

(解説)



KOBELCOのものづくりを支える高度計測技術

迫田尚和*¹・岡本 陽*¹・芦田 強*¹・桑名孝汰*¹

Advanced Measurement Technology Supporting KOBELCO's Manufacturing

Naokazu SAKODA・Akira OKAMOTO・Tsuyoshi ASHIDA・Kota KUWANA

要旨

計測技術は科学・ものづくり力の礎である。世界のインフラを支える基幹部品を幅広く供給する当社において、計測技術は安全・安心な製品と持続可能なものづくりを支える主要な要素基盤技術として、製品の安定供給や品質の作り込みに挑戦し続ける中で鍛錬され独自の発展を遂げた。今後も社会の根幹を支える基幹部品・製品群を安定供給し、あくなき品質・機能・性能要求の高度化に引き続き、またカーボンニュートラルへの挑戦やものづくり変革を通して持続可能な社会を実現するための計測技術の展望を述べる。

Abstract

Measurement technology is the cornerstone of science and manufacturing prowess. At Kobe Steel, a company that supplies a wide range of critical components supporting the world's infrastructure, measurement technology has evolved through continuous challenges in ensuring stable product supply and quality enhancement. It has become an essential foundational technology that supports the creation of safe and sustainable products, contributing to the company's unique development. In the future, the company will continue to provide stable supplies of essential components and products that underpin society, meeting the ever-increasing demands for quality, functionality, and performance. This paper also discusses the outlook for measurement technology as Kobe Steel strives to achieve a sustainable society through challenges such as carbon neutrality and manufacturing transformation.

検索用キーワード

非破壊検査, 磁粉探傷検査, プロセス計測, 特殊環境下の計測技術, 自動化, DX, AI, 自動超音波探傷, 熱間

まえがき = 産業/科学技術の発展において、計測技術はその基礎をなす重要な役割を担ってきた。新たな計測技術が産業/科学の進展に寄与し、それらの進歩があらたな計測ニーズを生む。

世界のインフラを支える基幹部品を幅広く供給する当社において、計測技術は安全・安心な製品と持続可能なものづくりを支える主要な要素基盤技術として、製品の安定供給や品質の作り込みに挑戦し続ける中で鍛えられてきた。非破壊検査技術やプロセス計測技術はもちろん、例えばマイクロ波やミリ波による粉じん環境下における測距技術¹⁾、大型構造物内の宇宙線による透視/可視化、1,300℃超の高温プロセスの遠隔リアルタイム測温センサ²⁾など、とくに汎用製品が存在しない、あるいはそのまま適用できないような特殊な用途・環境条件における計測技術においても独自の発展を遂げてきた。

非破壊検査技術は、長期の繰り返し負荷に耐えるため厳しくその表面および内部品質が求められる自動車エンジン用弁ばねや船舶エンジン用クランク軸といった製品品質の担保に適用されてきた。高温・粉じん・振動などの過酷・特殊な現場環境下におけるプロセス計測技術は、ものづくりにおける生産性向上や製品の作り込みの基盤であるとともに、現在では当社独自の高炉への直接還元鉄 (HBI) 多量装入によるCO₂低減ソリューションなど

に不可欠な技術領域である。また、優れた製品特性を出すために複雑な形状を有する機械加工部品や鋳鍛造部品の高精度3D形状計測や、原子数層レベルのサブナノメートル精度が要求されるシリコンウェハ平坦度を評価する表面形状計測技術³⁾などの精密計測技術は、当社製品ならびにお客様の製品・ものづくりの安全・安心を支えている。

これらに加えて社会のデジタル化やAI技術が加速度的に進展する現在においては、その土台となるデータをフィジカル (現実) 空間からサイバー (仮想) 空間へ橋渡しする計測技術がますます重要な役割を担っていくと考える。将来の国内労働力人口減少に対する事業継続性の観点からも自動化・ものづくりDXは必須であり、高度なプロセス自動化を推進するには計測技術の継続的な高度化が不可欠である。

これらの背景のもと、当社では古くから計測技術の研究開発に力を入れ、その技術向上に努めてきた。本稿ではそれらの技術内容や応用例を解説する。

1. 非破壊検査技術

当社では1970年代に自社開発力の強化と技術総合力を発揮させる目的で技術開発本部が新設され、その中の検知・計測Grにおいて生産技術高度化のために高性能

*¹ 技術開発本部 デジタルイノベーション技術センター

センサの開発などが行われていた。図1に約半世紀前の1972年に開発されたきず検知用光学センサを示す。現在のように容易・安価に撮像デバイスが入手できない中、時代を先取りして光学センサを応用した検査技術を独自に開発していた。以降、電磁波応用計測技術、画像処理技術、レーザや超音波応用計測技術の開発が進められ、渦流探傷、磁粉探傷、超音波探傷といった非破壊検査技術を高度化してきた。

ここでは線材・棒鋼製品への非破壊検査技術の適用例を示す。

1.1 線材・棒鋼製品の品質担保のための検査技術

当社線材・棒鋼製品は、高い市場占有率を誇っており「線材の神戸」として知られている。代表的な当社線条製品に冷間圧造用線材や軸受鋼などがあり、主に自動車向けで高信頼性が求められる部品に採用されている。これらの製品に求められる品質は年々厳格化される傾向にある。とくに圧延鋼材の表面・内部欠陥の残存状況は製品品質に大きな影響を与えるため、より上流側での早期発見・対策が重要であるが、鋼材温度が1,000℃に近い状態で加工される熱間圧延工程や検査対象が秒速数十メートルで高速に移動する中での検査は容易ではない。当社では熱間かつ高速に移動する線材圧延工程での検査にも取り組んでいるが、優れた特性と品質を担保するために、より上流側の半製品である鋼片に対する自動磁粉探傷検査を行っている。ここでは、その自動磁粉探傷検査について紹介する。

自動磁粉探傷装置の設備概要を図2に示す。磁粉探傷検査は以下の手順で行われる。

1. 強磁性体である検査対象に蛍光磁粉液を散布する。
2. 検査対象に磁界を加えることで磁化させる。
3. 磁化された検査対象の表面きず部に漏洩（ろうえい）磁束が生じ、そこに蛍光磁粉が吸着される。
4. 検査対象表面に紫外光を照射することで、きず部に吸着された蛍光磁粉が発光する。
5. 発光部を人が目視で確認またはカメラで撮像することできずを検出する。

当社は自動磁粉探傷検査装置の開発を1970年代から進めており、画像解析技術の高度化により複雑・不定形なきず検出率を向上させるとともに、図3のように実際のきずではない磁粉ノイズとの識別能を向上させることで過検知・誤検知も最小化している。

また、紫外光源の経時劣化や磁粉濃度変動といった検査時のばらつき要因に対しても、動的に画像処理のしき

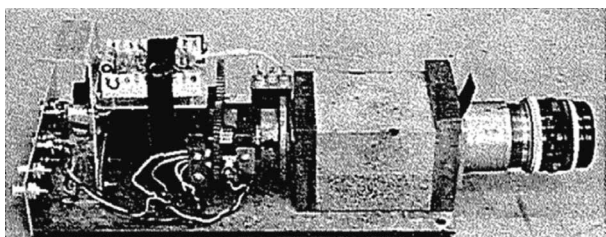


図1 キズ検知用光学センサ外観写真
Fig.1 Photo of optical sensor for surface defect detection

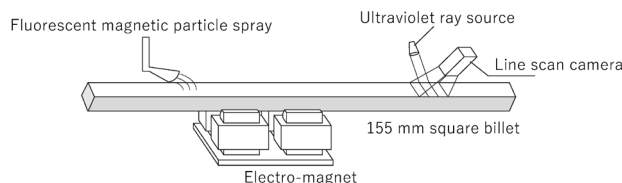


図2 自動磁粉探傷装置の設備概要
Fig.2 Overview of automatic magnetic particle inspection equipment

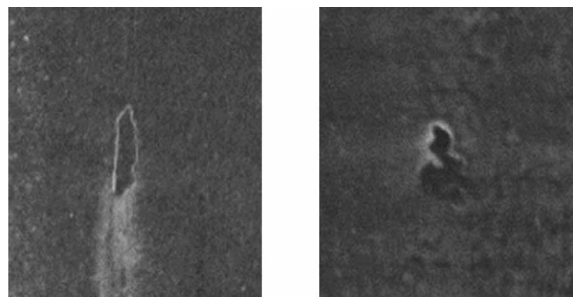


図3 判別の難しい疵（左）と磁粉ノイズ（右）の例
Fig.3 Example of hard-to-distinguish defects (left) and magnetic particle noise (right)

い値を調整する機能によりロバスト性を高めている。加えて、センサデバイスの高感度化・高機能化や光源の高出力化、計算機の処理性能の向上といった世の中の技術進展を巧みに取り込むことで高精度な検査を実現している。⁴⁾

近年はソフトウェア、とくにAIの技術進展には目覚ましいものがある。当社においてもこれまで以上に高い製品品質を実現するために、AI判定の適用による検査技術の高度化も進めている。⁵⁾

2. プロセス計測技術

当社におけるプロセス計測は鉄鋼部門から始まり、そこで培った技術はアルミ・銅・チタンなどの非鉄金属の製造プロセスに横展開され、さらに機械部門における製品の高機能化や当社グループ企業の計測・検査装置の製品化へと広がっていった。⁶⁾

製造プロセス中での計測は、実験室などの理想環境下での計測とは異なり、製造現場特有の様々な外乱や制約を伴う。例えば鉄鋼では1,000℃超の高温プロセスが多数存在するため、耐熱性などの制約から汎用センサ類をそのまま適用できなかつたり、そもそも設置すること自体が困難だったりすることも多い。そこでセンサを熱輻射（ふくしゃ）から保護する耐熱設計技術/冷却構造設計技術や、粉じん・蒸気などからセンサおよび視野・視程を安定確保するためのエアパージといった、耐環境機能を付与するエンジニアリング技術を確立することで、精度などの基本性能に加えて、耐環境性・高信頼性・保全性を高次を実現している。こうした特殊環境下での計測技術は独自開発されたものであり、世の中に存在しないものが多く、競合に対する競争力の源泉でもある。

新たな計測技術の開発による新たなプロセス情報の獲得は、ときに革新的なプロセスの確立につながる。本章ではグリーン社会の実現へ向けた高炉CO₂低減ソリューションを支えるプロセス計測技術について紹介する。

2.1 高炉HBI多量装入を支える溶銑（ようせん）温度連続測定技術

当社はこれまで高炉において、中心コークス装入技術⁷⁾、自社製造ペレットの使用技術、炉内降下プローブによる炉内温度分布測定技術⁸⁾をはじめとする炉内計測技術⁹⁾などを駆使して独自の操業を実現してきている。昨今ではグリーン社会の実現を見据え、2030年のCO₂削減目標（▲30～40%：13年度比）へ向けた取り組みの一環として、高炉へのHBI多配合による低CO₂操業技術を開発している。2020年10月、加古川製鉄所3高炉での約1カ月間にわたる実証実験の結果、高炉からのCO₂排出量を決定づける還元材比を、518 kg/tから415 kg/tへと低減（CO₂排出量：約▲20%）できることを立証するとともに、世界最小水準のコークス比（239 kg/t-溶銑）も達成している。

高炉HBIの多量装入を実現するには、エンジニアリング事業のMIDREXプロセスによるHBI製造技術と、鉄鋼事業における独自の高炉操業技術（高炉へのHBI装入技術、AIを活用した操炉技術、当社独自のペレット改質技術）という当社グループのキーテクノロジーの融合が欠かせない。

AI活用操炉技術では、炉熱の急激な変化を予測し適切なアクションを取るために5時間先の溶銑温度を予測する技術を開発しているが、正確な予測には溶銑温度の常時連続測定が重要な鍵を握る。これを実現するため、図4に示すとおり高炉出銑（しゅっせん）口から数m/秒で吐出される溶銑・溶滓（ようさい）の混相噴流（以降、出銑滓流）を高速度カメラで撮像し、放射測温の原理を用いて溶銑温度の連続測温を実現している。出銑滓

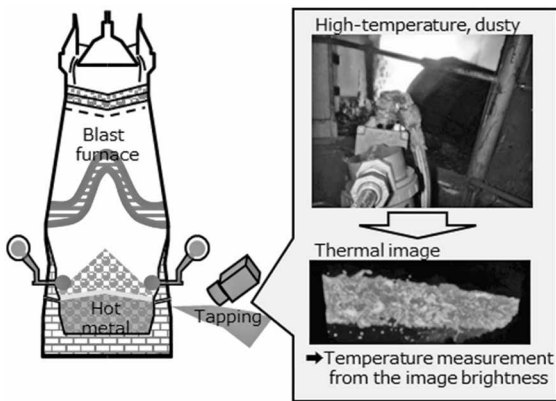


図4 高炉溶銑温度の連続測定

Fig.4 Continuous measurement of hot metal temperature at blast furnace

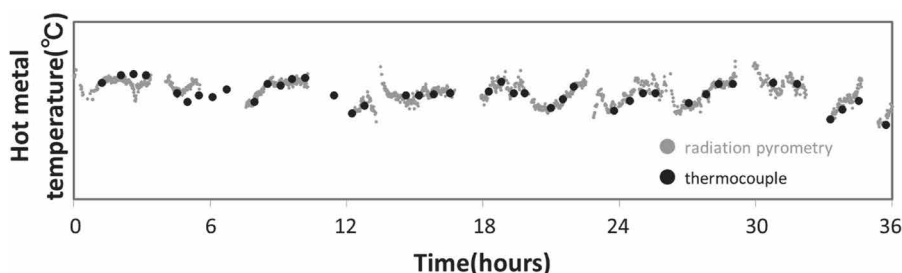


図5 実機高炉での連続測温結果

Fig.5 Continuous temperature measurement result in actual blast furnace

流は高温溶融状態にある溶銑，溶滓の放射率差により、図4の熱画像に示すようにマープル模様状に観測される。こうした特徴を踏まえて画像解析によって溶銑部を特定してその輝度を抽出することで、目的の溶銑温度の測定を可能にしている。

高炉出銑口での温度計測の代表的な外乱としては熱画像への煙の映り込みがある。煙がある場合は溶銑部が実際より暗く観測されるため測温誤差が生じるが、時間変動する煙の影響を受けて溶銑部輝度値の時間変動も大きくなるため、画像処理によってこれを判別・検知し測定の安定性を担保している。

加えて本件の測定環境は、溶銑などの高温溶融物からの輻射熱や飛散物、粉じんなどがあり過酷である。汎用的なカメラを設置した場合には輻射熱を受けてカメラ本体温度が上昇することによる故障や、粉じんなどがレンズに付着する光学障害によって、数日程度で熱画像が取得できなくなる。当社では独自のカメラ冷却機能や飛散物・粉じんを吹き飛ばすエアパージ機能を付与することで、半年以上メンテナンスフリーで良好な熱画像を取得し、安定的な測温を実現している。図5に放射測温結果を示す。熱電対による温度測定結果ともよい一致を示しており、測温精度10℃以下を達成している。

3. 働き方・プロセス変革を支える検査・計測技術

国内の労働力人口の減少が進む中で、とくに製造業の人手不足は他産業と比べても顕著に進んでいる。人手不足は事業継続性の観点からも無視できないリスクとして顕在化し始めており、ものづくりの自動化の取り組みは必須になりつつある。なかでも検査・計測には熟練技能を要する作業が多く、当社はこれまでも生産性向上、人による作業のばらつき低減、安全性向上などの観点から検査・計測の自動化に取り組んできた。ここではクランク軸の超音波探傷検査、火花試験、熱間鍛造物寸法計測の自動化事例を紹介する。

3.1 クランク軸の自動超音波探傷検査

当社が製造しているクランク軸は、ジャーナルと呼ばれる軸部にスローと呼ばれる偏心部材を焼ばめして作られる組立型クランク軸と、丸棒素材から鍛造して成型される一体型クランク軸に大別される。一般にクランク軸は長時間の繰り返し荷重に耐える必要があるが、例えば一体型クランク軸は近年のエンジン高出力化、コンパクト化に伴って、クランク軸のピンおよびフィレット部における表面および内部の厳格な品質管理が求められてい

る。かつてはいずれのクランク軸もすべての探傷面を手動で検査していたが、全面探傷には長時間を要し、探傷走査と探傷面の監視を確実に実施することは検査員に精神的かつ肉体的な負担をかけていた。そこで高速・安定に検査を行い、全面的検査結果を記録・保証する目的で、自走式で全面走査を行う自動超音波探傷装置を実用化し、クランク軸に求められる高い信頼性を支えている(図6)。¹⁰⁾

垂直探傷を例にとれば、検出範囲が中央の狭い領域に限られるため、小曲率半径を持つフィレット部の検査を行う物理的な探触子の接近限界のほか、探触子の走査ピッチを非常に細かく設定するなど作業上の配慮が必要となる。これらを手動で安定的に行うには検査員の負担が大きいため、フェイズドアレイ法を採用した独自の超音波探触子とその走査機構を開発した。これにより例えば探傷面が曲率を有していても、その表面から平底穴φ0.5mmの反射源をセクタスキャンと呼ばれる電子操作によって検出することが可能になった。概念図を図7に示す。¹¹⁾

3.2 火花試験

熟練技能を要する検査の自動化の取り組み例として、近年急速に進化しているAI画像認識技術を活用した火花試験を紹介する。鋼材をグラインダに押し付けて生じる火花は、鋼種や含有元素の量によって特徴が異なる。

火花試験はこの火花の特徴を熟練者が見分け、鋼種を判定する試験であり、鋼材判定検査として古くから実施されているが、熟練技能を必要とする官能検査であり自動化が求められていた。従来は火花をカメラで撮像し、ルールベースの画像処理(パターンマッチングなど)により火花画像から破裂や流線を検出し、炭素量を推定する取り組みが行われてきた。しかし、合金元素(S, Cr, Mo, Ni)を含めた多様な合金鋼の鋼種判定には、ルールベースの画像処理では限界がある。そこで当社はAI画像認識技術を活用し、鋼材の炭素含有量を推定¹²⁾するだけでなく、合金鋼種も判定するAI画像認識技術¹³⁾を開発し、熟練技術のデジタル化と自動化に取り組んでいる。図8に鋼種判定フローの概念図を示す。入力された火花画像に対して、前段で炭素含有量を推定し、後段で合金鋼種を分類する畳み込みニューラルネットワークを構築することで高精度な鋼種判定を実現している。

3.3 熱間鍛造物寸法計測

安全や酷暑環境対策についても計測技術は貢献している。当社が製造している大型鍛造品、例えば石油精製用圧力容器(リアクタ)に用いられるシェルリング(直径4~6m)は、図9(1)に示すように、当社鍛圧工場の8,000tプレスにより所定の形状に鍛造され、その後、製品形状に切削加工される。プレス作業における形状確認方法として、従来はプレス直下の熱間鍛造ワーク(500

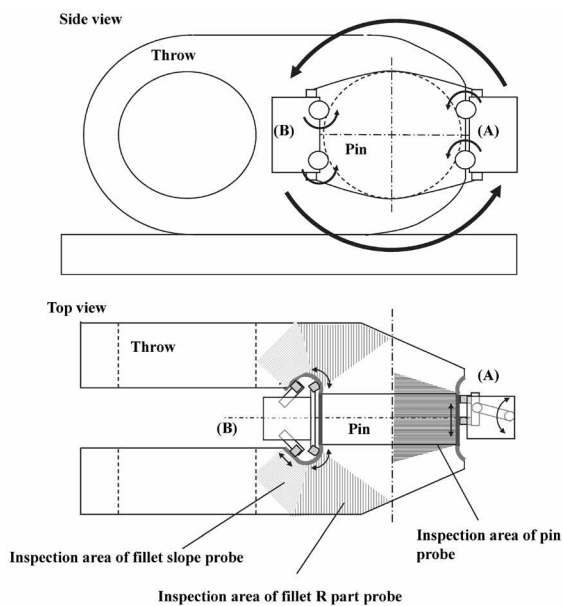
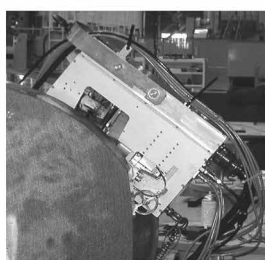


図6 組立型クランク軸のスロー自動超音波探傷装置¹⁰⁾
Fig.6 Scanning system of built-up type crankshaft throw automatic ultrasonic inspection



(A) Pin probe scanner
(B) Fillet probe scanner

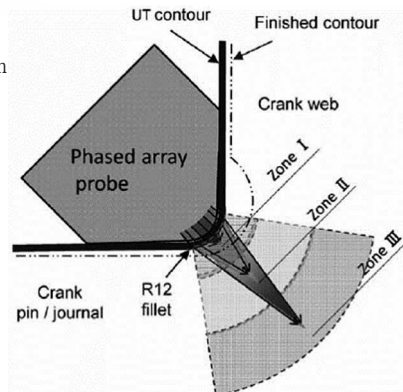


図7 フェイズドアレイ法におけるフォーカス模式図¹¹⁾
Fig.7 Focus pattern diagram of phased array

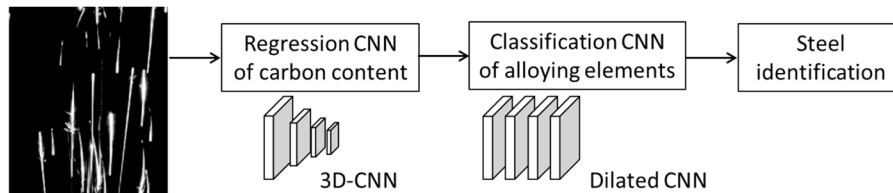


図8 火花画像の鋼種判定フロー¹³⁾
 Fig.8 Schematic flow diagram of steel identification for spark images

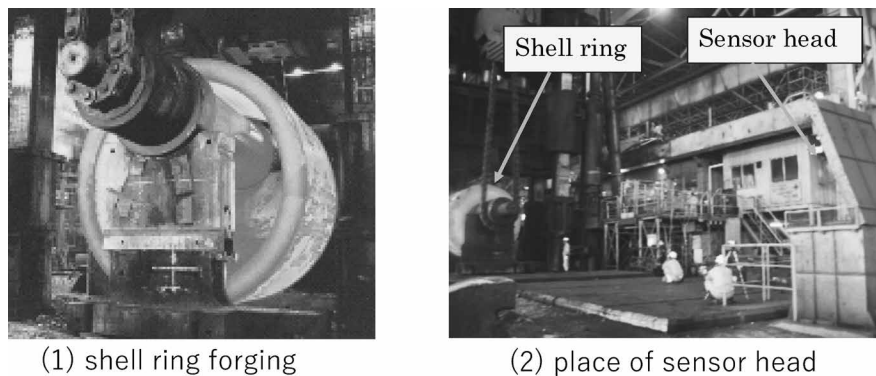


図9 シェルリング直径計測装置¹⁴⁾
 Fig.9 Shell ring diameter measurement equipment

～900℃) に近づいてパスを用いた寸法測定を行っていた。しかし、この作業は酷暑環境で行われているため作業負荷が非常に高く、また人による計測ばらつきが大きかった。そこで離れた場所から安全にシェルリングの直径を高速・高精度に測定する目的で、図9(2)に示すステレオ法を用いた画像計測装置¹⁴⁾を開発・実用化した。また、その他の熱間鍛造品の寸法計測についても随時自動計測の取り組みを行っている¹⁵⁾。

むすび = 本稿では当社における非破壊検査技術、プロセス計測技術および自動化を支える検査・計測技術について紹介し、コア技術としての計測技術が安全・安心な製品と持続可能なものづくりを支え、貢献してきたことを述べた。

今後は持続可能な社会の実現へ向けて、例えば鉄鋼事業においては、電炉化など生産プロセスにおけるCO₂削減への取り組みが加速し、製造プロセスの大きな変革が起こることも想定される。これに対して知能化をはじめとする計測技術の高度化、新プロセスへの基礎科学的理解および操業を高次に融合させることで、ものづくりの変革に貢献していく。

また近年のDXに加え将来の国内労働力人口減少で、ますます自動化ニーズは高まっている。とくに過酷な環境でありながら精緻なプロセスの制御が求められる当社のものづくりの現場では、これまでも検査・計測技術を最大限活用してきたが、近年のロボティクスやAI技術の非連続的ともいえる大きな進歩により、これまで人にしかできないと言われてきた操業知を捉え、操ることができる可能性も広がっている。いっぽうで、プロセスも変化し続ける中、人ならではの適応力、創造力もより重

要になっている。高まる高付加価値への要求を、人知と最新の検査・計測技術の組み合わせによって如何に満たしていくか、その知恵と工夫が世界のインフラを支える基幹部品を幅広く供給する当社においてとくに重要となっていくと考える。

最後に、今後も社会の根幹を支える基幹部品・製品群を安定供給し、あくなき品質・機能・性能要求の高度化に 대응し続けるため、またカーボンニュートラルへの挑戦や持続可能な社会の実現へむけて、計測技術の高度化に努めていく所存である。

参考文献

- 1) 川田 豊ほか、マイクロ波による高炉原料レベル計の開発。自動制御連合講演会前刷。1982, Vol.25, p.527-528.
- 2) 迫田尚和ほか、R&D神戸製鋼技報。2014, Vol.64, No.1, p.99-100.
- 3) 田原和彦ほか、R&D神戸製鋼技報。2015, Vol.65, No.2, p.87-91.
- 4) 前田 悟ほか、R&D神戸製鋼技報。2011, Vol.61, No.1, p.20-23.
- 5) 芦田 強ほか、欠陥画像認識への畳み込みニューラルネットワークの適用。材料とプロセス。第173回春季講演大会。日本鉄鋼協会。2017, Vol.30, No.1, p.293.
- 6) 川田 豊。R&D神戸製鋼技報。2007, Vol.57, No.3, p.1.
- 7) 松井良行ほか、R&D神戸製鋼技報。2005, Vol.55, No.2, p.9-17.
- 8) 小林 勲ほか、鉄と鋼。第73年(1987)第15号, p.2092-2099.
- 9) 松井良行ほか、R&D神戸製鋼技報。2007, Vol.57, No.3, p.2-11.
- 10) 岡本 陽ほか、R&D神戸製鋼技報。2005, Vol.55, No.3, p.16-21.
- 11) 和佐泰宏ほか、R&D神戸製鋼技報。2016, Vol.66, No.1, p.16-19.
- 12) 尾崎圭太ほか、ディープラーニングによる火花試験自動化技術の開発。材料とプロセス。第176回秋季講演大会。日本鉄鋼協会。2018, Vol.31, No.2, p.705.
- 13) 尾崎圭太ほか、ディープラーニングによる火花試験自動化技術の開発(II)。材料とプロセス。第177回春季講演大会。日本鉄鋼協会。2019, Vol.32, No.1, p.205.
- 14) 岡本 陽ほか、R&D神戸製鋼技報。2007, Vol.57, No.3, p.29-33.
- 15) 滝下峰史ほか、段付き丸棒の長さ計測装置の開発。材料とプロセス。第181回春季講演大会。日本鉄鋼協会。2021, Vol.34, No.1, p.137.