

UDC 620.179.16:
629.76

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-308

固体ロケット推進薬の超音波探傷

清水盛生・野口義男・種村利春

1972年12月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

既 刊 報 告

- TR-286T An Investigation of Secondary Injection Thrust Vector Control May 1972 Tatsuo YAMANAKA
- TR-287 内面加熱を受ける中空円筒の非定常熱応力
Transient Thermal Stresses of the Hollow
Cylinder Subjected Uniform Inner Heating 1972年5月 江川幸一, 竹中幸彦
- TR-288 低アスペクト比後退角片持平板翼の遷音速
および超音速のフラッター特性
The Transonic and Supersonic Flutter
Characteristics of Low Aspect Ratio
Sweptback Thin Cantilever 1972年5月 中井暎一, 森田甫之
菊池孝男, 高橋 実
東久保正年
- TR-289T Transient Hypersonic Leading-Edge Flow Jun. 1972 Katsuhisa KOURA
- TR-290 二自由度回転駆動振動検出型ジャイロの研究
Study of a Rotary-drive Vibratory-output
Two-degree-of-freedom Gyro 1972年7月 山田 博
- TR-291 はり板結合構造物の振動(Ⅲ)
On the Natural Vibration of Plate-Beam
Combination Structures (Ⅲ) 1972年7月 塙 武敏, 林 洋一
多田保夫, 戸田 勲
日下和夫
- TR-292 翼型の非圧縮乱流ウェーク流の近似計算法
—対称ウェーク流の場合—
An Approximate Calculation Method of
Incompressible Turbulent Wakes behind
Aerofoils—Symmetrical Wake Flow Case— 1972年7月 石田洋治
- TR-293 き裂先端塑性域に線形な応力分布のある弾
塑性モデルの解析
An Elastic-Plastic Analysis of a Crack
with Linearly Distributed Stress in the
Plastic Zone. 1972年8月 寺田博之
- TR-294 ジェットフラップを持つ高揚力機の地面効
果
Effect of Ground Proximity on the Longi-
tudinal Aerodynamic Characteristics of
an Airplane with a Jet-Flapped High
Lift Wing 1972年8月 遠藤 浩, 高橋 宏
中谷輝臣, 綿貫忠晴
- TR-295 自機搭載型軌道保持システムのための軌道
決定と制御
Orbit Determination and Control Method for
Self-Contained Station-Keeping System 1972年8月 松島弘一
- TR-296 航空用ガスタービン燃焼器のライナ壁面の
冷却
Liner Cooling of the Aeronautical Gas
Turbine Combustor 1972年8月 相波哲朗
- TR-297 Green 関数を二次元ラプラス方程式に適用
した解法による冷却タービン翼の温度分
布の計算 (境界条件として温度勾配を与
える場合)
A Calculation of Temperature Distribution
by Applying Green's Function to a Two-
Dimensional Laplace's Equations.
(The Case in which the Temperature
Gradients on the Boundary are Given) 1972年8月 西村英明, 白井 弘
- TR-255T The Study on the Motion of an Artificial
Satellite in the Earth's Gravitational Field Aug. 1972 Sumio TAKEUCHI,
Koichi MATSUSHIMA

固体ロケット推進薬の超音波探傷*

清水盛生**・野口義男***・種村利春**

On the Ultrasonic Inspection of Separation in Solid Propellant Rocket motors

By Morio SHIMIZU, Yoshio NOGUCHI and Toshiharu TANEMURA

Abstract

This paper describes the capability of an ultrasonic inspection technique to detect separation at the case-liner and liner-propellant interfaces, this being one of the most serious defects in solid propellant rocket motors.

It is reported that the ultrasonic multiple reflection method now being used in factories, is most effective in detecting case-liner separation, but is not very effective in detecting liner-propellant separation.

As a result of our experiments using rocket models, it is found that a multiple reflection method is capable of detecting not only case-liner separation but also liner-propellant separation if a continuously variable frequency oscillator is used and the reflectograms are analyzed considering interference.

1. まえがき

固体ロケットモータにおける推進薬～ケース間の接着不良やはく離等の欠陥は、異常燃焼や爆発の原因となり得る。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、固体ロケット・モータの非破壊検査を行なう必要がある。固体ロケット・モータに対する非破壊検査法には種々の方法があり、それぞれ長所短所があるが、ここでは手軽で安全な方法の一つである超音波探傷法を採りあげ、この方法の信頼性と可能性について研究した。その結果、ケース～ライナ間の検査における信頼性を向上させ、また従来困難とされてきたライナ～推進薬間の検査の可能性を得たので報告する。

2. 固体ロケット・モータの構造

固体ロケット・モータは一般に 図 1 に示すような構造をしている。点火器によって点火されると、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。燃焼

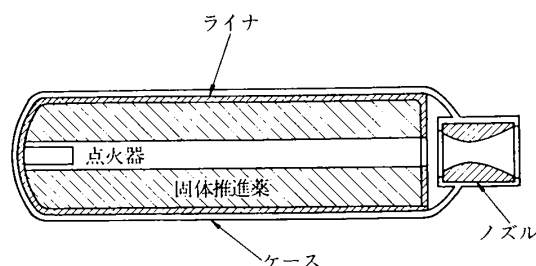


図 1 固体ロケットの構造

中、推力を一定に保つためには、燃焼面積を一定に保つ必要がある。推進薬の内孔の形状を星型等に行っている。

固体ロケット・モータの製法には次の二つがある。

- 1) 1個または数個の硬化させた推進薬にライナを巻いたものをケースに入れ、空隙に接着剤をつめる。
- 2) 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。

3. 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，き裂

* 昭和47年9月29日受付

** 宇宙研究グループ

*** 機体第一部

- 3) 個別に作った推進薬同士の接着不良やはく離
4) 推進薬, ライナ, ケース間の接着不良やはく離

これらの欠陥が許容限度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には欠陥が発生, 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, 推進, 振動, モータ内圧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, 燃焼中に火焰が接着不良部やき裂に達すると, 燃焼面積の急増を引きおこし, 内圧が増大し, 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がある。

ロケット発射の失敗は, 単に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している場合には, 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, 発射前の非破壊検査が必要となるが, この検査により何らかの欠陥が検出されれば, 常に発射中止となるわけではない。欠陥の位置, 種類, 程度等により, 欠陥自体に対する保強対策, 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であると判断されれば, ロケット発射は行ないうる。そこで, 欠陥に対する各種対策および許容規準の確立が必要となるが, このためには種々の欠陥を持ったロケットの地上燃焼試験や発射の経験が必要であり, この矛盾を解決するためには, 暫定的な対策や規準により地上燃焼試験や発射を行ない, その結果から対策や規準をより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, この方法ではロケット・モータの欠陥を必要な信頼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ロケット・モータの評価のためだけでなく, どのような欠陥を持ったロケット・モータはどのような性能上の影響を受け, 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, 以後のロケッ

ト製造や発射にフィードバックさせるためにも必要である。

4. 固体ロケット・モータの非破壊検査法

固体ロケット・モータに対する非破壊検査法²⁾には, 次のようなものがある。

4.1 打音による方法

この方法は, 従来高度の熟練を要する名人芸的な性格の強い方法であり, また欠陥部の大きさの定量的検査には適当でない。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, たとえば強化プラスチック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³⁾の応用等が実現されれば, 新たな発展が期待できよう。

4.2 X線, γ 線などによる方法

透過力の大きな放射線をロケット・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間隙を検査することができ。そこで, ロケット・モータをその中心軸まわりに少しづつ回転させて写真を撮る等して, ロケット・モータの外周全体を検査することができる。この方法はアメリカ等で広く実用化されているが, 設備に多額の費用を要し, 検査処理に時間を要し, また安全性の点で取扱いが比較的めんどうである。

4.3 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にさらすと, ケースとライナとの分離等を生じている欠陥部は非欠陥部に比べて見掛上熱伝達率が小さく現われるので, ケース表面における温度の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, 欠陥部を検知することができる。この方法は Clair⁴⁾ が固体ロケット・モータに適用して, ケース~ライナ間だけでなくライナ~推進薬間の欠陥をも検出している良い方法であるが, 設備に多額の費用を要する。

4.4 超音波探傷法⁵⁾

音響工学によれば, 音響インピーダンス* の異なる

* 電気通信工学において, 一様な伝送線路に1方向に電圧電流の波が伝わる場合に, 任意の点における電圧/電流の比を特性インピーダンスと称し, これはきわめて便利な概念であるが, 音響工学における平面音波の伝播においてもこれに対応して, (媒質内音圧)/(媒質の速度)を音響インピーダンスという。これは周波数に無関係であり, 媒質の基本的物理定数である密度と伝播速度の積である。これが実数であることは, 音圧と速度とが同位相であることを意味する。

二つの物質の境界面では、音波は一部は透過し、一部は反射する。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比べて音響インピーダンスが極めて小さいので、固体中に気体に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り欠陥部を検査することができる。

この方法は、探傷器が小型にまとまりやすく、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、金属性ケースと高分子ライナとの境界に対しては、かなり有効であるが、ライナと推進薬との境界に対しては、ライナ内部にまで達する超音波エネルギーが小さいこと、ライナ内部での超音波の減衰が大きいこと等の理由により、あまり有効でないとされてきた⁶⁾。しかし、高分子材料関係での超音波探傷法の有効性については、FRPノズルに関する報告⁷⁾⁸⁾があり、すでに実用化されていることは、ライナ～推進薬間の超音波探傷に希望をいだかせた。

Stinebringら⁹⁾は、低周波(25~250kHz)、高出力(100mW)の超音波探傷器を開発し、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の検出や内部欠陥、接着不良等の検知を行なっ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～推進薬間の欠陥の検出について探傷図形を示している報告はただ一つ見あたるにすぎない。丹羽ら¹⁰⁾は超音波探傷に必要な基礎データとしての推進薬など固体ロケット材料の音速、減衰の測定と共に、種々の超音波探傷実験を行なっている。その結果、鋼鉄製ケースの厚さが1~2mmの場合には2~4MHz、ケースの厚さが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。

5. 推進薬構造模型の超音波探傷

固体ロケット推進薬の強度に関する研究の中心を占める固体ロケット推進薬構造模型(図2参照)の環境試験¹¹⁾を行なった際、温度サイクル負荷を受けた模型のケース～ライナ～推進薬間の欠陥を検査するために多重反射法による超音波探傷を試みた。そして、得られた探傷図形を、丹羽らが報告した線に沿って、分類整理しようと試みたが、各種の条件の差異(供試模型の形状と材質、使用した超音波探傷器の型式、実験者の熟練度等が考えられる)のためか、分類整理は極め

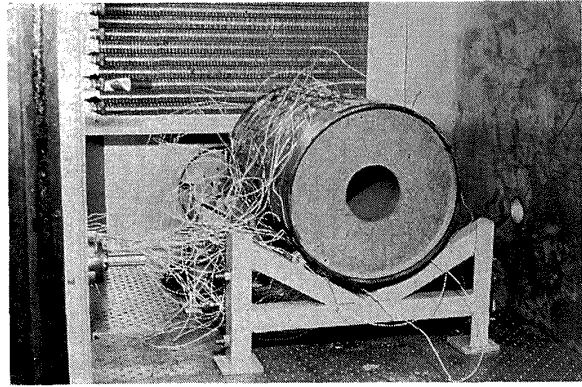


図2 試験槽内の固体ロケット推進薬構造模型

て困難であった。つまり、ケース～ライナ間については確かに検知できる探傷図形が得られたが、その他に接着部の状況を判断できかねるような種々の探傷図形が得られたからである。そこで、これら雑多な探傷図形を、その特徴に従って分類してみた。各分類の代表例を図3に示す。

図3(a)は、鋼鉄製ケースとライナが良好に接着している場合の探傷図形である。一方図3(e)は、ライナとケースが分離している場合の典型的な探傷図形である。(a)と(e)とを比較すれば、(a)の方が多重反射の過程での超音波の減衰ははるかに大きいことがわかる。ところで、鋼鉄製ケースに接しているライナ((a)の場合)と空気等の気体((e)の場合)のように、音響インピーダンスに差異のある場合の超音波の挙動は理論的には次のように示される。

平面波が二種類の媒質の境界に法線入射する場合(図4参照)、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の割合は、音響インピーダンスの値により、次のように定まる。

$$R = \left(\frac{Z_I - Z_{II}}{Z_I + Z_{II}} \right)^2$$

ただし、

R : 音波のエネルギー反射率

Z : 音響インピーダンス ($Z = \rho c$)

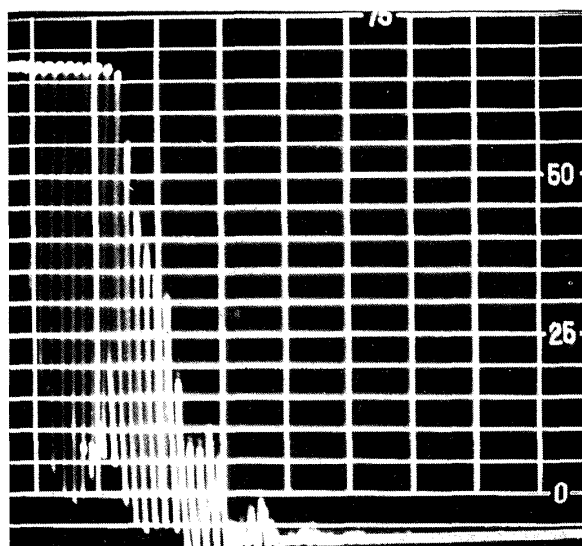
ρ : 媒質の密度

c : 媒質中での音速

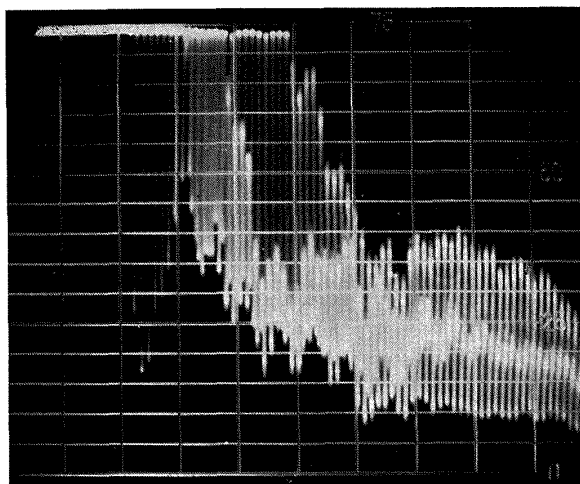
添字 I, II は媒質の種類を表わす。ここでは、波は媒質 I から媒質 II へと進行するものとする。

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、たとえば鳥飼¹²⁾の報告を参照されたい。

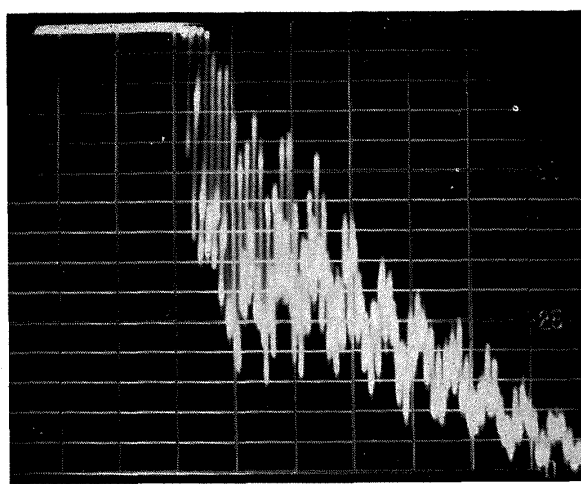
鋼鉄、ライナ、空気の音響インピーダンスから、エネルギー反射率を計算すると表1のようになる。図3(a)と(b)との差異は主としてエネルギー反射率の差



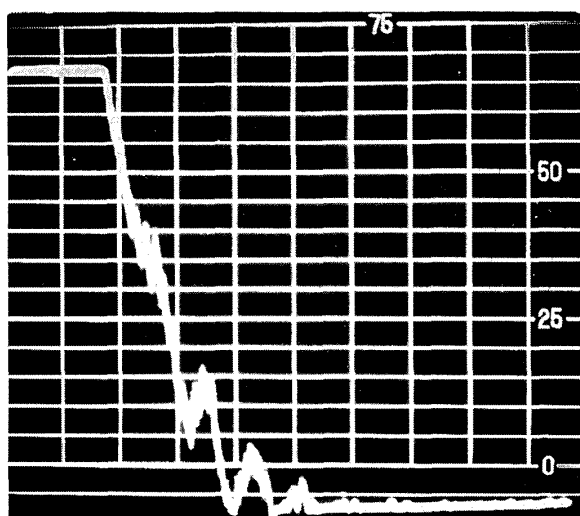
(a) 良好な接着の場合



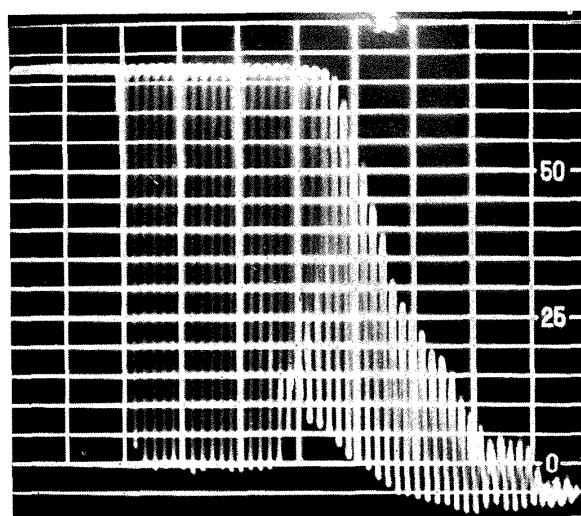
(b) 接着状況不明



(c) 接着状況不明



(d) 接着状況不明



(e) ライナとケースとが分離している場合

図 3 固体ロケット推進薬構造模型の超音波探傷図形

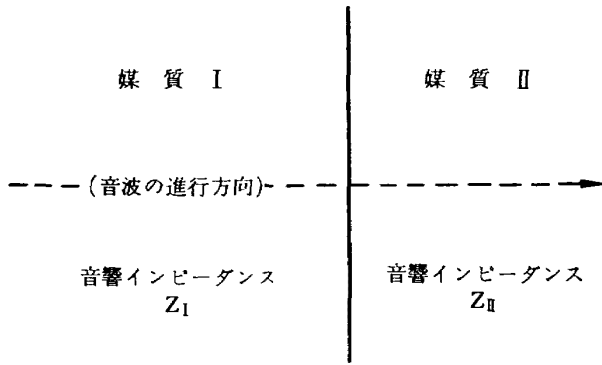


図 4 異媒質境界面への音波の垂直入射

表 1 音響インピーダンス, エネルギー反射率

材 質	縦波速度 cm/s	密 度 g/cm ³	音 響 イ ン ピ ー ダ ン ス dyne kine·cm ²
鋼 鉄	5.9×10 ⁵	7.7	4.5×10 ⁶
推 進 薬	1.8×10 ⁵	1.7	0.31
ライナ	1.5×10 ⁵	1.1	0.17
空 気*	0.34×10 ⁵	1.3×10 ⁻³	4×10 ⁻⁵

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

○エネルギー反射率 = $\left(\frac{Z_1 - Z_{II}}{Z_1 + Z_{II}}\right)^2$

但し Z_I は媒質 I の音響インピーダンス
 Z_{II} は媒質 II の音響インピーダンス
 (図 4 参照)

○測定周波数は 1 MHz である。

但し, * は文献 5) の非破壊検査 p530 による。

異によるのであろう。

次に, 図 3(b), (c), (d) の探傷図形については, (a) や (e) と異なり, 接着部の状況を判断することが困難である。(b), (c), (d) の探傷図形を単に (e) の場合より減衰が大きいとの理由から説明することには, (a), (e) と (b), (c), (d) の探傷図形とを比較すれば, 無理があると思われる。(b), (c), (d) のように (e) とは性格の異なると思われる探傷図形が得られた理由としては, いくつか考えられる。

(1) 超音波ビームの指向性が十分でないため, 波動様式の変換や, 試料の構造によっては試料底面のみでなく, 試料側面からも反射波が生じ, これらが干渉を生ずる¹³⁾。

(2) 試料が外力を受けている場合, 外力に対して平行に偏光された横波は垂直に偏光されたものよりも伝播速度が小さい。従って試料に外力が負荷されたり, 残留応力が存在する等の場合には干渉が生ずる。この現象は鋼鉄, アルミニウム等の残留応力の測定に利用されている¹⁴⁾。

(3) 試料内部の欠陥は音波の反射源となるが, 反射波は反射源の形状に従って周波数分布に変化を生ずる。この現象は溶接部の欠陥種類の判別¹⁵⁾や試料内部の欠陥の形状大きさの測定¹⁶⁾に利用されている。

この他にも種々の原因があり, しかもそれらが複雑に絡み合っていると想像されるが, もし (b), (c), (d) のような探傷図形の原因の中に支配的因子が存在し, それを確認できるならば, 超音波探傷法における信頼性を向上させ, さらには探傷範囲の拡大も期待できよう。従って, 種々の特徴的な探傷図形を分析し, その特徴の支配的因子を見出すことが課題となる。

ところで, こ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, 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ない, 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量の増加と質の向上をはかり, それらを分析してその欠陥と情報との対応をつける方法(方法〔I〕)である。もう一つは, 一つの欠陥に対する情報の質, 量は一定にしておき, 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。ここでは主として方法〔II〕を採用することにした。

6. 探傷図形の一実験的解析

6.1 応力による探傷図形の変化と破壊の様相

図 5 に示すように, 80×80 mm 厚さ 2.72 mm の鋼

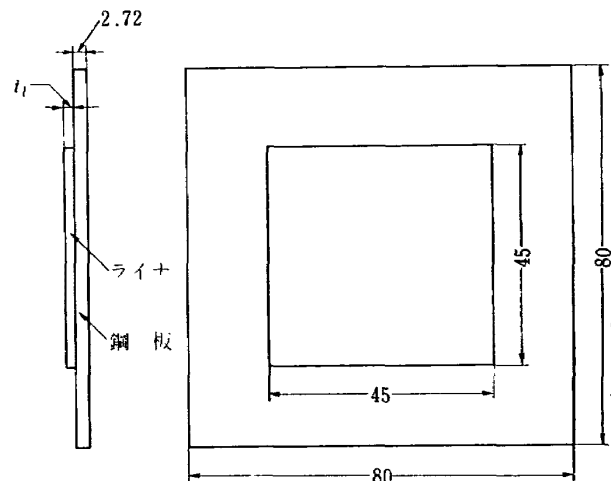


図 5 超音波探傷試験片 (1)

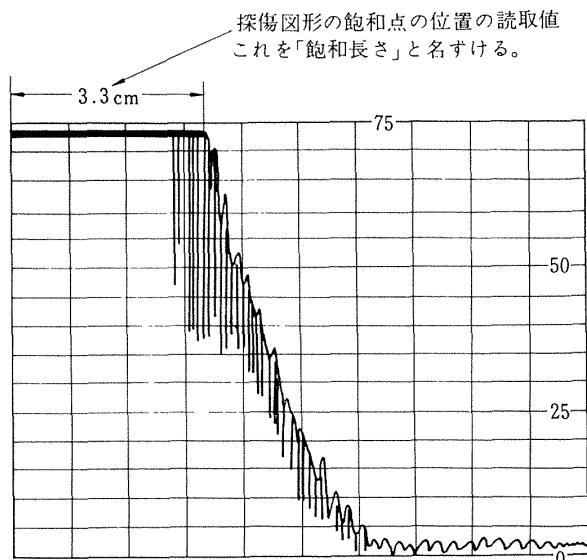


図 6 探傷図形の飽和点の位置の読取

鉄板の表面を研磨し、片面にサンドブラストをかけ、そこに枠を取付けてライナを直填した超音波探傷試験片(1)を10個製作した。ライナの寸法は45×45mm厚さはそれぞれ0mmから1.2mmまでの10種類とした。ただしライナ表面にはかなりの凸凹があり、厚さの精度は±0.05mm程度である。これらの試験片に対して、周波数5MHzの超音波を使用して、ある一定感度における探傷図形の飽和点の位置(図6参照)の読取を行なった。この読取値を「飽和長さ」と名づけることにする。実験に使用した超音波探傷器および探触子は、固体ロケット推進薬構造模型の環境試験の際にも使用した東京計器製造所製のUM721型(図7参照)および4SA06D型(NDI表示2.25Q19N)と、後に述べる2.25MHz用の3SDZ20D(NDI表示2.25Z20ND)および3SDZ20D(NDI表示2.25Z20ND)である。

なお、ライナは末端カルボキシル化ポリブタジエンポリマーに、50wt%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。

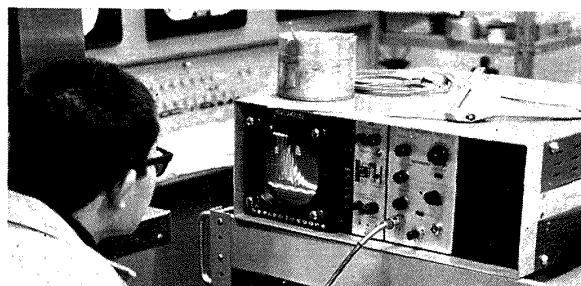


図 7 超音波探傷器 UM721 型 (東京計器製造所)

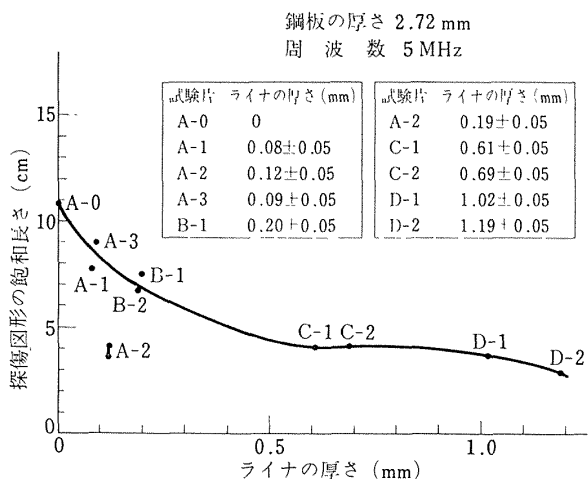


図 8 超音波探傷試験片(1)における探傷図形の飽和長さ

図8に、ライナの厚さと探傷図形の飽和長さとの関係を示す。ライナの厚さの増加にともない飽和長さはほぼ単調減少性を示すかにみえるが、ライナの厚さが0.5mmを超えると、あまり変化を示さない。ただしライナの厚さが約0.1mmであるA-2試験片の場合だけが、他の試験片の場合と大きくへだたっている点が注目される。これは、この測定の実差範囲(探触子と試験片との間に使われる機械油の状態などによる飽和長さの誤差が、±0.5cmを越えることはほとんどないと判断された)をはるかに上まわる2~3cmのへだたりである。

次に、これらの超音波探傷試験片(1)に、固体推進薬を図9のように直填して、超音波探傷試験片(2)を

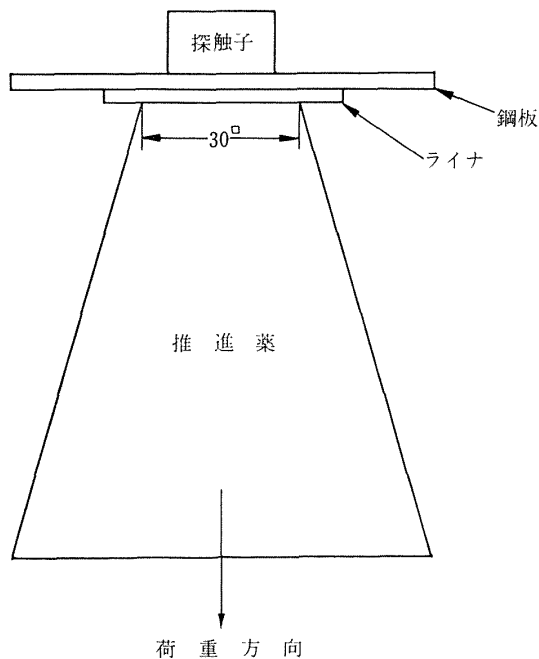


図 9 超音波探傷試験片(2)

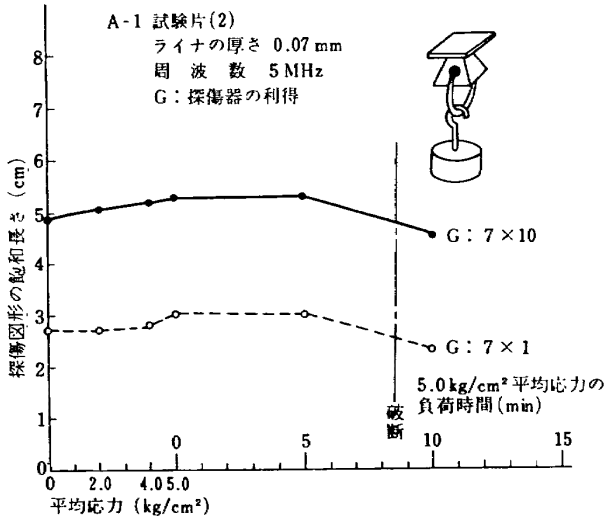


図 10(a) A-1 超音波探傷試験片(2)における平均応力および平均応力の荷荷時間に対する探傷図形の飽和長さの変化

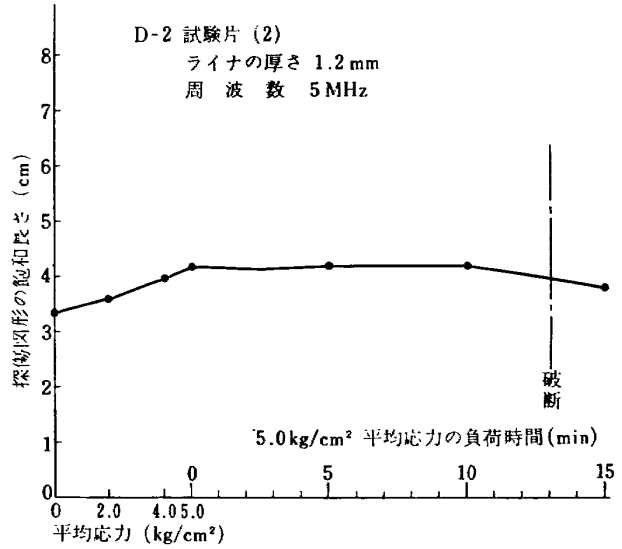


図 10(d) D-2 超音波探傷試験片(2)における平均応力および平均応力の荷荷時間に対する探傷図形の飽和長さの変化

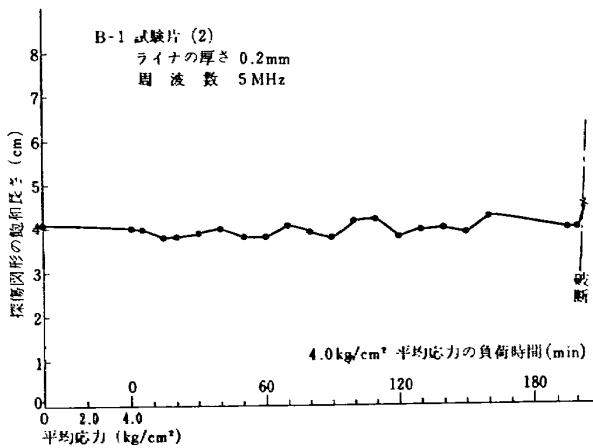


図 10(b) A-2 超音波探傷試験片(2)における平均応力および平均応力の荷荷時間に対する探傷図形の飽和長さの変化

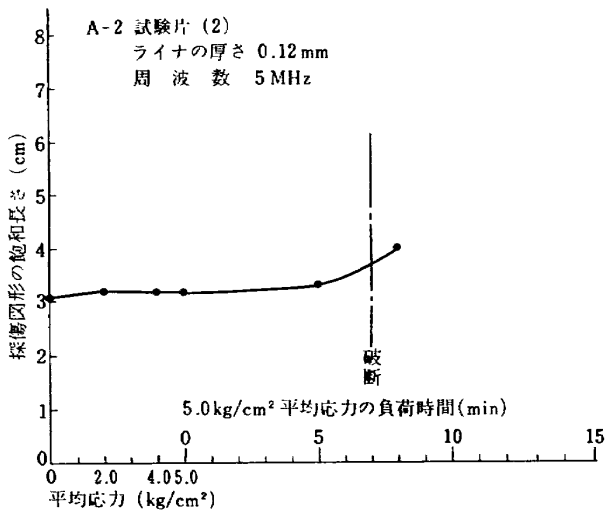
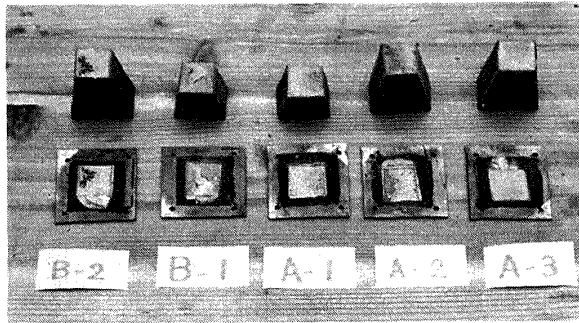


図 10(c) B-1 超音波探傷試験片(2)における平均応力および平均応力の荷荷時間に対する探傷図形の飽和長さの変化

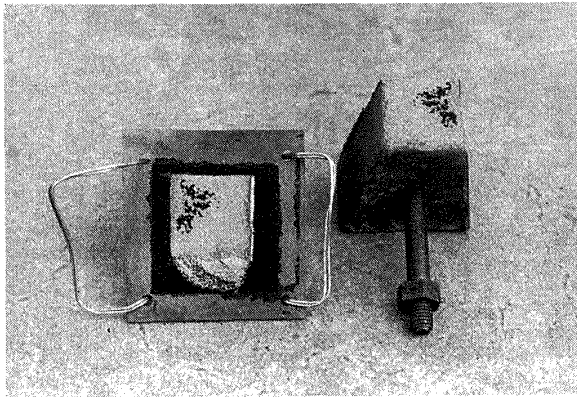
製作し、これに引張荷重をかけた際の探傷図形の変化を観察した。その結果を図 10 に示す。

図 10(a)にはゲインを 1/10 にした場合の結果をも共に示しているが、両者は定性的に傾向が一致している。図 10(a)~(d) からわかるように、負荷前から破断にいたるまで、特に変化はみられなかった。破断後、A-2 試験片では飽和長さが減少、A-2 試験片では増加、B-1 試験片では増加、D-2 試験片では減少している。従って飽和長さのこのような測定によって、ライナ~推進薬間の欠陥を検出することは困難である。また、破断前においては、引張荷重によるライナ、推進薬の音響インピーダンスにはあまり変化がないと考えられる。このことは超音波探傷法にとって重要である。もし、荷重によって、音響インピーダンスが大きく変化するならば、超音波探傷法は応力測定には利用できるが、欠陥検出には役立たなくなるおそれがある。

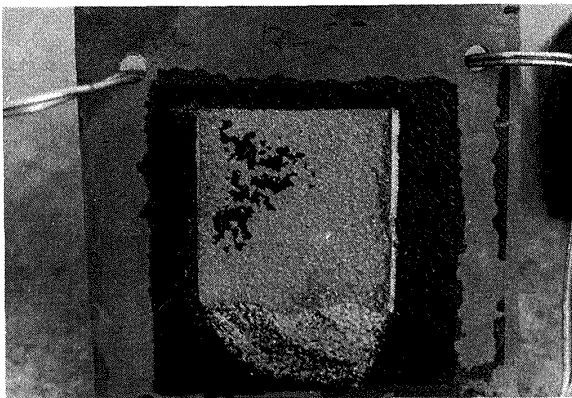
超音波探傷試験片(2)の荷重による破断面を図 11 に示す。B-2 試験片をのぞいてすべてライナ~推進薬境界から推進薬側に 0.1~0.2 mm 入った所での破断が、破断面の大部分を占めている。B-2 試験片は破断面の一部でライナ~推進薬境界からライナ側に 0.1~0.2 mm 入った所で破断している。いずれにしても破断面はライナ~推進薬境界の近傍で、この境界にほぼ平行に存在する傾向があることが確かめられた。この破断面は通常の引張試験による破断面より滑らかである。このことは、ライナ~推進薬間境界近傍での破断が、境界近傍以外での破断とは異なる過程を進行し、従って、前述の荷重試験中に音響インピーダンスにあ



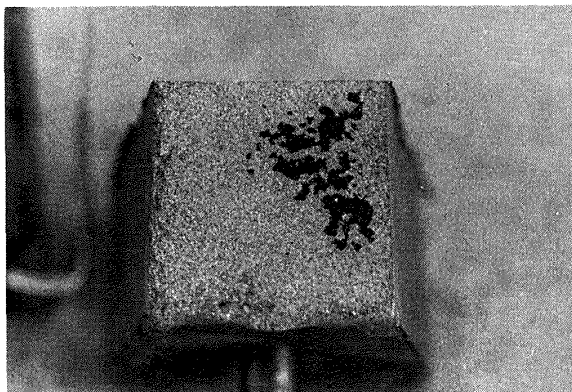
① 各試験片の破断の様相



② B-2 試験片



③ B-2 試験片のライナ側



④ B-2 試験片の推進薬側

図 11 ライナ～推進薬境界の破断面写真

まり変化がないことを暗示している。

また、ライナ～推進薬境界の欠陥がその境界にほぼ平行に存在することと、ライナと推進薬の音響インピーダンスにあまり差異がないことから、図 5 に示した超音波探傷試験片 (1) のライナに接している空気は、欠陥内部の何らかの気体に対応させることができよう。つまり、ライナの厚さの位置に欠陥が存在すると見なすことができよう。

6.2 ライナの厚さが探傷図形に及ぼす影響

6.1 においても述べたが、ライナの厚さの増加にとりも探傷図形の飽和長さが単調減少するのであるかもしれない。もし、そうならば、ある飽和長さに対するライナの厚さは一義的に定まるので、図 8 の曲線をより精密に求めれば、鋼鉄板の極く近傍 (約 0.5 mm 以内) で、鋼鉄板に接着したライナの厚さを検知することができ、従って鋼鉄製ケースを用いた固体ロケット・モータの、ケースの極く近傍でケースに平行な欠陥を検知できるであろう。そこで、この単調減少性の確認試験を行なった。図 5 の超音波探傷試験片 (1) でライナの厚さ 3 mm 程度のもの 3 個を用意し、これをフライス盤により鋼鉄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 ± 0.01 mm と考えられ、図 8 の場合より精度が高い。3 個の試験片の結果を図 12(a), (b), (c) にそれぞれ示す。これら 3 個の試験片の結果から、ほぼ再現性の確認ができる。さらに、ここに示した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と思われる。従って単調減少性を利用しての探傷は不可能である。

しかし、単調減少性でなくても、図 12 の曲線や探傷図形の性格を明らかにできれば、それを利用しての探傷は必ずしも不可能ではない。そこで、これらの曲線と探傷図形の性格を以下に示すが、これらは鋼鉄板の厚さを 5.25 mm に変更した場合にも、図 12(d) に示すように確認されうる。したがって、これらは特定の鋼鉄板の厚さによるものではない。

(1) この周期性は、ライナ内部における超音波の波長の 1/2 に等しい周期性である。

周波数は 5 MHz

ライナ内部での音速は約 1.5×10^3 m/s

故に、ライナ内部での波長は約 0.3 mm

一方、図 12 から探傷超音波の周波数が 5 MHz の場合の曲線の周期成分の波長は約 0.15 mm

(2) ライナの厚さが零から増加して行くとき、曲

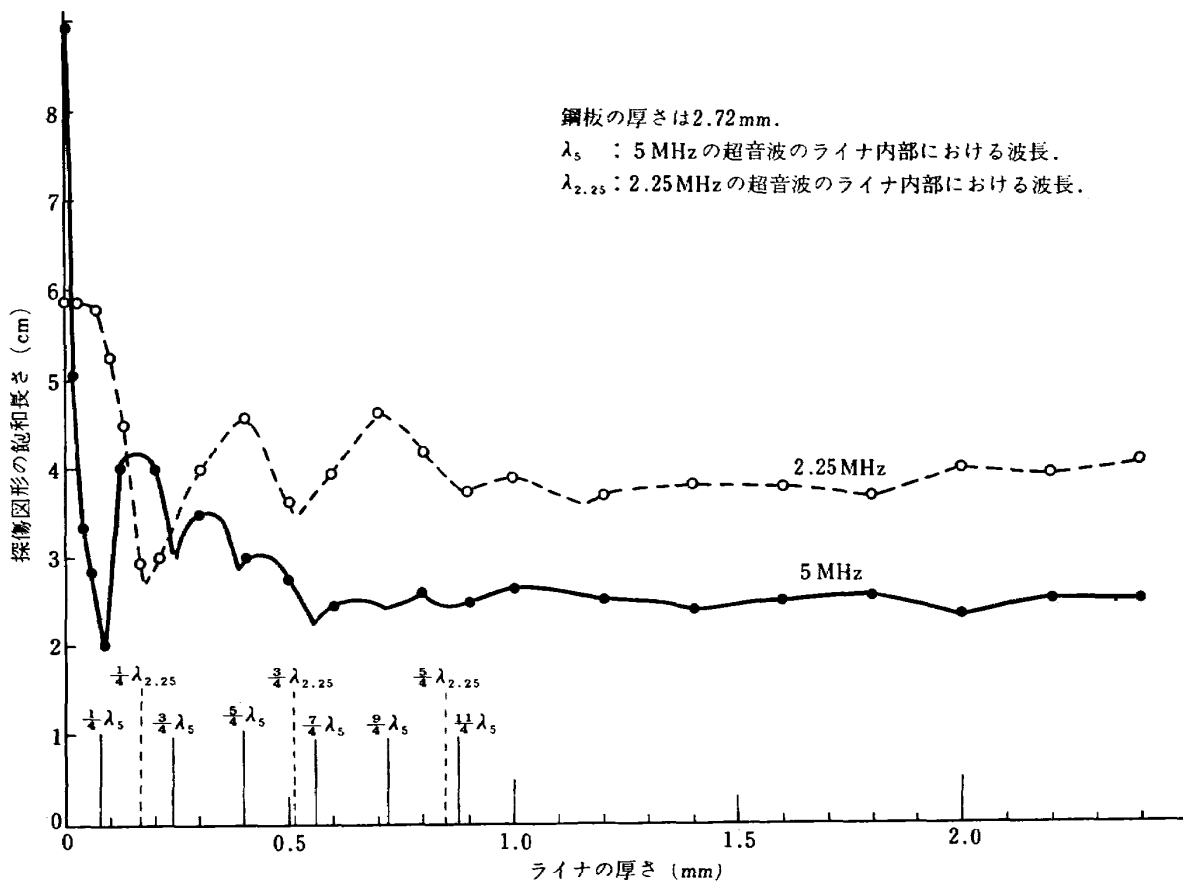


図 12(a) 超音波探傷試験片 (1) のライナの厚さの減少にともなう探傷図形の飽和長さの変化

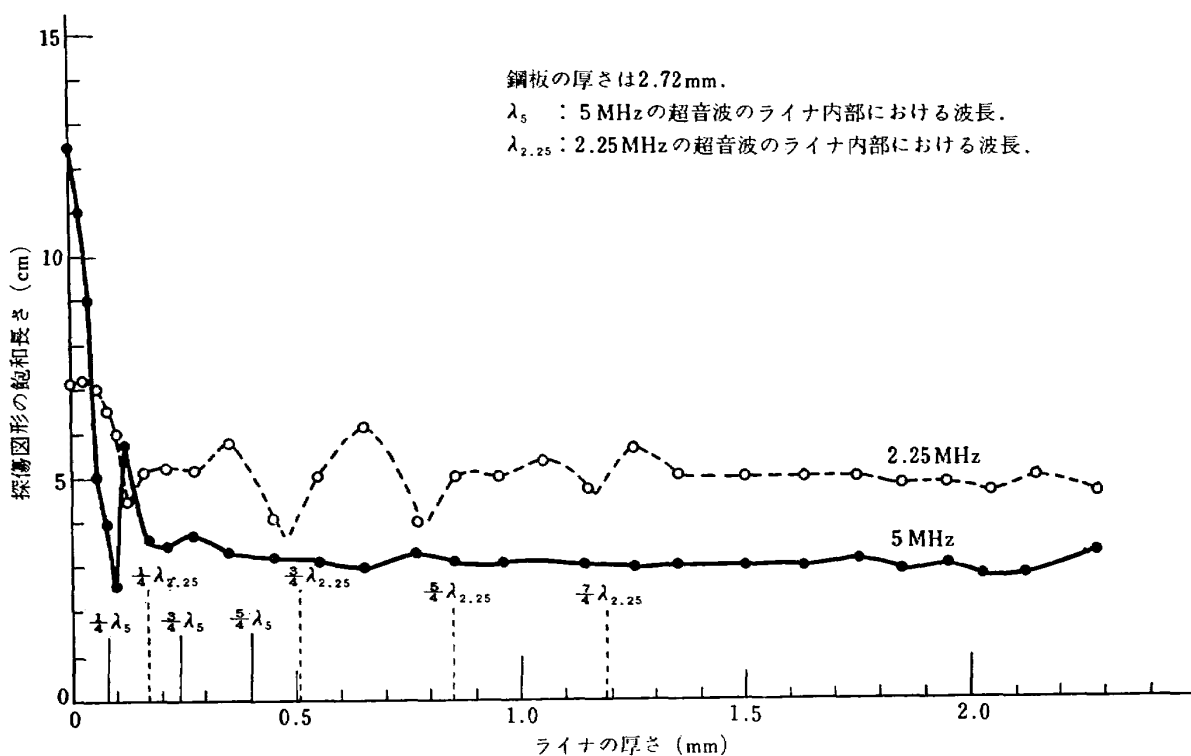


図 12(b) 超音波探傷試験片 (1) のライナの厚さの減少にともなう探傷図形の飽和長さの変化

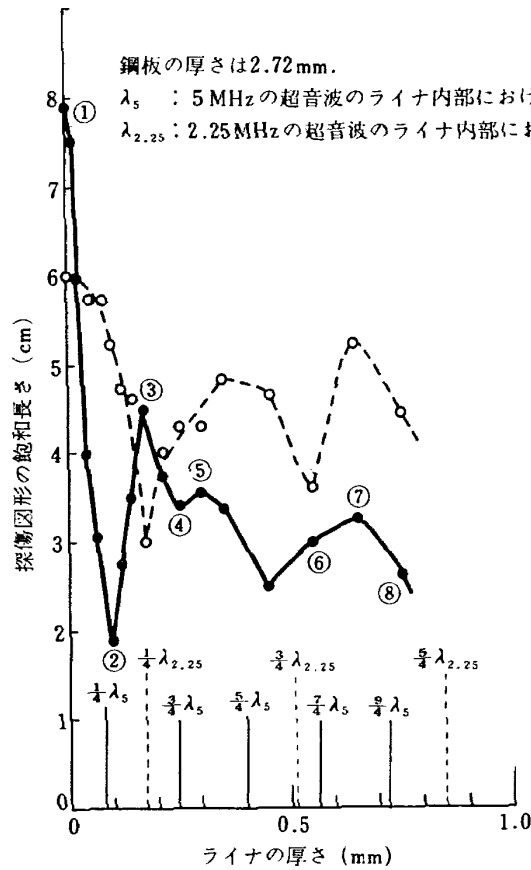


図 12(c) 超音波探傷試験片(1)のライナの厚さの減少とともに探傷図形の飽和長さの変化

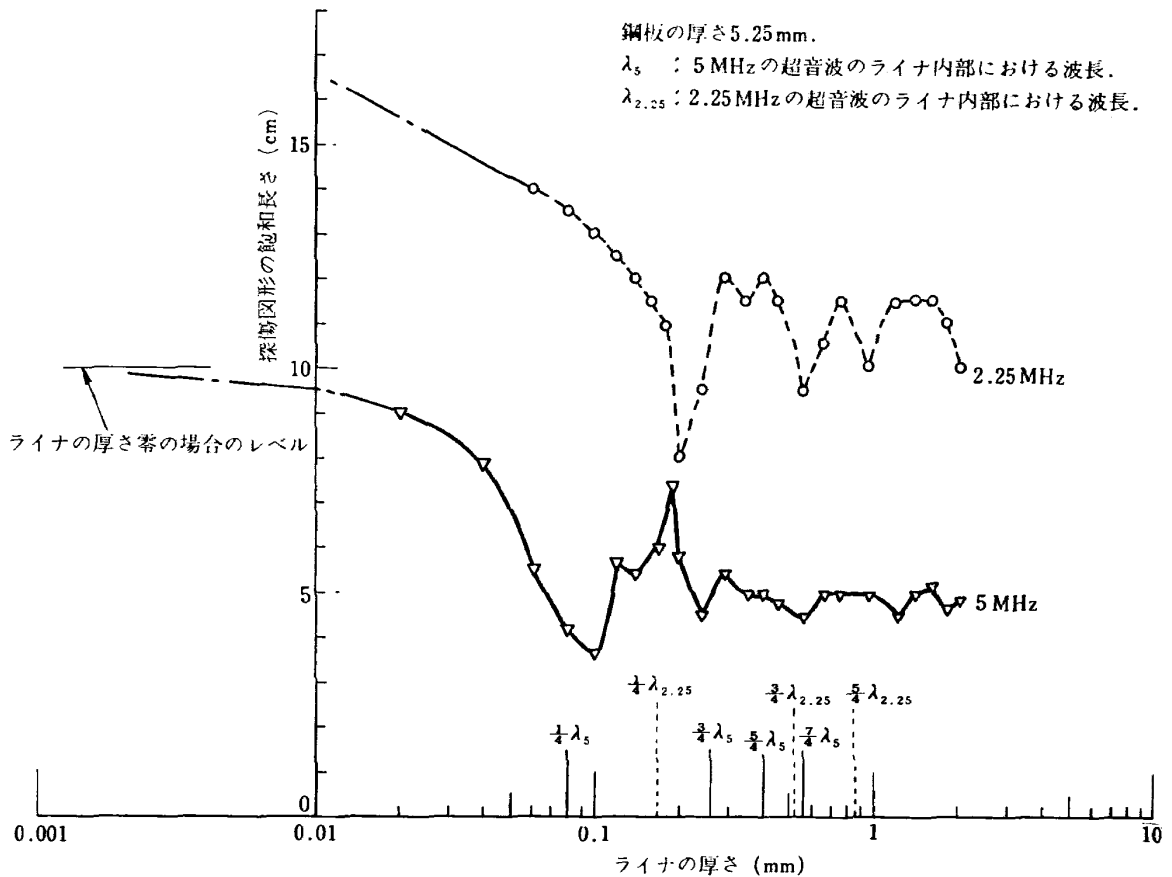
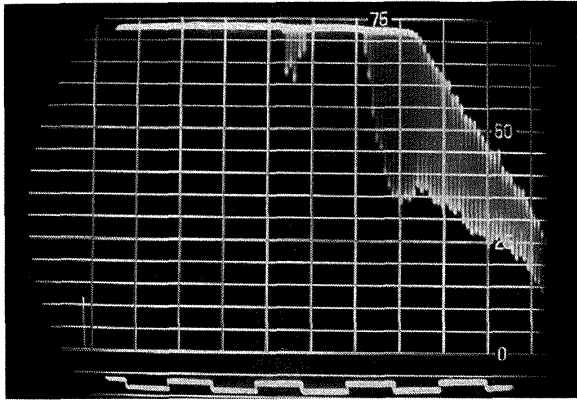
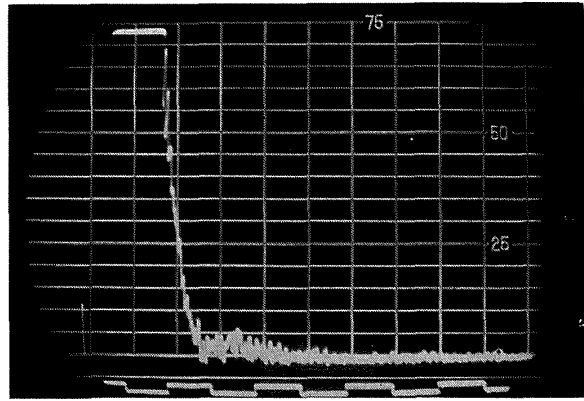


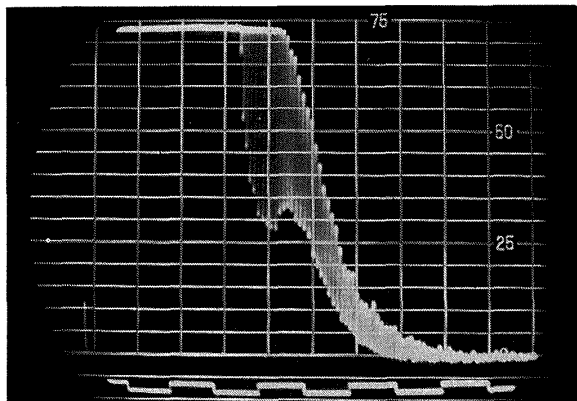
図 12(d) 鋼板の厚さ 5.25 mm の超音波探傷試験片(1)のライナの厚さの減少とともに探傷図形の飽和長さの変化



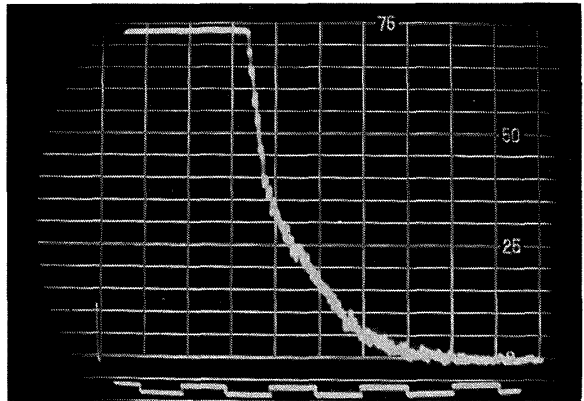
①の探傷図形



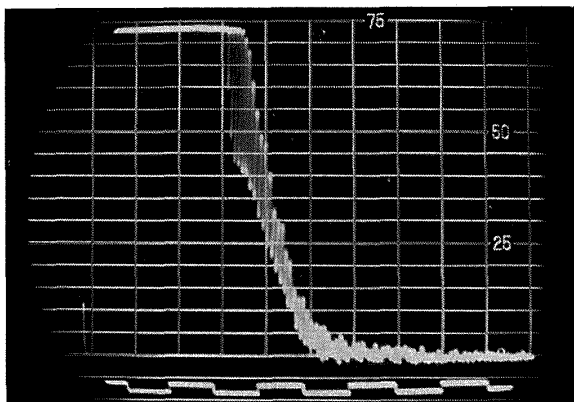
②の探傷図形



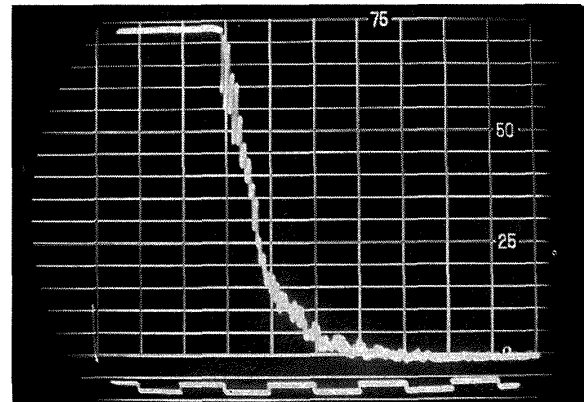
③の探傷図形



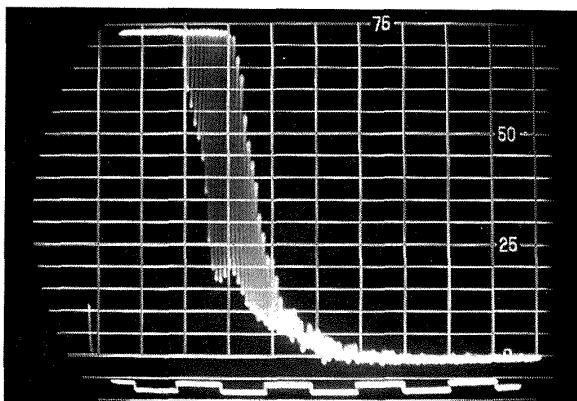
④の探傷図形



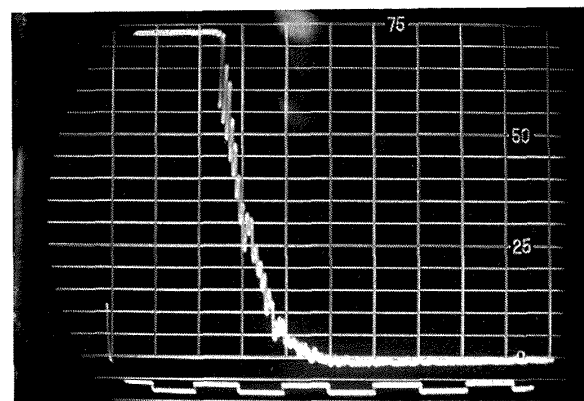
⑤の探傷図形



⑥の探傷図形



⑦の探傷図形



⑧の探傷図形

図 13 図 12 (c) の山と谷の探傷図形

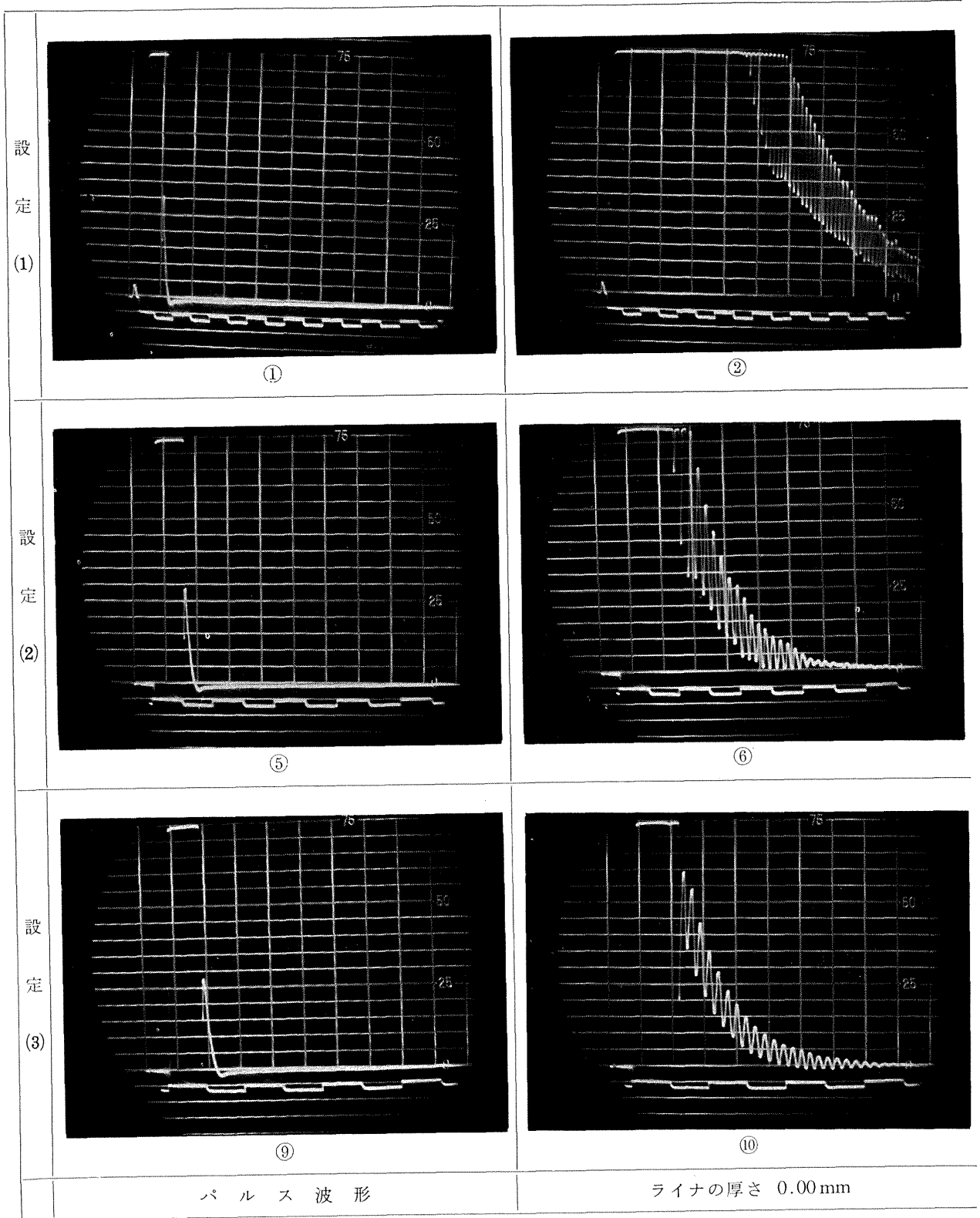
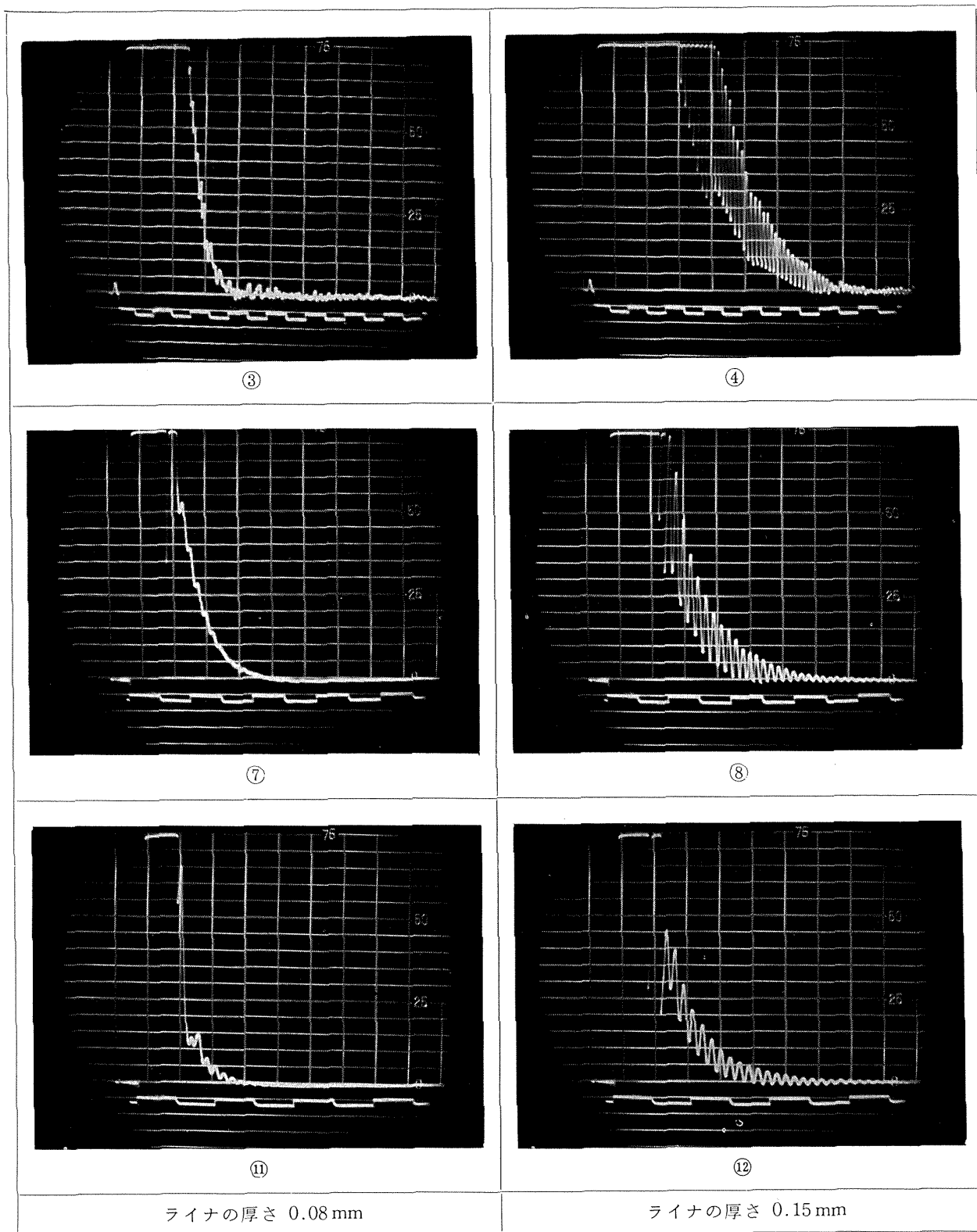


図 14 探傷器の利得の設定を変えた場合の探傷図形の変化



(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 6.8×10^{-6} sec, 4.1×10^{-6} sec, 3.2×10^{-6} sec である。)

線の最初の落込位置は $1/4$ 波長のところである。

周波数は 5 MHz, 従って $1/4$ 波長は約 0.08 mm
 曲線の最初の落込位置は約 0.1 mm

前節に述べた A-2 試験片の特異な測定結果は、上述の (1), (2) により説明できる。ライナの厚さが 0.08 mm に近いために飽和長さが極めて小さく測定されたのである。そして厚い推進薬を直填したことにより、ライナ～推進薬境界での反射率が減少し、特異性が薄れたのであろう。なお、A-1, A-3 試験片においても、ライナの厚さは $1/4$ 波長に近く、ほぼ A-2 試験片と同様な条件下にあるが飽和長さは大きい。この差はライナの厚さの精度が高くないことによると思われる。これらの試験片は前述のように、ライナを直填しているので、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、つまり約 $\pm 1/8$ 波長程度である。このため、A-1, A-3 試験片は、ライナの厚さが $1/4$ 波長から相当にずれていたと考えられる。一方フリス盤による加工では精度は ± 0.01 mm 程度になるので、図 12 では周期性がかなりはっきり現われたのであろう。

(3) 周期の山と谷とでは、探傷図形にも特徴的な周期性が認められる。

図 12(c) の山に ①, ③, ⑤, ⑦, 谷に ②, ④, ⑥, ⑧ と番号がついてあるが、その番号に対応する山谷の探傷図形を図 13 に示す。ただし、ライナの厚さの減小の刻みが荒いことや、測定誤差等のために、図 12(c) の曲線の山谷は (1) で述べた周期性とは必ずしも正確に合致しているわけではない。図 13 から、山においてはライナが接着していない探傷図形(図 3(e))と同様な探傷図形が認められる。一方、谷においては図 3(d) と同様な探傷図形が認められる。このことから図 3(d) のような探傷図形は、この探傷条件(特に探傷周波数)においては、ライナあるいは固体推進薬中の欠陥と、鋼鉄製ケースとの距離が特定(波長の $1/4$ の奇数倍)の場合に得られると考えられる。

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、ライナの厚さ 0.08 mm と 0.15 mm (光学顕微鏡により測定確認)の超音波探傷試験片(1)を作製し、超音波探傷器の利得等の設定を 3 種類採用して、その入射パルス、ライナの厚さ零の場合の探傷図形と共に、これらライナの特定の厚さの試験片の探傷図形を撮影し、図 14 に示す。これらの探傷図形から、超音波探傷器の設定を多少変えても、(3) にのべた探傷図形の特徴的な周期性は保たれるこ

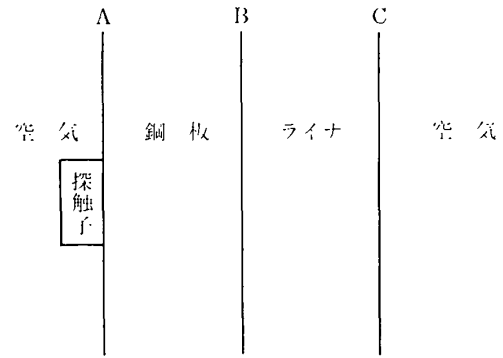


図 15 超音波探傷試験の系

とがわかる。

6.3 実験結果に対する推論

これまで述べたような実験結果に対して、理論的考察を行ない、実験結果を一応矛盾なく説明できる推論を作り上げたので、以下に述べる。

6.3.1 入射超音波の挙動と反射波の命名法

入射される超音波パルスは $1.5 \mu\text{sec}$ 程度の時間幅をもっている。つまりパルスは数波長程度の長さの波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る。

超音波探傷試験片(1)の超音波探傷試験の系は図 15 のように示される。空気～鋼鉄板～ライナ～空気(一部は油を介して探触子)の境界をそれぞれ A, B, C と名づける。C の右側の空気は欠陥内部の気体を想定したものである。

A から入射したパルスは B に達し、ここで一部は反射し一部は透過する。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 で反射(C では音響インピーダンスを考慮すると、表 1 に示すように 100% 反射するとも考えても良い)して B にもどり、B で再び反射波と透過波とに分れる。反射波は再び C に達し、ここで反射して B にもどる。ここでさらに反射波と透過波とに分れる。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、しだいに A にもどってくる。これらの波を、その経路にしたがって、A B C B A, A B C B C B A, A B C B C B C B A 等と表わす、そして、これらの波に、C における反射の回数により

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

表 2 各次数反射波の位相関係 (付図 12 の BC間が 1/4 波長の場合)

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

と名づける。次数の増加にしたがってAに帰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、また波が通過する経路が長くなるので、減衰が大きくなるからである。

6.3.2 各次反射波の位相関係

さて、B～C間の距離が1/4波長である場合の各次反射波の位相関係を調べてみよう。第0次反射波にはBにおける位相反転が1回ある。第1次反射波にはCにおける位相反転が1回とB～C間往復による経路差1/2波長とがある。第2次反射波にはCにおける位相反転2回と経路差1波長とがある。以下、同様にして第3次反射波、第4次反射波などの位相反転の回数と経路差とを数えることができる。それを表2に示す。

表2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。そのため、超音波探触子に受信される各次反射波の合成波は、第0次反射波より弱くなる。このことはB～C間の距離が1/4波長の奇数倍の場合にも同様である。一方、B～C間の距離が1/4波長の偶数倍の場合には、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次反射波より高くなる。またAに帰って来た波の一部はここで反射してBに向うが、Aにおける反射の際に位相が反転すると考えられるので、入射波と同位相となり、従って入射波の一部が強化されると考えれば、上述の内容には特に変更の必要はないであろう。

6.3.3 各次反射波の重畳関係

入射パルスの長さは有限であるので、あまり高次の反射波は、第0次反射波とは時間的に重畳しない。第0次反射波と第n次反射波との経路差はn/2波長であるので、入射パルスの長さがN波長とすると、ライナの厚さが1/4波長の場合、

$$\frac{n}{2} < N$$

を満足する第n次反射波のみが第0次反射波と部分的にもせよ重畳しうる。そして次数の小さい反射波ほど強さも大きく、重畳する部分も大きいので影響は大きい。

一方、B～C間の距離Dが1/4波長のM倍の場合、波長をλとして

$$D = \frac{1}{4} \lambda M$$

であり、入射パルスの長さをN波長として

$$2D = \frac{1}{2} \lambda M < N \lambda$$

を満足するようなライナの厚さの場合にだけ、第0次反射波と第1次反射波とは重畳しうる。第2次以上の反射波は、これよりさらにDが小さくなければ、第0次反射波と重畳しない。第n次反射波については

$$2Dn = \frac{1}{2} \lambda Mn / N \lambda$$

が重畳の条件式となる。そして

$$N - \frac{1}{2} Mn$$

の値が大きいほど重畳の効果が大きい。つまり、ライナの厚さが小さいほど、また反射波の次数が小さいほど、第0次反射波に及ぼす影響は大きい。

以上に述べた理由により、ライナの厚さが探傷超音波の1/4波長の奇数倍の場合には、多重反射の探傷図形において見掛上減衰が大きくなり、ライナの厚さが1/4波長の偶数倍の場合には減衰が小さくなる。そして減衰の大きさはライナの厚さによっても変わると推論される。これは、6.2で述べた(1)、(2)の実験結果と、図12の曲線の山谷が、ライナの厚さが増すほど小さくなることを説明している。

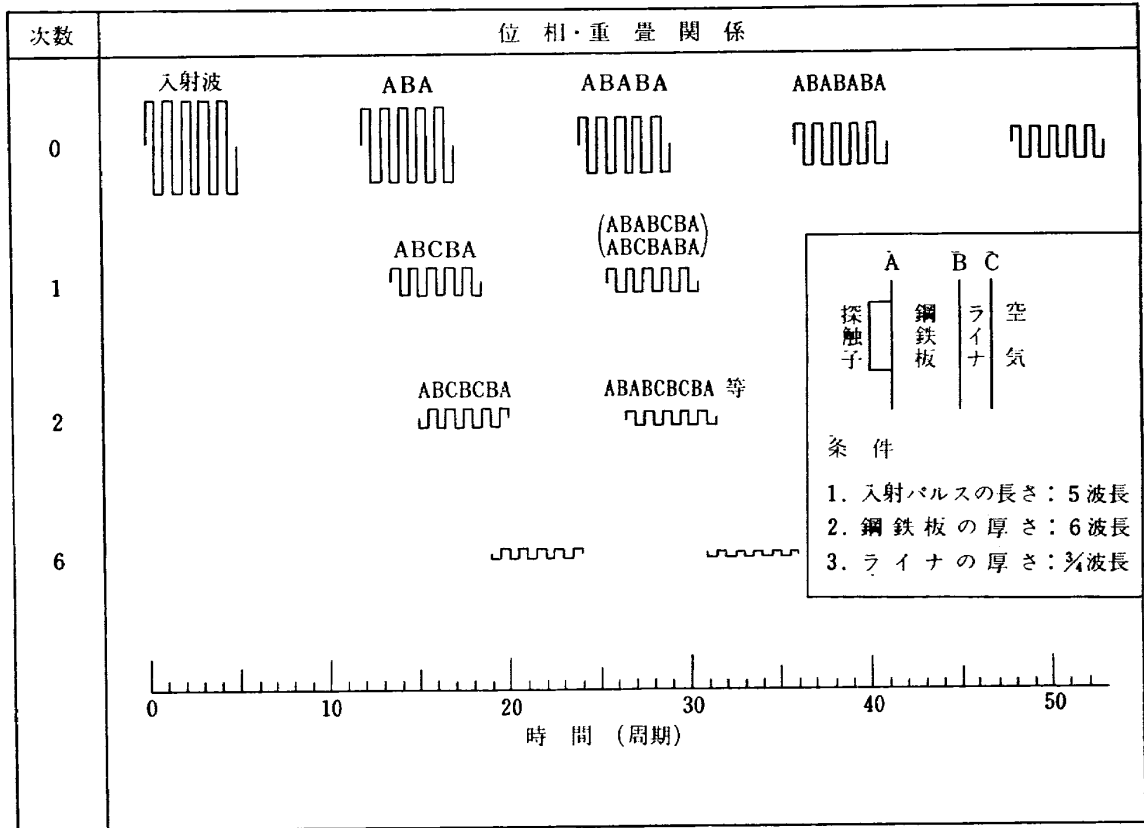


図 16 各次反射波間の位相・重畳関係

6.3.4 探傷図形の性格と位相・重畳関係

ここまで述べてきた位相・重畳を考慮した推論は、ライナの厚さが 1/4 波長の奇数倍の場合には山谷のはっきりしない探傷図形が得られ、偶数倍の場合には山谷のはっきりした探傷図形が得られること (6.3 の (3)の実験結果) をも説明できる。図 16 に示すように、奇数倍の場合には、第 0 次反射波のパルス時間幅 (図 16 では 5 周期分とした) 内では逆位相関係のために多重反射の探傷図形の山は低く押えられ、第 0 次反射波を探触子が受信しない時間 (図 16 では 7 周期分とした) 内では、低次反射波の第 0 次反射波と重畳しない部分や高次反射波により探傷図形の谷がうめられるため、山谷のあまりはっきりしない探傷図形が得られる。(さらに高次の反射波は次回の第 0 次反射波と重畳するなど、影響は後々まで及ぶが、次数が高くなると波の強さが小さくなることと、各回受信に際して、それぞれ比較的強い低次反射波が生ずるので、次回受信の第 0 次反射波への影響は無視しうると考えられる。)一方、偶数倍の場合には、低次反射波の一部や高次反射波は確かに谷をうめるが、高次反射波より強い低次反射波のかなりの部分により山が高められるので、山谷がかなり強く探傷図形に現われるのであろう。

6.4 推論の検証と考察

ここまでは 5. で述べた方法〔II〕に従って、探傷超音波周波数 5MHz だけを用い、探傷試験片を変化させた実験にもとづいて述べてきた。しかしながらこれだけでは必ずしも十分でなく、周波数の変更や周波数分析など (方法〔I〕) によって推論の検証をすることが望ましい。

そこで、探傷超音波の周波数を 2.25MHz に変更して、5MHz の場合と同様な実験を、5MHz の場合と同一試験片に対して、同一条件で、並行して行なった。その結果を図 12 に 5MHz の場合の結果と共に示した。2.25MHz の超音波を使用した場合には、5MHz の場合に比して探傷感度が落ちることと、入射パルスの波形が良くないことのため、5MHz の場合ほど明確には探傷図形に変化が表われないが、それでも、5MHz の場合と同様に位相・重畳を考慮した推論と実験結果とが矛盾しないことが十分確認できた。また、1MHz の探傷超音波をも用いてみたが、探傷感度が悪く、探傷図形にはほとんど変化が表われなかった。

ところで、ライナの厚さが 1/4 波長の偶数倍に近い場合の探傷図形は、ケース～ライナ間に欠陥が存在する場合に似ており、ライナの厚さが 1/4 波長の奇数倍に近い場合には、欠陥のない場合の探傷図形に似てい

る。従って、ライナあるいは推進薬内部で、鋼鉄製ケースから $1/4$ 波長の偶数倍の距離だけはなれた欠陥と、ケース～ライナ間の欠陥との判別が困難であり、また奇数倍の距離だけはなれた欠陥の場合には、その存否の判別が困難となる。しかしながら、この二つの困難は次の方法によって除かれうる。例えば、図 12(c) からもわかるように、探傷周波数が 5MHz の場合と 2.25MHz の場合とでは、位相・重畳関係が異なる。ライナの厚さが 5MHz で $1/4$ 波長の場合 (図 12(c) の ②) と $2/4$ 波長 (図 12(c) の ③) とを見れば、② から欠陥なしと判断することは、 2.25MHz の曲線を見れば飽和長さが大きいので、ありえない。同様に③ からケース～ライナ間に欠陥ありと判定することも、 2.25MHz の曲線を見れば飽和長さが小さいので、ありえない。つまり、周波数の異なる 2 種類以上の探傷超音波を用いれば、上述の困難を解消させることができるので、超音波探傷法が従来ある程度有効とされてきたケース～ライナ間の欠陥の検知の信頼性を向上させるだけでなく、従来困難とされてきたライナ～推進薬間の欠陥の検知の可能性があると推定される。

さて、以上のようにこの推論はある程度正しいと考えられるが、なお推論の域を出るものではあるまい。この確認には次の実験を行えば良いであろう。前述の実験ではライナの厚さを少しずつ変えて、探傷図形の変化を観察したが、この確認試験では、ライナの厚さを一定にしておき、探傷超音波の周波数を連続的に変化させて、探傷図形の変化が推論と一致するか否かを調べるのである。周波数の連続的変化は $1/4$ 波長の長さの連続的変化を意味するから、ライナの一定の厚さに対しても位相・重畳関係は周波数の変化と共に変化するからである。しかも、もしこの推論が正しければ、そして周波数の連続的変化 (共振法) と多重反射法との組合せの可能な超音波探傷系* を構成することができれば、単に欠陥の二次元的位置だけでなく、多重反射法では普通困難である欠陥の三次元的位置 (つまり、鋼鉄板から欠陥までの距離をも含む) を検知することができるはずである。従って、上述のような確認試験が行なわれることが望ましい。

さらに入射波、反射波の周波数分析等を行えば、

* これは基本的には共振法による超音波厚み計である。従来の共振型厚み計によるライナ～推進薬間の欠陥の検知の報告が見当らないのは、探傷感度が不足している等のためと考えられる。ここでは多重反射法と共振法とを結合することにより、第 0 次反射波と第 1 次以上の反射波との干渉現象を高感度に検知することが要求されている。

単に前述の推論の確認だけでなく、金属材料において行なわれているように¹⁵⁾¹⁶⁾、欠陥の形状寸法、性格をも検知し得る可能性がある。このことは欠陥についての安全基準の確立のためだけでなく、個々の欠陥を安全基準と照合するためにも極めて重要であり、これが実用化されれば固体ロケット・モータの超音波探傷技術に大きな進歩をもたらすだろう。

なお、ここでの実験では、欠陥は空気等の気体によって満たされていると考え、その考えに準じて超音波探傷試験片 (1) を作製した。しかしながら、実際の固体ロケット・モータにおいては、必ずしも欠陥は気体によって満たされているとは限らない。特に、き裂が閉じていて、き裂の両側が互いに密着している場合、さらに、そこに何らかの原因により生じた液体 (たとえば水分) が存在する場合には、超音波はそこであまり反射しないで、見掛上欠陥が存在しないかのような挙動をする。このような場合、超音波探傷法は誤まった結果を与えやすいので注意を要する。

さて、推論にしたがって図 3 の探傷図形のうち、未だ説明されていないものの説明を試みよう。図 3(c) のような探傷図形は、鋼鉄製ケースと欠陥との距離が $1/4$ 波長から少しずれている場合等に得られると思われる。つまり鋼鉄製ケース内部とライナや推進薬の内部とで何回か反射を繰返すうちに、位相がすこしづつずれて、一種のうなり現象を呈すると考えられる。また、図 3(b) については、多重反射的性格は強く残っているので、高次反射波や試料側面からの反射波等との干渉等¹³⁾¹⁴⁾ によると思われる。

7. む す び

固体ロケット・モータに対する超音波探傷法について実験、推論、考察を行ない、次のような結論が得られた。

在来型の超音波探傷器を使用した場合には、

(1) 固体ロケット・モータのケース～ライナ間の欠陥は、欠陥のき裂が開いている場合には、多重反射法により簡単に検知できるであろうことが追試推定された。

(2) ライナ～推進薬間の欠陥については、き裂が開いていても、超音波探傷法による検知はかなり困難である。一つの特定の周波数の超音波による多重反射の探傷図形において、多重反射の過程での減衰量から欠陥の存否を推定することは危険である。

(3) 周波数の異なる 2 種類以上の探傷超音波による探傷図形を、超音波の位相・重畳関係を考慮して解

析すれば、ケース～ライナ間の欠陥の検知の信頼性を向上させることができるだけでなく、従来困難とされてきたライナ～推進薬間の欠陥の検知の可能性があると推定される。

一方、より高度な超音波探傷を行なうためには、

- ① パルス多重反射が可能であること
- ② 探傷周波数の連続変化が可能であること
- ③ 周波数分析器を内蔵し、共振周波数が直読できること

つまり、パルス型超音波探傷器と共振型超音波厚み計と周波数分析器とを総合した性能をもつ方向へ進むことが考えられる。このような性能をもつ超音波探傷器が実用化され、かつポータブル化でき、データの集積が進めば、在来型の超音波探傷器を使用した場合に比して、さほど複雑でない操作、作業でもって、固体ロケット・モータのより正確な、より高度な探傷が期待できよう。

おわりに、本研究を進めるにあたり、終始かわらぬ御指導をいただいた宇宙研究グループ河崎俊夫総合研究官、中井映一機体第一部長、塙武敏第12研究グループリーダー、五代富文第2研究グループリーダーに深く感謝いたします。また、種々の検討、協力をいただいた大竹邦彦、越出慎一、遠藤修司の各技官に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) T. Godai: Flame Propagation into the Crack of Solid-Propellant Grain, AIAA Journal, Vol. 8, No. 7, July 1970, pp. 1322—1327.
- 2) たとえば, J. M. Amaral & B. L. Lamb: Development of Nondestructive Test Techniques for Large Solid Propellant Grains (Final Report), NASA CR 72840. March 1971.
- 3) 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.
- 4) J.C. St. Clair: An Infrared Method of Rocket Motor Inspection, Materials Evaluation, August 1966, pp. 425—430
- 5) たとえば
実吉ほか編: 超音波技術便覧, 改訂版, 日刊工業新聞社 (1967) pp. 720—745.
日本非破壊検査協会編: 非破壊検査便覧, 日刊工業新聞社 (1967) pp. 427—583.
- 6) B. Harris-Maddox: The Ultrasonic Testing of Solid-propellant Rocket Motors, Materials Evaluation, February, 1966, pp. 101—104.
- 7) 古田敏康, 野口義男: フェノール系複合材の環境試験結果, 航技研報告 TM-165 (1969).
- 8) N. D. Passerell & A. C. Foster: Ultrasonic Inspection of Large Solid-Fuel Booster Nozzles, Materials Evaluation, March (1967) pp. 53—57.
- 9) R. C. Stinebring & R. H. Harrison: Nondestructive Testing of Rocket Components Using Microwaves and Low-Frequency Ultrasonics, Materials Evaluation, January (1965) pp. 17—23.
- 10) 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.
- 11) 遠藤修司ほか: 固体ロケット推進薬の強度解析, 第14回宇宙科学技術講演会講演集 (1971年2月) pp. 169—172.
- 12) 鳥飼安生: 層状平板における音波の通過, 日本音響学会誌, 第8巻第1号 (1952) pp. 21—27.
- 13) 日本学術振興会編: 超音波探傷法, 丸善(昭和31年) pp. 138—140.
- 14) 栗谷丈夫ほか: 超音波による残留応力の測定, 日本材料強度学会誌, Vol. 5, No. (1971) pp. 99—105.
- 15) 加藤勉ほか: 超音波周波数分析法による溶接欠陥種類の判別, 非破壊検査, 第20巻第9号(1971) pp. 493—501.
- 16) H. L. Whaley & Laszlo Alder: Flaw Characterization by Ultrasonic Frequency Analysis, Materials Evaluation, August (1971) pp. 182—192.

附録 超音波探傷法

(1) 透過法

附図1(a)のように被検査体の一面から超音波を入射し、向い合った他端面に到着する音波の強さによって中間の傷の有無を推定する方法である。比較的簡単なので古くから各国で提案されていたが、精度不足などのため広く実用されるに至らなかった。

しかし最近では著しく改良され、パルス反射型探傷器の欠点を補って特殊な目的に使われている。

(2) パルス反射法

測深機と同様の原理で、超音波パルスを附図1(b)、(b')のように被検査体の一面から入射させ、他端面および中間の傷からの反射波の状況をブラウン管上で観察する方法で、反射型超音波探傷器(または単に超音波探傷器)と呼ばれて広く使われている。

(3) 共振法

附図1(c)のように被検査体中へ入射する超音波の波長を連続的に変え、半波長の整数倍が被検査体の厚さに等しくなると共振をおこすことを利用して、厚さの測定を行なうもので、被検査体中のラミネーション検出、二金属間の接着状況検査など探傷にも使われるが、俗に超音波厚み計と呼ばれている。

(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) パルス電圧発振器(水晶製等の送波器に加えるべき高周波の短い電圧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。)
- (ニ) ブラウン管指示器(普通のブラウン管オシログラフと同様のもので、蛍光面に緑色の光点が現われ、波形を画かせるようにしたもの。)
- (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、パルス発射の繰返し間隔をつかさどる。)

(ケ) 横軸掃引器(時間軸電圧発生器ともいい、ブラウン管の光点が蛍光面を一定の速度で横方向に移動していくための電圧を作る。)

(ク) 目盛電圧発生器(ブラウン管光点を一定時間毎に小さく縦振れさせるためのもので、この縦振れを距離目盛という。)

これらの部分は附図2に示す如く結合されている。これを電源につなぐと、超音波パルスの発振、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返される。

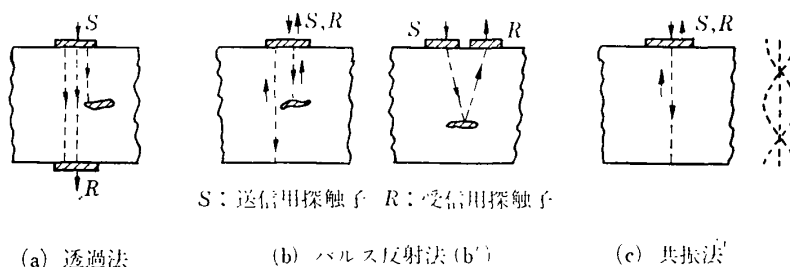
(5) 超音波探傷器の作動

探触子を材料表面に油のような適当な液体で密着させておくと、附図2において⇒印の如く同期制御器から指令パルスが出た瞬間に

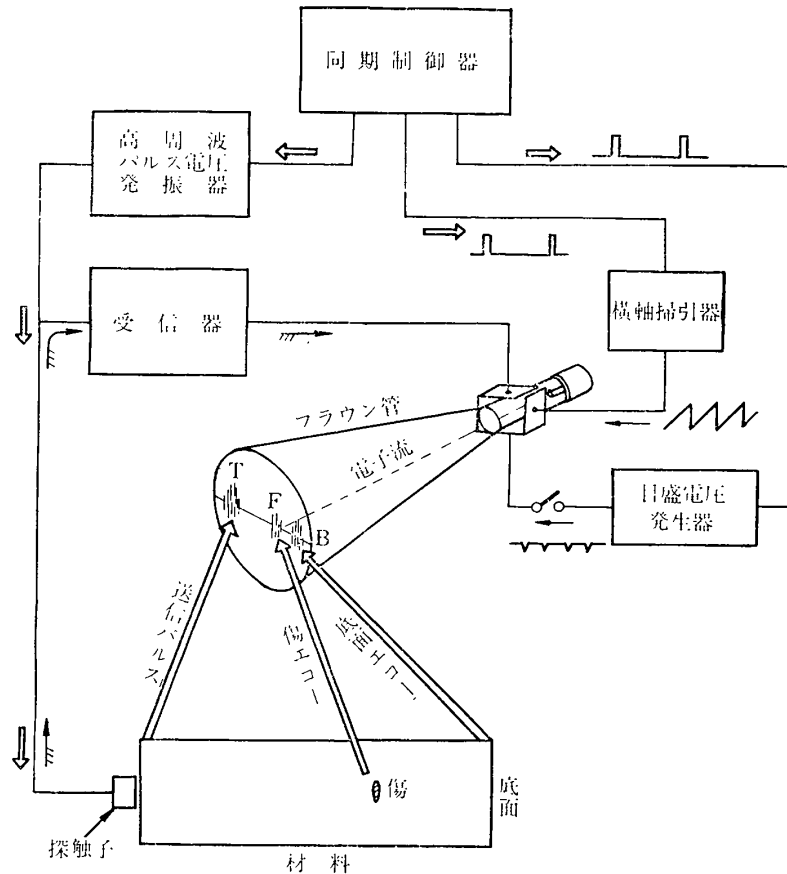
- (イ) 発振器が短い振動電流を発生し、
- (ロ) 探触子は超音波パルスを発射する。これと同時に
- (ハ) 横軸掃引器は直線的に大きくなる電圧の印加を開始し、それによって
- (ニ) ブラウン管の光点はTの位置から横方向に走り出す。その時には受信器にも発振器からの高周波の電圧が入り込むので、
- (ホ) ブラウン管の光点が振方向にも振れる。

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、⇒印の如く電流が流れて、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へ走った時であるから、図示のFの如く、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、材料の底面での反射波(底面エコー)が探触子に受信されると、光点は図示のBの如く縦振れする。これで第一回の作動が終る。

以上の第一回作動が終ったならば、再び同期制御器



付図1 3種の超音波検査法



付図 2 パルス式超音波探傷器の構成

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。このように繰返して行くと、探触子を一定の所にあてている限り、ブラウン管螢光面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ながめることができる。このような図形を探傷図形という。

(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振から材料底面のエコーが受信されるまでで第一回の作動が終ると説明したが、実は多重反射という現象が材料の中で起る。傷または底面からのエコーが探触子のあたっている材料表面へきて探触子に感度を与えると同時に再び反射し材料中を伝播する。すなわちこれは、発振器が発振しないのに最初の送信超音波パルス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、この波によって再び傷および底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返えされる。これを多重反射という。一般に底面のエコーは傷のエコーよりも強いのが普通であるから、底面の多重反射は相当回数繰返して後、減衰して見えなくなる。超音波パルス発振は、これらの多重反射が減衰して見えなくなる時間と残像現象を考慮して同期制御器の繰返し周期を決めてある。

多重反射の探傷図形は底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なうことができる。接着部が良好な接着状態であれば、接着面での反射波が弱くなり、多重反射が早く減衰するようになる。逆に接着部がはがれていれば、そこでの反射波は強くなり、多重反射があまり減衰しないようになる。このような検査法を多重反射法といい、本報告において固体ロケット・モータの接着部の検査に採用されている。

TR-298	航空機用対気速度計の位置誤差について Experiment on Airspeed Calibration Procedure	1972年12月	幸尾治朗, 岡遠一 塚野雄吉, 矢沢健司 小野孝次
TR-299	遷音速における二次元翼の抵抗発散 On the Drag Divergence of Two Dimensional Airfoils at Transonic Speeds	1973年1月	神谷信彦
TR-300	そり角の小さい遷音速二重円弧二次元翼列実験 Experimental Investigation of Two-Dimensional Cascade Performance with Thin and Low-Cambered Double-Circular-Arc Blade Sections at Transonic Inlet Mach Number Range	1972年10月	坂口一, 近藤博 高森晋, 岩下敬吾
TR-301	観測系の評価に関するひとつの数学的理論 A Mathematical Theory on Evaluation of Observation Systems	1972年9月	木村武雄
TR-302	Kalman-Bucy フィルターによる誘導誤差の推定 Estimation of Guidance Errors by Kalman-Bucy Filtering Technique	1972年10月	村田正秋
TR-303	ジンバルエンジン駆動用油圧制御系に適した IDPF サーボバルブの研究 Studies of IDPF Servovalve Appropriate for Gimbaled Engine Positioning Hydraulic Control Systems	1972年11月	畑山茂樹
TR-304	ドラッグカップ型ジャイロモータの同期化制御の研究 Study on a Synchronizing Control of a Drag-Cup Gyro Motor	1972年11月	山田博
TR-305	オイラー角表示による座標変換のアルゴリズム Coordinate Transformation Algorithm by the Eulerian Angles Representation	1972年11月	狼嘉彰
TR-306	フライングテストベッド用付帯設備の計画 System Design of Facilities for VTOL Flying Test Bed at National Aerospace Laboratory	1972年11月	滝沢直人, 渋谷昭義 小川敏雄, 藤枝郭俊 甲斐忠夫, 宮本義人 田辺義一, 小野幸一 竹内和之
TR-307	プラズマ風洞アーク加熱器, ノズル流およびノズル噴流に対する諸考察 Some Characteristics of the Arc-Heater Nozzle Flow and the Underexpanded Jet in NAL 60kW Plasma Wind Tunnel	1972年12月	松崎利一, 平林則明

航空宇宙技術研究所報告 308 号

昭和 47 年 12 月 発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺町 1880
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)☎182

印刷所 有限会社啓文堂 松本印刷
東京都文京区水道 2-7-5
