

For Earth, For Life
Kubota

KUBOTA TECHNICAL REPORT

クボタ技報 **58**
DECEMBER 2025

ISSN 0916-8249

クボタ技報

No.58 2025 年 12 月

目次

巻頭言

地球と人の未来を支え続ける研究開発	5
-------------------------	---

機械部門

国内向け乗用管理機 NR シリーズの開発	7
ロングベッドユーティリティビークル RTV-X1130 の開発	13
MBD 連携 5 軸台上設備評価技術の開発	19
キャビンエアコン快適性向上技術の開発	25
国内向け乗用田植機 NW60S/80S の開発	31
EURO5+ 規制適合ディーゼルエンジン Z482-K の開発	37
1D-CAE と AI による排出ガス予測技術の開発	43
監視制御システム 次世代型 CraftPat の開発	49

水・環境部門

新耐震型ダクティル鉄管 GENEX(呼び径 500 ～ 1000) の開発	55
浄水向け凝集沈澱制御システムの開発	61
下水サーベイランスによる感染動向モニタリングの開発	67
高温排水 (主に業務厨房排水) 向けポリプロピレン管・継手の研究開発	73

紹介記事

KSIS BLUE FRONT 設備モニタリングシステム「KEMOS」の紹介	77
--	----

新製品紹介

フラット設置タイプ・防水タイプ 電動アクチュエータ【ほ場水管理システム WATARAS】	79
--	----

KUBOTA TECHNICAL REPORT

No.58 DECEMBER 2025

CONTENTS

Prefatory Note

Research and Development Sustaining the Future of the Earth and Humanity	6
--	---

Farm & Industrial Machinery

Development of High-clearance Tractor "NR Series" for the Domestic Market	7
Development of the RTV-X1130 Long-bed Utility Vehicle	13
Development of the Evaluation Technology for the 5-axis Powertrain Testbed Following the MBD ...	19
Development of Technology to Improve the Comfort of Cabin Air Conditioning	25
Development of the Riding-type Rice Transplanter NW60S / 80S for the Japan Market	31
Development of the Diesel Engine Z482-K for European Quadricycle in Compliance with the EURO5+ Standard ...	37
Development of Emissions Prediction Technology Using 1D-CAE and AI	43
Development of the Next Generation of the Monitoring and Control System "CraftPat"	49

Water & Environment

Development of the New Earthquake Resistant Ductile Iron Pipe GENEX (DN 500-1000)	55
Development of Drinking Water Coagulation Control System	61
Development of Infection Trend Monitoring Using Wastewater Surveillance	67
Research and Development of Polypropylene Pipes and Fittings for High-Temperature Wastewater (Mainly from Commercial Kitchens) ...	73

Introduction Article

Introduction of the KSIS BLUE FRONT Equipment Monitoring System "KEMOS"	77
---	----

New Products

Flat-installation Type / Waterproof Type for the "WATARAS", Water Remote Management System in Paddy Fields ...	79
--	----

SDGsへの取り組み

～食料・水・環境の各分野で地球と人を支えるクボタ～

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

SDGsとは？

世界中が協力して取り組むべき課題を17の目標として定めたもの。

2030年の達成期限に向けて、2015年の国連サミットで採択された。

「Sustainable Development Goals」を略してSDGs(エスディージーズ)と呼ばれ、

日本語では「持続可能な開発目標」と訳されます。

掲載記事とSDGsの関わり

主に関わる分野		掲載記事	深く関連する：★ 関連する：●
食料(農業)	水・環境		
■		国内向け乗用管理機 NRシリーズの開発	
■		ロングベッドユーティリティビークルRTV-X1130の開発	
■		MBD連携5軸台上設備評価技術の開発	
■	■	キャビンエアコン快適性向上技術の開発	
■		国内向け乗用田植機NW60S/80Sの開発	
■	■	EURO5+規制適合ディーゼルエンジンZ482-Kの開発	
■	■	1D-CAEとAIによる排出ガス予測技術の開発	
	■	監視制御システム 次世代型CraftPatの開発	
	■	新耐震型ダクタイル鉄管GENEX(呼び径500～1000)の開発	
	■	浄水向け凝集沈澱制御システムの開発	
	■	下水サーベイランスによる感染動向モニタリングの開発	
	■	高温排水(主に業務厨房排水)向けポリプロピレン管・継手の研究開発	
	■	KSIS BLUE FRONT設備モニタリングシステム「KEMOS」の紹介	

SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS



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

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

地球と人の未来を支え続ける研究開発

代表取締役社長

北 尾 裕 一

President and
Representative Director

Yuichi Kitao



クボタは、1890年（明治23年）に創業し、2025年に135周年を迎えました。創業者 久保田権四郎の「技術的に優れているだけでなく、社会の皆様に役立つものでなければならない」という信念は、現在もクボタのDNAとして受け継がれ、「食料・水・環境」の分野で事業を通じ課題解決に貢献してきました。クボタは、持続可能な地球・社会・豊かな人の暮らしを実現する“命を支えるプラットフォーム”として、これからも皆さんにとって必要不可欠な存在となることを目指し、研究開発に取り組んでまいります。

さて、気候変動やアジア・アフリカ地域での人口急増に加え、先進国を中心に少子高齢化が進む中で、社会課題はますます複雑化していますが、クボタはその対策の一端を、今年10月に盛況のうちに終了した大阪・関西万博2025の「未来の都市」パビリオンにおいて、未来の農機のコンセプトモデルや未来の農業を考える体験ゲームなどでお伝えしました。展示した二種類の汎用プラットフォームロボットや、無人運転水素燃料電池トラクタは、単なる夢のコンセプトではありません。1970年の万博では、キャビンやエアコンつきの「夢のトラクタ」を展示しましたが、それから55年が経過した現在、当時の「夢」をはるかに超える自動運転農機や、データによる精密農業を実現しています。これは、クボタがビジョンを描き、さまざまなパートナーと協調しながら実現してきたものです。同様に、今年の万博で展示した「未来のコンセプト」も、今後数年から十数年のうちに各地域の未来に、より一層貢献できる製品やサービスとして実現していくものと確信しています。

日本をはじめ世界は、複雑化する未来社会の課題解決のために、新しい社会を目指しています。それは、工業化社会、情報化社会を経て、「サイバー空間とフィジカル空間の高度融合により、経済発展と社会課題解決が両立した社会 Society 5.0」です。この実現に向けて、クボタは、これまで培ってきた鋳物や農建機、電子制御技術に加え、ICT・AI・電動化などの新しい技術にも取り組んでいます。また、地域や国によって気候・水・土壌・作物・道路や管路インフラなどの条件は異なり、社会課題もそれぞれ違います。こうした特性を的確に把握し、課題解決に貢献する製品・サービス・ソリューションを、持続可能な形で提供していきます。

私は、課題は常に現場にあると考えています。だからこそ、現場に密着して顧客視点で課題を深く理解した上で力強いビジョンを描き、そのビジョンをステークホルダーと共有しながら、ともに実現へと動くことが不可欠だと考えています。産官学連携や、同業・異業種を問わないオープンな社外パートナーとの協創も活用し、今年の万博で展示したコンセプトを超えるビジョンを実現していきたいと思います。

クボタ技報58号では、お客様（ユーザー）の作業効率を向上させた乗用管理機・ユーティリティビークル・田植機、施工性を向上させた新耐震型ダクタイル鉄管、解析技術を活用して開発したキャビンエアコンの快適性向上技術、産官学連携によって開発に取り組んだ感染動向モニタリングシステムなどを掲載しています。クボタの取り組みについてご理解を深めていただければ幸いです。

Research and Development Sustaining the Future of the Earth and Humanity

Kubota was founded in 1890 and marked its 135th anniversary in 2025. The conviction of our founder, Gonshiro Kubota—that our products should not only be technically excellent, but also useful for the good of society—continues to be passed down in Kubota’s DNA. Through our businesses in the fields of food, water, and the environment, we have remained committed to addressing social issues. As a “platform provider supporting life” dedicated to realizing a sustainable Earth, society, and prosperous livelihoods, Kubota will continue its research and development efforts with the aim of being an indispensable presence for all.

Climate change continues to intensify. Populations are rapidly surging in Asia and Africa, and developed countries in particular are facing declining birthrates and aging populations. Against this backdrop, society’s challenges are becoming steadily more complex. Kubota shared a part of its approaches to these issues at the “Future City” Pavilion during the Osaka-Kansai Expo 2025, which successfully concluded in October of this year, by presenting concept models of agricultural machinery for the future and interactive games that encouraged visitors to envision the future of agriculture. The company exhibited two types of versatile platform robots and a concept model of autonomous fuel cell tractor. However, these are not simply visionary concepts. At the 1970 World Expo, Kubota showcased the Dream Tractor, equipped with an enclosed cabin and air conditioning unit. Now, 55 years later, the company has realized autonomous agricultural machinery and data-driven precision farming that far surpass the “dream” envisioned at that time. This vision forged by Kubota was brought to life through collaboration with a wide range of partners. Likewise, we are also confident that the concepts for the future exhibited at this year’s Expo will—within the next several to a dozen years—take shape as products and services that make an even greater contribution to the futures of communities around the world.

Japan and the rest of the world are all striving toward a new form of society to address the increasingly complex challenges of the future. This new form—known as Society 5.0—is defined as achieving both economic development and the resolution of social issues, following the stages of industrialization and transformation into an information-oriented society, through the advanced integration of cyberspace and physical space. To aid in achieving this, Kubota is drawing on the expertise it has cultivated in the fields of castings, farm and industrial machinery, and electronic control technologies, while also embracing new technologies such as ICT, AI, and electric motors. In addition, conditions relating to climate, water, soil, crops, roads, and pipeline infrastructure vary by region and country, as do the social issues they face. We will work to accurately understand these characteristics in order to continue delivering products, services, and solutions that help address these issues in a sustainable way.

I believe that the challenges are always at the frontlines. That is why I consider it essential to stay close to the frontline operations, gain a deep understanding of the challenges faced from the customer’s perspective, formulate a compelling vision, share this vision with our stakeholders, and move forward together to bring it to life. By leveraging the advantages of industry-government-academia collaboration and open co-creation projects with external partners from both inside and outside of the industry, we aim to realize a vision that far surpasses the concepts we presented at this year’s Expo.

Kubota Technical Report No. 58 features articles on high-clearance tractor, utility vehicles, and rice transplanters that improve work efficiency for customers (users); new earthquake-resistant ductile iron pipes with enhanced workability; cabin air-conditioning comfort-improvement technologies developed using analytical methods; and an infection-trend monitoring system developed through industry-government-academia collaboration. We hope this report provides a better understanding of Kubota’s initiatives.

国内向け乗用管理機 NRシリーズの開発

Development of High-clearance Tractor "NR Series" for the Domestic Market



○ 西川 翔太

Shota Nishikawa

トラクタ技術第一部



小林 句美子

Kumiko Kobayashi

トラクタ技術第一部



加藤 剣

Ken Kato

機械研究開発第三部

国内の農業において、消費者の『食の安心・安全』への意識が高まり、減農薬化が求められている。減農薬化には中間管理作業が重要となるが、これは人手と労力が伴う作業であり、中間管理作業における作業の効率化・省力化が課題となっている。この課題解決に向けて、クボタではトラクタをベースに開発した乗用管理機を市場投入し、作業の効率化を行った。本稿ではこの乗用管理機に関する開発技術を紹介する。

In Japanese agriculture, as consumers' awareness of 'food safety and security' increases, there is a growing demand for reduced use of pesticides. Intermediate management tasks are crucial for reducing pesticide use, but these tasks require significant manpower and effort, making the efficiency and labor-saving of intermediate management tasks a challenge. To address this issue, Kubota has developed a high-clearance machine on a tractor base and introduced it to the market to improve work efficiency. This paper introduces the development technology of this high-clearance Tractor.

【キーワード】

乗用管理機、4輪操舵、操作性、電子制御、安心機能

High-clearance Tractor, 4-wheel Steering, Operability, Electric Control, Safety Features

関連する SDGs



1. はじめに

近年、国内自給率向上への取組や、安全な国産野菜への関心の高まりから、農林水産省は2030年に野菜作付面積および野菜生産量を増やす計画を遂行している。また、消費者の『食の安心・安全』への意識高揚により、減農薬化が求められている。減農薬化の実現には中耕・機械除草作業等の管理作業が重要となり、これらの作業には生育中の作物の間に入ることができ、きめ細やかな作業ができる歩行形管理機(図1)が用いられることが多く、人手と労力が必要な作業となっている。一方で、近年では農業従事者が不足していることが日本の農業の深刻な問題の一つであり、野菜作で特に人手や労力が必要な管理作業の効率化・省力化に対する市場要望があり、管理作業の乗用化(歩行形管理機から乗用管理機(図2)への移行)の動きが高まっている。

クボタでは国内市場において1999年に水田転作大豆・麦を中心とした畑作向け乗用管理機GR16を発売したが、転作需要の減少により販売台数が減少し、2009年に生産を中止した。一方で、GR16の生産中止後、地上高が高く、4輪操舵など操舵モード変更が可能な乗用管理機が、麦・大豆のみならず野菜の管理作業にも適合する車体スペックであることが評価され、前述の野菜管理作業の乗用化の流れと相まって、乗用管理機の需要が増加した。しかし、GR16は既に生産を中止しており、市場要望に適合する乗用管理機をラインナップできていないことから、クボタはNBトラクタをベースとし、GR16の機能を踏襲した乗用管理機NRシリーズを開発した。本稿では、NRシリーズにおいて新たに開発した機能について紹介する。



図1 歩行形管理機の作業風景
Fig. 1 Walk-behind Tractor in Operation



図2 乗用管理機の作業風景
Fig. 2 High-clearance Tractor in Operation

2. 開発のコンセプトと目標値

市場要望に適合した乗用管理機を開発するにあたり、野菜の管理作業に適した車体スペックを実現するだけでなく、より使いやすく、安心して使うことができる機能が必要であった。また、需要の高まりに合わせて早期に市場投入する必要があった。そこで、NRシリーズ(図3)では、トラクタをベースとした製品として開発することで、新規投資を減らして開発工数・コストを抑えながらも優れた耐久性・操作性を備えつつ、「様々な圃場で、誰でも簡単に・安心して作業ができる製品」をコンセプトとした。このコンセプトを満たすため、本開発では以下3点を目標に開発を行った。

- ①野菜管理作業にマッチした乗用管理機として、様々な圃場に対応可能な車体寸法を実現する。
- ②作業に適した操舵方式にスムーズに切替えられる操舵モード切替機能を実現する。
- ③不注意や誤操作への対策を織り込み、誰でも安心して使用できる機能を実現する。



図3 乗用管理機「NRシリーズ」
Fig. 3 High-clearance Tractor "NR Series"

3. 解決すべき技術課題

3-1 様々な圃場に対応可能な車体寸法の実現

畑作乗用管理作業は畝や作物をまたいで作業することになるため、車体寸法として最低地上高(図4)およびトレッド(図5)が重要になる。畑作では地区や作物ごとに栽培体系が異なり、1つの機種で多様な栽培体系に適応するために

は、特にトレッド調整幅を広く持つ必要がある。そのため、作物の畝幅に合わせたトレッドをオペレータが簡単に変更できるような機構の開発が課題であった。



図4 最低地上高
Fig. 4 Min Clearance

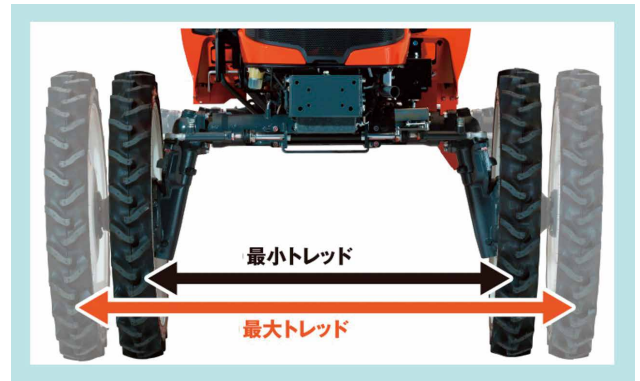


図5 トレッド
Fig. 5 Tread

3-2 作業に適した操舵モード切替機能の実現

畑作管理作業では、作物が植わった状態で限られたスペースを走行・作業するため、作業の場面により、求められる動きが異なる。例えば作物を跨いで作業するには、作物や畝を踏み荒らさないように安定した直進性が求められる。一方で旋回時には、旋回に必要なスペースを最小化し、作物植付けスペースを優先することで、収穫量を最大化するた

めに小旋回性が求められる。また、旋回後は畝と畝の間にタイヤが入るように、スムーズに車体位置を合わせなければならない。そのため、作業の状況に応じた動きができる操舵モードの切替機能の開発が課題だった。さらに、操舵モードをスムーズに切替えてできる操作性のよい操舵モード切替スイッチの設置も課題であった。

3-3 誰でも安心して使える機能の実現

乗用管理機はそのハイクリアランス仕様の特徴から同馬力帯の一般的なトラクタに比べて重心位置が高い。そのため、高速走行時における急ブレーキやブレーキ連結忘れなどオペレータの不注意によりタイヤが浮く、車体が振られる

など一般的なトラクタに比べてオペレータが不安に感じる可能性がある。そのため、不注意・誤操作をいかに起こさせないかが課題であった。

4. 開発技術

4-1 可変トレッド機構の開発

一般的にトレッドを変更する場合は①車軸とタイヤの間にスペーサを挟む、②左右のタイヤを入れ替える、③リムとディスクを組み替え可能なタイヤを使用するなどの方法でタイヤをオフセットさせることができる。ただし、これらのトレッド調整方法はタイヤの位置を外に広げることができても、ギヤケースが内側に残っており、トレッドを大幅に広げる際には作物に干渉してしまうことが問題である(図6)。干渉を防止するために

は、トレッドの変更に伴ってギヤケースも同時に動く構造が必要であった。そこでNRではギヤケースごと動かしてトレッドを変更するズームトレッド構造(図7)を採用した。この構造では、トレッド調整ボルトを工具で回すことでラックがスライドして、ギヤケースごととトレッドを調整できる。このズームトレッド構造にタイヤの左右入れ替えを組み合わせることで、1145～1505mmの間で約50mm間隔の8段階の可変トレッド機構を実現した。



図6 ギヤケースと作物の干渉
Fig. 6 Interference Between the Gear Case and the Crop

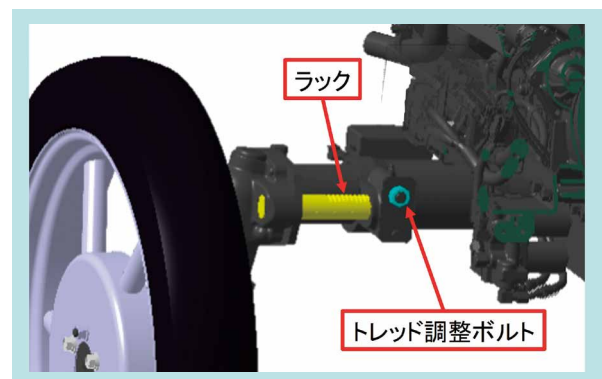


図7 ズームトレッド構造
Fig. 7 Zoom Tread Structure

4-2 操舵モード切替機能の開発

NRでは様々な車体操作ができるように、前輪だけではなく後輪も操舵ができる構造とし、操舵モードとして『前輪操舵(FWS)』『後輪操舵(RWS)』『4輪操舵(4WS)』『クラブ操舵(CWS)』を搭載した。各操舵の特徴は以下の通りである。

前輪操舵(FWS):

前進時の操舵がしやすく、通常のトラクタと同じ操作であり親しみがあるため、直進作業時や公道走行時に使用。

後輪操舵(RWS):

畑作管理作業においては畝間を長距離後進することがあり、その際の後進操舵性を高めるために使用。

4輪操舵(4WS):

前後輪が逆位相で操舵されるため小旋回が可能であり、枕地旋回時に使用。また、NRでは前後輪の切れ角を同等にしているため、前後輪が同じ軌道を通り、踏み荒らしを最小限にできる(図8)。

クラブ操舵(CWS):

前後輪が同位相で操舵されるため平行移動が可能であり、条合わせや幅寄せなど細かい調整の際に使用(図8)。

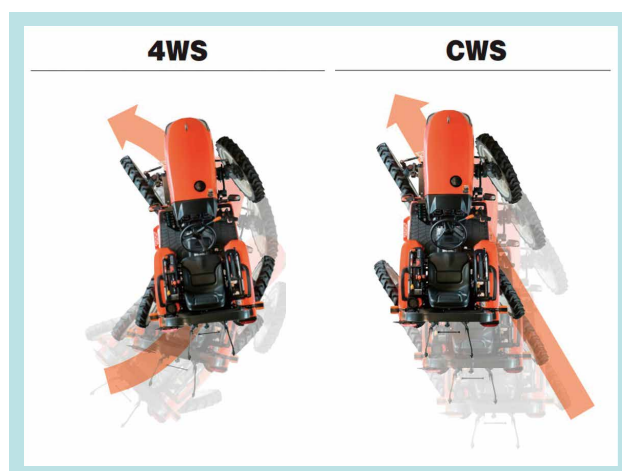


図8 4WS および CWS の走行軌道
Fig. 8 4WS and CWS Running Trajectories

4.2.1 操舵モード切替スイッチの配置

作業中に状況に応じてこれらの操舵モードをスムーズに切替えるためには、視認性がよく簡単に操作できる位置に操舵モード切替スイッチを配置することが重要である。着座位置からハンドル等に重なることなく視認、操作できるように、NRではパネルカバー左側に配置することとした。操舵モード切替スイッチの右側に操舵モード状態が一目でわかるイラストと文字のラベルを取り付け、選択されているモード

のスイッチを点灯させることで、他社機に比べて視認性と操作性を格段に向上させた(図9)。

また、企画台数が一般的なトラクタと比べて少なく、金型投資を抑える必要があったため、スイッチ組付けブラケットは金型を使用しない板金とし、パネルカバーと親和性を持たせた角度や曲げの構造とすることで、外観性の良いブラケットを実現した。

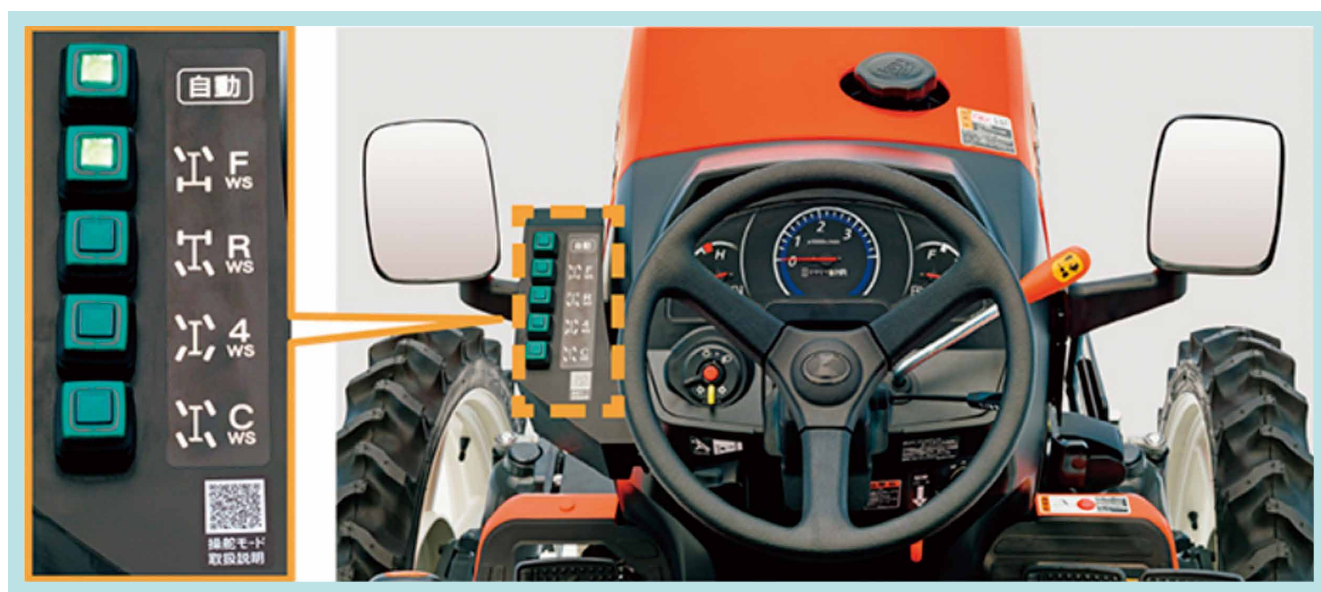


図9 NRシリーズの操舵モード切替スイッチレイアウト
Fig. 9 NR Series Steering Mode Switch Layout

4.2.2 カスタマイズ可能な自動モードの開発

前述のようにオペレータが手動で操舵モードを切替える以外にも、作業中の製品の状況に応じて操舵モードを自動的に適切なモードに切替える自動切替機能をNRには搭載している(図10)。これは操舵モード切替作業の手間を省くことを目的とし、製品の前後進、作業機の位置を検知することで実現している。前進で作業機下げの状態は作業中と認識し前輪操舵、前進で作業機上げの状態は旋回中と認識し4輪操舵、後進で作業機上げの状態は切り返しと認識し後輪操舵とすることで操舵時の自動切替を実現している製品が市場にあるが、ユーザーからは切り返し時の後輪操舵は一般的な前輪操舵での後進と操作感が異なり操作しにくいという声があった。そのためNRでは後進で作業機上げの切り返し時の操舵モードを前輪操舵、後輪操舵、4輪操舵からオペレータが自由に設定できるようなカスタマイズ機能を搭載した。カスタマイズの操作方法は自動モードスイッチを押しながらキーオンした状態でスイッチを手順通りに操作するのみで設定できるようにした。また、その操作手順はスイッチブラケットに貼り付けたQRラベルを読み取ることですぐに確認できるようにしており、誰でも簡単にカスタマイズ可能とした。

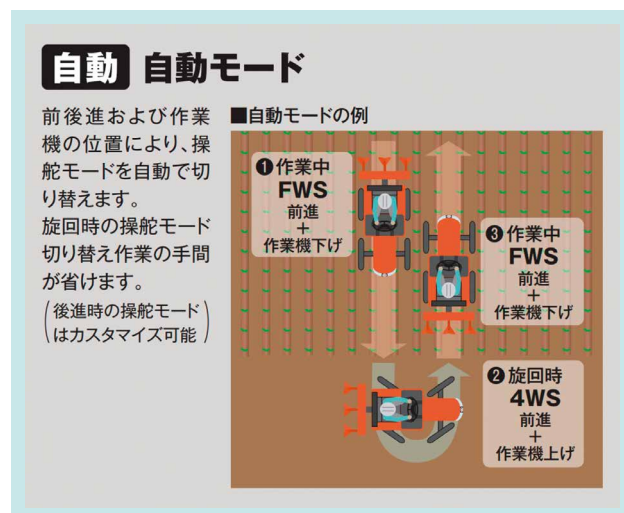


図 10 自動モード時の操舵モード切替例
Fig. 10 Example of Steering Mode Switching in Auto Mode

4 - 3 安心機能の実現

4.3.1 4駆お知らせ機能

乗用管理機においては重心位置の高さから4輪駆動(4駆、4WD)状態で速い車速から急停止することで後輪が浮く可能性がある。他社機においては最高車速を下げる対応や、取扱説明書および警告ラベルにて作業中以外は2駆にするように注意喚起するなどの対応に留まっていた。しかし、最高車速を下げてと圃場間や公道での移動が遅くなりユーザーの不満が高まるおそれがある。一方で、取扱説明書や警告ラベルでの注意喚起だけでは2駆への変更忘れのリスクが懸念される。また、乗用管理機は比較的安価な製品のため、車体状態を把握するセンサ類は少ないのが現状である。そこでNRでは少ないセンサでユーザーが安心感を得られるような機能の実現を目指した。

まず、4駆状態を検出するため4駆入切レバー部にスイッチセンサを採用し、メータパネルのランプ表示に「4WD」を追加した(図11)。次に、高車速であることを検知する必要があるが、車速センサを追加することはスペース的にもコスト的にも難しい。そのため、ベース機であるNBトラクタで既に搭載されていた副変速「高」の検出スイッチを使用した。副変速

「低」「中」を作業中の変速段、副変速「高」を移動中の変速段とすることで、副変速「高」＝高速走行とみなすことができ、このスイッチを活用できると考えたためである。しかし、既存のギヤの組み合わせで設定した車速では一般的なトラクタが使われる水田での耕うん作業に適した車速(副変速「低」は1.5km/h、副変速「中」は5.2km/h)であった。一方で、野菜の管理作業でよく使われる作業車速は2～3km/hおよび7km/hであった。そこで、副変速のギヤを限られたスペースの中で設計し直し、副変速「低」で3.2km/h、副変速「中」で7.0km/hとした。それにより、副変速「低」および「中」で作業車速を網羅することができ、副変速「高」を検出することで、作業中ではなく、高速走行中と判断することが可能になった。

以上の変更により、「4駆」状態かつ副変速「高」状態を検知した場合にブザーを吹鳴させることを可能にした。さらに、ブザー吹鳴の理由を理解しやすくするためにメータパネルの「4WD」ランプを点滅させることで、オペレータの誤操作を防止できる4駆お知らせ機能を実現した。

4.3.2 ブレーキ連結解除お知らせ機能

乗用管理機において、従来機から片ブレーキ機構が備わっている。片ブレーキ機能は左右で独立したブレーキペダルを備え、片側のみブレーキを効かせて旋回時に小旋回を

行うためや、作業時の車体方向を微修正するための機能であり、作業中には役立つ機能である。一方で、片ブレーキの使用には注意が必要である。特に公道走行などの高速走行

時に意図せず片ブレーキを使用すると、車体の向きが左右に滑る可能性があり、作業時以外は左右のブレーキペダルを連結し、片ブレーキを使用しないように注意する必要がある。従来機や他社機では、この問題に対して取扱説明書や警告ラベルでの注意喚起で対応していた。

一方、トラクタでは連結解除ペダルを備えており、ペダルを踏んでいる間だけ片ブレーキを使用でき、ペダルを離すと自動でブレーキペダルが連結される機能を採用して、オペレータの誤操作防止を図っている。ただし、この操作方法には同じ左足で操作するクラッチペダルと同時に操作できないなどの不便があり、市場から不満の声が上がっている。

そこで、連結解除ペダルの様な、誤操作ができないように防止する機能ではなく、NRでは避けるべき状況(高速走行かつ片ブレーキ操作ができる状況)になったことをブザー吹鳴とランプ(図11)点滅によってオペレータに知らせ、注意を促す方法を採用した。高速走行の検出には、4駆お知らせ機能と同じ副変速「高」の検出スイッチを使用し、ブレーキペダルの連結状態の検出には類似機種スイッチおよび構造を使用した。これにより、新たなセンサの採用は行わず、ベース機の機能を組み合わせることで、コストをかけずにオペレータの誤操作を防止できるブレーキ連結解除お知らせ機能を実現した。

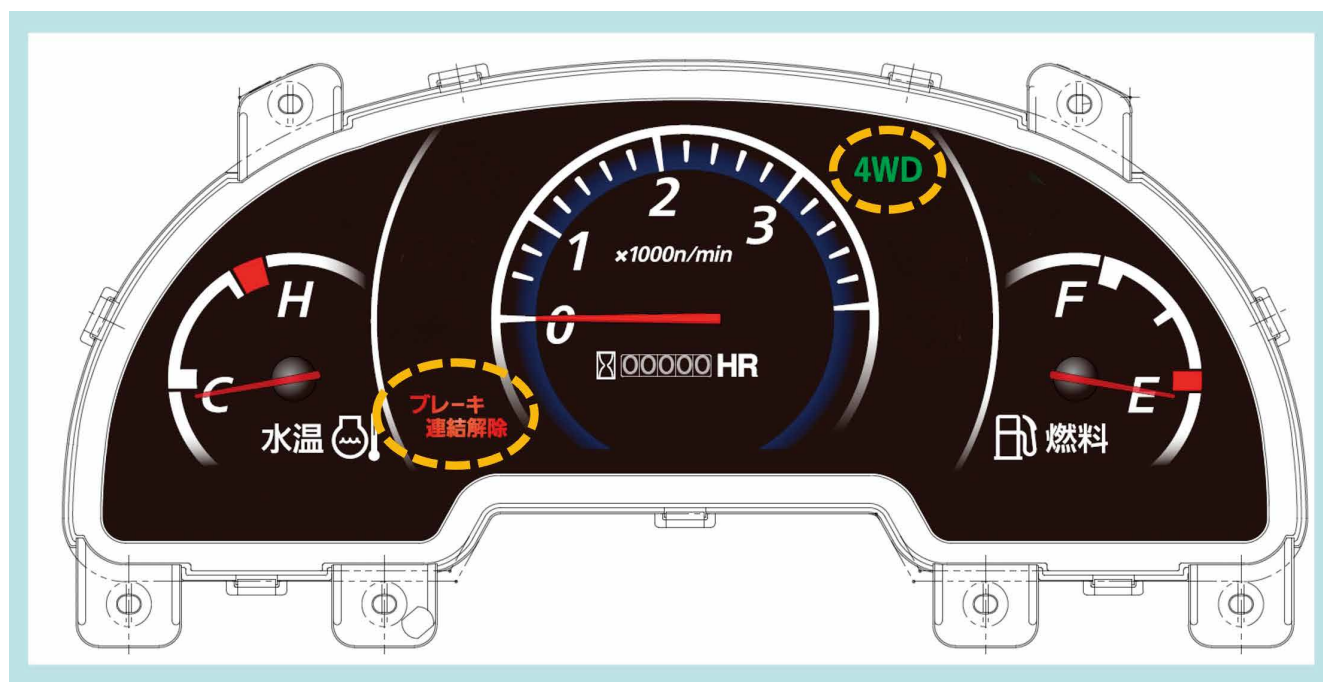


図 11 NRシリーズのメータパネルレイアウト

Fig. 11 NR Series Meter Panel Layout

5. おわりに

本開発機は、他社にはないトラクタベースの畑作向け乗用管理機として2023年に発売を開始した。国内農業を取り巻く環境の変化や農業従事者の減少に伴う効率化の必要性から、NRシリーズは多様な圃場に対応可能な、誰でも安心して使用できる製品として農業の効率化に貢献できると考える。また、中間管理作業の

乗用化を実現できたことで、更なる効率化として自動運転技術を織り込んだ製品の開発も可能となった。

今後は、お客様からの評価や要望をもとに、より使い易い乗用管理機の開発を行うと同時に、効率化・省力化を突き詰めた先の自動化の実現を目指して技術開発を推進していく。

SDGs のターゲットへの貢献

2.4 持続可能かつ強靱な農業の実現 操舵モード切替の効率化により、中間管理作業の省力化に貢献

9.4 環境に配慮した技術・産業プロセスの導入による産業改善 減農薬化により、環境に配慮した技術導入に貢献

12.2 天然資源の持続可能な管理及び効率的な利用 作業の効率化により、燃料消費量の削減に貢献

Development of the RTV-X1130 Long-bed Utility Vehicle

ロングベッドユーティリティビークル RTV-X1130 の開発



○ John White

Kubota Research & Development
North America Corporation
North America Utility Vehicle Team



Michael Anderson

Kubota Research & Development
North America Corporation
North America Utility Vehicle Team



Logan Hayes

Kubota Research & Development
North America Corporation
North America Utility Vehicle Team



Jay Taylor

Kubota Research & Development
North America Corporation
North America Utility Vehicle Team

RTV-X1130 is a derivative model introduced to expand the lineup of the RTV series. This model is directed towards the work-focused customer who wants the larger capacity of a long-bed model. The development concurrently provided several accessories to expand the model's functionality. This model has been well received, and the work-focused customer appreciates the option to purchase a model which caters to their needs. In the first full year of sales RTV-X1130 shipments exceeded original target by more than 30 %.

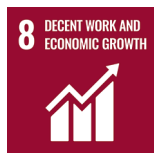
RTV-X1130は、RTVシリーズのラインアップ拡充を目的に導入された派生モデルである。本モデルは、ロングベッドモデルの大型積載容量を求める作業重視の顧客向けに開発された。また、モデルの機能性を拡張する複数のアクセサリーも同時に提供された。本モデルは好評を得ており、作業重視の顧客からニーズに応えるモデル購入の選択肢として高く評価されている。販売開始初年度において、RTV-X1130の出荷台数は当初の計画を30%以上上回った。

【Keyword】

Long-bed Utility Vehicle, Folding Side Gate, Cargo Winch

ロングベッドユーティリティビークル、開閉式サイドゲート、カーゴウインチ

Related SDGs



1. Introduction

At the time of the RTV-X1130 concept investigation, the North American Pure Utility Vehicle market volume was basically static, and the Kubota RTV series held a dominant position in the diesel segment. The RTV-X series was introduced several years prior and the interest in the model line had been decreasing. To reinvigorate the RTV-X series sales RTV-X1130 will be developed to capture customer interest ahead of the next major diesel model change and expand the market offering of the RTV series.

Market surveys prior to RTV-X1130 development indicated some customers were purchasing the current RTV-X1140 to utilize the larger cargo bed configuration only. It was evident that there was an unrealized market for a single-row long-bed RTV. It was determined that a model could be developed to meet the needs of the customer while providing a boost in profitability over the RTV-X1140.

Once the basic strategy was set, it must be decided how



Fig. 1 RTV-X1130

図1 RTV-X1130

to capitalize on the needs of the target market. This was accomplished by adding useful features and functions, while concurrently developing accessories tailored to the usage cases of the customer. This technical report will describe challenges encountered in this development and the solutions that were created to meet them.

2. R&D Concept and Target Value

2-1 R&D Concept

RTV products are used for a wide variety of tasks by customers in various industries. Customers range from small hobby farmers or landowners to large institutions in commercial settings. Kubota RTVs are well known for their durability and capability when used for carrying or pulling heavy loads. The target of the RTV-X1130 development

was to introduce a work-focused RTV to revitalize the pure utility vehicle market and expand the RTV business. This model should offer more working capabilities to the user while maintaining the reputation for durability. The development should also control the investment of manpower and capital to facilitate rapid introduction to the market.

2-2 Target Value

The primary targets of the RTV-X1130 development were:

(1) Introduce a new model to the RTV line-up with enhanced capabilities.

This will attract new customers to the RTV line and generate interest until the next generation of RTV models is introduced. It will expand the capabilities of the RTV platform to capture more market share.

(2) Improve the work capability of the model.

Increasing cargo volume and weight capacity will make it more attractive to users performing heavy work. Adding folding side gates will make it more user friendly and attractive to a larger market. Accessories that leverage the work focus and larger bed will provide additional opportunities to increase profitability.

(3) Respond to the customer who desires additional work functions of a diesel utility vehicle.

The existing diesel RTV provides the customer with a versatile platform, however there are requests for configurations focused on heavy work. The development should provide a solution that does not compromise work capacity while remaining within the performance limits of the existing platforms.

(4) Maintain current platform (RTV-X1140) as much as possible.

The established RTV-X1140 platform has already been developed and passed required durability testing. To reduce development investment of manpower and capital it will be used as the basis for the development. Efforts will be made to maintain the basic parameters of the chassis to prevent issues in development.

3. Technical Challenge to be Solved

3-1 Cargo Bed Sizing, Structure and Integration

Developing a cargo bed large enough to satisfy customer demand was the most important challenge to meet the development values. The current RTV one-row model cargo bed is fairly short, or folds into the passenger area on the two-row model. This compromise leaves a niche to be filled by a large non-folding cargo bed. The existing RTV platform places some limits on the overall size of the cargo bed to be implemented and there are competitor vehicles in the market which can offer some guidance to the development.

The designed structure of the cargo base plate also bears consideration due to the restriction on investment for the project. Without significant tooling investment part forms must be limited and welding configurations require careful consideration. The overall size of welded parts must be controlled as

well due to limitations in the manufacturing facility material handling equipment.

Working with a long cargo bed requires consideration of human interaction during loading and unloading. This leads to the requirement of accessing cargo from the side of the bed which can be facilitated by folding side gates that were not yet developed for the RTV series.

The base vehicle platform for the development was selected to be the RTV-X1140. This platform required the removal of parts related to the cargo bed, rear seat, ROPS, and several rear covers. In addition to integrating the new cargo bed the development had to account for the related parts removed from the chassis. Additionally, the chassis load limits had to be respected to prevent durability issues in the released model.

3-2 Accessory Integration

The larger cargo area and work focus of the project led to consideration of accessory development as well. Accessories that would allow the user to get more work done faster could be key to increasing

the value of the machine. The accessory packages must integrate into the base platform and aid in tasks that the work focused customer would be expected to perform.

4. Developed Technology

4-1 Cargo Base and Structure

4.1.1 Technical Challenge

The most significant consideration for the development was the cargo bed size and configuration. The project could not invest significant capital into tooling or fixtures so the part forms and weld process must respect the capabilities of

4.1.2 Solution of Challenge

Utilizing the maximum space available in the RTV-X1140 chassis footprint after removal of the rear seating would yield a cargo bed just over 5-feet-long (1.5 m). While this is an improvement over the existing models, many longer tools and parts would not be able to lay flat in the cargo bed. Therefore a 6-foot-long (1.8 m) cargo box was realized allowing long or bulky items to fit inside the cargo volume. The progression of the cargo bed size consideration is shown in Fig. 2. The resulting cargo bed volume is 37 % larger than the RTV-X1140 and 72 % larger than the other single-row RTV models. The cargo bed was developed to take advantage of the mass reduction due to the removal of components related to the seat and cargo transformation functions resulting in a 10 % increase in cargo load capacity to 1212 lbs. (550 kg).

Realizing the larger cargo bed required the structure to adopt a ladder-style frame with interlocking joints between the lateral and longitudinal members shown in Fig. 3. Welding was limited to the GMAW (Gas Metal Arc Welding) process due to manufacturing facility capacity and fixturing. The project also decided to keep all of the welding on one side of the cargo component parts to facilitate torch access.

The RTV-X series cargo beds are known to rise without user input if weight is placed on the rear side of the cargo bed due to internal leakage in the lift cylinder control valve. The additional length and capacity of the RTV-X1130 make this tendency more pronounced and requires an additional countermeasure. A mechanical lock underneath the cargo bed (Fig. 4) was added to secure the cargo base to the vehicle frame preventing unintended rising of the cargo bed due to the valve leakage. Analysis and testing of the lock system showed it would withstand repeated abuse while maintaining the ability to perform its intended function without damaging the base vehicle or cargo base.

the current manufacturing processes. The larger cargo bed also required the project to confront the base vehicle tendency to allow the cargo bed to rise unintentionally when loaded on the rear side.

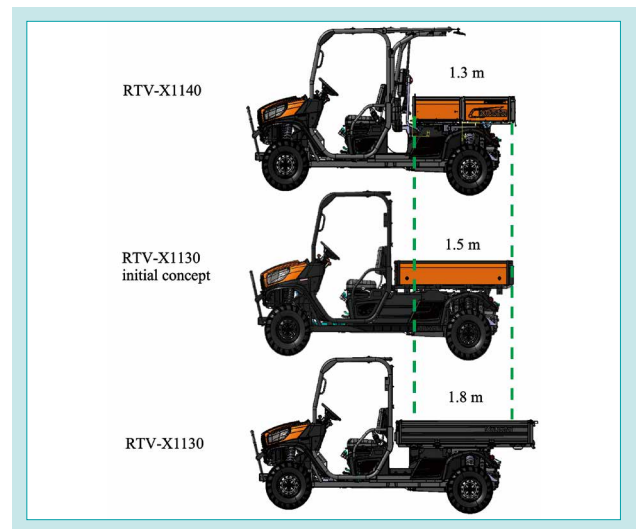


Fig. 2 Cargo Bed Length Development Progression
図 2 荷台長さの開発での進展

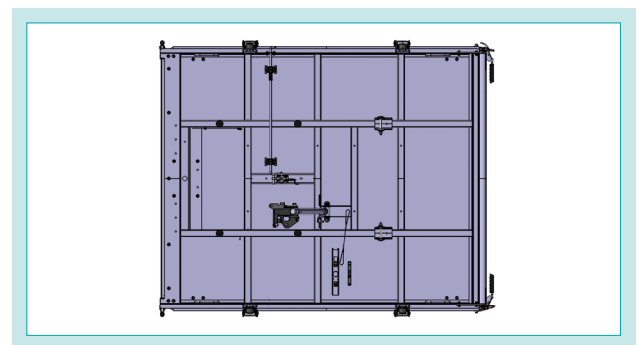


Fig. 3 Cargo Base Frame Ladder Structure
図 3 荷台ベースフレームのラダー構造

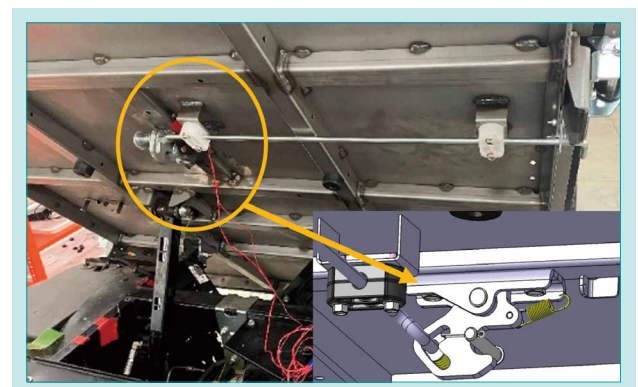


Fig. 4 Cargo Bed Lock
図 4 荷台のロック

4-2 Three-way Folding Cargo System

4.2.1 Technical Challenge

The large size of the cargo bed prevents customers from reaching items loaded in the center of the bed easily. Even with the larger cargo bed some

customers may still want to load oversize items that exceed the cargo bed footprint or side wall height so features should be provided to allow this.

4.2.2 Solution of Challenge

The side gates were designed to fold down as shown in Fig. 5 so customers can easily load/unload items from the larger cargo bed. The current model cargo beds feature a base plate with corrugations to prevent cargo sliding during operation. The side loading option planned for this model required the base plate to be flat so items could be slid easily. Cargo base traction would be provided by a rubberized coating (Line-X) on the base plate.

In order to provide customers additional flexibility in configuring their cargo area, divider slots were integrated to allow division of the cargo space using standard dimensional lumber, as shown in Fig. 6.

There are also stake pockets integrated into the side gates which allow the customer to raise the height of the side gates, Fig. 7, to increase the enclosed volume of the cargo bed using standard dimensional lumber.

The folding side gates and tailgate were developed to be easily removed without the use of tools. The resulting flat-bed configuration (Fig. 8) allows oversized cargo to be placed on the bed and secured with the attached cargo rings.



Fig. 5 Cargo Side Gate Open
図5 荷台サイドゲートを開いた状態



Fig. 6 Cargo Bed Dividers
図6 荷台の仕切り板



Fig. 7 Cargo Raised Stake Sides
図7 荷台積載高アップ用の側板



Fig. 8 Flat Bed Configuration
図8 フラットベッド状態

4-3 Base Vehicle Integration

4.3.1 Technical Challenge

The RTV-X1130 was developed with the RTV-X1140 as a base model. The RTV-X1140 is a two-row model with a cargo bed that converts from a short configuration to a long one by utilizing the rear seat space to expand forward. The rear seat

is covered by the ROPS and serves as a cover for powertrain components located under the seat. With the removal of the rear seat the ROPS and cover functions need to be replaced and integrated into the RTV-X1130.

4.3.2 Solution of Challenge

Throughout the development base chassis modifications were kept to a minimum, so that the development did not impact the durability of the powertrain and chassis components. Fig. 9 shows a high-level distribution of parts used in the development. The removal of the rear seat and step required that the area be covered for aesthetic and user protection purposes. Adding difficulty to this were several competitor patents restricting the layout of the area.

The RTV-X1140 ROPS that covered the area of the back seat and needed to be removed to allow overhead access to the longer cargo bed of RTV-X1130. However, the existing ROPS for single-row models is not strong enough to protect

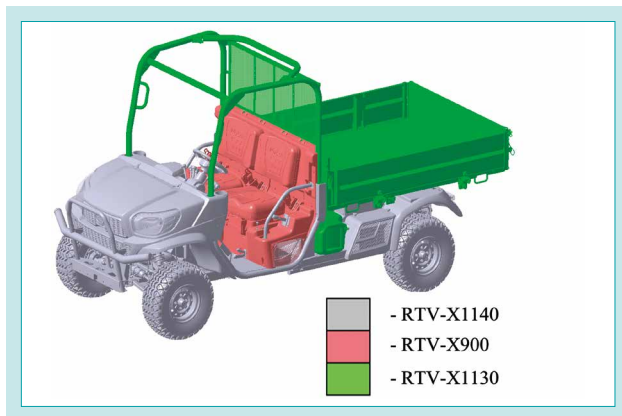


Fig. 9 Development Parts Distribution
図 9 開発部品の区分

4-4 Concurrent Accessory Development

4.4.1 Technical Challenge

Accessory development is a key profit driver for utility vehicles like the RTV series so it was essential to consider what could be developed to provide the target customer with more value in a work-focused unit. The accessories should leverage

4.4.2 Solution of Challenge

4.4.2.1 Cargo winch - Fixing an electric winch inside the cargo bed reduces the effort required by a customer to load heavy items into the cargo bed. Fig. 11 shows the cargo winch in operation with a large tractor tire. The selected winch uses a wireless remote to allow the user to manipulate the item being loaded or stand clear of the vehicle as the situation requires. When adding the cargo winch capability protecting the integrity of the cargo bed and frame was a significant consideration. Readily available winches are rated to pull thousands of pounds which could cause significant damage to the vehicle without some protection. An electronic limiting system was developed to prevent the cargo winch from overloading the vehicle structure by cutting power to

occupants on RTV-X1130, due to the higher curb weight of its long chassis. A new ROPS was developed using main tubing from the RTV-X1140. Additionally, a method was developed to prevent incorrect welding of the lighter single-row model tubing onto an RTV-X1140 or RTV-X1130 ROPS since outwardly the tubing for both types appear identical. The pin shown in Fig. 10 will reject a ROPS that is not intended for the RTV-X1130.

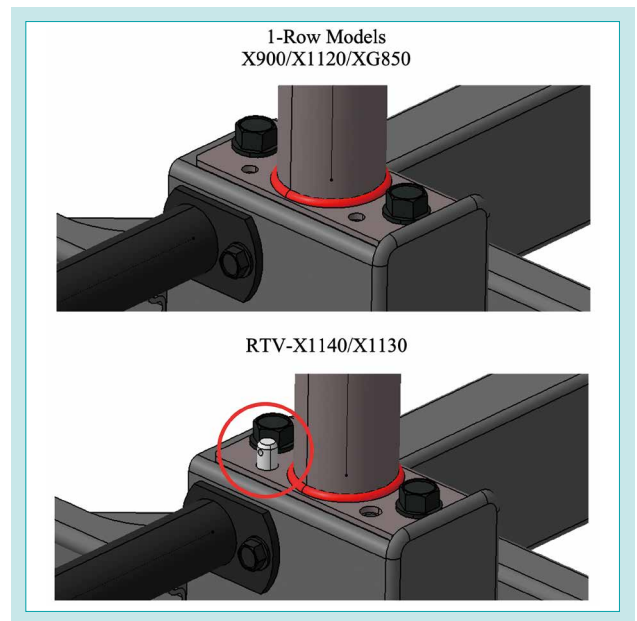


Fig. 10 ROPS Poke-yoke Pin
図 10 ROPS のポカヨケピン

the large cargo bed and available space on the unit to maximize value. They should also maintain the integrity of the base vehicle platform to prevent market issues or increase the development investment.

the winch when cable tension, determined by winch amperage, exceeds a set threshold.



Fig. 11 Cargo bed winch
図 11 荷台用ウインチ (カーゴウインチ)

4.4.2.2 Extended tailgate - The capability to pull items into the cargo bed with the cargo winch accessory led to the development of an extended tailgate accessory. This bridges the gap between the standard open tailgate and the ground when the cargo bed is raised. The resulting ramp lets the customer pull items directly into the cargo bed without requiring them to lift the item onto the tailgate as shown in Fig. 12. The extended gate can be folded down when not in use as a ramp or extended to increase the cargo volume in concert with user installed side panels.



Fig. 12 Cargo Extended Gate
図 12 荷台拡張ゲート

4.4.2.3 Cargo panel and lamp - When working behind the vehicle in low-light conditions it is helpful to have a rear-facing work light attached to the unit. The existing rear work lights for RTVs attach to the ROPS and will fit the RTV-X1130 but are blocked when the cargo bed is raised. The addition of a panel with lights attached (Fig. 13) to the front of the cargo bed alleviated these shortcomings by illuminating the cargo bed and the area behind it when the cargo bed is raised or lowered. The panel also complements side panels installed by the user to increase cargo volume.



Fig. 13 Cargo Panel Lamp
図 13 荷台用パネルランプ

4.4.2.4 Storage box - With the removal of the RTV-X1140 rear seat, unused space was provided under the front of the cargo bed. Lockable storage boxes (Fig. 14) were provided to exploit these spaces giving the user additional locations to store small items and tools.



Fig. 14 Under-bed Storage Box
図 14 荷台下収納ボックス

5. Conclusion

The RTV-X1130 created a Kubota offering into a new market segment for the RTV series. The capabilities and features have been well received by dealers and customers who appreciate the work-focused nature of the machine. Customers who would have purchased the RTV-X1140 solely for the longer cargo bed now have an option that offers more of the capabilities they are looking for.

The development was completed while retaining much of the durability tested and market proven vehicle architecture.

Contribution to SDG Targets

2.3 Increasing agricultural productivity and income

8.2 Improvement in productivity through innovation

This significantly reduced the development time and investment as compared to a full new model development.

In 2024 sales of the RTV-X1130 made a significant contribution to the overall RTV model sales. The sales volume exceeded the original target volume by over 30 %.

After a year in the market the RTV-X1130 cargo system will be updated and applied to a new base vehicle platform. This will incorporate incremental improvements to usability and respond to manufacturing and market request.

Increase in production through improvement in work efficiency
Provide product to the customer by development in market

MBD連携5軸台上設備評価技術の開発

Development of the Evaluation Technology for the 5-axis Powertrain Testbed Following the MBD



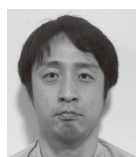
○ 北村 悠貴
Yuki Kitamura
機械研究開発第三部



西 栄治
Eiji Nishi
機械研究開発第三部



速水 敦郎
Atsuro Hayami
機械研究開発第五部



森永 啓太郎
Keitaro Morinaga
機械研究開発第五部

近年、トラクタ市場においてはCVT化をはじめ、高機能化、高速化、低燃費化が求められている。これに伴い、トランスミッション(T/M)の高度化・複雑化に対応するため、T/M性能開発の加速が求められている。本研究では、5軸台上設備(車軸4軸、PTO軸)を導入し、車両運動シミュレーションをダイナモ4軸と連携させることにより、車両走行の台上試験を可能にした。また、PTOダイナモと油圧負荷ユニットを連携させ、作業機への動力・油圧供給による負荷を再現することで、欧州燃費試験を再現する手法を確立した。これにより、開発効率の向上が期待されるとともに、ひいてはクボタのトラクタ性能と市場競争力の向上につながる。

In recent years, in the tractor market, there has been a demand for higher functions, higher speeds, and lower fuel consumption, including the introduction of CVT. In order to cope with the increasing sophistication and complexity of transmissions (T/M), it has become necessary to accelerate the development of T/M performance. In this study, introducing a 5-axis powertrain testbed (4-axle, PTO shaft), the vehicle motion simulation was linked with the 4 axes of the dynamo to enable the bench test of vehicle driving. A method to reproduce the European fuel efficiency test was established through integration with a PTO dynamo and a hydraulic load unit and by recreating the load caused by the power and hydraulic pressure supply to the implement. This is expected to enhance development efficiency, reduce costs, and improve Kubota's tractor performance and market competitiveness.

【キーワード】

トラクタ、パワートレイン、操縦性、燃費、台上試験、MBD

Tractor, Powertrain, Drivability, Fuel Consumption, Bench Test, MBD

関連する SDGs



1. はじめに

近年、トラクタ市場ではCVT(Continuously Variable Transmission:無段変速機)化を含む高機能化、高速化、低燃費化が求められており、特に操作性(ドライバビリティ)に対する要求性能が高まっている。クボタでは、先進国向けトラクタにCVTモデルをラインアップしており、CVT化に代表されるT/M(Transmission:トランスミッション)の高度化・複雑化(図1)の市場要求に対応していく必要がある。



High speed,
High functionality, CVT



Electronic control of
an advanced T/M

図1 高度なT/Mの例

Fig. 1 Example of Advanced T/M

従来開発では、①定常負荷を再現した台上試験での機能確認、②実車試験で電子制御を含めた性能開発、外部施設で燃費試験といった流れで開発しており、性能開発は、実車試験に依存している。実車試験は、地域や季節、路面状態、人間の操作の再現性の限界がある。また、急勾配の長い坂道でのトレーラ牽引による追廻しといった極限試験は安全上の理由から実施が難しく、試験場所の確保も課題である。従来のクボタ製品は長年の開発経験に

基づき開発しており、試験方法や試験場所も確立している。

しかし、市場要求にあるようなCVTトラクタでは、過去の開発経験に乏しく、従来開発では、性能開発が長期化しており、開発効率を向上するためには、新しい開発プロセスが必要である。そこで、5軸台上設備を導入し、トラクタの走行状態及び燃費性能の台上評価技術の確立に取り組んだ。

2. 開発のコンセプトと目標値

2-1 開発のコンセプト

以下の点を開発コンセプトとした。

- (1) T/M単体、試作機の各開発段階で、トラクタの動的な作業負荷を再現した台上試験を可能とする。
- (2) 台上試験を自動化することで、効率化と試験の再現性向上を図る。

- (3) 燃費性能試験を可能とし、代表的な燃費性能試験である欧州の公的機関による圃場作業を模擬した燃費性能試験(DLG-PowerMix: 以下「DLG燃費試験」という。)を再現する。

2-2 目標値

- (1) 台上試験での走行状態の再現精度向上
トラクタの走行状態における4輪の動的な負荷を再現する。評価方法としては、操作の応答時間や加速度波形をもとに操縦性を定量評価(点数化)する手法を導入し、実車試験に対する加速度波形の総合的な誤差10%以内とする。
- (2) 繰り返し試験の効率化及び再現性向上
試験の自動化により、24時間運転及び繰り返し同じ試験パターンを実行可能とする。

- (3) 燃費性能試験
前述の台上設備で、DLG燃費試験で定められた圃場作業を模擬した負荷をトラクタに与え、社内でDLG燃費試験の事前検証を可能とする。

3. 解決すべき技術課題

T/M高度化・複雑化に対応するためには、T/Mの性能開発を早期化し、性能開発期間をより長く確保する必要がある。T/M開発では、T/M単体の台上試験で機能確認を行い、実車試験で性能検証を行うが、下記の課題がある。

(1) 台上試験での走行状態の再現

従来のT/M試験装置(図2左)は定常状態の負荷を与えるための設備であり、動的な走行状態を再現できない。このため、電子制御を含む性能開発は実車試験に依存せざるを得ず、機械的な対策が必要な場合には手戻り工数が多くなる問題がある。また、急勾配の長い坂道など特殊な地形での危険な極限試験(図2右)は安全上の理由から実施が難しく、試験場所の確保も課題となる。例えば、30 tのトレーラ牽引作業中に急勾配の下り坂で過加速状態に陥った際に急ブレーキを行い、安全に停車するような制御の試験である。

(2) 繰り返し試験の再現性向上

地域性や季節性のある現地試験(図2右)は、期間的な制限や天候不順などで延期されるリスクがある。また、路面状態や人間の操作の再現の限界から、不具合の再現が難しい場合がある。



図2 従来手法による開発
Fig. 2 Development by Conventional Technology

(3) 燃費性能の事前検証

代表的な燃費性能試験として、DLG燃費試験(図3)があるが、社内で事前検証ができないため、欧州の公的機関で試験することになるが、目標性能達成まで繰り返し受験するのは期間及び費用面で非効率である。よって、開発日程上、開発に使用中の試作機での受験は難しく、燃費性能試験は開発後期となるため、燃費性能向上が必要な場合の手戻り工数が多くなる問題がある。



図 3 欧州燃費試験 (DLG 燃費試験) ^{1) 2)}

Fig. 3 European Fuel Consumption Test (DLG-PowerMix Cycles) ^{1) 2)}

4. 開発技術

4-1 走行状態の台上評価技術

4.1.1 走行状態の台上評価技術の課題

従来のT/M試験用の台上設備は、動的な走行状態を再現できないため、電子制御を含めた走行性能の開発は、実車試験でしかできない。一方で、自動車業界では、車両運動シミュレーションと連携して、試験車両(乗用車)の実路走行状態を再現する台上設備を用いている³⁾⁴⁾。しかし、トラクタと乗用

車では、馬力帯や作業車速域が異なる、かつ、4輪に加えて、PTO(Power Take-off:動力取り出し装置)軸及び油圧の負荷が必要なため、乗用車用の台上設備をそのまま適用することはできない。よって、トラクタに適した設備及び設備制御の構築が必要である。

4.1.2 走行状態の台上評価技術の解決策

設備面では、クボタのトラクタ製品の主要な馬力帯である60から200馬力クラスまでのトラクタに対応したサイズ、かつ、きわめて速いトルク制御速度を持つダイナモ5軸(4輪、PTO軸)、作業機への油圧供給による負荷を再現する油圧負荷装置により、作業負荷を再現可能とした(図4)。

制御面では、MBD(Model Based Development:モデルベース開発)用の車両運動シミュレーション(車両、タイヤ、インプル、走行コースで構成)(図5)により、作業・傾斜から受ける車軸トルクを計算し、ダイナモで車軸に実際にトルクを与えることで、走行状態を再現した。

MBDとは、制御ソフトおよび車両(油圧機器、タイヤ等)をモデルで記述し、車両の動作をシミュレーションで再現し、制御

ソフトの検証やチューニングを実車試験前に実施する開発手法であり、図6は、PCシミュレーションを用いたMBD環境の例である。5軸台上設備では、制御PCで車両運動シミュレーションを行う。車両運動シミュレーションは、車両モデルを用いて、地面と車両の間の力を計算し、車両の運動方程式($ma = F$)を計算することで、車両の挙動を模擬する仕組みである。

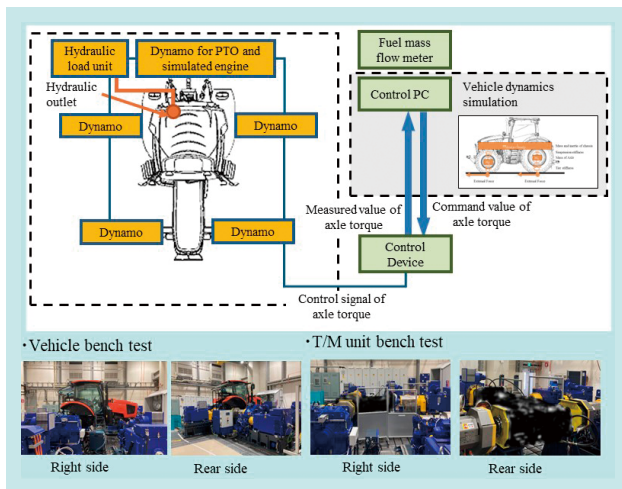


図 4 5 軸台上設備の構成

Fig. 4 Structure of the 5-axis Powertrain Testbed

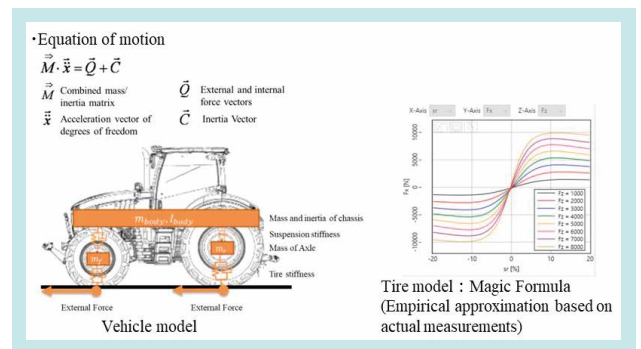


図 5 車両運動シミュレーション

Fig. 5 Vehicle Dynamics Simulation

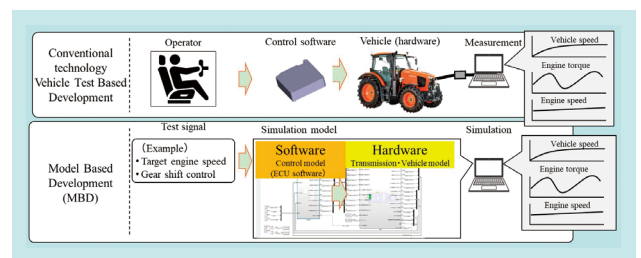


図 6 モデルベース開発

Fig. 6 Model-based Development

人間の操作の再現性には限界があるため、設備側から、アクセルや変速操作を遠隔操作可能(図7左)としており、オペレータの運転操作を模擬する自動テストシーケンス(図7右)を作成し、台上試験を自動化することで、効率化と試験の再現性向上を実現した。

評価手法としては、台上試験では、操縦性の感応評価はできないため、自動車業界で実績のある操作の応答時間や車両の加速度波形をもとに操縦性を定量評価(点数化)する手法を導入した。自動車の操縦性評価手法(試験、アルゴリズム)は、機構や作業の違いにより、トラクタには、そのまま適用はできないため、社内の開発知見から、トラクタの操縦性評価に用いる実車試験項目を策定し、現行機と台上評価機を比較することで、操縦性を相対評価する手法を確立した。

最後に、M6-142トラクタ単体及びトラクタ牽引状態(図8左上)での実車及び台上試験にて、走行試験(図8右上)を行

い、台上試験での実車走行の再現性を検証し、精度よく再現できることを確認した。例として、図8下側に前進から後進に切り替えたときの結果を示す。台上設備と連携する車両運動シミュレーションで算出した車体の加速度変化、車両の内部状態(車速、エンジン回転数及び負荷率)及び操縦性評価を精度よく実現できている。

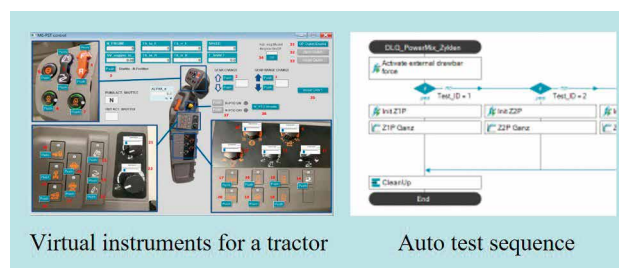


図 7 遠隔操作機能及びテスト自動化
Fig. 7 Remote Control Function and Test Automation

Test Items

Type	Operation	Vehicle Condition	
		Without a Trailer	With a Trailer
Drivability Test	Coast Down	Tested	Tested
	Shutting Forward and Reverse	Tested	Not Tested *1
	Drive Away	Tested	Tested
	Vehicle Stop	Tested	Tested
	Manual Shift	Tested	Tested
	Auto Shift	Tested	Tested
Extreme Test	Drive Away on the Uphill	Tested	Tested
	Drive Away on the Downhill	Tested	Tested
	Shutting Forward and Reverse on the Uphill	Tested	Not Tested *1
	Flat into the Uphill	Tested	Tested
	Flat into the Downhill	Tested	Tested
Fuel Consumption Test	DLG-PowerMixcycles	Not Tested *2	Not Tested *2

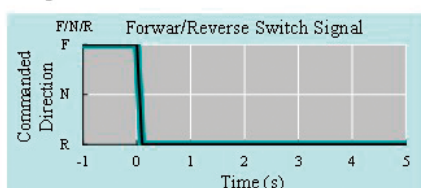
*1 This operation is not performed in practical use and is therefore not included in the test.

*2 This is a bench test conducted based on a test pattern established by the certification body, so no actual vehicle measurements were taken.

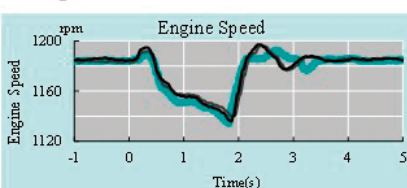
Example of Comparison Between the Actual Vehicle and the Bench Test:

Shuttling Between Forward and Backward

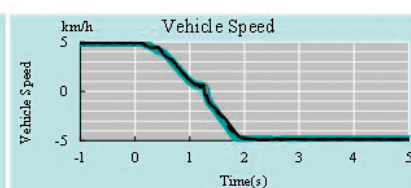
Operation



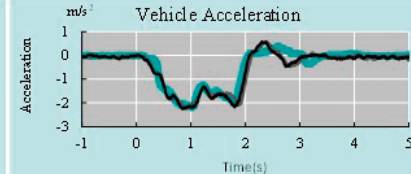
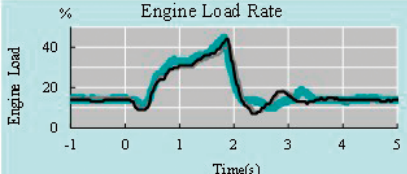
Engine State



Vehicle Behavior



- Black Solid Line : 1st Result of Vehicle Test
- Dark Gray Solid Line : 2nd Result of Vehicle Test
- Blue-green Solid Line : 1st Result of Bench Test
- Light Blue-green Solid Line : 2nd Result of Bench Test



Rating of Drivability

	Vehicle	Bench	Difference
Rating	8.4	8.3	-0.1

Test Tack



Test Vehicle

- Vehicle with a Trailer



- Vehicle without a Trailer



図 8 実車と台上試験の比較⁵⁾

Fig. 8 Comparison Between the Actual Vehicle and the Bench Test⁵⁾

4-2 燃費性能の台上評価技術

4.2.1 燃費性能の台上評価技術の課題

DLG燃費試験では、プラウ(耕起)やベアー(集草及び梱包)といった作業機の負荷として、牽引負荷、PTO負荷、油圧負荷の組み合わせが時系列波形のパターンとして定められ

ている。よって、DLG燃費試験の試験パターンを精度よく5軸台上設備で再現する必要がある。

4.2.2 燃費性能の台上評価技術の解決策

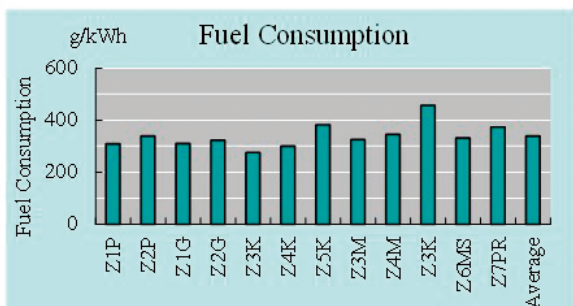
前述の走行状態を再現する手法を用いて、DLG燃費試験の負荷波形を車両運動シミュレーション(4輪のダイナモ4軸)、PTO軸のダイナモ、油圧負荷装置で精度よく再現し、燃料計で燃料消費量を計測することで、DLG燃費試験を再現した。これにより、社内でのDLG燃費試験相当の事前検証が可能

となった。例として、図9にDLG燃費試験の牽引負荷、PTO負荷、油圧負荷を含むマニユアスプレッダ(施肥)作業相当の試験パターンの実施結果を示す。DLG燃費試験で定められた負荷波形を台上試験で再現し、トラクタに作業負荷を与えることが可能となっている。

DLG-PowerMix Cycles

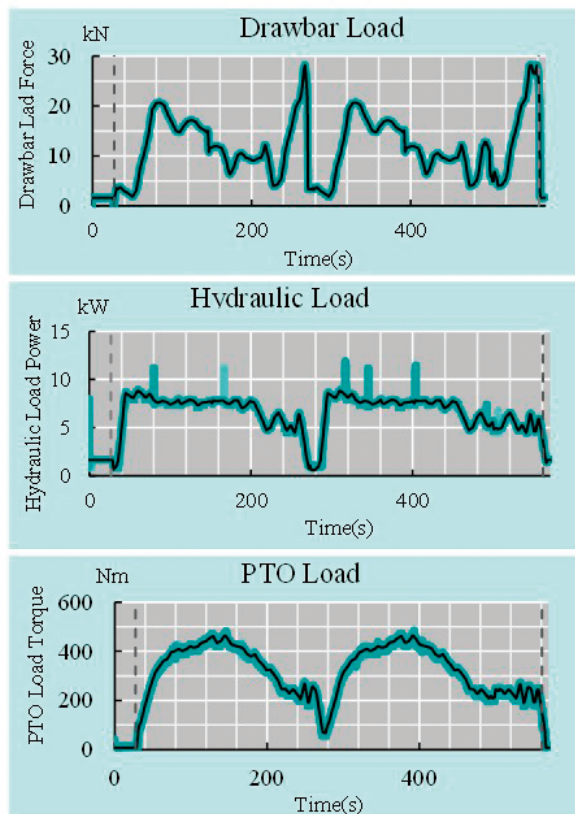
Load Type	Assumed work	Load	Cycle Name
Drawbar work	Ploughing	100%	Z1P
		60%	Z2P
	Cultivator	100%	Z1G
		60%	Z2G
Drawbar work + PTO work	Power harrow	100%	Z3K
		70%	Z4K
		40%	Z5K
	Mowing	100%	Z3M
		70%	Z4M
Drawbar work + PTO work + Hydraulic work	Manure Spreading	100%	Z6MS
	Balling	100%	Z7PR

Test Result: 12 cycles



Load Reproduction Example: Z6MS

→Equivalent of manure spreader (fertilizer application) works



■ Black solid line : Target Load
 ■ Blue-Green solid line : 1st Result
 ■ Light Blue-Green solid line : 2nd Result
 --- Dark Gray vertical dotted line: Scope of DLG-PowerMix Cycle

図9 燃費性能試験 Z6MS の例 (牽引 + PTO + 油圧作業による施肥を想定した試験) ¹⁾

Fig. 9 Example of the DLG-PowerMix Cycles of the Z6MS

(The Test Cycle Assumed Manure Spreading with Drawbar + PTO + Hydraulic Work) ¹⁾

5. おわりに

日本で初めて※、トラクタの作業状態を再現する5軸(車軸4軸、PTO軸)のダイナモ、油圧負荷装置で構成される5軸台上設備を導入し、車両運動シミュレーションとの連携により、クボタのトラクタの走行状態を精度よく再現可能とし、トラクタの実作業を模擬する台上評価技術確立した。これにより、T/M単体試験の段階から、電子制御を含めた安全性評価や変速性能等の網羅性の高い性能検証を行うことが可能となった(図10)。急勾配の坂道のような地形を仮想的に設定することで、現地試験の依存度の低減や実車では安全上の理由から実施が難しい極限試験が可能である。また、DLG燃費試験の社内での事前検証が可能であり、走行性能と燃費性能を並行開発が可能となった。これらより、T/Mの高度化・複雑化の市場要求への対応を可能とした。

※クボタ調べ

今後は、適用製品の拡大として、ハードウェア上対応可能な60から200馬力帯のトラクタへの適用を進め、クボタの主要な製品への対応を進める。

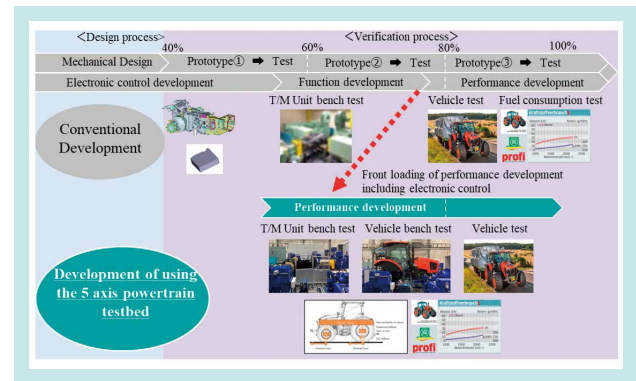


図 10 T/M 開発の前倒し²⁾

Fig. 10 Front Loading of Development of T/M²⁾

SDGs のターゲットへの貢献

2.4 持続可能かつ強靱な農業の実現 高性能な農業機械の開発効率向上により、農作業の効率化に貢献

7.3 エネルギー効率の改善 農業機械の燃費性能向上を促進

9.5 科学研究、イノベーションの促進 農業機械用T/Mの高度化・高機能化を促進

参考文献

- 1) Mastrogiovanni, Stefano: S_Mastrogiovanni_DLГ.pdf
https://www.enama.it/userfiles/PaginaSezione/files/S_Mastrogiovanni_DLГ.pdf, (参照日 2020-04-08)
- 2) DLG.org: 0617_Kubota_M7151.pdf
https://pruefberichte.dlg.org/filestorage/0617_Kubota_M7151.pdf, (参照日 2025-01-29閲覧)
- 3) 安部正人: 自動車の運動と制御 第2版—車両運動力学の理論形成と応用、(2012)、東京電機大学出版局
- 4) 茄子川 捷久: 自動車の走行性能と試験法、(2008)、東京電機大学出版局
- 5) 国土地理院: 国土地理院撮影の空中写真(2022年撮影)
<https://service.gsi.go.jp/map-photos/app/map?search=photo>, (参照日 2023-04-13閲覧)

キャビンエアコン快適性向上技術の開発

Development of Technology to Improve the Comfort of Cabin Air Conditioning



○ 高山 佳子
Yoshiko Takayama
解析センター



大門 伸輝
Nobuki Daimon
解析センター



前川 晃慶
Akiyoshi Maekawa
解析センター

本研究では、農業機械のキャビン内の温熱快適性を向上させる技術を開発した。農業従事者の減少に伴い、作業者の負担が増加している現状を踏まえ、キャビン内の快適性の向上が必要である。そこで、快適感を特定・予測し、効率的に向上させることを目指した。具体的には、SET*指標を用いて快適範囲を特定し、解析技術を駆使してキャビン内の熱収支を計算し、快適性を予測する技術を構築した。さらに、人間工学に基づいたエアコンダクトを提案し、快適性と省エネの両立を実現した。これにより、農作業の生産性の向上と、CO₂排出量を削減し、環境負荷低減に貢献することが期待される。

This study developed a technology to improve thermal comfort within the cabins of agricultural machinery. Given the current situation where the number of agricultural workers is decreasing and the burden on operators is increasing, enhancing cabin comfort is essential. Therefore, we aimed to identify and predict comfort levels and improve them efficiently. Specifically, we used the SET* index to determine the comfort range and employed analytical techniques to calculate the thermal balance within the cabin and predict comfort levels. Additionally, we proposed ergonomically designed air conditioning ducts to achieve a balance between comfort and energy efficiency. This is expected to contribute to increased productivity in agricultural work and a reduction in CO₂ emissions, thereby lessening the environmental impact.

【キーワード】

流体解析、温熱快適性、カーボンニュートラル、トラクタ、コンバイン

Fluid Analysis, Thermal Comfort, Carbon Neutrality, Tractor, Combine

関連する SDGs



1. はじめに

農業従事者は減少しており、農地の集約化に伴って担い手農家の耕地面積が増加している(図1¹⁾)。これにより、1人当たりの作業時間も増加しており、今後も従事者の減少が予測される中で、農業生産の維持には作業者の負担が増加することが懸念されている。

特に、温暖化の進行する中で、農業現場における高温環境はますます深刻な問題となっている。農機のキャビンは視界性を確保するために大きなガラスで囲まれており(図2)、日差しによって内部が高温になりやすい。高温環境は作業効率の低下や健康リスクを引き起こす恐れがあり、作業者の負担軽減にはキャビン

内の温熱快適性の向上が不可欠である。さらに、温暖化の影響で気温が上昇することが予想されるため、快適な作業環境を維持することはますます重要な課題となっている。一方で、カーボンニュートラルの観点からは過度な冷却は燃料消費を伴うため、最適な冷却が求められている。

クボタグループは「農業の生産性向上」と「カーボンニュートラ

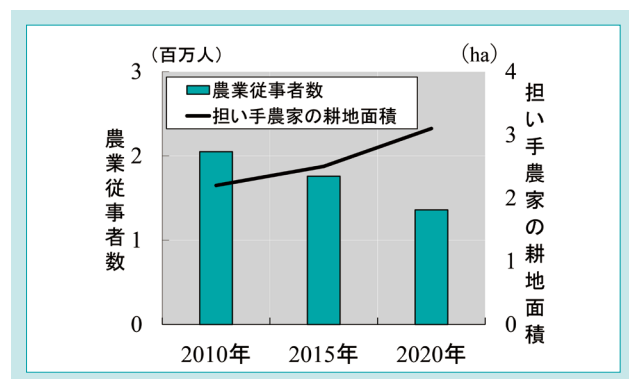


図1 農業従事者数と担い手農家当たりの耕地面積の推移
Fig. 1 Number of Agricultural Workers and Cultivated Area per Core Farmer in Japan

ルでレジリエントな社会の実現」という社会課題の解決を目指している。解析センターでは、キャビンエアコン（以下「A/C」という。）の開発において温熱快適性を向上させることで、農業現場における温暖化の影響を軽減し、作業者の負担軽減を目指している。この取り組みは、農業の持続可能性を高めるとともに、温暖化に対する効果的な対策として重要である。



図2 大きなガラスを通る日光
Fig. 2 Sunlight Passing Through Large Glass

2. 開発のコンセプトと目標

これまでキャビンA/Cの快適さは、試作機を使って実際にA/Cを稼働させ、風速や温度が基準値を満たしているかで判断していた。しかし、この方法で開発された製品のユーザヒアリングで「暑い」という意見が出るがあった。こうしたことが起こる背景には二つの問題があった。

一つ目は、従来は風速や温度等の物理的指標の評価に留まり、人の感覚である「快適感」を評価できていなかったことである。

二つ目は試作機を用いての評価では、開発プロセスの後半に実施するため、ほかの性能や設計制約とのバランスから、抜本的に快適性を向上させることが難しかったことである。

そこで、設計自由度の高い試作前にキャビンA/Cを設計・評価できる技術を開発することで、快適で省エネルギーなA/Cを搭載したキャビンを市場に提供することを、本研究の目標とする。

3. 解決すべき技術課題

前述の問題を解決し、目標を達成するために必要な技術課題は以下のとおりである。

(1) 人の快適感を特定する技術

人の「快適感」を評価するためには、キャビン内の環境を精度良く計測できるようにした上で、人がどのような環境を快適と認識するかを特定することが必要である。

(2) 人の快適感を予測する技術

設計段階では試作機がないため、試験による評価はできない。そのため、作業時のキャビン内環境を精度良く予測することと、その環境下で人が感じる快適感を予測できるようにする必要がある。

(3) 人の快適感を効率的に向上させる技術

快適感を上げるために冷房能力を上げると燃料の消費量が多くなる。そのため、冷房能力はそのまま、もしくは下げながら快適感を向上させる技術が必要である。

4. 開発技術

4-1 人の快適感を特定する技術

4.1.1 快適性の定義と評価指標

人間工学の分野では、暑すぎず寒すぎない状態を快適と定義している。人の暑さや寒さの感覚である温冷感は、非常に寒いを-3、非常に暑いを+3とした7段階の温度スケール

を用いて評価する。温冷感が-1から+1の範囲が快適となる。快適感を評価するためには、どのような環境がユーザにとって快適なのかを明らかにする必要がある。

温冷感は、人周囲の気温や風速に加えて、輻射や湿度に

よって左右される。建築や自動車業界ではこれらを統一したSET*という指標²⁾を用いて、人が快適と感じるSET*の範囲を定義している。しかし、農業機械は建築物や自動車と構造や使用状況に違いがある。例えば、農業機械は視界性を確保するためにガラスが大きく、日射の影響を受けやすい。また、

農業機械の乗車中は長時間の作業を伴うため、ユーザが求める快適感が異なる可能性もある。これらの理由から快適範囲は異なると考えられるが、これまで農業機械の快適感を評価する指標はなかった。

4.1.2 トラクタにおける快適性評価指標の特定

そこで、(1)トラクタ乗車時の温冷感と、その時の(2)周囲環境のSET*を計測し、2つを紐付けることで農業機械の快適なSET*の範囲を特定することにした。具体的には、図3のように縦軸を温冷感、横軸をSET*としたマップ上に取得した値をプロットし、線形近似することでトラクタの温冷感と環境の測定値を対応させた関係式を作ることを試みた。この関係式を用いれば、温冷感±1の範囲のSET*が推定でき、その環境が快適と感じられるかを評価できる。

(1)温冷感の取得方法

温冷感は、温度スケールで数値化して回答するアンケート³⁾で取得した。ここで、温冷感の感じ方には個人差のほか、年齢や体格などの人の属性によるばらつきが懸念された。今回は農作業を想定して快適範囲を特定するため、被験者は日本の農業従事者の50%を占める50～60歳の平均BMIの男性に絞った。また、8人以上の計測を実施することで有意差を得られるようにした。

(2)SET*の計測方法

キャビン内の上部はA/Cダクトからの風で涼しく、下部はトランスミッションなどの影響で暑くなるため、人周囲のSET*の値は分布する。この分布を精緻に測定するためには、被験者の作業姿勢に合わせて多点にセンサを配置することが必要だった。そこで、気温、風速、輻射熱、湿度センサを計128点搭載したセンサマネキンを用いて計測を行うことで、一度に多点計測を可能にした(図4)。温冷感の取得とSET*の計測はいずれも、環境再現性の高い恒温試験室を用いることで、試験環境を統一した。

得られた関係式から、ユーザが快適と感じるトラクタキャビンのSET*が特定できた。このSET*の範囲は、予想通り自動車や建築物とは異なっていた。

以上の取り組みにより、どのような環境がユーザにとって快適なのかを明らかにし、快適感の評価を可能にした。

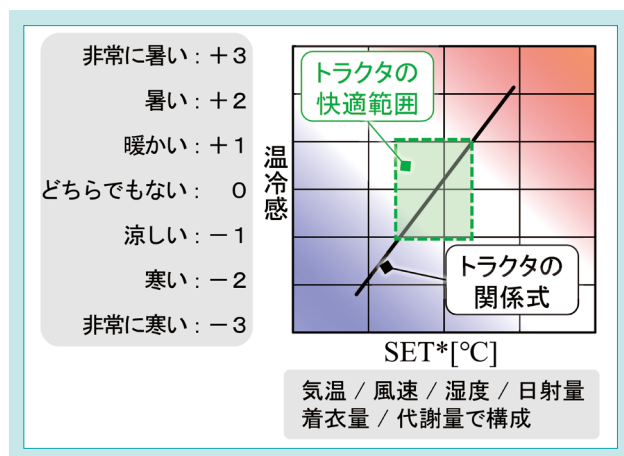


図3 温冷感-SET* マップ
Fig. 3 Thermal Sensation-SET* Map

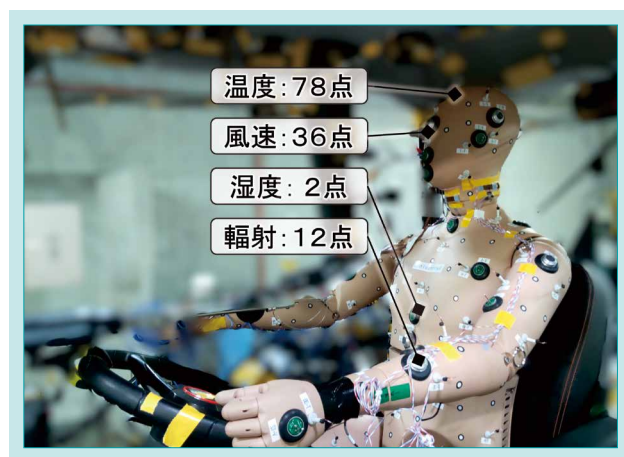


図4 センサマネキン
Fig. 4 Sensor Mannequin

4-2 人の快適感を予測する技術

4.2.1 設計活用のための快適感解析手法の構築

4-1で述べた温冷感とSET*の関係式を用いれば快適感の評価が可能になった。SET*の計測には実機が必要である。しかし、実機の試作後では設計変更の自由度が少なく抜本的な向上策を取れないという問題があった。そこで、解析でSET*を取得する方法を構築することにした。

4.2.2 キャビン内熱収支解析

快適感を評価するために、解析ではSET*を導出する必要がある。ここで、SET*の構成要素である気温や風速はキャビンの熱収支に基づいて決まる。よって、これを解析で正確に表現しなければならない。キャビン内の空気は日射やエンジン排熱によって温まり、A/Cユニットの冷風によって冷

却される(図5)。キャビンの熱収支を解く上では、これらすべての熱源を正確に表現することが求められる。さらに、これまで解析で考慮できていなかった人体の放熱についても加味しなければならない。そこで、(1)キャビン内の熱流体解析と、(2)人体の放熱解析を組み合わせることでキャビン内の熱収支を計算し、そこからSET*を導出し、そのSET*が快適範囲内かを予測する技術を構築することを試みた。

(1)キャビン内の熱流体解析

キャビン内の空気を温める、もしくは冷ます熱源は、3つの解析手法を用いて解く。一つ目の太陽の日射解析では、ルーフに差す日射と、ガラスから入る日射による熱の移動を表現した。二つ目のボンネットの排熱風解析では、ボンネット内部でエンジン等を発熱させてボンネット内部の空気を温める。さらにファンを回転させて、排熱風を表現した。排熱風がキャビンに当たることにより、キャビン内の空気温度は上昇する。三つ目のA/Cによる冷却解析では、A/Cユニット内の流れを再現し、ダクトを通して人周囲に吹く風を表現した。

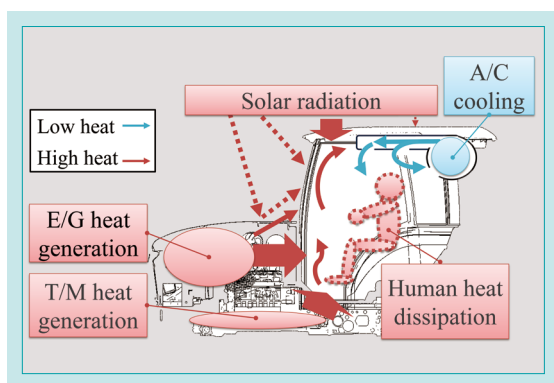


図5 人体とキャビンの熱収支

Fig. 5 Heat Balance of the Human Body and Cabin

(2)人体放熱解析

体内で発生した熱は血液循環によって全身に運ばれ、血管を通じて骨、筋肉、脂肪、皮膚を経由して放熱される。この放熱される熱を解析で求めるために、新たに人体内部の熱移動を予測することが可能な人体熱モデル⁴⁾を導入した。このモデルでは、基礎代謝量や着衣量を設定して全身の体温調節を計算できるようになった。特に、着衣量は実際の着衣に合わせて計測することで、より実際の状況に即した放熱を再現することが可能となった。これにより、人の発熱で暖まるキャビンをより正確に表現できるようになった。

(1)(2)の解析手法を組み合わせることで、キャビン全体の熱収支を表現できた。解析精度を確かめるために、被験者試験で温冷感が異なることが分かっている、暑い環境と、涼しい環境で、解析を行った結果を図6に示す。実測と解析の差は非常に小さく、解析により高精度で温冷感を求められることが示された。

以上の取り組みにより、解析を用いることで、試作機がない設計段階で人が感じる快適感を評価できるようになった。

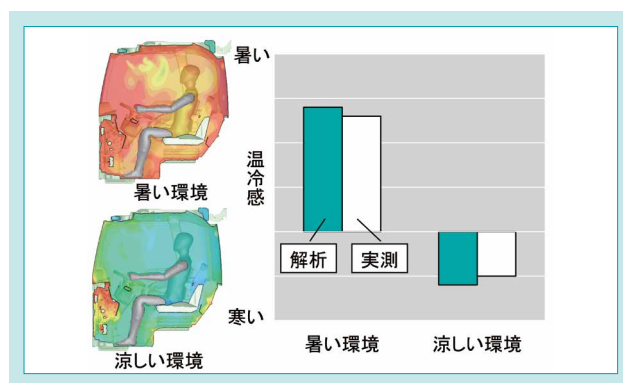


図6 快適感の予測精度

Fig. 6 Prediction Accuracy of Comfort

4-3 人の快適感を効率よく向上させる技術

4.3.1 省エネ性能に配慮した快適感向上策の必要性

快適感向上のために冷房能力を上げると燃費は悪化する。カーボンニュートラルの観点から、冷房能力を上げずに快適感を向上させる方法を検討した。

4.3.2 向上策の寄与分析

キャビン内が暑い場合、快適性を向上させる方法として、(1)人を直接的に冷却する方法と、(2)キャビン経由で人に伝わる熱を低減することにより人を間接的に冷却する方法の、2つのアプローチがあるが、どれが最も効果的かを検証した

事例はなかった。

そこで、これらの策の快適感への寄与度を分析することにした。寄与度は図3で示した温冷感とSET*のマップを利用した。

(1)人の直接的な冷却

人の冷却は、血流温度を下げることで全身の冷却効果を得られることが人間工学的に示されている⁵⁾。この知見から、皮膚が薄く、太い血管である動脈が通った部位では、より血流温度を下げやすいと考えた。これに基づき、首、顔、脇をA/Cダクトで冷却する被験者試験を実施した。結果、涼しくて快適と回答した人数は首、脇、顔の順で

多く、「首の冷却」が最も効果的であることを確認した。

(2)キャビン経由で人に伝わる熱の低減

キャビンを通じて人に伝わる熱の低減には、断熱と遮熱の二つのアプローチがある。断熱は断熱材などを用いて、熱の移動を防ぎ、内部の温度を維持する対策である。遮熱は主に赤外線を反射する遮熱材などを用いて、外部からの熱の侵入を防ぎ、内部を涼しく保つ対策である。それぞれの効果を確認するために、冷房能力は同一のまま各策を施したキャビンで被験者試験を実施した。

結果を図7に示す。先述したマップの左下に位置するほど冷却効果が高いことを示しており、人の直接的な冷却、遮熱、断熱の順で冷却効果が高いことが確認できた。

以上の取り組みにより、冷房能力はそのまま快適感を向上させることができるようになった。

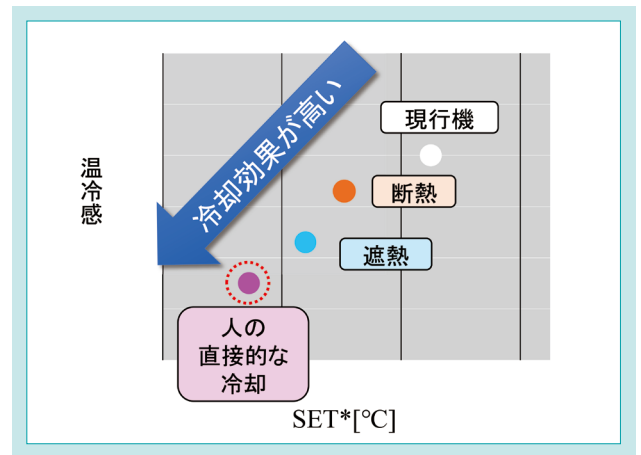


図 7 快適感向上策

Fig. 7 Measures to Improve Comfort Sensory Tests

4 - 4 開発技術の成果

4.4.1 製品への適用

4-1から4-3で開発した3つの技術をトラクタに適用して、快適性の高いキャビンを開発した事例を示す。

4.4.2 首部冷却を狙ったA/Cダクト形状の検討

現行機は吹き出し口がインナールーフに埋め込まれるように設計されている。この設計によりA/Cがキャビン全体を冷却できるようになっている。一方で、先に述べたように、全身をまんべんなく冷却するよりも首を局所的に冷却する方が、人は涼しさを感じやすいことが分かった。そのため、ユーザの首を直接冷却できるようなA/Cダクト形状を検討した。まず、ダクト経路を変更して、首に風が当たる位置に吹き出し口を配置した(図8)。ここで、A/Cの吹き出し口は複数あり、単純に首付近に吹き出し口を配置しただけでは、吹き出し風量が足りず、十分な冷却効果が得られない可能性があった。そこで、首を狙う吹き出し口に十分な風量が流入するように、ダクト内の形状を変更した。解析した結果、酷暑環境では、改良前ダクトの快適感是不快であったのに対し、改良した開発ダクトは快適となることが予測できた。

このA/Cダクトの快適感は、図3に示す温冷感-SET*マップを用いて評価する。しかし、製品毎にマップを準備するには数ヶ月の被験者試験が必要なため現実的でない。この問題を解決するために、自己発熱して人の放熱が表現でき、温冷感を数値化できるサーマルマネキンを用いることにした。これにより、数日で製品毎のマップを作成でき、被験者試験に先立ってダクトの評価を行った結果、本ダクトを用いることで快適性が不快から快適になることが予測できた。

4.4.3 省エネ性能の検討

最も人が涼しく感じやすい首の冷却を実施することにより、より少ないA/C風量や高い風温でも、体全体を冷却した場合と同じ快適感を得られる可能性がある。そこで、トラクタのA/C風量や風温を変化させた際の燃費噴射量の計測を行った。結果、実現場での作業ではA/Cの送風量を40%減らした場合には、燃料噴射量を2.8%改善できることが分かった(表1)。

このことから、首を局所的に冷却できるA/Cダクトを用いれば、より少ない燃料消費で、快適感を維持もしくは向上させることが示唆された。

4.4.4 酷暑環境における開発ダクトの効果検証

開発ダクトの効果を確認するために、酷暑環境で被験者試験を実施した。図9に結果を示す。改良前ダクトは最大風量で試験した。一方で、開発ダクトは最大風量より40%落とした風量で試験し、結果はトラクタの快適範囲内に入った。

このことから、開発ダクトは風量を40%下げて、燃料噴射量を2.8%減らしながらも、ユーザの快適感を向上させることが分かった。

以上から、開発した技術を適用することによって、設計段階で快適性向上策を検討することが可能になり、快適かつ省エネ性能の高い製品を開発することができた。

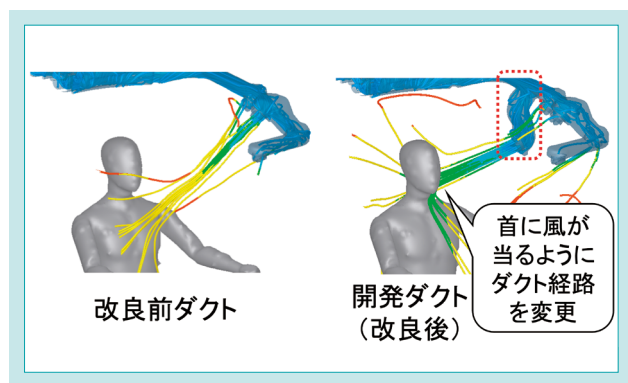


図8 開発ダクトと予想快適感
Fig. 8 Predicted Comfort from Analysis

表1 A/C 風量の違いによる燃料噴射量の低減率
Table. 1 Reduction Rate of Fuel Injection Amount Due to Differences in A/C Airflow

	風量5	風量3
風量(%)	100(最大)	60
燃料噴射量低減率(%)	— (対照)	-2.8

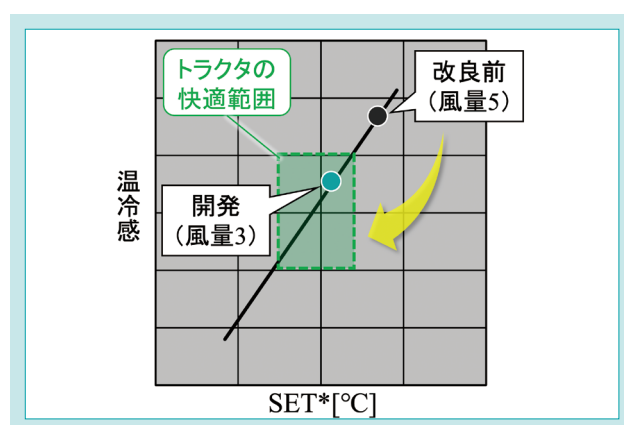


図9 開発ダクトの実機適用検討
Fig. 9 Examination of Practical Application of the Developed Duct

5. おわりに

開発初期段階で人の快適感を予測し、快適感を向上させることを可能にした。これにより、省エネルギーを実現し、かつ温熱快適性の高いキャビンを開発できるようになった。本技術は全ての農機と建機のキャビンに適用が可能で、2026年からコンバイン、トラクタ、建機のコンパクトトラックローダに順次適用予定である。本技術を用いてA/Cの出力を下げて燃料噴射量を最低2.8%削減することで、2030年までにCO₂排出量を約24万トン削減できるポテ

ンシャルがある。

今後は人種や属性、仕向地や作業毎に適した快適条件を特定した上で、省エネかつ快適性の高いキャビンを開発していく。さらに、クボタでは快適だけでなく、疲れにくいキャビン環境の実現を目指している。これにより、作業者の負担を可能な限り低減することで、「農業の生産性向上」と「カーボンニュートラルでレジリエントな社会の実現」に貢献する。

SDGs のターゲットへの貢献

- 2.4 持続可能かつ強靱な農業の実現 快適な作業環境を提供し、農業の生産性向上に貢献
- 7.3 エネルギー効率の改善 CO₂排出量を削減し、環境負荷低減に貢献
- 8.8 安全・安心な労働環境の促進 酷暑環境での作業環境改善により、作業者の身体的負担の軽減に貢献

参考文献

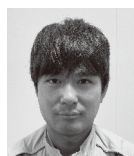
- 1) 農林水産省. 特集 変化(シフト)する我が国の農業構造
https://www.maff.go.jp/j/wpaper/w_maff/r3/r3_h/trend/part1/chap1/c1_1_01.html、(参照日 2025年1月)
- 2) 空気調和・衛生工学会、快適な温熱環境のしくみと実践、2019
- 3) ASHRAE、Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Retrieved from ASHRAE Standards and Guidelines、2023
- 4) Hepokoski M., Gibbs S., Curran A., A new anatomical and thermophysiological description of a 50th percentile adult western male、2016
- 5) Claus J., Temperature Regulation in Humans and Other Mammals、2001

国内向け乗用田植機NW60S/80Sの開発

Development of the Riding-type Rice Transplanter NW60S / 80S for the Japan Market



○ 田尾 哲也
Tetsuya Tao
移植機技術部



中村 謙
Ken Nakamura
移植機技術部



後藤 洋志
Hiroshi Goto
移植機技術部



荒木 鍊弥
Renya Araki
移植機技術部

国内農業従事者の減少と高齢化が進み、より一層の担い手農家への集約が進んでいる。担い手のニーズに応えるため、現行シリーズでは田植機の基本性能の向上を目指して開発を行った。更なる取り組みとして、「使いやすさ」と「作業能率」の向上をコンセプトに、「直進キープ機能の使いやすさの向上」と「苗補給作業の作業能率向上」に着目したNWシリーズの後継機種の開発について紹介する。

The decline and aging of agricultural workers in Japan is continuing, leading to a further consolidation of farming into capable hands. To meet the needs of these farmers, the current series has focused on improving the basic performance of rice transplanters. As a further initiative, based on market demands, we are introducing the development of a successor model to the NW series with a focus on enhancing "ease of use" and "work efficiency." Specifically, we are concentrating on improving the usability of the "keeping straight function" and enhancing the work efficiency of the seedling replenishment process.

【キーワード】

田植機、直進キープ機能、苗の補給作業、使いやすさ、作業能率

Rice Transplanter, Keeping Straight Function, Seedling Replenishment Process, Ease of Use, Work Efficiency

関連する SDGs



1. はじめに

国内では農業従事者の高齢化や離農の進行によって専業農家・担い手農家へ土地集約が進んでいる。担い手・中規模個人農家は機械の大型化・作業性向上によって規模拡大に貢献する機械を求めている。現行シリーズでは田植機の基本性能(走る、植える、肥料を撒く)の向上に取り組み、GNSS(Global Navigation Satellite System: 全球測位衛星システム)を用いた直進キープ機能(以下「GS機能」という。)も評価を得ている。現行シリーズの基本性能をベースに、本開発では植付作業以外の付帯作業も含め更なる作業性の向上に貢献する田植機の開発に取り組んだ(図1)。



図1 国内向け乗用田植機 NW80S

Fig. 1 Riding-type Rice Transplanter NW80S for Japan

2. 開発のコンセプトと目標値

2-1 開発のコンセプト

本開発では現行機の操作性改善を通じてユーザの満足度を高め、製品の訴求力向上を最優先課題とした。市場調査の結果から「使いやすさ」と「作業能率」の向上を重要なコ

ンセプトとした。使いやすさの向上に関しては、GS機能の使いやすさ向上、作業能率の向上としては苗補給作業の改善に焦点を当てて開発を進めた。

2-2 開発目標

(1) GS機能の使いやすさの向上

- ①GS機能の開始操作を簡素化
- ②衛星の受信不良により生ずるGS機能の精度低下の改善及びダウンタイム(機能停止時間)の低減

(2) 苗補給作業の改善

- ①圃場条件に合わせて切り替え可能な予備苗台の開発
- ②空箱回収機構の開発

3. 解決すべき技術課題

3-1 GS 機能の使いやすさの向上

3.1.1 操作の簡素化(かんたんスタート機能の開発)

GS機能は予め設定した基準方位にそって、直進時に自動操舵する機能で、現行シリーズはオペレータが任意のタイミングでGSスイッチを押すことでGS機能が開始される。旋回後に隣接する苗との条間を合わせる操作や、手動でGSスイッチを押す操作などが同時進行の操作が必要なため、オペレータの煩雑さをなくすことが課題であった。

また現行シリーズではGS機能の開始できる条件を満たすまでの時間がかかり、市場からも旋回後により早くGS機能を開始できるよう要望があり課題であった。

3.1.2 GS機能の精度低下の改善

GS機能の直進性は高い評価を受けているが、地域や時間帯によっては受信可能な衛星数が少ないなど環境によってGNSS衛星の受信不良が生じる。これらが要因となり、GS

走行の精度悪化や使用できない場合があり、GS機能の使いやすさを低下させている。現状、受信状況が不安定となると受信状況が安定するまで、待機するしかなかった。現行シリーズの衛星システム設定(GNSS設定)はGPS(米国)とGLONASS(ロシア)の2つのGNSSシステムを用いて測位を行う設定で、田植機側で設定を変更するなどの対応ができないことが課題であった。

3.1.3 GS機能のダウンタイムの低減

ダウンタイムの発生する要因一つとしては、SBAS(衛星航法補強システム)運用側のメンテナンス等で一時的な利用停止がある。現行シリーズではD-GNSS(ディファレンシャルGNSS)の衛星電波と加えてSBAS衛星の補正情報も使用している。SBASの補正情報が利用できない場合、GS機能を制限する仕様となっており、SBASが使用できない間、GS機能を使用できないことが課題であった。

3-2 苗補給作業の作業能率向上

3.2.1 圃場条件に合わせて切り替え可能な予備苗台の開発

一般的に苗の補給作業は予備苗台に苗箱を載せ、機体後方の苗載せ台に補給する。予備苗台とは車体後方の苗載せ台へ補給するための苗箱を機体上に仮置きしておく台である。「レール式」と「段積み式」の2種類が主流であり、購入時に選択するようになっている。それぞれの長所・短所としては下記のとおりである。

【レール式(図2)】

長所: 苗箱を滑らせて補給できるため、作業性に優れている。

短所: 圃場などではレールが機体前方に突出しているため、旋回時にあぜに障害物があると旋回がしづらい。

【段積み式(図3)】

長所: コンパクトなレイアウトのため、高いあぜや障害物がありレール式では旋回が困難な圃場でも旋回が容易。

短所: あぜからも苗載せ台からも遠い配置のため、苗箱の搭載や苗の補給がしづらい。

上記のそれぞれの長所を生かし、作業性の高いレール式でありながら、必要に応じて容易に段積み式へ切り替えできる機構の開発が課題であった。



図2 レール式予備苗台の苗の補給作業

Fig. 2 Replenishing the Rail-type Spare Seedling Platform



図3 段積み式予備苗台の苗の補給作業

Fig. 3 Replenishing the Stackable-type Spare Seedling Platform

3.2.2 空箱回収機構の開発

次に苗補給後の苗箱の処理について、現行機では苗が空になった苗箱(以下「空箱」という)の回収方法が明確でなく、作業者はステップや施肥機の上など作業の邪魔になる箇所に仮置きするしかなかった。またその仮置きした空箱を補助者に回収してもらうためには機械から身を乗り出す必要

があった。時には空箱をあぜに投げ、補助者が散らかった空箱を拾うケースなど、機体上の作業者とあぜにいる補助者での受け渡しを容易にかつ負担なくできる作業体系の構築が課題であった。

4. 開発技術

4-1 かんたんスタート機能の開発

煩雑な作業を減らすため、GS機能の開始操作の自動化(かんたんスタート機能)を検討した。自動で開始する上で、開始タイミングをオペレータがストレスなく開始したいタイミングにできるだけ近づける必要がある。現行シリーズでは、機体方位、車速などからGS機能の開始条件を決めている。

GS機能はGNSSアンテナとIMU(慣性計測ユニット)を使用し、目標方位と機体方位を元に制御を行っている。現行シリーズでは、旋回中にIMUから算出する方位はドリフト誤差が生じるため、信頼性が低いと考えていた。よって旋回中のIMU方位は使用せず、旋回後の直進時のGNSSの方位を使用し制御していた。そのため、旋回後GNSSの方位が安定するまで一定の直進距離が必要であり、GS機能が開始できる

条件が整うまでに一定の時間を必要としていた。今回の開発にあたり、制御を見直し、IMU方位のドリフト誤差を考慮しても直進キープ機能が使用可能であることを確認した。加えて、IMU方位からGNSS方位へ制御を切り替える際に急激に方位が変化しないよう移行できる制御を実装した。

上記の対策を施し、IMU方位を用いて旋回中の機体方位を算出することで、現行シリーズでは必要であった直進距離をなくし、開始までの時間を減らすことが可能となった。また開始タイミングを調整できる設定画面を田植機搭載のメータパネルに加えることで、オペレータの望むタイミングで自動でGS機能が開始できる仕様とした(図4)。

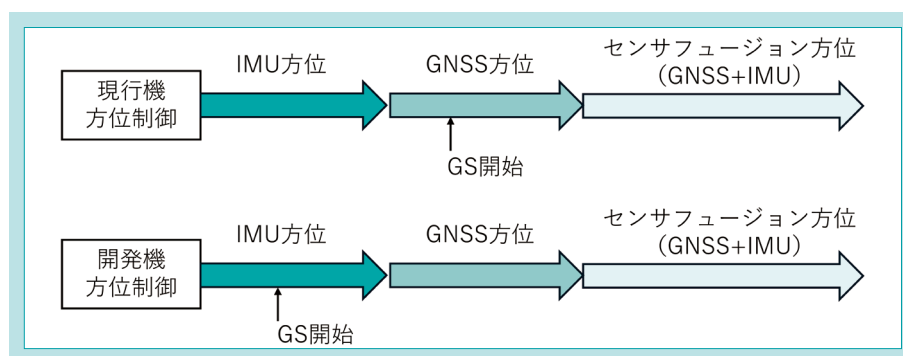


図4 方位制御の現行機と開発機の違い(概略)

Fig. 4 Overview of the Differences in Orientation Control Between the Current and Developed Model

4-2 GNSS 切替機能の開発

現行シリーズの設定であるGPS+GLONASSの受信状況が悪い場合に他のGNSSに設定を変更することで、継続してGS機能を使用し作業できる検討を行った。組み合わせは、GPS+GLONASSに加え、GPS+BEIDOU(中国)、GPS+GALILEO(欧州)で実施した。対象とするGNSSを国内の圃場環境下において、上記の組み合わせのアンテナユニットを本製品にそれぞれ搭載し(図5)、受信衛星数及び直進時の測位データの比較を行った。評価方法として、2周波RTKユニットの測位結果を真値とし、各衛星システムの測位性能を比較した。国内の各地区で確認した結果では測位衛星数は

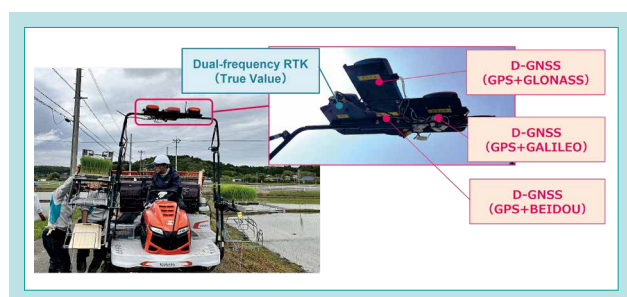


図5 GNSS 比較試験の写真
Fig. 5 Test Scene of GNSS Comparison

GPS+BEIDOUが他の設定に比べ、最大4割程度多い傾向があり、GPS+GLONASSとGPS+GALILEOは同等レベルの測位衛星数であることを確認した。また直進の精度はGPS+BEIDOUが傾向的に安定しており、最終位置ズレ量も低く、図6のように他の衛星の組み合わせよりズレが少なく、性能的に優れていることがわかった。

これらの結果より、現行シリーズのGPS+GLONASSの設定から新機種ではGPS+BEIDOUをデフォルト設定とし、更に使用環境により衛星をメータパネルで選択できるようした。

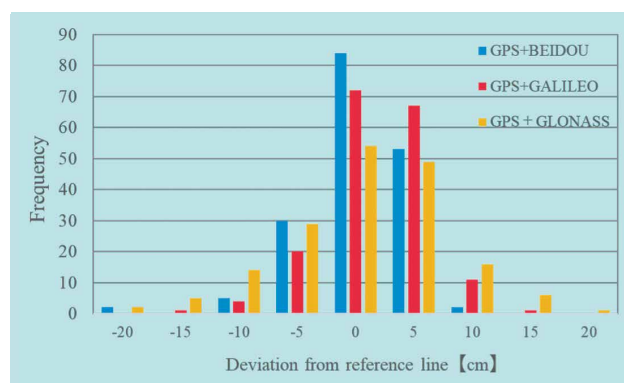


図6 GS 走行時の各 GNSS の位置精度の比較結果
Fig. 6 Comparison Results of Positioning Accuracy for Each GNSS

4-3 GS 機能のダウンタイムの低減

SBASの補正情報は、圃場内でのあぜ接近を報知するタイミング及び機体が強制停止する位置を算出する制御に使用している。SBASの補正情報が利用できない場合、停止位置の精度が低下する。現行シリーズでは安全性確保のためGS機能全体を使用できない仕様としているため、ダウンタイムが発生する。しかしながら、SBASの補正情報はあぜ接近による安全機能の精度向上のみに使用しており、直進制御には影響ない。したがって、あぜ接近時の停止位置の仕様を見直すことで、安全性と精度を両立したGS機能での走行(以下「GS走行」という。)の継続が可能になると考えた。具体的にはSBAS補正情報を受信できない場合は、安全側で機体が停止するように、試験で確認したSBAS補正無し状態の絶対位置のズレ量を考慮した制御を新たに追加した。加えて、車速に比例して検知位置を現行機よりも更に手前の位置で停止できる仕様(図7)を追加することで、SBAS補正情報が未受信時でも安全性を確保しつつGS走行が可能となるGS機能とした。

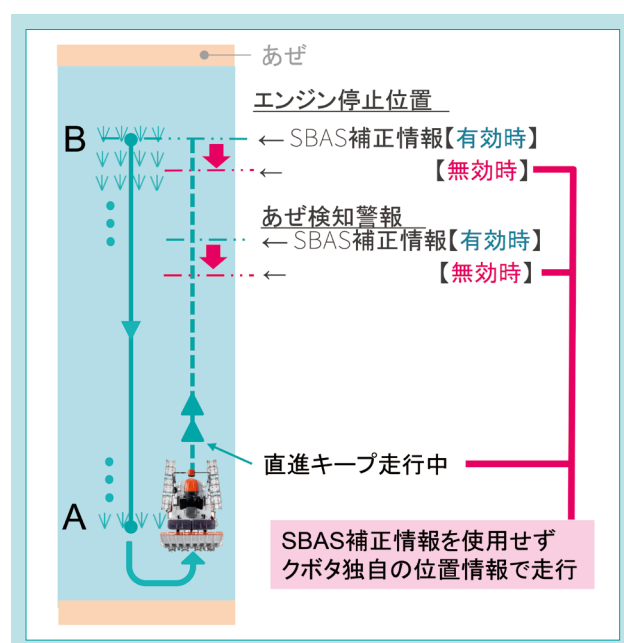


図7 田植機の SBAS 補正情報の使用イメージ
Fig. 7 Image of Using SBAS Correction Information in Rice Transplanting Machines

4-4 新予備苗台機構

予備苗台はレール式の作業性の長所を考慮し、現行のレール式予備苗台をベースに改良する方針とした。圃場に応じて前方の皿を移動させることで段積み式にも切り替え可能な予備苗台とし、

- ①: 作業者が作用部に挟まらない機構
 - ②: 切り替え後は振動や衝撃で動かないよう固定され、ロックは自動でかかる安全性
 - ③: 従来のレール式よりも乗りやすさを改善
- 上記の仕様で機構の開発を進めた(図8)。

機構①: 切り替え作業中に作業者が手を挟まないように、両手で作業する構造とし、切り替えレバーが作業の邪魔にならないレイアウトとした。

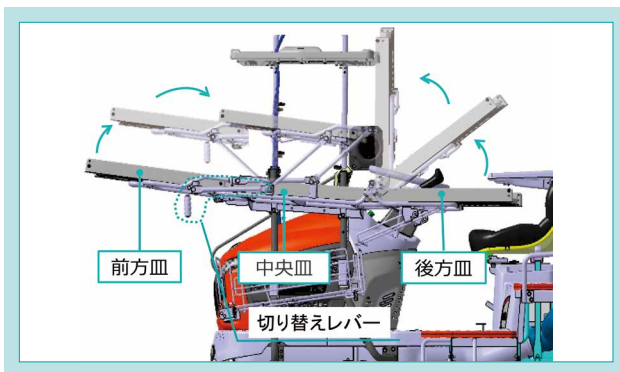


図8 新予備苗台機構のレール式の側面図
Fig. 8 Side View of Rail Mode

機構②: レール式から段積み式(図9)に切り替える場面で、ピストン式のロックピンを組み込み、リンクの回転の動きに合わせてロックが自動でかかり、切り替え時のロックの忘れを防ぐ構造とした。

機構③: 従来レール式では作業中に車体側面から乗り降りする場合、後方皿を手で抑えながら乗り降りする必要があったが、新たに後方皿部にロック機構を設け、ワンタッチで開閉可能とし、車体側面からの乗りやすさを改善した。

上記の内容を実現し、レール式と段積み式を簡単に切り替え可能な新予備苗台を完成させた。

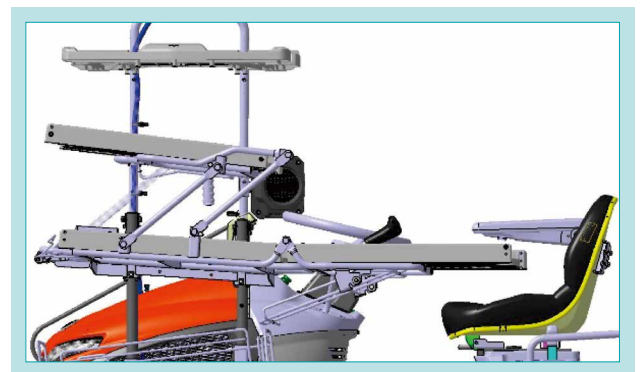


図9 新予備苗台機構の段積み式の側面図
Fig. 9 Side View of Stacking Mode

4-5 空箱回収機構

現行機の空箱回収時の動作を示した(図10)。

動作は大きく分けると4つで、

- Motion1: 空箱を予備苗台から取る
- Motion2: 施肥ホッパー又はステップの上に置く
- Motion1,2 を4回行う
- Motion3: 空箱を一つにまとめる
- Motion4: 補助者に渡す

という動作となる。作業者と補助者は身を乗り出し、受け渡しのタイミングを合わせる必要があるため、補助者に待機時間が生じる。また補助者は苗補給をしながら返却される空箱を都度受け取らなければならない、負担が大きい。

よって本開発では作業者と補助者それぞれが空箱を回収するために無駄な作業を発生させず効率的に行えるよう、下記の2つを満たすレイアウト配置を検討した。

- ①: 作業者が苗の補給をする作業範囲で空箱を投入する部分を設けること。
- ②: 補助者があぜから田植機に苗を補給する作業範囲内に空箱をまとめて回収できる位置に設けること。

上記の内容を踏まえ、①について作業者が苗箱から苗をすくい、補給後、空箱の端を持上げる動作のみで、容易に空

箱が回収できるように、予備苗台レール部の底面部に苗箱が通る大きさの投入口を新たに設けた。

次に②について、あぜにいる補助者が空箱の回収が容易となる位置として、車体前方部に配置し、機体上の作業や通行、機体の旋回の妨げにならないかを考慮した上で、先端のボンネット前方より前に出ない位置に空箱を回収するホルダーを設けた(図11)。図12のように新機構を搭載することで、作業者は空箱投入、補助者は空箱回収を任意のタイミングで可能となり効率的となった。動作は下記のとおりで、

Motion1: 作業者は苗補給動作に付随したわずかな動きで空箱を投入口へ挿入。

Motion2: 補助者は苗補給後に空箱ホルダからたまった空箱をまとめて回収。

更にあぜの形状や停止位置が圃場によって異なるため、取り出し口は車体前方方向、側面方向どちらからでも取り出せるよう開口部を2箇所設け、補助者の作業性を向上させた。

以上の結果、回収工数を比較すると現行機シリーズでは4工程であったのが新機構では2工程となり、空箱の回収作業にかかる時間が約20%(クボタ試験条件)軽減することができた。

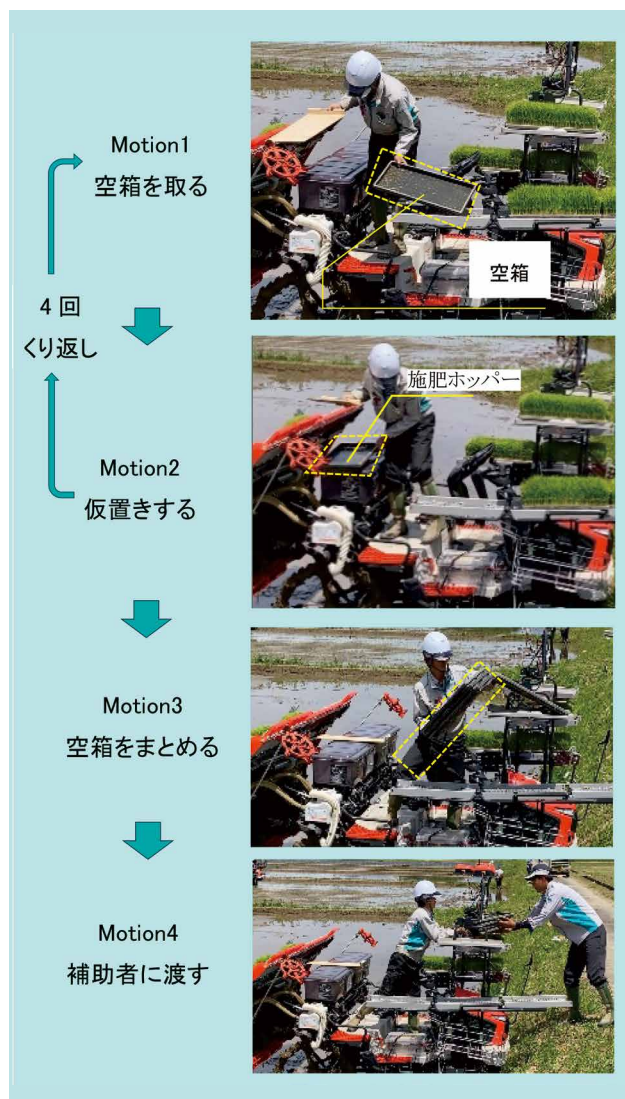


図 10 現行シリーズの空箱回収の動作
Fig. 10 Collection of Current Seedling Boxes

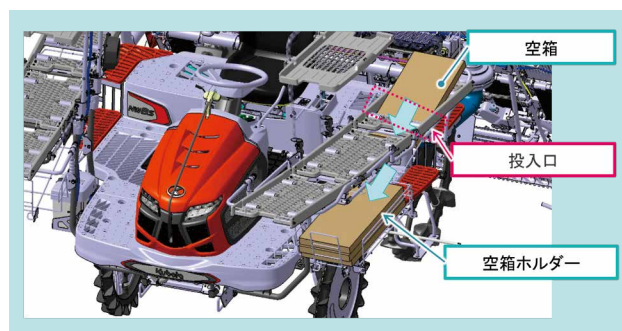


図 11 空箱回収機構の流れ
Fig. 11 Flow of the Empty Box Retrieval Operation



図 12 新機構での空箱回収の動作
Fig. 12 Operational Actions Using the New Mechanism

5. おわりに

GS機能の使いやすさ向上について、操作を簡素化し周囲環境に対応した、いつでも使えるGS機能を完成させた。

苗補給作業の向上について、レール式と段積み式予備苗台を切り替え可能な新予備苗台を開発し、共同作業の空箱回収において、オペレータと補助者が容易に回収可能な新機構で対応し、

作業工数を削減、共同作業で発生する無駄を減らす空箱回収機構を開発した。

本開発の結果、GS機能の進化と新予備苗台、空箱回収機構に関してモニター評価で高評価を得ることができた。今後、他機種にも展開することで、日本農業の発展に貢献していく。

SDGs のターゲットへの貢献

2.3 農業生産性及び所得の増加 苗補給作業の作業能率向上に貢献

8.2 イノベーションを通じた生産性の向上 衛星の受信不良によるダウンタイムの削減

EURO5+規制適合ディーゼルエンジンZ482-Kの開発

Development of the Diesel Engine Z482-K for European Quadricycle in Compliance with the EURO5+ Standard



○ 上田 友輝

Yuki Ueda

エンジン技術第一部



小林 泰

Yasushi Kobayashi

エンジン技術第一部



望月 宏朗

Hiroaki Mochizuki

エンジン技術第一部



天呑 将成

Masanari Tennomi

エンジン技術第一部

欧州には運転免許不要で公道走行が認められている四輪車(クアドリシクル)市場がある。クボタはクアドリシクルを生産しているメーカーにメカ式Z482を供給しており、2024年に1.7万台のエンジンを出荷している。そのクアドリシクルにおいて車両排出ガス規制となるEURO5+規制が2025年1月に施行された。EURO5+規制は、NOxでEURO4比84%、PMで同比94%の低減が必要となる非常に厳しい規制である。EURO5+規制に適合するため、メカ式Z482をベースに電子制御化し、車両搭載性やコスト競争力を考慮して必要最小限の排出ガス低減デバイスのマッチングで規制適合を目指す必要があった。そこで、排出ガス低減デバイスはDOCとEGRシステムとし、シンプルでコンパクト、コスト競争力のあるEURO5+規制適合エンジンを開発した。本稿では、EURO5+規制適合に向けて2気筒エンジンに最適な電子制御燃料噴射システムの開発と燃焼室形状の最適化による燃焼改善、2気筒エンジンに最適なEGRシステムの開発について紹介する。

In Europe, there is a market for Quadricycle that can be driven on public roads without a license. Kubota supplies the mechanical Z482 diesel engine to manufacturers producing quadricycles, having shipped 17,000 engines in 2024. The EURO5+ vehicle emissions regulation for European quadricycles came into effect in January 2025. The EURO 5+ regulations impose stringent requirements, mandating an 84% reduction in NOx and a 94% reduction in PM emissions. To meet the EURO 5+ standards, the mechanical Z482 engine adopted an electronically controlled fuel injection system, aiming to achieve compliance through the integration of only essential emission-reduction devices, while considering vehicle packaging constraints and cost competitiveness. We aim to achieve compliance without the use of SCR and DPF, focusing instead on utilizing DOC and EGR systems as exhaust emission reduction devices. This paper will discuss approaches for optimizing the electronic-controlled engine for compliance with EURO 5+ regulations, improvements in combustion through the optimization of the combustion chamber shape, and the development of a compact EGR design that balances EGR distribution performance and installation feasibility.

【キーワード】

Z482-K、TVCR、電子制御、車両排出ガス、EURO5+規制

Z482-K, TVCR, Electronic Control, Vehicle Emissions, EURO5+ Emission Regulation

関連する SDGs



1. はじめに

1L未満の排気量帯で構成されるSM(Super Mini)シリーズは、独自の燃焼方式E-TVCSをブラッシュアップすることで、米国、欧州、

中国をはじめとするグローバルな地域で排出ガス規制に適合している。SMシリーズは農機や建機、産業機械などに幅広く搭載さ

れ、多様な用途で動力源として活用されている。その中でも、最小クラスの排気量であるメカ式Z482は、欧州において運転免許不要で公道走行が認められている四輪車、クアドリシクル(以下「ミニカー」という。)に搭載され使用されている。

欧州ミニカー市場は、用途に応じてバッテリー式電気自動車と内燃機関自動車でそれぞれ市場を形成している。その内燃機関自動車の市場規模は年間約2.5万台であり、クボタはトップシェアを堅持しているA社ヘメカ式Z482を供給している。

ミニカーに対しては、表1に示すとおり、2017年に車両排出ガス規制としてEURO4規制が導入され、2020年にEURO5としてテストサイクルの改訂が実施された(図1)。そして2025年より、各排出ガス成分の規制値を大幅に強化したEURO5+が施行された。EURO5+規制は、NO_xでEURO4比84%、PMで同比94%の低減が必要となる非常に厳しい規制である。テストサイクルは、実車走行を模擬した過渡運転サイクルであるWMTCを継続採用している。そのため、各車速、負荷に応じて緻密な燃焼制御が必要となり、EURO5+規制は、これまで搭載してきたメカ式Z482では適合できないレベルまで強化された。

表 1 車両排出ガス規制
Table. 1 Vehicle Emission Standard Comparison

Regulation	Timing	CO	THC	NMHC	NO _x	PM	Test Cycle
		mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	
EURO4	2017年1月	1000	100	—	550	80	ECE R47
EURO5	2020年1月	1000	100	—	550	80	WMTC Stage3
EURO5+	2025年1月	500	100	68	90	4.5	WMTC Stage3

また、A社の車両は、車両重量425kg以下、エンジン排気量500cc以下で規定されているL6e-Bの区分としてEURO5+規制に適合することが求められる。EURO5+規制は車両認証であるため、開発の前半はエンジン単体で性能改善を進めつつも、最終的には車両搭載状態でL6e-B区分の規制内容に適合させる必要がある。そのため、エンジン開発とA社における車両開発の連携を密にして、規制適合を目指す必要がある。本稿は、A社のEURO5+規制適合車両に搭載されたZ482-Kの開発について、その規制適合技術とアプローチについて紹介する。

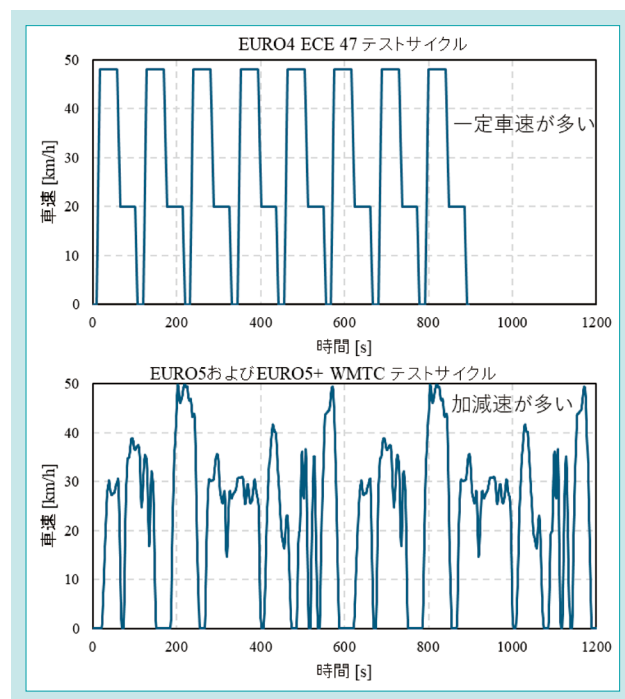


図 1 シヤシダイナモで運転するテストサイクル
Fig. 1 Test Cycle

2. 開発のコンセプトと目標値

2-1 開発のコンセプト

A社の車両がEURO5+規制に適合できることを目指し、その車両に搭載されるエンジンの開発コンセプトは以下のとおり設定した。

- ①必要最小限の排出ガス低減デバイスの採用でEURO5+規制に適合

排気量3L以上のエンジンで一般的に採用されているDPF(Diesel Particulate Filter)やSCR(Selective Catalytic Reduction System)等の高額かつ大型の排出ガス低減デバイスを採用せず、DOC(Diesel Oxidation Catalyst)や

EGR(Exhaust Gas Recirculation)といった必要最小限の排出ガス低減デバイスの採用でEURO5+規制に適合する。エンジンの燃焼制御レベルを従来機の延長線上にないレベルまで向上させ、シンプルでコンパクト、かつコスト競争力のあるエンジンを開発する。

- ②エンジンパッケージのコンパクト化

排出ガス低減デバイスを追加しつつも、既存車両のエンジンルーム内に搭載可能なエンジンパッケージを実現し、A社の開発負担軽減に貢献する。

2-2 目標値

EURO5+規制適合Z482-Kのエンジン諸元を表2に、外観図を図2に示す。L6e-B区分の排気量規定から、新機種Z482-Kは、メカ式Z482の基幹部品を流用し、新燃焼方式TVCRを2

気筒化した。またEURO5+規制に適合するエンジンのシステム構成を図3に示す。インジェクタの噴射制御、EGRシステムの制御を行うECU(Electronic Control Unit)はクボタで内製し

ているKCXを採用した。

車両運転状態の排出ガス性能を推定するため、エンジンベンチ上でWMTCを模擬した運転パターンを作成し、エンジン単体で性能改善可能な環境を構築した上で、新機種Z482-Kの開発目標を以下のとおり設定した。

- ①DOC、EGRシステムといった必要最小限の排出ガス低減デバイスでEURO5+規制への適合
- ②車体とエンジンの合計で規定の車両重量425kgを超えないエンジン重量の実現
- ③エンジンパッケージは、既存車両のエンジンルーム内に搭載可能であること

表 2 エンジン諸元
Table. 2 Engine Specifications

項目	メカ式Z482(現行機)	Z482-K(開発機)
気筒数	2	
排気量 (L)	0.479	
燃焼方式	E-TVCS	TVCR
燃料噴射方式	メカ式制御	電子制御
長さ/幅/高さ(mm)	366/384/507	424/477/601
エンジン質量(kg)	54	64
出力(kW/rpm)ネット	6.0kW/3200rpm	
ECU	無し	KCX(内製)
適合排出ガス規制	EURO4, EURO5	EURO5+

3. 解決すべき技術課題

3-1 EURO5+ 規制適合に向けた燃焼改善

メカ式Z482はメカ式燃料噴射システムとE-TVCSの最適化によって、EURO4、EURO5規制に適合してきた。メカ式燃料噴射システムの場合、噴射量や噴射タイミングが設計段階で構造的に決まってしまうため、各回転、負荷に応じて噴射量や噴射タイミングを最適化することができない。そのため、EURO5+規制で求められているNO_xとPMの大幅低減に向けては、燃料噴射制御の自由度を飛躍的に高められる電子制御化が必要不可欠となる。クボタは図4に示すIDI燃焼方式と電子制御燃料噴射システムを組み合わせた新燃焼方式TVCRを開発し、D902-Kエンジンで製品実装した。図4のシステムは3気筒用であるため、2気筒Z482-Kに最適化した噴射システム、噴射ロジックの開発が必要となる。

また、渦流室と主燃焼室の2つの燃焼室を有するIDI燃焼方式においては、図5に示すピストン頂部の主燃焼室形状によって、渦流室から噴出された燃焼ガス流れが制御される。そのため、燃焼改善でPMを極小化するためには、ピストン頂部形状の最適化により、主燃焼室の空気を効果的に活用することが更なるPM低減のキーテクノロジーとなる。



図 2 Z482-K
Fig. 2 Z482-K

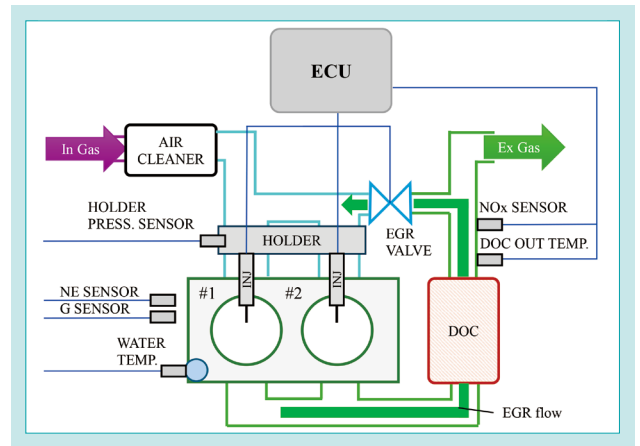


図 3 エンジンのシステム構成
Fig. 3 Engine System Configuration

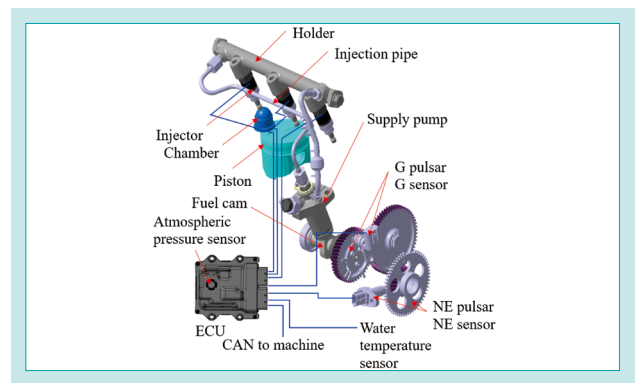


図 4 D902-K における電子制御エンジンの概略図
Fig. 4 Overview Diagram of the Electronic Control Engine in the D902-K

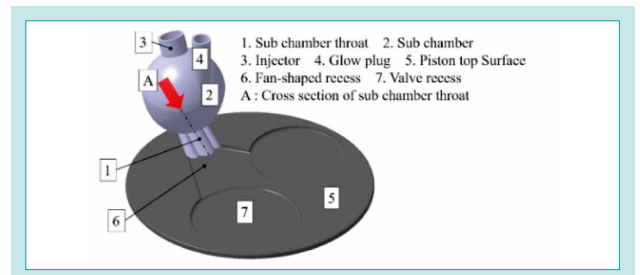


図 5 燃焼室形状の概略図
Fig. 5 Schematic Diagram of the Combustion Chamber Shape

3-2 EGR 率の気筒間ばらつき抑制とコンパクトなエンジンの両立

EURO5+規制では、EURO4比84%のNO_x低減が必要であるため、EGRシステムを採用し、高EGR化を狙った。Z482-Kは自然吸気エンジンであること、また燃焼間隔は180° クランクであることから各気筒のEGR量の差が懸念となる。具体的には1気筒目の吸気タイミングは2気筒目の排気タイミングと重なっており、1気筒目の吸気中に排気圧が加わるが、2気筒目は吸排気タイミングで排気圧が加わらないので、1気筒目のEGR量は2気筒目より相対的に多くなる(表3、図6)。

実際に各気筒のEGR率を測定した結果、1気筒目と2気筒目でEGR率が7.6ptの有意差があることを確認した(図7)。EGR

率の気筒間差が増加し、1気筒目と2気筒目でEGR率が不均一となった場合、EGR率の多い1気筒目で失火の懸念が高まるため、高EGR化の制約となる。そのため、EGRガスと新気を吸気マニホールド内で効果的に混合し、均一化する必要がある。一方、EGRの均一化に向けては、一般的にスペースの確保が必要となるが、背反として吸気マニホールドの大型化を招く。したがって、NO_xを狙いどおり低減するためには搭載性を満足するコンパクトさとEGRの均一化を高次元で両立できるEGRシステムの確立が必要となる。

表 3 Z482-K の燃焼間隔

Table. 3 Combustion Interval of the Z482-K

クランク角度	0°	180°	360°	540°	720°
1気筒	膨張	排気	吸気	圧縮	膨張
2気筒	圧縮	膨張	排気	吸気	圧縮

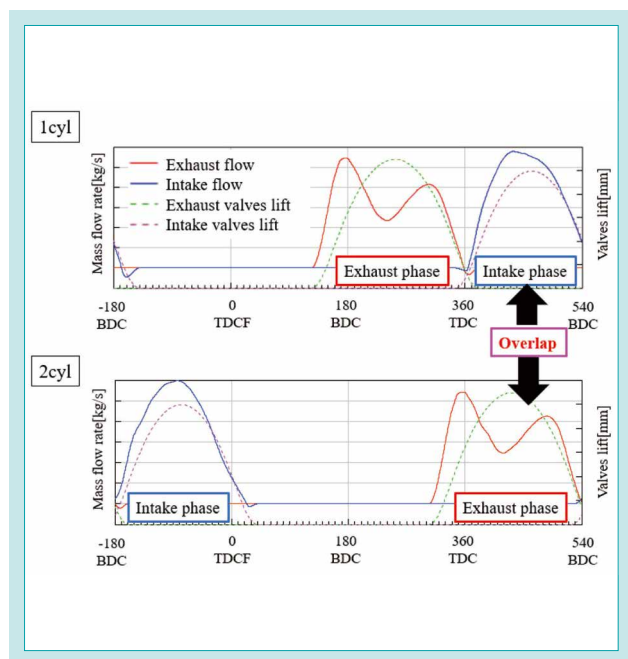


図 6 吸排気における空気流量の関係

Fig. 6 Relation of the Mass Flow Rates in the Intake and Exhaust Phases

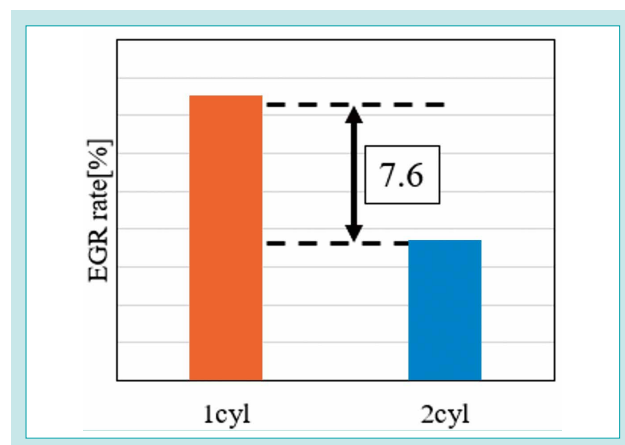


図 7 EGR 気筒間差

Fig. 7 EGR Difference Between 1 and 2 Cylinders

4. 開発技術

4-1 TVCR のブラッシュアップによる燃焼改善

4.1.1 電子制御燃料噴射システムの2気筒化

メカ式Z482では不可能だった全運転領域の緻密な燃焼制御を可能にするため、2気筒Z482-Kに最適化した噴射システム、噴射ロジックを有する電子制御燃料噴射システムを開発した。燃料を蓄圧するホルダ、アッシにはホルダ内圧をモニタするホルダ圧センサを新規に追加した。ホルダ内圧に応じて各気筒個別に噴射タイミングを最適化し、1気筒目と2気筒目で同じ燃焼状態を実現することで、より緻密な燃焼制御を可能とした。更に、多段噴射や噴射時期の最適化を実施し、全運転領域で緻密な燃焼制御を実現した。電子制御燃料噴射システムと初期試作のEGRシステムを組み合わせた仕様で排出ガス性能を確認した結果、NO_xをメカ式Z482比で約1/4、PMを約1/2に低減した(図8)。

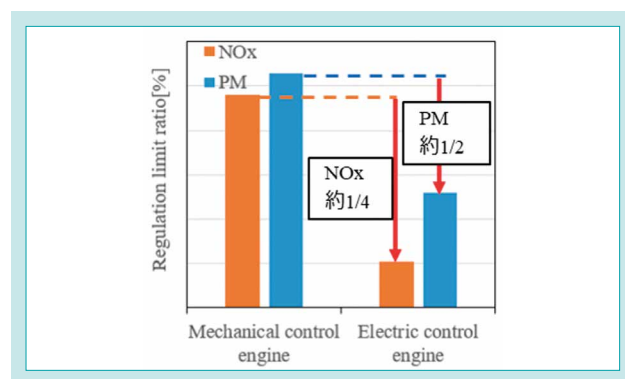


図 8 電子制御燃料噴射システムによる WMTC 排出ガス改善
Fig. 8 Improvements Through Electronic Fuel Injection Control

4.1.2 燃焼室形状の最適化による燃焼改善

更にピストン頂部で空気と燃料の混合を促進し、PMを低減するため流体解析を用いて、主燃焼室であるピストン頂部形状の最適化を検討した(図9、図10)。解析の結果、従来の扇形リセスガイド形状の場合、ピストン頂部において渦流室から噴出した燃焼ガスがピストン頂部中央で滞留し燃焼ガスと空気の混合が促進されないために過濃燃焼領域が多くなっていることがわかった。燃焼ガスがピストン頂部中央で滞留せずスムーズに流れ主燃焼室内の空気を有効活用することを目的にピストン頂部形状の改善に取り組んだ。ピストン頂部のリセスガイド形状を直線リセスガイド化することにより、燃焼ガスはピストン頂部中央で滞留せずスムーズに流れ、中央部の過濃燃焼領域が減少することを確認した。その結果、PMが20pt低下し、燃焼レベルを高めることができた(図11)。

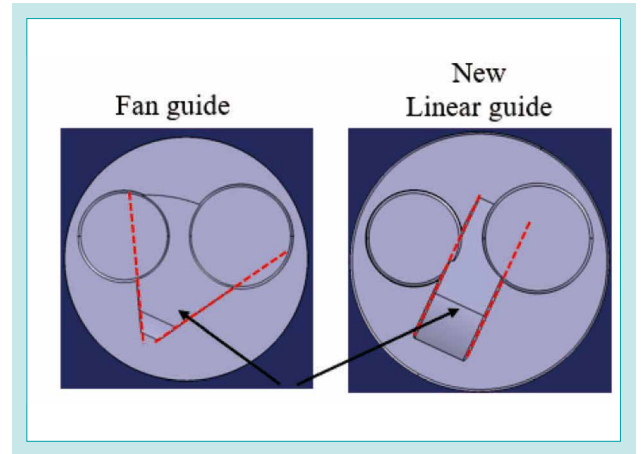


図9 ピストン頂部のリセスガイド形状
Fig. 9 Gas Guide Recess Shape of the Piston Top

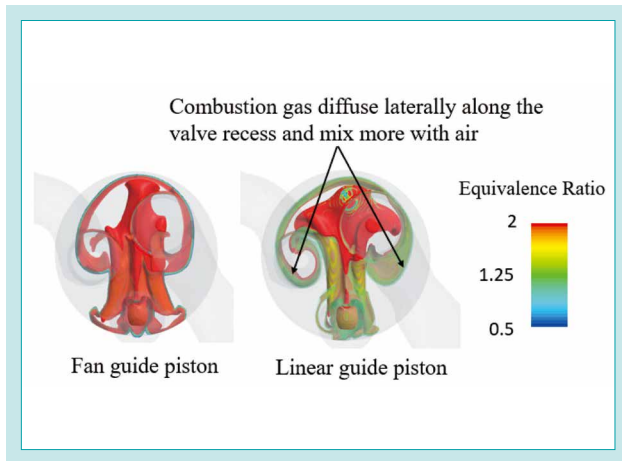


図10 ピストン頂部のリセスガイド形状の解析結果(25°クランク)
Fig. 10 Analysis Results of the Gas Guide Recess Shape of the Piston Top

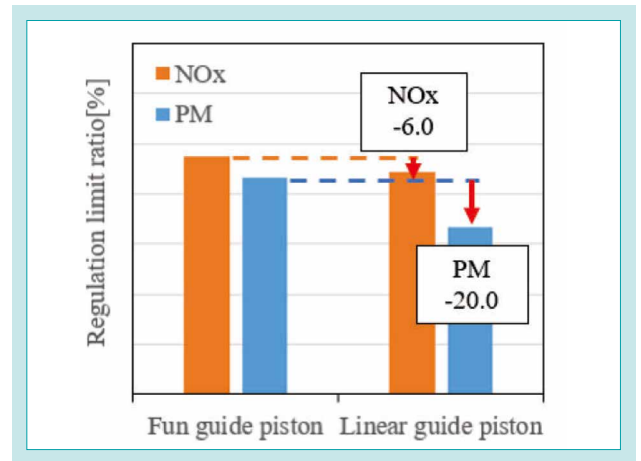


図11 燃焼室形状によるWMTC 排出ガス改善
Fig. 11 Improvement of the Combustion Chamber

4-2 EGR 率の気筒間ばらつき抑制とコンパクトなエンジンの両立

EURO4比でNOxを84%低減するためにコンパクト性と、吸気マニホールド内EGRの均一化を高次元で両立できるEGRシステムを検討した。

そこで、EGRガスと新気を効果的に混合可能なサージタンクを新規設計し、解析により最適化を実施した。その結果、吸気マニホールドの上流側に新気とEGRガスを混合するスペースを設け、EGRガスと新気の導入方向を工夫することでコンパクトなサージタンクを確立することができた(図12)。これにより図13に示すとおり、気筒間のEGR率の差は5.6pt改善した。それに伴い高EGR化が可能となりNOxを19.9pt低減することができた。加えて気筒間で均一な燃焼を実現できたことで、PMも54.2pt低減した。

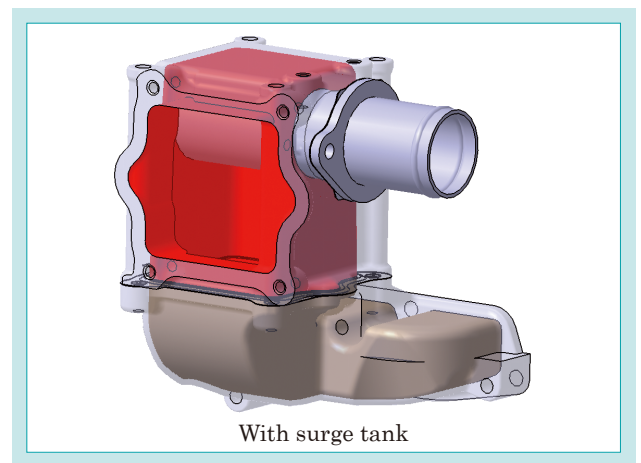


図12 吸気マニホールドのサージタンク(赤色部)
Fig. 12 Intake Manifold with Surge Tank

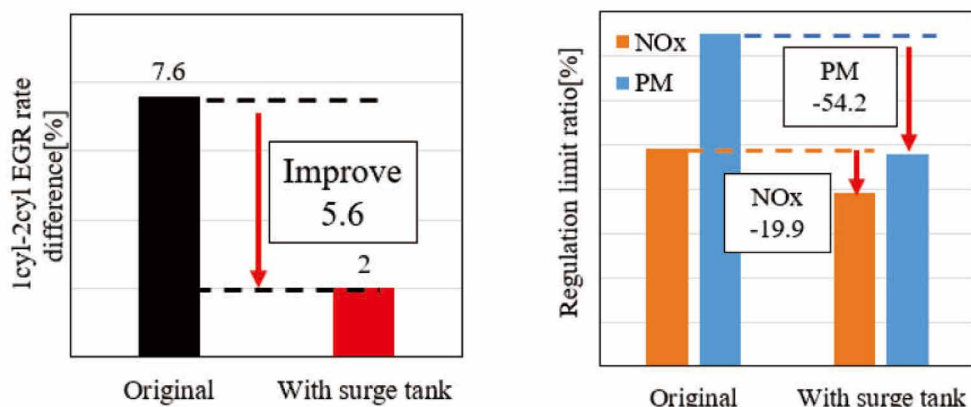


図 13 EGR 気筒間差の改善と WMTC 排出ガス改善

Fig. 13 Improvement of the EGR Difference Between 1 and 2 Cylinders and the Resulting Emission

4-3 車両搭載状態での排出ガス確認

4-1節および4-2節で述べた主な規制適合技術にDOCをマッピングしたZ482-Kを車両に搭載し、排出ガス性能を確認した結果、図14に示すとおりEURO5+規制の枠内に排出ガス性能を収めることができた。更に、EGRシステムのコンパクト化に取り組んだことで、既存車両のエンジンルーム内に搭載することができた。加えて、必要最小限の排出ガス低減デバイスでEURO5+に適合したことで、車両重量を規格内に抑えることに貢献した。

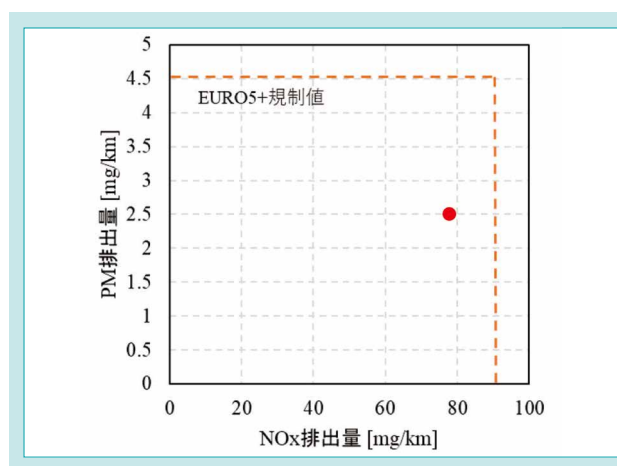


図 14 車両排出ガス測定結果

Fig. 14 Vehicle Exhaust Gas Results

5. おわりに

EURO5+規制に適合するために、メカ式Z482をベースとして電子制御化に取り組み、DOCやEGRといった必要最小限の排出ガス低減デバイスの追加でEURO5+規制に適合することができた。また、これらはEURO5+規制に適合しただけでなく燃焼音低減、始動性、最大トルク向上など車両性能の向上にも貢献した。

Z482-Kの開発を通して、小型エンジンにおいても電子制御燃料噴射システムや排出ガス低減デバイスを活用することができ、

EURO5+規制のような厳しい排出ガス規制に適合可能であることを示した。

本開発で得られた成果は、小型エンジンにおける将来の排出ガス規制適合に応用可能な基盤技術となる。今後も継続して環境性能の高いエンジンの開発を通して、持続可能な社会に貢献すると共に、エンジン事業の発展に貢献していく。

SDGs のターゲットへの貢献

- 7.1 現代的エネルギーサービスへの普遍的アクセスの確保 EURO5+規制に適合したクリーンなエンジンを提供
- 9.4 環境に配慮した技術の導入によるインフラ改良 低エミッションエンジンの開発により持続可能性向上に貢献
- 11.2 安全かつ安価で、持続可能な輸送システムの提供 エンジンをミニカーに提供でき輸送システムに貢献

1D-CAEとAIによる排出ガス予測技術の開発

Development of Emissions Prediction Technology Using 1D-CAE and AI



○ 松岡 綾乃

Ayano Matsuoka
エンジン技術第三部

北村 貴洋

Takahiro Kitamura
エンジン技術第三部

藤原 司

Tsukasa Fujiwara
エンジン技術第三部

末松 公輔

Kosuke Suematsu
エンジン技術第三部

オフロードディーゼルエンジンに対する排出ガス規制は年々強化されており、従来の試作・試験を繰り返す開発手法では膨大な工数を要する。そこで、排出ガス試験サイクルをシミュレーションで模擬し、規制対象成分であるNOx/Sootの排出量を予測する技術を開発した。また、エンジン・ECU・排出ガスモデルを統合した1D-CAE（一次元シミュレーション）モデルを構築し、任意の運転条件におけるエンジン挙動を再現した。特に物理モデルの構築が困難なSootについては、機械学習を組み合わせることで予測を可能にした。

The emissions regulations for off-road diesel engines are becoming stricter year by year, and traditional development methods that involve repeated prototyping and testing require a tremendous amount of labor. Therefore, a technology has been developed to simulate the emissions test cycle and predict the emissions of regulated components such as NOx and soot. The 1D-CAE model integrating the engine, ECU, and emissions prediction models has been constructed to reproduce engine behavior under arbitrary operating conditions. In particular, for soot, which is difficult to model physically, predictions have been enabled by combining it with machine learning.

【キーワード】

1D-CAE、排出ガス規制、ディーゼルエンジン、機械学習、シミュレーション
1D-CAE, Emissions Regulations, Diesel Engine, Machine Learning, Simulation

関連する SDGs



1. はじめに

オフロードディーゼルエンジンに対する排出ガス規制は世界的に強化されており、カリフォルニア大気資源局（CARB）で検討が進む次期規制CARB Tier 5では、NOx（窒素酸化物）及びPM（粒子状物質）の大幅な低減が求められる。更に、実使用下での排出ガス評価の重要性が世界的に高まっており、開発要件は一層複雑化している。このような背景において、規制に適合したエンジンを迅速に市場投入することは、クボタのエンジン事業発展にお

いて極めて重要である。しかし、従来の試作・試験を反復する開発手法では膨大な工数を要するため、クボタではモデルベース開発（MBD: Model Based Development）による効率化に取り組んでいる。本稿では、その一環として、NRTC（Non-Road Transient Cycle）やLLC（Low Load Cycle）といった過渡試験サイクルにおける排出ガス予測を目的とした解析手法を提案し、その有効性を検証する。

2. 開発のコンセプトと目標

数十分間にわたる排出ガス試験サイクルをモデル上で再現するために、1D-CAEを採用した。1D-CAEでは、流れ方向に一次元の空間離散化を行う流体解析と、エンジンシステムを構成する各デバイスを表現したサブモデルを組合せることで、エンジン全体の挙動を高速に計算することが可能である。

本開発では、エンジンモデル、ECU(Engine Control Unit:エンジン制御)モデル、排出ガスモデルを統合した1D-CAEモデルを構築し、圧縮比や排気量などのエンジン仕様及び運転条件を入力することで、任意の試験サイクルにおける排出ガス性能を予測可

能とすることをコンセプトとした(図1)。エンジンモデルは、吸排気システム(吸排気管、EGR(Exhaust Gas Recirculation:排気ガス再循環)、過給機)、燃料噴射系を含む構成とし、回転数・負荷、燃料噴射時期、燃料噴射圧力、EGR率などの制御量変化をモデル上で再現する。

予測対象とする排出ガス成分は、ディーゼルエンジンの規制対応上、特に重要なNO_x及びSoot(PMの主要構成成分)である。目標精度は、試験サイクル積算値(g/kWh)に対して相対誤差5%以下とする。

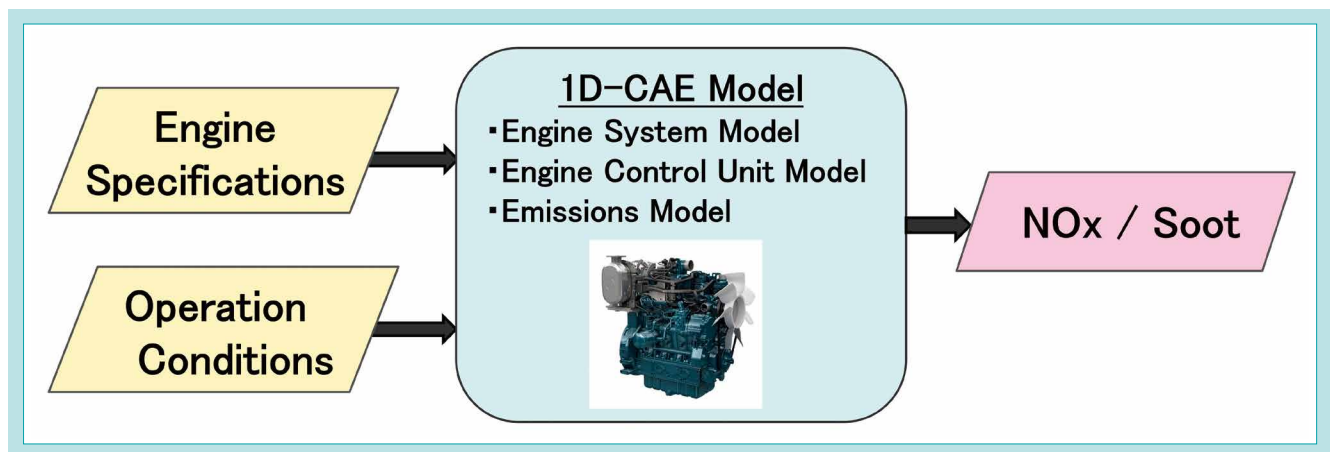


図1 排出ガス予測手法のコンセプト
Fig. 1 Concept of the Emissions Prediction Method

3. 解決すべき技術課題

本開発では、1D-CAEを用いた過渡試験サイクルにおける排出ガス予測を実現するために、以下の3つの課題に取り組む。

(1)エンジンモデルの構築

排出ガスを精度よく予測するには、過渡運転中の筒内温度・圧力・当量比などの物理量を妥当に推定するための基盤技術が不可欠である。そこで、吸排気系システムやディーゼル燃焼モデルを含む高精度な1D-CAEモデルを整備し、ECUの制御入力変化に追従しつつ過渡的な筒内状態を再現することを課題とする。

(2)NO_xモデルの構築

ディーゼルエンジンから排出されるNO_xの大部分は、燃焼により高温になった空気中の窒素が酸化されることにより発生する、Thermal NOであることが知られている。本開発では、このThermal NOを高精度に予測する手法の構築を課題とする。

(3)Sootモデルの構築

Sootは図2に示すように、核生成・表面成長・凝集・酸化といった過程が複雑に絡み合って生成される。このSoot生成量を高精度に予測するモデルは現状確立されておらず、予測手法の構築が課題である。

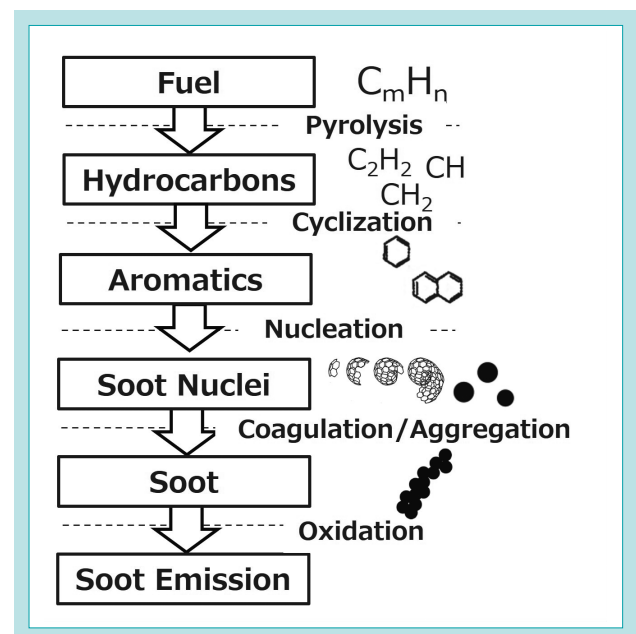


図2 Sootの生成過程
Fig. 2 Soot Formation Process

4. 開発技術

4-1 1D-CAE によるエンジン解析技術

4.1.1 エンジン吸排気系システムモデルの構築

本開発では、過給及びEGRシステムを備えるコモンレールディーゼルエンジンについて、システム全体の挙動を高精度に再現する1D-CAEモデルの構築に取り組んだ。その実現のためには、吸排気管や過給機、EGRシステム等の構成部品で生じる流体・伝熱現象を適切にモデル化し、各部の温度・圧力・流量などの物理量を高い精度で予測する必要がある。

高精度な過給モデルを構築するために、ターボチャージャ(過給機)で生じる空気力学的損失、熱損失、ベアリングのフリクション損失をそれぞれ分割してモデル化した。熱損失については、熱回路網法によりターボチャージャの各部品における熱容量、伝熱、輻射を表現した(図3)。過給モデル構築にあたり、ターボチャージャ単体リグ試験によって、各損失量を計測した。更に、過渡応答の再現性を高めるために、

ターボチャージャの慣性モーメントについても計測した。

筒内の物理量を高精度に予測するために、燃焼室壁温のモデル化にも工夫した。シリンダヘッドやクランクケース、ピストンなどのエンジン構成部品について、寸法や物性値から固体伝熱モデルを構築し、燃焼室や吸排気ポートの壁温を計算した。このモデルでは、筒内ガスやエンジンオイル、冷却水、エンジン周囲の空気などの流体と、固体である構成部品との間での熱伝達・熱伝導・輻射を考慮することでエンジン構成部品の壁温を計算する。このモデルの同定のために、シリンダヘッドやライナーの壁温を計測し、広範囲なエンジン回転数・負荷において燃焼室壁温を再現するモデルを構築した。

このような取り組みにより、高精度にエンジンへの吸入空気量やガス温度などの物理量を予測することに成功した(図4)。

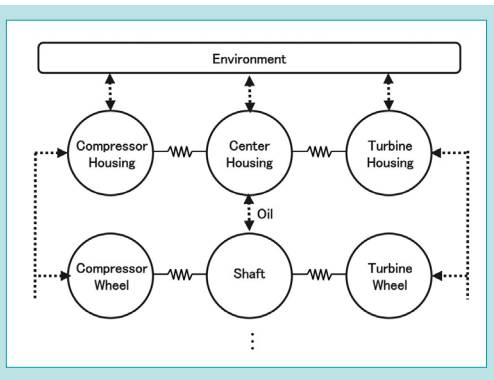


図3 熱回路網モデルの概略図

Fig. 3 Overview of the Thermal Network Model

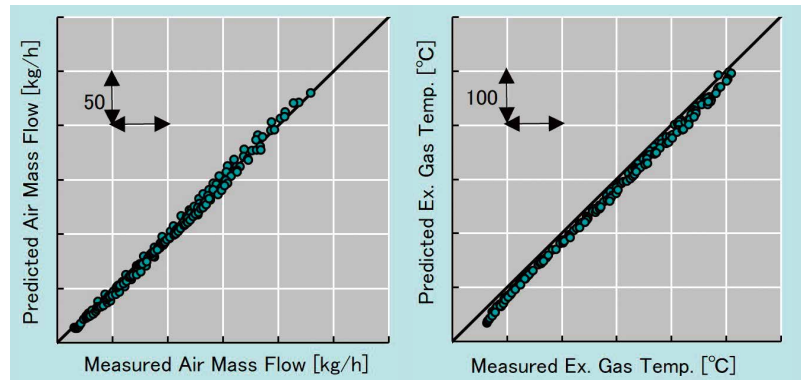


図4 1D-CAEモデルによる計算結果と実測値の比較(左図:空気流量、右図:排気ガス温度)
Fig. 4 Comparison of Calculated Results from the 1D-CAE Model and Measured Values(Left: Airflow; Right: Exhaust Gas Temperature)

4.1.2 ディーゼル燃焼モデルの構築

コモンレールディーゼルエンジンの燃焼を表現する4つのモデルパラメータ(それぞれ、燃料噴霧における周辺ガスの巻き込み量、着火遅れ、予混合燃焼、拡散燃焼を制御する)について、実測の燃焼過程を再現するように同定した。パラメータ

チューニングには、遺伝的アルゴリズムを使用し、広範囲な運転領域の燃焼を再現するモデルを構築した。図5に熱発生率、図6に質量燃焼割合50%位置(MFB 50%)について実測値と予測値の比較を示しており、高精度に予測できていることを確認した。

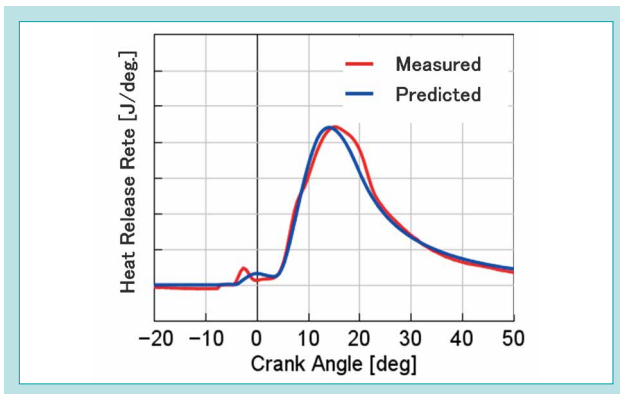


図5 熱発生率の実測値と予測値の比較

Fig. 5 Comparison of the Measured and Predicted Heat Release Rate

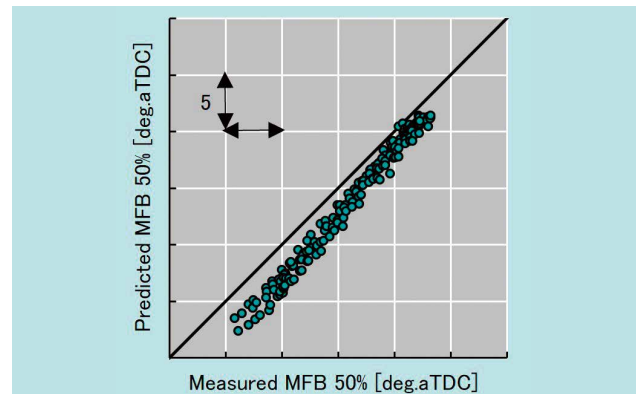
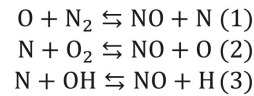


図6 MFB 50%の実測値と予測値の比較

Fig. 6 Comparison of the Measured and Predicted MFB 50%

4-2 NO_x 予測技術

Thermal NOの生成機構である拡大ゼルドヴィッチ機構を図7の式(1)から(3)に示す。この反応の進行を予測するには、式(1)から(3)の順・逆反応をアレニウスの式で表される反応速度から計算することになり、モデルパラメータが多数となる。しかし、燃料希薄の高温領域では、O₂⇌Oの反応について部分平衡が成り立っていると仮定すると、式(4)のようにNO排出量を表現することができる¹⁾。本開発では、式(4)に含まれるモデルパラメータである頻度因子A及び活性化エネルギーEの2つについて、広範囲な運転領域において実測のNO_x排出量結果を再現するように同定した。



$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = 2k_{1f}[\text{O}][\text{N}_2] = 2k_{1f}K_{fo}[\text{N}_2][\text{O}_2]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$k_{1f} = Ae^{-\frac{E}{RT}}$$

k_{1f} : Forward Reaction Rate Coefficient of Equation (1)

E : Activation Energy

A : Frequency Factor

k_{fo} : Equilibrium Constant

図7 Thermal NOの生成機構

Fig. 7 Formation Mechanism of Thermal NO

4-3 Soot 予測技術

Sootはその複雑な生成過程により、排出量を高精度に予測することができる理論的なモデルは存在しないのが現状である。しかし、理論的なモデル化が困難な対象についても、AI技術である機械学習により予測モデルを構築できることが知られている。そこで本開発では、1D-CAEと機械学習を組合せたSoot予測モデルの構築に取り組んだ。

高精度な機械学習モデルの構築において重要となる要件は次の二点である²⁾。

①適切な特徴量選択

機械学習は「Garbage In, Garbage Out」と言われており、高精度な予測結果を得るためには、質の高い情報を学習させることが重要である。そのため、予測対象と物理的関連を有する高品質な入力情報(説明変数)を準備することが不可欠である。

②適切な学習アルゴリズムの選定

使用する機械学習アルゴリズムによってモデルの予測精度は異なる結果となるが、No-Free-Lunch定理が示すように、全ての予測問題に対して普遍的に最適なアルゴリズムは存在しない。そのため、適切なアルゴリズムを選定するためには、複数の候補となるアルゴリズムに対してデータを学習させ、それぞれの精度を評価することが求められる。

Sootの生成メカニズム(図2)により、Soot排出量は、筒内

の温度、構成成分や燃焼の進行と相関があると考えられる。

①に示した理由から、このような情報を説明変数として機械学習モデルに入力することが求められる。しかし、これらのパラメータは計測難易度が高いことに加え、本手法は試作・試験前に排出ガス性能を予測することが目的であるため、実測データが存在しない条件について説明変数を準備する必要がある。そこで、1D-CAEにより、任意の条件における筒内の詳細な情報を推定し、説明変数として使用した。学習に使用する説明変数は、Sootの生成メカニズムや、決定木ベースのアルゴリズムを用いた重要度分析に基づき選定した。本手法を用いた、機械学習モデルの構築プロセスを図8に示す。

②に示した機械学習アルゴリズムの選定においては、数百点程度のデータを学習する場合において高い精度が期待できる複数のモデルを候補とした。候補のモデルにデータを学習させて機械学習モデルを構築し、学習に用いていない検証用のデータにおける予測精度を比較することで、Soot排出量に適している機械学習モデルを選定した。ここで、モデルのハイパーパラメータチューニングには、ベイズ最適化³⁾を用いた。この機械学習モデルに、定常運転条件(回転数、トルク一定)における約400点のデータを学習させることでSoot排出量の予測モデルを構築した。

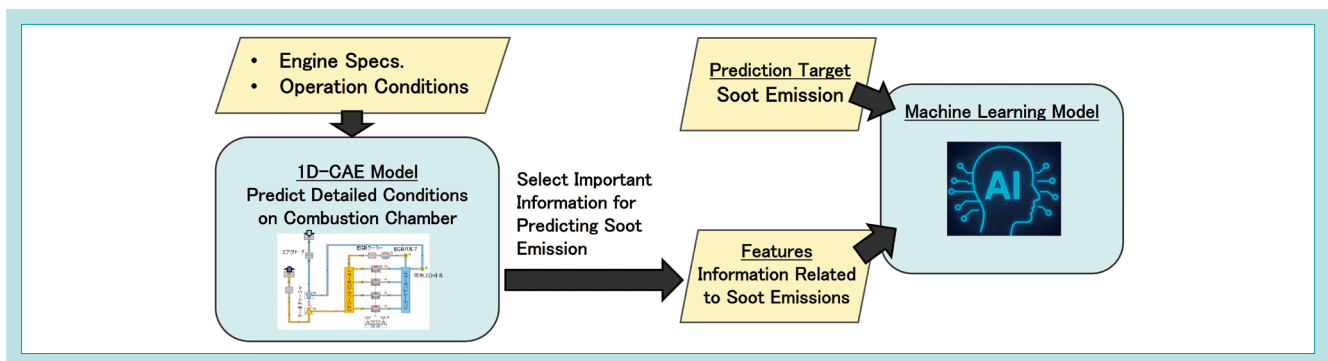


図8 Soot 排出量を予測する機械学習モデルの学習プロセス

Fig. 8 Training Process of the Machine Learning Model for Predicting Soot Emission

4-4 開発した排出ガス予測手法の全体像及び効果確認

4.4.1 開発した排出ガス予測手法の全体像

開発した排出ガス予測手法の全体像を図9に示す。NO_xについては1D-CAEに組み込んだThermal NOモデルから、Sootについては1D-CAEと機械学習モデルを併用して予測する。

4.4.2 成果の評価

開発した手法により、オフロードエンジンの規制値を測定する際の過渡運転パターンであるNRTC及びLLC運転におけるNO_x及びSoot排出量を予測し、実測結果と比較した(図10、図11)。NRTCにおけるNO_x及びSoot排出量、LLC運転におけるSoot排出量については、時間積算値 [g/kWh]の相対誤差5%未満の高い精度で予測できていることを確認した。LLC運転におけるNO_x排出量については相対誤差が18%と比較的高くなっている。これについてはLLC運転の主要な運転領域である、低負荷のNO_x予測精度が比較的低いことが原因だと推定される。今後、手法の更なる改善を実施する。

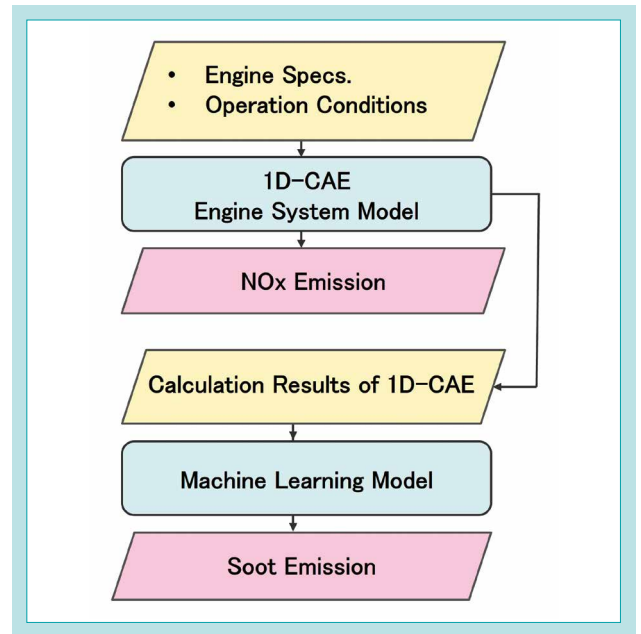


図9 開発した排出ガス予測手法の概略図

Fig. 9 Overview of the Developed Emissions Prediction Method

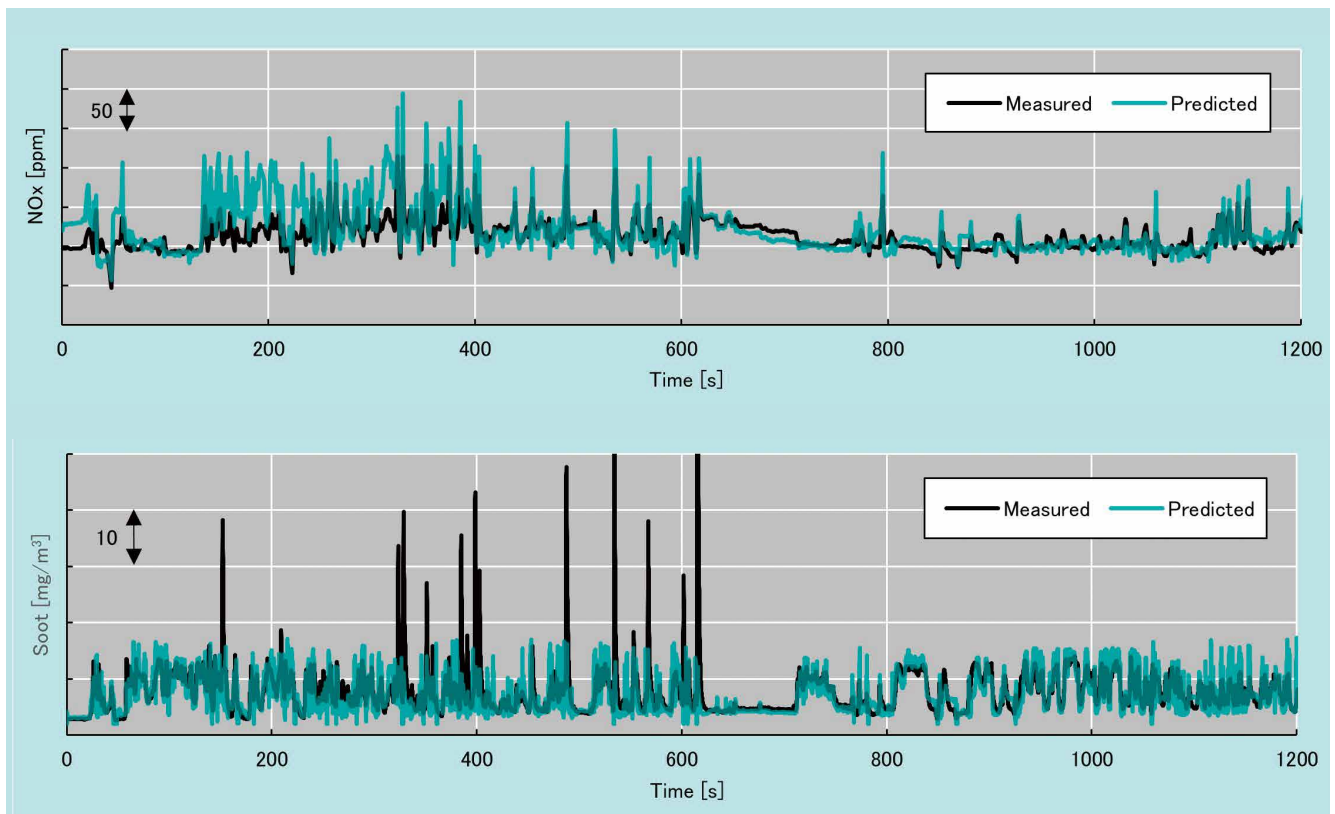


図10 NRTC 運転における排出ガス量の実測値と予測値の比較(上段: NO_x, 下段: Soot)

Fig. 10 Comparison of Measured and Predicted Emissions During NRTC Operation (Top: NO_x, Bottom: Soot)

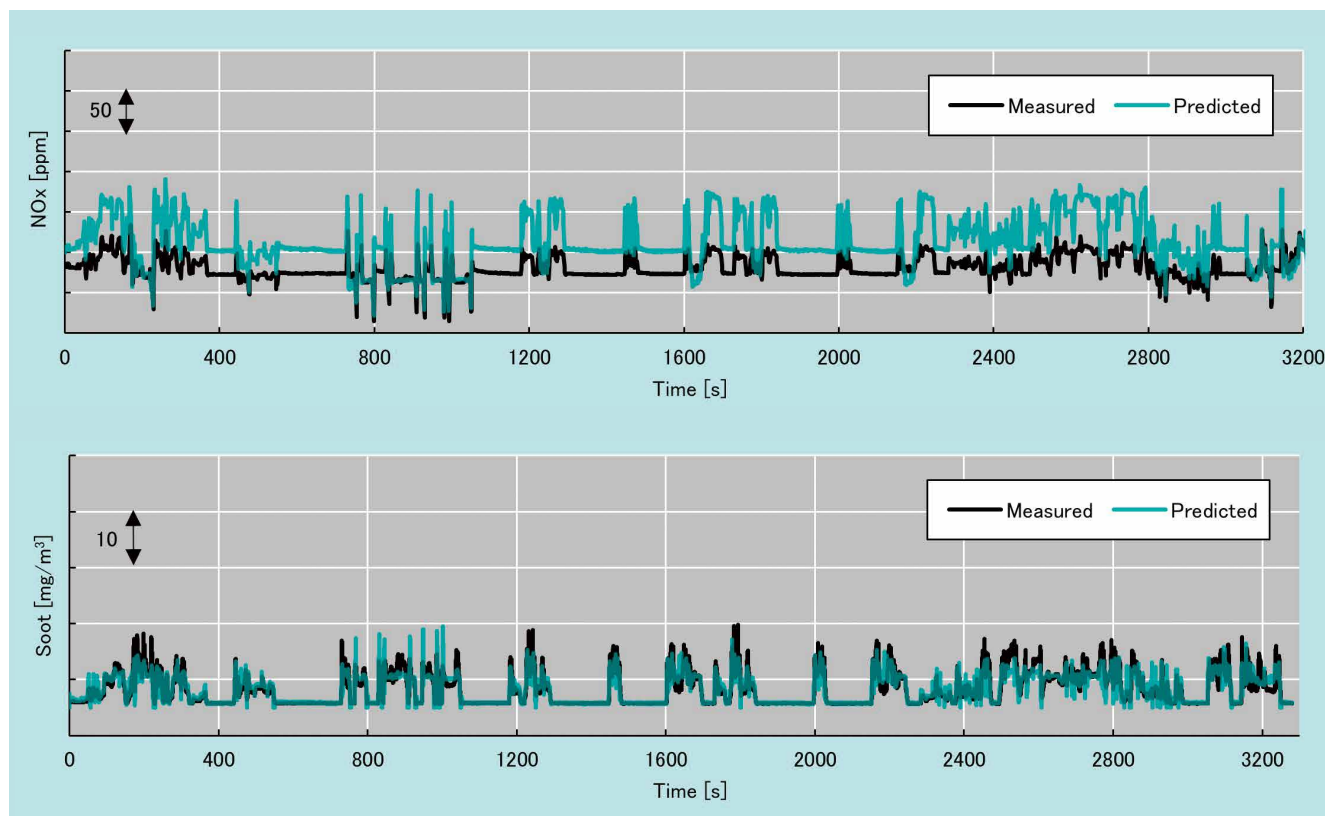


図 11 LLC 運転における排出ガス量の実測値と予測値の比較（上段：NOx, 下段：Soot）

Fig. 11 Comparison of Measured and Predicted Emissions During LLC Operation (Top: NOx, Bottom: Soot)

5. おわりに

本取り組みにより、開発初期段階から排出ガス低減効果の大きい設計案を絞り込むことや、任意の試験サイクルにおける排出ガス性能の机上評価が可能となり、開発効率の向上と排出ガス

性能の両立を実現することができる。今後は本技術を多機種展開することで、よりクリーンなエンジンを開発し、更なるエンジン事業の発展に貢献していく。

SDGs のターゲットへの貢献

7.3 エネルギー効率の改善 排出ガス・熱効率を考慮した設計を初期段階で行い、エンジンの高効率化に貢献

9.4 環境に配慮した技術・産業プロセスの導入によるインフラ改良・産業改善 開発効率の向上でエネルギー消費を低減

参考文献

- 1) 水谷 幸夫, “燃焼工学(第3版)”, 森北出版 (2002).
- 2) Aurélien Géron, “scikit-learn、Keras、TensorFlowによる実践機械学習 第2版”, オライリージャパン(2020).
- 3) Sano, Shotaro. “Black-box Optimization with Optuna”. Ohmsha Ltd., (2023).

監視制御システム 次世代型CraftPatの開発

Development of the Next Generation of the Monitoring and Control System "CraftPat"



○ 板井 菜津子
Natsuko Itai
計測システム部



瀬下 晃平
Kohei Seshita
計測システム部



村口 彰
Akira Muraguchi
計測システム部



浜田 和秀
Kazuhide Hamada
計測システム部

クボタが開発した監視制御システム「CraftPat」は、施設の稼働状態やプロセスデータなどの現場データを一元管理し見える化するソリューションを提供している。これにより、オペレータの負担軽減、コスト削減、運用の効率化、エネルギー管理、品質管理など様々な現場の課題解決に貢献してきた。今回、顧客ニーズの多様化および高度化に対応するため、製品の次世代化を図った。従来の高速監視性能は維持したまま、将来的に必要とされるAI制御やデータ分析を見据えた拡張性強化、クライアントのマルチプラットフォーム対応、さらには帳票機能の改良やセキュリティ強化を実現した。

The in-house developed monitoring and control system, "CraftPat" provides a solution for centralized management and visualization of on-site data, such as the operational status and process data of facilities. This has contributed to solving various on-site challenges, including reducing operator burden, cutting costs, improving operational efficiency, managing energy, and ensuring quality control. This time, to respond to the diversification and sophistication of customer needs, we aimed for the next generation of CraftPat. While maintaining conventional high-speed monitoring performance, we achieved enhanced scalability while looking ahead to AI control and data analysis, multi-platform compatibility for clients, improvements of reporting functions, and strengthened security.

【キーワード】

監視制御システム、遠隔監視、SCADA、見える化、Web、ソフトウェア開発
Monitoring and Control System, Remote Monitoring, SCADA, Visualization, Web, Software Development

関連する SDGs



1. はじめに

監視制御システム「CraftPat(クラフトパット)」は、クボタ製のSCADA(Supervisory Control And Data Acquisition:設備のデータ収集と可視化を行うシステム)である。これまで、CraftPatをベースとし、焼却炉、水処理施設、ポンプ揚排水機場、社内外の製造工場を中心に、施設の稼働状態やプロセスデータなどの現場データを一元管理し、見える化するソリューションを提供してきた。それにより、オペレータの負担軽減、コスト削減、運用効率の向上、エネルギー管理、品質管理など、様々な現場の課題解決に貢献してきた。

CraftPatのシステム構成を図1に示す。CraftPatは主にサーバとクライアントから構成されている。監視対象となる現場機器の信号を、PLC(Programmable Logic Controller:機器や装置と接続して利用される制御装置)などを介してサーバに収集する。収集された信号は、クライアントへ送信され、Webブラウザ(インターネットを見るために必要なソフトウェア)画面上で、監視画面、グラフ、帳票として表示できる。さらにWebブラウザ画面から、現場機器へ操作信号を送信することも可能である。

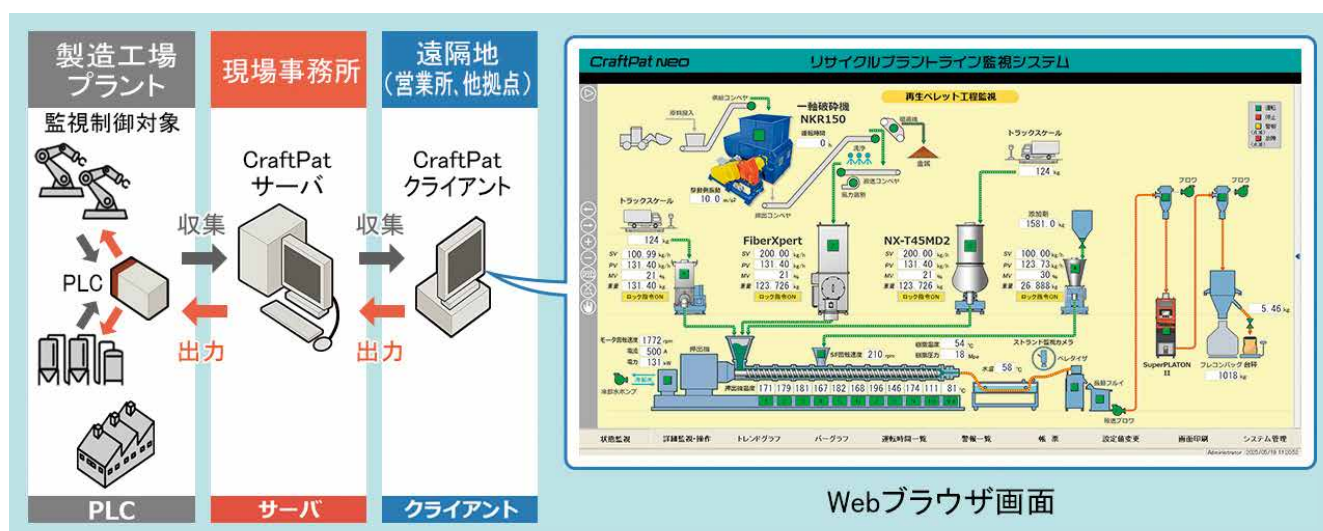


図1 CraftPat のシステム構成と監視画面サンプル

Fig. 1 System Configuration and Monitoring Screen Sample of CraftPat

2. 開発のコンセプトと目標

2-1 開発のコンセプト

今後もCraftPatをベースとし、顧客の課題解決を通して新たな付加価値を創造していくためには、時代と共に変化する多様な顧客ニーズに迅速に対応することが求められる。例えば、DX(Digital Transformation: デジタル技術を活用した変革)やIoT(Internet of Things: 様々なものがインターネットで通信すること)技術の進展によって、AI(Artificial Intelligence: 人工知能)を活用した自動制御や予知保全、スマートフォンやタブレットを用いた遠隔監視など、単なるデータの見える化にとどまらず、時代に即した付加価値の提供が重要になっている。そのためには新しい技術の活用が不可欠であり、CraftPatの動作環境や開発環境をアップデートする必要があった。そこで次世代型として「CraftPat Neo(クラフトパット

ネオ)」を開発した。開発コンセプトは、以下2点である。

- (1) CraftPatの基本仕様を継承しつつ、動作環境及び開発環境を時代に合った技術を用いてアップデートする。特に、SCADAの特徴の1つであるリアルタイム監視を行うための高速通信の性能維持は重要である。
- (2) より多くの顧客ニーズに柔軟に対応可能な製品とする。具体的には、市場や顧客に応じた機能追加や機能拡張、新機能開発に優れた製品とする。また、マルチプラットフォーム(複数の異なるデバイスで同様の動作が可能であること)に対応し、顧客の使用環境に適したソリューション提案が可能な製品とする。

2-2 開発目標

開発コンセプトを達成するため、高速監視、拡張性強化、Webクライアントの汎用性強化を3つのテーマとし、以下の目標値を定めた。

(1) 高速監視

- ① 現場の信号状態変化をPLCで受信してから、監視画面表示が更新されるまでの時間を、CraftPatと同等の最速100msとする。この目標値は、他社のSCADA性能や、過去の実績を踏まえ、リアルタイム監視を行うための高速通信の必要条件と判断した。
- ② 現場データを表形式で自動記録する帳票機能において、画面切替から3秒以内に帳票を表示する。CraftPatでは10秒程度を要しており、高速化の要望に応えることで利便性を向上させる。

(2) 拡張性強化

- ① 市場や顧客ニーズに応じた機能拡張性やシステム拡張性が高い製品とする。特に今や不可欠になっているAI制御やデータ分析の利用に適した技術を採用する。
- ② 製品の次世代化に伴い、他社SCADAに先行する新機能を開発する。

(3) Webクライアントの汎用性強化

- ① 顧客の使用環境に応じた提案を行うため、スマートフォンやタブレットでも監視可能なマルチOS(Operating System: コンピュータの動作を制御するソフトウェア)対応としてWindows、macOS、iOS、Android、Linuxに対応する。
- ② マルチブラウザ対応として国内シェア上位のChrome、Edge、Safari、Firefoxに対応する¹⁾。

3. 解決すべき技術課題

3-1 動作環境及び開発環境の次世代化

CraftPat Neoの開発にあたり、開発目標を満たす技術の選定と、最適な組み合わせを決定することが重要課題となる。CraftPat Neoを構成する主な技術はWebサーバ(Webページの表示に必要な情報を返すソフトウェア)、Webクライアント(Webサーバからの情報を利用するソフトウェア)、通信プロトコル(通信の手順を定めたもの)の3つである(図2)。

(1) Webサーバの選定

CraftPatのWebサーバで使用してきた開発環境C++ Builder Ver.5は、Windows 32bitで動作する技術であり、現在主流の64bit環境には対応できない。そのため、顧客ニーズに対応するための機能拡張、新機能開発、外部プログラムとの連携において障害となっていた。そこで、新たなWebサーバの選定が必要となる。Webサーバの性能は、監視機能の応答やデータ処理能力に直結するため、慎重な評価が必要である。特に、Webクライアントと通信プロトコルとの組み合わせや、開発環境との相性も考慮しながら、開発のスピードや保守性に与える影響も評価する必要がある。

(2) Webクライアントの選定

CraftPatのWebクライアントで使用してきたActiveXコントロール(Microsoft社のソフトウェア技術)は、Windows OS上のWebブラウザInternet Explorer(以下「IE」という。)でのみ動作するため、CraftPatで使用できるWebブラウザはIEに限

定されていた。そこで、汎用性向上のため、Webクライアント開発技術を見直し、マルチブラウザ対応を実現する必要がある。また、Webブラウザに表示する監視画面では、収集データの変化を瞬時に反映する必要がある。そのため、リアルタイムかつ効率的にグラフィックを表示できる技術が求められる。さらに、クライアントサイドでのデータ処理を行うことができれば、サーバとの通信を最小限に抑え、応答速度の向上が可能である。

(3) 通信プロトコルの選定

サーバとクライアント間で常時双方向通信を行い、高速かつリアルタイムでデータを送受信できる通信プロトコルが求められる。そのため、リアルタイム処理の効率が高く、迅速なデータ更新に適した選択が重要である。また、マルチブラウザ対応を実現できることも必要である。

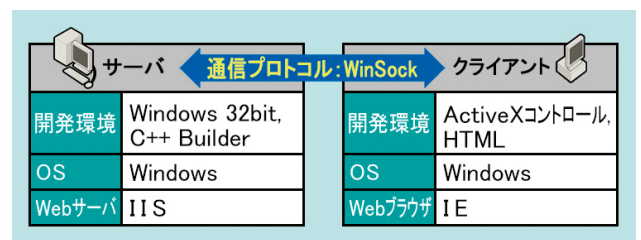


図2 従来 CraftPat のサーバ・クライアント構成

Fig. 2 Server and Client Configuration of Conventional CraftPat

3-2 機能の次世代化

時代と共に変化する多様な顧客ニーズに応えるためには、機能の次世代化も必要である。

(1) 拡張性

CraftPatでは、COM(Component Object Model:Microsoft社が策定した、ソフトウェアを部品化し外部から利用できるようにした仕様)やVBScript(Microsoft社が開発したプログラミング言語)を使用し、基本機能では対応できない演算や外部プログラム起動等の処理を実装してきた。しかし、単なる監視から、AIを活用した自動制御・予知保全、収集データを用いた予測・最適化といった高度な要求への対応が求められるようになった。これらのニーズに応えるためにはCOMやVBScriptでは対応が難しい。そこで、外部ライブラリ(プログラム部品の集まり)やクラウド(インターネット上にあるサーバにデータを保存する仕組み)との連携、AIの活用など、機能拡張を容易に行うことができる仕組みの構築が必要であった。

(2) 帳票機能

CraftPatの帳票機能では、クライアントにExcelをインストールし、ActiveXコントロールを用いてブラウザ内にExcelを埋め込んで帳票を表示していた。そのため、クライアントにExcelを

インストールする必要があること、利用できるWebブラウザがIEに限定されることになり、クライアント追加の手間やクライアント側の使用環境の制限に繋がっていた。さらに、近年のExcelは高機能化が進んでおり、Excel起動時に時間を要するようになった。帳票機能では、WebブラウザからExcelを起動し帳票を表示する方法を採用していたため、起動時間や初期表示の遅延が生じ、使いやすさの低下に繋がっていた。以上より、ActiveXコントロールに依存せずマルチブラウザ対応を実現する新たな仕組みの構築と、帳票表示の高速化が求められた。

(3) セキュリティ

SCADAは通常、インターネットに接続せず独立した構成が多く、CraftPatでも閉じたネットワークで使用する事が想定されており、セキュリティ機能は実装していなかった。しかし、近年、リモート監視やデータ活用のためのネットワーク化が進んでいる。プラントの制御システムが不正アクセスやデータ盗難などの標的になる事例も増加しており、セキュリティ確保は重要課題となっている。そこで、顧客の使用環境に応じた提案やシステム拡張に繋げるためのセキュリティ機能が必要であった。

4. 開発技術

4-1 動作環境及び開発環境の次世代化

4.1.1 構成技術の選定

(1) Webサーバの選定

現在シェアが高く新しいWebサーバであるNginX、IIS、Apacheを候補とし、特徴を比較した(表1)。比較の結果、CraftPat Neoで扱う動的コンテンツの処理に優れているIISとApacheを候補とした。IISは、Windows標準のWebサーバで既にCraftPatでも使用している。また、ApacheはOSを選ばず広く利用されている。

(2) Webクライアントの選定

Webブラウザ上の仕様であるHTML LS(HyperText Markup Language Living Standard)とWebAssemblyを候補とした。WebAssemblyは、開発当時においては規格化されたばかりの技術であったため、開発環境の信頼性を考慮し、HTML LSを選定した。HTML LSでは、Canvas機能(グラフィックの描写を使うための技術)とJavaScript(Web開発で使われるプログラミング言語)を用いてWebブラウザにグラフィックを描画するが、複雑な処理が不要であり高速な画面表示が実現できる。またこれらの技術は、主要なWebブラウザで広くサポートされており、マルチブラウザ対応も実現できる。

表 1 Web サーバの比較

Table 1 Comparison of Web Servers

NginX	IIS	Apache
・国内シェアトップ	・Windows標準	・OSを選ばず広く利用
・動的コンテンツ不得意	・動的コンテンツが得意	・動的コンテンツが得意
	・CraftPatでも使用	

4.1.2 比較評価結果

高速監視に必要な性能評価のために、サーバとクライアント間の通信処理と通信速度、WebサーバとWebクライアントの相性の評価のためにWebブラウザ画面表示の比較を行った。結果を表3に示す。

結果として、(3)のデータ送信時間において構成①(IIS)の方が優れていた。理由は、IISとセットで使用した開発環境ASP.

表 3 比較評価結果

Table 3 Comparison of Evaluation Results

	(1) 受信データ/秒	(2) 送信データ/秒	(3) データ送信時間	(4) Webブラウザ画面
構成①	999 件	1000 件	1 471 ns	CraftPatと同様
構成②	924 件	1000 件	344 435 ns	CraftPatと同様

(1)クライアントから送信されたデータをサーバで受信した件数

(2)サーバからクライアントに送信できる件数

(3)サーバの信号発生器からデータを取得しソケットに送信完了するまでの時間

(4)クライアントのWebブラウザ上に表示された画面描画、グラフ表示、ボタン動作

(3)通信プロトコルの選定

WebSocketとSSE(Server-Sent Events)を候補とした。どちらも主要なWebブラウザでサポートされており、マルチブラウザ対応実現可能である。しかし、WebSocketは常時サーバとクライアント間の双方向通信が可能である一方で、SSEはサーバからクライアントへの一方方向通信であるため、CraftPatの仕様には適していない。そのため、WebSocketを選定した。WebSocketは、双方向通信かつ高速リアルタイム通信を行うことができ、ほかの通信技術に比べリアルタイムでの送受信処理の効率がいため、高速監視に適していると言える。

(1)~(3)の検討を踏まえ、各構成要素を組み合わせた性能を比較評価するために、表2に示す構成で、基本的な監視機能とトレンドグラフを備えたデモシステムを構築した。サーバのOSは、顧客の保守管理が容易なWindowsを採用することが多いため、Windows10とした。

表 2 Web サーバ比較評価条件

Table 2 Experimental Conditions for the Server Test

	サーバ	クライアント	通信 プロトコル
構成①	Webサーバ:IIS OS:Windows10 Pro 64bit 開発環境:ASP.Net,C#	Webクライアント: HTML LS,Java Script Webブラウザ: Chrome,Edge,Safari, Firefox	WebSocket
構成②	Webサーバ:Apache OS:Windows10 Pro 64bit 開発環境:Spring,Java		

NetはMicrosoft社製品であるため、Apacheに比べWindows上で効率よく動作したためと考えられる。また、(4)のWebブラウザ画面においてWebクライアント画面表示や指定した画面更新時間を検証した結果、構成①(IIS)と構成②(Apache)による違いは見られず、CraftPatと同様の表示が確認された。以上の結果から、高速なWebサーバとしてIISが適切と判断した。これに基づき、CraftPat Neoの構成は図3のように決定した。

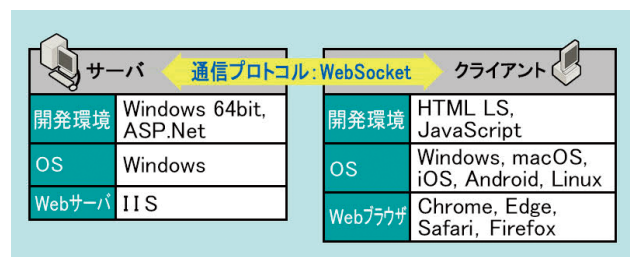


図 3 CraftPat Neo のサーバ・クライアント構成
Fig. 3 Server and Client Configuration of CraftPat Neo

4 - 2 機能の次世代化

4.2.1 拡張性強化

AI制御やデータ分析実現を見据え、CraftPat Neoでは、内部で保持するデータにアクセスし、値を取得・活用するための共有ライブラリDLL(Dynamic Link Library)を開発した。これにより、C#やPythonなど複数のプログラミング言語で使用可能とし、多様なニーズに応じた柔軟な環境での開発が可能となった。特に、Python はAI制御やデータ分析を実現するためのライブラリが豊富といった理由から今後重要な言語と位置付けられる。そのため標準機能として、Pythonプログラムとの連携を容易にする機能を開発した。これにより、AI 制御およびデータ分析基盤を構築することができた。Pythonはインタプリタ言語

(コードを一行ずつ機械語に翻訳・実行する言語)であり、開発環境が不要かつ可読性が高い強みがある一方で、処理速度が遅くなる問題がある。そのため、センサ値の取り込みやアラーム応答など、リアルタイム性が求められる処理にPythonを使うと不安定になる可能性がある。そこで、リアルタイム性が必要な処理には、即応性の高いC#を使用し、Pythonは内部で保持するデータにアクセスして値を取得しデータ処理・連携・解析などの処理に使用するハイブリッド構成とした。それによりリアルタイム性が必要な処理に遅延が生じないようにするとともに、システムの拡張性強化を達成した。

4.2.2 帳票機能の改良

CraftPat Neoでは新たな帳票表示方式を採用した。具体的には、サーバ側でExcelを利用して帳票表示用データを作成し、それをPDFファイルとして保存、Webブラウザ上で表示する仕組みを導入した。帳票をPDF形式で出力・表示する方式へと変更したことで、ActiveXコントロールを用いてExcelをブラウザ内に埋め込み表示する仕組みを使用せずに、開発目標に挙げた4つの主要ブラウザで帳票表示が可能と

なった。これにより、ActiveXコントロールへの依存を解消し、マルチブラウザ対応を実現した。さらに、クライアントPCにExcelをインストールする必要がなくなったことで、クライアントの追加が容易になり、システムの拡張性が向上した。また、クライアント側で表示の度にExcelを呼び出す必要がなくなったため、表示の高速化も実現した。

4.2.3 セキュリティ強化

セキュリティ対策として、SSL/TLS(インターネット上の通信を暗号化して保護する技術)を利用可能とした。近年は、社内など閉じたネットワーク内でもセキュリティ強化が求められるため、プライベート認証局(会社など限られた組織内でのみ電子

証明書を運用する認証局)で発行した証明書も使用できる仕組みを構築した。SSL/TLSに対応することで、インターネット上で通信を行うリモート監視などにも安全に対応できるようになり、顧客ニーズへの対応、システムの拡張が容易になった。

4.2.4 市場に特化した新機能開発

(1)コンパウンド市場向け機能開発

コンパウンド(プラスチック製品等の原料となる樹脂)工場では、グレード(生産するコンパウンド製品の種類)ごとに、フィーダなど各機器の設定値を管理している。グレードを切替える際は、都度、各機器の設定値変更が必要であり手間となっていた。そこで、効率化を図るため、グレード管理機能を開発した。

グレード管理機能により、グレードごとに各機器の設定値を事前登録することで、グレードの切替時に一括で設定値を反映できるようになった。従来は管理データのスケール変更やアラームの閾値変更などの設定更新を別アプリケーションで処理していたが、CraftPat Neoでは新たにWebサーバにて行うよう変更した。DAO(Data Access Objects: プログラミングにおけるオブジェクトの設計様式)にデータ変更検知機能を実装することで、システム再起動不要で即時設定更新反映を可能とした。また、グレード帳票機能に関しても、グレード名と生産期間をキーとしてデータ管理する構成とすることで、グレード名から効率よくデータ検索

できる機能を開発した。それにより、オペレータの負担軽減と利便性に寄与した。

(2)テストラボ向け機能開発

フィーダテクニカルセンターは、クボタ製フィーダのテストを行う施設である。様々な原料に対してサンプリングテストを実施し、顧客に最適なフィーダを提案している。テストラボ向け機能として、任意のテスト開始から終了期間のトレンドグラフとカメラ録画データを連携して呼び出し、解析できる機能を開発した(図4)。カメラ録画データに対しては、録画開始、録画停止をHTTP(Hypertext Transfer Protocol:通信プロトコルの1つ)コマンドで送る方式とし、必要な期間のみ録画することでデータ容量削減に寄与した。この機能により、異常発生時の迅速な原因特定と正確な情報伝達が可能となった。また、粉粒体特性のデータベースとCraftPat Neoを連携させ、フィーダの運転状況と粉粒体特性を同時に分析することで、高度なテスト結果の分析を実現した。これらのデジタル化、自動化の推進により作業効率を向上でき、CraftPat Neoをテストラボ用途でも活用できることを示した。

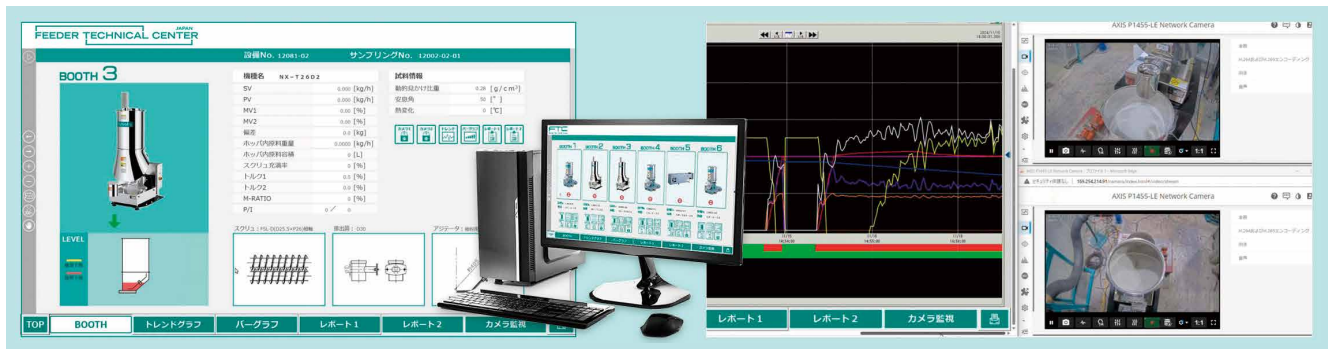


図4 フィーダテクニカルセンター向けトレンドグラフとカメラ録画データ
Fig. 4 Trend Graph and Camera Recording Data for the Feeder Technical Center

4-3 成果の検証

(1)高速監視

- ①現場の信号状態変化を監視PLCで受信してからCraftPat Neoの監視画面表示が更新されるまでの最速時間を計測した。図5に、PLCからサーバ通信、サーバ内処理、サーバからクライアント通信に要した時間を示す。結果として、最速でCraftPatと同等の100ms以下を達成した。サーバ処理でキャッシュ機能を使用し、データ取得の効率化を図ったことも高速化に繋がった。
- ②帳票機能については、CraftPat Neoの帳票画面切替から表示までに要する時間を計測した。その結果、表示までの時間が3秒以内であることを確認した。

(2)拡張性強化

- ①DLLやPythonプログラムとの連携を容易にする機能の開発により、機能の拡張が容易となった。特に、Pythonを使用したAI制御やデータ分析機能の拡張に繋がる。社内においてはPythonのオープンソースライブラリを利用した演算処理機能を組み込み、AI制御が正しく機能することを確認した。また、帳票機能の改良や、セキュリティ強化によって、システムの拡張性が向上した。

- ②コンパウンド市場、テストラボ向け新機能開発を行った。他社SCADAに先行して各市場に特化した機能を実現したことで、市場優位性を示すことができた。
- (3)Webクライアントの汎用性強化
 - ①社内において、Windows PC、Windowsタブレット、Mac PC、iPad、iPhone、Androidタブレット、Androidスマートフォン、Linux PCでの動作検証を実施し、マルチOS対応を達成した。
 - ②開発目標であったChrome、Edge、Safari、Firefoxで動作検証を実施し、マルチブラウザ対応を達成した。

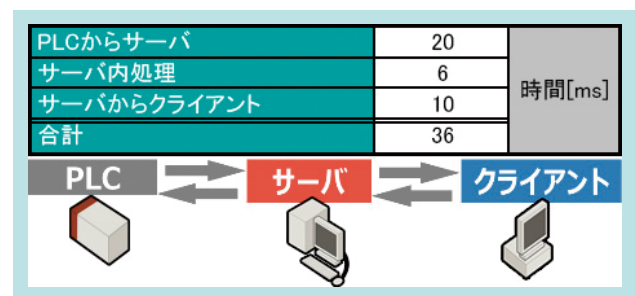


図5 通信速度結果
Fig. 5 Measurement Result

5. おわりに

本開発により、CraftPatの拡張性強化や汎用性強化を実現し、市場や顧客ニーズに柔軟に対応することが可能となった。今後の開発項目としては、クラウド対応、AIを活用した予知保全機能、海外展開を見据えた多言語対応や規格対応などを予定してい

る。CraftPat Neoの納入実績を重ねる中で顧客ニーズを取り入れ、新機能の拡充を進めていく。これからも、オペレータの負担軽減、作業効率化、エネルギー管理、品質管理など、様々な現場の課題解決に貢献し続ける。

SDGsのターゲットへの貢献

7.3 エネルギー効率改善 エネルギー使用量監視により、効率改善に貢献

9.2 包摂的かつ持続可能な産業基盤の強化 プラントや製造工場における作業効率化により、産業化促進に貢献

12.4 製品ライフサイクルを通じた廃棄物の管理の実現 廃棄物処理時の工程監視により、環境への悪影響削減に貢献

参考文献

- 1) Statcounter GlobalStats:「Browser Market Share in Japan - August 2025」
<https://gs.statcounter.com/browser-market-share/all/japan>、(参照日 2025-9-23)

新耐震型ダクトイル鉄管GENEX(呼び径500～1000)の開発

Development of the New Earthquake Resistant Ductile Iron Pipe GENEX (DN 500–1000)



○ 田中 龍之介
Ryunosuke Tanaka
パイプネットワーク技術部



小丸 維斗
Yuito Komaru
パイプシステム品質保証部



伊東 一也
Kazuya Ito
パイプネットワーク技術部

国の施策として、基幹管路の耐震化の推進については高い目標が掲げられている。これまで呼び径500～1000の重要な基幹管路では、優れた強靱性、耐震性を有するNS形ダクトイル鉄管が、多くの事業者で採用されてきた。NS形管がこのように広く普及するのに伴い、更なる施工性向上への要望を数多く頂いていた。また、水道予算の減少に伴い、より低コストでの耐震管路の構築も求められている。

そこで、これらの要望に応えるべく、NS形ダクトイル鉄管と同じ耐震性能を有し管路布設費の低減、より簡易に接合できる新たな呼び径500～1000耐震型ダクトイル鉄管「GENEX」を開発した。

As part of national policy, high targets have been set for enhancing the seismic resistance of main pipelines. NS type ductile iron pipes, known for their toughness and seismic performance, have long been widely used for critical pipelines of DN500–1000. With their widespread adoption, there have been growing requests for easier installation and lower-cost seismic pipelines.

To meet these needs, we developed “GENEX,” a new DN500–1000 seismic ductile iron pipe that provides the same seismic performance as NS type pipes, while reducing installation costs and simplifying jointing.

【キーワード】

耐震型ダクトイル鉄管、施工性向上、管路布設費低減、環境負荷低減、メタルタッチ構造、管下ボルトレス押輪

Earthquake-resistant Ductile Iron Pipe, Improved Jointing, Reduction of Pipeline Laying Cost, Reduction of Environmental Impact, Metal Touch, Boltless Gland Underside of the Pipe

関連する SDGs



1. はじめに

令和6年能登半島地震では、上下水道施設に多大な被害が生じ復旧に時間を要するなど、水道管路の耐震化の重要性が再認識された。2024年4月から水道を所管する国土交通省は、強力に上下水道の耐震化を進めるべく、急ピッチで様々な施策を打ち出してきている。

これまで、呼び径500～1000のサイズで使用されてきたNS形ダクトイル鉄管(以下「NS形」という)は、数多くの地震や自然災害に

おいて優れた強靱性、耐震性が実証され、多くの事業者で重要な基幹管路に使用されてきた。一方で、管路の工事事業者の高齢化や担い手不足、工事入札の不調等が進行する中、作業の簡素化や継手の更なる施工性向上への要望を数多く頂いてきた。

そこで、水道事業者や工事事業者等の要望に応え、上記の課題を解決すべく、新たな呼び径500～1000耐震型ダクトイル鉄管「GENEX」(以下「GX形」という)を開発した。

2. 開発のコンセプト

NS形の課題を解決しつつ、高い強靭性、耐震性を有した製品で基幹管路の耐震化に貢献していくため、GX形の開発コンセプトは、①施工性向上、②管路布設費低減、③実績のあるNS形と同じ継手性能とした。

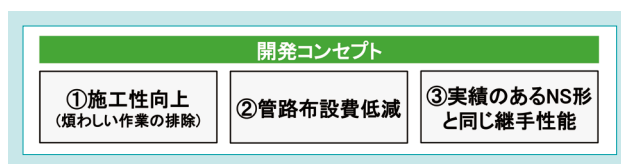


図1 GX形の開発コンセプト
Fig. 1 Development Concept of the GX Type

3. 解決すべき技術課題

GX形の開発にあたり、解決すべき技術課題は以下のとおりである。

(1) スピーディで熟練度に依存しない接合の実現

図2に示すようにNS形では、トルクレンチによるボルト締付や施工管理に時間を要している。さらに、多くの接合作業で熟練度が必要とされるとともに、管の心出しや寸法測定などは作業員にとって負担が大きい。

よって、誰でも簡便かつ迅速に接合できる継手を開発することとした。

(2) 管下作業の撤廃

図3に示すように、管下側の接合作業は、スペースがないことで作業しづらく、管理が難しい。また、管下側での作業スペースを確保するために、掘削溝は継手部毎に深くする(以下「継手掘り」という)必要があり、掘削が手間であり時間を要している。

よって、管下作業を不要にできる継手を開発し、施工性を向上させるとともに、継手掘りの省略により、作業時間の短縮や管路布設費の低減を実現させることとした。

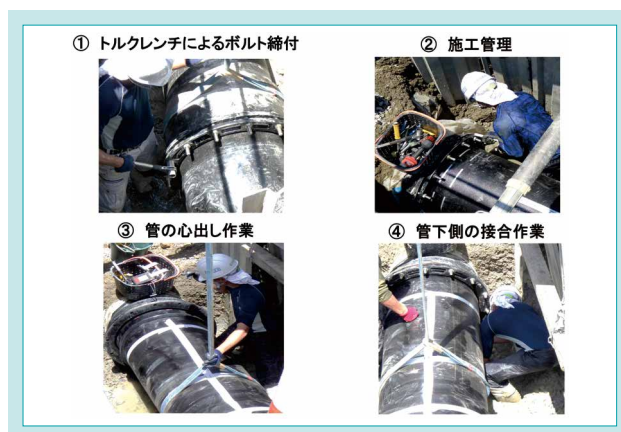


図2 NS形の課題
Fig. 2 Construction Challenges of the NS Type

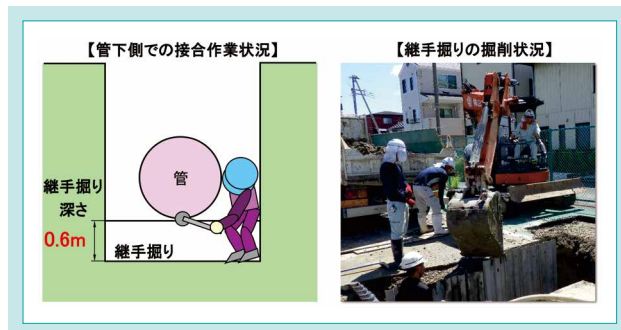


図3 管下側での接合作業および継手掘り
Fig. 3 Pipe Jointing Under Pipe and Joint Excavation

4. 開発技術

4-1 GX形の継手構造

図4にGX形の継手構造を示す。GX形の主な特長は、メタルタッチ構造と管下ボルトレス押輪である。

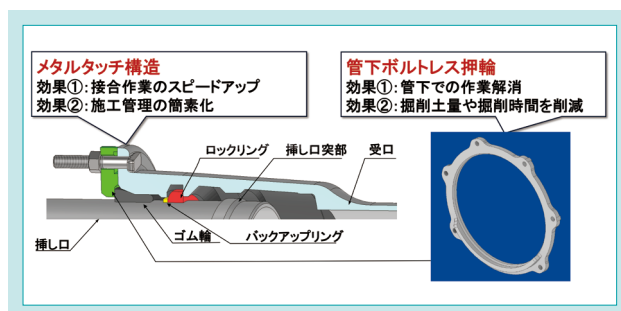


図4 GX形の継手構造および特長
Fig. 4 Joint Structure and Features of the GX Type

4-2 メタルタッチ構造の開発

4.2.1 メタルタッチ構造

呼び径500～1000GX形の継手は、施工性向上のため、呼び径75～450GX形異形管と同様にメタルタッチ構造を採用した。メタルタッチ構造とは、図5に示すように、押輪に設けた突起(管理用突起部)が受口面に接触するまでボルト・ナットを締付けることで、ゴム輪が水密性能を保持できる位置まで確実に押し込まれ、水密性を確保できる継手構造である。

NS形では、図6に示すように、接合時に①締付トルク管理、②受口と押輪の距離管理、③ゴム輪の出入り状態の確認という3つの管理が必要であり、作業時間を要するとともに、一定の熟練を必要とすることが課題である。

これに対しGX形ではメタルタッチ構造を採用することで、電動工具によるボルト締付が可能となり、熟練度に依存せずスピーディな接合を実現した。接合後は、図7に示すように、押輪の突起と受口面の当接を確認するだけでよく、管理上の測定作業も不要である。

呼び径500～1000GX形は、小中口径(呼び径75～450)と異なり、直管・異形管のいずれにもメタルタッチ構造を採用した。直管は大きく継手が屈曲した状態でも止水性を確保する必要があるため、止水性を小中口径異形管より向上させ、かつ施工性との両立を図った。また、電動工具の使用により、ボルトの締付が不均一になる可能性も高くなるため、その点にも留意してメタルタッチ構造の開発を行った。

4.2.2 水密性の確保

耐震管は、平常時はもちろん、地震時等で継手が大きく変位しても水密性を保持する必要がある。メタルタッチ構造では、鉄管の寸法関係に関わらずゴム輪の押し込み量が一定となる。よって、常に止水性を維持するため、継手の寸法や地震時の挙動なども考慮したどんな条件でもスタフingボックス(受口と挿し口の隙間)内にゴム輪が収納できるように、FEM解析と実験を繰返し、施工性と止水性を両立できるゴム輪、受口内面形状および押輪当接面の形状等を設計した。

(1) FEM解析によるゴム輪の挙動調査結果

FEM解析により、接合時のゴム輪の挙動を調査し、ゴム輪を一定量押し込めば、スタフingボックスの所定位置にゴム輪丸部が収まり、狙いの面圧値を達成できる最適な設計条件を特定した(図8)。

(2) ゴム輪の面圧測定結果

図9に示すように、実管を接合して、ゴム輪に発生する面圧を測定した結果、FEM解析結果と同等以上の高い面圧が発生していることを確認した(表1)。

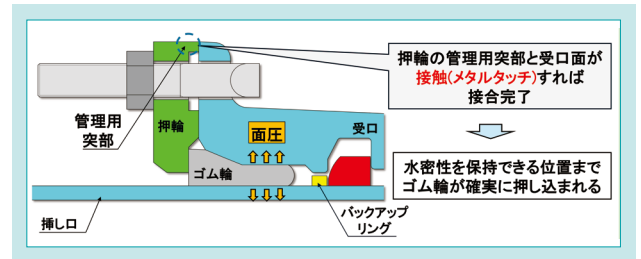


図5 メタルタッチ構造
Fig. 5 Metal Touch Structure

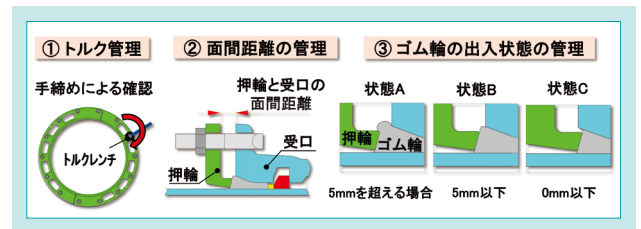


図6 NS形の施工管理
Fig. 6 Construction Management for the NS Type

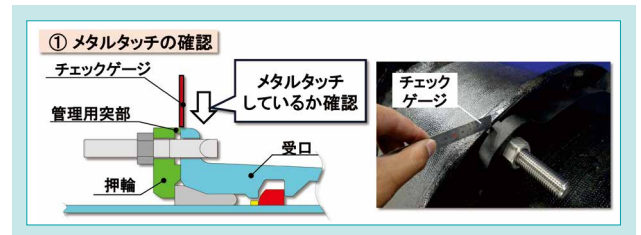


図7 GX形の施工管理
Fig. 7 Construction Management for the GX Type

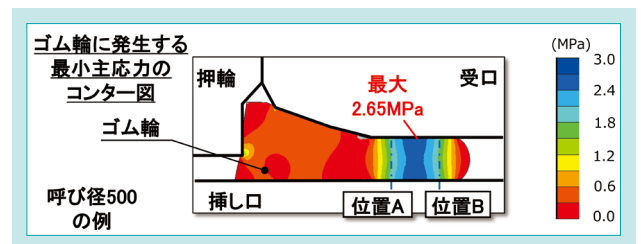


図8 FEM解析によるゴム輪の挙動調査結果
Fig. 8 FEM Analysis Results of Rubber Gasket Behavior

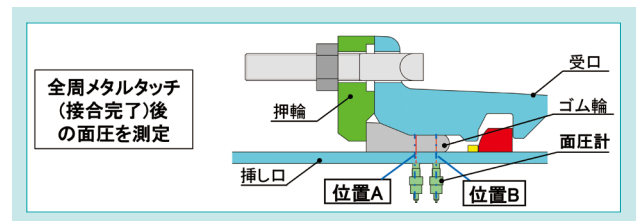


図9 実管を用いてのゴム輪の面圧測定方法
Fig. 9 Surface Pressure Measurement Method of the Rubber Gasket

表1 ゴム輪の面圧測定結果

Table 1 Surface Pressure Measurement Results of the Rubber Gasket

試験項目	結果:面圧		水密性の評価
	位置A	位置B	
実管調査結果	1.82MPa	2.02MPa	○
FEM解析結果	1.79MPa	1.95MPa	○

4.2.3 ボルト本数の削減

メタルタッチ構造で、スピーディな施工を実現するため、NS形からボルト本数を半減することをFEM解析と実験で検討した。

(1)解析条件の算出

接合時に押輪にかかる力(ゴム輪から受ける反力)をFEM解析により算出した。その結果、例えば呼び径500ではゴム輪を押し込む際に、最大53kNの力が押輪に作用することが分かった(図10)。

(2)FEM解析による押輪の応力評価

上記の接合時の反力を押輪に負荷し、押輪の発生応力が弾性域内となるように押輪形状を決定した。メタルタッチ構造では、電動工具の使用により、ボルトの締付が不均一な片締め接合が想定されるため、解析条件は厳しい条件として片締め接合とした(図11)。

(3)片締め接合による押輪の強度確認試験結果

実管を用いて片締め接合を行った結果、問題なく接合可能であり、接合後の押輪には変形が生じていないことを確認できた(図12)。

以上より、FEM解析および実験の結果から、GX形のボルト本数をNS形から半減できることを確認した。

4.2.4 熟練度に依らない接合作業

NS形の接合作業は、(1)受口と挿し口の心出し、(2)受口と挿し口をほぼ真直ぐに据付けて仮締め、(3)ボルトを円周均等に締め付け等、熟練度に依存する作業が多い(図13左)。

これに対しGX形では、作業の簡易化を目指し、(1)心ずれ状態、(2)屈曲状態、(3)片締め といったラフな接合手順でも接合できるように開発した(図13右)。

図14に示すように、上記条件の組み合わせでFEM解析を行い、ゴム輪の挙動を確認した結果、ゴム輪は無理なく受口と挿し口の間に収まることを確認した。

さらに、解析で想定したラフな条件での接合が実際に可能かを検証するため、実管を用いて最も厳しい条件で接合試験を実施した。その結果、すべての条件で接合が可能であり、熟練度に依らない接合作業が実現できることを確認した(表2)。

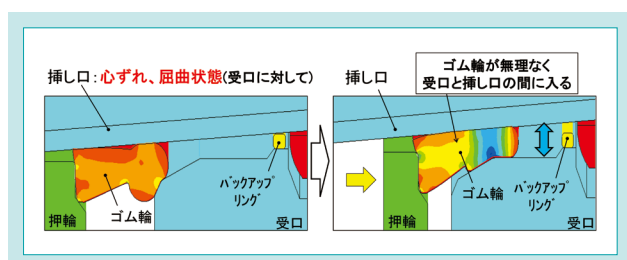


図 14 ラフな接合条件での FEM 解析結果
Fig. 14 FEM Analysis Results Reproducing a Rough

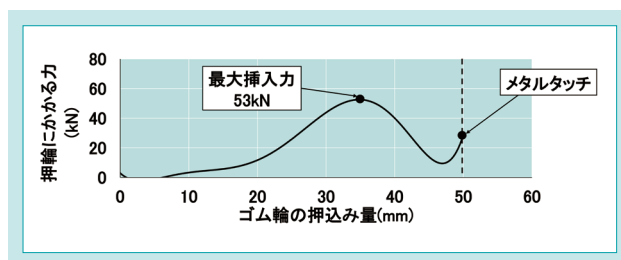


図 10 押輪にかかる力 (FEM 解析結果)
Fig. 10 Forces on the Gland (FEM Analysis Results)

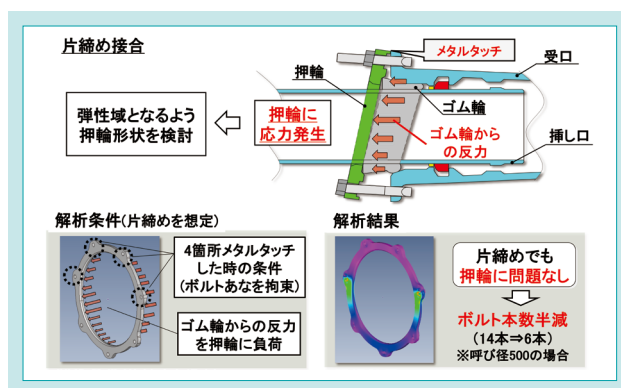


図 11 押輪の FEM 解析条件と解析結果
Fig. 11 FEM Analysis Conditions and Results for the Gland

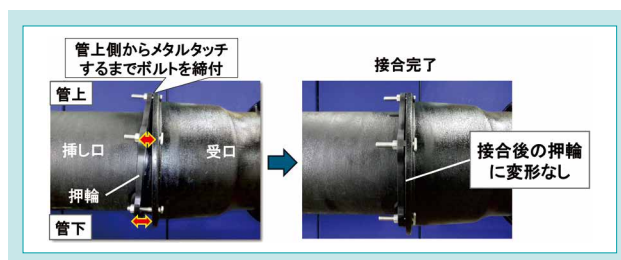


図 12 押輪の強度確認試験結果
Fig. 12 Results of the Strength Verification Test on the Gland

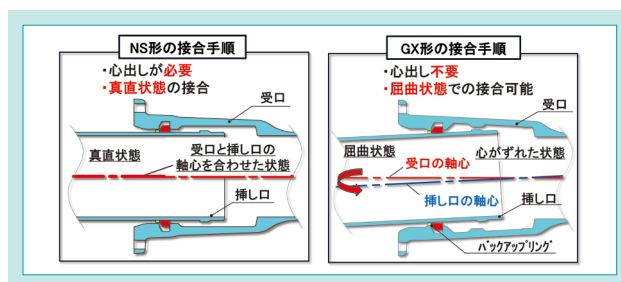


図 13 NS 形と GX 形の接合手順
Fig. 13 Assembly Procedure for the NS and GX type

表 2 厳しい条件での接合試験結果
Table 2 Jointing Test Results Under Severe Conditions

呼び径	対象	接合条件		試験結果
		屈曲角度	ボルト締付方法	
500	直管	0.0°	均等締め	○
			片締め	○
		3.5°	均等締め	○
			片締め	○

4-3 管下ボルトレス押輪の開発

4.3.1 管下ボルトレス押輪

作業しづらい管下でのボルトの締付作業や施工管理を減少させるため、図15に示すように、管下にボルトあなを配置しない押輪を開発した。

従来の押輪は、図16に示すように、いずれもボルトあなが円周均等に配置されているため、狭いスペースでの作業を避けられなかった。GX形では、管下等の作業のしづらい位置にボルトあなの無い箇所を配置すれば、狭いスペースで

の作業が解消され、施工性を向上させることができる。

さらに、図17に示すように、管下での接合作業を不要とすることで、継手掘りの深さを従来の0.6mから0.2mに削減可能となった。これにより、掘削土量や掘削時間を削減でき、モデルとした管路において土木工事費を算出した結果、NS形と比較して約2～3%低減できることを確認した(表3)。

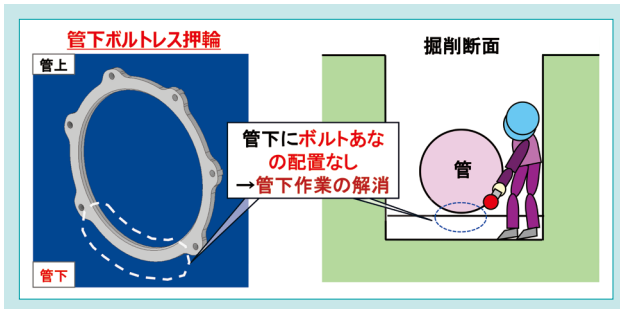


図 15 管下ボルトレス押輪

Fig. 15 Boltless Gland Underside of the Pipe

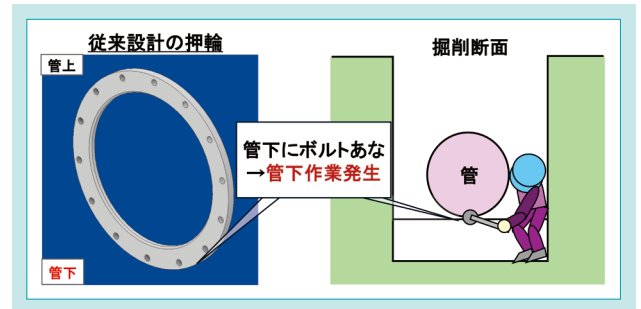


図 16 従来の押輪

Fig. 16 Conventional Gland

表 3 NS 形と GX 形の土木工事費の比較

Table. 3 Civil Engineering Costs for the NS and GX Type

呼び径	土木工事費(単位:千円)		NS形からの低減率
	NS形	GX形	
500	98,236	96,997	▲2.9%
800	154,697	152,946	▲2.5%
1000	229,537	227,306	▲2.3%

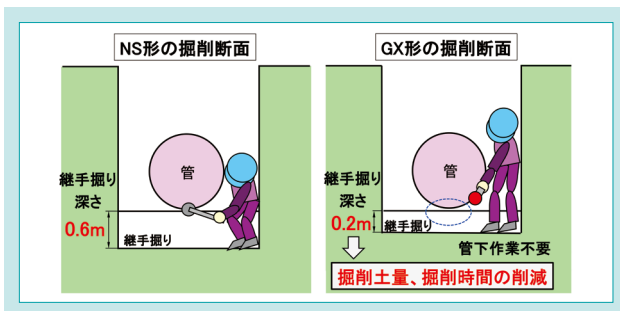


図 17 NS 形と GX 形の掘削断面

Fig. 17 Excavation Cross-Section of the NS and GX Type

4.3.2 管下ボルトレス押輪の設計

図18に示すように管下ボルトレス押輪は、管下のボルトあな間の距離が長い間、接合時や水圧負荷時にゴム輪から受ける反力により押輪がたわむことが懸念された。

そこでゴム輪からの反力によりたわみが大きな箇所をFEM解析により特定し、図19に示すように、当該部を厚肉化

し、剛性を向上させた。

本押輪でのFEM解析および実験のいずれにおいても、押輪の当該部に大きなたわみは認められず、水密性を十分に確保できることも確認できた。

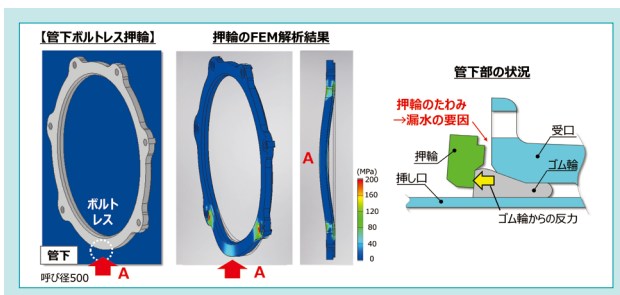


図 18 管下ボルトレス押輪の懸念点

Fig. 18 Concerns About the Boltless Gland Underside of the Pipe

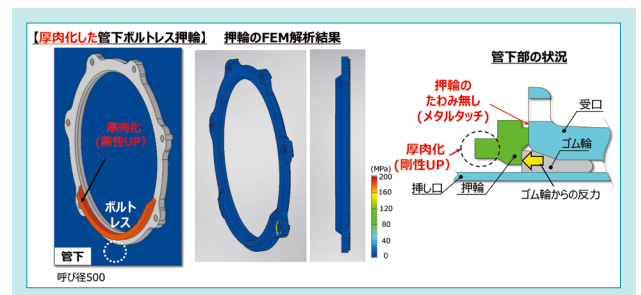


図 19 厚肉化した管下ボルトレス押輪

Fig. 19 Thickened Boltless Gland Underside of the Pipe

4-4 性能評価（呼び径 500、1000）

GX形の性能評価を行うため、呼び径500、1000直管の接合試験、離脱防止試験および水密試験を行った。

(1)接合試験結果

ボルト本数の半減やトルク管理が不要になったことで、ボルト締付や施工管理にかかる時間が大幅に削減され、NS形と比較して作業時間を42～47%短縮できることを確認した(図20)。

(2)離脱防止試験結果

継手部に引張り力を加えた結果、管長の1%以上継手が伸び出した後、3DkN(D:呼び径 mm)の引張り力に耐え、継手部は抜け出さず、変形等の異常がないことを確認した(図21)。

(3)水密試験結果

継手部が真直状態、屈曲(7°)状態の条件で水圧2.0MPaを加えても漏水がないことを確認した(表4)。

以上より、施工性はNS形に比べ大幅に向上し、離脱防止性能および水密性はNS形と同等であることを確認した。

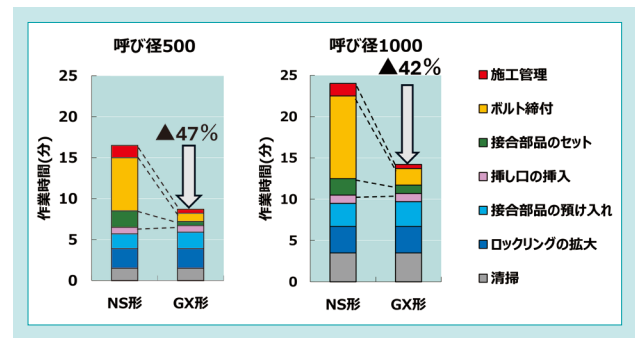


図 20 接合時間

Fig. 20 Comparison of the Jointing Time

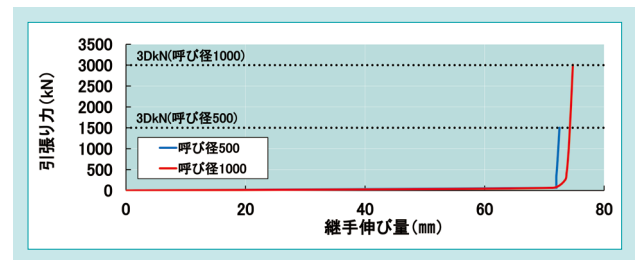


図 21 離脱防止試験結果

Fig. 21 Slip-Off Resistance Performance of the Joint

表 4 水密試験結果

Table. 4 Result of the Watertightness Test

呼び径	対象	試験条件			試験結果
		屈曲角度	負荷水圧	保持時間	
500	直管	0°、7°	2.0 MPa	5分	なし
1000		0°、7°	2.0 MPa	5分	なし

5. おわりに

上記のとおり開発を進め、呼び径500～1000耐震型ダクトイル鉄管GX形の製品化を行った。GX形の特長を以下にまとめる。

(1)メタルタッチ構造

ボルト本数の削減、ラフな接合を可能としたメタルタッチ構造の開発により、スピーディかつ熟練度に依らない施工が可能となった。

(2)管下ボルトレス押輪

管下にボルトあなを配置しない押輪の開発により、管下での作業を解消し、施工性が向上した。また、掘削土量や掘削時間を削減し、管路布設費を削減できることを確認した。

(3)継手性能

施工性はNS形に比べ大幅に向上し、離脱防止性能および水密性はNS形と同等であることを確認した。

これまで、水道事業者様向けに接合や吊り上げのデモンストラーションを実施し、GX形の施工性・強靱性・耐震性について高い評価を頂いてきた。

さらに、2025年からは呼び径500、600GX形の本格採用が始まっており、これまで全国各地の複数現場で施工調査を行ってきた。計37継手を調査した結果、すべての現場で接合作業時間はNS形より短縮できており、同じ工事条件(同呼び径、同施工業者)でのNS形との比較では、実験と同様46.1%の時間短縮を確認できた。今後もNS形からGX形へ置き換えを順次進めていく予定である。GX形の市場投入を通じて、今後急がれる基幹管路の耐震化・更新の促進に大きく貢献していく所存である。

SDGs のターゲットへの貢献

6.1 安全で安価な飲料水のアクセス強化 管路布設費を低減した水道管材の提供により上下水道インフラ設備に貢献

9.1 質の高い持続可能かつ強靱なインフラ開発 耐震管の提供により持続可能で強靱なインフラ開発に貢献

浄水向け凝集沈澱制御システムの開発

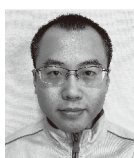
Development of Drinking Water Coagulation Control System



○ 権 大維
Dawei Quan
水環境研究開発第二部



大槻 トウイ
Thuy Otsuki
水環境研究開発第二部



松永 晃
Akira Matsunaga
水環境研究開発第二部

浄水場の運転管理の省力化・省人化を図るために、機械学習を活かした凝集剤注入率の予測演算技術と凝集状態の良否判定技術を組み合わせた制御システムを開発した。凝集剤注入率の予測演算では、更新型の回帰手法を採用してベテラン水道技術者並みの設定精度を実現する。凝集状態の良否判定では、独自開発の凝集状態監視装置で凝集状態を常時監視して良否を判定し、許容できない水質悪化を防止する。さらに、浄水場の運転管理支援ツールとして、取水流域の気象情報と機械学習による原水濁度の予測演算技術も搭載した。本システムを用いて猪名川浄水場を対象に実地検証を行った結果、良好に機能することを確認しており、安心して実運用に資することを示した。

For labor saving and manpower reduction in drinking water treatment plant operation, an automatic coagulation control system was developed. With a renewed machine learning approach built on previous operation data, human-level performance in coagulant dosage decisions was achieved. Meanwhile, based on images obtained by a floating monitoring device, coagulation status evaluation was conducted constantly to ensure effluent water quality. Furthermore, pre-information application of operation details based on predicted influent turbidity was also developed to gain a more rational and efficient operation plan. Field verification was conducted at the Inagawa Water Treatment Plant. The results confirmed that the system functioned effectively, demonstrating its potential for reliable practical operation.

【キーワード】

浄水処理、凝集剤、注入制御システム、原水濁度予測、機械学習

Drinking Water Treatment, Coagulant, Injection Control System, Influent Turbidity Prediction, Machine Learning

関連する SDGs



1. はじめに

国内では、急速ろ過方式(凝集沈澱+砂ろ過)を採用する浄水場が、水量ベース¹⁾で約80%を占めている。この方式で良好な浄水水質を確保するためには、凝集沈澱処理の適切な運転管理が不可欠である。

急速ろ過浄水場の凝集沈澱処理プロセスでは、降雨時等により変動する原水水質に応じて、適切な凝集剤の注入率を決定する必要がある。そのため、日々のジャーテスト(複数ピーカーに採取した原水に注入率を振って凝集剤を添加し、所定時間攪拌・

静置した後に凝集状態と上澄水濁度を確認する手作業による試験)や、現場での凝集状態の目視確認等、経験者による人的操作が欠かせない。一方、昨今の気候変動の影響により、取水流域での局地的な豪雨や土砂崩れに起因する原水水質の悪化(特に原水濁度の急上昇)が頻発している。筆者らが各浄水場から頂いた原水濁度データの経年推移を図1に示す。

このような状況に加え、ベテラン職員の退職等に伴い、水道技術者数の減少が進行し(図2)²⁾、原水濁度の変動に対応する凝集

沈澱処理の運転管理は、大きな負担になりつつある。特に、夜間に原水濁度が急上昇するような局面では、迅速な対応のために人員配置や業務指示を適切かつ効率的に行うことが求められる。

こうした背景のもと、各社からはさまざまな凝集剤注入に関する自動制御技術が提案³⁾されているが、不適切な凝集剤注入率

の設定による浄水水質の悪化への懸念や、制御装置のメンテナンスが必要であること等の問題があり、広く普及するには至っていない。

そこで、これらの課題を解決可能な凝集沈澱制御技術を開発した。

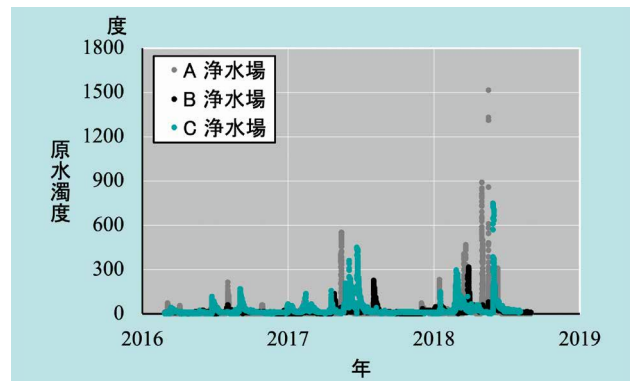


図1 浄水場原水濁度推移の例

Fig. 1 Influent Turbidities of Three Drinking Water Treatment Plants

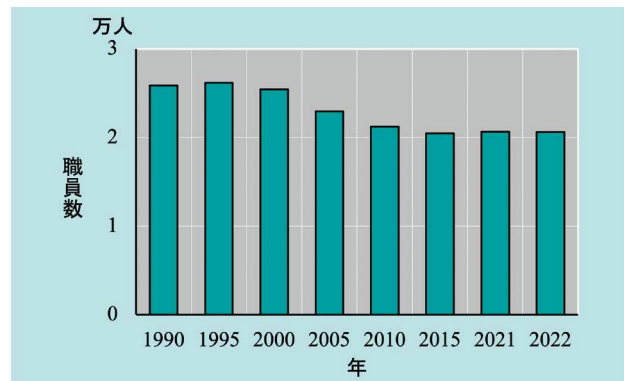


図2 全国水道技術者職員数の推移

Fig. 2 Number of Nationwide Water Supply Engineers

2. 開発のコンセプトと目標値

2-1 開発のコンセプト

水道事業者が安心して省力化・省人化を進められるよう、安定かつ良好な浄水水質を確保できる凝集沈澱制御システムの構築を目指す。これに向けて、凝集剤注入率の予測演算と凝集状態の良否判定を組み合わせる(図3)。

凝集剤注入率の予測演算には、更新型の機械学習回帰を採用し、運転ノウハウの集約によって技術継承と演算精度の維持を両立させる。凝集状態の良否判定には、異常を検知できるインターロック機能を搭載し、浄水水質の悪化を防

ぐことで、安心して運用できる仕組みとする。省力化・省人化の実現に向けては、ジャーテストや凝集状態の目視確認といった作業の大幅な軽減を図る。さらに、原水濁度の上昇に伴い通常とは異なる運転管理が必要となる場面に備え、高濁度予測機能をオプションとして実装する。これにより、事前に状況を把握し、勤務体制の変更や業務準備を、余裕をもって行えるようにする。

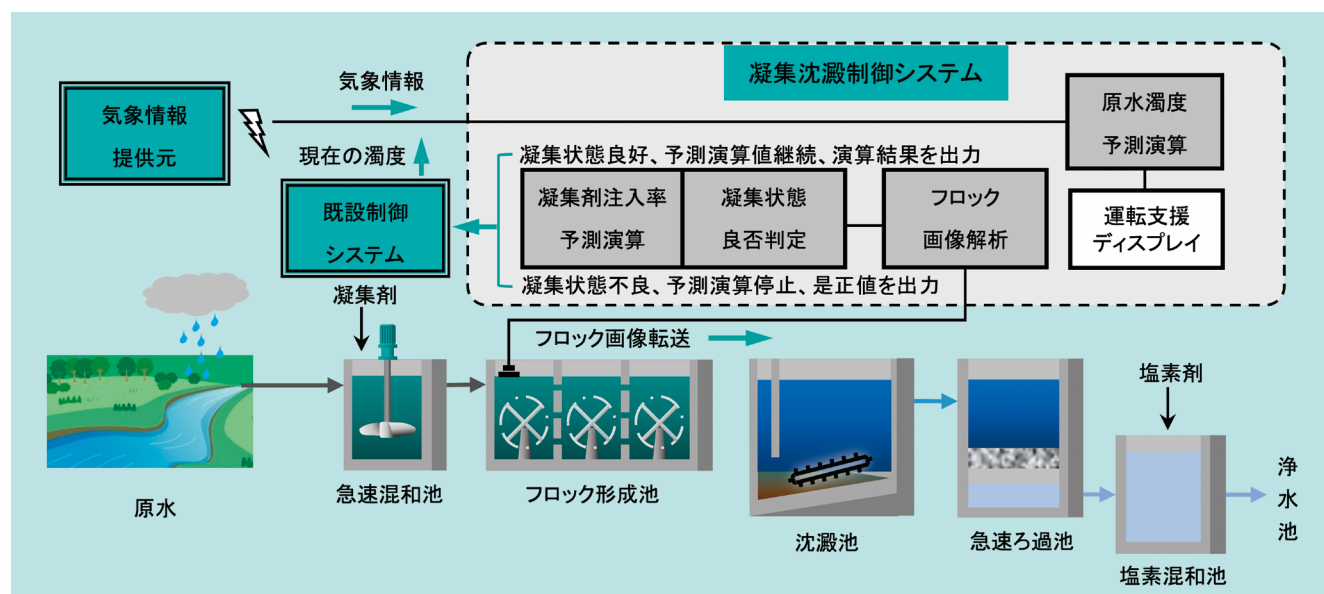


図3 凝集剤注入制御システムの概念図

Fig. 3 Image Diagram of the Coagulation Control System

2-2 目標値

凝集剤注入率の予測演算の目標は、演算値と実際に適切とされる設定値との誤差が浄水場のジャーテスト結果に基づく注入率の最小設定振幅より小さいこととした。すなわち、自動演算結果の許容誤差範囲がジャーテストによる結果と同程度の設定とした。また、凝集状態良否を判定する正解率の

目標は、95%以上と設定した。原水濁度予測の目標は、原水濁度の変動に対する業務指示を、管理者が適切なタイミングで行えるように、浄水場の運転管理内容の変更が必要となる濁度値への到達時刻を6時間前に予測することとした。

3. 解決すべき技術課題

下記、従来技術と比較し、解決すべき技術課題をあげる。

- 1) 従来の凝集剤注入率の演算技術は、重回帰やランダムフォーレスト回帰等固定した計算方法とパラメータ設定での算出が主流である⁴⁾⁵⁾。しかし、取水源の環境あるいは浄水プロセスに変化があった場合、既定の計算方法では適切な演算結果が得られないといった問題がある(演算方法の劣化)。したがって、環境変化が生じた場合でも、劣化が発生しにくい高精度の演算方法の確立を課題とした。
- 2) 従来の凝集状態に関する評価技術では、フロック形成池(注入した凝集剤が水中の浮遊物を凝集し、沈澱しやすい集塊(フロック)を形成する池)に水中カメラ等を設置して凝集フロックを観察する手法が一般的である⁶⁾⁷⁾。しかし、この方式は、カ

メラを水中に浸漬するため、レンズ等の光学測定部に汚れが付着しやすく、頻繁な洗浄等の保守作業が必要といった問題がある。したがって、汚れを付着させずにフロックの状態を観測できる装置構造とすることを課題とした。

- 3) 原水濁度予測技術の先行例としては、取水地域の降水量や河川流量の集計データから原水濁度の予測を試みる検討があるが、特定の河川を対象としており、汎用性に乏しいという問題がある。また、情報として、濁度の予測値が出力されるが、具体的に浄水場の運転管理をどう支援するかまで出力しない。したがって、原水濁度予測の精度に加えて汎用性も持たせ、各地の浄水場運転管理に即した実用性の高い運転管理支援技術として仕上げることを課題とした。

4. 開発技術

4-1 高精度の凝集剤注入率の演算方法の確立

4.1.1 技術概要

凝集剤注入率の予測演算では、ベテラン水道技術者による運転実績と近似する演算結果を実現するために、過去の運転データをクラスタリング処理で細分し、複数の回帰手法から各クラスタに対する最も精度の高いものを決定する手法を採用した。その上、現状と過去イベントの類似度合いを考

慮した回帰演算も採用した。また、通常濁度時と高濁度時のそれぞれに適した演算方法を使い分けることで、全体の演算精度を向上させた。さらに、定期的に最新の学習データを取り入れて更新することで、演算方法の劣化防止も図るアルゴリズムを構築した⁸⁾。

4.1.2 技術検証

技術検証は、琵琶湖・淀川水系を水源として916 900 m³/日を高度浄水処理する阪神水道企業団の基幹浄水場である猪名川浄水場で実施した。当浄水場では、凝集剤として硫酸バンドを利用しており、その注入率を決定するためにジャーテスト(30 mg/Lの振幅で5連試験)を毎日実施している。

本検証では、浄水場の過去データを用いて回帰モデルを構築し、リアルタイムで入力された水量や水質等のデータから連続的に凝集剤注入率の演算値を出力した。出力された凝集剤注入率の演算値と浄水場の実際設定値から平均絶対誤差を計算し、演算精度を評価した。具体的な検証方法を表IIに示す。

検証の結果、全体的に凝集剤注入率の演算値と実際設定値に大きな乖離はなく、原水濁度上昇に伴う注入率増加時でも遅れなく近似する結果となった(図4)。また、予実の平均絶対誤

差MAE値は、2.3 mg/Lを示し、浄水場のジャーテストの注入率設定振幅である30 mg/Lを下回っており、ベテラン水道技術者の運転実績に近似する演算結果が得られた。

一方、2022/1/6～1/31の期間中は凝集剤注入率の予実値に

表 1 凝集剤注入率の予測演算の検証方法
Table. 1 Test Method of Coagulant Dosage Prediction

項目	内容
目的変数	硫酸バンド注入率
説明変数	水量、水質、ほかの薬品注入関連10項目
通常濁度	ニューラルネットワーク回帰等から選定
高濁度	偏最小二乗回帰等から選定
学習データ	2016/4/1～2021/1/31
検証データ	2021/2/1～2023/2/28

乖離が見られた(図5)。この期間の運転状況を確認したところ、藻類増殖に伴う臭気対応のため凝集剤注入率を意図的に通常より増加させていた。このような運転管理の変更点に対しては、関連説明変数(藻類数等)を追加して学習後に演算する対応が理想であるが、現状では藻類数等の連続データ取得は困

難である。これに対応するため、この運転実績を追加学習データとして演算方法に取り入れた後に更新を行った(2022/2/1)。その結果、演算値が実際値に追従するようになり、演算方法の更新による精度向上の効果を確認できた。

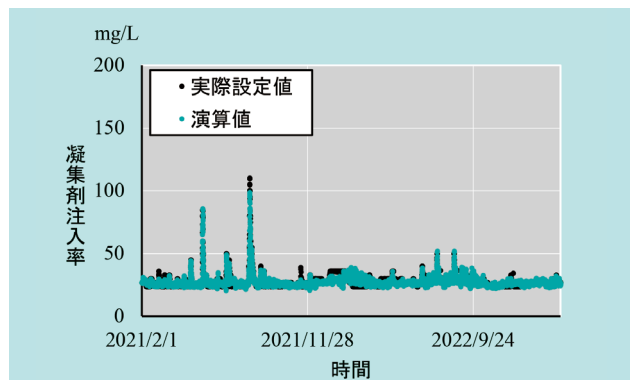


図4 凝集剤注入率の予実プロット

Fig. 4 Test Result of the Coagulant Dosage Prediction

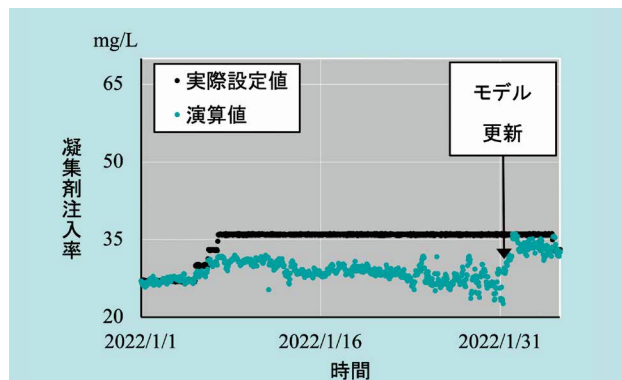


図5 凝集剤注入率の予実プロット(モデル更新の一例)

Fig. 5 Deviation Between Actual Dosage and the Prediction

4-2 保守性の優れた凝集状態監視装置及び良否判定技術の開発

4.2.1 技術概要

凝集状態の良否判定は、撮影したフロック画像を基に行った。このフロック画像を取得するために、凝集状態監視装置を開発した。本装置は、レーザー光源とカメラから構成されるセンサ(図6)を液相と接触しない光路設計で配置し、フロック形成池の水位変動に追従できる浮体式架台に搭載して水上に設置する。この凝集状態監視装置で連続撮影した凝集フロックの画像を解析し、凝集不良を検知した場合、警報を発信して設備点検を促すとともに、凝集剤注入率の演算を停止(同時に是正值を出力)するインターロック機能を搭載した。これにより万一の水質悪化を防止し、凝集制御システムを安心して利用できることになる。

良否判定の演算は、あらかじめ凝集状態の「正常・異常」をラベリングした凝集フロックの画像の解析結果と凝集剤注入率・水質データの結合を行った。次に、結合データを用いて機械学習し、複数の分類器を構築した。そして判定の精度を向上させるために、複数分類器の判定結果をさらに多数決で最終判定結果として出力させた。

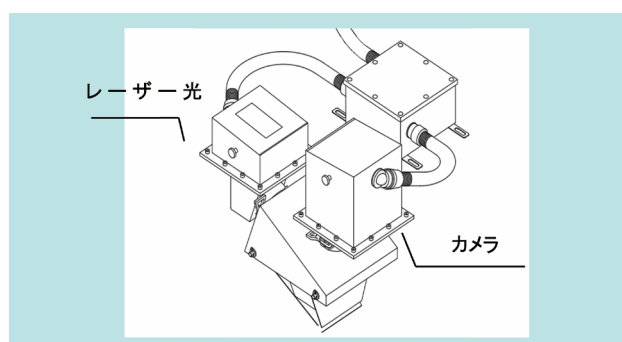


図6 凝集状態監視センサ本体部(浮体式架台に搭載)

Fig. 6 Coagulation Status Evaluation Sensor

4.2.2 技術検証

凝集状態監視装置を猪名川浄水場の上下迂流式及び攪拌機式フロック形成池の上流部に設置し(図7)、形成初期のフロック画像(図8)を連続に取得した。これら二方式のフロック形成池は攪拌方式が異なるため、それぞれの池構造に適した浮体式架台を設計した。

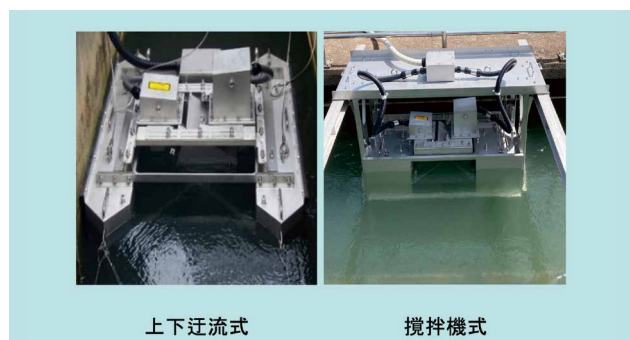


図7 二種フロック形成池に設置した凝集状態監視装置

Fig. 7 Floating Coagulation Status Monitoring Devices

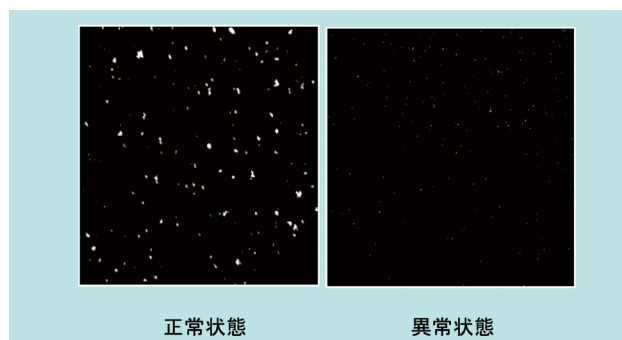


図8 異なる凝集状態のフロック画像例

Fig. 8 Coagulation Floc Image Samples

表2に示す方法で、画像を定量化処理し、原水水質や運転状況に合わせてデータのラベリングを行い、学習データとして蓄積した。機械学習の分類方法を活用して凝集状態良否判定の正誤率を検証した。検証用凝集フロック画像に対して、正常かどうかを判定した結果では、全期間において、99%以上の判定正解率を得られた。また、判定結果の混同行列で正誤率を確認した結果(表3)、運転管理上で最も避けたい誤判定である偽陰性(実際は異常であるにもかかわらず正

表 2 凝集状態良否判定の検証方法
Table. 2 Test Method of Coagulation Status Evaluation

項目	内容
変数	フロック粒子数、面積、周囲長に関する分布値
学習データ数	5000枚
検証データ数	1000枚
分類手法	サポートベクターマシン分類器等4種

常と判定)の出現率が0.3%以下であり、本演算方法により、高い判定精度で運用が可能と考える。

また、9ヶ月間連続稼働した凝集状態監視装置を点検したところ装置の状態は良好でそのまま引き続き使用可能であった。この間は清掃等のメンテナンスを行わなくとも凝集状態の良否判定に必要な画像の撮影・監視・評価機能を維持できており、本装置は優れた保守性を示した。

表 3 凝集状態良否判定の検証結果
Table. 3 Confusion Matrix of the Coagulation Status Evaluation

混同行列		判定の結果	
		正常	異常
実際の状態	正常	750	10
	異常	3 (0.3%)	237

4-3 汎用的な濁度予測技術を基にした運転管理支援技術の開発

4.3.1 技術概要

原水濁度の予測技術では、浄水場取水点の上流域の気象・河川地理情報と原水濁度の関係性に着目し、予測への寄与度が高い地域の地理メッシュを選定して当該地域の気象データから予測演算する手法を採用した。これにより、各地の浄水場に対して選定したメッシュの過去気象情報と濁度データを学習データとして利用することで汎用性のある予

測モデルの構築が可能となる。予測モデルについて、時系列データの予測に適した長・短期記憶回帰(LSTM)を採用した。また、原水濁度と浄水場の運転管理内容(もしくは対応レベル)をあらかじめ紐づけ、濁度の予測値とそれに応じた運転管理内容を同時に監視端末へ提示するようにした⁹⁾。

4.3.2 技術検証

猪名川浄水場の取水流域の三次地理メッシュ(1km×1km)¹⁰⁾における過去の気象データ(降水量、流域雨量指数)を用意し、同期間中の原水濁度挙動と照合し、挙動近似の地理メッシュとその気象データを抽出し、濁度データと合せて検証用のデータセットとした。これに対して交差検証を実施し、最も高精度の予測結果が出た際のパラメータを用いて予測モデルを構築した。同地理メッシュ現在の気象データと原水濁度データを予測モデルに入力し、6時間先の濁度を予

測演算し、予め設定した管理対応レベルを変更する濁度に対する予測の正答率を求めた。検証の結果では、濁度上昇に伴う管理対応レベルを変更する必要があることを、6時間前に89%の正答率で予測ができた(図9に一例を示す)。濁度が急上昇し始めるタイミングを事前に予測することで高濁度時に必要な業務を効率的に実施でき、本技術を運転管理に活用することが可能と考える。濁度予測及び運転管理内容の提示画面一例を図10に示す。

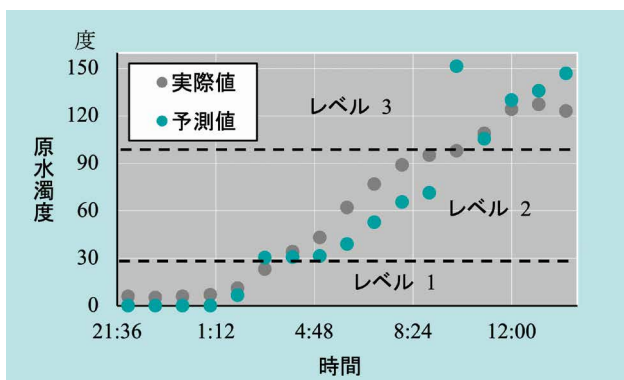


図 9 浄水場の運転管理対応レベル変更の予測
Fig. 9 Prediction of the Operation and Response Level

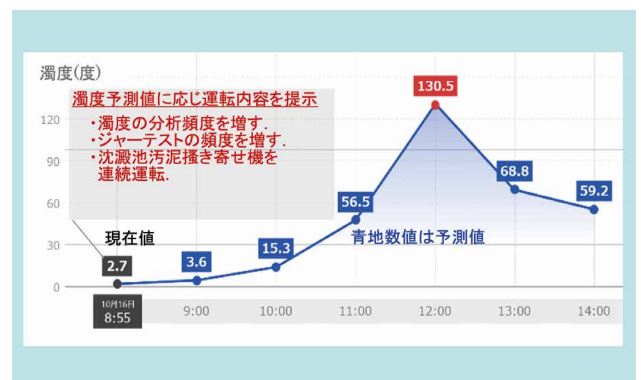


図 10 原水濁度予測値と運転管理内容の提示画面例
Fig. 10 Predicted Influent Turbidity and Operation Details

5. おわりに

浄水場の運転管理の省力化・省人化を図るために、凝集剤注入率の予測演算と凝集状態の良否判定を組み合わせた制御システム、原水濁度予測技術を開発した。システムの性能確認を目的に、猪名川浄水場を対象とした長期検証を行った。いずれも良好な性能を示しており、安心して省力化・省人化ができることを示した。

謝辞)

本研究は、阪神水道企業団及び株式会社日水コンとの共同研究「ビッグデータ・暗黙知の活用による凝集沈澱制御・支援モデルの構築」の一環として実施した。検証フィールドのご提供ならびに研究用データのご提供に際し、格別のご協力を賜りましたことに深く感謝申し上げます。

SDGs のターゲットへの貢献

6.1 安全で安価な飲料水のアクセス強化 安定かつ良好な浄水水質を確保できる浄水処理運転に貢献

9.1 質の高い持続可能かつ強靱なインフラの開発 水道事業者が安心して省力化・省人化が図れる新技術を開発

参考文献

- 1) 水道技術研究センター：高濁度原水への対応の手引き、(2014)、PP.5
- 2) 日本水道協会：水道統計、(2021)、PP.70
- 3) 三宮豊ほか：「アルミニウムを用いたPAC注入制御方式の実証」環境システム計測制御学会誌、Vol.17、第2・3合併号、(2012)、PP.143-150
- 4) 坪倉徹哉、岡田臣由：「水処理設備維持管理業務における凝集剤使用量の適正化」第17回情報科学技術フォーラム、第4分冊、(2018)、PP.319-320
- 5) 平林和也ほか：「ビッグデータ解析を適用した薬品注入ガイダンスシステム」環境システム計測制御学会誌、Vol.23、第2・3合併号、(2018)、PP.16-20
- 6) 福田美意ほか：「流動電流値を指標とした凝集剤注入制御の実用化」環境システム計測制御学会誌、Vol.20、第1号、(2015)、PP.19-26
- 7) 凌海ほか：「凝集フロック画像のAI判定による凝集条件最適化に向けたフロック画像前処理技術の開発」令和5年度全国会議(水道研究発表会)、4-4、(2023)、PP. 230-231
- 8) 権大維ほか：「機械学習を活かした凝集剤注入制御技術の開発」令和5年度全国会議(水道研究発表会)、4-15、(2023)、PP.252-253
- 9) 権大維ほか：「気象データを用いた原水濁度予測技術とその活用」令和6年度全国会議(水道研究発表会)、3-8、(2024)、PP.250-251
- 10) 国土数値情報河川データセット
<https://geoshape.ex.nii.ac.jp/river/resource/860604/>、(参照日2025-6-6)
- 11) Creative Commons
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>、(参照日2025-6-6)
- 12) 国土数値情報ダウンロードサイト
<https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/other/agreement.html>、(参照日2025-6-6)

本稿で利用した国土数値情報「河川データ」は、クリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際(CC BY 4.0)ライセンス¹¹⁾の下に提供される(『国土数値情報河川データセット』(NII作成)「国土数値情報」(国土交通省)を加工)¹²⁾。

下水サーベイランスによる感染動向モニタリングの開発

Development of Infection Trend Monitoring Using Wastewater Surveillance



○ 門田 優哉

Yuya Monda

水環境研究開発第二部



田村 崇

Takashi Tamura

水環境研究開発第二部



岡崎 亮太郎

Ryotaro Okazaki

次世代研究第三部



江崎 聡

Satoshi Ezaki

次世代研究第三部

下水サーベイランスは、集水域の人々から排出された病原性微生物の濃度を測定することで感染症の流行状況を把握する手法である。感染症に対してレジリエンスのある社会を実現するという社会課題を解決するために、学際研究を活用した下水サーベイランスの社会実装事例を報告する。本開発では、自治体、学際的な専門家、クボタが連携し、市民及び医師会の皆様から意見や要望を収集しながら、開発コンセプトの検討や技術開発に取り組んだ。これまでの研究の成果により下水サーベイランスの情報を市民の皆様に対して効果的に公表できる体制が整いつつある。

Wastewater surveillance is a method for monitoring infectious disease outbreaks by measuring the concentration of pathogenic microorganisms in wastewater. To achieve the societal goal of building resilience to infectious diseases, we report on a real-world implementation of wastewater surveillance that employed transdisciplinary research. In this research, local governments, interdisciplinary researchers/experts, and Kubota Corporation collaborated to develop the concept and technology while collecting input from citizens and medical associations. As a result, a system is being implemented to enable effective public disclosure of wastewater surveillance information.

【キーワード】

下水サーベイランス、学際研究、下水道、感染症対策

Wastewater Surveillance, Transdisciplinary Research (TDR), Sewerage, Infectious Disease Prevention

関連する SDGs



1. はじめに

下水には、集水域の住民から排出された情報が含まれており、これを有効に活用することで下水道の新たな価値を創造できる可能性がある。下水サーベイランスは、集水域の人々から排出された病原性微生物を測定することで、感染症の流行状況を把握する手法であり、新型コロナウイルスの流行とともに注目を集めてきた。下水サーベイランスの長所は、無症状の感染者を含む流域全体の感染状況を早期に把握できること、そして非侵襲性かつ匿名性が保たれることである。これをより有効に活用することで、感染症に対してレジリエンスのある社会を実現できる可能性がある。

新型コロナウイルスパンデミック時を振り返ると、保健所を持たない自治体では市区町村単位での流行状況を把握することが難しく、市民の皆様に対する呼びかけや医療機関における事前の体制整備ができないという問題が浮き彫りになった。

クボタは、感染症に対してレジリエンスのある社会を実現するという社会課題を解決するために下水サーベイランスの社会実装の検討を進めてきた。これにあたっては様々な科学分野の専門家や市民を代表する多様なステークホルダーとの学際研究が有効である¹⁾。本論では、下水サーベイランス技術の社会実装に取り組んだ学際研究の事例について述べる。

2. 開発のコンセプトと目標

2-1 開発のコンセプト

本開発では、感染症に対してレジリエンスのある社会を実現するという社会課題を達成するために、科学分野に限らず関連するステークホルダーが研究の初期プロセスから参加することを目指した。まず技術シーズをアカデミアの先生方と共有し、小松市様にその技術シーズに対する賛同を得て、小松市共同体連携協定を締結することで体制を構築して研究を開始した(図1)。そして研究成果により得られた下水サーベイランスデータを市民の皆様に向けて公開する取り組みを開始し、その結果に対するフィードバックを小松市健康福祉部や市民、医師会の皆様から得た。

このようにして、開発のコンセプトは決定され、「市民が必要とする情報を迅速かつ信頼性を確保し、発信できる状態」とした。

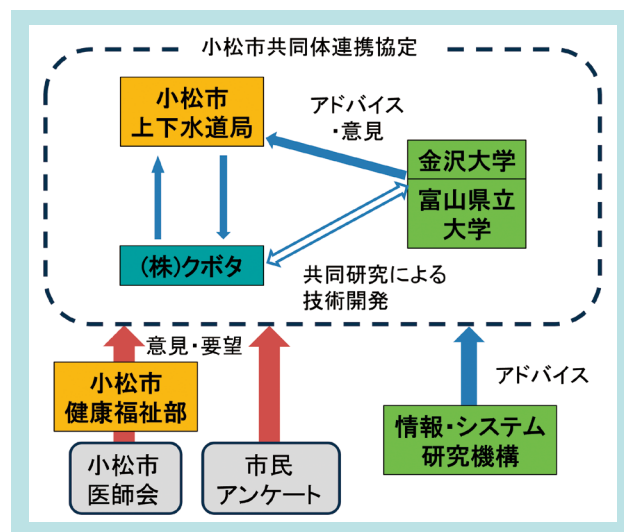


図1 小松市共同体の体制

Fig. 1 The Organizational Structure of the Komatsu City Community

2-2 目標

前述の開発コンセプトを達成するために、以下の目標を設定し、技術開発に取り組んだ。

【情報発信】採水した翌日に分析することで、迅速な情報発信ができる体制を確立すること。

【信頼性】下水サーベイランスデータと感染者数の相関係数が高く、信頼性を確保すること。

【汎用性】下水サーベイランスの対象とするウイルスの拡大とその効果を定量的に評価すること。

3. 解決すべき技術課題

3-1 【情報発信】採水日の翌日に分析し、有効な情報発信体制の確立

従来のPEG(ポリエチレングリコール)沈殿法を用いた分析方法²⁾では、分析拠点に輸送してから分析を開始するため、分析のリードタイムが2日であった。そのため、分析の翌日に情報発信をするとした場合には、情報発信までに採水してから3日のリードタイムを要した。市民の皆様へ感染動向

を早期に周知するためには分析のリードタイムを短縮する方法を確立する必要がある。また得られた情報を効果的に発信し、継続的な関心を喚起・維持する方法を検討する必要がある。

3-2 【信頼性】下水サーベイランスデータの信頼性を確保

下水中ウイルスの定量には、様々な誤差要因が影響する。例えば、個々人が排出するウイルス量の差異、下水中のウイルスの挙動、下水流入量の変動、計測機器の誤差など

である。これらの誤差を低減するデータ処理方法を開発するとともに、下水中ウイルス濃度が地域の流行状況をどの程度正確に反映しているのかを示す必要がある。

3-3 【汎用性】下水サーベイランスの対象ウイルス拡大

本開発の初期段階では、新型コロナウイルスを対象にして、下水サーベイランスを開始した。関連するステークホルダーから意見を収集すると、新型コロナウイルスの下水サーベイランスに対する高い評価に加えて、次なるサーベイラン

スの対象としてインフルエンザウイルスのニーズが明らかになった。そこで、インフルエンザウイルスの分析技術の確立を目指した。対象ウイルスを拡大するにあたり、この情報発信による有効性も評価する必要がある。

4. 開発技術

4-1【情報発信】採水日の翌日に分析し、有効な情報発信体制の確立

4.1.1 迅速な分析方法の確立

迅速な情報発信を実現するために必要なことは、分析のリードタイムを削減することである。従来の下水分析技術では、採水した試料の上清を使用し、PEGと混合した後、ウイルス濃縮を実施した(図2)。分析のリードタイムを削減するうえでボトルネックとなるのは以下の2点である。リードタイムの削減に加えて、分析感度を維持することが不可欠である。

- ①下水を粗遠心して上清を得る場合、下水を分析拠点へ輸送し、そこで粗遠心した後にPEGと混合する必要があった。
- ②分析拠点へ輸送後PEGと混合するため、PEGの混合が完了するまでに採水後2日間のリードタイムを要した。

共同体で検討した結果、粗遠心せず上清と沈殿の両方を用いることでより高感度な分析が可能であることが明らかとなった。またPEGを早期に添加し、迅速にRNA(リボ核酸)抽出

を行うことで高感度な分析が実現できることも示された。

図2に示すように従来法と異なり、分析拠点での粗遠心後にPEGと混合するのではなく、処理場でPEGを添加し、輸送と振とうを兼ねることで分析リードタイムの短縮を実現した。この結果、従来法を上回る感度を持った迅速な分析方法と体制が確立した。

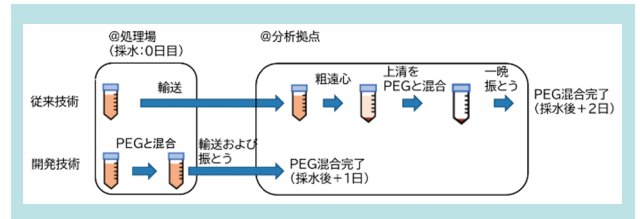


図2 開発した下水分析プロセスと従来の分析プロセスとの比較
Fig. 2 Comparison Between the Developed Wastewater Analysis Process and the Conventional Analysis Process

4.1.2 有効な情報発信の確立

情報発信の課題として、市民の皆様に対して効果的に周知し、また継続的な関心を促す手法を小松市様の広報担当者様の協力により模索した。この結果、プッシュ型の情報発信体制を構築し、認知度の向上と注意喚起の実現を目指した。

具体的には、図3に示すような小松市様が毎週金曜日に配信するLINEメッセージを通じて、グラフや数値情報を表示する仕組みを導入した。小松市様のLINE登録者数は約27万人(小松市人口:約10.3万人)あり、また市のホームページの閲覧数は常にアクセス数の上位4位以内を維持している。さらに、下水サーベイランスの濃度や前週からの変化量に応じてアラートや警戒レベルを設定し、わかりやすい情報発信を実現した。このようにして情報を効果的に周知できる体制を整えた。

さらに、アンケートや意見交換会により集めた意見を基に、

4-3節で示す新たな技術開発に取り組むこととした。このような学際共創の視点を取り入れた情報発信の取り組みが市民の皆様に関心を呼び、行動変容を促す一助になると考えられる。

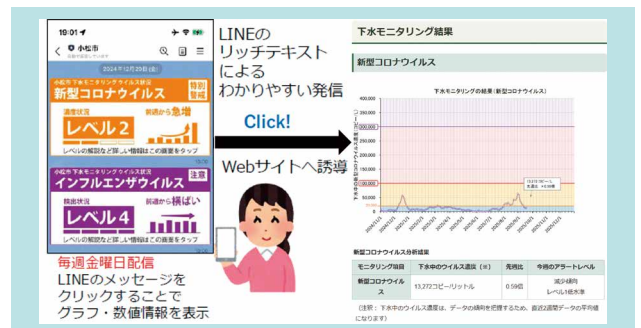


図3 小松市様が発信する下水サーベイランス情報
Fig. 3 Wastewater Surveillance Information Released by Komatsu City

4-2【信頼性】下水サーベイランスデータの信頼性を確保

4.2.1 データ処理方法の検証

下水サーベイランスデータはノイズが大きく、そのままでは十分に活用できないため、情報の信頼性を担保するために適切なデータ処理手法を開発した。容易に理解可能なデータ処理手法として移動平均を採用し、移動平均期間と平均を計算する方法について検討を行った。

まず、適切な期間について示す。新型コロナウイルスは感染後、症状が現れる数日前より糞便から検出され、さらにウイルス排出は感染後数日間でも多くなる³⁾。そのため感染後に症状を自覚し検査を受け、それが感染者数として報告されるまでに時間を要すると考えられる。すなわち、下水サーベイラ

ンスでは症状を自覚する前から排出するウイルスによって感染状況を把握することができる。さらに、令和4年度に実施された内閣官房「下水サーベイランスの活用に関する実証事業」で公開されたデータ⁴⁾を用い、感染者数データと下水サーベイランスデータのずれ日数を相関係数によって評価したところ、下水サーベイランスデータが全数把握期間の感染者数に対して約3日先行することが示された。人間社会の周期性を考慮した1週間移動平均の感染者数を目標とし、下水サーベイランスデータの移動平均期間を2週間とすれば両者の重心が一致し、最もよく感染状況を表す期間であることが明らかになった。

また、公開された下水サーベイランスデータの分布を調査したところ、対数正規分布に近いことが明らかになった。一般に対数正規分布に従うデータの中央値は幾何平均で表されるため、前述の2週間移動平均を考慮すると、2週間の移動幾何平均が適切なデータ処理手法であるといえる。

新型コロナウイルスが国内で全数把握対象となっていた2022年4月から9月までの期間を対象とした小松市様での新型コロナウイルスの下水サーベイランスデータと感染者数データの関係を図4に示す。元データではばらつきが大きいが、2週間

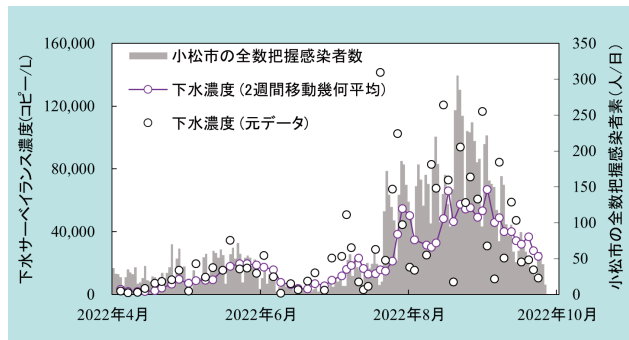


図4 全数把握期間の下水サーベイランス濃度と感染者数の時系列変化
Fig. 4 Temporal Trends in Wastewater Surveillance Concentrations and Case Counts During the Period of Notifiable Disease Surveillance

4.2.2 下水サーベイランスデータの有効性検証

下水サーベイランスデータによる地域の感染者数評価の有効性を検討した。新型コロナウイルス感染症のパンデミック初期は感染者を全数把握していたが、その後ウイルスの状況変化にともない2023年5月から定点把握に移行した。

小松市様は南加賀保健所(小松市、加賀市、能美市、川北町)の定点把握範囲内であり、単独での定点把握データは非公開である。定点把握感染者数の把握に移行したのは2023年5月であり、2023年5月～2025年9月までのデータを用いて、定点把握感染者数と下水サーベイランスデータの関係を検討する。図6に下水サーベイランスデータと定点把握感染者の時系列変化を、図7に下水サーベイランスデータと南加賀地区の定点把握患者報告数の関係を示す。

両者の相関係数に注目すると、全数把握感染者数と下水

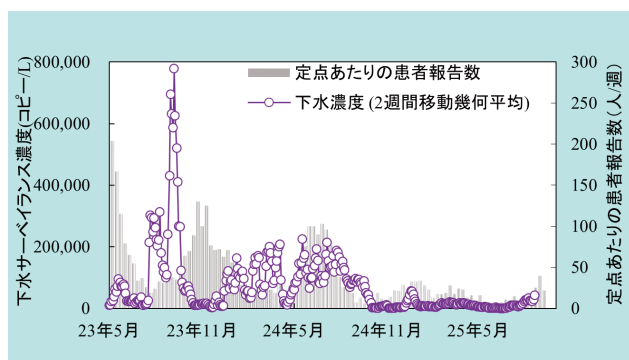


図6 定点把握期間の下水サーベイランス濃度と感染者数の時系列変化
Fig. 6 Temporal Trends in Wastewater Surveillance Concentrations and Case Counts During Sentinel Surveillance

移動幾何平均を適用することで平滑化され、全数把握感染者数に対して正確に感染状況を把握できていることが分かる。図5に両者の関係をプロットした。そして、それぞれのデータを対数変換しピアソンの相関係数で評価すると0.83であった。これは、内閣官房の報告書⁹⁾に示された全自治体におけるピアソンの相関係数の平均(0.66)を上回った値であり、前述の分析方法やデータ処理方法を用いることで小松市様における流行状況をより正確に把握する手段を確立できた。

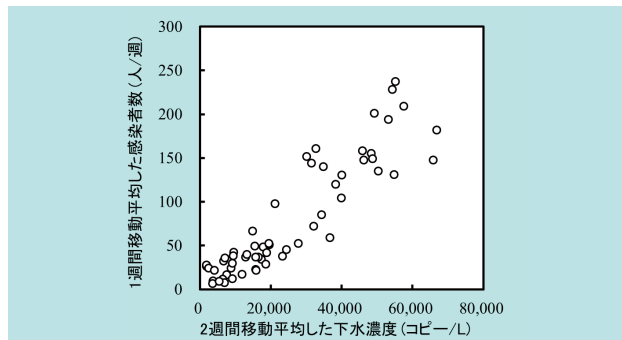


図5 全数把握期間の下水サーベイランス濃度と感染者数の関係
Fig. 5 Relationship Between Wastewater Surveillance Concentrations and Case Counts During the Period of Notifiable Disease Surveillance

サーベイランスデータの相関は0.83(図5)であったのに対して、定点把握感染者数との相関係数は0.71(図7)であった。これは、全数把握期間の感染者数とは異なり、定点把握感染者数が南加賀保健所管内にある特定の医療機関の受診者を対象としているために小松市様の下水サーベイランスデータとの相関が低下したことが考えられる。それでも統計的には有意に高い相関性が示されたことから、下水サーベイランスデータは地域の感染者数の実態把握にも有効であることが示唆された。実際には、両手法のデータを相補的に活用するのが望ましいと考える。

開発したデータ処理を適用することで、全数把握期間の感染者数と共に、定点把握感染者数への移行後も有意な相関が示された。

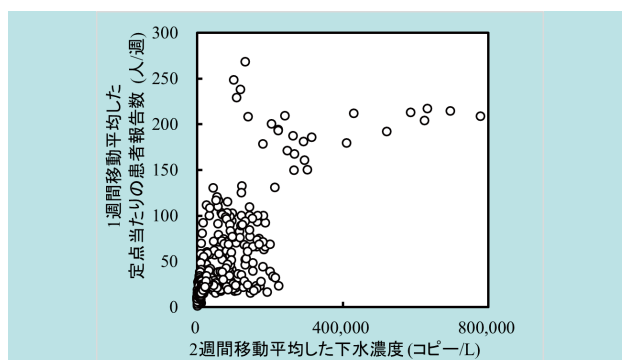


図7 定点把握期間の下水サーベイランス濃度と感染者数の関係
Fig. 7 Relationship Between Wastewater Surveillance Concentrations and Case Counts During Sentinel Surveillance

4-3【汎用性】下水サーベイランス技術の対象ウイルス拡大

4.3.1 小松市民の皆様を対象にしたアンケートの結果

市民の皆様が下水サーベイランスデータに対する評価や必要としている情報を把握することを目的とし、小松市様の「LINEで防災」登録者を対象にして、2023年1月(第1回)及び同年10月(第2回)に計2回のアンケートを実施した。図8に小松市民の皆様を対象にしたアンケートの結果を示す⁵⁾。

「下水モニタリング情報は、ご自身の感染予防や行動(仕事や学業、イベントなど)の参考となっているでしょうか」という問いに対して、参考に「なっている」、「まあまあなっている」と回答した人が第1回で約83%、第2回で約90%であった。また、第1回で参考に「なっている」と回答した人が約35%であったのに対して、第1回で得た結果を活用し情報発信内容の見直しなどに活用を進めるこ

とで、第2回で参考に「なっている」と回答した人が約52%となり、約17%増加した。

また、「新型コロナウイルス濃度のほかに発信してほしい情報はありますか。」という質問に対して、第1回、第2回ともに回答者の約35%が「あり」と回答した。そのうち約9割が「インフルエンザなど他の感染症情報」を希望し、インフルエンザウイルスの下水サーベイランス情報のニーズが明らかになった。

市民の皆様を対象とした情報発信システムを構築することで、取り組みの認知が向上し、本開発に対する意見・要望を集めることができた。そして、情報発信の見直しや開発の方向性を決定するために有効に活用できていると考える。

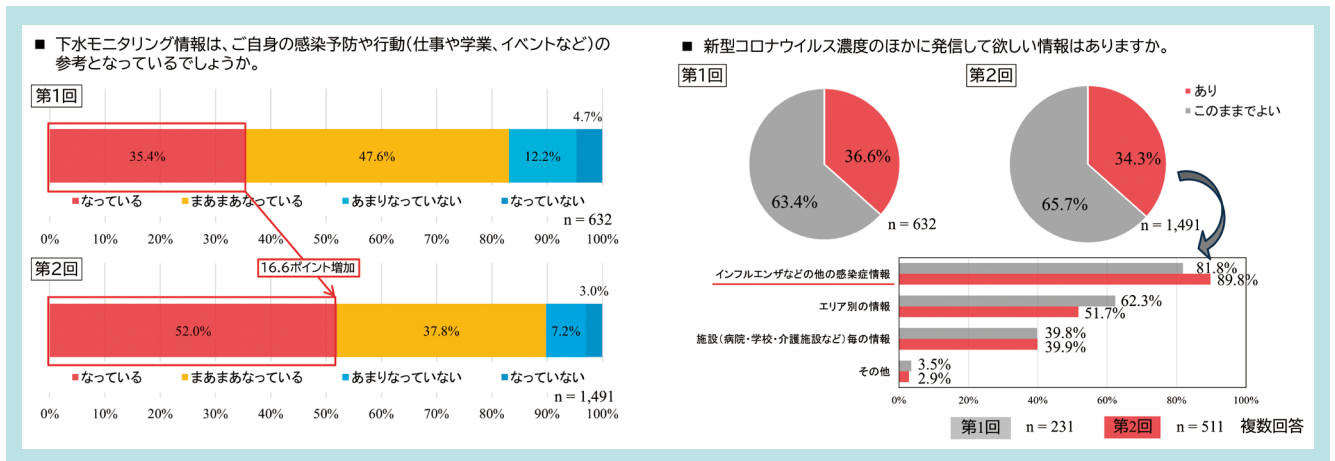


図8 小松市民の皆様を対象にしたアンケート結果

Fig. 8 Survey Results for Residents of Komatsu City

4.3.2 小松市医師会様との意見交換

医療関係者がどのようなニーズを持っているのかを調査するために、小松市医師会代表者様との意見交換会を実施した。意見交換会に併せて小松市医師会の皆様全員を対象としたアンケートも実施した。

小松市医師会代表者様との意見交換会では、下水サーベイランスの活用状況や、発信する情報の改善方法、さらには次に加えるターゲット等について協議した。医療現場の意見を下水サーベイランスに反映することで、情報発信の見直しや開発の方向性を決定する。

図9に小松市医師会様を対象にして、下水サーベイランスの活用方法を調査した結果を示す。ここでは質問の一つである、「下水サーベイランスの情報発信内容を評価されますか」という質問に対して、それぞれの項目での評価を示す。情報発信の内容について、医師会の皆様を対象に評価を広

く収集することで、地域医療に貢献する情報発信の在り方を模索した。

また、小松市医師会様との意見交換会の中で、下水サーベイランスの対象にインフルエンザウイルスを追加するニーズも明らかになった。

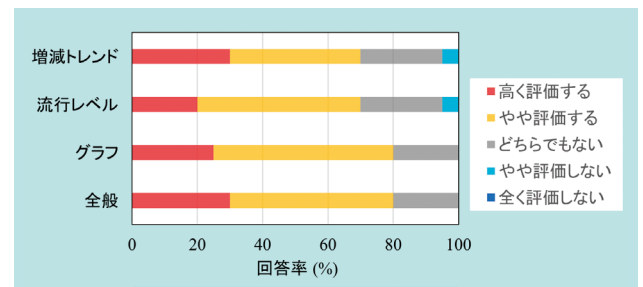


図9 小松市医師会様を対象にしたアンケート結果

Fig. 9 Survey Results for the Komatsu Medical Association

4.3.3 インフルエンザウイルスの下水モニタリング効果の検証

小松市民の皆様や小松市医師会様を対象とした調査結果より得られたインフルエンザウイルスに対するニーズを共同体

で共有し、インフルエンザウイルスを対象とした下水サーベイランス技術開発に取り組んだ。そして、2024年10月～2025年3月

に小松市様でインフルエンザウイルスを対象とした下水サーベイランスを実施した。図10にインフルエンザウイルスの下水サーベイランス結果を示す。アラートレベルは小松市医師会様の意見を反映して設定し、LINEでの情報発信を実施した。

インフルエンザウイルスの下水サーベイランスの効果の検証として、小松市様における国民健康保険の罹患件数、罹患率を図11に示す(罹患件数はICD10コードJ10.1J11.1が含まれる医科レセプト(外来)の件数を抽出(個人の重複あり))。下水サーベイランス情報の発信を通して、2019～2022年は新型コ

ロナウイルスの流行によりインフルエンザは比較的流行しなかったため除外すると、2024年のインフルエンザ罹患率は4.8%であり、2016年以降でのインフルエンザウイルスの罹患率は最も少ない。

インフルエンザウイルスの下水サーベイランスを公開したことで市民の皆様の行動変容等に起因してインフルエンザウイルスの感染者数が減少した可能性もある。このようにして他のウイルスを対象にした下水サーベイランス技術を確立した。

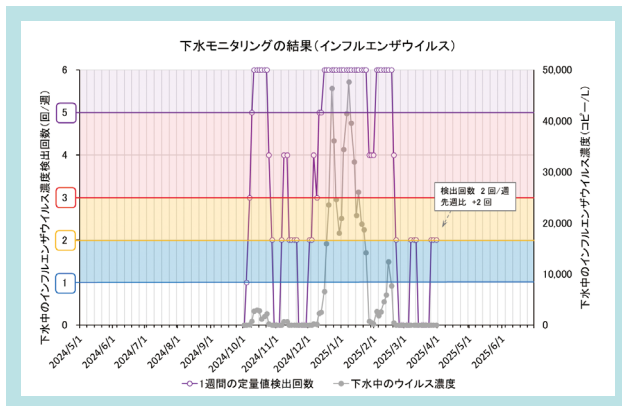


図 10 公開したインフルエンザウイルスの下水サーベイランス情報
Fig. 10 Published Wastewater Surveillance Information of Influenza

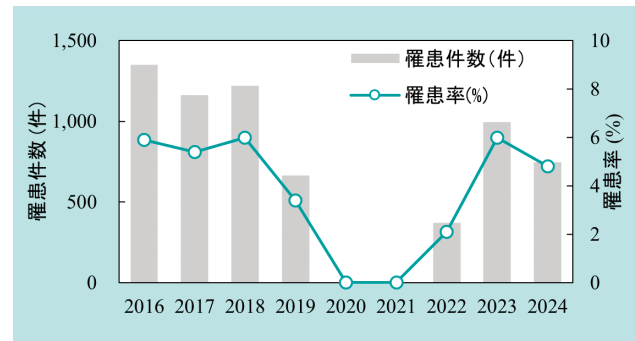


図 11 小松市様の国民健康保険加入者での
インフルエンザ罹患件数の推移 (小松市様より受領)
Fig. 11 Trends in Influenza Cases Among National Health
Insurance Subscribers in Komatsu City

5. おわりに

感染症に対してレジリエンスのある社会を実現するという社会課題解決のため、下水サーベイランスの社会実装に向けた学際研究の取り組み事例を紹介した。得られた成果を下記に示す。

- ・地域の感染状況を把握するため下水サーベイランスを社会実装し、情報を効果的に発信する体制を確立した。
- ・学際研究を進めるために、SNSプッシュ型発信によって、市

民・医療関係者に情報の有益性が広く認識し、関連するステークホルダーからの意見を収集することでより価値のある技術開発・情報発信を実現できた。

- ・今後は、「小松市モデル」として、情報の積極的な発信・活用方法を全国に水平展開することで、各種の感染症にも対応可能な安心・安全な地域社会づくりに貢献する。

論文に掲載した取り組みは、2025年度科学技術振興機構(JST)「STI for SDGs」アワードの優秀賞を受賞しました。本研究の共同体に参画ご尽力いただいている小松市上下水道局、金沢大学、富山県立大学、およびアドバイザーの情報・システム研究機構に改めて感謝申し上げます。

SDGs のターゲットへの貢献

- 3.3 伝染病の根絶、感染症への対応 下水サーベイランスの活用により感染症に対してレジリエントな社会の実現に貢献
- 16.10 情報への公共アクセスの確保と基本的自由の保障 情報発信により「だれも取り残さない」感染対策を実現

参考文献

- 1) OECD Science : Addressing societal challenges using transdisciplinary research, Technology and Industry Policy Papers, No. 88, (2020)
- 2) (公社)日本水環境学会COVID-19タスクフォース:下水中の新型コロナウイルス遺伝子検出マニュアル、(2022)
- 3) Manuel, D. G. et al. : Strengthening public health surveillance through wastewater testing: an essential investment for the COVID-19 pandemic and future health threats., (2022).
- 4) 内閣官房感染症危機管理統括庁:「下水サーベイランス」
<https://www.cas.go.jp/jp/caicm/action/survey/surveillance.html>、(参照日2025-09-24)
- 5) 小松市:「下水モニタリング利用者アンケート結果について」
<https://www.city.komatsu.lg.jp/soshiki/1042/surveillance/14588.html>、(参照日2025-09-24)

高温排水(主に業務厨房排水)向けポリプロピレン管・継手の研究開発

Research and Development of Polypropylene Pipes and Fittings for High-Temperature Wastewater (Mainly from Commercial Kitchens)



○ 櫻井 悠平

Yuhei Sakurai

株式会社クボタケミックス
商品開発部

森 裕一

Yuichi Mori

株式会社クボタケミックス
商品開発部

大川 歩夢

Ayumu Okawa

株式会社クボタケミックス
商品開発部

建築設備市場においては、給水・給湯配管、空調配管、排水配管が主要市場であり、現在は金属管が主流である。ユーザーニーズのヒアリングにより、重量のある金属管から、軽量で施工性の良い樹脂管の開発を要望されるケースが多いことがわかった。その中でも厨房排水市場では、耐熱性、耐薬品性、低伸縮性が要求されるが、クボタケミックス製品においてこれらすべてを満足する製品はなかった。本報告ではこれらの要求性能を満たす樹脂管・継手の開発について報告する。

In the core market in the building equipment sector, there are potable water and hot water piping, air conditioning piping, and kitchen drainage piping, with metal pipes currently being the mainstream. Through user needs assessments, it has become clear that there is a serious labor shortage at construction sites, leading to many requests for the development of lightweight and easy-to-install resin pipes instead of heavy metal pipes. In the kitchen drainage pipe market, there are particularly high demands for heat resistance, chemical resistance, and low thermal expansion; however, there were no products from Kubota Chemix that satisfied all these requirements. This report discusses the development of resin pipes that meet these performance demands.

【キーワード】

パイプ、ガラス繊維、ポリプロピレン、耐熱性、耐薬品性

Pipes, Fiberglass, Polypropylene, Heat Resistance, Chemical Resistance

関連する SDGs



1. はじめに

建築設備市場の中心的な配管として、給水・給湯配管、空調配管、排水配管があり、現在は金属管が主流であるが、しかしながら、施工現場では重量のある金属管から、軽量で施工性の良い樹脂管の開発提案を希望されるケースが多い。その中でも厨房排水管は、厨房からの高温水、洗浄剤、油脂の排出により過酷な環境に置かれている。クボタケミックスの既存ラインナップ品である塩ビ管やポリエチレン管は、高温排水による軟化、熱伸縮によ

る変形の影響が強く、適用が困難である。又、どちらの素材にも耐熱グレードが存在するが、流下する油や洗浄剤、廃薬品等の耐薬品性が不十分であった。これらの使用環境に対応するため、耐薬品性と耐熱性に優れたポリプロピレン樹脂(以下「PP樹脂」という。)と低熱伸縮性のガラス繊維を用いた厨房排水向けの管・継手の開発を行った。

2. 開発のコンセプトと目標値

2-1 開発のコンセプト

厨房排水管としての要求性能を満たすために、パイプの材料は耐薬品性、耐油性、耐熱性に優れたPP樹脂と、低熱伸縮性を実現するためにガラス繊維を添加したガラス繊維配合PP樹脂を用いることとした。また、排水がガラス繊維を伝って外に出ないようにパイプは2層構成とし、外層にガラス繊維配合PP樹脂層、内層にPP樹脂層を設けたガラス繊維強化PPパイプ(以下「HTPP」という。)とした(図1)。



図1 厨房排水用ポリプロピレンパイプ
Fig. 1 Polypropylene Pipe for Kitchen Drainage

継手は、軽量かつ熟練工や特殊な工具が不要な製品とすることをコンセプトとした。エルボやチーズの各種継手本体部は、HTPPパイプを加工しその端部に受口をPP樹脂溶接にて取付加工することにより様々な形状のバリエーションに対応できる構造とした。また、管挿入時に管を奥まで挿入しても熱伸縮を吸収できることとした(図2)。



図2 厨房排水用ポリプロピレン継手
Fig. 2 Polypropylene Fittings for Kitchen Drainage

2-2 目標値

(1)耐薬品性

厨房で使用される代表的な洗剤である、中性洗剤、厨房機器で使用するアルカリ洗浄剤、除菌で使用する塩素系洗剤に対して十分な耐薬品性を有することを目標とした。

(2)耐油性

油脂としては常温で固形のラード等動物性油脂は配管中に滞留しやすいことが想定されるため、食用油の中でも動物性の油脂に対して十分な耐油性を有することを目標とした。

(3)線膨張係数

管の熱伸縮を抑制するため線膨張係数 $2.4 \times 10^{-5} (1/^{\circ}\text{C})$ を目標とした。

(4)継手熱伸縮

継手については、標準施工された際に生じる熱伸縮量(±6mm)に継手が破損・漏水などの問題がないことを目標とした。

(5)継手曲げ・扁平

施工時に接合部で曲がり、パイプ扁平が生じる恐れがある為、想定される曲げ、扁平が生じた状態での水密性に問題ないことを目標とした。

3. 解決すべき技術課題

3-1 パイプ表面の凹凸改善

PP樹脂にガラス繊維を配合することで、パイプ表面に細かい凹凸が発生し、その凹凸を通して継手との接合部で漏水する。また、長期間の使用で熱伸縮を繰り返すことで、凹

凸によりゴムが摩耗し漏水することが想定される。漏水が起きないように、パイプ表面の凹凸を平滑に改善することが課題であった。

3-2 耐衝撃性改善

ガラス繊維入りのPP樹脂は、ガラス繊維の表面にシランカップリング剤等の接着剤が塗布されており¹⁾、それでガラスと樹脂が接着されているが、接着界面は強度が低く破壊しやすい。実際に、パイプ運搬トラックのあおり高さ1.5mを想定

した落下試験を行うと、ガラス繊維を起点として割れてしまう。落下の衝撃で割れないよう、パイプの耐衝撃性を改善することが課題であった。

3-3 パイプ内面の凹凸改善

ガラス繊維入りのPP樹脂を押出成形すると、成形時にガラス繊維が内層に押し込まれ、パイプの内面に凹凸が発生

する。それにより排水性能の目標値が達成できなくなるため、パイプ内面の凹凸を改善することが課題であった。

3-4 新規評価の実施

厨房で使用される様々な薬品の耐薬品性、排出される油脂について、使用可否判断を行う必要があるが、評価方法については一般的な工業規格がない。

また、継手についてはコンクリート中に埋設されることが多

く、埋設可否判断を行う必要があるが、これについても一般的な規格がない。耐薬品、耐油性の評価、および埋設の評価をどのように実施するかが課題であった。

4. 開発技術

4-1 パイプ表面の凹凸改善

パイプ表面の凹凸については、ガラス繊維が異物的にPP樹脂から飛び出して、そこに樹脂がまとわりついて凹凸となっている。したがって、ガラス繊維の飛び出しを抑制できれば、凹凸も改善されると推察される。

パイプの成形は押出機から出てきた円筒の樹脂を水槽の冷却筒に接触させて行う。ここで、アイロンをかけるように温度の高い状態で冷却筒に樹脂を押し付けることで凹凸を改

善することを検討した。その結果、内面に細かい凹凸を付けた冷却筒に高温の樹脂を接触させると、パイプ表面の凹凸が改善することがわかった（図3、図4）。

これにより課題となっていたパイプの表面凹凸を改善し、継手接合部での漏水、ゴムの摩耗の問題を解決することができた。

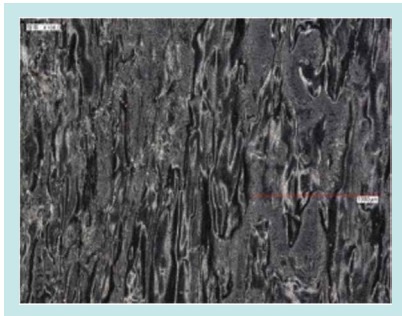


図3 漏水したパイプの表面
Fig. 3 Surface of a Leaking Pipe

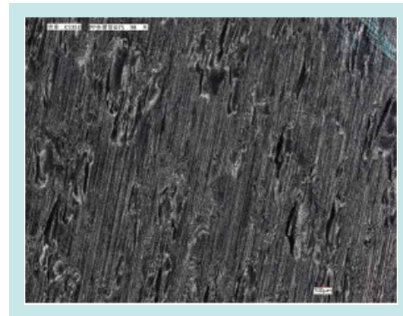


図4 凹凸改善したパイプの表面
Fig. 4 Surface of the Pipe with Improved Unevenness

4-2 耐衝撃性改善

実際にパイプの落下試験を行うと、パイプの縦方向に割れが発生していた（図5）。当初は、樹脂の流れを調整することで解決を試みたが、PP樹脂自体の耐衝撃性が不足していたこ

とがわかったため、耐衝撃性に優位な樹脂（ブロックポリマー）へと変更した。これにより課題となっていた耐衝撃性を強化することで、パイプの割れの問題を解決することができた（図6）。



図5 割れたパイプの内面
Fig. 5 Inner Surface of a Cracked Pipe



図6 耐衝撃性を改善したパイプの内面
Fig. 6 Improved Shock-Resistant Inner Surface of the Pipe

4-3 パイプ内面の凹凸改善

パイプの構成は、外層にガラス繊維入りPP樹脂層、内層にPP樹脂層という構成となっており、ガラス繊維による凹凸を内層で覆うような状態になっている。ここで、内面の凹凸を改善するため内外層の比率を変更して成形試作を実施した



図7 凹凸改善前パイプ内面

Fig. 7 Inner Surface of the Pipe Before the Improvement of Unevenness

ところ、内層の厚さが大きくなるほど凹凸も小さくなる傾向が認められた。これにより課題であった内面凹凸を改善し、排水性能の目標値を達成することができた(図7、図8)。



図8 凹凸改善後パイプ内面

Fig. 8 Inner Surface of the Pipe After Unevenness Improvement

4-4 新規評価の実施

パイプの耐薬品性、耐油性についての評価として、パイプと継手接合状態でパイプ、継手、接合部を同時評価することとした。評価対象の薬品としては、洗浄剤の代表として厨房設備用の洗浄剤、塩素系の洗浄剤、油の代表としてラード、中性洗浄剤、水を混合したものの3種類を対象とした。これらをパイプと継手を接合したもののの中に封入し、促進試験を行った。その結果、パイプ、継手ともに試験後の止水性能に問題なければ、耐薬品性、耐油性に問題なしという評価判定を行った。また、コンクリート埋設については実際にパイプ、継手のコンクリート埋設試験を行い、コンクリート硬化時の発熱、埋設荷重による扁平、割れが発生しないか、水密性に問題ないか評価を行った。また、コンクリート打設時に、継手部へのコンクリートの侵入が想定されたため、接合部に新たにコンクリートノロ止めのゴム板を追加することとした(図9)。

本評価及びノロ止め追加により、割れ、扁平、水密性に問題はなく、コンクリート埋設に耐えるという判定を行った。

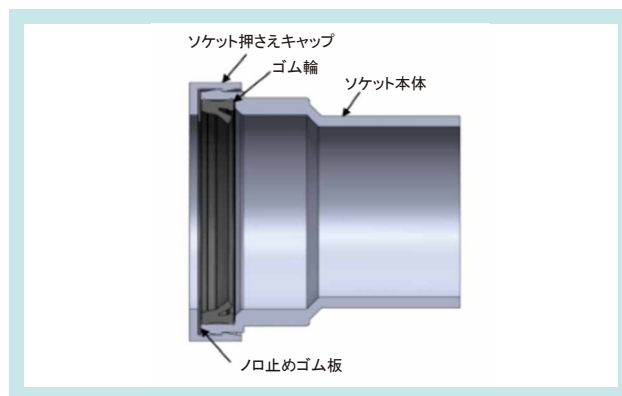


図9 継手受口構造

Fig. 9 Joint Receiving Structure

5. おわりに

本製品を開発することで、厨房排水市場に対して、軽量で施工性の良い樹脂管の提案が可能となった。今後は、ガラス繊維入り

樹脂の課題であるリサイクルに対して取り組むことで、環境負荷の低減に貢献していきたい。

SDGs のターゲットへの貢献

8.2 イノベーションを通じた生産性の向上 軽量な樹脂管で施工負荷の低減に貢献

9.1 質の高い持続可能かつ強靱なインフラの開発 耐熱性、耐薬品性に優れた排水配管を実現

参考文献

1) Nello Pasquini : 新版ポリプロピレンハンドブック(2012)、PP.398-400、日刊工業新聞社

KSIS BLUE FRONT設備モニタリングシステム「KEMOS」の紹介

Introduction of the KSIS BLUE FRONT Equipment Monitoring System “KEMOS”

クボタ環境エンジニアリング株式会社 産業スマート O&M 推進室

関連する SDGs



1. はじめに

クボタ環境エンジニアリング（以下、「KKE」という）では、日本および海外で民需向け排水処理プラントや排ガス処理プラント（以下、環境設備）の建設やメンテナンスの事業を行っている。

近年の持続的社會形成のための維持管理の重要性の高まりや、少子高齢化や各種産業における担い手不足などの社会的課題に対応するために、KKEは「DX(デジタル・トランスフォーメーション)を活用したO&M(Operation & Maintenance)事業の拡大に

よる総合環境ソリューション企業としての地位確立」を掲げている。本稿ではこれを推進するための基盤システムとして構築したKEMOS(KSIS Equipment Monitoring System)について紹介する。

KEMOSは施設管理の総合プラットフォームKSIS BLUE FRONTの関連システムであり、クボタ水環境IoTソリューションサービスKSIS[®]に属する監視機能向けシステムである。

2. 概要

2-1 システムの概要

本システムは、各地に点在する環境設備の運転データをインターネット回線経由で収集してクラウド上のデータベースに蓄積し、見える化するものである。概要を図1に示す。

基本的には社内業務システムであるが、設備を所有するお客様にも閲覧機能を提供し、お客様とKKEのメンテナンス・サポート部門が同じデータを同じ画面を見て共有することで、トラブル対応や運転に関するアドバイスをより効果的に行うことができるようになる。

またクラウドに蓄積されたデータを解析することで、AI等によるより高度かつ安定した設備運転や、予知保全等のより効率的なメンテナンスに発展させることが可能になる。

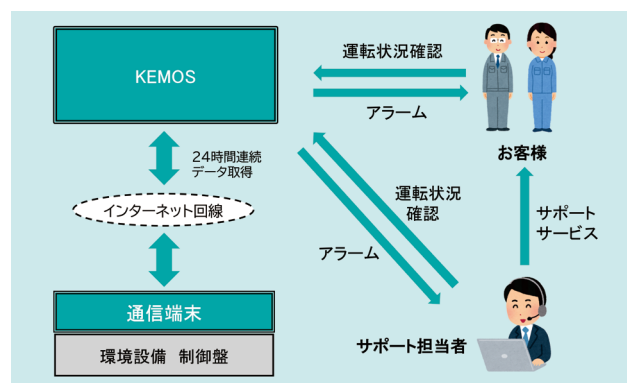


図 1 システムの概要
Fig. 1 System Outline

2-2 システムの特徴

2.2.1 Azureを活用したクラウドシステム

クボタは2020年に日本マイクロソフト社とDX促進に関する戦略的パートナーシップを結び、IT基盤のクラウド(Azure)化等を推進している。この基盤を活用し、ほかの社内業務シス

テムやデータ利用基盤などとのクラウド連携を容易にするために、本システムもAzureの機能を最大限活用するシステム構成にしている。

2.2.2 内製可能なシステム

様々なシステムとの連携や開発・保守の内製を可能とするために、PaaS(Platform as a Service)の組合せによるオープンなシステムにしている。ただし継続的な利便性向上に重

要な「見える化」機能については、IT専門家でないKKEでも簡単に作製できるようにするために、市販のWindowsベースのBI(Business Intelligence)ツールを採用している。

2.2.3 市販機器やIoTサービスの活用

本システムには現場のデータを収集するIoT機器や、データを転送するネットワークインフラが必要になる。IoT分野の非常に速い進化をキャッチアップするために、機器類につ

いては市販のIoT機器をそのまま使用している。また、ネットワークにはIoT向け機能が充実しているプロバイダのIoTプラットフォームを利用している。

3. 詳細説明

システム構成を図2に示す。

環境設備の制御盤に通信端末を設置し、設備を制御しているPLC内のデータをLTE回線経由でクラウドに定期的に転送する。

転送されたデータはデータベースに蓄積されるとともに、アラーム情報についてはメールサーバから即時にメールを送信する。蓄積されたデータはBIツールによって可視化されて、インターネットブラウザからのリクエストに応じた画面を表示する。

クラウド内はAzureのPaaSとVMで構成されており、仕組みとしては教科書的な組合せとなっている。また、ユーザー認証や外部からのシステムメンテナンス等については全社共通基盤の機能を活用している。

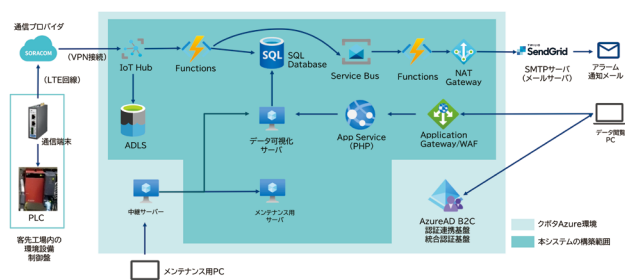


図2 システム構成
Fig. 2 System Configuration

蓄積したデータはインターネットブラウザから閲覧される。閲覧画面の例を図3に示す。

フロー図や現在値、設定値等の現場の制御盤で表示されているものと同等の画面が表示され、過去のデータも遡って表示することができる。また任意の項目のトレンドグラフや日報・月報、およびアラーム履歴画面が表示される。

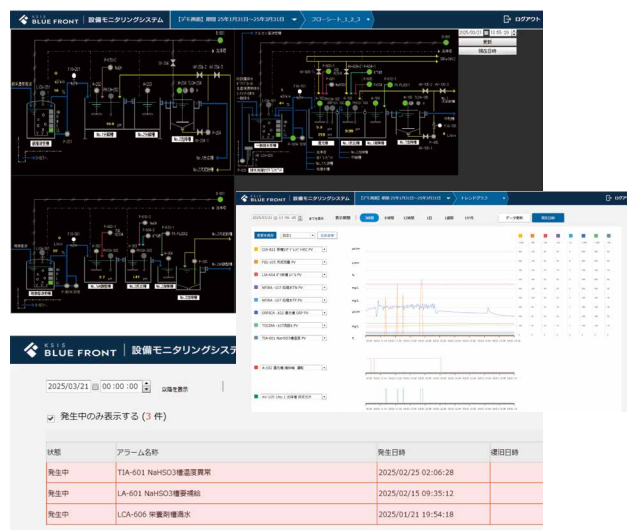


図3 データ閲覧画面例
Fig. 3 Example of the Data Browsing Screen

4. 実績の紹介

2022年末のリリース以降、国内外60件に導入し運用中である。2025年度からは官需向け設備や大型浄化槽などのクボタグループ各部門への水平展開を始めている。

現在、蓄積されたデータの解析・AI運用基盤を構築中であり、

あわせてそこで稼働する機械学習シミュレーションモデルによる排水処理設備の運転最適化プログラムの開発を行っている。これらと本システムとの連携による「クラウドからの環境設備の最適化自動運転」の実現を目指している。

5. おわりに

リリース後3年が経過して、データの蓄積も進みつつあり、今後はこのデータをいかに有効に活用していくかが重要となる。上述のデータ解析基盤やその他のKSISシステム群、およびクボタ

グループ内の各部門との連携を深めていくことでより高度なデータ活用を推進し、お客様や社会への価値提供に寄与していく。

SDGsのターゲットへの貢献

14.1 海洋汚染の防止、削減 汚染水の適性処理による流域や海洋汚染防止に貢献

参考文献

- 1) KSISソリューション・サービスのご紹介
<https://www.kubota.co.jp/product/ksis/>

フラット設置タイプ・防水タイプ 電動アクチュエータ 【ほ場水管理システムWATARAS】

Flat-installation Type / Waterproof Type for the “WATARAS”, Water Remote Management System in Paddy Fields

1. はじめに

「WATARAS(ワタラス)」は、ほ場の給・排水をスマートフォンやパソコンでモニタしながら遠隔・自動で制御できるシステムで、水管理労力の低減、節水、水管理のデータ化及び活用にメリットがある(図1)。今回は、給水ます内に収納設置が可能な「フラット設置タイプ」と、一定条件下の水没に耐えて故障しない「防水タイプ」の、2種類の電動アクチュエータの新製品を紹介する。

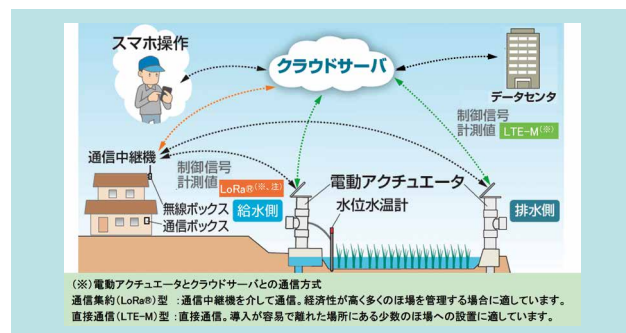


図1 WATARAS システムの概要

Fig. 1 Outline of “WATARAS”

注: 図1に記載の“LoRa®”は、Semtech Corporation の登録商標です。

2. 製品の概要と特長

2-1 フラット設置タイプ

畦草刈りなどの農機作業の妨げにならない電動アクチュエータで、次の特長を備えている(図2)。

- (1) 駆動部と制御部を分離し製品高さを抑えている。給水ます内に収納・設置することで耕作道とフラットに設置可能
- (2) 給水ます内に収まるため、降雪地域においても農閑期の取り外しが不要(バッテリー放電対策に電源OFFは必要)



図2 フラット設置タイプ

Fig. 2 Flat-installation Type

2-2 防水タイプ

大雨による内水氾濫等で水田が冠水した際に一定の水深まで耐えられる電動アクチュエータで、次の特長を備えている(図3)。

- (1) 防水等級IPX8(水没1 m×72時間で故障せず)
- (2) 軽量コンパクト。質量: 従来品比70%(10 kg⇒7 kg)
高さ: 従来品比82%(650 mm⇒530 mm)
- (3) 積雪6 m相当の耐荷重(粗目雪、垂直方向)



図3 防水タイプ

Fig. 3 Waterproof Type

3. おわりに

防水タイプは、製品化している開水路ゲート用に加え、大きな開閉トルクが必要なバルブ用の品揃えを予定している。

WATARASは水管理の自動化を推し進め、給排水スケジュールの自動設定や高温・低温障害対策等に活用可能なシステムへ展開し、今後も農業の発展に寄与していく。

問合せ先 〒104-8307

住所 東京都中央区京橋2丁目1番3号

会社名 株式会社クボタケミックス

部門名 事業企画部 スマートアグリ推進課

TEL 03-3245-3085

●
—クボタ技報—

KUBOTA TECHNICAL REPORT
No.58

●編集委員●

トラクタ技術企画部	梅本 英哉
収穫機技術部	田中 如一
精密機器事業ユニット	瀬川 浩一
パイプシステム事業部	柴木 敦
焼却溶融プラント部	岡田 正治
産業機材事業推進部	小谷 正典

●事務局●

技術開発推進部	倉持 克史
	高角 章夫

●
2025年12月発行

(執筆者・編集委員の所属は2025年11月現在)

————— 禁無断転載 —————

(非売品)

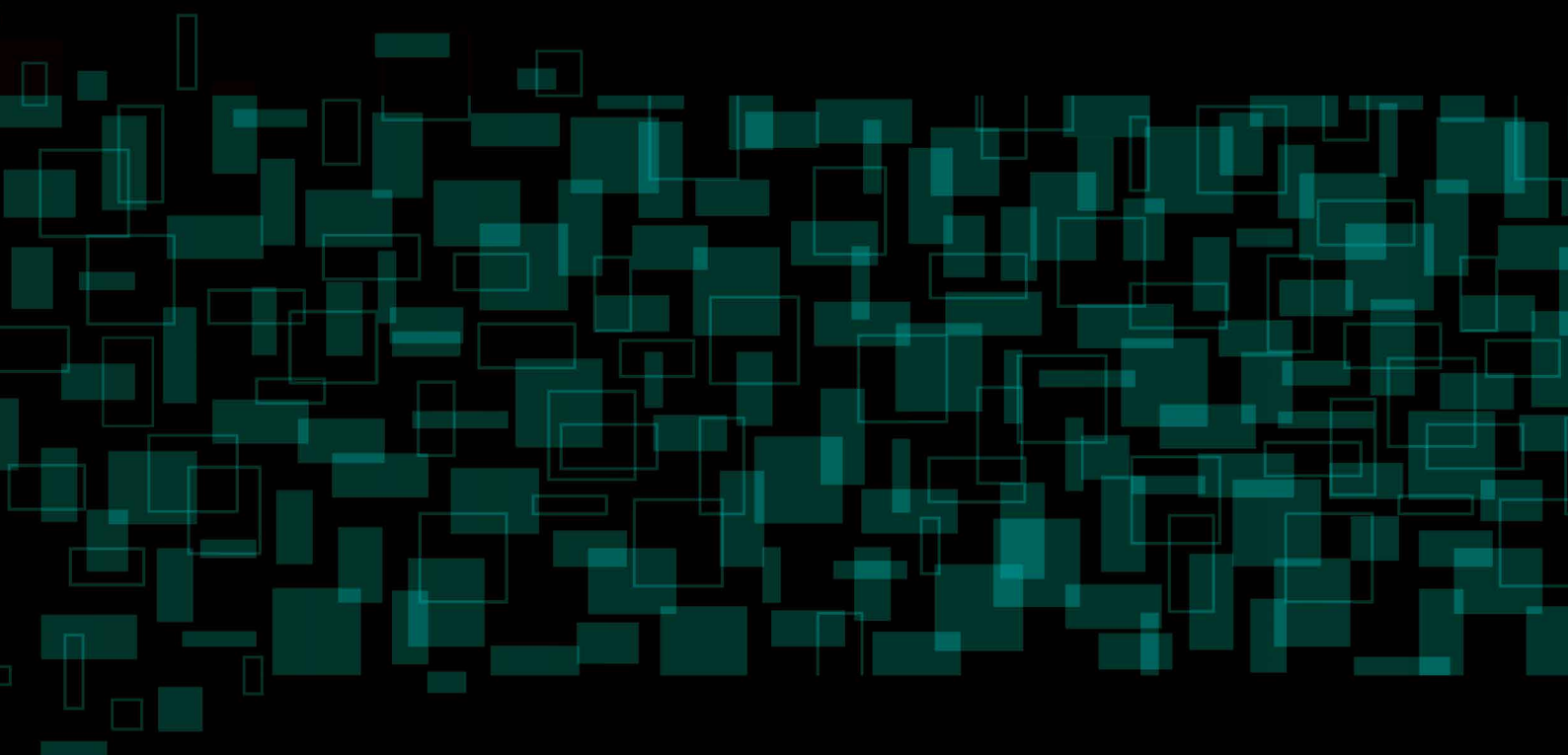
発行所 株式会社クボタ
グローバル技術研究所
技術開発推進部

〒590-0908 大阪府堺市堺区匠町1番地11

kbt_g.rd-techrep@kubota.com

製作 クボタエイトサービス株式会社

●



株式会社**クボタ**

www.kubota.co.jp