

For Earth, For Life
Kubota

KUBOTA TECHNICAL REPORT

クボタ技報 **55**
JANUARY 2022

ISSN 0916-8249

No.55

ISSN 0916-8249

JANUARY 2022

クボタ技報

KUBOTA TECHNICAL REPORT

クボタ技報

No.55 2022年1月

目次

巻頭言

豊かな社会と自然の循環にコミットする“命を支えるプラットフォーマー”	6
------------------------------------	---

機械部門

インド現地生産トラクタの開発	8
欧州向け M6002 シリーズトラクタの開発	14
枝豆コンバインの開発	20
DC70 コンバイン向けコーン刈取りヘッド CH70 の開発	26
乗用 2 条全自動野菜移植機の開発	32
発電機向け全領域再生 DPF システムの開発	38
V1505T コモンレールエンジンの開発	44
欧州向けミニバックホー RDL3 シリーズの開発	50
法面草刈機 GC-M500 の開発	56
微量 NX フィーダの開発	62

水・環境部門

水道管路工事向け「施工情報システム」の開発	68
高精度な水道管路の老朽度評価方法の開発	74
マンホールポンプ AI 異常運転検知機能の開発	80
ほ場水管理システム「WATARAS (ワタラス)」直接通信 (LTE-M) 型の開発	86
省コスト・省エネ・省スペース型高率脱窒 MBR (LOOP MBR) の開発	90
ごみ処理向けメタン発酵技術の開発	96
過給機を使用した汚泥焼却設備の省電力技術の開発	102
クラッキングチューブ市場向け 45Ni 系 Al 入り材の開発	108

紹介記事

アジアにおける水インフラ整備事業の紹介	114
廃棄物最終処分場の副生塩有効利用技術の紹介	118

KUBOTA TECHNICAL REPORT

No.55 JANUARY 2022

CONTENTS

Prefatory Note

An “Essentials Innovator for Supporting Life,” Committed to a Prosperous Society and Cycle of Nature ... 6

Farm & Industrial Machinery

Development of Tractors for Local Production in India	8
Development of M6002 Series Tractor for Europe	14
Development of Green Soybean Combine Harvester	20
Development of Corn Harvesting Header CH70 for DC70 Combine Harvester	26
Development of Ride-on Two-row Fully Automatic Vegetable Transplanter	32
Development of DPF Regeneration System Under All Operating Conditions for Generators	38
Development of V1505T Engine with Common Rail Fuel Injection System	44
Development of the Mini Excavator RDL3 Series for European Market	50
Development of Slope Grass Cutter “GC-M500”	56
Development of Micro Flow Rate NX Feeder	62

Water & Environment

Development of Water Work Information System for Water Pipe Construction	68
Development of Highly Accurate Method for Predicting the Degree of Deterioration in Water Pipes ...	74
Development of Manhole Pump AI Abnormal Operation Detection System	80
Development of “WATARAS” (LTE-M), Water Remote Management System in Paddy Fields without Gateway Device ...	86
Development of High-Efficiency Denitrification MBR (LOOP MBR) that Reduces Costs, Energy, Space ...	90
Development of Fermentation Technology for Household Garbage	96
Development of Energy-saving Technology Utilizing a Turbocharger for Sewage Sludge Incineration Facility ...	102
Development of 45% Nickel-based Aluminum-containing Material for Cracking Tube Market ...	108

Introduction Article

Introduction of Water Infrastructure Development Projects in Asia	114
Introduction of Technique Effectively Using Byproduct Salt in a Landfill Disposal Site	118

SDGsへの取り組み

～食料・水・環境の各分野で地球と人を支えるクボタ～

クボタグループは、国際社会共通の開発目標であるSDGsに取り組み、事業活動を通じてグローバルな課題の解決にチャレンジしています。

SDGsとは？

世界中が協力して取り組むべき課題を17の目標として定めたもの。
2030年の達成期限に向けて、2015年の国連サミットで採択された。
「Sustainable Development Goals」を略してSDGs(エスディージーズ)と呼ばれ、
日本語では「持続可能な開発目標」と訳されます。

掲載記事とSDGsの関わり

主に関わる分野		掲載記事	深く関連する：★ 関連する：●	
食料(農業)	水・環境			
■		インド現地生産トラクタの開発		
■		欧州向けM6002シリーズトラクタの開発		
■		枝豆コンバインの開発		
■		DC70 コンバイン向けコーン刈取りヘッダCH70 の開発		
■		乗用2条全自動野菜移植機の開発		
	■	発電機向け全領域再生DPFシステムの開発		
■	■	V1505Tコモンレールエンジンの開発		
	■	欧州向けミニバックホーRDL3シリーズの開発		
■		法面草刈機GC-M500の開発		
	■	微量NXフィーダの開発		
	■	水道管路工事向け「施工情報システム」の開発		
	■	高精度な水道管路の老朽度評価方法の開発		
	■	マンホールポンプAI異常運転検知機能の開発		
■	■	ほ場水管理システム「WATARAS(ワタラス)」直接通信(LTE-M)型の開発		
	■	省コスト・省エネ・省スペース型高率脱窒MBR(LOOP MBR)の開発		
	■	ごみ処理向けメタン発酵技術の開発		
	■	過給機を使用した汚泥焼却設備の省電力技術の開発		
	■	クラッキングチューブ市場向け45Ni系AI入り材の開発		
	■	アジアにおける水インフラ整備事業の紹介		
	■	廃棄物最終処分場の副生塩有効利用技術の紹介		

SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS



SDGs (Sustainable Development Goals)の詳細については、国際連合広報センターのWebサイトをご覧ください。
https://www.unic.or.jp/activities/economic_social_development/sustainable_development/2030agenda/

SDGゴール																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	●	●					●		★			★				●	●
		★						★	●							●	●
		★						★				●				●	●
		★						★				★	★		●	●	●
		★						★								●	●
			★				★		●			●				●	●
							★		★		●					●	●
		★					●	★								●	●
			●				●		★			★				●	●
						★					●	●				●	●
						★			★		●					●	●
						★		●	★		★					●	●
						★	★					●			●	●	●
						★	★		●		●			★		●	●
						★			★		●	●	●			●	●
						★			●			★				●	●
						●			★			★				●	●

豊かな社会と自然の循環にコミットする “命を支えるプラットフォーマー”

代表取締役社長

北尾 裕 一

President and
Representative Director

Yuichi Kitao



新型コロナウイルス感染拡大に伴う経済の停滞により、当社の事業も厳しい状況に直面いたしました。しかしながら、お客様をはじめ事業に関わるステークホルダーの皆様のおかげで、この難局を何とか切り抜けることができました。改めてクボタの事業がコロナ禍においても多くの人々に必要なエッセンシャルビジネスであることを強く認識させられた期間であったと思います。

2021年には、新しく策定した長期ビジョン「GMB2030」をスタートしました。気候変動や海洋汚染などの環境問題、自然災害やパンデミック、人口・資源問題、また世界政治の問題などが複雑に絡み合い、社会課題はますます難しくなっています。「このままの社会のあり方では、未来永劫続いていくことができない」との危機感を持つようになっていきましたが、このコロナ禍により世界共通認識になったと強く感じます。「GMB2030」は、今後10年に起こりうるさまざまな課題に向き合い、持続可能な社会を築いていくためにクボタは何をすべきか、その指標として策定しました。

この中で、2030年のめざす姿として描いた「豊かな社会と自然の循環にコミットする“命を支えるプラットフォーマー”」とは、モノの販売とそのアフターサービスを主とする企業から、お客様の課題を上流から下流まで一貫して解決できるトータルソリューションを提供できる企業への脱却を意味しています。それにより、「食料・水・環境」分野から、豊かで持続可能な新しい社会の構築、すなわちSDGs（持続可能な17の開発目標）の達成に寄与していきたいと考えています。

このクボタ技報55号には「食料・水・環境」分野に貢献するクボタの技術を掲載しています。「食料」の分野では、文化・風土と密接に絡む農業の在り方は、世界各地によっ

て大きく異なります。例えばトラクタの世界最大市場であるインドでは、農閑期に穀物をけん引したり人を乗せたりしますので、圃場での性能以上に多目的性が重視されます。また、畑作ではそれぞれの作物に応じた機能が必要になりますし、草刈りは頻度も多く手間のかかる作業です。本文では、世界のさまざまな現場の声に徹底的に耳を傾け、そして生み出した研究開発の成果を紹介しています。

「水」の分野では、日本では水インフラの更新、水処理施設の能力アップ、洪水・暴風雨などの気象関連災害の対策が課題です。また、世界では安全な飲み水へのアクセスや水処理施設の普及が重要な課題です。本文では、水道管の老朽評価や施工管理の合理化、従来の下水処理場を拡張せずに処理能力をアップさせる膜分離活性汚泥法、AIを活用したマンホールポンプ管理、海外の事例としてミャンマーでの水処理施設の導入などについて紹介しています。

「環境」の分野では、バイオガス発電によりCO₂排出量削減に貢献するごみ処理メタン発酵、排出ガス規制に対応するエンジン・建機などを紹介しています。

現場を理解せずして、真に役に立つ製品やソリューションを生み出すことはできません。創業以来、クボタの研究開発に脈々と受け継がれてきた現場主義は、今や世界規模で実践されています。この現場主義は目の前のニーズを汲み取るだけでなく、将来を予見するためにも欠かせません。社会の変化に必要な新価値をイノベーションにより創出し、豊かな社会と自然の循環を世界規模で実現して、持続可能な社会の構築に貢献したいと考えております。

お客様に寄り添い、お客様の課題を発見し、お客様に成功をお届けする「On Your Side」の精神で、クボタグループ丸となる「One Kubota」で臨んでまいります。今後とも変わらぬご支援を賜りますようお願い申し上げます。

An “Essentials Innovator for Supporting Life,” Committed to a Prosperous Society and Cycle of Nature

Due to economic stagnation caused by the spread of infections with COVID-19, our company’s business, too, faced a dire situation. However, thanks to our customers and all our other stakeholders involved in our business, we managed to get through those difficult times. I feel this was a period in which we firmly reaffirmed our recognition that Kubota’s businesses are essential and necessary for a great number of people even amidst the COVID-19 crisis.

In 2021, we launched our newly formulated long-term vision “GMB2030.” As environmental issues, such as climate change and oceanic pollution, natural disasters and pandemics, population and resources problems, as well as issues in world politics, are complicatedly intertwined, social issues are becoming increasingly difficult. I had come to have a sense of crisis that if society continued as it currently was, society would not be able to go on eternally. But I now feel strongly that the COVID-19 crisis has made it a common understanding worldwide.

GMB2030 was established as a guidepost to show what Kubota should do to deal with various issues that may arise over the next ten years in order to build a sustainable society.

Becoming an “Essentials Innovator for Supporting Life, Committed to a Prosperous Society and Cycle of Nature,” which is the type of company Kubota is aiming to be in 2030 as envisioned in GMB2030, means that Kubota must transform itself from being a company that mainly engages in the sale of products and after-sales services for those products to being a company that can offer comprehensive solutions that can solve customers’ problems, from upstream all the way to downstream. By achieving this transformation, it is our hope that Kubota will contribute to building a new, enriched and sustainable society; in other words, achieving SDGs (17 sustainable development goals) in the areas of “food, water, and the environment.”

In this issue, No. 55 of the Kubota Technical Report, readers will find descriptions of Kubota’s technologies that are making contributions in the areas of “food, water, and the environment.” In the area of “food,” the state of agriculture, which is closely connected with local culture and climate, differs greatly for each region around the world. For example, in India, with the largest market for tractors in the world, tractors must haul grain or transport people in the off-season, so greater importance is placed on multipurpose functionality

than on performance in cultivated fields. Furthermore, dry-field farming requires different functions for each type of crop, and mowing, which is labor intensive, must be done frequently. This report describes research and development results produced by listening thoroughly to the voices of the people at various farming worksites all over the world.

In the area of “water,” Japan is facing such issues as the updating of water infrastructure, improving the performance of water treatment facilities, and countermeasures to deal with weather-related disasters, such as floods and violent wind and rain storms. Globally, there are important issues such as access to safe drinking water and the spread of water treatment facilities. This report describes the deterioration evaluation and streamlining of installation management of water pipes; membrane bioreactor, which makes it possible to increase sewage water processing capacity without enlarging the existing sewage treatment facility; manhole pump management that makes use of AI; and overseas cases, with the introduction of a water treatment facility in Myanmar as an example.

In the area of “the environment,” the use of methane fermentation in waste treatment, which contributes to the reduction of CO₂ emissions by generating electricity from biogas; and engines and construction machinery that are compliant with exhaust gas regulations; and other topics are described.

It is impossible to create truly useful products or solutions without understanding the site where they will be used. The hands-on approach, which has been continuously handed down throughout Kubota’s R&D since the company was founded, is now being put into practice on a global scale. This hands-on approach is indispensable not only for grasping the immediate needs but also for forecasting the future. It is my hope that we will contribute to building a sustainable society by creating new value through innovation, which is necessary for changing society, and realizing a prosperous society and cycle of nature on a global scale.

In the spirit of “On Your Side,” which calls for standing by our customers’ side, finding the issues that concern our customers, and delivering success to our customers, the entire Kubota Group will strive to work together as “One Kubota.” I would be deeply grateful for your continued support as always in the future.

インド現地生産トラクタの開発

Development of Tractors for Local Production in India

トラクタ技術第一部／マテリアル・キャスティングセンター／解析センター
KUBOTA Research and Development Asia Co., Ltd.

クボタは2015年にMU5501、2017年にMU4501とインド向けトラクタMUシリーズの販売を開始したが、当時インドに生産拠点はなくタイ工場からトラクタを輸出していた。そのため、部品調達費および物流費が販売価格に反映され、性能はよいがローカルメーカーに比べ割高な製品となっていた。そこでクボタは2019年にインド大手のトラクタメーカーEscorts Limitedと合併でインドにトラクタ製造会社を設立し、2020年からインド工場でのMU4501トラクタの生産を開始した。本稿ではインド現地生産トラクタの開発で培った品質レベルを維持しインド現地調達、インド現地生産するための技術、特にトランスミッション部品に焦点をあてて紹介する。

【キーワード】

トラクタ、マルチパーパス、インド、材料評価、騒音解析

Kubota started selling MU series tractors to India in 2015 with the MU5501 followed by the MU4501 in 2017, but at the time, Kubota did not have a production base in India and was exporting tractors from its plant in Thailand. As a result, parts procurement and logistics costs were reflected in the sales price, making the products more expensive than those of local manufacturers despite their good performance. Given these circumstances, Kubota established a tractor manufacturing company in India in 2019 as a joint venture with Escorts Limited, a major Indian tractor manufacturer, and started production of MU4501 tractors at the Indian plant in 2020. In this paper, we will focus on the technologies, especially transmission parts, to maintain the quality level cultivated through the development of tractors for local production in India, and to procure and produce these parts locally in India.

【Key Word】

Tractor, Multi-purpose, India, Material Evaluation, Noise Analysis

関連する SDGs



1. はじめに

クボタは世界最大のトラクタ市場であるインドに向けて2015年にMU5501、2017年にMU4501と牽引等の多用途に適したマルチパーパストラクタMUシリーズの販売を開始した。当時インドに生産拠点はなくタイ工場からトラクタを生産し輸出していた。部品調達もクボタの高い要求品質を満たすことのできるタイのサプライヤ

とインドの限られたサプライヤが中心であった。そのため部品調達費および物流費が販売価格に反映され、性能はよいがローカルメーカーに比べ割高な製品となっていた。クボタは2019年2月にインド大手のトラクタメーカーEscorts Limited (EL社) と合併でインドにトラクタ製造会社Escorts Kubota India Private Limited (EKI) を設

立し、2020年9月からEKIでMU4501の現地生産を開始した。EKIではトラクタの生産だけでなく、EL社の優れた調達力でいままでも日本企業と取引のなかった多数のインドローカル新規サプライヤから部品を調達している。新規サプライヤからの部品調達に際し、品質確保しつつ材料調達や設備など現地の実状に適合した部品の変更を行っている。特にTM部品(トランスミッションを構成する部品)の製造は、材料・加工・熱処理・表面処理などの技術が必



図1 マルチパーパストラクタ (MU5501)
Fig. 1 Multi-purpose Tractor (MU5501)

要で、サプライヤの経験に頼る部分が多く品質確保の難しい部品である。今回、品質確認に際して、材料、熱処理、表面処理、軸受の信頼性などの要素に切り分け、部品の強度や耐久性に影響する要素に対し詳しく評価をすることで、1年半という短期間で部品の現地調達化を含めた生産移管を完了させることができた。これらの開発をとおしてインドでのTM部品調達推進上の課題とそれに対する取組みについて紹介する。



図2 EKIでの初ラインオフ時の様子
Fig. 2 First Tractor off the Line at EKI

2. 開発のコンセプトと目標

2-1 開発のコンセプト

インドローカルの新規サプライヤから部品を調達するにあたり、従来の日本や日本企業と取引のあるサプライヤと同じ材料や加工方法の部品を調達することは難しく、インドローカルの調達、製造環境に適合した対応をする必要があった。

一方で新規に調達する部品であっても今までどおりの性能および耐久性を確保したクボタ品質を実現することを開発のコンセプトとした。

2-2 開発目標

インドでは調達可能な材料や加工方法が限られる。新規サプライヤから部品調達するため下記を目標とした。

(1)インドローカルサプライヤからの部品調達

インドローカルのサプライヤにとってJIS規格は一般的ではない。材料としてJIS規格材の調達は可能だが、日系メーカーと取引のある規模の大きなサプライヤに限定される。そのためインドでの汎用性が高いインド規格材への置き換えを行う。同様にインドローカル技術でできることを踏

まえ、評価方法を現地事情に適合した対応を行うことでインドローカルサプライヤからの部品調達を実現すること。

(2)インド調達ギヤの採用

MUシリーズでは一部のギヤで、ギヤ騒音低減のために歯面を研磨した日本製の歯研ギヤを採用していた。歯研ギヤのインド調達は難しいため、歯研なしのインド調達ギヤでも同等の静粛性を確保しMUシリーズでのインド調達ギヤ採用を実現すること。

3. 解決すべき技術課題

3-1 インドローカルサプライヤ向け部品材料変更

日本やタイで部品調達する際、クボタでは一般的にJIS規格 (Japanese Industrial Standards) の材料を使用している。今回インドローカルサプライヤから部品を調達するにあたりインドの工業規格であるIS規格 (Indian Standard) や、米国のSAE規格 (Society of Automotive Engineers) 、EUのEN規格

(European Standards) など、規格を限定せずそれぞれのサプライヤで調達可能な材料に合わせる必要がある。鋼材、鋳鉄材、軸受ともに今までクボタで扱ったことのない材料の多くの部位について一括で採用できる材料評価が課題である。

3 - 2 歯研なしギヤでの低騒音化

インド北部のユーザはトラクタのT/M騒音に関して特に高い要求水準をもっており、MUシリーズでは他機種よりも厳しいギヤ騒音基準を定めている。歯研ギヤによってクリアして

いたギヤ騒音基準を歯車諸元および構造の見直しにより歯研なしのインド調達ギヤで騒音基準を達成できるかが課題である。

4. 課題の解決技術

4 - 1 インドローカルサプライヤ向け部品材料変更

4.1.1 鋼材

ギヤ軸に用いられる鋼材はJISなどの規格によって化学成分とその含有量、焼入れ性などが細かく決められている。化学成分の含有量や焼入れ性によって、熱処理を施した後の表面硬さや焼入れの深さが影響を受ける。部品の強度や耐久性に強く影響するため、成分や焼入れ性の管理は非常に重要である。これらの値は規格によって規定されており、JIS、IS、SAE、ENなど各国の規格間で若干の違いがある。従

来クボタでは、日本やタイで部品調達する際にJIS規格の材料を使用しているが、品質を確保するため別途仕様書を取り交わし許容範囲をさらに絞った形で材料を調達している。今回、現地サプライヤで調達可能なIS規格などの、クボタで採用実績のない規格の鋼材を採用するにあたっても同様に仕様書を締結し採用を進めた。

4.1.2 鋼材の評価結果

表1はインド鋼材メーカー8社の鋼材に対する回転曲げ疲労試験の結果である。日本製鋼材と比較しても遜色ない結果であり、非金属介在物に関しても採用に問題のない品質であることが確認できた。ほかの項目についても評価を行い、表2に記載の鋼材7種に対し1次サプライヤと鋼材メーカーの組合

せを考慮した計30種の鋼材について、採用可能な品質であることを確認した。これらの評価結果をもとに、鋼材を調達する際の仕様を決定し、30部の鋼材納入仕様書を新たに締結した。

表 1 回転曲げ疲労試験の結果

Table 1 Results of Rotary Bending Fatigue Test

鋼材メーカー	鋼種	10 ⁷ 回疲労強度
日本調達材	SCM420H	898MPa
インド 鋼材メーカー8社	SCM420H	880~933MPa 日本調達材料比: -0.2~+0.4%
	21Cr4Mo2	

表 2 インド調達時の代替可能な例

Table 2 Examples of Possible Substitutions During Indian Procurement

日本・タイ調達時		インド調達時	
規格	鋼種	規格	鋼種
JIS	SCM420H	JIS	SCM420H
		IS	21Cr4Mo2
JIS	SNCM420H	JIS	SNCM420H
JIS	SCM435H	SAE	SAE4137
JIS	SCM440H	IS	42Cr4Mo2
		EN	42CrMo4H
JIS	S45C	SAE	SAE1045

4.1.3 鋳鉄材

鋳鉄材についても品質確認のため材料単体での評価を行った。通常品質確認の流れとして量産中のロットごとに試験片を取り材料のチェックを行う。試験片の数は各ロット2本程度(組織及び成分評価、強度評価の各1本)であり、ロットの最後にまとめて鋳込むことが多い。今回、材料評価を正確に行うためにサンプル数を増やす必要があり、量産時に比べて多くの試験片が必要であった。試験片の鋳込みには時間がかかるため、量産時と同じようにロットの最後でまとめ

て試験片を鋳込むと途中で取鍋内の溶湯の成分や温度が変わってしまう。ダクタイル鋳鉄材で組織を調整するために使用される添加剤は特にこれらの影響を受けやすく、試験片の金属組織が影響を受け適切な試験片が製作されないことがあった。上記のような不具合を防ぐため、試験片の取り方を規定し評価の方法とあわせて鋳鉄材料評価時のフローとして運用した。また、今後はEKI生産の別機種の開発における新規鋳鉄材評価の際の指標として展開していく。

4.1.4 熱処理

ギヤ・軸部品は、トランスミッションケースなどの限られた空間に収める必要がありサイズ上での制約がある。その中でトラクタの駆動力を伝達するだけの負荷や摩耗に耐える必要があるため、強度や耐摩耗性の向上を狙って高周波焼入れや浸炭焼入れといった熱処理が施される。熱処理は処理の仕方によっては脆くなったり摩耗しやすくなったり、性能が低下することがあるため、厳格な品質管理が必要である。

4.1.5 表面処理

ギヤ・軸部品など回転する部品を支える箇所には、摩耗や焼き付き、回転抵抗を抑えるため転がり軸受などが用いられるのが一般的である。しかし中にはディファレンシャルギヤ内部など構造上の制約で金属面同士が摺動する箇所が存在する。このような箇所では摺動面の摩耗や焼き付きを防ぐためにリン酸マンガン被膜処理(以下PHAM処理)が用いられる。PHAM処理は、対象部品を処理液に浸漬・化成処理し表面に結晶状の不働態被膜を形成する表面処理方法で、金属同士の直接接触を防ぎ耐摩耗性・耐焼き付き性を向上させることができる。PHAM処理の部品をインド調達するに際し、評価の方法に課題があった。PHAM処理で形成される被膜は上述のとおり結晶状であり、この結晶粒子の大きさが被膜の性能に影響を与えるため、粒子の大きさを管理する必

4.1.6 表面処理の新たな評価方法の策定

従来の表面処理の評価方法として粒子サイズの測定にクボタが独自に管理する限度見本と比較し、段階に分けた「粒度番号」で評価するように定めていた。この限度見本はSUMP法による顕微鏡写真に対して取決めた基準であり、SEMで確認した結果をそのまま限度見本に当てはめることができない。右記の図3に測定結果の一部を示す。(A)がクボタの検査方法(SUMP法)で観察した被膜表面、(B)がSEMで観察した被膜表面である。同じ部品を同じ倍率で測定しているが、SUMP法ではプレパラート上に転写した粒子の形状を観察しているのに対し、SEMでは直接部品表面を観察しているという違いがある。今回PHAM処理を現地調達化するにあたっては、規定の限度見本の評価結果とSEMでの測定結果の相関を取り、SEMIによる測定のための検査基準を策定した。

4.1.7 転がり軸受

転がり軸受は世界中でさまざまな機械に使用されており、サイズ、種類、定格荷重や寿命の計算式などが国際規格によって統一されている。転がり軸受の耐久性能の指標として用いられる定格寿命(L10寿命)は「多数の同じ軸受を同条件下で個々に運転したときに90%の軸受が疲労による破損を起

このため、クボタでは図面とは別に検査基準書を用いた管理基準を設けている。この検査基準書では熱処理の品質に関わる管理値とその測定方法を規定しているが、インドではサプライヤごとに所有する検査設備が異なるため、共通の検査基準では対応できないことがあった。安定した品質の部品が供給されるよう、各サプライヤの設備に合わせた新規基準の作成を行った。

要がある。クボタでの粒子サイズの測定はSUMP (Suzuki's Universal Micro Printing) 液と呼ばれる特殊な処理液を用いて結晶表面をプレパラート上に転写し、これを光学顕微鏡で観察することで測定するSUMP法と呼ばれる手法を用いている。非破壊で検査が可能であること、高額な設備である電子顕微鏡(以下SEM)を用いず光学顕微鏡で測定することで簡易な設備で安く検査を行える等のメリットがある。しかし①インドのサプライヤではこのSUMP液が調達できないこと、②SUMP法を用いない光学顕微鏡での測定では部品を直接観察する必要があるが、円筒部などの曲面部の測定は被写界深度(ピントが合う領域)が足りず正確な測定ができないこと、の2つの理由から現地化にあたってはSEMで評価を行うための基準を作成する必要がある。

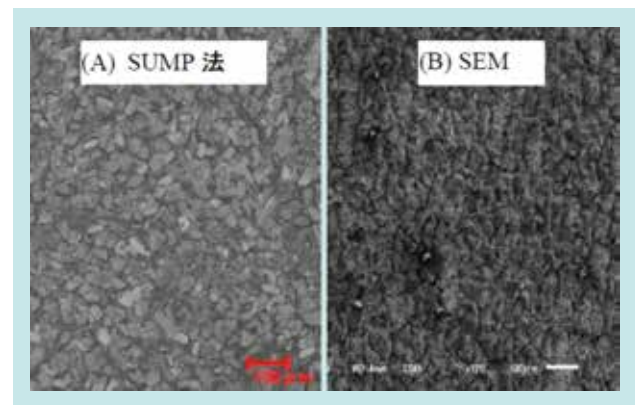


図3 粒子サイズの測定(×100倍)
Fig. 3 Measurement of Particle Size (×100)

こさずに回転できる総回転数または総時間」として定義される。¹⁾ もっとも一般的な転がり軸受である深溝玉軸受の定格寿命の計算を例にあげると数式では転がり軸受の種類やサイズなどの条件のみで決まるため、どのサプライヤの転がり軸受でも計算上のL10寿命は同じである。しかし、実際には

各部品の加工の精度や材料の品質など数式には組み込まない部分での品質が影響し寿命が変わるため、同じサイズの転がり軸受でも実際の寿命にはサプライヤごとにばらつきが生じ、製品の信頼性の差として表れる。そのため定格荷重、負荷、回転数から算出される計算寿命と各サプライヤの

ベアリングの信頼性の双方を勘案したうえでベアリングを選定することが耐久性の品質を確保する上で重要となる。今回新たなサプライヤから軸受を調達するにあたり、まず信頼性を明確にするためベアリングのサイズを絞って単体試験を行い、各サプライヤの信頼性を評価し採用基準を決定した。

4.1.8 転がり軸受の評価結果

転がり軸受の採用基準を決定するために信頼性の評価を行った。表3は、実験によって求めた日本国内調達品とインド調達品の転がり軸受のL10寿命の評価結果である。今回評価を行ったインド2社は日本調達品に対しておよそ50%程度のL10寿命であることがわかった。これらの結果をもとに計算寿命に対する採用判断基準を設定し、インド調達の転がり軸受に変更可能な箇所についてはインド調達品への切替えを実施した。なお、インドA社は過去2013年にも評価を行っており、今回評価した転がり軸受は当時に比べ倍程度のL10寿命があり、6年間で大幅なL10寿命の改善がなされていることがわかった。

表 3 実験によって求めた L10 寿命評価結果

Table 3 Evaluation Results of L10 Lifetime Obtained by Experiments

転がり軸受調達先	L10 寿命日本調達品比
[基準] 日本調達品	100%
インド A 社(2019 年)	57%
インド A 社(2013 年)	30%
インド B 社(2019 年)	55%

4 - 2 歯研なしギヤでの低騒音化

4.2.1 ギヤ騒音発生メカニズムと開発の進め方

ギヤ騒音発生メカニズムとして①起振、②伝達、③放射の3つのステップがある。表4にまとめたとおりそれぞれのステップに影響を与える部位は決まっている。最終的には各部位が複合的に絡み合ったものがギヤ騒音となる。MUシリーズの開発当初ギヤの一部に歯研ギヤを採用し歯面の

形状を整えることで起振力を抑え、ギヤ騒音低減を図っていた。今回、歯研なしのギヤでギヤ騒音低減を実現するため、それぞれのステップに対し影響を与える各部位に変更を加えた場合のシミュレーションによって効果を確認しながら開発を進めた。

表 4 ギヤ騒音の発生メカニズムと低減対策

Table 4 Mechanism of Gear Noise Generation

項目	部位	現象	低減の対策
① 起振	ギヤ	歯面形状や歯の剛性によって発生する 回転変動が起振力となる	歯の倒れの抑制および歯幅を変更し ギヤの噛み合い率を向上させ起振力を低減した
② 伝達	軸	ギヤを支持している軸やホルダを介して ケースに振動が伝達される	剛性を上げて噛み合い部の変位を小さくし 歯の噛み合い周波数から軸の共振周波数を避けた
	ホルダ		新たにホルダを追加し剛性を上げた ホルダの共振周波数は 軸受に作用する力の周波数帯を避けた
③ 放射	ケース	ケースの振動が空気に伝わり ギヤ騒音となる	ケースにリブを追加し剛性を上げ振動変位を抑え 音の放射パワーを低減させた

4.2.2 ギヤ騒音低減手法と低騒音化の実現

表4のとおりギヤ騒音に影響を与える各部位に対してギヤ騒音対策を取り入れた3Dモデルを作成し、シミュレーションでの効果確認を行った。シミュレーションではギヤ騒音の大きさの比較を行うため、騒音発生メカニズムに沿って音響放射パワーを求めた。①起振は準静解析により求めた歯の噛み合い進展にともなう伝達誤差をフーリエ変換し、回転数/周波数ごとの伝達誤差を求めた。②伝達としては周波数ごとの応答特性を有限要素法により求めた。③放射としては①②の結果を乗算することで回転数ごとの音響放射パワー

を解析した。一例として図4上段に特にギヤ騒音が大きくなるエンジン回転2000rpmでのギヤ騒音対策前後の比較結果を示す。右部にギヤ騒音の音響放射パワーの解析結果、左部に実測でのギヤ騒音測定結果を表している。図4下段には対策前後での実測したギヤ騒音を示している。特にギヤ騒音が問題となっていた範囲で大きくギヤ騒音値が低減し、各周波数帯で定めているギヤ騒音基準値を満たした。シミュレーションで効果を確認したギヤ騒音対策を盛り込むことで、歯研なしのインド調達ギヤを採用することができた。

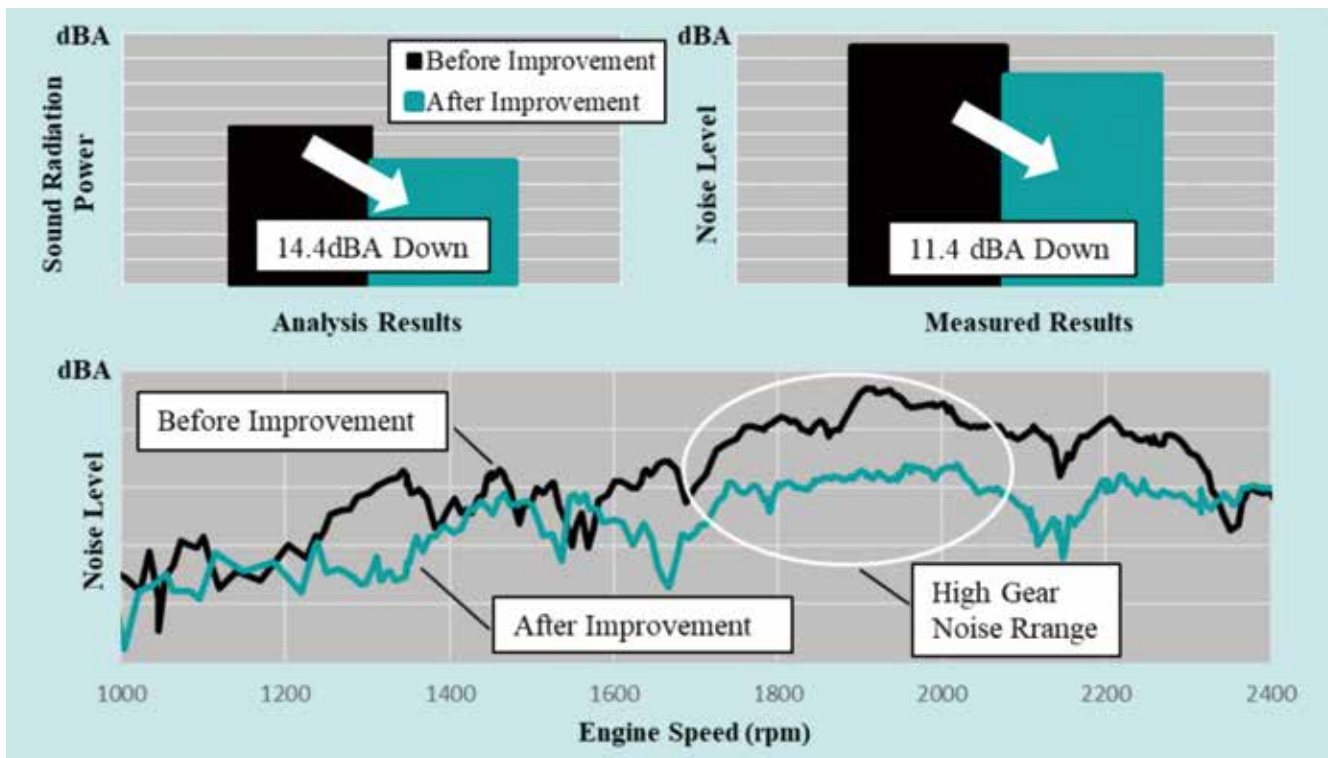


図4 ギヤ騒音の比較

Fig. 4 Comparison of Gear Noise

5. おわりに

クボタ初のインド現地生産機の開発をとおり、インドでのTM部品調達推進上の課題とそれに対して行った取組みについて紹介した。現地サプライヤと協力しながら設備や製造能力に適合した検査方法や評価方法を確立することで、品質を確保したうえで部品のインド調達化を推進することができた。これまでタイで生産していたインド向けトラクタの現地生産化によ

ってインドでの経済循環を生み出すなど経済への貢献や輸送エネルギーの削減など環境負荷の少ないトラクタ生産へ貢献することができた。まだまだ多くの課題はあるが、今後もさらに現地調達する部品点数、現地生産する機種を増やし最適調達、最適生産を実現することで持続可能な循環型の社会づくりと環境負荷低減に貢献していく。

SDGsのターゲットへの貢献

9.b 途上国の技術開発、研究及びイノベーションの支援 インドロカルサプライヤへの技術支援

12.1 持続可能な消費と生産の実施 現地調達と現地生産によるインド現地での経済循環に貢献

参考文献

1) JIS B 1518:2013 転がり軸受—動定格荷重及び定格

欧州向けM6002シリーズトラクタの開発

Development of M6002 Series Tractor for Europe

トラクタ技術第二部／機械研究開発第三部
油圧機器技術部／解析センター

世界の人口増加にともなって食料需要が急拡大し、食料供給の安定化に向けて重要な役割を担う農業機械の必要性はますます高まっている。欧州では最先端の技術を用いた高い土地生産性の農業が特徴で、これまでクボタでは大規模畑作農家向けに97～127 kW (130～170 HP) のM7シリーズトラクタを導入し、市場のニーズに応えてきた。一方、中規模クラスにおいてはミックス農業(畜産と飼料用も含めた作物生産の両方を行う)が大半を占めており、このクラスでも作業性・生産性向上が求められてきている。そこでM7に続く欧州農業向けトラクタとして、ミックス農業への適合性を向上させた91～106 kW (121～141 HP) のM6002シリーズトラクタを開発した。

【キーワード】

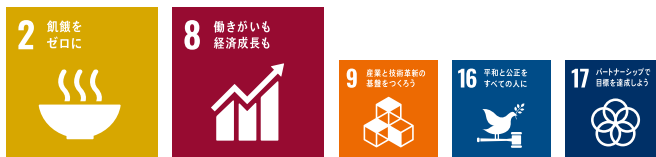
コントロールレバーレイアウト、クローズドセンタロードセンシング油圧システム

A growing world population has resulted in a rapidly increasing demand for food. Thus, the need for agricultural machinery has increased, given that it plays an important role in stabilizing the food supply. A key feature of European agriculture is the use of cutting edge technology to attain high crop yields. Kubota had already introduced the 97-127 kW rated M7 series tractor in response to these needs for large row-crop operations. The majority of medium sized operations in Europe are mixed farmers who both produce crops and raise livestock, sometimes using the crops as feed. Among these farmers, high yield per-hectare and ease of use are important. In addition to the M7, Kubota has now developed the 91-106 kW rated M6002 series tractors for the European market with a particular focus on being a good fit for mixed farmers.

【Key Word】

Control Lever Layout, Closed Center Load Sensing Hydraulic System

関連する SDGs



1. はじめに

欧州では、畑作農家が飼料も生産して畜産を行うミックス農業が多く、作物生産に向けた耕耘や播種、運搬から牛舎周りの給餌やし尿処理まで作業が多岐にわたることが特徴である。使用されるインプレメントの種類も多く、作業の負荷も大きく変わるため、一般的にトラクタを複数台所有することが多い。M6002トラクタはトランスミッション・キャビン・油圧を一新して、ミックス農家向けに幅広く作業できるトラクタを目指して開発を行った。また、汎用性が高いと使用される時間も長くなることから、快適性向上も重要課題として取組んだ。



図 1 M6002 シリーズトラクタ外観
Fig. 1 Appearance of M6002 Series Tractor

2. 開発のコンセプトと目標値

2-1 開発のコンセプト

ミックス農業の農家は給餌用の飼料を自身で生産するなど、畑作と畜産や酪農を兼業する農家であり、それぞれで求められる作業を複数台のトラクタで行うことが多い。トラクタの構成は耕起・播種などを受け持つ1stトラクタと、運搬・防除・牧草作業を受け持つ2ndトラクタ、牧草作業の中でも軽い負荷作業を受け持つ3rdトラクタなどが典型となっている(表1)。表に示す役割(作業)は写真のとおりである(図2、図3)。

M6002で扱う75～104kW(100-140 HP)の「2ndトラクタ」は、繁忙期には1stトラクタの作業もカバーすることも求められ、高い汎用性が必要となっている。また、その汎用性の高さから使用時間が最も長く、快適性も重要視されている。

そこで、本開発においては、以下のコンセプトでミックス農業市場にベストマッチさせることを目標とした。

①ミックス農業作業への適合性向上

耕起系インプラメントに対応する車体重量や車格・車枠強度を確保しつつ、既存モデルの高い機動性や低車高も確保して、畑作と畜産での作業の両立を図る。

②長時間作業での快適性向上

2ndトラクタで特に長時間使用されるローダとトレーラ作業を対象に、機能アップや操作性向上を図ることで、効果的なストレス低減を実現する。



図2 耕起 / トレーラ運搬
Fig. 2 Plow / Trailer Transportation

表1 ミックス農家におけるトラクタ作業
Table 1 Tractor Work on a Mixed Farm (example)

位置付	仕事率 (馬力)	役割	メインインプラメント
1st	104～149 (140-200)	・耕起/播種等 ・牽引等	ブ라우、ハロー、カルチ、サブソイラ、大型ペーラ、マニユアスプレッダ、トレーラ、コンビシーダ等
2nd	75～104 (100-140)	・耕起/播種等 ・牽引等 ・運搬/牧草等	ハロー、カルチ、ブ라우、コンビシーダ、スプレイヤー、トレーラ、モア、ローダ、ラウンドペーラ、スプレッダ、テッダ・レーキ等
3rd	60～75 (80-100)	・運搬/牧草等	ローダ、ラウンドペーラ、スプレッダ、テッダ・レーキ、フィーダー等
4th	37～60 50-80	・運搬/牧草等	ローダ (牛舎内掃除等の軽作業)等

赤字: 耕起・播種等、黒字: 牽引等、青字: 運搬・牧草作業等



図3 ローダ運搬 / ラウンドペーラ
Fig. 3 Loader Transportation / Round Baler

2-2 開発目標

前述の2つのコンセプトを実現するため、トランスミッション・キャビン・油圧を一新させて、以下の機能を実現することを開発目標に設定した。

a)トランスミッション関連

- ・重牽引作業を実現する車体重量と車枠強度
- ・変速ショックを低減し、快適性や操作性を向上した新8段主変速パワーシフト
- ・手元操作が可能な油圧変速式の3段副変速
- ・ブレーキ操作のみで停止や発進ができる自動クラッチ操作機能
- ・高速走行時での加速性を確保するエンジンプースト

- ・好みの作業性、快適性を実現するシヤトル感度調整

b)キャビン関連

- ・操作性向上のための新規操作系レイアウト
- ・手元集中操作を実現する新多機能アームレスト
- ・ローダ作業時の上方視界性を向上するワイドサンルーフ
- ・長時間作業時の負担軽減のためのキャビンススペンション

c)油圧関連

- ・複数同時作業を可能にするクローズドセンタロードセンシング油圧システム
- ・ローダ作業性を向上する大容量ポンプ吐出量

d)その他

- ・畑作業での燃費改善および走行時の加速性能を向上させるエンジン出力カーブ
- ・夜間作業性を向上する360°作業灯オプション
- ・精密農業に向けたVTモニタやISO-BUSオプション

本稿では、ミックス農業市場参入に向けて特に重点的に取り組む必要があった以下の3点の開発目標について述べる。

- ・重牽引作業を実現する車体重量と車枠強度
- ・操作性向上のための新規操作系レイアウト
- ・複数同時作業を可能にするクローズドセンタロードセンシング油圧システム

3. 解決すべき技術課題

前述した開発目標3点の課題を、具体的に示す。

(1) 車体重量と車枠強度の適正化

ターゲットであるミックス市場向け2ndトラクタには、1stトラクタの重牽引作業をカバーすることが求められる。装着されるインプラメントは大きく、高負荷な作業になるため、それに適応できる強固な車枠強度が必要となる。主要インプラメントの中からリバーシブルプラウ、コンビシーダ、フロントローダを車枠の強度確保のターゲットに設定した。

一方で、畜産や酪農作業では牛舎周りの管理作業に機動性も要求されるため、軽量・コンパクトであることも重要である。M600トラクタの開発では、重負荷作業にも適応した車枠強度を確保しつつ、軽量化を両立させることが課題となった。

(2) 操作性を向上した新規操作系レイアウト

欧州市場では、トラクタの運転方法は右手集中操作が一般的に好まれており、大型畑作市場によく見られる高級機のプレミアム仕様においては操作系のフル電子化・大型アームレストが採用され、各社のセールスポイントとなっている。

M600トラクタは右コンソールにメカニカルな操作レバーを有するスタンダード仕様としつつも、新規採用する多機能アームレストと一体化して組み合わせることで、プレミアム仕様に近い高い作業性と操作性を実現させることが課題となった。

(3) 複数同時作業を可能にするクローズドセンタロードセンシング油圧システム

ミックス農業市場で使用される、多種多様なインプラメントの多くは油圧駆動であるため、複数のアクチュエータを同時に操作可能な大流量油圧システムが必要となる。しかし、既存のクボタトラクタが採用しているオープンセンタ(以下「OC」という。)油圧システムでの大流量化は、ロス馬力の増大やヒートバランスの悪化によるシール部からの油漏れ/クラッチの焼付き/潤滑不良などの不具合が懸念されたため、実現が難しかった。そこで、M600トラクタでは、最適な油圧機器の開発によるクボタ独自のクローズドセンタロードセンシング(以下「CCLS」という。)油圧システムの構築が課題となった。

4. 開発技術

4-1 車体重量と車枠強度の適正化

4.1.1 車枠強度の適正化

車枠は大型鋳物で構成されており、試作や形状変更は容易でないため、開発初期段階から高い精度の検討が必要になる。特に耐久試験での不具合は大きな手戻りをともなう。そこで、高負荷耐久試験(オフセットインプラメントによる急旋回試験等)における以下の3つの不具合事象を対象に、それぞれ過去機種での解析評価の結果から基準を設定し、解析にて検証を行った(図4、図5)。

- ・ケース類の強度不足
- ・ケース合わせ面からの油漏れ
- ・ケース接合部ボルトのトルクダウン

結果、試作機での各ケース(クラッチハウジング/ミッドケース/トランスミッションケース/ブレーキケース/リアアクスルケース)の破損や接合面のボルト緩み、油漏れについて、

早期につぶし込むことができた。

4.1.2 車両重量の適正化

重量については、各試作段階で応力測定と解析の合わせ込みを継続して行うことで精度を高め、車枠強度に寄与しない余肉部の積極的な抽出を図った。これにより、各試験モードの応力基準を満足させ、車枠全体強度を落とすことなく重量低減を図ることができた。

以上の取り組みにより、目標とするインプラメントの作業に耐えうる強度を確保し、軽量化も実現することができた。

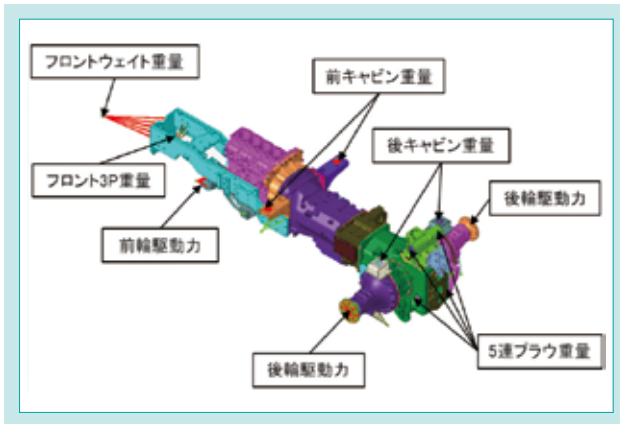


図4 高負荷耐久試験モードでの解析モデル

Fig. 4 Analysis Model of High Load Durability Test Mode

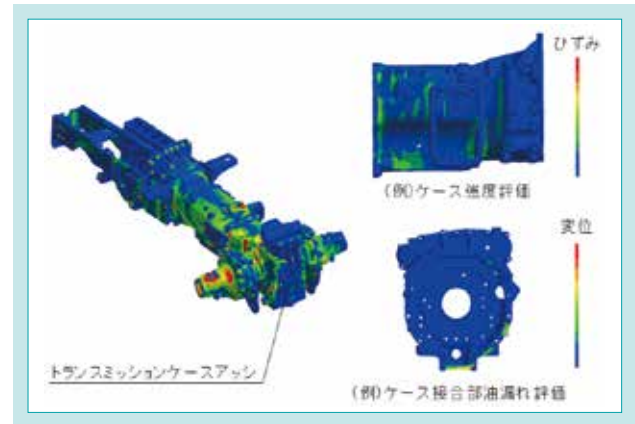


図5 応力解析結果

Fig. 5 Results of Strain Analysis

4-2 操作性を向上した新規操作系レイアウト

4.2.1 新規操作系レイアウト

最適な操作系レイアウトは対象とするメインインプレメントで異なってくる。ミックス農業の作業をターゲットにするM6002トラクタ開発では、改めてエルゴノミックデザインの考え方から、レイアウトの最適化を図った。

- ① 運転者が操作を直感的に理解できる
- ② 運転者が体格や動きに合わせ操作できる

4.2.2 操作系レイアウトの開発

① 直観的操作の実現

操作レバーやスイッチについて、機能別による分類とブロック化を図ることで運転者が直感的に操作できるレイアウトを検討した。具体的には、右手で集中操作させる機能についてミックス農業での使用頻度の高低を考えて、「シャトル・変速」、「ポンパ」のような高頻度の機能、「アクセル・走行・旋回」、「3P操作系」、「PTO入切」のような中頻度の機能、「サブ機能」、「エンジン・3P設定」のような低頻度の機能で分類した。これらをシート一体型のアームレスト上にレイアウトしていく中で、高頻度の操作は1本のマルチファンクションレバーに集約した。さらに、中頻度と低頻度の機能を、操作上の混乱がないように機能ごとにブロック化し、類似機能を集約して配置した(図6)。

② 体格や動きに合わせた操作レイアウトの実現

操作エリアとして運転者が腕を伸ばさず作業できる「正規作業域」と、腕を伸ばして手が届く「最大作業域」を考慮し、運転者が体格や動きに合わせ操作できるレイアウトを検討した(図7)。

具体的な設計として、アームレストは正規作業域内に収まるサイズ感に設定し、マルチファンクションレバーとPTOスイッチ、アクセルダイヤルを腕の動きに合わせて斜めに振り、自然な動作で操作できるようにした。また、シートとアーム

レストを固定するブラケットを前後、上下それぞれに調整できるようにすることで、運転者の体形や作業姿勢に合わせてアームレスト位置をセットできるようにした。さらに、アームレストブラケットに追加ディスプレイとなるバーチャルターミナルモニタを配置することで、最大作業域内でのレイアウトを実現し、運転者が着座状態でのバーチャルターミナルモニタ操作を可能にした。また、右コンソールのレバー類は運転者を中心に最大作業域内の円弧上に配置し、操作方向を運転者の腕の動きに合わせるよう配置した(図8)。

以上により、直観的操作と体格や動きに合わせた操作が実現可能となり、ミックス市場に合わせて操作性を向上させることができた。



図6 機能集約型アームレスト

Fig. 6 Multi-Function Armrest

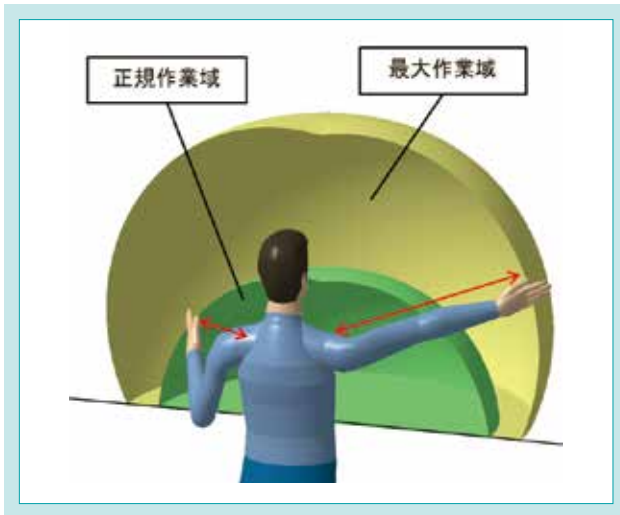


図 7 作業域
Fig. 7 Working Area



図 8 コントロールレバー配置と最大作業エリア
Fig. 8 Control Lever Layout and Maximum Work Area

4-3 複数同時作業が可能な CCLS 油圧システム

4.3.1 CCLS油圧システムの開発

トラクタの油圧回路は3Pヒッチコントロールバルブ(以下「3Pバルブ」という。)や補助コントロールバルブ(以下「AUXバルブ」という。)、フロントローダバルブ等を含む作業系回路と、ステアリングコントローラ用の操舵系回路や変速関係を含む走行系回路に大きく3つに分けられる。システム構成の多くは作業系回路、または作業系と走行系回路にCCLS油圧システムを採用しており、操舵系に関してはOC油圧システムを採用している(表2)。信頼性の高い操作が求められるステアリングは、OC油圧システムで制御した方が性能確保は容易であるが、ステアリング用に固定容量ポンプを搭載する必要があるためロス馬力の増加とレイアウトの自由度の低下が問題となる。

ミックス農業に向けてコンパクトな車体で機動性も確保したいM6002では、これらの問題を解決するために独自の優先弁システムを用いて、一つのピストンポンプで全ての油圧機器を動かす独自のCCLS油圧システムを開発することにした。

4.3.2 油圧システムの構築と油圧機器の開発

油圧システムの構築において、最も重要になるのが操舵系の安定した流量確保である。作業系と操舵系を並列に構成した油圧回路では同時操作した際に、作業回路の圧力やポンプの吐出量によっては、操舵系回路の流量が不足し、

表 2 油圧システムと機能の概要
Table 2 Overview of Hydraulic System and Function

項目		他社 A	他社 B	M6002
Pump 1	CCLS	作業系	作業系	作業系 操舵系
			走行系	走行系
Pump 2	OC	走行系	操舵系	—
Pump 3	OC	操舵系	—	—
コスト		△	○	◎(内製)
サイズ		△	○	◎
技術難易度		◎	○	△

■ : 高圧回路
■ : 低圧回路

操舵が重くなる不具合が発生する。このような不具合を回避するためには機器に優先順位を定め、吐出流量が飽和した際は優先順位の高い機器に油を供給する優先弁を油圧回路に設ける必要がある。そこでM6002ではピストンポンプか

らの供給流量は3つの優先弁により分流できる構成とした。具体的には、トラクタの安全性を確保するために最も優先する機器を操舵系とし、その次にトレーラブレーキ、走行系と続き、作業系(3Pバルブ、AUXバルブ、フロントローダバルブ)とした(図9)。

また、独自のCCLS油圧システムを実現するため、油圧ピストンポンプ、3Pバルブ、優先弁、フロントサスバルブ、主変速切替えバルブ、副変速・PTO切替えバルブを新たに開発した(図10)。

加えて、ピストンポンプの搭載については、一つのポンプに全ての機能を集約することでポンプの全長を抑えてコンパクトに配置した(図11)。結果、配管の取り回しも容易となりメンテナンス性向上も実現した。

以上の取り組みにより、大流量化と同時操作を実現するCCLS油圧システムと油圧機器を開発した。

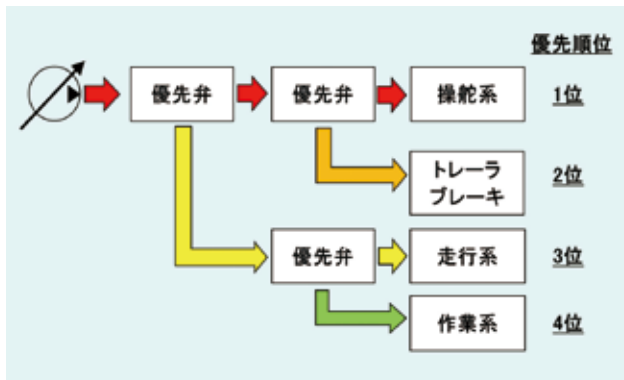


図9 油圧システムの概略

Fig. 9 Schematic Diagram of Hydraulic System

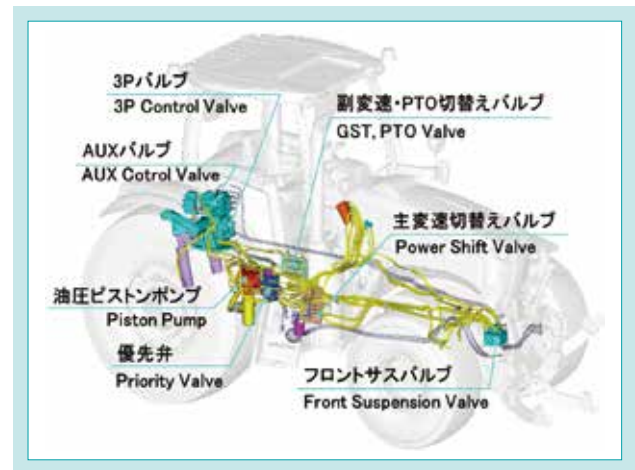


図10 新開発の油圧機器

Fig. 10 Newly Developed Hydraulic Equipment

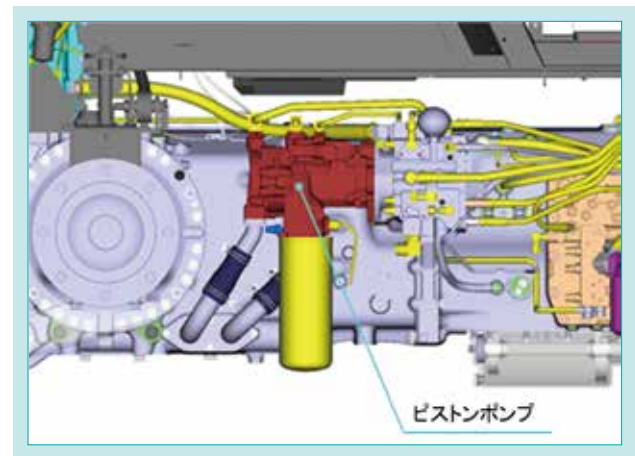


図11 ピストンポンプの搭載状態

Fig. 11 Piston Pump Layout

5. おわりに

本開発においては、欧州でのミックス農業市場への適合性を向上させるために、トランスミッション/操作系レイアウト/CCLS油圧システムなど多くの機能を新規設計した。結果、従来機種と比較して作業効率と生産性を向上させたM6002を開発することができた。

今後はお客様からの評価や要望を受けて、グローバル・メジャー・ブランドになるためのクボタの強みをさらに追求し、競合他社がひしめく畑作市場でブランド価値を高めて、確固たる地位を築いていく所存である。

SDGsのターゲットへの貢献

2.4 持続可能かつ強靱な農業の実現 従来機種に比べ作業効率と生産性アップ

8.2 イノベーションを通じた生産性の向上 作業効率と快適性を向上させ就農者の省力化に貢献

枝豆コンバインの開発

Development of Green Soybean Combine Harvester

収穫機技術部

近年、日本国内では枝豆は米からの転作により、作付面積、収穫量ともに増加傾向にある。クボタでは歩行型枝豆引抜き機を販売しているが、収穫作業には別途定置式脱莢機が必要となるため、作業能率の低さがネックとなっており、高精度と高能率を両立した収穫機の市場ニーズが高まっていた。このたびクボタでは、国内の枝豆主要生産地である秋田県農業試験場の協力を得て、業界初の「高精度・高能率な枝豆コンバイン」を開発した。本稿では、高精度・高能率の両立を実現した開発技術について紹介する。

【キーワード】

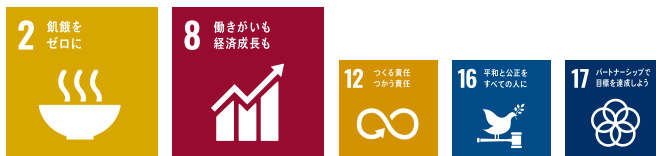
枝豆コンバイン、野菜収穫機、フィードチェーン、パトンタッチ、高精度、高能率

In recent years, the production of green soybeans has been increasing because of the conversion from rice cultivation in Japan. Kubota sells walk-behind green soybean pulling machines, but an additional threshing machine is necessary, and low efficiency is a bottleneck. There is increasing demand for a harvester having both high precision and high efficiency. Kubota has developed “high-precision, high-efficiency green soybeans combine” with the cooperation of the Akita Prefectural Agricultural Experiment Station, which is situated in the main production area for green soybeans in Japan. This paper introduces the development technology that achieves both high accuracy and high efficiency.

【Key Word】

Green Soybean Combine, Vegetable Harvester, Feed Chain, Pass, High Accuracy, High Efficiency

関連する SDGs



1. はじめに

1-1 背景

日本国内では米の生産量は低下傾向にあるが、枝豆は稲作からの転作作物として選ばれ、2019年の国内での作付面積は13 000ha、収穫量66 100tと、近年安定して推移している¹⁾(図1)。主要産地の山形・秋田では県をあげて枝豆の生産拡大に取り組んでおり、枝豆関連機器への助成制度が充実している。粗収入についても枝豆は米に対して収益の高い作物であるため、今後さらに規模拡大が進み作付面積・収穫量が増加すると考えられる。

枝豆栽培の出荷までの作業の流れは、①畝立・施肥 ②播種・移植 ③中耕 ④防除・灌水 ⑤収穫・脱莢・選別・出荷となっており、⑤が作業時間の大部分を占めている。また、枝豆は鮮度が重要となるため、朝採り品を出荷することが規定されている地域が多く、深夜から収穫を開始することで対応するため、収穫機はあるが作業時間の長さが農家の負担増大・規模拡大の妨げとなっている。

1-2 現行収穫機の特徴と課題

現行収穫機は、引抜きのみを行う引抜き機と立毛脱莢を行う立毛脱莢収穫機の2種類に分類される(図2)。

①引抜き機での収穫体系

歩行型引抜き機で枝豆の引抜きを行い、引抜いた枝豆を作業場等に運搬し、定置式脱莢機に1本ずつ手作業で投入して脱莢する必要がある。引抜き機の引抜き精度・定置式脱莢機の脱莢精度はともに良いが、手作業が多いため作業能率が低く、脱莢後の枝・茎・葉を別途廃棄する手間もかかるというデメリットがある。

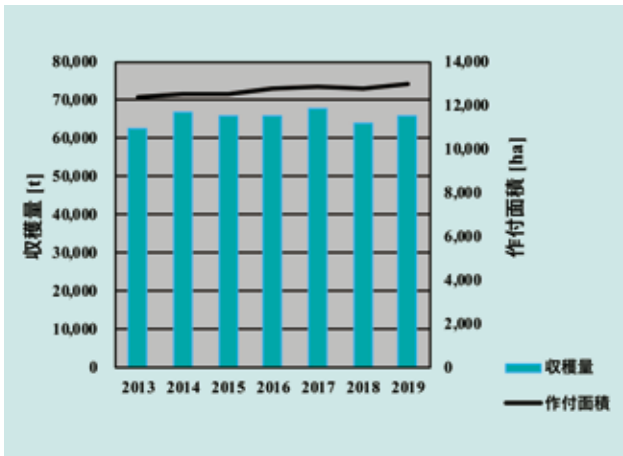


図1 枝豆作付面積・収穫量推移¹⁾

Fig. 1 Green Soybean Planted Area / Yield Transition

②立毛脱莢収穫機での収穫体系

茎は引抜かず回転式のタインで莢のみを収穫するため、作業場で脱莢・廃棄する手間が省け、作業能率は引抜き機に比べて高く、定置式脱莢機を購入する必要もない。ただし、金属製のタインにより作物を掻上げるため、ロス・損傷が多く、収穫精度が悪いというデメリットがある(図3)。

規模拡大・収益向上を求める場合は高能率である立毛脱莢収穫機が選択されるが、収穫精度が悪く、高精度・高能率を両立する収穫機のニーズが高まっていた。開発機を図4に示す。

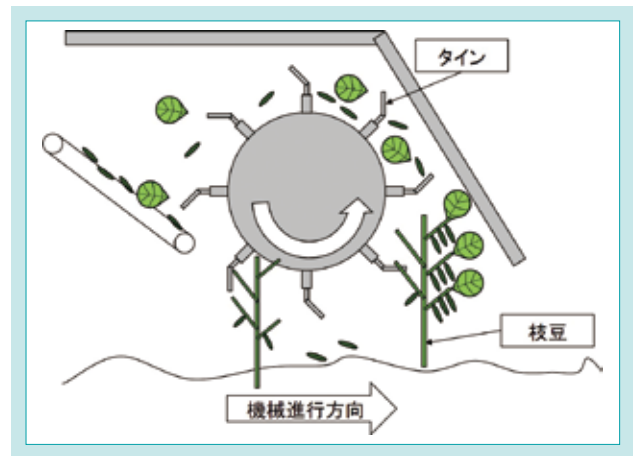


図3 立毛脱莢収穫機概略図

Fig. 3 Schematic Diagram of the Threshing Harvester

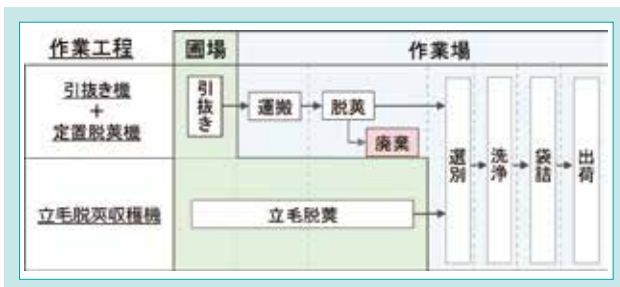


図2 現行収穫体系での作業工程

Fig. 2 Work Process of the Current Harvest Systems



図4 開発機

Fig. 4 Development Machine

2. 開発のコンセプトと目標値

2-1 開発のコンセプト

枝豆収穫機における市場のニーズは、①損傷・作物ロスが少ないこと(高精度)、②作業能率が高いこと(高能率)の両立である。そこで開発コンセプトはこれまでにない「高精度・高能率で、引抜きから運搬まで1工程・運転者1人での連

続作業が可能な1条引抜き方式乗用枝豆コンバイン」とした。さらに移動・運搬時のトラックへの積載性も考え、機体サイズがコンパクトであることも重要な要素とした。

2-2 目標値

精度の目標値は、引抜き機と定置式脱莢機を組合わせた作業体系での収穫精度以上を目標として、能率の目標値

は、立毛脱莢収穫機の作業能率以上を目標とした。機体サイズは2トンロングトラックに積載可能であること目標とした。

3. 解決すべき技術課題

3-1 高精度

高精度を実現するためには枝豆の莖を1本ずつ地面から引抜きを行い、1本ずつ丁寧に脱莢することが重要となる(引抜き機と定置式脱莢機を組合わせた方式)。しかし、単純に引抜き機と定置式脱莢機を連結させるだけでは、枝豆は地面に対して垂直に生育するため、引抜いたそのままの姿勢で脱莢することは困難となる。引抜き部から脱莢部への受渡

し(以後「バトンタッチ」という。)時に莖の姿勢が地面と平行になるよう90°変更してから脱莢する必要があり、姿勢変更をミスなく高速で連続的に行うことが課題であった。さらに、脱莢直後は葉や枝などの莢以外の不要物も多く含まれるため、高精度を実現するためには不要物の選別精度の向上も課題であった。

3-2 高能率

収穫した莢の貯留については、一般的に枝豆収穫に使用されるプラスチック製のミニコンテナに貯留した場合、収穫作

業中に収納容器を交換するために機械を頻繁に停止させる必要があるため、高能率化を実現する上での課題であった。

4. 開発技術

4-1 バトンタッチ技術

4.1.1 バトンタッチ技術の課題

開発機での枝豆の脱莢は引抜いた枝豆をフィードチェーンで後方に搬送しながら、機体中心部の脱莢部で莢・葉・枝を抜き落とす方式とした。引抜きは引抜きベルトで枝豆を挟持して行うが、バトンタッチ時には一度挟持した枝を離す必要があるため、搬送力の低下と枝豆の搬送姿勢が悪化しや

すいという問題が発生する。搬送力の低下は、枝の流れの停滞が原因となり、搬送姿勢の悪化は脱莢精度の低下の原因となるため、バトンタッチ時の搬送力の確保と正確な姿勢での受け渡しが課題であった。

4.1.2 バトンタッチ技術の解決策

枝豆の流れを停滞、姿勢を悪化させることなく、引抜き部から脱莢部に枝豆をスムーズに供給するため、以下の項目を実施することで高速かつ正確なバトンタッチを実現した。

①機械レイアウトの最適化

枝豆収穫作業時は圃場条件、作物条件に合わせて逐一引抜き部の高さを調整する必要があるため、引抜き部は油圧シリンダにより昇降する構造とした。引抜き部を昇降させる回転支点は機体上部の脱莢部入口近傍に配置することで、引抜き部昇降時のバトンタッチ部でのフィードチェーンと引抜きベルト間距離の変化を最小限に抑え、スムーズなバトンタッチを可能とした(図5)。

②引抜きベルト2段化

引抜きベルトを上下2段構造として、搬送途中で持ち替えを行う。搬送途中で挟持位置を下側にずらすことでバトンタッチ後の脱莢時に莢とフィードチェーンの空間を確保することができるため、フィードチェーンによる莢の挟まれを低減し、

株元付近の莢も効率的に脱莢することを可能とした(図6)。

③可動式丸棒ガイド

フィードチェーンに沿って可動式の丸棒ガイドを配置した。搬送されてきた枝豆に丸棒ガイドが追従し、バネによる押さえ荷重によりフィードチェーン側面部に枝豆を押し当てることで引抜きベルトから離れた後も搬送力を確保しつつ、連続的に枝豆の姿勢を90°変更することを可能とした(図7)。

④フィードチェーンのピン延長

引抜きベルトから枝豆が離れた後、姿勢変更が完了するまでの間は、フィードチェーンの側面部の搬送力のみ依存するため、枝豆の搬送力が低下し、最も滞留が発生しやすくなる。そこで、フィードチェーンのピンを外プレートから延長して飛び出させることで莖への搬送力を増加させ、莖径や形状に依存することなく安定した搬送力を確保しバトンタッチ精度を向上させることに成功した(図8)。

⑤引抜き部・脱莢部の車速連動駆動

収穫作業時は圃場条件や作物条件によって収穫車速が常に変化する。そのため、引抜き部・脱莢部の駆動(動力)をエンジンから直接取出してしまうと、車速とは関係なくエンジン回転による一定速度で回転するため、車速との速度差が発生する。この速度差によりバトンタッチ時の枝豆の姿勢が悪くなり、スムーズな受渡しが困難となることで、枝豆の滞留や脱莢精度の低下をまねく。そこで、引抜きベルトとフィードチェーンの駆動をトランスミッションから取出し、回転速度を車速に連動させることで、引抜き時およびバトンタッチ時の安定した姿勢を実現した。

悪くなり、スムーズな受渡しが困難となることで、枝豆の滞留や脱莢精度の低下をまねく。そこで、引抜きベルトとフィードチェーンの駆動をトランスミッションから取出し、回転速度を車速に連動させることで、引抜き時およびバトンタッチ時の安定した姿勢を実現した。

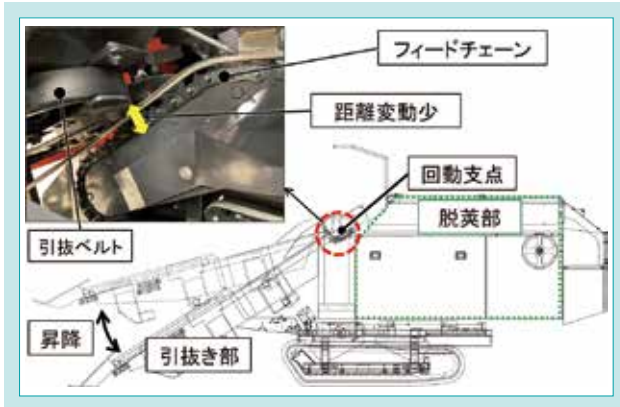


図5 機体レイアウト
Fig. 5 Machine Layout

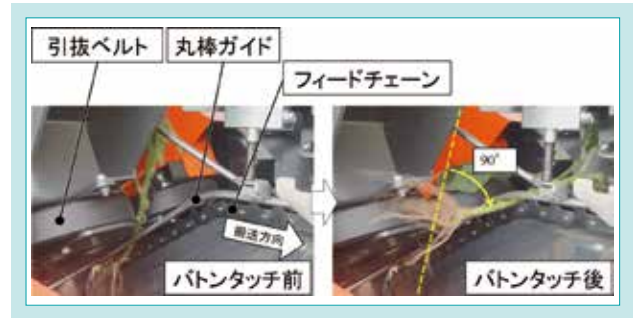


図7 可動式丸棒ガイド
Fig. 7 Movable Circle Stick Guide

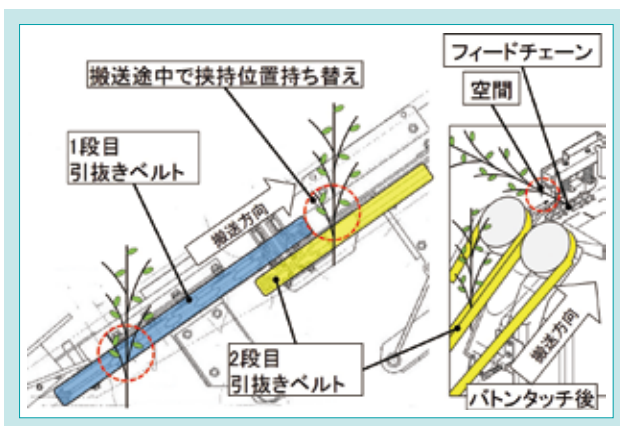


図6 2段階引抜きベルト
Fig. 6 2-Stage Pull-out Belt

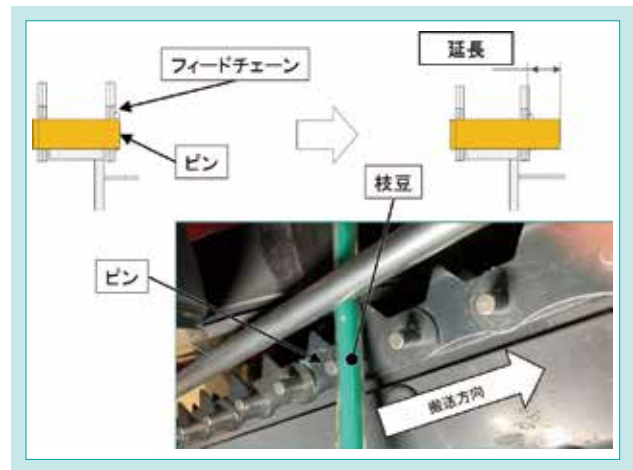


図8 フィードチェーンピン延長
Fig. 8 Extension Feed Chain Pin

4-2 選別技術

4.2.1 選別技術の課題

枝豆の選別は、一般的にはトウミの風により不要物を選別する方法が用いられる。その際不要物が残ることや、莢が機外に排出されることで選別精度が低下する。選別精度向上

のためには、莢とその他の不要物を精度よく分離することが課題であった。

4.2.2 選別技術の解決策

脱莢物の搬送経路は落差を設けた2段コンベア構成として、コンベア間での落下時にトウミによる風で選別を行う方式とした。選別の原理としては、風を受けやすく重量の軽い不要物は風の力で機外に排出し、風を受けにくく重量の重い莢はコンベア上に落下させることで選別を行う(図9)。ただ

し、脱莢部で莢と同時にちぎれた枝などの風を受ける面積が小さい不要物については、風のみで選別することは困難であるため、風下で突起付きの円筒状の選別ドラムを回転させることで、効率的に分離することに成功した(図10)。これにより、早朝からの朝露がついた状態や、降雨時の作物が濡

れた状態であっても、一度選別ドラムにぶつかることで、葉などの不要物と莢を分離しやすくなり、選別性能を向上させる

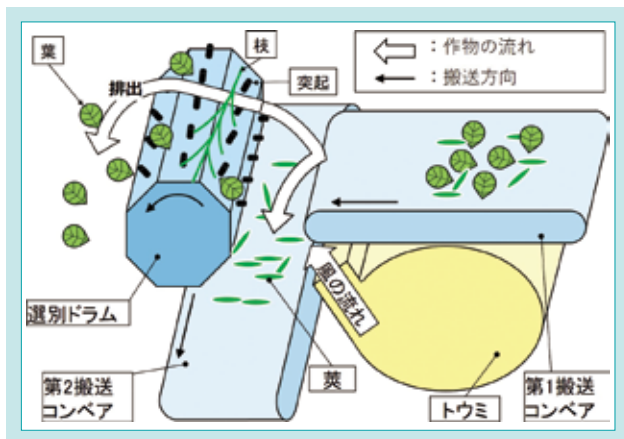


図9 選別部概略図

Fig. 9 Schematic Diagram of Separating Part

ことができた。さらに、トウミには風量調整・風向調整機構を設けることで、さまざまな作物条件に対応可能とした。

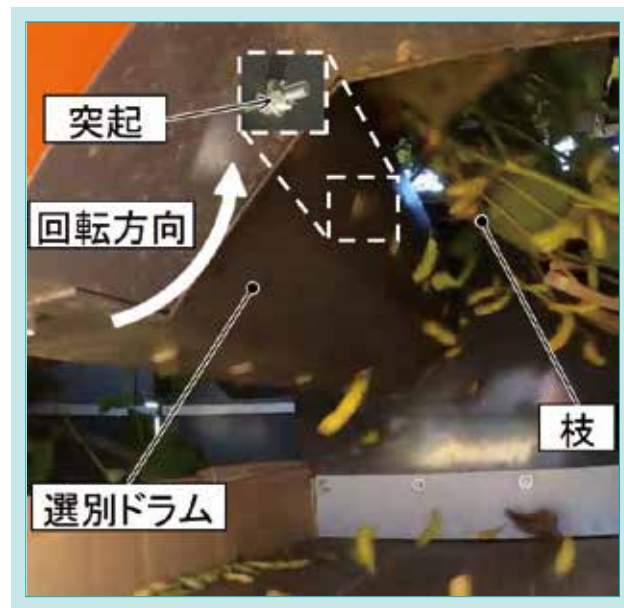


図10 選別部（収穫作業時）

Fig. 10 Separating Part During Harvesting

4-3 貯留技術

4.3.1 貯留技術の課題

一般的に枝豆の収穫作業では、プラスチック製のミニコンテナに収穫物を収納することが多いが、1個当たりの収納重量が10 kg程度であるため、頻繁に交換作業が必要となる。そのため一人作業の場合は、コンテナ交換のために機械を停止させる必要がある。また、条の途中で満杯になった場合、排出作業のために圃場内での移動が必要となるため、

作業能率が大きく低下してしまう。高能率化のためには一人作業時でも機械を停止させることなく、連続して収納が可能な大容量な貯留方法の実現が課題であった。さらに、移動・運搬の利便性を損なわないコンパクトな機体サイズの実現も課題であった。

4.3.2 貯留技術の解決策

運転者一人で高能率な連続作業を可能とするため、大容量かつ自動で莢を貯留可能とするベルトコンベア式のビーンタンクを搭載した(図11)。

①タンク容量

タンク容量は、一般的な枝豆圃場である1条100m分の莢が貯留できる60kgを想定することで、条の途中で機械を停止・移動させることなくノンストップで1条を収穫することを可能とした。

②コンパクトな機体サイズ

移動・運搬の利便性を考慮して、タンクは縦長形状の折り畳み方式とすることで、2トンロングトラックに積載可能な機体サイズを実現した(図12)。

③自動搬送・満杯センサ

脱莢・選別された枝豆は搬送コンベアからビーンタンクに投入され貯留される。搬送コンベア終端部には貯留された

枝豆を検知するための光電センサを設置することで、タンク内に枝豆が溜まり、センサが遮断されるとベルトコンベアが一定距離自動で機体の前方向に搬送される。これにより人の手でタンク内の莢をならす必要がなくなり、運転者一人作業時でも連続作業を可能とした。さらに、タンク前方には満杯センサを設置し、タンクが満杯になった際はブザーで運転者に知らせるため、運転者は運転操作のみに集中することができる。

④排出作業

収穫後タンクに貯留された莢は、タンク後部を開閉式にし、スイッチ操作でベルトコンベアを逆転させることで圃場端など任意の場所でまとめてミニコンテナ等に排出することができるため、圃場からの収穫物の排出作業の軽労化を実現した。

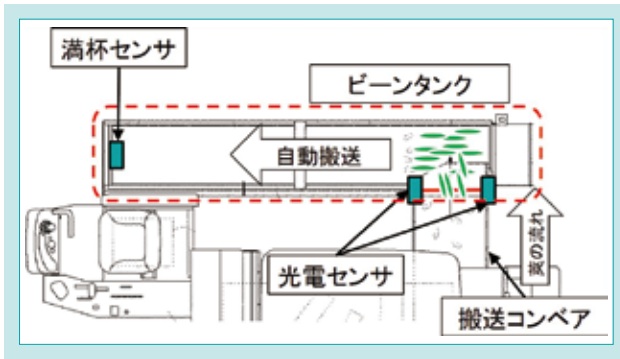


図 11 ビーンタンク概略図

Fig. 11 Schematic Diagram of Bean Tank



図 12 ビーンタンク収納・作業状態比較

Fig. 12 Comparison of Bean Tank Folding / Working Condition

4-4 開発の成果

開発機と立毛脱莢収穫機、引抜き機・定置脱莢機での収穫体系との収穫精度比較²⁾を図13に、作業能率比較を図14にそれぞれ示す。収穫精度(損傷・ロスなく回収できた莢の割合)については主にバントタッチ技術、選別技術の確立により開発の目標としていた引抜き機と定置脱莢機を組合せた収穫体系以上の精度を実現できた。また、作業能率に

については主に貯留技術を確認することで、2トントラックに積載可能でありながら立毛脱莢収穫機以上の能率を達成し、「高精度・高能率で、引抜から運搬まで1工程・運転者1人での連続作業が可能な1条引抜き方式乗用枝豆コンバイン」を実現できた。

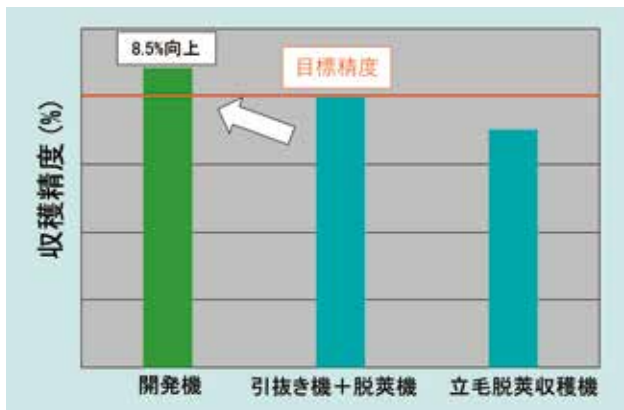
図 13 収穫精度比較²⁾

Fig. 13 Comparison of Harvest Accuracy

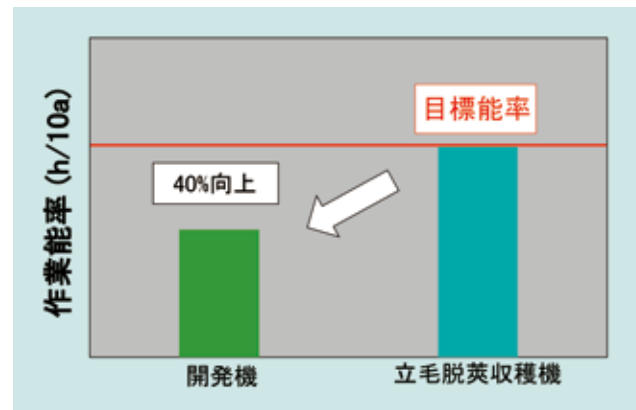


図 14 作業能率比較

Fig. 14 Comparison of Work Efficiency

5. おわりに

バントタッチ技術・選別技術・貯留技術を確認することで、今までにない高精度・高能率を実現し、市場ニーズを満たす枝豆コンバインを開発することができ、枝豆農家の省力化に貢献できた。

今後は市場・ユーザからの評価や要望をもとに、さらなる改良を進め、枝豆農家の省人化・軽労化に貢献できるよう取り組んでいきたい。

SDGs のターゲットへの貢献

2.3 農業生産性及び所得の増加 収穫時のロス低減

8.2 イノベーションを通じた生産性の向上 作業能率向上による収穫時間の削減

参考文献

1) 農林水産省 作物統計 作況調査(野菜)

https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotusakkyou_yasai/index.html、(参照日2021-08-17)

2) 鶴沼秀樹:「エダマメ栽培拡大のためのトラクターアタッチメント型収穫脱莢機の導入条件-秋田県におけるエダマメ作付け拡大を行う大規模水田経営者を対象に-」、農村経済研究、第38巻第1号、(2020年)、pp.78

Development of Corn Harvesting Header CH70 for DC70 Combine Harvester

DC70 コンバイン向けコーン刈取りヘッダ CH70 の開発

KUBOTA Research and Development Asia Co.,Ltd.

国内食料自給率の向上を狙った政府支援政策により、穀物トウモロコシの収穫性能に対するASEANの需要は、コーン市場の規模の拡大とともに増加している。ユーザは、高作業効率、低燃料消費、低作物損失、倒伏コーン刈取り性能を有した優れた収穫機を要望している。コーンヘッダは、ユーザの要望に応える事のできる解決策の1つである。

Kubota Research and Development Asia(KRDA)は、コンパクトなサイズ、軽量、着脱容易、収穫後の焼き畑削減への貢献、適正価格、および競合他社よりも優れた作業性能を有したコーンヘッダCH70を開発した。特別な性能を備えたコーンヘッダCH70は、ユーザの作業コストの削減に貢献し、競合他社コーンヘッダと比較してユーザ収入を向上させることを可能とする。CH70は、ユーザの要望に対応し、ASEAN市場の収穫機におけるクボタブランドのシェア向上、事業量および販売ネットワークを拡大して、ユーザとクボタの将来の事業成長に貢献することができる。

【キーワード】

コーンヘッダ、収穫機、コンパクト、刈刃形状、焼き畑削減

There is growing demand within ASEAN countries for better harvesting performance for grain corn along with the growing market for this product due to government-supported policies to achieve self-sufficiency through domestic production and reducing imports. The customer need perfect harvester that can be enhancing about working capacity, low fuel consumption, low header loss, lodged corn harvesting ability to support working. Corn header is one of solution of the enhance requirement.

KUBOTA Research and Development Asia Co.,Ltd.(KRDA) developed corn header CH70 focusing on greater compactness & flexible size, a header that is lightweight and easy to install, that supports the global policy of zero burn after harvest, has a reasonable price, and with performance superior to all other competitors. Due to its special features, corn header CH70 helps the customer to reduce operational costs and generate a higher income compared to the harvesters of competitors. CH70 can meet the above requirements and can also increase the market share of Kubota's harvesting machines in ASEAN countries, as well as increasing sales and expanding marketing networks to support the future business growth of both customers and Kubota.

【Keyword】

Corn Header, Combine Harvester, Compact, Blade shape, Zero burn

Related SDGs



1. Introduction

Total corn grain market in ASEAN is about 10.2 Million ha. It is second popular plant from rice and it still rising.

It makes demand of corn harvesting machine also rising. Present, selling of DC70 (multipurpose combine harvester)

on rice market is full. Increasing of combine harvester DC70 sale volume was on limited. Most of customer buy only for replace the old machine.

KRDA see the chance to develop Corn Header CH70 to catch both rising of demand on high performance harvester and energizing ASEAN sale volume of DC70 with corn, by developing CH70 as a best implement of harvesting machine and making better performance from competitor. We can make both DC70 and CH70 to be the market leader within the small combine harvester market.

When we use DC70 in corn harvesting, first, corn stalk will cut by Header. Second, separated corn pods are conveyed by feeder and transfer to thresher. Then, Corn is threshed in the thresher, only corn grain is separated and sent to product grain tank. Corncob is rejected out from thresher after threshed.

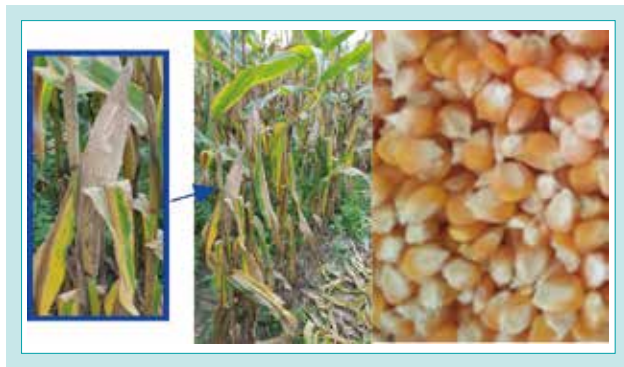


Fig. 1 Corn and Corn Grain
図1 とうもろこし房と粒

There are two types of corn harvester for DC70. First one is cutting type that is Kubota corn kit CK70. CK70 was developed based on original combine by replacing

the minimum parts. So Customer can harvest corn with a small investment. However, since the CK70 harvests the stems, leaves, and Pods and put all into the threshing section, the working load is heavy, the work efficiency is low, and the dust mixing rate is high, so there is a high demand for performance improvement in the market.



Fig. 2 Corn Kit CK70 Attached to DC70
図2 DC70に装着された Corn Kit CK70

Second one is pod separate type, competitors have launched this type harvester already. This type has high performance than cutting type basically, because can separate only corn pod within header section, and can thresh without stems and leaves. However, competitor header have some big problems, these are heavy weight and large header size. Both problems make customer inconvenient to use or transportation, and cause shorter lifetime of combine harvester.

KRDA decided to develop new machine that has better performance compared to cutting type (CK70) and a competitor corn headers, can have an overwhelming impact on the market and contribute to the expansion of Kubota's business.

2. R&D Concept and Target Value

2-1 R&D Concept

Development of CH70 focus to get achieve with two key design concept

- 1) "Flexible in using"
- 2) "High performance"

2-2 Target Value

To make CH70 to the best of new corn harvesting header for customer with below item.

- a.) No need to change hydraulic cylinder and no need to install rear balance weight
- b.) High working capacity
- c.) Low fuel consumptions

- d.) Low harvesting header loss
(Header loss : Falling crops out of the header)
- e.) Support zero burn after harvest

3. Technical Challenge to be Solved

1)“Flexible in using”

The competitor's corn header has two major problems: "too heavy" and "too big". If it is "too heavy", an unbalance will occur during the operation of the combine, making the operation difficult. In addition, extra parts such as special cylinders and rear counter weights need to be used to prevent unbalance. If it is "too big", it will be difficult to transport the combine on the truck, and will occur a problem.

The themes to be challenged when developing the new corn header CH70 are "lightening" and "compactification".

2)“High performance”

Even if the header is compact and lightweight, it cannot be allowed to be inferior to the competitor header in harvesting performance and working performance.

The themes to be challenged when developing the new corn header CH70 is “Ensuring high work performance”.

4. Developed Technology

4-1 Lightening Technology

4.1.1 Technical Challenge

Achieving both lightweight structure and durability

4.1.2 Solution of Challenge

A structure using a thin plate was adopted, and a structure with sufficient strength with a minimum weight was designed. Structural analysis was performed using analysis techniques(Fig3). The stress was measured and the durability test was performed on the actual prototype product. We have completed an overwhelmingly lightweight header compared with the competitor header.

As a result, we achieved the front-rear balance of the machine without adding a rear counterweight. In addition, due to the effect of the lightweight header structure, the original combine hydraulic cylinder could be used as it is. Therefore, the product has good operability and easy assembly performance without using extra parts (Fig4).

Use thin plate and design optimum shape

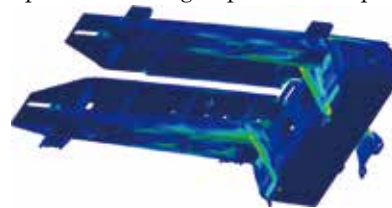


Fig. 3 Structure Analysis
図 3 構造解析



Fig. 4 Counterweight & Hydraulics Cylinder
図 4 カウンターウェイトと油圧シリンダ

4-2 Compactification Technology

4.2.1 Technical Challenge

Design optimal relation of unit harvester speed in compact header

4.2.2 Solution of Challenge

Unit harvester is sub assembly part of corn harvester header. Use a harvester unit per a row of corn harvesting. CH70 install for three unit to make three rows harvesting ability and matching

for width of combine harvester.

Pod separating process are 3 steps.

Step 1 : Corn pod with corn stalk is pushed by [A] Gathering chain and come into Unit harvester.

Step 2 : Corn is still pushed by gathering chain and low stalk is more pushed by [B] Screw feeder to push the corn into separating zone.

Step 3 : [C] Stalk roller will pulldown only corn

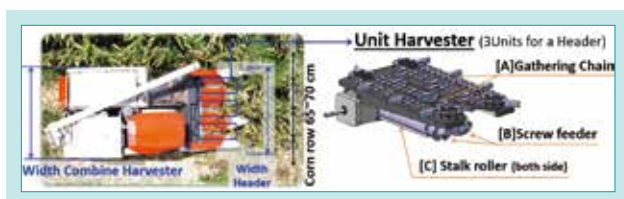


Fig. 5 CH70 Header & Unit Harvester
図 5 CH70 ヘッドと刈取りユニット

stalk while corn pod is left on frame in separating zone. Only corn pod is separated and pushed by gathering chain to convey only corn pod to thresher section.



Fig. 6 CH70 Unit Harvester for Corn Pod Separating Process
図 6 CH70 刈取りユニットでの房分離プロセス

Three main component of unit harvester must have operation speed in the same relation and matching with harvesting speed(V) of the combine harvester. If not, corn pod will drop out of the header and appear header loss.

A. Gathering chain ; Use for convey corn stalk come into unit harvester for pod separating process and convey separated corn pod to the rear side.

- Speed calculation.

$$N = \frac{60V}{\pi D} \quad [1]$$

N : Drive Sprocket rotation speed (rpm)
 V : Harvesting speed (m/s)
 D : P.C.D. diameter drive sprocket(m)

- Quantity of finger attach to gathering chain. Find quantity suitable of corn stalk frequent.

$$f = \frac{V}{Cp} \quad [2]$$

$$n = \frac{f}{(\frac{V}{Lc}) \times Cq} \quad [3]$$

f : Corn harvesting frequency (Stalk/s)
 V : Harvesting speed (m/s)
 Cp : In row corn pitch (m)
 n : Finger attached quantity (Pc.)
 Lc : Circumference of gathering chain (m)
 p : Pitch of corn planting (m)
 Cq : Quantity of gathering chain per a unit harvester (Pc.)

B. Screw feeder ; Use for convey corn stalk from gathering chain to feeding into stalk roller or pod separating process.

- Pitch length of screw feeder

$$P = \frac{60V}{Ns} \quad [4]$$

P : Pitch length of Screw feeder (m)
 V : Harvesting speed (m/s)
 Ns : Screw rotation speed (rpm)

C. Stalk roller ; Use for pull corn stalk down in pod separating process.

- Separating pull velocity

note : Prevent corn pod be bounce after pull, velocity should lower 7.2 m/s

$$Vp = \frac{(Ch - Uh) \times V}{Ls} \quad [5]$$

Vp : Velocity of corn pulling (m/s)
 Ch : Height of corn stalk (m)
 Uh : Height of unit harvester at harvesting position (m)
 V : Harvesting speed (m/s)
 Ls : Design long length of Stalk roller (m)

By setting the optimum parameters, the corn header CH70 has been completed as a product that both a compact structure and the required performance in the header.

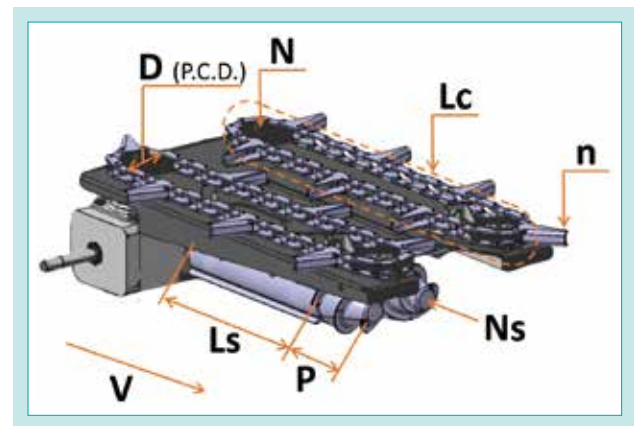


Fig. 7 Parameter of Unit Harvester
図 7 刈取りユニットのパラメータ

4-3 Ensuring high work performance Technology

4.3.1 Technical Challenge

Optimal Stalk roller design to achieve all performance in high level

4.3.2 Solution of Challenge

For enhancing of low fuel consumption performance & high working capacity, the most important part

is Stalk roller. Function of stalk roller is pull stalk down for separating only corn pod to reduce load of

thresher system by no corn stalk mix in thresher section. Blade is a part attached with stalk roller to improve separating performance.

We considerate two parameters in stalk roller design on separating performance development.

- Rate of complete separating. (Fig. 8)

Only corn pod separating out rate (%) from stalk. If this parameter is not good, not only the pod but also the stalk will be transported to the thresher section, which will increase the load on the thresher section.

- Ability to cut corn stalk. (Fig. 8)

Blade must able to cut pulled stalk to small piece. If pulled stalk was not cut to small piece, farmer must have to burn remain stalks after harvesting for preparing soil for next crop. Because, long stalk will always jam to plow or Rotary (Fig. 9) when prepare the soil for next crop. It is a special competitive advantage with regard to saving the environment and make easier of soil preparation merit for farmer.

Corn harvesting header CH70 blade of stalk roller design are concern on three parameters. (Fig. 10)

D. Clearance between stalk rollers ; Design for every corn stalk size able to pull pass.

E. Quantity of attached Blade ; Design blade quantity to cover circumference of stalk roller for anti-slip when pull the stalk.

F. Height of Blade ; Find suitable length on test machine for this length on both rate of complete separating (%) and ability to cut corn stalk after harvest. (Fig. 11)

We have realized a structure that achieves the performance of both “Corn pod separating” and “Stalk cutting” at a high level. In addition, the load on each part of the machine has been reduced, and good results have been obtained in terms of fuel efficiency and work capacity.



Fig. 8 CH70 Unit Harvester for Corn Pod Separating Process
 図 8 CH70 刈取りユニットでの房分離プロセス



Fig. 9 Picked-up Stalks Jamming into Rotary Machine
 図 9 ローターに巻き付いた刈取り後の茎

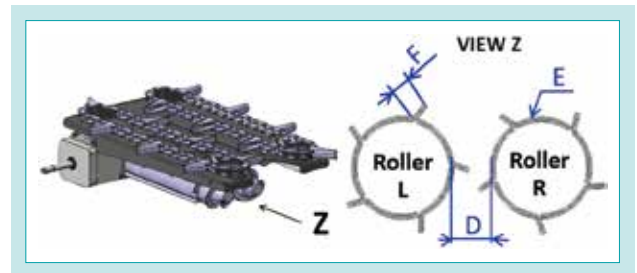


Fig. 10 Blade Shape Layout
 図 10 刃の形状レイアウト

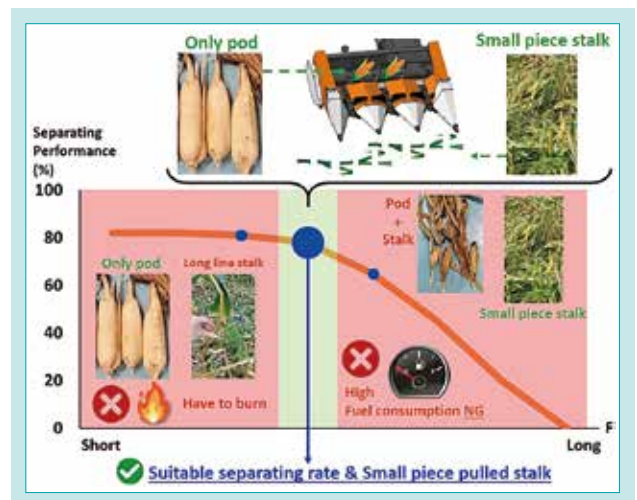


Fig. 11 Height of Blade Testing Result
 図 11 刃高さ変更テスト結果

5. Conclusion

With all developed technical innovations CH70 can meet all targets and much better than CK70 and competitor as shown below Table 1.

Table 1 Performance Comparison CH70, Competitor
表 1 性能比較結果

Specification	Result		
	CH70	Better Competitor	Competitor CH
“High Performance”			
HEADER LOSS [%]	0.21	CH70 Better 33 %	0.33
HARVEST LODGE CORN ≥ 10 Degree [%]	96	=	96
WORKING CAPACITY [ha/hr.]	0.54	CH70 Better 13 %	0.48
FUEL CONSUMPTION [L/ha]	15.62	CH70 Better 10 %	17.5
“Flexible in Using”			
HEADER WEIGHT [kg]	487	○	670
COUNTER WEIGHT [kg]	No	○	Need (100)
HYDRAULIC CYLINDER CHANGE	No	○	Need

○: Better =: Equal

CH70 was first launched in March 2021 in Thailand, and then it will be expanding to ASEAN and around the world from 2022.

CH70 is ready to be the best corn harvesting header in the world. CH70 can contribute to the expansion of Kubota's small combine business and to improve the workability and profitability of users.



Fig. 12 Corn Header CH70 Attached to DC70
図 12 DC70 に装着されたコーンヘッダ CH70

Contribution to SDG Targets

- | | |
|---|---|
| 2.3 Increasing agricultural productivity and income | Contribution to the increase in income of farmers and contractor in ASEAN through improvement in work efficiency and reduce header loss during corn harvesting. |
| 8.2 Improvement in productivity through innovation | Development a lightweight and compact corn header to save next crop productivity by low ground pressure from combine harvester during corn harvesting. |
| 12.3 Reduction of food loss in production and supply chains | Contribution to reduce the loss during corn harvesting process through development in suitable speed of unit harvester. |
| 13.b Capacity building for climate change planning and management in developing countries | Contribution to reduce CO ₂ from burning process after corn harvested and save the earth through development with corn stalk cutting after harvest ability on unit harvester of corn header. |

[Reference]

- 1.) Shiglet's, "Mechanical Engineering Design", McGrawHill, 2-D Resultants
- 2.) R.C. Hibbeler, "Engineering Mechanics 1", Global edition, Force system.
- 3.) ASEAN Food Security Information System (AFSIS), Agricultural Commodity Outlook , Dec 2020
- 4.) Asia Pacific maize market growth, trends, impact and forecasts (2021 - 2026)

乗用2条全自動野菜移植機の開発

Development of Ride-on Two-row Fully Automatic Vegetable Transplanter

移植機技術部

国内農業は、米価の低迷により乗用型に慣れた稲作農家が高収益な野菜作りに取り組む動きが拡大している。また農家の大規模化が進んでおり高効率で軽労な乗用型全自動野菜移植機(以下「乗用型」という。)のニーズが高まっている。一方、クボタは乗用型のラインナップがなく、これらのニーズに応えられていなかった。このような背景から新たに乗用2条全自動野菜移植機を開発した。本稿では、特にニーズが多い「高い植付け性能」と「容易な取扱い性能」を実現した開発技術について述べる。

【キーワード】

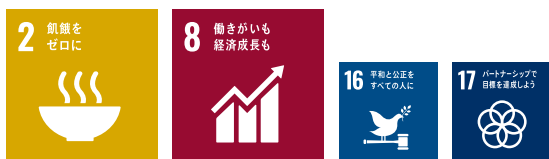
野菜移植機、植付け性能、取扱い性、植付け深さ制御

In domestic agriculture, rice farmers who are accustomed to ride-on machines are stepping up their efforts to grow highly profitable vegetables due to the slump in rice prices. In addition, the scale of farms is increasing, and there is a growing demand for a highly efficient and easy-to-use fully automatic ride-on vegetable transplanter. On the other hand, Kubota did not have a line-up ride-on machines that could meet this demand. Given these circumstances, we have developed a new two-row fully automatic ride-on vegetable transplanter. This paper describes the technology we developed made possible "high planting performance" and "easy handling performance", which are in especially high demand.

【Key Word】

Vegetable Transplanter, Planting Performance, Handling Performance, Structure for Controlling Planting Depth

関連する SDGs



1. はじめに

日本国内では、高齢化による農業従事者の減少によってあまった農地が担い手へ集約され、担い手の大規模化が進んでいる。また、米需要の低下によってあまった水田の有効活用や、米価低迷による野菜などの高収益作物の導入を目的に軽労な乗用型に慣れた稲作農家が野菜作りに取り組む動きが拡大している¹⁾。このような背景から野菜移植機は、さらなる高効率化と軽労化が求められていた。

一方、クボタはこれまで主力の歩行型全自動野菜移植機(以下「歩行型」という。)の高効率化を進めてきた。しかし、近年の高効率化や軽労化ニーズに十分応えきれていなかった。そこで、これらのニーズに応えるため新たに乗用2条全自動野菜移植機を開

発した(図1)。



図1 乗用2条全自動野菜移植機

Fig. 1 Two-row Fully Automatic Ride-on Vegetable Transplanter

2. 開発のコンセプトと目標値

2-1 開発のコンセプト

植付け性能は野菜移植機の最重要機能である。欠株が多ければ補植に時間を割かれ能率が低下する。植付け姿勢や植付け深さが設定から外れると生育不良を招き品質が低下する。当然、ユーザは収入に直結する植付け性能を最重要視する。歩行型(図2)はこの植付け性能で高い評価を得ており、当然開発機も歩行型同等の優れた植付け性能が求められた。また、本開発機は新たに市場投入するため誰もが初めて使用することになる。よって容易な取扱い性能が求められた。

以上より開発のコンセプトは「高い植付け性能」と「容易な取扱い性能」とした。

2-2 開発目標

(1) 高い植付け性能

評価が高い歩行型同等の優れた植付け性能を達成することを目標にした。

(2) 容易な取扱い性能

車体部は、最大で高さ30 cmの畝を跨ぎながら植付けを行う野菜作に適応でき、苗載せ台に苗を補給することを想定した広いステップを備えることが求められる。これらの条件に



図2 歩行型全自動野菜移植機

Fig. 2 Fully Automatic Vegetable Walk-behind Transplanter

最も適合するのが田植機車体であった。また、野菜作に取組もうとする稲作農家にとって田植機車体は扱い慣れている。よって、車体部は田植機の車体をベースに開発することを目標にした。

また、移植部は、作付け条件に合わせて簡単に調節できることが取扱い性を大きく向上させる。優れた取扱い性を達成するため、主要な調節である条間、植付け深さ、株間調節を最小限の作業ロスで行える構造を開発することを目標にした。

3. 解決すべき技術課題

(1) 高い植付け性能

全自動野菜移植機は、セルトレイ(図3)を機械にセットすれば、植付けまでを自動で行う。植付け部は、苗取り爪(A)、植付けカップ(B)、鎮圧輪(C)、苗載せ台(D)で構成され、次の工程で植付ける(図4)。

- ① 苗取り爪(A)で苗載せ台(D)に搭載したセルトレイから苗を1株取出す。
- ② 苗を植付けカップ(B)に受け渡す。
- ③ 植付けカップ(B)を圃場に突き刺して土中で植付けカップを開き苗を植付ける。
- ④ 直後に鎮圧輪(C)で覆土し苗を固定する。

歩行型同等の植付け性能を達成するためには構造が異なる乗用型に植付け部の構成要素(A)~(D)を同じ位置関係でレイアウトする必要がある。



図3 セルトレイで栽培された移植苗(ブロッコリ)

Fig. 3 Transplanted Seedlings (Broccoli) Cultivated in Cell Trays

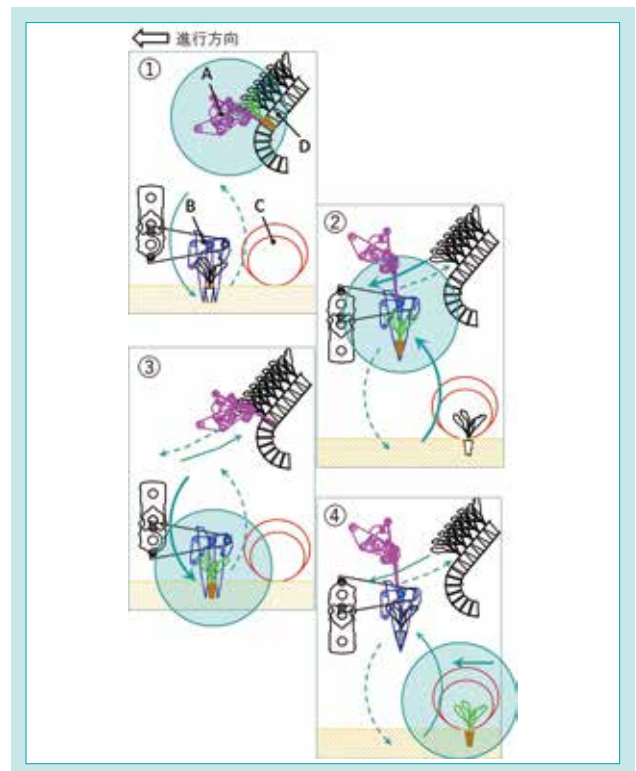


図4 植付け工程

Fig. 4 Planting Process

また、開発機は2条植えである。1条植えの歩行型と異なり機体が傾いたり、左右の畝に高低差がある場合、左右の植付け深さに差ができ、狙いの深さから外れる(図5)。よって、車体の傾きや、左右の畝の高低差にかかわらず左右の植付け深さを均等に維持する制御技術の開発が必要であった。

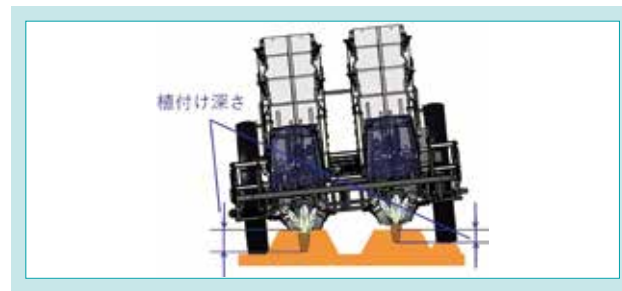


図5 植付け深さ
Fig. 5 Planting Depth

(2) 容易な取扱い性能

作業ロスを最小化するには、条間、植付け深さ、株間調節を容易に早く行えることが重要である。これを実現する調節構造

の開発が求められた(図6)。

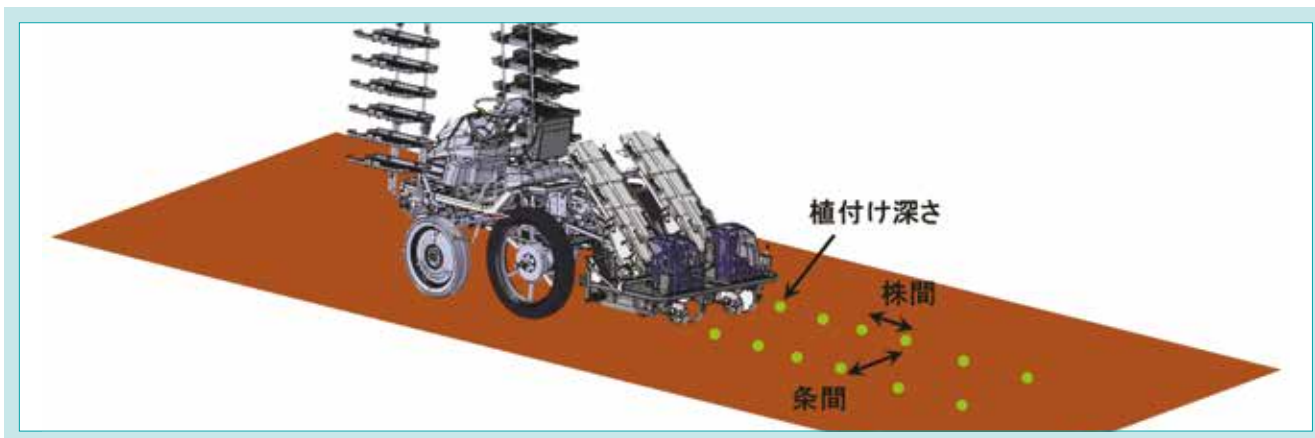


図6 各種調整
Fig. 6 Various Adjustments

4. 開発技術

4-1 高い植付け性能

4.1.1 乗用型向け植付け部の開発

歩行型はオペレータが機体後方で操作する。オペレータは前方に向かって苗を補給するため、苗載せ台はオペレータの前にある。よって植付けカップは苗載せ台の前方に位置することになる(図7)。一方、乗用型は、オペレータが前方の本機側にいる。オペレータは本機側から苗を補給するため、苗載せ台はオペレータの後方に配置することになる。よって植付けカップは苗載せ台の後方に配置する必要がある(図8)。

このように乗用型は歩行型と比較し大きくレイアウトを変更する必要があった。この乗用型のレイアウトに植付け部の構成要素を歩行型と同じ位置関係で配置しようとした場合、植付けカップをレイアウトする苗載せ台後方のスペースが狭く植付けカップのコンパクト化が必要であった。

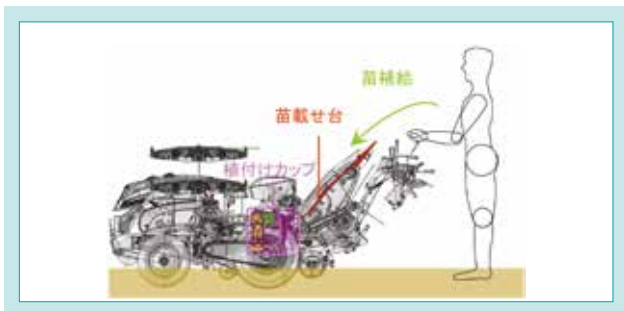


図7 歩行型のレイアウト
Fig. 7 Arrangement of Walk-behind Type

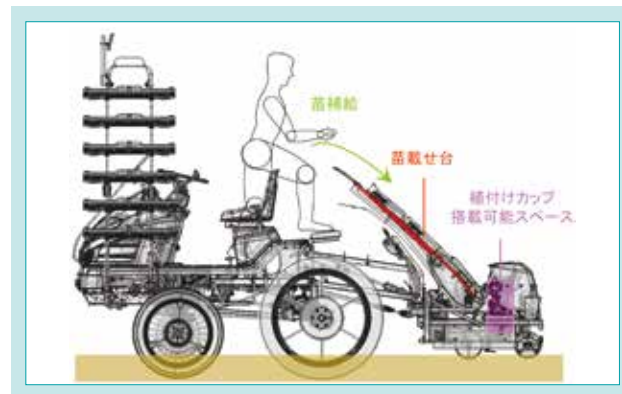


図8 乗用型のレイアウト
Fig. 8 Arrangement of Ride-on Type

植付けカップをコンパクト化するため、カップと駆動ケースを連結するホルダの構造を見直し、歩行型の全長305 mmに対し、140 mmまで短縮した乗用型向けの植付けカップを開発した(図9)。これによって、乗用型に歩行型と同じレイアウトで植付けカップを配置できた。

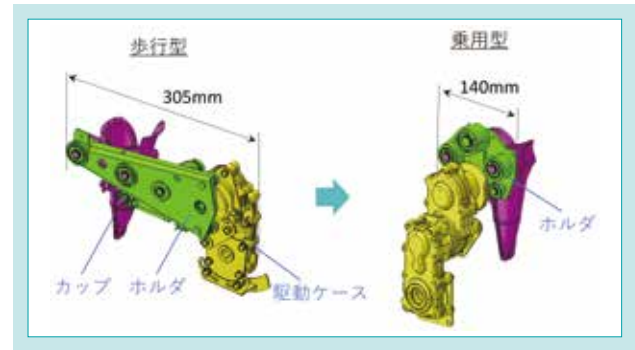


図9 植付けカップ構造
Fig. 9 Planting Cup Structure

4.1.2 対地モンローの開発

植付け深さ制御は田植機で採用している「モンロー機構」が知られている。これは、車体部に対し移植部をローリングさせ、車体部が傾いても移植部を水平に維持する機能である。田植機の場合、代掻きで水平にした泥面に移植するため、移植部に搭載した角度センサの情報をもとに移植部を水平制御し植付け深さを一定に保つ。一方、野菜移植機は

水平ではない畝に移植するため、左右の植付け深さを揃えるには、左右植付け部の対地高さを等しく制御する必要がある(図10)。本開発では、田植機のモンローを野菜移植機に適用することにしたが、左右植付け部の対地高さを検出する技術の開発が必要であった。

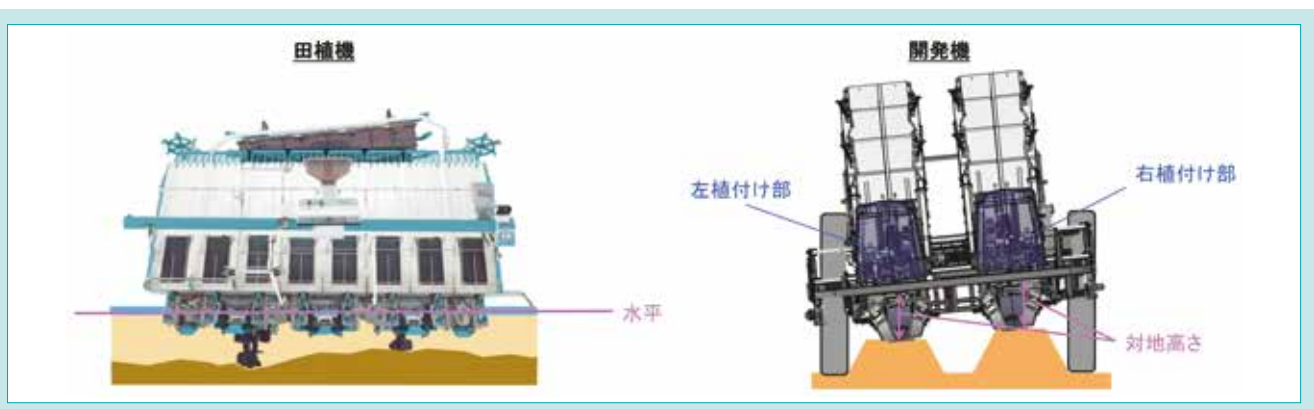


図10 植付け深さ制御
Fig. 10 Planting Depth Control

そこで、畝面に追従する感知ローラを開発した。感知ローラを畝面の凸凹などによる高さ変化に倣って上下動させ、回動支点部の角度変化をセンシングし畝高さを認識する(図11)。感知ローラを左右植付け部に配置することで左右植付け部の対地高さが分かるため、この差を埋める方

向に移植部を傾斜させ左右植付け部の対地高さを等しく保つ。この乗用全自動野菜移植機で初の「対地モンロー」によって歩行型同等の高精度な植付け深さ制御を可能にした。

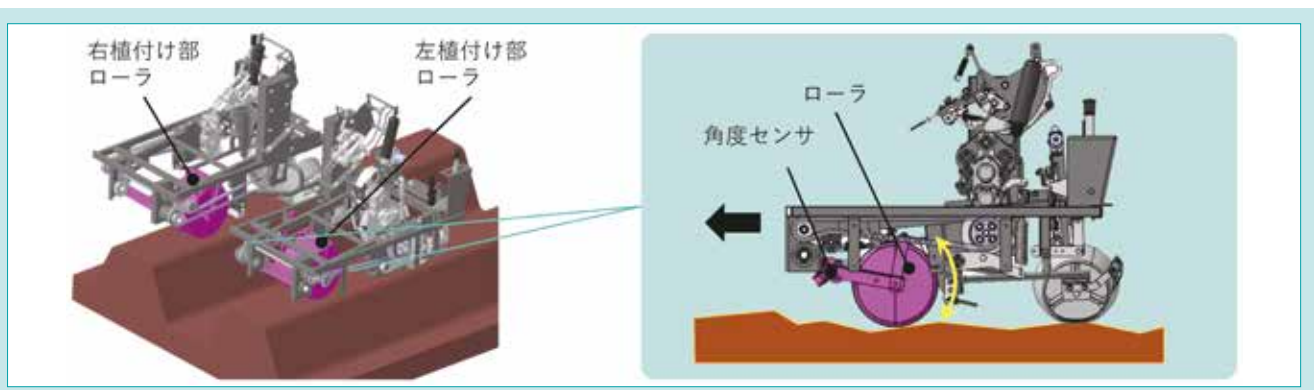


図11 対地高さ検出構造
Fig. 11 Ground Height Detection Structure

4-2 容易な取扱い性能

4.2.1 田植機車体の活用

12枚搭載可能な予備苗載せ台、畝体系に合わせてトレッドを変更できる構造、畑での走破性を確保するための幅広タイヤ、株間制御のための電磁クラッチ搭載、により田植機車体を野菜移植機に対応させた。また、クボタの田植機で評価

が高い、手で移植部の昇降および植付け操作が可能なポンパレバーや、快適作業に寄与する四輪サスペンションは残し、取扱い性の高い車体部を開発した。

4.2.2 容易な条間調節構造の開発

条間調節は左右植付け部の間隔を植付け条間に合わせて変更する。条間調節の容易化のため、植付け部を構成する苗載せ台、苗取り爪、植付けカップなどの各ブロック

を可能な限り集約し調節を行う箇所を3ユニットで構成した(図12)。3ユニットをスライドさせる調節構造のおかげで、容易な条間調節を実現できた。

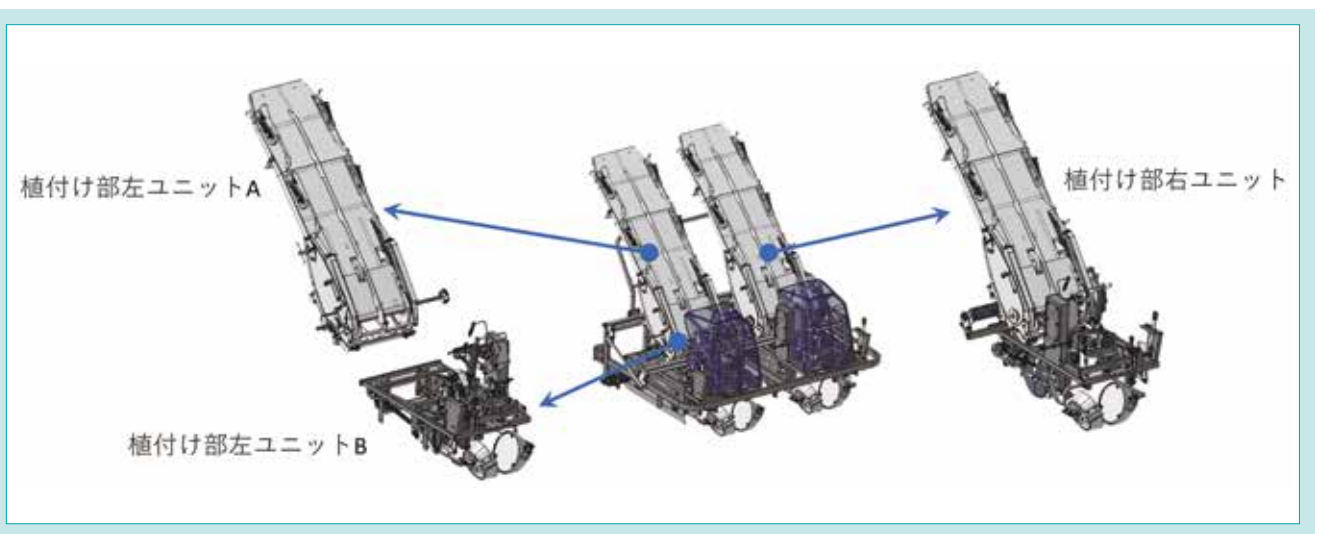


図 12 移植部のユニット構造
Fig. 12 Unit Structure of the Transplant part

4.2.3 容易な植付け深さ調節構造の開発

手で容易に調節できる構造を実現するため、植付け深さ変更構造を電動化し、手元に調節用ボリュームを配置し

た。手元のボリューム一つで調節できるので、運転しながらでも簡単かつ素早い調節を可能にした(図13)。



図 13 植付け深さ調節構造
Fig. 13 Planting Depth Adjustment Structure

4.2.4 株間調節機構の開発

歩行型で採用している株間制御構造を乗用型にも組込んだ。電磁クラッチで植付け駆動軸を間欠駆動させ、停止時間を制御し株間を変更する構造で、株間を広くする場合は停止時間を長く、株間を狭くする場合は停止時間を短くする

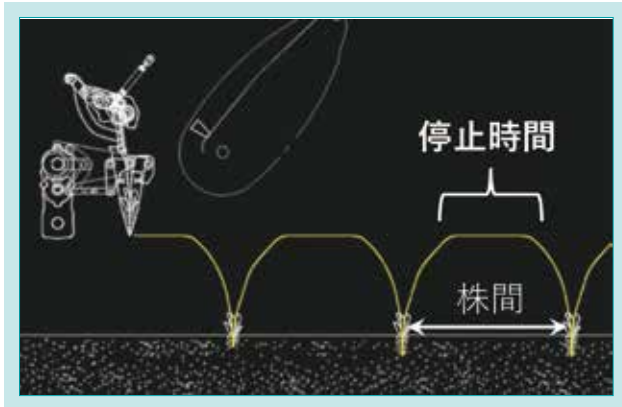


図 14 株間制御
Fig. 14 Hill Space Control

(図14)。また、調節用の操作パネルは株間表示とプッシュスイッチで構成し、表示される株間を確認しながら1 cm単位で正確に調節できるようにした(図15)。

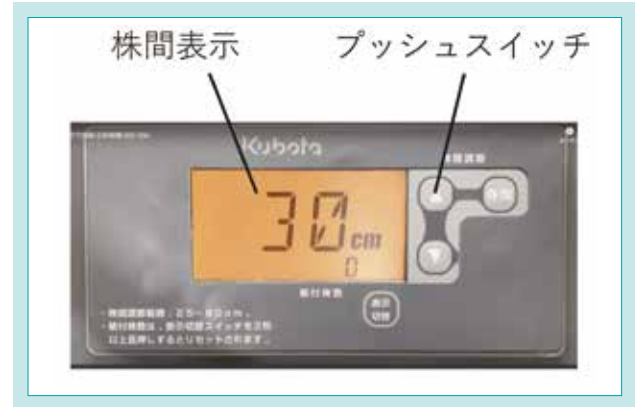


図 15 操作パネル
Fig. 15 Control Panel

5. おわりに

国内農家の高能率化、軽労化ニーズに応えるため、「高い植付け性能」と「容易な取扱い性能」を実現した乗用2条全自動野菜移植機を開発した。

- 1) 乗用型向けの植付けカップ構造を開発し、歩行型同等の高い植付け性能を達成した。
- 2) 「対地モノロー」の開発により2条植えながら正確な植付け深さ制御を達成した。
- 3) 田植機車体の活用、条間調節部のユニット構造、植付け深さ調節や株間調節の電動化による操作の手元化によって容易な取扱い性能を達成、調節による作業時間ロスを最小化した。

SDGs のターゲットへの貢献

2.3 農業生産性及び所得の増加 植付け性能向上による生産性向上

2.4 持続可能かつ強靱な農業の実現 乗用型による軽労化により高齢者でも楽に作業可能

8.2 イノベーションを通じた生産性の向上 乗用かつ2条植えによって作業能率が大幅に向上

参考文献

- 1) 農水省: 米をめぐる関係資料(令和2年7月)

本開発機は本稿の内容のほかにも、業界最高速の作業速度や、多目的ヒッチ採用により移植部を除草機などに交換可能にするなど、高能率化や利便性にも配慮している。また、本開発機は条間40 cm～66cmに対応させ他社機(条間45cm～65cm)より作付け条件の適応範囲が広いが、さらに適応範囲を広げる取組みを進める。また、さらなる高能率化を目指し多条化への取組みも進める。

発電機向け全領域再生DPFシステムの開発

Development of DPF Regeneration System Under All Operating Conditions for Generators

エンジン技術第一部

世界的な排出ガス規制の強化によってディーゼルエンジンには排出ガス中のPMを捕集するDPFが必須となりつつある。DPF装着エンジンには捕集されたPMを燃焼除去するDPF再生が必要となるが、無人運転される発電機用エンジンはDPF再生時に運転を停止させることができない。したがって運転条件の全領域でDPF再生可能なことが求められる。本開発では排気昇温触媒と排気スロットルを利用したクボタオリジナルの排気昇温システムの開発により全領域再生を可能にした。また、従来から発電機用エンジンの課題であった低負荷運転が起因となる白煙発生およびDOC閉塞を解決した。

【キーワード】

ディーゼルエンジン、発電機、PM、DOC、DPF、排気昇温触媒、排気スロットル

As the global emission regulations have become more stringent recently, a DPF that filters PM in exhaust gas is becoming essential for diesel engines. Engines equipped with a DPF must carry out DPF regeneration that burns and removes PM, but generator engines that operate unmanned cannot be stopped during DPF regeneration. Therefore, it is required that a DPF can be regenerated under all operating conditions even where the exhaust temperature is low. In this study, the development of Kubota's original exhaust gas heating system using an exhaust heating catalyst and exhaust throttle enables regeneration under all operating conditions. In addition, this study solved the problem that low load operation sometime causes both white smoke and DOC blockage during generator use.

【Key Word】

Diesel Engine, Electrical Generator, PM, DOC, DPF, Exhaust Heating Catalyst, Exhaust Throttle Valve

関連する SDGs



1. はじめに

近年施行された欧州StageV規制および中国4次規制において、排出ガス中の粒子状物質(Particulate Matter、以下PM)の重量に加え、粒子数が規制されている。そのため、ディーゼルエンジンはPMを捕集するディーゼル微粒子捕集フィルタ(Diesel Particulate Filter、以下DPF)の装着が必須となりつつある。DPFを搭載した場合、捕集したPMを燃焼除去する制御であるDPF再生が必要となる。DPF再生は、図1に示すDPF上流のディーゼル酸化触媒(Diesel Oxidation Catalyst、以下DOC)で燃料を反応させて排気温度を上昇させ、PM燃焼させることで実行される。

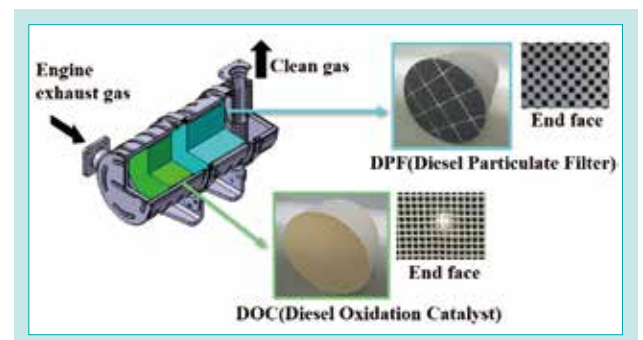


図1 DOCとDPFの概略図
Fig. 1 Schematic of DOC and DPF

発電機用エンジンは無人で連続して使用されるため、DPF再生を実施させるために運転を停止させることはできない。そのため、DPFに一定量以上のPMが堆積した際、いずれの運転条件下でもDPF再生が可能であることが求められる。また、発電機は電源負荷投入前の待機状態で使用されることが多いため、低排気温度の軽負荷で長時間運転されることが特徴である。そのため、PM燃焼除去が困難な低排気温度でもDPF再生の可能なシステムが必要となる。

発電機用エンジンの別の課題として、白煙発生およびDOC端面の閉塞が挙げられる。発電機での特徴の軽負荷運転は排気温度が低いため、未燃の燃料やオイルが原因となる炭化水素(以下HC)がエンジンから排出されDOCに蓄積する。長時間DOCに蓄積されたHCが高負荷

高温時にDOCから一気に放出されることで、白煙を発生させる。また、HCが糊の役割となりPMを凝集させてDOC端面を閉塞させてしまう(図2)。本技報では発電機用エンジンに適応したDPF再生技術および白煙・DOC閉塞の防止技術を紹介する。

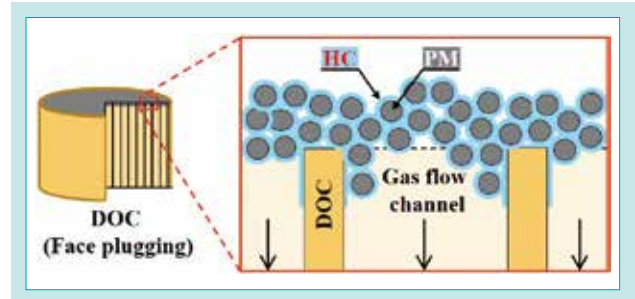


図2 DOC端面閉塞の概略図
Fig. 2 Schematic of DOC Face Plugging

2. 開発のコンセプトと目標値

2-1 開発のコンセプト

PMの粒子数規制を含む排出ガス規制に対応する発電機用エンジンとしてDPFを搭載し、発電機の特徴である軽負荷運転に対して適応したDPF再生システムを開発しなければならない。DPF再生は、DOCでの燃料の燃焼をともなう排出ガス昇温を利用するため、DOCが燃料燃焼可能な温度である活性温度より高いことが必要条件となる。したがって、低排気温度の軽負荷運転時にDOCが活性温度に達する排気昇温手法が必要である。また、白煙およびDOC端面閉塞は200℃未満の低排気温度時にDOCで蓄積されるHCが原因である。HC蓄積抑制のためにも、HCを酸化除去可能な200℃以上までDOCを昇温させることが求められる。そこで、DOCを昇温させるためのデバイスとして、メタル担体に貴金属触媒を担持した排気昇温触媒(Exhaust Heating Catalyst、以下EHC)および排気スロットルをDOC上流に設置した(図3)。EHCは触媒反応によって排気温度を上昇させることが可能である。また、排気スロットルの絞りも排出ガス圧縮および排気抵抗増加にともなう燃料噴射量増加によって排気温度を上昇させることが可能である。これらデバイスを利用した排気昇温手法を確立することで、低排気温度時でもDPF再生を可能とし、白煙およびDOC端面閉塞を防止できる高性能・高信頼性を有するエンジンの開発を目指した。

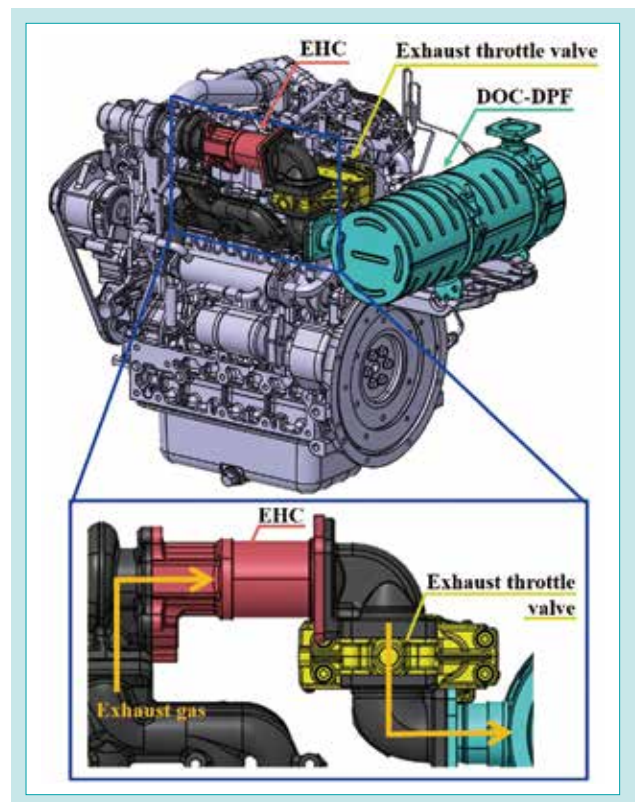


図3 本開発の発電機用エンジン概略図
Fig. 3 Schematic of Engine for Generator in this Development

2-2 目標値

100℃程度の最も低い排気温度となる無負荷運転においてもDPF再生可能な排気昇温技術を構築し、運転条件の全領域で実施可能なDPF再生システムを実現する。また、白煙およびDOC端面閉塞防止の手法を確立し、長期

連続の軽負荷運転に対応したシステムを開発する。

以上の技術開発により、DPFによるPM排出の低減を実現するとともに、メンテナンス性および信頼性に優れた発電機用エンジンの提供を目標とした。

3. 解決すべき技術課題

発電機用エンジンは周波数に合わせて一定回転数で運転されるため、排気温度はエンジン負荷率に依存する。図4にエンジン負荷率と排気温度の関係を示す。排気温度が250°C未満の軽負荷領域はDOCが活性温度に達しないため、DPF再生ができない。全領域で実施可能なDPF再生システムの実現には、軽負荷運転時に排気昇温する技術が必要となる。また、白煙およびDOC端面閉塞の原因となるHCを酸化除去するためにも排気昇温する技術が必要となる。特にDOC内に蓄積されたHCは400°C未満では燃焼しない難燃性に変化することが示唆されており¹⁾、DOC端面閉塞を防止するためには、難燃性のHCを含むPMを燃焼除去可能な温度まで昇温しなければならない。これら課題を解決するためDOC上流を排気昇温する技術の開発に取り組んだ。

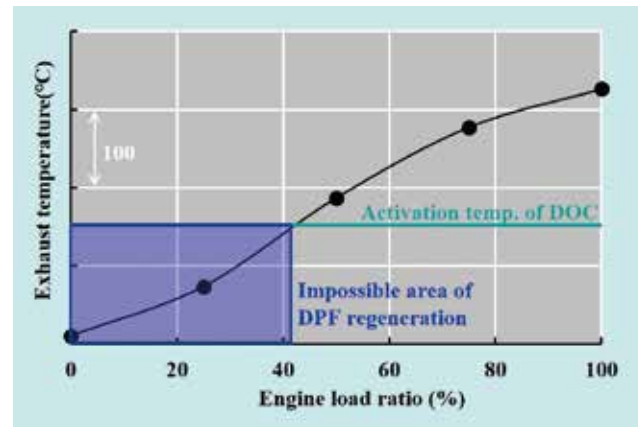


図4 エンジン負荷率と排気温度の関係

Fig. 4 Correlation Between Engine Load Ratio and Exhaust Temperature

4. 開発技術

4-1 無負荷 DPF 再生

4.1.1 多段噴射制御による昇温技術の課題

従来から排気温度を上昇させる技術として燃料の多段噴射制御におけるアフター噴射およびポスト噴射を利用している。図5に多段噴射制御の噴射プロセスを示す。アフター噴射は排気温度を上昇させるためにエンジントルクを引き出すメイン噴射後に実施される。アフター噴射による燃料がエンジン筒内で再燃焼を起こし、出力に影響することなく排気温度を上昇させることが可能である。しかしながら、無負荷運転時は燃焼温度が低く、再燃焼が起きにくいためにアフター噴射による昇温効果が得られない。ポスト噴射による燃料はエンジン筒内で燃焼せずにDOCまで到達し、DOCで触媒反応することで排気温度を上昇させる。つまり、ポスト噴射はDPF再生時に必要な燃料をDOCに供給する噴射であり、DOCが触媒の活性温度以上に保持されていなければ実施できない。

したがって、アフター噴射およびポスト噴射を利用した排気昇温は、一定温度未満では実施できず、その他の昇温技術が必要であった。

4.1.2 排気スロットルおよびEHCを利用した排気昇温制御

新規デバイスの排気スロットルは、バルブ開度を制御することによって排気経路を絞る機能を有する。排気スロットルの絞りは、排気抵抗増加にともなう燃料噴射量増加によって燃焼温度および排気温度を上昇させる。この排気スロットル制御によって、アフター噴射の再燃焼効果が得られる温度までの昇温を可能にした(図6-①)。しかし、排気スロットルおよびアフター噴射の利用では、DOC活性温度である250°Cまでの昇温

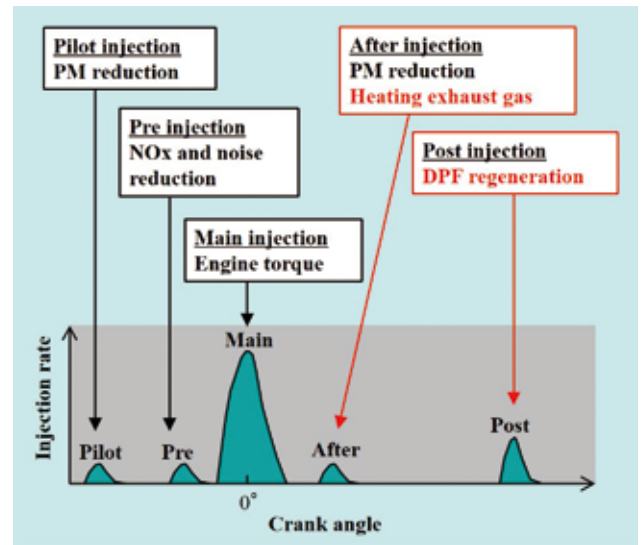


図5 多段噴射制御の噴射工程

Fig. 5 Process of Multiple Injection

には到達しなかった(図6-②)。そこで、未燃燃料をEHC内の触媒で反応させ、排気温度を上昇させる手法をさらに追加した。排気スロットルを絞りながらアフター噴射量を増加させることで未燃燃料をEHCへ送り、反応させて昇温させるクボタ独自のシステムである(図7)。この排気スロットルとアフター噴射およびEHCを利用した「排気昇温制御」の開発によって、DOCの活性温度を超える温度まで保持することが可能となった(図6-③)。

開発した「排気昇温制御」を適用して無負荷運転時にDPF再生を実施した。図8にDPF再生時のDOC入口温度、DPF入口温度の推移を示す。「排気昇温制御」によってDOC入口を活性温度まで昇温し、その直後にポスト噴射を実施することでDOCへ燃料を供給させた。DOC内での燃料燃焼によって高温となった排出ガスがDPFに流入し、PM燃焼温度領域まで昇温・保持された。以上の排気温度制御によって問題なく無負荷でのDPF再生が可能であることを確認した。

本開発の「排気昇温制御」を利用することで、北欧の寒冷地域市場を見据えた-25℃環境下でも問題無くDPF再生可能なことを確認済みであり、無負荷運転を含む全領域でのDPF再生を実現した。

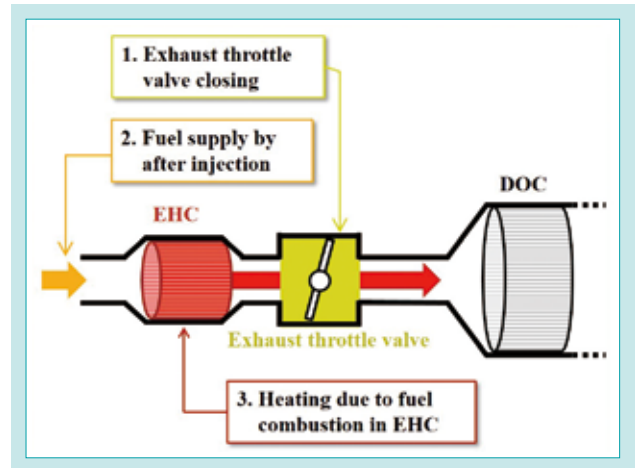


図 7 排気昇温制御のメカニズム
Fig. 7 Mechanism of Exhaust Heating Control

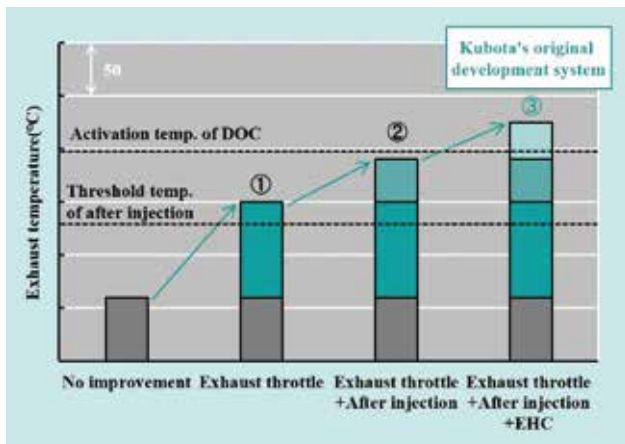


図 6 無負荷運転時の排気温度の昇温効果比較
Fig. 6 Comparison of Rising Exhaust Temperature Under no Load Operation

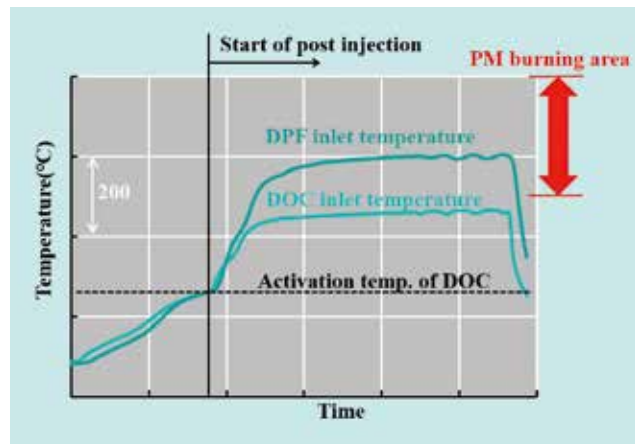


図 8 無負荷運転時の DPF 再生の排気温度推移
Fig. 8 Exhaust Temperature Profile of DPF Regeneration Under no Load Operation

4-2 定期昇温による白煙防止

200℃未満の低排気温度となる軽負荷運転時は、未燃の燃料が原因となるHCがエンジンから排出されてDOCに蓄積する。長時間DOCに蓄積されたHCが、高負荷高温時にDOCから一気に放出されて白煙を発生させる。したがってDOCにHCを一定量以上は蓄積させないことが必要である。そこで軽負荷運転を検知し、定期的に「排気昇温制御」を実施するクボタ独自の「定期昇温システム」を導入した。

DOCへのHC蓄積量は、燃料の未燃が発生しやすい一定の排気温度未満で急増する(図9)。定期昇温システムはこのHC蓄積量が急増する温度領域を軽負荷判定とし、その時間をカウントさせる。軽負荷判定が一定時間経過後に4-1と同様の「排気昇温制御」を実施させることでHCの酸化除去を行い、HC蓄積抑制による白煙防止を狙った(図10)。

連続無負荷運転とその直後に最大負荷を投入した際のHC排出量推移を定期昇温システムの導入有無で比較した(図11)。定期昇温システムを導入した場合、排気昇温制御時は排ガスが昇温されるためにエンジンから排出されるHCが

酸化されることで、その排出量が減少した。無負荷運転直後の最大負荷投入時、定期昇温システムを導入していない場合、白煙発生の原因であるHCのピークが確認された。一方、「定期昇温システム」を導入した場合、排気昇温制御によって定期的にDOC内のHCが酸化除去されることで最大負

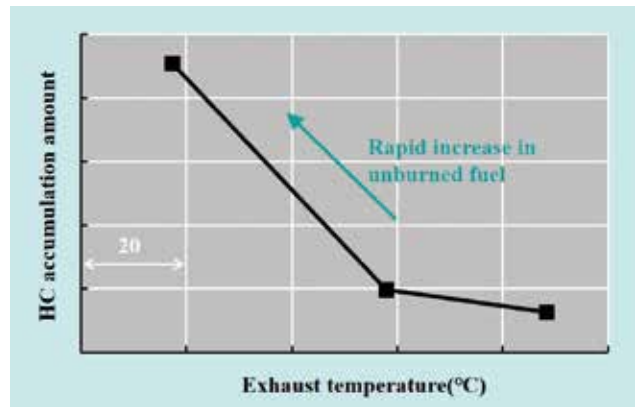


図 9 排気温度と HC 蓄積量の関係
Fig. 9 Relationship Between Exhaust Temperature and HC Accumulation

荷投入時にHCのピークは確認されず、白煙防止が可能となった。

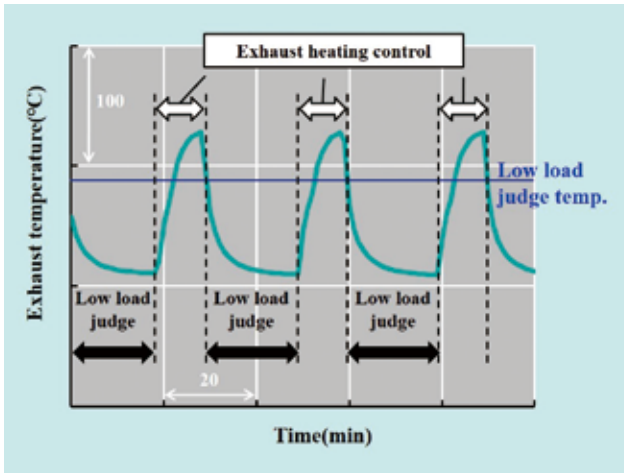


図 10 定期昇温システムの排気温度パターン
Fig. 10 Pattern of Constant Heating System

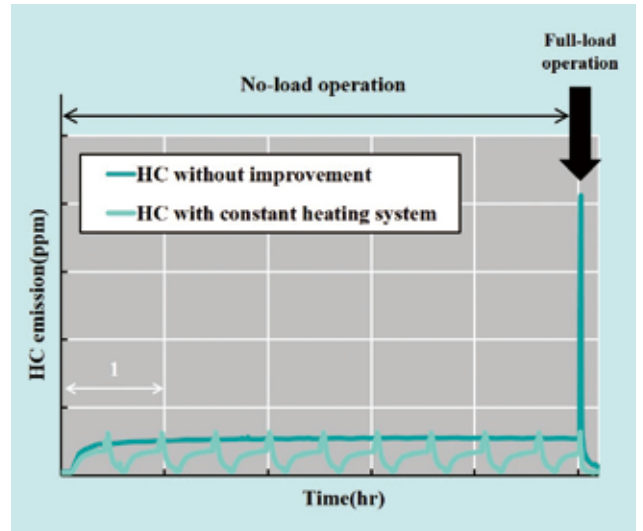


図 11 定期昇温システム有無の HC 排出量比較
Fig. 11 Comparison of HC Emission Profiles With and Without Constant Heating System

4 - 3 DOC 端面閉塞の防止

軽負荷運転時にエンジンから排出されるHCが糊の役割としてDOC端面上にPMを凝集させ、閉塞させてしまう。また、DOC触媒上でHCは、400°C未満では燃焼しない難燃性に変性することが確認されている。定期昇温システムによってDOC内部のHCの蓄積を抑制したが、DOC端面閉塞の防止には至らなかった。そこでDOC端面に堆積するHCを含むPMを燃焼させるためにDOC上流の排気温度を昇温させる「DOCリフレッシュ制御」を導入した。「DOCリフレッシュ制御」は、排気スロットルを絞りながらアフター噴射およびポスト噴射による燃料をEHC内で反応させることでDOCへ流入する排出ガスの温度を上げるクボタ独自の技術である。定期昇温やDPF再生時よりもDOC入口温度を高く保持することを目的とする(図12)。

この「DOCリフレッシュ制御」を端面閉塞したDOCへ実施した結果、閉塞物質は完全に除去されることを確認した(図13)。

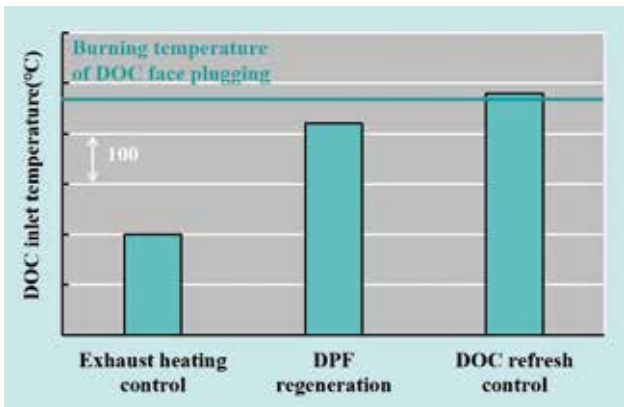


図 12 各制御時の DOC 入口温度比較
Fig. 12 Comparison of DOC Inlet Temperature for Each Control

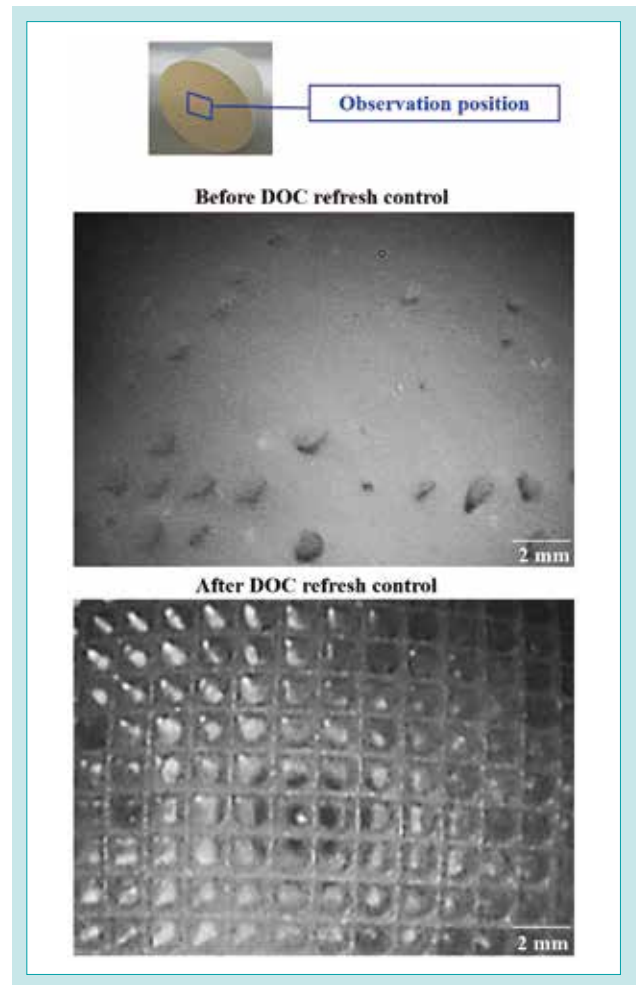


図 13 DOC リフレッシュ制御前後の DOC 端面外観
Fig. 13 Micrograph of Inlet End Face of DOC Before and After DOC Refresh Control

「DOCリフレッシュ制御」を定期的を実施するシステムを組み込み、長期の無負荷耐久試験において閉塞状況をDOC差圧の測定で確認した(図14)。DOC端面閉塞の初期傾向とみられるDOC差圧の増加が見られたが、DOCリフレッシュ制御を実施することでDOC差圧は耐久前の圧力まで低下することを確認した。「DOCリフレッシュ制御」によってDOC端面閉塞の防止が可能となり、軽負荷運転に対する信頼性および耐久性を向上させた。

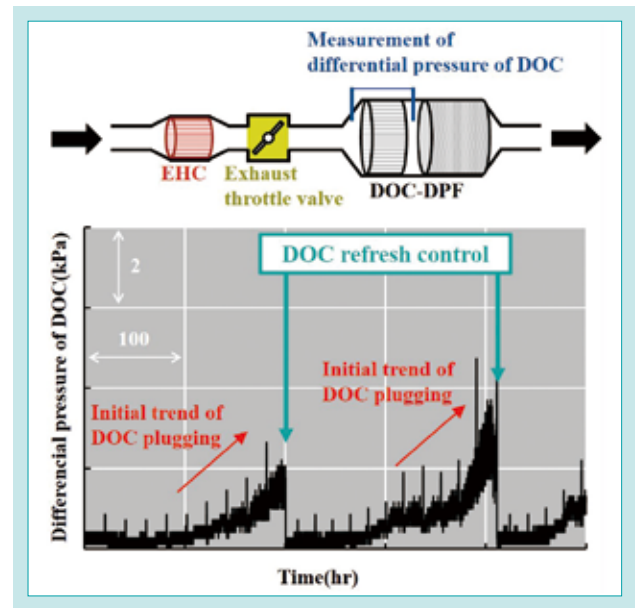


図 14 長期無負荷運転時の DOC 差圧推移
Fig. 14 Differential Pressure of DOC During Long-term no-load Durability Test

5. おわりに

DOCおよびDPFを搭載した発電機用エンジンに対して開発したクボタ独自の技術とその成果を下記に示す。

- ①EHCと排気スロットルを利用した「排気昇温制御」によって、無負荷運転を含む全領域でのDPF再生を実現した。
- ②軽負荷運転時に定期的な排気昇温制御を実行する「定期昇温システム」を導入することで、軽負荷運転におけるHC蓄積を抑制して白煙の発生を防止することを可能にした。
- ③DOC端面に堆積するHCを含むPMを燃焼させる「DOCリフレッシュ制御」を導入し、定期的を実施することでDOC端面閉塞を防止することを可能にした。

以上の開発結果によって、地球環境保全に必要なPM排出の低減を実現しつつ、メンテナンス性および信頼性に優れたエンジンを実現した。

本開発技術は、発電機以外のアプリケーションにおいても利用できる技術であり、DPF再生可能な運転領域の拡大と軽負荷運転に対する信頼性の向上が見込める。また、吸気不足で白煙発生のしやすい高地や排気温度の低くなる寒冷地での利用にも適している。これらDPF搭載エンジンの技術発展によって、クボタが得意とするDPFソリューションをさらに普及させていく。

SDGs のターゲットへの貢献

- 3.9 有害化学物質、大気・水質・土壌汚染による死亡・疫病の削減 健康被害をもたらす PM の排出を大幅に削減
7.1 現代的エネルギーサービスへの普遍的アクセスの確保 信頼性の高い発電機によるエネルギー供給

参考文献

- 1) 中野皓太ほか:「DOC端面閉塞のメカニズムの解明 -HC蓄積の温度依存性-」、第124回触媒討論会、2E08、(2019)

V1505Tコモンレールエンジンの開発

Development of V1505T Engine with Common Rail Fuel Injection System

エンジン技術第一部

05シリーズエンジンはクボタの農建機やOEM機械に搭載されている、エンジン事業の中核を担うシリーズである。なかでもV1505ターボ(V1505T)エンジンは、シリーズ最大出力の33 kWであり、小型体格と4気筒特有の低振動という、競合他社機にはない特長を有している。05シリーズを展開する欧州では、2019年より排出ガス規制Stage Vが施行されており、規制値が大幅に強化された。今回、欧州市場での事業量確保とさらなる拡販を目的に、規制適合機としてV1505Tコモンレール(V1505T-CR)エンジンを開発した。本稿では、業界最小シリンダボア径でのDI (Direct Injection) 燃焼成立と、競合他社3気筒エンジンを圧倒する小型体格の実現に向けたアプローチについて述べる。

【キーワード】

V1505T、コモンレールシステム、DI燃焼、小径シリンダボア、体格小型化

05 series engines are the leaders in our engine business. They are installed on Kubota's agricultural, construction and OEM machines. The V1505 Turbocharged (V1505T) engine is the high-end model of 05 series having features not found in competitors' products such as low vibration due to its small size and four-cylinder configuration. EU Stage V emissions regulations have been enforced since 2019 and the regulation value has been significantly strengthened. In order to secure business volume and further expand sales in the European market, we have developed the V1505T common rail engine. Here we describe our approach to achieve DI combustion with the smallest cylinder bore and to realize a compactness comparable to a competitor's 3-cylinder engine.

【Key Word】

V1505T, Common Rail System, DI Combustion, Small Cylinder Bore, Compactness

関連する SDGs



1. はじめに

05シリーズエンジンはクボタの農建機やOEM機械に搭載されている、エンジン事業の中核を担うシリーズである。なかでもV1505Tエンジンは、シリーズ最大出力の33 kWであり、小型体格と4気筒特有の低振動という、競合他社機にはない特長を有している。

05シリーズを展開する欧州では、2019年より排出ガス規制Stage Vが施行されている。V1505Tエンジンの属する19~37 kWの出力帯では、窒素酸化物(NOx)+炭化水素(HC)排出量が37%減、粒子状物質(以下PM:Particulate Matter)排出量が97.5%減と、規制値が大幅に強化された。またStage Vでは、世界初の粒子数(以下PN:Particulate Number)規制が導入されている。しかし、現行機の機械

式燃料噴射方式(以下メカ式)では緻密な燃料噴射制御ができず、規制に適合できない¹⁾。そのため、現状のエンジンラインナップの中で規制に適合するには、19kW未満エンジンへの載せ替え、もしくは電子制御式上位シリーズエンジンへの載せ替えを強いられる。しかし、19kW未満エンジンに載せ替えを行う場合、出力ダウンによる搭載機械の作業性悪化が懸念される。上位シリーズエンジンに載せ替えを行う場合は、エンジンが大型化するため搭載レイアウトの大幅な変更が必要となる。これらの課題をクリアし、欧州でエンジンおよび搭載機械をさらに拡販していくため、V1505Tの特長を継承したStage V適合機の開発が求められた。

2. 開発のコンセプトと目標値

2-1 開発のコンセプト

規制適合には、上位シリーズで実績のある電子制御式コモンレールシステム(以下CRS:Common Rail System)を採用し、燃焼改善を行う必要がある²⁾。また、NO_x排出量を低減させる排出ガス再循環装置(以下EGR:Exhaust Gas Recirculation)と、PMを捕集するディーゼル微粒子捕集フィルタ(以下DPF:Diesel Particulate Filter)を追加し、総合的に排

出ガスを浄化する必要がある。これらを踏まえ、開発コンセプトとして以下の2つを設定した。

- ①CRS、EGR、DPF採用による欧州排出ガス規制Stage Vへの適合
- ②現行機V1505Tの小型体格・低振動の継承

2-2 目標値

開発エンジンの仕様を表1、外観図を図1に示す。開発目標は以下の2つを設定した。

表1 開発エンジン仕様
Table 1 Engine Specification

モデル	V1505T(現行機)	V1505T-CR(開発機)
燃焼方式	IDI(Indirect Injection)	DI(Direct Injection)
燃料噴射方式	メカ式	電子制御式(CRS)
排ガス浄化装置	-	DOC, DPF, EGR
気筒数	4	
ボア×ストローク(mm)	78.0×78.4	
排気量(L)	1.498	
長さ×幅×高さ(mm)	591×433×621	591×455×638 (*787×455×691)
定格出力(kW/rpm)	33.0/3000	

*DPF 搭載状態時

- ①CRS、EGR、DPFを新規採用し、欧州排出ガス規制Stage Vの規制値を満足するエンジンを開発する。
- ②現行機V1505Tの特長である小型体格、低振動を継承したエンジンを開発する。



図1 V1505T-CR 外観図
Fig. 1 External View of V1505T-CR

3. 解決すべき技術課題

3-1 DI 燃焼の成立

CRS採用にあたって、燃焼方式をIDIからDIに変更する必要がある。図2に、それぞれの燃焼室形状を示す。図3は、クボタ上位シリーズおよび競合他社コモンレールエンジン(以下CRエンジン)のシリンダボア径と単気筒当たりの排気量を示したものである。現行機クラスの小径ボアのCRエンジンはなく、いずれの機種もボア径が大きい。よって現行機と同ボア径の開発機は、業界最小ボア径のCRエンジンとな

る。ボア径に加えて、ピストンの主燃焼室の容積も業界最小クラスとなる。そのためボア径の大きい上位シリーズと比較して、燃料噴霧が燃焼室壁面に到達するまでの時間が短い。噴霧は壁面に干渉すると粗大化し、燃焼に寄与しない。結果、燃費や排出ガス性能の悪化に繋がる。小径ボアでDI燃焼を成立させるには、燃料噴霧の壁面干渉を回避し、燃料と空気を短時間に均一混合することが重要となる。

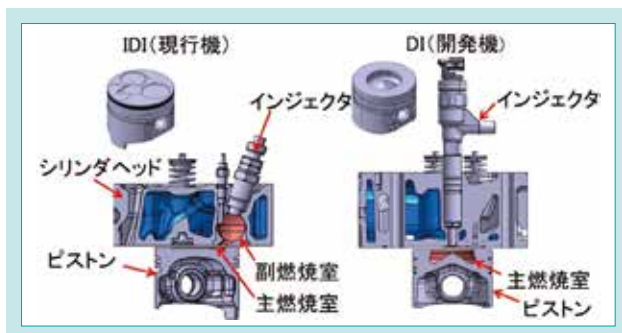


図2 燃焼室形状の比較
Fig. 2 Shape of Combustion Chamber

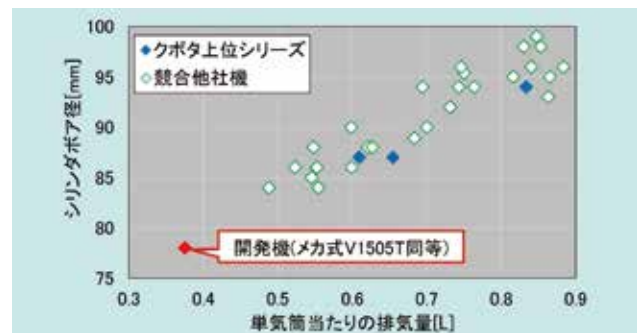


図3 CRエンジンのシリンダボア径と単気筒当たりの排気量の比較
Fig. 3 Comparison of Cylinder Bore Diameter and Displacement per Cylinder of CR Engine

3 - 2 搭載互換性の堅持

開発機では、CRS、DPFやEGR装置の採用に伴う追加機能部品が数多く存在する。図4に、主な追加機能部品の配置を示す。これらに加えて、表2に示す関連部品の追加も必要となる。V1505Tの特長である小型体格を継承し、従来機との搭載互換性を維持するには、新規追加部品による体格大型化を抑制することが重要である。

表 2 主な関連部品

Table 2 Main Additional Related Parts

関連デバイス	CRS	EGR	DPF
必要部品	パルサギヤ パルサホイール	EGRパイプ EGRフランジ	オイルセパレータ 差圧センサ

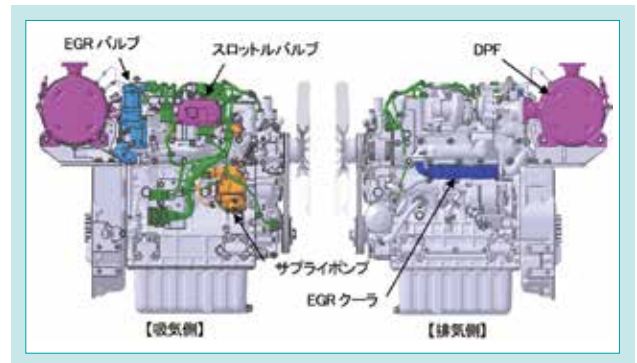


図 4 主な追加機能部品

Fig. 4 External View of Main Additional Functional Parts

4. 開発技術

4 - 1 小径ボアにおける DI 燃焼技術

4.1.1 4弁CDIS (Center Direct Injection System)

開発機では、副燃焼室を廃止した空間を活用し、インジェクタをシリンダボア中心に垂直配置するCDISを採用した。この変更により、シリンダ内への燃料噴射を均一化し、空気との混合を改善した。また燃料と空気の混合促進には、シリンダ内の空気流動が重要となる³⁾。そこで、吸排気4弁(各2弁)仕様を採用することでスワール流(シリンダ軸回りの旋回流)を強化し、空気流動の最適化を図った。図5に、4弁CDISの概略図を示す。

4弁化に対応したシリンダヘッドの吸気ポート形状設計では、流体解析を用いて最適化を図った。図6に、開発機の吸気ポートの解析結果を示す。2経路ある吸気ポートのうち、長経路のポートはシリンダに沿った形状にすることで、スワール流を強化させた。短経路のポートは、スワール流と干渉しないようにシリンダ中心に流し込む形状とした。このように2つの流れを最適化することで、通常トレードオフの関係にあるスワール流と吸入効率を同時に改善した。

4.1.2 燃焼解析

燃料噴霧の壁面干渉回避と空気流動の最適化のため、燃焼解析により燃料噴射角と燃焼室形状の最適化を図った。図7は燃焼解析結果であり、左はシリンダ内の混合気の流速、右は混合気における燃料濃度を示している。燃料噴霧が燃焼室内に広がった段階であり、燃料噴射孔から燃焼室壁面に向けて流速、燃料濃度が高くなっている。燃焼室断面図から、この段階で燃焼室中央の円錐部と噴霧が干渉しない燃料噴射角を推定した。また燃焼室内の混合気の挙動から、燃焼室内の空気をより多く使える燃焼室形状の傾向をつかみ、実機への反映を行った。

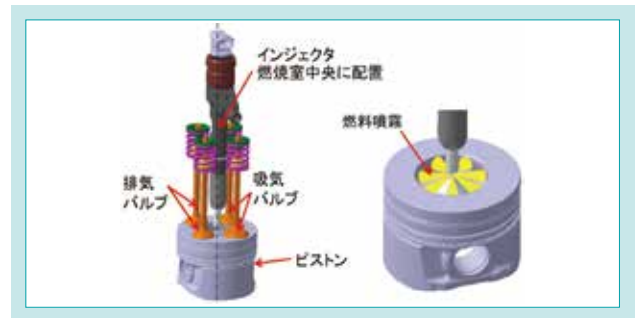


図 5 4 弁 CDIS

Fig. 5 4 Valve CDIS

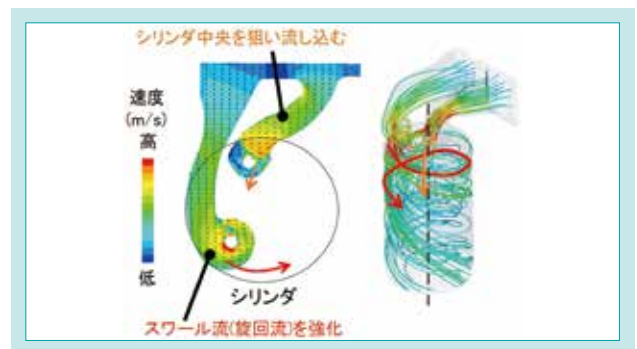


図 6 流体解析結果

Fig. 6 Analysis Result of Intake Air Flow

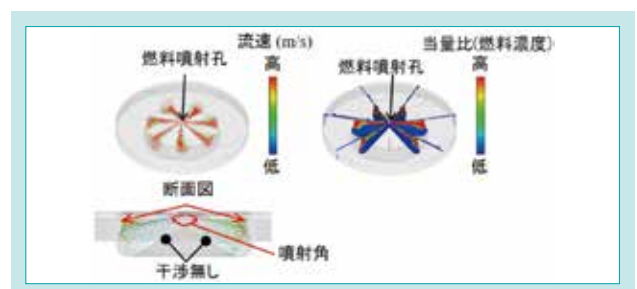


図 7 燃焼解析結果

Fig. 7 Combustion Analysis Results

4.1.3 性能測定結果

図8に、開発機の排出ガス測定結果を示す。開発初期段階ではPM、NO_xともに排出量が多い状態であったが、スワールの改善と、燃焼解析結果の反映を行い、実機にて研究適合を行うことで、排出量を低減することができた。EGR装置、DPFを追加することで排出量をさらに低減し、欧州Stage V 排出ガス規制値を満足する燃焼を成立させることができた。また、DI燃焼を成立させたことで、現行機から11%の燃費を低減した。これにより、燃費に直結するCO₂排出量も削減した。

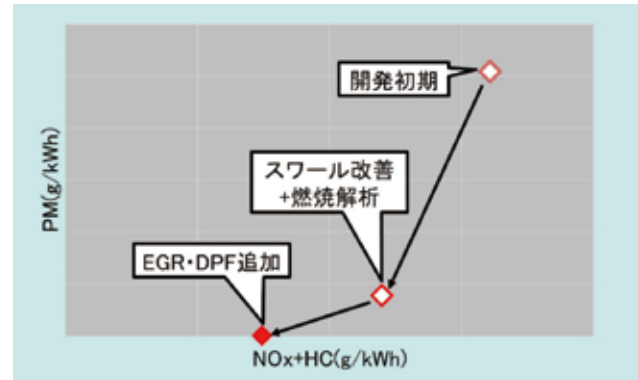


図8 排出ガス測定結果

Fig. 8 Measured Result of Emission Gas Level

4 - 2 部品内蔵化による小型化技術

4.2.1 パルサギヤ内蔵化

CRエンジンでは、エンジン回転数をセンシングし燃料噴射を制御するため、回転数センサ(以下NEセンサ)と検知体であるパルサギヤを新たに追加する必要がある。パルサギヤの内蔵化は上位シリーズでも行われている。ただし、内蔵化するスペースを新たに確保すると、エンジンが従来機よりも大型化する。開発機ではギヤケース内部のわずかな空間に着目し、パルサギヤをクランク軸に組付け内蔵化することで、全長の大型化抑制を図った。しかし、上位シリーズのギヤ形状、センサ位置を踏襲した場合、開発機ではNEセンサと内部ギヤの干渉が発生した。また、センサのロバスト性を確保するため搭載位置に制約があり、小径化、薄型化だけでは内蔵化は困難であった。そこでパルサギヤ先端を傾斜させることで、センサ配置自由度を向上させた。図9にパルサ

ギヤの配置を示す。先端を傾斜させるために、成形自由度と精度が高い焼結材を採用した。これにより、大型化を抑制しながらセンシングが成立する構造を実現した。

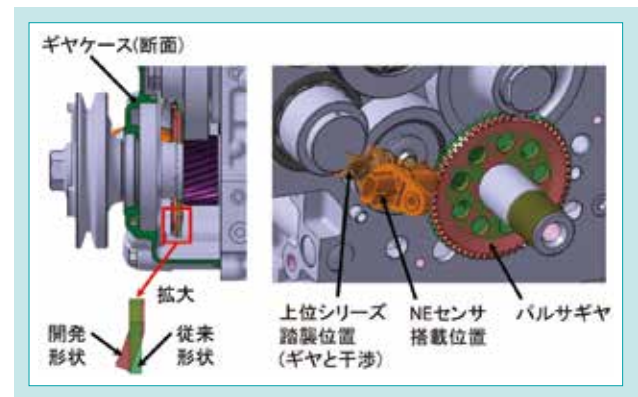


図9 パルサギヤ形状と配置

Fig. 9 Shape and Layout of Pulsar Gear

4.2.2 EGRパイプ内蔵化

開発機ではNO_x排出量低減のためEGR装置を採用している。図10に上位シリーズのEGRガス流れと部品構成を示す。EGRクーラとEGRバルブを繋ぐEGRパイプは、通常ではエンジン外部に配置されている。この従来配置を踏襲した場合、スペース確保のためDPF搭載位置をシリンダヘッドから離す必要があり、エンジン全長が大型化することになる。開発機では、EGRパイプをシリンダヘッドに内蔵化することで、全長の大型化を抑制した。図11に開発機のEGRガス経路と部品構成を示す。このEGRパイプは内蔵化するだけでなく、シリンダヘッド内部の冷却水経路に通す構造とすることで、EGRガスの冷却効率を向上させている。また、EGRパイプの断面を花卉形状とすることで、冷却水に触れる断面積を増やし、さらなる冷却性向上を図った。図12に、EGRパイプの配置および形状違いによるEGRガスの冷却効果を示している。外部EGRパイプと比較して、内蔵化により18℃の冷却性向上を、断面を花卉形状とすることで41℃の冷却性向上を実現している。

これによる効果で、メインとなるEGRクーラ内部の積層フィン数を1層減らし、小型化を実現している。さらに、スタータ周辺の省スペース化により、部品配置自由度も向上させている。

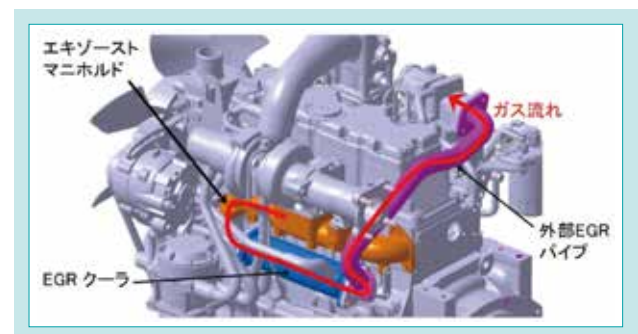


図10 従来機のEGRパイプ配置

Fig. 10 Conventional Layout of EGR Pipe

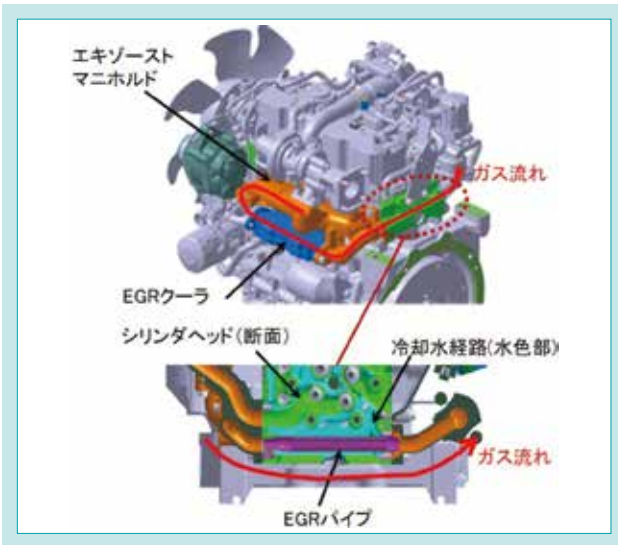


図 11 開発機の EGR パイプ内蔵化構造
Fig. 11 Built-in EGR Pipe of Developed Engine

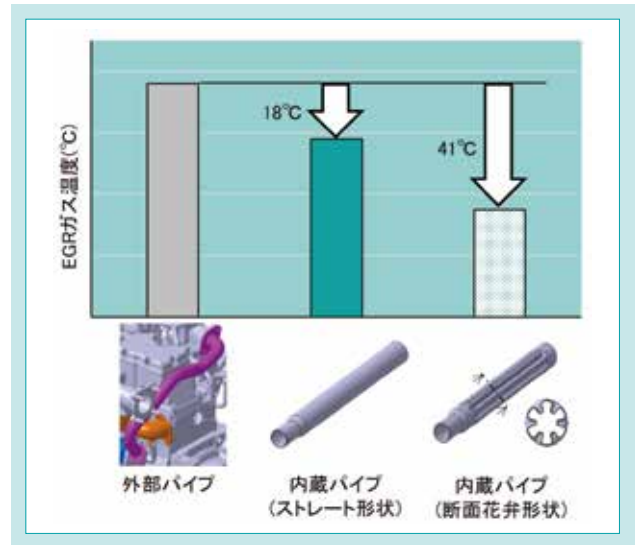


図 12 EGR ガス冷却効果
Fig. 12 Improvement of EGR Gas Cooling

4.2.3 オイルセパレータ内蔵化

ブローバイガス(燃焼室から漏れ出た燃焼ガス)からオイルを分離するオイルセパレータを、上位シリーズでは図13のようにエンジン外部に配置している。この従来型のオイルセパレータを追加した場合、エンジン横幅が大型化する。また、オイルセパレータと接続するゴムホース経路が長いと、低温環境下では経路が凍結しないように断熱シート追加など対策が必要であった。開発機では、シリンダヘッドカバー内部の空間に着目し、図14に示すように内蔵化することで、体格の大型化を抑制した。内蔵した小型オイルセパレータのオイル分離性能は、従来の外部オイルセパレータと同等であることを確認している。また、ゴムホース経路を吸気系との接続部のみとし、極小化した。さらに、内蔵オイルセパレータとヘッドカバーの間に空気層を設けることで断熱効果を付与し、凍結対策効果も向上させた。

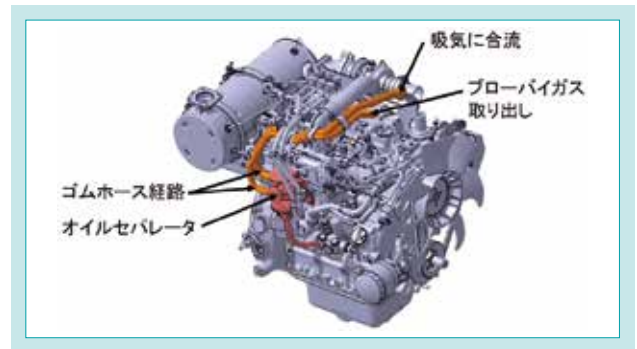


図 13 従来機のオイルセパレータ配置
Fig. 13 Conventional Layout of Oil Separator

4.2.4 開発機のエンジン体格

これまでに説明した部品内蔵化により、エンジン体格の大型化を抑制した。図15に、内蔵化による大型化抑制効果を示す。オイルセパレータ内蔵化により全幅60 mm、EGRパイプ内蔵化により全長10 mmの大型化を抑制した。また、パルサギヤをわずかな空間に内蔵化しセンシングを成立させたことで、全長の大型化も抑制している。図16に、開発機、上位シリーズ、競合他社3気筒エンジンの排気量とエンジン体格比較を示す。開発機は4気筒の特長を維持しながら、上位シリーズや競合他社機の3気筒に対して、圧倒的な小型体格を実現した。またDPF無し状態では従来機同等の体格を実現し、従来機との搭載互換性を堅持した。

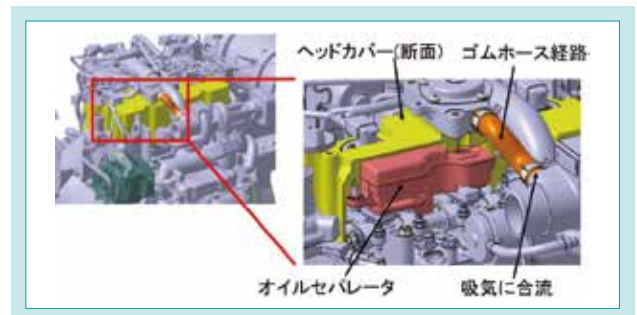


図 14 開発機のオイルセパレータ内蔵化構造
Fig. 14 Built-in Oil Separator of Developed Engine

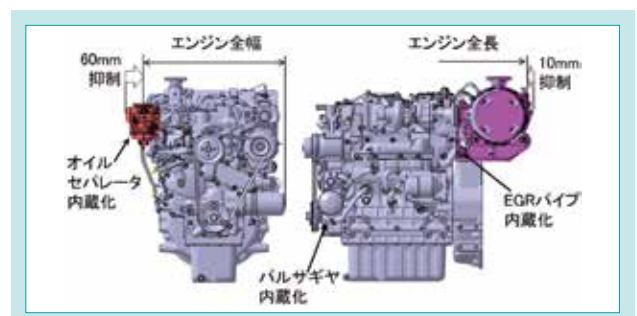


図 15 内蔵化による大型化抑制効果
Fig. 15 Effects of Reducing Dimensions by Built-in Architecture

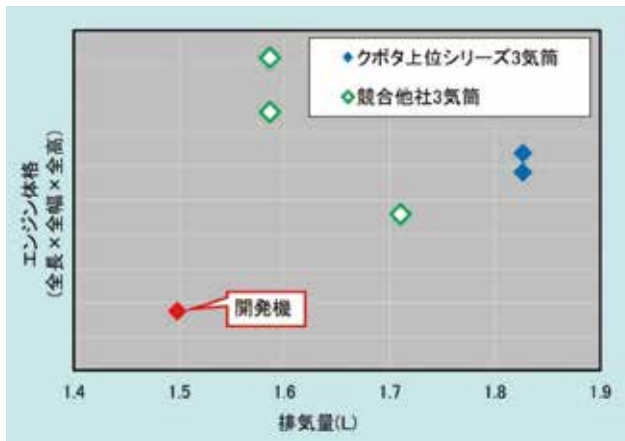


図 16 エンジン体格と排気量の比較

Fig. 16 Comparison of Engine Size and Displacement

5. おわりに

2019年から施行されている欧州排出ガス規制Stage Vへの対応として、V1505T-CRエンジンを開発した。

- (1)4弁CDISの採用と、DI燃焼室形状および燃料噴射角の最適化により、排出ガス性能を満足する燃焼を成立させた。これにより、業界最小シリンダボア径のCRエンジンを実現し、欧州排出ガス規制Stage Vに適合した。また燃費を現行機から11%低減し、製品競争力を強化した。さらに、燃費に直結するCO₂排出量の削減にも貢献した。

- (2)排出ガス規制対応により追加される機能部品を内蔵化することで、体格の大型化を抑制した。4気筒の特長を維持しながら、競合他社の3気筒エンジンに対して小型体格を実現した。

本開発機は、クボタの農機、OEM機械に幅広く搭載されており、搭載機械の製品力強化に貢献した。今後は、本開発で培った技術を他機種に展開するとともに、さらなる性能改善とコスト競争力強化を図ることで拡販を進める。

SDGs のターゲットへの貢献

7.3 エネルギー効率の改善 現行機に比べ燃料消費率11%低減

9.4 環境に配慮した技術・産業プロセスの導入によるインフラ改良・産業改善 DI燃焼技術開発による排出ガス規制への適合

参考文献

- 1) T.Hasegawa, T.Kuno, K.Kita, A.Kai, Y.Takemura, O.Yoshii, T.Okazaki, H.Miyazaki. Technical concepts on non-road small direct injection diesel engines with common rail system. JSAE 20129035, SAE 2012-32-0035
- 2) 依田 俊之, “環境保護と経済性を両立させる先進ディーゼルコモンレールシステム”, デンソーテクニカルレビュー Vol.14 (Dec. 2009), pp.30-35
- 3) T.Kuno, O.Yoshii, K.Higuchi, T.Okazaki. Techniques for lower exhaust emissions and higher power density in direct injection diesel engine. JSAE 20056513, SAE 2005-32-0051

欧州向けミニバックホーRDL3シリーズの開発

Development of the Mini Excavator RDL3 Series for European Market

建設機械技術第一部／建設機械基礎技術部

欧州向けミニバックホーRDL3シリーズは、欧州排出ガス規制Stage Vに対応した5-5.5tクラスのフルモデルチェンジ機である。従来機で市場から好評をいただいている操作性、安定性、耐久性、吊り能力、掘削力といった基本性能を継承しつつ、近年市場から強く求められるようになってきた快適性の追求と装備品の刷新を行うことで製品競争力をアップし、シェア拡大を図った。快適性については、ミニバックホー業界でトップクラスの静粛性(耳元騒音)を達成した。装備品については、直感的に操作可能なクボタ独自のニューザインターフェイス(UI)を開発した。

【キーワード】

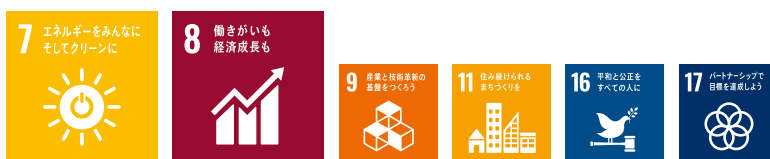
ミニバックホー、欧州排出ガス規制Stage V、耳元騒音、ニューザインターフェイス

The mini excavator RDL3 series for the European market is new model 5 to 5.5t class machine that complies with European Stage V emission regulations. Inheriting the basic performance of the previous model, which was well received by the market, such as operability, stability, durability, lifting capacity, and digging power, the new model delivers the comfort that has been strongly demanded by the market in recent years and upgrades the equipment to increase product competitiveness and expand market share. In terms of comfort, we have achieved the industry's top class quietness (ear noise) for mini backhoes. In the equipment upgrade, we have developed a new user interface (UI) that can be operated intuitively.

【Key Word】

Mini Backhoe, European Emission Regulations Stage V, Ear Noise, User Interface

関連する SDGs



1. はじめに

欧州ミニバックホー市場において、4-6tクラスは、需要の19%を占める重要なクラス帯である。2009年の現行機導入により4-6tのシェアは向上したが、2015年以降はシェア拡大が鈍化している。

現行5-5.5tクラス機は、基本性能の高さ、装備の先進性により好評をいただいていたが、基本性能以外にも耳元騒音の低減といった快適性への要望が年々高まってきた。また、モデルチェンジを行った他社機と比較し、装備品の見劣りが指摘されるようになってきた。

市場要望に応え、シェアを拡大していくために、業界トップクラスの快適性の実現と装備品を刷新した機械を開発した(図1)。



図1 RDL3 後方小旋回機 U56-5
Fig. 1 RDL3 Tight Tail Swing Excavator U56-5

2. 開発のコンセプトと目標値

2-1 開発のコンセプト

市場から満足を得ている基本性能を継承し、欧州新排出ガス規制Stage V対応に合わせて、次の特徴を持つ機械を開発する。

(1) ユーザの快適性を追求した操縦空間

- ① 業界トップクラスの静粛性(耳元騒音)
- ② ガラス領域を拡大し、視界性と開放感を向上させたキャビン
- ③ 大柄ユーザの体格に合わせられるダブルアジャスト機

構を装備した操縦席

(2) 先進的に刷新された装備品

- ④ 直感的に操作可能な新ユーザインターフェイス(UI)
- ⑤ コンパクトでスタイリッシュな操作装置
- ⑥ 質感を向上した内装

本稿では、①業界トップクラスの静粛性(耳元騒音)と④直感的に操作可能な新UIについて記述する。

2-2 目標値

(1) 業界トップクラスの静粛性

操縦空間の静粛性の指標である運転中の耳元騒音の値を74dBA未満にすることを目標値とした。

この目標値は、欧州で競合他社機を比較調査し、業界トップクラスの静粛性のレベルを検討した結果である。

(2) 直感的に操作可能な新UI

UIとは、ユーザと機械をつなぐ接点であり、機械の状態を見る、設定を操作する、その結果として機械が応答する

という一連の仕組みである。ミニバックホーでは、メータ画面とその操作をUIと定義する。

従来のメータは、3インチのモノクロ表示であったのに対し、本開発では7インチのカラー液晶メータを採用することにしたが、カラー液晶メータは、競合他社では既に市場に投入されているため、他社を凌駕するクボタ独自の新しいUIを作ることを目標とした。

3. 解決すべき技術課題

(1) 業界トップクラスの静粛性

従来機の耳元騒音値は79dBAだったので、5dBA以上騒音値を低減することが課題であった。

さらに、耳元騒音対応の中で運転室への熱伝導を防ぐ新たな課題が生じた。

(2) 直観的に操作可能なUIの開発

UIを圧倒的に見やすく、使いやすくし、直観的に操作できるようにすることが課題であった。

“視認性”と“操作性”を切り口としてUIの作込みを検討し、ユーザ感覚に合うUIの評価方法の検討が必要であった。

4. 開発技術

4-1 耳元騒音低減技術

4.1.1 直接音の低減

従来機のステップでは、隙間が多い構造となっていた。

RDL3では、従来分割して構成していたステップを一体化した鋼板で構成するとともに、カバーを全てボルトで固定し、パイロットホースやワイヤハーネスの通過部にグロメットを採用し、徹底して隙間を詰めることで直接音を低減した(図2)。

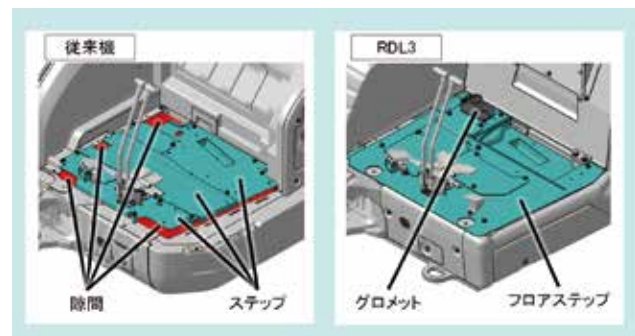


図 2 ステップ
Fig. 2 Steps

4.1.2 固体伝搬音の低減

定常状態で耳元騒音を悪化させる主な振動源は、エンジンと油圧ポンプである。

エンジン・油圧ポンプから操縦席周りに至るまでの伝達経路の振動測定を実施したところ、エンジンブラケットとエンジンサポートが油圧ポンプの加振周波数460Hzと応答し、耳元騒音を悪化させる要因となっていることを発見した。

エンジンブラケットとエンジンサポートの共振周波数を引上げるためにマウント位置と形状を見直した結果(図3)、エンジンブラケットは共振域から外れ(図4)、エンジンサポートは応答しなくなり(図5)、固体伝搬音を低減した。

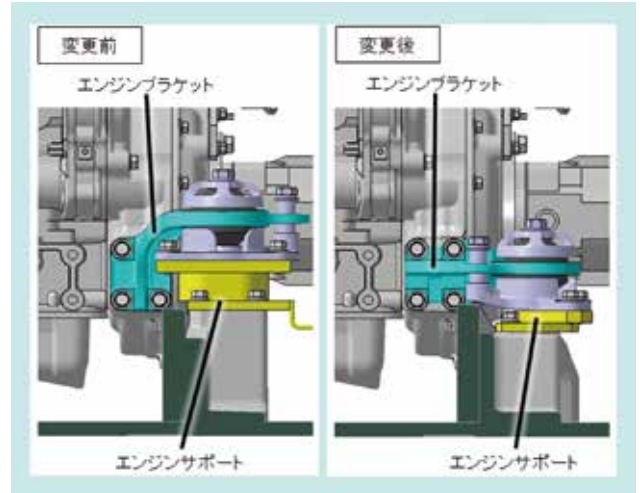


図3 エンジンマウント
Fig. 3 Engine Mount

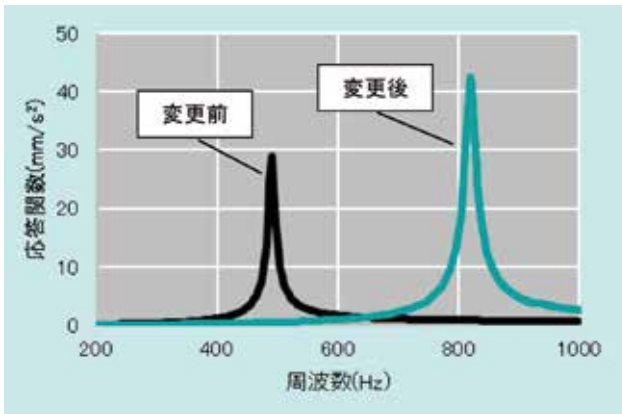


図4 エンジンブラケットの応答関数
Fig. 4 Frequency Response Function of the Engine Bracket

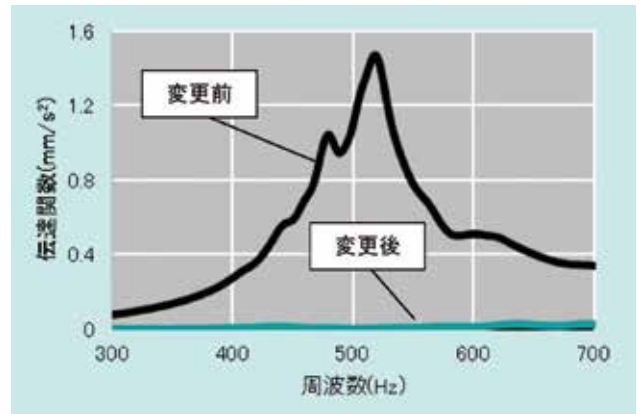


図5 エンジンサポートの応答関数
Fig. 5 Frequency Response Function of the Engine Support

4.1.3 透過音の低減

従来機では、エンジンルームと運転席を仕切る隔壁は、形状製作の自由度、遮熱性の良さとコスト優位性からPP(ポリプロピレン)のインジェクション成形品を採用していたが、遮音効果(透過損失)に関しては、質量則の式が適用されることから、鋼板に比べて大きく劣る(表1)。

遮音に関する質量則

$$TL_o = 20 \cdot \log_{10}(f \cdot m) - 43$$

TL_o: 透過損失(dB)

f: 周波数(Hz)

m: 面密度(kg/m²)

RDL3では、エンジンルームの隔壁をt3.2の鋼板で製作し、透過音を低減した(図6)。

しかし、これにより運転室への熱伝導の課題が生じた。対応については4-2で記述する。

表1 各周波数における透過損失 (dB)

Table 1 Transmission Loss at Each Frequency(dB)

周波数	PP	鋼板	
	t3(mm)	t1.6(mm)	t3(mm)
125(Hz)	8.1	21.4	26.9
250(Hz)	14.1	27.4	32.9
500(Hz)	20.1	33.5	38.9
1000(Hz)	26.1	39.5	44.9
2000(Hz)	32.1	45.5	51.0

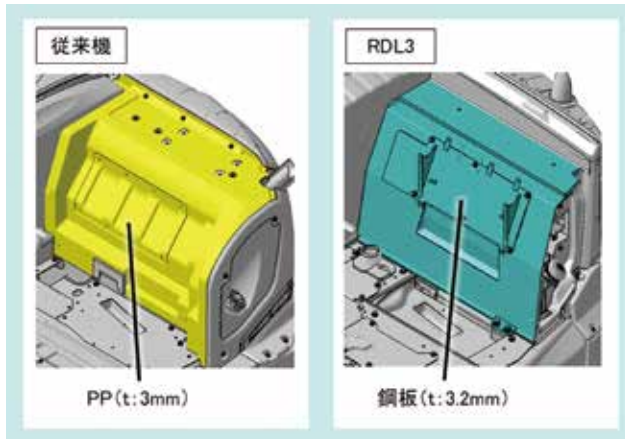


図 6 エンジンルームの仕切り
Fig. 6 Engine Room Partition

以上の耳元騒音の対応を行った結果、耳元騒音の値は下記となり目標を達成した(表2)。

表 2 耳元騒音結果
Table 2 Ear Noise Measurement Results

機種	耳元騒音(dBA)
RDL3 後方小旋回機 U56-5	73.2
RDL3 標準機 KX060-5	72.0

4 - 2 冷却システム最適化（熱低減）技術

4.1.3 でエンジンルームと運転席を仕切る隔壁を樹脂から鋼板に変更したため、従来機よりも隔壁が熱くなり、オペレータが熱く感じるという問題が生じた。運転室への熱伝導の解決にはエンジンルーム内温度を低減することが必要であったため、流体解析を用いてエンジンルーム内の風の流れと温度を検証し、最適な冷却システムを導き出した(図7)。

ラジエータとオイルクーラの配列を直列レイアウトから並列レイアウトに変更することで(図8)、エンジンルームに流入する空気の温度を低減すると同時に、冷却水温や作動油温などのヒートバランス性能を成立させた。

さらに従来機と比較しても隔壁の表面温度を低くすることができ、運転室への熱伝導問題を解決した。

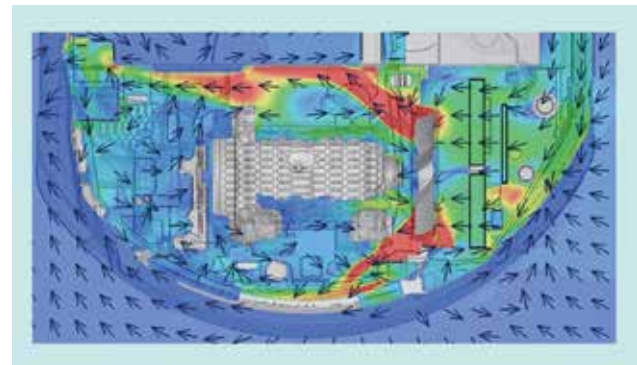


図 7 流体解析
Fig. 7 Fluid Analysis

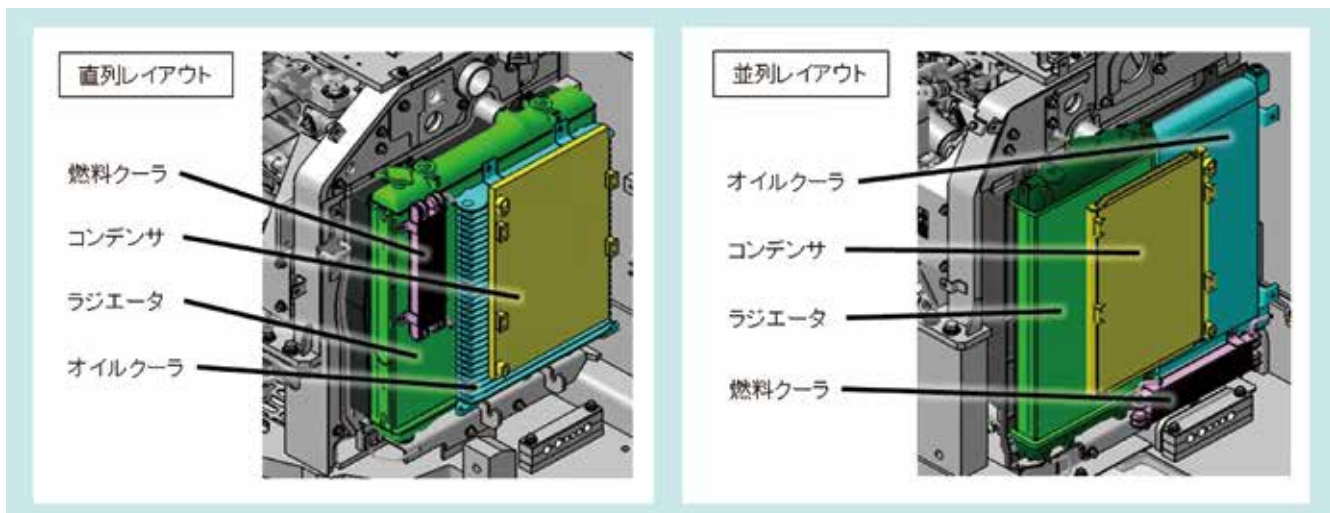


図 8 冷却器ユニット
Fig. 8 Cooler Unit

4 - 3 UI の開発技術

4.3.1 建設機械業界のUIの調査

クボタ独自のUIを作るために、“視認性”と“操作性”を切り口として、欧州の競合他社機の調査を行った。

“視認性”については、表示画面を瞬間的に認知することができる適切な情報量、レイアウト、文字やイメージの大きさ、色調等を調べた。

“操作性”については、スムーズに操作するためのスイ

チ配置、およびメータ表示とスイッチのマッチングを調べた。

調査では、実機操作を行い、オペレータの視線の軌道をアイトラッキングで記録し、分析することにより、オペレータ視線での“視認性”と“操作性”に関する利点と欠点を抽出し、新UIに取り入れる点、排除する点を明確にした。

4.3.2 UIの検討

競合他社の調査結果から、“視認性”については、次の2点を要点とした。

- ① 情報の大きさ、レイアウトは重要度をもとに決定する。
- ② 表示は、シンプルかつ最小限にし、オペレータが理解しにくい表示や音のフィードバックは排除する。

また、調査では、作業時にオペレータがメータ画面を見る時間が一回あたり0.3秒であったことから、0.3秒以内に認知可能であることを視認性の基準と定め、メータ画面をデザインした(図9)。

さらに、メータをキャビン支柱に沿わせて配置したことで、作業エリアからメータへの視線移動を極小化した。

“操作性”については、回転と押し込みというシンプルな操作のジョグダイヤルを採用し、表示画面と親和性が高いスムーズな操作フィーリングを作り込んで、直観的操作を可能にした。

さらに、ジョグダイヤルを操作レバーの横に配置することでメータへの視線移動と同時に作業姿勢のまま直ぐに操作できるようにした。

メータの“視認性”とジョグダイヤルの“操作性”、この2つをもってクボタ独自の新UIとした(図10)。



図 9 メータ画面
Fig. 9 Meter Display



図 10 新ユーザインターフェイス
Fig. 10 New User Interface

4.3.3 UIの評価

UIの使いやすさを検証し、改善点を抽出するため、外部の建設機械オペレータを対象としたユーザビリティテストを実施した。

テスト方法は、メータ表示および操作を模擬したPC上のシミュレータを用いて操作してもらい、操作時の印象についてアンケート方式で記入してもらった。別の部屋からユーザの操作について観察と分析を実施し、アンケート記入後、インタビューを行うことで改善点を抽出した。

抽出した改善点は、リスクアセスメントの考え方を応用したハザードとリスクから重要度判定基準(表3)を用いて判定した。

テストの判定結果は、Aランク0件となり、致命的となる改善点は抽出されなかった。

Bランクの例としては、メッセージ数を表す「1/3」によってダイヤルの回転でメッセージの切替ができること示していたが、ユーザに意図が伝わらず、切替方法が分からなかった。この表示はユーザの感覚と合わないと判断し、メッセージ数は中央に移動し、スクロールを示唆するアイコン「◀ ▶」を追加し、ユーザの感覚に合うUIを作込んだ(図11)。

改善後に耐久試験のフィーリングチェックで再評価し、指摘がなくなったことから直感的でスムーズな操作ができたこと判断した。

表3 重要度判定基準
Table 3 Importance Criteria

		リスク (利用頻度)		
		高 (75 to 100%)	中 (25 to 75%)	低 (0 to 25%)
ハザード (難易度)	難 (学習しても問題)	A	A	B
	中 (学習しにくい)	A	B	C
	易 (初回のみ問題)	B	C	C



図11 Bランクの改善
Fig. 11 Improvement of B Rank

5. おわりに

RDL3は当初の製品コンセプトである業界トップクラスの静粛性(耳元騒音)による快適な操縦空間と直観的操作が可能なクボタ独自の新しいUIを実現し、欧州市場で高く評価されている。

今後は、排出ガス規制対応といった環境問題への取組みと同時にオペレータにとって安全・安心な操縦空間を作っていくこと、オペレータの感覚に合う、使いやすい装備品にしていくことがますます重要になってくる。RDL3の開発をとおして培った技術をさらに深め、他クラスのミニバックホーにも水平展開し、世界のインフラ整備や都市づくりに貢献していく。

また、RDL3の機能性や設計思想、クボタの社会的使命に

対する姿勢が評価され、世界的権威のデザイン賞Red Dot Design AwardとiF DESIGN AWARD、さらに、日本のグッドデザイン賞を受賞し、グローバル・メジャー・ブランドの実現に貢献している(図12)。



図12 受賞デザイン賞
Fig. 12 Awarded Design Awards

SDGsのターゲットへの貢献

7.a エネルギー関連インフラ、クリーンエネルギー技術への投資促進 欧州排出ガス規制対応エンジン搭載

8.8 安全・安心な労働環境の促進 業界トップクラスの静粛性(耳元騒音)により快適な操縦空間を実現

法面草刈機GC-M500の開発

Development of Slope Grass Cutter "GC-M500"

農業ソリューション技術部／解析センター

自走式法面草刈機は除草作業の効率と安全性を高める製品として浸透している。

一方、規模拡大を図る担い手や法人農家が増加している中で、法面草刈機の稼働時間も増えており、さらなる作業能率と耐久性の向上が必要である。そこで、プロ向けの法面草刈機GC-M500を開発した。特にエンジンの最高回転数を2段階から選択できる「マスターモード」を搭載したことで、さまざまな状況に合わせた作業を可能にした。他にもエンジンの出力アップ、耐久性の向上により、農家は作業時間を減らすことができ、高い耐久性によりダウンタイムを減らすことができるため、忙しい大規模農家の時間を他の作業に割り当てられ、生産性を向上できるとともにさらなる規模拡大を図ることができる。

【キーワード】

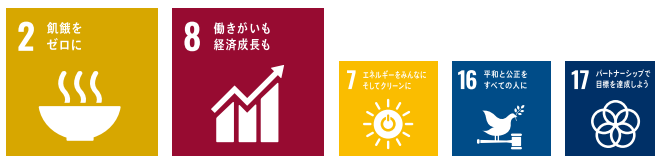
法面草刈機、マスターモード、刈刃取付方法、メンテナンス性改善、高寿命刈刃

Slope grass cutters have become popular as a product that improves the efficiency and safety of mowing operations. On the other hand, as the number of farmers expanding the scale of their farms is increasing, the operating hours of slope grass cutters is also increasing, and it is necessary to further improve work efficiency and durability. Therefore, we developed the slope grass cutter GC-M500 for professionals. By selecting the maximum engine speed from two stages in the "Master mode", it is possible to work under various conditions. Because of its features, an operator can reduce physical discomfort and the working time. In addition, he can reduce downtime and improve productivity due to the product's high durability.

【Key Word】

Slope grass cutter, Master mode, Blade mounting method, Easy maintenance, Long-life blade

関連する SDGs



1. はじめに

水田圃場における除草作業は、怠ると水田管理に支障が出たり、害虫被害により収量が減少するため、シーズン中3～5回程度は必須で、重要な作業のひとつである。しかし、暑い夏場では過酷な作業であり、収益に直結しないため、農家にとって最も苦痛な作業といわれている。また、中山間地の水田の畔は長い法面が多く、刈払機での草刈作業は斜面に立つ必要があるため身体への負担が大きく、危険な作業である。このため、作業者が畔の上面に立った状態で法面の草刈が可能な自走式法面草刈機は、

除草作業の効率と安全性を高める製品として国内市場に浸透している。一方、規模拡大を図る担い手や法人農家が増加傾向にある中で、1経営体当たりの圃場面積は年々増加しており(図1)¹⁾、法面草刈機の年間使用時間も増加している。その中で、年間使用時間100時間を想定して開発された従来機から、さらなる作業能率と耐久性の向上が求められている。

こうした声に応えるため、クボタでは従来機より高能率・高耐久を実現したプロ向け法面草刈機「GC-M500」を開発した(図2)。



図1 1経営体当たりの圃場面積の推移
Fig. 1 Cultivated Area per Management Entity



図2 開発機 GC-M500
Fig. 2 Development Model GC-M500

2. 開発のコンセプトと目標値

2-1 開発のコンセプト

近年増加している担い手・大規模農家をターゲットに定め、面積拡大による作業の長時間化に対応するため、開発コンセプトを以下に定めた。

- 1) 高出力エンジンを搭載することで、草のボリュームが大きい圃場でも余裕のある作業を可能にする。また、作業速度をアップすることで草刈作業のさらなる高能率化を実現する。
- 2) 従来機より各部の耐久性およびメンテナンス性を向上させることで、手離れの良い機械とする。

2-2 目標値

1) 高能率作業

エンジンは高出力エンジンを搭載し、作業速度を見直すことで、時間当たりの作業可能面積である作業能率を従来機より10%向上させることを目標とする。

2) 耐久性向上

圃場規模拡大による作業の長時間化や、エンジン出力アップにより、機体全体の耐久性を向上させる必要がある。中でも消耗部品として交換頻度の高い刈刃の寿命を1.2倍に向上させることを目標とする。

3. 解決すべき技術課題

3-1 さまざまな作業環境への適応

大規模農家向けの法面草刈機として市場に浸透させていくためには、高負荷圃場への対応、高能率化だけでなく、足元が悪い圃場条件などでの最適な作業性、周囲への騒音配慮が必要な、早朝や住宅街近くの圃場での作業等、さまざまな作業環境への適応が課題である。

3.1.1 足元が悪い圃場への対応

足元が悪い圃場では、安全のため低速で作業することが望ましい。しかし従来の法面草刈機はアクセルレバーを常時全開でON-OFF切り替えるだけで細かな回転数調節ができず(図3)、単純に低速段の速度を下げることは高速と低速の速度差が大きくなり、状況に応じて適切な速度を選択できないため作業性の悪化につながる。また、変速段数を単純に増やすことは質量・コストの増加につながる。このため、質量・コストを抑制しながら変速段を増やす方法を検討する必要があった。



図3 アクセルレバー
Fig. 3 Accelerator Lever

3.1.2 騒音の低減

開発機は従来機より排気量の大きいエンジンを搭載し、アクセルを常時全開で使用するため、騒音が大きくなる。周囲への騒音配慮が必要な状況で作業するためには、騒音を低減する必要があった。しかし騒音低減のためマフラーの変更

や、エンジンの最高回転数を下げることはエンジン出力を下げってしまう。高出力・高能率作業と低騒音を両立させる方法が必要であった。

3 - 2 刈刃および刈刃取付部の改善

法面草刈機は、本体下面に取り付けた刈刃ホルダが回転することにより、刈刃ホルダに取り付けた刈刃が草を刈り取る構造である(図4)。

3.2.1 刈刃の高寿命化

作業能率を向上させることで、時間当たりの作業面積が増加し、従来の刈刃では刈刃寿命が短くなることが予測される。このため、より長時間使用可能な刈刃を開発する必要があった。しかし刈刃は消耗部品であり、特殊加工などによる部品単価の上昇はユーザの負担になるため、高価な加工や処理を行わず、高寿命化が課題であった。

3.2.2 刈刃取付方法のメンテナンス性改善と強度確保

従来機で採用している刈刃取付方法は、半割のピンを刈刃取付穴の上下から差し込み、半割ピンの抜け止めにL字のリテーナを差し込み、その保持にボルトと座金を用いていた(図5)。この構造はピン自身が回って緩み、脱落するという問題は発生しないが、部品点数や刈刃着脱時の作業工程が多く、交換作業が煩わしいとの声があった。

そのため、刈刃の取付方法を変更することでメンテナンス性改善と、刈刃取付部品の強度を確保した刈刃取付方式が課題であった。

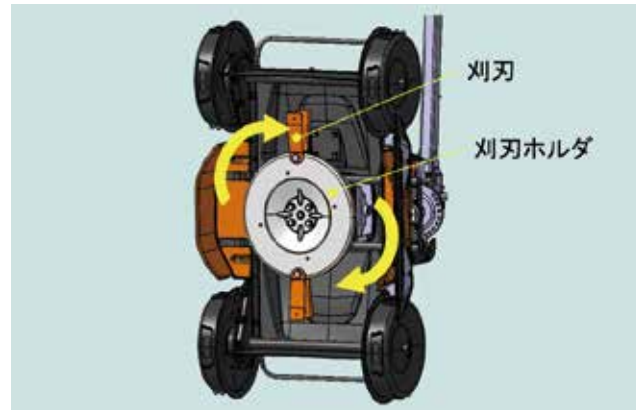


図4 法面草刈機 刈取部
Fig. 4 Grass Cutting Part

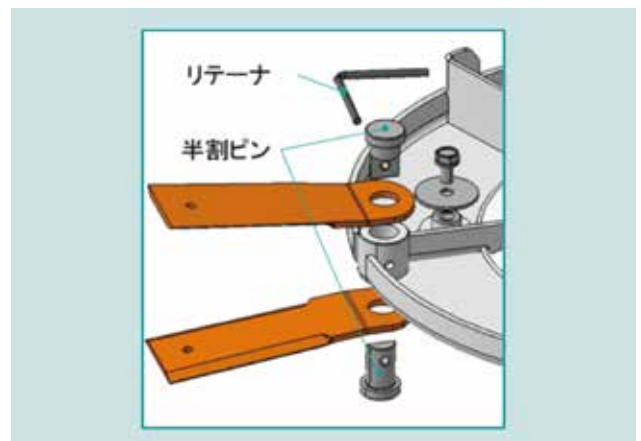


図5 従来の刈刃取付方法(半割ピン方式)
Fig. 5 Conventional Blade Mounting Method

4. 開発技術

4 - 1 マスターモードの採用

4.1.1 エンジン最高回転数の調整

さまざまな作業環境に対応するため、エンジンの最高回転数が調整できる機構を検討した。まず、アクセルレバーの回動量やアクセルワイヤの引きしろを変化させて回転数を調整する機構を検討したが、これは部品点数の増加、作業中の操作の煩雑化につながり、さらに変化させるエンジン回転数の幅が狭い中で、一定の回転数に調整することが困難であった。

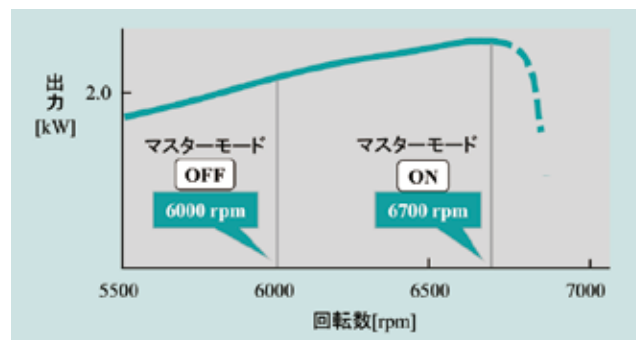


図6 エンジン性能曲線(イメージ)
Fig. 6 Engine Performance Curve (Image)

4.1.2 マスターモードの採用

上記の問題を解決するため、操作の煩雑化、コスト・質量の増加を抑制できる手法として、エンジンの最高回転数を2段階から選択する「マスターモード」を考案した。これまでの搭載エンジンは機体の保護、騒音対策のため、最高回転数が一定以上に上がらないよう、イグニッションコイルで点火時期を制御し特定の最高回転数を決めているが、この制御を変更し2段階にすることで、最高回転数を6700 / 6000 rpmに切替可能にした(図6)。また、切替操作は手元のスイッチ1つで容易に変更可能とした(図7)。

4.1.3 車速設定と作業効率

マスターモードにより、2段階の最高回転数に対し、それぞれ車速を低速／高速の2段階、合計4段階から選べるようになった(図8)。

高負荷圃場で高出力が必要な場合や、高速で高効率な作業を求める場合は6700 rpm(マスターモードON)、軽負荷圃場や、足元が悪いなど低速作業したいとき、周囲への配慮のため低騒音を求める場合や、従来機同等の速度で作業したい場合は6000 rpm(マスターモードOFF)を選択することで、圃場の負荷の大小や足元の良悪、騒音配慮など、さまざまな状況に合わせた作業を可能にした。

また、業界最高速の0.72 m/sを追加したことで、作業効率 は従来機から11%改善(*)し、目標を達成することができた。

※圃場条件:草丈0.9 m、草密度1.0 kg/m²



図7 マスターモード切り替えスイッチ
Fig. 7 Master Mode Switch

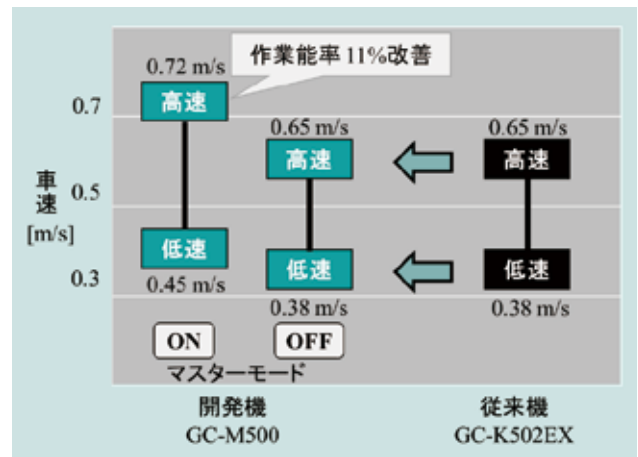


図8 車速
Fig. 8 Vehicle Speed

4-2 刈刃・刈刃取付方法の改善

4.2.1 刈刃の高寿命化

エンジン的高出力化、作業効率の向上にともない、従来の刈刃では使用可能時間が短くなるため、刈刃の高寿命化を検討した。まず、従来の刈刃では先端の角部から摩耗が進行していくため、摩耗しやすい部分の面積を大きくとった、扇形形状を検討した(図9)。さらに寿命を延ばすため、刈刃の板厚を見直した。

その結果、刈刃摩耗加速試験により板厚に比例して刈刃寿命が延びることが確認できたが、刈刃寿命が長くなると、刈刃を固定している刈刃ピンの頭が先に摩耗限界となってしまうことが判明した(図10)。万々刈刃ピンの頭が完全に摩耗した場合、刈刃が外れてしまう。そのため、刈刃ピンの寿命を延長する方法を検討したが、刈刃ピンの硬度を上げると衝撃によって折損する可能性があり、また刈刃ピンの頭の厚さを厚くすると、地面との距離が近くなるため摩耗が促進され、

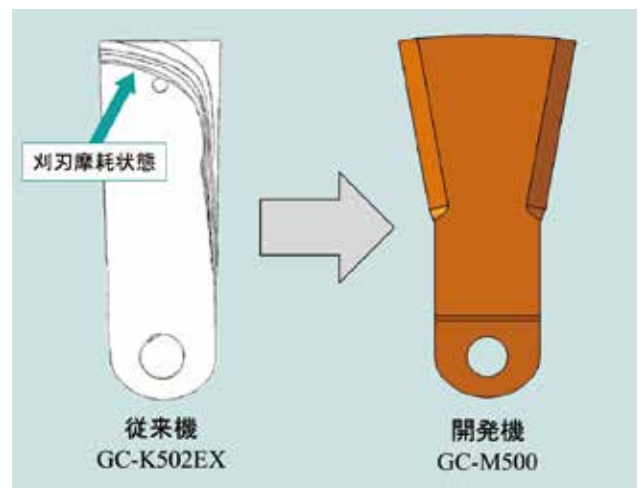


図9 刈刃形状
Fig. 9 Shape of the Cutting Blade

高寿命化とならない。

以上より、刈刃の厚さを刈刃ピンとの摩耗バランスをとった厚みに設定し、刈刃摩耗加速試験にて刈刃寿命を確認し



図 10 刈刃と刈刃ピン頭の摩耗

Fig. 10 Wear Status of Cutting Blade and Cutting Blade Pin Head

4.2.2 刈刃取付部の強度確保

メンテナンス性改善のため、刈刃取付方法を従来機の半割ピンを用いた方式から、部品点数や刈刃着脱時の作業工程を抑制したボルトナットを用いた方式に変更することを検討した。ボルトナット方式では刈刃が回転した際、刈刃取付ボルトが連れ回って緩んでしまう懸念があるため、刈刃ピンおよび取付穴を小判形状とし、刈刃取付ボルト自体が回転しない形状とした(図12)。さらに、刈刃の回転によるナットの連れ回り防止の小判座金を追加し、ナットにはねじロック剤を

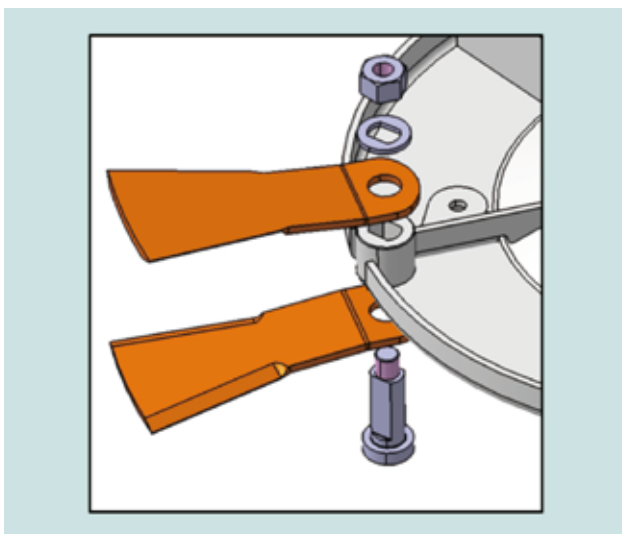


図 12 開発機の刈刃取付方法(ボルトナット)

Fig. 12 Method of Mounting the Blade of Development Model

た結果、開発機の刈刃は従来機の刈刃比1.3倍の高寿命化を達成した(図11)。

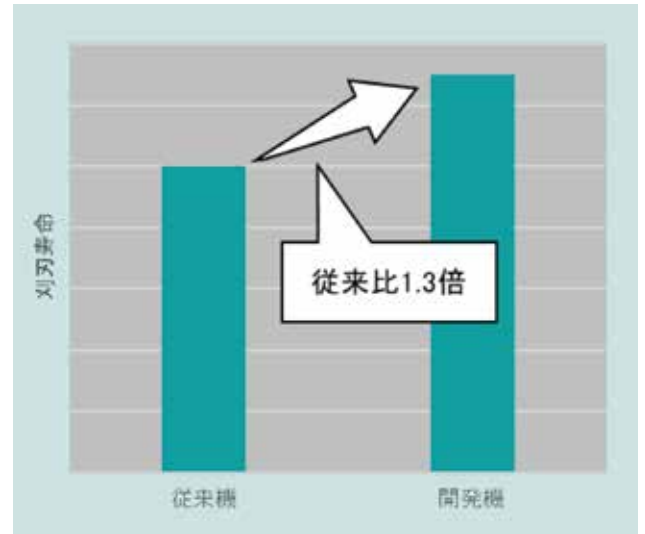


図 11 刈刃寿命向上

Fig. 11 Improvement of Cutting Blade Life

塗布することで安全性を確保した。

また、刈刃の固定については安全面で重要な箇所であるため、今回の扇形刈刃および刈刃取付方式変更に対して、過大な負荷がかかった際の強度について解析にて検証した。結果、刈刃ピンの角部に応力が発生することがわかった。そこで刈刃取付ボルトの取付小判穴の角度を変更することで応力を低減し、高出力化による衝撃に耐えられる仕様とした(図13)。

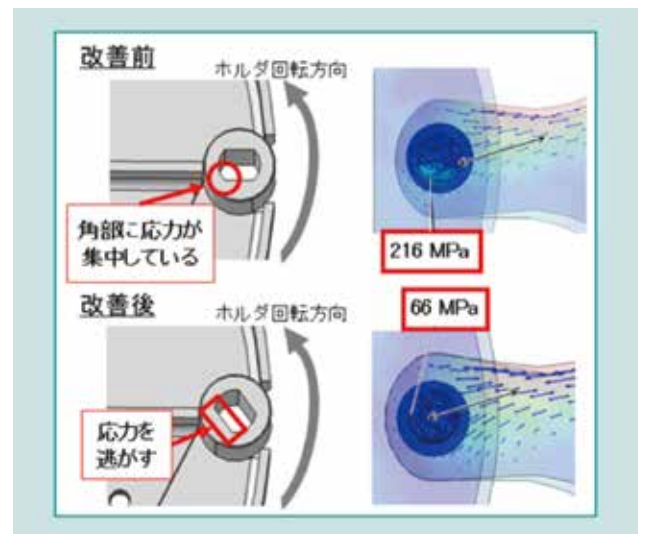


図 13 強度解析結果

Fig. 13 Strength Analysis Result

4-3 その他の改善点

大規模農家向けの法面草刈機として、上記以外にも各部の改善を図った。以下に2点の改善点を紹介する。

4.3.1 ハンドル長さ延長

法面草刈機のハンドルは伸縮可能であり、法面の長さに合わせてハンドルを伸縮させることで、作業者が上面に立ったまま法面の草を刈ることができる。しかし従来機では法面の草刈作業時に上面を歩行姿勢で作業していると、法面の下に刈れない草があと一段分残ってしまい、その1段を作業者が法面に立って作業することになるため、大変な重労働になるとの声があった。そこで、開発機では法面の草刈作業における身体的負担を軽減するため、ハンドル最長時の長さを延長することで、もう1段分を上面に立ったままの歩行姿勢で作業可能とした(図14)。



図 14 ハンドル長さ延長
Fig. 14 Extend the Handle Length

4.3.2 フレーム損傷抑制

エンジン出力が大きくなった分、飛散する石の衝撃も大きくなるため、フレームが損傷しやすく、耐久性が懸念された。しかし、単純に板厚を上げることは質量増加となり、草刈機の取り回しの悪さにつながってしまう。

そこで、石当たりの多い部分のみに衝撃低減ゴムを貼ることで、質量増加を抑制し、フレームの耐久性を向上させた。また損傷した場合にも交換部品がゴムだけになることで、メンテナンス性も改善することができた(図15)。



図 15 衝撃低減ゴム
Fig. 15 Frame Protect Rubber

5. おわりに

担い手農家や法人農家は、規模拡大にともない草刈作業を行う面積も増加し、特に、夏場の暑い中での作業は非常に過酷である。そのような中、効率のよい草刈作業を可能にした本開発機は、作業時間を減らすことが出来るため農家の時間確保と身体的負担を低減できた。また、高い耐久性によりダウンタイムを減らすことができ、生産性向上にも貢献できた。

2020年に本開発機をシリーズ追加したことで、法面草刈機の

販売台数を伸ばすことができ、市場からもご好評をいただいている。今後、さらに顧客ニーズに合った新製品を開発することで、事業量拡大に貢献していく。

SDGs のターゲットへの貢献

2.4 持続可能かつ強靱な農業の実現 従来機に比べ作業能率11%アップ

8.2 イノベーションを通じた生産性の向上 従来機に比べ作業能率11%アップ

参考文献

1) 農林水産省 農地に関する統計

<https://www.maff.go.jp/j/tokei/sihyo/data/10.html> (参照日:2021-05-14)

微量NXフィーダの開発

Development of Micro Flow Rate NX Feeder

精密機器技術部

フィーダとは樹脂混合(コンパウンド)に使用される「二軸混練押出機」(以下、押出機という)に様々な粉粒体状の材料を定められた比率で連続的に定流量供給する装置である。従来、樹脂の生産工程では、微量添加剤をほかの材料と事前にブレンドし、それをフィーダから押出機に供給することで樹脂製品を生産していた。一方で、生産性向上のため、事前のブレンド工程を無くし、押出機に直接微量添加したいというニーズがあった。それに応えるため、新たに微量NXフィーダを開発した。NXフィーダシリーズはクボタが開発した独自構造のフィーダである(特許取得済み)。その構造的長をを活かすとともに、本開発機では供給精度の向上、微小流量域への拡大、適用材料の拡大、設置面積の低減等の技術を開発し、目標スペックを達成した。本稿ではこれらの開発技術について解説する。

【キーワード】

フィーダ、高供給精度、微小流量、微量添加、高精度高安定、ブリッジ材料

A feeder is a device for continuously supplying a constant flow rate of various powdery and granular materials in order to meet specific resin mixing ratios. Conventionally, resin products have been produced in process by blending a small amount of additives with other materials in advance and supplying them from a feeder to an extruder. On the other hand, in order to improve productivity, there was a need to eliminate the prior blending process and to add a trace amount directly to the extruder. In response, we have developed a new micro NX feeder. The NX feeder series is a proprietary feeder developed by Kubota. In addition to making use of its structural features, we have developed technologies to improve the supply accuracy, expand the flow rate range, expand the range of applicable materials, reduce the installation area, and achieve the target specifications. This paper explains these development technologies.

【Key Word】

Feeder, High Supply Accuracy, Micro Flow Rate, Supply of Very Small Amount, High Accurately Weigh and High Stability, Bridge Material

関連する SDGs



1. はじめに

日本国内を含め多くの樹脂メーカーでは、汎用樹脂よりも耐熱性や耐摩耗性を高めた高機能樹脂の生産に取り組んでいる。高機能樹脂は軽量で複雑な形状を成型できる特長から、自動車や家電などあらゆる産業において金属部品の代用として利用が広がっている。高機能樹脂の生産工程では、樹脂に様々な機能を付与するための材料や添加剤を複数投入するため、それらの供給に

使用されるフィーダの台数は増加傾向にある。クボタ製フィーダは樹脂生産工程において材料を高精度に定流量で供給することで、樹脂製品の品質確保と生産性の向上に欠かせないものとなっている。

昨今の樹脂生産工程では生産性向上の観点から、省人化や工程削減のため、押出機前工程での微量添加剤のブレンド工程をな

くし、押出機に直接微量添加する処方が増えてきている(図1)。

クボタはお客様の要望に応えるため、それぞれの流量域に対応したフィーダをラインナップしているが、微小流量域での高精度供給という要望に応えきれなかった。

更に、お客様が使用する材料の性状は様々で、フィーダで安定供給が容易な材料もあれば難しい材料もある。安定供給が難しい材料では、ブリッジ(材料の粒子同士がアーチ構造を形成して閉塞し、排出されなくなる現象)が発生することがあり、それらに幅広く適応できることも考慮しなければならない。

また、複数台のフィーダを配置することから、配置のレイアウト自由度を高める必要があり、設置面積の大きさも考慮しなければならない。

従来のクボタ製小流量フィーダでは、供給精度や適応する材料に満足できずに、他社製フィーダを採用している樹脂メーカーや押出機メーカーに対し、微小流量高供給精度と幅広い材料適応

力、省スペース性を兼ね備えた微小流量フィーダを開発し、お客様の要望に応える。

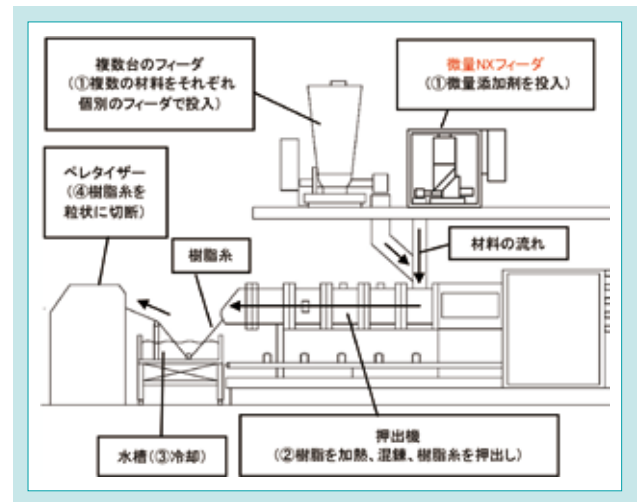


図1 微量NXフィーダの設置例
Fig. 1 Micro Flow Rate NX Feeder Installation Example

2. 開発のコンセプトと目標値

2-1 開発のコンセプト

開発機は、従来機の供給精度を上回る高い供給精度を備えるとともに、従来機の流量域を上回る微小流量域に対応範囲を拡大することを目指す。

現在、中流量・大流量域では、従来機からNXフィーダシリーズ(以下、NXフィーダという)へ置きかわりが進んでいる(図2)。NXフィーダは供給精度が高く、幅広い材料適応力という特長があるため、NXフィーダを開発のベースとすることで、それらの特長を持った微量NXフィーダの実現をはかる。そして、NXフィーダのラインナップを拡充し、フィーダ製品群の機種統合を行う。

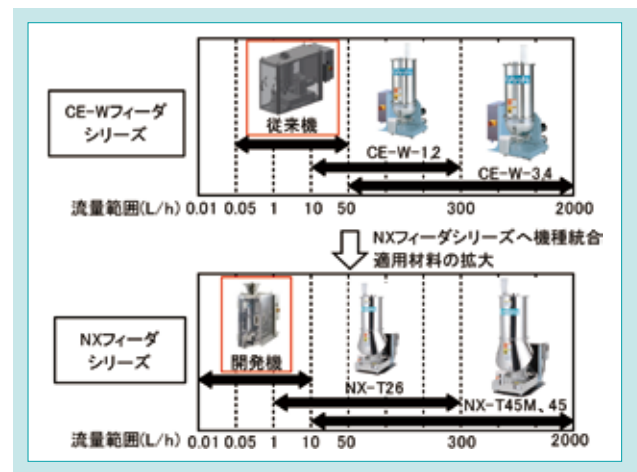


図2 フィーダラインナップ
Fig. 2 Weighing Feeder Lineup

2-2 目標値

開発機の供給精度は、市場要望である「100 g/h、1 minサンプリングで供給精度1%以下」を目指す。併せて、フィーダの流量域を微小流量域に拡大し、最小流量を0.01 L/hを目標値とした。それらの確認にはタルクを基準材料として用いた。

適用材料は従来機では難しかった高ブリッジ材料(ブリッジ性は発生程度により「低」「中」「高」で分類される)の供給を目指す。

フィーダの設置面積は従来機に対して20%以上低減し、省スペースで複数台設置しやすい形状とする。

目標スペックを表1にまとめた。

表1 目標スペック
Table 1 Target specification

項目	開発機	従来機
供給精度	100 g/h、1 minサンプリングで供給精度1%以下 (低ブリッジ材料:タルク)	100 g/h、1 minサンプリングで供給精度3%以下 (低ブリッジ材料:タルク)
最小流量	0.01 L/h (低ブリッジ材料:タルク)	0.05 L/h (低ブリッジ材料:タルク)
適用材料	低ブリッジ材料(イルガノックス)、 中ブリッジ材料(炭酸カルシウム)、 高ブリッジ材料(酸化チタン)	低ブリッジ材料(イルガノックス)、 中ブリッジ材料(炭酸カルシウム)
設置面積	従来機比20%減	-

3. 開発技術

3-1 NX フィーダの特徴を活かした微小流量フィーダ

3.1.1 供給精度の向上

従来機とNXフィーダの断面図を図3に示す。フィーダは計量部、駆動部、ホoppaから構成されており、計量ホoppaでは材料を貯蔵し、供給ホoppaでは攪拌羽のアジテータ、材料を排出するスクリュが回転する。制御運転時は、スクリュによる材料排出を計量部で検出し、時間当たりの減量が常に一定となるようにモータの回転数を制御し、材料を定流量供給している。

従来機は、横型アジテータの回転により、材料の上下動が発生するため重量値に変動が出やすく、特に小流量で制御状態を自分で乱してしまうことがある。

本開発機では、NXフィーダの特徴である斜め型アジテータにより、材料の上下動が少なく重量値が安定し、結果として制御状態が安定し、良好な供給精度を実現させた。

3.1.2 微小流量域への拡大

従来機は、アジテータとスクリュが最接近しているのは中央の一点だけであり、その前後は空間が生じているため、スクリュへの充填性能に劣る。

本開発機では微小流量用のスクリュを新規開発した。NXフィーダの特徴である斜め型アジテータが、充填口全域でス

3.1.3 適用材料の拡大

従来機は、ブリッジ性の高い酸化チタン等の材料はスクリュへの充填が不安定で、制御状態が安定せず、供給できない。

NXフィーダはアジテータが斜めのため、材料が上下方向や円周方向と様々な方向に動かされることにより、ブリッジ性の高い酸化チタン等の材料も流動化され、スクリュへ安定し

3.1.4 設置面積の低減

従来機は風防が長方形の箱型のため、複数フィーダを放射状に集合配置した際、お互いの前方の角が干渉する(図4)。

本開発機では従来機と同様に周囲の風が重量値に影響を与えないように風防を設けた設計としている。複数のフィーダが集合配置されるときにお互いが干渉しにくくなるよう、風防フレーム前方をテーパ形状とし、更に設置面積を28%低減させた(図5)。また、前方テーパ部の風防扉をヒンジ連結とすることで開口空間を設け、フィーダの分解清掃時のメンテナンス性を維持した(図6)。

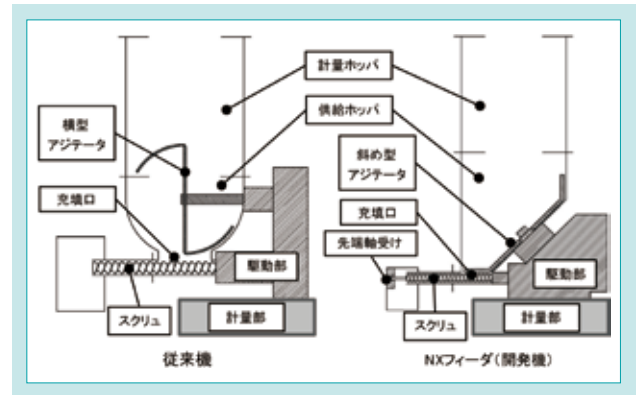


図3 従来機とNXフィーダ
Fig. 3 Conventional Model and NX Feeder

クリュに材料を押し付けながら通過するため、スクリュへの充填性能が高まる。そのため、溝が浅くピッチの狭い微小流量用に設計されたスクリュでも安定した制御ができる。

て充填することができる。しかし、酸化チタン等の材料はスクリュへ充填された後、スクリュ内で圧密され、抵抗となりスクリュ振れを発生させ、精度を低下させることがあった。

本開発機ではスクリュに先端軸受けを追加し、スクリュ振れが発生しない改良を加え、酸化チタンといった高ブリッジ材料の高精度供給を実現させた。

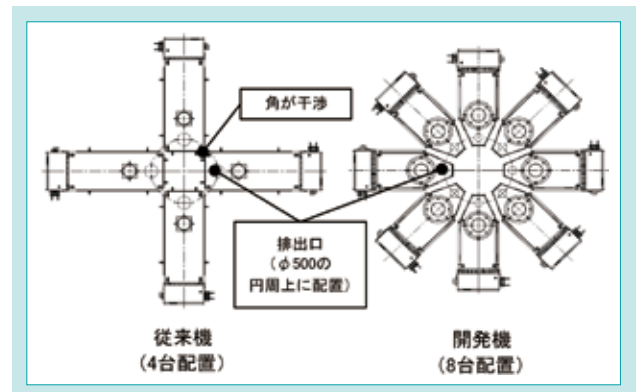


図4 集合配置(上面図)
Fig. 4 Collective Installation



図5 設置面積
Fig. 5 Installation Area

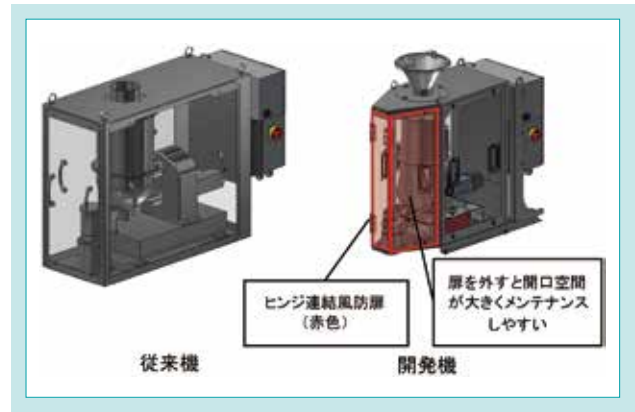


図6 フィーダ形状
Fig. 6 Feeder Shape

3-2 計量精度の向上技術

3.2.1 計量精度の課題

僅かな重量値の変動が微小流量の領域では制御状態を乱してしまう要因となる。そのため、重量値に影響を与えない

3.2.2 ロードセルの高精度高安定化

重量値計測の高精度化のため、計量部内にある自社製ロードセルの改良を行った。微量の検出精度を高めるため、ロードセルの固有振動数の高さに着目した。ロードセルは固有振動数が高いものほど剛性が高くなり、荷重負荷による振動の収束時間が短くなり、安定した計量結果が得られる。今回、固有振動数の高いロードセルを採用した。

更に、歪ゲージに使用している箔材質の起電力にも着目した。起電力は箔材質CuNiで高く、NiCrは低い。これは1°C当たりの温度変化が重量値に誤差として及ぼす影響を示している。重量値への影響を減らし温度による安定性を強化す

技術の開発を行った。具体的にはロードセルの高精度高安定化、モータ配線経路の固定化、フレキの開発である。

るため、開発機ではNiCrの歪ゲージ箔を用いたロードセルを採用した(表2)。

表2 ロードセル
Table 2 Load Cell

ロードセル	固有振動数(Hz)	箔材質	箔材の熱起電力
試作①	高	CuNi	高
試作②	低	NiCr	低
開発機	高	NiCr	低

3.2.3 モータ配線経路の固定化

フィーダの駆動部は計量部の上であり、駆動部にはモータに電力を供給するための配線がある。モータ配線に張力やねじれがあると計量部に力が加わり、重量値の誤差につながる。そのため、計量に影響を与えない配線経路と長さで決定し、再現できるようブラケットとケーブルグランドで固定することで影響を低減させた(図7)。

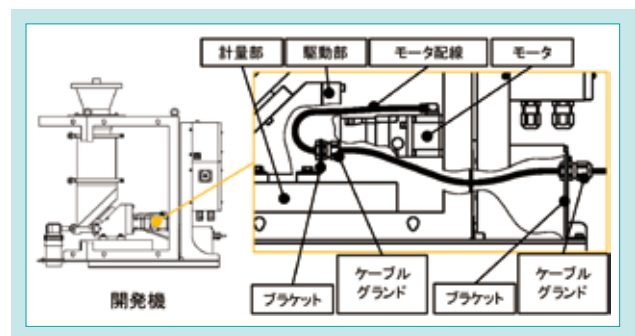


図7 モータ配線
Fig. 7 Motor Wiring

3.2.4 重量値に影響を与えないフレキの開発

従来機には重量値が変動しないよう、計量側と固定側を縁切りするためのフレキが標準では装着されていない。そのため材料が飛散し、清掃頻度が高くなる。また、お客様の要望で筒状のフレキをオプションで取付ける事があるが、精度

の保証が困難であった。

本開発機では材料の飛散防止と精度保証が可能なフレキを開発した(図8)。薄肉のシリコンゴムを用いて試作したが、重量値に影響を与えない形状の決定には複数回の試

作と試験を要した。最終的には薄肉ジャバラ形状のフレキとした。

飛散を防止するためのフレキを図8の位置に取付け、フレキと重量値との関係性を評価した。

フレキを取付けた状態でフィーダにタルクを投入しフィーダを制御運転させ、流量ごとに重量値の変化を測定した。フレキ径の影響を見るため、65A(口径φ76.3)と90A(口径φ101.6)の2種類を試した。材料を攪拌することから重量値変化と関係していると考えられるアジテータは、NXフィーダに一般的な2枚羽と、2枚羽とは攪拌周期が異なる3枚羽の2種類を確認した(図9)。

65Aのフレキと2枚羽アジテータを付けた状態では重量値の変化が大きく出た。65Aのフレキと3枚羽アジテータを付けた状態では、重量値変化が小さくなることが分かった。更に、フレキの口径を90Aに変更し、3枚羽アジテータを付けた状態では、重量値の変化が小さくなることが判った。

アジテータの羽枚数が2枚の時、アジテータの攪拌により、ホップ内部の攪拌バランスが崩れ、目には見えない細かな揺れにより、上部のフレキが引っ張られ重量値が変化していた。羽枚数を3枚にすることでバランスが良くなったと考えられる。更に、フレキの口径が大きいほど、可とう性が良く、細かな揺れを柔軟に吸収し引っ張られなくなったと考えられる。

本開発機ではアジテータ3枚羽と大口径フレキの採用により、制御運転時の重量値変化の低減を実現した。

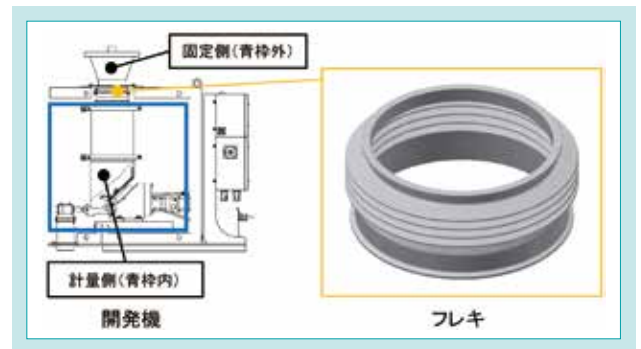


図8 フレキ
Fig. 8 Flexible Tube



図9 アジテータ
Fig. 9 Agitator

4. 性能確認と技術的考察

4-1 供給精度と最小流量の確認

(1) 試験方法

試験材料としてタルクを開発機に投入し、目標値である流量100 g/hを含む、50、100、200、500、1000 g/hで定流量供給した。

供給精度は電子天秤を用いて、1分毎のサンプリングを10回連続で計測し、その10回計測した値の標準偏差と平均値を用い、供給精度(式①)を測定した。本値は、小さいほど供給精度が高いことを意味する。

$$\text{供給精度(\%)} = \text{標準偏差} \div \text{平均値} \times 100 \quad \dots \text{①}$$

更に、データの信頼性をあげるため、上記測定を13回連続で行い、以下のとおり供給精度の平均値(式②)を求めた。

$$\text{供給精度の平均値(\%)} = \text{供給精度13回の和} / 13 \quad \dots \text{②}$$

この値を評価の数値とした。

また、同時に流量領域確認のため、最小流量の制御確認を行った。0.01 L/hの流量設定で、スクリュを駆動するモータの最小制御出力0.1%を上回るか確認を行った。

(2) 試験結果

試験結果を図10に示す。

試験結果より、設定流量全域で従来機よりも本開発機の方が供給精度が高いことが確認できた。100 g/hにおける供給精度は、従来機1.43%に対し、開発機0.69%となった。更に、0.01 L/hでモータ出力0.18%となり、止まることなくスクリュが回転し、問題なく制御できていることを確認した。

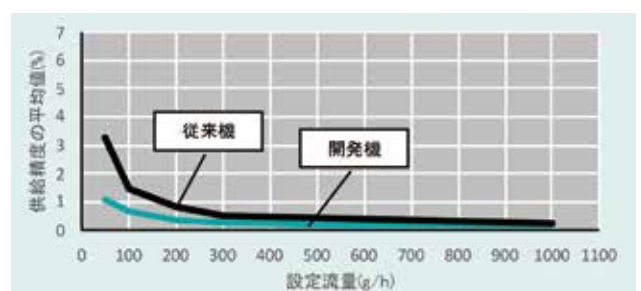


図10 タルクの供給精度
Fig. 10 Supply Accuracy of Talc

(3)結論

本開発機は、目標値「100 g/h、1 minサンプリングで供給精度1%以下」、「最小流量0.01 L/h」を達成した。

4-2 適用材料範囲の確認

(1)試験対象

タルク以外の供給精度も開発機、従来機で比較した。

(2)試験方法

性状の異なる3種類の代表的な材料、イルガノックス(低ブリッジ材料)、炭酸カルシウム(中ブリッジ材料)、酸化チタン(高ブリッジ材料)で試験を行った。

各材料を投入し、50、100、200、500、1000 g/hで定流量供給し、供給精度の平均値を確認した。

(3)試験結果

試験結果を図11、12、13に示す。イルガノックスと炭酸カルシウムでは、開発機が従来機の供給精度を上回った。

酸化チタンは、従来機ではスクリュへの充填が不安定で、制御状態が安定せず、供給できなかった。

(4)結論

本開発機では高ブリッジ材料である酸化チタンの供給も達成した。

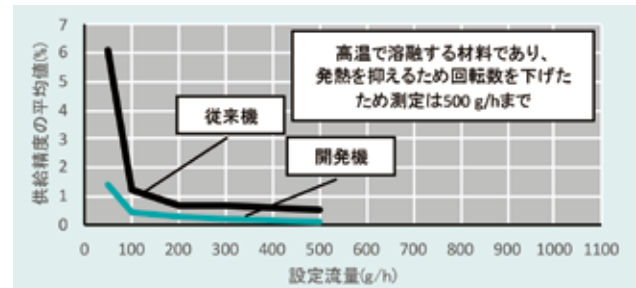


図 11 イルガノックスの供給精度(低ブリッジ材料)

Fig. 11 Supply Accuracy of Irganox

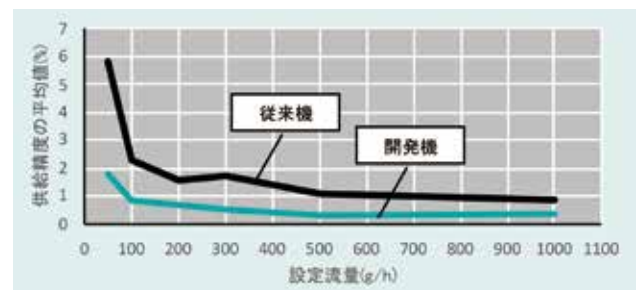


図 12 炭酸カルシウムの供給精度(中ブリッジ材料)

Fig. 12 Supply Accuracy of Calcium Carbonate

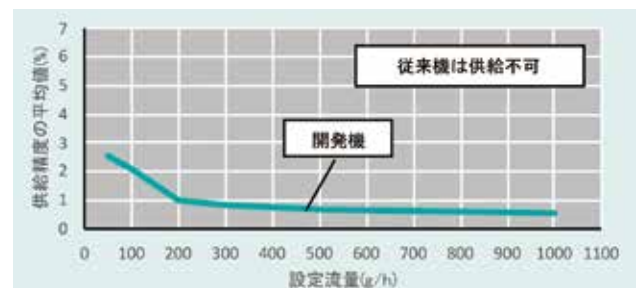


図 13 酸化チタンの供給精度(高ブリッジ材料)

Fig. 13 Supply Accuracy of Titanium Oxide

5. おわりに

微小流量域での高精度供給というお客様の要望に応えるため、「100 g/h、1 minサンプリングで供給精度1%以下」、「最小流量0.01L/h」を達成した。適用材料では従来機では難しかった高ブリッジ材料である酸化チタンの供給を実現した。更に、フィーダの設置面積を28%低減し、省スペースで複数台設置しやすい形状を実現した。

本機は2020年に上市し、国内外の市場において徐々に認知度

が上がってきている。樹脂生産工程で添加剤の微量供給に使用されはじめ、生産性向上に貢献している。

また、樹脂生産工程だけでなく、少量生産を行う試作や研究ライン、また樹脂以外の電池や化粧品、食品などの様々な産業の研究開発用途にも展開が可能である。将来的には、微量供給ニーズの高い医薬市場に参入し、医薬品の生産性向上への貢献を目指す。

SDGs のターゲットへの貢献

9.5 科学研究、イノベーションの促進 様々な産業の研究開発力向上に貢献

12.1 持続可能な消費と生産の実施 樹脂生産における生産性向上に貢献

水道管路工事向け「施工情報システム」の開発

Development of Water Work Information System for Water Pipe Construction

パイプネットワーク技術部

老朽化した水道管路の更新・耐震化が進められる中、経年化管理率は年々上昇し、早急な管路更新が求められている。

しかし、水道管路工事事業者は人手不足に加え、多岐にわたる施工管理書類の作成が義務付けられる等、工事期間が長引くことで、管路工事数が思うように伸長していない。一方、水道事業体は施工管理レベルの低下を懸念しており、正確な施工手順の履行や施工時の管理数値の確実な記録を求めている。

そこで、工事現場で表示画面順に作業し、施工情報を携帯端末に入力することで施工管理書類を即時作成できる「施工情報システム」、及び工事の出来形管理のための拡張機能として施工後の止水ゴム輪位置を測定し無線通信機能で反映できる「サイトチェッカー」と継手屈曲角度を自動測定する「サイトアングル」を開発した。

【キーワード】

水道管路工事、耐震型ダクタイル鉄管、IoT、施工品質・効率の向上

Despite efforts to renew and build earthquake-resistant pipelines, the ratio of aging pipes increases year by year, so acceleration of renewal is required. However, in addition to manpower shortage, construction companies spend a lot of time on various documents to submit. On the other hand, water utilities are concerned about the drop in level of the construction management, and require secure jointing work according to the manual and reliable measurement records. In order to solve these problems, we have developed “Water work information system (WWIS)”, “Site Checker” and “Site Angle”. WWIS can encourage secure works and automatically create documents using portable terminals, Site Checker can measure positions of a rubber gasket and send to WWIS, and Site Angle can automatically measure joint deflection angles.

【Key Word】

water pipe construction, earthquake-resistant ductile iron pipe, IoT, improvement of quality and efficiency of constructions

関連する SDGs



1. はじめに

水道管路の更新・耐震化は急がれているものの、経年化管理率は上昇している¹⁾(図1)。過去の水道普及率の推移からみても、管路の経年化は今後更に進むとされており、管路更新のより一層のスピードアップが求められている。

現状、水道管路工事において、工事事業者は現場の管理や関係書類の作成に多くの労力と時間を費やしており(図2)、これが工事期間の長期化の一つの要因といわれている。一方で、水道事

業体や工事事業者は人手不足であり、技能伝承や施工品質の維持に対する取り組みも必要とされている。

そこで、これらの課題を解決し、関係者の手間解消による水道管路工事の生産性向上と、施工管理の一元化による工事品質の向上が期待できる「施工情報システム」、及びその拡張機能ツールとしてゴム輪位置を測定する「サイトチェッカー」と、継手屈曲角度を自動測定する「サイトアングル」を開発した。

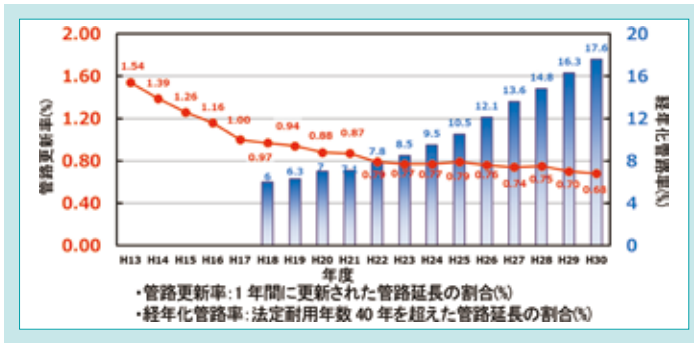


図1 日本の水道管路の更新率・経年化率
Fig. 1 The Ratio of Aging Pipes is Increasing in Japan

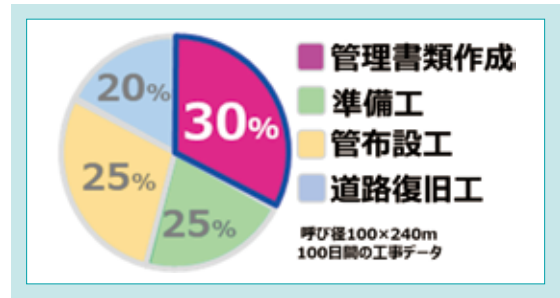


図2 工事事業者の工事業務
Fig. 2 Construction Works

2. 開発のコンセプトと目標値

2-1 開発のコンセプト

水道管路工事の施工管理レベルの向上及び効率化を目的とし、表1のとおり開発コンセプトを設定した。

表1 開発コンセプト
Table 1 Development Concepts

コンセプト	内容
適切な施工の促進	耐震型ダクタイル鉄管の機能を発揮させるためには、適切な施工及びその管理が重要となる。そこで、工事現場でスマートフォンに施工情報を順次入力することにより、適切な施工手順に誘導できる施工情報システムを開発する。
施工管理書類作成作業の効率化	工事事業者が水道事業体に提出する必要がある竣工図書のうち、管の布設に関わる図書を自動作成可能なシステムとする。
施工管理数値の正確かつ確実な記録	施工時の管理数値として、適切に継手の接合が行われたことを確認するための、ゴム輪位置の確認及び継手屈曲角度の測定が重要である。従来、工事現場で測定値をメモ書きして工事後に清書するため、誤記や転記ミス等が発生する恐れがあった。これら管理数値の正確かつ確実な記録のため、各数値を容易に測定し、施工情報システムに反映可能な機能拡張ツールを開発する。

2-2 目標値

2.2.1 施工情報システムの開発

- ①小中口径の耐震型ダクタイル鉄管(GX形管、NS形E種管)を対象とし、当該管路に付随するNS形管、K形管やフランジ形管にも対応させることとした(図3)。
- ②工事現場でスマートフォンの入力画面にしたがって施工管理項目を順次入力し、(一社)日本ダクタイル鉄管協会(以下、JDPA)の接合要領書に従った適切な施工手順に誘導し、かつ適正に施工されたかの合否判定が可能なシステムとした(図3)。
- ③スマートフォンに必要情報を入力することにより、工事事業者が水道事業体に竣工図書として一般的に提出する必要がある、継手チェックシート、工事日報、管割図が自動作成されるシステムとした(図4)。

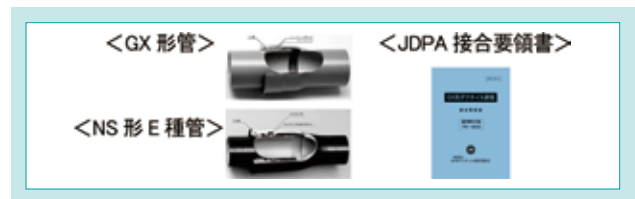


図3 施工情報システムの適用範囲及び入力手順
Fig. 3 Application Range and Data Input Procedure of WWIS



図4 施工情報システムの概要
Fig. 4 Water Work Information System(WWIS)

2.2.2 サイトチェッカーの開発

- ①GX形管、NS形E種管において、ゴム輪位置を測定する必要がある直管受口の継手を対象とした。
- ②ボタン一つでゴム輪位置が正確に測定でき(図5)、測定値

- ③現場掘削溝内の種々の条件に左右されないものとした。

2.2.3 サイトアングルの開発

- ①GX形管、NS形E種管において、継手屈曲角度を測定する必要がある直管受口の継手を対象とした。
- ②施工情報システムを搭載したスマートフォンのカメラで、接合後の継手写真を1枚撮影することにより、水平方向・垂直方向の角度、及びそれらの合成角度を10秒以内で算出でき、その合否判定をできるものとした(図5)。
- ③継手の地震時に曲がり得る最大屈曲角度8度以下を適用範囲とし、ラボベースでの測定精度を±0.5度とした。
- ④施工情報システムからボタン一つで起動可能で、かつ算出値を施工情報システムに反映できるアプリケーションとした。
- ⑤継手の耐震性能を最大限発揮するための挿し口挿入量のチェックについても、本アプリケーションで確認可能とした。



図5 施工情報システムの機能拡張
Fig. 5 Enhancement of WWIS

3. 解決すべき課題

(1) 施工情報システム

施工不良を防止し工事品質を向上させるため、適切な接合手順の履行を促進するシステムの設計が求められた。

また、工事現場でシステムの安定した稼働を図るため、部

品供給元が一定でソフトウェアのアップデートを管理しやすいOS、及びシステムの基盤となる市販のアプリケーションを選定する必要があった。

(2) サイトチェッカー

管底部等スペースが狭い箇所でも容易にゴム輪位置を測定できるよう、大きさの制限を満足する必要があった。

また、雨天時の使用や水場への落下が想定されるため、水密性の確保が求められた(図6)。



図6 ゴム輪の位置確認
Fig. 6 Checking Positions of a Rubber Gasket

(3) サイトアングル

継手屈曲角度を継手写真1枚の画像処理により高精度で算出するためには、管挿し口の輪郭線を高精度で抽出する必要があった(図7)。特に、垂直方向の角度を算出するためには、輪郭線の角度の微小な変化を抽出する必要があった。

また、通信状態の悪い工事現場でも使用可能とするため、スマートフォン内で全処理が可能なアプリケーションの開発が求められた。



図7 継手屈曲角度の確認
Fig. 7 Checking Joint Deflection Angles

4. 開発技術

4-1 施工情報システム

4.1.1 端末及びアプリケーションの選定

端末は、画面サイズが大きく屋外使用に適し、部品供給元が一定で解析ツールの開発がしやすいiPhoneXRを選定した。また、システムの基盤となるiOSアプリは、画面表示の設計自由度が高い市販のi-Reporterを選定した(図8)。



図8 施工情報システムの端末及びアプリケーション
Fig. 8 Device and Application of WWIS

4.1.2 入力システムの開発

(1)基本情報の入力

工事日、工事名、工事事業者名等基本情報の入力後、配管に使用する管材を入力することとした(図9)。管材は、JDPAの便覧に記載の直管・異形管の全種類から選択可能とし

た。なお、画面には適宜ヘルプボタンを設け、接合要領書に沿った施工管理方法を参照できるようにした(図10~12)。

(2)接合チェック項目の入力

①接合前の確認

継手の接合前に確認が必要な、挿し口突部の有無や接合用滑剤塗布等の項目をチェックできるようにした(図10)。

で入力することにより、合否判定が自動表示されるようにした(図11、図13)。

②ゴム輪位置の確認

接合後にゴム輪が適正な位置にあるか確認するために、行う受口端面からゴム輪位置までの距離(b)を円周8等分点

③継手屈曲角度の確認及び継手写真の記録

受口端面から挿し口白線までの距離(a)の測定結果を円周4等分点で入力することにより、自動で合否判定が表示されるようにした。また、継手チェックシートに記録する継手写真を撮影することとした(図12、図13)。



図9 管材入力画面 図10 接合前の確認画面 図11 ゴム輪の位置確認画面 図12 継手屈曲角度の確認画面 図13 ゴム輪位置及び継手屈曲角度の確認
 Fig. 9 Information on Pipe Materials Fig. 10 Check Items Before Jointing Fig. 11 Positions (b) of a Rubber Gasket Fig. 12 Distances (a) Between a White Line and the Socket Surface Fig. 13 Positions(b) and Distances(a)

(3)施工管理書類(竣工図書)の作成

入力情報から竣工図書を自動作成するWebアプリを作成し、自動作成した継手チェックシート、工事日報、管割図を閲覧・ダウンロードできるようにした(図14)。



図14 出力システム
 Fig. 14 Output System of WWIS

4-2 サイトチェッカー

4.2.1 サイトチェッカーの概要

サイトチェッカーは、伸縮する軸棒を受口端面に当て、ゲージがゴム輪に当たるまで押し込んで測定ボタンを押すことで、Bluetooth通信により受口端面からゴム輪位置までの距離の測定結果を施工情報システムに自動反映できる機器とした(図15)。



図15 サイトチェッカー
 Fig. 15 Image of Site Checker

4.2.2 サイトチェッカーの性能確認試験

サイトチェッカーの性能確認試験を実施した結果、施工情報システムへの通信、防水性能、施工性等に問題はなく、要

求性能を満足することを確認した(表2、図16)。

水・環境部門
 1
 水道管路工事向け「施工情報システム」の開発

表 2 サイトチェッカーの性能確認試験結果
Table 2 Performance Test Results

性能確認項目	試験結果	性能確認項目	試験結果
測定結果を施工情報システムに反映できること	○	過1回程度の充電で使用可能な電気容量があること	○
水深50mmで3分間水没させても内部に浸水がないこと	○	受口を地面に直置きした継手の管底部でも測定できること	○
軸棒を10万回繰り返し伸縮させても摺動性に問題がないこと	○	挿し口の種類によりサイトチェッカーの挿入位置が狭い場合でも測定できること	○

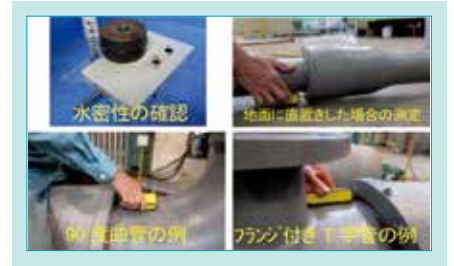


図 16 サイトチェッカーの性能確認試験
Fig. 16 Performance Test of Site Checker

4-3 サイトアングル

4.3.1 端末選定及びアプリケーションの開発

施工情報システム端末上で動作し、i-ReporterのカスタムURLスキーム機能を用いて起動できるアプリとし、iPhone搭載カメラで継手写真を撮影することにより即座に写真と角度算出結果を施工情報システムに反映できるようにした。

また、iOSプラットフォーム上で動作可能なOpenCVを活用して画像処理アルゴリズムを実装した(図17)。



図 17 サイトアングル
Fig. 17 Image of Site Angle

4.3.2 画像処理手法の開発

継手屈曲角度は線形代数処理を行うことで、水平方向の屈曲角度、垂直方向の屈曲角度を算出し、合成角度を計算するアルゴリズムを開発した。なお、継手チェックシートに添付する必要がある継手写真と画像解析用の写真を共通化するため、継手全体が映るように管からカメラまでの距離を決定した。継手屈曲角度の算出方法を以下に示す。

ここで、図18～図21は継手を上から見た平面模式図である。受口に向かって、継手は水平方向には左側に凸、垂直方向には上側に凸に屈曲した状態を示す。そのため、挿し口は受口から離れるほど直径(幅)を大きく示している。

(1) 水平方向の角度

- ① 画像を2値化し挿し口の上下の輪郭線を抽出後、精度の悪い輪郭線を除去して挿し口の中心線を概定

- ② 概定した中心線から輪郭線までの±σ内の距離データの輪郭線から、高精度な挿し口の中心線を抽出(図18)
 - ③ 挿し口と受口の中心線のなす角度を算出(図21)
- (2) 垂直方向の角度
- ① 挿し口を4分割し輪郭線4本を抽出後、精度の悪い輪郭線を除去して輪郭線を概定(図19)
 - ② 概定した輪郭線上に2値化小領域を重ねて配置し θ_1 、 θ_2 のデータ数を増加させた後、±σに入るデータのみを残して平均をとることで、高精度な θ_1 、 θ_2 を算出(図20)
 - ③ 呼び径及び水平方向の角度毎に用意した関数により $180^\circ - (\theta_1 + \theta_2)$ の計算結果を垂直方向の角度に変換(図21)
- (3) 合成角度
水平・垂直方向の角度の2乗和の平方根を算出

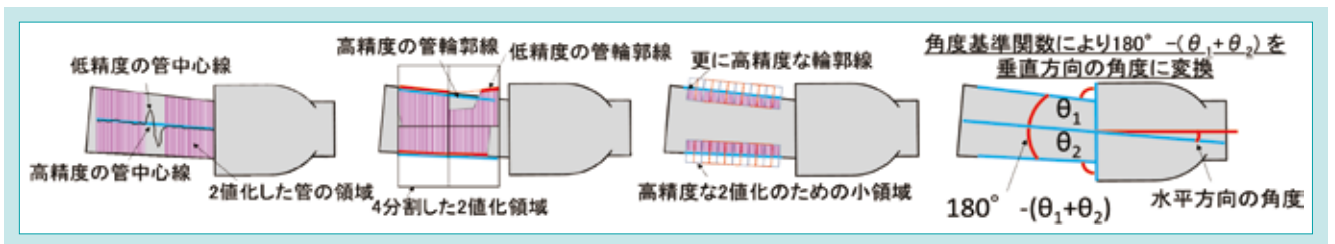


図 18 水平方向の角度算出 図 19 垂直方向の角度算出 図 20 垂直方向の角度算出 図 21 合成角度の算出
Fig. 18 Calculating the Horizontal Angle Fig. 19 Calculating the Vertical Angle Fig. 20 Calculating the Vertical Angle Fig. 21 Calculating the 3D-deflection Angle

4.3.3 サイトアングルの性能確認試験

厳密に8度屈曲した一体継手を製作し、ラボベースでの画像処理精度を検証した。垂直上方向に8度屈曲した状態から垂直下方向に8度屈曲するまで10度ずつ回転させた画像を撮影して継手屈曲角度を算出した結果、算出誤差は最大0.46度であり、目標の±0.5度以下を満足した(図22、表3)。

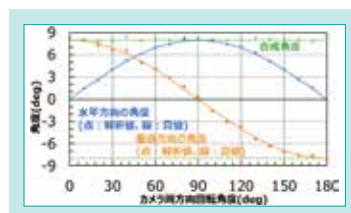


図 22 ラボベースでの精度検証結果
Fig. 22 Results of Analysis and True Values

表 3 ラボベースでの検証結果
Table 3 Analysis Accuracies on a Lab Basis

	平均誤差 (deg)	最大誤差 (deg)
水平方向の角度	0.13	0.32
垂直方向の角度	0.24	0.40
合成角度	0.18	0.46

4.3.4 撮影治具の開発

CADシミュレーションを行った結果、最小口径である呼び径75の継手では垂直方向に許容曲げ角度(4度)屈曲しても画像上の管外径変化量が50pixel程度に留まり、カメラ位置及び姿勢を高精度に制御する必要があることが判った(図23)。そこで、現場での簡易な操作でカメラを受口に対して0.1度以内の傾きで固定できる撮影治具を開発した(図24)。

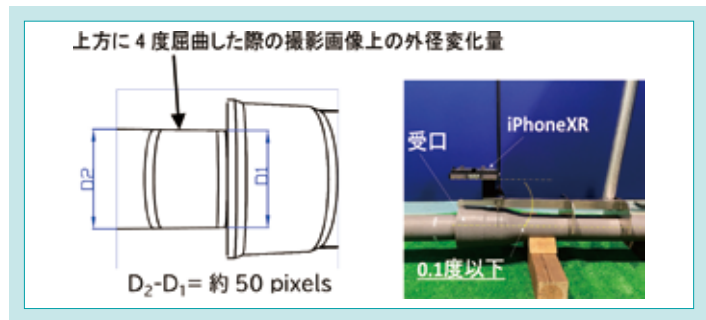


図 23 外径変化量のCADシミュレーション
Fig. 23 Difference in Diameters

図 24 専用撮影治具
Fig. 24 Photographing Jig

4.3.5 管挿入量判定機能の開発

現状は、挿し口白線①の幅の中に受口端面が合っているか確認することにより(図25)、挿し口挿入量が適正であるか確認しているが、管底部の確認が困難であるという課題があった。そのため、サイトアングルで使用する継手写真に、管の挿入量が規定範囲内であるか目視確認できるマークを表示させ白線②との重なりをチェックすることにより作業者が容易に管の挿入量が適正であるか確認できるようにした(図26)。

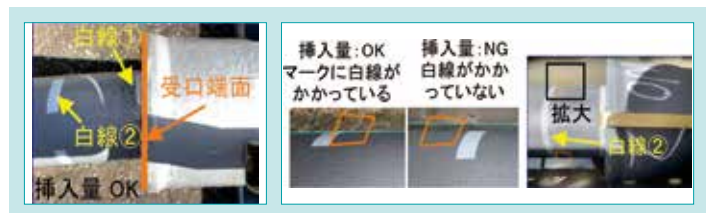


図 25 管挿入の確認
Fig. 25 Checking the Degree of Pipe Insertion by Visual Inspection

図 26 管挿入量判定機能
Fig. 26 Checking the Degree of Pipe Insertion Using Marks

4-4 各システムの現場試行結果

施工情報システム及びサイトアングルの実際の工事現場での試行結果を以下に示す。なお、サイトチェッカーは試行工事現場が決定した段階であり、順次試行していく予定である。

(1)施工情報システム

合計66工事6,250継手で試行した結果、現場での情報入力に問題はなく、竣工図書(継手チェックシート、工事日報、管割図)の自動作成機能にも問題はなかった。また、1継手当たりの入力時間は手書き作成と同等(1~2分)であり、工事後の竣工図書作成作業時間(1日あたり平均30分)を削減できることが判った。

(2)サイトアングル

施工現場において合計13継手で試行した結果、直射日光が当たる、湧水がある等の精度悪化条件があったものの、全継手で約0.5度の誤差で算出でき、従来の測定方法(誤差0.9度)よりも高精度に測定可能であった。解析時間は1継手当たり約2秒であり、目標の10秒以内を満足した。また、管の挿入量も全継手で正しく目視判定できることを確認した。

5. おわりに

水道管路工事向け「施工情報システム」を開発した。

接合要領書に沿った作業手順への誘導による「適切な施工の促進」、竣工図書の自動作成機能による「施工管理書類作成作業の効率化」、サイトチェッカー・サイトアングルとの連携により「施工管理数値の正確かつ確実な記録」を実現することができた。

現在、水道管路工事の施工品質向上及び効率化が可能なツールとして採用活動を展開中であり、複数の水道事業者での採用が進んでいる状況である。

今後も継続して水道管路の更新率向上、安全安心な水道管路の構築に貢献できる製品やソリューションの開発に努めていく。

SDGsのターゲットへの貢献

- 6.1 安全で安価な飲料水のアクセス強化 水道管路工事の管路更新率をアップさせ、上下水道インフラ整備に貢献
- 11.5 災害による死者・被災者の削減、経済的損失の減少 安全安心な水道管路の提供で経済的損失削減に貢献
- 12.8 持続可能な開発、ライフスタイルの普及啓発 人々の上下水道への意識を向上させ、持続可能な社会実現に貢献

参考文献

- 1) 公益社団法人日本水道協会:水道統計(平成30年度)

高精度な水道管路の老朽度評価方法の開発

Development of Highly Accurate Method for Predicting the Degree of Deterioration in Water Pipes

パイプネットワーク技術部／次世代研究第一部

国内には更新が必要な水道管路が多く存在している。水道事業体は健全な水道管路を維持していくことが求められているが、水道管路は埋設されており老朽度は判別しにくく、明確な管路の老朽度評価手法がないため、管路の更新が滞っているとされている。そこで、水道管路の更新促進策の一つとして、これまで蓄積してきた約6000件の調査データを基に、腐食のばらつきや外面塗装の防護期間を考慮し、かつ漏水事故率(件/年/km)として定量的に評価できる高精度な水道管路の老朽度評価方法を開発した。

【キーワード】

ダクタイル鉄管及び鋳鉄管、老朽度評価、管路更新

There are many domestic water pipes that need to be replaced. Although water utilities need to maintain pipelines to a high standard, pipe replacement has been actually delayed because it is difficult to evaluate the extent to which buried pipes have deteriorated, and there are no clear guidelines on how to evaluate pipe deterioration. Then, as part of an initiative to promote pipe replacement, using approx. 6000 of the accumulated survey data, we have developed a method that can predict the degree of deterioration in water pipelines with high accuracy. The method considers both variation and lag time of corrosion, and predicts pipe deterioration quantitatively as leakage probability (number/year/km).

【Key Word】

Ductile and Cast Iron Pipe, Degree of Deterioration in Water Pipes, Pipe Replacement

関連する SDGs



1. はじめに

国内の水道管路の多くは高度経済成長期(1954~1973年)に布設され、現在老朽化が進み更新が必要な管路が多く存在している。法定耐用年数を超過した管路の割合である経年化率は年々増加し続けている反面、更新率は漸減している¹⁾(図1)。現在の更新ペースでは、将来、漏水事故が多発し、全国至る所で漏水事故が社会問題化する懸念がある。

国内の導・送・配水管路の56.3%²⁾を占め、最も多く使用されているダクタイル鉄管は、法定耐用年数(減価償却の考え方による)は40年であるが、実際の耐久性は管の口径や埋設環境等により異なり、概ね60年以上と評価されている。したがって、法定耐用年数に従い管路を更新するのではなく、管路の老朽度を正しく評価して決定した更新優先順位にしたがって更新することで、効率的な

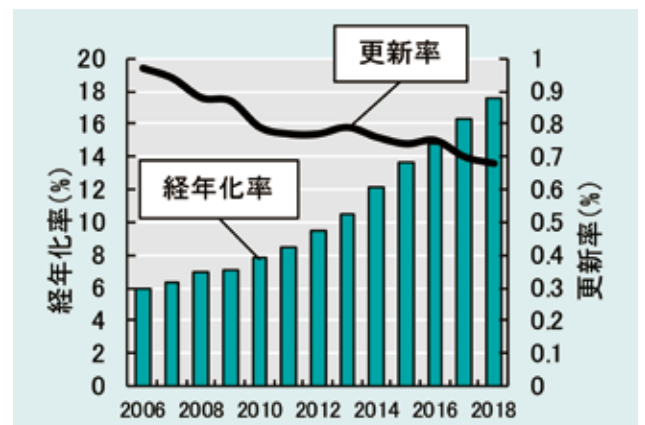


図1 国内の水道管路の経年化率及び更新率の推移
Fig. 1 Transition of Aging Rate and Replacement Rate of Domestic Water Pipes

予算で将来にわたって健全な管路を維持することが可能となると考えられる。

水道事業者の中には、老朽化した管路の更新に際して、更新優先順位付けが難しい水道事業者もあり、特に主要な管路に採用されているダクタイル鉄管の明確な老朽度評価指標が要望されてきた。一部の水道事業者では、独自に管体や土壌を直接診断することで、口径や埋設環境によって40～100年の更新基準年

数を設定している場合もあるが³⁾、特に比較的小さい規模の水道事業者では古い管から更新する機会が多いことから、明確な老朽度評価指標が必要と考えられる。

そこで、水道事業者の効率的な更新計画の立案を支援するため、国内主要管路であるダクタイル鉄管及び鋳鉄管の高精度な老朽度評価方法を開発した。

2. 開発のコンセプト

高精度な老朽度評価方法の開発コンセプトを以下に示す。

- (1)老朽度の定量的な評価ができること(例えば、漏水事故率(件/年/km)として算出)。
- (2)従来の老朽度評価方法(以下、従来方法)に比べて、漏水事

故の予測精度が向上していること。

- (3)腐食のばらつきや外面塗装の防護期間(以下、ラグタイム)を考慮できること。

3. 解決すべき技術課題

従来方法は、埋設土壌と管体の腐食深さに関する調査データを基に重回帰分析を行い、求めた対数回帰式により、埋設土壌の腐食性及び管の埋設年数に応じて老朽度を5段階の老朽度ランク(ランクⅠ～Ⅴ)に分類していた(表1)。これには以下の課題があった。

- (1)老朽度ランクによる定性的な評価しかできず、水道事業者が求める「漏水事故率(件/年/km)」のような定量的な評価ができていない。
- (2)腐食深さの予測精度が十分でないことから、漏水事故の予測精度が低い。
- (3)腐食深さの平均値を用いて予測するため、腐食のばらつきを考慮した評価ができていない。更に、実際の埋設管は、ラ

グタイムが存在することにより埋設後すぐには腐食しないが、埋設後すぐに腐食が開始するモデルとしており、実態との乖離がある。

表1 腐食深さと老朽度ランク

Table 1 Corrosion Depth and Degree of Deterioration

腐食深さ(mm)	老朽度ランク	判断
6.5～	Ⅰ	即時更新が必要
6.1～6.5	Ⅱ	早急に更新が必要
5.8～6.1	Ⅲ	管路によっては更新を検討
2.0～5.8	Ⅳ	10年以内に再診断
～2.0	Ⅴ	20年以内に再診断

※呼び径 75、ダクタイル鉄管(1種管)の例

4. 開発技術

4-1 漏水リスクモデルの構築

4.1.1 漏水リスクモデルの構築フロー

図2に漏水リスクモデルの構築フローを示す。クボタがこれまで蓄積してきた腐食深さ0 mmデータを含む約6000件の調査データを解析し、新しい老朽度評価方法に用いる漏水リスクモデルを構築した。

- (1)調査データを土壌の腐食性の違いによる4つの埋設環境に分類する。
- (2)4つの埋設環境毎に、腐食のばらつきやラグタイムを反映した腐食深さ予測モデルを構築する。
- (3)腐食深さ予測モデルを用い、腐食深さが管厚に達する確率を算出する漏水リスクモデルを構築する。

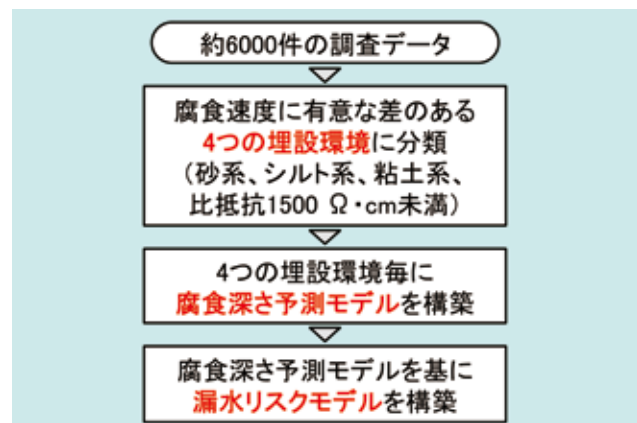


図2 漏水リスクモデルの構築フロー

Fig. 2 Construction Process of Leakage Risk Prediction Model

4.1.2 埋設環境の分類

表2に解析に用いた約6000件の調査データの概要を示す。最初に埋設環境データを分析し、様々な項目の中で土質と比抵抗が腐食速度に大きく寄与していることが分かった。

次に、土質と比抵抗を基に埋設環境を分類した。分類に際しては、それぞれが十分なデータ量を確保でき、かつ統計的な有意差ができることに留意しながら検討した。

表 2 解析に用いた約 6000 件の調査データの概要

Table 2 Outline of Approx. 6000 Pieces of Survey Data Used for the Analysis

調査対象	データ
管体 (ダクタイル鉄管、 鑄鉄管)	埋設住所
	管仕様(口径、管厚、布設年)
	最大腐食深さ(mm)
	腐食速度(mm/年)
埋設環境 (土壌を採取して分析)	土質
	比抵抗($\Omega \cdot \text{cm}$)
	含水比(%)
	pH(-)
	硫化物の有無(-) 等

その結果、図3に示すように、埋設環境を砂系、シルト系、粘土系、比抵抗1500 $\Omega \cdot \text{cm}$ 未満に分類すれば最適であることが確認された。

そこで、以下、この4つの埋設環境分類毎に解析を行った。

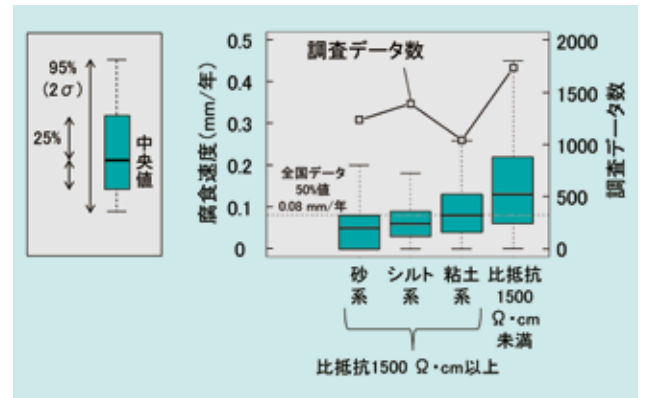


図 3 埋設環境分類毎の腐食速度の箱ひげ図
Fig. 3 Box Plot of Corrosion Rate of Each Buried Environment

4.1.3 腐食深さ予測モデルの構築

調査データの埋設年数と腐食深さの関係を、4つの埋設環境分類毎に調べることで、埋設環境分類毎、即ち土壌の腐食性毎に腐食深さを予測可能なモデルを構築した。

調査データの中には、ラグタイムにより腐食が開始していない腐食深さ0 mmデータが多く存在する。腐食深さ0 mmデータの割合から、ラグタイムの分布を推定することができ、推定したラグタイムを埋設年数から差し引くことで、埋設年数と腐食深さに明確な相関を得ることができた(図4)。

しかし、埋設年数が同じでもなお腐食深さにばらつきが存在する。そこで、腐食深さを平均値ではなく確率値として算出可能なモデルを考案した。

図5に腐食深さヒストグラムを用いた腐食深さ予測モデルの構築手順(粘土系、埋設20~30年での例)を示す。

- (1)腐食深さが任意の値を超過する確率(腐食深さ超過確率)を算出するモデルを、機械学習(ロジスティック回帰)の考えを活用し構築した。
- (2)埋設年数毎に(1)の回帰を行い、腐食深さ予測モデルを構築した。
- (3)ほかの埋設環境分類についても同様に腐食深さ予測モデルを構築した。

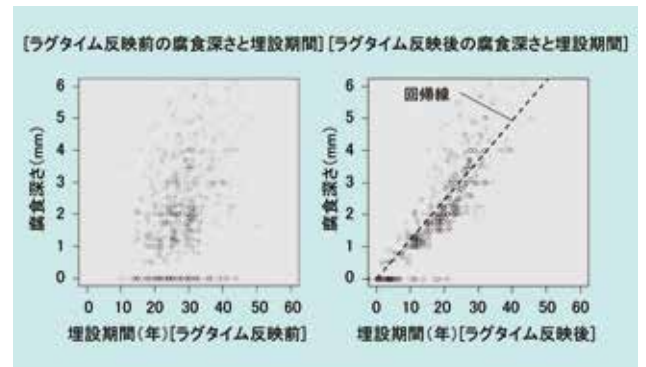


図 4 埋設年数(ラグタイム反映前後)と腐食深さの関係(粘土系での例)
Fig. 4 Relationship between Buried Period (Before and After Considering Lag Time of Corrosion) and Corrosion Depth (Case of Clay Type)

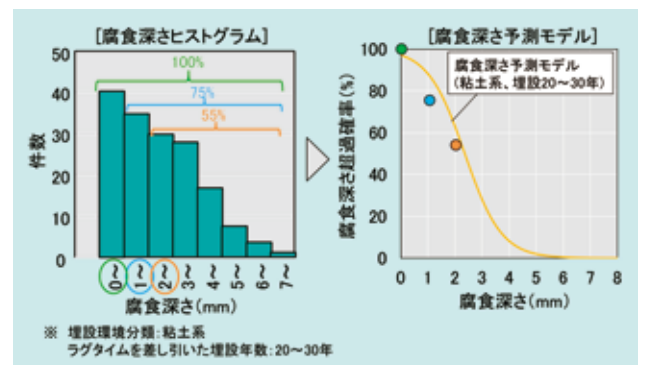


図 5 腐食深さヒストグラムを用いた腐食深さ予測モデルの構築手順
Fig. 5 Construction Process of the Corrosion Depth Prediction Model Using Corrosion Depth Histogram

水・環境部門
2
高精度な水道管路の老朽度評価方法の開発

4.1.4 漏水リスクモデルの構築

腐食深さが管厚に達すれば漏水が生じると考え、腐食深さ予測モデルを、管路の老朽度評価に適用可能な漏水リスクモデルに変換した。図6に腐食深さ予測モデルを用いた漏水リスクモデルの構築手順を示す(粘土系、管厚7.5 mmでの例)。

- (1)腐食深さ予測モデルで、腐食深さが管厚(例えば7.5 mm)を超過する確率(管厚超過確率)を埋設年数毎に求めた。
- (2)求めた管厚超過確率を漏水リスクとして埋設年数毎にプロットし、得られた関係式を漏水リスクモデルとした。
- (3)ほかの埋設環境分類についても同様に漏水リスクモデルを構築した。

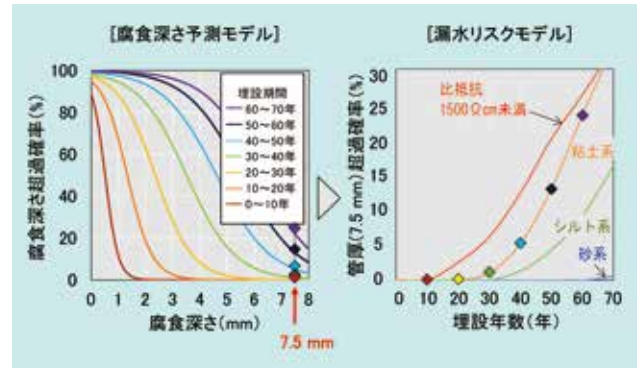


図6 腐食深さ予測モデルを用いた漏水リスクモデルの構築手順
Fig. 6 Construction Process of the Leakage Risk Prediction Model Using Corrosion Depth Prediction Model

4-2 漏水事故率の予測手法の開発

漏水リスクモデルでは管厚超過確率(%)を算出する。これを漏水事故率(件/年/km)に変換するためには、実際に発生する漏水の頻度(管路延長あたりの年間漏水件数)を把握し、適切な変換処理が必要となる。老朽度を漏水事故率として定量評価することができれば、漏水事故率が高い管路から更新した場合に、漏水事故件数(=漏水事故率(件/年/km)×管路長(km))をどの程度低減できるかを定量的に把握することができる。

図7に漏水リスクモデルによる管路の漏水事故率の解析方法を示す。管路データに4つの埋設環境分類マップを重ね

ることで、管路毎に埋設環境分類を定義し、管厚及び埋設年数から管厚超過確率を算出する。埋設環境分類マップは、約6000件の調査データ、及び一般公開されている全国の各種土壌、地質分布データを重ね合わせ、腐食速度に差のある4つの埋設環境分類を定義して作成した。算出した管厚超過確率に適切な変換処理を行うことで、漏水事故率の算出が可能と考え、複数水道事業者の管路データを解析して得られた管厚超過確率と実際に発生した漏水データとの比較を行った。

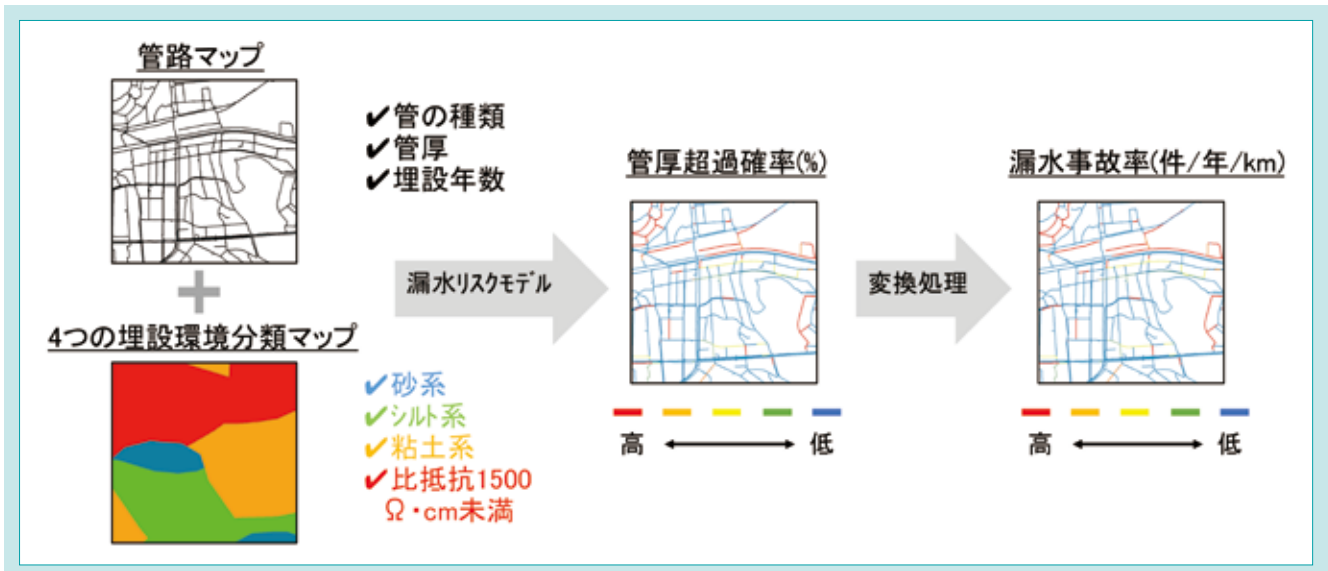


図7 漏水リスクモデルによる管路の漏水事故率の解析方法
Fig. 7 Method of Analyzing Leakage Probability using the Leakage Risk Prediction Model

図8に解析した管厚超過確率と実際の漏水事故率の関係を示す。管厚超過確率毎に管路延長と実際の漏水事故件数を集計し、漏水事故率を算出した。その結果、解析した管厚超過確率と実際の漏水事故率に明確な相関が認められ

た。ここで得られた管厚超過確率と漏水事故率の関係式を用いることで、管厚超過確率から漏水事故率を算出することが可能となった。

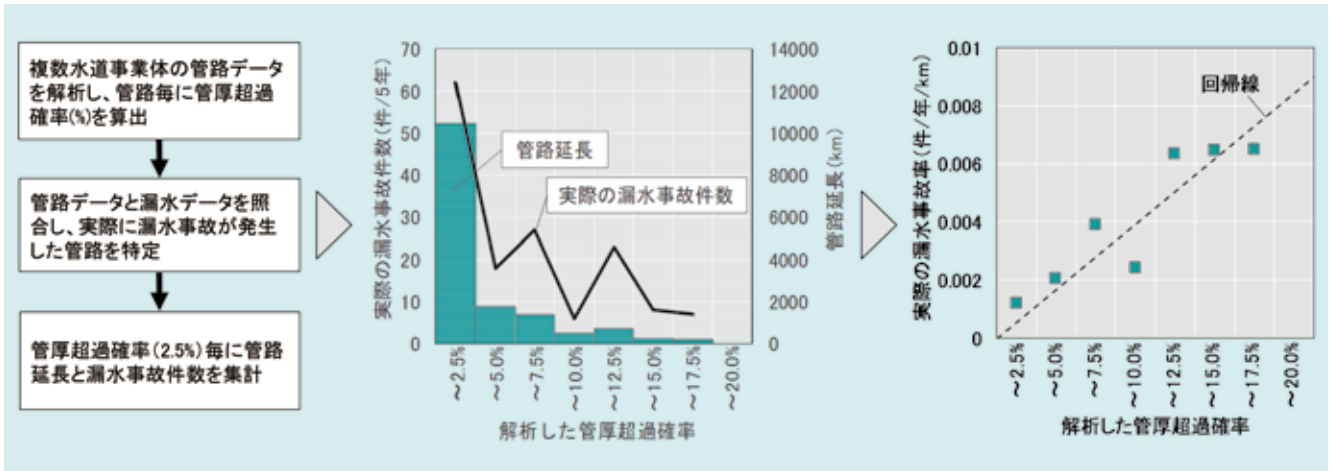


図8 解析した管厚超過確率と実際の漏水事故率の関係

Fig. 8 Relationship Between Analyzed Leakage Risk and Actual Leakage Probability

4-3 漏水事故の予測精度の検証

4.3.1 検証方法

図9に漏水事故の予測精度の検証方法を示す。過去のある時点での管路データを用いて管路毎の漏水事故率を予測し、それ以降5年分の腐食に起因する漏水事故と照合するこ

とで、漏水事故率が高い管路で実際に漏水が生じていたかを確認した。従来方法でも同様に確認し、新しい老朽度評価方法との比較を行った。



図9 漏水事故の予測精度の検証方法

Fig. 9 Method to Validate the Accuracy of Predicting Leakages

4.3.2 検証結果

図10に漏水事故の予測精度検証結果の一例(H事業者)を示す。予測した漏水事故率が高い順に管路を10%更新した場合、従来方法では漏水事故を57件から51件までしか減らせないのに対し、新しい老朽度評価方法では31件にまで減らすことができた。新しい老朽度評価方法を用いて管路を更新することで、同じ更新延長でも将来発生する漏水事故を低減できることが確認できた。

表3に漏水事故の予測精度検証結果の一覧を示す。予測した漏水事故率が高い順に管路を20%更新した場合、8事業者を合算して評価すると、漏水事故を従来方法では79件、新しい老朽度評価方法では39件まで減らせることから、従来方法に比べて漏水事故をほぼ半減できることが確認できた(図11)。

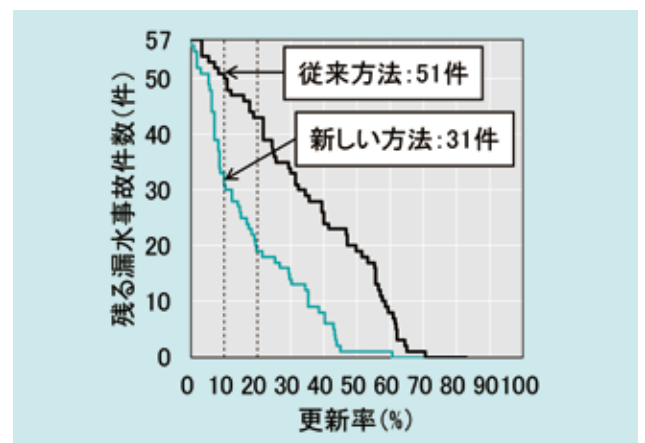


図10 漏水事故の予測精度検証結果の一例(H事業者)

Fig. 10 One Result Validating the Accuracy of Predicting Leakages (H Water Utility)

表 3 漏水事故の予測精度検証結果の一覧

Table 3 All Results Validating the Accuracy of Predicting Leakages

事業体	残る漏水事故件数(件)						
	更新なし	10%更新後			20%更新後		
		従来方法	新しい方法	評価	従来方法	新しい方法	評価
A	14	9	3	○	6	1	○
B	27	21	18	○	14	11	○
C	22	12	7	○	5	2	○
D	13	8	6	○	5	4	○
E	4	2	0	○	0	0	—
F	15	6	5	○	6	2	○
G	5	2	0	○	0	0	—
H	57	51	31	○	43	19	○
合計	157	111	70	○	79	39	○

評価基準 ○：従来方法と比較して残る漏水件数が少ない
—：いずれも0件のため評価対象外

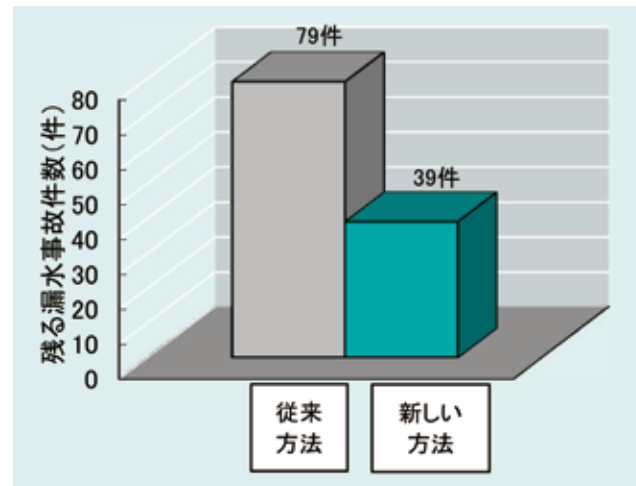


図 11 漏水事故の予測精度検証結果(更新率 20%、8 事業体合計)
Fig. 11 Results Validating the Accuracy of Predicting Leakages
(Top 20% Replace, Sum of 8 Water Utility)

5. おわりに

腐食のばらつきやラグタイムを反映し、漏水事故率を定量的に算出可能で、従来方法より精度の高い老朽度評価方法を開発した。複数の水道事業体の管路データ及び漏水データを用いた検証では、従来方法に比べて高精度に漏水事故を予測でき、将来発生する漏水事故をほぼ半減させることが可能であることが確認できた。

本技術を活用することで、投資効果を先取り・最大化できる管路の更新計画を立案でき、水道事業を支援することができると考える。

今後は、管路更新の実施計画や工事実施にも適用可能な手法をシステム化し、計画から工事完了までの流れをよりスマート化することで、水道事業、管路管理に貢献していきたい。

SDGs のターゲットへの貢献

- 6.1 安全で安価な飲料水のアクセス強化 漏水事故低減により修繕費用を削減し安全で安価な飲料水の提供に貢献
9.1 質の高い持続可能な強靱なインフラの開発 効率的な更新計画策定支援により強靱な管路の維持管理に貢献

参考文献

- 厚生労働省：「令和2年度全国水道関係担当者会議資料(資料編)」
<https://www.mhlw.go.jp/content/000793782.pdf>、(参照日2021-09-30)
- 日本水道協会水道統計編纂専門委員会：「水道統計の経年分析(平成30年度)」水道協会雑誌、89-1、(2020)、pp.85~128
- 厚生労働省：「参考資料 更新基準の設定事例」
<https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000617077.pdf>、(参照日2021-09-30)
- 川勝智ほか：「高精度な鉄部寿命予測式の管路データへの適用と漏水事故データを用いた予測精度の検証」令和2年度水道研究発表会講演集、(2020)、pp.348~349

マンホールポンプAI異常運転検知機能の開発

Development of Manhole Pump AI Abnormal Operation Detection System

水環境研究開発第一部／環境プラント設計調達部
環境プラント技術部／欧州イノベーションセンター

広範囲に数多く点在する下水圧送用マンホールポンプでは、管理の効率化のためクラウド監視システムの導入が増えている。ところが、取得される運転データが膨大なため、維持管理者は日常的な確認が困難になり、異常な運転状態があっても気付かず、故障が発生してからの緊急対応を余儀なくされている。そこでクボタでは、AI・機械学習技術を用いた異常運転検知機能を開発した。AIが人に代わって運転データを分析し、異常な運転状態を通知するため、維持管理者は効率的な予防保全が可能になる。本稿では、開発した2方式のAI機能の詳細に加え、国土交通省B-DASHプロジェクトで実証した本機能の有効性について述べる。

【キーワード】

AI、機械学習、IoT、マンホールポンプ、予防保全

For manhole pumps for sewage pumping, which are distributed over a wide area, the adoption of cloud monitoring systems has increased recently in order to improve management efficiency. However, due to the huge amount of operational data acquired, it is difficult for maintenance managers to check daily, and even if an abnormal operating condition occurs, they are not aware of it and are forced to take emergency measures after a failure occurs. Therefore, Kubota has developed an abnormal operation detection system using AI / machine learning technology. Since AI analyzes operation data on behalf of humans and notifies abnormal conditions, maintenance managers can perform efficient preventive maintenance. In this paper, in addition to the details of the two AI functions developed, the effectiveness of these functions demonstrated in the B-DASH project of the MLIT will be described.

【Key Word】

AI, Machine Learning, IoT, Manhole Pump, Preventive Maintenance

関連する SDGs



1. はじめに

マンホールポンプとは、家庭等から出る生活污水を集めて下水処理場へ圧送するポンプ施設である。マンホール内にポンプ設備が組み込まれ、道路の下に埋設される形で設置されており、2台一組の水中ポンプが水位によって交互に運転される制御が一般的である(図1)。1980年代から下水道の普及に合わせて設置が進み、現在では全国に約6万カ所以上が存在するとされる。多い所では数百カ所を有する自治体もあり、市街地や集落の分布、また土地の起伏や河川などの地形に応じて、市域内の広範囲に点在している。

設備数が非常に多いため、管理を効率化すべく、クボタではKSIS(Kubota Smart Infrastructure System)によるクラウド監視システムを提供している。マンホールポンプの地上には制御盤が設置されており、この中にKSISのIoT(Internet of Things)通信端末(図2)が設置され、運転データを無線インターネット通信を介してクラウドサーバに送信する。マンホールポンプを維持管理する自治体職員や、自治体から委託を受けたメンテナンス業者は、クラウド画面上でそれらの稼働状況を監視できる(図3)。また、帳票出力機能や故障発生時のメール通報機能も備えている。

このたびクボタでは、クラウド監視システムの新機能として、AI(Artificial Intelligence: 人工知能)技術を用いた異常運転検知機能を開発した。AIが人に代わって運転データを分析することで、異常状態の早期通知が可能となる。これにより、設備が緊急停止する前に対策を打つことができ、効率的な維持管理が可能になる。



図1 マンホールポンプユニット(左)と水中ポンプ(右)
Fig. 1 Manhole Pump Unit and Submersible Pump



図2 KSISのIoT通信端末MU-1000シリーズ
Fig. 2 KSIS IoT Terminal MU-1000 Series



図3 クラウド監視画面の例
Fig. 3 Cloud Monitoring Screen Example

2. マンホールポンプの維持管理

マンホールポンプでは、生活污水を扱うことから異物が流入するケースが多く、それらの堆積によるポンプ内部の閉塞や、回転部への噛み込みによる過負荷といった故障が発生しやすい。故障によりポンプが運転不能になった場合、維持管理者は現地へ赴き異物除去などの対応を行うが、マンホールから汚水が溢れないよう、緊急性が求められることが負担になっている。また、平常時の定期点検においても、巡回箇所が広範囲に数多く点在することが負担になっている。

前述のクラウド監視システムを利用して水位変動グラフやポンプ電流値、また運転時間や運転回数の傾向変化を日々確認する

ことで、不具合の兆候があった際に気づくことができる。ところが実情としては、対象となる設備数が多いため監視データが膨大になり、維持管理者が日常的に全数をチェックすることがほぼ不可能な状況にある。更には、近年の担い手不足の背景によって、こういった状況に益々拍車がかかっている。

そのため、ポンプに不具合が生じた際は、故障通報を受けて初めて状態を認識し、夜間や休日であっても緊急対応しているのが現状である。せっかくクラウド監視システムを導入していても、データが有効活用できず、事後保全型のメンテナンスにならざるを得ない実態があった。

3. 開発のコンセプト

今回の開発にあたっては、AIが人に代わってマンホールポンプの運転データを監視し、異常な運転があればお知らせすることをコンセプトとした。

このAIを用いることで、膨大な運転データから「いつも」と違う運転、すなわち異常運転を自動的に検知することが可能になる。人が1施設ずつ入念に確認しないと判別できないような運転変化の検知も、AIであれば自動で・大量に・判定基準の個人差なく、処理

が可能である。維持管理者は、AIから異常運転の通知があったときのみ当該マンホールポンプの詳細な稼働グラフ等を確認し、緊急度や地理特性などを考慮して、対応の内容やタイミングを検討する。重大な故障に至る前に対応でき、夜間休日の緊急対応でなく平日昼間に計画的に対応できるため、維持管理の効率化が可能である。すなわち、開発したAIは予防保全型のメンテナンスを実現するものである(図4)。

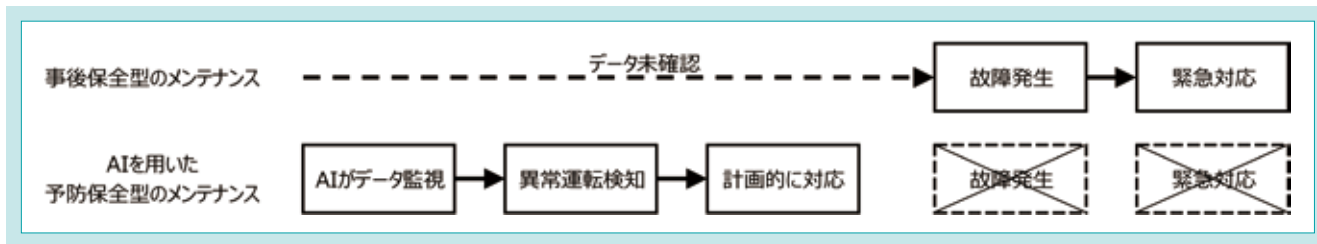


図4 AIを用いた予防保全型のメンテナンスの流れ
Fig. 4 Flow of Preventive Maintenance Using AI

4. 開発技術

4-1 クボタ技術者の判定を学習した AI

開発したAIには、クボタで長年マンホールポンプに携わったベテラン技術者の異常/正常判定を機械学習によって学習させた。これによってデータ空間上では異常/正常データの境界線が作成される。特徴量(AIに与えるデータ)の選択や前処理でのデータ加工、また機械学習のパラメータのチューニング等を幾通りも試行錯誤した結果、クボタ技術者の判定を9割以上再現するAIが完成した。

運用時は、新しく入力されるデータ点が境界線の内側であれば正常、外側であれば異常と判定される(図5)。

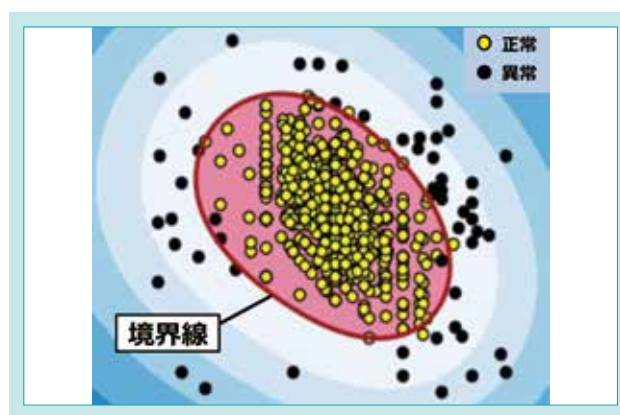


図5 学習された境界線のイメージ
Fig. 5 Image of Learned Border

4-2 特徴量の異なる2方式

前述のコンセプトや機械学習手法は共通とした上で、特徴量の異なる2方式の異常運転検知技術を開発した。1つは水位と電流値のデータを用いたもの、もう1つは運転時間と運転回数のデータを用いたものである。ここでは前者をアナログ版、後者をデジタル版と呼称する。これはIoT端末で取得するデータ信号がアナログ入力(連続値)かデジタル入力(接点)かに由来する。

アナログ版とデジタル版の比較表を表1に示す。両者の違いで特徴的な点は、アナログ版では水位や電流を連続値として計測するためのセンサが必要な点である。情報量の豊富なデータをAIに与えられるため、詳細な異常原因推定が可能であるが、センサ設置やデータ通信量が多いため導入コストは高くなる。このため高機能版の位置付けである。一方のデジタル版ではそのようなセンサは必要ないため、導入コストが低く、普及型の位置付けである。

クボタのベテラン技術者の判定を学習させている点、それに基づいて施設ごとに通常運転の範囲がAIによって自動設定される点、通常運転の範囲から外れた運転データがあった場合に異常運転と判定する点、通常範囲からの外れ度合に応じて異常レベルを算出し提示する点などは共通である。

更に、異常運転の有無だけでなく推定される異常原因を提示する点も共通である。ただし、アナログ版では「詰まり」や「水漏れ」といった詳細まで提示するのに対し、デジタル版では1号機か2号機のどちらに原因があるかを推定するに留まる。推定原因が提示されることで、維持管理者は緊急度の判断や、点検に携行する道具の選定、現地での確認箇所の順番付けといった段取りが容易になり、より一層メンテナンス作業の効率化が可能になる。

表1 アナログ版とデジタル版の比較表
Table 1 Table Comparing Analog and Digital Versions

項目	アナログ版	デジタル版
利用するデータ	マンホール水位 ポンプ電流値 ポンプON/OFF時刻	ポンプON/OFF時刻 (⇒運転時間・運転回数)
追加センサ	水位センサ 電流センサ	(不要)
異常原因推定	詳細原因まで提示	異常号機の提示のみ
導入コスト	高い	低い
位置付け	高機能版	普及型

4-3 アナログ版 AI 異常運転検知技術

4.3.1 考え方

アナログ版では、水位と電流値のデータを利用する。マンホール水位の時系列変化のデータから、ポンプ運転1回あたりの水位の低下速度が算出可能であり、これはポンプの排水能力を表す指標と言える。ポンプ内部に異物が詰まるなどして流路が閉塞すると通常時に比べて排水能力が低下するため、異常を捉えることができる。

4.3.2 検知事例①

ポンプ内部のインペラ周りに繊維質の異物の絡みつきがあった事例である。異物が擦れながら運転されるため、摩擦抵抗が生じてポンプ電流値が高くなったことをAIが検知した。異物の性状から、ある程度の日数をかけて徐々に蓄積されたものであり、このまま蓄積が進めば過電流が生じて故障発報に至っていたと想定される。

本事例において、AIでは現地調査の約40日前から既に異常運転を検知し、異常判定が継続していた(図6)。また、原因推定でも「羽根車へのゴミ絡み」を予測しており、実物状態と合致していた。したがって、実運用上はその期間を利用することで十分に計画的な対応が可能と考えられる。

一方のポンプ電流値は、運転中のポンプの負荷状態を表す指標である。例えばポンプの羽根車に異物が絡んでケーシングと擦れながら運転される場合、摩擦抵抗が増えて通常時よりポンプ負荷が高くなるため、異常を捉えることができる。

これらはポンプの状態をより直接的に表す指標であり、これらの特徴量としてAIに与えることで異常運転検知を実現した。

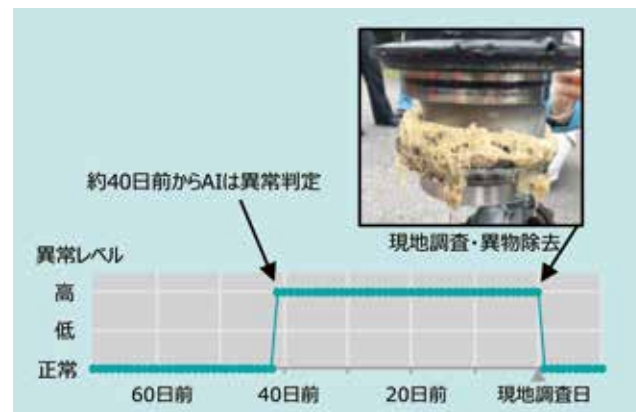


図6 検知事例①
Fig. 6 Detection Case 1

4.3.3 検知事例②

2号ポンプの排気弁の配管に異物の詰まりがあった事例である。ポンプ内の空気溜まりが排出されないため空運転状態になっており、排水能力が低下していたことをAIが検知した。この施設では排水運転中に一定時間が経過するともう片方の号機に運転が切り替わる制御になっていたため、本来であれば2号ポンプによって排水されるべき場合も、後続の1号ポンプの運転によって排水自体は完了できており、故障が発報されることはなかった。

この事象の約1年前からAIでは断続的に異常判定が出ており、後半ではほぼ継続して異常判定となっていた(図7)。また、原因推定でも「排気弁の詰まり」を予測しており、実物状態と合致していた。長期間の空運転は、無駄なエネルギー消費や機器寿命の減少を引き起こす。AI判定に基づいて期間中の早期のタイミングで現地点検を行っていれば、詰まりを解消し、長期間の異常運転を回避できた可能性がある。

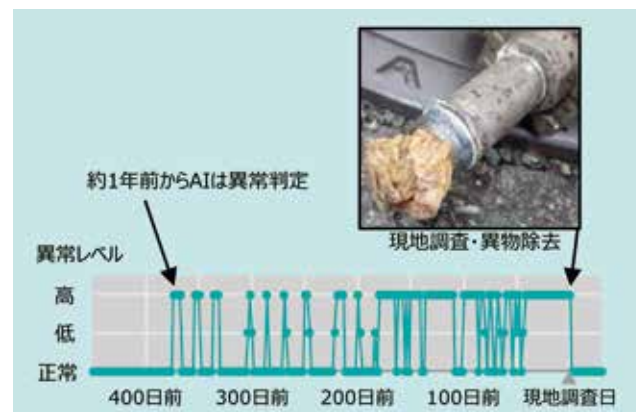


図7 検知事例②
Fig. 7 Detection Case 2

4-4 デジタル版 AI 異常運転検知技術

デジタル版では、運転時間と運転回数のデータを利用する。IoT端末に入力される信号はポンプON/OFFの接点信号のみであるが、それらが時刻情報つきデータとして取得され

るため、運転時間や運転回数を算出可能である。

マンホールポンプは基本的に2台一組の交互運転のため、通常であれば1日あたりの運転時間や運転回数は2台でほぼ

同じになる。どちらかの号機に不具合が生じるとそのバランスが崩れるため、異常を捉えることができる。例えば1号機の排水能力が低下した場合、1号機の運転時間が長くなる。

運転時間や運転回数はポンプの状態を間接的にしか表せ

ない指標ではあるが、最小限の情報量を用いて低コストながらも実用に足る異常運転検知を実現できた。

次章では、このデジタル版を用いたフィールド実証実験について詳述する。

5. B-DASH プロジェクトによるフィールド実証

5-1 概要

開発したデジタル版AI異常運転検知技術を用いて、国土交通省の下水道革新的技術実証事業(通称:B-DASHプロジェクト)に参画し、実フィールドにおける実証実験を行った。B-DASHプロジェクトとは、下水道分野における革新的技術の普及展開を目的とし、国土交通省が主導するプロジェクトである¹⁾。クボタのデジタル版AI異常運転検知技術が令和2年度のテーマ「IoTとAIを活用した効率的予防保全型マン

ホールポンプ維持管理技術の実証事業」として採択され、クボタはクリアウォーター-OSAKA株式会社、大阪府河内長野市、愛媛県今治市、岡山県赤磐市とともに5者の共同研究体として参画している。3自治体のマンホールポンプ合計194カ所を対象に、AIの検知性能や維持管理の効率化の効果について検証した。ここでは、2021年6月までに得られた結果について報告する。

5-2 実証項目及び実証結果

5.2.1 AI検知性能

AIが各マンホールポンプ施設について毎日出力する異常判定結果に基づいて現地調査を行い、実物の状態を確認することでAI判定の正しさを検証した。AI検知性能は機械学習分野で頻繁に用いられる、図8の考え方で定義し評価した。

延べ531回の現地調査を実施した結果を図8に併記する。検出率の目標値70%以上に対して73.8%、正解率の目標値70%以上に対して96.0%となり、いずれも目標を達成した。開発したAIの実用性が証明された形である。現地調査で判明した異常事例の一部を図9に示す。

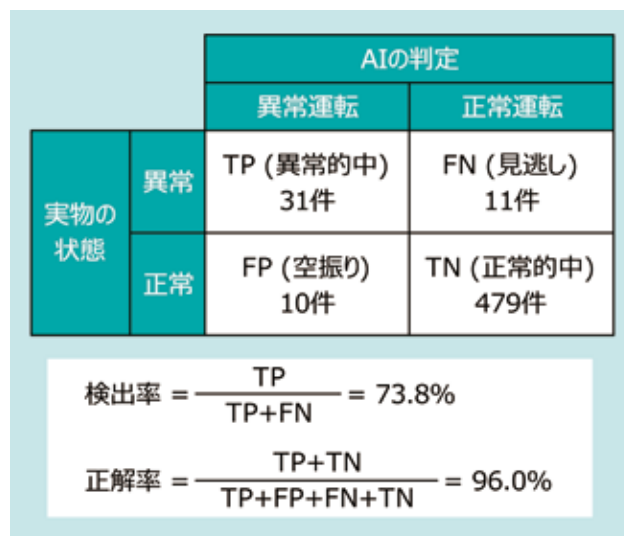


図8 AI 検知性能の評価

Fig. 8 Evaluation of AI Detection Performance



図9 検知された異常事例

Fig. 9 Abnormal Cases Detected

5.2.2 緊急出動回数の低減効果

AI技術を活用した予防保全を行うことにより、故障発生による緊急出動回数が減少することを、AI技術導入前の過去実績と比較することで検証した。結果を表2に示す。なお、実証結果では過去実績と算出期間長を合わせるための換算を行ったほか、落雷による停電など人であっても事前に予知できない事象は対象外とした。

結果は緊急出動回数の低減率83%となり、70%以上としていた目標を達成した。緊急出動はマンホールポンプ維持管理業務の中でも特に労務的・心理的負担の大きい業務であり、これを大幅に低減できた形である。これによって担い手の確保や維持管理コストの削減が期待できる。

5.2.3 異常運転時間の削減効果

AI技術を用いた予防保全によって異常要因を早期に取り除くことで、マンホールポンプが異常状態のまま運転される期間が削減されることを、実証中に検知した異常事例に基づく試算により確認した。異常が生じると運転時間が長くなる場合があり、これは通常時に比べて余分な運転時間が生じていることになる。仮にAIを導入していなければ、次の定期点検のタイミングまで異常が発見されないため(図10)、それまでの期間で発生する余分な運転時間の合計を算出し、それが削減できると仮定した試算を行った。

結果は異常運転時間の削減率22%となり、11%以上としていた目標を達成した。これによって無駄なエネルギー消費や、機器寿命減少の抑制が期待できる。

表 2 緊急出動回数の低減結果

Table 2 Results Showing Reduction in Emergency Dispatches

		河内長野市	今治市	赤磐市	合計
実証対象マンホールポンプ数		80カ所	82カ所	32カ所	194カ所
緊急出動回数	過去実績(回/年)	72	52	30	154
	実証結果(回/年換算)	20.8	2.3	2.2	25
緊急出動回数の低減率		71%	95%	93%	83%

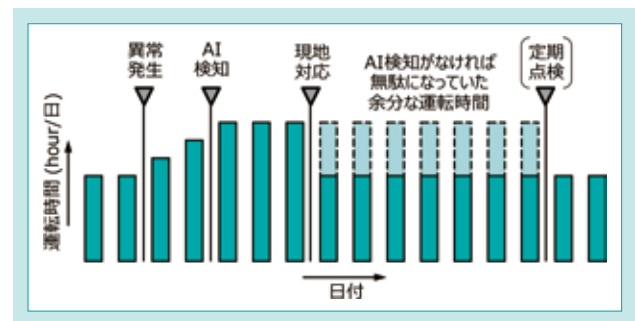


図 10 異常運転時間の削減イメージ

Fig. 10 Image Showing Reduction in Abnormal Operation Time

6. おわりに

AI技術という先進分野と、クボタが長年培った製品技術力を組合せたことで、これまで活用できていなかった運転データを有効活用し、マンホールポンプの効率的な予防保全に繋げることができるようになった。高機能版であるアナログ版、普及型であるデジタル版の2方式のAI異常運転検知機能を開発し、いずれも実際の検知事例でその有効性を示した。

アナログ版については、本稿執筆時点で既に25の自治体、約700カ所(準備中含む)のマンホールポンプで利用いただい

る。デジタル版においては、B-DASHプロジェクトを通じてAIの性能のみでなく実際の維持管理における導入効果の高さを確認できた。B-DASHプロジェクトの取組みは現在も継続中であり、今後は運用面での使い勝手などを評価していく予定である。

マンホールポンプに限らず、インフラ施設の維持管理においては、老朽化や担い手不足といった共通の課題がある。今後も、AIなど先進的な技術をいち早く取り入れて実用化し、普及展開を図ることで、社会的な課題解決に貢献していく所存である。

SDGs のターゲットへの貢献

- 6.2 下水施設・衛生施設へのアクセスの強化 予防保全型メンテナンスで下水道インフラの維持に貢献
- 9.1 質の高い持続可能かつ強靱なインフラの開発 担い手不足をAIで代替することで持続可能性に貢献
- 11.1 安全かつ安価な基本的サービスへのアクセス確保 維持管理の効率化でコスト低減に貢献

参考文献

- 1) 国土交通省 国土技術政策総合研究所 下水道革新的技術実証事業(B-DASHプロジェクト)
<http://www.nilim.go.jp/lab/ecg/bdash/bdash.htm>

ほ場水管理システム「WATARAS(ワタラス)」直接通信(LTE-M)型の開発

Development of "WATARAS" (LTE-M), Water Remote Management System in Paddy Fields without Gateway Device

水環境研究開発第一部／株式会社クボタケミックス 研究部

ほ場水管理システム「WATARAS (ワタラス)」は、ほ場の給排水をスマートフォンやパソコンでモニタリングしながら遠隔・自動で制御できるシステムで、水管理労力の低減、節水、及び水管理のデータ化とその活用にメリットがある。今回報告する直接通信(LTE-M)型は、ほ場に設置する電動アクチュエータが公衆回線に直接的に接続する通信方式で、既存製品では必須となる通信中継機を必要としないため、これまでは難しかった遠隔地や中山間地での設置・使用が可能となる、本システムを補完する製品である。

【キーワード】

ほ場、ワタラス、水管理、遠隔地、中山間地、通信中継機、労力低減、節水

The water remote management system "WATARAS" can remotely and automatically control the water supply and drainage of paddy fields while monitoring them with a smartphone or personal computer. The benefits include reducing manhours spent on water management, conserving water resources, and digitizing and utilizing water management. The direct communication (LTE-M) type reported in this article is a communication method in which the electric actuator installed in the paddy field connects directly to the public radio wave (cellular wave), and it does not require a gateway device that is indispensable for existing products. It can be installed and used in remote or mountainous areas; something that was difficult until now.

【Key Word】

paddy fields, WATARAS, water management, remote area, mountainous area, LTE-M, IoT, gateway, reducing manhours spent on water management, saving water

関連する SDGs



1. はじめに

1-1 WATARAS について

WATARAS (ワタラス) とは、研究開発国家プロジェクト「戦略的イノベーション創造プログラム」の「次世代農林水産業創造技術」によって「国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構」(以下、「農研機構」という。)が中心となって開発した技術を基盤とした、ほ場の水管理システムである。日本の農家人口は2010年 時点の261万人(平均年齢65.8歳)から、2015年 時点では210万人(66.3歳)と、5年間で50万人減少しており、農家の著しい高齢状態も続いている¹⁾。そのため日本再興戦略²⁾において、担い手農家による農地利用を2014

年末の5割から10年間で8割へ増加させることとしている。

水稲作の労働のうち水管理に関わる作業は、日々の経常的な作業であるが自動化が進んでいない。そのため全労働時間の約30%を占めており、これは特に分散農地を管理することがある担い手農家にとって大きな負担となっている¹⁾。クボタケミックスは、この問題の解決に取り組む前述の開発に参画してWATARASを製品化、2018年から販売を開始している。

WATARAS導入のメリットは、図1に示す「軽労」、「節水」、「タイマー」、「データ化」の4点である。農研機構の試験結果

では、これらの効果として次のことが確認されている。

- ・水管理に要する労働時間は、約8割削減
- ・用水量は、約5割減少
- ・水位制御したほ場は、降雨時を除いて設定水位を維持
(いずれも農研機構所内の試験ほ場と対照ほ場との比較)
更にはスケジュール運転機能や取得したデータを活用することによって、精密農業の実現に寄与し得るシステムである。

加えて、大区画化などのほ場整備事業での採用を考慮し、製品寿命を10年として設計。更に電子部品の交換によって20年以上の長期使用、及び通信方式変更へ対応可能としている。

WATARASは販売開始から4年目となり、日本各地で約1800台(2021年8月末現在)の電動アクチュエータ(ほ場の給・排水設備の遠隔開閉操作を可能にする、WATARASの主要機器)が設置・運用されている。

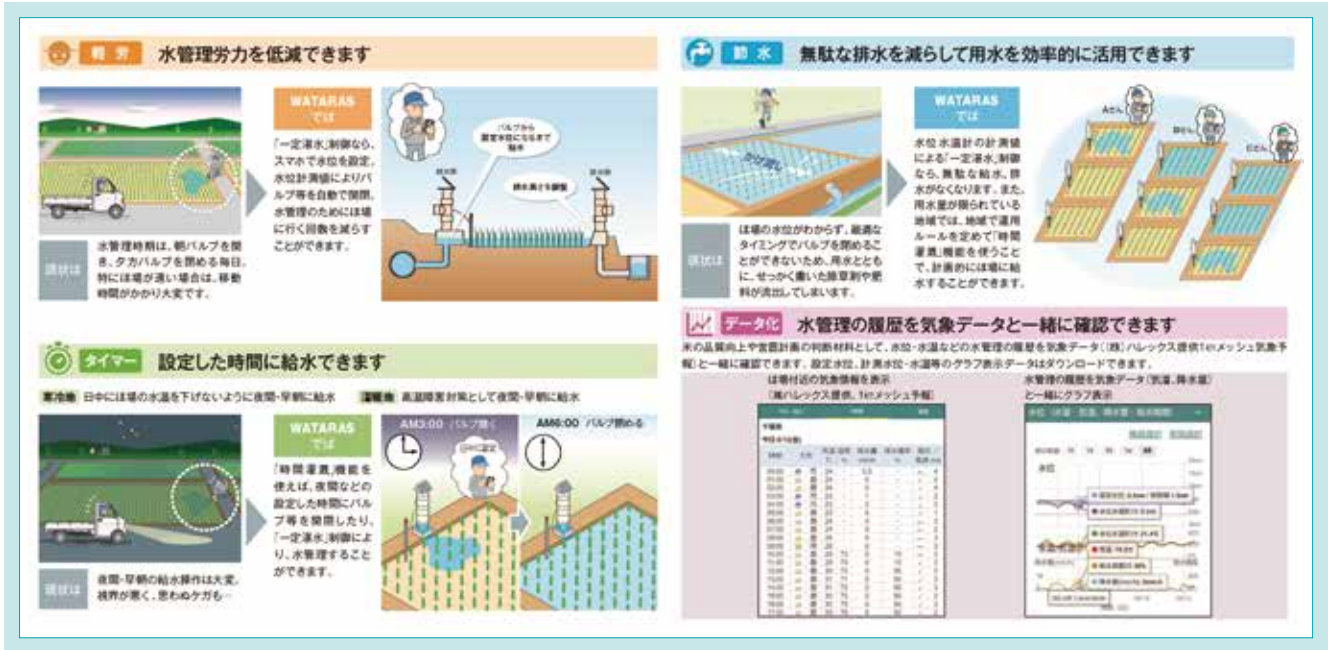


図1 WATARAS 導入のメリット
Fig. 1 Advantages of introducing WATARAS

1-2 既存の通信方式：通信集約 (LoRa) 型

WATARASはスマートフォンやパソコンから操作する。これらから出した制御命令はクラウドサーバを通じてほ場に設置した電動アクチュエータに送信される。それとともに電動アクチュエータや水位水温計からの計測値がクラウドサーバに送信・保存され、スマートフォンやパソコンから閲覧・利用できる。

通信方式には販売開始当初から通信集約(LoRa)型を採用してきた(図2)。これはほ場近隣の建屋などに設置された通信中継機(ゲートウェイ)を介してクラウドサーバと電動アクチュエータとを接続する方式で、クラウドサーバと通信中継機

の間は公衆回線(携帯通信網)、通信中継機と電動アクチュエータの間は長距離通信が特徴でライセンス不要なLoRaとしている。この方式は通信中継機1台(公衆回線1本)で電動アクチュエータを40台(無線ボックス追加によって80台)まで接続可能なことから、多くのほ場を管理する場合には、通信費の経済性が高い。なお、通信中継機と電動アクチュエータの推奨距離は、障害物などを考慮する場合は1~2 km、良好な条件下では5 kmである。

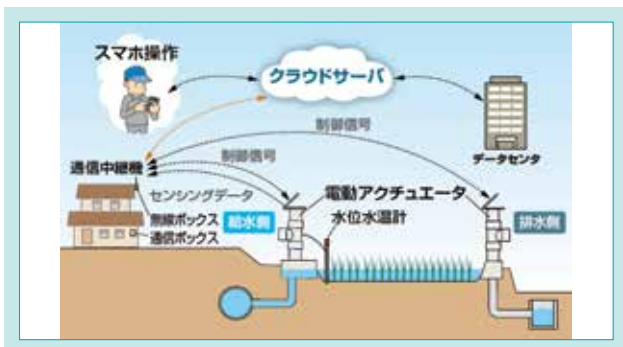


図2 システム構成：通信集約 (LoRa) 型
Fig. 2 System configuration: Communication aggregation (LoRa) type

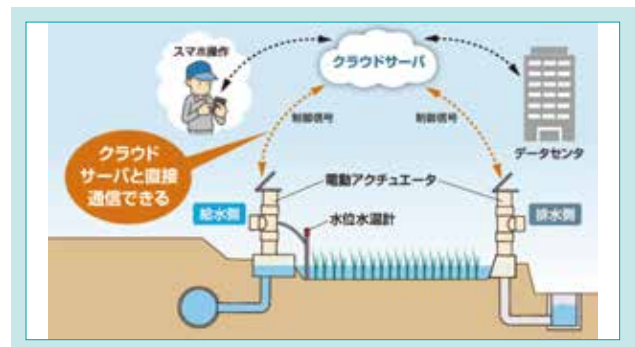


図3 システム構成：直接通信 (LTE-M) 型
Fig. 3 System configuration: Direct communication (LTE-M) type

1-3 今回報告する通信方式：直接通信 (LTE-M) 型

直接通信(LTE-M)型は、クラウドサーバと電動アクチュエータとの通信を公衆回線によって直接行う方式で、通信中継機を

必要としない(図3)。離れた場所にある少数のほ場や、無線が届きにくい中山間地、及び実証での設置に有利な方式である。

2. 開発のコンセプトと目標値

2-1 開発のコンセプト

直接通信(LTE-M)型の開発のコンセプトは、既存の通信集約(LoRa)型の通信方式では難しかった遠隔地や中山間地

での設置・使用を可能として、WATARASのシステムを補完することである。双方の通信方式の違いを表1に示す。

表1 通信集約(LoRa)型と直接通信(LTE-M)型との違い

Table 1 Difference between communication aggregation (LoRa) type and direct communication (LTE-M) type

項目	通信集約(LoRa)型	直接通信(LTE-M)型
使用シーン	近接する多数(最大80台)のほ場に設置する場合	・離れた場所に少数のほ場がある ・LoRa無線が届きにくい中山間地のほ場 ・お試して少数を設置
通信方式	クラウドサーバ ⇄ 通信中継機 : LTE(公衆回線) 通信中継機 ⇄ 電動アクチュエータ : LoRa	クラウドサーバ ⇄ 電動アクチュエータ : LTE-M(公衆回線)
通信範囲	通信中継機から無線が届く範囲(推奨1~2 km)	公衆回線(携帯通信網)のカバーエリア
通信中継機	必要	不要
経済性	多数導入時に経済性が高い	少数導入時に経済性が高い

2-2 目標値

直接通信(LTE-M)型の開発にあたっては、既存の通信集約(LoRa)型の仕様を満たし、これに加えてWATARASのこれ

までの販売によって得られた知見からの改良点も盛り込み、表2のように設定した。

表2 直接通信(LTE-M)型の開発目標

Table 2 Development goals of direct communication (LTE-M) type

項目	開発目標	特記事項
不日照対応	太陽光によるバッテリーの充電無しで連続動作5日以上	動作条件：給排水装置動作2回/日
電磁妨害波	30 MHz~230 MHz : 50 dB以内 230 MHz~1000 MHz : 57 dB以内	通電状態、測定距離3 m (CISPR 22、EN55022、VCCI)
放射無線周波数電磁界	故障せず、異常動作しない	動作状態、照射電波：10 V/m×3秒、26 MHz~1000 MHz (JIS C 61000-4-3、IEC/EN 61000-4-3)
中山間地使用特性	電動アクチュエータ単独で、クラウドサーバと接続可能	LTE-Mによる通信確立
メンテナンス性	機器設定を遠隔操作可能	既存の通信集約(LoRa)型は機側での有線による操作
運用性	既存の通信集約(LoRa)型と同一地区に設置可能	既存システムとの親和性

3. 解決すべき技術課題

3-1 不日照担保日数の確保

LTE-Mは公衆回線への直接無線通信であることから、ライセンス不要な特定小電力無線局のLoRaと比較して消費電力が大きく、直接通信(LTE-M)型に搭載の通信モジュールでは、既存の通信集約(LoRa)型に比べ約40%増となっている。

通信条件(制御命令の送受信間隔)の設定が「短」に選択されている場合、直接通信(LTE-M)型は、充電のない状況での作動日数の確保(不日照対応)が難しい。

3-2 機器設定時の現地作業の削減

既存の通信集約(LoRa)型では、モータ設定(電流制限値、ストローク、そのほか)や識別番号(ID、チャンネル)の変更は、

電動アクチュエータ内部の基板にPCを接続して行う。この方式は実施の際、ほ場ぎわで電動アクチュエータの上部フラン

ジ(止水構造)を取り外す状況が生じ得るが、精密機器の取扱いとしては回避すべきで、省力化の観点からも削減したい

運用である。

4. 開発技術

4-1 消費電力の抑制技術

WATARASは制御命令の送受信間隔の長・短が切替え可能で、間隔を延ばすと消費電力を抑制できる。既存の通信集約(LoRa)型ではこの間隔を手動で変更している。送受信間隔が「短」(電力消費が大きい)の状態でも表2の不日照対応を充分満たすのでこの方式でも支障なかったが、直接通信(LTE-M)型は送受信間隔が「短」の場合これを満たせない。

そこで直接通信(LTE-M)型では、電動アクチュエータ起動後、一定時間の経過で送受信間隔を「長」に切替えてスリープ状態に移行することや、起動時の省電力化の工夫によって、

通信集約(LoRa)型、送受信間隔「長」の場合と同等の消費電力に抑えてバッテリー残量を確保している(表3)。

表3 バッテリー残量:(LoRa)型の送受信間隔「長」を100とした場合の換算
Table 3 Battery level : converted value when (LoRa) type transmission / reception interval "long" is 100

種類	送受信間隔	消費電流量	バッテリー残量(5日後)
LTE-M型	短→長 連動	115	98 (LoRa型同等)
	短	690	16
LoRa型	長	100	100
	短	213	84

備考: Gバルブ、開閉2回/日として算出。太陽光パネルによる充電なし。

4-2 モータの遠隔設定技術

電動アクチュエータには「通信基板」と「制御基板」の2枚の基板が収められている。今回の開発は通信方式の変更であるため制御基板は既存の通信集約(LoRa)型から変更していないが、この基板に保存されているモータの制御設定値を直接通信(LTE-M)型の通信基板が取り込み、クラウドサーバと送・受信することでWATARASの操作画面から遠隔で制御設定値を参照・変更できる機能を付加している(図4)。これによって直接通信(LTE-M)型は、通常の運用管理における、ほ場ぎわでの電動アクチュエータ内部の基板へのPC接続を

不要としている。



図4 制御設定変更画面(一部抜粋)
Fig. 4 Control setting screen (excerpt)

5. おわりに

WATARAS直接通信(LTE-M)型は、2020年9月からほ場での試験運用を開始し(図5)、2022年4月の本格販売開始に向けた不具合の抽出と改善を進めている。今後は公衆回線というLTE-Mの通信安定性を生かし、電動アクチュエータをほ場のます内へコンパクトに格納する方式の開発を検討している。

WATARASの開発には、クボタ水環境営業推進部、クボタシステムズ、クボタ機械研究開発第一部、外部協力会社等から多大なるご協力をいただいている。この場を借りて心から感謝申し上げます。



図5 試験運用の一例(沖縄県石垣市)
Fig. 5 Example of trial operation (Ishigaki City, Okinawa Prefecture)

SDGsのターゲットへの貢献

6.4 水不足の解消 用水量を約5割減少

7.2 再生可能エネルギーの拡大 太陽光発電による機器動作

参考文献

- 1) 若杉晃介, 鈴木翔: 「ICTを用いて省力・最適化を実現する圃場水管理システムの開発」農業農村工学会誌85(1)、(2017)、pp.11~14
- 2) 内閣府: 「日本再興戦略」改訂2015、(2015)、pp.160~165

省コスト・省エネ・省スペース型高率脱窒MBR(LOOP MBR)の開発

Development of High-Efficiency Denitrification MBR (LOOP MBR) that Reduces Costs, Energy, Space

環境プラント技術部

放流先に閉鎖性水域を抱える下水処理場では窒素除去が求められており、処理水T-Nの放流規制値が5 mg/L未満に定められている施設もある。このような高率脱窒に対応する従来の高度処理方式は、標準活性汚泥法等の二次処理方式に比較して処理コストや消費電力、設置スペースが大幅に増加する。この課題を踏まえ、省コスト・省エネルギー・省スペースでありながら高率脱窒を可能とする新たな膜分離活性汚泥法(MBR)の開発を行った。本法は、無酸素タンクと好気タンクを1槽ずつ有する単段のMBRを直列に4組配置し多段化することで、処理水T-N≒3 mg/Lの高率脱窒を可能としている。後脱窒タンクの設置を不要とし、かつ好気タンクと膜分離タンクを一体化することで、土木・送風機設備の工事費、散気風量の削減が期待できる。また、処理場の高度処理化において本法を既設の二次処理法と並列で稼働させることで、処理水T-N≒10 mg/L相当の規制に対し、高度処理化に必要な費用と工期の削減が期待できる。

【キーワード】

膜分離活性汚泥法、MBR、省コスト、省エネルギー、省スペース、高率脱窒

Nitrogen removal is required at some sewage treatment plants, however high-efficiency denitrification significantly increases the cost, power consumption, and footprint as compared with the conventional activated sludge method. Based on this issue, we have developed a new membrane bioreactor. By operating this method in parallel with the existing secondary treatment method, it is expected that the general regulation value of treated water T-N \leq 10mg/L can be achieved and the cost can be reduced.

【Key Word】

MBR, Cost-Saving, Energy-Saving, Space-Saving, High-Efficiency Denitrification

関連する SDGs



1. はじめに

下水道は、我々の生活環境の改善や公共用水域の水質保全のための重要な社会インフラであり、継続的に整備されてきた。令和2年度末における下水道処理人口普及率は80.1%に達し¹⁾、河川や湖沼、沿岸海域の水質は改善されつつある。しかし、閉鎖性水域の富栄養化の対策や、水質環境基準値の強化に対応するため、有機性汚濁物質の除去を中心とした二次処理から高度処理(窒素やりん等の無機栄養塩類の除去)への切替えが求められ

ているものの、令和元年度末における良好な水環境創出のための高度処理実施率は僅か56.3%に留まっている²⁾。また、琵琶湖や霞ヶ浦などの湖では、処理水全窒素(以下、T-N)濃度5 mg/L以下の高率脱窒処理プロセスが求められているが、非常に高コストとなり、処理場の敷地面積も限られ自治体は対応に苦慮している。このため、従来の高率脱窒処理プロセスと比べて省コスト、省エネ、省スペースな処理法が求められていた。

2. 開発のコンセプト

2-1 既存技術の問題点

2.1.1 稼働実績を有する高率脱窒プロセス

T-N \leq 3 mg/Lを達成可能な処理方法として、ステップ流入式多段硝化脱窒法(以下、多段ステップ法)が挙げられる(図1)。本法は、無酸素処理と好気処理を繰り返し行うことで高率脱窒が可能だが、複雑な処理プロセスとなっている。このため、高コストで所要スペースも大きく、敷地の制約が厳しい処理場では採用ができない等の課題もある。

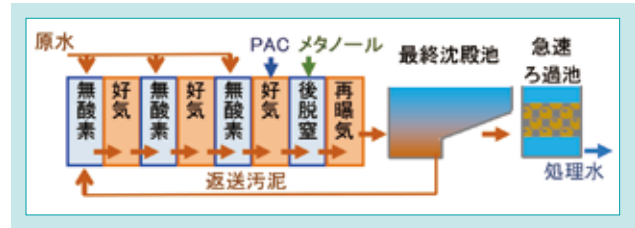


図1 従来の高率脱窒プロセスの処理フロー

Fig. 1 Conventional High-Efficiency Denitrification Process

2.1.2 多段ステップMBR

上記の処理方式を省スペース化する手段として、膜を用いることにより施設のコンパクト化が図られる膜分離活性汚泥法(以下、MBR)と組合せた多段ステップMBRが実用化されている(図2)。本法は最終沈殿池や急速ろ過池が不要で、活性汚泥濃度も高く保持できるため省スペースではあるが、MBRの強みであるコンパクト性が後脱窒タンクや膜分離タンクの設置により希薄化している。また、後脱窒工程で有機物源(メタノール)の添加が必要な上、膜分離を生物処理が完了した最後段で行うため、膜分離のために行っている膜洗

浄曝気による供給酸素を生物処理に活用できない。このため、薬品費や電力費が増加するという課題もある。

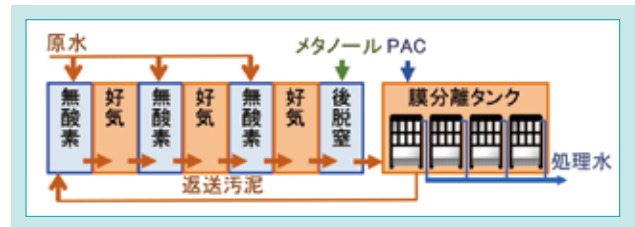


図2 多段ステップ MBR の処理フロー

Fig. 2 Step-Feed Nitrogen Removal MBR Process

2-2 開発技術の概要

上記の問題点を解消する高率脱窒MBRとして、新たに「多槽循環式硝化脱窒型膜分離活性汚泥法」を開発した。本法は、無終端のループ状に配置された複数の水槽から成り、その特長を英語で表現するとLow OPEX and Optimized MBR(低ランニングコストで最適化されたMBR)であることからLOOP MBR[®]を略称とした。本法の開発に並行し、生物脱りんプロセスを追加したUCT LOOP MBRも開発した。LOOP MBR及びUCT LOOP MBRの処理フローを図3に示す。LOOP MBRは国内下水処理場で多く採用されている循環式硝化脱窒型膜分離活性汚泥法(以下、MLE MBR)の改良変法と言える。窒素除去性能の根幹となる硝化脱窒反応に与る窒素除去率(以下、 η_{DN})と、硝化液循環比Rの理論上の関係式を以下に示す。

$$\text{硝化脱窒反応に与る窒素除去率 } \eta_{DN} = \frac{R}{1+R}$$

式で示されるとおりRと η_{DN} は正の相関にあり、Rを増加させれば窒素除去性能を高めることが可能であるが、硝化液循環ポンプの経済性の理由から、Rはこれまで3Q程度が上限とされてきた。しかし、本法では好気タンクと無酸素タンクを多段化し原水を各タンクに均等にステップ流入させることで、硝化液循環量を引上げることなく、実質的な硝化液循環比の引上げを実現した。例えば、4段のLOOP MBRにおいて循環液量を原水流入量の3倍とした場合、一槽当たりでは原水0.25Qに対

して3Qの硝化液を循環させることになり、以下に示すように実質的な硝化液循環比は12倍に増加される。この結果、経済性を損なうことなく窒素除去性能を大幅に高めることができる。

$$\text{硝化液循環比 } R = \frac{\text{硝化液循環量}}{\text{原水量}} = \frac{3}{0.25} = 12Q$$

また、LOOP MBRは多段ステップMBRで必要とされる後脱窒タンク及び膜分離タンクが不要である上に、実質的な循環比が高くなることで無酸素タンクのMLSS濃度が高くなり反応タンクの容量を縮小できるため省スペースである。更に、好気タンクに分離膜を設置するため、膜洗浄用曝気で供給される

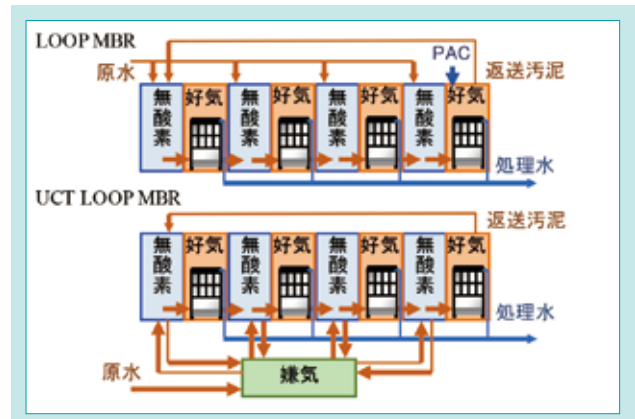


図3 LOOP MBR 及び UCT LOOP MBR の処理フロー

Fig. 3 LOOP MBR and UCT LOOP MBR Process

酸素を生物処理に活用でき、省エネルギーである。そして、後脱窒タンクにおける有機物源の添加が不要であるため省コストである。

UCT LOOP MBRはLOOP MBRの上流に嫌気タンクを設置し、無酸素タンクから嫌気タンクへ脱窒液を循環させる処理方式である。

通常は凝集剤(PAC)を添加して化学的に除去するケースが多いが、本法では生物学的なりん除去が可能となるため凝集剤の添加量を抑制でき、更なるランニングコストの低減が期待できる。

3. 開発目標

本開発の基本的なコンセプトは高率脱窒が可能なMBRを省コスト・省エネ・省スペースで実現することであり、以下の2つの手順を経て開発した。

- ①パイロットプラントを用いた実証実験で処理性能を確認
- ②実証結果に基づく机上検討に拠る実現性の確認

LOOP MBR及びUCT LOOP MBRの主要な開発目標の一覧を表1に示す。目標とする窒素除去性能は処理水T-N濃度 ≤ 3 mg/L又は $\eta_{DN} \geq 90\%$ 、りん除去性能は処理水全りん(以下、T-P)濃度 ≤ 0.5 mg/Lと設定した。なお、実証データに基づく η_{DN} の算出には下記の式を用いた。

$$\eta_{DN} = \frac{\text{脱窒量}}{\text{硝化対象窒素量}}$$

また、高率脱窒が可能なMBRとして実用化されている多

段ステップMBR法と比較して、ライフサイクルコスト(以下、LCC)を5%以上、ランニングコストを10%以上、消費電力を10%以上、所要スペースを10%以上削減することを目標とした。

表1 主要な開発目標
Table 1 Development Target

項目	LOOP MBR	UCT LOOP MBR
窒素除去性能	T-N<3mg/L または $\eta_{DN} > 90\%$	同左
りん除去性能	T-P<0.5mg/L	同左
LCC	95	同左
ランニングコスト	90	75
消費電力	90	同左
所要スペース	85	90

表中の数値は多段ステップMBRを100とした比率

4. 開発の課題

4-1 安定した窒素除去性能を示す実証データの収集

窒素除去性能を実証するためには、連続的に安定した処理が実施できたことを示すデータが求められる。LOOP MBRでは、実質的な硝化液循環量が大幅に上げられることにより、好気タンクから供給される溶存酸素(以下、DO)の流入量が増加し、無酸素タンクで脱窒阻害が生じる可能性が

あった。また、多段化により好気タンク・無酸素タンクの1槽当たりの実質的な無酸素タンクの滞留時間が短縮化されたことで、流入負荷の変動による影響を受けやすくなっていることが想定され、負荷変動に対する耐性についても確認する必要があった。

4-2 各水槽の運転条件の均等化

各膜ユニットでろ過される処理水量を均等化することは、膜の目詰まりの速度を抑制するために有効である。加えて、本法の場合は各水槽における処理状況を均等に維持することが処理水質の安定化のために重要である。そのため各

好気タンクから排出される膜ろ過水量や、各無酸素タンクに供給される原水量が均一となるための設計上の検討が必要であった。また、多少の不均等が生じた場合でも、処理水質への影響は軽微であることの確認が求められた。

4-3 流入水中の有機物不足への対応

窒素除去が行われるには、流入水に一定量を超える有機物(有機物量を示す指標であるBODとしてT-Nの3倍以上)が必要である。有機物量が不足すると処理水T-Nの上昇リスクがあり、計画放流水質を超過することが懸念される。このた

め流入水中の有機物量の低下時には有機物源の添加が必要である。本法においても従来同様、有機物源の添加で処理水T-Nの濃度の安定化が可能であることを確認する必要があった。

4-4 開発プロセスの実施設での実現性検証

本プロセスでは、多槽化により水槽レイアウトの大幅な変更が必要となることが想定された。汚水の均等分配、処理水管や空気管の配置検討や維持管理動線の確保等、実際に

建設・運転が可能な施設を設計可能であることをケーススタディの実施により検証する必要があった。

5. 実証実験及び机上検討の結果

5-1 実験プラントの概要と実験条件

LOOP MBR及びUCT LOOP MBRの処理性能を確認するため、それぞれについて処理能力15 m³/dのパイロットプラントを建設した。LOOP MBRを1系、UCT LOOP MBRを2系の実験プラントとする。基本運転条件を表2に示す。供給水量は中大規模の処理場を想定し、日間変動比1.4(ピーク/日平均)で変動させ、ろ過流束もそれに追従させた。実証実験は2019年6月10日から2021年7月6日まで実施した。運転工程を図4に示す。なお、プラント実験期間のうち、1系、2系それぞれについて評価期間を設定し、処理機能及び処理性能の評価を行った。評価期間における処理水質の平均値が水質目標を達成していることを以て開発目標達成とした。運転開始以降、両系列ともにDO濃度不足に起因する硝化不良が起こり、その対策として補助散気を追加した。この結果DO不足は概ね解消されたが、無酸素タンクへのDO流入の影響で脱窒性能が悪化した。対策として補助散気のDO制御、膜洗浄曝気の一部放風を行うことで厳密なDO管理を行った。

2系では有機物源添加による脱窒性能の確保を目的として、メタノール及びエコニリン®の添加実験を行った。エコニリンはメタノール代替として尿処理施設で実績を有するクボタ環境サービス株式会社の製品で、食品等の製造工程で生じる副産物の活用によりメタノールと比べ約95%のCO₂発生量の削減効果が見込まれる製品である。生物脱りんを行うプロセスでは、降雨時にりん除去機能が悪化することが知られており、本法でも同様の傾向が見られた。実施ではPAC添加により処理水質の悪化防止を図ることが一般的であるが、本法でも同様の対応が可能であるかを検証するため、降雨時に限りPACの添加実

験を行った。なお、1系の脱りんはPAC常時添加に拠った。

表2 基本運転条件
Table 2 Basic Operating Conditions

項目	夏季	春秋季	冬季
処理水量	15.0 m ³ /d	13.5 m ³ /d	12.0 m ³ /d
HRT(1系)	5.7時間	6.3時間	7.1時間
HRT(2系)	6.7時間	7.4時間	8.4時間
好気タンク 目標MLSS	9 000 mg/L	同左	同左
	10 000 mg/L	同左	同左
膜洗浄曝気風量	0.1 m ³ /min/台	同左	同左
DO管理目標値	1.0 mg/L以上	同左	同左
硝化液循環比	3Q循環	同左	同左
脱窒液循環比(2系)	1Q循環	同左	同左

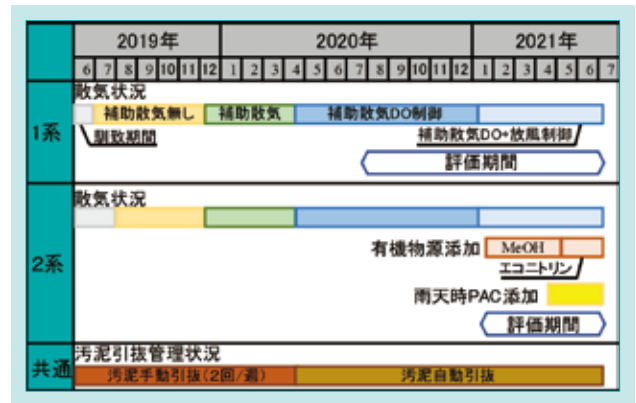


図4 実証プラントの運転工程
Fig. 4 Operating Mode of Demonstration Plant

5-2 実験データ

評価期間中において1系及び2系の運転状況を表3に、得られた処理水質データを表4に、窒素とりん除去の経日データを図5に示す。ピーク負荷時の好気タンクDOと η_{DN} の関係を分析したところ、ピーク負荷時のDOが1.5 mg/Lを超過すると η_{DN} が悪化する傾向が見られた。適正なDO制御が行われた(流入水量がピーク時における平均好気タンクDOが1.5 mg/L未満を維持できた)範囲で η_{DN} を分析した結果、1系の平均値は90.1%であり、90%の開発目標を達成した。

表3 運転状況
Table 3 Parameters for Biological Treatment

項目	分析・計測結果	
	1系(N=40)	2系(N=20)
好気タンク MLSS(mg/L)	7 900 ~ 11 400 (9 800)	8 000 ~ 11 900 (10 000)
反応タンク 水温(°C)	14.8 ~ 30.0 (21.8)	14.6 ~ 26.5 (20.5)
供給BOD/T-N比	2.8 ~ 5.4 (3.6)	3.7 ~ 6.5 (4.7)

表4 流入水質及び処理水質
Table 4 Influent and Effluent Water Quality

項目	分析・計測結果		
	1系(N=40)	2系(N=20)	
BOD	流入水	71 ~ 184 (111)	72 ~ 184 (121)
	処理水	0.4 ~ 3.6 (1.6)	0.5 ~ 2.5 (1.3)
COD	流入水	39 ~ 93 (55)	48 ~ 93 (58)
	処理水	4.1 ~ 6.3 (5.3)	5.0 ~ 7.0 (6.1)
SS	流入水	33 ~ 200 (73)	52 ~ 177 (84)
	処理水	N.D.	N.D.
T-N	流入水	21 ~ 41 (32)	29 ~ 39 (33)
	処理水	2.3 ~ 6.9 (3.7)	3.0 ~ 7.6 (4.1)
NH ₄ -N	流入水	12 ~ 26 (21)	17 ~ 26 (22)
	処理水	N.D. ~ 1.1 (0.22)	N.D. ~ 0.3 (0.12)
T-P	流入水	2.8 ~ 5.7 (4.1)	3.9 ~ 5.7 (4.5)
	処理水	0.08 ~ 0.47 (0.23)	0.02 ~ 0.71 (0.14)

水質の単位は全て mg/L であり、()内は平均値を示す

一方、2系の η_{DN} の平均値は88.5%であり、開発目標に対して僅かに未達であった。これは一部のデータが平均値を押し下げた影響による。その原因として、本実証実験では有機物源を一定添加としており、有機物源が不足した可能性が考えられた。実規模施設では流入水量や無酸素タンクのORP等のモニタリングを通して、有機物の添加量を適切に調整し、処理水質の安定化を図ることで、 η_{DN} の更なる引上げは可能と考えている。りんに関しては、1系の評価期間中の平均処理水T-Pは0.23 mg/L、2系は0.14 mg/Lであり、T-P<0.5 mg/Lの開発目標を達成した。UCT LOOP MBRでは降雨時においてもPAC添加の実施により、処理水質T-P<0.5 mg/Lを達成した。

実証実験データの分析結果から、1系では好気タンクのDO濃度を1.5 mg/L以下に制御することにより安定した処理水T-Nが得られることが判明し、本法の運転管理においては従来のMBRに比べてDO値の管理が重要であることが確認された。処理水T-PについてはPAC添加により安定した処理性能が実証された。2系では嫌気タンクにおいて有機物が消費されるため、窒素除去用の有機物源が不足しやすい状況にあり、流入水のBODとT-Nのバランス管理の重要性が確認された。更に、有機物が不足する状況下においては、従来技術と同様に有機物源を添加することで、生物脱りんと窒素除去の両立が可能であることが示された。また、雨天時においてもPAC添加により脱りん性能の安定化が可能であることを確認した。

また、各槽の処理状況の均等性を確認するために各槽の膜ろ過水や汚泥のろ液を採取して水質分析を実施した。その結果、1系2系ともに槽毎の差は軽微であり、各槽において均等な処理が行われていることを裏付けるデータが得られた。

5-3 机上検討結果

実証実験の結果を踏まえ、処理能力80 000 m³/dの下水処理場を新設するケーススタディを実施した。開発プロセスが実証した性能を発揮させるために必要な土木水槽形状の

検討、各種機器や配管・弁類の選定、施工性や維持管理性を考慮した設備配置検討等を通じて、開発プロセスの設計・建設が可能であることを確認した。

6. 開発プロセスの導入効果

6-1 多段ステップ MBR に対する省コスト・省エネ・省スペースの効果

既述のケーススタディにおいて、多段ステップMBRに対する各要素の削減率の試算結果を表5に示す。LOOP MBRは多段ステップMBRと比較してLCCを5%以上、ランニングコストを10%以上の削減が期待できる。また、消費電力を10%以上、所要スペースを15%以上の削減効果が期待できる。UCT LOOP MBRは、LCCの項目で開発目標である5%以上の削減を達成し、そのほかの項目についても削減効果が示された。

表5 ケーススタディ結果
Table 5 Case Study Results

削減項目	LOOP MBR		UCT LOOP MBR	
	削減目標	ケーススタディ結果	削減目標	ケーススタディ結果
建設費	—	98	—	100
LCC	95	95	95	95
ランニングコスト	90	87	75	77
消費電力	90	89	90	94
所要スペース	85	83	90	94

表中の数値は多段ステップMBRを100とした比率

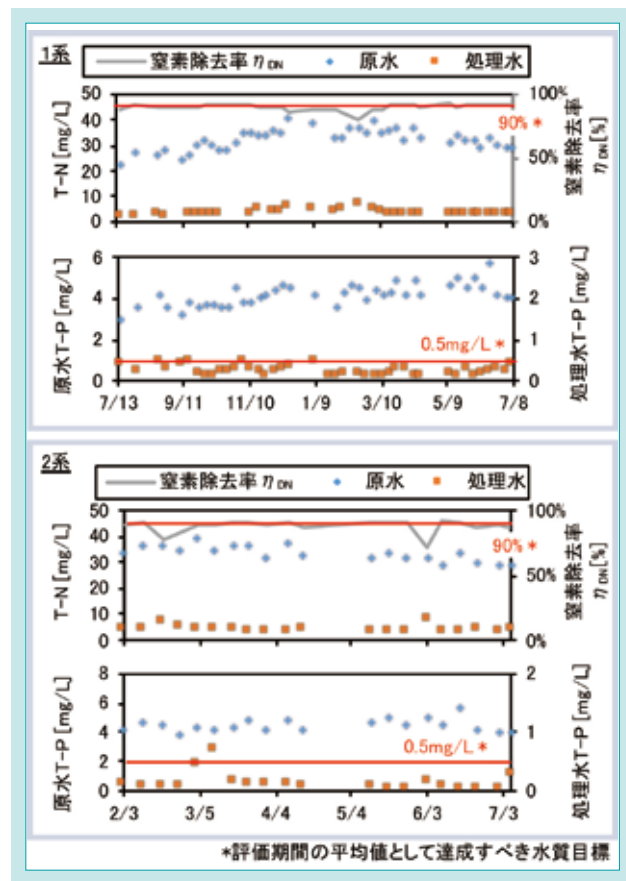


図5 1系及び2系の窒素除去・りん除去状況

Fig. 5 Time Course of Nitrogen and Phosphorus Removal in Two Trains

6-2 LOOP MBRを用いた高度処理化

LOOP MBRが達成可能な窒素除去率90%の性能が必要とされる国内の下水処理場は少ない。しかし、本法の導入によりそのほかの下水処理場の高度処理化に必要なコストの大幅な削減が期待でき、図6において例を示す。全体が5系列の標準活性汚泥法(有機物除去にのみ対応)を、処理水T-N ≤ 10 mg/L、T-P ≤ 1 mg/Lに対応する高度処理法へと改築する場合、従来の高度処理化の手法に拠ると反応タンク、最終沈殿池、急速ろ過池の増設及び全系列の改築が必要であり、また消費電力も上昇するため、改築コスト及びランニングコストが大幅に上昇する。それに対し本法を導入する場合は、土木躯体の増設が不要であり、3系列の改築だけで処理水T-N ≤ 10 mg/Lの規制を達成することが可能で、改築後の消費電力の増加量も抑制することができる。

また、通常の下水道整備計画では管轄下の全ての下水処理場に対して同等の高度処理化を行うことが多い。この整備計画では、敷地制約や予算制約による遅延の発生や、施設の増設のための敷地不足等が問題となり、高度処理化が遅延する原因となっている。この問題に対し、一部の下水処理場にLOOP MBRを導入して集中的に窒素除去を行い、そ

のほかの下水処理場は標準活性汚泥法での処理を継続、あるいは土木躯体の増設を伴わずに改造が可能な有機物と脱りんに対応する嫌気好気法に改築を行うことで、放流先の閉鎖性水域における総量規制をクリアするという手法も考えられる。これにより、高度処理化に必要なコスト・工期を大きく削減・短縮することが期待できる。

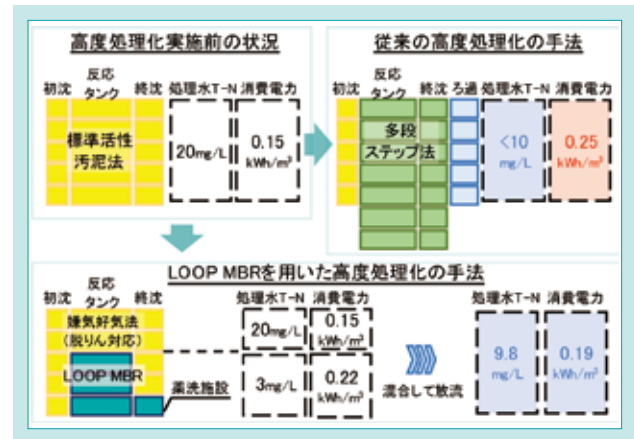


図6 従来の高度処理化とLOOP MBRを用いた高度処理化の対比
Fig. 6 Comparison of Upgrade Scheme Between Conventional Processes and Present Process with LOOP MBR

7. おわりに

2021年秋より大阪市中浜下水処理場において処理能力40 000 m³/dのMLE MBRが供用を開始するなど、国内では老朽化した施設の全面更新需要を取り込む形で大規模下水処理場へのMBRの導入が進んでいる。今後は、LOOP MBRとUCT LOOP MBRが有する高度処理化に必要なコスト、電力、スペースの削減効果により、MBRの普及が加速することを期待する。後日談となるが、本開発に先立って過去にLOOP MBRのアイデアは2回提案されていたが、開発行為に移行できずにそのままアイデアが埋もれてしまっていたことが判明した。LOOP MBRは、これまでの下水処理に

における『高率脱窒の実現はコスト・電力・スペースとのトレードオフ』という常識を覆す画期的な技術であり、その技術を発案しながらも長期間実用化へと至ることができなかったことは大きな損失である。アイデアをアイデアのまま終わらせず、検証・開発へと繋げていくことの重要性を認識した。

最後となったが、本開発は日本下水道事業団殿との共同研究「省コスト・省エネ・省スペース型高率脱窒MBRの開発」の成果である。ここに、共同研究の関係者の皆様に深く感謝の意を表する。

SDGsのターゲットへの貢献

- 6.2 下水施設・衛生施設へのアクセスの強化 高率脱窒可能な従来法に比べてLCCを5%以上、ランニングコストを10%以上、消費電力を10%以上、所要スペースを15%以上削減
- 7.3 エネルギー効率の改善 高率脱窒可能な高度処理法に比べて消費電力を10%以上削減
- 14.1 海洋汚染の防止、削減 窒素除去率90%以上、処理水T-P<0.5 mg/Lを達成

参考文献

- 国土交通省.“令和2年度末の汚水処理人口普及状況について”.2021-08-31.
https://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo13_hh_000477.html, (参照2021-09-30)
- 下水道データ室.“事業の実施状況”.国土交通省.
https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewage/crd_sewage_tk_000104.html, (参照2021-09-30)

ごみ処理向けメタン発酵技術の開発

Development of Fermentation Technology for Household Garbage

水環境研究開発第三部／カーボンニュートラル推進部

可燃ごみ中の生ごみと紙ごみを分離してメタン発酵処理することでバイオガスを回収し、それ以外のプラスチック類(以下、プラ類)や木質等の発酵不適物(以下、異物)を焼却するコンバインドシステムは、廃棄物が持つエネルギーを有効活用できる利点があるが、従来の焼却単独処理に比べてライフサイクルコスト(以下、LCC)が課題となり導入が円滑に進んでいない。本開発では、①高効率な前処理、②独自の縦型メタン発酵槽、③低含水率化が可能な残渣処理を組み合わせ、既存コンバインドシステムの課題を解決することを目指した。その結果、開発システムは、焼却単独処理よりも低LCCを達成でき、顧客である自治体が導入しやすいものとなった。またバイオガス発電によりCO₂排出量を削減できる本システムを普及させることで、CO₂排出量削減・資源循環に貢献することが可能である。

【キーワード】

CO₂排出量削減、資源循環、ごみ、メタン発酵

The combined system, which recovers biogas by separating garbage and paper garbage from combustible garbage and subjecting it to fermentation, and incinerates nondegradable materials such as plastics and wood has the advantage of being able to effectively utilize the energy of the waste. However, the introduction of the combined system has not proceeded smoothly due to the problem of life cycle cost (LCC) compared with the conventional incineration system. This development aims to solve the problems of existing combined systems by (1) highly efficient pretreatment, (2) an original vertical fermenter, and (3) dewatering residue. As a result, the developed system achieved a lower LCC than the incineration system, making it easier for local governments to introduce the system. By popularizing this system, which can reduce CO₂ emissions by biogas power generation, it is possible to contribute to CO₂ emissions reduction and resource circulation.

【Key Word】

CO₂ Emission Reduction, Resources Circulation, Household Garbage, Methane Fermentation

関連する SDGs



1. はじめに

世界各国でCO₂排出量削減や資源循環の取組みが推進されるなか、我が国の廃棄物処理(ごみ処理)分野においても、その対応が強く求められるようになってきている。

国は、これまで廃棄物エネルギーの利活用や資源循環の取組みを進めてきたが、地方の中小規模施設では発電設備を持たない廃棄物処理施設(焼却処理施設)が多く、エネルギー利用(≒CO₂排出量削減)は十分に行われていない。一部では、焼却処理にメタン発酵処理を組合せたコンバインドシステムを導入するこ

とでエネルギー利用が図られている施設もあるが、LCCが高いため、普及は進んでいない。

こうした背景から、クボタでは中小廃棄物処理施設をターゲットとして、経済合理性を確保しつつエネルギー・資源を回収できる処理システムの開発を進めてきた。本稿では、環境省の委託事業である「中小廃棄物処理施設における先導的廃棄物処理システム化等評価・検証事業」(平成29～31年度)(以下、委託事業)を受託して取組んだ開発成果を中心に報告する。

2. 開発のコンセプトと目標値

2-1 開発のコンセプト

メタン発酵処理と焼却処理を組合せたコンバインドシステムは、可燃ごみ中の生ごみや紙ごみを分離してメタン発酵処理することで再生可能エネルギーとしてバイオガスを回収し、プラ類や木質等の発酵不適物は焼却処理するシステムである。焼却に適さない湿潤ごみからバイオガスを回収できるため、エネルギー回収率が高く、CO₂排出量削減に貢献できる。特に、焼却単独処理ではエネルギー回収が困難な中小処理施設(概ね70 t/日以下)においては、有効な手段である。

しかし既存のコンバインドシステムは、LCCが高く、導入が円滑に進んでいない。

そこで、図1に示すように、①高効率な前処理(破碎分別)技術、②独自の縦型発酵槽によるメタン発酵処理技術、③低含水率化が可能な残渣処理(脱水)技術を組合せることにより既存コンバインドシステムの課題を解決できる改良型のコンバインドシステムを開発した。

更に、可燃ごみだけでなく、し尿・下水汚泥等の湿潤廃棄物を複合処理することで、廃棄物系公共インフラ全体の合理化による全体コスト低減が可能となる。

なお、本稿では、広義に①、②、③を合わせてメタン発酵技術と称する。

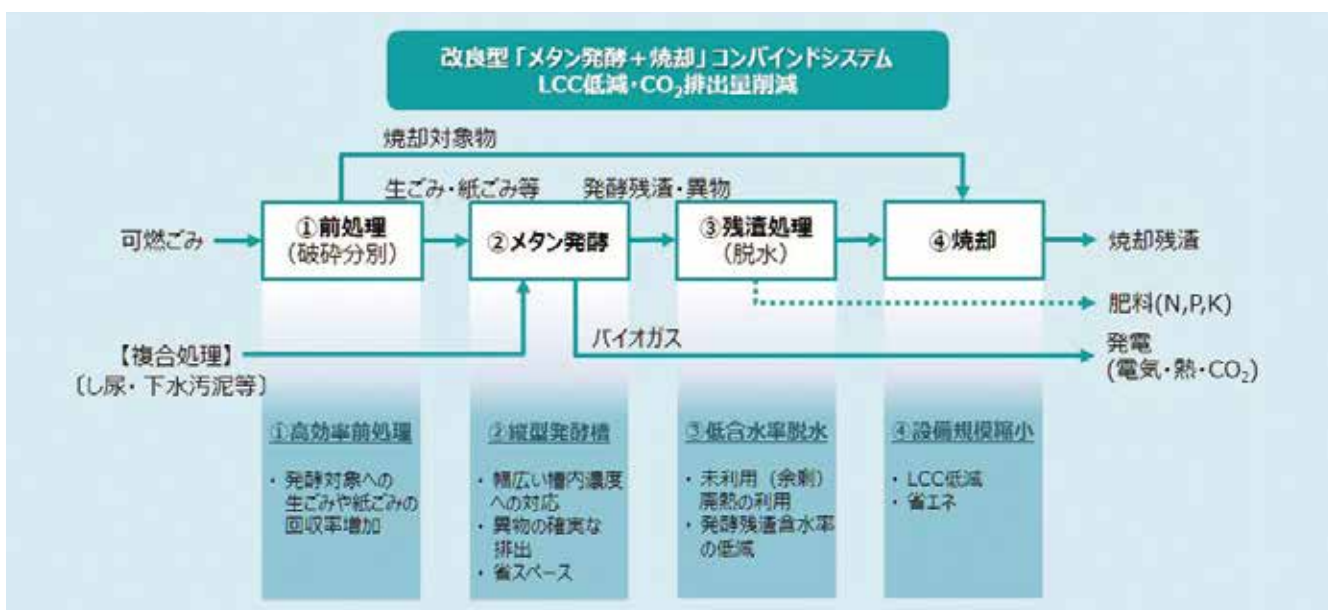


図1 開発システムのコンセプト

Fig. 1 Concept of the Development System

2-2 目標値

本開発の目標は、「従来の焼却単独処理に比べてLCC低減とCO₂排出削減の両立が可能なコンバインドシステムを確立すること」である。

目標値は環境省から中小廃棄物処理施設の標準として提示されたモデルケース(表1)において、LCC、CO₂排出量が焼却単独処理以下となることとした(表2)。

表1 モデルケース条件
Table 1 Model Case

項目	条件
ごみ性状	生ごみ35%、紙ごみ25%、その他ごみ40%(うちプラ類15%)
ごみ量	50 t/日×280 日/年

表2 目標値
Table 2 Target for Model Case

項目	目標値
LCC	542 百万円/年 以下
CO ₂ 排出量 ¹⁾	7470 t-CO ₂ /年 以下

LCC：社内独自算出

3. 解決すべき技術課題

開発目標を達成するためには、図1に示したシステムを構成する、①前処理(破碎分別)、②メタン発酵処理、③残渣処理(脱水)、

それぞれの課題を解決し、システム全体を最適化する必要がある。以下に課題を示す。

① 前処理(破碎分別)

- ・生ごみ、紙ごみの回収率を増やしつつ、プラ類等の異物を分離除去する(=焼却対象にする)必要がある。
- 生ごみ回収率90%以上、紙ごみ回収率60%以上となる前処理システムを構築する

② メタン発酵処理

- ・ごみは固形分が多く槽内濃度・粘度が高くなるため、従来のポンプやブロウによる攪拌ができない。一方で、汚泥等との複合処理時など相対的に濃度・粘度が低くなる場合もあり、両方への対応が必要となる。
- 幅広い槽内濃度・粘度に対応できる攪拌機構を確立する
- ・プラ類や砂など様々な異物が含まれるため、それらが発酵槽

内で堆積し出口が閉塞しやすい。

- 異物を確実に排出できる機構を確立する
- ・適正な前処理(破碎分別)や攪拌機構、異物排出機構により、高いバイオガス発生量を実現する。
- ごみ単独処理において、発酵槽投入ごみ当たりのバイオガス発生量210 Nm³/t以上
- ※既存メタン発酵処理技術のバイオガス発生量150 Nm³/t (環境省 エネルギー回収型廃棄物処理施設マニュアル)

③ 残渣処理(脱水)

- ・焼却処理される残渣量を減らし、焼却コスト低減を図るため残渣の含水率を低減する必要がある。
- 含水率60%以下となる脱水技術を確立する

4. 開発技術

4-1 実証プラント

開発の第一ステップとして、まずは模擬ごみを用いたラボ実験や実ごみでの小型機実験を進めて基本技術を確立した。

しかし、実際の処理対象は家庭や事業所から発生する可燃ごみで、その性状は極めて多様である。また、ある程度の規模がないと性能が検証できない装置・機能もある。そこで、環境省の委託事業を活用し、京都府の船井郡衛生管理組合(南丹市、京丹波町で構成)にご協力を頂き、現地に実証プラントを設けて実験を行った。実証プラントの概要を表3、フローを図2、外観写真を図3に示す。

表3 実証プラントの概要
Table 3 Outline of the Demonstration Plant

項目	概要
処理対象物	家庭系および事業系可燃ごみ
(汚泥複合処理時)	し尿浄化槽脱水汚泥および下水脱水汚泥
前処理量	300 kg/d
発酵槽容量	3 m ³ /槽 × 2 槽
発酵処理量	75 kg/(日・槽)

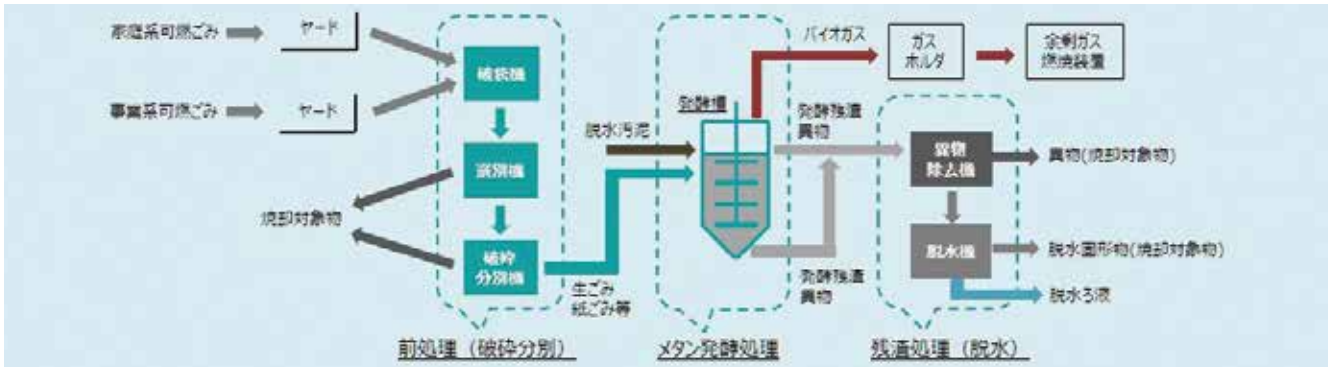


図2 実証プラントのフロー
Fig. 2 Flow of the Demonstration Plant



図3-1 前処理(破碎分別)設備
Fig. 3-1 Pretreatment



図3-2 メタン発酵処理設備
Fig. 3-2 Fermentation



図3-3 残渣処理設備
Fig. 3-3 Dewatering

4-2 実証実験の成果

4.2.1 前処理(破碎分別)技術

開発した前処理技術は、図2に示す通り、(1)破袋工程(破袋機でゴミ袋を破り中身を出す)、(2)選別工程(選別機の篩効果によりビニル袋やペットボトル等の比較的大きい異物を焼却対象物として除外)、(3)破碎分別工程(破碎分別機で破碎しつつ風選により更に異物を除去)で構成される。

前処理における生ごみ、紙ごみの回収率を表4に、前処理前後の写真を図4にそれぞれ示す。

前処理する前のゴミ性状にバラつきが見られたが、生ご

み、紙ごみは大部分を回収することができた。一方、プラ類等の異物の多くは焼却対象物側へ除去できた。

表4 生ごみ、紙ごみの回収率

Table 4 Recovery Rate in Fermentation Object by Composition

項目	回収率
生ごみ	88~99.9%
紙ごみ	58~81%
全体	平均63% (45~87%)



図 4-1 ごみ
Fig. 4-1 Garbage

図 4-2 前処理で分別した異物
Fig. 4-2 Nondegradable

図 4-3 前処理後の生ごみ、紙ごみ等
Fig. 4-3 After pretreatment

4.2.2 メタン発酵処理技術

メタン発酵処理は、前処理で回収した生ごみ、紙ごみ等を発酵槽に投入し、微生物の働きによりバイオガス(主にメタンとCO₂)を発生させ、発電などでエネルギー回収するものである。

開発した発酵槽の概略を図5に示す。形状は独自の縦型発酵槽とし、幅広い槽内濃度(TS)に対して必要十分な混合を実現できる機械式攪拌機構と、異物排出機構として、前処理で除去されずに混入した異物の排出を促す上部と下部の羽根、プラ類等の軽い異物を発酵残渣とともに引抜くための側

面引抜口、砂等の重い異物を引抜くための底部引抜口を備えたものである。この独自の縦型発酵槽により、実証期間の約400日間にわたり安定した発酵処理を行うことができた。

結果を表5に示す。ゴミ単条件と污泥複合条件では、槽内濃度(TS)などが異なるが、攪拌機構の運転を適正に調整することで、いずれの系でもアンモニア濃度や有機酸濃度、pHなど発酵処理に関する管理指標は適正範囲に維持でき、目標値210 Nm³/t以上のバイオガスを回収できた。

表5 メタン発酵実験結果

Table 5 Results of Fermentation Experiments

項目	ゴミ単条件	污泥複合条件
発酵処理対象物	前処理ごみ100%	前処理ごみ70% + 污泥30%
希釈	通常は無希釈*	2倍
槽内濃度(TS)	~12%	~7%
滞留日数	40日以下	40日以下 (希釈込20日以下)
ガス発生量	280 Nm ³ /t	220 Nm ³ /t
メタン濃度	54%	53%
アンモニア濃度	適正範囲を維持	適正範囲を維持
有機酸濃度	適正範囲を維持	適正範囲を維持
pH	適正範囲を維持	適正範囲を維持

※前処理ごみ TS を 40% 以下に調整する希釈のみ実施

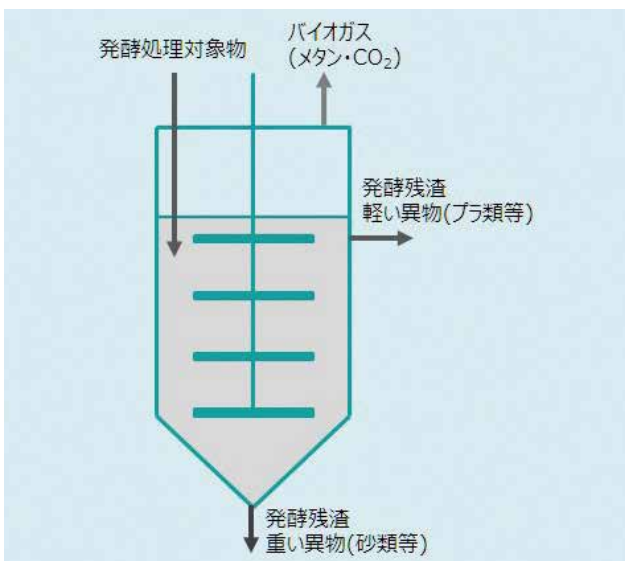


図 5 メタン発酵槽概略図
Fig. 5 Diagram of Fermentation Tank

引抜きした異物の例を図6に示す。側面引抜口からはプラ類等、底部引抜口からは砂や卵殻等を閉塞なく引抜くことができ、異物排出機構が意図した機能を発揮した。なお、実験終了後には槽内への異物堆積がないことも目視確認した。



図 6-1 引抜した異物(側面) 図 6-2 引抜した異物(底部)
Fig. 6-1 Nondegradable (Side) Fig. 6-2 Nondegradable (Bottom)

4.2.3 残渣処理(脱水)

メタン発酵処理により、微生物が分解した有機物はバイオガスとなるが、一方で余剰の微生物、無機物、異物等が水分と混在した残渣も発生する。

コンバインドシステムでは、この残渣は焼却処理を行うため、水分を減らすことが望ましい。残渣処理は、そのために脱水処理を行うものである(図2)。

実施設では、バイオガス発電による余剰の廃熱が生じるため、その未利用廃熱を用いて効率的に含水率を下げる検討を行った。

結果を表6に示す。凝集剤添加と加温を組合せることにより、脱水固形物の含水率は目標の60%以下とすることができた。

なお、異物除去後の脱水固形物や脱水ろ液は、成分分

析や植害試験により肥料として利用可能なことを確認している。地域によって肥料として有効利用できる場合は、凝集剤添加や加温を調整することで求められる性状に調整可能である。肥料として利用できれば、地域内での窒素、リンなどの資源循環に繋がるため積極的に利用先確保を図ることが望ましい。

表 6 残渣の脱水処理結果(含水率)
Table 6 Result of Dewatering (Water Content)

項目	加温なし	加温あり
ごみ単独条件	57%	47%
汚泥複合条件	64%	59%

4-3 システム全体の LCC と CO₂ 排出削減効果の試算

本実証実験により、改良型のコンバインドシステムを構築することができた。

ごみ性状、ごみ量(≒施設規模)、汚泥の複合処理の有無が異なる5ケースにおいて、LCCとCO₂排出削減量を試算

した。表7に、試算条件を示す。条件Bが表1に示したモデルケース、条件Eは船井郡衛生管理組合で発生するごみ性状である。

表 7 試算条件
Table 7 Study Conditions

項目	A	B	C	D	E	備考
ごみ性状(%) 生ごみ		35			20	
紙ごみ		25			40	
その他ごみ(うちプラ類)		40(15)			40(20)	
ごみ量(t/日)	30	50	70	50	30	280日/年
汚泥量(t/日)	0	0	0	15	0	280日/年
焼却単独処理						
焼却能力(t/日)	30	50	70	65(ごみ・汚泥混焼)	30	280日/年
コンバインドシステム						
焼却能力(t/日)	16.5	27.5	38.5	32.5	18.7	280日/年
メタン処理能力(t/日)	15.2	25.3	35.4	36.8	13.8	365日/年

※ 焼却炉の炉数：焼却単独処理は2炉、コンバインドは1炉(焼却炉停止時もメタン発酵で概ね半分のごみを処理できるため)
※ 焼却炉の運転時間：A、Eは14h/日(準連炉)、B、C、Dは24h/日(連続炉)

LCC試算結果を図7、CO₂排出量(バイオガス発電による削減効果を含む)を図8示す。

LCCは社内独自算出である。イニシャルコストは環境省の交付金(焼却単独:1/3、コンバインド:1/2)を考慮しており、用地費や造成費は含んでいない。ランニングコストは、用役費、人件費、施設補修費の支出にFIT売電による収入(39円/kWh)を考慮したものである。また、CO₂排出量は環境省の「地球温暖化対策事業効果算定ガイドブック(補助事業申請用)」の計算ツール等を用いた試算である。ごみ中のプラ類の燃焼により発生する排出量と処理施設の使用電力・燃料由来の排出量から、バイオガス発電による削減量を差し引いたものである(生ごみや紙ごみ、木質等の燃焼時に発生するCO₂は排出量としてカウントしない)。

検討した全ての条件において、改良型コンバインドシステムは焼却単独処理に比べて、LCC低減とCO₂排出量削減の

両立ができる結果となり、目標を達成できた。

LCCについては、生ごみ比率が高いと低減効果は大きくなり(A>E)、汚泥を複合しても効果は小さくなるが低減できる結果となった(B>D)。

CO₂排出量については、本改良システムが実現する高いバイオガス発生量により、全てのケースで20%を超える削減効果が得られた。

モデルケース(B)のLCC低減効果は約46百万円/年、運用期間を20年とすると約920百万円、CO₂排出量削減効果は1940 t-CO₂/年である(表8)。

実施施設の検討においては、個別の条件に合わせた精度の高い試算が必要であるが、今回の試算は幅広い条件設定で行っており、多くの中小廃棄物処理施設におけるLCCとCO₂排出量は、改良型コンバインドシステムの採用により焼却単独処理に比べて低減可能であると考えられる。

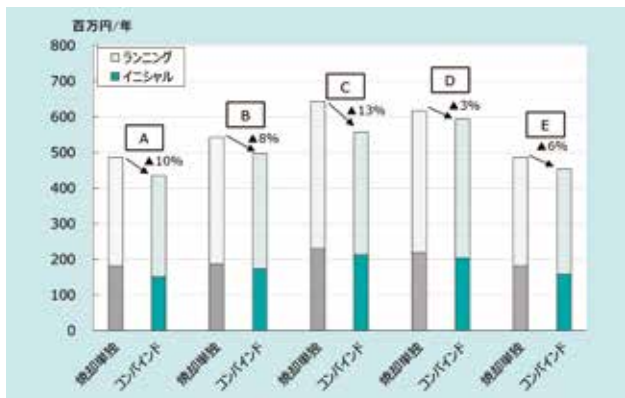


図7 LCC
Fig. 7 LCC

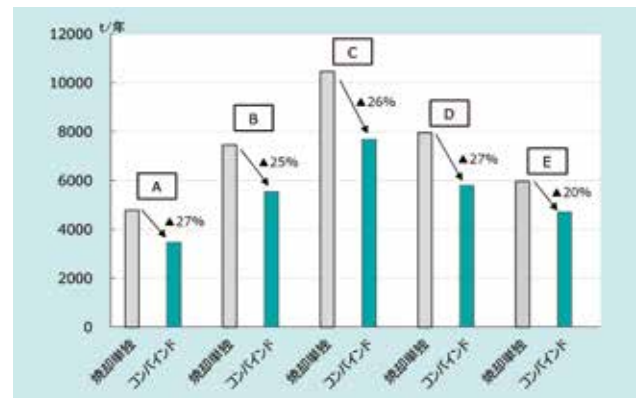


図8 CO₂ 排出量
Fig. 8 CO₂ Emissions

表8 モデルケースにおける評価結果
Table 8 Evaluation Results in Model Case

項目	焼却単独処理(目標値)	検討結果	削減量
LCC	542百万円/年	496百万円/年	46百万円/年
CO ₂ 排出量	7470 t-CO ₂ /年	5530 t-CO ₂ /年	1940 t-CO ₂ /年

5. おわりに

中小廃棄物処理施設においても、経済合理性を確保しつつエネルギー・資源を回収できる、独自の縦型メタン発酵技術を核としたコンバインドシステムを開発した。

本開発システムを国内の中小規模廃棄物処理施設の全てに導入することができれば、CO₂排出削減量は175万 t-CO₂/年と推定される。本システムが広く普及しCO₂排出量削減・資源循環に

大きく貢献できるよう、今後も更なるシステム改良やLCC低減に努めていきたい。

最後に、実証実験に当り多大なご協力頂いた船井郡衛生管理組合、南丹市、京丹波町、環境省はじめ関係者の皆さまに深く御礼申し上げます。

SDGs のターゲットへの貢献

7.2 再生可能エネルギーの拡大 GHG(温室効果ガス)排出削減に貢献

9.4 環境に配慮した技術・産業プロセスの導入によるインフラ改良・産業改善 環境配慮型ごみ処理施設の導入

参考文献

1) 環境省「CO₂排出量:地球温暖化対策事業効果算定ガイドブック(補助事業申請者用)」 pp.2-3

過給機を使用した汚泥焼却設備の省電力技術の開発

Development of Energy-saving Technology Utilizing a Turbocharger for Sewage Sludge Incineration Facility

環境プラント設計調達部

近年、地球環境保全の観点から省エネ技術が求められている。下水処理施設において、汚泥の処理装置として流動床式焼却炉が広く使用されているが、燃焼空気送風機の消費電力が多いことが技術的課題であった。そこで、過給機で廃熱を活用することにより、汚泥焼却設備の電力消費量を大幅に削減する技術を開発した。

【キーワード】

省エネ、消費電力削減、過給機、流動床式焼却炉、汚泥処理

In recent years, there has been an increasing need for energy saving technology from the viewpoint of global environmental conservation, and sewage treatment plants are no exception. Fluidized bed incinerators have been widely used as sewage sludge volume reduction technology, but the high consumption of electricity has been an issue. We developed a method utilizing a turbocharger that significantly reduces the amount of electricity consumed by a sludge incineration facility.

【Key Word】

Energy Saving Technology, Turbocharger, Fluidized Bed Incinerator, Sludge Disposal

関連する SDGs



1. はじめに

現在、我が国の汚水処理普及率は対象人口ベースで9割を超え、市街地における排水は、ほぼ下水として処理されている。下水処理場において、下水を処理する過程で発生する汚泥は、濃縮処理及び脱水処理によって減容化した後に、焼却処理を経て最終処分される。

近年、地球環境保全の観点から、下水処理場のようなインフ

ラ施設においても、電力使用量の削減を図ることが求められている。現在、一定水準以上の省エネを達成できない設備は、国庫補助事業の対象から外れることから、建設が事実上不可能になっており、クボタの事業推進上の必要性からも、早急に電力消費削減に寄与する技術を開発する必要があった。

2. 開発技術の概要

2-1 技術上の課題

焼却処理前の脱水汚泥は、高効率の脱水機を使用しても重量比70%以上の水分を含んでいるが、有機性の汚泥は大量の可燃性成分=熱エネルギーを有するため、焼却による処理が可能である。一般的に、高含水率の脱水汚泥を焼却するために「流動床炉」を使用する。

流動床炉は、炉内底部に硅砂を堆積して、最下部より流動空気を吹き込み、硅砂を流動化させることで流動床を形成する。流動床は、700~800℃程度の高温に維持され、脱水汚

泥中の水分を蒸発及び可燃分のガス化燃焼をさせた後に、炉内上方の燃焼空間(フリーボード)で、800~900℃で可燃分を完全燃焼させる。流動床炉は、流動床の熱容量が大きいため、水分を多く含む脱水汚泥を安定的かつ効率的に処理することが可能である。

汚泥焼却設備では、水分を多く含む脱水汚泥を効率的に焼却処理するため、焼却排ガスの廃熱で燃焼空気を予熱する。予熱空気温度は700℃程度に達し、比較的含水率の低

い脱水汚泥であれば、化石燃料を補助的に使用しないでも、汚泥可燃分の保有熱量(=熱エネルギー)だけで焼却処理することができる。ただし、焼却プロセスで水分を蒸発させるためには多くの熱エネルギーを必要とするため、廃熱回収した後の排ガスに残される熱エネルギー量は少なく、ゴミ焼却施設などで廃熱利用技術として広く普及している蒸気タービン発電装置を導入することが難しい。

また、炉内に流動床を形成するために燃焼空気を送風する際の送風圧力が高く、送風機(流動ブロウ)の必要動力が大きい。現状の汚泥焼却設備において、1tの脱水汚泥を焼却処理するために消費する電力量は、およそ 80~100 kWh である。そのうち、流動ブロウは汚泥焼却設備全体の電力消費量の約1/3を占めるため、流動ブロウの省電力化を図ることができれば、設備の消費電力量を大幅に削減することができる。

2-2 設備構成

今回開発した「タービンアシスト」システムは、燃焼空気の送風経路に「過給機」を組み込むことで機能するプラント設備の省電力技術である。

汚泥焼却設備は、燃焼空気を流動ブロウによって流動床炉へ送風する際に、燃焼効率を高めるため、送風経路に配置した空気予熱器(熱交換器)で、焼却排ガスと間接的に熱交換を行って約 700°C に予熱する。

「タービンアシスト」システムを備える設備は、流動ブロウと空気予熱器の間にコンプレッサを、空気予熱器と流動床炉の間にタービンを配置して構成される。従来の設備と比較すると、図1の通りである。本技術は、過給機の設置のために空気予熱器やダクトの改造が必要だが、従来設備の改修により改善効果を得ることが可能である。

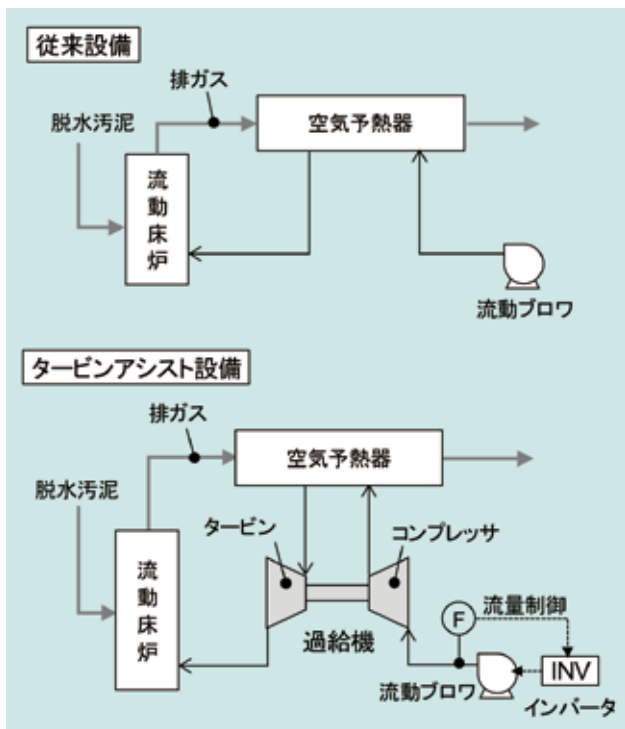


図1 設備構成

Fig. 1 Configuration of Sludge Incineration Facility

過給機は、遠心式圧縮機(コンプレッサ)とタービンを軸で連結した装置で、エンジンなどの内燃機関の出力や効率の向上を図る目的で利用されている(図2)。

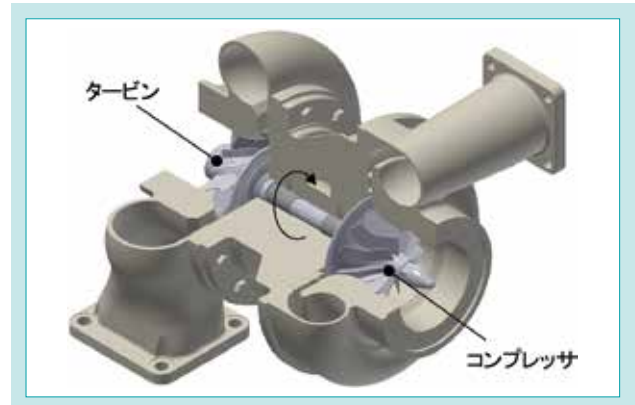


図2 過給機の構造

Fig. 2 Structure of Turbocharger

「タービンアシスト」は、熱エネルギーで駆動する過給機と、インバータ駆動の流動ブロウを組み合わせ、送風装置として使用する技術である。流動ブロウから送風される燃焼空気は、まず空気予熱器に流入する前にコンプレッサで加圧される。更に、加圧された燃焼空気は、空気予熱器で加熱されて膨張して、タービンを駆動する。ここで、流動空気は、過給機と空気予熱器を通過する過程で増圧されることになるが、この作用は熱エネルギーによってもたらされるものである。

過給機の駆動状態は、通過する空気の温度や圧力によって変動するが、併せて流動ブロウの負荷量をインバータの回転数を協調制御することで、流動床炉に送風する燃焼空気量を所定値に調整する。図3に示すように、廃熱を受けて過給機の駆動力を活用できた分だけ流動ブロウの負荷を軽減(アシスト)するため、結果として消費電力を削減できる。

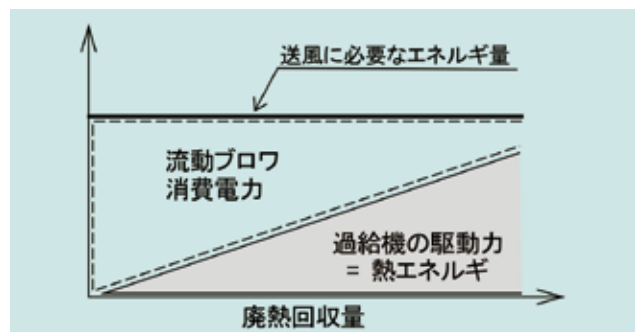


図3 流動ブロウ消費電力の削減

Fig. 3 Principle of Electricity Reduction

2-3 類似技術との比較

汚泥焼却設備で過給機を利用する省電力技術として、先行して普及している「過給式」がある。「過給式」は、過給機の配置する位置や過給機の駆動原理などがクボタの開発した「タービンアシスト」と異なり、表1に示す相違がある。

「過給式」設備に対して、「タービンアシスト」システムを備える設備は、特に以下の利点があると考えられる。

- 1) 「過給式」のタービン駆動流体は、焼却排ガスのため、タービン導入前に排ガスに含まれるダスト(焼却灰)を除去する必要がある。更に、高温での集じんが必要

え、集じん機が破損した場合のリスクが大きい。

- 2) 「過給式」は、平衡通風機構がなく加圧状態で焼却するため、焼却炉や下流側設備より焼却排ガスが漏洩するリスクがある。また、導入に際しては焼却炉を含めた大規模(全面)改修が必要だが、「タービンアシスト」は部分改造でも導入可能である。

廃棄物処理設備技術としては、「タービンアシスト」の方が容易に安全性を確保できることなどから、長期的には受け入れられていくものと考えている。

表 1 各設備の特徴
Table 1 Features of Facilities

	従来設備	タービンアシスト設備	過給式設備
設備構成			
消費電力量	—	△: 従来設備の 60~70%	○: 従来設備の約 50%
焼却炉内圧	負圧	○: 負圧	×: 正圧
タービン流入ガス	—	○: 大気	×: 焼却排ガス
集じん装置	バグフィルタ (負圧, 約 200°C)	○: バグフィルタ (負圧, 約 200°C)	×: セラミックフィルタ (正圧, 500°C以上)
維持管理性	○	○: 従来と同等	×: 設備保全負担が大きい

3. 実証試験設備での確認

3-1 実証試験設備

「タービンアシスト」の機能や性能確認のため、クボタが納入した焼却設備において、顧客の協力を得たうえで設備の改造を実施した。

実証試験のために、直列に配置された2基の空気予熱器のうち、低温側のNo.2空気予熱器と付帯するダクトを改造して過給機を取り付けた(図4、5)。過給機は、焼却設備で使用するにあたって、車のエンジンよりも多い送風量を必要とすることから、船用の機種を選定して、2基並列に設置した。また、流動ブロウをインバータ駆動に変更して、送風量の制御方法を、送風機の回転数制御によるものに変更した。



図 5 過給機外観
Fig. 5 Turbocharger

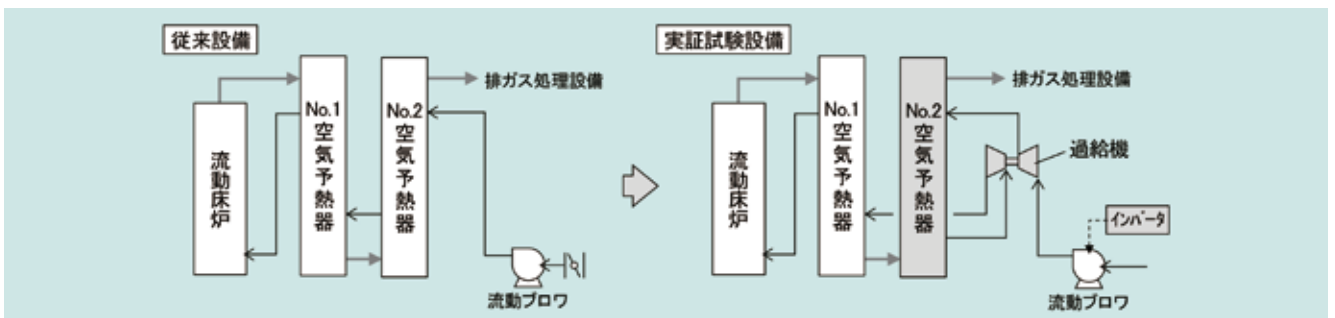


図 4 設備改造方法

Fig. 4 Configuration of Test Facility

3-2 試験結果

設備改造後、過給機を使用することによって、改造前に 25～28 kPa[G] 程度だった流動ブロウの吐出圧を大幅に引き下げることができた。タービン入口温度を 500°C 以上まで引き上げると、流動ブロウの吐出圧力は 1 kPa[G] 以下となり、改造前に 250 kW だった流動ブロウの消費電力を 9.2 kW（従来対比-96%）まで引き下げることができた(図6)。

流動ブロウ分の消費電力を削減できた結果として、設備全体の消費電力量を従来対比-29%に削減することができた。

過給機は、特にタービン入口温度の影響を受ける。例えば、空気予熱器のバイパス機能を使用してタービン入口温度を上昇させた場合、温度変化に伴って送風量が変動(増加)する。この操作を短時間に繰り返して、過給機に掛かる負荷を変動させたところ、流動ブロウ駆動装置(インバータ)が速やかに追従して、燃焼空気量を安定的に制御できることを確認した(図7)。

なお、このタービン入口温度の上昇による流動ブロウ吐出圧の低下に伴い、流動ブロウの消費電力は削減される。

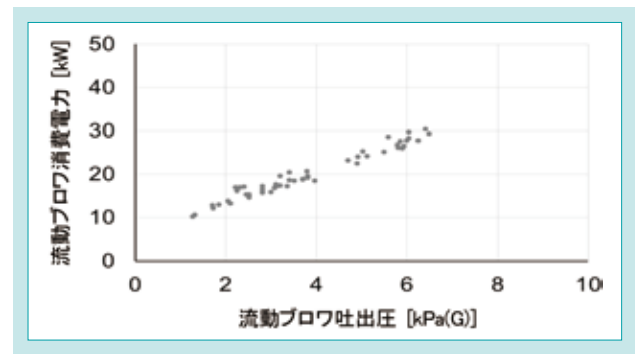


図 6 流動ブロウ吐出圧と消費電力の関係

Fig. 6 Relationship between Outlet Pressure and Electricity Consumption

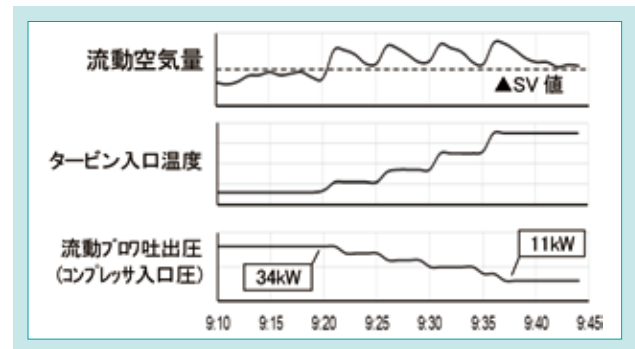


図 7 タービン入口温度変化時の挙動

Fig. 7 Changes in Airflow Volume

4. 本技術の原理及び考察

4-1 ブレイトンサイクル機関

過給機は、ブレイトンサイクルに区分される熱機関である。ブレイトンサイクルは、等圧状態の加熱・冷却(放熱)プロセスと、断熱(等エントロピ)状態での圧縮・膨張プロセスを組み合わせたものである。過給機のほかに、ガスタービンやジェットエンジンなどもブレイトンサイクルに属する機器である。

サイクル線図(図8)からは、低温低圧下での圧縮プロセスよりも、高温高圧下での膨張プロセスの方がエンタルピ(T)の変化量が相対的に多いため、熱機関として機能することが読み取れる。

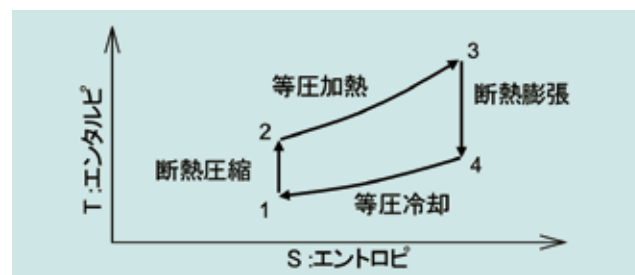


図 8 ブレイトンサイクル

Fig. 8 T-S Diagram of Brayton Cycle

4-2 T-S 線図及び圧力変化

「タービンアシスト」は、過給機のタービン出口圧力が流動床炉への送風圧力分だけ高くなることで膨張仕事を稼げなくなる分を、流動ブロウを補助的に使用してコンプレッサ入口圧力を引き上げて、圧縮仕事を補うことによって過給機の駆動力を維持する。「タービンアシスト」のサイクル線図(図9)において、コンプレッサの断熱圧縮仕事量とタービンの断熱膨張仕事量は同じである。流動床炉の送風圧力(流動空気圧)よりも流動ブロウの吐出圧力が小さい条件において、流動ブロウの省電力効果が得られることになる。

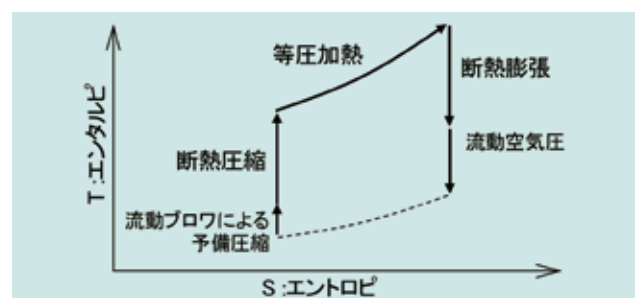


図 9 タービンアシストの T-S 線図

Fig. 9 T-S Diagram with Turbocharger

「タービンアシスト」システムを備える設備の送風経路における圧力変化は、図10に示す通りとなる。流動ブロウから送風された燃焼空気は、まず、コンプレッサで加圧された後に、等圧状態で加熱されて膨張する。その後、過給機に返流して、タービンで減圧される際に過給機の駆動力を得て、残圧分で流動床炉へ送風する。一連の過程で、過給機の入口圧力よりも出口圧力の方が高くなるため、過給機は燃焼空気の増圧装置として機能していることになる。

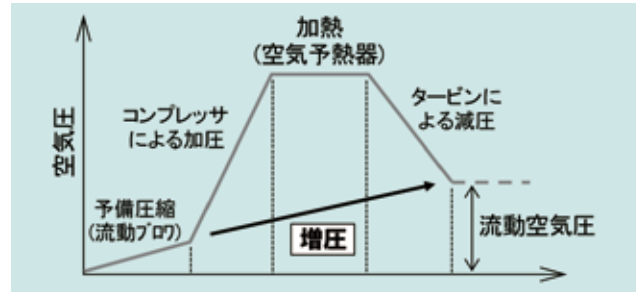


図 10 タービンアシスト設備の圧力変化
Fig. 10 Changes of Air Pressure

4 - 3 挙動特性

「タービンアシスト」は、ブレイトンサイクルを理解できれば、計算で状態変化を推測することが可能である。

表 2 過給機の挙動特性
Table 2 Behavior of Airflow Volume

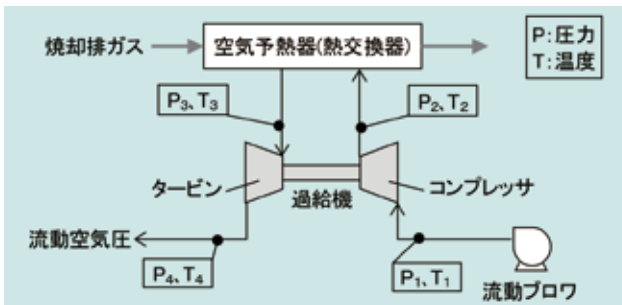


図 11 過給機廻りの影響因子
Fig. 11 Factors Influencing Turbocharger

熱力学の知見によれば、過給機廻りの状態量(図11)は、過給機の挙動特性によって、送風量は表2のように変化する。実証試験設備は、流動ブロウでコンプレッサ入口圧力 P_1 を調整して制御している。また、実証試験においては、ほかの影響因子の変化を受けて過給機の挙動が予測通りに変化することなどを確認した。

「タービンアシスト」で使用する過給機は、特にタービン入口温度 T_3 の影響を受け、タービン入口温度 T_3 が高い方が送風量が増加する。対して、コンプレッサ入口温度 T_1 が高い場合(：気温が高い状態に相当)や、タービン出口圧力 P_4 が高い

影響因子	上昇時	低下時
コンプレッサ入口圧力 P_1	送風量増加	送風量減少
コンプレッサ入口温度 T_1	送風量減少	送風量増加
タービン入口温度 T_3	送風量増加	送風量減少
タービン出口圧力 P_4	送風量減少	送風量増加

場合(：流動床炉への送風圧力=流動空気圧が高い状態に相当)には送風量が減少する。

例えば気温の影響を考慮すると、冬期と夏期で 30°C の気温差がある場合、コンプレッサ入口温度 T_1 も 30°C の差が生じるため、送風量が減少する夏期は、タービン入口温度 T_3 を冬期より 70°C 程度引き上げる(高くする)必要がある。タービン入口温度 T_3 の調整代が不十分だと、夏期に期待する省電力効果が得られなくなる、あるいは冬期に制御不能となる不具合が生じる。

設備建設時には、各因子の変動に伴う影響を十分に考慮したうえで、余裕をもって調整できるよう設計配慮する必要がある。

4 - 4 エネルギー利用効率

気体を断熱状態で圧縮、あるいは膨張させると、圧力変化は温度変化をもたらす。具体的には、圧縮する場合は温度上昇、膨張する場合は温度低下する。

気体が過給機を通過する際に、コンプレッサにおける圧力変化 $P_1 \rightarrow P_2$ や、タービンにおける圧力変化 $P_3 \rightarrow P_4$ を受けた場合、コンプレッサ出口温度 T_2 やタービン出口温度 T_4 は、コンプレッサ効率 η_c やタービン効率 η_T により以下の式で示される。

$$T_2 = T_1 \left\{ \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - (1 - \eta_c) \right\}$$

$$T_4 = T_3 \left\{ \eta_T \left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} + (1 - \eta_T) \right\}$$

この式からは、圧力変化に伴う温度変化が、コンプレッサやタービンの効率の影響を受けることが分かる。

実際の過給機のコンプレッサにおける圧縮仕事やタービンにおける膨張仕事には損失があり、過給機の総合効率は船用の場合、60%程度である。現実の過給機を使用する場合、コンプレッサ出口温度 T_2 及びタービン出口温度 T_4 は、 $\eta = 1$ の理想的な圧力変化を受ける場合よりも高くなる。このことは、コンプレッサ及びタービンにおける損失は、通過する気体に熱エネルギーとして蓄積されると解釈できる。

ただし、本プロセスは燃焼空気の予熱も目的としているため、過給機の損失による気体温度の上昇は機能的には実害はなく、実質的にはエネルギー損失の全くない、極めて効率

の良いシステムであると言える。

過給機の効率 η が異なる場合を想定して、設備の運転条件を試算すると図12に示す通りとなる。

過給機の効率が高い方(上图)が、過給機を駆動するための必要熱エネルギー量は少なく、タービン入口温度 T_3 も低い。ただし、流動床炉の燃焼効率を高めるため、もう一つの熱交換器で所定の温度まで流動空気温度を引き上げる必要がある。一方、効率の低い過給機の場合(下图)、タービン入口温度を高くする必要があるが、後流側の熱交換器で所定の流動空気温度まで引き上げるための必要熱エネルギー量は少ない。

結果として、過給機の効率によらず、流動空気の予熱プロセスとして熱交換器で回収する熱エネルギー量は同じとなる。過給機におけるエネルギー損失は、流動空気の予熱を目的とした廃熱回収を損なうことなく、熱エネルギーは、損失なく流動空気の圧力上昇に転換されていることになる。

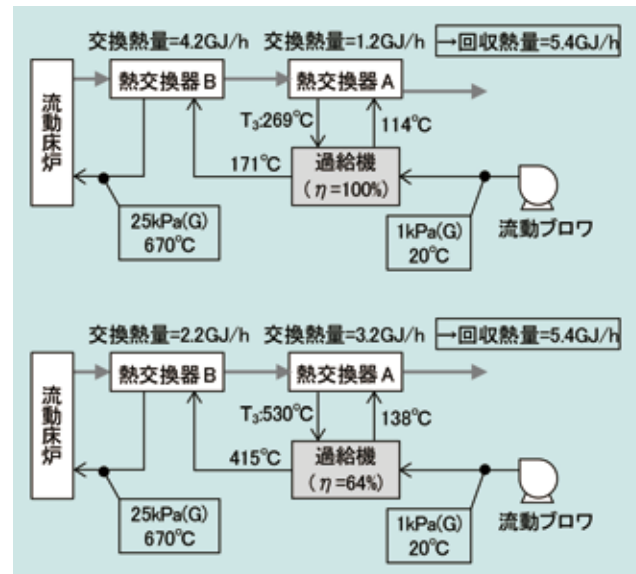


図 12 過給機の効率の異なる設備の試算事例
Fig. 12 Comparison of Facilities with Different Turbocharger Efficiencies

4-5 過給機単独での運用

開発当初、「タービンアシスト」の性能を正確に予測できなかったため、まず、送風機と過給機を併用する機構が成立することの確認及び実証を目標とした。

前記の実証試験を経て、更にタービン入口温度を引き上げることで、過給機の送風量を増加して、送風機を併用しない過給機単独での送風運転ができる見通しが立った。過給機のみで送風する場合、送風機を併用するよりも消費電力量の削減を図ることが可能となる。

そこで、別の処理場において、送風機を併用せず過給機のみで送風することを目標とした試験を追加実施した。改造設備の設計にあたっては、①タービン入口温度の引き上げ(600°C以上)、②送風量を制御するためのタービンをバイパスする調整機構の追加などを実施した(図13)。本設備においては、送風量を増加したい場合には、タービンバイパス量を減らしてタービンの駆動力を増加させ、減少させる場合は逆の操作を行う。

本手法でも問題なく機能することを確認でき、現在も長期

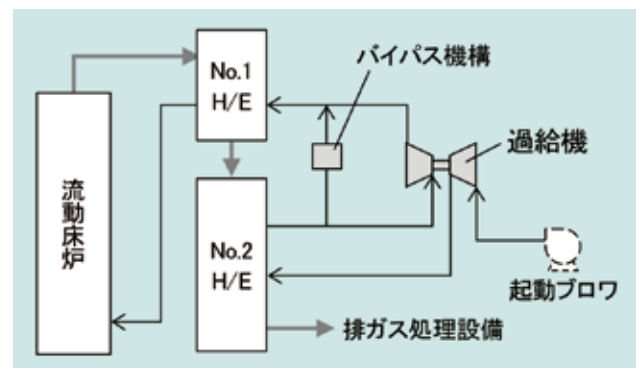


図 13 過給機単独運用型設備の構成
Fig. 13 Configuration of Facility Using Only a Turbocharger

確認試験運転中である。

なお、本手法によれば、送風機を併用しない場合よりも電力消費量を削減できるが、送風機併用運転と過給機単独運転を切り替えるための制御機構などを追加することや、タービン入口温度を上げた分だけ過給機に負荷がかかることなどを考慮する必要がある。

5. おわりに

現在、地球規模での環境保全の流れを受け、下水処理場における省エネは喫緊の課題になっており、大幅な省電力が達成できる過給機活用技術に注目が集まっている。本技術を採用した設備については、既に長野県向けの案件として受注して、建設に向けて

準備中である。また、更なる普及に向けた営業活動を展開しているところである。

本技術の開発にあたり、実証試験用の設備を提供するとともに、多大な御支援をいただいた仙台市及び愛知県に謝意を表する。

SDGs のターゲットへの貢献

7.3 エネルギー効率の改善 従来設備に比べて消費電力量を約2/3に削減

クラッキングチューブ市場向け45Ni系Al入り材の開発

Development of 45% Nickel-based Aluminum-containing Material for Cracking Tube Market

鑄鋼技術部

エチレン製造用クラッキングチューブ市場では、高付加価値製品となるAl(アルミニウム)入り材を採用する顧客が増加している。クボタのAl入り材は、チューブ変形を懸念してクリープ破断強度の高い35Ni(ニッケル)系材をベースとしているが、チューブ変形より耐浸炭性を重要視した、45Ni系材へのニーズが存在する。クボタはこれらのニーズに応えるため、顧客の志向する耐浸炭性の向上を目指し、更に顧客の現地溶接に配慮した合金設計を行った。また、現行のAl入り材の一部の製造工程を省き、現行材の35Ni系Al入り材と同等コストかつ製造期間を短縮した製品を開発した。

【キーワード】

分解管、耐浸炭性、Al入り材料、アルミナ皮膜、現地溶接性

In the cracking tube market for ethylene production, a growing number of customers use materials containing Al (aluminum) which are high value added products. Kubota's Al-containing material is based on 35 Ni (nickel) with high creep rupture strength in order to prevent tube deformation. However, some customers prefer 45 Ni material because carburizing resistance is more important than preventing tube deformation. In order to meet a variety of customer needs, we designed an alloy aiming to improve the carburizing resistance performance required by customers and provide good weldability for on-site welding. Also, we developed a product with the same cost and shorter delivery time as the current 35 Ni based Al-containing material by streamlining a part of the manufacturing process of the current Al-containing material.

【Key Word】

Cracking Tube, Carburizing Resistance, Al-Containing Material, Alumina Forming, Customer's On-Site Welding

関連する SDGs



1. はじめに

エチレン製造用クラッキングチューブ(分解管)は、石油化学産業のエチレン等の製造プラント(エチレンプラント)で、管外面側の熱源により約1000~1100°Cに加熱され、管内を流下する原料のエタンやナフサ等を熱分解してエチレン等を生成する基幹部品である(図1)¹⁾。そのため、その特性には高温環境下での高い耐熱性・耐浸炭性が要求される。一般的にはオーステナイト系耐熱鋼と呼ばれる、Ni-Cr-Fe合金が使用される。分解管は操業中に原料の熱分解反応と、分解管主成分のNi、Fe元素との触媒反応によって管内面に炭素が析出(コーキング、(図2))し、管内径の減少による閉塞や著しい浸炭による材料劣化が生じ、これが基本的

に製品寿命を律速する。更に、高温で使用されるためクリープ変形・破断も製品寿命の原因となり得る。

クボタは、これら課題の解決策の一つとして、2012年にアルミナ皮膜を管内面に形成した分解管AFTALLOY(35Ni系Al入り材、(図3))²⁾の販売を開始した。この技術は、分解管材料の合金設計と材料を保護するアルミナ酸化皮膜の生成条件を最適化し、特殊な加工と熱処理を行うことで、最低限のAl添加量で管内面全体に緻密で均様な高純度のアルミナ皮膜を生成させる。アルミナ皮膜は、従来材料(45Ni、Alなし)に生成されるクロミア皮膜に比較し、より緻密で高純度な酸化皮膜のため、堆積コークから管内面への

炭素の浸入を防ぐことができる。そのため、耐浸炭特性は大幅に向上し、更にアルミナ皮膜で母材を保護する(マスキング)ことで母材主成分と原料の触媒反応を防ぎ、操業中におけるコーキング抑制も可能とした。ここで、分解炉は一定以上のコークが堆積すると除去するために操業を一時停止し、堆積したコークを燃やすデコーキングを行う必要がある。AFTALLOYの緻密なアルミナ皮膜はコークの堆積を減らし、Al入りでない従来材料に比べて2~5倍の連続操業日数を達成する等の実績を積み重ねている。この効果は顧客のエチレンプラントの稼働率やエチレン生産性の向上に繋がり、デコーキング回数を減らすことによるエネルギー効率の改善等に貢献している。近年、特にエタンやプロパン等を原料とする分解炉で採用する顧客が増加している(図4)。

クボタのAl入り材は、耐コーキング性、耐浸炭性だけでなくチューブ変形も重要視してクリープ破断強度の高い35Ni系材を

ベースとし、クリープ破断強度を低下させるAl添加量を最低限とした。一方で、チューブ変形よりも更なる耐浸炭性の向上を期待する顧客が存在する。これらの顧客は、具体的にアルミナ皮膜が劣化して、皮膜で母材を保護できない場合に母材自体の耐浸炭性を強化させる元素としてNiの多い材料や、そもそもアルミナ皮膜が劣化しにくい高Alの材料を希望している。Niは添加量を増加させると母材への炭素の内部拡散を抑制させるため、耐浸炭性の向上により製品の寿命延長効果が見込める。Alは添加量を増加させるとアルミナ皮膜を強化して劣化しにくくすることができ、長期間に渡ってアルミナ皮膜が母材を保護して操業効率を高めることができる。

以上のことから、顧客要望への対応と、Al入り材の商品ラインアップ拡充を図るため、耐浸炭性及びアルミナ皮膜を強化した、クラッキングチューブ市場向け45Ni系Al入り材の開発を行った。

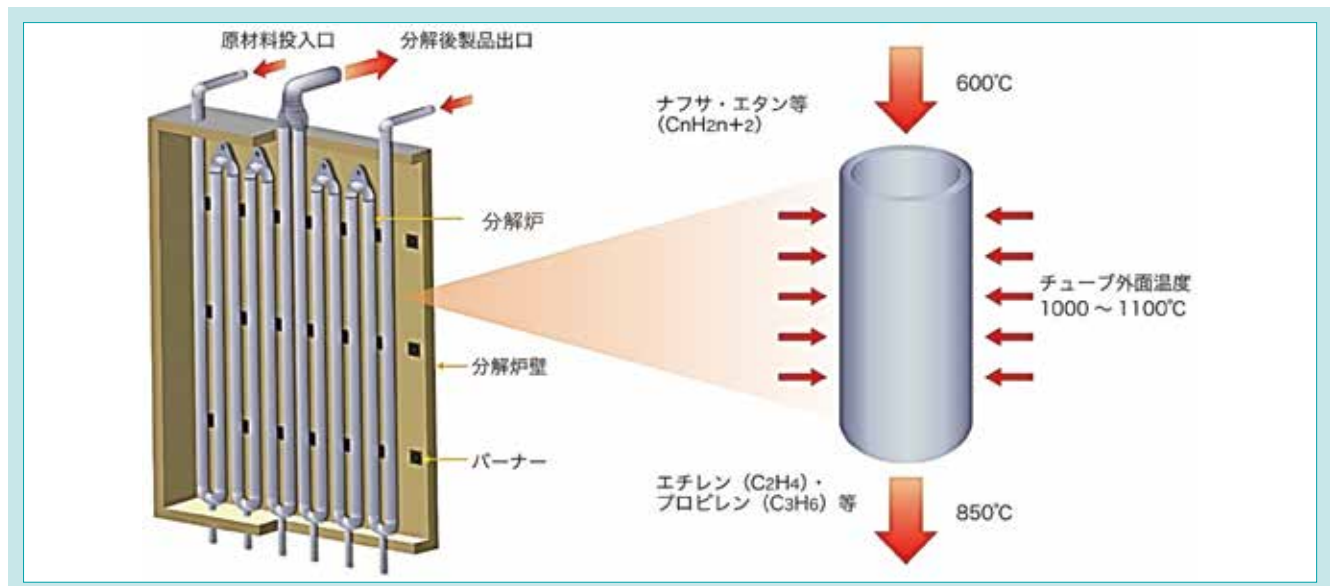


図1 分解管の使用環境¹⁾

Fig. 1 Cracking Tube in Cracking Furnace for Ethylene Production

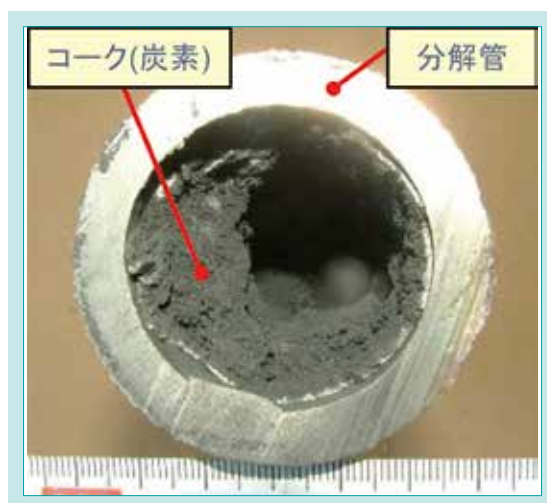


図2 管内の堆積コーク(コーキング)

Fig. 2 Coking in Cracking Tube

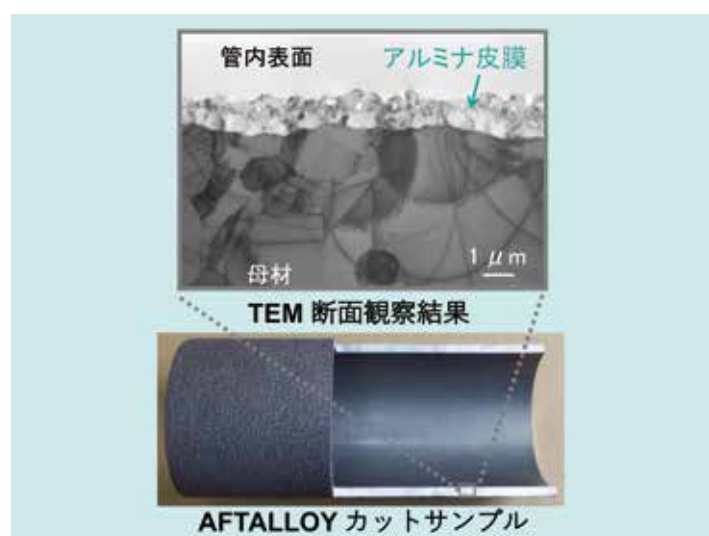


図3 AFTALLOY カットサンプルの外観と組成、およびアルミナ皮膜の断面写真
Fig. 3 Overview and Chemical Composition of AFTALLOY Cut Sample and Cross Section View of Alumina Layer

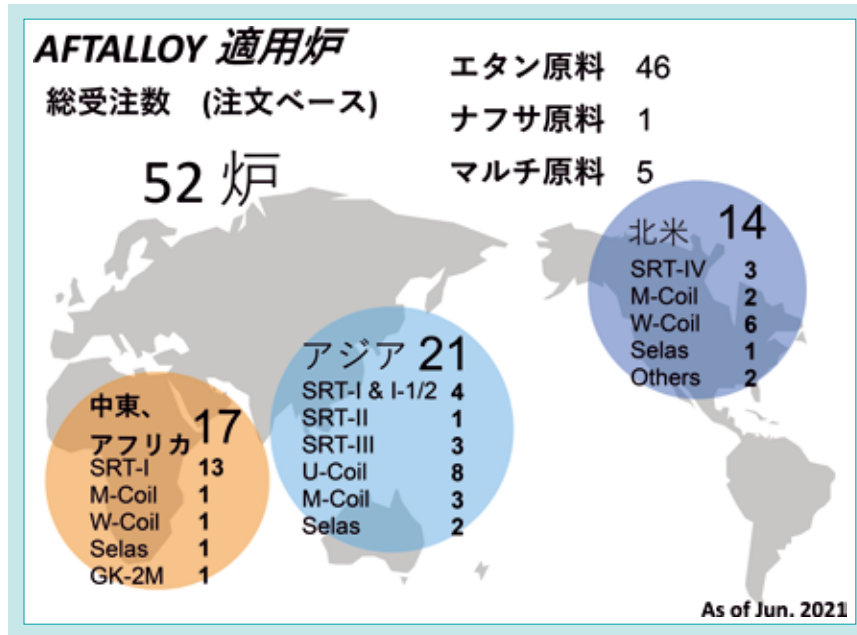


図4 地域別のAFTALLOY採用炉(2021年6月時点)
Fig. 4 Number of Commercial Furnaces Installed AFTALLOY as of June, 2021

2. 開発のコンセプトと目標値

2-1 開発のコンセプト

45Ni系Al入り材は、Ni及びAlの添加量を増加し、製品寿命の向上及び長期間の操業効率の向上を目指す。更に、クラッキングチューブは客先での現地溶接が必須となる。そこで、従来材同等の良好な溶接性を有することで現地溶接を容易にする。最後に、Al添加量を増加することでアルミナ皮膜の

生成を容易にした効果を活用して、AFTALLOYのアルミナ皮膜生成に必要な特殊な製造工程を簡略化して、造り易さを志向することで、本来であればNi原材料増分が製造費に上乗せされるところを、従来材同等に製造費を抑え、製造期間も短縮する。

2-2 目標値

45Ni系Al入り材の開発目標を以下に設定した。

- ① 製品寿命の向上:耐浸炭性がAFTALLOYの2倍以上
- ② 長期間の操業効率の向上:AFTALLOYと比較し、加速試験後のアルミナ皮膜が層状に生成

- ③ 良好な溶接性:溶接試験にて割れなし
- ④ 製造費:AFTALLOY同等
製造期間:AFTALLOY比10%短縮

3. 解決すべき技術課題

一般的にオーステナイト系耐熱鋼は、Ni及びAlが増加することで耐浸炭性が向上する。しかしAl量の増加は組織中に、高硬度・高強度かつ低延性のAl化合物が生成されることで、延性値をはじめとした機械的特性の低下が発生する。ここで、

接性は母材に含まれる他元素の影響も受けるが、延性値の低下は溶接時の凝固収縮割れに繋がる。そのため合金組成そのものを最適化し、Al化合物が生成しても従来材料同等の延性値を有し、溶接性に優れた材料の開発が必要になった。

4. 開発技術

4-1 合金設計技術

4.1.1 合金設計技術の課題

45Ni系Al入り材は、上述した課題を解決するために様々な成分組成で評価を検討した。しかし実際の評価を行うには、

鋳造品を製作し、各種試験を行う必要があり、思ったように開発のスピードが上がらなかった。

4.1.2 合金設計技術の解決策

開発スピードを上げるために、成分組成及び析出組織、固液相線温度を平衡状態図シミュレーションソフト「Thermo-Calc」を用いて100件以上の解析及び評価を実施した。事前に解析にて評価することで、実験を行う試験体数を低減し

た。そこから適切な成分組成を選択し、置注鑄造及び遠心鑄造を行い、それぞれ20件以上の試験体について、実際に試験・評価した。

4-2 開発品の評価

本開発品は置注鑄造及び遠心鑄造を用いて試験体を作成した。試験体は開発品の45Ni系Al入り材(KHR45AH)、比較材に35Ni系Al入り材(AFTALLOY)及び従来材である45Ni+Al

なし(KHR45A)、を用いて評価した。表1は各材料の成分組成を示す。

表 1 化学組成
Table 1 Chemical Compositions (wt%)

材料			C	Si	Mn	Ni	Cr	Nb	Al	Others	Fe
開発材料	45Ni系Al入り材	KHR45AH	0.4-0.6	<1.0	<1.0	43-47	23-27	<1.8	3-5	<0.5	Bal.
従来材料	35Ni系Al入り材	AFTALLOY	0.4-0.6	<1.0	<1.0	33-37	23-27	—	2-4	<0.5	Bal.
	45Ni材 Alなし	KHR45A	0.4-0.6	<2.0	<2.0	40-46	30-35	<1.8	<0.5	<0.5	Bal.

4.2.1 酸化皮膜の評価

図5は試験体の酸化皮膜の断面観察結果を示す。初期状態の酸化皮膜の生成条件は、KHR45AHはAFTALLOYに比較しAl添加量を増加しているため特殊な加工及び熱処理を施さずに、客先での操業を模擬し水蒸気で熱処理を実施した。KHR45Aも客先での操業を模擬し水蒸気で熱処理を実施した。一方で、AFTALLOYはアルミナ皮膜の生成を促進させるために特殊な加工及び熱処理を実施した。経年劣化の評価では初期状態の酸化皮膜に、実機の操業よりも高温で一定時間保持した後に常温まで冷却、を繰り返して加速試験を実施した。

初期状態の酸化皮膜の観察結果から、KHR45AHとAFTALLOYはともにアルミナが層状かつ均一に生成しており、アルミナ皮膜であることを確認した。更にKHR45AHはAl量をAFTALLOYより多くすることで、初期状態でAFTALLOYに必要である特殊な加工や熱処理を施すことなく、アルミナ単層に近い層状皮膜を確認した。この結果を受け、KHR45AHではAFTALLOYに比較し特殊な加工や熱処理を省くことができ、上述した目標④を達成した(製造費:AFTALLOY同等、製造期間:AFTALLOY比10%短縮)。一方で、KHR45Aは主に

クロミアが層状に生成した。

次に、経年劣化後の酸化皮膜の断面観察結果としては、KHR45AHはクロミア皮膜の下部にアルミナ皮膜が観察された。これはアルミナ皮膜の剥離等が発生後、一旦クロミア皮膜が生成するが、クロミア皮膜は十分に緻密ではないために酸素の内部拡散が起こり、クロミア皮膜の下部にアルミナが生成し、更にAl添加量が多いために一様にアルミナ皮膜が生成した。AFTALLOYも同様にクロミア皮膜の下部にアルミナが生成したが、クリープ破断強度を高めるために最低限のAl添加量に抑えたため、層状ではなく隙間の多い塊状のアルミナが生成した。また、KHR45Aはクロミア皮膜が肥大化した。

以上の結果から酸化皮膜の経年劣化に対する評価は、KHR45AHはAFTALLOYに比較して酸化皮膜の劣化が抑えられ、層状のアルミナ皮膜を維持できることを確認した(目標②達成)。KHR45AHは、層状のアルミナ皮膜が存在することで長期間に渡り母材を保護することが可能になり、使用中の耐コーキング性の低下が抑えられ、顧客の操業効率向上を長期間に渡り維持することが期待できる。

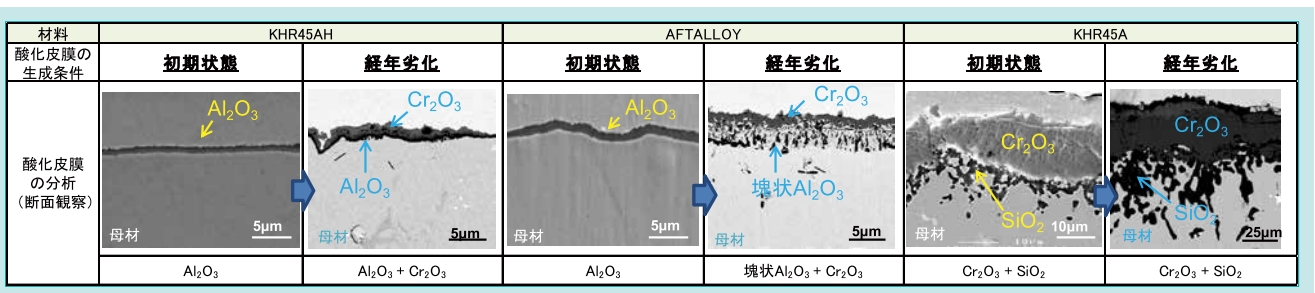


図 5 酸化皮膜の比較
Fig. 5 Comparison of Oxidation Film Formation

4.2.2 耐浸炭性の評価

図6は図5で観察した試験体の浸炭試験の結果を示す。浸炭試験はメタンガスを用いて高温加熱状態で一定時間保持した後に断面を観察し浸炭深さを測定した。浸炭深さは浅いほど炭素の浸入を防ぐ耐浸炭性に優れることを示す。

初期状態の浸炭試験の結果は、KHR45AH及びAFTALLOYでは浸炭が確認されなかった。これはアルミナ皮膜が緻密なため、炭素の内部への浸入を防ぎ、浸炭されなかったことを示唆する。一方で、KHR45Aは浸炭が確認された。クロミア皮膜はアルミナ皮膜に比べると緻密ではなく、炭素が内部へ浸入しやすいためである。

次に、経年劣化後の浸炭試験結果では、KHR45AHは浸炭していない箇所と浸炭している箇所の両方が確認された。浸炭していない箇所はアルミナ皮膜が存在し浸炭を防いで

いる。浸炭している箇所は母材のNi量の増加による効果で、35%Ni材のAFTALLOYに比較し炭素の内部拡散が起こりにくく、浸炭深さはAFTALLOYの半分以下となっている。

また、AFTALLOYも塊状ではあるがアルミナが生成しており、KHR45Aに比較すると浸炭深さが浅く、優れた耐浸炭性を有していることを確認した。

以上の結果から、初期状態の耐浸炭性は、KHR45AH = AFTALLOY > KHR45A、経年劣化後の耐浸炭性は、KHR45AH > AFTALLOY > KHR45A、であることを確認し、浸炭深さの結果からKHR45AHの耐浸炭特性はAFTALLOYの2倍以上であることを確認した(目標①達成)。

耐浸炭性の向上により、開発品のKHR45AHはAFTALLOY、KHR45Aに比較し製品寿命の延長が期待できる。

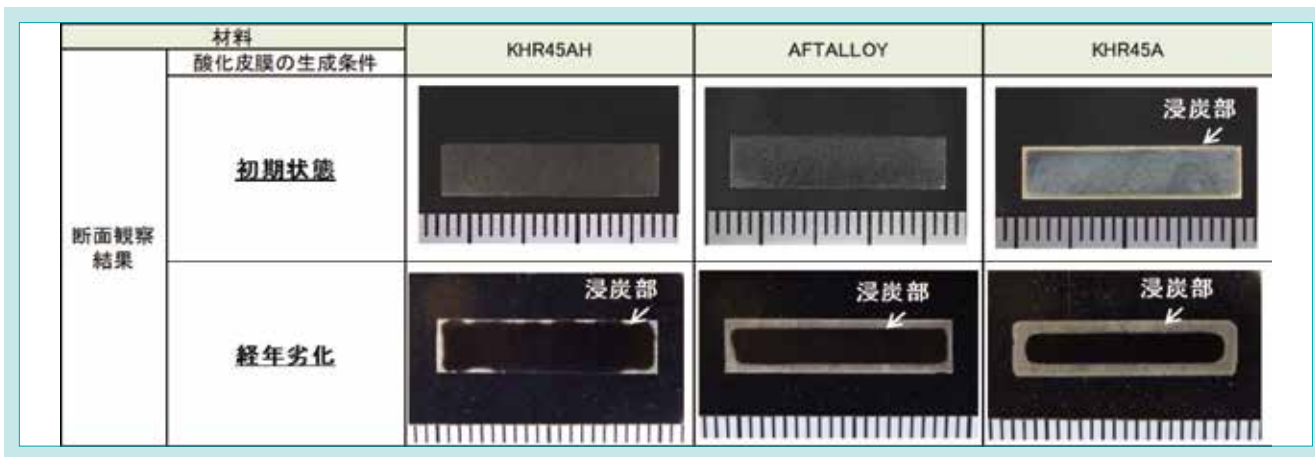


図6 耐浸炭特性

Fig. 6 Anti-Carburization Property

4.2.3 溶接性の評価

一般的にオーステナイト系耐熱鋼は、耐浸炭性やクリープ破断強度等の高温強度を有する合金鋼で、成形性や溶接性も優れている材料である。更にAl、Cr、Si等を添加することで更に耐浸炭性を向上させることができる。しかし、Al等の添加物は高硬度・高強度かつ低延性の化合物や低融点化合物を生成することで機械的特性、特にクリープ破断強度や延性を低下させることが知られている。延性の低下は溶接時の凝固収縮に伴う割れの原因となり、溶接性の低下に繋がる。更に溶接性は合金中のC量、Cr量、Nb量等の各種元素のバランスによっても変化するため、延性を向上させると同時に溶接が可能な合金を調査する必要があった。そこで解析を用いて高硬度・高強度かつ低延性となる化合物の析出が少ない成分組成を探索した。その結果、Crが最も影響の大きい元素であることを突き止めた。KHR45Aでは45%Niに対し、Crは30~35%添加されている。Crは炭化物を生成して母材の強度を向上させ、クロミア皮膜を生成させて耐浸炭性を向上させるために重要な元素である。しかし、KHR45AHは高いNi量とAlを添加することで十分な耐浸炭性を有するた

め、Crの効果は主に強度への寄与となる。そこで従来材同等の強度を有しつつ延性値が高いCr量を、実製造品を用いて評価した。

Crの強度及び延性に与える影響を図7に示す。比較材として、AFTALLOY及びKHR45Aを示す。Cr添加量を25%とすることでCrが30%の材料に比較し、高い延性を得ることができ、強度も比較材同等を維持した。Crが生成する炭化物は高硬度・高強度であり、ネットワーク上に広がることで合金の強度を向上させる。しかし、延性は強度に反比例して低下する。KHR45AHはAl添加の影響でAl化合物が基地及び炭化物を強化することで、合金全体の強度が向上し延性が低下していた。そのためCr量を低下しても強度は大きく低下せず、延性が回復したと考える。

これらの結果と合わせて、溶接性に影響のあるC、Nb等を最適化した成分にて溶接試験を実施した。溶接試験結果として突合せ溶接後の断面観察写真を図8に示す。溶接部は割れ等の欠陥がなく、KHR45AHの良好な溶接性を確認した(目標③達成)。

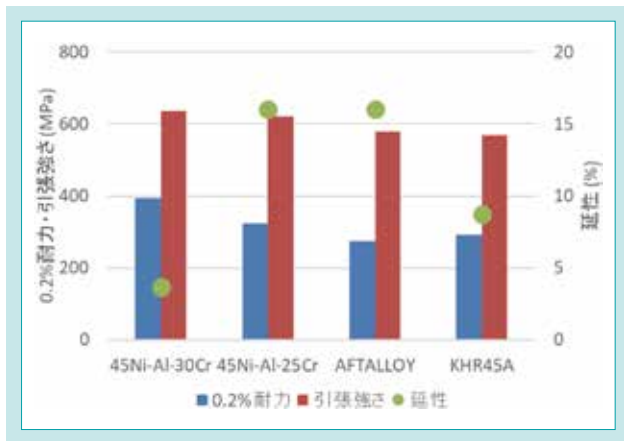


図7 引張試験結果
Fig. 7 Tensile Test Results

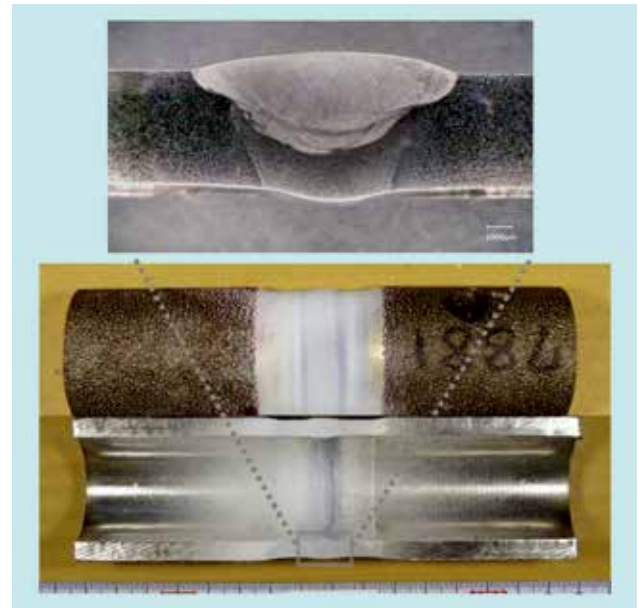


図8 溶接試験結果
Fig. 8 Welding Test Results

4.2.4 クリープ破断強度の評価

最後にクリープ破断強度の試験結果を表2に示す。一般的にクラッキングチューブは3~5年程度使用されることから10 000 hrs以上のデータが必要だが、KHR45AHは現在調査中のため、現時点の評価を示す。上述したようにAFTALLOYはアルミナ皮膜を有しつつクリープ破断強度に優れた材料であり、クリープ変形・破断等が製品寿命を律速している顧

客に最適な材料である。

一方で、KHR45AHはAFTALLOYよりもクリープ破断強度は低いが成分組成の最適化によりクリープ破断強度の強化に考慮した材料である。更にアルミナ皮膜を有し、長期間に渡り耐浸炭性及び操業効率の向上を維持する材料であり、浸炭が製品寿命を律速している顧客に最適な材料である。

表2 クリープ破断強度(参考例)
Table 2 Creep Rupture Strength (Reference Example) (MPa)

材質	温度	1000°C		1100°C	
	破断時間	100hrs	1000hrs	100hrs	1000hrs
KHR45AH		29.9	22.5	16.7	11.7
AFTALLOY		30.4	22.9	17.1	12.0

5. おわりに

KHR45AHは耐浸炭性向上のニーズ及びAI入り材の製品ラインアップを拡充させるために開発された製品である。本開発品は浸炭律速の製品寿命の延長及び長期間の操業効率の向上が実現でき、更に良好な現地溶接性、製造費削減及び製造期間短縮も達成した。

現在は北米を中心にAI入り材の採用が加速している。現行のAFTALLOYに加えてKHR45AHを追加投入することで、顧客の多様なニーズを満たし、エネルギー効率の改善や天然資源の持続可能な管理及び効率的な利用に貢献する。

SDGsのターゲットへの貢献

7.3 エネルギー効率の改善 長期間に渡る操業効率の向上

12.2 天然資源の持続可能な管理及び効率的な利用 製品寿命向上による取替機会の低減

参考文献

- 1) Kubota: 分解管、https://www.kubota.co.jp/product/materials/products/cracking_coil/
- 2) Kubota: AFTALLOY、https://www.kubota.co.jp/product/materials/products/cracking_coil/AFTALLOY.html

アジアにおける水インフラ整備事業の紹介

Introduction of Water Infrastructure Development Projects in Asia

環境海外推進部

関連する SDGs



1. はじめに

社会における水インフラは、ベーシックヒューマンニーズを満たすために不可欠であるとともに、地域の経済発展においても重要な役割を担うことから、SDGsにおいても到達目標6や11にターゲットが掲げられている。

一方アジアにおいて、一部の主要都市では水道インフラ開発が進み上水道普及率も近年上昇してきているものの、水道普及率が未だ50%未満の新興国も多く、24時間安定した給水や安全な水質を確保することが、重要なインフラ開発課題であると各国で

位置付けられている。

クボタでは、日本やアジアで水関連の製品供給やプラント建設を行ってきた経験を活かし、これからのアジアの水インフラ開発に貢献していくことを事業方針に掲げ、活動を強化してきている。本報では、2017年に受注した「ヤンゴン首都圏上水道整備事業（フェーズ1）」が稼働を開始したことから、プロジェクトの概要とともに、日本国内と異なる海外特有の諸課題へ取り組んだ事例について紹介する。

2. プロジェクトの概要

2-1 プロジェクトの背景

ヤンゴン市は人口500万人超のミャンマー国最大の都市で、その上水道の歴史は古く、1842年から整備が開始されてきた。ただ、近年は人口増加に整備が追いついておらず、同市で水道事業を所掌するヤンゴン市開発委員会(以下、「YCDC」という)から給水を受けている人口は全市の35%に留まっていた。また、水源は約9割が良好な水質とはいえない貯水池に依存しているながら、その3分の2が浄水処理されずに直接給水され、塩素消毒も行われていなかった⁹⁾。更に、未給水エリアでは、市民の生活用水は市内に点在する小規模雨水貯水池に水汲み(図1)に行くか、その水をタンク付きのカート(図2)で販売している“水売り”から購入するしかなく、安全な水をいつでも確保できる状態ではなかった。

このような状況の下、YCDCでは逼迫する水需要への対策を喫緊の課題と位置づけ、都市開発の中でも上水道サービス

の改善に高い優先度を持って取り組んできている。また、日本政府・JICAも、2012年4月制定の対ミャンマー経済協力方針である「国民生活向上のための支援」及び「持続的な経済成長のために必要なインフラや制度の整備等の支援」に基づき、ヤンゴン市の上水道への支援を開始した。以降、各種事前調査を経て、本報で紹介する円借款プロジェクト「ヤンゴン首都圏上水道整備事業」が計画され、2017年から実施されている。



図1 水汲みの様子
Fig. 1 Water Drawing



図2 水売りカート
Fig. 2 Water Seller Cart

2-2 プロジェクトの概要

ヤンゴン首都圏上水道整備事業では、安心・安全な水を供給することを目的として、YCDCが建設したラゲンビン浄水場から送水するための送配水ポンプ場3箇所や送水管路、市東部の水道未普及地域解消のための市内配水管路網、そして全市への未消毒給水状態解消のための次亜塩素酸ソーダ

による消毒設備4箇所が建設された。なお、プロジェクトエリアの南部に位置し、ミャンマーと日本で共同開発されているティラワ経済特区へ安定的に送水を行い、経済活性化に繋げることも大きな目的の一つであった。

本プロジェクトはICB01からICB05までの5パッケージに分け

て発注され、クボタグループでは、クボタがJV(共同企業体)でポンプ場と塩素消毒施設の建設を担うICB01を、そして、クボタ建設がJVで送水管の建設を担うICB02をそれぞれ受注した。

表 1 プロジェクトと各パッケージの概要

Table 1 Summary of the Project and Each Package

国名	ミャンマー連邦共和国		
案件名	ヤンゴン都市圏上水整備事業(フェーズ1)		
事業実施機関	ヤンゴン市開発委員会(YCDC)		
ドナー	JICA		
総事業費	312億円(うち、円借款対象額237億円)		
各パッケージの概要	パッケージ	内容	受注者
	ICB01	・ポンプ場(3箇所:ポンプ合計17台) ・配水池(2箇所:21 000 m ³ , 28 000 m ³) ・監視制御設備(ポンプ場) ・塩素消毒施設(4箇所) ・浄水場管理棟	POSCO E&C/ クボタ JV
	ICB02	・送水管布設(ダクタイル鉄管) - φ1000:14.8 km - φ700:32.5 km	クボタ建設/ 丸紅プロテックス JV
	ICB03	・河川横断部の送水管布設 - 距離:約820 m - 本管口径:700 mm	日本企業
	ICB04	・配水管布設 - φ300~φ700:72 km - φ100~φ200:224 km ・各戸への水道メータ取付	中国/ ミャンマー企業 JV
	ICB05	・ICB04で取り付ける水道メータの調達	ミャンマー企業

それぞれのパッケージの概要を表1に、位置図を図3に示す。

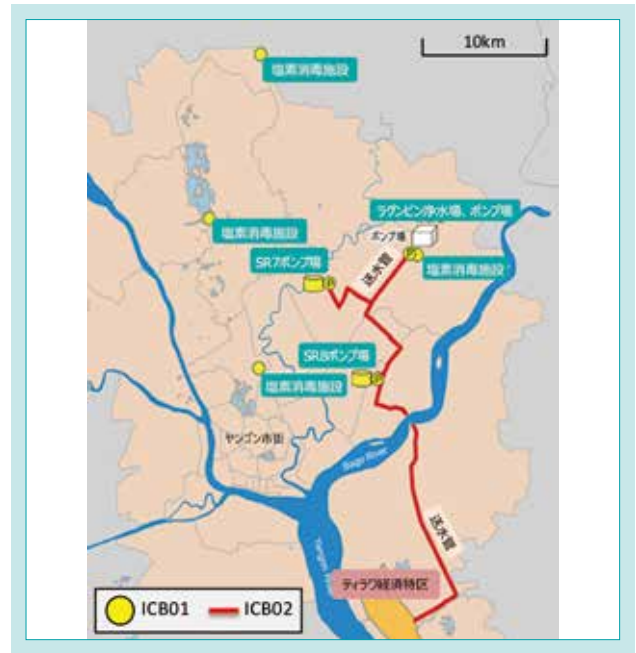


図 3 プロジェクトの位置図

Fig. 3 Project Map

3. プロジェクトでの取り組み

クボタとJVパートナーのPOSCO E&C社(以下、「P社」という)は、クボタが機械・電気設備、P社が土木・建築設備を担当して、本プロジェクトのICB01パッケージを2017年12月5日に受注し、2018年1月29日から着工した。

クボタではポンプ・鉄管等の自社製品を含む各設備のエンジニアリング(詳細設計)、製作・調達、輸送(通関)・受入検査、現地での機器据付け、試運転と、多岐にわたる業務をP社と工程調整を

行いながら、同時かつ適時に進めてくることで、3年以上に及ぶ工期を経て、無事に無災害にてYCDCに施設を引き渡すことができたが、このような大規模設備や多様な業務を全て現地でごなすにあたり、様々な課題にも直面した。特に、プロジェクト後半では新型コロナウイルス感染症やミャンマーの政変への対策も余儀なくされたが、都度解決をしつつ、着実なプロジェクトの進捗を図ってきた。本章ではそれらの取り組みを紹介する。

3-1 エンジニアリング(詳細設計)、調達

詳細設計は、YCDCから提示された設備の仕様や図面を基に行われるが、実際に設計を進めるにつれて、様々な設計変更を要する課題が日常的に発生した。それらの多くは、大規模プロジェクトゆえの齟齬や干渉であったが、それらを解決するために、土木範囲も含むプラント施工図面をクボタで作成した上で、YCDCやP社と変更の詳細打合せを現地でも何度も繰り返し、他設備や土工事等との設計や工程の変更・調整も含めて、

一つずつYCDCの承認を得ていった。また、既に要求仕様が旧式となっていた設備は、施設を運転・維持管理するYCDCの使い勝手を考慮して最新仕様を提案するなどの交渉を行った。

よりよい品質のものをできるだけ安価に調達することに努め、その結果、本プロジェクトでの調達先は8か国にわたり(表2参照)、調達アイテム数は主要な機器だけで少なくとも約1400種に及ぶこととなった。図4に主要機器のクボタ製ポンプを示す。

表 2 主要な調達アイテム

Table 2 Procurement Items

調達国	調達機器
日本	送配水ポンプ(クボタ製)、ダクタイル鉄管(クボタ製)、塩素タンク、薬品注入ポンプ、水中ポンプ、特殊バルブ、電気制御盤、水質分析機器
タイ	バルブ、ゲート、監視制御装置(SCADA)
ベトナム	鋼管、エアベッセル
中国	管路部材
台湾	クレーン、ホイスト
韓国	ポンプ用モータ、ポンプ起動制御盤
イギリス	特殊バルブ(逆止弁)
ミャンマー	工事部材等

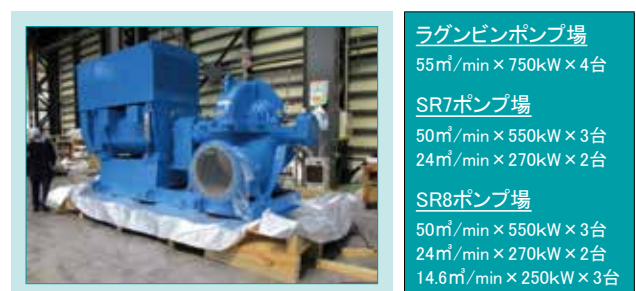


図 4 本プロジェクトで採用されたクボタ製ポンプ

Fig. 4 Kubota Pump Used in the Project

3-2 製作・輸送

本プロジェクトでの製作・調達アイテム数は膨大で、主要機器だけで船積み52回、コンテナ総数152本の輸送を行った。

当初、船積みはより少ない回数で計画していたが、現地での保管スペースが限られていたことや、保安上長期保管が好ましくない等の観点から、少しずつエンジニアリングの進捗や工事のタイミングに合わせて発注し、都度現地に輸送することが必要であった。

ただ、輸送制限(重量・通行時間)や悪路・樹木等の障害物による輸送上の悪条件に加え、半年間の雨季には土木工事の度重なる遅延等も発生し、スムーズな物流は到底期待できない状況であったが、次第に、輸送上の障害や工事の進捗を予測できるようになり、現場・発注先・輸送業者と緻密に調整を重ねて各国からの輸送の時期を調整することで、現地での機器の保管期間を数週間～2か月にまで短縮するこ

とができた。なお、これらの活動は、滞りのない工事進捗や保管倉庫費用削減を実現しただけでなく、発注先の製作負荷の平準化や、湿気に弱い電気・計装品の納入前故障ゼロにも貢献した。保管倉庫での受入検査の状況を図5に、現場での荷下ろし状況を図6に示す。

また、本プロジェクトはYCDCにとって初の円借款案件であり、YCDCとの契約における関税や輸入税支払いの仕組みが、プロジェクト初期にはまだ確立されておらず、YCDCの手続き遅延に伴う通関の遅れも度々発生していたが、粘り強く、YCDCと協議を繰り返し、クボタからYCDCに今後1年間の船積みリストを提出し、それに基づきYCDCで関税支払い費用をデポジットしてもらおう方式を提案し、その後の通関遅延を解消することができた。



図5 ポンプ廻りの鋼管の受入検査
Fig. 5 Acceptance Inspection (Steel Pipe)



図6 現場荷下ろし状況(薬品タンク)
Fig. 6 Unloading at Site (Chemical Tank)

3-3 据付工事・試運転

本プロジェクトでは、現地で工事を進めるために体制づくりから開始し、ヤンゴン市内6箇所での工事を日本人エンジニア2名で監督していくため、本プロジェクト専任のミャンマー人スタッフを8名雇用し、現地工事業者にもポンプや水関連機器の据付工事経験を有する会社を選定・採用した。

ただ、施工は日本と同等レベルの品質を確保すべく監理を行ってきたが、最初から即戦力とはならないため、国民性の違いも把握した上で、クボタの施工管理の考え方を理解してもらうよう努めた。例えば、ミャンマー人は総じて真面目な気質であり、一度理解すると決められた通り実直に作業をするが、時には作業のポイントを正確に理解していないこともあり、クボタのエンジニア自身の目で何度も作業状況を確認しながら根気強く説明を繰り返すことで、真の理解を得られることができた。

また、あらゆる工事現場と同様、ミャンマーでも安全教育は徹底し、現地工事業者と共同で作業毎の事前リスク抽出や、毎日の朝礼(図7)、クボタ主催の定期的な安全教育等、日本と同レベルの安全管理を実施した。度重なる設計変更や、雨季の影響、マイ

ナートラブル等で決して予定通りに進まない中、延べ28,000人以上の作業員の中から、1件の事故も起こさず施工を完了できた。

これは、東南アジア特有の猛暑における熱中症対策や感染症対策(チクングニア熱等)にも充分配慮したことにより達成できた。特に新型コロナウイルス感染症対策でマスクをしながらの猛暑下での作業は過酷で、そういう中でも作業を進めるには適切な休憩や水分・塩分補給等が不可欠であった。



図7 安全朝礼の状況
Fig. 7 Safety Morning Tool Box Meeting

なお、本プロジェクトの施工期間の終盤には、2020年に新型コロナウイルス感染症、2021年にはミャンマー政変の影響により、合計108日間工事を停止せざるを得なかった。更に、クボタの現場監督や設計担当者も現地入りできなかったが、それまでの指導が功を奏し、ミャンマー人スタッフだけで残りの施工管理をやり遂げることができた。試運転や検査にお

いても、必要なメーカからの指導員が現地入りできなかったが、要領書を事前に具体的かつ詳細に作成した上で、各国からリモートで試運転指導を実施することでミャンマー人スタッフだけで無事に終えることができた。本プロジェクトでの工事の状況を図8、図9に示す。



図8 ポンプの据付状況
Fig. 8 Pump Installation



図9 ダクタイル鉄管(口径 1600 mm)の施工状況
Fig. 9 Ductile Iron Pipe Installation (DN 1600 mm)

4. おわりに

雨季による工事遅延や新型コロナウイルス感染症や政変等の予期せぬ事態にも見舞われ、アジアで日本と同じことを当たり前にやり抜くことの難しさを痛感したプロジェクトであったが、ラガンビンポンプ場(図10)は2020年3月に、そのほか2箇所の送配水ポンプ場は2021年8月までにYCDCIに引渡しを行うことができた。また市内ポンプ場4箇所の塩素消毒施設においても、2020年2月までに引渡しを行い、それぞれYCDCIにより一部供用が開始されている。

JICAによる事業効果の試算では、各施設の本格稼働後に、ヤンゴン市の給水人口は190万人から330万人(水道普及率54.4%)に増加、塩素消毒の連続実施率は100%になる¹⁾とされており、同市の水インフラの発展に貢献するという目標は達成できたと考える。

本報では、ヤンゴン市でのプロジェクト事例を紹介したが、東南アジアの都市では、今後も下水道整備のプロジェクトが多数予定されている。更に下水道整備や洪水対策も既に水インフラ

開発の中で大きな課題として進められつつある。クボタはこれまでのアジアでの経験と、幅広い水関連の自社製品とエンジニアリング力、そしてそれを現地で実現する建設力を活かし、現地の状況に寄り添った水インフラ施設の建設を通じて、これからもSDGsの目標達成に貢献していく。



図10 完成したラガンビンポンプ場
Fig. 10 Lagunbyin Pumping Station

SDGs のターゲットへの貢献

6.1 安全で安価な飲料水のアクセス強化 ヤンゴン市の上水道普及率向上と塩素消毒実施に貢献
(上水道普及率35%→54%、塩素消毒0%→100%)

11.3 包括的かつ持続可能な居住計画・管理能力の強化 ヤンゴン市の水インフラ整備に貢献

参考文献

- 1) 事業事前評価表(ヤンゴン都市圏上水整備事業) (2014)
https://www2.jica.go.jp/ja/evaluation/pdf/2014_MY-P5-1_s.pdf

廃棄物最終処分場の副生塩有効利用技術の紹介

Introduction of Technique Effectively Using Byproduct Salt in a Landfill Disposal Site

クボタ環境サービス株式会社

関連する SDGs



1. はじめに

近年、廃棄物最終処分場の建設において、環境保全と地域調和の観点から、埋立地を屋根で覆い、浸出水を放流せず場内で再利用する無放流システムの導入が増えている。浸出水には高濃度の塩化物イオンが含まれており、無放流システムを採用する場合、この塩化物イオンを取り除く脱塩処理が必要になり、その際副生物として発生する濃縮塩水の処分方法が

問題となる。現状は、大量の化石燃料を使用して濃縮塩水を乾燥塩にして産廃処分している事例が多い。1m³の濃縮塩水を乾燥塩にするには約100Lの重油を要する。今回、濃縮塩水を電気分解して消毒剤として有効利用できる次亜塩素酸ソーダ(以下「エコ次亜」という。)の生成技術を紹介する。

2. 概要

2-1 技術概要

原理は、濃縮塩水を電気分解して次亜塩素酸ソーダを生成するものである。電気分解の方法は無隔膜法であり、濃縮塩水を電気分解すると、陽極では主に塩素が、陰極では水酸化ナトリウムが発生し、電解槽内でそれぞれが混合してエコ次亜ができる(図1)。生成されるエコ次亜の有効塩素濃度は1000~4000 mg/Lである。濃縮塩水の全量を消毒剤として利用でき、地域の資源循環に貢献するリサイクル技術である。

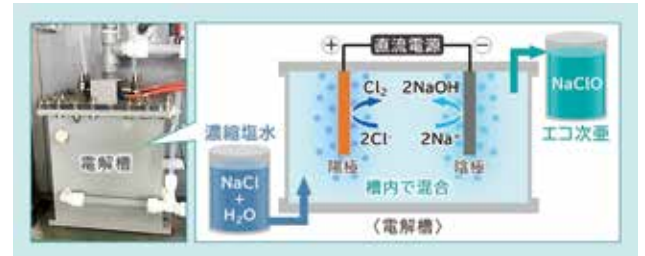


図1 エコ次亜生成装置概要図
Fig. 1 Figure of Eco Sodium Hypochlorite Generator

2-2 エコ次亜技術の特長

2.2.1 地域資源循環システムの構築

エコ次亜の利用先候補として近隣の下水処理場等の排水処理施設を想定している。最終処分場と排水処理施設

の間で、図2のようなリサイクルシステムを構築することにより、濃縮塩水を有効な資源として利用できる。

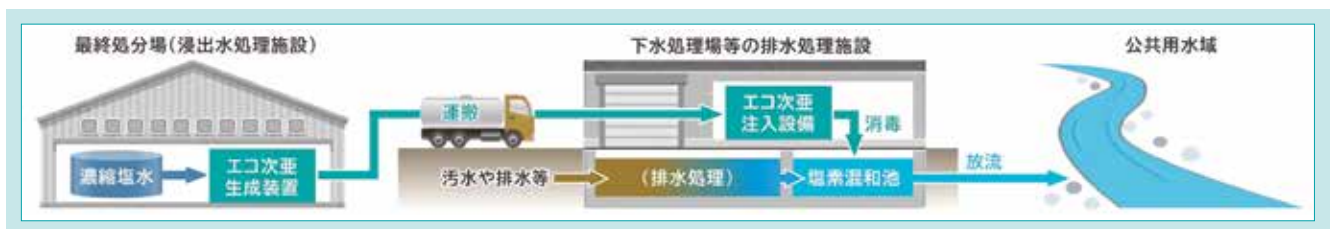


図2 エコ次亜リサイクルフロー
Fig. 2 Recycled Flow of Eco Sodium Hypochlorite

2.2.2 CO₂排出量の削減

エコ次亜技術の最大の特長は重油が不要になることである。濃縮塩水を乾燥塩にする必要がなく、液体のまま

でエコ次亜を生成するので、CO₂排出量の大幅な削減が可能となる。

3. 詳細説明

3-1 エコ次亜の消毒剤としての評価

エコ次亜技術を導入するうえで重要となるのが、エコ次亜の品質である。そこで、一般廃棄物由来の濃縮塩水を原水とした、エコ次亜の実証試験を行った。本試験の目的はエコ次亜の性能と安全性を確認することである。安全

性確認試験では、3生物種を用いたバイオアッセイ試験を行った。試験の結果、エコ次亜の性能・安全性は市販次亜と同等であり、消毒剤として利用できることを確認した。試験内容と結果の一覧を表1に示す。

表1 試験内容と結果
Table 1 Test Contents and Results

	試験名	試験内容	試験結果
性能	持続性確認試験	有効塩素濃度は時間の経過と共に低下する。生成したエコ次亜を1週間静置し、貯留時における有効塩素濃度の持続性を確認した。	1週間後のエコ次亜の有効塩素濃度低下率は市販次亜と同程度であり、エコ次亜の有効塩素濃度の持続性を確認した。
	消毒効果確認試験	消毒前の下水にエコ次亜を注入し、大腸菌群数 [*] の消毒効果を確認した。 ※排水基準:3000 個/cm ³ 以下	エコ次亜および市販次亜ともに次亜注入率1.0mg/L以上で大腸菌群数はゼロになり、市販次亜と同等の消毒効果を確認した。
安全	安全性確認試験	WET(生物応答を利用した排水管理手法)試験を行い、エコ次亜の安全性を確認した。有効塩素を失活したエコ次亜を使用。 ・胚、仔魚期の魚類(ゼブラフィッシュ)を用いる短期毒性試験 ・ニセネコゼミジンコを用いるミジンコ繁殖試験 ・淡水藻類(ムレミカツキモ)を用いる生長阻害試験	消毒時の次亜注入率において、エコ次亜および市販次亜ともに生物への影響はなく、エコ次亜の安全性を確認した。

3-2 CO₂ 排出量削減効果

エコ次亜技術のCO₂排出量を試算した。試算条件とCO₂排出量を表2に示す。試算の結果、エコ次亜技術は重油が不要になる効果が大きく、従来技術に比べてCO₂排出量を約95%削減できた。

表2 試算条件とCO₂ 排出量
Table 2 Calculation Conditions and CO₂ Emissions

	試算条件	CO ₂ 排出量
従来技術 (蒸発処理→処分先)	ボイラー運転に必要な重油と処分先までの乾燥塩運搬にかかる軽油のCO ₂ 排出量	2450 t-CO ₂ /年
エコ次亜技術 (エコ次亜→利用先)	電気分解に必要な消費電力量と利用先までのエコ次亜運搬にかかる軽油のCO ₂ 排出量	69 t-CO ₂ /年

※両技術ともメンテナンスなどのCO₂排出量は含まれていない。

4. 実績紹介

上記の試験は、環境省が実施している環境技術実証(ETV)事業のロゴマーク(図3)と実証番号の交付を受けている。今後の技術の普及拡大に向けて有効に活用していきたいと考えている。ETV事業とは、信頼できる第三者機関(実証機関)が、環境技術を実際の現場等で実証し、その結果を広く公表することで、環境技術の普及を支援する事業¹⁾である。現在、建設中の施設にエコ次亜技術の導入を検討している。



図3 ETV ロゴマーク
Fig. 3 ETV Logo

5. おわりに

本試験で、エコ次亜の消毒効果や安全性を実証することができた。今後も覆蓋型最終処分場の建設は増加すると予測さ

れ、エコ次亜技術は地域資源循環システムの構築及び環境負荷削減の観点から有効な技術であると考えられる。

SDGs のターゲットへの貢献

- 9.4 環境に配慮した技術・産業プロセスの導入によるインフラ改良・産業改善 従来技術よりCO₂排出量約95%削減、環境に配慮した技術
12.5 廃棄物の発生防止、再利用の実施 濃縮塩水を消毒剤として100%再利用、廃棄物の発生防止に貢献

参考文献

- 1) 環境省:環境技術実証事業 <https://www.env.go.jp/policy/etv/> (参照日 2021-08-31)

●
—クボタ技報—

KUBOTA TECHNICAL REPORT

No.55

●編集委員●

農業ソリューション技術部	松下 肇
精密機器技術部	円藤 幸夫
パイプインフラ事業推進部	肝付 兼士
パイプインフラ事業推進部	小谷 正典
環境プラント技術部	松井 寛幸

●事務局●

研究開発統括部	大霜 新三郎
	倉持 克史

●
2022年1月印刷

2022年1月発行

(執筆者・編集委員の所属は2021年12月現在)

————— 禁無断転載 —————

(非売品)

発行所 株式会社クボタ

研究開発統括部

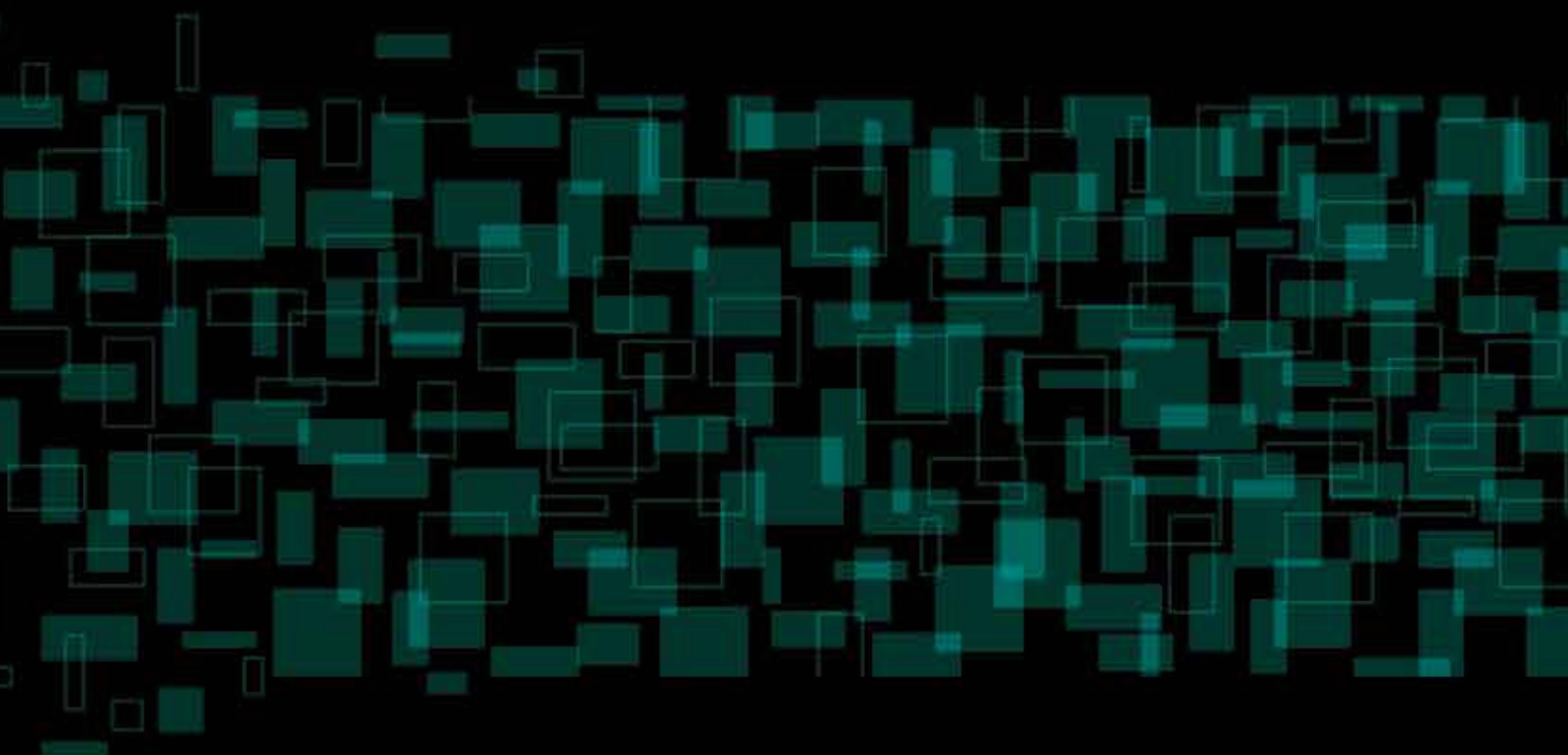
〒556-8601 大阪市浪速区敷津東1丁目2番47号

TEL (06) 6648-2499 (ダイヤルイン)

FAX (06) 6648-2503

印刷 クボタエイトサービス株式会社





株式会社**クボタ**

www.kubota.co.jp