



タイトル：「非磁性金属の渦電流探傷方法と厚み測定」

発明の名称：「渦電流探傷方法とその装置」

特許番号：特許第4234761号

日時：平成21年11月13日(金)

場所：ポート名古屋メッセ 交流館3F

発表者：野々垣 慶一

E-mail: keinonogaki@nifty.com



PA プロセスオートメーション プラント設備の安全

化学、石油、食品、電力、パルプ、等

危険な工場災害を未然に防ぐ

- 社会インフラや工場設備の老朽化、余寿命管理
- 原子力発電所、プラント等での配管設備の安全管理
 - エロージョン(侵食)とコロージョン(腐食)
 - 熱、応力、ヒートサイクルの印加
 - 地震による変動と応力発生
 - 金属疲労の耐久性/寿命限界



確実に簡易な検査システムが欲しい。

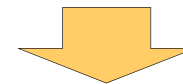
- 減肉、傷の深さと大きさの程度と進行

FA ファクトリーオートメーション 製品の品質検査

金属素材製造、金属加工、自動車部品、
航空機部品、等

製品品質の向上

- 鋳物巣を無くす
- 溶接不良の発見
- 板厚みの管理



インラインで検査でき、かつ性能の
高いシステムが欲しい。



方式	観測方法	自動化の可否	測定深度	長所	短所
放射線	画像観測	自動化可能	材料内部	内部の透過画像が得られる。(鋼に対して300mm程度まで適用)	試験器具によって対象試験体を挟みこななければならない。 人体に悪影響がある。
超音波				検体深くまで検査できる。(数cmまで適用可能)	スケールが有ると検査不能。接触剤の塗布が必要。
渦電流			材料の表層	扱いが簡単で検査時間が短くインライン検査が可能。	表面層の検査に限られる。
磁粉	肉眼による実体観測	自動化不可		簡単	試験体上面しか検査できない。(割れが表面から2～3mm程度の表層部に散在の場合は検出可能)。磁性金属のみ検査可能。大型設備が必要。
浸透			材料の表面	安価	乾燥に時間がかかる。表面傷のみ検出。

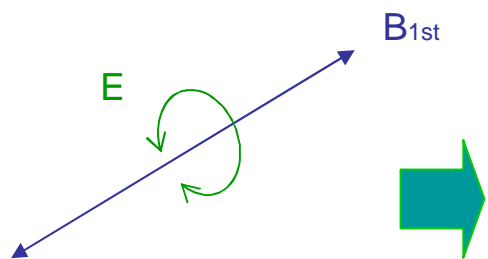
各種非破壊検査方法の比較 2



方式	測定深度	近点不感帯	測定条件 接触媒質	配管内部のスケール、内部流体の存在
既存の渦電流法	探傷深度が非常に浅い 表面から1~2mmまで	なし	接触媒質は必要ない	内面にスケール、流体が有っても測定可能
傾斜渦電流法	深層/裏面/内面まで検査可能 <ul style="list-style-type: none"> • ステンレスで20mm厚まで • アルミで10mm厚まで 	なし		内面にスケール、流体が有っても測定可能
超音波法	探傷深度は非常に深い、数cmまで。 厚手材の検査が可能	不感帯あり、薄手材は測定不能。	接触媒質の塗布が必要	内面にスケール、流体があると検査不能

傾斜渦電流法において、上記の探傷深度を得ることが出来る材料は、非磁性金属に限られる。磁性金属では表層探傷のみ可能。

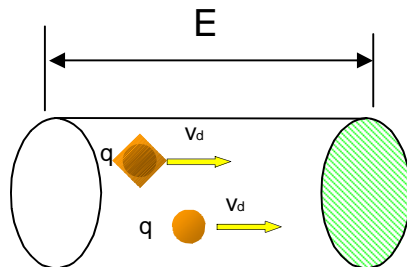
渦電流とは？



$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}_{1st}}{\partial t}$$

ファラデーの法則

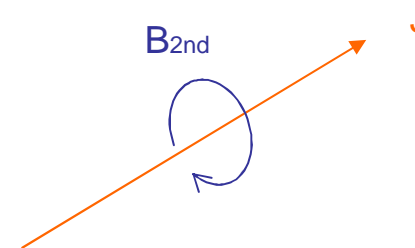
外部交流磁界B_{1st} が金属板に加わる。



$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

オームの法則

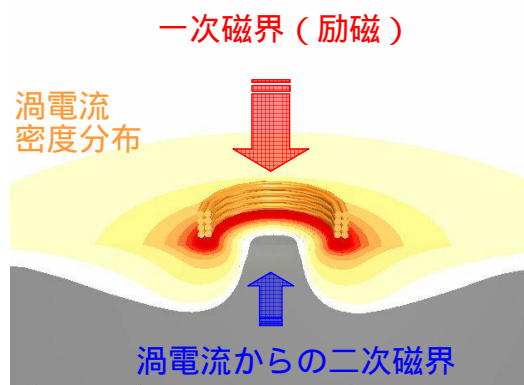
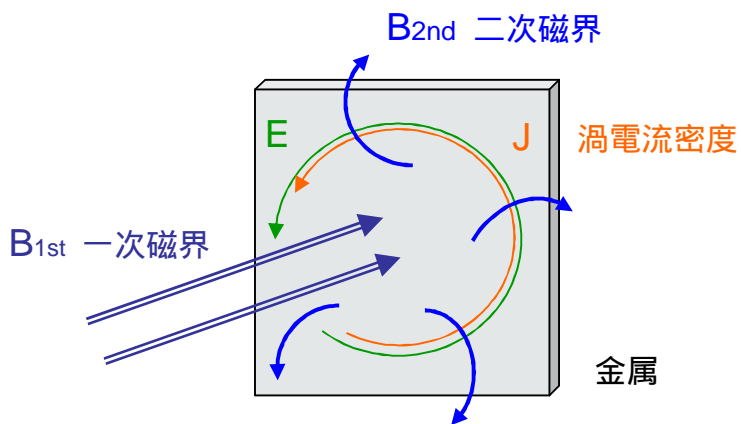
渦電流J が金属板に流れる。



$$\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{H} = \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{B}_{2nd}$$

アンペールの法則

渦電流から反射磁界B_{2nd} が返される。



J: 渦電流密度

H: 磁界強度

B: 磁束密度

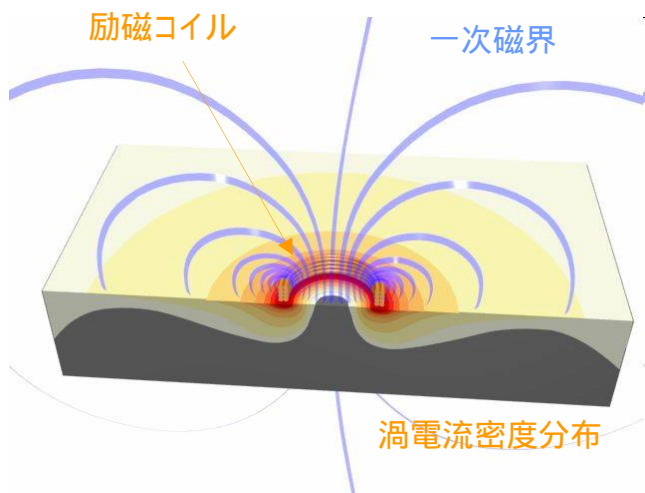
E: 電界強度

○: 透磁率

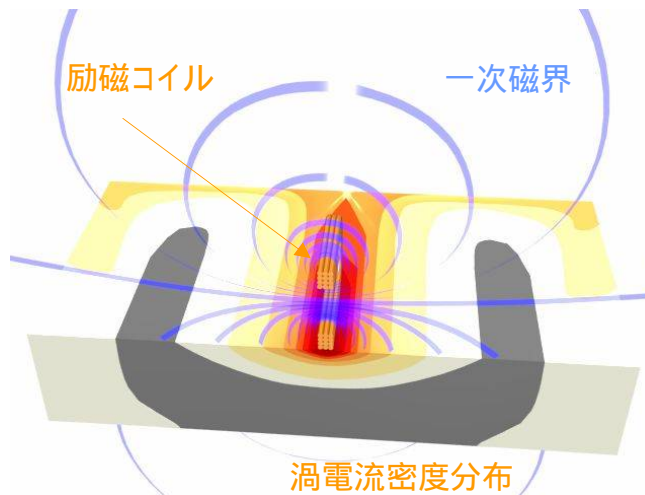
◆: 導電率

μ_0 : 真空の誘電率

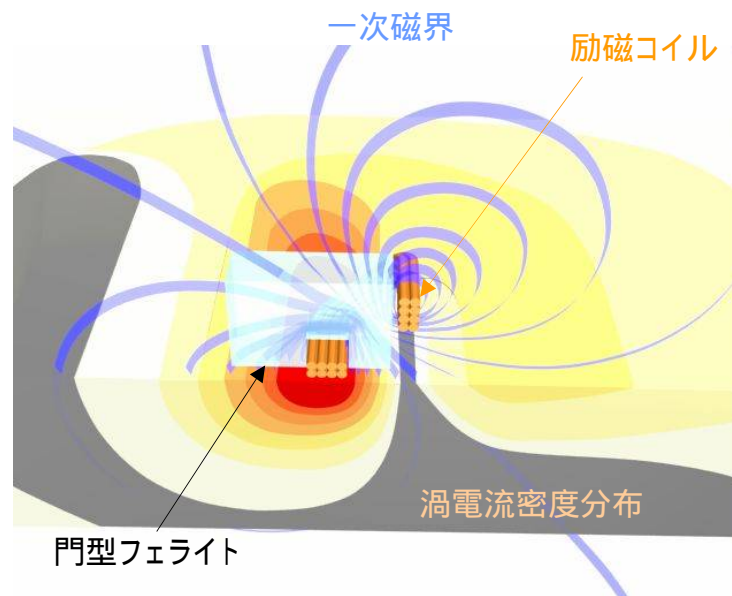
渦電流探傷法とは、渦電流から発生する二次磁界を捉えて探傷する。



平行励磁 コイル面は金属検体表面と平行

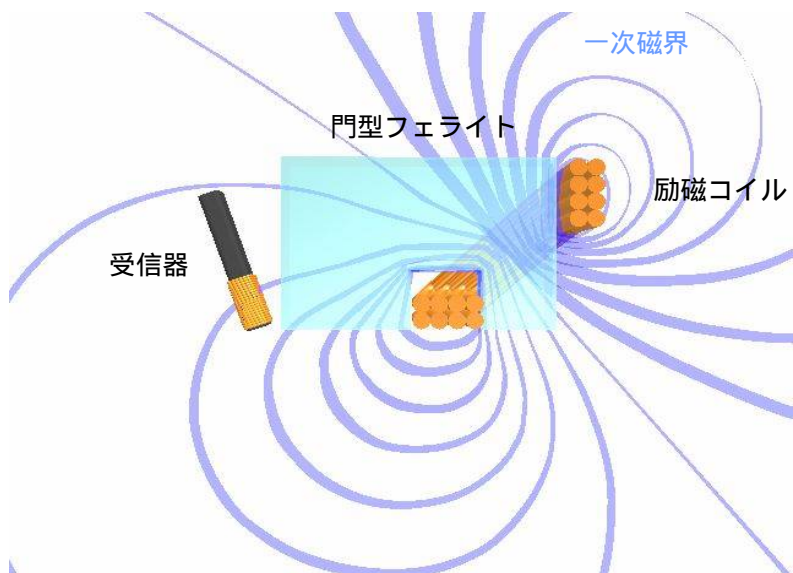


垂直励磁 コイル面は金属検体表面と垂直



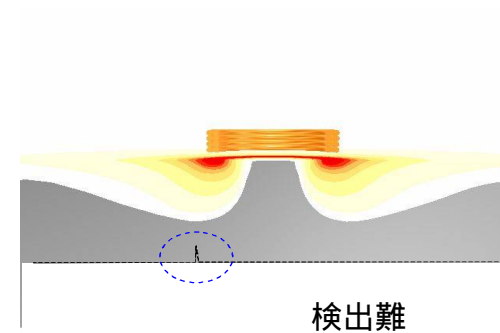
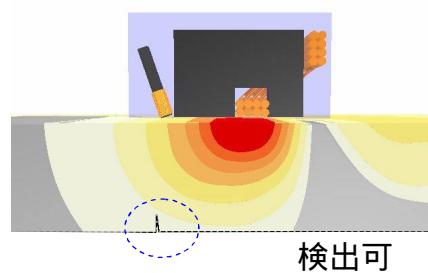
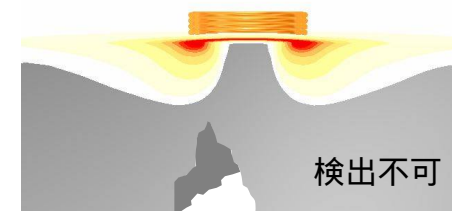
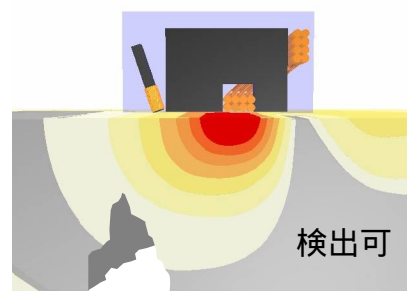
傾斜励磁

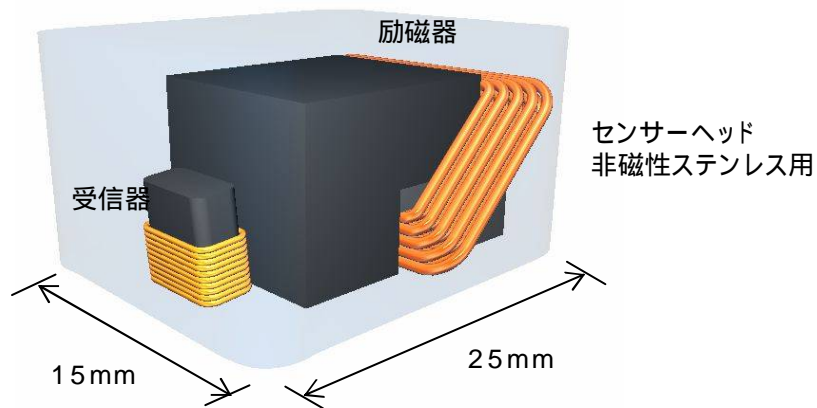
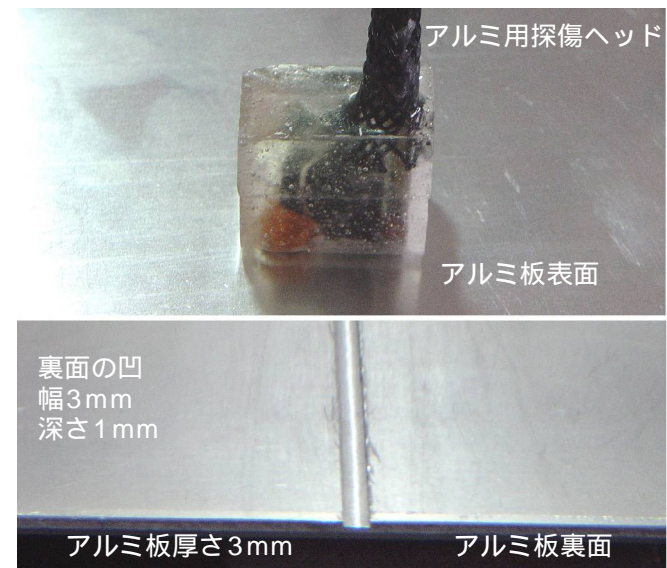
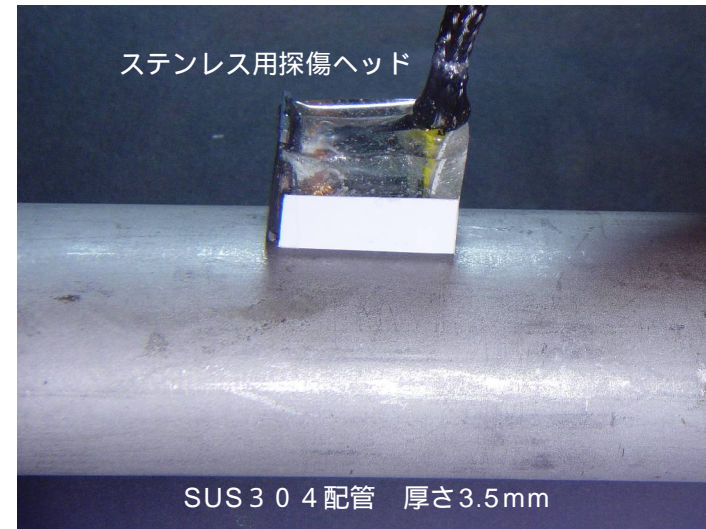
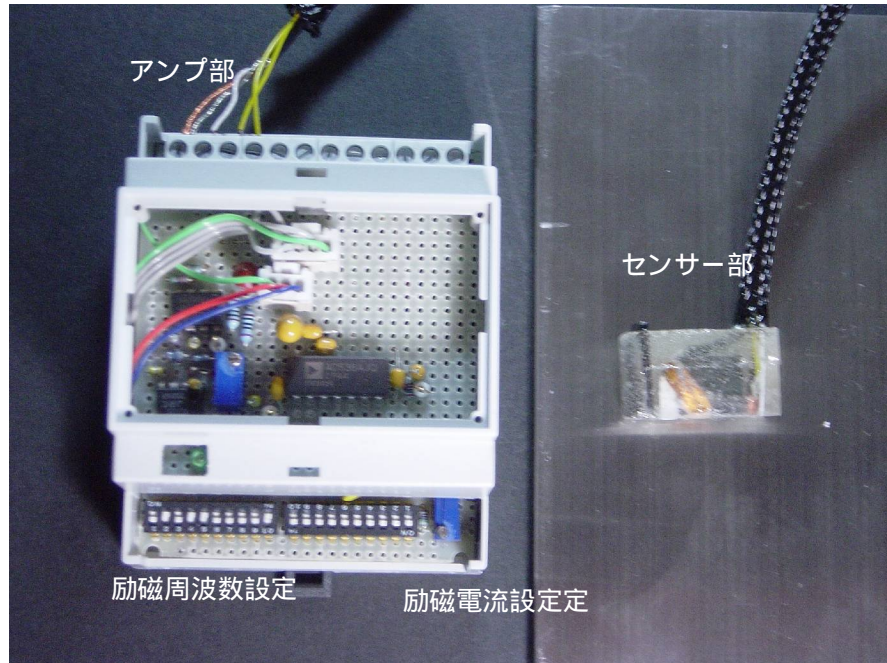
門型フェライトにより一次磁界は金属検体表面と傾斜



受信器は一次磁界と鎖交しない角度に設定

一次磁界を全く検出せずに、渦電流から生まれる二次磁界のみ検出します。

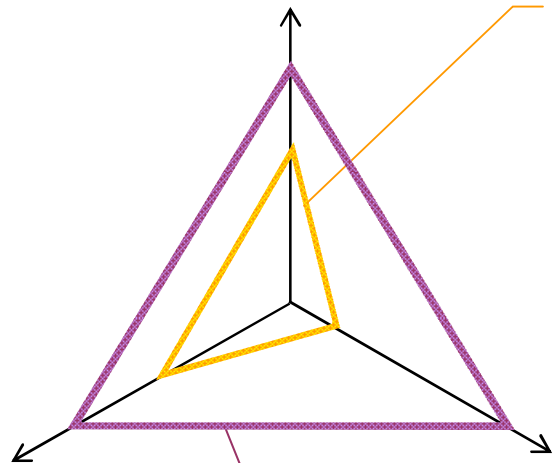






位置と大きさの特定

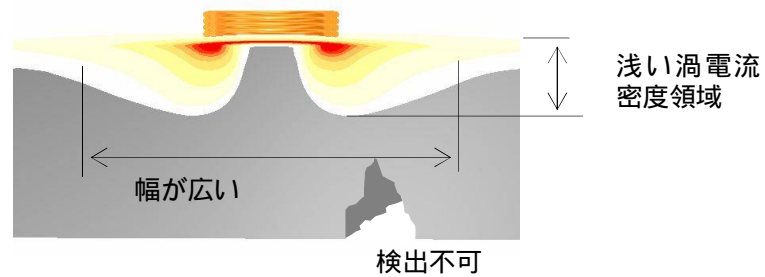
既存の渦電流探傷法：深度が浅く、磁界が左右に広がっている為、位置精度が悪い。表層の探傷に利用される。



感応度（より小さな変位の検出）

探傷可能深度（厚さ）

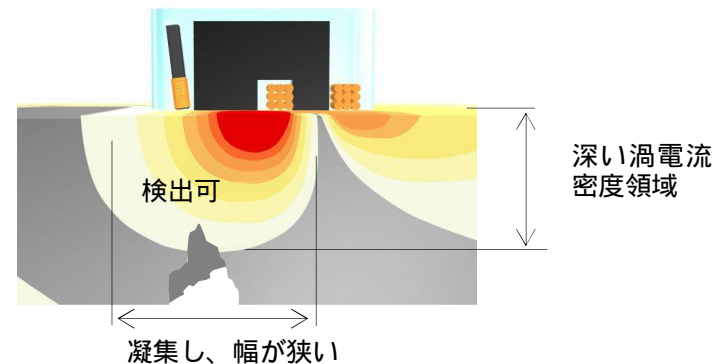
傾斜渦電流探傷法：磁界が強く低周波数でも動作可能、深い探傷深度を得る。コア材を使用しながら磁界は凝縮している為、傷や凹が浅層から深層、裏面まで検出可能。一次磁界と二次磁界の鎖交バランスにより、深層でも高感度を得る。



探傷深度が深い（裏面まで）

傷への感度が高い

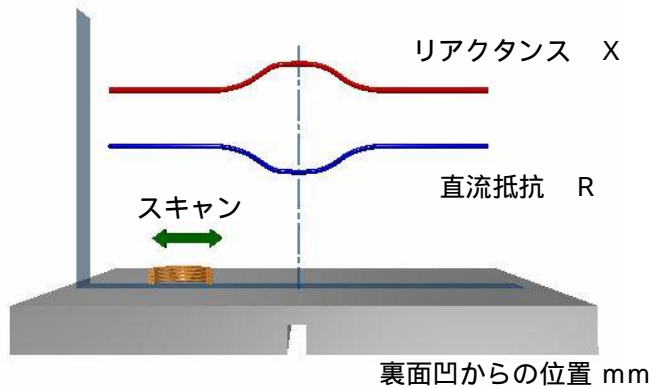
傷の位置特定に優れる。



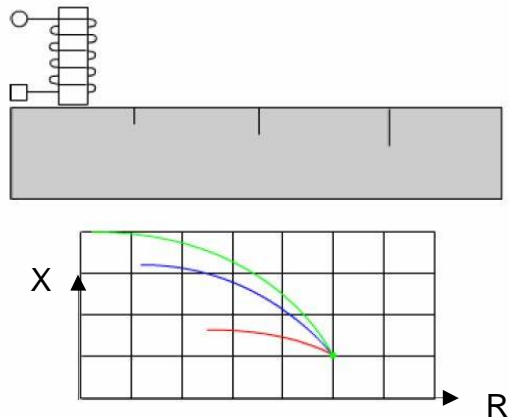
傾斜渦電流法と既存の渦電流探傷法との比較 2



既存の渦電流探傷法

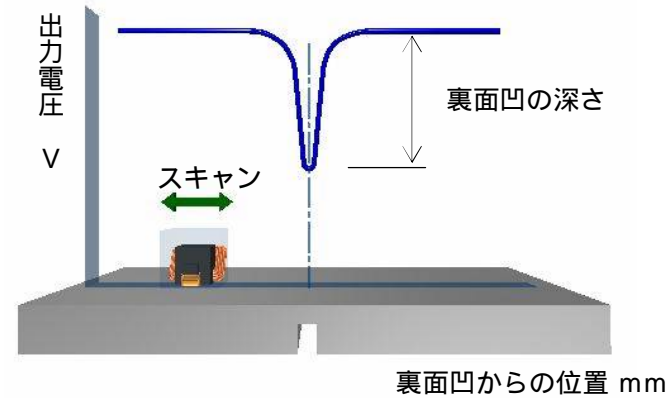


探傷コイルが、裏面の傷の上にかかっている間、直流抵抗成分もリアクタンスもフラットになる。

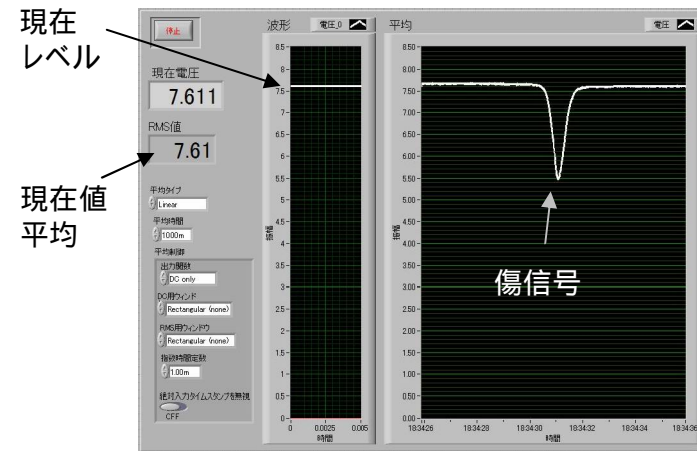


XとRを軸とするインピーダンス平面上の点の軌跡を観測する。 専門家による目視観測が必要。

傾斜渦電流探傷法



探傷センサが、裏面の傷の上に到達してから中心に位置するまで、出力電圧は大きく下降する。



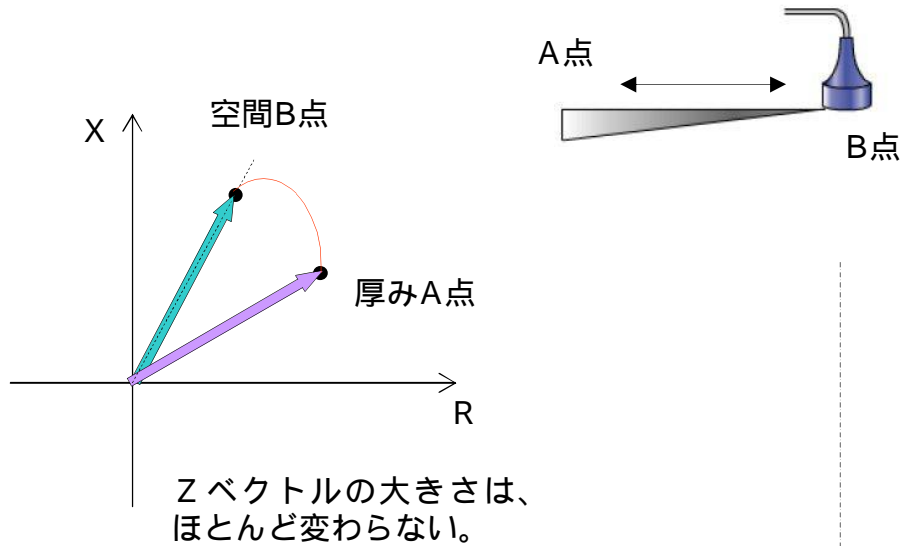
時間-電圧記録

インピーダンス平面観測から電圧出力測定へ単純化
目視観測は必要なく、完全自動化が可能。

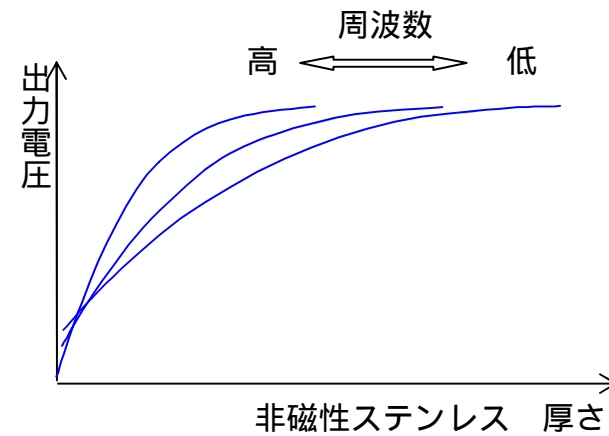
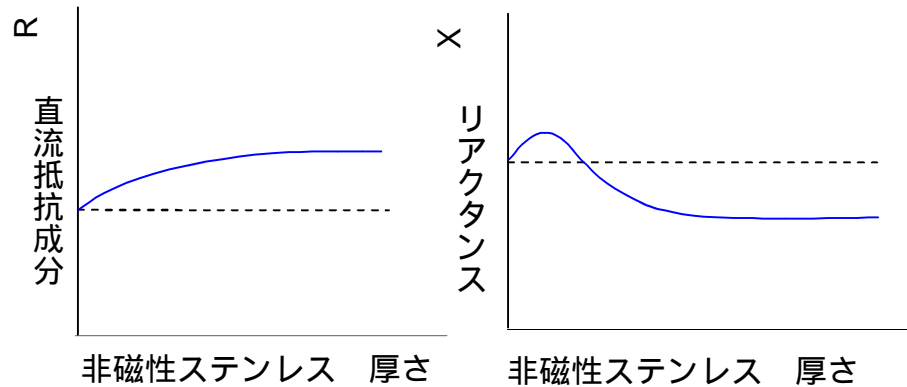
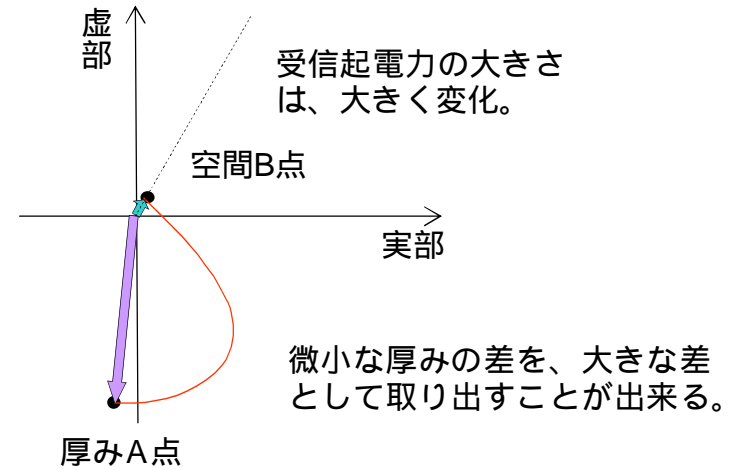
傾斜渦電流法と既存の渦電流探傷法との比較 3



既存の渦電流探傷法



傾斜渦電流探傷法

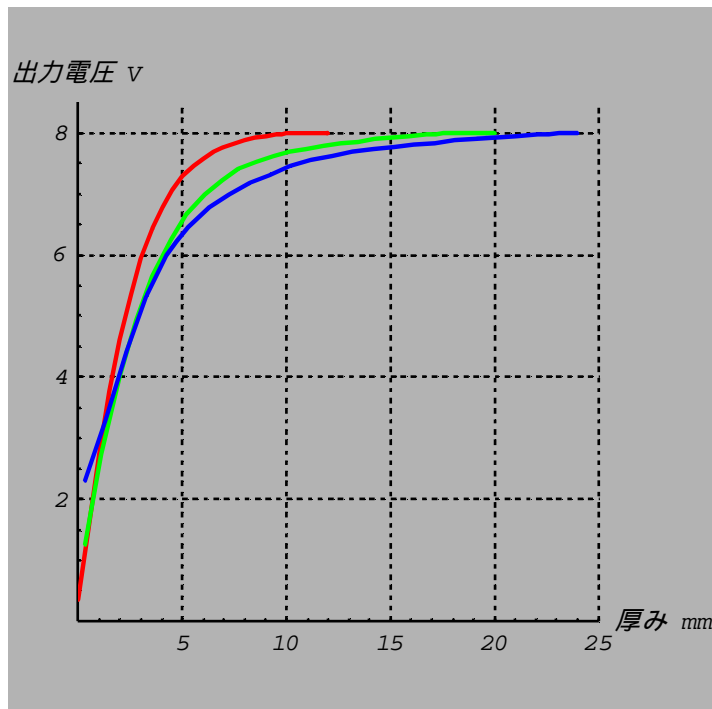


厚みに対して1:1の電圧出力

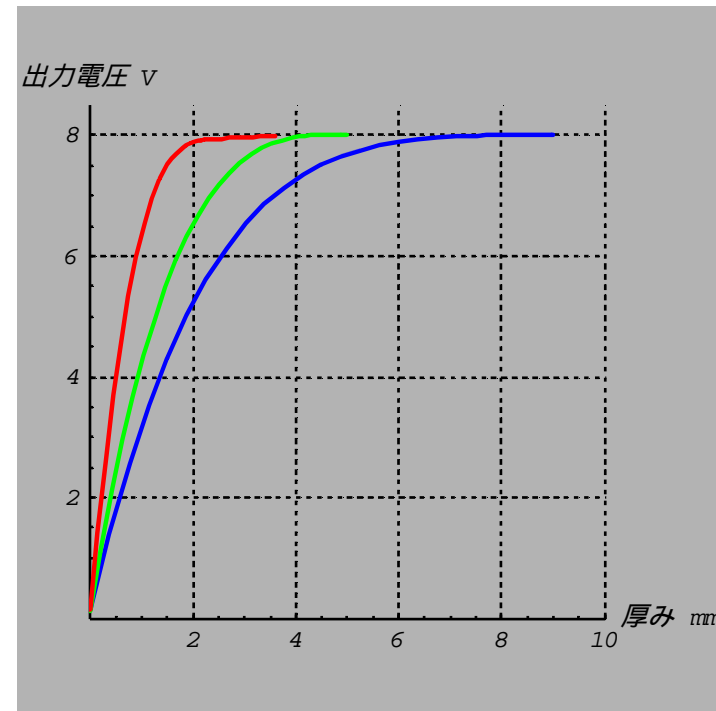
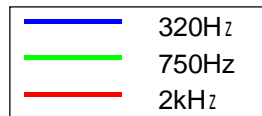


非磁性ステンレス板の厚さ 出力電圧特性

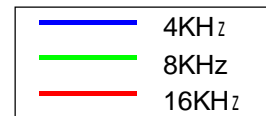
SUS304大きき150mm×150mm板の異なる厚さ6、4、3、2、0.8、0.5、0.3mmを使い、各種枚数重ね合わせた総合厚みを測定。



320Hzから2kHz各までは、総合厚さ24mmを最大出力電圧8Vになるよう感度を設定。



4kHzから16kHz各までは、総合厚さ10mmを最大出力電圧8Vになるよう感度を設定。

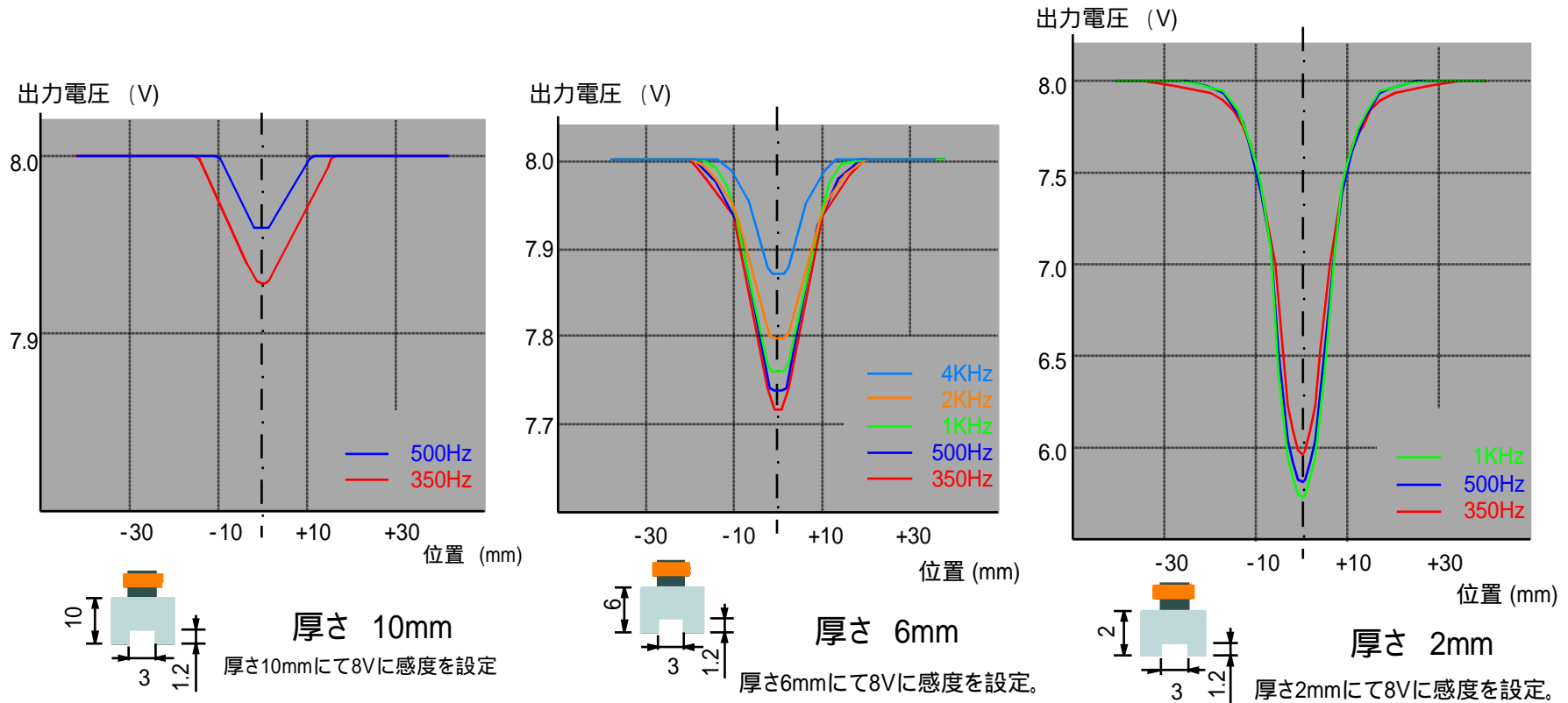


- 周波数が低いほど測定深度が深い。周波数が高いほど測定深度が浅くなるが、サイジング精度が高い。
- ステンレス板SUS304の厚さに対して、1:1の電圧出力曲線。
- 320Hzでは20mm以上の厚みまで感応がある。



非磁性ステンレス板の裏面凹 出力電圧特性 1

SUS304 大きき150mm×150mm 厚さ2mm の板の中心に幅3mm、深さ1.2mmの直線状の溝を切った。厚さ4mm又は2mmの別の板を上重ねて総合厚みとし、センサーの横方向に且つ溝と鉛直に交差するように、溝と反対面上をスキャンした。

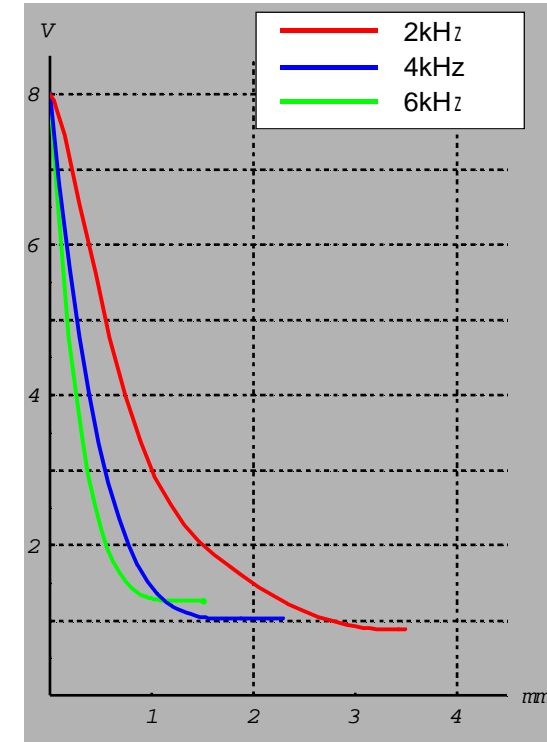
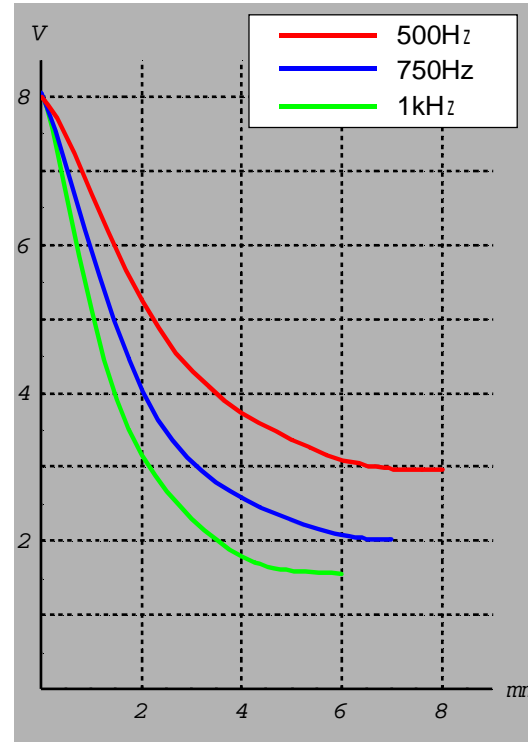
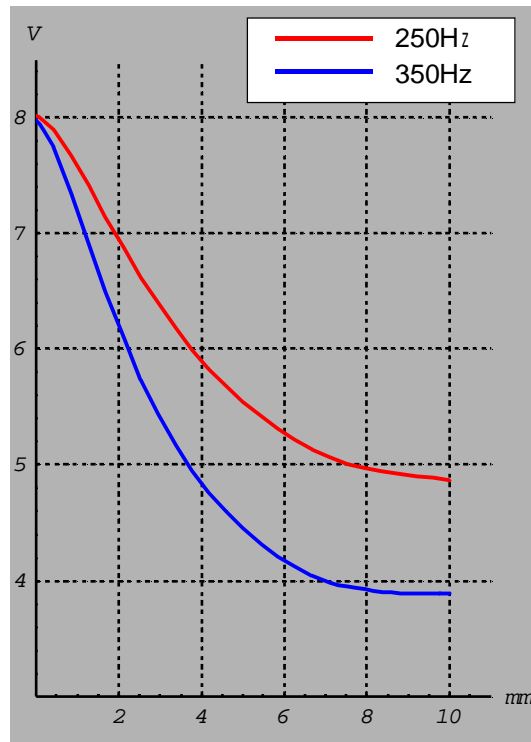


- 厚さ10mmのステンレス板においても、幅3mm深さ1.2mmの裏面の凹みが検出される。
- ステンレス板が薄い程、裏面の凹みに対して大きな電圧差が得られる。サイジングの精度が高い。



市販アルミニウム板の厚さ 出力電圧特性

アルミ（純度約99.5%） 大きさ150mm×100mm 板の異なる厚さ0.3, 0.6, 0.7, 0.8, 1.0, 2.0, 3.0mmを使い、各種枚数重ね合わせた総合厚みを測定。各周波数において、検体が無い状態で出力電圧が8Vになるよう感度を設定。



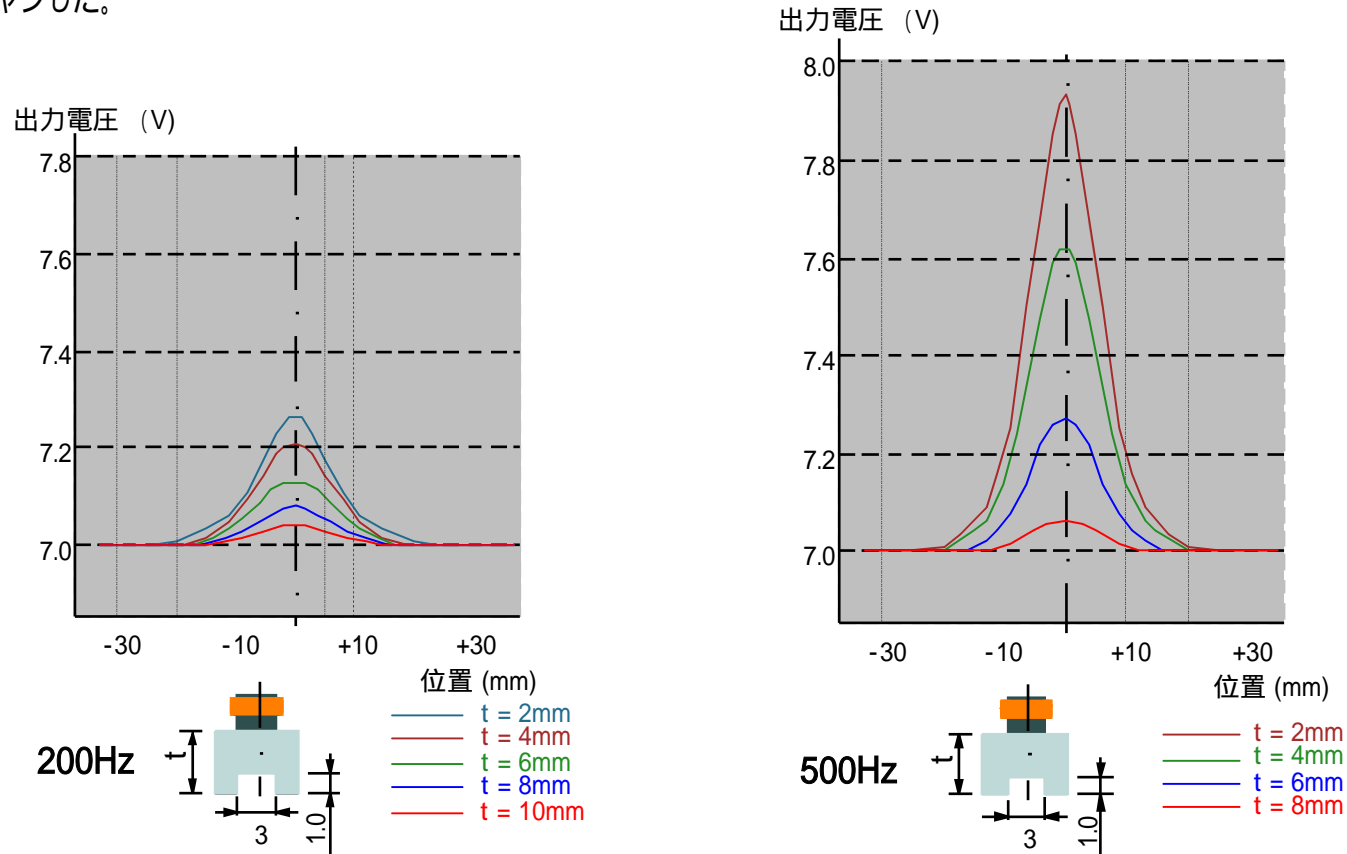
上記グラフは、市販アルミ板（純度約99.5%）における厚さ-出力電圧特性です。一般に、添加物を含むアルミ合金の場合、導電率が純アルミより下がりますので、探傷深度が伸びます。上記のグラフで得られた各周波数のカーブは、厚い方向に伸びます。

- 周波数が低いほど測定深度が深い。周波数が高いほど測定深度が浅くなるが、サイジング精度が高い。
- アルミ板の厚さに対して、1:1の電圧出力曲線。
- 320Hzでは10mm以上の厚みまで感応がある。



市販アルミニウム板の裏面凹 出力電圧特性 1

市販アルミ板（純度約99.5%） 大きさ100mm×150mm 厚さ2mm の板の中心に幅3mm、深さ1.0mmの直線状の溝を切った。厚さ2mm又は1mmの別の板を上重ねて総合厚みとし、センサーの横方向に且つ溝と鉛直に交差するように、溝と反対面上をスキャンした。



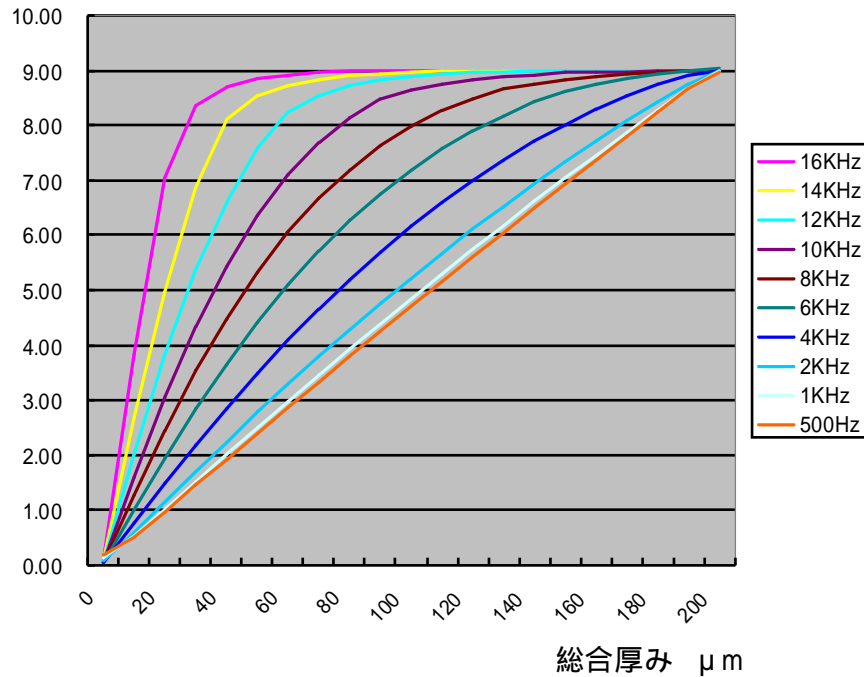
- 200Hzでは、厚さ10mmのアルミ板においても幅3mm深さ1.0mmの裏面の凹みが検出される。
- アルミ板が薄い程、裏面の凹みに対して大きな電圧差が得られる。サイジングの精度が高い。



銅箔の厚さ 出力電圧特性

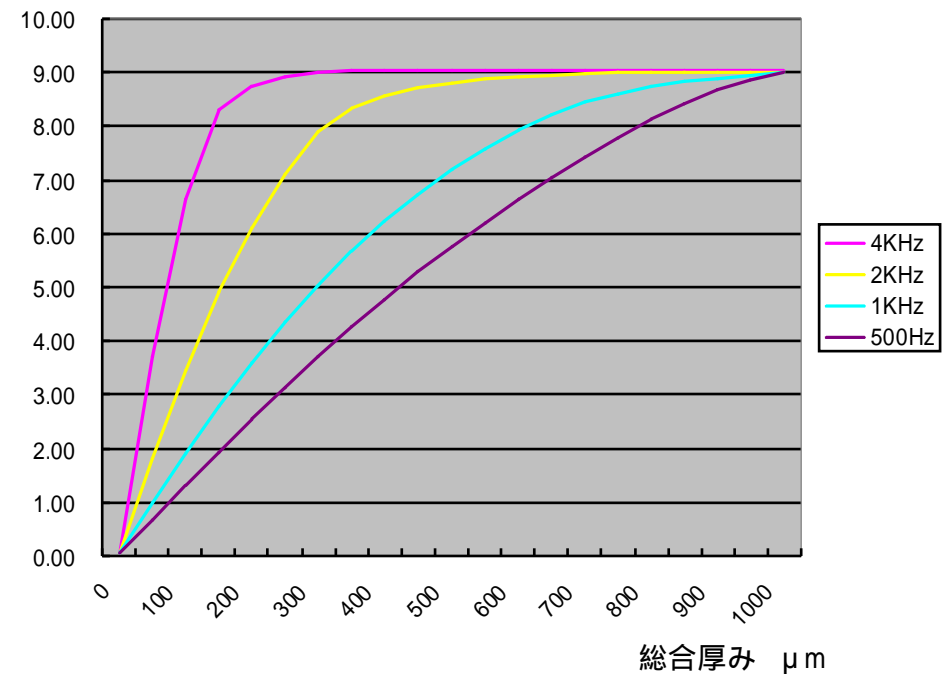
銅箔大きさ100mm×50mm厚さ10 μ mを複数枚重ね合わせた総合厚みを測定。総合厚み200 μ m(20枚)にて出力電圧が9Vになるように感度を設定。

出力電圧 V



銅箔大きさ100mm×50mm厚さ50 μ mを複数枚重ね合わせた総合厚みを測定。総合厚み1,000 μ m(20枚)にて出力電圧が9Vになるように感度を設定。

出力電圧 V



- 周波数が低いほど厚み測定レンジが長く、最大厚み測定レンジは、1,000 μ m以上。
- 周波数が高いほど厚み測定レンジが短い、分解能が高い。最高分解能は、0.05 μ m以下。
- 銅箔の厚さに対して、1:1の電圧出力曲線。

傾斜渦電流法の特許内容



特許番号	特許4234761号
PCT国際出願番号	PCT/JP2008/58361
国際公開番号	WO2009/025105

請求項と内容	得られる特徴	代替可能特許
励磁の方法と装置 門型フェライトを利用して一次磁界を変容し、検査対象金属内に高渦電流密度領域を作り出す。		
請求項1： 励磁方法 請求項3： その装置	探傷深度が深い 傷への感度が高い 傷の位置特定に優れる	、 、 各を個別に満足させる特許は存在しても、 、 、 を同時に満足させる代替特許技術は、見当たらない。
受信の方法と装置 門型フェライトと近傍する受信器を傾斜させる事により、一次磁界に対して無感状態にし、金属内を流れる渦電流からの二次磁界のみに感度を有する。		
請求項2： 請求項1と受信方法 請求項5： 請求項3と受信装置	インピーダンス平面観測から電圧出力測定へ単純化 厚みに対して1:1の電圧出力	、 を満足させる代替特許技術は、見当たらない。
方法の特許 x 2 装置の特許 x 7 計 9請求項	長尺アレイタイプ 屈曲アレイタイプ パイプ挿入アレイタイプ パイプ外挿アレイタイプ	各々請求項一つ
<ul style="list-style-type: none"> 励磁方法のみで、励磁方法 + 受信方法とを合わせて、二重に権利化。 特許権利は、センサープローブ内のコア形状、コイルの巻き方、受信器の据え付け方である事から、権利侵害の発見が容易。 		



引用文献の カテゴリー	引用文献名	関連する請求 の範囲の番号
A	JP 10-73570 A (ルーセント テクノロジーズ インコーポレイテッド) 1998.03.17, 全文 & US 5942893 A & EP 819944 A1	1-9
A	JP 10-288606 A (株式会社原子力エンジニアリング) 1998.10.27, 全文、全図 (ファミリーなし)	1-9
A	JP 3-167470 A (ゼネラル・エレクトリック・カンパニー) 1991.07.19, 全文、全図 & US 5006800 A & GB 2239524 & DE 4034817 A	1-9
A	JP 2000-131287 A (科学技術振興事業団) 2000.05.12, 全文、全図 (ファミリーなし)	1-9
A	JP 2006-194661 A (株式会社日立製作所) 2006.07.27, 全文、全図 & US 2006/0170420 A1	1-9
A	JP 2000-235020 A (株式会社原子力エンジニアリング) 2000.08.29, 全文、全図	1-9
A	& US 6344739 B1 & EP 1153289 A & WO 2000/047986 A1 & WO 2000/047987 A1	1-9
A	JP 2000-227420 A (日本鋼管株式会社) 2000.08.15, 全文、全図 (ファミリーなし)	1-9
A	JP 10-307124 A (鹿島建設株式会社) 1998.11.17, 全文、全図 (ファミリーなし)	1-9

1. 見解			
新規性 (N)	請求の範囲	1-9	有り
進歩性 (IS)	請求の範囲	1-9	有り
産業上の利用可能性 (IA)	請求の範囲	1-9	有り
<u>請求の範囲1-9に係る発明について</u>			
<p>門型断面形状の鉄心の第1脚部と第2脚部の内側に第1電流線路を、第1脚部の外側に第2電流線路を配置し、鉄心外の第2電流線路と反対側であって鉄心の第2脚部と導電体の間の隅角部に配置する渦電流探傷法は、上記文献のいずれにも開示されておらず、また、当業者にとっても自明なことでもない。</p>			

既存Instrument製品と傾斜渦電流法モジュール製品との比較



	既存渦電流探傷器 Instrument	傾斜渦電流法のセンサーモジュール
探傷方法	<p>既存の渦電流法による探傷解析は、インピーダンス平面上での点の軌跡を追わなければならない。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 技能取得者による目視観測が必要。 2. データの保存記録は限定的。 	<p>傾斜渦電流法では、電圧レベル計測のみで探傷、厚み測定が出来る。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 目視観測は必要ない。 人の読み取り技能に左右されない。 2. データの保存記録が完全。
時系列測定	<ul style="list-style-type: none"> • Y-t 観測では、傷の認識が不完全 	<ul style="list-style-type: none"> • 電圧出力のみの為、時間計測が簡単で完全
トレース時間	<ul style="list-style-type: none"> • 60秒 	<ul style="list-style-type: none"> • 時間限定なし、接続されるデータロガーによる。
利用	<ul style="list-style-type: none"> • 非破壊検査技能士による利用。 	<ul style="list-style-type: none"> • 検査のロボット化、自動化を推し進める。 • 誰でも一目瞭然。
開発投資	<ul style="list-style-type: none"> • PC接続機能が求められ、OS毎のソフト対応、度重なるバージョンUPにより、投資が大きい。 	<ul style="list-style-type: none"> • 市販のデータロガーを利用していただく。開発投資は小さい。
市場価格	<p>単価:170万~250万円 市場が小さい = 少量</p>	<p>予定単価: 20~30万円 センシング基本機能のみを提供</p>
市場の拡大	<ul style="list-style-type: none"> • 非破壊検査技能士の人数は限られている。市場は広がらない。 • 産業装置メーカーは、Instrumentを搭載しない。 	<ul style="list-style-type: none"> • 日本には多くの中小産業機械装置メーカーが存在する。 • 保全の人、製造の人でも市販のデータロガーを使えば利用できる。
競合と市場	<ul style="list-style-type: none"> • GE社、オリンパス社 低単価なモジュール商品への参入はないと考えられる。 	<ul style="list-style-type: none"> • 競合の持たない傾斜渦電流法の技術 • モジュール販売による、競合の居ないニッチ市場の形成と占有

各非破壊検査機器の現在の市場規模 推定



現在の市場	年間販売高	月間平均販売高	月間平均販売台数	市場平均価格
超音波探傷機器	52億円	4.3億円	1,000	25～80万円
渦電流探傷機器	28億円	2.3億円	100	170～500万円

- 超音波探傷機器の年間販売高は、52億円。（「検査・計測機器ビジネス市場の全貌」富士経済出版社より）
- (社)非破壊検査工業会発表による検査業務サービス販売額の内訳では、X線法24.5%、超音波法24.2%、浸透法13.4%、磁粉法13.1%、渦電流法4.3%、と渦電流探傷の利用規模は、X線法、超音波法と比べ約1/5と小さい。Instrument用渦電流探傷は、この比率におおよそ準ずると考えられる。しかし、Inline用渦電流探傷は除外される。

渦電流探傷機器の小分類	用途	年市場規模 合計26億円	販売単価	市場特性
Instrument用	PA向け：航空機、インフラのメンテナンス用	2～5億円	170～250万円	非破壊検査技能士にのみ利用される為、市場が狭い。
Inline用	FA向け：製造ラインに据付、金属製品の品質管理	25億円	300万円以上	供給企業は、5～6社程度有り、オーダーメイドとなる為、市場に行き渡っていない。

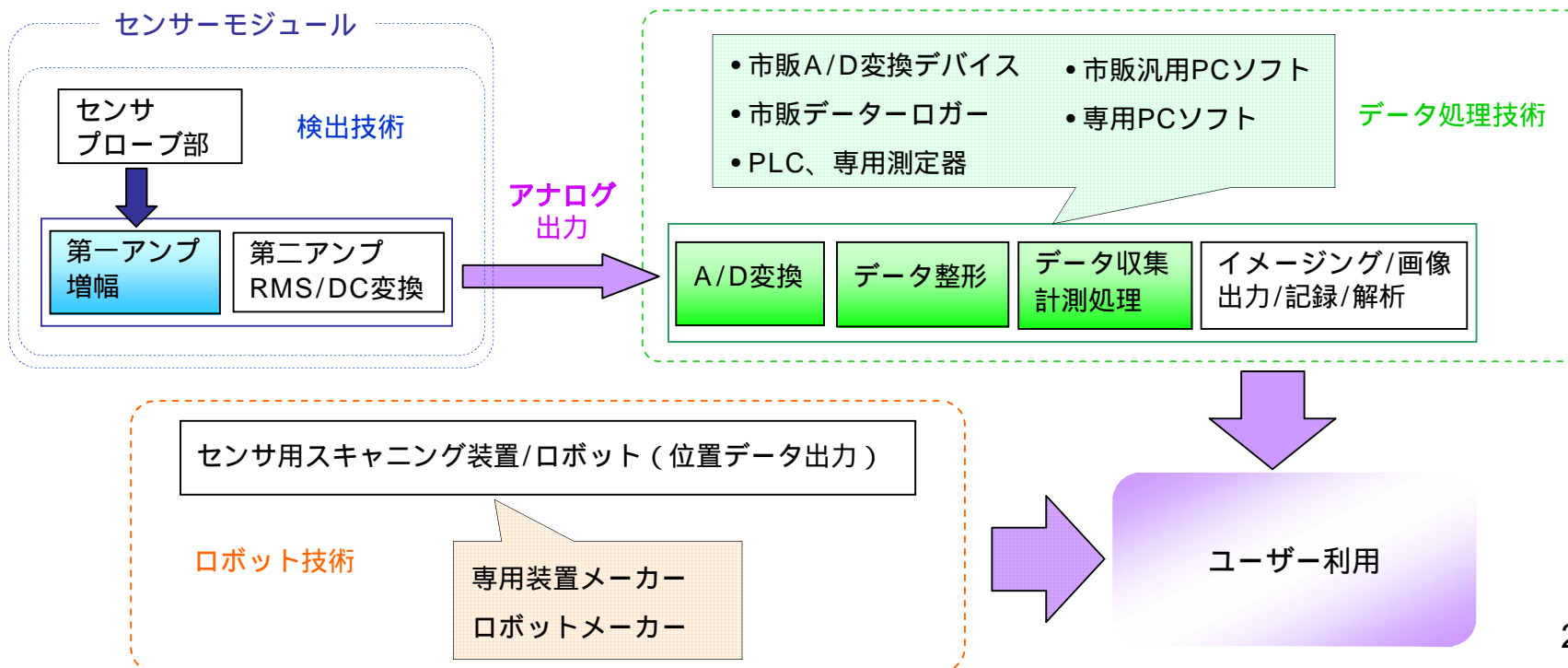
- Inline用渦電流探傷機器の専門メーカーである日本フェルスター社の売り上げは、18.6億円。その他小さな会社数社が供給しているので、Inline用の市場は、これよりおおよそ1.5倍程度と考えた。
- Instrument用渦電流探傷機器は、GE社、オリンパス社、日本クラウトクレマー社、等から販売されている。市場規模は、上記超音波探傷器の売上げと検査業務サービスの比率から求められた数値より低いものとした。

ビジネスモデル：渦電流探傷センサーモジュールでの販売

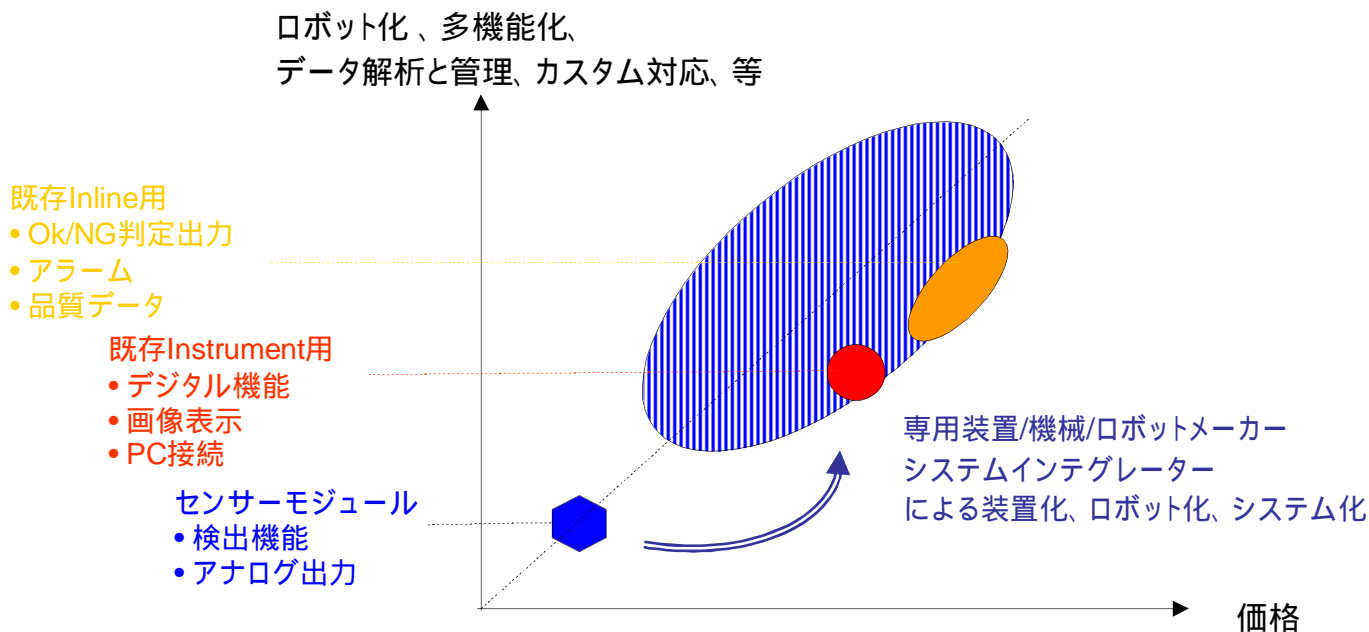
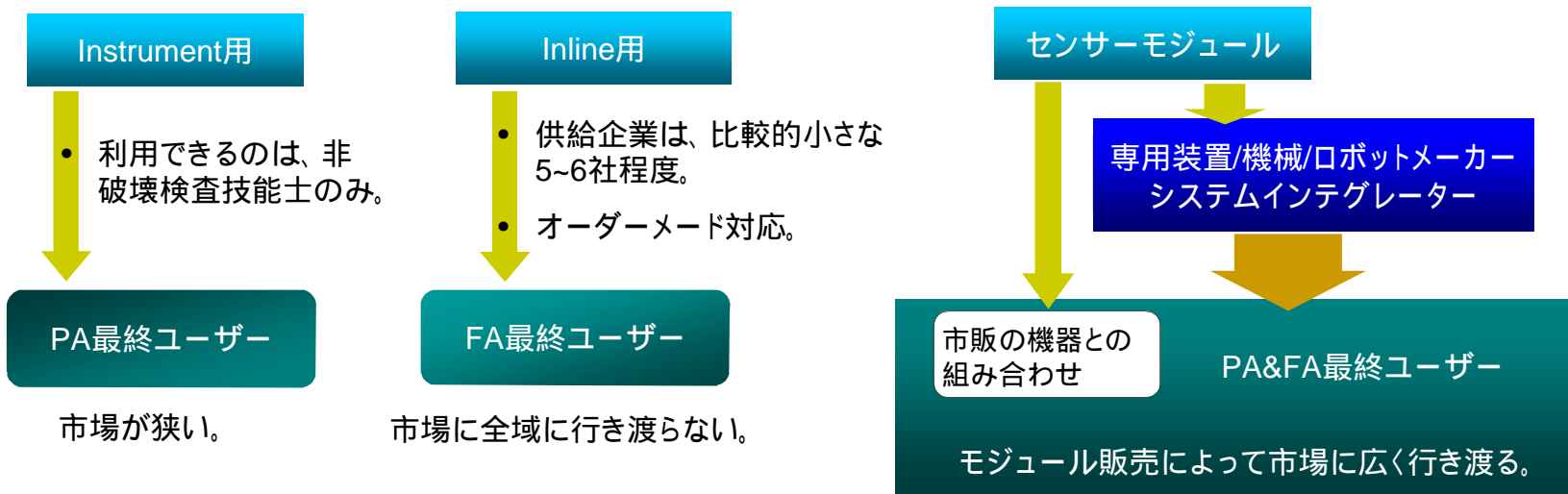


渦電流探傷	購入先	販売単価	量産化	機器の機能
Instrument用	PAエンドユーザー	170~250万円	汎用品	検出機能 + 画像表示、PC接続、各種プローブとの接続、目視による画像解析
Inline用	FAエンドユーザー	300万円以上	カスタム	検出機能 + 製造ライン据付、OK/NG判断、品質管理データ 自動良否判断
センサーモジュール	PAエンドユーザー、FAエンドユーザー、装置/ロボットメーカー、システムインテグレーター	20~30万円	汎用品	検出機能 + アナログ出力 販売する製品
		30~50万円	汎用品	データロガー おおよその市販価格

センサーモジュールと市販データロガーを組み合わせれば、Instrument用探傷器として利用できる。



ビジネスモデル：センサーモジュール販売の流通比較





	購入先	年市場規模	販売単価	平均月間販売台数
超音波探傷機器	PA向け、FA向け、	52億円	25～80万円	1,000
既存渦電流Instrument用	PA向け	3億円	170～250万円	12
既存渦電流Inline用	FA向け	25億円	300万円以上	50
傾斜渦電流法 センサーモジュール	PA向け、FA向け、 産業装置メーカー向け	6億円	20～30万円	250

- 超音波探傷装置が、月間1,000台ほど販売されていると想定される。これに対し、傾斜渦電流法 + センサーモジュールの月間販売台数は、月間250台ほどは十分達成可能な販売台数と考えられる。
- 他の探傷方式と比べ検出性能が優れ、使い易い。機器部品としてのモジュールの製造販売に特化し、メンテナンスが軽減、販売効率を上げる。傾斜渦電流法 + センサーモジュールの年間目標販売額6億円は、十分現実的な目標と見込まれる。

モジュール製品販売のもたらす効果

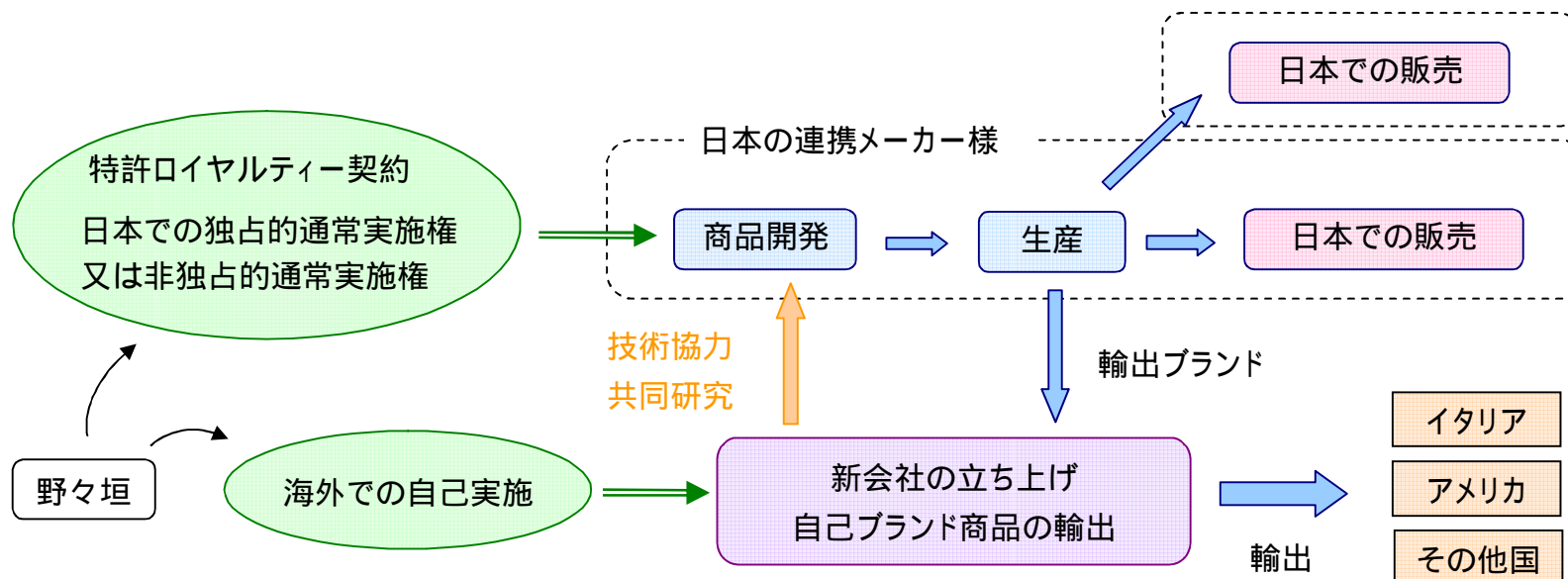
各種の装置/ロボットへの搭載、装備が容易になり、各分野での点検、検査の自動化が進むと考えられる。

- FA向けでは、最終出荷前検査から製品の生産制御へ、歩留まりの向上。
- PA向けでは、点検作業の負担が減られる事から、定期点検における点検箇所を増大、点検間隔の短縮(傷の進行が管理出来る)が行われ、安全性が高まる。又、運転稼働中の点検が可能になり、稼働率の向上。

事業連携のモデル



センサーモジュールの日本での製造と販売、輸出ブランドの製品供給をお願いしたい。
海外輸出によって量産効果が上がり、製品原価、製造コストをさらに削減できる。



発明者本人は、新しく会社を立ち上げ、当該商品の輸出を担当する。

- 海外技術営業経験15年、うちオランダ駐在5年、ドイツ駐在2年。
- 海外各国のセンサー販社との人脈をもつ。現在イタリアの販社と共同事業推進中。
- 傾斜渦電流法の技術を海外に広めたい。EU特許出願中。アメリカ計画中。

実施権	日本における独占的通常実施権、又は 非独占的通常実施権
対価	一時金 + 実施料(販売価格の3%程度)
その他	改良特許、周辺特許の共同出願