For Earth, For Life
Kubota

KUBOTA TECHNICAL REPORT

クボタ技報 57

JANUARY 2025

ISSN 0916-8249

ISSN 0916-8249
No.57
JANUARY 2025

クボタ技報

KUBOTA TECHNICAL REPORT

クボタ技報

No.57　2025 年 1 月

目　次

巻頭言

On Your Side を体現する研究開発 …… 6

機械部門

国内市場向けコンパクトトラクタ ST シリーズの開発 …… 8

走行解析による耐久性評価手法の開発 …… 14

タイ向け普通型コンバイン DC-120X の開発 …… 20

無人自動運転コンバイン DRH1200A-A の開発 …… 26

中国向け乗用田植機 KA シリーズの開発 …… 32

ユーティリティビークル向けガソリンエンジン GZ850H の開発 …… 38

産業用ディーゼルエンジン V5009 の開発 …… 44

SCR 触媒性能の劣化予測技術の開発 …… 50

大型エンジン鋳物用鋳造方案の設計指針確立 …… 54

ミニバックホー作業範囲拡大技術の開発 …… 58

北米向けコンパクトトラックローダ SVL75-3 の開発 …… 64

製造現場の DX 化を見据えたフィーダコントローラの開発 …… 70

しおれ検知式自動潅水制御システムの開発 …… 76

水・環境部門

パイプ外面欠陥判定技術の開発 …… 82

大口径 EF 継手の開発 …… 86

ベルト型ろ過濃縮機の自動高圧洗浄装置の開発 …… 88

MR デバイスを活用した点検合理化技術の開発 …… 94

TMP 予測モデルを活用した MBR 運転制御技術の開発 …… 98

紹介記事

KRDE (Kubota Research and Development Europe) の紹介 …… 104

新製品紹介

状態基準保全と安定稼働を実現する遠心脱水機の診断機能 …… 108

高圧消火設備用ポリエチレンパイプ【スーパータフポリ HPPE-HF】…… 109

KUBOTA TECHNICAL REPORT

No.57 JANUARY 2025

CONTENTS

Prefatory Note

Embodying "On Your Side" in Research and Development ····· 7

Farm & Industrial Machinery

Development of the Compact Tractor ST Series for the Domestic Market ····· 8

Development of the Method for Durability Improvement by Using Drive Simulation ····· 14

Development of the Combine Harvester DC-120X for Thailand ····· 20

Development of the Unmanned Autonomous Combine Harvester "DRH1200A-A" ····· 26

Development of the Riding Type Rice Transplanter KA Series for China ····· 32

Development of the Gasoline Engine GZ850H ····· 38

Development of the Diesel Engine for Industrial Use "V5009" ····· 44

Development of SCR Catalyst Performance Degradation Prediction Technology ····· 50

Establishment of Design Guidelines of Casting Plans for Large Engine Castings ····· 54

Development of the Expanding Working Range Technique for Mini Excavators ····· 58

Development of the Compact Track Loader SVL75-3 for North America ····· 64

Development of a Feeder Controller with a Focus on DX at Manufacturing Sites ····· 70

Development of an Automatic Watering Control System Based on Wilt Detection ····· 76

Water & Environment

Development of Inspection Technology for the Outer Surface of Pipes ····· 82

Development of a Large Diameter Electro Fusion Socket ····· 86

Development of an Automatic High-pressure Cleaning System for the Gravity Belt Thickener ····· 88

Development of Inspection Rationalization Technology Using MR Devices ····· 94

Development of the MBR Operating System with a TMP Prediction Model ····· 98

Introduction Article

Introduction of Kubota Research and Development Europe (KRDE) ····· 104

New Products

Diagnostic Functions of a Centrifugal Dewatering Machine to Realize Condition-based Maintenance and Stable Operation ··· 108

Polyethylene Pipe for High Pressure Fire Extinguishing Equipment ····· 109

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		深く関連する：★　関連する：●
食料（農業）	水・環境	掲載記事
■		国内市場向けコンパクトトラクタSTシリーズの開発
■		走行解析による耐久性評価手法の開発
■		タイ向け普通型コンバインDC-120Xの開発
■		無人自動運転コンバインDRH1200A-Aの開発
■		中国向け乗用田植機KAシリーズの開発
■	■	ユーティリティビークル向けガソリンエンジンGZ850Hの開発
■	■	産業用ディーゼルエンジンV5009の開発
■	■	SCR触媒性能の劣化予測技術の開発
■	■	大型エンジン鋳物用鋳造方案の設計指針確立
	■	ミニバックホー作業範囲拡大技術の開発
	■	北米向けコンパクトトラックローダSVL75-3の開発
	■	製造現場のDX化を見据えたフィーダコントローラの開発
■		しおれ検知式自動潅水制御システムの開発
	■	パイプ外面欠陥判定技術の開発
	■	大口径EF継手の開発
	■	ベルト型ろ過濃縮機の自動高圧洗浄装置の開発
	■	MRデバイスを活用した点検合理化技術の開発
	■	TMP予測モデルを活用したMBR運転制御技術の開発
■	■	Introduction of Kubota Research and Development Europe (KRDE)

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
		★						★	★							●	●
	★	★										★				●	●
		★						★	★							●	●
		★						★	★							●	●
		★						★	●							●	●
							★	★								●	●
							★		★		●					●	●
							★		★		●					●	●
							★		★			★				●	●
								★	★		●					●	●
									★		★					●	●
							★		★			★				●	●
		★						★	★							●	●
						★			★							●	●
						●		★	★		●					●	●
						★		★	★							●	●
				★				★	★							●	●
						★	★		★							●	●
								★	★		●					●	★

On Your Side を体現する研究開発

代表取締役社長
北 尾 裕 一
President and
Representative Director
Yuichi Kitao

2024 年は、年明け早々に能登半島地震により多くの方が被災されました。近年、地震や大雨などの自然災害は世界中で頻発しており、影響はより深刻化しています。また、日照不足や記録的高温などの異常気象により、農作物は安定供給をしばしば阻害され、人々の暮らしに大きな影響を与えています。他方、上下水施設の老朽化が進んでいます。例えば 40 年以上使用した排水機場で、水害防止の役割が発揮できず、日常生活に影響するリスクが高まっています。世界では、衛生設備の不足や温暖化が原因で、安全な水にアクセスできない人が 22 億人に上るとも言われています。

このように生活の基盤が安定しているとは言えない世界情勢の中で、クボタの目指す姿は「豊かな社会と自然の環境にコミットする“命を支えるプラットフォーマー”」です。食料・水・環境の領域において、従来の製品売り切りのビジネスにとどまらず、製品やサービスを一体とするソリューションを提供することで、より多くのお客様の課題やさまざまな国・地域の社会課題の解決に寄与していきます。

さて、2024 年のノーベル賞は、物理・化学賞ともに AI の分野に授与されました。クボタでも 2024 年を AI 元年と位置付け、研究開発だけではなく製造や営業なども含めた全社で AI の活用を推進しています。

当社は世界に先駆けてトラクタ・コンバイン・田植機という主要農機の無人化を成し遂げました。これは、GNSS 技術が世に出始め非常に高価だった 1980 年代頃からクボタが着目し、脈々と技術の蓄積をしてきた結果と考えています。このように、将来必要となる新技術を見極め、その習得を継続的に進めることで、これからも新しい付加価値を生み出していきたいと考えています。

一方で、クボタの技術の根幹である「現場主義」を忘れてはいけません。2006 年、私自身がインドへ赴いた際、「軽量でコンパクトなトラクタをもち込めば産業で喜ばれるはず」とインド市場へ挑んだのですが、トラクタの使われ方の違いや桁違いに求められる耐久性の問題から、販売は苦戦の連続でした。現地の文化を肌で感じながら「現地のニーズに合う製品開発をしていかなければならない」と痛感しました。

お客様の望みを超える製品・技術・サービスを、お客様の予想を超えるスピードで提供できること、すなわち“On Your Side”を体現するために「お客様に最大限喜んでいただくにはどうすればよいか」を「現場主義」で考えることが重要です。新技術の創出と現場主義を両立する研究開発に磨きをかけ、クボタは最も多くのお客様から信頼され、最も多くの社会貢献をなしうる企業を目指していきます。

このクボタ技報 57 号では、AI 技術を活用して開発した業界初の無人運転コンバイン、しおれ検知式自動潅水制御システム、ダクタイル鉄管外面を AI 画像分析により欠陥判定する技術などを掲載しています。「食料」の分野では、電子制御 HST を搭載したコンパクトトラクタ、湿田走破性と植付精度を向上させた中国市場向け乗用田植機の開発などを取り上げています。「水・環境」の分野では、簡単操作を実現した北米市場向けコンパクトトラックローダ、腐食するリスクのない樹脂の大口径継手、水害防止の役割を担う排水機場の点検合理化技術の開発などを掲載しています。ぜひご一読ください。

クボタはこれからも、社会の役に立つ研究開発の推進に取り組み続けていきます。皆さまの変わらぬご支援を賜りますようお願い申し上げます。

Embodying “On Your Side” in Research and Development

At the start of 2024, the lives of many people in the Noto Peninsula were affected by the earthquake. In recent years, the frequency and intensity of natural disasters, including earthquakes and torrential rains, are increasing worldwide. Extreme weather events such as insufficient sunlight and record-breaking heatwaves often disrupt the stability of agricultural supply, posing significant impact on people's livelihoods. Meanwhile, the continued deterioration of water infrastructure due to aging is becoming more and more serious. For example, drainage pump stations used for more than 40 years lose their ability to prevent flooding, posing heightened risks to the people's daily life. Globally, it's estimated that 2.2 billion people lack access to safe water due to inadequate sanitation and the effects of climate change.

In this world of growing instability, Kubota envisions itself as an “Essentials Innovator for Supporting Life,” committed to a prosperous society and cycle of nature. We will go beyond the conventional sales model focusing on selling products only and instead, aim at delivering integrated solutions combining products and services. By doing so, Kubota aims to address customer challenges and societal issues across various countries and regions in the field of food, water, and environment.

This year, the 2024 Nobel Prizes in Physics and Chemistry were both awarded for advancements in the field of artificial intelligence. At Kubota as well, we have set 2024 as the beginning year of our journey to advance AI integration, not just in research and development, but throughout the company, including manufacturing and sales.

Our company was a global pioneer in achieving automation of key agricultural machinery, including tractors, combine harvesters, and rice transplanters. We believe this was achieved because Kubota started engaging in GNSS and accumulating our expertise of the technology from when it first emerged in the 1980s despite its high cost. By identifying and continuously mastering the new technologies essential for the future, we aim to continually deliver new added value.

At the same time, we must never lose sight of the core of Kubota's technology: our commitment to working closely with the actual users. In 2006, I visited India to introduce tractors, confident that lightweight, compact tractors would be well-received. However, I constantly struggled with the sales due to the differences in how the tractors were used and the significantly high requirements for durability. This event made me deeply understand the importance to actually experience the local culture to develop products tailored to local needs.

Our “On Your Side” philosophy is embodied by providing products, technologies, and services that exceed customer expectations at an incomparable speed. It is crucial to embrace the actual needs at the field and continually consider how to bring maximum satisfaction to our customers. By honing our research and development to balance innovation with a field-based approach, Kubota strives to become the most trusted company, contributing to society on a global scale.

This 57th issue of the Kubota Technical Report highlights innovations developed using AI technology such as the industry's first autonomous combine harvester and the withering detection-based automated irrigation control system. It also covers the technology for detecting defects on ductile iron pipe surfaces using AI image analysis. From the food sector, we feature developments such as a compact tractor equipped with an electronically controlled HST and a riding rice transplanter for the Chinese market, designed to improve wet field maneuverability and planting accuracy. From the water and environment sectors, we showcase a compact track loader for the North American market designed for ease of operation, large-diameter plastic fittings resistant to corrosion, and development of technologies for streamlining inspections of drainage pump stations critical for flood prevention. We invite you to explore this issue in full.

Kubota will remain committed to advancing research and development for the betterment of society. We deeply appreciate your continued support.

国内市場向けコンパクトトラクタSTシリーズの開発

Development of the Compact Tractor ST Series for the Domestic Market

機能開発部／トラクタ技術第一部
機械研究開発第三部

国内向けトラクタの総需要は減少傾向にあるが、20馬力以上40馬力未満のトラクタは今なお総需要の過半数を占める重要なボリュームゾーンである。この馬力帯のコンパクトトラクタのユーザは兼業で小規模の農家が多く、高齢者の割合も高いため、安価で使い易い製品が求められる。この度、クボタは一層の操作性向上を低価格で実現すべく、フルモデルチェンジ機STシリーズを開発した。本稿ではこのクラスにクボタで初の搭載となった電子制御HSTの開発技術について述べる。

【キーワード】
トラクタ、電子制御、静油圧式無段変速機

The total domestic demand for tractors is on a declining trend, but tractors with 20 to 40 horsepower still represent a significant volume zone, accounting for more than half of the total demand. Many users of small tractors in this horsepower range are part-time, small-scale farmers, and a high percentage of them are elderly. Therefore, there is a demand for affordable and easy-to-use products. In response, Kubota has developed the ST series, a fully redesigned model, to achieve even greater operability at a low price. This paper discusses the development technology of the electronically controlled HST, which is being introduced in this class for the first time by Kubota.

【Key Word】
Tractor, Electric Control, Hydro Static Transmission

関連する SDGs

1. はじめに

国内のトラクタ総需要は販売農家戸数の減少などの影響により減少傾向にあるが、20馬力以上40馬力未満のトラクタは今なお総需要の過半数を占める重要なボリュームゾーンである。クボタはこの馬力帯に2012年よりFTシリーズトラクタ(22～30馬力)を市場投入している。同モデルはシンプルな操作性、コンパクトな車体、安価を追求したベーシックトラクタで、小規模な水稲農家をメインターゲットとしている。ユーザの年間使用時間が20時間から50時間程度と短く、4割弱が70歳以上で高齢のユーザも多いため、安価で使い易い特徴が特に重要視されている。

この度、クボタはFTシリーズのフルモデルチェンジ機として、STシリーズ(図1)を新たに開発した。STシリーズでは、走行操作性の更なる向上という市場の要望に応えるため、電子制御HST(Hydro Static Transmission:静油圧式変速機)を同馬力帯にクボタで初めて搭載した。HSTは油圧ポンプと油圧モータにて構成され、油圧ポンプの斜板(以下「HST斜板」という)の角度を変更することで変速を行う無段変速機である。電子制御HSTはこの変速操作をECU(Electronic Control Unit)によって行うHSTであり、変速だけでなく前後進切換やブレーキ操作を制御で実行するため、人による煩雑な操作が不要となる。本稿では、新たに開発したこの電子制御HSTの開発技術について紹介する。

図 1 コンパクトトラクタ「ST シリーズ」
Fig. 1 Compact Tractor “ST Series”

2. 開発のコンセプトと目標値

2 － 1 開発のコンセプト

STシリーズの開発コンセプトは、安価で使い易いというFTシリーズの特徴を継承しつつ、走行操作性、居住性等の基本機能を向上することである。したがって、走行操作性に大きくかかわる部分である電子制御HSTについても安価に実現する必要がある。

2 － 2 開発の目標値

クボタのコンパクトトラクタのハイエンドモデルで使用される電子制御HSTは、HST斜板の角度を、油圧サーボピストンを介して電磁比例弁から制御することにより変速を行う。仮に、STシリーズで同様の機構を採用するとした場合、HSTケースの新規型投資が必要となり、開発コンセプトに反して高コストとなってしまう。これを避けるため、STシリーズでは既存のHSTに電動モータと電子制御ギヤボックスを外付けし、HSTケースの新規型投資無しで電子制御化する方式を採用した。また、既存HSTとして、欧州・北米向けのLXシリーズトラクタ(35～40馬力)のHSTを兼用した。LXシリーズではペダルと連結したメカリンク機構によってHST斜板の操作を行うが、STシリーズではこのペダルとメカリンク機構を電子制御ギヤボックス(電子制御に必要な各部品を搭載したギヤボックス)に置き換え、電動モータにより駆動する(図2)。電子制御ギヤボックスにはモータの回転トルクを増幅させるための減速ギヤや、HST斜板の角度を検知する角度センサ(制御精度の向上が目的)などが搭載されている。

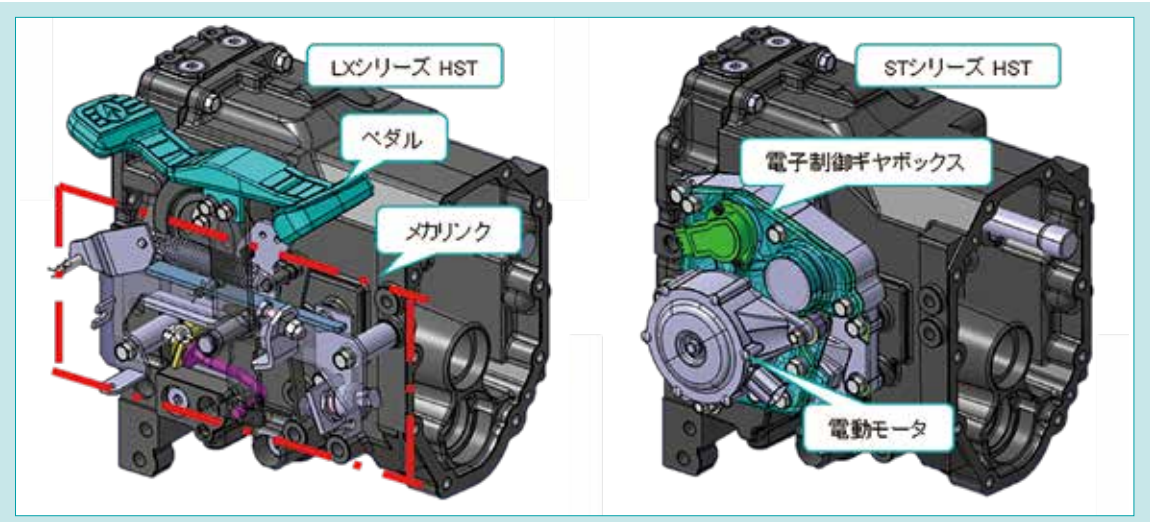


図 2 LX シリーズと ST シリーズの HST 比較
Fig. 2 Comparison of the LX Series HST and ST Series HST

国内においてはトラクタの走行速度を一定に保持して行う農作業が多いため、作業車速を容易に再現できることが求められる。そのため、欧州や北米向けで採用しているペダル変速ではなく、各変速レバーを用いて変速操作を行う。現行機FTシリーズでは、「主変速レバー」によりHST斜板の操作を行う。

この主変速レバーは、メカリンクを介してHST斜板と繋がっており、レバー操作によって車速設定、前後進の切替え、発進と停止を行えるものとなっている。

今回開発したSTシリーズにおいては、電子制御HSTを搭載したことによって、HST斜板の操作を、①車速設定を行う「主変速レバー」(図3)、②前後進の切替えと発進と停止を行う「シャトルレバー」(図4)、という2つのレバーにより操作を分割することを可能とした。

圃場作業では前後進の切替えが多く行われるが、シャトルレバーを設けることでステアリングホイールを握り、周囲を見渡しながら指先で前後進の切替えを行なえることを可能とした。この機構により、前後進の切替え時や発進、停止時に主変速レバーの操作を不要とすることで、作業に適した車速に一度設定すれば、その後に車速を再設定し直す回数を大きく減らすことが可能となる。加えて、電子制御HSTの採用により、クラッチペダルを使わずにブレーキペダルのみを操作するだけで車速調整と停止ができる「イージーブレーキ」機能や、旋回時に自動で減速して余裕を持った旋回操作ができる「イージーターン」機能を実装することができた。

以上より今回開発した技術によって圃場での作業を大幅に軽労化することを可能にする。開発においては手元を見ずに作業に集中できることを目標とした。

図 3 主変速レバー
Fig. 3 Main Shift Lever

図 4 シャトルレバー
Fig. 4 Shuttle Lever

3. 解決すべき技術課題

3 ー 1 中立復帰性能の確保

HSTを搭載したトランスミッションはHST斜板の角度をある一定の範囲に制御することで車体を停止させることができる。この角度の範囲を中立と呼ぶ。製品の安全上、シャトルレバーをニュートラルポジションに入れ、中立の指示を与えたときには、確実に車両を停止させる必要がある。そのため、中立復帰性能の確保が課題であった。

3 ー 2 油圧に起因する振動騒音の低減

STシリーズの電子制御HSTでは電動モータからギヤを介してHST斜板の角度を操作しているが、HST斜板は油圧脈動により大きく振動しているために、ギヤやモータにも振動が伝わることとなる。したがって、ギヤの振動によりギヤの歯面同士が衝突し、異音が発生することや、モータに大きな振動が伝わることにより破損するリスクがある。これらの理由からギヤやモータに伝わる振動をいかに低減するかが課題であった。

3 ー 3 操作性の向上

前述のように国内市場向けのSTシリーズにおいては作業車速の再現性が重要であることから車速設定には有段の主変速レバーを用いることが望ましい。しかし、無段階に車速設定ができる主変速レバーを搭載することについても、無段変速機であるHSTにより得られる滑らかな変速操作や速度設定の自由度を活かせてユーザへのメリットがある。そのため、有段と無段それぞれの良さを両立できる主変速レバーを開発することが課題であった。

4. 開発技術

4 ― 1 中立復帰補助構造の開発

STシリーズの電子制御HSTでは外付けの電動モータでHST斜板を傾転させるが、車体の走行中、HST斜板には常にHST内部の油圧反力によるトルクが発生するために、ギヤを介して電動モータには常に外部からのトルクが加わる。そのトルクによりモータが回されてしまうとトラクタは一定の車速を維持できないため、モータには外部からのトルクで回されないロック機能を備えている。ペダルリンク式のHSTではペダルから足を離すとばねの力でペダルとHST斜板は自動的に中立に戻るが、電動モータはロック機能があるために、ばねの力だけでは中立復帰できない。したがって、STシリーズではレバー操作で中立を指示したときには、モータが回転してHST斜板を中立位置に戻す。しかし、モータからHST斜板までの間にはガタやギヤ同士のバックラッシなどが存在するため、モータを精度良く制御しても中立の範囲に収めることができない(図5)。そのため、中立復帰補助構造を開発し、電子制御ギヤボックスの内部に設けた。これはHST斜板と接続されているギヤのカム部にねじりばねの力でベアリングを押し付けることにより、カムにベアリングが収まる位置に向かってギヤを誘導する構造である(図6)。この構造により、モータで中立付近までHST斜板を近づけることで、ガタとバックラッシの範囲でギヤを中立位置に誘導し、確実に中立復帰を行うことができる。

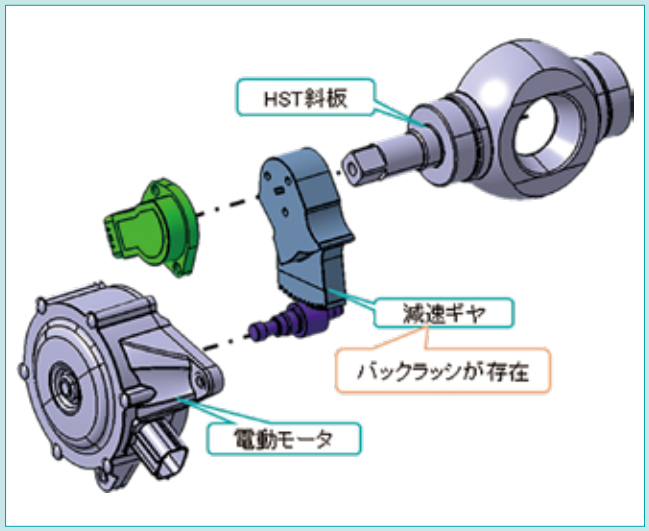


図 5 モータ動力伝達部構造
Fig. 5 Structure of the Motor Power Transmission Unit

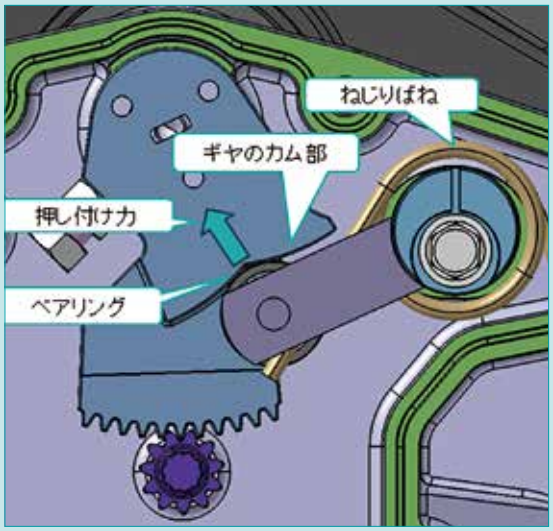


図 6 中立復帰補助構造
Fig. 6 Neutral Recovery Assist Structure

4 ― 2 電子制御ギヤボックスによる振動騒音の抑制

音響解析と加速度測定の結果から振動騒音の発生源は、HSTから伝わる振動によりギヤボックス内のギヤが揺動し、相手ギヤと歯面同士が衝突していることが原因であると推定された。したがって、課題解決のため、以下の3つの振動対策を実施した。

4.2.1 ギヤの歯面衝突の衝撃の抑制

ギヤボックスへ注油を行うことにより、ギヤ同士の歯面の衝突時に油膜を挟むことによる減衰効果[1)]と、揺動するギヤが油中を動くことによる粘性減衰の効果を狙った。また、4-1で示した中立復帰補助構造により常にギヤに一方向へのトルクを作用し続けることにより、ギヤ同士の歯面が分離し、衝突することを抑制する。さらに、振動発生時に揺動する各軸部にゴムを追加することで摺動抵抗を発生させ振動の減衰効果を与えた(図7)。

4.2.2 ギヤボックスの振動の低減

騒音が発生する際にはギヤボックスに振動が伝わることで、その筐体で音が増幅され、騒音が大きくなっていると考えられる。したがって、騒音の増幅を抑制するためにギヤボックスの振動抑制を行った。具体的にはギヤボックスの締結点を増加させることでギヤボックスの剛性を増加させるほか、素材を減衰効果のある鋳鉄とした。

4.2.3 モータに伝わる振動の低減

振動によるモータの破損を防ぐため、モータ取付け部に防振ゴムを追加してゴムマウント構造とし、モータに伝わる振動を低減した(図8)。

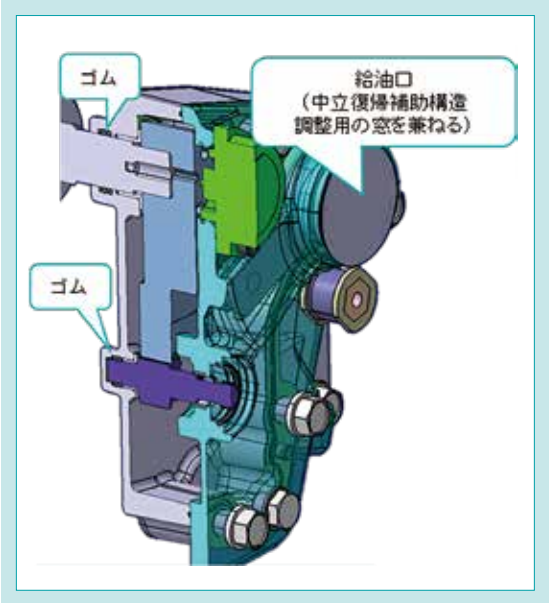


図 7 衝突抑制のための構造
Fig. 7 Structure for Collision Mitigation

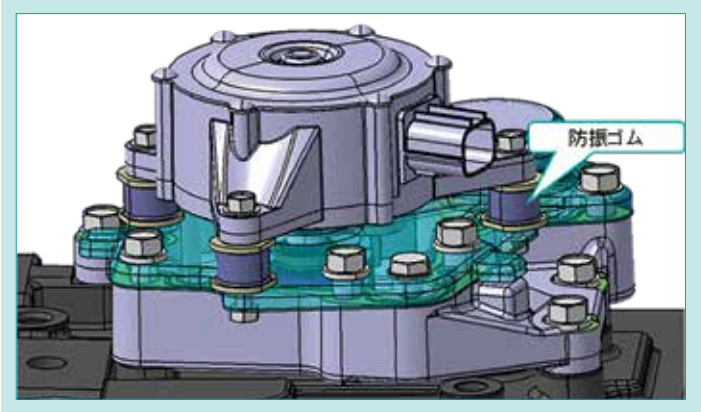


図 8 モータの防振ゴム
Fig. 8 Vibration-damping Rubber for the Motor

以上の対策により、ギヤボックスからの騒音、モータに伝わる振動を大幅に抑制することができた。

4 ー 3 有段無段切替え機能

国内市場に求められる車速の再現性を確保しつつ、HSTの特性を活かした滑らかな変速操作や速度設定の自由度を実現するために、STシリーズの主変速レバーには有段無段切替え機能を実装した(図9)。これは主変速レバーのグリップをひねることで有段モードと無段モードを切替えることができるものである。有段モードでは図に示すようなコマがデテントにはまり込む。このためレバーから手を離すとコマがデテントの10箇所の谷のいずれかにはまり込む位置で停止し、10段の有段変速のレバーとなる。これにより、レバー位置を再現性高く変更でき、またデテントを乗り越える際のクリック感が手に伝わるために手元を見なくても狙った段数分の車速調整が可能である。一方で無段モードでは、グリップの回転がリンクを動かし、ケーブルを引っ張ることによりコマが引上げられデテントに接しなくなる。これによりデテントによるレバー位置の制約を受けず、車速を自由に設定できるほか、軽い操作力で直感的にスピードを増減できるため運転の快適性を得られる。無段モードで手を離しても摩擦板により主変速レバーは保持される。ユーザの好みによっては常に有段モード、無段モードで使うこともできるほか、切替えを行いたいときにはグリップをひねるのみで即座にモードを切替えることができる。本機能は「イージーセレクト」という名称でSTシリーズに搭載している。

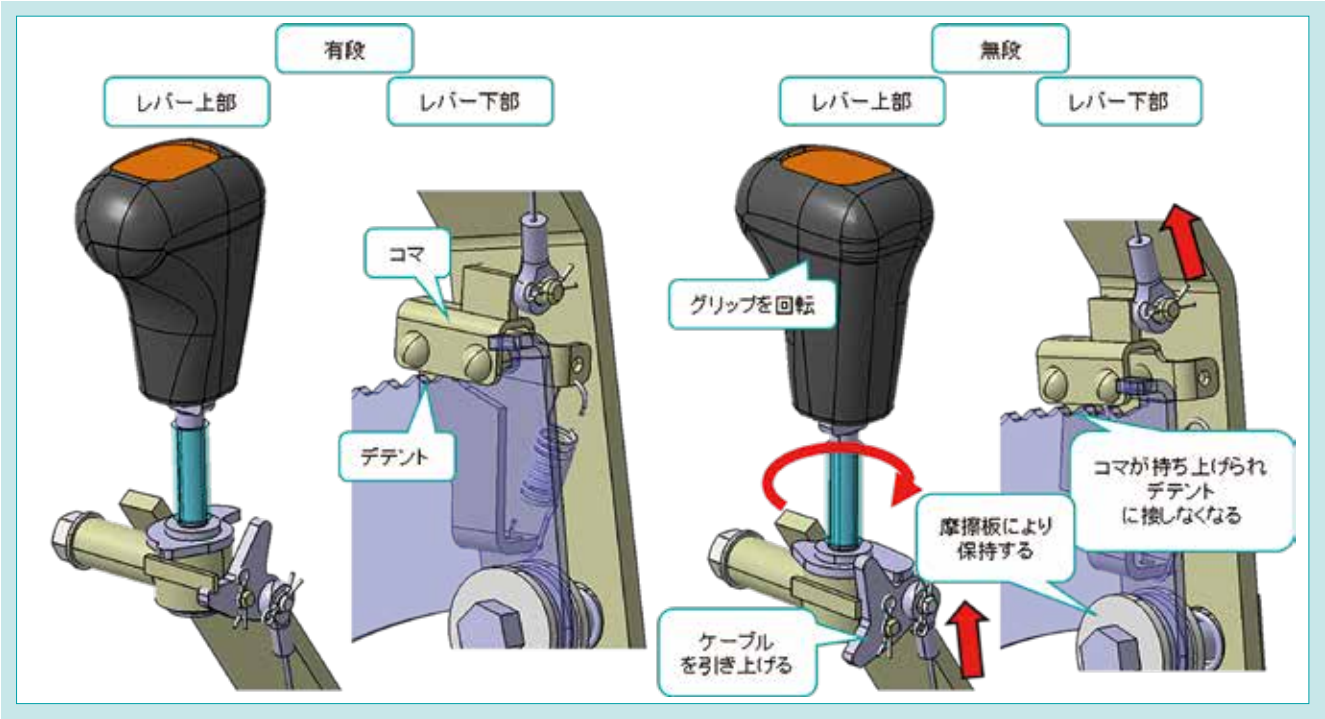


図 9 イージーセレクトの概要
Fig. 9 Overview of "Easy Select"

5. おわりに

本開発により、国内向けコンパクトトラクタSTシリーズでは現行機FTシリーズの安価で使い易いという特徴を継承しつつ、同クラス初の搭載となる電子制御HSTにより更なる走行操作性の向上を行うことができた。本技術により煩雑な操作を減らすことができ、ユーザの疲労軽減に貢献できると考える。本開発技術は走行操作の自動化にもつなげることができる技術であり、また、ほかの既存のHSTにも取付けが可能な汎用性を持つ。今後この技術をベースに、ほかの仕向け地のトラクタなどにも展開することでユーザの更なる軽労化に貢献していく。

SDGs のターゲットへの貢献

2.4　持続可能かつ強靭な農業の実現　　走行操作の電子制御化により、耕うん作業の省力・軽労化に貢献
8.2　イノベーションを通じた生産性の向上　　同クラス初の電子制御HST搭載により無駄な操作を低減
9.5　科学研究、イノベーションの推進　　新技術の開発により先端農業の普及に貢献

参考文献

1）太田 和秀, 池田 幸一郎, 山野井 俊樹, 榎園 怜, 謝 瀟閲:「歯車衝突を考慮したエンジン振動騒音解析法の研究」Dynamics & Design Conference, 2016, 2016 巻, セッションID 333, p. 333−.

走行解析による耐久性評価手法の開発

Development of the Method for Durability Improvement by Using Drive Simulation

解析センター

クボタは近年、機械事業拡大に伴い、欧州畑作用トラクタ、北米の高速ユーティリティビークル(以下「UV」)市場の新規製品ラインアップ拡充を進めている。トラクタは畑作で使用する様々な大型の作業機での作業、UVは高速化により負荷が増大し、車体の耐久性の確保が困難になっている。従来は過去の経験に基づいて試作機による実機耐久試験を繰り返して性能を確保したが、前例の無い開発機では経験が通用しない。また従来の解析手法では、強度解析に用いる荷重条件を試作機で計測して決定していたため開発が長期化することがしばしばあった。今回車両全体と路面をシミュレーション上でモデル化し、仮想的に作業させることで、設計初期から車両にかかる荷重を算出し、耐久性を向上できる解析手法を開発した。

【キーワード】
走行解析、疲労寿命解析、トラクタ、ユーティリティビークル

In recent years, the farm and industrial machinery consolidated department has aimed to expand our product lineup for farming tractors in Europe and the high-speed utility vehicle (UV) market in North America. It is difficult to ensure the durability of the body. Because the tractors can be used for various high-load operations in farming, the load of the UV is unclear when driving on rough roads. In the past, products were developed by repeating a design based on experience and durability tests on actual machines, but this experience may not apply for new markets. Additionally, our previous analysis method needs the load condition, calculated by using actual measurement, so its measurement needs a lot of time and we cannot determine the optimal design. Therefore, we have developed an analysis method that can calculate the load which is applied to the vehicle, and consider the improvement of durability by performing virtual work on a simulation.

【Key Word】
Drive Simulation, Fatigue Analysis, Tractor, Utility Vehicle

関連する SDGs

1. はじめに

欧州市場においてトラクタは農業の効率化のため大型化し、2トンを超えるインプルメントを用いた高負荷作業が行われ、また北米のUV市場では多積載状態で不整地走行するなど、高い耐久性が求められる(図1)。しかしこれらの作業負荷に対する製品開発はクボタにとって経験がなかったため、設計段階で全ての負荷作業を想定して耐久性能を確保することが困難であった。耐久試験で試作機が破損すると、再設計と再試験する手戻りが発生し、開発が長期化し適切な形状を十分に検討することができない。[1)]

今後の事業拡大と継続のために、製品の設計段階で車両全体の強度を確保して信頼性の高い製品を短期間で開発できるようにする開発プロセス改革(Design Process Innovation、以下DPI)が必要である。

図 1 トラクタや UV の作業
Fig. 1 Work of the Tractor and UV

2. 開発のコンセプトと目標値

従来の悪路・不整地走行試験の強度解析では、車体にかかる荷重がわからないため、一度試作機を作成して実機試験により荷重を測定し、解析条件を決定した後、耐久性能を向上させた機械を再度試作していた。この手法では耐久試験合格までに最低2回の試作が必要なため開発期間が長期化し、最適な形状を十分に検討することができなかった。よってDPI実現のため、新たな解析技術を開発して設計段階でトラクタやUVにかかる荷重を予測し、車体が受けるダメージを評価することにより、試作前に耐久性能の確保を早期に実現させ、1回の試作での耐久試験合格が目標である(図2)。

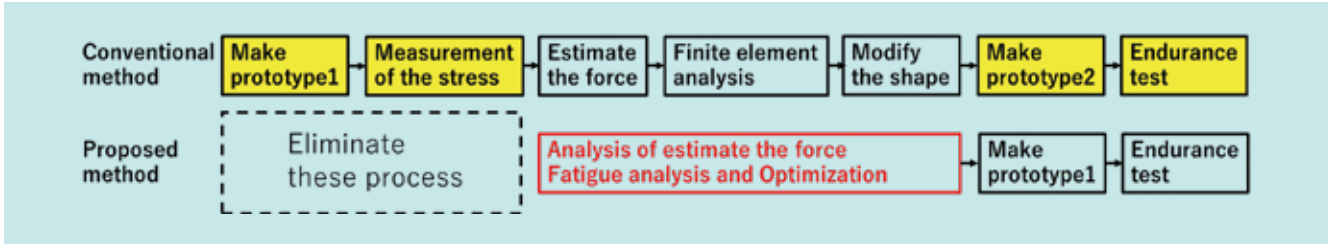


図 2 従来の開発手法と提案する開発手法
Fig. 2 Previous Development Process and Proposed Development Process

3. 解決すべき技術課題

シミュレーションで仮想的にトラクタやUVを作業・走行させ、実機のない設計段階において耐久性能を向上させる。そのために、3つの課題をあげる。

(1)走行解析技術

解析で実機耐久試験の作業や走行状態を表現し、強度解析に必要な、地面からの入力荷重、姿勢や重量物の慣性力の時刻変化を予測可能にする。

(2)疲労寿命解析技術

時系列の荷重に対して連続的に変化する応力分布を高精度に計算し、車体に蓄積する疲労の評価手法を開発し、全工程を考慮した耐久性能を評価できるようにする。[2)]

(3)最適設計技術

試作を繰り返すことなく目標となる耐久性能を確保しながら最も軽量な形状を提案するなどの最適設計を可能にする。

4. 開発技術

4 ー 1 走行解析技術

4.1.1 解決策1(タイヤ特性計測と解析モデル作成)

悪路走行で突起を乗り越える時の車体入力荷重や車体挙動はタイヤの種類やサイズによって大きく異なり、耐久性に大きく影響する。そのため走行解析ではタイヤの剛性や減衰特性を正確に計測しモデル化する必要がある[3)]。しかし、トラクタ用のタイヤはサイズが大きいため、自動車用の試験機では全ての特性を計測することができない。また、トラクタ用のタイヤは扁平率が高く、ラグが大きいため、高速で突起を乗り越えた時のタイヤの大きな変形やラグの影響で発生する高周波の荷重変動を自動車用のタイヤ解析モデルでは表現できない。

そこでタイヤメーカーと共同で、試験機で取得できなかった段差高さ, 車速違いのタイヤの動的特性取得を、ゴムの特性や内部構造をモデル化したタイヤ解析モデルによるシミュレーションで取得した。ただし、特性計測で用いたタイヤ解析モデルは解析データ容量が大きいため、トラクタに装着し長時間路面走行させるシミュレーションには適用不可能である。そして、タイヤをばね・ダンパー要素で表現し、左記シミュレーションと実測で取得した数十パターン全ての特性が一致するようなパラメータを同定した。これにより、タイヤの変形を正確に表現し、悪路走行時に生じる高周波領域の荷重伝達を表現できるトラクタタイヤモデルを作成した(図3)。

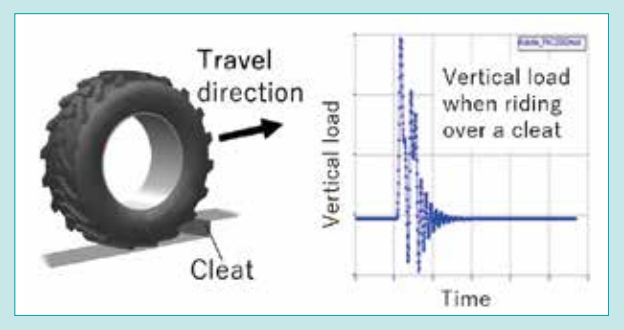


図 3 タイヤモデルと垂直荷重
Fig. 3 Tire Simulation Model and Vertical Load

4.1.2 解決策2(UV耐久試験用の不整地路面3D形状化のための計測技術)

高精度な走行解析には、正確な路面の3Dモデルが必要である。コンクリートなどで整地された路面は、図面データから走行路3D形状を作成できる。しかし図面の無い不整地路面や、外部の走行路面での耐久試験を解析で表現する場合、走行経路全体をタイヤの凹凸以下の精度で形状取得が必要であった。ハンディスキャナーやドローンに搭載できる軽量で簡易のスキャン装置では走行路面全体の傾きが表現できず、目標精度が達成できなかった。そこで、砂漠路面形状計測技術を持っている会社と共同で計測した(図4)。

図 4 路面計測車両
Fig. 4 Road Surface Measurement Vehicle

その計測原理はクローラ車両に360° 形状データを捕捉できるレーザーを搭載して走行させ、高精度なGPSデータから車両位置と車両姿勢を捕捉するものであり、大域的な空間を把握しながら、路面の小さな凹凸がスキャンできる技術である。

UVの不整地路面は、砂漠の山とは異なり急激な凹凸が多くあるため、あらゆる方向から繰り返し計測し、結果を重ね合わせることで形状を作成できるようにした。さらに路面形状の精度を高めるため、走行解析に不要な草や細かい石の形状を除去するフィルタ処理をすることで、広範囲の複雑な不整地路面データを目標以下の誤差で3D形状化した(図5)。

図 5 不整地路面の3D 形状化
Fig. 5 3D Modeling of a Rough Road

4.1.3 解決策3（車両走行モデルの高度化）

(1)インプルメントやキャビンマウントモデル化手法

トラクタに搭載するプラウ(インプルメントの一種)はたわみやすく、キャビンはキャブマウントがあるため、悪路走行時に車体と別の挙動を示す。そこでインプルメントを弾性体として、キャビンマウントをバネ・ダンパー要素でモデル化した。これにより重量物の挙動や荷重が車体に伝達される際の位相差や構造減衰を考慮することを可能にした。

(2)駆動系のモデル化

走行解析にデファレンシャルを含めた駆動系をモデル化しアクセルの開度とステアリングの切れ角に即したタイヤの駆動トルクの分布とタイヤの切れ角を表現することで、車両の挙動を高精度に解析可能にした。

4 ー 2 疲労寿命解析技術

4.2.1 疲労寿命解析技術の解決策1（時系列で応力を評価できる解析技術）

(1)解析モデル作成手法

UVのタイヤはAアームやサスペンションのリンクで、トラクタのインプルメントは3Pリンク機構で車両と接続しており、従来の剛体要素で荷重点と車体を直接接続する解析手法ではリンク接続根元部分の応力精度が低い。その原因が実際のリンク機構の荷重分配を解析で表現できていないことと考え、サスペンション機構や3Pリンク機構を解析に組み込み、実際の動きに則したジョイント条件を付与するモデルを開発した。これにより車体への荷重を誤差3%未満で分配できるようにし、目標以上の応力予測精度を実現した(図6)。

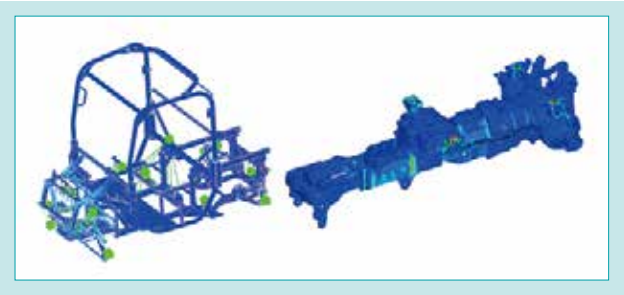


図 6 解析モデル
Fig. 6 Analysis Models

(2)応力評価手法

従来手法では、ある瞬間の車両全体の応力分布を算出するのに数時間を要し、長時間の耐久試験全てを応力解析するのに数か月必要であった。フレームの各部に発生する応力は、入力荷重とのつり合いによって発生する静的な応力が支配的であると考え、時系列荷重に対して線形的に応力を重ね合わせることにより、逐次応力状態を評価できる手法を適用した。この手法では応力履歴は単位荷重により得られた応力と入力荷重履歴との掛け合わせで決まるため、数か月の解析時間を短縮させた(図7赤枠内)。

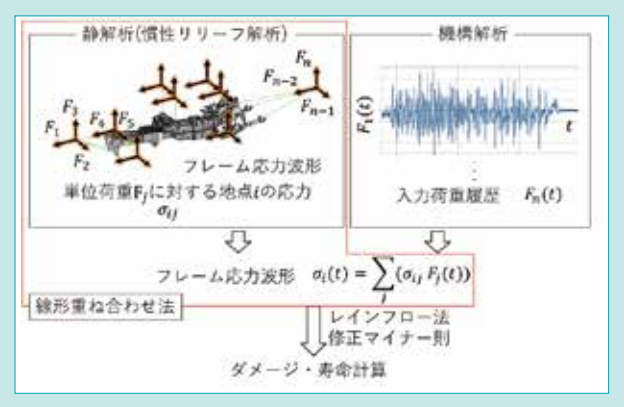


図 7 疲労評価手法
Fig. 7 Process of Estimating the Fatigue

4 ー 3 最適設計技術

(1)板金フレームの最適化手法

板金フレームの部品の板厚の組み合わせは数万通りに及び、設計者の経験と勘だけでは開発期間内で最適な板厚の組み合わせが十分検討できず軽量化が困難であった。そこで市場に流通している板厚を候補として、各部品の板厚を自動で最適化する手法を適用し、耐久性能を維持した上で最も軽量な板厚を短時間で決定できるようにした。

(2)鋳物部品の最適化手法

これまでは、複数の条件に対する応力解析結果から設計者の経験により軽量化を実施していたため、十分な軽量化検討ができなかった。そこでケースの表面形状を設計変数として変化させる形状最適化手法を用いて、剛性への寄与が大きな部位を明確にし、必要なリブやフィレットを追加できるようにした。また、複数の荷重条件に対して耐久性能を確保するため、耐久回数に応じた応力の閾値を制約条件とする手法と、作業ごとに異なる作業機の剛性を考慮し最適化できる手法を開発することにより、全ての荷重条件に対して耐久性能を維持したうえで最も軽量な形状を創出可能にした。

4 ー 4 効果確認

開発技術の精度検証のため、クボタ初の170馬力のM7トラクタを用いて円形悪路耐久試験を実施した。測定にはトラクタ車軸にかかる荷重を計測できる車軸六分力計を用いた(図8)。この六分力計と計測治具は実機耐久試験の重量条件と同等になるよう、一部にアルミ合金を用いて軽量化し、かつM7の高荷重に耐えられるように設計した。さらに4輪、キャビン、車体本体、フロントウエイト、インプルメントの合計8箇所に加速度センサを、車体にはジャイロセンサを配置し、試験時のトラクタにかかる荷重や車体挙動を計測した。同時に車体部に発生する応力を計測した。

検証の結果、地面からタイヤを介して車軸に入力する荷重は、走行解析と実測でピーク値の誤差10%以下の精度で計算できることを確認した(図9)。

そして車体で高応力が発生するタイミングで、実測と解析の応力の誤差が15%以下であることを確認した(図10)。最後に疲労寿命解析と実測の応力データから計算される寿命を比較し、疲労が大きい箇所も誤差10倍以内(図11)で予測できており、高精度で疲労寿命を評価できることを確認した。

図 8　実機検証試験
Fig. 8 Verification Test Using an Actual Machine

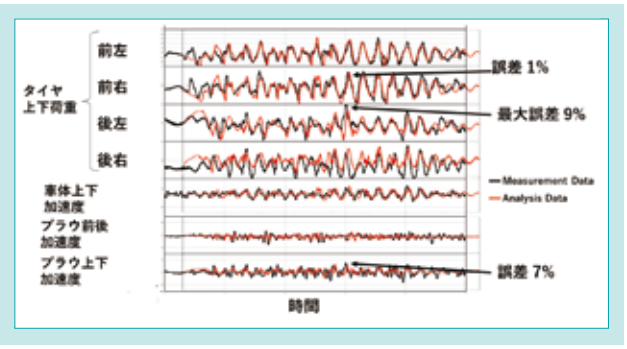


図 9　走行解析の精度検証
Fig. 9 Validation of the Running Analysis

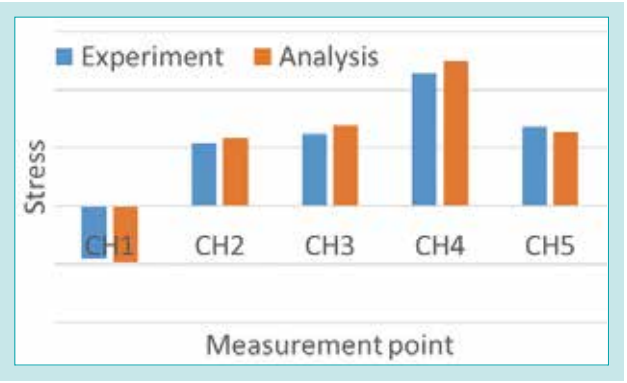


図 10　応力の精度検証
Fig. 10 Validation of the Stress

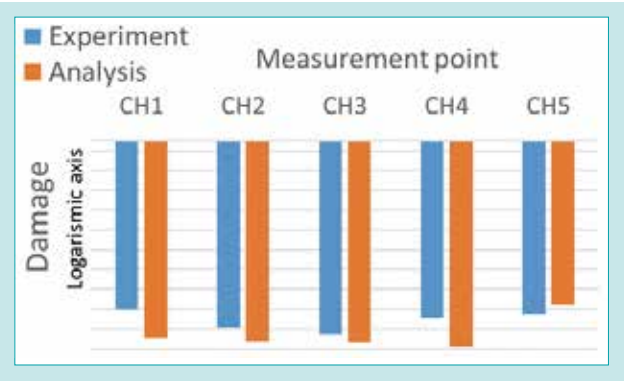


図 11　疲労寿命の精度検証
Fig. 11 Validation of the Fatigue

5. おわりに

本取り組みにより、これまでクボタにとって開発経験のない製品に対して、設計段階で耐久性能を短期間で確保することが可能になる。

今後、本開発技術を他の農業機械や建設機械に適用する。

SDGs のターゲットへの貢献

1.a　途上国への開発協力の強化　　新興国の農業機械化に応用、貢献

2.4　持続可能かつ強靭な農業の実現　　製品に必要な耐久性能を早期に確保

12.2　天然資源の持続可能な管理及び効率的な利用　　試作機削減により資源抑制に貢献

参考文献

1）安部正人，自動車の運動と制御，東京電機大学出版局，2008，p181−194

2）鯉渕興二，材料力学と疲労設計入門，日刊工業新聞社，2009，p108−123

3）久保田容平，弾性体フルビークルシミュレーションによる悪路走行疲労強度予測，自動車技術論文集41巻2号，2010，p183−188

タイ向け普通型コンバインDC-120Xの開発

Development of the Combine Harvester DC-120X for Thailand

収穫機技術部／解析センター

クボタはタイのコンバイン市場において販売台数でトップシェアを獲得している。しかしながら、主力の東北部では収穫作業面積で見ると相対的に低シェアにとどまっている。これは、東北部に多い長稈倒伏作物と強湿田という悪条件において、作業能率が高いタイの現地製他社機(以下「ローカル機」という。)が根強い人気を保っているためである。そこでクボタでは、悪条件下における作業能率の向上を目指し、「長稈倒伏性能」の改善と、2ポンプ2モータのトランスミッション(以下「2P2M T/M」という。)による「湿田性能」を向上させた新たな普通型コンバインの開発を行った。

【キーワード】
コンバイン、長稈倒伏稲、湿田、2P2M T/M

Kubota has acquired the top share in the Thailand combine harvester market in terms of sales volume. However, the market share remains relatively low in the harvesting area in the main north-eastern region. This is due to the strong popularity of machines manufactured by other companies in Thailand, which have high work efficiency in spite of the adverse conditions of the long-culm lodging rice and deep wet fields that are prevalent in the north-eastern region. Therefore, we developed a new model to improve “long-culm lodging performance” and “wet field performance” with a 2-pump 2-motor transmission, aiming to improve work efficiency under adverse conditions.

【Key Word】
Combine Harvester, Long-culm Lodging Rice, Wet Field, 2P2M T/M

関連する SDGs

1. はじめに

タイの稲作は機械化率がほぼ100%に達しており、クボタはコンバイン市場で販売台数のトップシェアを獲得している。しかしながら主力の東北部では、収穫作業面積で見ると相対的に低シェアにとどまっている。これは東北部に多い長稈倒伏作物、強湿田(深く粘度の高い泥の湿田)という悪条件(図1)において、高馬力(クボタ現行機が100馬力前後であるのに対し200馬力帯)、高作業能率のローカル機が根強い人気を保っているためである。また、ローカル機は2P2M T/M、すなわち2機の油圧モータで左右それぞれのクローラを動かす方式で、ソフトターン(両輪駆動での緩やかな旋回)による強湿田での旋回性能に優れている。

図1 強湿田
Fig. 1 Wet Field

一方でローカル機のデメリットとしてその重量が挙げられる。クボタの現行機重量が約4.6 tであるのに対し、高馬力のエンジンと2機の油圧モータを搭載しているため約8 tと非常に重い。機体が重すぎると圃場を荒らしやすい上、道路や畔を損傷させるなどの問題を発生しやすい。クボタ現行機はその軽さから圃場を荒らさないことが市場評価を得ており、前記悪条件への対応と軽量を両立する製品要望が高まっている。

以上より、クボタの強みである軽量を維持しつつ「長稈倒伏性能向上」及び「湿田性能向上」による作業能率向上を実現するコンバインの開発に取り組んだ。

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DC-120X(図2)は「現行機で市場評価の高い走行部の高耐久性を維持しつつ、高能率、稼働時間延長、条件適応性向上を実現したコンバイン」をコンセプトとした。本稿ではコンセプト達成のため取り組んだ「長稈倒伏性能向上」「湿田性能向上」について述べる。

【長稈倒伏性能向上】

・フィーダから脱穀部への稲のバトンタッチ性能向上による長稈作物の巻き付きや詰まりの発生頻度低減

【湿田性能向上】

・2P2M T/Mの搭載による操作性、旋回性向上

・最低地上高拡大による泥の腹づかえ回避

・後輪駆動による前後バランスの改善

・クローラの前後舟形化による湿田走破性向上

図 2　普通型コンバイン「DC-120X」
Fig. 2 Combine Harvester DC-120X

2－2 目標値

前章で挙げたローカル機はクボタ現行機DC-105Xに対し、刈取幅と作業時最高車速の積で表される処理量、すなわち標準立毛作物における1秒間の理論刈取面積が約1.45倍であるのに対し、開発機DC-120Xの処理量は1.32倍である。現地で実際にローカル機の作業能率を測定することは困難であるため、ローカル機は長稈倒伏作物でもDC-105Xの1.45倍の作業能率があると仮定すると、過去のデータより稲の長稈倒伏率を50%としたとき、平均作業能率がDC-105Xの1.46倍以上となるには、DC-120Xの長稈倒伏作物での作業能率は1.58倍以上である必要がある。そこで、作業能率の目標値は「長稈倒伏作物の刈取において、現行機DC-105Xの1.60倍以上であること」とする(表1)。

また湿田性能についてはDC-105Xの作業可能な足下沈下量が30 cmであるのに対し、ローカル機が作業できることが確認されている40cm以上(現行機の約1.33倍以上)を目標とする。

表 1　処理量の比較と目標値
Table 1 Comparison of Throughput and Target Values

項目	現行機 DC-105X	ローカル機	開発機 DC-120X	
標準立毛での作業能率（処理量ベース）	1	1.45 倍	1.32 倍	
長稈倒伏での作業能率	1	1.45 倍	1.60 倍以上	
平均作業能率	1	1.45 倍	1.46 倍以上	←目標値
湿田性能（作業可能な足下沈下量）	30cm	40cm 以上（1.33 倍以上）	40cm 以上（1.33 倍以上）	

3. 解決すべき技術課題

3 ー 1 長稈倒伏性能

日本の稲の全長が70～115 cmほどであるのに対し、タイ東北部に多く見られる長稈の稲は170～200 cmもあり(図3)、中には300 cmを超える品種も存在する。加えて倒伏していると籾周辺だけ刈ることが難しく、刈取部に入ってくる藁の量は長く非常に多い。長い藁は刈取部から脱穀部へ運ばれる過程(図4)で回転する搬送機構への巻き付きや詰まりを引き起こしやすく、これらは作業能率の低下につながる。詰まりの解除はタイムロスが大きく、発生頻度を下げることは作業能率の向上に大きく寄与する。本開発では、特に発生頻度が高いフィーダから脱穀部へのバトンタッチ部での詰まり低減に取り組んだ。

図 3　長稈倒伏作物
Fig. 3 Long-culm Lodging Rice

図 4　稲の搬送経路
Fig. 4 Transport Path of Rice

3 ー 2 湿田性能

図1で示したような足下沈下量の大きい湿田では、機械が沈んで泥が腹づかえするとクローラで進むことが困難になる。一度湿田にはまると抜け出すには何度も細かく前後進を繰り返す必要があるため圃場を荒らしてしまう上、それでも抜けられない場合は別の機械で牽引してもらう必要があり、非常に大きな作業能率の低下を招く。また、タイのクボタ現行機のトランスミッション(以下「T/M」という。)は旋回方式がブレーキターンと呼ばれる旋回時に内側のクローラの動力を切るタイプのため、直進は可能な湿田でも、旋回時に駆動力が足りず駆動している側のクローラがスリップしやすいことが課題であった。

4. 開発技術

4 ー 1 長稈倒伏性能向上

4.1.1　フィーダ−脱穀バトンタッチ部の流れ解析

詰まりや巻き付きの少ないバトンタッチを実現するためには、当該部を構成する様々な要素の最適な形状・組合わせを決定する必要がある。しかしながら、何通りもある組合わせ全てで作物を刈って詰まりの有無を確認すると工数がかかりすぎてしまう。バトンタッチ部の構成要素の中で性能に対して影響の大きい要素を調べるため、解析センターと共同で搬送経路及び稲をモデル化し、稲の流れ解析を行った(図5)。この解析の中で様々な組合わせを試した結果、バトンタッチにおいて次の3要素が重要であることがわかった(図6)。

①脱穀部への稲の投射角度
②脱穀部への搬送速度
③扱ぎ胴(稲を脱粒する部位)先端ドラム・スクリュの形状

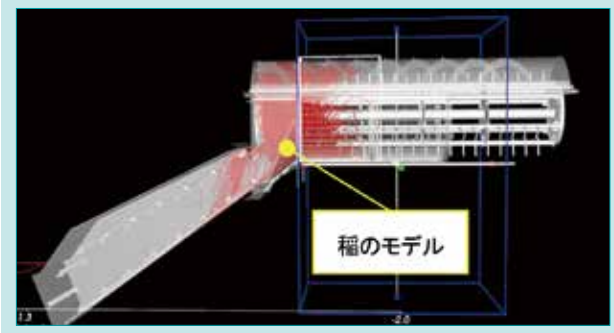


図 5　流れ解析モデル
Fig. 5 Flow Analysis Model

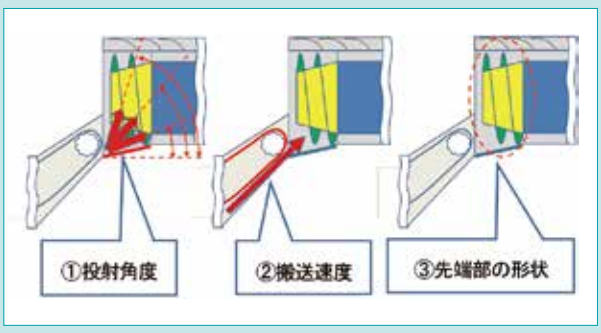


図 6　バトンタッチにおける重要な要素
Fig. 6 Key Elements in Baton Touch

4.1.2 台上試験

解析の結果をもとに、実際の稲の搬送における前記3要素の最適な形状・組合わせを選定するため、タイの長稈を再現した稲をフィーダから脱穀部へ流す台上試験を行った(図7)。各要素に実施した内容は下記の通りである。

①:フィーダと脱穀部の相対位置変更(2通り)
及び脱穀入口プレートの角度変更(2通り)

②:フィーダチェーン(フィーダ内部で稲を搬送するチェーン)の速度変更(2通り)

③:扱ぎ胴先端ドラム及びスクリュ形状変更(3通りずつ)

この台上試験により、計72通りから詰まりの発生しない組合わせを選出した。①はフィーダ出口を現行より76 mm下げ、かつ入口プレートの角度を約2.1倍急にしつつ(図8)、②は搬送速度を30%上げることで詰まりが減少した。稲が扱ぎ胴先端スクリュの前側で掻き上げられ、より早い段階から搬送が行われたためだと考えられる。③は上記の①②の組合わせに対し、詰まりなくバトンタッチできる形状を3通りまで絞り込むことができたため、これらをタイの現地で実際に刈取を行い長稈倒伏作物に対するバトンタッチ性能を比較した。

図 7 台上試験
Fig. 7 Bench Test

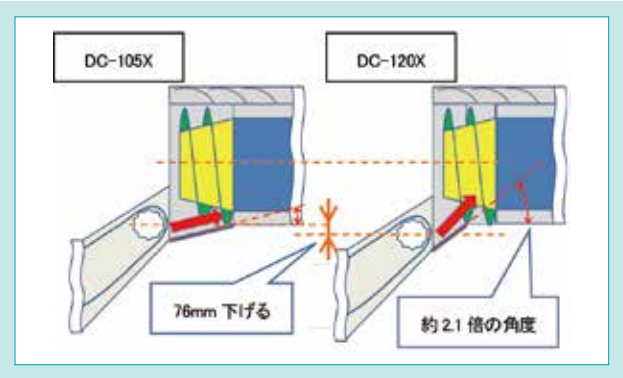


図 8 稲の投射角度の変更
Fig. 8 Changing the Throwing Angle of Rice

4.1.3 現地試験

全長約200 cm、倒伏率100%の稲に対し、3通りの扱ぎ胴先端形状で刈取を行い、ドラム・スクリュ形状において最もバトンタッチ性能の良い組合わせを決定した。その組合わせで現行機DC-105Xと比較した結果、作業能率は1.65倍となり目標の1.60倍以上を達成することができた(表2)。

表 2 能率比較結果
Table 2 Results of an Efficiency Comparison

項目	圃場面積 [ha]	所要時間 [s]	能率 [ha/h]	能率現行比
DC-105X	0.11	1921	0.206	1
DC-120X	0.09	956	0.339	1.65

4 ― 2 湿田性能向上

4.2.1 2P2M T/Mの搭載

この方式は2つのHST(Hydro Static Transmission:油圧式無段変速機)で駆動するため牽引力が高く、また現行機に搭載されている従来のT/Mと異なり旋回時に内側クローラにも動力が伝わるため、路面抵抗を左右で分担し湿田でのスリップが低減される。加えて、旋回方式を従来のブレーキターンのみからソフトターンとスピンターンを加えた3種類から選ぶことができ、操作性、旋回性の向上を実現した(図9)。

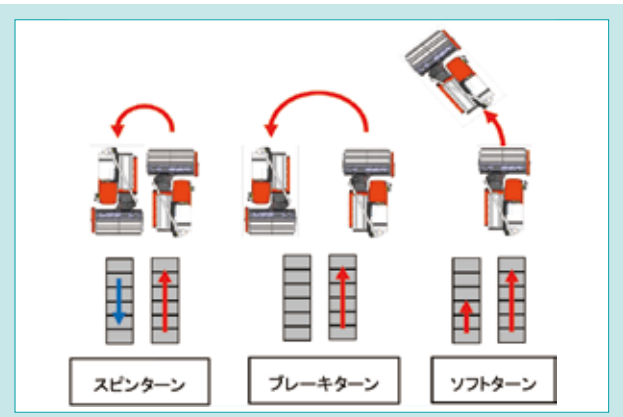


図 9 旋回方式
Fig. 9 Turning Systems

4.2.2 最低地上高拡大

DC-120Xでは、足下沈下量の大きい湿田での泥の腹づかえを低減するため、機械の最低地上高(クローラ接地面からT/M下端までの距離)を現行機DC-105Xから75 mm高くした(図10)。

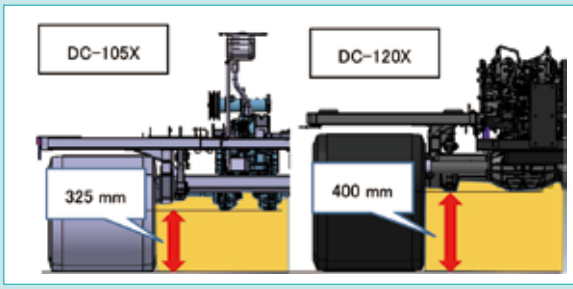


図 10 最低地上高比較
Fig. 10 Ground Clearance Comparison

4.2.3 後輪駆動

従来の普通型コンバインは、エンジン、T/M、運転席が機体前側に位置し、更にフィーダと刈取部が前方にオーバーハングしているため、重量が機体前側に集中している(図11)。前後バランスを調整するためだけに機体後方にウエイトを積んでいる機種も存在する。2P2M T/Mの搭載にあたり、T/Mの重量は現行機DC-105Xに比べ約25%増加しているため、そのまま搭載すると機体前側がその分重くなる。そこでDC-120XではT/Mを後方に配置し後輪駆動とすることで、バランス調整用のウエイトを積むことなくDC-105Xと同程度の前後バランスを実現した(図12)。

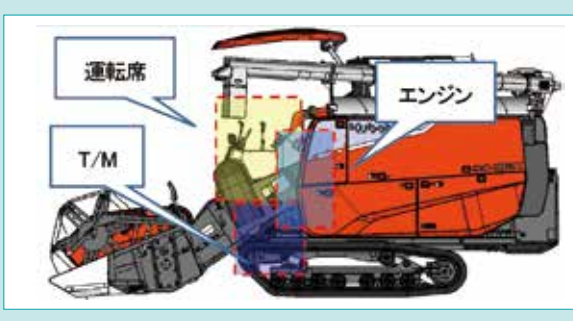


図 11 一般的なコンバインのレイアウト
Fig. 11 Ordinary Combine Layout

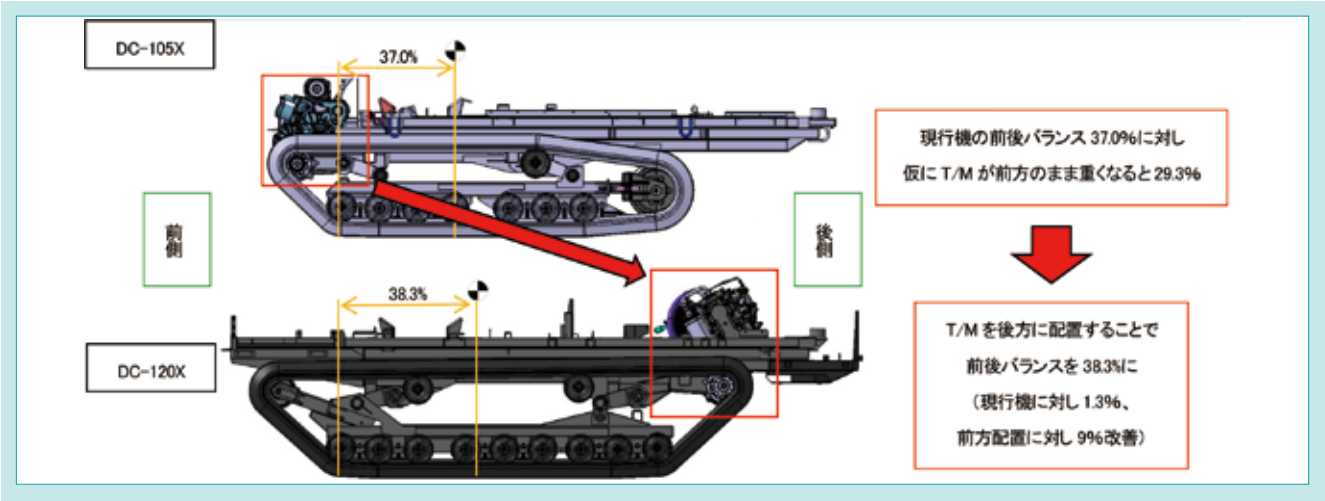


図 12 前後バランス比較
Fig. 12 Comparison of the Anteroposterior Balance

4.2.4 クローラの前後舟形化

湿田において、進行方向のクローラ傾斜面が地面となす角度θが小さいほど、機体が沈んだ際に泥を乗り越える力が小さくなる(図13)。そこで従来の機械はクローラ前側を舟形にしてこの角度を大きくしていたが、DC-120Xではクローラのテンションを張る方向を変えることで前後ともに舟形にし、前後進どちらにおいても高い湿田走破性の実現を目指した(図14)。

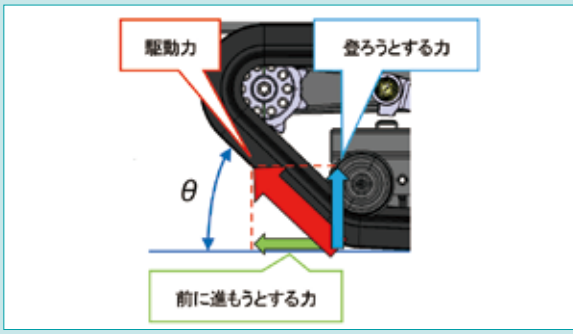


図 13 クローラの舟形角度
Fig. 13 Boat Shape Angle of the Crawler

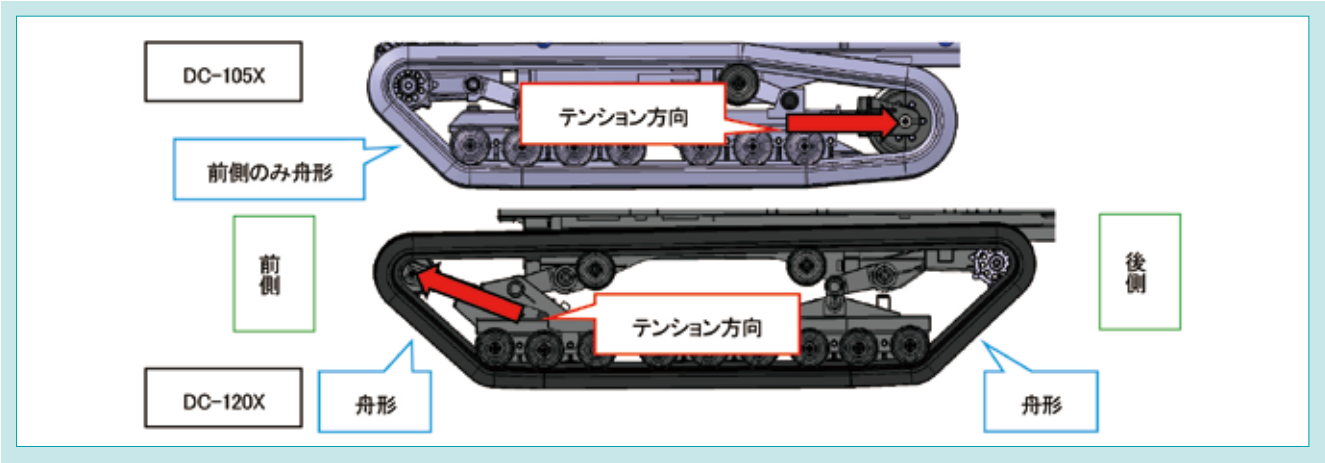


図 14　クローラの前後舟形化
Fig. 14 Front and Rear Boat Shape of the Crawler

4.2.5　現地試験

足下沈下量45 cmの湿田において、現行機DC-105XとDC-120Xの湿田性能を比較するため、直線100 mを刈取しながら1往復する時間を比較した。結果、DC-105Xは刈取中に1回湿田にはまり脱出までに65秒を要したのに対し、DC-120Xは1回もはまらなかった。また旋回にかかる時間も後者の方が短く、作業能率は1.86倍となった（表3）。また、DC-120Xの湿田性能の限界を調査するためさらに深い湿田で刈取を行ったところ、作業可能沈下量は55 cm、走行可能沈下量は60 cmであることを確認し、目標の40cm以上を達成することができた。

表 3　能率比較結果
Table 3 Results of an Efficiency Comparison

項目	所要時間 [s]	所要時間のうち湿田にはまった時間[s]	能率現行比
DC-105X	414	65	1
DC-120X	222	0	1.86

4 － 3　開発の成果

開発機DC-120Xにおいて、長稈倒伏性能及び湿田性能の向上により、目標の作業能率と作業可能足下沈下量を達成することができた。目標の達成を目指すにあたり、解析センターと共同で行った流れ解析と台上試験により、現地試験を実施する費用・工数を大幅に削減することができた。また、普通型コンバインの従来のレイアウトでは、湿田性能向上のための2P2M T/Mの搭載という方策に、重量バランス悪化というマイナスが伴うため採用が難しい場合があったが、今回T/M後方配置という新しいレイアウトを実現したことにより、タイ以外の地域や異なるクラスのコンバインにおいても湿田性能向上の方策を示すことができた。

5. おわりに

長稈倒伏作物、強湿田などの悪条件でローカル機を使用している層をターゲットに新規ユーザを獲得しうる技術開発を行った。

また今後の展開について、今回はバトンタッチ性能の観点で最も厳しいタイの長稈稲を対象としたが、普通型コンバインはほかの作物を刈ることもできるため、麦やトウモロコシ、豆類や蕎麦などにも今回の解析・台上試験を応用し、多様な作物への適応・最適な形状を検討していく。湿田性能についても、今回は目標とする足下沈下量を大きく超える湿田性能を確保することができたが、それ以上に深い湿田が存在するのも事実である。これに対応する新技術の開発を検討し、さらなる湿田性能の向上を目指す。

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　　作業能率向上により、刈取作業の省力・軽労化に貢献
8.2　イノベーションを通じた生産性の向上　　2P2M T/Mの後輪駆動で強湿田の作業能率向上に貢献
9.2　包摂的かつ持続可能な産業基盤の強化　　農業の労働力不足に対し、長稈倒伏作物の刈取作業の省力化に貢献

無人自動運転コンバインDRH1200A-Aの開発

Development of the Unmanned Autonomous Combine Harvester “DRH1200A-A”

機械研究開発第六部／機械研究開発第一部
次世代研究第二部／収穫機技術部

農機の自動運転レベルは大きく3つのレベルに区分されており、レベル1は使用者が搭乗した状態での自動操舵、レベル2は使用者が搭乗しない状態で目視可能な場所からの監視による自動走行、レベル3は遠隔監視による自動走行とされている[1)]。稲や麦を収穫しながら走行するコンバインは作業中の周囲監視、作業難易度の高さ、作業継続性に課題があり、レベル2の実現は困難であったが、先進技術と制御技術によりこれらの課題を克服し、製品化に成功した。本稿では、自動運転レベル2コンバイン実現に向けて開発した、作業環境下での障害物検出技術と刈取作業の自動化技術、加えて自動運転作業の効率向上を実現した技術について紹介する。

【キーワード】
コンバイン、自動運転、障害物検出、2D-LiDAR、ミリ波レーダ

The level of automatic operation of agricultural machines is roughly divided into three levels: Level 1 is automatic steering with the user on board, Level 2 is automatic operation with the user off board and monitoring from a visible location, and Level 3 is automatic operation with remote monitoring[1)]. The combine harvester, which is run while harvesting rice and wheat, has problems such as monitoring the surrounding area during operation, a high level of difficulty in operation, and continuity of operation. It was difficult to achieve Level 2, but advanced technology and control technology overcame these problems and succeeded in commercialization. This paper introduces the obstacle detection technology in the working environment and the technology to automate reaping work, as well as the technology to improve the efficiency of automatic operation work, which were developed to realize this automatic operation Level 2 combine.

【Key Word】
Combine Harvester, Autonomous Driving, Obstacle Detection, 2D-LiDAR, Millimeter-wave Radar

関連する SDGs

1. はじめに

日本農業は就業人口の減少と高齢化が進み、担い手農家への農地集約や営農規模の拡大が加速している。このような状況下において効率化や省力化のため、自動で作業を行うロボット農機の開発が進められている。クボタは、トラクタや田植機において自動運転レベル2対応の無人自動運転モデルを販売していたが、作物を収穫しながら走行するコンバインは周囲の障害物認識や作業継続性に課題があり実現できていなかった。

今回、新たなセンサ技術と制御技術を開発することにより、稲と麦の無人収穫作業に対応する無人自動運転コンバイン「DRH1200A-A」を実現した(図1)。

図 1　無人自動運転コンバイン DRH1200A-A
Fig. 1 Unmanned Autonomous Combine Harvester "DRH1200A-A"

2. 開発のコンセプトと目標値

2 ー 1 開発のコンセプト

2018年以降、クボタは自動運転コンバインを発売してきたが、これまでの製品では自動運転中の機体周囲の人や障害物の監視、作物に応じた刈取部の位置調整、刈取部が詰まった際の復帰作業など、一部は搭乗者が行わなければならなかった。また、自動運転に必要な圃場マップを作成するには、事前に圃場の外周を3周手動運転で刈取作業する必要もあった。そのため市場からは、搭乗することなく自動で作業を行うことや刈取領域を拡大し、さらなる軽労化につながるコンバインが求められていた。

そこで本製品のコンセプトは、「熟練オペレータのような刈取作業を行い、自動運転領域も拡大した無人運転コンバインの実現」とした。

2 ー 2 目標値

開発コンセプトに基づき、次の開発目標を設定した。

(1)収穫作業に最適な周囲監視システム

収穫作業時に圃場内に存在する作物や雑草、鳥などを検出せずに人・障害物を検出する周囲監視システムを開発する。

(2)無人収穫に必要な刈取作業の自動化技術

①自動リール制御機能

熟練オペレータは作物の穂先高さに合わせて刈取部のリール位置を調整している(図2)。そこで、刈取中にリール位置を自動制御する機能を開発する。

②自動詰まり解除機能

刈取作業中、刈取部に作物が詰まってしまうケースがある(図2)。この場合でも停止することなく、無人自動運転を継続できるよう、自動で詰まりを解除する機能を開発する。

(3)自動運転領域拡大と効率化

現行製品では、自動運転のための圃場マップを作成する際、手動運転で3周の刈取りが必要であり、自動運転領域は71%※にとどまっていた。本製品では、必要な手動運転の周回数を1周に抑え、90%※以上の領域で自動運転作業ができることを目指す(図3)。さらに熟練オペレータと同等の作業効率を目指す(熟練オペレータの作業時間に対して+5%以下)。

※自動運転領域算出条件

・圃場サイズ:1ha(100m×100m)

・ヘッダサイズ:2.6m

図 2　刈取部と詰まり
Fig. 2 Reaping Part and Clog

図 3　自動運転領域
Fig. 3 Autonomous Work Area

3. 解決すべき技術課題

3 ー 1 収穫作業に最適な周囲監視システム

無人自動運転トラクタや田植機では、レーザセンサ(レーザ光)やソナー(音波)を利用した障害物検出技術を搭載している。しかし、コンバインの収穫作業では作物の中を走行するため、レーザセンサやソナーを用いると図4のように作物を障害物と誤って検出してしまう。そのため、コンバインの作業環境に適応し、作物を障害物と誤検出することなく、人や障害物を正確に検出できる新しい障害物検出システムが求められた。

図 4 トラクタとコンバインの環境の違い
Fig. 4 Difference of the Environment Tractors and Combines

3 ー 2 刈取作業の自動化技術

3.2.1 自動リール制御機能

作物の高さに応じてリール位置を自動制御するためには、車両前方の作物の高さを検出する新たな技術の開発が必要となる。

3.2.2 自動詰まり解除機能

手動作業では、刈取部が詰まると、作業者が刈取部を逆転駆動させるレバーを引上げ、詰まった作物を刈取部から取り除く。この作業の自動化が必要となる。

3 ー 3 自動運転領域拡大

現行製品では、圃場マップ作成のために手動運転で周囲刈りを3周した後に自動運転を行っている。手動運転を1周に短縮すると、旋回スペースが十分に確保できていない状態で自動運転を開始することとなる。スペースが十分でない状態でも効率よく旋回を実現するため、新たな自動運転技術が必要となった(図5)。

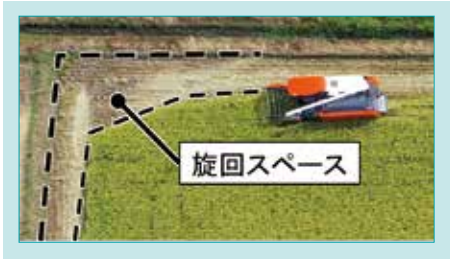


図 5 周囲刈り 1 周後の旋回スペース
Fig. 5 Turning Space After One Lap

4. 開発技術

4 ー 1 収穫作業に最適な周囲監視システム

4.1.1 人の検出技術

刈取作業中の人検出については、カメラで取得した画像データからAIを利用して人を検出するセンサシステムを開発した(図6)。まず、収穫作業環境における人が写った大量の画像データを収集し、AIに読み込ませて人物の特徴を学習させる。この学習したAIモデルを使用して推論を行い、機体の四方向に搭載したカメラで取得した画像から人を検出する(図7)。

図 6 機体周囲に搭載したカメラと人物検出
Fig. 6 Camera Mounted Around the Combine Harvester and Person Detection

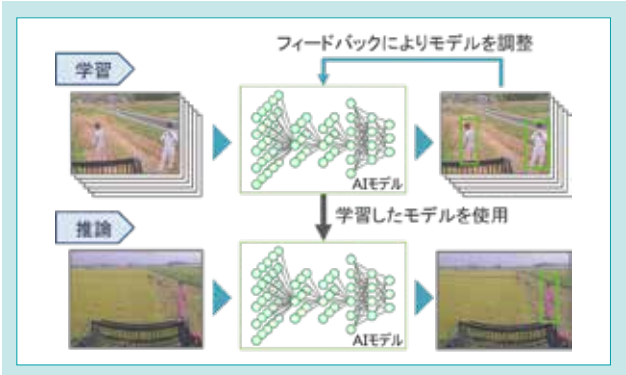


図 7 AI による学習と推論
Fig. 7 Learning and Inference with AI

しかし、この処理だけの場合、人物以外を誤って人と判定してしまうことがあった。誤判定の要因を分析したところ、多くのケースは自機の一部、影、背景などが複合的に影響して発生していた。そこで、自機の映り込みや影、背景の影響を抑制するために、取得した画像に自機の領域を隠すマスキングを追加した。また、カメラの取付け姿勢やレンズのばらつきを吸収するために、カメラに映り込む自機の特徴点からマスク領域を動的に生成する技術も開発した。

4.1.2 車両の検出技術

圃場に侵入した車両などは、機体の前後に搭載したミリ波レーダによるセンサシステムで検出する(図8)。

ミリ波レーダはミリ波帯の電波を照射し、反射波を計測することで対象物との距離、方向を測定することができる。収穫作業環境では、反射波に検出対象の車両と非検出対象である作物や雑草の反射成分が含まれるため、反射波の信号強度をもとに車両による測点と作物や雑草による測点を識別する。信号強度に閾値を設定して識別するだけでは除去できないケースもあるため、ミリ波レーダの検出領域を分割し、同一領域内において一定期間以上検出された測点の数が閾値を超えた場合に障害物と判定する(図9)。

圃場周辺に反射強度が高い車両や金属の構造物が存在する場合、それらを誤って検出することを避けるため、自動運転用の圃場マップ内に限って検出を行っている。また、機体の進行方向以外の測点による誤検出も避けるため、進行方向に基づいて動的に検出範囲を変更する処理を行っている。

これらの技術により、圃場内の作物や雑草、圃場外の物体による誤検出を抑制しつつ、圃場内の車両を検出するセンサシステムを開発した。

さらに、AI学習用の画像データの色分布や対象物とカメラの位置などを分析し、統計的に偏りなくデータを収集することで多様な環境における検出精度を向上させた。人として検出した対象物については、接触リスクの大きさに応じて点数付けを行い、その結果に基づいて停止させるか否かを判断することにより、検出性能を安定させた。

以上の技術開発の結果、作物、雑草、鳥などの誤検出を抑制しながら、AIで高精度な人物検出システムを実現した。

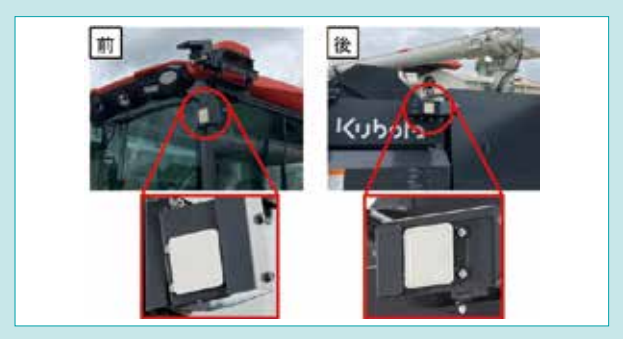


図 8 ミリ波レーダ
Fig. 8 Millimeter-wave Radar

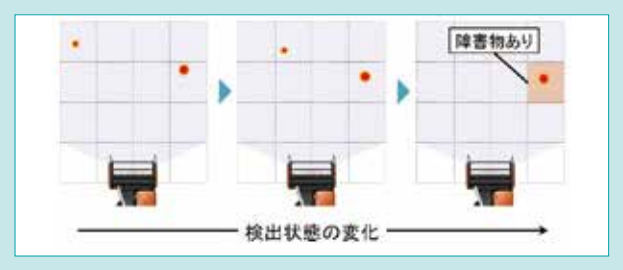


図 9 検出領域と障害物
Fig. 9 Detection Area and Obstacles

4 ー 2 刈取作業の自動化

4.2.1 収穫作物の高さに応じた刈取部制御

作物の高さに応じてリール位置を自動で制御するため、機体の前方上方にレーザセンサ(2D-LiDAR)を搭載し、新たな制御技術を開発した。

自動運転で作物を刈取りしている間、RTK-GNSS(Real Time Kinematic-GNSS)による機体位置、IMU(Inertial Measurement Unit)による機体姿勢、レーザセンサによる機体前方の三次元点群データを取得する(図10)。

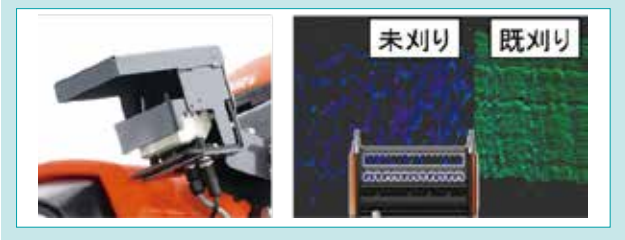


図 10 レーザセンサと計測データ
Fig. 10 Laser Sensor and Measurement Data

これらのデータをノイズ除去した後、前方領域の座標ごとのデータに変換して蓄積する。蓄積したデータから一定距離ごとの作物高さの中央値を算出し、作物高さマップを生成する(図11)。生成した作物高さマップをもとに、刈取部のリール前後・上下位置、リールの回転数、車速を自動制御する。

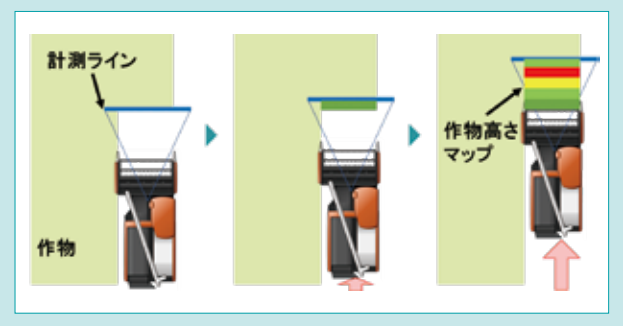


図 11 作物高さマップの生成イメージ
Fig. 11 Generated Image of the Crop Height Map

作物の高さに応じた自動制御の設定値は、熟練オペレータの操作データを分析して決定した。リールの前後・上下の駆動、リールの回転数の調整、車速の増減については、駆動に要する時間が異なるため、各部に対して最適な地点の作物高さ情報を用いて制御を行うこととした。

この作物高さ認識技術により、熟練オペレータが行うような作物の高さに応じた刈取部の操作を実現した。

4.2.2 刈取部詰まりの自動解除

刈取部が詰まった際に、自動で詰まりを解除し、作業に復帰できる電動刈取逆転装置と自動解除制御を開発した。

刈取部の詰まり除去には瞬間的に大きなトルクが必要となるため、駆動装置にはエンジン始動用のスタータモータを採用し、ギアトレイン機構を用いて刈取部の駆動を逆転する(図12)。

刈取部に搭載した回転センサが作物の詰まりによる刈取部の回転停止を検出すると、刈取走行を停止して後進を始める。この際、逆転動作時に刈刃で前方の作物の穂先を切らないように、刈取部を上昇させて後進した後、刈取部を逆回転させて詰まった作物を前方に放出する。放出後、刈取部を正転させ、詰まりが解除できたら刈取走行を再開する(図13)。再開直後は、逆転時に機体の前方に放出された作物を回収するため、刈取部とリール位置を最下限まで下げて走行する。

この刈取部詰まりの自動解除機能により、人の操作を介さずに詰まりの解除と作業再開が可能となり、無人運転の継続性を向上させることができた。

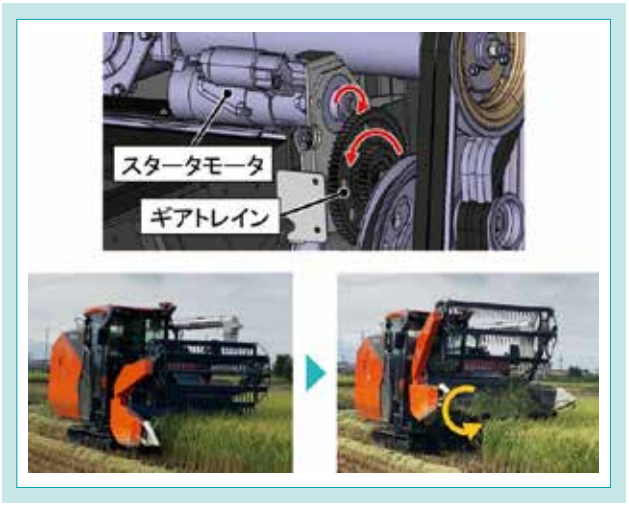


図 12 電動刈取逆転装置と詰まり解除の様子
Fig. 12 Electric Reaping Reversing Device and Unclogging

図 13 刈取部詰まりの自動解除フロー
Fig. 13 Automatic Release Flow for a Clogged Cutting Part

4 ー 3 自動運転領域拡大

4.3.1 圃場角部の刈取り技術

一般的に圃場最外周など、旋回スペースが十分確保できていない状態で刈取りする場合、角の部分では斜めに前後進を繰り返しながら刈取りを行い、少しずつ旋回スペースを確保する。そのため、刈取り後の未刈り領域の形状は複雑な多角形となっている。この多角形の圃場角部の刈取り技術を開発した(図14)。

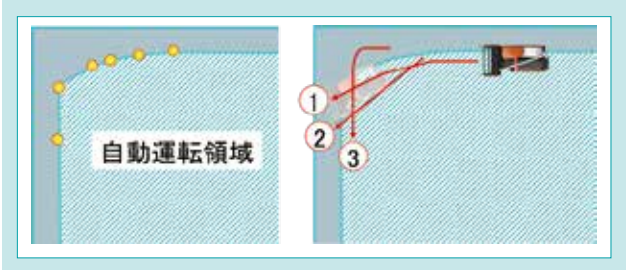


図 14 角部分の認識と刈取り方法
Fig. 14 Recognition and Reaping Method of a Corner Section

まず、圃場の未刈り領域は最大64点からなる頂点を直線で繋ぎ、詳細に形状を形成する。次に、圃場外形と圃場角部の未刈り領域から旋回可能な領域が確保できたかの可否を判定し、旋回領域が不足している場合は、未刈り領域に沿った刈取り経路を生成する。旋回領域が確保できるまで前後進の刈取り動作を繰り返し、旋回領域を確保した後、旋回を行う。

このように熟練オペレータのような圃場角部の刈取り動作を実現し、最外周のみ手動運転で刈取りを行えば、2周目以降は自動運転で刈取りを行うことが可能となり、圃場の自動運転領域を90%まで拡大することができた。

4.3.2 畦高さマップ

熟練オペレータは圃場の角部分を刈取る際、畦が低い場合には機体の前後を一部畦の上に飛び出させながら旋回する。これにより、前後進の回数を減らし、効率的な動きを実現している。同様の効率的な旋回を自動運転でも可能にするため、圃場周囲の畦高さを認識する技術を開発し、畦が低い場合に機体の前後を一部畦上に飛び出させる効率的な旋回を可能とする。

まず、手動運転で圃場の最外周を刈取りする際に、レーザセンサを用いて機体前方の三次元点群データを取得する(図15)。この点群データを座標に変換し、格子状の高さマップを作成する。その後、コンバインが走行した領域の外側を畦領域として畦高さマップを生成する。畦に雑草が生えている場合や、作物が畦上に倒れている場合、それらを含めた高さを畦の高さとして認識してしまう。これを防ぐため、空間的に密度が低い点群を除去するフィルタリング処理を施すことで、畦上の雑草や倒れた作物の影響を最小限に抑えて畦高さを認識することが可能になった。

この畦高さマップに基づき、機体の前後を畦の上に飛び出させることが可能かを判断し可能な場合は機体前後の一部を飛び出させる動作をすることで、熟練オペレータの動作に近い自動運転を実現した(図16)。

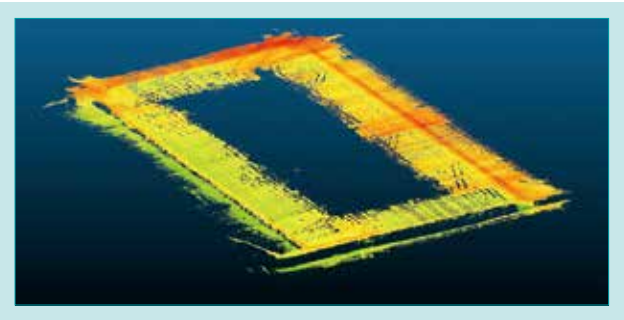


図 15 圃場周囲の測定データ
Fig. 15 Measurement Data Around the Field

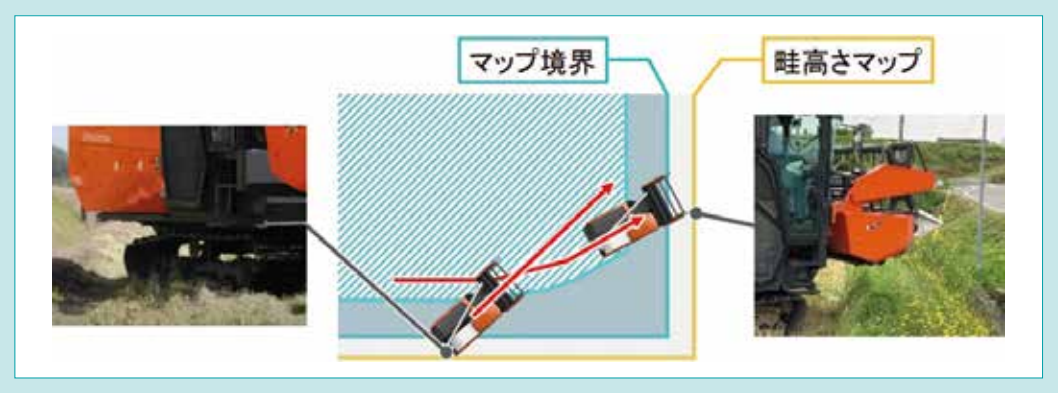


図 16 畦高さマップを利用した旋回
Fig. 16 Turning Using a Ridge Height Map

5. おわりに

収穫作業に適した人・障害物検出センサ、作物や畦の高さ認識技術、刈取部の自動詰まり解除機能など、さまざまな新技術を開発したことで、業界初の無人運転コンバインを市場に投入することができた。また、複雑な未刈り形状にも対応した刈取りを実現し、自動運転の対応領域を90%まで向上させた。本製品が農家の方々の人手不足や作業効率改善に貢献することを期待する。

SDGs のターゲットへの貢献

2.4 持続可能かつ強靭な農業の実現　収穫作業の無人化により、収穫作業の省人化と軽労化に貢献
8.2 イノベーションを通じた生産性の向上　業界初の無人自動運転コンバインで農業経営の効率化に貢献
9.2 包摂的かつ持続可能な産業基盤の強化　農業の労働力不足に対して、収穫作業の無人化で貢献

参考文献
1) 農林水産省. 農業機械の安全性確保の自動化レベル
https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kihyo03/gityo/g_smart_nougyo/pdf/04_jidouka.pdf、(参照日 2024-09-30)

中国向け乗用田植機KAシリーズの開発

Development of the Riding Type Rice Transplanter KA Series for China

移植機技術部／解析センター

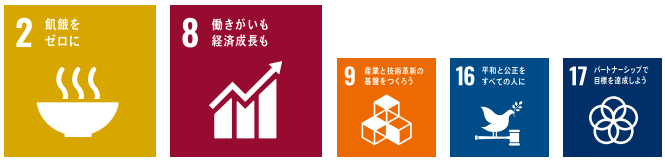
中国市場では、農家が業者に委託して田植えを行う、「賃植え」が主流である。賃植えの経営規模拡大や、農村人口の減少による労働力不足を背景に、より能率をアップさせた大型の機械が求められている。このニーズに応えるべく、“大規模賃植えユーザの能率アップが図れる田植機”をコンセプトとした中国向け乗用田植機を開発した。本稿では大型化に対応するため、走破性向上を目的とした湿田走破性向上車輪の開発と、植付精度向上を目的とした新規の植付部水平制御機構について紹介する。

【キーワード】
乗用田植機、高能率、植付部水平制御、解析

In the Chinese market, the main stream is contractors, in which farmers entrust rice transplanting to companies. Larger machines with higher efficiency are needed against the backdrop of an expansion in the scale of wage planting and a shortage of labor due to a declining rural population. To meet these needs, we developed a riding type rice transplanter for China based on the concept of “a rice transplanter that can improve the efficiency of large-scale contract transplanters.” In this paper, we introduce the development of a wheel for improved paddy field driving and a new horizontal control mechanism for improved planting accuracy in order to cope with increasing size.

【Key Word】
Riding Type Rice Transplanter, High Efficiency, Planting Part Horizontal Control, Analysis

関連する SDGs



1. はじめに

中国市場では「賃植え」と呼ばれる田植えの請負業者が田植えをすることが主流である。賃植えユーザは経営意識が高いため、より作業能率が高く、請負面積を拡大できる儲かる機械を求めている。また、農村人口減少に伴い労働力が減少しており、田植機は歩行型から乗用型へ移行し、さらに大型化が求められている。クボタの6条機と8条機の販売台数に占める8条機の割合は増加しており、今後もこの傾向が続くと予測される。

これらのニーズに応えるために機械の大型化と、基本性能向上を両立させた中国向け乗用田植機KAシリーズの開発を行った(図1)。

図 1 中国向け乗用田植機 KA シリーズ
Fig. 1 Riding Type Rice Transplanter KA Series for China

2. 開発のコンセプトと目標値

2 ー 1 開発のコンセプト

中国市場の田植機の大型化ニーズを踏まえ、“大規模賃植えユーザの作業能率向上を図る田植機”を開発コンセプトとした。本開発では能率向上を実現するために、主に以下の4つの取り組みを実施した。

(1)湿田における走破性向上
(2)植付精度向上
(3)苗搭載量増加につながる車格大型化
(4)高速化

本稿では、これら4つのうち
(1)湿田における走破性向上、および
(2)植付精度向上の実現、について述べる。

2 ー 2 目標値

(1)湿田における走破性向上
圃場深さが不均一でかつ深い圃場において
①従来沈没していた圃場で走行が可能である。
②現行機を5%以上上回る作業能率を達成する。

(2)植付精度向上
①植付部の水平制御の整定時間を現行機比50%以下に抑える。
②現行機を上回る植付精度を達成する。

3. 解決すべき技術課題

3 ー 1 田植機大型化による走破性の課題

田植機は圃場走行時に車輪が硬盤に沈み込み、その沈み込み量が増加すると負荷トルクが増加し、車速の低下を招く。車輪は硬盤に沈み駆動力を発生させるが、その反力で機械前側が浮き上がろうとする(図2)。重量が増加すると沈み込み量が増加し、反力も増加するため、前上がりになると最終的には圃場に沈み込んで沈没といわれる自力で走行できない状態になる。沈没すると引き上げ作業が必要となりタイムロスを引き起こし、作業能率が大幅に低下する。田植機が大型化し重量増加があっても、沈没することなく走破性を向上させることが課題である。本開発では、主に下記に取り組んだ。

・湿田走破性向上車輪の開発
・車体前後重量バランスの改善
・同クラス最大出力のエンジン搭載

本稿では、4-1で湿田走破性向上車輪の開発について主に説明する。

図 2 走行時に前上がりになるメカニズム
Fig. 2 Mechanism That Lifts Forward When Driving

3 ー 2 田植機大型化による植付精度の課題

田植機の植付部は中央部を支点に揺動する構造のため、条数が6条から8条に増加して幅が拡がると植付作業中の苗補給時に植付部の重量アンバランスが大きくなり、植付部がふらつきやすくなる(図3)。また、硬盤の凹凸により田植機が傾いた際に、植付部の両端の条ほど泥面と植付爪の距離の差が大きくなり、植付精度の指標の一つである植付深さのバラつきが大きくなる。機械を大型化させる上で、より植付部の安定性を向上させることが課題である(図4)。

そこで本開発では、植付部の水平制御性能の改善に取り組んだ。

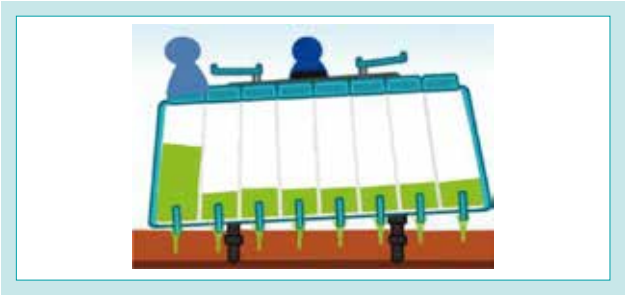


図 3　苗補給時の重量アンバランス
Fig. 3 Weight Imbalance During Seedling Supply

図 4　硬盤の凹凸による植付精度の影響
Fig. 4 Effect of an Irregularity of Hardboard on Planting Accuracy

4. 開発技術

4 － 1 湿田走破性向上のための新規車輪の開発

4.1.1　湿田走破性向上のための新規車輪開発の課題

田植機の車輪は、自動車とは異なり、車輪のラグが沈み込み土を圧縮し、その反力によって牽引力を得る(図5)。この牽引力を得るために、ラグ形状やラグ角度が重要である。従来は形状の異なる試作品を製作して効果を研究確認して適正な形状を決めてきたため、車輪の試作確認に時間を要した。湿田走行に適する形状をより短期間で試作確認することが必要であった。

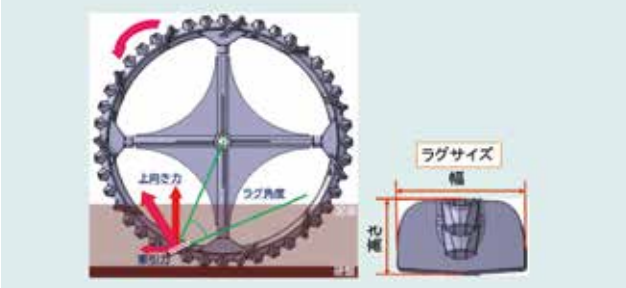


図 5　田植機の車輪の走行原理
Fig. 5 Running Principle of the Rice Transplanter Wheel

4.1.2　湿田走破性向上のための新規車輪開発の解決策

本開発では解析技術を利用して、湿田圃場に対する車輪走行解析を実施し、車輪ラグ形状の最適化に取り組んだ。圃場における車輪単体の挙動について機構(車輪挙動)とDEM(Digital Elevation Model)による土壌解析の連成解析を実施した(図6)。この解析により、車輪に回転を入力すると、泥水を模したDEM粒子からの反力が車輪に作用して、3つの走行性能指標(牽引力、上向き力、駆動トルク)を定量的に得られる。

図 6　車輪の解析モデル
Fig. 6 Analytical Model of the Wheel

この解析を用いて車輪のラグ角度・幅・高さの三つのパラメータを変化させて各走行性能指標を最適化することにした。各パラメータの特性は下記の通りである。

ラグ角度：角度が起きると牽引力が増加し、角度が寝ると上向き力が増加する。全ての走行指標に対する影響が大きく、牽引力に対する影響が最も顕著である。

ラグ幅と高さ(ラグサイズ)：ラグサイズを大きくすると、泥水の中に入っている周囲のラグの抵抗増加量が牽引力増加量を上回るため、牽引力は減少する一方で、上向き力に対する影響は大きい。

実際に沈没が多い湿田地域において、クボタの現行車輪では走行できないために現地製車輪が使用されていた。現地製車輪はラグを極端に拡大して走破性を向上させていた。一方で植付性は度外視していたため、ラグによる車輪跡が大きく、隣接する工程の植付箇所の泥面を荒らし、植付姿勢が不安定になる問題が発生していた。

図 7　現行車輪と開発車輪
Fig. 7 Current Wheels and Improved Wheels

そこで、車輪跡が植付けに影響しない範囲で最大のラグ幅を設定した。車輪をモデリングし、前述した解析から参考とする上向き力を設定した。その上向き力同等になる様に、ラグの高さと角度を求めた。(図7)

現地車輪を参考に上向き力を重視した結果、車輪単体での牽引力は低下したが、車輪ラグ変更とは別に以下の項目を改善し、機械の総合性能として走破性を向上させた。

①エンジン出力12%アップ

②車体重量バランス改善による後輪分担荷重低減

効果検証のため、実圃場で湿田走行試験を行った。車輪の違いによる比較では、現行車輪では走破できなかった圃場においても、新規開発した車輪であれば走破可能であった。また、異なる圃場においても機体姿勢が前上がり2.1°→1.1°に改善され、開発車輪は沈み込みが小さく有用性を実証した(表1)。

本開発機において設定が同じ現行機との湿田における実作業能率比較試験を行った。路上での速度が同じにもかかわらず、比較機より、7%の作業能率アップを達成し、本開発機の走破性の優位性を実証した(表2)。

表 1　湿田走行比較試験結果

Table 1 Results of a Wet Field Running Comparison Test

圃場	機体姿勢	
	現行車輪	開発車輪
Y	沈没	1.5°
Z	2.1°	1.1°

表 2　実作業能率比較試験結果

Table 2 Results of an Actual Work Efficiency Comparison Test

	現行機	開発機
作業能率[a/hr]	72.3	77.4
現行機比	–	+7%

4 ― 2 植付部水平制御性能の向上

4.2.1　植付部水平制御の課題

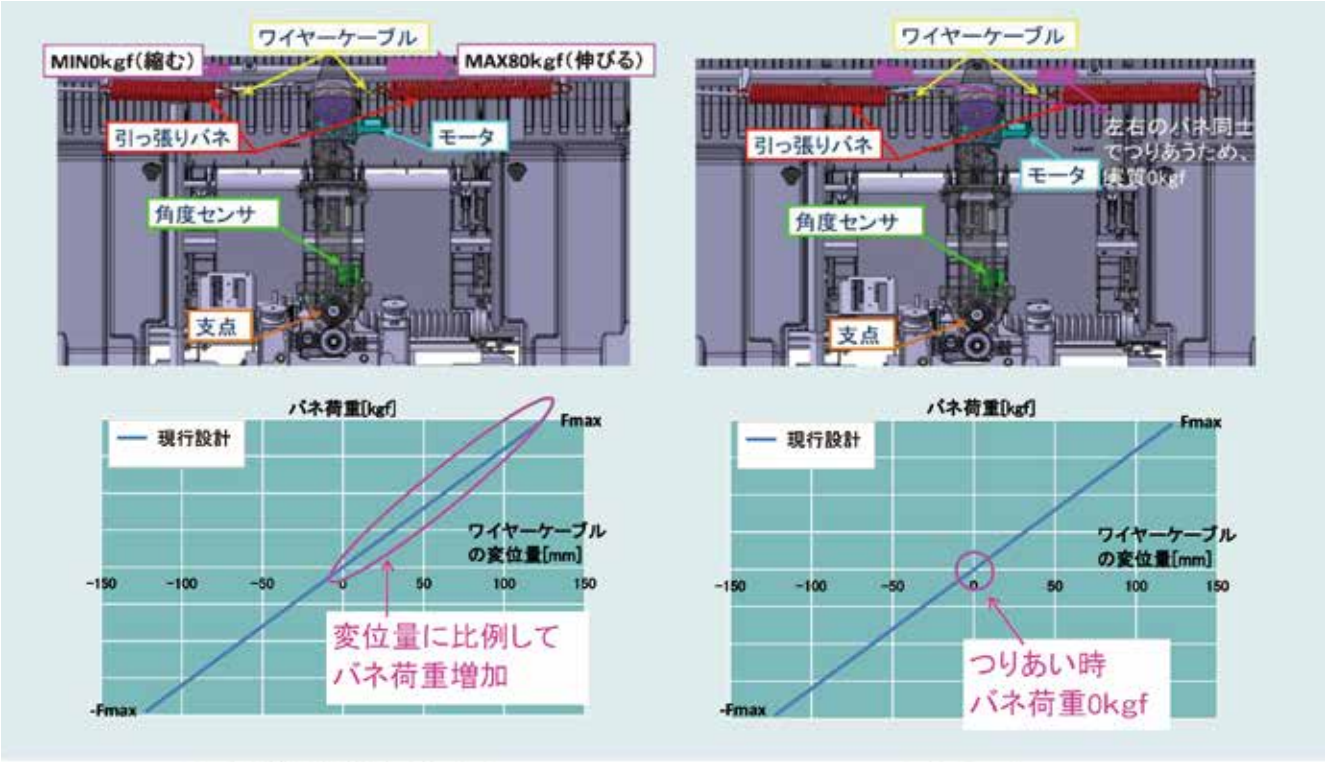
植付部の水平制御では、主に以下二点の外乱に対して植付深さが一定となるように制御する必要がある。

①苗補給時の重量アンバランス

②圃場の凹凸

重量アンバランスを修正する応答性と、圃場凹凸状況に合わせて植付部を傾斜させ追従させるという、相反する二要素を成り立たせることが課題であった。

クボタの現行機の水平制御機構は引っ張りバネとワイヤーケーブルを介してモータで植付部の傾斜の下方側を引き上げる構造であった(図8)。バネを介することで圃場の凹凸



(a) 植付部右側が傾き下がった時

(a) When the Right Side of the Planting Part Tilts Down

(b)水平の時

(b) When Horizontal

図 8　現行構造の水平制御機構

Fig. 8 Horizontal Control Mechanism of a Conventional Structure

に対して、ある程度自由に傾き追従することができる。また、重量アンバランスにより植付部が傾いた際には、植付部側に設けた角度センサで傾きを測定して、本機側に取りついたモータでバネを引っ張って水平を保つ制御を行う構成である。例えば右側が傾き下がった状態であればモータでバネを左側に引き上げて、植付部を水平に保持する(図8-(a))。しかし、植付部が水平になると左右の引張りバネの荷重がつりあうため、水平部近傍ではバランス補正力が発生せず、ふらつきやすいという問題があった(図8-(b))。

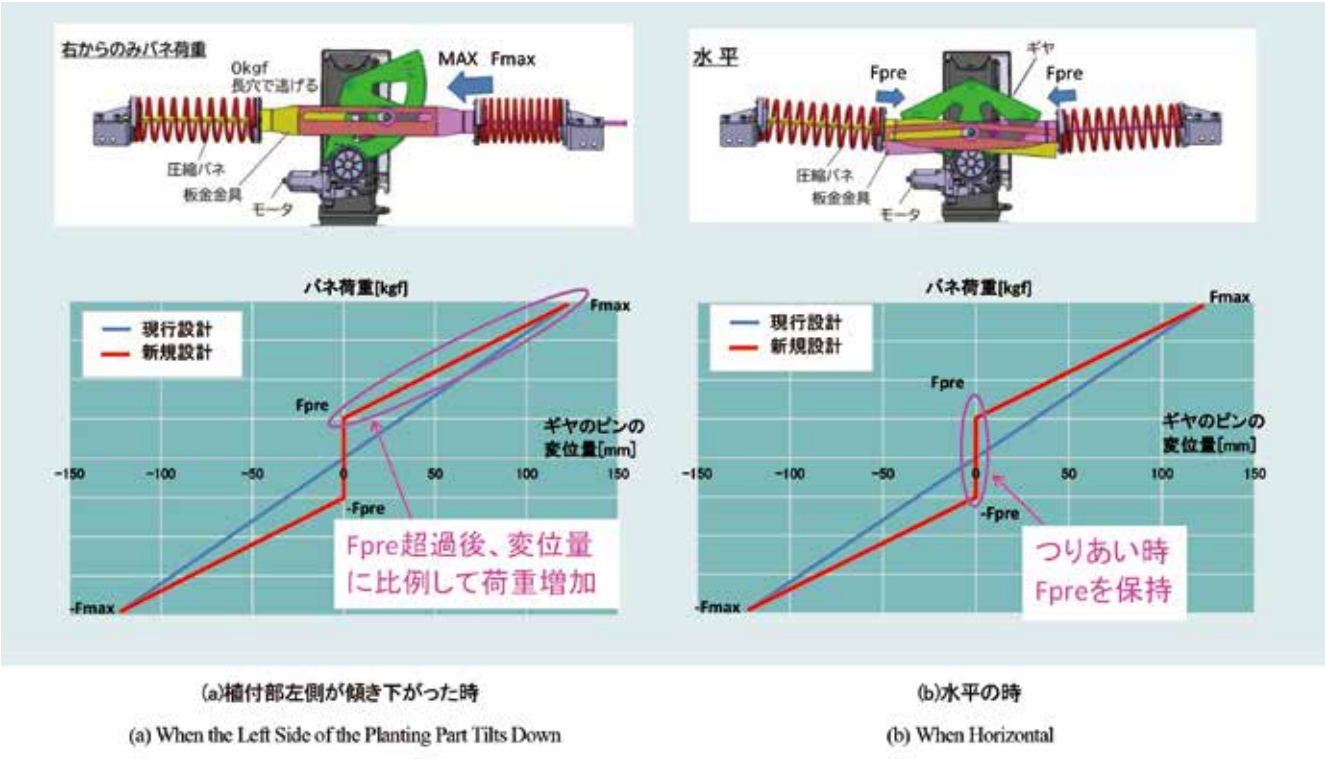
4.2.2 植付部水平制御性能向上の解決策

新たに開発した機構では、圧縮バネを用い、水平時に予めプリセット荷重(Fpre)を持たせ、水平部近傍においてもバランス補正力を有する構成とした(図9)。水平時は、植付部側に取りついた左右の板金金具は本機側に設けたギヤのピンを押して植付部にプリセット荷重を左右両側から持たせた状態を確保する。(図9-(b))。例えば左側が傾き下がった状態であれば、モータによりピン付きのギヤが右に動く。左側の板金金具(図9(a)黄塗部品)は、長穴によりピンから逃げる構造となっており、植付部に荷重を伝えない。右側の板金部品(図9(a)ピンク塗部品)はピンから荷重を受け、植付部へバネ荷重を伝達し、上がった植付部右側を下げることでバランス補正を行う。プリセット荷重を超過するまでは植付部が動かず、プリセット荷重を超過した後は、変位量に応じてバネ荷重を増加させてバランス補正を行う構造となる(図9-(a))。

これにより、現行機の強みであるバネによる圃場の凹凸への追従性を有しつつ、水平部近傍ではプリセット荷重を保持することで、ふらつきを抑えることが可能となった。

効果の検証のため、植付部を空中に浮かせた状態で、片端に10kgfの荷重を与えた際の水平整定試験を実施した。試験結果を図10に示す。負荷が加わった2秒のタイミングで植付部の角度が大きく傾いており、植付部の追従が確保されていた。また、水平整定時間は、現行機約10秒であるのに対し、開発機は約80%低減され、約2秒に抑えることができた。

現行機との植付精度比較試験を実施した結果、植付深さの標準偏差が現行機に比べて約30%低減され、圃場の凹凸に合わせて精度よく植付けが行われていることが確認された(表3)。



(a)植付部左側が傾き下がった時
(a) When the Left Side of the Planting Part Tilts Down

(b)水平の時
(b) When Horizontal

図 9 開発した新水平制御機構
Fig. 9 New Horizontal Control Mechanism Developed

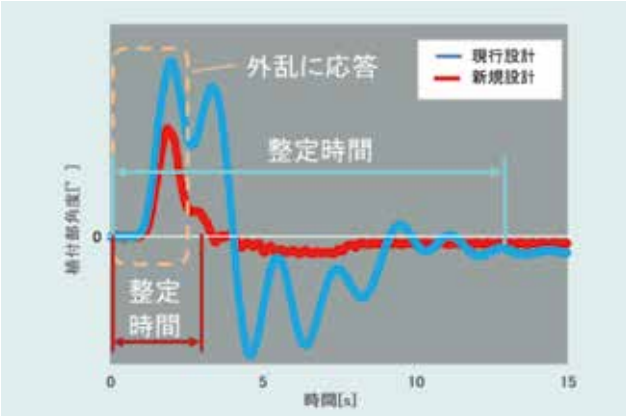


図 10　水平整定試験結果
Fig. 10 Horizontal Setting Test Result

表 3　植付精度比較試験結果
Table 3 Results of a Comparative Planting Accuracy Test

	現行機	開発機
植付深さ標準偏差[mm]	8.38	5.87
現行機比	–	−30%

5. おわりに

中国市場のニーズに応える開発として、“大規模賃植えユーザの能率アップが図れる田植機”をコンセプトにKAシリーズを投入した。KAシリーズは狙いとしていた能率アップにつながる走破性の向上や植付部水平制御に対し、高評価を得ることができた。

ASEANを中心とした市場は圃場の基盤整備が不十分なことを起因とした湿田圃場が多いため、今回開発した作業能率を向上させる技術を搭載した田植機は広く受け入れられることが見込まれる。今後KAシリーズをベースにASEAN・インドのニーズに合わせた海外向け仕様を順次展開予定である。

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　　植付精度の向上による生産性の向上に貢献
2.4　持続可能かつ強靭な農業の実現　　走破性の向上による田植え作業能率の向上に貢献
8.2　イノベーションを通じた生産性の向上　　大型化に適したKAシリーズで多条化促進による作業能率の向上に貢献

ユーティリティビークル向けガソリンエンジンGZ850Hの開発

Development of the Gasoline Engine GZ850H

エンジン技術第一部

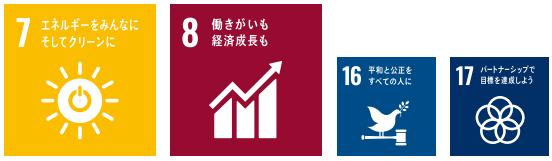
ユーティリティビークルRTV-XG850に搭載するガソリンエンジンモデルGZ850Hの開発に取り組み、事業領域の拡大を実現した。これはクボタとして初めてとなる高速型ガソリンエンジンの開発である。従来機から吸気システムを変更し、高出力化と低燃費化を実現した。また、エンジンストール耐性の向上により、競争力を強化した。排出ガス規制に対応するため、吸気圧力制御を用いた新しい試験方法を確立し、エンジン単体での排出ガス測定による品質確保に取り組んだ。

【キーワード】
GZ850H、高速型ガソリンエンジン、出力向上、燃費改善、排出ガス規制

Development of the gasoline engine GZ850H for use in the Utility Vehicle RTV-XG850 enabled us to expand our business domain. This is Kubota's first development of a high-speed gasoline engine. The air intake system was changed from the conventional model to achieve higher output and lower fuel consumption. Competitiveness was strengthened by improving engine stall resistance. In order to comply with exhaust gas regulations, a new test method using intake pressure control was established, and efforts were made to ensure quality by measuring exhaust gas on a non-consolidated basis at the engine.

【Key Word】
GZ850H, High-speed Gasoline Engine, Increased Output, Improved Fuel Consumption, Emission Regulation

関連する SDGs



1. はじめに

GZ850Hは、トラクタ事業部が開発したユーティリティビークルRTV-XG850に搭載される高速型水冷2気筒ガソリンエンジンである。従来は他社生産エンジンを搭載していたが、新機種のエンジンはクボタへの生産移管が行われることとなった。

これを好機と捉えクボタエンジン事業として新領域である高速回転エンジンを開発する。製品コンセプトであるホビー・ファーマー/レジデンシャルの客層向けに、作業性、レクリエーション性の向上を実現すべく、従来機からの性能改善に取り組み、ユーティリティビークル（以下「UV」という）事業領域の確保に加え、エンジン事業の拡大を図る。

2. 開発のコンセプトと目標値

2 ー 1 開発のコンセプト

高出力、高性能、高信頼性のエンジンを開発し、悪路や低温下でも安定した走行性能と快適な乗り心地を実現することで、製品競争力を強化し、事業拡大に貢献する。

2 ー 2 開発目標

開発エンジン仕様を表1に、外観図を図1に示す。開発目標は上記コンセプトのもと、エンジン性能を改善し付加価値の向上を目指す。また、新しい排出ガス計測手法の確立により排出ガス品質を管理する体制を整える。

・出力アップ、燃費性能改善

・エンジンストール耐性の向上

車両走行中に最も厳しい条件である「低温時にタイヤがロックする急ブレーキ」でもエンストしないことを目標とする。

・エンジン単体での排出ガス計測方法の確立

表 1　GZ850H 開発仕様
Table. 1 Engine Specification

項目	仕様
動弁機構	DOHC
排気量(L)	0.851
ボア×ストローク(mm)	92×64
気筒数	2
出力(kW)	40.3

図 1　GZ850H
Fig. 1 GZ850H

3. 解決すべき技術課題

3 ー 1 出力向上、燃費改善

従来機は2気筒エンジン特有の連続した吸気行程の影響により、各気筒への吸気の均等な分配が難しく、体積効率が低いため、出力向上、低燃費化が難しかった。

吸気系の最適化を進めることで、気筒間の吸気分配を均等化し、36kW/5750rpmから、40.3kW/6000rpmへの高出力化を実現する。また、吸気効率の改善により燃費改善を目指す。

3 ー 2 エンジンストール耐性向上

従来機はアクセルレスポンスを向上させるために、フライホイール等の回転系の慣性モーメントを小さく設計している。更にはガバナ機構等の調速装置が備付けられておらず、減速時のスロットル開度はアクセルの踏み込み量と1対1で対応するため、エンジンストール(以下エンストという)への耐性が低い構造となっている。特に低温時に顕著にその特性が表れていた。そこで、従来機の操作性を損なわず、よりスムーズな加速を実現させるには、慣性モーメントや調速装置を追加せずに、ECUによるアイドルスピードコントロールバルブ(以下ISCバルブ)の制御を工夫することで、エンスト耐性を向上させる。

3 ー 3 車両排出ガス規制対応及び、エンジン単体での排出ガス性能の計測

本アプリケーションは従来のクボタエンジンに適応される排出ガス規制(エンジン単体規制)とは異なり、車両搭載状態での排出ガス規制の対象となっている。排出ガス規制上は、車両をシャシダイナモに載せ加減速させる走行モードで排出ガス計測することが規定されている。そのためエンジン単体での排出ガス評価手法が確立されておらず、エンジン単体での排出ガス性能の品質管理が課題であった。

4. 開発技術

4 ー 1 吸気系改善による気筒間吸気バランスの改善技術

4.1.1 従来機の吸気バランス

従来機は180度クランクの2気筒エンジン特有の吸気量アンバランスが発生しており、1気筒に対し2気筒の吸気量が極端に少ない状態であった。そのため、2気筒側の仕事量が少なく、エンジン性能が最大限に発揮できていない状態となっていた。

4.1.2 吸気のアンバランスの解決策

吸気量の気筒間バランスの改善のため、従来機からインテークマニホルドの容量アップを検討した。まずは1D-CAEを用いて従来機とGZ850Hの吸気量比(1気筒吸気量÷2気筒吸気量)を算出した結果を図2に示す。従来機では全負荷域で吸気量比が1以上、アイドル運転条件で1.3を超えており、相対的に2気筒の吸気量が少ないことが示されている。一方、GZ850Hでは全域でバランスの最適値である1に近づき、全域で1.1以下の値となり、吸気バランスの改善を示唆する結果が得られた。また、体積効率(=吸気量÷排気量)も増加している結果が得られた。

これを元に改善仕様のインテークマニホルドを試作し、実機での性能確認を行った結果を図3に示す。1D-CAEの解析結果と同様の傾向を示し、インテークマニホルドの大容量化による気筒バランスの改善及び、体積効率の向上効果が得られた。

図4には全開性能曲線の比較結果を示す。体積効率の向上により吸気量の絶対量が上昇したため、36.0kW/5750rpmから40.3kW/6000rpmへ約11%の出力アップを実現した。

また、吸気効率の改善により、燃費の改善効果も得られた。排出ガスモード走行時には10%の燃費向上を実現した。

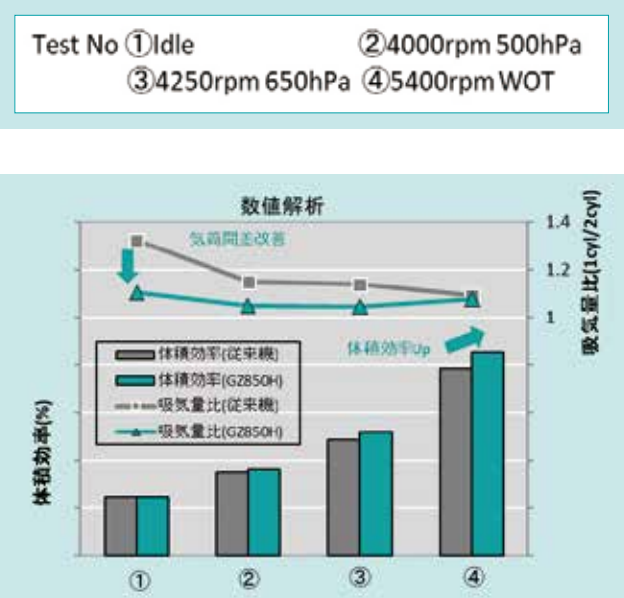


図 2 吸気量比較（数値解析）
Fig. 2 Intake Flow Comparison (Numerical Analysis)

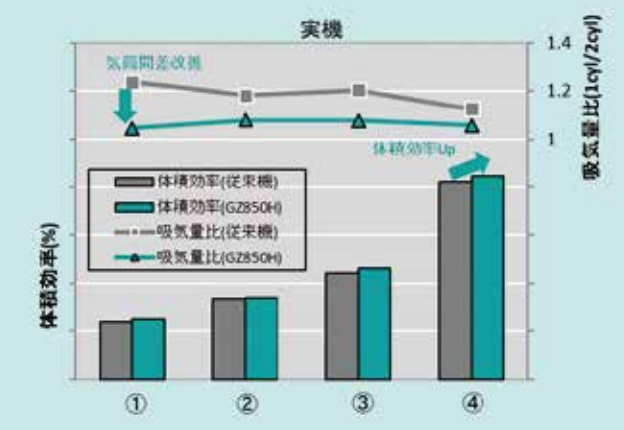


図 3 吸気量比較（実機）
Fig. 3 Intake Flow Comparison (Actual)

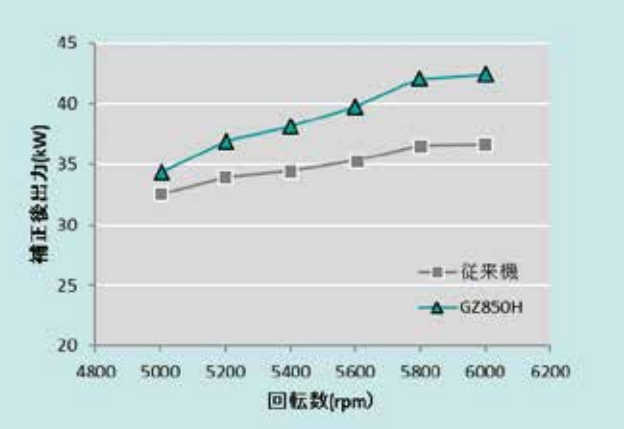


図 4 出力カーブ
Fig. 4 Output Curve

4 ― 2 エンジンストール耐性の改善

4.2.1 エンジンストール耐性

従来のクボタエンジンでは農業機械、建設機械といった産業機械用のエンジンが大多数を占めていた。産業機械用のエンジンでは急負荷による回転ドロップや瞬時に負荷が抜けた時のエンジン回転の急上昇を抑えるため、回転系に慣性モーメントの大きなフライホイールの採用や、調速装置が備付けられている。ただし、本エンジンはアクセル操作に即応したダイレクトな走りを実現するため、フライホイールの慣性モーメントが小さく、調速装置も備付けられていない。そのため、負荷変動に対して回転変動が大きく、エンスト耐性を確保することが困難であった。図5に一般的な調速装置を備えたクボタエンジンとGZ850Hのスロットル挙動のイメージ図を示す。調速装置を持つエンジンではドライバーがアクセルから脚を離すと、一度スロットルは全閉に到達するがエンジン回転数が低下すると調速装置が働き、スロットルが開き方向へ動くため、一定の吸気量を確保することができる。一方でGZ850Hではアクセルペダルを離すとスロットルバルブは全閉で張り付き、吸気流量が不足するため、エンスト耐性が低い。

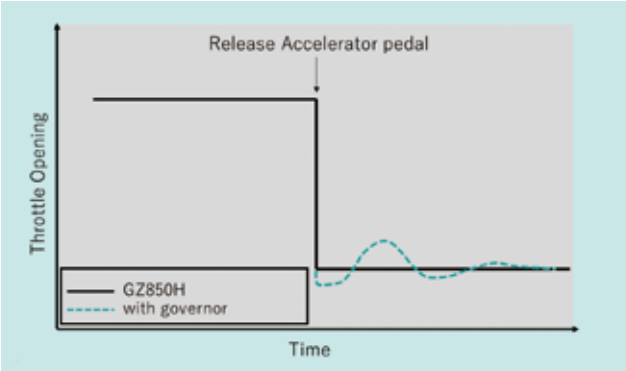


図 5 スロットル挙動
Fig. 5 Throttle Behavior

4.2.2 エンジンストール耐性の向上

本エンジンのスロットルボディにはISCバルブと呼ばれる、アイドル時の空気量を調整することを目的とした電磁弁が備付けられている。図6にその構造を示す。ISCバルブを活用することで、減速時の吸気量を補い、エンスト耐性の向上を図った。

図7に改善前後で比較したGZ850Hの急ブレーキによる減速時のエンジン回転数及びISCバルブの挙動を示す。改善前は急ブレーキ時にエンジン回転数が低下した際、図中白色矢印のようにISCバルブの開度上昇は緩慢であり、吸気量が不足(=エンジントルクが不足)しエンストを引き起こす。一方、改善後はエンジン回転数の低下を検出すると、ISCバルブは図中青色矢印のように高応答で開度を上昇させるように動く。これにより、回転が落ち込む前に吸気量を確保することが可能となり、急ブレーキ時でもエンジンが粘れるようなトルクを維持し、エンストしない結果を得た。

また、減速時のエンジンブレーキ性能が極端に弱化しないように、ISCバルブが開き方向へ動き出すタイミングを、遠心クラッチのミート回転数(=1800rpm、駆動トルクがトランスミッションへ伝達する回転数)を下回る設定とした。

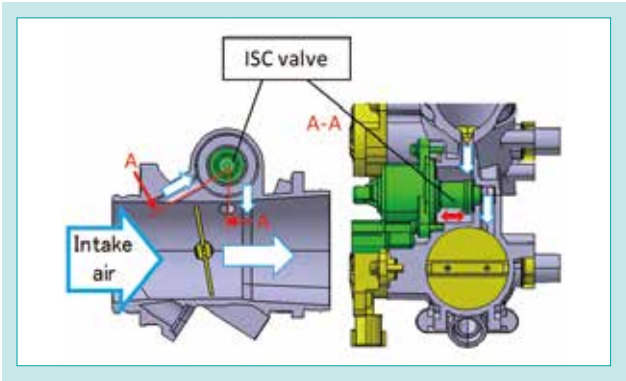


図 6 スロットルボディ
Fig. 6 Throttle Body

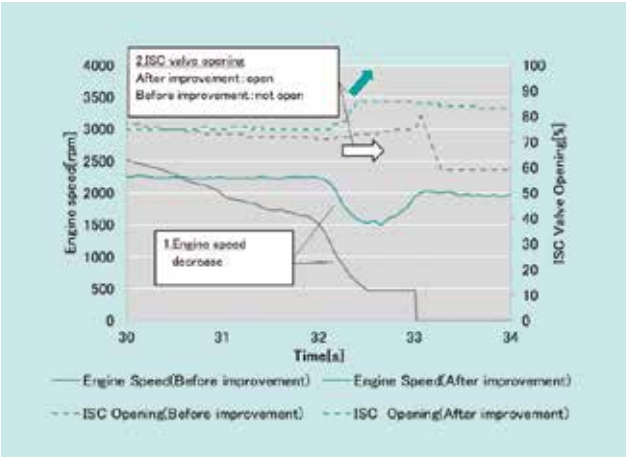


図 7 減速時の ISC バルブの挙動
Fig. 7 Behavior of the ISC Valve During Deceleration

4 ー 3 車両排出ガス規制対応

4.3.1 エンジン単体での排出ガス模擬モードの作成

車両排出ガス規制は、決められた走行パターンをシャシダイナモ上で走行するパターンであり、エンジン単体での計測パターンは規定されていない。そこで、車両排出ガス測定時に計測したエンジンデータ(回転数、負荷データ)を使用し、排出ガス模擬モードの作成を行う。図8に排出ガス模擬モードのイメージを示す。車速データからエンジン回転数＋吸気圧力へと変換し、エンジン単体での計測を目指す。

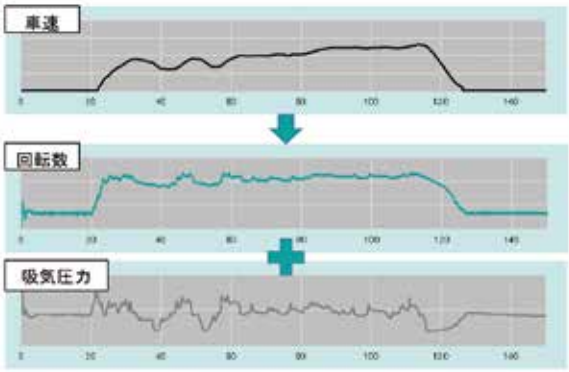


図 8 排出ガス模擬モードイメージ
Fig. 8 Exhaust Gas Simulation Mode

4.3.2 吸気圧制御手法による車両試験時のエンジン負荷の再現

一般的にエンジンベンチ上で動力計からエンジンに負荷を与える際に、制御目標値となるのがトルクである。しかし、車載状態では、トルクメータの設置が難しく、エンジントルクを直接測定することは困難である。そのため、トルクの代用値として吸気圧による負荷制御(TH-ABR)を採用した。TH-ABRは吸気スロットルバルブの開度をフィードバック制御により操作することで、目標値として設定した吸気圧に近づける手法であり、エンジンの回転数と一致するダイナモメータ回転数の制御(DY-ASR)を組み合わせることで、車両試験時のエンジン負荷を再現した。

4.3.3 新規導入した交流動力計によるマイナストルクの再現

既存のエンジンベンチ(渦電流式動力計)では、トルクの吸収は可能であるが、動力計からエンジンを駆動してマイナストルク(車両からエンジン側へのトルク伝達。エンジンブレーキ等が該当)を発生することができない。そこで、動力計からエンジンを駆動可能な交流動力計を設備導入した。交流動力計はトルク吸収、発生の両方が可能である。この吸収、駆動の両方を使い分ける制御と、上述したエンジンの吸気圧制御を組合せた協調制御によるエンジン自動運転プログラムを作成し、車両走行時のマイナストルクを再現させた。

4.3.4 排出ガス模擬モードの決定・検証

排出ガス模擬モードによりエンジンベンチで測定したエンジン単体の排出ガス量と、同一エンジンを車両へ搭載しシャシダイナモ上でFTP(b)モード走行した際の排出ガス量を図9に比較する。エンジン単体と車両搭載状態の排出ガス量は、規制値に対し十分に近似しているといえる値となった。図10に時系列の排出ガス濃度と積算値の比較グラフを示す。時系列データも車両搭載状態と概ね一致する値を示す。以上の結果よりエンジン単体での排出ガス品質管理が可能となった。

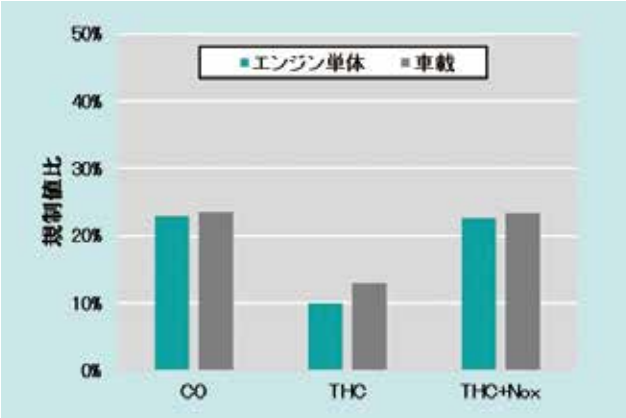


図 9 モード運転時排出ガス
Fig. 9 Exhaust Gas During Mode Operation

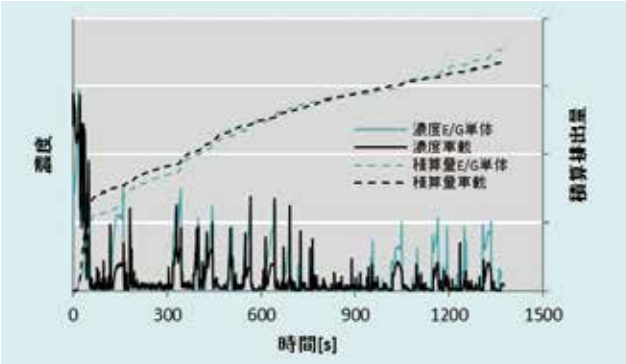


図 10 排出ガスの時系列データ
Fig. 10 Time Series Data of Exhaust Gas

図 11　RTV-XG850
Fig. 11 RTV-XG850

5. おわりに

ユーティリティビークル(図11)向けの高速型ガソリンエンジンのブラッシュアップに取り組み、従来機に対し出力アップ、低燃費化を両立することで、CO_2排出量の低減に貢献した。

さらに、エンジン単体での排出ガス計測方法の確立を行うことで、排出ガス品質の管理ができる環境を整えた。

エンジンの体格は搭載互換性を確保するため、従来機同等でありながら、前述の出力アップ、低燃費化に加え、エンスト耐性の改善により競争力の強化を実現した。

本エンジンの開発はエンジン事業部としては、新たな領域へ参入するチャレンジであった。今回の開発で得られた成果を元に、高速型ガソリンエンジンの事業拡大に貢献するとともに、高性能、低燃費化を両立するエンジンの開発を通し、SDGsに貢献していく。

SDGs のターゲットへの貢献

7.3　エネルギー効率の改善　　従来機に比べ燃費10%改善
8.2　イノベーションを通じた生産性の向上　　エンジン単体での排出ガス品質の管理に貢献

産業用ディーゼルエンジンV5009の開発

Development of the Diesel Engine for Industrial Use “V5009”

エンジン技術第三部

V5009エンジンはクボタシリーズ最大200馬力を誇り、低燃費性能の市場ニーズを達成するために、高筒内圧に耐えうる基本構造設計やVGターボによる高過給制御技術を取り入れている。規制対応においては2019年より欧州Stage V排出ガス規制が施行されており、DOC+DPF/SCRの後処理技術によりNOx/PMの低減に成功した。また、V5009は燃費・排出ガス低減の必要条件に加え、大型エンジン特有の厳しい環境下での耐久性を実現し、製品競争力を強化させた。

【キーワード】
V5009、高筒内圧設計、高出力密度化、VGターボ技術

The V5009 engine boasts 200 PS, the largest horsepower in the Kubota series. To achieve the market need for low fuel consumption performance, it incorporates a basic structural design that can withstand high cylinder pressure, and high boost control technology with a VG turbo. In terms of regulatory compliance, the European Stage V Emission regulations have been implemented from 2019, and DOC+DPF/SCR after-treatment technology has successfully reduced NOx/PM. In addition to the fuel consumption and emission reduction requirements, the V5009 has achieved durability in the severe environments specific to large engines, strengthening the product's competitiveness.

【Key Word】
V5009, High Cylinder Pressure Design, High Power Density, VG Turbo Technology

関連する SDGs

1. はじめに

クボタディーゼルエンジンは、もともと国内の小規模農業向けのトラクタ用として開発されてきた。しかし、その後は大型農業機械や海外のOEM先のニーズに応えるため、搭載アプリケーションと出力帯の拡充に注力してきた。最近では、市場からのさらなる高出力化と低燃費化の要望を受け、2020年にはクボタエンジン最大の200馬力を誇るV5009（排気量:5.017L）を開発した。

今後、クボタは大型農業機械の海外シェア獲得に向けて、さらにエンジンの高出力化を推進し、製品の競争力強化に貢献することを目指している。また、大型ディーゼルエンジン市場への事業拡大も重要な課題となる。この事業拡大を実現するためには、これまでクボタがディーゼルエンジン開発で培ってきた高出力化および低燃費技術の活用、そして信頼性と耐久性の確保が不可欠である。さらに、世界的な地球環境に対する関心の高まりを受けて、排気ガス中の有害環境物質である窒素酸化物とススの排出規制が段階的に強化されている。また、2019年より開始された欧州Stage V排出ガス規制に適合させるため、排出ガスを浄化する後処理装置の技術開発が必要不可欠となっている[1)]。

本稿では、V5009エンジンの開発を通して培った技術について紹介する。

2. 開発のコンセプトとエンジン仕様

2 ― 1 開発のコンセプト

クボタエンジンシリーズとしてディーゼルエンジンV6108 をベースに、排出ガス5次規制へ適合、更には大幅出力増加を実現し、畑作大型農機に適合可能なエンジンを開発する。

V5009 はクボタ最大排気量5.017L、4 気筒のディーゼルエンジンである。V5009 はクボタディーゼルエンジンの特徴であるコンパクトで優れた搭載性及び、信頼性、コスト、メンテナンス性が優れた4 気筒エンジンである。ベットプレート構造のクランクケースと鋳鉄製オイルパンを採用し、トラクタ搭載にも十分耐えうる構造強度を確保している。本研究では、クボタエンジンラインナップ のハイエンドモデルとして大幅出力増を実現し、クボタ最大出力、最高出力密度を備える新エンジン「V5009」を開発する。

図1　V5009 外観図
Fig. 1 V5009 External View

2 ― 2 エンジン仕様

出力は200馬力(155kW)をターゲットとし、欧州Stage V排出ガス規制に適合したクボタハイエンドモデルとする。また、クボタで出力および排気量が最大となるV5009エンジンスペックを表1に示す。

表に示すとおり、形式は立形水冷仕様の4サイクルディーゼル4気筒エンジン、排気量は5.017Lでボアストロークは110×132とする。また、過給方式はターボ・インタークーラ方式、排出ガス後処理装置はDOC+DPF/SCR、燃焼方式は直噴、燃料供給方式はコモンレールシステムとした。またエンジンスペックとしては、定格出力は157.3kW(2200rpm)、最大トルクは883.1Nm(1500−1600rpm)とする。

表 1　V5009 エンジン仕様
Table 1 V5009 Engine Specifications

	仕様
名称	V5009-TIE5
適合排出ガス規制	EPA/CARB Tier4 +EU StageV
形式	立形水冷4サイクルディーゼルエンジン
気筒数	4
ボア[mm]×ストローク[mm]	110.0×132.0
排気量[L]	5.017
過給方式	ターボ・インタークーラ
排出ガス後処理装置	DOC+DPF/SCR
定格出力[kW]/回転数[rpm]※1	157.3/2200
最大トルク[Nm]/回転数[rpm]※1	883.1/1500-1600
燃焼方式/燃料供給装置	直噴コモンレールシステム
外観寸法[mm]	894×693×967
乾燥重量[kg]	632

※1： SAE J1995に基づくグロス値

3. 解決すべき技術課題

クボタハイエンドモデルとして、解決すべき課題は3点である。

3.1. 高出力化熱負荷増大に対する冷却技術

大幅出力増加に伴い、燃焼熱負荷・燃焼圧力が増大するため、冷却性能向上、耐久信頼性の確保が重要となる。これにより、効率的な冷却システムの開発が求められる。

また、CFD(Computational Fluid Dynamics)技術を駆使した流路設計の最適化が課題となる。

3.2. エンジン・後処理装置搭載技術

エンジンの幅狭設計において、従来のクランクケース内にバランサを配置する方式では、クランクケースの幅が大きくなってしまう。さらに、熱負荷増大に対応するためのオイルクーラやEGR量確保のための大型EGRクーラが必要となり、従来のバランサ配置ではエンジンの横幅をさらに拡大する必要がある。

3.3. ターボ過給の高度化による急負荷応答技術

建機市場において急負荷変動時のエンジン回転ドロップが問題となる。急激な負荷変動により、エンジンの回転数が瞬時に低下し、作業効率の低下や機器の損傷リスクが高まる。このような状況に対処するための技術は、エンジンの耐久性やパフォーマンスを維持しつつ、急激な負荷変動に迅速に対応することが課題である。これにより、建機の運用効率と信頼性を向上させることが期待される。

4. 開発技術

4 ー 1 高出力化熱負荷増大に対する冷却性能向上技術

4.1.1 クランクケース ウォータジャケット冷却性能向上技術

耐久性を確保するためには、高筒内圧化による熱負荷の増大に対し、冷却性能を向上させなければならない。ウォータポンプから吐出された冷却水はエンジン中央部の分配部で各気筒へ均等になるように分配される(図2)。

シリンダライナ部の冷却性能を向上させるために、従来繋げていたシリンダライナとヘッドボルトボスをV5009では切り離すことで、ライナ周りに冷却水通路を設けることができた(図3)。これにより、熱負荷の増加に対してクランクケースの冷却性能を向上し、耐久性を確保することができた[2)]。

図 2 クランクケース冷却水通路
Fig. 2 Crankcase Coolant Passage

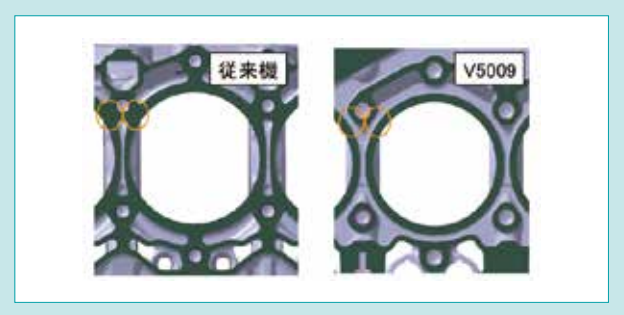


図 3 シリンダライナ冷却水通路
Fig. 3 Cylinder Liner Cooling Water Passage

4.1.2 クランクケース 熱伝達解析技術

クランクケースの熱伝達率解析結果を従来機と比較したコンター図を図4に示す。左は従来機、右は均等分配を採用したV5009のクランクケースの解析結果を示している。熱伝達率は青い所が低く、赤い所が高いことを示している。従来機の冷却構造は、ウォータポンプからの冷却水通路と各気筒の冷却水通路をつなぎ、冷却水がエンジンフロントからリアにかけて流れると同時に各気筒に分配される。従来機はエンジンリア側の気筒間になるに従い熱伝達率が下がるのに対し、V5009では3-4気筒間の熱伝達率も1-2、3-4気筒間と同等である。

クランクケース中央に分配部を配置することで、各気筒に均等に冷却水を分配できたことが分かる。これにより、気筒間の冷却性能のばらつきを低減し、ライナ摩耗抑制やヘッドガスケットの耐久性向上を果たした。

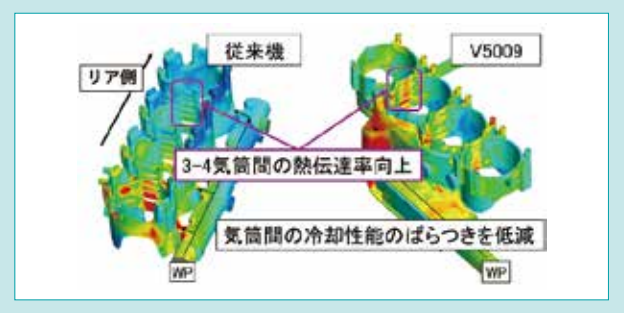


図 4 クランクケース熱伝達率解析結果
Fig. 4 Crankcase Heat Transfer Coefficient Analysis Results

4.1.3 シリンダヘッド冷却性能向上技術

続いてシリンダヘッドの冷却構造について説明する。シリンダヘッドの冷却水通路はウォータジャケット、吸排気バルブ、インジェクター冷却用のインジェクタースリーブを含んでいる。シリンダヘッドではインジェクター、バルブ周りを集中的に冷却することで熱負荷の増大に対応している。

具体的には、吸排気バルブ間に冷却水通路を設けることで吸排気バルブ周りを冷却し、バルブシートの摩耗を低減した。従来はシリンダヘッドに直接インジェクターの穴を加工していたが、インジェクター冷却用のスリーブを設けることでインジェクター挿入部の薄肉化が可能となり冷却性能を向上させた。さらに、排気側にリブを設けることで、冷却水がより温度の高い爆発面側の下部に流れるようにした(図5)。

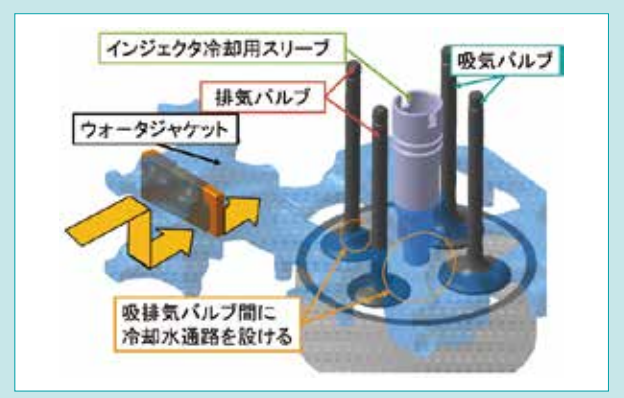


図 5 シリンダヘッド冷却構造
Fig. 5 Cylinder Head Cooling Structure

4 ― 2 エンジン・後処理装置搭載技術

4.2.1 エンジンの幅狭設計

技術的には、カセット式バランサの導入はエンジンの設計に革新的な変化をもたらす。従来の内蔵型バランサから外部に取り出すことで、エンジンのコンパクト化が図られた(図6)。これにより、エンジンの全体的なパッケージングが改善され、車両設計の自由度が増す。特に、エンジン回りのスペースを広くとれるため、ほかの重要なコンポーネントの配置が容易になる。例えば、オイルクーラとEGRクーラの最適な配置が可能になった(図7)。これにより、冷却性能が向上し、エンジンの耐久性と性能が向上した。また、EGR経路の短縮により、排出ガスの再循環効率が高まり、環境性能も向上することができた。カセット式バランサの採用は、エンジン設計の進化を象徴する技術であり、今後のエンジン開発において重要な役割を果たすことが期待される。

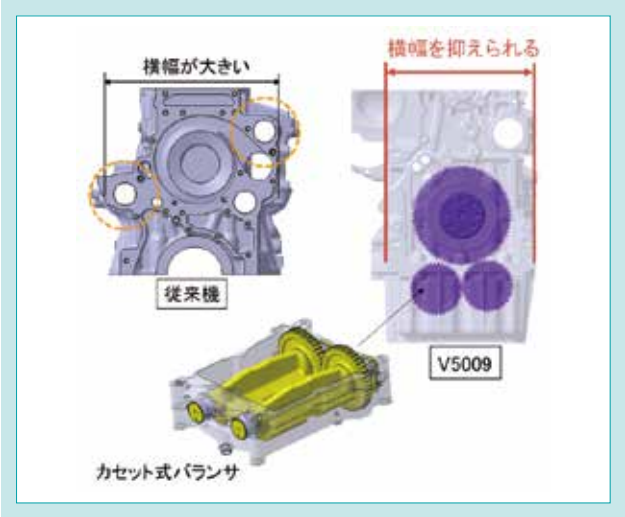


図 6 カセット式バランサ
Fig. 6 Cassette Type Balancer

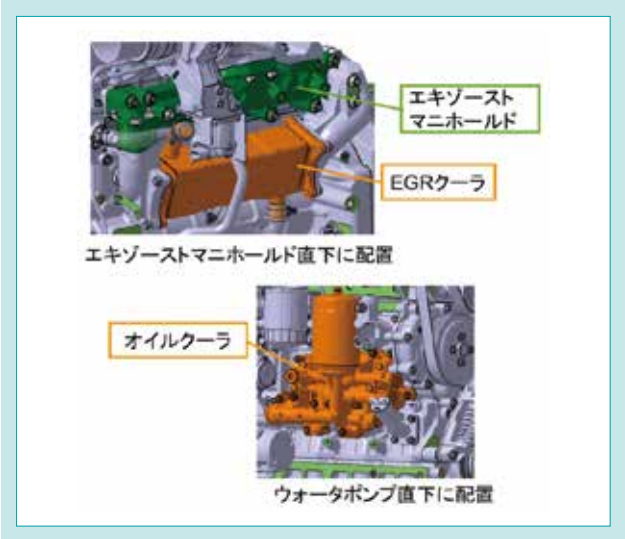


図 7 エンジン部品のレイアウト
Fig. 7 Layout Adjustment of Engine Components

4.2.2 排出ガス後処理装置の外観コンパクト化

排出ガス後処理装置の外観コンパクト化について、後処理装置を農機のボンネット内に収めるには、装置の幅がエンジン幅を超えないことが求められる。V5009は高出力化により排出ガス流量が増え、装置が大きくなる懸念があった。そこで、DEFインジェクターの位置と角度を調整し、DEFと排出ガスのミキシングを促進するためにミキシング部を確保した(図8)。この2点によりNOx浄化性能を向上させ、SCRのサイズを小さくすることができた。最適な配置と角度を見つけるために流体解析シミュレーションを活用し、ミキシング部の形状と長さも最適化して効率的な化学反応を促進した。結果として、装置の小型化が実現した。

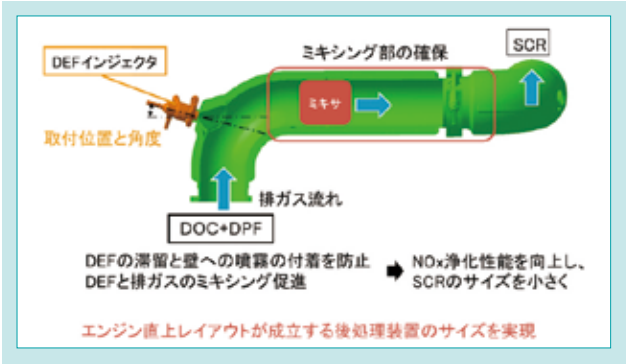


図 8 後処理コンパクト化
Fig. 8 Compact Post-processing

4.2.3 メンテナンス性

ワンサイドメンテナンスに関しては、V5009では、図9に示すメンテナンス部品を吸気側に配置することで、ワンサイドメンテナンスを実現している。また、吸気側への集約により、作業効率が向上し、メンテナンスコストの削減にも寄与している。HLA(Hydraulic Lash Adjuster)油圧タペットの採用について、従来、クボタエンジンでは、バルブクリアランスの調整が必要だったが、油圧タペットを採用することでバルブクリアランスの調整が不要になり、メンテナンス性向上を果たした。エンジン高さの抑制を目的に、OHV形式で成立する油圧タペットにこだわった。

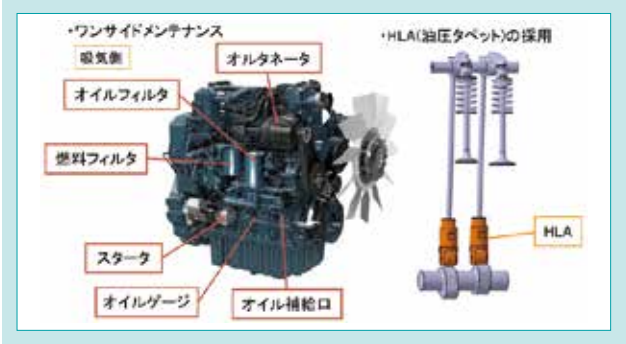


図 9 エンジンメンテナンス性の向上
Fig. 9 Engine Maintainability

4 ー 3 ターボ過給の高度化による急負荷応答技術

4.3.1 負荷変動に対するエンジン回転ドロップ

建設機械や農業機械において、エンジンの性能と耐久性は非常に重要である。特に建設機械では、エキスカベータなどの掘削作業中に急激な負荷変動が発生するため、エンジンの高応答性や高地・高温環境での作業性が求められる。これらの課題を克服するために、ターボチャージャーの適合が重要な役割を果たす。まず、急激な負荷変動に対するエンジンの回転ドロップについて急な負荷変動が発生すると、エンジン回転数が急激に低下し、瞬間的に出力が不足するため、エンジンストールなどの作業性の悪化が生じる。この問題を解決するためには、回転ドロップを抑制する必要がある(図10)。

クボタでは、建設機械に適したターボチャージャーの選定を行った。従来使用していたWGターボと新たにVGターボを、過給圧の制御、高出力、作業性、排出ガス性能、の4つの観点から比較した。その結果、VGターボは全域での過給圧の制御と高出力化が可能であり、作業性と排出ガス性能の両立が図れることが分かった。

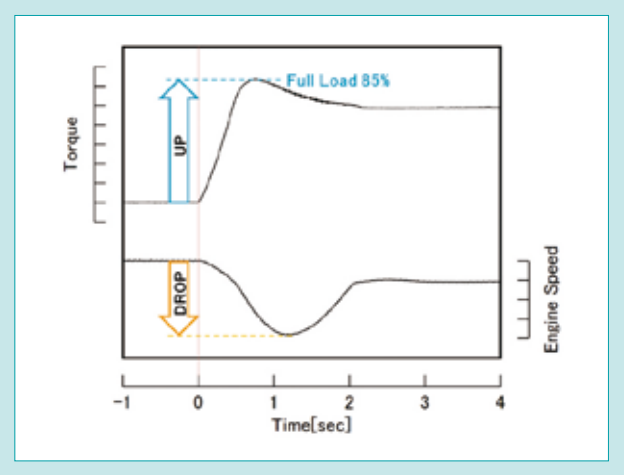


図 10 負荷変動を与えた時のエンジン回転数の挙動
Fig. 10 Behavior of Engine Speed When Load Variation is Applied

4.3.2 燃料噴射量増によるエンジン回転ドロップ改善

従来の燃料噴射量増加による回転ドロップの改善ではドロップを46%改善したが、過給圧の立ち上がりが遅れるため、空気量が不足し多量のススが発生する問題があった(図11)。ススの発生はDPFの再生インターバルを短くし、燃費の悪化を引き起こす。これに対し、V5009ではVGターボによる過給圧の制御で回転ドロップを改善する方法を採用した。

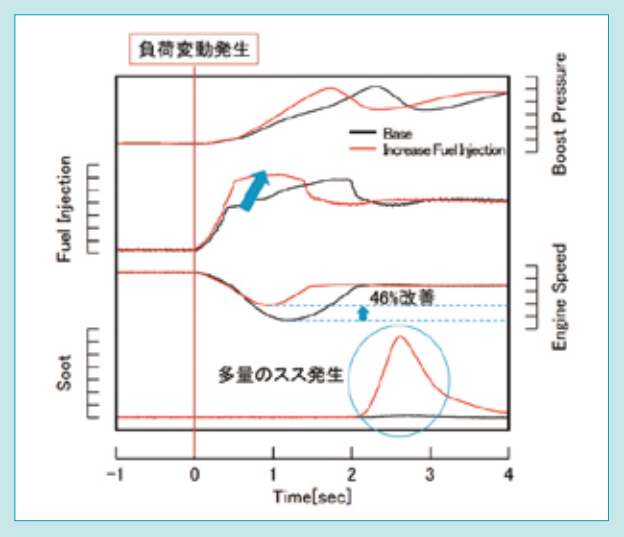


図 11 燃料噴射量による回転ドロップ量変化
Fig. 11 Rotation Drop Variation with Fuel Injection Increase

4.3.3 ターボ過給圧増によるエンジン回転ドロップ改善

VGターボの導入により、過給圧の制御が全域で可能となり、過給圧増加に伴う回転ドロップを改善した。過給圧を事前に高めることで、燃料噴射量増加時と同様に回転ドロップを抑えつつ、ススの発生量を大幅に低減できた。具体的には、ススの発生量が94%減少し、DPF再生インターバルの延長と燃費の改善が実現した。図12では、緑色の線が過給圧を制御した場合を示し、燃料噴射量増加後と過給圧増加後のススの発生量を比較している。これにより、エンジンの効率と環境性能の向上が達成した。

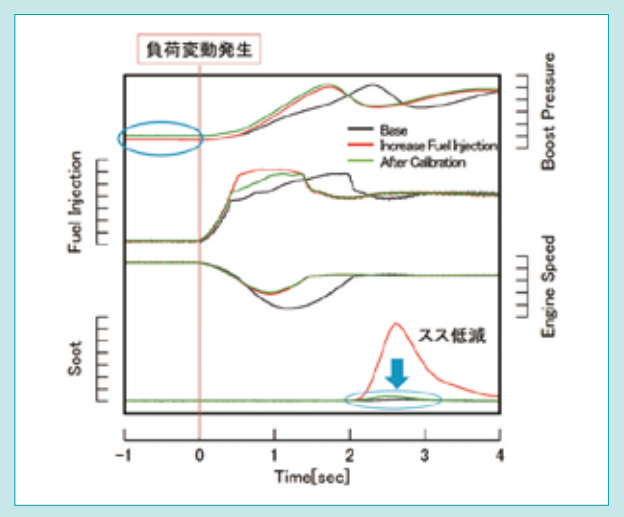


図 12 ターボ過給圧増による回転ドロップ量変化
Fig. 12 Rotation Drop Variation with Turbo Boost Pressure Increase

4.3.4 高温・高地性能

建設機械が高温や高地での過酷な環境下でも性能を確保するための技術について説明する。砂漠のような高温環境や標高の高い鉱山での使用が求められる建設機械は、走行風による冷却が難しく、冷却に不利な条件がある。高温環境下では吸気温度が上昇し、過給温度も上昇する。高地環境下では気圧が低下し、圧力比が上がるため、同様に過給温度が上昇する。これにより排気温度も上昇し、酸素濃度の低下によって出力が低下する。高温や高地環境下では過給温度や排気温度の上昇、出力の低下が発生し、ターボのコンプレッサハウジングやタービンの耐熱温度が制約される。従来の方法では、燃料制限を行い過給圧を下げることで温度の上昇を防いでいたが、これは出力の低下を意味し作業性が悪化していた。そこで、VGターボを用いることで高温や高地環境下での性能改善と作業性の向上を図った。具体的には、外気温度25℃と60℃での回転数と出力の関係を示した図13において、60℃の適合前では最大23%低下していた出力を、全域において25℃と同等の出力に適合させた。また、平地と高度4000mに相当する減圧下での回転数と出力の関係を示したグラフでは、過給圧の制御により過給温度を下げ、適合前後で定格出力において12%の出力向上を実現した。

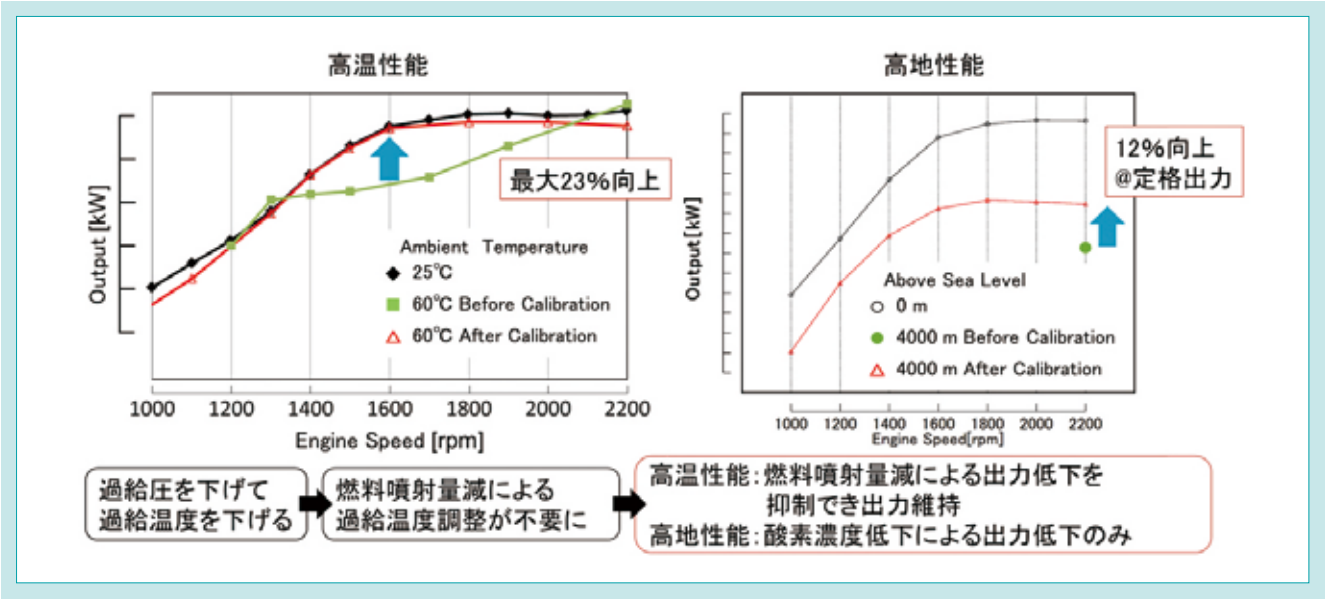


図 13　高温・高地性能
Fig. 13 High Temperature and High-altitude Performance

5. おわりに

本研究の結果、以下の結論を得た。

・クランクケースとシリンダヘッドの冷却性能を向上させる技術により、クランクケースでは冷却水を均等に分配し、熱負荷の増大に対応し、シリンダヘッドではインジェクタースリーブや水流を誘導するリブを設け、吸排気バルブ周りの冷却を強化した。

・カセット式バランサの導入によりエンジンのコンパクト化が進み、車両設計の自由度が増す。排出ガス後処理装置は流体解析シミュレーションを活用し小型化を実現した。また、メンテナンス部品を吸気側に集約し、作業効率向上を達成した。

・急激な負荷変動に対応するための高応答性に対し、VGターボを採用し、過給圧の制御で回転ドロップを抑制し、ススの発生を94%低減した。VGターボ技術採用により、エンジンの性能と耐久性を高地・高温環境でも向上させた。

今後とも、クボタエンジンの低エミッション、低燃費性能が地球環境保全、社会的ニーズを実現するよう追及していく。

SDGs のターゲットへの貢献

7.3　エネルギー効率の改善　　クボタ初となるVGターボ技術により燃料消費率低減を実現

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　　有害環境物質の排出量低減を実現

参考文献

1）鈴木孝幸編「ディーゼルエンジンの徹底研究」(2012)

2）渡邊慧「新開発エンジン_農建機用新型V5009ディーセルエンジンの開発,自技会シンポジウム」(2021)

SCR触媒性能の劣化予測技術の開発

Development of SCR Catalyst Performance Degradation Prediction Technology

エンジン技術第三部

56-155kW出力帯をカバーするV3、08、09シリーズエンジンの後処理システムは、2014年より施行されたEPA/CARB Final Tier4の排出ガス規制より「DOC+DPF/SCR」を採用した。SCRの触媒劣化は排出ガス性能にダイレクトに寄与する。汎用エンジンに最適なSCR触媒の検討を行い、触媒劣化に対してロバスト性の高い銅系の触媒を新たに開発した。新触媒の開発には、劣化評価のために長時間の耐久運転が必要であるが、劣化予測手法を用いた。これにより耐劣化性評価期間の短縮を行うことができた。

【キーワード】
SCR、銅触媒、排出ガス、後処理、触媒劣化、劣化予測

The after-treatment system of the V3, 08, and 09 series engines, covering an output range of 56-155 kW, has adopted "DOC+DPF/SCR" in compliance with the EPA/CARB Final Tier 4 emission regulations implemented in 2014. The degradation of the SCR catalyst directly affects exhaust gas performance. We conducted research on the optimal SCR catalyst for general-purpose engines and developed a new copper-based catalyst with high robustness against catalyst degradation. The development of the new catalyst required long-duration endurance testing for degradation evaluation, but we utilized a degradation prediction method. This allowed us to shorten the development time.

【Key Word】
SCR, Copper Catalyst, Exhaust Gas, After-treatment, Catalyst Degradation, Degradation Prediction

関連する SDGs

1. はじめに

クボタの産業用ディーゼルエンジンはこれまで世界各国で施行されている排出ガス規制にタイムリーに適合することで農建機などの様々な搭載機械に貢献してきている。中でも欧米をはじめとする先進国の排出ガス規制は最も厳しく、56kW超のカテゴリにおいて規制を遵守するためにはエンジンの排出ガスを浄化する後処理システムが必須となっている。そのためクボタエンジンの56-155kW出力帯をカバーするV3、08、09シリーズエンジン(図1)の後処理システムは、EPA/CARB Final Tier4規制より「DOC+DPF/SCR」を採用している。2020年にCARBより排出ガス劣化係数を検証する新たな要求を受け、更なる耐劣化性を向上した新しい後処理システムの開発が急務となった。SCRマフラ装備エンジンの排出ガス劣化において、寄与率が高い部品はSCR触媒の性能劣化である。そのため、56-155kW出力帯をカバーするV3、08、09シリーズエンジンの耐劣化性を向上した後処理システムを新しい予測手法により短期間で認証取得を可能とし、快適な生活環境の創造と保全に貢献する。

図 1　V3800-TIE5H
Fig. 1　V3800-TIE5H

2. 開発のコンセプトと目標値

2 ー 1 開発のコンセプト

触媒メーカもエンジン実機と相関させた予測手法に関して、ほとんど知見がない。そこで、開発工数削減のためSCR触媒の劣化予測技術をクボタが独自に確立する。

2 ー 2 開発目標

1)化学反応分析を高度化することによる触媒特性の把握を短期間で可能にする。

2)SCRシステムにおける劣化耐久試験後のNOx排出量を高精度で予測可能にする。

3. 解決すべき技術課題

3 ー 1 加速劣化触媒の作成条件の確立

調査可能なSCR触媒の特性の雰囲気条件範囲がエンジン実機に依存してしまい、条件の一部をパラメータとして評価することができないため、限定された雰囲気条件内での触媒選定、制御ソフトの反映適合値を決定している。また、最終的なNOx還元性能以外の特性の洗い出しと洗い出した特性項目の適切な評価方法を確立できておらず、エンジン実機用の触媒を作成するための選定期間が長くなる。

そこでSCR触媒の特性を把握し選定するため、化学反応分析を物性分析の観点からSCR触媒の評価を行い、加速劣化触媒の作成条件を確立する。

3 ー 2 長時間運転後の SCR 触媒性能の予測

長時間運転後のSCR触媒性能においてエンジン実機と相関させた予測手法の知見がなく、エンジン実機によるSCR触媒性能劣化を確認するため、長時間の運転時間が必要になる。

エンジン実機による触媒性能劣化を確認するため、認証試験に必要なエンジン実機による劣化耐久試験(例:CARB8000時間)に代表される長時間運転が必要な試験において、触媒性能が満たされない場合に手戻りが発生する。やり直しには、長時間かかるため目標開発期間を超過する懸念がある。

そこで長時間かけて生じる化学変化を、短時間の加速試験の結果から長時間運転後のSCR触媒性能を予測する。

4. 開発技術

4 ー 1 化学反応分析の高度化技術

SCR触媒の特性を把握し選定するために、テストピースの模擬排ガス試験による化学反応分析を物性分析の観点からSCR触媒の評価を行う。模擬排出ガス試験装置の概略図を図2に示す。

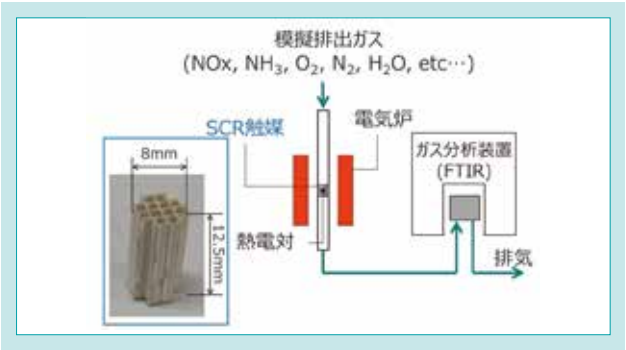


図 2　模擬排出ガス試験装置の概略図
Fig. 2　The Simulated Exhaust Gas Testing Device

SCR触媒はゼオライトと銅や鉄などの触媒種の種類によって性能に差がある。エンジン性能に最適なSCR触媒を開発するためにNOx還元性能、NH_3吸着性能を基に複数のSCR触媒を模擬排出ガスで評価する。各性能の評価手法と評価結果(図3)を以下に示す。[1)]

●評価手法

①NOx還元性能

・高温条件から徐々に降温させた際のNOx還元性能の計測。

②NH_3吸着性能

・NH_3を低温条件からSCR触媒へ流通させた後、徐々に昇温してNH_3の離脱量を計測し、NH_3吸着量推定。

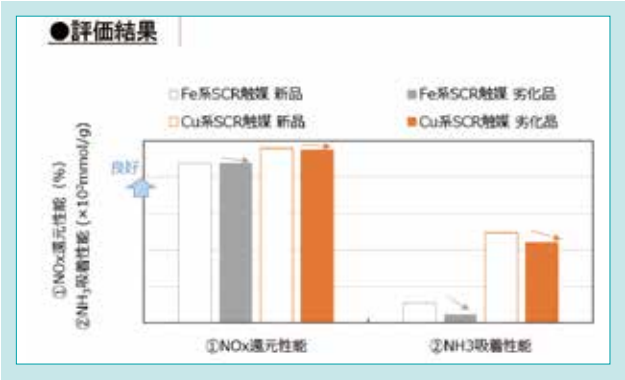


図 3　模擬排出ガス評価結果
Fig. 3　Result of Mock Exhaust Gas Evaluation

化学反応分析により明らかとなった鉄系SCR触媒から銅系SCR触媒への変更によるメリットを以下に示す。

①低温領域でのNOx浄化率が高く、
　高温領域も性能差無し。
②SCR触媒の劣化率が低い。
③DOCの劣化によるNO_2/NOx比の影響が小さい。

SCR触媒劣化前後の化学特性把握による触媒選定と期間短縮および制御ソフトの反映適合値の高精度化を実現した。

本開発におけるテストピースの模擬排出ガス試験及びNH_3吸着性能試験は、国立研究開発法人産業技術総合研究所省エネルギー研究部門との共同研究により実施したものである。

4 － 2 アレニウスの式による SCR 触媒性能の劣化予測技術

3－2の課題に挙げた通り、エンジンを実際に長時間運転することによる手戻りを防ぐためには、設計的な予測検討によってSCR触媒性能の劣化を正確に予測することが必要となる。そこで、長時間をかけて生じる化学変化を、短時間の加速試験の結果で予測することを目的として利用されるアレニウスの式を用いる。アレニウスの式は下記のとおり定義されている。

$$k = Aexp\left(\frac{-Ea}{RT}\right)$$

・変数

k:化学反応速度定数

T:絶対温度

・定数

Ea:活性化エネルギー（材料固有）

R:気体定数

A:温度に無関係な定数（頻度因子）

この式を応用することで4－1の化学反応分析で行ったテストピースによる模擬排出ガス試験による結果とエンジン運転時のSCR触媒の環境条件を基に長時間運転相当となる加速劣化時間t_2を求める。求めるイメージ図を図4に示す。

左記より算出される加速劣化時間t_2の間だけ加速劣化温度T_2に曝して劣化させたSCR触媒を用いたSCRマフラを作成してエンジン実機で排出ガス試験の評価を行うことで、長時間運転後のSCR触媒性能を模擬した評価を可能とする。

左記にて算出された結果を基に、次の条件にて劣化させた触媒の場合と実際にA時間及びB時間運転した場合の鉄触媒及び銅触媒を用いたSCRマフラによる測定結果の比較を行った。[2)]

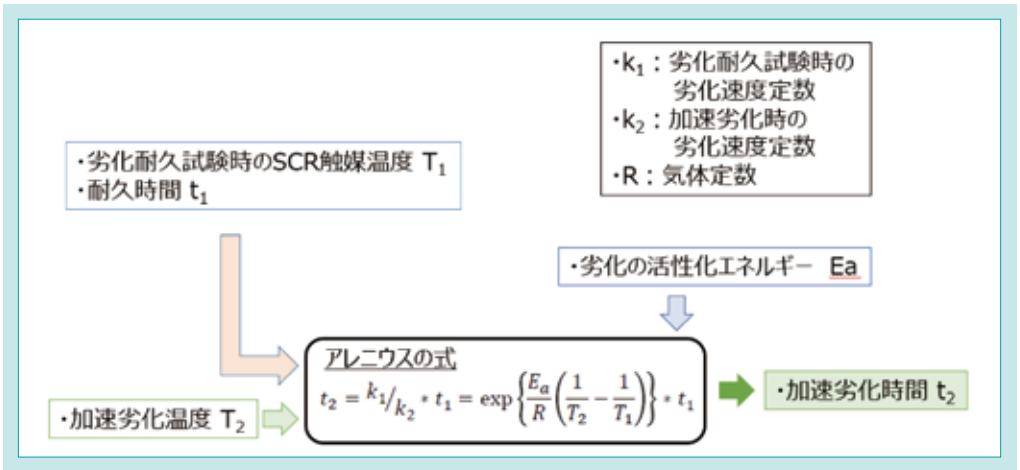


図 4　加速劣化時間算出のイメージ図
Fig. 4　Determination of Accelerated Degradation Time

・劣化条件

①加速劣化温度A℃/加速劣化時間T_1hr

②加速劣化温度B℃/加速劣化時間T_2hr

結果を図5に示す。

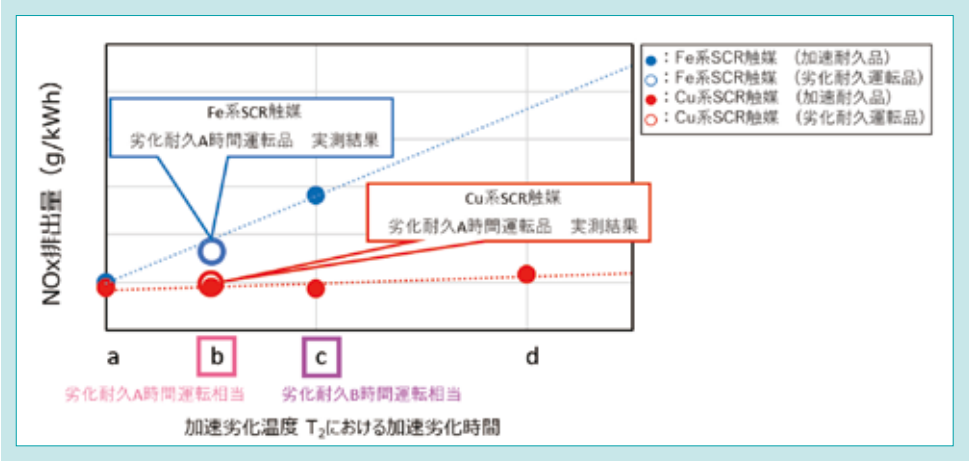


図 5 加速劣化時間と NOx 排出量

Fig. 5 Accelerated Degradation Time and NOx Emissions

この結果から次のことが示唆される。

①:劣化耐久試験運転と本劣化に相当すると算出した加速耐久のNOx排出量がほぼ一致したことから、本算出手法が有効であることを明らかにした。

②:劣化耐久B時間運転相当と算出した加熱加速した銅系SCR触媒が余裕をもって規制に適合することを確認した。

③:銅系SCR触媒は鉄系SCR触媒と比較して、加速耐久品・劣化耐久運転品いずれもNOx浄化性能が高く、劣化率(新品と加速耐久品の一次近似の傾き)が低い、つまり劣化耐性が高いことを明らかにした。

5. おわりに

新触媒をEPA/CARB Final Tier4の排出ガス規制以降に施行された欧州StageV規制、韓国5次規制に対応した後処理装置にも適用し、開発をすることができた。これに伴い、SCR触媒性能の劣化予測技術を用いることで各国の排出ガス規制開始までにタイムリーな認証取得が可能になり、開発工数低減を図ることを実現した。本開発により、エンジンの競争力強化に貢献できた。

SDGs のターゲットへの貢献

7.3 エネルギー効率の改善　現行機に比べてSCR触媒の耐劣化性能を向上

9.5 科学研究、イノベーションの促進　劣化予測技術により、開発期間を2か月以上短縮

参考文献

1) 塚本佳久 ほか、Cu活性点及びBronsted酸点上の反応を考慮したCu-chabazite SCR触媒の高温域での反応性解析とモデリング、自動車技術会論文集、50,6(2019)

2) 冨板崇 ほか、発展型アレニウスモデルと環境劣化因子データベースを結合した特性変化シミュレーション手法、マテリアルライフ学会誌、14,134-140(2002)

大型エンジン鋳物用鋳造方案の設計指針確立

Establishment of Design Guidelines of Casting Plans for Large Engine Castings

マテリアル・キャスティングセンター／機械鋳物製造部

近年、エンジン鋳物の大型化、形状の複雑化、薄肉化が進んでいる。一方、エンジン鋳物の形状係数（体積/最小肉厚）の増加に伴い、溶湯を鋳型に素早く充填することが困難となるため、鋳物の鋳造方案は押上方案から旗型方案や段堰方案に変化してきた。そこで、本研究では段堰方案の設計指針を確立するために、まず湯流れ解析や水モデルなどの手法を用いて、溶湯充填挙動に及ぼす湯口比及び注湯流速の影響を明らかにし、次に直接観察実験により検証して適切な湯口比の範囲を決定した。

【キーワード】
エンジン鋳物、鋳造方案、段堰方案、湯流れ解析、充填温度、湯口比

Engine castings are becoming larger, more complex in shape, and thinner-walled in recent years. On the other hand, as the shape factor (volume/minimum wall thickness) of engine castings increases, it becomes more difficult for molten metal to fill the mold quickly, so the gating system plans for castings have changed from the push-up plan to the flag-type plan and step-gate plan. Therefore, in this study, in order to establish design guidelines for the step-gate plan, we first clarified the effects of the sprue ratio and pouring velocity on the molten-metal filling behavior using methods such as flow simulation and water models, and then determined the appropriate sprue ratio range by verifying it through direct observation experiments.

【Key Word】
Engine Castings, Gating System Plan, Step Gate Plan, Flow Simulation, Filling Temperature, Sprue Ratio

関連する SDGs

1. はじめに

近年、農業機械の大型化及びエンジンの低燃費・高出力密度に対応するために、エンジン鋳物の大型化、形状の複雑化、薄肉化が進んでおり、エンジン出力の増加とともに鋳物の形状係数（体積/最小肉厚）が増加する傾向にある（図1）。それに伴い、鋳造ラインの不良率が上昇し、鋳型キャビティを充填する際に生じるガスの巻き込みやノロ（スラグ）の発生、あるいは温度の低下に起因する不良の発生率が高くなっている。これに対応するために、図2に示すように、鋳物の鋳造方案は押上方案から旗型方案や段堰方案に変化してきた。これらの方案の変化は、主に充填時間の短縮及び充填温度の向上を目的としている。

一方、鋳型キャビティを充填する際に流速が大きすぎると、空気やガスの巻き込みやキャビティ内での溶湯の乱流が生じ、型の破損を起こしやすくなる。逆に、流速が小さい場合は、均一な流れを得ることが難しく、ノロを生じやすい、またキャビティの充填時間が長くなり溶湯の温度が低下するなどの欠点がある[1)]。従って、鋳造方案を設計する際には、製品の形状や鋳造条件などを周到に検討した上で決定しなければならない。

そこで、本研究では段堰方案の設計指針を確立するために、まず湯流れ解析や水モデルなどの手法を用い、溶湯充填挙動に及ぼす湯口比及び注湯流速の影響を検討した。

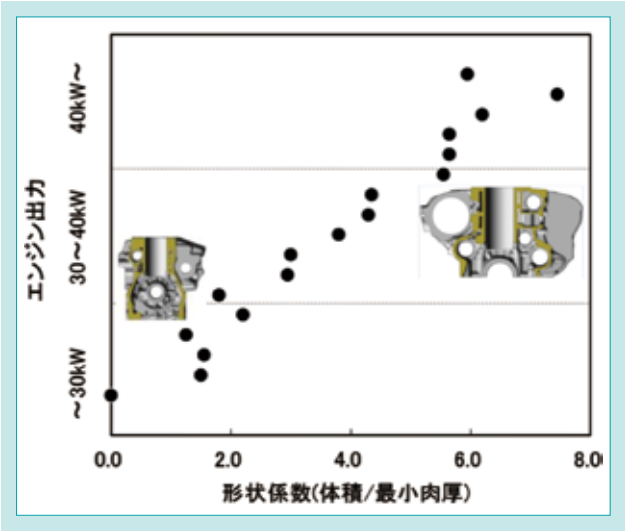


図 1　エンジン出力と形状係数の関係
Fig. 1 Relationship Between Engine Power and the Shape Factor

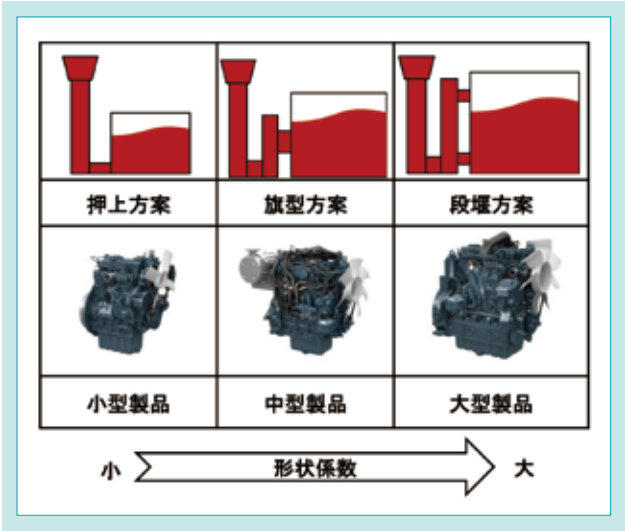


図 2　エンジン出力に伴う鋳造方案の変化
Fig. 2 Changes in the Gating System Plan According to Engine Power

2. 開発の進め方と目標値

2 － 1 開発の進め方

最適な段堰方案を検討するために、本研究は下記のステップで進めた。

(1)鋳造CAEを用いて量産品の湯流れ解析を行い、現状方案の問題点を洗い出す

(2)溶湯分配の理論式を用いて基礎検討を行い、湯口比や上下堰面積比が溶湯充填時の溶湯分配に及ぼす影響を検討し、水モデルの実験計画を作成する

(3)水モデルによって段堰方案の湯口を変更して溶湯充填挙動を観察し、最適な湯口比の範囲を決定する

(4)注湯実験を行い、直接観察実験により水モデルの検討結果を検証する

(5)方案の設計指針を確立して量産に適用する

2 － 2 目標値

鋳造方案は、キャビティに流入する溶湯の流速と流量を制御し、速やかにキャビティを充填させることが理想である。本研究では、湯道方案を適正に設計し、以下の3項目を達成することによって凹み欠陥の発生率を50%未満にする。

(1)溶湯流入時に乱流が発生しない

(2)上段堰高さまでは主に下段堰からの溶湯で充填

(3)充填直後の溶湯温度が低下しない

3. 解決すべき技術課題

従来方案の課題を抽出するために、鋳造CAEを用いて湯流れ解析を行って溶湯の充填挙動を観察し、また測温実験により充填後の溶湯温度を測定した。湯流れ解析の結果及び測温実験の結果を図3及び図4に示す。これらの結果によって、下記の技術課題があることが分かった。

(1)下段堰溶湯流入時の流速を抑える

湯流れ解析では、溶湯流入時の流速は1m/s以上で、従来推奨される0.4m/s以下より遥かに大きい。

(2)上段堰から溶湯の流入タイミングを適正にする

図3に示した通り上段堰からの溶湯は下段堰からの溶湯とほぼ同時にキャビティに流入し、また、上段堰の高さが高いため、落下時に溶湯の飛散が発生する。

(3)キャビティ充填完了時の溶湯温度を上昇させる

図4に示した測温結果では、充填完了直後の上面の溶湯温度は約1243℃である。この温度では、湯境や凹みなど、湯温に起因する不良が多く発生することが推測できる。

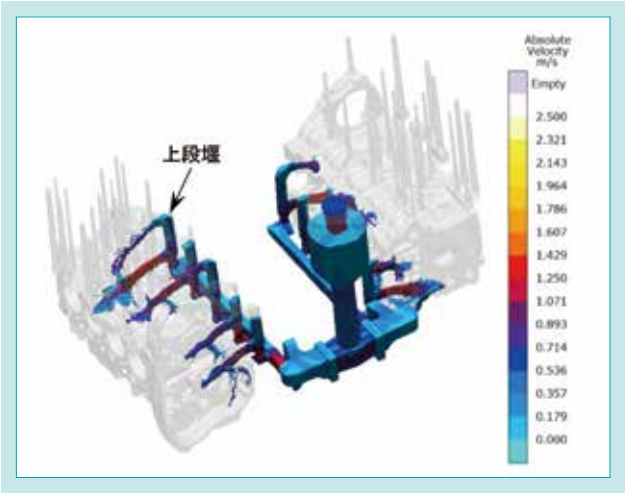


図 3　湯流れシミュレーションの結果
Fig. 3 Results of the Molten Metal Flow Simulation

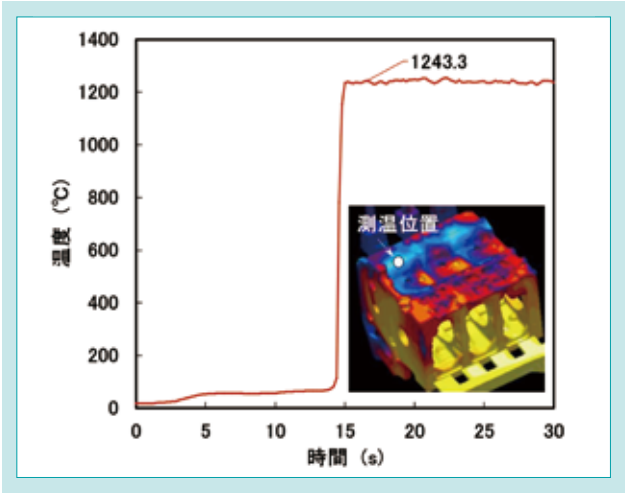


図 4　充填温度測定の結果
Fig. 4 Filling Temperature Measurement Results

4. 開発技術

4 － 1 水モデルによる湯口比及び流速の検討

前述した技術課題を解決するために、水モデルを用いて溶湯充填挙動に及ぼす湯口比の影響を評価した。掛け堰を用いてストッパー方式で注湯を行った。湯道の寸法を一定に保ち、ストッパーの径（注湯流径）及び堰の断面積を変更することによって湯口比を調整した。

非加圧方案(湯口断面積＜湯道断面積＜堰断面積)及び加圧方案(湯口断面積＞湯道断面積＞堰断面積)の溶湯充填例を図5に示す。非加圧方案では、上段堰の高さまで下段堰から流入した溶湯で充填され、加圧方案では、上段堰からの溶湯流入が早く、溶湯充填時に飛散が観察された。よって、2-2節に示した目標を達成するためには非加圧方案が必須である。

各堰寸法における注湯流径とキャビティ充填時間の関係を図6に示す。同じ注湯流径（注湯速度）の場合、堰寸法の変化によるキャビティ充填時間の変化は少なく、充填時間は注湯速度に支配されることが分かった。

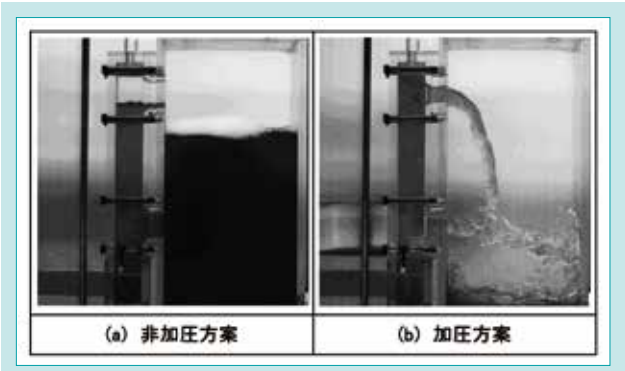


図 5　非加圧方案及び加圧方案の溶湯充填例
Fig. 5 Examples of Molten Metal Filling Using Pressurized and Non-pressurized Plans

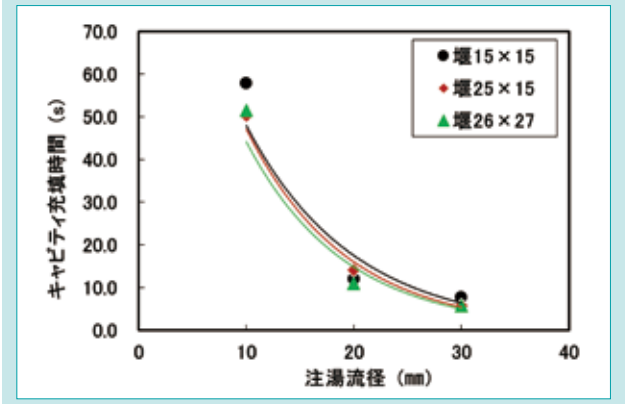


図 6　注湯流径とキャビティ充填時間の関係
Fig. 6 Relationship Between the Pouring Flow Diameter and Cavity Filling Time

4 － 2 注湯による湯口比の検証

上記水モデルの実験結果を検証するために、湯口比（湯口断面積:下段堰断面積）を1:0.9（量産方案）、1:1.6、1:2の3条件にて鋳造実験を行い、鋳型の上型を開放して溶湯の充填挙動を直接観察した。溶湯の充填を直接観察した結果を図7に示す。量産条件の湯口比1:0.9において、下段堰から溶湯が勢いよく流入し、その後まもなく上段堰からの溶湯が流入する。また、上段堰から流入した溶湯の落下高さは高く、キャビティの湯面をたたきながら動揺させることが観察される。湯口比の増加に伴い、上段堰からの溶湯流入が遅くなり、落下高さが小さくなる。これらの実験結果は上記の水モデルの実験結果とよく一致する。注湯終了時の

湯面観察結果では、湯口比量産条件(1:0.9)と1:1.6では、湯面にノロが観察されるのに対し、湯口比1:2では湯面にノロが観察されず、また、湯温が高くなって開発目標を達成できることが分かった(図8)。

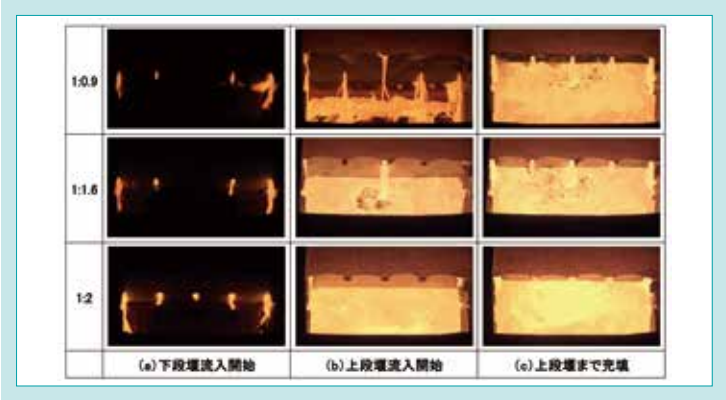


図 7　直接観察実験による溶湯充填の観察結果
Fig. 7 Observation Results of Molten Metal Filling by Direct Observation

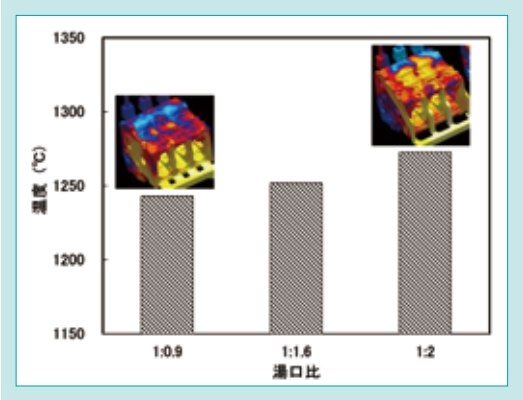


図 8　充填直後の温度測定結果
Fig. 8 Temperature Measurement Results After Filling

4 ー 3 量産の適用状況

上記の水モデル及び注湯実験により、湯口比の影響が明らかになったため、次に量産展開に向けて評価テストを行った。評価機種として、大型量産品V3307クランクケースを選定した。

V3307クランクケースの湯口比を加圧方案から非加圧方案に変更して2023年7月に鋳造を行い、計460台を鋳造して方案改善による不良低減効果を評価した。評価項目として、ノロ噛みや湯温低下に起因する凹み欠陥を評価した。図9に示す通り、凹み欠陥の発生率を72%低減させた。湯口比を変更する鋳造方案の改良によって凹み欠陥の発生率が低下することを確認した。

これらの結果に基づき、湯口比の検討結果を量産方案の設計に適用し、引き続き不良の発生状況を監視中である。

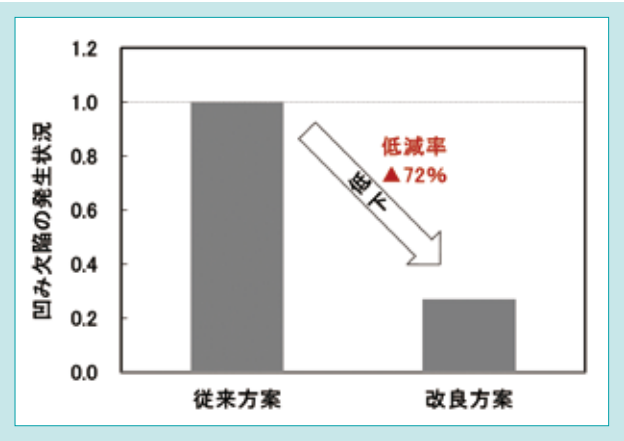


図 9　鋳造方案改善による凹み欠陥の低減効果
Fig. 9 Effect of Reducing Dent Defects by Improving the Gating System Plan

5. おわりに

大型エンジン鋳物用段堰方案の設計指針を確立するために、種々の実験を行った結果下記のことが分かった。

(1)非加圧方案では、上段堰高さまで下段堰から流入した溶湯で充填され、より静かな充填が得られる。

(2)キャビティ充填時間に及ぼす堰寸法の影響は少なく、充填時間は注湯速度に支配される。

(3)直接観察実験を行った結果は水モデルの結果とよく一致する。

上記の研究結果を量産に適用し、凹み欠陥の発生率の低減に貢献していく。

SDGs のターゲットへの貢献

7.a　エネルギー関連インフラへの投資促進　　不良率の低減により電気使用量削減に貢献

9.4　環境に配慮した技術の導入によるインフラ改良　　最適な鋳造方案の導入により不良率の低減に貢献

12.5　廃棄物の発生防止、再利用の実施　　不良率の低減による廃棄物削減に貢献

参考文献

1) 王麟、田村俊樹、松本圭司：日本鋳造工学会第183回全国講演大会、No58

ミニバックホー作業範囲拡大技術の開発

Development of the Expanding Working Range Technique for Mini Excavators

建設機械基礎技術部／建設機械技術第一部

ミニバックホーは、広い作業範囲が評価される一方で、狭所作業性も同時に要求される。作業範囲を維持しつつ狭所作業性を向上するためには、電子制御を活用した新たな作業機設計手法が必要であるが、作業機の角度検出について、バケット付近は破損や水没など条件が厳しく、搭載が困難であった。近年のICT建機ではバケット付近の環境条件を回避した高価な検出方法が採用されているが、ミニバックホーにはコスト負担が大きく、採用が難しい。本稿では、必要な狭所作業性を達成するための作業機干渉防止制御と、当該制御の鍵となるバケット角度検出をポテンショメータで実現した方法について紹介する。

【キーワード】
ミニバックホー、電気ジョイスティック、ポテンショメータ、電子制御、A333

While the mini excavator is highly evaluated for its wide working range, it is also required to work in a narrow space at the same time. In order to improve the narrow-space workability while maintaining the working range, a new working machine design method utilizing electronic control is necessary. However, regarding the angle detection of the working machine, the conditions near the bucket, such as breakage and submergence, are severe, and installation is difficult. In recent years, expensive detection methods that avoid environmental conditions near buckets have been adopted in ICT construction equipment. However, adoption is difficult for mini-excavators because of the large cost burden. This paper introduces the anti-interference control of the working machine to achieve the required narrow-field workability, and the method to realize bucket angle detection, which is key for control by the potentiometer.

【Key Word】
Mini Excavator, Electric Joystick, Potentiometer, Electronic Control, A333

関連する SDGs

1. はじめに

ミニバックホーの用途は主に軽作業であり、広い作業範囲が評価される一方で、都市部では狭所作業性も同時に要求される。

図1に示すように、狭所作業性の指標として、最大バケット底高さ（以下「バケット底高さ」という。）と、バケット爪ーブレード間最小距離（以下「バケット爪距離」という。）があり、「バケット底高さ」が低い場合は、ダンプトラックへ土砂を積込む際にアームを開いてバケット高さを維持する必要があることから旋回半径拡大・安定性悪化につながる。

一方、「バケット爪距離」が大きい場合は、アスファルトのはつり作業性や、土砂やがれきをブレードに当てながらすくい取る、ちり

図 1 ミニバックホー狭所作業性の指標
Fig. 1 Index of Mini Excavator Narrow-space Workability

とり作業性が不十分になる。これらの「バケット底高さ」と「バケット爪距離」は、「バケット底高さ」を高くすれば、「バケット爪距離」が大きくなるため、相反する関係にあり、両立が難しい。また、「バケット爪距離」については、ブレード前後長を伸ばせば容易に短縮は可能だが、機体全長が拡大し、ダンプトラック搭載時の「荷台搭載スペース余剰長さ」が短くなることで、運搬時のユーザビリティ低下という別の問題が発生する。

従来機ではこれら3つのバランスを取る必要があり、他社を凌駕する設計が困難であった。そこで新規作業機設計と電子制御の組み合わせにより、狭所作業性を従来より大幅に向上させる、新世代の作業機設計技術を開発した。本稿では、新規技術内容のうち、電子制御関係を中心に紹介する。

2. 開発のコンセプトと目標値

2 ー 1 開発のコンセプト

従来の「荷台搭載スペース余剰長さ」を維持しつつ、「バケット底高さ」「バケット爪距離」を大幅に向上し、3つの要素を高水準で達成することをコンセプトとして開発を行った。

また、先行開発の電気ジョイスティックシステムを搭載した3tミニバックホーA333（従来機U-30-6αの派生機）をターゲットとすることで、量産実現性を考慮したシステム設計と、電気ジョイスティック機の市場価値を高めることも同時に狙った。

2 ー 2 目標値

コンセプトに沿ったミニバックホーを実現するため、A333における開発の目標を以下のように設定した。

(1)バケット底高さ

従来機U-30-6α：地上から1489mmに対し、

目標：地上から1550mm以上

(2))バケット爪距離

従来機U-30-6α：236mmに対し、

目標：150mm以内

(3)荷台搭載スペース余剰長さ

目標：従来機U-30-6α：590mmと同等

図 2 荷台搭載スペース余剰長さ
Fig. 2 Excess Length of Loading Space

3. 解決すべき技術課題

3 ー 1 作業機の可動範囲の拡大

「バケット底高さ」を高くするためには、ブーム長に対してアーム長を短くする必要があるが、そうすると「バケット爪距離」が拡大してしまう。これを補うには、アーム閉じ側の可動範囲拡大が有効であるが、アームの可動範囲を拡大させると、バケットとブームシリンダが干渉してしまうので、干渉を防止する技術が課題であった。

3 ー 2 バケット角度検出方法

作業機の姿勢検出のために、従来のミニバックホーのクレーン仕様および超小旋回機ではポテンショメータを用いてブームおよびアームの角度を検出しているが、バケットの角度を検出している機種はない。クボタ機より大型で高価な他社機では、バケットの角度検出を高価なセンサや装置を用いて行っている。クボタでは同様の性能を、従来のミニバックホーで使用しているポテンショメータを用いたバケットの角度検出で行う必要がある。しかし、角度検出が容易なバケット支点にセンサを設置すると、作業中にセンサを破損する可能性があるため、バケットから離れた位置にセンサを設置した状態でのバケット角度検出方法を確立することが課題であった。

4. 開発技術

4 ー 1 干渉防止制御

アーム閉じ側の可動範囲を拡大させることによって生じるバケットとブームシリンダの干渉を従来の作業機設計手法で回避することには限界があった。電子制御を用いて、バケットとアームの角度を検出し、各々の角度に応じて、バケットとアームの動作を制限・許可する作業機制御システムを開発した。

具体的には、バケットとアームの可動範囲にそれぞれ干渉領域と非干渉領域を設定し、バケットとアームのどちらか一方が干渉領域に入っている場合は、他方は可動範囲を制御によって非干渉領域内に制限した。

バケットの非干渉領域は、アームの閉じ側エンド時にバケットとブームシリンダが干渉しないバケットの可動範囲とし、アームの非干渉領域は、バケットがブームシリンダに最接近する角度でのバケットとブームシリンダが干渉しないアームの可動範囲とする。そして、アームとバケットの可動範囲のうち、非干渉領域でない範囲を、各々の干渉領域とした(図3)。

バケット角度が非干渉領域に入っている場合は、アームの動作は制限されないが、バケット角度が干渉領域に入っている場合は、アームの閉じ動作はアーム角度が非干渉領域内に留まるように制限される。逆に、アーム角度が非干渉領域に入っている場合は、バケットの動作は制限されないが、アーム角度が干渉領域に入っている場合は、バケットの閉じ動作はバケット角度が非干渉領域内に留まるように制限される。これによって、アームの可動範囲を拡大した上でのバケットとブームシリンダの干渉の防止を実現した。

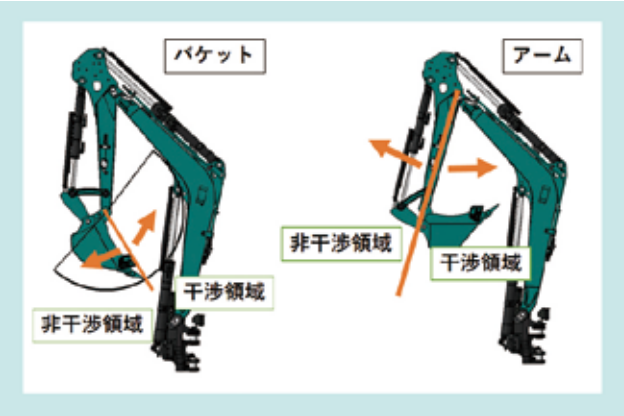


図 3 干渉領域と非干渉領域
Fig. 3 Interference and Non-interference Areas

4 ー 2 ポテンショメータによるバケット角度検出技術

4.2.1 バケット角度検出技術の問題点

ポテンショメータを用いてバケットから離れた側のバケットシリンダ支点の角度を検出する構成(図4)とすることで、安価で高耐久な構成でのバケット角度検出を実現することとした。しかし、バケットシリンダ支点角度から得られるのはバケットシリンダの揺動角度のみであり、同一のバケットシリンダ支点角度に対してバケット閉じ側とバケット開き側の2つのバケット角度が存在するため、ポテンショメータの角度からバケット角度への一対一での変換ができないことが問題であった。

図 4 バケットポテンショメータ搭載位置
Fig. 4 Bucket Potentiometer Mounting Position

4.2.2 バケット角度検出技術の解決策

同一のバケットシリンダ支点角度に対してバケット閉じ側(図5のC)とバケット開き側(図5のA)の2つのバケット角度が存在する。バケット角度を検出するためには、バケットポテンショメータの角度に加えて、閉じ側と開き側のどちらにバケットが位置しているかを検出する必要がある。そこで、同一のポテンショメータ角度であっても、バケット位置が閉じ側か開き側かによって、バケットの動作方向に対してバケットのポテンショメータ角度が変化する方向に違いがあることに着目した。

バケットには閉じ側の動作方向と、開き側の動作方向が存在し、バケットシリンダは閉じ側のエンド位置と開き側のエンド位置ではアームに近づき、中間の位置(図5のB)ではアームから遠ざかる。したがって、バケットを一方のエンド位置から他方のエンド位置へ動作させると、バケットが閉じ動作および開き動作のいずれの場合でも、バケットシリンダはアームに近い位置から始まってアームから遠ざかる動きとなり、中間の位置を境に再度アームに近づく動きとなる。つまり、バケットが閉じ側にいた場合、閉じ動作をするとバケットシリンダはアームに近づくが、開き動作をするとアームから

遠ざかる。逆に、バケットが開き側にいた場合、閉じ動作をするとバケットシリンダはアームから遠ざかるが、開き動作をするとアームに近づく。

この違いを利用して、バケットの閉じ動作または開き動作をしたときに、バケットポテンショメータを用いて、バケットシリンダの動きがアームに近づく方向なのか、アームから遠ざかる方向なのかを検出することで、バケットが閉じ側と開き側のどちらの位置にいるのかを判断することができる(表1)。そして、この判断結果と、ポテンショメータの角度を組み合わせることで、バケット角度の計算を実現した。

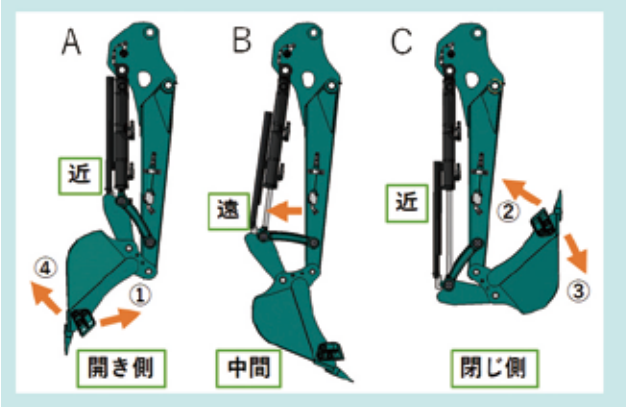


図 5 バケット角度に対するバケットシリンダ位置
Fig. 5 Bucket Cylinder Position Relative to the Bucket Angle

また、電気ジョイスティックシステムでは操作方向を制御装置に入力し、制御装置が電磁比例弁に電流を出力することで作業機を動作させているため、電気ジョイスティックシステムを用いることでバケットの動作方向を制御装置自身で把握することができ、圧力センサを追加で搭載することなくバケット角度の計算を実現することが可能となっている。

表 1 バケット位置判定表
Table. 1 Bucket Position Determination Table

項目	操作方向	バケットシリンダ	判定
①	閉じ操作	アームから離れる	開き側
②	閉じ操作	アームに近づく	閉じ側
③	開き操作	アームから離れる	閉じ側
④	開き操作	アームに近づく	開き側

4 ― 3 バケット位置誤判定防止技術

新しいバケット角度検出技術の確立により、安価で高耐久な構成でのバケット角度の計算は実現できたが、機械の状況によってはバケットの位置を誤判定する場合があったため、誤判定を防止するための制御が必要となった。

4.3.1 バケット向きの記憶

今回の構成では、バケットの動作方向とポテンショメータの角度変化方向を用いてバケット角度の計算を行うため、バケットが動作を行うことでバケット角度の計算が実現される。しかし、キーON直後はバケットが動作していないため、バケット角度の計算を正しく行うことができないことが問題であった。

キーON直後の状態を推測するために、バケット角度の計算に使用していた、バケットが閉じ側と開き側のどちらの位置にいるのかに関する情報を記憶することとした。これによって、キーOFFによって制御装置が動作を停止した後でも、バケットが閉じ側と開き側のどちらの位置にいるのかに関する情報を保持することができ、キーON直後の計算を正しく行うことができるようにした。

また、当初はバケットが閉じ側と開き側のどちらの位置にいるかの判定結果が変わるたびに情報を記憶していたが、書き込み許容回数オーバーと、バッテリ取り外しによる誤判定が発生した。

これを解決するために、記憶領域に判定結果を書き込む際に、書き込みが実施されたかどうかのフラグを合わせて書き込み、キーON時にフラグが書き込み実施済みとなっている場合は記憶していた値を採用し、書き込みが未実施だった場合は、記憶していた値は採用せずに干渉防止制御の干渉領域が含まれる閉じ側を必ず採用することとした(図6)。これによって、バッテリを外した場合でも、バケット向きを再判定することで、バケットがブームシリンダに接触することを防止した。

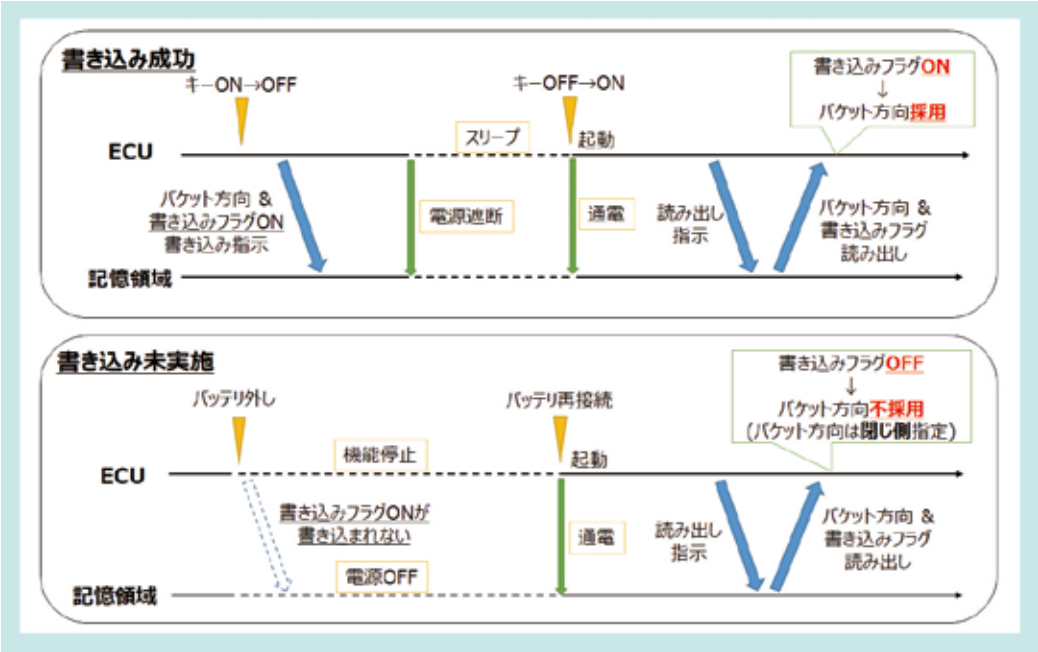


図 6 バケット方向記憶シーケンス
Fig. 6 Bucket Direction Storage Sequence

4.3.2 起動時の判定

干渉防止制御によって通常動作中はアームとバケットが同時に干渉領域に侵入することはないが、キーOFFの間に外的要因で作業機が動いたり、特殊モードによって干渉防止制御を解除した状態で動かした後にキーOFFしたりした場合は、アームとバケットが同時に干渉領域に侵入する可能性がある。アームとバケットが同時に干渉領域に侵入した場合の姿勢では、アームとバケットが両方閉じエンドにいる状態でもバケットはブームシリンダに接触しないが、その姿勢からバケット開き動作を行うとバケットがブームシリンダに接触してしまう(図7黄色着色部)。

このため、通常動作中はアームとバケットは閉じ動作のみを制限しているが、キーON直後にアームとバケットが同時に干渉領域に侵入している状態となっている場合は、アームとバケットの閉じ動作に加えて、バケットの開き動作の制限も行う。これによって、イレギュラーな姿勢においても、バケットがブームシリンダに接触することを防止した。

図 7 起動時の干渉姿勢
Fig. 7 Interference Posture at Startup

4.3.3 判定時間の設定

ポテンショメータは作業機角度に応じた電圧を出力するが、作業機が動いていなくても電圧の揺れが発生するため、ポテンショメータの角度変化方向を判定するときには、ポテンショメータが同一方向に一定時間変化することを判定する判定時間(数十ms程度)を設定している。判定時間が短すぎると誤判定してしまい、判定時間が長すぎるとバケット角度の計算が実際のバケット角度と合っていない時間が長くなってしまう。いずれの場合であっても、干渉防止制御が働かずにバケットとブームシリンダが接触する可能性が出てきてしまうため、判定時間は適切に設定する必要がある。

一方で、バケットには物理的なガタが存在しており、ブームやアームといったほかの部材を動かしたときにもガタの分だけポテンショメータが動いてしまうことがある。また、バケットの動作方向は油圧回路に設けられた電磁比例弁への通電の有無で判定しているが、動き出しをスムーズにするために実際に動き出す電流よりも少し低い電流から通電を開始

しているため、電磁比例弁への通電は行っているがバケットが動いていない状態が存在する。これにより、バケットが動かない程度にバケットを微小操作している状態でアームやブームを操作すると、バケット操作方向とは逆にガタ分だけバケットが動いてしまうことで、バケットポテンショメータの角度変化方向を誤判定してしまうことがあった。

ポテンショメータの角度変化方向の誤判定を解決するために、誤判定が発生するバケット微小操作付近ではバケットが動かない、もしくはゆっくりとしか動かないことに着目し、通常よりも判定時間を長くする制御を追加した。判定時間を延長することによる干渉防止制御への悪影響については、バケットの動きが遅いときは、たとえ誤判定していたとしてもバケットがブームシリンダに接触するまでに時間がかかるため、通常よりも判定時間を長くすることに問題はなく、バケット微小操作時の判定精度を向上することができる。これにより、ガタによる誤判定とバケット微小操作時のバケットとブームシリンダの接触を同時に防止することができた。

4 ― 4 開発の成果

アームの可動範囲拡大と、干渉防止制御および新規のバケット角度検出技術により、「バケット底高さ」「バケット爪距離」「荷台搭載スペース余剰長さ」を高次元で成立させる、新世代の設計手法を確立した。

開発技術を搭載したA333と、従来機および他社機の比較結果を表2に示す。従来のフロント設計だけでは達成不可能だった目標値を、A333では電子制御と組み合わせることで達成することができた。

表 2 A333 と従来機・他社機の比較
Table 2 Comparison of the A333 with the Conventional Model and Machines of Other Companies

項目	A333		従来機 U-30-6α		A社3t機		B社3t機	
バケット底高さ 目標:地上から1550mm以上	1596mm	○	1489mm	△	1440mm	×	1680mm	◎
バケット爪距離 目標:150mm以下	120mm	○	236mm	△	235mm	△	130mm	○
荷台スペース余剰長さ 目標:590mm以上	590mm	○	590mm	○	500mm	△	400mm	×

5. おわりに

干渉防止技術とバケット角度検出技術によって、目標の作業範囲を超過達成することができた。また、バケット角度検出技術とバケット位置誤判定防止技術によって、量産可能なコストと品質を実現することができた。本技術を採用したA333は、2022年に市場投入して以降、お客様からご好評をいただいている。

今後は、本開発で実現した干渉防止技術を含む電気ジョイスティックシステムを他機種へ展開することで、製品競争力の向上を図っていく。また、ミニバックホーの特性に合った安価で付加価値の高い機能の開発を進めていくことで、生産性向上および人手不足の解消に繋げていく所存である。

SDGs のターゲットへの貢献

8.2　イノベーションを通じた生産性の向上　　新しい電気ジョイスティックシステムで作業範囲の拡大を実現

9.2　包摂的かつ持続可能な産業基盤の強化　　狭所での作業性向上を実現

北米向けコンパクトトラックローダSVL75-3の開発

Development of the Compact Track Loader SVL75-3 for North America

建設機械技術第二部

コンパクトトラックローダは、優れた不整地走破性と高い機動力、汎用性を特徴とし、多種多様なアタッチメント作業も可能な、主に北米市場で活躍している小型建設機械である。クボタは2010年にベースモデルであるSVL75を発売したが、近年、特に騒音と振動、機動力、旧式の操作システムの面で改善の声が増えていた。そこでSVL75-3では、騒音低減のためにインテキャビンと可変制御ファンを採用した。また、動力源の確保、ヒートバランス改善に注力した他、機動力向上のための自動減速制御を採用した。操作システムにおいては、7インチのLCDタッチパネルと広角リアカメラを導入した。本稿ではこれらの技術開発について紹介する。

【キーワード】
コンパクトトラックローダ、インテキャビン、自動減速、液晶タッチパネル

Compact Track Loaders are compact construction machines used in the North American market. They have good running ability on rough terrain, high maneuverability, and versatility. Kubota launched the 75-horsepower base model SVL75 in 2010, but in recent years, there have been no significant improvements. There have been increasing criticisms that it is inferior to competitors, particularly in terms of noise and vibration, maneuverability, and its outdated operating system. Therefore, in the SVL75-3, we implemented an integrated cab and a variable control fan to reduce noise. We also focused on power source security and heat balance, and added Auto-shift control for improved maneuverability. A 7-inch LCD touch panel and a wide-angle rear camera were introduced for the operating system. This article introduces these technological developments.

【Key Word】
Compact Track Loader, Integrated Cab, Auto-shift, LCD Touch Panel

関連する SDGs

1. はじめに

コンパクトトラックローダ（以下「CTL」という。）は主に北米市場で活躍している小型建設機械である（図1）。特徴として、「一点旋回が可能」、「多種多様なアタッチメントが使用可能」及び「クローラ走行による不整地走破性が高い」があり、建築・インフラ整備・農業等の多岐にわたる現場で土砂運搬・掘削・整地作業等の多用途で使用される。建機市場は、好調な経済と旺盛な住宅需要を背景に右肩上がりで成長しており、中でもCTL市場は8.9万台（2022年）で小型建機市場の46%を占める最大市場である。更にCTLは全天候型且不整地での走破性・安定性が評価され、スキッドステアローダ（SSL）や小型ブルドーザーの代替として今後も成長が見込まれる[1]（図2）。CTLのクラス帯別需要構成をみると、本開発製品であるSVL75-3が属する定格積載（ROC）2,300-2,600 lbsクラスは、2011年は市場全体の13%程度にすぎなかったが、他社が続々と進出し、CTL市場に占める割合も年々増加している最重要市場の1つである。2022年には2,000-2,300 lbsクラスを超え、2番目の規模を有する[1]（図3）。

図 1　SVL75-3
Fig. 1 SVL75-3

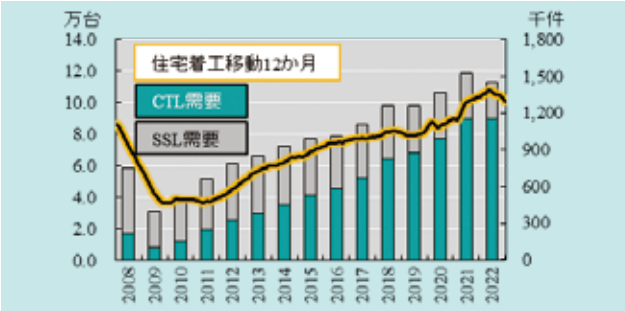


図 2　北米 CTL 市場の推移 [1)]
Fig. 2 Transition of the North American CTL Market

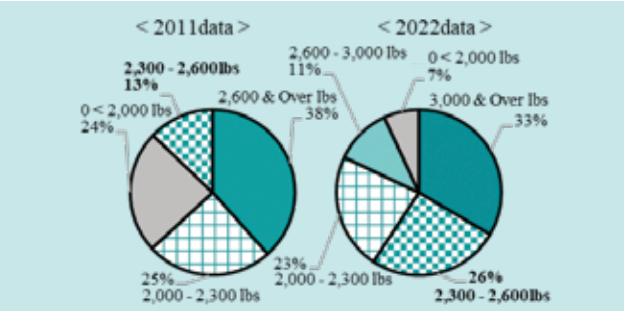


図 3　CTL クラス帯別市場構成 [1)]
Fig. 3 Market Composition Segmented by CTL Class

2. 開発のコンセプトと目標値

2 － 1 開発のコンセプト

コンストラクション系アプリケーションでの使用比率が高いCTLのオペレータは一日の大半をキャビン内で過ごすため、疲労軽減や作業時の集中力向上に貢献する快適な居住空間が求められている。また高い基本性能を有し、ストレスのない快適な作業を実現できる技術で他社機と差別化することが重要と考えた。以上のことからSVL75-3は『快適性・基本性能を追求した次世代SVLのベースモデル』として次の3点を開発のコンセプトとした。

①業界トップレベルの居住性を実現した製品
②「基本性能重視」の考え方を継承し、高性能を有する製品
③「Simplicity」を追求した簡単操作・簡単整備・簡単清掃を強みにした製品

本報では本節の①～③のコンセプトが次節以降の①～③とリンクしている。

2 － 2 目標値

開発のコンセプトを実現して、他社を超える製品を開発するために、それぞれの目標を以下のように設定した。

①のコンセプトに対しては、従来機の耳元騒音を5 dBA引下げ、業界トップレベルにすることを目標とした。

②のコンセプトに対しては、作業効率を現行機比15%向上させることを目標とした。

③のコンセプトに対しては（本報では簡単操作に関して記載）、業界最大の7インチ液晶カラータッチパネルを標準採用し、作業中に視線を切らずとも視認でき、タッチ操作を手元化できるレイアウトの実現を目標とした。また、リアビューカメラを標準搭載とし、表示レイアウトを工夫することで各種メータ表示とリアビューカメラ表示を1つのモニタで成立させることも目標とした。

3. 解決すべき技術課題

3 － 1 騒音低減のための技術課題

①のコンセプトに対しては、前窓の横揺れを規制するストッパの追加、スライドローラの材質変更に加えてインテキャビン化が必要と考えた。インテキャビンは居住空間の密閉が比較的容易で低騒音化に貢献する点で優れるが、CTLは整備時にキャビンをチルトアップできることが必須機能であるため、足元までワンピースで構成した際のチルト軌跡と周辺部品との干渉回避が課題であった。またワンピース化に伴ってキャビン内部の塗装品質や組立性の確保も課題であった。更に、低騒音化を図るために、油圧モータを用いた可変ファンシステムへの移行が必要であったが、搭載に大きなスペースが必要なため後方直接視界性が悪化することや圧力損失による動力の伝達ロスを解決することが課題となった。

3 － 2 作業性向上のための技術課題

②のコンセプトに対しては、まずは車速の引き上げが必須であったが、車速アップによってエンジン負荷が増加し、発熱量が増えることが懸念された。よって、車速アップに伴い増大する動力源の確保とヒートバランス性能の改善が課題となった。また、走行副変速（1速：低速、2速：高速）を有するCTLの車速アップは快適性と相反することが懸念され、具体的には変速ショックの抑制と作業機を高く上げた状態で高速旋回する際に生じる機体の振動の抑制が必要であった。

3 ー 3 簡単操作のための技術課題

③のコンセプトに対しては、視線を切らずともモニタを視認できるよう、市場で定評のある現行機と同じオペレータの右下前方の操作レバー周辺に配置することで、タッチ機能の手元化と合わせて他社機と差別化することを目標としたが、サイズアップしたモニタとオペレータおよびスライドアップする前窓との干渉回避、作業機操作レバーの陰になり視認性を損なわないことが課題となった。

4. 開発技術

4 ー 1 居住性改善のための開発技術

4.1.1 インテキャビン実現のための開発

インテキャビンの導入に際して、キャビンをチルトする際に足元のカバーが機体前方に飛び出す軌跡となるため、周辺部品との干渉を回避するためにメインフレーム前部を大きく切り欠く構造とした(図4)。この部分は、段差乗り越え、ピボットターン、バケット作業時の応力を現行同等レベルに収める必要があるため、補強リブを加えて強度を確保した。

また、キャビン前面はエプロンのようにフレームとの隙間をシールする構造とし、後方はエンジン高温部へのデブリ侵入を防ぐラビリンス構造とした。加えてキャビンのワンピース化により影になる部分の塗装品質やキャビン内部品の生産ラインでの組立性を確保するために、キャビン底に必要最低限の作業用の開口を設けて塗装や組立後にはカバーをすることで、これらの問題に対応した。

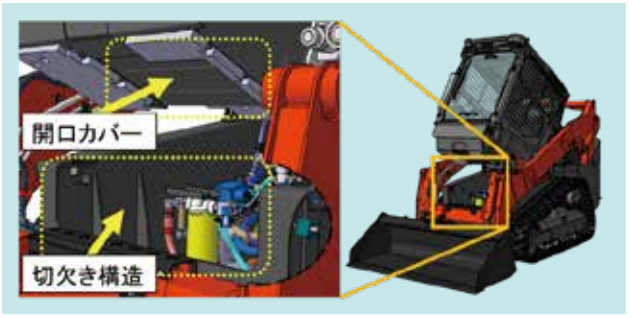


図 4 SVL75-3 フレーム構造
Fig. 4 Frame Structure of the SVL75-3

4.1.2 油圧可変ファンの採用とファン馬力の制御技術

冷却ファンシステムとしては、クボタSSLシリーズで採用した油圧可変制御ファンと同様に、油脂類の温度に応じてファン回転数を必要最低限に制御する方式を採用した。これにより周囲騒音を10 dBA近く下げることができた(表1)。

課題として前述の後方視界性の確保と、動力伝達ロス低減があるが、後方視界性についてはバックモニタを標準装備することでカバーした(詳細は5章)。動力伝達ロスの課題については、エンジン回転数をセンシングし、負荷によってエンジン回転数が低下すると、一時的にファン回転数を低下させて消費馬力を抑制するファン馬力制御を導入した(図5)。これにより、掘削作業、登坂作業や排土後の作業機復帰動作などエンジン負荷が大きな時においても走行や作業機に充てる馬力を確保し、パフォーマンスを落とさず作業が可能となった。具体的には、高負荷作業時の登坂車速において約20%の車速アップを実現した。

表 1 従来機比改善効果
Table 1 Comparison of Effects with the Old Model

機種名	従来機 SVL75-2	開発機 SVL75-3
周囲騒音	110 dBA	**100 dBA**
高負荷時登坂車速	2.1 km/h	**2.5 km/h(馬力制御)**

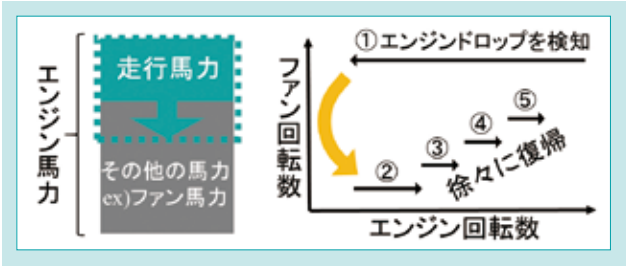


図 5 馬力制御
Fig. 5 Horsepower Control

4.1.3 最終的な改善効果

以上の施策により、基本性能を落とすことなく、耳元騒音値を従来機SVL75-2の80 dBAから74 dBAまで引下げることができ、目標であった5dBA削減を達成することができた。また、この値は他社機よりも優れている(表2)。

表 2　耳元騒音の比較（実測値）
Table 2 Comparison of Noise Levels Near the Ear

会社	Kubota		A 社		B 社
機種名	SVL75-3	SVL75-2	A1	A2	B1
耳元騒音	**74 dBA**	80 dBA	84 dBA	80 dBA	78 dBA

4 ― 2 基本性能向上のための技術

4.2.1　旋回自動減速機能

旋回自動減速とは、パイロット圧センサでオペレータの操作パターンを検知し、走行圧センサで走行負荷をセンシングすることで、自動で減速と復帰を行う制御である（図6）。走行パイロット圧センサと走行圧センサにより常に圧力が監視され、旋回操作時の負荷上昇を感知し、自動的にシフトダウンすることで高い旋回トルクを実現した。負荷が低下すると自動的にシフトアップし、高速走行にスムーズに復帰する。変速時には走行パイロット圧を一時的に落とし、容積変化により発生するショックを軽減する策も取り入れた。旋回車速変化に対応した走行圧変化を検知し、負荷に応じて自動減速の閾値を変える工夫も行った。また、作業機を高く上げた不安定な状態で高速旋回すると機体が前後にバタつくことがあり、旋回中はHSTポンプの斜板がふらつかないようにフル傾転させるとともに、HSTポンプの斜板特性とパイロット圧変動範囲の最適化（図7）やスピン操作時にエンジン回転数を一時的に下げるといった、ばたつきを抑制する制御システムを開発した。

これらの施策により、旋回時の過度なエンジン回転数低下による作業速度の低下、煩わしい変速操作が不要になり、さらに安定した旋回走行も可能な、ストレスのないシームレスな作業が実現できた。

図 6 旋回自動減速
Fig. 6 Auto-Shift During Turning

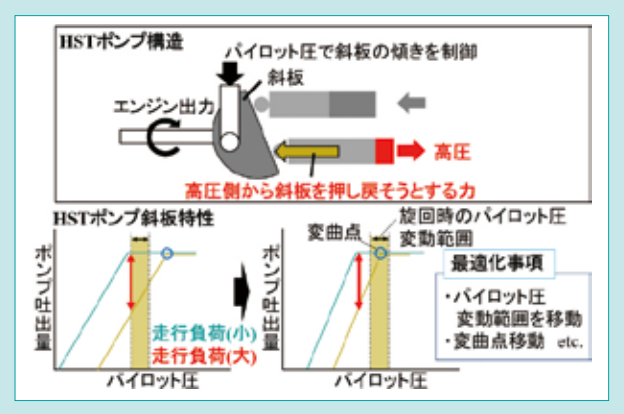


図 7　HST ポンプの斜板特性とパイロット変動範囲の最適化
Fig. 7 Optimization of the Swash Plate Characteristics of the HST Pump and Pilot Control Range

4.2.2　変速ショック軽減制御

変速スイッチ操作時のショックを軽減するため、2速から1速への変速時にはエンジン回転数を緩やかに低下させ、その後変速を作動させると同時にエンジン回転数を復帰させることで、変速による減速を緩やかにしてショックを低減させた（図8）。逆に、1速から2速への変速時には走行パイロット圧力を直ちに低下させ、その後緩やかに走行パイロット圧力を復帰させることで、変速による加速が緩やかになりショックが低減された。これらの制御の組合せにより、機動力向上とスムーズな変速を両立させた。

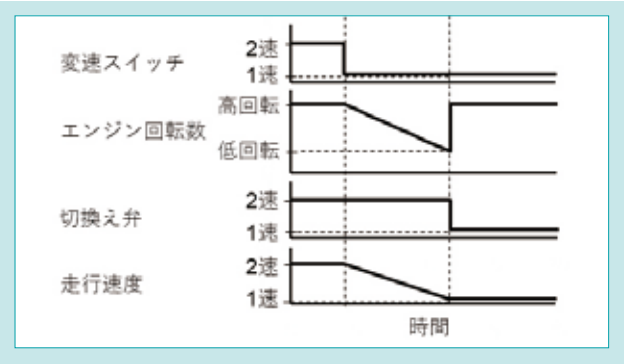


図 8　変速ショック軽減制御
Fig. 8 Shift Shock Reduction Control

4.2.3 冷却効率の改善

車速アップの背反としてヒートバランスが悪化することへの対応が必要だった。従来機はファンがエンジンに直結しているが、本開発では前述のとおり馬力制御のために油圧可変ファンを採用しており、エンジン上部に、ファンダクトと油圧可変ファンを搭載するような構造となっている(図9)。

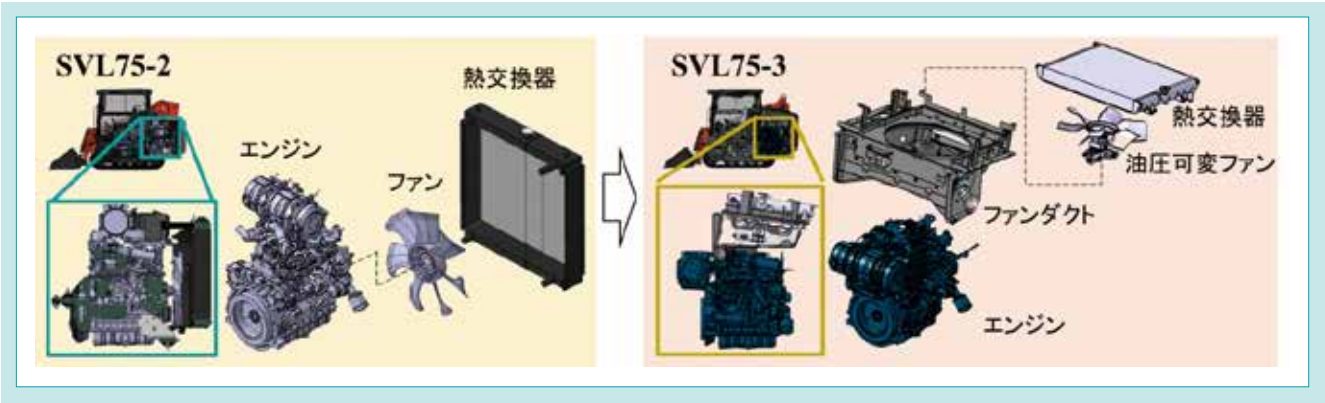


図 9 クーリングレイアウト変更
Fig. 9 Cooling Layout Change

この構造を採用するにあたり、冷却風の流れを吐き出し式から吸い込み式に変更した。これにより、従来のエンジンルームを通過して温められた風ではなく、外気から直接風を送ることで、エンジンルームよりも冷えた外気を熱交換器に直接当てることを狙った。また、ファン角度の調整や、流体解析を活用した冷却システム構成要素の形状・レイアウト最適化により、風の流れをスムーズにすることができ(図10)、圧力損失を低減できた。本開発に先立って実施したクボタSSLを用いた比較テストでは冷却水および作動油温が2℃～3℃改善された。また、ファンダクトで外気の入口から出口までのルートをエンジンルームと隔離することでエンジンルーム内へのダスト侵入も抑制できた。

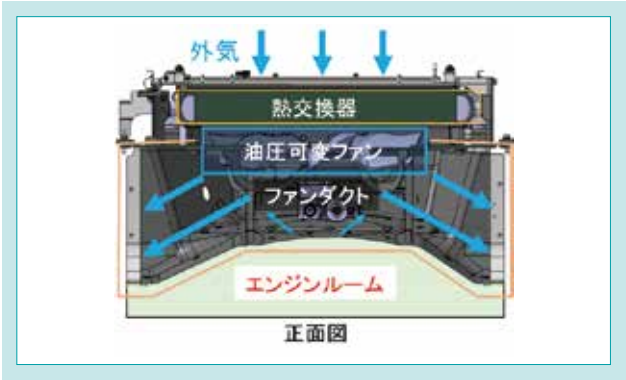


図 10 吸い込み式ファン
Fig. 10 Suction Fan

4.2.4 最終的な改善効果

これらの施策により、切り返しや旋回走行を頻繁に行う住宅着工現場等でSVL75-3は高い運搬能力と快適な作業を両立できた。現場を模擬した実機確認の結果、作業効率が現行機比で15%向上して目標を達成するとともに、他社機を超える基本性能を実現した(図11)。

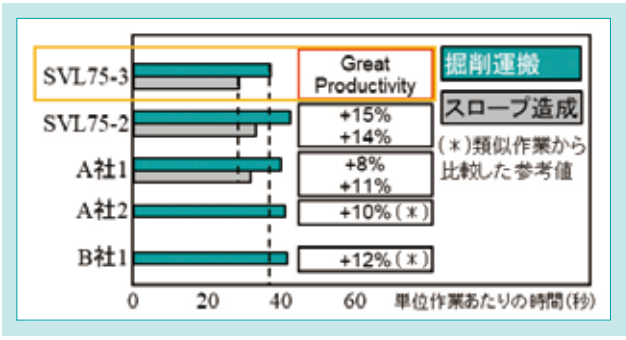


図 11 作業効率改善効果
Fig. 11 Effect of Improved Work Efficiency

4 ― 3 簡単操作のための技術

4.3.1 業界最大サイズメータパネルの開発

メータパネルの配置に関する課題は、以下の手段で解決した(図12)。パネルが大きい分、周辺部品をコンパクトに設計する必要があった。まず、ベゼルレス(モニタの枠サイズを最小化)薄型メータを開発し、キャビン作業灯の厚みを抑え

ることでキャビンのドアを前方に移動させた。これにより、前窓の開閉軌跡とメータパネルのクリアランスを確保した。また、操作レバー用の油圧ホース継手を従来のクイックタイプからネジ式に変更し、ホース配索を調整することで、操作レバーの位置を下方に20 mm、後方に5 mm移動させることができ、メータの視認性を確保した。これらの改善により、作業時に視線を切らずに手元操作が可能なレイアウトが実現された。

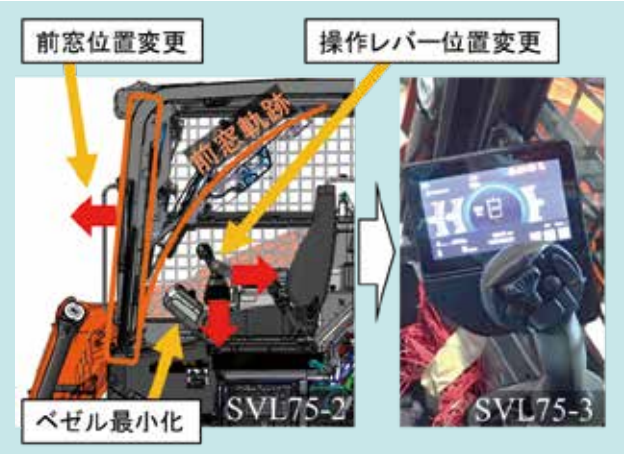


図 12　レイアウト調整の概要と調整後のモニタ表示
Fig. 12 Overview of Layout Adjustments and View of the Monitor After Adjustment

4.3.2　広角バックモニタの開発

バックモニタ画面の同一パネルへの表示についてもレイアウトで工夫した。具体的には、バックモニタ起動時には画面のインジケータ位置を中央部へ移動させ、上部エリアにカメラ画面を表示させることで、走行レバーとの重複を最小限に抑えつつ、視認性を向上させた。また、カメラについては、広い視野角を持つカメラと大型モニタを横置き配置することで、死角を減少させ、より良い後方視界の確保を実現した。図13に示すように、SVL75-3は物陰に遮られて直接視認できない人なども確認できる。

これらの施策により、操作性と視認性が大幅に向上し、簡単操作を強みにした製品開発を実現した。

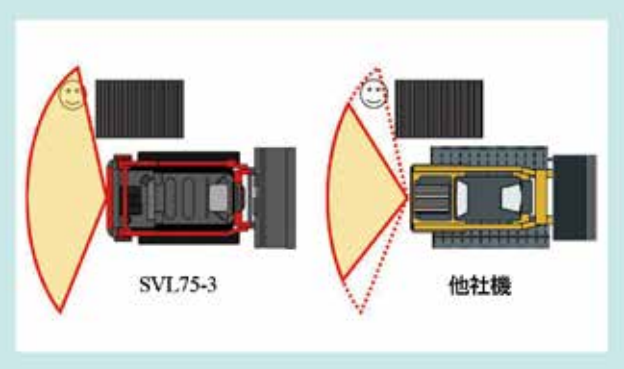


図 13　視野のイメージ図
Fig. 13 Field of View Image Diagram

5. おわりに

SVL75-3は、業界トップレベルの居住性、他社機を超える基本性能、そしてSimplicityを追求した製品を実現した。更に本機は、初物生産機を用いてユーザーによる現地モニタ試験を実施し、コンセプトの有効性が確認された。また、この活動を通じてSVL75-3はユーザーに高い評価を得た。本機は2023年5月に北米市場に上市され、順調に販売台数を伸ばしている。また、2023年11月には豪州向けの量産も開始し、2025年には欧州市場にも上市を予定している。SVL75-3で開発したインテキャビン、液晶タッチパネル、旋回自動減速といった技術は、後続機種のモデルチェンジの核となる技術として活かすことができ、北米をはじめ建機事業の発展に貢献できる。クボタはこれらの技術革新を通じて、市場のニーズに応え続けていく。

SDGs のターゲットへの貢献

9.2　包括的かつ持続可能な産業基盤の強化　　基本性能と居住性の向上により、産業の発展に貢献
11.3　包括的かつ持続可能な居住計画・管理能力の強化　　基本性能と操作性の向上により、インフラ整備に貢献

参考文献

1）AEM（Association of Equipment Manufacturers）

製造現場のDX化を見据えたフィーダコントローラの開発

Development of a Feeder Controller with a Focus on DX at Manufacturing Sites

精密機器技術部

クボタのフィーダ事業は、傘下に加わったクボタブラベンダーテクノロジー社との協業により、世界市場で高いシェアを確保している。近年、既存市場である樹脂コンパウンド市場だけでなく、新市場からの連続生産へのニーズも高まってきており、これに応じた進化が求められている。クボタは他社に先駆けてDXなどの新技術へ対応し、製造現場の変革にも対応したフィーダコントローラを開発した。

【キーワード】
フィーダコントローラ、DX、接続容易性、オートチューニング、リモートメンテナンス

Kubota's feeder business has secured a high share of the global market through cooperation with Kubota Brabender Technologie, which became a subsidiary of Kubota. In recent years, the need for continuous production has increased not only in the existing resin compound market, but also in new markets, making it essential to evolve with new markets in mind. Kubota developed a feeder controller that responds to new technologies such as DX, ahead of our competitors, and also responds to changes in the manufacturing site.

【Key Word】
Feeder Controller, DX, High Connectivity, Auto Tuning, Remote Maintenance

関連する SDGs

1. はじめに

重量フィーダ(以下、フィーダ)とは、主に樹脂コンパウンドの連続生産プロセスに使用され、本装置の下流または上流設備から指示された流量(設定流量)で、粉粒体状の原料を連続的に供給することを目的とした装置である。本装置は生産ライン、特に大規模な連続生産プロセスの中では、安定的に原料を供給するために必要不可欠となっている。制御方式としてはロス・イン・ウェイト方式と輸送量積算方式がある。これらはともに重量センサであるロードセルからの出力値に基づき制御演算を行い、定流量で原料の排出を制御するものである。図1に一般的なロス・イン・ウェイト方式フィーダのシステム概略図を示す。なお、輸送量積算方式も基本的な制御原理は同一だが、ロス・イン・ウェイト方式が重量の減少率で制御しているのに対し、ベルト上の原料通過量で制御している点が異なっている[1)]。

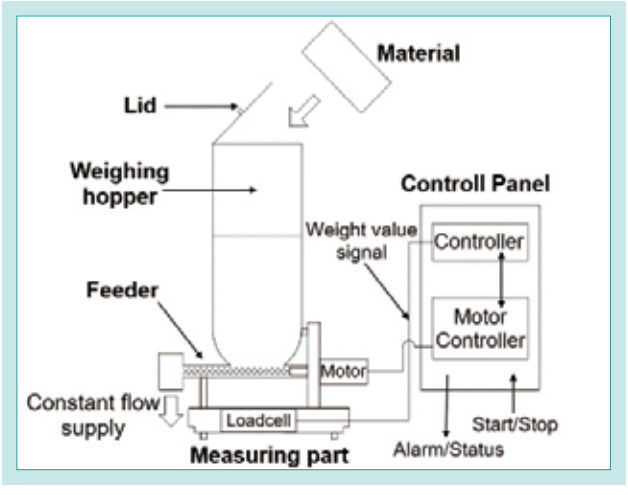


図 1　ロス・イン・ウェイト方式フィーダシステム概略図
Fig. 1 System Diagram of the Loss-in-weight Feeder

2. 開発のコンセプトと目標値

2 ― 1 開発のコンセプト

本コントローラの開発コンセプトは、主力市場である樹脂コンパウンド市場で培ってきた高機能性を維持しながら、“市場変化にマッチしたフィーダコントローラ”である。具体的には熟練者に頼らない対話形式で完結する操作性と、新市場(医薬や二次電池、リサイクル等の成長分野)への参入容易化である。

フィーダにとって重要な技術は、大きく分けて2つある。一つは、機械要素としての原料(粉粒体材料)ハンドリング技術、もう一つは、フィーダ動作の制御技術(コントローラ部)であり、両技術のレベルの高さが市場シェアを左右している。従来の自社コントローラは、過去の市場要望を多く反映してきた高機能なコントローラである。しかし、フィーダ本体の機種の多さや日々増えていく新原料、粉粒体の性状が多岐にわたることから、多くの制御パラメータを有することになり、性能を最大限発揮させるには十分な習熟が必要という側面があった。また、フィーダは既存の主力市場である樹脂コンパウンド市場だけでなく、バッチ生産(独立した工程で一定量をまとめて生産する方法)から連続生産へ移行が進む医薬などの新市場への参入も期待されている製品である。そこでクボタは高いユーザビリティと拡張性を備えた新たなコントローラを開発した。

2 ― 2 目標値

開発目標は以下のように設定した。

(1)ユーザビリティの向上

フィーダ設置時の初期設定、及び制御パラメータの調整を対話形式で実施できるものとし、調整時間を従来比で50%以上短縮することを目標とする。

(2)産業用イーサネットとフィールドバスへの対応

すでに海外の製造現場では多く使用されている次の通信プロトコルに対応できるものとする。

- Modbus-RTU / Modbus-TCP
- Profibus-DP V1 / Profinet
- CC-Link / CC-Link IE Field

(3)リモートコントロール可能なコントローラの実現

インターネット経由で遠隔地のPCから全ての操作が可能であることを目標とする。

3. 解決すべき技術課題

3 ― 1 定流量制御を行うための各種パラメータ設定を容易にすること

従来機の高機能性を維持しつつ非熟練者でも容易に使用可能なコントローラとするためには、誰でも簡単に扱えるようなインターフェイスが必要である。なお、操作が難しいとされる理由は次の2点であると考えられる。

- フィーダを動作させるための設定項目が多い。
- パラメータ最適値を決定するまでの調整回数や時間が作業者の習熟度に依存している。

3 ― 2 産業用フィールドネットワーク機能をコンパクトなコントローラにアドオンすること

現在DX化の波が樹脂製造メーカの生産ラインにも押し寄せてきており、アナログデータの単なるデジタル化だけでなく、各機器がネットワークに繋がっていれば時間や場所に関わらず、ユーザが欲しいデータが即座に取得できるようなシステムが望まれている。そのためには、海外市場で多く使用されている産業用イーサネット、フィールドバス等の通信規格にコントローラ単体で対応し、様々な周辺機器と簡単に接続可能なシステムを提供する必要がある。

3 ― 3 セキュアな通信ネットワークの確立と直感的アプリケーションを実現すること

フィーダは生産ラインの中で使用される機器であり、予期せぬ停止やダウンタイムは最小限にしたいというニーズがある。これに応えるためにはリモートメンテナンス機能を実装し、トラブル発生時にサービスマンが即座に遠隔地から調査、診断、修復することを可能にする必要がある。加えて高度なセキュリティレベルの通信ネットワークの確立と、オペレータが違和感なく操作できるアプリケーションが必須である。

4. 開発技術

4 ー 1 初期設定ガイダンス機能とPI制御パラメータオートチューニング機能

4.1.1 初期設定ガイダンス機能

従来のコントローラでは多くの種類のフィーダや原料に対応してきたため、フィーダを動作させるには500近いパラメータを手動設定する必要があった(図2)。そのため熟練者でなければすぐにフィーダを使える状態にすることができなかった。この問題を解決するため、非熟練者でも簡単に設定できる対話形式の初期設定ガイダンス機能を開発した。

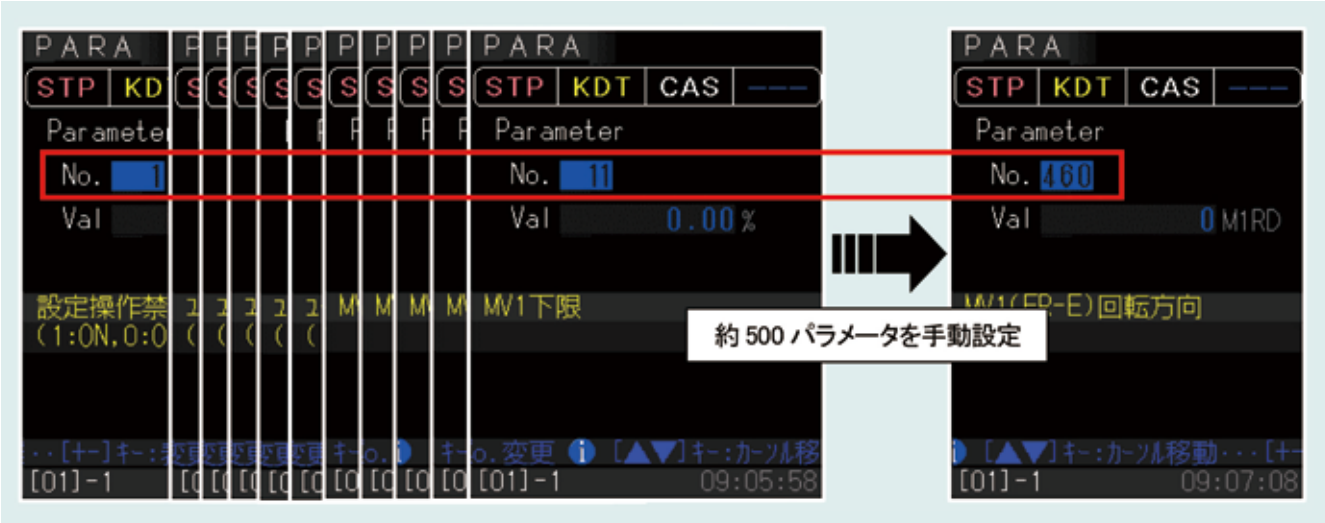


図 2　従来機のパラメータ設定画面
Fig. 2 Parameter Setting Screen of the Conventional Model

対話形式での初期設定ガイダンス機能を実現するために、予め各種フィーダの標準設定データをコントローラ内に保持し、機種名や機器構成を対話形式で選択させることで、運転に必要な基本パラメータが全て設定される仕組みを実装した。その結果、全10ステップの対話形式による設定のみでフィーダの運転が可能となり、熟練者でも2時間以上かかっていた初期設定が約10分で完了できるようになった(図3)。また、各種フィーダの標準設定データ作成ツールを別途開発し、内部保持しているデータをアップデートできる環境を整えた。これにより新機種が追加された場合も随時対応することができる。

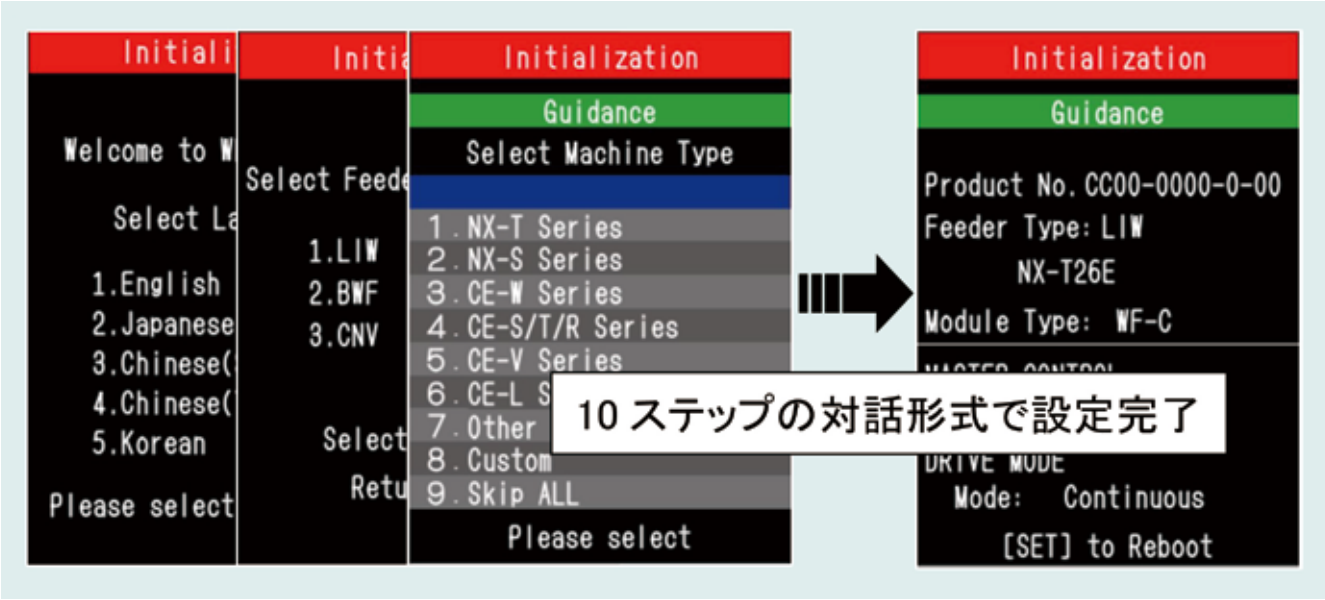


図 3　初期設定画面 (対話形式)
Fig. 3 Initial Setting Screen (Interactive)

4.1.2 PI制御パラメータオートチューニング機能

フィーダの流量制御はPI制御を使用しており、前項で述べた初期設定後にパラメータPとIを調整しなければ十分な精度を出すことはできず、調整作業には時間とスキルを要する。具体的には作業者が実際に原料を流し、流量波形を何度も計測し、最適な供給精度となるよう経験則を基に決定している(図4)。そのため作業者によって結果が異なり、場合によっては最適パラメータを導き出せないこともあった。

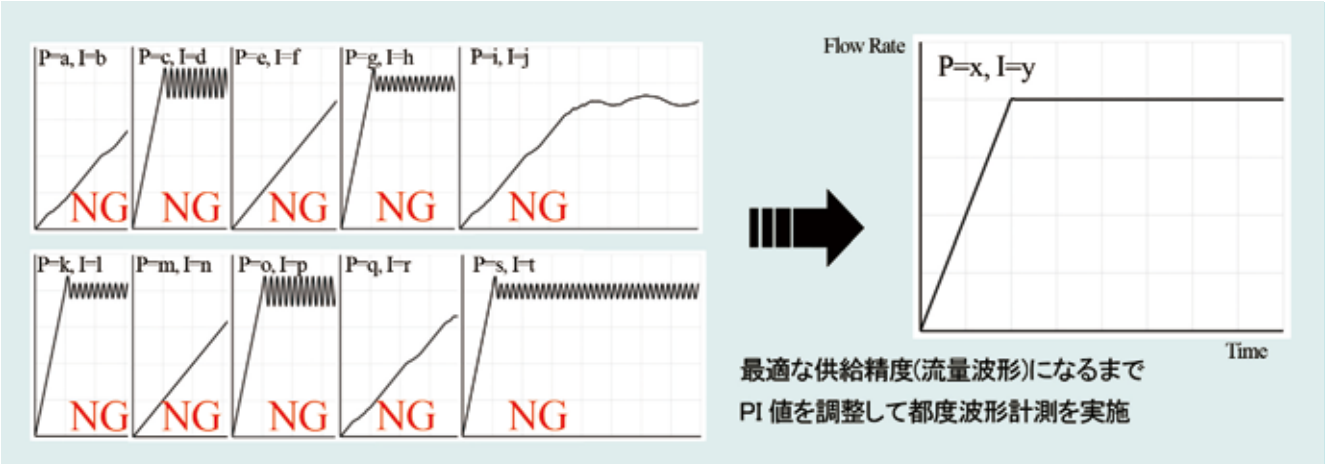


図 4　流量波形計測による PI 値調整
Fig. 4 PI Value Adjustment Based on the Flow Waveform

この属人的要素を取り除くため、誰がどのような環境でも最適なパラメータ値が得られる動作フローと、それを対話形式で実行するオートチューニング機能を開発した。図5に動作フローを示す。PIパラメータ算出方法は、停止状態から設定流量到達までの波形計測のみで算出可能なジーグラ・ニコルスのステップ応答法を採用した。また、クボタ独自の技術として、波形計測前に原料の低速排出、高速排出の2工程を実施することで、原料消費を最小限に抑えつつフィーダ内部の圧密(粉体の圧縮状態)を定常化する機能を搭載した(図6)。これにより次工程以降の計測精度を高くすることができ、オートチューニングがこれまで実用化されてこなかった根本原因である“正しい流量波形が計測できない”という問題を解決した。さらに粉体の流動性を加味した算出ロジックを実装、波形計測と計算工程を複数回実施し、異常値を計算から除外することで算出値の正確性を担保した。その結果、熟練者による手動調整と遜色のない供給精度を実現した。図7にその一例を示す。

図中のATmaxとATminはオートチューニングを20回実施した際のPI算出値の最大ばらつき(平均+3σ)のワースト条件による試験結果である。いずれも実用領域(流量4kg/hour以上)において精度1%以内に収まっており、手動調整とも遜色ないことが確認できる。また、熟練作業者でも40分以上、条件によっては数時間かかっていた調整作業が、習熟度を問わず約10分で完了できるようになった。本オートチューニング機能については特許出願済である。

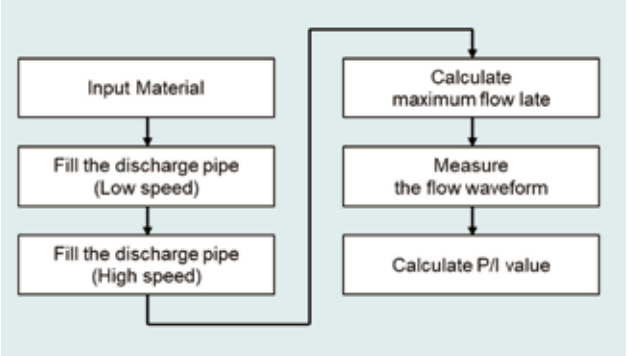


図 5　オートチューニング動作フロー
Fig. 5 Auto Tuning Flowchart

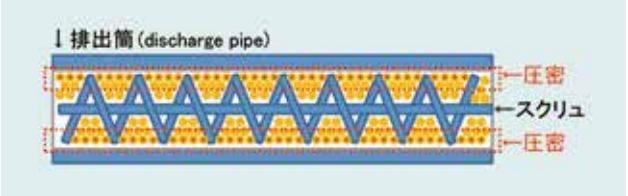


図 6　フィーダ内部定常状態
Fig. 6 Steady State Inside the Feeder

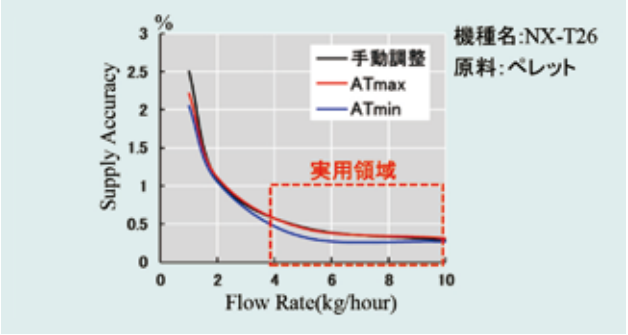


図 7　供給精度比較グラフ
Fig. 7 Supply Accuracy Comparison Graph

4 ― 2 ModbusTCP/RTU への標準対応とオプション基板によるアドオン機能

従来のコントローラは独自のシリアル通信にのみ対応しており、接続機器側でプログラムを組むのが難しいという問題があった。また、ほかの通信規格に対応するためには、別途外部機器を導入する必要があった。コントローラサイズを肥大化させずに世界標準の通信形態に対応するため、Modbus-TCP/RTUには標準対応し、それ以外の通信形態には各規格に対応した市販ユニットが装着可能なオプション基板を開発し、顧客が導入しやすいシステムを構築した(図8)。オプションを含めて本コントローラが対応している通信規格は以下のとおりである。

・Modbus-TCP/RTU(標準対応)
・CC-Link/CC-Link IE Field(オプション対応)
・PROFINET/PROFIBUS(オプション対応)

これにより外部機器に頼ることなく様々な機器と簡単に接続でき、市場の通信規格の50%以上をカバーできるようになった。

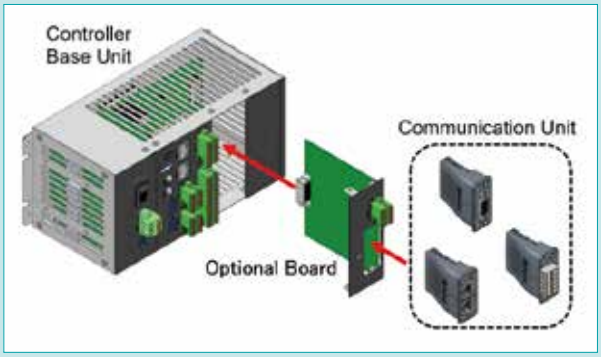


図 8 コントローラ本体とオプション基板
Fig. 8 Controller Base Unit and Optional Board

4 ― 3 VPN 接続機器への標準対応とアプリケーションによるオペレーションターミナルの再現

4.3.1 VPN接続機器への標準対応

リモートメンテナンスを実現するためにはコントローラをインターネットに接続させる必要がある。しかし、フィーダ市場において、配合レシピは非常に重要な情報であり厳重に管理されているため、ネットワーク上で取り扱うためには高度なセキュリティレベルを要求される。このような高い安全性をもった接続を実現するには物理的な専用回線を引くか、インターネットを利用したVPN(仮想専用通信網)接続を確立する必要がある。専用回線を引くのはコスト面から非現実的であるため、事項で述べるアプリケーションの通信内容に対して十分なセキュリティが確保できるVPN接続を採用した。VPN接続機器には既製品を使用するものとした。

なお、従来機でのログデータ取得やパラメータバックアップにはUSBメモリが必要だったが、近年記録メディアの持込みが制限されている製造現場が増えてきているため、ネットワーク上でファイル転送が可能なプロトコルであるFTP通信にも対応した。これによりUSBメモリが不要になるだけでなく、VPN経由で遠隔地からのログデータの取得やパラメータバックアップも可能となった。

4.3.2 アプリ版オペレーションターミナルの開発

リモートメンテナンスを実施する際、実機のオペレーションターミナルを使い慣れたサービスマンが違和感なく操作できるように、全く同じ画面とキー配列を再現したWindowsアプリケーションを開発した(図9a)。これによりトラブル発生時にサービスマンが移動することなく、自席のPCから即座に顧客フィーダの調査、診断、修復を行うことが可能となる。

また上記に加え、セルフサンプリング機能やグラフ表示機能を搭載した顧客向けAndroidアプリケーションを開発した(図9b)。このアプリケーションを市販のタブレット等のAndroid端末にインストールすることにより、オペレーションターミナルの無線化が可能になる。先に述べたリモートメンテナンスだけでなく、上流設備、下流設備の傍や事務所などで運転状況のモニタリングやコントローラの操作などが可能となり、顧客の利便性向上を図ることができる。

図 9　オペレーションターミナルアプリケーション
Fig. 9 Operation Terminal Application

5. おわりに

初期設定や制御パラメータ調整にガイダンス機能を取り入れることにより、高機能であるという従来機の強みはそのままに、非熟練者でも容易に設定・操作ができるコントローラを実現した。また、様々な通信規格や無線接続機器に対応したことにより、リモートメンテナンス、遠隔監視といった新たなサービスを顧客に提案できるようになった。

今後はAIや機械学習といった新たな技術を取り入れ、医薬や二次電池、リサイクル等の成長分野で活用できるよう取り組み、持続可能な社会の実現に貢献することを目指す。

SDGs のターゲットへの貢献

7.3　エネルギー効率改善　　従来製品に比べコントローラの消費電力量を15.2%削減
9.2　包摂的かつ持続可能な産業基盤の強化　　非熟練者でも操作・設定可能なインターフェイスを実現
12.4　製品ライフサイクルを通じた廃棄物の管理の実現　　オートチューニング機能により無駄な原料消費を避け、廃棄物抑制に貢献

参考文献
1) 日刊工業新聞社　はかりハンドブック第2版 7.2.1プラスチック原料計量配合システム(参照日　2024-09-13)

しおれ検知式自動潅水制御システムの開発

Development of an Automatic Watering Control System Based on Wilt Detection

次世代研究第三部

近年、異常気象が頻発し、気温上昇などの気候変動も顕著になっていることから、ハウス内の環境制御が可能な施設園芸に対する食料の安定供給の役割の重要性が高まっている。また、高齢化等に伴い農家が年々減少しているため、生産の効率化、省力化が求められている。このような背景を受け、クボタでは2022年10月に自社開発品としては初の施設園芸向け製品となる『しおれ検知式自動潅水制御システム(Hamirus:ハミルス)』を発売した。本システムは、高糖度トマト栽培における潅水管理を自動化することで、潅水管理の省力化、安定生産に貢献している。本稿ではその技術について紹介する。

【キーワード】
施設園芸、自動潅水、しおれ検知、画像センシング

In recent years, extreme weather events have become frequent, and climate change, such as rising temperatures, has become increasingly evident. As a result, the importance of greenhouse horticulture, which can control the environmental conditions, has grown significantly for ensuring a stable food supply. Additionally, due to factors like an aging population, the number of farmers is decreasing, leading to a demand for more efficient and labor-saving production methods. In response to this situation, Kubota launched its first in-house product for greenhouse horticulture, the automatic watering control system based on wilt detection (Hamirus), in October 2022. This system automates watering management for high-sugar tomatoes, contributing to labor savings in watering management and stable production. This article introduces the technology behind it.

【Key Word】
Greenhouse Horticulture, Automatic Watering System, Wilt Detection, Image Sensing

関連する SDGs

1. はじめに

園芸作物である野菜、果樹、花きの2022年の産出額は、日本の農業総産出額の4割弱を占めている[1)]。野菜は、カロリーベースでの食料自給率への寄与率は小さいものの、健康の維持増進や農業振興の上で重要な作物となっている。この園芸作物の消費者ニーズに応えるためには、施設園芸による周年安定供給が必須となってきている。特に近年は、異常気象が頻発し、気温上昇などの気候変動も顕著になっていることから、ハウス内の環境制御が可能な施設園芸に対する、食料の安定供給の役割の重要性が高まっている。また、高齢化等に伴い農家が年々減少しているため、生産の効率化、省力化が求められている。クボタでは2016年から施設園芸向けスマート農業の研究開発に取り組んでおり、2022年10月に自社開発品としては初の施設園芸向け製品となる『しおれ検知式自動潅水制御システム(Hamirus:ハミルス)』を発売した。

本システムでは、トマト群落の上部に設置したカメラで撮影した画像をもとにトマトの葉のしおれを数値化し、その数値が一定の閾値を下回ったタイミングで自動潅水を行う(図1)。この機能により、高糖度トマト栽培における潅水管理を自動化することで、潅水管理の省力化、安定生産に貢献している。本稿では、開発したしおれ検知式自動潅水制御システムの技術について紹介する。

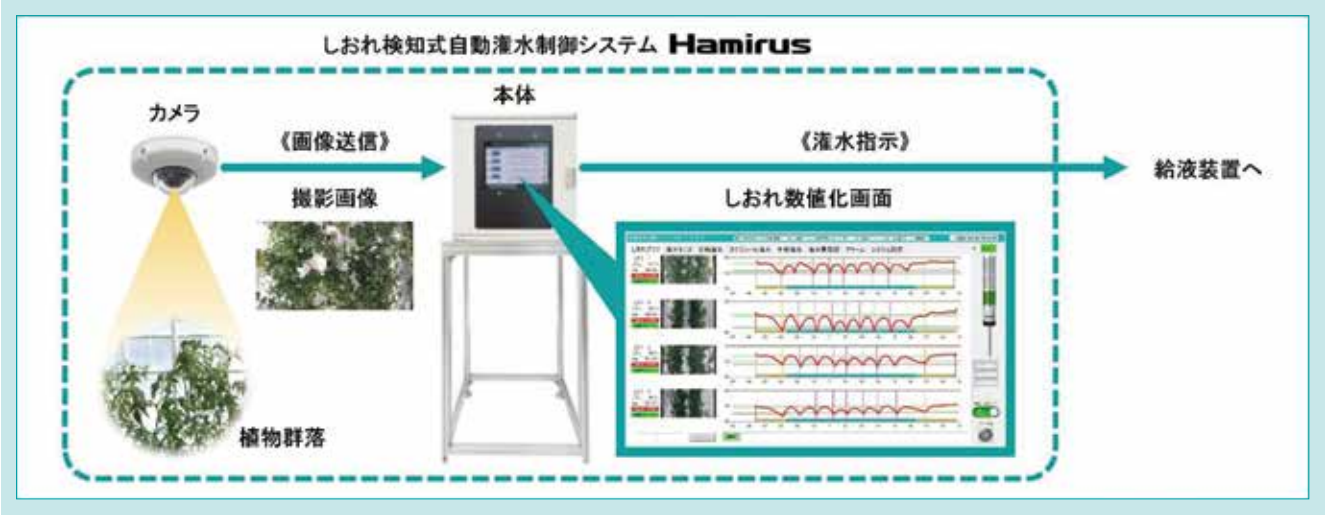


図 1　しおれ検知式自動潅水制御システムの概要
Fig. 1 Overview of the Automatic Watering Control System Based on Wilt Detection

2. 開発のコンセプトと目標値

2 － 1 開発のコンセプト

高糖度トマト栽培では、果実への水分の流入を抑え、果実からの水分の流出を防ぐ役割を果たす糖等の成分の蓄積を促すために、潅水量を必要最低限に抑える必要がある。潅水を行うタイミングを見極める指標としては、葉のしおれが有効であることが知られている。ここでしおれとは、植物の蒸散量が吸水量を上回り、植物内の水分が失われた状態を指す。しおれると、植物の細胞の張りが失われ、しぼんだ状態となる(図2)。

従来の高糖度トマト栽培では、熟練農家が目視によりこのしおれを確認し、長年の経験や勘に従って潅水のタイミングを判断していた。そのため、熟練農家の潅水管理を再現するには葉のしおれを数値化し、その結果に基づき潅水制御を行う必要があった。

また、システムを導入するハウスに使用される被覆材としては散乱フィルム、透明フィルム、ガラス等がある。被覆材によってハウス内の光環境が異なるが、光環境が異なっても安定的に潅水制御が可能なシステムが求められていた。

さらに、栽培中はつる下ろしや葉掻き等の栽培管理によりトマトの草姿が変化する。そのため、草姿が変化しても農家が意図した潅水制御が可能なシステムが求められていた。

以上のことから、開発のコンセプトは以下の通りとした。

(1) 葉のしおれに基づき潅水制御ができること
(2) ハウスの被覆材によらずシステムを導入できること
(3) 草姿変化に対応した潅水制御ができること

図 2 しおれ前後の植物の様子
Fig. 2 Appearance of a Plant Before and After Wilting

2 － 2 開発目標

コンセプトに沿ったシステムを実現するために、開発目標は以下の通りとした。

(1) しおれ数値化技術の確立
(2) 光環境の違いに頑健な画像センシング技術の確立
(3) 草姿変化に適応可能な潅水制御アルゴリズムの確立

3. 解決すべき技術課題

3 ー 1 しおれ数値化技術の確立

葉のしおれに基づき潅水制御を行うには、まず、葉のしおれを数値化する必要がある。熟練農家は目視で葉のしおれを確認していることから、画像センシング技術により数値化が可能だと考えられた。また、開発当時、画像センシング技術を用いたしおれ数値化の先行研究[2]があったが、しおれ数値は相対値であるため、潅水制御に応用するには基準値をどのように設定するか検討を行う必要があった。そのため、実用的なしおれの数値化技術を開発することが課題であった。

3 ー 2 光環境の違いに頑健な画像センシング技術の確立

ハウスの被覆材が散乱フィルムの場合、太陽の直達光は被覆材で散乱されてハウス内に入射する。そのため、ハウス内は比較的均一に光が照射される。このような光環境では、撮影画像に白飛びや黒潰れが発生しにくい。ここで、白飛びとは画像の明るい部分の諧調が失われ真っ白になっている状態を指し、黒潰れとは画像の影の部分の諧調が無くなっている状態を指す。いずれも被写体の情報が消失した状態であるため、白飛びや黒潰れのない画像は画像センシングに適している。

一方、ハウスの被覆材が透明フィルムやガラスの場合、太陽の直達光は被覆材で散乱されることなくハウス内に入射する。そのため、ハウス内には日向と日陰の領域が存在する。このような光環境では撮影画像に白飛びや黒潰れが発生しやすく、安定的な画像センシングを行う上での阻害要因となる。

白飛びや黒潰れを低減する方法としては、HDR（High Dynamic Range)撮影が有効であるが、HDR撮影の場合でも白飛びや黒潰れが発生していたため、光環境の違いに頑健な画像センシング技術を開発することが課題であった。

3 ー 3 草姿変化に適応可能な潅水制御アルゴリズムの開発

トマトの栽培期間中は、つる下ろしや葉掻き等の栽培管理が行われる。商業的なトマト栽培では、植物の形を整えるために、茎の一部を紐や柱に固定する誘引仕立てが一般的である。つる下ろしとは、背丈が紐や柱の上限に達した植物の高さを下げ、植物の形を整え直す作業を指す（図3)。また、葉掻きとは、日当たりや風通しを良くするために葉を間引いたり、光合成に寄与しない葉を取り除いたりする作業を指す。そのため、つる下ろしや葉掻きによりトマトの草姿が変化する。

しおれ数値化技術では、このような草姿変化による影響を除去することが難しいため、草姿が変化しても不必要な潅水を防ぐことができる潅水制御アルゴリズムの開発が課題であった。

図 3 つる下ろし前後の草姿変化
Fig. 3 Appearance of Plants Before and After Lowering

4. 開発技術

4 ー 1 しおれ数値化技術

開発したしおれ数値化技術のフローチャートを図4に示す。しおれ数値化では、トマト群落の上部に設置した定点カメラにより撮影した1分間隔のインターバル撮影画像を用いる。各時刻の撮影画像に対して、最初にホワイトバランス補正を行い、次に植物の葉を含む植物領域の検出を行う。その後、次の式により被覆率を算出する。

被覆率 ＝（植物領域の画素数）/（全領域の画素数）

植物の葉はしおれると葉が縮む。そのため、しおれが発生すると相対的に被覆率が減少する。本システムではこの特徴を利用して植物のしおれを数値化している。

さらに、被覆率の時系列データに対してノイズ除去を行い、最後に次の式を用いてしおれ率を算出する。

しおれ率 =（各時刻の被覆率）/（基準被覆率）

ここで、基準被覆率とは植物のしおれが発生していない時の基準となる被覆率である。しおれ率を用いることで、相対的にどの程度しおれが発生したか定量化することができる。なお、しおれ率は植物がしおれるに従い100%から低下していく指標となっている。

図 4 しおれ数値化のフローチャート
Fig. 4 Flowchart of Wilt Quantification

図5はしおれ数値化技術を用いて高糖度トマトの1日のしおれを数値化したグラフである。図中の赤線は各時刻の被覆率(しおれ率)を表している。図中の黄緑色の線は基準被覆率を表している。基準被覆率は基準被覆率計算期間における被覆率をもとに自動的に設定され、基準被覆率計算期間は植物にしおれが発生していない朝の時間帯に設定される。基準被覆率を毎朝設定し直すことで、植物の生長に伴い被覆率が変化しても、植物のしおれを定量化することができる。

本システムはしおれに基づいて潅水を行う自動潅水制御モードと、予め設定した時刻に潅水を行うスケジュール潅水制御モードとを有しており、基準被覆率計算期間はスケジュール潅水制御モードで潅水を行い、基準被覆率が設定された後に自動潅水制御モードで潅水が実行される。

図中の緑色の線はしおれ率閾値を表しており、しおれ率がこの閾値を下回ると自動潅水が実行される。図中のピンク色の縦線は自動潅水を行ったタイミングを表しており、潅水により しおれ率が回復している。以上より、実際に潅水制御に応用できていることから、実用的なしおれ数値化技術を開発できた。

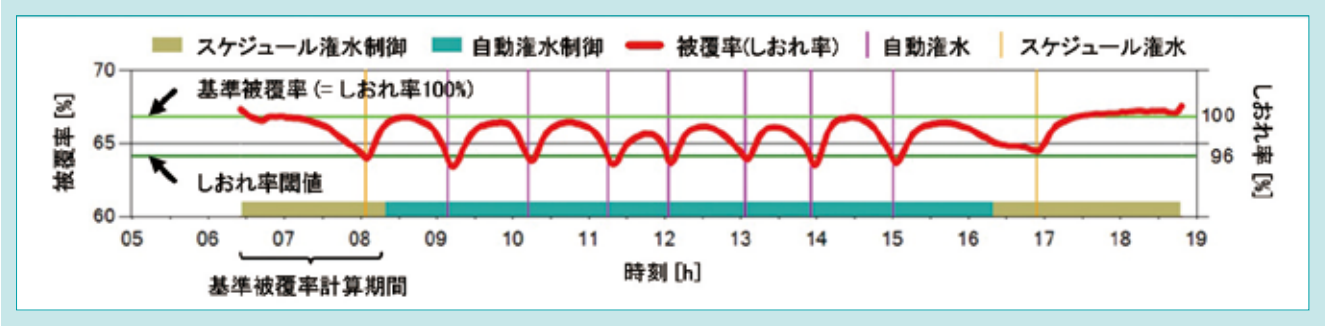


図 5 しおれ数値化グラフ
Fig. 5 Graph of Wilt Quantification

4 ― 2 光環境の違いに頑健な画像センシング技術

ハウスの被覆材が透明フィルムやガラスの場合、撮影画像に白飛びや黒潰れが発生しやすい。しおれ数値化において、この影響を最も受けるのは植物領域検出の画像処理である。

植物領域検出手法としてはHSV色空間を用いた色抽出手法が一般的である。ここで、HSV色空間とは色相(Hue)、彩度(Saturation)、明度(Value)の3つの成分からなる色空間で、色相は色の種類を0～360° の範囲で、彩度は色の鮮やかさを0～100%の範囲で、明度は色の明るさを0～100%の範囲で表している。植物領域を検出する場合は、植物領域を適切に検出できるように、これら3つの特徴量の範囲を設定する必要がある。

しかしながら、白飛びや黒潰れが発生すると彩度が低下し、色相が不安定になる。そのため、白飛びや黒潰れが発生した植物領域は検出することが困難になる。図6(a)は白飛びが発生した撮影画像の例を示している。画面左上の太陽の直達光が照射されている植物領域にて白飛びが発生している。図6(b)はHSV色空間を用いた色抽出手法における植物領域の検出結果を示している。赤く塗られた領域が検出された植物領域を表しており、白飛びが発生した植物領域を検出できていないことが確認できる。このような植物領域の検出漏れが発生すると、植物がしおれていないにもかかわらずシステムが誤って潅水を実行してしまう恐れがある。不要な潅水は根腐れなどの生理障害に繋がるため、対策が必要であった。

そこで、解決策としてディープラーニングを用いた手法を検討した。ディープラーニングでは学習により特徴量抽出が自動的に行われるため、色情報だけでなく形状や質感等の様々な特徴を組み合わせた検出器が作成できると期待した。

作成したモデルは画素毎にクラス分類を行うセマンティックセグメンテーションタスク用モデルであり、入力画像の各画素に対して植物領域か否かを二値分類する。図6(c)はディープラーニング手法における植物領域の検出結果を表しており、白飛びが発生した植物領域も漏れなく検出できることが確認できた。定量的にも、検出性能を示すF値(1に近いほどよい)がHSV色空間を用いた色抽出手法では0.831であったのに対し、ディープラーニングを用いた手法では0.984に改善することを確認できた。以上により、光環境の違いに頑健な画像センシング技術を開発することができた。

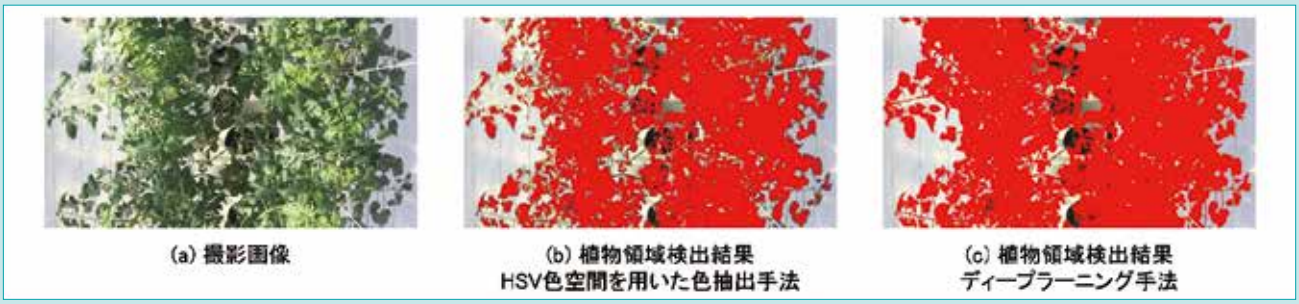


図 6 植物領域検出結果の比較
Fig. 6 Comparison of the Plant Region Detection Results

4 ー 3 草姿変化に適応した自動潅水制御アルゴリズム

トマトの栽培期間中につる下ろしや葉掻きを行うと、被覆率が変化する。図7につる下ろし前後における撮影画像の変化の例を示す。この例では画像左側のトマト株がつる下ろしされて、つる下ろしされた領域の被覆率が低下している。この被覆率の低下は植物のしおれによるものではないため、この状態でしおれ率を計算し続けるとしおれ率が極端に低下したままとなり、不要な潅水を繰り返してしまう。

そこで、このような草姿変化に適応した自動潅水制御アルゴリズムを開発した。図8に開発したアルゴリズムに基づき自動潅水制御を実施した例を示す。つる下ろし等により急激な被覆率の低下が発生し、しおれ率が閾値を下回ると、最初に自動潅水が実行される。開発したアルゴリズムでは、自動潅水後のN分間の被覆率を元に、この被覆率の急激な低下が草姿変化によるものかどうかを判定する。N分間の内、被覆率が一定の回数以上、しおれ率閾値を下回ったままの状態だと、被覆率の急激な低下は草姿変化によるものと判断する。そうでない場合は、被覆率の急激な低下はしおれによるものと判断する。草姿変化によるものと判断した場合は、N分間の被覆率を用いて基準被覆率を再設定する。このようなアルゴリズムで基準被覆率を再設定することにより、不要な潅水の繰り返しを防ぎ、草姿が変化した後も植物のしおれに基づいた潅水制御を実現している。

なお、本節では、草姿変化により被覆率が低下する場合に適応したアルゴリズムを紹介したが、草姿変化により被覆率が上昇する場合についても、自動的に基準被覆率を再設定するアルゴリズムを備えている。これらのアルゴリズムの開発により、草姿変化が発生しても安定的に自動潅水制御を行うことが可能となった。

図 7 つる下ろし前後の撮影画像
Fig. 7 Comparison of Images Taken Before and After Lowering

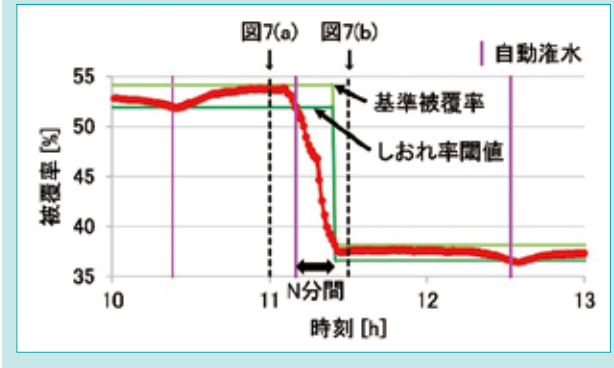


図 8 草姿変化に適応した自動潅水制御の例
Fig. 8 Example of the Automatic Watering Control Adapted to Changes in Plant Coverage Due to Lowering

4 ー 4 本システムの導入事例

しおれ検知式自動潅水制御システムの導入事例として、省力化の事例と収量増加の事例を紹介する。各事例では、しおれ検知式自動潅水とスケジュール式自動潅水との比較を行っている。

4.4.1 省力化の事例

図9の積み上げ棒グラフは潅水管理にかかる作業時間を比較した結果である。縦軸は1ヶ月当たりの作業時間となっており、緑色の棒はトマトの葉のしおれを確認するのに要した時間、灰色の棒は自動潅水の設定に要した時間を表している。

スケジュール式では、その日の天候によって潅水回数や潅水量を調整する必要があるため、自動潅水の設定に時間を要している。一方、しおれ検知式では、植物がしおれ始めた段階(＝植物が水を必要とする段階)で自動的に潅水を行うため、天候によって設定を変更する必要が無い。そのため、設定に要する時間を大幅に削減できている。全体の結果としては、46%の潅水管理の作業時間の削減につながり、本システムによる省力化効果を確認できた。

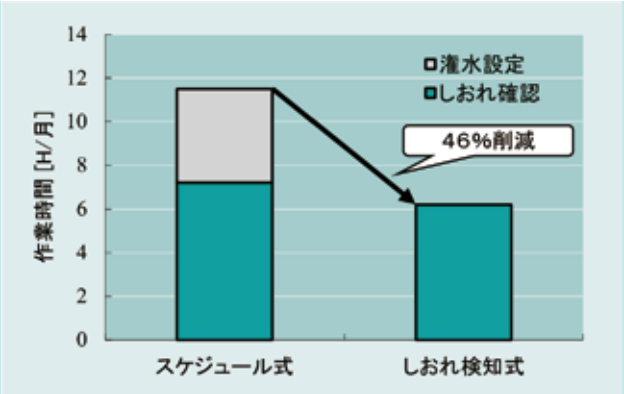


図 9 潅水管理にかかる作業時間の比較
Fig. 9 Comparison of the Working Time for Watering Management

4.4.2 収量増加の事例

図10の積み上げ棒グラフは高糖度トマトの収量を比較した結果である。各色の棒は期間毎の収量を表している。この比較試験では、糖度が同等となる条件で潅水制御を行った場合の収量の違いを比較している。各潅水方式が果実の糖度、収量に与える影響を評価するために、収穫の2ヶ月以上前から各潅水方式による潅水制御を実施している。

スケジュール式と比較すると、しおれ検知式では8%の収量増加を確認するできた。スケジュール式では急な晴れ間等により植物に過度なしおれが発生し植物にダメージを与えることがあるが、しおれ検知式ではしおれに応じて潅水することによりこれを防げたことが、収量増加の要因ではないかと考えられる。

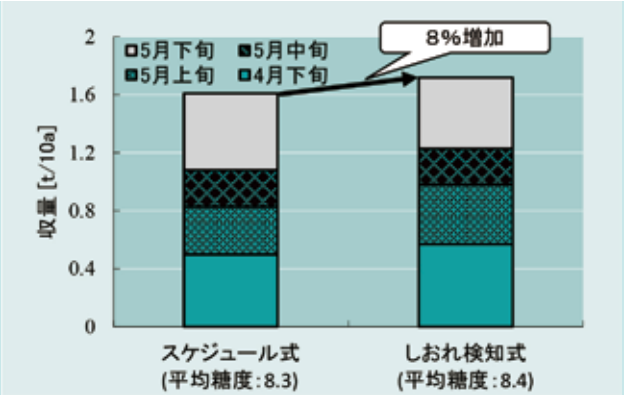


図 10 収量の比較
Fig. 10 Comparison of the Yield

5. おわりに

クボタ自社開発品としては初の施設園芸向けスマート農業機器である、しおれ検知式自動潅水制御システム(Hamirus)を開発し、2022年10月に市場導入した。熟練農家の目と経験や勘を、画像センシング技術と自動潅水制御アルゴリズムに置き換えることで、誰でも容易に高糖度トマト栽培の潅水管理が行えるようになった。今後は、本システムが適用可能な品目、品種、栽培方式の拡大や機能拡張等により、農家が抱える潅水管理に関する課題の解決に取り組んでいく。

また、本開発で得られた技術や経験をベースに、潅水管理以外の栽培管理作業の自動化に向けた技術開発に取り組み、持続可能な施設園芸の実現に貢献していく。

SDGs のターゲットへの貢献

2.4　持続可能かつ強靭な農業の実現　　スケジュール潅水に比べ収量が8%増加
8.2　イノベーションを通じた生産性の向上　　スケジュール潅水に比べ潅水作業時間を46%削減
9.5　科学技術、イノベーションの推進　　画像センシング技術を活用したスマート農業技術の開発を推進

参考文献
1) 農林水産省. 生産農業所得統計.
https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/nougyou_sansyutu/ (参照日2024-09-30)
2) 仁科弘重, 高山弘太朗, 羽藤堅治. 給液制御装置. 特許第4820966号. (発行日2011-11-24)

パイプ外面欠陥判定技術の開発

Development of Inspection Technology for the Outer Surface of Pipes

パイプシステム生産技術開発部／京葉工場
パイプシステム品質保証部

ダクタイル鉄管の外観検査では目視による官能検査を行っているため、検査員の違いによる判定のバラツキや不良の見逃しといった検査品質上のリスクが存在する。このリスクに対応するために、AIによる画像分析を用いた自動検査技術を開発した。この技術開発により、検査の信頼性向上と検査員の省力化を実現した。今後は鉄管生産ラインに加えて、合成管生産ラインへの当該技術の適用拡大を進める。

【キーワード】
ダクタイル鉄管、AI、画像分析、自動検査

Because of visual sensory inspection for ductile iron pipe, we have the risks of inspection judgement variation by the inspectors and the overlooking of defects. To solve these problems, we have developed automatic inspection technology using image analysis by AI. With this technological development, we have achieved reliability improvements in inspection and labor saving for inspectors. In addition to the production line of iron pipe, we are going to promote technology expansion to the production line of synthetic pipe.

【Key Word】
Ductile Iron Pipe, AI (Artificial Intelligence), Image Analysis, Automatic Inspection

関連する SDGs

1. はじめに

1－1 事業の概要

日本の水道事業では、人口減少に伴う水道料金の収入減などにより、水道用資機材の出荷量が年々減少している。加えて製造の分野のみならず、施工工事の分野でも熟練作業者の減少など、事業を取り巻く環境は厳しい状況にある。

一方、人々に安心安全な水を届け続けるために、鉄管(図1)や合成管は水インフラを支える重要な水道用資機材であり、クボタには信頼性の高い製品を供給し続けていく責任がある。そこで、鉄管の生産ラインにおいては、「検査の信頼性向上」や「省人化」のための技術開発に取り組んでいる。

図 1 水道用資機材の例
Fig. 1 Example of Water Supply Materials and Equipment

1 ー 2 取り組んだ課題

長年、鉄管の生産ラインでは手直しと外観検査について、人に頼った生産が続けられてきた。特に外観検査では全数検査を行っているものの、目視による官能検査であるため、合否判定のバラツキや不良の見逃しといった検査品質上のリスクが存在する。さらに、適切な判定技能を有する検査員を育てるには時間が掛かり、将来的な労働力の減少も重なることで検査員の確保が難しくなる。そのため、客観的なデータを基にした検査の自動化が急務である。

一方で、自動検査技術には検査員と同等以上の検査精度を有することが求められる。過去に表面形状測定を使った検査の自動化を検討したが、製品のライン内搬送で生じた傷や汚れなどの阻害要因によって十分な検査精度が得られなかった。そこで、検査員の目を再現する検査方法として、AIによる画像分析を用いて欠陥を正しく検出する自動検査技術を開発した。

2. 開発のコンセプトと目標

2 ー 1 開発のコンセプト

京葉工場の生産ライン(図2の加工工程)に、目視検査と同等以上の判定精度を持つAIによる画像分析を用いた自動検査装置を導入する。それにより、目視検査と組合せたダブルチェックで次工程への不良管流出を防止する。開発コンセプトを次の3点とした。

(1)インラインでの全数自動検査

対象ラインで生産される全ての鉄管の外面を自動検査可能な装置とする。そのためには、既設ラインに設置でき、かつ外面全体を検査(撮影)可能な構造にする必要がある。

(2)欠陥内容の特定と記録を含めた合否判定

欠陥には亀裂、凹み、小穴など複数の種類があり、それぞれ発生原因が異なる。検査結果を基にした品質改善活動への展開を視野に、単純な合否判定に留まらず、欠陥の種類の特定および記録(種類、発生位置)が可能な仕組みとする。

(3)設備異常時の自動停止(フェールセーフ)

正常な検査には、適切な検査画像を得ることやPC等の制御機器間の適切な通信状態の維持が不可欠である。そこで、検査が正常に実施されていることを担保するために、設備稼働状態を自動で監視し、設備異常が発生した場合、検査装置が自動で検査を停止し、オペレータに知らせる仕組みとする。

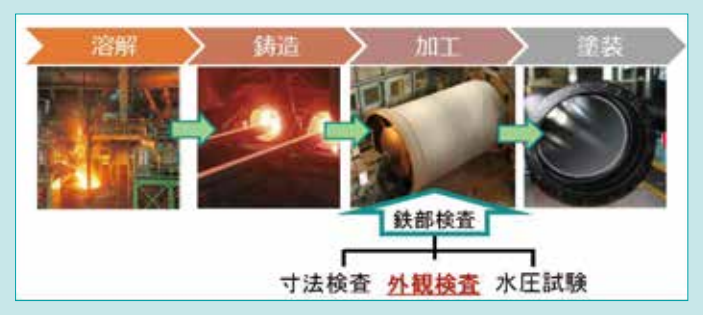


図 2 ダクタイル鉄管の生産工程
Fig. 2 Production Process of Ductile Iron Pipe

2 ー 2 開発目標

①次工程の塗装ラインへの不良管流出ゼロ
②欠陥の種類を正しく判定可能
③設備異常の見逃しゼロ
・適切な検査画像を撮影できているか判定できる
・機器間の通信異常を検知できる

3. 開発技術

3 ー 1 検査画像の撮影技術

3.1.1 撮影技術の課題

(1)1台のカメラで円筒状の鉄管外面の検査範囲全面を漏れなく撮影する。

(2)欠陥部分と正常な良品部分の差を明確に撮影する。

3.1.2 撮影技術の解決策

技術課題の解決のために、適切な撮影機器の選定、配置検討、撮影条件の設定を行った。

まず、検出が必要な最小の欠陥サイズに応じた画素数のカメラを選定した。そのカメラで鉄管外面の検査範囲全面を漏れなく撮影し、かつ明るさのバラツキを極小化した画像を得るために、鉄管を回転させながら鉄管上を遮光カバーを有した撮影機器が移動する装置構成を考案した。

また、亀裂等の欠陥部分の特徴を明確に撮影するために、照明をカメラの中心軸から離して斜め方向から照射する配置とした(図3)。さらに、鉄管およびカメラを高速で動かした場合においてもブレのない画像を得るための露光時間等の適切な撮影条件を設定した。

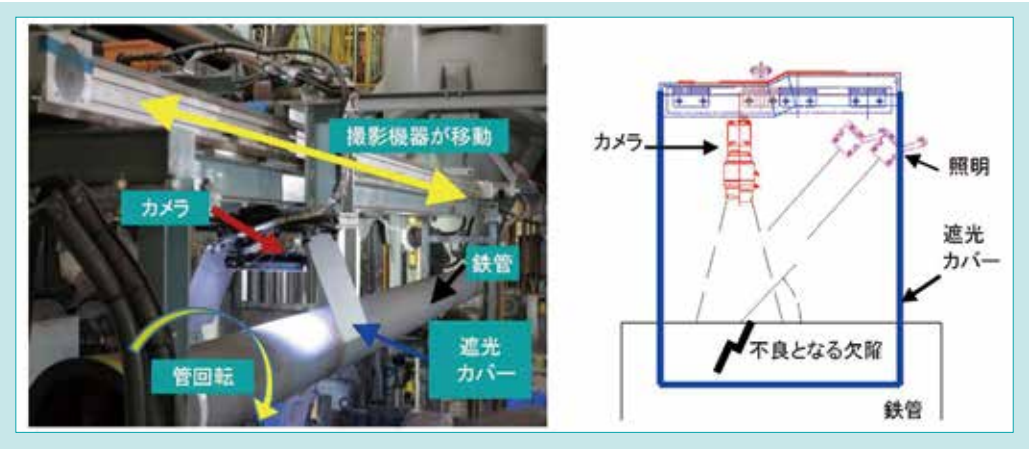


図 3 検査装置の外観と撮影機器の配置
Fig. 3 Appearance of Inspection Equipment and Configuration of the Imaging Device

3 ー 2 合否判定技術

3.2.1 合否判定技術の課題

(1)形状や特徴の異なる欠陥を分類する。

(2)適正な判定精度を確保する。

3.2.2 合否判定技術の解決策

AIで欠陥を分類するために、各欠陥の特徴を学習する「教師あり学習」を採用した。以下に学習方法を示す。

①全種類の欠陥画像を別々に学習させることで特徴の違いを認識させた。

②ダクタイル鉄管などの鋳物製品の欠陥形状は一定でないため、同じ種類の欠陥に対しても異なる形状の画像を複数選別して学習を行った。

③各欠陥の大きさなどの特徴を適切に学習させるために、画像ごとに欠陥の発生箇所を指定(アノテーション)して学習を行った(図4)。

判定方法としては、適正な判定精度を確保するために、学習した各欠陥と検査画像と比較して一致率を出力する仕組みとした。この一致率に対し、欠陥ごとに不良判定の閾値を設定することで適正な判定精度を確保した。

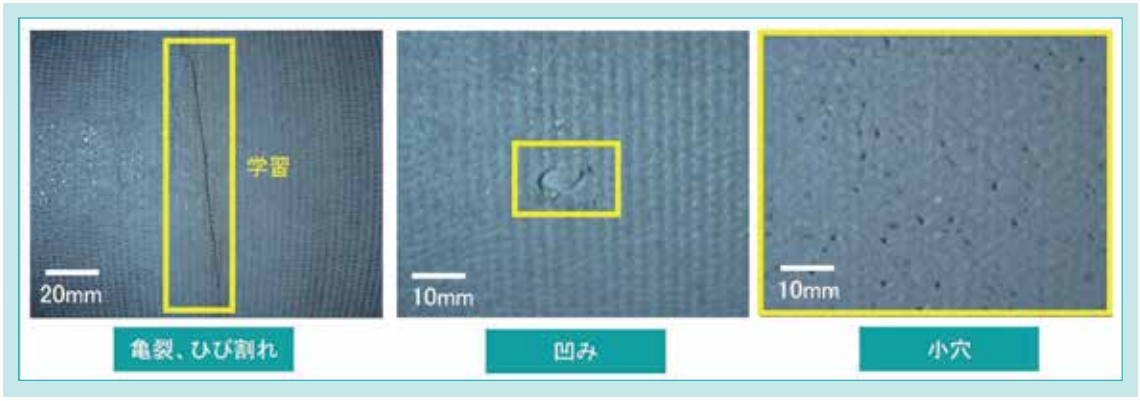


図 4 不良画像を使った AI 学習の例
Fig. 4 Sample of AI Learning with Images of Defects

3 ー 3 設備自動停止技術

3.3.1 設備自動停止技術の課題

(1)カメラが正常に撮影を行い、合否判定に適した検査画像が得られたことを確認する。

(2)AIが正常に合否判定を行い、生産ラインの制御機器が判定結果を受け取ったことを確認する。

3.3.2 設備自動停止技術の解決策

得られた検査画像に対し、合否判定の動作と並行して画像の明るさ等を分析することで正常な状態で撮影されているかを判断する仕組みとした(図5)。加えて、異常発生時にはその場で異常信号を出して検査装置を停止し、オペレータへ異常を知らせる仕組みとした。

同様に、AIが合否判定を行うPCと生産ラインの制御を行うPLCとの通信状況を監視し、判定結果を受け取れなかった場合に異常信号を出す仕組みとした。検査中に設備状態を常時監視することで異常の発生を即座に検知し、検査未完了の鉄管が下工程へ流出することを防止する。

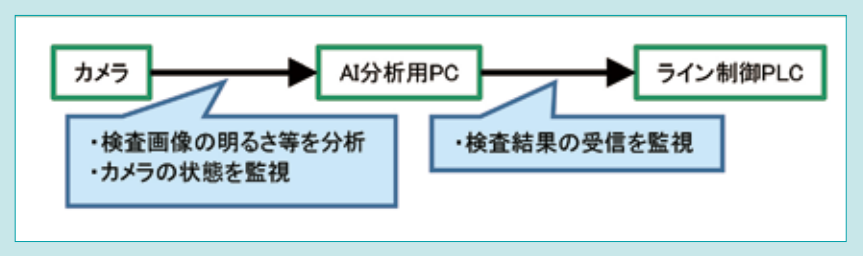


図 5 検査の動作フロー
Fig. 5 Operation Flow of Inspection

4. 開発の成果

開発した各技術を組込んだ外観自動検査装置を京葉工場の生産ラインに設置し、数日間に分け、合計5000本の鉄管を対象に、評価試験を実施した。

その結果、

①AIは発生した全ての欠陥を見逃すことなく検出でき、次工程の塗装ラインへの不良管流出はゼロであった。

②検出した欠陥に対して、その種類を正しく分類できた。

③設備異常(適切な検査画像を撮影出来ない状態や機器間の通信異常)を正しく検知し、次工程への未検査管の流出を防止できた。

なお、外観自動検査装置の導入後、約2年の運用で大きなトラブルは発生していない。

5. おわりに

パイプ外面欠陥判定技術の開発により、人の意思が介在しない客観的なデータを基にした一定の判定基準による自動検査を実現した。

今後は、他工場の鉄管生産ラインにもこの判定技術を導入するとともに、合成管などの他製品への技術展開を進め、パイプシステム事業の検査の信頼性向上に貢献する。

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　信頼性の高い水道用資機材を提供

9.1 質の高い持続可能かつ強靭なインフラの開発　水道用資機材の供給により、強靭なパイプラインの構築に貢献

大口径EF継手の開発

Development of a Large Diameter Electro Fusion Socket

株式会社クボタケミックス 商品開発部

高度成長期に建設された多くの工場内の配管材として使われていた鋼管は、経年劣化による腐食の問題が発生している。クボタケミックス(以下「KC」という)では、これら金属管の樹脂管代替を提案することにより市場開拓を進めている。

KCで取り扱うφ200以下のポリエチレン用電気融着(以下EFという)継手は射出成形による連続生産を行っているが、φ250以上のサイズでは多品種少量生産に適した、パイプ短管を加工原管として電熱線を埋め込むEF継手専用設備及び製造技術を確立し、EF継手の製品化に繋げた。

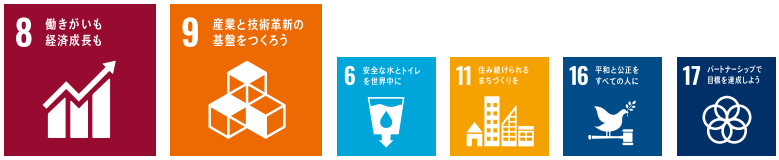
【キーワード】
圧力管路、旋盤加工、施工性、EF継手

Steel pipes, which were used as piping materials in many factories built during the period of economic growth, are suffering corrosion problems due to aging. Kubota Chemix (hereinafter referred to as "KC") is promoting market development by proposing plastic pipes as an alternative to these metal pipes.

We use injection molding to continuously produce polyethylene EF fittings of φ200 or less. However, for sizes of φ250 or more, we have developed equipment and manufacturing techniques specifically for original pipe-type EF fittings, which have heating wires embedded in short pipes, and are able to produce many models in small quantities.

【Key Word】
Pressure Pipeline, Lathe Processing, Applicability, Electro Fusion Socket

関連する SDGs



1. はじめに

KCでは、水道配水用途向けに採用実績を伸ばしているポリエチレン管を、工場内の冷却水・各種排水や小水力発電設備配管などのプラント・土木市場へ適用することで金属管からの代替需要拡大を図っている。その品揃え拡充の一環として施工性に優れる片受直管・片受曲管(以下、片受管という)の開発を推進中である(図1)。

図 1　片受直管・曲管(φ 250)
Fig. 1 Pipe and Bend with a Single Socket (φ250)

2. 開発のコンセプトと目標

2 ― 1 開発のコンセプト

KCではφ50～200の片受管を品揃えしており、受口は射出成形機(図2)及び巻線機(図3)を組合せて製造している。

一方、今回開発した継手は、旋盤に専用刃物を取付け、パイプを原管とした加工原管を回転させることで、内面に電熱線の埋込加工を行う。専用刃物は原管内面を刃先で切り裂きながら電熱線を挿入し、開口部を押し当て電熱線を固定しなが

ら刃物を進める(図4)。原管サイズが異なっても同じ加工方法が適用できるため、少ロット生産に適した製造手法と言える。

継手は左右を個別に融着可能な構造としており、片側の受口とパイプを接合することで片受管とした。片受構造により施工現場ではEF接合時に必要な管表面の切削及び清掃作業を半減できるメリットがある。

図 2　射出成形機
Fig. 2 Injection Molding Machine

図 3　巻線機
Fig. 3 Winding Machine

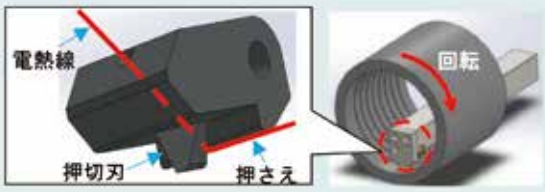


図 4　電熱線設置の概略
Fig. 4 Schematic of Heating Wire Installation

2 ― 2 開発目標

受口の要求性能は、①日本ポリエチレンパイプシステム協会が制定する規格試験(JP K 013)を満たすこと、②社内基準として規定する限界性能試験を満たすこと、とした。

3. 開発技術

3 ― 1 試作品性能試験における課題

EF接合に用いるコントローラからの出力エネルギーは、温度測定誤差や出力電圧許容差などで変動する。その結果、パイプと受口端面の隙間から溶融した樹脂が飛び出し、従来の継手形状では性能を満たせないことが判明した(図5)。この問題を解決し、前述の目標を達成することが課題である。

図 5　樹脂漏れ
Fig. 5 Leaked Resin

3 ― 2 解決策

上記課題への解決策として、受口外側の形状に着目し、過剰に溶融した樹脂を溜めることができるような樹脂溜まりの溝を設けた(図6)。この結果、溶融樹脂の飛び出しは解消できた(図7)。この形状は従来の射出成形継手では金型構造が非常に複雑となるが、今回開発した継手の受口はEF継手専用設備の切削機構を用いて比較的容易にこの形状に対応可能である。

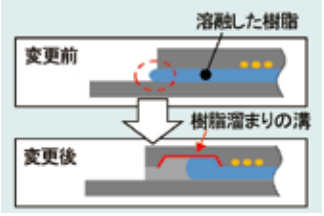


図 6　形状変更概略
Fig. 6 Schematic of the Shape Change

図 7　評価結果
Fig. 7 Evaluation Results

4. おわりに

φ250・300の開発を完了し、実現場では施工業者から施工面で高い評価を得ている(図8)。今後もサイズ拡大を進めるとともにユーザーニーズに合った製品を開発していく。

図 8　配管現場の状況
Fig. 8 Plumbing Conditions

SDGs のターゲットへの貢献

8.2　イノベーションを通じた生産性の向上　　片受直管の採用により施工時間の短縮化に貢献
9.1　質の高い持続可能かつ強靭なインフラの開発　　漏水しにくい強靭なパイプラインの実現に貢献

ベルト型ろ過濃縮機の自動高圧洗浄装置の開発

Development of an Automatic High-pressure Cleaning System for the Gravity Belt Thickener

水循環プラント設計部／環境事業推進部
水環境研究開発第二部／環境システム制御部

下水処理場向け「クボタベルト型ろ過濃縮機」は、低コスト・低動力・運転管理が容易であり、国内の下水処理場に多く採用され、下水処理場の省エネルギー化、省力化に大きな貢献を果たしている。その中で、一部の処理対象物に含まれる物質がステンレスベルトに目詰まりを発生させ、濃縮性能を低下させることがある。この目詰まりの発生頻度を低減し、維持管理の手間を削減することができる自動高圧洗浄装置を開発した。

【キーワード】
下水汚泥、ベルト型ろ過濃縮機、ステンレスベルト、目詰まり、高圧洗浄

The "Kubota Gravity Belt Thickener" for sewage treatment plants is low-cost, low-power, and easy to manage, and it has been widely adopted in domestic sewage treatment plants, significantly contributing to energy savings and labor reduction. However, certain substances contained in some of the treatment targets can cause clogging on the stainless steel belt, leading to a decrease in concentration performance. To reduce the frequency of this clogging and minimize maintenance efforts, we have developed an automatic high-pressure cleaning device.

【Key Word】
Sewage Sludge, Gravity Belt Thickener, Stainless Steel Belt, Clogging, High-pressure Cleaning

関連する SDGs

1. はじめに

下水処理場の機械濃縮機は汚泥処理フローの前段に設けられ、水処理過程で発生する汚泥を濃度0.5～1.0 %程度から濃度4～5 %程度まで濃縮する装置で、本装置の性能次第で後段の汚泥処理に大きく影響を与える重要な装置である(図1)。

機械濃縮機の1つであるベルト型ろ過濃縮機の機能は次のとおりである。汚泥に凝集剤を添加し凝集装置にて撹拌して凝集汚泥を作ることで水分を分離しやすくする。凝集汚泥を無終端のベルトの上に供給し、ベルト駆動装置によりベルトが動くことで重力により水分を分離しながら排出部まで運び、濃縮汚泥とろ液に分離する。また、ベルトは濃縮性能を維持するために連続洗浄している(図2)。

「クボタベルト型ろ過濃縮機」は、下水汚泥濃縮機としてはベルトに国内で唯一ステンレスベルト(図3)を採用し、汚泥処理量10～150 m^3/hで9つのラインナップをもち(型式名:SNM-01X～15X)、安定した濃縮性能と省エネ性、優れた維持管理性が多くのお客様に高く評価され、これまでに全国の下水処理場向けに280台以上の納入実績がある。

多くの処理場では、安定した濃縮性能を長期間維持することができているものの、処理対象である下水汚泥には様々な物質が含まれており、汚泥性状によってはステンレスベルトに連続洗浄では落としきれない物質が付着、蓄積し、早ければ数か月の運転で、濃縮性能が低下するほどステンレスベルトが目詰まりを起こしてしまうことがある(図4)。

ステンレスベルトが目詰まりを起こした場合は、濃縮運転を停

止して、維持管理者が高圧洗浄機を用いた高圧洗浄、酸やアルカリを使った薬品洗浄を行うことにより、目詰まりを解消し、濃縮性能の回復を図ることができる。しかしながら、高圧洗浄や薬品洗浄は手動となるため、維持管理上の負担となっている。

そのため、維持管理の手間を大幅に低減し、濃縮性能を長期間維持可能な自動高圧洗浄装置が求められていた。

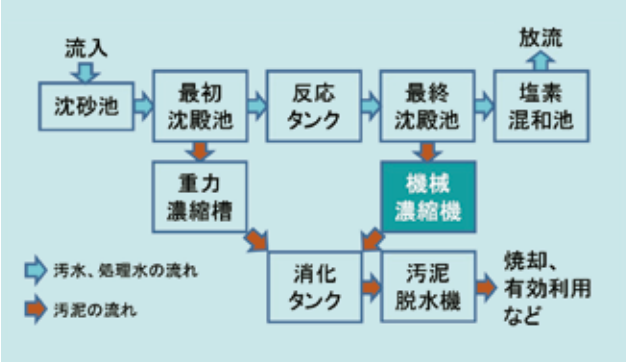


図 1 下水処理場の代表的フロー
Fig. 1 Typical Flow of a Wastewater Treatment Plant

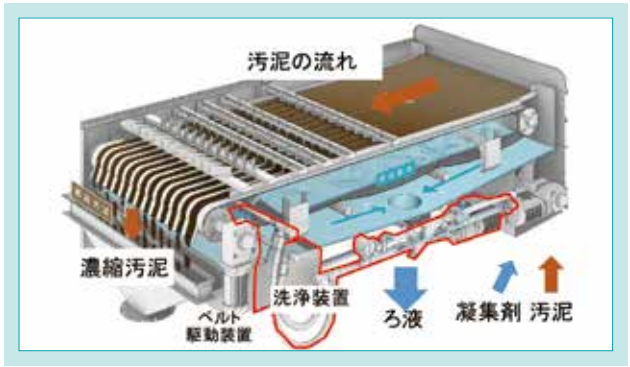


図 2 ベルト型ろ過濃縮機の概略図
Fig. 2 Schematic Diagram of the Gravity Belt Thickener

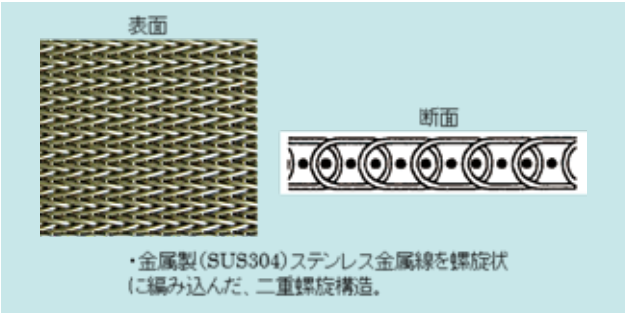


図 3 ステンレスベルトの構造
Fig. 3 Structure of the Stainless Steel Belt

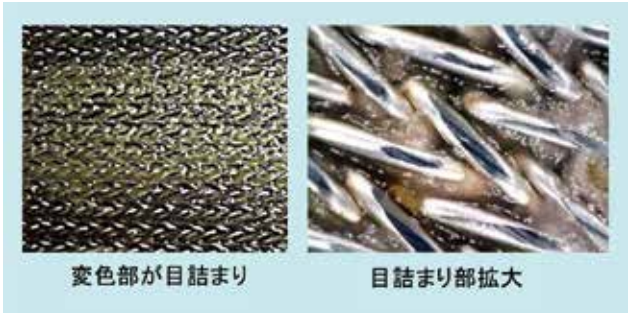


図 4 ステンレスベルトの目詰まり例
Fig. 4 Example of Clogging in the Stainless Steel Belt

2. 開発のコンセプトと目標値

2 ― 1 開発のコンセプト

薬品洗浄に比べ高圧洗浄の方が洗浄の頻度が多いことから、高圧洗浄を自動化することによる維持管理の手間の削減効果が高い。よって、開発のコンセプトは、「手動の高圧洗浄を自動化して濃縮性能の安定化が図れ、維持管理の手間を削減できる洗浄システム」とした。

2 ― 2 目標値

前述のコンセプトを実現するため、本開発では、実際の下水処理場で実施している手動の高圧洗浄を調査し、お客様へのヒアリング結果も踏まえ、以下の開発目標を設定した。

①洗浄効果:手動の高圧洗浄と同等以上の洗浄効果
②洗浄頻度:機種名…SNM-12X、汚泥処理量…120 m^3/h において、1回/週、1時間/回
③動力:高圧洗浄水ポンプ5.5kW(既存の洗浄水ポンプと同等)
④維持管理性:高圧ノズルの閉塞検知、自動運転(点検を除く作業工数0)、薬品洗浄頻度 2回/年以下
⑤その他:既納入機への後付け可能な構造

3. 解決すべき技術課題

3 ― 1 洗浄打力の決定

下水処理場でベルトの目詰まりが発生した際に実施している手動の高圧洗浄と同等以上の洗浄効果を得るために、高圧洗浄機の洗浄打力を調査し、高圧洗浄装置に必要十分な洗浄打力を決定する必要がある。洗浄ノズルから噴出される洗浄水の洗浄打力は次の式により算出できるが、実測して確認する。

$$洗浄打力(N/m) = 0.745 \times 流量(L/min) \times (圧力(MPa))^{1/2} \div 噴射幅(m)$$

$$噴射幅(m) = 噴射高さ(m) \times \tan(噴射角度 \div 2) \times 2$$

なお、洗浄打力は強い方が洗浄力は高いが、過去に過剰な洗浄打力により、ステンレスベルトが変形してしまうトラブルが発生したことがあったため、ベルトが変形しない洗浄打力とする。

参考までに、連続洗浄の洗浄打力は10 N/m程度である。

3 ― 2 ベルトの分割洗浄

「クボタベルト型ろ過濃縮機」は、機種により、ベルト幅が0.5～3.0 mである。必要な洗浄打力を満たす条件でベルト幅全体を一度に洗浄するには、大きな流量が必要で、ポンプ動力は流量と圧力に比例するため、最もベルト幅が小さい0.5 mであっても、5.5 kWの高圧洗浄ポンプでは能力が不足する。そのため、ベルトを分割して洗浄可能な機構を開発する必要がある。

3 ― 3 異物除去

高圧洗浄を実施する際は汚泥の供給を停止して、ステンレスベルトを運転する。その際に、濃縮機内に残留していたし渣等の異物が何らかの拍子でベルト上に落ち、搬送されてくることがある。異物を除去しないで高圧洗浄を行うとステンレスベルトへ悪影響を与えることが懸念されるため、手動の高圧洗浄では、人が目視で確認しながら異物を除去している。自動高圧洗浄でも、ステンレスベルトへの悪影響を防止するため、高圧洗浄前にステンレスベルト上の異物を除去する必要がある。

3 ― 4 高圧洗浄ノズルの閉塞検知

高圧洗浄ノズルは数が少ないため、1個でも閉塞してしまうと、その影響は大きく、ステンレスベルトの目詰まりが進行してしまう。そのため、高圧洗浄ノズルの閉塞を検知して警報を発令する装置が必要である。

4. 開発技術

4 ― 1 洗浄打力、ベルトの分割洗浄、異物除去技術

下水処理場(A、B処理場)での手動の高圧洗浄を調査した(図5、表1)。

調査結果を参考に洗浄打力、ベルトの分割洗浄方式を決定し、異物除去技術を開発した。

図 5　手動の高圧洗浄作業
Fig. 5 Manual High-pressure Cleaning Work

表 1　手動での高圧洗浄作業の調査結果
Table 1 Investigation Results of Manual High-pressure Cleaning Operations

		A 処理場	B 処理場
型式名		SNM-15X	SNM-12X
洗浄水量		13 L/min	13.8 L/min
洗浄水圧		5.2 MPa	10 MPa
ポンプ動力		2.2 kW	3.7 kW
洗浄位置	キャリア面	供給シュート近傍	駆動ローラ上部
	リターン面	駆動ローラ近傍	なし
洗浄高さ		0.2 m	0.2 m
洗浄打力		420 N/m	600 N/m
洗浄方法		ベルトを停止させ、幅：約 3 m×長：約 1 m の範囲にノズルを動かして約 15 分かけて洗浄。洗浄後、ベルトを走行させて、洗浄作業を繰り返す。	ベルトを 5 m/min で走行させ、幅：約 0.3 m の範囲にノズルを動かして 1 周ずつ洗浄。全幅約 3m なので 10 分割の洗浄となる。異物が搬送されてくると、ノズルの先端を斜めにして飛ばす。
1 回当り作業時間（うち洗浄時間）		7 h (約 360 min(両方向))	1 h (約 20 min(1 方向))
洗浄頻度		2 回 / 年	1 回 / 週
作業工数		28 人・h / 年	104 人・h / 年

4.1.1　洗浄打力の決定

B処理場では、1 回/週の頻度で高圧洗浄を実施しており、洗浄打力が600 N/mで、高圧洗浄によるステンレスベルトへのダメージは報告されていない。

そこで、小型試験機にてステンレスベルトに高圧水を当て、洗浄打力を徐々に上げていき、最大700 N/mで、ベルトを2400周させ、ベルトの伸び、変形がないことを確認した。高圧洗浄頻度を1 回/週とすると、ベルト寿命6年間の高圧洗浄での周回数は1 周/週×52 週/年×6 年＝312 周となるので、余裕率2400÷312＝7.7 倍である。

以上により、洗浄打力はB処理場の600 N/mを採用することとした。

4.1.2 ベルトの分割洗浄方式の決定

A処理場に対し、B処理場の方が1回当りの洗浄時間が短いことから、B処理場の洗浄方法を参考に、ステンレスベルトを走行させた状態でベルト幅方向に分割して洗浄する方式を採用した。

また、ステンレスベルトへの洗浄方向は、B処理場ではステンレスベルトのキャリア面(汚泥が乗る面)から1方向であり、同等の洗浄効果を得るには、1方向からの洗浄で十分であると考えた。

ベルト幅方向に分割して洗浄するためには、洗浄ノズルをステンレスベルトの幅方向に移動させる装置が必要になる。この移動装置として、ほかの汚泥処理機器(スクリュープレス脱水機)の洗浄装置で実績のある往復動式を採用した(図6)。

本洗浄機構は、チェーン駆動の往復動装置、高圧ゴムホースとホースサポートの組合せによる洗浄方式を採用し、駆動装置によってチェーンを介してノズルを自在に移動することができ、高圧ゴムホースがノズルの移動に追随する構造となっている。

また、高圧洗浄水ポンプは実績のあるプランジャポンプを採用した。

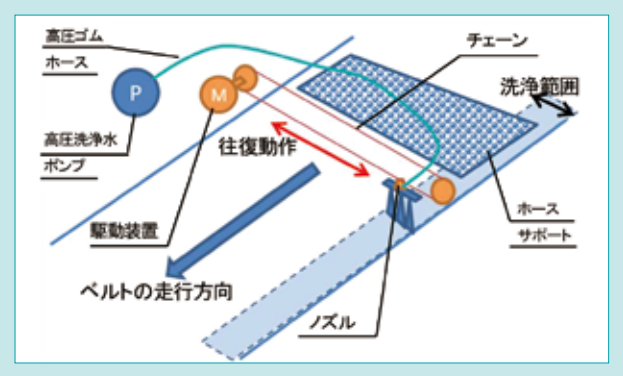


図 6 自動高圧洗浄装置の概略図
Fig. 6 Schematic Diagram of the Automatic High-pressure Cleaning Device

4.1.3 異物除去技術の開発

小型試験機にて、ステンレスベルト上に異物を乗せ、高圧水を垂直に当てて、ベルトへの影響の有無を確認した。異物には、下水汚泥に含まれるし渣等の異物を模擬的に再現するためコットン、紐、金属くずを使用した。

試験の結果、紐と金属くずは高圧水の勢いで吹き飛ばすことができたが、コットンはステンレスベルトに押し込まれた。ベルトに押し込まれたコットンは指で摘まむことで除去することは可能であったが、垂直に当てた高圧水では除去できなかった(図7)。

B処理場の手動の高圧洗浄では高圧洗浄機のノズルの先端を斜めに傾けて異物を飛ばしており、これを参考に装置化を検討した。異物除去ノズルとして高圧洗浄ノズルよりも広角に洗浄できるノズルを追加で取付け、高圧水をステンレスベルトに角度を付けて当てることで、垂直に当たる高圧水の上流側でコットンの除去が可能であることを確認した(図8)。

図 7 ベルトに押し込まれたコットン
Fig. 7 Cotton Trapped in the Stainless Steel Belt

図 8 異物除去ノズル
Fig. 8 Foreign Object Removal Nozzle

4 ― 2 高圧洗浄ノズルの閉塞検知

高圧洗浄ノズルの閉塞は、高圧洗浄水ポンプの特徴から接点付き流量計の流量低の警報により検知可能であると考えた。高圧洗浄水ポンプには容積式のプランジャポンプを、その吐出部にはばね式の調圧弁を採用している。洗浄ノズルが詰まったときは、調圧弁のばねの作用により余水側に過剰な洗浄水が流れるため、高圧水の流量が下がり、流量低を検知できるからである。

ノズルをプラグに交換してノズルの閉塞を模擬し、高圧水流量とノズル部圧力を測定した。ノズルを1つ閉塞させたときの高圧水量は、48.4 L/min→45.1 L/minとなり、流量によるノズルの閉塞検知が可能であることを確認した。また、全てのノズルが閉塞した場合のノズル部圧力は6.25 MPaとなるため、ホース、配管類の最大使用圧力が7.0 MPa以下の仕様を採用した(図9)。

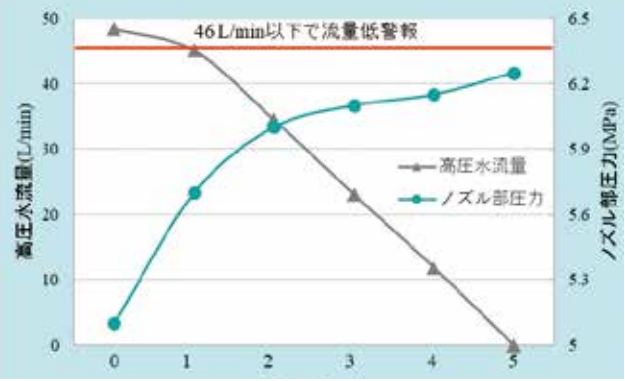


図 9 ノズルの閉塞と高圧水流量、ノズル部圧力の関係
Fig. 9 Relationship Between Nozzle Blockage, High-pressure Water Flow Rate, and Nozzle Pressure

4 ー 3 実機での洗浄効果、長期安定性の確認

開発した試作機をB処理場の既納入機の1台に取付け、1年3か月の期間で実機試験を実施した(図10、図11)。

B処理場では、汚泥濃縮機は年間7000～8000時間(約290～330日)ほどの運転時間があり、実機試験の期間中、手動の高圧洗浄を1回/2週、薬品洗浄を5回/年の頻度で実施していた。一方、試験機は手動の高圧洗浄は実施せず、1回/週の頻度で自動高圧洗浄を実施した。

高圧洗浄装置を設置した濃縮機(試験機)と、自動高圧洗浄装置を設置していない濃縮機(比較対象機)で、通水試験を実施し、自動高圧洗浄装置の洗浄効果を確認した。

試験期間を、①一旦閉塞後の自動高圧洗浄性能、②短期安定性、③長期安定性、の3つに分け、試験機と比較対象機の結果を比べることで、以下のとおり、満足できる洗浄効果と、長期安定性を確認した。

図 10　自動高圧洗浄の様子
Fig. 10 State of High-pressure Cleaning

4.3.1　通水試験方法

クボタでは、ステンレスベルトの目詰まり状況を確認する方法として、通水試験を実施しており、以下の作業標準と目詰まりの判断基準を規定している。

作業標準･･･ベルト上に設置した試験装置に約0.9Lの水をため、ベルトに水を流して、規定量の水が流れる時間を計測する(図12)。計測は、1か所当たり3回の平均を取り、更にベルト全体で12か所実施し、その平均をとる。

目詰まりの判断基準･･･ステンレスベルトが新品又は、薬品洗浄等により完全に付着物を除去した状態では、通水時間は4.0秒以下であり、5.0秒以上で目詰まりと判断する。

4.3.2　洗浄効果の確認

薬品洗浄を実施した時点を0hとし、濃縮運転時間と通水時間の推移を試験機と比較対象機で、2回の試験期間で比較した。

試験期間①では、薬品洗浄後600h経過後に自動高圧洗浄装置を設置して、実機試験を開始した(図13)。試験機は600hで通水時間が5.0秒を超えており目詰まりと判断される状態であったが、自動高圧洗浄を実施することによって4.1秒程度まで下がり目詰まりが解消され、以降も自動高圧洗浄によって5.0秒以下を維持した。

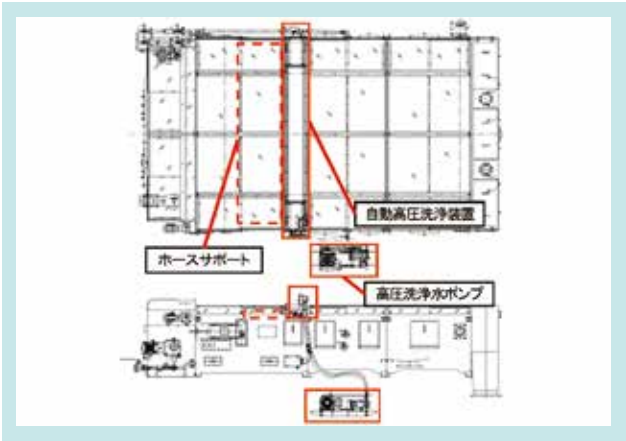


図 11　自動高圧洗浄装置を搭載したベルト型ろ過濃縮機
Fig. 11 Gravity Belt Thickener Equipped with the Automatic High-pressure Cleaning Device

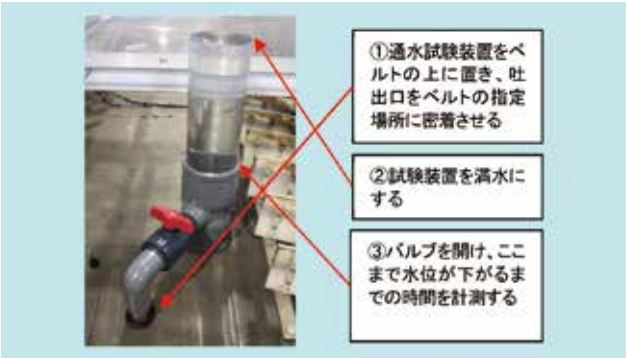


図 12　通水試験方法
Fig. 12 Water Flow Testing Device

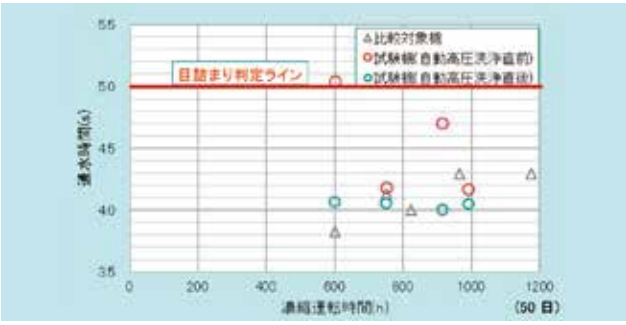


図 13　通水時間の推移 (試験期間①)
Fig. 13 Transition of Water Flow Times (Test Period ①)

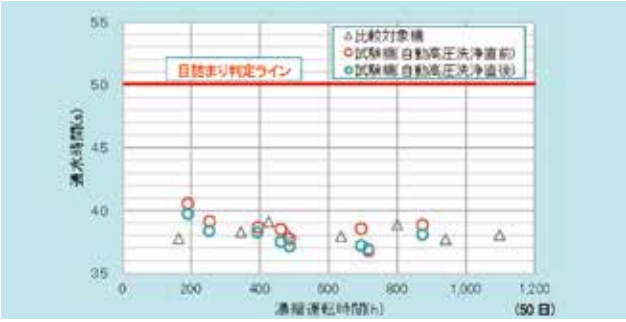


図 14　通水時間の推移 (試験期間②)
Fig. 14 Transition of Water Flow Times (Test Period ②)

一方、比較対象機は、通水時間が5.0秒以下で目詰まりは発生していないが、徐々に通水時間が悪化していった。

試験期間②では、薬品洗浄後から自動高圧洗浄を開始し、試験機、比較対象機とも通水時間が4.0秒以下で推移し、目詰まりのない良好な状態が継続した(図14)。

以上の結果から、自動高圧洗浄装置による洗浄効果は手動の高圧洗浄と同等以上であることが確認できた。

4.3.3 長期安定性の確認

試験期間③では、試験機は薬品洗浄を実施せず、長期安定性の確認を行った。この期間、比較対象機は3回の薬品洗浄を実施した(図15)。

試験機はおよそ4500 h(約190日)まで、ステンレスベルトに目詰まりがなく、良好な状態を維持した。この結果から、自動高圧洗浄装置の導入で、B処理場では薬品洗浄を5回/年から2回/年に削減可能であることが確認できた。

また、この期間、試験機の維持管理者による半自動運転を実施した。起動時に異常がないかの目視確認を行うため、高圧洗浄実施時は起動の押しボタンスイッチを入れてもらい、起動後は自動運転で洗浄終了まで完了する制御とした。その結果、試験期間中に大きなトラブルはなく、長期間ステンレスベルトの目詰まりがなかったことで、維持管理者からは高い評価をいただいた。起動時の目視確認も必要がないことを確認したため、これから製作する本作機では濃縮運転終了時やタイマーの設定による自動高圧洗浄工程を追加することで、高圧洗浄作業の完全自動運転を実現する。

自動高圧洗浄装置に関わる維持管理者の作業工数としては、洗浄作業の工数は0hで、半年に1回1h程度の点検作業(ストレーナ清掃、外観、水漏れ等の点検)のみとなり、本装置の導入により高圧洗浄作業の大幅な工数削減が達成できる(表2)。

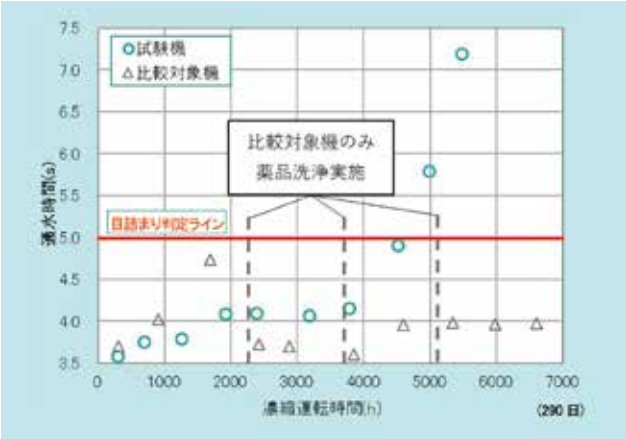


図 15 通水時間の推移 (試験期間③)
Fig. 15 Transition of Water Flow Times (Test Period ③)

表 2 試験機と比較対象機の仕様と維持管理の作業工数の比較
Table 2 Comparison of Specifications and Maintenance Efforts between Test Equipment and Reference Equipment

		比較対象機	試験機
仕様	洗浄水量	13.8 L/min	50 L/min
	洗浄水圧	10 MPa	5 MPa
	洗浄高さ	0.200 m	0.109 m
	洗浄打力	600 N/m	600 N/m
	高圧洗浄頻度	1 回/2 週	1 回/週
維持管理の作業工数	高圧洗浄	52 人・h / 年	2 人・h / 年
	薬品洗浄	160 人・h / 年	64 人・h / 年

高圧洗浄作業工数の算出根拠

比較対象機:1h/回×2人×365日/年÷14日/回=52人・h/年

試験機:1h/回×1人×2回/年=2人・h/年

薬品洗浄作業工数の算出根拠

比較対象機:8h/回×4人×5回/年÷14=160人・h/年

試験機:8h/回×4人×2回/年÷14=64人・h/年

5. おわりに

本開発では、採用実績のある往復動式の洗浄機構を採用し、シンプルな構造となるように配慮した設計を行ったことで、信頼性の高い自動高圧洗浄装置の開発に成功した。本装置は納入済みの濃縮機にも後付けすることができ、ステンレスベルトの目詰まりで課題のあるお客様に自信をもって推奨できる製品である。

実機試験を実施したB処理場では、維持管理者からの高評価を受け、本装置の採用が決定した。

今後も、お客様のニーズを注視し、生活に不可欠なインフラである下水処理場の安定した運用に貢献していきたい。

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　低コストの下水処理に貢献

8.2 イノベーションを通じた生産性の向上　下水処理場の維持管理工数の削減に貢献　212人・h/年 → 66人・h/年

9.4 環境に配慮した技術の導入によるインフラ改良　下水処理における安定した濃縮機能の維持に貢献

MRデバイスを活用した点検合理化技術の開発

Development of Inspection Rationalization Technology Using MR Devices

クボタ環境エンジニアリング株式会社 ポンプ事業推進部／ DX 推進部
DX 推進部

水害防止の役割を担う排水機場は、設置後40年を経過して老朽化が進む施設が増えており、施設保全の重要性が高まっている。一方、排水機場の点検作業員の高齢化が進み、熟練作業員の減少と非熟練者へのノウハウの伝承が課題となっている。その中で、国土交通省関東地方整備局は点検整備の効率化のため、2024年4月より「点検合理化技術」を導入した。クボタグループでは求められる作業効率の更なる追求と、点検作業員のノウハウ伝承を目的としてMRデバイスを活用した「点検合理化技術」を開発した。

【キーワード】
MRデバイス、機械保全、サーバ管理、点群データ

Drainage pumping stations, which play a role in preventing flood damage, are becoming increasingly old after 40 years of use since their installation, and facility maintenance is becoming increasingly important. Meanwhile, the inspection workers at drainage pumping stations are aging, leading to a decrease in the number of skilled workers and issues with the passing on know-how to unskilled workers. In response to this, the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism's Kanto Regional Development Bureau introduced "inspection rationalization technology" in April 2024 to improve the efficiency of inspection and maintenance. The Kubota Group has developed "inspection rationalization technology" using MR devices with the aim of further pursuing the work efficiency required and passing on the know-how of inspection workers.

【Key Word】
MR Devices, Machine Maintenance, Server Management, Point Cloud Data

関連する SDGs

1. はじめに

近年の気候変動の影響により、豪雨の年間発生回数は増加しており、1時間降水量が50mmを超える局地的大雨の発生頻度は1980年前後と比べると約1.5倍に増加している[1)]。豪雨による水害を防止するために建設された排水機場は、設備更新目安の設置後40年を経過する施設が2030年には全国534機場の約半数を超えると言われている[2)]。施設保全のための点検業務の重要性が高まる一方で、点検業務に従事する作業員の高齢化による人手不足、それに伴うノウハウの伝承が課題となっている。

そのような中、2024年4月より国土交通省関東地方整備局より、点検整備の効率化を目的とした「点検合理化技術」が導入された。従来の点検業務は受注者が現場で点検結果を記録してから事務所に戻ってPCに入力し、それを電子データで発注者に提出

していた。発注者においては、受注者が提出したデータを発注者のサーバに入力する必要があり、受注者、発注者ともに手間を要していた。「点検合理化技術」では、受注者と発注者のサーバを連携し、受注者がスマートデバイスを用いて現場で入力した点検データが直接発注者のサーバに入力される仕組みを構築することで両者の手間が削減され、点検業務の効率化を実現した(図1)。

クボタグループにおいては、点検業務の作業性のさらなる向上と、熟練作業員のノウハウ伝承による点検事業の持続的発展を目指すため、他社製の頭部装着型のMR(Mixed Reality:複合現実)デバイス(図2)を活用した「点検合理化技術」を開発した。

本稿では、本技術の機能、導入効果などについて紹介する。

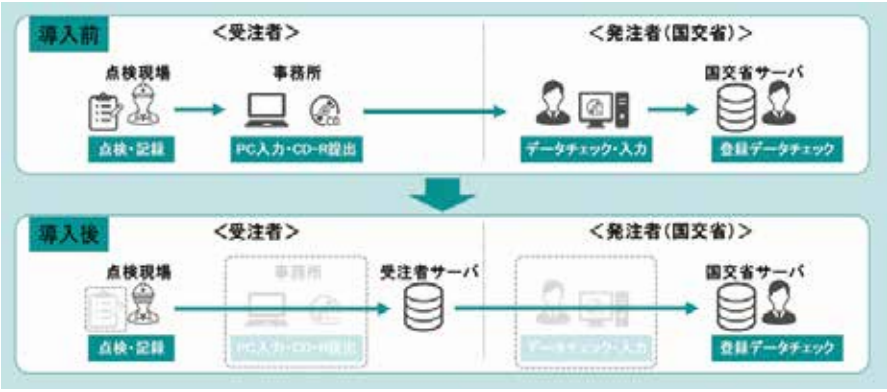


図 1　点検合理化技術の概要
Fig. 1 Overview of Inspection Rationalization Technology

図 2　頭部装着型 MR デバイス
Fig. 2 Head-Mounted MR Device
(写真は Microsoft 社 HoloLens 2※)

※ HoloLens 2 は Microsoft 社の米国およびその他の国における商標または登録商標です。

2. 開発のコンセプトと目標値

2 ― 1 開発のコンセプト

従来、点検業務における記録媒体は紙であり、「点検合理化技術」においてはタブレット端末を用いる技術のみであった。しかし、タブレット端末は紙に比べて利便性は上がるが、手に持って作業をするのが負担となったり、ぶつけたり落としたりして故障するリスクもある。

そこで、今回MRデバイスを記録媒体に用いた点検業務において、タブレット端末と同等以上の作業性・安全性が確保できること、熟練作業員と同レベルの点検業務が非熟練者でも実施可能なことを開発のコンセプトとした。

2 ― 2 目標値

上記の開発コンセプトから下記の目標値を設定した。

(1)作業性・安全性

タブレット端末等のスマートデバイスと同等以上の作業性と安全性を有すること。

(2)作業時間

非熟練者でも熟練作業員と同等の時間で点検が実施できること。

3. 解決すべき技術課題

3 ― 1 点検箇所の可視化と入力手法の確立

(1)排水機場の点検箇所は一般的に200箇所以上あり全数把握には熟練を要する。その点検箇所を作業員が正確に把握できることが求められる。

(2)可視化された点検箇所における点検記録は、入力用のスマートデバイスを別途必要とせず、MRデバイスで完結することが必要である。

3 ― 2 点検作業の標準化とアシスト機能の拡充

(1)非熟練者でも熟練作業員と同等の作業レベルを実現するため、熟練作業員の作業を標準化および可視化して、作業員をアシストする機能が求められる。

(2)仮に点検作業中に故障等の問題が発生した場合において、非熟練者をアシストできる機能が求められる。

4. 開発技術

4 ― 1 3D 点群データと MR 技術の活用

4.1.1 3D点群データの活用による点検箇所の可視化

排水機場の膨大な点検箇所を可視化するため、まず排水機場全体を3Dスキャンし、3D点群データ化を行った(図3)。

次に、この仮想の点群データ上において、点検箇所に旗を立てることで、点検箇所の明確化を図った(図4)。

そして、この仮想上の点群データと現実の排水機場の座標を一致させ、MRデバイスを装着した作業員の視界に投影することで、現実空間に点検箇所の旗が可視化され、点検箇所を正確に把握することが可能となった(図5)。

図 3 排水機場 3D 点群データ
Fig. 3 3D Point Cloud Data of Drainage Pumping Station

図 4 3D 点群データ上の点検箇所の旗立て
Fig. 4 Flag Inspection Points Overlaid on 3D Point Cloud Data

図 5 作業員の視界に可視化された点検箇所
Fig. 5 Inspection Points Visible to Workers

4.1.2 MRデバイスによる空間入力の実現

作業員が可視化された点検箇所における点検結果を記録するために、MRデバイスの空間認識を活かした入力手法を確立した。具体的には、MRデバイスに表示された点検箇所の旗を作業員がタッチすることで、点検記録表を空間上に表示させ、記録欄にタッチすることで空間入力する手法である(図6)。

この手法を確立したことにより、タブレット端末と比較して故障リスクが低減され、手の濡れや汚れによる入力不具合も解消されるため作業性が向上した。また、ハンズフリーでの点検を可能としたことで、梯子や階段の昇降等、作業時の安全性も向上できた(図7)。

図 6 点検記録の空間入力
Fig. 6 Spatial Input of Inspection Log

図 7 点検中の梯子昇降状況
Fig. 7 Conditions While Climbing and Descending a Ladder During Inspection

4 ― 2 点検アシスト機能の拡充

4.2.1 点検手順のアシスト

熟練作業員の効率的な点検作業を非熟練者でも実現可能とするため、熟練作業員の点検手順を調査した。その結果を踏まえ、熟練作業員の順序で点検できるよう、次の点検箇所の旗の色で区別して視認できるようにした(図8)。

これにより、非熟練者でも旗の色に従い順番に作業を行うことで、点検順序に迷うことなく、また、点検漏れをすることなく、熟練作業員と同等の時間で効率良く点検作業を実施することが可能となった。

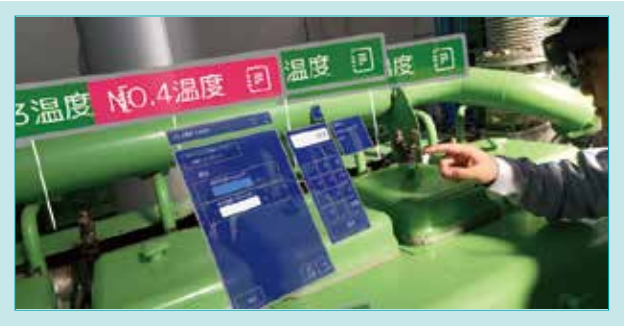


図 8 点検順序のアシスト表示
Fig. 8 Assistance Display for the Inspection Sequence

4.2.2 リモートアシスト機能

点検現場で故障等が発生した際、非熟練者が対応に迷ったときにサポートできるように、MRデバイスを用いて遠隔地の技術者からサポートを受けられる仕組みを構築した。作業員がMRデバイスで撮影した現場の映像を遠隔地の技術者がリアルタイムで確認し、状況を踏まえて必要な資料を作業員のMRデバイスに表示することができ、的確な指示を可能とすることで、作業員のサポートの拡充を図った(図9)。

図 9 リモートアシスト機能
Fig. 9 Remote Assist Function

5. おわりに

本技術は国土交通省発注の「点検合理化技術」向けとして開発を行い、年間729時間の点検において274.5時間、約37%の時間削減を実現した(表1)。今回開発した頭部装着型MRデバイスを用いた点検支援技術は、全国の公共施設のほか、民間施設の点検のみならず、建設、製造現場でも活用可能と思われる。今後は様々な分野における業務効率化やノウハウ伝承に貢献していきたい。

表 1 点検合理化技術における時間削減効果 (年間)
Table 1 Time Reduction Effect of Inspection Rationalization Technology

項目	単位	点検・記録	書類作成	報告・登録	合計
導入前	時間	432	288	9	729
導入後	時間	405	45	4.5	454.5
導入効果	時間	▲27	▲243	▲4.5	▲274.5

SDGs のターゲットへの貢献

4.4 若者・成人の技術的・職業的スキルの向上　点検時における若手作業員・非熟練者の育成に貢献
8.2 イノベーションを通じた生産性の向上　従来の点検に比べ約37%時間削減
9.1 質の高い持続可能かつ強靭なインフラの開発　排水機場の設備保全に貢献

参考文献
1) 気象庁 気候変動監視レポート2023
https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/2023/pdf/ccmr2023_all.pdf、P59(参照日 2024-09-09)
2) 国土交通省 社会資本整備審議会河川分科会河川機械設備小委員会(第1回目) 資料3「河川機械設備における現状と課題」
https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001396613.pdf、P1(参照日 2024-09-09)

TMP予測モデルを活用したMBR運転制御技術の開発

Development of the MBR Operating System with a TMP Prediction Model

水環境研究開発第二部
Kubota Membrane USA Corporation

膜分離活性汚泥法(MBR)は、処理水質に優れ、設置面積が小さいという特長を持つ排水処理方式の一つである。高い固液分離性能から排水再利用に適した技術であるが、さらなる普及には膜洗浄動力に係るエネルギーとコストの削減が課題となる。膜モジュール・ユニットの高集積化などのハード面での改良に加え、クボタでは膜洗浄風量制御の開発を進めてきた。本稿では膜状態診断を行う自動更新型機械学習モデルによる膜洗浄風量制御の取り組みを紹介する。既設システムへの導入も容易な形態として、エッジAIを採用した本開発システムにより、安定運転を維持しながら従来機比20%以上の膜洗浄風量削減を実現した。

【キーワード】
膜分離活性汚泥法、省エネ、機械学習、TMP予測、エッジAI

Membrane Bio-Reactor (MBR) is a wastewater treatment process which features superior effluent quality and a small footprint. Although it is a technology used for wastewater reuse due to its high solid-liquid separation performance, the reduction of energy and costs related to membrane scouring power is a challenge needing further discussion. In addition to hardware improvements, such as high integration of membrane modules and units, Kubota has developed a membrane scouring airflow control. This paper introduces our approach to membrane scouring airflow control using an automatically updated machine learning model that diagnoses membrane conditions. This developed system uses edge AI and can be easily introduced into existing systems, achieving more than 20% reduction in membrane scouring airflow compared to conventional models, with stable operating performance.

【Key Word】
MBR, Energy Saving, Machine Learning, TMP Prediction, Edge AI

関連するSDGs

1. はじめに

膜分離活性汚泥法(Membrane Bio-Reactor以下、MBR)は、生物処理と膜ろ過処理を組合せた排水処理技術である。省スペースで、再利用に適した清澄な処理水が得られる点に特長があり、国内外の工場排水・下水処理施設で採用されている。

MBR用膜装置の世界市場は約560億円(2021年実績)である。排水規制の強化や排水再利用ニーズの増加を受け、今後も6～7%/年程度(既設更新含む)で規模を拡大し、2030年には1000億円超に達すると見込まれている。[1)]

高い固液分離性能や省スペース性能の一方で、MBRではろ過運転を継続すると膜面に汚れが蓄積し、膜の目詰まり(ファウリング)が進行する。ファウリングの進行によって、膜間差圧(Trans Membrane Pressure以下、TMP)が上昇するとろ過動力が増大し、深刻な場合は必要なろ過能力が失われる。そのため、防汚・洗浄として常時膜洗浄ブロワの送風による物理洗浄と、TMP上昇後に次亜塩素酸ナトリウムや酸などによる薬液洗浄(薬洗)を行っている。従来の標準活性汚泥法と比較すると、膜洗浄にかかる動力・コストが大きく、MBRのさらなる普及に向けて洗浄の効率化やランニングコスト低減が長年の課題である。

一方、当初設計よりも高いFlux(膜面積あたり透過流束)運転や高濃度の汚濁物質の流入といった、膜ろ過にとって負荷の高い条件では、ファウリング傾向が強まる。膜への汚泥付着防止に必要な膜洗浄風量が増加するため、風量が不足した状態で膜ろ過運転を継続してしまうと、急激にTMPが上昇するケースもある。ファウリングの抑制および洗浄には、流入変動に強く、安定的な運転管理を実現する技術要素も求められる。

膜装置の高集積化などハード技術の改良を進めてきたが、動力・コストの中でも大きな比重を占める膜洗浄風量の積極的な運転制御は限定的で、余裕を持たせた一定値で運転されているケースが多い。近年の排水処理プロセスでの温室効果ガス(GHG)削減のニーズからも、さらなる省エネルギー化を実現するスマート運転制御技術が求められており、本開発では、安定運転を維持しながら適切な膜洗浄風量で運転するMBR運転制御技術の開発に取組んだ。

2. 開発のコンセプトと目標値

2 ー 1 開発のコンセプト

本開発は、クボタで過去に取り組んだTMP長期予測モデルの開発実績を基に進めた。TMP長期予測の開発では、機械学習モデルにより、5ー7日先のTMPを精度よく予測し、薬洗時期の予測から薬剤発注や人員計画の精度向上といった運転支援への活用が可能であることがわかった。

ここで培われた機械学習モデル技術の活用により、ロバスト性の高いMBR自動運転制御(①流入原水の水質・水量の変動等に対応する高い処理安定性②ヒトの判断や調整が不要なMBR運転管理の自動化・省人化)の実現をコンセプトとした。また本運転制御システムは既設MBRプラントへも導入容易な形態を目指し、エッジAIを採用した(図1)。機械学習プログラムを搭載したエッジPCをイーサネットにより制御装置(PLC)に接続し、センサ値読み込みと膜洗浄風量制御値の書き込みを行う。

MBRで使われるセンサ特性や、ろ過運転サイクル、データの変動パターンを考慮し、10秒毎のデータ収集、10分毎のモデル推論(診断・予測)および膜洗浄風量制御値の演算、24時間毎のモデル更新機能を有する。

既設PLCの改造を最小限にとどめ、PLC演算だけでは処理が難しかった過去の大量データをPCによって活用するシステムであり、市場への投入が容易な製品形態とした。

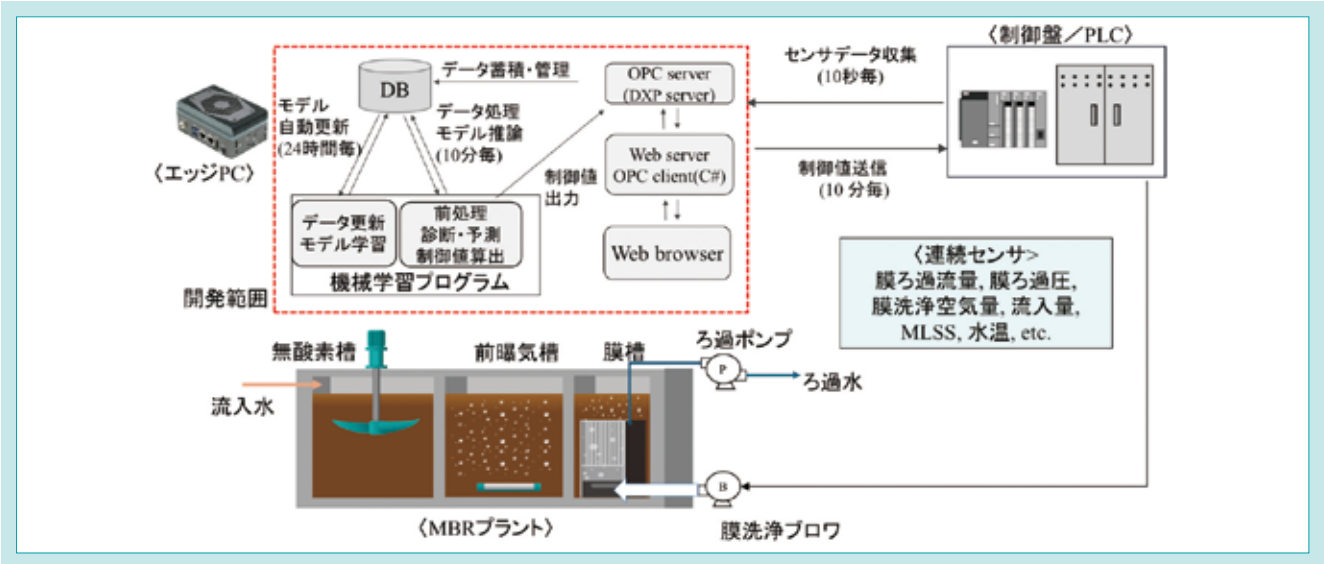


図 1 TMP 予測モデルを活用した MBR 運転制御技術のシステム構成
Fig. 1 Configuration of the MBR Operating System with a TMP Prediction Model

2 ー 2 目標値

活性汚泥浮遊物質(MLSS)、Flux等の種々の施設運転条件により、風量削減効果は変動するが、従来機の定格風量を基準に1)標準的な流量条件(4.2.1)と、2)高負荷流量条件(4.2.2、4.3)での、膜洗浄風量削減効果と処理水量当たり消費電力量の削減効果について以下の目標値を定めた。

1)日平均Flux0.6m/d 条件… 膜洗浄風量20%削減
2)日平均Flux0.87m/d条件…処理水量当たり消費電力15%削減

膜面積当りの洗浄風量(SAD_m)や膜ろ過水量当りの洗浄風量(SAD_p)の指標については実験機の膜モジュールやユニットの配置条件の影響をうけるため、参考にとどめた。

3. 解決すべき技術課題

クボタでは、これまで膜洗浄風量を制御する取り組みとして、①直近数時間の⊿TMPを閾値判定し風量増減するフィードバック制御[2]、②TMP予測機能を有する省エネMBR制御[3]、③MLSS濃度とFluxからの回帰式で膜洗浄風量を算出するルールベース制御の技術開発を進めてきた(表1)。これらの取り組みにも制御応答性の問題や流入水質・水量とそれに起因する汚泥性状への追従性の問題が残されている。従来の制御技術の利点を統合し、「流入原水および汚泥性状の変化へ追従可能な自動更新型の診断モデルによる膜洗浄風量制御システム」を開発する。

表 1　従来の膜洗浄風量制御の特長と問題点
Table 1 Features and Problems of Conventional Membrane Scouring Airflow Control

	特長	問題点
① フィードバック制御	圧力挙動に基づく必要最小風量探索 数時間ごとに演算した基準値 TMP と現在膜 TMP の差分⊿TMP について、風量増加・減少判定用閾値と比較判定しながら風量目標値を増減し、最適な風量を探索するフィードバック制御	差圧上昇に対する制御応答遅れ
② 予測制御	TMP 予測モデルによる予防的な制御 機械学習モデルによる TMP 予測値と TMP 目標曲線を比較し、大小関係とその偏差に応じて膜洗浄風量を増減する PI 制御。予測により、膜ファウリングの進行に対し、予防的に風量増加対応が可能	モデルの劣化
③ ルールベース制御	制御値算出の即応性 実験で得られたパラメータを利用した、MLSS, Flux による重回帰式で膜洗浄風量を算出。流量条件変動時でも制御演算における即応性が高い	汚泥性状変化に追従できない

4. 開発技術

4 － 1 膜洗浄風量制御ロジック

膜洗浄風量制御の基本方針は、従来の①フィードバック制御による必要最小風量探索を、②膜状態診断モデルの診断結果に基づき実施し、③ルールベースによる風量制御範囲策定を組合わせることとした。ルールベースの回帰式を基準として膜洗浄風量の制御範囲を規定することで、流量条件変動時への対応性および安全性を確保し、機械学習モデルの分類結果に応じて風量を増減する方法で、相補的に必要最小風量を探索する仕組みとした。

4.1.1フィードバック制御による必要最小風量探索

必要最小風量を膜面への固形分の付着・堆積を防止するのに必要な最小限の膜洗浄風量と定義する。それ以下の風量では膜洗浄能力が低下し、膜面に顕著に汚泥が付着・堆積し、TMPが急激に上昇するものとみなす。

フィードバック制御では直近のTMP上昇量もしくは上昇速度の閾値判定による風量増減を行い、必要最小風量の探索を行ってきた(図2)。

しかし、従来の方法ではTMP上昇後に風量を増加させることになるなど応答性遅れの問題点があった。この問題を解決するために、PCにより大量データを活用した機械学習モデルを扱うことで、現時刻や直近の差圧変化の判定にとどまらず、将来のTMP予測の要素を内包した膜状態(TMP上昇雰囲気)の診断を行う。膜状態診断モデル(教師あり学習・多値分類モデル)では膜状態を[+]、[N]、[－]の3段階のラベルに分類し、その結果を膜洗浄風量増減操作へ反映することで、必要最小風量の探索を行う。([+]:風量増指示、[N]:風量維持指示、[－]:風量減指示)

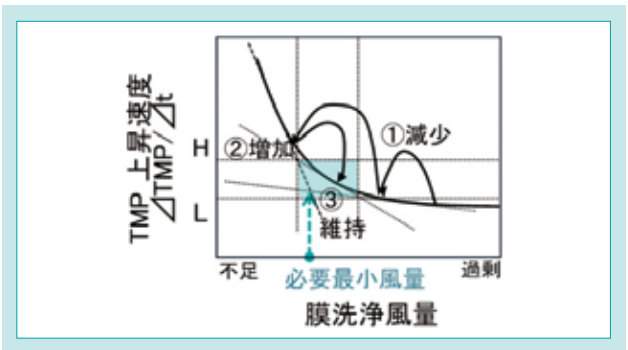


図 2 フィードバック制御による必要最小風量探索の概念
Fig. 2 The Concept of Exploring the Minimum Required Airflow Using Feedback Control

4.1.2 膜状態診断モデル

膜状態を診断する機械学習モデルの構築条件を表2に示す。目的変数となる、[＋]、[N]、[－]のラベルは、TMP曲線を安定期、差圧上昇前期、差圧上昇後期に分類した際のTMP変化速度(dTMP/dt)、もしくは膜ろ過抵抗(R)の変化速度(dR/dt)の閾値条件に基づく。さらに、直近、長期トレンド、将来予測の複数の時間幅での変化速度に適用・組合せることでラベルを定義する(図3)。特徴量は、MBRプラントで測定される連続センサとしては最小規模に近い、膜ろ過圧、膜ろ過流量、膜洗浄風量、水温を必須項目として構成する。MLSSや流入水量などモデル精度の向上につながるセンサ類についてはオプションとして、モデル構築条件に設定する。

また、モデルの劣化防止のため、Just in Time(以下、JIT)の考え方を用いて、自動更新による最適化を図る。JITモデルでは、直近の運転における特徴量との類似度が高いデータを、既存データベースの中からトレーニングデータとして選択し、学習を行う(図4)。分類器と特徴量Xの組合せからなるモデル構築条件候補を複数設定し、ハイパーパラメータを最適化したのち、学習用データと異なる評価用データの正解率を比較し、正解率が最も高いモデルを採用する。

表 2　機械学習モデル構築条件の概要
Table 2 Overview of Machine Learning Model Construction Conditions

目的変数 (y)	ラベル([＋], [N], [－]): 様々な時間幅(将来予測を含む)の、 TMP もしくは膜ろ過抵抗の変化速度(dR/dt) の閾値条件によって分類。 $\frac{dR}{dt} = \frac{\Delta \frac{TMP}{\mu J}}{\Delta t}$
特徴量候補 (X)	【必須】 膜ろ過圧, 膜ろ過流量, 膜洗浄風量, 水温 【オプション】 流入量, MLSS, DO, 粘度, COD, etc. ※各センサ値を前処理したもの

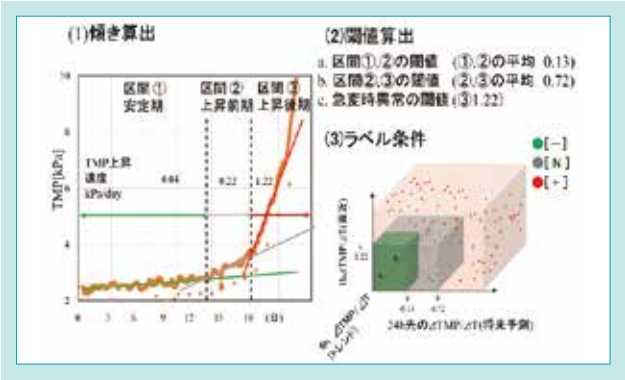


図 3　ラベル条件の設定方法
Fig. 3 Setting Method of the Label Condition

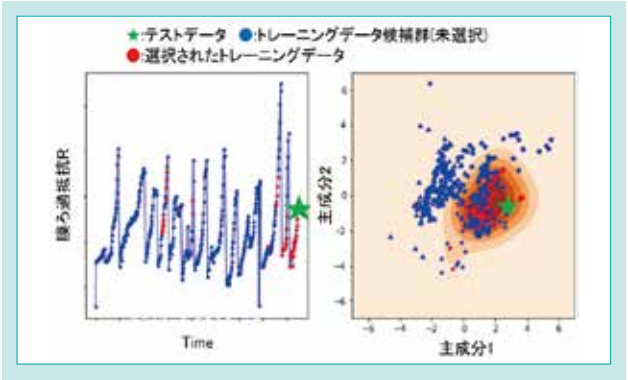


図 4　Just in Time によるトレーニングデータ選択
Fig. 4 Training Data Selection by the Just-in-time Method

4.1.3 ルールベースによる風量制御範囲の策定

従来のルールベース制御では事前実験としてMLSSとFlux、風量条件を変更することで、TMP変動速度の変曲点を算出し、変曲点における風量を必要最小風量として、MLSSとFluxから規定される回帰式(1)に表現する。

$$Q_a = \left(1 + (FL - FL_b) \times K_{a,Fl}\right) \times \left(1 + (ML - ML_b) \times K_{a,Ml} \div 1000\right) \times Q_{a,b} \quad (1)$$

FL:Flux　FL_b:Flux 基準　$K_{a,Fl}$:Flux 係数
ML:MLSS　ML_b:MLSS 基準　$K_{a,Ml}$:MLSS 係数

事前実験において得られた回帰式で表現される必要最小風量は概算値であり、膜面状況や汚泥性状によって値は常に変化する。またMLSSセンサの精度なども考慮すると、真の必要最小風量からは乖離(調整しろ)が存在する。一方で診断モデルによる相対的な風量増減による最適値探索に比べ、測定値に基づき即時に風量制御値を算出可能である。

この点を考慮し、回帰式算出値に基づき風量制御の推奨範囲を策定し、範囲内で診断モデルの結果に基づき風量の増減を行うこととした。

4 ― 2 開発技術の適用事例

開発制御システムの性能評価は国内外の実下水処理場内に設置したテストプラントにて実証した。テストプラントは、いずれも共通の無酸素槽(A: Anoxic tank)、好気槽(O: Oxic tank)と、後段の複数の膜槽からなる約80 m^3のAO-MBRの構成である。膜槽ごと、開発系と対照系(設計標準の一定風量運転、もしくは従来の風量制御方式)との比較試験を行うこ

とで、膜洗浄風量削減効果を評価した。安定運転性能の両立という観点で、対照系と同等の薬洗間隔であること、顕著な膜面汚れが起きないことを品質目標とし、薬洗までの運転間隔および、膜モジュールの重量測定もしくは目視観察により汚泥付着量を確認した。また、本検証ではクボタで販売する標準的な平板タイプ(RWシリーズ)と高Flux対応の高集積カートリッジタイプ(SPシリーズ)の2タイプそれぞれを使用し、種々のFlux、MLSS領域でのデータ取得を行った。

4.2.1 一定流量運転(RWシリーズ)

国内に設置したテストプラントにて、RW 100膜ユニット(膜面積145 m^2、定格風量0.7 m^3/min)を用いて、MLSS 9500 mg/L、日平均Flux 0.6 m/dの一定流量条件で、実下水を対象に、本開発技術と従来の一定風量運転を対照系とする比較試験を行った(図5)。本試験では、回帰式による制御範囲の規定をせず、定格風量の70～100 %を開発系の風量制御範囲とした。

実験中の制御挙動として、開発系ではTMPの安定期には風量下限値で運転を行い、TMP の上昇に追従して風量が増加する傾向を示した。2022年3～4月の1ヶ月の運転期間を通じた開発系の膜洗浄風量は 0.54 m^3/min (定格風量比22.9 %減、SADm 0.22 $m^3/(m^2 \cdot hr)$、SADp 8.9 m^3/m^3)であり、風量削減目標値20%を達成した。

TMP上昇までの運転日数は対照系で15.5日、開発系で16日と大きな差は見られなかった。試験終了後に膜モジュールを吊り上げて汚泥付着状況を目視で点検したところ、膜モジュール下部に若干の汚泥付着が認められたが、対照系と開発系の付着度合いは同程度であることから、風量削減を適切に実現したことを確認した。

4.2.2 高負荷変動流量運転(SPシリーズ)

クボタ北米水環境研究所にて、SP270膜ユニット(膜面積270m^2、定格風量0.9 m^3/min)を用いて、MLSS 12000 mg/L、日平均Flux 0.87 m/d(時間最大1.2 m/d)の高負荷変動流量条件で、実下水を対象に本開発技術とルールベース制御を対照系とする比較試験を行った(図6)。本試験は高Flux条件のため、ルールベース制御では、定格風量以上で運転することになる。また、1日の中で1～2時間のろ過休止時間(ろ過休止中にも膜洗浄ブロワを運転)を設けたほか、低濃度のメンテナンス薬洗と高濃度のリカバリ薬洗からなる自動薬洗を行っている。開発系では、ルールベース制御範囲の−20～+5%を風量制御範囲とした。

2022年7～8月の1ヶ月の運転ののち、対照系・開発系どちらにも顕著な膜面汚れは確認されず、膜モジュール重量測定でも差は見られなかった。自動薬洗までの平均運転日数は対照系で5.2日、開発制御系で7.8日であった。安定的な運転が実現できたうえで、ルールベース制御の対照系の膜洗浄風量1.02 m^3/minに対し、開発系は膜洗浄風量 0.88 m^3/min((対照系比13.4%減、SADm 0.20 $m^3/((m^2 \cdot hr))$ 、SADp 5.4 m^3/m^3))と、風量削減効果も確認することができた。

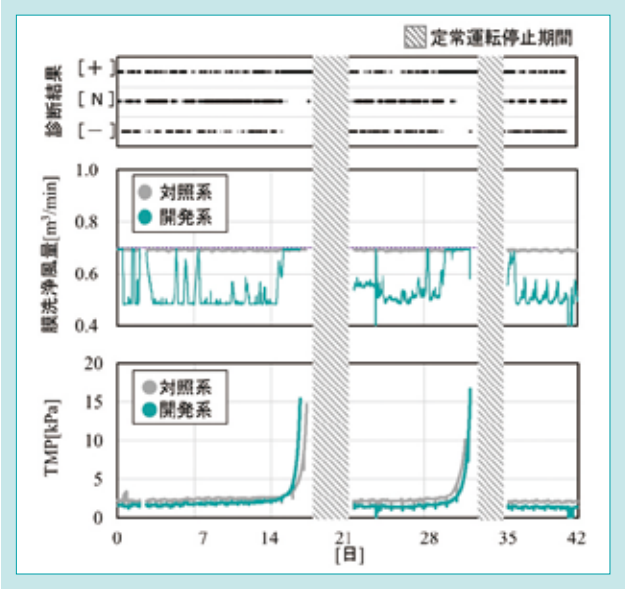


図 5 一定 Flux 運転における TMP、膜洗浄風量、モデル診断
Fig. 5 TMP, MBR Airflow and Diagnosis in Constant Flux Operation

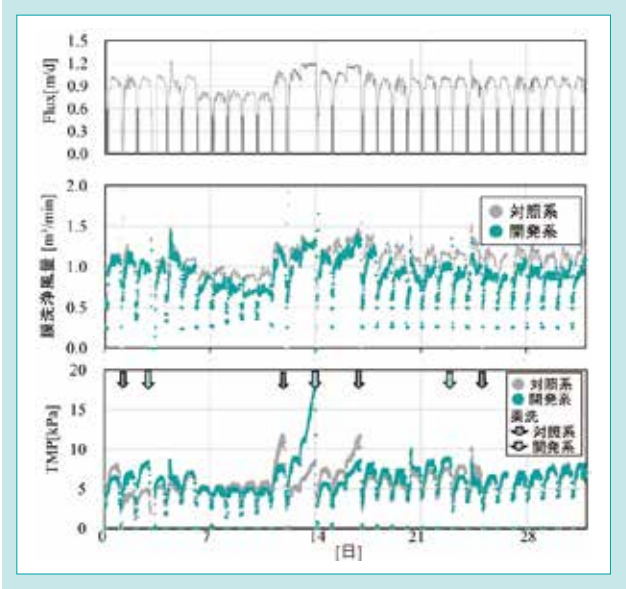


図 6 高負荷変動流量運転における TMP、膜洗浄風量、Flux
Fig. 6 TMP, MBR Airflow and Flux in High Loading and Variable Flow Rate Operation

4 ー 3 省エネルギー運転への貢献

本開発の膜洗浄風量制御による試験結果(4.2.2)に基づく、処理水量当たりの消費電力量の試算条件を表3に、試算結果を図7に示す。

従来MBRの処理水量当たり消費電力量0.293 kWh/m^3に対し、0.242 kWh/m^3 (17.5%減)と目標値15%を超える省エネルギー効果があることを確認した。本開発技術が高Fluxの変動流量条件へも適用可能であることも確認できた。

本開発製品により、導入検討が盛んである海外下水市場でのMBR導入に向けた訴求力の強化が見込まれる。また、アフターサービスとして本製品を追加販売することで、既存施設の省エネ性能アップをお客様に提供することが可能になる。これによりアフターサービス事業も強化することで、事業拡大に貢献することが期待できる。

表 3　消費電力量試算条件
Table 3 Conditions for the Calculation of Energy

項目	内容	
処理方式	初沈＋循環式膜分離活性汚泥法	
電力試算対象機器	初沈掻寄機、微細目スクリーン、無酸素槽撹拌機、硝化液循環ポンプ、余剰汚泥ポンプ、送風機(膜洗浄、補助散気)	
水量条件	日最大水量　10000 m^3/d	
水質条件(mg/L)	反応槽流入水 BOD:120, SS: 100, T-N:31.5 処理水 BOD:1, SS:1 以下, T-N:10	
Flux 膜ユニット	従来: 0.6 m/d　SP600 × 28 台 実証: 0.87 m/d　SP600 × 20 台	
送風機動力算出条件	膜洗浄風量	定格: 2 m^3/min-ユニット 実証: 1.96 m^3/min-ユニット
	補助散気風量	水質・水量条件から算出される理論必要酸素量からの算出(膜洗浄風量不足分)
	送風機断熱効率	65%
	水深	5.0 m

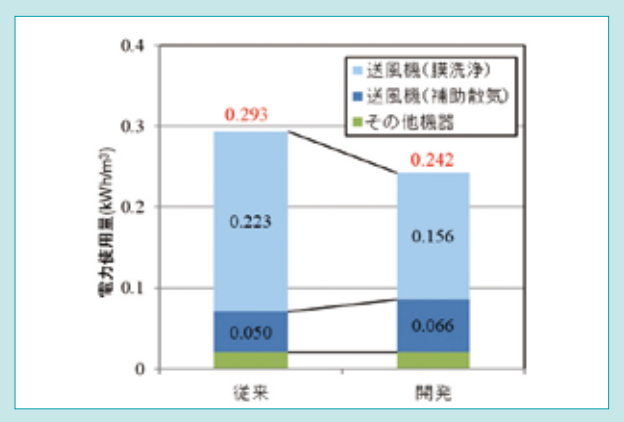


図 7　電力試算結果
Fig. 7 Results of the Calculation of Energy

5. おわりに

膜洗浄風量制御に用いる膜状態診断モデルを開発し、エッジAIの形態で制御システムを構築した。国内外のテストプラントにおいて、従来の一定運転制御もしくはルールベース制御との比較試験を実施し、安定運転を維持しながら膜洗浄風量の削減を確認した。流入負荷状況や既設ブロワ性能等の制約から風量削減実績にばらつきがあるが、種々の条件下(膜ユニットタイプRW/SP、MLSS 8000-12000 mg/L、Flux 0.4-0.87m/d)で、風量20-35%(従来機比)の削減が可能であることを確認した。

現在、MBRの普及と既存システムの最適化にむけ、欧州の工場内排水処理施設での導入試験を実施中である。また、北米の下水処理施設への導入に向けた活動も推進中である。今後は、新規センシング技術の確立によるモデル精度の向上と、AIと運転員間のインタラクティブなユーザエクスペリエンス機能の開発も併せて行い、膜洗浄風量にとどまらないMBRプロセス全体のスマート制御を実現することで、世界的なGHG削減のニーズ、水インフラの技術職員の不足といった水環境事業を取り巻く問題の解決に貢献していく。

SDGs のターゲットへの貢献

6.3　未処理排水の再生利用等による水質の改善　　MBR適用可能な制御技術の開発により、適正な排水処理に貢献
7.3　エネルギー効率の改善　　MBRの適正運転を行う制御技術の開発により、排水処理によるエネルギー削減に貢献
9.4　環境に配慮した技術導入によるインフラ改良　　スマート制御技術の開発により、排水処理の運転安定化に貢献

参考文献
1) 富士経済: 2021年版 水資源関連市場の現状と将来展望、2021
2) 徳島 幹治: 省エネ型MBR技術の開発、: 膜37(5)、2012
3) 省エネルギー化を実現するスマート MBR(SCRUM)の開発、クボタ技報No 51、2018

Introduction of Kubota Research and Development Europe (KRDE)

KRDE (Kubota Research and Development Europe) の紹介

Kubota Research and Development Europe S.A.S.

Related SDGs

1. Introduction

After the launch of the M7 tractor in the factory of Kubota Farm Machinery Europe (KFM) in 2015, Kubota established an engineering department in Europe to support the development and maintenance of the M7 tractors. Farm Machinery Engineering Europe (FMEE) first started its operation in 2016 in the premises of Kubota Europe, then Kubota Research and Development Europe SAS (KRDE) was established in 2020, as a subsidiary of Kubota Holdings Europe, after the completion of the new European research and development site in Crépy-en-Valois, France (Fig. 1).

KRDE's main scope is the development of the M7 range for all Kubota markets worldwide, but also the development and integration of the Precision Farming features (ISOBUS, TIM...), and the development of an OEM front loader range for the M-series tractors sold in the European market. KRDE also supports the local development of specific sales features for the European market on M6 tractors.

The local engineers and technicians, representing 90% of KRDE's total workforce, are operating in Project Management, Engineering, Validation and Systems Controls in a brand new R&D Site utilizing state of the art equipment for the design and the evaluation of the tractors, such as CAD, virtual reality rooms, assembly workshop, test benches, test courses...

KRDE works in close cooperation with the Tractor Engineering Department II to ensure that M7 keeps both the Kubota tractors attributes and a common family look and feel with the M6 tractors. Additionally, a close cooperation with the Kverneland Group Mechatronics team supports the goal of developing agricultural tractors that are highly automated, easily customizable, connected, and strongly interfaced with the implements.

Summary of KRDE

- Name: Kubota Research and Development Europe S.A.S.
- Establishment: July 2020
- Employees: 100 full-time staff, of which 10 expats
- Total site area: 30 hectares
- Total building area: 10700 m²
- Location : 80 Rue du Bois de Tillet, 60800 Crépy-en-Valois, France

Fig. 1 KRDE Main Office
図1 KRDE 社屋

2. Overview of KRDE's Test Center

KRDE's major physical asset is the Test Center, which consists of 3 main facilities: Test Benches, Test Tracks and Agricultural Field. Additionally, the site is equipped with a fuel station, washing areas and garages to store tractors and agricultural implements.

The activity of the Test Center is mainly for internal KRDE purposes, to support the M7 development activities. However, KRDE also offers to the other Kubota Group entities the possibility to perform their testing activities in the Test Center.

Overview

- Agricultural Field area: 10 hectares
- Test tracks: 43000m² including a 1.8km long track
- Test Bench building area: 2480 m²

2-1 Test Benches

KRDE has 9 benches to perform mechanical, performance tests or environmental tests.

Mechanical benches: 3-point hitch, 4-poster, tilt angle, multi-axis simulation table (MAST), platform for mechanical components test, and dynamometrics wheels.

Performance benches: PTO bench, 5-axis driveline bench.

Environment: Cold cell.

Some of them are more precisely described in the next part.

2-2 Test Tracks

The test track area consists of a 1,6 km long and 12 m wide main flat track having an "8" shape. On one side, 4 slopes (6%, 12%, 18%, 36%) for dynamic or static tests are present.

In the center, a perfectly flat surface is used as the homologation area, to perform steering and braking tests. A portion of the inner track can be covered with water to execute wet braking tests.

Along the straight line of the main track are located 2 rough road tracks to measure whole-body vibrations according to ISO 5008.

Finally, a circle rough road test (Merry Go round) can be used for small tractors and turf machinery (Fig. 2).

Fig. 2 KRDE Test Track
図 2 KRDE テストコース

2-3 Agricultural Field

The 10-hectare agricultural field is used for actual operations with the tractors and agricultural implements (Fig. 3). A dedicated area with sand, soil and piles of stones is used for front loader operations.

The field test activities can also be performed in the surrounding of KRDE, through a partnership with local farmers.

Fig. 3 M7 Tractor Operating in KRDE's Field
図 3 様々な M7 の試験が可能な KRDE 圃場

3. Details of 3 Test Benches

KRDE has invested in cutting edge testing technologies to ensure product's durability and comfort. The test benches are also a driver of the development efficiency, through their repeatability, accurate reproduction of the real usage of the machines, and their ability to work on single components or sub-assemblies instead of a complete machine.

3-1 Driveline Bench

The 5-axis driveline bench is dedicated to tractors (Fig. 4). It is equipped with 5 dynos (4 for the wheels' hubs and 1 for the PTO) that have been designed to Kubota's specification with a very low inertia in order to reproduce perfectly the wheels' torques measured in real conditions. The bench also has a climatic conditioning (temperature control, air flow and solar simulation).

The driveline bench can be used not only for endurance tests on powertrains, but also for the development and characterization of the transmission controls, or to check the performances of the cooling systems of the engine or in the cabin.

By accurately reproducing the measures collected on the test track or in the field, the driveline bench ensures a better repeatability of the tests during all the development steps.

Fig. 4 5-axis Driveline Bench
図 4 5軸駆動系テストベンチ

3-2 Multi-axis Simulation Table

The Multi-Axis Simulation Table (MAST), unique in Kubota, is capable of performing vibratory tests on machines or sub-assemblies up to 2 tons (Fig.5). The table is capable of moving in the 3 degrees (x,y,z) of freedom.

For the tractor development, the MAST is used to test components or sub-assemblies independently by reproducing accurately the excitation measured on the complete tractor, either in real conditions or on the 4-poster bench.

The MAST provides to the R&D engineers early results on their design in terms of vibrations and endurance. Associated with a Fatigue Simulation Software, the reliability of the assemblies can be evaluated for their all life-time to optimize the products' quality and cost.

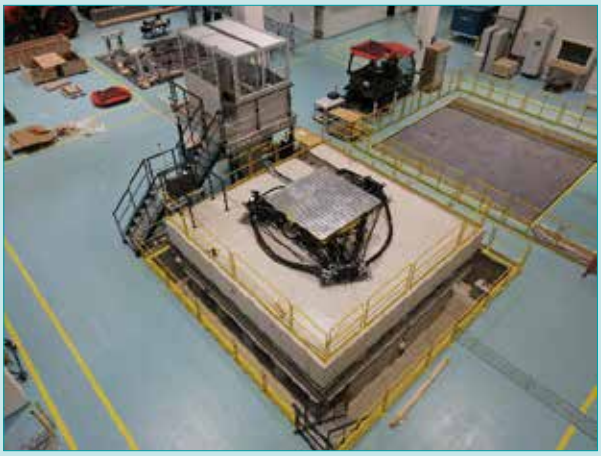


Fig. 5 MAST: Multi-axis Simulation Table
図 5 多軸可変式振動シミュレーション装置

3-3 Mechanical Components Test Platform

The Mechanical Components Test (MCT) platform is used to perform mechanical strength and structural endurance tests. The primary goal of this bench is to perform FOPS (Falling Object Protection Structure) and ROPS (Roll Over Protection Structure) tests for the internal pre-homologation of our cabins.

The MCT platform is also used on complete machine bodies. The results are used by the R&D engineers in KRDE and the Analysis Center in KGIT (Kubota Global Institute of Technology) to develop accurate models of the structures, to improve the simulation and achieve the right design at the first time, to prevent from later test failures or molds modification cost.

As for the Driveline and MAST benches, the MCT platform is a key driver for KRDE's validation process efficiency by bridging the actual measurements on physical tractors parts and more robust simulation results.

Fig. 6 MCT Platform
図 6 安全フレーム試験装置

4. Conclusion

As one of the 6 Global Sites of Kubota's R&D System, KRDE is acting both globally, as the engineering base for the M7 tractor, and locally to support the European Business Units for Tractors and Implements.

KRDE cooperates with the Engineering teams in Japan and Europe to develop innovative features.

To maximize the benefits of the cutting edge equipment, KRDE offers test services to the other Kubota entities.

Contribution to SDG Targets

8.2 Improvement in productivity through innovation　Accelerate development of precision farming and automation features

8.5 Achieving productive employment and rewarding work　Contribute to employee's satisfaction and loyalty

9.5 Promoting scientific research and innovation　Develop efficient development processes

17.16 Building Global Partnerships　Cooperate with Japanese and European bases, develop global test services for all Kubota machinery and regions.

状態基準保全と安定稼働を実現する遠心脱水機の診断機能

Diagnostic Functions of a Centrifugal Dewatering Machine to Realize Condition-based Maintenance and Stable Operation

1. はじめに

下水道の普及にともなって下水汚泥が増加することにより、下水汚泥処理は大きな課題となっており、汚泥減量のための重要な設備である遠心脱水機(図1)には安定した稼働が求められる。高速回転機器である遠心脱水機は時間基準による定期的な工場整備が一般的であり整備費用は比較的高額となる一方、限られた予算を有効活用するため劣化状態に即した状態基準保全への移行ニーズは高い。

このたび、運転データに基づいて遠心脱水機を診断する機能(以下、本機能)を開発した。日々の運転データに基づく診断により、状態基準保全と安定稼働の実現を目指す。

図1 遠心脱水機
Fig. 1 Centrifugal Dewatering Machine

2. 製品の概要

図2に遠心脱水機の診断手順を示す。脱水機本体には運転データを取得するための振動センサーを取付け、制御盤の中に設置した計測設備で計測し、独自の診断アルゴリズムを用いて主要部位毎のデータ分析を行う。診断結果は部位毎に現在の健全度と、修繕対応が必要となる時期を予測して表示する。5段階の健全度の定義は国交省「下水道事業のストックマネジメント実施時に関するガイドライン(2015年版)」に準拠している。

診断結果はクラウドサーバに保存され、ユーザーはパソコンからクラウドサーバにアクセスして結果を閲覧することができる。日々の運転データ(時系列データ)に基づく傾向管理を行い、健全度を評価することで、状態に応じた修繕・整備が可能となる。

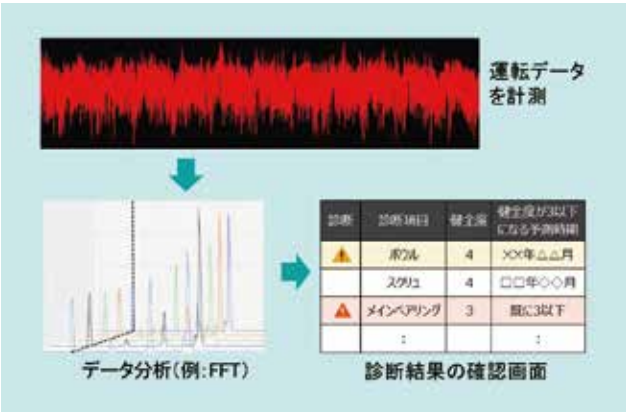


図 2 遠心脱水機の診断手順
Fig. 2 Diagnostic Procedure for the Centrifugal Dewatering Machine

3. おわりに

本機能は、クボタ独自の水環境ICTソリューションシステムであるKSIS (KUBOTA Smart Infrastructure System)の一部である。人口減少に伴う財政難や人手不足が顕在化する中で、状態基準保全による予算の有効活用と設備の安定稼働の両立への期待がますます高まっていくと考える。今後も開発を進めこれらの期待に応えつつ、快適かつ持続可能な社会の実現に寄与していく所存である。

問合せ先　〒104-8307
住所　東京都中央区京橋2丁目1番3号
会社名　株式会社クボタ　水循環プラント営業部
TEL　03-3245-3337

高圧消火設備用ポリエチレンパイプ【スーパータフポリHPPE-HF】

Polyethylene Pipe for High Pressure Fire Extinguishing Equipment

1. はじめに

クボタケミックスでは水道配水用途や建築設備用途向けにポリエチレン管・継手を製造販売しており、近年ではこれら製品を用いて消火設備やスプリンクラー設備用途にも市場展開を図っている。

今回新たに高層建築物(マンション、オフィスビル)や地下街等に設置される連結送水管の埋設部分(図1)で、最高使用圧力1.6MPaに適用可能な「高圧消火設備用ポリエチレンパイプ」をラインナップした。現状連結送水管には主に鋼管が使用されているが、腐食の懸念がないポリエチレン管への切替えが期待できる。

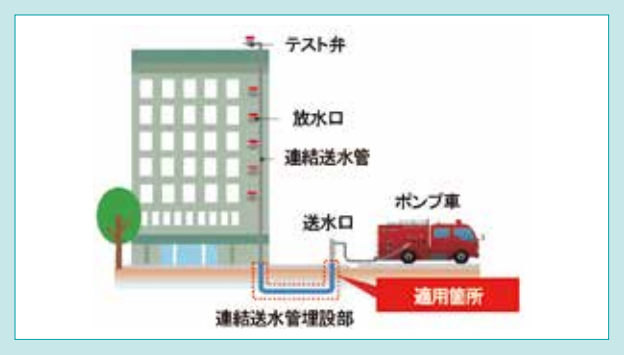


図 1 適用消火設備

Fig. 1 Applicable Fire Extinguishing Equipment

2. 製品の概要

高圧消火設備用ポリエチレンパイプは以下の特長を有する。

【優れた耐食性・耐酸性】

酸性土壌地盤や海岸地域の塩害においても優れた耐食性を維持できる。埋設時の防食・腐食対策が不要で更新頻度が少なくなるため、ライフサイクルコストの低減に寄与できる。

【高い耐震性能】

柔軟で伸びが大きい材料特性と、管と継手が組織的に一体化構造となる電気融着(Electro Fusion)接合により、地震時における地盤変位に対しても管路機能を損なうことなく追従できる。

【金属管と同等の損失水頭】

現在主に使用されている消火用硬質塩化ビニル外面被覆鋼管(STPG370-VS)と比較して同等の摩擦損失水頭を確保可能である。

図 2 製品ラインナップ

Fig. 2 Product Lineup

3. おわりに

クボタケミックスは樹脂管・継手のトップメーカとして、水道管路で培った技術をほかの用途への展開を図るとともに、更なる品揃えの拡充に引き続き取り組むことで、安心・安全な市民生活の確保に貢献していく所存である。

問合せ先　〒104-8307
住所　東京都中央区京橋2丁目1番3号
会社名　株式会社クボタケミックス　設備営業部
TEL　03-3245-3085

●

－クボタ技報－

KUBOTA TECHNICAL REPORT

No.57

●編集委員●

トラクタ技術企画部	梅本　英哉
収穫機技術部	田中　如一
精密機器技術部	田村　展洋
パイプシステム事業推進部	柴木　敦
滋賀工場	北川　雅之
産業機材事業推進部	小谷　正典

●事務局●

研究開発統括部	倉持　克史
	甲藤　智子

●

2025年1月印刷

2025年1月発行

（執筆者・編集委員の所属は2024年12月現在）

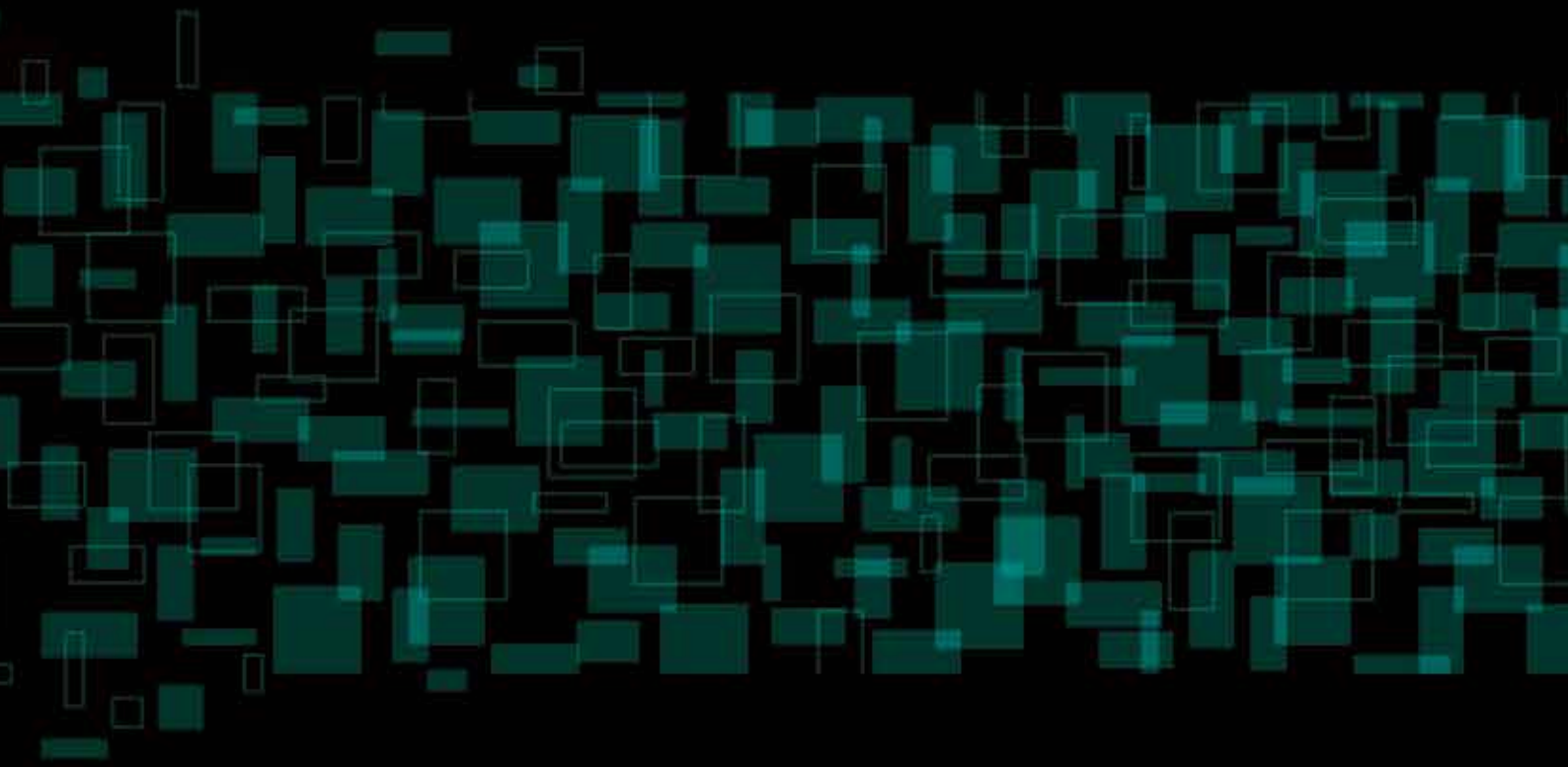
――――― 禁無断転載 ―――――

（非売品）

発行所　株式会社クボタ
グローバル技術研究所
研究開発統括部
〒590-0908　大阪府堺市堺区匠町1番地11
kbt_g.rd-techrep@kubota.com

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