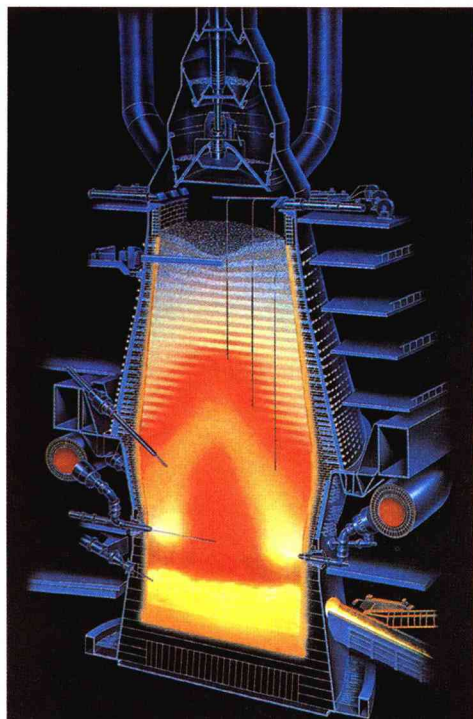


最近のセンサー技術の発達と鉄鋼への応用

—センシング技術が拓く計測の最前線—



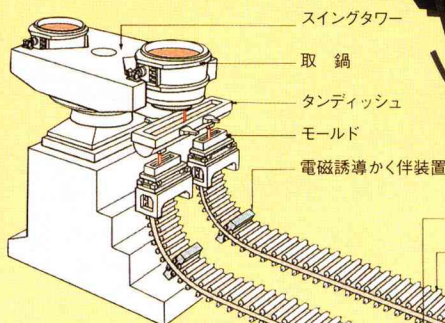
(イラスト：NKKパンフレットより)

高炉関連計測システムのテーマ

- ①炉内温度分布の連続的把握
- ②炉内ガス流れの把握
- ③溶銑レベル監視
- ④煉瓦劣化診断
- ⑤出銑口温度の監視

転炉関連計測システムのテーマ

- ①炉内温度の連続的把握
- ②カーボン量の連続監視
- ③その他の成分の把握

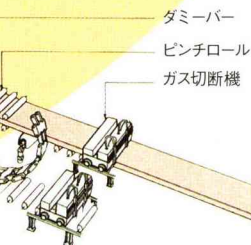


連続 casting 関連のテーマ

- ①溶湯温度の連続的把握

圧延ラインのテーマ

- ①内部介在物探傷
- ②表面疵検査



近年のエレクトロニクス技術の発達によって、新たな地平線が見渡せるようになりつつあるもののひとつに、センサー技術がある。製鉄という観点からすると、センサー技術はインライン計測への応用に可能性が期待されるものであり、ライン上での合理化を通じ、操業や品質のレベルを向上させ、日本の鉄鋼業の競争力を将来にわたって維持していくうえで重要な鍵のひとつになってきている。今回は、新たなセンサー技術の獲得によって開ける可能性と、同時に今後目標とされる鉄鋼におけるセンサー技術の方向性について概観してみる。

高炉内部が「見える」技術

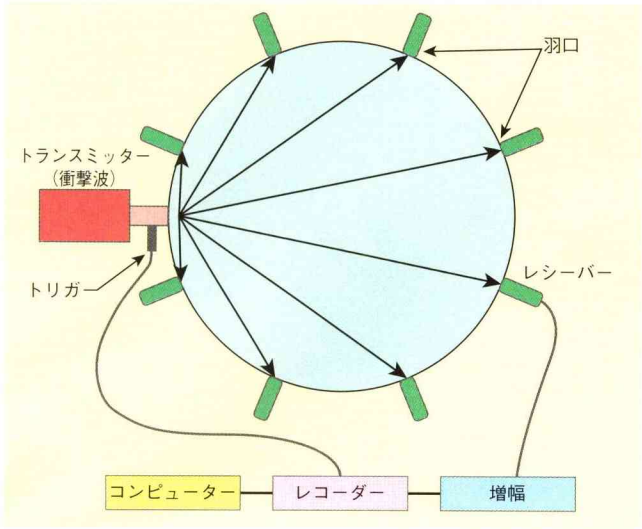
鉄鋼製造のラインには、多くの「ブラック・ボックス」が存在してきた。そうした不可視の領域を知るために、かつては熟練者の経験や勘が重要な役割を果たしてきた時代があった。まず製鉄の心臓部ともいべき高炉内の状況——温度分布や、ガス流れ、出銑口の状況などといった——にしても、実用的なレベルでのノウハウは確立されているにせよ、正確な情報を得ることがなかなか難しいというのが実態だった。

だが新たなセンサー技術の研究は、そうした「目の届かなかった」領域に光を当てようとしている。

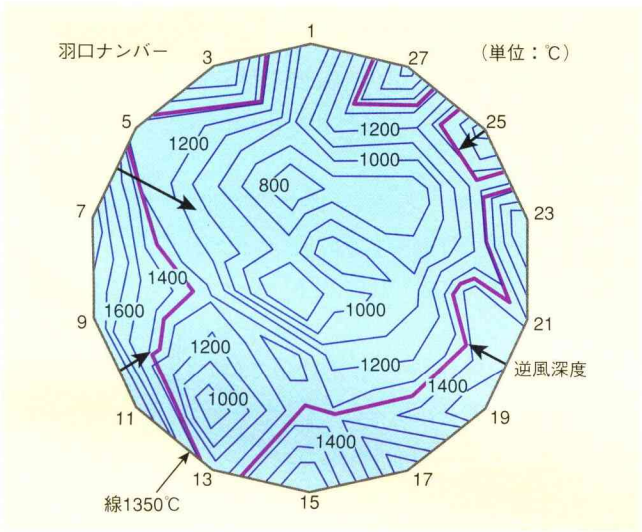
たとえばCT (Computer Tomography) 技術は、見えなかった断面の視覚化を可能にした。医療分野でいえばX線CTによって身体の断面映像がとれたり、音響を使ったCTを海洋探査に使ったりといった例がある。

鉄鋼でもこのCT技術を用いて高炉内の温度分布を視覚化できるのではないかの発想から、研究が行われている。

「炉芯温度分布測定法」として研究が進むこのノウハウは、



炉心温度分布の測定システム。

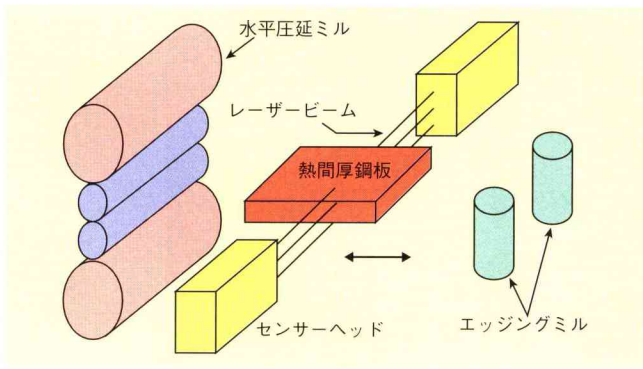


羽口断面付近の温度分布の計測例。

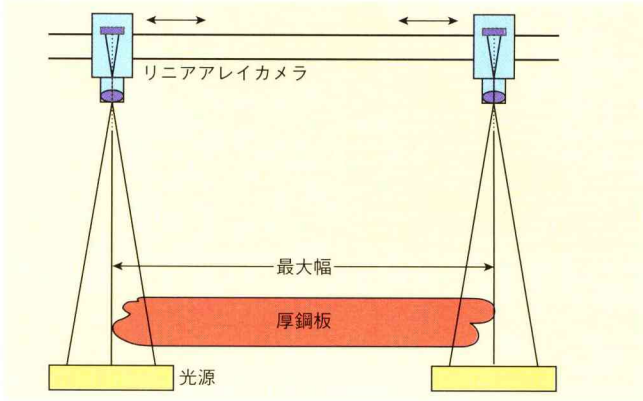
入射波として衝撃波を用い、それを微弱信号が受信可能なセンサーで受け、CT法によって断面の2次元的温度分布を視覚化しようというものである。炉内では伝搬波の強度減衰がきわめて大きいので、従来の音波CT法では限界があったが、衝撃波を用いることで、有効な計測ができることが分かってきている。衝撃波には音圧の高いパルス波を用い、受信側には微弱信号まで受信できる感度の高いセンサーを用いることで複雑な極限環境の炉内の視覚化を可能にしている。

この装置を用いれば、炉を「輪切り」にした断面の温度分布を、目で「見る」ことができるというわけだ。現状、オフラインでの測定試験が行われる段階まで研究が進められており、実用への可能性が示唆されている。

近年は省エネルギーの観点から、重油の吹き込みの代わりに微粉炭や廃プラスチックの吹き込みによって経済性を向上させてゆこうという試みが導入されつつあるが、こうした場合、炉内状況の監視はこれまで以上に重要な要素になることが予想される。その意味でガス流れや融着帯パターンも含め可能な限り、継続的に監視できる技術が求められており、この種の



レーザー走査型光波距離計を用いた新幅計の構成。



従来の幅計の構成。

たなセンシング技術への期待が高まっているようである。

光波距離計で鋼板・鋼材の正確な形状が把握可能に

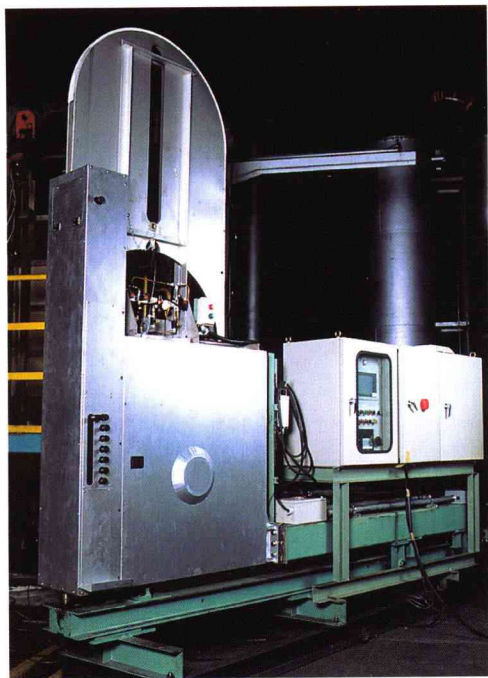
コークス炉、高炉関連では、煉瓦残厚のより正確な計測、銑鉄の湯溜まりレベルの正確な計測などが、次世代センシング技術の進歩によって期待される技術である。いずれも補修のタイミング、出銑のタイミングなどを最適化することで、ムダを削減してコスト圧縮に効果が期待できる。

現状は、誤差分を大きく見ておかねばならないこともあり、もしセンサー技術によって、より正確な状況把握が可能になれば、大きな合理化につながる可能性を秘めていると考えられる。こうした炉内環境の把握・監視の技術が、センシング技術の組み合わせによってより正確に継続的に行えるようになれば、設備資源を無駄なく安全に使うことができる。

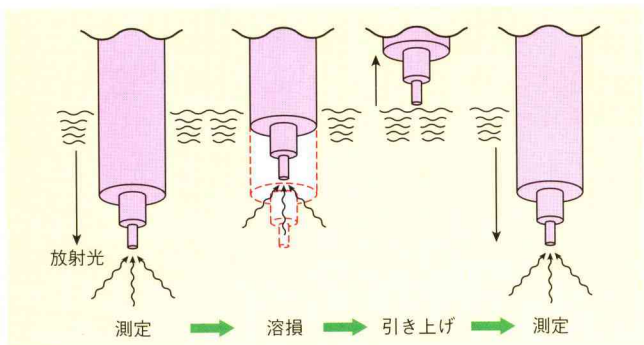
レーザー走査型光波距離計は、転炉の耐火物（煉瓦）の損傷状況を非接触で測定（操業中は不可能）するのに用いられてきた技術である。

これまでのレーザー走査型光波距離計は、精度1cm・測定周期1秒/点程度の性能であったが、ここへ来て精度1mm・測定周期1ミリ秒という高速・高精度のものが開発され、炉内の煉瓦の「減り具合」をさらに正確に計測できるようになってきている。

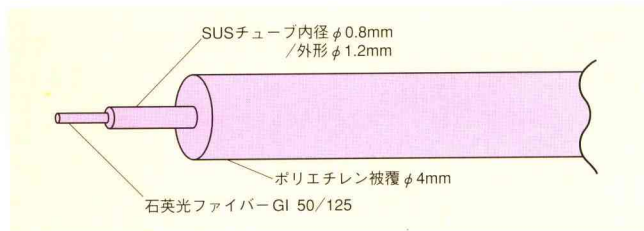
またその他にも、こうしたレーザー走査型光波距離計は、高速で流れる厚板圧延ラインでのエッジ形状までを含めた板幅の正確な計測を可能にした。鋼板の板幅計は、これまでもさ



浸漬型光ファイバーによる溶湯温度計。



金属管被覆光ファイバーによる溶湯の测温。

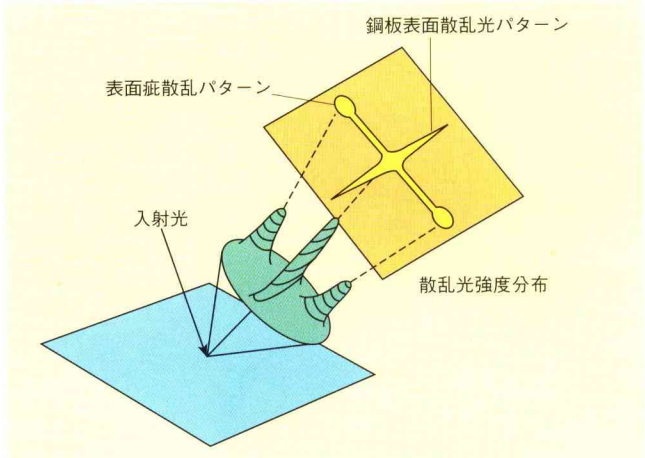


溶湯测温用光ファイバー構造。

さまざまなタイプのものが開発されてきたが、いずれも「最大幅」を計測することしかできなかったため、両端のエッジにまくれ込みなどがあった場合、計測値にはどうしてもその分の小さなバラツキが生じてしまうことを避けられなかった。

最終的な板幅を調整するには、ライン上でのこうしたエッジ形状による誤差を考慮にいれて計測を行えば、より精密な制御が可能になる。

高速・高精度の光波計測計を板の両脇に設置した、新たな鋼板平面の2次元形状を測定できる装置は、こうしたエッジ形状による誤差を考慮にいれたリアルタイムでの板幅計測を可能にする技術でもある。



光走査法の表面疵検出原理。

光ファイバーで溶湯の温度を測定

溶湯の测温という場面でも、センサーによる新たな計測技術が実用化されている。溶湯の温度を測定する方法として、これまでは紙筒に実装した熱電対を溶湯中に浸漬して計測を行っていた。

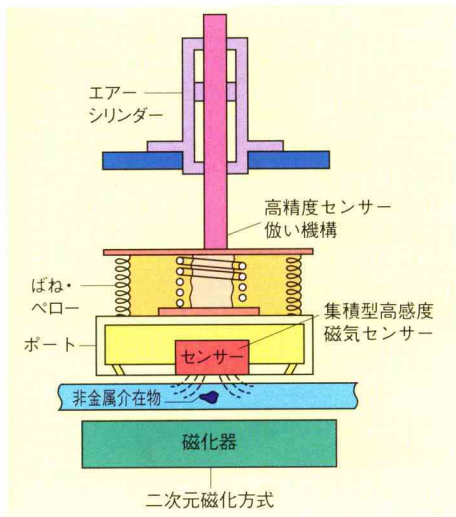
高炉の出銑口や、連続鑄造機などの测温では、より連続的な测温ができれば理想である。とくにタンディッシュの溶鋼の温度管理では、1550～1600℃という高温環境のなかで、±3℃の精度が要求される。また测温の頻度の点でもより頻繁に計測ができれば理想的だが、消耗品でありコスト的にも安いとはいえない熱電対を使用することを考えると、その回数には限界があった。

こうした問題を解決したのが、光ファイバーと光学素子のセンシング技術を組み合わせた测温技術だった。これはステンレス被覆して剛性をもたせた光ファイバーを溶湯に浸漬し、光ファイバーを透過してくる光をもとに温度を測定するものである。消耗型である点は、熱電対と同様だが、白金ロジウムに比べると光ファイバーのコストは小さいため、計測回数を増やして、連続的な温度の把握が可能になる。

光ファイバーによる溶湯测温技術は、すでにインラインに適用されており、ポビンに巻いた光ファイバーを少しずつ繰り出しながら、先端を浸漬しつつ、断続的に計測を行える装置が実用化されている。

インテリジェント化する光学式鋼板表面疵検査

鋼板・鋼材の品質管理・品質保証の高度化・自動化という側面では、さらにさまざまな可能性がある。センサーによる探傷技術は、人手によるマニュアル探傷を減らし、ラインを合理化するうえで重要な意味がある。オイルショック以来の省エネルギー化、省力化の流れのなかで、マニュアル探傷をセンサーに代替させてゆくことへのニーズが高まってきた経緯があるが、高度な「官能検査」でもある探傷という作業を、どう機械におきかえていくかが難しいポイントになっている。



強磁性薄膜磁気センサーアレイ（新日鉄）。

毎分数10mからときには数100mで走行するラインでの表面疵検査は、過去目視にたよる部分が大きかった。これを自動化するために導入されてきているのが光学式検査装置である。これは薄板表面の疵による光の散乱パターンを検出するもので、当初錫めっき銅板から導入が始まり、CAL、CGL、ステンレスへと拡大されてきた。

身の回りの製品が高品質化していくなかで、食缶、自動車、家電などを中心に銅板に対する需要家のニーズが高度化する傾向があるが、そうした中でこの種の表面疵検査技術は、重要な意味をもっている。

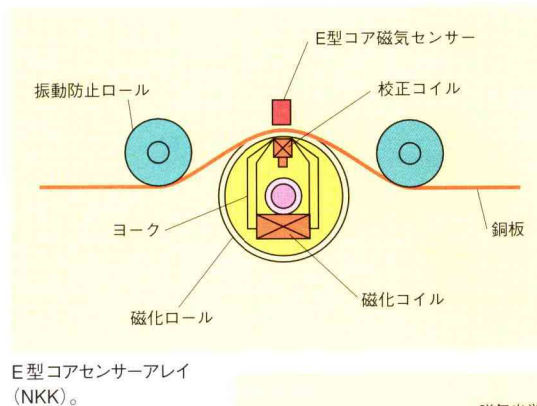
こうした光学式疵検査技術は銅板の品質向上に大きく寄与しているが、現在さらなる厳しい品質要求に応えるために、すでにいくつかのタイプが実用化されてきており、新たな技術的シーズなども取り込んで複合化による「インテリジェント化による性能向上」への道が模索されている段階である。

とくに「官能検査」の極致といわれる疵の等級判定などでは、高度な判断機能が求められるところから、ニューラル・ネットワークを応用した認識・学習の機能についても研究がなされている。

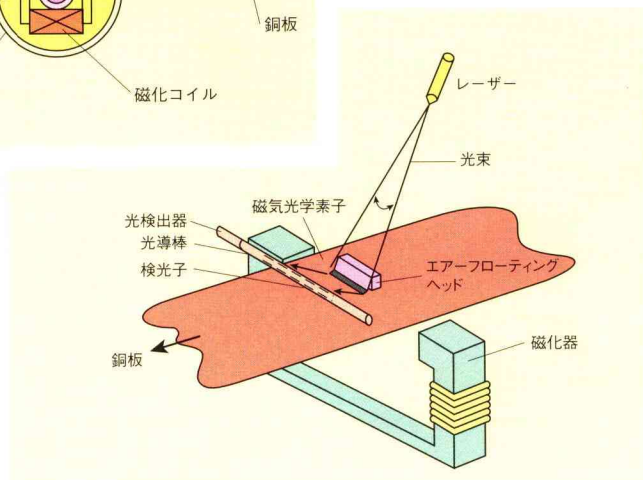
漏洩磁束法の高度化とデジタル化する超音波探傷

内部欠陥検査は、製鋼の過程での非金属介在物の混入や、熱間圧延での鉄粉の圧入などによって生じた欠陥の検出がおもな目的となる。缶などの加工割れを防止するためには、 $5 \times 10^{-4} \text{mm}^3$ という微小な欠陥の検出が必要になる。

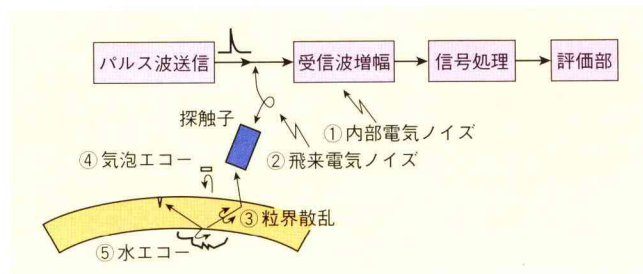
こうした欠陥の検出には、これまでに漏洩磁束探傷法が開発され用いられてきた。これは銅板に磁界をあたえて、そこから漏洩してくる磁束の乱れを検出する方法で、センサーとして強磁性薄膜センサーアレイやE型コアセンサーアレイなどを用いた装置が実用化されている。今後はこうした既存の技術をいかにして信頼性を高め、材料起因その他のノイズに影響されにくい（よりロバストな）センサーへとブラッシュアップしていく



E型コアセンサーアレイ（NKK）。



磁気光学素子（住友金属）。



超音波深傷におけるノイズ発生要因。

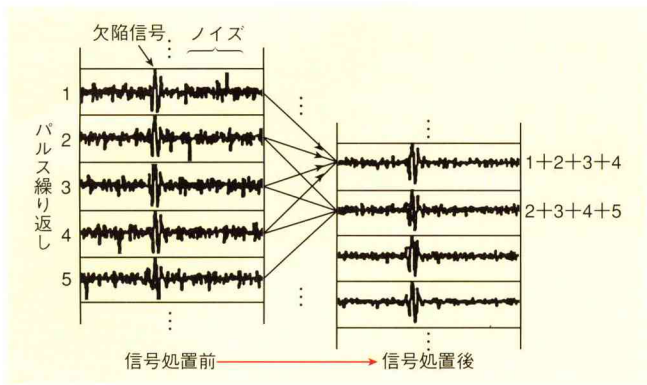
かが研究課題となっている。

最近はこの漏洩磁束探傷法のひとつとして磁気光学素子を用いて漏洩磁束のパターンを光の強度パターンに変換して探傷する方法も登場してきており、いくつかのノウハウが並行して使われるようになってきている。

同様に内部欠陥の非破壊検査の方法として、最近研究が進んできているものに、デジタル超音波探傷技術がある。デジタル処理による超音波探傷技術が可能になった背景には、近年発達してきたIC技術によって、高速・大容量のデジタル信号処理が一般化し、それによって超音波探傷信号のデジタル処理を十分に迅速に行えるようになったことがある。

超音波探傷を行う場合、飛来電気ノイズ、気泡、付着水分、結晶粒界での散乱など、いくつかのノイズ要因が考えられるが、そうしたノイズ信号をどう解消していくかが、この技術においてのひとつのテーマになっている。

現状、超音波のパルスが繰り返し信号であることを利用し、重複する信号を同期加算平均処理（測定ポイントの前後で出されたパルスの信号を利用し同期させて加算平均）することで、ランダム・ノイズを平均化して目立たないものにしてしまう方法が考えられている。欠陥があれば、その部分の信号は繰り返



同期加算平均処理。

し検出されるため、平均化されても薄められることなく、発見ができる。

もうひとつのノイズ除去法としては、チャープ波（高周波数から低周波数までを連続的につけた波）を測定対象に当てて、対象からの反射波の周波数特性を受信し、その相関処理によって波形を再構築する。

これらの方法はリアルタイムでの高速処理を必要とするため90年代に入りエレクトロニクス関連技術の充実によって、ようやく実機化が可能になってきたものである。

超音波デジタル信号処理技術は、銅板の高品質志向に対応して検査精度向上に寄与することはもちろん、探傷感度アップによって生じる過検出を人手で再探傷する手間を省くうえでも有効な技術だと考えられている。

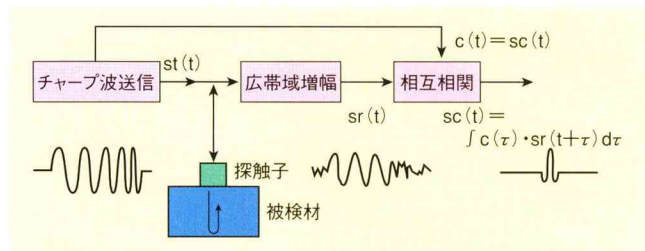
期待される先端的センシング技術

鉄鋼の製造ラインですでに应用が進んでいるものを中心に紹介したが、新たに開発され注目されている技術のなかで、応用への大きな期待がかかっているものもいくつかある。

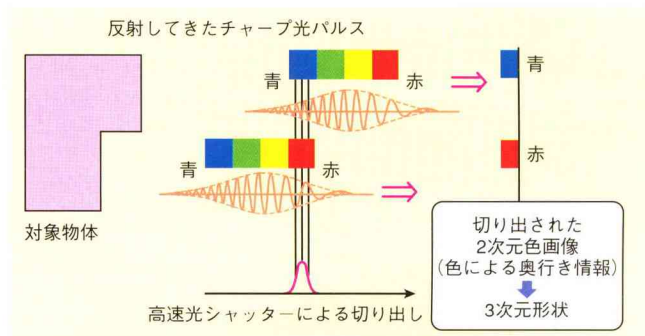
赤外線センサーを用いたサーモグラフィによる探傷技術もそのひとつだ。サーモグラフィをラインに应用するためには、赤外線カメラが不可欠である。だが、従来のものは熱雑音をなくすために液体ヘリウムやスターリング・クーラーなどを用いた冷却式のものが主流であり、冷却するためにイニシャル・コスト、メンテナンス・コストともにかさみやすく、インラインで使用するには、問題があった。

ところが近年になってマイクロ・マシニングの技術を応用することで非冷却式の赤外線カメラの技術が可能になってきた。これによってカメラ本体の価格が大きく下がり、メンテナンスにも従来のようなコストがかからなくなった。こうした新技術の登場によって、赤外線サーモグラフィのインライン化への道が開けつつある。今後、どんな形で应用されていくことになるのが、期待される技術のひとつといえるだろう。

先端技術として目を引くセンサー技術としては、フェムト秒パルス・レーザーによる3次元形状計測といったものがある。レーザー光のチャープ波を使う技術である。つまり赤から青ま



チャープ波パルス圧縮処理。



チャープ光と光シャッターによる3次元形状計測の原理。

で——長波長から短波長まで——の連続的に変化する光を対象物に当てて、もどってきた光をある瞬間で切り取ると、わずかな対象物の凹凸が光の到達時間の差となって視覚化できる。つまり出っ張り部分ではわずかに距離が短くなるから、同時の瞬間に先に出た赤（に近い波長の色）がとらえられ、ひっ込んだ部分では青（に近い波長の色）がとらえられる。

むろんこの「瞬間」はフェムト（ 10^{-15} ：千兆分の1）秒という極限的に短い時間単位でのものである。通常のビデオは画像1枚あたりが1/30秒程度のスピードなので、こうしたフェムト秒単位の計測には使えない。この極限的な「一瞬」をとらえるという技術は、画素ひとつにプロセッサひとつが対応するという高速光シャッターの技術によって可能になったものである。

こうした極限計測技術についても、鉄鋼計測への応用の可能性が模索されている。

その他、近年「脳磁図」などのように、磁気を利用したトモグラフィ技術が進展をみせているが、こうした磁気パターンをうまく利用することでさまざまなセンサー技術が可能になる。

要素技術としての新しいセンサーや、それらの応用方法が見出だされるなかで、今後センシング技術は、いくつかのセンサーを複合的に組み合わせたセンサーフュージョンの発想や、ニューラル・ネットなど判断機能を備えたセンサー、またパターン認識などといった方向に向かいつつあるという。エレクトロニクス周辺技術の充実も確実にセンサーの高度化を推し進める要因になってきている。製鉄のインライン計測技術は、開発にあたっての独自性が高く、オリジナルに開発していかなければならないという実態を考えると、今後、マイクロ・マシンやフェムト秒のような先端技術が直接的に鉄鋼の場に関係してくることも予想される。

【取材協力：本会計測フォーラム、イラスト提供：表示外（社）日本鉄鋼連盟】