

No. **51** ISSN 0916-8249
JANUARY 2018

For Earth, For Life
Kubota

クボタ技報

KUBOTA TECHNICAL REPORT

特集

ICTで次世代農業をリードするクボタ



ICTで次世代農業を リードするクボタ

クボタグループは、皆様と共に、
将来の新しい農業のあるべき姿を考え、
その実現に向けて技術開発に取り組んでいます。



M7トラクタ搭載
オートステア



直進キープ機能付田植機
EP8D-GS(8条)



アグリロボトラクタ
SL60A



特集論文・特集技術レポートで紹介する技術・製品



KSAS対応乾燥機
KRC40



ウインチ型パワーアシストスーツ
WIN-1



圃場水管理システム用
電動アクチュエータ

クボタ技報

No.51 2018年1月

目次

[特集]

ICTで次世代農業をリードするクボタ

巻頭言

未来の農業を描き、新しい価値を創造するクボタ 4

基調論文

クボタの次世代農業への取り組み 6

特集論文

M7トラクタ搭載オートステアの開発 14

直進キープ機能付田植機の開発 20

アグリロボトラクタの開発 26

KSAS 乾燥システムの開発 32

ウインチ型パワーアシストスーツ WIN-1 の開発 38

特集技術レポート

圃場水管理システム用電動アクチュエータの開発 44

一般論文

北米向け M5 シリーズトラクタの開発 48

北米向けゼロターンモア ZD シリーズの開発 54

北米向け CTL SVL95-2s の開発 60

エンジン HILS システムの開発 66

PRO688Q 粟収穫キットの開発 72

ミドルレンジ重量フィーダの開発 78

下水圧送管路における硫化水素腐食調査・診断技術の開発 84

高効率型二軸スクリーブレス脱水機の改良開発 90

省エネルギー化を実現するスマート MBR (SCRUM) の開発 96

都市ごみ焼却炉における NOx 低減技術の開発 102

技術レポート

大型コンパクト浄化槽 KTZ 型の開発 108

KSIS 導入事例のご紹介 110

紹介記事

プラント市場向け樹脂配管材の可能性とクボタケミックスの取り組み 112

KUBOTA TECHNICAL REPORT

No.51 JANUARY 2018

CONTENTS

[Feature Theme]

Kubota, a Leading Company in Next-generation Farming with ICT

Prefatory Note

Kubota Is Depicting the Future of Agriculture and Creating New Value 4

Keynote Text

Kubota's Efforts in Next-generation Farming 6

Feature Text

Development of Automatic Steering for M7 Series Tractors 14

Development of Rice-transplanter with Keeping Straight Function 20

Development of AgriRobo Tractor 26

Development of KSAS Drying System 32

Development of WIN-1 Winch-type Power Assist Suit 38

Feature Technical Report

Development of Electric Actuator for Field Water Management System 44

General Text

Development of M5 Series Tractor for North America 48

Development of ZD Series of Zero Turn Mowers for North America 54

Development of CTL SVL95-2s for North America 60

Development of Engine HILS System 66

Development of a Kit for PRO688Q Combine Harvester for Harvesting Foxtail Millet 72

Development of Middle Range Weighing Feeder 78

Development of Survey and Diagnostic Technology for Pressured Sewer Pipelines Damaged by Hydrogen Sulfide Corrosion ... 84

Improvement and Development of Double Screw-press Dewatering Machine 90

Development of Smart MBR System 96

Development of NOx Reduction Technologies for MSW Incineration Plants 102

Technical Report

Development of Compact Johkasou KTZ Type for Large Scale Facilities 108

A Case Example of the Introduction of KSIS to Wastewater Treatment Plant 110

Topic

The Market Potential of Plastic Pipeline for Plant Market 112

未来の農業を描き、新しい価値を創造するクボタ

代表取締役社長

木 股 昌 俊

President and
Representative Director

Masatoshi Kimata



世界の経済発展とともに人々は豊かな食生活を求め、農業も大きく変化しています。稲作の4倍の生産量と言われている世界の畑作において、経済先進国では既に未来を見据えた農業が展開されています。欧米諸国の先進農家ではセンシング技術、解析技術を用い、農地の状況・作物の生育状況等をデータ化し、それらを見える化することにより効率的な収穫を行い、市場に送り出しています。アジアなどの発展途上国においても機械化が進む中、欧米のような精密農業をも取り入れようとしています。

一方、先進国である日本の農業はどうでしょうか。欧米とは異なり稲作が中心ですが、農業従事者の減少と高齢化が進み、耕作放棄地面積も年々増加し耕地面積はピーク時から26%も減少しています。日本の農業を守ることはできるのか、自給率を回復させることができるのか、日本の農業は待ったなしの厳しい状況に直面しています。この課題を解決していくためには、担い手農家や営農集団が儲かる魅力ある農業ビジネスとしてのビジョンを持ち、自立していくことや、中山間地などの農村が活性化していくことが重要です。

クボタは日本から世界に視野を拡げ、農業の発展に真摯に取り組んできました。各地域の農業事情を把握し、お客様が求める技術を生み出し、同時に私たちは未来の農業の姿を描きながら、これら技術を農業機械に展開してきました。日本の農業に対しては、クボタはこれまで稲作を中心に機械化一貫体系を構築してきましたが、現在は農業機械が自ら作物のデータを収集し、それを作業計画で次の栽培・収穫に活かすPDCA型の精密農業の実現や、作業の効率を

更に引き上げる自動化技術による超省力化で担い手農家への支援を進めています。これからもクボタはこれらの技術を更に進化させ、日本型スマート農業へのトータルソリューションを提案していきます。

また、グローバルな展開として、欧米諸国に対しても現地グループ会社と共同で大型トラクタとインプラメントをシステムで一体化させたスマート農機の開発を促進し、市場投入しています。

今、クボタは農業の新たな価値創造へのチャレンジとして、最新のGNSS(Global Navigation Satellite System)の導入、センシング技術や制御技術の更なる高度化を目指し、研究開発を進めています。

今回のクボタ技報51号では未来の農業の実現に向かい、「ICTで次世代農業をリードするクボタ」を特集テーマとし、先に述べました自動化技術を適用した自動操舵技術を搭載したトラクタや田植機、遠隔監視や協調作業を可能にしたトラクタ、PDCA型農業の事例としてのKSAS乾燥システムなどを紹介するとともに、収穫や集荷作業の軽労化を可能にするアシストスーツの開発を紹介します。クボタ技報を通して、創業以来127年間にわたって積上げてきた技術で「未来の農業」という壁に挑戦する姿を感じとっていただければ幸いです。

Kubota Is Depicting the Future of Agriculture and Creating New Value

People are demanding a rich and varied diet along with global economic development, and agriculture is also changing greatly. In global farming, which is said to have four times the production volume of rice crops, future-oriented agriculture is already being developed in economically advanced countries. The advanced farmers of Europe and America are using sensing technology and analytical technology to turn the state of their agricultural land and the growth of their products, etc., into data, and to harvest efficiently and send products to market by visualizing them. While mechanization is advancing in the developing countries of Asia and elsewhere too, farmers there are also trying to incorporate precision farming techniques like those of Europe and America.

Meanwhile, what is happening with agriculture in Japan, also an advanced country? Unlike Europe and America, rice is central in Japan, but the number of people engaged in agriculture is declining and they are getting older too. The area of abandoned farmland is increasing year by year, and the total has fallen by 26% from its peak. Japanese agriculture is facing an urgent and difficult situation, in which it is unclear whether it can be protected or whether the country's self-sufficiency rate can be made to recover. In order to solve this issue, it will be important to have an attractive vision of agricultural business with professional farmers and farming groups making money and supporting themselves, and agricultural villages in hilly and mountainous areas and elsewhere becoming active.

Kubota has expanded its field of vision from Japan to the world and worked sincerely on the development of agriculture. We have grasped the state of agriculture in each region, created the technology demanded by customers and rolled these technologies out in agricultural machinery while, at the same time, depicting the future of agriculture. In Japanese agriculture, Kubota has mechanized and built a consistent framework centered on rice farming to this point. However, currently, we are advancing support for professional farmers with the realization of PDCA-style precision farming where agricultural machines gather data on produce themselves and use it for the next cultivation and harvest in their work plans, and ultra-labor saving based on automation technology

that raises the efficiency of work further. From now on too, Kubota will push the further evolution of these technologies and propose total solutions for Japanese-style smart agriculture.

In addition, as global expansion, we are also promoting the development of smart agriculture integrating large tractors and implements in a system with local group companies in Europe and America and introducing them to the market.

Kubota is currently advancing R&D aiming for the introduction of a new GNSS (Global Navigation Satellite System) and the further upgrading of sensing technology and control technology as a challenge towards the creation of new value for agriculture.

We have made "Kubota, a Leading Company in Next-generation Farming with ICT" the feature theme of Kubota Technical Report No.51, aimed at the realization of future agriculture. Along with introducing products applying the automation technology raised above, like tractors and rice-transplanters equipped with automatic steering technology, tractors enabling remote monitoring and cooperative work, and the KSAS Drying System as an example of PDCA-style agriculture, we also introduce the development of the Assist Suit, which enables labor reductions in harvesting and packing work. I will be happy if you can understand our attitude of taking on the challenge of "future agriculture" with the technology we have accumulated over the 127 years since our founding through this Kubota Technical Report.

クボタの次世代農業への取り組み

Kubota's Efforts in Next-generation Farming

日本農業は、高齢化による就農者の大幅な減少、農作物の輸入自由化などにより大きな転換点を迎えている。このような状況下で日本農業を発展させていくためには、それを支える担い手にとって儲かる魅力的なビジネスに変えていく必要がある。このためクボタは、次世代農業としてICT(Information and Communication Technology)やIoT(Internet of Things)を活用したスマート農業(①データ活用による精密化、②自動化による超省力化)の研究開発とその普及を進めている。

クボタはこれまで、①精密化についてはKSAS (Kubota Smart Agri System)を、②超省力化については直進キープ田植機や自動運転トラクタ(アグリロボトラクタ SL60A)を上市してきたが、本稿ではこれらに取り組んできた狙いと研究開発の状

取締役専務執行役員
研究開発本部長

飯田 聡

Satoshi Iida



況を述べる。

更に、①②を連携させたスマート農業トータルソリューションの将来構想、その実現と普及に向けてクリアしなければならない課題を述べるとともに、海外展開の考え方を示す。

Japanese agriculture has reached a great turning point due to factors such as a significant decline in the number of farmers because of aging, and the liberalization of agricultural imports. In such circumstances, it will be necessary to change Japanese agriculture into an attractive, profitable business for the professional farmers supporting it, to allow Japanese agriculture to develop. To this end, Kubota is advancing R&D on smart agriculture ([1] precision farming based on the use of data; [2] ultra-labor saving based on automation) using ICT (Information and Communication Technology) and the IoT (Internet of Things) and its diffusion as Next-generation agriculture. To this point, Kubota has launched the KSAS (Kubota Smart Agri System) with regard to [1] precision farming, and a rice-transplanter with automatic steering and an automatically operated tractor (the SL60A Agri Robo Tractor) with regard to [2] ultra-labor saving. In this article, we raise the targets that we have worked towards with these products and the state of our R&D.

Moreover, we also raise the future concept of a smart agriculture total solution combining [1] and [2], and the issues that we will have to clear towards its realization and diffusion, and show our way of thinking about overseas expansion.

1. はじめに

現在クボタは、中長期目標としてグローバル・メジャー・ブランドになることを標榜しています。これは最も多くのお客さまに信頼されるブランドになるということであり、このためには、今までのように単に製品を販売するだけでなく、お客さまに製品を核とする新しいソリューションを提供、更には未だ見ぬ新しい価値を創造していく企業に成長させていく必要があります(図1)。

近年、ICTやIoT技術を用いて新たなビジネスモデルを構築して事業を成長させる企業が見られ、ICT・IoTはクボタでも注力している研究開発分野の1つです。

本稿では、ICT・IoT技術を活用する次世代のスマート農業への取り組み状況や目指すべきビジョンについてお伝えします。



図1 クボタの成長の方向性

Fig. 1 Kubota's Growth Orientation

2. クボタが次世代農業に取り組む意義

2-1 日本農業の現状と課題

今、日本農業は多くの課題を抱えており、大きな転換期を迎えています。例えば、2000年に230万戸あった販売農家が2015年には130万戸とほぼ半減しています。日本農家の平均年齢は67歳以上と超高齢化しており、今後10年では半減以下になると予測されています。

一方で、農業を主業とする担い手農家(プロ農家)や営農集団が増えており、離農農家の農地委託等によりその規模を拡大しています。農業政策としても、『規模を拡大し生産の効率化』を促進するため、企業の農業参入の容易化や農地バンク設置などの施策を打ち出しており、2023年に担い手が占める農地の割合は、現状の56%から80%に達するとしています。また、2018年からはこれまで長年続いてきた減反政策も廃止され、日本の農家はいよいよ自立をせまられることとなります(図2)。

この状況において、クボタとしては、

- ①日本農業が儲かる魅力的なビジネスとして独り立ちすること
- ②中山間地を含む農村の活性化、及び農業の多面的な機能の発現・維持のための支援が重要な課題であると考えています。

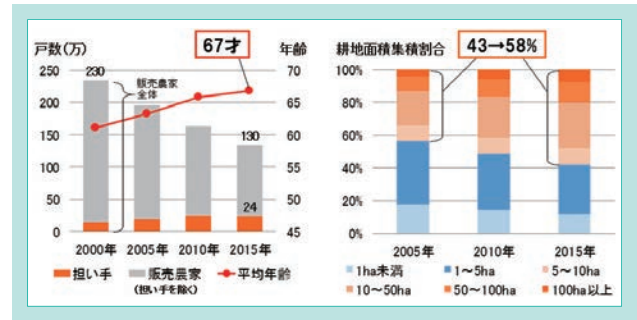


図2 就農人口及び担い手が占める農地の割合
Fig. 2 Agricultural Population and Proportion of Agricultural Land Held by Professional Farmers

2-2 担い手農家の課題とクボタの取り組み

日本農業を支える土地利用型の担い手農家や営農組合は、その規模拡大とともに次のような多くの課題に直面しています。

【担い手の課題】

- (1)多数圃場管理の問題
 - ・増加する作業管理の問題
 - ・収量、品質低下の問題
- (2)省力化・軽労化、生産コストの削減
- (3)生產品の高付加価値化
- (4)人材育成(ノウハウの伝授)
- (5)販路開拓・拡大

これらの課題解決のため、クボタでは次のような取り組みを進めています。

【担い手に対するクボタの取り組み】

- I 高性能・高耐久農機とともに低価格農機の開発

2-3 日本農業の進化のステップ

図3は、日本農業の進化のステップを示しています。

私たちは1947年に耕うん機の製造・販売で農機市場に本格参入して以来、農家の皆さんの困りごとに着目してイノベーションを生み出しながら日本農業の機械化一貫体系の構築に邁進してきました。そして現在、次世代農業を支える①データ活用による精密化、②自動化による超省力化を軸とするスマート農業について、2010年頃から本格的な研究開発を進めてきました。

II 営農ソリューションの提案強化

- i)鉄コーティング直播+密播疎植栽培による低コスト化
 - ii)畑作・野菜作の機械化一貫体系構築 など
- #### III 米の輸出や玄米ペースト事業など6次産業化による販売支援

日本農業を魅力ある儲かるビジネスに変えていくためには、これらに加えて農業システム全体を見える化することで、『求められる作物を求められる時期に求められる量だけ作る』仕組み、すなわちICT・IoT技術を活用したスマート農業システムの開発と普及が不可欠です。



図3 日本農業の進化のステップ
Fig. 3 Steps in the Evolution of Japanese Agriculture

3. データ活用による精密化

3-1 営農支援システム KSAS(Kubota Smart Agri System)

スマート農業に本格的に取り組むにあたり、多くの担い手の方々とお話しして、現場の実際の課題や悩みの把握を行いました。「日本の田んぼは平均0.2~0.3ha/枚と非常に狭い。そのため、例えば40haの稲作農家は200枚以上の田んぼを抱え、それぞれに異なる耕うん・田植えから収穫に至る一連の栽培プロセスの管理に追われている。更に、規模拡大で増加した作業者の管理の問題も発生している。その結果、収量や品質が低下し、掛けた労力と結果が釣り合わない場合がある。」このような現場の生の意見をベースに議論を重ねた結果、当時既に存在した作業記録を目的としたソフトウェアを改良するのではなく、農機のセンサで情報を収集し有効活用することでPDCA型の精密農業を行うという、これまでの日本にはない新しいシステムの開発に挑戦することにしました。

こうしてクボタが独自に開発した営農・サービス支援システムKSASは、農業機械とICTを利用して作業・作物情報(収量、食味)を収集し活用することで、「儲かるPDCA型農業」を実現する新しいソリューションです。

全体構成としては図4に示す通りで、無線LAN通信機能を搭載した『KSAS農機』、作業者が作業記録と情報の中継を行う『KSASモバイル』、情報の蓄積と分析を行う『KSASクラウドサーバシステム』で構成されています。この上で営農支援システムと機械サービスシステムが稼働しており、それぞれ次のような価値の提供を狙いとしています。

【営農支援システム】

- ①高収量・良食味づくり
- ②安心安全な農作物づくり(トレーサビリティ確保)
- ③農業経営基盤の強化(コスト分析と低減)

【機械サービスシステム】

- ・迅速で適切なサービスの提供によるダウンタイムの低減

【データに基づくPDCA型農業】

現行KSASの核となる食味収量コンバインは、グレンタンク内のみ重量と食味の主要な代用特性であるタンパク含有率及び水分をリアルタイムに計測するセンサ(ロードセル及び近赤外分光分析センサ)を搭載しており、計測データは、田んぼ1枚を刈り取る毎に、コンバインの稼働データとともにKSASモバイルを通じてクラウドサーバに送られます。

担い手は、事務所のパソコンからクラウドサーバに蓄積された作業日誌や圃場1枚ごとの収量・食味のばらつき(図5左参照)を一目で把握することができます。そのため、土壌分析と合わせることで圃場1枚ごとの特性に合わせた土壌改善や翌年の施肥設計が可能となります。その設計した肥料の散布量データを、逆に作業者のモバイルを介しKSAS対応の施肥田植機やトラクタに送信します。受信したKSAS農機は散布量を自動で調量する機能を持っていますので、農業初心者でも簡単に、百枚以上の田んぼでも間違いなく施肥を行うことができます。

このように、データ収集とそれを基にした作業計画→栽培→収穫→データ収集・・・というサイクルを回すことで収量や食味を上げるとともに施肥量や作業人数・時間を適正化し農業経営を改善し続ける。これがこれまでの日本農業にはなかったデータに基づくPDCA型農業です(図5)。

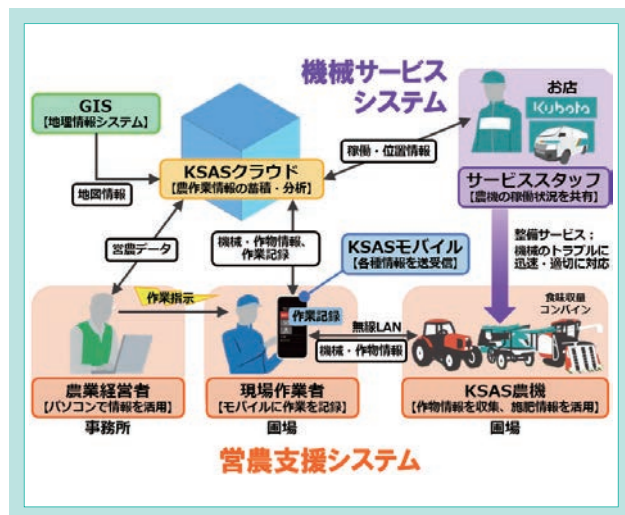


図4 現行KSASの全体像

Fig. 4 The Overall Picture of the Current KSAS

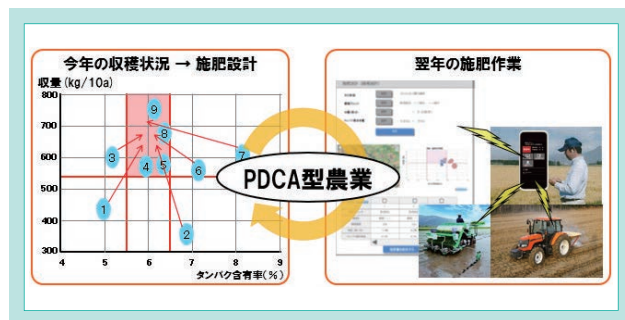


図5 KSASのPDCAサイクル

Fig. 5 The KSAS PDCA Cycle

新潟県などでの2年間の実証テストでは、食味(たんぱく含有率)の改善・安定化とともに15%の収量増加を確認してお

り、これを40ha規模で換算すると約30トン以上の増収が期待できることとなります。また、食味値による米の仕分けで美味しい米を高い価格で販売することや、水分による乾燥機の仕分けでの品質の安定化と乾燥コストの低減も可能となります。

なお、このKSASの開発は、図6に示すようにトラクタ・田植機・コンバイン等の製品開発を担当する製品技術部とGPSや計測・制御技術など各種要素技術に取り組む研究開発本部、そして営業やサービス部門も含めた部門横断の全社プロジェクトを編成して進めました。

また、KSASは、クボタにとって初のB to C製品(システム)であり、ビジネスとしても新たな挑戦が必要でした。このため、クボタ本体の事業推進部門に加え各社のKSAS推進グループ、システム開発会社(クボタシステムズ)等で事業運営組織を構築し、地域ごとのキャラバン活動や教育研修会開催などの普及活動に取り組んでいます。もちろん、操作性や不具合についても現場の意見を集約して改善を継続しています。

担い手の方々に、このようなICT・IoT技術を活用したシステムを使っていたくには予測以上に時間と労力を要し

ていますが、こうした地道な活動により2014年6月のサービス開始から3年半で、営農システムでは約1,370軒、サービスシステムを含む全件数では4,500軒以上の担い手農家や法人のお客さまにご利用頂いています。登録圃場面積は47,000ha(平均34ha)、枚数では21万枚(平均150枚)になり、特に規模の大きい担い手の方々から、「圃場管理の効率が上がった」「米の収量・品質が上がった」と高評価を得ています。

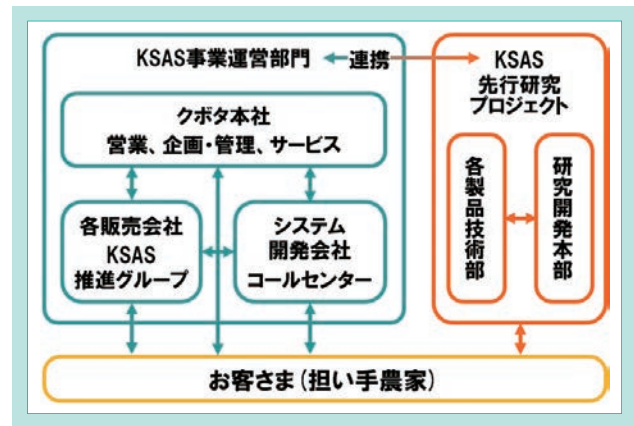


図6 KSASプロジェクトの体制概要
Fig. 6 Overview of the KSAS Project Framework

3-2 KSASの進化の方向性

図7には、KSASの進化の方向性を示しています。

Step.1は、稲作機械化一貫体系の中で各農機とのデータ連携によるPDCA型農業を実現することであり、現在も開発を続けていますが、ほぼ完成に近づいています。そして更にStep.2、3と進化させるべく研究開発を進めています。

【Step.1】機械化一貫体系、及びデータ連携の拡張

- ①ポストハーベスト機器や中間管理機(乾燥システム)：2017年6月に本格販売、中間管理機：2017年1月からモニタ販売)、更に農業散布用ドローンとのデータ連携を進めています。
- ②水田稲作から麦・大豆など畑作にも展開中です。

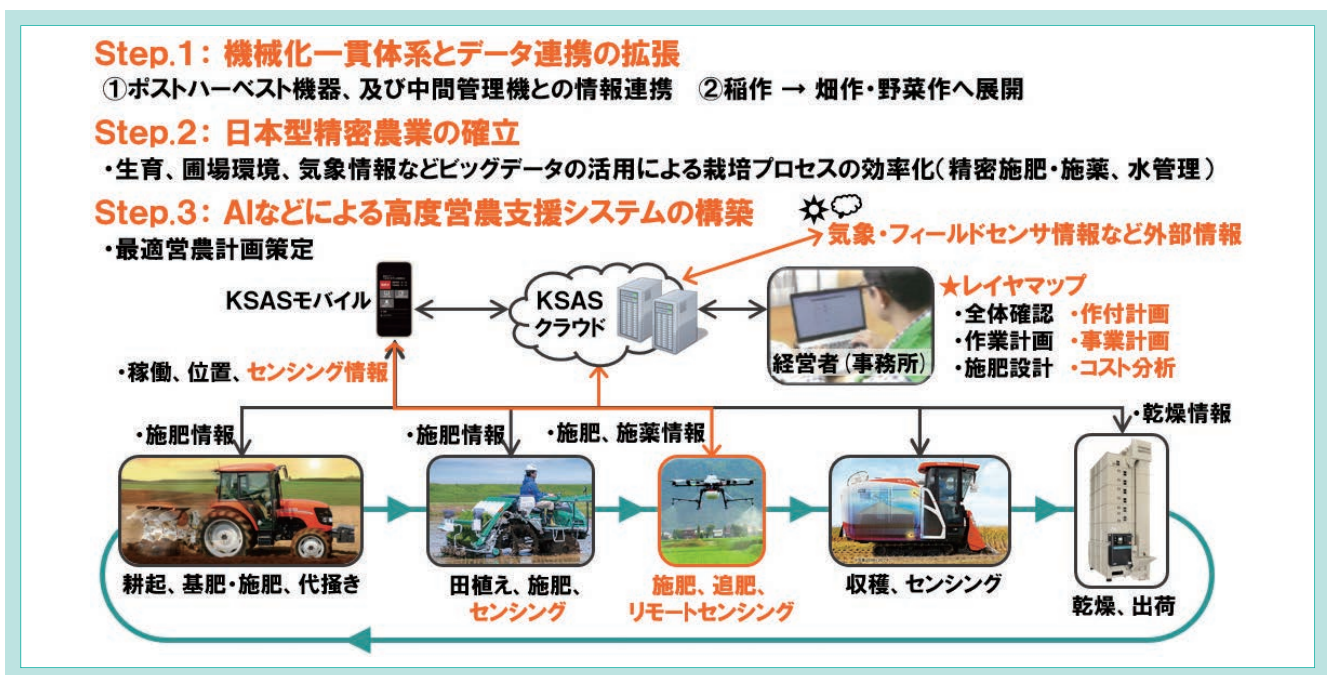


図7 KSASの進化の方向性
Fig. 7 The Orientation of the Evolution of the KSAS

【Step.2】日本型精密農業の確立

- ①今後も圃場の基盤整備(合筆等)が進み圃場1枚の面積が拡大すると、圃場1枚の中でのバラツキの管理がますます重要になります。この要求に対応するため、圃場内での土壌や生育環境、生育情報、収量のバラツキをセンシングし、更に精緻な可変施肥・施薬ができる農業機械システムの開発に取り組んでいます。つまり、地図・地番情報(GIS)を基に、農機やフィールドサーバでセンシングした圃場環境情報、ドローンや衛星でのリモートセンシングによる生育情報、水管理情報に、気象や種苗、肥料・農薬等資材情報などの外部データを結び付けレイヤマップ(図8)として整理し、これらの蓄積されたビッグデータを解析・活用することで可変施肥や施薬を可能とすべく研究を進めています。
- ②また、レイヤマップの情報を基に、品種毎の生育予測や病虫害発生予測を行いながら、外部環境の変化に合わせて作業計画や水管理計画の修正・活用ができるシステムの構築を目指しています。

【Step.3】高度営農支援システムの構築

- ①Step.2の機能に加えて、会計システムや販売システム

ムなど農家が用いる情報システム、流通網や金融機関など市況情報等外部データ、更には圃場水管理システムなどと連携し、これらから得られるビッグデータをAIで分析・処理することで、土地利用型農家の利益が最大※となる事業計画や作付計画の作成を支援できる高度営農シミュレータに進化させていく予定です。

※コストの最小化、栽培サイクルの最適化(土地利用の極大化)、作業の平準化、等を考慮

- ②また、何時、どこで、誰が、どの機械で作業すると効率的か、最適な作業実行プランの作成を支援できるようにしたいと考えています。

クボタは、KSASを農家にとって真に有益なシステムにすることで、より多くの皆さまに使っていただくことを目指しています。そのためには、農地・地図、気象、土壌、生育モデルなど蓄積された官民データの活用・連携が必須であり、他社農機や情報システムとの連携も重要です。ただ、データ連携やシステム連携はクボタ単独では進められませんので、農業データ連携基盤協議会(WAGRI)に参画することにより、農業データ共通基盤の整備にも取り組んでいます。

基調論文

クボタの次世代農業への取り組み

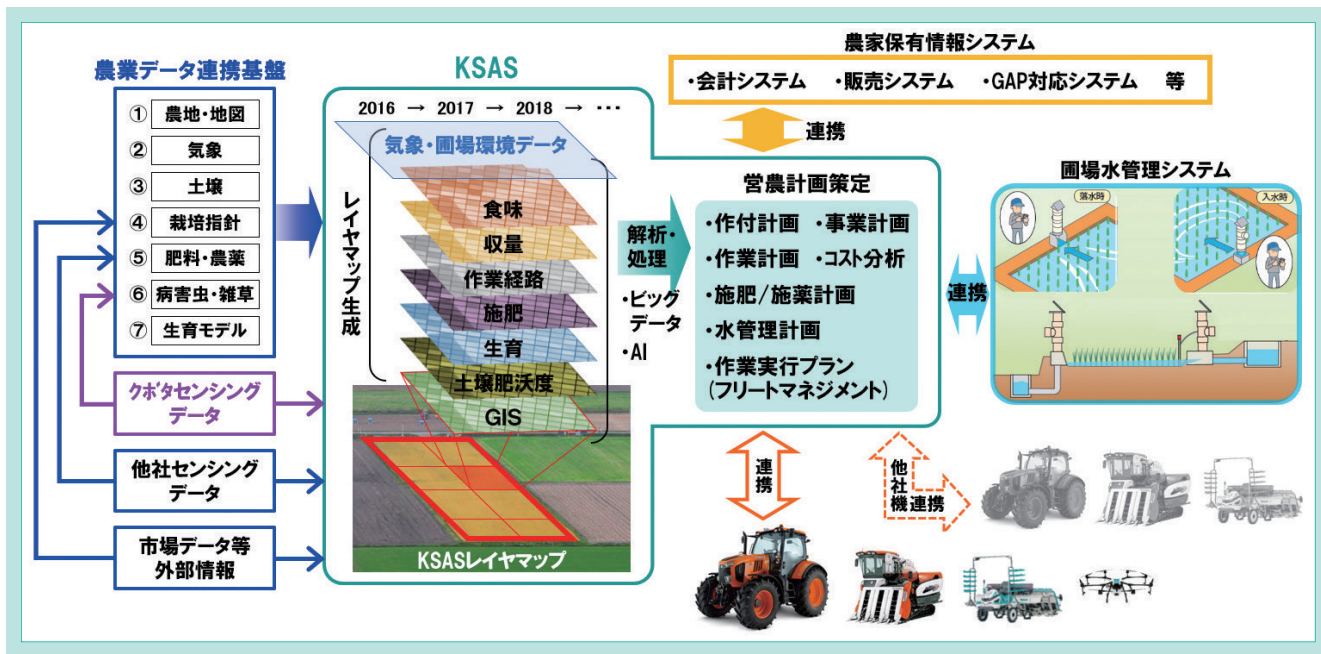


図 8 Kubotaのスマート農業トータルソリューションの将来構想とレイヤマップ
Fig. 8 The Future Concept of Kubota's Smart Agriculture and Layer Map

4. 自動化による超省力化

4-1 自動・無人化農機

ICT・IoT技術を用いたデータの活用により栽培プロセス管理や農業経営を効率化するKSASに加えて、耕うんや

刈取りなど機械化済みの作業の効率を更に引上げ、超省力で精密な作業を実現するため、ロボット技術による農機

の自動化・無人化の研究開発を進めています。この自動・無人化のレベルは、図9に示す通り農水省の定義としては3段階あり、クボタとしても市場の要求を喚起すべく次のようなテーマに取り組んでいます。

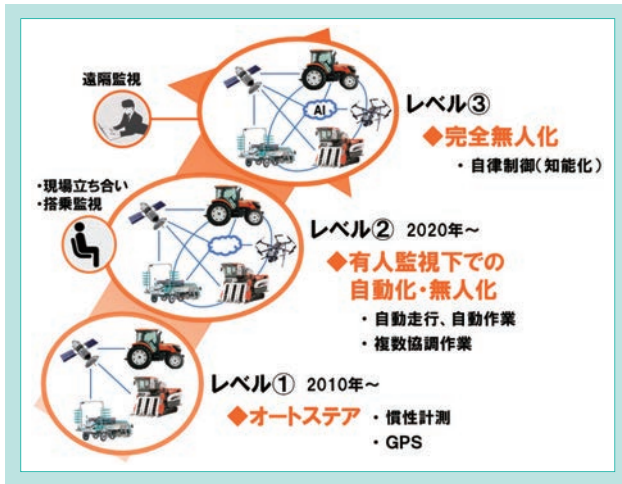


図9 農業機械の自動化・無人化のステップ
Fig. 9 Steps in the Autonomous Agricultural Machine

レベル①のオートステアは、高精度GPS装置を利用した自動操舵の技術です。スマート農業で先行する欧米では2000年頃に大型トラクタで実用化され、既にポピュラーな技術となっています。

クボタでは2015年春にリリースした、日本メーカー初の本格畑作市場向け大型(130-170馬力)トラクタM7シリーズからオートステア機能を採用しています。欧米では後発の本格畑作トラクタとなりますが、直線だけでなく曲線経路も自動操舵できるオートステアの性能の良さや、畑作トラクタ特有の大型インプレメントの複雑な制御をシンプルに操作できるターミナルの開発などにより高い支持を得ています。

また、2015年秋からは直線キープ機能付き田植機を販売しています。既存のオートステアリング装置は大型で高額であったため、安価なサブm級GPS(DGPS)とIMU(慣性計測装置)を組合せた独自の制御方式を開発することで、小型で安価なオートステアシステムを実現しました(価格上昇10%)。結果、雇用したての初心者でもベテランのような高精度の田植えができ、ストレスが大幅に軽減されるということで、お客さまのみならず日経優秀製品・サービス

賞 最優秀賞や十大新製品賞 本賞をいただくなど、各方面から高い評価を得ています。

レベル②は、有人監視下での自動化・無人化であり、無人走行機と有人監視機の複数機による協調作業も含まれます。このレベルは、システム体系が完成すると作業効率が従来比で1.3~1.5倍に向上することが実証試験で確認できており、現在、国内外の産官学で活発に研究開発が進められています。

クボタでもKSASと同様に関連部門で自動農機開発プロジェクトを組織し、トラクタ、田植機、コンバインが1つのマップを共用し、協調・連携しながら自動運転するシステムの研究を進めてきました。

その第一弾として、昨秋から自動運転トラクタ(アグリロボトラクタ SL60A)のモニタ販売を開始しました(図10中央)。高精度GPSであるRTK-GPSを内作することで、無人機1台での自動運転作業、無人機と有人機による2台協調運転作業、有人でのオートステアを可能としました。安全機能については、レーザスキャナや超音波ソナーを活用して人や障害物を高精度に検知し確実に自動停止する機構、4台のカメラで周囲を常時監視できるシステムを搭載し、農水省で新たに策定された自動運転トラクタの安全ガイドライン及び現在検討中のISOの安全基準に適合させています。

今後は本格販売に向けて改良を進めるとともに、自動運転コンバイン・田植機も市場に投入していく予定です(図10)。



図10 自動運転トラクタ・田植機・コンバイン
Fig. 10 Autonomous Tractor, Rice-transplanter and Combine Harvester

4-2 自動・無人化農機の進化の方向性

自動・無人化農機の進化については、先ずレベル②の完成を目指しています。具体的には、先行するトラクタだけでなく、コンバイン・田植機・草刈り機の自動化を進めるとともに、制御システムを高度化し、外周作業の無人化や傾斜地での畑作対応など圃場内作業の更なる自動化を

進めています。ただし、あらゆる農地への対応は困難で、自動化用に圃場基盤の整備やレベル③のための特区の設定を行政に働きかけています。

合わせて、GNSS(全球測位衛星システム)や安全関連システムのVE(Value Engineering)も進めています。また、

内閣府が戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)で進める準天頂衛星システムへの対応も鋭意進めています。

次に、レベル③遠隔監視による完全無人化では、農道を走行し、複数の圃場での無人作業を実現する必要があります。これには、3Dダイナミックマップの活用など自動車メーカーの技術を取り入れること、無人農機の異常復帰機能など安全システムの更なる高度化や監視・制御の高速化のための5Gなど農業用高速通信インフラの整備が必要となります。なお、トラクタであればインプラメント装着状態での自動走行のためには道路交通法の緩和が必要であり、技術開発以外の課題もあります。

このように、レベル③の実現にはかなり高いハードルがあり、研究開発のみならず政府や業界団体と協力して規格やインフラを整備する必要があります。

なお、自動・無人化農機は単体運用ではその効果が限られます。このため、現在クボタでは、完全自動ではない農機も含む複数農機の最適な運用・管理ができるように、図11に示す通りKSASに連携する自動農機の稼働支援システムを構築し、複数農機における最適走行ルートの作成を支援するとともに、自動農機の情報収集しモニタリング・活用できる仕組みを構築しています。



図 11 KSAS と自動・無人化農機の連携
Fig. 11 Cooperation of the KSAS and Autonomous Agricultural Machine

4-3 農作業の更なる省力化・軽労化

これから農業を継続していくためには、女性・高齢者の力が不可欠であり、そのためには農作業の更なる省力化・軽労化が必要です。

クボタはこの要求に応えるため、ロボット技術を応用したアシストスーツの開発も進めています。まず第一弾として、2013年に棚下作業向けに「ラクベスト」をリリースしました。開発の狙い通り、果樹園を中心に普及が進んでいます。

また第二弾として、野菜用・果樹用のコンテナなどの運搬作業向けにクボタオリジナルのウインチ型パワーアシストスーツ「WIN1」を開発し、2017年1月からモニター販売を行っており、高齢のジャガイモ農家などから高い評価を得ています(図12)。現在は、工場や物流業界など一般産業用としての用途開拓も進めています。

このような省力・軽労化のための機器は篤農家からの要望が強く、今後も継続的に開発していきます。



図 12 アシストスーツ
Fig. 12 Assist Suit

5. おわりに

今回紹介させていただいたスマート農業は、ICT・IoTを用いて農業を変革するものです。その狙いは、図13に示す通りであり、国内農業の課題解決と発展のため、これからも業界をリードしていきたいと考えています。

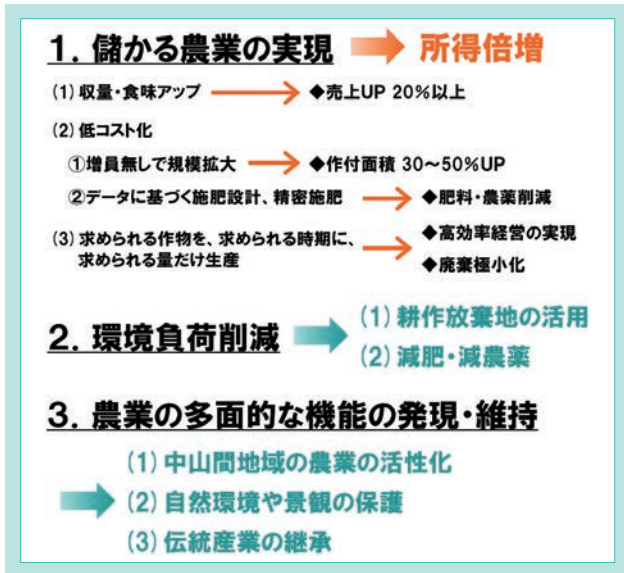


図 13 Kubotaが目指す次世代農業のビジョン
Fig. 13 Kubota's Vision for the Next-generation Farming

ところで、クボタは明治～昭和の水道鉄管敷設を推進した国内最大の水道管メーカーであるとともに、香川県豊島の産業廃棄物不法投棄問題を解決まで導いた唯一の環

境プラント企業です。この領域においても、ICT・IoTにより水環境分野の施設や設備を安価に遠隔監視・診断できる共通プラットフォームKSIS(Kubota Smart Infrastructure System)を開発し、実案件への適用を進めています。今後、このKSISを基に農業用水管理システムを構築し、KSASと連携させることで、より効率的な農業システムを提供していく予定です。

一方、海外については、アジアでは稲作地域や大規模畑作地帯を中心にKSASを展開していきたいと考えています。欧米については、各国の精密農業システム(FMIS)に適合するスマート農機(トラクタ+インプラメント)を開発することで、世界農業の課題解決にも貢献していきたいと考えています(図14)。

なお、スマート農業の社会実装は、クボタ単独で進めることはできません。このため、NTTグループとの連携やデータ連携基盤協議会への参画など、オープンイノベーション体制で研究開発と普及を進めていきます。

本技報では、これまでに紹介した製品や技術について詳しく説明していますので、ご一読ください。クボタは、これからも次世代農業の実現に向けて力を尽くして参りますので、今一層の応援を頂ければ幸いです。

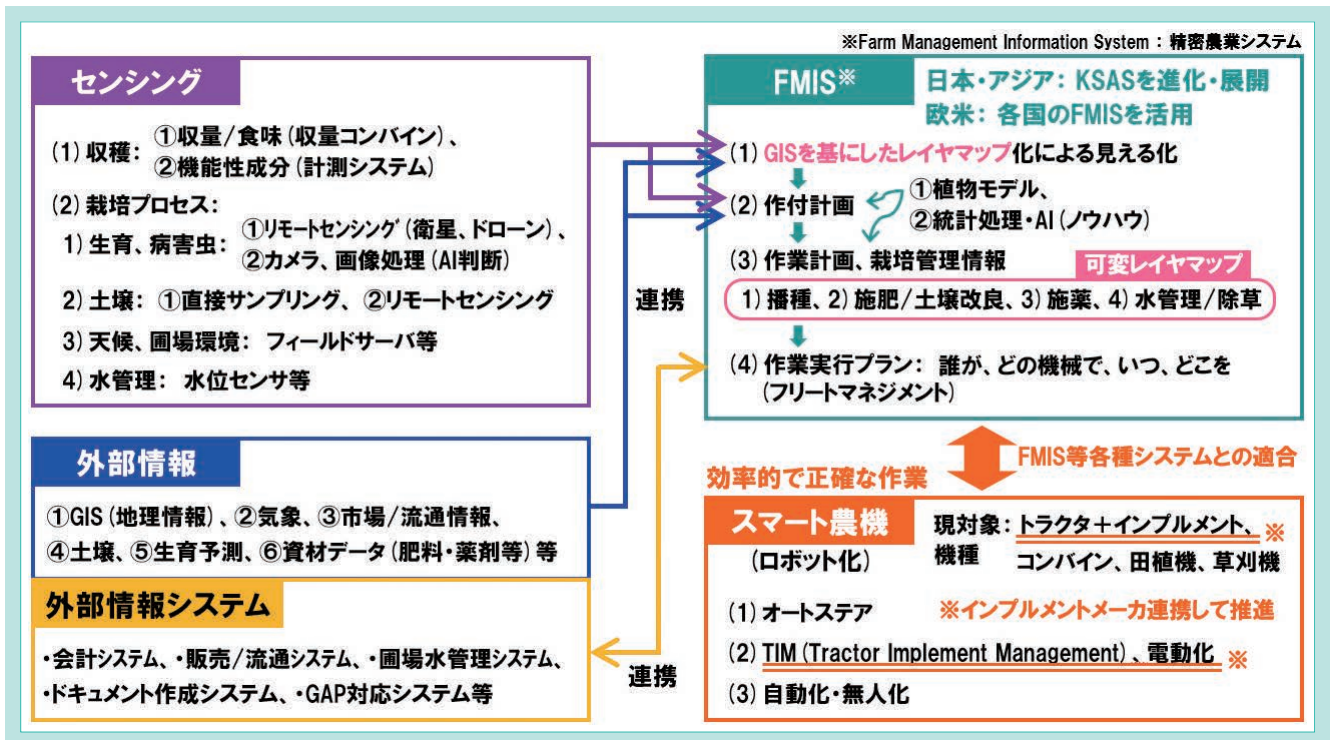


図 14 スマート農業の構成概略とクボタの取り組み
Fig. 14 Outline of Smart Agriculture and Kubota's Efforts

M7トラクタ搭載オートステアの開発

Development of Automatic Steering for M7 Series Tractors

トラクタ技術第二部／車両基礎技術部

クボタは本格畑作市場用M7トラクタを投入する上で、重要な機能の1つであるオートステアを自社ブランドで開発した。開発においては競合他社との優位性を確保するため、自動走行精度やオートステアの導入方法、操作方法について着目した。また最新の安全規格であるISO25119をベースに新たな安全評価手法を確立し、オートステア使用時におけるユーザの安全を最大限に配慮したシステム設計を行った。量産開始以降、オートステアを搭載したM7トラクタは本格畑作市場で高い評価を受け、世界の農業に貢献している。

【キーワード】

オートステア、GPS(全地球測位システム)、ISO25119、本格畑作市場

Kubota has developed an automatic steering system, an important function for the M7 tractor in dry-field farming. To ensure an advantage over other companies, the automatic steering system was designed with a focus on driving accuracy, the method of installation and the operating procedure. Based on ISO25119, the latest standard for safety, Kubota established a new safety assessment and evaluated the automatic steering system using it. The M7 tractor equipped with the automatic steering system has received the support of many users in dry-field farming and contributes to farmers all over the world.

【Key Word】

Automatic Steering, GPS (Global Positioning System), ISO25119, Dry-field Farming

1. はじめに

従来のクボタトラクタは軽量、コンパクト、操作容易性を活かし、北米、国内、アジアを中心とする水田市場、酪農市場で高い評価を得てきた。今後更にクボタトラクタが世界の農業に貢献するためには、現有ラインナップではカバーが困難であった本格畑作市場への新規参入が必要不可欠であった。

本格畑作市場は世界の耕作地の約4割を占めており、広大な耕作面積を有する大規模農場が多い。大規模農場ではトラクタを長時間使用するため、サスペンションによる振動低減、操作容易性によりユーザの疲労を軽減する機能が重要視される。疲労軽減の中でも、ユーザがハンドルを握ることなく電

子制御により自動走行するオートステア(自動操舵技術)は重要な機能であり、競合他社は既に導入している。そこでクボタは、業界最後発でありながら競合他社以上の性能と安全性を有したオートステアを自社ブランドで開発し、本格畑作市場向けM7トラクタ¹⁾に搭載した。本開発を通じて、水田だけでなく本格畑作においても市場を席卷し、クボタのグローバル・メジャー・ブランド実現に貢献していく。

本稿では本格畑作市場向けM7トラクタに搭載したオートステア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目標値

2-1 開発のコンセプト

オートステアはGPS信号を利用した自動操舵技術である。GPS衛星からの測位情報と複数の地上基準局から発信される誤差補正位置情報を受信し、トラクタがリアルタイムで解析して現在位置を特定する(図1)。その位置情報やトラクタ車速情報などを基に、ハンドル操作を自動調整しながら走行する。経路については圃場内の両端に基準点(A)と(B)を結ぶ直線又は曲線を走行経路としてモニタ上で設定する(図2)。トラクタは設定した走行経路上をインプラメント作業幅に応じた間隔で自動走行する。

圃場内では肥料散布や播種などのインプラメント作業が行われており、オートステアではこれらの散布量にムラが発生しないよう、事前に設定した走行経路を高い精度で走行する制御技術が要求された。また競合他社は既に

オートステア技術を確立し、様々なトラクタに後付けできるよう販売している。しかしトラクタ毎の専用設計ではないため、オートステア専用モニタやGPSアンテナの設置場所の確保によるオートステア導入時の煩雑さ、設定項目が多いことによる複雑な操作性が課題であった。更にハンドル操作を自動で行う機能上、ユーザの安全を考慮した制御システムが強く要求された。新規開発となるオートステア開発において確実に安全を確保する制御システムを実現するためには、新たな安全評価手法の確立が必要であった。

以上より、開発コンセプトを以下の3点とした。

- (1)競合他社同等以上の精度実現
- (2)オートステア導入の容易性/シンプルな操作性
- (3)安全を確保した制御システムの開発

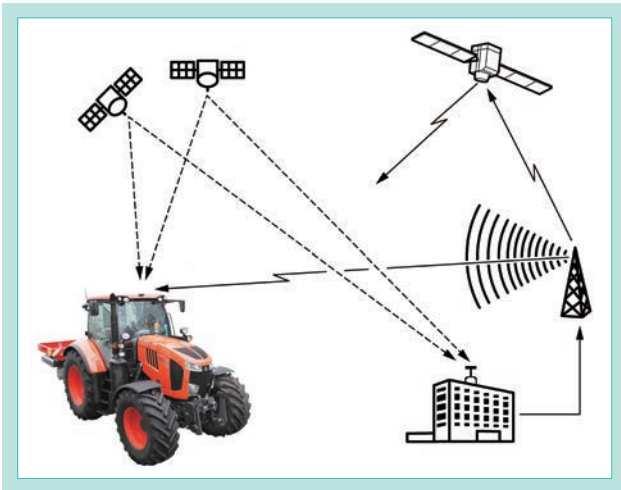


図1 GPS受信システム
Fig. 1 GPS Receiver System



図2 オートステアリング使用方法
Fig. 2 Automatic Steering Method

2-2 開発目標

- (1)競合他社同等以上の精度実現
最後発でクボタが参入することから、競合他社と同等以上の制御精度を実現する。
- (2)オートステア導入の容易性/シンプルな操作性
トラクタに後付けする競合他社よりも手軽にオートステアを導入できること、またオートステア操作方法ではシンプルで直観的な操作性を目指す。

- (3)安全を確保した制御システムの開発
オートステア使用時制御システムに異常や故障が発生した場合、オートステアの動作を停止しユーザの安全を確保する必要がある。オートステア使用時におけるあらゆる事象を想定し、ユーザが安全に使用できる制御システムを開発する。

3. 解決すべき技術課題

- (1)競合他社同等以上の精度実現
クボタにとって、競合他社同等以上の制御精度を実現することが必須であるが、開発するオートステア機能が

目標精度で制御できているか確認するための評価方法を確立する必要がある。

(2)オートステア導入の容易性/シンプルな操作性

競合他社のオートステアはトラクタ毎の専用設計ではないため、後付けが必要な機器の設置場所や電気配線を考慮した設計ではない。また操作方法では、さまざまなトラクタへの取付けを考慮しているため不要な設定項目が多く、設定が難しく操作が複雑である。簡単に導入でき、シンプルに操作できることが必須である。

(3)安全を確保した制御システムの開発

オートステアは新規開発技術であり、社内ノウハウを新たに構築する必要がある。また安全を確実に担保できるシステム制御を設計することが要求される。この2点を達成するため、開発プロセスを新たに体系化し、安全評価手法を確立することが要求される。

4. 開発技術

4-1 競合他社同等以上の精度実現

4.1.1 概要

オートステアは様々な作業で使用され、特に播種作業では数cmの作業精度が求められる。そのため、制御精度がオートステアの性能評価の指標となる。

市場で要求される性能を確保するために、制御精度を他社と同等以上とする目標を設定し開発を開始した。しかしクボタにとってオートステアは新規開発技術であり、性能評価を行うためのノウハウが自社に不足していた。

4.1.2 解決策

(1)検証する試験条件

今回開発したオートステアは直線と曲線の走行が可能であり、それぞれの制御精度評価が必要である。直線、曲線走行でオートステアの制御精度に最も影響を与える要因はトラクタの走行車速であると考えた。また曲線走行では曲線経路の形状と曲線の曲率半径も制御精度に大きな影響を与えると考えた。上記の検討結果から、検証する試験条件として走行車速、曲線経路形状、及び曲線経路の曲率半径を設定する必要がある。オートステアを使用するシーダ、スプレーヤ等の作業において想定される走行車速は3~15 km/hであることから、走行車速の試験条件を3 km/h、5 km/h及び15 km/hとして設定した。

(2)実施した試験と性能評価方法

オートステアで走行するには事前に経路を設定する必要があり、通常は手動操作で走行した経路を記録させる。しかし今回実施した試験では自社と競合他社共通で使用できる走行経路データをクバンランド社がPC上で作成することで、全く同じ走行経路を設定し、評価することを可能とした。

次に直線走行と曲線走行の評価方法について述べる。直線走行の性能評価で設定した試験経路を図3に示す。試験手順は下記のとおりである。

そこで今回開発したオートステアの走行精度を評価する際に、クボタ及びクボタの子会社であるクバンランド社のノウハウをもとに性能評価の基準を定めた。精度の性能評価として4種類の走行条件で評価試験を実施し、競合他社同等以上の精度で制御可能であることを確認した。また、今後の自動走行制御開発で活用できる評価基準を社内に蓄積した。

- ①手動で点1まで走行し、オートステア走行を開始する
 - ②点Aで精度評価用の経路記録を開始する
 - ③直線ABを走行し、点Bで経路記録を終了する
- 点1から点Aまでは、手動操作していたトラクタがオートステア走行経路に完全に乗るまでの区間である。①~③と同様の手順を、点Bから点A、点B'から点A'、点A'から点B'に向かって実施した。

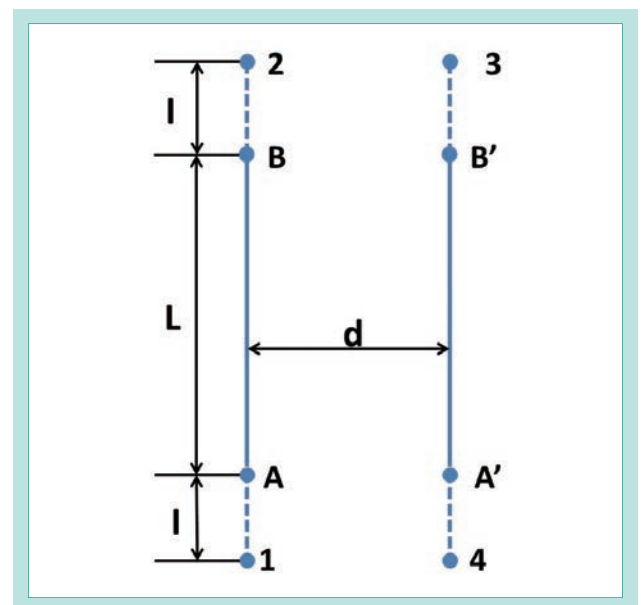


図3 直線走行の性能評価

Fig. 3 Evaluation of Automatic Steering on a Straight Line

曲線走行の性能評価では、楕円、S字、90° ターンの走行経路を設定した。本稿では90° ターンの試験手順と走行経路について述べる。走行経路を図4に示す。試験手順については下記のとおりである。

- ① 手で点1まで走行し、オートステア走行を開始する
 - ② 点Aで精度評価用の経路記録を開始する
 - ③ 曲線ABCDを走行し、点Dで経路記録を終了する
- ①～③の手順と同様に、点Dから点Aに向かって実施した。

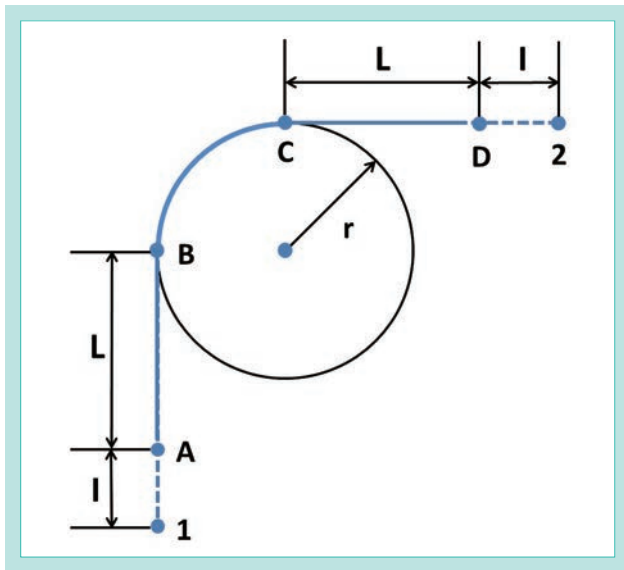


図4 曲線走行の性能評価

Fig. 4 Evaluation of Automatic Steering on a Curved Line

精度評価はPCで作成した走行経路データと、実際にオートステアで走行した経路データを比較し、その経路差によって評価した。

(3)開発結果

制御精度評価の結果を表1に示す。直線走行では0.2～0.5 cmの差で競合他社と同等レベルであった。一方、曲線走行では競合他社よりも3.0～11.4 cm高精度で走行した。この結果から、クボタが開発したオートステアは競合他社同等以上の精度で走行できることが確認できた。また今回のオートステアの開発は今後の開発においても試験コードとして活用でき、オートステアの精度評価基準を社内に蓄積することができた。これからの開発課題と考えられるインプラメントの位置を考慮したオートステア制御精度の評価も、この試験コードを活用することができる。

表1 M7トラクタと競合他社との比較
Table 1 Comparison of M7 Tractor and Competitor

経路形状	直線走行		曲線走行			
	直線	楕円	S字	90° ターン		
走行車速[km/h]	3	15	5	3	15	
平均経路誤差[cm]	M7	0.8	2.5	10.6	8.5	6.6
	他社機	1.0	3.0	13.6	19.9	11.5

4-2 オートステア導入の容易性 / シンプルな操作性

4.2.1 概要

競合他社は既に多様な機能を搭載したオートステアを販売しているが、自社ブランドで販売している農機メーカーは少なく、ユーザはトラクタメーカーの純正品ではないオートステアを後付けしている。

オートステア専用モニタやGPSアンテナの設置が必要となるが、トラクタ専用開発ではないため新たに設置場所を確保する必要があり、トラクタによっては設置が困難であった。更に電気配線のレイアウト検討も必要であり、これら煩

4.2.2 解決策

M7トラクタにはオールインワンターミナルと呼ばれるモニタが搭載されており、トラクタの各種設定を行うことができる。このオールインワンターミナルでオートステアの制御や設定ができるため、新たに専用モニタを設置する必要がなくなった。オートステアに必要なアンテナの設置や電気配線の配策については、M7トラクタ専用設計により設置場所や配線箇所が決まっているため、すっきりとしたレイアウトを実現した(図5)。オートステアに必要な機器の設置や初

雑な作業を要する点で、オートステアの導入が容易ではなかった。

オートステア操作性の面では、さまざまなトラクタに取付けできるよう汎用性が高い分、トラクタによっては設定不要な項目があり、設定が複雑で操作性悪化に繋がっていた。

そこで自社ブランドによるオートステアを開発し、M7トラクタ専用設計にすることで上記の課題をクリアした。

期設定についてはクボタディーラーで対応でき、ユーザは気軽にオートステアを導入可能となった。

次にオートステアの操作方法について述べる。オートステアを操作するオールインワンターミナルはクバンランド社と共同開発したモニタであり、トラクタの各種設定と同じような操作方法でオートステアを設定できるよう開発した。専用モニタが必須となる競合他社製品と比べ、ユーザが新たに習得すべき操作はほとんどない。また設定不要な項目が

ないため、設定画面の階層が1~3と非常に少なく、シンプルな操作性を可能にした。操作はタッチパネル式、アイコンを用いることで直感的で分かりやすくした。オートステア操作画面は主画面(地図)と設定項目タブの2つに区切り、最小限のアイコンのみを主画面に配置することで、オートステア

ア動作に必要なアイコンを明確にした(図6)。

以上のようにM7トラクタ専用オートステアを自社開発した結果、競合他社のオートステアと比較して圧倒的な操作容易性を実現した。またトラクタとオートステアが同じクボタブランドであり、その安心感を提供できたと考える。



図5 M7トラクタのオールインワンターミナル
Fig. 5 All-in-One Terminal of M7 Tractor



図6 オートステア画面表示
Fig. 6 Display for Automatic Steering

4-3 安全を確保した制御システムの開発

4.3.1 概要

オートステアではトラクタ車速、ステアリング操作角、GPS信号など多くの情報を処理し、制御を行う。この信号に問題が発生したケースなど、あらゆるリスクを想定しユーザの安全を確保する制御システムの構築が必要である。オートステアはクボタ初の開発であり、こうした制御システ

ムを構築するためには新たな開発プロセスを体系化し、安全評価基準を確立することが必須である。

そこで最新の安全設計基準であるISO25119を活用することで、製品の安全性を確保したオートステアを開発した。

4.3.2 解決策

ISO25119は、何らかの不具合が発生しても不具合を補完する制御システムを設けることで安全を確保する、機能安全に関する最新の国際規格である。この規格に記載されている開発プロセスをベースに開発を行った。

ISO25119を用いたさまざまな取組みの中で、本稿では安全評価手法について述べる。初めにリスクが想定されるケースを全てリストアップし、各ケースについてシビアリティ(S0~3:危害の深刻度)、曝露の確率(E0~4:リスクにさらされる確率)、コントローラビリティ(C0~3:運転操作によりリスク回避の可能性)の3つの観点から安全要求レベルを決定した。3つの項目では、数字が大きいほどリスクが高いことを示す。安全要求レベルの表を図7に示す。QM(Quality Management)は機能安全を適用しなくてもよい通常の品質管理で安全要求レベルは最小、a~eではeが最も安全要求レベルが高い。安全要求レベルが高い場合、制御システムを追加することで安全を確保した。このように安全要求レベルを安全評価基準として開発した。

		C0	C1	C2	C3	
S0		QM	QM	QM	QM	
	E0	QM	QM	QM	QM	
		S1	E1	QM	QM	QM
			E2	QM	QM	a
E3			QM	QM	a	b
E4	QM		a	b	c	
E0	QM	QM	QM	QM		
	S2	E1	QM	QM	a	
		E2	QM	QM	a	b
		E3	QM	a	b	c
E4		QM	b	c	d	
E0	QM	QM	QM	a		
	S3	E1	QM	QM	a	b
		E2	QM	a	b	c
		E3	QM	b	c	d
E4		QM	c	d	e	

図7 安全要求レベル
Fig. 7 Level of Safety Requirements

次に安全要求レベルの設定方法について述べる。先に述べた3つの観点は官能評価となる要素であるため、複数人で検討し統計的評価を行った。特に安全要求レベルが高いケースについてはトラクタの挙動を再現し、実際に乗車したうえで評価を行い、制御システムを変更した。再度安全要求レベルを検討し、安全要求レベルが下がるまで再現試験を繰り返した。このようにして制御システムを決定した一例を述べる。

急カーブのある走行経路を高速で走行した場合、急ハンドル操作によるトラクタの転倒が想定された。そこで走行速度に応じてステアリング操舵角の上限を設定し、ユーザの安全を確保した。走行速度と操舵角上限の関係については、走行中急ハンドル操作をしたときの官能評価試験を実施し、十分に安全を確保できる操舵角範囲を決定した(図8)。その他安全要求レベルが高いケースにおいて対策を行った結果、トラクタ车速、ステアリング操舵角、オートステアスイッチ信号などを2重化し、安全に配慮した開発を行った。

以上より、安全規格ISO25119に基づき開発を推進し、安全を確保する制御システムを実現した。同時に開発プロセスを体系化し、安全評価手法を確立することができ

た。その結果、必要最小限のシステム設計で最大限の安全設計を実現し、新たな開発プロセスを通じて短期間に効率よく開発することができた。

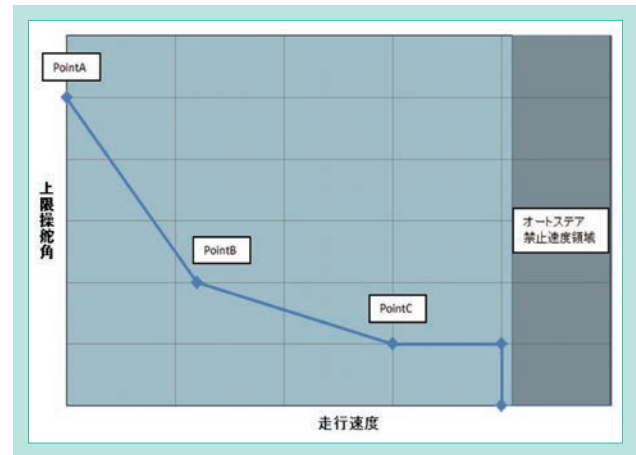


図8 走行速度と上限操舵角の関係
Fig. 8 Relationship of Velocity and Upper Steering Angle for Steering

5. おわりに

本開発により、クボタは競合他社以上の精度で走行するオートステアを開発することができた。また高機能でありながら、これまでのクボタの強みである操作容易性も兼ね備えたオートステアの開発に成功した。更に、最新の安全規格であるISO25119を活用し、ユーザの安全を最大限に配慮した制御設計を実施した。本開発を通じて獲得した技術はGPS搭載自動運転技術などの研究開発に活用していく。

現在M7トラクタは北米、欧州、日本で販売され、市場で高い評価をいただいている。特にM7トラクタ用に最適化されたオートステアは、長時間作業を強いられるユーザにとって疲労低減に大きく貢献している(図9)。

今後クボタが本格畑作市場において更にグローバル・メジャー・ブランドを確立するためには、今回の開発で得られた技術を更に発展させていく必要がある。優れた技術を通じてより良い製品を開発し、世界の農業に貢献していく所存である。



図9 M7トラクタ外観
Fig. 9 Appearance of M7 Tractor

参考文献

- 1) 清水俊秀他:「本格畑作向けM7シリーズトラクタ(97~127kW)の開発」クボタ技報No.49(2015)、pp.6~11

直進キープ機能付田植機の開発

Development of Rice-transplanter with Keeping Straight Function

移植機技術部／機械研究第一部

近年の日本農業においては、熟練した技能を持ったオペレータの不足が問題となっており、解決のための一手段としてGNSS (Global Navigation Satellite System)を利用した作業機の自動操舵技術に注目が集まっている。特に田植作業は高い技術が要求される難しい作業であり、田植機の自動操舵技術には大きなメリットがある。しかし、既存の自動操舵技術を田植機に応用するためには、水田での作業精度や操作性、生産コストといった解決すべき課題があった。そこでクボタでは、「誰でも・簡単に・楽に田植えができる機械」をコンセプトに独自の技術開発を行い、安価かつ高性能な直進自動操舵機能(直進キープ機能)付き田植機を実用化した。本稿では、直進キープ機能の開発における技術開発について紹介する。

【キーワード】

ロボット、自動操舵、GNSS、GPS(Global Positioning System)、センサフュージョン

A shortage of skilled human resources is becoming a serious problem in Japanese agriculture. In this situation, GNSS-based (Global Navigation Satellite System) automatic steering systems are considered an effective way to solve this problem. In particular, a rice-transplanter with an automatic steering system is strongly desired because of the fact that rice-planting is one of the most difficult tasks of rice cropping. However, conventional automatic steering systems are hard to install in rice-transplanters because of problems with operating accuracy, production costs and usability. Kubota made original efforts and developed a “Keeping Straight Function” as an inexpensive, high-performance, automatic steering system for rice-transplanters. This paper describes our efforts in development.

【Key Word】

Robot, Automatic Steering, GNSS, GPS (Global Positioning System), Sensor Fusion

1. はじめに

近年の日本農業においては、高齢化や後継者不足を背景とする就農者数の減少により、離農や農地委託の増加が進んでいる。農林水産省が公表している資料¹⁾²⁾によれば、2017年の農業就業人口は181万6千人であり、2005年の約54%に減少している。また、2017年の農業就業人口に占める65歳以上の割合は66.5%となっており、高齢化を理由とする人員減少は今後も加速していくと考えられる(図1)。一方で、2015年の新規就農者数は5年ぶりに6万人を超えているものの³⁾、特に熟練した技能が必要とされる作業において、作業人員の不足が深刻化している。

様々な稲作基幹作業の中でも、特に高い精度が求められる作業が田植作業である。作業精度が低く、苗の植付け跡が蛇行していると、稲の生育不良や収穫作業の効率低下につなが

り、結果的に収量低下を引き起こすためである。しかし、凹凸が多く、ぬかるみによるタイヤの滑りが頻繁に発生する水田で田植機をまっすぐに走らせることは、未熟練オペレータにとっては難しく、熟練オペレータにとっても集中を要する負担の大きな作業である。

近年では海外を中心に、全地球航法衛星システム(GNSS)を活用した農業機械の自動制御技術の開発と導入が進んでいる。この技術は、未熟練オペレータでも簡単に高精度な作業ができるだけでなく、熟練オペレータにとっても作業の省力化が可能なることから、日本農業の抱える問題に対する解決策の一つとなり得る技術である。しかし、導入コストが高額である、初期設定などの操作が複雑で習熟に時間がかかる、といった問題点もあり、国内農家での普及はこれまで限定的であった。

そこでクボタでは、国内農家のニーズに合わせた田植機向け直進自動操舵機能(直進キープ機能)の開発に取り組んだ

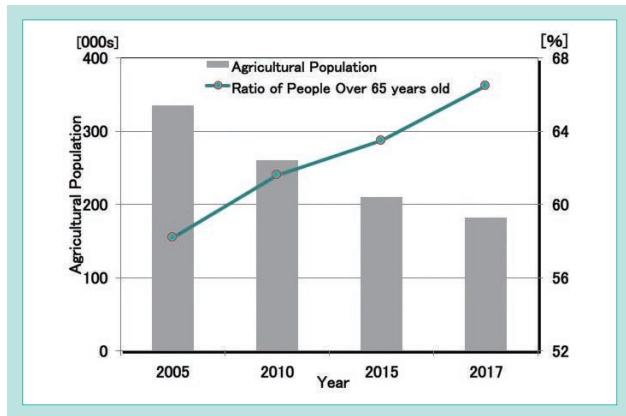


図1 農業就業人口の推移
Fig. 1 Change in Agricultural Population

(図2)。本稿ではクボタ独自の技術開発について紹介する。



図2 直進キープ機能付田植機「EP8D-GS」(8条)
Fig. 2 Rice-transplanter "EP8D-GS" with Automatic steering (8 rows)

2. 開発のコンセプトと目標値

2-1 開発のコンセプト

国内農家に広く受け入れられ、臨時雇用者などの未熟練オペレータでも簡単に高精度な田植作業が行える製品と

するため、「誰でも・簡単に・楽に田植えができる機械」を開発のコンセプトとした。

2-2 開発目標

(1) 良好な操作性

初めて使用するオペレータであっても短時間の指導のみで操作を習得できる、誰でも簡単に使える機能とすることを目標とした。

(2) 高い作業精度

田植作業においては、条間(苗列の間隔)を30 cmとすることが一般的である。そこで、一般的な作業条件で苗列同士の重なりが発生しないよう、目標走行ラインからの誤差が±10 cm以下となる作業精度を目標とした。

(3) 安心して作業できる機能設計

不注意や誤操作への対策機能を盛り込み、誰でも安心して作業できる機能設計を目標とした。

(4) リーズナブルな販売価格

全国の販売関係者から広く意見を収集し、国内農家に広く受け入れられる販売価格を検討した。その結果、従来機から10%以下の販売価格アップで製品化することを目標に設定した。

3. 解決すべき技術課題

(1) 簡単に使いやすい操作インターフェースの実現

既存の自動操舵装置は画面を見ながら複雑な設定項目(走行パターンや作業機の幅など)を入力するといった操作が必要であり、初めて使用するオペレータには操作が難しい。誰でも簡単に使える操作性を実現するため、オペレータの行うべき操作がなるべく少なくなるように操作インターフェースを構成する必要がある。

(2) 高精度センシング技術の確立

リーズナブルな販売価格で田植作業に必要な高精度測位を実現するため、安価なセンサの組合せによる独自の測位精度向上技術を開発する必要がある。

(3) 田植機に対応可能な直進制御技術の確立

水田圃場においては、泥による滑りや、耕盤の凹凸にタイヤがはまり込むことによる操舵特性の変化など、特有の現象が発生する。目標とする作業精度を実現するため、これらの現象を考慮した田植機向けの新たな制御技術を開発する必要がある。

(4) オペレータが安心して使える支援機能の実現

開発機能は未熟練オペレータによる使用を想定しており、ヒューマンエラーの発生頻度が高いことが懸念される。誰でも安心して田植作業が行えるよう、オペレータを支援する機能の開発が必要であった。

4. 開発技術

4-1 操作インターフェースの開発

一般的な田植作業では、田植機を水田の長辺方向に直進走行させながら苗を植付ける。水田の端に到達すると180° 旋回し、次は前行程で植えた苗列の隣に苗を植付けながら逆方向に直進走行する。この作業を繰り返して水田の全面に苗を植付けていく。すなわち、田植作業の大部分は、ある決まった方向への田植機の直進走行であるといえる。そこで、設定した方向への直進走行に特化した操作インターフェースを考案した。

操作部は図3に示すとおり、従来機にスイッチを3つ追加

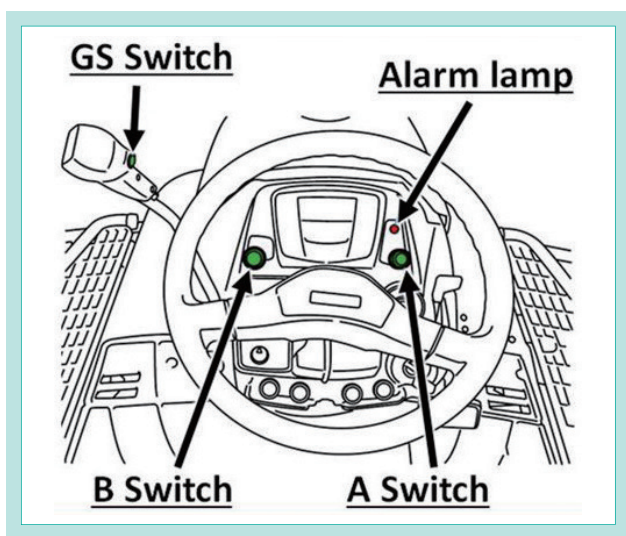


図3 操作インターフェース

Fig. 3 Interface of the Developed System

しただけのシンプルな構成とした。開発機能の操作方法を図4に示す。オペレータは、最初の行程で2つのスイッチ(基準登録スイッチ(始点A)、基準登録スイッチ(終点B))を押して直進自動操舵の規範となる直線(基準線)を登録する。登録後は180° 旋回した後、植付け走行しながら自動操舵の入/切を切り替えるスイッチ(GSスイッチ)を操作するだけで直進自動操舵機能を使用することができる。オペレータの行うべき操作を絞り込んだことにより、誰にでも簡単に使える操作インターフェースを実現することができた。

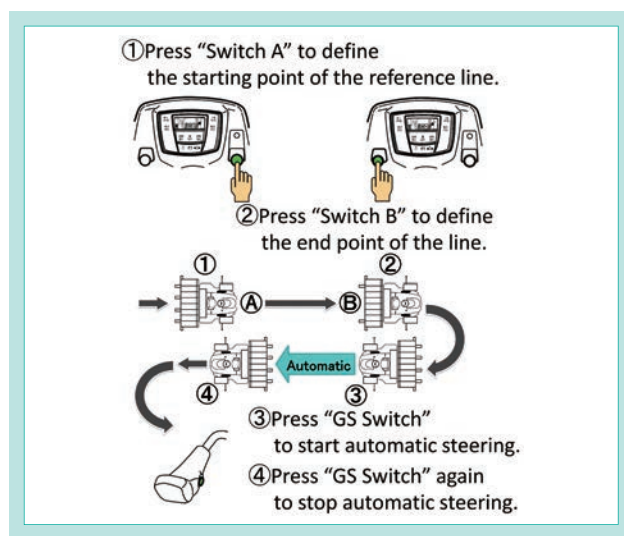


図4 開発機能の使用手順

Fig. 4 How to Use the Developed System

4-2 高精度センシング技術の開発

4.2.1 位置情報の高精度化

田植作業のように高い測位精度が要求される作業にGNSSを利用する場合、RTK-GNSS (Real Time Kinematic-GNSS)と呼ばれる高精度な測位方式を利用することが一般的である。しかしRTK-GNSSは高価であり、トラクタなどに比べ年間稼働率の低い田植機への搭載は困難であった。そこで本開発では、安価、中精度な測位方式であるDGPS (Differential GPS)を採用した。

今回採用したDGPSの絶対測位精度は約60 cmであり、目標である±10 cmという測位精度を満たすことができない。しかし、相対的な位置変化という観点では、数分程度の短時間であれば安定した測位が可能である。一方で、田植作業においては1行程の植付け走行に要する時間は概ね数分以内であり、DGPSによって比較的高精度な測位が実現可能であると考えた。

開発した測位アルゴリズムを図5に示す。制御開始地

点を基準位置とし、走行中の相対的な位置変化に基づいて目標走行ラインからの偏差を推定する信号処理アルゴリズムである。この手法により、各行程での植え始めから植え終わりまでの間、高精度な位置情報を利用した制御が可能となった。

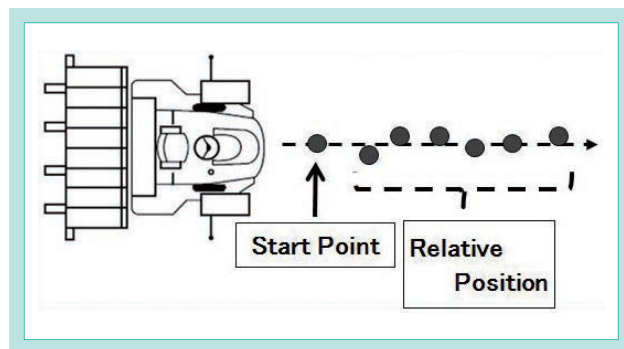


図5 相対的位置偏差

Fig. 5 Relative Positional Deviation

4.2.2 方位角情報の高精度化

高精度な方位角情報を得るため、安価型の慣性センサであるMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) IMU (Inertial Measurement Units)を採用した。IMUには、短期的には高精度な方位角演算が可能だが、時間とともに誤差が増大していくという特徴がある。一方で、DGPSによっても2点の位置情報から方位角を演算することができるが、位置情報の誤差による影響を大きく受けるという特徴がある。それぞれの信号が異なる誤差特性を持つことに着目し、センサフュージョン処理による高精度化が可能であると考えた。

方位角を補正するフィルタの構成を図6に示す。それぞれのセンサから得られた方位角にカルマンフィルタを適用することで精度向上を図った。カルマンフィルタとは、誤

差特性の異なる複数信号から真値を推定する状態推定アルゴリズムである。本構成は一般に相補フィルタと呼ばれ、誤差成分をカルマンフィルタで予測し、この誤差予測値を元の信号から差し引くという手法である。この手法により、IMUの時間経過による誤差をキャンセルし、高精度な方位角演算が可能となった(図7)。

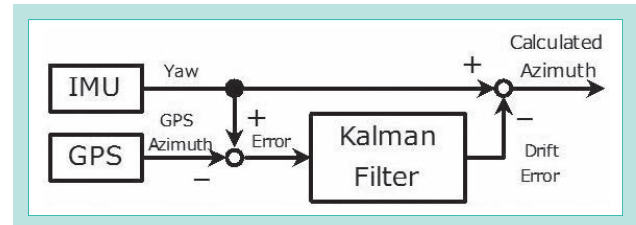


図6 フィルタ構成
Fig. 6 Configuration of the Filter

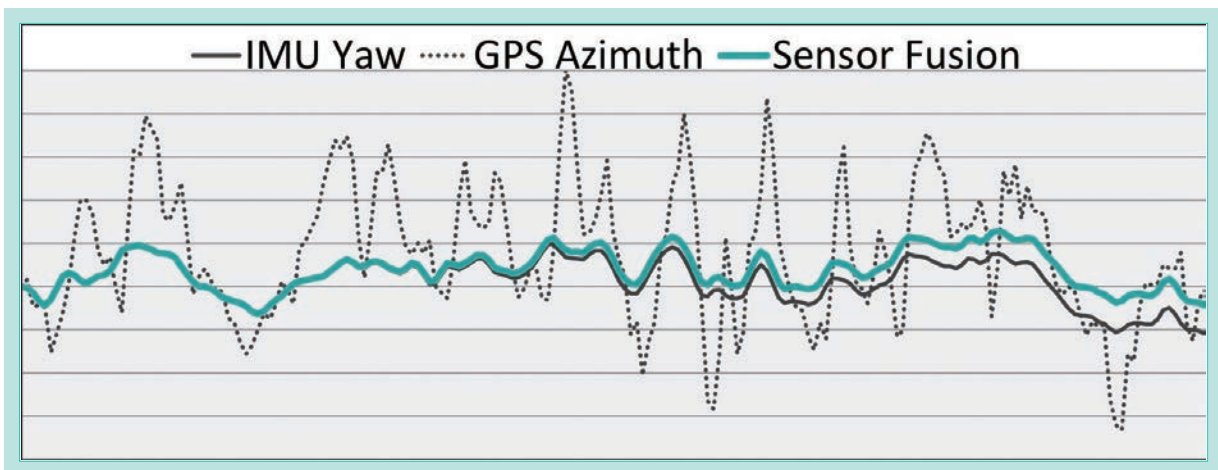


図7 センサフュージョンによる精度向上
Fig. 7 Accuracy Improvement Due to Sensor Fusion

4 - 3 直進制御技術の開発

4.3.1 操舵制御アルゴリズムの開発

基準線との位置偏差を最小とするように操舵制御した場合、苗を植付けた軌跡(植え跡)はジグザグ状になってしまう。この手法では位置偏差の総和を最小にできるが、熟練オペレータが手動操舵で植付けた場合に比べて美観が悪いという印象を持たれやすい。

そこで熟練オペレータのハンドル操作を分析し、人間の

4.3.2 水田圃場における制御安定性の向上

水田圃場は土質や深さなど、条件のばらつきが非常に大きい。そのため、田植機が操舵に機敏に反応して機体の向きを変える場合もあれば、前輪がスリップして操舵通りに素早く反応しない場合もある。このため、目標との偏差量に応じて操舵角度を決定するという一般的な操舵制御の手法では、精度の良い走行制御を行うことは困難である。

操舵操作に近い滑らかな制御とする方法を志向することにした。具体的には、「目標方位からの方位偏差最小(目標方位に向かってまっすぐ走る)」及び「目標軌跡からの位置偏差最小」という2種類の制御目標を設定し、それらを合成することで操舵出力を決定するという制御アルゴリズムを開発した(図8)。

そこで、目標との偏差量に加え、車両の状況に応じて操舵角度を決定する操舵制御アルゴリズムを考案し、方位及び位置情報に基づいて車両が所望の挙動となるような制御系を構成した。これにより、例えば滑りやすい圃場では自動的に大きな操舵角となるように制御されるなど、幅広い条件下で安定した性能を発揮するロバスト性の高い制御を実現することができた。

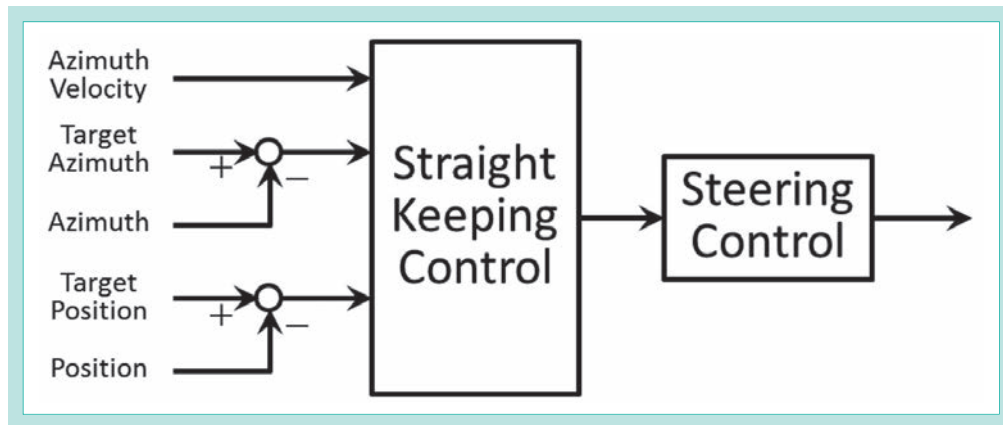


図 8 操舵制御ブロック
Fig. 8 Block Diagram of Control

4-4 安心サポート機能の開発

4.4.1 畦への接近防止機能

直進自動操舵機能の使用中は操舵操作に集中する必要がなくなるため、オペレータは後ろを振り返って植付け跡を確認できるとともに、苗や肥料、薬剤の減り具合などにも意識を向けながら作業を行うことができる。一方で、自ら操舵操作を行う場合と比べて前方への注意力が低下し、畦への接近に気が付かずにより上げてしまいオペレータに不安感を与える恐れがある。そこで、畦への接近を検知し、衝突や乗り上げを防止する機能が必要であった。

そこで、位置情報を利用して畦への接近を検出するアルゴリズムを開発した(図9)。これは前行程で植付け作業を開始した地点を仮想的な畦位置として登録することで実現した。また、田植機の電装システムと連動し、自動操舵中に畦への接近が検出されるとブザー警報を吹鳴、畦の直前まで到達するとエンジンを自動停止することで、周囲

に意識を向けながらも安心して作業が行える機能に仕上げた。

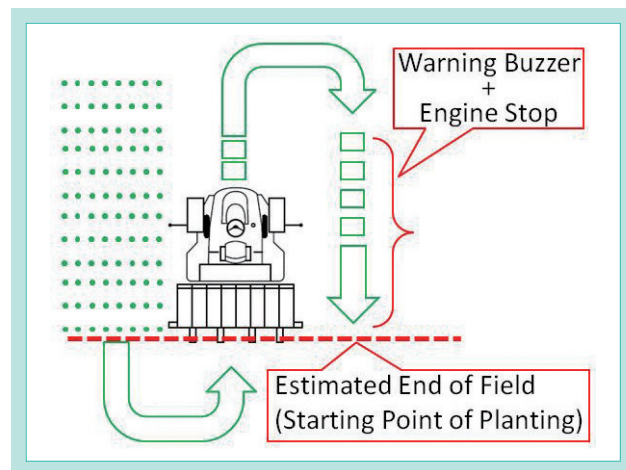


図 9 畦接近防止機能
Fig. 9 Approach Preventing Function

4.4.2 水田外での誤使用防止機能

農道での高速走行中やトラックへの積み下ろし作業中などに、誤って自動操舵機能が有効になった場合、思わぬ方向への操舵によりオペレータに不安を与える可能性がある。そこで、水田内での植付け作業時のみ、直進自動操舵が使用できる機能設計とする必要があった。

田植機の植付け部には、フロートと呼ばれる部品が装備されている(図10)。植付け作業時には植付け部を下降位置にセットし、このフロートを接地させることで、泥面を均しながら作業を行う。一方で、水田の外を走行するときには、フロートが地面と接触しないように植付け部は上昇位置にある。すなわち、フロートの接地状態を監視することで、植付け作業中であるかどうかを判断できると考えた。フロートの接地を検出するセンサを利用し、接地状態

の時にのみ自動操舵機能を有効にできるようにソフトウェアを設計した。水田の外で誤って自動操舵機能が有効となることを防ぎ、安心して作業できる機能を実現できた。

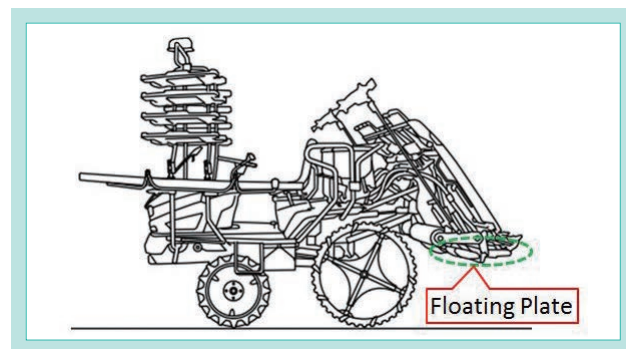


図 10 植付け部フロート
Fig. 10 Floating Plate

5. 市場適合性の評価

全国各地でモニタ試験を実施し、開発した直進キープ機能の評価を行った。各地における植付け跡の写真を図11に、測定データから得られた位置偏差の95%信頼区間を表1に示す。幅広い作業条件において、目標とする±10 cm以下の位置偏差を達成できることを確認できた。

モニタ試験で実施したユーザアンケートの結果を表2及び図12に示す。開発目標であった「操作の簡単さ」「作業精度」「安心作業」について、それぞれ93%、87%、80%のユーザが「評価する」と回答した。また、従来機+10%という開発機の販売価格を考慮し、「購入する価値があるかどうか」についても意見を収集した結果、約90%のユーザが「購入する価値がある」と回答した。これらのアンケート結果により、開発機能が国内農家のニーズに合った製品となっていることを確認できた。

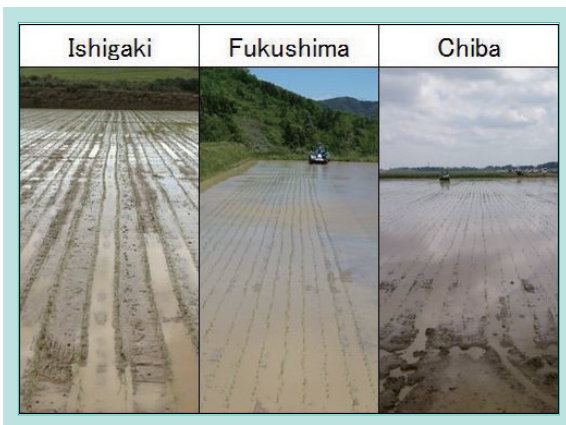


図 11 モニタ試験結果（写真）
Fig. 11 Result of Monitor Test (Pictures)

表 1 モニタ試験結果（95%信頼区間）

Table 1 Result of Monitor Test (95% Confidence Interval)

	Ishigaki	Fukushima	Chiba
2σ [cm]	4.51	3.47	6.82

表 2 アンケート項目

Table 2 Questions

No.	Question
①	Is the system easy to use?
②	How is the accuracy of auto-steering?
③	Is the system able to use safely for the first time?
④	Does the machine have value to buy?

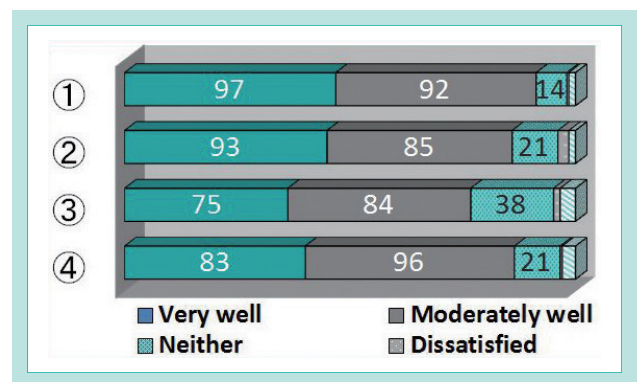


図 12 ユーザアンケート結果
Fig. 12 Results of Questionnaire

6. おわりに

人材不足が深刻化する日本農業の課題解決のため、業界初となる田植機向け直進自動操舵機能である「直進キープ機能」の開発に取り組んだ。独自の測位、制御技術開発により、低価格ながらオペレータの熟練度に左右されない高精度田植作業を実現できた(図13)。更にシンプルな操作インターフェースや安心サポート機能を織り込むことで、誰にでも使いやすい機能に仕上げた。直進キープ機能を搭載した田植機は2016年9月より販売を開始している。販売開始以降の同クラス田植機出荷台数のうち約50%が直進キープ機能を搭載したモデルとなっており、国内農家に広く受け入れられる製品となった。

本開発を通して、今後の日本農業に必要な不可欠である自動走行やロボット化といった先進技術の社会実装に寄与すること

ができたと考える。農作業の更なる効率化のため、今後も業界に先駆けた新技術の開発を推進していく。



図 13 開発機 (EP8D-GS) による田植作業
Fig. 13 Transplanting with EP8D-GS

参考文献

- 1) 農林水産省: 2015年農林業センサス結果の概要(確定値)、(2016) <http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/noucen/index.html>
- 2) 農林水産省: 平成29年農林業構造動態調査、(2017) <http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/noukou/index.html>
- 3) 農林水産省: 平成28年度新規就農者調査、(2017) <http://www.maff.go.jp/j/tokei/sokuhou/sinki/h28/index.html>

アグリロボトラクタの開発

Development of AgriRobo Tractor

トラクタ技術第一部／機械研究第一部／計測制御技術センター／車両基礎技術部

日本国内では農業人口の高齢化に伴い離農者が増加している。一方で、効率的かつ安定的な農業経営を目指す認定農業者の増加や農業経営の法人化が進みつつある。これら担い手による農地の集約によって営農規模の拡大が進む中、一層の生産コスト削減が求められている。次世代農業としてICT(Information and Communication Technology)を活用したスマート農業が推進される中、クボタはこれまでに担い手農家の生産の効率化と省力化を支援するためGNSS(Global Navigation Satellite System)を利用したスマート農業技術の開発を行っており、ファームパイロットシリーズとして自動操舵走行機能付き畑作大型トラクタと直進キープ機能付田植機を既に上市している。更なる高効率化、高精度化、省人化、軽労化を図るため、これまでの機能をより高度化したファームパイロットシリーズの第3弾として、監視下での無人トラクタの自動運転作業及び、無人トラクタを監視する有人トラクタとの2台協調作業を可能とするアグリロボトラクタを開発し、他社に先駆けて市場投入を行った。本稿ではアグリロボトラクタの概要と開発技術について述べる。

【キーワード】

スマート農業、自動運転、制御、GNSS、検知システム

With the aging of society, the number of retired farmers is increasing in Japan. On the other hand, certified farmers aiming for efficient and stable farm management and agricultural corporations are increasing. As agricultural lands are consolidated by these principal farmers, the scale of agricultural farms is expanding, and further reductions in production costs are required. As smart-agriculture utilizing ICT (Information and Communication Technology) is being promoted as the next generation agriculture, has been developing smart agricultural technology using GNSS (Global Navigation Satellite System) to support efficiency and labor saving for farmers, and has already launched a tractor with an automatic steering traveling function and a rice transplanter with a “keeping straight” function in the FarmPilot series. As the third step in the FarmPilot series, which has advanced more sophisticated functions, and in order to achieve even higher efficiency, higher precision, and less labor, we developed the AgriRobo tractor. This enables automatic operation of an autonomous monitored tractor and cooperative work with a manned tractor monitoring the autonomous tractor, and put it on the market ahead of other companies. Here we show the outline of the AgriRobo tractor and its technical development.

【Key Word】

Smart-agriculture, Autonomous, Control, GNSS, Detection System

1. はじめに

日本国内において、高齢化に伴う離農者は増加している。一方で、認定農業者は増加し、営農の組織化と法人化が進んでいる。これら担い手による農地の集約により、営農組織あたりの耕作面積は増加している。効率的で安定的な農業経営を持続するためには生産性と収益性の向上が必要であり、農業

機械には更なる効率化と省力化が求められている。

次世代農業であるICTを活用したスマート農業が推進される中で、クボタは更なる高効率化、高精度化、省人化、軽労化を実現させるためGNSSを利用した無人自動作業が行えるアグリロボトラクタを開発した。

2. 開発のコンセプトと目標

2-1 開発のコンセプトと目標

トラクタは作業機を付け替えることにより様々な作業が可能となるが、日本国内においては水田のロータリ耕うんと代かきがトラクタの主な作業である。移動時間の大部分を占める耕うんと代かき作業の効率化が求められている。

一般的なロータリ隣接耕うん作業の流れとしては、ロータリの幅から枕地の幅を決めた後、圃場の形状から作業の開始位置を決める。作業開始位置までトラクタを移動させ、ロータリを降ろし耕うんを始める。耕うん中は、稲株・コンバインのクローラ跡の凹凸・土壌の柔らかさ等の条件が変化する圃場の上で負荷や振動を受けながら目標とする経路に沿って作業する。対岸まで作業を進めた後、ロータリを上げて小回り旋回し、旋回後は残耕が生じないように既耕地と枕地に合わせてロータリを降ろす。そして目標と

する経路に進路を合わせて作業を行う。以後はこの動作を繰り返すこととなる。

効率良い作業のためには、圃場の形状と作業中のトラクタの位置を正確に測り、作業機の幅や圃場の形状に応じた効率の良い作業経路を設定し、刻々と状況が変化する圃場の中で目標とする経路に沿った走行が必要となる。

本開発では、①一連のトラクタ作業工程を無駄なく高精度に自動化させることによってオペレータの技能や熟練度に依存することなく高効率化・省力化・軽労化を実現する。②2台の自動運転トラクタによる協調作業を実現させることによって更なる効率化と省人化を実現する。③これら自動運転トラクタを運用するにあたっての安全性を確保する。この3点を目標に開発を進めた。

2-2 ターゲットとするアグリロボトラクタの概要

2.2.1 自動運転システムの概要

自動運転システムの概要を以下に示す(図1)。

- ①トラクタがRTK-GNSS(Real Time Kinematic-GNSS)基地局(以下「基地局」という。)、衛星と通信を行い自機及び圃場の位置情報を測位する。
- ②自動運転中は、トラクタと基地局及び衛星が常に通信を行って位置情報を更新し、圃場に対する位置を正確

に演算し、作業及び旋回・直進・停止を自動で行う。

- ③自動運転開始、中断、停止は監視者が適宜判断し、無人機と通信を行うリモコンにて指示する。
- ④協調作業の際は、上記の通信に加え、無人機と有人機の車両間の通信により、無人機周辺状況をモニタリング、双方の位置情報及び作業情報の共有を行う。

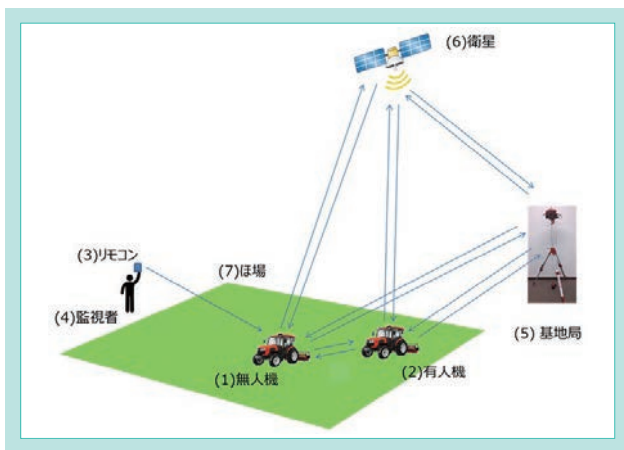


図1 自動運転システムの概要

Fig. 1 Schematic Diagram of the Automatic Operation System

2.2.2 自動運転トラクタの作業領域

自動運転可能な圃場内の作業域としては圃場中央部の隣接耕うん部と枕地耕うんの最内周部とした。水田においては、揚排水のための水口や取水バルブなどが畦から圃場内へ突出している場合があることに加え、コンクリート製の畦も多く、トラクタや作業機の接触や衝突の可能性を考慮して枕地外周部は自動運転の作業域から除外した。

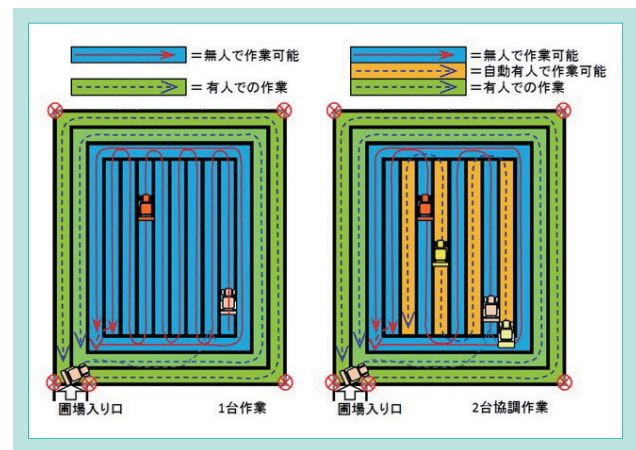


図2 自動運転トラクタの作業領域

Fig. 2 Autonomous Tractor Work Area

2台協調作業時においても上記と同じ作業域とした。作業順序としては、先行する無人自動トラクタが一筋置きの間接耕うんを行い、既耕地間の未耕地部分を有人自動トラクタが作業を行うこととした。無人トラクタを常に先行させることにより、有人トラクタに乗車している監視者の目視による監視を行い易くすることが可能となる(図2)。

2.2.3 アグリロボトラクタの構成

自動運転を実現するために搭載した主な機器及びシステムとして、高精度な位置情報を得られるRTK-GNSSユニット、圃場の位置情報の登録・作業経路の生成・条件設定・情報表示のためのターミナルモニタ、電子制御操舵システム、センサ及び機器類から得られる情報を基に統合制御を行う自動走行制御システム、監視者の車両周囲の

監視を支援する安全監視システム、車両間の情報共有及び無人機の周囲をカメラ監視するための通信システム、監視者が作業の開始・中断・停止を行うためのリモコン通信機器があり、アグリロボトラクタはこれらの多岐にわたる様々な機器及びシステムによって構成されている。

3. 解決すべき技術課題

3-1 自動走行技術の課題

3.1.1 高い走行精度の実現

トラクタでの作業は一般道を走行する自動車と比べ要求される位置精度が高く、かつ低速で作業負荷も大きいため走行ズレの解消に時間がかかる。更には、スリップや凹

凸により瞬時に目標位置からの位置ズレが生じることがある。これら種々の要因に対応しながら高い走行精度を達成する制御技術を新たに確立することが課題となった。

3.1.2 安定した自動旋回の実現

自動走行制御で重要な項目のひとつに旋回制御がある。本技術は水田を対象としており、国内の圃場を想定すると中央部を広く、枕地部は最小限のサイズに抑えたい。そ

こで枕地部の狭いスペースで既耕地に踏み込まず、また圃場から逸脱しないよう旋回制御することが課題となった。

3.1.3 同一圃場内協調作業における効率的なルート生成

圃場中央部を自動運転で作業するためには、走行ルートを生成する必要がある。本技術は1台車両での単独作業と2台車両(1台は無人自動、もう1台は監視者が乗車しての自動或いは手動)の協調作業が可能であり、作業終了後に既耕地を踏まず出入り口から圃場外へ移動できるよう、作業終了場所が圃場の出入り口近くになる作

業ルートの生成と、作業効率を上げることができる2台協調作業の作業ルートでは、どのような圃場形状でも必ず先行車両が追走車両の障害にならないよう、作業終了場所が出入り口近くになる作業ルートを生成しなければならないことが課題となった。

3-2 自動走行制御向け RTK-GNSS ユニットの課題

3.2.1 RTK-GNSSユニットの低コスト化とオールインワン化

ロボット農機の基幹技術となるRTK-GNSSは、市販品では測量用RTK-GNSSがベースとなっており、非常に高価である。また、複数の機器(GNSSアンテナや受信機、無

線機、IMU等)から構成されており、農機間の載せ替えやチューニングが容易ではなく、ユーザの負担となる。

3.2.2 高精度かつ高レートな位置・方位角検出

近年、普及が進みつつあるオーステアリングシステムでは、直進のみの自動走行(GNSS位置情報のみを活用)が可能である。しかし、旋回を含めた様々な作業パターン

を含む自動走行では、高精度かつ高レートな位置・方位角検出が必須である。

3-3 無人運転状態での安全確保

農水省の自動運転ガイドライン¹⁾では、トラクタを自動で作業させるために監視者がトラクタ近傍で監視することとしている。しかし、実際には全ての工程が完了するまで監視者が目視で途切れなく監視し続けることは難しく、監視者の監視を支援するために、トラクタ周囲の障害物を検出し、衝突前に自動的にトラクタを停止させるシステムが必要である。また、農業機械の自動運転に関する国際規格(ISO18497)²⁾が発表される見通しであり、この規格の要

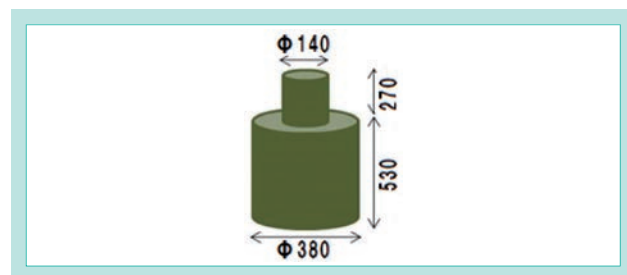


図3 障害物モデル
Fig. 3 Test Obstacle

求に適合することが必要となる。規格では障害物を検知するためのシステムに対し、障害物モデル(図3)が定めら

れており、自動運転の際にはこのモデルを検知し、衝突する前に自動停止することが求められている。

4. 開発技術

4-1 走行制御技術と自動旋回制御技術と協調作業ルート生成技術

4.1.1 高精度走行制御技術の開発

制御目標を「目標方位に向かって走る(方位偏差最小)」及び「目標経路からの位置偏差を最小」の2種類設け、それらの合成により操舵出力を決定する制御アルゴリズムを実装し、圃場状態に関わらず、蛇行感のない高い走行性を実現している。また、アグリロボトラクタは「自動運転」を行うため、常に一定の経路を走行し続けるだけでなく、動作開始点への誘導や自動旋回、離れた目標経路上にある作業開始点への移動など、各種動作シーケンスを切替えながら一連の作業をこなしていく。そのために、走行制御アルゴリズムにも高い適応性が求められる。

例えば、特定の目標経路に沿った制御動作中は、位置偏差及び方位偏差ともに比較的小さな値で安定的に推移するが、旋回動作から直進動作等、動作シーケンスが切り替わった直後は、瞬間的に大きな位置偏差が発生するため、そのままでは操舵出力が過大となり目標経路への収束性が低下することとなる。そこで、車両が目標経路に接近するほど方位ゲインを強め進入角度が徐々に小さくなる可変ゲインアルゴリズム(図4)を開発し、機体の状態に応じて常に最適な制御が行えるようにした(図5)。以上の技術開発により、圃場状態に関わらず、常に高精度な走行を可能とした。

4.1.2 自動旋回制御の解決策

走行ライン情報はあらかじめガイダンスアプリから取得しており、走行中のライン終端(中央部作業ラインの終端)に到達すると次の作業ラインの開始位置、ライン方位、車両との位置関係が算出できる。この位置関係から仮想旋回経路を生成し、経路に沿って旋回動作を行うが、畦に対する走行ライン方位によっては経路通り走行すると圃場から逸脱してしまう場合がある。その場合は最小限のスペースで旋回ができるように切替えし旋回経路を算出し直す(図6)。また、旋回動作中は旋回経路からのズレが一定以上になると減速し、更にズレが大きくなると再度切替えし動作を行うなど、新たな旋回経路を生成するリトライ制御により旋回精度を高めている。加えて、車軸回転から得られる車速とGNSS車速の比較からスリップやスタック、IMU情報から車両の傾き、GNSS位置情報から圃場逸脱を即座に検知するなど、制御不能な状態を即座に検知し停車することで安全に配慮した旋回制御を実現した。

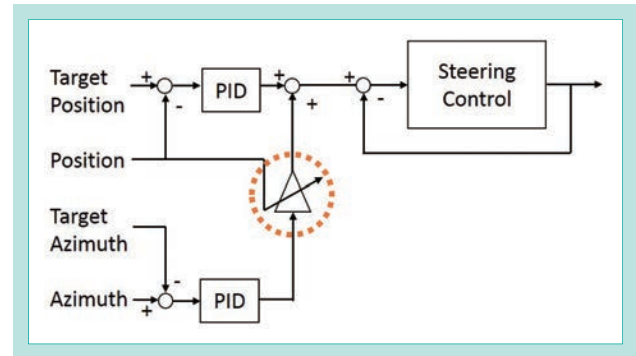


図4 コントローラ構成
Fig. 4 Configuration of the Controller

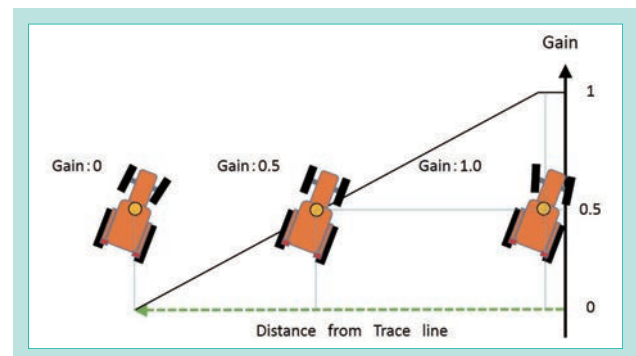


図5 目標経路からの距離とゲイン
Fig. 5 Distance from Trace Line vs Gain

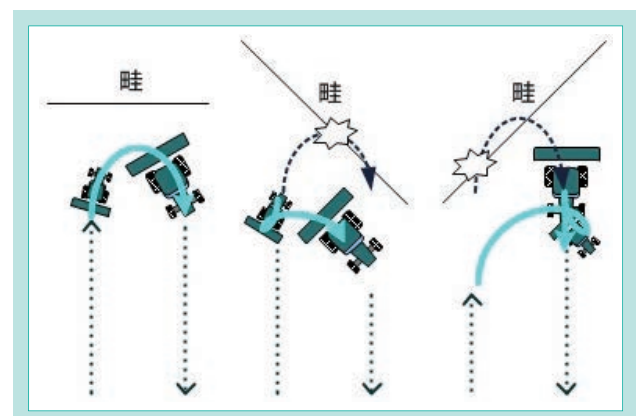


図6 切り替えし経路
Fig. 6 Turning Route

4.1.3 協調作業ルート作成の解決策

圃場中央部の作業ルートのライン総数が偶数の場合は、出入り口に最も近い作業ラインを先行車両の作業ラインとし、出入り口側のラインの端を作業ラインの終点になるように作業ラインの方向を決定した後、これを基準として他のラインに対して作業車両や作業方向、作業の開始位置を決定する(図7)。

圃場中央部の作業ルートのライン総数が奇数の場合は、出入り口側に最も近い作業ライン2本を先行車両の作業ラインとした後、他のラインに対して作業車両や作業方向、作業の開始位置を決定する(図8)。この場合、先行車両と追走車両との擦れ違い時の接触を考慮し、追走車両の作業終了位置が出入り口と逆を向くことになるが、追走車両となる有人機には監視者が必ず乗車しており、有人機の自動運転終了後は手動運転による圃場最外周の枕地作業へ移行するため、問題とはならない。

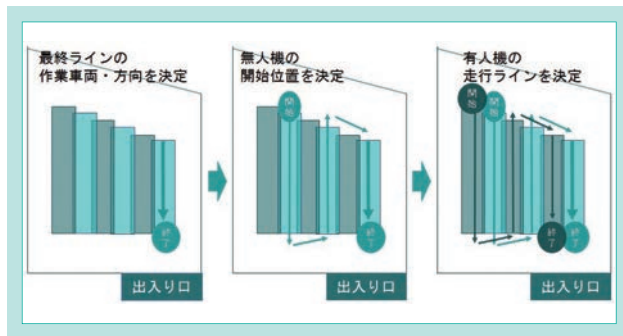


図7 作業ルートの生成 (偶数時)
Fig. 7 Generation of Work Line (Even Number)

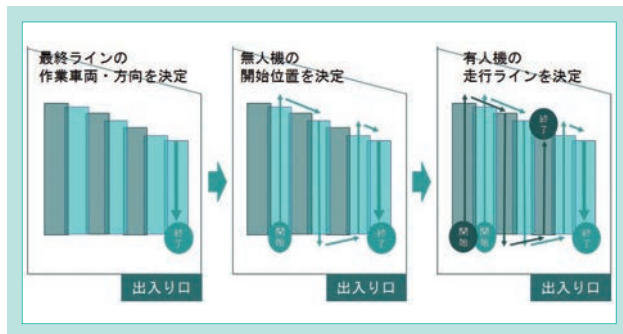


図8 作業ルートの生成 (奇数時)
Fig. 8 Generation of Work Line (Odd Number)

4-2 農機の自動走行に最適な RTK-GNSS ユニットの開発

4.2.1 低コストRTK-GNSS一体型ユニット

構成機器を集約した一体型RTK-GNSSユニットを独自に開発した(図9)。本ユニットでは、安価デバイスの採用、GNSSアンテナの自社開発、及び高精度化ソフト開発(IMUとGNSSを組合せたハイブリッド航法(後述))により、安価でありながら、高性能なRTK-GNSSユニットを実現した。また、一体型ユニットとすることにより、農機間での載せ替えが容易となるだけでなく、GNSSアンテナ近傍にIMUを配置し、より正確な位置・方位演算を行うことができる。

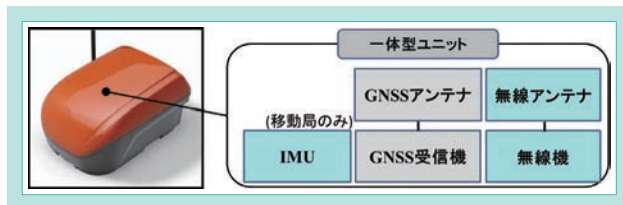


図9 開発した RTK-GNSS ユニット
Fig. 9 Developed RTK-GNSS Unit

4.2.2 高精度かつ高レートな位置・方位角検出手法

凹凸した圃場においても高精度な農作業を実現し、かつ高レートな出力を可能とする航法センサとするため、GNSSとIMUの長所を活かしたハイブリッド航法をベースに本機情報(本機の手車速や操舵角、マップ情報から生成する本機の走行状態)を活用することにより、各走行状態に応じた独自の最適演算を行う。これにより、直進だけでなく、旋回も含めた様々な作業パターンにて、高レート・高精度な位置(3 cm以内)・方位角(1° 以内)検出を実現し(図10)、農機の自動走行に最適な航法センサを完成させた。

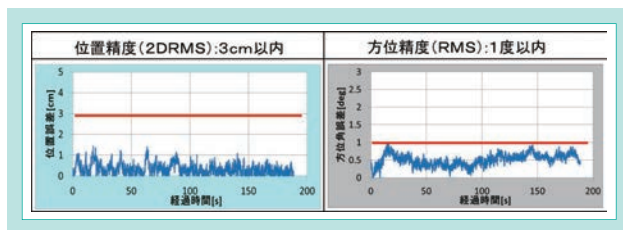


図10 ハイブリッド性能評価
Fig. 10 Result of Performance Evaluation

4 - 3 障害物検知システムの構築

4.3.1 障害物検知システムの構築

トラクタはボンネットの外側に前輪があり、作業機はキャビンの幅よりも広く、車両外形が「複雑」な形状をしている。ISO18497の障害物モデルは高さが800 mmと低く、これをトラクタ周囲で検知するためには、複数のセンサを組み合わせる必要があった。

自動運転時に検出した障害物と衝突する前に停止するために、車両の左右及び後方にレーザスキャナを搭載した。選定したレーザスキャナは一つの平面を広角でスキャンできるため、遠方にある障害物を検出するのに適している。一方でトラクタの至近距離にはスキャナの走査平面の下に死角ができるため、超音波ソナーを配置し、背の低い障害物を検出可能とした。超音波ソナーは検知距離が短い、近傍の空間を検知できるため、発進前のトラクタ近傍の検知に適した特性を持っている。

上記のように、センサの配置はそれぞれの特徴を考慮したものとしているが、いずれも発進前・自動運転中で検出機能は有効とし、相補的に検出能力を活用している。

アグリロボトラクタでは、3台のレーザスキャナと8個の超音波ソナーによってトラクタ周囲の障害物監視を行う構成とした(図11)。

4.3.2 実圃場環境への適合

搭載したレーザスキャナ、超音波ソナーは周囲に物体が存在することは検知できるが、その物体が何であるかを特定することはできない。トラクタの作業環境では、圃場内の雑草、収穫後の株あと、タイヤに付着した泥など、障害物として誤検出され得るものが数多く存在する。障害物の誤検出は可用性を低下させ、無人による効率化という目的そのものを損なう可能性がある。様々な圃場で評価を繰り返し、障害物の誤検出を回避するための調整や検出アルゴリズムの開発を行った。

レーザスキャナに対しては、障害物として検出するひと

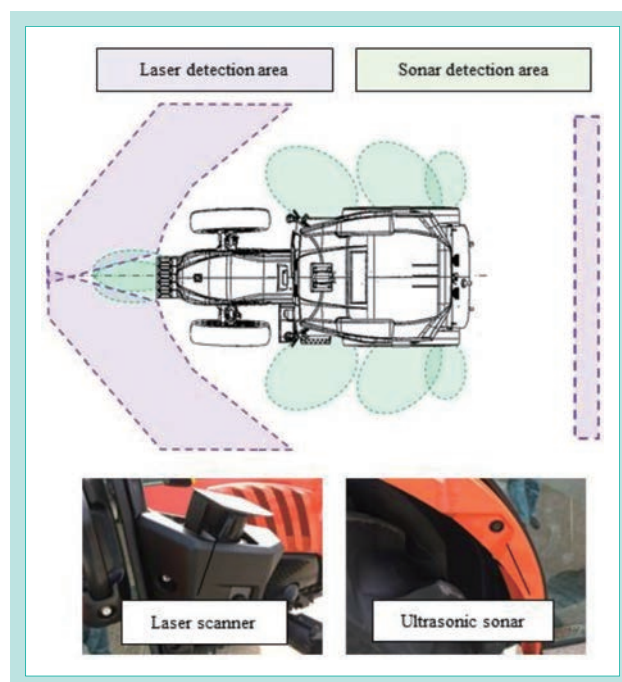


図 11 障害物検知システム
Fig. 11 Object Detection System

塊のサイズの最低値や、障害物と判定するまでの検出回数をチューニングし、特に圃場内の雑草の誤検出を可能な限り低減した。超音波ソナーではセンサが検出した距離に重み付けを設け、「障害物らしさ」を推定することで、特に地面の凹凸に対する誤判定の低減を実現した。

障害物が存在する可能性が高いと考えられる畦際に対しては、圃場端での旋回動作前にレーザスキャナ前方の検出エリアを旋回する方向に対して拡張し、旋回地点周囲の確認を行うことで、障害物へ接近する可能性を一層低減することとしている。

5. おわりに

作業の高効率化、高精度化、省人化、軽労化をコンセプトに自動運転トラクタとしてアグリロボトラクタを開発した。自動運転及び協調作業の実現により、市場要求である効率的な農業経営の実現に大きく貢献できるものとする。

今後は、お客様からの評価や要望をもとに、汎用性の向上や他のクボタトラクタへの技術展開を進めていくとともに、次のステップであるKSASとの連携や完全自動化の実現へ向けての取り組みを推進していく所存である。

参考文献

- 1) 農林水産省：農業機械の自動走行に関する安全性確保ガイドライン
(平成29年(2017年)3月31日付け28生産第2 1 5 2号農林水産省生産局長通知)
- 2) ISO/FDIS 18497: Agricultural machinery and tractors — Safety of highly automated agricultural machines

KSAS 乾燥システムの開発

Development of KSAS Drying System

ポストハーベスト技術部

近年、IoT(Internet of Things)技術やビッグデータ解析技術などのICT(情報通信技術)の進化が著しい。一方、ミニライスセンタを自ら建設し、営農改善を狙う意欲的な担い手が増加してきている。そのため、クボタでは、ICTを活用しミニライスセンタの運用を支援するシステムの検討に着手し、2017年6月、「KSAS乾燥システム」を他社に先駆け市場に投入した。本論では、この「KSAS乾燥システム」の開発コンセプトや、提供機能を説明する。また、2016年に8ヶ所でシーズンを通じたモニタテストを実施した。その結果から、本システムがポストハーベスト分野において、タンパク仕分等のICTを活用した新しい付加価値の提供が行えただけでなく、農家の収益改善に対する有効性も確認できた。

【キーワード】

ミニライスセンタ、クボタスマートアグリシステム、KSAS乾燥システム、IoT、ICT

In recent years, the evolution of ICT (Information Communication Technology) such as the IoT (Internet of Things) and big data analysis technology has been remarkable. Meanwhile, the number of ambitious farmers constructing mini rice centers for themselves and aiming for improvements in farming is increasing. For this reason, the Post-Harvest Technology Division began studying a system to support the operation of mini rice centers using ICT. In June 2017, Kubota launched the "KSAS drying system for mini-rice centers" ahead of other companies in the market. In this paper, we explain the development concept of the "KSAS drying system" and the functions to be provided. In addition, the results of monitoring tests through the season at 8 places conducted in 2016, show that this system is useful for providing new value using ICT such as protein sorting and improving farmers' earnings in the post-harvest are.

【Key Word】

Mini Rice Center, Kubota Smart Agri System, KSAS Drying System, IoT, ICT

1. はじめに

近年、IoT技術やビッグデータ解析技術などが著しい進化を遂げている。これらのICT(情報通信技術)の進化を農業に活用するため、クボタでは営農を支援するKSAS(クボタスマートアグリシステム)を開発し、2014年6月からサービスを開始した。このKSASは、トラクタ/コンバイン/田植機などの農機からの情報をクラウドに集め、互いに連携させつつ、圃場管理や各時期の農作業(田植え、刈取り、施肥、防除など)に対して、PDCA(Plan-Do-Check-Act)型農業の実施を支援する総合的な営農システムである。

一方、国内農業において、担い手農家への圃場の集約が進みつつある。その結果、農家1軒当たりの耕地面積が増え、農業経営も家族経営から営農組織に移行する兆候が目立ってきている。2015年に農林水産省が発表した農林水産統計¹⁾によると、2005年には約200万軒であった農家数が、2015年には、30%以上減少し、約140万軒となっている。そのうち、営農組織は2.8万軒から3.3万軒に増加していることから、農家数

が減少する一方、逆に規模の大きい農家数は増えてきており、圃場の集約化とともに営農の大規模化/組織化が進行しつつあることが分かる。意欲的に米作りに取り組み担い手は、更なる規模拡大や新規販路開拓/品質向上を行うために、自ら乾燥調製施設を建設することが多い。これらの乾燥調製施設は、これまで一般的にライスセンタと呼ばれていたJA(農業協同組合)等の乾燥調製施設より一回り規模が小さいため、ミニライスセンタと呼ばれる。

そこで、クボタでは、ICTを活用し、ミニライスセンタの運用を効果的に支援するシステムの検討を2014年から開始した。2016年のモニタテストを経て、2017年6月に、ミニライスセンタ向けのシステム(「KSAS乾燥システム」)を他社に先駆け市場に投入した。本論では、この「KSAS乾燥システム」の開発コンセプトや、提供機能を説明する。また、2016年に8ヶ所で実施したモニタテストの結果から、本システムが実運用に適した有用なシステムであることを示す。

2. 開発のコンセプトと目標

2-1 開発のコンセプトと目標

KSASは、農機とICTを活用し「儲かるPDCA型農業」の実現を目指している。

今回、収穫までを対象としていたKSASの範囲を玄米の出荷まで広げ、これまで栽培情報として活用してきたKSASの農機や収穫データを、ミニライスセンタでの工程にも活かすことで、農家の収益改善/売上向上を実現することを「KSAS乾燥システム」の開発コンセプトとし、目標を次の3点と定めた。

①作業の効率化による収益改善

KSAS乾燥システムでは、離れた場所にあるミニライスセンタと圃場との間で、最適なPDCAを回す手法を構築することで収益改善を目指した。

②農機とICTを活用した新しい付加価値創出による売上向上

ミニライスセンタより前工程の農機の情報を活用できるというKSASの特徴を活かし、これまでにない新しい付加価値の創出を目指した。

③他社の乾燥調製機器も利用可能

ミニライスセンタには多くの乾燥機メーカーの機器が混在して稼働しているのが一般的であり、自社ブランドに拘ってはいは、利用していただけるユーザが限定される。そのため、複数メーカーの賛同を募り、それぞれのメーカーの機器と接続できることで、より多くのユーザに利用していただけることを目指した。

2-2 システム構成

目標とするKSAS乾燥システムの全体像(図1)。

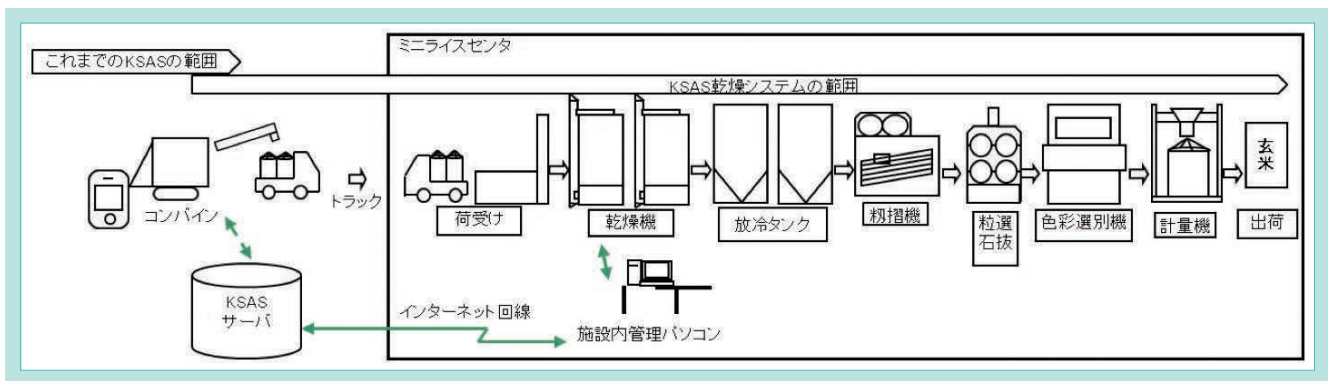


図1 システム構成

Fig. 1 System Configuration

3. 解決すべき技術課題

前述の目標を達成し、更なる収益改善、売上向上を実現するために、担い手にヒアリングを重ね、現在の運用/技術の課題を以下のとおり抽出した。

(1)作業の効率化:離れた場所にある刈取り圃場とミニライスセンタの間では、今まで勤と経験に頼った運用が行われてきた。例えば、刈取り担当者は、乾燥機に入り切るだけの刈取り量が見込まれる刈取り圃場を勤と経験で選定し、刈取り終盤にミニライスセンタ担当者に連絡して、乾燥機の張込可能量を確認する。ミニライスセンタ担当者は、まだ乾燥機に入れていない籾、圃場からの運搬中の籾を鑑み、大まかな乾燥機の空き容量を返答する。結果、乾燥機に入り切らない籾が出て、時間や籾の無駄が発生する等である。これらの刈取り・乾燥計画を事前に計画・実行し、その履歴を振り返り、改善できるPDCA型

農業を運用できるシステムを、簡単に使いこなせるインターフェースで実現することを一つの課題とした。

(2)新しい付加価値の創出:KSASで重要視しているのは、売上やブランド化に直結する「収量」と「食味」向上である。これまで、後工程の乾燥機において、乾燥機の稼働率を考え複数圃場の籾を混ぜて入れていた。食味・収量センサ仕様コンパインの登場により、センサで得られたデータは、翌年の肥培管理などに活かされ、栽培圃場全体の「収量」と「食味」の底上げに利用されることになった。これらセンサでは食味に相関の高いタンパク値等を計測しており、このデータを乾燥施設でも利用し、張り込む乾燥機を仕分け、その結果「食味」の良い低タンパク米を新規販路開拓などに繋げられるシステムの実現を二つ目の課題とした。

(3)他社の乾燥調製機器も利用可能:KSAS乾燥システムへの接続仕様は、システムから見て共通化が必要となる。しかし、各社の製品は、既に長い開発の歴史を持っており、ハードウェアやソフトウェアの仕様、エラーのコードや分類などの仕様などが各社各様それぞれ異なり、各社の仕様を共通化したり、逆にKSAS乾燥システム側で、仕様の差異を吸収し、機器毎に個別対応したりすることは難しい。更に、過去に出荷された既販機を含む各メーカーの機器の対応も必要である。そこで、接続仕様を共通仕様と機種依存/メーカー依存仕様に切り分け、システム全体で吸収し、各社の異なる仕様を共通に扱える仕組みを作り上げることを三つ目の課題とした。

また、離れた場所においても即座に乾燥機のエラーを知りたいという要望が多くあった。

これらの運用/技術課題を吟味し、「KSAS乾燥システム」として、以下の5つの機能を実現した。次章では、これらの機能を順に紹介する。

- ①刈取乾燥計画作成
- ②ミニライスセンタ状況の見える化
- ③タンパク仕分と水分仕分
- ④異常時のメール通知
- ⑤作業工程の記録

4. 開発技術

4-1 KSAS 乾燥システムの機能紹介

4.1.1 刈取乾燥計画作成

KSAS乾燥システムは、ミニライスセンタでPDCA型農業を実現できるようにするため、圃場の収穫総量やコンバインの刈取能力、乾燥機の張込容量を画面で確認しながら、効率的な刈取乾燥計画を立てることが可能である。担い手は、図2の計画作成画面で、左側の点線で囲まれた部分で乾燥機とコンバインを選び、中央に表示される地図から圃場を選択し、乾燥機の張込可能量を確認しながら、簡単に刈取乾燥計画を作成することができる。また、操作に慣れない担い手のため、図2の下部の点線で囲まれた部分に、操作方法のガイダンスが表示される。この刈取乾燥計画を作成すると、コンバインオペレータが持つスマートフォンに刈り取る圃場の場所が示された作業指示が今日の計画として送信される。コンバインオペレータは、その指示を確認し、その指示に従いながら刈取作業を行う。

刈取乾燥計画を立てることで、乾燥機の充填率向上と刈り過ぎ防止が実現できる。更に、各作業者がどこにいても、その日の計画に対する全体進捗状況を簡単に把握できるようになる。

4.1.2 ミニライスセンタ状況の見える化

図3は、ミニライスセンタの全体状況が俯瞰的に確認可能な画面である。離れた圃場からでもミニライスセンタの状況が一目で把握できる。従来であれば、コンバインオペレータと、ミニライスセンタの作業員間の連絡手段は携帯電話などによる通話が多かったが、その頻度を下げることが可能となる。図3の点線で囲まれた部分は、上から順に、その日の作業計画の一覧、コンバインで収穫した穀をミニライスセンタへ運ぶ状況の一覧、乾燥機をはじめとし



図2 計画作成画面例

Fig. 2 Plan-Making Display Example

た各調製機器の稼働状況の一覧となる。また、主にKSASで作業日誌をつけるための専用スマートフォンアプリ(図4)でも、各乾燥機の張込み量や運転状態を離れた場所から確認可能である。

刈取乾燥計画作成とミニライスセンタの見える化の機能で、圃場とミニライスセンタ間のスムーズな連携が生まれ、生産性向上が可能となる。

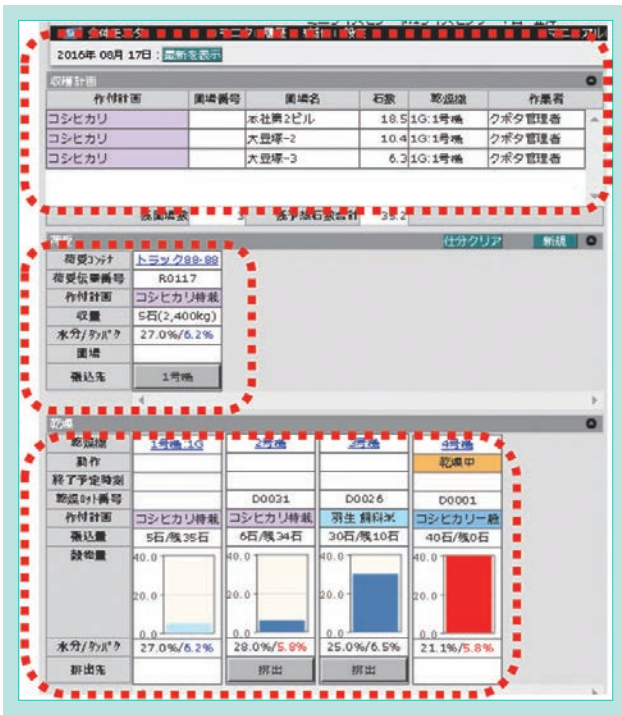


図3 全体状況画面例(PC/タブレット)

Fig. 3 Screen Example of the Monitoring of a Rice Dryer for PC/Tablet

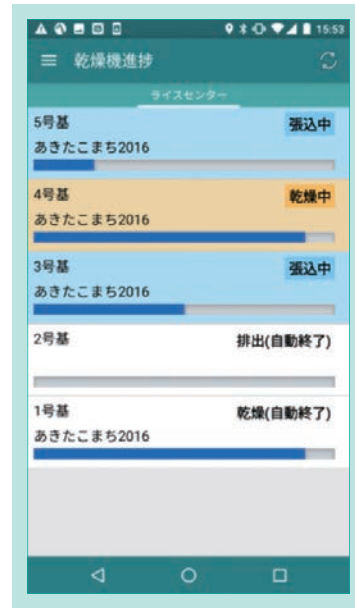


図4 全体状況画面例(スマートフォン)

Fig. 4 Screen Example of the Monitoring of a Rice Dryer for Smartphone

4.1.3 タンパク仕分と水分仕分

食味・収量センサ仕様コンバインは、圃場で刈取りしながらセンサでタンパク値、水分値、収量を測定し、これらの値をクラウドに定期的送信することが可能である。

これらの値をKSAS乾燥システムで処理することで、張込先を2種類のナビゲーション方法(タンパク仕分と水分仕分)で振り分けることが可能である。

(1)タンパク仕分

タンパク仕分では、低タンパク籾を特定の乾燥機に集めることで、図5に示すように低タンパク米を販売につなげることが可能となる。近年、食味の優れた低タンパク米の生産に注目が集まっており、高付加価値米によるブランド化/新規販路拡大等、担い手農家が新しい取り組みに積極的にアプローチすることが可能となる。

(2)水分仕分

水分仕分では、図6に示すように、乾燥機に張り込む段階で、水分のばらつきを減らすことにより、仕上がり時の水分のばらつきを減らし、出荷米の品質向上や過乾燥/乾燥不足を防ぐことが可能となる。また、水分差が大きい籾を特定の乾燥機に集中させることで、乾燥機運用の効率化が可能となる。売上げと比例する収量は水分も含んだ収量であるため、米に含まれる水分値は売上げに結び付く重要な要素である。

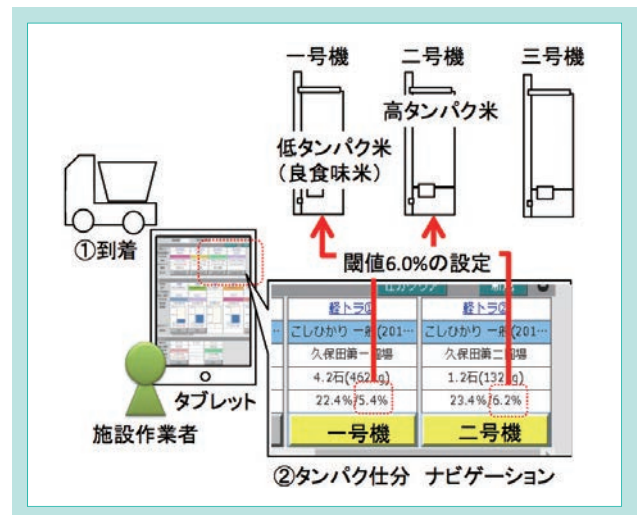


図5 タンパク仕分

Fig. 5 Sorting by Protein

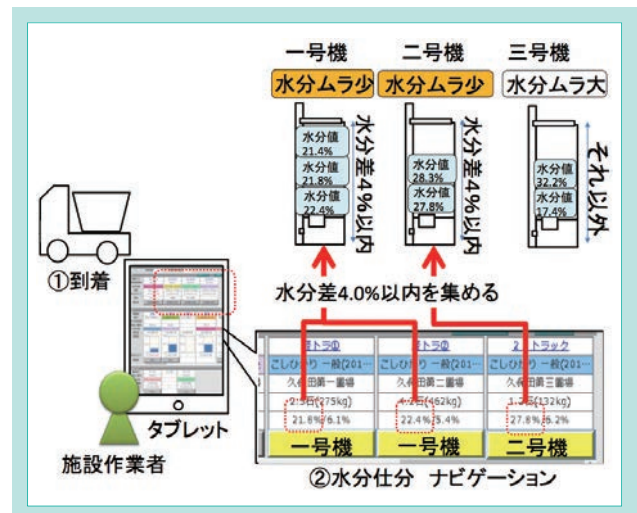


図6 水分仕分

Fig. 6 Sorting by Moisture

4.1.4 異常時のメール通知

乾燥機の一般的な使い方として、日中コンバインで
 籾を収穫し、日が落ちてから乾燥機を点火し、ほとんどの
 場合、翌朝に乾燥が終了する。乾燥機がエラーで停止し
 た場合、籾が腐敗し、その乾燥機内の籾が使えなくなるだ
 けでなく、乾燥機の清掃も必要となり、大きな手間となる。

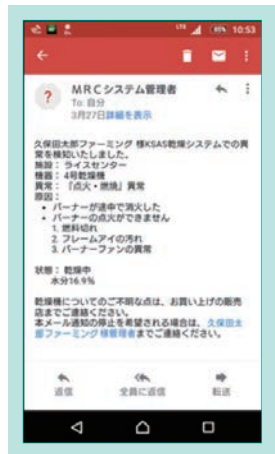


図 7 エラー通知メール例

Fig. 7 Example of Email Error Notification

KSAS乾燥システムでは乾燥機の異常を検知した場合、
 メールで異常状態を通知することができる(図7)。また、離
 れた場所から乾燥調製の状態を詳細に把握できるため、
 夜間巡回の回数が減らせる。

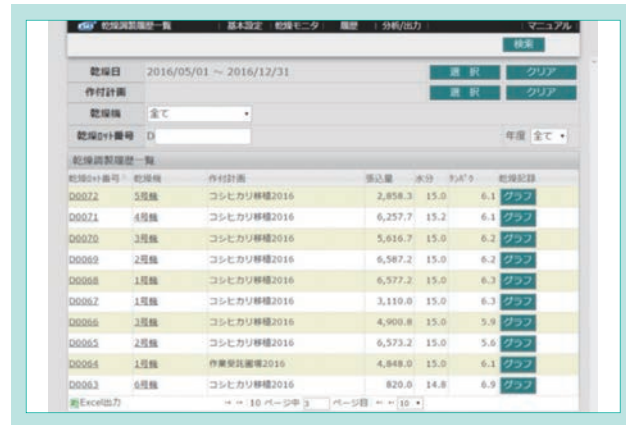


図 8 検索画面

Fig. 8 Search Screen

4.1.5 作業工程の記録

荷受から出荷までの作業工程を、担い手がPCやタブ
 レットで記録することにより、後からいつでも振り返るこ
 とが可能である。数値で管理し、確認できるようになるた
 め、品質改善の取り組みでの大きな助けとなる。

これらのデータは、荷受単位、乾燥単位で、KSASクラ
 ウドに蓄積されたデータに対し、検索や表示、検索結果の
 エクセル出力が可能である。図8は乾燥ロット単位の検索
 画面である。条件を指定することで、検索結果が表示され
 る。図9は、これまでの収穫した籾のタンパク値の分布を
 グラフで確認する画面である。



図 9 タンパク分布

Fig. 9 Graph of Protein Value

4-2 システムの評価

2016年、全国8ヶ所(表1)の担い手農家様と一緒に、
 KSAS乾燥システムのモニタテストと、その評価を行った。

担い手への事前ヒアリングにおいては、夜間にミニラ
 イスセンタの状況が確認できることや、乾燥機の異常を
 メールで受けとる機能に対して魅力を感じるとの声が多
 かった。加えて、モニタテスト後のヒアリングにおいては、
 日中、離れた場所からミニライスセンタの状況が分かるた
 め、必要に応じて圃場からミニライスセンタに対して最適
 な指示が出せる点や、今まで残すことができなかつた農
 作業の全データを数値で残すことができ、翌年の作物の
 品質改善に取り組める点について、非常に有用である
 との声をいただいた。また、全利用者が翌年も利用したい
 とのことであった。

表 1 モニタテスト先一覧

Table 1 List of Monitor Test

	場所	耕地面積	KSAS対応乾燥機数	KSAS対応コンバイン数	作業員数
A	秋田県	70ha	5	2	6
B	茨城県	45ha	1	1	2
C	新潟県	54ha	6	2	6
D	青森県	70ha	2	1	5
E	福島県	30ha	0	1	3
F	福島県	15ha	1	1	2
G	岐阜県	30ha	3	1	3~4
H	福井県	30ha	4	1	4

以下、費用効果を中心に、得られたデータから考察したことの一部を簡単に紹介する。

【人件費削減効果】

ミニライスセンタの稼働状況を前年と比較することで、1 haあたり0.6時間ほどセンタの稼働時間が短くなっている現象を確認できた。作業員数と一人当たりの人件費から試算したところ、金額でセンタ当たり15万円弱の人件費削減効果があったと算出した。ヒアリング結果の内容も含めて、以下の理由でコンバインの稼働率が上がったと考察した。

- 圃場とセンタ間の搬送トラックの状況が見える化されたことにより、搬送状況に合わせてセンタでの受入れ準備が効率的に行えるようになったため
- 刈取乾燥計画作成と進捗の見える化により、次の刈取圃場の確認や、刈過防止のための電話確認の頻度が減るため

【タンパク仕分効果】

表1におけるAとGのモニタでタンパク仕分を実施した。タンパク含有率から売上価格を推測すると、1 haあたり約4万円の売上向上効果があることが分かった。

【水分仕分効果】

AとCのモニタで水分仕分の効果を確認した。張込み時の水分値のばらつきが減ることで、仕上がりの水分ムラが減少することが確認できた。過乾燥を防ぐことによる費用効果はシーズン通して、数万円ほどであった。

また、多くの乾燥機メーカーにKSAS乾燥システムの指向に賛同いただき、主要6社のうち、4社の乾燥機メーカーにKSAS対応乾燥機を製品化していただいた。対応型式を表2に示す。

表2 対応型式
Table 2 Corresponding Model

KSAS乾燥システム対応乾燥機一覧(順不同敬称略、2017年4月現在)				
クボタ	金子農機	サタケ	静岡製機	山本製作所
KRC	KWB-X	SDR-CP II	SSE-EX	HD-AR
KRH	KWC-X	SDR-CPS	SSE-ELLA	HD-AR2
	KWH-X	SDR-CPSⅢ	SSE-ELK	HD-AR3
	KWF-X	SDR-LP	SSE-GLK	HD-BR
	RKB-XS	SDR-LPS	SSE-EM	HD-DR
	RKC-XS	SDR-LPSⅢ	SSE-GM	HD-MR
	RKH-XS	SDR-LEZG	SSE-ES	HD-NR
	RKF-XS	SDR-LEZK	SSE-GS	HD-NR2

5. おわりに

KSAS乾燥システムは、発売前に実施したモニタテスト先全てで、担い手に有用性を認めていただいた。翌年以降も継続して利用していただけることになっている。また、KSAS対応乾燥機もクボタを除き4社から販売されることとなった。このようなことから、クボタは、開発コンセプトに従い、作業の効率化、新付加価値の創出、他社乾燥調製機器利用可能という3つの技術的課題を解決するシステムを開発できたと考えている。

しかしながら、ミニライスセンタのICT化に取り組む中で、まだまだ取り組むべき課題が残されている。例えば、操作の自

動化や導入の簡易化である。

今後、クボタではこれらの課題に対してICTの効果的な活用方法を検討し、KSAS乾燥システムを改善し続け、農業のイノベーションに積極的に貢献していくつもりである。

<WEBサイト>

KSAS: <https://ksas.kubota.co.jp/>

KSAS乾燥システム: <https://ksas.kubota.co.jp/dryer/index.html>

参考文献

- 1) 農林水産省.農林水産統計「2015年農林業センサ結果の概要(確定値)」平成28年(2016年)3月25日

ウインチ型パワーアシストスーツWIN-1の開発

Development of WIN-1 Winch-type Power Assist Suit

農業ソリューション技術部／機械研究第一部

急速な高齢化や労働力不足など、多くの課題を抱える日本の農業は変革の必要に迫られている。その解決策の一つは、農業での女性や高齢者の更なる活躍を促進することである。一方、機械化が進んだ日本の農業においても、特に野菜や果樹栽培では未だに人手に頼らざるを得ない重量物の運搬作業が多く残されている。収穫物が詰まった20 kgにもなるコンテナを、地上から作業者の肩ほどの高さにまで積み上げる作業は、作業者の腰や腕、肩などの上半身に大きな負担となっていた。クボタは、これらの要求に応えるため、腰と上半身の両方をアシストするパワーアシストスーツの開発に取り組んだ。その結果、ウインチを備えた独自のアシスト方式を採用し、扱いやすい操作と制御、新素材の活用による機体の軽量化を実現したWIN-1を製品化し、2017年より販売を開始した。

【キーワード】

パワーアシストスーツ、コンテナ、積み上げ作業、軽労化、ウインチ、軽量化、炭素繊維強化樹脂

Domestic agriculture, which has many problems such as rapid aging and labor shortages, is under pressure to change. One solution is to promote the further activities of women and the elderly in agriculture. On the other hand, mechanization has progressed in domestic agriculture, but there are still many people carrying heavy loads, especially in vegetable and fruit farming. The work of stacking 20 kg containers filled with crops from ground to shoulder height is a heavy strain on the waist, arms and upper body of workers. To respond to these demands, Kubota has worked on the development of a power assist suit that assists both the waist and the upper body. As a result, Kubota produced the WIN - 1, which adopts a unique assist system with a winch, realizing easy operation and natural control, and started selling it in 2017.

【Key Word】

Power Assist Suit, Container, Stack Works, Reduce Labor, Winch, Weight Reduction, Carbon Fiber Reinforced Plastics

1. はじめに

日本の農業は、急速な高齢化や後継者不足などの課題を抱えており(図1)¹⁾、高齢者が末永く活躍し、新規参入者も働きがいを実感できる、魅力ある産業への転換が求められている。そこで、2013年より国が主体となり、ロボット技術やICTを積極的に活用し、生産性や省力化を極限まで高めるスマート農業の実現にむけた研究が進められている。そのテーマの一つに、パワーアシストスーツ等を活用した負担の大きい作業の省力化が挙げられている²⁾。

パワーアシストスーツとは、人が装着して使用する、重量物を運搬する際の身体的負担を軽減する装置であり、大学等の研究機関やベンチャー企業により研究がさかんに行われてきた³⁾⁴⁾⁵⁾。医療・介護の分野では既に製品化され注目を集めており、建築、流通、製造業などの一般産業分野への展開も検討がなさ

れている⁶⁾。

これからの日本の農業には、女性や高齢者の活躍が不可欠であり、農作業の更なる軽労化が必要である。クボタはこの要求に応えるため、いち早くアシストスーツの軽労化効果に着目し、2013年にはぶどうや梨などの棚下作業時の腕の姿勢保持を助けるアシストスーツ「ラクベスト」を製品化した。更に、より幅広い農作業の軽労化を実現するため、農業における重量物の積み上げ積み降ろし作業に対応したクボタ独自のウインチ型パワーアシストスーツWIN-1を開発し(図2)、2017年1月より販売を開始した。

本稿では、農業の重量物運搬の軽労化により、女性や高齢者を体力上の制約から解放し、活躍のフィールドを広げるWIN-1の開発について紹介する。

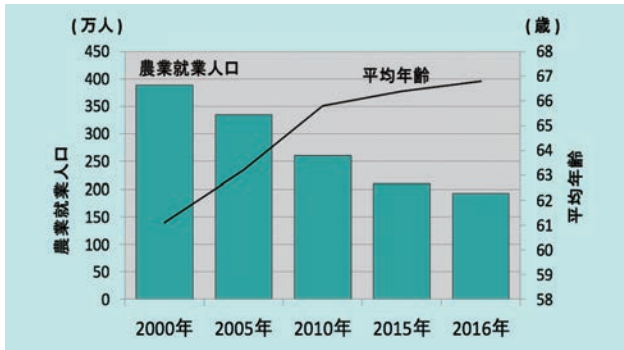


図1 日本の農業就業人口と平均年齢

Fig. 1 Agricultural Worker Population and Average Age in Japan



図2 WIN-1を活用し圃場でジャガイモ収穫をする様子

Fig. 2 Using a Power Assist Suit WIN-1 to Harvest Potatoes in a Field

2. 開発のコンセプト

機械化が進んだ日本農業においても、特に野菜や果樹栽培では未だ手作業による重量物運搬の機会が多く残されている。これらの現場では多くの場合、プラスチック製コンテナに詰めた収穫物を圃場から運搬車両まで、また運搬車両から選果作業場や出荷先へと手作業で運んでいる。この作業は、重いコンテナを運搬用パレットやトラックの荷台の上に何段も積み上げたり積み下ろしたりする作業である。地面から胸元近くの高さまでコンテナを持ち上げるので、腰ばかりか腕にも大きな負担がかかる過酷な作業である。

他社にて開発されている一般作業用パワーアシストスーツには、地面から荷物を持ち上げる際に腰部をアシストするものはあるが、荷物を胸元の高さにまで持ち上げる際の腕部のアシストに対応したものはなかった。そこで、農業における重量物運搬の軽労化を実現するために、腰部と腕部の両方のアシストに対応する独自のアシストスーツの製品化が必要と考え、表1のコンセプトを掲げWIN-1の開発に取り組んだ。

表1 WIN-1 開発コンセプト

Table 1 WIN-1 Development Concept

項目	内容
アシスト能力	収穫物を詰めたコンテナの質量20 kgを扱えること。
アシスト部位	腰と、腕や肩など上半身
積み上げ高さ	地面においた運搬用パレットにコンテナを4段まで、若しくは軽トラの荷台にコンテナを2段まで積めること。
連続作業回数	農家での1日の作業量をやり遂げられること(昼休み中のバッテリー充電は認める)。
操作性	高齢者や女性でも容易に、かつ意図どおりに操作ができること。
装着性	一人で簡単に着脱ができること。
携帯性	一人で持ち運びができること。
使用環境	屋内以外に、圃場など屋外でも使用できること。

3. 解決すべき技術課題

(1) 農業に適したアシスト方式の開発

狙いとする積み上げ高さに対応するには、腰だけでなく腕や肩などの上半身のアシストも必要である。これまで知られていた上半身のアシストに対応したパワーアシストスーツは、人体の骨格に合せた強固なフレームと、各関節を駆動する複数のアクチュエータで構成されており、非常に大掛かりであった。様々な農作業の場面で手軽に使用できるようにするためには、シンプルな構成で腰と腕の両方をアシストする新たな方式の開発が課題であった。

(2) 容易な操作性と違和感のないアシスト制御

容易な操作性を実現するために、まずセンサにより作業者の動きを検知して自動的にアシストを行うことを検討した。しかし、操作が容易な反面、作業者が無意識に動いてしまった際などに意図せずアシストが働いてしまい、混乱を招くことも考えられるため十分な注意が求められた。更に、本開

発では腰と腕の2箇所へのアシストを調和させる必要もあった。これら複合的な制御を、作業者に違和感を与えることなく行い、かつ容易な操作とすることが課題であった。

(3) 必要機能と軽量化の両立

製品各部の構造はアシスト能力に耐えうる強度確保が求められ、装着性や携帯性確保のための機体軽量化との両立が課題であった。開発当初の試作機の質量はおよそ30 kgもあり、少なくとも1/3の10 kg以下にする必要があると考えられた。そのためには既存技術や従来概念にとらわれない大胆な軽量化設計に取り組む必要があった。

(4) 安全設計技術

WIN-1は人が装着して使用する製品であるため、従来の農業機械とは異なる特有の安全上の配慮が必要となる。このような新しい製品に対して客観的で漏れのない検証を行い、安全性を確保することが課題であった。

4. 開発技術

4-1 基本構成とアシスト方式

現地調査に基づく機能設計と、現地適合評価を重ねた結果、農業に適したパワーアシストスーツとして、下記の主要部からなる独自の基本構成とアシスト方式を開発した(図3)。

(1)「ウインチ機能」と「腰アシスト機能」の複合アシスト

農業のコンテナ積み上げ作業の軽労化に焦点を当て、腰より上の高さに荷物を引上げる「ウインチ機能」を考案し、「腰アシスト機能」と複合させた独自のアシスト方式を開発した。「ウインチ機能」は、両肩上のウインチアームから下げたワイヤで荷物を吊り、背面のウインチユニットでワイヤを牽引し、荷物の引上げ・引下げをアシストする。ウインチアームに掛かる荷重は背面のメインフレームから腰ベルトを介して作業者の体幹で支える構造とし、腕や肩などの上半身に負担が掛からないようにしている。「腰アシスト機能」は、脚アームで太腿を押して上体を引き起こし、荷物を持って立ち上る際の腰の負担を軽減する。

これら2種類の機能を連続的に組合せて、地面から胸の高さ(コンテナ4段積みの高さ)にまで荷物を持ち上げる一連のアシスト動作を実現した。

(2)ウインチユニット

「ウインチ機能」の駆動源としてウインチユニットを開発した。各リールの形状やギヤの減速比は、必要なワイヤ速度と牽引力を満足するように最適化した。

これにより、メインフレームの背面にコンパクトに収まるユニットとしながらも、81 Wの小型モータで20 kgの荷物の引上げ・引下げを、腕力を全く必要とせず行えるようになっている。また、モータに内蔵された電磁ブレーキの力で、非通電時でも30 kgまでの重量物を保持することができ、腕力を使わずに荷物を運搬することができる。

(3)腰アシストユニット

「腰アシスト機能」の駆動源として、独自の腰アシストユニットを開発した。ギヤトレンやケース形状の最適化により、腰回りの限られたスペースにも関わらず、波動歯車などの高価なデバイスを用いずに1/75の高減速比を実現した。これにより、50 Wの小型軽量なモータを2個使用するのみで77 N・mの高トルクを発揮し、コンパクトなユニットとしながらも20 kgのコンテナを持ち上げるのに十分な腰アシスト能力を確保することができた。

(4)ハンド

荷物にワイヤを掛けるためのハンドは、標準の「コンテナ用」のほかにも、「ダンボール用」、取っ手穴の開いていない「リングコンテナ用」等、取り扱う荷物の形状に合ったオプションを用意した。これらハンドは容易に荷物に掛けられ、なおかつ不用意に外れないように工夫した形状としている。これにより、握力を全く必要とせず、重い荷物を長時間確実に持ち上げることができるようになった。



図3 WIN-1 主要機能と関連部位
Fig. 3 WIN-1 Main Functions and Related Parts

4-2 容易な操作性と違和感のないアシスト制御

4.2.1 腰アシストとウインチの複合制御

左右のハンドに設けられた2つのスイッチ(「上昇スイッチ」と「下降スイッチ」)を操作するだけで、自然な流れで荷

物を地上から胸の高さに積み上げ、積み下ろしができる制御方式を開発した。WIN-1では、作業者による各スイ

チの操作に加え、脚ギヤケースに内蔵したポテンショメータで作業者の姿勢を推定し、ウインチと腰アシストのトルク・速度・位置を複合的に制御している。

図4に、WIN-1を使用した作業での操作と制御の流れを示す。地上から荷物を持ち上げる際には、しゃがんで荷物を把持し上昇スイッチを操作し(図4①)、かつ作業者が上体を起こそうとする姿勢変化を検出することで腰アシストが作動する(図4②)。これにより作業者の確実な意思の

下、身体の動きに合わせた自然なタイミングでアシストが利くようにしている。更にスイッチ操作を継続したまま、作業者が立ち上がりの姿勢になると腰アシストからウインチに自動的に切り換わり荷物を引上げる(図4③)。これにより作業者はスイッチを押し続けるだけで、腰アシストとウインチの切り換えを意識せず一連のながれで積み上げ作業(図4①～④)と積み降ろし作業(図4⑤～⑧)を実施することが可能となった。

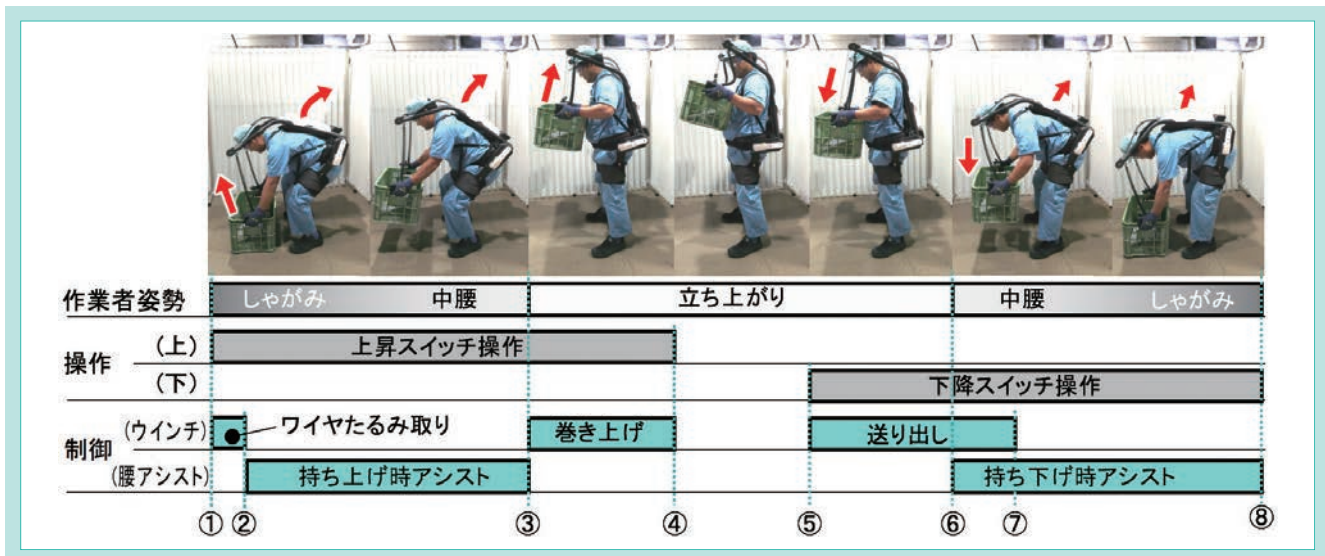


図4 WIN-1を使用した作業での操作と制御の流れ

Fig. 4 WIN-1 Operation and Control Flow

4.2.2 腰アシスト制御

腰アシストモータの制御方式は、トルク制御と速度制御の2種を比較した結果、特に不慣れた初心者でも扱いやすいトルク制御を採用した。更に、作業者の姿勢変化に応じて出力トルクを変化させることで、扱いやすさとパワフルさを両立させる制御とした。

また、3つのアシストモード(「弱」・「中」・「強」)の選択により出力トルクの変化特性を切替えて、初心者から上級者まで段階的に習熟することができ、好みに応じた使い分けも可能な仕様とした(図5)。

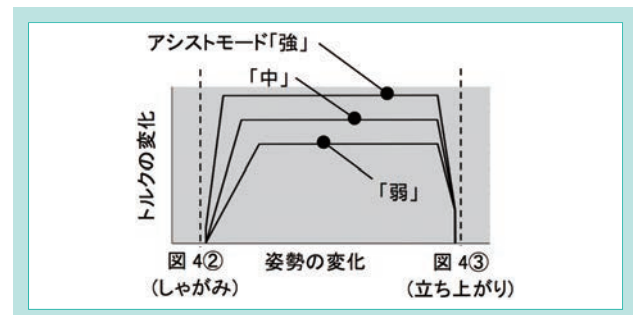


図5 腰アシストトルク特性

Fig. 5 Waist Assist Torque Characteristic Chart

4.2.3 ウインチ制御

荷物の質量が個々に違う場合でも、その影響を受けずに作業者が荷物の高さを意図どおりに合わせやすいよう、ウインチモータは速度制御とした。また、ウインチユニットに内蔵したポテンショメータによりウインチの位置を検知し、可動範囲を制御している。更に、制御中にモータに掛かっている負荷を監視することで、荷物を下ろす際の

ウインチワイヤの過剰な送り出しを防止する機能や、荷物を地上から持ち上げる際に腰アシストを効果的に利かせるためのワイヤのたるみ取り機能も備えた。

これらの機能により、WIN-1の使用に不慣れた初心者でも容易に作業ができるようになった。

4-3 軽量化技術

各部の構造体や動力機構、モータやバッテリーなど電装システム構成品の見直しなど、他の開発で培った軽量化

手法を用いて製品全般にわたる設計改善を重ねた結果、開発当初は30 kgであった製品質量を11.5 kgまで軽量化

できた。しかし、目標の製品質量10 kg以下を達成するために、残り1.5 kgを軽量化するには既存の保有技術を超え

4.3.1 メインフレームの軽量化

開発当初のメインフレームには軽量のアルミ素材を使用していたものの、汎用部材を用いていたため形状の最適化ができておらず重かった。そこで、専用のアルミフレームとし形状の改良を重ねたものの、メインフレームだけで2 kg (全体比15%)あり、製品全体の軽量化のためにはメインフレームを更に軽くする必要があった。

そこで新材料として炭素繊維強化熱硬化性樹脂(CFRP)に着目し、解析技術を活用したCFRPへの置き換え設計を行った。製品使用時に掛かる負荷として、ウインチアーム先端部に4パターン、ウインチモジュール取付部に1パターン、脚アシストユニット取付部に1パターンの条件設定をし解析を行った。解析結果から、いずれのパターンの負荷入力に対してもアルミ製フレームと同等以上の

の挑戦的な取組みが必要であった。その取組みについて紹介する。

剛性を確保できるようCFRPの繊維の配向や板厚を決定した。その後、実際の部品にてひずみ量の測定を行い、想定どおりの剛性が確保できていることを確認した(図6)。

その結果、超軽量で十分な強度を備えたメインフレームを実現し0.9 kgにまで質量を軽減することができた。

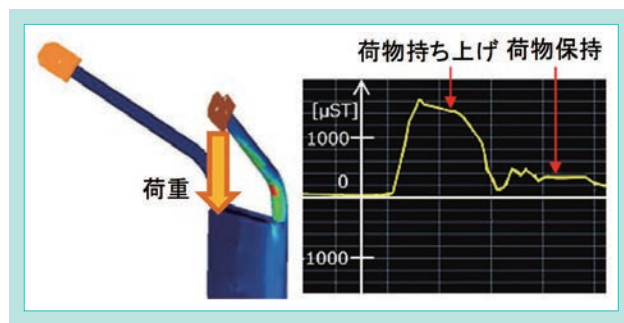


図6 メインフレームの強度解析と歪み実測値

Fig. 6 Main Frame Strength Analysis and Actual Strain Measurement

4.3.2 腰アシストユニットの軽量化

腰アシストユニットには、脚からの反力を受け止める強度が求められる。アシスト能力に必要なギヤ配置スペースの確保と、軽量化を両立するためにギヤケースの材料として軽量で高強度な炭素繊維強化熱可塑性樹脂(CFRTP)を使用することとした。更に軸受保持をフレーム構造からモノコック構造に見直し、解析により強度を確認しながら薄肉化することでギヤ配置スペースと強度を確保しながら、軽量化を実現することができた。また、ひずみ量の測定により設計値の裏付けも行った(図7)。

同時に脚アームもアルミフレーム構造から、樹脂プレートベルトで大腿に巻付けて一体化させることで剛性を確

保する方式に改めることで、残り0.4 kgの軽量化を達成することができた。

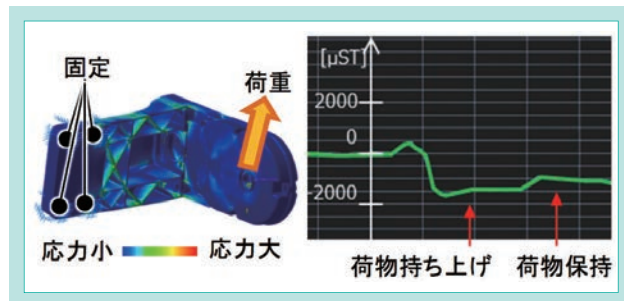


図7 腰ギヤケースの強度解析と歪み実測値

Fig. 7 Waist Gear Case Strength Analysis and Actual Strain Measurement

4-4 安全設計技術

生活支援ロボットの国際安全規格(ISO13482)に準じたリスクアセスメントプロセス⁷⁾により、開発段階で製品に潜むリスク事象を抽出し、その発生を未然防止する設計を行った。総数183件のリスクを抽出し、リスクレベルについて評価を行い、リスクの除去又は低減を図る設計改良を施した。次に主な対策を挙げる。

(1)ウインチワイヤの二重化

ウインチワイヤが傷み、万一破断したとしても荷物が落下しないよう、左右それぞれのハンドに主ワイヤと予備ワイヤの2本のワイヤを取付け、計4本のワイヤを使用

している。通常時には主ワイヤにのみ荷重がかかるようになっており、主ワイヤが万一破断したときでも予備ワイヤで荷物の落下を防ぐことができる。

(2)ウインチへのネガティブ電磁ブレーキの採用

荷物を吊り上げている状態の時に、何らかの異常によりウインチのブレーキが解除されて荷物が落下することがないように、電磁ブレーキにはネガティブ方式を採用した。たとえ電源が喪失してしまったとしても、機械的なバネの力でブレーキが掛かるようになっており、十分なブレーキ力で30 kgの荷物を吊り上げたまま保持することができる。

5. 開発技術の評価

軽労化効果の確認として、以下の評価を実施した。

(1) 人体モデルを用いた解析

コンピュータ上の人体モデルを用いて、20 kgのコンテナを床から持ち上げた際の身体各部の負担を解析した。その結果、WIN-1非装着時の負担を100%とすると、装着時、腰は32%、肩は9%、肘は6%にまで負担が低減されていることを確認できた(図8)。

(2) 実作業による筋電位計測

(1)の解析時と同じ姿勢で、20 kgのコンテナを床から持ち上げた際の身体各部の筋電位量(負荷に相当)を計測した。その結果、筋電位計測においてもWIN-1装着時には身体負荷が軽減されていることを確認できた。また、(1)と比較しても同様の結果が得られたことから、解析結果の妥当性も確認できた(図9)。

(3) 作業主観による軽労化効果の評価※

作業者が実感している軽労化効果を確認するために、VAS(Visual Analog Scale)という、主観的な感覚や感情の程度を定量化する手法を用いて評価した。作業者が感じた身体各部の疲労の程度を、WIN-1非装着時を100として装着時と比較した結果を図10に示す。全ての部位において、WIN-1装着時の方が、疲労感が少ないことが確認できた。

※(3)の評価は、農業技術革新工学研究センター「革新的技術開発・緊急展開事業(うち地域戦略プロジェクト)」の支援を受けて行った。

以上の結果、(1)、(2)で行った客観的評価に加え、作業者の主観としても軽労化効果が実感されていることが確認でき、多角的な評価で軽労化効果を裏付けることができた。

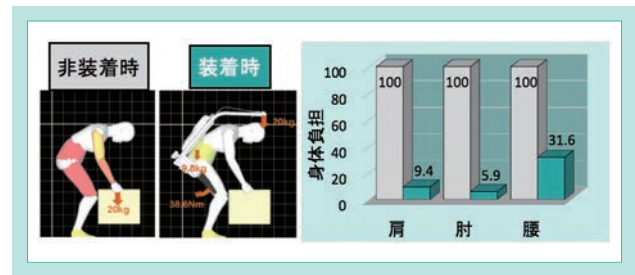


図8 人体モデルによる身体的負荷解析結果

Fig. 8 Physical Load Analysis Result Based on Human Body Model

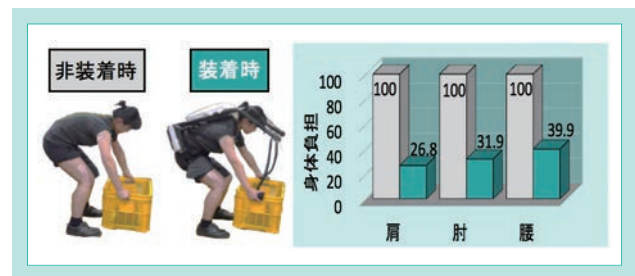


図9 筋電位による身体的負荷計測結果

Fig. 9 Physical Load Measurement Result Based on Myoelectric Potential

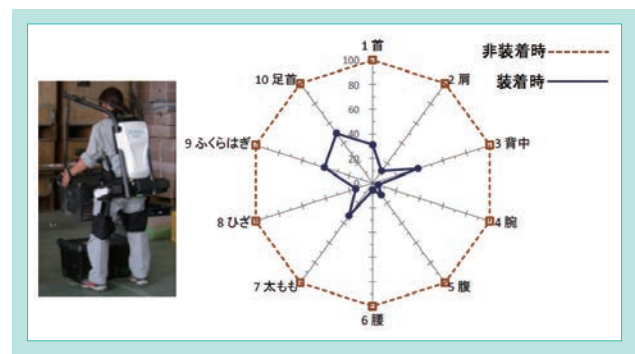


図10 VASによる軽労化効果の評価

Fig. 10 Evaluation of Fatigue Relief by Visual Analog Scale

6. おわりに

ウインチと腰アシストを組合せた独自のアシスト方式を開発し、農業特有の重量物を多段に積上げる作業に対応したウインチ型パワーアシストスーツの製品化を実現した。この技術を

基に今後も機能拡張や派生機の開発に取り組み、より多くの農業シーンで多くの人々の軽労化に役立つ製品を開発することで日本農業に貢献していく。

参考文献

- 1) 農林水産省: 農林業センサス、(2000, 2005, 2010, 2015) <http://www.maff.go.jp/j/tokei/census/afc/index.html>
- 2) 農林水産省: 「スマート農業の実現に向けた研究会」検討結果の中間とりまとめ、(2014)
http://www.maff.go.jp/j/kanbo/kihyo03/gityo/g_smart_nougyo/pdf/cmatome.pdf
- 3) 山海嘉之他: 「ロボットスーツHALによる移乗介助動作の支援」日本機械学会論文集.C編 76(762)、(2010)、pp.227-235
- 4) 小林宏他: 「腰補助用マッスルスーツの開発と定量的評価」日本機械学会論文集.C編 78(792)、(2012)、pp.2987-2999
- 5) 八木栄一他: 「農作業用持ち上げ動作を支援するための空気圧駆動上肢パワーアシストシステムの開発」日本機械学会論文集.C編 75(755)、(2009)、pp.2036-2043
- 6) 日経BP社: 「日経ビジネス」2017年2月27日号、(2017)、pp.80-82
- 7) ISO: 13482 Robots and robotic devices - Safety requirements for personal care robots

圃場水管理システム用電動アクチュエータの開発

Development of Electric Actuator for Field Water Management System

株式会社クボタケミックス 開発部

水稲作の労力は、農業機械によって大幅に削減されたが、水管理の省力化は取り残されていた。しかしICTが普及しつつある今、漸くその解決策が見出された。給水バルブ、排水口(落水口)のIoTによってパソコンやモバイル端末などを用い、現地に行くことなく自宅などで状況を把握して遠隔操作や自動制御を行うものである。この実現を目指し政府はプロジェクト開発を推進中であり、株式会社クボタケミックスはこれに協力しておりその内容を紹介する。

【キーワード】

水管理、省力化、自動化、遠隔操作

The labor of rice paddy work was greatly reduced by agricultural machinery, but labor saving in water management was left behind. However, as ICT is becoming widespread, the solution to this problem has been discovered gradually. The water supply valve and drain port are set up as IoT and the situation is grasped at home or elsewhere using a PC or mobile terminal without going to the site, and remote control and automatic control are performed. The government is promoting project development aimed at realizing this system, which Kubota ChemiX Co.,Ltd. is cooperating with, and this report introduces the details.

【Key Word】

Water Management, Labor Saving, Automation, Remote Control

1. はじめに

わが国の農業が直面する課題である農家人口の減少、高齢化に対応するため、政府は担い手農家への農地集約を全農地面積の8割に増加させ、更にコメ生産コストを4割削減する目標を掲げている¹⁾。その実現に向けて政府は府省連携の研究開発国家プロジェクトである戦略的イノベーションプログラム(以下、「SIP」という。)のうちの「次世代農林水産業創造技術」で農業のスマート化を目指している。開発テーマには既にクボタも取り組んでいる農機の自動・無人化等による耕うん・施肥・収穫の省力化のほか圃場水管理システム(以下、「本システム」という。)の開発(以下、「本テーマ」という。)による水管理の自動化・省力化が重要テーマとなっている。農機や営農技術の発達によって水稲農家の労力は大幅に削減されてきたが水管理に要する労力は他に比べ省力化が進んでおらず、総労働時間の約3割を占めているからである(図1)。

現在、水管理の既存の省力化機器には、株式会社クボタケミックス(以下、「KC」という。)が地下灌漑システムFOEAS(以下、「フォアス」という。)用に開発・供給している水位管理器やダイヤフラム弁タイプの他社自動給水栓等がある。これらは、

所定の水位に設定しておけば機構的に自動給水されるが、設定値自体の変更は人手に頼らなければならない、また、排水側の省力化機器は皆無である。

本テーマは国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構(以下、「農研機構」という。)が中心となって2014年度から5年計画で推進しているものであり、給水・排水などの水管理をICT活用により遠隔操作化・自動化し、労力50%減を目指すものである。

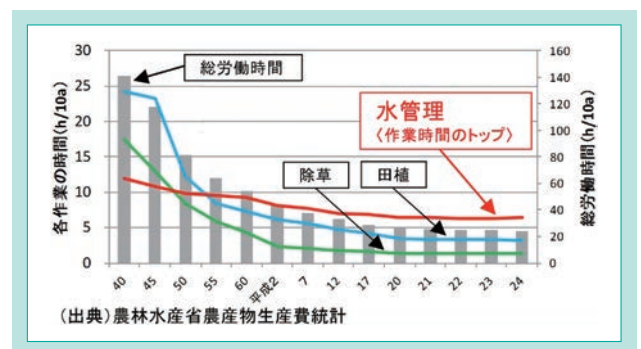


図1 水稲作の作業時間推移
Fig. 1 Work Time of Rice Paddy Work

本システムは以下で構成される(図2)。

- (1) 遠隔操作対応給水装置・排水装置
- (2) 水位センサ
- (3) クラウドサーバ
- (4) 水位データや制御信号をクラウドサーバと送受信する通信子機・中継機

KCは本テーマに関して、次のような協力を行っている。

- ① 初年度(2014年度)より農研機構からの委託により本テーマの中の(1) 遠隔操作対応給水装置・排水装置の開発に伴う技術支援。
- ② 2016年度より本システムの社会実装に向けた検討。

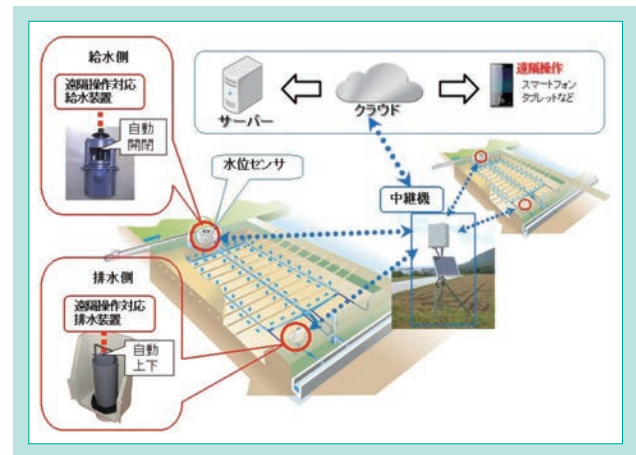


図 2 SIP システム構成図

Fig. 2 SIP System Configuration Diagram

2. 開発コンセプト

本システムの目標は、圃場の給水装置と排水装置の両方を遠隔操作化することであり、更に社会実装できる低価格でそれを実現することである。

この目標に対して、以下のコンセプトにより開発を進めた。

「既存の給水バルブ、排水口に取付けられる低コストで汎用性のある遠隔操作対応電動アクチュエータ(以下、「アクチュエータ」という。)とする。」

遠隔操作機能を有する専用の給水バルブ、排水口をそれぞれ開発するという方策も考えられたが、既存のバルブや排水口を撤去しなければならず、別途撤去交換工事の費用が必要となるため、既存バルブ、既存排水口を活かせるアクチュエータ開発を行うことにした。更に低コスト化を図る構造とすることで、必要機能を有しユーザの費用負担を最大限低減させることを開発コンセプトとした。

3. アクチュエータの開発

3-1 概要と特長

開発したアクチュエータは、ソーラーパネル、バッテリー、通信制御基板、アンテナ、操作パネル、モータ、ギヤ、回転軸を一体としてコンパクト化を図り、商用電源の無い圃場でも設置するだけで動作させることができるようにした(図3)。水位センサを接続することで水位情報と設定水位から給・排水を判断し、回転軸の回転によりバルブ開閉や排水高さ調整を行わせることができる。

特長は以下のとおり。

- (1) 汎用性が高く既存の給水バルブ・排水口に対応可能
アクチュエータ本体下部の取付板には、各社主要バルブに対応する取付孔を設けており、バルブに直接設置が可能。直接取付ができない特殊形状のバルブでも簡易なアダプタにより設置可能とした。
排水口には送りネジ機構を追加設置することでアクチュエータの回転を上下運動に変換して対応する。
また、バルブの種類毎の開度ストロークや締付けトルク、回転方向、ネジのリードなどを任意に調整可能とした。

- (2) 容易な取扱いと初期設定

設置後の初期設定として行う原点設定はボタン一つで完了(自動原点設定)。また現地で手動操作を行う場合も本体操作パネルにより容易とした。

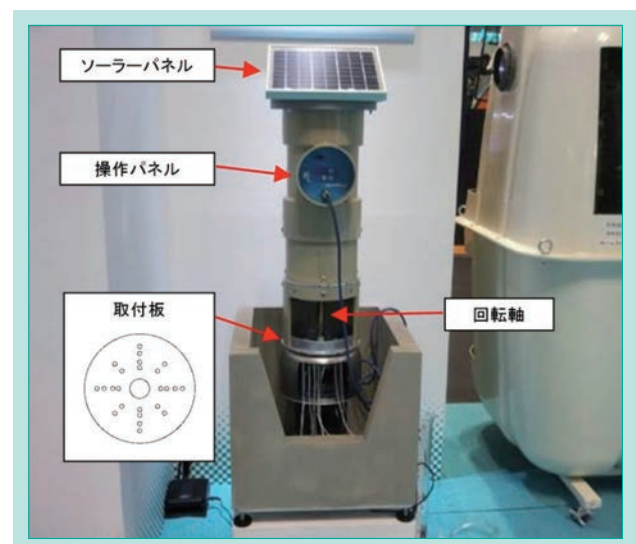


図 3 アクチュエータ外観

Fig. 3 Appearance of Actuator

(3) 各種異常検知機能

給水ロスを防ぐ閉時のゴミ詰まり検知やリトライ動作機能をはじめ、万が一の電圧低下などの各種アラーム機能を備えた。

(4) コストダウン設計

本体に屋外配管用の耐候性塩ビ管・継手を利用。また、給水側・排水側とも同構造にし、内部設定変更で給水側・排水側に使用できる兼用化設計でコストダウンを図った。

3 - 2 設置事例

(1) 圃場設置事例全景

本システム構築のためには、各圃場にアクチュエータと水位センサを、地区毎に中継器を設置する(図4)。

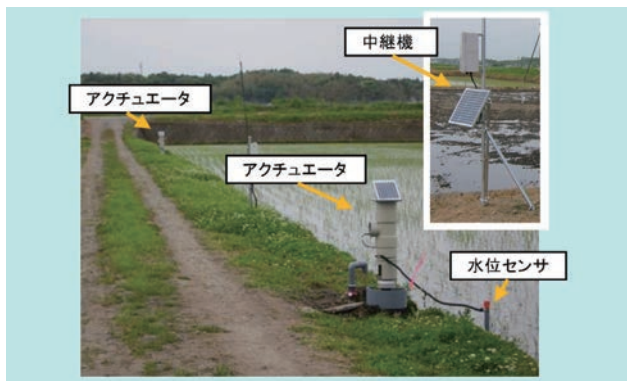


図4 圃場設置事例全景
Fig. 4 Full View of the Field Setting Case

(2) 給水側設置事例(アルファルファ形バルブ)

アルファルファ形バルブには、ハンドルを取外すことで直接取付けが可能(図5)。

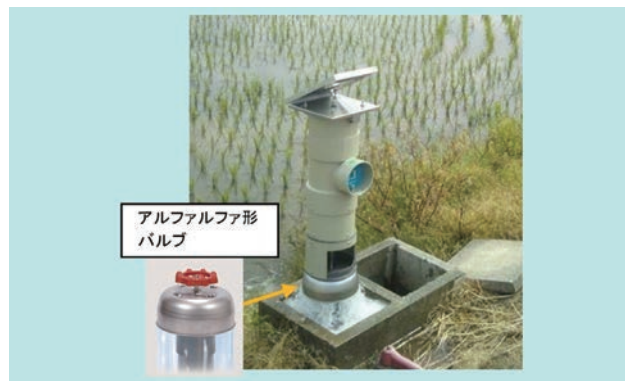


図5 給水側設置事例 (アルファルファ形バルブ)
Fig. 5 Water Supply Side Installation Example (Alfalfa Type Valve)

(3) 給水側設置事例(アングルバルブ)

アングルバルブには、ハンドルを取外した上でバルブ上部にアダプタを介して取付ける(図6)。



図6 給水側設置事例 (アングルバルブ)
Fig. 6 Water Supply Side Installation Example (Angle Valve)

(4) 排水側設置事例(落水口「ふかみずくん」:KC品)

排水口には、送りネジ機構を組込んだアダプタを排水口上部に取付けてアクチュエータを設置(図7)。



図7 排水側設置事例 (ふかみずくん)
Fig. 7 Installation Example on Drain Side (Fukamizukun)

3 - 3 これまでの実証試験実施箇所

SIPによる本システムの実証試験として、既に100機以上を福井、富山、千葉、茨城、栃木、宮城、岩手、北海道(2ヶ所)と、東日本を中心に設置し(図8)、動作や安定性および水位制御による品質・収量や節水性、省力化の確認を行っている。

農研機構によると、現状で水管理労力は80%削減と目標の50%を上回る効果が確認できている。また用水量も約50%減少する効果も確認された。



図8 実証試験実施箇所
Fig. 8 Field Test Locations

4. 社会実装化のために

システムの社会実装のためには、アクチュエータ以外にクラウドサーバ、通信子機・中継機、水位センサについて研究レベルであったものを、仕様の見直し、更なるコストダウン、品質の確保を図り実用化しなければならない。

農研機構からアクチュエータだけでなくシステム全体の実用化をクボタグループで行うことを要望されており、現在これに向けて推進中である(図9)。具体的には以下のとおり。

(1) クラウドサーバ

クボタグループは水環境インフラソリューションとしてKSIS^{*1} (Kubota Smart Infrastructure System)を構築しており、本システムもKSISクラウドサーバ用に再構築することでセキュリティや障害時対応などの課題を解決する。

(2) サーバソフト

クボタシステムズ株式会社によりSIPで作成したソフトをKSISサーバ上に実用に即した仕様、セキュリティを確保した上、土地改良区などへのサービスを行っている水管理システムやKSAS^{*1}(Kubota Smart Agri System; 基調論文参照)との連携を図る。このようにクボタグループとして農業のIoTを推進する。

(3) 通信子機・中継機・水位センサ等の電子機器

KSISで従来から採用している携帯電話網およびLPWA(Low Power Wide Area)無線を利用した通信システムをクボタ計測制御技術センターの協力のもと開発し、信頼性の確保、ランニングコストの低減を図る。

*1 KSIS,KSASは(株)クボタの登録商標です。

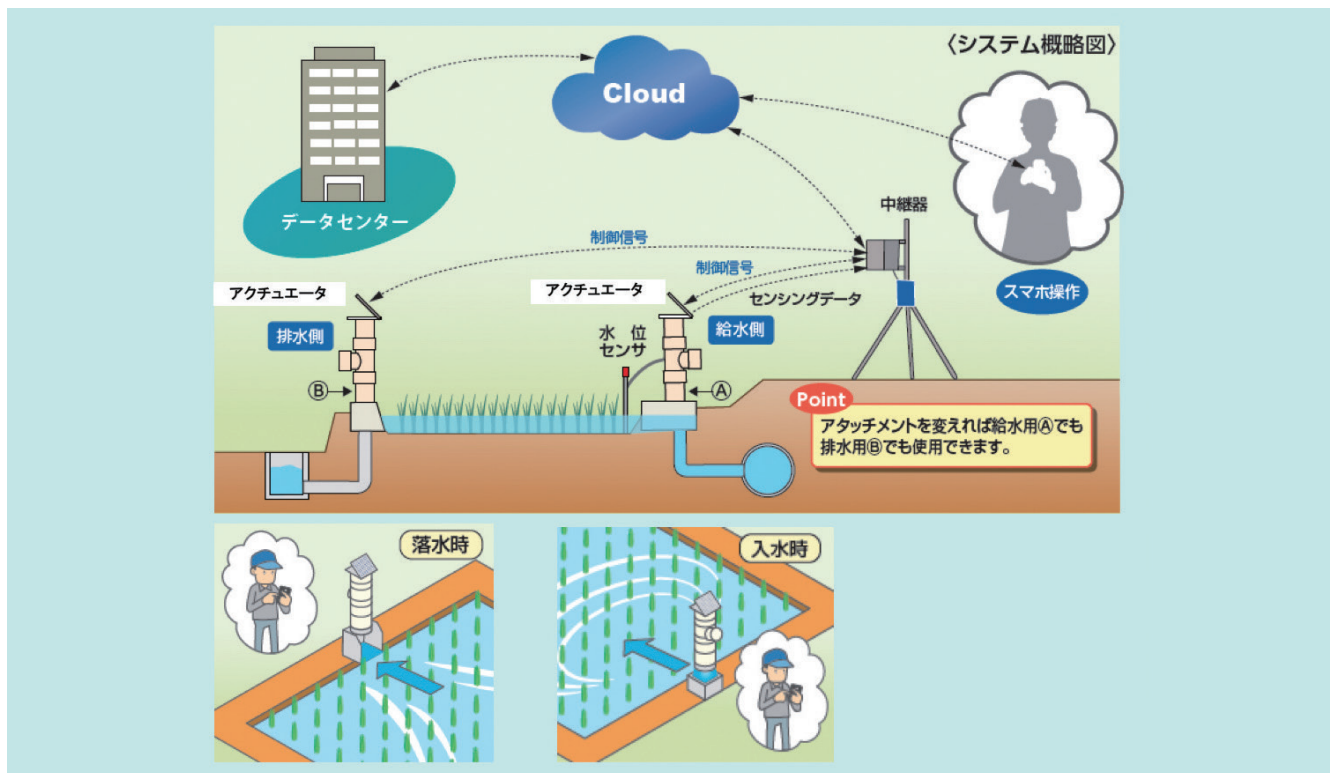


図9 Kubotaグループシステム構成図
Fig. 9 Kubota Group System Configuration

5. おわりに

上述のように水管理の自動化・省力化についても日本の農業にとって重要課題でありKCはSIPにおける圃場水管理システムの研究開発を受託して実施してきた。今後の社会実装に向けては、クボタ計測制御技術センターやクボタシステムズにご協力いただき、クボタグループとして実用化を行い、水管理

の省力化に貢献していく所存である。

なお、本稿の執筆に当たっては資料提供等でご協力いただいた農研機構農村工学研究部門の若杉晃介様に感謝いたします。

引用文献

- 1) 首相官邸：平成26年度産業競争力強化のための重点施策等に関する報告書

http://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/houkoku_honbun_150210.pdf

北米向けM5シリーズトラクタの開発

Development of M5 Series Tractor for North America

トラクタ技術第二部

北米向けM5シリーズはPTO50～70 kW(70～90馬力)の排出ガス規制対応モデルとして開発したユーティリティトラクタである。北米排出ガス最終4次規制適合に必要なSCR (Selective Catalytic Reduction)マフラを他機種と同様にエンジンルームの外に搭載すると従来シリーズの強みである車体の取り回し性が低下する。M5シリーズでは、SCRマフラをエンジンルーム内に搭載するという独自技術の開発に挑戦し、取り回しの良さを継承しながら排出ガス規制へ適合させた。更に市場要望に応えるべく取組んだ室内空間拡大のためのキャビンの開発では、拡大方法の工夫とFEM (Finite Element Method)解析による強度の作り込みによって、投資・コストを抑えたキャビンフレームを開発した。室内空間の拡大によって低下するエアコン性能は、設計段階で性能向上案の策定と計算による効果検証を行い、前シリーズ以上の性能を達成した。

【キーワード】

北米排出ガス最終4次規制、SCRマフラ、DPF(ディーゼルパーティキュレートフィルタ)マフラ、キャビン

The M5 series for North America are utility tractors developed as PTO 50 to 70 kW (70 to 90 hp) tractors compliant with the EPA (Environmental Protection Agency) Tier 4 Final emissions regulation. In fact, mounting the SCR (Selective Catalytic Reduction) muffler outside the engine room as with other models worsens handling performance, the strength of the previous series. We took on the challenge of developing proprietary technology to install the SCR muffler in the engine room for good handling performance and to comply with the EPA Tier 4 Final regulation. In developing the expanded cabin, we developed a cabin frame with reduced investment and cost by deliberating on expansion methods and using FEM (Finite Element Method) analysis. Usually, the expansion of the cabin deteriorates the performance of the air conditioner, but the M5 series has at least the same performance as previous models as we designed a performance improvement plan and verified the effects by calculation.

【Key Word】

EPA Tier 4 Final, SCR Muffler, DPF (Diesel Particulate Filter) Muffler, Cabin

1. はじめに

クボタが開発するPTO50～70 kWのトラクタは1997年に初代シリーズを北米市場に導入し、主にフロントローダ・牧草・草刈・運搬・牽引・整地・耕うんなどの多様な作業を行うユーティリティトラクタとして使用される。シリーズ導入時から独自のシリーズコンセプトである取り回しの良さ、快適作業性、高出力、求めやすい価格といった特長が評価され販売を伸ばしてきた。特に小旋回性能に代表されるコンパクトさや操作性の良さ等の「取り回しの良さ」と「作業視界の良さ」がフロントローダや狭い牛舎、圃場での作業において、他社に対して優位性があり高いシェアを確立してきた。M5シリーズ(図1)導入前年の2014年には市場規模18,500台の中でシェア約20%の地位を築いた。



図1 M5シリーズトラクタ
Fig. 1 M5 Series Tractor

2. 解決すべき課題

(1) 従来シリーズの強みである取り回しの良さの継承と排出ガス規制適合の両立

2015年から北米排出ガス最終4次規制が施行され、適合させるためには、SCRシステム(尿素水を利用した排ガス浄化システム)を搭載しなければならないという局面を迎えた。SCRシステムは前シリーズで搭載したDPFマフラに加え、SCRマフラや尿素水タンク等の大きな搭載スペースが必要な部品から構成される。50~70 kWのユーティリティトラクタの場合、先行していた高出力機種のようにSCRマフラをエンジンルームの外に搭載すると(図2)、フロントロードとの共着のために大きな搭載スペースが必要で、ホイールベース延長や前輪切れ角規制が必須となる。その結果、コンパクトさや旋回性などの取り回し性に関する性能が低下してしまうため、従来シリーズの強みである取り回しの良さを継承しながら排出ガス規制に適合させることが課題であった。

(2) 新たな市場ニーズへの対応

競合他社が室内空間の広いキャビンや補助シート、上方視界性を向上させるルーフウィンドウなどのこれまでこのクラスのトラクタにはなかった特長を持った新機種を導入してきたことで、これらの機能に対する市場ニーズが高



図2 高出力機種

Fig. 2 High Power Tractor

まり、販売に影響する大きなファクタとなっていた。これらの機能がない前シリーズは競争力の低下が懸念されており、新機能を追加して市場ニーズへ対応していくことが課題であった。

M5シリーズは以上の課題に対応することを狙いとして開発した機種である。

3. 開発のコンセプト

(1) 取り回しの良さの継承と排出ガス規制適合の両立

前シリーズと同じホイールベースと前輪切れ角を維持し、コンパクトさと旋回性能において他社に対する優位性を確保したまま排出ガス最終4次規制に適合させるために、「業界初のSCRマフラをエンジンルーム内に搭載すること」をコンセプトとし、独自にSCRマフラ搭載技術を開発することとした。

(2) 新たな市場ニーズへの対応

前述の新機能を搭載した競合他社のキャビンは市場評

価が高い。対抗できるキャビンにするために、競合他社と同等以上の機能を追加することを狙いとし、「キャビン室内空間の拡大、補助シート搭載、ルーフウィンドウ搭載」に加え「油圧シャトルの電子化、ノークラッチペダルシフトの採用、操作系レイアウトリニューアル、外観デザイン一新」をコンセプトとした。

本稿では、SCRマフラのエンジンルーム内搭載とキャビン室内空間の拡大について述べる。

4. 開発技術

4-1 業界初 SCR マフラのエンジンルーム内搭載技術

4.1.1 SCRマフラのエンジンルーム内搭載のための主要な技術課題

(1) SCRマフラ搭載要件への適合

SCRシステムを正常に作動させるには、背圧、ドージング管長さ、温度低下、尿素水インジェクタとセンサの距離等の搭載要件を満足する必要がある。スペースが少ないエンジンルームでは、特にドージング管長さ(図3, b)、尿素水インジェクタとセンサの距離(図3, a)を確保できるように排気管を取回すことが課題であった。

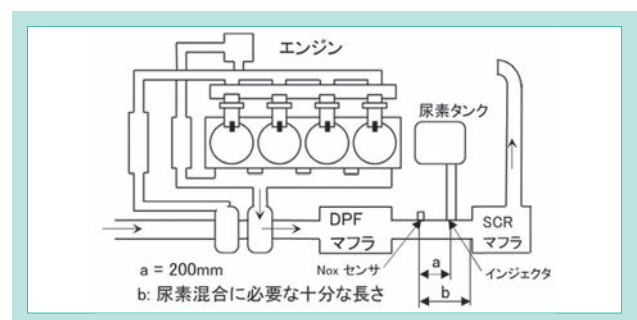


図3 SCR マフラ搭載要件

Fig. 3 Requirements for SCR Muffler Installation

(2) 前シリーズと同等の視界性確保

SCRマフラの搭載スペースを確保するためには、ボンネットの高さを上げ、幅を広げる必要がある。単純なボンネットのサイズアップ方法では、前方視界性を悪化させる。市場評価の高い前シリーズと同等の前方視界性を維持できる方法でボンネットを拡大することが課題であった。

4.1.2 技術課題の解決策

(1) DPFマフラとSCRマフラの並行配置と排気管を後方に取り回すレイアウト

図4にレイアウトを示す。前述のSCRマフラ搭載要件を満足させるため、エンジン上部にDPFマフラとSCRマフラを並行に配置し、排気管をDPFマフラから後方に取回して、SCRマフラに接続する構造とした(図5, c)。排気管は後方に取回し、長さを稼ぐことで搭載要件のドージング管長さ(図5, b)と尿素インジェクタとセンサの距離(図5, a)を確保した。



図4 マフラレイアウト概要
Fig. 4 Muffler Layout Overview

(2) マフラのスラント配置と排気管の後方すぼみレイアウト

両マフラはスラント配置(前傾姿勢)とし(図5, f)ボンネットシルエットもそれに沿わせる形状とした。図6は、前シリーズとM5シリーズのボンネットを重ねて描き、運転席からの視界を一点鎖線で表している。マフラのスラント配置により、ボンネット前方視界で重要なボンネット中央高さ(図6, h)を前シリーズと同じにすることができ、同等の視界性を確保した。

図7は、A社とB社の競合機とM5シリーズのボンネット前方の視界を比較したものである(この時点の競合機は排出ガス最終4次規制適合前)。三角の部分はフロントローダのバケット先端から先の視認できない領

(3) エンジンルーム内の排熱

DPFマフラとSCRマフラは最高で630°Cの排気ガスが通る高温の熱源である。それらを狭いエンジンルーム内に搭載すると、特にエンジンを停止させて冷却ファンが停止すると上部に熱がこもり、雰囲気温度が高くなる。上部に配置され、耐熱温度を上げることができないワイヤハーネス周りの雰囲気温度を耐熱温度以下にすることが課題であった。

距離が小さいほど前方視界性は良い。M5シリーズはA社よりも小さくB社と同等という結果で、前方視界性はM5シリーズとB社が最も良い。

図6の上の図はボンネット横の視界を表したものである。両マフラを連結する排気管は運転者側を狭くする後方すぼみ形状としたことで(図5, e)、この視界性に影響するボンネット後端の幅を前シリーズと同じにし、同等の視界性を確保した(図6, k)。フロントローダ作業では目標物に近接したときにボンネット横とローダの

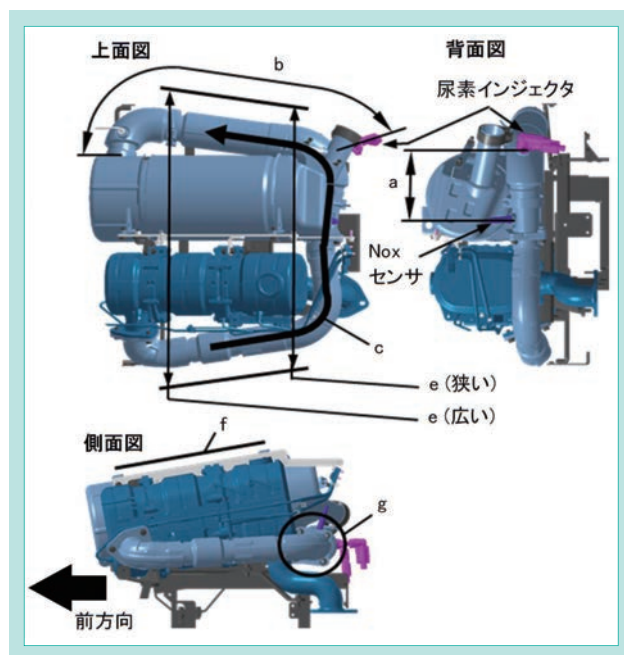


図5 マフラレイアウトの詳細
Fig. 5 Details of Muffler Layout

ブームの隙間から目標物を視認するため、この部分の視界は重要である。図8は、運転席からのボンネット横の視界を示している。M5とA社とB社の競合機を比較すると、A社とM5シリーズはその視界性を確保できているが、B社は確保できていなかった。

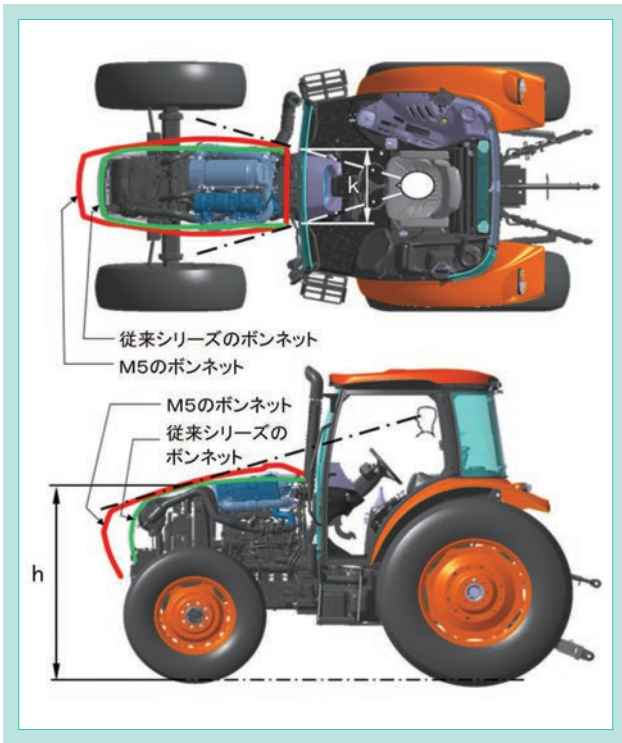


図6 ボンネット前方の視界
Fig. 6 Front Visibility



図7 ボンネット前方の視界性比較
Fig. 7 Comparison with Competition of
Visibility in Front of Bonnet

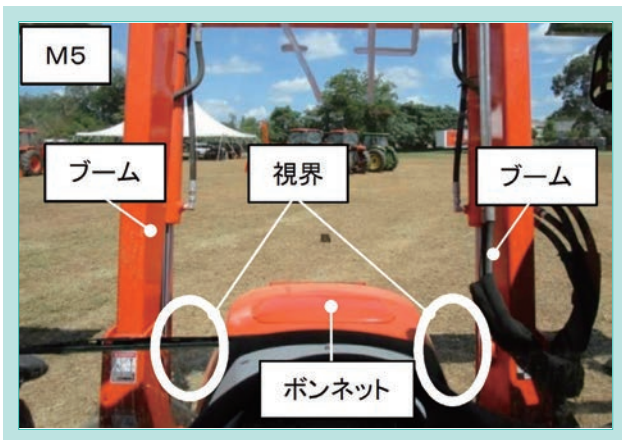


図8 ボンネット横の視界性
Fig. 8 Visibility at the Sides of the Bonnet

(3) 後部排気管のマフラ下側配置

後方に取り回した排気管は、スラントさせたことで空いたマフラ下側のスペースを通すレイアウトとした(図5、

g)。このスペースを有効活用することで、前シリーズに対してエンジンを前方に50 mm 移設するだけで搭載スペースを確保することができ、前シリーズと同じホイールベースと前輪切れ角を維持している。

表1にA社とB社の排出ガス最終4次規制対応機とM5シリーズのホイールベースと旋回半径を示す。A社、B社ともにSCRマフラをエンジンルームの外に配置し、ホイールベースを50 mm延長してきた。ホイールベース、旋回半径ともにM5シリーズが最も小さく、取り回し性で競合機よりも優れていることがわかる。

表1 ホイールベースと旋回半径の競合機との比較
Table 1 Comparison with Competition of Wheelbase and Turning Radius

	M5	A社	B社
ホイールベース(mm)	2,250	2,285	2,350
旋回半径(m)	3.8	5.8	4.3

(4) ボンネット上面に排熱口を設置

図9はエンジンルーム上部のワイヤハーネス周りの雰囲気温度とエンジン回転数の関係を表している。エンジン稼働時は冷却ファンの送風で比較的温度は低いですがエンジンを停止すると急激に上昇し、ワイヤハーネスの耐熱温度120°Cを超える。この対応として、こもった熱を排出するために300 mm×50 mmの排熱口をボンネット最上部に設けた。図9に実線で示すように、排熱口の効果でエンジン停止後の温度上昇が小さくなり、耐熱温度以下にすることができた。

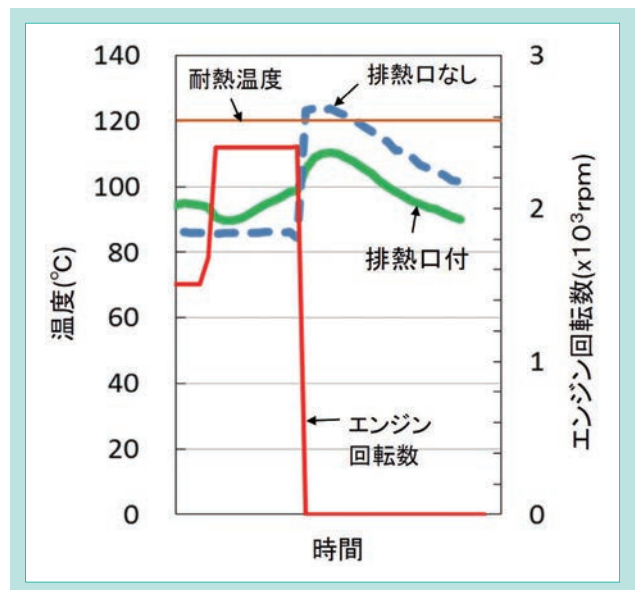


図9 ワイヤハーネス周辺のエンジン停止時の温度履歴
Fig. 9 Temperature History when the Engine is Stopped Around
the Wire Harness

4-2 キャビン室内空間の拡大

4.2.1 キャビン室内空間を拡大するための技術課題

(1) 市場要望を満たすキャビンサイズの設定

最大の市場要望である補助シートの搭載、操作性、居住性の向上、他社機に引けをとらない大きさ、強みである車体のコンパクト性、価格競争力を考慮し、キャビンサイズを決定する必要がある。

(2) 投資とコストの抑制と強度確保

キャビンの使命は「転倒時の運転者保護」であり、

サイズアップによって低下する強度をいかに投資・コストを抑えて補強するかが課題である。

(3) エアコン(冷房)性能の確保

サイズアップに伴う表面積の増加とルーフウィンドウからの輻射熱が加わり、キャビン内に入る熱量は増加する。その分の冷房性能向上が必要である。

4.2.2 技術課題の解決策

(1) 幅方向に限定したキャビンフレームの拡大

操作性、居住性と最大の市場要望である補助シート搭載の観点からはできるだけ拡大する方がよいが、エアコン性能・強度・車体のコンパクト性・コストの観点からは、拡大は最小限に抑えたい。そこで、最大の市場要望であった補助シートの搭載と従来シリーズの強みである車体コンパクト性を最優先に考え、次の3点を実施し、必要最小限の160 mmの幅拡大だけを行うことに決定した。

① ISOとEC規格で規定される補助シート周囲クリアランスに適合できる最小サイズでの設計

② 評価の高いB社キャビンとの室内空間広さの比較

③ 現地適合性試験でのユーザ評価

また、幅方向のみの拡大とすることで図10の緑色で示すフロア・ドア枠・ドアガラスを前シリーズと兼用して、投資を抑制している。

(2) FEM解析によるフレーム強度作り込み

FEM解析はこれまでの解析結果と実測結果から部材同士の接触条件や材料物性値の見直しを図ることにより、実際の試験に近い変形が得られ、的確な補強を求めることができる。図11に示すフェンダの場合は、変形を抑えるために材料費が大幅に上がる鋼材の板厚増加等ではなく、少ない材料で、ピンポイントで補強するという考えで補強案を検討し、最終的に小さい部材で強度を確保することができた。キャブフレーム全体で20の補強案を検討し、投資・コストを抑えながら強度を確保した。

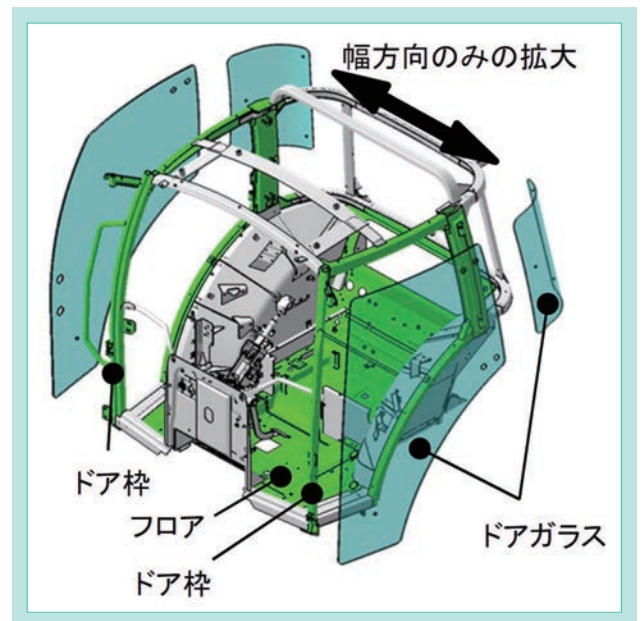


図 10 キャビンの拡大方法
Fig. 10 Cabin Expansion Method

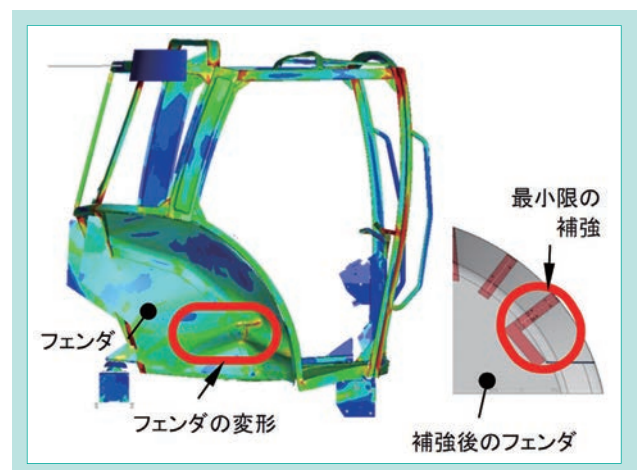


図 11 FEM 解析によるフェンダの補強例
Fig. 11 Example of Reinforcement of Fender by FEM

(3) 冷房能力の向上とサンシェードの採用

キャビン拡大により熱の流入面積は上面で15%、背面で21%、前面で19.5%増加する(図12)。更に、ルーフウィンドウからの日射による輻射熱が加わる。冷房時のキャビン内飽和温度を計算すると、①キャビン拡大による熱の流入面積増加によって前シリーズに対して1°C上昇し(23.8°Cから24.8°Cまで上昇)、②ルーフウィンドウからの輻射熱の増加によって、更に1.9°C上昇する(26.7°Cまで上昇)結果であった(表2)。

性能向上策として、①コンデンサ容量増加、②冷却ファン径拡大、③冷却ファン回転数増加、④コンプレッ

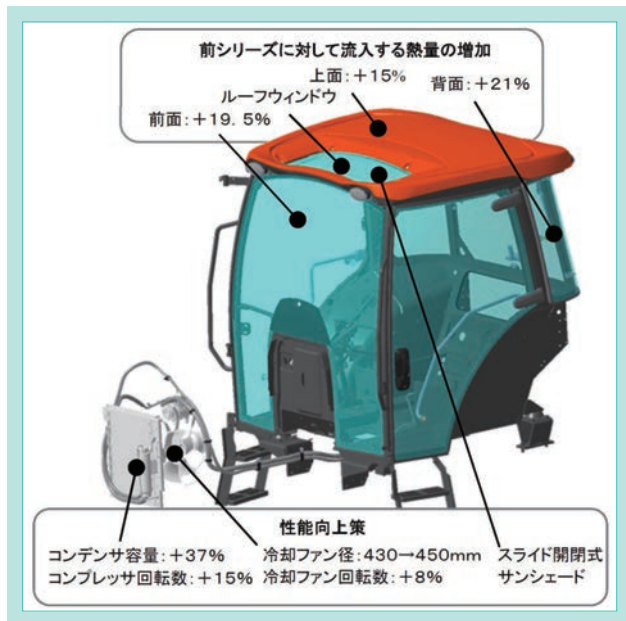


図12 流入熱量の増加とその対応策

Fig. 12 Increase in Incoming Heat and the Measures

サ回転数増加を行い、更にルーフウィンドウにスライド開閉式のサンシェードを追加し、吹き出し温度の低下と輻射熱の減少を図った(図12)。計算結果を表3に示す。吹き出し温度は10.4°Cから8.1°Cまで低下し、更にサンシェードによる輻射熱の減少によって飽和温度は、26.7°Cから22.9°Cまで低下するという結果が得られ、策定した性能向上策が効果的であることがわかる。実車試験でも(表3)、吹き出し温度と飽和温度ともに計算結果に近い結果が得られ、目標を上回る性能を達成した。

表2 熱流入増加による飽和温度の上昇

Table 2 Increase in Saturated Temperature Due to Increased Heat Inflow

	計算結果		
	前シリーズ (目標)	① 熱流入面積の 増加	② ①+ルーフウィンドウ からの輻射熱増加
飽和 温度	23.8°C	24.8°C	26.7°C

表3 性能向上策の効果

Table 3 Effect of Performance Improvement Measures

	計算結果			試験結果
	前シリーズ (目標)	対策前	対策後	
飽和 温度	23.8°C	26.7°C	22.9°C	22.7°C
吹き 出し 温度	10.1°C	10.4°C	8.1°C	8.7°C

5. おわりに

独自のSCRマフラ搭載技術の開発に挑戦し、業界で初めてDPFマフラとSCRマフラのエンジンルーム内搭載を実現したことで、市場評価の高い従来シリーズの取り回しの良さを継承しながら北米排出ガス最終4次規制に適合させた。また二つのマフラをエンジンルーム内に搭載することでネックとなった作業視界性は、運転者側を幅狭にし、上面をスラントさせるボンネット形状にすることで従来シリーズの強みである作業視界性を確保し、ユーティリティトラックとしての他社に対する優位性を維持した。

室内空間拡大のためのキャビンの開発では、拡大方法の工夫や解析を駆使した強度の確保によって、キャビンフレームの低コスト化を実現した。また、補助シートやルーフウィンドウ採用、操作系のリニューアルによって、市場の要求に応えることができた。

M5シリーズトラックはそのほかにも外観デザインを一新したことや油圧シャトルの電子化などの新機能の追加によって市場で高い評価を得ており、現在は欧州、韓国でも好評販売中である。

北米向けゼロターンモア ZDシリーズの開発

Development of ZD Series of Zero Turn Mowers for North America

汎用技術部／北米汎用技術部

北米に大きな市場を持つゼロターンモアはレバー操作により左右駆動輪を独立して制御できるため、1点旋回可能な小回りの利く機動性の良い芝刈り機である。2013年以降、米国では排出ガス4次規制(Tier 4)が施行され、出力19 kW以上のディーゼルエンジン搭載機については高価なディーゼルパーティキュレートフィルタ(DPF)や改質器といった後処理装置が必要になった。これまで高出力機を購入していたユーザ層の大部分はこれらによる大幅な価格アップを受入れられないと考え、芝刈り作業で消費する動力を低減することで作業効率向上に挑戦した。これにより、高出力エンジン(21.6 kW)を搭載した現行機に比肩する作業能力を有する出力19 kW未満の新機種を開発した。

【キーワード】

ゼロターンモア、消費動力、作業効率、品質工学、可視化

Zero Turn Mowers, which have a big market in North America, are highly maneuverable machines that can rotate on one point by controlling the right and left drive wheel independently. Expensive devices such as a Diesel Particulate Filter (DPF) and reformer were essential for diesel engine power of 19 kW or more to meet the EPA (United States Environmental Protection Agency) Tier 4 emissions regulation, which has been enforced since 2013. There was a concern that the majority of high engine power machine users would not accept a drastic price increase, so we researched work efficiency increases by decreasing power consumption to allow diesel engine power of less than 19 kW. As a result, a new machine capable of mowing just as well as a high output machine (a current 21.6 kW machine) was developed.

【Key Word】

Zero Turn Mower, Power Consumption, Work Efficiency, Quality Engineering, Visualization

1. はじめに

芝刈り機を中心とする芝関連商品市場は欧米を中心とする先進国で発展してきている。特に北米では個人の庭だけでなく会社・病院・学校にも大きな芝庭を有しており、巨大な産業構造を形成している。

ゼロターンモアはモアと呼ばれるインプラメントにより芝を刈っていく乗用型芝刈り機であり、その最大市場である北米でも機動性の良さから人気商品の一つとなっている(図1)。ゼロターンモアは、レバー操作により左右駆動輪を独立して制御できるため、左右後輪中央を中心に1点旋回でき小回りが利くのが特長である。クボタゼロターンモアのフラグシップモデルであるZDシリーズは自社製ディーゼルエンジンを搭載した機種であり、高い品質を武器に北米市場のユーザから多くの支持を得ている。



モア: 芝を刈るインプラメント

図1 ゼロターンモア
Fig. 1 Zero Turn Mower

2013年以降、最大市場である米国で新たな排出ガス4次規制(Tier 4)が施行され、出力19 kW以上のディーゼルエンジンを搭載したZD331(21.6 kW)は対応を迫られていた。2013年以降の3年間で排出ガス規制の猶予枠分を使い切り、販売台数は低下していた(図2)。

販売台数を2013年並みに回復させるにはDPFや改質器といった排出ガス後処理装置を搭載し、排出ガス規制に対応する必要がある。しかし、これまでZD331を購入していたユーザー層の大部分に排出ガス規制対応による大幅な価格アップを強いることとなり、販売への影響が予想されるため、代替機の開発が必要となった。そこで排出ガス規制対象外の機種(18.6 kW)で作業効率を改善させることに着目した。

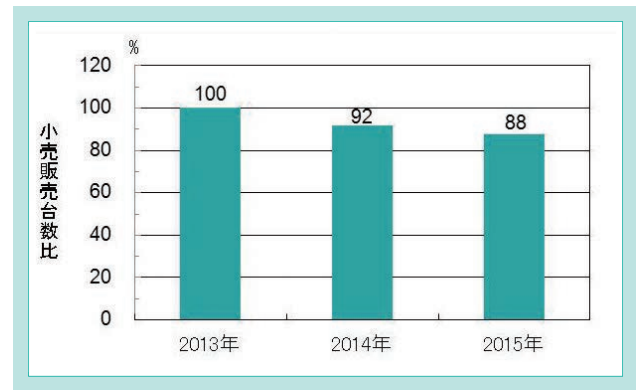


図2 ZDシリーズ 年間小売販売台数(2013年比)
Fig. 2 Annual Retail Unit Sales of the ZD Series (Compared with 2013)

2. 開発コンセプトと目標値

2-1 開発のコンセプト

排出ガス規制対象外の機種(18.6 kW)で21.6 kWの現行機に比肩する作業能力を実現することで製品の付加価値

を高め、大幅な価格アップを回避した高出力機ユーザー層のための代替機とする。

2-2 技術課題及び目標値

これまでゼロターンモアに搭載していたモア(以下「現行モア」という。)はより綺麗に芝を刈ることを重視しており、芝刈り作業で大きな消費動力が発生していた。作業効率が高く評価されている競合他社のモアと比較しても芝刈り作業で消費される動力は1 kW程度大きくなっており、消費動力を低減する余裕が十分にあると考えた(図3)。モアに着目することで現行機とのエンジン出力差である3 kWに相当する芝刈り消費動力低減を目標とし、高作業効率モアの技術開発に挑戦した。外観・居住性・操作性と多くの性能を改善した18.6 kWの機種に新高作業効率モアを搭載することで、2018年の販売台数目標は2013年(図2)を上回る台数とする。

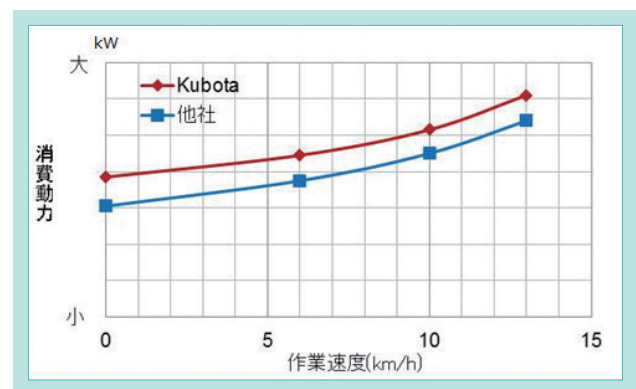


図3 芝刈り消費動力
Fig. 3 Power Consumption of Mower

3. 開発技術

3-1 刈り刃検討による消費動力低減

3.1.1 芝刈りメカニズム

モアで行う芝刈り作業は「芝を刈る作業」と「芝を放出する作業」に分けることができる。

「芝を刈る作業」は、刈り刃に設けた風起こし部を高速で回転させることで負圧を発生させ、芝を吸い上げる風を起こすことで、芝を立たせて刈る作業のことである(図4)。風起こしが小さいと芝を吸い上げる風は弱いため、刈り残しが発生しやすく圃場の見栄えは悪くなる。この刈り跡の見栄えを刈り性能として評価しており、刈り性能は北米市

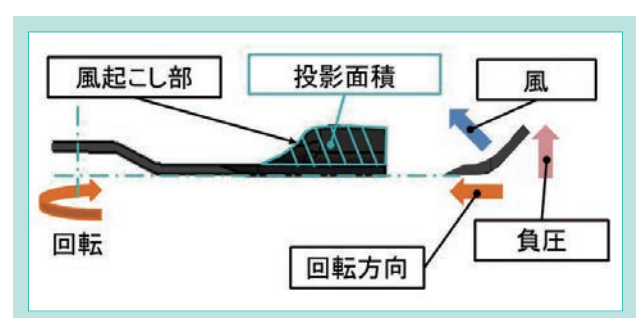


図4 芝を刈る作業
Fig. 4 Cutting Method of Mower

場におけるゼロターンモアのユーザにとって非常に重要な性能である。現行モアは、多くのユーザに満足してもらうために、刈り性能を重視して風起こしが大きい刈り刃を採用していた。

「芝を放出する作業」は、刈り刃を囲むモアデッキに沿って刈り芝をモアデッキ右側に設けた開口部からモアの外に放出して圃場に均一にばらまく作業のことである(図5)。

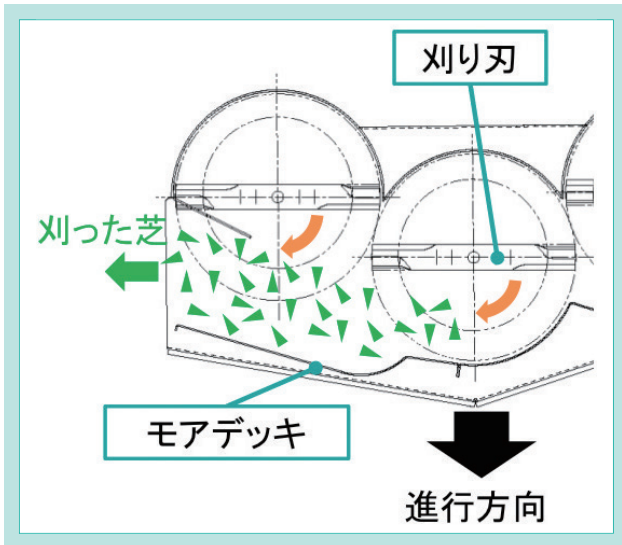


図5 芝を放出する作業(上面図)
Fig. 5 Discharging Method of Mower (Top View)

刈った芝の放出幅が狭かったり、芝の塊であるクランピングが発生したりすると圃場の見栄えが悪く、芝の生育状況にも悪影響を与えるためモアの評価が低くなる(図6)。刈った芝の放出幅やクランピングの有無は刈った芝の大きさやモアデッキ内で発生している風の流れが影響して発生する。この刈った芝のばらまき具合を放出性能として評価しており、刈り性能と同様にゼロターンモアの重要な性能である。現行モアではモアデッキ右側面付近にクランピングが発生しやすい放出性能上の課題があった。

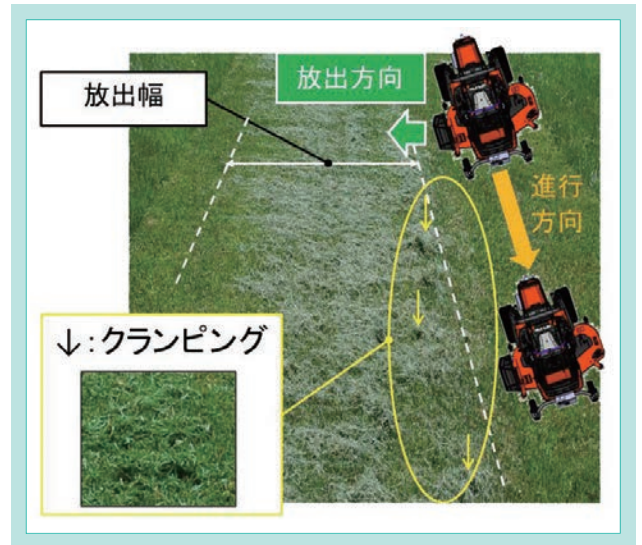


図6 放出性能
Fig. 6 Discharging Performance

3.1.2 品質工学を活用した性能評価方法

品質工学を用いることで、消費動力を低減するモア形状の最適解を明確にした。性能評価方法として、まずモア形状から抽出できる因子の中から制御因子を決め、パラメータを直交実験表に設定する。直交実験表に基づいてモアデッキ内部の風速・風圧及び消費動力を測定する。風速・風圧データから刈り性能を評価するために風の上下挙動を算出し、芝の姿勢を予測することで刈り跡断面(図7)を導き出し、評価点を付ける。この刈り跡の評価点及び消費動力測定データを要因効果図に入力することで刈り性能及び消費動力に対する最適形状の絞り込みが行える(図8)。

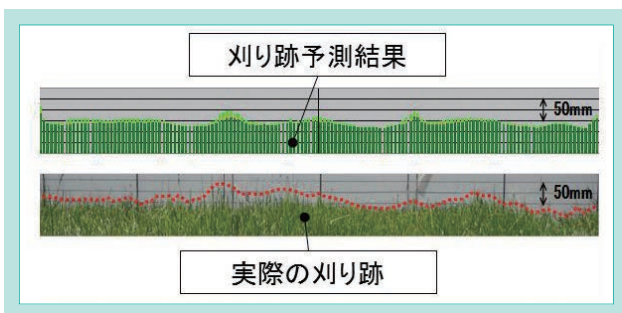


図7 刈り跡断面計算結果
Fig. 7 Simulated Section of Cutting Line

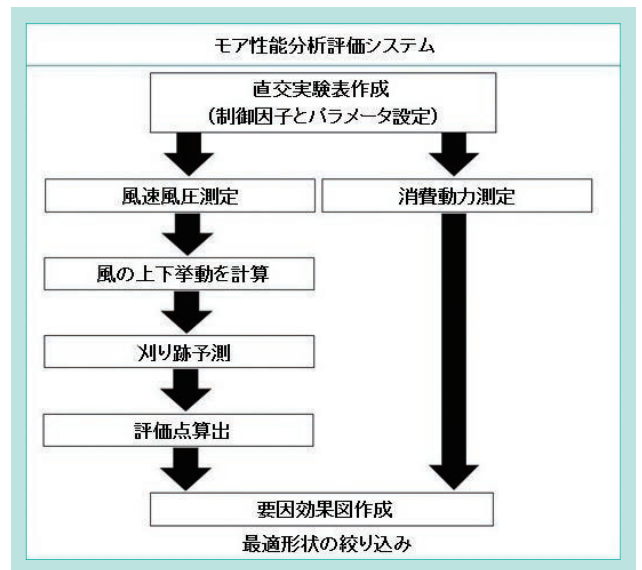


図8 品質工学を活用した評価方法
Fig. 8 Evaluation Method Chart Based on Quality Engineering

まず、モアは刈り刃とモアデッキから形成されていることから刈り刃形状・刈り刃回転数・モアデッキ形状を制御因子としてパラメータを設定して直交実験表に基づき予備実験を行い、因子の絞込みを行った。図9に示すように刈り刃形状と刈り刃回転数が消費動力に大きく影響すること及びモアデッキ形状の影響は小さいことが分かった。刈り刃回転数を変えるにはギヤ変更を伴い品質確認工数がかかること及び刈り刃形状は特許取得により他社との差別化がしやすいため、刈り刃形状に絞り込んでモア形状の検討を行った。

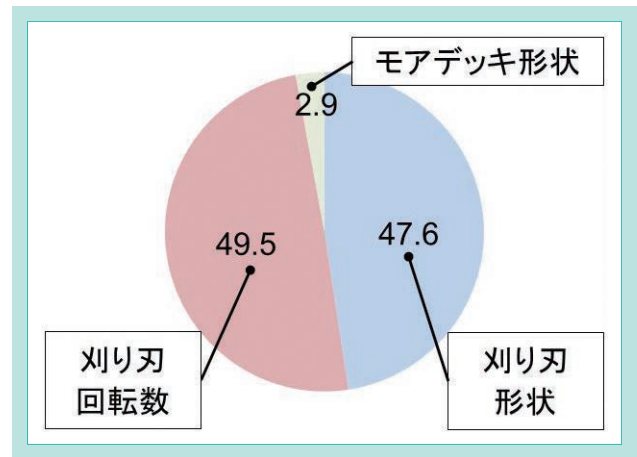


図9 消費動力への寄与度 (%)
Fig. 9 Contribution to Power Consumption (%)

3.1.3 モア最適形状

これまでの知見から刈り刃形状の中で消費動力に影響の大きい風起こしの①投影面積・②高さ・③内曲げ角・④曲げ角度を制御因子(図10)とした。それぞれの制御因子にパラメータを設定した直交実験表に基づき試作した刈り刃9本の消費動力及び風速風圧を測定し、刈り刃の最適形状(表1に示す新刈り刃)を導き出した。

最適形状による消費動力低減効果を確認するため表2に示す北米市場で一般的な作業条件下で、新刈り刃を搭載した新モアと現行モアの作業速度比較を行った。図11の測定結果は表2の作業条件下で作業速度ごとの消費動力を3回測定して平均した結果である。この結果から次のことが言える。

- (1)北米市場のユーザが通常作業する10 km/hで、新モアは現行モアよりも消費動力が3.0 kW小さい。
- (2)移動せず(作業速度0km/h)に刈り刃を回すだけでも新モアは現行モアよりも消費動力が1.5 kW小さい。
- (3)作業速度が大きい方が新モアと現行モアの消費動力差が大きくなっている。

上記(1)から新モア採用により消費動力を最大3.0 kW低減できると考えられる。上記(2)は現行モアよりも風起こしを小さくしたことで空気抵抗も小さくなった効果であり、上記(3)も現行モアよりもモアデッキ内における風の流れをスムーズにしたことで空気抵抗が小さくなった効果と考えられる。よって、上記(1)の効果は上記(2)と(3)の効果と合わせた結果と考える。

一方で、これまでの知見から風起こしを小さくしたことで刈り跡の見栄えを評価する刈り性能及び刈った芝の放出跡を評価する放出性能に懸念が生じた。そのため、次に新モアの刈り性能・放出性能に関する懸念を払拭し、現行モア同等以上を実現するための検討を行った。

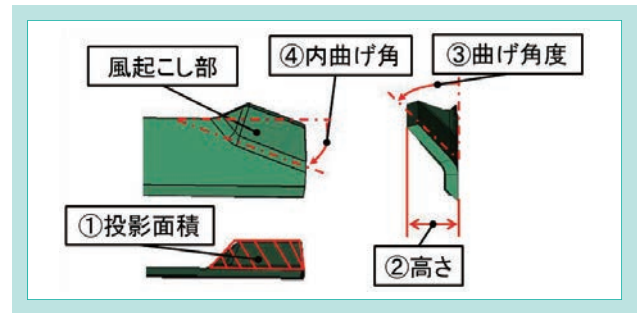


図10 制御因子
Fig. 10 Control Factor for Power Consumption

表1 ブレード最適形状
Table 1 Optimal Shape of Blade for Power Consumption

項目	①投影面積 mm ²	②高さ mm	③内曲げ角 °	④曲げ角度 °
新刈り刃	1600	26	30	20
現行刈り刃	2000	30	45	0

表2 作業条件
Table 2 Working Condition

芝種	芝丈	湿り気	刈り高さ
フェスキュー	125mm	ドライ	100mm

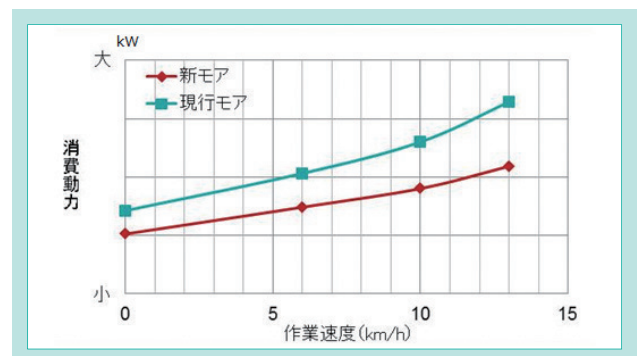


図11 モア最適形状の消費動力低減効果
Fig. 11 Power Consumption Reduction Effect of New Mower

3-2 前輪最適配置による刈り性能検討

新モアの刈り性能においては、風起こしを小さくしたことで芝を吸い上げる風が弱まり、前輪で踏んで倒された芝を立たせ難くなることで、刈り残しが発生しやすくなる可能性があった。そこでモア内部の風速・風圧を測定し、芝を立たせる風が現行モア同様に発生しているかを確認した。その結果、新モアは現行モアよりも右前輪が踏む位置で上向きの芝を吸い上げる風が弱くなっており、やはり芝を立たせ難くなっていることが分かった。そこで、モア内部全体の風の状態を分析したところ、右前輪を現行の位置ではなく、現行の位置よりも外側となるモア右端の前方に配置させると芝を吸い上げる領域が現行の前輪位置よりも広がることになり、右前輪を現行位置に置いた時よりも綺麗に刈れると考えた。

実際に北米市場の一般的な作業条件下で芝を刈って刈り跡断面を評価した結果(図12)、右前輪が現行の位置では右前輪で踏んだ芝を立たせられずに刈り残しが発生し、予想通りであった。右前輪をモア右端の方に出すことで刈り残しを減少でき、現行同等の刈り性能となった。

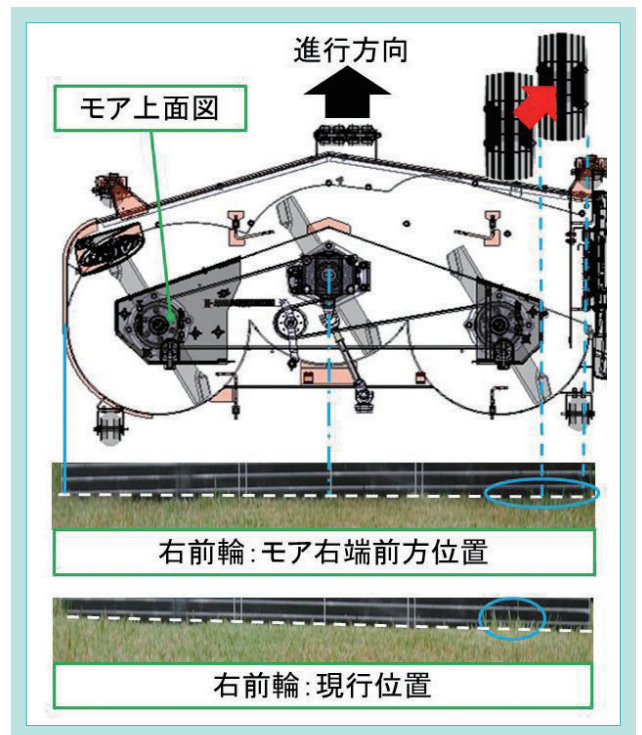


図 12 右前輪位置変更による刈り跡断面への影響
Fig. 12 Effect of Right Front Wheel Location Change on Cutting Line

3-3 可視化による放出性能検討

現行モアでは、モア内部で刈った芝が滞留して塊になりやすくクラumpingが出やすい課題がある。モア内部を可視化することで、芝が滞留して塊が発生することが分かった。そこで風起こしに内曲げ角を設けて芝の流れる方向を変え、芝の滞留が発生しない形状とした。新しい刈り刃では風起こしを小さくしたことで刈った芝を放出する風

が弱くなるため、刈った芝の放出幅が狭くなる懸念があったが、実際に圃場で芝を刈って放出性能を評価した結果、放出幅は刈った芝が目立つほど狭くなっておらず、クラumpingは現行モアよりも出難くなっており、現行モア以上の放出性能であることが分かった。

3-4 作業効率による評価

今回開発した高作業効率モアを搭載することにより、新機種であるZD1211(18.6 kW)の作業効率が改善される効果を確認するため、表3に示す作業条件下でZD331(21.6 kW)との作業速度比較を行った。ZD331の作業速度を基準となる100としたときのZD1211の作業速度比率(%)は表4上段に示す結果となり、それぞれ3回測定した作業速度比率の平均を平均速度比率(%)として算出した。

表4に示すようにZD1211の作業速度はZD331と同等であり、モアの刈り幅が同じことから作業効率も同等と言える。また3章でも述べたようにZD1211の刈り性能についてはZD331同等であり、放出性能についてはZD331以上である。

以上の結果から、高価な排出ガス後処理装置なしで排出ガス規制に適合できるZD1211で21.6kWのZD331に比肩する作業能力を実現できていると言える。

表 3 作業条件
Table 3 Working Conditions

項目	1回目	2回目	3回目
芝種	フェスキュー	雑草	雑草
芝丈	150mm	125mm	125mm
湿り気	ドライ	ウエット	ウエット
刈り高さ	100mm	75mm	75mm

表 4 新 ZD1211 と現行機との作業速度比率
Table 4 Mowing Performance of New ZD1211

機種	作業速度比率(%)			平均速度比率(%)
	1回目	2回目	3回目	
ZD1211	96	109	93	100
ZD331	100	100	100	100

4. おわりに

ZD1211を始めとする新ZDシリーズは作業効率改善に加えて走行安定性・外観・シート居住性・操作性といった多くの性能をお客様のニーズをもとに向上させ、2015年末から北米市場に投入している(図13)。

ZDシリーズはクボタ独自のディーゼルエンジンやトランスミッションの性能・強度・耐久性により高価な製品であるにも関わらず長らく2013年の年間小売販売台数相当の販売台数を推移してきた。しかし、2013年に北米排出ガス4次規制(Tier 4)が施行された影響により2015年には2013年の販売台数に対して9割を切る販売台数に落ち込んだ。

図14に示すように2016年には新ZDシリーズの市場投入により販売台数は、2013年相当にまで回復してきている。2016年の増加分及びお客様からご好評いただいていることから考えると2013年を上回る2018年の目標台数に向け順調に推移していると言える。

排出ガス規制については、今回対象となった北米だけでなく欧州や大洋州といった芝刈り機市場全体でますます強化されていくことは容易に想像できる。今後も汎用製品の市場を守り、拡大させていくためには排出ガス規制に対応するとともに更なる作業効率向上への取り組みは非常に重要と考える。今後お客様が満足する作業を実現するための技術開発に取り組んでいく。



図 13 新 ZD シリーズのセールスポイント

Fig. 13 Sales Point of New ZD Series



図 14 19 kW 未満の ZD シリーズ小売販売台数比 (2013 年比)

Fig. 14 Retail Unit Sales of ZD Series of Less Than 19 kW (Compared with 2013)

北米向け CTL SVL95-2s の開発

Development of CTL SVL95-2s for North America

建設機械技術第二部

コンパクトトラックローダ(CTL)は、主に北米市場において用いられる、建築・インフラ整備・農業等の現場で土砂運搬・掘削・整地作業及び、多種多様なアタッチメント作業も可能な小型建設機械である。近年、その市場は拡大を続けており、クボタも2010年にCTLを発売して以来、順調に販売台数を伸ばしている。今回、2015年に従来機SVL90-2の後継機として、北米排出ガス最終4次規制に対応したSVL95-2sを発売した。このSVL95-2sは、業界で初めてロードセンシング(Load Sensing: LS)システムを標準搭載し、作業機・AUX(Auxiliary)・走行の同時操作性を向上させている。これにより、単純にエンジン出力を上げるだけではなく、効率よくエンジン出力を使うことで機械のパフォーマンスを向上させた。

【キーワード】

CTL、北米排出ガス最終4次規制、ロードセンシング

A compact track loader (CTL) is a compact construction machine that can perform not only material handling, excavation, and leveling work, but also a wide variety of attachment work mainly in the fields of construction, infrastructure development, and agriculture, etc., in the North American market. In recent years, this market has continued to expand, and Kubota has also steadily expanded its sales volume since launching the CTL in 2010. This time, in 2015, Kubota released the SVL95-2s, which complies with the Tier 4 Final North American emissions regulation as a successor to the SVL90-2. This SVL95-2s is the first in the industry to install a Load Sensing (LS) system as standard, improving the simultaneous operability of arm and bucket work, AUX (Auxiliary) and traveling. As a result, we not only raised engine output, but also improved the performance of the machine by using engine output efficiently.

【Key Word】

CTL, EPA (Environmental Protection Agency) Tier 4 Final, Load Sensing

1. はじめに

CTLは主に北米市場において活躍している小型の建設機械である(図1)。その特徴として、「一点旋回が可能であること」、「多種多様なアタッチメント(図2)が使用できること」及び「クローラ走行による不整地走破性が高いこと」等があり、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ている。

特に北米CTL市場は近年、急激に成長しており、2011年から2016年の間で2倍以上の規模になっている(図3)。

クボタは2010年、SVL75 & SVL90を発売しCTL市場に新規参入した。その後、モデルチェンジ機SVL75-2 & SVL90-2においてETTM(Electric Travel Torque Management)を導入し、重負荷作業時に走行力を求める市場のニーズに応えた。その結果、参入から僅か4年で北米CTL市場におけるシェアを業界4位となる12.9%まで伸ばすに至った。今回、クボタは更なるグ

レードアップをめざし、SVL95-2sを開発した。



図1 SVL95-2s
Fig. 1 SVL95-2s



図2 各種アタッチメント
Fig. 2 Example Attachments

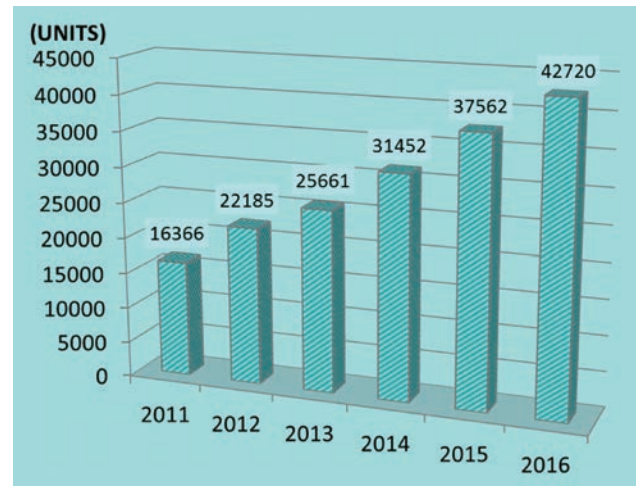


図3 米国のCTL市場
Fig. 3 CTL Sales (in U.S.A)

2. 開発のコンセプト

2-1 製品コンセプト及び主な課題

北米で新たに排出ガス最終4次規制が導入され、従来機(SVL90-2)もその対応を行う必要があった。そこで、この機会により多くのユーザに使っていただける製品をめざした。

まずはCTL市場の状況考えた(図4)。図4において、縦軸のROC(Rated Operating Capacities)は主に車格と車重で決まる定格積載質量を表し、横軸のkWはエンジン出力を表している。

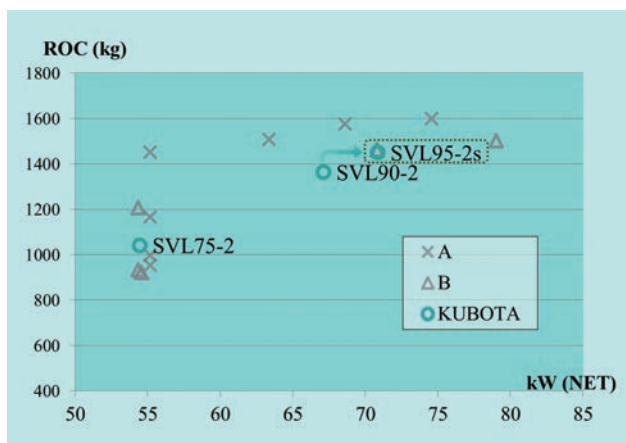


図4 CTL 競合 (ROC-kW)
Fig. 4 CTL Competition (ROC-kW)

CTL市場において競合他社は多種のラインナップ(メーカーによっては10種類以上)を有し、幅広い出力帯をカバーしている。それに対し Kubota は現在 SVL75-2 と SVL90-2 の2型式のみで全体をカバーしている。特にエンジン出力68.6 kW の SVL90-2 は、67 kW 帯の機種を求めるユーザには好評を得ているものの、更に上位の75 kW 超えの機種をを求めるユーザに対しては、作業性が足りていない印象が

あった。

一般にエンジン出力が上がれば価格も維持費も上がり車格も大きくなるが、作業性が向上するので、コストをかけてでも作業性を求めるユーザは高出力帯の機械へシフトする。しかし、今回、SVL90-2 を単純に75 kW 超えにモデルチェンジしてしまうと、従来機にご愛顧をいただいているユーザ層(先ほどとは逆にコストをかけてまで作業性は求めないユーザや、余り車格が大きくなると困るユーザ)には受入れてもらえない可能性がある。そこで、車格、コスト、エンジン出力を67 kW 帯に抑えたまま、今まで以上に効率よくエンジン出力を使うことで、75 kW 帯の機械と競合できる作業性を目指し、製品コンセプトを以下のとおり設定した。

<製品コンセプト>

『北米排出ガス最終4次規制に対応した

コンパクトかつ作業効率の良い機械』

また、このコンセプトを達成するため、対応が必要であった主な課題は以下の3点である。

<主な課題>

- ①作業機・走行・AUXの同時操作性の向上
- ②AUXの大流量化
- ③北米排出ガス最終4次規制への対応

なお、「③北米排出ガス最終4次規制への対応」の具体策としてはNOxの排出を抑えるため、尿素SCRシステムを搭載する必要があった。元々コンパクトに機器が詰め込まれたCTLに、尿素水タンクやSCRマフラといった排出ガスの後処理装置を追加することは容易ではなかったが、本稿では①②のユーザニーズへの対応に焦点をあてる。

3. 解決すべき技術課題と目標値

3-1 技術課題

「①作業機・走行・AUXの同時操作性の向上」については以下のとおり更に分解して考えることができる。

- ①-1 作業機とAUXの同時操作性の向上
- ①-2 作業機と走行の同時操作性の向上

まずここで、AUXについて説明を行う。AUXとはCTLに取付ける様々なアタッチメントを動かすための油圧源のことであり、アームに取り付けられているカプラ(図5)にアタッチメントの油圧ホースを接続して使用する。アタッチメントの種類によって、必要となる流量は異なるため、手元のグリップのスライダ(図6)の操作で流量が調節できるようになっている。

また、作業機とはアームとバケットをまとめた呼称であり、このアーム・バケットとAUXに油を送るポンプを作業機ポンプと呼んでいる。



図5 AUXカプラ
Fig. 5 AUX Coupler

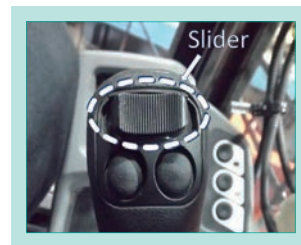


図6 AUXスライダ
Fig. 6 AUX Slider

3.1.1 作業機とAUXの同時操作性について

作業機とAUXを同時に操作する作業例としてグラップルバケット作業がある(図7)。これは林業などで木材等をつかんで運ぶための作業であるが、バケット全体の角度はバケットシリンダで操作(図7右上の緑色の矢印)し、爪部の開閉はAUXを用いたシリンダで操作(図7右上の黄色の矢印)する。従来機では爪とバケットが同時に操作できないため、爪で木材を押え続けながらバケットの角度を変えることができず、交互に操作する必要があり、作業時間のロスにつながっていた。また、バケットの角度を変える際に、爪で押え続けていないため、バケットの角度を動かした際に木材がずれて脱落してしまうこともあり、その場合は再度つかみ直すため、一層、作業時間のロスが増えてしまっていた。

そこで、作業機とAUXを同時に操作できるようにすることで、この作業時間のロスを減らそうと考えた。



図7 グラップルバケット作業
Fig. 7 Grapple Bucket

3.1.2 作業機と走行の同時操作性について

作業機と走行を同時に操作する作業例として傾斜地での土押し作業がある(図8)。この作業は作業機部分で土を押しながら登坂を行うため、走行と作業機両方に大きな負荷がかかることで、エンジンが耐え切れず、エンジン回転数が落ちる。それにより、走行ポンプの吐出流量も減ってしまうため、単純に登坂するとき(約8 km/h)に比べて走行速度が極端に低下してしまう。その結果、作業時間のロスが増えてしまうことになる。

向上を目指した。

表1 登坂速度(作業機負荷あり)

Table 1 Travel Speed on a Slope with Bucket Operation

	SVL90-2	SVL90	Competitor A	Competitor B (2011)	Competitor B (2014)
Travel Speed [km/h]	3.3	2.0	N/A (Engine stalled)	2.4	3.7

表1は、作業機に重負荷をかけながら登坂した時の速度を示している。この項目は旧機種(SVL90)から従来機(SVL90-2)へマイナチェンジを行った際にETTMを導入することで一度改善した項目である¹⁾。その後の他社機調査において他社機の実力も上がってきていることが確認されており、この性能が市場で求められているものであることがうかがえる。今回の開発ではこの点についても更なる



図8 傾斜地での作業
Fig. 8 Working on a Slope

3.1.3 AUXの大流量化について

このAUXで大流量が必要になる作業例としてはマルチチャ作業がある(図9)。この作業は宅地造成のために低木を切り倒し、その場で切り倒した低木をウッドチップに粉砕していく作業である。この作業に使用するアタッチメントには油圧モータに接続された爪付きのドラムが搭載されており、AUXを用いてこのドラムを高速回転させ、それを押し付けることで低木を切り倒し、粉砕して使用する。

2.1の項でも触れた通り、今回の開発で75 kW帯の機械の作業性を考えたときに、下位出力帯の機械と大きく違うところの一つが、このAUXの流量である。従来機は128 L/minの流量を出すことができるが、市場の75 kW帯の機械の中には150 L/min付近の流量がでるものもあり、この出力帯の機械を使用するユーザに受入れてもらうために、AUX流量を増そうと考えた。



図9 マルチャ作業
Fig. 9 Mulching Head

3-2 各課題に対する目標設定

3-1で述べた各課題に対し、以下のとおり目標を設定することにした。

- ①-1 作業機とAUXの同時操作性の向上
同時操作が可能であること
- ①-2 作業機と走行の同時操作性の向上

作業機に重負荷をかけた状態での登坂速度が目標を上回ること(目標:4.0 km/h以上)。

- ② AUXの大流量化
75 kW帯の機械と同等の流量を確保すること
(目標:150 L/min)。

4. 開発技術

4-1 課題の現状把握

目標①-1に関して、従来作業機とAUXが同時操作できなかったのは、従来機の油圧回路(図10)がシリーズ回路であることに起因する。

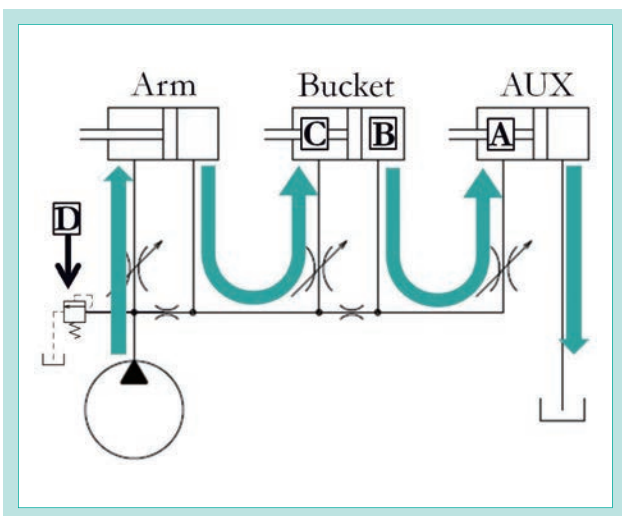


図10 油圧回路図(SVL90-2)
Fig. 10 Hydraulic Circuit (SVL90-2)

シリーズ回路とは図中の矢印のとおり、ポンプから出

た作動油を一つ目のアクチュエータに送り、そのアクチュエータからの戻り油を次のアクチュエータに送る回路である。この方式の利点としては、複数のアクチュエータを並列で並べた時よりも比較的小さなポンプで機械を動かすことができる点が挙げられる。しかし、欠点として、今回の課題のように下流にあるアクチュエータ(図10のAUXのA部)での圧力が上昇すると、その上流にあるアクチュエータ(図10のバケットシリンダ)のボトム側(B部)の圧力も上昇してしまうため、ロッド側(C部)に油を送ってもシリンダを動かすことができなくなってしまう。

次に目標①-2について、作業機に重負荷をかけた結果として油圧回路がリリーフを噴いている時の挙動を想定すると、図10のD部に記載のリリーフバルブから油が捨てられることになる。

図11は図10の回路にエンジンと走行ポンプを加え、動力の流れを示す矢印(青色の矢印が作業機ポンプを駆動する動力、灰色の矢印が走行ポンプを駆動する動力を示す)を付け足した図である。CTLでは作業機ポンプと走行ポンプがエンジン出力を分け合っているが、先ほど

のD部から油を捨て続けることで作業機ポンプが大きな動力を消費してしまうと、走行ポンプへ回すことのできるエンジン出力が減ってしまうことになる。また、作業機と走行で過大な動力を消費してしまうとエンジンが耐え切れず、エンジン回転数が落ちてしまう。これらの結果、登坂速度が低下してしまう。

また、目標②について、単純に作業機ポンプを大きくするとAUXから取り出せる流量は増加するが、目標①-2の理由と同様に、リリースしたときを想定すると、走行ポンプが使用できるエンジン出力が更に低下してしまうことになる。

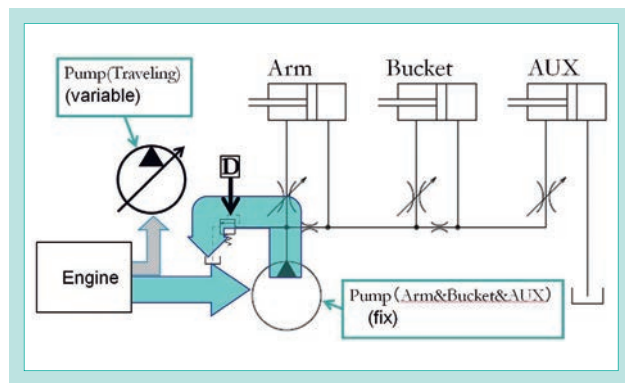


図 11 油圧回路図 2 (SVL90-2)
Fig. 11 Hydraulic Circuit 2 (SVL90-2)

4-2 LS システム導入による課題解決

そこで、今回、LSシステムの導入により、これらの課題を一度に解決することを考えた(図12)。

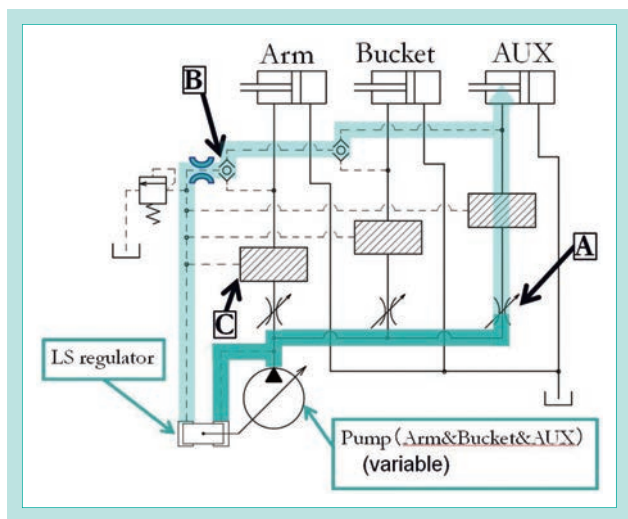


図 12 油圧回路図 (SVL95-2s)
Fig. 12 Hydraulic Circuit (SVL95-2s)

図12ではAUXを操作した時の動きを例として示している。まず、メインスプール(A部)を操作すると作業機ポンプから出た油がAUXへと送られる。メインスプールは可変絞りであるため、油が流れるとメインスプール前後で圧力差が生じる。上記の回路ではそのメインスプール前後の油をそれぞれLSレギュレータに引き込んで、圧力差を検出している。LSレギュレータはこの圧力差が予め設定してある差圧より小さいときは流量を増やし、大きいときは流量を減らすことで、ポンプ流量の調整を行う。すなわち、メインスプールが大きく開かれると差圧が下がるため流量を増やし、小さく開かれると差圧が大きくなるため流量を減らすようになる。そうすることで、作業機ポンプは必要な時に必要なだけの作動油を供給することになり、ロスを少なくすることができるのである。

また、単純な平行回路であれば、メインスプールの操作量に関係なく、負荷圧の低いアクチュエータにばかり油が流れてしまう(負荷の低いアクチュエータだけが動いてしまう)が、図12のB部の高圧選択弁とC部の圧力補償弁の効果により、メインスプールの操作量に応じた速度で各アクチュエータを動かすことが可能となっている。この結果、各アクチュエータが独立し、互いの負荷圧に影響を受けないため、作業機とAUXの同時操作が可能となり、目標①-1はクリアすることができた。

次に油圧回路がリリースを噴いた時の動きについて考える。図13はバケット操作でリリースを噴いた時の様子を表している。

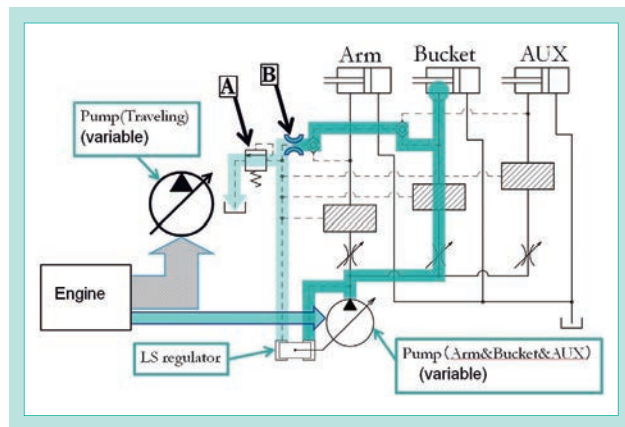


図 13 油圧回路図 2(SVL95-2s)
Fig. 13 Hydraulic Circuit 2 (SVL95-2s)

バケットシリンダがシリンダエンドに到達し、リリースを噴いたときを考えると、バケットシリンダへそれ以上油が送られることはない。よって、メインスプールを油が通過しないため、その前後での圧力差は生まれえない。しかし、本システムにおいては高圧時のリリースバルブが図13のA部に存在することから、B部の絞りに油が流れ、この絞り

の前後で圧力差が発生する。この圧力差をLSレギュレータで検出することで、ポンプ流量を減らすように制御を行う。流量が減ると、A部でリリーフする量が少なくなり、メインスプール前後での圧力差はやはり発生しづらくなるが、前述のB部の絞りも僅かな流量で十分な圧力差が発生するように調整されているため、ポンプの制御を維持することができる。このようにして、リリーフ時に流量をカットすること(以下「リリーフカット」という。)で、作業機ポンプでのロス出力が低減し、より多くのエンジン出力を走行ポンプに回すことができる。

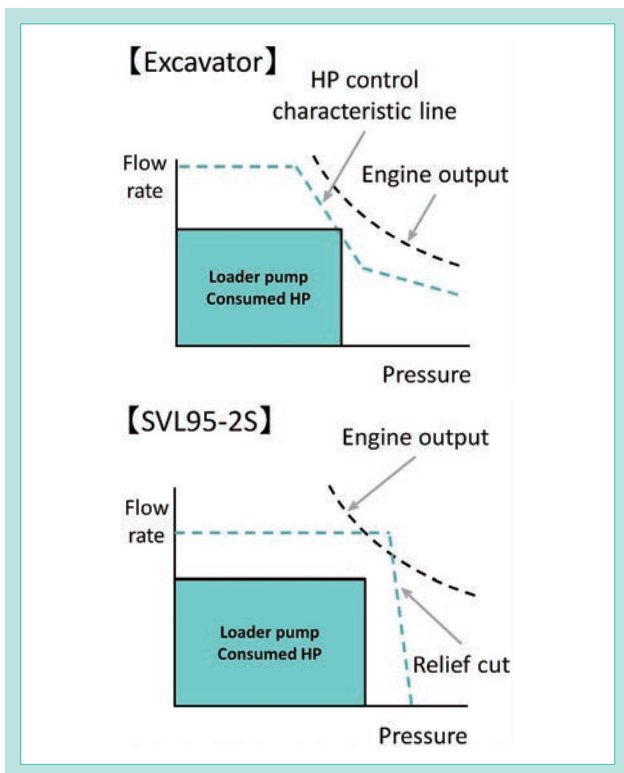


図 14 MB と SVL95-2S の LS システムの違い

Fig. 14 Difference Between MB and SVL95-2S of LS-system

このリリーフカットのシステムがMB(ミニバックホー)で多く使われているLSシステムとの大きな違いである。MBで

使用されている一般的なLSポンプでは出力制御が用いられている(図14)。この制御では、LSポンプが使用できる出力に制限を設け、その制限値をLSポンプが搭載されている機械のエンジン出力にあらかじめ合わせてある。このMBで用いられているシステムの方が操作に対する追従性が良いため、CTLよりも繊細な動きが要求されるMBには適したシステムである。

一方、前述のとおり、CTLでは作業機ポンプとは別に走行ポンプが存在しており、作業機ポンプと走行ポンプでエンジン出力を分け合う必要がある。

そこで、エンジン出力に合わせて作業機ポンプの消費出力に制限を設けたと仮定し、油圧回路上でリリーフを噴いたときを想定すると、作業機ポンプは油を出し続け、制限値一杯でエンジン出力を消費しようとするため、走行ポンプが使用できるエンジン出力が減ってしまうことになる。

逆に、エンジン出力よりも小さく作業機ポンプの消費出力に制限を設けたと仮定すると、作業機ポンプに要求される出力はAUX流量やその他の作業機のスペックで決まってくるため、先ほどよりも大きなエンジン出力が必要となる。更には、同時操作以外の時にはエンジン出力を使い切ることができず、もてあますことになってしまう。

また、アクチュエータからの戻り油を再利用するシリーズ回路の時に比べて各アクチュエータにバラバラに油を送るパラレル回路ではより大きなポンプが必要となり、かつ、大流量のAUX実現のためにも大きなポンプが必要となる。その点からも、LSシステムとこのリリーフカットのシステムを併用し、無駄な流量を極力抑えることでエンジン出力を効率よく利用することが有効である。

よって、CTLには今回のリリーフカットを含んだLSシステムの方が適しているといえる。

上記システムを導入した結果、全ての課題を達成することができた。中でも、目標①-2の測定結果は7.1 km/hと目標を大幅に達成することができた。

5. おわりに

SVL95-2sは71.9 kWのエンジン出力を有効利用することで当初のコンセプトを実現した。これにより、75 kW帯の機械を検討していたユーザに対し、より小型で75 kW以下のエンジンを

搭載した新たな選択肢を提案することができた。SVL95-2sは市場で高い評価をいただき好調に売上げを伸ばしている。なお、2016年度のシェアは15%まで上昇している。

参考文献

- 1) Kubota技報第46号『走行性能向上のための電子式走行出力制御システム(ETTM)の開発』(2012)

エンジン HILS システムの開発

Development of Engine HILS System

エンジン技術部

近年、産業用ディーゼルエンジンは複数の排出ガス規制への同時対応に伴い、エンジンだけでなく排気後処理装置も含め高度な電子制御が求められている。グローバルに事業を展開するクボタは、タイムリーに排出ガス規制に対応したエンジンを開発すると同時に、市場要求に応えるため、多種あるアプリケーション特有の使用状況に合わせたエンジン制御開発の対応が必要である。その結果、ECU(エンジンコントロールユニット)制御ソフトウェアは急激に複雑化、多様化しており、実際にエンジンを運転して試験を行う開発だけでは限界が生じる。そのため、ソフトウェアの品質を確保しながら開発速度を向上するために、新しい開発プロセスであるエンジンHILS(Hardware In the Loop Simulation)システムを構築した。

【キーワード】

エンジンHILSシステム、シミュレーション、エンジンモデル、ソフトウェア試験、試験自動化

Lately, in association with simultaneous compliance with multiple exhaust emissions regulations, higher level electronic control systems have been required, including not just for the engine itself, but also exhaust aftertreatment devices. To expand our presence around the world, Kubota has to develop engines to meet the emissions regulations on time. At the same time, to accommodate market demand, we have to develop engine control systems matched to the specific states of use of each application, of which there are many. As a result, the software of the Engine Control Unit (ECU) has rapidly become complicated and diverse, and there are difficulties developing systems with complete verification of actual engine operation. Consequently, we introduced a new development process, 'HILS (Hardware In the Loop Simulation),' a system that improves the speed of development while securing the quality of the software.

【Key Word】

Engine HILS System, Simulation, Engine Model, Software Test, Test Automation

1. はじめに

排出ガス規制は段階的に強化され、それに合わせてクボタディーゼルエンジンは緻密な燃料噴射の制御を可能とするコモンレールシステム(以下「CRS」という。)に加え、PM(排気中の粒子状物質)を捕集するためのDPF(Diesel Particulate Filter)、更にNOx(窒素酸化物)を浄化するためのSCR(Selective Catalytic Reduction)といった排気後処理装置を段階的に導入してきた。これらのシステムや装置は全て電子制御されており、エンジン制御においてもソフトウェアの重要性が高まっている。

前段で述べたCRSや排気後処理装置が必須となる厳しい排出ガス規制は、日米欧の排出ガス規制先進国から導入されたが、近年、他の地域における排出ガス規制も日米欧に遅れる形で規制強化されている。そのため、世界のマーケットで事業展開するクボタエンジンは、同時に異なる段階の規制に対

応することが求められるようになってきた。また、産業エンジンは多くのアプリケーションが存在するため、各種アプリケーションの使用状況に合わせたきめ細やかな対応を行ってきた。結果、ECU制御ソフトウェアは複雑さを増す一方で、その仕様数は急激に増加している。

従来は、ソフトウェアの変更の度に実機エンジンを運転して試験を行ってきた。しかしこの方法では、開発期間内に必要な確認を全て行うことは困難になりつつある。従来のソフトウェア試験工程では、エンジン運転準備などの時間が試験の度に発生していた。また、実機エンジンでは再現困難な試験、危険を伴う試験が存在すること、莫大な試験工数が生じていること、作業者の知識レベルにより、試験精度・効率にバラつきが発生するなどの課題が存在していた。

そこで本研究では、エンジン制御ソフトウェアの品質を確保しながら開発速度を向上するための新規試験環境を構築する必要があると考え、これを実現するための具体的な方法として「エンジンHILSシステム」を構築した。そして、数多くのアプリケーションに採用されているCRSエンジンの新規ソフトウェア開発・サンプルソフト・量産ソフトのリリース段階で適用し、課題の解決を図る。

尚、CRSエンジンは、厳しい排出ガス規制をクリアするためには必要不可欠である。そのため、クボタの主要エンジンである立形ディーゼルエンジンにおいて、CRSエンジンソフトウェアの開発は重要な位置づけである。

本稿では、これらの課題を解決するために導入した「エンジンシステム診断ツール」の開発を通して培った技術を紹介する。

2. 開発のコンセプトと目標値

2-1 開発のコンセプト

世界中で様々な機械に搭載されるクボタエンジン(図1)に対し、高品質を担保するための検証環境として必須である「エンジンHILSシステム」は以下の2点を開発コンセプトとする。

- (1)実機だけではなく、シミュレーションを活かした検証環境を実現すること
- (2)テストを自動化することで効率良くソフトウェアの品質を高めること

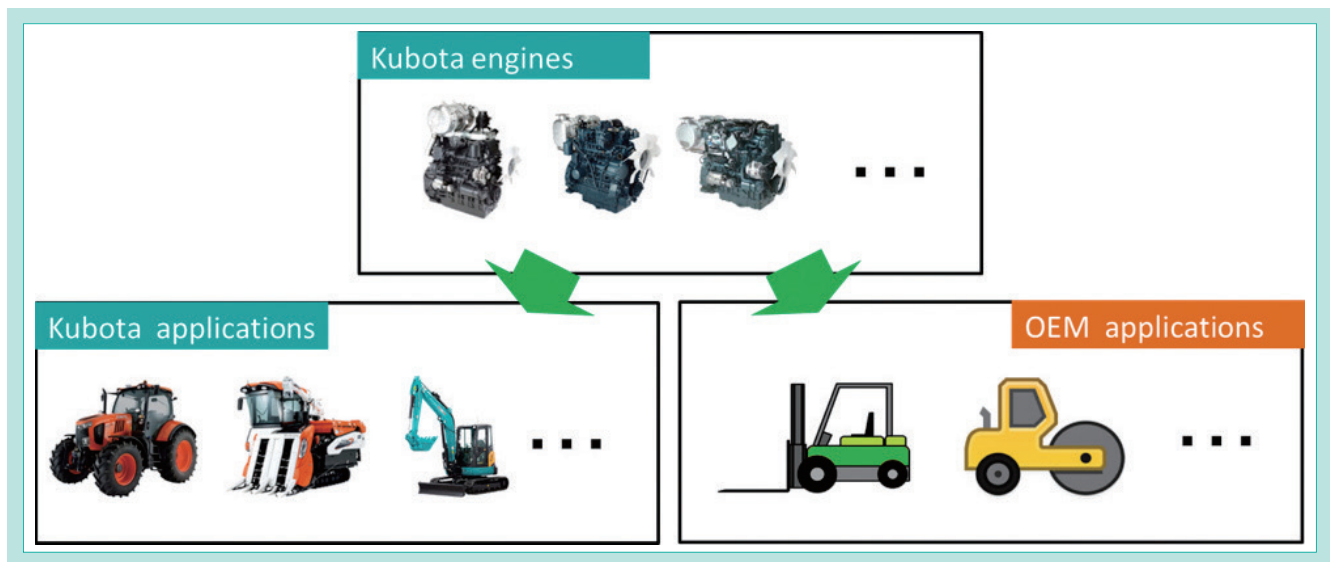


図1 クボタエンジンの搭載状況
Fig. 1 Applications

2-2 開発目標

(1)シミュレーション技術を用いて試験を行い、再現困難な試験、危険を伴う試験を実現可能とする。

(2)試験を自動化することで、作業者の熟練度の差による試験精度・効率のバラつきをなくすことを可能とする。

3. 解決すべき技術課題

従来、ECUソフトウェアの試験はECUを実機エンジンに取付けて行っていた。この試験環境では、以下の課題が存在する。

(1)試験環境準備による時間ロス

ソフトウェアの変更の度に試験対象のエンジンをエンジン運転ベンチに据付ける時間が発生する。エンジン試験ベンチには限りがあるため、常に試験対象エンジンが取付けられている訳ではない。エンジン据付けに多くの時間を費やし

てしまう問題がある。

(2)再現困難・危険を伴う試験

実機エンジンでは再現困難な試験や、危険を伴う試験が存在する問題がある。例としては、再現困難な試験では、電源変動試験や複雑なタイミングでのスイッチ操作試験があり、危険を伴う試験では、オーバラン試験などがある。詳細に関しては後の4章で詳しく記述をする。

(3)試験項目の増加・精度のバラつき

多種ある量産ソフトウェアに対して行うべき、莫大な試験項目に対して、実機エンジン、かつ手作業で全て試験を行う

のは困難である。また、作業者の知識レベルにより試験精度・効率にバラつきが発生する問題がある。

4. 開発技術

4-1 本開発による新規試験環境

本章では、課題解決のために新規開発したエンジンHILSシステムについての概要を説明する。具体的な課題解決の方策については、4-2以降で詳しく述べる。

HILSとは、Hardware In the Loop Simulationの略であり、Hardwareとは試験対象の実機のECUを示している。エンジンHILSシステムの構成を図2に示す。

HILSシステムは、試験対象のテストECUをエンジンHILSシステムに接続し、テストECUがあたかも実環境上にてエンジンを制御し正常動作しているような状態を作り出すシステムである。

実際には、図に示すようなエンジンモデルをシミュレータにインストールすることで、実際のエンジンの挙動をリアルタイムでシミュレーションすることが可能となる。シミュレーションで使用する入力データとしては、インジェクタやサプライポンプなどのエンジン制御アクチュエータ駆動信

号であり、出力データは温度、圧力、回転信号などのセンサ信号である。また、シミュレーション結果は各種センサ出力としてECUにフィードバックされることで、クローズドループシミュレーションを実現している。

上記で示した新規試験環境を使用することで、実機エンジン無しでソフトウェアの検証が可能となる。

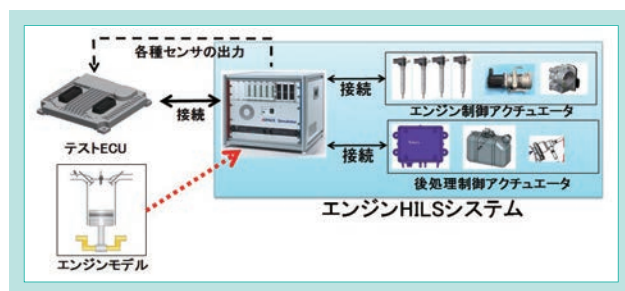


図2 システム概要
Fig. 2 Overall Structure

4-2 HILS エンジンモデルの開発

4.2.1 HILSエンジンモデルの概要

3章で述べた課題点(1)、(2)を解決するために、実機エンジン無しでソフトウェアの試験を行えるように、クボタ独自のエンジンモデルを使用して実機エンジンの挙動をシミュレーションする。図3に示すようなブロック線図を用いてエンジンモデルを規定する。

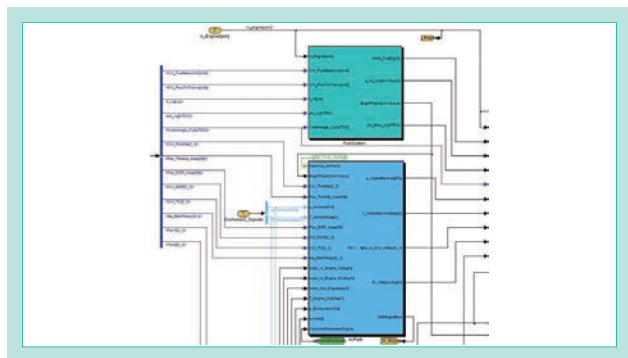


図3 モデル概要
Fig. 3 Model Overview

エンジンモデルとは、エンジンの物理現象を数式化したものである。クボタ独自のエンジンモデルを作成するために必要なことは以下の3点である。

①クボタエンジンで使用しているセンサ特性をエンジンモデルに反映させる。

- ②実機エンジンデータを計測し、エンジンモデルをチューニングする。
- ③クボタに合ったサプライポンプ・インジェクタ等の演算モデルを作成する。

①～③をエンジンモデルの構成図として図4に示す。

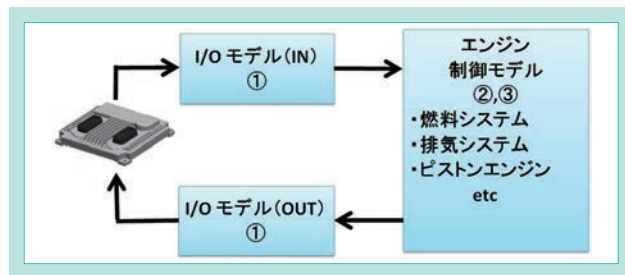


図4 I/Oモデル概要
Fig. 4 I/O Model Overview

本開発では、I/Oモデルとエンジン制御モデルの一部作成を行った。

・I/Oモデルでは、クボタエンジンのセンサ特性に合った入出力変換を行っている。

例: 電圧値 ⇄ 物理値 (上記①の内容)

・エンジン制御モデルでは、クボタエンジンの実測データをもとにモデルチューニングを行った(上記②の内容)。

・制御モデル作成にあたり、クボタがTier 4 Final(T4F)排出ガス規制で新規採用したモデルが存在しなかったため、新規でクボタ独自のモデルを作成した(上記③の内容)。エンジン制御モデルの中で、サプライポンプモデルはエ

ンジンシミュレーションにとって重要なパラメータであり、コモンレール圧力を演算する際のシミュレーション結果に大きな影響を与える要素である。本論文では、サプライポンプモデルの作成について説明する。

4.2.2 HILSエンジンモデルの概要

(1) サプライポンプの役割について

サプライポンプは燃料をコモンレールに圧送するアクチュエータである。燃料の圧送量に関しては、ECUからの制御信号によって調整される。圧送された燃料はインジェクタから噴射される。燃料経路を図5に示す。

前述のように、新規仕様サプライポンプは機械的・電気的な仕様異なる。

(3) サプライポンプモデルの作成

新規仕様を実装したサプライポンプモデルの一部を説明する。まず、閉弁タイミングとポンプカム角度を算出するために作成した制御モデルを図7に示す。

このモデルは、ECUから出力されたパルスをもとに、演算するモデルである。入力信号から演算されたシミュレーションデータの精度が低いと吐出量の演算が正しく行えないため、エンジンモデルの中で重要なモデルの一部である。

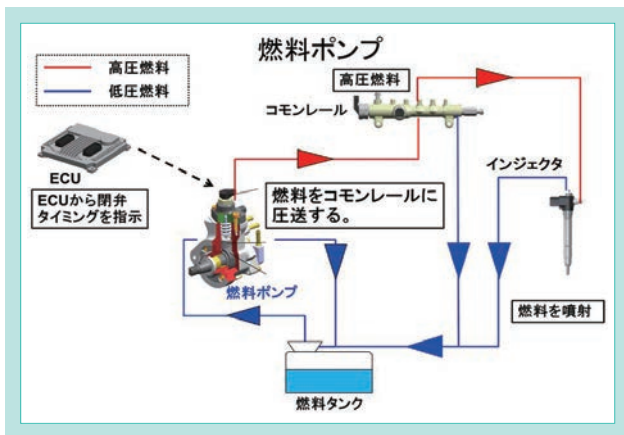


図5 燃料経路
Fig. 5 Fuel Line

(2) サプライポンプのシステム

サプライポンプの機械的な動作の概要図を図6に示す。従来のサプライポンプでは、燃料経路の開口面積によって燃料吐出量が決まる。開口面積は、ECUから出力されるDuty電流で制御されている。

T4F新規仕様サプライポンプは、ポンプ弁の閉弁タイミングによって燃料吐出量が決まる。ECUから出力されるパルス電流の出力タイミングで制御しており、従来のサプライポンプと比べ緻密な吐出制御が可能である。そのため、シミュレーション精度が低いとサプライポンプ故障として誤認識を起し、シミュレーションを行うことができない。

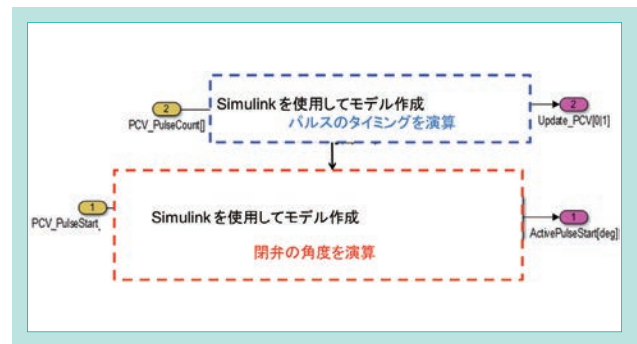


図7 入力データモデル
Fig. 7 Input Data Model

更に、サプライポンプ吐出量を演算するために作成した制御モデルを図8に示す。

これは、1気筒あたりの燃料吐出量を演算し、圧送タイミングに合わせて出力するモデルである。図7で求めた演算値を利用して吐出量を演算し、パルスタイミングに合わせて出力される。

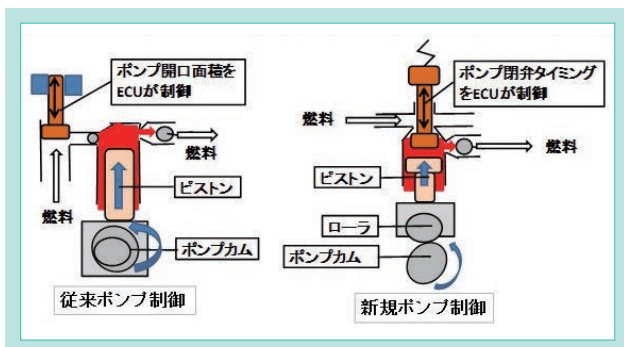


図6 燃料ポンプ
Fig. 6 Mechanism of Fuel Pump

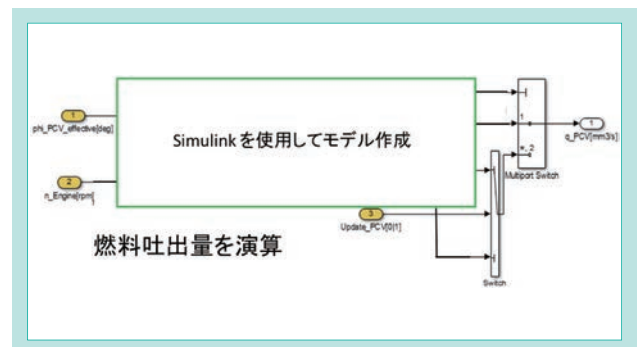


図8 燃料吐出量モデル
Fig. 8 Fuel Discharge Rate Model

上記で求めた燃料吐出量から、最終的にコモンレール圧力を演算する。HILSで得たコモンレール圧力のシミュレーションデータと制御目標のコモンレール圧力の比較を図9に示す。

実機エンジンでは、制御目標のコモンレール圧力と実際のコモンレール圧力が一致している。HILSで演算されたコモンレール圧力は、実機エンジン運転時と同様に、制御目標と合致していることが確認できた。このことから、今回作成したサプライポンプモデルを使用したエンジンシミュレーションは実機とほぼ同等な挙動を再現することができていると言える。

本開発エンジンシミュレーションを用いて、実機で再現困難な電源変動テスト、予期しないタイミングでのスイッチ操作テストや、実機では危険を伴うエンジンオーバランテストを行うことが可能となった。シミュレーション技術を利用することにより、試験環境準備によるロスを低減し、多くの試験項目を短時間で効率良く行うことを可能にした。

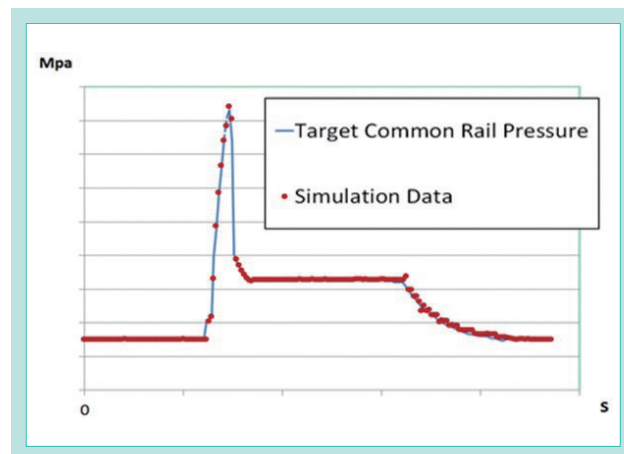


図9 シミュレーションデータ
Fig. 9 HILS Simulation Data

4-3 HILS を用いたソフトウェア試験自動化の構築

4.3.1 試験自動化

3章で述べた課題点(3)を解決するために、ソフトウェア試験自動化を構築した。ソフトウェア試験プロセスで求められるポイントは以下の3点である。

①試験の再現性

作業者の熟練度に関わらず、正確な試験を実現したい

②試験の再利用性

ECU種別を問わず、試験パターンを再利用したい

4.3.2 試験自動化のプロセス

試験自動化プロセスを図10に示す。

(1)仕様書の作成

どのような状況で、何を試験するか、入力データと出力データ(期待される結果)を試験仕様として記載する。

(2)試験コードの作成

- ・試験仕様に従ったエンジン運転状態を再現
自動でアクセル・負荷を切り替えることが可能
- ・運転中の変数をロギング
試験中のデータを自動計測
- ・期待値とロギングデータを比較
自動でデータ検証
- ・試験結果を自動でレポート出力
自動で試験レポートを出力するようにプログラムを作成。
出力内容はクボタオリジナルで変更可能。

③試験自動化による時間節約

作業者の手作業の時間を減らすことでヒューマンエラーを減らしたい

この課題を解決するために、エンジンHILSを用いた試験自動化を構築した。

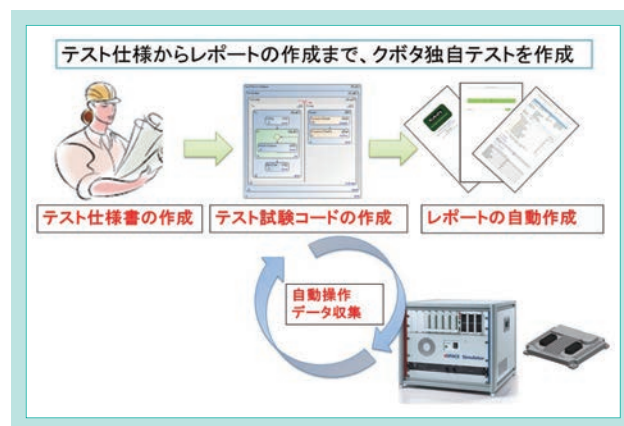


図10 自動化試験の流れ
Fig. 10 Flow Chart of Automation Test

4.3.3 試験自動化項目

本開発では、故障診断試験・SCR制御ロジック試験・基本入出力試験の自動化を行った。

(1)故障診断試験

エンジン構成部品であるセンサ及び、アクチュエータに様々な条件下で異常が発生した際に故障を検知し、故障に応じた制御処理をソフトウェアが正確に行うことを確認する。更に実機では危険を伴う故障診断試験を、安全に実施できる。

(2)SCR制御ロジック試験

SCRシステム(NO_x浄化システム)において、各種アクチュエータ動作制御時に、ソフトウェア内の複雑なステータスが適切に動作していることを検証する。

(3)基本入出力試験

エンジンECUが各センサの出力電圧を適切に読み取れているかを確認する。また、農建機に特有な再現困難なキーの微妙なOn/Offタイミングによる不具合の確認も可能である。

表1に示すように、試験自動化を取り入れることで、作業者の手作業の時間を減らし、正確な試験を実現した。また、表1の試験は各種エンジン・ECUの組合せに於いて流用可能となっており、様々なエンジンで使用可能であり、広範囲な検証を可能とした。実機エンジンでの試験を行う前にHILSを使用した試験を行うことで、後工程での手戻りを大幅に少なくすることが可能となった。

表 1 試験自動化結果

Table 1 Result of Test Automation Sequence

項目	手作業 [day]	自動化 [day]
故障診断試験		⇒1/3に短縮
SCR制御 ロジック試験		⇒1/5に短縮
基本入出力試験		⇒1/2に短縮

5. おわりに

今回開発したエンジンHILSシステムを使用して、エンジン制御ソフトウェアの検証を行うことで、以下の2点を実現した。

- ①エンジン実機では再現困難な試験・危険を伴う試験の実施を可能とした。
 - ②試験自動化を導入することにより、作業精度・効率を向上させ、作業者の熟練度の差による試験精度の差異をなくすることが可能となった。
- 上記のとおり、当初の開発コンセプトを達成することができ

た。また、本開発環境を実現したことにより、今まで以上に高品質な製品開発を行うことが可能となった。

結果として、短期間でソフトウェアの検証を終えることで、市場要求にタイムリーに対応可能となり、より多くのユーザに満足していただける製品開発を実現可能とした。

参考文献(論文全体として参照)

- 1) dSPACE JAPAN :モデルベース開発、(2013)、日経BP社
- 2) 申鉄龍、大島明:自動車エンジンのモデリングと制御、(2011)、コロナ社
- 3) Steve McConnell :コードコンプリート、(1993)、アスキー出版局
- 4) Glenford J. Myers :ソフトウェア・テストの技法 第2版、(2006)、近代科学社
- 5) Dustin Boswell、Trevor 、Foucher:リーダブルコード 初版、(2012)、O'REILLY
- 6) IEEE computer society :ソフトウェアエンジニアリング 基礎知識体系、(2014)、オーム社
- 7) 久保孝行:自動車業界MBDエンジニアのためのSimulink入門、(2012)、TechShare
- 8) 人見光夫、御堀直嗣:マツダ スカイアクティブエンジンの開発、(2013)、三樹書房
- 9) ビジネスキューブ・アンド・パートナーズ:Automotive SPICE 実践ガイドブック、(2007)、日経Automotive Technology
- 10) dSPACE Japan :dSPACE USER Japan CONFERENCE、(2015、2016、2017)、Springer

PRO688Q 粟収穫キットの開発

Development of a Kit for PRO688Q Combine Harvester for Harvesting Foxtail Millet

技術部

中国において粟の作付面積は2011年から年々増加し、2015年には約89万haにまで達し、今後も増加すると予想される。しかし、粟は稲麦よりも穀粒が小さい等の原因から現状の稲麦仕様機のままでは、市場が粟収穫に対して要望している性能を確保できない。そこで、久保田農業機械(蘇州)有限公司(以下「KAMS」という。)技術部では主力機種であるPRO688Qのキットとして市場要望である「収穫ロス低減」、「高選別率」を実現する高性能で「低コスト」な粟収穫キットを開発した。

【キーワード】

粟、収穫ロス低減、高選別率、低コスト

In China, the planted area of foxtail millet has increased every year since 2011, reaching about 890,000 ha in 2015, and is expected to continue increasing in the future. However, the present combine harvester specification for rice and wheat cannot secure the performance demanded by the market for harvesting foxtail millet. One of the reasons is that foxtail millet grain is smaller than rice and wheat. So, Kubota Agricultural Machinery (Suzhou) (hereinafter KAMS) Technical Development Department was able to develop a high performance, low cost kit for the main combine harvester PRO688Q harvesting foxtail millet that meets market demands for “low loss of yield” and “high selecting rate.”

【Key Word】

Foxtail Millet, Low Loss of Yield, High Selecting Rate, Cost Reduction

1. はじめに

中国において粟の作付面積は、2011年から年々増加し、2015年には約89万haにまで達し(図1)、今後も増加すると予想される。増加する理由として以下の2点がある。

- ① 粟のメイン市場である畑作地区(図2)は干ばつが多い。そのため干ばつに強い粟が目立って注目されている。
- ② 中国では最近、成人病が増加している。そのため栄養価値の高い粟が健康食品として見直されている。

これらの背景から、KAMSで最も売れているPRO688Qに対し、粟の収穫が可能になる粟収穫キットを開発することで、一機多用を実現し、ユーザの収益アップと中国畑作地区でのクボタブランドの浸透を図り、普通型コンバインの市場での競争力向上と更なる拡販を狙う。

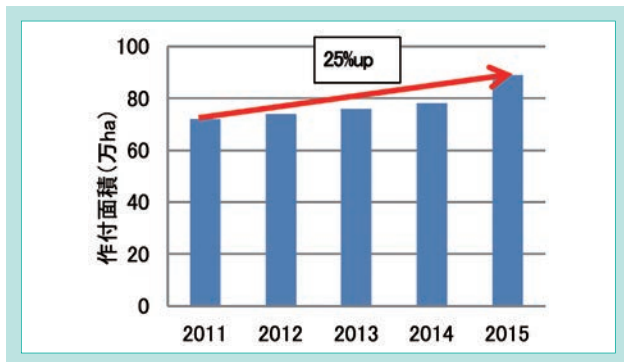


図1 中国における粟の作付面積¹⁾

Fig. 1 Planted Area of Foxtail Millet in China



図2 中国の畑作地区

Fig. 2 Upland Cropping Area in China

2. 開発のコンセプトと目標値

2-1 開発のコンセプト

粟は、稲麦よりも穀粒が小さい等の原因からベースとなる稲麦仕様機のままでは、市場が要望する「収穫ロス(以下「ロス」という。)低減」、「高選別率」を実現することができない。そこで、部品交換のみで粟を収穫できるキットとして

上記市場要望を満たす高性能で「低コスト」な粟収穫キットを開発する。購入したユーザは、麦だけでなく粟も収穫することにより収益をアップすることができるため、畑作地区での普通型コンバインPRO688Qの拡販が可能となる。

2-2 開発目標

粟を収穫する機械の開発は、クボタとして初めてであった。また、粟の収穫に対する中国の国家規格であるGB規格もなかった。

そこで、まず他社機(中国ローカルメーカ)の性能調査を行った。しかし他社機のユーザは性能に満足しておらず目標値とすることはできなかった。

そこで、穀粒の大きさが近く、収穫に対するGB規格がある菜種の評価基準と市場調査の結果を参考にしながら、KAMSとして「収穫ロス率」、「選別率」それぞれの目標値を

表1のように設定した。また、「売価」はユーザ収益から他社機の67%以下に設定した。

表1 目標値
Table 1 Target Values

項目	収穫ロス率	選別率	売価
他社機	9.4%	91.2%	100%
菜種【GB規格】	8%以下	94%以上	73%
開発目標	5%以下	95%以上	67%以下

3. 解決すべき技術課題

本開発における解決すべき技術課題を述べる前に粟の作物としての特徴について述べる。

稲麦との大きな違いは下記の2点である。

(1)稲麦と比較して穀粒が小さくて軽い(表2、図3)。

表2 粟、稲、麦の穀粒の大きさ及び重量

Table 2 Size and Weight for Grain of Foxtail Millet and Rice/Wheat

項目	粟	稲、麦
大きさ(mm)	φ1~3(直径)	6~12(長辺)
1,000粒重量(g)	2~4	25~35



図3 粟、稲、麦の穀粒

Fig. 3 Grains of Foxtail Millet, Rice and Wheat

(2)稲麦と比較して作物の全長が長い上に、穂も長い(表3、図4)。

全長は稲麦の1.4~2.4倍。

穂の長さは稲麦の1.3~3倍。

表3 粟、稲、麦の全長及び穂の長さ

Table 3 Total and Head Length of Foxtail Millet and Rice/Wheat

項目	粟	稲、麦
全長(mm)	1,100~1,700	700~1,400
穂の長さ(mm)	200~300	100~150



図4 粟、稲、麦の穂

Fig. 4 Heads of Foxtail Millet, Rice, and Wheat

このように稲麦と大きく作物の特徴が異なる粟を収穫するキットの開発で、解決すべき技術課題を以下に述べる。

(1)収穫ロス低減に対する技術課題

粟の作物特性に対応し、刈取部から落下する穀粒や脱穀部から排出する穀粒を低減する必要がある。

(2)高選別率に対する技術課題

稲麦の選別と比較して、ゴミ等の不要物との比重差が小さい穀粒だけを選別する必要がある。

(3)低コストに対する技術課題

キットのため、コンバイン本機のような台数は期待できないので、償却費を考慮すると金型への投資を抑える必要がある。

4. 開発技術

4-1 収穫ロス低減

まず、ロスの発生箇所を明確にするため、稲麦仕様で実作業を行った。その結果、刈取部では、サイドカバー部とリール部でロスが発生していた。また脱穀部は、こぎ胴部とトウミ風量によるロスが発生していた(図5)。

次にコンバイン全体での収穫ロス率を5%以下にするため、各部それぞれの目標値を表4のように設定した。

表4 収穫ロスの開発目標
Table 4 Target Value of Yield Loss

項目	刈取ロス	こぎ室ロス	選別室ロス
開発目標	3%以下	1%以下	1%以下

4.1.1 刈取部からのロス低減

(1) サイドカバー部からのロス低減

刈刃で切断された稈(かん)の中には、刈取部の左右端から機体外側方向に倒れる稈がある。そのような場合、粟は穂先が重く、重心位置が高いため、稲麦用のサイドカバーでは、穂先が乗り越えて落下してしまう。

そこで、サイドカバーの高さを350 mm高くすることにより、穂先を機体内側に向け、乗り越えにくくすることにより、ロスを低減させた(図6、図7)。

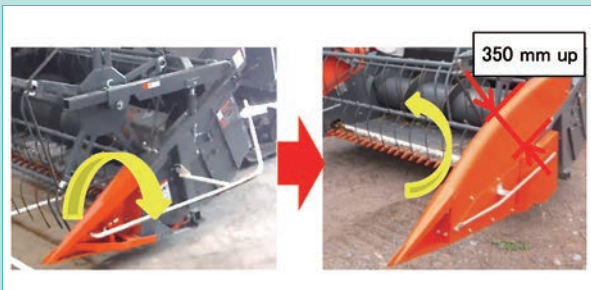


図6 サイドカバー部からのロス改善

Fig. 6 Comparison of Side Cover for Current Machine and Developed Kit

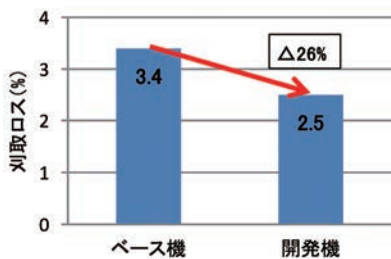


図7 サイドカバー性能比較
Fig. 7 Side Cover Performance Comparison

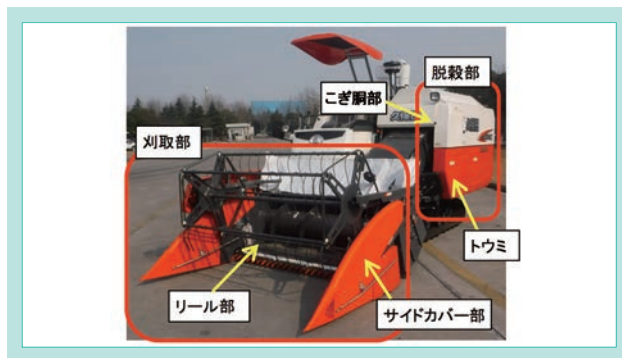


図5 ロス発生箇所

Fig. 5 Parts Generating Yield Loss

(2) リール部からのロス低減

リール部で穂先を切って地面に落下させ、ロスになる。その原因は、リールの回転が速すぎ、掻き込む際に穂先を切ってしまうためであった(図8)。



図8 リール部からのロス

Fig. 8 Yield Loss from Reel

そこで、下記のようにリール回転数を低くする試験を行った。

ベース機: ベース機回転数

改善案1: ベース機回転数比30%減

改善案2: ベース機回転数比50%減

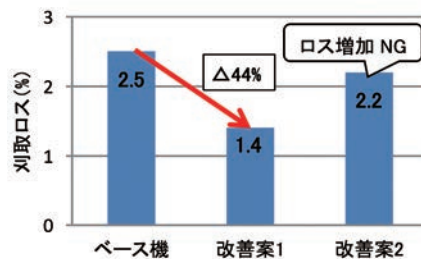


図9 リール回転数性能比較

Fig. 9 Comparison of Reel Rotational Speed

試験の結果、改善案2の場合、車速を上げていくとリールの処理能力が不足し、作物を掻き込まずに機体前方に押し倒し、ロスが増加したため改善案1を採用した(図9)。

4.1.2 脱穀部からのロス低減

(1) こぎ残しロス改善

粟は穂の部分が長く、多くの穀粒がついている、また脱粒強度も高いため、稲麦仕様と同じこぎ歯ではこぎ残しによるこぎ室からのロスが多く発生していた。

そこで、こぎ歯のピッチを狭くすることにより、こぎ歯が作物をこぐ頻度を増加させ試験を行った(図10)。

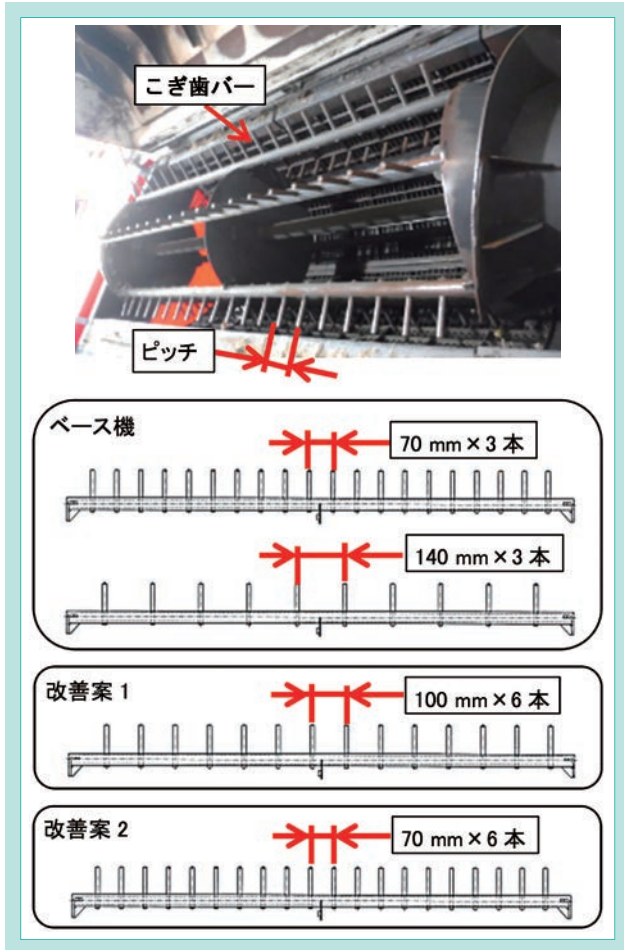


図10 こぎ歯バー
Fig. 10 Threshing Bar

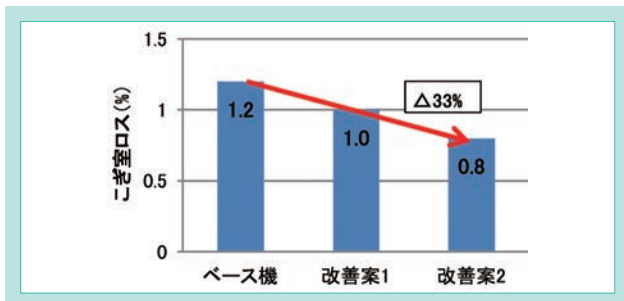


図11 こぎ歯バー性能比較
Fig. 11 Threshing Bar Performance Comparison

試験の結果、33%減少と最も改善効果が大きい改善案2を採用した(図11)。

(2) トウミからの風による穀粒の飛散ロス改善

稲麦よりも穀粒が小さいため、トウミからの風で、ゴミと一緒に穀粒も飛ばし、選別部からのロスになっていた。

そこで、適切な風量にするため、トウミへの風の流入量を減少させながら試験を行った。

ベース機では、トウミ上部からの風の流入量が調整可能である。しかし上部からの風の流入量を0にしてもロスが多かったため、トウミの下部からの風の流入量も減少させる風量規制板を追加して試験を行った(図12)。

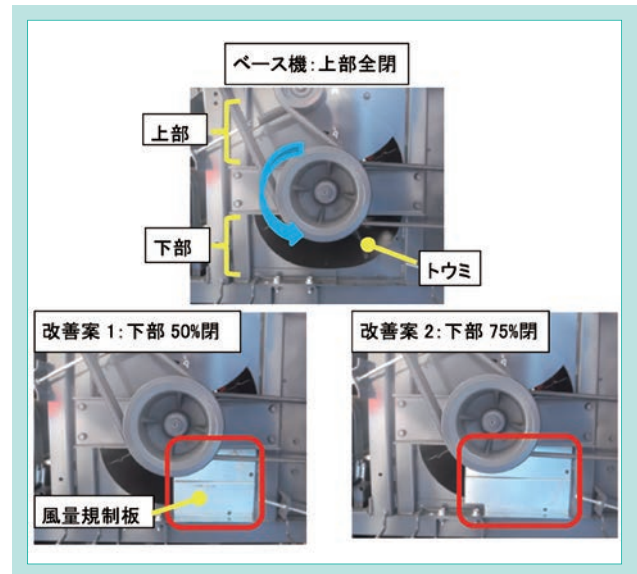


図12 風量規制板
Fig. 12 Airflow Regulating Plate

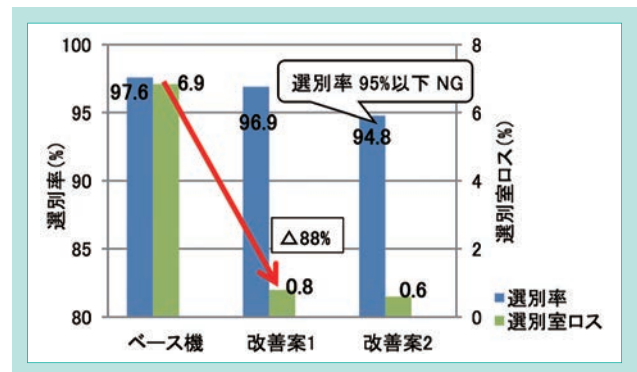


図13 風量規制板性能比較
Fig. 13 Airflow Regulating Plate Performance Comparison

試験の結果、風量が大きすぎると選別部からのロスが増加するが、小さすぎると改善案2のように選別率が低下するため、改善案1を採用した(図13)。

4 - 2 高選別率

脱穀部は、図14に示すように様々な部品で構成されている。その中から高選別のために特に「(1)受け網」と「(2)シーブケース後部」の改善を行った(図15)。

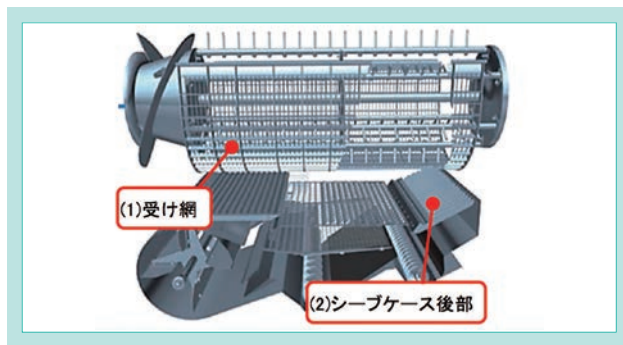


図 14 脱穀部

Fig. 14 Threshing System

4.2.1 受け網の改善

前述したように稲麦より穀粒が小さいため、こぎ歯で脱穀された段階で、穀粒とゴミの選別精度を上げるため、こ

ぎ歯の下に配置されている受け網のメッシュを稲麦仕様より小さくして試験を行った。

試験の結果、改善案2までメッシュを小さくすると、こぎ室からのロスが1%を越えたため、選別率、ロスともに目標値をクリアする改善案1を採用した(図16)。

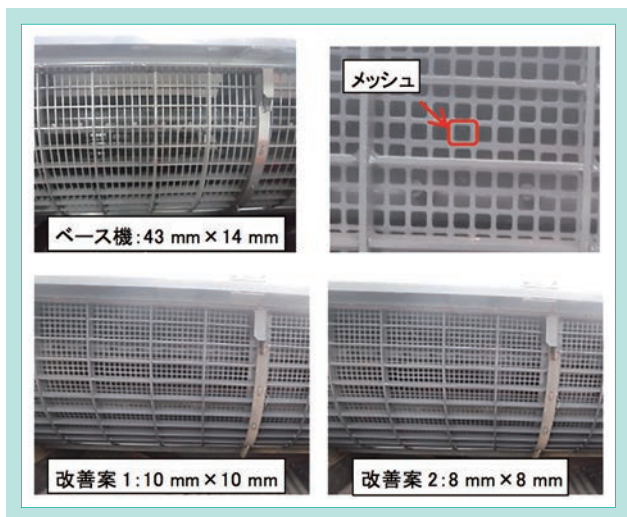


図 15 受け網
Fig. 15 Concave

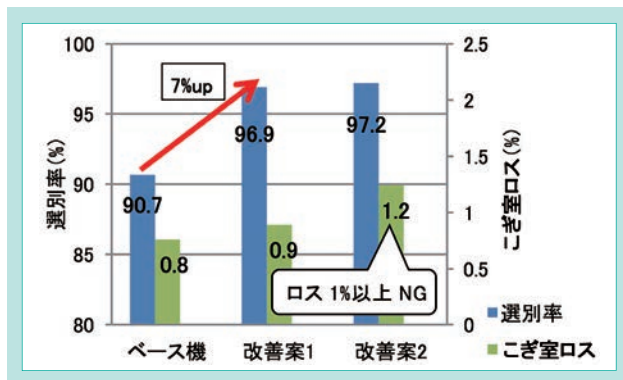


図 16 受け網性能比較

Fig. 16 Concave Performance Comparison

4.2.2 シーブケース後部の改善

穀粒とゴミを選別する最終部分が、稲麦仕様ではストローラックという選別部からのロスを低減することを主目的とした部品になっている。しかし、ストローラックは、ロスになる穀粒を回収することもできるが、同時にゴミ等も回収してしまうマイナス面もある。

そこで、リヤチャフという隙間調整可能な選別板を配置した部品で試験を行った(図17)。

試験の結果、選別部からのロスの大幅な増加が懸念されたが、同等で目標の1%以内であったため、リヤチャフを採用した(図18)。

また、実測試験を行った際に、シーブケース前方で穀粒が回収できているため、シーブケース後部で積極的にロスを回収しなくても良いことが分かった。

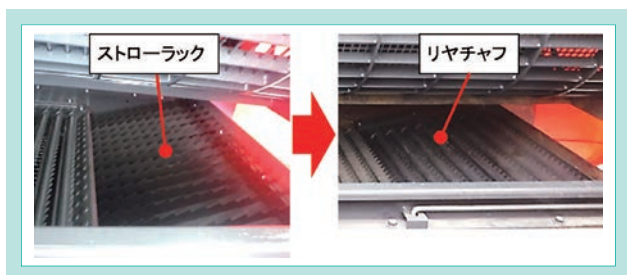


図 17 ストローラック&リヤチャフ
Fig. 17 Straw Rack and Rear Chaff

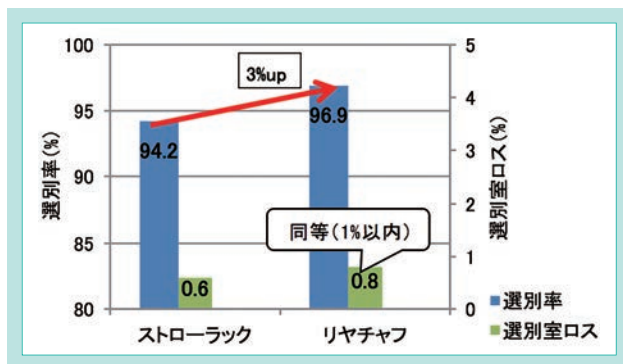


図 18 ストローラックとリヤチャフ性能比較

Fig. 18 Comparison of Straw Rack and Rear Chaff

4-3 低コスト

金型への投資を抑えるため性能確保に必要な部品に限定し、投資を行った。しかし、最大の課題が先ほどの刈取部のサイドカバーであった。

粟キットのサイドカバーは、作物の引っ掛かり防止のため上部が半円状で、両側は平面で構成する必要がある。

この様な形状の類似部品として、コーンコンバインの刈取部サイドカバーがあったが樹脂製であった。しかし、樹脂製は金型費が高いため板金構造で製作する方法を検討した。板金で製作する際の最大の課題が、強度を確保しながら半円の形状を構成することであった(図19)。

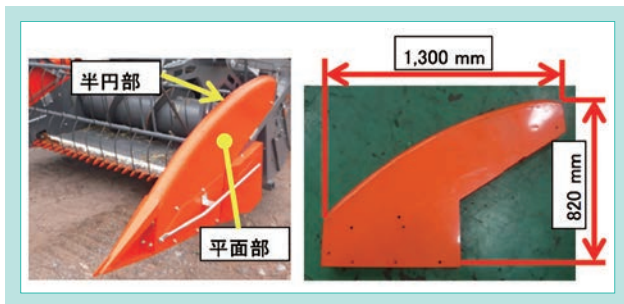


図 19 刈取部サイドカバー
Fig. 19 Side Cover

そこで、この部分は図20に示すようにパイプを曲げた部品に平板を溶接して構成した。この構造で実刈試験時のロス測定やKAMSでの悪路耐久試験を行い、性能及び耐

久性に問題がないことを確認した。

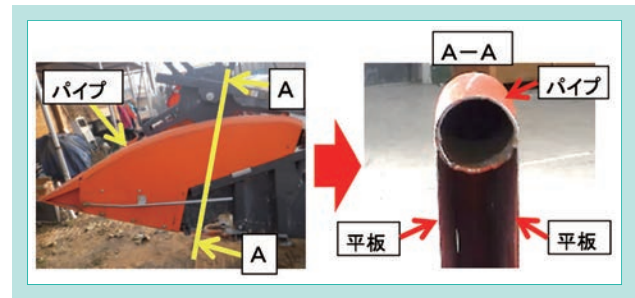


図 20 サイドカバーの構造
Fig. 20 Structure of Side Cover

この構造の採用によりサイドカバー部だけで、金型費を樹脂で製作する場合と比較して84%のコストダウンを行った(図21)。

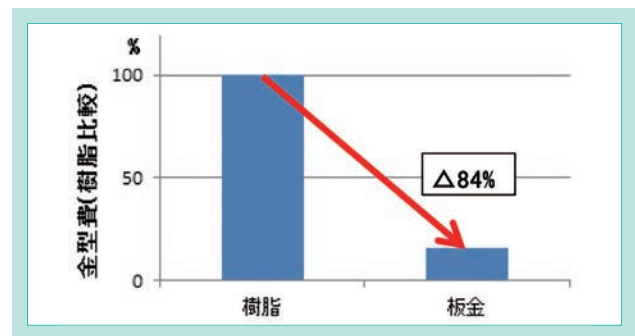


図 21 サイドカバーの金型費
Fig. 21 Mold Cost of Side Cover

5. おわりに

まず、開発目標に対する成果については、表5のように収穫ロス率、選別率、売価、全ての開発目標を達成した。

表 5 開発目標に対する成果
Table 5 Result Against Target Values

項目	収穫ロス率	選別率	売価
開発目標	5%以下	95%以上	他社機比67%以下
成果	3.4%	96.9%	同上67%

その結果、粟収穫キットは2017年に初物生産を行い、2018年に量産を行う予定である。

今後は、粟収穫キットをホイールコンバインやクローラ式普通型コンバインの上位機種へ、本開発キットをベースに展開する。また今回の開発で得られた稲麦以外の作物を収穫するための技術や知識を活かし、他の作物を収穫可能にするキットも開発していく。

最後に、KAMS技術部としては、市場に近いというメリットを活かし、市場の要望や変化等の市場情報を、素早く把握することにより、下記の内容に貢献する所存である。

- (1) 中国の畑作地区での農業の機械化に貢献する。
- (2) 事業としては、中国特有のキットや仕様をKAMSで企画、開発することによりコンバインベース機種の拡販に貢献する。

参考文献

- 1) 中国国家統計局統計データ(2016)

ミドルレンジ重量フィーダの開発

Development of Middle Range Weighing Feeder

精密機器技術部／精密機器営業部

重量フィーダは、樹脂混合(コンパウンド)に使用される「押出機」に、樹脂原料を定流量で供給する装置である。海外市場において競争力を強化し、売上を拡大するため、価格を抑えながら適用原料の幅が広い「ミドルレンジ」機を開発した。「ハイエンド」機である現行機は、標準仕様のままでは適用原料の範囲が狭く、オプションの「縦軸型アジテータ」を追加装着することによりその範囲を広げている。そのため、高価格となりメンテナンス性が悪いという問題点があった。本開発機では、「独自形状の供給ホッパ及び供給部の構造」と「斜め軸型アジテータ」を備えることにより、耐ブリッジ性を大幅に向上させ、適用原料の幅を拡大するだけでなく、供給精度も向上させた(特許出願1件)。本稿では、特殊構造による耐ブリッジ性向上技術と、その量産化技術について解説する。

【キーワード】

重量フィーダ、アジテータ、溶接治具、耐ブリッジ性、充填性能、供給精度

A weighing feeder is the piece of equipment that supplies resin material at a constant flow rate in an "extruder" used for resin mixing (compounding). We developed a "Middle Range Weighing Feeder" which keep down product price and can be used with various materials in order to extend sales in overseas markets by enhancing our competitiveness. The current model, a "High End Weighing Feeder," can only supply materials of limited types with standard specifications. Users have to attach "a vertical agitator" as an option to a feeder to supply other materials so it is high cost and difficult to maintain. With this development model, we greatly improved bridge resistance by developing a feeder with "an original form feed hopper and feed part structure" and "a diagonal agitator." (One patent applied for). This made it possible not only to expand the range of usable materials, but also to improve supply accuracy. In this paper, we explain the technical development of improving bridge resistance with the special structures and the technical development of mass production of the structures.

【Key Word】

Weighing Feeder, Agitator, Fixture for Welding, Bridge Resistance, Filling Efficiency, Supply Accuracy

1. はじめに

樹脂コンパウンド工程において、重量フィーダは原料の配合比率を一定にする役割を果たしており、樹脂コンパウンドメーカーにとっては、品質の確保と生産性の向上に欠かせない存在となっている(図1)。

クボタはこれまで、コンパウンド業界向けにフィーダを製造・販売し、国内ではトップシェアを獲得してきた。しかし、主なターゲットである化学(樹脂)の成長市場は国内から海外(中国・東南アジア・インド等)にシフトしている。海外での事業を拡大し、

「グローバル・メジャー・ブランド・クボタ」を実現するためには、海外競合製品に対して競争力のある製品の投入が必要である。

競合は主に欧米メーカーであり、仕様はクボタ現行機と同等の「ハイエンド」機が中心であるが、低価格な「ローエンド」機もラインナップしている。複数台を納入する案件では、全てを「ハイエンド」機で揃える必要性が低く、現行ラインナップでは顧客要望に沿った提案ができない事例がある。

現行「ハイエンド」機では、国内市場において、客先のコンパウンド原料ごとに原料テストを実施し、最適な機種選定を行うことでユーザの要求仕様を満足してきた。しかし、海外市場向けの原料テストを実施することは、工数・設備の面で困難が想定される。

フィーダで供給する原料の性状は様々で、安定供給が容易な原料もあれば難しい原料もある。安定供給が難しい原料では、ブリッジ(原料の粒子同士がアーチ構造を形成して閉塞し、排出されなくなる現象)が発生することがある。現行機では、ブリッジ回避策として、オプションで「縦軸型アジテータ」を追加

装着することにより、最も制御が難しいとされる酸化チタン等の高ブリッジ原料(頭文字の「高」はブリッジの発生程度を表し「低」「中」「高」で分類される)まで適応可能となる。しかし、高価格及びメンテナンス性が悪いという問題点がある。

以上のような背景から、海外戦略機種として、標準仕様での適用原料範囲が広い「ミドルレンジ」機をラインナップし、「ハイエンド」機でしか扱えなかった原料への対応と、機種選定を行うための原料テストの不要化を実現することで、価格競争力を強化することを狙いとする。

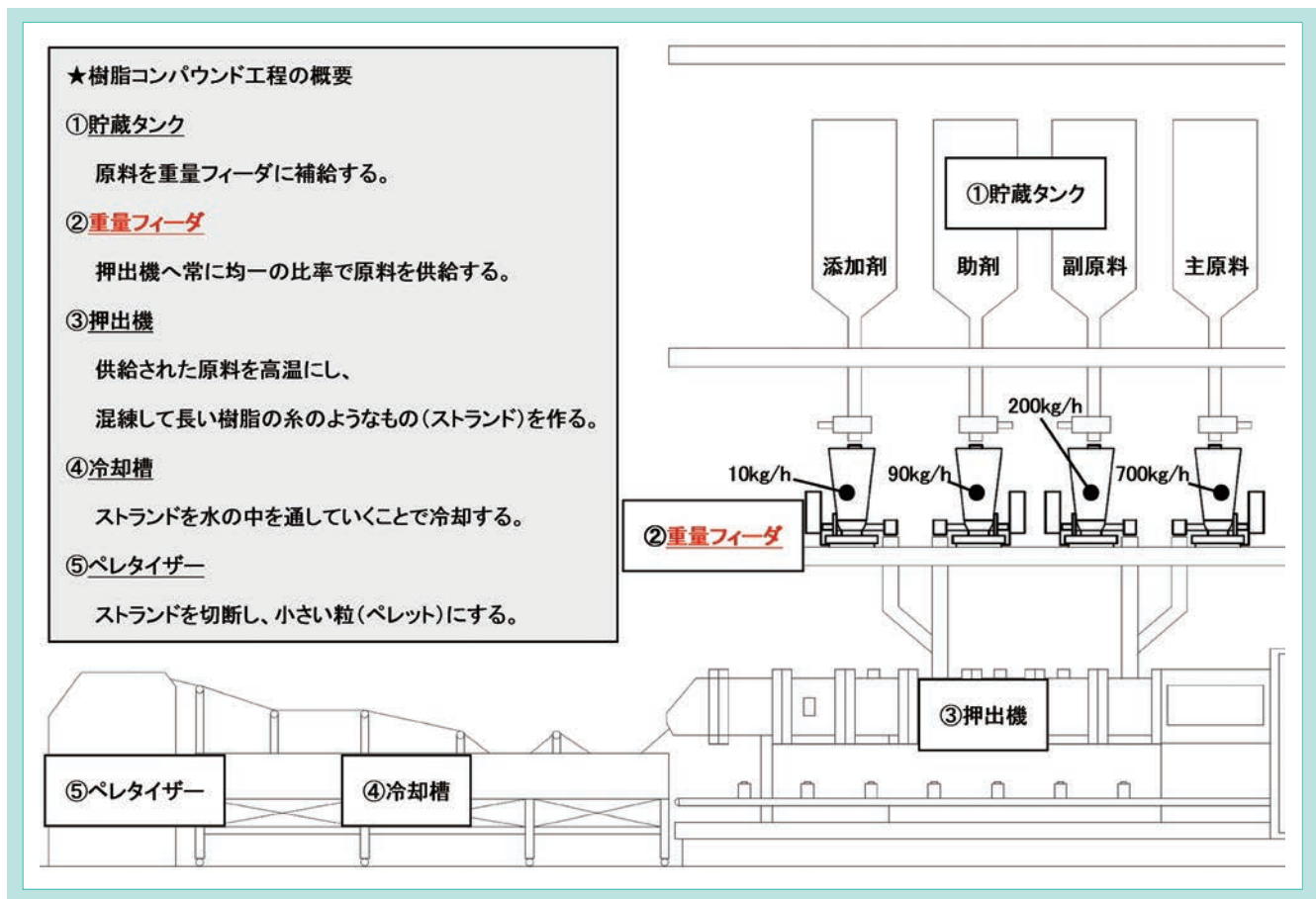


図1 重量フィーダの設置例
Fig. 1 Weighing Feeder Installation Example

2. 開発のコンセプトと目標値

2-1 開発のコンセプト

海外市場において競争力を強化し、売上を拡大するため、価格を抑えながら適用原料の幅が広い「ミドルレンジ」

機を開発する。供給精度は現行機(「ハイエンド」機)並みを維持する。

2-2 目標値

①適応原料範囲の拡大

標準仕様で中ブリッジ原料である炭酸カルシウムまで対応できること。

②ハイエンド機と同等の供給精度を維持

設定流量5kg/hでの供給精度が1%以下であること。

3. 解決すべき技術課題

適用原料の範囲を拡大するためには、耐ブリッジ性の向上を、価格を抑えながら実現する必要がある。そのための、

3-1 耐ブリッジ性向上の技術課題

現行機(「ハイエンド」機)や多くの競合メーカーが採用する「半球型の供給ホッパ」+「横軸型アジテータ」の方式では、構造上の制約から、高さを抑えつつ容積を確保するために、上に行くほど広がった円錐形状の「計量ホッパ」にせざるを得なかった。この方式では、アジテータのかき上げ側や押し付け側の壁面に原料の付着が発生し、そこが起点となって円錐形の「計量ホッパ」が原料を支えてしまい、ブリッジが発生することがある。

ブリッジ回避策として、オプションの「縦軸型アジテータ」を追加装着することにより、高ブリッジ原料まで適応可能となる。その反面、「縦軸型アジテータ」の装着により、高価格となる。また、ホッパ上面から吊り下げのように設置するため、メンテナンス性が悪いという問題点がある(図2)。

以上のことから、価格を抑えながら適用原料範囲を拡大するには、円錐形のホッパを用いずに容積を確保し、かつ縦軸型アジテータを追加することなくブリッジを回避する設計が必要となる。

具体的な技術課題について、以下で述べる。

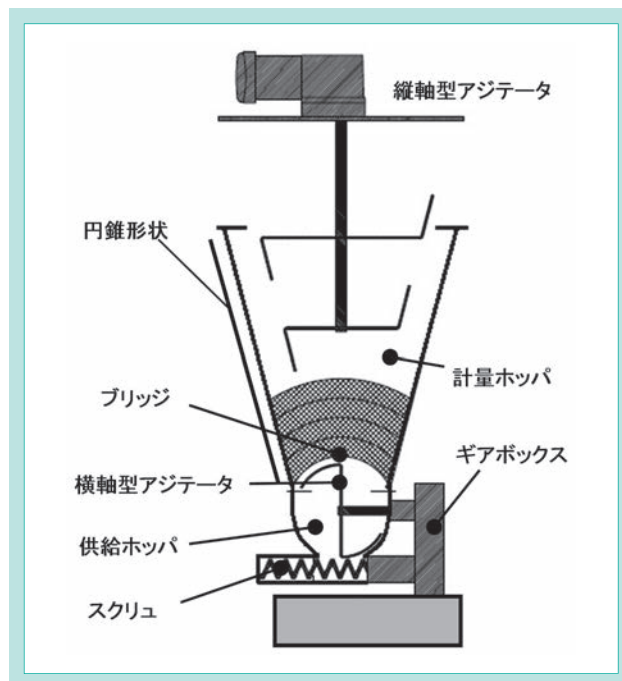


図2 現行の重量フィーダ
Fig. 2 A Conventional Weighing Feeder

4. 開発技術

4-1 「独自形状の供給ホッパ及び供給部の構造」と「斜め軸型アジテータ」

4.1.1 耐ブリッジ性の向上

壁面が逆テーパである独自形状の「供給ホッパ」を採用することで、高さを抑えつつ容積を確保することが可能となり、ブリッジ回避に有効な直管形状の「計量ホッパ」を使用することができるようになった。本構造により、ブリッジ発生を抑制することができる。

また、現行機の「横軸型アジテータ」と「縦軸型アジテータ」のメリットを併せ持つ「斜め軸型アジテータ」により、広範囲を攪拌することができ、原料が上下方向や円周方向と様々な方向に動かされる。これにより、壁面の粉の付着の成長を抑制することができ、更に耐ブリッジ性の向上が実現できる(図3)。

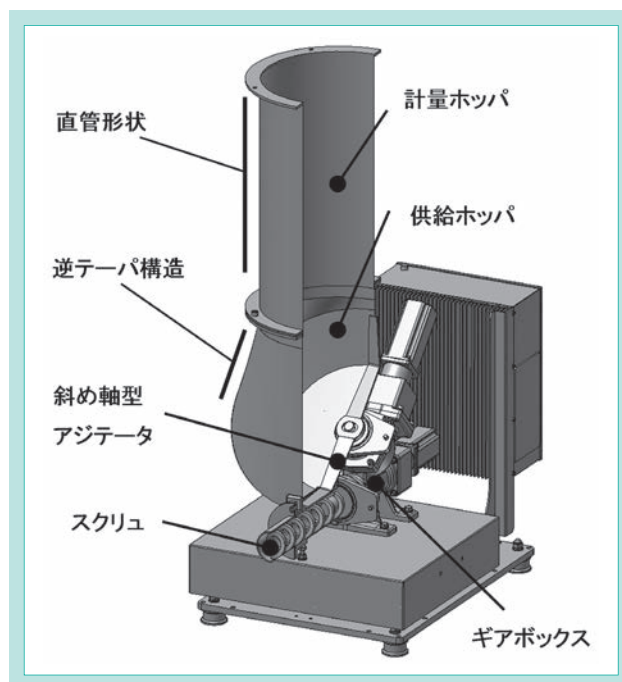


図3 開発した重量フィーダ
Fig. 3 The Developed Weighing Feeder

4.1.2 供給精度の向上

現行機では、「横軸型アジテータ」の回転により原料の上下動が発生するため、重量値に変動が出やすく、制御状態を自身の上下動で乱してしまうことがあった。本開発機では、アジテータが供給ホップの壁面のみを通過するため、原料の上下動が少なく、供給精度への影響が小さい。

また、現行機に比べスクリュへの供給口が長く、アジ

テータがスクリュの供給口全域の直上を原料を押しこみながら通過するため、スクリュへの充填性能に優れている。スクリュへの充填性能は、原料の安定供給に影響する(図4)。充填性能が悪いと、原料が粗密に充填されるため、供給が不安定になるが、充填性能が良いと、原料がムラなく連続して充填され、安定した供給が可能となる。

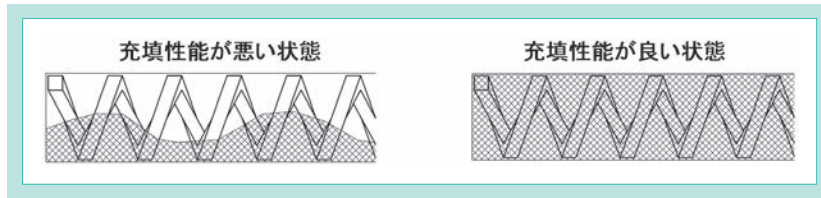


図4 スクリュへの充填性能の違い

Fig. 4 Difference in the Filling Performance to the Screw

4-2 「独自形状の供給ホップ」の量産技術

4.2.1 供給ホップの量産化

数多くのメリットを持つ反面、三次元的に複雑な形状をしたステンレス製の「独自形状の供給ホップ」を設計通りに量産することが難しく、寸法精度がバラつくため、アジテータが干渉したり、装置に組み込めないといった問題が予想される(図5)。

4.2.2 解決策1(ケーシング部の構造変更)

アジテータが干渉する原因は、ケーシング部の製作精度が設計基準を満足できていないためである。ケーシング部は鋳物で製作し、ギアボックスとの接触面に機械加工を施してから、シュートと溶接していた。しかし、形状的に機械加工の基準点を取りづらく、加工が困難である。また、鋳物による製作であるため、機械加工を施してもギアボックスとの接触面の厚み寸法にバラつきが生じ、図面通りの製作ができない。

これらを解決するために、ケーシング部において加工が困難な部分を分離した。分離した部分は、別の部品として機械加工で製作することとし、当初、一体型であったケーシング部は、「ケーシング(鋳物)」と「フランジ(機械加工)」の2つに分割した(図6)。

分割したケーシング・フランジとシュートを溶接するため、溶接治具を新規設計し、それに固定して溶接を行うようにした。溶接治具はケーシングの両フランジ面をボルトによる固定ができる構造とした(図7)。

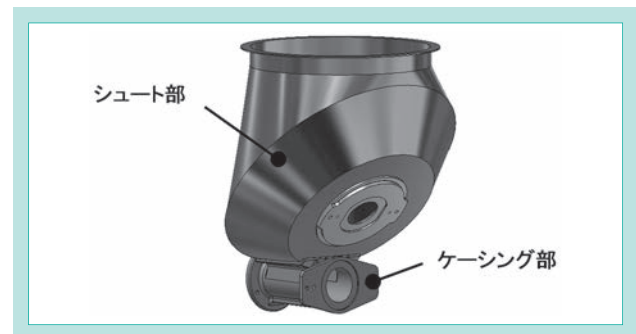


図5 供給ホップの形状

Fig. 5 Structure of a Feed Hopper

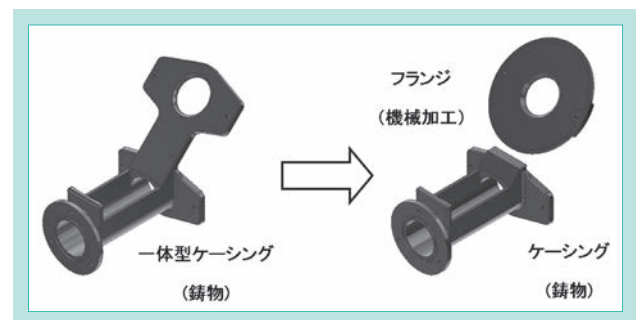


図6 ケーシングの分割

Fig. 6 Division of the Casing

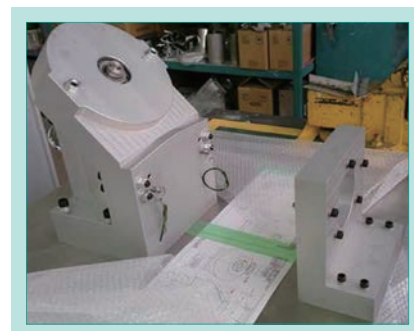


図7 溶接治具

Fig. 7 The Fixture for Welding

4.2.3 解決策2(溶接歪の防止)

供給ホッパ製作時、ケーシングのフランジ面に傾きが生じると、スクリュが他部品に接触するという問題が発生する。原因はケーシングをシュートと溶接する際に起こる溶接歪により、溶接箇所が縮んでしまうためである。

それを解決するため、ケーシングの溶接箇所の構造を変更し、溶接歪による影響を小さくして対策した(図8)。

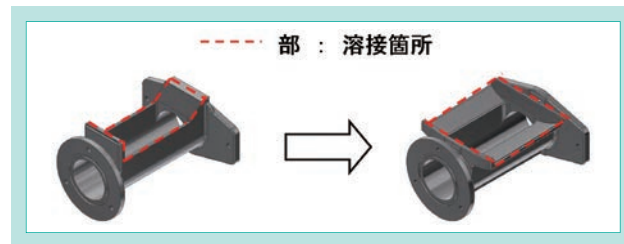


図 8 溶接箇所の構造変更

Fig. 8 Structural Change of a Welding part

4-3 「斜め軸型アジテータ」の形状

4.3.1 低トルクでのハンドリング

本開発機ではアジテータの攪拌面積が大きいいため、アジテータ駆動用モータは現行機以上のトルクが必要となる。しかし、価格を抑えるためには駆動用モータの容量は現行機より大きくならないことが必要である。

4.3.2 解決策1(アジテータの最適な形状)

できるだけ低トルクでアジテータを回転させるため、アジテータの先端を刃物形状にし、かつ原料を掻きとる方向に角度を付けることにより、アジテータが原料内を滑らかに動けるようにした(図9)。

4.3.3 解決策2(スクリュとアジテータの回転比)

スクリュとアジテータはそれぞれ個別のモータで駆動し

ており、ソフト上で回転比を調整することが可能である。充填効率を最大にするためには、最適なスクリュとアジテータの回転比を求める必要がある。数々の原料テストを行い、充填効率が最大となるスクリュとアジテータの回転比の評価を積み重ね、最適な回転比を決定することで、モータ容量は現行のままに必要な性能をクリアすることができた。

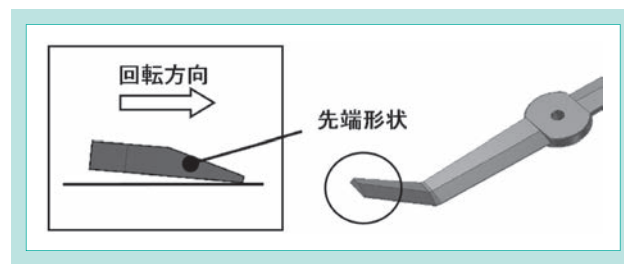


図 9 アジテータ

Fig. 9 Agitator

5. 性能確認と技術的考察

5-1 原料テストの条件

(1)試験対象

原料テストは開発機、現行機、他社機で比較した。現行機は「縦軸型アジテータ」を装着せず、標準仕様とした。

表 1 テスト原料
Table 1 Test Material

	形状	ブリッジ性
ペレット	粒状	無
PCパウダ	粉状	低
炭酸カルシウム	粉状	中

(2)原料の選定

性状の異なる3種類の代表的な原料(ペレット、PCパウダ、炭酸カルシウム)で試験を行った。それらの形状・ブリッジの起こりやすさ(無・低・中・高の4段階で評価)を表1に示す。

5-2 試験結果

5.2.1 適応原料範囲の確認

(1)試験方法

原料を投入し、定流量供給(設定流量5kg/h)を開始して、ブリッジが発生することなく全量排出が可能であるかを確認する。炭酸カルシウムは付着性が高い原料であるため、投入後に時間が経過すると、原料の自重で

圧密され、ブリッジが発生しやすくなる。そのため、客先にて夜間停止中に原料が放置されることを想定し、炭酸カルシウムのみ投入後12時間放置してから運転を開始する方法でも同様に確認した。

(2)試験結果

試験結果を表2に示す。

表2 原料の適用範囲
Table 2 Material Application Range

フィード原料	開発機	現行機	競合機
ペレット	○	○	○
PCパウダ	○	○	○
炭酸カルシウム	○	×	×
炭酸カルシウム (12時間経過後)	○	×	×

※1) ○:原料の全量排出が可能、×:ブリッジが発生

(3)考察

炭酸カルシウムにおいて、現行機や他社機では、投入直後からの運転開始でもブリッジが発生し閉塞状態となった。本開発機では試験した全ての原料においてブリッジが発生せず、中ブリッジ原料である炭酸カルシウムまで対応できることが立証された。

5.2.2 供給精度の確認

(1)試験方法

炭酸カルシウムを投入し、通常使用より厳しい条件である低い設定流量(1、2、5kg/h)で定流量供給した。電子天秤を用いて、1分毎のサンプリングを10回連続で計測し、その10回計測した値の標準偏差と平均値を用いて、供給精度(式①)を確認した。本値は、小さいほど供給精度が高いことを意味する。

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

(2)試験結果

現行機は投入量を制限し、ブリッジが発生しない状態で測定した。他社機は投入量を制限してもブリッジが発生

するため、測定不能であった。試験結果を図10に示す。

データの信頼性を上げるため、供給精度を13回測定し、それらの平均値(A)と標準偏差(σ)を用いて、式②を評価用の値とした。

$$\text{供給精度(評価用)} = A + 3\sigma \quad \dots \text{②}$$

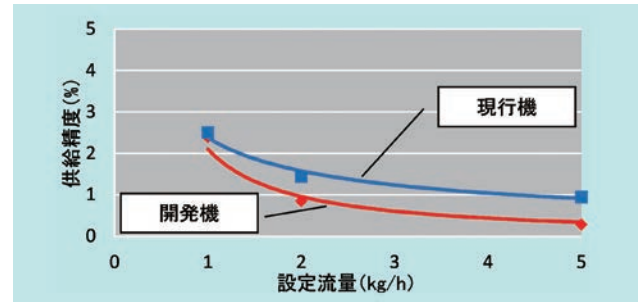


図10 供給精度

Fig. 10 Supply Accuracy

(3)考察

試験結果より、1、2、5kg/hの流量において、現行機よりも本開発機の供給精度が高いことが確認できた。その理由として2点が考えられる。

①原料の上下動が少ない

現行機では原料の上下動が発生していたが、本開発機ではほとんど見られなかった。原料の上下動が少ないことが、重量値の安定に繋がり、安定した供給精度が得られることが立証された。

②充填性能の向上

本開発機は現行機に比べ、スクリュの充填率が高く、排出量も常に安定し変動が少ないことが確認できた。スクリュにムラなく安定して充填されることが、制御状態の安定に繋がり、良好な供給精度が得られるということが立証された。

6. おわりに

本テーマにより、価格を抑えながら適用原料の幅が広く、かつ供給精度も高い「ミドルレンジ」機を開発した。

2013年に本機を上市し、海外市場を中心に売上げを拡大している。これまで知名度の低かった海外市場において、重量フィーダメカとしてのクボタの認知度も徐々に向上しており、「グローバル・メジャー・ブランド・クボタ」実現に向けて着実な一歩を踏み出している。

上市から現在に至るまでに、流量別ラインナップの拡充を進めており、2015年には国内での販売も開始した。「革新的な構

造」「従来機よりも高精度」をセールスポイントとし、国内市場での、既存ユーザの更新需要の喚起を行っている。販売台数も年々増加しており、2016年度には販売数の約半数を占めるまでに至った。

将来的には、本機種で全ての原料に対応可能とし、フィーダラインナップの統合を行うことを目指す。そのためにも、「ミドルレンジ」機を要求仕様に応じて「ハイエンド」化できるよう、機能拡充性を持たせることが今後の課題となる。

下水圧送管路における硫化水素腐食調査・診断技術の開発

Development of Survey and Diagnostic Technology for Pressured Sewer Pipelines Damaged by Hydrogen Sulfide Corrosion

鉄管研究部／パイプシステム事業ユニット

近年、下水圧送管路において、硫化水素に起因する内面腐食のため漏水に至った事例が報告されている。しかし、下水圧送管路では、自然流下管路で一般的に実施されているカメラによる管内面調査が困難であるため、適切な調査・診断がほとんど行われていないのが現状である。本開発では、下水圧送管路を対象として、硫化水素腐食が起こりうる危険箇所を管路縦断図等から絞り込む手法を開発するとともに、実管路において、硫化水素腐食を調査・診断する技術を開発した。また、実際の下水圧送管路において、開発した両技術の有効性を立証した。本開発により、下水道事業者が下水圧送管路の調査・診断を効率的に実施できるようになると考えられる。

【キーワード】

ダクタイル鉄管、下水圧送管路、硫化水素腐食、診断技術、腐食調査、腐食危険推定

In recent years, water leakage accidents in pressured sewer pipelines have occurred frequently due to internal corrosion caused by hydrogen sulfide. In many cases pressured sewer pipelines are not properly maintained because of the difficulty in surveying the inside of the pipelines with cameras generally used with gravity flow sewer pipelines. We have developed two core technologies targeting pressured sewer pipelines: (1) risk prediction methods for hydrogen sulfide corrosion using pipeline data; and (2) research technology for pressured sewer pipelines without suspension of service. We have confirmed the efficiency of our development through joint field tests with the National Institute for Land and Infrastructure Management. We trust our development will be greatly beneficial for sewage operators in controlling pressured sewer pipelines properly over the long-term.

【Key Word】

Ductile Iron Pipe, Pressured Sewer Pipeline, Hydrogen Sulfide Corrosion, Diagnostic Technology, Corrosion Survey, Risk Prediction of Corrosion

1. はじめに

近年、下水圧送管路において、硫化水素による内面腐食に起因する漏水・道路陥没事故が報告されている(図1)。下水道において、自然流下管路の場合マンホールでの開口部があるため、自走式カメラで管内面を診断する技術が実用化されている。一方下水圧送管路では、事故発生時に下水の流出等多大なリスクがあるにもかかわらず、調査・診断技術が確立していなかったため、実現可能な技術開発が強く求められていた。

そこで、下水圧送管路を対象として、①硫化水素腐食が起こりうる腐食危険箇所の絞り込み手法、及び②硫化水素腐食の調査診断技術を開発した。本技術により、下水道事業者が下水圧送管路を効率的に調査診断できるようになり、効果的な更新計画を策定することができると考えられる。なお、本開発の有

効性は、国土交通省国土技術政策総合研究所(以下「国総研」という。)からの委託を受けた平成28年度下水道革新的技術実証事業(B-DASHプロジェクト)の予備調査として確認した。



図1 道路陥没事故事例

Fig. 1 Collapsed Road due to Corroded Pipeline

2. 開発コンセプトと開発目標

2-1 開発のコンセプト

下水圧送管路において硫化水素腐食が発生する危険箇所は限定的であり、管路全長にわたり腐食調査することは合理的ではない。そこで、下水圧送管路の硫化水素腐食理論に基づき、腐食危険箇所を効率的に絞り込む手法を開発することにした。更に、導出した腐食危険箇所の危険度を容

易に診断するため、掘削等の土木工事が不要な管路内面調査機器を開発することにした。腐食危険箇所を絞り込んだ上で危険度を診断することにより、下水道事業者が効率的に更新計画を策定できることを開発コンセプトとした。

2-2 目標

(1) 腐食危険箇所の絞り込み手法の開発

管路図等の管路布設時の竣工図や実際のポンプ運転情報のみを用い、腐食危険箇所を机上で的確に絞り込める手法とする。

(2) 腐食調査機器の開発

① 対象管路

下水圧送管路の基幹管路である、管径200 mm～1,000 mmを対象とした。

② 調査方法

掘削等の土木工事を不要とするため、下水圧送管路に設置される管径75 mmの空気弁分岐から管内に調査機器を挿入可能にすることとした。

③ 腐食診断

撮影した映像で、管内面腐食の危険度を評価可能であることとした。

④ 調査距離

下水圧送管路における硫化水素腐食は、同様の腐食環境中ではほぼ同じレベルで進行するため、長距離にわたり腐食調査を行う必要性は低い。そのため、調査距離は空気弁分岐から30 mとした。

⑤ 調査時間

下水圧送管路では、送水ポンプを間欠運転して運用している。そのため、調査時間はポンプの一時停止可能時間(1.5時間)以内とした。

3. 解決すべき技術課題

3-1 腐食危険箇所の絞り込み手法における技術課題

下水圧送管路において、管路縦断図上で動水こう配線よりも高い位置の管路は、ポンプ稼働時も非満流となる(後述)。その場合、図2に示すように、下水管路の硫化水素腐食が以下の4段階の過程で発生する¹⁾。

- (1) 下水に含まれる硫酸イオン(SO_4^{2-})が、嫌気性硫酸塩還元細菌で還元され、硫化物(H_2S)が生成される。
- (2) 管内の気相部に下水が攪拌されると、硫化水素ガスが気相部に放散される。
- (3) 気相中の硫化水素ガスが、管壁に生息する好気性硫酸化細菌で酸化され、硫酸(H_2SO_4)が生成される。
- (4) 生成された硫酸が徐々に濃縮されてpHが低下し、コン

クリート構造物や金属材料が腐食する。

本腐食条件に合致する箇所を、机上で確実に特定できる手法の開発が課題となる。

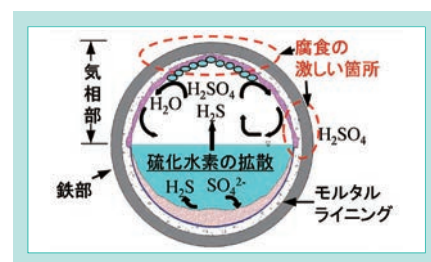


図2 硫化水素腐食のメカニズム

Fig. 2 Mechanism of Hydrogen Sulfide Corrosion

3-2 腐食調査機器における技術課題

(1) 調査機器の管内への挿入

図3に示すように、管径75 mmの分岐から挿入できるサイズであり、かつ管路内で90° 屈曲できること。

(2) 撮影範囲

下水圧送管路の硫化水素腐食は管側部から管頂部の範囲で激しく発生するため、管頂側180° を腐食危険度が評価可能なレベルで撮影できること。

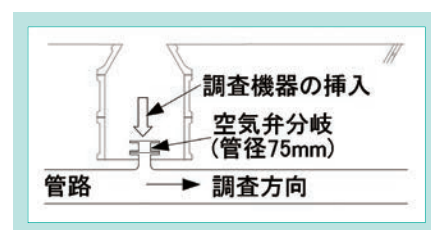


図3 調査機器の挿入方法

Fig. 3 Survey Equipment Insertion Method

(3)管内での走行

硫化水素腐食が発生している下水圧送管路内には、図4に示すように管内面のさび等の異物が堆積していることがある。その場合でも、管路に30 m調査機器を挿入し、かつ確実に管頂側を撮影できること。

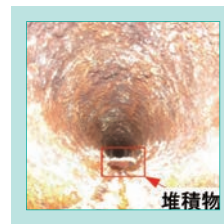


図4 管内堆積物
Fig. 4 Sediment in Pipeline

4. 開発技術

4-1 腐食危険箇所の絞り込み手法

(1)腐食危険箇所の絞り込み手法

下水圧送管路で硫化水素腐食が発生するためには、硫化水素が放散される気相部が存在する必要がある。つまり、管路内で下水が非満流で流れていることが必須条件となる。また、管路途中で硫酸を生成するための酸素が継続して供給される箇所は、ポンプ停止時に管内に外空気を吸引する空気弁近傍に限定される。

本腐食危険箇所を、管路縦断面図とポンプの運転流量のみにより、図5に示すとおり推定する技術を開発した。

- ①式(1)に示すヘーゼン・ウィリアムズ公式により計算した動水こう配線を用いて、管路縦断面図上非満流で流れている箇所を推定する。

- ②非満流区間中に空気弁が存在する場合、その区間を腐食危険箇所として推定する。

なお、腐食危険箇所推定区間が過小にならないよう、管内面の滑らかさを表す流速係数を150(通常の設計では130)と大きめに設定し、動水こう配線の傾きを小さくした。

$$I = 10.666 \times C^{-1.85} \times D^{-4.87} \times Q^{1.85} \quad \text{----式(1)}$$

ただし、

- I : 動水こう配(m/m)
- C : 流速係数
- D : 管径(m)
- Q : 流量(m³/sec)

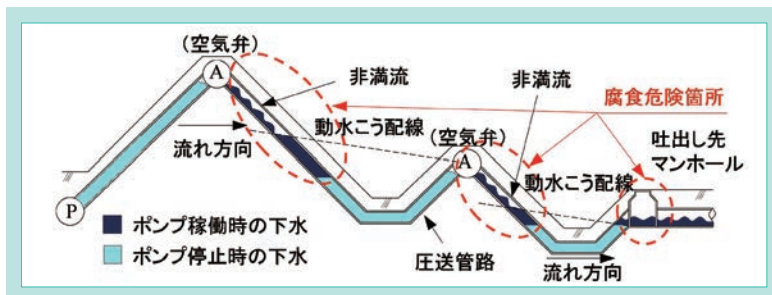


図5 硫化水素腐食危険箇所の絞り込み
Fig. 5 Risk Prediction Method for Hydrogen Sulfide Corrosion

また、以下に示す箇所についても非満流かつ空気の入替わりが生じ、硫化水素腐食の発生条件を満たすため、腐食危険箇所として推定することとした。

a. 管路吐出し先

吐出し先がマンホールの場合、図6に示すとおり管路吐出し先付近が自然流下状態になり、気相部が存在し、かつマンホールから空気が供給されるため。



図6 腐食危険箇所(管路吐出し先)
Fig. 6 Flow Condition Around Manhole

b. 管路縦断面頂部の上流側

管路縦断面図頂上近傍は図7に示すとおり頂上の上流側も一定区間非満流となり、空気弁から空気が供給されるため。

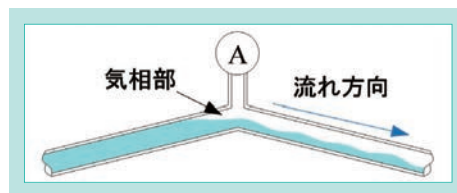


図7 腐食危険箇所(管路頂上部)
Fig. 7 Flow Condition Around Peak of Pipeline

(2)有効性の検証

過去に硫化水素腐食に起因する事故が発生した下水圧送管路情報を収集し、前述の手法による腐食危険箇所の絞り込みを行い、実際の事故発生地点との比較を行った。図8に示すC市の事例では、管路途中と吐出し先の2箇所で漏水事故が発生したが、いずれも開発した手法により腐食危険箇所と推定される区間と合致していた。

同様の比較を表1に示す合計9管路で実施したが、事故発生箇所は全て腐食危険推定箇所と一致していた。

また、D市では、事故発生後に図9に示す300 mの区間の管路を掘り上げ、内面の腐食状況を確認した。その結果、空気弁上流側も含め、開発手法による腐食危険推定箇所と、実際の腐食状況とが完全に一致していた。

以上から、開発した腐食危険箇所推定手法の有効性が立証できた。

表 1 比較検討結果

Table 1 Comparison of Prediction and Result

事業体	管径 (mm)	管路長 (m)	事故形態	検討結果
A流域下水道	250	4,410	漏水	事故発生箇所と腐食危険推定箇所が一致
B流域下水道	250	3,670	漏水	
C市	350	4,730	漏水	
D市	600	970	道路陥没	
	600	2,490	道路陥没	
	450	1,480	道路陥没	
E市	350	約4,080	漏水	
F流域下水道	300	1,990	漏水	
G市	300	約1,400	漏水	

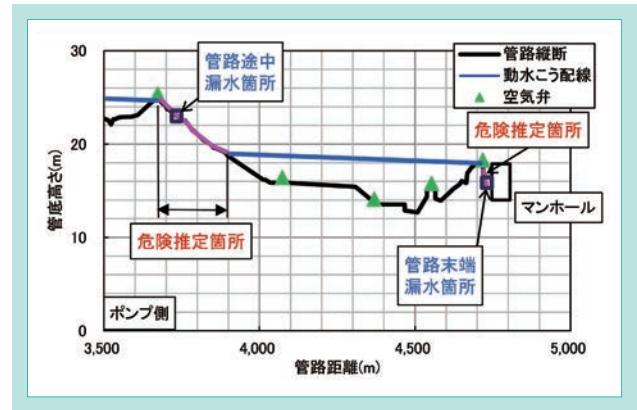


図 8 C市管路縦断面図

Fig. 8 Risk Prediction of Corrosion and Water Leakage Area with Section of Pipeline

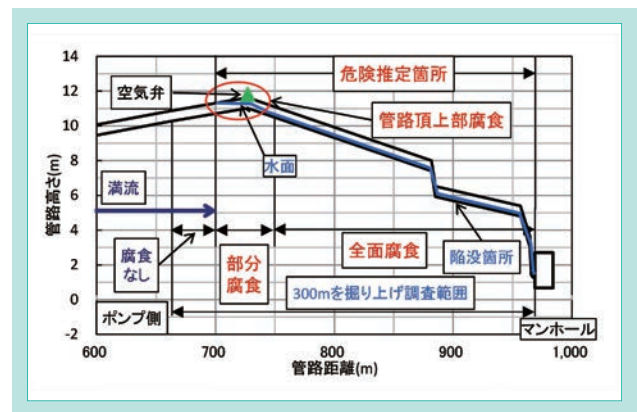


図 9 D市管路縦断面図

Fig. 9 Risk Prediction of Corrosion and Survey Result

4-2 腐食調査機器

4.2.1 腐食調査機器の構造と調査方法

以下のとおり調査機器の基本構造を決定し、図10に示すように調査を実施することにした。

- (1)調査距離が30 mと長距離ではないため、機器を人力で押込む。
- (2)管径75 mmの分岐から挿入でき、かつ管径200 mmの管内で90° 屈曲させる必要があることから、図11に示すように幅30 mm、高さ30 mm、長さ100 mmの角材を蝶番で1方向にのみ屈曲可能に連結した。
- (3)機器の分岐への押し込み力を調査方向への挿入力として効果的に伝達するため、剛性が高く軽量のアルミ角材を使用するとともに、各角材に車輪を設けた。
- (4)機器の先頭部材上方に、管径200 mmでも180° の範囲を撮影可能なカメラを取付けた。なお、前方の管路状況を確認するためのビデオカメラをアルミ角材内に取付けた。

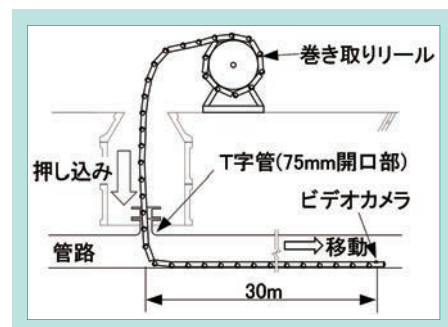


図 10 腐食調査方法

Fig. 10 Corrosion Survey Method

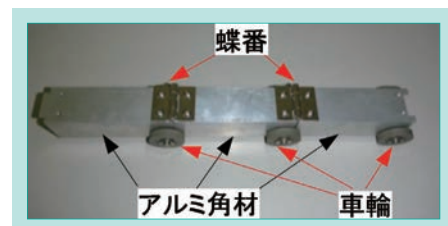


図 11 調査機器基本構造

Fig. 11 Fundamental Structure of Survey Equipment

機器の先頭部材は、管内堆積物を容易に乗り越えられるよう、図12に示す以下の対策を図った。①先頭部に車輪を上下段違いに取付けた。②先頭と2両目との端面を6°斜め加工し、先頭の角材が10 mm浮き上がるようにした。また、堆積物があった場合、図13に示すように蝶番連結部の横振れにより機器が蛇行し、機器の押し込み力を増加させても機器が前進しない。そのため、図14に示すように全ての角材連結部に凹凸を設け、連結部の左右方向への横振れを抑制した。

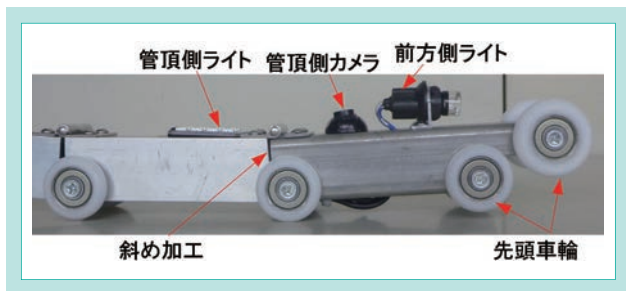


図 12 調査機器先頭部

Fig. 12 Forefront Structure of Survey Equipment

4.2.2 挿入確認試験

本構造の調査機器を用いて、図15に示すように実管路を模擬した管路を使用して挿入確認試験を行った。管内面には高さ50 mmの障害物を設けるとともに、全長にわたって土砂等の異物を敷詰めることにより、調査機器の走行に対する摩擦抵抗を増加させた。

試験では、管径75 mmの分岐から調査機器を押し込み、30 mまで調査機器を走行させることができた。その際の最大挿入力には70 Nであった。

また、本挿入力に安全率2を乗じた140 Nを連結部に負荷する圧縮試験を行い、連結構造に異常がないことを確認した。

4-3 実管路での調査

4.3.1 腐食調査機器の性能確認結果

開発した調査機器を使用し、実際の下水圧送管路において内面腐食調査を行った。調査は、図16に示すように空気弁室に設けられたマンホール蓋を開け、空気弁を取外すことにより実施可能であり、掘削等の土木工事は不要であった。

表2に示す6管路で調査を行った結果、全ての管路で空気弁分岐から30 mの目標区間を調査することができた。また、図17に示すように撮影画像を用いて管内面腐食状況をランク分けすることが可能であり、腐食危険度を評価できた。なお、必要な調査時間は全ての調査で1時間以内であり、目標の1.5時間以内を十分満足した。

以上から、開発した腐食調査機器により下水圧送管路内面の腐食診断が目標どおり実施可能であることを実証した。



図 13 横振れ状況

Fig. 13 Meandering Shape of Equipment



図 14 連結部の形状

Fig. 14 Joint Structure of Equipment

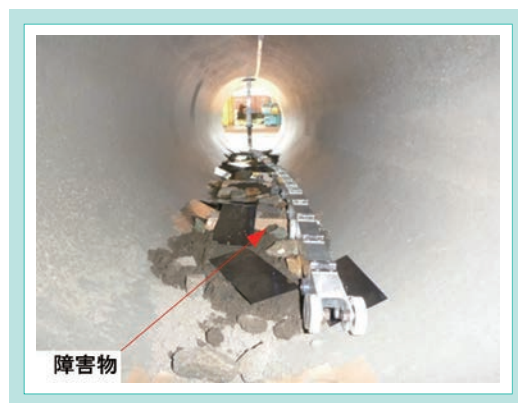


図 15 挿入確認試験状況

Fig. 15 Verification Test



図 16 実管路での調査状況

Fig. 16 Corrosion Survey of Pipeline in Service

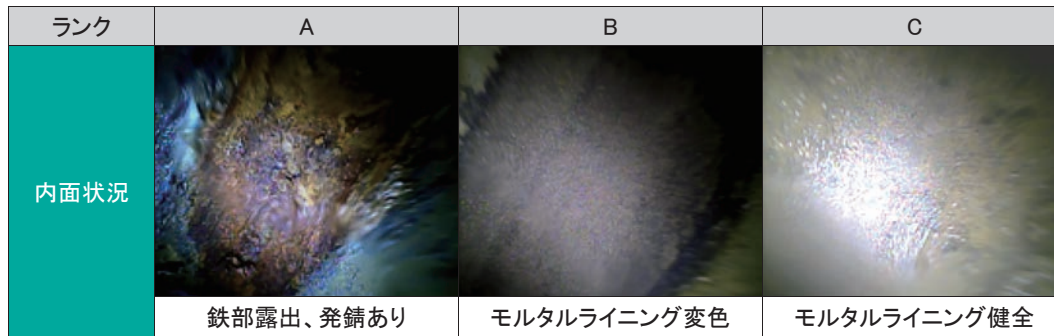


図 17 管内面腐食状況のランク分け
Fig. 17 Diagnostic Results for Corrosion in Pipelines

4.3.2 腐食危険箇所絞り込み手法の有効性確認

前述の絞り込み手法により腐食危険箇所と推定した5区間では、本調査により全箇所でも管路内面に腐食が発生していた。一方、腐食危険箇所ではないと推定した1区間では、腐食は全く発生していなかった。以上から、腐食危険箇所絞り込み手法の有効性が、本実管路調査でも実証できた。

4.3.3 内面エポキシ樹脂粉体塗装の耐食性

以前は、下水道にも内面セメントモルタルライニング(以下「CL」という。)のダクト鉄管を使用していたが、現在は耐食性の高い内面エポキシ樹脂粉体塗装管を使用している。調査管路において、本粉体塗装の曲管等が多数使用されていたが、図18に示すように隣接するCL管に鉄部に至る激しい腐食が発生しているにもかかわらず、エポキシ樹脂粉体塗装には腐食はなく、健全な状態であった。つまり、下水圧送管路にエポキ



図 18 エポキシ樹脂粉体塗装の状況
Fig. 18 Fusion Bonded Epoxy Resin Powder Coating Under Corrosive Environment

表 2 実証フィールド概要

Table 2 Overview of Test Field of Corrosion

事業者	管径 (mm)	内面 ^{※1} 仕様	供用開始年
H流域下水道	200 (2条)	CL	1996
I市	250	CL	2003
J市	350	CL	1994
K市	管路1	CL	1973
	管路2	CL	1991
L流域下水道 ^{※2}	300	CL	1994

※1: CLはセメントモルタルライニング

※2: 腐食危険箇所ではないと推定した区間で調査

シ樹脂粉体塗装管を使用することの安全性を併せて確認できた。

5. おわりに

下水圧送管路を対象として、硫化水素腐食が起こりうる腐食危険箇所を効率的に絞り込み、その危険度を診断できる技術を開発した。本開発は国総研の下水道革新的技術実証事業の一環として行い、成果を高く評価された。本成果に基づき、今後下水道事業者が活用していく下水圧送管路における硫酸腐食箇所の効率的な調査技術導入ガイドライン(案)

が、国総研より発行される予定である。これにより、下水圧送管路においても改正下水道法に基づいた点検が確実に実施されるとともに、下水圧送管路の二条化等による機能確保に向けた取組みが推進されると考えられる。

本開発により、下水道管路施設の更なる健全化に貢献できれば幸いである。

参考文献

1) ライフサポート研究会:「微生物腐食の4段階メカニズム」、月刊下水道、22-13、(1999)、pp.61~64

高効率型二軸スクリーブレス脱水機の改良開発

Improvement and Development of Double Screw-press Dewatering Machine

水処理システム技術部／水環境開発第二部

下水汚泥向けの「高効率型二軸スクリーブレス脱水機」は低動力で低コストという特長を持つ脱水機であるが、今回、一層の性能改善を目的とした改良開発を行った。脱水機を構成するろ材の一部を改良し、最適化した目開きのウェッジワイヤを用いた配列に変更することで、高い脱水圧力での運転が可能となり、さらなる脱水ケーキ(以下、ケーキ)含水率の低減と高い固形物回収率を両立させることが可能となった。

【キーワード】

脱水機、スクリーブレス、ろ材、ウェッジワイヤ、脱水圧力

The "Double Screw-press Dewatering Machine" for sewage sludge has the features of low energy consumption and low cost. This time, we carried out improvements and development for further performance enhancement. We refined part of the dewatering machine's filter material by changing to an arrangement using wedge wire with optimized slit width. This makes it possible for the dewatering machine to operate with high dewatering pressure, enabling both further reductions in moisture content and the retention of the high solid recovery rate.

【Key Word】

Dewatering machine, Screw-press, Filter Material, Wedge Wire, Dewatering Pressure

1. はじめに

持続的発展が可能な社会の構築を目指す上で、下水処理をはじめとする汚水処理が果たす役割は極めて大きい。国内の汚水処理人口普及率は、2016年度末で約90%¹⁾に達しており、ほぼ国内全域に汚水処理が行き渡ることで、健全な水環境が維持されている。一方で、汚水処理にともない発生する液状の汚泥は水分を多量に含むため、そのまま産廃処理すると膨大な費用が発生してしまう。そのため、汚泥から効率よく水分を除去(固液分離)し減容化する「脱水機」が必要不可欠な装置となっており、各社より様々な形式の脱水機が開発され、市場導入されてきた。また近年では、再生可能エネルギーの利用促進の観点から、汚泥のバイオマスエネルギーの回収が注目されているが、そのような処理システムにおいても、汚泥から機械的な水分除去が可能な脱水機は、汚泥処理全体プロセスの最適化を図る上においても重要な構成要素となっている。

国内下水市場における一般的な脱水機としては、ベルトプ

レス脱水機、遠心脱水機、スクリーブレス脱水機等がある。近年、低動力や低コストの顧客ニーズから、ろ材の耐久性が高い金属ろ材を用いたスクリーブレス脱水機の採用が増加してきたが、脱水しやすい混合生汚泥の脱水性能と比べて、消化汚泥等の難脱水性汚泥を対象とした場合には、軟弱な凝集フロックに対する圧密力が不足して脱水性能が低下し、ケーキ含水率の上昇や処理量の低下を招く傾向があった。このため、難脱水性汚泥に対しても脱水性能が高い脱水機の開発が望まれてきた。

クボタはこれらの要望を踏まえ、低動力でありながら混合生汚泥はもとより難脱水性汚泥に対しても高い脱水性能を発揮できる脱水機として「高効率型二軸スクリーブレス脱水機」(以下、「本脱水機」)を開発²⁾し、2010年度より販売を開始した。今回、本脱水機のろ材を改良し、さらなる性能改善を図ったので、ここに紹介する。

2. 高効率型二軸スクリープレス脱水機の概要

2-1 構造概要

本脱水機は、金属ろ材からなる外胴スクリーン(以下、スクリーン)、二本のスクリー軸、背圧プレッサ、駆動装置、洗浄装置、及びフロキュレータ(凝集混和槽)から構成される。本脱水機の最大の特徴は、従来1本であったスクリー軸を平行かつ縦に2本配置し、それらを羽根の噛み合う軸間距離で配列した上で、スクリーを互いに逆回転させた構造にある(図2)。

凝集剤と混合されてフロックを形成した汚泥は一定の圧力で機内に供給された後、スクリーンでろ過され、低速(〜1 min⁻¹)で回転するスクリーにより搬送される。汚泥は2本のスクリーの回転によって中央部に巻き込まれ、強い圧密・剪断脱水効果を受け低含水率が促進される。加えて、上下のスクリー間での適度な汚泥混合効果により、機内での脱水の不均一性を改善し脱水効率を更に高めるとともに、従来のスクリープレス脱水機で見られる汚泥の供回り(脱水機内の汚泥がスクリーと一体に

なって回転し、汚泥を排出部へ搬送できない現象)を防止し、安定した脱水運転が可能となった。

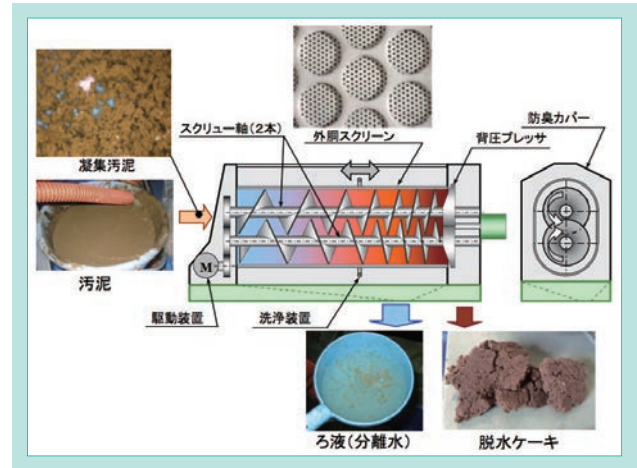


図2 構造図
Fig. 2 Construction Drawing



図1 高効率型二軸スクリープレス脱水機
Fig. 1 Double Screw-press Dewatering Machine

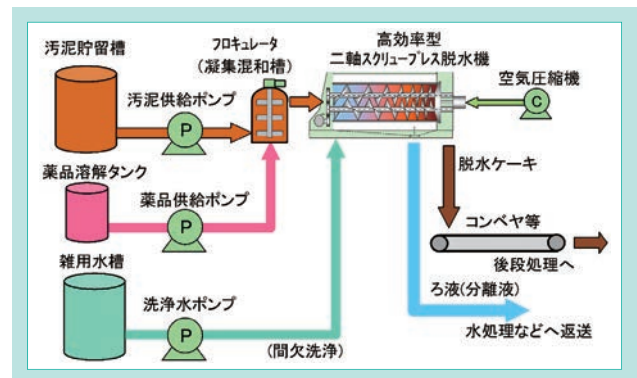


図3 設備フロー
Fig. 3 Device Flow

2-2 特長

①高い脱水性能

国内下水処理場(A処理場)における消化汚泥での性能試験データの一部を図4に示す。本脱水機のケーキ含水率は、従来の一軸式スクリープレスと比較して同一の処理量負荷率の運転において2.8%低下[※]し、大幅な性能改善が図れている(※運転条件により異なる)。

なお本脱水機の消費電力は0.05〜0.16 kWh/m³と低く、高速回転機器である遠心脱水機(3000 min⁻¹以上で回転)の1/10〜1/20の値である。

②経済性

本脱水機の経済性について、計画日最大汚水量10,000 m³/日の下水処理場を想定して評価した結果を図5に示す。本脱水機は一軸式スクリープレスと比較して小さいスクリー径の機種を適用できるため、イニシャルコ

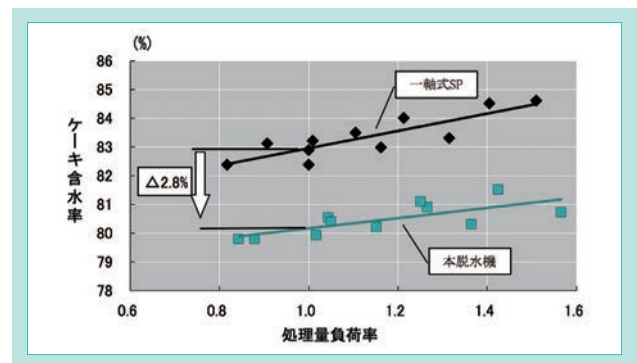


図4 脱水性能の比較
Fig. 4 Comparison of Dewatering Performance

ストで約15%、ランニングコストで約8%の削減(ケーキ処分費約9%の削減)が図れる。その他、設置スペースは16%削減、CO₂排出量も11%削減でき、環境負荷も小さくなる。

③耐久性・作業環境

本脱水機は、スクリーンの回転が 1 min^{-1} 以下と非常に低速なため、スクリーン等の汚泥接触部の摩耗がほとんど発生せず、耐久性が良好である。

また、脱水部は密閉型の防臭カバーで覆われているため臭気対策が容易であるほか、振動や騒音もほとんどなく、作業環境が良好である。

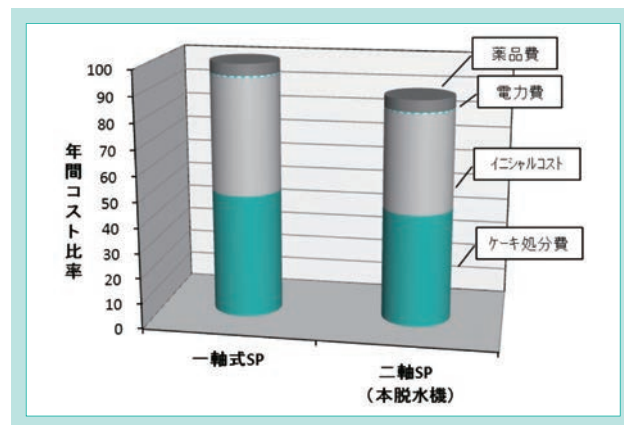


図5 経済性の比較

Fig. 5 Economic Comparison

3. 開発課題

スクリープレス脱水機では、供給された汚泥を速やかに機内で濃縮し、十分高濃度化した汚泥を機内に充填していくことで、長い脱水時間を確保して低含水率のケーキを得ることが可能になる。そのため、さらなる脱水性能の改善を図るには、汚泥供給部での初期ろ過性能を向上することが最も重要となる。初期ろ過性能を向上させるには、脱水機への汚泥供給圧力を増加させることが有効と考えられたが、通常、供給圧力を

増加させるとろ液量は増大する反面、固形物がスクリーンを通過する量が増え、固形物回収率が悪化する。固形物回収率の悪化は水処理の負荷増大を招くため、脱水機には通常95%程度の高い固形物回収率が求められる。そのため、さらなる性能向上には、ろ過性と固形物の捕捉性を両立する技術の確立が課題となった。

4. 開発技術

4-1 ろ材の最適化

4.1.1 ラボ試験によるろ材仕様の選定

供給圧力(ろ過圧力)を上げた際のろ過性と固形物の捕捉性を両立するには、ろ材(スクリーン)の再選定が必要と考え、実験室レベルでのろ過性試験を実施した。試験装置の外観を図6に示す。試験対象は、従来機で使用している丸孔のパンチングメタルに加え、断面が三角形形状で開孔部がスリット形状をなすウェッジワイヤ(図7)を検討に加えた。ウェッジワイヤはパンチングメタルの孔径と比べてスリット幅が小さくても、高い開口率が実現できるろ材である。

様々な目開きのろ材上に凝集した汚泥を供給し、エアシリンダによる加圧でろ過圧力を変化させた場合の、汚泥濃度と固形物回収率の関係を図8及び図9に示す。いずれのろ材においても、ろ過圧力を増加させると汚泥濃度が上昇し固形物回収率が低下する傾向を示した。従来のパンチングメタルや小孔径のパンチングメタルよりも、適切な目開きのウェッジワイヤを用いることで、ろ過圧力35 kPaの条件においても汚泥濃度9.4%、固形物回収率95%の良好な結果が得られることが確認された(ウェッジワイヤ①)。



図6 ろ過試験装置

Fig. 6 Filtration Test Equipment

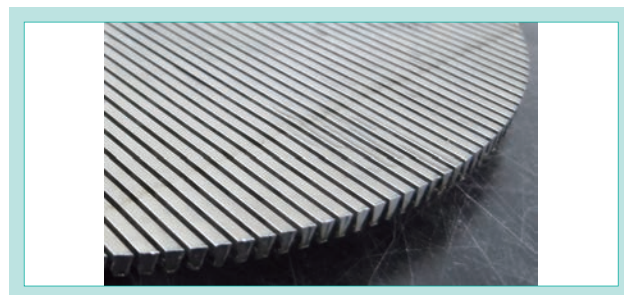


図7 ウェッジワイヤ

Fig. 7 Wedge Wire

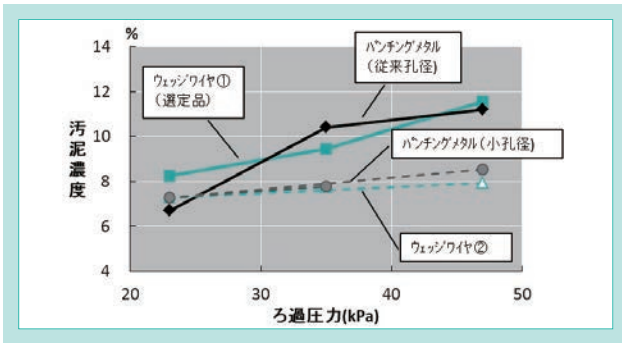


図 8 ろ過圧力と汚泥濃度の関係

Fig. 8 Relation Between Filtration Pressure and Sludge Concentration

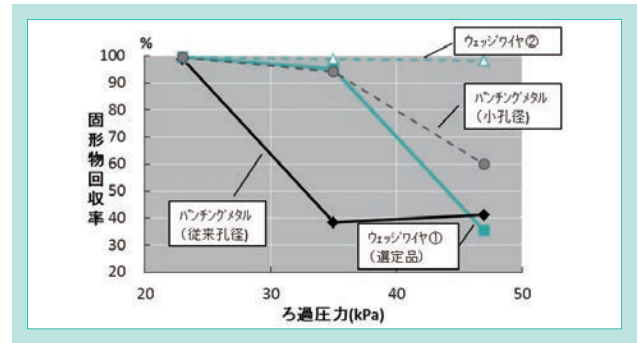


図 9 ろ過圧力と固形物回収率の関係

Fig. 9 Relation Between Filtration Pressure and Solid Recovery Rate

4.1.2 ろ材の配列

脱水性能向上とコストアップ抑制の両立を図るため、ラボ試験で選定したウェッジワイヤスクリーンを、初期ろ過

性能の向上に最も寄与する脱水機前半(汚泥供給部)のろ材に採用した。

4.1.3 実機試験による性能確認

①混合生汚泥

B処理場の混合生汚泥を対象に、従来機(全面パンチングメタル)と開発機(前半ウェッジワイヤ)の性能比較を行った結果を図10に示す。脱水機への汚泥供給圧力を増加させると脱水ケーキ含水率が低下する傾向が見られるが、例えば従来機の場合、供給圧力5 kPaではケーキ含水率77.3%が得られており、供給圧力を15 kPaに増加させるとケーキ含水率は75.4%まで低下するが、反面、固形物回収率が95%から90%程度に大きく低下してしまうため、脱水機としての必要機能である固形物回収率95%以上を維持するためには、投入圧力を5 kPaとした運転が実際の使用点とせざるを得ない。それに対し開発機では、供給圧力を25 kPaまで増加させても固形物回収率は95%程度で変化がなく、ケーキ含水率は74.2%まで低下する結果が得られた。つまり開発機では95%以上の固形物回収率を維持したまま、ケーキ含水率を3.1%低減した運転が可能であり、固形物回収率との維持とケーキ含水率の低減を両立することができた。

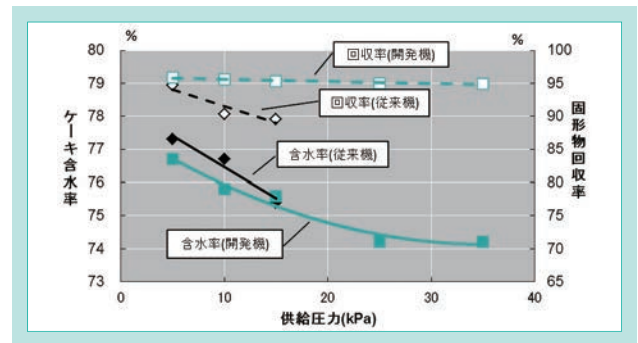


図 10 供給圧力と脱水性能の関係 (混合生汚泥)

Fig. 10 Relationship Between Supply Pressure and Dewatering Performance (Mixed Sludge)

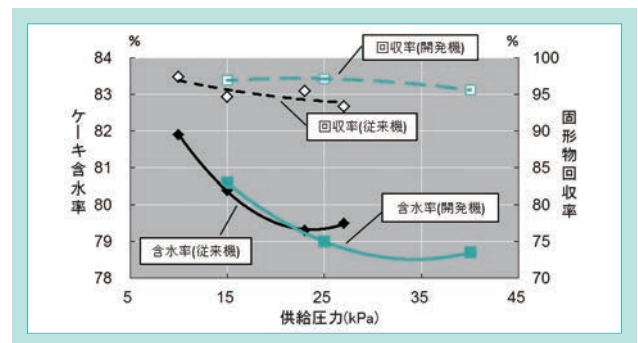


図 11 供給圧力と脱水性能の関係 (消化汚泥)

Fig. 11 Relationship Between Supply Pressure and Dewatering Performance (Digested Sludge)

②消化汚泥

C処理場の消化汚泥でも性能比較試験を実施した(図11)。混合生汚泥の場合と同様、従来機では供給圧力15 kPaでケーキ含水率80.4%の運転となるが、開発機では供給圧を40 kPaまで増加させても固形物回収率95%以上を維持し、ケーキ含水率は78.7%が得られ、ケーキ含水率を1.7%低減した運転が可能であった。

表 1 性能改善効果

Table 1 Effect of Performance Improvement

	混合生汚泥		消化汚泥	
	従来機	開発機	従来機	開発機
供給圧力 (kPa)	5	25	15	40
ケーキ含水率 (%)	77.3	74.2	80.4	78.7
固形物回収率 (%)	94.7	95.0	94.7	95.6

4-2 強度確認

4.2.1 内圧測定

開発機は汚泥の供給圧力を高めた運転により、ケーキ含水率の低減を図るものであるが、脱水機的设计強度を検証するためには、汚泥供給部だけでなくケーキ排出部までの全域に渡る圧力上昇パターンを把握する必要がある。スクリーンの表面に圧力センサを取付け、脱水運転中の内圧を連続測定した結果、供給圧力を高めた影響で内圧が上昇する傾向が認められた。

測定結果に基づき、内圧の影響を受ける部材の形状見直しを行い、強度アップを図った。

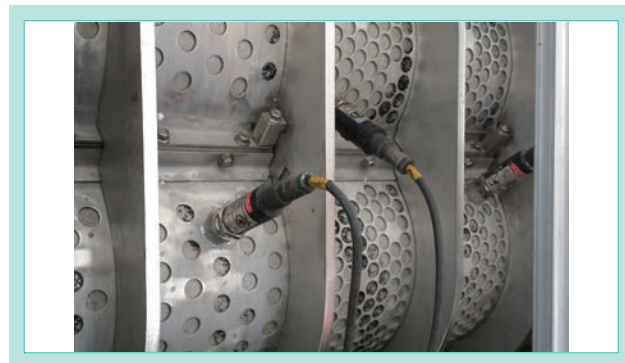


図 12 内圧測定試験

Fig. 12 Internal Pressure Measurement Test

4.2.2 ひずみ測定

汚泥に脱水助剤を添加して、意図的に設計の最大内圧が発生する条件での脱水運転を行い、各強度部材のひずみ測定を行った。その結果、設計を見直した部材を含め、各部の最大発生応力は許容応力値以下になることを確認した。

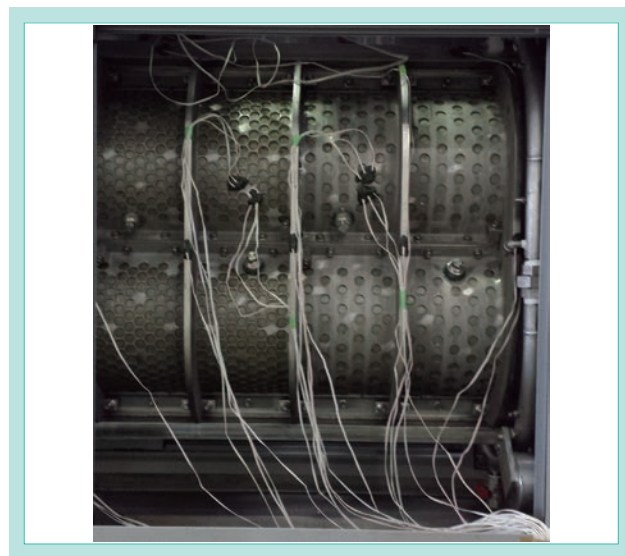


図 13 ひずみ測定試験

Fig. 13 Strain Measurement Test

5. 導入事例

5-1 納入実績と運転事例

これまでに、本脱水機は下水処理場を対象に16台(従来機・開発機合計)を受注しており、その内13台が既に稼働中である。以下に納入機の運転データの一例を示す。

D処理場は、標準活性汚泥法から発生した混合生汚泥を分離濃縮し脱水処理している。クボタは2014年3月にスクリーン径φ500mmの脱水機(従来のパンチングメタル仕様)を納入しており、稼働開始から現在まで約3年半が経過している。

これまでの運転データの一覧を図15に示す。脱水機への供給汚泥濃度が、発注仕様の3.5%に対し年々低下する傾向が見られ、汚泥性状が変動する傾向を示しているものの、薬注率0.6~0.8%、ケーキ含水率74~76%程度の性能が得られており、発注仕様を満足する良好な運転となっている。また、大きなハード上のトラブルもなく、安定

的な処理運転を継続している。

今年度から実施する部分的な修繕(オーバーホール)を通し、消耗部品の交換サイクルの妥当性の再検証などを行う予定である。



図 14 実機設置状況 (φ500)

Fig. 14 Actual Installation Status (φ500)

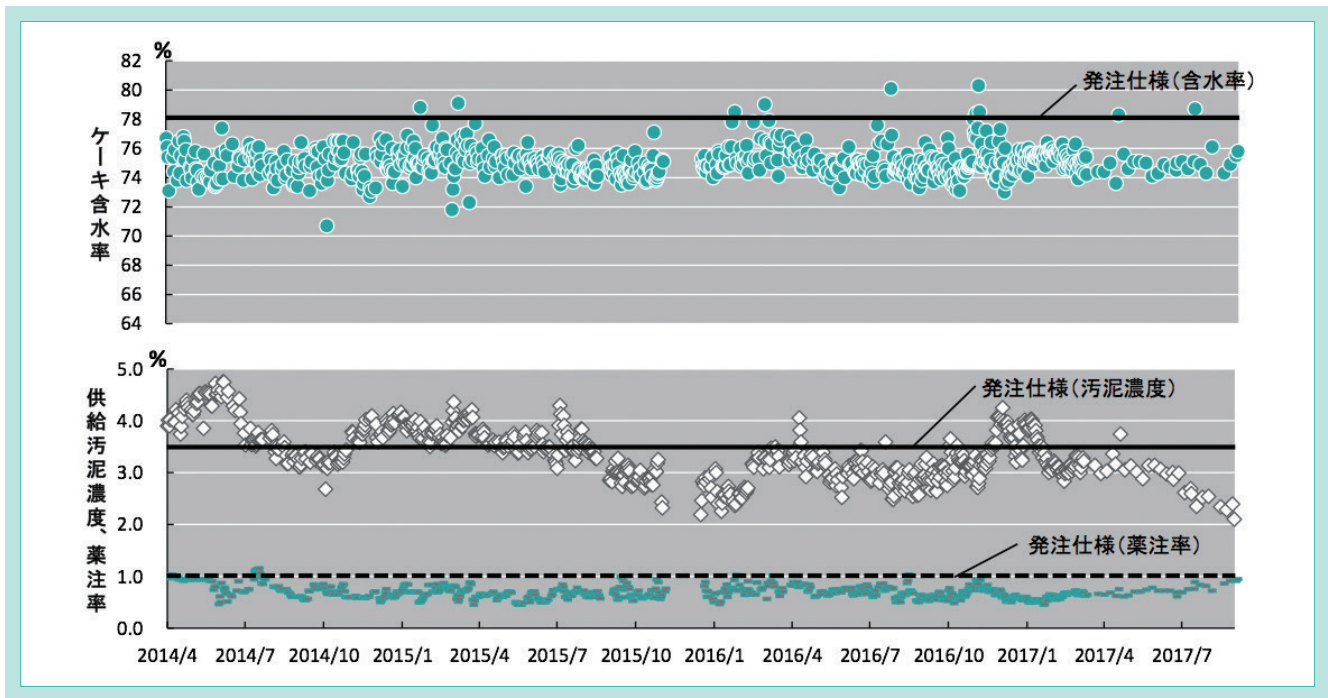


図 15 実機の運転データ
Fig. 15 Actual Operating Data

5 - 2 優秀環境装置表彰の受賞

本脱水機は、(一社)日本産業機械工業会が主催した「第42回優秀環境装置表彰事業」において、最高位となる経済産業大臣賞を受賞した。本脱水機の独創性・脱水性能・経済性・将来性が高く評価されたものと考えられる。



図 16 経済産業大臣賞の受賞
Fig. 16 Receiving of the Minister of Economy, Trade and Industry Award

6. おわりに

高効率型二軸スクリーブレスのろ材を一部改良し、最適化した目開きのウェッジワイヤを用いた配列に変更することで、高い脱水圧力での運転が可能となり、さらなるケーキ含水率の低減と固形物回収率の維持を両立させることが可能であると確認された。

脱水機は汚泥処理の中心を担っており、汚泥処理の在り方が如何に変わろうとも必要不可欠な装置である。今後も、ハードの技術改良に加えて汚泥調質などのソフト技術も組合せた脱水技術を深化させ、お客様からの処理効率化へのニーズに応え続けていきたい。

参考文献

- 1) 国土交通省: 汚水処理人口普及率、(2017) <http://www.mlit.go.jp>
- 2) 水上浩良、鈴木登、松井寛幸、星野正明: 「クボタ下水汚泥脱水機の技術 DNAの進化と将来展望〜「高効率型二軸スクリーブレス脱水機」の開発〜」、クボタ技報44号(2010)、pp.82~89

省エネルギー化を実現するスマートMBR(SCRUM)の開発

Development of Smart MBR System

水処理システム技術部

MBR(膜分離活性汚泥法)は、省スペースで高度な処理水が得られる汚水処理方法であるが、従来の方式と比較して消費電力が高いことが課題であった。省エネルギー化のため、消費電力の大半を占める送風機動力を削減する空気量制御技術:スマートMBR(SCRUM)の開発に着手した。MBRでは、①膜面を洗浄するための膜洗浄用空気と②膜洗浄空気だけでは不足する生物処理に必要な酸素を補うための補助散気用空気の2系統の空気を供給する。スマートMBR(SCRUM)では、それぞれ①膜差圧予測モデルを用いた膜洗浄用空気量制御、②アンモニア性窒素濃度計を用いた補助散気用空気量制御を行うことで、空気量の最適化を図る。本開発は東芝インフラシステムズ株式会社との共同開発であり、平成30年3月までの予定で、名古屋市上下水道局を含めた3者で共同研究を実施中である。現在、名古屋市守山水処理センターにて実証試験を行っており、本稿では膜差圧予測モデル構築および実証試験の経過報告を行う。

【キーワード】

MBR(膜分離活性汚泥法)、下水処理、省エネルギー化、空気量制御

MBR (Membrane Bio-reactor) is one of wastewater treatment process, which feature is superior effluent quality and small footprint. However, MBR use more energy than conventional wastewater treatment process. In order to save energy used in MBR process, it is necessary to reduce air, because energy for aeration fills the most part of energy used in MBR. We work on the development of smart MBR (SCRUM), which control aeration to optimum amount. In MBR process, air is supplied in 2 line, membrane scour air and pre-aeration air. Smart MBR control each air supply amounts in follow method. (1) Scour air control using transmembrane pressure (TMP) predictive model, (2) Pre-aeration control using ammonium sensor. We developed the model in conjunction with Toshiba Infrastructure systems & Solutions Corp. Now, we are conducting a joint research with Toshiba Infrastructure systems & Solutions Corp. and Nagoya city and testing the control system using the model.

【Key Word】

Membrane Bioreactor, Sewage Treatment, Energy Saving, Aeration Control

1. はじめに

MBR(Membrane Bioreactor:膜分離活性汚泥法)は、省スペースで高度な処理水が得られる汚水処理方法であり、これまで国内外で工場排水処理や下水処理等で採用されてきた。

国内下水市場においても、計23箇所に導入されており、クボタグループはその約半数にあたる11箇所、水量ベースで90%以上と高いシェアを維持している。一方で、国内下水市場におけるMBR施設は新規の小規模下水処理場がほとんどで水量

10,000m³/日以上の大規模処理場での採用は少なく、従来の処理方式と比較して消費電力が高いことが課題であった。近年、各社膜ユニットの改良等により、MBRシステムの省エネルギー化を図ってきたことで、中大規模下水処理場にMBRを導入する計画も具体化するなど、市場環境は大きく変化している。

クボタは、新型膜ユニット(SP型)及び周辺機器の開発により、処理水量あたりの消費電力は、従来の小規模MBR(0.7~

1.0kWh/m³)と比較して約半分程度の0.3kWh/m³程度まで低減してきた¹⁾。しかしながら、依然として循環式硝化脱窒法等の従来

型の高度処理方式(0.25kWh/m³程度)と比較すると若干高く、MBR市場拡大のためには更なる省エネルギー化が必要である。

2. 開発のコンセプトと目標値

クボタMBRシステムの消費電力量の9割以上を占めているのが送風機動力であり、省エネルギー化に当たっては空気量の削減が必須である。MBRでは、図1に示す通り、膜面を洗浄するための膜洗浄用空気と、生物処理に必要な酸素を補うための補助散気用空気の2系統の空気

を供給する。いずれも、従来は流入水量、水質、水温等の変動に対し、安全をみた空気量で運転してきた。これらの空気量を各種条件に応じて最適化する制御を導入することにより、省エネルギー化を図る。

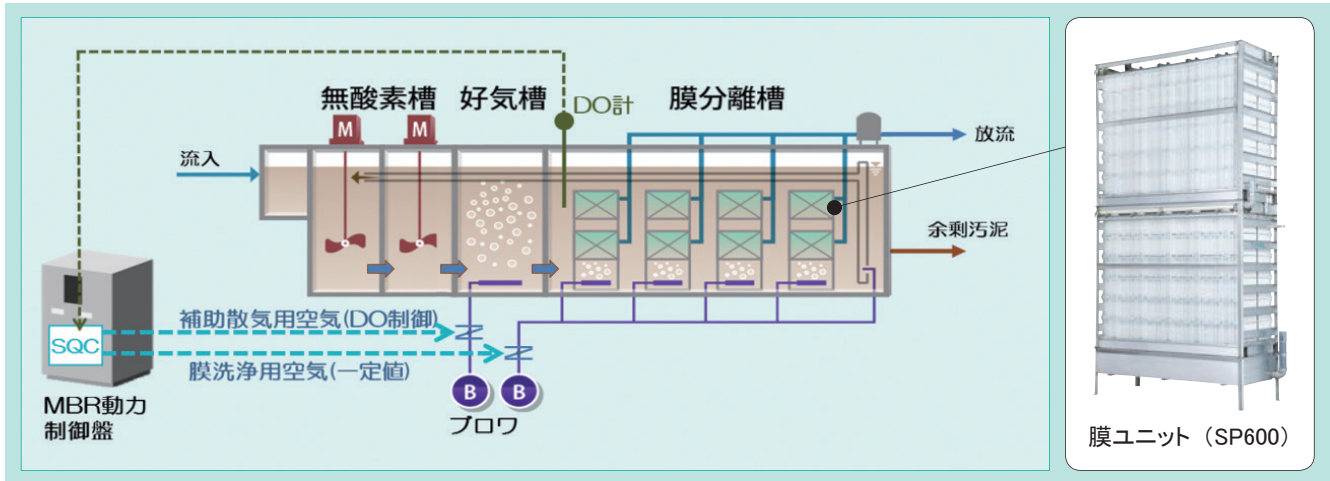


図1 従来 MBR 空気量制御
Fig. 1 Conventional MBR System

2-1 開発のコンセプト

膜洗浄用空気及び補助散気用空気に対し、以下の制御を行うことで、空気量の最適化を図る。

(1) 膜差圧予測モデルを用いた膜洗浄用空気量制御

MBRでは、膜面の洗浄として、常時膜ユニット下部より空気を吹き込むことによる物理洗浄と膜の目詰まりの指標である膜差圧(TMP)が一定以上に上昇した際に次亜塩素酸ナトリウム等による薬液洗浄を実施する。従来は常時一定量であった膜洗浄用空気量に対し、各種センサ情報から数日先の膜差圧を予測し、設定した薬液洗浄間隔を確保するために必要な空気量を算出して制御を行う(図2)。

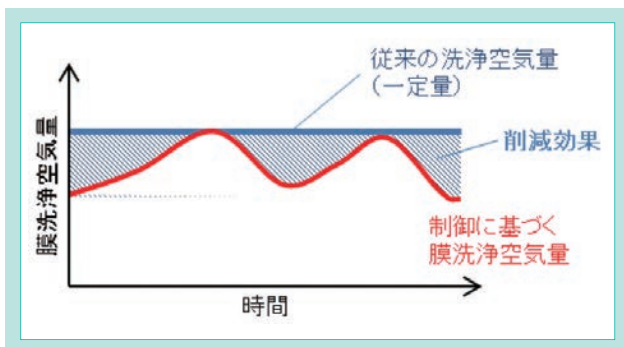


図2 膜洗浄用空気量制御の概念
Fig. 2 Concept of Membrane Scour Air Control

具体的には、薬液洗浄と薬液洗浄の間の膜差圧目標曲線を設定し、それに沿うように膜洗浄用空気量を制御する。洗浄空気量を現状維持した場合の数日先の膜差圧を予測モデルにより予測し、その値が目標曲線を下回る場合には空気量を低減させ、上回る場合には空気量を増加させるよう制御する(図3)。

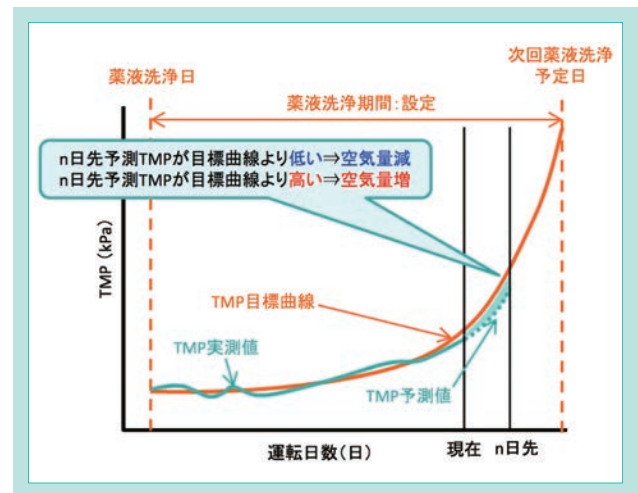


図3 膜差圧予測を用いた膜洗浄用空気量制御の概念図
Fig. 3 Concept of Membrane Scour Air Control Using Transmembrane Pressure (TMP) Predictive Model

(2)アンモニア性窒素濃度計(NH₄-N計)を用いた補助散気用空気量制御

下水処理では生物処理に必要な空気を供給しており、一般的にその空気量制御は、DO(溶存酸素)を一定に保つよう制御する。しかし、流入水量や水質の上昇による負荷上昇時に処理不足とならないよう余裕をみたDO目標値

を設定している。

本制御では、処理水のアンモニア性窒素濃度を連続測定しDO制御の目標値を適正化することで、硝化性能を確保するために必要な空気量での制御を行う(以下、NH₄-N/DO制御)。流入負荷変動に対して、より適切な制御を行うことで、補助散気用空気量を最小化する。

2-2 目標値

従来高度処理法の水量あたりの消費電力0.25 kWh/m³以下を達成するため、膜洗浄用空気量制御および補助散

気用空気量制御より、空気量全体で25%の削減を目標とする。

3. 解決すべき技術課題

(1)膜差圧予測モデルを用いた膜洗浄用空気量制御

本制御を開発するための主な課題を以下にあげる。

- ①膜差圧予測モデルの立案
- ②要因変数の選定、パラメータ同定
- ③予測目標曲線の設定
- ④予測PI(比例積分)制御の確立
- ⑤膜差圧予測モデル評価

(2)NH₄-N計を用いた補助散気用空気量制御

本制御は、従来の処理方式において既に実績のある技術となるため、MBRに適用し、制御上の課題の抽出・改良を行う。技術的課題を以下にあげる。

- ①NH₄-N計のドリフト有無および電極寿命
- ②NH₄-N濃度からDO目標値の設定方法最適化
- ③NH₄-N/DO制御評価

4. 開発技術

4-1 膜差圧予測モデルを用いた膜洗浄用空気量制御

4.1.1 膜差圧予測モデルの立案

膜差圧は、流入水量や水温等、様々な条件により変化するため、その予測モデルの開発には多変量解析手法の一つである部分最小二乗法(以下、PLSとする)を用いた²⁾³⁾。

TMP予測は、ろ過抵抗モデルと閉塞モデルに線形回帰モデルを組み合わせた予測モデルを用いて行った。

$$\text{ろ過抵抗モデル: } \text{TMP}(t) = \mu(t) \times J(t) \times R(t) \quad \dots(1)$$

$$\text{閉塞モデル: } dR(t)/dt = f(X(t)) \times R(t)^k \quad \dots(2)$$

$$\begin{aligned} \text{線形回帰モデル: } f(X(t)) &= f(X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t)) \\ &= a_1 \times X_1(t) + a_2 \times X_2(t) + \dots + a_n \times X_n(t) \quad \dots(3) \end{aligned}$$

ここでTMP(t)[kPa]は膜差圧、 $\mu(t)$ [kPa・日]は粘性係数、J(t)[m/日]はフラックス、R(t)[1/m]はろ過抵抗、kは膜閉塞機構に依存する定数であり、k=1を仮定した。またf(X(t))は閉塞モデルの係数であるが、ろ過抵抗変化の要因変数X(t)の線形回帰モデルで表されると仮定し、係数a_i, i=1, ..., n(n: 要因変数の数)はPLSにより同定した。要因変数X_i(t)は、フラックス、MLSS(反応タンク活性汚泥濃

度)、膜洗浄用空気量などを含む。なおTMP(t)はフラックスJ(t)の変化にも依存するため、MBR施設の定格フラックスJ_rを基準としたTMP_r(t)= $\mu(t) \times J_r \times R(t)$ =TMP(t) × J_r / J(t)を定義してTMP_r(t)の予測を行うこととした。TMP_r(t)は実質的にはろ過抵抗R(t)を意味し、これをTMP(t)の次元で見たものである。 $\mu(t)$ を一定値と仮定すると、TMP_r(t)についても(2)式が成立する。

4.1.2 膜差圧予測モデルの評価

MBRプラント2か所(A, B)における過去の運用データを用いて係数パラメータa_i (i=1, ..., n)の決定及び評価を行った。運用データには、膜差圧、フラックス、MLSS、pH、DO、膜洗浄用空気量、補助散気用空気量等、20項目が含まれ、それらから合成される項目も含め、1日単位の時系列データを用いた。このうち、出力とするTMP_rに対し、相関が高い項目を選定し、要因変数X_i(t)とした。

プラントA, Bそれぞれについて、一部期間のデータを用いてPLSにより係数パラメータ(a_i)を同定し、全期間のデータを用いて予測精度を評価した。

プラントA及びBにおける1～6日先の膜差圧予測値と実測値の相関係数を表1に示す。プラントAは流入水量変動が小さいが、プラントBは流入水量変動が大きいプラントである。1日先予測は、いずれのプラントにおいても、0.97と高い精度で予測できた。予測日数を延ばすと精度は徐々に低下するが、プラントBの直接予測モデルを除けば、3日先予測でも相関係数0.86～0.88、5日先予測で0.74～0.78と比較的精度で予測できた。条件の異なるプラントA、Bにて高い精度で予測できたことから、本モデルを予測モデルとして採用した。

表1 膜差圧予測値と実測値の相関係数
Table 1 Correlation Coefficient between Predicted TMP and Measured TMP (Indirect Prediction)

	1日先予測	2日先予測	3日先予測	4日先予測	5日先予測	6日先予測
プラントA	0.97	0.93	0.88	0.83	0.78	0.74
プラントB	0.97	0.92	0.86	0.80	0.74	0.69

4.1.3 予測目標曲線の設定方法

TMPの制御目標は $TMP_r(t)$ に対する目標を規定するものであり、(1)式、(2)式において $\mu(t)=\mu$ 、 $f(X(t))=F$ (一定値)と仮定した(4)式を用いて定義する。⁴⁾

$$dTMP_{pref}(t)/dt = F \times TMP_{pref}(t)^{k_0} \dots \dots (4)$$

薬液洗浄直後の初期値 TMP_0 、薬液洗浄実施を判定する上限値 TMP_{lim} 、薬液洗浄周期 L 、およびべき乗定数 k_0 を固定すると、(4)式の F の値が一意に決まる。なお制御目標の形状は、 k_0 の値に応じて図4に示すように変化する。

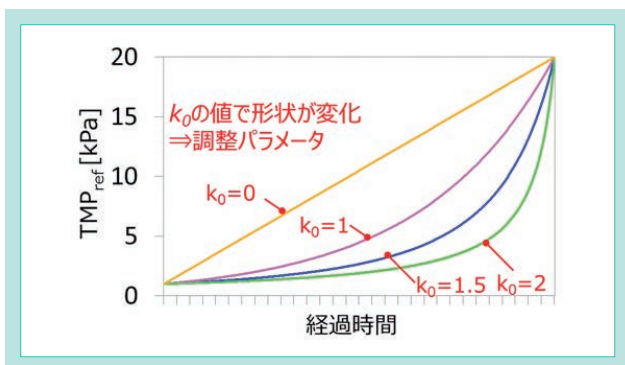


図4 k_0 の値と制御目標曲線形状の関係
Fig. 4 Relation between k_0 and Target Curve

4.1.4 予測PI制御の評価

(1)～(3)式から得られる $TMP_r(t)$ の予測値と(4)式から得られる制御目標 $TMP_{pref}(t)$ の予測誤差 $e(t)$ を小さくするように、(5)式の予測PI制御で膜洗浄用空気量 $Q_b(t)$ を算出する。この制御は、 $TMP_r(t)$ を $TMP_{pref}(t)$ に近づけるように膜洗

浄用空気量を調整するものであるが、要因変数 $X_i(t)$ によって変化する(3)式の閉塞モデルの係数 $f(X(t))$ を(4)式の F に一致するように空気量を調整するものと見ることもできる。

$$Q_b(t) = K_p \times (e(t) + T_{pre}) + 1/TI \int_t^{t+T_{pre}} e(t) dt \dots (5)$$

ここで $e(t) = TMP_r(t) - TMP_{pref}(t)$ 、 T_{pre} は予測期間の長さ、 K_p と TI は予測PI制御の制御パラメータである。

本制御の調整パラメータは、 a_i 、 k 、 T_{pre} (予測モデル)、 k_0 (制御目標)、 K_p 、 TI (予測PI制御)である。予測モデルパラメータの妥当性は評価中であり、予測PI制御パラメータは通常のPI制御の調整法に準ずるため、ここでは k_0 の調整の基本的な考え方を示す。図4より、 k_0 を大きくすると、薬液洗浄後しばらくTMPを低く維持し、次の薬液洗浄直前に急激にTMPを増加させる目標となる。そのため、 k_0 を大きくすると薬液洗浄後は比較的高い空気量を維持し、次の薬液洗浄前に不必要な空気量を削減するように動作する。逆に k_0 を小さくすると、薬液洗浄後に空気量を削減し、TMPが上昇した時に空気量を増加させる。この特徴を利用して、膜洗浄用空気量を調整できる(図5参照)。

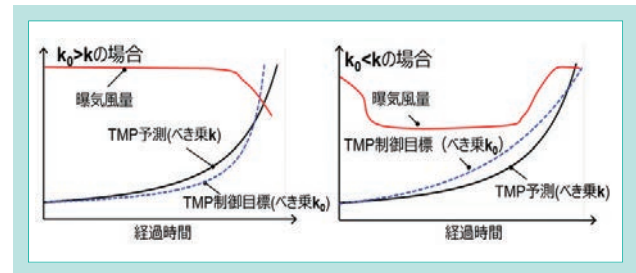


図5 k_0 の値と膜洗浄用空気量制御動作の関係
Fig. 5 Relation between k_0 and Membrane Scour Air Control

名古屋市守山水処理センターMBR施設の膜ユニット(RW400×12台)のうち、2台を実証設備用に独立運転できるよう改造を行い、膜洗浄用空気量制御の効果を検証している。

2つの膜ユニットの一方を、膜洗浄用空気量制御を適用する実証ユニットとし、もう一方を、定格空気量 $2.8\text{m}^3/\text{min}$ で運転する対照ユニットとした。1回の薬液洗浄周期を1RUNとして、実証ユニットの予測PI制御の K_p と TI は、RUN1開始前に予め調整し、予測モデルのパラメータ a_i 、 $i=1, \dots, n$ は文献2)で同定した値を用い、予測期間 $T_{pre}=1$ 日とした。制御目標のパラメータ k_0 はRUN1で $k_0=1 (=k)$ を設定し、膜洗浄用空気量の動作を確認しながらRUN毎に1～2.4の範囲で調整した。定性評価として、膜洗浄用空気量制御が想定どおり動作するか否かを評価した。また、定量評価として対照ユニットの空気量に対する空気量削減率を求めた。

膜洗浄用空気量制御結果の一例を図6に示す。膜差圧(TMP)予測誤差の大小関係に応じて想定どおり洗浄空気量が増減するよう制御されることを確認し、空気量削減率は11.3%であった。ただし、薬液洗浄直後にしばらく高い空気量を維持しており、TMP制御目標曲線およびTMP₀を最適に調整することができれば、更なる空気量の削減ができる可能性が示唆された。一方、RUNの後半では、TMP_{Pr}(t)が目標TMP_{Pr}(t)よりも高くなり、最大空気量を維

持してもTMP_{Pr}(t)に追従させることができなかった。ただし、定格空気量(≒最大空気量)を維持した対照ユニットのTMP_{Pr}(t)もほぼ同じ挙動をしているため、薬液洗浄周期の設定を適正化する必要性が示唆された。以上の結果から、今後の課題として、薬液洗浄直後のTMP₀の設定方法、k₀などのパラメータの最適な調整法、フラックスや薬液洗浄直後のTMP_{Pr}(t)の値に応じた最適な薬液洗浄周期の設定法などを残りの実証期間に確立していく。

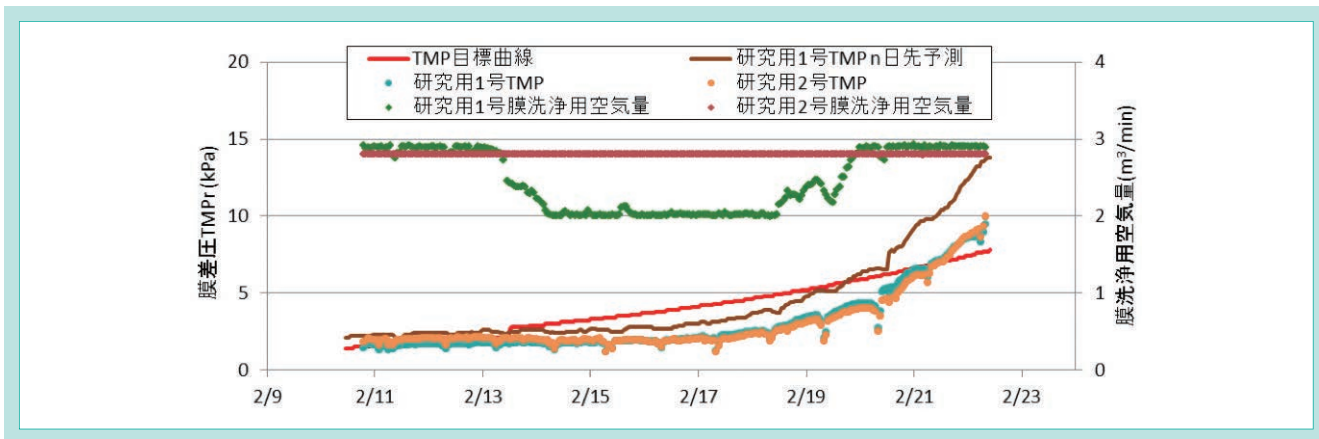


図6 膜洗浄空気量制御結果
Fig. 6 Result of Membrane Scour Air Control

4-2 アンモニア性窒素濃度計を用いた補助散気用空気量制御

4.2.1 NH₄-N濃度計を用いた補助散気用空気量制御の評価方法

NH₄-N濃度計による補助散気用空気量削減は、期間を区切って従来のDO制御とNH₄-N/DO制御の運転を行い、その差を評価した。膜洗浄制御の試験と並行して試験を行ったため、期間により水量や膜洗浄用空気量等の条件が異なる。よって、NH₄-N/DO制御の評価は、単位水量当りの酸素供給量(SOR)により行った。また、NH₄-N濃度計について、ドリフト(測定値のズレ)がどのくらいの頻度で生じるのか、ドリフトが生じた場合に定期校正により回復可能なのか、電極寿命はどのくらいなのかを確認した。

て、ドリフトは年2回発生したが定期校正(1回/月)にて安定した測定が可能であること、電極寿命は1年間であることが確認でき、MBRIに適用可能であると判断した。

4.2.2 NH₄-N濃度計を用いた補助散気用空気量制御の結果

NH₄-N濃度からDO目標値の設定は図7に示した制御目標曲線にて行った。水質を重視した曲線と省エネを重視した曲線にて評価した結果、省エネ重視では処理水のNH₄-N濃度が1mg/Lを超えて高くなる場合があったため、水質を重視した曲線で評価することとした。

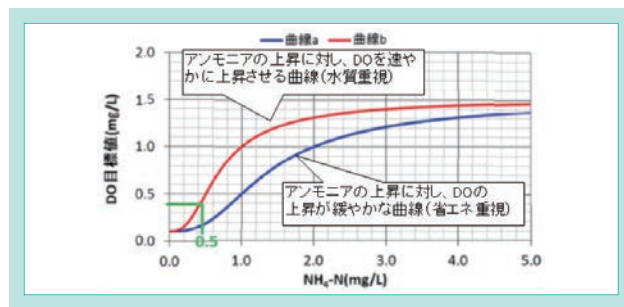


図7 NH₄-N/DO 制御目標曲線
Fig. 7 NH₄-N/DO Control Target Curve

図8に評価結果の一例を示す。NH₄-N/DO制御での単位水量当りのSORがDO制御と比べて17.5%削減された。この削減率は、膜洗浄用空気量と同じとした場合、補助散気用空気量として約70%の削減に相当する。

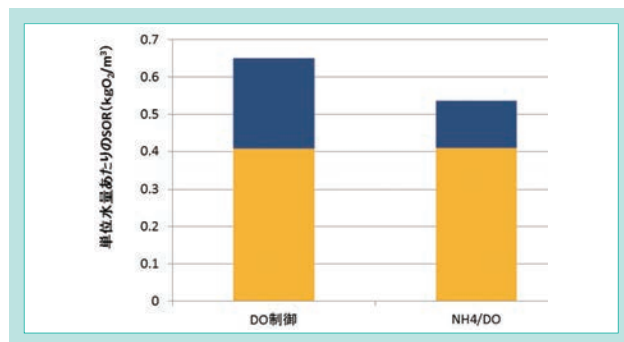


図8 NH₄-N/DO 制御結果
Fig. 8 Result of NH₄-N/DO Control

1年間の運転によるNH₄-N濃度計の維持管理性について

4-3 消費電力量試算

膜洗浄用空気量制御および補助散気用空気量制御を行った場合の消費電力量の試算条件を表2に、試算結果を図9に示す。

表2 消費電力量試算条件
Table 2 Conditions for 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、無酸素槽攪拌機、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)	
膜ユニット	SP600×28台	
水量条件	日最大水量10,000m ³ /日	
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	
送風機動力算出条件	膜洗浄用空気量	定格:2m ³ /min・ユニット
	補助散気用空気量	水質・水量条件から算出される理論必要酸素量から算出(膜洗浄空気不足分)
	送風機断熱効率	65%
	水深	5.0m

従来MBRの処理水量あたり消費電力量約0.3kWh/m³に対し、上記実証結果で得られた膜洗浄用空気量:11.3%削

減、補助散気用空気量制御によるSOR:17.5%削減に基づき消費電力量を試算すると、0.24kWh/m³となり従来高度処理方式の電力量以下を達成した。さらに、膜洗浄用空気量制御の最適化により25%程度の削減を行うことで、消費電力量0.22kWh/m³の達成を目標とし、実証試験を行っていく。

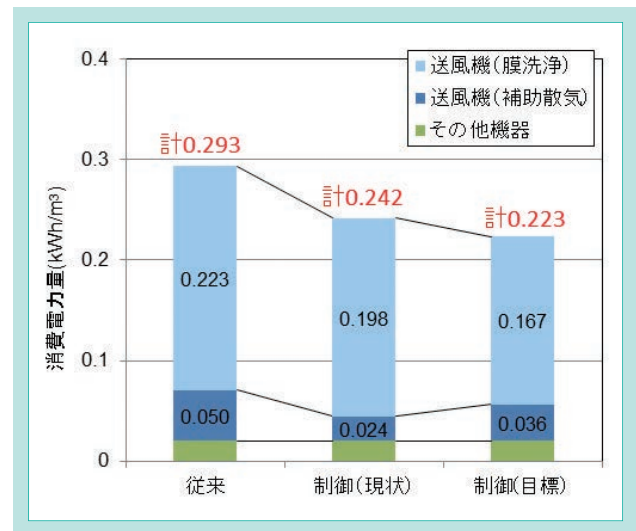


図9 電力試算結果
Fig. 9 Results of Calculation of Energy

5. おわりに

膜差圧予測モデルを用いた膜洗浄用空気量制御およびNH₄-N/DO制御による補助散気用空気量制御を立案し、実証施設で適用評価中である。これまでの実証結果より従来高度処理での消費電力量以下を達成した。更なる低減を図るため、パラメータの最適な調整等について、確立する。

大阪市中浜下水処理場にて40,000m³/日のMBR施設を受

注(2021年4月運転開始予定)し、SCRUMの導入を予定している。

今後、老朽化した下水処理場の改築更新や河川の更なる水質改善が求められる中で、MBRは省スペースで清澄な処理水を得られる処理方式であり、これまで弱点であった消費電力を従来法以下とすることで、一層の導入を図っていく。

参考文献

- 1) 中川佑子: 省エネルギー型MBRシステム、環境浄化技術、pp.64-68、2015
- 2) 山中理ら: MBR運用データを用いた多変量解析による洗浄曝気風量制御のための膜差圧予測、第53回下水道研究発表会講演集、pp.214-216、2016
- 3) 都築佑子ら: 膜分離活性汚泥法の曝気風量制御システムの開発、第53回環境工学研究フォーラム(土木学会)、2016
- 4) 山中理ら: MBRプロセスの膜差圧予測を用いた洗浄曝気風量制御の実証、第54回下水道研究発表会講演集、pp.197-199、2017

都市ごみ焼却炉における NO_x 低減技術の開発Development of NO_x Reduction Technologies for MSW Incineration Plants

クボタ環境サービス(株) 焼却プラント部／水環境開発第三部／水環境開発第一部

都市ごみ焼却炉では燃焼に伴いNO_x(窒素酸化物)が発生する。除去技術として、煙突前で触媒を設置する触媒脱硝方式(SCR)と、触媒を用いず炉内にアンモニアを噴霧する無触媒脱硝方式(SNCR)がある。前者の設備費は高価だがNO_xを50 ppm程度まで削減可能であるのに対し、後者は安価であるが効率が低く、保証値は100 ppm程度である。

近年、公共事業の財政が逼迫する中、都市ごみ焼却炉においてもLCC(ライフサイクルコスト)削減が重要な課題となっている。クボタ環境サービス(株)はクボタ(水環境総合研究所)と開発を行い、排ガス再循環を用いた低空気比燃焼による発生NO_xの抑制と無触媒脱硝装置の高効率化により、脱硝装置なしでNO_xを20 ppm以下に削減することに成功した。これにより、建設費、補修費の削減のほか、脱硝装置に必要な蒸気も不要になるため、ごみ発電効率も向上し、LCC削減に大きく寄与することができる。

【キーワード】

都市ごみ焼却炉、触媒、排ガス再循環、無触媒脱硝

NO_x (Nitrogen Oxides) are generated in incineration of Municipal Solid Waste (MSW) and two methods have been employed to reduce them: Selective Catalytic Reduction (SCR) and Selective Non-Catalytic Reduction (SNCR). The SCR method is to inject ammonia water into a catalytic reactor before the stack, and the SNCR method also injects ammonia water, but into the furnace. The former equipment is costly, but gives higher performance, enabling a guaranteed level lower than 50 ppm. On the other hand, the latter method guarantees a level no higher than 100 ppm, but is less costly.

With the recent stringent financial situation in public projects, reduction of Life Cycle Cost (LCC) has become one of the most important requirements. In response to this, Kubota Environment Service Co.,Ltd. and Kubota Corporation(Water and Environment R&D Dept). achieved a NO_x concentration of lower than 20 ppm without an SCR reactor. This consists of two steps: suppression of NO_x generation by low excess air ratio combustion using exhaust gas recirculation (EGR); and improvement of SNCR reduction efficiency. The above achievement, which leads to cost reductions in construction and operation, and the improvement of power generation efficiency due to the reduction in steam for the SCR, is expected to contribute to considerable LCC reductions.

【Key Word】

MSW Incinerator, Catalyst, EGR, SNCR

1. はじめに

クボタ環境サービス(株)(以下「KSK」という。)は都市ごみ焼却プラントの運転、維持管理及び改造工事を行っており、更に2015年からは新規プラントの建設事業を再開した。

近年では、地方自治体の経費削減や資源循環のためのプロセス複雑化により自治体による廃棄物処理施設の運転、維持管理(以下、運営)が困難となってきている。このため、施設

の発注方式として施設建設と同時に包括的に長期間(20年程度)の運営を建設メーカーに委託するDesign Build Operate(以下「DBO」という。)案件が増加している¹⁾²⁾。したがって、新規プラントの受注には建設費用のみならず、20年間の運営費を加えたライフサイクルコスト(以下「LCC」という。)を総合的に最小限に抑える技術開発が不可欠である。

2. 開発のコンセプトと目標値

2-1 開発のコンセプト

排ガス中のNO_x処理において、従来からの触媒脱硝方式(以下「SCR」という。)は除去性能は高いが、大きな触媒脱硝塔が必要であるため、建設費用、触媒交換費用(数年毎に必要)が高価となる。また排ガスを再加熱するために蒸気が必要であり、ごみ発電の発電効率が低下しランニングコストが高くなる。

無触媒脱硝方式(以下「SNCR」という。)は、安価なアンモニア(以下「NH₃」という。)を焼却炉内に噴霧する方法のため設備が簡素な上、SCRのような触媒の交換も不要である。ただし脱硝率^{※1}が30~40%程度³⁾と性能が低い。そのためSNCRの脱硝率向上を開発目標の1つとした。

しかし、SNCRのみでSCR並みの性能を得るのは困難であるため、ごみ焼却による発生NO_xを抑制する必要がある。発生NO_xの抑制には、排ガス再循環(Exhaust Gas Recirculation)(以下「EGR」という。)による低空気比燃焼が有効であることが知られており⁴⁾、EGRによる発生NO_xの抑制を開発目標の1つとした。

したがって、今回の開発ではSCRなしで、厳しいNO_x規制に対応するため、①SNCRの脱硝率の向上、②EGRによる発生NO_xの抑制、の2つの組み合わせによるNO_x低減技術を開発することとした(図1)。

※1 脱硝率(%)=(1-NO_x(処理後濃度)/NO_x(処理前濃度))×100

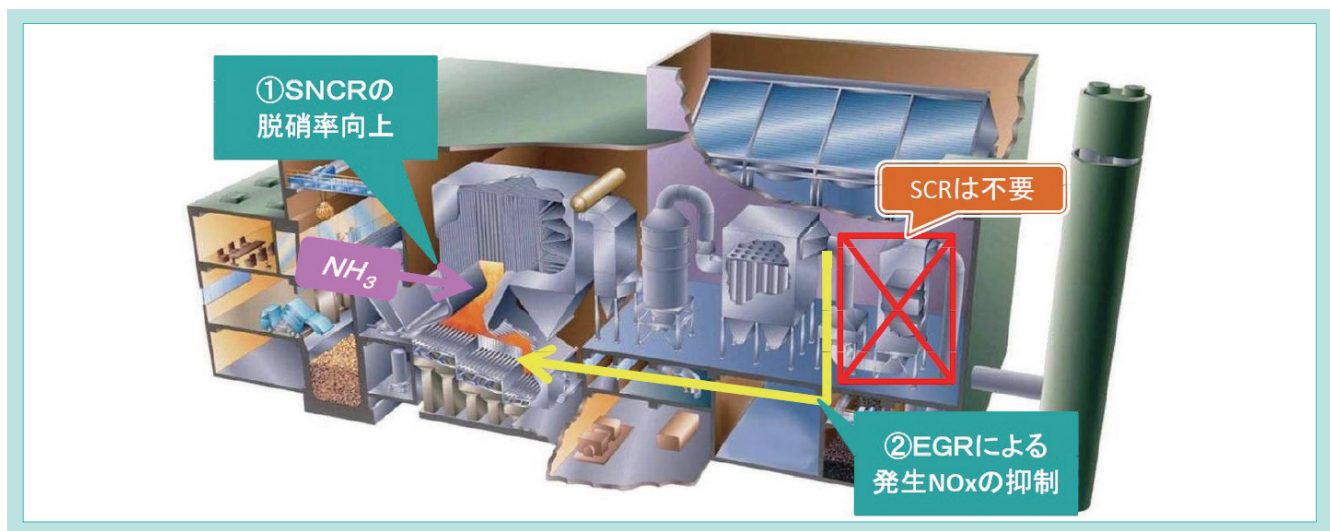


図1 SCRを不要とするNO_x低減技術の開発コンセプト

Fig. 1 Development Concept of NO_x Reduction Technology to Dispense with SCR

2-2 開発目標値

従来、発生NO_xで100~150 ppm(12%O₂換算の1時間平均値、以下全て同じ)、SNCR処理後で保証値100 ppm程度であったが、SCR並みの50 ppmを保証できるよう、EGR

とSNCRとの相乗効果での開発目標値を30 ppm以下と設定した(表1)。

2.2.1 SNCRの脱硝率の目標値

従来、30~40%程度であるSNCRの脱硝率を約2倍の60%に向上させる。ただし、NH₃を焼却炉内に過剰に吹くと未反応のNH₃が放出され、煙突から白煙となって見える。これをリークアンモニアと呼ぶ。NH₃が白煙となる濃度は10 ppm以上とされているため、リークアンモニア5 ppm以下を開発目標値とした。

2.2.2 発生NO_xの目標値

SNCRの脱硝率60%を適用して30 ppmが得られるよう、通常100~150 ppmの発生NO_xを開発目標値として70 ppmとした^{※2}。またNO_xを抑制することにより、逆にCOやダイオ

キシン類(以下「DXNs」という。)の増加が懸念されるため、CO、DXNsについても開発目標値を設定した。

※2 70 ppm × (100% - 60%) = 28 ppm ≤ 30 ppm

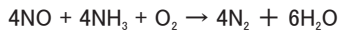
表1 開発目標値
Table 1 Development Target Values

NO _x 低減技術	項目	現在	開発目標
EGR	発生NO _x	100~150ppm	≤70ppm
	CO		≤30ppm
	DXNs(BF出口)		≤0.1ng-TEQ/m ³ N
SNCR	脱硝率	30~40%	60%
	リークNH ₃	-	≤5ppm
EGR+SNCR	処理後NO _x	≤100ppm	≤30ppm

3. 開発の内容

3-1 脱硝率の向上

NH₃は以下の反応式によりNO_xを還元する。



上式の反応は800~900℃で最も活発となる。この温度領域より低いとNH₃は反応せずにリークアンモニアとなり、高いとNH₃は次式の酸化反応により逆にNO_xとなり脱硝率が低下する。



焼却炉内温度は負荷変動によって温度変化が激しい。また、焼却炉内ではボイラによる熱の吸収があるため、排ガスが上部(下流)に行くほど温度が低下する。

そこでNH₃噴霧ノズル(以下「ノズル」という。)を3段に配置し、適切な温度域へNH₃を噴霧するものとした。

3-2 発生 NO_x の抑制

燃焼によって発生するNO_xを抑制するには燃焼空気量(O₂)の削減と燃焼温度の低温化が効果的とされる。しかし燃焼空気を減らすだけでは過剰な燃焼空気もたらず冷却効果が薄まり、燃焼温度は上昇してしまうため、発生NO_xの抑制には限界がある⁹⁾。また、燃焼空気の削減により炉内での攪拌不足によるCO、DXNsの増加が懸念される。そのため排ガスを炉内に吹込むEGRを採用し、バグフィルタ(以下「BF」という)出口の低温排ガスを焼却炉内に循環させ、O₂を上げず

に焼却炉内の低温化と攪拌の向上を図った。循環ガスの吹込位置の決定等については熱流体解析を活用した。

また、燃焼空気量を削減する低空気比運転ではごみの燃焼の変化によりCOが発生しやすくなる。そこで、制御応答性を改善して、CO発生を抑制しながら低空気比を保つ必要がある。従来は除じんされたBF出口の排ガスO₂を制御対象としていたのに対し、上流側の焼却炉内でも測定できるレーザO₂計を新たに設けて応答遅れを改善することとした。

3-3 実験を行った施設概要

今回実験を行った堺市クリーンセンター東工場第二工場の施設概要を表2に示す。

脱硝装置としては、SNCR、SCRの両方を備えており、SNCRについては今回実験用に部分的に改造することで脱硝率の向上を図った。

EGRについては付帯されていないため、今回実験設備として設置した。循環ガスの炉内への吹込みについては解析結果を元に吹込み位置等を決定し、実験により最適な吹込方法の調整を行い、適宜改造を行った。

今回の実験設備を含めたごみ処理の概略フローを図2に示す。

表2 堺市クリーンセンター東工場第二工場の施設概要
Table 2 Schematic Specification of Sakai City Clean Center HIGASHI No.2 Incineration Plant

項目	内容
処理量	230ton/24h × 2炉
炉形式	全連続ストーク式焼却炉
ボイラー	蒸気条件: 4MPa × 400℃ 最大蒸発量: 36t/h
排ガス処理方式	乾式有害ガス除去装置 + バグフィルタ + 脱硝装置 (SNCR、SCR)
発電設備	定格出力: 12,600kW

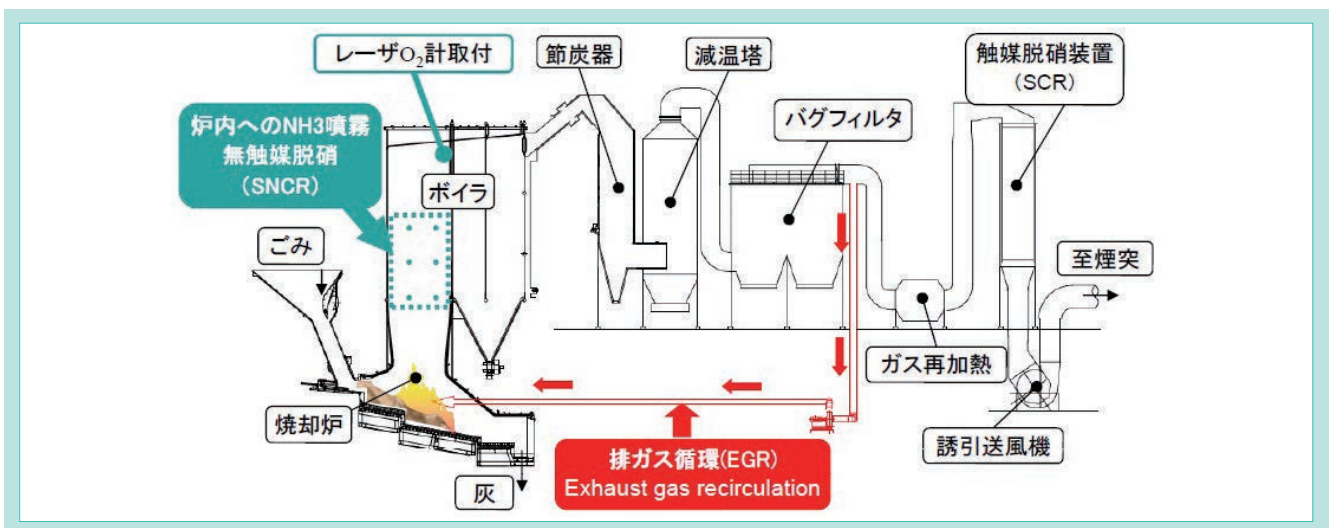


図2 プラントの概略フロー
Fig. 2 General Flow Sheet

4. 実験結果

4-1 脱硝率の向上

4.1.1 アンモニア吹込温度域の最適化

3段に配置したノズルに対してノズル部の温度を測定しながら焼却炉内へNH₃を噴霧した結果を図3に示す。脱硝率は吹込位置の温度の影響を受け、820~860℃の温度域で最も脱硝率が高くなることがわかった。また当量比(NH₃/処理前NO_x)を増すことで脱硝率が向上する。最適温度域に当量比を1.0~1.2噴霧することで脱硝率60%は達成可能であることがわかった。また、図4にNH₃吹込位置温度とリークアンモニアの関係を示す。温度が低下するに従ってリークアンモニアが増加している。これは温度の低下に伴い、NH₃が反応しないためである。脱硝率の高い最適温度域でもリークアンモニアが発生するため、リークアンモニア対策が必要となった。

4.1.2 リークアンモニア対策

焼却炉出口のNO_x測定時に、NH₃を吹込むと吹込み位置より上流(位置では下側)のNO_xが下がる現象が見られた。熱流体解析でガス流れを確認した結果、通常運転において図5a)に示すように燃焼室上部において渦を巻いていることが判明した。この渦はごみの燃焼位置や、燃焼空気のバランスで巻く方向が変化する。渦中にNH₃を吹込むことで未反応のNH₃が滞留し、その後渦の向きが変わることで、リークアンモニアとして流出していると考えられる。

対策として、渦を巻くことなく燃焼ガスの主流がNH₃ノズル位置に来るよう、二次空気の吹込み方やバランスの制御を行うこととした。図5b)に制御を行った場合の解析結果を示す。燃焼ガスが渦を巻くことなく、ノズル部にバランスよく流れていることがわかる。

表3に実際の運転で、この制御を入れた場合と切った場合のボイラ入口温度分布とリークアンモニアの関係を示す。「制御切」の場合、最高部の温度が前壁部か後壁部側に偏り、渦が発生していることが推測できる。またリークアンモニアについても開発目標値である5 ppmを超える結果となった。「制御入」の場合、ボイラ中央部で最高温度となっていることより、排ガスの主流がボイラ中央部を流れていることがわかる。リークアンモニアについても開発目標値である5 ppmをクリアすることが確認できた。

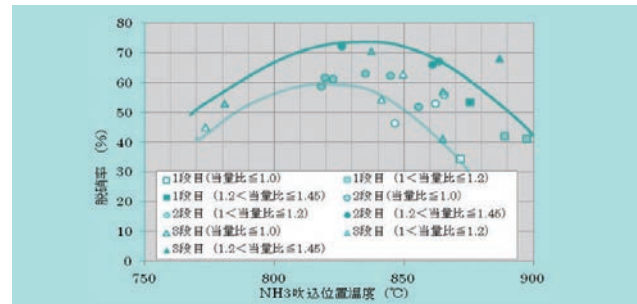


図3 脱硝率と吹込温度との関係

Fig. 3 NO_x Reduction Ratio as a Function of Temperature of Injection Area

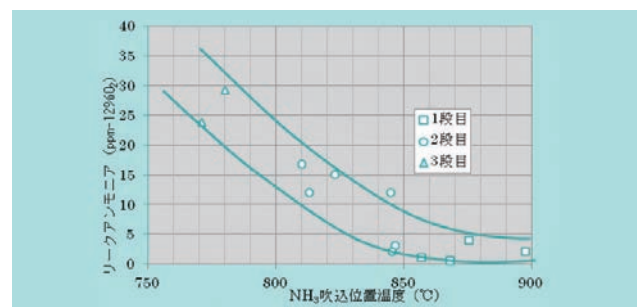


図4 リークアンモニアと吹込温度との関係

Fig. 4 Leakage Ammonia Concentration as a Function of Temperature at the Injection Area

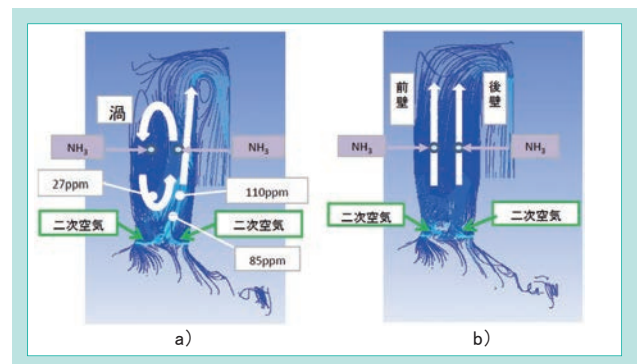


図5 渦の発生とNO_x測定値の変化

Fig. 5 Relation Between Gas Swirl and NO_x Value

表3 渦の有無によるリークアンモニア濃度

Table 3 Effect of Gas Swirl on Leakage Ammonia Concentration

	ボイラ入口温度(°C)			リークアンモニア ppm-12%O ₂
	前壁側	中央部	後壁側	
制御切 (渦有)	768	825	842	3
	742	829	864	10
	850	790	729	9
	752	836	863	7
制御入 (渦無)	824	873	845	1
	803	840	823	2
	840	876	844	3
	827	882	856	2

4-2 発生 NO_x の抑制

4.2.1 熱流体解析によるEGRの評価

炉内に循環ガスを吹き込む改造に当り、熱流体解析を用いて吹込ノズルの位置・形状の検討を行い、焼却炉の吹込ノズルの取付け工事及び排ガス再循環設備の設置工事を行った。

図6に、熱流体解析を用いた炉内温度分布を示す。図6a)は、通常運転の解析結果であり、b)はEGRによる低空気比運転での解析結果である。a)では炉内で局部的に高温となっているエリアが存在し、b)の方が循環ガスにより炉内の最高温度が下がるため、発生NO_xの抑制に有効であることがわかる。

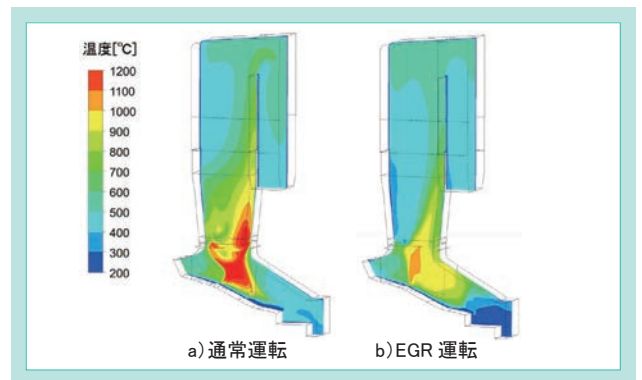


図 6 熱流体解析結果

Fig. 6 Results of Thermal Computational Fluid Analysis

4.2.2 O₂測定部位変更による応答性向上

高温(800°C超)かつ高ダスト、腐食性ガス条件下での測定が可能なレーザO₂計を採用し、図2に示す焼却炉内に取付けた。取付状況を図7に示す。

図8にBF出口の既設O₂計(ジルコニア式)とレーザO₂計の測定データを示す。O₂をより上流側で検知するレーザO₂計の応答は下流にある既設O₂計よりも約50秒早くなっている。また、既設O₂計測定位置の排ガスは、漏込空気、パージ空気を含んで値が高い上、50秒滞留する空間内での淀み(特にBF内)の影響で振幅が小さくなっている。このレーザO₂計を使用することで、応答性がよくなり、EGRによる低空気比燃焼においてO₂不足によるCOの発生を抑制することができる。

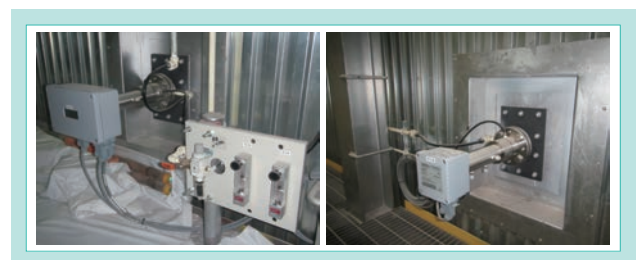


図 7 レーザ O₂ 計

Fig. 7 Laser O₂ Analyzer

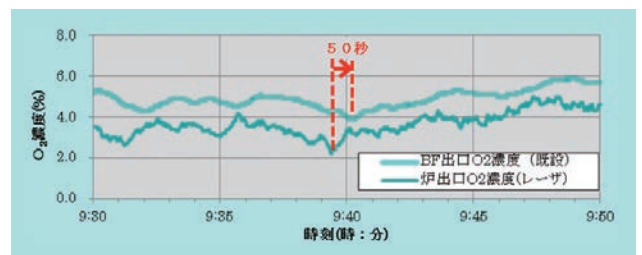


図 8 レーザ O₂ 計と既設 O₂ 計の運転データ

Fig. 8 Operating Date of the Laser O₂ Analyzer and Conventional O₂ Analyzer

4.2.3 EGR単独でのNO_x低減効果

図9にEGRによる低空気比運転を行った際のNO_x、O₂、COの運転データを示す。EGR運転を開始しO₂を低下させていくことで、NO_xが100 ppm前後から45.5 ppm(RUN平均)まで低下し、開発目標の70 ppmを超過達成することができた。O₂も4%前後で制御できており、COも9.5 ppmと1桁台となり、レーザO₂計の効果が確認できた。

DXNsについても、BF入口で0.58 ng-TEQ/m³Nと通常運転と比較しても低い値となり、BF出口においては開発目標値である0.1 ng-TEQ/m³Nを大きく下回る0.0034 ng-TEQ/m³Nであった。EGRによる焼却炉内での攪拌効果により、少ないO₂であってもDXNsの発生が抑制されたものと考えられる。

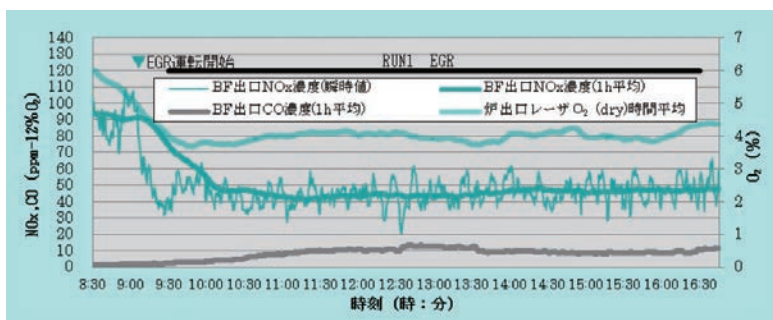


図 9 EGR 単独での NO_x, CO, O₂ の運転データ

Fig. 9 NO_x, CO, O₂ in Operation with EGR Alone

表 4 RUN1(EGR) での運転結果

Table 4 Operating Data in RUN 1(EGR)

項目	測定結果	単位
BF出口NO _x	45.5	ppm-12%O ₂
レーザO ₂	4.0	% (dry換算)
BF出口CO	9.5	ppm-12%O ₂
BF入口DXNs	0.58	ng-TEQ/m ³ N
BF出口DXNs	0.0034	ng-TEQ/m ³ N

4.2.4 EGR+SNCRによるNO_x低減相乗効果

図10はEGRとSNCRを運転した際のNO_x、O₂、リークアンモニアの運転データである。通常運転からEGRを運転することで、NO_xは47 ppm程度まで下がり、更にSNCRを運転することで、開発目標値の30 ppmを大きく下回る18.9 ppmまで低減することができた。脱硝率は60%であり、期待した効

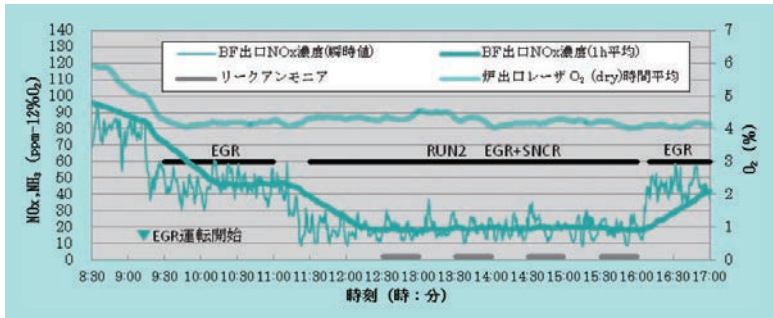


図 10 EGR+SNCR での NO_x、CO、リークアンモニアの運転データ
Fig. 10 NO_x、O₂ and Leak Ammonia in Operation with EGR+SNCR

果を發揮することができた。

リークアンモニアについては4回測定を実施したが、1.7～2.1 ppmと開発目標値の5 ppmを下回ることができた。

DXNsについてもEGR単独時と同様に良好な結果を得ることができ、全ての開発目標値を達成することができた。

表 5 RUN2(EGR+SNCR) での運転結果
Table 5 Operating Data in RUN 2(EGR+SNCR)

項目	測定結果	単位
BF出口NO _x	18.9	ppm-12%O ₂
レーザーO ₂	4.2	% (dry換算)
脱硝率	60	%
リークアンモニア	1.7～2.1	ppm-12%O ₂
BF入口DXNs	0.78	ng-TEQ/m ³ N
BF出口DXNs	0.0018	ng-TEQ/m ³ N

5. LCC 評価

SCRと同様の性能をEGRとSNCRで得ることができた。SCRの省略のほか、実験で得られた低空気比運転による排ガス量の削減等も加味し建設費及び運営費の削減効果を試算した。試算条件は処理能力60 t/日×2炉規模の施設である。表6はその試算結果である。本開発による建設費(建築を除く)削減効果は1.6%であった。

運営費では、触媒の維持管理費が不要になるほか、触媒効果を発現させるための再加熱蒸気が不要となり、発電効率が16.6%から17.5%へ向上し、売電量が増えることから年間で、10.7%削減が期待できる。

20年間のLCCでは3.2%削減できるという評価となった。

表 6 LCC 削減効果

Table 6 Estimated Cost Reduction Effect

	従来タイプ (SCR有)	開発タイプ (SCR無)	削減効果
単位	億円	億円	%
建設費用 (建築を除く)	47.49	46.74	1.6
年間運営費用 (人件費を除く)	1.69	1.51	10.7
LCC (20年)	134.26	130.03	3.2

6. おわりに

本稿では、新設のDBO案件の受注に向けLCCを削減するため、EGR、SNCRの2つの組み合わせによるNO_x低減技術の開発について紹介した。またこの技術は運営費用が大きく削減されるため基幹改良工事^{※3}にも適用可能である。

今後もNO_xを含む環境負荷の低減、及びLCC削減の開発に取り組んでいく考えである。

最後に、本開発の実施にあたり、多大なる御協力を賜りました堺市様に感謝申し上げます。

※3 概ね10～15年ごとに実施する大規模な改良工事

参考文献

- 1) 環境省:「廃棄物処理の現状と課題」、(2013) <http://www.env.go.jp/council/former2013/03haiki/y0320-02/mat04.pdf>
- 2) 新井:「廃棄物処理施設の事業方式と総合評価落札制度について」、(2014) <http://www.jefma.or.jp/jefma/62/pdf/jefma62-3.pdf>
- 3) 全国都市清掃会議(財)廃棄物研究財団:「ごみ処理施設整備の計画・設計要領」、(1999)、pp.267-268
- 4) 石見,山口,鎌田他:「排ガス再循環を利用した都市ごみ焼却炉の低空気比燃焼」クボタ技報No.38、(2003)、pp.45-50
- 5) 石見,松川他:「ごみ焼却炉における低空気比燃焼の実証」廃棄物学会研究発表会講演論文集、(2002)、pp.621-623

大型コンパクト浄化槽KTZ型の開発

Development of Compact Johkasou KTZ Type for Large Scale Facilities

浄化槽事業ユニット 技術グループ

大型合併処理浄化槽は、アパート、病院、工場、公共施設等の排水を処理する大規模浄化槽で国内に約1,500台/年の需要があり、分散型汚水処理装置としてアジアを中心とした海外へも展開している。浄化槽に対する顧客の要求は、浄化機能はもとより施工費の低減が最も大きく、競合他社も競ってコンパクト化をはかってきた。本稿では従来機同等の処理性能・メンテナンス性を維持した上で、クボタ独自の技術を盛り込み業界最小のコンパクト化を実現したクボタ大型浄化槽KTZ型の開発について報告する。

【キーワード】

浄化槽、コンパクト化、スポンジ

The large-type Johkasou is a large-scale sewage treatment tank for the drainage of apartments, hospitals, factories and public facilities, etc. In Japan, there is demand for approximately 1,500 units a year, and they are also sold overseas, mainly in Asia, as dispersal-type sewage treatment devices. The main demand from customers for the Johkasou after sewage treatment is the reduction of construction costs, while competitors have competed by downsizing. This paper reports the development of the large type Johkasou KTZ furnished with Kubota's original technology. It is the smallest model in the Johkasou market while maintaining equal sewage treatment performance and maintenance characteristics to conventional products.

【Key Word】

Johkasou, Downsizing, Sponge

1. はじめに

クボタのFRP(繊維強化プラスチック)製大型浄化槽(51人槽以上の規模)は構造例示型[沈殿分離型、流量調整型]、コンパクト型[沈殿分離型、流量調整型]、高度処理型[膜処理型BOD(生物化学的酸素要求量)除去、窒素リン除去]の6型式を製品化している。水処理プラントをパッケージ化した浄化槽

は、工場で生産された製品を施工するため工期が早く、環境負荷低減の効果が早いという利点がある。日本国内では、人口が少ない地域での汚水処理施設として、また東南アジアなど下水道普及が遅れている地域では、水環境を改善する施設として期待されている。

2. 開発の目標

2-1 開発のコンセプト

大型浄化槽市場ではコンパクト型(処理性能:放流BOD20 mg/L)の設置が9割を占めているが、本開発ではその最量販セグメントである200人槽以下を主ターゲットと

し、業界最小コンパクト型浄化槽により顧客の施工費を大幅低減することを開発のコンセプトとした。

2-2 目標値

- ・従来機比約20%のコンパクト化。
- ・200人槽をFRP本体槽1本構造(最大10.7 m/本)に縮減

[従来機、競合機は本体槽2本構造]

3. 技術の説明

3-1 製品の概要

浄化槽は前段(固液分離槽、嫌気ろ床槽)で流入污水中に含まれる夾雑物等を除去し、後段(生物反応槽、ろ過槽)で溶解性物質を生物処理し、清澄な処理水を得る構造である。

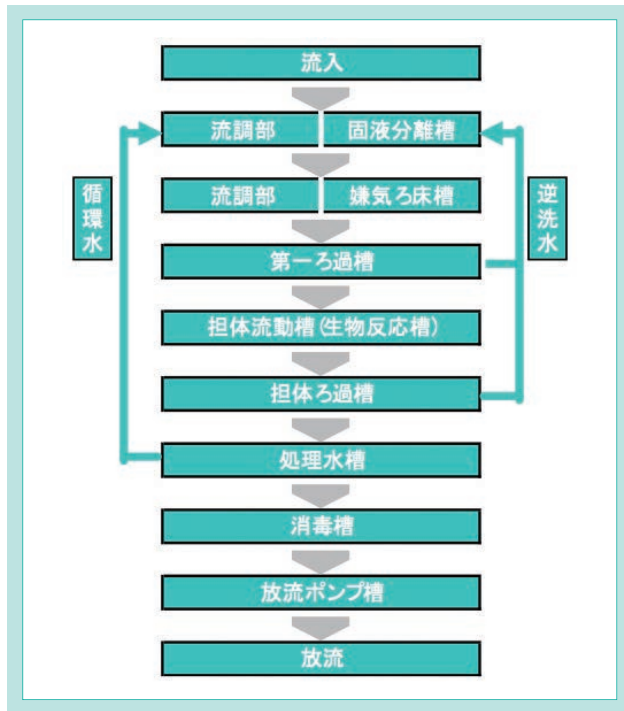


図1 開発機の処理フロー

Fig. 1 Treatment Flow of the Development Product

開発の重要なポイントは、処理性能を確保しながら各槽の容量縮減であり、下記の技術開発により達成した。

(1)担体流動槽のコンパクト化

担体流動槽には小・中型浄化槽で実績のあるスポンジ担体(図2)を採用した。スポンジは内部にも微生物が固定化され、単位容積当たりの微生物量が増加することから槽容量のコンパクト化を実現できた。

(2)2段濾過方式の採用[SS(浮遊物質)除去能力の改善]

担体流動槽前後にろ過槽を設けた2段ろ過(図2)方式とした。製作が困難になることが懸念されたが、ろ過槽自体をシンプルな構造に見直し、2段ろ過部をサブアッシ化することで克服した。前段のろ過槽(第一ろ過槽)は担

体流動槽への流入負荷を低減し汚泥発生量を低減させ、また後段のろ過槽(担体ろ過槽)は生物反応槽で発生した汚泥を除去し放流水中のSSを低減させる構造とし、所期の性能を確保した。

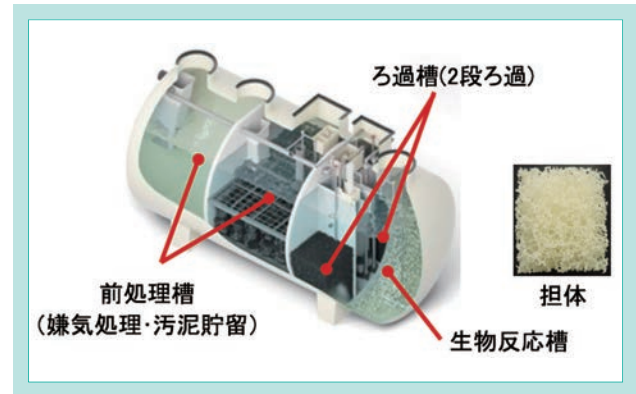


図2 コンパクト化のポイント

Fig. 2 Important Points of Downsizing

(3)前処理槽の汚泥貯留方法改善

流入バツフルに底板を設け(図3)、汚水流入時に浄化槽底部に堆積した汚泥の巻き上げ・攪拌を抑制し、汚泥の濃縮貯留化を実現することで前処理槽の容量を縮減した。

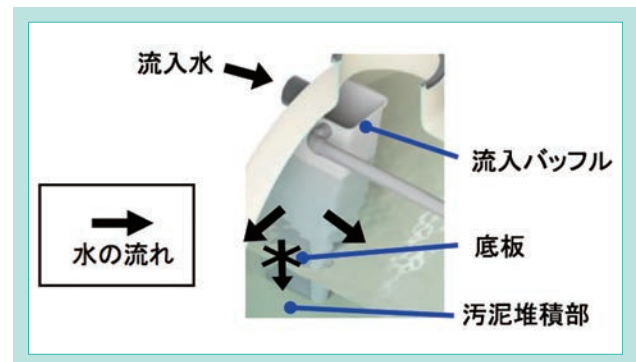


図3 流入部の水の流れ

Fig. 3 Flow Direction of the Water of the Inflow Section

(1)~(3)のポイントを中心にした技術開発により、目標の200人槽以下を本体槽1本仕様とした業界最小KTZ型の製品化を実現した。

4. おわりに

コンパクト化の達成により多くの波及効果をもたらした。製品運搬時や施工時のエネルギーの低減や製造時に使用する材料・資源の削減等が挙げられる。今回、施工時の掘削土量の削減(200人槽で対従来機比27%減)により、環境配慮性の高

い製品として社内認定制度であるエコプロダクツの認定を受けた。次は200人槽以上の市場をターゲットとする開発となるが今回の技術を応用し、さらなる社会貢献に寄与する製品開発へ繋げたい。

KSIS 導入事例のご紹介

A Case Example of the Introduction of KSIS to Wastewater Treatment Plant

クボタ化水 技術開発部／クボタ化水 エンジニアリング部

クボタ化水株式会社は、民間工場の用排水処理、ガス処理などの環境設備プラントを手掛ける総合環境エンジニアリング会社であり、環境負荷の低減と経済性を両立させた固有技術を進化させることで、産業と社会の発展に貢献してきた。また、設計施工から維持管理まで一貫通貫で手掛け、国内から東南アジアまで日系企業の海外展開に合わせて事業展開を行っている。今回、クボタが開発したIoT(モノのインターネット)の共通プラットフォーム「KSIS(クボタスマートインフラストラクチャシステム)^{*1}」を排水処理設備へ適用した事例を紹介する。

【キーワード】

排水処理設備、遠隔監視、クラウド

*1 KSISは(株)クボタの登録商標です。

KUBOTA KASUI Corporation is an engineering company that produces environmental treatment plants, such as plants for wastewater treatment and waste gas treatment and provides those for private companies. By advancing our original technologies that realize both of environmental protection and economic efficiency, we have contributed to the development of industry and civil society. We expand our business activities not only in Japan but also in Southeast Asian market along with the overseas expansion of Japanese companies by offering comprehensive services including design, construction and maintenance. This report presents a case example of implementation of “KSIS (Kubota Smart Infrastructure System)”, a common platform for the remote monitoring and diagnosis, which is developed by KUBOTA to wastewater treatment plant.

【Key Word】

Wastewater Treatment Plant, Remote Monitoring, CloudService

1. はじめに

工場の排水処理設備において、排水の水質や水量は稼働状況や生産工程に応じて変化する。排水処理施設には、流量計や水質計などのセンサが設置してあるが、そのデータが傾向管理や維持管理効率化へ十分に活かされていないのが現状である。今回クボタ化水株式会社(以下、クボタ化水)が納入するA社工場排水処理設備では、KSISを導入しクラウド上で

運転状況を常時モニタリングできるようにした。KSIS導入により、現場に行く手間が省けるとともに、トラブル発生時の原因究明や長期的な傾向管理を可能とした。また、生産工程毎に流量、COD(化学的酸素要求量)、pH(水素イオン指数)などの運転データを把握することで、流入排水の質、量の見える化、流入排水に応じた効率的な運転管理を可能とした。

2. 技術の説明

2-1 KSIS の特長

KSISの特長として、以下の3点が挙げられる。

①いつでもどこでも閲覧可能

PC、スマートフォンなどで24時間いつでもどこからでも設備状況の監視が可能となる。導入に当たって中央監視装置が不要となるため、少ない初期投資で処理状況の見える化を可能とする。

②安価なランニングコスト

サービス利用料は、サーバ管理費と通信費を含んだ定額制で、クボタとNTTが包括提携しており、通信費を安価に抑えている。

③高い信頼性と強固なセキュリティ

データはクボタの東西2拠点のデータサーバで20年間保存し、ワンタイムパスワードによるユーザアクセス制限により高いセキュリティを確保している。

2-2 監視システムの機能

① 運転状況の把握

全体フロー表示により、現在のポンプ等の機器稼働状況や流量の全体像が把握できる(図1)。また、運転管理指標となる凝集処理におけるpHや生物処理におけるDO(溶存酸素量)、汚泥濃度、膜処理の閉塞状況などをフロー上で確認でき、異常発生箇所を特定しやすい。

② トレンドグラフ

複数項目(最大4~8点)のトレンドを表示させることが可能(図2)。数時間から1ヶ月までのトレンドを見ることでデータ推移の把握やトラブル発生時に各運転指標の過去のトレンドを確認することで原因推定がしやすい。

③ 帳票出力

予め設定した項目について、日報、月報、年報の表示ができ、記録・報告作業の省人化が可能。また、機器の累積稼働時間をカウントできるため、機器の保全計画の立案に活かすことができる(図3)。

④ 警報メール通報

異常時には警報が表示され、過去の警報履歴一覧も記録、表示できる。また、警報発生時、回復時に予め登録した連絡先にメールを自動送信することが可能。メール通報する警報項目や項目毎に送付するメールアドレスを個別設定することができる。

⑤ モバイル端末での監視

スマートフォンやiPadなどのモバイル端末でも特殊なソフトやアプリの導入なしで監視が可能。

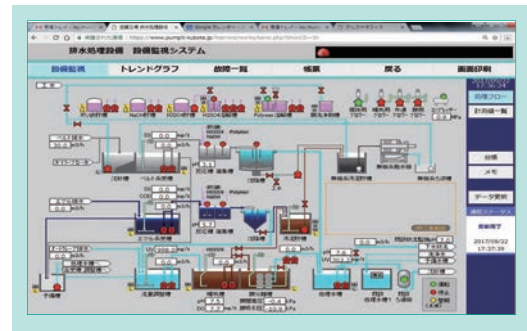


図1 設備監視フロー
Fig. 1 Facility Monitoring Flow

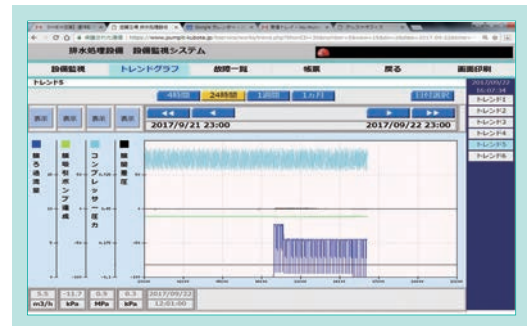


図2 トレンドグラフ
Fig. 2 Trend Graph



図3 帳票
Fig. 3 Report

2-3 客先メリット

客先メリットとしては、以下3点が挙げられる。

① 維持管理作業の低減

現場に行かずとも流量やpH等の確認ができるため、巡回点検作業を軽減できる。

② トラブル対応の迅速化

トラブル発生時、いつでもどこからでもトレンドや状況確認が可能となり、現場の状況のある程度把握した上で現場へ向かうことができるため、迅速かつ適切な対応

が可能となる。また、クボタ化水と情報を共有しながら対応が可能となる。

③ 処理の安定性とコスト低減の実現

排水処理で使用する薬品量を見える化するすると、運転条件を変更した場合の処理状況と薬品使用量低減効果を定量的に評価でき、処理性とランニングコストの最適化が実現できる。

3. 今後の展開

今後、国内だけでなく海外プロジェクトへ展開していく。現在、ミャンマー、ベトナム、マレーシア等の排水処理設備へ導入予定であり、海外の水処理プラント維持管理を国内から監

視、支援することが可能となる。これにより海外プラントの処理状況を国内でも監視し、海外現地法人のスタッフと共有することで、より質の高い維持管理サービスを提供していきたい。

プラント市場向け樹脂配管材の可能性とクボタケミックスの取組み

The Market Potential of Plastic Pipeline for Plant Market

1. はじめに

日本の工場の多くは高度成長期に建設され、既に約40年を経過している。また、工場の多くは沿岸地域に建設されており、使用管材の多くを占める鋼管は、腐食・漏水が懸念されてきた。クボタケミックス(以下「KC」という。)では、冷却水配管、海水取水管、排気配管等、工場内配管材の樹脂化を目指し、この市場の開拓を進めている。

こうした中、2015年に消火用屋外給水配管に対する省令改

正(総務省)が行われ、埋設消火管への樹脂管使用が可能となった。この改正を受け、消火管の腐食・漏水で困っていた顧客が樹脂管の検討を始め、一部の自治体では埋設消火管にポリエチレン管を推奨する動きも見せている。

本記事では消火用配管を中心としたプラント市場の状況と課題、そしてKCの取組みについて紹介する。

2. プラント市場を取り巻く状況

(1) 消火用配管

2015年10月1日の省令^{*}改正により、石油コンビナート地区等における消火用屋外給水施設(埋設)として樹脂管が使用できるようになった。元々配管材には鋼管が指定されていたが、設置から40年以上が経過し、腐食による漏水のほか、管摩擦損失の増大による給水能力の低下等が懸念されていた。一方では、耐震性、耐腐食性、可とう性に優れたポリエチレン管が様々な分野で用いられるようになってきたことから、今回の省令改正となった。

対象となる事業所は沿岸部に設置されることが多く、腐食で困っていた顧客がまず検討を始めていたが、更に、KCを含めた樹脂管メーカーの営業活動により、プラント市場での樹脂管の認知度が向上し、市場は徐々に立ち上がりつつある。既に自治体によってはポリエチレン管を指定するところも出ている。

寺社向けではあるが、図1に消火配管用途への設置例を示す。

^{*}石油コンビナート等における特定防災施設等及び防災、組織等に関する省令(以下「石災法」という。)の一部を改正する省令。

(2) 推定需要

石災法の対象となる企業の事業所敷地総面積は約300百万m²で、敷設されている消火管の総延長は約10,000 kmとも推定できる。管材費や更新期間を独自に設定しての算出となるが、市場規模は数百億円/年となる。

(3) 消火用配管以外

冷却水、海水取水といった液体搬送に加え、動力用エアール、排気用といった用途が対象となる。図2に海水取水用にポリエチレン管が使用された例を示す。



図1 寺社消火配管への設置例(呼び径50ポリエチレン管)
Fig. 1 PE Pipe for Firefighting Line in Shrine (ND 50 mm)



図2 海水取水管への設置例(呼び径450ポリエチレン管)
Fig. 2 PE Pipe for Seawater Intake (ND 450 mm)

3. KC の取り組み

(1) 消火用配管向け評価

所轄の消防署の判断に委ねられる部分はあるが、消火用途には、原則として日本消防設備安全センターの認定品(以下「消安認定品」という。)以外は使用できず、各社消安認定品の拡充に取り組んでいる。しかし、認定の取得には数多くの評価が義務付けられており(表1)、さらに各々の評価に対して、n数3個で2回(事前試験と立会い試験)の実施が定められている。これら大量のサンプル費用や評価作業に対応し、かつ対応する設備を有することが消安認定取得の条件となる。KCでは2003年頃から消火配管向け製品取扱いを開始しており(一般の消防用設備配管へは2001年の消防法施行規則の改正により利用が可能になっている)、消安認定を呼び径50 mmから200 mmまで取得してきた。現在は、プラント市場の消火配管を取り込むべく、更に大口徑の呼び径250、300mmの消安認定を進めている。設備面では長期静水圧試験用の大型水槽を導入(図3)、他の評価項目の設備大口徑化も順次進めている。

表 1 消安認定評価項目
Table 1 Regulation for Firefighting Pipe

評価項目	内容概略
①外観・構造・寸法等試験	申請書類との寸法、形状の照合
②押しつぶし試験	温度2°C下で1kNでの載荷
③衝撃試験	温度-18、0、20°C下で高さ1.5mから重錘を落下
④繰り返し温度試験	使用圧力下で、2⇄40°Cを5回繰り返す
⑤漏れ試験	0.1MPaの水圧下で3分間保持
⑥耐圧試験	漏れ試験後、使用圧力×1.5倍で3分間保持
⑦曲げ試験	最大支持間隔×2倍の間隔で支持した状態で、管内水重と同荷重を1分間載荷
⑧引張強度試験	管継手長手方向の引張強度1kN以上を確認
⑨破壊試験	使用圧力×4倍以上で破壊すること
⑩水撃圧試験	「0⇄使用圧力の3.5倍」の圧力変動100回
⑪長期静水圧試験	50°C下で、使用圧力×1000hr異常無き事
⑫等価管長試験	実管流水試験による測定で、試験値が申請値±20%であること



図 3 大型水槽 (長期静水圧試験用)
Fig. 3 Hot Bath for Hydrostatic Pressure Test

(2) 大口徑での材工費用低減

競合となる鋼管は溶接での接合が一般的で、接合時に継手製品を必要としない。これに対してポリエチレン管はEF(電気融着)接合(図4)が国内では一般的で、管以外にEF継手が必要となるため施工費が上昇し、特に大口徑では顕著となる。これに対し、EF継手が不要となるBF(突き合わせ)接合を提案している。BF接合はパイプの端部を溶かして突き合わせる接合方法のため、管以外の継手は不要であり、施工費を抑えることができる。反面、施工手順は若干複雑で、工具の取り扱いもEF接合より難しいが、グループ会社であるクボタプラテックがBF接合を含めた施工受注、または施工指導を行うことで対応している。

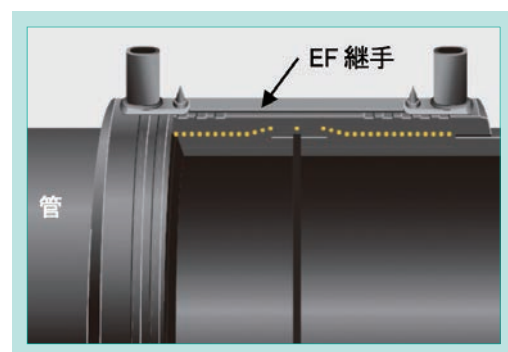


図 4 EF (電気融着) 接合
Fig. 4 Electro Fusion Joint

4. おわりに

KCは合成樹脂管材における国内トップメーカーであり、特にインフラ分野でその強みを発揮してきたが、その市場は人口減による需要減少が不可避である。このような状況に対し、継続した成長を目指して、新市場への参入を模索してきた。

今回取り上げたプラント市場は、樹脂管の利点が活かせるだけでなく、2015年の省令改正による追い風が吹いている。また、プラント内の他用途配管(冷却水、エア一用、海水取水、

等)を含めると更に可能性が広がる魅力的な市場である。

本市場で重要となる消安認定の口径拡大と、お客様にとって価格メリットのある提案を行い、より高品質なパイプラインの提供を進めていく。

問合せ先: 株式会社クボタケミックス

開発部 PE・インフラグループ

TEL 072-244-7188