

ミクロ損傷の非破壊検出法の開発

—超音波検出システムによるクリープ疲労損傷検出試験—

1996年10月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

システム開発推進部技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to : Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-machi, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-Ken 311-13, Japan.

動力炉・核燃料開発事業団

(Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1996

公開資料

PNC TN9410 96-288

1996年10月

ミクロ損傷の非破壊検出法の開発

——超音波検出システムによるクリープ疲労損傷検出試験——

川崎 弘嗣*

要旨

FBRプラントの余寿命診断法の開発にあたり、寿命初期の段階から余寿命を評価するため、クリープ疲労による材料の損傷をミクロレベルから非破壊的に検出する方法を開発している。このため、損傷に支配的と考えられるキャビティを模擬して作製した空孔模擬材とクリープ疲労損傷を受けた試験片に関して、周波数特性変化の検出に有効と考えられるバースト波を用いた超音波検出を行い、クリープ疲労損傷の検出可能性と検出された信号に対して損傷を有効に評価できるパラメータについて検討した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) キャビティ発生を模擬してミクロ空孔発生量を変化させた3種類の空孔模擬試料に対し、空孔面積率が 10^{-5} 以下になると超音波音速の変化量は捉えにくいことがわかった。
- (2) 底面エコーの周波数解析からパワースペクトルのピーク周波数を評価した結果、50MHzセンサーの測定において空孔発生量に相関して顕著な相違が検出できた。
- (3) クリープ疲労寿命途中でのいくつかの段階における損傷材に対して超音波検出を行った結果、損傷の進行に相關したパワースペクトルのピーク周波数変化が検出できた。
- (4) 底面エコーのフーリエスペクトルの周波数帯域面積をパラメータとして評価した結果、空孔発生量の増加やクリープ疲労損傷の進行に対して低下することを確認し、寿命前期での損傷量変化を評価できる見通しを得た。

*)動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター 安全工学部 機器・構造安全工学室

Development of nondestructive techniques for micro-damages

— Application of ultrasonic detection method for evaluation
of creep-fatigue damage —

Hirotsugu Kawasaki*

ABSTRACT

In order to develop remaining life assessment of FBR plant, application of nondestructive detection for creep-fatigue damage are studied. To evaluate remaining life from early stage of life, nondestructive detection technology was needed to detect for micro-damage. So, the ultrasonic detection system generated burst wave-form which was used effective frequency analysis, was applied to evaluate damage for the specimen with pores imitated cavity which was creep-fatigue damage dominantly and the specimen of creep-fatigue damage. The feasibility for creep-fatigue damage detection and the estimation parameter for quantitative damage detection from bottom echo were evaluated. The results are as follows.

- (1) The ultrasonic detection were carried out for three types specimen with pores imitated cavity. It was found that ultrasonic velocity was not changed clearly for area fraction of pore below 10^{-5}
- (2) The peak frequency of power spectrum on pore specimen's bottom echo was decreased with increasing area fraction of pore. In case of 50MHz sensor, the difference of peak frequency became more clear.
- (3) The ultrasonic detection was also carried out for several interrupted specimens under creep-fatigue loading. The peak frequency of power spectrum on creep-fatigue specimen's bottom echo was decreased with progressing creep-fatigue damage.
- (4) Area of Fourier frequency range as evaluation of damage parameter was decreased with increasing area fraction of pore and with progressing creep-fatigue damage. It was found that this parameter was evaluated for the difference of damage at the early stage of creep-fatigue life.

*)Structure Safety Engineering Section, Oarai Engineering Center, Power Reactor & Nuclear Fuel Development Corporation

目 次

1. 緒 言	1
2. クリープ疲労におけるキャビティ発生・成長の様相	3
3. クリープ疲労損傷の超音波検出試験	4
3.1 試験方法	4
(1)供試材の選定	4
(2)超音波検出試験方法	5
3.2 試験結果および考察	7
(1)バースト超音波による検出波形	7
(2)空孔模擬材に対する音速の変化	7
(3)空孔模擬材に対する周波数特性	8
(4)超音波信号評価パラメータの検討	8
(5)クリープ疲労損傷材の超音波検出と周波数特性に及ぼす影響	9
4. 結 論	10
5. 今後の課題	11
謝 辞	12
参考文献	13

表リスト

表 3.1 供試材一覧

表 3.2 超音波センサーと測定項目

図リスト

図 2.1 クリープ疲労寿命比に対するキャビティ径の変化

図 2.2 クリープ疲労寿命比に対するキャビティ面積率の変化

図 3.1 超音波検出システム構成図

図 3.2 超音波底面エコー波形

図 3.3 ミクロ空孔量に対する超音波音速の変化

図 3.4 底面エコーのパワースペクトル

図 3.5 ミクロ空孔量に対する底面エコ一周波数の変化

図 3.6 ミクロ空孔量に対する底面エコ一周波数帯域面積の変化

図 3.7 クリープ疲労寿命比に対するピーク周波数の変化

図 3.8 クリープ疲労寿命比に対する底面エコ一周波数帯域面積の変化

1. 緒 言

FBR プラントの寿命・余寿命診断法の開発にあたり、プラントでは起動・停止に伴う繰り返しおよび定常運転中のクリープとが重畠する、いわゆるクリープ疲労によって材料の損傷劣化が生じるため、金属組織学的にミクロ組織変化レベルからクリープ疲労損傷を評価することにより、寿命初期の段階から評価できる余寿命診断法の開発を行っている。クリープ疲労損傷の進行は、FBR 主要構造材料である SUS304 のクリープ疲労試験から、結晶粒界に析出物やキャビティが発生・成長し、やがてき裂の発生・進展となり破損に至ることが示されてきた^{1),2)}。このように、材料中でクリープ疲労損傷がどのようなメカニズムで進行していくのかミクロンオーダーのキャビティや析出物等によるミクロ損傷機構を解明する一方、そのようなミクロレベルからの損傷を非破壊的に検出できることが必要となる。しかし、ミクロ損傷の非破壊検出は、現状の非破壊検査技術では難しくき裂と呼ばれる大きさが検出限界である。そこで、き裂が発生する以前の損傷変化(キャビティ、析出物等の状態変化)から検出できる非破壊検出法の開発が必要とされ、現在超音波等を用いた非破壊検出技術開発を行っている。

超音波を用いた検出法は、材料内部の損傷状態を検出できること、測定周波数を高くすることにより目的のミクロンオーダーの反射源でも検出できる可能性があること、検出信号から得られる物理量が比較的多いこと、実用的であること等から開発の対象として選択された。これまでに、測定周波数 30 MHz までのパルス波をもちいた検出が試みられ、1 ミクロン程度の空孔が群生した状態において検出の見通しが得られている³⁾。

本研究の目的は、クリープ疲労損傷材に対する超音波検出の適用見通しを得ること、クリープ疲労損傷の主要損傷因子と考えられるキャビティに着目した検出可能性を調べること、また、超音波検出信号から損傷に対して有効に評価できるパラメータを検討することである。このため、従来行ってきた超音波パルス波による検出に代わって、底面エコーから得られる周波数特性変化を精度よく捉えるために、超音波の波としては単一周波数成分を持った正弦波の連続波(バースト波)を発信できるの装置を今回新たに用いた。測定周波数に関しても、よりミクロな損傷を捉えやすくするために高周波による測定が必要とされ、従来より測定周波数の高い 50MHz センサーによる検出を行うこととした。

なお、本研究は、非破壊検出法開発のフェーズ1（～平成7年度）の中で、超音波によるミクロ損傷検出の見通しを補足し、フェーズ2（平成8年度～平成10年度）における損傷の定量化手法開発に際し、信号を評価する有効なパラメータの見通しを得ることに位置づけられる。

2. クリープ疲労におけるキャビティ発生・成長の様相

材料試験で行われるひずみ制御型クリープ疲労試験においては、前述したように、損傷の進行とともに結晶粒界に析出物やキャビティが発生・成長し、やがてき裂の発生・進展となり破損に至ることが示されてきた。これまでに、SUS304クリープ疲労試験の寿命途中での中断試験材を用いたミクロ組織観察から、損傷の素過程と考えられる粒界キャビティの変化に着目し、観察視野内に存在するキャビティの面積、いわゆるキャビティ面積率により損傷を評価するパラメータとして整理してきた^{1), 2)}。

図2.1は、SUS304クリープ疲労試験から、いくつかの寿命途中での段階において観察されたキャビティ径（空孔の直径の最も長いところ）の平均値を示している。ここでキャビティとしたものは、粒界上に丸いあるいは楕円上の形跡を残している単体の空孔で、いくつかのキャビティの合体したと思われる空孔、もしくは粒界が平行に剥離しているようなところはミクロき裂とみなし除外されている。また、SEM写真の画像処理上の分解能の制約から0.1 μm以下の空孔は測定されていない。キャビティは発生と成長が寿命中を通して生じており、隣接するキャビティ同士が合体していくため、キャビティ径の平均値としては寿命を通して大差なく0.3 μm程度となっている。

図2.2は、寿命途中での各段階において観察されたキャビティ面積率（試験片縦断面の観察領域に存在するキャビティの総面積と観察領域の面積の比）の変化を示したものである。図にはこれまでのデータにその後新たに測定したデータ（75%Nf：破損寿命Nfを100%とした時の75%の時点まで負荷したデータ）を加えてあるが、寿命後期のデータが追加されたことにより、寿命の前半にキャビティ面積率は単調増加し、寿命後半に増加率は低下するものの増え続ける様子がわかる。

以上より、キャビティは寿命中を通して発生・成長が認められ、クリープ疲労損傷の進行を定量的に表し得る因子として超音波検出の対象とした。

3. クリープ疲労損傷の超音波検出試験

3.1 試験方法

(1)供試材

本研究の課題は、クリープ疲労損傷を超音波により検出することであるが、クリープ疲労試験材は、熱力学的組織変化やキャビティやき裂等の変化が観察されていることから、超音波検出信号として得られる情報にはこれらの総合的な情報が含まれている可能性がある。クリープ疲労損傷を評価するには、これら総合的な損傷状態変化を検出できること、さらに、個々の損傷因子ごとに変化を捉えられれば一層損傷評価には有益な情報が提供できる。そこで、材料試験におけるクリープ疲労損傷材と、前節で観察されたキャビティに着目してミクロ損傷模擬材としてキャビティ(空孔)を人工的に作製した試料を用いて、超音波による検出特性を把握することとした。

超音波検出に用いた供試材を表3.1に示す。ミクロ損傷模擬材は、キャビティを模擬してコンマ数 $\mu\text{ m}$ から $1\text{ }\mu\text{ m}$ 前後の空孔を発生させた試料とするため、SUS304粉末の焼結によるHIP成形法を用いて、焼結時の処理圧力を3条件で行うことにより空孔径・発生量を変化させた空孔模擬試料3種類³⁾を用いた。図2.1、図2.2と比較すると、本試料は空孔の大きさはほぼ模擬されているが、空孔発生量としては一番少ないA材でも破損寿命付近の模擬となっている。なお、試料形状は、 $20\text{ W}\times25\text{ l}\times10\text{ t}$ の直方体で、表面はバフ研磨されている。

また、クリープ疲労損傷材の超音波検出としては、材料試験におけるクリープ疲労損傷材を用いた。クリープ疲労損傷材は、破損材のみならず破損に至るまでのいくつかの段階における時系列な検出を行うため、2章の観察で用いられたクリープ疲労中断材(平行部直径10mmの丸棒試験片)を用いた。しかし、これらの試験片は、ミクロ組織観察のために試験片平行部が残っていないものは除外せざるを得ないが、試験片平行部を縦割りにした半面が残っている試料は超音波検出試料として用いた。そのため、測定位置の試料厚さとしては、試験片直径の約半分5mm前後である。検出試料としては、破損サイクル N_f に対する途中中断サイクル N の比(N/N_f)で、2、5、50、75、100%の途中中断試験片を用いることができた。また、比較のため試験前の試験片(受入材の試験片)も用いた。

(2)超音波検出試験方法

超音波検出システムの構成図を図3.1に示す。超音波検出システムは、バースト波を発信する検出装置である。一般には、パルス波を用いた測定が行われているが、パルス波の場合、ある周波数を測定周波数としてセンサーに送信しても、パルス(矩形)の周波数成分としては測定周波数以外にも高調波の周波数成分を含んだ波がセンサーに送信される。このため、得られる底面エコーは、損傷によって変化した周波数特性変化を明確に捉えにくいと考えられる。本装置は、正弦波の單一周波数特性を持った連続波を発信するバースト波⁴⁾で測定するため、測定周波数は設定した周波数となり、底面エコーの周波数解析において測定周波数からの周波数特性変化が検出しやすいという特徴を持っている。そして、数十MHz以上の高周波測定になると底面エコーの減衰が著しいため、バースト波を用いることでパワーの増加にもつながる。また、一般的工業用の装置よりも高周波測定を可能とするため、100MHzまでの高周波測定が可能なアンプを用いた。

信号の流れは、測定する周波数を発信器からゲートアンプモジュールへ送り、ここでバースト波が作成されセンサーに打ち出される。打ち出された波は試料底面で跳ね返り再びセンサーに拾われ、レシーバを通してデジタルストレージスコープで記録・表示される。この超音波検出信号波形はパソコンに取り込まれ解析される。接触式の超音波センサーの場合、試料の表面に接触させるだけであるが、水浸式の超音波センサーの場合、試料を水槽の中に入れ、試料表面近くまでセンサーを水中に沈めて測定する。測定場所を変える場合は、水槽がX-Yステージ上に取り付けられているので、センサーは定位置で水槽を水平方向に移動するようになっている。また、ノイズ対策として、ケーブルのシールドおよびモジュールアンプ、レシーバ等に50Ω終端抵抗を取り付けた。

表3.2に使用した超音波センサーと測定項目を示す。超音波センサーは、5MHzから50MHzの範囲で6種類の周波数や測定方式の異なるセンサーを用いた。試料面の比較的広い測定範囲で損傷を検出するため、5、7.5、10MHz用の接触式センサーを、局所的かつ水という外乱の少ない媒体を用いて検出をするため、10、15、50MHz用の水浸式の焦点型センサーを用いた。バースト波の波数は、センサーにより底面エコーの返りが良好な条件に設定し、数波から十数波の範囲で測定した。センサーと試料との距離、傾斜の調整に関しては、底面エコー高さが最大

になる位置とした。クリープ疲労損傷材の超音波検出にあたっては、50 MHz のセンサーの場合バックグラウンドノイズにより底面エコーが捉えにくかったため、バックグラウンドノイズの比較的少ない15 MHz の水浸式を用いた。そして、試験片の測定個所は、試験片平行部長さの中央付近を5カ所測定した。

超音波検出信号の解析は、これまでにパルス波の超音波試験で検討されていた音速測定と底面エコーの周波数特性を行った。音速Vは、複数の底面エコー間の時間間隔 ΔT と試料の厚さ t から

$$V(\text{m/s}) = 2t / \Delta T$$

として求めた。ここで、時間間隔はそれぞれの底面エコーの振幅のピークからピークの時間間隔とした。試料の厚さはマイクロメータで測定した。また、底面エコーの周波数特性は、そのパワースペクトル^{5,6)}を求め、パワースペクトル振幅の最大となるところの周波数（ピーク周波数）の変化を調べた。ここで、底面エコー波形の解析範囲としては、第1底面エコーはバースト波の減衰振動が第2底面エコまで続くため、パルス波のように飛び飛びの波形として分離されず、第1底面エコーをどこまでの波形として捉えるかが問題となるが、本解析はバースト波の減衰振動も含めた、つまり第1底面エコーの始まりから第2底面エコーの始まる付近までを周波数解析に用いた。

3.2 試験結果および考察

(1) バースト超音波による検出波形

図 3.2 は、超音波の底面エコーの一例を示している。(a)の場合は、15 MHz 水浸式センサーによる検出波形を示しており、打ち出し波形の後、試料表面からの表面エコーに続いて第1底面エコー、第2底面エコーが観察されている。この程度の周波数では比較的ノイズの少ないエコーが観察されている。

図 3.2(b)は、(a)図における第1底面エコーの波形を抽出したもので、バースト波としての波形が返ってくるため、波形のピークを過ぎると第2底面エコーが出現するまで減衰振動の波が続いている。パルス波による超音波測定で見られるようなエコー波がとびとびに出現する様子とは異なる。

図 3.2(c)は、50 MHz 水浸式センサーによる検出波形を示しており、周波数が低い場合と比べてかなりバックグラウンドノイズが多い。底面エコー以外の波形は、センサーを通して表面波の多重反射等により振動波を拾っているものと考えられる。試料からの底面エコーの検出は、センサーを上下することによりオシロスコープ上に表示される波形の時間軸方向(横方向)に移動する波として捉えることができた。50 MHz の高周波になると、底面エコーも試料中での減衰が著しく、バースト波を用いても小さいパワーの振幅の低い波として返ってくるため、第2底面エコーはさらに減衰してノイズの中に隠れてしまいいずれの試料も観察されていない。このため、50MHz では音速測定はできなかった。しかし、第1底面エコーは観察されたことから周波数解析することは十分可能であることがわかった。

(2) 空孔模擬材に対する音速の変化

図 3.3 は、空孔模擬材に関して、空孔面積率に対する音速の変化を示す。ここで、音速は複数の底面エコーのそれぞれの時間間隔に対して求めた音速の平均値として示した。この結果、15 MHzまでの測定周波数では、空孔面積率が 10^{-5} より大きい場合は音速の低下が顕著に見られるものの、空孔面積率が 10^{-5} より小さくなると音速の変化量は非常に小さい。測定周波数を更に高くした方が音速測定は期待できるが反面、減衰、ノイズ等の問題から測定自体が難しくなる。今回、50 MHz の測定では第1底面エコーしか観察されず、音速を求めることはできなかった。

以上より、バースト波を用いた 15 MHz 程度の測定周波数では、クリープ疲労

における破損寿命付近のキャビティ発生量(空孔面積率で 10^{-6} 程度)を音速変化から検出するのは難しいことがわかった。

(3) 空孔模擬材に対する周波数特性

図3.4は、1例として15MHzセンサーにおける第1底面エコーのパワースペクトルを示す。センサー周波数付近に鋭いピークの山が現れ、他に目立つようなピークは観察されない。したがって、バースト波により測定周波数成分が顕著であることがわかる。

図3.5は、空孔模擬材に対するパワースペクトルのピーク周波数の変化を示す。15MHz以下のセンサー周波数では、空孔面積率の増加に対してピーク周波数の変化は極わずかであるが低下している。50MHzセンサーの測定では、ピーク周波数は明らかに低下している様子がわかる。したがって、キャビティのような空孔量変化には50MHz程度の高周波測定が必要であることがわかった。

(4) 超音波信号評価パラメータの検討

底面エコーの周波数特性において、スペクトル波形から得られるパラメータとしてはピーク周波数以外に、スペクトルの中心周波数、-6dB減衰する所の周波数帯域幅等あり、また、底面エコー間のノイズ部分のスペクトル分布からその面積を求める方法⁷⁾がある。ノイズ面積をとる場合は、当然ノイズ部分の信号がサンプリングされなければならないが、バースト波の検出においてはその減衰振動が続いため、ノイズ部分の抽出はできない。スペクトル面積は、ピーク周波数のような一つの特性値変化よりは波の周波数成分全体の変化を捉えることができる。そこで、底面エコーのフーリエスペクトル分布の面積(周波数帯域面積)をパラメータとして評価した。そこで、空孔模擬材に関して、10および15MHzセンサーでの測定結果の底面エコーのフーリエスペクトルに対し、面積の累積範囲を1MHzから使用装置の上限周波数である100MHzまでとし、測定周波数に対して十分広い範囲での周波数帯域面積を求ることとした。

図3.6はミクロ空孔量に対する底面エコー周波数帯域面積の変化を示す。この結果、音速やピーク周波数変化が微少であった10や15MHzの測定周波数でも、 10^{-5} 以下の空孔面積率に明瞭な差がみられた。本パラメータは、図の変化量から推

測して、 10^{-6} 以下の空孔面積率に対しても相違を示すことが期待できる。したがって、周波数帯域面積をパラメータにとることにより、キャビティの発生量変化を評価できる見通しが得られた。

(5) クリープ疲労損傷材の超音波検出と周波数特性に及ぼす影響

クリープ疲労損傷材に対して、バースト超音波による検出を行い、前項までの空孔模擬材における評価結果を踏まえ、底面エコーの周波数特性について評価を行った。

図3.7は、クリープ疲労損傷に対するパワースペクトルのピーク周波数の変化を示す。クリープ疲労寿命比の増加（損傷の進行）に対してピーク周波数は低下する傾向を示した。寿命初期の時点でもピーク周波数の相違がみられる。空孔模擬材の結果からは、測定周波数が15MHz以下のセンサーの場合、空孔量変化に対してピーク周波数は極わずかの相違であった。クリープ疲労損傷材では、明瞭な相違を示していることから、キャビティ（空孔）以外にき裂、析出物、転位等の変化も検出されている可能性があり、総合的な信号として捉えやすくなっていると考えられる。特に、寿命後半においてのピーク周波数の低下が顕著であり、この領域ではき裂の成長を有意に捉えている可能性がある。受け入れ材の試験片でピーク周波数が低い値となっている理由としては、損傷材は半断面形状なため試料底面では平面であるのに対し、受け入れ材の試料底面は丸棒の曲面であることによる試料形状や厚さの影響が考えられる。しかしながら、クリープ疲労負荷が加わった後は損傷の進行に伴ってピーク周波数は低下することが確認されたので、超音波検出により寿命初期からのクリープ疲労損傷の検出が可能であることがわかった。

図3.8は、クリープ疲労損傷に対して底面エコーの周波数帯域面積をパラメータにとって整理したものである。その結果、寿命比に対して周波数帯域面積は特に寿命前期での低下が顕著な差として検出されている。したがって、周波数帯域面積をパラメータにとることにより、クリープ疲労損傷を、特に寿命前期での損傷量検出に有効なパラメータとして評価できる見通しを得た。

4. 結 論

クリープ疲労損傷を検出するため、損傷に支配的と考えられるキャビティを模擬して作製した空孔模擬材と、クリープ疲労損傷を受けた試験片に関して、バースト波を用いた超音波検出を実施し、ミクロ損傷の検出可能性と検出された信号に対して損傷を有効に評価できるパラメータについて検討した。その結果、以下の結論を得た。

- (1) キャビティ発生を模擬してミクロ空孔発生量を変化させた3種類の空孔模擬試料に対し、空孔面積率が 10^{-5} 以下になると超音波音速の変化量は捉えにくいことがわかった。
- (2) 底面エコーの周波数解析からパワースペクトルのピーク周波数を評価した結果、50 MHz センサーの測定において空孔発生量に相関して顕著な相違が検出できた。
- (3) クリープ疲労寿命途中でのいくつかの段階における損傷材に対して超音波検出を行った結果、損傷の進行に相関したパワースペクトルのピーク周波数変化が検出できた。
- (4) 底面エコーのフーリエスペクトルの周波数帯域面積をパラメータとして評価した結果、空孔発生量の増加やクリープ疲労損傷の進行に対して低下することが確認できた。このパラメータにより、寿命前期での損傷量変化を評価できる見通しを得た。

5. 今後の課題

本研究では、50 MHzまでのバースト波を用いた超音波検出を試み、その有効性が確認されたが、よりミクロな損傷を捉えるため、100MHz程度のさらに高周波による測定を今後行っていく予定である。また、高周波測定に対する測定技術の面からノイズ対策を検討していく必要がある。

超音波信号から損傷を評価するパラメータに関しては、周波数解析を中心とした定量評価に最適なパラメータの検討を継続して行っていく。また、検出波形から得られる情報は多いと考えられ、超音波から得られる信号から個々の損傷因子の識別方法も検討していきたい。そのため、キャビティ以外のき裂や転位等を導入した標準試料の作製とそれらの検出・比較検討、および疲労損傷とクリープ損傷の分離のための信号処理方法や、波形解析手法等による検討を行っていく予定である。

謝　　辞

本研究の遂行にあたり、超音波検出試験、データ収集ソフト作成、データ処理に協力していただいた常陽産業（株）菅谷全氏、および、金属組織観察、画像処理による測定値算出を行っていただいた常陽産業（株）鴨川浩一氏、富田正人氏に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) F. Ueno, K. Aoto, Y. Wada, Study on metallographic damage parameter in creep-damage-dominant condition under creep-fatigue loading, Nuclear Engineering & Design, 162, pp85-95, 1996
- 2) F. Ueno, K. Aoto, Y. Wada, A Study on damage parameters in creep cavity growth dominant region under creep-fatigue loading, SMiRT-12, L05/4, 1993
- 3) 上野文義、「非破壊材料劣化評価法開発用の模擬損傷試料の作成法の検討」、材料学会第32回高温強度シンポジウム前刷集、pp144-148、1994年12月
- 4) 谷腰欣司 著、「超音波とその使い方」、日刊工業新聞社
- 5) 日野幹雄 著、「スペクトル解析」、朝倉書店
- 6) 岩田彰 編著、「ディジタル信号処理」、コロナ社
- 7) 中代雅士、「超音波による構造材料の劣化損傷評価」、燃料協会誌 Vol.69、No.5、pp343-354、1990年

表3.1 供試材一覧

試料名	ミクロ損傷内容	対象とする損傷因子
空孔模擬材A	空孔径 $0.35\text{ }\mu\text{m}$ 以下 空孔面積率 1.28×10^{-6}	少量のキャビティ
空孔模擬材B	空孔径 $0.61\text{ }\mu\text{m}$ 以下 空孔面積率 6.49×10^{-6}	比較的少量の キャビティ
空孔模擬材C	空孔径 $1.77\text{ }\mu\text{m}$ 以下 空孔面積率 2.10×10^{-4}	多量のキャビティ
SUS304圧延材	受入れ材	—
クリープ疲労中断材	寿命比(N/Nf)：2、5、50、75、100%のクリーフ°損傷材 SUS304、 温度 550°C 、ひずみ範囲0.5%、10hr保持	

表3.2 超音波センサーと測定項目

センサー	センサー周波数 (MHz)	仕様	測定項目	
			空孔模擬材	クリーフ°疲労損傷材
パナメトリクス v406	5	接触式	音速、周波数特性	
パナメトリクス v4017	7.5	接触式	音速、周波数特性	
パナメトリクス v410	10	接触式	音速、周波数特性	
ハリソニック I3-1006-S	10	水浸式 焦点:50.8mm	音速、周波数特性	
ハリソニック I3-1504-S	15	水浸式 焦点:38.1mm	音速、周波数特性	周波数特性
東レテクノ PT-50-3-10	50	水浸式 焦点:10mm	周波数特性	

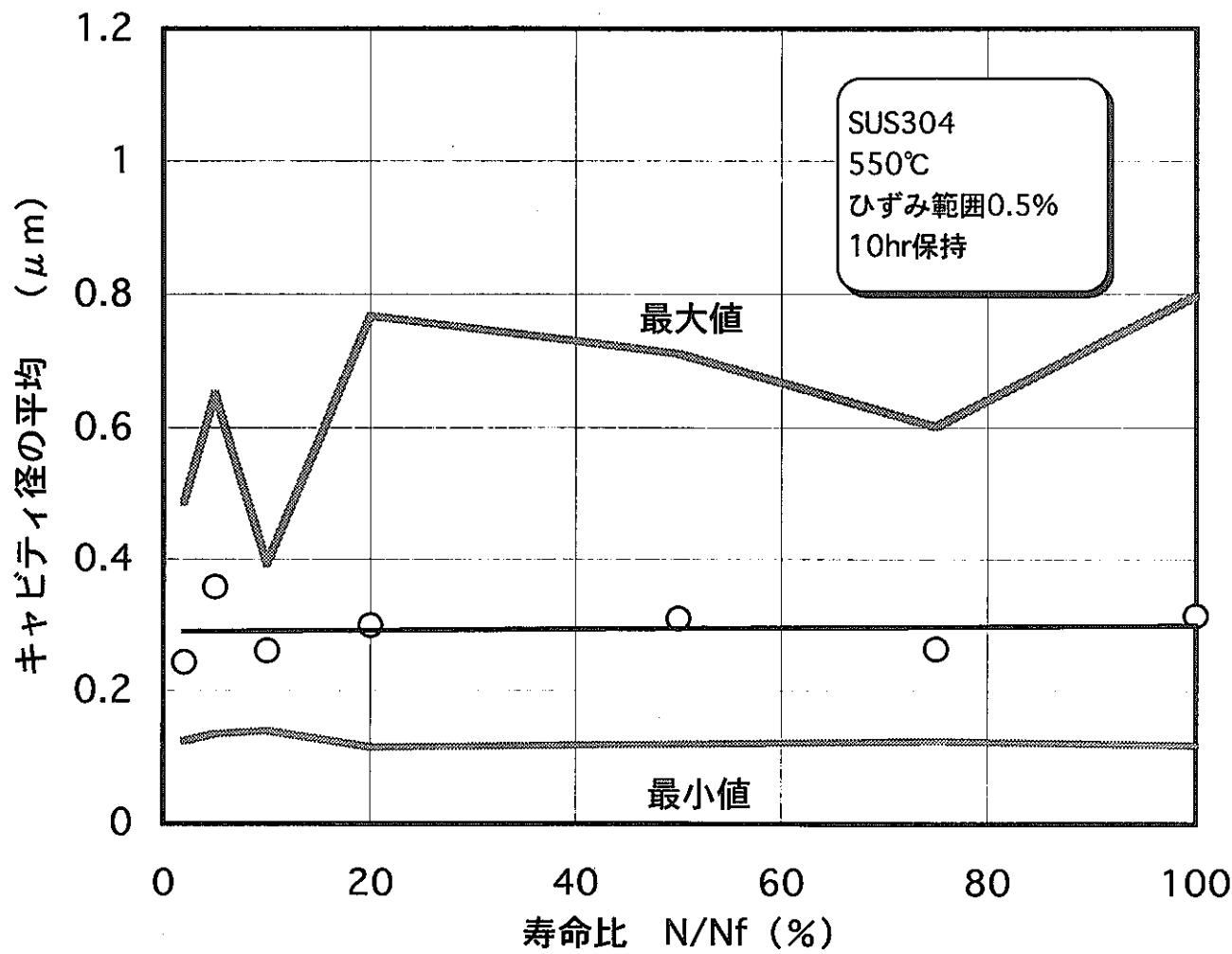


図2.1 クリープ疲労寿命比に対するキャビティ径の変化

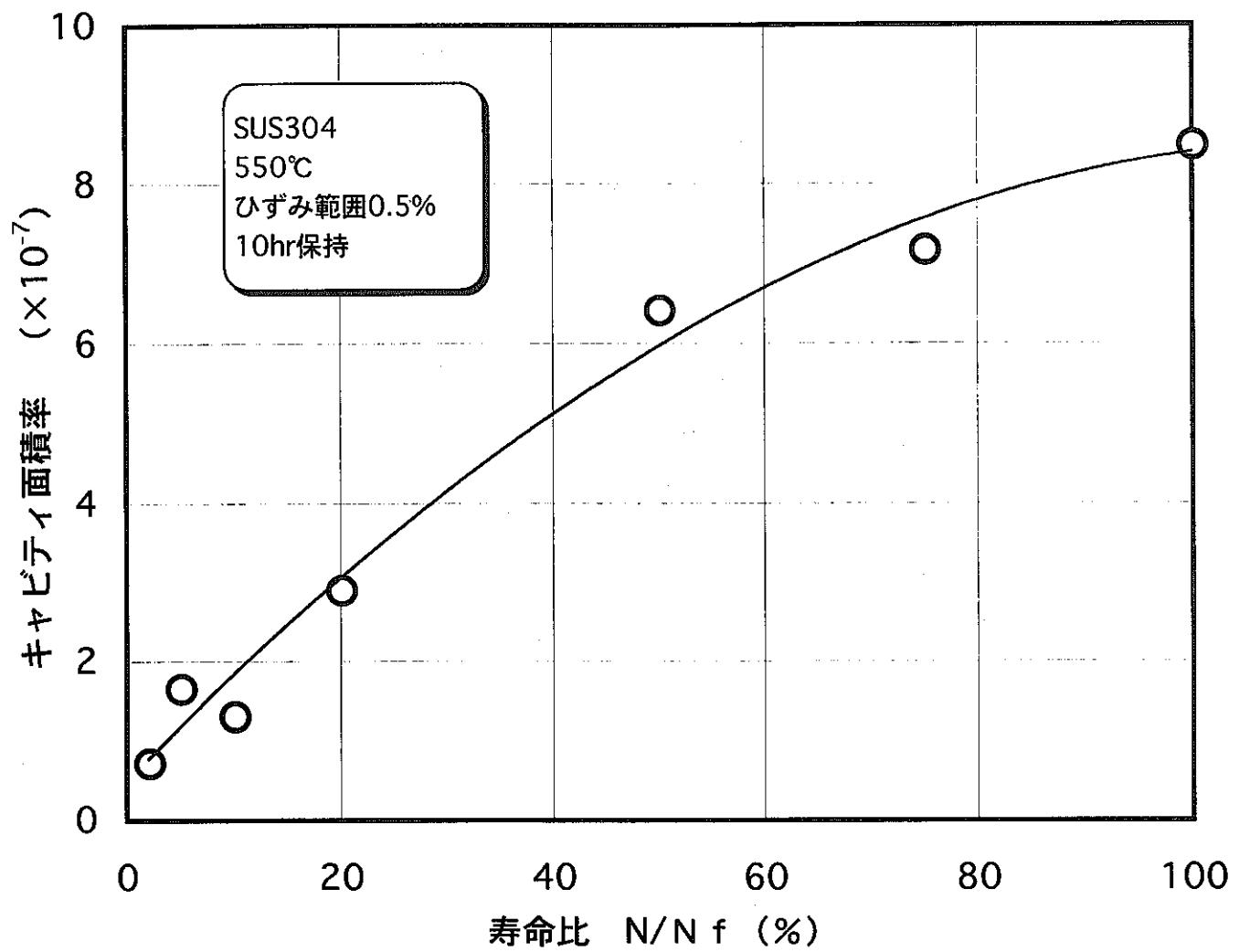


図2.2 クリープ疲労寿命比に対するキャビティ面積率の変化

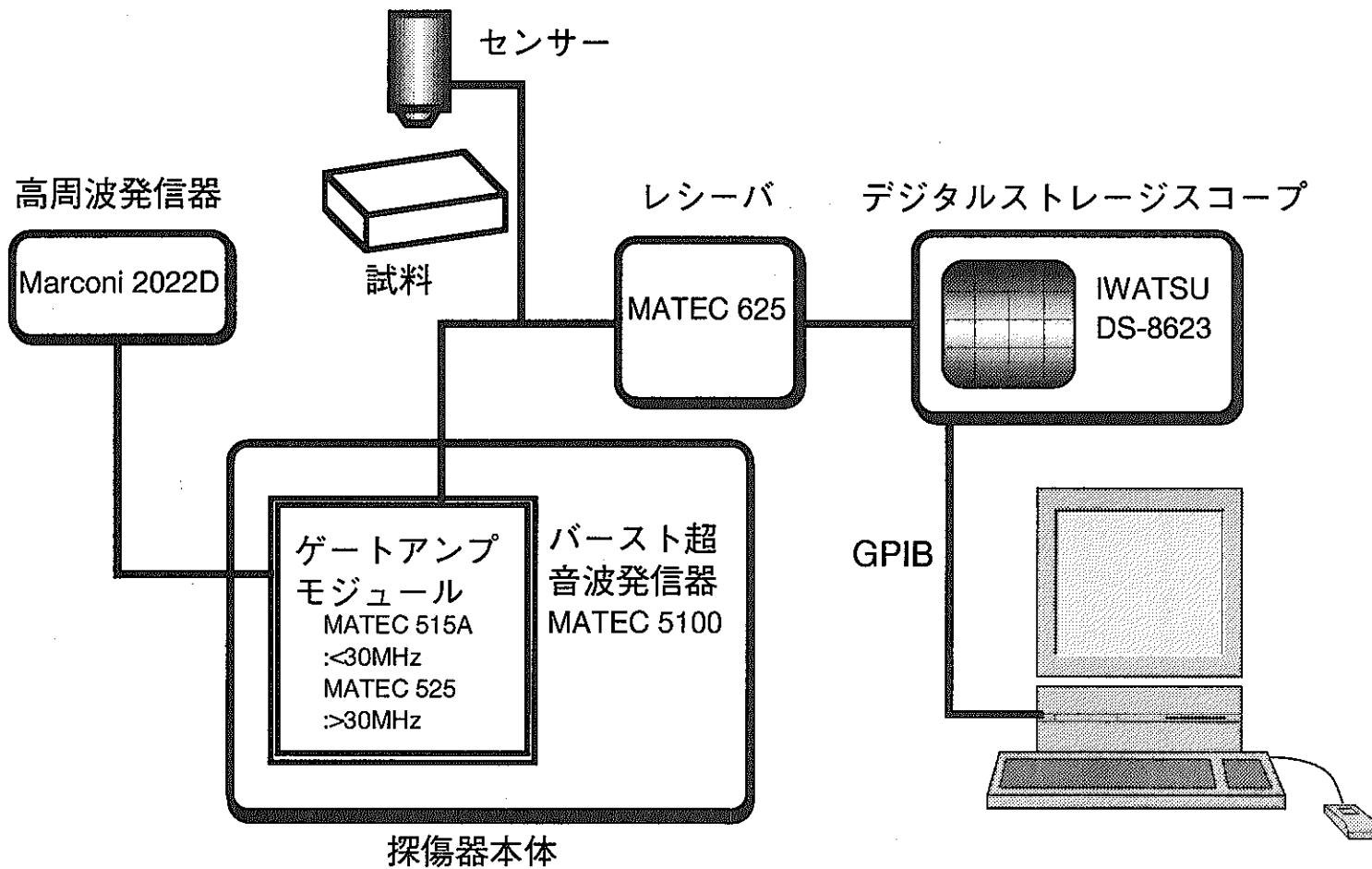
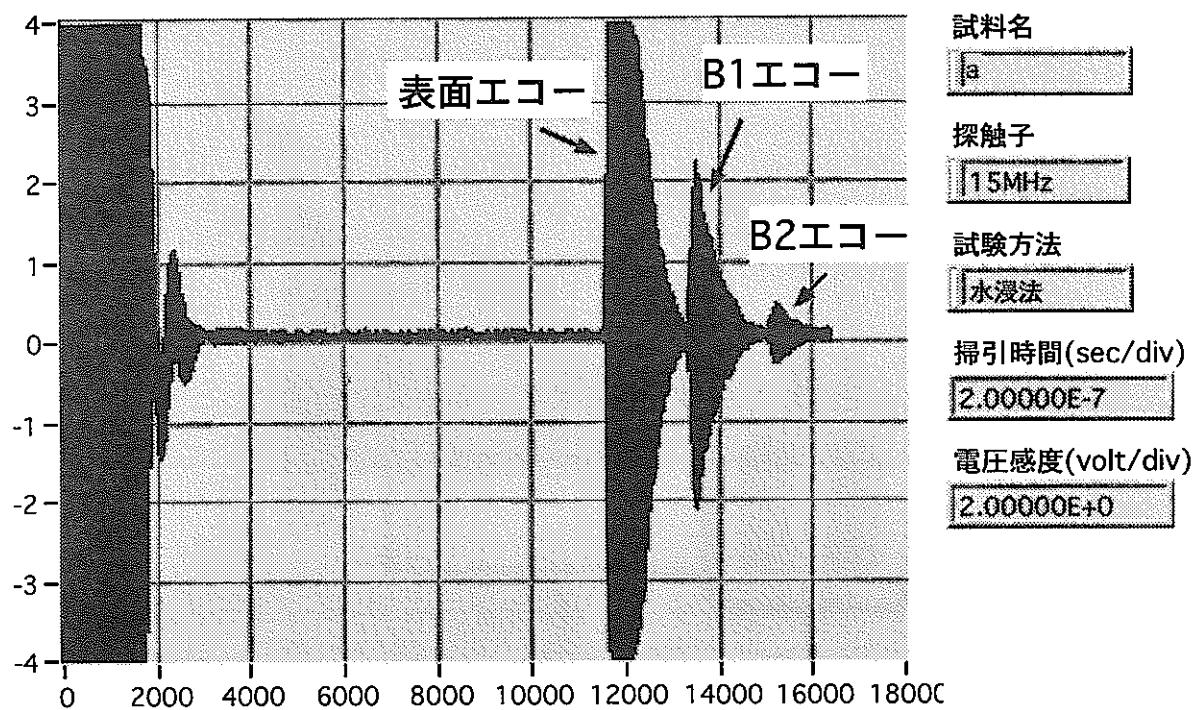
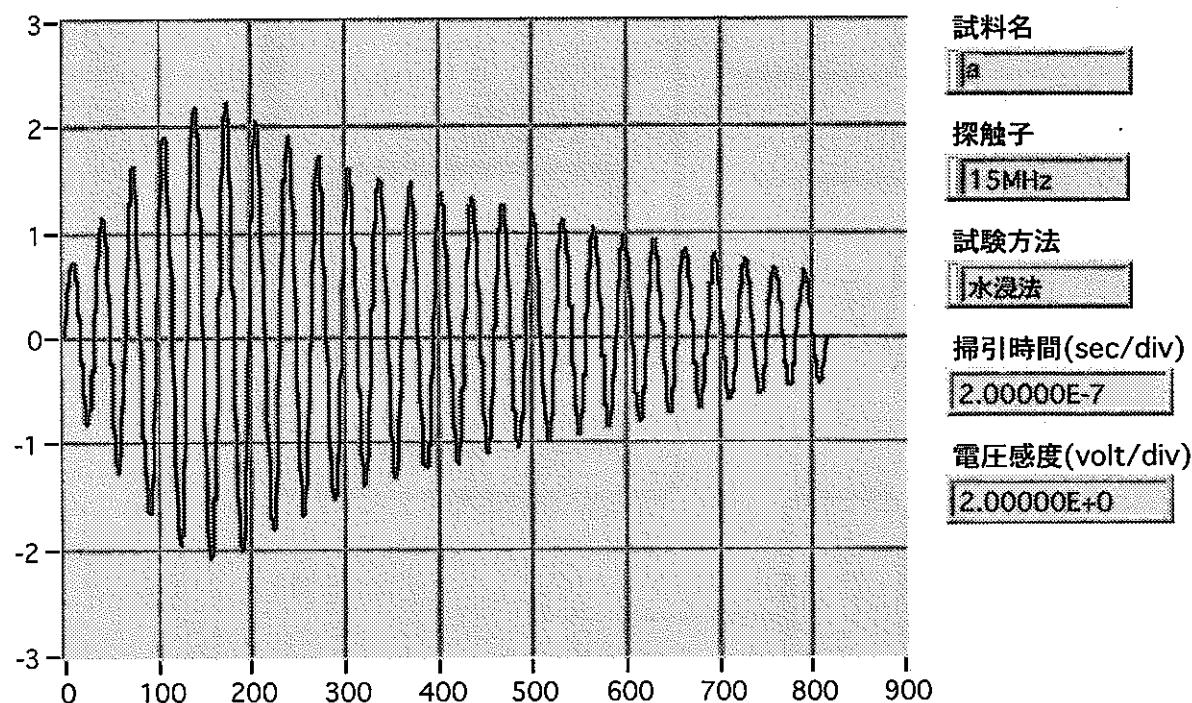


図3.1 超音波検出システム構成図

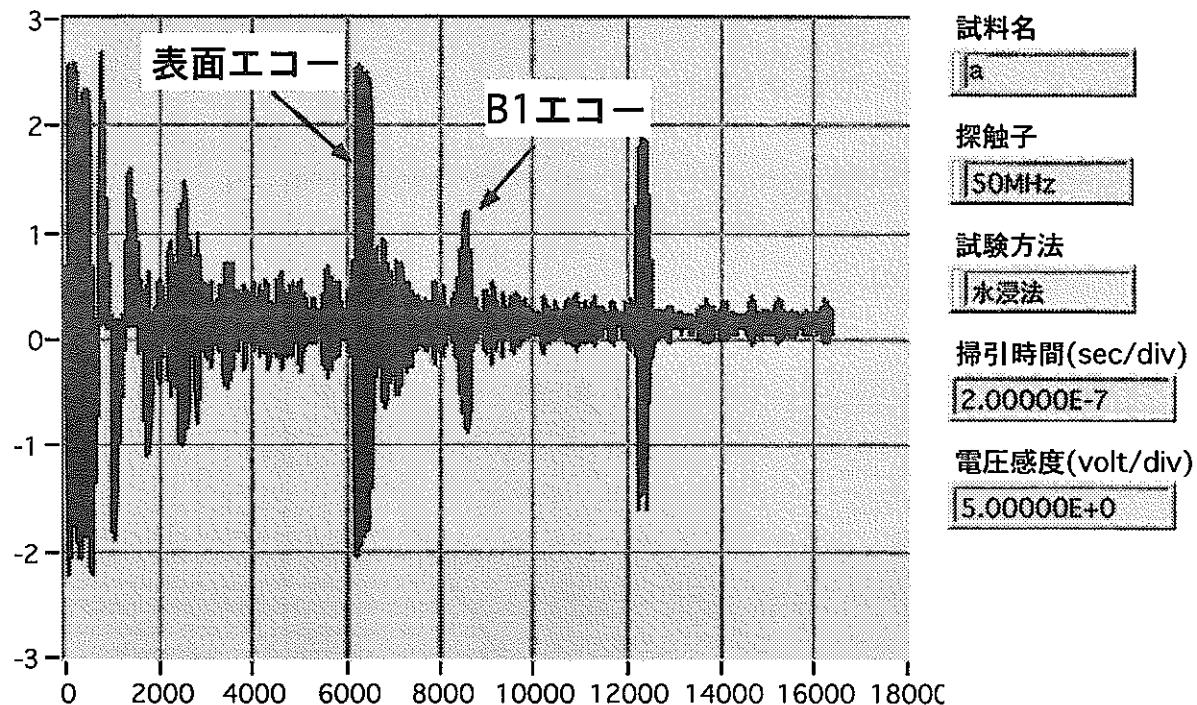


(a) 表面波と底面エコー波形(15MHz)



(b) 第1底面エコー波形

図3.2 超音波検出波形



(c) 表面波と底面エコー波形(50MHz)

図3.2 超音波検出波形(続き)

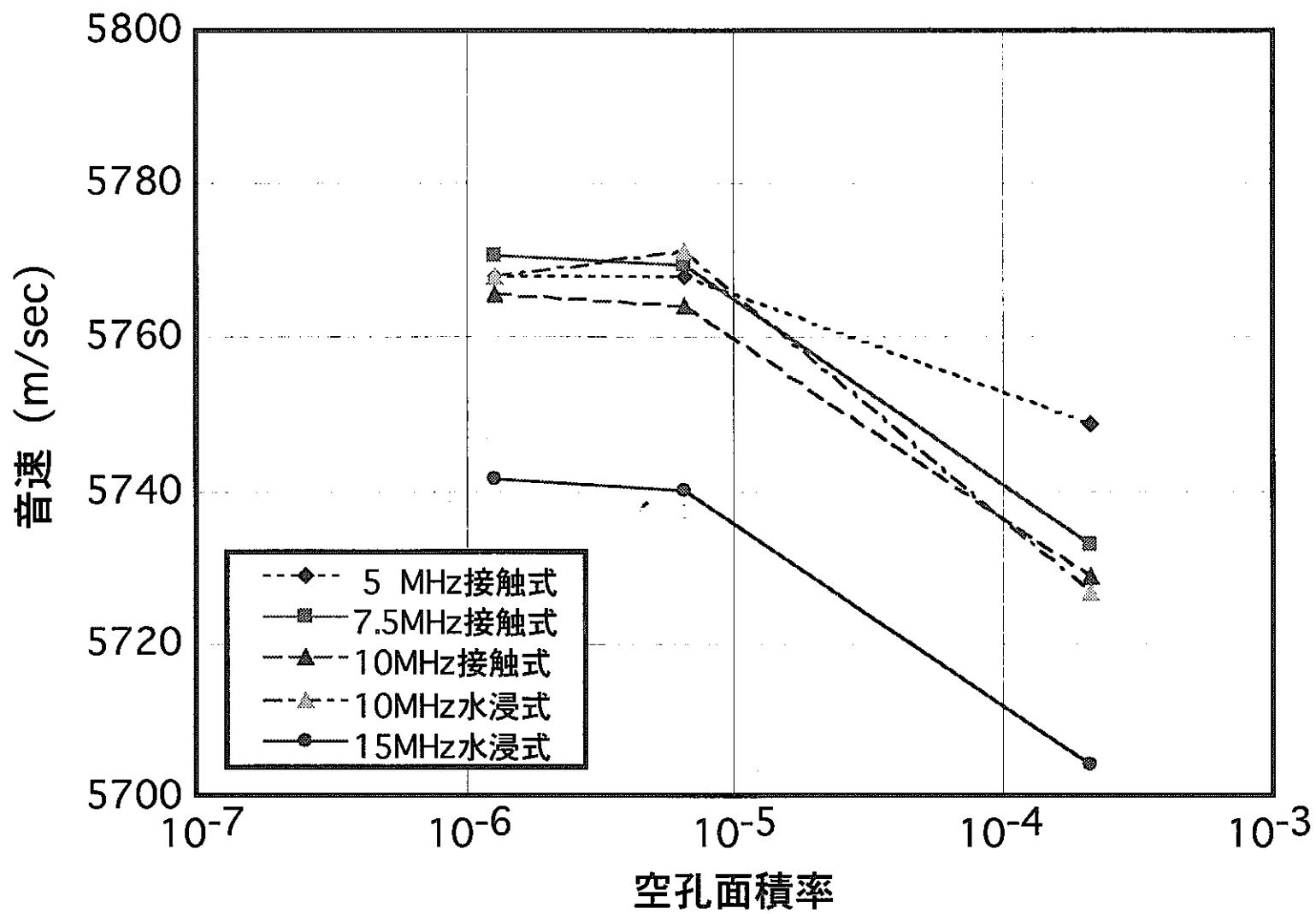


図3.3 ミクロ空孔量に対する超音波音速の変化

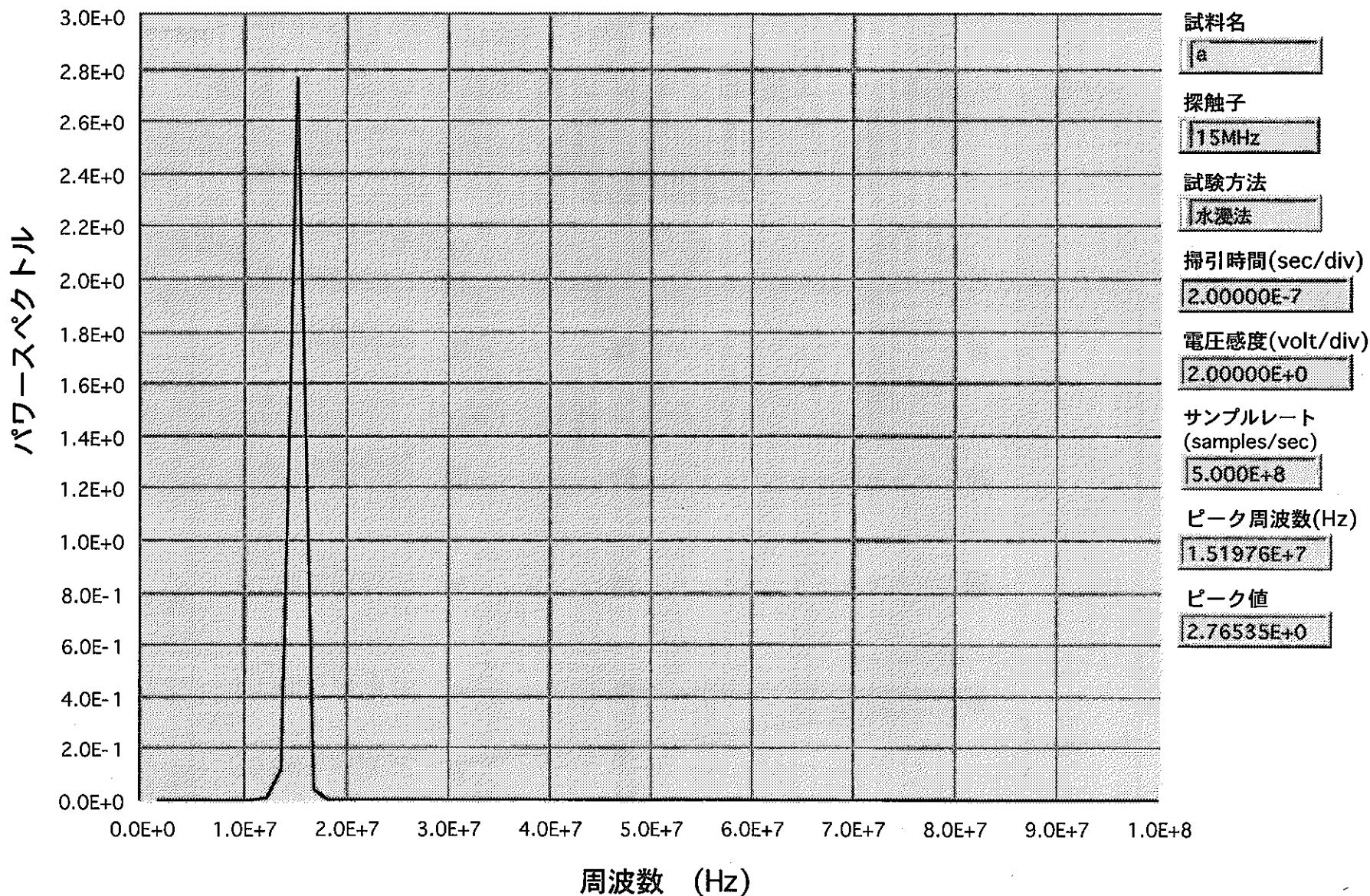


図3.4 底面エコーのパワースペクトル

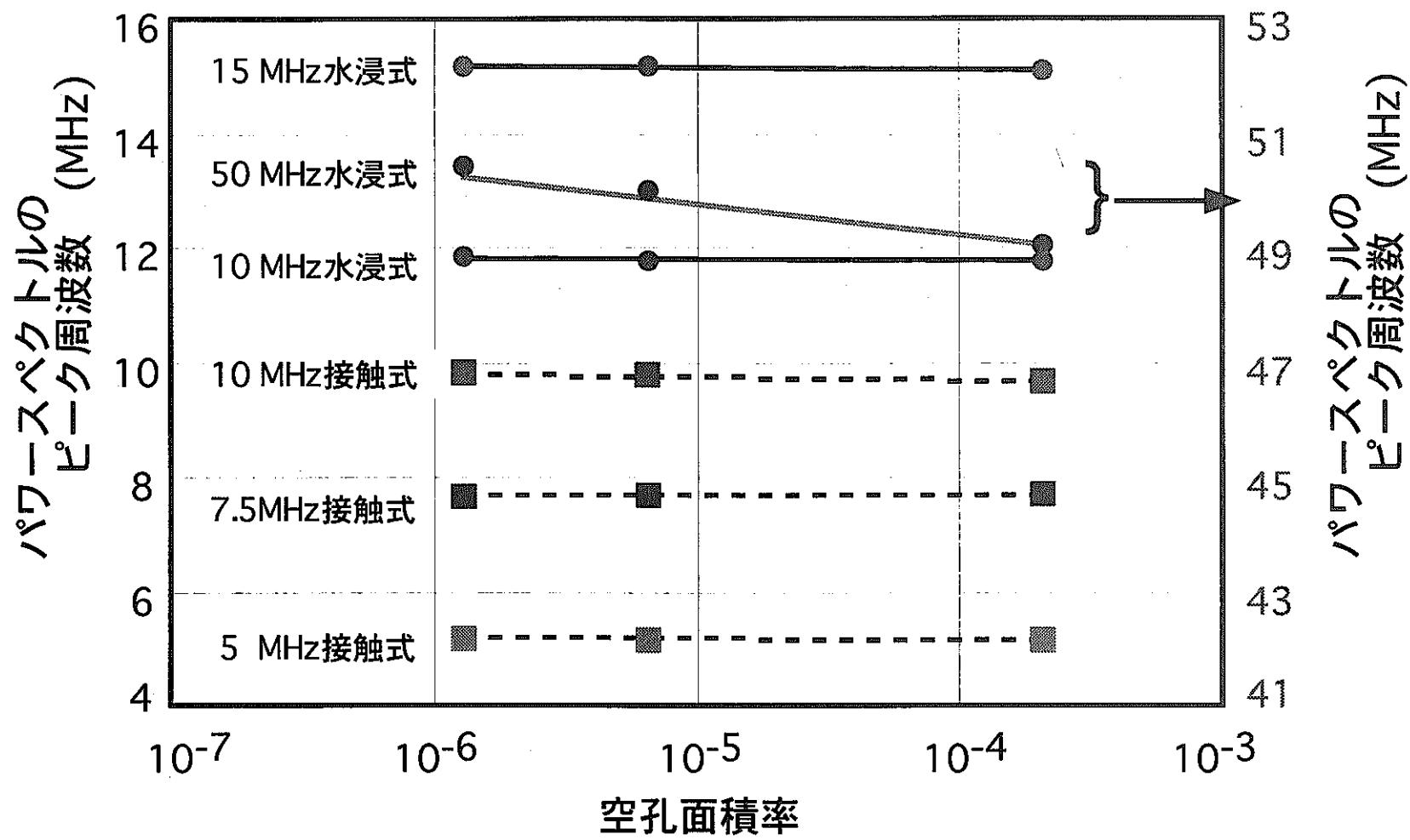


図3.5 ミクロ空孔量に対する底面エコー周波数の変化

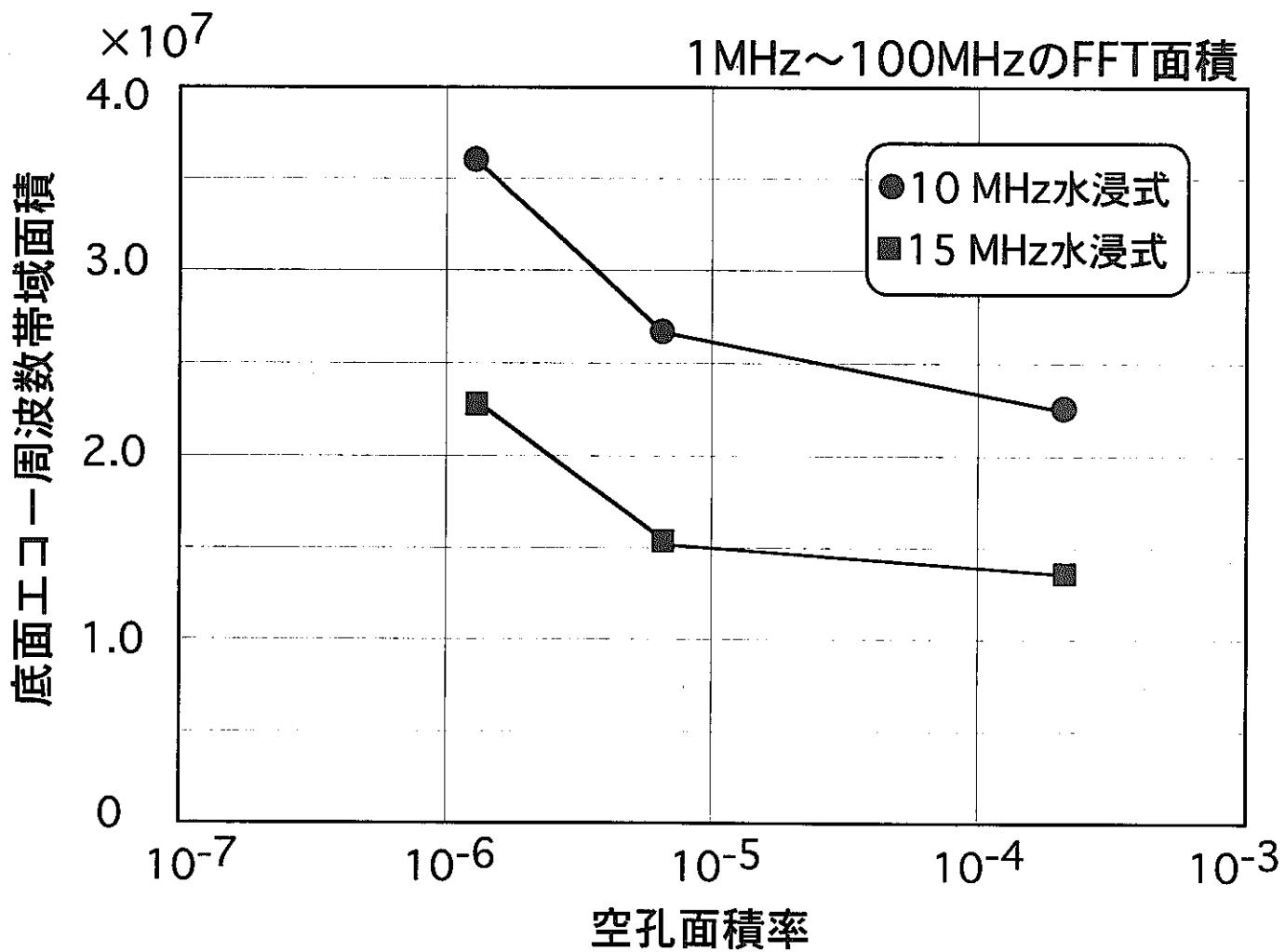


図3.6 ミクロ空孔量に対する底面工コ一周波数帯域面積の変化

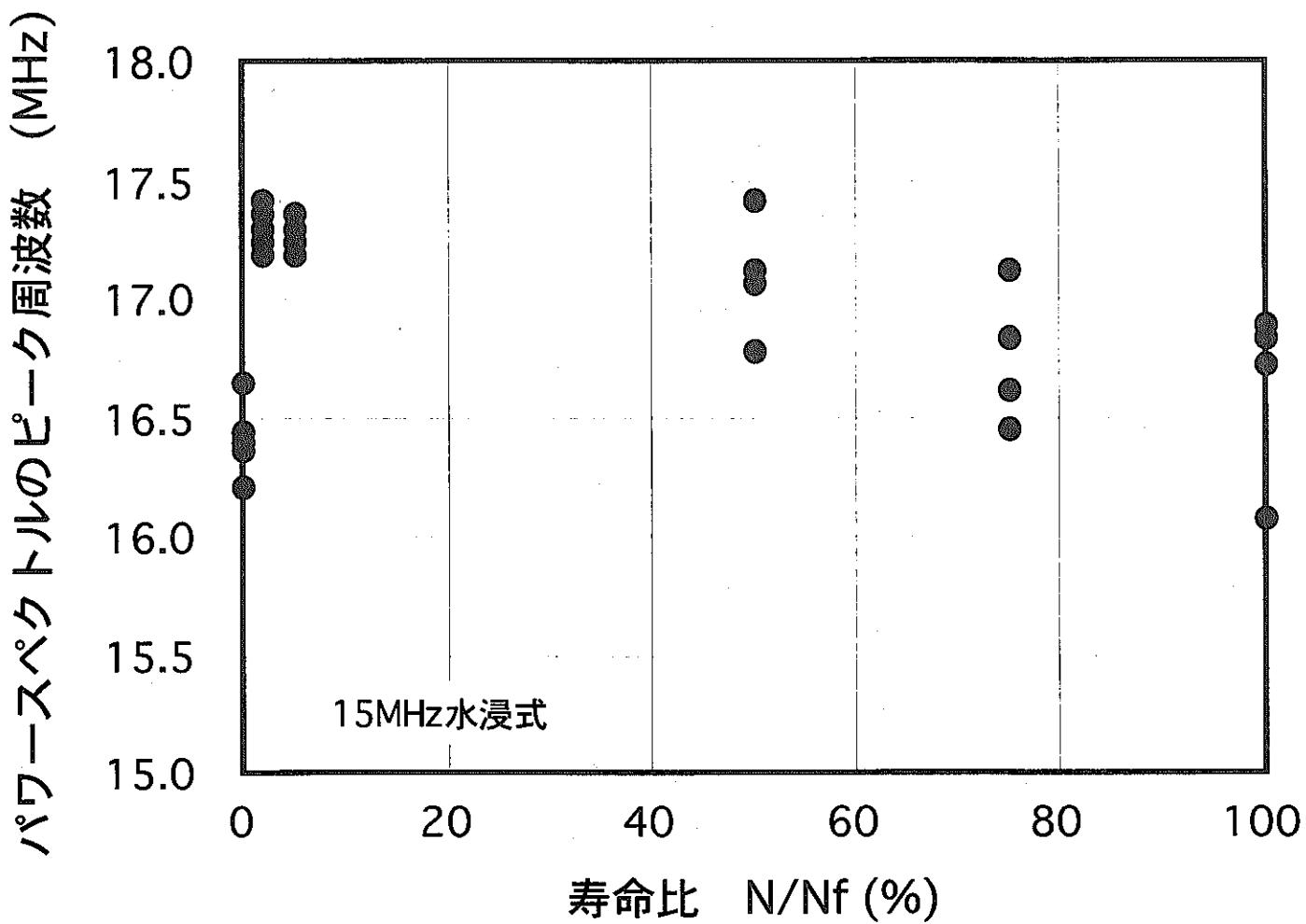


図3.7 クリープ疲労寿命比に対するピーク周波数の変化

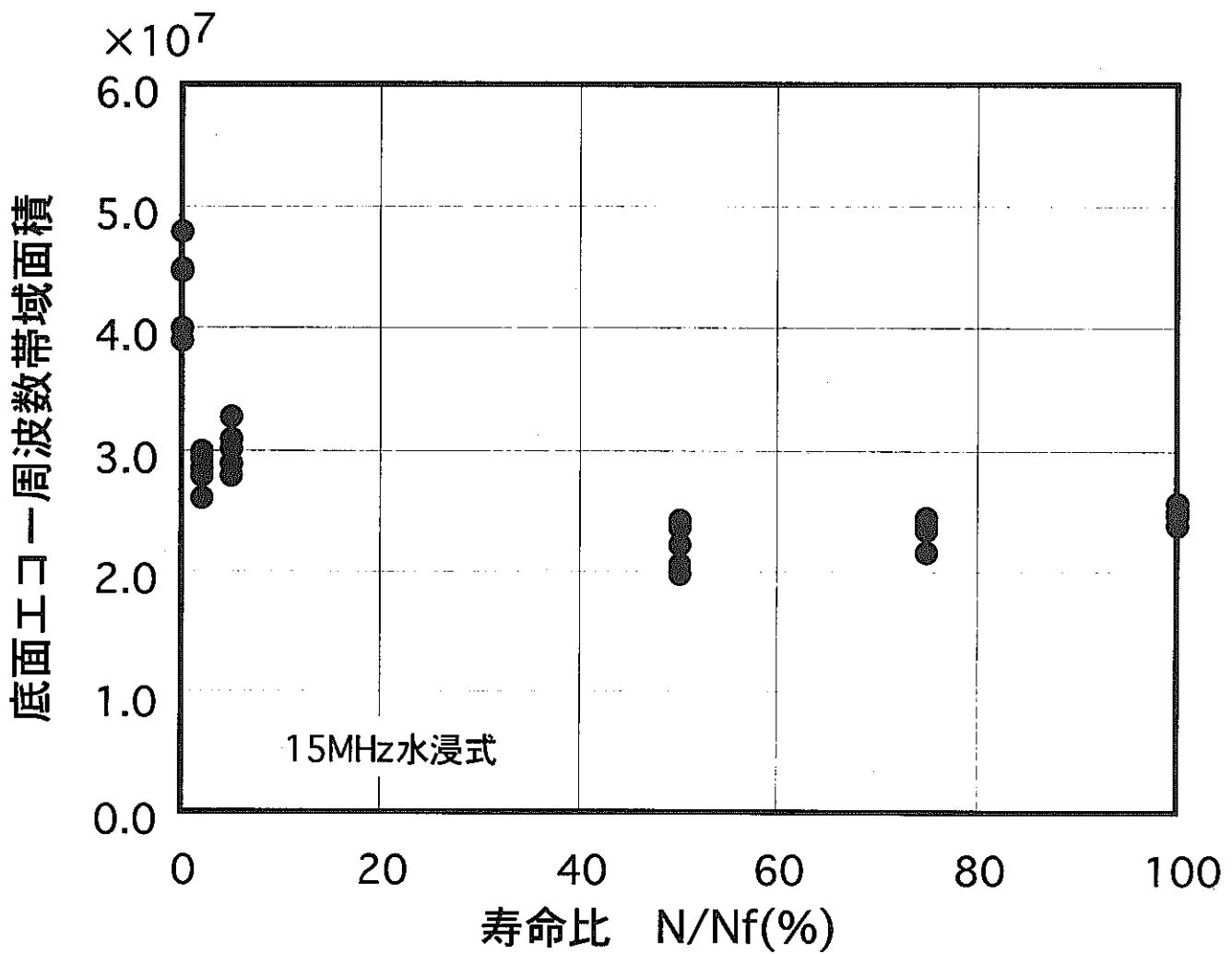


図3.8 クリープ疲労寿命比に対する底面エコー周波数帯域面積の変化