住友重機械 技報

Feb.2025
No.215 ISSN 0387-1304

Sumitomo Heavy Industries Technical Review

加工機械・大型装置特集

Special Issue for Industrial Equipment & System

住友重機械技報 No. 215 2025

巻頭言

「加工機械・大型装置特集」に寄せて　日朝俊一

加工機械・大型装置特集

論文・報告

自動車骨格部品向けSTAFプロセスの開発　野際公宏　上野紀条　粂野宏之　閑　浩之　1

撹拌リアクターの状態監視ソリューション　蒋　雍　5

移動機診断システムの開発　高橋　誠　小林貴一　岩朝義典　檜垣明日香　9

被削材物性値と研削条件からの研削抵抗の予測　市原浩一　15

技術解説

熱間鍛造プレスFPZ シリーズの開発　柳原　渉　23

門形平面研削盤における機械稼働の効率化支援機能　久保拓也　25

新製品紹介

クロスレール固定門形平面研削盤 KSL-F830(H) フルカバー仕様　27

論文・報告

人材育成センターの紹介　佐々木靖彦　鈴木由衣　29

Sumitomo Heavy Industries Technical Review

No. 215 2025

Message for "Special Issue for Industrial Equipment & System" Toshikazu HIASA

Special Issue for Industrial Equipment & System

T/PAPERS

Development of STAF Process for Automotive Frame Parts — Kimihiro NOGIWA, Norieda UENO, Hiroyuki KUMENO, Hiroyuki KAN — 1

Condition Monitoring Solutions for Agitator Reactors — Yong JIANG — 5

Development of Process Equipment Diagnosis System — Makoto TAKAHASHI, Kiichi KOBAYASHI, Yoshinori IWASA, Asuka HIGAKI — 9

Prediction of Grinding Force from Work Material Properties and Grinding Conditions — Kouichi ICHIHARA — 15

T/INVITATIONS

Hot Forging Press FPZ Series — Wataru YANAGIHARA — 23

Functions to Support Efficient Operation of Double Column Type Surface Grinding Machine — Takuya KUBO — 25

NEW PRODUCTS

Double Column Type Surface Grinding Machine MODEL:KSL-F830(H) Full Coverage — 27

T/PAPERS

Introduction of Human Resource Development Center — Yasuhiko SASAKI, Yui SUZUKI — 29

「加工機械・大型装置特集」に寄せて

産業機器事業部長　日　朝　俊　一

住友重機械グループの加工機械・大型装置は，長きにわたる歴史を持ち，さまざまな産業に対してお客様の要求を具現化してまいりました。その技術の基礎となる要素技術は非常に幅広く，機械工学はもとより機種固有の技術を必要とし，それに加えて巨大な構造物を精密に製作して組立てを行う生産技術面でのさまざまな知見も必要とします。当社グループは絶え間なくその技術力を磨いてまいりましたが，求められる技術も時代と共に変化してまいりました。高度経済成長の時代は高速化，自動化といった生産量向上が最大のテーマでした。現在は社会が直面するさまざまな課題を解決するテーマに移行しています。CO_2削減のための省エネルギー・省資源化，労働環境をはじめとした工場環境の改善や産業廃棄物の削減により環境負荷軽減を求められるもの，労働力不足・技能伝承問題を解決するための省力化や状態監視技術など，その取組みは多岐にわたります。

今回の特集号では，半世紀以上の歴史を持ちマザーマシンとして定評のある研削盤やシェア90％を占めるコークス炉移動機械，自動車骨格部品の分野で新規開発した生産技術であるSTAF，化学プラントにおける重要設備である撹拌装置などの新旧さまざまな機種が，社会課題の解決のために現在取り組んでいる各種技術課題の一部を紹介いたします。

当社グループは昨年「こだわりの心と，共に先を見据える力で，人と社会を優しさで満たします」というパーパスを策定しました。本特集号で紹介する機種や技術はそれぞれこの存在意義に基づくものであり，お客様の直面する社会課題解決の一助となり，生産活動に貢献できることができれば幸甚ですが，こだわりの詰まった先端技術で社会に貢献する取組みに終わりはありません。今後とも皆様方のご指導，ご鞭撻をよろしくお願い申し上げます。

自動車骨格部品向けSTAFプロセスの開発

Development of STAF Process for Automotive Frame Parts

●野際公宏* 上野紀条** 粂野宏之*** 閑浩之***
Kimihiro NOGIWA Norieda UENO Hiroyuki KUMENO Hiroyuki KAN

STAF 装置外観
Appearance of STAF equipment

自動車骨格部品においては，エネルギー消費量やCO_2排出量削減の観点に加え，EV化により増加した車両重量の軽量化要求が高まっている。その一方で，衝突安全性に求められる水準の高まりや乗り心地，走行安定性の面から高強度・高剛性化を満足することが課題となっている。このような相反する要求に対して当社ではフランジ付き連続異形閉断面を有するチューブフォーミング技術「STAF（Steel Tube Air Forming）」を開発した。本報では，その概要と特長について報告する。

For automotive frame parts, there is a growing demand for weight reduction from the perspective of energy consumption reduction, CO_2 emission reduction, and vehicle weight increase due to EVs, while at the same time, there is a challenge to satisfy high strength and high rigidity from the perspective of increased collision safety requirements, ride comfort, and driving stability. In response to these conflicting requirements, Sumitomo Heavy Industries, Ltd. has developed STAF(Steel Tube Air Forming), a tube forming technology with a continuous deformed closed section with a flange. This paper describes the outline and features of STAF.

1　まえがき

エネルギー消費量や，CO_2排出量に対する規制が年々厳しくなっている昨今，自動車ボディの軽量化技術はその対応策として必須となっている[(1)]。同じく環境負荷低減の観点で，ガソリン車から電気自動車へのシフトが近年加速しているが，電気自動車に必須のバッテリーはガソリンエンジンよりも重いことから，車体重量はむしろ増加しており，ボディ軽量化はますます必須の課題となっている[(2)]。一方で，衝突安全に求められる水準に加え，乗り心地や走行安定性などへの要求も年々高まっており，自動車骨格部品を軽くしつつ，高強度・高剛性化への要求を満足する技術開発の重要性が増し，種々の材料開発や成形加工プロセス開発が進められている[(3)〜(7)]。このような背景のもと，当社は部材の軽量化および高強度・高剛性化の両立が可能な成形加工プロセスとして，熱間エアブローによるフランジ付き連続異形閉断面を有するチューブフォーミング技術「STAF」を開発した[(8)〜(10)]。本加工技術では，鋼管を対象に熱間で高圧エアを内部に注入しながら金型に這わせて成形することで，**図1**に示すような，長手方向に断面形状の異なる閉断面構造を有した剛性の高い部品を成形することができる。また，材料にホットスタンプ工法と同じ素材で，焼入れ性が高く金型焼入れが可能なMn-B鋼を用いることにより1500 MPa級の材料強度が得られる。その結果，部品点数の削減および部材の薄板化が実現し，軽量化に貢献することができる。本報では，STAFプロセスの概要とその特長について報告する。

＊技術本部　＊＊企画本部　＊＊＊産業機器事業部

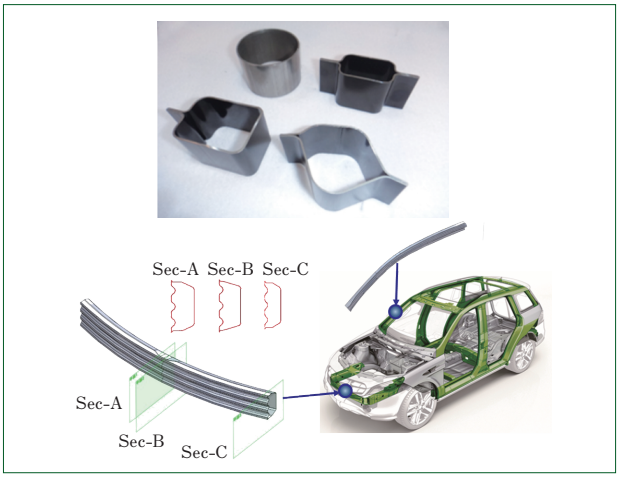


図1　STAF 適用部品例
Example of STAF applied part

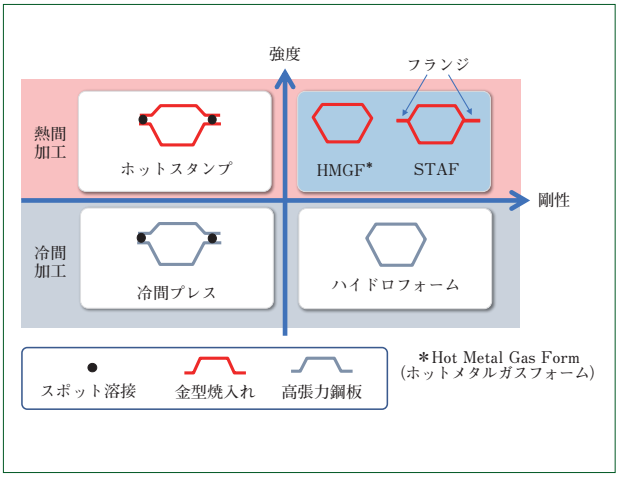


図3　他工法と比較した STAF プロセスの位置付け
Classification of STAF process compared to other processes

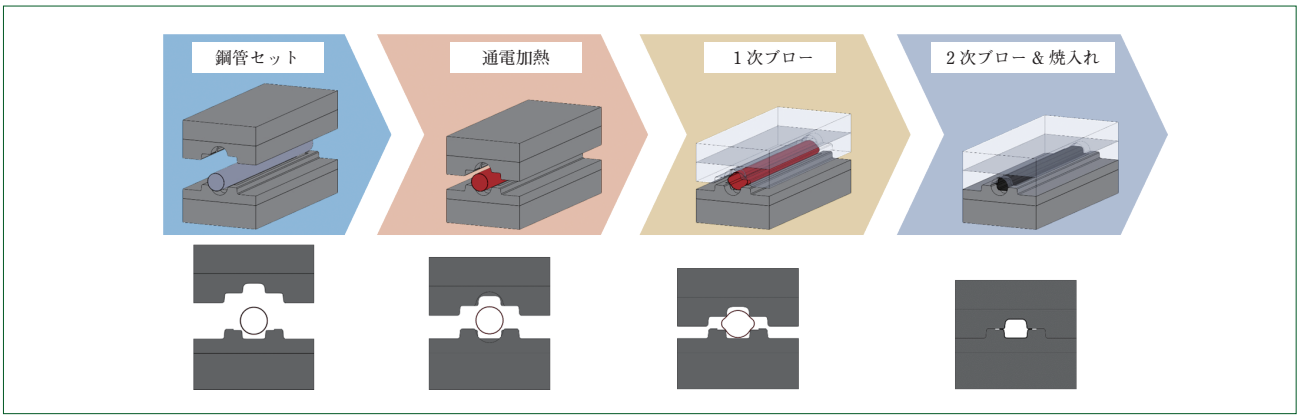


図2　STAFプロセス
STAF process

2　STAF プロセスの概要

図2に，STAFプロセスの概要を示す。STAFでは，加熱から成形，焼入れまでのすべてをプレス金型内で完了するワンパック加工が可能である。まず金型内において，電極で鋼管を把持し，直流通電加熱により所定温度まで加熱を行う。通電完了後，上下金型とパイプを接触させ，金型が半開きの状態でパイプ両端から数MPa程度の高圧ガスを注入し，フランジ部に相当する部分を張り出させる。最終的には完全に金型を閉じて，さらに高圧の20～30 MPa程度のガスを注入する。このように鋼管を拡管させて金型と密着させることで目的の形状に成形していき，同時に金型を冷却することで焼入れの完了した成形部品を得ることができる。

図3に，強度・剛性の点から見たSTAFの既存工法に対する位置付けを示す。通常の冷間プレス板成形に対しホットスタンプでは，金型焼入れを利用することにより材料強度の高い部材を成形することが可能である。このことから，板厚を薄くして軽量化できるというメリットがある。一方で，ハイドロフォームなどの鋼管から部材成形した場合は，スポット溶接で接合された部材とは異なり，連続閉断面を有することから剛性の高い部材を成形することが可能である。ホットスタンプとハイドロフォームのメリットを両立させた工法として焼入れ鋼管を熱間ガスブロー成形する工法(ホットメタルガスフォーム：HMGF)があり，すでに実用化例がある。このHMGFに対しSTAFでは，他部品との接合や強度・剛性向上のためのフランジを一体で成形できるという特長を持つ。

図4に，Aピラーのケースを対象として材料強度，部品構成，断面図およびプロセスをSTAFと既存工法で比較した結果を示す。ホットスタンプが2枚の板材を貼り合わせた構造であるのに対し，STAFでは鋼管から成形することにより部品点数が削減できる。また，2つの金型を必要とするホットスタンプ対して，STAFでは1つの金型，1回の成形で済むことから，溶接組立てのプロセスも削減できる。一方，STAFと同様に鋼管から成形する工法としてハイドロフォームやホットガスメタルフォームが挙げられるが，断面図に示されるように，外板などの他部品との接合のための部品を設ける必要があり，STAFと比較して部品点数が多く，溶接組立ても必要になることが分かる。

3　STAF プロセスの特長

3.1　通電加熱方式による消費エネルギー削減効果

STAFは，プレス内に設けられた電極でパイプを把持して通電加熱を行うことができる構造とし，通電加熱からエアブロー成形までをプレス内で行うワンパック成形機構となっている。したがって，このような直接通電加熱方式を採用する

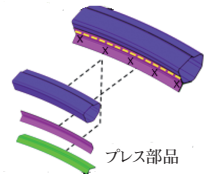
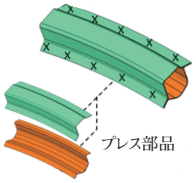
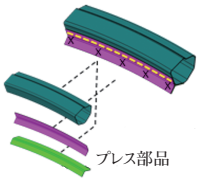
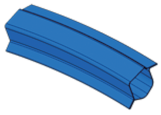
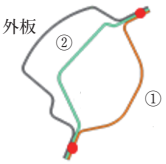
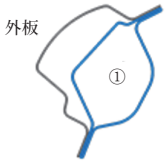
	ハイドロフォーム	ホットスタンプ	ホットメタルガスフォーム	STAF
材料強度	～980 MPa	1500 MPa	1500 MPa～	1500 MPa～
部品構成				
断面図	2～3部品	2部品	2～3部品	1部品
				
プロセス	5工程	5工程	6工程	3工程
	・プリフォーム ・ハイドロフォーム（3000 t～） ・レーザカット ・プレス加工 ・溶接組立て	・ブランキング ・炉加熱 ・ホットスタンプ ・レーザカット ・溶接組立て	・プリフォーム ・炉加熱 ・ガスフォーム ・レーザカット ・プレス加工 ・溶接組立て	・プリフォーム ・STAF（800 t～） ・レーザカット

図4　**既存工法と STAFの比較**
Comparison with existing construction processes

ことで工場内のフットプリントを削減することができ，加熱に必要な電力は原理上ほぼ鋼管のみを加熱することに消費されるので，エネルギー消費量の削減が可能である。このように環境負荷低減効果の観点から非常に魅力的な方式ではあるが，著者らの知る範囲ではホットスタンプにおいて量産に適用された事例は少なく，通常は炉加熱が用いられている。この理由の一つに，酸化スケール対策としてAlSiめっき鋼板を採用していることが挙げられる。金型焼入れプロセスでは，加熱時にオーステナイト相に完全に変態させることを目的としているので，900℃以上まで加熱する必要がある。その際に，部材表面に酸化スケールが発生するが，その対策としてAlSiめっき鋼板が適用されている。アルミニウムの融点は660℃であることから，通常，AlSiめっき鋼板を900℃以上に加熱する場合は加熱過程でのめっき層の溶融が問題となる。ところが，加熱速度をたとえば10℃/s前後に制御することにより，加熱過程において母材の鉄をめっき層に拡散する時間が確保でき，より融点の高い鉄-アルミニウム合金層が形成され，めっき層の溶融を防止している[11)～13)]。ただし，AlSiめっき鋼板に通電加熱を採用した場合，急速加熱過程において融点の高い鉄-アルミニウム合金層を形成する前にめっき層は溶融状態となる。溶融されるのみであれば，通電加熱の場合は端部の電極において板材を保持し，加熱炉のように送りロールなどと接触することはないので，大きな支障とはならないと考えられる。しかし，実際は板材を流れる電流により板材周辺には磁界が発生し，この磁界と溶融しためっき層を流れる電流との間で，フレミングの左手の法則によるローレンツ力が溶融めっき層に作用し，板材表面で溶融めっきが流動してめっき厚差が生じる「寄る」という特異現象が発生する。こうした事情から，AlSiめっき鋼板を用いたホットスタンプでは，通電加熱プロセスの実用化は進んでいない[12)～14)]。

前記の背景を踏まえ，AlSiめっき鋼板を通電加熱した際に，鋼管でも溶融しためっきが流動する現象が発生するか検証を行った[15)]。**図5**は，板材および管材に直流電流を流した場合について，フレミングの左手の法則により，それぞれの材料に作用するローレンツ力を導出した結果である。板材では板材中央に向かってローレンツ力が作用し，その大きさは端部ほど大きい。このローレンツ力はめっきにも作用することから，めっき層が溶融し板材中央部に流動して「寄る」ことへの説明がつく。管材においては，ローレンツ力は管材中央方向に作用し，円周方向には作用しない。したがって加熱中にめっきが溶融しても板材のように特定の箇所に流動するなどの現象は起こらない。**図6**に，実際にAlSiめっき鋼板および鋼管を通電加熱した後の表面状態を比較した結果を示す。鋼管は，比較に用いた鋼板から造管し，断面積も同等になるようにそれぞれの板幅と周長をそろえたものを用意した。**図6**に示すように，AlSiめっき鋼板では中央付近に溶融しためっきが集まり，めっき厚が厚くなっている様子が観察されるが，鋼管ではこういった現象が発生しないことが確認された。このように，AlSiめっき鋼板を材料とするホットスタンプでは困難とされてきた通電加熱は，AlSiめっき鋼管を材料とする場合では溶融しためっき層が流動するという問題は回避され，適用が可能であることが確認された。実際のエネルギーおよびCO_2排出量に関する詳細な削減効果は評価中であるが，立上げやアイドル時の電力消費も考慮すると，通電加熱はガス加熱炉や赤外線加熱炉と比較して消費エネルギーを1/10以下に抑えられるという試算が得られている。

3.2　フランジ付き閉断面構造による部品削減・軽量化効果

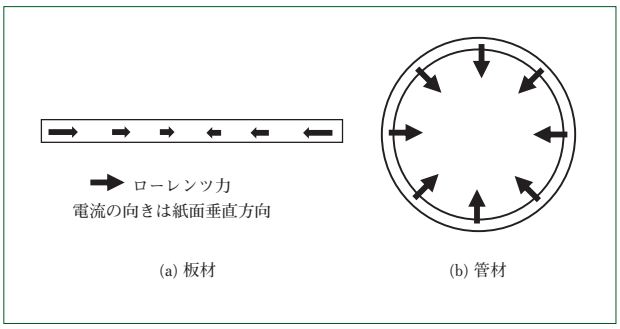


図5　板材およびパイプ材を通電加熱した場合に作用するローレンツ力分布
Lorentz force distribution acting on plate and pipe materials when heated by electric current

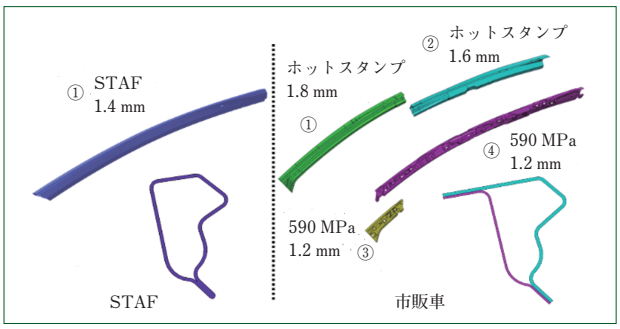
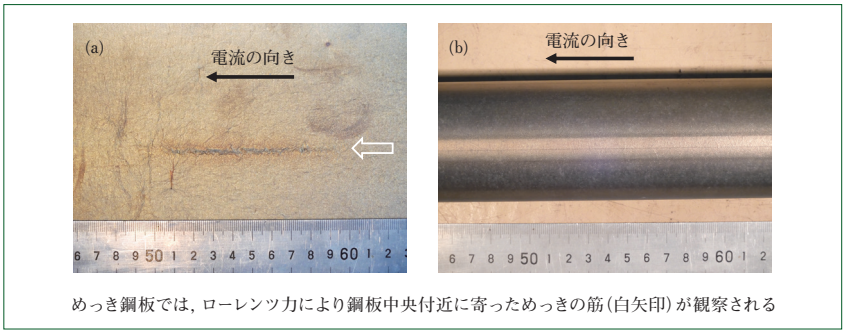


図7　STAF による部品点数削減および軽量化効果
Reduction in number of parts and weight



めっき鋼板では，ローレンツ力により鋼板中央付近に寄っためっきの筋（白矢印）が観察される

図6　通電加熱後の表面外観観察結果　(a) AlSi めっき鋼板　(b) AlSi めっき鋼管
Observation of surface appearance after electric current heating (a)AlSi plated steel sheet (b)AlSi plated steel pipe

実際の市販車を対象に，STAFに置き換えた場合の部品削減および軽量化効果について検討した事例を紹介する。**図7**は，ホットスタンプおよび冷間プレスで成形された市販車のAピラーを対象に，部材としての強度・剛性を維持しつつSTAFで置き換えた場合の部品削減効果を示したものである。板プレス加工における接合では両側にフランジを設ける必要があるが，STAFでは両側フランジおよびフランジなしのほか，鋼管から成形しているので片側フランジの成形も可能である。部品数については，市販車は４部品で構成されていたのに対してSTAFでは１部品に削減可能であった。部品点数削減や板厚を薄くすることにより質量も5.5 kgから3.8 kgに減少し約30％の軽量化が可能であるという検討結果が得られた。

4　むすび

(1) 自動車骨格ボディ部品の軽量化および高強度・高剛性化の両立が可能な成形加工プロセス技術として，熱間エアブローによるフランジ付き連続異形閉断面を有するチューブフォーミング技術「STAF」を開発した。

(2) STAFでは通電加熱方式を採用することにより，通常の炉加熱方式よりもエネルギー効率が高く，またフットプリントを削減できることを特長としている。ホットスタンプでは困難であった酸化スケール抑制を目的とするAlSiめっき材の通電加熱適用について，鋼管を対象としているSTAFでは適用可能であることを実証した。

(3) 市販車のAピラーをSTAFに置き換えた場合の軽量化効果を検討した結果，約30％の軽量化効果が見込まれることが示された。

（参考文献）

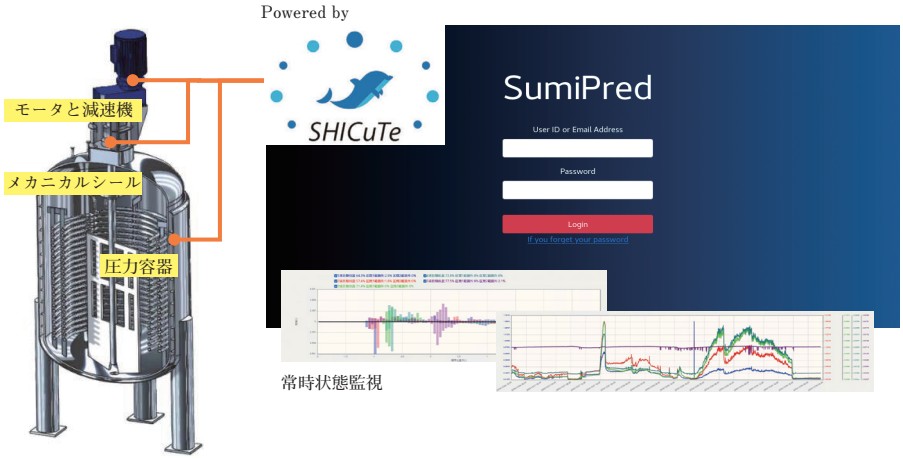
(1)　小松隆，CFRP による自動車軽量化設計入門，(2017)，2-9，日刊工業新聞社.
(2)　水野慎也，HEV, EV 化で鋳物はどうなる・・・学会・大学への期待，鋳造工学，82-7 (2010)，420-426.
(3)　Karbasian, H., Tekkaya, A.E., A review on hot stamping, J. Mater. Process. Technol., 210 (2010), 2103-2118.
(4)　Mori, K., Bariani, P.E., Behrens, B.A., Brosius, A., Bruschi, S., Maeno, T., Merklein, M., Yanagimoto, J., Hot stamping of ultra-high strength steel parts, CIRP Ann. 66 (2017), 209-212.
(5)　Hikida, K., Nishibata, T., Kikuchi, H., Suzuki, T. and Nakayama, N., Properties of New TS 1800 MPa Grade Hot Stamping Steel and Application for Bumper Beam, Proc. 4th International conference Hot sheet metal forming of high-performance steel, (2013), 127-134.
(6)　水村正昭他，ハイドロフォーミングの新加工技術の開発，新日鉄技報，393 (2012)，39-46.
(7)　櫻井建夫，自動車軽量化技術の 10 年 - まとめと将来技術 -，軽金属，71-12 (2021)，569-573.
(8)　野際公宏，熱間エアブロー成形技術 (STAF: Steel Tube Air Forming)，第 335 回塑性加工シンポジウムテキスト，(2019)，17-24.
(9)　Ishizuka, M., Nogiwa, K., Ide, A., Kan, H., Ueno, N., Development of STAF (Steel Tube Air Forming) Process, Proceedings of 7th International conference on Hot Sheet metal forming of High-performance steel, (2019), 431-438.
(10)　野際公宏，鋼管のフランジ付き熱間エアブロー成形技術，ぷらすとす，29-3 (2020)，263-267.
(11)　末広正芳，真木純，楠見和久，大神正浩，宮腰寿拓，ホットプレス用アルミニウムめっき鋼管の諸特性，新日鉄技法，378 (2003)，15-20.
(12)　瀬沼武秀，プレス技術者のためのホットスタンピングのメタラジー，塑性と加工 58-682 (2017)，1021-1026.
(13)　Fan, D.W. and Cooman, B.C.D., State-of-the-Knowledge on Coating Systems for Hot Stamped Parts, Steel Res. Int., 83-5 (2012), 412-433.
(14)　Lee, C.W., Choi, W.S., Cho, Y.R. and Cooman, B.C.D., Direct Resistance Joule Heating of Al-10 pct Si-Coated Press Hardening Steel, Metall. Mater. Trans. A, 47A (2016), 2875-2884.
(15)　野際公宏，鋼管のフランジ付き熱間エアブロー成形技術の開発，ぷらすとす，55-5 (2022)，448-452.

※「STAF」は，住友重機械工業株式会社の登録商標です。

撹拌リアクターの状態監視ソリューション

Condition Monitoring Solutions for Agitator Reactors

●蒋　　雍*
Yong JIANG



撹拌リアクターの状態監視システム
Condition monitoring system for agitation reactors

本報では，化学プラントの撹拌リアクターにおけるメカニカルシールの状態監視技術について述べる。撹拌リアクターは生産効率や製品品質に大きな影響を与えることから，その安定稼働は特に重要である。なかでもメカニカルシールの状態監視は重要視されているにもかかわらず，従来手法では不十分であり，実用レベルでの有効なアプリケーションがまだ確立されていない。住友重機械プロセス機器株式会社では，アコースティックエミッション(AE：Acoustic Emission)技術の活用と処理手法の進化により摺動面における負荷や振動特徴を高次元パラメータで表現することを可能とし，さらに機械学習により変化度という指標を作成することで状態変化の可視化に成功した。

This paper presents a condition monitoring technology for mechanical seals in agitator reactors used in chemical plants. Given the significant impact of agitator reactors on production efficiency and product quality, their stable operation is particularly crucial. Among these components, mechanical seal monitoring is of paramount importance; however, conventional methods remain inadequate, and effective, practical-level applications have yet to be established. By leveraging Acoustic Emission (AE) technology and advances in data processing techniques, we have achieved high-dimensional parameter representation of load and vibration characteristics on sliding surfaces. Furthermore, utilizing machine learning, we successfully created an indicator called "change degree" to visualize state changes in real-time.

1　まえがき

撹拌リアクターは，化学プラントにおいて生産効率や製品の品質に影響を与える重要な設備である。特に，化学反応を担うメインリアクターのトラブルは工場全体の操業に甚大な影響を与えることから，点検および整備は怠ってはならない。しかしながら，一般の検査手法では不具合を検出できず，突発的な事故に発展するケースも少なくない。復旧には多くの時間と費用がかかることが多いので，効率的かつ確実な状態監視が求められている。

住友重機械プロセス機器では，撹拌リアクターの駆動部における不具合や容器の破損といった異常の予兆を早期に検出する総合的な状態監視ソリューションおよびそれらを用いたアフターサービスの提供に取り組んでいる。

1.1　常時状態監視の役割

従来の設備監視の目的は，早期異常検出や突発事故防止によるユーザの安定した操業を支援することにあった。近年では，このリスク低減という利点に加え，常時状態監視の導入によって連続的に得られる時系列データの新たな価値を創出する可能性が注目されている。たとえば，実際の運転負荷を把握することで，運転方法の改善点や設計上の妥当性を検証することが可能となる。これにより，ユーザは設備の制御を最適化でき，住友重機械プロセス機器はより適合する設計へと改良を進めることができる。本報では，メカニカルシールに焦点を当てた状態監視技術について紹介する。

1.2　メカニカルシール

撹拌リアクターには，反応槽内での化学反応を効率的に行うために撹拌軸と撹拌翼などが装備されている。このことから，撹拌リアクターは内部圧力や温度に耐え，反応物を外部に漏らさずに密封状態を維持する必要がある。この密封の役割を担う部品が**図 1** に示すメカニカルシールである。

＊住友重機械プロセス機器株式会社

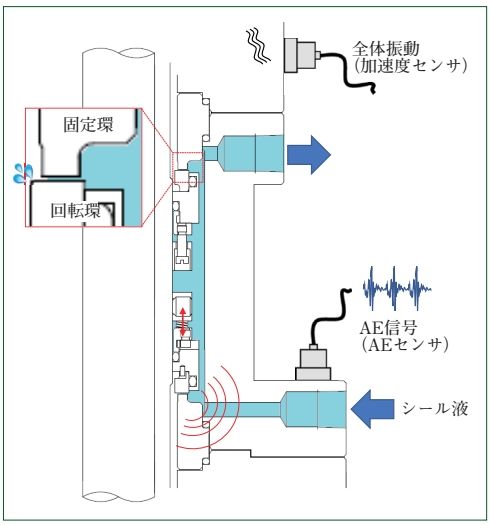


図1　メカニカルシールの概略図
Schematic outline of mechanical seal

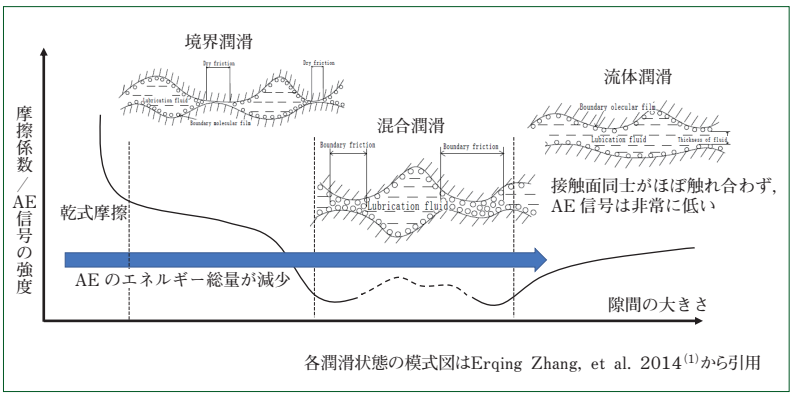


図2　潤滑状態と AE信号
Lubrication condition and AE signal

メカニカルシールには，反応槽内の有害物質が外部に漏れ出ないよう，高圧の条件に耐えるシール液が充填されている。このシール液は，シールを構成する固定環と回転環（摺動材）の間に保持され，摺動部の潤滑や冷却機能を果たしている。通常，シール液の消耗は微量にとどまるが，摺動材の摩耗や摺動部の損傷によってシール液が槽内に漏出する「メカ漏れ」が発生することがある。最悪の場合，シール液がすべて流出し，反応槽内の有害物質が大気中に漏出するというリスクも伴う。

設計段階において，ユーザによる運転方法の違いや，運転条件が多岐にわたることから，動的条件も考慮した高精度な性能設計は至難である。実際の運用における複雑な現象に適合できずに故障が頻発し，改善がなかなか進まない設備も存在する。さらに近年，既存の装置を新しい製品製造に利用するケースが増え，運転条件の複雑化が進むことで不具合リスクが増大している。このような突発的なトラブルを未然に防ぎ，複雑な条件に対応するために高度なセンシング技術を活用して早期の異常兆候を監視し，予防保全を行うことが求められている。

メカニカルシールの作動状態を診断することが難しい理由は，その構造にある。メカニカルシールは，固定環と回転環が軸方向に互いに押し付けられる構造であり，半径方向は半自由なことから固定環や回転環から発生する振動が外部に伝わりにくい。特に撹拌リアクターにおいては低回転で作動するため，振動センサによる監視が困難であるうえ振動センサを設置できる箇所も限られている。メカニカルシールでは，ベアリングのように損傷を振動データで検出することは難しい。さらに，メカニカルシールのシール性能低下は損傷だけでなく，摺動部に汚れが付着して動作が妨げられることなど，ほかの要因によっても生じる。大きく分けて，摺動材が損傷するケースと摺動面の追従性が低下するケース，あるいはこれらが同時に発生するケースが考えられる。このことから，摺動材と摺動面の両方の変化を検出可能な技術が必要となる。

2　アコースティックエミッション (AE)

AEは，物体内部での亀裂や変形に伴う弾性エネルギーの放出が超音波として放出される現象である。AE技術は構造物や材料内部で発生する損傷の発生をリアルタイムで検出する非破壊検査手段として実用化されている。

2.1　メカニカルシールにおけるAE技術

メカニカルシールの摺動面においては，摩擦や摩耗といったトライボロジー現象はAEが伴い，AE信号の強度や周波数特性を調べるなど，AEの解析技術を用いることで摺動面における摩擦や摩耗状態を監視することが可能となる。たとえば，摩耗が進行するとAE信号は高周波成分を含むようになり，摩擦の増加に伴って低周波成分が増加することが確認されている(1)(2)。**図2**に示すように，摺動面の潤滑状態によりAEの発生量が変化する。

2.2　計測処理技術

従来技術は，主にトライボロジー現象に注目して摺動材の損傷を監視するものであるが，摺動面の追従性低下や摺動部の機械的動作の変化については十分に考慮されていない。住友重機械プロセス機器は，それら両方に対処できるAE信号の処理方法と計測処理装置を開発した。具体的には，トライボロジー現象の変化によって生じるAE信号の強度変化を摺動部の負荷変動として捉えることで，損傷リスクの高い状態を把握することが可能となる(3)。また，機械運動や相互作用によりAEが伴うことから，AE信号から摺動部の振動特性を抽出することができた。両方に対応できる高次元な特徴パラメータはリアルタイムで計測処理装置により計算される。

3　機械学習による変化検出

摺動部におけるAE信号の強度は，設備の設計や運転条件によって異なることから，すべての機器に適用できるような「一般的な正常範囲」は存在しない。また，AE信号から摺動部の負荷を評価するには，複数の特徴パラメータで構成される高次元データが必要であり，それを直接人間が見て理解することは困難である。さらに，振動特性に関しても，特定の周波数成分のみを監視することは現実的ではない。このことから，変化の度合いを定量的に分析し，異常を検出するために機械学習を採用した。

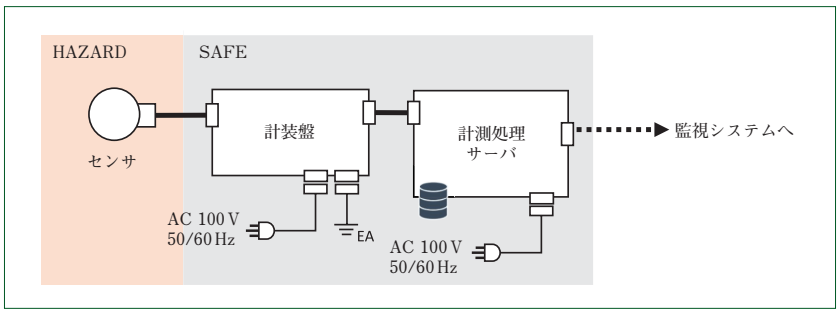


図 3　計測システム
Measuring system

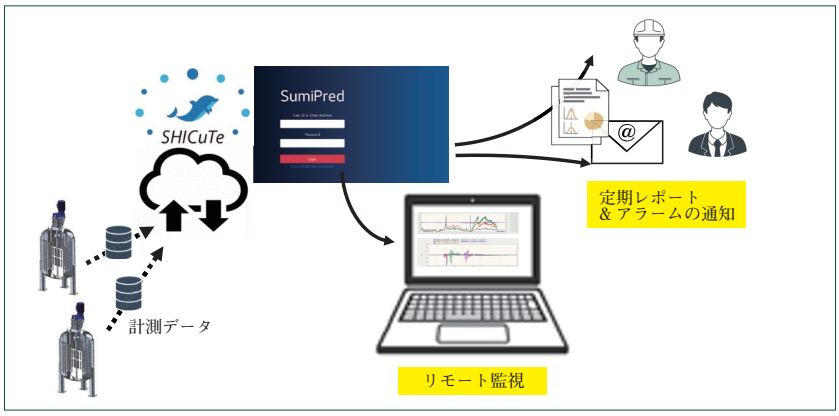


図 4　クラウド監視システム SumiPred
Cloud monitoring system SumiPred

最初に正常状態の初期データを収集し，それを用いて機械学習で正常範囲を定義する。以降のデータは，この初期データ空間との類似性をもとに，正常範囲に属する確率が計算される。最初はこの確率の閾値を厳しく設定し，運用が進むにつれて調整を行う。これにより，初期段階では微細な変化にも高感度に反応し，運用が進むにつれて必要なレベルに近づいていく仕組みとなっている。

複雑なAEから実用的な指標である変化度を生成し，その傾向をリアルタイムで監視することにより，気付かないうちに進行するトラブルの早期発見につなげる。長期間のデータから変化が認められる際に，次のステップとしてAE特徴パラメータの変化パターンを詳細に調査する。装置の分解検査で得られた知見と合わせることで，発生した問題を特定の不具合パターンに関連付けることが可能である。これによりAE信号のデータ分析は，従来のリアルタイム監視から一歩進み，不具合の根本原因を理解するための補助ツールとして機能する。最終的に，不具合のリスクを定量的に評価することが難しい場合でも，定性的に評価することで実用レベルでの改善が期待できる。

4　状態監視システムの構成

状態監視システムは，計測システムと監視システムから構成されている。

4.1　計測システム

計測システムはセンサ，計装盤，計測処理サーバから構成され，それぞれは有線接続となる（**図３**）。外部振動が原因のトラブルとメカニカルシール内部でのトラブルを区別すべく，AEセンサに加えて振動センサを装備している。

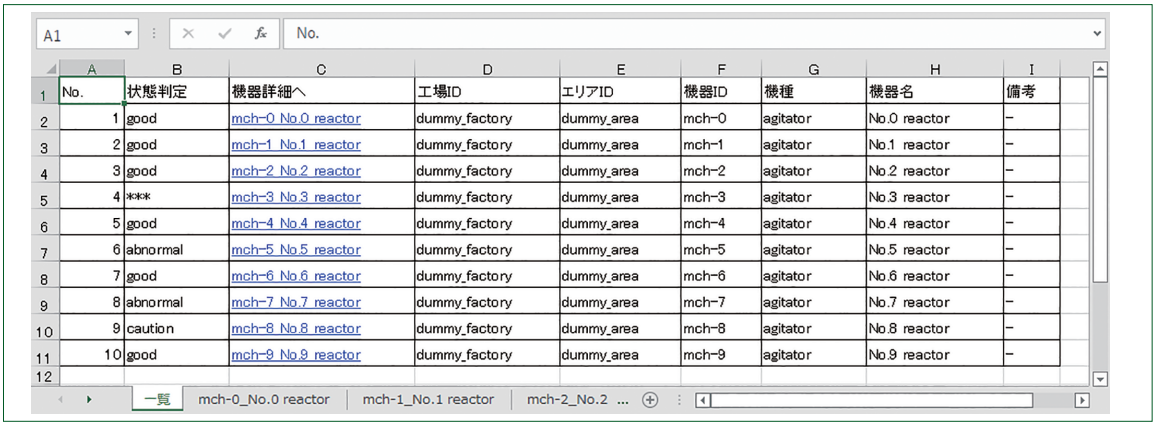
作動中のメカニカルシールの全体振動および内部で発生するAE信号を計測し，計測処理サーバで摺動面にかかる負荷や摺動部の振動特徴を示す特徴パラメータをリアルタイムで算出する。回転数やモータ電流値などのプロセスデータの取得には，PLC（Programmable Logic Controller）と計測システムとの連携も推奨される。これにより，計測された振動や負荷データがより豊富なデータセットとして機械学習モデルに活用され，精度の高い異常検出が可能となる。

さらに，機械学習モデルを実装することで，特徴パラメータやプロセスデータをインプットして，リアルタイムで変化度をアウトプットするセンサとして機能させることができる。

4.2　監視システム

住友重機械プロセス機器では，住友重機械グループの共通基盤プラットフォーム「SHICuTe[4]」を利用したクラウド型監視システム「SumiPred」を開発している（**図４**）。SumiPredは，必要十分なデータ可視化機能を備え，変化度や一部のパラメータを使用して時系列のトレンドを確認し，過去と現在のデータを重ねて比較することができる。また，設備の状態を日次で自動判定するメール日報機能も搭載しており，前日のデータと比較して「正常」「注意」「異常」のいずれかの判定結果を設備管理者へ通知する機能を備えている。

計測システムは，ユーザが独自にデータの可視化や監視システムを構築する場合にも対応可能である。さらに，ユーザのニーズに応じて，指定されたほかの可視化システムとの接続も可能であり，特定要件に基づいた柔軟なカスタマイズが提供できる。



No.	状態判定	機器詳細へ	工場ID	エリアID	機器ID	機種	機器名	備考
1	good	mch-0_No.0 reactor	dummy_factory	dummy_area	mch-0	agitator	No.0 reactor	–
2	good	mch-1_No.1 reactor	dummy_factory	dummy_area	mch-1	agitator	No.1 reactor	–
3	good	mch-2_No.2 reactor	dummy_factory	dummy_area	mch-2	agitator	No.2 reactor	–
4	***	mch-3_No.3 reactor	dummy_factory	dummy_area	mch-3	agitator	No.3 reactor	–
5	good	mch-4_No.4 reactor	dummy_factory	dummy_area	mch-4	agitator	No.4 reactor	–
6	abnormal	mch-5_No.5 reactor	dummy_factory	dummy_area	mch-5	agitator	No.5 reactor	–
7	good	mch-6_No.6 reactor	dummy_factory	dummy_area	mch-6	agitator	No.6 reactor	–
8	abnormal	mch-7_No.7 reactor	dummy_factory	dummy_area	mch-7	agitator	No.7 reactor	–
9	caution	mch-8_No.8 reactor	dummy_factory	dummy_area	mch-8	agitator	No.8 reactor	–
10	good	mch-9_No.9 reactor	dummy_factory	dummy_area	mch-9	agitator	No.9 reactor	–

図5　日報 Excel ファイルの機器一覧
Equipment list for daily report of Excel file

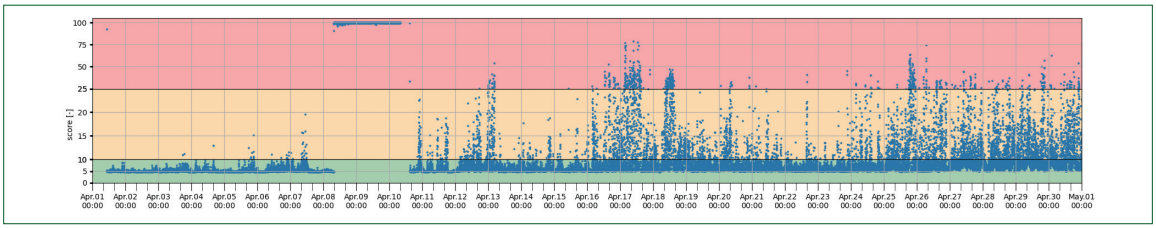


図6　変化度の時系列グラフ
Time series graph of condition variation

5　運用のイメージ

SumiPredの日報メールには，機器の判定結果をまとめたExcelファイルが添付されている。このExcelファイルの一覧（**図5**）で「正常（good）」「注意（caution）」「異常（abnormal）」を確認することができる。各機器の詳細ページに進むと，変化度の時系列グラフ（**図6**）を確認できる。正常な状態であれば，変化度スコアは0～10の範囲内で安定するが，状態が悪化するとスコアが大きくなる。スコアが25以上になると，正常な状態から大きく逸脱していることを示す。ここで，機器の状態は瞬間的なスコアではなく長期間にわたるスコアの傾向によって評価されることに注意していただきたい。高いスコアが増加している場合は，詳細な診断が必要となり，状態がさらに悪化すると全体的に赤い範囲へシフトすることが予想される。日報では1日の変化度スコアを分単位でプロットするが，SumiPredにアクセスすることで，より長期間のデータを1時間や1日単位で確認し，長期的な傾向を把握することができる。

注意や異常が判定された機器については，住友重機械プロセス機器が詳細な診断を行い，機械の不具合の可能性についてのレポートを提出する。詳細診断は計測処理サーバに蓄積されたパラメータデータを分析して行う。

6　今度の展望と課題

撹拌リアクターの状態監視技術は今後さらに進化し，設備の健全性だけでなく，より高度な予測制御や製品品質に関わる自律的な最適運転への応用が期待される。特に，機械学習を活用した高速シミュレーション技術により反応の最適化や異常予測の精度が向上し，効率的で安全な運転が可能となるだろう。それらを目指すには十分な導入実績とデータの蓄積が必要であるが，導入するには工期や費用などの初期投資が高額になることが問題である。このことから，低コストで既存設備に導入しやすいソリューションの開発が今後の課題となる。また，設備単位の状態監視にとどまらず，制御データやほかの設備のデータと連携することで，さらなる知見を得ることが可能だが，それにはエンドユーザやエンジニアリング会社の協力が不可欠である。このほかデータ活用の意識向上や社内教育，人材育成も必要であり，設備をシステムにつなげることで得られる潜在的なデータの価値を認識し，IoTによる状態監視システムの価値を最大限に引き出すことが重要である。

7　むすび

AE技術を活用した状態監視システムにより，メカニカルシールの運転中の状態変化，異常の予兆監視をできるようになった。データ蓄積が進むことで，より具体的な診断が可能となり，将来的には余寿命予測が期待できる。

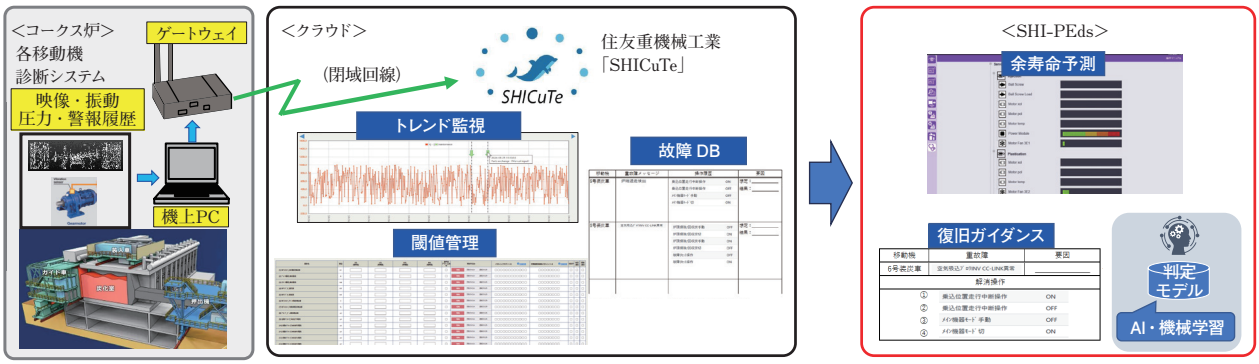
（参考文献）
(1)　Erqing Zhang, et al., Mechanical Seal Opening Condition Monitoring Based on Acoustic Emission Technology, Sensors & Transducers, 172-6 (2014), 139-146.
(2)　Jinxin Chen, et al., Study on the Friction Behavior and Abnormal Conditions of Non-Contact Mechanical Seal based on Acoustic Emission, Tribology Letters, 72-71, (2024).
(3)　蒋雍，大西功一郎，小川雅史，診断装置，診断方法，診断プログラム，特開 2023-119674.
(4)　明渡豊，村上憲司，住友重機械グループ共通基盤プラットフォーム SHICuTe，住友重機械技報，209 (2023), 1-4.

※「SHICuTe」は，住友重機械工業株式会社の登録商標です。

移動機診断システムの開発

Development of Process Equipment Diagnosis System

●高　橋　　誠*　小　林　貴　一*　岩　朝　義　典*　檜　垣　明日香**
Makoto TAKAHASHI　Kiichi KOBAYASHI　Yoshinori IWASA　Asuka HIGAKI



SHI-PEds 概要
Overview of SHI-PEds

長年，コークス炉移動機械では安定操業と設備自動化が求められてきたが，近年では製鉄各社で 2050 年カーボンニュートラルの実現に向け，革新的製鉄プロセス技術開発 COURSE50 を始めとする多くの環境調和を目指した技術開発が進められている。これに伴い，人員配置の最適化とさらなる効率生産体制構築が急務となっており，住友重機械プロセス機器株式会社ではコークス炉移動機械のダウンタイム削減と予防保全につながる移動機状態監視システムの開発に取り組んだ。SHICuTe プラットフォームを最大限活用するとともに，コークス炉移動機械（移動機）の短時間停止（チョコ停）分析と画像認識技術を絡めて，移動機はもちろんのこと他設備にも転用可能な状態監視システムを提供している

For many years, stable operation and equipment automation have been required for coke oven transfer machines. Recently, steel manufacturers have been advancing the implementation of COURSE50 in the current steel manufacturing process to achieve a 30 % reduction in total CO_2 emissions, aiming for carbon neutrality by 2050. Consequently, optimizing personnel allocation and establishing a more efficient production system have become urgent tasks. We have developed a transfer machine condition monitoring system that reduces downtime and contributes to preventive maintenance. By maximizing the use of the SHICuTe platform and integrating short-term stoppage (choco-tei) analysis with image recognition technology, we provide a condition monitoring system applicable not only to coke oven transfer machines but also to other equipment.

1　まえがき

住友重機械プロセス機器が製造・販売している製鉄向け移動機では，長年にわたり設備の安定操業と自動化（無人化）率の向上が求められてきた。また，製鉄各社においては製鉄プロセスの高効率化，経済合理性からのプロセスコストの精査と，さらなる低減への動きが顕著となっており，IoTやICT技術を利活用する動きが活発となっている。

一方，移動機では，老朽化した炉体に性能や機能をすり合わせることで，差別化技術や付加価値を高めてきたが，機構や機能が複雑化しており，熟練運転員の減少も相まって不具合発生時の早期復旧や原因特定が困難になってきている。

そこで住友重機械プロセス機器では，移動機の運転状況の見える化から始まる移動機診断システムの開発に取り組んだ。顧客要望の強いチョコ停の自動帳票化を筆頭に，故障の傾向監視と予測推定，機械学習やAIによる故障の原因探求と復旧ガイダンスの提示へと段階的なサービスを提供すべく開発を進めている。本報では，住友重機械プロセス機器のアフターサービス事業のキーとなる「移動機診断システム SHI-PEds」について紹介する。

2　開発の背景

開発のきっかけは，主要顧客から操業人員の最適化を目標に，移動機のチョコ停対策を求められたことである。開発の第１段階として自動帳票化システムと称した故障情報の見える化（LV１）から取り掛かった。並行してクラウドへの故障データ蓄積を行い，傾向管理・原因分析により操業安定化・予防保全につながるシステム確立（LV２）を進めている。こうしたニーズは顧客の各製鉄所全体に広がっている。さらなるデータ蓄積により故障要因の特定，復旧ガイダンスの提示を進め，最終的には故障自動回避システムの実現（LV３）を目指している。

＊住友重機械プロセス機器株式会社　＊＊株式会社ライトウェル

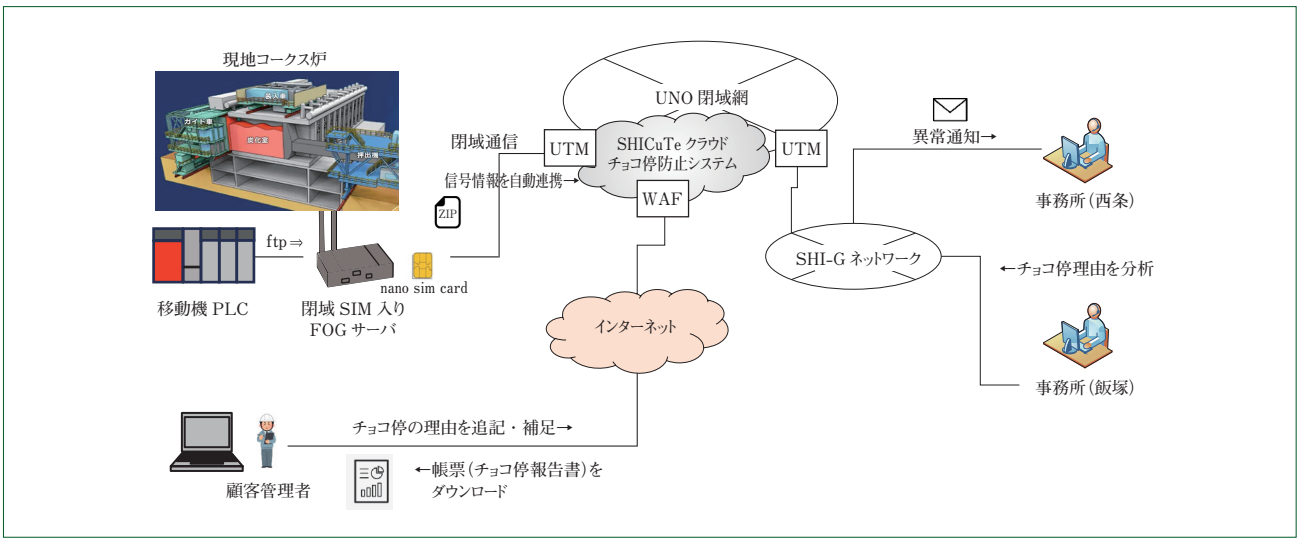


図 1　システム構成図
System configuration diagram

図 2　LV 1　自動帳票化システム 帳票画面
LV 1　Automated reporting system reporting screen

また，脱炭素化による移動機の減少が予測されるなかで，故障原因から設備診断やコンポーネント更新計画の提案サポートも求められている。住友重機械プロセス機器では，アフターサービスを中心とした事業の転換を図っていくうえでの差別化技術として移動機の設備診断・状態監視システムを開発し，サービスの受注拡大を図るツールとして異常情報から設備診断やコンポーネント更新計画の提案を行っている（**図1**）。

3　移動機診断システム

3.1　開発のステップとレベル別機能

3.1.1　LV 1　自動帳票化システム

移動機では自動・無人操業を実施しているが，故障に伴うチョコ停が発生すると，そのたびに運転員が現場に駆け付け，手動で復旧操作を実施した後に再度無人操業に切り替えて対応している。また，発生したチョコ停は日報にまとめて顧客内で情報共有をしているが，その収集作業は各運転員の操業日誌からの転記によって行われているのが実情である。

LV 1では，システム導入の第1段階としてチョコ停発生時の故障履歴データを住友重機械グループ共通基盤プラットフォームSHICuTe[1]のクラウド上に収集し，故障履歴帳票を自動的に作成する機能を搭載した。チョコ停の発生をトリガーに，警報メッセージを表示し，その故障に付随する発生年月日および時間，炉体・窯番号，移動機の号車，故障が発生した装置名をPLC（Programmable Logic Controller）にロギングする。また，故障発生から復旧までに実行した操作履歴も同様に記録する。PLCからSHICuTeのクラウドに送られたそれらのデータをもとに帳票を自動作成する。日々の履歴を管理・確認できるほか，期間別や原因別などにソートできる機能も有している。帳票は月・週・日・時間別，また発生した故障ごとの回数や，復旧までに要した時間の日別・月別集計とグラフを作成することができ，日報作成に関する省力化を実現するとともに，傾向を見える化するものとなる（**図2**）。

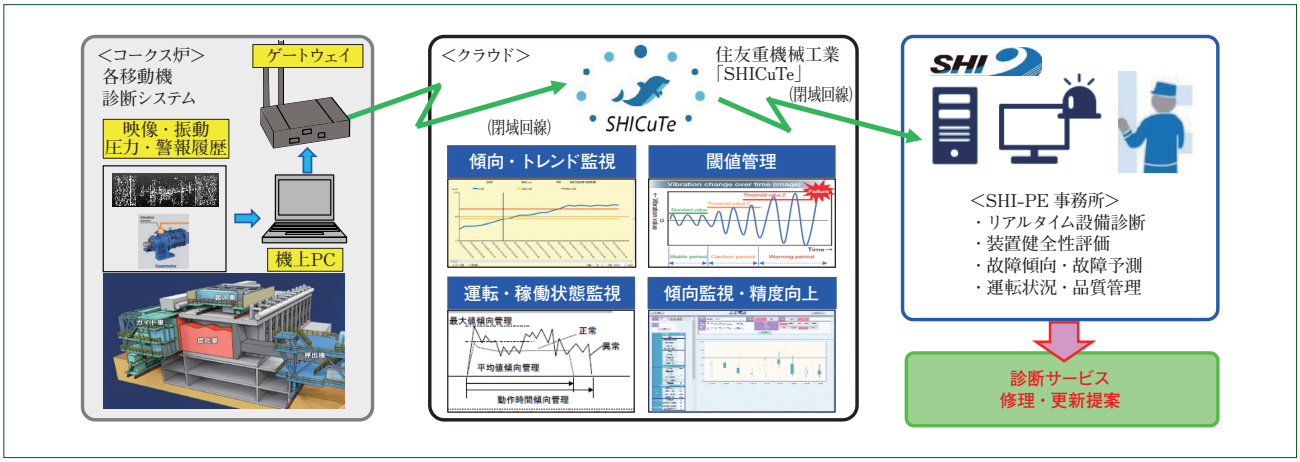


図 3　LV２ 機能および構成図
LV２ function and configuration diagram

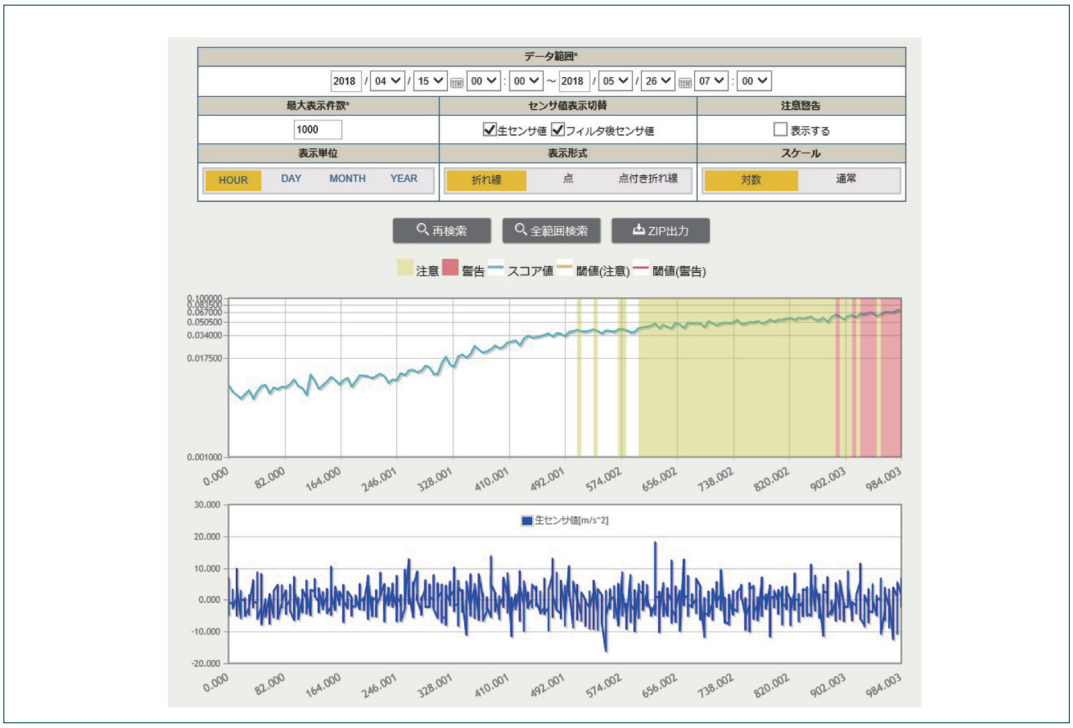


図 4　故障診断画面例
Example of fault diagnosis screen

自動帳票化システムの主な機能を次に示す。

(1) チョコ停履歴

トリガー：①ブロックI/L欠落 ②自動モードOFF(手動介入) ③機械停止

分類項目：①炉体・窯番別 ②移動機別 ③装置別 ④交代組別 ⑤日時別

(2) 帳票機能

表示画面，時間，回数，月別，設備，炉№など

3.1.2　LV２ 傾向監視システム，故障予測・診断システム

LV２では，LV１で収集した故障情報に加え移動機において重要な装置(押出装置，蓋取装置，走行装置など)の各種センシングデータ(電流値，振動値など)を収集し，操業状態での変移を常時監視することで装置が故障に至る時期を予測して診断できるシステムを目指している(**図３**)。予測診断には機械学習とAIを用いているが，「故障データの不足」と「学習モデルのトレーサビリティ」が懸念される。今後は顧客サイトのフィールドデータ収集のなかで検証していくが，現段階では正常データのみ学習させ，これを基準として操業情報(機器の動作状態やタイムサイクルデータ)を組み合わせた有効パラメータで，異常算出および故障予測・診断のためのアルゴリズムを設定する。このアルゴリズムはSHICuTeの標準プラットフォームをベースに開発した。

また，装置ごとに主要部品の摩耗・劣化を①使用時間，②使用回数，③消費電力，④経過時間などから定義し，部品ごとに上限を定義して注意喚起の警告を発報する仕組みも取り入れた。これにより各装置の故障前の予防保全が可能となる。このほかLV２には基本機能として，各データの状態トレンドとそれをもとにした将来の傾向予測の表示，閾値

故障要因箇所分析　画面イメージ

移動機	重故障メッセージ	操作履歴		要因
6号装炭車	炉端過走検出	乗込位置走行中断操作	ON	想定：＿＿＿＿ ⇐自動入力
		乗込位置走行中断操作	OFF	結果：＿＿＿＿ ⇐手入力
		ﾒｲﾝ機器ﾓｰﾄﾞ手動	OFF	
		ﾒｲﾝ機器ﾓｰﾄﾞ切	ON	
6号装炭車	空気吸込ﾌﾞﾛﾜINV CC-LINK異常	炉頂掃除/回収炭手動	OFF	想定：＿＿＿＿
		炉頂掃除/回収炭切	ON	結果：＿＿＿＿
		炉頂掃除/回収炭手動	ON	
		炉頂掃除/回収炭切	OFF	
		故障ﾘｾｯﾄ操作	OFF	
		故障ﾘｾｯﾄ操作	ON	

※「移動機」「重故障メッセージ」「操作履歴」はそれぞれ帳票画面から転記
※「要因」の想定欄はロジックをPE(＋技術研究所)で検討後，連絡

図５　故障要因分析の画面イメージ
Image of failure cause analysis

故障時操作パターン提示

移動機	重故障	要因
6号装炭車	空気吸込ﾌﾞﾛﾜINV CC-LINK異常	＿＿＿＿＿＿ ⇐故障要因分析画面の「想定」から転記
解消操作		
①	乗込位置走行中断操作	ON
②	乗込位置走行中断操作	OFF
③	ﾒｲﾝ機器ﾓｰﾄﾞ手動	OFF
④	ﾒｲﾝ機器ﾓｰﾄﾞ切	ON

※「移動機」「解消操作」は故障要因分析画面の「操作履歴」から転記

図6　LV３ 故障復旧ガイダンスのイメージ
Image of LV３ fault recovery guidance

の設定と管理，メンテナンスを促すアナウンス機能などを装備する(**図４**)。

傾向監視・故障予測・診断システムの主な機能を次に示す。

(1) 傾向監視・故障予測

主要装置の各種データトレンド，閾値管理，機械学習・AIによる故障予測診断

(2) 余寿命予測

主要部品の摩耗，劣化情報，交換推奨情報

3.1.3　LV３ 故障復旧ガイダンスシステム，故障自動回避システム

LV３ではLV１，LV２で蓄積した各種データおよび故障情報，操作履歴をクラウド上でデータベースにまとめ，運転員の復旧操作をパターン化する(**図５**)。そこから各故障要因と復旧操作を紐づけ，各故障要因に対する復旧ガイダンスとして運転員に提示するシステムの開発を目指している。移動機の重故障１件につき，データベースより複数の復旧方法をガイダンスし想定要因を表示する(**図６**)。操作員は最適と思われる復旧方法を選択し，操作を行うこととなる。さらに，この復旧操作手順のデータベース化が進めば，運転員の習熟度に伴う復旧時間差異の平準化や故障時のダウンタイムが低減できる。提示したガイダンスの有効性や確からしさが担保されれば，将来的に運転員の操作を介さずともガイダンスに従って移動機が自動で故障から復帰する故障自動回避システムが可能となり，ダウンタイムゼロ化の移動機が実現する。将来的な人口減少を見据え，現場の作業者の負担を軽減することでより適切な人材投資にも貢献できるようにしたい。

3.2　画像認識技術の適用

移動機診断システムに，別途開発した画像認識による状態判定技術を適用することで，さらなる高機能化が可能となる。移動機の一つである装炭車の蓋着工程において，炉への蓋装着状態を画像で判定することで，蓋の隙間から噴出している火炎を映像上の動きで検知し，蓋着の正常/異常の判定が可能となっている(**図７**)。燃えカスなどの動きのない外乱については，RGBの色情報で判別するとともに，特定の色(火炎の場合：R)の検出で識別する。検証実績として異常判定正解率100％，正常判定正解率99.7％を達成した。

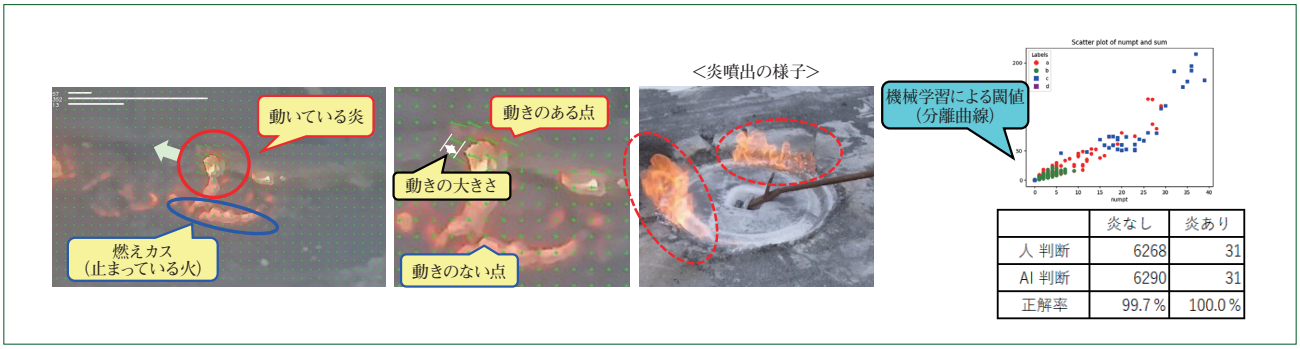


図 7　**装入蓋着状態の画像認識による判定技術**
Recognition-based detection technology for cover status

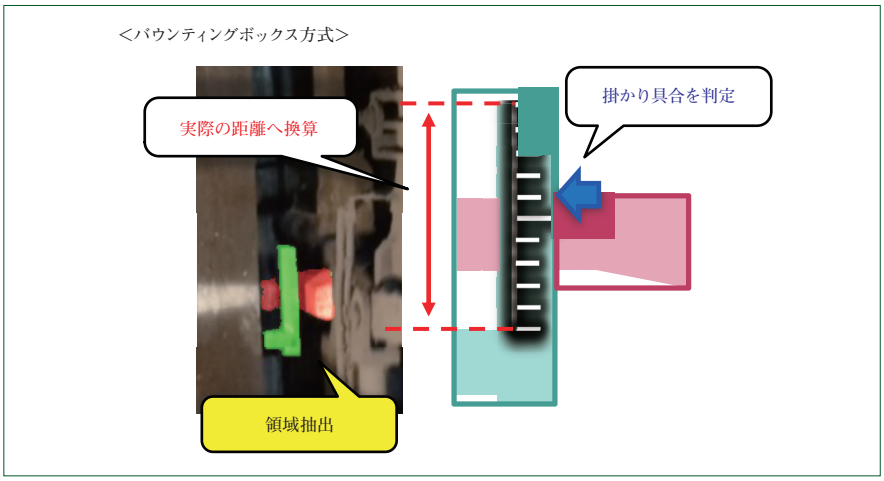


図 8　**画像認識技術の応用例**
Application example of recognition-based detection technology

この判定技術の適用範囲を広げ，その他移動機の押出機・ガイド車の蓋着検知(**図8**)やコークス炉トロリの湾曲，走行軌条レールの歪みなどの診断機能として応用し，状態監視の高機能化につなげる。

3.3　SHICuTeプラットフォームの活用

前述のように本システムの構築にはSHICuTeプラットフォームを最大限に活用している(**図9**)。今まで顧客の内部情報として現場にしかなかった移動機の運転データや稼働情報をSHICuTeに常時集めることによって，データの一元化や移動機の運転データの活用，評価結果の共有が可能になる。移動機の稼働状態を現場の管理者はもちろん，メーカー側もリアルタイムに把握できるようになる。

SHICuTeを生かすことで，他事業部で持っているDXに関する知見，技術，ノウハウを利活用でき開発を加速させることができる。また，本開発で得られた診断技術をSHICuTe全体のシステムに還元することで，住友重機械グループ全体の技術革新のサイクルに寄与できると考える。

4　診断技術の確立 データ収集とフィールドテスト

4.1　故障予兆検知と余寿命予測

SHICuTeには，プラント運転支援システムにおける故障予兆検知として，噴破などの異常検知を構築した事例[2]や，MT法(Mahalanobis-Taguchi method)を用いた故障診断システムを構築した事例などが存在する。移動機の各種機器データを蓄積・分析して装置の故障予兆を検知し，余寿命を予測することにより(**図10**)移動機の稼働停止が防止でき，適切なタイミングでの保全計画立案のサポートが可能となる。また，ユーザの主観に寄らない正確な稼働率の実態を把握することも期待できる。移動機診断システムではこれらをベースとして，顧客サイドでのフィールドテストで有効性を評価し，最適なアルゴリズムを構築する。

4.2　故障要因分析とガイダンス機能

チョコ停発生時の故障要因と作業指示を記録し続けることにより，チョコ停の発生データが溜まりデータベース化が進めば，発生した事象から操作員へ最適な故障対応ガイダンスを出すことが可能となる。いずれは現場に知見のある作業者がいなくても，ノウハウが失われずに機械への復旧作業指示を自動的に出せるようになり，より「壊れない，停まらない」移動機が提案できるようになる。

5　今後の展望と課題

今後の展望として，移動機だけでなく炉体設備や他機種への適用も視野に入れている。現在はガイド車と装炭車に適用しており，これらの移動機専用にカスタマイズされた構成となっている。移動機の構成や制御方法，経年状況など製鉄所ごとにそれぞれ独自の特徴を持っていることから，適用先を

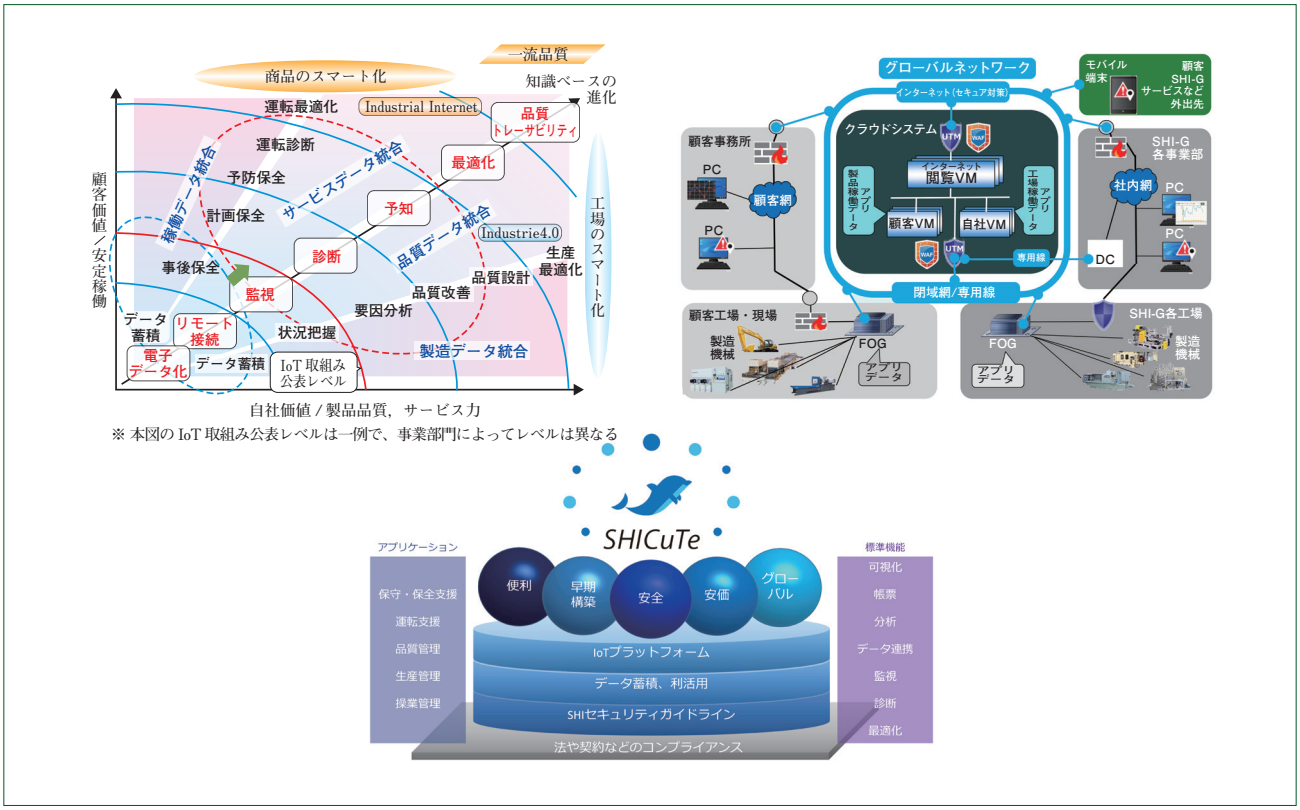


図 9　**SHICuTeの概要**
Overview of SHICuTe

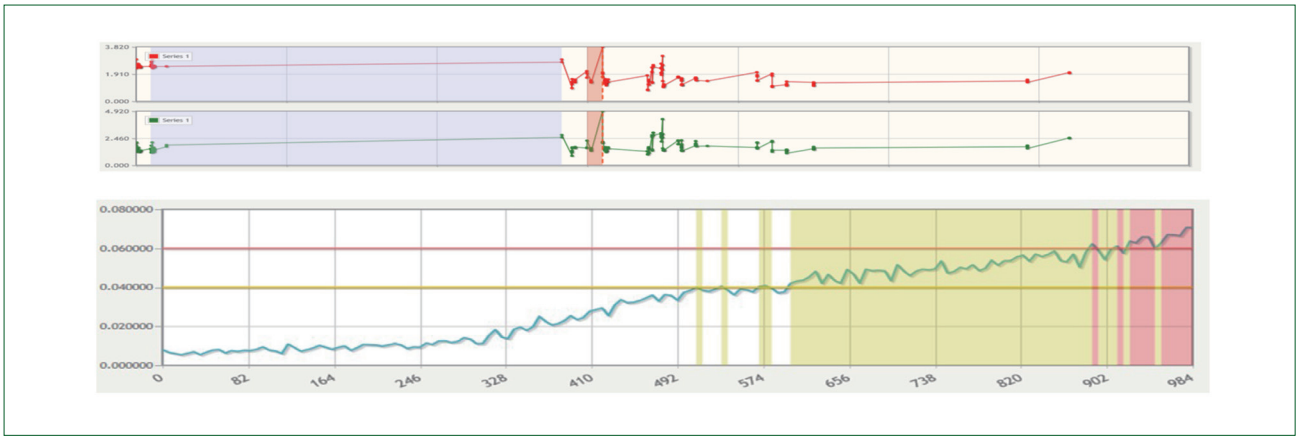


図10　**故障・余寿命診断システム例**
Example of failure and remaining useful life diagnosis system

広げていくための幅広いデータ収集が今後の課題となる。

6　むすび

(1) 移動機において，予防保全とダウンタイム削減を目的とした診断システムの開発を行っている。

(2) SHICuTeを最大限活用して，移動機診断システムをLV１：自動帳票化システム，LV２：傾向監視システム，故障予測・診断システム，LV３：故障復旧ガイダンスシステム，故障自動回避システムとに位置付け，現在LV２の開発まで完了しており，今後LV３の開発に取り組んでいく。

(3) フィールドテストにて有効性を確認し，他機種含め適用先を広げていく。

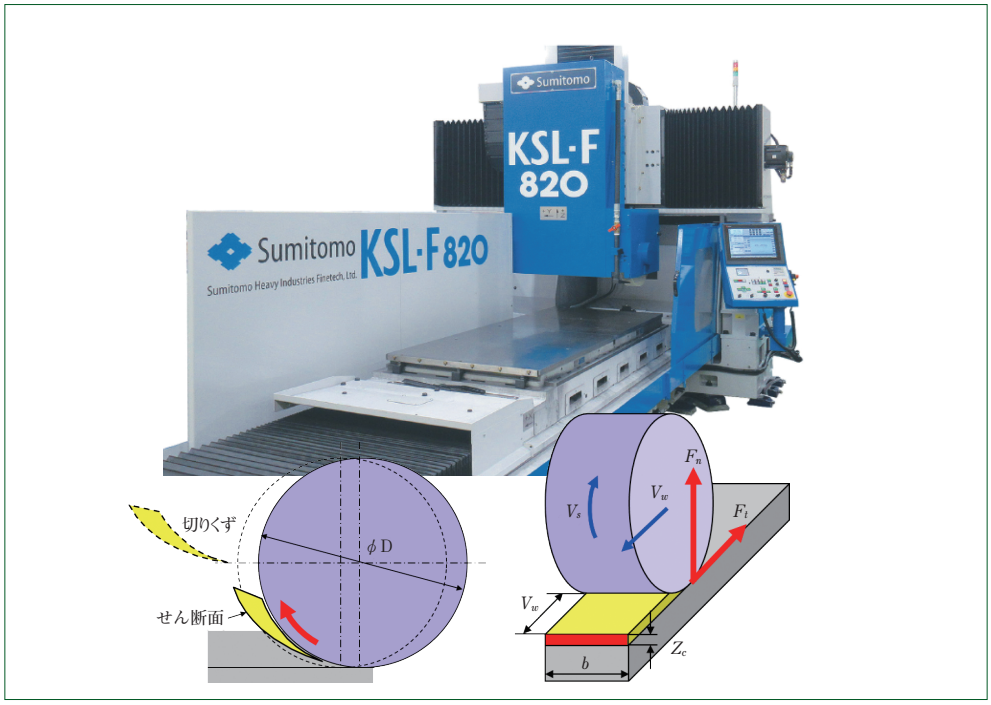
(参考文献)
(1)　明渡豊，村上憲司，住友重機械グループ共通基盤プラットフォーム SHICuTe，住友重機械技報 , 209 (2023), 1-4.
(2)　門脇正法，IZANA（プラント運用支援システム）向け異常検知機能の開発，住友重機械技報，209 (2023), 33-34.

※「SHICuTe」は，住友重機械工業株式会社の登録商標です。

被削材物性値と研削条件からの研削抵抗の予測

Prediction of Grinding Force from Work Material Properties and Grinding Conditions

●市　原　浩　一*
Kouichi　ICHIHARA



研削抵抗モデル
Grinding force model of grinding wheel

研削抵抗は研削盤の主軸動力，加工歪み，研削熱などに関係する重要なパラメータであり，従来より比研削エネルギーの実験値を用いた計算方法が知られている。本報では切りくずのせん断力に着目して，被削材の物性値と研削条件から接線抵抗，法線抵抗の推定を試みた。その結果，実機での研削抵抗の実測値と推定値は被削材質や切込み量に対して傾向および大きさがおおむね一致した。本方法により未経験の被削材質や研削条件に対して，あらかじめ研削抵抗を知ることが可能となり，条件出し作業の負担軽減に貢献できると考える。

Grinding force is an important parameter related to the spindle power of the grinder, machining strain, grinding heat, and so on. To calculate it, a method using experimental values of specific grinding energy has been known for some time. In this paper, we focused on the shear force of the grinding chips and attempted to predict the tangential force and normal force from the physical properties of the workpiece material and grinding conditions. As a result, the tendency and magnitude of the grinding force of the actual machine and the predicted results were generally consistent with respect to the workpiece material and depth of cut. We believe that this method makes it possible to know the grinding force in advance for workpiece materials and grinding conditions with which we have no experience, contributing to reducing the burden of setting the conditions.

1　まえがき

研削加工はさまざまな被削材質や部品形状に対し粗さ，うねり，幾何精度や加工時間などが求められ，現場では要求を満たす加工条件を決定しなければならない。その加工条件にはといしやドレッサの仕様，ドレス条件や研削条件など多岐にわたり，その組合わせは実に多く，条件出しには研削加工の高度なスキルが求められる。

既存ワークでも要求精度が上がるだけで既存の加工データは流用できなくなり，社内に蓄積された加工データ，熟練工のノウハウ，といし・研削盤メーカー，大学の知見を総動員してテストカットの条件出しが行われるが，試行錯誤を伴うことから膨大な時間とコストを要してきた。

一方で生産現場の労働者不足は慢性化し，団塊の世代が現場を離れて早10年が経過し，その間属人的ノウハウの技術伝承も課題となっている。このような時代を背景に持続可能な

＊技術本部

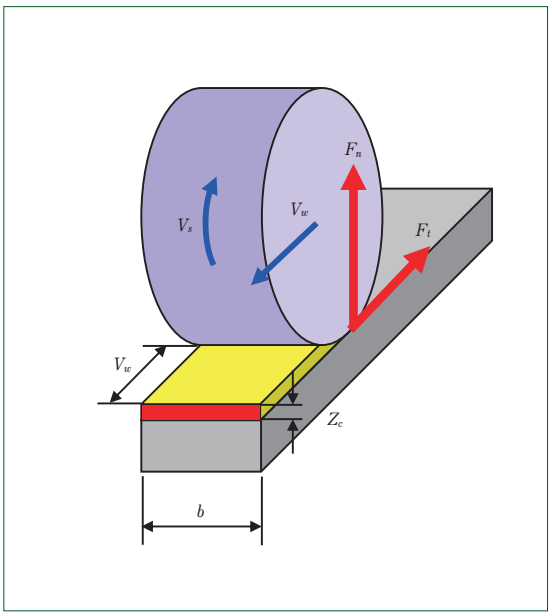


図1　研削抵抗幾何モデル
Grinding force geometoric model of grinding wheel

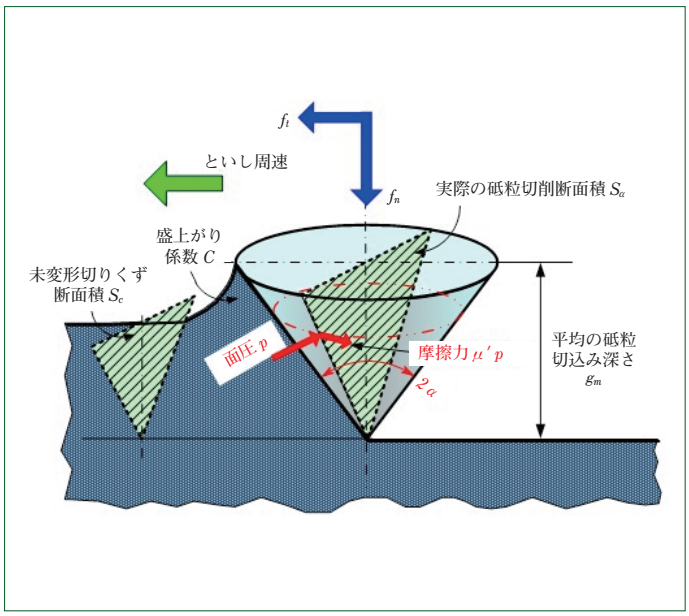


図2　円錐砥粒モデル[4]
Conical abrasive grain model

ものづくりを維持成長させるには人間の知的活動をデータベースやAIで補完することが必須になってきている。

本報は，研削抵抗の新たな予測方法について参考文献(1)から抜粋し，まとめ直したものである。

2　従来の研削抵抗モデル

2.1　比研削エネルギーの面圧モデル

図1の平面研削加工の幾何モデルを用いて従来の研削抵抗モデルを説明する。といしの仕事量は被削材の除去体積である。この除去体積はといしが被削材に加えた加工エネルギーに比例する。これを単位時間で表すと，といし出力L kWは除去体積速度q mm^3/sに比例する。といし出力Lはといし周速V_sと接線抵抗F_tの積であり，除去体積速度qは研削幅bと切込み量Z_cと被削材のワーク速度V_wの積である。Lとqの比例定数をkと置けば式(1)が成り立ち，式を変形すると式(2)となり，接線抵抗は被削材ワーク速度に比例してといし周速に反比例する基本式が求まる。

$$L=F_t\cdot V_s=k\cdot b\cdot Z_c\cdot V_w \quad \cdots\cdots(1)$$

$$F_t=k\cdot b\cdot Z_c\cdot V_w/V_s \quad \cdots\cdots(2)$$

比例定数kは単位体積当たりの研削エネルギー J/mm^{3}を示し，比研削エネルギーと呼ばれる。比研削エネルギーは次元解析より面圧と同じ次元を持ち[2]，接線抵抗はこの面圧(=比研削エネルギー)に切込み断面積bZ_cとワークといしの速度比V_w/V_sの積より求まる。**図2**に示す円錐砥粒モデルを用いても砥粒断面積の総和は切込み断面積bZ_cと等しくなり，接線抵抗は式(3)より，法線抵抗は式(4)より求まる。式(3)には摩擦項も含まれている。ここで，比研削エネルギーC_p，砥粒頂角2α，切込み量Δ，摩擦係数μである[3]。

$$F_t=C_p\left(\frac{v\Delta b}{V}\right)+\mu F_n \quad \cdots\cdots(3)$$

$$F_n=C_p\left(\frac{\pi v\Delta b}{2V}\right)\tan\alpha \quad \cdots\cdots(4)$$

したがって，被削材の比研削エネルギーから接線抵抗を推定できる。逆に言えば比研削エネルギーのデータがない被削材質は接線抵抗を推定することはできない。

2.2　従来モデルの問題点

式(1)～(4)では消費された研削エネルギーは除去体積のみに比例し，削り方の影響を説明できない。たとえば切込み量10 μm×1回と1 μm×10回の除去体積は同じであるが，消費研削エネルギーは1 μm×10回の方が大きくなる。これは，切りくずサイズが小さくなるほど単位体積当たりの切断される表面積が切りくずサイズに反比例して増加し，切りくずのせん断エネルギーが増加することによると理解できる。しかし，式(1)～(4)には切りくずサイズの影響が反映されていない。

また，実機の経験からドレス条件により研削抵抗が大きく変化することが知られているが，式(1)～(4)ではドレス条件の違いも説明できない。法線抵抗F_nの発生原因は式(4)より砥粒頂角，いわゆる負のすくい角で説明される。しかし砥粒頂角の影響は$\tan\alpha$で効くことから，ツルーイング状態の砥粒先端が平坦な場合，すなわち$\alpha=90°$の場合は法線抵抗が発散して実態と合わない。

式(2)の基本式は，実機のテスト結果と乖離するので式(5)，(6)のように切込み量，といし速度，ワーク速度の指数乗に比例する補正を加えた実験式が提案されている[5]。しかし，比研削エネルギーの実験値は測定時のドレス条件や研削条件で値が変化し，推定条件と比研削エネルギーの測定条件が異なれば，比研削エネルギーに差が生じ研削抵抗の推定精度に影響する。また，さまざまな被削材質やドレス・研削条件を満たす汎用の実験式を見出すことも現実的ではない。

$$F_t=k\cdot b\cdot Z_c^{\alpha}\cdot V_w^{\beta}/V_s^{\gamma} \quad \cdots\cdots(5)$$

$$F_n=k'\cdot b\cdot Z_c^{\alpha'}\cdot V_w^{\beta'}/V_s^{\gamma'} \quad \cdots\cdots(6)$$

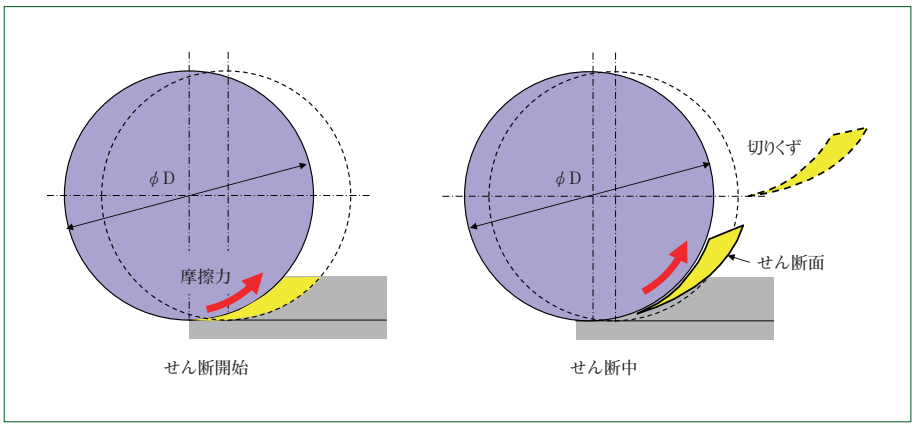


図3　切りくずせん断モデル
Chip shearing model

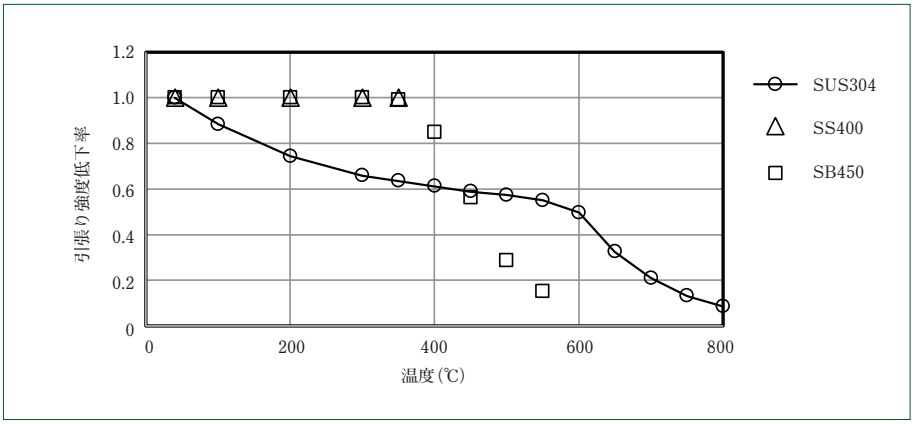


図4　引張り強度の低下率と温度の関係
Relationship between tensile strength reduction rate and temperature

3　提案する研削抵抗モデル

3.1　切りくずせん断モデル

これまで述べたように研削抵抗の従来モデルには問題点が散見される。その要因として研削抵抗を砥粒断面に作用する面圧と捉えるモデルに無理があるのではないかと考える。

切りくずはマクロ的に見れば，**図3**に示すようにといしの接触弧面に作用する接線方向の摩擦力により，切りくずせん断面が被削材からずらされて切り離されることで生成されると考えられる。このことから，といしの接線抵抗は切りくずせん断面に作用するせん断破壊の抵抗と考えられる。切りくずは，接触弧面が接触弧長さを回転する間に被削材から切り離されることから，といし作業面の切れ刃単位は接触弧面と考えられる。すなわち，切れ刃ピッチは接触弧長さである。切りくずの摩擦力は接触弧面の砥粒と結合剤により発生する。切りくずは砥粒で細かくせん断された切粉状となるが，その砥粒せん断面面積は，マクロ的には接触弧面で近似できると考えられる。したがって，せん断抵抗はせん断面積に比例し，といし接触弧面に切りくずのせん断力に耐えられる砥粒数が分布していれば砥粒サイズの影響は小さいと考えられる。これは，砥粒の番手を数倍大きくしても研削抵抗の変化が小さいことからも分かる。

3.2　せん断力とせん断長さ

せん断力F_sは，せん断応力×せん断面積より被削材質のせん断強度τ_{max}と研削時のせん断面積Sから式(7)で与えられる。ここで，bは研削幅，L_sはせん断長さである。延性材の場合，最大歪みエネルギー説によれば，せん断強度τ_{max}は降伏応力σ_yの$1/\sqrt{3}$である。ここでは，せん断強度τ_{max}を引張り強度σ_{max}を用いて式(8)より求める。

$$F_s = \tau_{max} S = \tau_{max} b L_s \quad \cdots\cdots (7)$$

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_{max}}{\sqrt{3}} \quad \cdots\cdots (8)$$

研削時のせん断強度τ_{max}は，被削材物性値の引張り強度から求めた値より低くなると考えられる。その原因は被削材物性値の伸びと高温軟化である。

切りくずは，といしとの摩擦力により被削材とせん断面で引きちぎられる。切りくずが破断分離するまではせん断抵抗が作用し，破断と同時にせん断抵抗はゼロに開放される。この破断はといしが接触弧回転する間に生じる。破断まではせん断面が塑性変形して伸ばされ，伸びている間だけせん断抵抗が働く。といしが接触弧回転して切りくずが破断しない場合の伸びは100％になるが，通常の被削材質の伸びは50％以下の場合がほとんどであり，といしが接触弧回転する途中で切りくずが破断し，せん断抵抗はゼロに開放される。したがって，実質せん断応力はせん断強度に被削材の伸びE_Lを乗じた値に低下すると考えられる。

また，研削加工は火花が出ることから，切りくずおよびせ

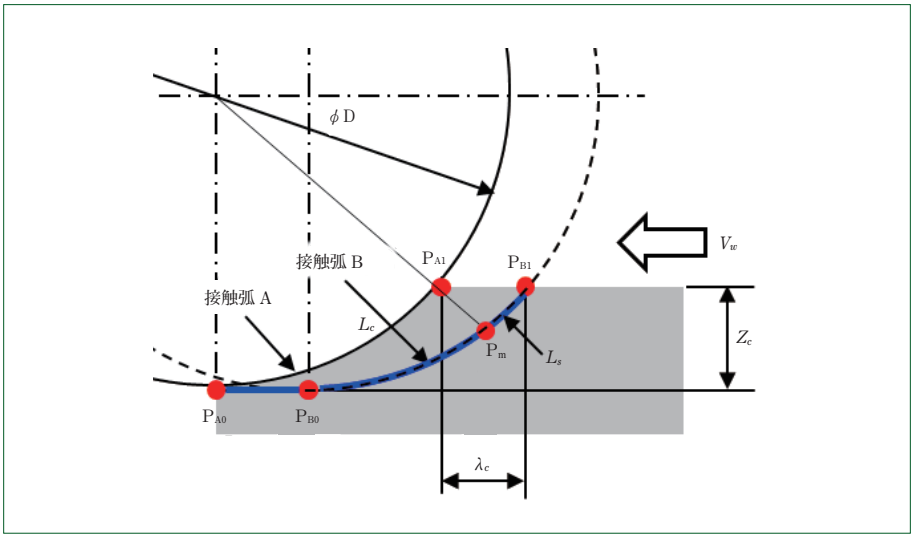


図5　**接触弧のせん断長さ**
Shearing length of contact arc of grinding wheel

表1　**被削材物性値と研削条件**
Physical properties of the work material and grinding conditions

#	項目	被削材					単位
		SUS304	SS400	S55C	NAK55	FC250	-
1	引張り強度(σ_{max})	500	400	800	1200	250	MPa
2	伸び(E_L)	0.4	0.22	0.15	0.14	0.01	-
3	といし径(ϕD)	510	510	510	510	510	mm
4	といし回転数(N)	1000	1000	1000	1000	1000	r/min
5	テーブル速度(V_w)	30	30	30	30	30	m/min
6	研削切込み量(Z_c)	5	10	10	10	10	μm
7	研削幅(b)	40	40	40	40	40	mm

ん断面は研削熱により1000℃程度の高温にさらされ，これにより被削材強度は著しく低下する。1000℃の高温環境下の物性強度の公開データの知見がないので推測になるが，**図4**は鉄鋼材料の温度と許容引張り応力のデータ[6]から引張り強度の低下率と温度の関係をプロットしたものである。耐熱材のSUS304でも800℃で常温の1/10以下に低下し，その他材料の場合も600℃で1/10程度まで低下することが分かる。このことから，研削中の被削材強度は1桁以上低下し，実質せん断強度は高温軟化率 η_{th} を乗じた値に低下すると考えられる。したがって，実質のせん断応力は式(9)に示すように，被削材せん断強度 τ_{max} に伸び E_L と高温軟化率 η_{th} を掛けた値に低下し，これを等価せん断応力 τ_{eq} と呼ぶことにする。

さらに，滑り摩擦抵抗も接線抵抗に影響する。といしと被削材の干渉量が小さい場合は，法線抵抗が低くといしが切りくず上面を上滑りして滑り摩擦が発生する。一般的に動摩擦係数は静止摩擦係数より低いことから，研削が上滑りからせん断に遷移するときに接線抵抗は不連続に摩擦係数比だけ大きくなると考えられる。接触弧のせん断長さを L_s とし，L_s/L_c が接触弧のせん断率 η_s，上滑り率は $1-\eta_s$ である。したがって，接線抵抗は滑り摩擦抵抗とせん断抵抗の割合を掛けた和より，切りくずを削るときのせん断応力の推定値は式(10)，接線抵抗の推定値は式(11)で与えられる。ここで滑り摩擦抵抗はゼロから一次関数で増加し，最大値がせん断力の1/2すなわち静止摩擦と動摩擦の係数比2の仮定により，滑り摩擦の平均応力は等価せん断応力の1/4とした。

$$\tau_{eq} = \tau_{max} E_L \eta_{th} \quad \cdots\cdots (9)$$

$$\tau_{est} = \tau_{eq} \frac{L_s}{L_c} + \frac{\tau_{eq}}{4}\left(1 - \frac{L_s}{L_c}\right) \cdots\cdots (10)$$

$$F_{t_est} = bL_s\left(\tau_{eq} \frac{L_s}{L_c} + \frac{\tau_{eq}}{4}\left(1 - \frac{L_s}{L_c}\right)\right) \cdots\cdots (11)$$

次に，せん断長さを**図5**を用いて説明する。といしは回転しながら送りにより研削方向に移動する。といしが接触弧回転する間に実線円から破線円に変位し，それぞれの接触弧A,Bとし，接触弧Aの両端の点を P_{A0}，P_{A1}，接触弧Bの両端の点を P_{B0}，P_{B1} とする。点 P_{A0} の砥粒が P_{A1} まで回転する間にといしは λ_c 移動して点 P_{A0} は点 P_{B1} に移動する。そして，点 P_{A0}，P_{A1}，P_{B1}，P_{B0} で囲まれた断面の一部がといしによって削り取られる。接触弧長さ L_c は研削幾何理論[7]~[9]から式(12)で与えられる。また，接触弧当たりのといし移動量 λ_c は式(13)で与えられる。ここで，V_w はワーク速度，V_s はといし周速，N はといし回転数，Z_c は研削切込み量，D はといし直径である。

したがって，せん断長さの最大値は $\lambda_c + L_c$ である。これを L_c で割ると式(14)となり，$V_s >> V_w$ よりせん断長さはおおむね切込み量とといし径で決まる接触弧長さと考えられ，ワー

表２　**被削材の研削抵抗の推定結果**
Estimated results of grinding force of work material

#	項目	被削材					単位
		SUS304	SS400	S55C	NAK55	FC250	-
1	せん断強度（τ_{max}）	288.7	230.9	461.9	692.8	144.3	MPa
2	伸び（E_L）	0.4	0.22	0.15	0.14	0.01	-
3	高温軟化率（η_{th}）	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	-
4	等価せん断応力（τ_{eq}）	5.77	2.54	3.46	4.85	2.13	MPa
5	接触弧長さ（L_c）	1.60	2.26	2.26	2.26	2.26	mm
6	接触弧せん断率（η_s=L_s/L_c）	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	-
7	せん断長さ（L_s=L_c×η_s）	1.44	2.03	2.03	2.03	2.03	mm
8	公称せん断面積（S=bL_c）	63.9	90.3	90.3	90.3	90.3	mm^2
9	せん断抵抗（F_s）	368.8	229.5	312.9	438.1	192.7	N
10	静止動摩擦係数比	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	-
11	滑り摩擦抵抗	92.2	57.4	78.2	109.5	48.2	N
12	接線抵抗推定値（F_{t_est}）	341.1	212.3	289.5	405.2	178.3	N
13	静止摩擦係数（μ_t）	0.40	0.56	0.56	0.39	0.27	-
14	法線抵抗推定値（F_{n_est}）	849.9	375.8	518.7	1031.9	668.7	N
15	接触弧面接触率（η_c）	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	-
16	ドレス面接線抵抗推定値（F_{td_est}）	110.6	68.8	93.9	131.4	57.8	N
17	ドレス面法線抵抗推定値（F_{nd_est}）	255.0	112.7	155.6	309.6	200.6	N
18	接触弧通過時間（Δt_c）	6×10^{-5}	8×10^{-5}	8×10^{-5}	8×10^{-5}	8×10^{-5}	s
19	最大切込み深さ（h_{max}）	0.19	0.37	0.37	0.37	0.37	μm
20	接触弧当たりワーク移動量（λ_c）	0.030	0.042	0.042	0.042	0.042	mm

ク速度にほとんど依存しない。これは従来モデルの接線抵抗の基本式がワーク速度に比例する考え方との大きな違いである。

$$L_c=\sqrt{Z_cD} \quad \cdots\cdots(12)$$

$$\lambda_c=\frac{V_w}{V_s}L_c=\frac{V_w}{N\pi D}L_c \quad \cdots\cdots(13)$$

$$\frac{L_c+\lambda_c}{L_c}=1+\frac{\lambda_c}{L_c}=1+\frac{V_w}{V_s}\cong1 \quad \cdots\cdots(14)$$

4　研削抵抗の推定値と実測値の比較

4.1　被削材物性値の影響比較

ここでは，研削抵抗への影響が大きい被削材質と切込み量の影響について推定値と実測値の比較を行った。まず，被削材質の比較結果を示す。**表１**に，５種類の被削材質SUS304，SS400，S55C，NAK55，FC250の物性値と研削条件を示す。推定に必要な物性データは引張り強度と伸びである（残りの高温軟化率といしと被削材間の静止摩擦係数の物性値については**表２**に示す）。研削条件の切込み量は10 μmとした。ただし，SUS304は10 μmの実機テストが過負荷となったことから５ μmとした。

表２に，研削抵抗と関連するパラメータの推定値の一覧を示す。計算方法は３章で述べた通りである。**表２**の#３行の高温軟化率は**図４**から一律５％とした。#13行の静止摩擦係数は実機テストの二分力比の平均値の逆数を用いた。#４行の研削時の等価せん断応力は#１行のせん断強度より２桁程度低いことが分かる。FC250の常温伸びは１％と低く，ほかの被削材より等価せん断応力が著しく低下し，推定値が実測値と乖離することから実機の等価せん断応力を用いた。

#８行の公称せん断面積は，接触弧長さ×研削幅である。これに#６行の接触弧せん断率を掛けると正味せん断面積になる。せん断率は90％とし，接触弧の前半10％はといしが上滑りすると仮定した。#９行がせん断抵抗で，#12行が滑り摩擦抵抗とせん断抵抗の割合を加味した接線抵抗推定値である。滑り摩擦抵抗の推定に#10行の静止動摩擦係数比2.0を用いた。

#12行の接線抵抗推定値はといし接触率が100％の場合を示し，これはツルーイング面の抵抗相当と考えられる。といしは切れ味を良くするためにドレッシングが行われ，といしと被削材の接触率はドレス条件により変化する。たとえばドレスピッチ0.5 mm，ドレス溝幅0.25 mmの場合，接触率は50％になり，せん断面積が減少する[10]。したがって，ドレッシングにより接線抵抗は#15行の接触率を乗じた値に低下すると考えられる。ここでは，#16行に接触率30％の場合の接線抵抗推定値を示し，#17行に法線抵抗推定値を示した。法線抵抗推定値は，接線抵抗推定値に静止摩擦係数データの代わりに実機テストの二分力比を直接乗じて求めた。

図６に，実測値のボックスプロットと推定値の折れ線グラフを重ねて示す。といしはN3A46H（クレトイシ製）を用い，研削条件は**表１**の通りである。データ総数は155件で，SUS304が15件，SS400が９件，S55Cが24件，NAK55が30件，FC250が77件である。ボックスプロット幅のばらつきは，ドレス条件とドレス層の摩耗の違いの影響である。研削抵抗は被削材質により大きく変化し，ドレス条件にも影響される。二分力比は被削材質で変化し，ドレス条件の影響は小

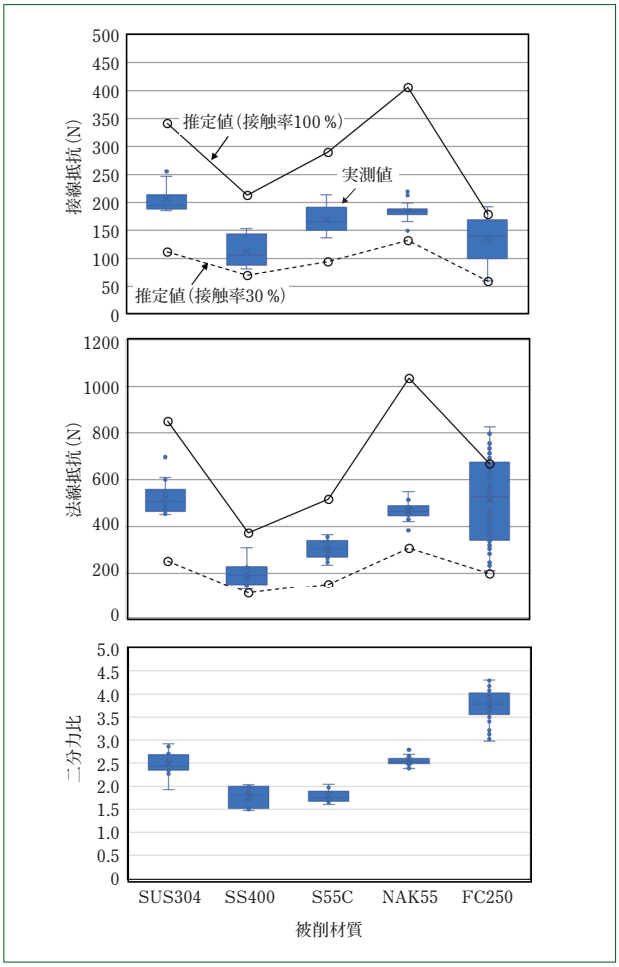


図6　**被削材の研削抵抗の実測値と推定値の比較**
Comparison between estimated results and actual machine results for grinding force

表3　**等価せん断応力の実測値と推定値の比較**
Comparison between estimated results and actual machine results for equivalent shear stress

	SUS304	SS400	S55C	NAK55	FC250	単位
実測値	4.09	1.70	2.37	2.43	2.13	MPa
推定値	5.77	2.54	3.46	4.85	2.13	MPa
推定値/実測値	1.41	1.50	1.46	1.99	1.00	-

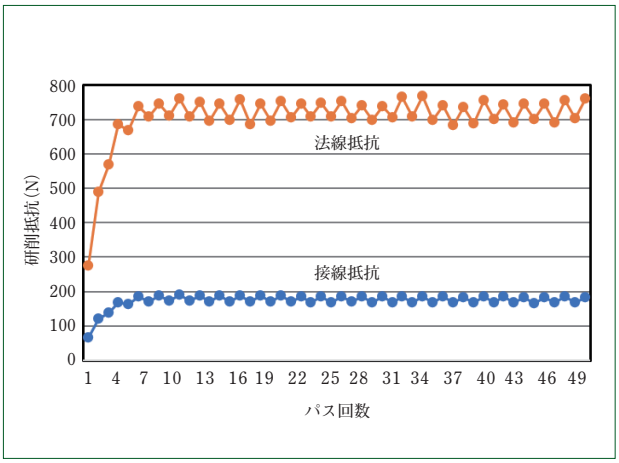


図7　**法線抵抗トレンド波形例**
Example of normal force trend waveform

さい。二分力比の逆数は摩擦係数相当と考えられるので，摩擦係数は被削材ごとに異なると考えられる。

折れ線は，**表2**の#12，#14，#16，#17行の接触率100％と30％の場合の接線抵抗と法線抵抗の推定値である。100％はツルーイング面相当に該当し，30％は間引き率が高めのドレス面相当に該当する。FC250は前述の通り常温伸びが小さいことから実機の接線抵抗の最大値をせん断面積で割った等価せん断応力を用いて推定した。実機の等価せん断応力2.13MPaから逆算した高温時の伸びは29.5％である。

実機テスト結果はおおむね推定範囲内に分布し，被削材との傾向もおおむね合っている。これから提案方法によりツルーイング面を含むドレス面に対して研削抵抗が推定可能と考えられる。従来方式の課題である研削抵抗に対するドレス条件の影響についても，といし接触率により推定が可能となった。

接線抵抗の推定値の上限はすべての被削材質に対して実測値より高くなり，特にNAK55が高く出ている（FC250は推定に実機データを用いたので一致している）。**表3**に，実機のボックスプロットの接線抵抗の最大値をせん断面積で割った等価せん断応力と推定値の比較を示す。推定値と実測値の比はNAK55が２倍，それ以外は約1.5倍であった。これから設定した高温軟化率５％は，この比率だけ高かったと考えられる。被削材物性値に合った高温軟化率の設定が推定精度の向上には重要であり，FC250のように伸びがゼロに近い被削材は高温時の伸びの設定も必須と考えられる。

続いて法線抵抗を考察する。**表2**の#19行の最大切込み深さh_{max}は，切込み量10 μmでも0.374 μmと極めて小さな値である。これはといしと被削材の干渉量であるから，この干渉量とといしと被削材間の接触剛性から法線抵抗が求まる。

接触剛性はといしと研削盤のシリーズ結合となるので，いずれか小さい方の剛性を超えることはない。一般的な高剛性研削盤の切込み剛性を100 N/ μ mとすると，法線抵抗は37.4 Nである。この値は**図6**で示した実機の法線抵抗より１桁以上低い値であり，切込み深さによりせん断力に必要な接線抵抗は発生できないことが分かる。では，なぜ実機の法線抵抗は高いのか。その理由は，実機では切込み剛性×担ぎ量の荷重が加算されるからである。すなわち，法線抵抗は切込み深さの成分よりも担ぎ量成分の方が大きく支配的であるといえる。

図7に，実機の50パス分の接線抵抗と法線抵抗のパスごとの平均値のトレンド波形の例を示す。被削材はFC250，研削条件は**表1**の通りである。波形のパスごとのジグザグの変動はアップカットとダウンカットの影響である。法線抵抗は，研削開始からパスを重ねるごとに切残し，量が累積して弾性変位が増加し上昇する。この弾性変位が担ぎ量である。６パス目で約730 Nの法線抵抗にバランスしている。このときの切込み量と除去量は10 μmで釣り合っている。６パス目の接線抵抗は約180 Nで，この接線抵抗を発生させるために必要なといしの接触力が法線抵抗の約730 Nである。この値は切込み深さから求めた接触力37.4 Nの約20倍に相当し，せ

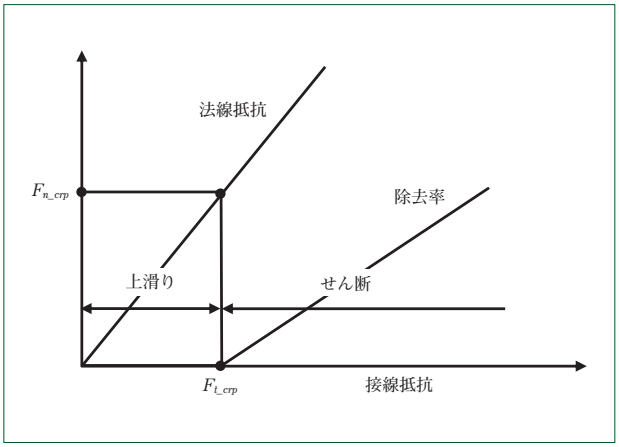


図８　除去率と研削抵抗の関係
Relationship between removal rate and grinding force

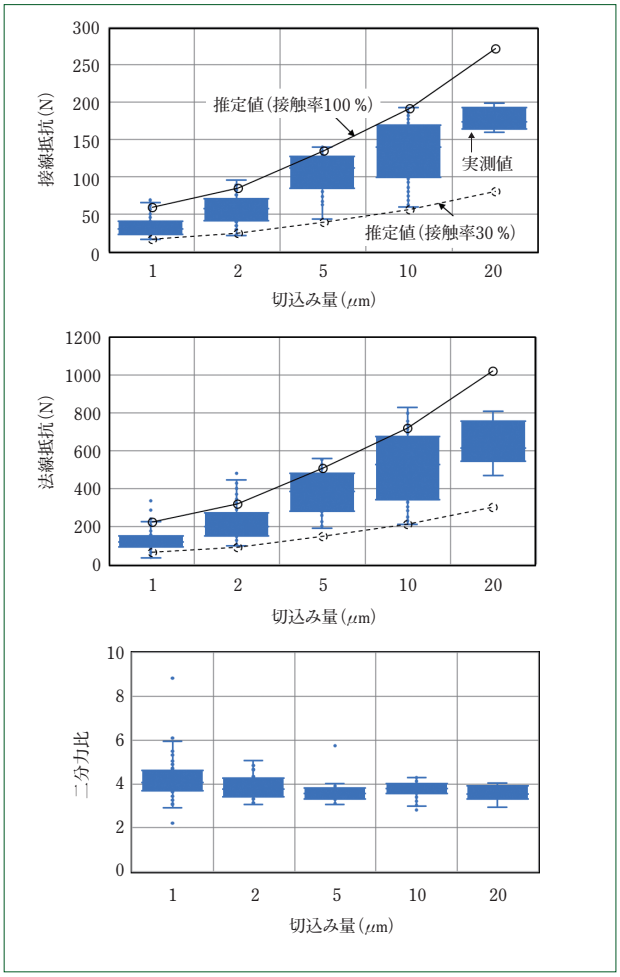


図９　FC250の切込み量に対する研削抵抗の実測値と推定値の比較
Comparison between estimated results and actual machine results for grinding force to depth of cut of FC250

ん断に必要な接触力は担ぎ量により発生することが分かる。

１パス当たりの除去量は切込み量ではなくせん断力で決まり，そのせん断力は担ぎ量に比例する接触力といしと切りくず接触面間の摩擦係数の積の摩擦力に等しい。研削の定常状態は，切込み量と除去量が釣り合うことから切込み量で除去量が決定するように見えるが，実態は切込み量により担ぎ量が変化し，接触力のレベルを変えることで摩擦力が変化して除去量をコントロールしていると考えられる。これは研削開始後の過渡状態や，切込み停止後のゼロカット状態の除去量が切込み量ではなく法線抵抗により変化することからも分かる。

切りくずがせん断される条件として，といしと切りくず接触面間の摩擦力により切りくずせん断面が被削材の等価せん断応力の臨界点を超える必要があるということが挙げられる。臨界点に達しなければといしは切りくず接触面を上滑りし削ることはできない。また，摩擦力の発生には接触力(＝法線抵抗)が必要で，接触力は切残しによる担ぎ量に比例する。接触力と接線抵抗の変換効率が摩擦係数である。すなわち，摩擦係数が大きいほど小さな接触力でせん断に必要な摩擦力が得られる。

この摩擦係数は被削材とといし間の接触状態で決まる物性値であり，ここでは実測値の二分力比のデータを用いて法線抵抗を求めたが，摩擦係数の物性データが入手できれば接線抵抗に摩擦係数の逆数を乗じて法線抵抗が求まる。このように，法線抵抗は負のすくい角に作用する面圧で生じるのではなく，もっと単純なせん断に必要な摩擦力を発生させる接触面圧の反作用と考えられる。

こうした関係をまとめ，**図８**にイメージで示す。横軸に接線抵抗を，縦軸に除去率と法線抵抗を取り，せん断が開始される接線抵抗の臨界点はF_{t_crp}である。この値は被削材物性値の等価せん断応力とせん断面積の積である。このせん断力は，法線抵抗F_{n_crp}と静止摩擦係数μの積の摩擦力で発生する。

4.2　切込み量の影響比較

続いてFC250に対する切込み量の影響について実測値と推定値を比較した。**表４**に，計算条件とその結果を示す。FC250の研削抵抗は，常温伸びを使用すると推定値と実測値のレベルが合わないことから，**表３**に示した切込み量10μmの実機の等価せん断応力2.13 MPaを接線抵抗の推定計算に用いた。＃３行の強度補正係数は，伸びと高温軟化率の積である。0.015は研削時のせん断強度が常温の1.5％に低下することを意味する。＃１～＃８行が被削材物性値と研削条件を示し，＃９，#18行が実機データ，残りは推定値である。切込み量は#７行に示すように１～20μmである。

図９に，実機テストのボックスプロットと推定値の折れ線グラフを重ねて示す。といしはN3A46H(クレトイシ製)である。データ総数は283件，切込み量１μmが113件，２μmが51件，５μmが36件，10μmが77件，20μmが６件である。ボックスプロット幅のばらつきは，ドレス条件とドレス層の摩耗の違いの影響である。実機と推定値は切込み量に対する研削抵抗の傾向がおおむね一致している。法線抵抗は接線抵抗÷摩擦係数である。摩擦係数は二分力比の逆数より，法線抵抗は接線抵抗に実機283件の二分力比の平均値を掛けて求めた。このことから，摩擦係数(二分力比の逆数)が平均値より低い実機のボックスプロットの一部の点が推定折れ線グラフからはみ出ている。

しかし，実機と推定値は切込み量に対する研削抵抗の傾向はおおむね一致している。従来の比研削エネルギーの面圧モデルは切込み量に比例した研削抵抗となるので，切込み量が小さい側では抵抗が低めになる。一方で，提案する切りくず

表 4　**切込み量に対する研削抵抗の推定結果**
Estimated results of grinding force to depth of cut

#	項目	被削材 FC250					単位
		1 μm	2 μm	5 μm	10 μm	20 μm	-
1	引張り強度（σ_{max}）	250	250	250	250	250	MPa
2	せん断強度（τ_{max}）	144.3	144.3	144.3	144.3	144.3	MPa
3	強度補正係数	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	-
4	といし径（ϕD）	510	510	510	510	510	mm
5	といし回転数（N）	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000	r/min
6	テーブル速度（V_w）	30	30	30	30	30	m/min
7	研削切込み量（Z_c）	1	2	5	10	20	μm
8	研削幅（b）	40	40	40	40	40	mm
9	等価せん断応力（τ_{eq}）	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13	MPa
10	接触弧長さ（L_c）	0.71	1.01	1.60	2.26	3.19	mm
11	接触弧せん断率（$\eta_s=L_s/L_c$）	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	-
12	せん断長さ（$L_s=L_c\times\eta_s$）	0.71	1.01	1.60	2.26	3.19	mm
13	公称せん断面積（$S=bL_c$）	28.6	40.4	63.9	90.3	127.7	mm^2
14	せん断抵抗（F_s）	60.9	86.2	136.3	192.7	272.5	N
15	静止動摩擦係数比	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	-
16	滑り摩擦抵抗	15.2	21.5	34.1	48.2	68.1	N
17	接線抵抗推定値（F_{t_est}）	60.9	86.2	136.3	192.7	272.5	N
18	静止摩擦係数（μ_t）	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	-
19	法線抵抗推定値（F_{n_est}）	228.6	323.3	511.2	722.9	1 022.3	N
20	接触弧面接触率（η_c）	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	-
21	ドレス面接線抵抗推定値（F_{td_est}）	18.3	25.9	40.9	57.8	81.8	N
22	ドレス面法線抵抗推定値（F_{nd_est}）	68.6	97.0	153.3	216.9	306.7	N
23	接触弧通過時間（Δt_c）	3×10^{-5}	4×10^{-5}	6×10^{-5}	8×10^{-5}	1×10^{-4}	s
24	最大切込み深さ（h_{max}）	0.04	0.07	0.19	0.37	0.75	μm
25	接触弧当たりワーク移動量（λ_c）	0.013	0.019	0.030	0.042	0.060	mm

せん断モデルの研削抵抗は接触弧長さに比例し，接触弧長さは切込み量の平方根に比例するので，切込み量が小さいほど単位切込み量当たりの抵抗が増加する現象が再現できている。

6　むすび

従来の比研削エネルギーの面圧と切込み断面積に基づく研削抵抗モデルに対して，被削材物性値と研削条件から接線抵抗と法線抵抗を求める切りくずせん断モデルを提案した。その推定値は実測値とおおむね一致した。切りくずせん断モデルの知見を次にまとめる。

(1)　切りくずせん断モデルから被削材物性値を，研削条件から接線抵抗と法線抵抗を求める方法を提案した。

(2)　せん断抵抗は，被削材のせん断強度と伸びと高温軟化率を掛けた等価せん断応力とせん断面積の積から求まる。

(3)　せん断面積のせん断長さの最大値は，といし接触弧長さL_cと接触弧当たりのといし移動量λ_cの和と考えられる。

(4)　実測値と推定値は接線抵抗の被削材質の傾向と大きさがおおむね一致し，FC250の検証より切込み量に対しても接線抵抗はおおむね一致した。

(5)　二分力比は被削材質とといし間の摩擦係数で決まると考えられる。

(6)　切りくずの上滑りからせん断状態への遷移は，接線抵抗をせん断面積で割ったせん断応力が被削材物性値で決定される等価せん断応力の臨界点で起こると考えられる。

(7)　ドレッシングで切れ味が変化する原因は，といし作業面の間引きによる接触面圧の上昇とせん断面積の減少と考えられる。

（参考文献）

(1)　市原浩一，研削抵抗の被削材物性値と研削条件からの計算予測，砥粒加工学会誌 68-8 (2024)，28-35.

(2)　市原浩一，多条ドレス砥石の研削メーカーニズムの研究　第２報：研削効率の評価方法と被削材質の影響，砥粒加工学会学術講演会講演論文集，(2020)，B26.

(3)　庄司克雄，研削加工学，(2004)，88，養賢堂 .

(4)　庄司克雄，研削技術者のための３D で見る『考える研削加工』へのアプローチ，機械と工具，(2016-2 月号)，61.

(5)　奥山茂樹，若手技術者のための研削工学 第５回研削抵抗とその変化，砥粒加工学会誌，59-6 (2015)，355-358.

(6)　経済産業省，別表第１鉄鋼材料の各温度における許容引張応力，https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/oshirase/2005/files/171214-3.pdf

(7)　（財）機械振興協会 技術研究所，加工技術データファイル基礎編 研削研磨加工初版，(2002)，35.

(8)　庄司克雄，研削加工学，(2004)，72，養賢堂 .

(9)　河村末久他，研削加工と砥粒加工，(1984)，32，共立出版 .

(10)　市原浩一，ドレス層の研削メーカーニズムと多条ドレス，砥粒加工学会誌，67-2 (2023)，63-66.

熱間鍛造プレス FPZ シリーズの開発

Hot Forging Press FPZ Series

●柳　原　　渉*
Wataru YANAGIHARA

図1　FPZ-2000 外観
FPZ-2000 exterior

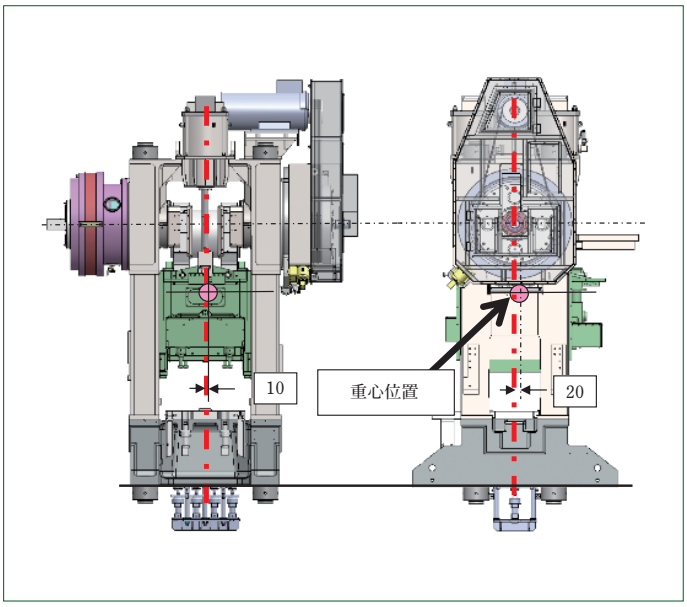


図2　FPZ-2000 機械重心位置
FPZ-2000 machine center of gravity

1　はじめに

当社の熱間鍛造プレスは，１号機を1967年に納入してその歴史がスタートした。その後，大量生産時代に入り，高速生産実現に向け，高速のプレス機や高速化に対応した自動化設備の開発を進め，現在まで国内外合わせて250台以上のクランク式熱間鍛造プレスの納入実績を上げている。本報では，最新機種として開発・上市した熱間鍛造プレスFPZシリーズを紹介する。

2　FPZ シリーズ開発の背景

最新機種であるFPZシリーズの開発コンセプトは，従来機種であるFPX・FPRシリーズで培われた機能をベースにさらなる進化を目指すことである。

従来機の良い点，改善すべき点をプレスの基本構造へ反映し，それと並行して鍛造プレスに求められる顧客の声や視点を改めて収集した。その結果「安定生産」を可能にする設備が大前提であるということを再認識し「STABLE：安定，SUITABLE：最適，COMFORTABLE：快適」の３つをキーワードに開発を進め，FPZシリーズを完成させた（**図１**）。

3　装置コンセプト

FPZシリーズの最大のポイントは，プレス本体の重量バランスを最適化（SUITABLE）している点であり，バランス最適化設計により前後・左右とも，重心位置を機械のセンターに大幅に接近させた。**図２**に，2000tクラスFPZでのプレス重心位置を示す。プレス中心からの重心位置のずれ量は左右方向で10mm，前後方向においても20mmと非常にわずかである。これを実現した技術は，プレスの心臓部ともいえる駆動系を構成する遊星減速機と湿式クラッチ/ブレーキの分割配置である。エキセン軸に貫通穴を設け，左右の駆動力を伝達する伝動軸を配置することで，右側に湿式クラッチ/ブレーキ，左側に遊星減速機を分割配置した構造が可能となった（**図３**）。

また，メインモータについても従来はプレス後面側にモータ台を設置していたが，FPZシリーズではクラウン上部に取り付ける構造としている。これらにより，プレスの安定性（STABLE）の向上が実現した。

4　キーコンポーネント：湿式クラッチ / ブレーキ

最適性（SUITABLE）を実現するために採用したキーコンポーネントの湿式クラッチ/ブレーキは，従来機では当初海外からの購入品を使用していた。ひとたび不具合が発生すると，いろいろな面でコントロールが難しく，解決に時間を要するなど，顧客にも迷惑を掛けることがあった。このことから，当社はこれまで蓄積したノウハウをベースに，自社開

＊産業機器事業部

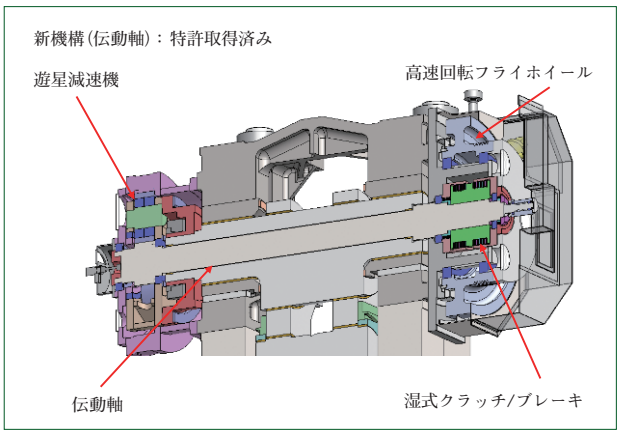


図3　FPZ-2000 駆動機構
FPZ-2000 drive mechanism

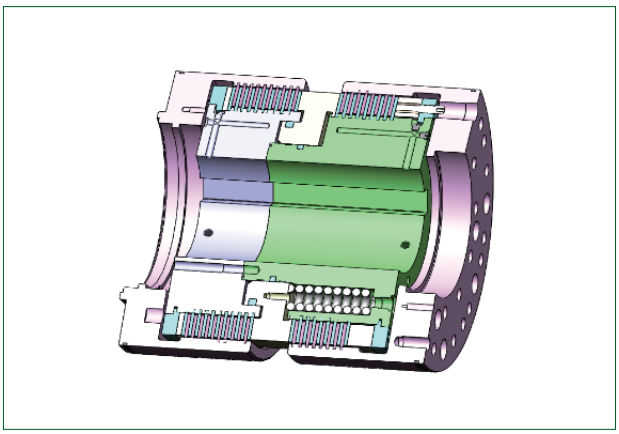


図4　湿式クラッチ/ブレーキ構造図
Wet clutch/brake structure diagram

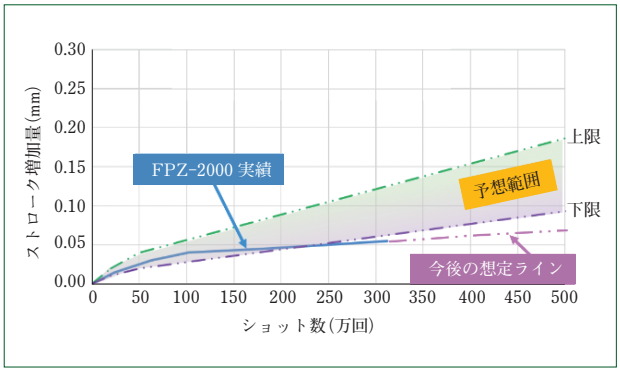


図5　FPZ湿式クラッチ/ブレーキストローク増加量
FPZ wet clutch/brake stroke increase amount

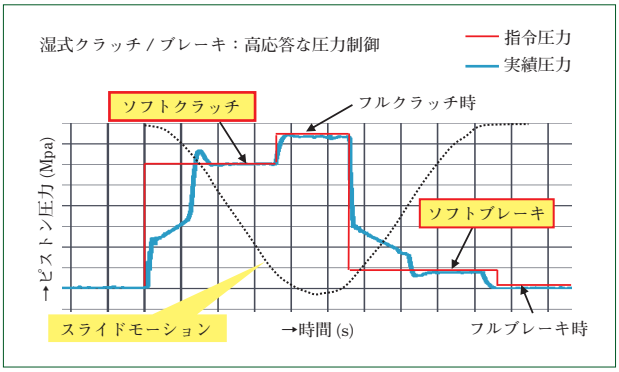


図6　湿式クラッチ/ブレーキ制御特性
Wet clutch/brake control characteristics

発を推し進め，鍛造プレス用の湿式クラッチ/ブレーキの内製化を実現した(**図4**)。

従来の乾式クラッチ/ブレーキと比較して，ライニング摩耗は大幅に低減できており，さらに開発当初想定していた摩耗量(≒ストローク増加量)と比べても，FPZ実機での摩耗量はその想定範囲の下限以下で推移していることを確認している。このままの傾向で摩耗が推移すれば，十数年以上にわたってストローク調整が不要になり，特に不具合がなければ解放点検も不要であることから，保全の手間を大きく改善することができる(**図5**)。

一方で，乾式クラッチ/ブレーキでは，どうしても機械的接触によるライニングの摩耗粉が発生してしまい，これが工場内の環境を悪化させる要因となっていた。これに対し，湿式クラッチ/ブレーキでは摩耗粉が大気中へ放出されることがないので，工場内の環境改善にも貢献している。

自社開発の湿式クラッチ/ブレーキはサーボバルブを用いた高応答な圧力制御システムでコントロールする。**図6**に，その制御特性を示す。縦軸にピストン圧力，横軸に時間を示したグラフには，湿式クラッチ/ブレーキの特徴的な圧力波形が見られる。油圧駆動方式(湿式)とすることにより，従来の空圧式では不可能な圧力制御が可能となる。指令圧力の赤線に対し，実績圧力の青線が示すように確実に制御されていることが分かる。また，ソフトクラッチやソフトブレーキで圧力を最適にコントロールすることで，クラッチやブレーキをつなぐ瞬間の振動・騒音を大幅に低減し，快適性(COMFORTABLE)が向上している。

5　おわりに

(1) FPZシリーズは2000t，2500t，3000t，4000t，4500tをラインナップしている。

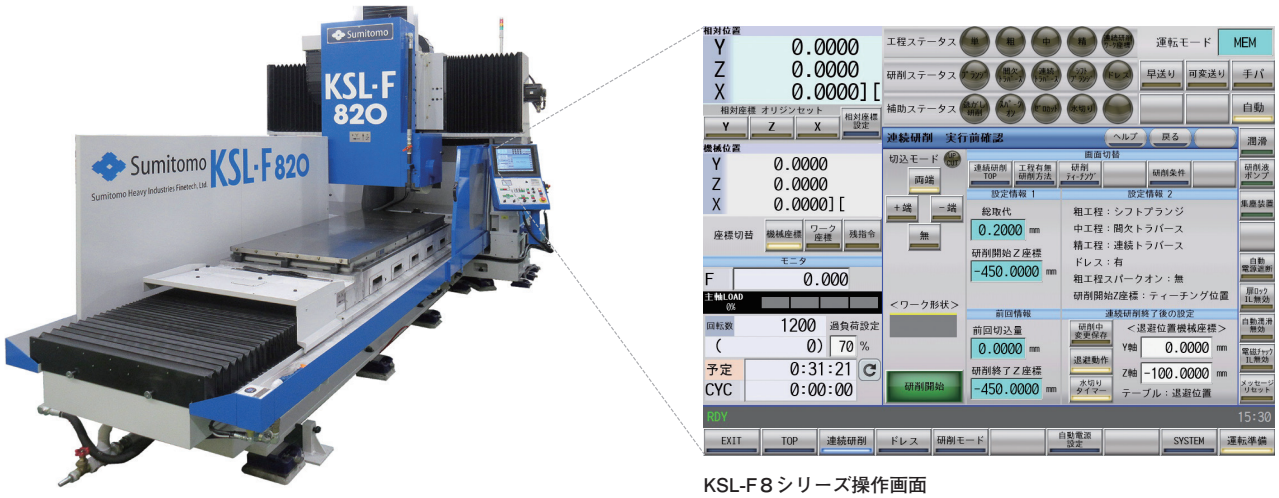
(2) 重量バランスの徹底的な最適化と，長寿命・高応答の内製湿式クラッチ/ブレーキを搭載したFPZシリーズは，鍛造工場の生産の安定化および品質向上に寄与している。加えて，今後さらに要望が高まると思われる人手不足への対策を踏まえた労働環境改善(騒音，振動，ライニング摩耗粉などの削減)のニーズに対しても，顧客の要望に応えることができると考えている。

FPZシリーズの開発をプレス事業でのSDGs推進の取組みの一つとして，今後も持続可能な世界の実現に貢献していく。

門形平面研削盤における機械稼働の効率化支援機能

Functions to Support Efficient Operation of Double Column Type Surface Grinding Machine

●久　保　拓　也*
Takuya KUBO



KSL-F８シリーズ操作画面
KSL-F８operation screen

表１　平ワークの研削条件
Grinding conditions for flat workpieces

テストNo.	1			2			3			4			5		
工程	粗	中	精	粗	中	精	粗	中	精	粗	中	精	粗	中	精
研削方法	プランジ	プランジ	連続トラバース	プランジ	プランジ	連続トラバース	間欠トラバース	間欠トラバース	連続トラバース	シフトプランジ	間欠トラバース	連続トラバース	シフトプランジ	間欠トラバース	連続トラバース
総取り代(mm)	0.200			0.200			0.200			0.200			0.200		
取り代(mm)	0.170	0.020	0.010	0.170	0.020	0.010	0.170	0.020	0.010	0.170	0.020	0.010	0.170	0.020	0.010
切込み量(mm)	0.005	0.003	0.002	0.005	0.003	0.002	0.005	0.003	0.002	0.005	0.003	0.002	0.005	0.003	0.002
インターバル(mm)	0.000			0.120			0.120			0.200			0.200		
トラバース量(mm)	0	0	0	0	0	0	45	30	0	45	30	0	45	30	0
トラバース速度(mm/min)	0	0	250	0	0	250	0	0	250	0	0	250	0	0	250
テーブル速度(m/min)	35	35	30	35	35	30	35	35	30	35	35	30	35	35	30
といし逃がし量(mm)	0	0	0	0.005	0.005	0.003	0.005	0.005	0.003	0.005	0.005	0.003	0.005	0.005	0.003
といし逃がし回数(回)	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
ドレス	無			有			有			有			有		
ドレス時逃がし量(mm)	50			50			50			50			50		
ドレス切込み量(mm)	0.000	0.000	0.000	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
ドレス回数(回)	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
ドレス速度(mm/min)	0	0	0	400	300	250	400	300	250	400	300	250	400	300	250
面取り幅(mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	10	10
面取り高さ(mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.005	0.005	0.005
といし回転数(r/min)	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800

1　はじめに

住友重機械ファインテック株式会社は，門形平面研削盤を製造して60年となる。住友重機械ファインテックの門形平面研削盤は，横軸といし頭と旋回といし頭の２頭を装備し，工作機械や産業機械の摺動面や精密機械部品などの平面を高効率高精度に仕上げるマザーマシンとして工作機械業界で認知されている。

一方，金型や鋼材，セラミックスやガラスなどの脆性材料の研削用として，横軸といし頭のみを搭載した平面研削盤を市場投入している。さらに金型市場への拡販を狙い，新しい発想の平面研削盤KSL-F８シリーズを開発し市場投入した。近年は労働人口不足が問題となっており，一人の作業者が複数台の工作機械を担当する企業も多い。このことから，状態監視や故障予知など，稼働率を高めるシステムへの関心が高まっている。本報では，複数工程を連続研削加工する際の研削時間事前通知機能を紹介する。

2　機能紹介

一人の作業者が複数台の機械を使用する場合は，一台で加工が行われている間に別の機械で作業を行うことから，サイクル運転が可能なコンピュータ数値制御(CNC)装置搭載機が採用される。KSL-F８シリーズの研削プログラムは数値入力と項目選択により簡単に作成することができ，複数工程を連続して研削することが可能である。これにより作業者は機械操作や監視を常時行う必要がなくなり，研削中に別の作業が可能となる。機械を少人数で効率的に稼働させるには，機械と作業者それぞれの待機時間を減らすことが重要である。

＊住友重機械ファインテック株式会社

表２　段差付きワーク（３段）の研削条件
Grinding conditions for ３stepped workpieces

段	下段			中段			上段		
工程	粗	中	精	粗	中	精	粗	中	精
研削方法	プランジ	プランジ	連続トラバース	シフトプランジ	間欠トラバース	連続トラバース	間欠トラバース	間欠トラバース	連続トラバース
総取り代(mm)	0.200			0.200			0.200		
取り代(mm)	0.170	0.020	0.010	0.170	0.020	0.010	0.170	0.020	0.010
切込み量(mm)	0.005	0.003	0.002	0.005	0.003	0.002	0.005	0.003	0.002
インターバル(mm)	0.120			0.200			0.120		
トラバース量(mm)	0	0	0	45	30	0	45	30	0
トラバース速度(mm/min)	0	0	250	0	0	250	0	0	250
テーブル速度(m/min)	35	35	30	35	35	30	35	35	30
といし逃がし量(mm)	0.005	0.005	0.003	0.005	0.005	0.003	0.005	0.005	0.003
といし逃がし回数(回)	4	4	4	4	4	4	4	4	4
ドレス	有			有			有		
ドレス時逃がし量(mm)	60			60			60		
ドレス切込み量(mm)	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
ドレス回数(回)	2	2	2	2	2	2	2	2	2
ドレス速度(mm/min)	400	300	250	400	300	250	400	300	250
面取り幅(mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
面取り高さ(mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
といし回転数(r/min)	800	800	800	800	800	800	800	800	800

表３　検証結果
Test results

平ワーク	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
予想時間	0:06:02	0:15:03	0:22:38	0:25:51	0:44:15
実測時間	0:06:03	0:15:04	0:22:41	0:25:55	0:44:17
誤差(s)	1	1	3	4	2
誤差率(%)	0.28	0.11	0.22	0.26	0.08

ワーク種類	マルチワーク	段差(２段)	段差(３段)	２条面凹	２条面凸
予想時間	2:02:22	0:54:48	1:25:42	1:14:53	1:17:15
実測時間	2:02:59	0:54:42	1:25:57	1:14:44	1:17:18
誤差(s)	37	6	15	9	3
誤差率(%)	0.50	0.18	0.29	0.20	0.06

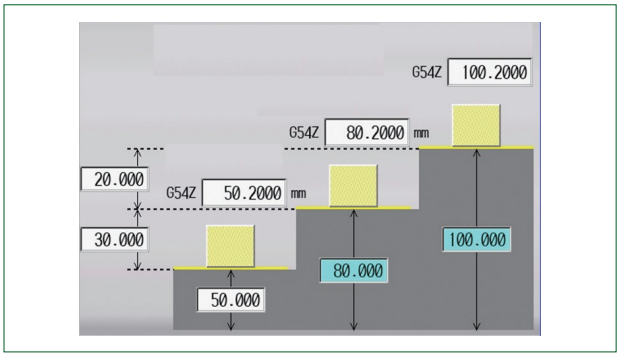


図１　段差付きワーク（３段）断面図
Cross section of ３stepped workpiece

熟練作業者は経験から加工時間を予測することができる。しかし，熟練作業者が減少している昨今では経験による研削時間の予測は難しく，作業者の育成と効率的な稼働の両立が求められる。本機能では，事前に加工時間を把握できるので経験の浅い作業者でも効率的な稼働を計画することが可能となる。

３　機能の検証

本機能の検証は，３つの研削工程(粗研削工程・中研削工程・精研削工程)について，次に示す加工物と研削方法で行った。なお，といしのドレッシング工程も検証動作に含まれる。

・加工物：平ワーク，平ワーク(高さ違い)，段差付きワーク(２段および３段)，２条面ワーク(凸形状，凹形状)
・研削方法：プランジ，間欠トラバース，連続トラバース，シフトプランジ(プランジ＋トラバース)

検証は，それぞれの加工物に対してさまざまな研削条件を用いて実施した。本報では，平ワークと段差付きワーク(３段)の研削条件を示す(**表１**，**表２**，**図１**)。平ワークにおける検証では，予定研削時間における研削条件の影響を確認した。段差付きワーク(３段)を含むさまざまな形状における検証では，予定研削時間におけるといし頭動作の影響を確認した。

４　検証結果

表３に，検証結果を示す。平ワークでの検証では，研削時間の予定時間と実測時間の誤差率は0.3％以内となった。これに対して，段差付きワーク(３段)を含むさまざまな形状での検証では，予定時間と実測時間の誤差率は0.5％以内であった。といし頭がさまざまなパターンで動作する加工条件では，動作間のインターバルやプログラムの切替わりに生じる微小な時間のズレが積算され，研削時間の誤差が大きくなる傾向にあった。

２時間程度の研削加工で研削時間予想の精度が誤差１％未満の本機能は，より複雑な条件の研削プログラムにも耐え得るものであり，効率的な機械稼働計画を支援することができる。なお手動操作の介入など，一部の操作においては本機能に大きな誤差を生じさせる可能性がある。その場合，操作画面の予定研削時間の右にある更新ボタンを押すことで，再計算された時間が表示される。

５　おわりに

(1) 門形平面研削盤に研削時間事前通知機能を搭載することで，２時間の研削加工において誤差１％未満の研削時間を事前に知ることができる。
(2) KSL-F８シリーズでは，研削時間事前通知機能以外にも経験の浅い作業者への操作支援機能が充実している。
(3) KSL-F８シリーズは，作業者の育成や技能伝承，省人化といった課題にも貢献でき，高い付加価値を提供できる。

クロスレール固定門形平面研削盤 KSL-F830(H) フルカバー仕様

Double Column Type Surface Grinding Machine MODEL:KSL-F830(H) Full Coverage

KSL-F８シリーズは，自動車用モータコア金型やプレス金型，プラスチック金型をターゲットに開発された，テーブル作業面幅800 mmの門形平面研削盤である。昨今の働き方改革の推進や生産労働人口の減少による労働力不足，熟練作業者の引退による技能伝承問題に対して，操作性や作業性の面から高い評価を受けている。

一方，モータコア金型は大型化が進んでおり，テーブル作業面幅1 000 mmの研削盤の需要が増えている。また，省エネルギー・省資源化，SDGsに向けた取組み，工場内環境の改善や産業廃棄物の削減など，より一層の環境負荷軽減が求められている。研削加工は，多量の研削液を加工点に供給しながら行うことから，ミスト化した研削液が飛散しやすく，人体や工場環境に悪影響を及ぼす可能性が懸念されている。KSL-F830（H）フルカバー仕様は，これらの社会課題や環境問題に対応する研削盤である。

主要仕様

テーブル作業面寸法（W×L）	1 000×3 000 mm
ワーク最大寸法（W×H×L）	1 100×505×3 000 mm
ワーク最大搭載質量	3 400 kg
テーブル送り速度	２～30 m/min
といしの形状および寸法（外径×厚さ）	φ510×50～100 mm
といし軸の回転数	100～1 500 r/min
といし頭の上下送り速度	１～2 000 mm/min
といし頭の左右送り速度	１～6 000 mm/min
機械寸法（W×H×L）	3 800×3 100×9 670 mm
といし軸駆動用モータ	15 kW
テーブル駆動用モータ	15 kW
といし頭上下送り用サーボモータ	2.2 kW
といし頭左右送り用サーボモータ	3.0 kW

特　　長

（1）テーブル作業面ワイド仕様

従来のKSL-F８シリーズの機械サイズを維持しながら，幅1 000 mmの永電磁チャックを搭載し，大型化したワークでも安定した研削加工を実現している。

（2）フルカバー仕様

機械前方をフルカバー仕様にすることで，研削液ミストの飛散を抑え工場内環境の改善に寄与する。また，可動部分が覆われ，カバー開閉を監視するインターロック機構が付属していることで，安全性が大幅に向上している。

（3）対話式研削ソフトの搭載

タッチパネルを採用した対話式研削ソフトにより誰でも簡単に操作ができ，熟練作業者からの技能の引継ぎを容易にしている。

（4）省エネルギー仕様テーブル駆動装置

高効率かつ，タンク油量を最小限とする油圧駆動システムの採用により，駆動油量と消費電力を大幅に削減している。

（住友重機械ファインテック株式会社　菅野 怜）

T/PAPERS

論文・報告

人材育成センターの紹介

Introduction of Human Resource Development Center

●佐々木　靖　彦*　Yasuhiko SASAKI
鈴　木　由　衣*　Yui SUZUKI

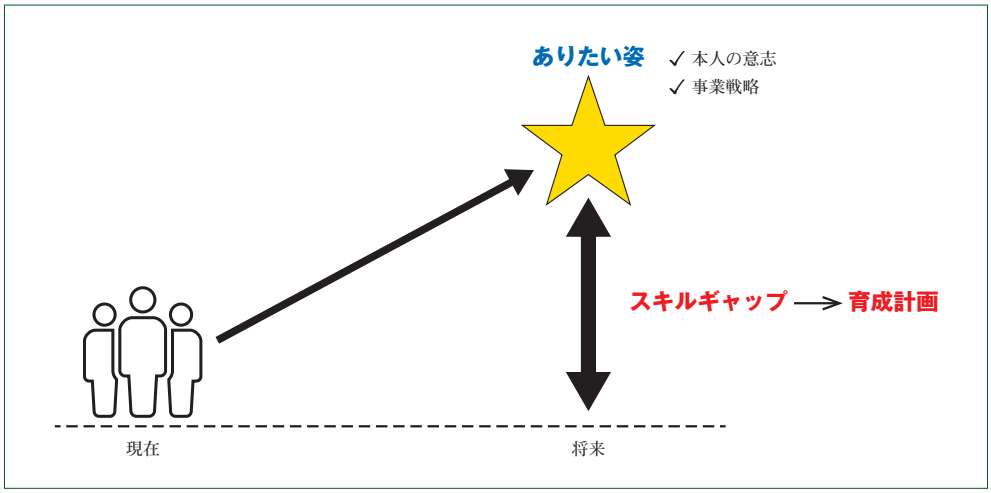


図１　人材育成の仕組みのイメージ
Image of structure of Human Resource Development

1　まえがき

当社の「中期経営計画2026」[1]には人的資本経営が謳われており「人材育成基盤強化，組織能力強化に重点的・継続的に取り組み『人と組織が互いに成長・発展する環境・風土』への変革を図っていく」と記載されている。2024年１月に人材育成センターが発足し，人材育成基盤強化と人材育成をポジティブにとらえる風土醸成に向けた取組みを開始した。本報ではその取組みの骨子を紹介する。

2　当社の現状

社員意識調査において，教育/育成に対する当社社員の評価は日本の製造業平均と比較して低い傾向にある。従業員の声を分析すると，業務を優先する風潮が根強く残っていることや，人材育成の仕組みが整っていないことなどがその要因として挙げられる。一方で，ここ数年の人材育成に対する意識の高まりと各種研修の充実によって社員による評価は少しずつではあるが向上してきており，さらなる効果的方策を講じることにより改善が期待できる。

また，設計現場では，熟練技術者の高齢化によりさまざまな問題が顕在化しており，技術伝承を喫緊の課題としている事業部門が多い。これまでOFF-JTの充実を図ってきたが，技術伝承の核となるOJTへの取組みは一部の部門で実施されているものの，当社全体としては不十分である。

3　目指す姿

図１に示すように，本人の意思と事業戦略を考慮した「ありたい姿」を定め，それを実現するために必要な力量と，現状の力量とのギャップから育成計画を立てるという仕組みを構築することを目指す。本人と上司・指導者がギャップ（＝目標）を共有し，双方にとって重要な力量を向上させることで成長のモチベーションが上がる。また，この活動を評価することにより人材育成を大切にする企業風土に変えることができる。

4　人材育成センターの役割

人材育成センターは次の２つの役割を担い，当社の人材育成に関する課題を解決すべく活動している。

4.1　人材育成基盤の強化

図２に，人材育成サイクルを示す。各事業部門がこのサイクルをうまく回していくための基盤を提供する。具体的には，社員の力量を可視化・分析して育成計画と人材配置に活用できる力量管理システムを導入し，育成に必要な教育体系の充実を推進していく。

4.2　事業部門との連携による進化

これまで教育・研修などの情報は，本社部門から一方的に発信されるのみで事業部門とのコミュニケーションはほとんどなく，事業部門同士のつながりも見られなかった。

事業部門の実態を把握し，情報を共有して初めて効果の高い人材育成活動になる。そこで，**図３**に示すように事業部門に育成リーダを配置し，人材育成センターと連携する体制作りに着手した。部門を越えた交流は新たな刺激となりシナジー効果による進化が期待できる。

5　人材育成基盤強化策

4.1で示した人材育成基盤の強化を目的とした施策を説明

＊人事本部

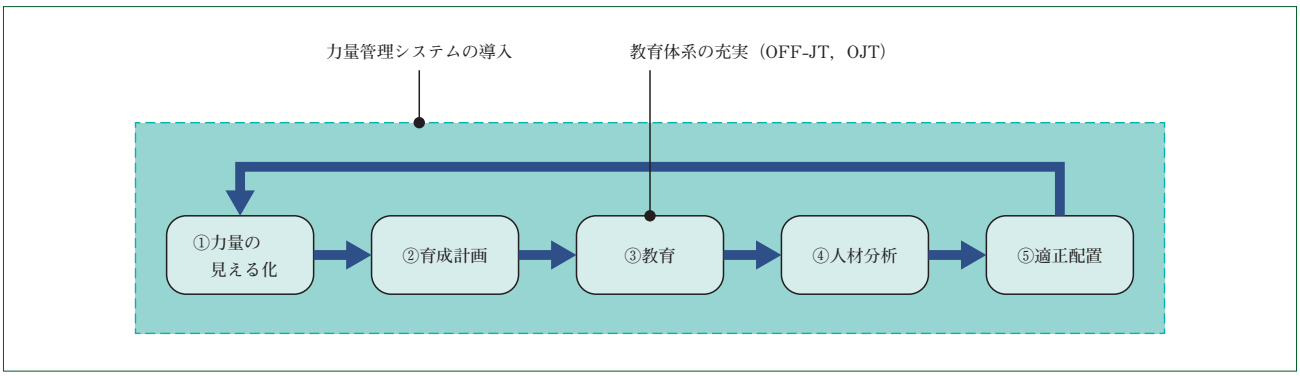


図２　人材育成サイクル
Human Resource Development cycle

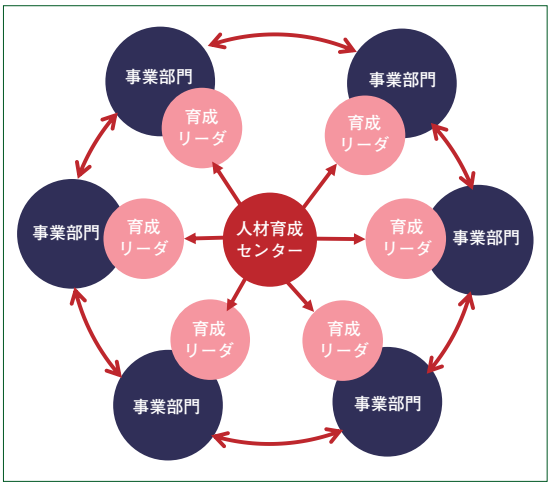


図３　事業部門との連携
Cooperation with business unit

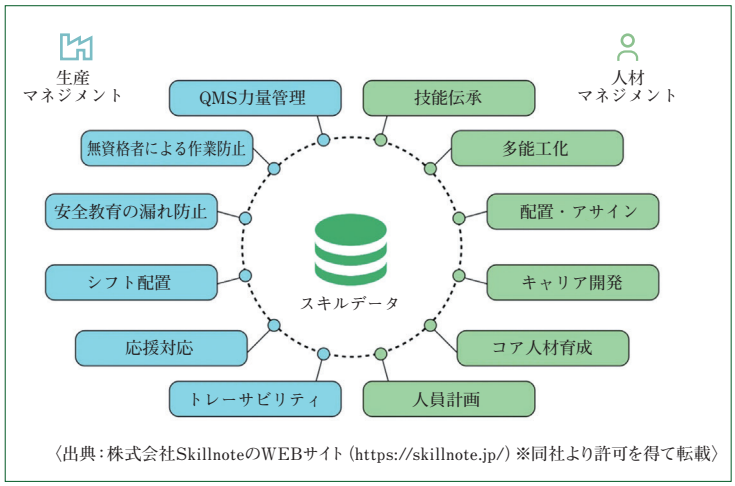


図４　力量管理システム
Ability management system

する。

5.1　力量管理システム[2]

開発・設計部門においては，組織や従業員が持っている力量を把握し，適切な育成計画や人材配置に生かすことを目的として力量マップを作成している。しかし現状では，多くの部門で十分に活用できているとは言えない。これは力量マップを表計算ソフトで作成していることの弊害であり，次のような問題が顕在化している。

・力量マップの作成自体に手間がかかり，本来やるべき人材分析と育成計画ができていない。
・力量マップは部署別で作成していることから，力量項目や評価の仕方などが異なり，横通しでの一元管理ができていない。

これらの問題を解消すべく，**図４**に示すような力量管理に特化したクラウドシステムの導入を進めている。このシステムにより，力量マップの作成や更新作業が大幅に軽減され，力量の可視化・分析が容易となり，本来時間をかけるべき育成計画と人材配置計画に注力できる。2024年度は４事業部門で試運用を開始し，効果が見込めるようであれば導入部門を順次増やす予定である。さらに，これが将来的に全社展開され，技術伝承の基盤システムとして当社の中期経営計画2026に示される「事業戦略と連動した育成プログラム」を支えるシステムとなることが期待される。

5.2　技術教育体系

育成計画を達成するためには，必要とする人が必要な教育を受けることができる教育体系を作らなければならない。このことから，人材育成センターでは**図５**に示すように「OFF-JTによる知識（原理原則）の蓄積」と「OJTによる知見（経験則）の獲得」の両輪でうまく回し，さらにデジタル時代に対応した新たな知識・知見を取り入れて進化させることを方針とし整備している。

5.3　OJT研修

正しいOJTにより技術伝承の実効性は格段に上がる。しかし，これまで全社的なOJTに取り組んでこなかったことで，従業員から次のような声を聞くことが多い。

・部下に業務を丸投げすることをOJTと取り違えており，人材育成の観点がずれている
・指導する側のスキルとやる気に依存し，指導方法にばらつきがある

そこで，OJTを効果的に行う研修を企画・実施している。2023年８月の設計部長会においてOJTのあり方を正しく理解することを目的とした研修を開催した。開催後の反応はポジティブなものが多かったが，部門内全員が共通意識を持つべきという意見が多く寄せられたことから，部長→グ

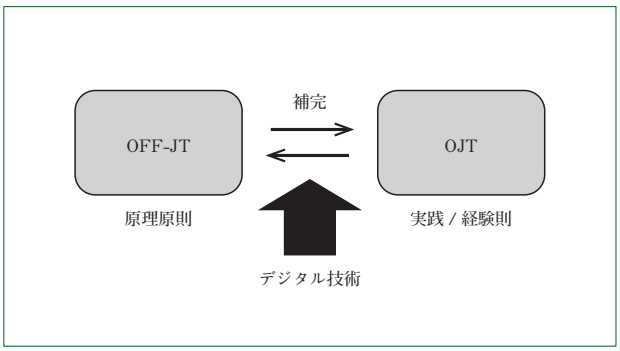


図5　教育体系の概念
Concept of education system

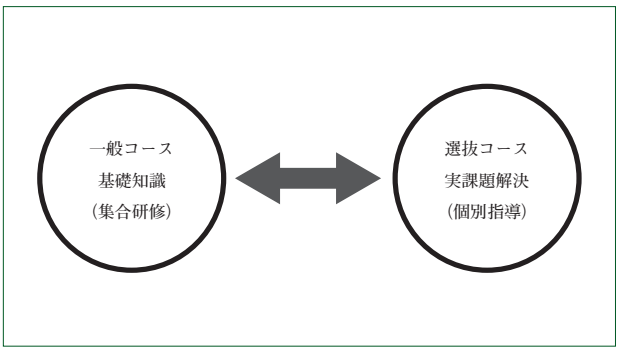


図6　専門技術教育
Expertise education

ループリーダ→中堅社員と対象を広げて継続的に開催する予定である。

一方で，教え方のノウハウやテクニックの教育をしてほしいという声も多い。これに対しては，SHIオープンカレッジと称するビジネスの一般素養を学ぶ場を用意し「コーチング」「部下指導・育成」といった講座の受講を推奨している。

5.4　OFF-JT研修[3][4]

技術系のOFF-JTに関する教育については，**図6**に示すように専門技術教育と称し，集合研修で基礎知識を習得する一般コースと，個別指導で実課題を解決する選抜コースを運営している。**図7**に，2024年度専門技術教育講座の一覧を示す。それぞれのコースの特徴を次に説明する。

(1)　専門技術教育（一般コース　実践・座学）

専門技術教育では「戦力としての基礎知識」の学びの場として，幅広い分野で多くの講座を設置している。

座学で原理原則を学ぶのは大切だが，モノを触って動かし体で覚える実習系の講座で学ぶことにより，効果的に実設計へ生かすことができる。このことから実践系講座の後に座学講座を受講することを推奨している。デジタル時代への対応として，情報系およびソフトウエア系の充実も図っている。

講座内容は常にアップデートし続けなければならない。すべての講座で受講者に事後アンケートをとり，NPS（Net Promoter Score）と呼ばれる指標を用いて満足度を測定し，評価の低い講座はアンケートコメントを参考に改善を続けるというプロセスで実施している。改善事例として，数年前にNPSが低かった座学系講座について，コメントをもとに「式展開は省き実務に使える計算実習を増やす」「事前に受講者の問題意識を聞く」などの対策を講じ，評価を大幅に向上させたことが挙げられる。

また，現在の募集形式は誰もが自由に応募できる「公募制」としているが，受講者のほとんどは意欲がある若手であり，必要とする人が必要な講座を受講しているとは言えない。そこで，各事業部門と対話し，組織として必ず身に付けるべきスキルを念頭に置き，受講すべき講座を部門ごとに選定し，計画的に受講させていくという活動を開始した。

対話の際には，困りごとを聞き，新規講座開講の参考としている。たとえば「設計者が基本的な材料知識，加工技術を知らなかったことで間違った図面がそのまま流れ，コストアップや不具合につながる事例が増えている」という複数の事業部門の困りごとに対し，2024年度に材料選定と部品加工の基礎知識を教える講座を開講した。その結果，定員を超える申し込みがあり，アンケートではNPSが高くポジティブな意見が多く見られた。

(2)　専門技術教育（選抜コース）

専門技術教育では，指導的・中核的戦力を身に付ける場という位置付けで，各事業部門から選抜された人材に対し教育を行っている。

選抜コースでは，座学などの受動的な知識習得にとどまらず，自ら問題を発見して必要な知識を獲得することにより問題解決能力の習得を目指す学習法「課題解決型学習（PBL：Project Based-Learning）」を取り入れている。単に問題を解決するだけでなく，解決に至るプロセスを重要視する。たとえば「３D-CADがあったので有限要素法のソフトで解析してみた。するとこんな結果が出た」ではなく，なぜその結果が出るのかを考察し，有限要素法の特性や理論解との違い，力学的なバックグラウンドの理解など，工学的視点で考えるというプロセスを大切にしている。これにより，受講者はその技術分野の基礎技術に加え，問題解決までの思考を身に付けることができる。

図8に，選抜コースの体制を示す。実設計で直面している問題や先行開発課題などをテーマとし，講師（主に大学の先生），チュータ（主に技術研究所の研究員），部門指導者とともに解決を目指す。受講者の技術力向上はもちろんだが，チュータは事業部門の課題に接し，さらなる技術のレベルアップを図ることができ，部門指導者は受講者の指導を通じてリーダーシップを養うことができる。

選抜コースの期間は約１年であるが，そこで解決できない課題は修了後もチュータがフォローし，習得した技術の製品への反映を目指す。本研修を修了した１年後にアンケート形式で追跡調査を実施しているが，約８割が「本研修の成果が製品に反映された」と回答し，９割以上が「本研修は有用であった」と回答している。

これまで，選抜コースは保有している技術をさらに

区分		機械・材料		電気・電子・制御	ソフトウエア		情報	生産技術
選抜コース	個別指導	熱流体	摩耗・潤滑	制御技術			機械学習	
		振動・騒音	構造・疲労					
一般コース（実践）	実験・計測	CAE実験室（流体）	材料力学実験室					
		CAE実験室（伝熱）	CAE実験室（構造）					
		CAE実験室（振動）	振動測定の基礎					
	実習	構造CAE（ANSYS）	公差設計・解析技術	発生ノイズ対策	アーキテクト育成	構造化分析ロボット演習	画像処理	溶接技術
		設計者構造CAE	設計施工溶接技術	オペアンプ回路	アーキテクチャ設計実践	構造化モデリング-動的	画像認識実践	切削加工
		金属腐食対策	熱流体CAE	FPGA開発技術	ソフトウエアテスト実践	構造化モデリング-静的	深層学習実践	測定技術
		構造CAEⅡ（FEMAP）	設計者熱流体CAE	MOSFET回路	リバースモデリング	新人向け設計技法基礎	機械学習実践	治具設計
		構造CAEⅠ（FEMAP）	製品図面の読み方	実践制御	リファクタリング実践	USDM	データ解析実践	塗装技術
		機械材料選定の基礎	部品加工の基礎知識	自動機製作	凝集度・結合度	マイコン制御	データ解析応用	自動機製作
							時系列解析実践	SHIPS現場実習
							異常検知実践	SHIPS自職場実践
一般コース（座学）	講義	振動工学Ⅱ	トライボロジー基礎		組込みソフトウエア開発	アーキテクチャ設計基礎	データ解析基礎	鋳造技術
		騒音防止	事故品解析			ソフトウエアテスト基礎		SHIPS座学
		振動工学Ⅰ	鋼構造物の疲労設計			エンジニアリング入門Ⅱ		マネージャー向けSHIPS
		材料力学	伝熱工学			エンジニアリング入門Ⅰ		
		構造CAEの設計応用	品質工学基礎					
	eラーニング	金属材料学	工業力学	電気回路			Python入門	
		機械力学	機構学	電子回路				
		流体力学	材料力学	制御工学				

図7　**2024年度専門技術教育講座一覧**
List of expertise education course in 2024

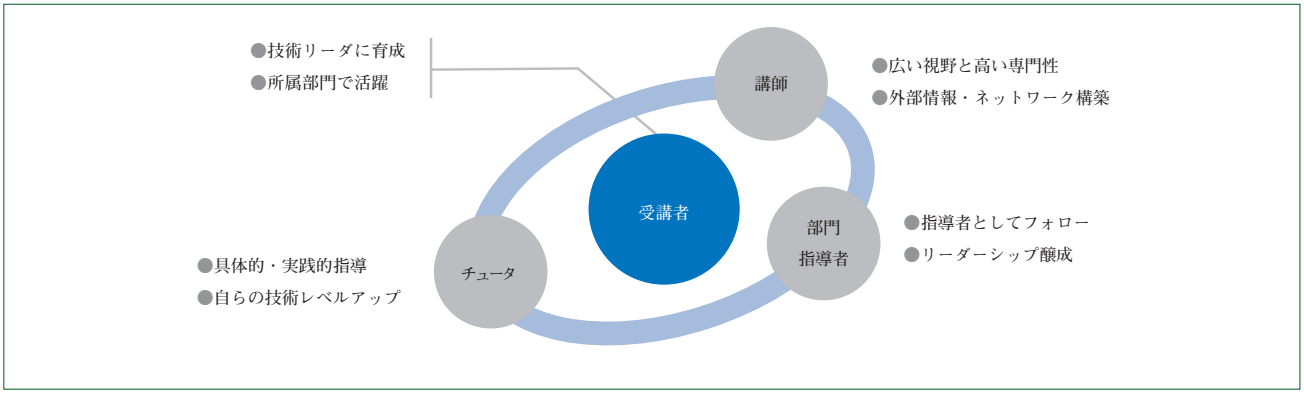


図8　**選抜コースの体制**
Structure of selective course

磨くこと（アップスキリング）に重きを置いていたが，リスキリングの観点からも必要な講座と認識されてきている。その事例としては，制御技術者が機械学習講座の受講を経て，新たな制御システムを発案し実装したケースや，機械技術者が制御技術を習得し，マルチスキルを身に付けて技術リーダとして活躍しているケースなどが挙げられる。

6　むすび

本報では2024年１月に発足した人材育成センターの活動状況を紹介した。

本人の意思と事業戦略を考慮した「ありたい姿」を定め，それに必要な力量と現状の力量とのギャップから育成計画を立てるという仕組みの構築を目指している。それを支えるのは，力量管理システムの構築と技術教育体系（OJT，OFF-JT）の充実である。これを確実に実行し，企業価値向上に資する人材育成に取り組んでいく。

従業員が持つノウハウ，知識などを広い意味で「技術」と捉え「伝承の対象」と考えている。現在，人材育成センターは技術系職種の育成を中心として活動しているが，将来的には全職種へ展開していく予定である。

（参考文献）
(1)　住友重機械工業株式会社，中期経営計画 2026，2024/2/14，https://www.shi.co.jp/ir/policy/plan/pdf/2026management_plan.pdf
(2)　髙橋悠，ゼロから学ぶ！製造業のスキルマネジメント，MONOist，https://monoist.itmedia.co.jp/mn/series/34763/
(3)　中島 聡，佐々木 靖彦，宗清 洋一郎，住友重機械グループにおける技術人材育成制度について，日本マリンエンジニアリング学会誌，2021 年 56 巻 1 号.
(4)　佐々木靖彦，福井基文，ICT・DX 人材育成，住友重機械技報 ICT・DX 特集，Jan.2023 No.209，https://www.shi.co.jp/tech/tech_report/pdf/209.pdf

住友重機械技報第215号発行に当たり

住友重機械技報第215号をお届け致します。

本誌は，当社が常々ご指導いただいている方々へ，最近の新製品，新技術をご紹介申し上げ，より一層のご理解とご協力をいただくよう編集したものです。

本誌の内容につきましては，さらに充実するよう努めたいと考えますので，なにとぞご意見賜りたく，今後ともよろしくご支援下さるよう，お願い申し上げます。

なお，貴組織名，ご担当部署などについては，変更がございましたら裏面の用紙にご記入のうえ，FAXでお知らせいただきたくお願い申し上げます。また，読後感や不備な点を簡単に裏面用紙にご記入願えれば幸いに存じます。

2025年2月

〒141-6025 東京都品川区大崎2丁目1番1号（ThinkPark Tower）
住友重機械工業株式会社
技術本部　技報編集事務局

キリトリ線

（宛先）

住友重機械工業㈱
技術本部　技報編集事務局　行
FAX 横須賀 046－869－2357

（発信元）

貴組織名
担当部署
氏　　名
TEL　No.
FAX　No.

住友重機械技報第215号の送付先の確認と読後感などの件

送付先変更

（旧送付先）

送付番号 _____
組織名称 _____
担当部署 _____
所 在 地 _____
〒 _____

➔

（新送付先）

送付番号 _____
組織名称 _____
担当部署 _____
所 在 地 _____
〒 _____

新規送付先

新しい部署ができた場合ご記入下さい。

組織名称 _____
担当部署 _____
所 在 地 _____
〒 _____

必要部数 _____ 部

本号の読後感について

1．本号で，一番関心を持たれた記事は。

2．本号を読まれたご感想をお知らせ下さい。（○印でご記入下さい。）

1　興味深かった　　2　特に興味なし

その理由をお聞かせ下さい。

キリトリ線

住友重機械工業株式会社
Sumitomo Heavy Industries, Ltd.

VEGETABLE OIL INK

FSC ミックス 責任ある木質資源を使用した紙 FSC® C010463

Printed in Japan