

電磁超音波計測装置“MAGCAST”とその応用

Electromagnetic Acoustic Transducer “MAGCAST”

非接触超音波計測は、超音波に携わる関係者にとっては長年の夢であり、単に液状接触媒質の取扱いがなくなったという使用上の簡便さにとどまらず、超高温下での探傷や肉厚測定、コーティングされた面からの計測、高速搬送下での計測などが期待されるため、従来予想もされなかった応用分野への開発が研究されてきている。ここでは最近クローズアップされている電磁超音波の各種応用ニーズ、中でも肉厚計測のニーズにこたえて開発したMAGCASTの原理、特徴及び実例について紹介する。

山口久雄* Hisao Yamaguchi

伊東 将** Susumu Itô

石川博章*** Hiroaki Ishikawa

佐藤式也**** Ichiya Satô

1 緒 言

渦電流と磁界の相互作用による電磁力を応用した電磁超音波法は、圧電素子を利用した従来法と比較して、(1)電磁的に超音波の送・受信を行なうため、水、油などのカップラント(接触媒質)が不要である。(2)被検査材表面のスケール、凹凸の除去が不要で、塗装面からの計測が可能である。(3)被検査材表面の磁界の強さが所定の値を確保できれば、熱間での計測が可能である、などの特長をもっている。これらの特長を生かし、主として鉄鋼業の上位熱間工程での内質検査、厚み計測の合理化検討が進められ、連続铸造から直接圧延へのいわゆるOne Heat化へ向けての不可欠なFA(ファクトリーオートメーション)用機器として、その実用化が期待されている。一方、小形・軽量化を図った汎用厚み計として、非接触計測の特長を生かし、石油タンクなどの底板を塗膜の上から減肉計測したり、各種配管類、ガス管、通信用ケーブル管路の減肉状態を調査するなど、NDI(Non Destructive Inspec-

tion)の分野及び予防・予知保全の分野への適用が大きくクローズアップされてきている。以下、電磁超音波法を用いた計測センサMAGCAST (Magnetic Coupling Acoustic Transducer: 日立製作所の登録商標)の原理と特徴、開発の動向及び応用例について述べる。

2 電磁超音波法の原理と特徴

2.1 電磁超音波法の原理¹⁾

電磁超音波法は、金属材料表面に置かれた渦電流発生用のコイルと、磁界発生用の電磁石の組合せにより電磁力を応用して超音波を送受信するものである。図1に示すように、被検査材(導電性材料)に磁界 B が与えられた状態で受信を兼ねた送受信コイルにパルス電流 I_t を印加すると、被検査材表面に渦電流 I_{et} が誘起され、「フレミングの左手の法則」に基づく力(ローレンツ力) F が被検査材に働き、機械的変位(超音波)

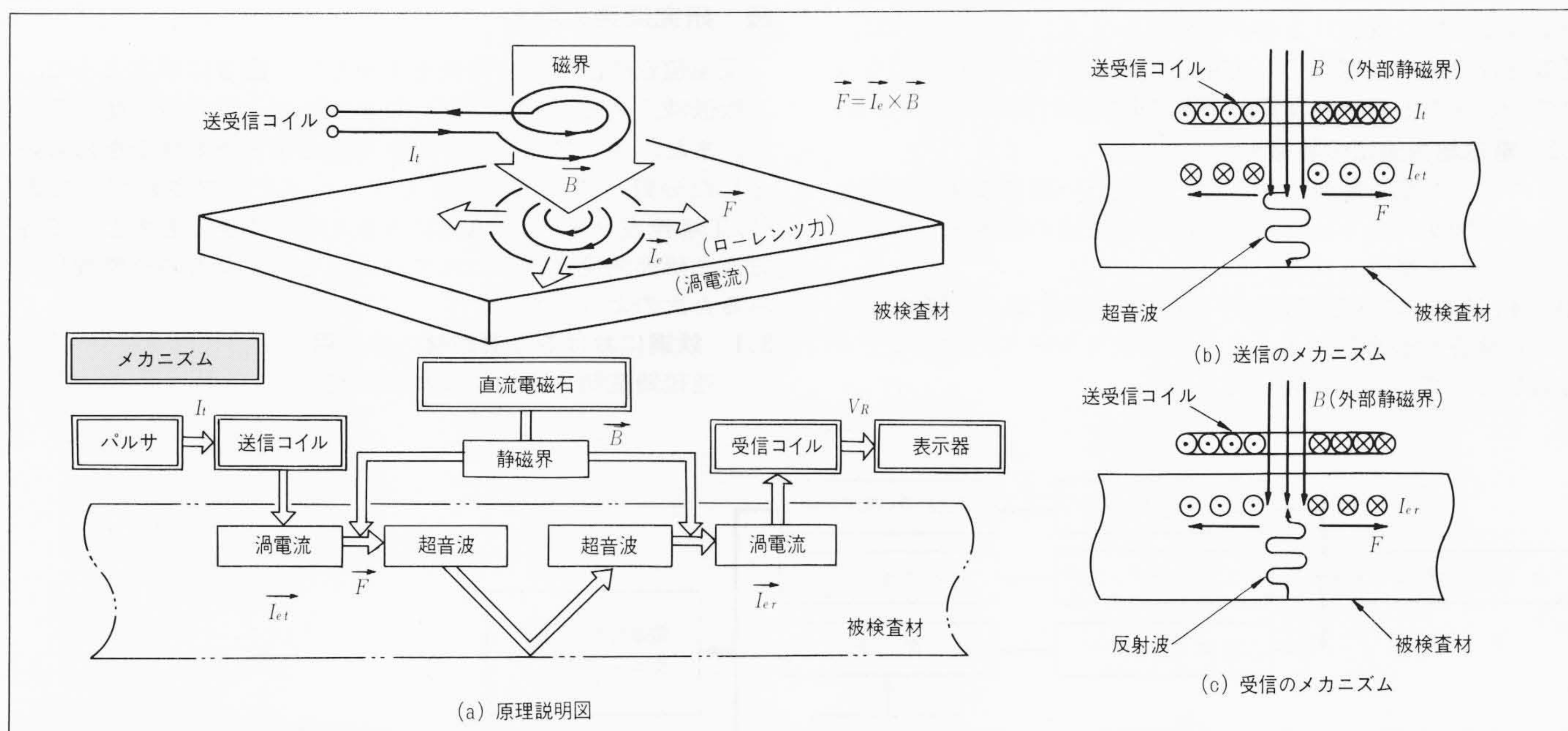


図1 電磁超音波の送受信原理 被検査材が導電材の場合、渦電流と磁界の相互作用による電磁力により、非接触で超音波の発生、検出を行なうことができる。

* 住友金属工業株式会社制御技術センタ

** 日立製作所国分工場

*** 日立製作所システム事業部 工学博士

**** 日立製作所日立研究所

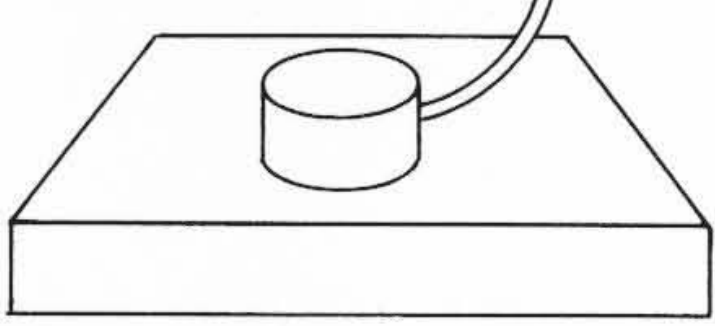
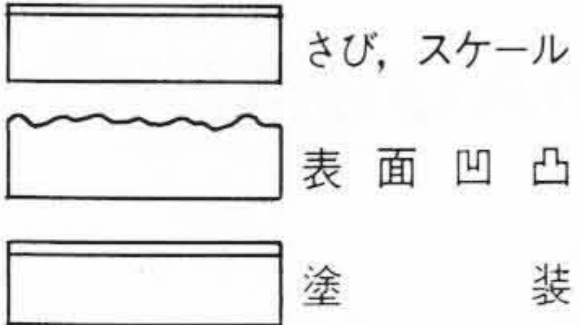
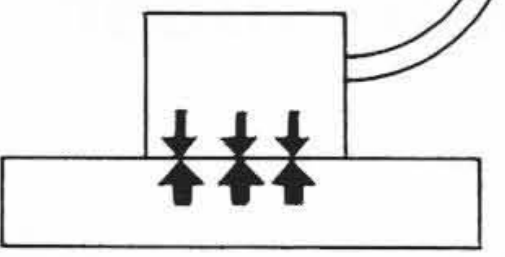
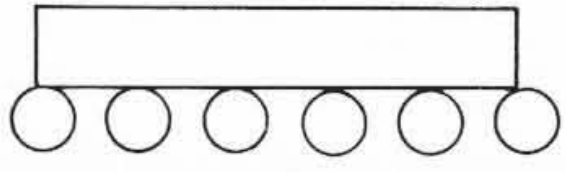
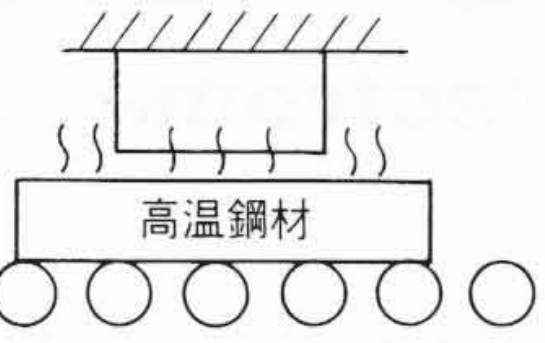
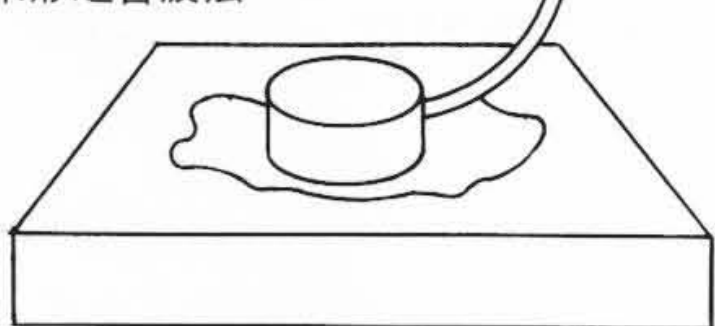
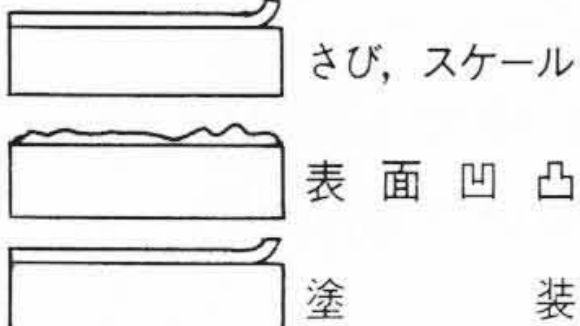
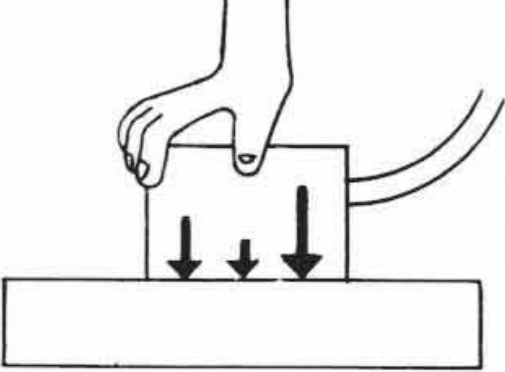
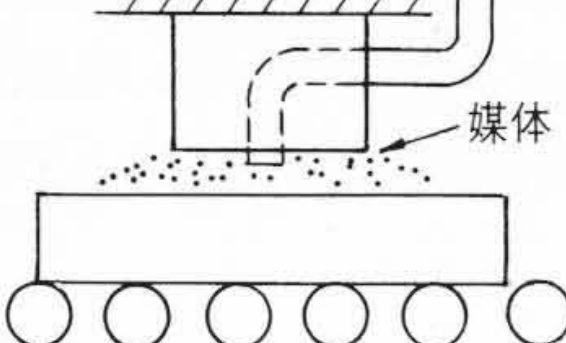
電磁超音波法  乾式計測 接触媒質不要	 さび, スケール 表面凹凸 塗装 そのままの状態で計測可能	 電磁力により 接合圧力は安定	移動体のオンライン計測の場合  触れずに計測可能 省エネルギー化が図れる。	 高温鋼材 探触子の冷却で 高温材も計測可能
従来形超音波法  湿式計測 水, 油などの接触媒質必要	 さび, スケール 表面凹凸 塗装 表面の凹凸除去及び磨きが必要	 手作業により 接合圧力は不安定	移動体のオンライン計測の場合  媒体 水などの媒体消費	 高温鋼材 高温材は計測不可

図2 電磁超音波法と従来形超音波法の比較 カップリング材(接触媒質)が不要な電磁超音波法は、従来不可能とされてきた超音波計測を可能とする。

が発生する。この超音波は材料中を伝搬し、欠陥あるいは裏面で反射し、再び表面に戻ってくる。超音波が表面に戻ってくると、磁界中で被検査材が機械的変位をすることになり、「フレミングの右手の法則」に基づく起電力により再び渦電流 I_e が発生する。渦電流による磁界変化を送受信コイルで電圧信号 V_R として受信する。

受信電圧 V_R は、詳細な誘導式は省略するが、

$$V_R \propto \frac{B^2 \cdot G^2}{Z} \cdot I_t$$

ここで B : 磁束密度
 G : 送受信コイルと被検材による形状係数
 Z : 音響インピーダンス
 I_t : 送信パルス電流

で表わされる。上式から、受信感度を大きく左右するものとして直流の磁束密度があり、常伝導領域では被検査材を磁氣的な飽和領域に近づけるのが得策といえる。以上のように、電磁超音波法では電磁力を応用して超音波の送受信を行なうので、水・油などの接触媒質が不要で非接触計測が可能になる。

2.2 電磁超音波法の特徴¹⁾

このような電磁超音波法と従来の電わい超音波法を比較してみると図2のようになる。電磁超音波法の長所として次のようなものが挙げられる。

- (1) 水、油などの接触媒質が不要で、非接触計測が可能である。
- (2) 被検査材が高温でも、また表面にスケール、塗膜などが付着していても計測が可能である。

- (3) 渦電流及び磁界の方向を組み合わせることにより、電わい超音波法では困難な各種モードの超音波が送受信できる。
- (4) 電わい超音波法で問題となる探触子接触圧変化による感度のばらつきがない。また、短所としては次のようなものが挙げられる。
 - (a) 非金属(非導電性材料)には渦電流が発生しないので適用できない。
 - (b) 電わい超音波法に比較し、現時点では40dB以上も感度が低い。
 - (c) 探触子が比較的大形となってしまう。

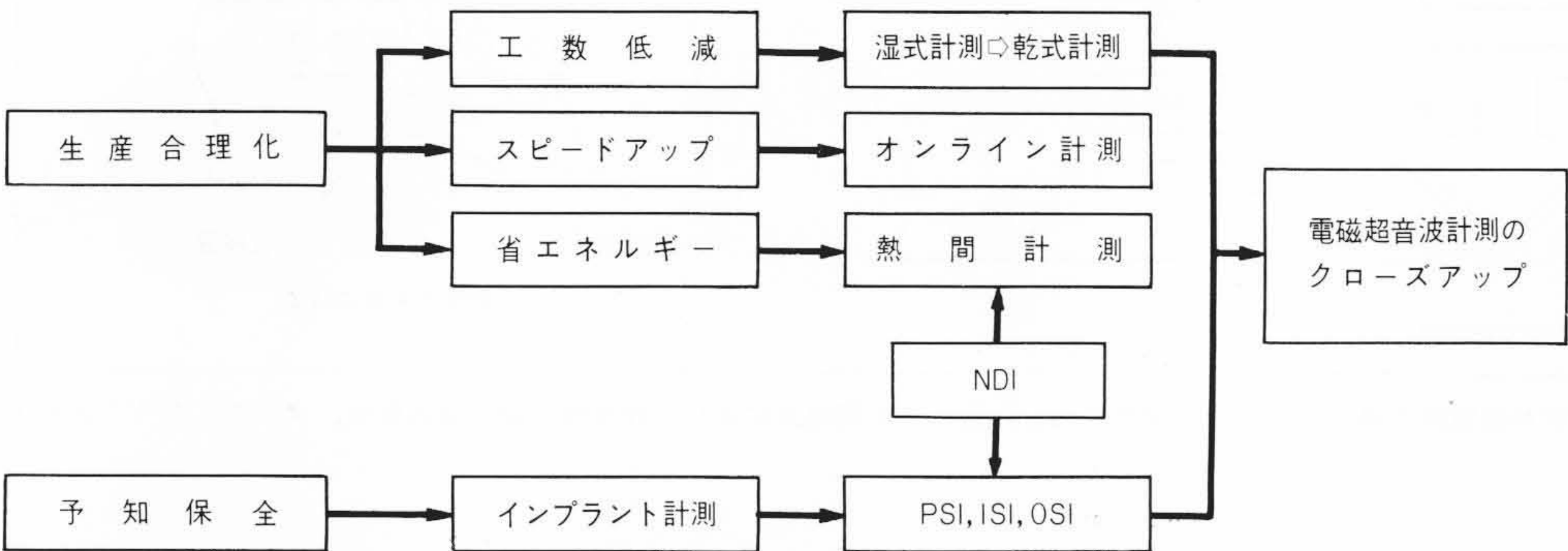
電磁超音波法を利用した計測は、その様式、及び適用可能な方式が多くあり、そのすべてに万能な方式はなく、用途ごとに上記のような特徴を考慮して最適な方式を決める必要がある。

3 研究開発の動向

電磁超音波法はその特長を生かして、図3に示すように、工数低減、スピードアップ、省エネルギーによる生産合理化を、また、インプラント計測を可能とする予知保全をねらいとした分野への適用が大きくクローズアップされてきており、工場検査ラインのFA化に大きく寄与できるものとして各方面で研究開発が行なわれている。その主なものを整理してみると次のようになる。

3.1 鉄鋼における高温鋼材への応用

- (1) 連続铸造 铸片凝固シェル厚測定²⁾



注：略語説明
NDI(Non Destructive Inspection)
PSI(Pre-Service Inspection)
ISI(In-Service Inspection)
OSI(On Stream Inspection)

図3 電磁超音波法のクローズアップ 電磁超音波法は、工場の計測・検査プロセスのFA化に大きく寄与できるものとして、各方面でクローズアップされてきている。

(2) 熱間鋼片の探傷、内質検査^{3),4)}

(3) 継目なし鋼管の熱間肉厚計測⁵⁾

3.2 タンク、配管及び塔槽類への応用

(1) 石油タンク、配管類の肉厚計測^{6),7)}

(2) 板波を用いたボイラ鋼管の探傷

(3) 通信ケーブル管路の減肉計測

3.3 その他電磁超音波の強みを生かした応用

(1) 電縫鋼管のシーム部検出

(2) 金属材料の物理定数、組織測定

以上、鉄鋼での高温鋼材、石油タンク、配管系統の肉厚測定など常温付近の鋼材でもさびや汚れにより表面状況が悪い場合などでは電磁超音波を使用すれば可能となる。微少な欠陥を検出するにはまだ感度不足の面もあるが、接触媒質が不要であるメリットを生かせる場所も多く、そのための研究が熱心に行なわれている。図4に最近手掛けているMAGCASTの応用分野を整理したものを示す。この中から主なものを以下に詳述する。

4 鉄鋼における高温鋼材への電磁超音波計測の応用例 (鉄鋼プロセスの計測合理化)

4.1 連続鋳造プロセスにおける凝固状況測定装置²⁾

鉄鋼業では、溶鋼を凝固させるプロセスは、現在ではほとんどが連続的に凝固させ、長大な鋼スラブを作る連続鋳造プロセスに置き代わっている。このような連続鋳造の作業中で、鋳片の凝固状態を把握することは、適切・効果的な連続鋳造の制御に必要な度が高い。電磁超音波透過法による測定方法が開発され、一部実用化されている。

4.2 熱間鋼片(スラブ、ブルーム、ビレット)のオンライン内質検査装置^{3),4)}

鉄鋼業では、省エネルギー、プロセスの効率化を目的とし

て、連続鋳造熱片を冷却することなく次工程の圧延機に直接装入する、いわゆる製鋼-圧延直結化プロセス(One Heat化)が盛んに検討され、一部実施に移されつつある。このOne Heat Processを実現するためには、熱間鋼片の内質検査技術が不可欠であり、これにこたえるものとして図5に示すような貫通形電磁石を用いた熱間鋼片内質検査装置のプロト機を開発した。同図に示したピーク信号差動検出法は、2系統の送受信系を構成して、従来の差動検出法の欠点であった振幅と位相の両成分について平衡を取らねばならない点を改善したもので、特に厚物高温材の場合は、温度変化やその分布による位相差の影響を受けやすいので有効な手法となる。図6はスラブ、ビレットの熱間での人工欠陥を用いた内質検査の計測例である。

4.3 シームレスパイプの熱間肉厚計測装置⁵⁾

継目なし鋼管はケーシング、ドリルパイプ、チュービングなどの油井管、ボイラチューブ、特殊ラインパイプ、機械構造用鋼管などに数多く用いられている。しかし、近年これら鋼管の使用環境はますます厳しいものとなり、高付加価値化あるいは寸法の高精度化が要求されている。シームレス鋼管は、その製法上ややもすると肉厚が不均一になるおそれがあるため、これを圧延中又は直後に測定し圧延制御をしたり、品質管理を行なうことが重要である。寸法精度の改善として、従来は冷間抜き取りで水浸法の超音波パルス反射方式による間接的手法を用いていたが、このたびストレッチレデュースミル用の電磁超音波によるオンライン(熱間)肉厚測定システムを開発した。本方式は貫通形電磁石を用い、電磁石による静磁界と高周波プローブコイルの作る鋼管表面の渦電流の相互作用により、非接触で超音波を送受信し、超音波パルスの管壁面でのエコー反射時間を計測するもので、円周方向6ch、軸方向4msごとに肉厚を±0.1mmの高精度で精密計測

	常 温	300~500℃	約1,000℃
	タンク減肉計測	OSI減肉計測	シームレスパイプ熱間肉厚計測
肉厚・減肉計測	プリンタ 制御装置 スキャナ装置 走行台車 探触子	OSI: 石油, 化学の稼働中の定点測定 デジタル表示 探触子 保温材 高温配管 (測定対象物)	送マ 受ル 信チ マイクロコンピュータ 肉厚計算 精度 1%(0.1mm) 画像処理
欠陥・接合計測	保持装置 探触子 シーム ターニングローラ シーム部の組織変化をキャッチ	検出ヘッド 溶接	探触子 スラブ 直流マグネット

図4 電磁超音波計測装置MAGCASTの応用分野
にその用途拡大が期待されている。

電磁超音波は鉄鋼での高温鋼材からタンク、配管類など幅広い応用が考えられ、今後の技術改善とともに

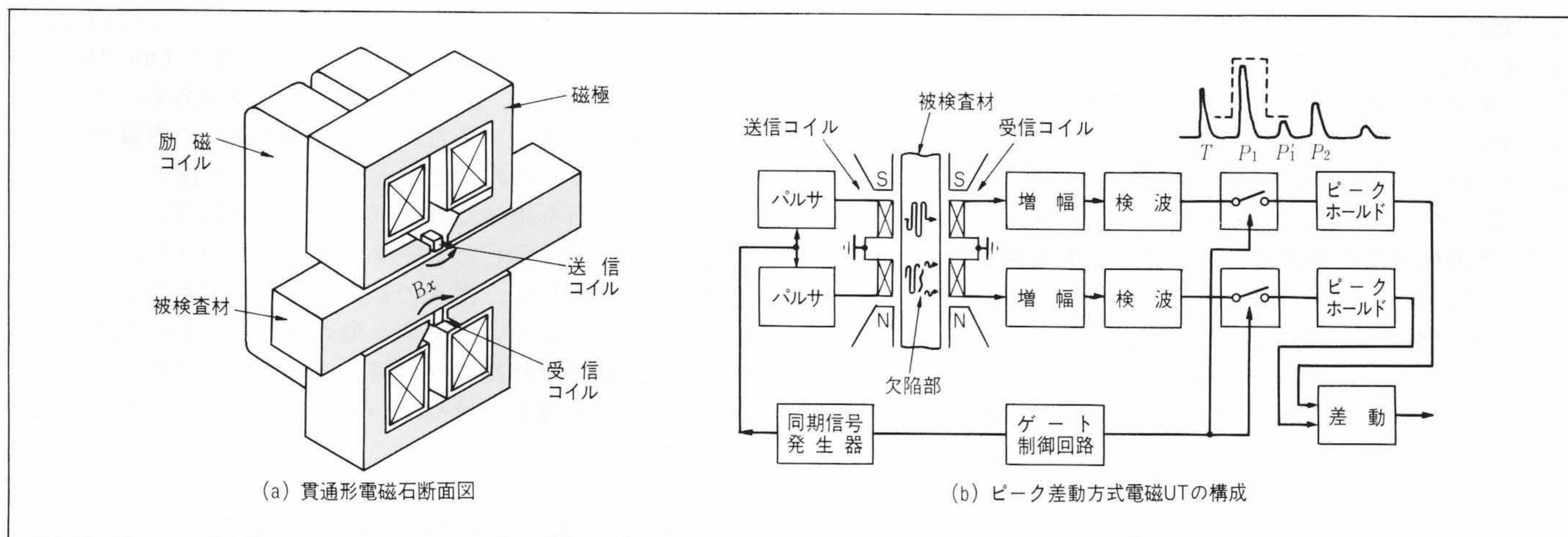


図5 貫通形電磁石式鋼片内質検査装置 被検査材が電磁石を貫通する貫通形電磁石により高い磁場が発生でき、2系統の送受信系によるピーク差動検出法で熱間鋼片の欠陥や介在物の内質検査が可能となる。

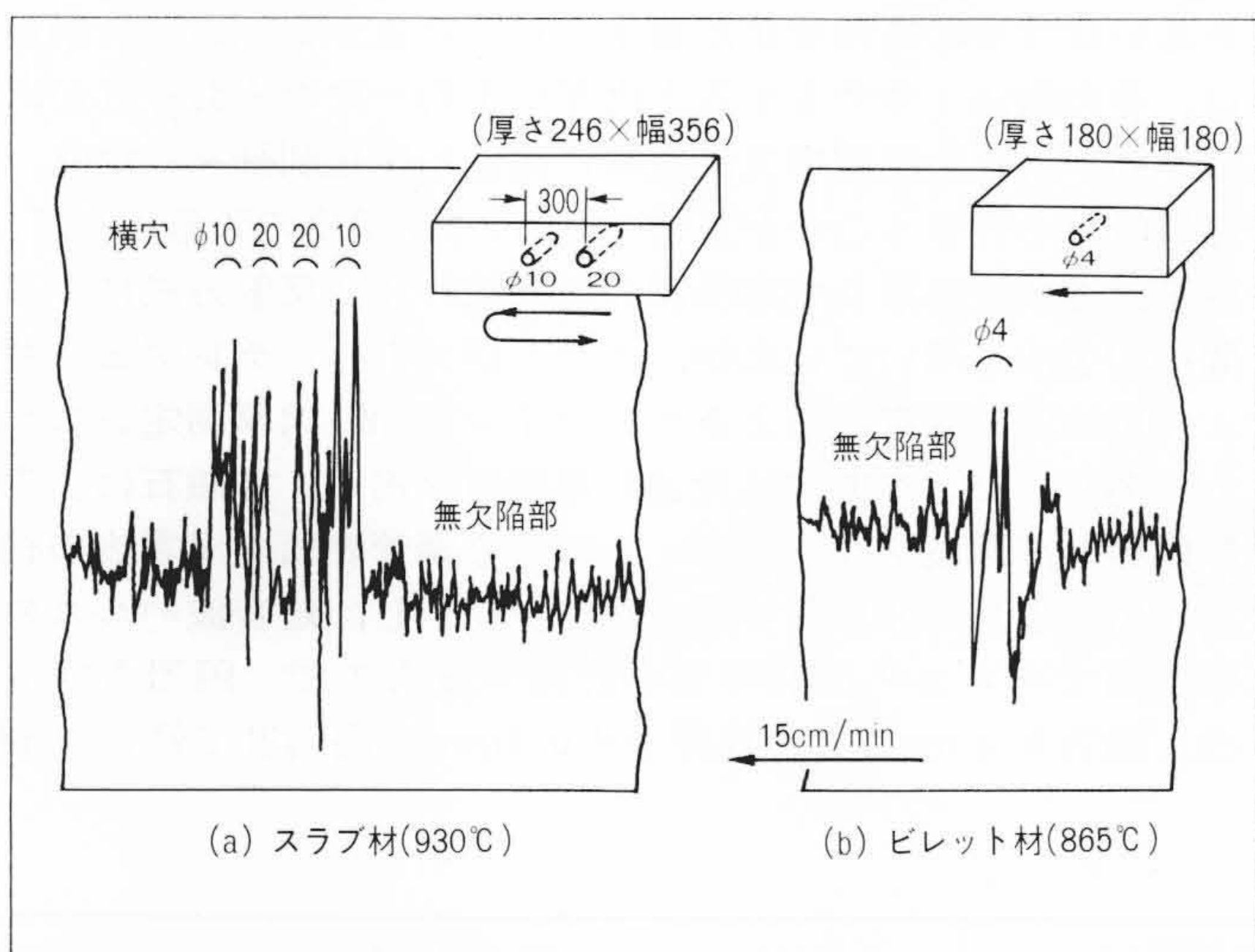


図6 熱間鋼片の熱間探傷実験結果例 800°C以上の高温で鋼片の内部欠陥を明確に識別できる。

できるものである。図7はシステム構成図で、貫通形電磁石及びプローブ(送受信コイル)、電磁石を励磁するための電源、送受信コイルを励磁するパルス、送受信コイルからの微弱信号を増幅するアンプ、パイプの温度を検出する温度計及び肉厚の計算をする信号処理部から成り、得られた肉厚計測値のデータ処理を行なうマイクロコンピュータを介し圧延機のフィードフォワード、フィードバック制御を行なう上位プロセスコンピュータにリンクされる。

図8に貫通形電磁石式シームレスパイプ肉厚計測装置の外観と、これを用いてストレッチレデュサミルラインで肉厚を計測した例を示す。本図中の実線はオンラインでの肉厚計測結果を示し、白丸印は、製管後オンライン測定点と同一円周位置を超音波厚さ計によって計測した冷間肉厚値を示す。データは250Hzの高速で取り込み、表面温度計測値によって補正した音速値を用いて、肉厚が算出されている。この例で示すように、熱間と冷間の肉厚計測値はよく一致しており、ストレッチレデュサで発生する管端部の増肉現象、あるいは

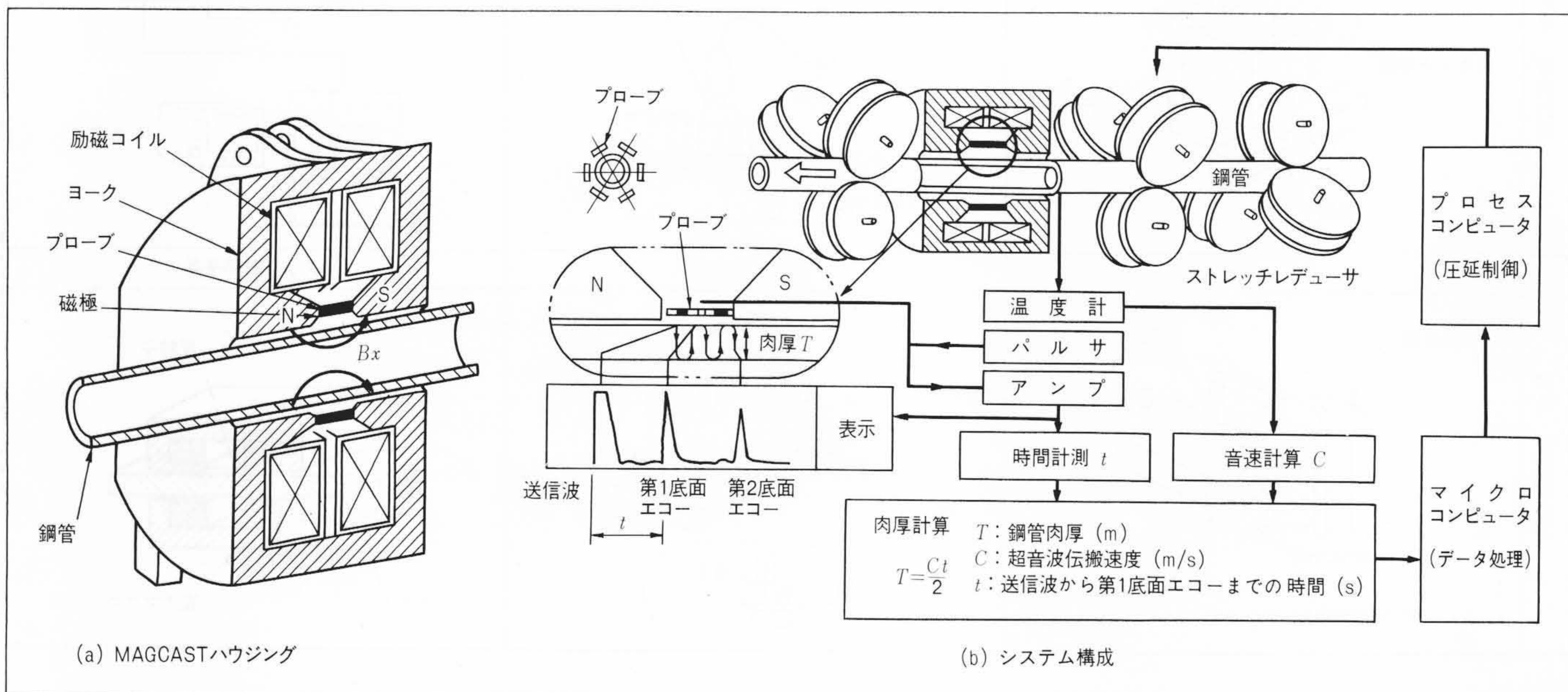
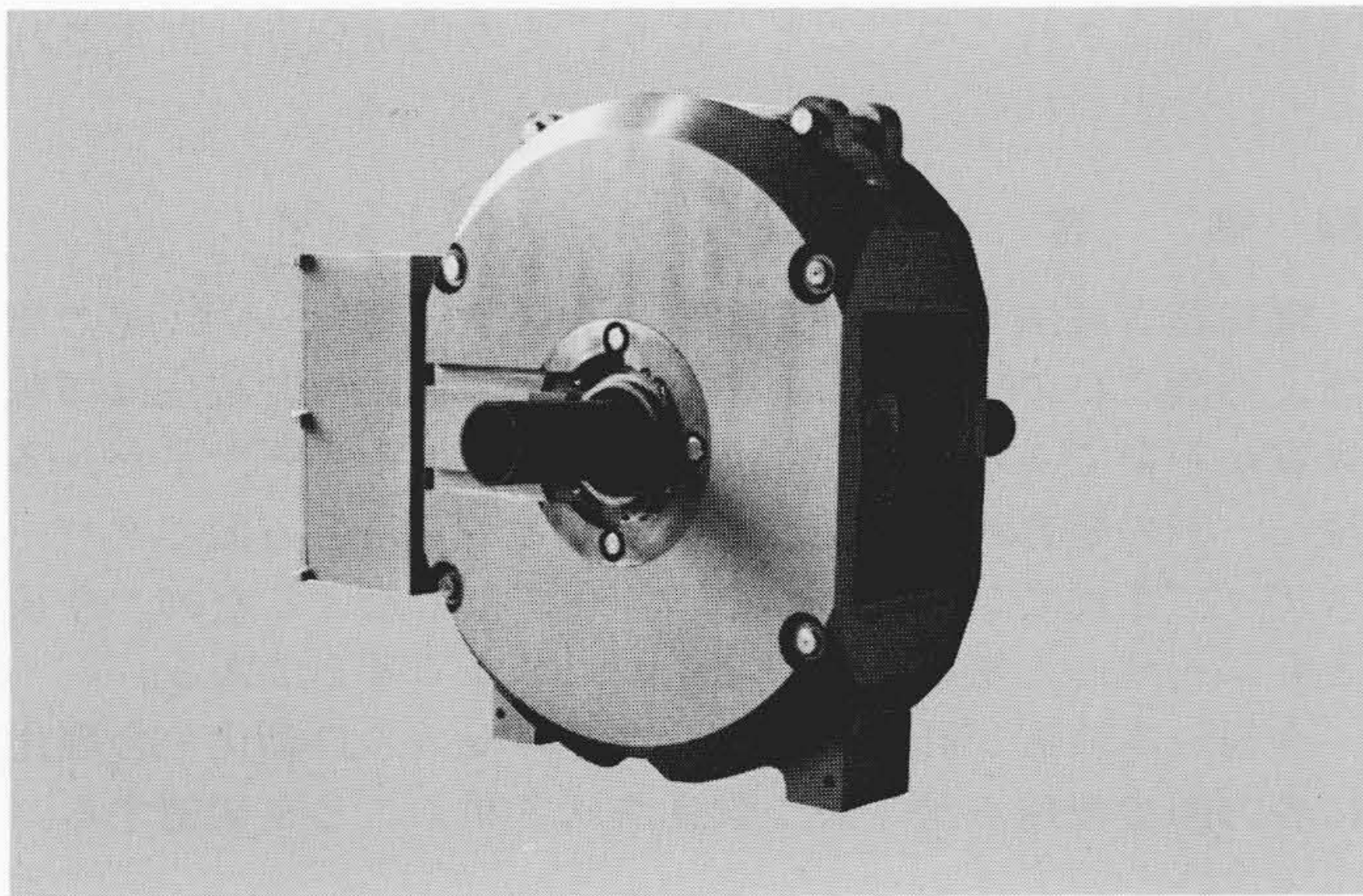
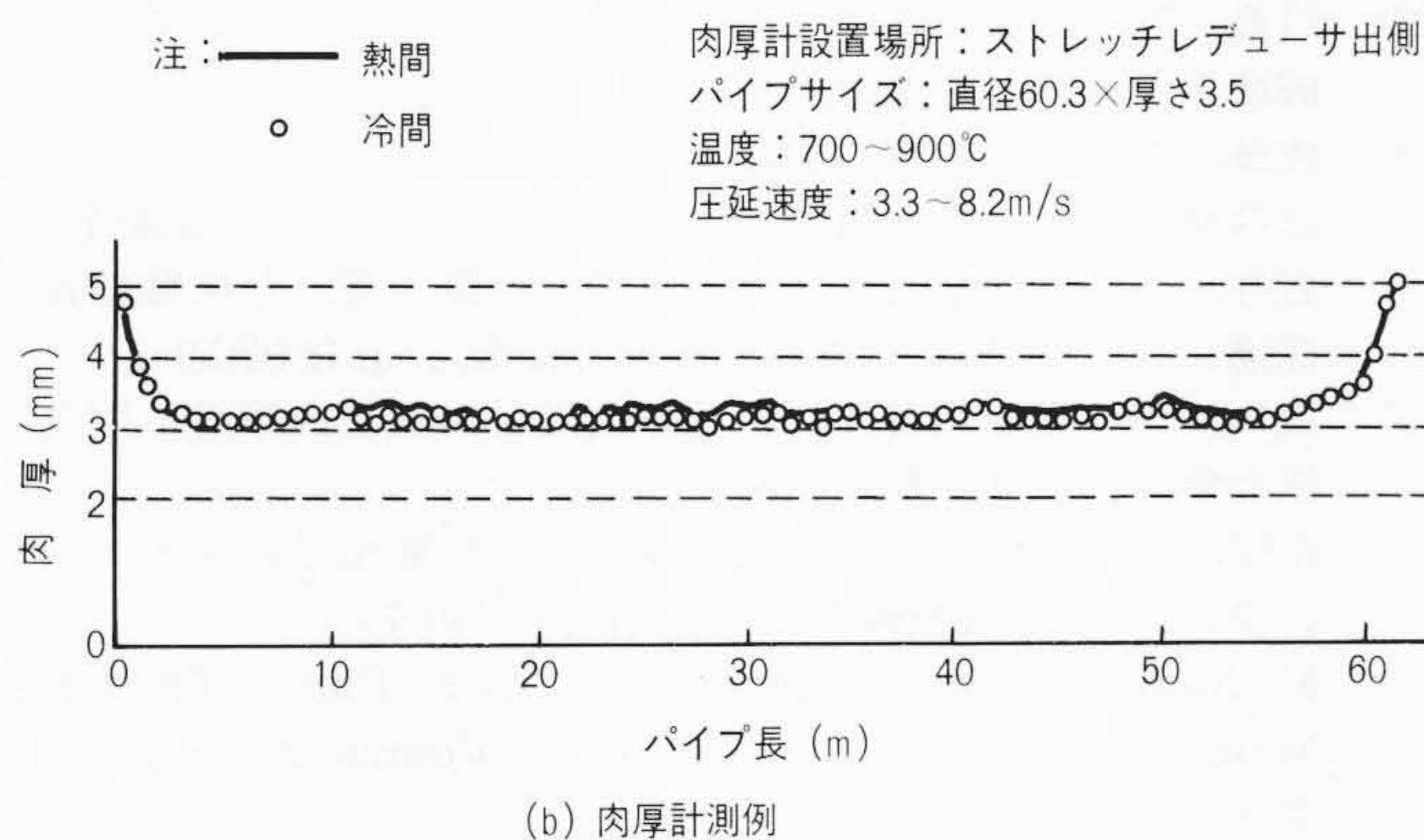


図7 シームレスパイプ熱間肉厚計測装置システム構成 熱間肉厚計の実現は、より高精度・高品質のシームレスパイプの生産に大きく寄与できる。また円周方向、長手方向の密計測により管端部の増肉現象が把握でき、歩留まり向上が図れる。



(a) 外 観



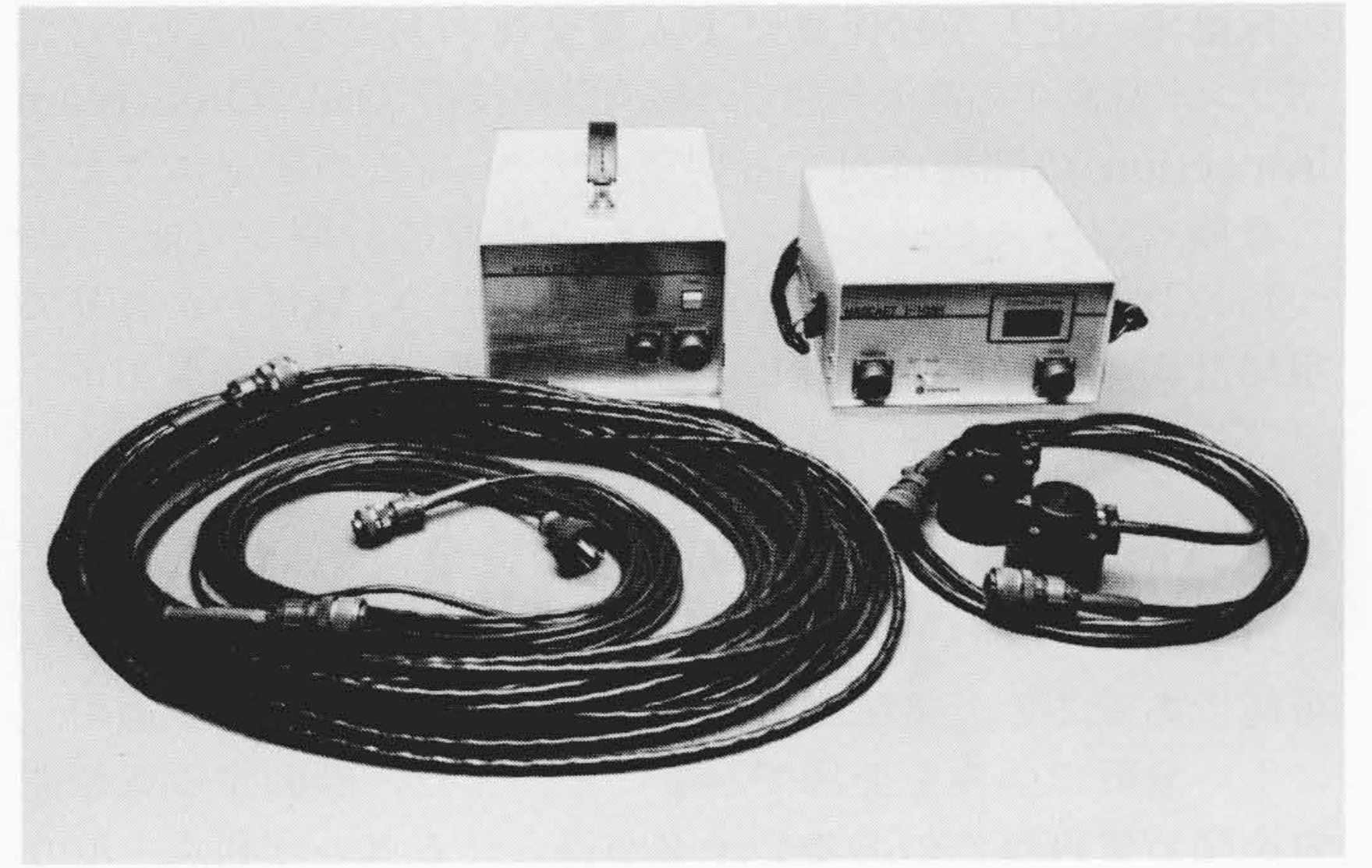
は上位ピアサ工程で発生するスパイラル状偏肉による長手方向の周期的肉厚変動を、よくとらえていることが分かる。また測定精度は、表面温度による音速補正及びAGC(自動感度補正)によるエコー高さの安定化により大略±0.1mmの高精度であり、従来不可能であった熱間オンライン肉厚計測値を用いた高精度のリアルタイム肉厚制御が、近く実現される方向にある。

5 石油タンク、配管類の肉厚計測

5.1 石油タンクへの適用

国家備蓄基地の大形タンクをはじめ、製油所、油槽所のタンクは、防食上の見地からほとんどのタンクで塗装が施されている。一方、これらのタンクは消防法により底板の定期点検が義務付けられている。これらの点検作業は、従来、電波超音波法による厚み計を用いて行なっており、底板上の塗装膜の影響をなくすため、塗装膜の除去及び点検作業後に再塗装の必要がある。

これに対し電磁超音波法では、塗装面から直接底板の肉厚計測が可能のため、塗装の除去が不要となり大幅な検査工数の低減が可能となる。図9にポータブル形厚み計の外観と仕様を示す⁶⁾。この厚み計は探触子、電源ユニット、表示ユニットから成る。表示ユニットは電源ユニットと最大30mのケーブルで接続可能で、電源ユニットは一定場所に置き、表示ユニットと探触子は検査員が携帯して計測を行なう。また、同図のポータブル厚み計と自走式ロボットとを組み合わせ、これらの点検作業の自動化が可能となる。



ポータブル形厚み計の仕様例

No.	項 目	仕 様
1	測 定 方 式	電磁超音波パルス反射法 (2MHz)
2	表 示 方 式	デジタル 3 けた, 0.1mm
3	被 測 定 物	一般鋼, 低合金鋼
4	測 定 範 囲	6～25mm
5	温 度	0～450℃
6	温 度 補 正	補 正 表 式
7	塗 膜 厚	Max. 0.5mm
8	測 定 精 度	±0.1mm (常温)
9	電 源	AC100V, 50/60Hz, 1相
10	探 触 子	φ70, 1.5kg
11	重 量	指示部
		電源部
		約 5 kg
		約 8 kg

図9 電磁超音波式ポータブル厚み計 さび・汚れや塗装膜の上から直接計測できるので、タンクや配管系統の肉厚計測の経費節減になる。

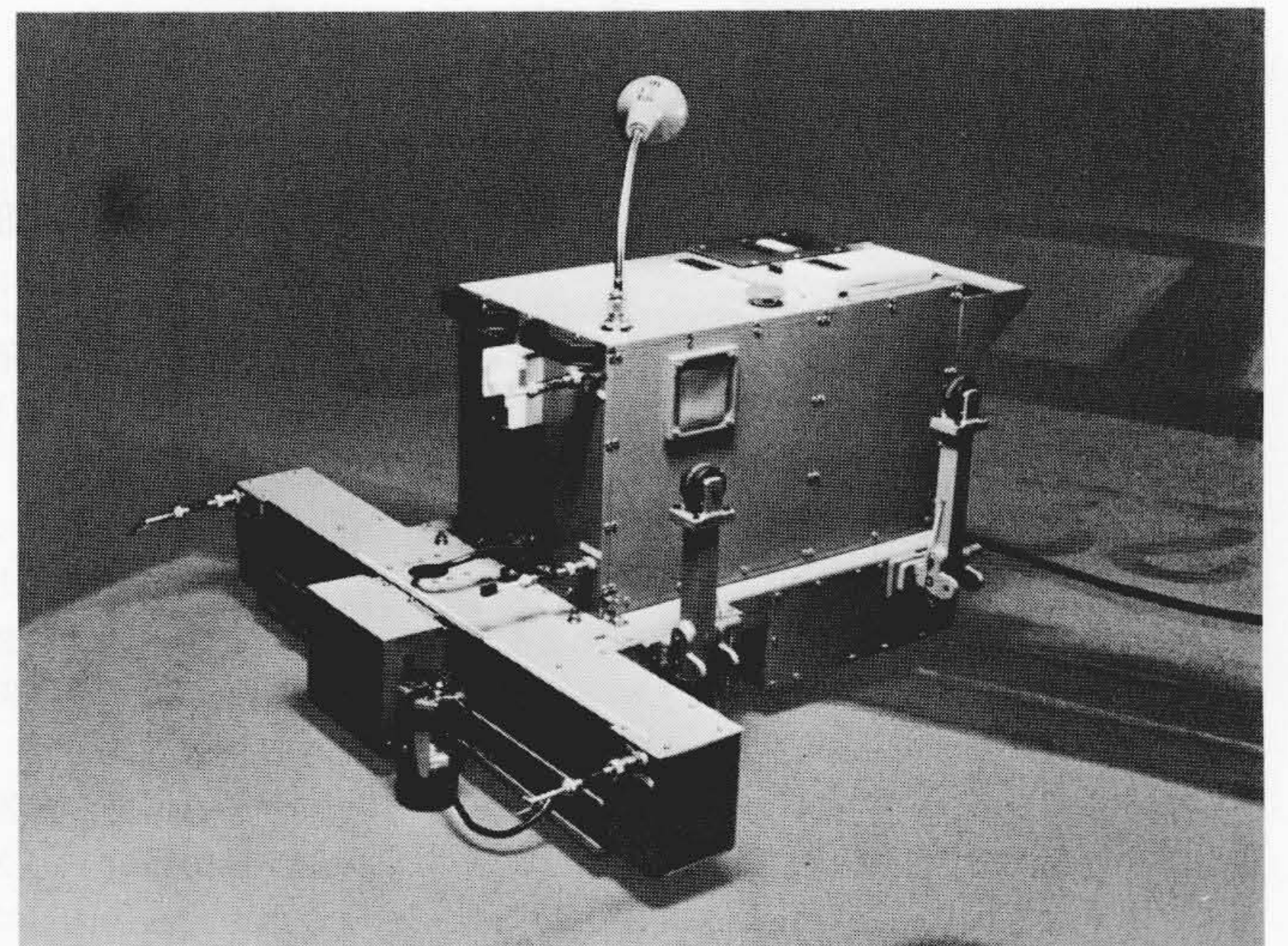


図10 自走式板厚計測装置の外観 タンク底板をプログラムされた番地に従って肉厚を計測し、プリンタに出力され、測定作業の大幅省力化が図れる。

図10は、ワンマンコントロールの自走式板厚計測装置⁷⁾でタンク底板の計測値は、LED(発光ダイオード)及びプリンタに出力される。

5.2 配管類への適用

石油精製・石油化学、原子力などのプラント内の高温配管及び圧力容器の減肉計測は、主として定修や定検時の配管などが冷却した状態で、スケールを除去して行なっている。プラント

の稼働率向上と予知保全による安全性の向上を図るために、プラント稼働中の高温状態での減肉計測技術(OSI: On Stream Inspection)の開発に対する要望も大きい。この要望にこたえて塗膜・さび・スケールなどの上から板厚の計測が可能で、かつ450℃までの高温の鋼板の板厚が測定でき、取扱いが容易で現場計測の用に供することができる。小形・軽量の高温用ポータブル電磁超音波厚さ計を開発し、実用化段階にきている。

6 技術的課題と将来展望

以上述べてきたように電磁超音波法は、高温鋼材の計測が可能であること、接触媒質不要など電波超音波法が適用しにくい分野で強みを発揮できること、また、計測する人や能力を問わず再現性のあるデータが得られるという利点を取り入れることによって、非破壊検査技術の大きな改善が図れる。

特に、従来の抜き取り検査から全数検査へ、冷間検査から熱間検査へ、といったように検査プロセスのFA化はもちろん、自動化、高速化による品質保証、検査信頼性向上、省エネルギー化と歩留まり向上、予防・予知保全の上で今後重要な位置を占めるものと思われる。

今後の研究開発のポイントは、主としていかに効率の良い、換言すれば高周波大電流パルス技術、低ノイズアンプ、強磁場発生装置や高効率送受信コイルなどといったSN比の優れた方式を作るか、にあると言える。また、探触子の小形化に関しては、磁極構造、鉄心材料、送受信コイルなどの改良検討と最新の電子回路技術との結合により、近い将来、更に小形化されると考えられる。また、縦波、横波による垂直探傷法に加えて、今後、斜角法、表面波法、板波法などの技術が

開発、確立されてゆくことにより、その応用分野は拡大されるものと思われる。

7 結 言

電磁超音波法による計測装置MAGCASTについて、その原理と特徴及び応用例について述べたが、電磁超音波法は接触媒質が不要であること、高温材に適用できること、また、各種モードの超音波が送受信できることから、各方面でクローズアップされてきている。そのニーズにこたえるため、今後ともユーザーと密接して開発を進めてゆく考えである。

今後、本装置が計測制御、検査プロセスの自動化・合理化に各方面で使用され、かつ改良されてゆくことを切望する。

参考文献

- 1) 伊東, 外: 電磁超音波法による計測センサとその応用, 計装, 27, 3, 26(昭59-3)
- 2) 川島, 外: 連続鋳造スラブの凝固シェル厚みのオンライン非破壊測定, 鉄と鋼, 67, 9, 1515(昭56-9)
- 3) 佐藤, 外: 電磁超音波法による高温鋼片の探傷, 非接触超音波探傷シンポジウム(日本非破壊検査協会), p.37(昭59-7)
- 4) 岩井, 外: 電磁超音波法による熱間探傷装置, 非接触超音波探傷シンポジウム(日本非破壊検査協会), p.18(昭59-7)
- 5) 山口, 外: 電磁超音波による熱間継目無鋼管肉厚計の開発, 鉄と鋼, 70, 9, 147(昭59)
- 6) 山田, 外: 電磁超音波汎用厚み計, 非接触超音波探傷シンポジウム(日本非破壊検査協会), p.32(昭59-7)
- 7) M. Nemoto, et al.: Automatic Floor Plate Thickness Measuring Equipment, IECON '84 Volume 2, p. 759, 計測学会

論文抄録

分散計算機制御システムに適したループ伝送制御方式

日立製作所 高橋正弘・浜田卓志・他1名

電子通信学会論文誌 J68-D3, 400~407(昭60-3)

鉄鋼、化学、電力などプロセス制御システムでは、生産業務に密着した応答性を確保し、障害の局所化を実現するため、生産プロセス単位に計算機を分散配置する分散計算機制御システムが発展してきた。この分散計算機制御システムの神経系としてデータウエイシステムに代表されるように高速伝送に適したループネットワークが適用されている。

近年、分散計算機制御システムは、ますます大規模化、広域化が進み、これに伴って計算機間データ転送でのスループットの向上、転送時間の短縮など、性能向上が強く求められている。これらの要求にこたえるためには、(1)光ファイバ伝送による高速化、長距離化、(2)ループ伝送制御方式の高効率化、(3)ステーション装置の高速化が重要な課題である。

ループ伝送制御方式の高効率化の指標として、リアルタイムなデータ転送が要求されるプロセス制御分野では、転送応答時間

(データ転送要求発生から相手ステーションからの応答確認を得るまでの時間)の短縮が重要である。

従来、ループネットワークでは、共通伝送路へのアクセス方法としてトークン方式によるループ伝送制御方式が提案され、また、多くの実用化例がある。しかし、これらの制御方式では、データ送信局に対するデータ受信局の応答確認のための情報送出手が、受信局でトークンをとらえた時点であるため、転送応答時間の短縮が図れない。特に、伝送路上で誤りが発生した場合には、データの再送が遅れ、転送応答時間が増大することになり、リアルタイム性が保証できないことになる。

そこで、トークン方式をベースとしてデータ転送、応答確認、データ再送の各フェーズを一体化したループ伝送制御方式を提案した。この伝送制御方式で、まず、伝送誤り発生時のデータ再送の高速化、シーケンス番号の管理、ロックアップ防止の具体

的な制御手順について述べ、伝送制御の簡単化にも本方式が有効であることを明らかにした。更に、データ転送、応答確認のフェーズを分離した従来方式と定量的な性能比較を行ない、提案方式が高速伝送時でもデータ転送能力が高く、また、転送応答時間が大幅に短縮できることを示している。具体的には、伝送速度10Mビット/秒、ループ全長10km、ステーション16台で平均転送応答時間2msを確保する場合には、
(1) 従来方式: 1,560(再送なし), 950(1回再送)パケット/秒
(2) 提案方式: 1,700(再送なし), 1,540(1回再送)パケット/秒
のトラヒックに対応可能である。

このループ伝送制御方式は、OA、FAなどの多くの分野で使用されるLAN(ローカルエリアネットワーク)に対しても、性能の点及び制御の簡単さの点で有効である。