



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

画像計測という切り口で鉄鋼プロセス革新に貢献する

Contribution to Innovation in Steel Manufacturing Processes Using Image Sensing

大野 紘明

Hiroaki Ono

JFE スチール（株） スチール研究所
サイバーフィジカルシステム研究開発部
主任研究員

1 はじめに

鉄鋼業は技術の裾野が非常に広い業界であり、大規模な製造プラントで商品を製造し、かつ製造プロセスを維持発展させていくために必要な要素技術は多岐にわたります。画像計測も鉄鋼業を支える上でなくてはならない技術の一つです。私は大学で計測工学の基礎を学び、大学院の修士課程で画像を用いたインターフェースの研究開発に従事してきました。研究の傍ら就職活動を開始する時期に差し掛かり、社会貢献が目に見えやすいと感じて民間の技術系の職種に興味を持った私は、様々な企業の情報収集を始めました。同級生がIT業界や計測機器メーカー、電気メーカーに目を向ける中、自分の計測工学の専門を活かせると感じたのが鉄鋼業でした。

鉄鋼業に関する技術分野では、製品開発を行う材料工学や生産設備およびプロセスの開発を行う機械工学、電気工学を専門とする技術者や研究者が活躍するイメージが強く、なかなか計測工学はピンとこない方が多いかもしれません。しかしながら、材料開発やプロセス開発を行う土壌として、製造現場で何が起きているかを可視化することはとても重要です。特に鉄鋼プロセスでは製造ラインにおいて膨大な質量の対象を高温、高圧、高速といった条件で扱うため、自動車などの他の製造現場と比較し外乱ノイズが大きく、対象から得たい情報のみを精度よく計測することが難しいです。そのため、ノイズの多い計測値を用いたモデルによる推定や、人による直感・感覚を介して現象を理解することも求められます。そのような状況の中で、今まで得ることができなかった情報や見えなかった現象を新たな計測技術をもって直接可視化することは、鉄鋼製造プロセスが一変する可能性を秘めています。

本稿では、鉄鋼プロセスにおける画像計測の研究開発について、私がJFE スチール入社後に携わった表面検査装置の開発を実例としてご紹介いたします。

2 鉄鋼プロセスにおける表面検査の意義

鉄鋼製品は建築や土木、パイプラインなどの社会インフラ、自動車や船舶といったモビリティの構造に用いられるため品質が非常に重要であり、工業規格やユーザーから要求された仕様を満たさない製品の供給は社会の安全の根幹を揺るがします。特に、仕様を満たさない製品が万が一災害や事故につながったとき、莫大な社会的損失だけでなく人命にも関わるため、高い信頼性と性能が製品に要求されてきました。したがって、安心して使用できる鉄鋼材料を安定的に社会に供給することが鉄鋼業の使命と言えるでしょう。

製品の性能を脅かすものとして、水素脆化、低温などによる強度や靱性の低下、破壊の起点となる内部介在物や割れなどの様々な要因があり、その中の一つに表面欠陥があります。製品表面に発生した欠陥は、肉厚を減少させ強度低下させる、応力集中による疲労を発生させるなど、様々な観点で製品そのものの性能を損ないます。

そのような表面欠陥の発生原因は、鑄造から圧延、表面処理まで多岐にわたります。具体的には、鑄造時にスラブに割れが発生し、この割れが次工程で圧延され表面に界面として現れる、また圧延中や表面処理中に圧延ロールに付着した異物（例えば、設備の破片などが飛び込む）により表面に凹みが発生する、などが挙げられます。表面欠陥の発生を抑止する対策は数多く実施されておりますが、設備の老朽化などや想定外のトラブルなどにより、現状完全に防ぎきることは困難です。そこで、ユーザーに表面欠陥がある製品を流出させないために、発生した欠陥を製造プロセスの中で検知する表面検査が重要な意味を持ちます。

最も容易に実現できる表面検査は、検査員が製品の表面を自身の目で見ることにより欠陥を検出する目視検査であり、

鉄鋼プロセスでも古くから実施されています。目視検査というと原始的で性能が悪いように感じるかもしれませんが、実を言いますと人の目と頭脳は非常に優秀です。カラー、ステレオビジョン、アクティブビジョン、周波数解析、時系列処理、畳み込みニューラルネットワークといった最新のセンシング機能と解析機能を備えており、製品表面のちょっとした違和感を見逃さないばかりか、検査装置だと識別困難な欠陥を簡単に見分けることも可能です。

しかしながら、高い性能を持つ目視検査にも様々な課題があります。具体的には、検査に要する高度な技能を持つ検査員の育成に時間がかかる、各検査員の熟練度や検査時の疲労の蓄積具合により検出性能がばらつく可能性がある、製品のサイズが大きく検査に時間を要する、長時間にわたり製品を目視し続ける作業は非常に過酷な作業であるといったことが挙げられます。さらに、検査結果の記録は定量的ではなく欠陥発生の要因解析と解析結果に基づく対策を効率よく実行できないという課題もありました。そのため、多くの研究者、技術者により、昨今の計測技術の進歩を反映させた安定して高い検出性能を持つ自動検査装置が開発、導入されてきました。

3 表面検査技術の変遷

鉄鋼製品の欠陥検査には、鋼材内部の欠陥に適した超音波検査、鋼材表面から表層の欠陥に適した電磁気を用いる検査（過流探傷法や漏洩磁束探傷法）、鋼材表面の欠陥に適したレーザーや画像を用いる検査など様々な手法があります。薄鋼板の表面検査はレーザーや画像を用いた手法が主流となって発展してきました。まず検査対象となったのは、表面欠陥に厳格であり比較的表面性状が均一なCGLやCALで製造された薄鋼板です。製造ラインでは薄鋼板は非常に高速で通板するため、自動検査装置も高速で動作しなければなりません。1980年代まで、カメラなどの光学デバイスの発達が不十分であり、検査対象の表面を撮像するには撮像速度が不足していました。そのため、対象の表面にレーザーを照射し、その散乱パターンをアナログ的に処理して欠陥を検出するなどの工夫で、リアルタイムな自動検査が実現されました¹⁾。

その後、CCDカメラの発達とともに画像式表面検査が可能となりました²⁾。一般的な画像式表面検査装置は、ライン照明を用いて鋼板の表面に均一に光を照射し、鋼板幅方向に直線状の視野を持つラインCCDカメラで反射光を取得し画像化します。照明とカメラを線状にする理由は、搬送中の鋼板表面を幅長手においてむらなく均一な条件で高速撮像できるためです。その後得られた画像から、特に信号が強く発生している箇所を欠陥部として閾値処理を用いて自動で検出します。

欠陥の検出性能を向上するために、画像式表面検査装置は

投受光角の光学条件やカメラの分解能、また波長や偏光などの光学特性のといった様々な工夫がされてきました。例えばJFEスチールでは、対象表面に直線偏光の光を照射し、反射光を複数の偏光条件で取得することにより、無害な油膜と欠陥部の金属光沢を精度よく弁別するデルタアイ[®]を開発し、CGLやCALの表面品質向上に貢献してきました^{3,4)}。また、国内外のメーカーが薄鋼板向けに画像式表面検査装置を販売するようになり、現在では数多くの薄鋼板製造ミルに導入されています。私が入社した2012年では、このように薄鋼板の表面検査性能を高めよう開発が続いている状況でした。そういった中、最初のテーマとして与えられたのが、薄鋼板ではない黒皮がついた継目無鋼管に対して凹凸のある欠陥を熱間で検査する表面検査装置の開発でした。

4 黒皮がついた鋼材の表面検査の難しさ

私の開発対象であった継目無鋼管ラインでは、薄鋼板とは異なり表面検査の自動化が進んでいませんでした。継目無鋼管や厚鋼板、熱延鋼板などの鋼材製品の表面は黒皮と呼ばれる酸化被膜に覆われており、これは冷却むらなどにより不均一に付着します。そのため図1に示すような模様が鋼材表面全体にあらわれます。この模様自身は無害ですが、画像で撮像した際に、有害な凹凸を持つ欠陥と同様にコントラストが強く映るので、欠陥と模様の区別ができません。

この無害な模様の影響を受けず、凹凸形状だけ抽出する技術として光切断法と呼ばれる手法が存在します⁵⁾。この手法は、対象の表面にレーザーを照射して別方向からカメラで撮像することで、レーザーの照射位置の画像上での変化から三角測量の原理で形状を取得することができます。当時の私は、黒皮がついた鋼材試験片をリニアステージで平行移動させて、光切断法でスキャンするラボ実験を行い、欠陥部以外の部分は均一な形状で、欠陥部のみ凹みとして検出できることを確認しました。しかしながら、実際の製造ラインは高温、粉塵、振動がある悪環境下で、必ずしも実験室の様にリニアステージで精密に搬送されることはなく、跳ねたり揺れたりしなが

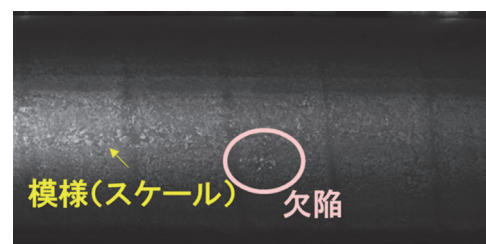


図1 黒皮がついた鋼材の鋼管表面における凹凸欠陥と模様
(Online version in color.)

ら搬送されます。光切断法は振動しながら搬送されてくる製品の検査に適しません。したがって、開発目標としていた継目無鋼管の搬送ラインへの適用は難しいと判断しました。

5 ツイン投光差分方式表面検査装置の開発

黒皮がついた鋼材で模様の影響を受けずターゲットとなる凹凸欠陥のみ検出するという技術課題に対し、「反射光を撮像することとは異なった物理現象の一つとして、赤熱していることを利用して対象の自発光を捉えて黒皮と欠陥の見え方を評価してはどうか」というアドバイスを先輩からもらい実験を進めました。実際の作業中において搬送される赤熱した鋼材に適用すると、黒皮が発生しやすい鋼種では自発光で撮像した画像でも欠陥部以外の大量の黒点が現れることが判明しました。この黒点は無害であり、欠陥部との弁別を様々な画像処理により試みましたが、実用的なレベルまで弁別することはできませんでした。

そこで、再度手法から見直すことにしました。まず自発光方式で撮像した際に過検出となる黒皮がついた鋼材の黒点を目視でよく観察したところ、凹凸があるようには見えませんでした。観察した結果から、何とかして部分的に凹凸があるかどうかの情報を実作業環境下で得られないか考え、欠陥サンプルを用いて実験室で試行錯誤を繰り返しました。あるとき、サンプルに光を当てて、また異なる方向から光を当てると、模様は見え方が変わらないが、凹凸部は陰影が異なるということに気が付きました。考えてみると当然のことでしたが、平らな模様が「見え方が変わらない」ことに着目し、異なる方向から光をあてて撮像した2枚の画像を引き算すれば模様のみキャンセルされて消えるのではと思い付きました。実験してみたところ、図2に示すように模様はきれいにキャンセルされ欠陥のみ残りました。光の照射角を多少変えても同

じように模様がキャンセルされ、この原理であれば対象が多少跳ねたり揺れたりしても安定して凹凸の信号のみ検出できると考えました。この新たな画像検査手法を「ツイン投光差分方式」と名付け、まずラボ実験で黒皮の表面模様に対して非常に効果的であることを示しました⁶⁾。

こうして「ツイン投光差分方式」の基本的な構想が確立した後、次に搬送中に動いている継目無鋼管に対してどのように適用すればよいか課題となりました。高速に搬送される継目無鋼管に対してツイン投光差分方式を適用するには、ほとんど同時に同じ部位を撮像しなければなりません。たとえば、移動体に対して、二つの方向から光を照らして順番に撮像したとしましょう。このとき、移動体に対して撮像するタイミングが遅いと、その間に撮像の位置がずれてしまい、二つの画像を差し引いてもツイン投光差分方式の効果をうまく引き出せません。そこで、カラーカメラと赤青緑光源を用いて同時に照射して色で分離する方式など様々な手法を検討しました。その結果、フラッシュ光源と高速に撮像可能なカメラを用いて、1/10000秒で撮像と照射を切り替える時間分割式が、赤熱している継目無鋼管でも十分な光量で表面を検査することが可能であり、最も適していると結論付けました⁷⁾。

光源とカメラを実際の製造ラインに一時的に設置した簡易試験で有効性を確認したのち、本格的に連続稼働するプロトタイプ装置を設置し大量データで評価することになりました。今までになかった世界で初めての装置です。したがって、一から仕様検討することになり、経験が不足する中で試行錯誤しながら検査装置メーカーと設計製作を進めました。設計通りと考えた機器を設置、配線し、電源を投入して立ち上げを行ったとき、残念ながら設計した通りに動作せず全く意図しないタイミングでカメラやフラッシュ光源が動作してしまいました。

当時の上司に状況を報告すると、「調査に必要な機材は送るから、安定動作するまで頑張って現場で対応してほしい」

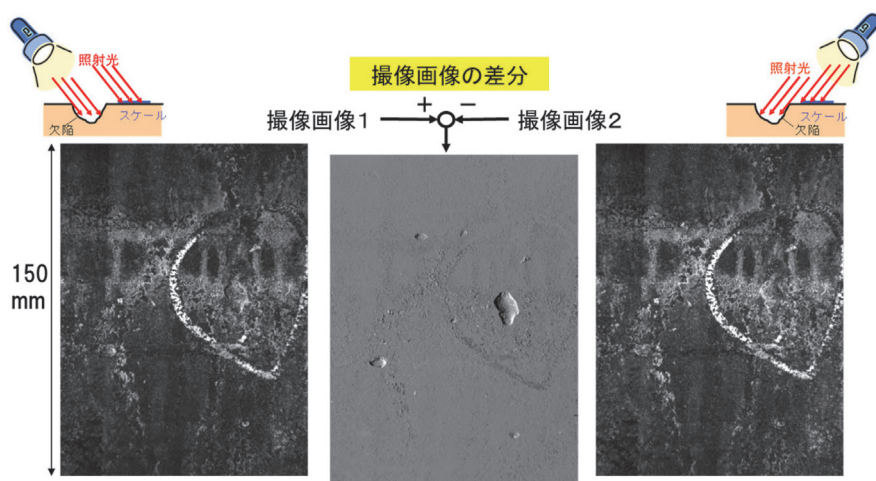


図2 ツイン投光差分方式の原理と鋼材表面への適用結果(Online version in color.)

とエールを送って頂き、次の日から原因調査に没頭する日々が始まりました。現場に設置する前での実験室での動作確認では安定して動作していたことから、製造現場では何かが違うはずです。配線の長さや電気ノイズに着目しオシロスコープを持って調査を続け、様々な方のアドバイスを頂きながらアースや絶縁を工夫、なんとか異常動作を抑えることができました。動作不具合の解消に目途が立ちつつあると、今度はカメラや光源が粉塵などで汚れたり、プログラムにバグがあったりと次から次に不具合が発生しました。必死に一つずつ不具合をつぶしていき、装置の設置から3カ月経ったころようやく安定して目的の試験が達成できるようになりました。

プロトタイプ装置を用いて得られた画像に対し、机上で当初想定していた画像処理を適用し、欠陥の検出性能を整理してみたところ想定以上の誤検知率でした。このままでは使い物になりません。そこで誤検知の原因を一つ一つ精査して、欠陥のみを検出できる画像処理と判定ロジックをつくりこんでいき、なんとか誤検知を抑えることができました。特に、欠陥が凹形状であることに着目して凸形状と反対の明暗パターンとなることをうまく利用した判別方法は、誤検知率の低減に大きく寄与しました⁸⁾。当時の私は、それでも開発中の表面検査装置が実際の製品製造に役立つかどうか不安でした。装置が役に立つ確証を得るために、保存直後の撮像画像から自動で欠陥を検出し、製造のオペレータに結果を表示して音でアラームを発砲するプログラムを自作しました。画像処理や表示機能のブラッシュアップと並行して自作プログラムを用いた長期運用試験を行った結果、実際にオペレータから「欠陥が早く見つかって役に立つ」と声をかけてもらい大変嬉しく思うと同時に工程装置として導入できると確信しました。

最後に、プロトタイプ装置をツイン投光差分方式表面検査装置として作り直し、工程設備として製造ラインへ導入しました。工場の設備・制御技術担当者とよく議論し、長期的に性能を維持するために必要な故障アラーム、機器交換や粉塵清掃の手順などを確立し、工場で安定的に活躍できる設備につくりこみました。工程装置導入後は、継目無鋼管の製造プロセスにおいて、ロール焼き付きの転写などで発生する欠陥をオンラインで検知することで、欠陥発生を抑止する対策を早期に行う運用としました。欠陥の発生率を本表面検査装置の導入前後で比較すると大きく改善されていることがわかり、ようやく製品製造に貢献する仕事ができたと実感しました。

ツイン投光差分方式表面検査装置は、その後、厚鋼板など今まで目視検査が主流であった様々な黒皮がついた鋼材製造ラインに導入され、今日も表面品質の向上に貢献しています。単純な水平展開ではなく、検査対象の鋼材や対象欠陥に特化した光学配置の最適化、画像から検出した欠陥信号が有害であるか無害であるかを判定するための機械学習による判定ロ

ジックの改善など、検出性能を着実にレベルアップさせました^{9,10)}。導入後の装置は、どの製造ラインでも操業上なくてはならない位置づけとなっており、画像計測技術を応用して鉄鋼プロセスを革新することができたと感じております。

6 終わりに

前章で述べた通り、私の経験不足などの原因もあり、ツイン投光差分方式表面検査装置の開発は苦難の連続でした。多くの技術課題や不具合を手探りで必死に取り組んだ日々は非常につらかったですが、今、振り返ると、このときの経験が私の技術力を底上げしてくれた貴重な経験だったと思います。光学系や画像処理のノウハウといった技術的なことはもちろん、想定外の不具合に対する原因の切り分けと対処法、様々な担当者とのコミュニケーションの取り方、現場で想定通り装置を動かす難しさ、数えきれないほど多くのことを学ぶことができました。開発で携わった方すべてが先生であり、私の技術者としての基礎の大部分がこの開発を通して形作られました。今後もこの経験を活かし、次の研究開発につなげていきたいと思います。

最後に、本記事の執筆に値する成果につなげて頂いた全ての方々に感謝の意を示します。今後ともご指導ご鞭撻のほどよろしくお願いいたします。

参考文献

- 1) 深沢千秋, 渡部利克, 相沢健治: 東芝レビュー, 44 (1989), 413/146.
- 2) 中井康秀: 金属素材の表面欠陥検査, 53 (1987) 8, 1161.
- 3) 風間彰, 杉浦 寛幸, 大重貴彦, 猪股雅一, 上杉 満昭, 田口昇: 鉄と鋼, 90 (2004) 11, 870.
- 4) T.Oshige: Trans. Soc. Instrum. Control Eng., 55 (2016) 3, 228.
- 5) R.Fackert, J.Busch, C.Mittag and A.Weinert: Metallurgical Plant and Technology, 36 (2013) 4, 52.
- 6) 大野紘明, 小川晃弘, 山崎孝博, 腰原敬弘, 児玉俊文, 飯塚幸理, 大重貴彦: 鉄と鋼, 104 (2018) 1, 11.
- 7) 大野紘明, 小川晃弘, 山崎孝博, 腰原敬弘, 児玉俊文, 飯塚幸理: CAMP-ISIJ, 29 (2016), 229, CD-ROM.
- 8) 大野紘明, 小川晃弘, 山崎孝博, 飯塚幸理, 大重貴彦: CAMP-ISIJ, 30 (2017), 775, CD-ROM.
- 9) 大野紘明, 大重貴彦, 楯真沙美: CAMP-ISIJ, 33 (2020) 1, 112, CD-ROM.
- 10) 大野紘明, 大重貴彦: 第35回SICEセンシングフォーラム予稿, (2018), 1C1-1.

(2022年3月17日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

東京工業大学 工学院 情報通信系 准教授

渡辺 義浩

大野氏による「画像計測という切り口で鉄鋼プロセス革新に貢献する」は、技術解説の記事に留まらない面白さがあります。この記事には、計測工学の技術が生み出されるまでの真髄があります。

計測とは何でしょうか。JISの定義によれば、計測とは「特定の目的をもって、測定の方法及び手段を考究し、実施し、その結果を用いて所期の目的を達成させること」とあります。定規を使って長さを測るような作業を指すと思われるがちですが、少し異なる定義となっています。この測る作業のイメージと近い用語は測定になります。測定は「ある量をそれと同じ種類の量の測定単位と比較して、その量の値を実験的に得るプロセス」と定義されています。

つまり計測とは、目的の定義から始まり、考究を介して、時空間的に普遍的な量を能動的に得るまでの一連の探求を指しています。ここで興味深い例として、地球の直径の計測を挙げてみましょう。コンピュータなど欠片もない紀元前200年頃、エラトステネスはこの目的を達成しました。彼は夏至の日の同時刻に、異なる地点で太陽が作る影の長さが異なることに気づきました。このことを利用すると、地球が円形であり、太陽が平行光である前提を立てれば、その直径を得られることを考究し、

実際に直径を取得しました。

計測工学の真髄は、今も昔も変わりません。目的の量を直接的・間接的に授けてくれる実世界のメカニズムを能動的に探し、観察・考究・実施を繰り返すことで、計測技術の工学的な実現を目指します。大野氏が、観察を通して対象の鋼材を深く知り、目的の量とそれ以外の違いを考究し、取り得る手段を次々と試し、仮説と実態の間を行き来することで、少しずつ前に進んでいく様は、まさに計測工学の姿であると言えます。

私の知る大野氏は、考えながら手を動かす、つまり考究と実施を同時並行的に進めることが得意な人物です。これは、計測工学における試行錯誤を重ねるうえで極めて重要な能力であると言えます。鉄鋼という明確な観察対象が得られたいま、彼の能力がこの上なく発揮されていることを、記事を通して強く感じました。

計測工学は更なる深化の時代を迎えています。高度情報処理と計測技術が融合することによって、見えない物理量を計る、見えなかった変化を見る、見つけられなかった変化を見つける段階へと踏み出すことが国の戦略目標として新たに定められました。大野氏には、鉄鋼分野における計測工学の先駆けとして、さらなるご活躍をされますことを心から期待しています。

日本製鉄(株) プロセス研究所 計測・制御研究部

伊勢居 良仁

大野さんの代表的な研究成果は、ツイン投光差分方式と呼ばれる熱間圧延鋼材を対象とした独自の光学表面検査技術です。日本鉄鋼協会の講演大会で何度か報告されており、最初の講演では基礎原理と装置構成、次は欠陥と疑似模様の判別法、そして、厚板への展開、最近では奨励賞の受賞講演といった内容でした。最初は製造ラインで使えるのか心配していたのですが、発表される度にレベルアップする様子を理解でき、次は何の話をするのか毎回楽しみにしていました。いずれの講演も、ご自身のアイデアとその効果を具体的にわかりやすく説明されていることも、評価される理由と感じています。

熱間圧延鋼材の光学表面検査は、これまでに多くの開発がなされたにもかかわらず、未だに適用できていない対象が残る開発課題でした。表面の疑似模様、電気ノイズ、振動など多くの外乱環境下で高精度な欠陥検出を要求されるうえに、24時間休みなく稼働する過酷な製造ラインで実用するために、長期にわたる精度維持と耐久性が要求されます。このため、実験室や冷間の製品検査で使用されている装置をそのまま適用することはできず、新しいアイデアによる課題解決が求められていました。

製造ラインへの導入では、一所懸命に考え作り上げた

装置、言わば、自分の分身が過酷な環境におかれているような気持ちで試験に臨むことになります。誰も成し得ていないことに挑戦するわけですから、何度か想定外のトラブルが発生し、その度に対策を練る必要があります。何が原因でうまく動作しないか考え悩み、対策を繰り返した後に、何事もなかったかのように装置が動作するようになる。従来にない技術が完成した瞬間であり、鉄鋼の製造ラインにおける計測装置開発の醍醐味でもあります。このように考え悩んで得た経験は、これからの研究者人生において忘れずに心に残り、研究者を成長させます。

さて、現在の鉄鋼業において、より一層の操業安定化、高度な製品品質の作りこみが要求されており、この手段としてAIの活用が研究されています。このAIを高度に機能させる新しい操業データを得るためにも計測技術への期待は高まっています。大野さんは、日本鉄鋼協会のみならず、計測・制御分野の専門家が集う学会にも参加しています。そこでは大学の先生が中心となって計測技術に関するより深い議論が行われますが、その学会においても研究成果を評価されています。今後も鉄鋼プロセスの革新に貢献できる計測技術の研究者として成長とご活躍を期待しています。