



入門講座

鉄鋼材料を作り込む計測技術－2

鉄鋼材料の内部品質計測・検査技術

Non Destructive Testing for Internal Quality of Steel Material

和佐泰宏

Yasuhiro Wasa

(株) 神戸製鋼所
生産システム研究所
上席研究員

1 はじめに

省エネルギー、高強度、高機能といったニーズの流れの中、自動車をはじめとする鉄鋼顧客の材料に対するニーズは高まる一方である。表面品質はもとより、強度・耐久性にかかわる内部品質に対しても、高いニーズを満足することが求められている。鉄鋼材料内部にワレや偏析・介在物などの欠陥が存在すると用途によっては塑性変形や疲労破壊が発生し重大事故につながる危険性を有しており、厳しく管理される必要がある。

材質や連続的に発生する欠陥に対しては、抜き取りで破壊して詳細に分析することが可能であるが、不連続にかつ希に発生する欠陥に対しては、なるべく大容量、できれば全数、全長に対する検査が望ましく、非破壊検査を行う必要がある。

これらのニーズに応えるべく非破壊検査技術は、地道ながらも継続的な進歩が続けられている。技術進歩の背景には、

撮像デバイスに代表されるセンサ技術の進歩と、計算速度、記憶容量の飛躍的な進歩による信号処理、情報処理手段の革新が大いに寄与している。

ここでは、鉄鋼材料の内部品質を計測する方法としての非破壊検査技術を中心にその原理と現場に適用されている現状及び今後の展望を解説する。

2 非破壊検査技術

非破壊検査は20世紀初めから発達してきて従来より産業界に広く適用されている^{1,4)}。その原理そのものに大きな変化はなく、新たな原理に基づく全く新しい検査手法は出現していない。表1には各種非破壊検査の原理と適用先をまとめている¹⁾。

鉄鋼などの金属材料内部を非破壊で検査できる手法としては、物理的に超音波と放射線のみであり、表層近傍に限れば渦流探傷や漏洩磁束探傷などの電磁気探傷も適用可能である

表1 各種非破壊検査技術¹⁾

	放射線透過試験	超音波探傷試験	磁粉探傷試験	漏洩磁束探傷試験	渦流探傷試験	透過探傷試験
探傷方法	線源 透過度計 増感計 フィルム	垂直探触子 きず 斜角探触子 きず	微粉 漏洩磁束	漏洩磁束 センサー N S 磁化器	磁気飽和コイル 検出コイル	現象皮膜 指示皮膜 きず
物理現象	電磁波	弾性波	磁気吸引	電磁気	電磁誘導	浸透(毛細管現象)
探傷上の留意点	・写真濃度 ・コントラスト ・X線装置の焦点寸法 ・線源と被写体、フィルムとの距離 ・透過性	・波動(縦波、横波、表面波、板波) ・波長 ・指向性(探触子の音場) ・減衰 ・垂直、斜角探傷 ・直接接触、局部水浸	・磁粉の選択 ・磁粉液濃度 ・磁粉の散布 ・磁化方法 ・磁粉模様の観察	・磁化方法(交流、直流他) ・コイル寸法 ・励磁周波数 ・リフトオフ ・雑音	・貫通、プローブ、内挿方式 ・自己比較、相互比較 ・コイル寸法 ・励磁周波数 ・リフトオフ ・雑音	・被検査材の表面状況 ・浸透、洗浄、現像作業 ・指示模様の観察
探傷可能な材料	金属・非金属材料	金属・非金属材料	強磁性体	強磁性体	導電材料	金属・非金属材料
検出可能なきず	表面・内部	表面・内部	表面・表面直下	表面・表面直下	表面・表面直下	表面(開口傷)

ので、これらが鉄鋼工程に適用される大部分である。

放射線は鉄鋼に対する透過力の制約から小容量を対象とした分析目的の利用が主であり、板厚計など一部を除き鉄鋼プロセスに直接適用されるものは少ない。対して、超音波と電磁気探傷技術は、安全性、適用容易性から鉄鋼プロセスに広く適用されている。

3 超音波探傷技術

超音波探傷法 (UT : Ultrasonic Testing) は、鉄鋼内部に数 kHz~MHz の高い周波数の弾性波 (超音波) を入射し、欠陥等音響的に不連続な部分で弾性波が反射するのを検知することで欠陥検出を行う技術であり、手軽で安全なことから鉄鋼プロセスにおいても古くから活用されている⁵⁻⁶⁾。図1にその原理図を示しており、超音波を送受信するプローブを被検査材の表面上を走査して検査する。平板の場合、表面と底面からのエコーの間に欠陥からのエコーが観測されるとその強度から欠陥の大きさ、そのピーク時間から欠陥の深さが観測できる。

超音波の周波数が高いほど、波長が短くビームの広がりも小さく超音波が集中するので、小さい欠陥を探傷するのに有効である一方、材料中での減衰が大きくなるため、深い欠陥の探傷には不適となる。さらに、一般に高周波数ほどプローブは小さくビームも絞られるので、超音波の伝播方向に対し欠陥反射面が垂直に当たらない場合は、反射した超音波が探触子に戻らず、検出しにくくなるといった特性がある。超音波入射面と想定される欠陥面が平行でない場合、台形くさび

を用いて斜め方向に超音波を入射させる斜角探傷法も活用される。このように、超音波探傷では、周波数や入射角、送信、受信プローブの配置など、目的、対象に応じて適切に検査方法を選択する必要がある。

従来は、1つまたは2つの振動子からなる探触子を機械的に走査しながら検査する手法が一般的であったが、最近では1次元または2次元のアレイ状に配列した複数の振動子を任意の遅延時間で複数励起し、所望の超音波ビーム形状を合成構成して探傷するフェーズドアレイ探傷法や、レーザや電磁力によって非接触で超音波を励起する非接触超音波法も実用化が進んでいる。

4 フェーズドアレイ超音波探傷技術

フェーズドアレイ探傷法は、従来コスト的なハードルが高かったが、最近は広く普及しはじめ、鉄鋼プロセスでも実用化されている。図2⁷⁾に示した様に、従来の探傷子を機械的に走査して超音波ビームを被検査部に入射する代わりに、複数

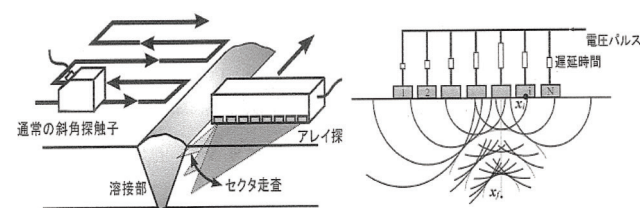


図2 フェーズドアレイ探傷法の原理図⁷⁾

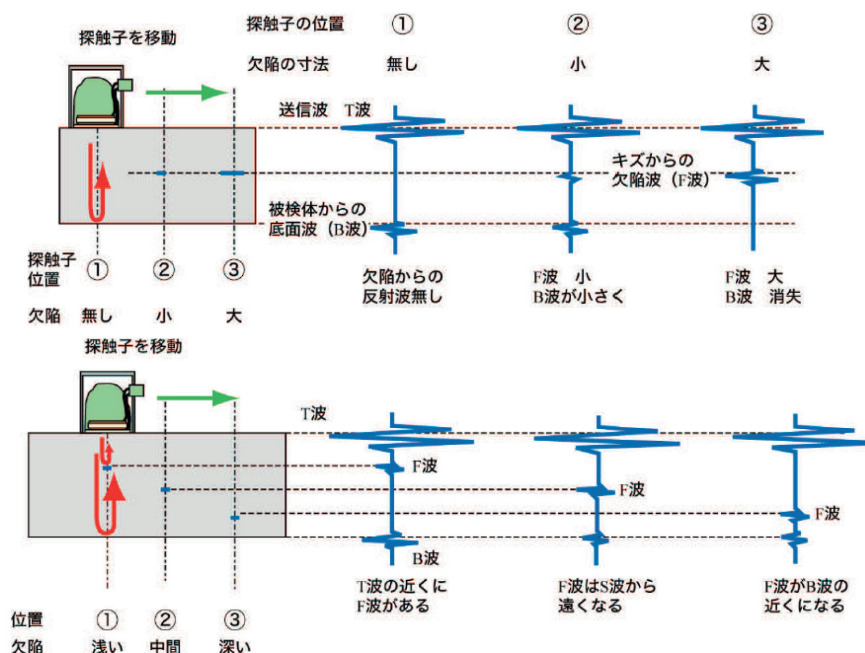


図1 超音波探傷法の原理図

の振動子群からなるアレイ探触子を適切な位相差で同時励起し、波形合成することで所望の方向や所望の位置に超音波ビームを電子的走査できる。代表的な電子走査は、同一の遅延時間セットで素子群を切り替えてビームを移動するリニアスキャンと素子群は固定だが遅延時間セットを変化させて超音波ビームを扇状に走査するセクタスキャンがある。

図2は1次元アレイの振動子によるセクタスキャンの例であり、鋼板の深さ方向には電子走査を行い、溶接線に沿った方向には機械走査を行うことになる。

このようにフェーズドアレイは、従来の機械走査をソフトウェアで簡単に変更可能な電子走査に置き換えることができるので、複雑形状やいろいろなサイズの被検査材が混在する製造ラインへの適用が進んでいる⁸⁾。鋼管(UOE管や電縫管)の溶接部の高精度全域探傷や、複雑な断面形状を持ったレールへの適用が報告されている。丸棒鋼などの曲率面からの探傷は、円弧状に配列された複数のリニアアレイを周囲に配置し、機械走査を全く排除した探傷システムが実用化されている。さらに中間製品である銅片探傷にもフェーズドアレイ探傷システムが実用化されているとの報告がある。

一方でコスト以外にも、探触子とケーブルが一体となって交換が難しいことや、プローブサイズが大きく被検査面への倣いがやや困難になるなど、より広く活用されるには実用面において障害となりえる課題もあり、さらなる発展が望まれる。

1次元アレイを用いたリニアスキャンやセクタスキャンなど従来の基本的な探傷から発展し、開口合成法などのいろいろな信号処理と組み合わせた高精度探傷法も実用化されている⁹⁻¹⁰⁾。

全振動子を1つずつ励起し、全振動子の受信波形をすべて記録し、同じく計算機上で全領域に焦点をあわせる開口合成処理を行って探傷するフルマトリックスアレイ探傷「Full Matrix Capture/Total Focusing Method」が開発され、探傷機として商品化されている。これらは、コンポジット振動子などのアレイプローブの高精度製造技術の向上とともに、GPGPU (General Purpose Graphics Processing Unit) などの非常に強力な並列処理高速計算機が手軽に活用できるようになったからこそリアルタイム処理が実現できたものである。一例を図3に示す。従来のセクタスキャンはb)に示すようにビームの広がりゆえに丸穴からのエコーも広がって被検体の断面像(Bスコープ)に観測される。複数の欠陥が近接して存在する場合、各欠陥を分解することが出来ず、欠陥サイズ評価が困難であった。取得した各素子の受信信号に対し、開口合成処理(SAFT)を行うことで、全断面領域に焦点を合わせた画像(同図c)が得られ、さらに線型化逆散乱法という処理により、欠陥からのエコーを圧縮する(同図d)ことで、さらに評価しやすい画像が得られる。

これまでのフェーズドアレイ探傷機は、合成できる素子数

はハードウェアの制約で決定されていたが、本手法はソフト上での仮想的な合成であり、所望のより広い開口巾を実現でき超音波ビームのシャープさを任意に制御できる特長がある。ただし、Full Matrix Capture法では、最低でもアレイ素子数分の送信を同一場所で繰り返す(受信は並列にできる)必要があり、どうしても時間がかかってしまうという課題がある。このような制約はあるものの、直近ではリアルタイム探傷機として商品化・実用化されつつある。繰り返し周波数の高速化による多素子化、検出欠陥の定量化方法など、今後の発展が期待される。

5 非接触超音波技術

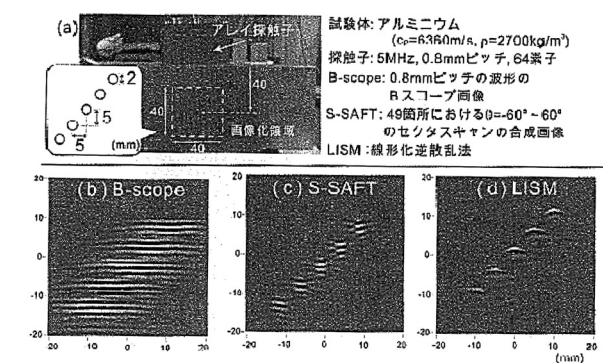
通常の超音波探傷では、振動子からの音波振動を、水や油、グリセリンなどの接触媒質を介して鉄鋼材料に送受信する必要がある。従って、高温物体や高速に圧延されている物体に対しての超音波検査は困難であり、非接触での超音波探傷技術が望まれている。

非接触(非媒質)超音波法として、レーザ超音波法、電磁超音波法、空気超音波法などがあるが、鉄鋼材を対象とした場合には、レーザ超音波法と電磁超音波法が適用されることが多い。

5.1 レーザ超音波法

図4に示すように被検査材にパルスレーザを照射し、レーザエネルギーによる瞬間的なアブレーション(プラズマ化)または、熱膨張(熱弾性)による反力として超音波を発生させ、別の高分解能レーザ変位計にて、被検査材表面の超音波振動を検出して、非接触で超音波送受信を実現する技術である。探傷装置と被検査材との距離を大きくできる特長がある。

このレーザ超音波を用いて厚肉多パス溶接のインプロセス探傷が実用化されている¹¹⁻¹²⁾。大パワーレーザを用いたアブ



(a) 欠陥を有するアルミニウム試験片と (b) Bスコープ、(c) S-SAFT、及び (d) 線型化逆散乱法による画像

図3 Full Matrix Capture/Total Focusing Methodの適用例⁷⁾

レーションモードでのレーザ超音波法では、信号強度は高くなるもののレーザ照射点に微小なクレタ状の跡が残るため表面品質が問題になるような対象には適用しにくい。従い、跡が残らない熱弾性でのレーザ超音波による高精度探傷技術の開発が望まれている。

薄板を対象に、平均粒径、ポアソン比、変態率、応力などのオンライン材質計測を目的にレーザ超音波法を適用した一連の報告¹³⁾もなされている。材質異方性による音速等の超音波特性を測定するために、ライン状に広げたレーザ照射で平面波発生を行うなどの様々な工夫がなされている。

5.2 電磁超音波法

電磁超音波法 (EMAT: Electromagnetic Acoustic Transducer) は、図5に示すように被検査材にバイアス直流磁場を付与しながら、近接したコイルに流す交流電流による電磁誘導によって被検査材内に交流電流を発生させ、ローレンツ力または、磁性体の場合には磁歪力によって被検査材内に超音波振動を直接発生させる。検出は、同じコイルで欠陥からのエコー振動を全く逆の過程で電圧として検出する。非接触探傷法に分類されるものの、リフトオフが大きくなるにつれて感度が極端に低くなることから許容されるリフトオフは数mm以下と非常に小さい。通常探傷の様な接触媒質が不要であり、被検査材内に直接振動を発生させることから、所望の超音波振動モードを選択的に発生できる特長を持つ。

電磁超音波の特長として、目的に応じて縦波や横波、表面

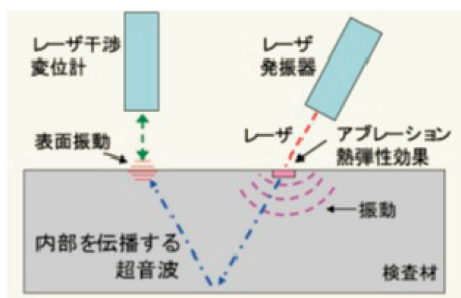


図4 非接触超音波法（レーザ超音波）の原理図

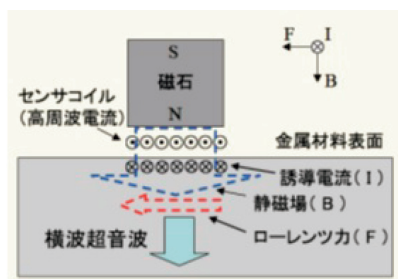


図5 非接触超音波法（電磁超音波）の原理図

波など様々なモードの超音波を直接被検査材に発生させることができるが、発生効率の高いローレンツ型の横波垂直探傷の適用例が多い。また、リフトオフがわずかしかとれず、距離変動による感度変化が非常に大きいので、センサは被検査材にほぼ密着させる必要がある。実用化されている熱間探傷装置では冷却とギャップ安定確保のために、センサと鋼材の間にエアを噴射するエアークッション方式でのリフトオフ安定化機構を採用しており、試験的には1000℃近傍の鋼材への適用も行っているとのことで今後の発展が期待される。

6 電磁気探傷技術

渦電流探傷¹⁴⁾ (ECT: Eddy Current Testing) や漏洩磁束探傷¹⁵⁾ (MLFT: Magnetic Leakage Flux Testing) などの電磁気探傷は比較的簡易な装置構成で手軽に使用できることから古くから実用化されている¹⁶⁾。渦流探傷は、図6に示すように導電性被検査体に近接して交流磁場を発生させるコイルを配置して、被検査体渦電流を発生させ、欠陥の存在による渦電流の乱れを渦電流による発生磁場の誘導電圧変化として検知する技術である。一方、漏洩磁束探傷は図7に示すように、被検査体の欠陥による漏れ磁場を磁気センサで検知する技術である。どちらも等価的には欠陥部の磁気ダイポールを検知するものであり、距離の3乗に反比例して検出信号が減衰するので探傷器を近接させる必要がある。鋼板では圧延ロール直上、線材では伸線ダイス出側など極力距離変動の少ない場所での探傷が行われている。

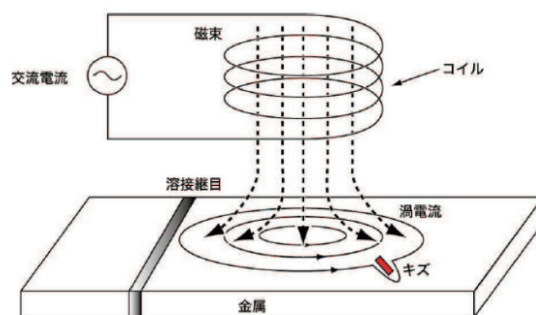


図6 渦電流探傷の原理図

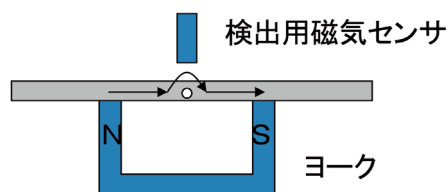


図7 薄板の漏洩磁束探傷の原理図

探傷ニーズの高度化に伴い、より小さな欠陥をも検出しようとする試みがなされている。そのために、高感度化の障害となるノイズ要因の究明と対策法の開発が継続的になされている。

電磁気探傷において小さな欠陥まで検出しようと高感度化すると検出対象以外の要因によるノイズによる誤過検出が多くなり、探傷不能となる。ノイズ要因としては、以下のようなものがある。

- A：センサ、回路、配線などに誘起する電気ノイズ
- B：リフトオフ変動に伴うノイズ（通称、ガタノイズ）
- C：被検査材の透磁率、導電率ムラによるノイズ（通称 μ 、 σ ノイズ）

ノイズ源A,Bに関しては、純粋にエンジニアリング技術で解決するとともに、ノイズと欠陥信号の周波数領域や送信信号との時間的な同期状態の差に注目して、ハードやソフトによるフィルタリング、平均化などの信号処理技術が適用され高精度化が図られる。ノイズ源Cに関しては、磁気飽和法など対象ごとに対策を施す必要がある。熱延鋼板スケールムラによる電磁気ノイズ低減法の報告もある¹⁷⁻¹⁸⁾。

7 おわりに

素材に対する品質要求の高まりから検査に対するニーズは高まる一方である。検査による素材の品質保証そのものが付加価値ともなり得るためである。素材系内部品質保証の観点からは、より小さい欠陥検出も大切であるが、大きな欠陥であっても密着され、スケールに埋もれた欠陥、表層近傍に埋もれた欠陥など、従来の非破壊探傷法では検出しにくい欠陥の高精度探傷法の開発も望まれている。

今後とも、鉄鋼製造現場で使い続けられる検査技術、装置としては、探傷性能はもとより、安定性、対環境性、メンテナンス性、操業性（段取替）に優れたものでなければならない。

当然ながら検査にはコストが発生し、素材系製造現場に許される検査コストは大きくない。そのなかで検査結果の生産工程へのフィードバックも含めた有効活用など、最大付加価値を生む検査のあり方を追求していく必要がある。

このように検査ニーズは限りなく、今後とも非破壊検査技術は周辺技術の進歩にも助けられながら継続的に発展していくものと思われる。

参考文献

- 1) 山口久雄：第140回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会，東京，(1988)，1.
- 2) 松實敏幸：鉄と鋼，79 (1993) 7，823.
- 3) 窪田淳之：第193回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会，東京，(2007)，37.
- 4) 飯塚幸理：第201・202回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会，東京，(2010)，159.
- 5) 日本非破壊検査協会：非破壊検査技術シリーズ 超音波探傷試験Ⅱ，(2000)
- 6) 日本鉄鋼協会品質管理部会：鋼板の超音波探傷法 改訂新版，(1999)
- 7) 廣瀬壮一：ふえらむ，18 (2013) 11，614.
- 8) 飯塚幸理，松井穰：非破壊検査，62 (2013) 2，84.
- 9) 中畑和之，堀口貴志：日本機械学会論文集，81 (2015) 832，1.
- 10) 横濱慎也：検査技術，2015.11，(2015)，52.
- 11) 山本撰，三浦崇広，星岳志，落合誠，小川剛史，藤田善宏，平野正三，浅井知：日本非破壊検査協会平成22年春季講演大会講演概要集，(2010)，63.
- 12) 星岳志，山本撰，千星淳，落合誠：非破壊検査，61 (2012) 10，531.
- 13) 永田泰昭，山田裕久，橋口昇平：非破壊検査，63 (2014) 4，182.
- 14) 日本非破壊検査協会：非破壊検査技術シリーズ 渦流探傷試験Ⅱ，(1989)
- 15) 日本鉄鋼協会品質管理部会：鉄鋼製品の漏洩磁束探傷法 改訂新版，(2001)
- 16) 坂本隆秀：非破壊検査，43 (1994) 8，503.
- 17) 四辻淳一，長棟章夫，加藤宏晴：非破壊検査，63 (2014) 1，37.
- 18) 四辻淳一，腰原敬弘，長棟章夫：日本非破壊検査協会平成24年春季講演大会講演概要集，(2012)，67.

(2018年1月29日受付)