

ISSN 0389-4010
UDC 620.179.16
629.76

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1107

固体ロケット・モータのライナ・推進薬間剥離の
超音波探傷法

清水盛生

1991年5月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

目 次

第1章 序論	2
第1.1節 固体ロケット・モータに対する各種非破壊検査法	2
第1.2節 固体ロケット・モータに対する従来の超音波探傷法	6
第2章 ライナ・推進薬間剝離の超音波探傷法による検出の基礎試験	8
第2.1節 従来法の理論的背景	8
第2.2節 従来の理論に対する追試	9
第2.3節 多重反射音圧減衰の周期的依存性と超音波周波数との関係	14
第3章 周波数掃引型超音波探傷理論の構築	18
第3.1節 波動方程式の導出と媒質境界での反射・透過	18
第3.2節 ケース・ライナ間剝離の超音波探傷理論	22
第3.3節 ライナ・推進薬間剝離の検出のための新理論	23
第4章 新探傷理論のライナ・推進薬間剝離検出に対する有効性検証試験	29
第4.1節 検証試験方法	29
第4.2節 試験結果	30
第4.3節 考察	36
第5章 周波数掃引型超音波探傷法の実機モータへの適用	38
第5.1節 H-I ロケット上段モータ	38
第5.2節 H-II ロケットのSRBへの適用試験	44
第5.3節 固体ロケット・モータの非破壊評価における本法の役割	48
第6章 結論	50
参考文献	51
付録-I	53

固体ロケット・モータのライナ・推進薬間剥離の 超音波探傷法*

清水盛生*¹

Swept Frequency Type of Ultrasonic Inspection Method for Liner-Propellant Separations of Solid Motors*

Morio SHIMIZU*¹

ABSTRACT

A swept frequency type ultrasonic inspection method is used for inspecting not only case-liner separations, but also liner-propellant separations of solid motors, with its successful application to the H-I upper-stage motors also being discussed. Over the past quarter of a century, liner-propellant separations have never been practically inspected using conventional ultrasonic inspection methods. This new method has been in development at the National Aerospace Laboratory (NAL) since 1968, and is based on using the one-dimensional quarter-wavelength resonance principle to determine the liner thickness under one free and the other fixed end-face boundary condition, being considered to be the liner's line-propellant separation boundary condition. Since the motor cases have curved (spherical/cylindrical) surfaces, several curved contact surface probes were developed. This method was subsequently applied to test successfully both the apogee and third stage motor of the H-I rocket during manufacturing and also at the launching site. This inspection has contributed to successful launchings of the H-I rocket since the first launching in August 1987, and will be applied to the Solid Rocket Booster (SRB) of the H-II rocket in the near future.

Keywords: solid rocket, ultrasonic inspection, liner-propellant separation, liner-propellant debond, quarter-wavelength resonance principle.

概 要

この論文は固体モータのケース・ライナ間剥離だけでなく、ライナ・推進薬間剥離の検査に有効な掃引型超音波探傷法と、そのH-I上段モータへの成功裡の適用について記述している。残念ながら、過去四半世紀以上にわたり、ライナ・推進薬間剥離は、通常の超音波探傷法では検査できなかった。航空宇宙技術研究所では、1968年より新方法が研究開発されてきたが、その技術は、ライナのライナ・推進薬間剥離境界条件と考えられる一端固定・一端自由の境界条件下でのライナ厚さに対する一次元4分の1波長共振原理にもとづいている。モータ・ケースは局面（球面または円筒面）であるので、局面探触子が開発された。この方

* 平成3年3月5日受付

*¹ 元宇宙研究グループ

法は、H-I ロケットのアポジ・モータと第3段モータに、まず製造工場にて、ついで射場にて適用され、好結果を収めた。この方法は、1987年8月のH-I ロケット初号機の打ち上げ以来、その成功に貢献しており、さらに、H-II ロケットの固体ロケット・ブースタにも近い将来適用されよう。

第1章 序論

固体ロケット・モータにおけるケース・ライナ間剝離等の欠陥は異常燃焼や爆発の原因となりうる。この危険を避けるためには製造工程中、出荷時、発射前等に固体モータの非破壊検査を行う必要がある。固体モータに対する有力・簡便な非破壊検査法として超音波探傷法があり、ケース・ライナ間剝離に対しては極めて有効であって既に広く実用化されている。但し、ケース・ライナ間よりも接着強度の低い傾向のあるライナ・推進薬間に生ずる剝離については、従来有効な検査法がなく、超音波探傷法もケース・ライナ境界での反射率が大きいこと、ライナ内での超音波の減衰が大きいこと等の理由により有効でなく、研究段階に留まり、実用化されていない。しかし、ケース・ライナ間剝離の検出に対して簡便にして極めて有効な超音波探傷法がライナ・推進薬間剝離に対しても有効であれば、まことに好都合ということで、超音波探傷法によるライナ・推進薬間剝離検出の研究が過去四半世紀以上にわたって行われてきたが、未だ成功していないのが現状である。

本論文では、これまでのライナ・推進薬間剝離に対する超音波探傷法を基本的に見直し、ライナ・推進薬間剝離の場合のライナの力学的境界条件が一端固定・一端自由であることから、4分の1波長共振に着目した。そしてライナ厚さが4分の1波長の奇数倍に等しい周波数の超音波を用いれば探傷可能との理論を構築し、探傷超音波掃引型探傷装置により、この理論の正しいことを確認した。さらに、この方法をH-I 上段モータに対して実用化するとともに、H-II・SRBにも有効であることを確認した試験結果について述べる。

第1.1節 固体ロケット・モータに対する各種非破壊検査法

1.1.1 固体ロケットの構造と特徴

固体ロケット・モータは一般に図1.1.1に示すような構造をしており、液体ロケットよりも、バルブ、ターボポンプ等がないので簡単である(文献1)。液体ロケットでは、推力方向制御、推力大きさ制御(推力中断、再着火をふくむ)が比較的簡単にできるが、そのためのシステムはかなり複雑になる。固体ロケットにおいても近年、推力方向制御は、ノズル内への二次噴射や、可動ノズル技術により、一般化してきているが、推力大きさ制御については、未だ研究段階(文献2)である。総じて、固体ロケットでは、構造が簡単で安価に高信頼性が達成しやすいと言えよう。

固体ロケットの主要部は、推進薬、燃焼室(ケース)、ノズル、点火装置である。点火装置により点火されると、推進薬は表面から一定の速度で燃焼する。この時に発生した燃焼ガスはノズルから噴出し、推力を生ずる。多くの場合、燃焼中の推力をほぼ一定に保つ必要があるため、推進薬グレインの内孔形状を星型等に行っている。

固体ロケット・モータの製法については、最近では、ケース内面にライナを加硫接着させた後、未硬化の推進薬を流し込んで硬化させる直填法が主流となっている。

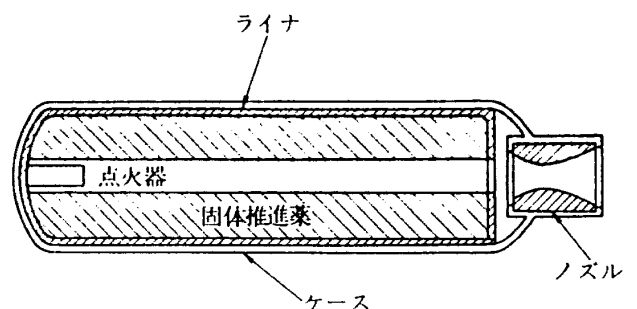


図1.1.1 固体ロケット・モータの構造

1.1.2 非破壊検査の必要性

固体ロケット・モータに発生する欠陥としては、次のようなものが考えられる。

- (1) ケースの素材，加工上の欠陥
- (2) 推進薬中の気泡，亀裂
- (3) 個別に作った推進薬同士の接着不良や剝離
- (4) 推進薬，ライナ，ケース間の接着不良や剝離

これらの欠陥が許容範囲内であることは当然，工場出荷時において確認されているが，製品は一般に完成と同時に（あるいはそれ以前から），破壊過程を進行しはじめると考えられるから，ロケット発射時までは欠陥が発生，増大する恐れがある。破壊過程における進行を促進させる要因としては，輸送中等に受ける振動や衝撃，推進薬の自重による変形，環境温度の変化による熱応力，推進薬物性，強度の変化等が挙げられる。

固体ロケット・モータにおける推進薬の燃焼は，推力，振動，燃焼圧力等，あらゆる点で計画に沿ったものでなければならない。ところが，燃焼中に火炎が接着不良部や亀裂に達すると，燃焼面積の急増を引き起こし，燃焼内圧も急増し，推力増大のためにロケットが予定の軌道からはずれる可能性がある。内圧の増大があまりに大きい場合には，ロケット・モータが爆発する恐れすらある（文献3）。そして，ケース・ライナ間剝離やライナ・推進薬間剝離は固体ロケット・モータの最も重大な欠陥に含まれる。

ロケット発射の失敗は，単にそのロケットそのものだけでなく，観測，支援体制を含めての高価な損失であり，人身事故をも伴う恐れがある。さらにロケットの発射が宇宙観測を目的とする場合には，天体運行時期の関係から，観測の機会を永久に失うことにもなりかねない。従って，発射前に入念な検査が必要となるが，このなかでは非破壊検査が極めて大きな役割を果たすことになる。この検査によりなんらかの欠陥が検出されれば，常にそのロケットを廃棄するわけではない。欠陥の種類，位置，程度等により，欠陥自体に対する補修・補強対策，ロケットの性能変化に対する対策，安全上の対策等を検討し，欠陥が許容範囲内

のものと判断されれば，ロケット発射は行い得る。そこで，欠陥に対する各種対策および許容基準の確立が必要となるが，このためには種々の欠陥を有するロケットの地上燃焼試験や発射の経験が必要である。この試験や発射は，危険を伴うるので，その欠陥が安全であることを確認することが前提となり，そのためには確固とした基準や対策が必要である。

この矛盾を解決するためには，暫定的な対策や基準により，地上燃焼試験や発射を行い，その結果から対策や基準を合理的なものにして行くという方法を採用することになるが，そこではロケット・モータの欠陥を必要な精度，確度で検出することが前提となる。つまり，ロケット・モータの非破壊検査は，単に対象となっているモータの評価のためだけでなく，どのような欠陥を有するモータはどのような危険にさらされ，どのような性能上の影響をうけ，それに対する対策はどのような効果をあげたかという情報を，以後のモータの製造，検査，対策，発射にフィード・バックするためにも必要である。

1.1.3 各種非破壊検査法

固体ロケット・モータに対する非破壊検査法には，次のようなものがある。

1.1.3.1 打音による方法

この方法はコインやハンマー等で被検物を軽くたたいて，その音から欠陥の有無，種類，程度を判断するもので，極めて高度の熟練を要する名人芸的方法であり，現実には，あまり信頼度の高い方法ではない。ただし，簡単であり，欠陥部が極めて大きい場合には容易に検査できる。さらに，打音の音響学的分析，たとえばFRPの非破壊検査に対して用いられた音響スペクトログラムの方法（文献4）の応用等が実現されれば，新たな発展が期待できよう。

1.1.3.2 放射線による方法

透過力の大きい放射線，例えばX線， γ 線，中性子線等により，ロケット・モータの透過写真を撮ることにより，推進薬内の気泡を検出できる。また，放射線をモータの外周の接線方向に透過させれば，その接線と外周との接点近傍の欠陥によ

る空隙（例えば、ケース・ライナ間剥離やライナ・推進薬間剥離等の接着不良）を検出できる。そこで、モータをその中心軸まわりに少しずつ回転させて写真撮影する事により、モータの外周全体を検査することができる。この方法は我国でも早くから試みられ（文献16）、アメリカ等で実用化されているが、空隙がかなり広くないと検出困難であり、また、設備に多額の費用を用し、写真枚数も膨大で、検査時間も長時間となり、安全性の点で取扱が比較的面倒である。

最近では、医療用X線診断技術に大革新をもたらしたX線コンピュータ断層撮影法（X線CT）が工業分野にも適用され始めており、固体ロケット・モータにも早くから適用された。当初は、上段モータのFRPやC/C（Carbon/Carbon）ノズルの検査に120～400kV級（文献5, 6）が、ついでモータ本体（ケース、ライナ、推進薬）にも120kV級（文献7）からライナックを用いた10MV級（文献8）が適用され、X線写真法とは比較にならぬ卓越した検査能力を示し、我国の次期大型ロケットであるH-IIロケットのSRB（Solid Rocket Booster）にも適用される予定である。しかし、金属製ケースとライナや推進薬とでは、そのX線吸収係数が大幅に異なるので、金属ケース近傍の欠陥は検出しがたい。そのため、現在および近未来のX線CTをもってしても、ケース・ライナ間剥離やライナ・推進薬間剥離を検出することは、その空隙が狭い場合には特に困難である。その点、空隙の狭さに事実上、依存しない超音波探傷法に期待するところが大きい。

1.1.3.3 熱伝達による方法

ロケット・モータ全体を一定温度に保っておき、それを急に異なる温度環境にさらすと、ケース・ライナ間剥離やライナ・推進薬間剥離を生じている欠陥部は非欠陥部に比べて見掛け上、熱伝達率が低下するので、ケース表面における温度変化の様相が異なる。そこで、ケース表面の温度分布を赤外線等を利用して測定することにより、欠陥部を検出することができる。この方法は、Clair等（文献9）が固体ロケット・モータに適用して、ケース・ライナ間剥離やライナ・推進薬間剥離の

検出に成功し、また、これと類似の方法がタイタン・ロケットにも適用されているが、欠陥部が小面積である場合には、特にライナ・推進薬間剥離検出が困難となろう。また、ロケット・モータの表面塗装により、表面色が各部によって異なるが、その場合には赤外線放射率は色の影響が大きいので、赤外線法の適用は困難となろう。

1.1.3.4 超音波探傷法

超音波探傷法のモータの各種剥離への適用については、次節に詳しく述べるので、ここでは超音波探傷法と装置の概略を示すにとどめる（文献10, 11）。

(1) 透過法

図1.1.2(a)被検査体の一面から超音波を入射し、向かい合った他端面に到達する超音波の強さによって両端面間の欠陥の有無を推定する方法である。比較的簡単な方法なので古くからひろく提案されてきたが、探傷精度の不足（小さい欠陥の探傷に不向き）のため、あまり広くは実用化されていない。パルス反射法の有効でない場合に用いられることが多い。ライナ・推進薬間剥離についても、極めて広い剥離については、探傷できる場合がある（文献12）。

(2) パルス反射法

測深機と同様の原理で、図1.1.2(b)に示すように超音波パルスを被検査体の一面から入射させ、他端面および中間の欠陥からの反射波の状況をブラウン管上で観測する方法で、このための探傷器は反射型超音波探傷器と呼ばれていたが、1960年代後半には、水晶発振子による当時としては高精度時計が安価に組み込まれるようになり、高精度超音波厚み計としても用いられ、超音波探傷法の主流の地位をゆるぎないものとした。この方法はケース・ライナ間剥離の検出には極めて有効で実用化されているが、ライナ・推進薬間剥離の検出には有効ではない（第1.2節参照）。

(3) 共振法

図1.1.2(c)に示すように、被検査体に入射する超音波の波長（周波数）を連続的に変化させ、被検査体の厚さが半波長の整数倍に等しくなると共振をおこすことを利用して、多層板のデラミネー

ジョンの検出や、二金属間の接着状況の検査などにも適用されてきたが、検査感度があまり高くないので、主として被検査体の厚み測定に使われ、そのための装置も超音波厚み計と呼ばれてきた。そして、パルス反射法が厚み計としても高精度となる1960年代後半以後は、あまり使われなくなった。

(4) 超音波探傷器の構成

パルス反射法を用いる超音波探傷器は次の部分

から構成される。

- (イ) パルス電圧発信器（水晶製等の送波器に加えるべき高周波の短い電圧パルスを発生する電気回路である）
- (ロ) 探触子（水晶製等の振動子をケースに取り付けたもの。普通は送波にも受信にも同じ構造のものが用いられる。また、同一のものを送・受に共用しうる）
- (ハ) 受信器（受信波を増幅するためのもの）

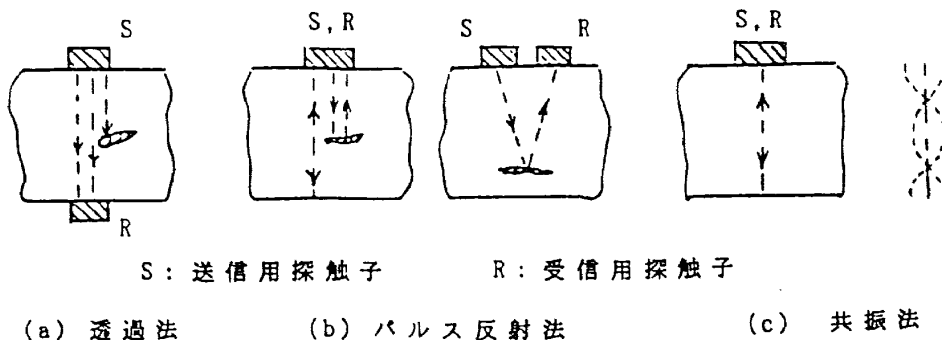


図 1.1.2 3種類の超音波探傷法（文献10）

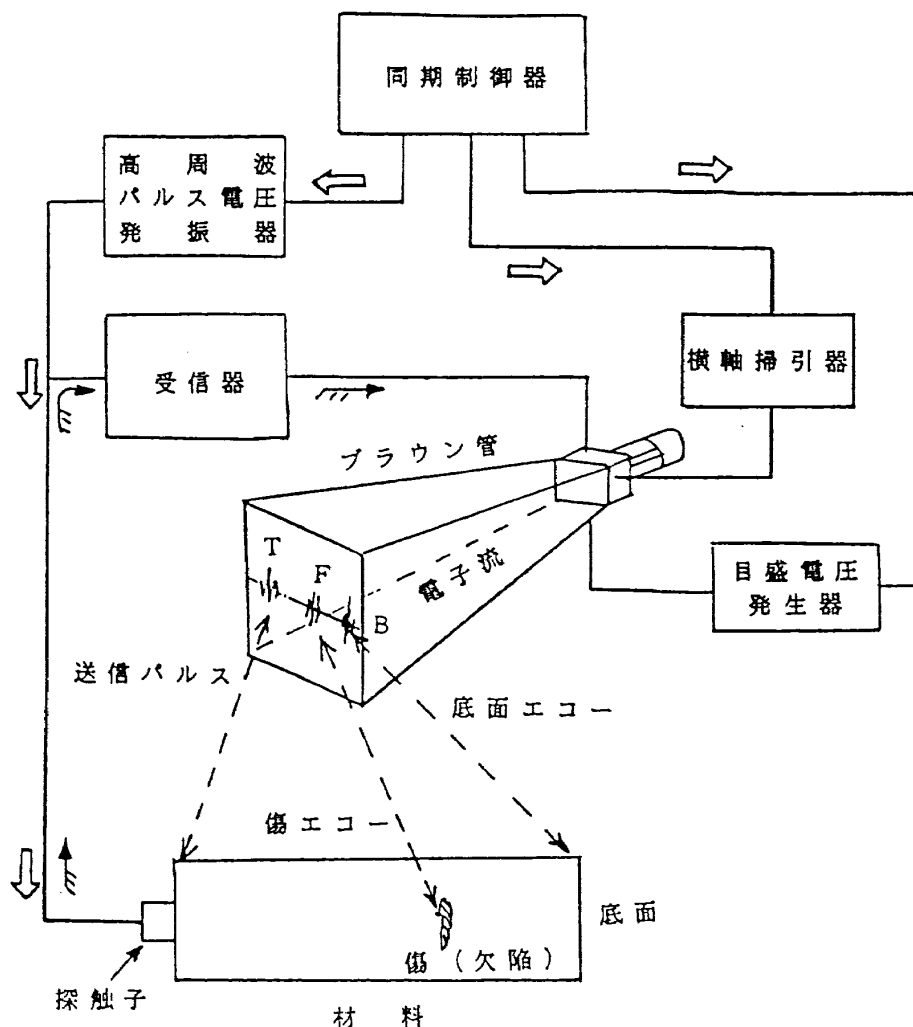


図 1.1.3 パルス反射型超音波探傷器の構成（文献10）

- (ニ) ブラウン管指示部
- (ホ) 同期制御器 (ブラウン管の光点が動き出す時刻と超音波パルスが探触子から発射される時刻とを同期させる電気回路で、パルス発射間隔を制御する)
- (ヘ) ブラウン管の横軸掃引器
- (ト) ブラウン管の目盛電圧発生器

これらは図 1. 1. 3 に示すように結合され、超音波パルスの発信、超音波エコーの受信と、それらの状況をブラウン管に表示する作動が自動的に繰り返される。

(5) 超音波探傷器の作動

探触子と材料表面とを油のような適当な媒質液体で密着させると、図 1. 1. 3 に示す ⇔ 印のように同期制御器から指令パルスが出た瞬間に、

- (イ) 発信器が短い振動電流を発生させ、
- (ロ) 探触子は超音波パルスを発射する。これと同時に
- (ハ) 横軸掃引器は直線的に大きくなる電圧の印加を開始し、それによって
- (ニ) ブラウン管の光点は T の位置から横方向に走り出す。その時には受信器にも発信器からの高周波電流が入り込むので、
- (ホ) ブラウン管の光点が縦方向にも振れる。

それからしばらく後、傷からの反射波 (傷エコー) が探触子に戻って来て受信されると、⇐ 印のように電流が流れて、その瞬間だけブラウン管光点を縦振れさせる。この時の光点の横軸位置は横軸掃引器の電圧によって相当右に走った時であるから、図中の F のように送信時 T の位置より離れた所で縦振れをすることになる。またしばらく後、材料の低面での反射波 (低面エコー) が探触子に受信されると、光点は B のように縦振れする。これで第一回目の作動が終る。

以上の第一回作動が終ったならば、再び同期制御器は指令パルスを出して前と同様の作動を各部分に開始させる。このように繰り返して行くと、探触子を一定の所に当てている限り、ブラウン管蛍光面上の同じ位置に同一の図形が幾度も重なって現われる。従って、観測者は静止した図形を見ることができる。このような図形を探傷図形と言

い、縦軸は音圧を、横軸は時間を表わす。

(6) 多重反射法

上述においては、第一回の超音波パルスの発信から材料低面のエコーが受信されるまでで第一回の作動が終るとしたが、実は多重反射と言う現象が材料の中で起こる。傷または低面からのエコーが探触子の当たっている材料表面に来て探触子に一部入射すると同時に、一部は反射し材料中を伝播する。すなわちこれは、発信器が発信しないのに最初の送信超音波の送信と同様なことが再び始まることに相当するわけである。この波によって再び傷および低面のエコーが探触子に受信される。さらに、このようなことが繰り返される。これを多重反射と言う。

多重反射の探傷図形は低面の状態にかなり敏感である。このことを利用して、金属板の接着部の検査をかなり高い感度で行うことができる。接着部が良好な接着状況であれば、接着面での反射が弱くなり、多重反射が早く減衰するように見える。逆に接着部が剥離していれば、そこでの反射波は強くなり、多重反射過程であまり減衰しないように見える。このような検査法を多重反射法と言い、固体ロケット・モータのケース・ライナ間剥離の検査に実用化されている。

第 1. 2 節 固体ロケット・モータに対する従来の超音波探傷法

音響工学によれば、音響インピーダンスの異なる二つの物質の境界面では、音波は一部は反射し、一部は透過する。欠陥部は多くの場合、空隙を生じており、そこは何らかの気体によって満たされている。気体は一般に固体に較べて音響インピーダンスが極めて小さいので、固体中に気体の満たされた空隙が存在すると、音波は大部分反射する。従って、その反射波を測定することによって欠陥部を検査することができるのである (文献 10, 11)。

この方法は、探傷器が小型にまとまり易く、ポータブル化が容易であり、安全で取扱いやすく、安価である。ただし従来、金属製ケースと高分子ライナとの境界のケース・ライナ間剥離には極めて有効であるが、ライナ・推進薬間剥離に対して

は、ライナ内部にまで達する超音波のエネルギーが小さいこと、ライナ内部での超音波エネルギーの減衰が大きいこと等の理由により、あまり有効ではないとされてきた。実際、ロケット製造工場や射場では、ケース・ライナ間剝離には大いに役だっているが、ライナ・推進薬間剝離に対しては実用化されていない。一般に超音波探傷法は金属材料には極めて有効であるが、減衰の大きい高分子材料にはあまり有効ではないとされてきた。しかし、FRPノズル等に関する研究もかなり行われてきており(文献13, 14)、実用化されていることは、ライナ・推進薬間剝離に対する超音波探傷法に希望をいだかせた。

Stinebring等(文献15)は、低周波(25~250 kHz)、高出力(100mW)の超音波探傷装置を開発し、その強力な透過力を利用して、透過法により固体推進薬の時効効果や内部欠陥、接着不良等の検出に成功したと報告しているが、探傷器のブラウン管に現われる探傷図形は示されていない。

ライナ・推進薬間剝離の検出について、探傷図形を示している報告は数少なく、数年前までは唯一件見あたるに過ぎなかった。丹羽、等(文献16)は既に1969年に超音波探傷に必要な基礎データとして、推進薬等の固体ロケット・モータ用材料の音速、超音波減衰係数の測定とともに、種々の超音波探傷実験を行っている。その結果、鋼鉄製ケースの厚さが1~2mmの場合には2~4MHz、ケース厚さが2~4mmの場合には0.4~2MHzの周波数の探傷超音波を用いれば、多重反射法によりライナ・推進薬間の接着状況を検査できるとして、探傷図形を示している。それによると、多重反射超音波音圧は、ケース・ライナ間剝離の場合に極めて減衰が小さく、良好接着の場合とは容易に区別できるので、ケース・ライナ間剝離はこの方法で十分に検査できる。そして、ライナ・推進薬間剝離の場合には、多重反射超音波音圧の減衰は、良好接着とケース・ライナ間剝離との間にあり、しかも良好接着に近いことが示されている。これがあまりに近いと、良好接着とライナ・推進薬間剝離との区別が困難となる。

この時から15年後、ヨーロッパの研究者により

丹羽論文と同様の内容・論旨の論文(文献17)が、その多重反射の探傷図形を含んで発表された。結論として、超音波探傷法は、ケース・ライナ間剝離の検出には有効であるが、ライナ・推進薬間剝離に対しては無効であり、その原因はライナ内部の直径0.1~0.2mmの多数の気泡により、超音波が散乱されるためとしている。しかし、このような気泡が原因であるとは考えがたく、たとえそのような気泡が存在していなくとも、ライナ・推進薬間剝離の検出が困難であることは確認されている。またその翌年、アメリカのロッキード社の研究者は、やはり丹羽論文と同様の論文(文献18)を発表した。その中で示された多重反射の探傷図形は、ライナ・推進薬間剝離の検出が困難であることを丹羽論文よりもむしろ強く示している。

第1.1節で述べたように、固体ロケット・モータの非破壊検査法としては、X線CTが卓越した能力を有するものの、狭い空隙の剝離部に対しては必ずしも有効ではない。また、本節で述べたように超音波探傷法は、ケース・ライナ間剝離に対しては極めて有効であるが、ライナ・推進薬間剝離に対しては有効でなく、特にその空隙が狭い場合には、有効な検査法が見あたらない。ただし各種の検査法の中では、超音波探傷法に希望が持てそうである。他の検査法に較べて安価、安全、手軽で、ケース・ライナ間剝離に極めて有効で実用化(文献19)もされている超音波探傷法が、もしもライナ・推進薬間剝離に対しても有効であればまことに好都合である。そのため、超音波探傷法によるライナ・推進薬間剝離の検出の試みが繰り返されてきたがこれまではっきりした成果は出ていない。問題は、ケース・ライナ間剝離にあれほど効果的な超音波探傷法が、何故、最小の場合わずか1mmほどの厚さのライナを介するとライナ・推進薬間剝離が検出できなくなるかにある。この点に関しては、丹羽論文が、1960年代としてはその先進性において高く評価されるべきものであることは、その後20年にわたりヨーロッパやアメリカの論文がその水準を一歩も出していないことが証明していると言えよう。しかし、丹羽論文の方法だけでは、なお不十分であり、追試の結果も良

好な再現性を示しておらず，実用化には至っていない。やはり，従来法を越える何らかのブレイク・スルーが必要であり，その点についての研究成果が本論文の主題である。

第2章 ライナ・推進薬間剥離の超音波探傷法による検出の基礎試験

前章に述べたように，超音波探傷法にてライナ・推進薬間剥離の検出を行うためには，ブレイク・スルーが必要である。そのために，まず従来法の追試を基礎試験として行った（文献20，21）。

第2.1節 従来法の理論的背景

超音波が二種類の媒質の境界に法線入射する場合（図2.1.1），縦波が横波に変わる等の波動様式の変換は生じない。そして境界面での通過と反射との割合は両媒質の音響インピーダンスの値により，次式のように定まる（文献10，11，22）。

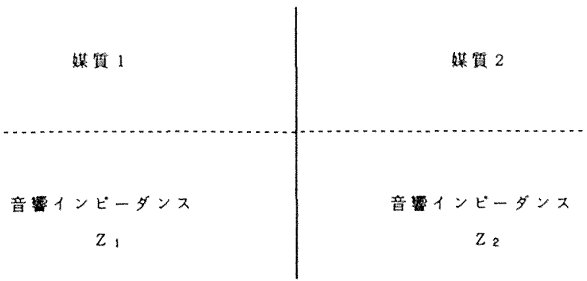


図 2.1.1 異媒質境界面への音波の垂直入射

$$R_e = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad \text{〔第3.1節の(3.1.23)式〕}$$

$$R_p = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad \text{〔第3.1節の(3.1.21)式〕}$$

ただし，

- R_e : 音波のエネルギー反射率
- R_p : 音波の音圧反射率
- Z : 音響インピーダンス ($Z = \rho c$)
- ρ : 媒質の密度
- c : 媒質中での音速

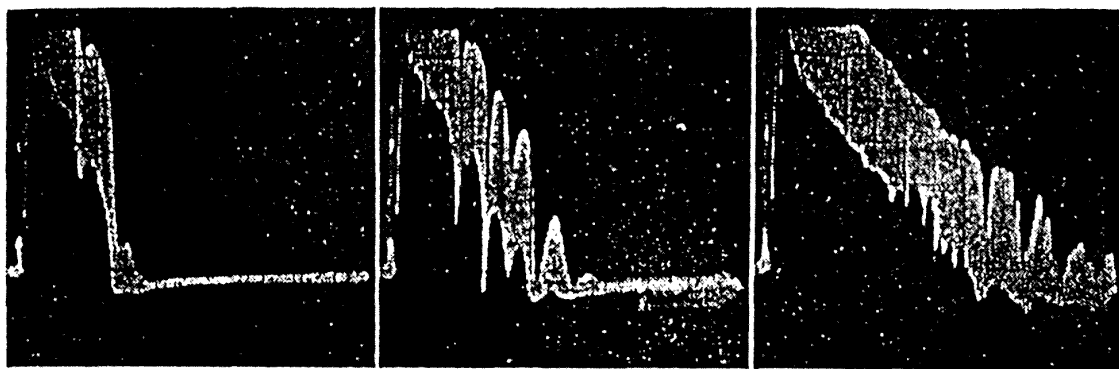
添字 1, 2 は媒質の種類を表わす。ここでは，波は媒質 1 から媒質 2 へと進行するものとする。

上述の理論式は無限空間の場合のものである。媒質の有限の厚さの影響については，第3章にて

表 2.1.1 音響インピーダンスとエネルギー反射率

材 質	縦波速度 × 10 ⁵ cm/s	密 度 g/cm ³	音響インピーダンス × 10 ⁶ kg/m ² s
鋼 鉄	5.9	7.7	45.3
推進薬	1.8	1.7	3.1
ライナ	1.5	1.1	1.7
空 気	0.34	1.3 × 10 ⁻³	0.0004

材 質	音波の垂直入射時のエネルギー反射率(%)			
	空 気	ライナ	推進薬	鋼 鉄
鋼 鉄	100	86	76	0
推進薬	100	8.5	0	
ライナ	100	0		
空 気	0			



(a) 接着良好部 (b) ライナ・推進薬間剥離部 (c) ケース・ライナ間剥離部

図 2.1.2 多重反射法によるケース・ライナ・推進薬の接着状況とそれに対応する探傷図形（文献16）

述べることにする。ここでは、鋼鉄、ライナ、空気の音響インピーダンスと、上式を用いて計算したエネルギー反射率を表 2.1.1 に示す。この表では、ケース・ライナ間剝離の場合には、反射率 100% で減衰はケース内での吸収だけによるが、ライナがケースに接着している場合には、反射率が 86% なので、ケース・ライナ間剝離の場合よりも、減衰がはるかに大きい。このことは、丹羽論文（文献 16）でも実験的にも確認されており、両者の探傷図形（音圧が表示される）には図 2.1.2 に示すように大差があり、そのためケース・ライナ間剝離は容易に検出できる。

しかしながら、ライナ・推進薬間剝離の探傷図形は良好接着の探傷図形とさほど違いがなく、ライナ・推進薬間剝離の検出は困難となっていることは前章でも述べた通りである。ライナ・推進薬間剝離の検出に成功したとの報告は、殆ど全て、ライナ・推進薬間剝離部での多重反射過程での音圧減衰が、ケース・ライナ間剝離部での減衰よりはるかに大きい、良好接着部での減衰よりもやや少なく、その差が有意であるとしている（文献 16, 18）。このような結果は、残念ながら再現性に乏しく（文献 12, 17）、そのためこの方法は実用化されていない。

第 2.2 節 従来の理論に対する追試

ライナ・推進薬間剝離が存在すれば、図 2.2.1 に示すように、そこでの反射率が約 100% で推進薬への超音波の洩れがほとんどないので、探触子の受信超音波音圧が大きく、減衰が少なくなることが期待される（文献 17, 18）。しかも、ライナの厚さが少ないほど、多重反射過程における行程が短く、従って減衰が少ない。このような従来の理論は必ずしもはっきりした形で提出されていないが、これを以下のように整理することができる。図 2.2.2 に示すような探傷図形において、多重反射音圧の減衰の尺度として「飽和長さ」を定義すれば、図 2.2.3 に示すように、ライナの厚さの増加に従い飽和長さが単調減少することになる。もし、図 2.2.3 のような単調減少曲線が実験的に得られれば、それをライナ・推進薬間剝離の判定曲線として超音波探傷が可能である。そして、以上がライナ・推進薬間剝離に対する従来のあまり有効でない超音波探傷理論と言えよう（この理論が有効でない理由は、後述のように、単に半無限体の境界での反射・透過理論にのみ立脚し、有限厚さの反射層に伴う共振理論に配慮しなかったためである）。

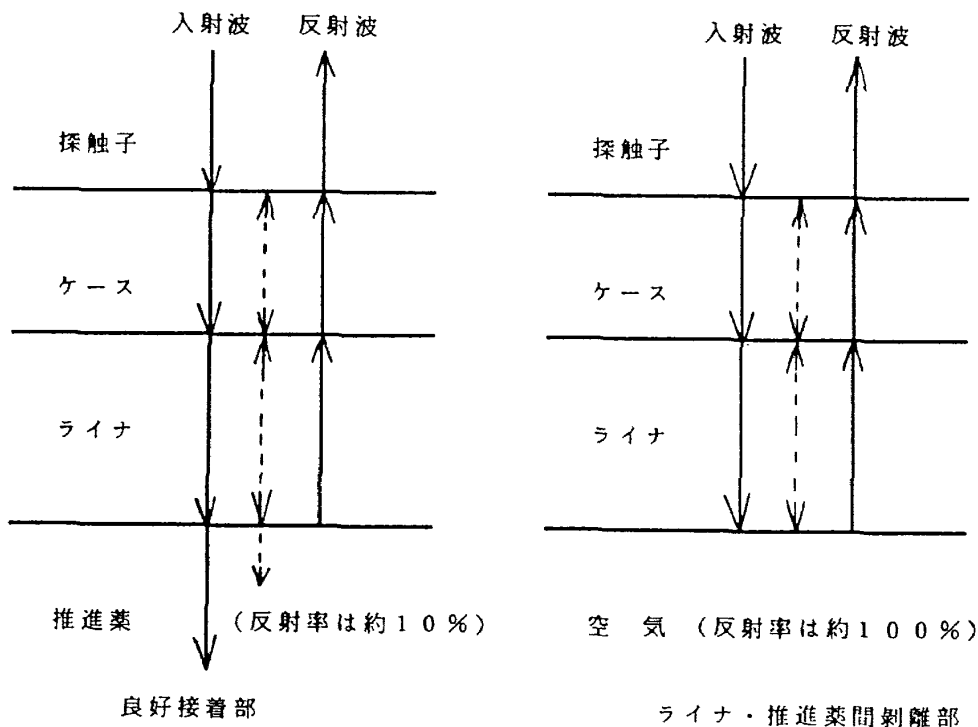


図 2.2.1 ケース・ライナ内の超音波の多重反射状況

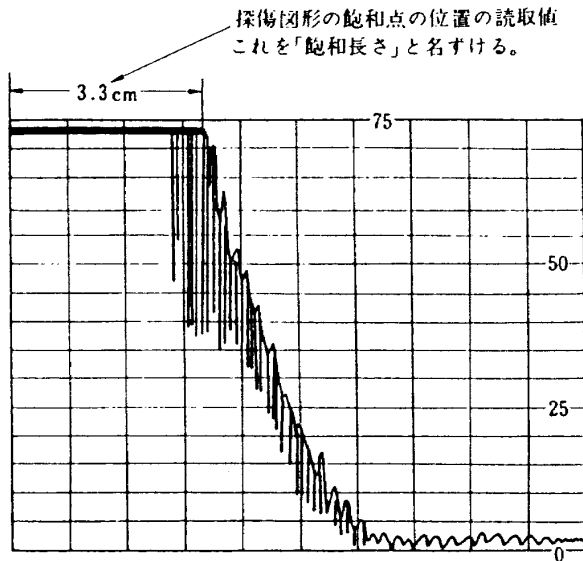


図 2. 2. 2 探傷図形の飽和点の位置と「飽和長さ」

2. 2. 1 試験方法

ここでは、従来理論の有効性や再現性確認のための追試を行うことにした。そこで、図 2. 2. 4 に示すように、80×80 mm、厚さ2.72 mm の鋼板の表面を研磨し、片面にサンド・ブラストをかけ、そこに枠を取り付けてライナを直填したライナ・推進薬間剥離の検査用試験片を10個製作した。ライナの寸法は45×45 mm、厚さはそれぞれ0 mm から1.2 mm までの10種類とした。ただし、ライナの表面にはかなりの凹凸があり、厚さの精度は±0.05 mm 程度である。これらの試験片に対して、周波数5 MHz と 2.25 MHz の超音波を使用して、探傷器のある探傷設定条件での探傷図形の飽和長さを測定した。使用した超音波探傷器および探触子は東京計器製造所製の UM721型と SA06D (5 MHz) と 3SDZ20D (2.25 MHz) である。ライナは末端カルボキシル基化ポリブタジエン・ポリマに、50 wt% に相当するカーボン・ブラックを混和し、いわゆる MAPO (硬化剤の一種) により硬化させたものである。

2. 2. 2 試験結果

試験結果、図 2. 2. 5 に示すように、ライナ厚さが0.5 mm 以上では飽和長さにあまり変化はないが、ライナ厚さ0.5 mm までの範囲では、飽和長さにはほぼ単調減少性が認められ、一見、従来の理

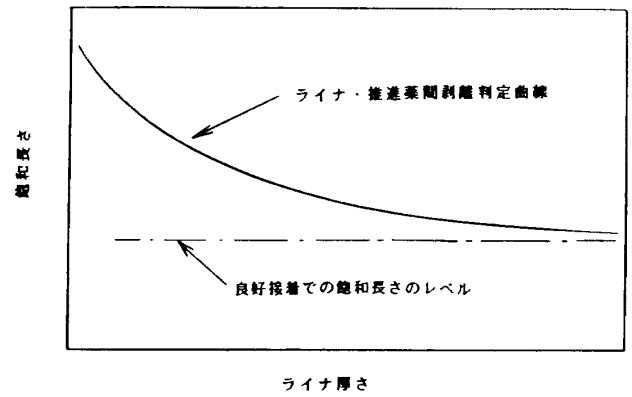


図 2. 2. 3 飽和長さによるライナ・推進薬間剥離の想定される判定曲線

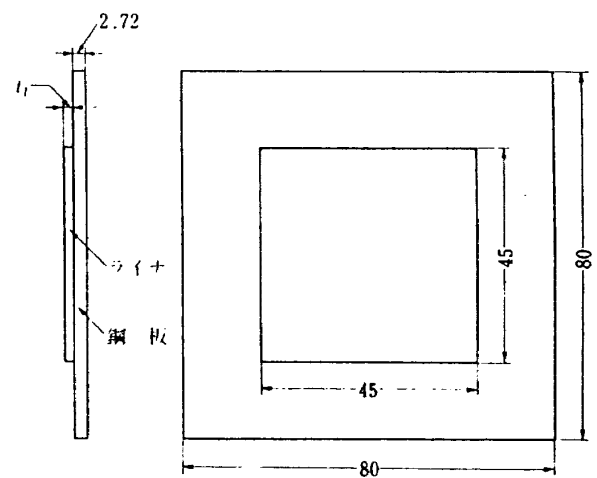


図 2. 2. 4 超音波試験片(1)

論が成立するかのようであった。しかし、ライナ厚さが約0.1 mm の A-2 試験片の場合だけは、単調減少曲線と大きく隔たっている点が注目される。この特異な差異は測定の誤差範囲(超音波の良好な通過のために、探触子と試験片との間に使われる媒体(機械油等)の状態等による飽和長さの誤差が±0.5 cm を越えることはない、ここでの実験条件においては確認された)よりはるかに大きい3 cm 以上である。

そこで、この単調減少性に疑問が生じたので、その確認試験を行った。前節で使用した試験片と同様で、ライナの厚さの大きい(3 mm 程度)ものを3個用意し、これをフライス盤により鋼鉄板面に平行に切削して、ライナの厚さを0.2 mm から0.02 mm の刻みで薄くして行き、その過程で探傷周波数5 MHz と 2.25 MHz での探傷図形の変化を観察した。この場合、ライナの厚さの誤差範囲は

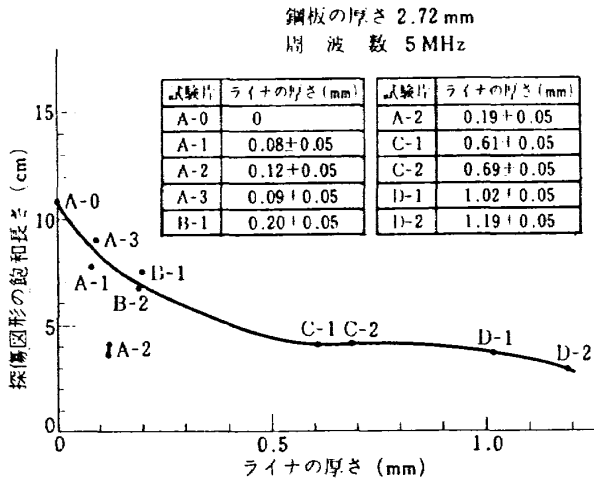


図 2.2.5 飽和長さの実験値とライナ・推進薬間剝離の判定曲線

±0.01 mm と考えられ、図 2.2.5 の場合より精度がほぼ一桁たかい。これら 3 個の試験片での結果を図 2.2.6(a), (b), (c) にそれぞれ示す。それに加えて、ケース厚さを 5.25 mm とした試験片についても同様な結果が図 2.2.6(d) のように得られた。これらの図から、試験結果の再現性がほぼ確認できる。さらに、これらの飽和長さ曲線は単に単調減少成分だけでなく、周期成分をも含んだ曲線であり、しかもライナ厚さの大きい場合 (1.5 mm 以上) よりも飽和長さの小さいことがライナ厚さの小さい場合 (0.5 mm 以下) に有り得る。そして、A-2 試験片の場合の特異なデータは、まさにライナ厚さ約 0.1 mm での曲線の極めて深く鋭い谷 (50% 以上の低下) に相当するデータであって、測定上の誤りではないことが確認された。そして、このような飽和長さが短い場合を良好接着と誤診する危険がある。従って、上述の単調減少性に基づくライナ・推進薬間剝離の探傷は不可能であり危険でさえあるので、ライナ・推進薬間剝離に対する従来の超音波探傷理論の有効性は明確に否定されたと言えよう。そして、このような結論を得、さらに本論文でこれから展開する新方法を発見するきっかけとなった A-2 試験片の特異な結果は極めて貴重であり、後に述べるようにそのライナ厚さが偶然にも 4 分の 1 波長であったことは、特に意図したわけではなかっただけに、まことに幸運と言わねばなるまい。

2.2.3 多重反射音圧減衰のライナ厚さに対する周期的依存性

ここまで述べたように、探傷超音波の反射音圧のライナ厚さに対する単調減少性は実験的に否定されたが、単調減少性でなくとも、図 2.2.6 の飽和長さ曲線や探傷図形の特性を明らかにできれば、それに基づいての探傷は必ずしも不可能ではない。この点に関しては前節で述べたように、丹羽論文 (文献 16) の方法は再現性に乏しく実用化されていないとは言え、貴重な指針を与えている。

すなわち、

- (イ) 提示された探傷図形から、特定の探傷条件では、かなり高い感度でライナ・推進薬間剝離の検出に成功していると思われる。
- (ロ) その条件はケース厚さに依存しており、探傷周波数を選定する必要がある。
- (ハ) 探傷周波数はケース・ライナ間剝離の場合 (5~10 MHz) よりかなり低い領域 (0.4 MHz) にまで及ぶことがある。

このような指針を考慮しつつ実験結果を検討し、得られた特性を以下に述べることにする。

(1) ケース厚さの影響

図 2.2.6(a), (b), (c) では、ケース厚さは 2.72 mm であるが、これを図 2.2.6(d) の場合のように 5.25 mm としても、飽和長さの周期性に変化はない。これらの数値は互いにも、またケース内での超音波の波長とも共振などの特別な関係はない (鋼鉄内の音速 = 5.9 km/s, 周波数 = 5 MHz であるから、2.72 mm = 2.31 波長, 5.25 mm = 4.45 波長) ので、ケース厚さの影響はないと言えよう。なお、この点については第 3.3 節(4), 第 5.2 節 5.2.2(4) に詳しく述べる。

(2) 超音波周波数の影響

図 2.2.6 には、5 MHz だけでなく 2.25 MHz の探傷超音波での飽和長さの試験結果も示している。2.25 MHz の場合は、5 MHz の場合より感度が低い、減衰性は少ない。両曲線とも、ライナ厚さの刻みが十分に小さくないためか、必ずしも滑らかな曲線ではないが、それでも明確な周期性が認められる。そして、その周期性には、明かな周波数依存性が認められる。そこでは 2.25 MHz の曲線の

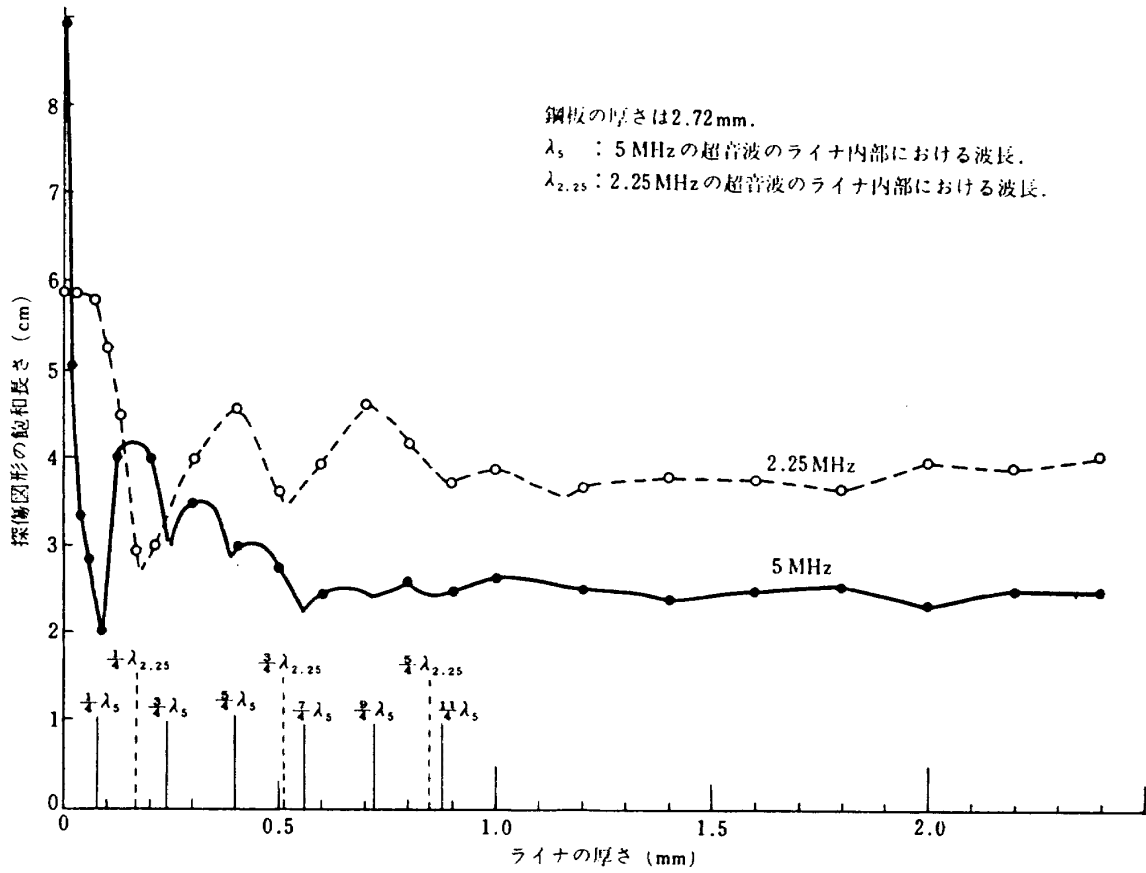


図 2. 2. 6 (a) ライナ厚さのフライス盤による削減に伴う飽和長さの変化 (その 1)

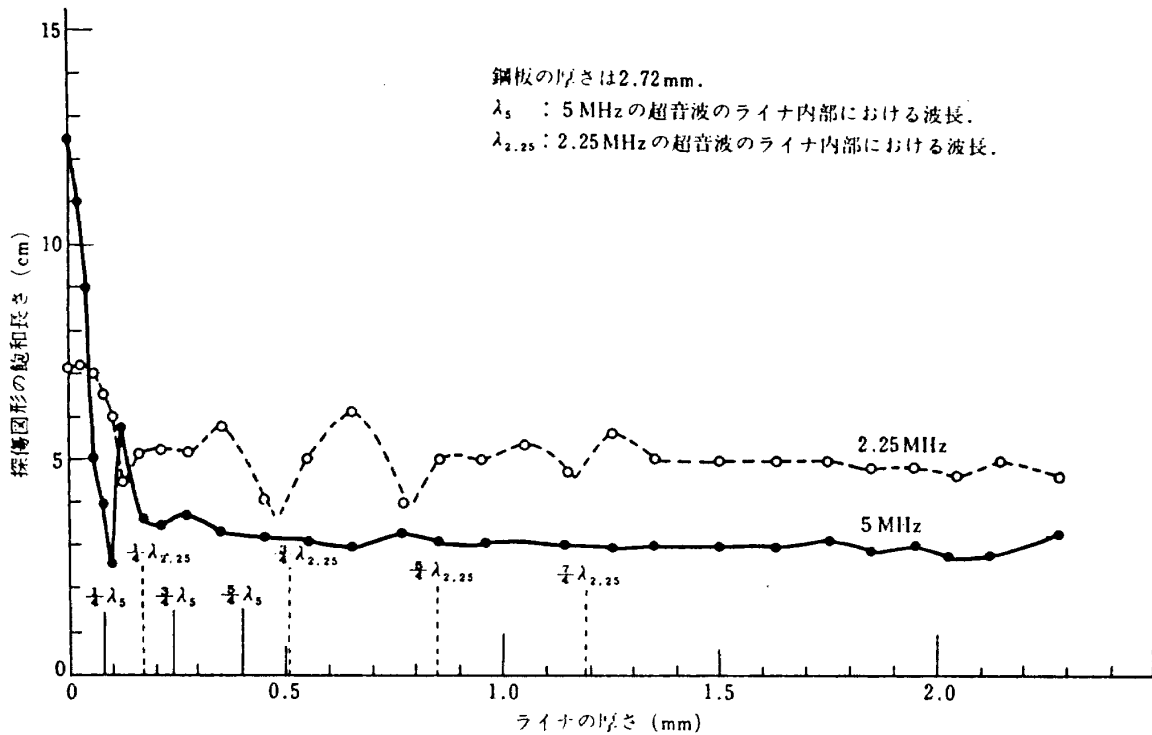


図 2. 2. 6 (b) ライナ厚さのフライス盤による削減に伴う飽和長さの変化 (その 2)

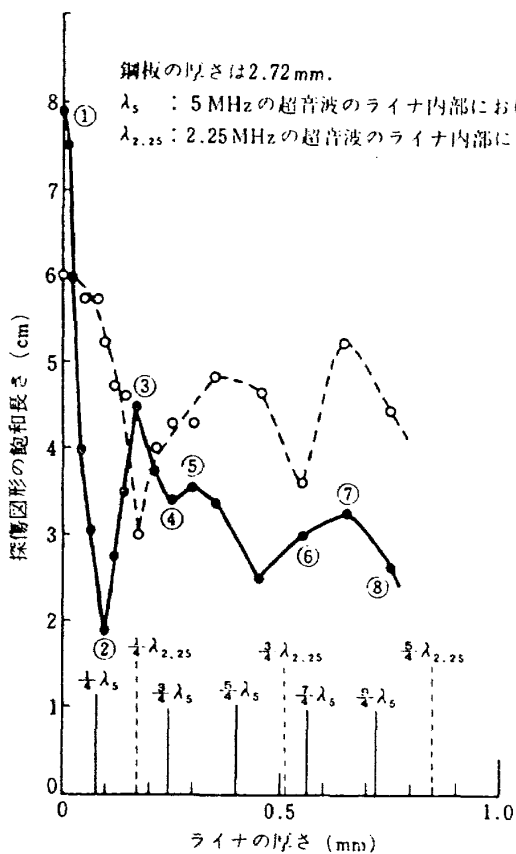


図 2. 2. 6 (c) ライナ厚さのフライス盤による削減に伴う飽和長さの変化(その3)

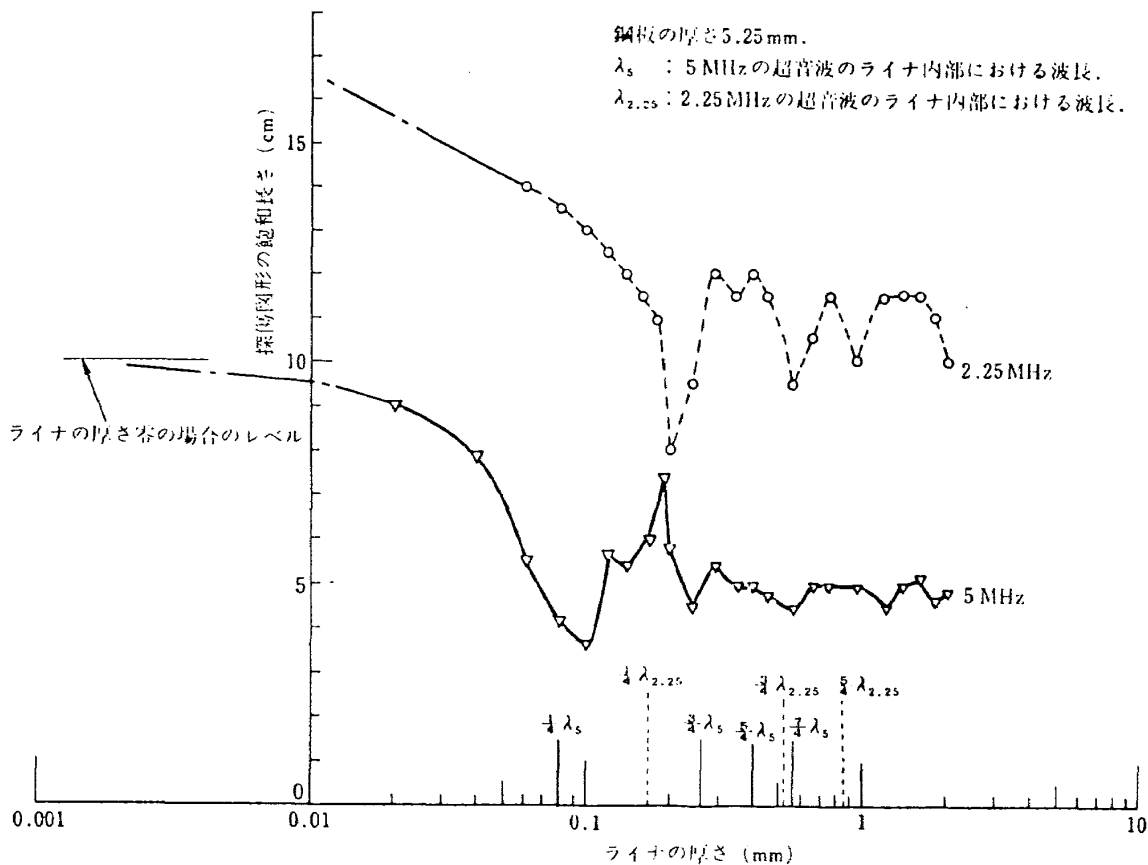


図 2. 2. 6 (d) ライナ厚さのフライス盤による削減に伴う飽和長さの変化(その4)

ライナ厚さの少ない方から最初の谷は、5MHzの曲線の2番目(ライナ厚さを1番目とする)の山に対応している。すなわち、5MHzの場合は、2.25MHzの場合の約半分の周期となっている。

(3) 超音波音圧減衰(飽和長さ)の周期性と波長との関係

この周期性は、ライナ内部における超音波の波長の1/2に等しい。すなわち、周波数が5MHzの場合、

- (イ) ライナ内部での音速：約1.5km/s
- (ロ) ライナ内部での波長：約0.3mm
- (ハ) 図2.2.6にて、ライナ厚さが零から増加してゆくときの最初の谷に位置は約0.08mm(ライナ内部波長の1/4)である。
- (ニ) 超音波音圧減衰(飽和長さ)曲線の周期性成分の周期は約0.15mm(ライナ内部波長の1/2)である。
- (ホ) 上述の(ハ)、(ニ)の周期特性は、5MHzの場合だけでなく、2.25MHzの場合にも、その周期・波長が約2倍になる形で認められる。

(4) 探傷図形における特徴

図2.2.6においては、全ての飽和長さは写真撮影された探傷図形から測定されたので、飽和長さ曲線の山と谷での探傷図形を比較する事ができる。例えば、図2.2.6(c)の曲線の山に①、③、⑤、⑦、谷に②、④と番号が付けてあるが、その番号に対応する山、谷での探傷図形を図2.2.7に示す。ただし、⑥と⑧は谷とはずれているが、②と④とのライナ厚さが超音波の1/4波長の奇数倍に一致するので⑥と⑧についても1/4波長の奇数倍となるようにした。図2.2.7より、山においてはライナが接着していない場合(①や図2.1.2(c))と同様な探傷図形が得られた。一方、谷においては、図2.1.2(a)よりも減衰の大きいような探傷図形が得られた。このことから、図2.2.7の谷でのような減衰の大きな探傷図形は、ライナ厚さが探傷超音波の1/4波長の奇数倍の場合に得られることになる。

このことの確認のためには、探傷器の利得等の設定を変えた場合にも探傷図形の性格が変わらないことを確かめる必要がある。そこで、ライナ厚

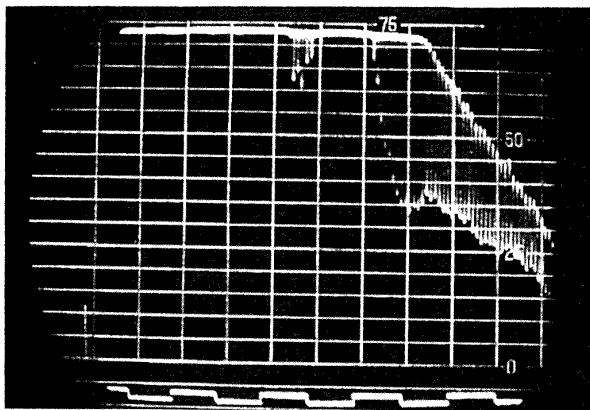
さ0.08mmと0.15mm(光学顕微鏡にて測定確認)の試験片を作製し、超音波探傷器の利得等の設定を3段階に変化させて、その入射パルス、ライナ厚さ零の場合の探傷図形と共に、これら特定厚さのライナの試験片について探傷図形を撮影した。その結果、図2.2.8に示すように、超音波探傷器の設定を変えても、探傷図形の特徴的な周期性は保たれることがわかる。

第2.3節 多重反射音圧減衰の周期的依存性と超音波周波数との関係

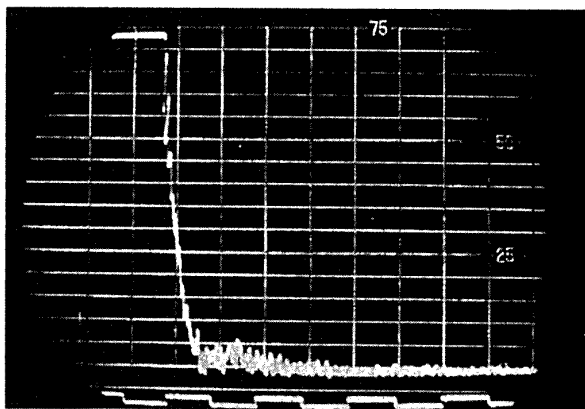
前節で述べたように、多重反射音圧減衰のライナ厚さに対する周期的依存性の存在が確認された。そこでは、ライナ厚さを細かい刻みで変化させての実験結果は、ライナ厚さの尺度をライナ内部での超音波の波長として、うまく整理された。しかし、現実のライナ・推進葉間剥離の検査では、ライナ厚さはモータの部位によって定まっており、検査時に変えるわけではない。従って、この周期的依存性の特性をより明確にし、それをライナ・推進葉間剥離の検査に役立てるためには、探傷超音波の周波数を種々に変えての実験(前節では、5MHzと2.25MHzのみで、まったく不十分)により、前節の(3)の飽和長さとの関係を確認することが必要である。

すなわち、本章での課題に対するアプローチの方法には二つが考えられる。一つは欠陥を有する試験片に対する入射波(発信波)の周波数の変更、反射波(受信波)の周波数分析等を行い、ある特定の欠陥に対して得られる考察の対象となる情報の質の向上と量の増加をはかり、それらを分析して欠陥と情報との対応を付ける方法{方法Ⅰ}である。もう一つは、欠陥に対する情報の質と量を一定に限定しておき、種々の系統的に変化させた欠陥に対して得られた情報を、欠陥の変化を考慮しながら比較検討する方法{方法Ⅱ}である。この両者は片方だけで十分というのではなく、互いに補い合う関係にある。

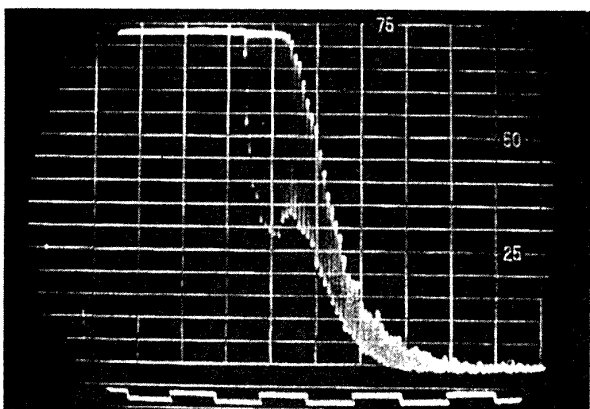
しかし、本章での実験が行われた1960年代末には、{方法Ⅰ}を採用することは困難であった。従来、超音波探傷法には、周波数掃引可能な超音



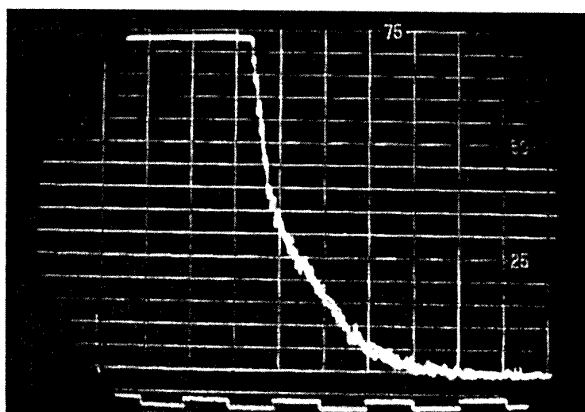
①の探傷図形



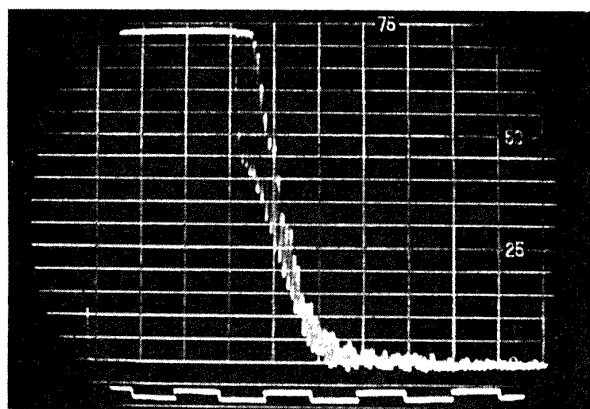
②の探傷図形



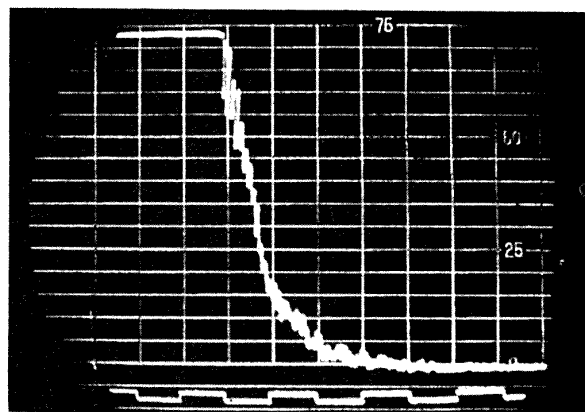
③の探傷図形



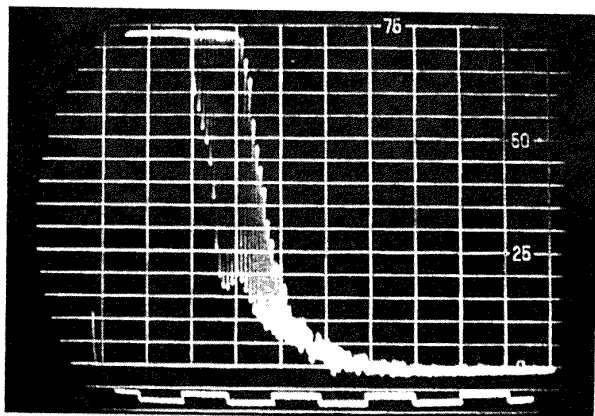
④の探傷図形



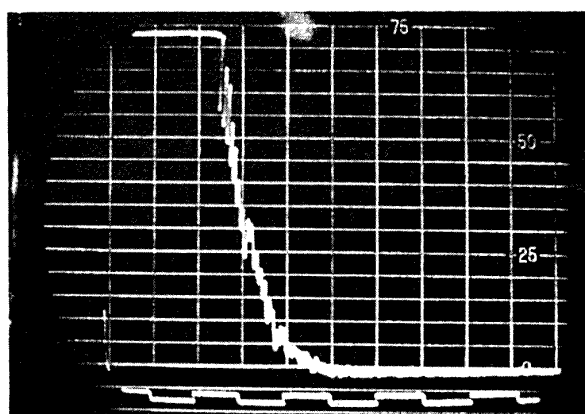
⑤の探傷図形



⑥の探傷図形



⑦の探傷図形



⑧の探傷図形

図 2.2.7 図 2.2.6(c)の飽和長さ曲線の山と谷での探傷図形

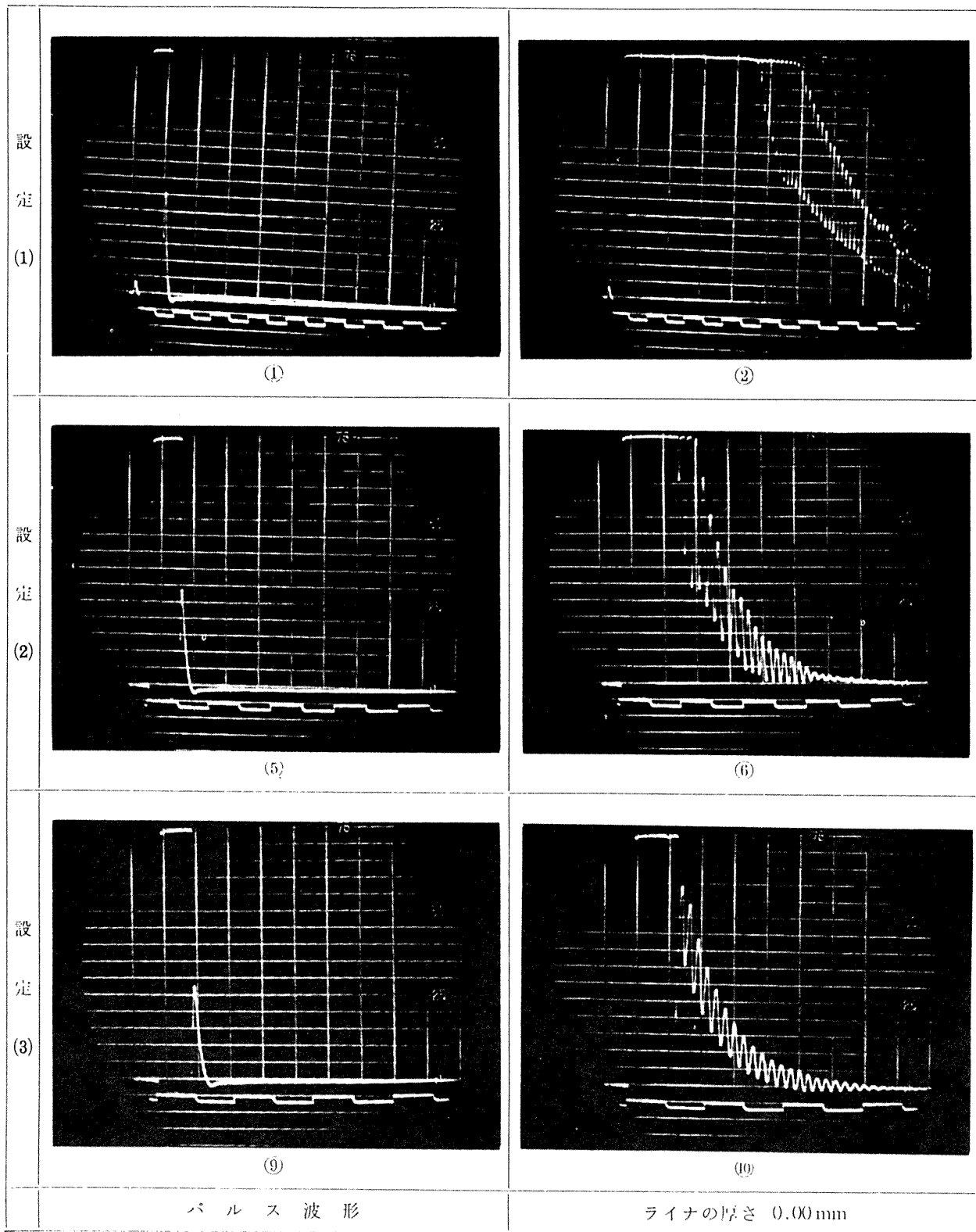
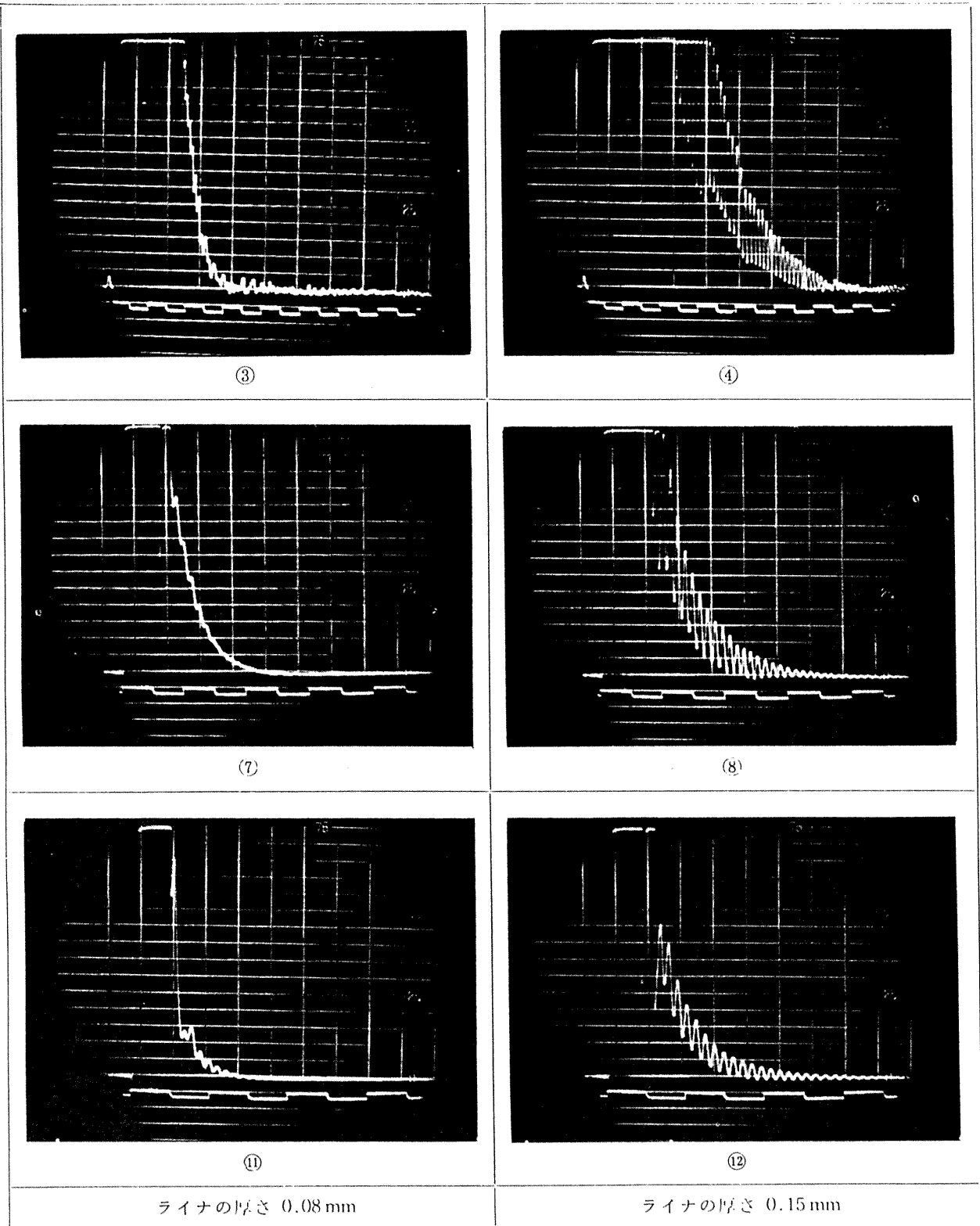


図 2. 2. 8 探傷器の利得などの設定の変化に伴う探傷図形の変化



ライナの厚さ 0.08 mm

ライナの厚さ 0.15 mm

(使用周波数は 5 MHz, 設定(1), 設定(2), 設定(3)の利得の比は 0.1 : 1 : 10, 設定(1), 設定(2), 設定(3)のタイムスケールは 1 目盛それぞれ $6.8 \times 10^{-6} \text{ sec}$, $4.1 \times 10^{-6} \text{ sec}$, $3.2 \times 10^{-6} \text{ sec}$ である。)

図 2.2.8 (続き)

波厚み計を用いた共振法があり、多層板のデラミネーションの検出等に用いられたが、水晶発振子を用いたパルス反射法が厚み計としても安価・高精度となる1960年代後半には市場からほとんど姿を消し、入手困難であった。そこで、反射型超音波探傷器を入手し、ケース・ライナ間剝離の検出に極めて有効な多重反射法により、{方法Ⅱ}により本章の実験を行ったのである。もっとも、当時の超音波厚み計は多重反射法での試験ができなかったもので、たとえ使っていたとしても、良好な結果は期待できなかったと思われる。そして、周波数連続可変型で、多重反射法の可能な周波数掃引反射型超音波探傷装置の市場への出現を1980年代初めまで待たねばならなかった。

第3章 周波数掃引型超音波探傷理論の構築

前章において、多重反射超音波の音圧減衰の波長すなわち周波数に対するかなり強い依存性の存在が推定されたので、それに基づきライナ・推進薬間剝離に対する新たな超音波探傷理論を構築した。

第3.1節 波動方程式の導出と媒質境界での反射・透過 (文献10, 11, 22)

(1) 波動方程式の導出

無限に広い媒質中に平面音波が存在するものとして、その微分方程式を立てる。図3.1.1のように、音波の進行方向を x 軸に選ぶと、媒質内の諸量(変位, 圧力など)は他の座標には無関係に x

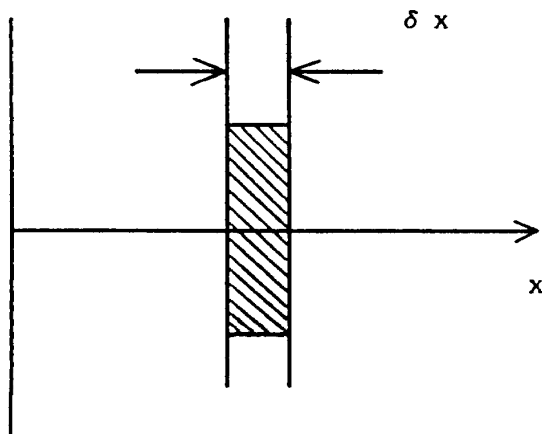


図3.1 平面波音場

だけで定まる。 x 軸に垂直で厚さ δx なる薄い層を考え、その層の単位面積の部分の運動を調べる。音波による x 方向の変位を u 、体積弾性率を K 、圧力を p とすると連続の式はつぎのように表わされる。

$$p = -K \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3.1.1)$$

つぎに媒質にこの部分についての運動方程式を考える。媒質の密度を ρ とすると、この部分に加わる力 f は

$$f = -\frac{\partial p}{\partial x} \delta x \quad (3.1.2)$$

この力が慣性力と釣り合うのであるから

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\frac{\partial p}{\partial x} \quad (3.1.3)$$

媒質の速度 $v = \partial u / \partial t$ とすると、上式と連続の式より

$$\frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{1}{K} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (3.1.4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (3.1.5)$$

両式より v あるいは p を消去して

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{\rho}{K} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (3.1.6)$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{\rho}{K} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (3.1.7)$$

これが波動方程式で、その解はいずれも $c = \sqrt{K/\rho}$ なる速度で伝播する波動現象であることが知られている。すなわち体積弾性率 K で表わされる弾性と密度 ρ で表わされる慣性を持つ媒質は、平面音波を伝える能力を有するというを意味する。ただし、音波の現実の p や v の値は音源という境界条件や、ある瞬間の p 、 v の分布を表わす初期条件が与えられなければ決定できない。なお、振動的な圧力変化 p を音圧、媒質の振動速度 v を粒子速度(または単に速度)という。

この解を求めるのに便利な速度ポテンシャル ϕ を次のように定義する。

$$v = -\frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (3.1.8)$$

これと運動方程式 (3.1.5) から

$$p = \rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (3.1.9)$$

(3.1.8) 式, (3.1.9) 式と連続の式 (3.1.1) よりやはり波動方程式が得られる。

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} = \frac{\rho}{K} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \quad (3.1.10)$$

(2) 2 媒質の境界平面への音波の垂直入射

図 3.1.2 のような相接する二つの半無限媒質を考える。境界面の左側の媒質 1 の音響インピーダンスを $Z_1 = \rho_1 c_1$, 右側の媒質 2 のそれを $Z_2 = \rho_2 c_2$ とそれぞれ添字を付けて表わす。さて単振動平面波が媒質 1 から境界面に垂直入射する場合, 入射波, 反射波, 透過波, 速度ポテンシャルを添字 i, r, t を付けて表わす。媒質 1 においては x 軸の正方向と負方向に進行する波媒が, 媒質 2 においては x 軸の正方向に進行する波だけが存在する。単振動平面波の角周波数を ω , 時間を t とすると, 各媒質での速度ポテンシャル Φ_1, Φ_2 は

$$\Phi_1 = \Phi_i + \Phi_r = (\phi_{(1+)} e^{ik_1 x} + \phi_{(1-)} e^{-ik_1 x}) e^{-i\omega t} \quad (3.1.11)$$

$$\Phi_2 = \Phi_t = \phi_{(2+)} e^{ik_2 x} e^{-i\omega t} \quad (3.1.12)$$

ここで, 各媒質の波長定数 k_j , 音速 c_j , 密度 ρ_j とすると, $k_j = \omega/c_j$ である。さらに $P_{(j\pm)} = -i\omega\rho_j \phi_{(j\pm)}$, ($j=1, 2$) とおくと, 各媒質での音圧 p_j は

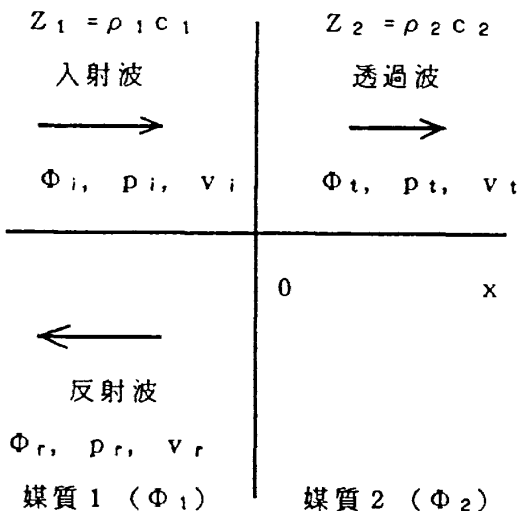


図 3.1.2 異媒質境界面への単振動平面波の垂直入射

$$p_1 = p_i + p_r = -i\omega\rho_1 (\phi_{(1+)} e^{ik_1 x} + \phi_{(1-)} e^{-ik_1 x}) e^{-i\omega t} = (P_{(1+)} e^{ik_1 x} + P_{(1-)} e^{-ik_1 x}) e^{-i\omega t} \quad (3.1.13)$$

$$p_2 = p_t = -i\omega\rho_2 \phi_{(2+)} e^{ik_2 x} e^{-i\omega t} = P_{(2+)} e^{ik_2 x} e^{-i\omega t} \quad (3.1.14)$$

音圧連続の境界条件より

$$P_{(2+)} = P_{(1+)} + P_{(1-)} \quad (3.1.15)$$

両媒質中の速度は,

$$v_1 = -ik_1 (\phi_{(1+)} e^{ik_1 x} - \phi_{(1-)} e^{-ik_1 x}) e^{-i\omega t} = \frac{1}{Z_1} (P_{(1+)} e^{ik_1 x} - P_{(1-)} e^{-ik_1 x}) e^{-i\omega t} \quad (3.1.16)$$

$$v_2 = -ik_2 \phi_{(2+)} e^{ik_2 x} e^{-i\omega t} = \frac{1}{Z_2} P_{(2+)} e^{ik_2 x} e^{-i\omega t} \quad (3.1.17)$$

境界面での速度連続の条件から

$$\frac{Z_1}{Z_2} P_{(2+)} = P_{(1+)} - P_{(1-)} \quad (3.1.18)$$

(3.1.15) 式と, (3.1.18) 式より

$$\frac{P_{(1-)}}{P_{(1+)}} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (3.1.19)$$

$$\frac{P_{(2+)}}{P_{(1+)}} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (3.1.20)$$

であるから, 音圧の反射率は

$$R_p = \frac{p_r}{p_i} = \frac{P_{(1-)}}{P_{(1+)}} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (3.1.21)$$

速度の反射率は

$$R_v = \frac{v_r}{v_i} = \frac{-P_{(1-)}}{P_{(1+)}} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (3.1.22)$$

エネルギー反射率は

$$R_e = -R_p \cdot R_v = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (3.1.23)$$

音圧の透過率は

$$T_p = \frac{p_t}{p_i} = \frac{P_{(2+)}}{P_{(1+)}} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (3.1.24)$$

速度の透過率は

$$T_v = \frac{v_t}{v_i} = \frac{\frac{P_{(2+)}}{Z_2}}{\frac{P_{(1+)}}{Z_1}} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (3.1.25)$$

表3.1.1 各種の物質の音響インピーダンスとそれらの境界面における音圧反射率(平面波・垂直入射)

物質	音響インピーダンス 単位 $10^6 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$	空気	アルコール	変圧器油	ゴム(軟質)	水 20°C	グリセリン	ゴム(硬質)	エポナイト	ポリスチロール	ヨウ化メチレン	エポキシ樹脂	アクリル樹脂	ベークライト	水	マグネシウム	ガラス	石英ガラス	水晶	アルミニウム	水銀	鉛	銀	銅	黄銅	鋼	ニッケル	超硬合金	タンゲステン
タンゲステン	104	100	98	98	97	97	95	95	94	95	94	94	94	93	68	84	76	76	74	72	68	61	45	45	45	39	35	2	0
超硬合金	100	100	97	97	97	97	95	95	94	95	94	94	94	93	67	83	75	75	74	71	67	59	44	44	43	38	34	2	0
ニッケル	49.8	100	96	95	95	94	91	89	88	89	88	88	88	87	43	69	56	55	53	49	43	32	12	12	11	5	0	0	0
鋼	45.3	100	95	94	94	94	90	88	87	88	87	87	86	85	39	66	53	52	50	45	39	28	7	7	7	0	0	0	0
黄銅	39.6	100	94	94	93	93	89	87	85	85	85	85	85	83	33	62	46	46	45	40	33	22	0	0	0	0	0	0	0
銅	39.3	100	95	94	93	93	89	87	85	85	85	85	85	83	33	62	47	46	44	39	33	21	0	0	0	0	0	0	0
銀	39.3	100	95	94	93	93	89	87	85	85	85	85	85	83	33	62	47	46	44	39	33	21	0	0	0	0	0	0	0
鉛	25.5	100	92	90	90	89	83	80	80	80	78	78	77	75	28	47	29	28	25	20	13	0	0	0	0	0	0	0	0
水	19.8	100	89	88	87	86	78	75	75	75	72	72	71	69	13	36	17	15	13	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
アルミニウム	17.1	100	88	86	85	84	75	72	72	72	69	69	68	65	6	30	10	8	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
水晶	15.2	100	87	84	83	82	73	69	65	65	65	64	64	62	0	24	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
石英ガラス	14.5	100	86	84	82	81	72	68	64	64	64	63	63	60	0	22	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ガラス	14	100	85	83	82	81	71	67	64	64	63	63	62	59	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
マグネシウム	9.3	100	79	75	75	72	59	54	54	54	49	49	48	44	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
水	3.7	100	54	48	45	42	21	14	14	14	7	7	6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ベークライト	3.6	100	53	47	44	41	20	13	13	13	6	6	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
アクリル樹脂	3.3	100	50	44	40	37	16	8	8	8	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
エポキシ樹脂	3.2	100	49	42	39	36	14	7	7	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ヨウ化メチレン	3.2	100	49	42	39	36	14	7	7	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ポリスチロール	2.8	100	44	37	33	30	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
エポナイト	2.8	100	44	37	33	30	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ゴム(硬質)	2.8	100	44	37	33	30	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
グリセリン	2.4	100	37	30	26	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
水(20°C)	1.5	100	15	7	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ゴム(軟質)	1.4	100	13	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
変圧器油	1.3	100	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
アルコール	1.1	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
空気	0.0004	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

エネルギー透過率は

$$T_e = T_p \cdot T_v = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (3.1.26)$$

ここで (3.1.23) 式と (3.1.26) 式とから

$$R_e + T_e = 1 \quad (3.1.27)$$

であることは、エネルギー保存則からも当然である。ただし

$$R_p + T_p \neq 1, \quad R_v + T_v \neq 1 \quad (3.1.28)$$

であることは注意を要する。

ここで代表的な媒質について、音響インピーダンスと (3.1.21) 式より求めた音圧反射率を表 3.1.1 に示す。空気と液体・固体との境界では完全反射としてよく、実用的に鉄と油や水との境界面で完全反射すると考えてもよい場合もある。従来の固体ロケット・モータに対する超音波探傷法は、ここに述べた半無限媒体の境界での超音波の透過率・反射率に基づくものであった。

(3) 異媒質層への入射・反射・往復通過率

超音波探傷法において探触子による超音波の入射・反射については異媒質層への入射・反射を取り扱う必要がある。図 3.1.3 に示すように、2 種類の半無限媒質の中間に厚さ L の層が存在する 3 媒質系において、単振動平面波が媒質 1 から中間層に垂直入射する場合、その一部は反射し、一部は媒質 3 へ透過する。超音波探傷法では同一探触子を超音波の送信・受信に共用することが多いので、実用的な見地から媒質 3 での透過波は損失なしに反転し、再び媒質 1 に戻って来る場合の音圧の往復通過率が重要となる。そこで、音波の透過率については、前項の 2 媒質系の場合と同様の手法により、各媒質中に速度ポテンシャルを導入し、3 媒質間の 2 境界での音圧、速度が連続であるという条件から、透過率が導出され、それにより音圧往復通過率 T_1 は、以下のように求められる(詳しくは、付録-I を参照)。各媒質の波長定数 k_j 、音速 c_j 、波長 λ_j 、密度 ρ_j とすると、両端媒質が同一の媒質の場合には

$$T_{1(121)} = \frac{p_t}{p_i} \cdot \frac{p'_t}{p'_i} = \frac{4}{4 + (Z_{12} - Z_{21})^2 \sin^2 \theta_2} \quad (3.1.29)$$

{ (付27) 式 }

ただし、 $Z_{mn} = Z_m / Z_n$ とする。また、「和の規約」は適用しないとして

$$k_j = \frac{2\pi}{\lambda_j}, \quad \theta_2 = k_2 L = \frac{2\pi L}{\lambda_2}, \quad Z_j = \rho_j c_j \quad (3.1.30)$$

音圧往復通過率は層の厚さと波長との比と音響インピーダンスの比によりかなり異なる。層の厚さが 2 分の 1 波長の場合には 100% 透過する。また、水晶・油膜・鉄のように図 3.1.3 の右側の媒質が左側の媒質 1 と異なる媒質 3 の場合の音圧往復通過率は次式で表わされる。

$$T_{1(123)} = \frac{4Z_{13}}{(1 + Z_{13})^2 \cos^2 \theta_2 + (Z_{12} + Z_{23})^2 \sin^2 \theta_2} \quad (3.1.31)$$

{ (付26) 式 }

ここで、層の厚さが 4 分の 1 波長で $Z_2 = \sqrt{Z_1 Z_3}$ の場合に 100% 透過する。ただし、水晶と鉄の場合にはこの関係を満足する媒質は存在しない。また、音圧反射率 R_{123} は音圧往復通過率から付録-I の (付28) 式により次式のように求められる。

$$|R_{123}| = (1 - T_{1(123)})^{0.5} \quad (3.1.32)$$

すなわち、音圧往復通過率が増加すれば、音圧反射率が減少し、音圧往復通過率が減少すれば、音圧反射率が増加する関係にある。

本論文での固体ロケット・モータに対する超音波探傷法は、ここで述べた有限厚さの層での透過

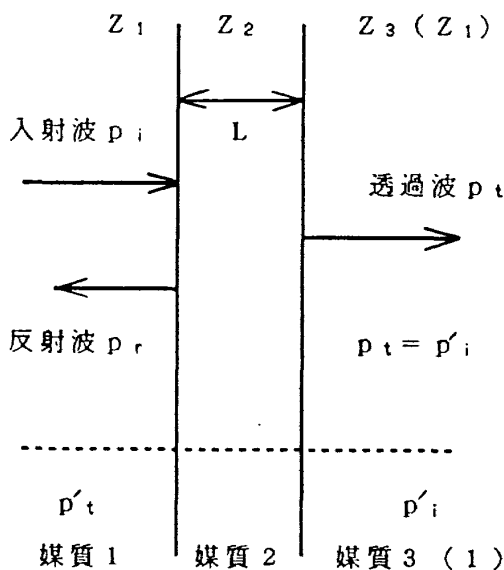


図 3.1.3 異媒質層への単振動平面波の垂直入射

率・反射率に基づくものである。本来ならば、多層板での多重反射についての理論を構築すべきであるが、それは極めて複雑となる。ここでは3種類の媒質からなる系を想定し、(3.1.31)式にて評価したところ、第3.2節、第3.3節に示すようにほぼ良好な結果を得ることができた。

第3.2節 ケース・ライナ間剥離の超音波探傷理論

(1) 良好接着の場合

この場合、ケースの両側の油とライナ・推進薬の音響インピーダンスはほぼ等しいので、ケースの条件は図3.1.3とほぼ同様(図3.2.1)で、超音波の挙動はほぼ(3.1.29)式にて表わされるが、

厳密には油・鋼鉄・ライナ(推進薬を含む)の3媒質に対する(3.1.31)式に従い、図3.2.2に音圧往復通過率 T_1 を示す。ケース厚さが2分の1波長の整数倍に近ければ、ケースは共振的に強く振動し、入射パルスの通過後の減衰過程においても強い多重反射超音波が長く観測される。また、ケース厚さが2分の1波長の整数倍に近くなければ、音響インピーダンスの比に応じた多重反射の反射波が観測されるが、往復通過率は後述のケース・ライナ間剥離の場合(図3.2.3)よりかなり大きいので、(3.1.32)式より反射率は小さく、両者を識別できる。

なお、従来は前節(2)の半無限媒体の理論を適用してきたが(第2.1節)、共振周波数近傍以外で

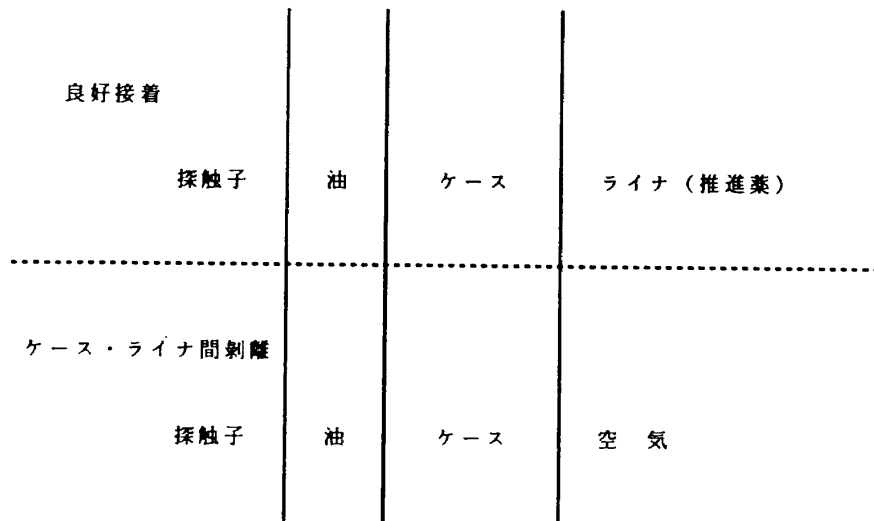


図3.2.1 固体ロケット・モータの超音波探傷系

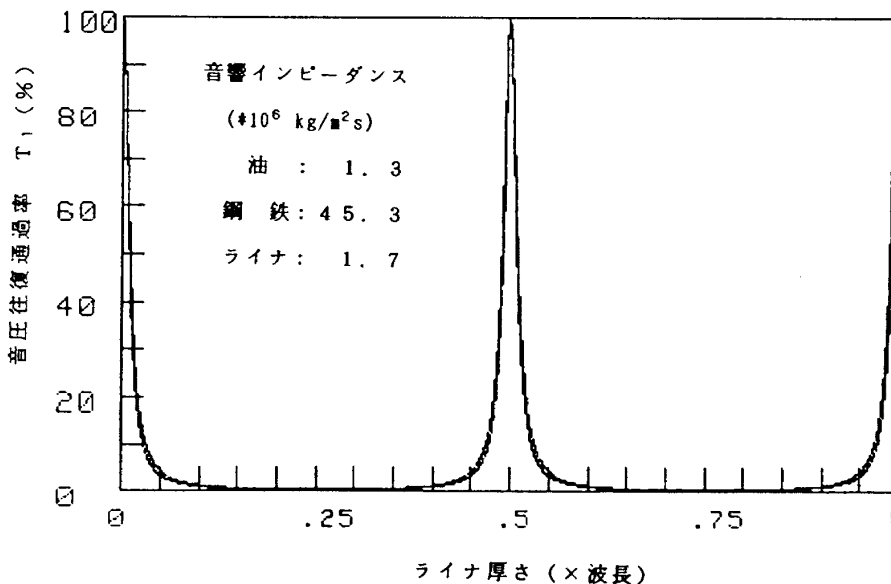


図3.2.2 油・鋼鉄・ライナの系の往復通過率

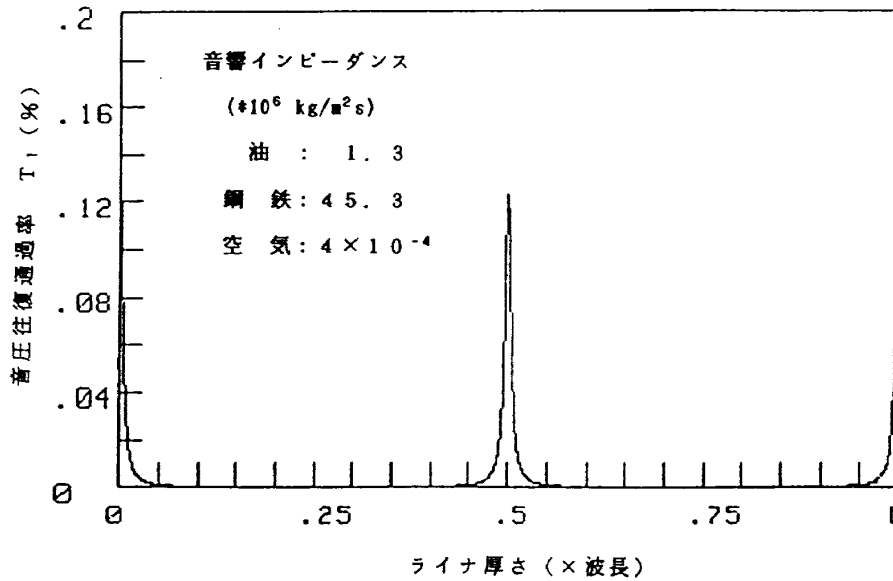


図 3.2.3 油・鋼鉄・空気の系(ケース・ライナ間剝離相当)の音圧往復通過率

は定性的には上述の内容と変わらない。

(2) ケース・ライナ間剝離の場合

ケース・ライナ間剝離の場合、ケースの右側の媒質は空気で、その音響インピーダンスはほとんど零であり、ケース・ライナ間境界ではほぼ100%反射する(図3.2.1)。この場合の音圧往復通過率は油・鋼鉄・空気の3媒質に対する(3.1.31)式に従い、図3.2.3に示す。本節(1)の良好接着の場合より往復通過率ははるかに小さく、従って反射率が大きいので、両者を識別できる。

これも、従来は前節(2)の半無限媒体の理論を適用してきたが(第2.1節)、共振周波数近傍以外では定性的には上述の内容と変わらず、従って従来理論でも多重反射法にてケース・ライナ間剝離の検出が可能であることを定性的には説明できる。

第 3.3 節 ライナ・推進薬間剝離の検出のための新理論

ライナ・推進薬間剝離の場合、ケースの振動条件は前節(1)の良好接着とあまり変わらない。ただし、ライナ・推進薬間剝離部からののはるかに強い反射波はライナ内にて多重反射しながら、その一部はケース内に戻ってくるので、良好接着の場合よりも多少強い反射波が観測されるとの期待に基づき、ライナ・推進薬間剝離が検出できるとする

のが従来の理論である。しかし、前節のケース・ライナ間剝離の場合と異なり、ライナ・推進薬間剝離ではこの理論で予測したような実験結果は得られず、実際には検出できない。そこで、ケース内、ライナ内での多重反射の状態を第3.1節(3)の有限厚さの層に対する透過・反射の理論を基に、より詳しく検討する。

(1) 入射超音波の挙動と反射波の命名法(文献 20)

入射される超音波パルスは最短 $3\mu\text{s}$ 程度の時間幅をもっている。つまりパルスは数波長以上の長さから構成されている。そのような入射波がどのような挙動をするかを考えてみる。

ライナ・推進薬間剝離部においては、空気・鋼鉄板・ライナ・空気の構成となっており、それぞれの境界を図3.3.1のようにA, B, Cとする。Cの右側の空気は剝離部内の気体を想定している。また探触子とケースとの間には媒質として油が使われるので、油・鋼鉄板・ライナ・空気の構成と言えよう。

Aから入射したパルスはBに達し、ここでその一部は反射し残りは透過する。波を表わすのにその経路をとって、反射波はA B A, 透過波はA B Cのように表わすことにする。透過波A B CはCにて事実上100%反射してBに戻り、Bで再び透

過波と反射波に分かれることになる。ここでの反射波は再びCに達し、そこで反射してBに戻る。ここでさらに透過波と反射波とにわかれる。このように、入射波のうちで最初にBを透過した波は、B~C間を往復しながら次第にAに戻ってくる。これらの波を、その経路に従って、A B C B A, A B C B C B A, A B C B C B C B A, …のように表わす。そして、これらの波に、Cにおける反射回数により

- A B A : 第0次反射波
- A B C B A : 第1次反射波
- A B C B C B A : 第2次反射波
- A B C B C B C B A : 第3次反射波
- ・
- ・
- ・

と名づける。次数の増加にしたがって戻ってくる波の強さは小さくなる。というのは、各境界面で反射・透過の際に強さが分割され、しだいに探触子に戻っているため波のエネルギーがしだいに減少するし、また波が通過する経路が長くなるので、その間の減衰が大きくなるからである。

(2) 各次反射波の位相関係とライナ内共振(文献20, 23, 24)

さて、図3.3.2のようにB~C間の距離が4分の1波長である場合の各次反射波の位相関係を調べよう。音響インピーダンスの大小関係については、鋼鉄板 ≧ ライナ ≧ 空気の関係にあるので、第0次反射波にはBでの反射における位相反転が一回ある。第1次反射波にはCでの反射における位相反転が一回とB~C間往復による経路差2分の1波長とがある。第2次反射波には、Cにおける

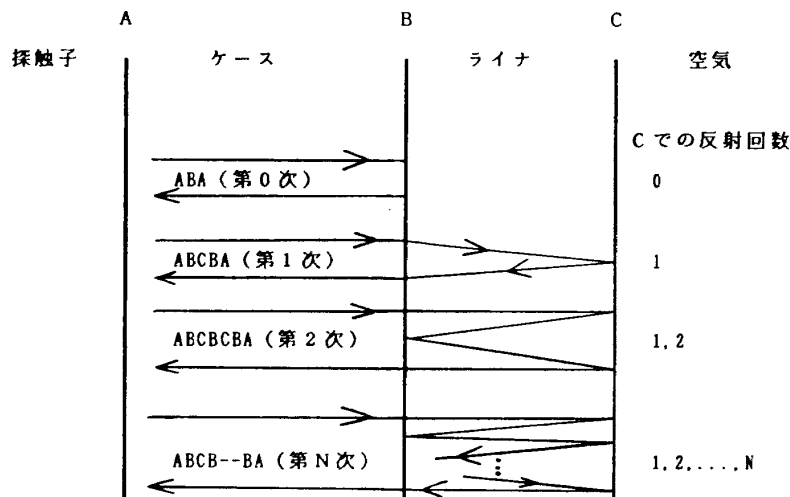


図3.3.1 ライナ・推進薬間剥離の超音波探傷の系

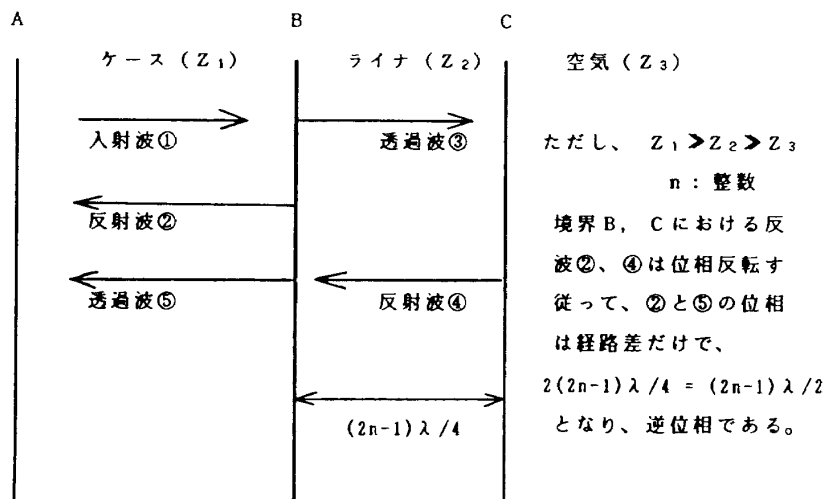


図3.3.2 ライナ厚さ = $(2n-1)\lambda/4$ での第0次反射波と第1次反射波との位相関係

位相反転 2 回と B ~ C 間往復経路差 1 波長がある。以下、同様にして高次反射波の位相反転回数と経路差を数えることができる。その結果を表 3.3.1 に示す。

この表より、第 0 次反射波に対して、第 1 次以上の反射波はすべて逆位相となっていることがわかる。そのため、第 2 章での試験のように、ケースがある程度厚く、探傷図形にて多重反射が入射パルスと区別して認められるような場合には、超音波探触子に受信される各次反射波の合成反射波は第 0 次反射波より弱くなる。このことは、B ~ C 間が 4 分の 1 波長の奇数倍の場合も同様である。一方、図 3.3.3 のように B ~ C 間が 4 分の 1 波長の偶数倍の場合には、逆に第 1 次以上の反射波は

第 0 次反射波と同位相となり、探触子に受信される合成波は第 0 次反射波より強くなる。さらに、ライナ内での多重反射波とケースからの入射波との位相関係を調べてみると、ライナ厚さが 4 分の 1 波長の奇数倍の場合には同位相となり共振し、2 分の 1 波長の整数倍の場合には逆位相で、反共振となる。従って、ライナ内反共振の場合には、弱い同位相の反共振波によって、僅かながら強められ、また、ライナ内共振の場合には、ケース内多重反射波は逆位相の強い共振波によって大幅に弱められる。すなわち、音圧反射率はライナ内反共振の場合には増大し、ライナ内共振の場合には極端に減少する。このことは、従来理論 (3.1.21) 式では音圧反射率は約 90%) では説明困難な

表 3.3.1 各次反射波の位相関係 (図 3.3.2 でライナ厚さ = $\lambda/4$ の場合)

波の次数	位相反転の回数	第 0 次反射波との経路差 (波長)	第 0 次反射波との位相反転回数の差	第 0 次反射波との位相関係
0	1	0	0	正
1	1	$\frac{1}{2}$	0	逆
2	2	1	1	逆
3	3	$\frac{3}{2}$	2	逆
n	n	$\frac{n}{2}$	n-1	逆

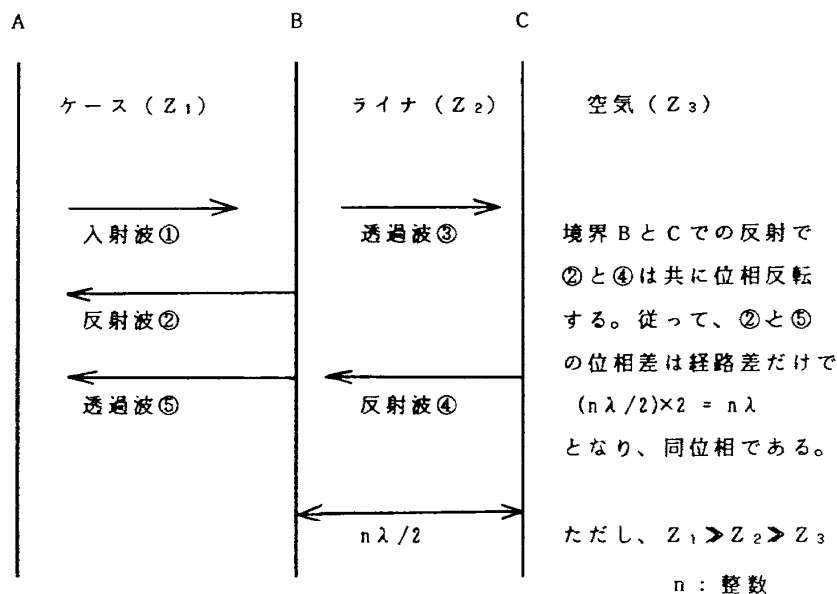


図 3.3.3 ライナ厚さ = $n\lambda/2$ での第 0 次反射波と第 1 次反射波との位相関係

図2.2.6の飽和長さの50%以上にも及ぶ強い周波数依存性を説明できよう。

このように、ライナ内共振が、ライナ・推進薬間剥離の場合に生ずることは、(3.1.31)式からも推定できる。すなわち、金属製ケースの音響インピーダンスはライナよりはるかに高く、また、推進薬の音響インピーダンスはライナと同等か、または少し高い。従って、良好接着の場合にはライナの境界条件はケース側は一端固定であるが、他端は音響学的には推進薬とあまり区別できず、どちらかと言えば固定端であるが、超音波エネルギーはかなりライナから推進薬へと透過する。図3.3.4に鋼鉄・ライナ・推進薬の系の音圧往復通過率を示すが、約10~25%の範囲で周期的に緩やかに変化しており、両端固定の境界条件での2分の1波長共振や4分の1波長反共振は、予想通り明確には現われていない。従って、(3.1.32)式より音圧反射率にもライナ厚さの変化による共振・反共振は明確には現われない。

ライナ・推進薬間剥離の場合には、ライナのケース側は固定で変わらないが、推進薬側は空気に接しており、従って、一端固定・一端自由の境界条件となっている。この条件下では、ライナ厚さが4分の1波長の奇数倍の時に共振し、偶数倍すなわち2分の1波長の整数倍の時に反共振することはよく知られている。この共振条件は、(3.1.31)

式からも知られる。つまり、第1層と第3層の音響インピーダンスの相乗平均が中間層(第2層)の音響インピーダンスに等しく、かつ第2層の厚さが4分の1波長の奇数倍の場合に共振し、音波は完全透過し反射率が零となる。実際には、空気の音響インピーダンスはライナより数桁小さいのに対して、金属製ケースの音響インピーダンスはライナより1~2桁大きいだけなので、厳密にはライナの音響インピーダンスは、空気とケースの音響インピーダンスの相乗平均に等しくないが、それぞれの音響インピーダンスは桁違いなので、実際にはある程度の共振は起こると考えられる。ここでは鋼鉄・ライナ・空気の3層系の場合の往復通過率を(3.1.31)式より計算した結果を図3.3.5に示すが、やはり4分の1波長共振が窺われる。従って、(3.1.32)式より音圧反射率は、ライナ厚さが4分の1波長の奇数倍の場合には極端に減少することになる。

(3) ライナ・推進薬間剥離の新検出法

図3.3.4の良好接着と図3.3.5のライナ・推進薬間剥離とでは、音圧往復通過率に相当の差異があるので、音圧反射率にも当然相当の差異があり、超音波探傷装置にてその差異を観測することにより、ライナ・推進薬間剥離を検出しようとするのが従来法である。すなわち、図3.3.4では音圧往復通過率は約10~25%の範囲内で緩やかに変化し

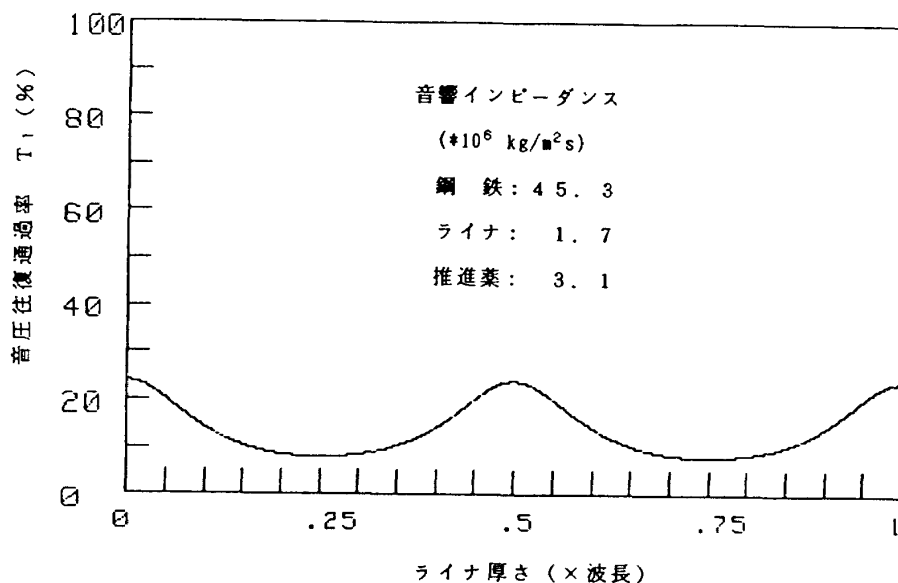


図3.3.4 鋼鉄・ライナ・推進薬の系(良好接着に相当)の往復通過率

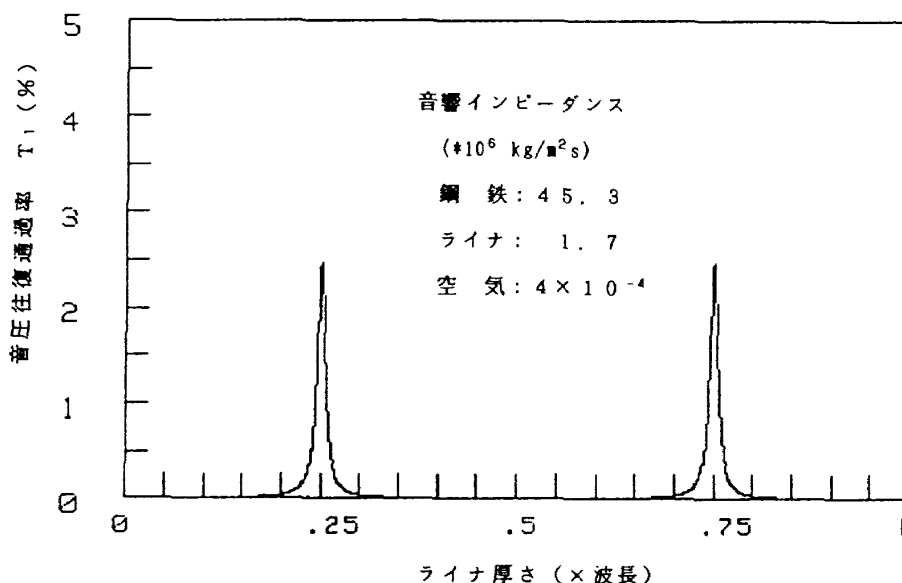


図 3.3.5 鋼鉄・ライナ・空気の系 (ライナ・推進薬間剝離に相当) の往復通過率

ているのに対して、図 3.3.5 では 4 分の 1 波長の奇数倍の鋭い共振ピークでは、約 2.5% であるが、それ以外ではほとんど 1% 以下である。そのため、共振ピークではやや検出能力が低下するものの、それ以外では、特定の探傷周波数での音圧反射率を高感度に観測できる多重反射法にてライナ・推進薬間剝離を検出できそうに思われる。

しかしながら、第 2 章の試験にて確認したように、この差異は現用の超音波探傷装置では観測困難であり、後述するように図 4.2.1, 図 4.2.2, 図 5.1.2, 図 5.2.3 においても観測できない。この理由は、第 3.1 節の末尾にて述べたように、(3.1.31) 式は現実の探傷条件をあまりにも単純化しすぎているためであろう。現実の探傷条件に近い、より複雑な理論を用いれば、この差異は減少するであろうが、そのことは、この方法ではライナ・推進薬間剝離の検出が困難であることを理論的に追認するだけであり、あまり積極的な意味はなからう。

ここでは、ライナ・推進薬間剝離を検出できる新方法を考案し、その有効性を確認することが重要である。そこで、第 2 章の図 2.2.6 の飽和長さの探傷周波数依存性に着目し、探傷周波数を掃引したときの探傷図形の変化のパターンを観測する方法を考案した。すなわち、良好接着では、図 3.3.4 のように 4 分の 1 波長の奇数倍で反共振、2

分の 1 波長の整数倍で共振するが、その音圧往復通過率の変化は最大値が最小値の約 2.5 倍であるのに対して、ライナ・推進薬間剝離では、図 3.3.5 のように、4 分の 1 波長の奇数倍にて共振、2 分の 1 波長の整数倍では、反共振と図 3.3.4 とは逆であり、その最大値は約 2.5% と小さいものの、最小値は約 0.0035% と極めて小さく、最大値は最小値の約 700 倍であり、良好接着の約 2.5 倍とは大差がある。従って、この方法では、探傷周波数を掃引したときに、(3.1.32) 式より音圧反射率に、2 分の 1 波長の整数倍に谷のある弱い周波数依存性が観測された場合は良好接着、4 分の 1 波長の奇数倍に鋭い谷のある強い周波数依存性が観測された場合はライナ・推進薬間剝離と判定される。実際には、最も観測の容易なライナ内 4 分の 1 波長共振が観測された場合を、ライナ・推進薬間剝離、観測されない場合を良好接着と判定することになる。勿論、ここでの理論は、現実の探傷条件を非常に単純化しているため、上記の数値が現実の探傷での測定結果とどの程度合致するかは疑問であるが、その本質は中間層であるライナの波動透過の周波数依存性の規定にあるので、この式にてこのような対照的な周波数依存性が推論されたからには、この方法の有効性は確認を試みる価値があろう。

図 2.2.6 では、探傷周波数が 5MHz と高いため、

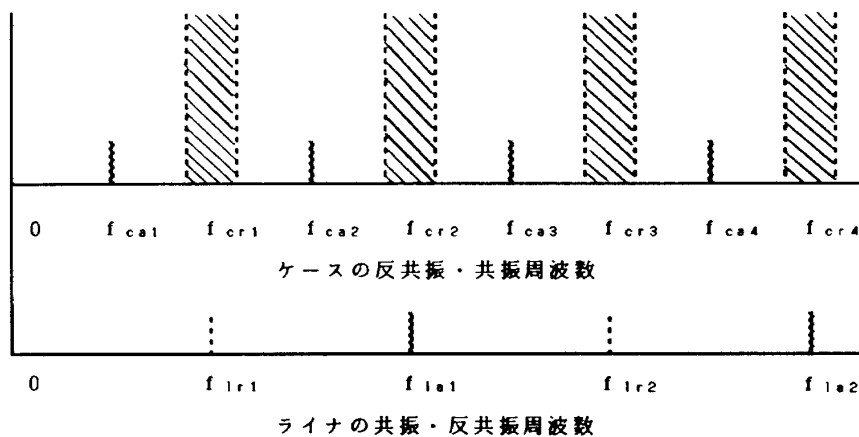
探傷可能なライナ・推進薬間剝離でのライナ厚さは0.5mm以下で実用性に乏しい。そこで、できるだけ低い探傷周波数・共振次数にて共振を観測することが望まれる。この場合、ライナ厚さは10mm以上にもなるので、探傷周波数は数十から数百kHzとなり、現用超音波探傷装置の探傷可能周波数域を、かなり低い領域まで拡張することが望まれよう。

(4) 超音波周波数上の「探傷窓」

これまで、ライナ厚さが4分の1波長の奇数倍となる探傷周波数によれば、ライナ・推進薬間剝離を検出できると述べてきたが、ライナとケースの厚さの関係によっては検出困難となる場合があることに注意しなければならない。すなわち、前述のように、ケースはその厚さが2分の1波長の整数倍（4分の1波長の偶数倍）のときに共振するが、この周波数がライナの共振周波数とほぼ一致する場合、ライナ共振波（これをSとする）よりはるかに強いケース共振波（これをNとする）と重畳するので、S/Nが極めて低くなり、検出能力が低下すると考えられる。一方、ケースはその厚さが4分の1波長の奇数倍のときに反共振となるので、この周波数がライナの共振周波数とほぼ一致すると、探触子からの超音波はケースにあまり入らず、そのためライナが共振条件にあってもライナ共振はあまり強くない。さらに、ライナ共振波は反共振状態のケースにはさほど戻らず、そ

のため探触子に受信されるライナ共振波はケース通過の際に2重に弱められるが、(3.1.31)式より計算した図3.2.2に示すように、この場合は $n\lambda/2$ の共振ピークに較べて $(2n-1)\lambda/4$ の反共振ピークはあまり鋭くないので、ライナ・推進薬間剝離の検出はさほど困難とはなるまいが、一応は、注意する必要がある。従って、探傷周波数としては、ライナ厚さがその4分の1波長の奇数倍とするのであるが、それがケース厚さの4分の1波長の偶数倍（ケース共振周波数）の近傍を必ず避け、奇数倍（ケース反共振）の近傍も避けることが望ましい。つまり、周波数掃引型超音波探傷法では、図3.3.6に示すように、ライナ・推進薬間剝離の探傷可能な周波数領域が間欠的に存在する。この状況は、ロケット打ち上げの際のローンチ・ウィンドウに似ているので、周波数上の「探傷窓」とでも呼ぶことができよう。

もし、ケースの第1次共振周波数（ケース厚さ $=\lambda/2$ ）が、ライナの第1次共振周波数に一致すると、ライナの高次共振周波数もすべてケースの高次共振周波数と一致してしまい、適当な探傷周波数は存在しないことになる。この場合には、ケースの奇数次共振波はライナの共振波と逆位相で、ケース共振を弱めるが、ケースの偶数次共振ではライナは反共振なので反射率が大きく、両波は同位相であるのでケース共振を強める。このことを利用しての探傷も一方法であるが、ケースを探触



縦軸：探傷困難性、横軸：探傷超音波周波数

f_{ca1} ：第1次ケース反共振周波数、 f_{cr2} ：第2次ケース共振周波数

f_{lr2} ：第2次ライナ共振周波数、 f_{la2} ：第2次ライナ反共振周波数、等

図3.3.6 ライナ・推進薬間剝離の超音波探傷における周波数上の「探傷窓」

子の一部とすることになるので、小面積のライナ・推進薬間剝離部の検出は難しいであろう。

もっとも、一般的にはライナの第1次共振周波数はケースの第1次共振周波数よりかなり低く、ほとんど問題とはならない。鋼鉄製ケースの音速は約5.9km/sで、ライナの音速の約1.5km/sの約4倍であり、しかもケースはλ/2共振であるのにライナはλ/4共振なので、同一周波数に対する共振時の厚さはケースがライナの約8倍となり、チタン合金製ケースの場合でもやはり約8倍となる。ケース第1次反共振の場合でも約4倍であるのに対して、固体モータ実機の場合、上段モータでは1倍に達せず、ブースタ・モータでもせいぜい2倍程度である。

以上に述べた推論の検証試験について次章に述べる。

第4章 新探傷理論のライナ・推進薬間剝離検出に対する有効性検証試験

第4.1節 検証試験方法

前章で構築した理論の検証のためには、探傷超音波の周波数の掃引が可能で、しかも通常のパルス反射型超音波探傷装置のように多重反射法が可能である超音波探傷装置が必要である。従来、このような性能を有する探傷装置は市販されていなかったが、1980年代にはいって、キャノン・ホロソニック社製のM200(0.5~10MHz)、カール・ドイチュ社製のスエプト・フリケンシー(0.08~10MHz)が相次いで販売されたので、両装置によっ

て、ライナ・推進薬間剝離の検出理論の有効性の検証試験(文献23, 24)を行った。使用した両装置と比較用の第2章でも用いた通常型探傷装置の仕様を表4.1.1に示す。また、使用探触子は第2章でも用いた狭帯域型5MHz探触子と、超音波掃引用低周波(500kHz)広帯域型探触子とである。

供試体としては、図4.1.1に示すように1mm及び3mmの鋼鉄板の3分の2の領域に1mm及び2mm厚のネオプレンゴムを接着し、その上の半分の領域に25mm及び45mm厚のガラス・ビーズ、アルミニウム粒、CTPB(末端カルボキシル基化ポリブタジエン)を原料とするダミー推進薬を注型硬化させた平板模型を採用した。これにより、良好接着、ケース・ライナ間剝離、ライナ・推進薬間剝離を模擬することができる。また、実機モータは円筒形あるいは球形であり曲率半径が有限であるが、このような対象物への超音波探傷は平面を有する対象物に比較して一般には困難となる。そのことを確認するために、ここでは加圧キュア実験に使用済みの直径200mmチタン合金製ケースを用いた円筒モータ模型(文献25, 26)の一部を切り出して供試した。ケース厚は1.5mm、使用ライナは1mm厚のEPDM(エチレン・プロピレン・ジエン・モノマー)にアスベストを混入して硬化させたものである。使用推進薬は14wt%のCTPB、ガラス・ビーズ等の充填剤によるダミー推進薬である。供試体の欠陥部等の各部位の表示法として、鋼鉄板厚-ライナ厚-推進薬厚をmm単位で表わした数字を連ねる方式を採用する。例えば、図4.1.1において3-1-25は、3mm厚

表4.1.1 周波数掃引型および通常型超音波探傷装置の仕様

項目	機種	M200改造型(キャノン・ホロソニック社)	スエプト・フリケンシー(カール・ドイチュ社)	UM721型(御東京計器)
周波数範囲		0.05~10MHz	0.08~10MHz	1, 2, 2.5, 5MHz
周波数精度		1Hz以下	10kHz	—
周波数表示		11桁	4桁	—
変調モード		—	6種	—
探傷法		一探触子法	一及び二探触子法	一及び二探触子法
探触子		0.5MHz広帯域型	同左	5MHz狭帯域型
型式		据置型	ポータブル型	ポータブル型

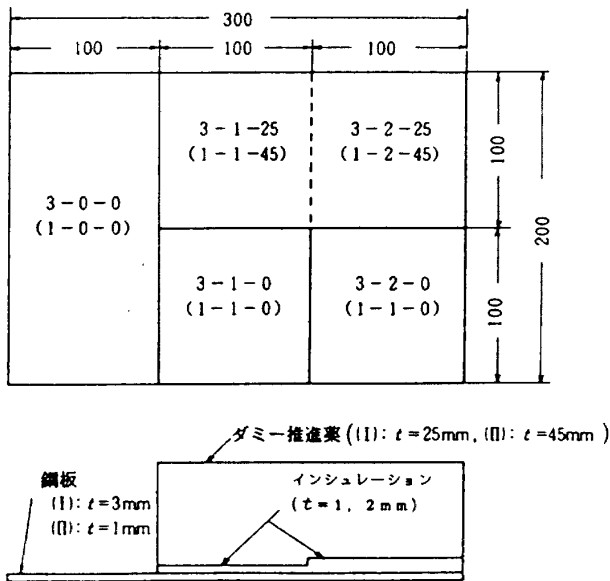


図 4.1.1 供試平板模型(I), (II)

のケース, 1mm 厚のライナ, 25mm 厚の推進薬の良好接着に相当し, 3-1-0 は鋼鉄板厚 3mm, ライナ厚 1mm, 推進薬厚 0mm を表わし, ライナ・推進薬間剝離に相当する。3-0-0 はライナ, 推進薬とも厚さが零でケース・ライナ間剝離に相当する。また, 0-0-0 はケース厚も零で, 探触子を供試体に接触させず, 単に空気に接触している場合に相当する。

第 4.2 節 試験結果

通常型探傷装置は使用可能周波数が 1, 2.25, 5 MHz の 3 種類に限られるが, その中では, 5 MHz の超音波周波数の場合が最も高感度にケース・ライナ間剝離を検出できた。その探傷図形を図 4.2.1, 図 4.2.2 に示す。これらの探傷図形において, 縦軸は超音波の音圧, 横軸は時間を示す。両図とも (特に図 4.2.2), ケース・ライナ間剝離に相当する 1-0-0 及び 3-0-0 の場合, 多重反射過程での減衰が極めて少なく, 他の部位での探傷図形との差異は明確であるが, ライナ・推進薬間剝離に相当する 2 つの部位及び良好接着に相当する 2 つの部位の計 4 部位間での探傷図形の差異は殆ど認められない。また, 探傷周波数を, 2.25, 1 MHz と低下させた実験では周波数が低いほど, ケース・ライナ間剝離部と他の部位との差異は減少し, 1 MHz では検出は殆ど困難であった。また, これらの低周波数の場合でも, ライナ・推進薬間剝離

部での探傷図形と良好接着部での探傷図形との差異も殆ど認められなかった。このことは, 通常型探傷装置では 5 MHz 程度の超音波周波数によればケース・ライナ間剝離部は明確に検出できるが, ライナ・推進薬間剝離部の検出は困難であるとの従来結果と一致する。

次に, M200 探傷装置を探傷周波数範囲 0.5~10 MHz の低域を延ばして 0.05~10 MHz までとなるよう改造し, 探傷試験を行って得られた探傷図形を図 4.2.3~図 4.2.5 に示す。これらの探傷図形において, 入射超音波パルスは 35 μ s ほどの時点で終わっており, またパルスの強さは ± 0.9 V ほどにて飽和して表示されているので, 入射超音波の強度を大きくしても ± 0.9 V での飽和に変化はなく, ただすこし飽和時間が長くなるだけである。従って, ここではパルス後の多重反射過程での減衰状況を観測することになる。図 4.2.3 (探傷周波数 326 kHz) では 3-1-0 の部位において, 図 4.2.4 (探傷周波数 168 kHz) では 3-2-0 の部位において, 図 4.2.5 (探傷周波数 346 kHz) では 1-1-0 の部位においてパルスの後の減衰が極めて少なく, 他の探傷図形に比べて 10 μ s ほど長く飽和している探傷図形が得られた。これらは, それぞれ他の部位の探傷図形とは明確に区別できる。このような探傷図形は, カール・ドイチェ社製の探傷装置 (スエプト・フリケンシー) によっても図 4.2.6, 図 4.2.7 に示すように M200 型探傷装置によるよりも顕著に得られた。これらの探傷周波数は, その波長がライナ厚さの 4 分の 1 に相当しており, 第 3 章での探傷理論に基づくライナ共振の予測と一致する。なお, 図 4.2.6 では 3-2-25, 図 4.2.7 では 3-1-25 での探傷図形を示していないが, これらはそれぞれ隣の良好接着の場合の探傷図形とほとんど変わらぬ探傷図形であったことをつけ加えておく。また, 図 4.2.3 の場合に周波数分析を行ったが, その結果を図 4.2.8 に示す。使用した周波数分析器はヒューレット・パッカード社の HP-8553B である。図 4.2.8 から分かるように, 部位 3-1-0 において約 326 kHz のピークが, 他の部位に比べて 3~5 dB 高くなっており, やはり共振を裏付けていると言えよう。

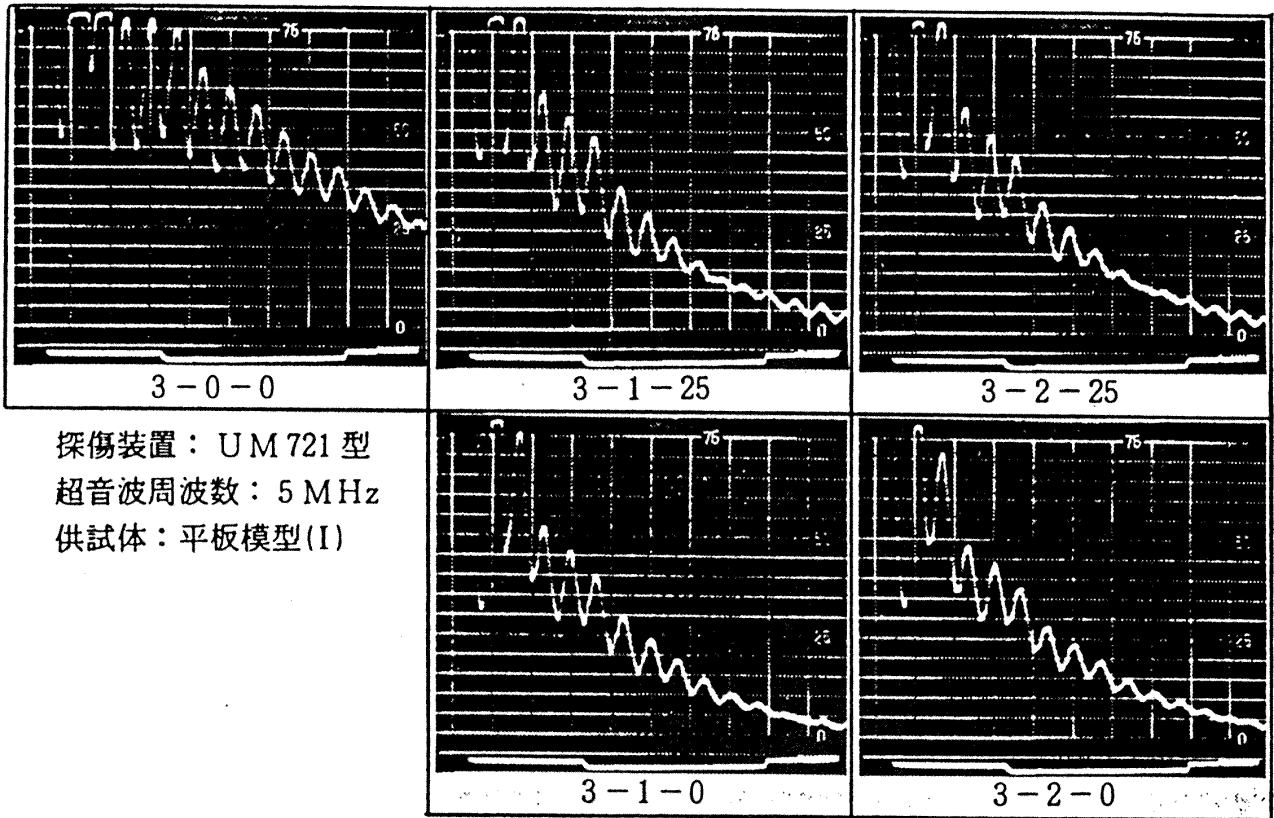


図4.2.1 平板模型(I)に対する通常型超音波探傷装置による探傷図形
 (周波数=5MHz)

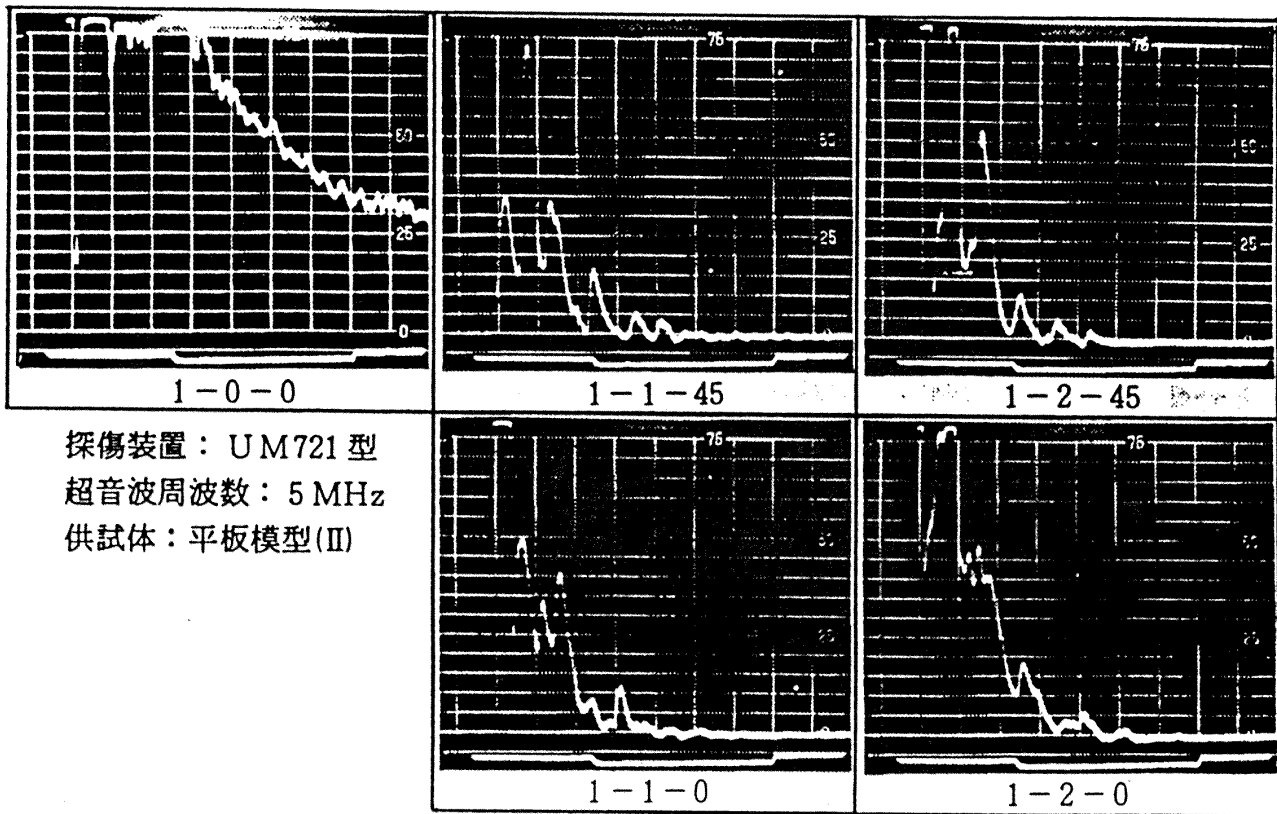
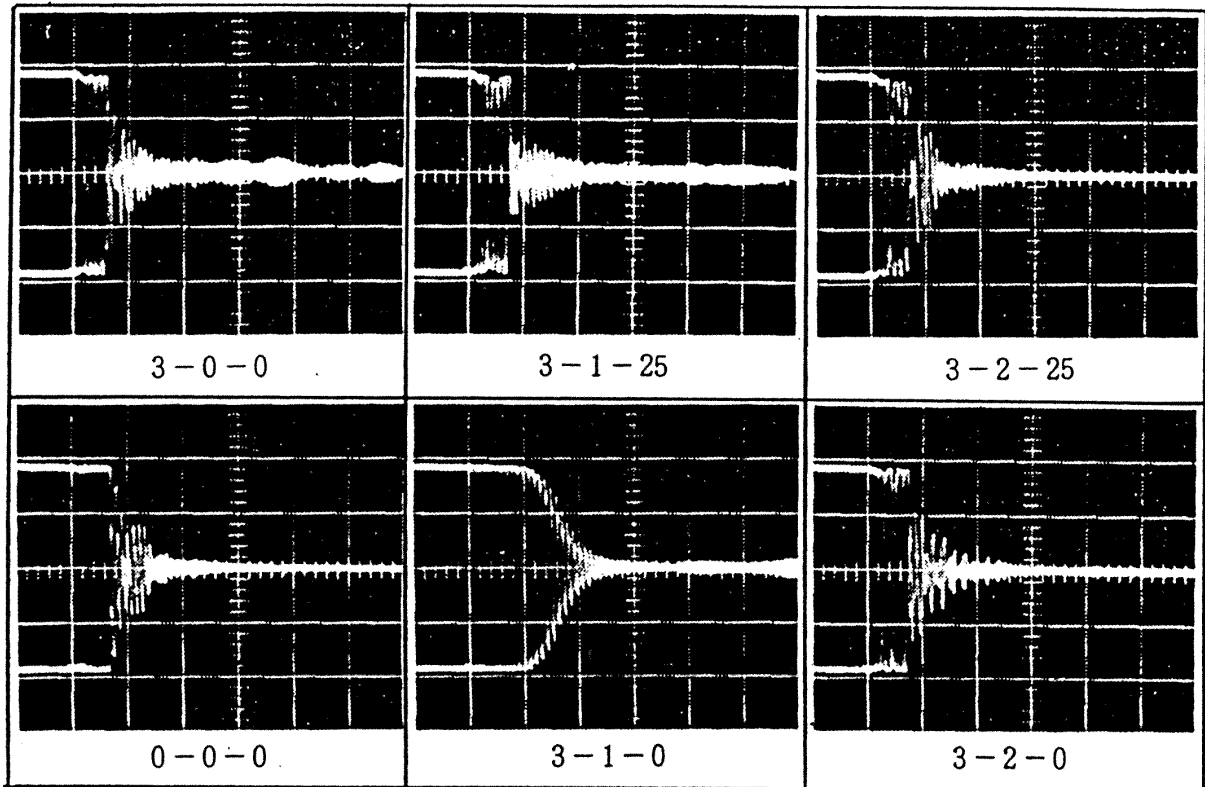
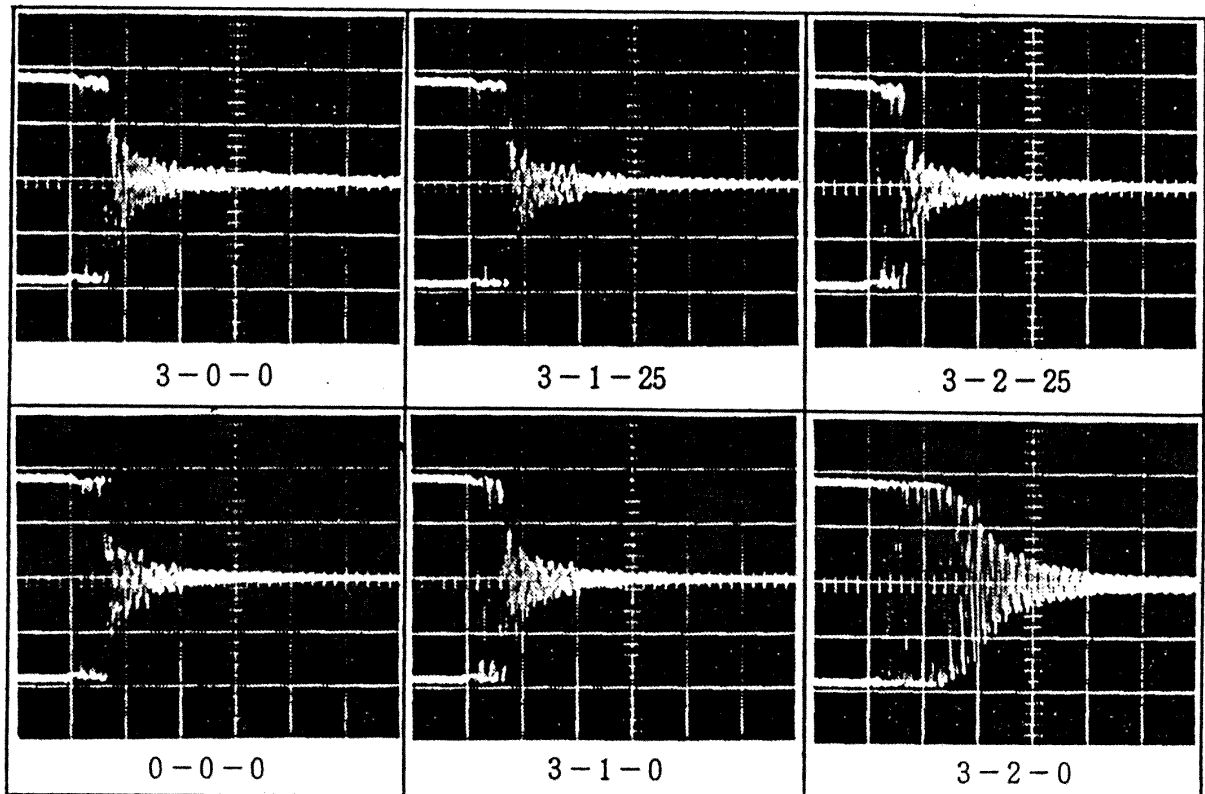


図4.2.2 平板模型(II)に対する通常型超音波探傷装置による探傷図形
 (周波数=5MHz)



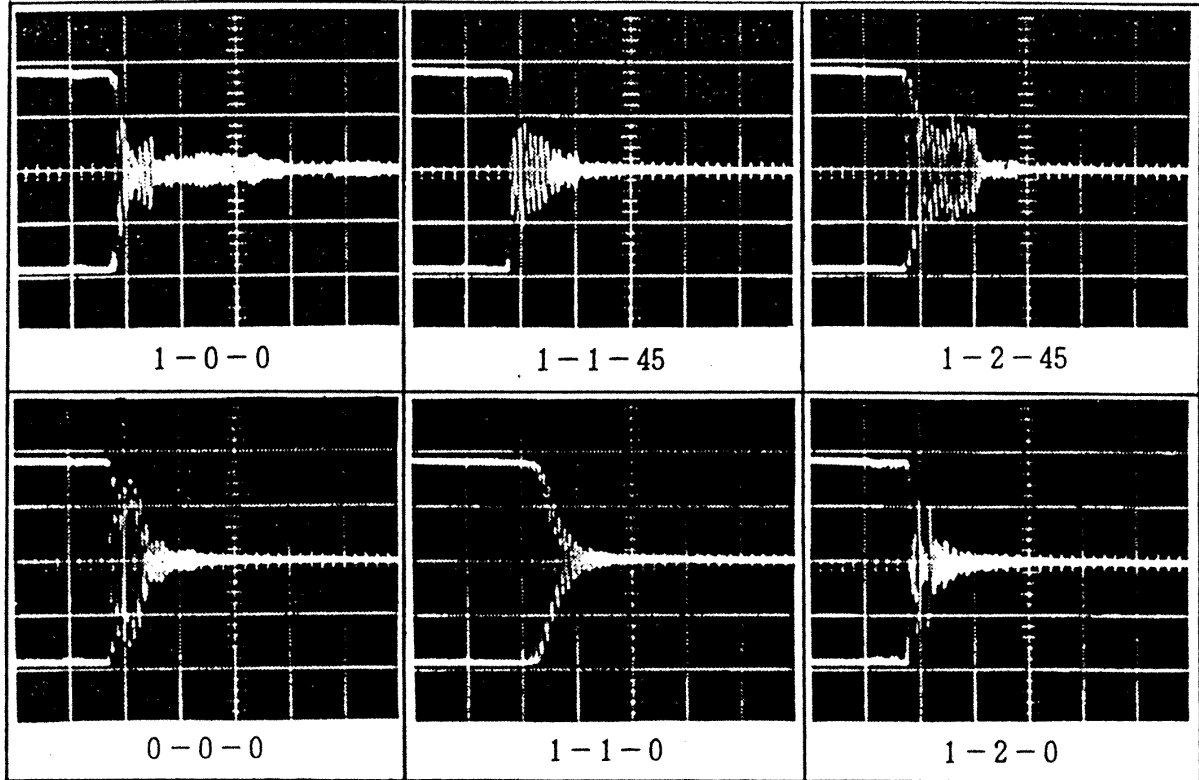
探傷装置 M200 型, 超音波周波数 326kHz, 縦軸 0.5 V/D, 横軸 20 μ s/D

図 4.2.3 平板模型(I) に対する周波数掃引型超音波探傷装置(据置型)による探傷図形
(その 1: 周波数=326kHz)



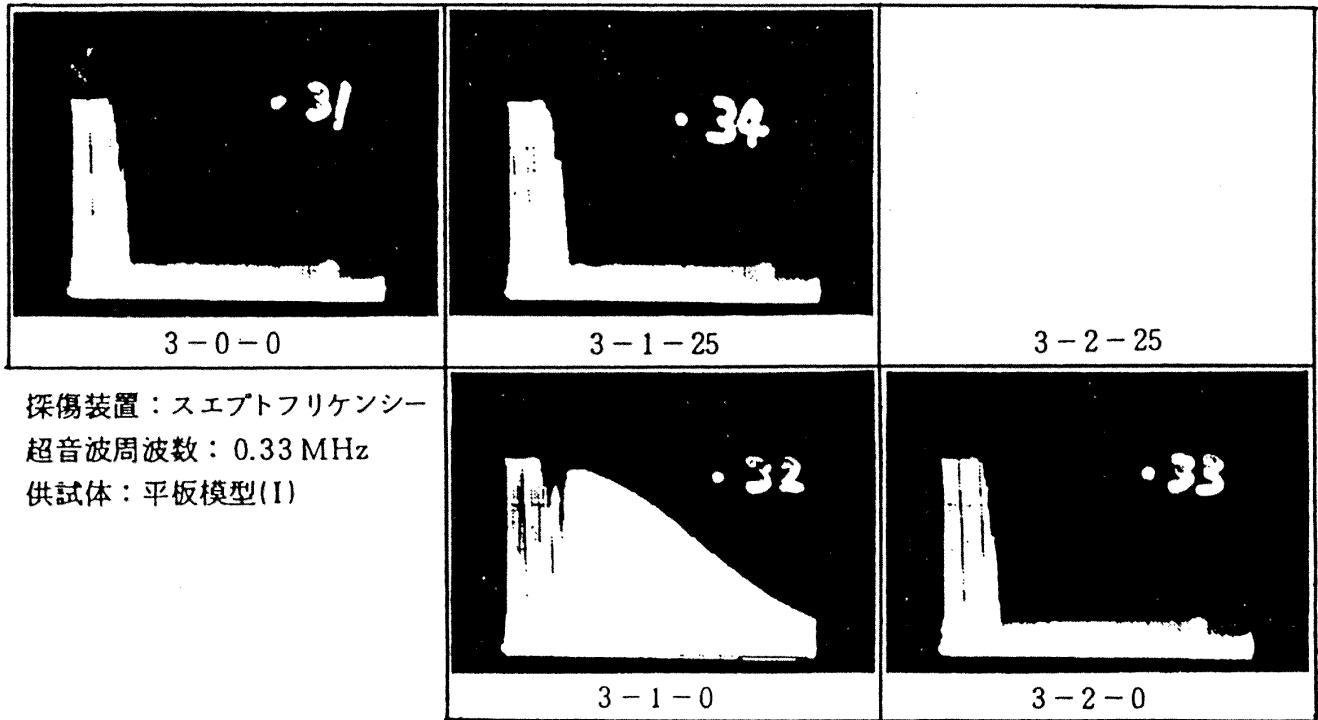
探傷装置 M200 型, 超音波周波数 168kHz, 縦軸 0.5 V/D, 横軸 20 μ s/D

図 4.2.4 平板模型(I)に対する周波数掃引型超音波探傷装置(据置型)による探傷図形
(その 2: 周波数=168kHz)



探傷装置 M200 型, 超音波周波数 346 kHz, 縦軸 0.5 V/D, 横軸 20 μ s/D

図 4.2.5 平板模型(II)に対する周波数掃引型超音波探傷装置(据置型)による探傷図形(周波数=346kHz)



探傷装置: スエプトフリケンシー
 超音波周波数: 0.33 MHz
 供試体: 平板模型(I)

図 4.2.6 平板模型(I)に対する周波数掃引型超音波探傷装置(ポータブル型)による探傷図形(その1: 周波数=0.33MHz)

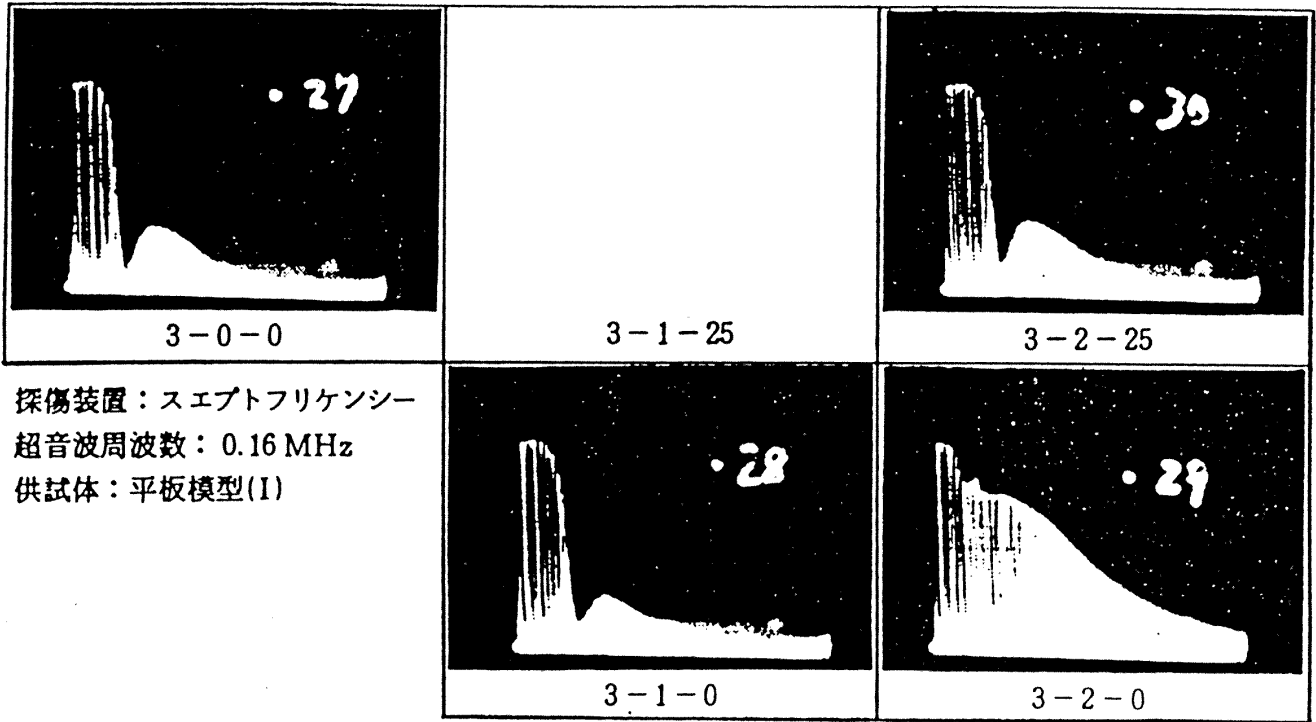


図 4.2.7 平板模型(I)に対する周波数掃引型超音波探傷装置(ポータブル型)による探傷図形
 (その2: 周波数=0.16MHz)

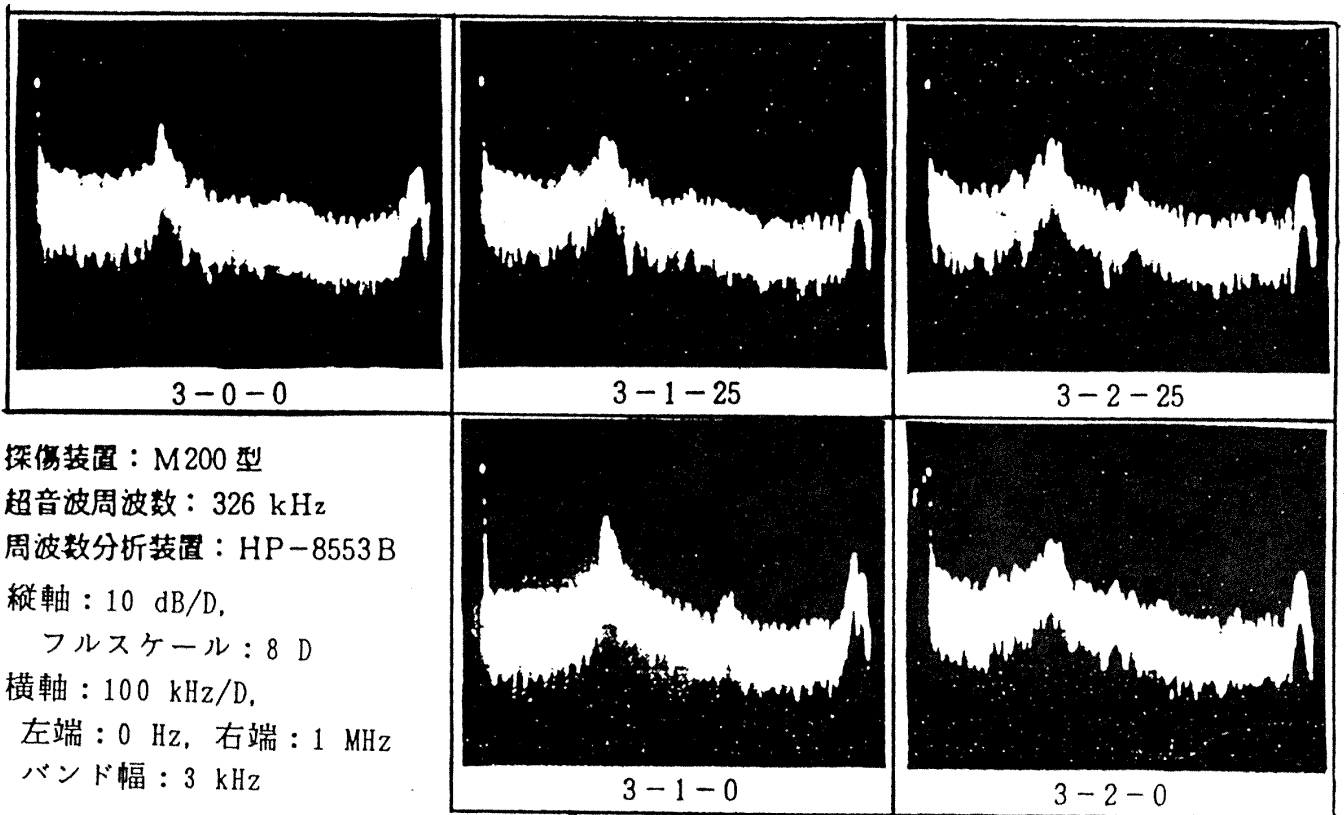


図 4.2.8 図 4.2.3 の場合に周波数分析装置にて測定した超音波周波数分布

第3章での探傷理論によれば、ライナ共振は単にライナ厚さが探傷超音波の4分の1波長に等しい場合だけに起きるだけでなく、4分の1波長の奇数倍の場合にも起きるはずである。つまり、

$$L = \frac{1}{4} (2n-1) \lambda_1$$

L :ライナ厚さ、 n :整数、 λ_1 :ライナ内波長
 そこで、より高い周波数での試験を行って得た結果を表4.2.1に示す。この表に示すように、 $n=1, 2, 3$ にて共振が確認された。以上の試験結果から第3章での探傷理論はその有効性が確認された

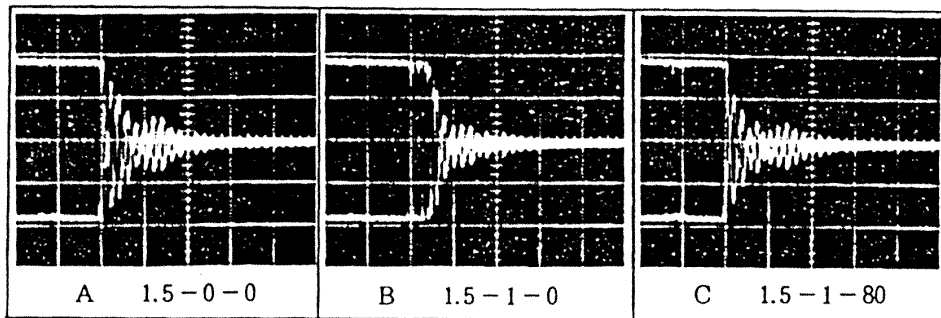
と言えよう。

また、直径200mm円筒模型による探傷図形を図4.2.9に示す。探傷周波数326kHzにおいて、やはり1.5-1-0の部位の探傷図形に共振が認められるが、この場合は平面探触子を用いているので、探触子とケースとの接触は、前述の平面模型の場合の面接触とは異なり、円筒模型の軸方向に平行な線接触となるので、感度が大幅に低下する。これへの対策が本法を実機に適用する場合に重要であり、部分水侵法や曲面探触子の採用が考えられる。

表4.2.1 ライナ・推進薬間剝離でのライナの4分の1波長共振時の探傷条件

試験部位	共振周波数 (kHz)	ライナ内の波長 λ_1 (mm) ($a_1=1.5 \text{ km/s}$)	ライナの厚さ	スチール板内の波長 λ_s (mm) ($a_s=5.9 \text{ km/s}$)	スチール板の厚さ
3-2-0 (ライナ厚さ: 2.2mm)	166	8.9	$0.24 \lambda_1$	35	$0.08 \lambda_s$
	501	3.0	$0.73 \lambda_1$	12	$0.25 \lambda_s$
	839	1.8	$1.22 \lambda_1$	7.0	$0.43 \lambda_s$
3-1-0 (ライナ厚さ: 1.1mm)	326	4.6	$0.24 \lambda_1$	18	$0.16 \lambda_s$
	1,030	1.4	$0.79 \lambda_1$	5.5	$0.55 \lambda_s$
1-2-0 (ライナ厚さ: 2.2mm)	168	9.0	$0.24 \lambda_1$	35	$0.03 \lambda_s$
	509	2.9	$0.76 \lambda_1$	12	$0.08 \lambda_s$
	840	1.8	$1.22 \lambda_1$	7.0	$0.14 \lambda_s$
1-1-0 (ライナ厚さ: 1.1mm)	346	4.3	$0.26 \lambda_1$	17	$0.06 \lambda_s$
	1,018	1.5	$0.75 \lambda_1$	5.8	$0.17 \lambda_s$

λ_1 : ライナ内波長、 λ_s : ケース (スチール板) 内波長



探傷装置: M200型
 周波数: 328 kHz
 縦軸: 0.5 V/D
 横軸: 20 μ s/D

ϕ 200円筒模型
 ケース: チタン合金
 ライナ: EPDM
 推進薬: ダミー

図4.2.9 直径200mm円筒模型に対する探傷図形 (周波数=328kHz)

第 4.3 節 考察

第 2 章にて得られた試験結果を基にして、第 3 章にて展開した探傷理論は、前節の実験にてその有効性が確認されたと言えよう。すなわち、ライナ・推進薬間剝離におけるライナの力学的境界条件は、一次元的に一端固定・一端自由であり、ライナ厚さが探傷超音波の 4 分の 1 波長の奇数倍に等しい場合に共振するので、その共振を探傷超音波の周波数掃引可能なパルス反射型探傷装置にて検出することにより、ライナ・推進薬間剝離の検出が可能であるとする理論は、2 種類の周波数掃引型超音波探傷装置を用いて、ライナ・推進薬間剝離部を有する平板模型に対して得られた探傷図形にて、その有効性が確認されたのである。

ただし、第 2 章と第 4.2 節とでは、探傷図形はある意味では対照的である。すなわち、第 4.2 節の図 4.2.3 ~ 図 4.2.7 ではライナ厚さが探傷超音波の 4 分の 1 波長の奇数倍に等しい場合に共振し、それ以外では供試体からの反射入力波がほとんどないような状況を示しているのに対し、第 2 章の図 2.2.7 と図 2.2.8 ではライナ厚さが 4 分の 1 波長の偶数倍にて共振し、奇数倍にて反共振しているかのような探傷図形となっている。これは、第 3 章での理論展開にても予測したが、探傷超音波の波長と、ケース厚さとの関係に依存する。すなわち、第 2 章では探傷超音波の周波数が 5MHz と高いために波長が短く、平板模型の鋼鉄製ケース厚さは波長の数倍となり、数波長の長さのパルスの反射過程ではケース内に強い多重反射波が形成される。そして、ケース・ライナ間剝離の場合には、反射波のエネルギーが最も大きく、ライナ・推進薬間剝離の場合はケース・ライナ境界での反射率が低下して、ケース内の多重反射エネルギーは低下するのは当然である。問題は、ライナ厚さが 4 分の 1 波長の奇数倍の場合、ケース内の多重反射波とライナ内の多重反射波とがケース・ライナ境界にて、位相が逆であることである。そのため、ライナ内の強い共振波がケースに戻って合成した時に、ケース内多重反射波が大幅に弱められ、探触子への入射波はあたかもケース内での逆共振のように観測される。

他方、第 4.2 節では探傷超音波の周波数が 1MHz 以下と低く波長が長い。特に第 1 次共振の場合にはケース厚さは波長の 10% 前後なので、入射パルスとケース内多重反射波はほとんど重なって区別できず、入射パルスの状態がすこし変化した探傷図形が得られる。このことは、本来ならケース内の多重反射波エネルギーの最も大きいはずのケース・ライナ間剝離の場合の探傷図形 (1-0-0 や 3-0-0) が探触子を空気に接触させた (反射入力波のない) 場合の探傷図形とほとんど差異のないことから確認される。従って、ライナ内にて共振が生じた場合には、その共振波の減衰過程を探傷図形上で十分観測できるほど共振波が強ければ、ライナ内非共振時よりも共振時の方が探触子への入力波が強く観測され、第 2 章とは対照的な探傷図形が得られたのであろう。

以上の実験結果をまとめると以下のようになる。本論文でのライナ・推進薬間剝離の検出法はライナ・推進薬間剝離の場合のライナ内の 4 分の 1 波長共振を検出することにある。現用の探傷装置では超音波パルスの継続期間での共振観測の場合よりも、パルス後の減衰過程の観測の場合が良好接着とライナ・推進薬間剝離との差異が明瞭である。すなわち、良好接着の場合には、ごく僅かの多重反射しか観測されないのに反し、ライナ・推進薬間剝離の場合には 4 分の 1 波長共振により探傷超音波パルスの振動エネルギーはライナ内に蓄えられ、パルス後に良好接着よりはるかに多量の振動エネルギーが解放され、長時間をかけて減衰する過程が明瞭に観測されている。このような良好接着とライナ・推進薬間剝離との明瞭な差異は本検出法の有効性を実証するに十分であらう。

また、この理論によれば、これまでのライナ・推進薬間剝離に対する超音波探傷法の有効性についての研究報告や工場現場からの情報に見られるある種の混乱をも説明できる。すなわち、ライナ・推進薬間剝離に対しては、超音波探傷法は有効でないとするものが主流であるが、探傷可能との報告もある。これは、その研究報告での実験条件 (特に探傷周波数とライナ厚さとの関係) がたまたま図 2.2.6 の周期性の山の高いところに相当し

た場合は、探傷可能と報告し(丹羽論文はその典型であろう), 山のあまり高くないところや谷に相当した場合は探傷不能としたのであろう。この理論の確立により, 今後はこのような混乱もなくなる。

ところで, 4分の1波長共振における奇数値としては, どの値を選定すべきであろうか。理論的にはどの値でも共振を起こすので, どの値でもよさそうだが, 現実には探傷装置の周波数特性に依存する。そして, 一般的には最小値つまり「1」が最適と考えられる。すなわち, ライナは高分子材料からできており, その内部での音波の減衰は金属材料に比べてかなり大きく, 周波数が高いほど大きいので, 低周波の方が有利である。また, 実際のライナ・推進薬間剥離は, 図4.3.1に示すように, その剥離面が必ずしも滑らかな平面ではない。ライナ・推進薬間剥離は境界面の推進薬側に生じることが多く, 特に大型固体ロケット用の複合推進薬は粒子充填ゴム系複合材料の一種とみなされ, その破壊面はかなり荒い。しかも, ライナ・推進薬間剥離面内では, ライナ厚さは必ずしも一定ではない。従って, ライナ・推進薬間剥離面内では, 局所的にしか共振条件を満足しないことになり, その共振波は剥離面の全面での共振と比べて弱くなり, 探傷感度が低下する。しかし, 共振条件の不満足は尺度は波長で測られるので, 同一の荒さやライナ厚さの変化に対しては, 周波数が低く波長が長いほど不満足度は小さく, 探傷に有利である。一方, 周波数が低いと小さい欠陥に対する探傷感度が低下することになるが, 次章にて述べるように, 100~500kHzの周波数にても直径15mmの剥離が検出できるので, 十分であろう。ただし, アメリカのスペース・シャトルやESAで開発中のアリアン-Vの固体モータとか, 今後日本で開発されるであろう大型固体モータにおいては, 当然ケースやライナがより厚くなると思われるが, その場合に本法を適用するためには, より低周波(例えば, 20~100kHz)用の探傷装置と探触子の開発が必要となる。

なお, 最近になって, ケース・ライナ・推進薬の多層板系に対して超音波の透過・反射について

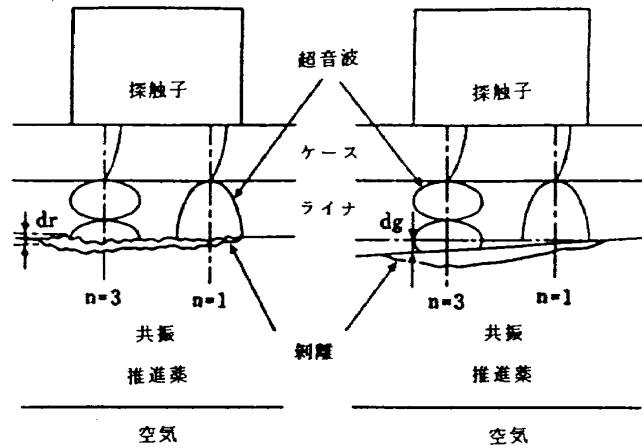


図4.3.1 ライナ・推進薬間剥離面の表面粗さ・勾配条件と探傷波長との関係

の理論式にもとづいてコンピュータによる数値計算を行い, ライナ・推進薬間剥離の検出を試みた2篇の研究がアメリカより発表された。1つはAir Force Rocket Propulsion Lab. (旧AFRPL, 現Air Force Astronautics Lab. AFAL)の委託で, Battelle Pacific Northwest Lab.の行った研究であり, 音圧反射率“R”及び探触子と多層板とを結合した振動系の共振のquality factor “Q”について計算を行い, また探傷周波数連続可変型でコンピュータ制御の高度な探傷装置AISを開発し, 小型モータに適用している(文献27)。しかし, 結果は不良であり, そのことを, その続報にても認めている(文献28)。この失敗の原因は, 探傷理論が不十分であったためと考えられる。もし, 本論文の理論を採用し, その方法を適用していれば, 良好な結果が得られたであろう。

もう1件は, NASAのLangley Research Centerでの研究(文献29)で, スペース・シャトルのSRMのライナ・推進薬間剥離の検出に探傷周波数を変動させて2分の1インチ厚の鋼鉄製ケースを共振させて“鳴”らす。そして, その共振周波数の超音波によりライナ・推進薬間剥離を検出しようとするものである。この方法は次の点で良い方法である。ライナ・推進薬間剥離の検査においては金属製ケースとライナの音響インピーダンスの大幅な差異が困難をもたらしていることは前述のとおりである。もし, ケースがなく, 探触子を直接ライナに接触させることができれば, ライナ

・推進葉間剝離の検出はさほど困難ではなからう。その点で、この方法はケースの共振超音波を用いて探傷するので、いわばケースを探触子(少なくともその一部)として探傷することに相当するので、上述の困難を除去することができる。しかし、この方法には2つの大きな欠点がある。一般にケース・ライナ間剝離やライナ・推進葉間剝離の検査の場合、探触面積が小さいほど、小さい面積の欠陥の検出が高S/N(Signal/Noise)で可能である。この方法の欠点の1つは、ケースを探触子(の一部)とすることは、探触子が途方もないほど小さくなったことになり、小さい欠陥の検出が難しいということである。もう一つの欠点は、探傷周波数がケースの共振周波数に限定されることである。このことは、本論文の理論によれば、ライナが特定の厚さである場所では、ライナ・推進葉間剝離の検出ができないことになる。実際、文献29においてはケース厚さ12.7mm、ライナ厚さ(レストリクタを含む)5mmであり、ケース第1次共振周波数約220kHzとなる。そして、この第1次共振の強さがライナ・推進葉間剝離の場合には少し弱くなることからライナ・推進葉間剝離の検出ができるとする結果を報告しているが、この220kHzはまさに5mm厚さのライナ(おそらく接着層を含めて厚さ約5.5mm、ライナ内での音速1.65km/s)の第3次共振周波数に一致する。これは第3.3節の(4)の最後あたりにて述べた方法であり、ケースとライナの厚さの関係がたまたま良かったから一応探傷可能となったが、ライナはモータ全域で一樣ではないので適用範囲は限られる。従って、これらの研究によっても本論文の方法の優位性は少しも損なわれまいと言えよう。

第5章 周波数掃引型超音波探傷法 の実機モータへの適用

前章にて、周波数掃引型超音波探傷法がライナ・推進葉間剝離の検査に有効であることが研究室レベルで確認されたので、次の段階としてこの方法を固体ロケット・モータの製造工場や、打ち上げ射場にて適用するための準備を行い、さらに実際に適用することにした。以下にそれについて述

べる。

第5.1節 H-Iロケット上段モータ(文献30)

5.1.1 有効性確認試験

(1) H-Iロケットの概略と上段モータの非破壊検査

H-Iロケットは我国の実用衛星打ち上げ用のロケットで、第1段はNロケット以来の米国から導入したデルタ・ロケットの第1段と同じであるが、第2段に我国初の自主開発の液酸/液水エンジンを、また第3段には自主開発の高性能固体上段モータを配して、地球静止軌道に550kg級の衛星を投入できる性能を有している。さらに、550kg級静止衛星用のアポジ・モータも開発されたが、これはチタン合金製ケース、C/C(Carbon/Carbon)ノズル、HMX(High Melting-point Explosive)添加推進薬、後方点火方式の採用による最高性能モータである。従来、Nロケット上段モータに対する非破壊検査法としては、X線写真法を主力にし、ケース・ライナ間剝離に対しては超音波探傷法が適用されてきたが、H-I上段モータについては、従来法の外にノズルに対して400kV級X線CTを、ライナ・推進葉間剝離については本法を追加する方針となった。ここでは、主としてアポジ・モータのライナ・推進葉間剝離の検出に周波数掃引型超音波探傷法が適用できることを確認する試験について述べる。

(2) 供試体

確認試験のための供試体を図5.1.1に示す。このケースとしては実機と同一材料・形状・寸法のチタン合金球形ケース(ケース厚さ1mm、曲率半径380mm)の一部を使用し、これに実機と同じEPDM(Ethylene Propylene Dimethyl Monomer)ライナとダミー推進薬を接着して作成した。ライナの厚さは6段階あり、ダミー推進薬にはライナ・推進葉間剝離部を模擬した3種類の直径(25, 15, 6mm)の円孔が設けられている。また、ケース・ライナ間剝離部を模擬した部分もある。

(3) 探傷装置と探触子

探傷装置としては第2.2節で使用した従来の反射型UM721と第4.1節の周波数掃引型M200とで

ある。その性能仕様を表5.1.1にあらためて示す（周波数掃引型Ⅰ）。また、探触子としては、第4.2節でも述べたように、手持ちの平面探触子ではケースとの接触が線接触または点接触となり、感度が大幅に低下するので、H-I 上段モータの曲率（アポジ・モータ及び第3段モータの2種類の曲率）に合わせた低周波広帯域型曲面探触子を特注にて製作した。それらを表5.1.2に示す。アポジ・モータは中央部に円筒形の伸展部があるので、曲面探触子として球面探触子だけでなく、円筒面探触子も用意した。

(4) 従来の反射型探傷装置と平面探触子による試験

特定の探傷周波数しか適用できない従来の反射型探傷装置と5MHz平面探触子を使用した結果を、図5.1.2に示す。探触子とケースとは点接触であるにもかかわらず、ケース・ライナ間剝離とそれ以外とでは、探傷図形上の多重反射の状況がまったく異なる。つまり、ケース・ライナ間剝離の場合には多重反射過程での減衰が他の場合よりはるかに少ないので、この方法でケース・ライナ間剝離は容易に検出できる。しかし、ライナ・推進薬

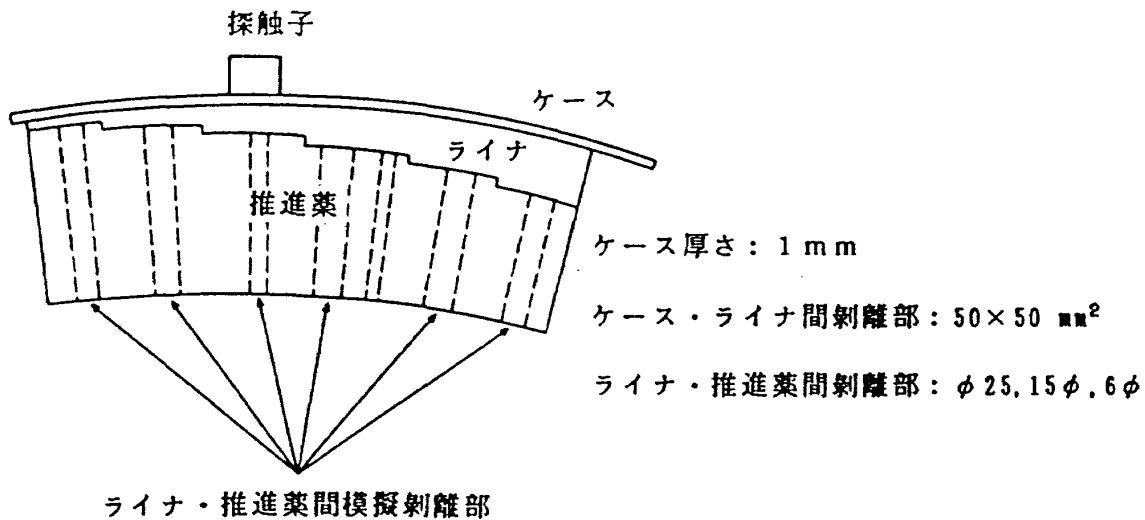


図5.1.1 H-I・アポジ・モータの実機チタン合金製ケースを用い、直径25, 15, 6mmのライナ・推進薬間剝離部などを含む球形模型（文献30）

表5.1.1 試験に使用した超音波探傷装置の概略仕様

項目	周波数掃引型Ⅰ	周波数掃引型ⅠⅠ	通常型
形式	据置型	据置型	可般型
周波数範囲	0.05~10 MHz	0.01~10 MHz	1, 2.25, 5 MHz
変調モード	--	6種	--

表5.1.2 平面探触子とH-I 上段モータ用の球面探触子と円筒面探触子の仕様

項目	平面探触子	球面探触子			円筒面探触子	
		S-1	S-2	S-3	C-1	C-2
共振周波数 (MHz)	5	0.2	0.5	0.2	0.2	0.2
接触面曲率半径 (mm)	無限大	378	378	646	378	646
探触子直径 (mm)	25	25	25	25	25	25

間剝離の場合の探傷図形は良好接着の場合の探傷図形とほとんど差異はなく、従ってライナ・推進薬間剝離はこの方法では検出できない。これらの結果は従来の研究結果と一致する。

(5) 周波数掃引型探傷装置と曲面探触子による試験

本論文の理論・方法に従い、周波数掃引型探傷装置と曲面探触子を用いた場合の試験結果は、上述の(4)での結果とまったく異なり、ライナ・推進薬間剝離とその他の場合との探傷図形上の明確な差異が認められ、しかもその差異は図5.1.2のケース・ライナ間剝離とその他との差異に優るとも劣らない。つまり、探傷周波数をその4分の1波長の奇数倍がライナ厚さに一致するように選ぶと、ライナの6段階の厚さのすべての場合に直径25mmのライナ・推進薬間剝離部を上述(4)のケース・ライナ間剝離と同等の確度で検出できる。例えば、

図5.1.3はライナ厚さ1.6mmであるが、探傷周波数236kHz(ライナ厚さ=4分の1波長)とすると、ライナ内の共振が直径25mmだけでなく15mmのライナ・推進薬間剝離部でも検出できる。図5.1.4にはライナ厚さが6.7mmの場合、図5.1.5にはライナ厚さ12.8mmの場合の試験結果を示すが、ともに図5.1.3の場合よりむしろ検出能力は高いと言える。これらの結果を表5.1.3に示すが直径6mmという極めて小さなライナ・推進薬間剝離部も検出できる場合があるが、従来法ではどれほど大きなライナ・推進薬間剝離でも検出できなかったことを考えると、これは本法の優秀性を端的に示すものと言えよう。

5.1.2 実機上段モータへの適用

これまでの試験結果から、本法の実機H-I上段モータへの適用に自信が得られたので、いよいよ固体ロケット・モータの製造工場及び種子島の

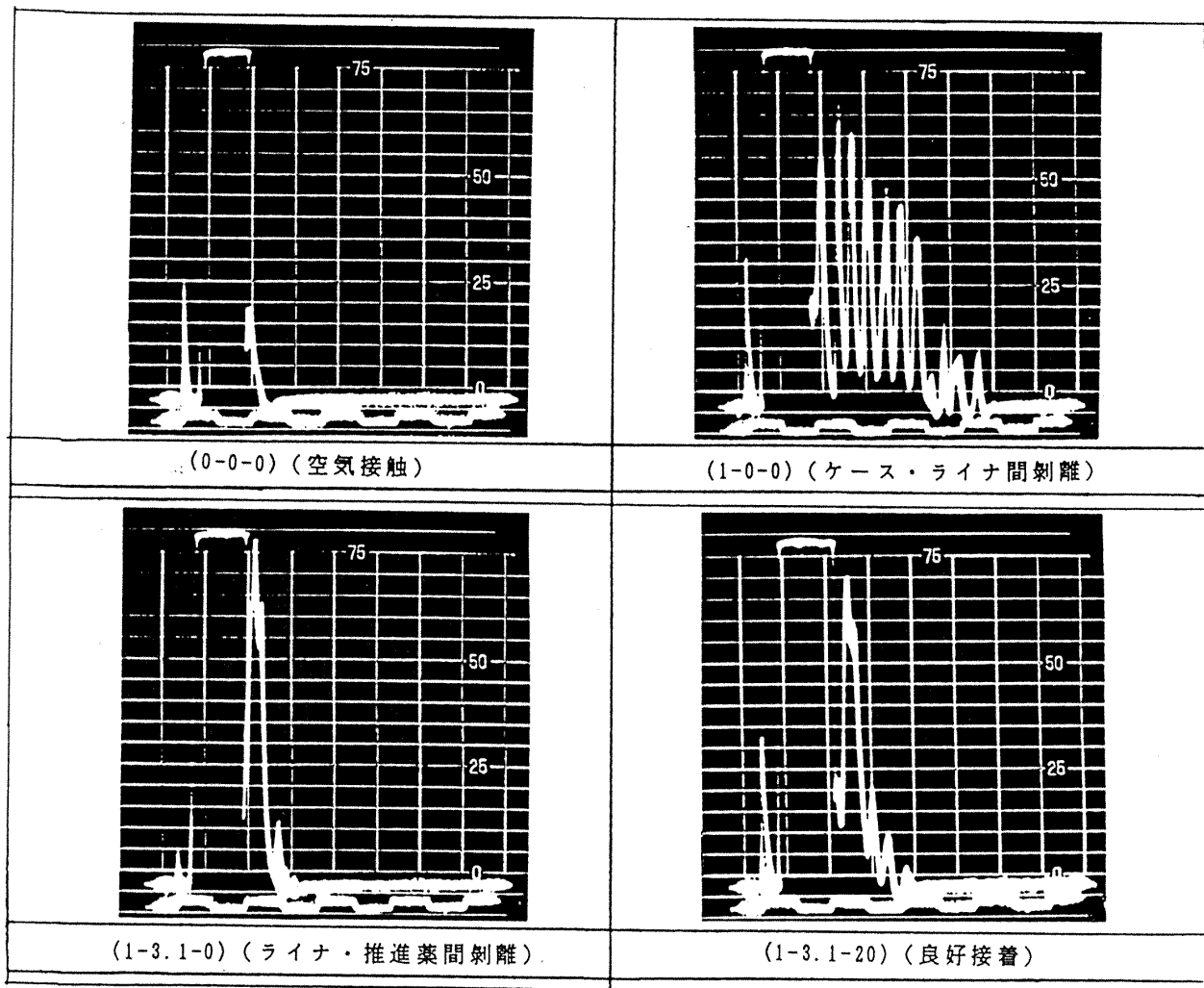


図5.1.2 H-I・アポジ・モータ対応の球形模型に対する通常型超音波探傷装置による探傷図形

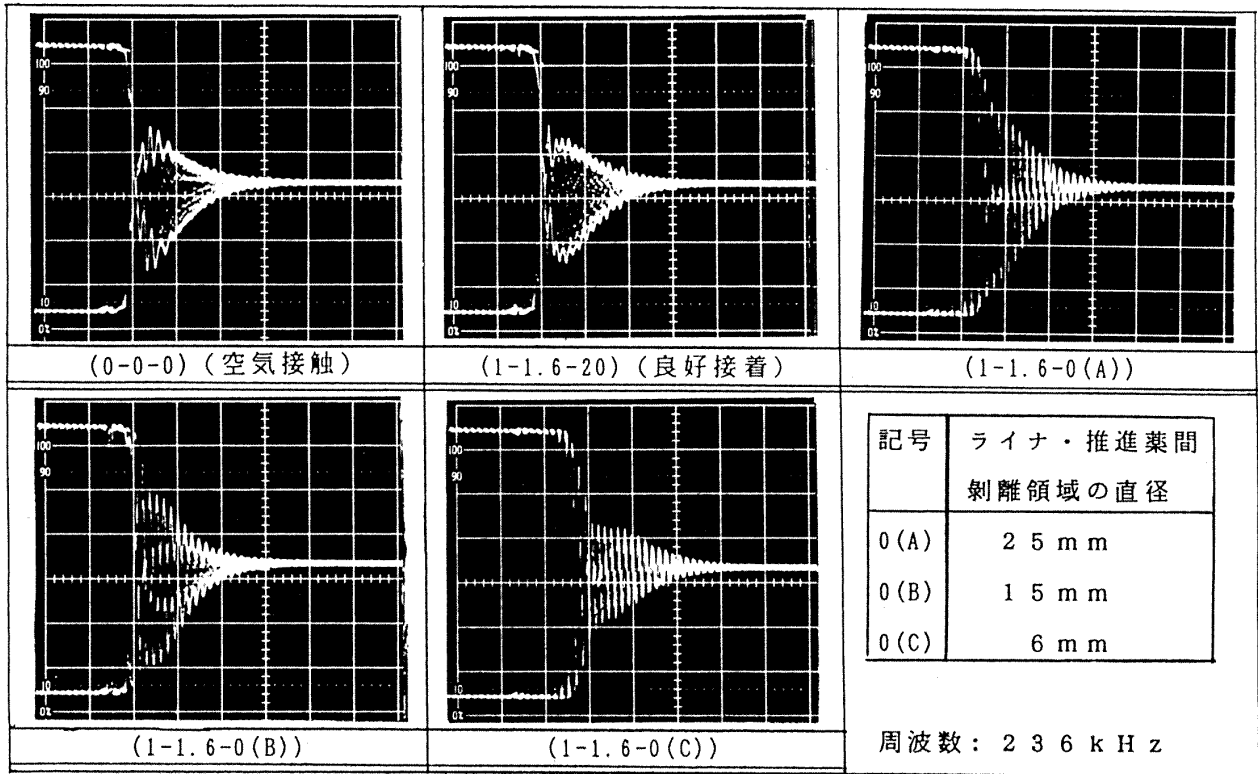


図 5.1.3 球形模型に対する周波数掃引型超音波探傷装置による探傷図形
 (その1: ライナ厚さ=1.6mm, 周波数=236kHz, N=1)

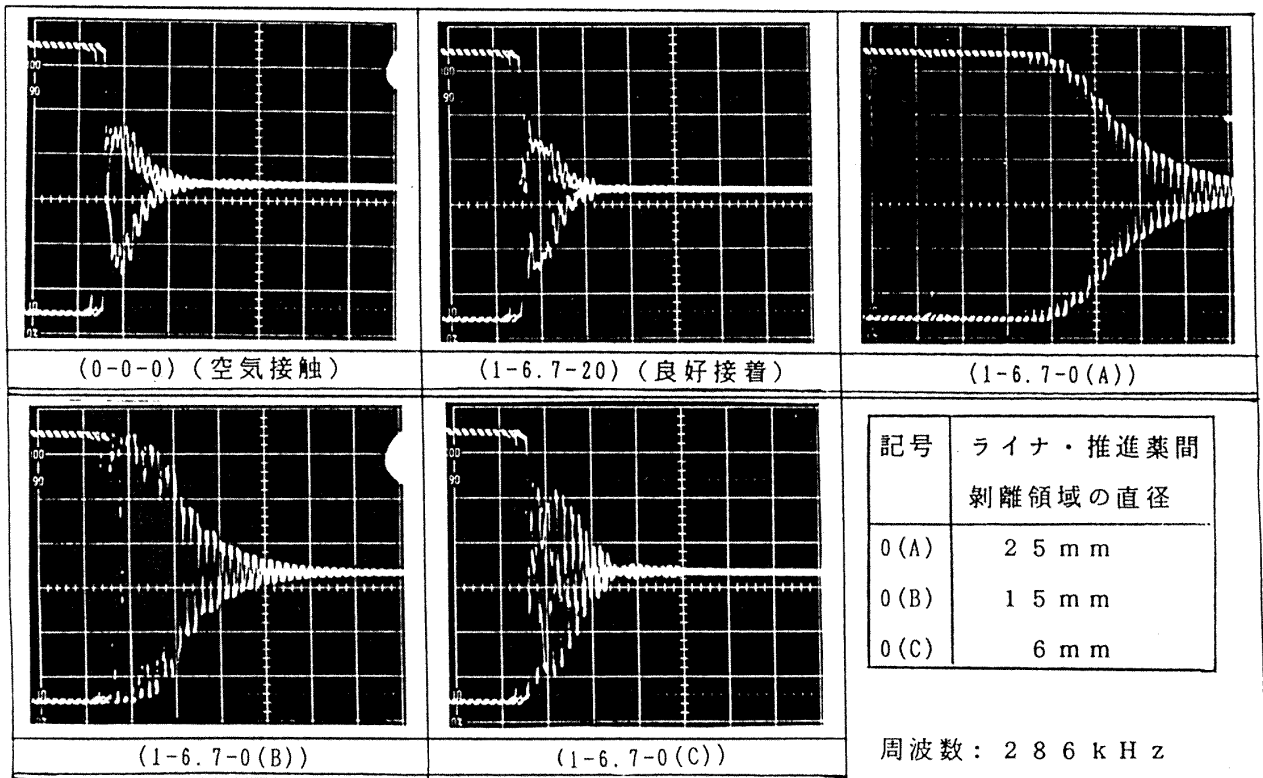


図 5.1.4 球形模型に対する周波数掃引型超音波探傷装置による探傷図形
 (その2: ライナ厚さ=6.7mm, 周波数=286kHz, N=3)

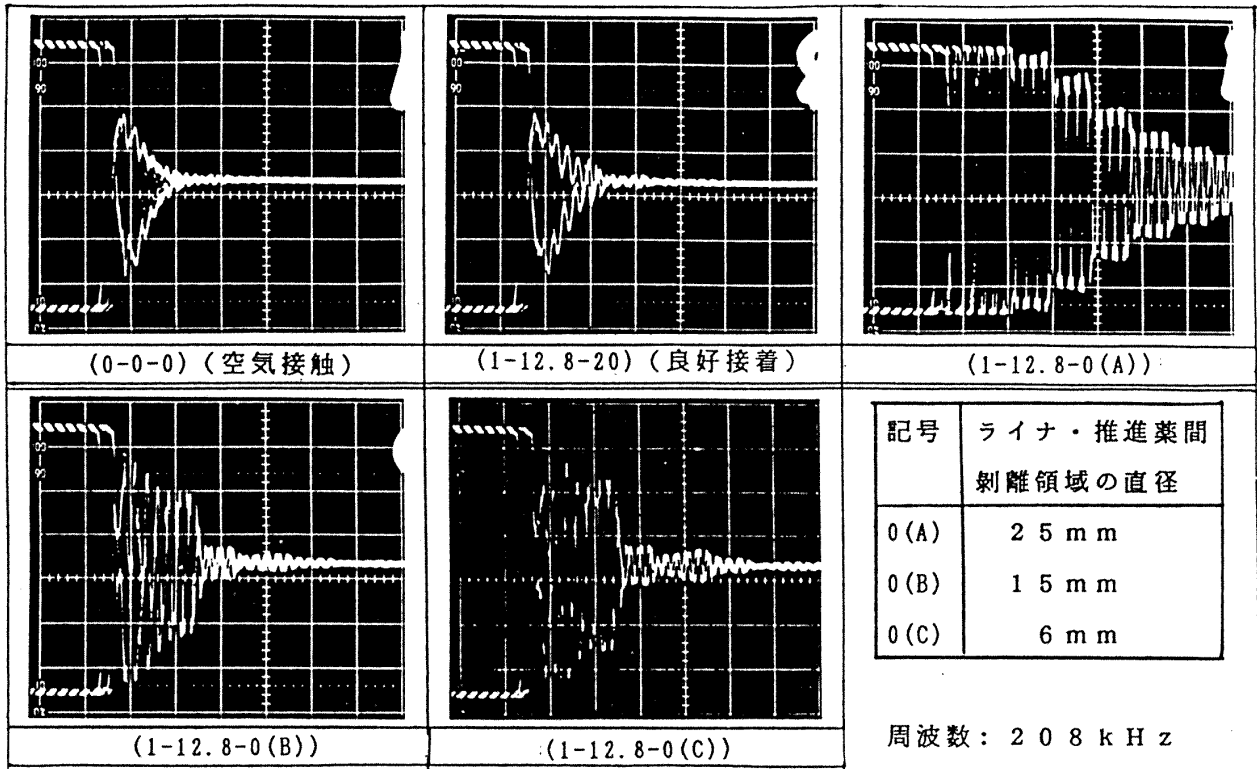


図 5.1.5 球形模型に対する周波数掃引型超音波探傷装置による探傷図形
(その 3 : ライナ厚さ = 12.8 mm, 周波数 = 208 kHz, N = 7)

表 5.1.3 各種の大きさの円形ライナ・推進薬間剝離部に対する本法の探傷能力

剝離領域	A	B	C	D	E	F
ライナ厚さ (mm)	1.6	3.1	5.2	6.7	8.3	12.8
共振周波数 (kHz)	236	118	220	286	226	208
奇数	1	1	3	5	5	7
検出能力						
25 mm 直径剝離	優秀	優秀	優秀	優秀	優秀	優秀
15 mm 直径剝離	可能	可能	可能	優秀	良好	良好
6 mm 直径剝離	不能	不能	不能	可能	良好	良好

表 5.1.4 図 5.1.7 での周波数掃引型探傷装置による探傷試験の条件

検査箇所	使用探触子	ライナ厚さ (mm)	周波数 (kHz)	奇数
前部 (A)	S-1	1.6	650	3
中央部 (B)	C-1	5	230	3
後部 (C)	S-1	6	330	5

ロケット打ち上げ射場にて「技術試験衛星V型(ETS-V)」の打ち上げ用上段モータに本法を適用した。そのために新たに周波数掃引型探傷装置を準備したが、その仕様は表5.1.1に示してある(周波数掃引型Ⅱ)。このロケットは静止衛星打ち上げのH-Iロケット初号機である。そのアポジ・モータの形状・寸法を図5.1.6に示す(文献31)が、検査の結果、ケース・ライナ間剝離もライナ・推進薬間剝離も検出されなかった。そこで、ここではモータの代表的な3カ所での探傷図形を示すことにする。その探傷条件を表5.1.4に示す。図5.1.6の前方部(A)、中央部(B)、後方部(C)にて得られた探傷図形から、図5.1.7に示すように、ライナ・推進薬間剝離部分と同様な状態となってい

るリリース・ブーツ部をそこでのライナ厚さに対応した周波数の超音波にて明確に検知できる。従って、もしライナ・推進薬間剝離部が存在すれば、本法により検出されたであろうと確信できた。

また、H-I第3段モータについても、同様の試験及び実機への適用を行った。第3段モータには図5.1.8(文献32)に示すように、中央部に円筒形の伸展部がないので、球面探触子だけで十分である。この場合にも、アポジ・モータの場合と同様の良好な結果が得られた。そして、本法での検査を終えたモータはH-Iロケット及び「ETS-V」に組み込まれ、1987年8月に種子島の射場からの打ち上げに成功裏にその使命を果たした。

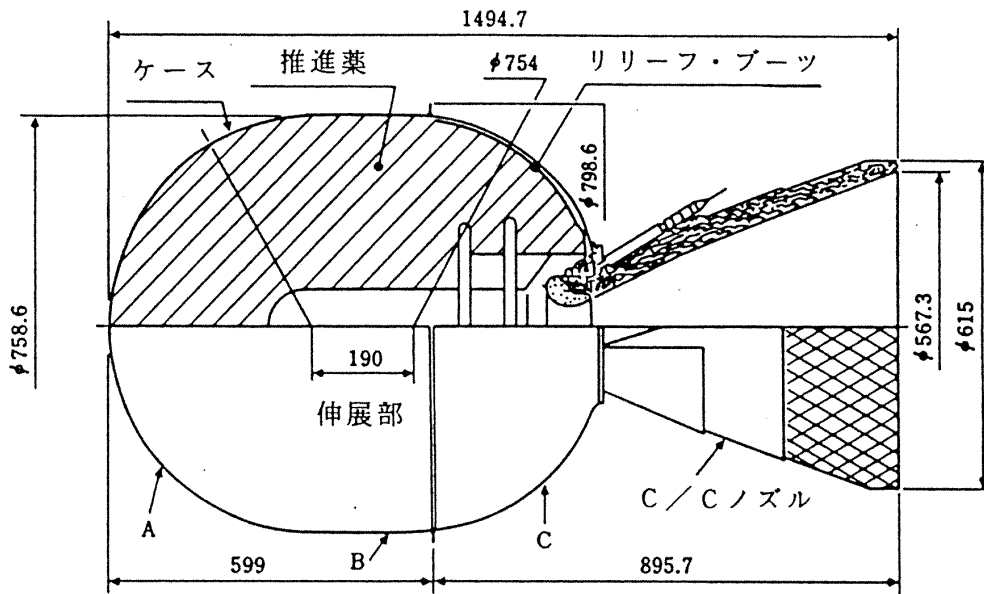


図5.1.6 H-I・アポジ・モータの形状・寸法と探傷試験位置(A, B, C)(文献31)

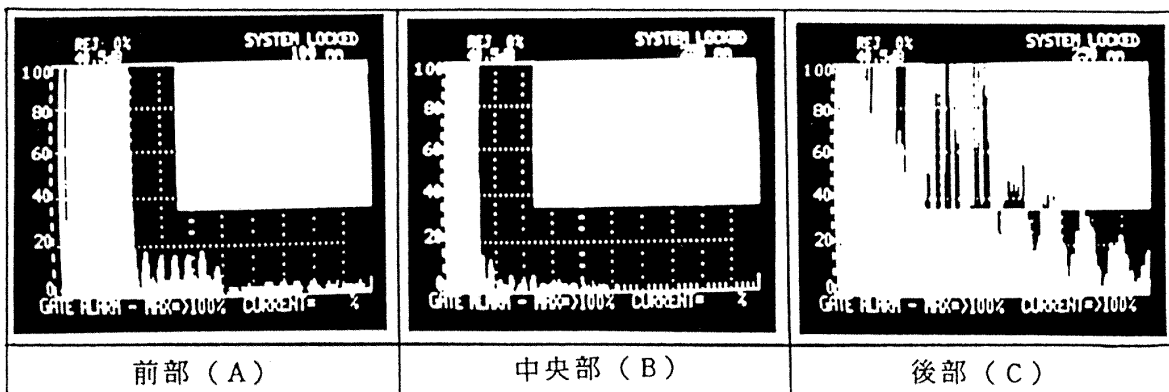


図5.1.7 図5.1.6での探傷試験位置(A, B, C)における探傷図形

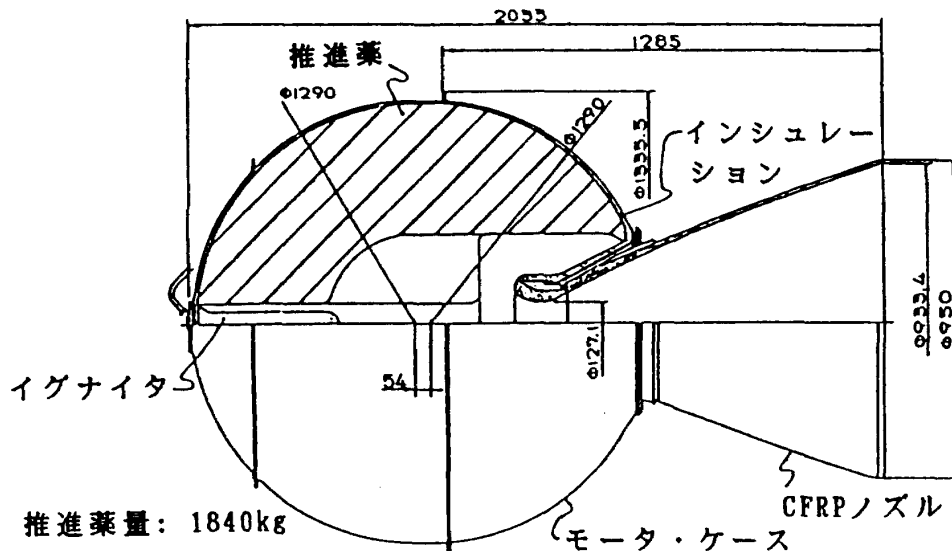


図5.1.8 H-I ロケット第3段モータの形状・寸法(文献32)

第5.2節 H-II ロケットのSRB への適用試験

5.2.1 H-II ロケットの概要とSRBの非破壊検査

H-II ロケットは、自主開発中の次期主力ロケットとして、第1段、第2段ともに液酸/液水エンジンを搭載し、2t級静止衛星打ち上げ能力を有する高性能大型ロケットである。そして、その第1段エンジンの推力不足を2本の補助固体モータ(SRB)にて補っている。このSRBは2本で320tの推力を有しており、第1段エンジンの93tよりもはるかに大きく、たとえ第1段エンジンが不着火であっても、ロケットをリフト・オフさせる能力があるので、補助ロケットというより初段ロケット(あるいは第0段ロケット)とでもいふべき重要なロケットである。その直径1.8m、長さ23.4m、重量約70tの我国最大、世界第3位の大型固体ロケット・モータである(図5.2.1)(文献34)。

H-II・SRB に対する非破壊検査法としては、現段階では高エネルギーX線を放射できるライナックを線源とする高エネルギーX線コンピュータ断層撮影法(高エネルギーX線CT)と、本論文の周波数掃引型超音波探傷法とを併用する予定である。X線CTは、医用X線診断法に大革新をもたらした新検査法で、X線写真法とは比較にならぬ高感度にて推進薬中の気泡などの検出に威力を発揮するが、金属製ケースのX線吸収係数は、ライナや推

進薬よりはるかに大きいので、ケース近傍の欠陥(ケース・ライナ間剥離やライナ・推進薬間剥離)の検出は、その空隙が狭いときには困難となる。その点で、空隙の狭さに事実上依存しない超音波探傷法との組合せは、その欠点を補いあって理想的と言えよう。既に述べたように、超音波探傷法はケース・ライナ間剥離の検査には極めて有効で実用化されているので、残る課題はライナ・推進薬間剥離の検出であり、そこに本法の適用を試みた(文献33)。

5.2.2 有効性確認試験

(1) 供試体

本法の有効性確認試験のために、2種類の供試体を用意した。一つは4.7mm厚さの鋼鉄板に2, 4, 6mmのネオプレン・ゴムとダミー推進薬を接着した平板模型であり、図5.2.2(a)に示すように、ケース・ライナ間剥離部とライナ・推進薬間剥離部とが設けられている。もう一つは、ケースに実機SRBと同じ材料・形状の鋼鉄製円筒形ケースの一部を用い、これに実機と同じEPDMライナ(2, 4, 6mm厚さ)とダミー推進薬を接着し、ケース・ライナ間剥離部やライナ・推進薬間剥離部を設けた円筒形模型である(図5.2.2(b))。

(2) 探傷装置と探触子

使用した探傷装置は第5.1節にて用いたものと同一である(表5.1.1)。また、探触子としては

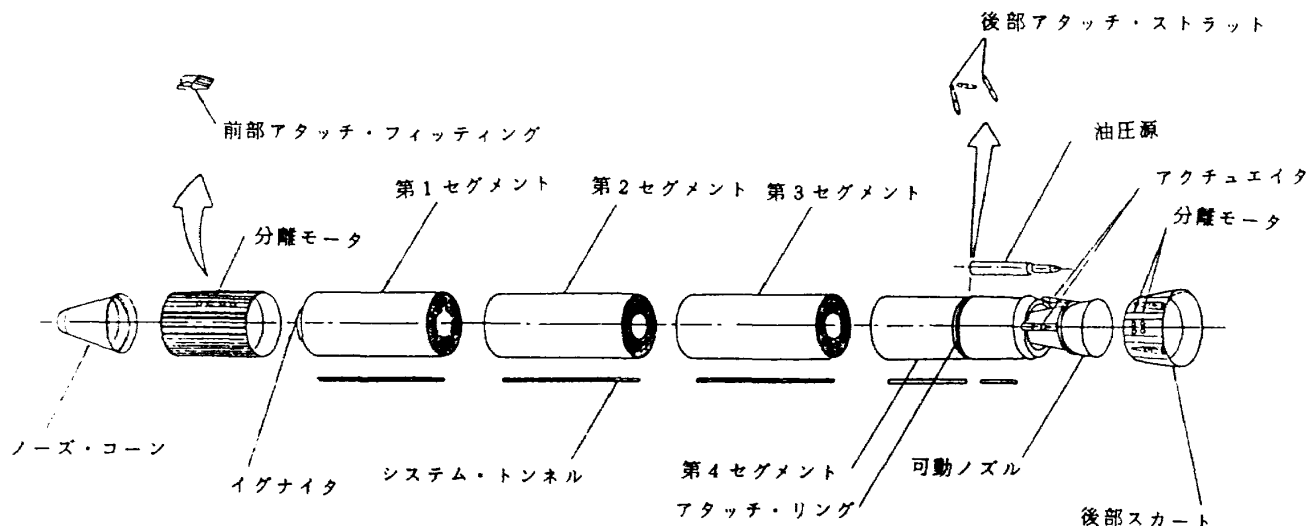
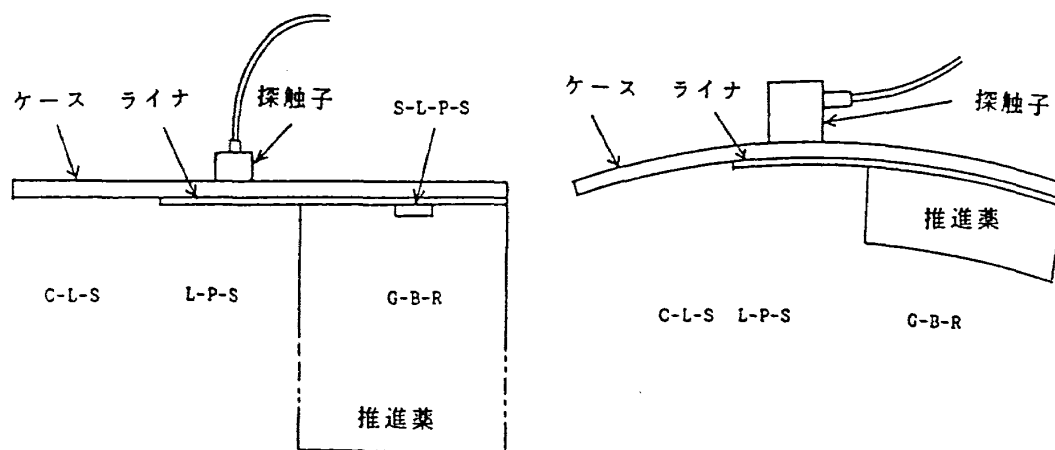


図5.2.1 H-II ロケット補助固体モータ (SRB) の構成 (文献34)



(a) 平板模型

(b) 円筒形模型

- C-L-S : ケース・ライナ間剝離部
- L-P-S : ライナ・推進薬間剝離部
- S-L-P-S : 小さいライナ・推進薬間剝離部
- G-B-R : 接着良好部

図5.2.2 H-II・SRB対応の平板模型と円筒形模型の形状

平面探触子を用いたが、これは、SRBはH-I上段モータと比較して曲率が小さいので、そのような曲率の曲面探触子の制作が困難であり、またケースと探触子との中間媒体の条件が良いならば、平面探触子でもかなりの感度が期待できるからである。ただし、ライナ厚さ6mmに対しては、その共振周波数が100kHz以下になるので、手持ちの500kHzまたは200kHzの探触子ではカバーできず、100kHzの広帯域型平面探触子を特注試作した。これらを表5.2.1に示す。

(3) 従来の反射型探傷装置と平板模型による試験結果

平板模型に従来の反射型探傷装置と5MHzの探触子を使用した結果を図5.2.3に示す。これまでと同様にケース・ライナ間剝離は検出できるが、ライナ・推進薬間剝離は検出できないことがわかる。

(4) 周波数掃引型探傷装置と平板模型による試験結果

周波数掃引型探傷装置を用いた結果を図5.2.4

表 5.2.1 使用した探触子の仕様

探触子	A	B	C	D	N
共振周波数 (MHz)	5	1	0.5	0.2	0.1
探触子直径 (mm)	2.5	1.3	2.5	2.5	3.8

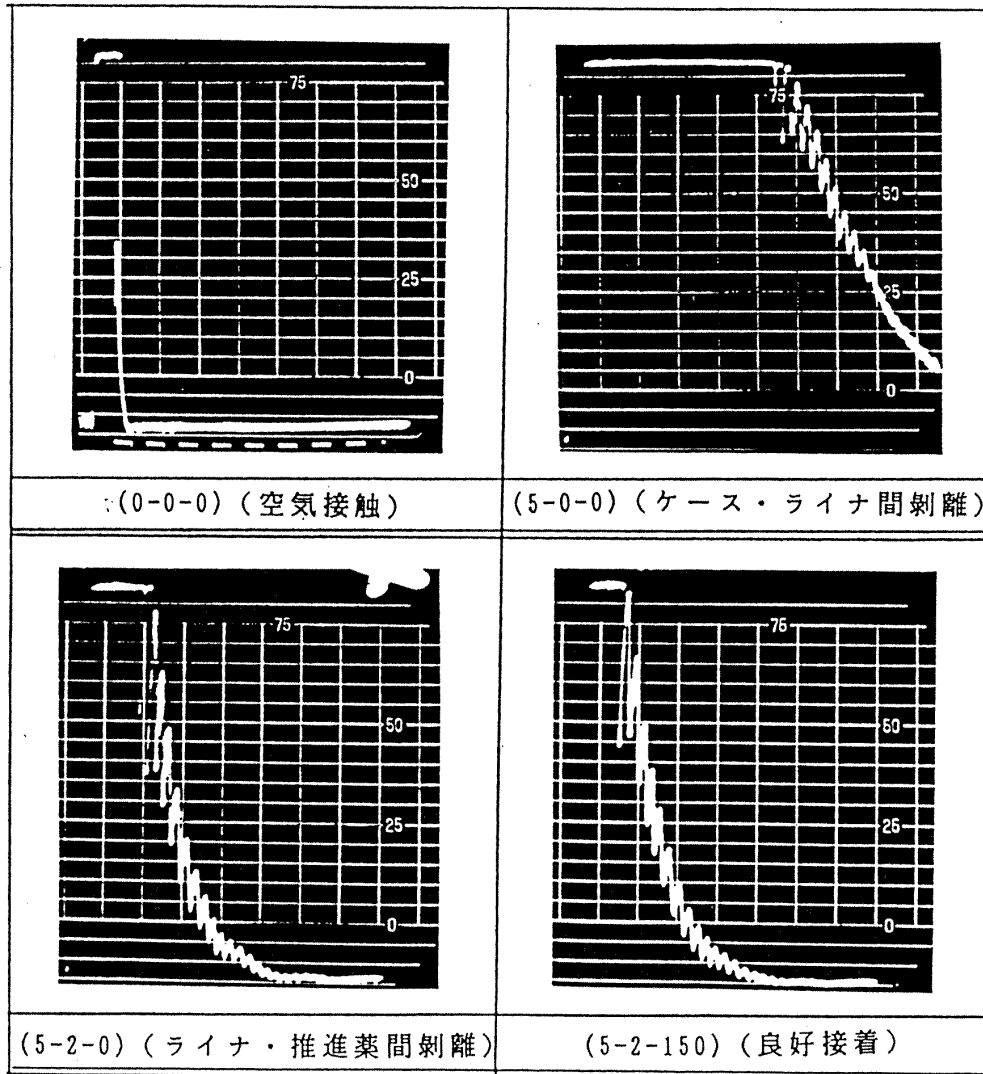


図 5.2.3 H-II・SRB 対応の平板模型に対する通常型超音波探傷装置による探傷図形
(周波数=5MHz)

に示す。ここでは、ライナ厚さ 2mm の場合のライナ・推進薬間剝離が探傷周波数 204kHz にて明確に検出できる。また、ライナ厚さ 6mm の場合も、ライナ厚さ 2mm の場合と同一探傷条件にて検出できた。これは、4分の1波長の奇数倍の奇数値が、ライナ厚さ 2mm の場合は「1」、6mm の場合は「3」となって、ともに共振条件を満足するからである。ただし、ライナ厚さ 4mm の場合は探傷周波数 300kHz での探傷は、受信したラ

イナ共振波があまり大きくなく、やや困難であった。これは、ライナ内での音速が約 1.6km/s であり、ライナ厚さ 4mm が 4分の1波長の 3倍となる周波数約 300kHz が、たまたまケース厚さ 4.7mm にたいしても 4分の1波長の 1倍の反共振周波数とほぼ一致したためと考えられる。そして、ライナ厚さが 4分の1波長の 1倍となる 100kHz では、特注試作の 100kHz 平面型探触子にてライナ・推進薬間剝離が検出できた。このことは第3.

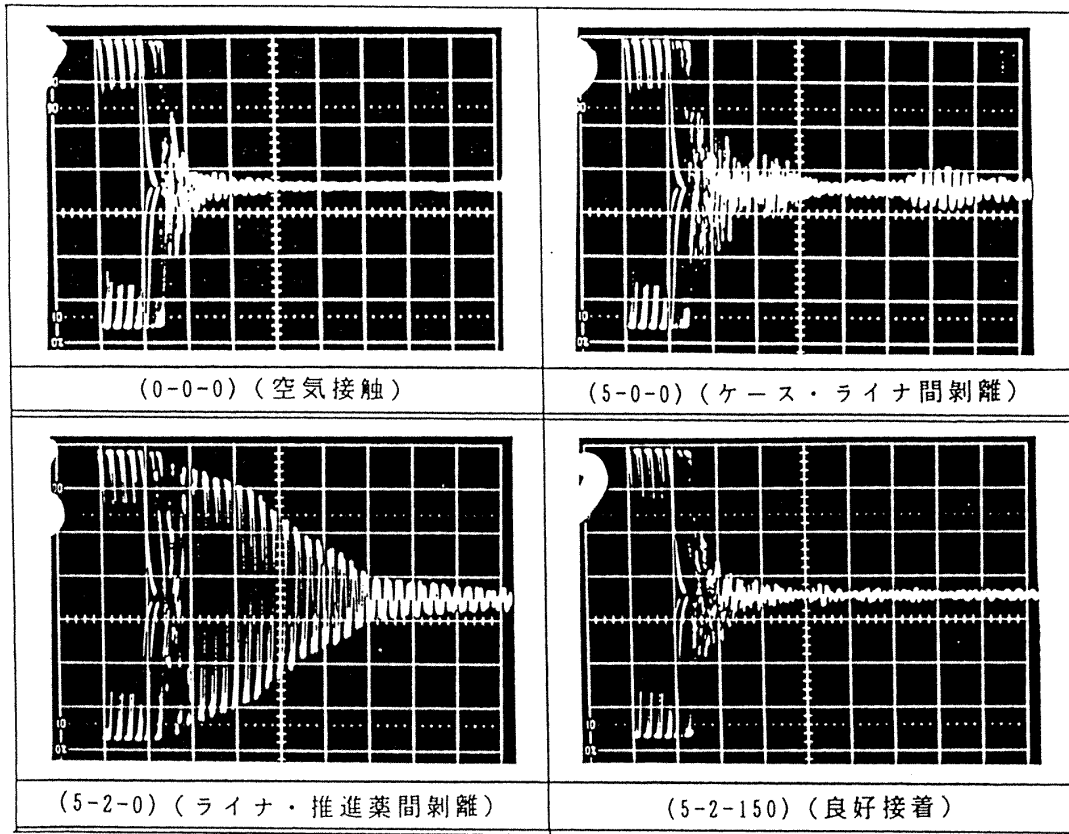


図 5. 2. 4 平板模型のライナ・推進薬間剝離に対する周波数掃引型探傷装置による探傷図形

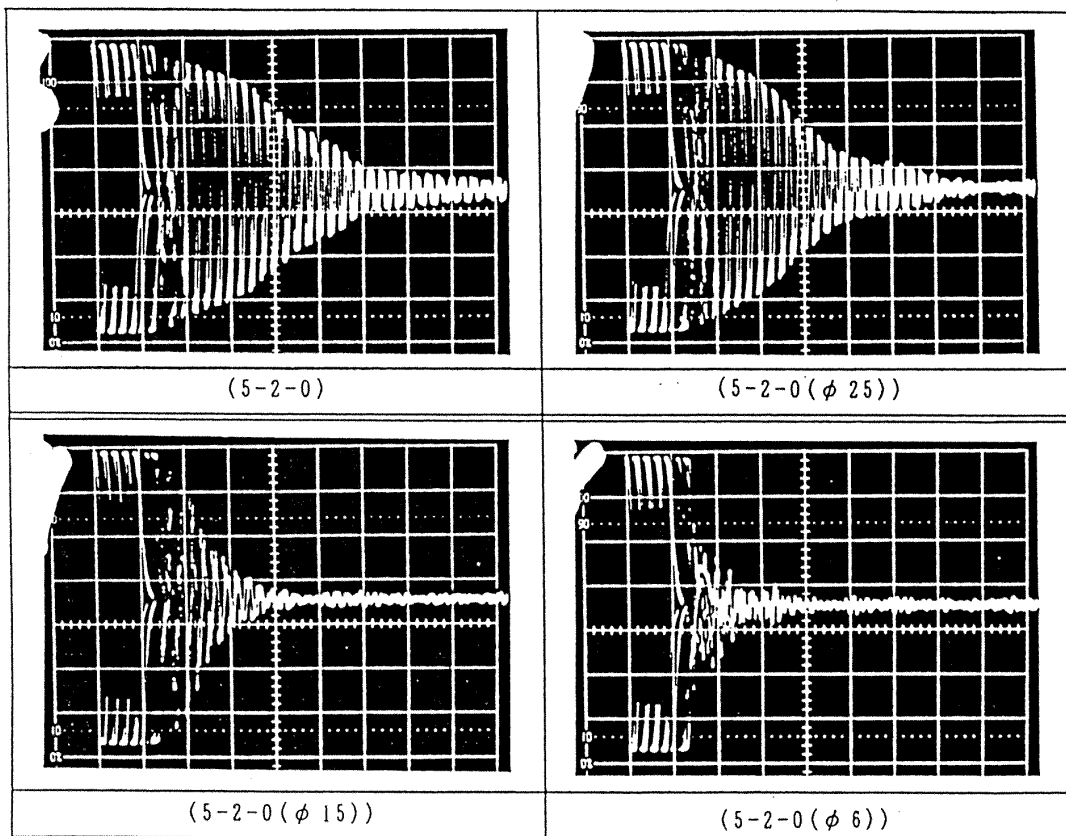


図 5. 2. 5 平板模型のライナ・推進薬間剝離に対する周波数掃引型探傷装置による探傷図形の変化 (50×70mmと直径25, 15, 6mmの剝離部)

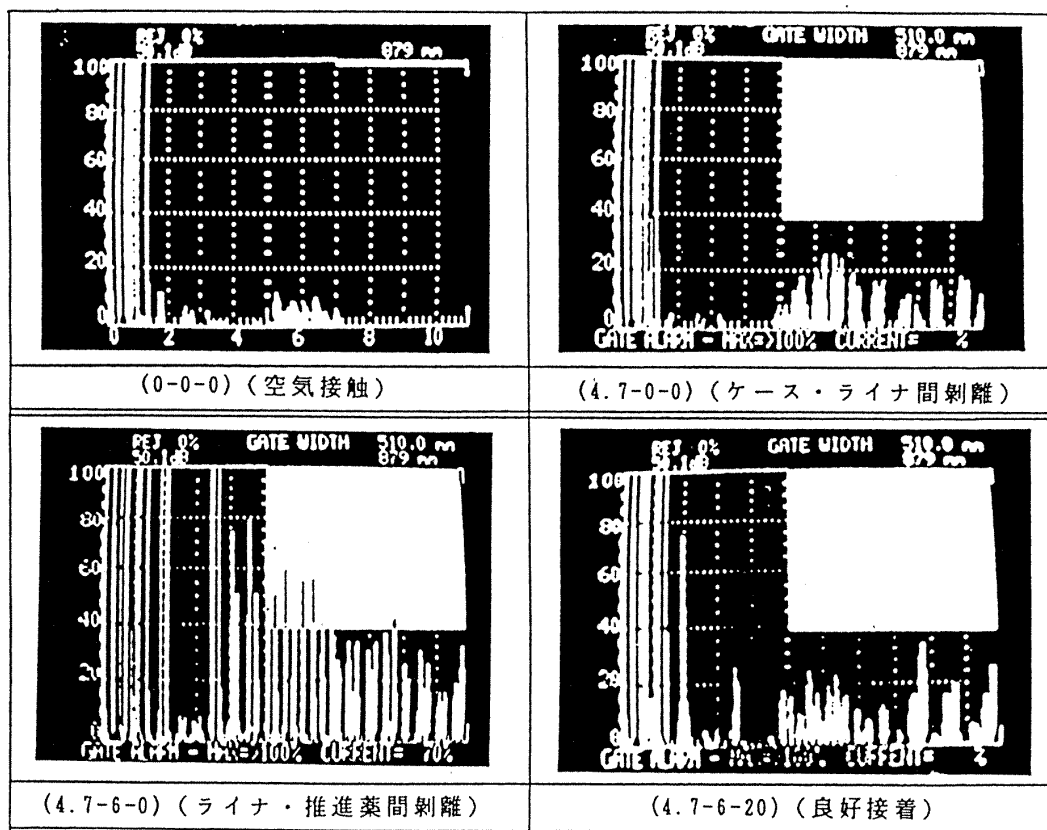


図 5.2.6 H-II・SRB 対応の円筒形模型に対する周波数掃引型探傷装置と100kHz探触子による探傷図形(周波数=80kHz, N=1)

3節(4)にて述べたように、ケース共振周波数近傍ほどではないにしても、ケース反共振周波数近傍においても探傷困難となることがあるので、この周波数域をできれば避けることが望ましく、周波数上の「探傷窓」の存在を示唆していると言えよう。また、図5.2.5にはライナ・推進薬間剥離の大きさ(広さ)の変化に対する探傷図形の変化を示す。これによると、直径15mm以上のライナ・推進薬間剥離部は十分に検出できることがわかる。

(5) 円筒形模型への適用

実機SRBと同一曲率の円筒形模型に対しては、上述の平面探触子(500, 200kHz)ではライナ・推進薬間剥離は検出できなかったが、特注試作の100kHz平面探触子を用いたところ、図5.2.6のように、探傷周波数80kHzにて十分に検出できることが確認された。従って、H-II・SRBにも、その製造工場や、射場にて本法の適用に明るい見通しが得られた。ただし、できればSRBの曲率に適合した曲面探触子が製作されれば、さらなる好結果が期待できよう。

第5.3節 非破壊評価における本法の役割

従来、固体ロケット・モータのライナ・推進薬間剥離に対して有効な検査法がなかったが、本論文での周波数掃引型超音波探傷法が実験室的にも実用的にも極めて有効であることを第4章および本章にて述べてきた。

しかしながら、本法の終局的な目的は、固体ロケット・モータの高信頼性の確保であり、そのためには単に非破壊検査だけではなく、図5.3.1に示すような非破壊検査をその一部として含む非破壊評価を行わなければならない(文献35)。そして、本検査法は、この図の上部に示された非破壊検査に要求される検査能力を有しなければその有用性を確立したことにはならない。ここではその点について考察しよう。

(1) 欠陥の検出

これについては、既に述べたように、本法はライナ・推進薬間剥離の検出に優れている。多くの場合、剥離の空隙が狭いが、その場合には他に競合する検査法がない。

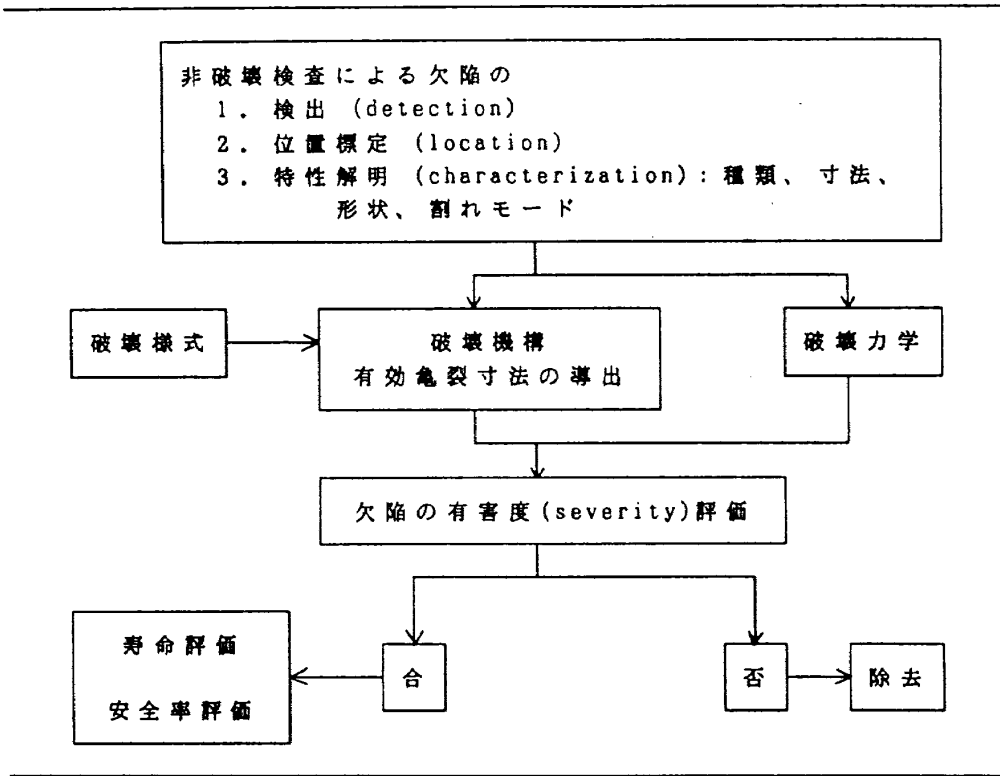


図 5.3.1 非破壊評価手法の流れ図 (文献35)

(2) 位置標定

これについても、(1)の欠陥検出は同時にその位置標定を意味する。すなわち、深さ方向の情報については、探傷超音波の約十分の1波長の精度で、また、モータ・ケースに平行する位置情報については、探触子の直径より高い精度で位置評定できる。

(3) 特性解明

ここでは、欠陥をライナ・推進薬間剝離(ライナも多層構造であるので、ライナ内剝離をも含む)と限定しているのので、その形状寸法と開口変位が問題となる。形状寸法については、剝離領域が探触子接触面より小さい場合にはあまりはっきりとは同定できないが、探触子接触面よりかなり大きい場合にはその測定精度を推定することができる。すなわち、直径25mmの探触子にて直径15mmの剝離領域が十分に検出できるので、探触子接触面積の約4分の1の面積の剝離領域が検出できることになる。このことは、接着良好部からライナ・推進薬間剝離部へ探触子を移動させた場合にその境界を約±3mmの精度にて検出でき、この精度の剝離領域形状測定能力を有することになる。ま

た、開口変位は超音波探傷法では測定できないので、X線法に委ねることになるが、その空隙が狭く、X線法では検出できないことも多い。この場合は、開口変位が非常に小さいとして扱うことになる。

以上のような本法の検査能力は、非破壊評価の観点からは十分であろうか。ここで対象とする固体ロケット・モータの推進薬は、粒子充填ゴム系複合材料の一種であり、充填粒子とゴムとの接着強度が極めて低く、かつ単軸伸長破壊歪が50%以上にもなりうる極めて複雑な破壊過程を有する特殊な材料であり、その構造敏感性はかなり低い(例えば、文献36)。ライナもまたアスベストをふくむゴム系複合材料であり、その強度は推進薬よりは高く、破壊歪も大きい。そのため、ライナ・推進薬間剝離についても、図5.3.1のような破壊力学的取扱が事実上不可能である。現実には欠陥が検出された場合、それを特性解明し、それに基づいて欠陥周辺の応力・歪の有限要素解析を実施し、その結果が設計安全基準に適合しているかどうかを判定して、評価している。その場合の有限要素解析でのメッシュの刻みの寸法は、計算機

能力などのかねあいから通常20mm, 細かくとも5mm程度であり, あまり小さな欠陥は問題にできていない。上述のように, 本超音波探傷法のライナ・推進薬間剝離に対する欠陥形状測定能力は約±3mmであり, 現行の有限要素解析に十分対応できるので, 本法は非破壊評価において極めて有用な役割を果たすことができる。

第6章 結 論

固体ロケット・モータの重大欠陥の1つであるケース・ライナ間剝離の検査には, 多重反射超音波探傷法が安価・簡便かつ極めて有効であり, 実用化されてきた。ところが, それと並ぶ重大な欠陥の1つであるライナ・推進薬間剝離についてはあまり有効な検査法がなかった。仮に超音波探傷法がライナ・推進薬間剝離の検査にも有効であればまことに好都合であるので, 世界的に研究が続けられてきたが, これまではさしたる成果は得られていない。

本論文では, 従来理論に対する追試に始まる基礎試験に基づき, 有限厚さの異媒質層における超音波の反射・透過の理論を用いて固体ロケット・モータに対する新たな超音波探傷理論を構築した。この新理論はモータのケース・ライナ間剝離に付いては従来理論とあまり変わらない結果となるが, ライナ・推進薬間剝離については従来理論とまったく異なる検査法を示した。それは, ライナ・推進薬間剝離の場合のライナが力学的に一端固定・一端自由の振動境界条件にあり, ライナ厚さが4分の1波長の奇数倍に等しい時に共振することに基づく。そして, 周波数掃引型超音波探傷装置を用いて, 探傷周波数を掃引させて, ライナ・推進薬間剝離部のライナを共振させ, その共振波を探傷図形上で検知することにより, ライナ・推進薬間剝離を検出する方法である。この方法は実験的にそのすぐれた有効性が確認され, 我国の実用衛星打ち上げ用H-Iロケットの上段モータ(第3段モータとアポジ・モータ)の検査に実用化された。また, 現在開発中の次期大型ロケットであるH-IIロケットの補助固体モータ(SRB)への適用性確認試験を行い, 実機SRBへの適用に有望な良

好な結果を得た。そして, 本法はモータの非破壊評価において現在要求される探傷精度に達しており, 特に剝離の空隙が狭い場合には他に競合する検査法がないので, モータの高信頼性確保に極めて重要な役割を果たしている。

謝 辞

本研究において, 固体ロケット・モータに対する超音波探傷法に成果が得られたが, 勿論これは筆者一人によるものではなく, 多くの方々の指導・激励・協力・援助があって初めて成し遂げられたことは言うまでもない。

その中で, まず第一に五代富文博士(現, 宇宙開発事業団理事)を挙げなければならない。五代博士は航空宇宙技術研究所に在職中, 永きにわたり, 筆者の直属上司であり, 固体ロケットや宇宙開発について何も知らない浅学非才の筆者に親身も及ばぬ暖かい御指導・御鞭撻を重ねていただいた。本研究についても, 最初の基礎試験の開始された1969年より, 最近のH-I上段モータへの実用化や, H-II・SRBへの適用性確認試験に至るまで, 五代博士が宇宙開発事業団の要職に就かれて後も, 御多忙にも拘らず全面的に御指導を頂いた。ここに深く感謝いたします。

また, 本研究において数多く引用した丹羽論文と巡り会えたことにも感謝したい。著者である丹羽登先生は, 日本非破壊検査協会会長などの要職を歴任された斯界の大御所として有名である。残念ながら, 筆者は先生から直接の御指導を受ける機会に恵まれなかったが, 本研究は先生の論文から数多くの重要な指針を得ており, それなくしては本研究の成果はおぼつかなかったと思われる。

さらに, 超音波探傷理論に関して貴重なご助言をいただいた金属材料技術研究所の第4研究グループ総合研究官, 斎藤鉄哉博士に感謝いたします。

本研究は開始から完成まで約20年を経過しており, その間に航空宇宙技術研究所, 宇宙開発事業団, 日産自動車(株)などの多方面の方々に広範囲にわたる協力・援助を頂いた。特に, 筆者と永く研究室を共にした伊藤克弥, 種村利春, 藤原 勉の諸氏には多大の援助・協力を頂いたことに感謝

します。

参 考 文 献

- 1) 日本航空宇宙学会編；航空宇宙工学便覧，丸善(株)，昭和49年12月。
- 2) T. Godai & M. Shimizu ; Pressure Exponent of Controllable Solid Rocket Propellant, AIAA Paper, 72-1135, 1972.
- 3) T. Godai ; Flame Propagation into the Crack of Solid-Propellant Grain, AIAA Journal, Vol.8, No.7, July 1970, pp.1322-1327.
- 4) 座古 勝；強化プラスチックの非破壊検査方法に関する研究(第4報)，第14回材料研究連合講演会前刷，昭和45年，pp.69-70.
- 5) M. Shimizu, et al. ; Reliability Technique for Solid Motors (I) Micro X-Ray TV-CT for C/C Composite and Propellant Dewetting, Proc. 15th International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), Tokyo, Japan, 1986, pp.289-294.
- 6) T. Maniwa, et al. ; Estimation of C/C Composite Material by X-Ray CT Scanner, Proc. 16th International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), Sapporo, Japan, 1988, pp.369-374.
- 7) M. Shimizu, et al. ; X-Ray Computerized Tomography (XCT) for Nondestructive Inspection Research of Solid Rocket Motors, Proc. 14th International Symposium on Space Technology and Science (ITST), Tokyo, Japan, 1984, pp.83-88.
- 8) P. Burstein, et al. ; Computerized Tomography Inspection of Trident Rocket Motors : A Capability Demonstration, Materials Evaluation, 40, Nov. 1982, pp. 1280-1284.
- 9) J. C. St. Clair ; An Infrared Method of Rocket Motor Inspection, Materials Evaluation, August 1966, pp.425-430.
- 10) 日本学術振興会製鋼第19委員会編；超音波探傷法，昭和31年，超音波探傷法(改訂新版)，昭和49年，日刊工業新聞社。
- 11) 日本非破壊検査協会編；非破壊検査便覧(新版)，昭和53年，日刊工業新聞社，pp. 351-572.
- 12) J. M. Amaral & B. L. Lamb ; Development of Nondestructive Test Techniques for Large Solid Propellant Grains : Final Report, NASA CR 72840, N71-20477.
- 13) B. Harris-Maddox ; The Ultrasonic Testing of Solid-Propellant Rocket Motors, Materials Evaluation, February 1966, pp.101-104.
- 14) N. D. Passerell & A. C. Foster ; Ultrasonic Inspection of Large Solid-Fuel Booster Nozzles, Materials Evaluation, March 1967, pp.53-57.
- 15) R. C. Stinebring & R. H. Harrison ; Non-destructive Testing of Rocket Components Using Microwaves and Low-Frequency Ultrasonics, Materials Evaluation, January 1965, pp.17-23.
- 16) 丹羽 登，ほか；固体ロケットエンジン接着部の超音波検査，非破壊検査，18巻2号，昭和44年2月，pp.55-61.
- 17) A. Zwijnenburg, et al. ; On the Possibility of Detecting Case/Liner and Liner/Propellant Debonds in a Rocket Motor by Means of Ultrasonic Multiple Reflection Pulse Echo Technique, Propellants, Explosives, Pyrotechniques, 8, 1983, pp.40-45.
- 18) A. J. Rogovsky ; Ultrasonic and Thermographic Methods for NDE of Composite Tubular Parts, Materials Evaluation, 43, April 1985, pp.547-555.
- 19) 丹羽 登，秋葉鎌二郎；KSCでのロケットエンジンの検査，東京大学宇宙航空研究所報告，第4巻第4号(B)，1968年12月，観測ロケット特集号ーランダム4S型ロケットー，pp.775-781.
- 20) 清水盛生，ほか；固体ロケット推進薬の超音

- 波探傷, 航空宇宙技術研究所報告, NAL TR-308, 1972年12月.
- 21) M. Shimizu, et al. ; On the Ultrasonic Inspection of Separation in Solid Propellant Rocket Motors, Proc. 17th Japan Congress on Materials Research, Kyoto, Japan, 1973, pp.271-275.
- 22) 実吉純一, ほか監修 ; 超音波技術便覧(新訂版), 日刊工業新聞社, 昭和53年.
- 23) 清水盛生, ほか ; 固体ロケットのライナ・推進薬間剥離の超音波探傷, 昭和57年度宇宙輸送シンポジウム論文集, pp.17-25.
- 24) M. Shimizu, et al. ; Reliability Technique for Solid Motors (II), Swept Frequency Type of Ultrasonic Inspection Method for Liner-Propellant Separations, Proc. 15th International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), Tokyo, Japan, 1986, pp.295-302.
- 25) 荒井敬司, ほか ; 固体ロケットモータにおける加圧硬化法の研究, 工業火薬協会誌, Vol. 43, No.6, 1982, pp.360-367.
- 26) A. Morita, et al. ; Investigation of Pressure Curing on Solid Propellant Motor, Proc. ISAS Space Energy Symposium, January 28-29, 1982, pp.217-225.
- 27) L. J. Busse, et al. ; An Acoustical Imaging System for the Inspection of Solid Rocket Motors, AFRPL-TR-84-002, AD-A139482, January 1984.
- 28) M. Foley ; Acoustical Imaging System Evaluation, AFRPL-TR-85-057, AD-A159425, September 1985.
- 29) E. I. Madaras, et al. ; Detection of Bond-line Delaminations in Multilayer Structures with Lossy Components, IEEE 1987 Ultrasonics Symposium Proceedings, Vol.2, October 14-16, 1987, pp.1047-1052.
- 30) M. Shimizu, et al. ; Swept Frequency Type of Ultrasonic Inspection Method for Liner-Propellant Separations of the H-I Upper Stage Motors, AIAA Paper, AIAA 88-3356, Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 26, No.5, September-October 1989, pp.379-384.
- 31) 齊藤紀男, ほか ; H-I アポジモータの開発現状, 昭和58年宇宙輸送シンポジウム論文集, 宇宙科学研究所, pp.67-72.
- 32) 祖父江照雄, ほか ; H-I 第3段モータ, 第32回宇宙科学技術連合講演会講演集, 昭和63年, pp.808-809.
- 33) M. Shimizu, et al. ; Swept Frequency Ultrasonic Inspection Method for Liner-Propellant Separations of H-II SRB, 40th Congress of the International Astronautical Federation, October 1989, Malaga, Spain, IAF-89-295.
- 34) M. Miyazawa & Y. Fukushima ; Development Status of Japan's New Launch Vehicle ; H-II Rocket, 40th Congress of the International Astronautical Federation, October 1989, Malaga, Spain, IAF-89-195.
- 35) 岸 輝雄 ; 新素材の非破壊検査と信頼性の確保, 日本機械学会誌, 第90巻第821号, 昭和62年4月, pp.463-467.
- 36) M. Shimizu ; Design and Application of a Micro-Structural Failure Testing Machine for Solid Rocket Propellants, Proc. 12th ISTS-Tokyo, Japan, 1977, pp.501-506.

付録-I 3媒質系での音圧の反射率, 透過率, 往復通過率

第3章にて, ライナ・推進薬間剥離の超音波探傷理論について述べた際, 3媒質系での音波の往復通過率の式(3.1.29)式~(3.1.31)式を用いた。これらの式は, その導出が煩雑であるので, 第3章の本文には含めず, 本付録-Iに記載することにした。以下にその導出法を示す。

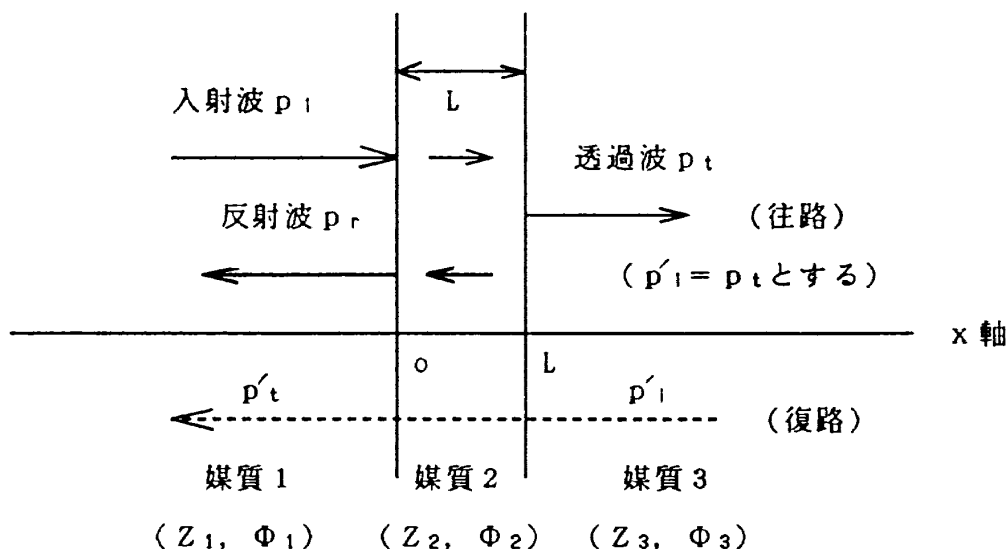


図-付1 3媒質系での音波の反射・透過・往復通過

図-付1に示すように, 2種類の半無限媒質の中間に厚さ L の層が存在する3媒質系において, 単振動平面波が媒質1から中間層に垂直入射する場合(往路), 媒質1および2においては, x 軸の正方向と負方向に進行する波が, また媒質3においては正方向に進行する波だけが存在する。単振動平面波の角周波数を ω , 時間を t とすると, 各媒質での速度ポテンシャル Φ_j , ($j=1, 2, 3$) は,

$$\Phi_1 = (\phi_{(1+)} e^{ik_1x} + \phi_{(1-)} e^{-ik_1x}) e^{-i\omega t} \tag{付1}$$

$$\Phi_2 = (\phi_{(2+)} e^{ik_2x} + \phi_{(2-)} e^{-ik_2x}) e^{-i\omega t} \tag{付2}$$

$$\Phi_3 = (\phi_{(3+)} e^{ik_3(x-L)} e^{-i\omega t} \tag{付3}$$

のように表わされる。ここに各媒質の波長定数 k_j , 音速 c_j , 波長 λ_j とすると

$$k_j = \frac{\omega}{c_j} = \frac{2\pi}{\lambda_j} \quad (j=1, 2, 3) \tag{付4}$$

ここで, ρ_j を各媒質での密度とすると, 各媒質での音圧 p_j , 速度 v_j は

$$p_1 = -i\omega\rho_1 (\phi_{(1+)} e^{ik_1x} + \phi_{(1-)} e^{-ik_1x}) e^{-i\omega t} = (P_{(1+)} e^{ik_1x} + P_{(1-)} e^{-ik_1x}) e^{-i\omega t} \tag{付5}$$

$$v_1 = -ik_1 (\phi_{(1+)} e^{ik_1x} - \phi_{(1-)} e^{-ik_1x}) e^{-i\omega t} = \frac{1}{Z_1} (P_{(1+)} e^{ik_1x} - P_{(1-)} e^{-ik_1x}) e^{-i\omega t} \tag{付6}$$

$$p_2 = -i\omega\rho_2 (\phi_{(2+)} e^{ik_2x} + \phi_{(2-)} e^{-ik_2x}) e^{-i\omega t} = (P_{(2+)} e^{ik_2x} + P_{(2-)} e^{-ik_2x}) e^{-i\omega t} \tag{付7}$$

$$v_2 = -ik_2 (\phi_{(2+)} e^{ik_2x} - \phi_{(2-)} e^{-ik_2x}) e^{-i\omega t} = \frac{1}{Z_2} (P_{(2+)} e^{ik_2x} - P_{(2-)} e^{-ik_2x}) e^{-i\omega t} \tag{付8}$$

$$p_3 = -i\rho_3 \omega \phi_{(3+)} e^{ik_3(x-L)} e^{-i\omega t} = P_{(3+)} e^{ik_3(x-L)} e^{-i\omega t}$$

$$v_3 = -ik_3 \phi_{(3+)} e^{ik_3(x-L)} e^{-i\omega t} = \frac{1}{Z_3} P_{(3+)} e^{ik_3(x-L)} e^{-i\omega t} \tag{付10}$$

と表わされる。ただし, $P_{(j\pm)} = -i\omega\rho_j\phi_{(j\pm)}$, ($j=1, 2, 3$) であり, Z_j は各媒質の音響インピーダンスで,

次のように与えられる。

$$Z_j = \rho_j c_j = \frac{\omega \rho_j}{k_j} \quad (\text{「和の規約」は適用しない。}) \quad (\text{付11})$$

各媒質の境界において音圧，速度は連続であるという境界条件から $x=0$ において

$$P_{(1+)} + P_{(1-)} = P_{(2+)} + P_{(2-)} \quad (\text{付12})$$

$$P_{(1+)} - P_{(1-)} = \frac{Z_1}{Z_2} (P_{(2+)} - P_{(2-)}) \quad (\text{付13})$$

$x=L$ において

$$P_{(3+)} = P_{(2+)} e^{ik_2L} + P_{(2-)} e^{-ik_2L} \quad (\text{付14})$$

$$\frac{Z_2}{Z_3} P_{(3+)} = P_{(2+)} e^{ik_2L} - P_{(2-)} e^{-ik_2L} \quad (\text{付15})$$

となる。ここでインピーダンス比

$$Z_{mn} = \frac{Z_m}{Z_n} \quad (\text{付16})$$

とおくと，これらの式から

$$\begin{aligned} P_{(1+)} &= \frac{1}{2} \{ P_{(2+)} (1+Z_{12}) + P_{(2-)} (1-Z_{12}) \} \\ &= \frac{1}{4} P_{(3+)} \{ (1+Z_{12})(1+Z_{23}) e^{-ik_2L} + (1-Z_{12})(1-Z_{23}) e^{ik_2L} \} \end{aligned} \quad (\text{付17})$$

$$\begin{aligned} P_{(1-)} &= \frac{1}{2} \{ P_{(2+)} (1-Z_{12}) + P_{(2-)} (1+Z_{12}) \} \\ &= \frac{1}{4} P_{(3+)} \{ (1-Z_{12})(1+Z_{23}) e^{-ik_2L} + (1+Z_{12})(1-Z_{23}) e^{ik_2L} \} \end{aligned} \quad (\text{付18})$$

$$P_{(2+)} = \frac{1}{2} P_{(3+)} (1+Z_{12}) e^{-ik_2L} \quad (\text{付19})$$

$$P_{(2-)} = \frac{1}{2} P_{(3+)} (1-Z_{12}) e^{ik_2L} \quad (\text{付20})$$

が求められる。従って音圧反射率は

$$R_{123} = \frac{P_{(1-)}}{P_{(1+)}} = \frac{(1-Z_{12})(1+Z_{23}) e^{-ik_2L} + (1+Z_{12})(1-Z_{23}) e^{ik_2L}}{(1+Z_{12})(1+Z_{23}) e^{-ik_2L} + (1-Z_{12})(1-Z_{23}) e^{ik_2L}} \quad (\text{付21})$$

三角関数にて表示すると

$$R_{123} = \frac{(1-Z_{13}) \cos \theta_2 + i (Z_{12} - Z_{23}) \sin \theta_2}{(1+Z_{13}) \cos \theta_2 - i (Z_{12} + Z_{23}) \sin \theta_2} \quad (\text{付22})$$

ただし $\theta_2 = k_2 L$

また，音圧透過率は

$$T_{123} = \frac{P_{(3+)}}{P_{(1+)}} = \frac{4}{(1+Z_{12})(1+Z_{23}) e^{-ik_2L} + (1-Z_{12})(1-Z_{23}) e^{ik_2L}} \quad (\text{付23})$$

三角関数にて表示すると

$$T_{123} = \frac{2}{(1+Z_{13}) \cos \theta_2 - i (Z_{12} + Z_{23}) \sin \theta_2} \quad (\text{付24})$$

一方，これまでと逆方向に，媒質 3 から中間層に垂直入射する場合（復路）の音圧透過率は，（付23），

(付24)にて媒質2と3の境界を原点, 媒質1と2の境界を $-L$ ($\theta_2 = -\theta_2$) とし, 音響インピーダンスの Z_1 と Z_3 とを入れ換えることによって以下のように得られる。

$$\begin{aligned} T_{321} &= \frac{2}{(1+Z_{31}) \cos(-\theta_2) - i(Z_{32}+Z_{21}) \sin(-\theta_2)} = \frac{2}{(1+Z_{31}) \cos\theta_2 + i(Z_{32}+Z_{21}) \sin\theta_2} \\ &= \frac{2Z_{13}}{(1+Z_{13}) \cos\theta_2 + i(Z_{12}+Z_{23}) \sin\theta_2} \end{aligned} \quad (\text{付25})$$

超音波探傷法においては, 同一探触子を超音波の送信・受信に共用する事が多いので, 実用的な見地から媒質3での透過波は損失なしに反転し, 再び媒質1に戻って来る場合の音圧の通過率をあらわす音圧往復通過率が重要となる。

音圧往復通過率は

$$T_{1(123)} = T_{123} \times T_{321}$$

であるから

$$\begin{aligned} T_{1(123)} &= \left[\frac{2}{(1+Z_{13}) \cos\theta_2 - i(Z_{12}+Z_{23}) \sin\theta_2} \right] \times \left[\frac{2Z_{13}}{(1+Z_{13}) \cos\theta_2 + i(Z_{12}+Z_{23}) \sin\theta_2} \right] \\ &= \frac{4Z_{13}}{(1+Z_{13})^2 \cos^2\theta_2 + (Z_{12}+Z_{23})^2 \sin^2\theta_2} \end{aligned} \quad (\text{付26})$$

となり, 第3章の(3.1.31)式が導出された。

また, 媒質1と3が同一であれば, $Z_1 = Z_3$ であるから, (付26)より

$$\begin{aligned} T_{1(121)} &= \frac{4Z_{11}}{(1+Z_{11})^2 \cos^2\theta_2 + (Z_{12}+Z_{21})^2 \sin^2\theta_2} = \frac{4}{2^2 \cos^2\theta_2 + (Z_{12}+Z_{21})^2 \sin^2\theta_2} \\ &= \frac{4}{4(\cos^2\theta_2 + \sin^2\theta_2) + (Z_{12}-Z_{21})^2 \sin^2\theta_2} = \frac{4}{4 + (Z_{12}-Z_{21})^2 \sin^2\theta_2} \end{aligned} \quad (\text{付27})$$

となり, 第3章の(3.1.29)が導出された。

また, (1-音圧反射率の絶対値の自乗)が音圧往復通過率に等しいことも, (付21)より以下のように求められる。

$$1 - |R_{123}|^2 = 1 - \left| \frac{(1-Z_{13}) \cos\theta_2 + i(Z_{12}-Z_{23}) \sin\theta_2}{(1+Z_{13}) \cos\theta_2 - i(Z_{12}+Z_{23}) \sin\theta_2} \right|^2 = 1 - \frac{(1-Z_{13})^2 \cos^2\theta_2 + (Z_{12}-Z_{23})^2 \sin^2\theta_2}{(1+Z_{13})^2 \cos^2\theta_2 + (Z_{12}+Z_{23})^2 \sin^2\theta_2}$$

通分すると,

$$\begin{aligned} \text{分母} &= (1+Z_{13})^2 \cos^2\theta_2 + (Z_{12}+Z_{23})^2 \sin^2\theta_2 \\ \text{分子} &= (1+Z_{13})^2 \cos^2\theta_2 + (Z_{12}+Z_{23})^2 \sin^2\theta_2 - (1-Z_{13})^2 \cos^2\theta_2 - (Z_{12}-Z_{23})^2 \sin^2\theta_2 \\ &= 4Z_{13} \cos^2\theta_2 + (2Z_{12})(2Z_{23}) \sin^2\theta_2 = 4(Z_{13} \cos^2\theta_2 + Z_{12}Z_{23} \sin^2\theta_2) \\ &= 4(Z_{13} \cos^2\theta_2 + Z_{13} \sin^2\theta_2) = 4Z_{13} \end{aligned}$$

従って,

$$1 - |R_{123}|^2 = \frac{4Z_{13}}{(1+Z_{13})^2 \cos^2\theta_2 + (Z_{12}+Z_{23})^2 \sin^2\theta_2} = T_{1(123)} \quad (\text{付28})$$

航空宇宙技術研究所報告1107号

平成3年5月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町7丁目44番地1
電話三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182
印刷所 株式会社 三興印刷
東京都新宿区西早稲田2-1-18
