

平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「金属クラッド帯板の接合界面評価システムの開発」

研究開発成果報告書

平成22年3月31日

委託者 関東経済産業局

委託先 株式会社 特殊金属エクセル

目 次

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

- (1) 高度化指針における要請
- (2) 背景
- (3) 研究開発動向とこれまでの取り組み
- (4) 研究目的及び目標

1-2 研究体制

1-3 成果概要

1-4 当該研究開発の連絡窓口

第2章 本論

2-1 予備的有限要素法解析

- (1) 背景と目的・目標
- (2) 実施内容
 - (2.1)クラッドの拘束条件が固有値に与える影響の解析
 - (2.2)クラッドの内部欠陥が固有値に与える影響の解析
- (3) 成果
- (4) まとめ

2-2 共振測定装置製作

- (1) 背景と目的・目標
- (2) 実施内容と成果
- (3) まとめ

2-3 プロトタイプ探傷機製作

- (1) 背景と目的・目標
- (2) 実施内容と成果
- (3) まとめ

2-4 クラッド実検査ラインでの検証

- (1) 背景と目的・目標
- (2) 実施内容と成果
- (3) まとめ

2-5 プロジェクトの管理・運営

- (1) 研究開発推進委員会の設置
- (2) 委員会開催議事録

最3章 全体総括

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

(1) 高度化指針における要請

「特定ものづくり基盤技術高度化指針」において、溶接（接合）に係る技術に関する事項の中で、川下製造業者の抱える課題及び要請の一つとして自動車分野では、接合品質及び信頼性の向上を挙げている。そのために、中小企業事業者が達成すべき高度化目標の一つとして、製造プロセスにおける品質保証検査技術の高度化を掲げている。

さらに、指針では、この高度化目標の達成に資する特定研究開発等の実施方法として、非破壊検査技術の研究開発を方向性として示しており、より具体的には、内部欠陥の認識及び良否判定技術の研究開発が必要であると述べている。

本研究開発は、この高度化指針における要請に沿ったものである。

(2) 背景

近年、自動車の軽量化による燃費向上を図るために、搭載される電子機器モジュールは小型化され、そこに使用される電子部品の一つである電流検出用固定抵抗器もチップ化されて基板実装されるようになって来ている。しかし、特に、熱や振動の繰り返し負荷など、使用環境が厳しいモータ用等のモジュールにあつては、チップ型固定抵抗器の構成要素である抵抗体と電極の間の接合信頼性が問題となる。そこで、信頼性の高い固定抵抗器用材料として、金属抵抗材である Cu-Ni 合金や Ni-Cr 合金などの帯板と電極材である Cu 帯板を圧延で圧着して製造される、金属クラッド帯板[*]が使用されている（図1）。

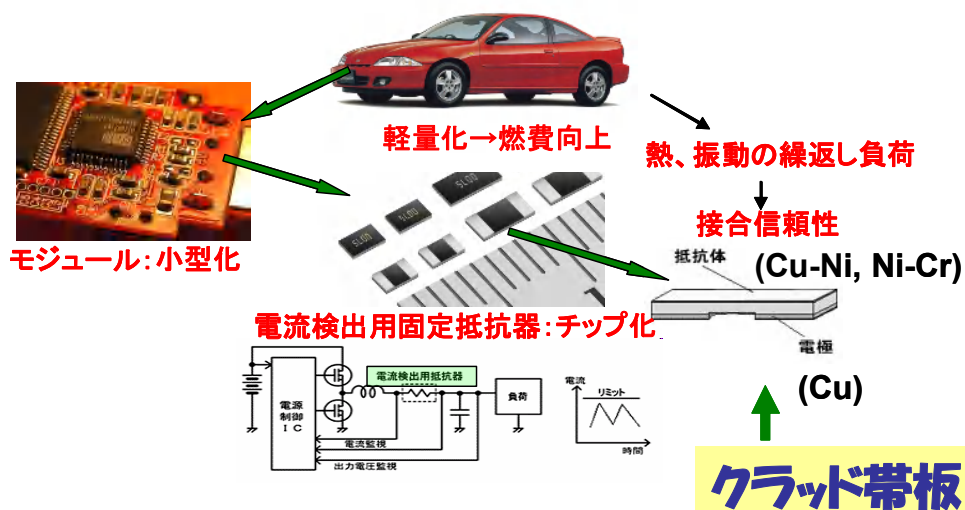


図1 車載固定抵抗器に対する接合信頼性の要求

(3) 研究開発動向とこれまでの取り組み

ところが、従来、長尺のクラッド帯板の接合界面品質を全長にわたって直接的に保証するための実用的な手段はなかった。X線や超音波探傷法（図3）などの非破壊的探傷法が検討されてはいるが、設備が高価であり、検査速度が遅く生産性が不十分で、さらに、その材料から製造される固定抵抗器が要求する探傷精度(解像度)にも不十分であり、材料製造現場で品質保証に利用することはできなかった。

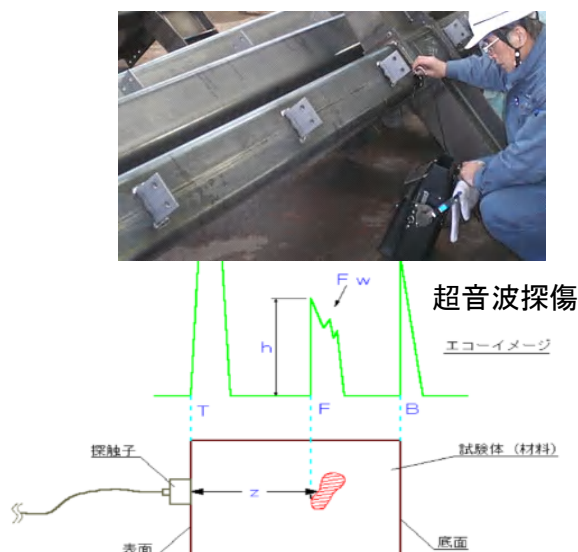


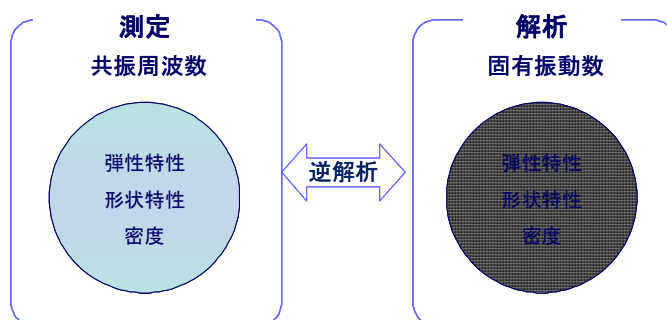
図3 超音波探傷による非破壊検査

従って、接合界面の品質は、材料製造条件の管理に頼って、間接的方法で保証せざるを得ず、潜在欠陥の可能性を否定できず、必ずしも品質管理が十分なされているとは言えなかった。また、その材料から作られた固定抵抗器に不良があった場合、材料の製造ロット単位で廃棄処理をすることになり、歩留りの悪化に伴う製造コスト増を招くばかりでなく、希少元素資源保護の観点からも問題があった。

そこで、クラッド帯板接合界面の品質を、直接的に、コイル全長に渡って保証する、新たな技術の研究開発の必要がある。

本課題解決のためのシーズ技術は、超音波共振による非破壊検査技術である。一般に、超音波共振とは、測定により得られる材料の共振周波数と、解析により得られる固有振動数とを比較することによって、材料物性（例えば、弾性率や密度など）を逆解析的[**]に同定する手法として知られている(図4)。

超音波共振法の原理



- 弾性特性の同定(弾性率, ポアソン比, 異方性)
- 非破壊検査(形状誤差, はく離・欠陥, 残留応力)

迅速 (1秒以内)
簡便 (圧電振動子と波形分析器のみ)
正確 (解像度が高い)

図4 超音波共振法による非破壊検査の原理

近年、荒木(埼玉大学：本研究実施者の一)らは、材料物性が既知である場合に、材料内部や表面の欠陥検出や応力同定において、本超音波共振法[***]が有用であることを示している[1,2]。本手法は、他の非破壊検査と比較して、迅速（数秒以内）・簡便（圧電振動子と波形分析器のみ）かつ正確な検査が可能である。従って、超音波共振法を金属クラッド帯板の検査に利用することにより、コイル状の帯板における不良部分を迅速・簡便に検出するための検査、品質保証システムの開発が期待される。

既に、荒木らは、有限要素法解析による予備的な検討によって、クラッド板の共振周波数や共振モードは、接合界面の剥離の大きさに依存するとの知見を得ている（図5）。連続体である帯板に対しても、この方法を拡張して適用し、実際のクラッド帯板の共振測定と対比させることによって、逆解析的に欠陥の有無を判断することができると考えられる。これを利用すれば、簡便で安価な設備によって、実用上十分な生産性と精度の、クラッド帯板全長にわたる接合界面の品質評価システムを構築することが可能である。

はく離を有するクラッド板の共振（1mm厚の板を2枚重ねた場合）

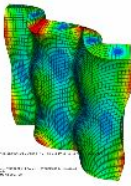
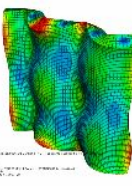
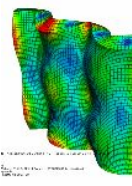
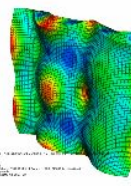
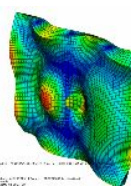
Sample	1	2	3	4	5
はく離 位置・大きさ	無	有	有	有	有
共振モード					
共振周波数 (kHz)	137.880	137.859	137.303	133.913	125.828

図5 界面剥離の大きさによるクラッド板の共振状況の相違

（４）研究目的及び目標

本研究開発は、自動車用の固定抵抗器の製造に使用される金属クラッド帯板の接合品質を保証することにより、その抵抗器が実装される自動車用電子機器基板の信頼性向上を図ることを目的とし、そのために、金属クラッド帯板の接合界面の接合品質を、全長にわたって保証するための検査技術とそれを実現するシステムのプロトタイプを開発することを

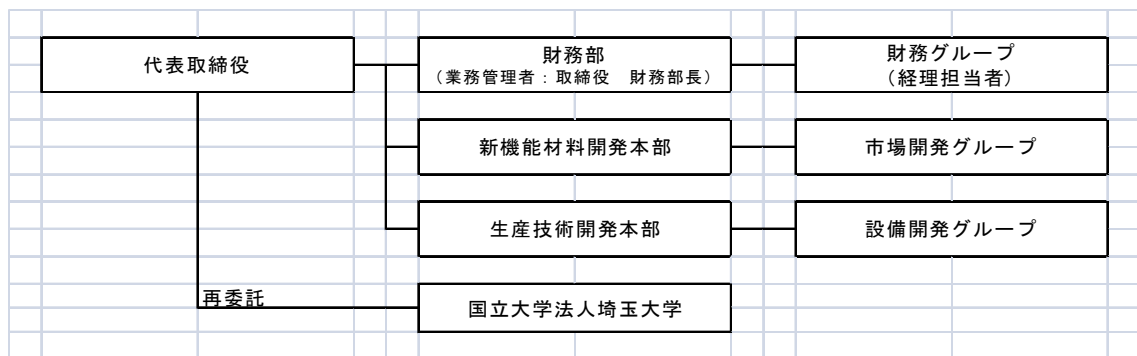


図7 事業管理者（株）特殊金属エクセルの管理体制

表1 管理員および研究員のリスト

【事業管理者】株式会社特殊金属エクセル

①管理員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
田中 光之	監査役 新機能材料開発本部 統括マネジャー	⑤

②研究員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
田中 光之(再)	監査役 新機能材料開発本部 統括マネジャー	③④
成田 毅央	新機能材料開発本部 市場開発グループ	③④
小林 怜史	新機能材料開発本部 市場開発グループ	④
斉藤 桂亮	生産技術開発本部 設備開発グループ	③

【再委託先】国立大学法人埼玉大学

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
荒木 稚子	大学院理工学研究科 准教授	①②
内木 浩太	大学院理工学研究科 学生(修士)	①②

表2 研究開発推進委員会

研究開発推進委員会 委員

氏名	所属・役職	備考
田中 光之	株式会社特殊金属エクセル 監査役	PL

荒木 稚子	新機能材料開発本部 統括マネジャー	SL アドバイザー
荒居 善雄	国立大学法人埼玉大学 大学院理工学研究科 准教授	
成田 毅央	国立大学法人埼玉大学 大学院理工学研究科 教授	
	株式会社特殊金属エクセル	
	新機能材料開発本部 市場開発グループ	
小林 怜史	株式会社特殊金属エクセル	
	新機能材料開発本部 市場開発グループ	委 アドバイザー アドバイザー
斉藤 桂亮	株式会社特殊金属エクセル	
	生産技術開発本部 設備開発グループ	
内木 浩太	国立大学法人埼玉大学 大学院理工学研究科 学生(修士)	
仲村 圭史	コア株式会社 基盤技術事業化センター マネジャー	
吉岡 忠彦	コア株式会社 基盤技術事業化センター	

1-3 成果概要

本研究開発の実施内容項目ごとに、得られた成果の概要を下記に示す。

①予備的有限要素法解析

金属クラッド帯板の超音波共振を有限要素法でシミュレーションするモデルを構築した。材料支持方法が共振に大きな影響を及ぼすことが示され、実際の共振測定装置において必要な張力制御精度が明らかになり、また、剥離位置と剥離有無の影響を区別するための詳細な解析が必要であることが示された。

②共振測定装置製作

長尺材の共振測定においては、支持条件によって共振状況が異なり、さらに安定した最適支持方法を検討する必要がある。その支持条件と支持体に挟まれた部分の共振特性の関係をさらに追求する必要がある。また、各共振モードの簡便な同定法を検討する必要がある。

③プロトタイプ探傷機製作

予備的に振動媒体の機能を確認した上で、プロトタイプ探傷機を設計製作した。

④クラッド実検査ラインでの検証

1 mm の接合欠陥を検出するためには、振動子やロールと材料との接触状態をもっと工夫して、安定した共振波形が得られる方法を検討しなければならない。また、共振モードの同定方法を検討する必要がある。

⑤プロジェクトの管理・運営

委員会を2回開催し、各研究実施者から研究開発における進捗状況等の説明を行い、その内容について協議を行った。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

当該研究開発の連絡窓口は、事業管理者である下記の者がそれを務める。(本年4月に組織名称変更)

田中光之

株式会社特殊金属エクセル 監査役・新機能材料研究開発本部マネジャー

〒355-0342 埼玉県比企郡ときがわ町玉川 56

Tel : 0493-65-4030 Fax : 0493-65-3578

e-mail : m-tanaka@tokkin.co.jp

第2章 本論

本研究開発の内容と成果を、実施計画書の項目ごとに以下に説明する。

2-1 予備的有限要素法解析 (実施：国立大学法人埼玉大学、株式会社特殊金属エクセル)

(1) 背景と目的・目標

超音波共振法によって材料内部の欠陥を検出するには、測定対象物の有限要素法固有値解析と共振測定を対比する。従来は、個々に独立した部品の研究がなされており、一部で実用化されつつあるが、長尺コイル状の金属クラッド帯板のような連続体に対して研究された例はない。

測定対象物が連続体の場合には、全体の固有値解析や共振測定をすることができないので、一部分を支持した状態における解析や測定をすることになる。しかし、どのような支持をしたらよいか、その支持方法が固有値解析や共振測定にどのような影響をあたえるか、などが知られておらず、超音波共振法における連続体特有の課題である (図8)。

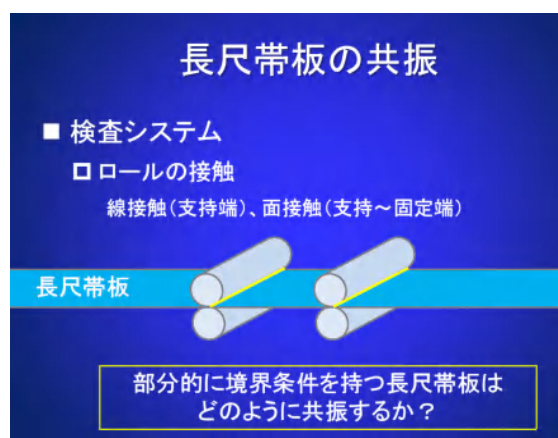


図8 長尺帯板の支持と共振の概念

また、クラッド内部の非接合欠陥にあっては、その形状は、板面に垂直な方向には非常に小さく、板面内方向広がっている独特のものであるので、欠陥が共振周波数や共振モードにどのような影響を与えるかも知られていない。

これらの情報が得られれば、2－3項のプロトタイプ探傷機製作において、重要な設計指針となる。

そこで、まず、有限要素法固有値解析において、解析対象たる金属クラッド帯板の拘束条件が固有値に与える影響を、1mm（直径）以上の接合不良欠陥の有無との関係において検討する。また、クラッド接合界面にある欠陥に敏感な固有振動モードを同定する。

（２）実施内容

図9に示すとおり、長い板材の支持方法が共振に与える影響を知る目的で、厚さ 1mm、幅 20mm、長さ 60、80、100mm の銅板を想定した有限要素法モデルを作成し、汎用の非線形有限要素法プログラム ABAQUS を使用して固有値解析を実施した。両端は自由端とし、中央 20mm 長さの両側を固定端または支持端とした場合について固有振動数や固有振動モードを解析した。

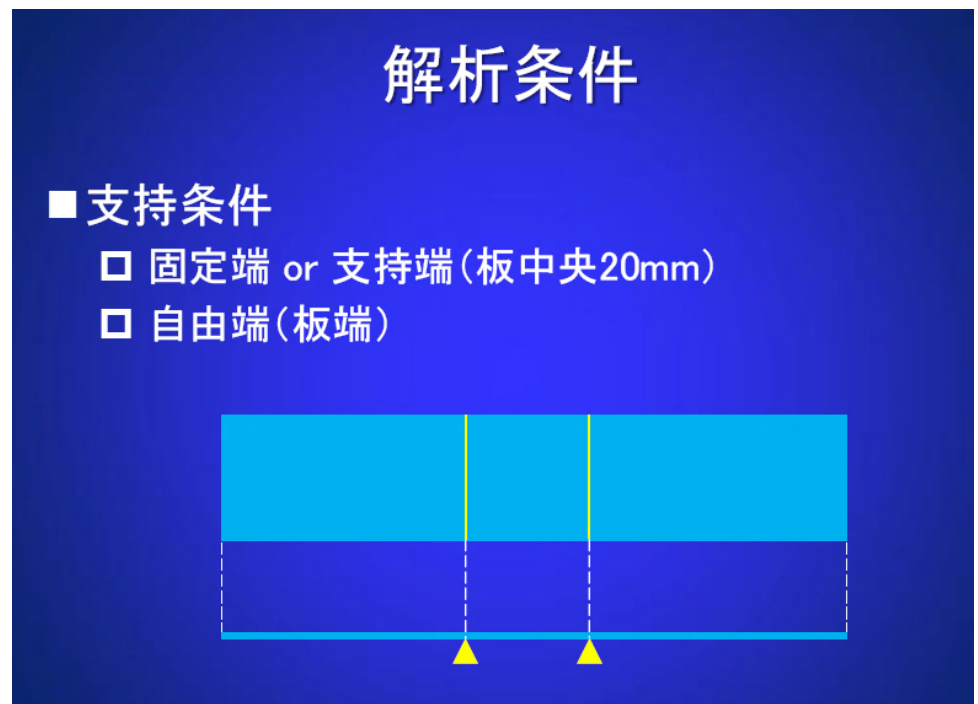
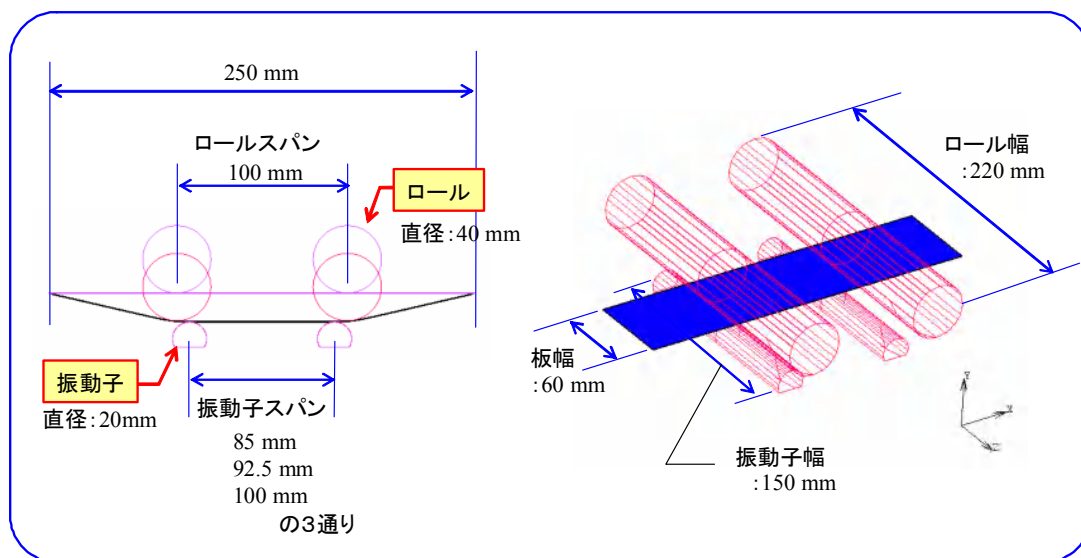


図9 長尺材の支持条件が固有振動に与える影響を解析するモデル

それとは別に、実ラインの設計指針を得るための解析として、2－3項で製作するプロトタイプ探傷機のラインを想定して、図10に示す有限要素法モデルを作成した。

連続体である長尺帯板に張力を与えて、その一部を剛体のロールで支持、これも剛体とした振動子を帯板に接触して超音波振動を加振・受振する。ロールや振動子と材料の間は、接触問題として扱う。発振・受振の振動子のスパンは3通りである（図10－1）。

■解析モデル概要



●モデル寸法(ロールと振動子は剛体としてモデル化)

図 10-1 解析モデル：剛体ロールによる弾性体板材の支持

解析対象の材料は金属抵抗材料の板と銅板のクラッドであるので、厚さ方向はそれぞれの材料の厚さに応じたメッシュ分割をし、それぞれ材料特性を与えた。両材料の境界は、一般的な部分は接点を共有して連続した材料とし、想定した剥離部分は接点を分離することによって剥離を表現した。使用した要素のタイプは Solid-Shell 要素である(図 10-2)。

■解析モデル概要

●板材の接着と剥離のモデル化

接着面の節点は共有化し、剥離部のみ節点を分離

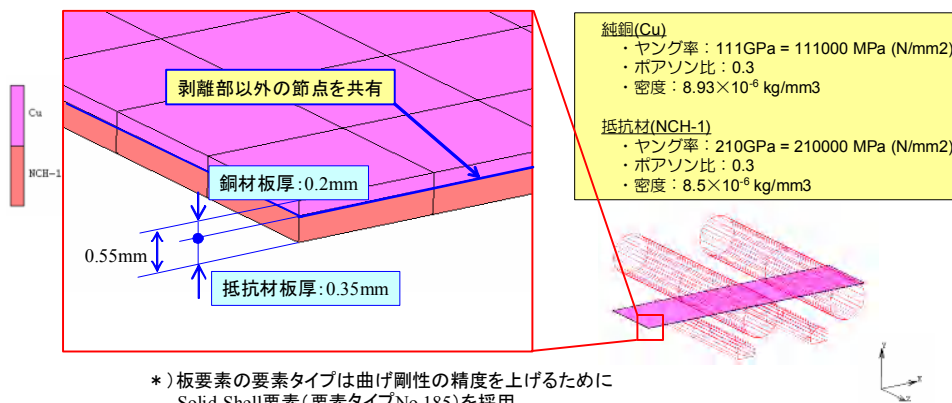


図 10-2 解析モデル：クラッド板材のモデル化

材料の面内方向の要素分割は次の通りである。すなわち、 $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ の大きさとした剥離部分は 8×8 分割（一つのメッシュサイズが $0.125\text{mm} \times 0.125\text{mm}$ ）、ロールスパン内の剥離部以外は、 $0.5\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ とした。また、ロールのスパン外のメッシュは、スパン内の材料の固有値にあまり影響ないと推定して、 $2\text{mm} \times 2\text{mm}$ とした（図 10-3）。

剥離の位置は、ロールスパン内中心部、および、幅方向、長さ方向 2ヶ所ずつとした。この部分は上記の剥離部分のメッシュ分割を与えているが、個々の位置ごとに材料の剥離を表現する接点の分離を付与し、それぞれの場合の解析を行なった（図 10-4）。

境界条件として、振動子と材料との接触荷重を 3 通り、振動子のスパンを 3 通りに変化させ、それぞれの場合の解析を行なった（図 10-5）。材料に与えた張力は、材料断面積あたり 3, 10, 15kgf/mm^2 の 3 通りとした。

■解析モデル概要

●板材のメッシュ分割(1)

- ・ 剥離部メッシュサイズ： 0.125mm (剥離サイズ 1mm を 8 分割)
- ・ ロールスパン内一般部メッシュサイズ： 0.5mm
- ・ ロールスパン外一般部メッシュサイズ： 2mm （評価対象外）

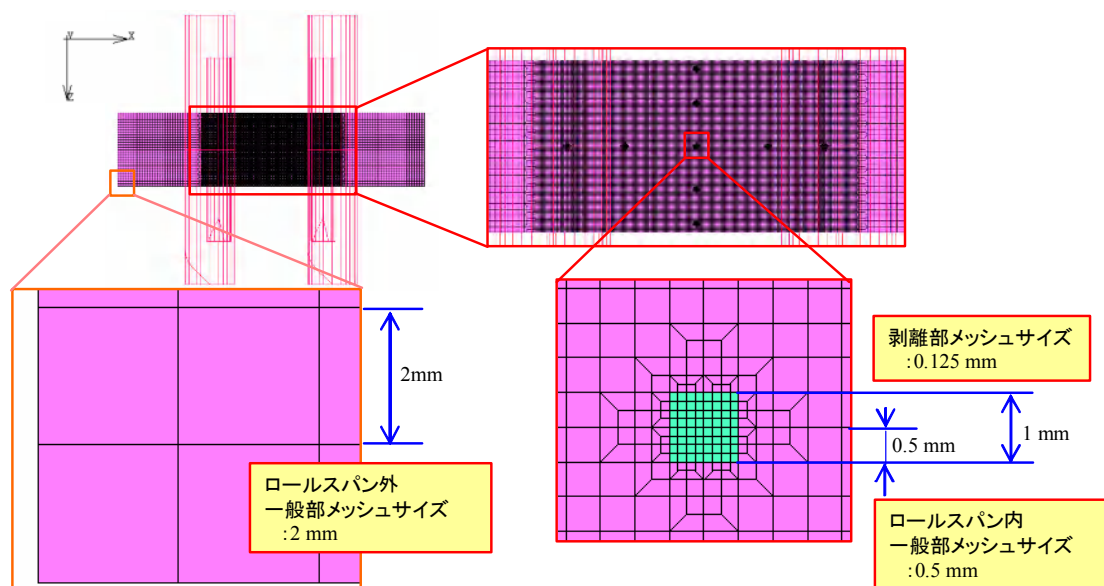


図 10-3 解析モデル：板材のメッシュ分割

■解析モデル概要

●板材のメッシュ分割(2)

メッシュ分割の差異による計算誤差を低減するために
所定の全剥離位置(対称部含む)に詳細メッシュを配備した。

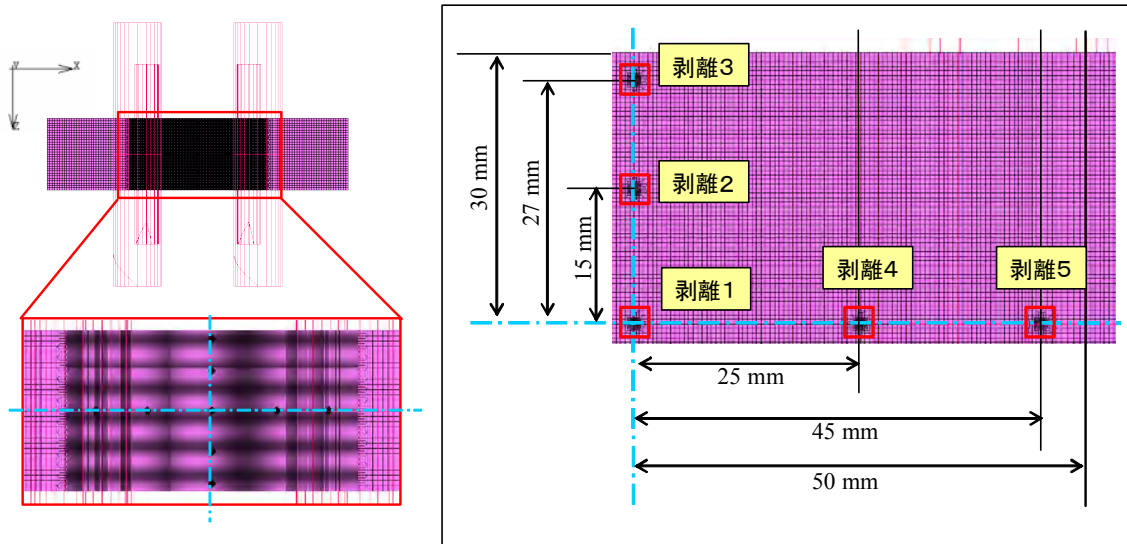


図 10-4 解析モデル：剥離の位置

■解析モデル概要

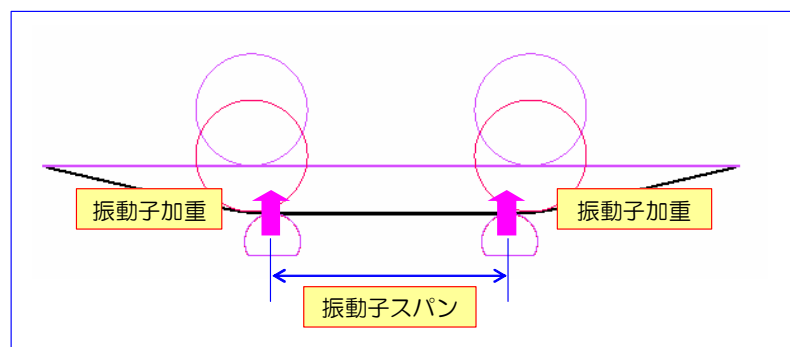
●境界条件

振動子荷重

・ 6.5N、25.5N、127.4Nの3ケースで荷重制御

振動子スパン

・ 85mm、92.5mm、100mmの3通り



本解析モデル

図 10-5 解析モデル：境界条件

解析には、汎用の非線形有限要素法プログラム MARC(2008r1), Windows XP 版を使用した。MARC は、前述の ABAQUS とともに、非線形商用コードとして定評がある有限要素法プログラムであり、信頼性が高い。図 1 1 は MARC のプリ/ポストプロセッサである MENTAT を通じて MARC で解析中の様子である。使用したハードウェアは、64 ビットの Xeon(R) X5550 プロセッサ (2.66GHz)×2CPU、8GB のメモリーを搭載したワークステーションである。



図 1 1 非線形有限要素法 Marc による解析の様子

(3) 成果

図 9 のモデルで、支持方法によって固有値がどのように変わるかを解析した結果を、図 1 2 に示す。

支持端の場合、一次の単純振動から 8 次の対称振動に至るまでの間に、特に支持部の外側に各種の固有振動があることがわかる (図 1 2 - 1)。材料の長さが長いと、固有振動の周波数は高くなるが、支持部外側の振動モードによっては、その影響は少ない場合がある。

(図 1 2 - 2) 長尺材の一部が固定端で拘束されている場合は、拘束の内側と外側では別々

に固有振動が起こる。また、内側の固有振動数は、外側に材料があると高くなる（図 1 2－3）。

これらの結果から、長尺帯板の一部を超音波共振させようとする場合、共振の周波数やモードは、拘束の条件によって大きな影響を受けることが判明した。従って、実際の共振測定においては、安定した材料拘束を付与する必要がある。

解析結果(支持端)

Mode #	Freq. Hz	sym	center	side
1	279.06			
2	334.16			
3	1532.6	sym		s1
4	1563.9	asym		s1
5	1929.2	sym		s2
6	2178.3	asym		s2
7	4928.2	sym		s3
8	5080.1	asym		s3
9	5190.4	sym	c1	s4
10	6166.8	asym		s4
11	6496.6	left		s5
12	6496.7	right		s5
13	7904.6	sym	c1	s4
14	8475.9	sym	c2	s6
15	9701.9	asym		s6
16	10413	asym		s7
17	10466	sym		s7
18	10711	sym	c2	s6
19	12186	asym		s8
20	12931	sym		s8

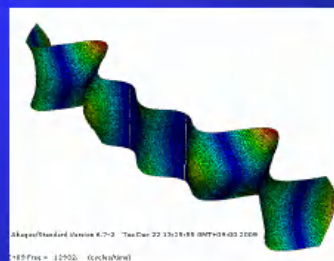
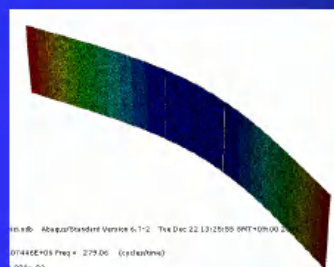


図 1 2－1 長尺材の一部が支持端で拘束されている場合の固有振動

解析結果(支持端)

■長さと周波数

Mode #	単体	帯板60 mm	帯板80 mm	帯板100 mm
				
c1	4356	5663.6	6941.7	7904.6
c2	7018.8	8847.5	9663	10711
c3	16006	17585	18037	17457
c4	17447	19910	19495	23941
c5	20504	23386	22945	22573

周波数は、* サイドが長いほど高い傾向
* サイドのモードに依存

16

図 1 2 - 2 長さの異なる材料が支持端で拘束されている場合の固有振動

解析結果

■固定端

Mode #	Freq, Hz	center	side
1	1663		s1
2	2426		s2
3	5318		s3
4	6496		s4
5	6775		s5
6	10210		s6
7	10483		s7
8	10748	c1	
9	12470	c2	

Mode	単体	帯板100mm
		
c1	9917	10748
c2	11644	12470
c3	19039	

固定端では、* サイドとセンターは別々
* 単体よりも周波数は高い

17

図 1 2 - 3 長尺材の一部が固定端で拘束されている場合の固有振動

図 10 のモデルによる解析結果の内、主要なものを図 13 に示す。

固有振動の周波数は、材料に与えられた張力の影響を強く受ける。同じ共振モードにおける固有振動数は、張力が大きいほど高くなり、解析した張力の範囲では、張力とほぼ線形の関係にあり、その傾きは $2.6\text{Hz}/(\text{kgf}/\text{mm}^2)$ である。この関係は、剥離があってもなくても同じである (図 13-1)。

■初期検討解析モデル

●剥離有無の振動数差 上位20モード

最低次の同一剥離モードでは、張力 $3\text{kg}/\text{mm}^2$ に対し、張力 $10\text{kg}/\text{mm}^2$ では 17Hz 高め(剥離無しで $100285\text{--}100268\text{Hz}$)、張力 $15\text{kg}/\text{mm}^2$ では 31Hz 高め(剥離無しで $100299\text{--}100268\text{Hz}$)となった。



図 13-1 張力と剥離が固有振動に与える影響

また、ロールのスパン中央部にクラッド界面の剥離 ($1\text{mm} \times 1\text{mm}$) がある場合、数 Hz の固有振動数の差が出てくる。この差は張力の大きさには依存しない (図 13-1)。また、加振周波数が 100kHz から 150 個の固有振動数では、共振モードの差は見られなかった。剥離の大きさは振動の $1/4$ 波長以下なので、剥離の有無による固有振動の差はあまり大きくない (図 13-2)。

この解析の結果から、実際の共振測定においては、張力が一定になるように制御する必要

があることが明らかになった。その 1kgf/mm^2 の変動による固有振動数差は、 $1\text{mm}\times 1\text{mm}$ の欠陥の有無による固有振動数差を隠蔽する可能性がある。従って、実際の検査ラインの張力制御は、インバータモータによるものとしなければならない。株式会社特殊金属エクセルは、厚さ 0.01mm の金属箔のコイル圧延や連続焼鈍をしており、その設備は自社で設計している。上記の張力制御は実現可能である。これを 2－3 項のプロトタイプ探傷機製作に反映させている。

■初期検討解析モデル

●最低次の同一剥離モード図

最低次の同一剥離モード図(約 100kHz)

(剥離サイズ 1mm に対し、 $1/2$ 波長が約 3mm のYZ平面に対称なモード)

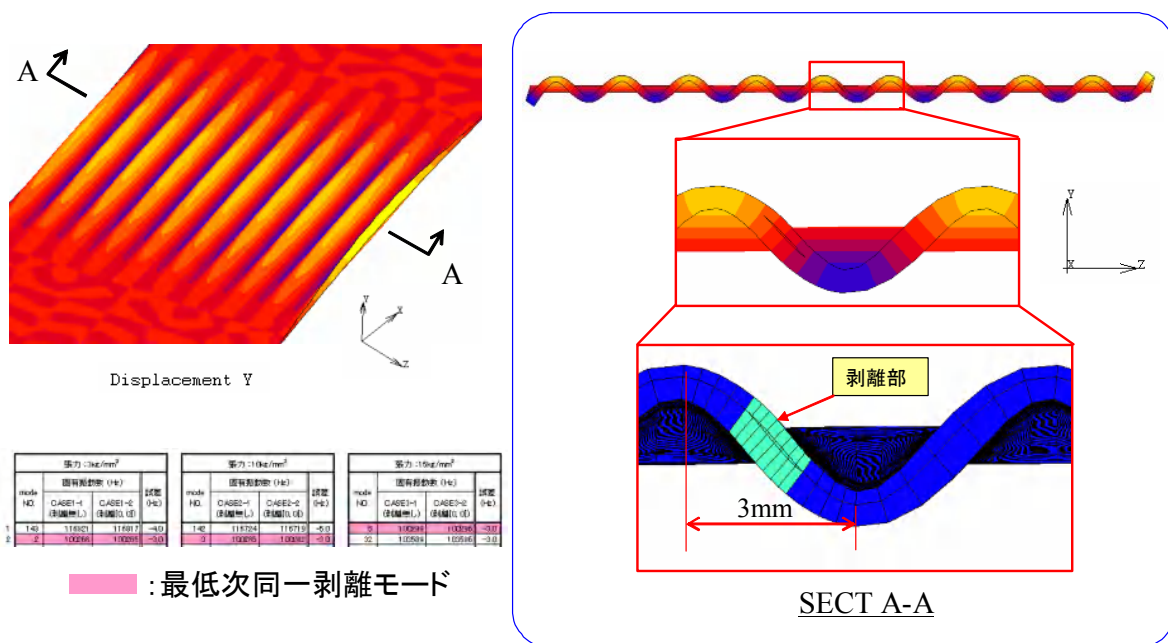


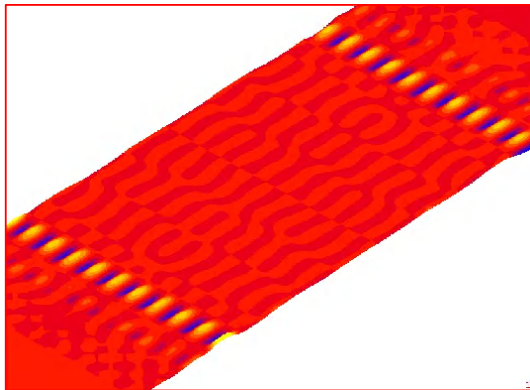
図 1 3－2 剥離がある材料の固有振動の様子

振動子の接触荷重が $6.5, 25.5, 127.4\text{N}$ と変化させた場合、また、振動子のスパンを $92.5, 100\text{mm}$ に変化させた場合、固有振動のモードが全く変わってくる(図 1 3－3、1 3－4)。従って、これらの条件も、実際の検査ラインでは一定になるようにしなければならない。2－3 項のプロトタイプ探傷機においては、接触荷重はばねの力で与えるので、変位が一定になるように制御すれば、荷重一定が保たれる。また、振動子スパンは位置決めしたら固定できるようにするので、一定に保たれる。

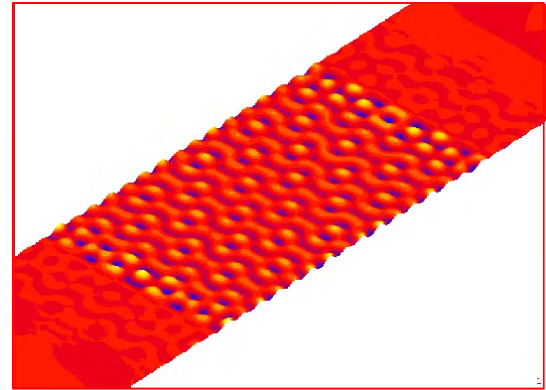
■追加検討 振動子荷重結果

- 振動子荷重6.5Nでは基準状態とはモードが1対1対応せず、固有振動数も著しく異なる結果

振動子加重 : 6.5N			
mode NO.	固有振動数(Hz)		誤差 (Hz)
	基準条件 (剥離無し)	CASE3-1	
150	117589	100210	17379
149	117482	100261	17221
148	117344	100279	17065
147	117230	100369	16861
146	117228	100420	16808



基準条件_mode150



CASE3-1_mode150

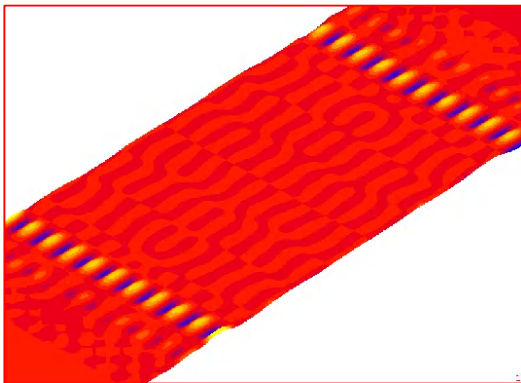
図 1 3 - 3 振動子の接触荷重が固有振動に与える影響

■追加検討 振動子スパン結果

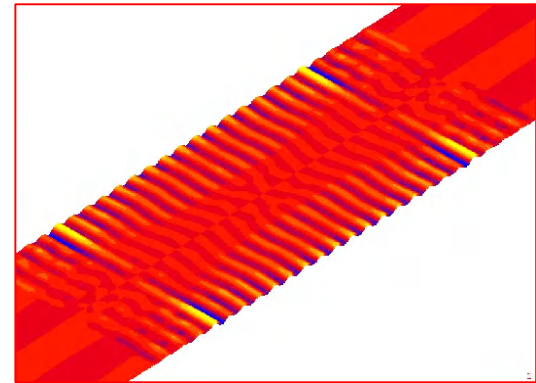
- 振動子スパン92.5mm,100mmでは基準状態とはモードが1対1対応せず、固有振動数も著しく異なる結果

振動子スパン : 92.5mm			
mode NO.	固有振動数(Hz)		誤差 (Hz)
	基準条件 (剥離無し)	CASE3-3	
150	117589	118021	432
149	117482	118001	519
148	117344	117990	646
147	117230	117707	477
146	117228	117520	292

振動子スパン : 100mm			
mode NO.	固有振動数(Hz)		誤差 (Hz)
	基準条件 (剥離無し)	CASE3-4	
126	114633	115600	967
134	115684	116600	916
137	116161	117070	909
138	116284	117186	902
125	114578	115413	835



基準条件_mode150



CASE3-3_mode150

図 1 3 - 4 振動子のスパンが固有振動に与える影響

剥離位置の相違は、固有振動モードの差を与えず、固有振動周波数の数 kHz の差をもたらす（図 1 3－5）。従って、実際の共振測定で解析と共振の周波数差があった場合、それが剥離欠陥の有無によるものか、剥離位置の相違によるものかを区別しなければならない。剥離位置によって周波数がどちらにどれだけずれるか、詳細な解析と、定量的関係を求めておく必要がある。

■追加検討 剥離箇所2～5の結果

- 最高次の同一剥離モードでは、
箇所2～5に対し、モード形状の相違はみられず、最大振動数差は5Hz程度に留まった。

剥離箇所 : No.2			
mode NO.	固有振動数(Hz)	誤差 (Hz)	
基準条件 (剥離無し)	CASE3-5		
58	107007	107004	3
13	101497	101494	3
95	111540	111538	2
113	113625	113623	2
41	105209	105207	2
101	112166	112164	2
38	104670	104668	2
70	107840	107839	1
133	115659	115660	1
140	116497	116496	1

剥離箇所 : No.3			
mode NO.	固有振動数(Hz)	誤差 (Hz)	
基準条件 (剥離無し)	CASE3-6		
89	110911	110908	3
122	114227	114225	2
98	112030	112028	2
16	101597	101595	2
97	111854	111852	2
58	107007	107006	1
13	101497	101496	1
41	105209	105208	1
101	112166	112165	1
70	107840	107839	1

剥離箇所 : No.4			
mode NO.	固有振動数(Hz)	誤差 (Hz)	
基準条件 (剥離無し)	CASE3-7		
57	106845	106842	3
80	109158	109155	3
97	111854	111852	2
143	116821	116819	2
33	104069	104067	2
110	113239	113237	2
7	100887	100885	2
37	104432	104430	2
12	101429	101427	2
90	110946	110944	2

剥離箇所 : No.5			
mode NO.	固有振動数(Hz)	誤差 (Hz)	
基準条件 (剥離無し)	CASE3-8		
81	109301	109296	5
64	107467	107462	5
115	113808	113804	4
85	109964	109960	4
54	106586	106582	4
67	107654	107650	4
97	111854	111851	3
135	116039	116036	3
55	106760	106757	3
57	106845	106843	2

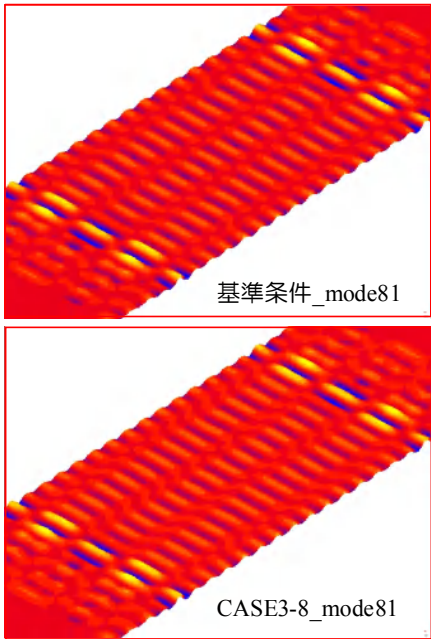


図 1 3－5 剥離の位置が固有振動に与える影響

なお、図 1 0 のモデルにおいては、上記のハードウェアを使用して、一つの条件の解析を実施するのに約 2 時間を要した。この時間は、オフラインであらかじめ種々の条件の固有値解析を行なっておいてデータベース作成し、実検査ラインでは、測定結果をデータベースと対比すると方法を採用すれば、十分実用的な計算所要時間であり、クラッド帯板の接合界面評価のために作成した解析モデルが、計算所要時間の観点から、適当であったことが示された。

(4) まとめ

金属クラッド帯板の接合界面を超音波共振法で評価することを想定して、それを有限要素法で効率よくシミュレーションするモデルを構築することができた。

そのモデルを使用して、固有振動解析を実施した結果、次の点が明らかになった。

- ・固有振動は拘束条件に強く影響されるので、共振測定ラインでは安定した拘束を付与する必要がある。
- ・材料に付与される張力は固有値に大きな影響がある。
- ・しかし、実際の共振測定において、クラッド界面剥離の影響が隠蔽されない程度に精度よく張力を制御できる設備を製作することは十分可能である。
- ・振動子の接触荷重やスパンも固有振動に影響が大きい、実際の共振測定においては十分制御できる。
- ・剥離位置による固有振動数の相違と剥離有無による相違を区別するために、より詳細な解析が必要で、それに基づく定量的な関係を求めておく必要がある。

2-2 共振測定装置製作（実施：国立大学法人埼玉大学）

（1）背景と目的・目標

超音波共振測定は、従来、ベアリングなどの立体的形状のものを対称として研究されており、クラッド板などの薄板形状の物体の測定例は少ない。

そこで、薄板の共振測定の可能性を探る目的で、超音波発振子と波形分析装置を組み合わせ、ラボ的な超音波共振装置を製作し、共振評価用サンプル材を用いて共振測定を行う。また、2-1項の成果と組み合わせて、共振から欠陥を同定するための逆解析プログラムを作成する。

（2）実施内容と成果

図14は、製作したラボ的な超音波共振測定装置である。超音波発信子による共振部分と共振周波数を表示すると波形分析装置より成る（図14-1）。共振部の実例を図14-2に示す。

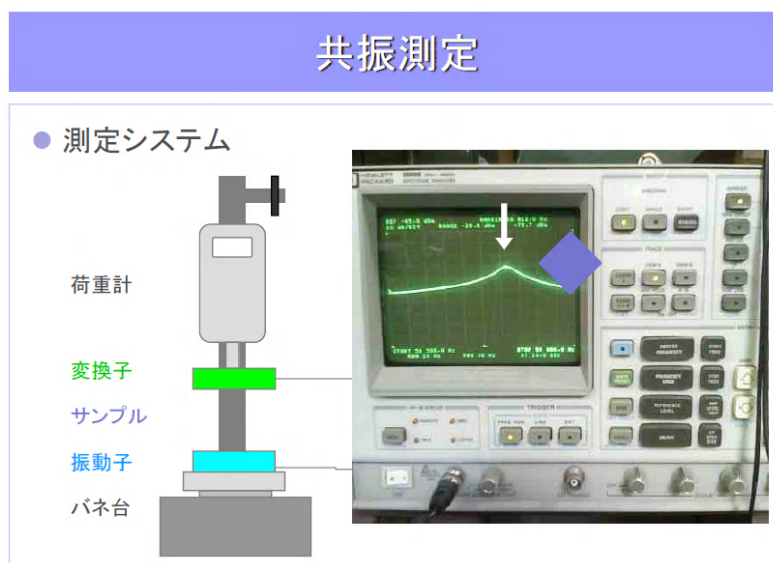


図14-1 超音波共振測定装置

共振測定には、加振子と受振子が材料に安定して接触する必要がある。接触状態が不安定であると、測定される共振周波数がばらつくからである。

図15は、長尺の板材を測定する場合に対して、接触方法の改良をした例である。これによって測定方法の簡便性が大幅に向上した。この方法はクラッド帯板の実際の測定ラインでも取り入れやすい方法である。さらに、図16のように、支持部と共振測定部を分離すれば、さらに安定的な接触状態が得られる。この考え方は、2－3項のプロトタイプ探傷機製作の際にも取り入れられている。

共振実験 実験装置

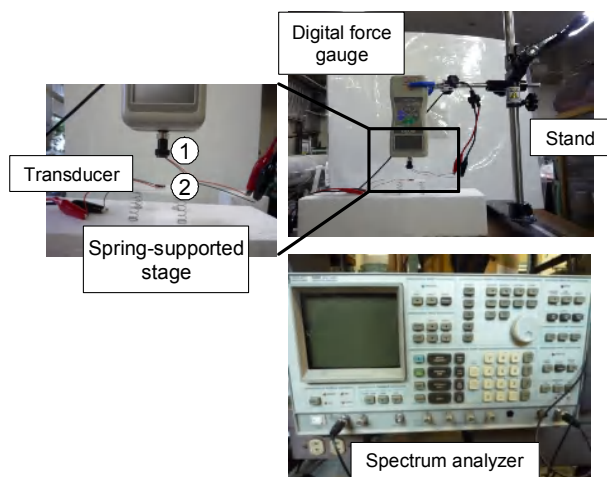
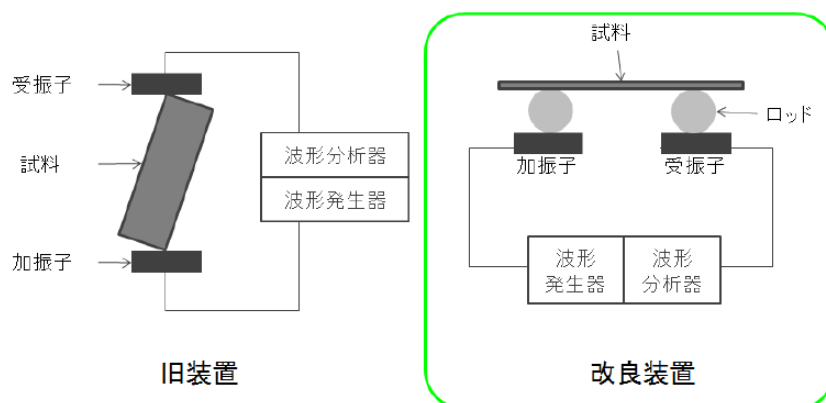


Fig. 9 Experimental setup

図14－2 共振部の実例



共振測定装置を、試料を挟み込む形から、単に載せる形へと改良した。
→改良により、測定の簡易性が大幅に向上した。(測定精度は同等)

図15 共振測定装置の改良

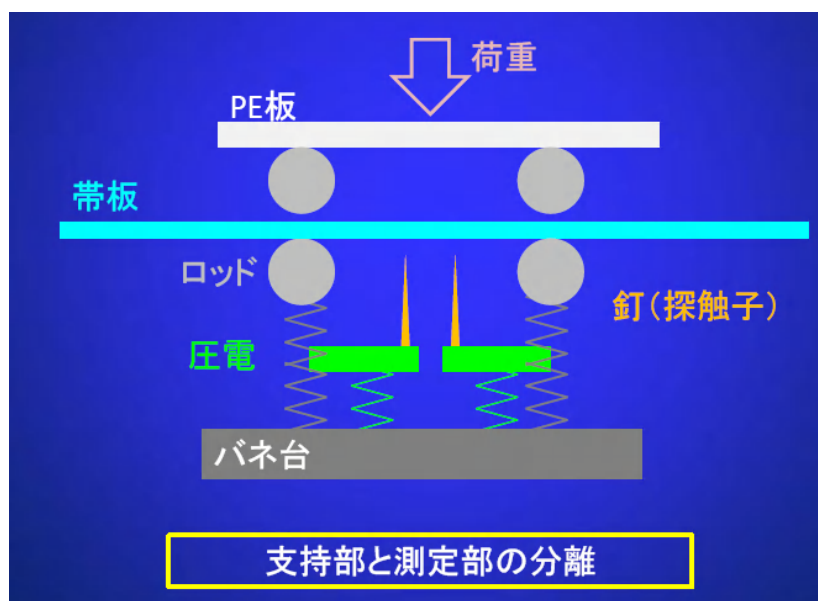


図 1 6 支持部と共振測定部の分離

適切な支持方法について、さらに検討するために、図 1 7 に示す 3 種類のサンプル材を用意した。いずれも厚さ 0.68mm の銅板であるが、Sample 0 はムクの銅板であり、A と B は、2 枚の銅板をクラッドしたものである。A は通常のクラッド材、B は界面に人工的に直径数 mm 程度の剥離欠陥を導入したものである。



図 1 7 クラッドサンプル材

これらのサンプルに対して、あらかじめ、超音波顕微鏡（図 1 8）を利用して内部欠陥の観察をした。図 1 9 はその結果を示すものである。Sample A と O はほぼ無欠陥であるが（図 1 9 - 1）、A には、微小な接合界面欠陥が認められる（図 1 9 - 2）。O では、人工的に導入した界面剥離が明瞭である。

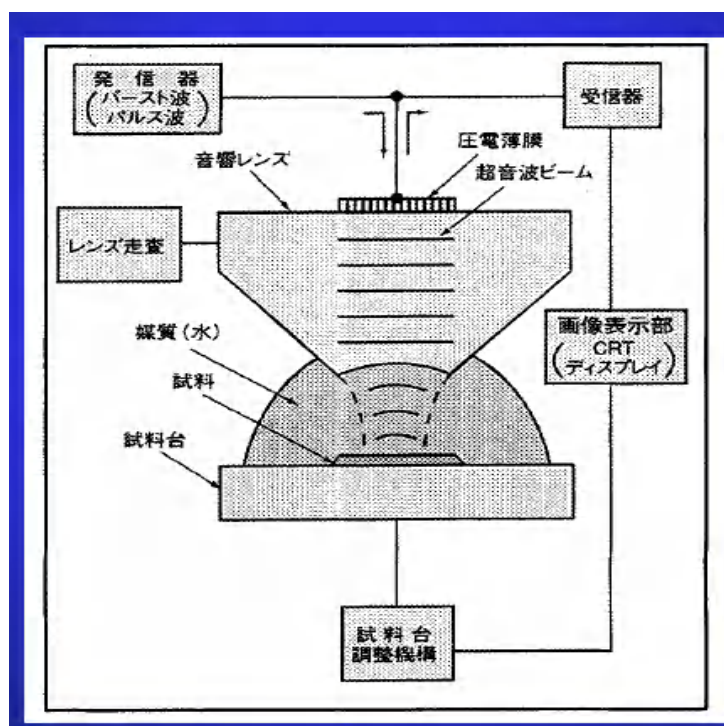


図 1 8 超音波顕微鏡の原理

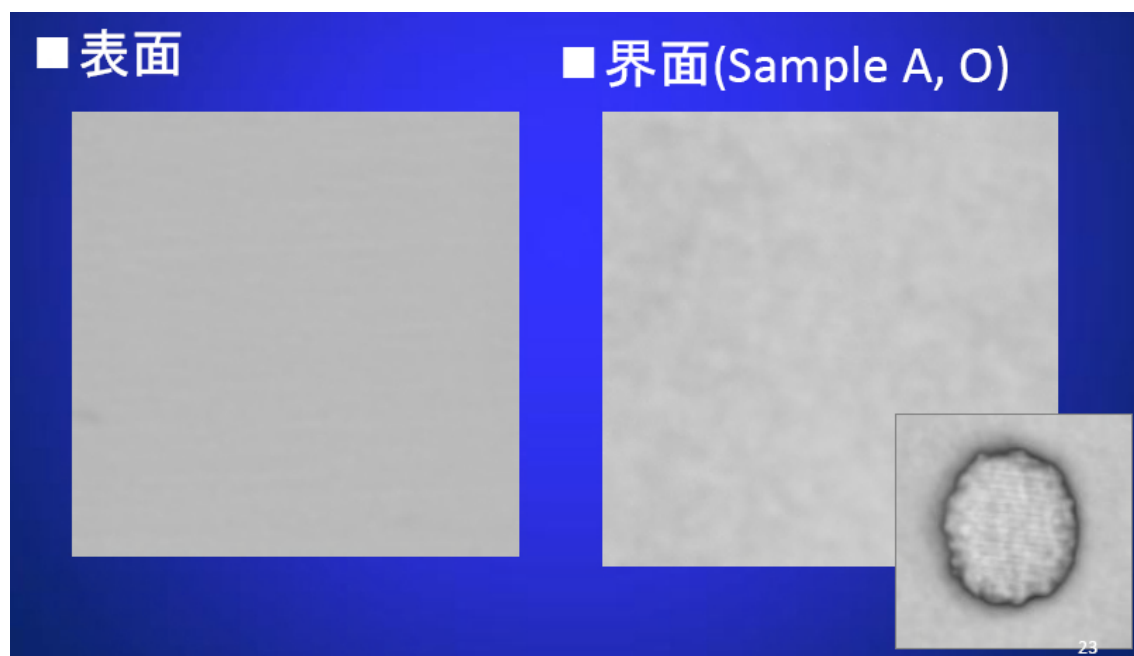


図 1 9 - 1 クラッドサンプルの超音波顕微鏡による観察 (Sample O, A)

■ 界面欠陥

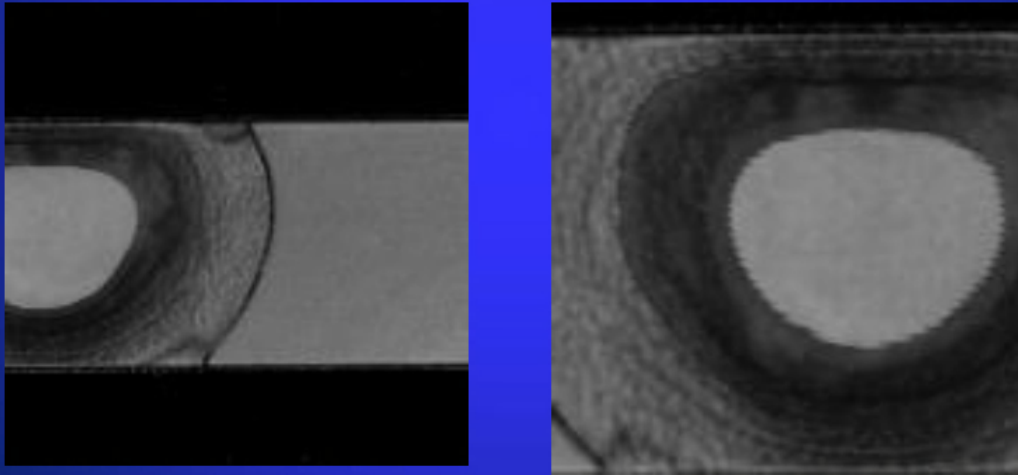


図 1 9－2 クラッドサンプルの超音波顕微鏡による観察 (Sample B)

これらのサンプルに対して、前述の超音波共振測定装置で共振測定をした結果を図 2 0 に示す。欠陥を導入したサンプル B は、A や O に比較して共振周波数が低い (図 2 0－1) ので、実際の長尺クラッド帯板の界面剥離を超音波共振測定で検出できることが示唆された。しかし、ロールで挟んだ場合は挟みかたに依存して周波数が変動し、安定しない (図 2 0－2)。

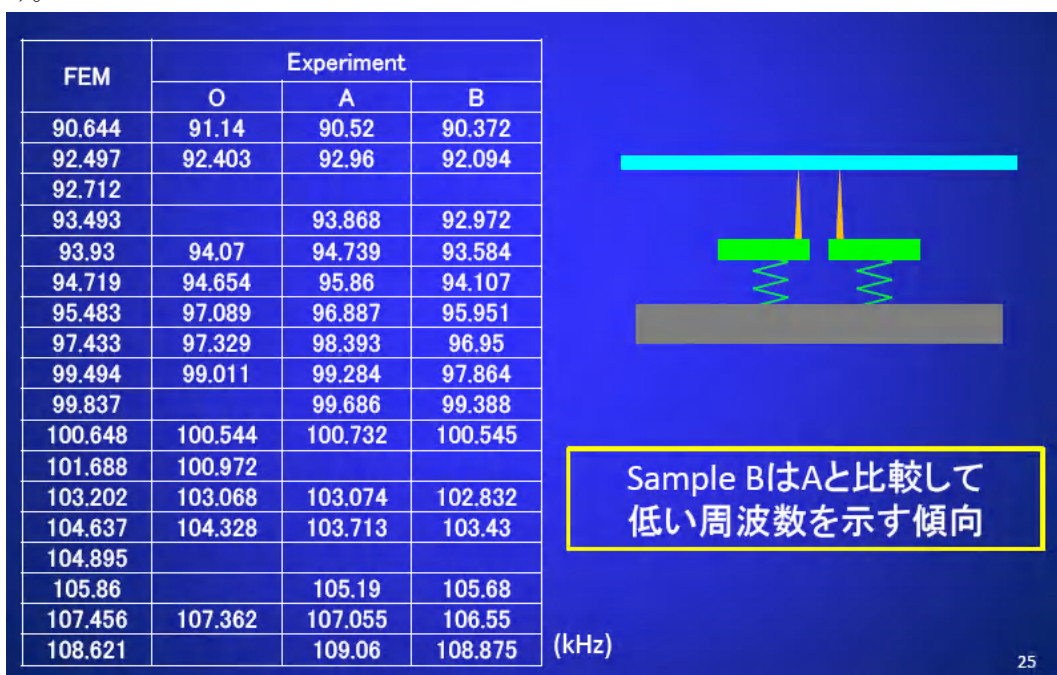
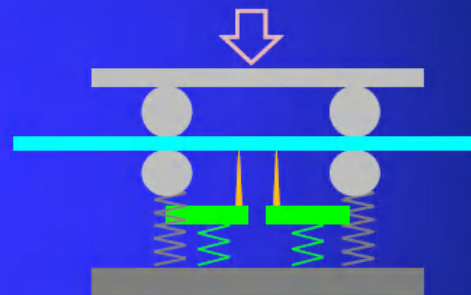


図 2 0－1 クラッドサンプルの超音波共振測定 (拘束がない場合)

■ 界面欠陥

Experiment		
O	A	B
90.204	90.255	
91.202	91.707	
91.962	92.498	92.138
94.846	95.662	96.283
98.29	98.556	98.185
100.173	101.469	99.47
100.854		101.389
102.816	103.872	103.672
103.897	104.393	104.073
105.459	106.635	106.636
107.502	107.677	107.197
109.344	108.728	108.478
		109.8

(kHz)



挟み方に依存
安定性改善の課題

図 2 0－2 クラッドサンプルの超音波共振測定（ロールで挟んだ場合）

（3）まとめ

これらの結果から、長尺材の共振測定においては、さらに安定した最適支持方法を検討する必要があることが示された。その支持条件と支持体に挟まれた部分の共振特性の関係をさらに追求する必要がある。

また、測定では、全ての共振周波数を補足できているとは限らないので、補足されている各共振周波数の共振モードが簡便に同定できれば、有限要素法固有値解析結果との対応が付き易い。今後、その同定法を検討する必要がある。

本研究開発では、その対応づけが容易にはできなかったこともあって、実際の共振測定と有限要素法固有値解析のあわせ込みに至らず、予定していた逆解析プログラムを作成するには至らなかった。

2－3 プロトタイプ探傷機製作（実施：株式会社特殊金属エクセル）

（1）背景と目的・目標

実際の金属クラッドの界面の接合品質を、コイル全長にわたって検査するには、コイルを巻き出し、巻き込む間に、材料の一部を支持して共振測定し、その結果を固有値解析と対比することによって、その部分の欠陥の有無を判断するシステムが必要である。図 2 1 は、超音波共振によるクラッド帯板の接合界面品質検査システムの概念図である。

そこで、2－1 項、および、2－2 項で得られた知見をもとに、実際の金属クラッドをラインで連続的に検査できるようなプロトタイプ探傷機と、その付帯設備を設計し製作する。プロトタイプ機では、材料送りやデータ採取等を手動で行う。

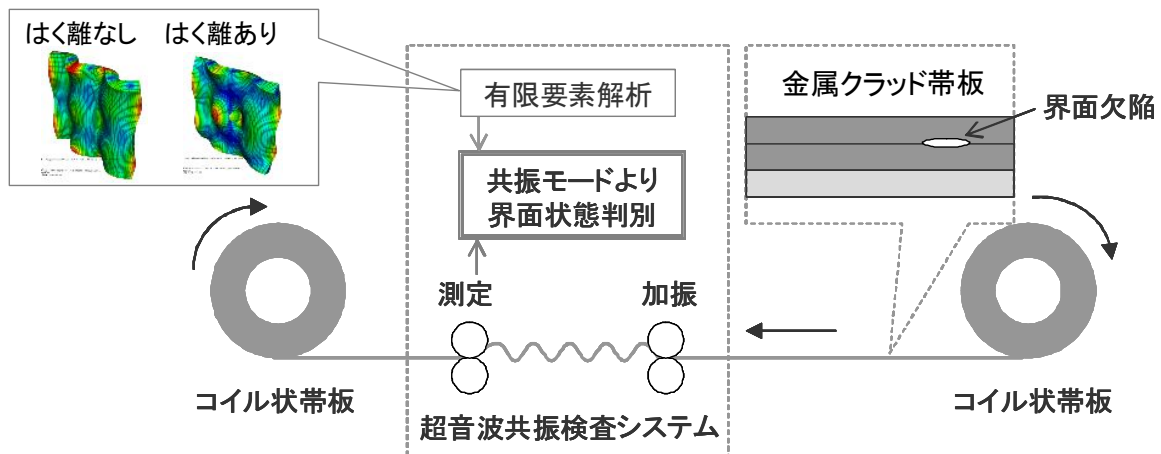


図 2 1 超音波共振によるクラッド帯板検査システム の概念

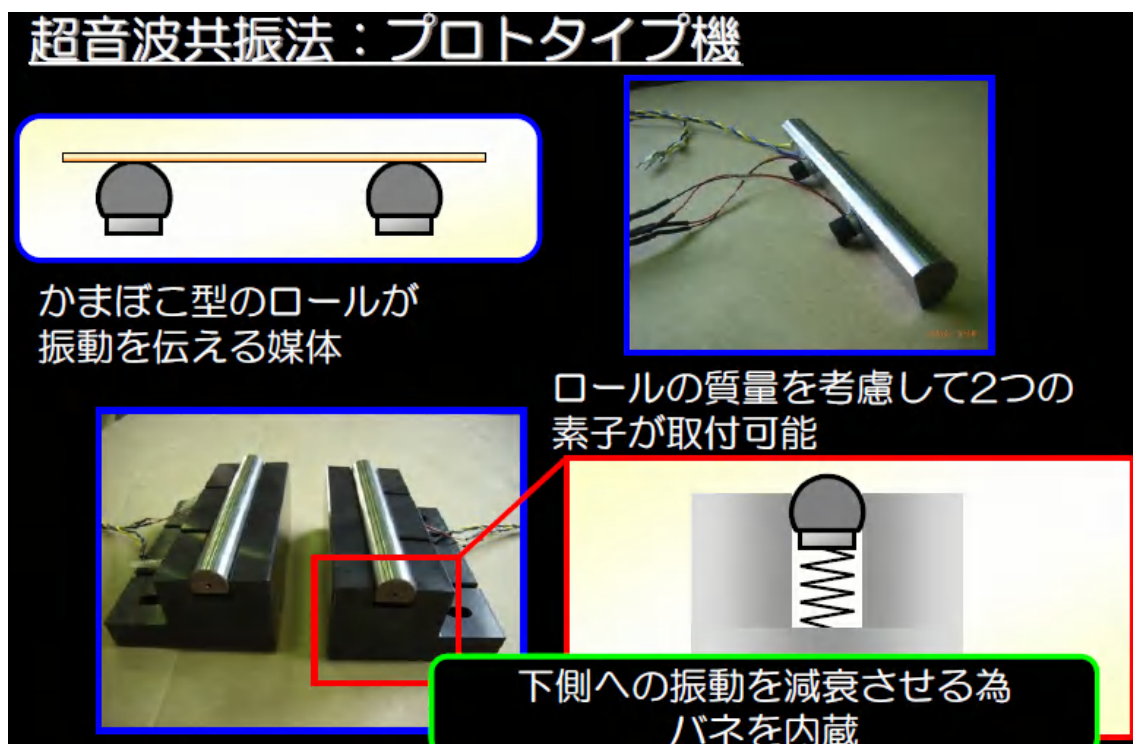


図 2 2 プロトタイプ探傷機に組み込む振動媒体による予備試験の方法

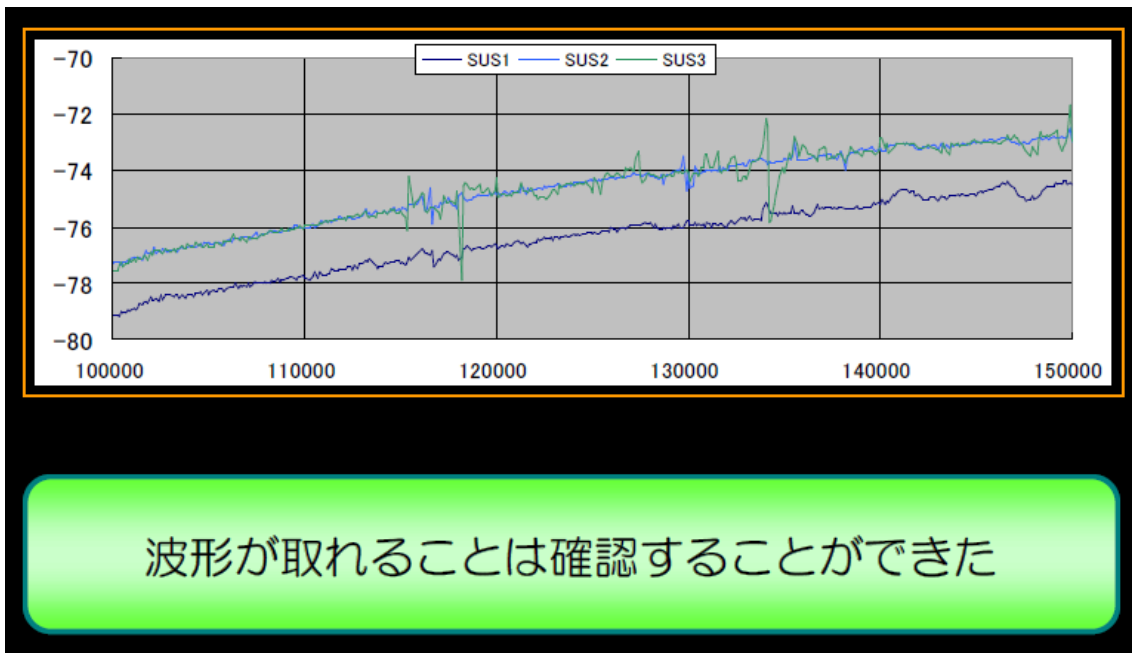


図 2.3 プロトタイプ探傷機に組み込む振動媒体による予備試験の結果

(2) 実施内容と成果

上記 2-2 項から、材料の支持方法によっては、共振測定が出来ない可能性があることがわかったので、プロトタイプ探傷機製作にあたって、まず、予定している振動子を組み込む振動媒体 2 本を使って、そこに長い切り板材料を載せ、波形分析装置で共振周波数のデータが得られるかどうかを検討した。図 2.2 はその検討方法を、図 2.3 はその結果を示す。予定した振動媒体で共振測定ができることを確認した。

株式会社特殊金属エクセルは、その冷間圧延製品を製造するための圧延機をはじめとする各種生産設備を自社で設計製作してきており、帯板をコイルを巻き出し、巻き込む間に、その材料に対して各種の付加価値を付与する設備に関して豊富な製作実績を持っている。その経験を生かし、本研究開発 2-1 項と 2-2 項から得られた知見をもとに、クラッド帯板の接合品質を評価するシステムのプロトタイプ探傷機を設計製作した。

特に、長尺帯板の一部を共振させて測定する方法として、上記の知見から、図 2.4 に示すように、十分な質量のロールに接触弧長をできるだけ長く取って接触させることとした。

プロトタイプ探傷機ラインの設計図を図 2.5-1、-2 に示す。図 2.6-1、-2 は実際に製作したプロトタイプ機とその測定部である。

装置は特に問題なく動作し、波形分析装置（スペクトラムアナライザー）を組み込んだ試験に供することができた。

(3) まとめ

予備的に振動媒体の機能を確認した上で、プロトタイプ探傷機を設計製作した。

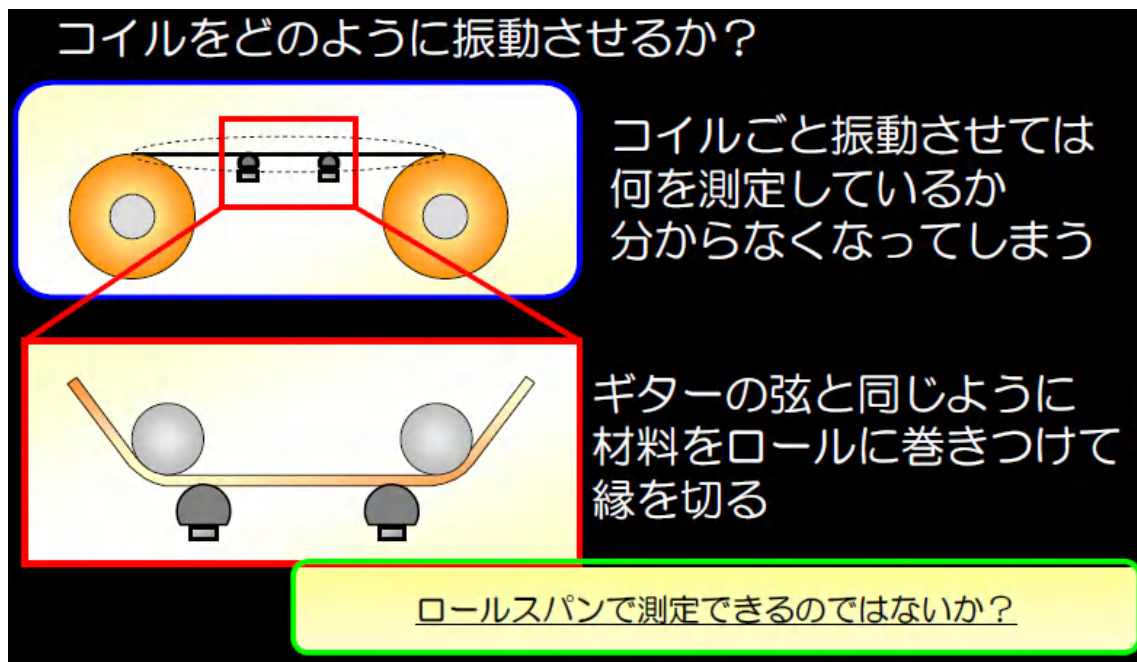


図 2 4 長尺材の一部を共振させるための支持方法

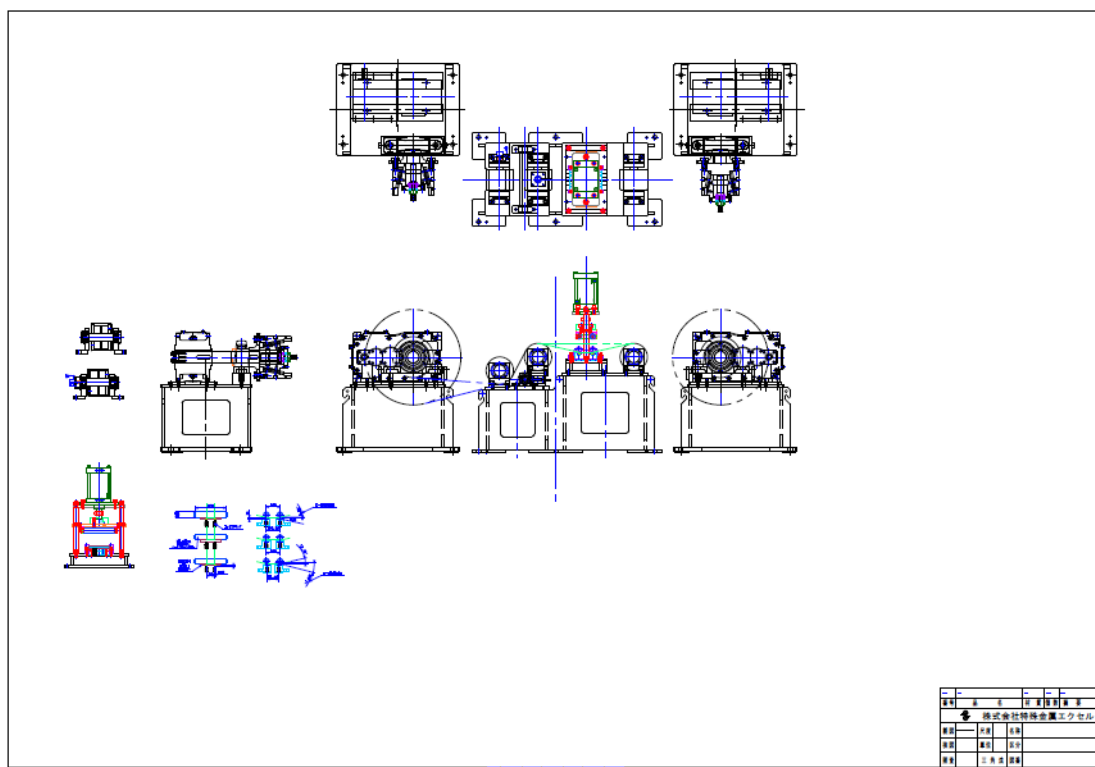
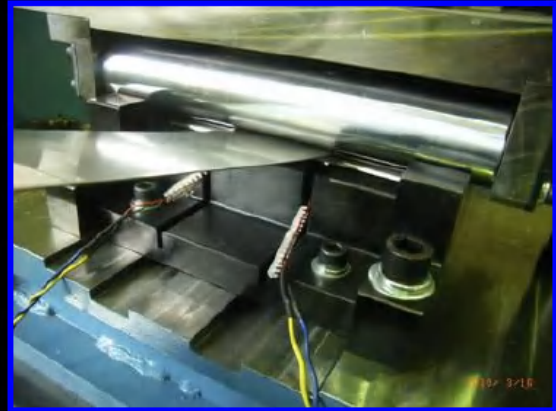


図 2 5 - 1 プロトタイプ探傷機の全体図

超音波共振法：測定部



送り出し時



測定時

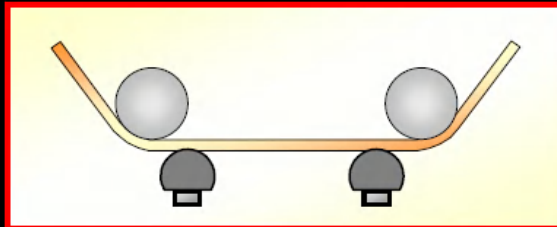


図 2 6 - 2 製作したプロトタイプ探傷機の測定部

2-4 クラッド実検査ラインでの検証（実施：株式会社特殊金属エクセル）

（1）背景と目的・目標

2-3 項で製作したプロトタイプ機を、株式会社特殊金属エクセルの工場で稼働させ、実際のクラッド帯板について、工場の振動や電気・磁氣的ノイズ等の環境下での探傷能力を評価検証する。

具体的には、1mm（直径）以上の接合不良欠陥を検査速度 5m/min で探傷することができる、金属クラッド帯板の非破壊検査システムを構築できるかどうか、プロトタイプ機を利用して検討する。

（2）実施内容と成果

2-3 項の装置を使用して、ステンレスの帯板と固定抵抗器用のクラッド帯板について、共振測定を試みた。図 2 7 は、その測定例である。多くの共振周波数があり、材料による違いも見られる。

しかしながら、振動媒体の材料への接触状態によって、測定は必ずしも安定していない。また、例えば、図 2 8 に示すとおり、振動媒体の接触荷重を変えると大きく変動する。図

2-9は、張力を変えた場合の例である。2-1項の解析結果から、これらの条件の変動は固有値に大きな影響を与えるので、共振波形が変化するのは当然であるが、どのピークがどの共振モードであって、それが測定条件によってどれだけ移動したのかは判定できない。2-2項と同様に、ピークの振動モードを同定する方法を検討する必要がある。

(3) まとめ

実際の長尺材の共振測定においては、1 mm の大きさの接合欠陥を検出するためには。振動子やロールと材料との接触状態をもっと工夫して、安定した共振波形が得られる方法を検討しなければならない。また、共振モードの同定方法を検討する必要がある。

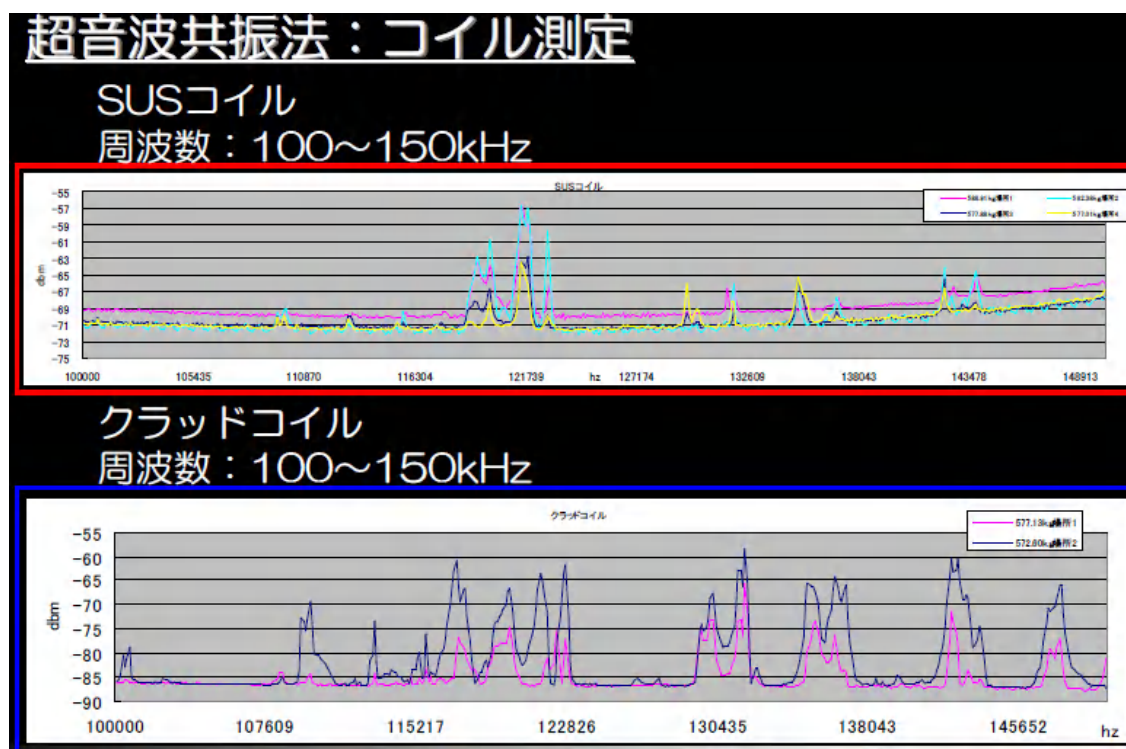


図 2-7 ステンレス帯板とクラッド帯板の共振測定

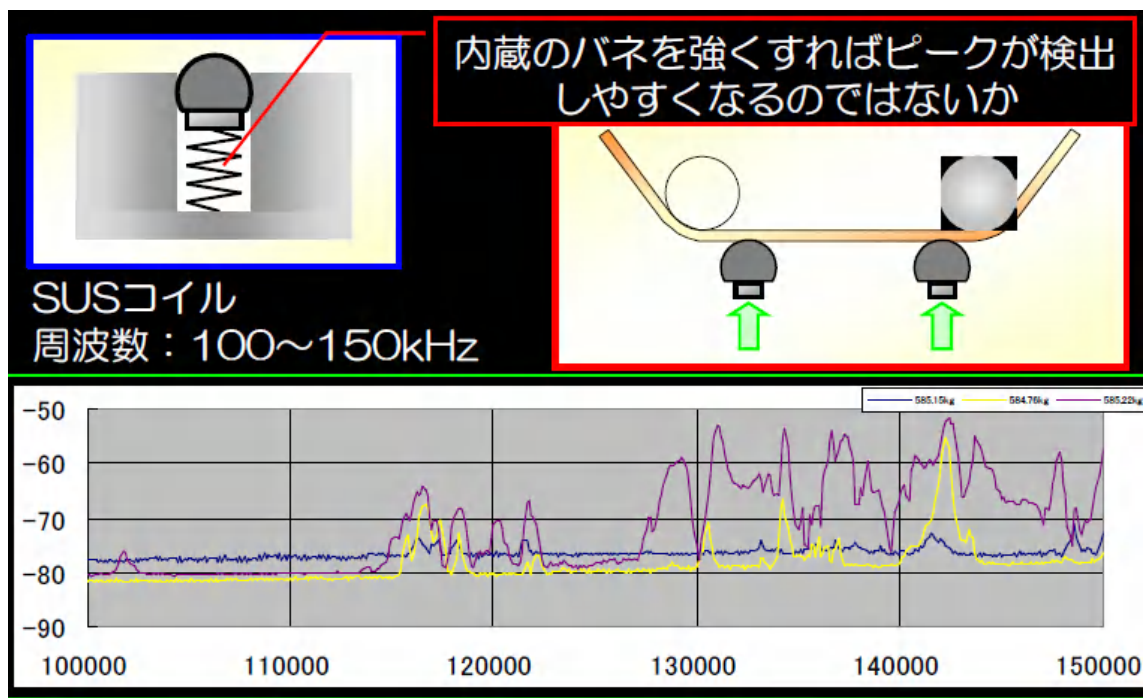


図 2 8 振動媒体の接触荷重による共振波形の変化

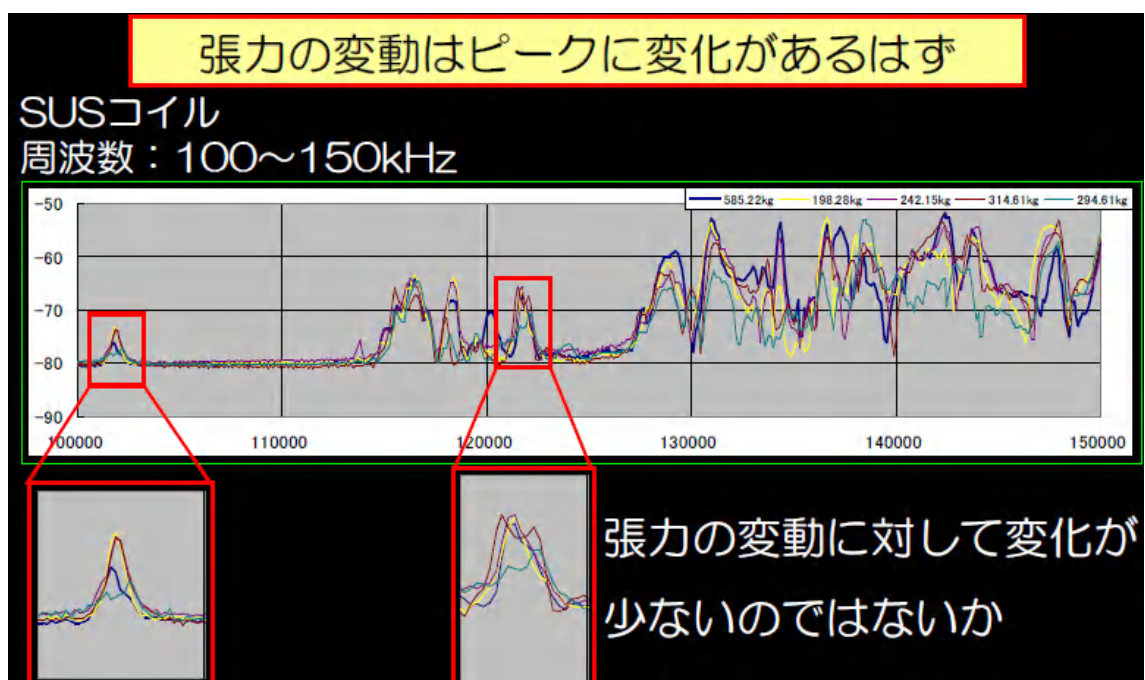


図 2 9 張力による共振波形の変化

2-5 プロジェクトの管理・運営（実施：株式会社特殊金属エクセル）

（1）研究開発推進委員会の設置

本研究開発支援事業においては、「平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業（金属クラッド帯板の接合界面評価システムの開発）に関する委員会設置規程」に基づいて、進捗管理・方向性を検討・検証し、研究開発事業が実施計画書どおりに進捗し、成果が事業化されることを目的として、事業管理者を事務局とする研究開発推進委員会を設置した。委員会は、事業管理者、再委託先及びアドバイザーにより構成され、アドバイザーは事業管理者が委嘱した。

委員会では、各研究実施者から研究開発における進捗状況等の説明を行い、その内容について協議を行った。また、アドバイザーから意見を聴いた。

（2）委員会開催議事録

本研究開発支援事業は、平成21年11月9日に委託契約が調印され、11月27日に、プロジェクト発足にあたって、背景、目的や目標、技術的バックグラウンド、進め方などについて、関係者の合意を形成し、相互理解を図ることを目的として、第1回委員会を開催した。平成22年3月24日には、プロジェクト最終段階を迎え、その成果を確認し、今後の方向を検討する目的で、第2回（最終）委員会を開催した。それぞれの会議の議事録を次ページ以降に示す。

第3章 全体総括

金属クラッド帯板の接合界面の品質を、全長にわたって非破壊的に検査するために、超音波共振法を利用したシステムを構築することを最終的な目標として、本研究開発では、有限要素法解析や共振測定によって基礎的な検討をした上で、検査ラインのプロトタイプを製作して共振測定を試みた。得られた結果を要約すれば、次のとおりである。

- (1)有限要素法解析では、材料支持方法などが共振に大きな影響を及ぼすことが示され、実際の共振測定装置製作の指針を与えた。
- (2)ラボ的な長尺材の共振試験でも、支持条件によって共振状況が異なることが明らかになり、さらに安定した最適支持方法の検討が必要である。
- (3)プロトタイプ探傷機製作し、実環境で共振測定を試みた。1 mm の接合欠陥を検出するためには、振動子やロールと材料との接触状態をもっと工夫しなければならない。

今後は、解析と測定の対比を容易にする方法の研究も含めて、支持方法、接触方法をさらに検討し、実用化の道を開いて行く必要がある。

第 1 回委員会議事録

(議事録作成者氏名：田中光之)

事業名	平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業 (金属クラッド帯板の接合界面評価システムの開発)
会議名	委員会(第1回)
開催年月日	平成21年11月27日 13時30分～17時10分
開催場所	株式会社特殊金属エクセル埼玉事業所 大会議室 (住所) 埼玉県比企郡ときがわ町玉川56
出席者(所属、役職及び氏名)(出席者数12名)	
【委員】	
田中光之 (株)特殊金属エクセル 監査役 新機能材料開発本部 統括マネジャー(PL)	
荒木稚子 埼玉大学大学院理工学研究科 准教授 副総括研究代表者(SL)	
荒居善雄 埼玉大学大学院理工学研究科 教授(AD)	
内木浩太 埼玉大学大学院理工学研究科 学生(修士)	
成田毅央 (株)特殊金属エクセル 市場開発G	
小林怜史 (株)特殊金属エクセル 市場開発G	
斉藤桂亮 (株)特殊金属エクセル 設備開発G	
荒井 研 (株)特殊金属エクセル 財務G(経理担当)	
仲村圭史 コーア (株)基盤技術事業化センター マネジャー(AD)	
吉岡忠彦 コーア (株)基盤技術事業化センター(AD)	
【オブザーバー】	
谷口能人 (株)特殊金属エクセル 代表取締役社長	
谷口 毅 (株)特殊金属エクセル 常務取締役 国内精密材料事業本部長	
(PL)総括研究代表者、(SL)副総括研究代表者、(AD)アドバイザー	

会議の概要（会議資料を添付のこと）

【会議の趣旨】プロジェクト発足にあたって、背景、目的や目標、技術的バックグラウンド、進め方などについて、関係者の合意を形成し、相互理解を図る。

1. 開会挨拶（谷口毅）

2. 【プレゼンテーション】

1)超音波共振法による材料特性の同定と欠陥の検出(荒木)

次の各項目について、説明があった。

共振。超音波。超音波共振。超音波共振利用例。板の超音波共振。内部欠陥のある板の超音波共振。長尺帯板の超音波共振。

2)低抵抗固定抵抗器の用途と要求品質及び課題(仲村)

次の各項目について説明があった。

コーア(株)の概要。固定抵抗器。低抵抗固定抵抗器。その用途と利用例及び製造方法。要求品質や課題。

3)固定抵抗器用材料の製造方法と課題(成田)

クラッドやその特徴と製造方法。接合メカニズム。間接的品質保証と非破壊検査。などについて説明があった。

4)固定抵抗器用材料の摩擦攪拌接合の試み(小林)

ニクロム板とCu板の摩擦攪拌突合せ接合の可能性を示した。

3. プロジェクト実施計画の説明(田中)

プロジェクトの目的と目標、実施内容とスケジュール、予算内訳。

4. 討論、他

（仲村）過剰品質によるコストアップを避けるために、「無欠陥保証」から「意識化された欠陥保証」に移行して行く必要がある。そのためにも、接合欠陥の検出は重要な役割を持つ。

5. 総括、閉会挨拶(谷口能人)

第2回委員会議事録

(議事録作成者氏名：田中光之)

事業名	平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業 (金属クラッド帯板の接合界面評価システムの開発)
会議名	委員会(第2回)
開催年月日	平成22年3月24日 14時30分～16時30分
開催場所	株式会社特殊金属エクセル埼玉事業所 大会議室 (住所) 埼玉県比企郡ときがわ町玉川56
出席者(所属、役職及び氏名)(出席者数12名)	
【委員】	
田中光之 (株)特殊金属エクセル 監査役 新機能材料開発本部 統括マネジャー(PL)	
荒木稚子 埼玉大学大学院理工学研究科 准教授 副総括研究代表者(SL)	
内木浩太 埼玉大学大学院理工学研究科 学生(修士)	
成田毅央 (株)特殊金属エクセル 市場開発G	
小林怜史 (株)特殊金属エクセル 市場開発G	
斉藤桂亮 (株)特殊金属エクセル 設備開発G	
荒井 研 (株)特殊金属エクセル 財務G(経理担当)	
吉岡忠彦 コーア (株)基盤技術事業化センター(AD)	
【オブザーバー】	
谷口 毅 (株)特殊金属エクセル 常務取締役 国内精密材料事業本部長	
小久保邦彦 (株)特殊金属エクセル 設備開発Gアシスタントマネジャー	
(PL)総括研究代表者、(SL)副総括研究代表者、(AD)アドバイザー	

会議の概要（会議資料を添付のこと）

【会議の趣旨】プロジェクト最終段階を迎え、その成果を確認し、今後の方向を検討する。

1. 開会挨拶（谷口毅）

2. 【プレゼンテーション】

1)超音波共振法による,長尺帯板の評価(荒木)

次の各項目について、説明があった。

長尺帯板の共振(有限要素法解析、測定装置)

クラッドの検査(超音波顕微鏡による観察、超音波共振法による評価)

2)帯板の超音波共振解析（成田）

次の各項目について説明があった。

解析モデル。

帯板の解析。欠陥位置、張力、振動子接触荷重の共振周波数やモードに与える影響。

3) プロトタイプクラッド検査設備と共振測定(斉藤)

次の各項目について説明があった。

プロトタイプ設備の概要。

単板での共振波形。

連続帯板の共振波形。

支持方法の影響。

4) アドバイザーコメント(吉岡)

支持体として、減衰パットが考えられるのではないか。

新規な研究や設備開発をするために、田口メソッド、FEMA、QFDなどの手法があるので、それらを取り入れることを勧める。

不良によるダメージを少なくするには、工程のできるだけ早期段階で欠陥を検出する方向が望ましい。抵抗器にしてからの個品検査も考えられるが、その前段階として材料の保証が必要である。

3. 討論、今後の方向

連続帯板の共振は、測定方法を模索しはじめた段階である。この課題は、大学の研究としても興味深く、実際のクラッドの検査への応用可能性も高い。埼玉大学、特金とも、今後、協力関係を維持して研究開発を継続する。

4. 総括、閉会挨拶(谷口)

【本研究開発に関する対外発表】

1. 内木浩太,荒木稚子,荒居善雄: "超音波共振を利用した複層金属板の界面評価",
日本機械学会 M&M2009 材料力学カンファレンス (2009 年 7 月).
2. Wakako Araki a,n, Kota Uchiki a, Yoshio Arai a, Mitsuyuki Tanaka:
"Effects of interface stiffness and delamination on resonant oscillations of
metal laminates", NDT&E International 43 (2010) 297-304.

【参考文献】

- [1] NDT&E International, V.41, p.82, W Araki et al.(2008).
- [2] NDT&E International, V.38, p.548, T Adachi et al.(2005).