
音響を利用した薄膜材料の非接触枚数検出法に関する研究

1 6 5 6 0 2 0 5

平成 1 6 年度～平成 1 7 年度科学研究費補助金
(基盤研究 (C)) 研究成果報告書

平成 1 8 年 5 月

研究代表者 坂 本 秀 一

新潟大学 工学部 助教授

<はしがき>

本報告は、平成16年度～平成17年度科学研究費補助金（基盤研究（C））を受けて行った「音響を利用した薄膜材料の非接触枚数検出法に関する研究」（16560205）に関するものである。第2，3章では多孔質薄膜の基礎実験として，布を含む検出部の伝達関数の周波数応答を測定し，その結果から枚数と伝達関数の関係を検証した結果を示した。第4章では，布の入力インピーダンスの実測値と，布の音響特性の計算値，をそれぞれ布と検出部を含む音響系の理論解析に導入し計算を行った結果を示した。第5章では使用した数値解析環境について述べ，第6章では，有限要素法を用いて布の音響特性を導入した検出部の数値解析値を求め，数値解析値・実測値・理論解析値の3者の比較を記した。第7章では，多孔性膜材料の基礎的データとして，異なる粒径の粒状体を積層させた場合の垂直入射吸音率を理論的・実験的に求め，両者の比較について記した。第8章では，多孔性膜材料が湿度から受ける影響の基礎的データとして，粒状材料の吸音率ピーク周波数を求めた結果について記した。第9章では，多孔質薄膜材料の透過損失測定システムの構築について記した。

研 究 組 織

研究代表者：坂本秀一（新潟大学 工学部 助教授）

交付決定額（配分額）

（金額単位：千円）

	直接経費	間接経費	合 計
平成16年度	2,300	0	2,300
平成17年度	1,100	0	1,100
総 計	3,400	0	3,400

研 究 発 表

- (1) 坂本秀一・栗山俊助・草階達朗・柳本憲作・渡部誠二・一宮亮一、
粒状材料の音響特性に関する基礎的研究（垂直入射吸音率と透過損失）
日本機械学会北陸信越支部第42期総会・講演会、2005年3月9日（新潟）
- (2) 坂本秀一・圓田恵一・佐久間陽介・柳本憲作・渡部誠二、
粒状材料の音響特性に関する基礎的研究
（異なる粒径間の積層における垂直入射吸音率）
日本機械学会北陸信越支部第43期総会・講演会、2006年3月9日（長野）

研究成果による工業所有権の出願・取得状況

工業所有権の名称：液体含有率測定法及びその装置
発明者：坂本秀一
権利者：新潟大学
工業所有権の種類：特許
番 号：特願 2005-103761
出願年月日：平成17年3月31日
取得年月日：出願中

目 次

第1章 緒 論	1
第2章 枚数検出装置の概要及び測定機器	4
2-1 音響を利用した布の枚数検出の原理	4
2-2 枚数検出装置の概要	4
2-3 測定機器	6
2-4 本測定法の適用例	10
第3章 枚数検出装置の基礎実験	12
3-1 伝達関数測定	12
3-2 伝達関数測定結果	12
3-3 再現性の確認	17
3-4 布のたるみによる影響	17
第4章 枚数検出部の音響系の理論解析	22
4-1 音響系の等価回路	22
4-1-1 スピーカの空洞部	22
4-1-2 マイクロホン空洞部	22
4-1-3 隙間のインピーダンス	23
4-1-4 空気柱	25
4-1-5 スピーカ接続部	25
4-1-6 マイクロホン接続部	26
4-1-7 布の入力インピーダンス	26
4-1-8 等価回路図	32
4-2 理論解析	34
4-2-1 並列インピーダンス	34
4-2-2 布と空気柱の境界面から見た回路全体の音響インピーダンス	34
第5章 数値解析環境	37
5-1 数値解析ツール	37
5-2 数値解析ツールを用いた解析環境	37

第6章 有限要素法を用いた数値解析	39
6-1 数値解析	39
6-2 SYSNOISEによる数値解析法	39
6-2-1 形状メッシュの作成	39
6-2-2 SYSNOISE内での操作	52
6-3 SYSNOISEによる数値解析結果の評価(位相)	57
6-4 SYSNOISEによる数値解析結果の評価(振幅)	94
第7章 異なる粒径のガラスビーズ層を積層した場合の吸音率に関する 実測値と理論解析値の比較と考察	130
7-1 実測値と理論解析値の比較	130
7-2 考察	130
第8章 多孔質材料の含水率変化による吸音率の周波数特性の変化	162
8-1 伝達関数の測定	162
8-2 吸音率の算出	162
8-3 含水率の定義	164
8-4 含水率変化による吸音率の測定結果 ($\phi 2.0\text{mm}$, $d20\text{mm}$)	166
8-4-1 含水率 0~25%の測定結果・考察	166
8-4-2 含水率 0~10%の測定結果・考察	168
8-4-3 含水率 0~3%の測定結果・考察	173
8-5 含水率変化による吸音率の測定結果 ($\phi 1.0\text{mm}$, $d20\text{mm}$)	178
8-5-1 含水率 0~3%の測定結果・考察	178
第9章 4マイクロホン法による多孔質材料の透過損失測定	183
第10章 結 論	193
文 献	194

第 1 章 緒 論

現在、工業的に多くの薄膜や多孔質材料が使われている。一例として布は一般の工業材料と比較してハンドリングの際に大きく変形し易いため、縫製等で自動化する際には困難を伴う。よって布が確実に 1 枚であることを判定することは重要である。小野らは歪ゲージをロボットハンドに組み込む事で検出を試みており⁽¹⁾、そのほか各種の基礎実験を行っている⁽²⁾。

当研究室では、紙に代表されるような比較的薄いシートの搬送時の枚数を非接触で検出する装置を考案し、紙幣などに用いられる紙の厚み方向への音波の伝搬形態は、固体と同様であることを実験により確認した⁽³⁾⁽⁴⁾。しかし、布のような比較的繊維が粗に結合した物体は吸音材のような性質を示すため上記の装置では枚数の検出は困難であった。

布を密着させた剛壁に、剛壁から一定の隙間を隔てて検出部の空気柱管端を設置する。このとき、布の枚数により管端に接続される音響インピーダンスは変化し、これに伴い音響系の伝達関数も変化する。このように、布の枚数を伝達関数に変換することにより検出する。

この枚数検出装置は、布が薄い多孔質材料であるという観点から、布表面の入力インピーダンスに着目し、布の厚さが音響系の伝達関数の周波数応答に及ぼす効果を利用するもので、接触式についての研究成果は既報⁽⁵⁾⁽⁶⁾により発表した。

第 2, 3 章では基礎実験として、布の枚数を変化させ、布の枚数を含む検出部の伝達関数の周波数応答を測定し、その結果から枚数と伝達関数の関係を検証した。

布のような多孔性材料の特性音響インピーダンス等の音響特性を、流体抵抗や構造係数（形状係数や空孔率など）といったパラメータから算出することは困難を伴う。例えば、布前面から見た音響インピーダンス、つまり入力インピーダンスを測定しただけでは、同じ材質であっても厚さ、枚数等の諸条件が変化するたびに測定し直す必要がある。ここで、材料の特性音響インピーダンスが分かれば、諸条件が変化しても特性音響インピーダンスから直ちに吸音率等の特性を算出することができる。つまり 1 つの材料についてあらかじめ 1 回、測定を行うだけでその後は計算により諸パラメータを求められるという大きなメリットがある。こうした例から分かるように特性音響インピーダンスは材料の本質的な特性であり、材料の音響特性の最も基本的かつ重要なものである。

そのため、音響的実験からこれを求める方法が検討されてきたが、従来からの定在波比法などの実験方法では手間や非常に長い時間がかかるという欠点があった。近年の測定、分析器の発達により、伝達関数法⁽⁷⁾（2マイクロホン法）の理論を適用できるようになり、この方法が主流となっている。

この伝達関数法は、一般には広い周波数帯域にわたっての伝達関数を測定し、それを利用して吸収係数および特性音響インピーダンスなどの音響特性を求めるものである。この方法により、諸特性の算出を短時間でかつ簡便に、高精度で行うことができるようになった。この布の枚数検出装置を改良し、最適な設計をするにあたり、布の特性音響インピーダンスを利用することが有効であると考えた。

本研究課題においては、測定の信頼性向上を目的として、B & K製インピーダンスチューブを導入し、伝達関数法による布をはじめとする多孔性材料の諸音響特性を把握するための簡単かつ信頼性の高い測定方法を考案し、基礎的実験を行った。

本研究においては、布の入力インピーダンスの実測値と、布の音響特性の計算値、をそれぞれ布と検出部を含む音響系の理論解析に導入し計算を行った。ここでは装置の検出部の音響系を電氣的等価回路に置き換えることで解析を行っている。その解析の計算とその検討は第4章にて述べる。

報告書の第5～6章では、位相特性、振幅特性を用いた非接触での枚数検出法について、有限要素法による数値解析を行った結果について述べる。

現在、機種が多様化や開発期間の短縮に伴い、解析ツールを用いたCAE（computer aided engineering）による製品化が広い分野で行われ始めており、これらの数値解析ツールを有効活用した設計開発および製造の数値解析シミュレーションに対する要求はますます高まっている。これらの解析ツールは基本的に有限要素法（FEM）または境界要素法（BEM）の数値解析法を採用しているものがほとんどであり、音響・騒音分野においてもこれらの数値解析法を用いた汎用数値解析ツールが数種類存在し、各方面に活用されている。

本研究室においても音響解析プログラムSYSNOISE Rev5.4およびメッシュ作成に使用するHyper Mesh 2Dを導入している。

第5章では本研究室における数値解析環境の説明、第6章では、有限要素法を用いて先に述べた布の音響特性を導入した検出部の数値解析値を求め、実測値、理論解析値と比較した結果について述べる。

第7章では、多孔性膜材料の積層における基礎的データとして、異なる粒径におけるガラスビーズ層を積層させた場合の垂直入射吸音率を理論的に求め、2マ

マイクロホンインピーダンス測定管を用いた実験結果と比較した結果について記した。

第8章では、多孔性膜材料が湿度から受ける影響の基礎的データとして、粒状材料の吸音率ピーク周波数を求めた結果について記した。

第9章では、多孔質の薄膜材料の透過損失を測定に用いることが出来る、4マイクロホン法を使用した透過損失測定システムの構築について記した。

第10章では、本報告書のまとめを記した。

第2章 枚数検出装置の概要及び測定機器

2-1 音響を利用した布の枚数検出の原理

装置の概略を図2-1に示す。布を密着させた剛壁に、剛壁から一定の隙間を隔てて検出部の空気柱管端を設置する。このとき検出部の音響系には、吸音材のような多孔質材料を管端から距離を置いて固定したときと同様の効果が布の枚数に応じて緩やかに現れる。つまり布の枚数により、厚み方向の布の表面から見た音響インピーダンス、すなわち、入力インピーダンスが変化する。したがって空気柱開口端に接続される音響インピーダンスは変化するため、装置内部より音波を放射したとき、布の枚数により検出部と布を含む音響系の伝達関数は変化する。このように、布の枚数変化が伝達関数の変化に対応するため、枚数の検出が可能となる。

また図2-1について、検出部、布、剛壁を上下逆に見ると、台の上に置かれた布に空気柱開口端面を近接させた場合等の実際の例に相当する事がわかる。

2-2 枚数検出装置の概要

実験に使用した空気柱は内径18mm、空気柱の長さは5～30 mmまで5mm間隔で6種類、フランジ幅は5,10,20mmの3種類、合計18種類の検出部を用いた。また、隙間は検出部の上端から剛体壁までの距離を1～3mmまで0.5mm間隔で5通りを設定した。マイクロホンとスピーカはともにシリコンチューブを介して装置に取り付けマイクロホンとスピーカの振動絶縁を図っている。マイクロホン側のチューブの内径は1mmとし、長さは30mmにした。また、スピーカ側のチューブの内径は2.5mm、長さは30mmである。

布はクリップにより剛体壁に固定し、軽い張力がかかるように調整した。なお、布を固定するための剛体壁として透明なアクリル材を使用し、布と剛体壁の密着状態を確認できるようにした。

また本実験装置の音源としては、ホーン型ツイータスピーカを使用し、マイクはリオン社製1/4インチ型精密マイクロホンを使用した（図2-2参照）。

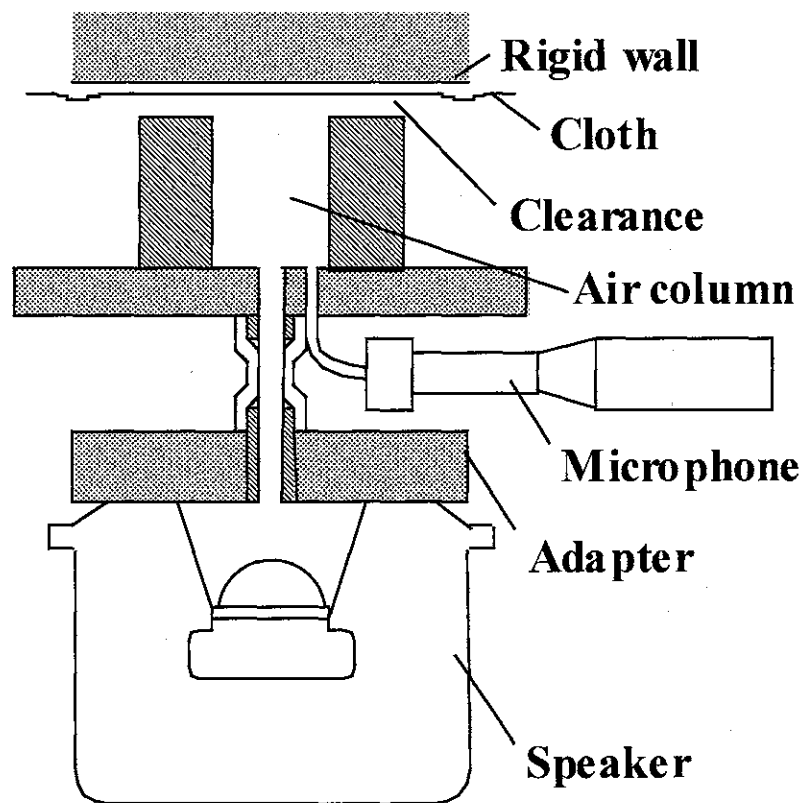


図2-1 装置の概略

2-3 測定機器

本論文で使用した測定機器は以下の通りである。

1) FFT デジタルスペクトラムアナライザ

アドバンテスト社製 R9211C

分析レンジ 10,20,50,100,200,500 mHz
1,2,5,10,20,50,100,200,500 Hz
1,2,5,10,20,50,100 kHz

分解能 25 ～ 3200 lines (1 channel)
25 ～ 1600 lines (2 channel)
25 ～ 800 lines (4 channel)

使用時: 400 lines (Servo Mode)

スペクトラムアナライザのレンジとスペクトル幅の関係

分解能[Hz]=周波数レンジ[Hz]÷ライン数

(10kHz- 400lines → 分解能25Hzを使用)

2) 精密騒音計

リオン社製 NA- 40

測定範囲 音圧レベル 15 ～ 150 dB (A)

周波数範囲 2 ～ 70000 Hz , ± 3 dB

3) 1/4インチ型精密コンデンサマイクロホン

リオン社製 UC- 29

外径 ϕ 7.00 mm

バイアス電圧 200 V

感度 - 48 dB/Pa

容量 8 pF

温度係数 0.01 dB / °C

振動膜 チタン合金

測定範囲 音圧レベル 35 ～ 130 dB (FLAT)

周波数範囲 2 ～ 70000 Hz , ± 3 dB (FLAT)

4) ユニバーサルカウンタ（時間間隔測定機能を使用）

日置電機社製	3601
測定範囲	100nsec～999.99999sec
倍率	$10^0, 10^1, 10^2, 10^3, 10^4$
タイムユニット	100nsec
測定確度	±トリガ誤差 / N ±1カウント ±基準時間確度
	N: 倍率の平方根

5) デュアルディケードフィルタ

NF回路設計ブロック社製	FV- 624
遮断周波数	0.1Hz～199.9kHz
同上設定方式	3桁ディケード方式
遮断周波数確度	(at 25°C)
	0.1Hz～99.9Hz 3レンジ設定値±2%
	1Hz～999Hz 3レンジ設定値±2%
	0.01kHz～9.99kHz 3レンジ設定値±2%
	0.1kHz～99.9kHz (2桁以上設定) ±3%
減衰傾度	24 dB / oct

6) 高速電力増幅器

NF回路設計ブロック社製	4010
出力	±150Vレンジ (100Ω)
周波数特性	+0.5dB, - 3dB
	40Hz～500kHz
	(出力電圧 20V, 400Hz 基準 連続可変利得調整器 CAL時)
高調波ひずみ率	0.1% (40Hz～1kHz)
	1.0% (40Hz～50kHz)
	3.0% (40Hz～500kHz)
雑音出力レベル	(1+0.4G) mV _{rms} , G: 利得
温湿度範囲	動作時 0～+50°C 10～90% RH
	保存時 - 20～+60°C 10～80% RH

7) スピーカ

FOSTEX 社製 FT-17H

インピーダンス 8 Ω

瞬間最大入力 40W (MUS)

連続最大入力 12W (NOM)

出力音圧レベル 98.5dB / W (1m)

8) デジタル・マルチ温度計

アドバンテスト社製 TR2114

温度測定部 (シース型 T 熱電対)

測定範囲 - 270°C ~ + 400°C

分解能 0.1°C

温度係数 0°C ~ +18°C, +28°C ~ +50°C において,
 $\pm(0.005\% \text{ of rdg} + 0.2^\circ\text{C})/^\circ\text{C}$

測定方式 積分方式

測定速度 約 2.5 回/sec

使用環境 温度 0°C ~ +50°C, 湿度 85% 以下

9) X 軸ラックビニオンステージ CX-202

明立精機株式会社製

移動量 $\pm 30 \text{ mm}$

最小読取 バーニア読 0.1 mm

移動精度 真直度 0.03mm

耐荷重 4 kg

自重 0.7 kg

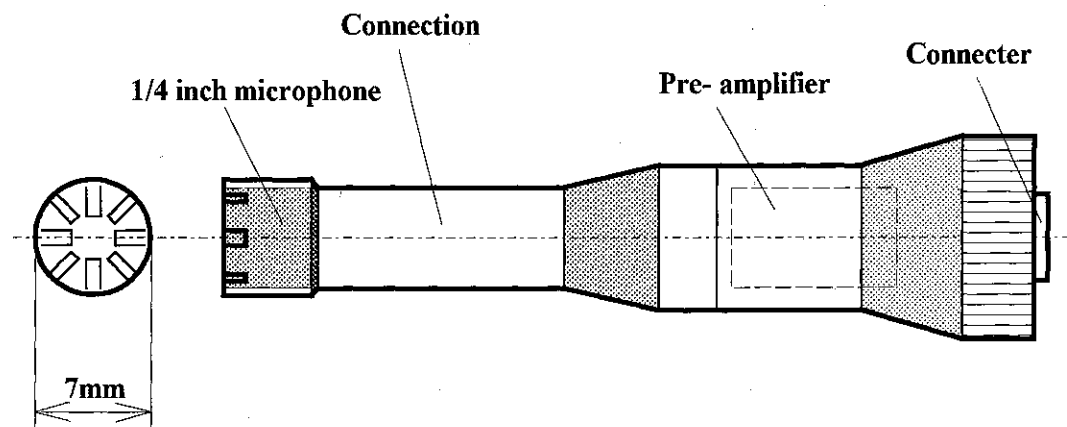


図2-2 精密コンデンサマイクロホンの全体構造

2-4 本測定法の適用例

布が1枚であるか否かを判別する本測定法の適用例を図2-3に示す。テーブルに置かれた布に検出部の管端を近づけることにより検出を行う。この他にも応用が考えられるであろう。

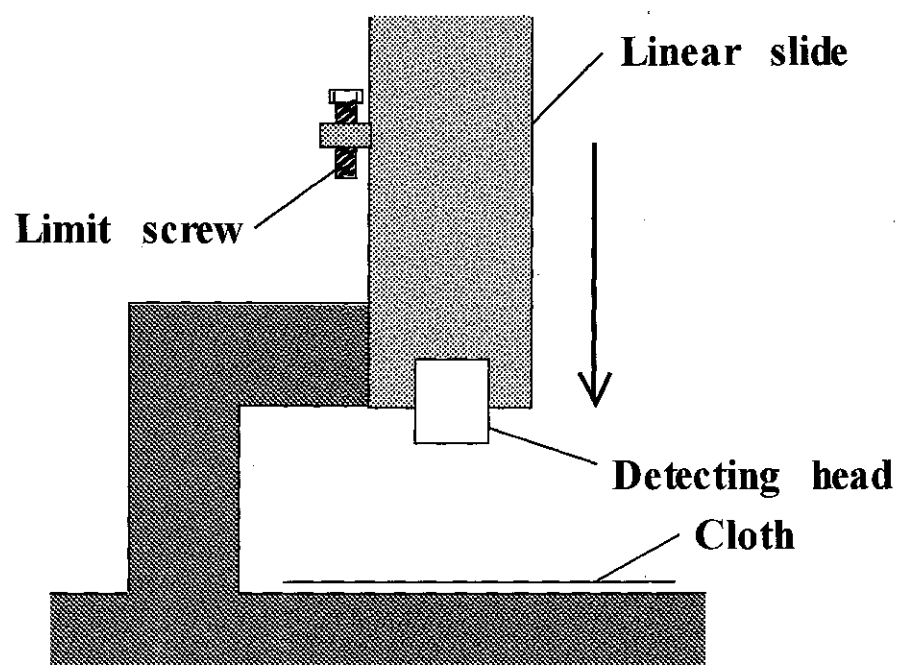


図2-3 本測定法の適用例

第3章 枚数検出装置の基礎実験

3-1 伝達関数測定

本章では、布を含む検出部音響系の伝達関数において、特定の周波数における周波数応答の伝達関数変化と枚数の関係に着目している。その基礎実験として、布の枚数を変化させ、それぞれの場合の伝達関数の周波数応答を測定し、その結果から伝達関数と枚数の関係を検証した。そのために、ここでは面密度、厚さ、材質等が異なる11種類の布A～Kにおいて、布の枚数が1枚、2枚の時の伝達関数の周波数応答の測定を行った。その種類を表3-1に示す。うちA～Gの7種類の布はJIS L 0803染色堅ろう度試験用添付白布の中から用いた。

図3-1は伝達関数測定の際に使用した装置および周辺機器の構成を示すブロック図である。FFTアナライザに内蔵されている信号発生器から0～10kHzの正弦波スイープ信号をスピーカから装置内に放射する。それを基準信号としてAチャンネルに入力し、マイクが検出部の空気柱管端より拾った信号を精密騒音計を介してBチャンネルに入力しフーリエ解析を行う。

3-2 伝達関数測定結果

図3-2は空気柱長さ25mm、フランジ幅20mm、隙間1.5mmにおいて布H（綿、厚さ0.565mm）を用いた場合の、1枚、2枚時の伝達関数の振幅周波数応答を測定した結果を示したものである。実線が1枚時、破線が2枚時を表している。1.4kHz近傍で振幅に変化が見られ、1枚、2枚時の振幅差が明確に確認できる。

図3-3に1枚時の振幅を基準とした2枚時の振幅を示す。1.4kHz近傍で振幅差が大きくなっているのが分かる。これは空気柱の音響コンプライアンス成分と隙間のインピーダンスがなす振動系の共振点が多孔質である布の存在により影響を受けるためである。最も振幅差が大きくなる周波数はフランジ幅、隙間、空気柱長さにより異なり、また布の種類によっても異なるが、後者の影響は小さいためフランジ幅、隙間、空気柱長さの組み合わせにつき代表の周波数を選ぶことにより布の種類が変わっても検出は可能であった。

音響系における共振周波数近傍の正弦波を放射した際の出力電圧を測定することで簡単な装置により布の枚数の検出が可能となる。これが本測定法の原理である。

表3-1 実験に使用した布

Standard Adjacent Fabrics for Staining of Colour Fastness Test JIS L 0803		
Code of Cloth	Material of Fiber	Code No (JIS)
A	Silk	2-2
B	Cotton	3
C	Rayon	5
D	Cellulose Acetate Rayon	7
E	Nylon	8
F	Polyester	10
G	Acryl	11

General Fabrics			
Code of Cloth	Material of Fiber	Thickness $\times 10^{-3} \text{m}$	Surface Density kg/m^2
H	Cotton	0.565	0.147
I	Wool	0.872	0.263
J	Wool	0.460	0.158
K	Polyester	0.210	0.0898

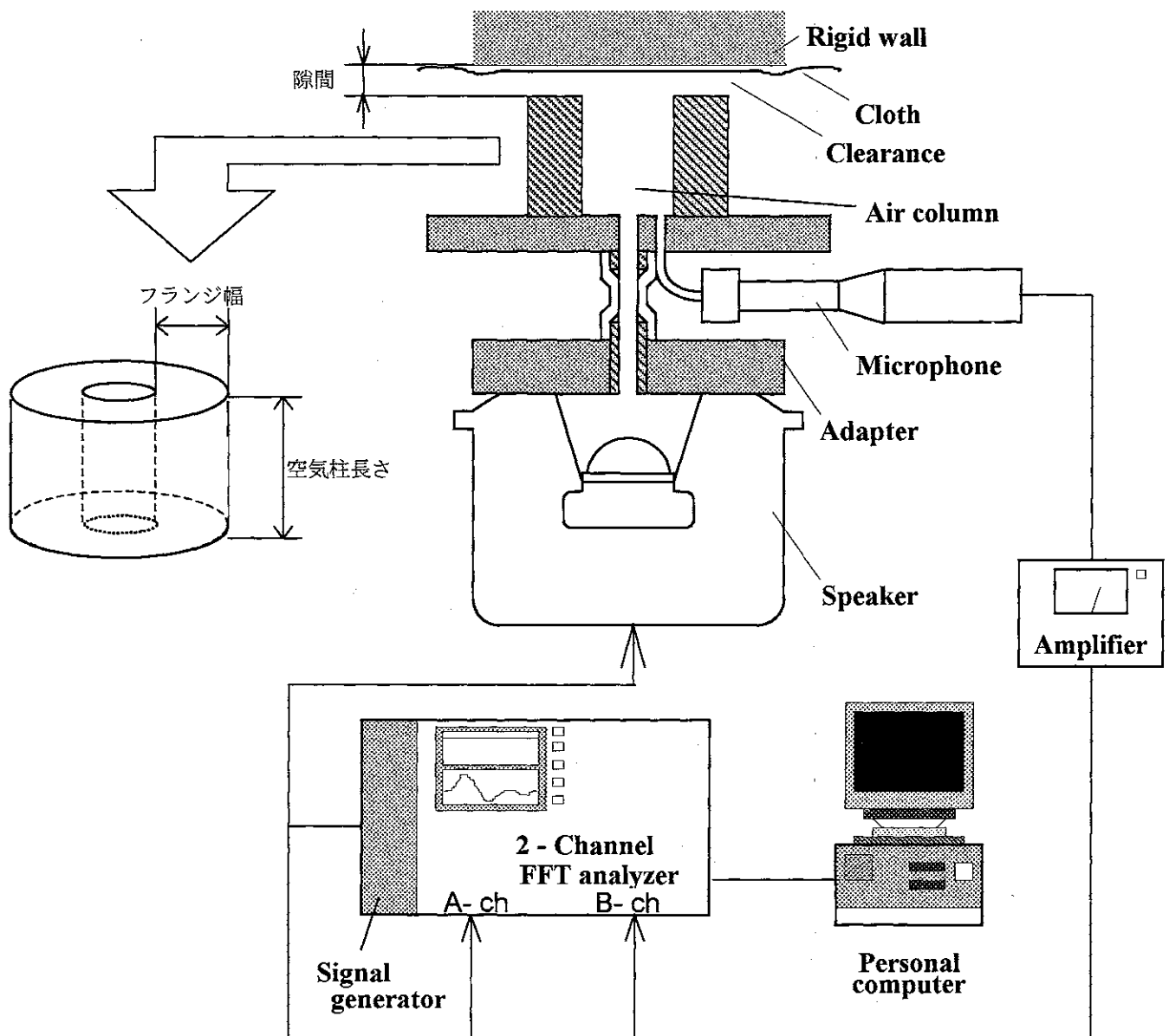


図3-1 伝達関数測定のパック図

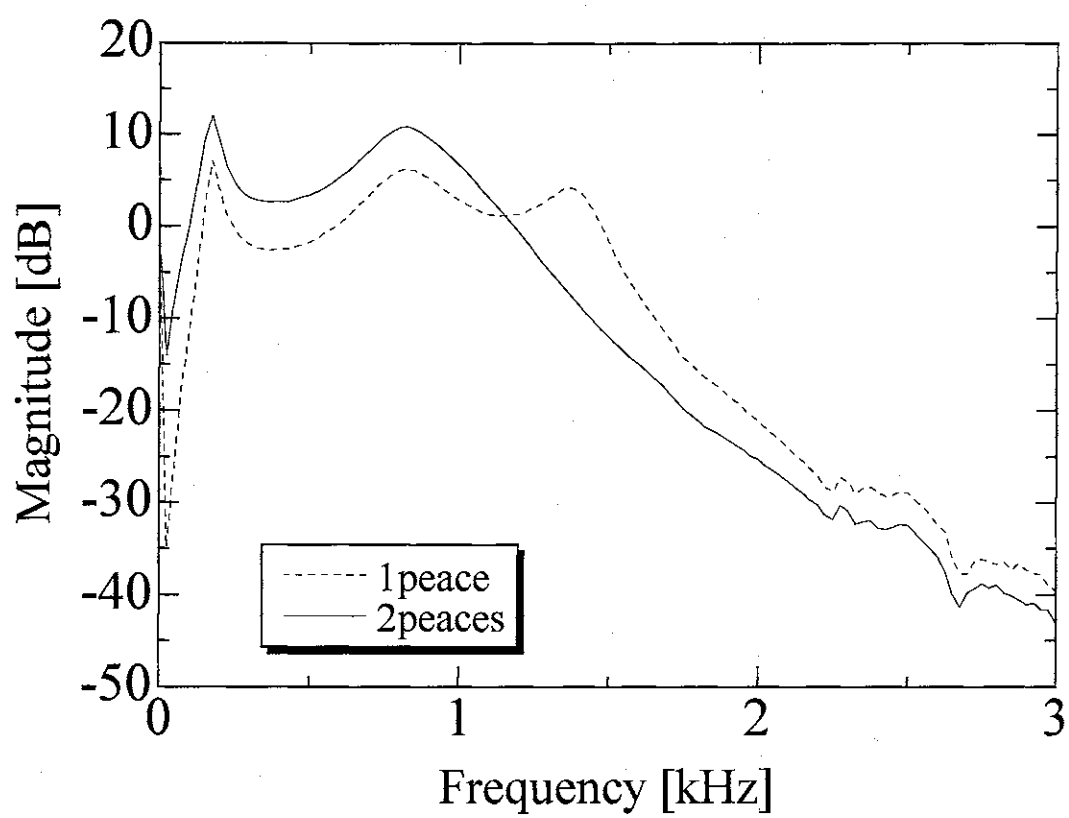


図3-2 伝達関数の測定結果（布H）

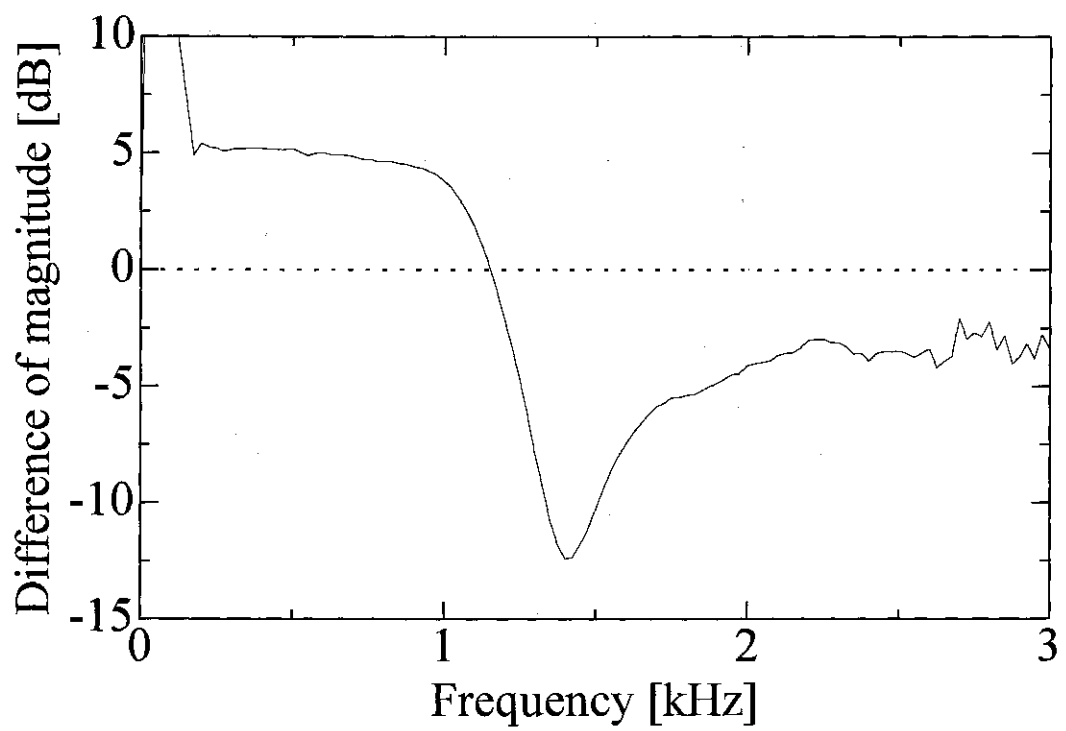


図3-3 1枚時と2枚時の振幅差（布H）

3-3 再現性

実測値の再現性のため同じ実験を繰り返して行った。図3-4は空気柱長さ20mm，フレンジ幅10mm，隙間1.5mmにおいて，布J（ウール，厚さ0.460mm）を用いて1枚時，2枚時それぞれの測定結果を5回分表している。これを見ると多少のばらつきはあるものの，1枚であるか否かを判別することは十分可能である。

また，条件を変えて行っても同様な結果が得られた。

3-4 布のたるみによる影響

図3-5に布C（レーヨン，厚さ0.141mm）について，図3-6に布E（ナイロン，厚さ0.121mm）について，図3-7に布J（ウール，厚さ0.460mm）について空気柱長さ20mm，フレンジ幅10mm，隙間1.5mmに設定したときの布のたるみの有無による測定結果を示す。実線が「たるみ無し1枚」，破線が「たるみ無し2枚」，点線が「たるみ有り1枚」を表している。

通常は布と剛体壁の間に隙間ができない程度の張力を加えているが，「たるみ有り」の場合は故意に布をたるませて測定を行った。たるみの大きさを正確に設定する事は困難であるが，空気柱開口端面に接触しない程度に設定した。

グラフを見ると，たるみを持たせた場合検出部の共振が小さくなる。我々が着目している検出部の共振点付近での検出は困難である事が判った。

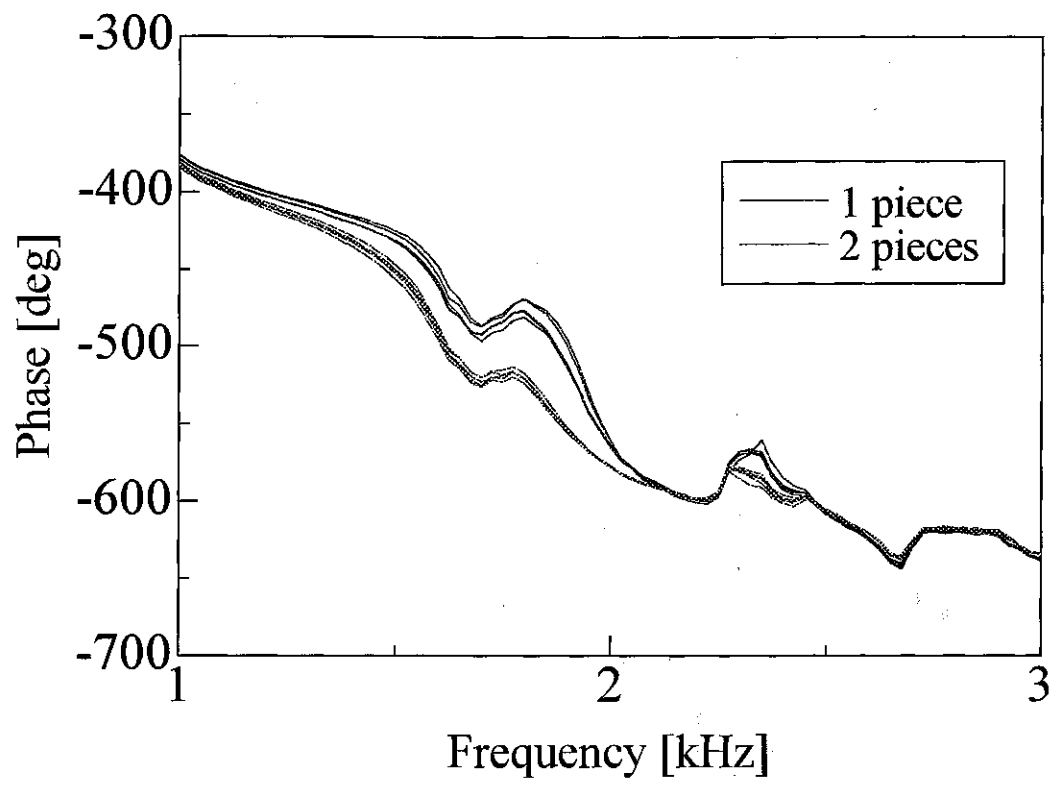


図3-4 再現性 (布 J)

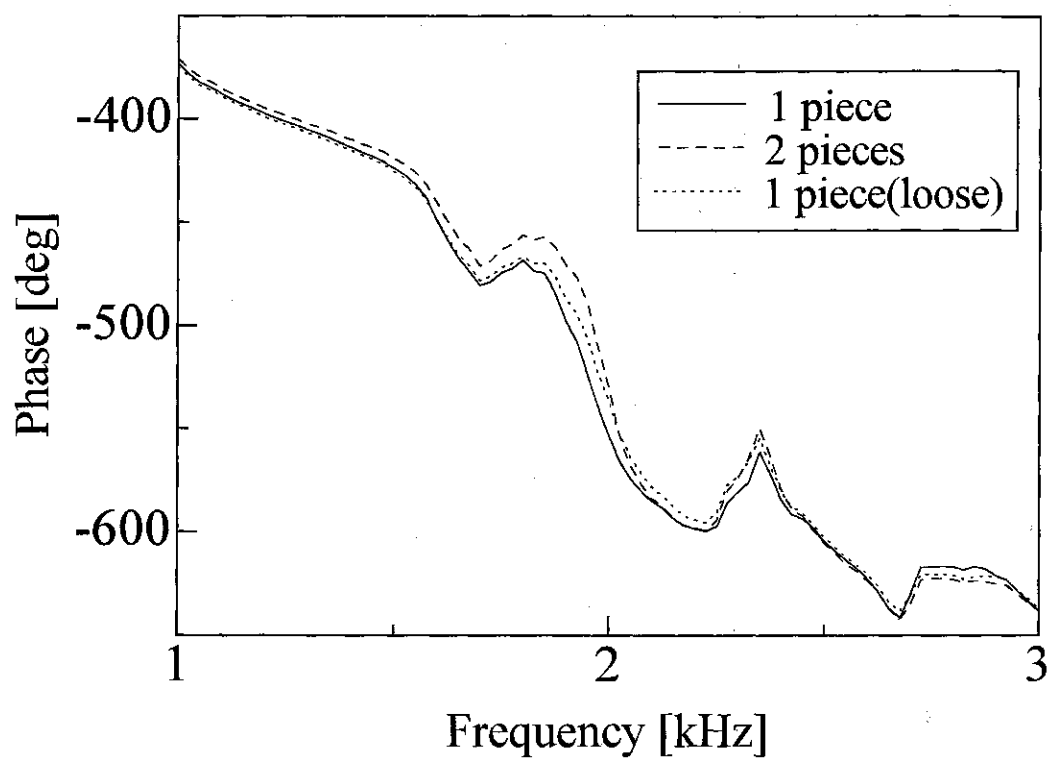


図3-5 位相特性に与える布のたるみの影響（布C）

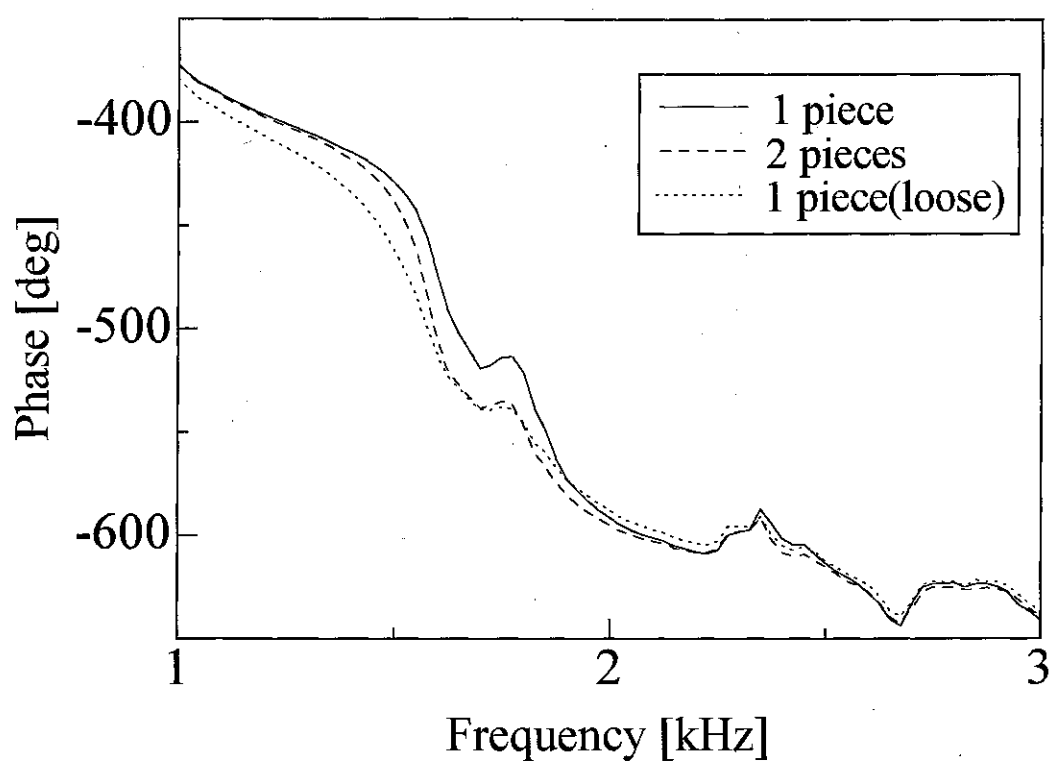


図3-6 位相特性に与える布のたるみの影響（布E）

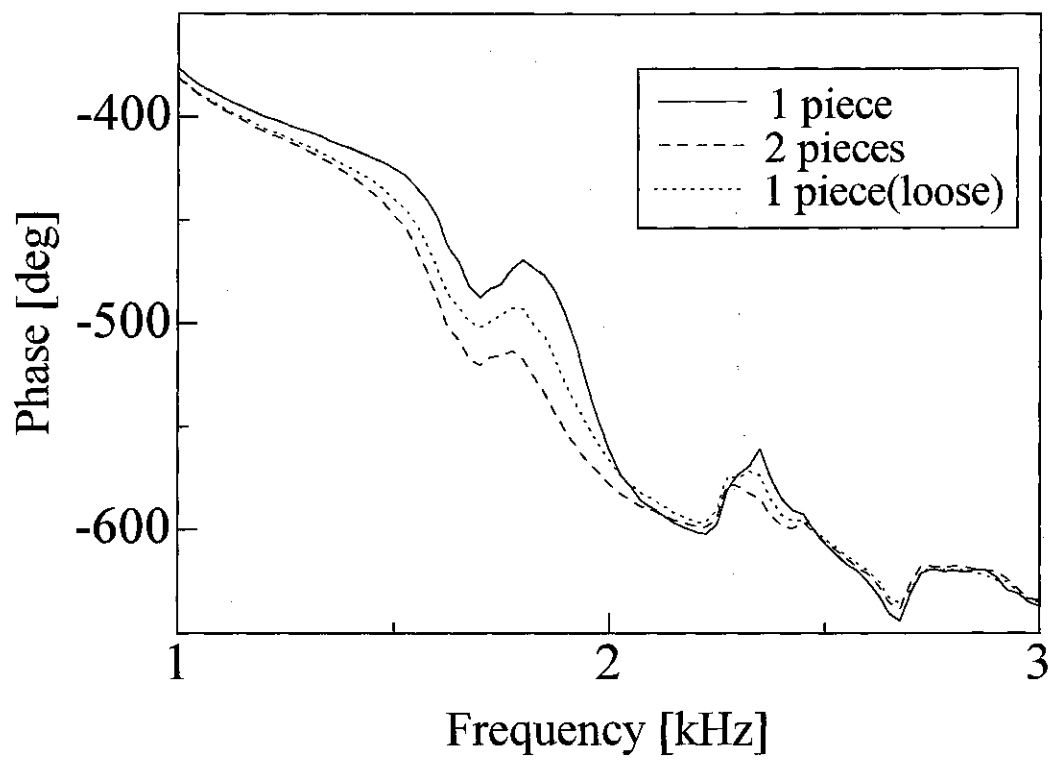


図3-7 位相特性に与える布のたるみの影響（布J）

第4章 枚数検出部の音響系の理論解析

4-1 音響系の等価回路

本章では図2-1で示した装置において、検出部の音響系を電氣的等価回路に置き換えることにより解析を行う。

まず、装置の検出部を図4-1のように7つの音響素子（布、隙間、空気柱、スピーカ接続部、マイクロホン接続部、スピーカ空洞部、マイクロホン空洞部）に分け、4点（①隙間と空気柱の境界面②空気柱下端③スピーカ空洞部付け根④マイクロホン空洞部付け根）での音圧と体積速度を設定する。

そして、7個の音響素子を個々に理論解析する。

4-1-1 スピーカの空洞部

スピーカの空洞部は、電気回路で置き換えるとコンデンサに相当するので、スピーカのインピーダンス Z_{sr} は次式で与えられる。

$$Z_{sr} = \frac{1}{j\omega C_{sr}} \quad (4-1)$$

ここで C_{sr} は音響キャパシタンス（電気容量に相当）で、空洞部の体積 V_{sr} から次式で与えられる。

$$C_{sr} = \frac{V_{sr}}{\rho c^2} \quad (4-2)$$

4-1-2 マイクロホン空洞部

マイクロホン空洞部のインピーダンス Z_{mr} は、スピーカ前室のインピーダンス Z_{sr} と同様に次式で与えられる。

$$Z_{mr} = \frac{1}{j\omega C_{mr}} = -j \frac{\rho c^2}{V_{mr} \omega} \quad (4-3)$$

ただし V_{mr} はマイクロホン前室の空洞部体積である。

4-1-3 隙間のインピーダンス

布と検出部の隙間において隙間入口から見たインピーダンス Z_g は次式⁽¹²⁾によって表せる。ここで r_f は検出部の半径, $r_f - r_a$ は隙間の重なり部分の長さ, S_g は隙間の空間を内外に振り分ける平均半径における断面積をそれぞれ示す。

$$Z_g = \Gamma \frac{\tanh k_g (r_f - r_a)}{k_g S_g} \quad (4-4)$$

$$S_g \equiv 2\pi\{(r_a^2 + r_f^2)/2\}^{1/2} l_s \quad (4-5)$$

このとき Γ は次式で表される。ここで l_s は布から検出部までの距離, μ は空気の粘度である。

$$\Gamma = \left\{ \sum_{q=1,3,5,\dots}^{\infty} \left(\frac{q^4 \pi^4 \mu}{8 l_s^2} + j \frac{q^2 \pi^2 \rho \omega}{8} \right)^{-1} \right\}^{-1} \quad (4-6)$$

また, k_g は隙間における位相定数であり次式で求められ, κ は空気の体積弾性率を示す。

$$k_g = \sqrt{\frac{j\omega\Gamma}{\kappa}} \quad (4-7)$$

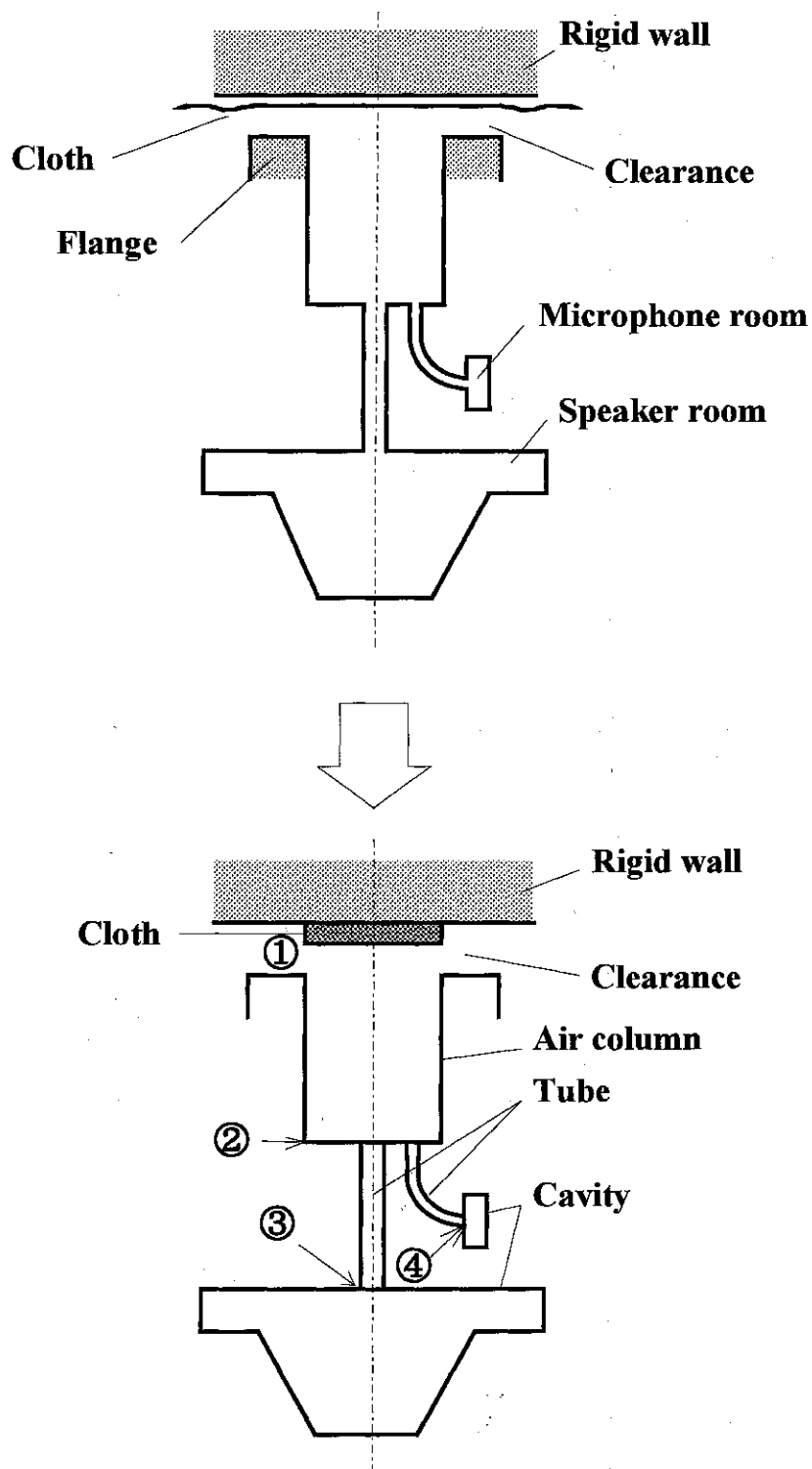


図4-1 検出部の音響系に関する理論解析のモデル図

4-1-4 空気柱

空気柱は①点と②点の間の音圧と体積速度をもとに伝達マトリックスを用いて表す。ここでは②点から上側を見たインピーダンスを求める。

入口を②点，出口を①点とし，②点での音圧と体積速度を p_2 ， U_2 ，①点についても同様に p_1 ， U_1 とすると②～①点の伝達マトリックスはa-4-1節より次式となる。

$$\begin{bmatrix} p_2 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_p & B_p \\ C_p & D_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ U_1 \end{bmatrix} \quad (4-8)$$

ここで，四端子定数 $A_p \sim D_p$ は減衰を無視しているため，式(a-27)において検出部の空気柱長さ l_p ，内半径 r_p を用いて得られる。

4-1-5 スピーカ接続部

スピーカ接続部は空気柱と同様にして，②点と③点の間の伝達マトリックスを用いて表す。ここでは②点からスピーカ側を見たインピーダンスを求める。

入口を②点，出口を③点として，②点での音圧と体積速度を p_2 ， U_2 ，③点についても同様に p_3 ， U_3 とすると， N_{sh} にあたる②～③点の伝達マトリックスは次式となる。

$$\begin{bmatrix} p_2 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{sh} & B_{sh} \\ C_{sh} & D_{sh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_3 \\ U_3 \end{bmatrix} \quad (4-9)$$

四端子定数 $A_{sh} \sim D_{sh}$ は式(a-27)において頸部長さ l_{sh} ，頸部半径 r_{sh} を用いて得られる。また，式(a-28)より

$$Z_{sp} \equiv \frac{p_2}{U_2} \quad (4-10)$$

$$Z_{sr} \equiv \frac{p_3}{U_3} \quad (4-11)$$

より，式(4-9)は次式のように変形できる。

$$Z_{sp} = \frac{A_{sh}Z_{sr} + B_{sh}}{C_{sh}Z_{sr} + D_{sh}} \quad (4-12)$$

これより、②点からスピーカ側を見たインピーダンス Z_{sp} が得られる。

4-1-6 マイクロホン接続部

マイクロホン接続部でも空気柱と同様にして、②点と④点の間の伝達マトリックスを利用する。ここでは②点からマイクロホン側を見たインピーダンスを求める。

入口を②点、出口を④点として、②点での音圧と体積速度を p_2, U_2 、④点についても同様に p_4, U_4 とすると、 N_{mh} にあたる②～④点の伝達マトリックスは次式となる。

$$\begin{bmatrix} p_2 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{mh} & B_{mh} \\ C_{mh} & D_{mh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_4 \\ U_4 \end{bmatrix} \quad (4-13)$$

四端子定数 $A_{mh} \sim D_{mh}$ は同様に頸部長さ l_{mh} 、頸部半径 r_{mh} を用いて得られる。また、4-1-5節と同様に

$$Z_m \equiv \frac{p_2}{U_2} \quad (4-14)$$

$$Z_{mr} \equiv \frac{p_4}{U_4} \quad (4-15)$$

より、式(4-13)は次式のように変形できる。

$$Z_m = \frac{A_{mh}Z_{mr} + B_{mh}}{C_{mh}Z_{mr} + D_{mh}} \quad (4-16)$$

これより、②点からマイクロホン側を見たインピーダンス Z_m も得られる。

4-1-7 布の入カインピーダンス

布の入カインピーダンスは実測値と、音響特性から求めた計算値をそれぞれ理論解析に導入する。

音響特性 z_c, k_a から布の入カインピーダンスへの導出は以下のように導く。

2厚さ法から得られた特性音響インピーダンス z_c と k_a の実部をそれぞれ $\text{Re}(z_c)$, $\text{Re}(k_a)$, 虚部をそれぞれ $\text{Im}(z_c)$, $\text{Im}(k_a)$ とすると, z_c , k_a は次式で表される.

$$z_c = \text{Re}(z_c) + j \text{Im}(z_c) \quad (4-17)$$

$$k_a = \text{Re}(k_a) + j \text{Im}(k_a) \quad (4-18)$$

伝搬定数 γ は,

$$\gamma = j \cdot k_a \quad (4-19)$$

であるから, 式(4-18)を代入すると式(4-19)は,

$$\gamma = -\text{Im}(k_a) + j \text{Re}(k_a) \quad (4-20)$$

これを式(a-48)に代入すると,

$$z_0 = z_c \frac{\exp\{-2d \text{Im}(k_a) + j \cdot 2d \text{Re}(k_a)\} + 1}{\exp\{-2d \text{Im}(k_a) + j \cdot 2d \text{Re}(k_a)\} - 1} \quad (4-21)$$

式(4-21)の左辺は粒子速度と音圧の比であるから体積速度と音圧の比に書き換えると式(a-28)より

$$Z_0 = \frac{p_0}{U_0} = \frac{p_0}{S \cdot u_0} = \frac{z_0}{S} = \frac{z_c}{S} \cdot \frac{\exp\{-2d \text{Im}(k_a) + j \cdot 2d \text{Re}(k_a)\} + 1}{\exp\{-2d \text{Im}(k_a) + j \cdot 2d \text{Re}(k_a)\} - 1} \quad (4-22)$$

となる. ここで,

$$\begin{aligned} & \exp\{-2d \text{Im}(k_a) + j \cdot 2d \text{Re}(k_a)\} \\ &= \exp\{-2d \text{Im}(k_a)\} \cdot \exp\{j \cdot 2d \text{Re}(k_a)\} \end{aligned}$$

オイラーの公式より,

$$\begin{aligned} &= \exp\{-2d \text{Im}(k_a)\} \cdot [\cos\{2d \text{Re}(k_a)\} + j \cdot \sin\{2d \text{Re}(k_a)\}] \\ &= \exp\{-2d \text{Im}(k_a)\} \cdot \cos\{2d \text{Re}(k_a)\} + j \cdot \exp\{-2d \text{Im}(k_a)\} \cdot \sin\{2d \text{Re}(k_a)\} \end{aligned}$$

となるので, 式(4-22)は,

$$Z_0 = \frac{z_c}{S} \cdot \frac{[\exp\{-2d \text{Im}(k_a)\} \cdot \cos\{2d \text{Re}(k_a)\} + 1] + j \cdot [\exp\{-2d \text{Im}(k_a)\} \cdot \sin\{2d \text{Re}(k_a)\}]}{[\exp\{-2d \text{Im}(k_a)\} \cdot \cos\{2d \text{Re}(k_a)\} - 1] + j \cdot [\exp\{-2d \text{Im}(k_a)\} \cdot \sin\{2d \text{Re}(k_a)\}]} \quad (4-23)$$

式(4-23)は分母の実数化を行うと,

$$\begin{aligned}
Z_o = & \frac{z_c}{S} \cdot \frac{\exp\{-4d \operatorname{Im}(k_a)\} - 1}{\exp\{-4d \operatorname{Im}(k_a)\} - 2 \exp\{-2d \operatorname{Im}(k_a)\} \cos\{2d \operatorname{Re}(k_a)\} + 1} \\
& + j \cdot \frac{z_c}{S} \cdot \frac{-2 \exp\{-2d \operatorname{Im}(k_a)\} \sin\{2d \operatorname{Re}(k_a)\}}{\exp\{-4d \operatorname{Im}(k_a)\} - 2 \exp\{-2d \operatorname{Im}(k_a)\} \cos\{2d \operatorname{Re}(k_a)\} + 1}
\end{aligned} \quad (4-24)$$

次に式(4-17)を代入して、実数部と虚数部に分けると、

$$\operatorname{Re}(Z_o) = \frac{\operatorname{Re}(z_c) [\exp\{-4d \operatorname{Im}(k_a)\} - 1] + 2 \operatorname{Im}(z_c) \exp\{-2d \operatorname{Im}(k_a)\} \sin\{2d \operatorname{Re}(k_a)\}}{S [\exp\{-4d \operatorname{Im}(k_a)\} - 2 \exp\{-2d \operatorname{Im}(k_a)\} \cos\{2d \operatorname{Re}(k_a)\} + 1]} \quad (4-25)$$

$$\operatorname{Im}(Z_o) = \frac{\operatorname{Im}(z_c) [\exp\{-4d \operatorname{Im}(k_a)\} - 1] - 2 \operatorname{Re}(z_c) \exp\{-2d \operatorname{Im}(k_a)\} \sin\{2d \operatorname{Re}(k_a)\}}{S [\exp\{-4d \operatorname{Im}(k_a)\} - 2 \exp\{-2d \operatorname{Im}(k_a)\} \cos\{2d \operatorname{Re}(k_a)\} + 1]} \quad (4-26)$$

図4-2に、伝達関数法の測定から得られた布Iの入力インピーダンスを示す。これは、布Iの枚数が1枚時と2枚時の入力インピーダンスの測定結果を重ね合わせたものである。布の枚数による伝達関数の変化は、布の前面から見た音響インピーダンス、すなわち、入力インピーダンスが布の枚数により変化することにより起こる。これを利用し布の枚数の検出が可能となる。

図4-3に、式(4-25)、(4-26)における布の表現が適正かを確認するために、伝達関数法の測定から得られた布Iの音響特性である特性音響インピーダンス z_c と複素波定数 k_a を式(4-25)、(4-26)に代入して算出した布Iの入力インピーダンスを示す。これも、図4-2と同様、布Iの枚数が1枚時と2枚時の入力インピーダンスの計算結果を重ね合わせたものである。グラフは、図4-2、図4-3双方とも太線、細線が1枚時の入力インピーダンスの実数部、虚数部をそれぞれ示し、一点鎖線、二点鎖線が2枚時の入力インピーダンスの実数部、虚数部をそれぞれ示す。

図4-2と図4-3を比較してみると、「実測値ともいえる図4-2の入力インピーダンス」と「特性音響インピーダンス z_c と複素波定数 k_a から計算で求めた図4-3の入力インピーダンス」は完全に一致している。ゆえに、布の入力インピーダンスが正しく算出されていることが分かる。

入力インピーダンスは、同じ布であっても、布の厚さ、枚数等の諸条件により変化するものであるから、通常はその都度測定しなければならない。しかし、布の特性音響インピーダンス z_c と複素波定数 k_a があらかじめ分かっているならば、式(4-25)、(4-26)の d に任意の布の厚さを代入することにより、計算のみで入力インピーダンスを算出できることが証明された。

また、この特性音響インピーダンス z_c と複素波定数 k_a から入力インピーダンスを算出する計算は、後の理論解析、数値解析において、1枚時や2枚時などの任意の枚数についての入力インピーダンス Z_0 を算出するのに用いる。

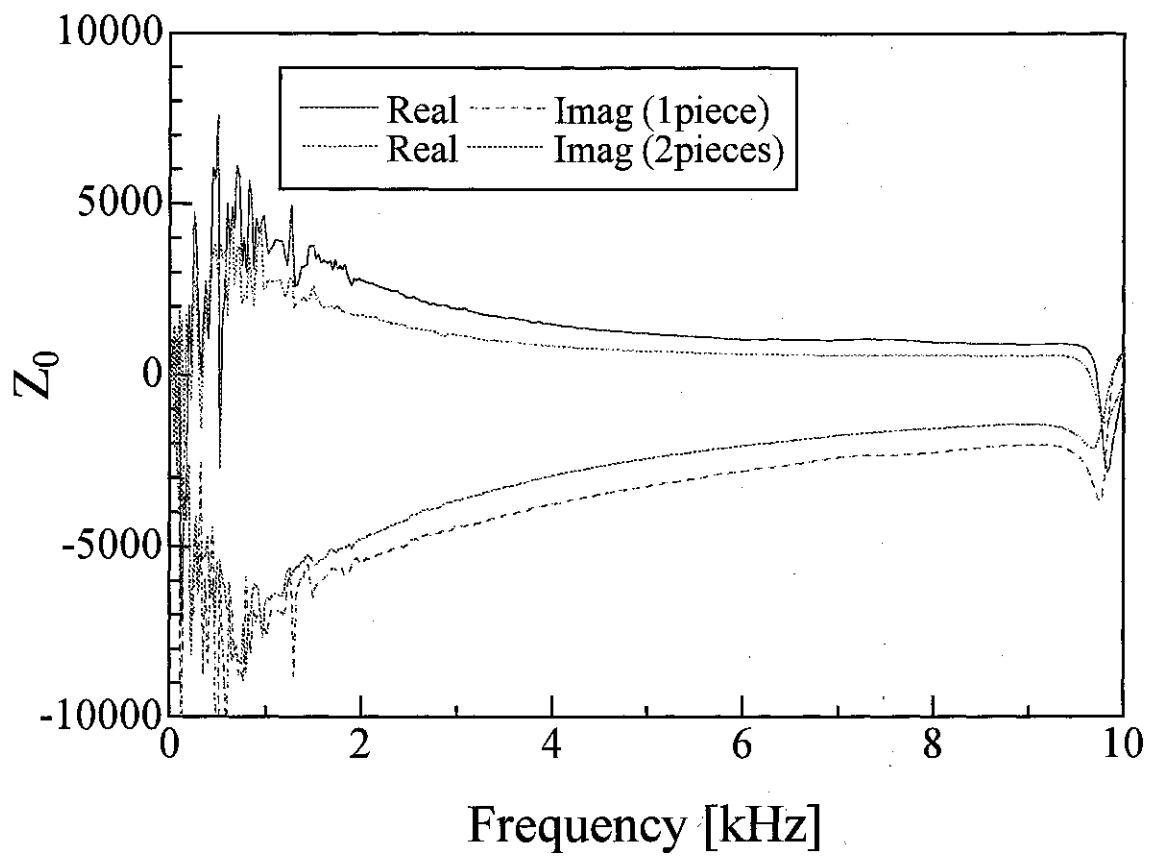
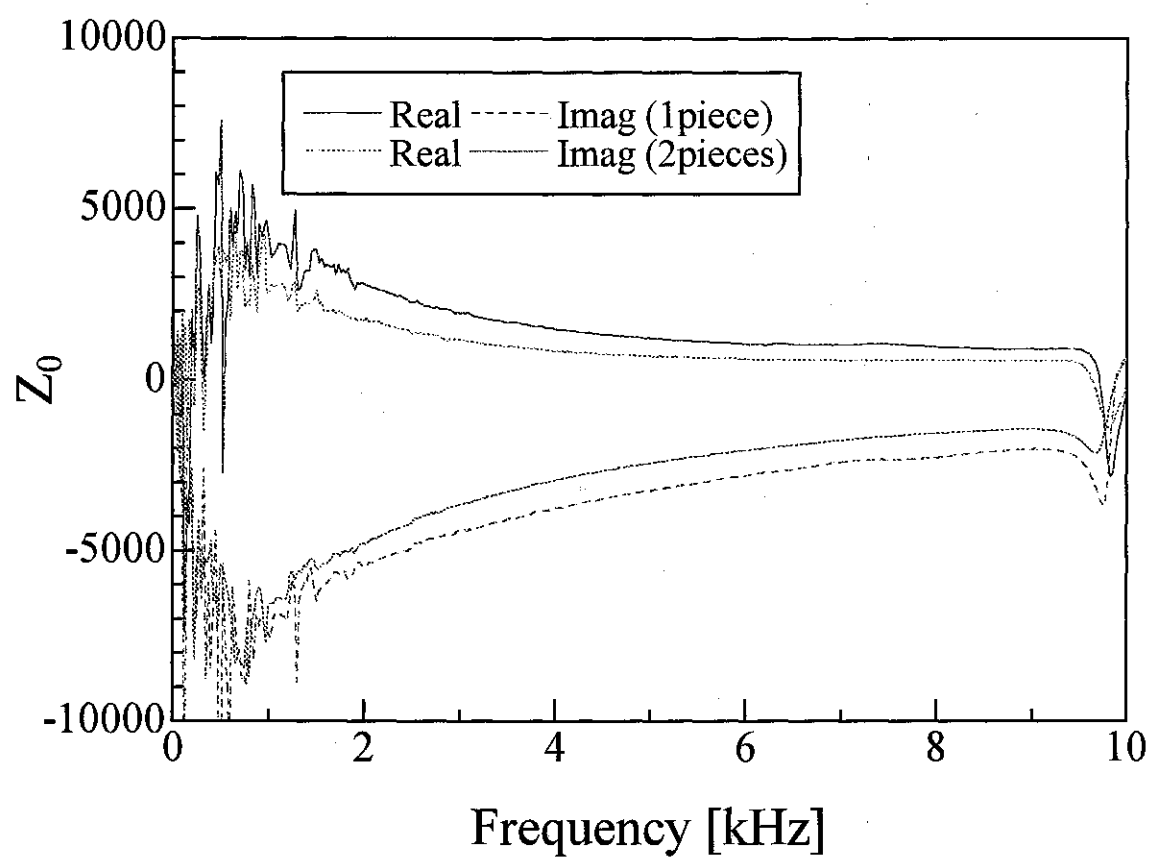


図4-2 伝達関数法により測定された入カインピーダンス（布I）

図4-3 z_c , k_a から算出された入カインピーダンス (布I)

4-1-8 等価回路図

4-1-1節から4-1-7節までのように個々の音響素子により，装置の検出部は図4-4のような等価回路で表される．

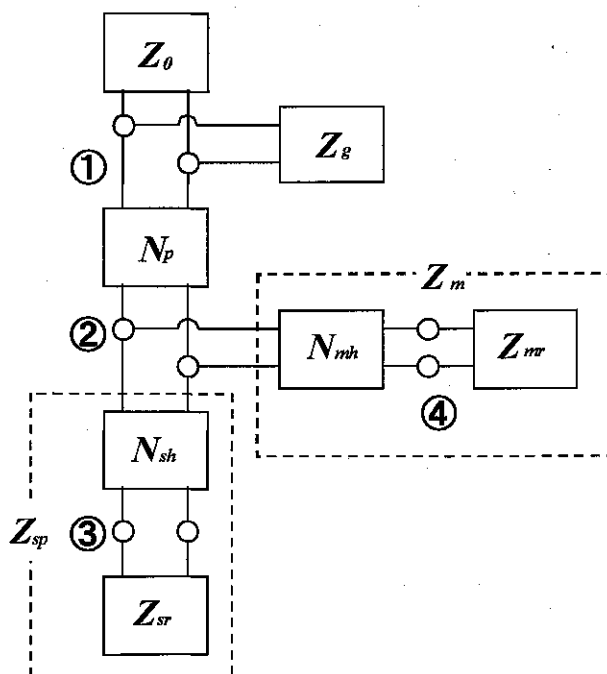
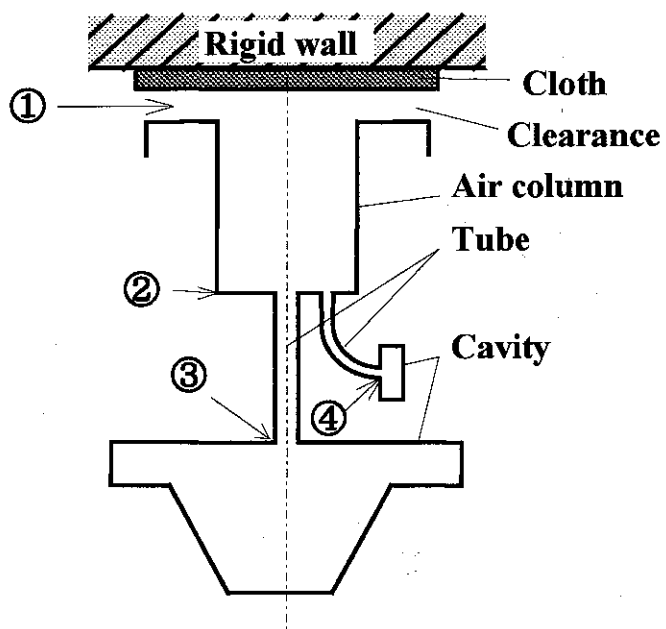


図4-4 検出部の音響系に関する等価回路

4-2 理論解析

4-2-1 並列インピーダンス

2つのインピーダンスが並列の場合、等価回路は図4-5のように表わされる。
このとき体積速度は2つに分岐し、両者には等しい音圧がかかる。

$$U = U_1 + U_2 = \frac{P}{Z_1} + \frac{P}{Z_2} \quad (4-27)$$

したがって合成インピーダンスは

$$Z = \frac{P}{U} = \frac{P}{\frac{P}{Z_1} + \frac{P}{Z_2}} = \frac{1}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}} = (Z_1^{-1} + Z_2^{-1})^{-1} \quad (4-28)$$

4-2-2 隙間と空気柱の境界面から見た回路全体の音響インピーダンス

次に隙間と空気柱の境界面から見た回路全体の音響インピーダンスを考える。
つまり図4-6の①点から見た回路全体の音響インピーダンス Z_1 は次式で表される。

$$Z_1 = \frac{1}{Z_o^{-1} + Z_s^{-1} + Z_p^{-1}} \quad (4-29)$$

ここで Z_p は図4-6における破線の囲みで、次式で表される。

$$Z_p = \frac{A_p(Z_m^{-1} + Z_{sp}^{-1})^{-1} + B_p}{C_p(Z_m^{-1} + Z_{sp}^{-1})^{-1} + D_p} \quad (4-30)$$

ただし、 $A_p \sim D_p$ は②～①点の伝達マトリックスの四端子定数

Z_m ; ②点からマイクロホン側を見たインピーダンス

Z_{sp} ; ②点からスピーカ側を見たインピーダンス

である。

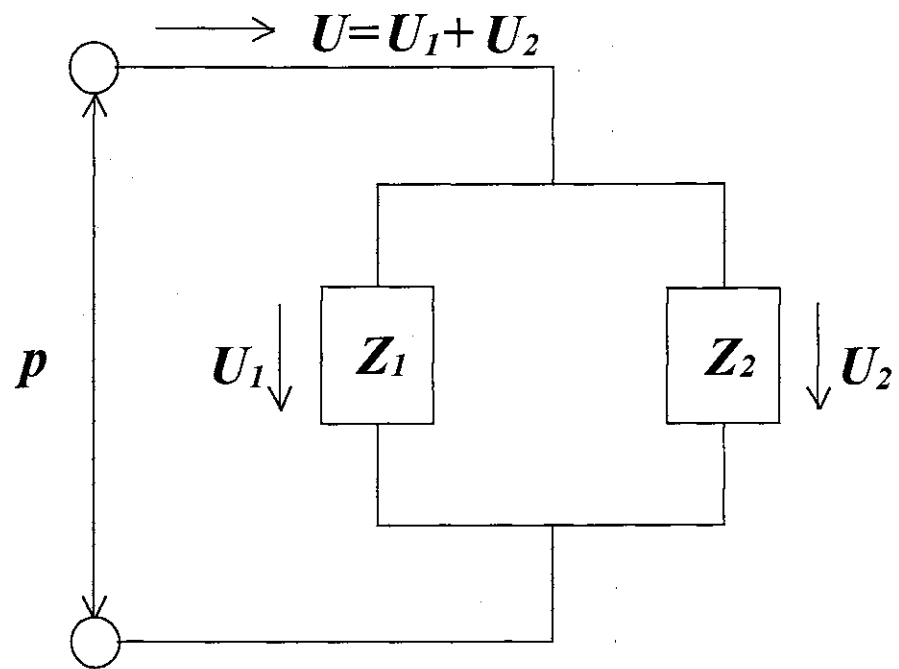


図4-5 並列の等価回路（例）

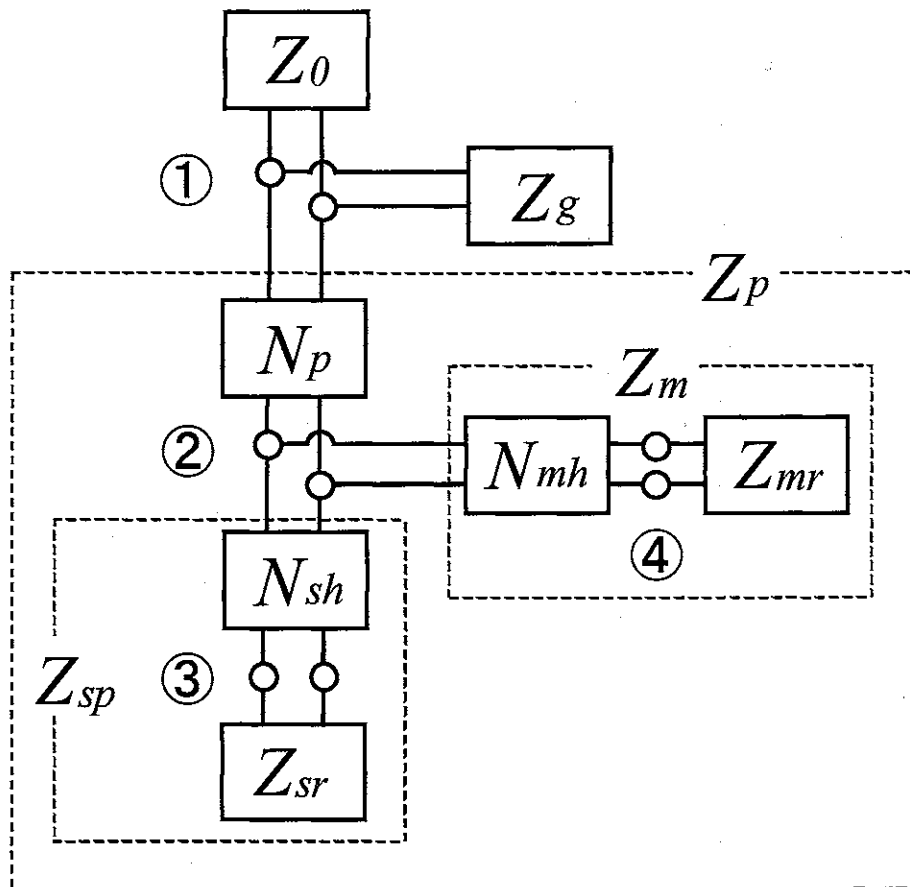


図4-6 検出部の音響系に関する等価回路
(隙間と空気柱の境界面から見る)

第5章 本研究室における数値解析環境

5-1 数値解析ツール

本研究室で扱う数値解析ツールはHyper Mesh 2D⁽¹³⁾とSYSNOISE Rev5.4⁽¹⁴⁾である。それぞれの機能についての概要を次に述べる。

・ Hyper Mesh

有限要素メッシュ作成から解析結果の評価まで行える汎用プリ・ポストシステムである。ソフト内での形状メッシュ作成およびCADで作成した形状をダイレクトに取り込み有限要素メッシュ分割を行うことができ、様々な解析ツールに対応するインターフェースを持つ。さらに材料および熱・流体解析に対応し、それらの解析および結果の評価を行うことができる。

本研究室では形状作成とそのメッシュ分割作業に用いている。

・ SYSENOISE

有限要素法（FEM）、境界要素法（BEM）を用いて、音響問題や、振動している構造物との連成問題に対応する音響シミュレーションプログラムである。音場のモデルは閉空間でも開空間でも解析可能であり、音を‘波動’として捉え、与えられた音場モデルの波動方程式（Helmholtz方程式）を導き出す。導き出された方程式に対して境界条件を定義することにより音波の伝搬や構造物の振動状況を予測し、周波数応答解析や時刻歴応答解析を行う。その結果としては音圧、音響パワー、粒子速度、粒子加速度、音響インテンシティ等を導出することができ、他にも寄与率解析、指向性特性解析や、固有値解析（振動、音響固有モード解析）等が行える。

5-2 数値解析ツールを用いた解析環境

本研究室では2台のパーソナルコンピュータでHyper MeshとSYSNOISE Rev5.4のそれぞれを使用している。Hyper Meshで作成した形状メッシュデータをSYSNOISE用テンプレートにより変換し、SYSNOISEで読み込み解析を行うという流れになっている。

それぞれの解析ツールに用いているパーソナルコンピュータの仕様は以下の通りである。

• Hyper Mesh側

CPU	Pentium Pro 200MHz
メモリー	96MB
HD	6.4GB
OS	Windows NT

• SYSENOISE側

CPU	Pentium III 933MHz
メモリー	768MB
HD	43GB
OS	Windows NT

第6章 有限要素法*を用いた数値解析

6-1 数値解析

本章ではSYSNOISEを用いて数値解析により位相特性と振幅特性に関するシミュレーションを行った。

そして数値解析の結果と実測値，理論解析値を比較した。

6-2 SYSNOISEによる数値解析法

SYSNOISEによる数値解析法には有限要素法を用い，形状メッシュもそれに対応するものを作成した。

6-2-1 形状メッシュの作成

検出部となる空気柱と隙間の断面についてモデルを作成し解析を行った。解析に用いた形状メッシュの一例を図6-1に示す。

解析に用いた形状寸法は実験装置と同じである。空気柱の半径は9.0mm。空気柱長さは5.0 mm，10.0mm，15.0mm，20.0mm，25.0mm，30.0mm，フランジ幅は5.0mm，10.0 mm，20.0mm，隙間は1.0mm，1.5mm，2.0mm，2.5mm，3.0mmと変化した。空気柱長さを変化させる場合では，フランジ幅は10.0mmとし，隙間はそれぞれの布に適した値に設定した。フランジ幅を変化させる場合は，空気柱長さは20.0mmとし，隙間はそれぞれの布に適した値に設定した。隙間を変化させる場合では，空気柱長さは20.0mmとし，フランジ幅は10.0mmに設定した。ここで隙間の「それぞれの布で適した値」とは過去の実験値，理論解析値の結果から，より大きな位相差、振幅差が得られた距離を示す。空気柱長さを20.0mm，フランジ幅を10.0mmとしたのは，実験値，理論解析値の結果によれば，布の種類によらず大きな位相差、振幅差が得られた値であったためである。

* Finite element method

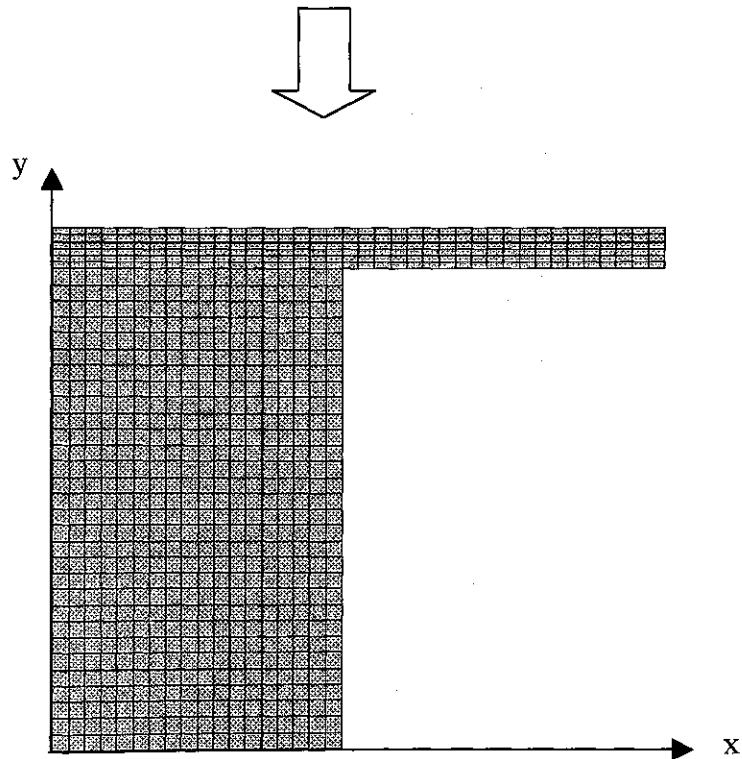
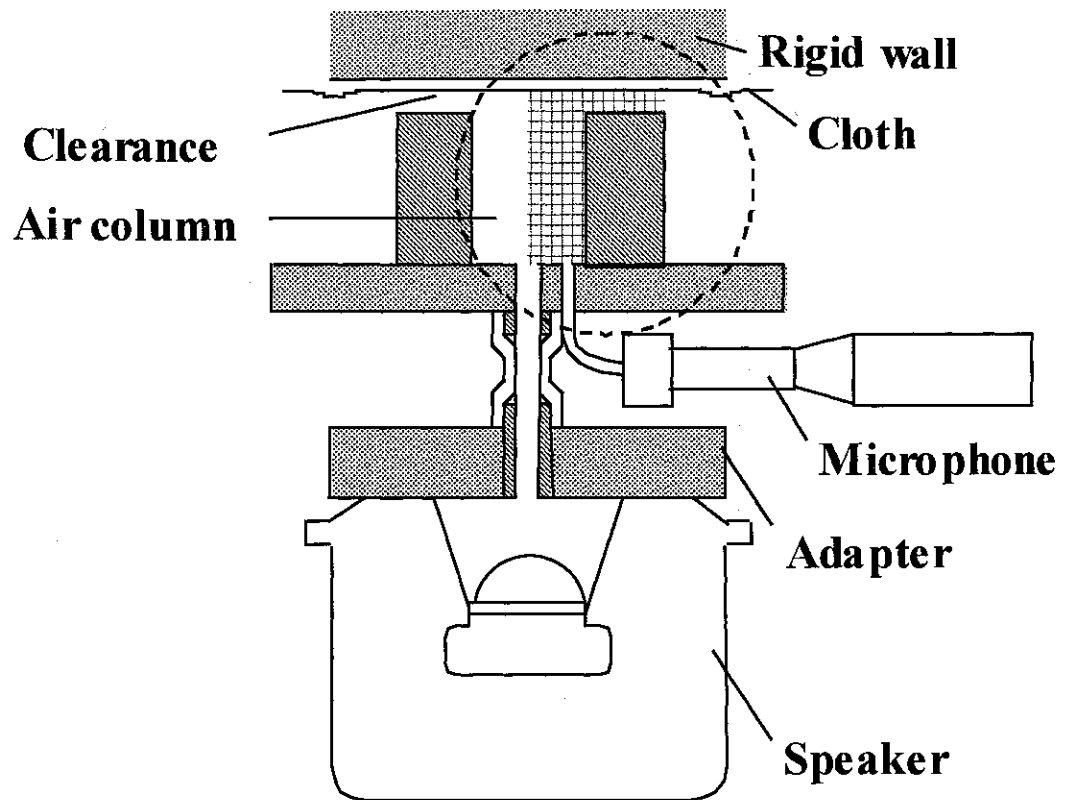


図6-1 解析モデルの一例
 (布 G 1 枚、フランチ幅 10.0mm、空気柱長さ 15.0mm、隙間 1.5mm)

隙間について、図6-1（下）の空気柱開放管端から上面までの長さは、隙間の距離から布の厚さを引いた長さである（隙間2.0mm、布H1枚ならば1.435mm）。これは上面に布の入力インピーダンス（アドミタンス）を設定するためである（6-2-2参照）。

要素は1次要素で、2次元四角要素を使用し、2次元形状とした。それぞれの要素分割数およびSYSNOISEにおけるその形状メッシュの解析可能な最大周波数（ f_{\max} ）を表6-1-1～11に示す。解析可能な最大周波数はメッシュ内における最も大きい要素の寸法より決定され、それが解析精度の目安となる。

隙間におけるY軸方向の要素分割数を細かくしたのは、解析精度の向上を狙ったためである。当初は最低3分割で解析を行っていたが、6分割、10分割での解析も行った。その結果、3、6、10分割において明確な違いは見られなかったが、布F、Gにおいては最低6分割で解析を行った。なぜ3分割で6、10分割と同様な結果が得られたかは以下の理由と考えられる。

要素分割を細かくする必要があるのは波長が短い場合（周波数が高い場合）である。この場合、解析の上限は6kHzである。音速340m/sとして6kHzのときの「波長＝音速／周波数」であるから、波長は57mmとなる。このとき隙間が最大の3mmであっても、隙間は波長の20分の1程度（ $57\text{mm}/20 \div 3\text{mm}$ ）にしかない。計算の精度から言って1/6波長以下に分割すべきであるが、この場合最低でも3分割としたため、十分に条件を満たしており精度を確保できたと考えられる。

形状メッシュを断面のハーフサイズとしたのは、計算時間の短縮化を計ったことからである。SYSNOISEにおける有限要素法解析では軸対称問題として2次元の線要素や面要素を座標軸に対して回転させた形状（軸対称形状）を扱うことができる。扱う軸対称モデルは、XY平面に作成された2次元の形状メッシュを用い、Y軸を回転軸として反時計方向に一回転させることにより軸対称問題とする。メッシュを半分にすることで要素数を半分にすることができ、計算時間を削減することができる。

実験値、理論解析値と同様に、布Hについて隙間1.0mmのデータ、布Iについて隙間1.0mm、1.5mmのデータを掲載していないのは、2枚時の布の厚さが隙間よりも大きくなり、物理的に不可能なためである。また、布J隙間1.0mmのデータも掲載していない。これはメッシュ作成ソフトが、0.1mm以下の距離の2点を識別しないため2枚時の形状メッシュを作成することができないためである。

表6-1-1 形状メッシュごとの要素分割数と解析可能な最大周波数(布A)

布コード (枚数)	フランジ幅 (mm)	空気柱長さ (mm)	隙間 (mm)	要素数	f_{max} (kHz)
A (1枚)	5.0	20.0	1.0	804	113.3
"	10.0	5.0	1.0	294	113.3
"	10.0	10.0	1.0	474	113.3
"	10.0	15.0	1.0	654	113.3
"	10.0	20.0	1.0	834	113.3
"	10.0	20.0	1.5	834	113.3
"	10.0	20.0	2.0	872	113.3
"	10.0	20.0	2.5	910	113.3
"	10.0	20.0	3.0	948	113.3
"	10.0	25.0	1.0	1014	113.3
"	10.0	30.0	1.0	1194	113.3
"	20.0	20.0	1.0	894	113.3
A (2枚)	5.0	20.0	1.0	804	113.3
"	10.0	5.0	1.0	294	113.3
"	10.0	10.0	1.0	474	113.3
"	10.0	15.0	1.0	654	113.3
"	10.0	20.0	1.0	834	113.3
"	10.0	20.0	1.5	834	113.3
"	10.0	20.0	2.0	842	113.3
"	10.0	20.0	2.5	910	113.3
"	10.0	20.0	3.0	948	113.3
"	10.0	25.0	1.0	1014	113.3
"	10.0	30.0	1.0	1194	113.3
"	20.0	20.0	1.0	894	113.3

表6-1-2 形状メッシュごとの要素分割数と解析可能な最大周波数(布B)

布コード (枚数)	フランシ幅 (mm)	空気柱長さ (mm)	隙間 (mm)	要素数	f_{max} (kHz)
B (1枚)	5.0	20.0	1.5	804	113.3
"	10.0	5.0	1.5	294	113.3
"	10.0	10.0	1.5	474	113.3
"	10.0	15.0	1.5	654	113.3
"	10.0	20.0	1.0	834	113.3
"	10.0	20.0	1.5	834	113.3
"	10.0	20.0	2.0	872	113.3
"	10.0	20.0	2.5	910	113.3
"	10.0	20.0	3.0	948	113.3
"	10.0	25.0	1.5	1014	113.3
"	10.0	30.0	1.5	1194	113.3
"	20.0	20.0	1.5	894	113.3
B (2枚)	5.0	20.0	1.5	804	113.3
"	10.0	5.0	1.5	294	113.3
"	10.0	10.0	1.5	474	113.3
"	10.0	15.0	1.5	654	113.3
"	10.0	20.0	1.5	834	113.3
"	10.0	20.0	1.0	834	113.3
"	10.0	20.0	2.0	834	113.3
"	10.0	20.0	2.5	872	113.3
"	10.0	20.0	3.0	910	113.3
"	10.0	25.0	1.5	1014	113.3
"	10.0	30.0	1.5	1194	113.3
"	20.0	20.0	1.5	894	113.3

表6-1-3 形状メッシュごとの要素分割数と解析可能な最大周波数(布C)

布コード (枚数)	フランジ幅 (mm)	空気柱長さ (mm)	隙間 (mm)	要素数	f_{\max} (kHz)
C (1枚)	5.0	20.0	1.5	804	113.3
"	10.0	5.0	1.5	294	113.3
"	10.0	10.0	1.5	474	113.3
"	10.0	15.0	1.5	654	113.3
"	10.0	20.0	1.0	834	113.3
"	10.0	20.0	1.5	834	113.3
"	10.0	20.0	2.0	872	113.3
"	10.0	20.0	2.5	910	113.3
"	10.0	20.0	3.0	948	113.3
"	10.0	25.0	1.5	1014	113.3
"	10.0	30.0	1.5	1194	113.3
"	20.0	20.0	1.5	894	113.3
C (2枚)	5.0	20.0	1.5	804	113.3
"	10.0	5.0	1.5	294	113.3
"	10.0	10.0	1.5	474	113.3
"	10.0	15.0	1.5	654	113.3
"	10.0	20.0	1.5	834	113.3
"	10.0	20.0	1.0	834	113.3
"	10.0	20.0	2.0	834	113.3
"	10.0	20.0	2.5	872	113.3
"	10.0	20.0	3.0	910	113.3
"	10.0	25.0	1.5	1014	113.3
"	10.0	30.0	1.5	1194	113.3
"	20.0	20.0	1.5	894	113.3

表6-1-4 形状メッシュごとの要素分割数と解析可能な最大周波数(布D)

布コード (枚数)	フランジ幅 (mm)	空気柱長さ (mm)	隙間 (mm)	要素数	f_{max} (kHz)
D (1枚)	5.0	20.0	1.0	804	113.3
"	10.0	5.0	1.0	294	113.3
"	10.0	10.0	1.0	474	113.3
"	10.0	15.0	1.0	654	113.3
"	10.0	20.0	1.0	834	113.3
"	10.0	20.0	1.5	834	113.3
"	10.0	20.0	2.0	872	113.3
"	10.0	20.0	2.5	910	113.3
"	10.0	20.0	3.0	948	113.3
"	10.0	25.0	1.0	1014	113.3
"	10.0	30.0	1.0	1194	113.3
"	20.0	20.0	1.0	894	113.3
D (2枚)	5.0	20.0	1.0	804	113.3
"	10.0	5.0	1.0	294	113.3
"	10.0	10.0	1.0	474	113.3
"	10.0	15.0	1.0	654	113.3
"	10.0	20.0	1.0	834	113.3
"	10.0	20.0	1.5	834	113.3
"	10.0	20.0	2.0	872	113.3
"	10.0	20.0	2.5	910	113.3
"	10.0	20.0	3.0	948	113.3
"	10.0	25.0	1.0	1014	113.3
"	10.0	30.0	1.0	1194	113.3
"	20.0	20.0	1.0	894	113.3

表6-1-5 形状メッシュごとの要素分割数と解析可能な最大周波数(布E)

布コード (枚数)	フランシ幅 (mm)	空気柱長さ (mm)	隙間 (mm)	要素数	f_{\max} (kHz)
E (1枚)	5.0	20.0	1.0	804	113.3
"	10.0	5.0	1.0	294	113.3
"	10.0	10.0	1.0	474	113.3
"	10.0	15.0	1.0	654	113.3
"	10.0	20.0	1.0	834	113.3
"	10.0	20.0	1.5	834	113.3
"	10.0	20.0	2.0	872	113.3
"	10.0	20.0	2.5	910	113.3
"	10.0	20.0	3.0	948	113.3
"	10.0	25.0	1.0	1014	113.3
"	10.0	30.0	1.0	1194	113.3
"	20.0	20.0	1.0	894	113.3
E (2枚)	5.0	20.0	1.0	804	113.3
"	10.0	5.0	1.0	294	113.3
"	10.0	10.0	1.0	474	113.3
"	10.0	15.0	1.0	654	113.3
"	10.0	20.0	1.0	834	113.3
"	10.0	20.0	1.5	834	113.3
"	10.0	20.0	2.0	972	113.3
"	10.0	20.0	2.5	910	113.3
"	10.0	20.0	3.0	948	113.3
"	10.0	25.0	1.0	1014	113.3
"	10.0	30.0	1.0	1194	113.3
"	20.0	20.0	1.0	894	113.3

表6-1-6 形状メッシュごとの要素分割数と解析可能な最大周波数(布F)

布コード (枚数)	フランジ幅 (mm)	空気柱長さ (mm)	隙間 (mm)	要素数	f_{\max} (kHz)
F (1枚)	5.0	20.0	1.0	888	113.3
"	10.0	5.0	1.0	408	113.3
"	10.0	10.0	1.0	588	113.3
"	10.0	15.0	1.0	768	113.3
"	10.0	20.0	1.0	948	113.3
"	10.0	20.0	1.5	948	113.3
"	10.0	20.0	2.0	948	113.3
"	10.0	20.0	2.5	948	113.3
"	10.0	20.0	3.0	948	113.3
"	10.0	25.0	1.0	1128	113.3
"	10.0	30.0	1.0	1308	113.3
"	20.0	20.0	1.0	1068	113.3
F (2枚)	5.0	20.0	1.0	888	113.3
"	10.0	5.0	1.0	408	113.3
"	10.0	10.0	1.0	588	113.3
"	10.0	15.0	1.0	768	113.3
"	10.0	20.0	1.0	948	113.3
"	10.0	20.0	1.5	948	113.3
"	10.0	20.0	2.0	948	113.3
"	10.0	20.0	2.5	948	113.3
"	10.0	20.0	3.0	948	113.3
"	10.0	25.0	1.0	1128	113.3
"	10.0	30.0	1.0	1308	113.3
"	20.0	20.0	1.0	1068	113.3

表6-1-7 形状メッシュごとの要素分割数と解析可能な最大周波数(布G)

布コード (枚数)	フランシ幅 (mm)	空気柱長さ (mm)	離間 (mm)	要素数	f_{max} (kHz)
G (1枚)	5.0	20.0	1.5	888	113.3
"	10.0	5.0	1.5	408	113.3
"	10.0	10.0	1.5	588	113.3
"	10.0	15.0	1.5	768	113.3
"	10.0	20.0	1.0	948	113.3
"	10.0	20.0	1.5	948	113.3
"	10.0	20.0	2.0	948	113.3
"	10.0	20.0	2.5	948	113.3
"	10.0	20.0	3.0	948	113.3
"	10.0	25.0	1.5	1128	113.3
"	10.0	30.0	1.5	1308	113.3
"	20.0	20.0	1.5	1068	113.3
G (2枚)	5.0	20.0	1.5	888	113.3
"	10.0	5.0	1.5	408	113.3
"	10.0	10.0	1.5	588	113.3
"	10.0	15.0	1.5	768	113.3
"	10.0	20.0	1.5	948	113.3
"	10.0	20.0	1.0	910	113.3
"	10.0	20.0	2.0	948	113.3
"	10.0	20.0	2.5	948	113.3
"	10.0	20.0	3.0	948	113.3
"	10.0	25.0	1.5	1128	113.3
"	10.0	30.0	1.5	1308	113.3
"	20.0	20.0	1.5	1068	113.3

表6-1-8 形状メッシュごとの要素分割数と解析可能な最大周波数(布H)

布コード (枚数)	フランジ幅 (mm)	空気柱長さ (mm)	隙間 (mm)	要素数	f_{max} (kHz)
H (1枚)	5.0	20.0	2.0	804	113.3
"	10.0	5.0	2.0	294	113.3
"	10.0	10.0	2.0	474	113.3
"	10.0	15.0	2.0	654	113.3
"	10.0	20.0	1.5	834	113.3
"	10.0	20.0	2.0	834	113.3
"	10.0	20.0	2.5	872	113.3
"	10.0	20.0	3.0	910	113.3
"	10.0	25.0	2.0	1014	113.3
"	10.0	30.0	2.0	894	113.3
"	20.0	20.0	2.0	804	113.3
H (2枚)	5.0	20.0	2.0	294	113.3
"	10.0	5.0	2.0	474	113.3
"	10.0	10.0	2.0	654	113.3
"	10.0	15.0	2.0	834	113.3
"	10.0	20.0	1.5	834	113.3
"	10.0	20.0	2.0	834	113.3
"	10.0	20.0	2.5	872	113.3
"	10.0	20.0	3.0	910	113.3
"	10.0	25.0	2.0	1014	113.3
"	10.0	30.0	2.0	1194	113.3
"	20.0	20.0	2.0	894	113.3

表6-1-9 形状メッシュごとの要素分割数と解析可能な最大周波数(布 I)

布コード (枚数)	フランジ幅 (mm)	空気柱長さ (mm)	隙間 (mm)	要素数	f_{max} (kHz)
I (1枚)	5.0	20.0	2.5	804	113.3
"	10.0	5.0	2.5	294	113.3
"	10.0	10.0	2.5	474	113.3
"	10.0	15.0	2.5	654	113.3
"	10.0	20.0	2.0	834	113.3
"	10.0	20.0	2.5	834	113.3
"	10.0	20.0	3.0	872	113.3
"	10.0	25.0	2.5	1014	113.3
"	10.0	30.0	2.5	1194	113.3
"	20.0	20.0	2.5	894	113.3
I (2枚)	5.0	20.0	2.5	804	113.3
"	10.0	5.0	2.5	294	113.3
"	10.0	10.0	2.5	474	113.3
"	10.0	15.0	2.5	654	113.3
"	10.0	20.0	2.0	796	113.3
"	10.0	20.0	2.5	834	113.3
"	10.0	20.0	3.0	834	113.3
"	10.0	25.0	2.5	1014	113.3
"	10.0	30.0	2.5	1194	113.3
"	20.0	20.0	2.5	894	113.3

表6-1-10 形状メッシュごとの要素分割数と解析可能な最大周波数(布 J)

布コード (枚数)	フランジ幅 (mm)	空気柱長さ (mm)	隙間 (mm)	要素数	f_{\max} (kHz)
J (1枚)	5.0	20.0	2.0	804	113.3
"	10.0	5.0	2.0	294	113.3
"	10.0	10.0	2.0	474	113.3
"	10.0	15.0	2.0	654	113.3
"	10.0	20.0	2.0	834	113.3
"	10.0	20.0	1.5	834	113.3
"	10.0	20.0	2.5	872	113.3
"	10.0	20.0	3.0	910	113.3
"	10.0	25.0	2.0	1014	113.3
"	10.0	30.0	2.0	1194	113.3
"	20.0	20.0	2.0	894	113.3
J (2枚)	5.0	20.0	2.0	804	113.3
"	10.0	5.0	2.0	294	113.3
"	10.0	10.0	2.0	474	113.3
"	10.0	15.0	2.0	654	113.3
"	10.0	20.0	2.0	834	113.3
"	10.0	20.0	1.5	834	113.3
"	10.0	20.0	2.5	834	113.3
"	10.0	20.0	3.0	872	113.3
"	10.0	25.0	2.0	1014	113.3
"	10.0	30.0	2.0	1194	113.3
"	20.0	20.0	2.0	894	113.3

表6-1-11 形状メッシュごとの要素分割数と解析可能な最大周波数(布K)

布コード (枚数)	フランジ幅 (mm)	空気柱長さ (mm)	隙間 (mm)	要素数	f_{max} (kHz)
K (1枚)	5.0	20.0	1.0	804	113.3
"	10.0	5.0	1.0	294	113.3
"	10.0	10.0	1.0	474	113.3
"	10.0	15.0	1.0	654	113.3
"	10.0	20.0	1.0	834	113.3
"	10.0	20.0	1.5	834	113.3
"	10.0	20.0	2.0	872	113.3
"	10.0	20.0	2.5	910	113.3
"	10.0	20.0	3.0	948	113.3
"	10.0	25.0	1.0	1014	113.3
"	10.0	30.0	1.0	1194	113.3
"	20.0	20.0	1.0	894	113.3
K (2枚)	5.0	20.0	1.0	804	113.3
"	10.0	5.0	1.0	294	113.3
"	10.0	10.0	1.0	474	113.3
"	10.0	15.0	1.0	654	113.3
"	10.0	20.0	1.0	834	113.3
"	10.0	20.0	1.5	834	113.3
"	10.0	20.0	2.0	834	113.3
"	10.0	20.0	2.5	872	113.3
"	10.0	20.0	3.0	910	113.3
"	10.0	25.0	1.0	1014	113.3
"	10.0	30.0	1.0	1194	113.3
"	20.0	20.0	1.0	894	113.3

6-2-2 SYSNOISE内における操作

作成したメッシュはSYSNOISE内に読み込み、解析する上で必要となるメッシュの操作ならびに諸条件の定義を行った後、周波数応答解析を実行する。次よりSYSNOISE内で行う操作について順に述べていく。

(1) 解析オプション（数値解析法）の選択

本解析では音響有限要素法[†]を用いた。これは、音響媒質要素や吸音材要素で分割された内部音場モデルに対して有限要素法（FEM）を用いて波動方程式を解くものである。そのためモデルは音響領域全体を有限要素分割したものとなる。

境界要素法[‡]を用いた解析も可能であるが、有限要素法と比較すると計算がきわめて長い。本研究では数値解析値と実験値、理論解析値を比較し、数値解析の有用性を確認することを目的の1つとしている。そのためには多くの解析事例を必要とするため、有限要素法が有効であると考えた。

SYSNOISEにおける有限要素法のシステム方程式を次に示す。

$$\left[K + i\omega C - \omega^2 M \right] \{p\} = \{F_A\}$$

ここで、

$\{F_A\}$: 音響メッシュ面に指定した法線方向粒子速度境界条件に比例する、法線方向音響加振力ベクトル。

$[K]$: stiffness matrix

$[C]$: damping matrix

$[M]$: mass matrix

$\{p\}$: 音圧分布

この方程式を用いて周波数応答解析を行うことを直接応答法[§]と呼び、この方程式より任意の周波数における音圧分布 $\{p\}$ が算出される。

また、音響モデルにおいて固有値解析が行われていて、すでに音響モードが算出されている場合、音場内の周波数応答解析においてモード重ね合わせ法が可能であり、音圧分布 $\{p\}$ は次のような線形結合で表される。

[†] FEM for fluid

[‡] Boundary element method

[§] Direct response method

$$\{p\} = \sum_{i=1}^m a_i \{\phi_i\} = [\phi] \{a\}$$

ここで,

$\{a\}$: m個のモード関与因子

$[\phi]$: 固有値を列に持つ行列

これよりモード関与因子が未知数となり, それらが解となる $m \times m$ 行列の方程式が作られる.

$$([\phi]^t [K + i\omega C - \omega^2 M] [\phi]) \{a\} = [\phi]^t \{F_A\}$$

この方程式を用いて周波数応答解析を行うことをモード重ね合わせ法**と呼ぶ.

(2) メッシュの操作

取り込んだメッシュに関して目的となる解析を実行できるように操作を加える.

○ 次元の宣言

2次元問題とする.

○ 軸対称問題の定義

Y軸に対して一回転させた形状について解析するため定義する.

○ 形状メッシュのチェック

作成した形状メッシュを取り込んだ後, 音響メッシュ (構造メッシュ) として有効にするためにメッシュに関して, メッシュ中の余分な節点を併合するなどの操作を行う.

○ セットの作成

SYSNOISEでは境界条件を定めたいエンティティをひとまとまり (セット) にすることができる. 本解析に使用したメッシュについては, 布表面, 隙間の要素をセットとした. (図6-2参照)

(3) 諸条件の定義 (図6-2参照)

○ 音響媒質の定義

空気として音響媒質密度 $\rho_f = 1.213 [\text{kg/m}^3]$, 音速 $c = 340 [\text{m/s}]$ を定める.

** Modal superposition method

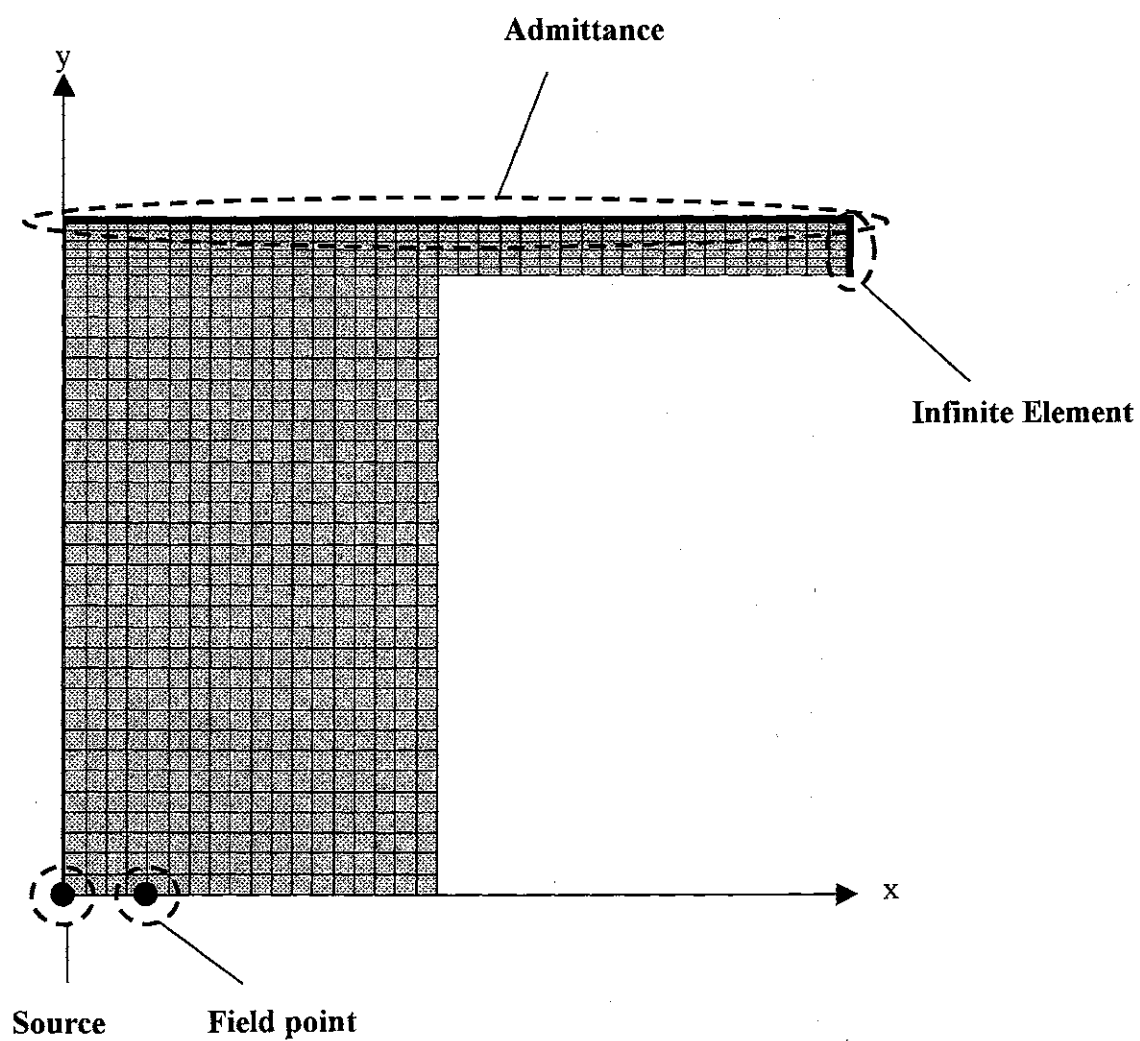


図6-2 諸条件の定義

(布 G 1 枚、フレンジ幅 10.0mm、空気柱長さ 15.0mm、隙間 1.5mm)

○ 音源の定義

点音源を定義する．値は音圧レベル80dBとした．これは実験における精密騒音計のレンジの値になっている．設定する場所は，実験装置にならい空気柱の中心とした．座標は (0.0, 0.0, 0.0) である．

○ 無限要素の定義

隙間を定義するため無限要素を設定する．

無限要素 (Infinite Element) を取り入れた有限要素 (FEM) 解析はI-FEM解析と呼ばれる．無限要素を定めた要素面において音は無限に放射されるので，FEM解析で放射音響問題や散乱場問題に対応できる．

○ アドミタンスの定義

布表面について，アドミタンス (Admittance) を設定する．

SYSNOISEにおいて吸音する面は，法線アドミタンス境界条件や法線インピーダンスで表現でき，アドミタンス A_n ，インピーダンス Z_n は次のように定義される．

$$A_n = \frac{v_n}{p} \quad \text{and} \quad Z_n = \frac{p}{v_n}$$

ここで，

v_n : 粒子速度

p : 音圧

本来，布の入力インピーダンスを設定したいが，SYSNOISEにおいてインピーダンスではTable fileを用いることができないためインピーダンスの逆数であるアドミタンスとして設定する．周波数依存入力インピーダンス (4-1-7参照) を，周波数依存入力アドミタンスに変換し，テキスト形式で出力しTable fileとした．

(4) 周波数応答解析の実行

上記の作業を終えたモデルに対し周波数応答解析を実行する．SYSNOISEにおいては周波数，または周波数域およびステップ周波数を入力することで計算を実行する．導出されるシステム方程式の解は，はじめに節点上に算出され，解はPotentialと呼ばれる．

本数値解析では，0Hzから6kHzにおいて25Hz刻みで計算を実行した．実験，理論解析は0Hzから10kHzまで行っているが，その結果より枚数検出に用いる検出部の共振周波数は2kHz前後にあることが判明している．そのため0Hzから6kHzまで

の解析で十分な結果が得られると考え、計算時間の短縮も考慮し決定した。25Hz刻みとしたのは実験にならっている。

また、先に述べたアドミタンスも25Hz刻みのデータである。

(5) 観測点の設定 (図6-2参照)

Potentialは音響領域の任意の場所に作成される観測点 (Field point) においてResultと呼ばれる解で算出される。観測点はいわばマイクロホンと同じ働きをするものである。

観測点は実験装置にならい、音源からx軸方向に2.0mmの場所に設定した。座標は (0.002, 0.0, 0.0) である。

(6) 観測点における周波数応答解析の実行

ここで、(4)で算出されたpotentialをもとに観測点上の音響特性 (音圧, 粒子速度など) を算出する。解析する周波数域およびステップ周波数は(4)と同様である。

(7) 位相特性, 振幅特性の出力

ここで、(6)によって算出された位相特性、振幅特性の計算結果を出力し、その後1枚時、2枚時の結果より位相差および振幅差を求めた。

6-3 SYSNOISEによる数値解析結果の評価（位相）

「1枚時を基準とした2枚時の位相」について、SYSNOISEによる数値解析値（FEM）と実験値（Measured）・理論解析値（Theory）を重ね合わせた結果を図6-3-A-1～図6-3-K-3に示す。それぞれの条件は表6-2-1～2に示した。図において、数値解析値は実線、実験値は破線、理論解析値は一点鎖線で示している。

図6-3-A-1は布Aについて、フランジ幅を10mm、隙間を1mmに設定した時の空気柱長さの変化に対する位相差を示している。グラフを比較すると、数値解析値、実験値、理論解析値それぞれにおいて空気柱長さがある程度長くなるにつれ大きな位相差が得られていることがわかる。この事は、空気柱の幾何学的寸法と共振の尖鋭度の関係によるものと考えられる。また、空気柱長さが長くなるにつれ、共振周波数が低周波側にシフトしていく事についても、それぞれ同じ傾向が見られる。

図6-3-A-2は布Aについて、フランジ幅を10mm、空気柱長さを20mmに設定した時の隙間の変化に対する位相差を示している。布の入力インピーダンスと隙間のインピーダンスは並列の関係にあり、隙間が空き、隙間のインピーダンスが小さくなると布の入力インピーダンスは短絡されたかのようになり、音響系に及ぼす影響が小さくなってしまふ。そのため隙間のインピーダンスはある程度の大きさが必要になり、つまりは適度な隙間の大きさが必要になってくる。グラフを見ると、それぞれ隙間が小さい場合に、より大きな位相差が得られていることがわかる。検出に適した隙間の大きさは布によって違うが、布Aは0.123mmと薄いため、小さな隙間が適している。隙間が大きくなると高周波側に共振周波数がシフトしていく事についても、同じ傾向が見られる。

図6-3-A-3は布Aについて、空気柱長さを20mm、隙間を1mmに設定した時のフランジ幅の変化に対する位相差を示している。フランジ幅も隙間の大きさ同様隙間のインピーダンスに大きな影響を及ぼす。一般に幅が広いほどインピーダンスの絶対値は大きくなり、隙間と同様な理由で適度なフランジ幅が必要になる。フランジ幅が広くなるにつれ共振周波数が低周波側にシフトしていく事について同じ傾向が見られる。

また、同様な傾向が布B～Kについても見られる。

2種類以上の布に関する結果同士を比較する場合、条件によってグラフの縦軸のレンジが異なるので注意を要する。

表6-2-1 図番に対応する条件

図番	布コード (枚数)	フランジ幅 (mm)	空気柱長さ (mm)	隙間 (mm)
6-3-A-1	A	10.0	—	1.0
6-3-A-2	"	10.0	20.0	—
6-3-A-3	"	—	20.0	1.0
6-3-B-1	B	10.0	—	1.5
6-3-B-2	"	10.0	20.0	—
6-3-B-3	"	—	20.0	1.5
6-3-C-1	C	10.0	—	1.5
6-3-C-2	"	10.0	20.0	—
6-3-C-3	"	—	20.0	1.5
6-3-D-1	D	10.0	—	1.0
6-3-D-2	"	10.0	20.0	—
6-3-D-3	"	—	20.0	1.0
6-3-E-1	E	10.0	—	1.0
6-3-E-2	"	10.0	20.0	—
6-3-E-3	"	—	20.0	1.0
6-3-F-1	F	10.0	—	1.0
6-3-F-2	"	10.0	20.0	—
6-3-F-3	"	—	20.0	1.0
6-3-G-1	G	10.0	—	1.5
6-3-G-2	"	10.0	20.0	—
6-3-G-3	"	—	20.0	1.5
6-3-H-1	H	10.0	—	2.0
6-3-H-2	"	10.0	20.0	—
6-3-H-3	"	—	20.0	2.0

表6-2-2 図番に対応する条件

図番	布コード (枚数)	フランジ幅 (mm)	空気柱長さ (mm)	隙間 (mm)
6-3-I-1	I	10.0	—	2.5
6-3-I-2	〃	10.0	20.0	—
6-3-I-3	〃	—	20.0	2.5
6-3-J-1	J	10.0	—	1.5
6-3-J-2	〃	10.0	20.0	—
6-3-J-3	〃	—	0.0	1.5
6-3-K-1	K	10.0	—	1.0
6-3-K-2	〃	10.0	20.0	—
6-3-K-3	〃	—	20.0	1.0

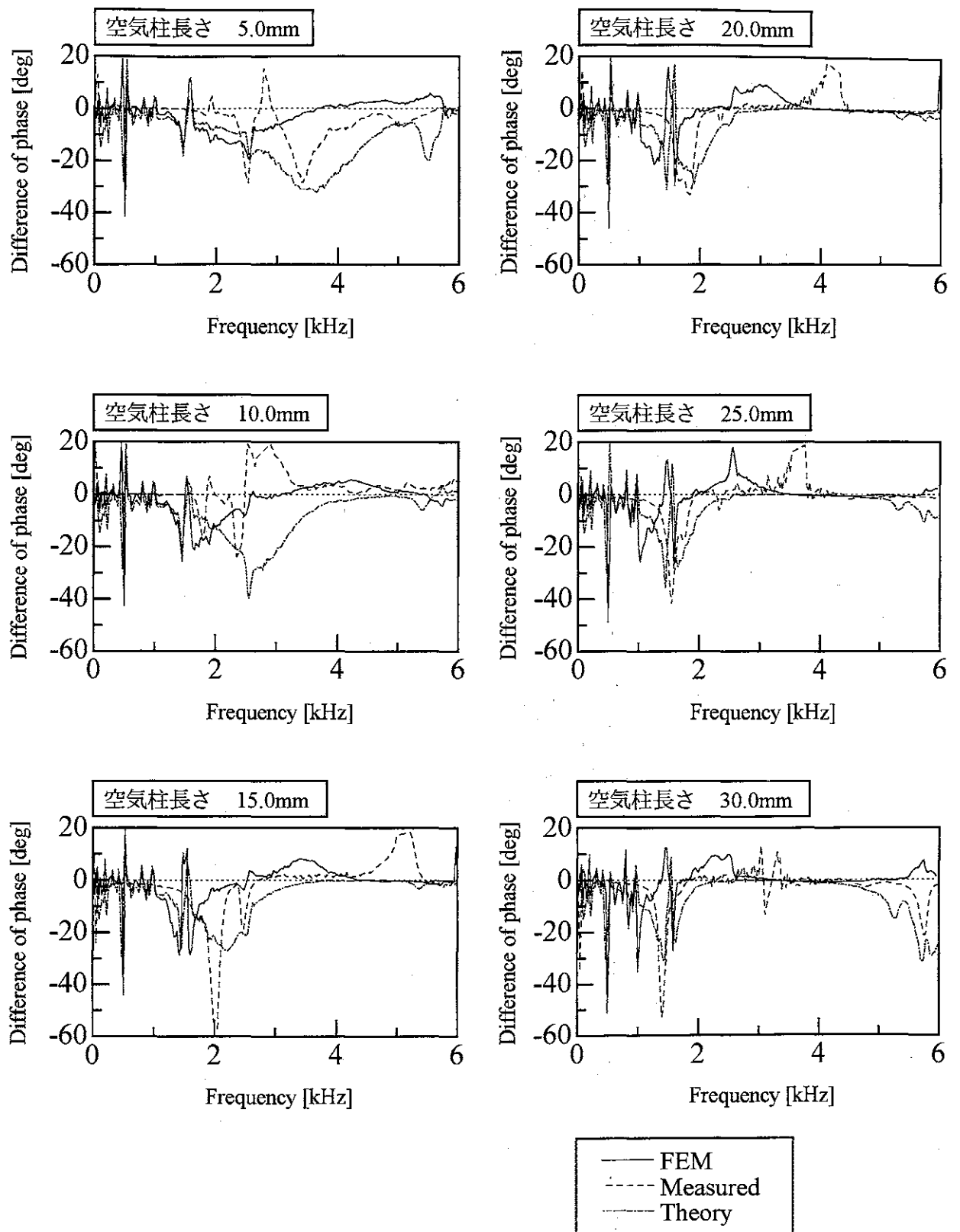


図 6-3-A-1 布 A 空気柱長を変化させた場合
(フランジ幅 10.0mm, 隙間 1.0mm)

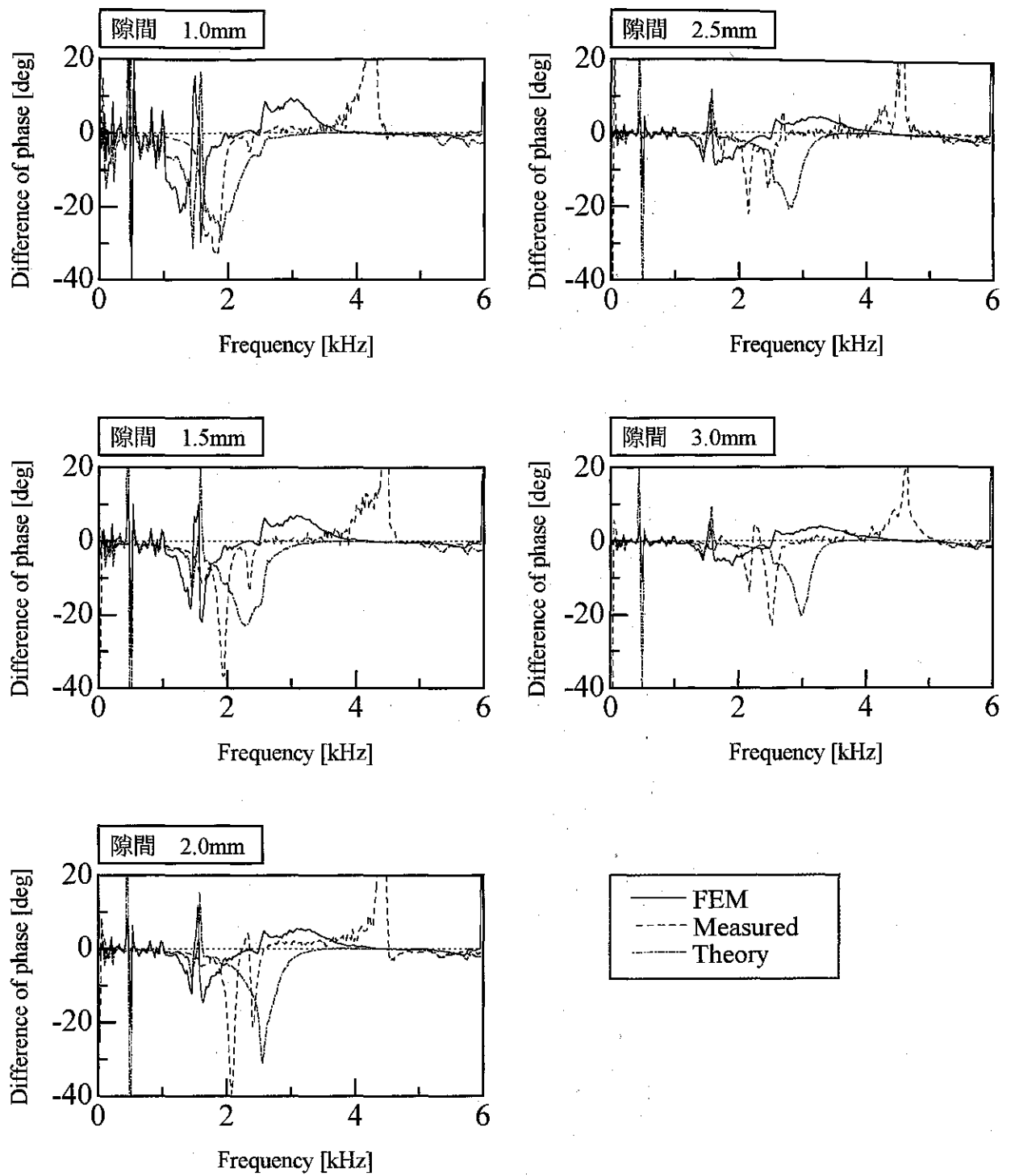


図 6-3-A-2 布 A 隙間を変化させた場合
(フレンジ幅 10.0mm, 空気柱長さ 20.0mm)

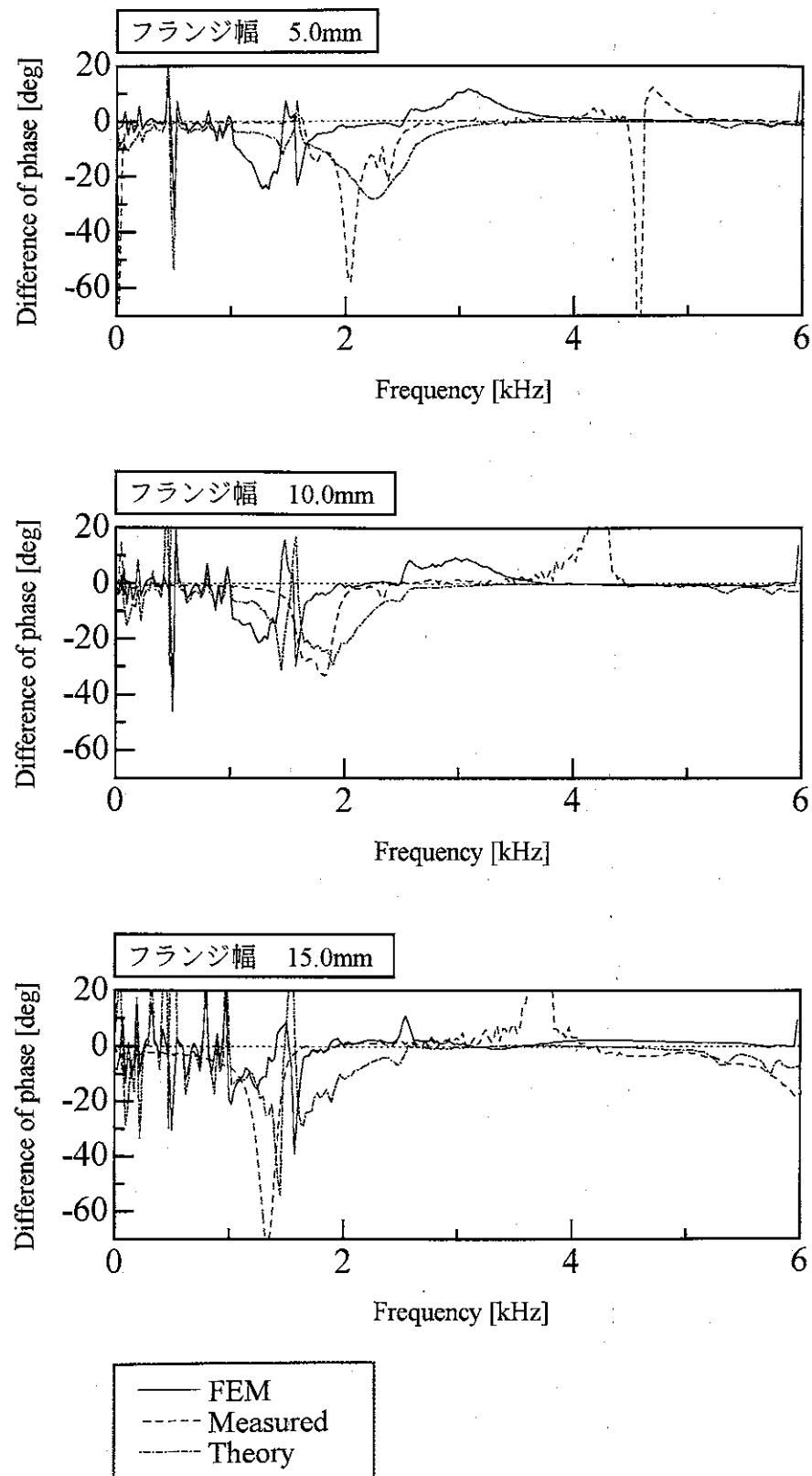


図 6-3-A-3 布 A フランジ幅を変化させた場合
(空気柱長さ 20.0mm, 隙間 1.0mm)

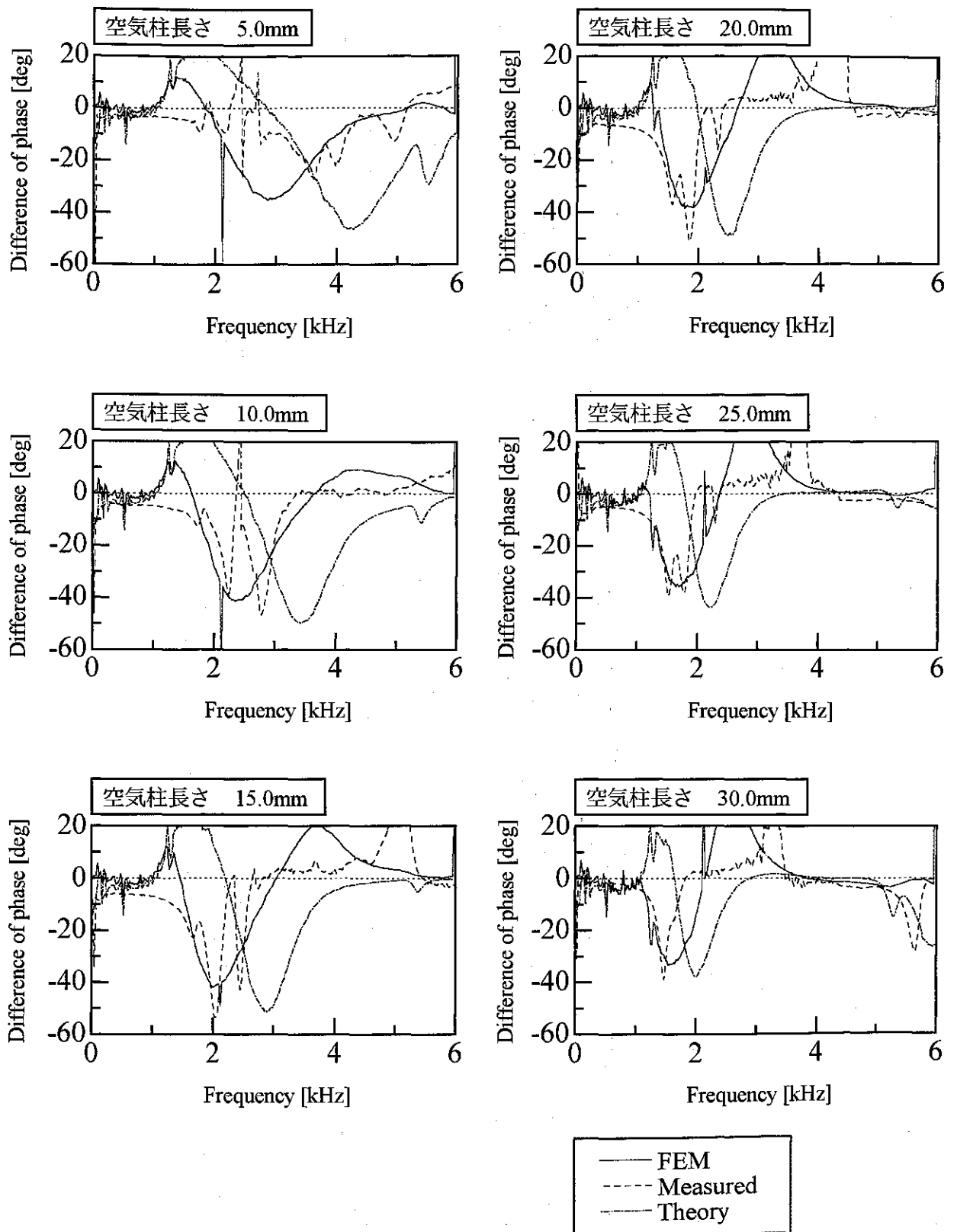


図 6-3-B-1 布B 空気柱長さを変化させた場合
(フランジ幅 10.0mm, 隙間 1.5mm)

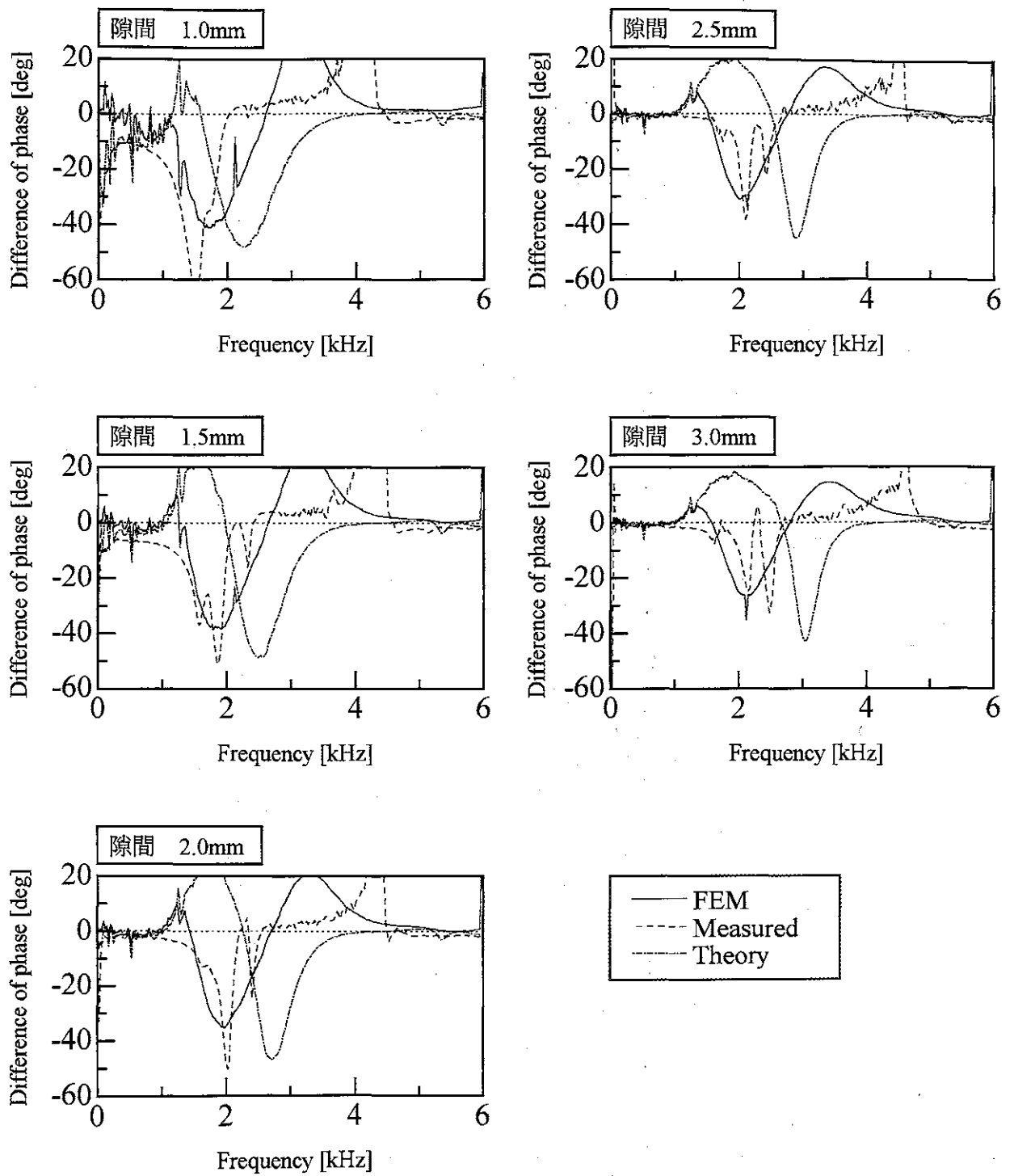


図 6-3-B-2 布B 隙間を変化させた場合
(フランジ幅 10.0mm, 空気柱長さ 20.0mm)

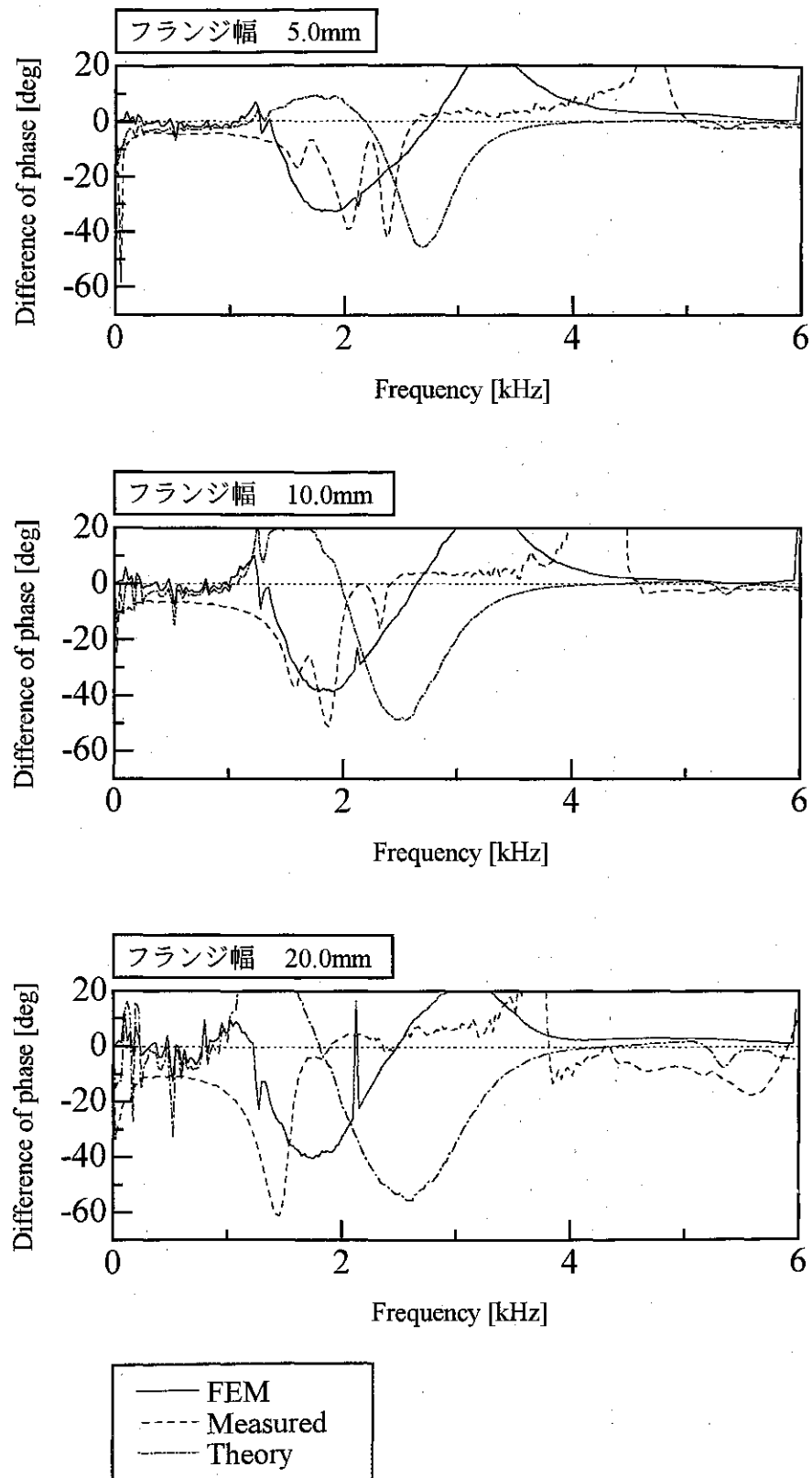


図 6-3-B-3 布B フランジ幅を変化させた場合
(空気柱長さ 20.0mm, 隙間 1.5mm)

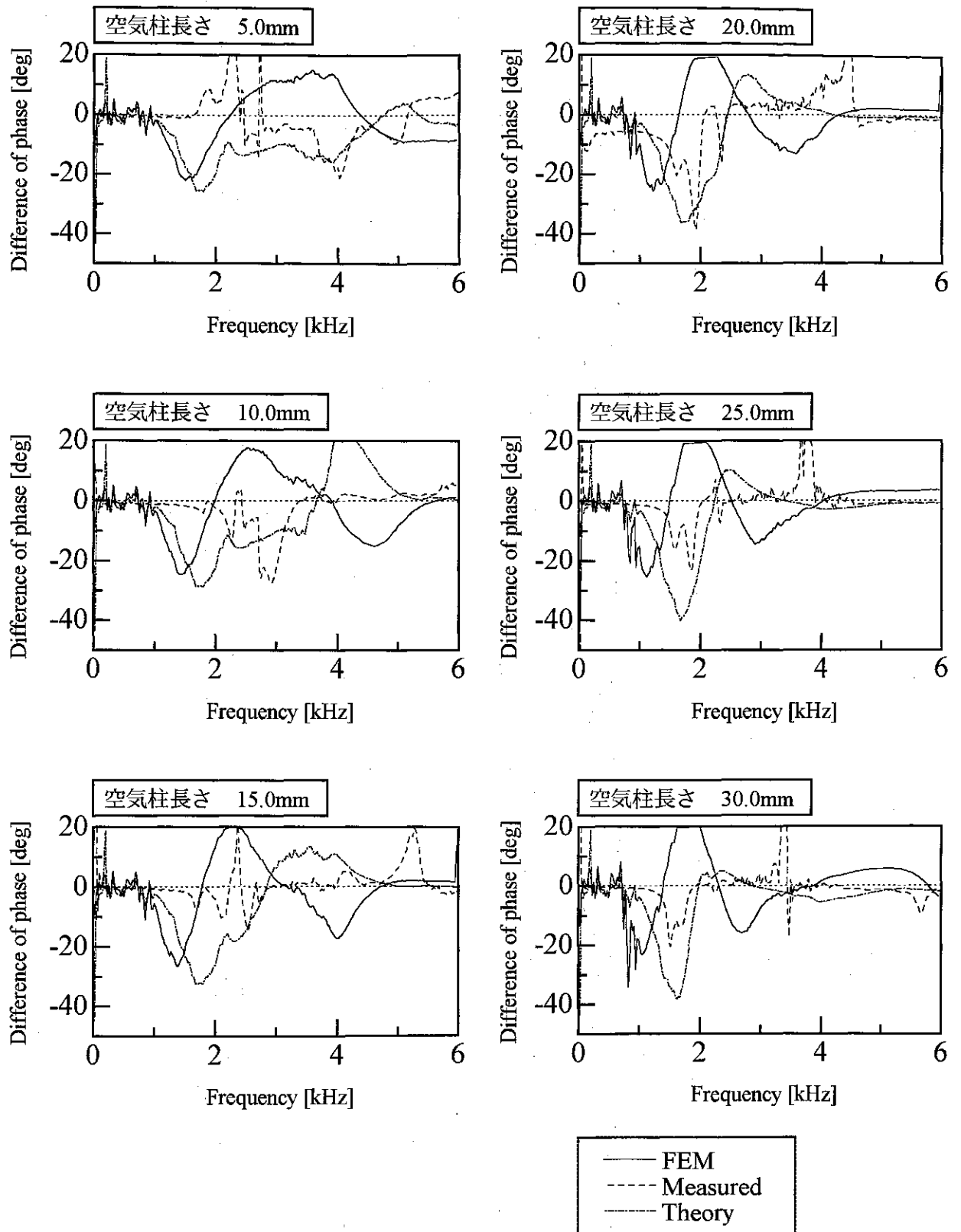


図 6-3-C-1 布 C 空気柱長を変化させた場合
(フランジ幅 10.0mm, 隙間 1.5mm)

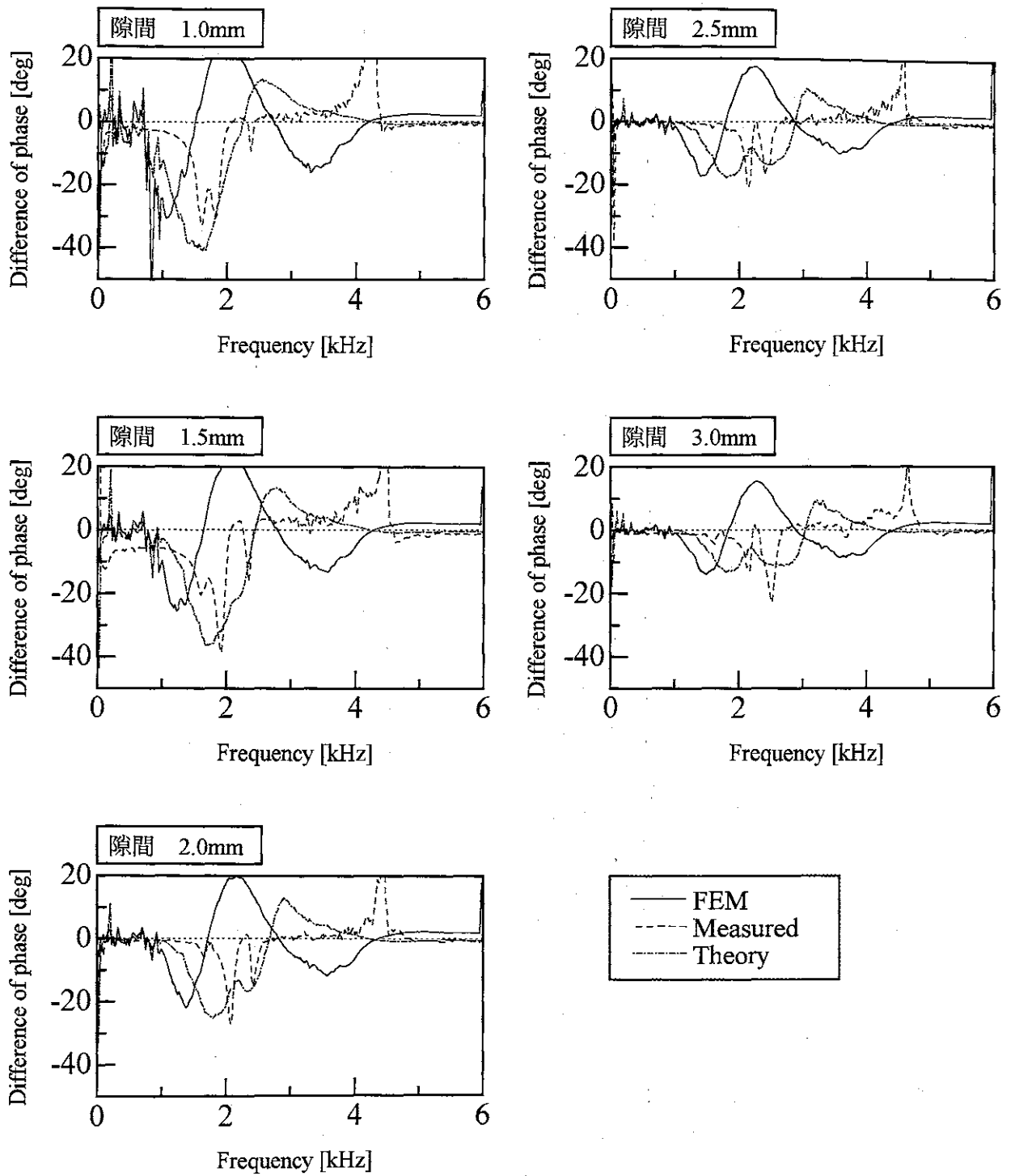


図 6-3-C-2 布 C 隙間を変化させた場合
(フランジ幅 10.0mm, 空気柱長さ 20.0mm)

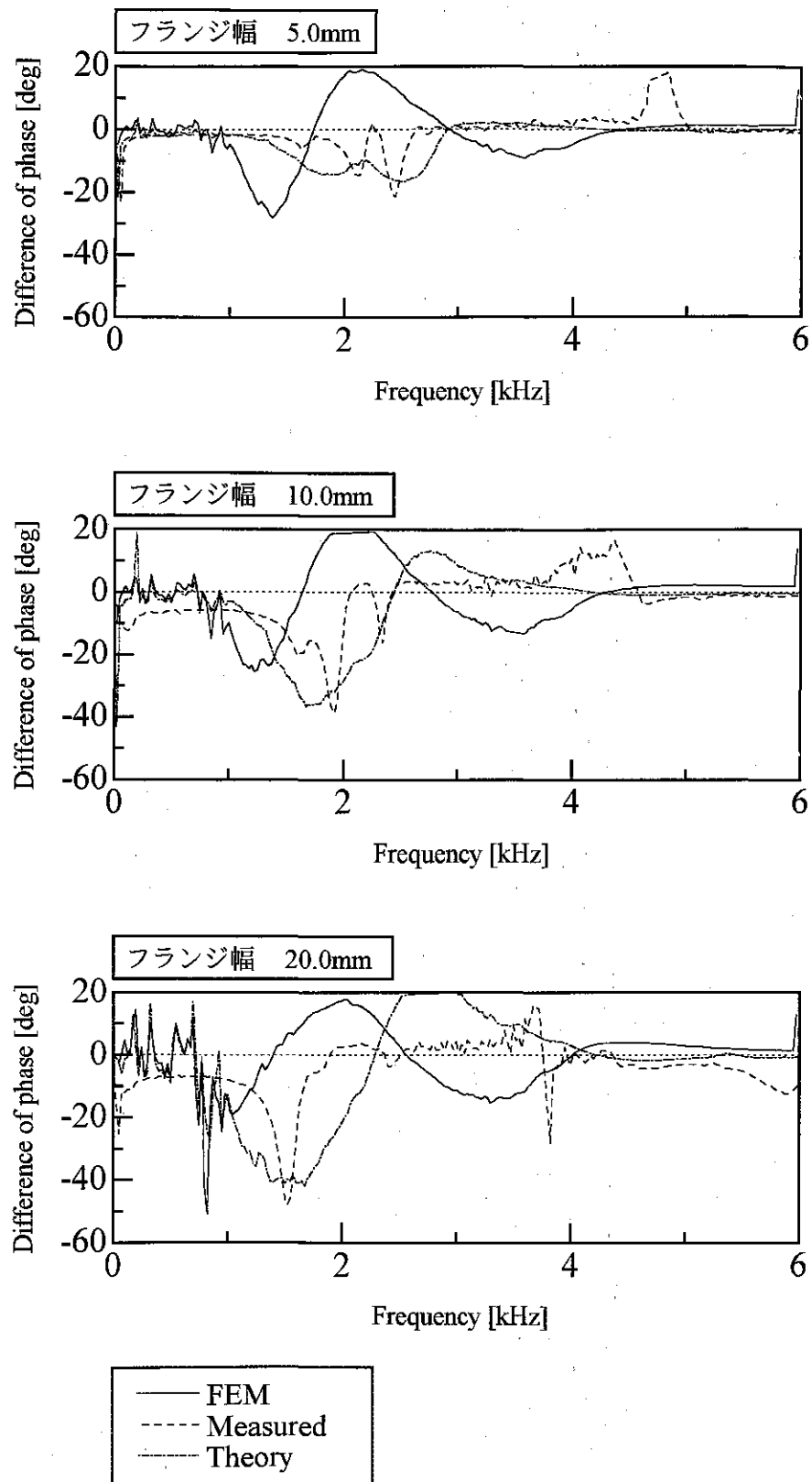


図 6-3-C-3 布 C フランジ幅を変化させた場合
(空気柱長さ 20.0mm, 隙間 1.5mm)

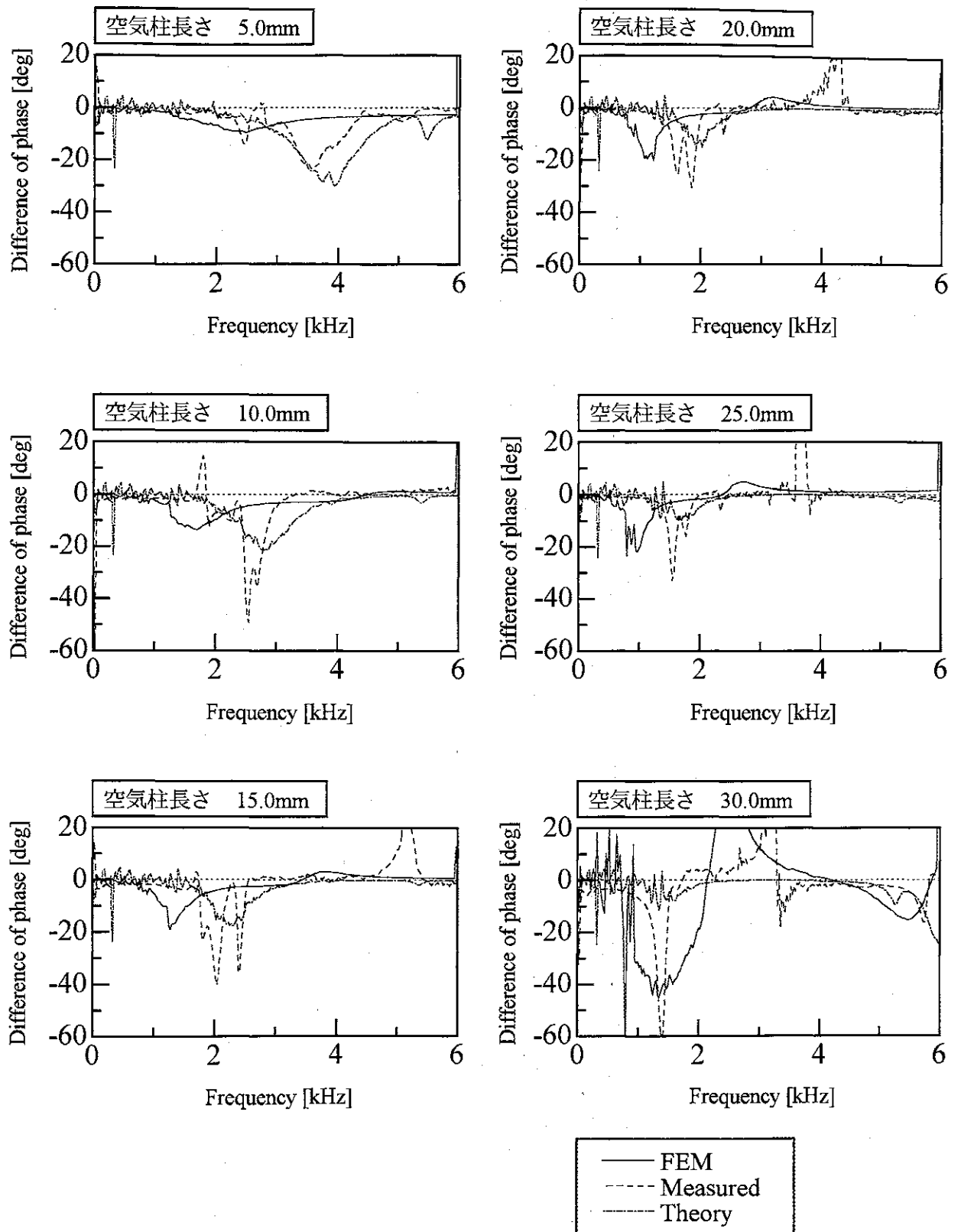


図 6-3-D-1 布 D 空気柱長を変化させた場合
(フランジ幅 10.0mm, 隙間 1.0mm)

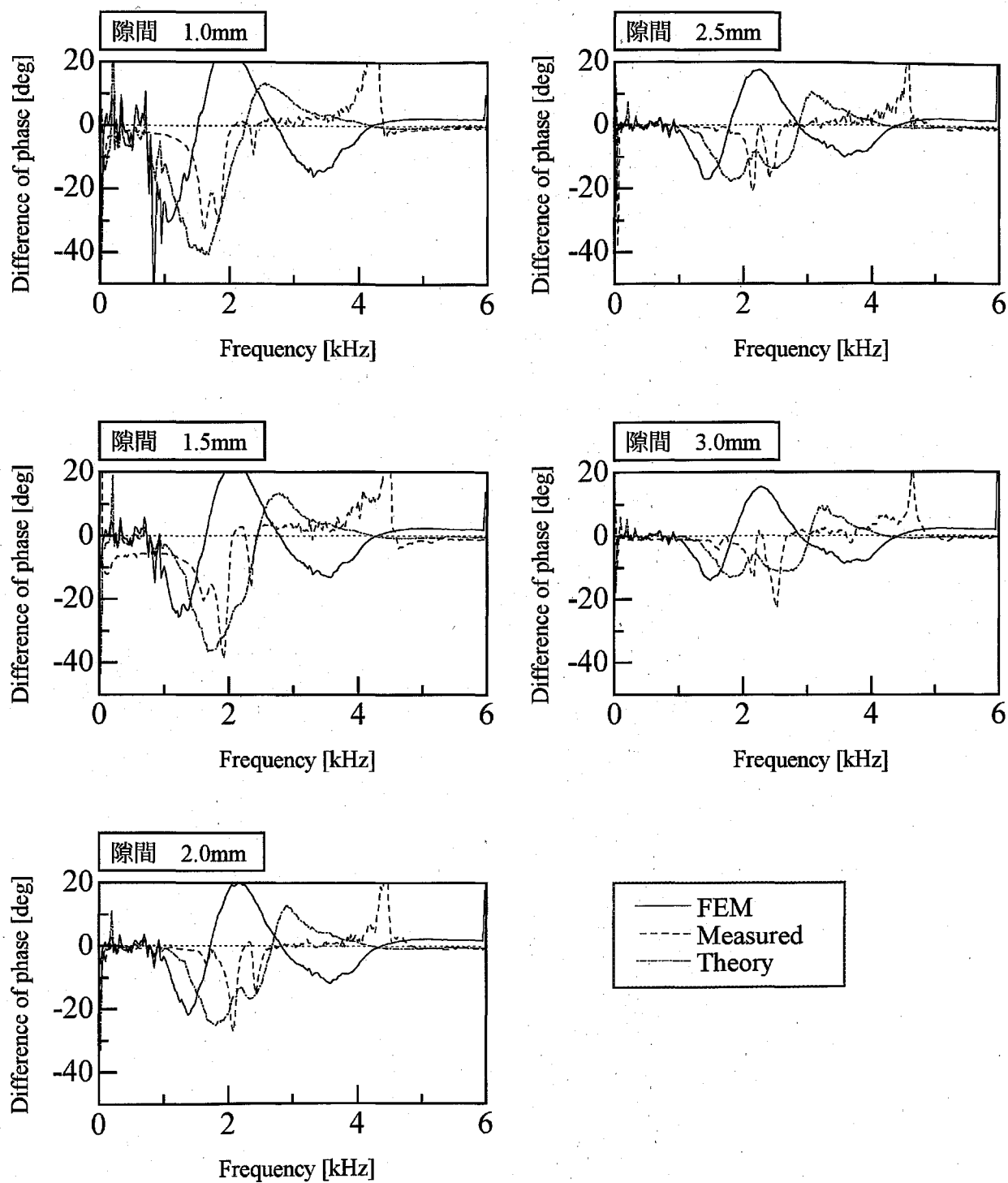


図 6-3-D-2 布 D 隙間を変化させた場合
(フランジ幅 10.0mm, 空気柱長さ 20.0mm)

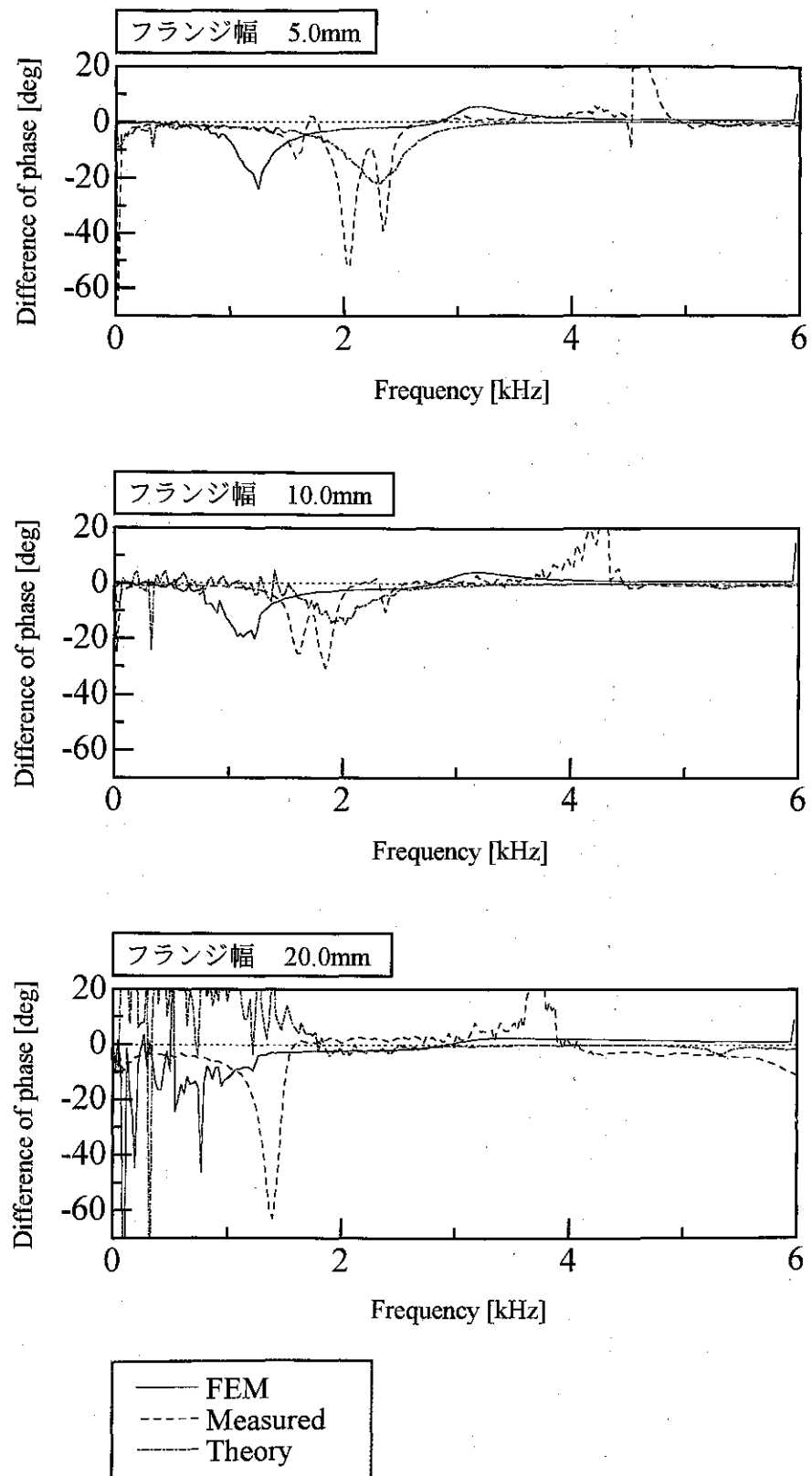


図 6-3-D-3 布 D フランジ幅を変化させた場合
(空気柱長さ 20.0mm, 隙間 1.0mm)

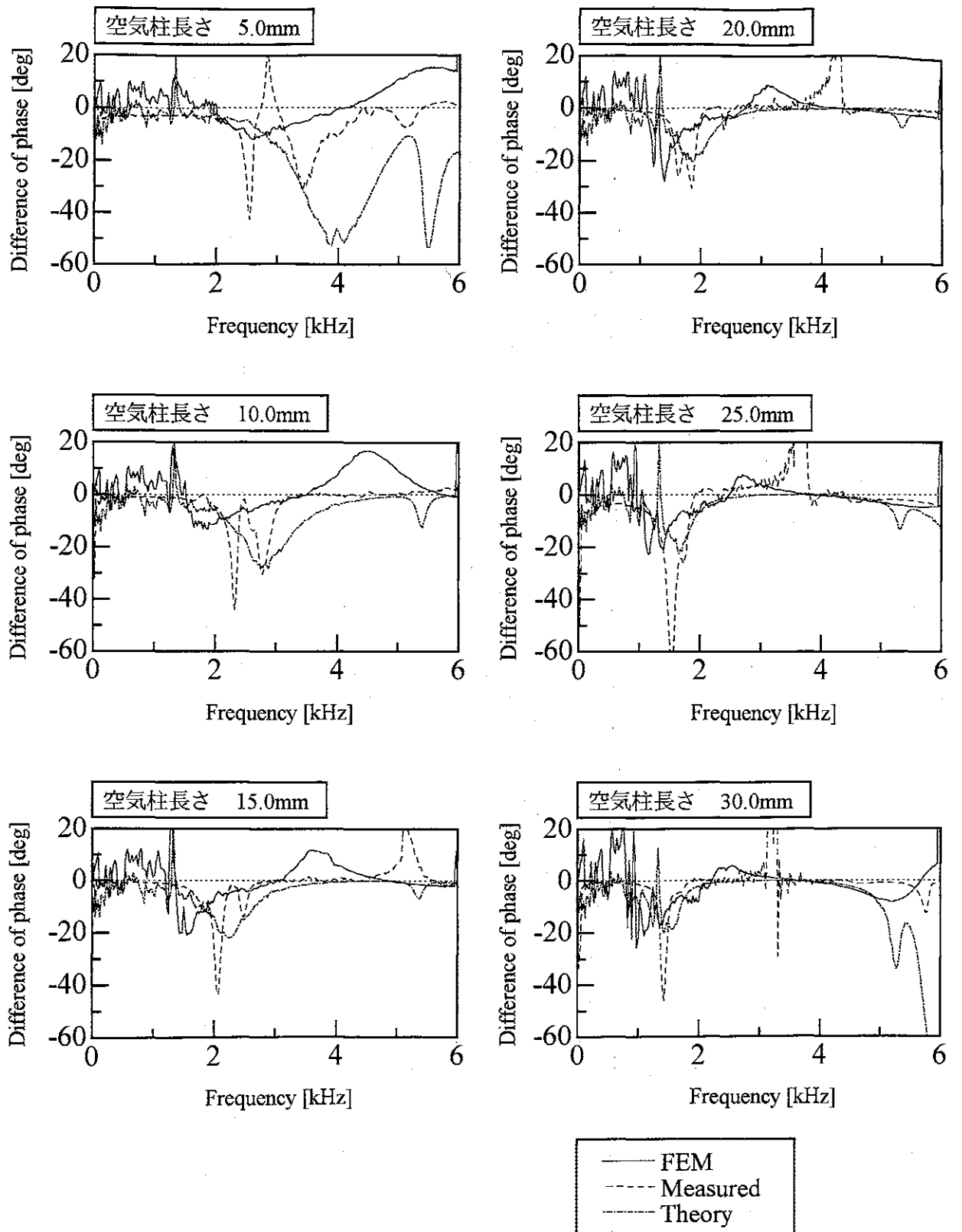


図 6-3-E-1 布 E 空気柱長さを変化させた場合
(フランジ幅 10.0mm, 隙間 1.0mm)

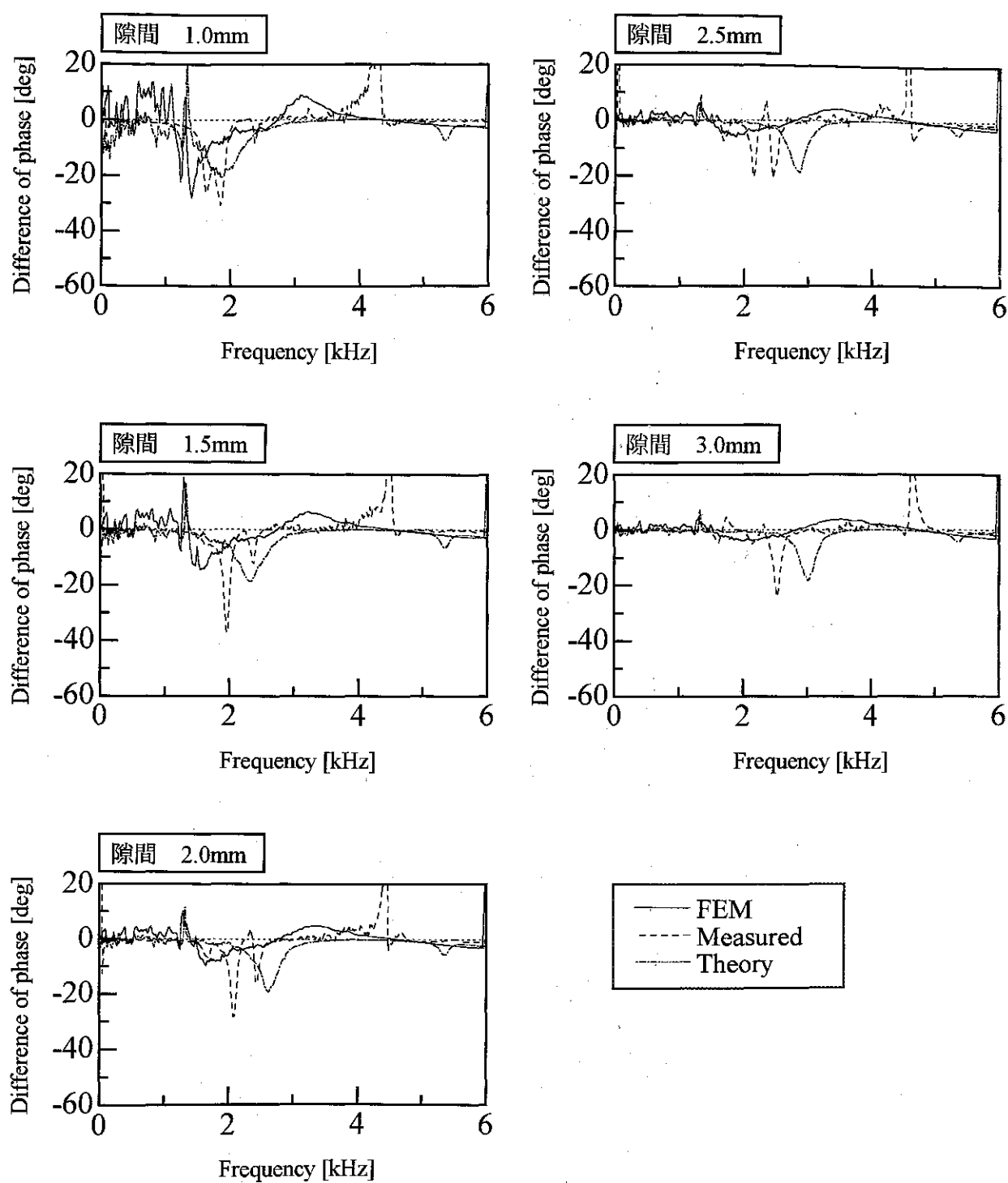


図 6-3-E-2 布E 隙間を変化させた場合
(フランジ幅 10.0mm, 空気柱長さ 20.0mm)

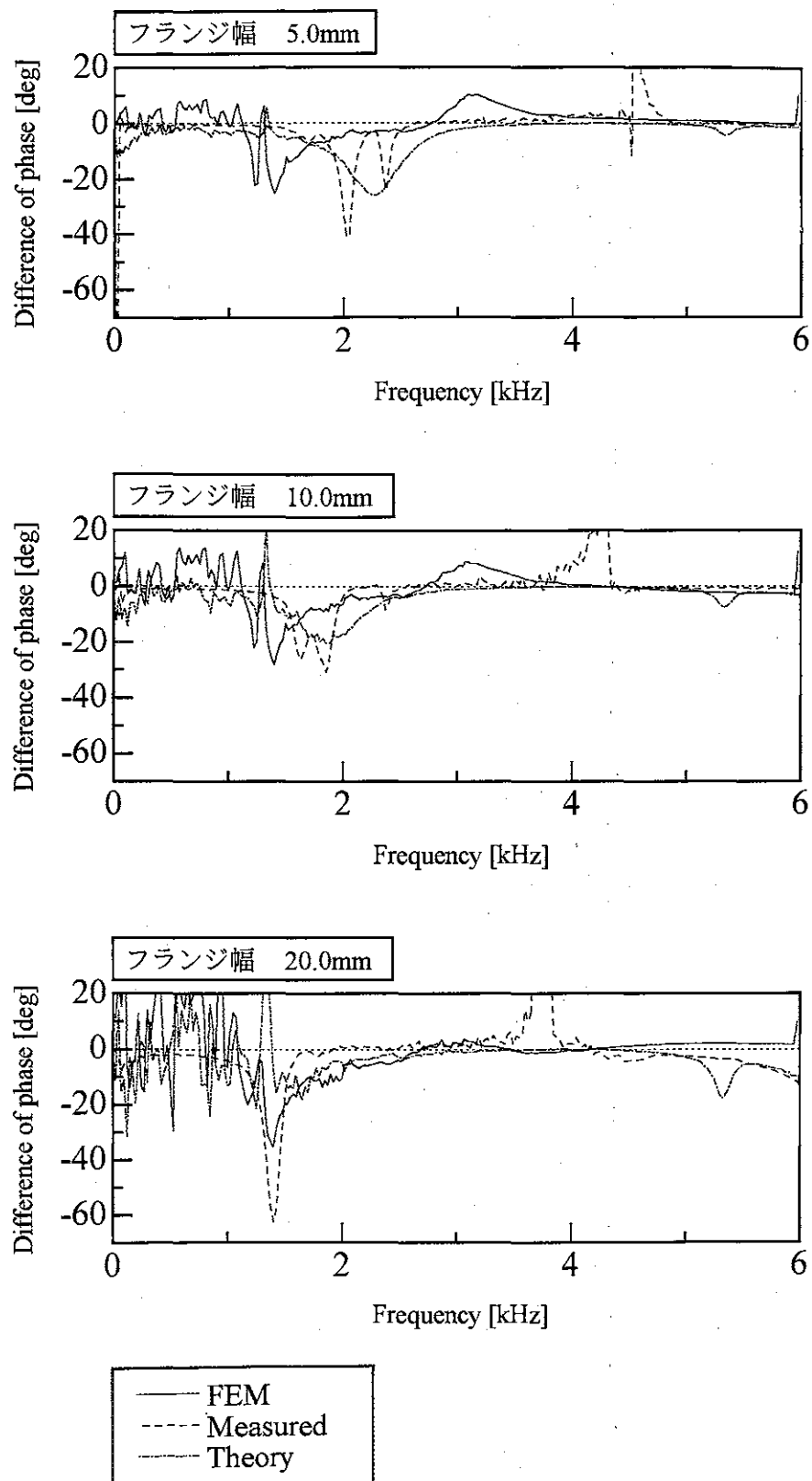


図 6-3-E-3 布E フランジ幅を変化させた場合
(空気柱長さ 20.0mm, 隙間 1.0mm)

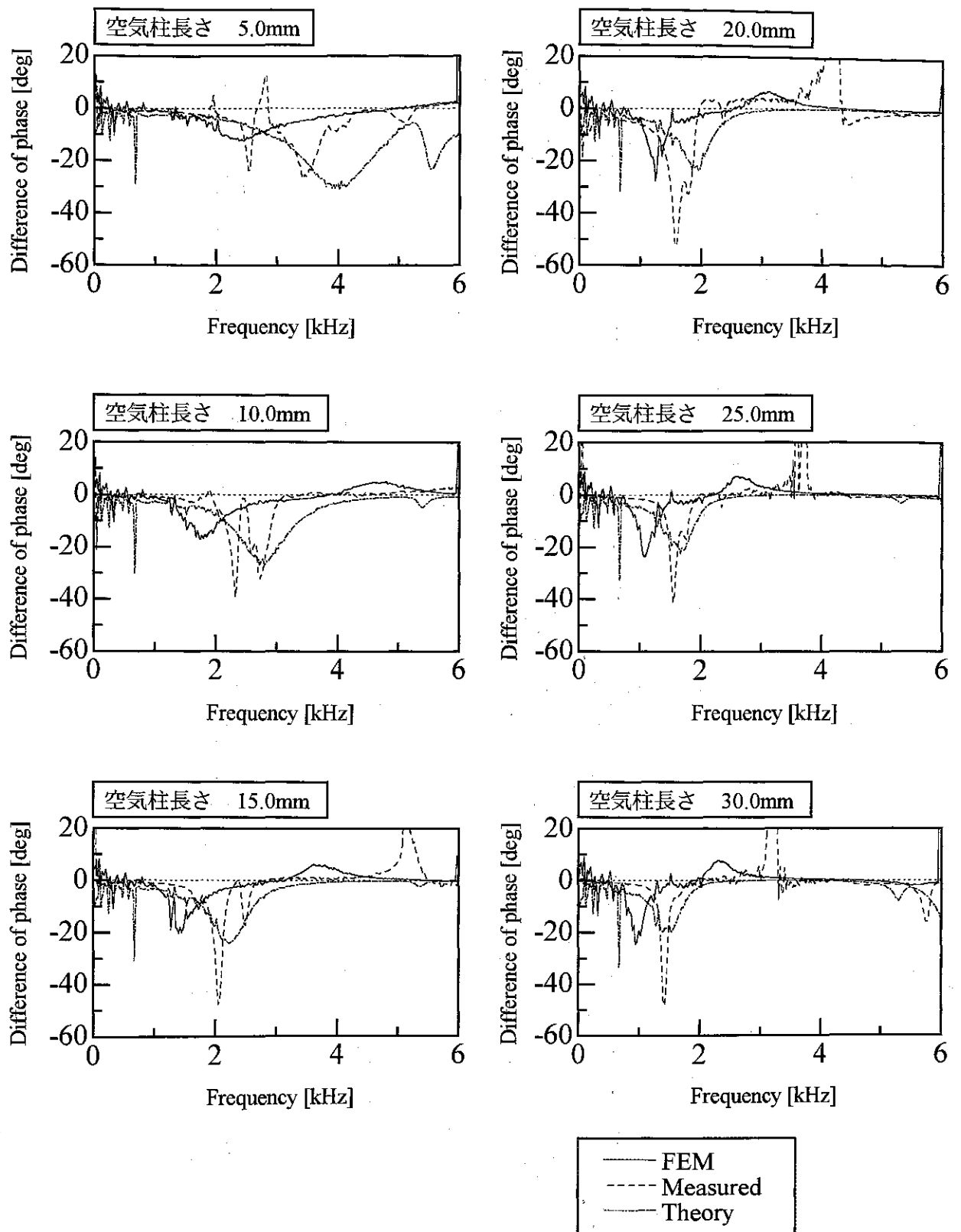


図 6-3-F-1 布 F 空気柱長さを変化させた場合
(フランジ幅 10.0mm, 隙間 1.0mm)

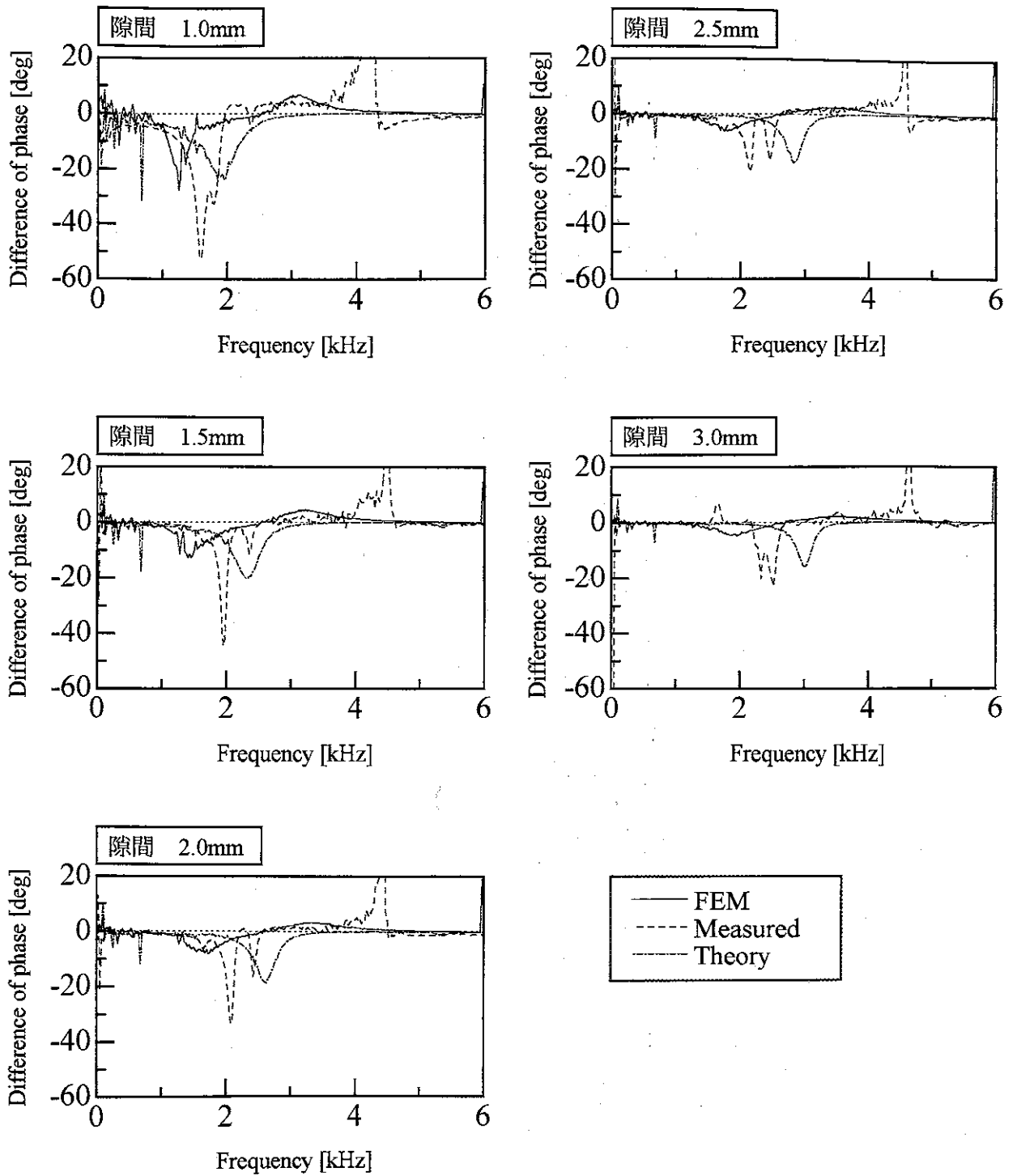


図 6-3-F-2 布 F 隙間を変化させた場合
(フランジ幅 10.0mm, 空気柱長さ 20.0mm)

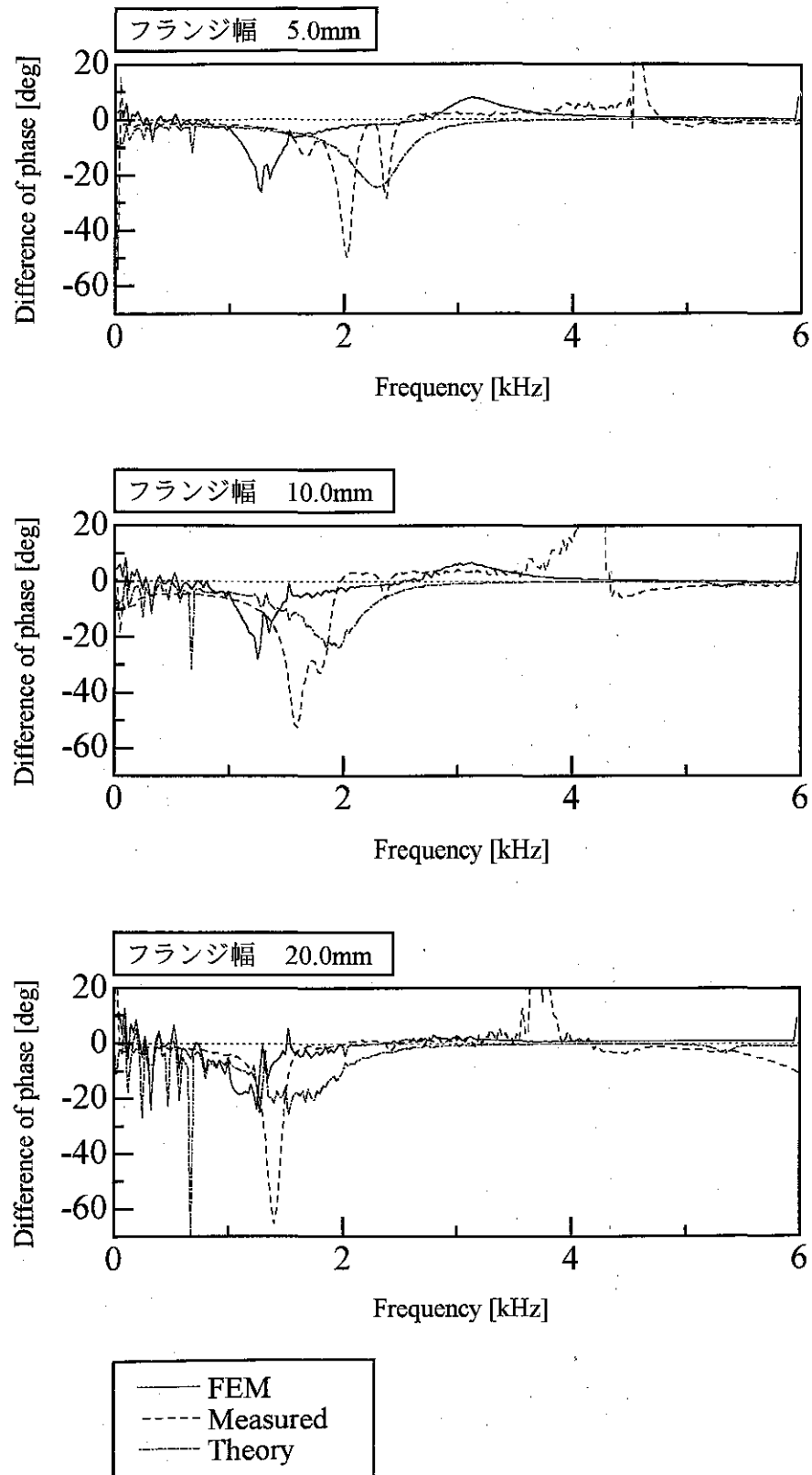


図 6-3-F-3 布 F フランジ幅を変化させた場合
(空気柱長さ 20.0mm, 隙間 1.0mm)

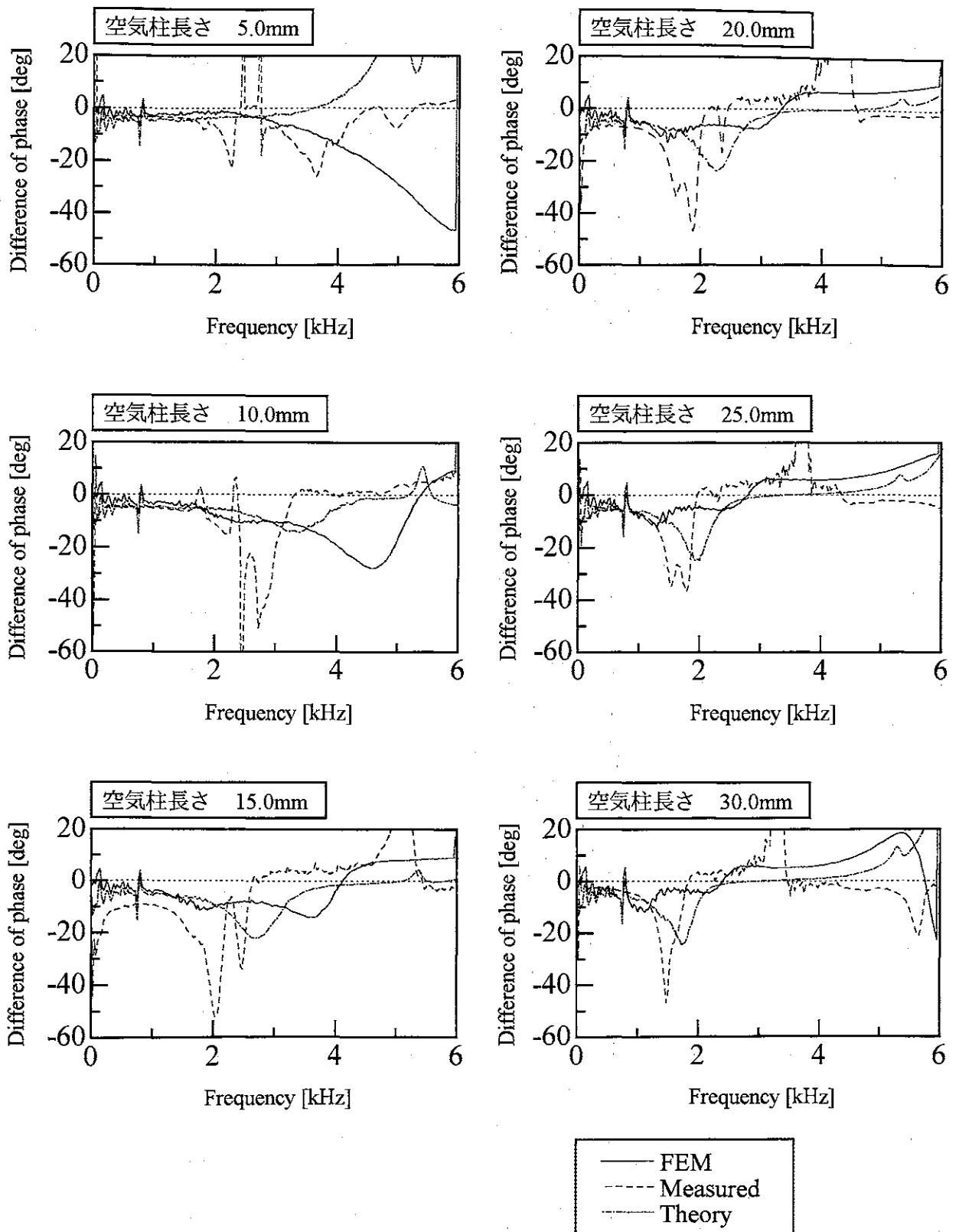


図 6-3-G-1 布 G 空気柱長を変化させた場合
(フランジ幅 10.0mm, 隙間 1.5mm)

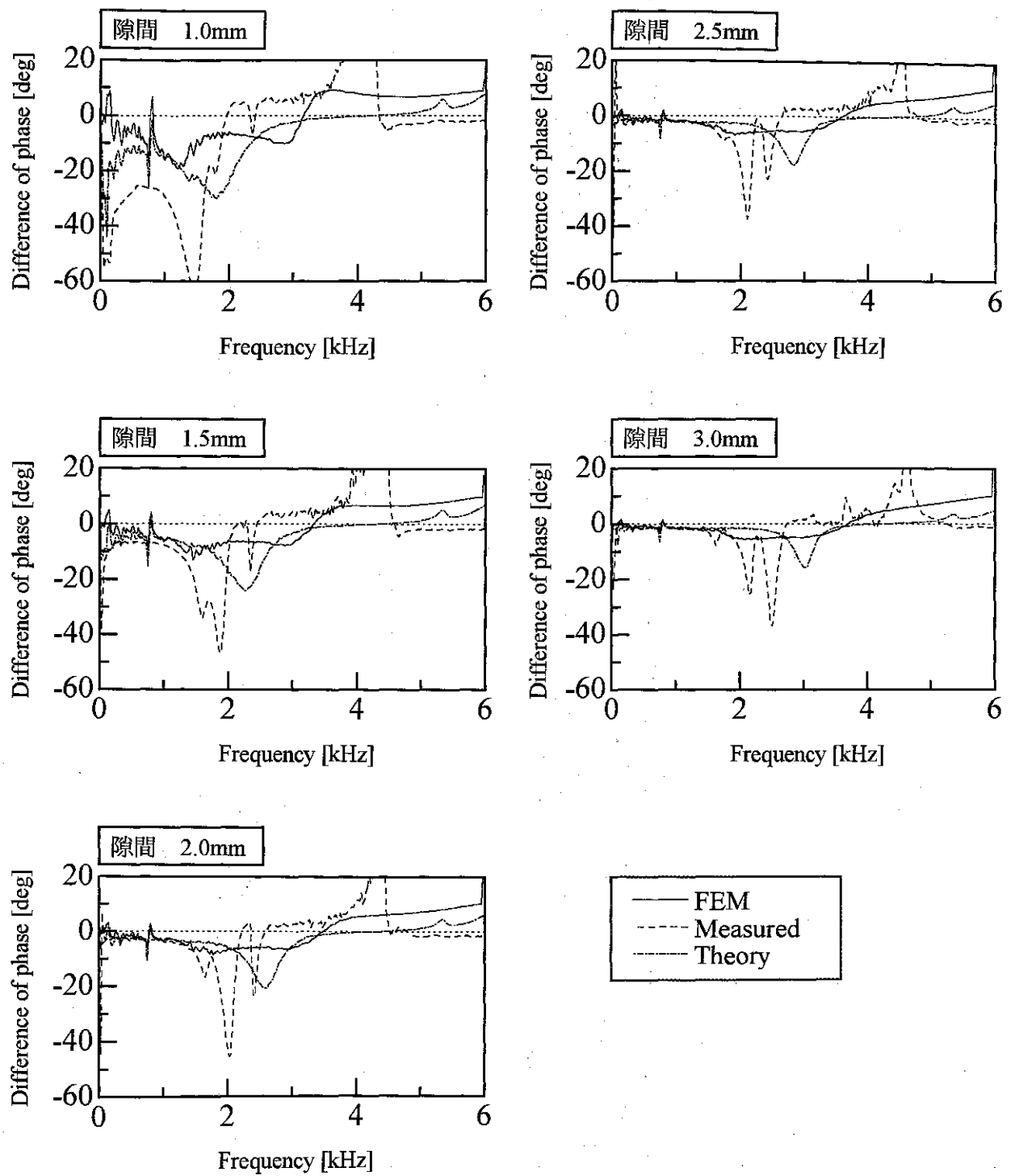


図 6-3-G-2 布 G 隙間を変化させた場合
(フランジ幅 10.0mm, 空気柱長さ 20.0mm)

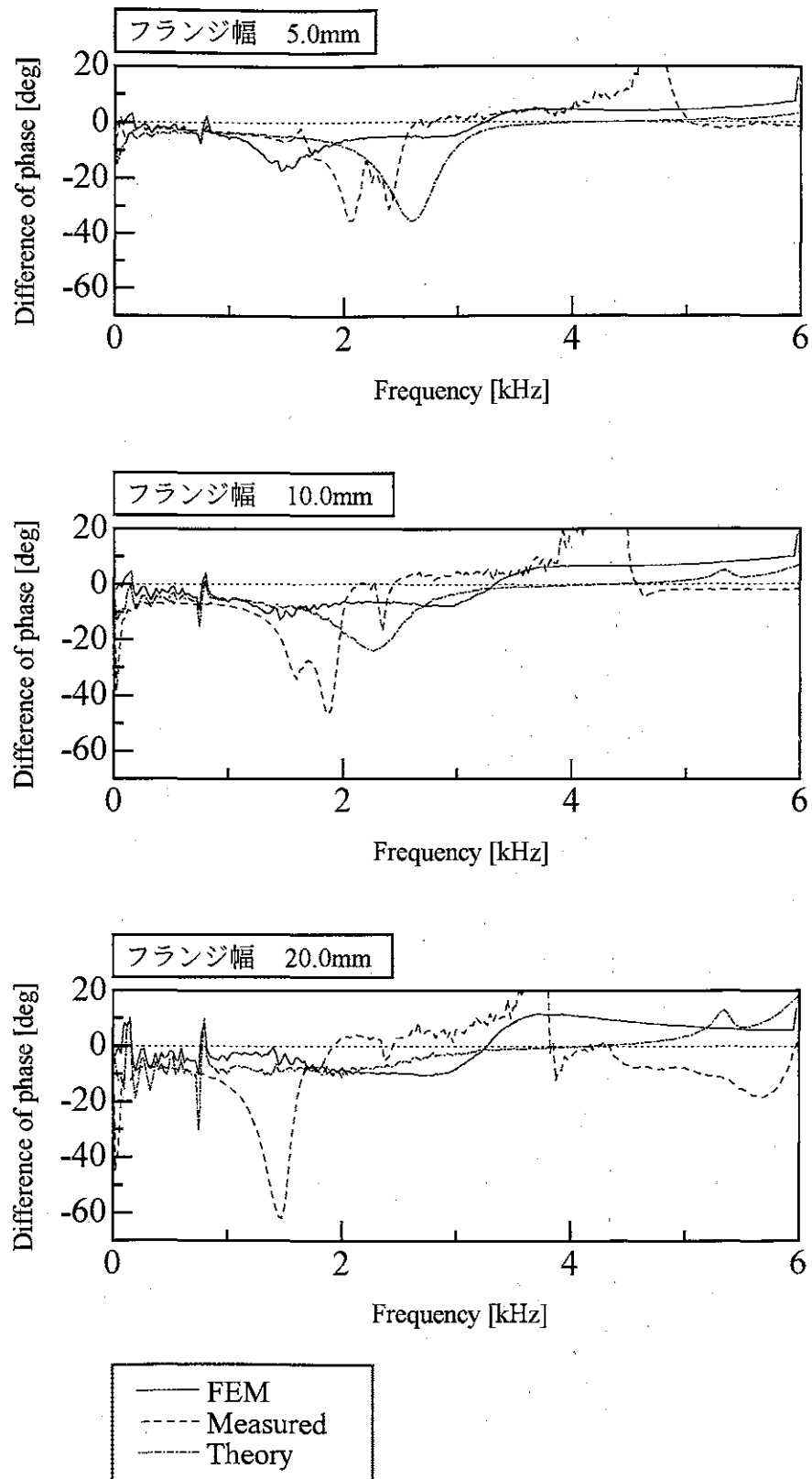


図 6-3-G-3 布 G フレンジ幅を変化させた場合
(空気柱長さ 20.0mm, 隙間 1.5mm)

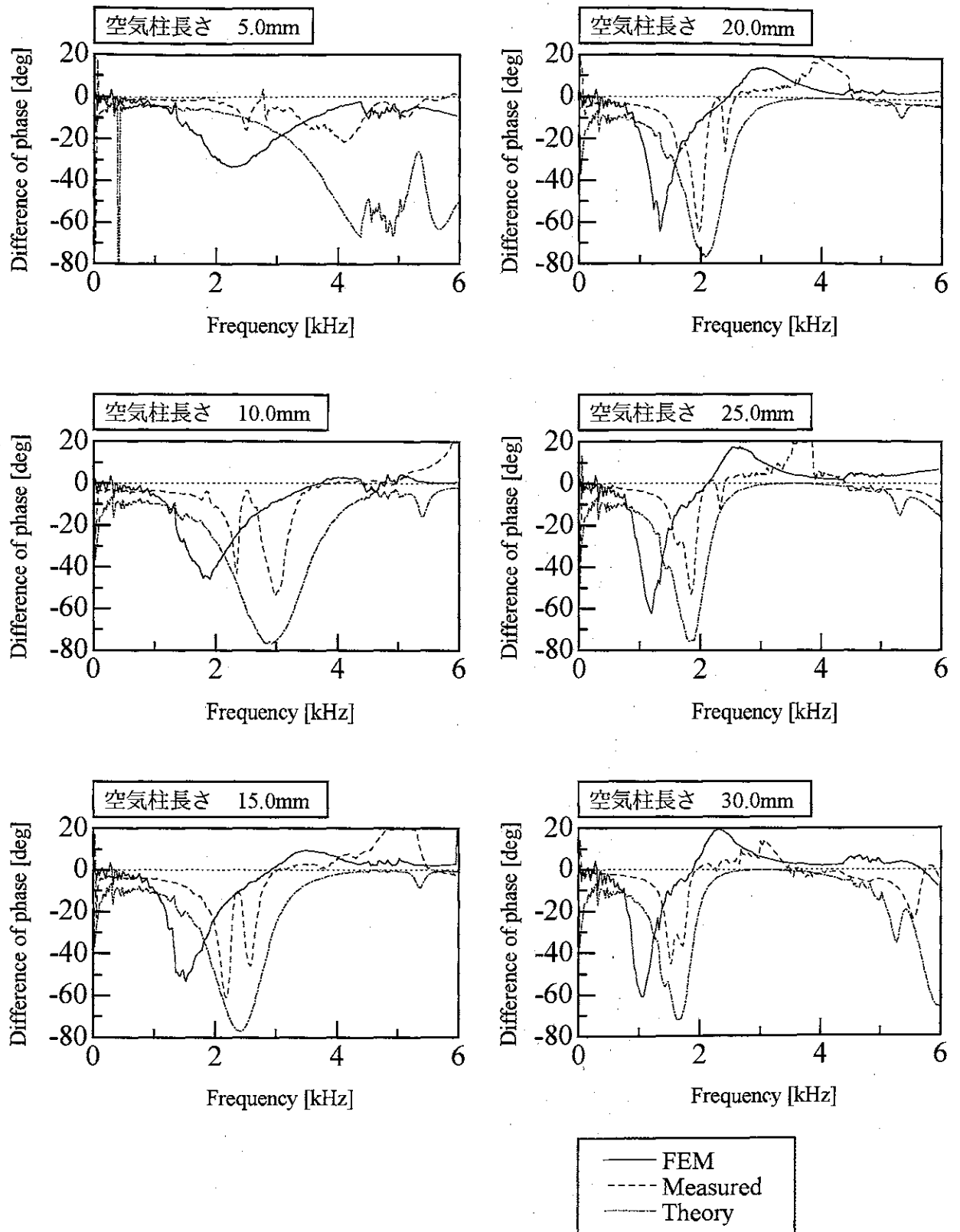


図 6-3-H-1 布H 空気柱長さを変化させた場合
(フランジ幅 10.0mm, 隙間 2.0mm)

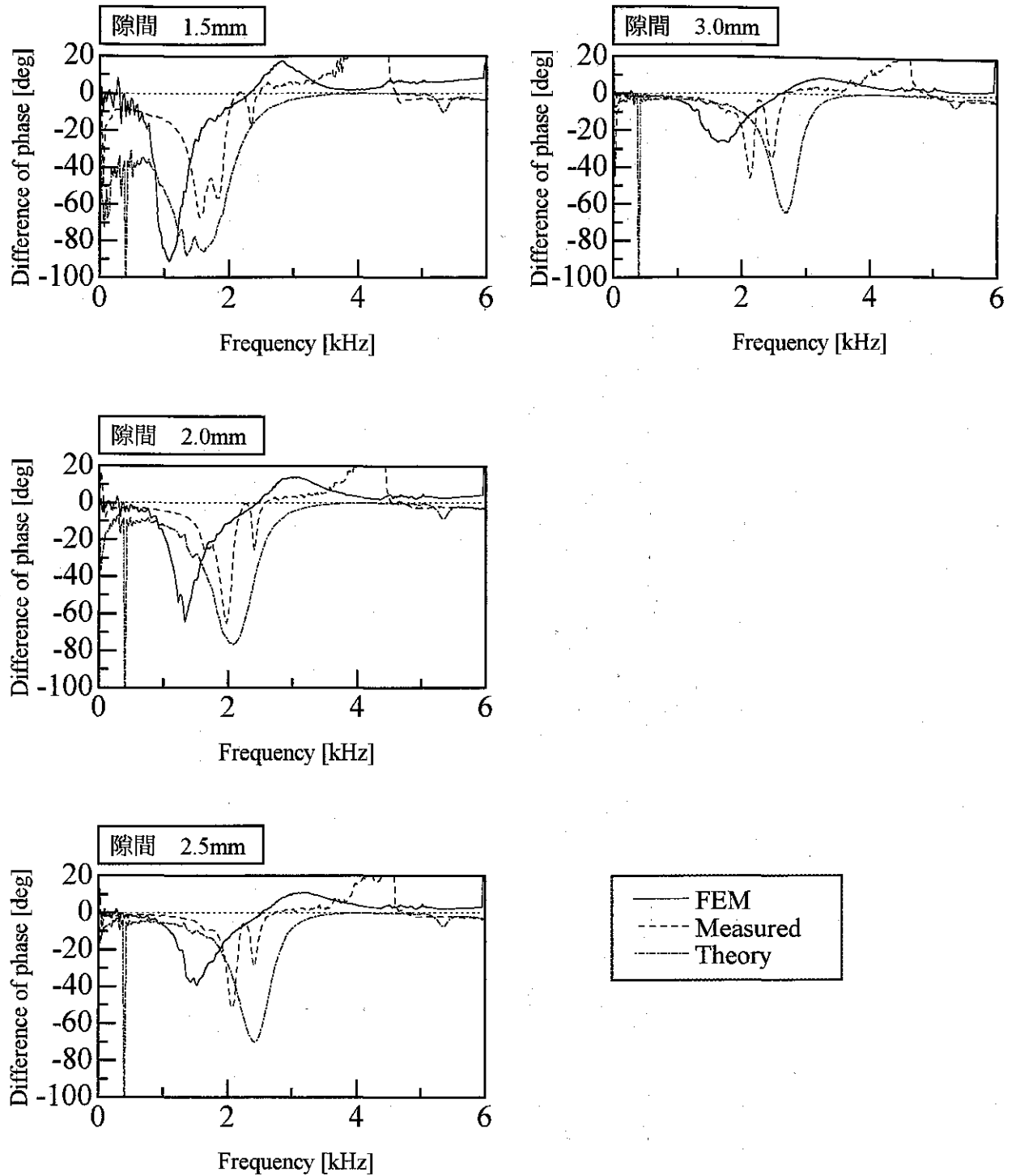


図 6-3-H-2 布H 隙間を変化させた場合
(フランジ幅 10.0mm, 空気柱長さ 20.0mm)

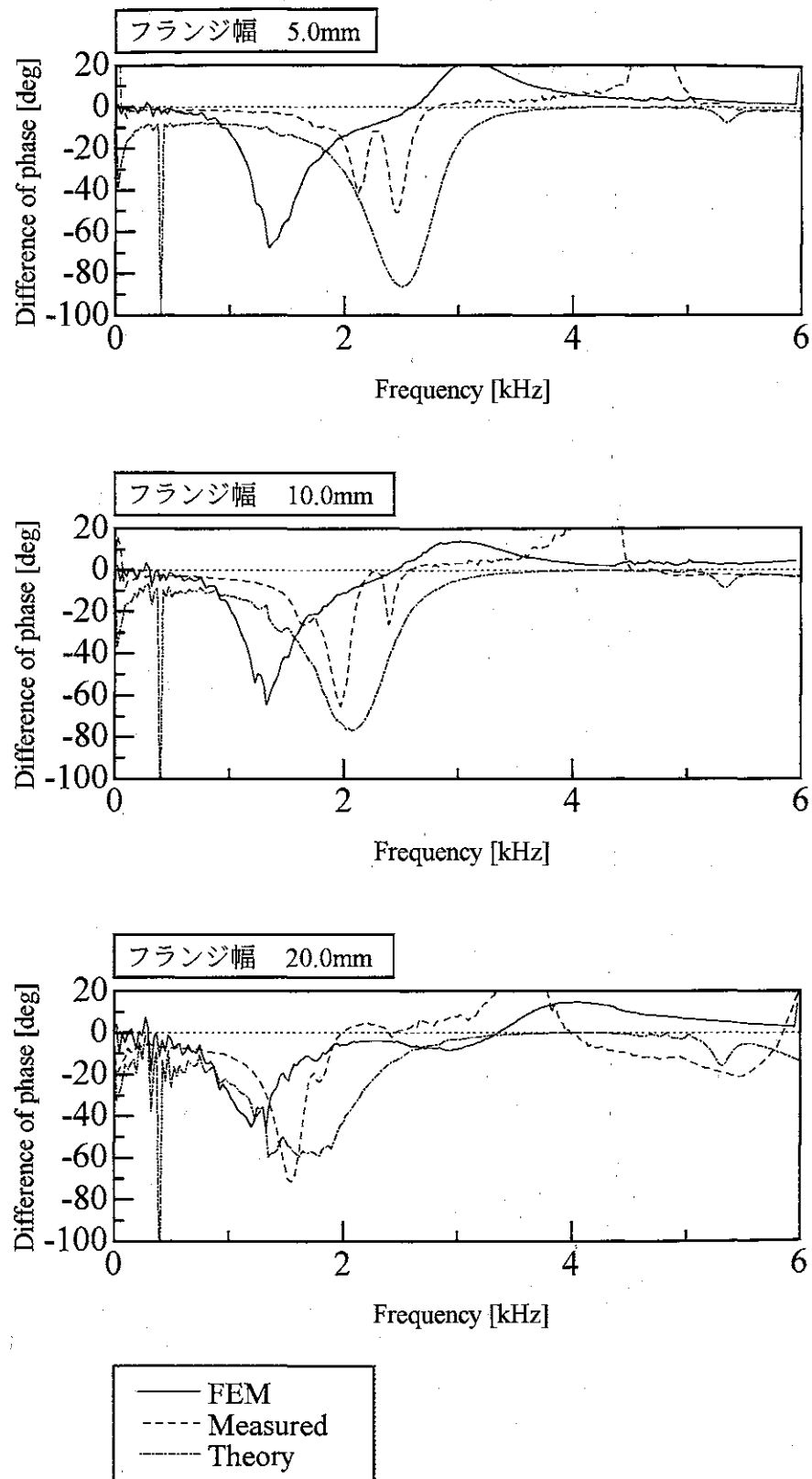


図 6-3-H-3 布H フランジ幅を変化させた場合
(空気柱長さ 20.0mm, 隙間 2.0mm)

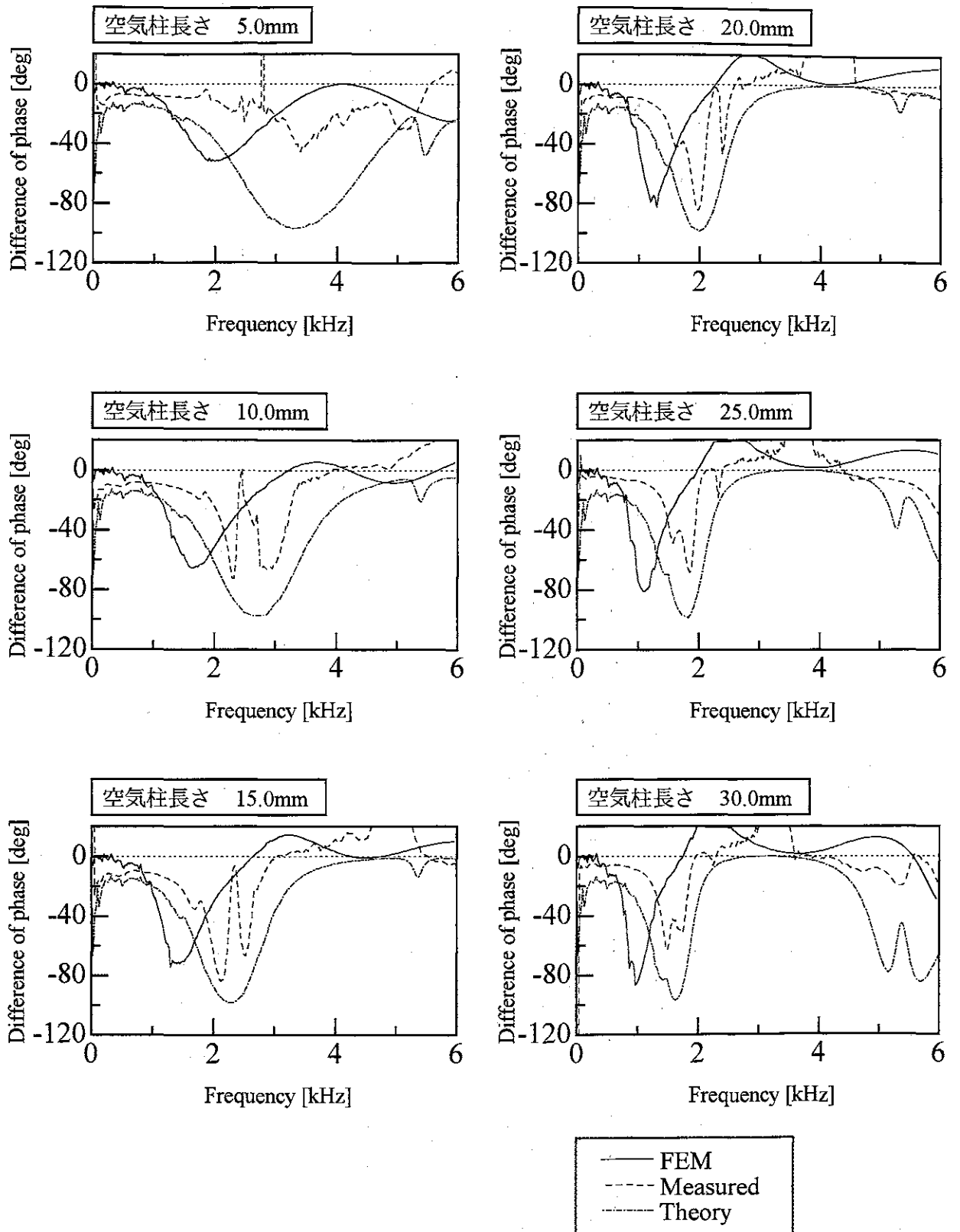


図 6-3-1-1 布 I 空気柱長さを変化させた場合
(フランジ幅 10.0mm, 隙間 2.5mm)

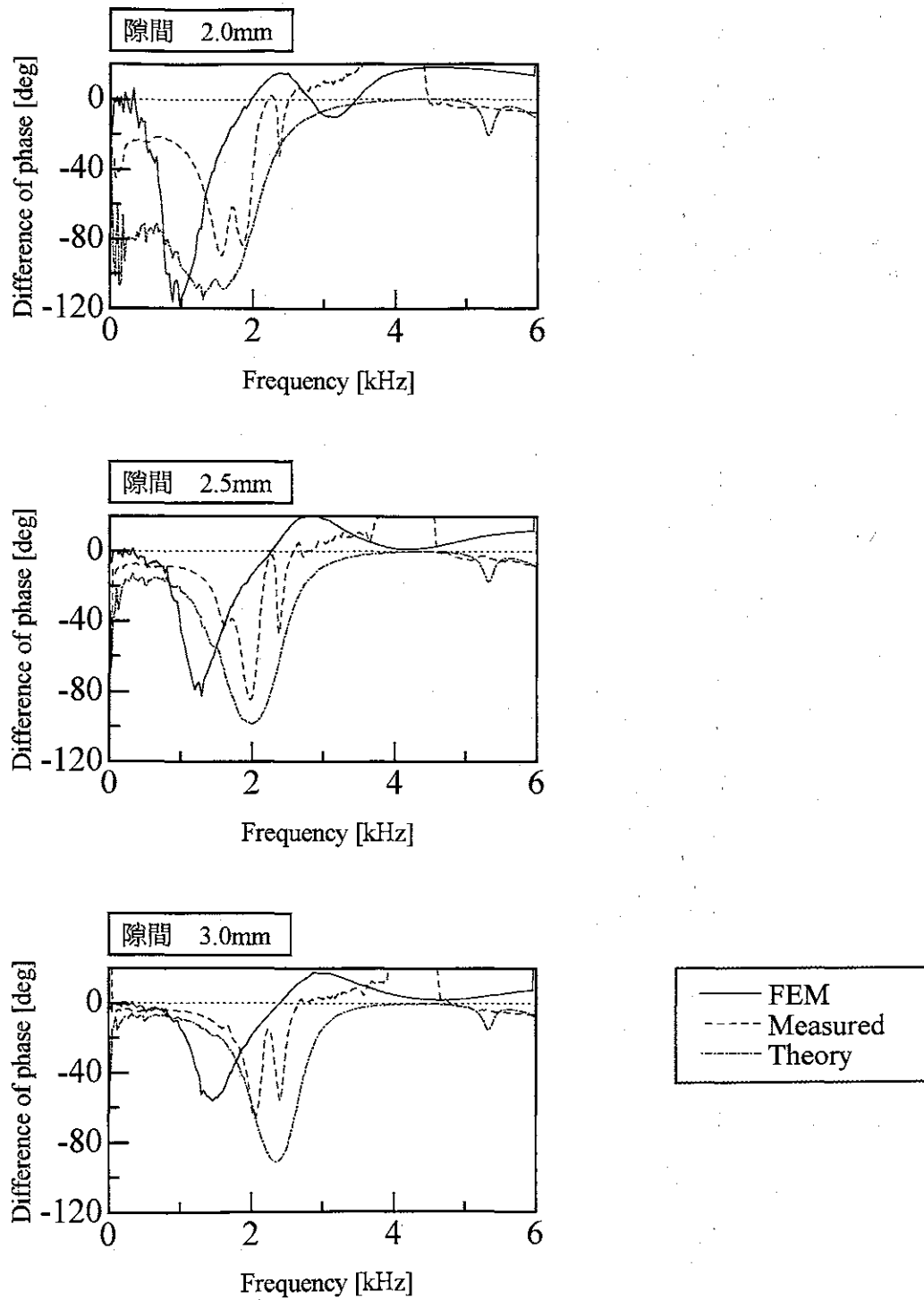


図 6-3-1-2 布 I 隙間を変化させた場合
(フランジ幅 10.0mm, 空気柱長さ 20.0mm)

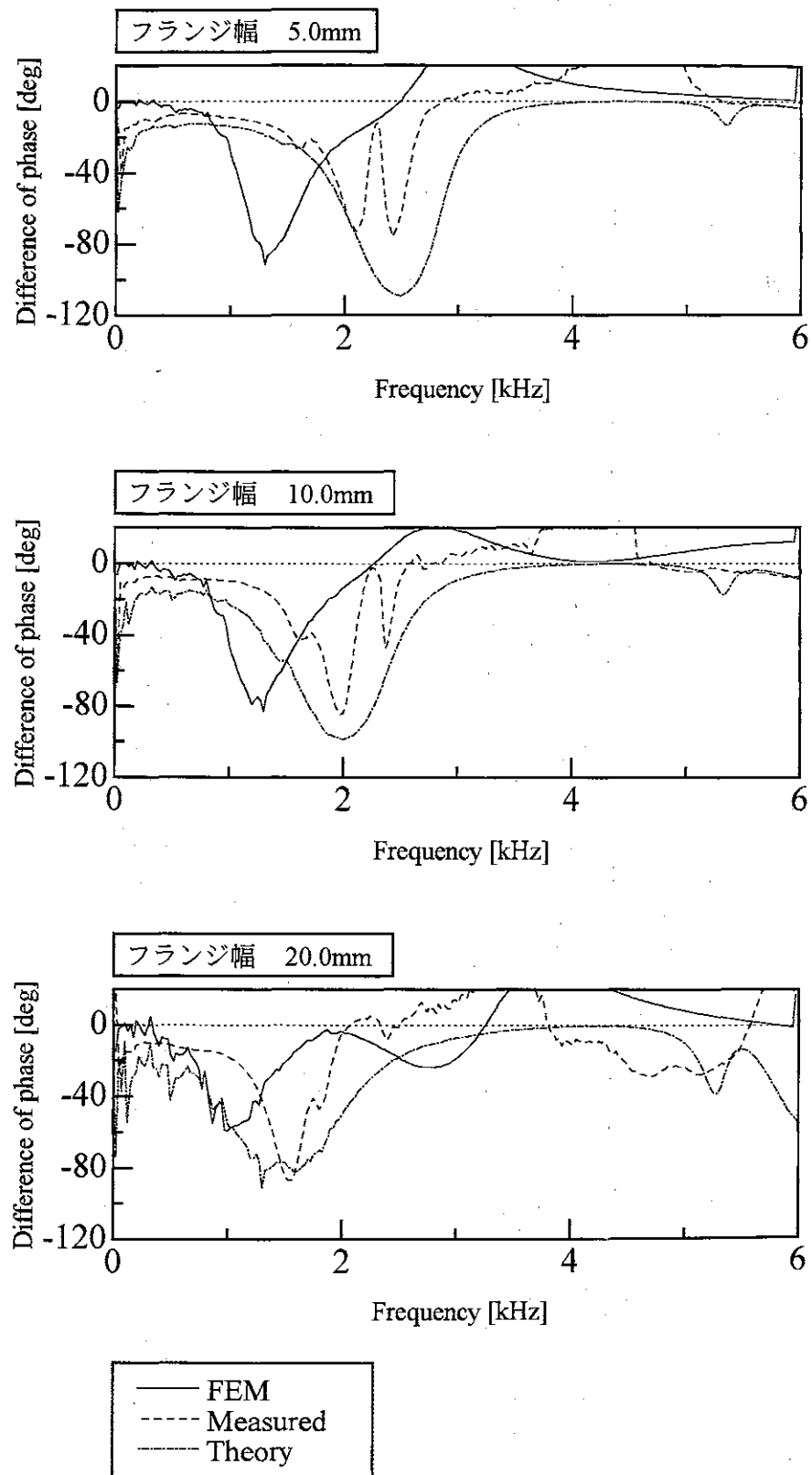


図 6-3-1-3 布 I フランジ幅を変化させた場合
(空気柱長さ 20.0mm, 隙間 2.5mm)

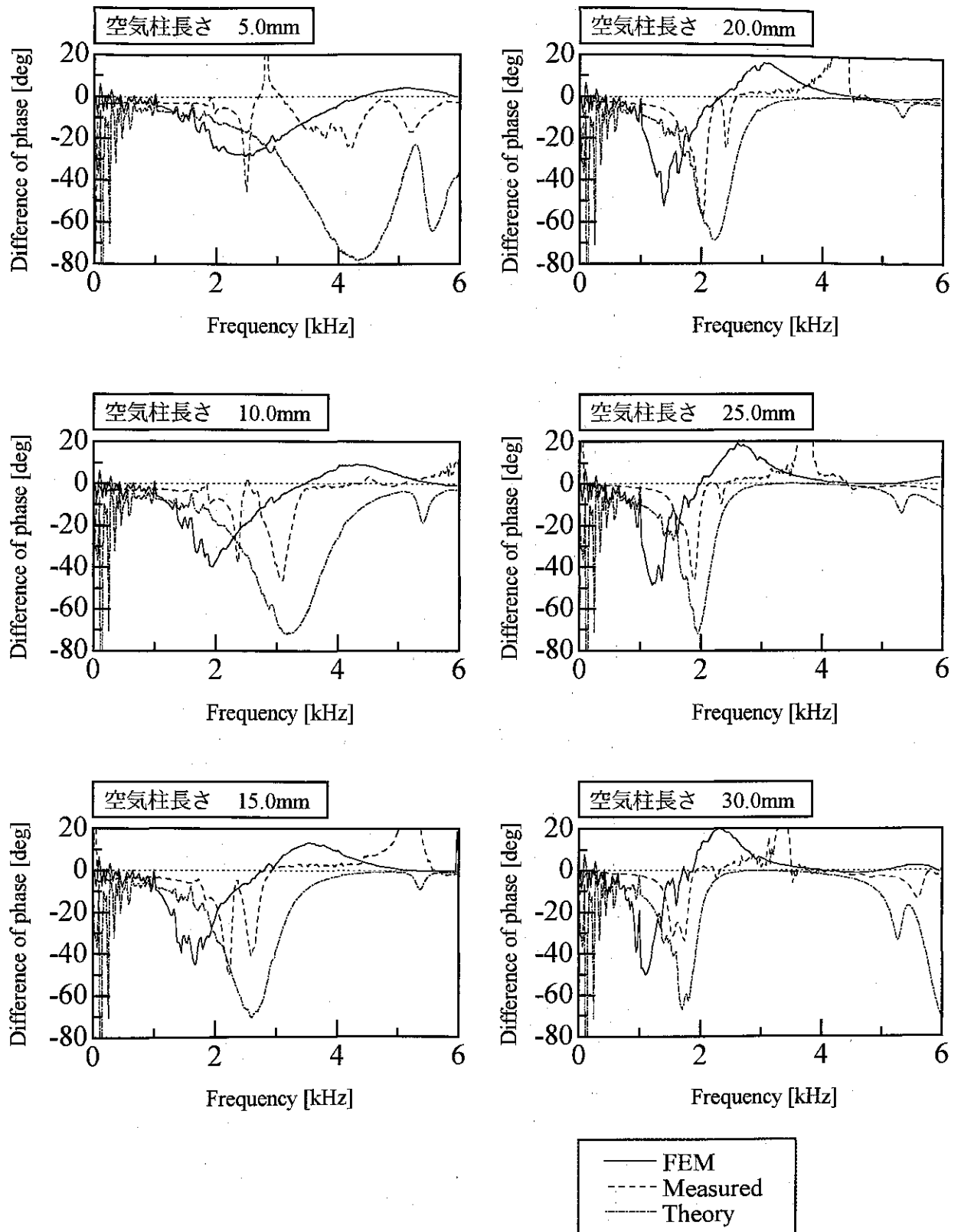


図 6-3-J-1 布 J 空気柱長さを変化させた場合
(フランジ幅 10.0mm, 隙間 1.5mm)

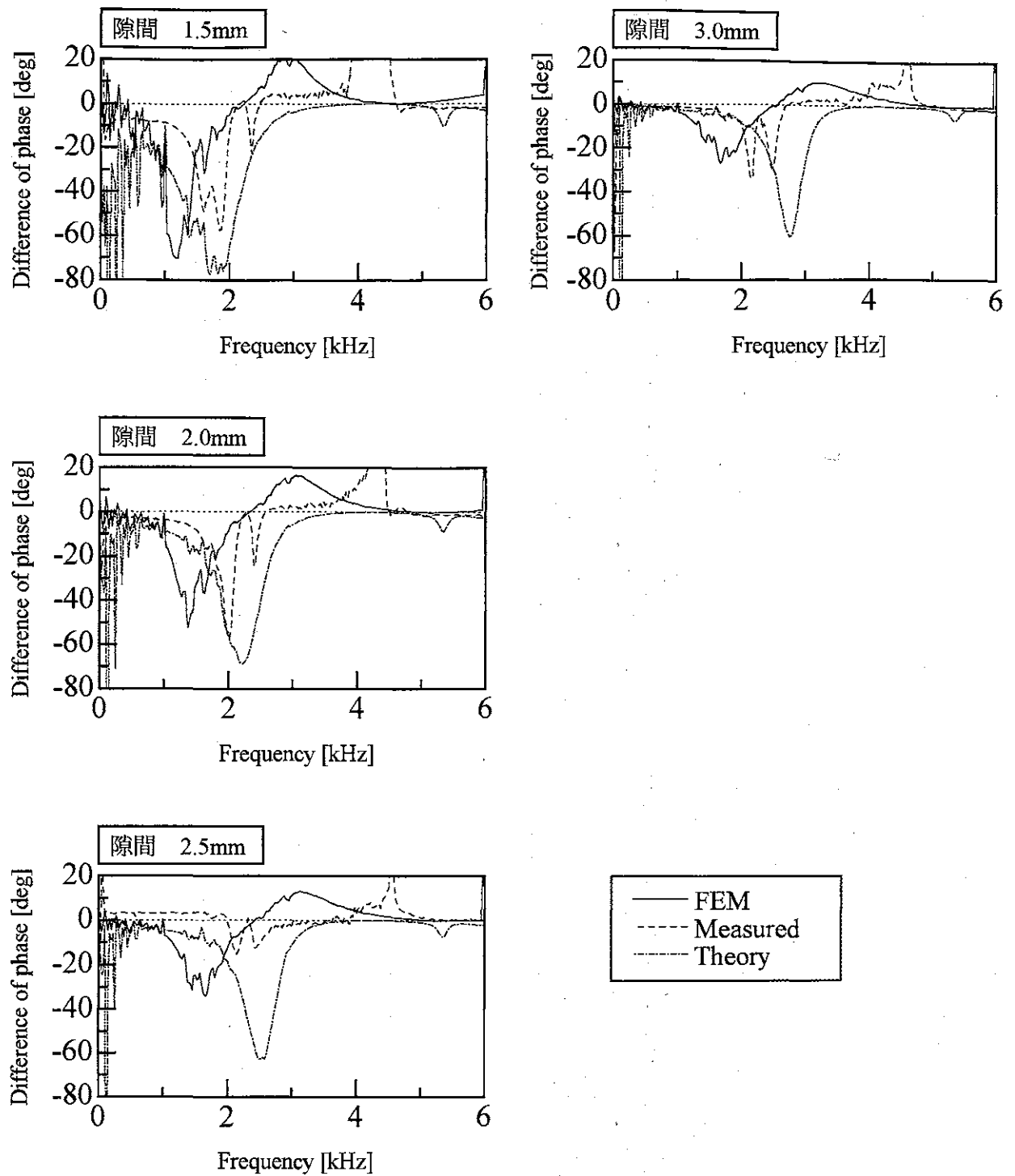


図 6-3-J-2 布 J 隙間を変化させた場合
(フランジ幅 10.0mm, 空気柱長さ 20.0mm)

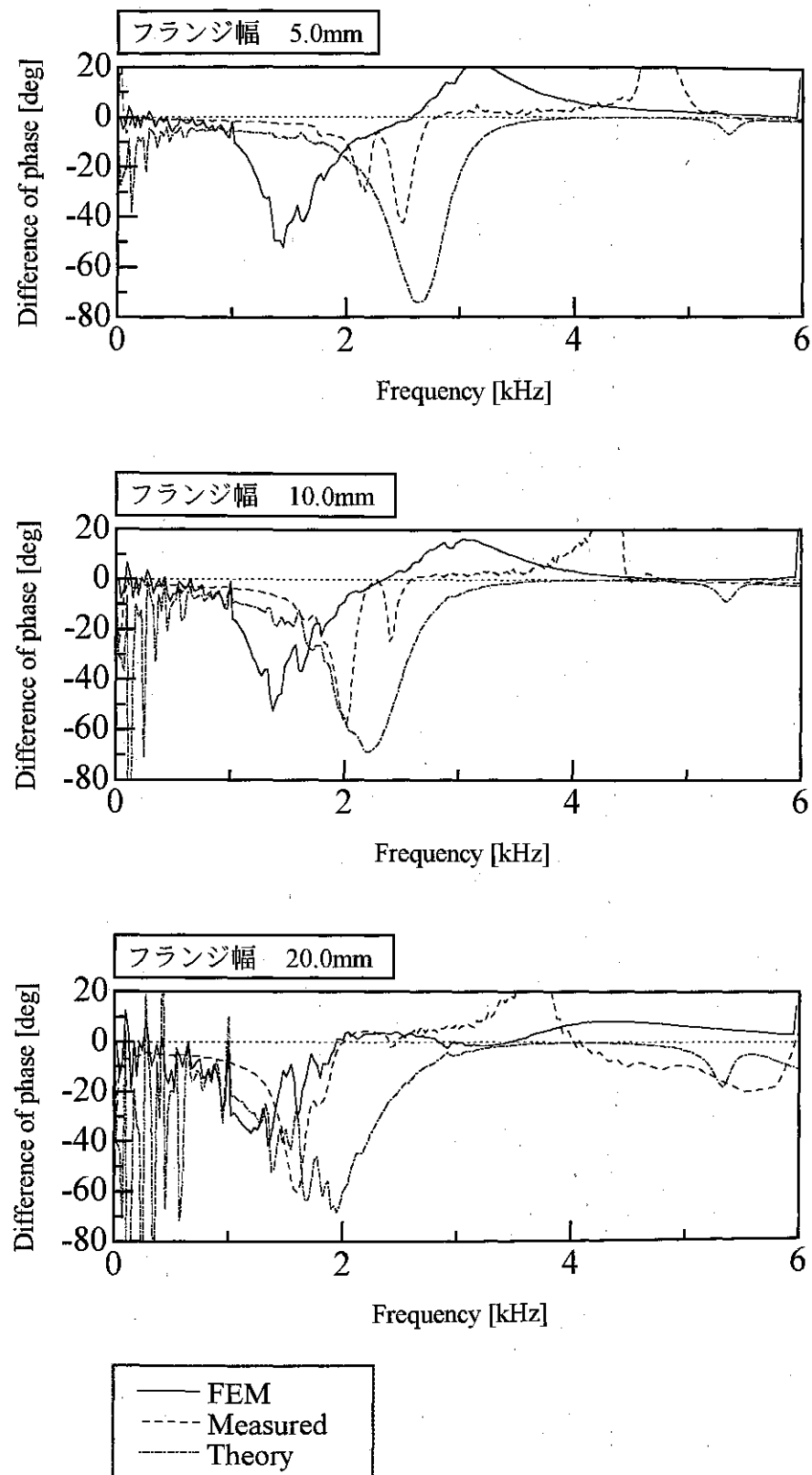


図 6-3-J-3 布 J フランジ幅を変化させた場合
(空気柱長さ 20.0mm, 隙間 1.5mm)

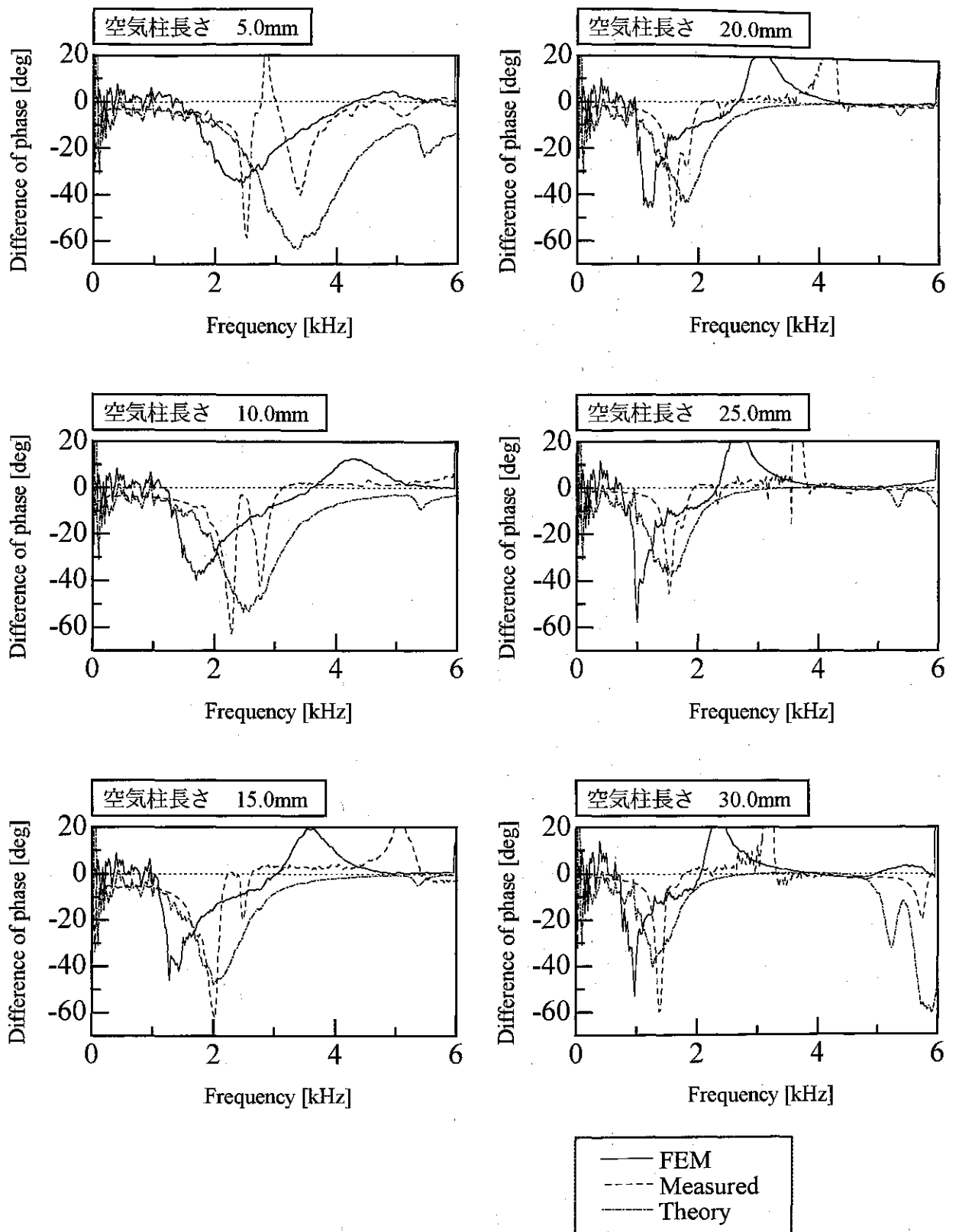


図 6-3-K-1 布K 空気柱長さを変化させた場合
(フランジ幅 10.0mm, 隙間 1.0mm)

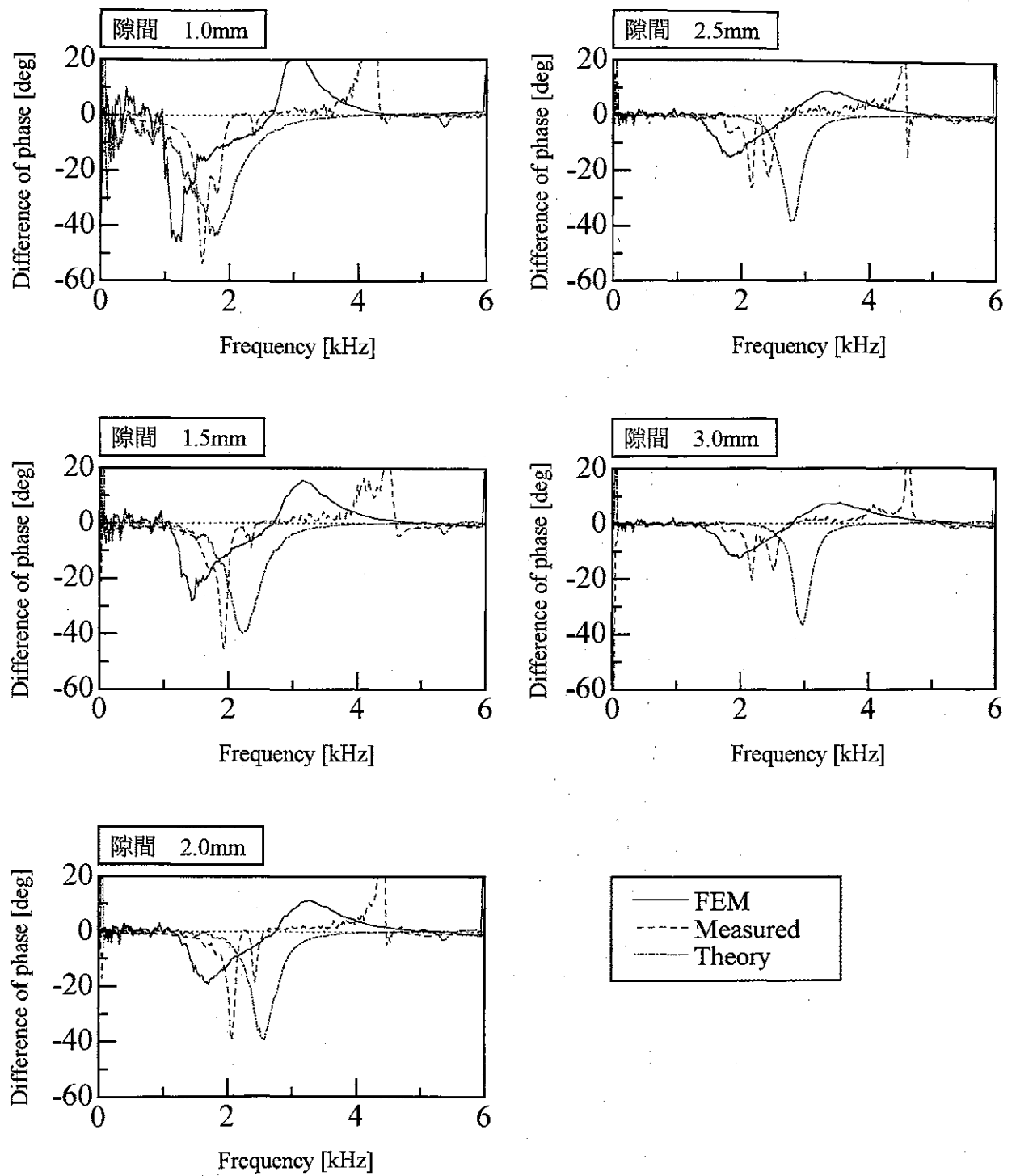


図 6-3-K-2 布 K 隙間を変化させた場合
(フランジ幅 10.0mm, 空気柱長さ 20.0mm)

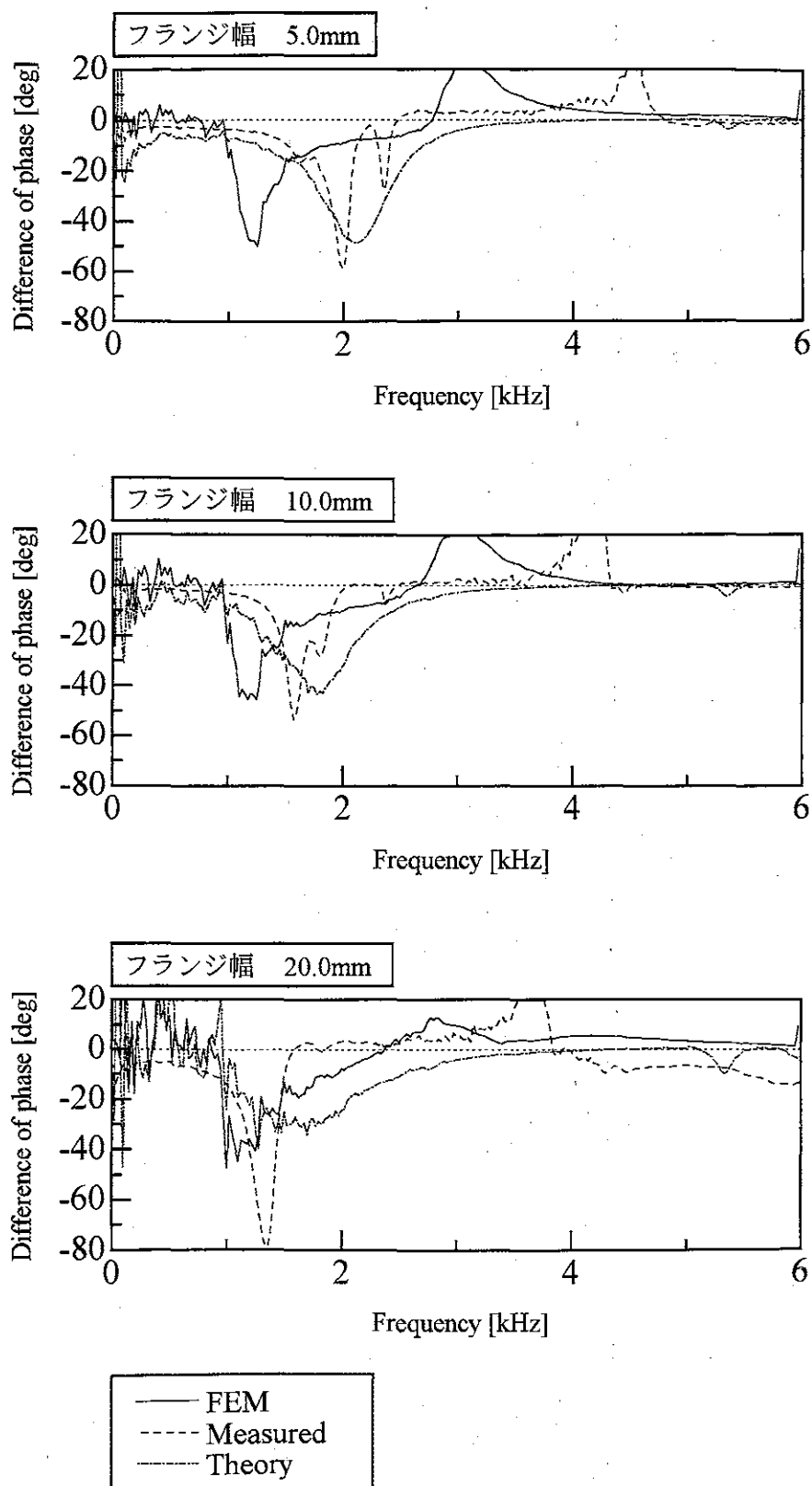


図 6-3-K-3 布K フランジ幅を変化させた場合
(空気柱長さ 20.0mm, 隙間 1.0mm)

6-4 SYSNOISE による数値解析結果の評価（振幅）

6-3 と同様にして、「1 枚時を基準とした 2 枚時の振幅」について、SYSNOISE による数値解析値（FEM）と実験値（Measured）・理論解析値（Theory）を重ね合わせた結果を図 6-4-A-1～図 6-4-K-3 に示す。それぞれの条件は表 6-3-1～2 に示した。

グラフを見ると、それぞれの布について位相と同様な傾向が見られる。

表 6-3-1 図番に対応する条件

図番	布コード (枚数)	フランジ幅 (mm)	空気柱長さ (mm)	隙間 (mm)
6-4-A-1	A	10.0	—	1.0
6-4-A-2	"	10.0	20.0	—
6-4-A-3	"	—	20.0	1.0
6-4-B-1	B	10.0	—	1.5
6-4-B-2	"	10.0	20.0	—
6-4-B-3	"	—	20.0	1.5
6-4-C-1	C	10.0	—	1.5
6-4-C-2	"	10.0	20.0	—
6-4-C-3	"	—	20.0	1.5
6-4-D-1	D	10.0	—	1.0
6-4-D-2	"	10.0	20.0	—
6-4-D-3	"	—	20.0	1.0
6-4-E-1	E	10.0	—	1.0
6-4-E-2	"	10.0	20.0	—
6-4-E-3	"	—	20.0	1.0
6-4-F-1	F	10.0	—	1.0
6-4-F-2	"	10.0	20.0	—
6-4-F-3	"	—	20.0	1.0
6-4-G-1	G	10.0	—	1.5
6-4-G-2	"	10.0	20.0	—
6-4-G-3	"	—	20.0	1.5
6-4-H-1	H	10.0	—	2.0
6-4-H-2	"	10.0	20.0	—
6-4-H-3	"	—	20.0	2.0

表 6-3-2 図番に対応する条件

図番	布コード (枚数)	フランジ幅 (mm)	空気柱長さ (mm)	隙間 (mm)
6-4-I-1	I	10.0	—	2.5
6-4-I-2	〃	10.0	20.0	—
6-4-I-3	〃	—	20.0	2.5
6-4-J-1	J	10.0	—	1.5
6-4-J-2	〃	10.0	20.0	—
6-4-J-3	〃	—	0.0	1.5
6-4-K-1	K	10.0	—	1.0
6-4-K-2	〃	10.0	20.0	—
6-4-K-3	〃	—	20.0	1.0

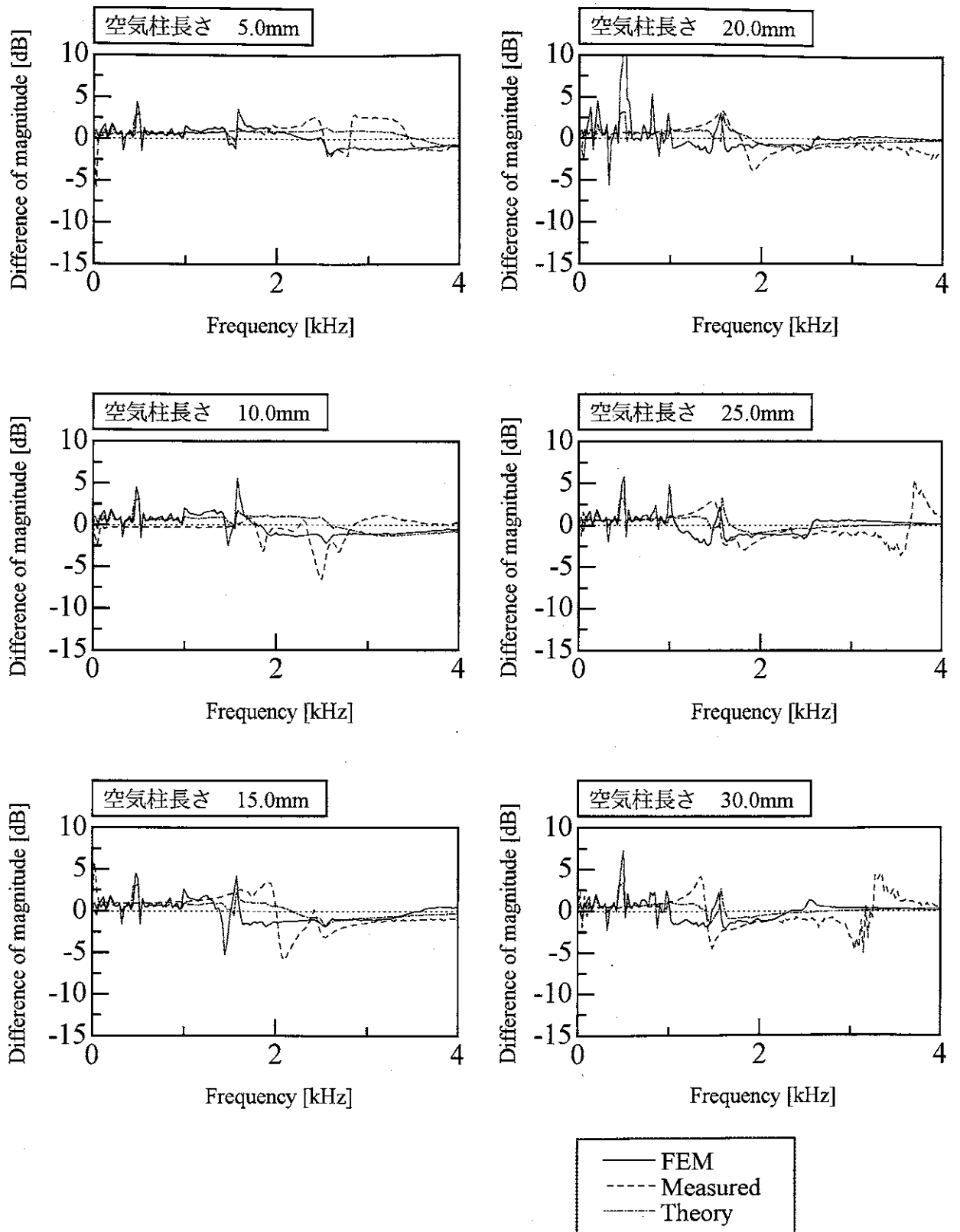


図 6-4-A-1 布 A 空気柱長さを変化させた場合
(フランジ幅 10.0mm, 隙間 1.0mm)

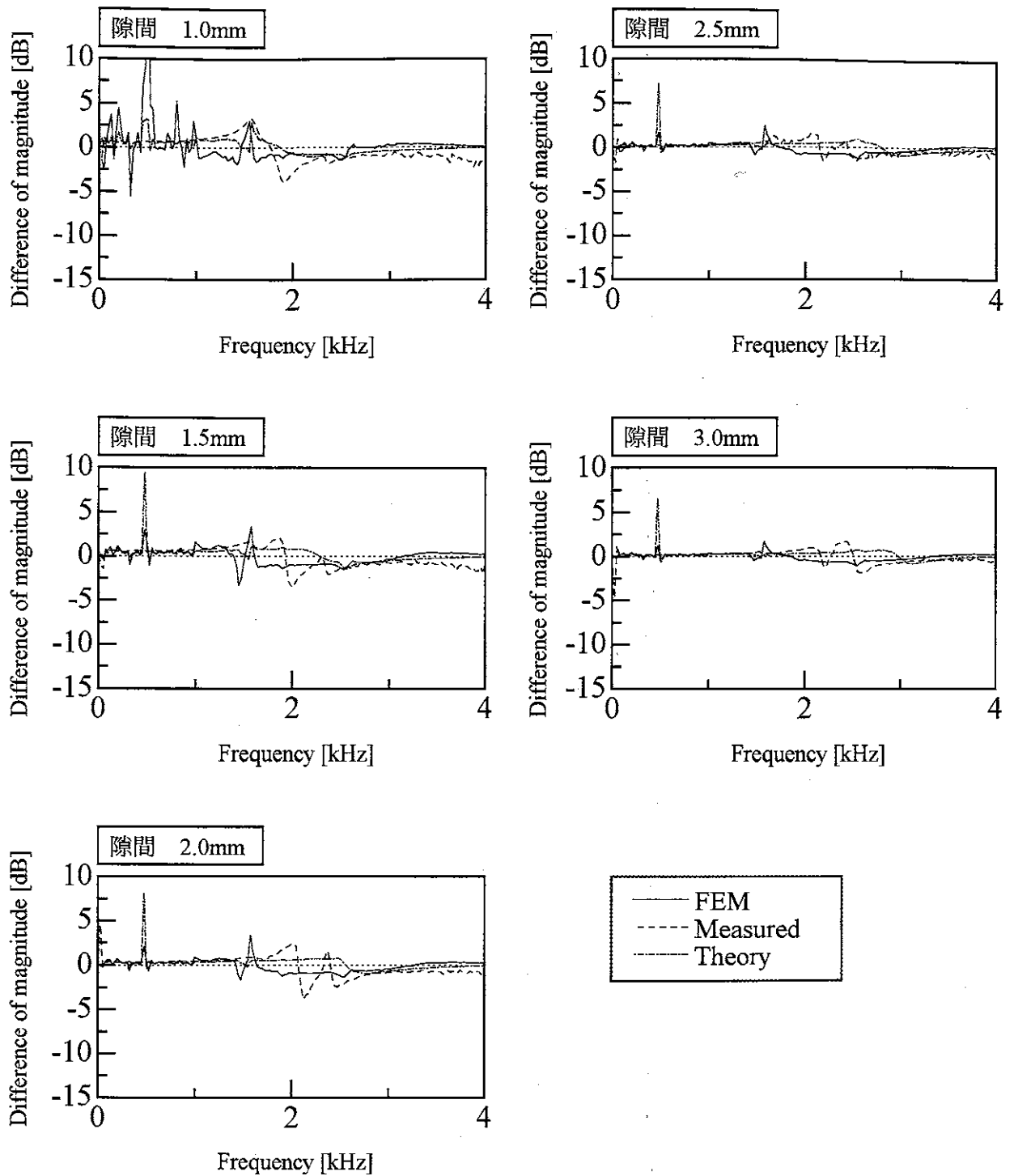


図 6-4-A-2 布 A 隙間を変化させた場合
(フランジ幅 10.0mm, 空気柱長さ 20.0mm)

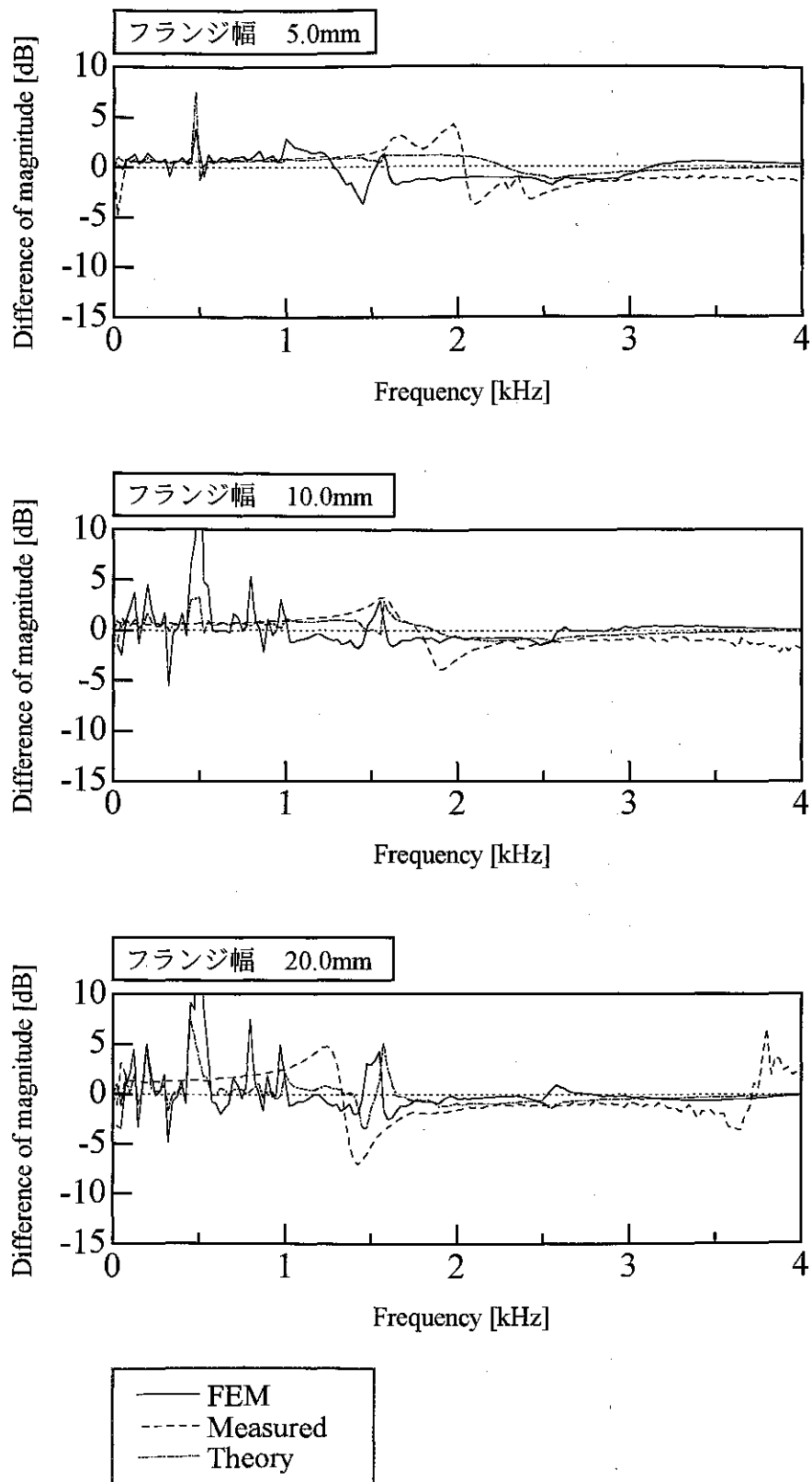


図 6-4-A-3 布 A フレンジ幅を変化させた場合
(空気柱長さ 20.0mm, 隙間 1.0mm)

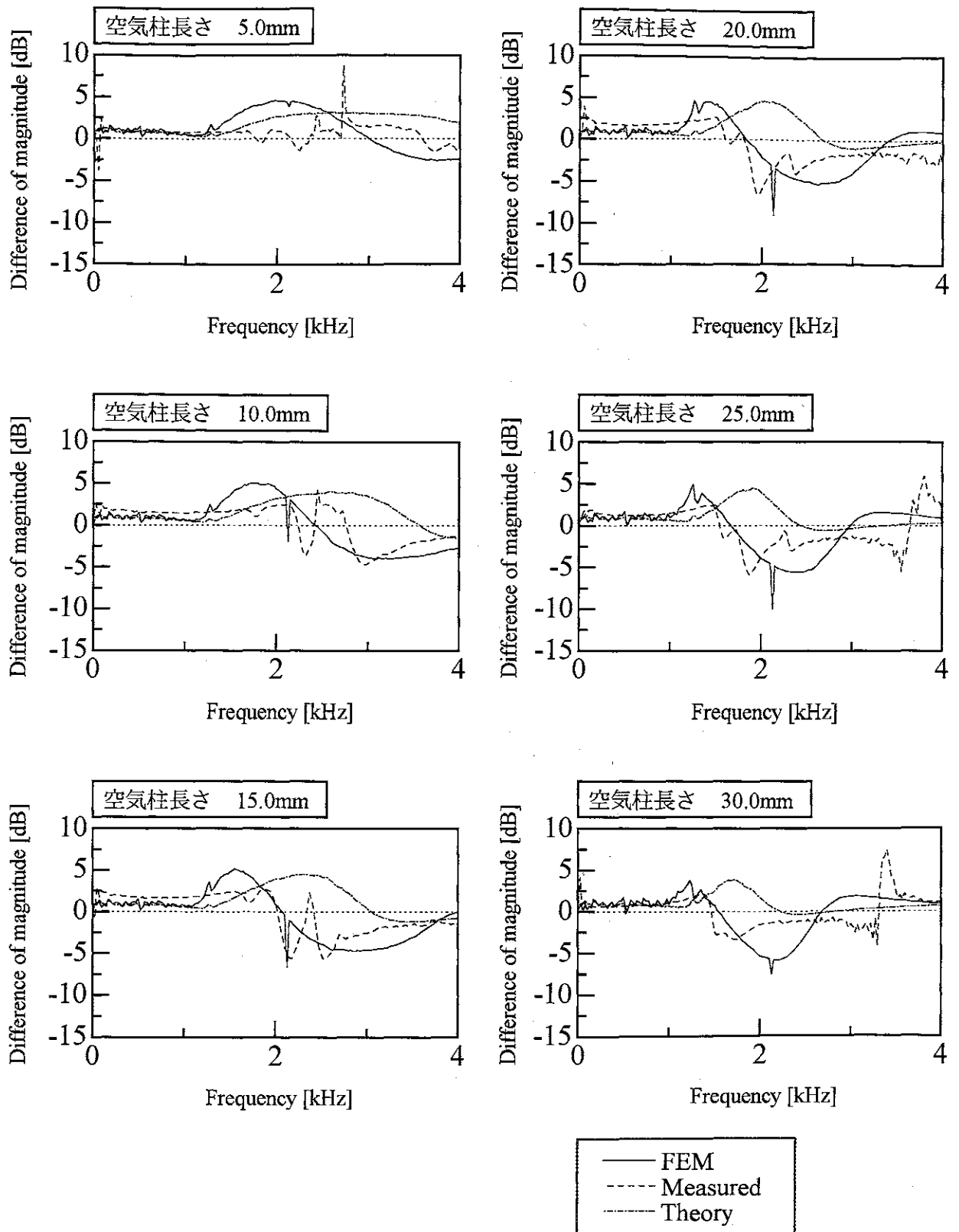


図 6-4-B-1 布B 空気柱長を変化させた場合
(フランジ幅 10.0mm, 隙間 1.5mm)

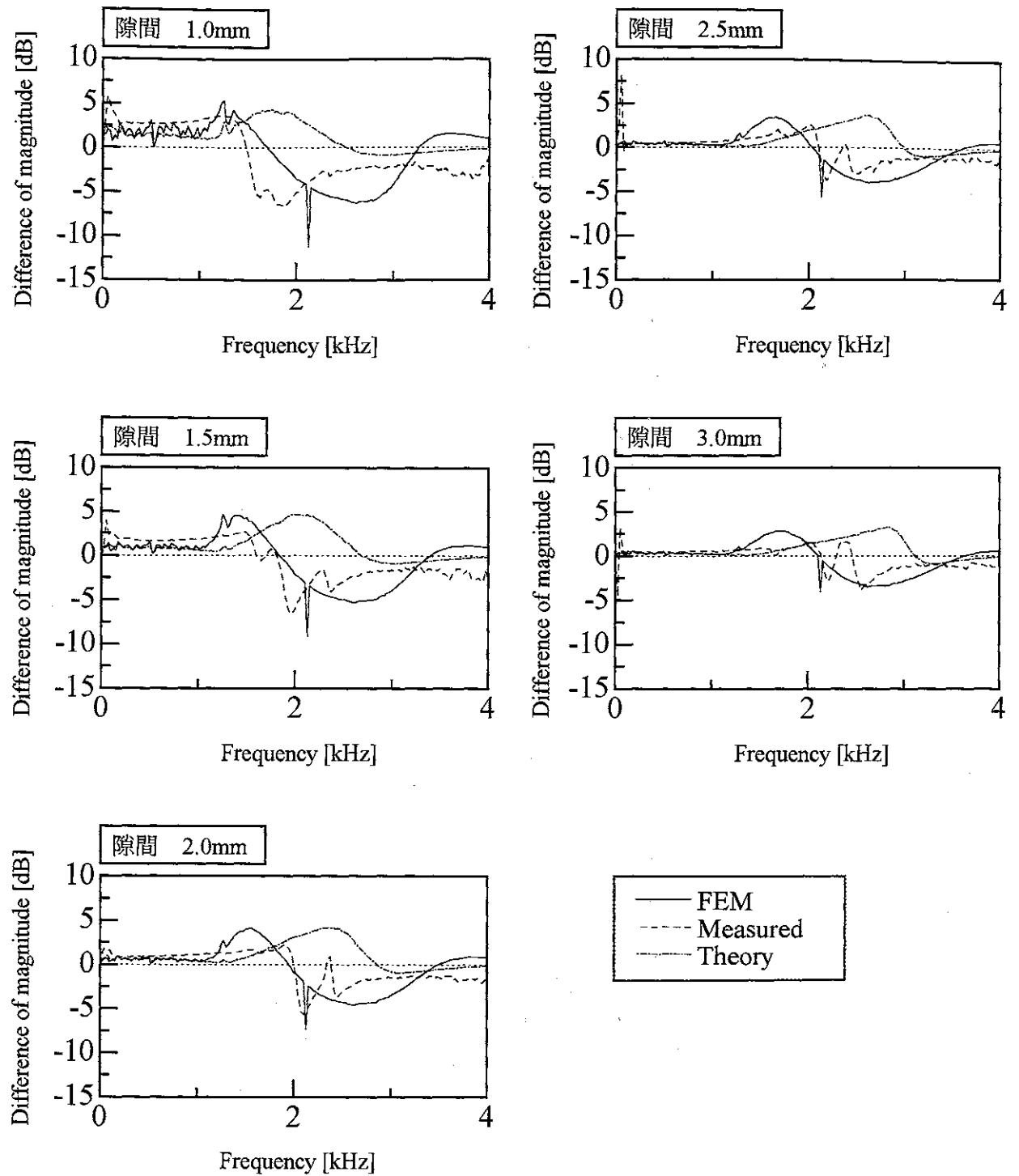


図 6-4-B-2 布B 隙間を変化させた場合
(フランジ幅 10.0mm, 空気柱長さ 20.0mm)

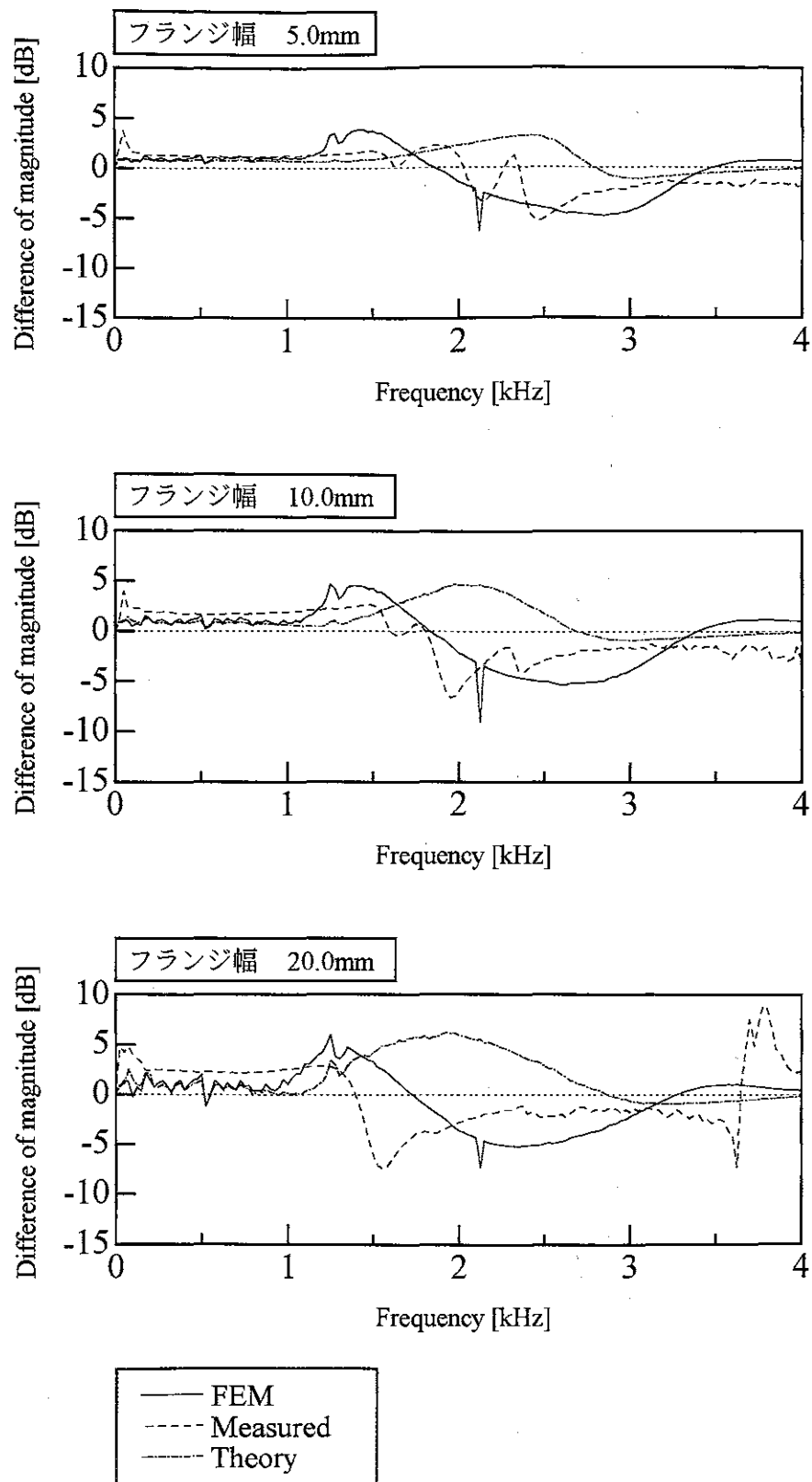


図 6-4-B-3 布 B フランジ幅を変化させた場合
(空気柱長さ 20.0mm, 隙間 1.5mm)

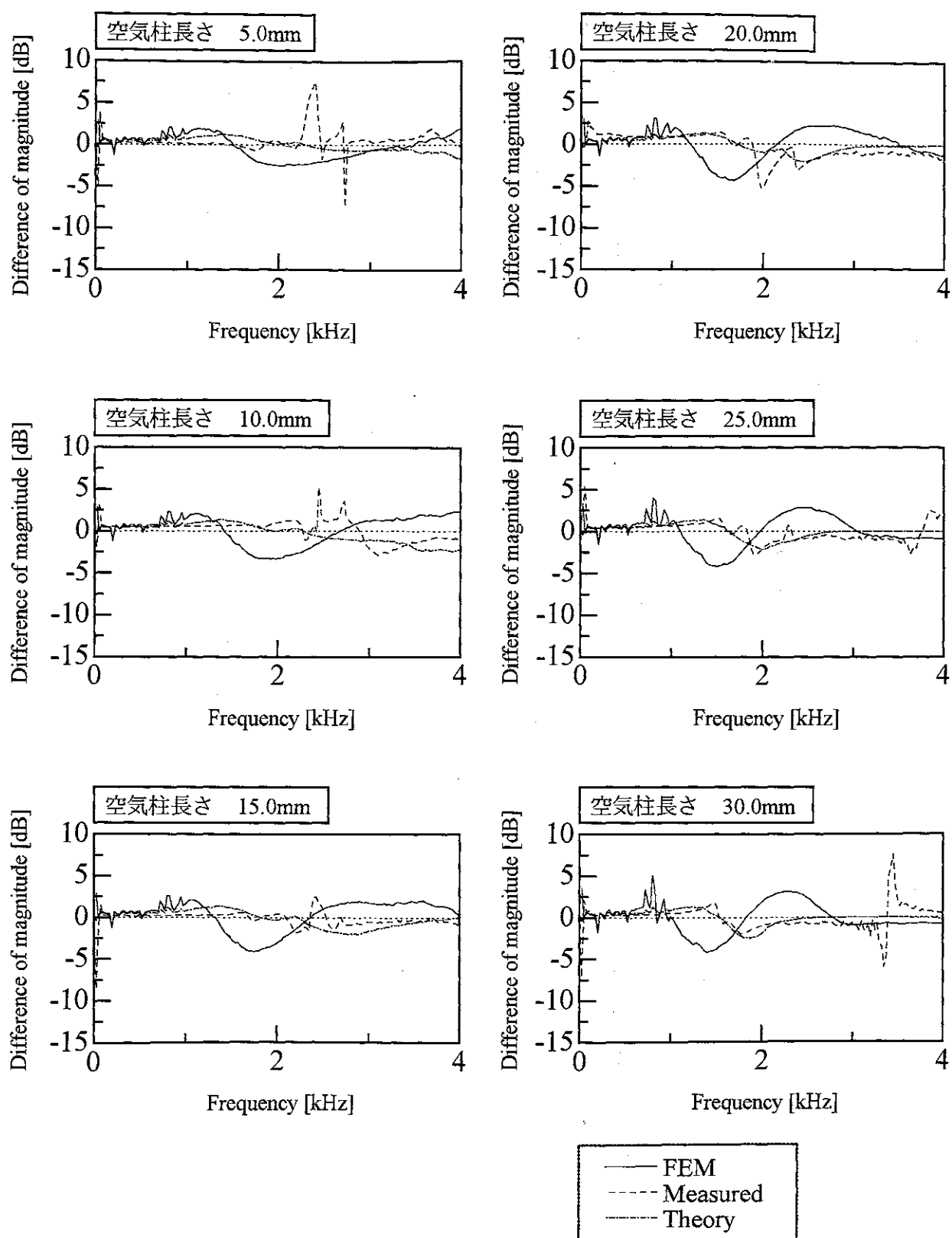


図 6-4-C-1 布 C 空気柱長さを変化させた場合
(フランジ幅 10.0mm, 隙間 1.5mm)

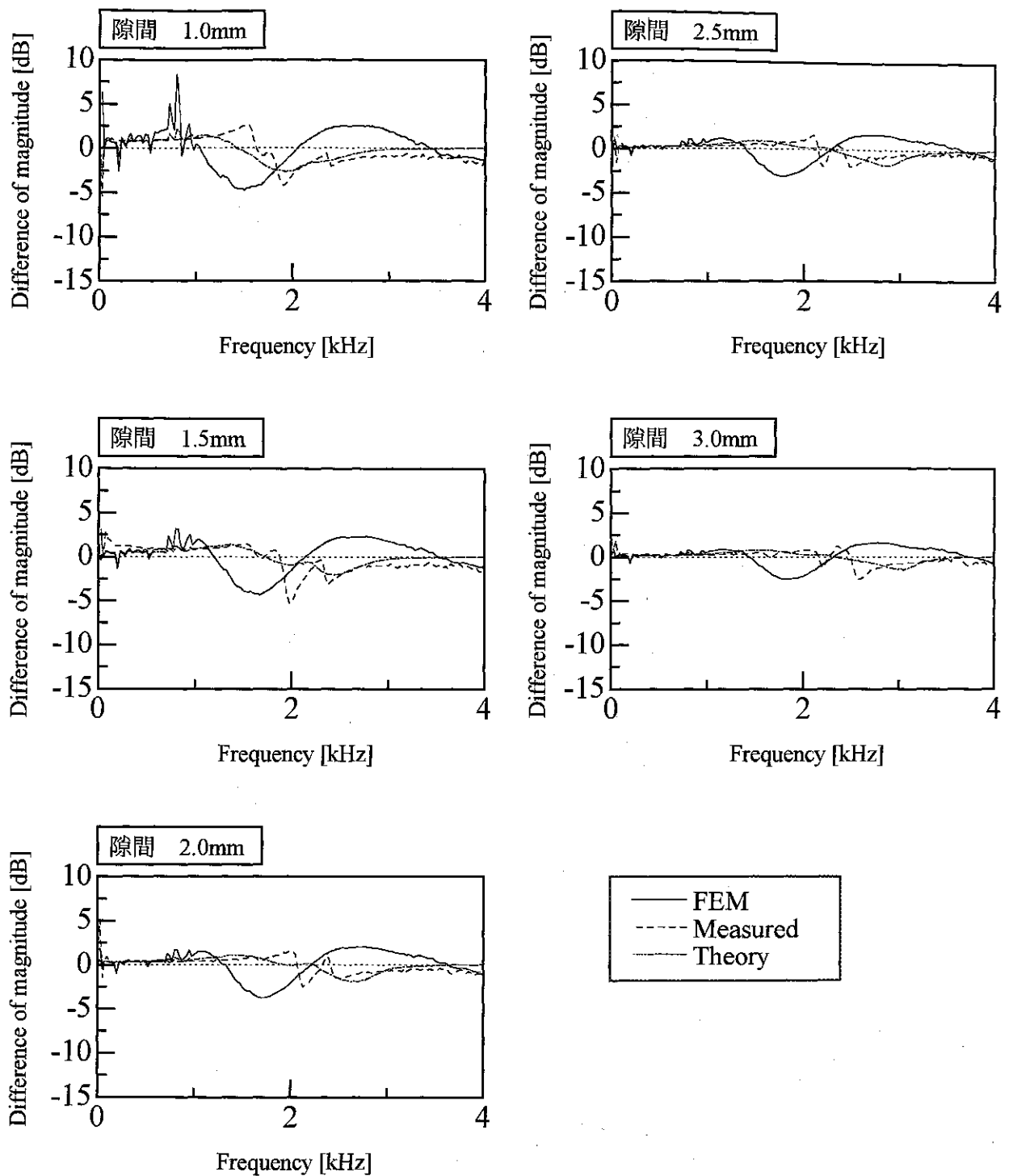


図 6-4-C-2 布 C 隙間を変化させた場合
(フランジ幅 10.0mm, 空気柱長さ 20.0mm)

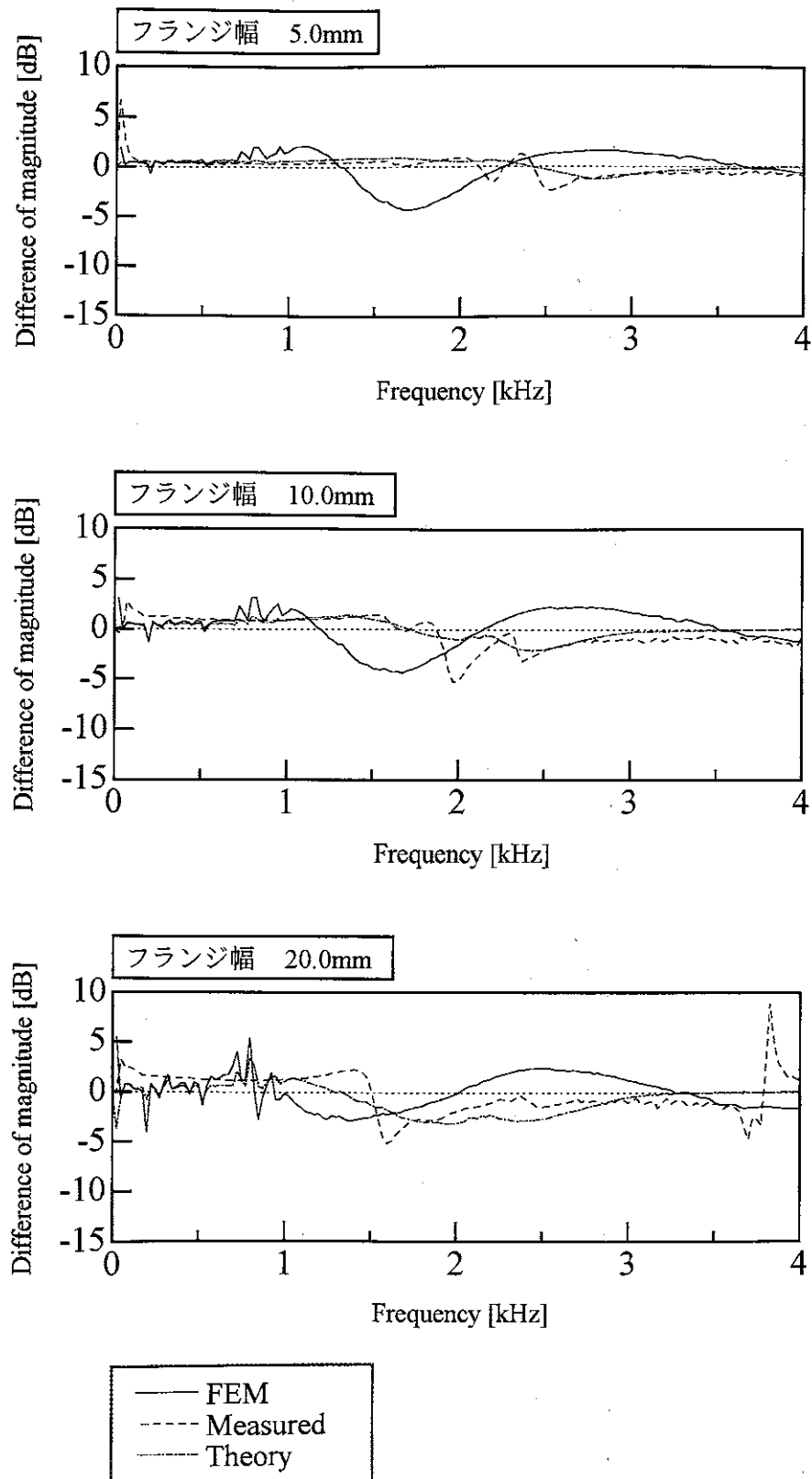


図 6-4-C-3 布 C フランジ幅を変化させた場合
(空気柱長さ 20.0mm, 隙間 1.5mm)

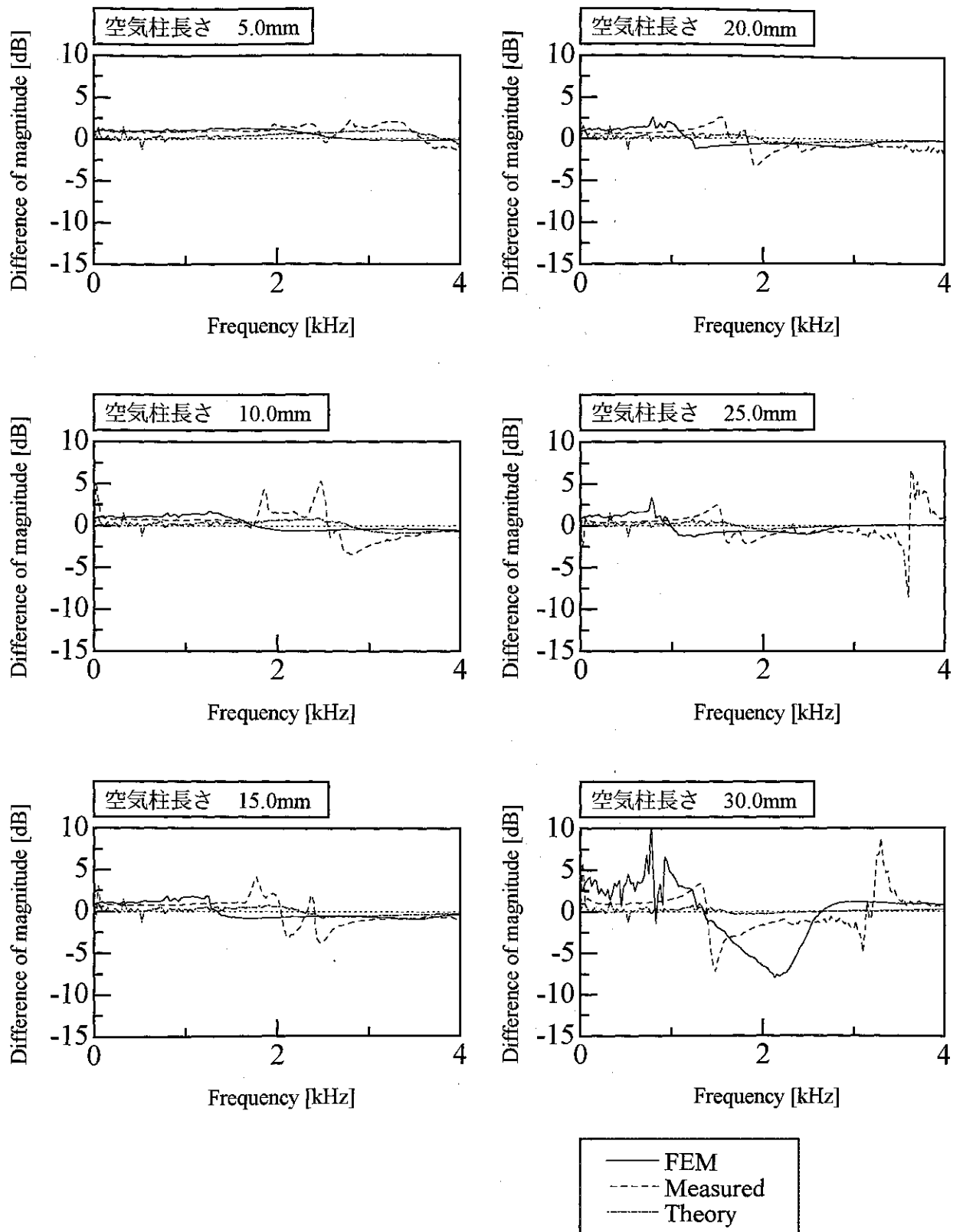


図 6-4-D-1 布 D 空気柱長さを変化させた場合
(フランジ幅 10.0mm, 隙間 1.0mm)

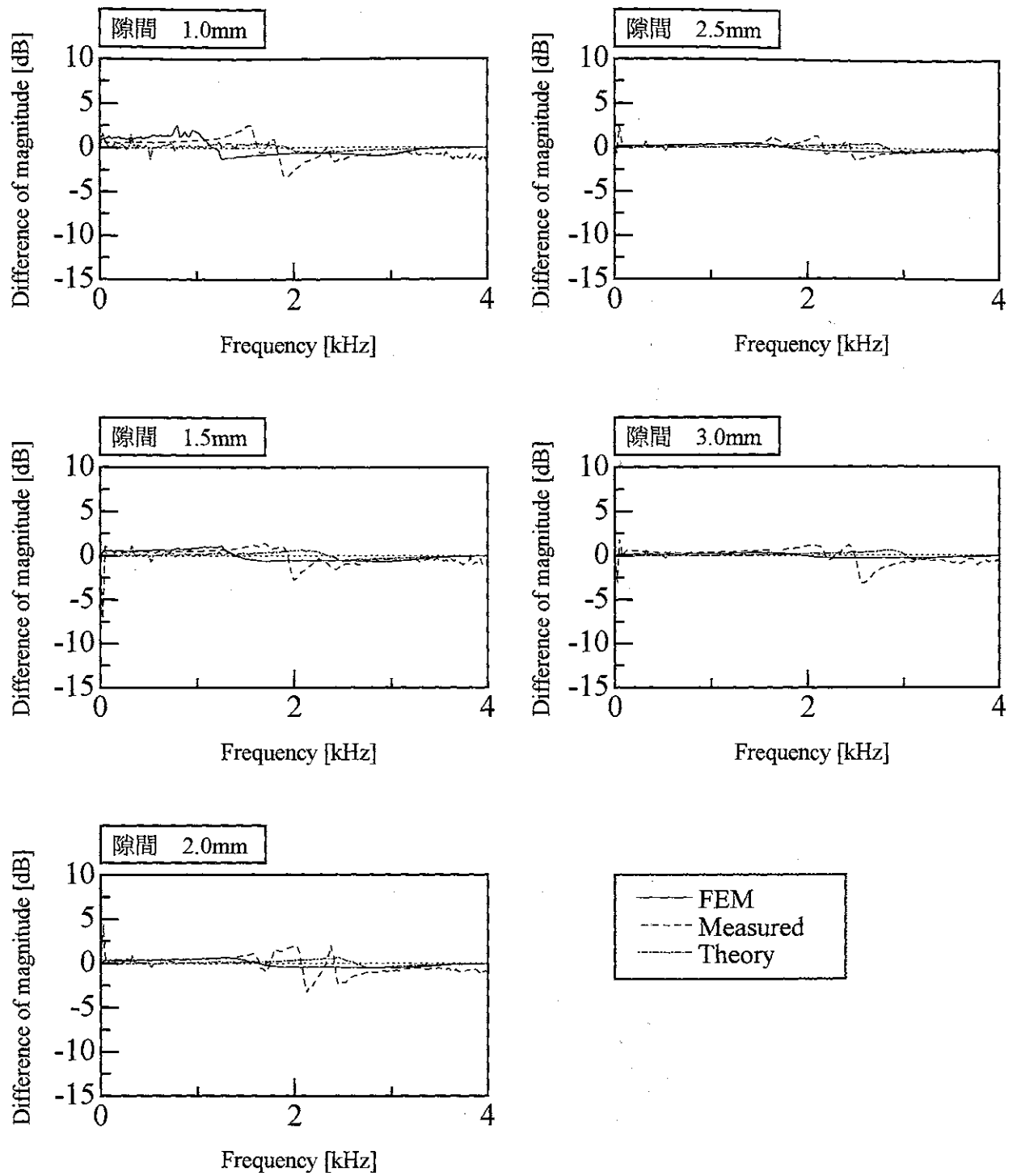


図 6-4-D-2 布 D 隙間を変化させた場合
(フランジ幅 10.0mm, 空気柱長さ 20.0mm)

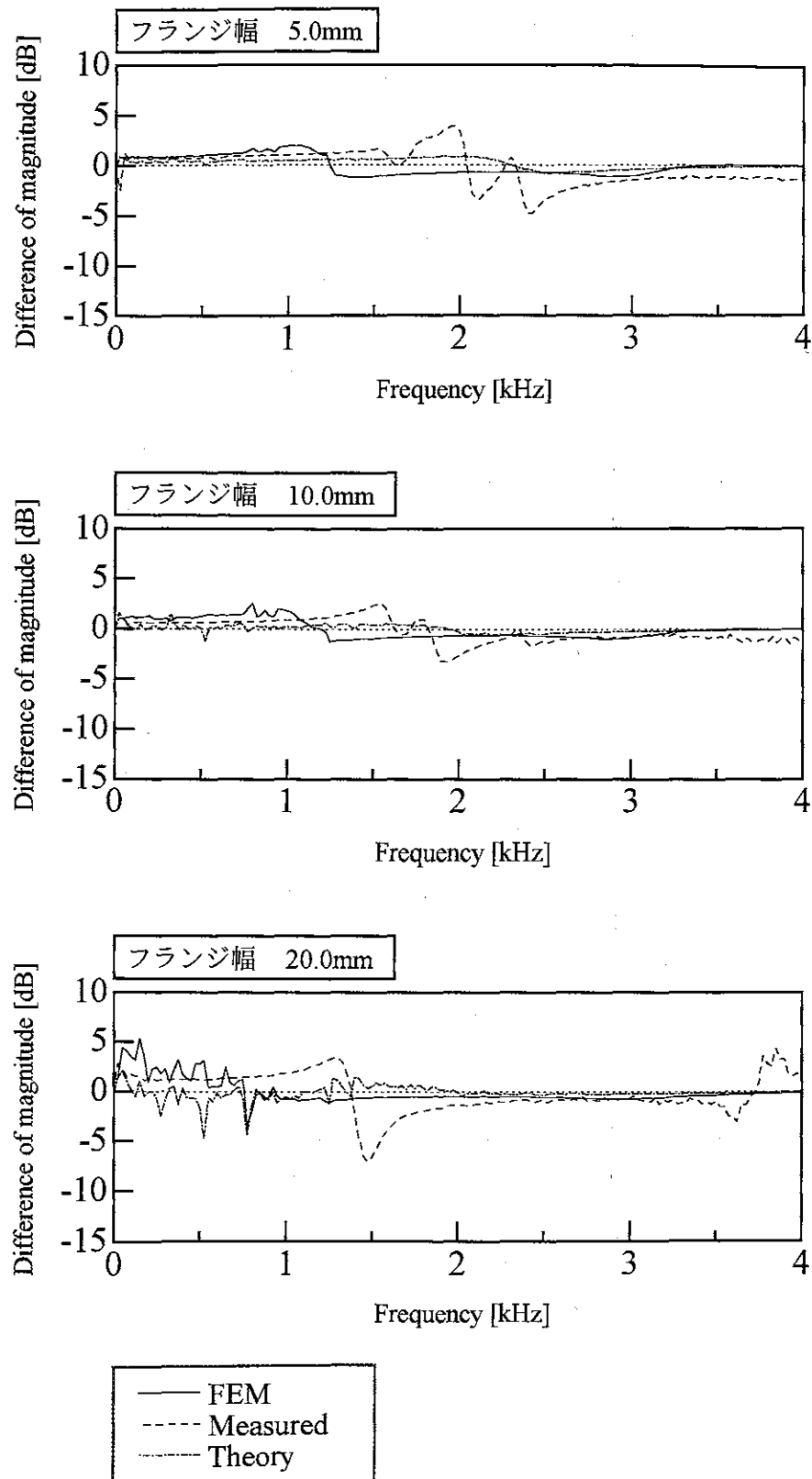


図 6-4-D-3 布 D フランジ幅を変化させた場合
(空気柱長さ 20.0mm, 隙間 1.0mm)

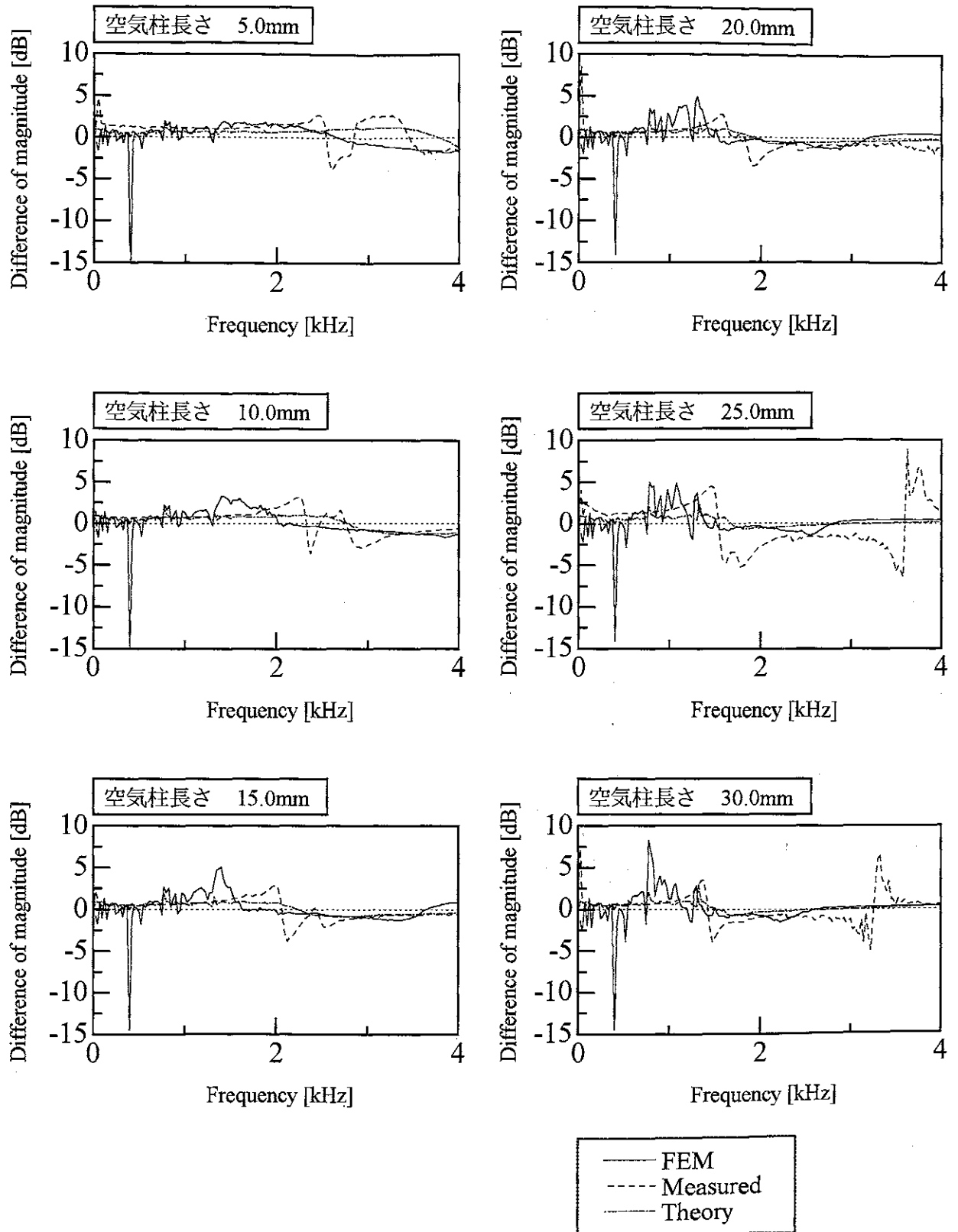


図 6-4-E-1 布E 空気柱長さを変化させた場合
(フランジ幅 10.0mm, 隙間 1.0mm)

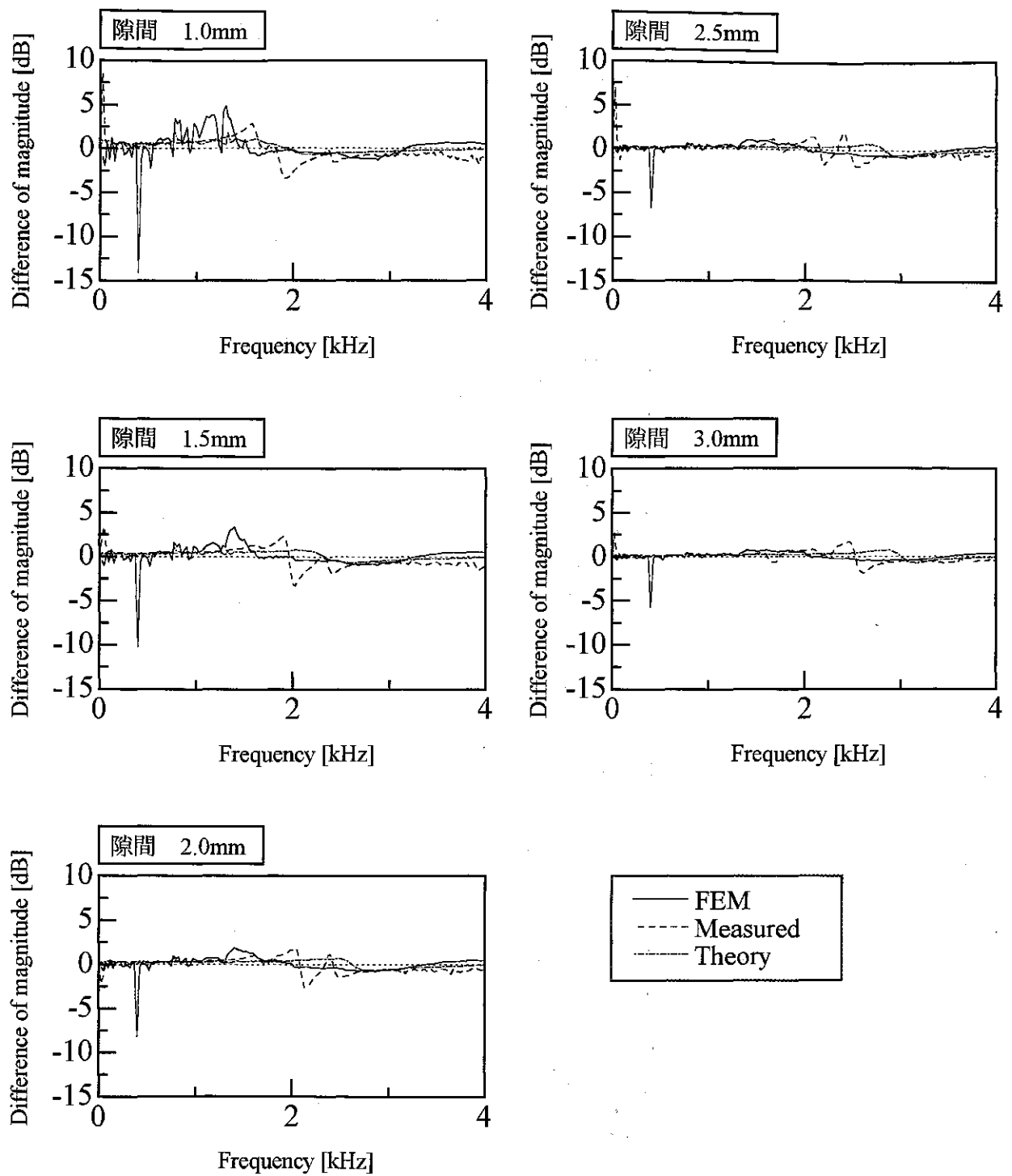


図 6-4-E-2 布 E 隙間を変化させた場合
(フランジ幅 10.0mm, 空気柱長さ 20.0mm)

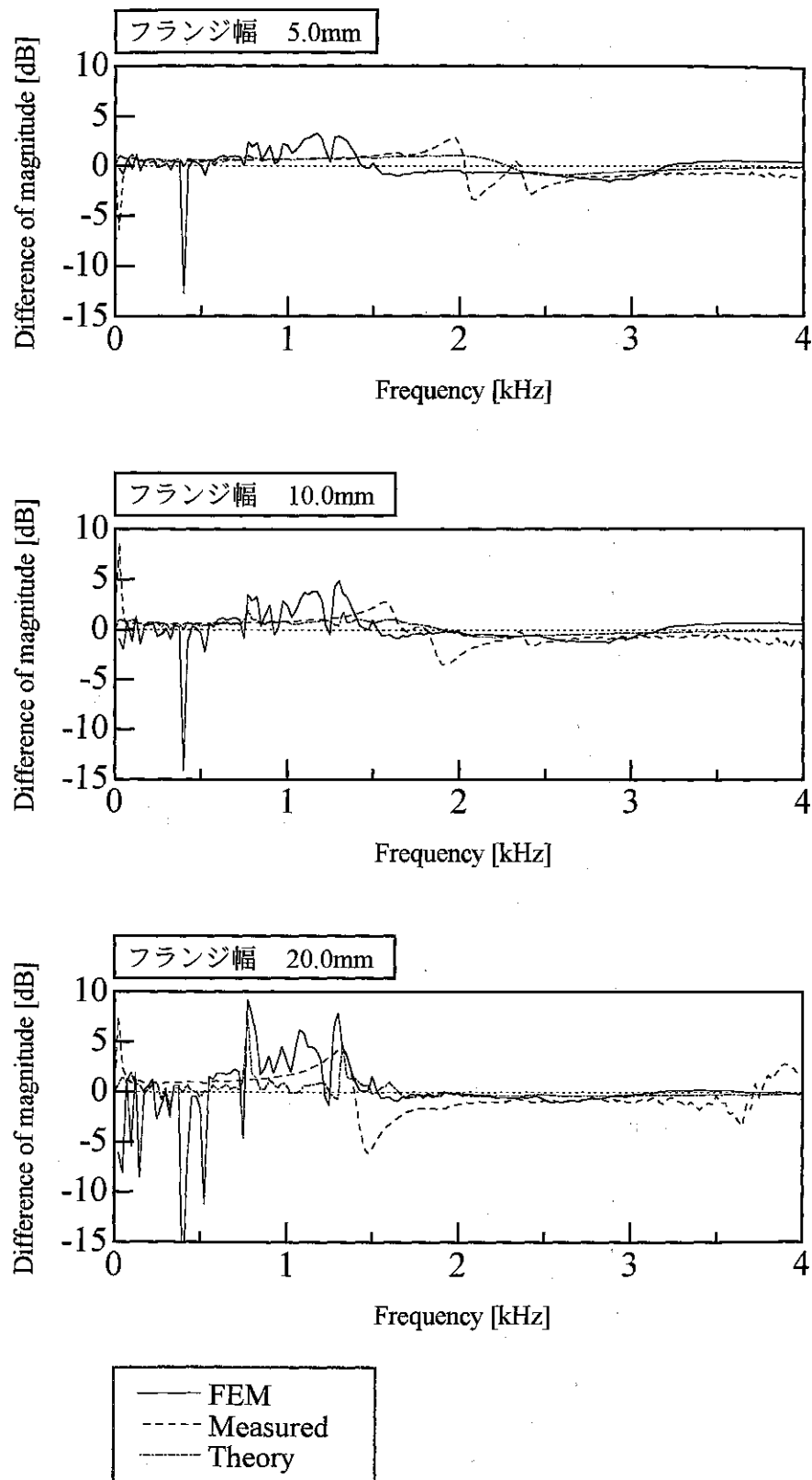


図 6-4-E-3 布E フランジ幅を変化させた場合
(空気柱長さ 20.0mm, 隙間 1.0mm)

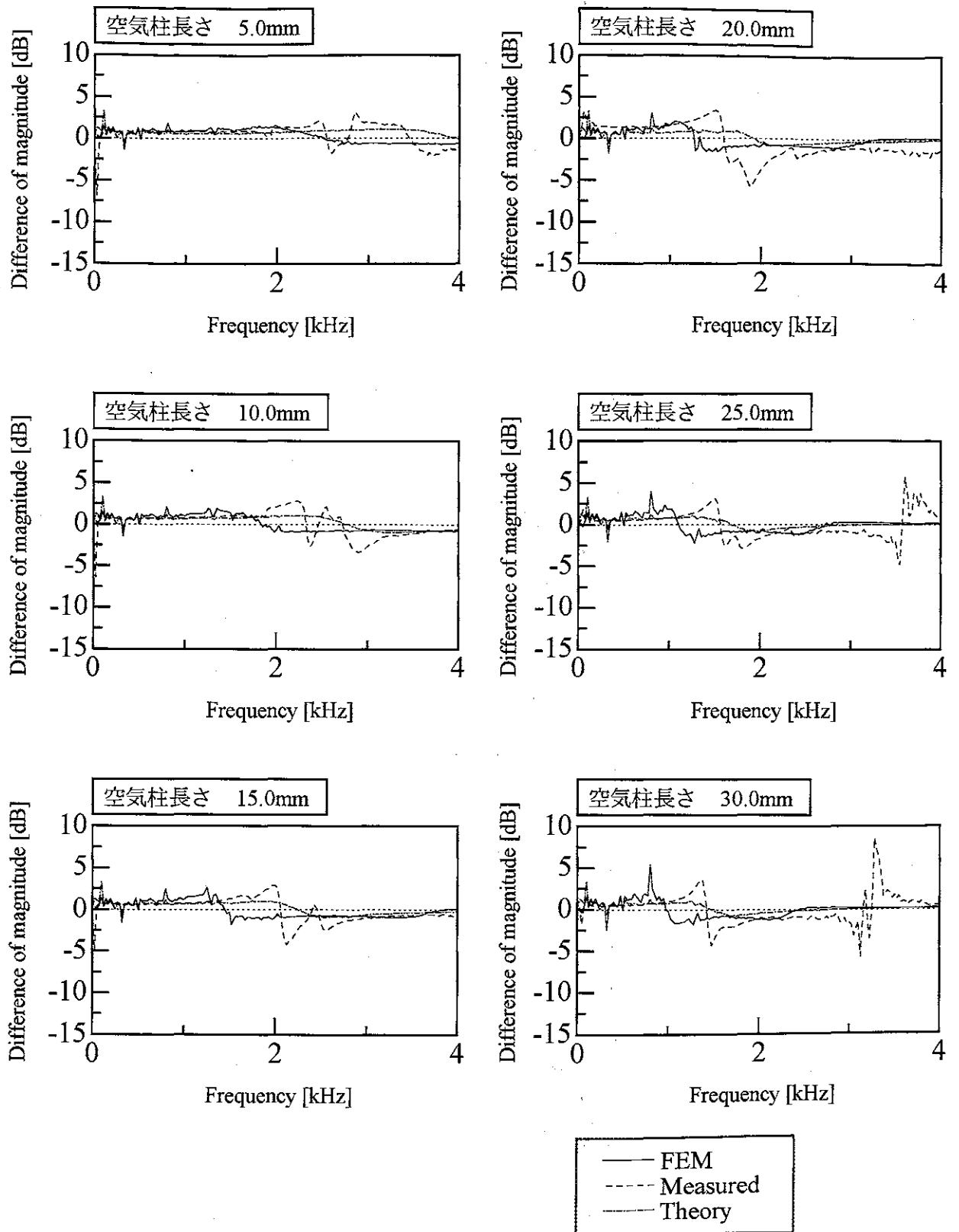


図 6-4-F-1 布 F 空気柱長を変化させた場合
(フランジ幅 10.0mm, 隙間 1.0mm)

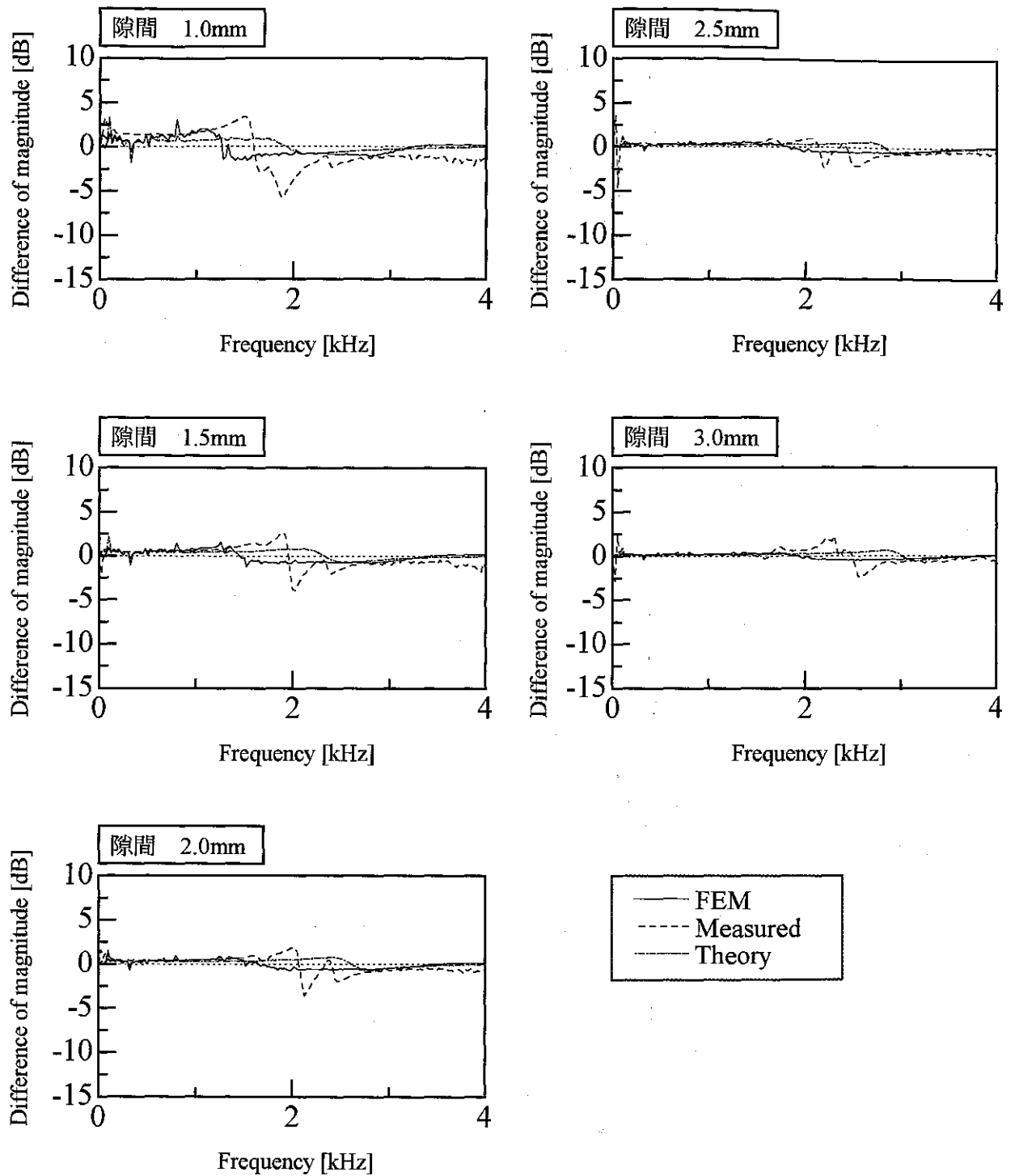


図 6-4-F-2 布 F 隙間を変化させた場合
(フランジ幅 10.0mm, 空気柱長さ 20.0mm)

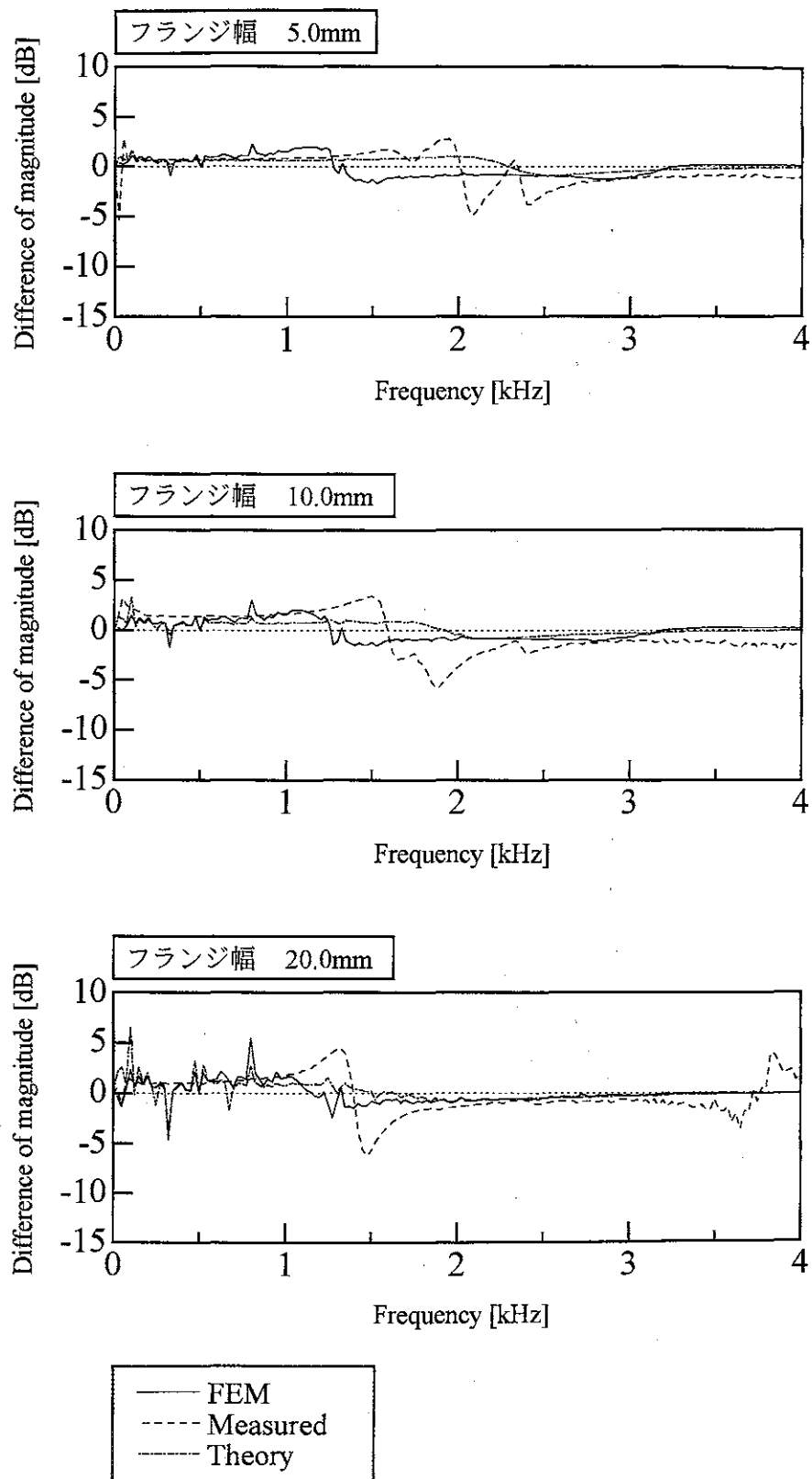


図 6-4-F-3 布 F フランジ幅を変化させた場合
(空気柱長さ 20.0mm, 隙間 1.0mm)

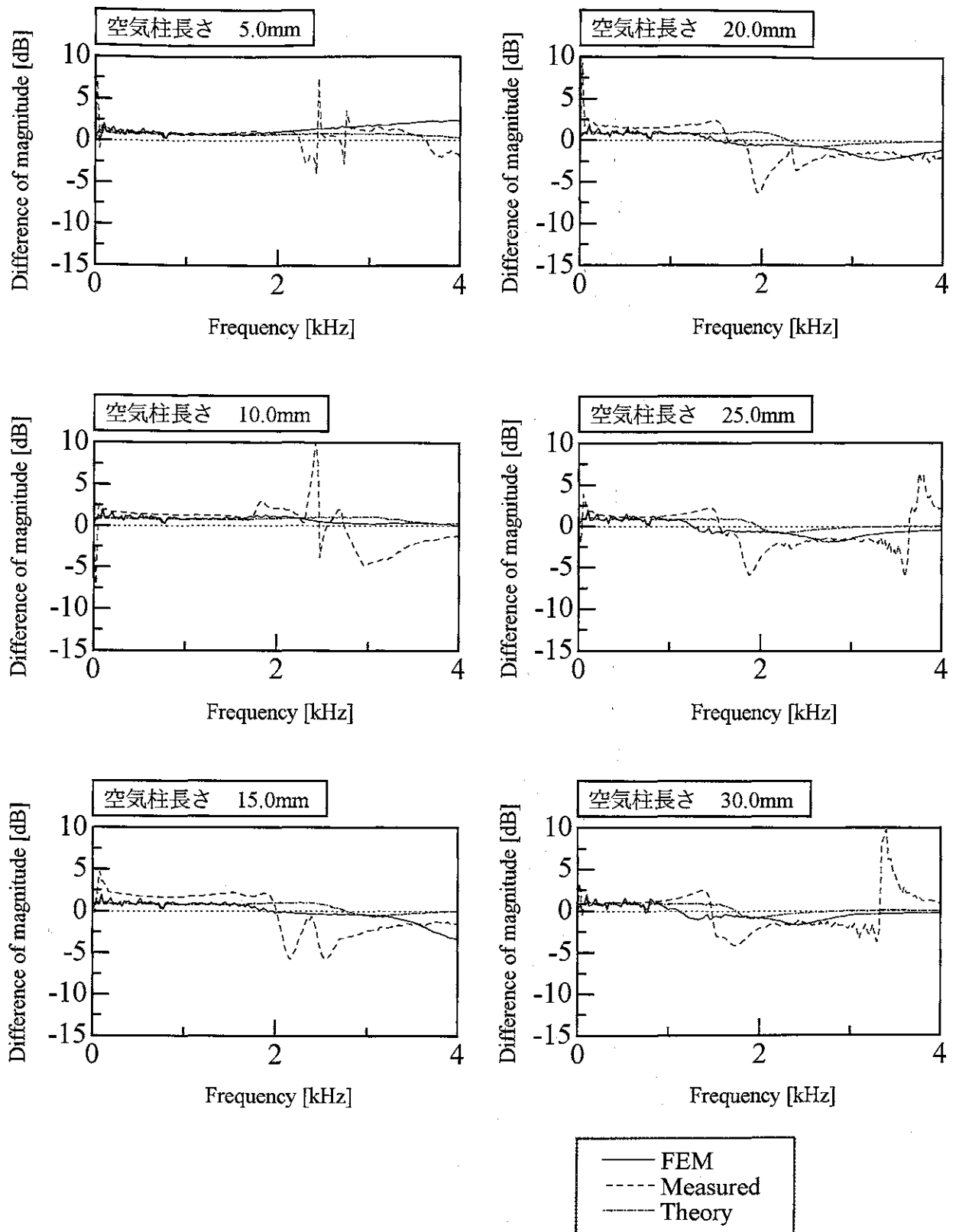


図 6-4-G-1 布 G 空気柱長さを変化させた場合
(フランジ幅 10.0mm, 隙間 1.5mm)

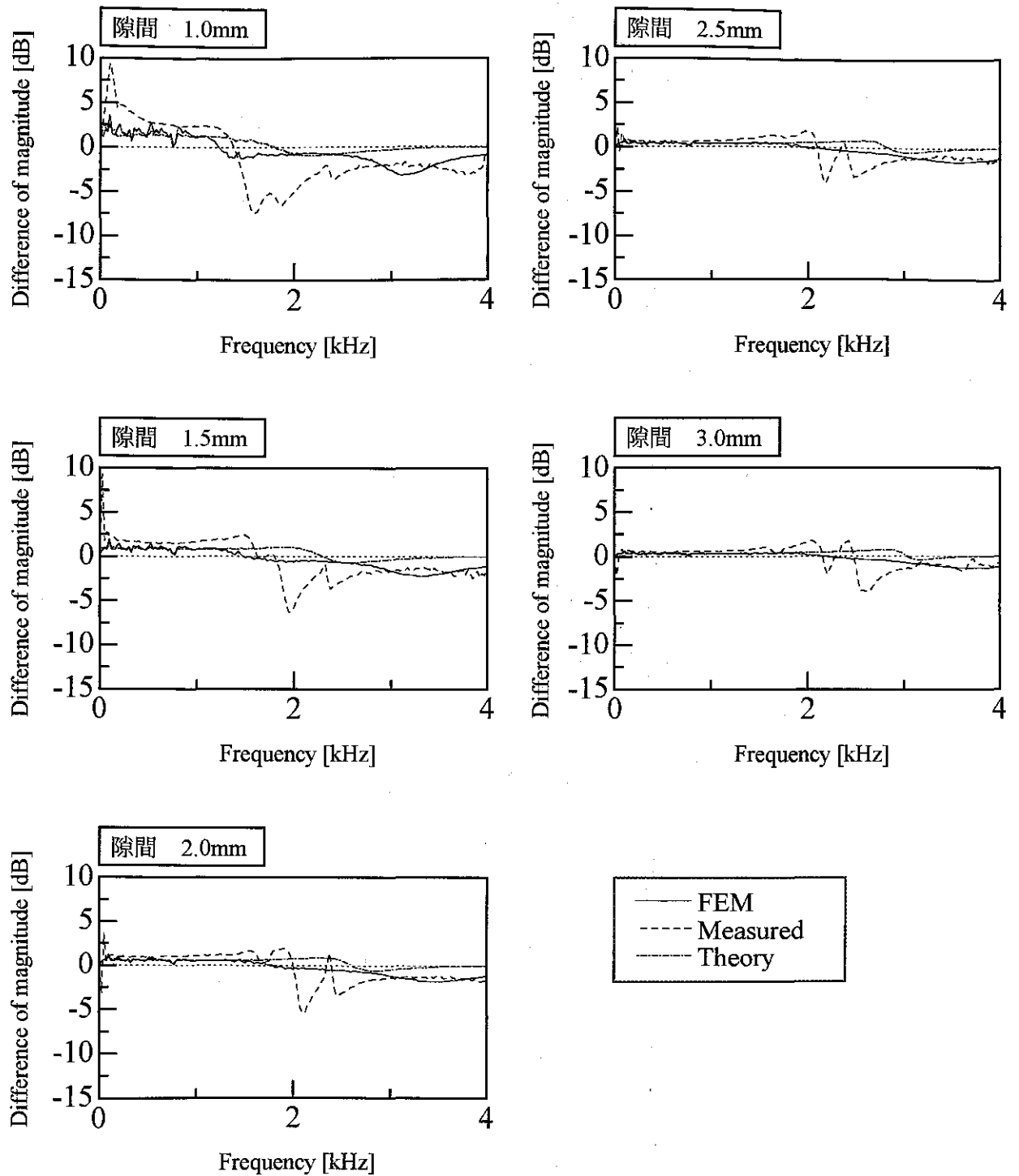


図 6-4-G-2 布 G 隙間を変化させた場合
(フランジ幅 10.0mm, 空気柱長さ 20.0mm)

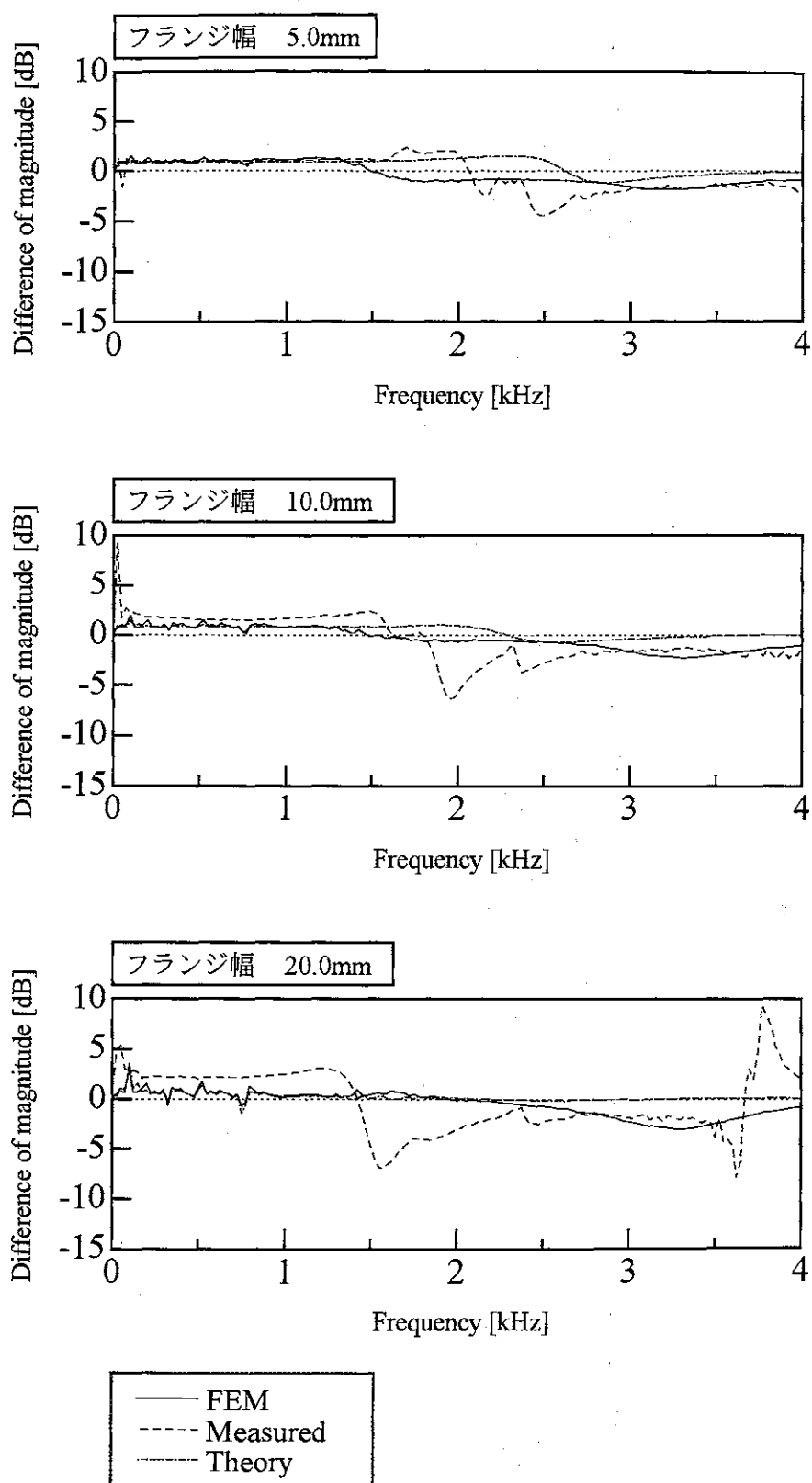


図 6-4-G-3 布 G フランジ幅を変化させた場合
(空気柱長さ 20.0mm, 隙間 1.5mm)

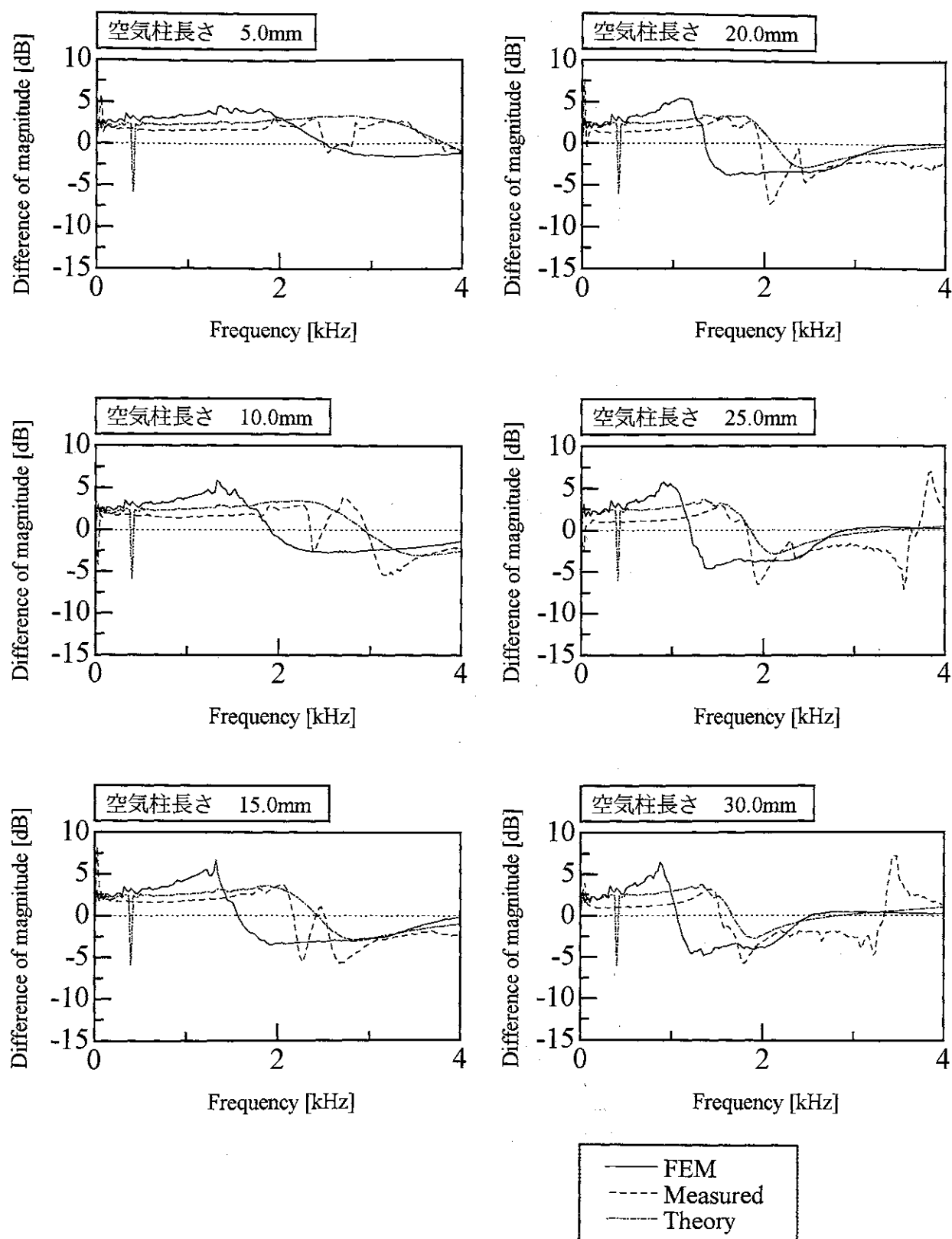


図 6-4-H-1 布H 空気柱長さを変化させた場合
(フランジ幅 10.0mm, 隙間 2.0mm)

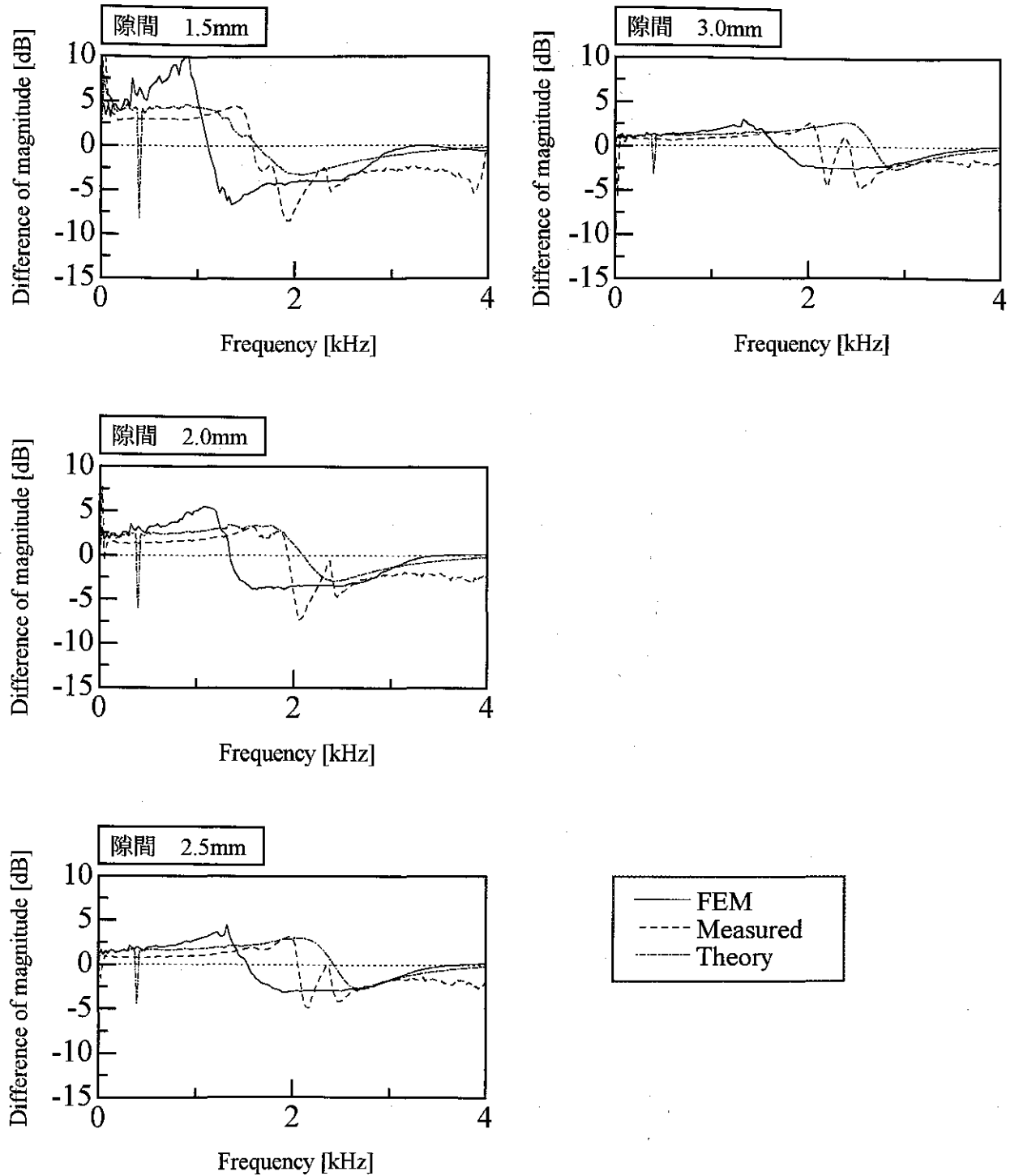


図 6-4-H-2 布H 隙間を変化させた場合
(フランジ幅 10.0mm, 空気柱長さ 20.0mm)

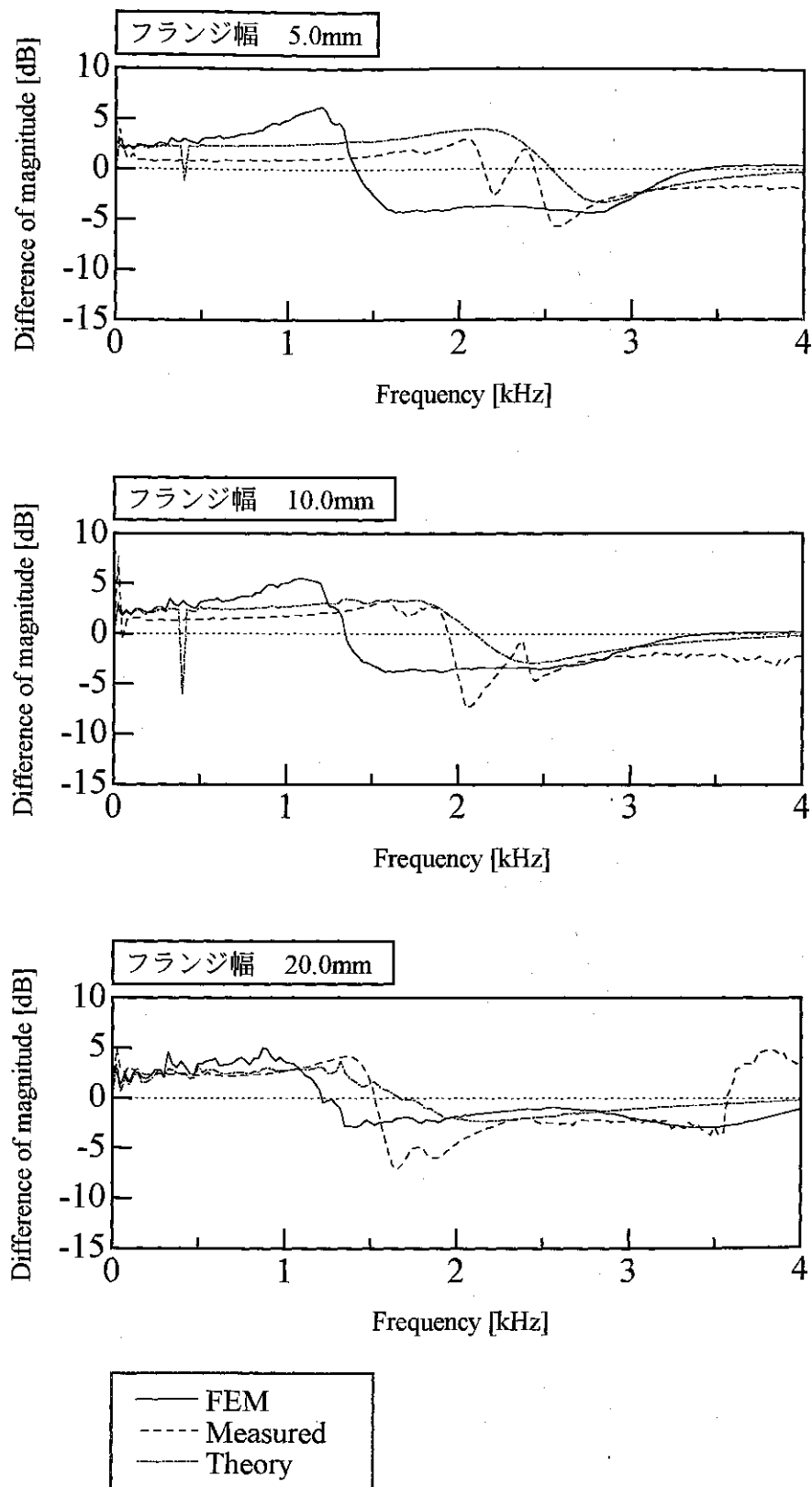


図 6-4-H-3 布H フランジ幅を変化させた場合
(空気柱長さ 20.0mm, 隙間 2.0mm)

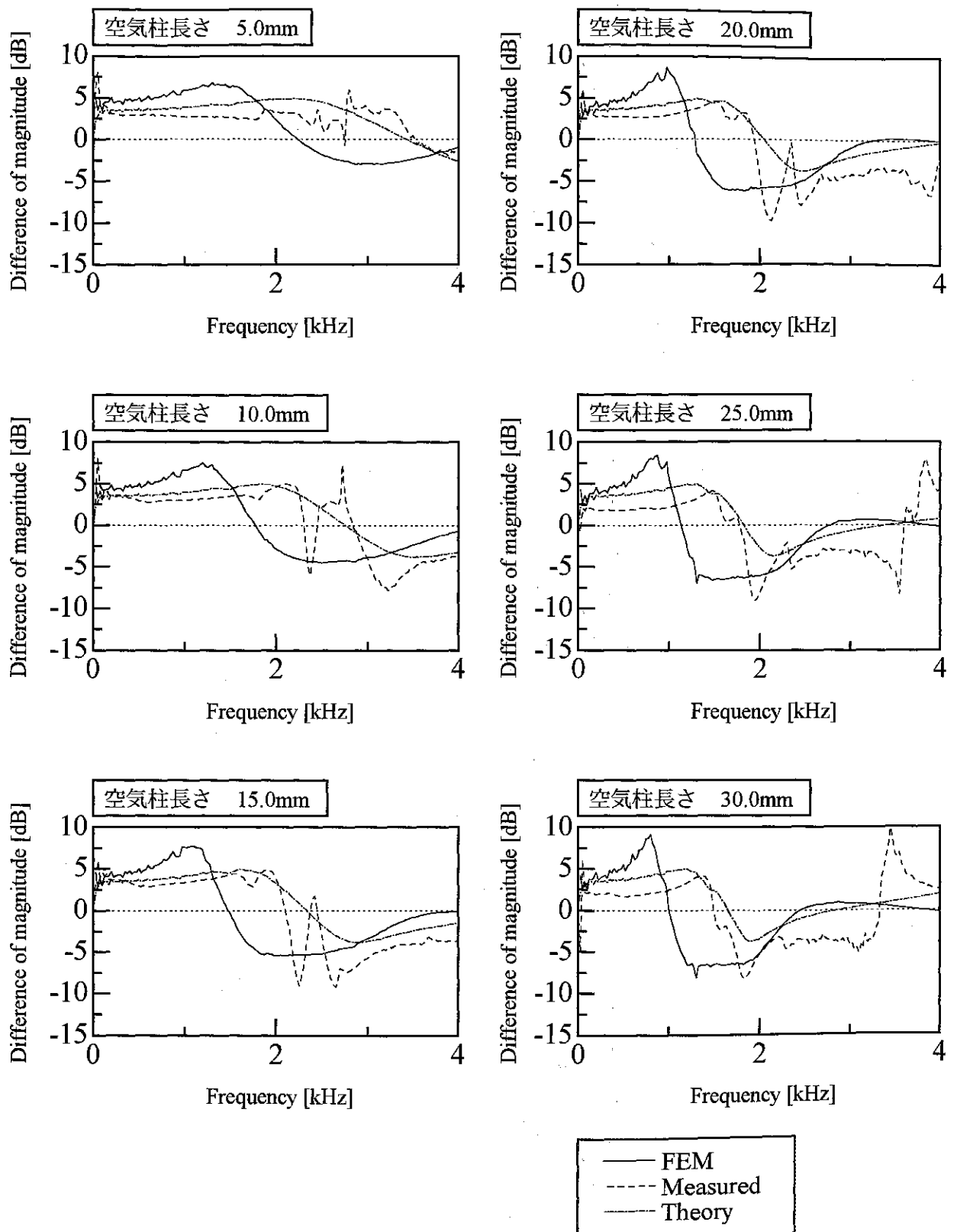


図 6-4-1-1 布 I 空気柱長さを変化させた場合
(フランジ幅 10.0mm, 隙間 2.5mm)

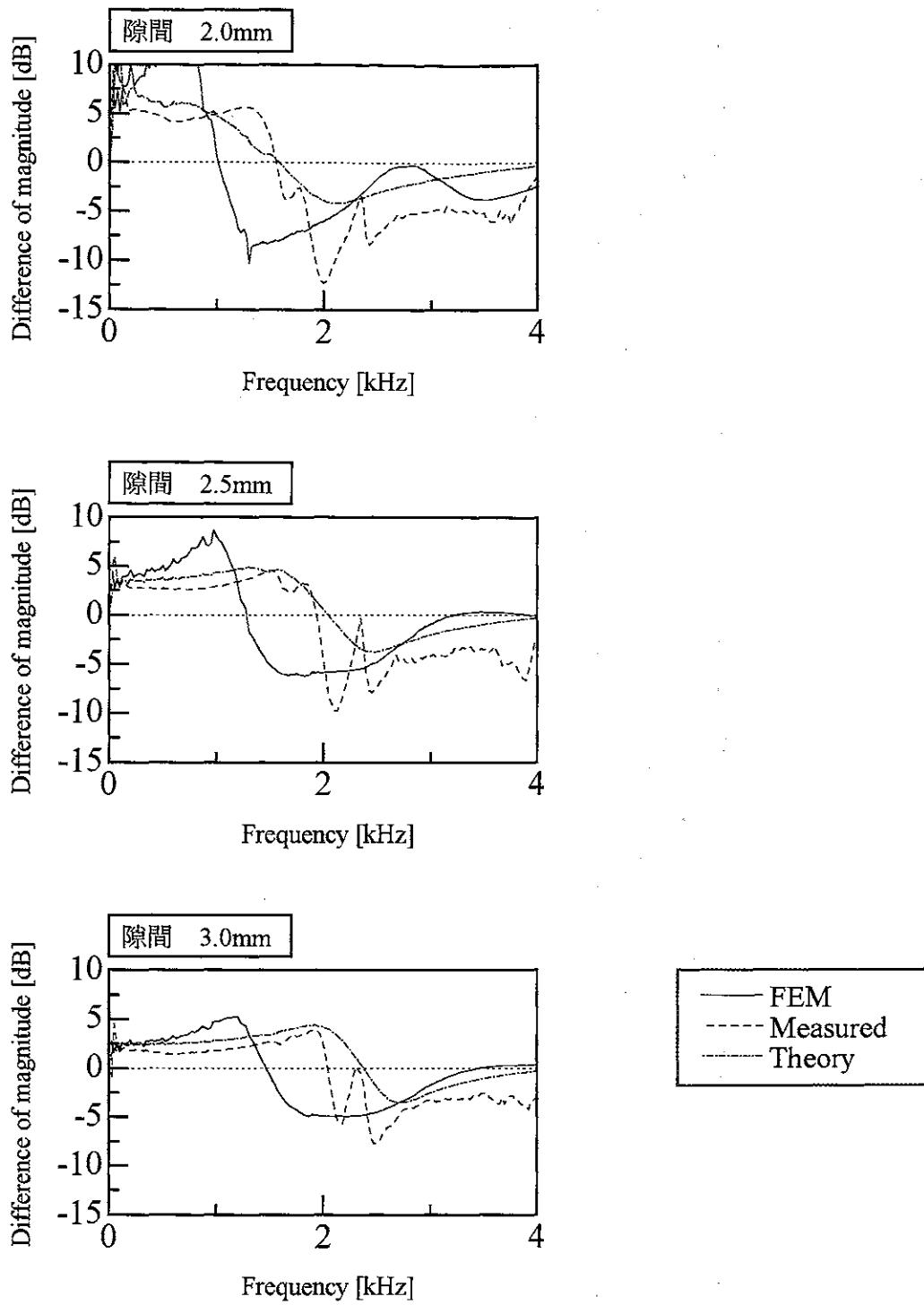


図 6-4-1-2 布 I 隙間を変化させた場合
(フランジ幅 10.0mm, 空気柱長さ 20.0mm)

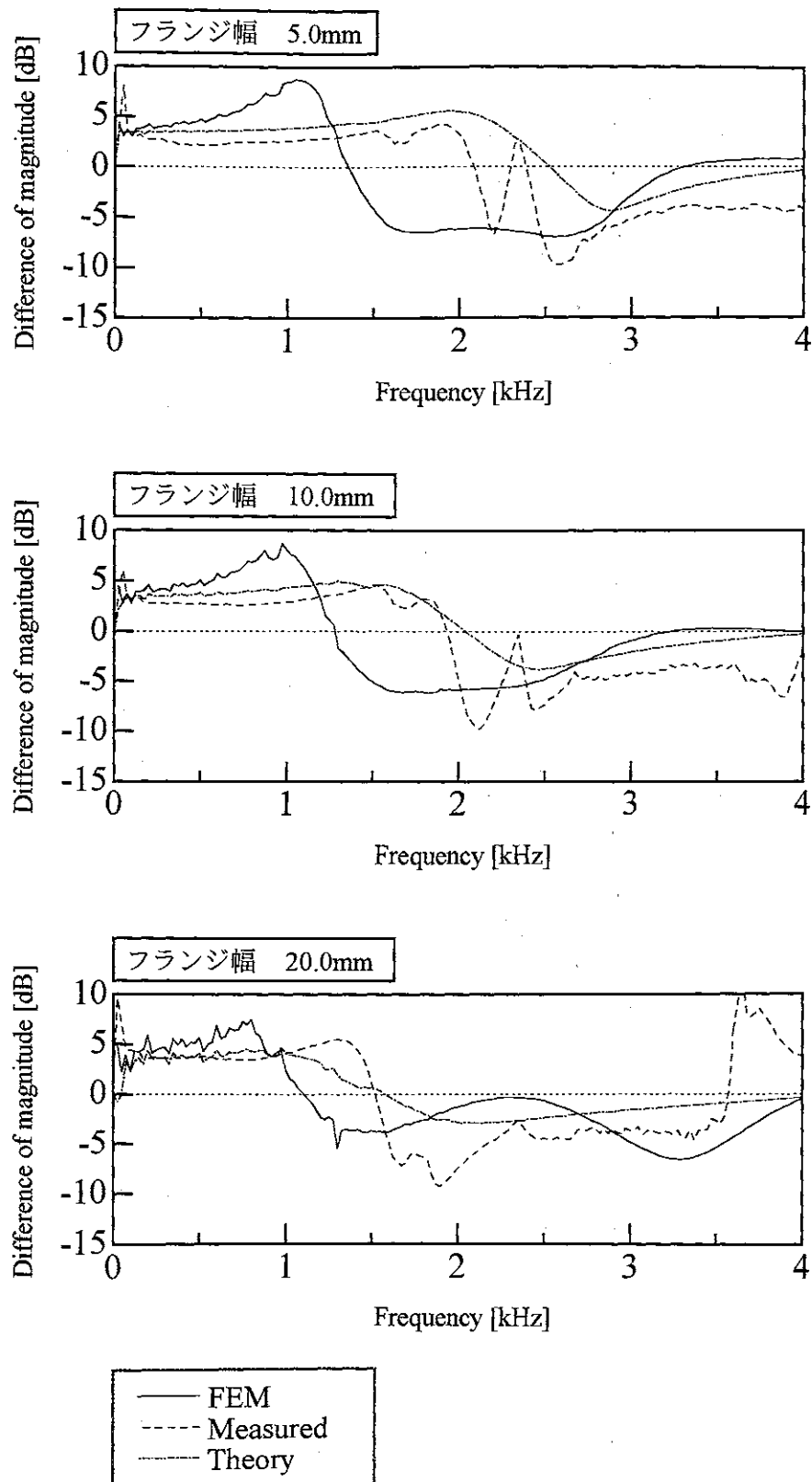


図 6-4-1-3 布 I フランジ幅を変化させた場合
(空気柱長さ 20.0mm, 隙間 2.5mm)

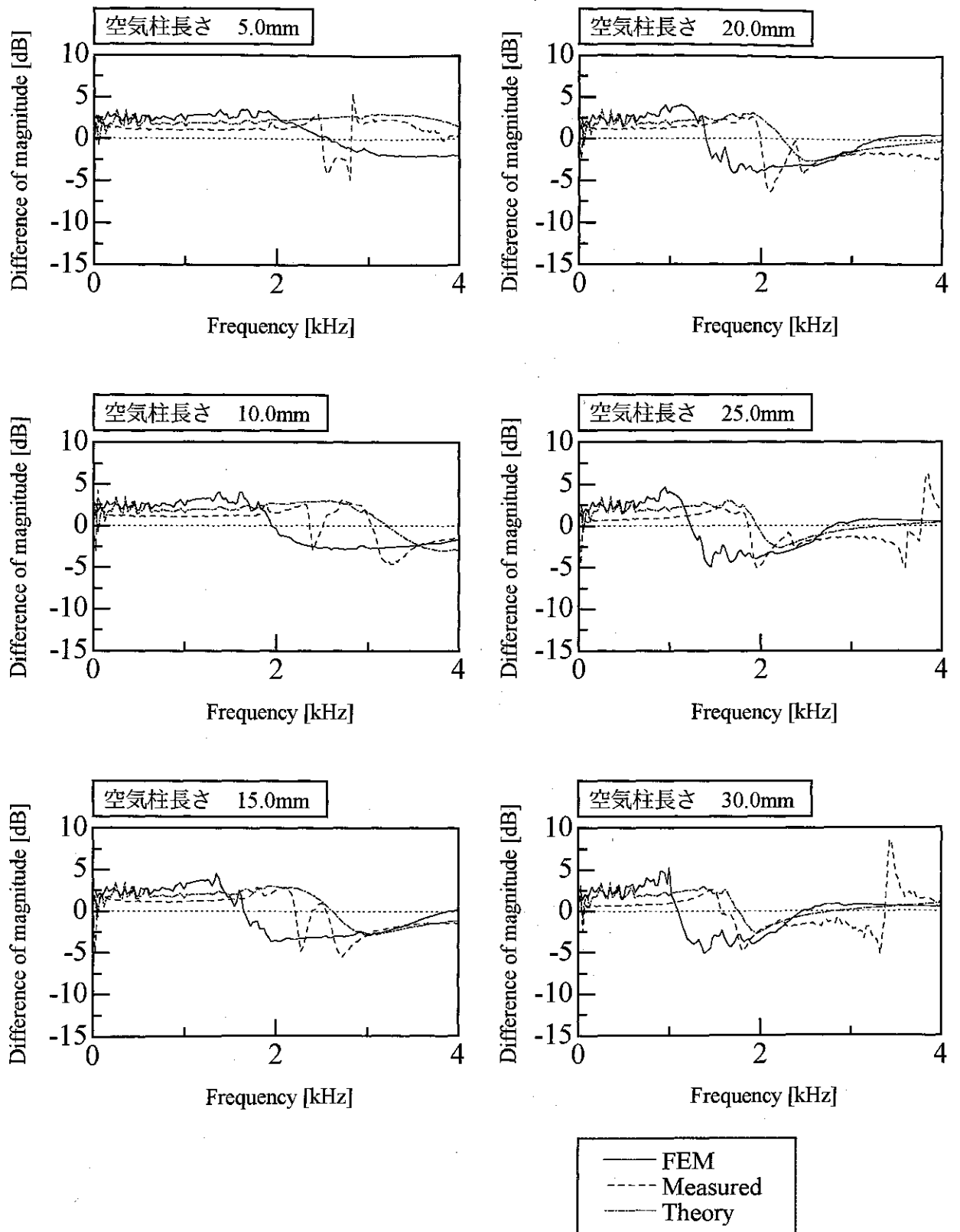


図 6-4-J-1 布 J 空気柱長さを変化させた場合
(フランジ幅 10.0mm, 隙間 1.5mm)

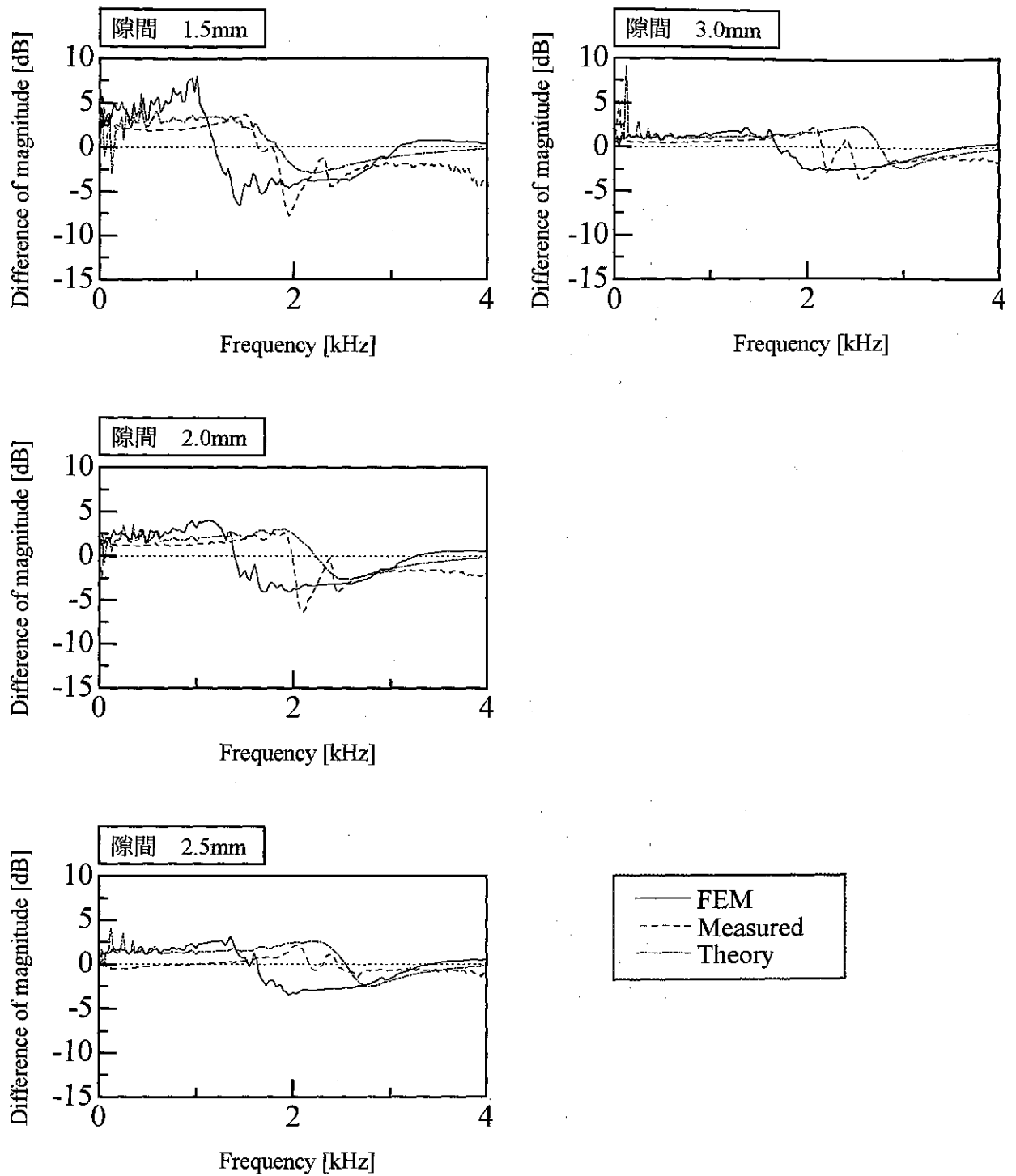


図 6-4-J-2 布 J 隙間を変化させた場合
(フランジ幅 10.0mm, 空気柱長さ 20.0mm)

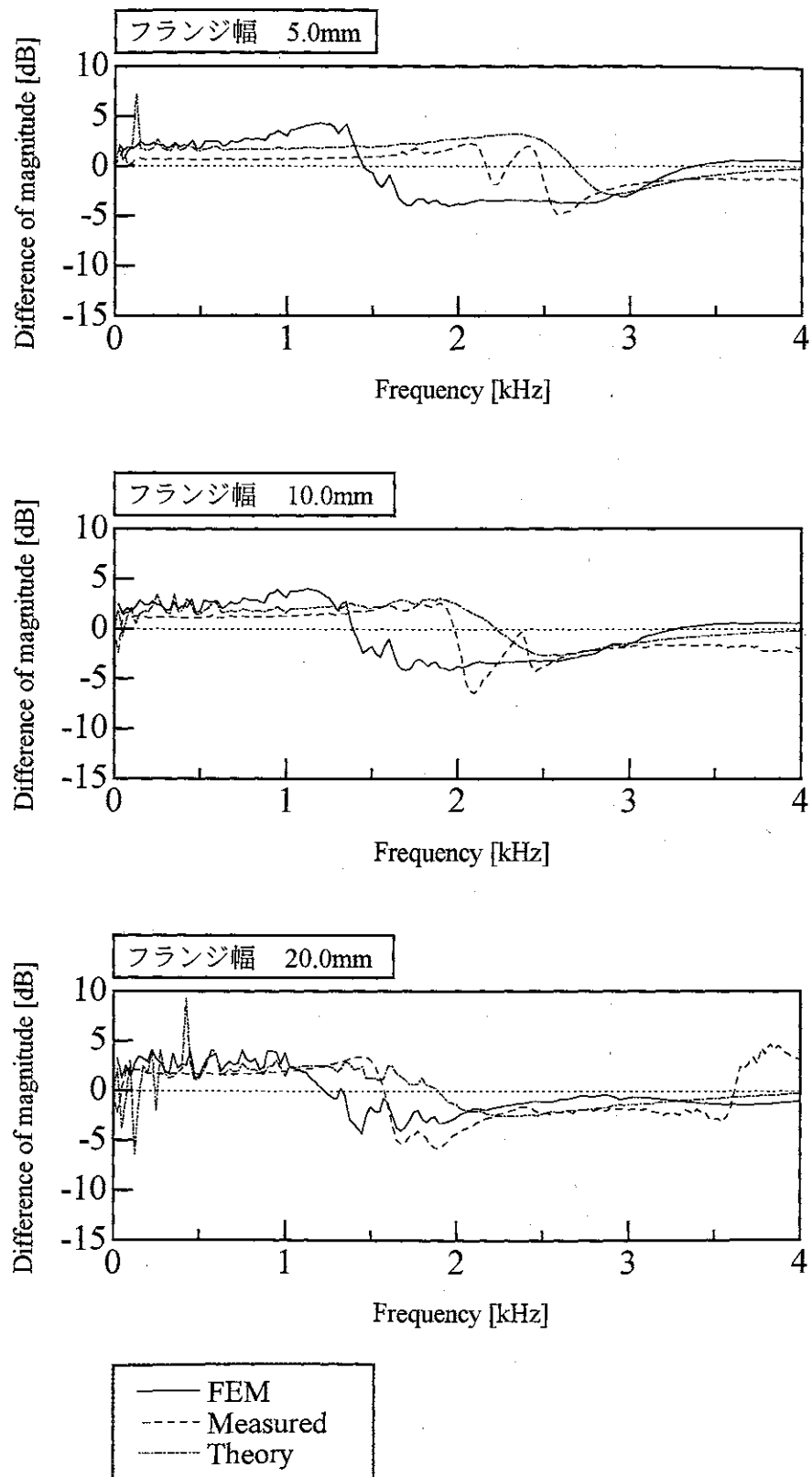


図 6-4-J-3 布 J フランジ幅を変化させた場合
(空気柱長さ 20.0mm, 隙間 1.5mm)

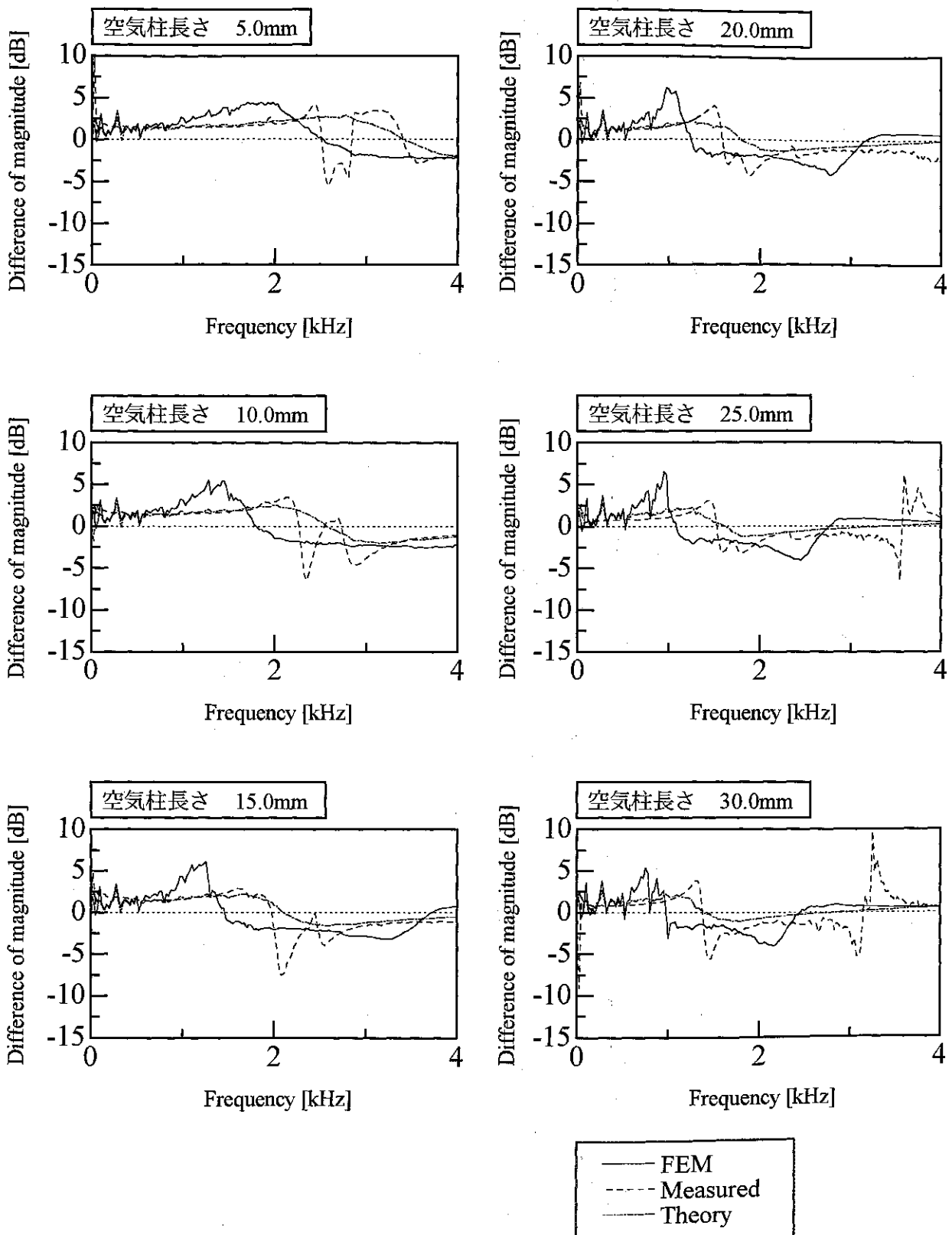


図 6-4-K-1 布 K 空気柱長さを変化させた場合
(フランジ幅 10.0mm, 隙間 1.0mm)

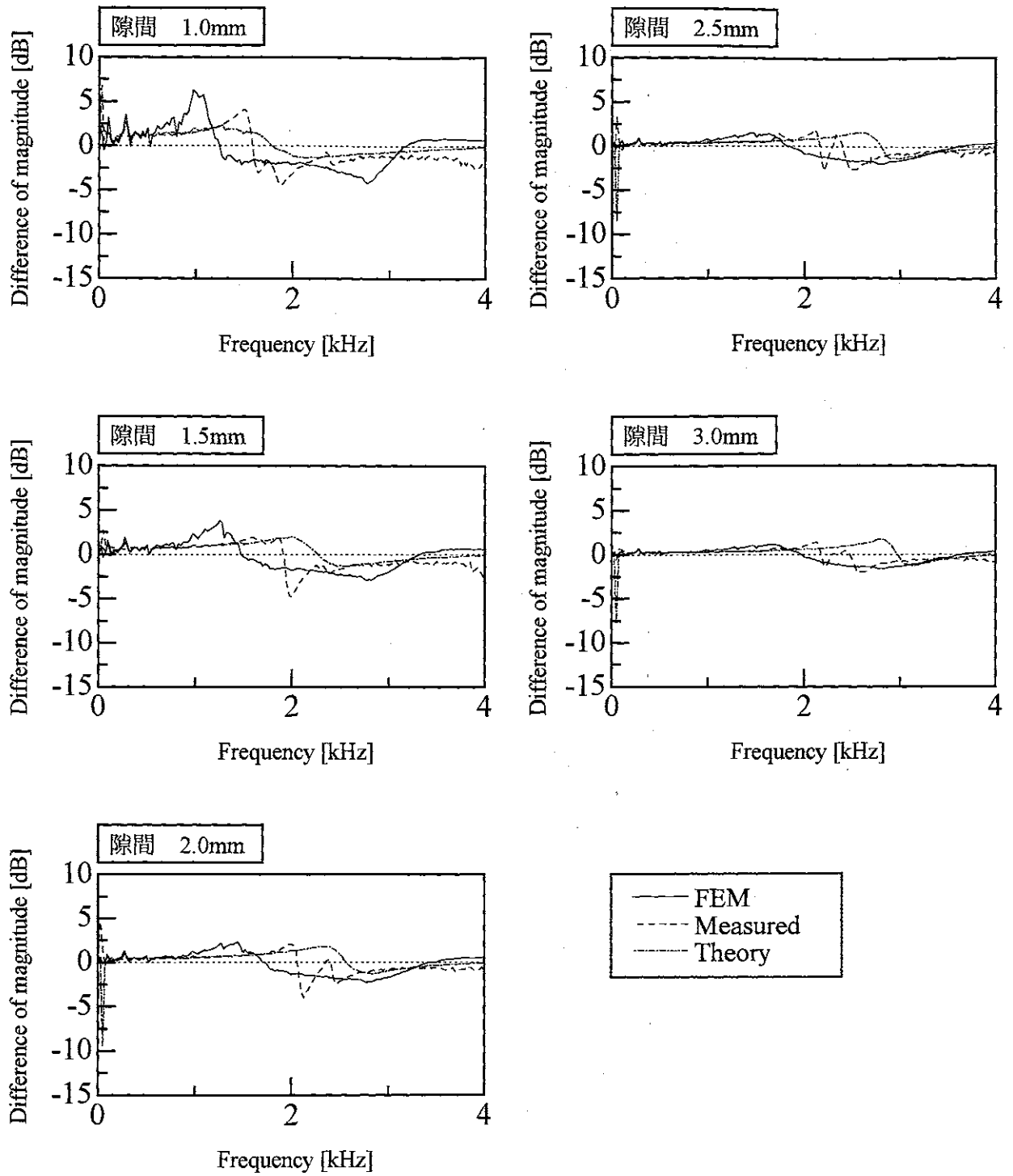


図 6-4-K-2 布 K 隙間を変化させた場合
(フランジ幅 10.0mm, 空気柱長さ 20.0mm)

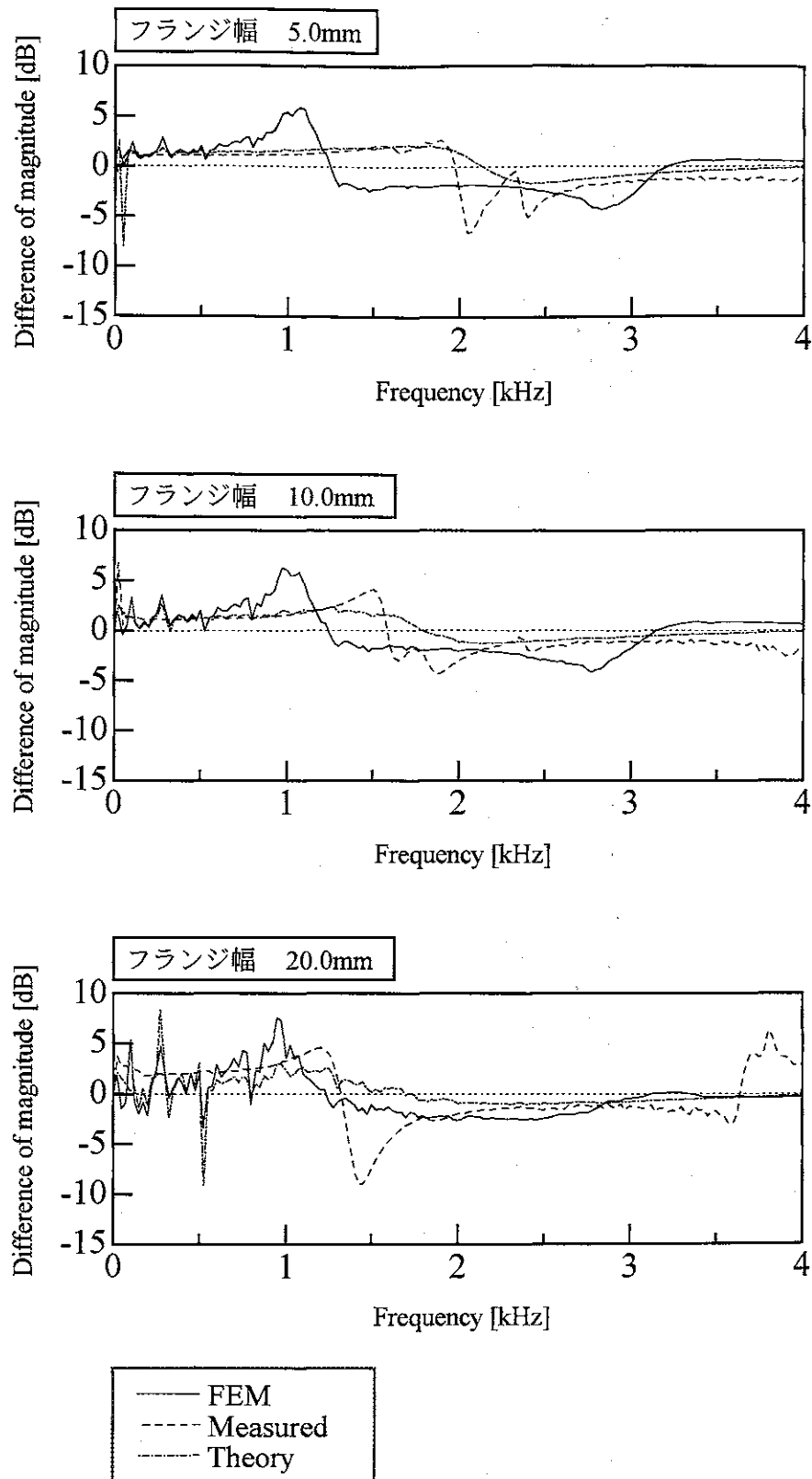


図 6-4-K-3 布 K フランジ幅を変化させた場合
(空気柱長さ 20.0mm, 隙間 1.0mm)

第7章 異なる粒径のガラスビーズ層を積層した場合の 吸音率に関する実測値と理論解析値の比較と考察

7-1 実測値と理論解析値の比較

図7-1から図7-85は、「ガラスビーズ単層の場合」と「ガラスビーズ層を積層させた場合」の吸音率について、同じ条件において実測された吸音率と理論解析で求めた吸音率を比較した。図7-1から図7-5はガラスビーズ単層であり、図7-6から図7-45をガラスビーズ層の上層の粒径が下層より粒径が大きい条件、図7-46から図7-85はガラスビーズ層の上層の粒径が下層より小さい条件を示している。

ここでは、吸音率の実測値を実線で表し、理論解析値をプロット付きの実線で表している。

7-2 考 察

ガラスビーズ単層の吸音率は、実測値と理論解析値ともによく一致している。これは、2厚さ法に使用する伝達関数の測定条件において、各粒径の2つの試料厚さは20mm、40mmであるため、理論解析で計算させる試料厚さ50mmに比較的近い。よって、計算に用いる特性音響インピーダンスと複素波定数を導出する実測値の値が、理論解析時の試料厚さに近いとき、実測値と理論解析値の吸音率はよく一致すると考えられる。しかし、 $\phi 4.0$ のような粒径の大きなガラスビーズで構成される層は、吸音率のピーク値は近い値となるが、ガラスビーズを敷き詰めた後に構成される空隙の状態は、層の場所によって差が生じやすいという理由、または、空隙が大きいという理由で、他の粒径に比べて両者は差異が大きい。

ガラスビーズ層を積層した場合の吸音率は、条件によっては実測値と理論解析値はよく一致する。異なる粒径のガラスビーズ層の積層における垂直入射吸音率は、表層にある材料の音響特性の影響が出やすいことが今までの結果から判っている。これは、表層の入射インピーダンスが吸音率に大きく影響を与えるからである。このように、音が中に入射し難い、細かいガラスビーズ層が上層にある場合、表層の入射インピーダンスが影響を与えるため、音は入射面において反射し易くなり、下層のガラスビーズ層の影響を受けにくい。これは、吸音率の値の飽和にも関連し、上層にある層が、ガラスビーズ粒径の小さい、吸音率の飽和する厚さである場合、下層にどんな粒径のガラスビーズ層を敷き詰めても、効果が得難いと考えられる。しかし、粒径の大きなガラスビーズ層

に比べて、空隙の出来方に差が生じ難いことから、実測値と理論解析値はよく一致すると考えられる。

また、組合せによって、単層より高い吸音率を得られる周波数があることが判る。これは、ガラスビーズ表層における吸音率のピーク値に起因している。吸音のメカニズムは、吸音材料の中に入射した音エネルギーが摩擦により熱エネルギーに変換されることで吸音される。よって、音が吸音材料の中に入射することが重要である。粒径の小さい層が上層にある場合、音は入射し難いと考えられるが、粒径の大きなガラスビーズの層が上層にある場合、音が入射しやすく、吸音のメカニズムが起りやすいためと考えられる。

さらに、結果から、上層に吸音率のピーク値が表れる粒径のガラスビーズ層、下層に吸音率のピーク値が顕著に表れないガラスビーズ層の組合せで、単層よりも高い吸音率の値を示している条件がある。これは、上層から下層へ入射する音が、下層に入射された場合は吸音され、下層において反射された場合も、再び上層において吸音され、積層の吸音材料の中で、入射と反射が繰り返されることで高い吸音効果を得ていると考えられる。

さらに、効果の現れている周波数に注目する。効果の現れている周波数帯を波長に換算すると、本実験における試料厚さの 50mm に近い長さになることが判る。このことから、ガラスビーズ層を積層した場合の吸音率において、積層の効果を得るためには、減音すべき周波数に対応する波長と試料の厚さの関係にも注目するべきであると考えられる。

上層に粒径の大きなガラスビーズ層がある場合の方が、実測値と理論解析値の差異が少し大きくなる原因として、ガラスビーズ層を構成する粒径の大きさによっては、積層の条件に組み合わせた場合、粒径に対しての厚さが足らずに、空隙の出来方が不十分になってしまうことも考えられる。十分な厚さを得ないガラスビーズ層は所要の吸音率のピーク値を得られず、結果として、実測値と理論解析値のピーク周波数が一致しないという原因が考えられる。この原因の例として、ガラスビーズφ4.0のガラスビーズ層を考える。本研究室の粒状材料に関する研究の経験から、ガラスビーズを敷き詰めてガラスビーズ層を構成するときに、そのガラスビーズ粒径の10倍以上の厚さを持つガラスビーズ層厚さが適切であると判っている。(ガラスビーズφ4.0の場合は40mm) よって、粒径によっては、ガラスビーズ層の厚さが足らずに所要の特性が得にくいため、理論解析の結果が実測値の結果と一致しにくい。

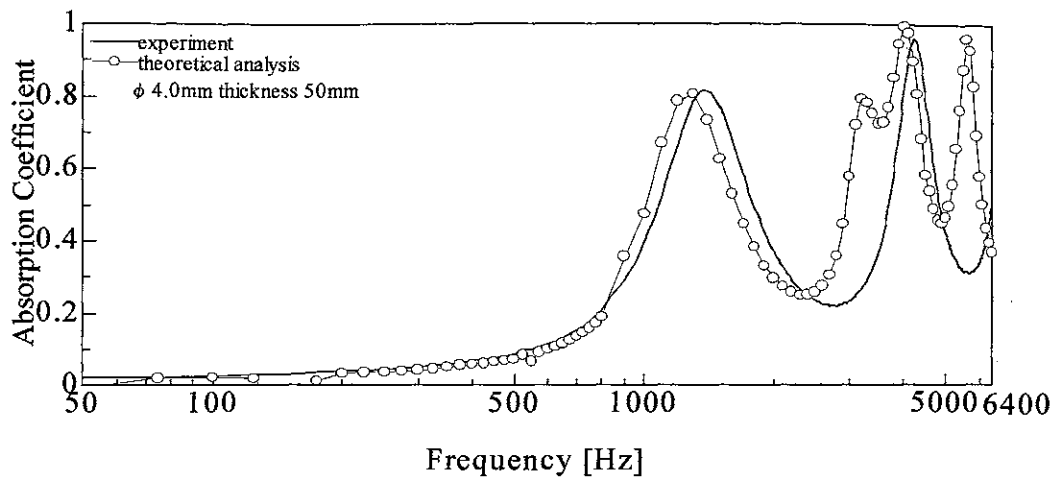


図 7-1 ガラスビーズ層単層 ϕ 4.0 thickness 50mm

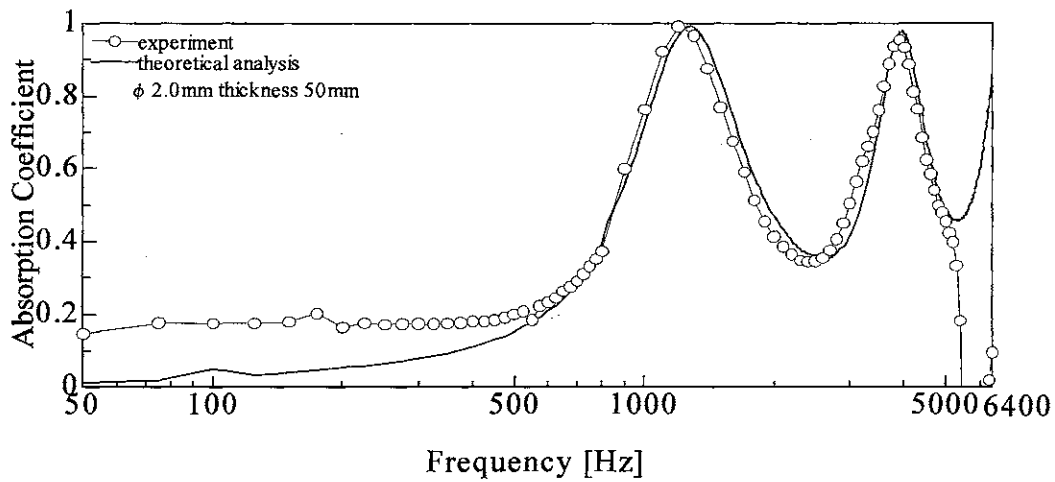


図 7-2 ガラスビーズ層単層 ϕ 2.0 thickness 50mm

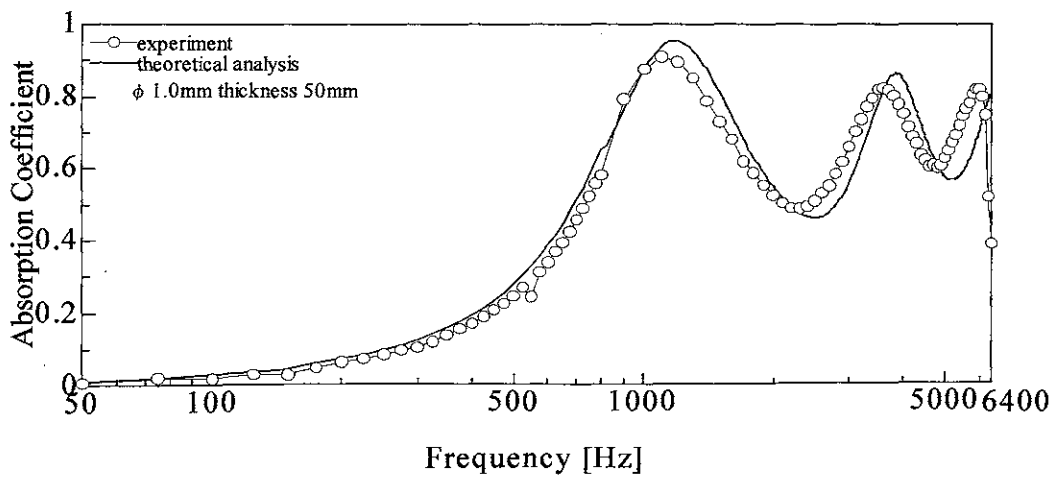


図 7-3 ガラスビーズ層単層 ϕ 1.0 thickness 50mm

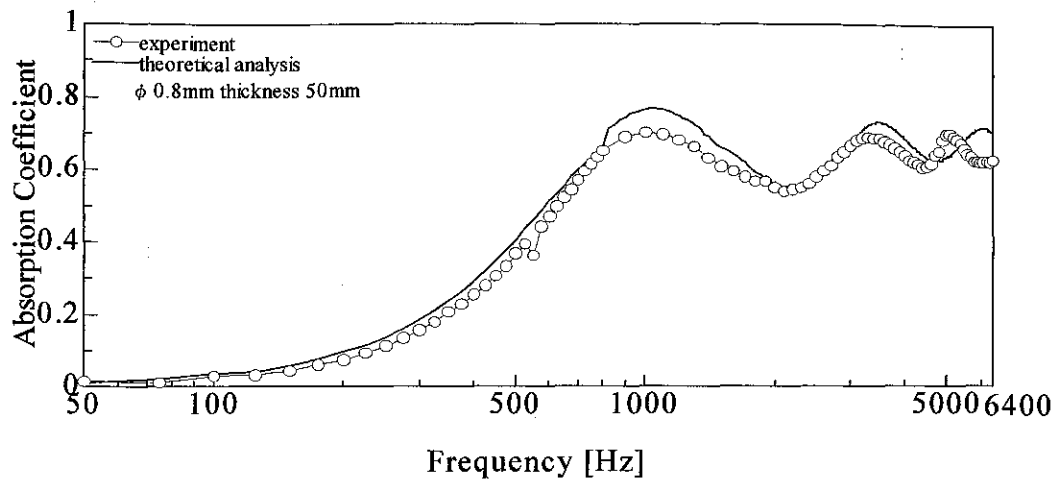


図 7-4 ガラスビーズ層単層 ϕ 0.8 thickness 50mm

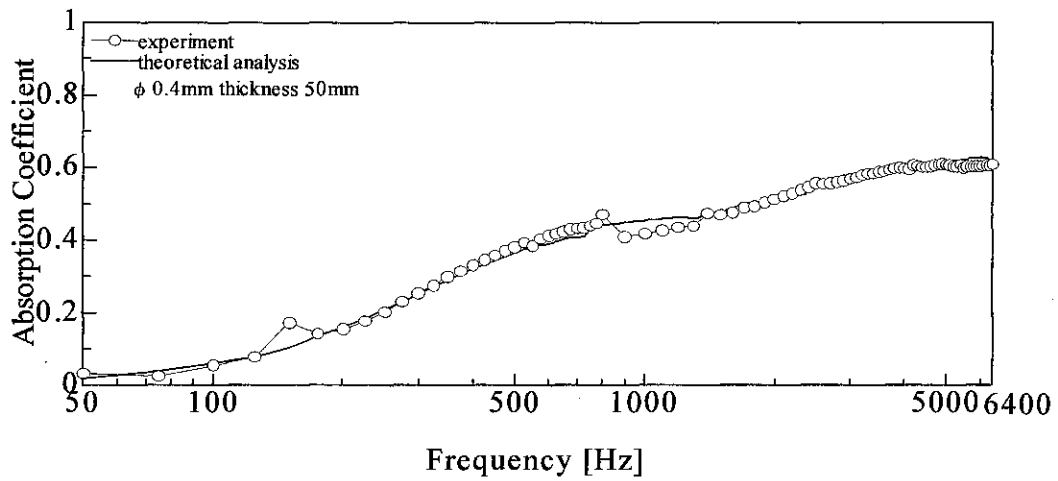


図 7-5 ガラスビーズ層単層 ϕ 0.4 thickness 50mm

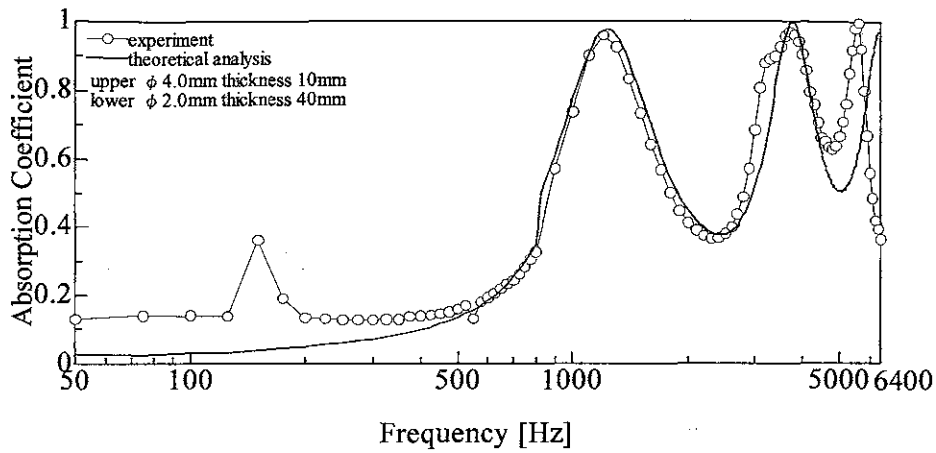


図 7-6 ガラスビーズ層積層 $\phi 4.0$ thickness 10mm – $\phi 2.0$ thickness 40mm

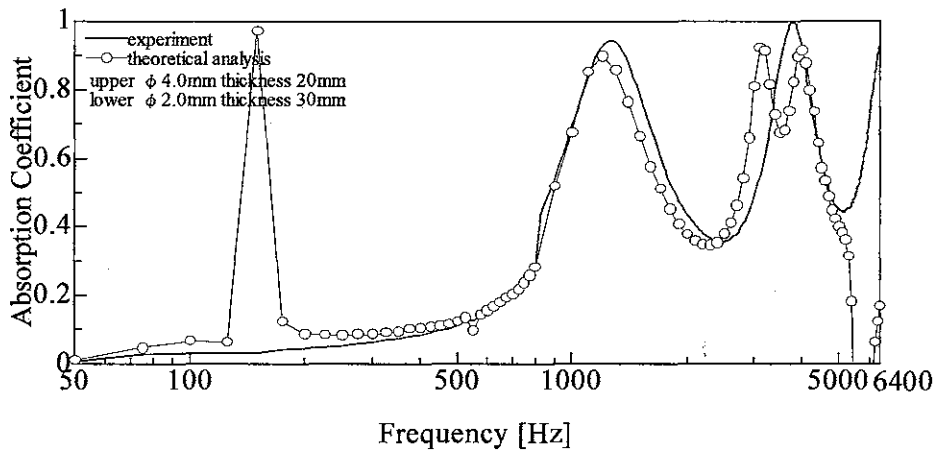


図 7-7 ガラスビーズ層積層 $\phi 4.0$ thickness 20mm – $\phi 2.0$ thickness 30mm

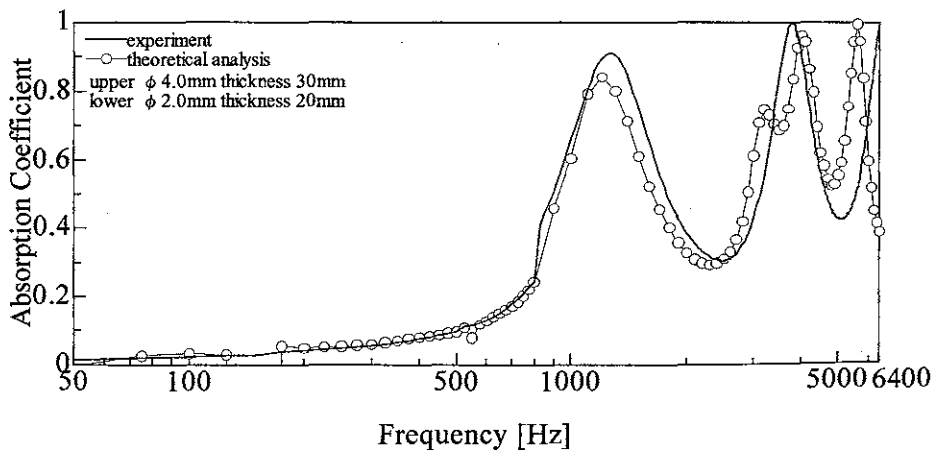


図 7-8 ガラスビーズ層積層 $\phi 4.0$ thickness 30mm – $\phi 2.0$ thickness 20mm

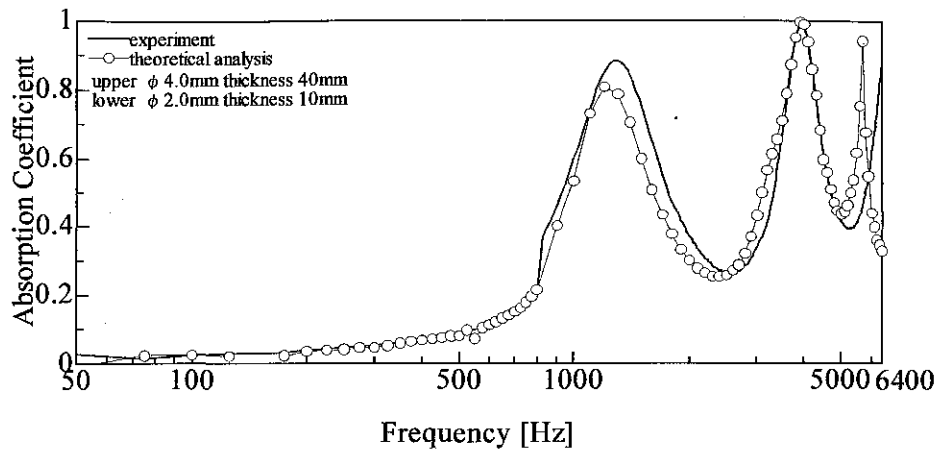


図 7-9 ガラスビーズ層積層 $\phi 4.0$ thickness 40mm – $\phi 2.0$ thickness 10mm

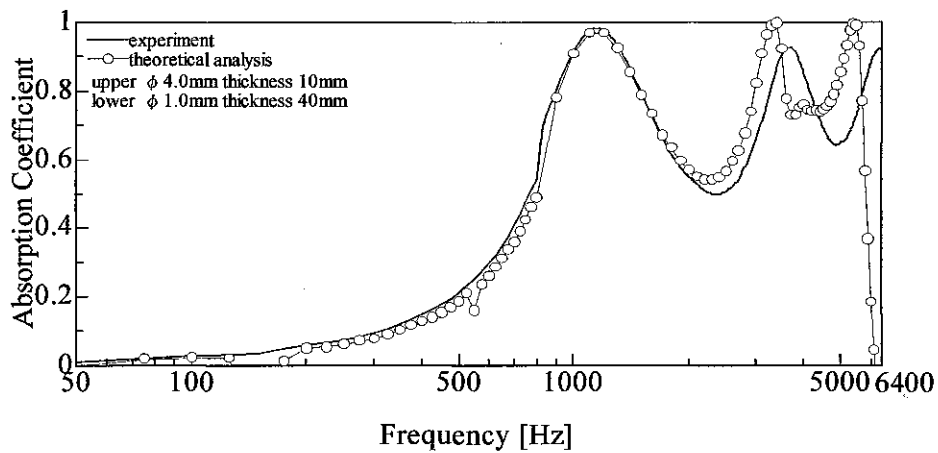


図 7-10 ガラスビーズ層積層 $\phi 4.0$ thickness 10mm – $\phi 1.0$ thickness 40mm

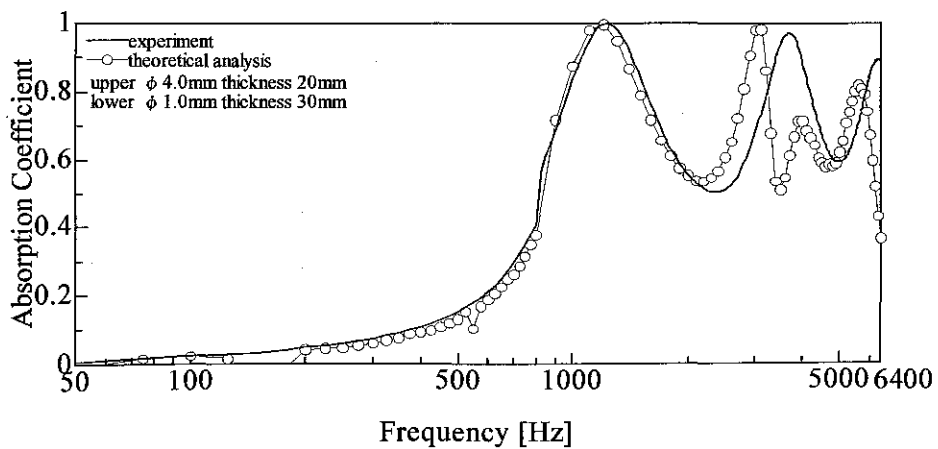


図 7-11 ガラスビーズ層積層 $\phi 4.0$ thickness 20mm – $\phi 1.0$ thickness 30mm

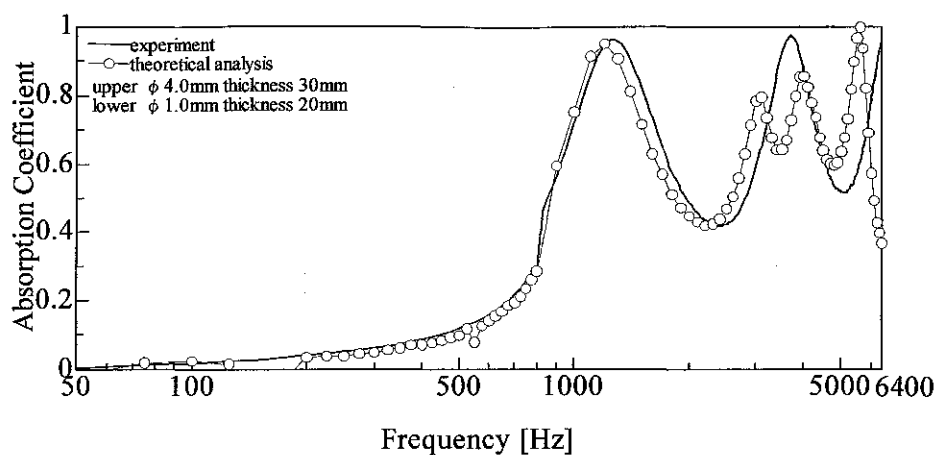


図 7-12 ガラスビーズ層積層 $\phi 4.0$ thickness 30mm – $\phi 1.0$ thickness 20mm

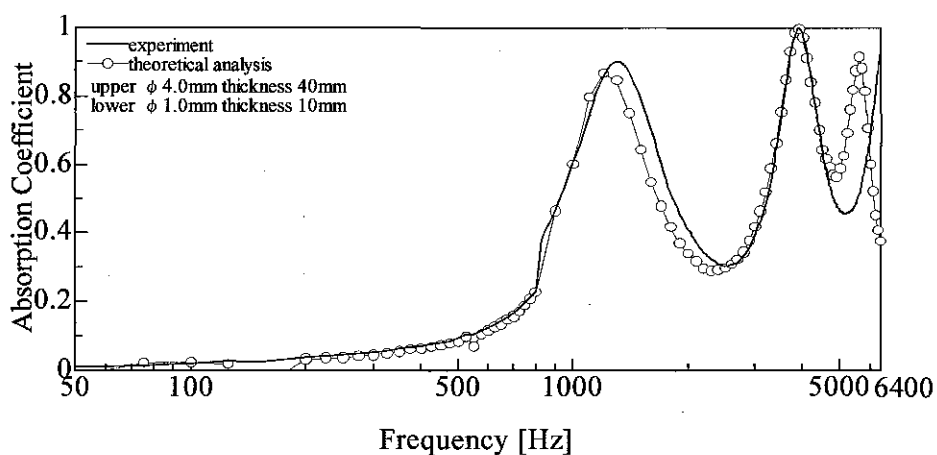


図 7-13 ガラスビーズ層積層 $\phi 4.0$ thickness 40mm – $\phi 1.0$ thickness 10mm

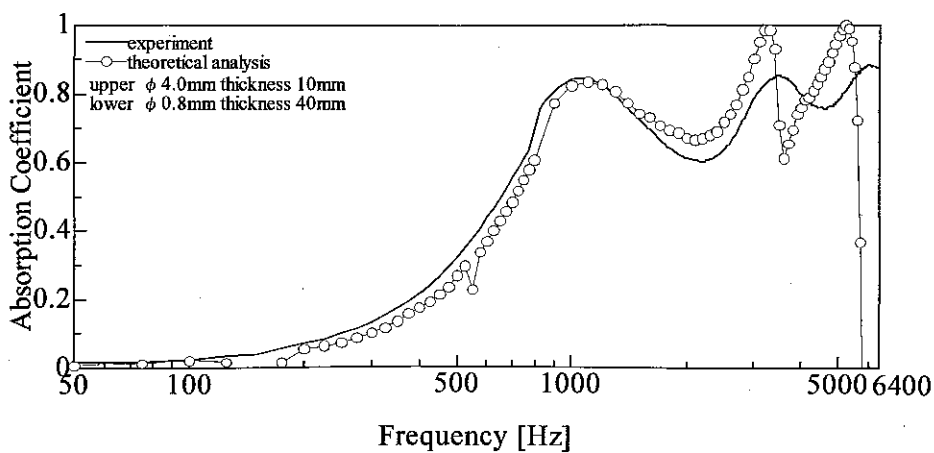


図 7-14 ガラスビーズ層積層 $\phi 4.0$ thickness 10mm – $\phi 0.8$ thickness 40mm

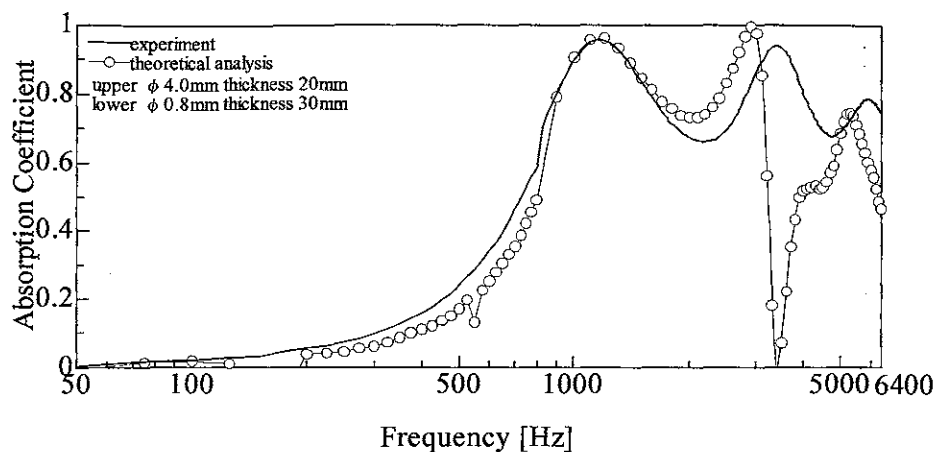


図 7-15 ガラスビーズ層積層 ϕ 4.0 thickness 20mm – ϕ 0.8 thickness 30mm

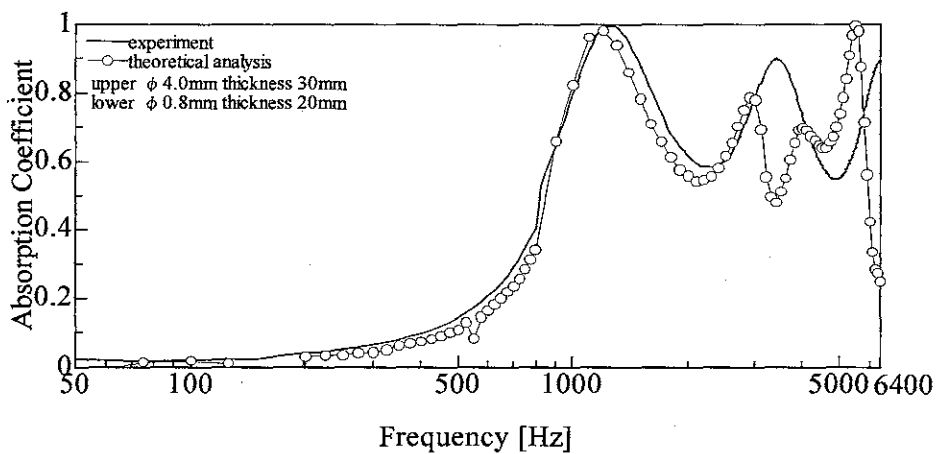


図 7-16 ガラスビーズ層積層 ϕ 4.0 thickness 30mm – ϕ 0.8 thickness 20mm

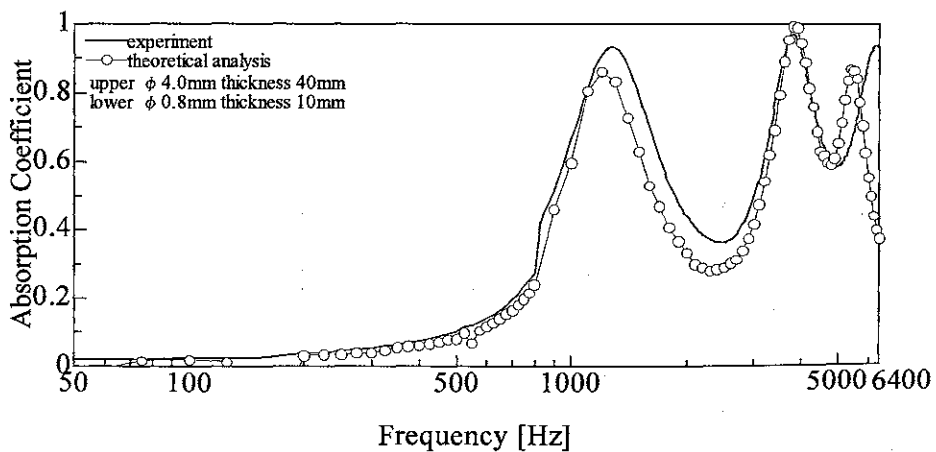


図 7-17 ガラスビーズ層積層 ϕ 4.0 thickness 40mm – ϕ 0.8 thickness 10mm

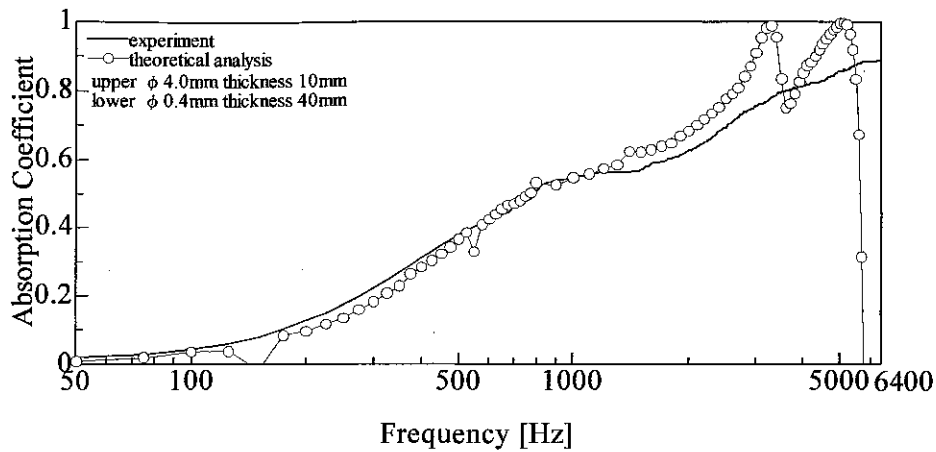


図 7-18 ガラスビーズ層積層 $\phi 4.0$ thickness 10mm – $\phi 0.4$ thickness 40mm

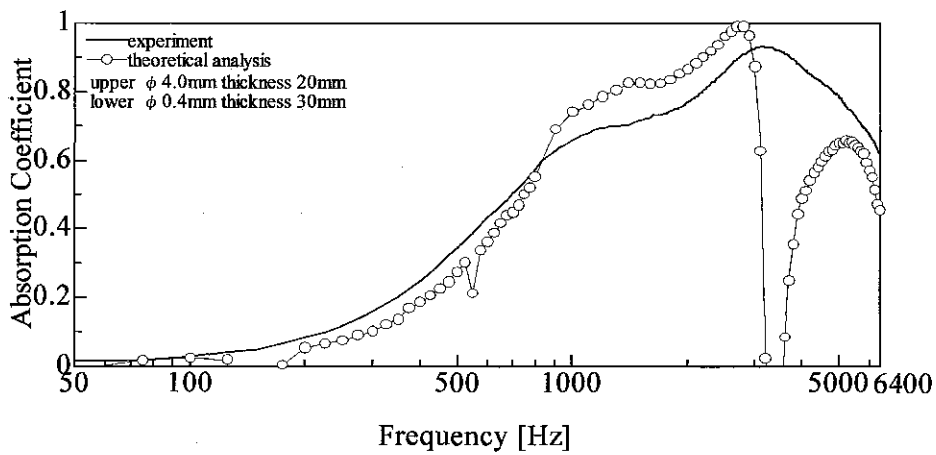


図 7-19 ガラスビーズ層積層 $\phi 4.0$ thickness 20mm – $\phi 0.4$ thickness 30mm

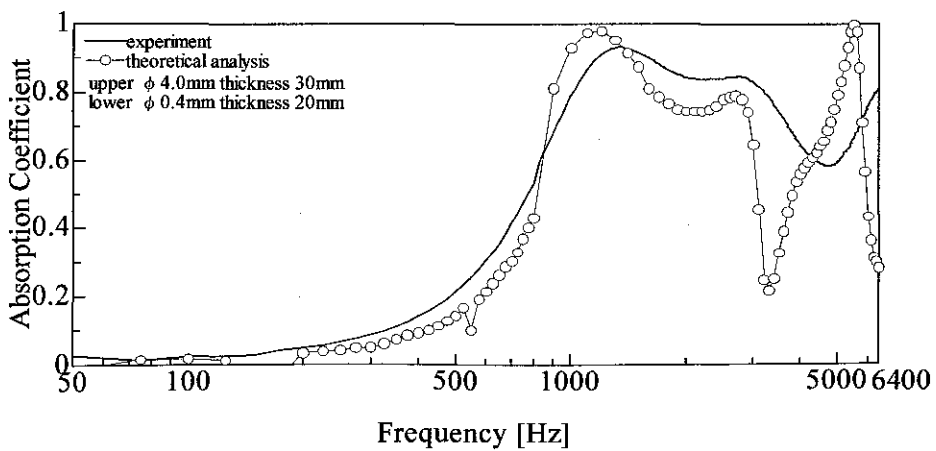


図 7-20 ガラスビーズ層積層 $\phi 4.0$ thickness 30mm – $\phi 0.4$ thickness 20mm

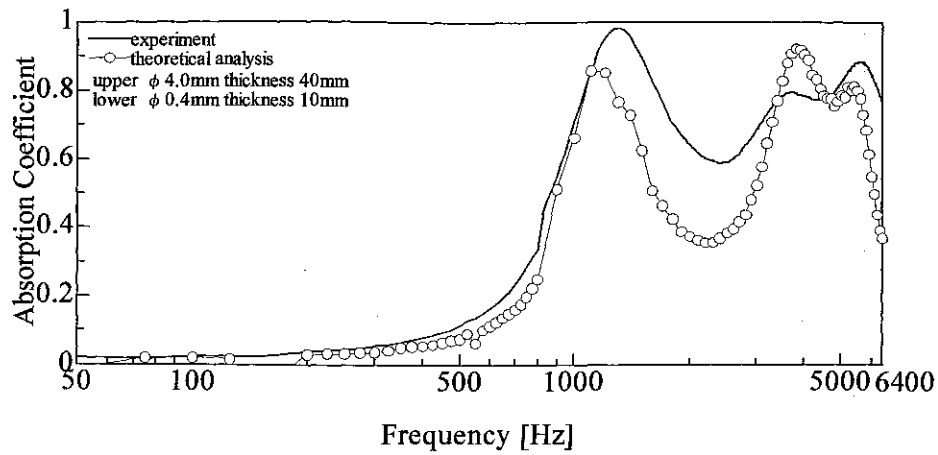


図 7-21 ガラスビーズ層積層 $\phi 4.0$ thickness 40mm – $\phi 0.4$ thickness 10mm

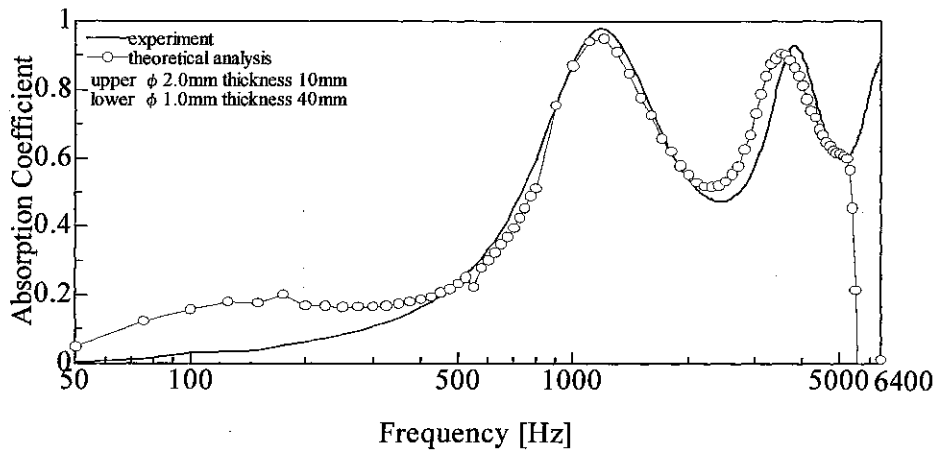


図 7-22 ガラスビーズ層積層 $\phi 2.0$ thickness 10mm – $\phi 1.0$ thickness 40mm

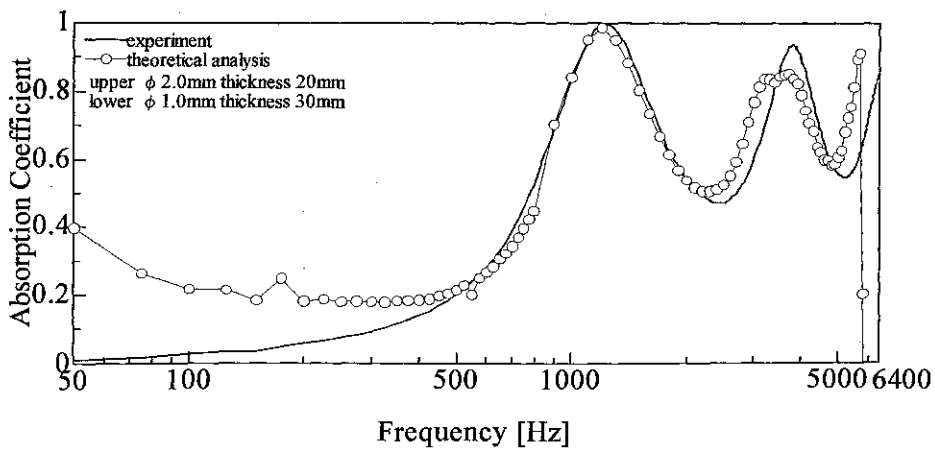


図 7-23 ガラスビーズ層積層 $\phi 2.0$ thickness 20mm – $\phi 1.0$ thickness 30mm

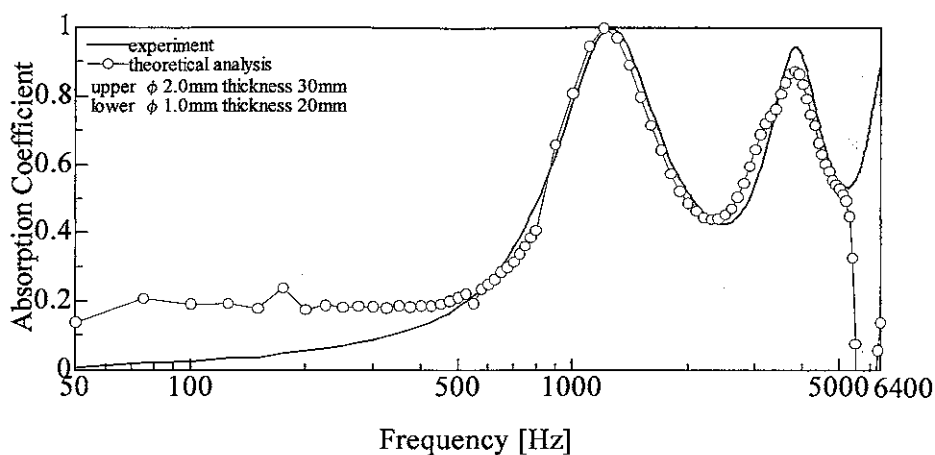


図 7-24 ガラスビーズ層積層 $\phi 2.0$ thickness 30mm – $\phi 1.0$ thickness 20mm

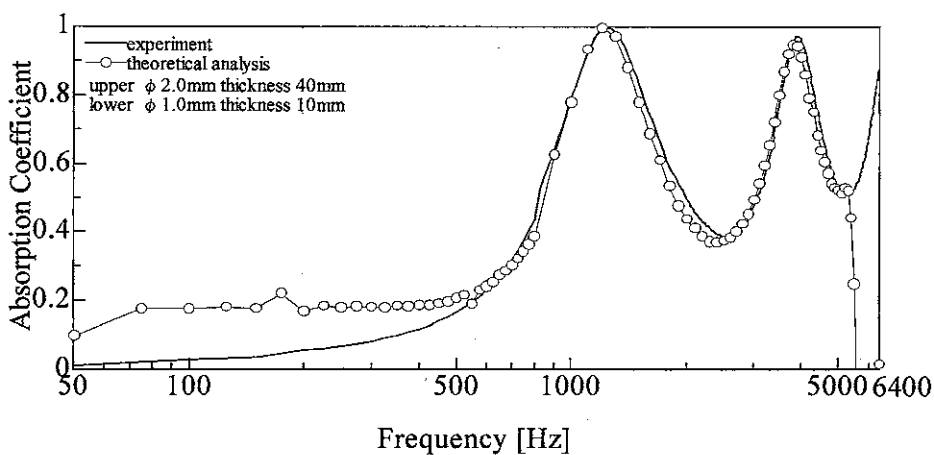


図 7-25 ガラスビーズ層積層 $\phi 2.0$ thickness 40mm – $\phi 1.0$ thickness 10mm

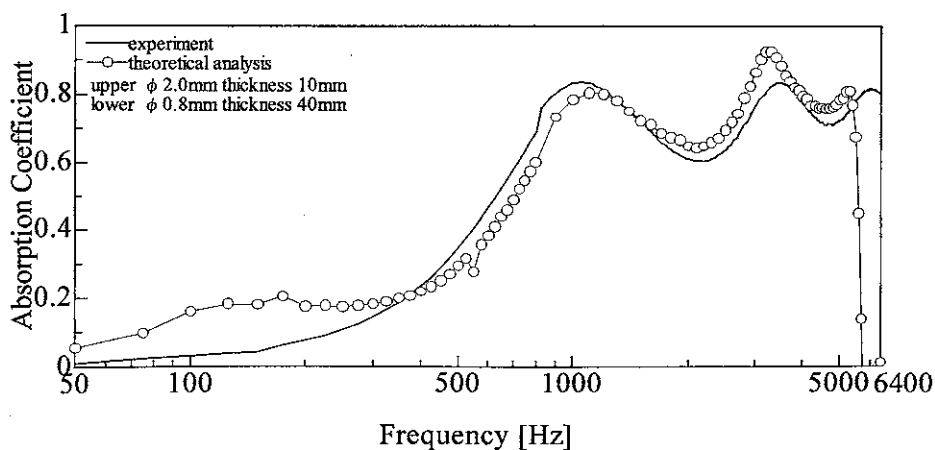


図 7-26 ガラスビーズ層積層 $\phi 2.0$ thickness 10mm – $\phi 0.8$ thickness 40mm

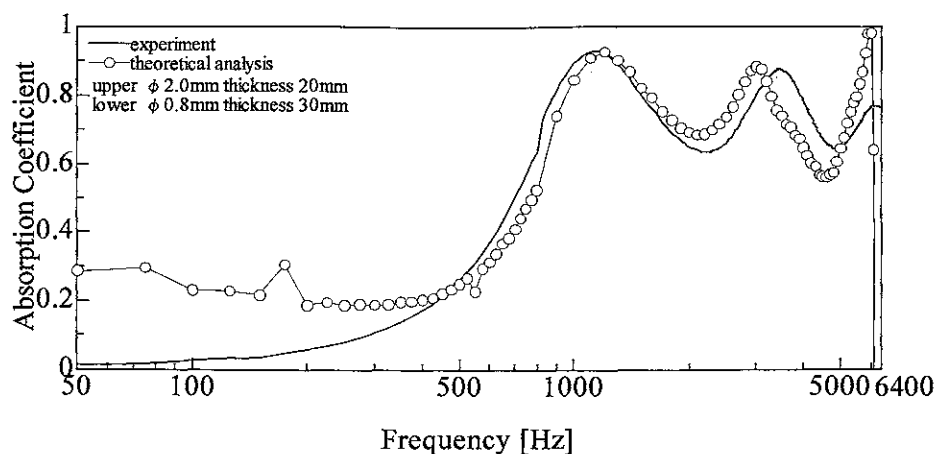


図 7-27 ガラスビーズ層積層 $\phi 2.0$ thickness 20mm - $\phi 0.8$ thickness 30mm

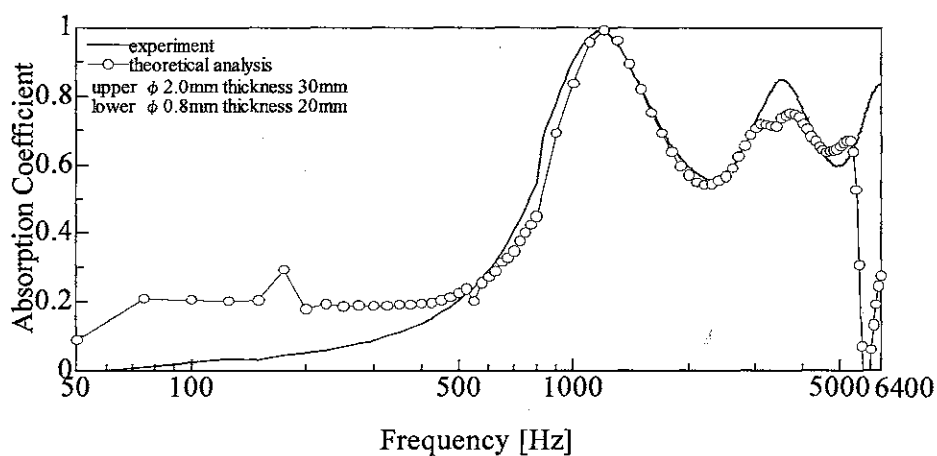


図 7-28 ガラスビーズ層積層 $\phi 2.0$ thickness 30mm - $\phi 0.8$ thickness 20mm

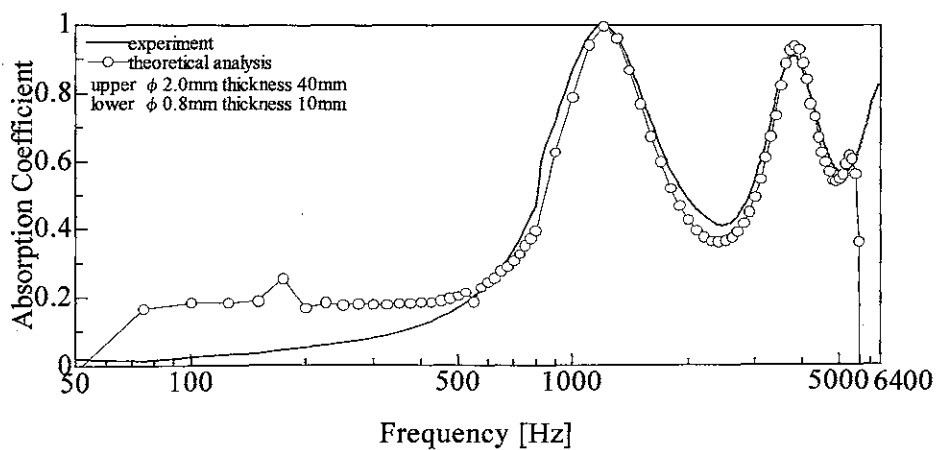


図 7-29 ガラスビーズ層積層 $\phi 2.0$ thickness 40mm - $\phi 0.8$ thickness 10mm

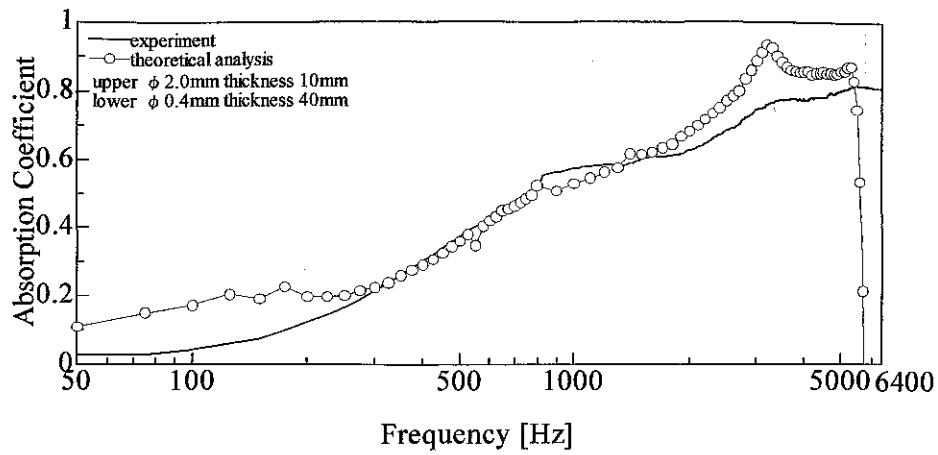


図 7-30 ガラスビーズ層積層 $\phi 2.0$ thickness 10mm - $\phi 0.4$ thickness 40mm

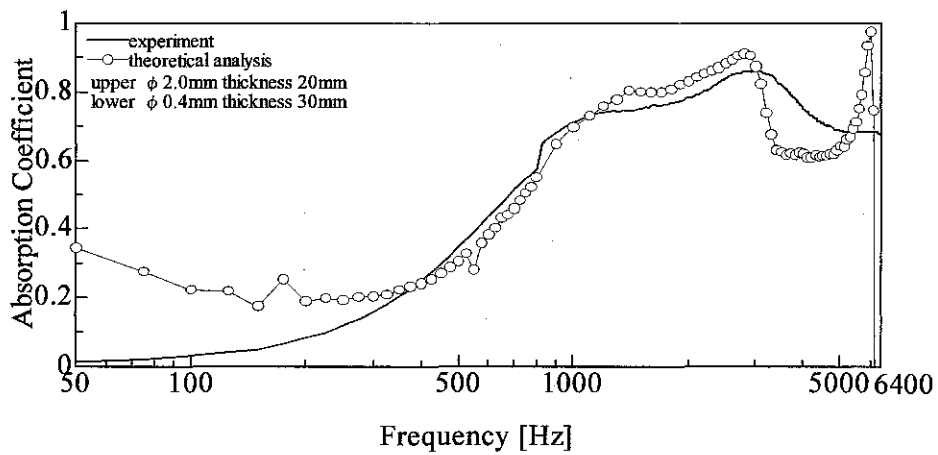


図 7-31 ガラスビーズ層積層 $\phi 2.0$ thickness 20mm - $\phi 0.4$ thickness 30mm

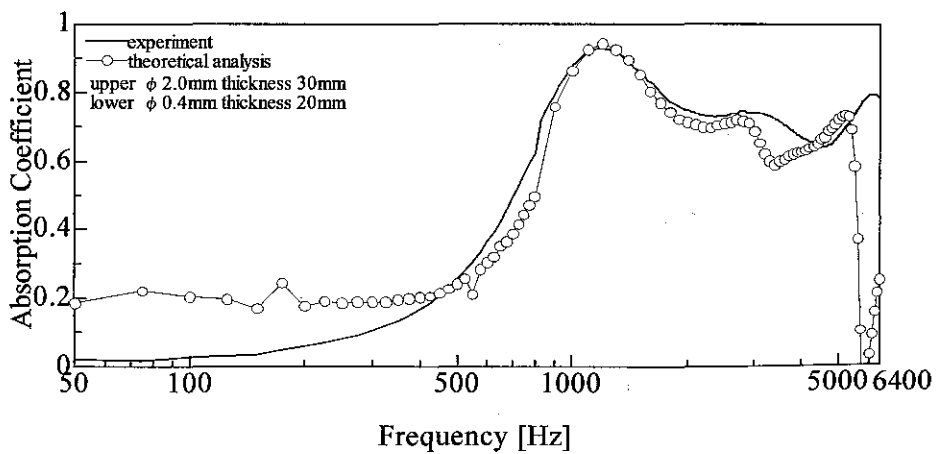


図 7-32 ガラスビーズ層積層 $\phi 2.0$ thickness 30mm - $\phi 0.4$ thickness 20mm

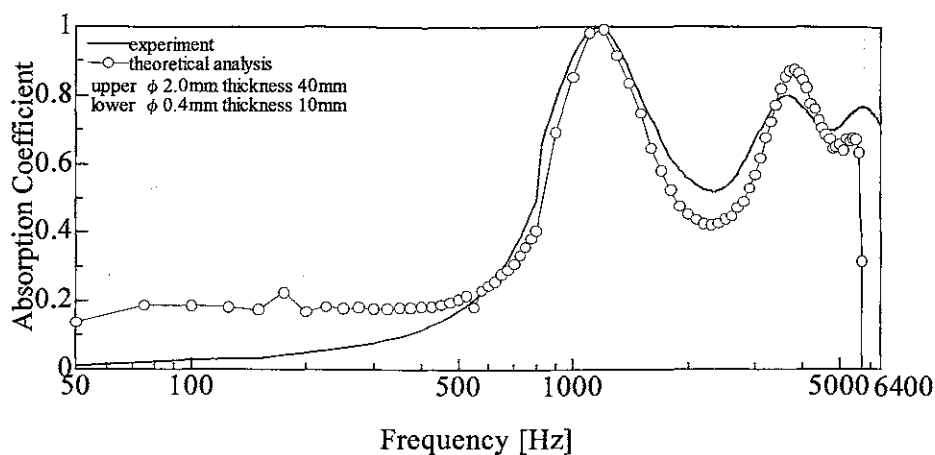


図 7-33 ガラスビーズ層積層 $\phi 2.0$ thickness 40mm – $\phi 0.4$ thickness 10mm

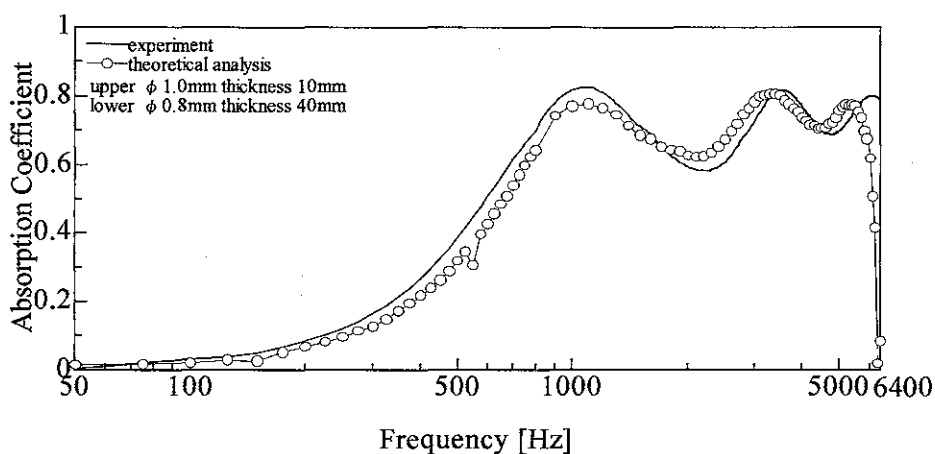


図 7-34 ガラスビーズ層積層 $\phi 1.0$ thickness 10mm – $\phi 0.8$ thickness 40mm

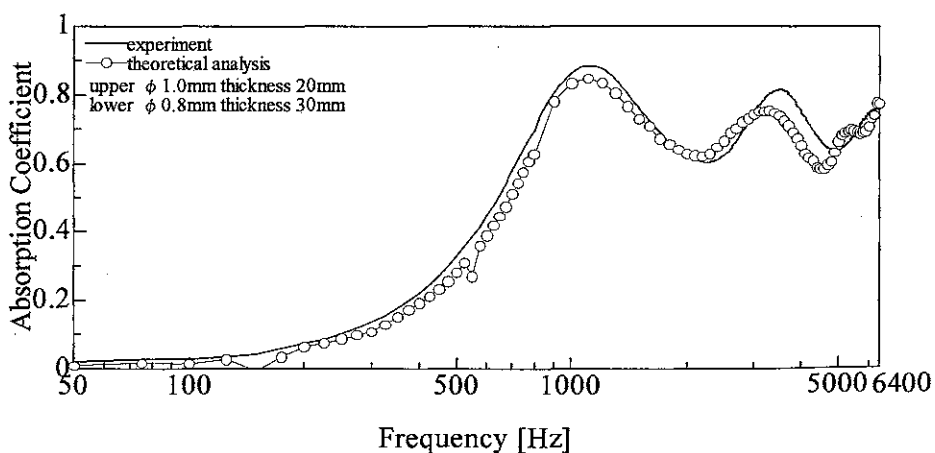


図 7-35 ガラスビーズ層積層 $\phi 1.0$ thickness 20mm – $\phi 0.8$ thickness 30mm

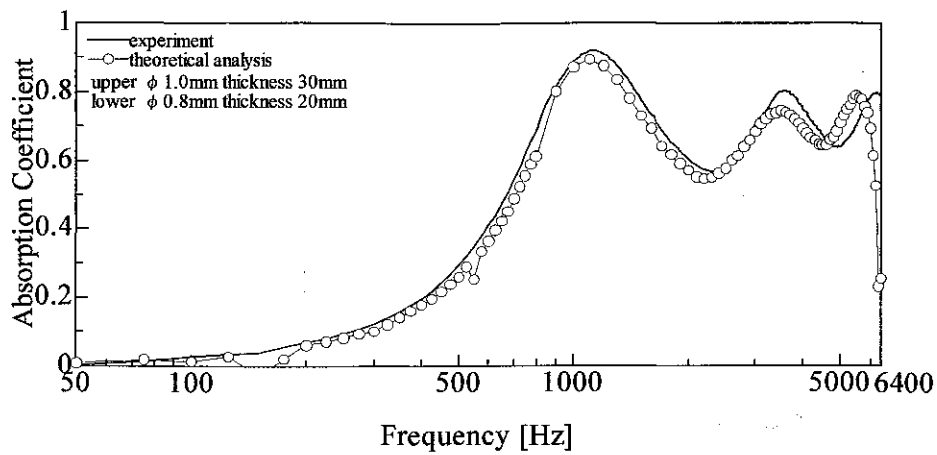


図 7-36 ガラスビーズ層積層 ϕ 1.0 thickness 30mm - ϕ 0.8 thickness 20mm

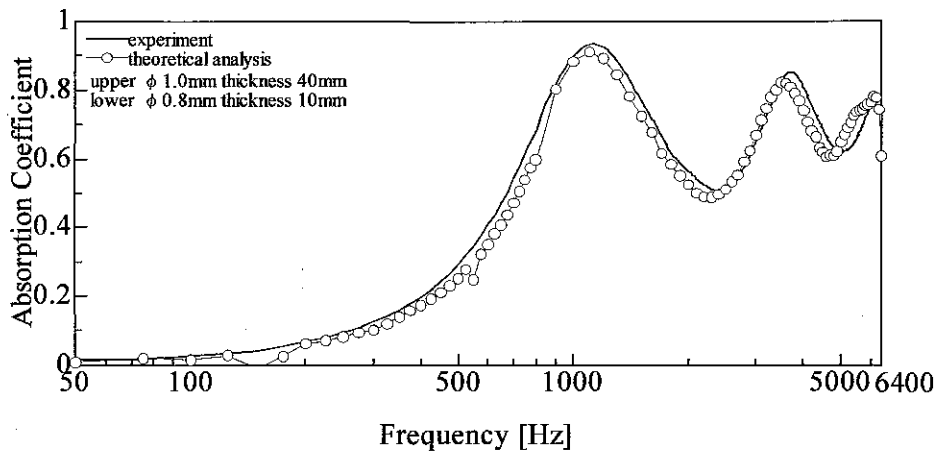


図 7-37 ガラスビーズ層積層 ϕ 1.0 thickness 40mm - ϕ 0.8 thickness 10mm

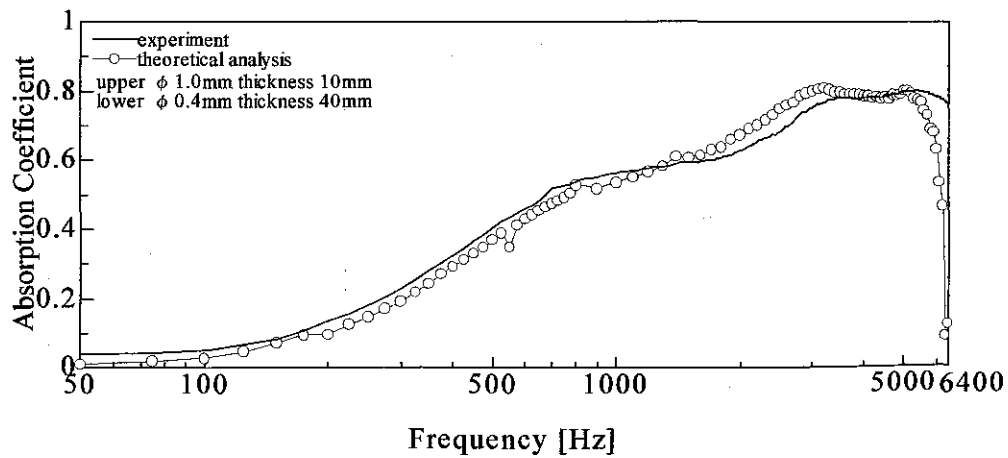


図 7-38 ガラスビーズ層積層 ϕ 1.0 thickness 10mm - ϕ 0.4 thickness 40mm

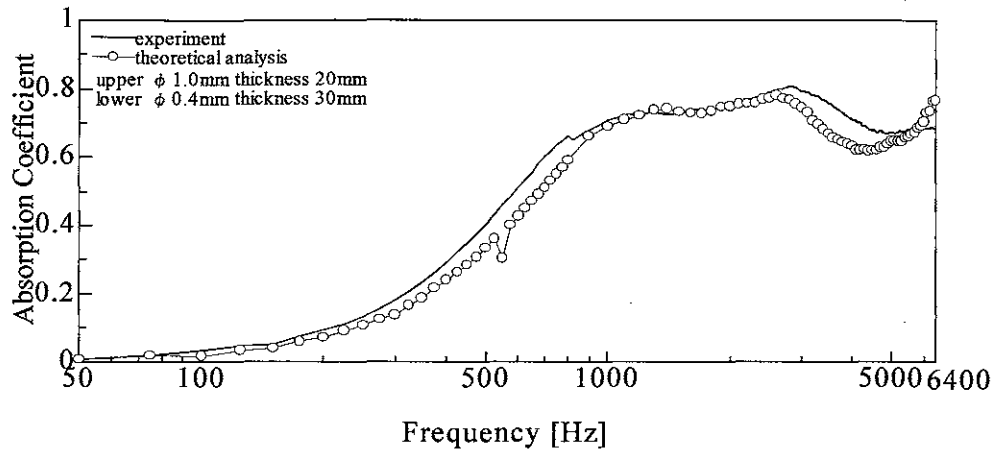


図 7-39 ガラスビーズ層積層 ϕ 1.0 thickness 20mm – ϕ 0.4 thickness 30mm

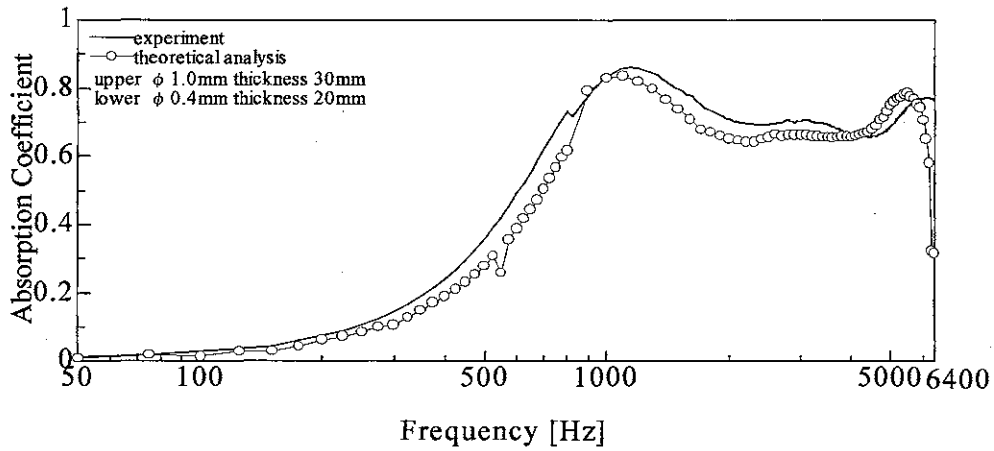


図 7-40 ガラスビーズ層積層 ϕ 1.0 thickness 30mm – ϕ 0.4 thickness 20mm

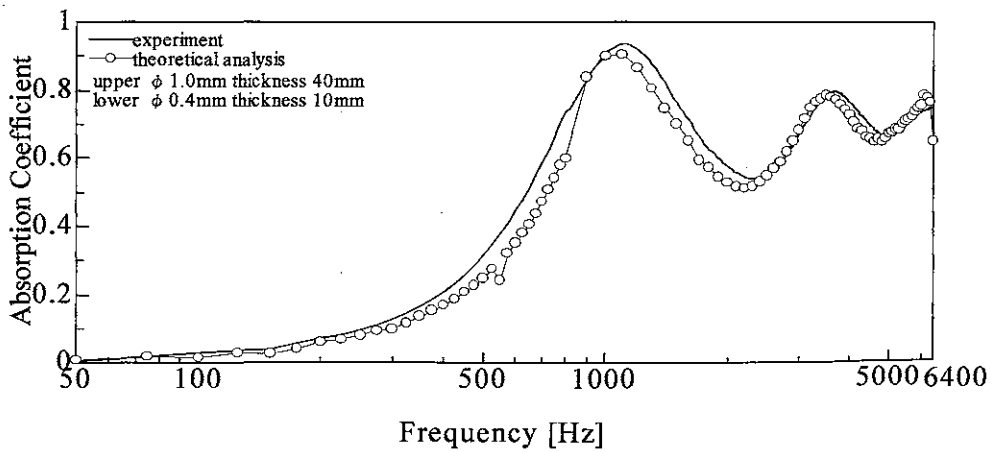


図 7-41 ガラスビーズ層積層 ϕ 1.0 thickness 40mm – ϕ 0.4 thickness 10mm

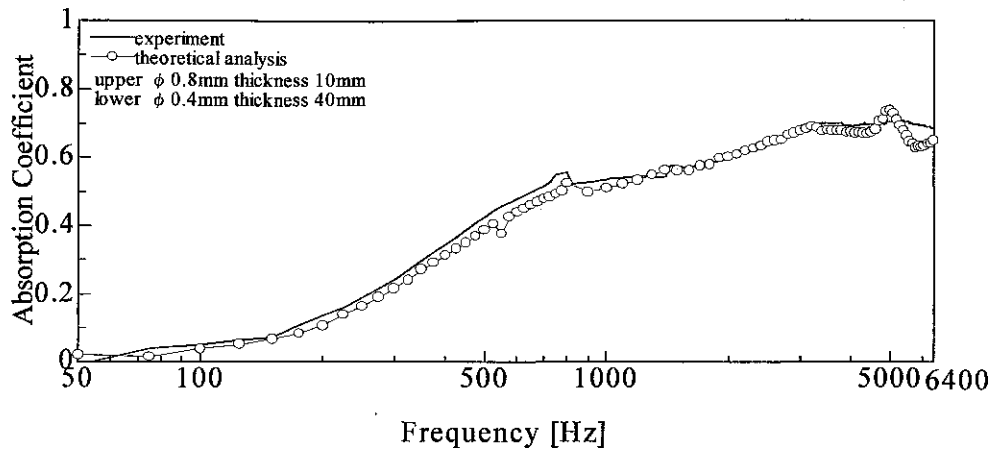


図 7-42 ガラスビーズ層積層 ϕ 0.8 thickness 10mm – ϕ 0.4 thickness 40mm

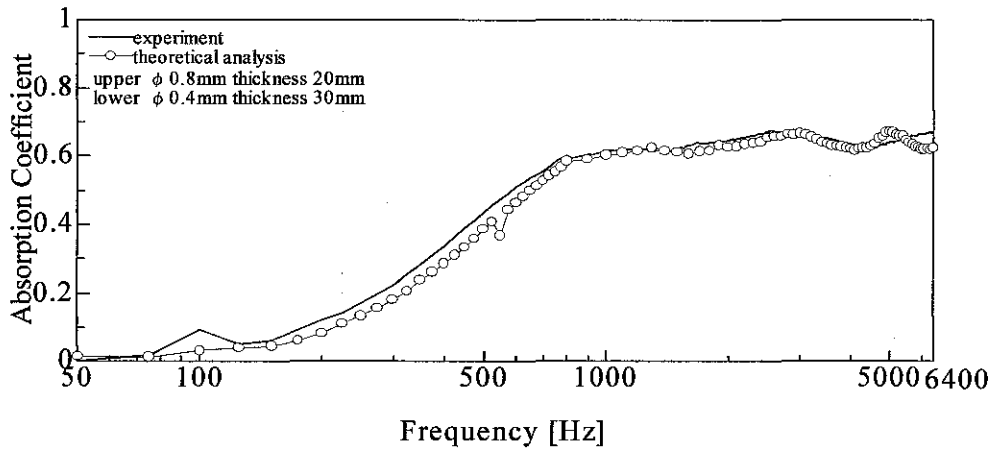


図 7-43 ガラスビーズ層積層 ϕ 0.8 thickness 20mm – ϕ 0.4 thickness 30mm

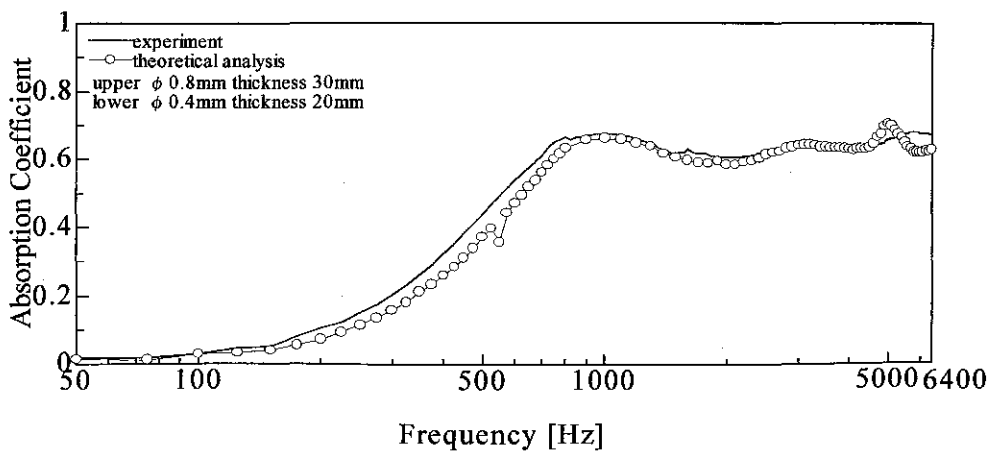


図 7-44 ガラスビーズ層積層 ϕ 0.8 thickness 30mm – ϕ 0.4 thickness 20mm

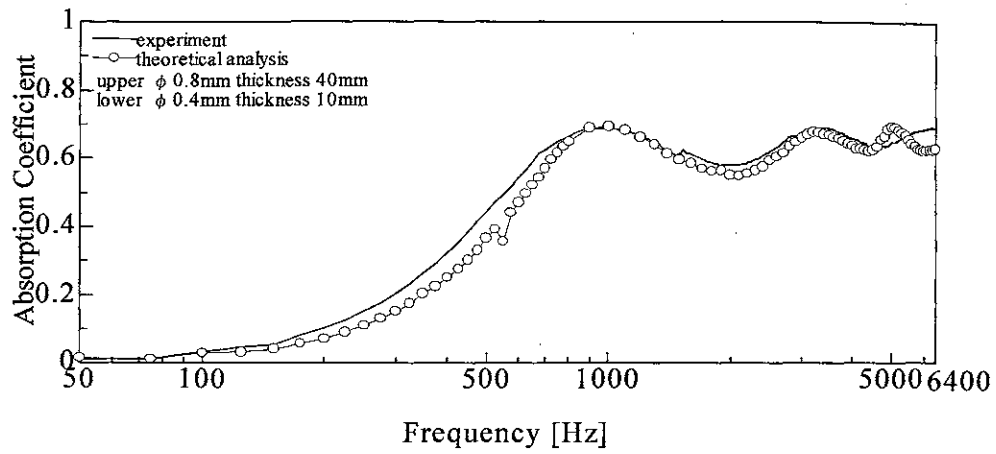


図 7-45 ガラスビーズ層積層 ϕ 0.8 thickness 40mm - ϕ 0.4 thickness 10mm

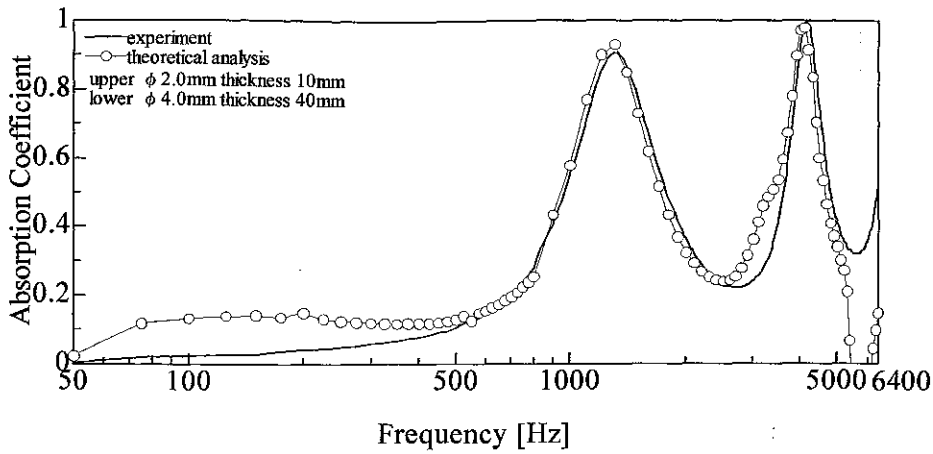


図 7-46 ガラスビーズ層積層 $\phi 2.0$ thickness 10mm – $\phi 4.0$ thickness 40mm

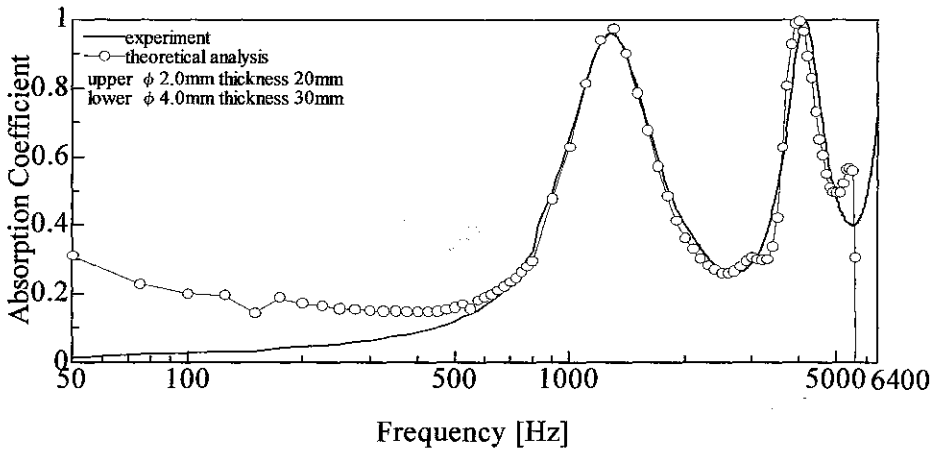


図 7-47 ガラスビーズ層積層 $\phi 2.0$ thickness 20mm – $\phi 4.0$ thickness 30mm

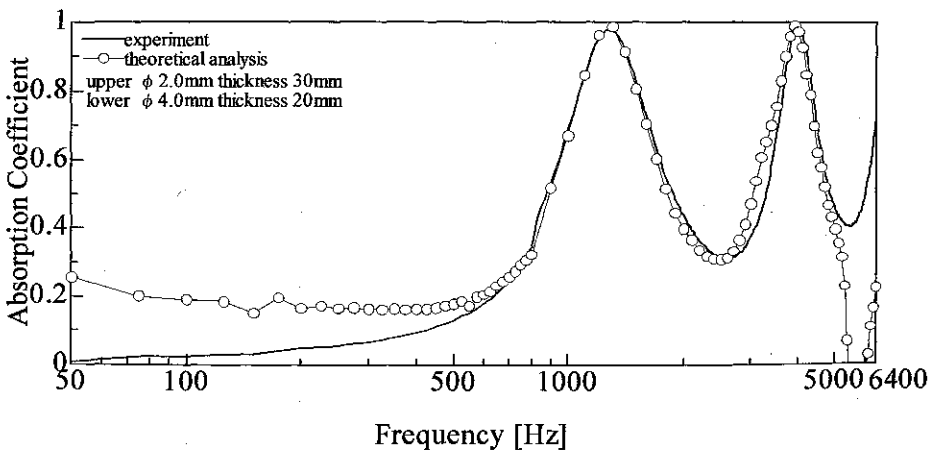


図 7-48 ガラスビーズ層積層 $\phi 2.0$ thickness 30mm – $\phi 4.0$ thickness 20mm

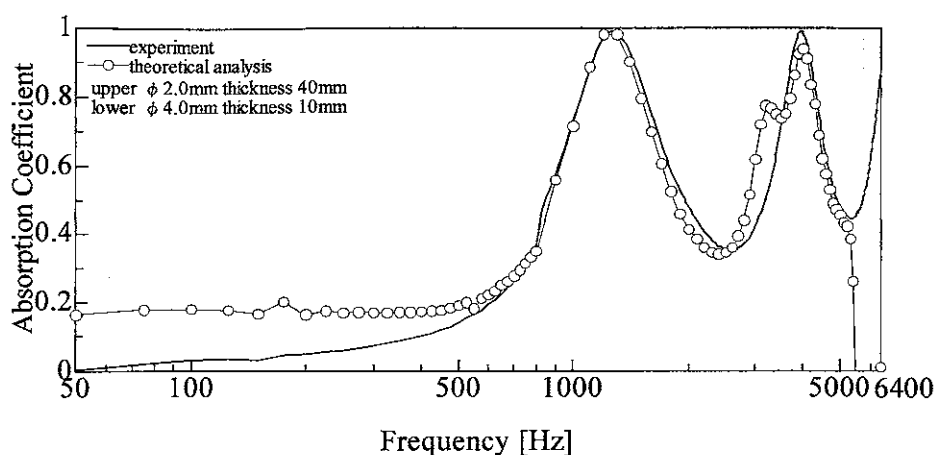


図 7-49 ガラスビーズ層積層 $\phi 2.0$ thickness 40mm – $\phi 4.0$ thickness 10mm

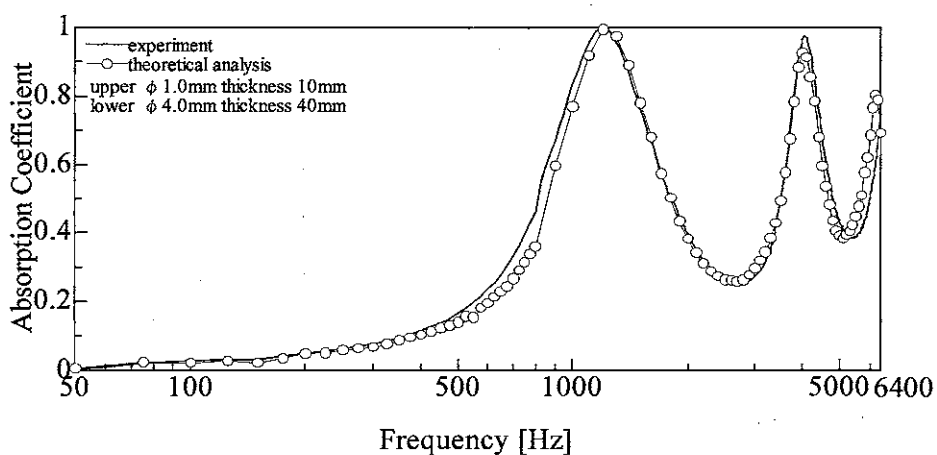


図 7-50 ガラスビーズ層積層 $\phi 1.0$ thickness 10mm – $\phi 4.0$ thickness 40mm

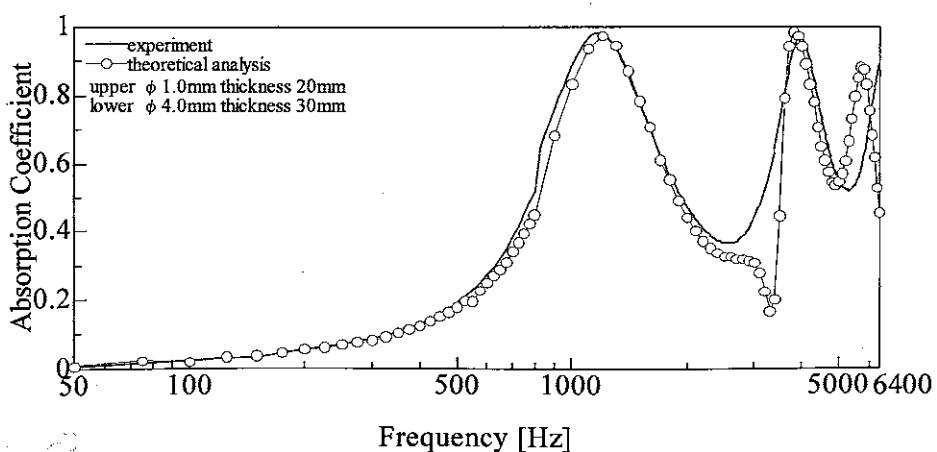


図 7-51 ガラスビーズ層積層 $\phi 1.0$ thickness 20mm – $\phi 4.0$ thickness 30mm

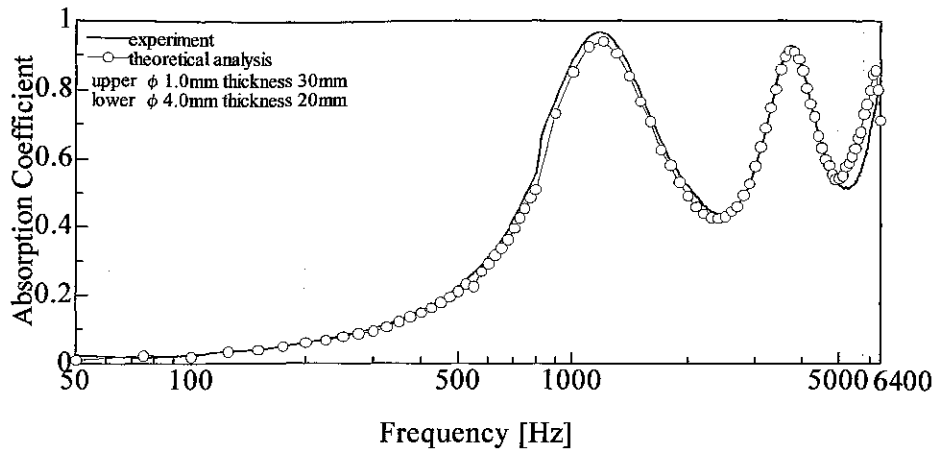


図 7-52 ガラスビーズ層積層 $\phi 1.0$ thickness 30mm – $\phi 4.0$ thickness 20mm

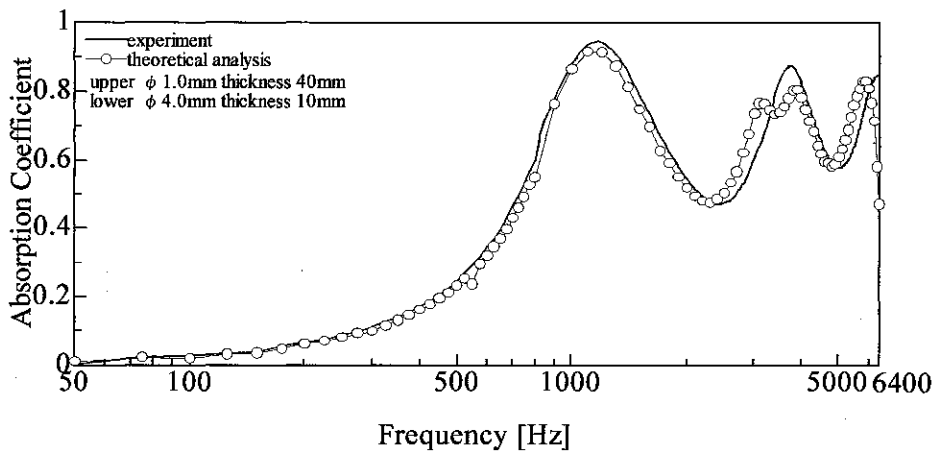


図 7-53 ガラスビーズ層積層 $\phi 1.0$ thickness 40mm – $\phi 4.0$ thickness 10mm

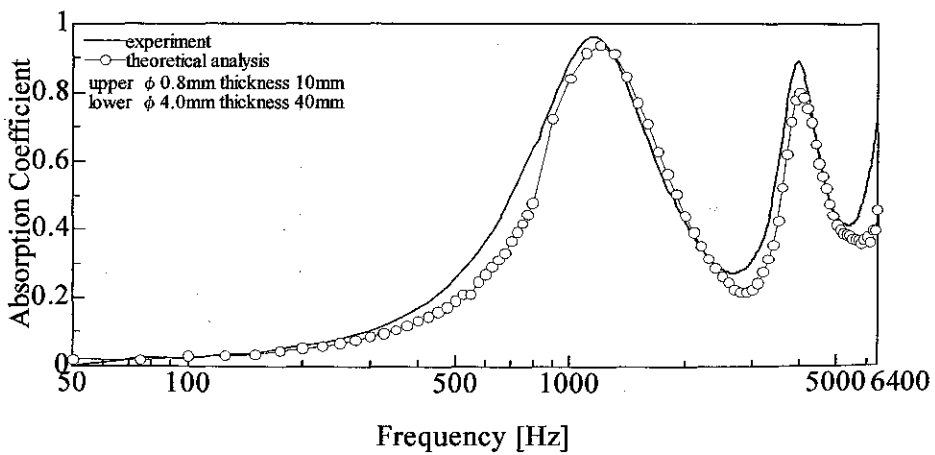


図 7-54 ガラスビーズ層積層 $\phi 0.8$ thickness 10mm – $\phi 4.0$ thickness 40mm

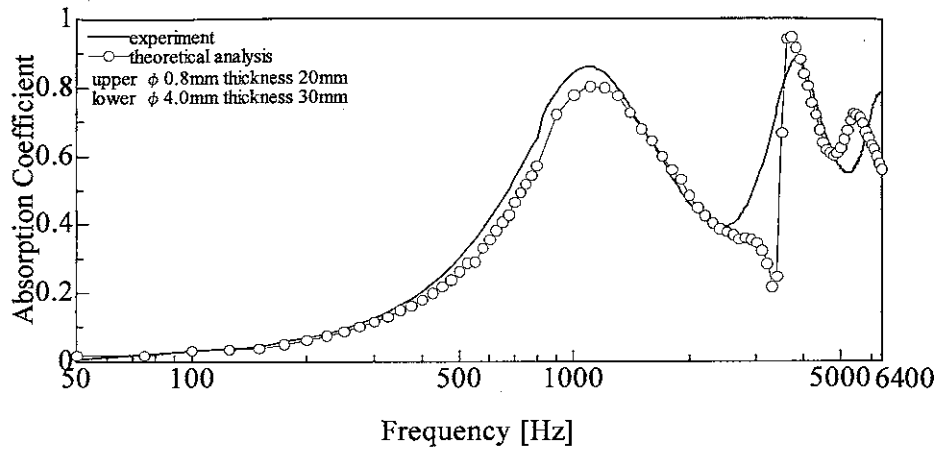


図 7-55 ガラスビーズ層積層 $\phi 0.8$ thickness 20mm - $\phi 4.0$ thickness 30mm

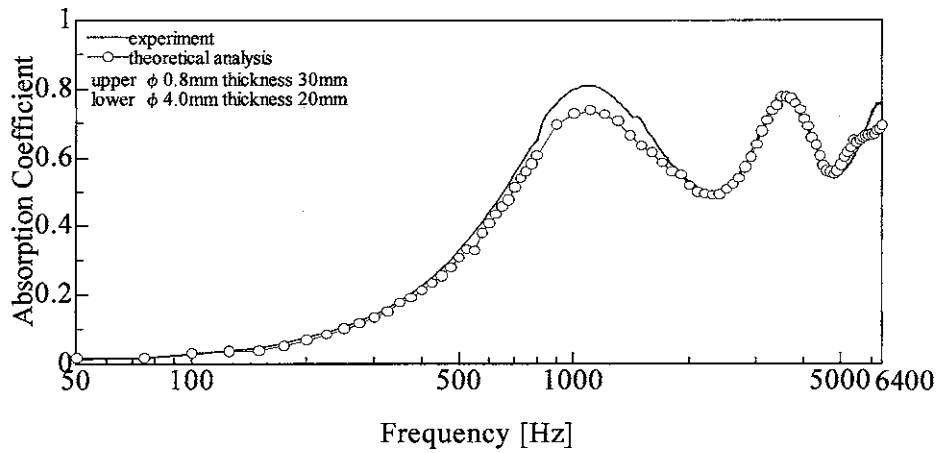


図 7-56 ガラスビーズ層積層 $\phi 0.8$ thickness 30mm - $\phi 4.0$ thickness 20mm

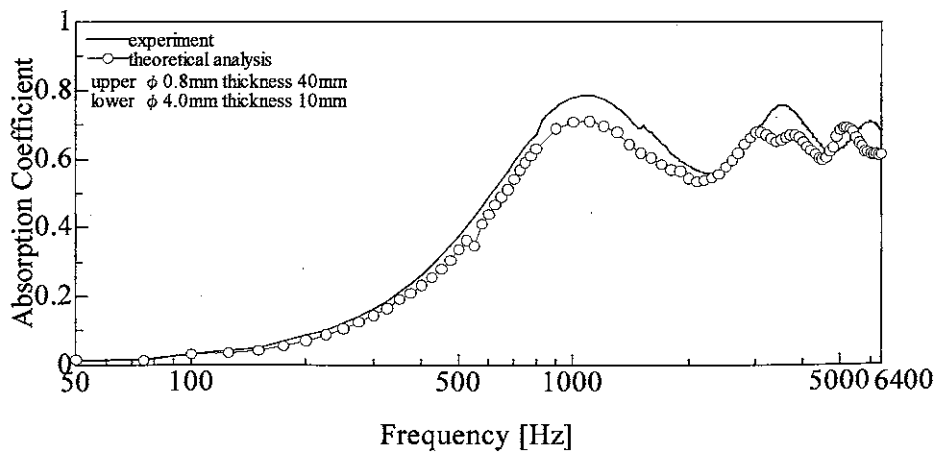


図 7-57 ガラスビーズ層積層 $\phi 0.8$ thickness 40mm - $\phi 4.0$ thickness 10mm

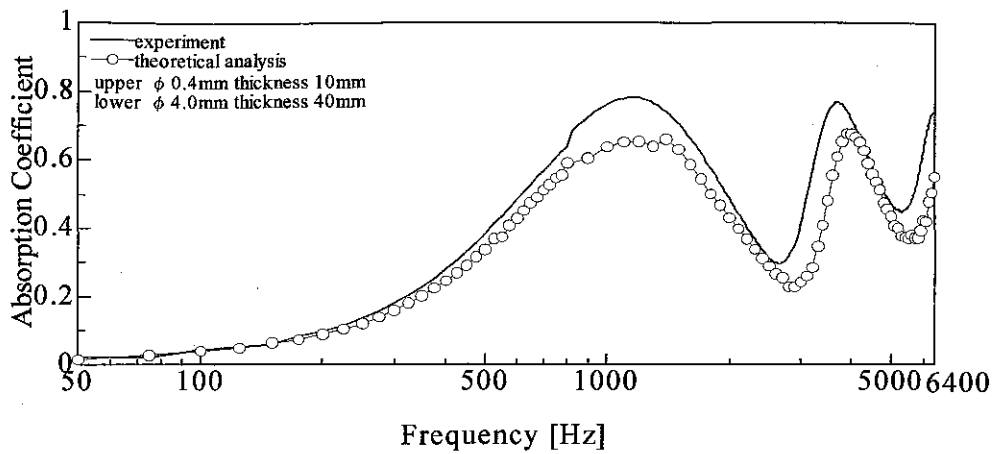


図 7-58 ガラスビーズ層積層 ϕ 0.4 thickness 10mm - ϕ 4.0 thickness 40mm

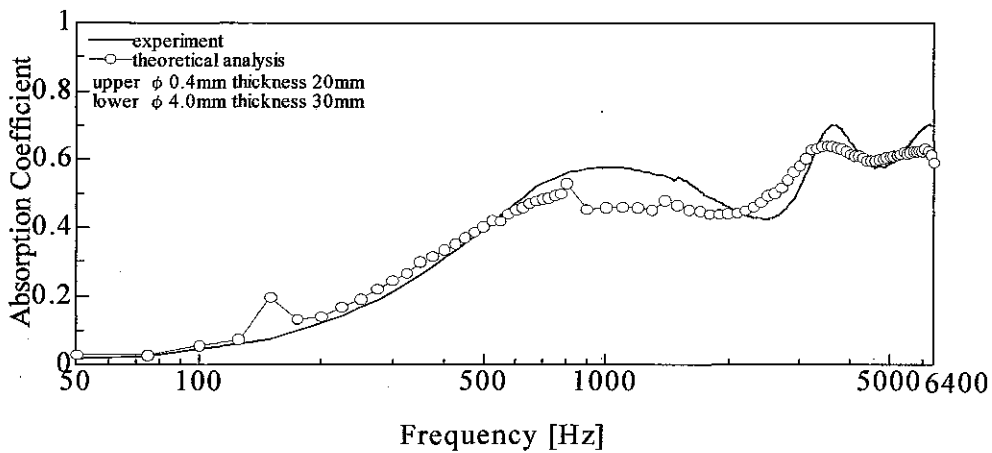


図 7-59 ガラスビーズ層積層 ϕ 0.4 thickness 20mm - ϕ 4.0 thickness 30mm

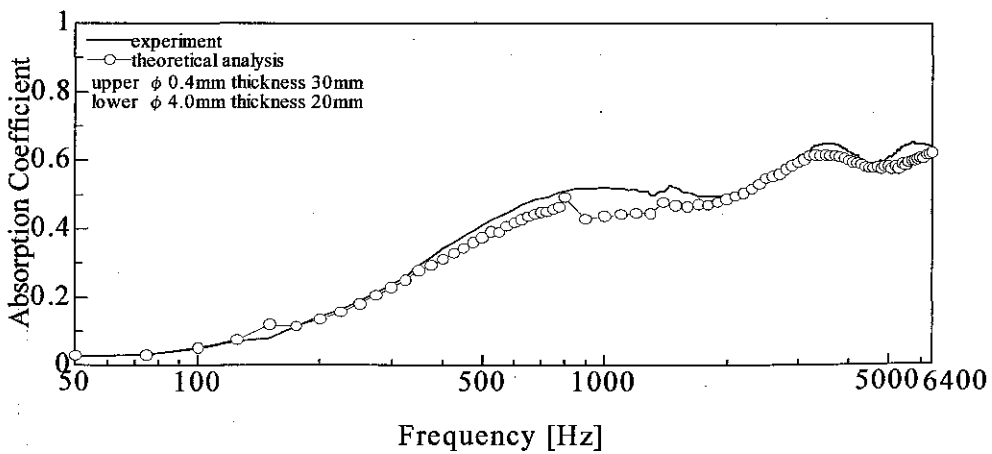


図 7-60 ガラスビーズ層積層 ϕ 0.4 thickness 30mm - ϕ 4.0 thickness 20mm

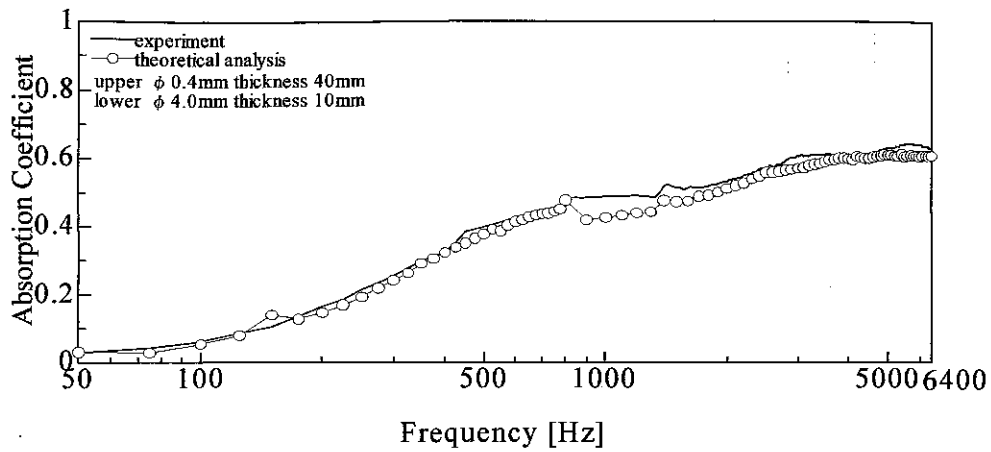


図 7-61 ガラスビーズ層積層 $\phi 0.4$ thickness 40mm – $\phi 4.0$ thickness 10mm

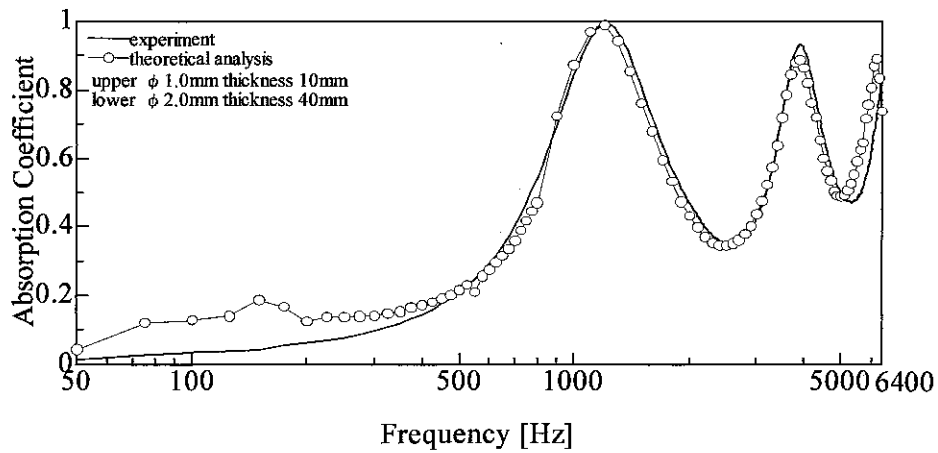


図 7-62 ガラスビーズ層積層 $\phi 1.0$ thickness 10mm – $\phi 2.0$ thickness 40mm

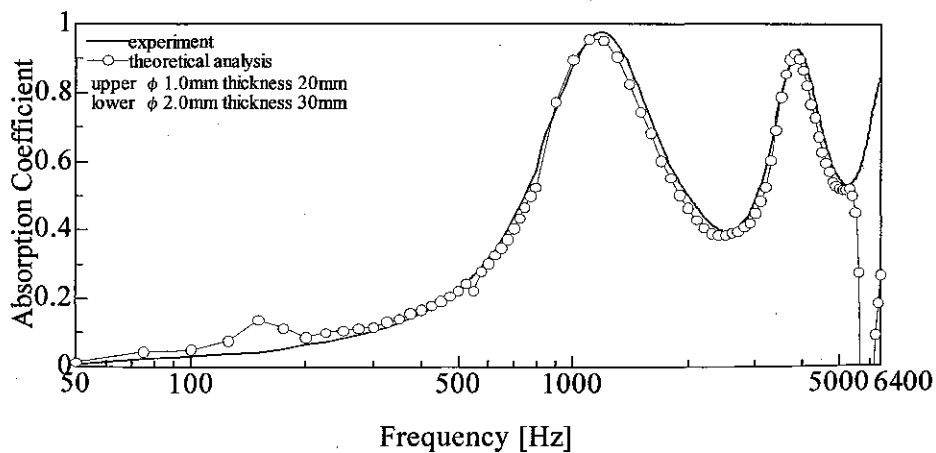


図 7-63 ガラスビーズ層積層 $\phi 1.0$ thickness 20mm – $\phi 2.0$ thickness 30mm

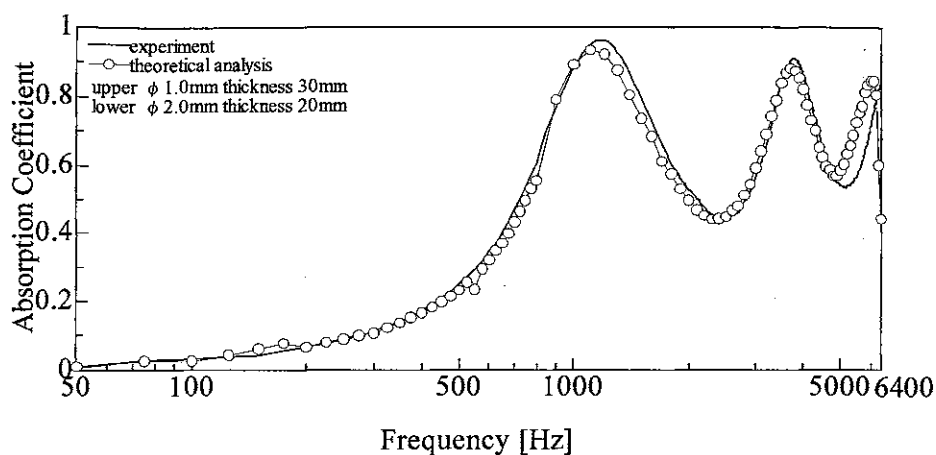


図 7-64 ガラスビーズ層積層 $\phi 1.0$ thickness 30mm – $\phi 2.0$ thickness 20mm

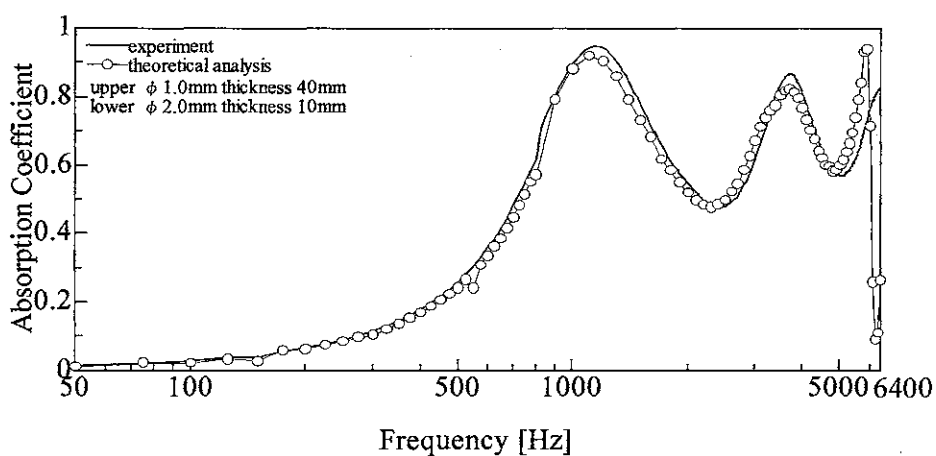


図 7-65 ガラスビーズ層積層 $\phi 1.0$ thickness 40mm – $\phi 2.0$ thickness 10mm

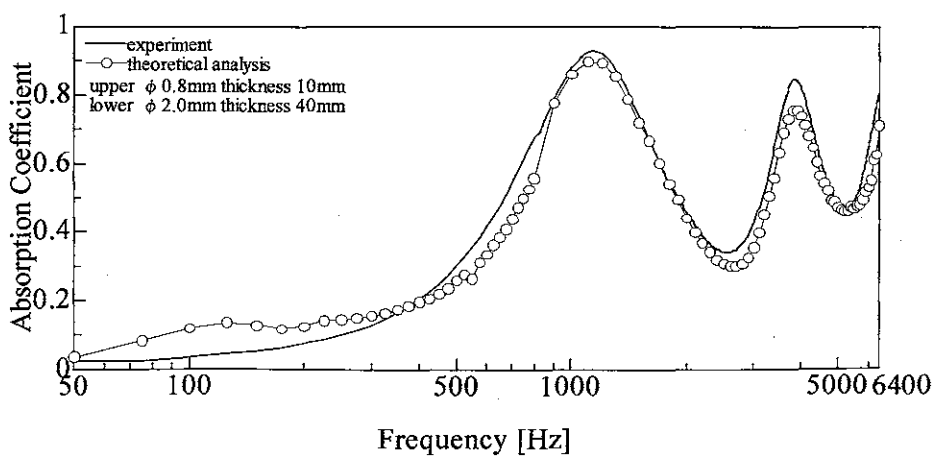


図 7-66 ガラスビーズ層積層 $\phi 0.8$ thickness 10mm – $\phi 2.0$ thickness 40mm

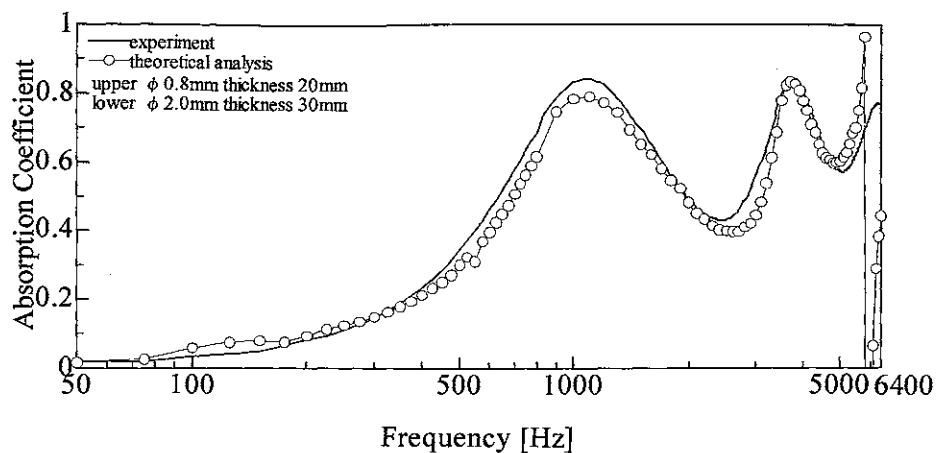


図 7-67 ガラスビーズ層積層 ϕ 0.8 thickness 20mm - ϕ 2.0 thickness 30mm

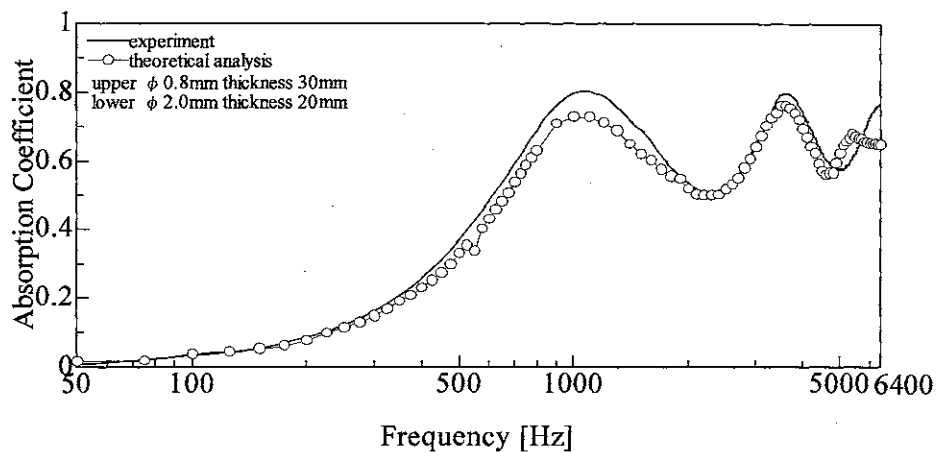


図 7-68 ガラスビーズ層積層 ϕ 0.8 thickness 30mm - ϕ 2.0 thickness 20mm

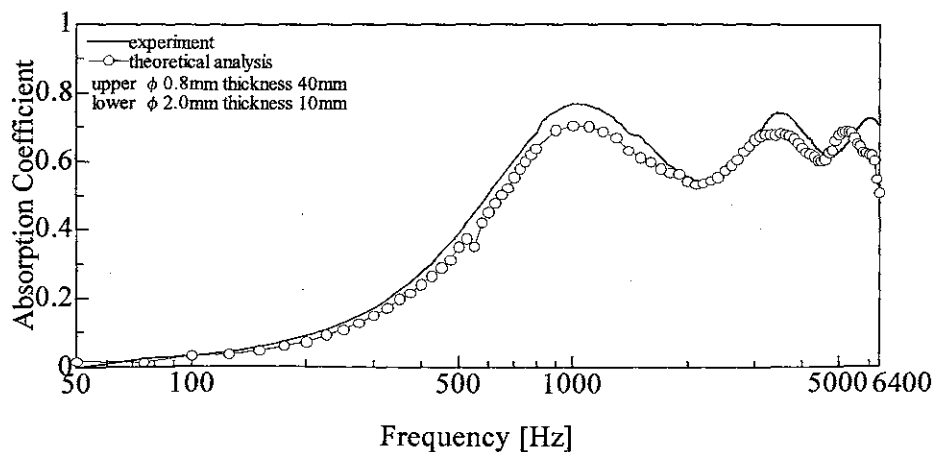


図 7-69 ガラスビーズ層積層 ϕ 0.8 thickness 40mm - ϕ 2.0 thickness 10mm

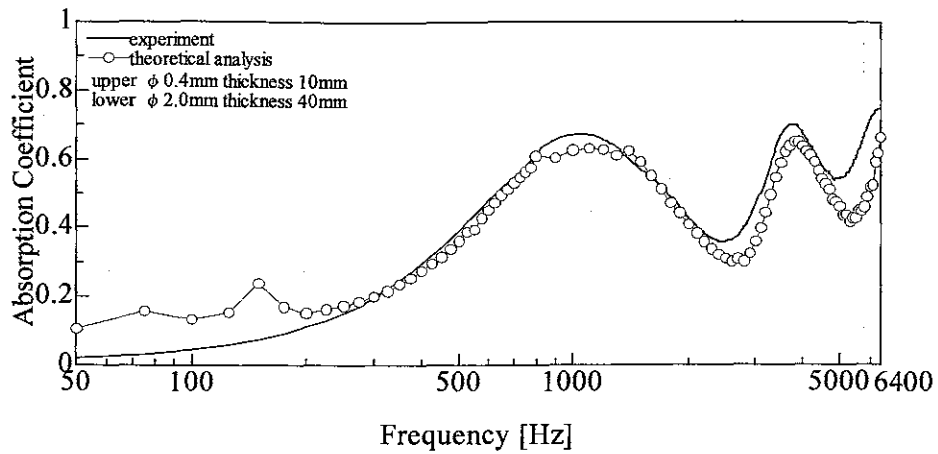


図 7-70 ガラスビーズ層積層 $\phi 0.4$ thickness 10mm – $\phi 2.0$ thickness 40mm

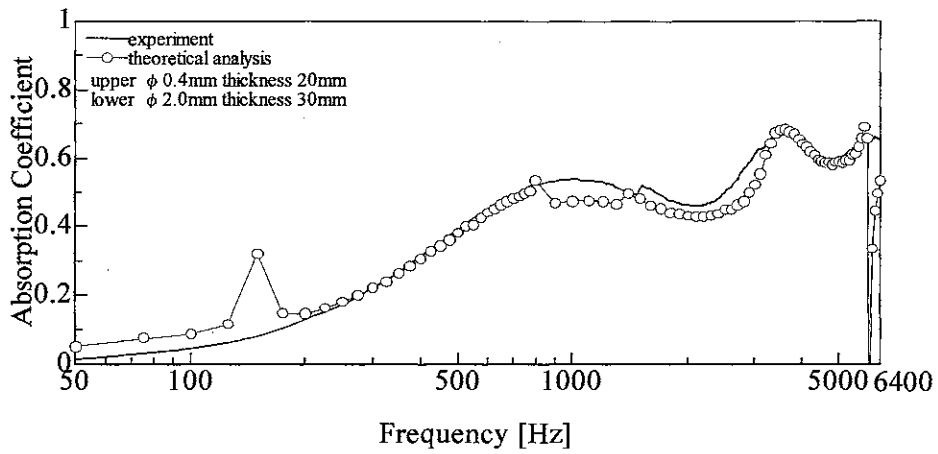


図 7-71 ガラスビーズ層積層 $\phi 0.4$ thickness 20mm – $\phi 2.0$ thickness 30mm

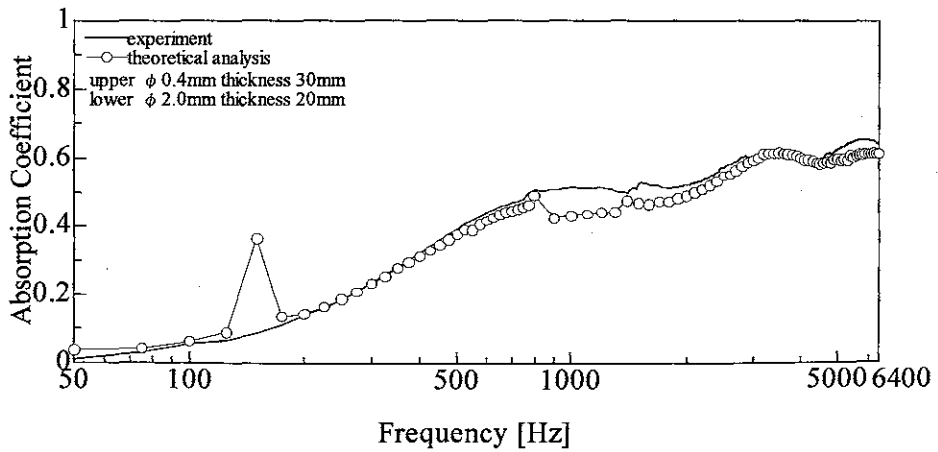


図 7-72 ガラスビーズ層積層 $\phi 0.4$ thickness 30mm – $\phi 2.0$ thickness 20mm

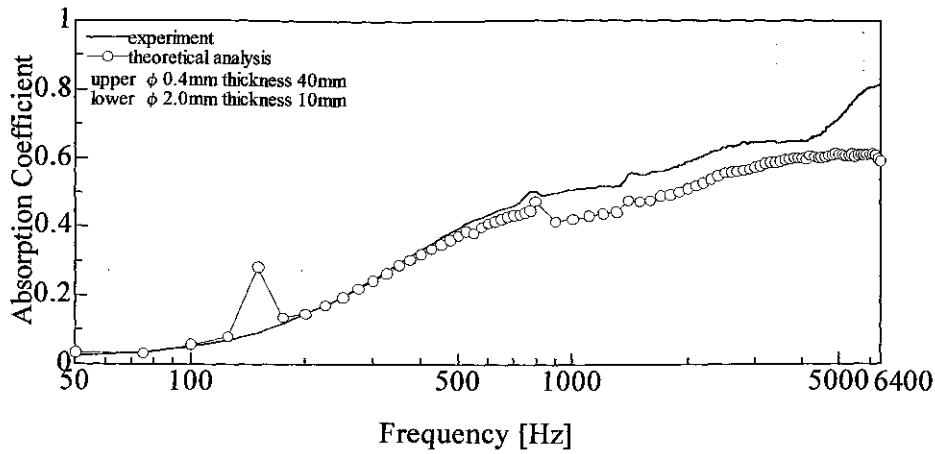


図 7-73 ガラスビーズ層積層 $\phi 0.4$ thickness 40mm – $\phi 2.0$ thickness 10mm

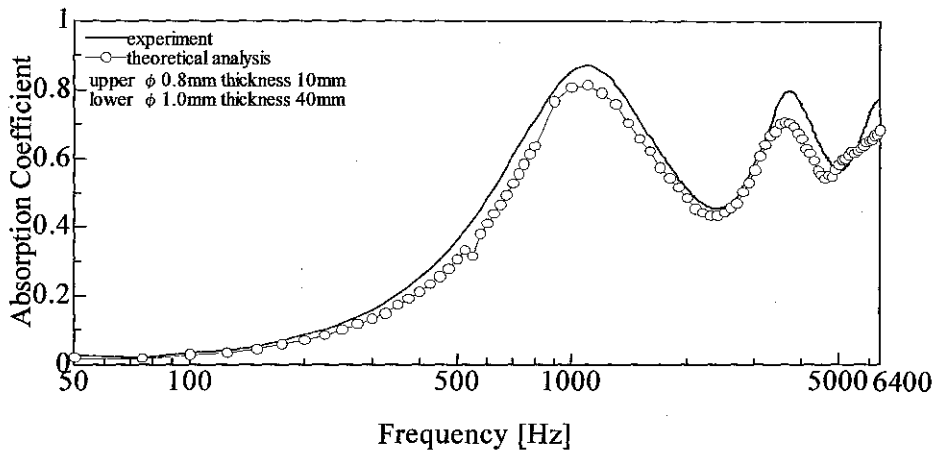


図 7-74 ガラスビーズ層積層 $\phi 0.8$ thickness 10mm – $\phi 1.0$ thickness 40mm

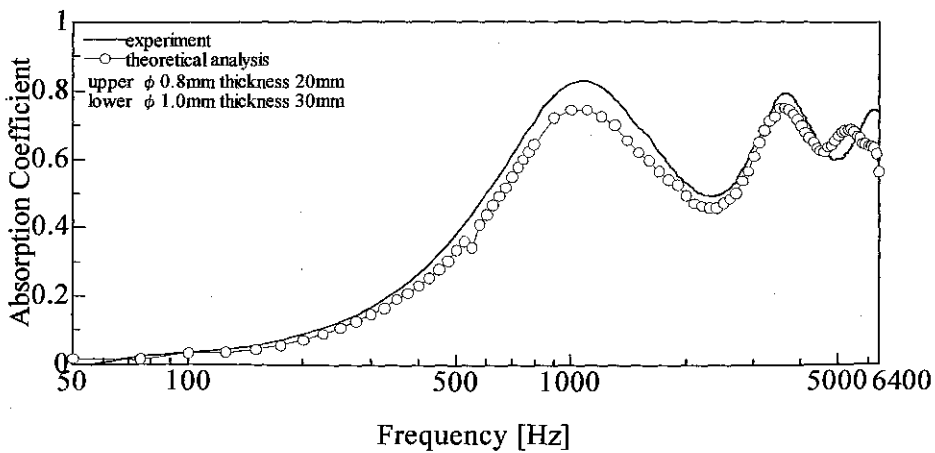


図 7-75 ガラスビーズ層積層 $\phi 0.8$ thickness 20mm – $\phi 1.0$ thickness 30mm

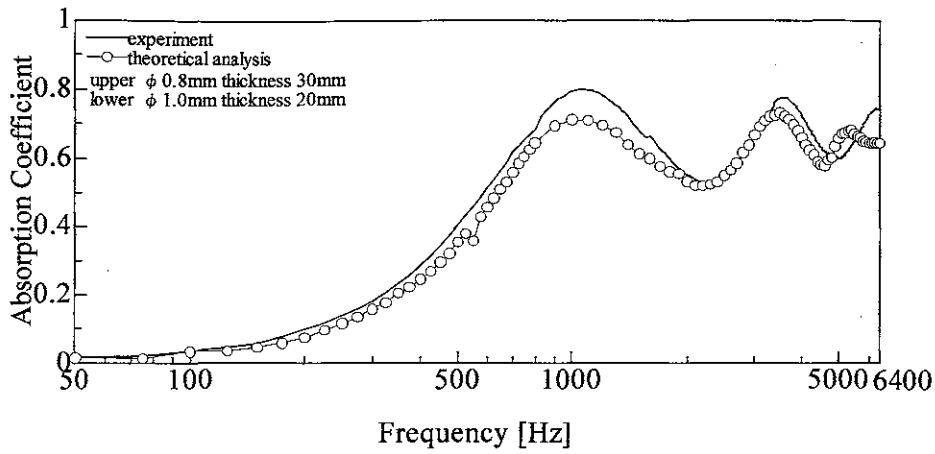


図 7-76 ガラスビーズ層積層 $\phi 0.8$ thickness 30mm – $\phi 1.0$ thickness 20mm

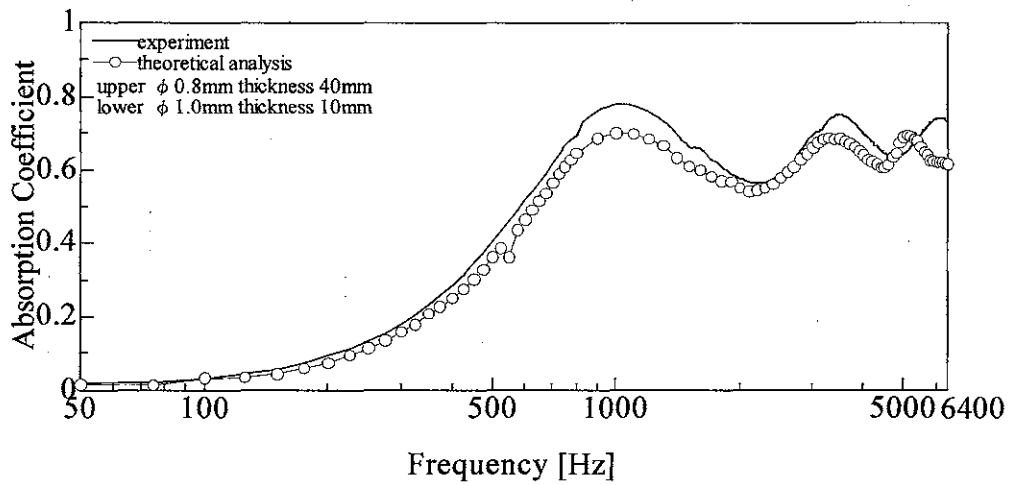


図 7-77 ガラスビーズ層積層 $\phi 0.8$ thickness 40mm – $\phi 1.0$ thickness 10mm

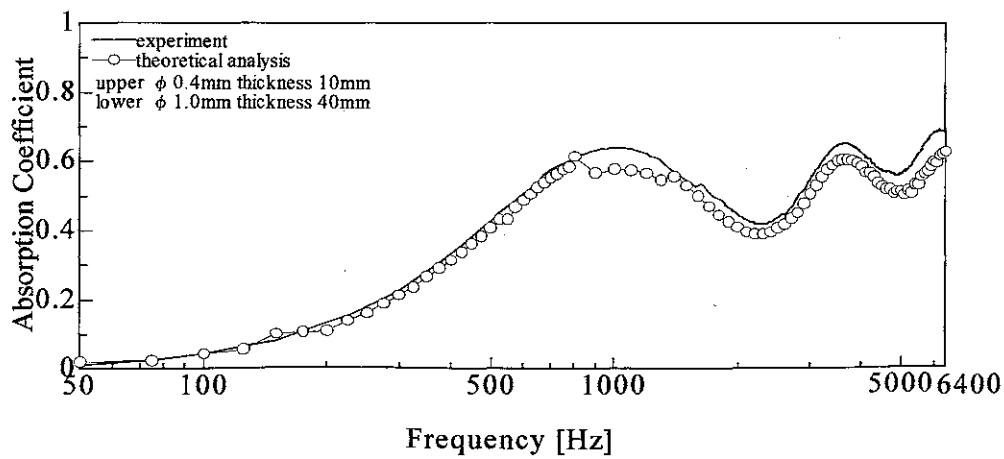


図 7-78 ガラスビーズ層積層 $\phi 0.4$ thickness 10mm – $\phi 1.0$ thickness 40mm

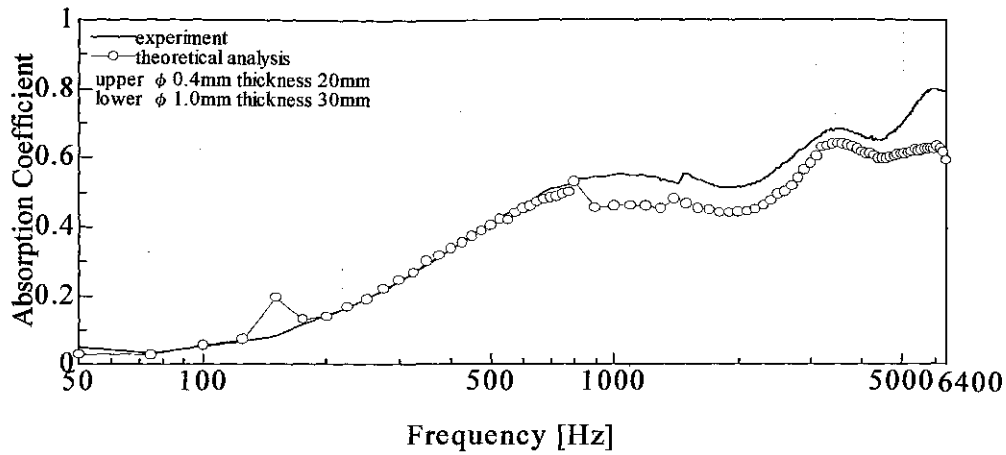


図 7-79 ガラスビーズ層積層 ϕ 0.4 thickness 20mm – ϕ 1.0 thickness 30mm

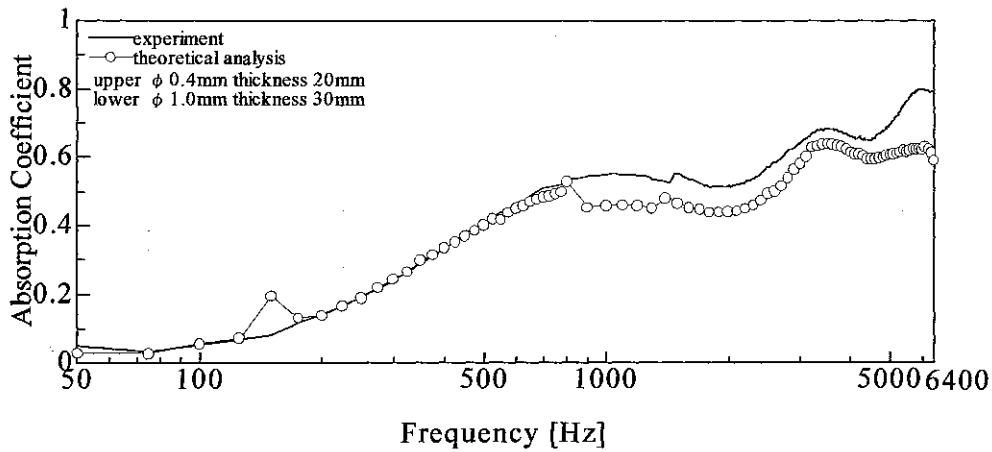


図 7-80 ガラスビーズ層積層 ϕ 0.4 thickness 30mm – ϕ 1.0 thickness 20mm

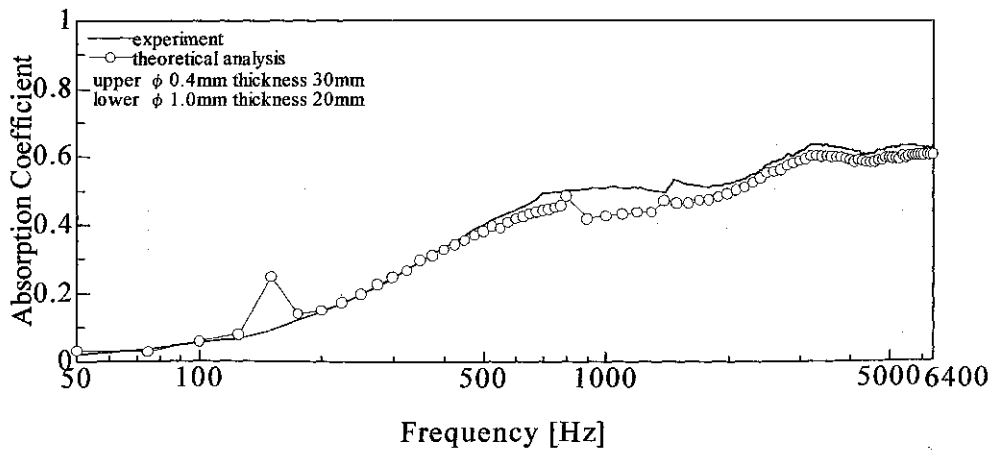


図 7-81 ガラスビーズ層積層 ϕ 0.4 thickness 40mm – ϕ 1.0 thickness 10mm

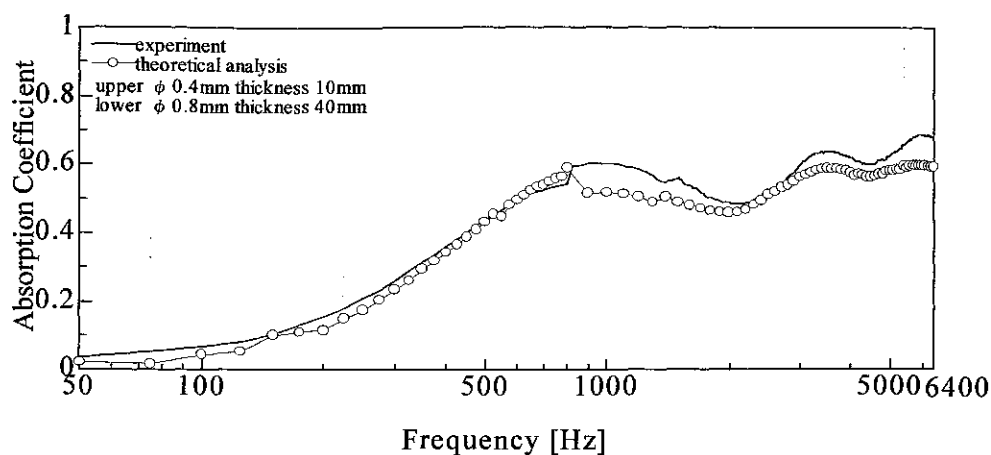


図 7-82 ガラスビーズ層積層 $\phi 0.4$ thickness 10mm – $\phi 0.8$ thickness 40mm

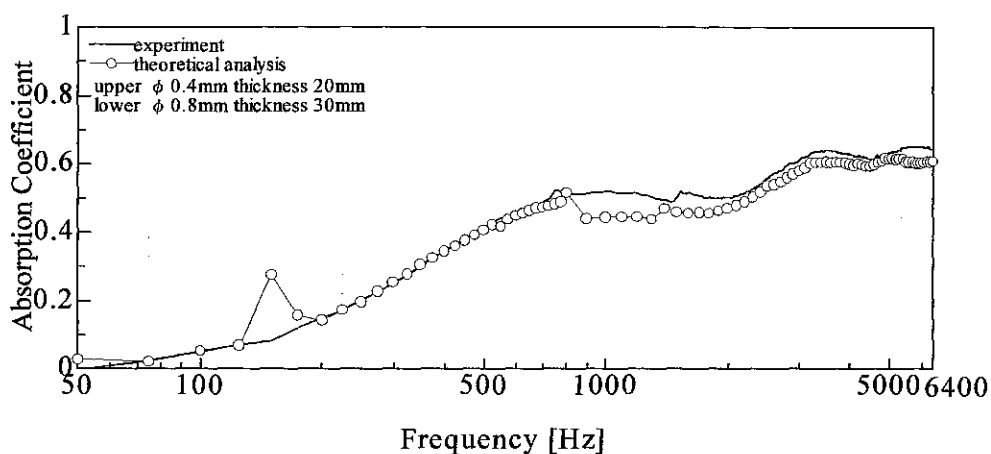


図 7-83 ガラスビーズ層積層 $\phi 0.4$ thickness 20mm – $\phi 0.8$ thickness 30mm

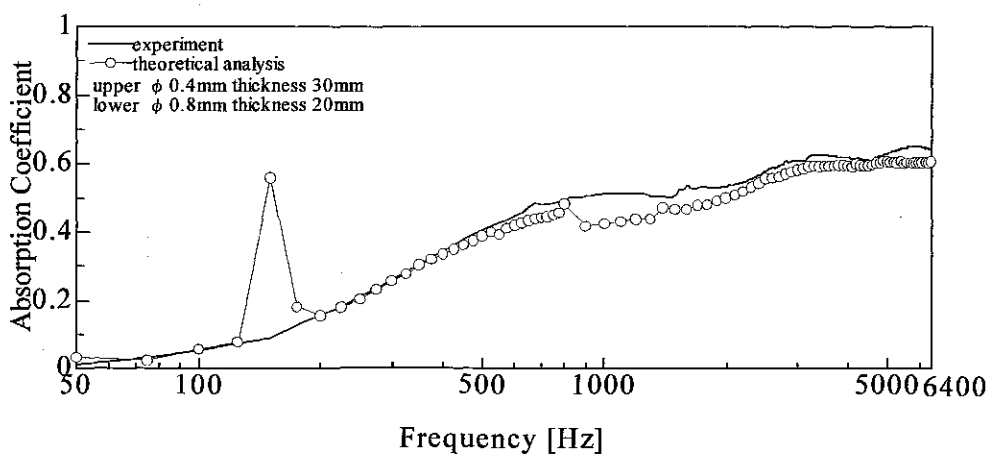


図 7-84 ガラスビーズ層積層 $\phi 0.4$ thickness 30mm – $\phi 0.8$ thickness 20mm

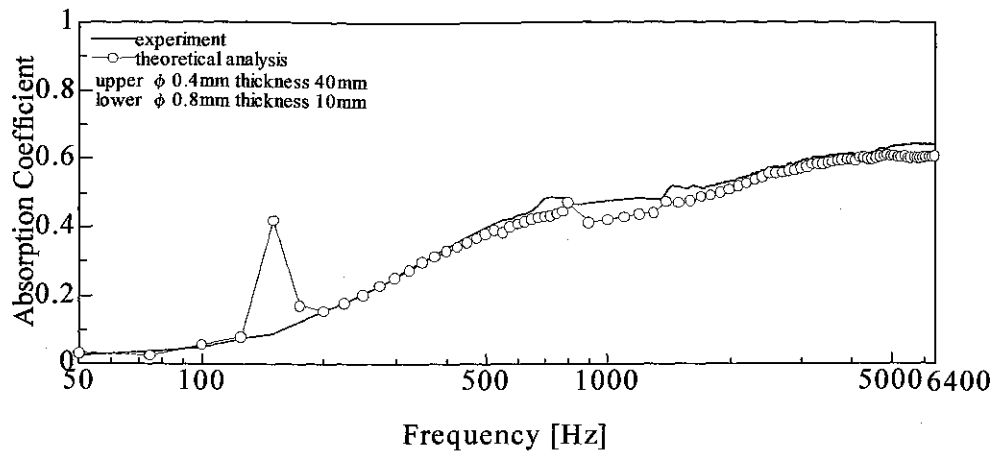


図 7-85 ガラスビーズ層積層 $\phi 0.4$ thickness 40mm – $\phi 0.8$ thickness 10mm

第8章 多孔質材料の含水率変化による吸音率の周波数特性の変化

8-1 伝達関数の測定

ガラスビーズの含水率変化による吸音率を求める前の段階として、伝達関数の周波数応答を測定する。

図 8-1 は伝達関数測定に使用した装置および周辺の測定機器の構成を示すブロック図である。FFT アナライザに内蔵されている信号発生器より、小型管測定では500～6.4kHzのサイン波の信号が増幅器を介して音響管内に放射され、系の周波数応答を2本のマイクロホンを用いてサーボ測定する。この際の測定回数は16回の加算平均を行っている。マイクロホンスイッチ前の状態では、スピーカから見て上流のマイクロホンから得た音圧信号がFFTアナライザのAチャンネル、下流側がBチャンネルに入力される。マイクロホンスイッチ後は下流側がAチャンネル、上流側がBチャンネルとなる。FFTアナライザ側ではAチャンネルへの入力を基準信号として、フーリエ変換を行い、そのパワー・スペクトル、クロス・スペクトルから伝達関数およびコヒーレンス関数などのデータが得られる。その伝達関数を用いてパーソナルコンピュータによって各種の音響特性について計算を行う。

8-2 吸音率の算出

測定された伝達関数から吸音率を求める。吸音率は伝達関数から直接求めることができ、次のように表される。

$$\alpha = 1 - |R|^2$$

伝達関数を測定する際に、マイクロホンスイッチングを行うことで、マイクロホン間の特性差を相殺する。吸音率は平均化処理を行った真の伝達関数から求めたものであり、スイッチング前および後の伝達関数から求めた吸音率を平均して求めたものではないことをここに述べておく。

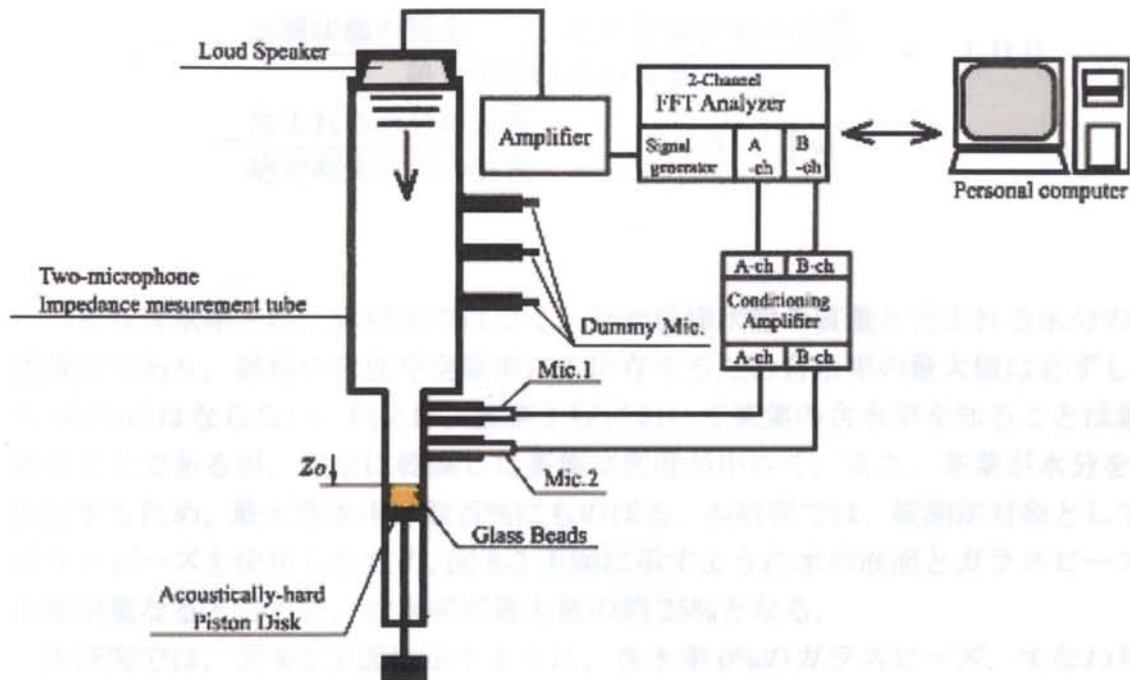


図 8-1 小型管測定のプロック図

8-3 含水率の定義

含水率(water content)は、湿潤状態の質量と絶対乾燥状態の質量を測定し、次の計算により求める。

$$\begin{aligned} \text{含水率} &= \frac{\text{湿潤状態の質量} - \text{絶対乾燥状態の質量}}{\text{絶対乾燥状態の質量}} \times 100 \\ &= \frac{\text{含まれる水分の質量}}{\text{絶対乾燥状態の質量}} \times 100 \quad [\%] \end{aligned}$$

つまり含水率とは、体積比ではなく、絶対乾燥状態の質量と含まれる水分の質量比であり、試料の密度や空隙率にも依存するため含水率の最大値は必ずしも100%にはならない。例えば、製茶工程において茶葉の含水率を知ることは重要なことであるが、完全に乾燥した茶葉は密度が小さく、また、茶葉が水分を吸収するため、最大含水率は数百%にもものぼる。本研究では、被測定対象としてガラスビーズを使用したため、図8-2 下図に示すように水の液面とガラスビーズ上面が重なるところで、含水率が最大値の約25%となる。

本研究では、図8-2 上図に示すように、含水率0%のガラスビーズ、すなわち絶対乾燥状態の試料の質量、また、加える水の質量を測定し含水率を決定した上で、測定を行った。

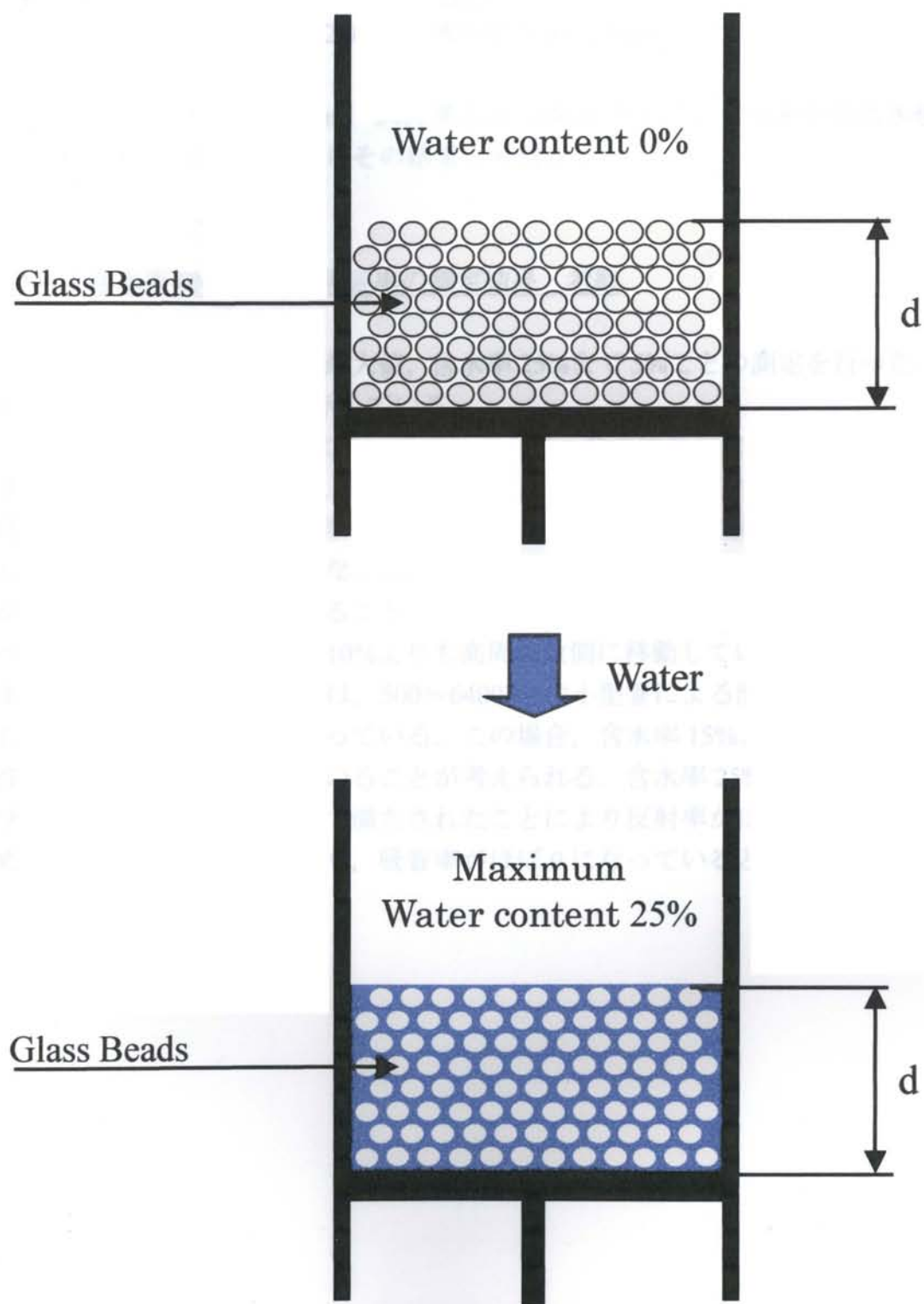


図 8-2 使用したガラスビーズにおける含水率 0%と 25%の状態

8-4 含水率変化による吸音率の測定結果

(ガラスビーズ粒径 $\phi 2.0\text{mm}$, 試料厚さ $d=20\text{mm}$)

ガラスビーズ粒径 $\phi 2.0\text{mm}$, 試料厚さ $d=20\text{mm}$ として, 含水率を変化させて吸音率を算出した. 次項からその結果と考察を示す.

8-4-1 含水率 0%~25%の吸音率の測定結果・考察

本実験における含水率の最大値, 含水率 25%まで 5%ごとの測定を行った. 図 8-3 はその吸音率の結果を示している.

含水率 0%, 5%, 10%, 15% について注目すると, 含水率変化による吸音率のピーク値の変化はほとんどなく, それぞれのピーク周波数において, 高い吸音率を得られている. ピーク周波数については, 含水率 0% から含水率 5% へは, ほとんど変化を見ることができないが, 含水率 5% から含水率 10% へはピーク周波数が高周波数側に移動していることがわかる. また含水率 10% から含水率 15% については, ピークが含水率 10% よりも高周波数側に移動していることがわかる. また, 含水率 20% については, 500~6400Hz の小型管による測定可能周波数において吸音率が 0 に近くなっている. この場合, 含水率 15% よりもさらに高周波数側にピークが移動していることが考えられる. 含水率 25% については, ガラスビーズの空隙がほぼ水で満たされたことにより反射率がほぼ 1 になったため, どの周波数帯においても, 吸音率がほぼ 0 になっていると考えられる.

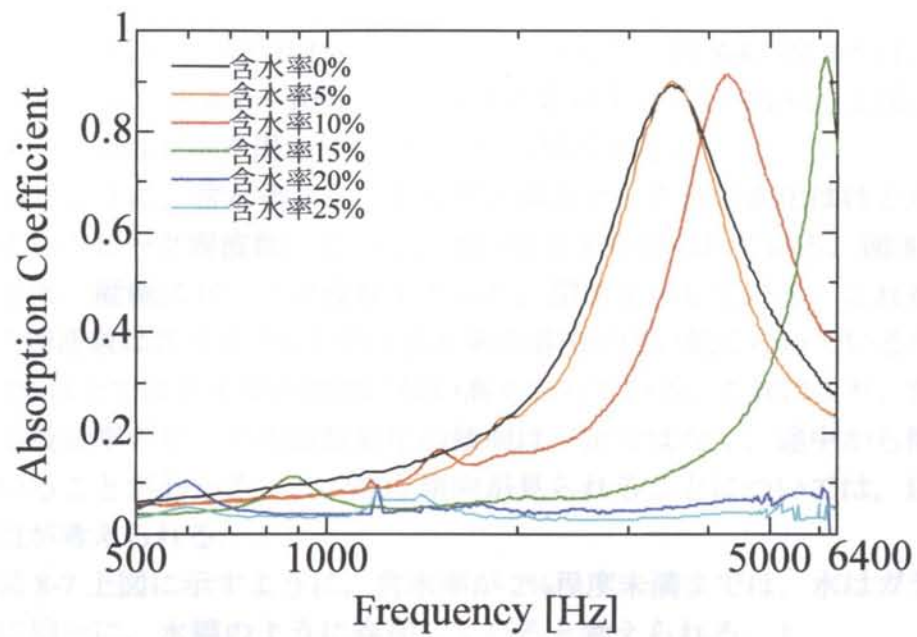


図 8-3 含水率変化による吸音率
 粒径 2.0mm, 試料厚さ 20mm, 含水率 0~25%

8-4-2 含水率 0%~10%の吸音率の測定結果・考察

含水率 0%~10%まで含水率 1%ごとの測定を行った。図 8-4, 図 8-5 は, それぞれ含水率 0~5%, 含水率 6~10%の吸音率の測定結果を示している。上図は吸音率の全体図, 下図はピーク周辺についての拡大図である。

前項と同じように, 含水率変化による吸音率のピーク値の変化はほとんどなく, それぞれのピーク周波数において, 高い吸音率を得られている。図 8-6 は, 横軸に含水率, 縦軸にピーク周波数をとった, 関係を示している。これを見ると, ピーク周波数は含水率 2%までは含水率の増加に伴い低くなっているが, 逆に含水率 2%以上では含水率の増加に伴い高くなっている。これにより, 含水率変化による吸音率のピーク周波数変化の傾向は一定ではなく, 途中から傾向が変わっていることがわかる。このような傾向が見られることについては, 以下に述べる原因が考えられる。

まず, 図 8-7 上図に示すように, 含水率が 2%程度未満までは, 水はガラスビーズ表面に均一に, 水膜のように存在していると考えられる。しかし, 含水率が 2%以上に高くなると, 図 8-7 下図に示すように, 管の底に水が溜まり, ガラスビーズが水没した層が出来る。このガラスビーズが水没した層が出来ることは実験により目視で確認ができた。このガラスビーズが水没した層は, 含水率が最大の状態, つまり, 含水率が約 25%の状態であると考えられるが, 図 8-8 に示すように, 含水率 25%の場合と剛壁の場合の吸音率は, 含水率 20%の場合や水についての吸音率と同様に, ほぼ 0 になっていることがわかる。このことから, 含水率 25%の場合はほぼ剛壁とみなすことが出来ると考えられる。すなわちガラスビーズが水没した層も剛壁とみなすことが出来るため, 図 8-7 下図に示すように, 実際の試料厚さは d であるが, 見かけ上の試料厚さは d' のように薄くなっていると考えられる。

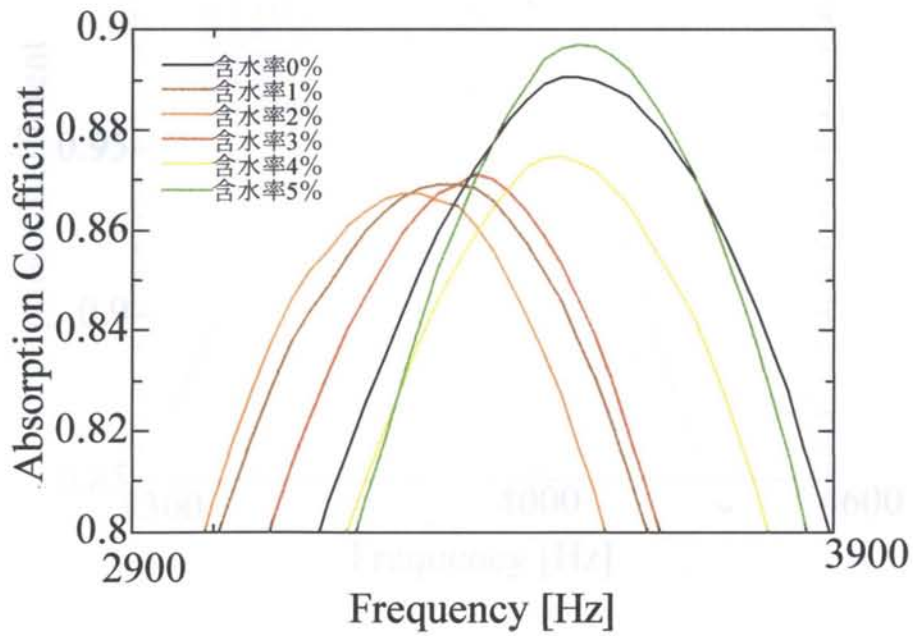
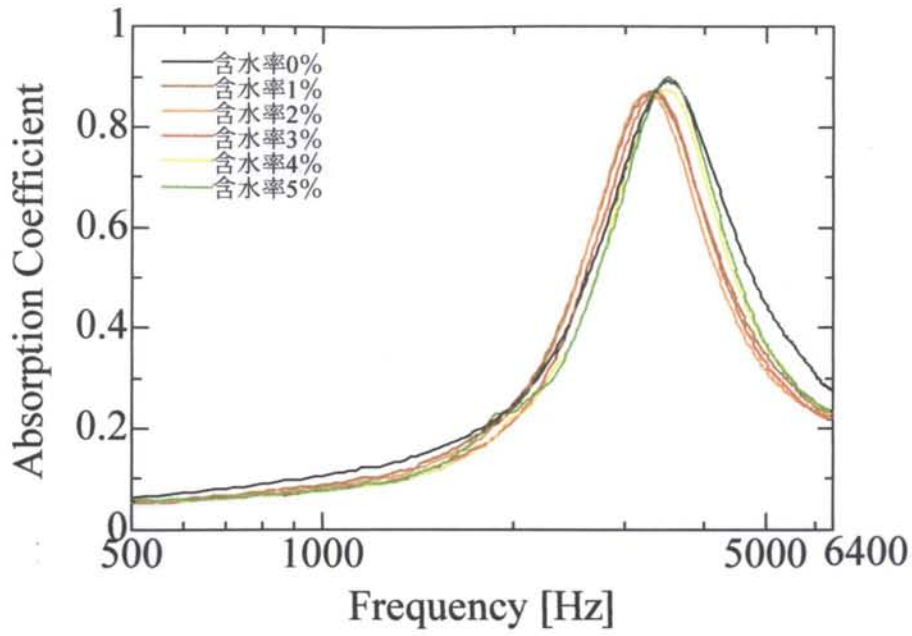


図 8-4 含水率変化による吸音率の周波数特性
 粒径 2.0mm, 試料厚さ 20mm, 含水率 0~5%

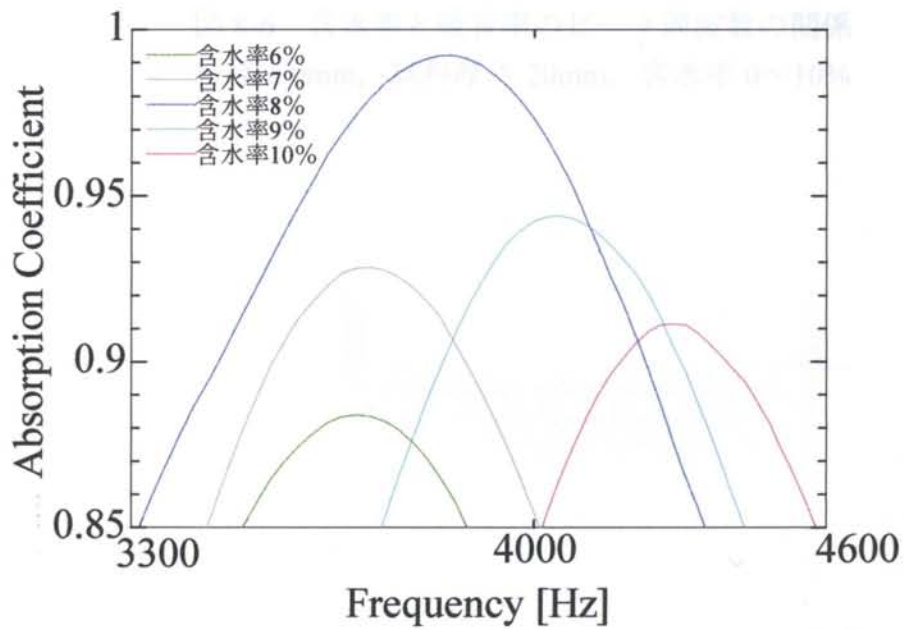
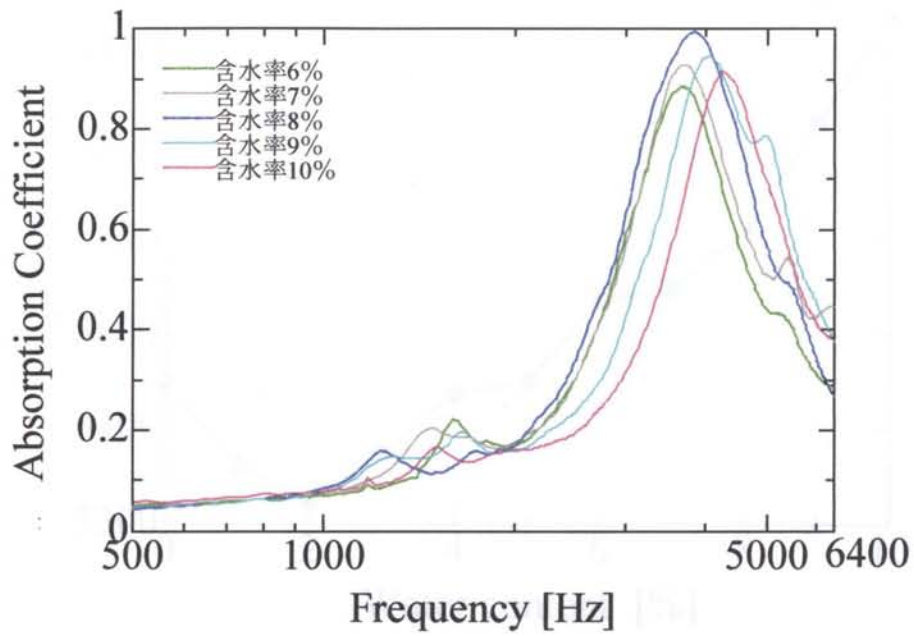


図 8-5 含水率変化による吸音率の周波数特性
粒径 2.0mm, 試料厚さ 20mm, 含水率 6~10%

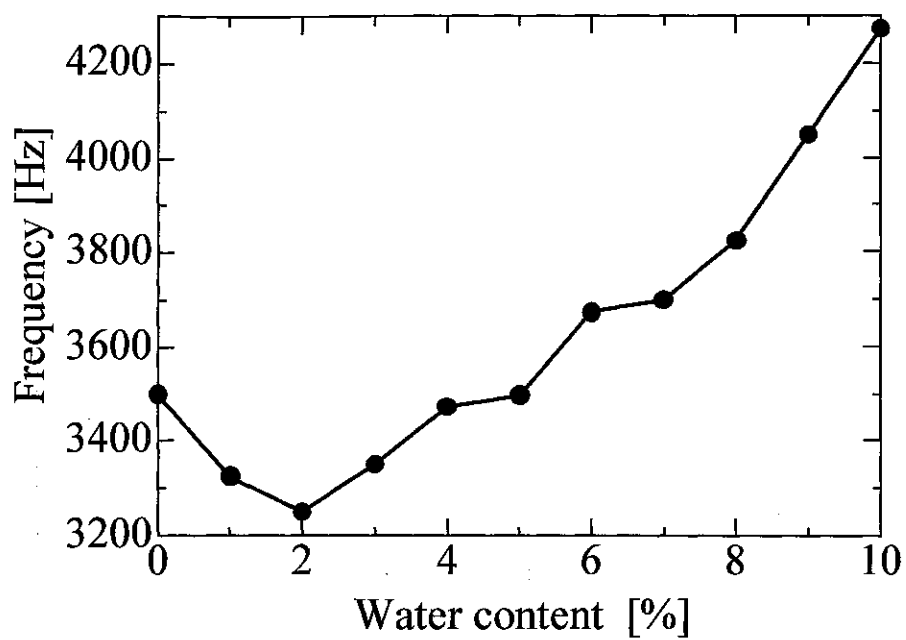


図 8-6 含水率と吸音率のピーク周波数の関係
粒径 2.0mm, 試料厚さ 20mm, 含水率 0~10%

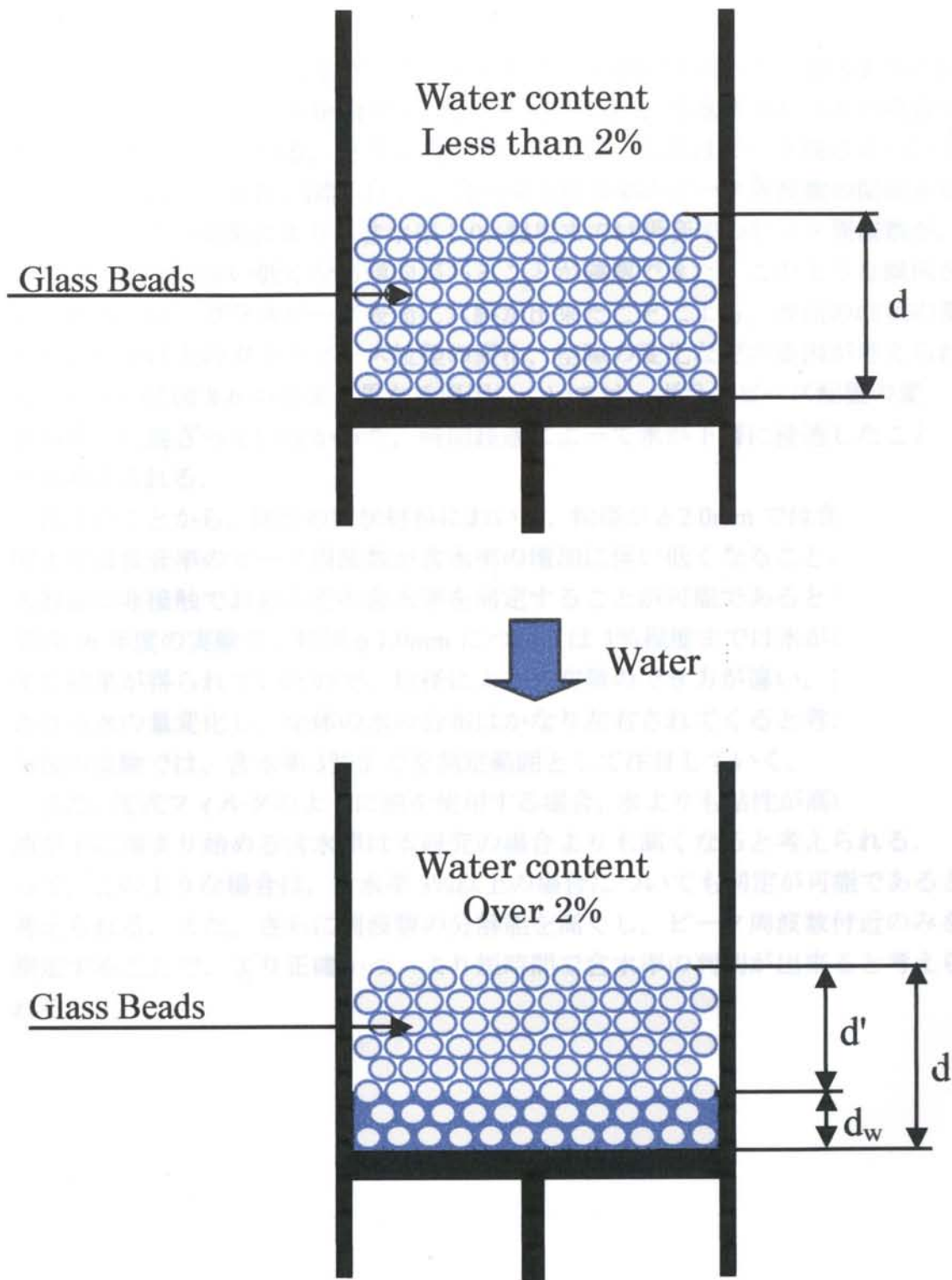


図 8-7 使用したガラスビーズにおける含水率 2%未満と 2%以上の状態

8-4-3 含水率 0～3%の吸音率の測定結果・考察

さらに、含水率 0～3%まで、含水率 0.2%ごとの測定を行った。図 8-8 から図 8-10 は、それぞれ含水率 0～1.0%、含水率 1.2～2.0%、含水率 2.2～3.0 の吸音率の測定結果を示している。上図は吸音率の全体図、下図はピーク周辺についての拡大図である。また、図 8-11 は、含水率と吸音率のピーク周波数の関係を示している。この結果により、含水率 2.0%程度までは吸音率のピーク周波数が、含水率の増加に伴い低くなる傾向があることが確認できた。このような傾向が見られるのは、ガラスビーズ表面に水膜が出来たことによる、表面の性状の変化や、見かけ上のガラスビーズ粒径の変化、空隙の変化などの要因が考えられる。わずかに図 8-6 の結果と異なる原因については、ガラスビーズ配置の変化、水が均一に混ざっていなかった、時間経過によって水が下層に浸透したことなどが考えられる。

以上のことから、球形の粒状材料において、粒径が $\phi 2.0\text{mm}$ では含水率 2%程度までは吸音率のピーク周波数が含水率の増加に伴い低くなることを利用して、入射面に非接触でおおよその含水率を同定することが可能であると考えられる。平成 16 年度の実験で、粒径 $\phi 1.0\text{mm}$ については 3%程度までは水が均一に分布する結果が得られていたので、粒径によって空隙のでき方が違い、空隙に保持される水の量変化し、全体の水の分布はかなり左右されてくると考えられる。今後の実験では、含水率 3%までを測定範囲として注目していく。

また、湿式フィルタのように油を使用する場合、水よりも粘性が高い油では、油が下に溜まり始める含水率は本研究の場合よりも高くなると考えられる。よって、このような場合は、含水率 3%以上の場合についても同定が可能であると考えられる。また、さらに周波数の分解能を高くし、ピーク周波数付近のみを測定することで、より正確かつ、より短時間で含水率の判別が出来ると考えられる。

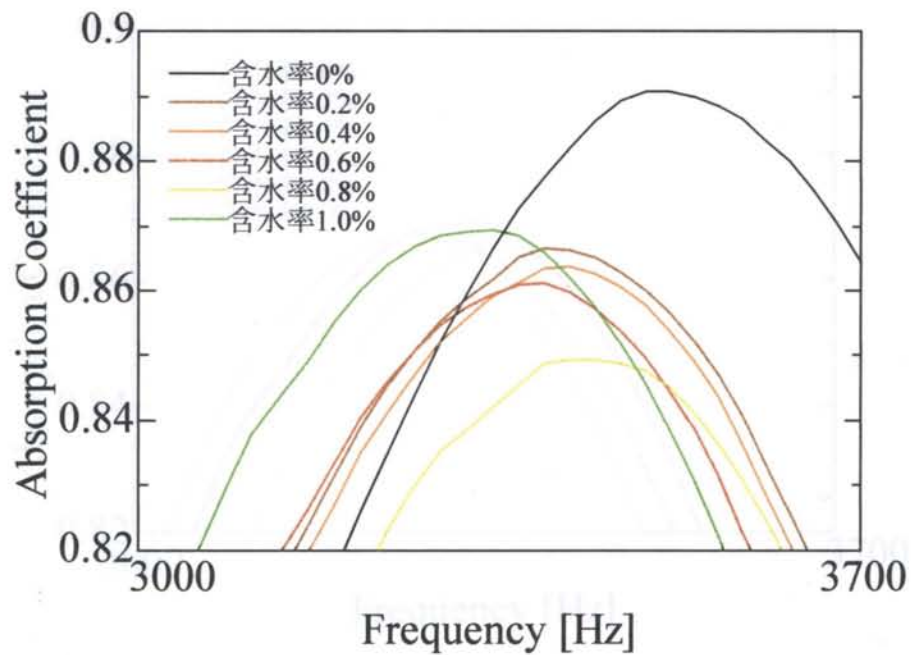
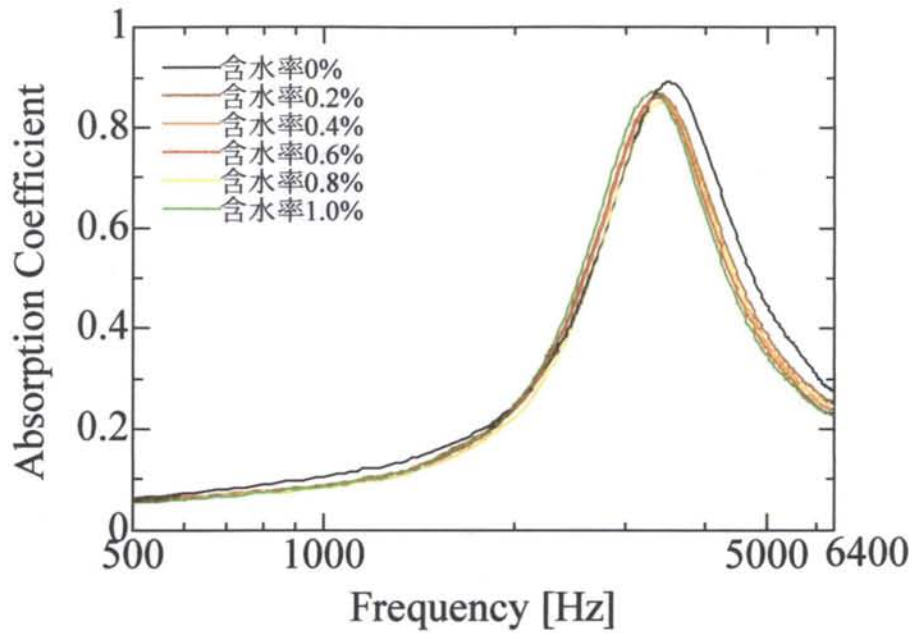


図 8-8 含水率変化による吸音率の周波数特性
 粒径 2.0mm, 試料厚さ 20mm, 含水率 0~1%

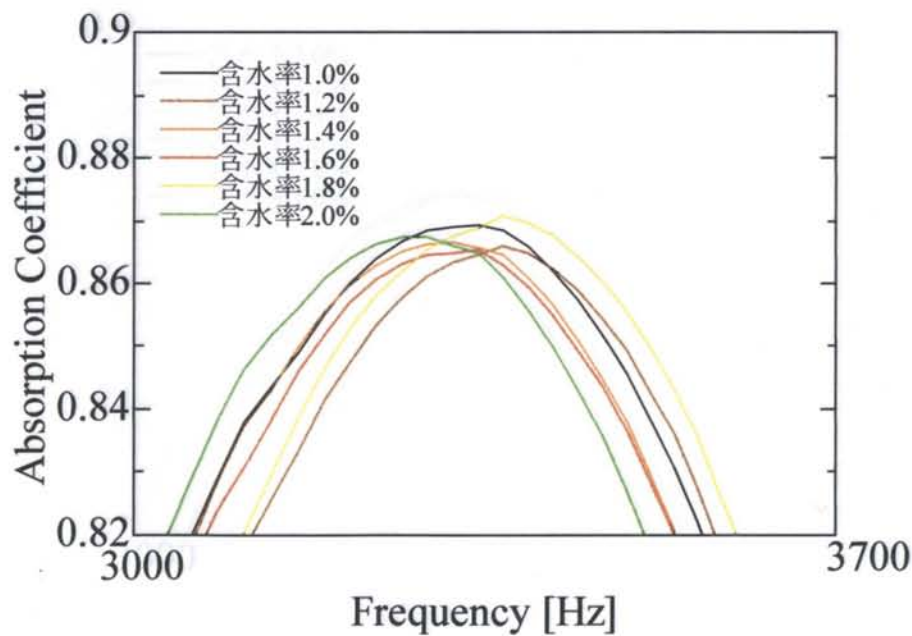
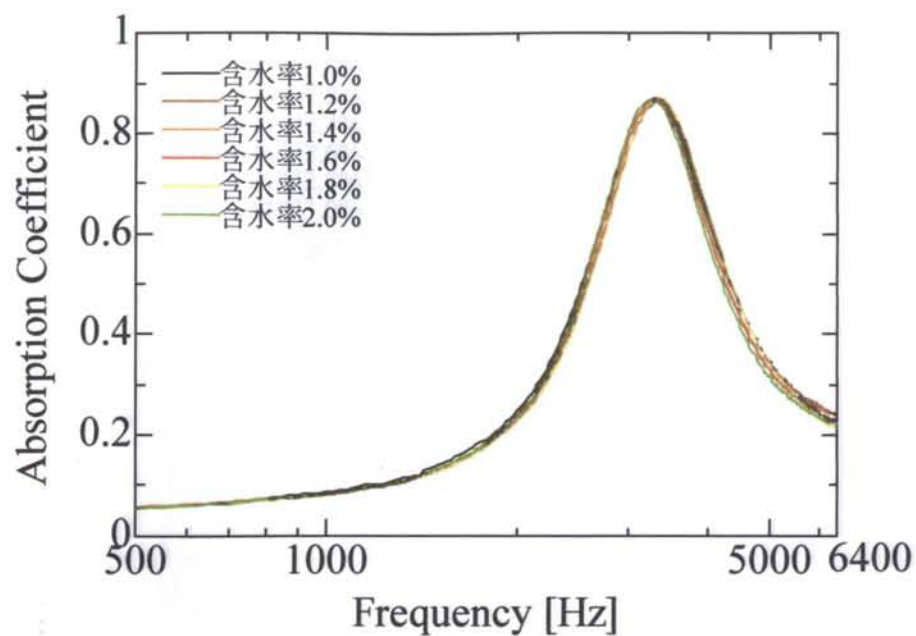


図 8-9 含水率変化による吸音率の周波数特性
 粒径 2.0mm, 試料厚さ 20mm, 含水率 1.2~2.0%

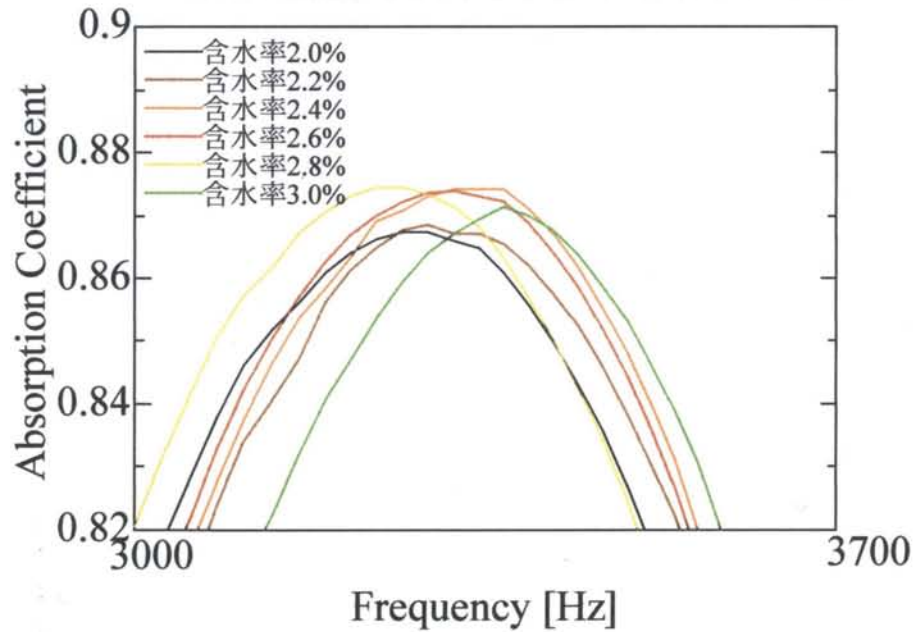
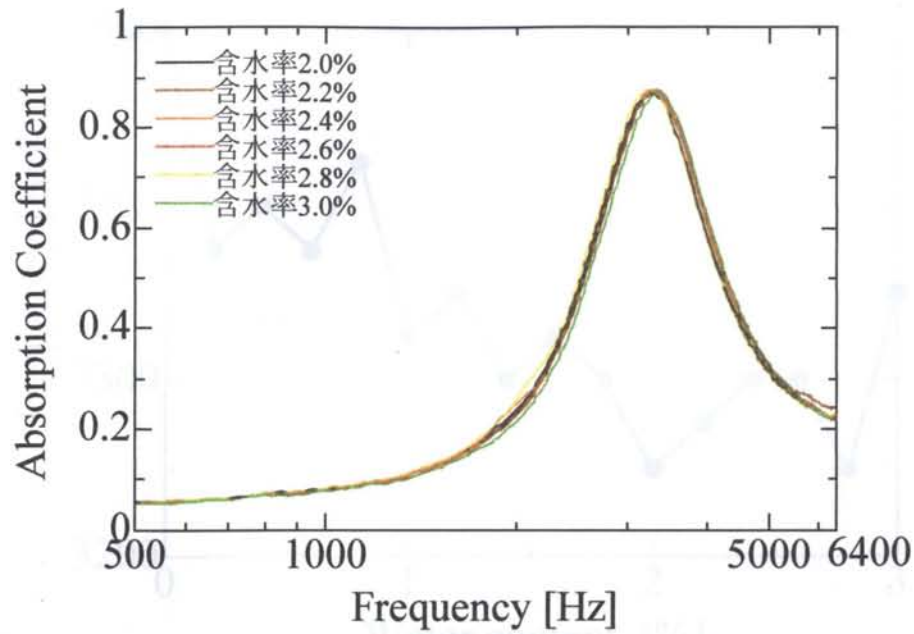


図 8-10 含水率変化による吸音率の周波数特性
 粒径 2.0mm, 試料厚さ 20mm, 含水率 2.2~3.0%

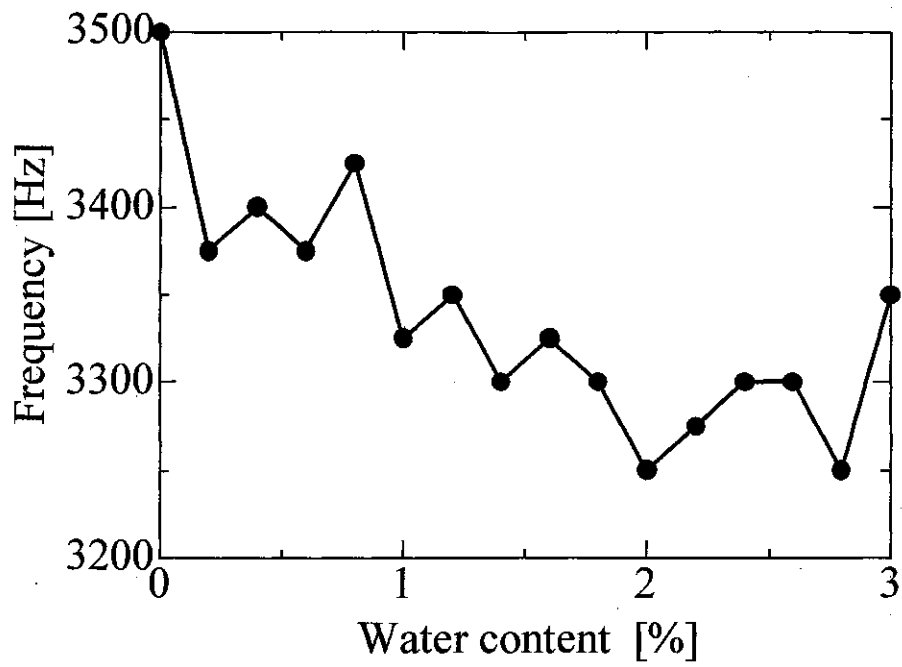


図 8-11 含水率と吸音率のピーク周波数の関係
粒径 2.0mm, 試料厚さ 20mm, 含水率 0~3.0%

8-5 含水率変化による吸音率の測定結果

(ガラスビーズ粒径 $\phi 1.0\text{mm}$, 試料厚さ $d20\text{mm}$)

8-5-1 含水率 0～3%の測定結果・考察

粒径を $\phi 1.0\text{mm}$ 試料厚さ 20mm として、実験を行った。ただし、水の滴下には、ピペットと精密はかりを使用し、 0.1% ごとの測定とした。

図 8-12 から図 8-14 は、それぞれ含水率 0～1.0%, 含水率 1.2～2.0%, 含水率 2.2～3.0 の吸音率の測定結果を 0.2% ごとに示している。上図は吸音率の全体図、下図はピーク周辺についての拡大図である。また、図 8-15 は、横軸に含水率、縦軸に一つ目のピーク周波数をとった、含水率と吸音率のピーク周波数の関係を示している。

この結果により、含水率 3%程度までは吸音率のピーク周波数が、含水率の増加に伴い低くなる傾向があることが確認できた。このような傾向が見られるのは、ガラスビーズ表面に水膜が出来たことによる、表面の性状の変化や、見かけ上のガラスビーズ粒径の変化、空隙の変化などの要因が考えられる。

これは図 8-15 上図の変化と同様であり、再現性があると考えられる。

以上のことから、多孔性材料において、含水率 3%程度までは吸音率のピーク周波数が含水率の増加に伴って低くなることを利用して、入射面に非接触でおおよその含水率を同定することが可能であると考えられる。また、水よりも粘性が高い液体の場合、液体が下に溜まり始める含水率は水を用いた場合よりも高くなると考えられる。

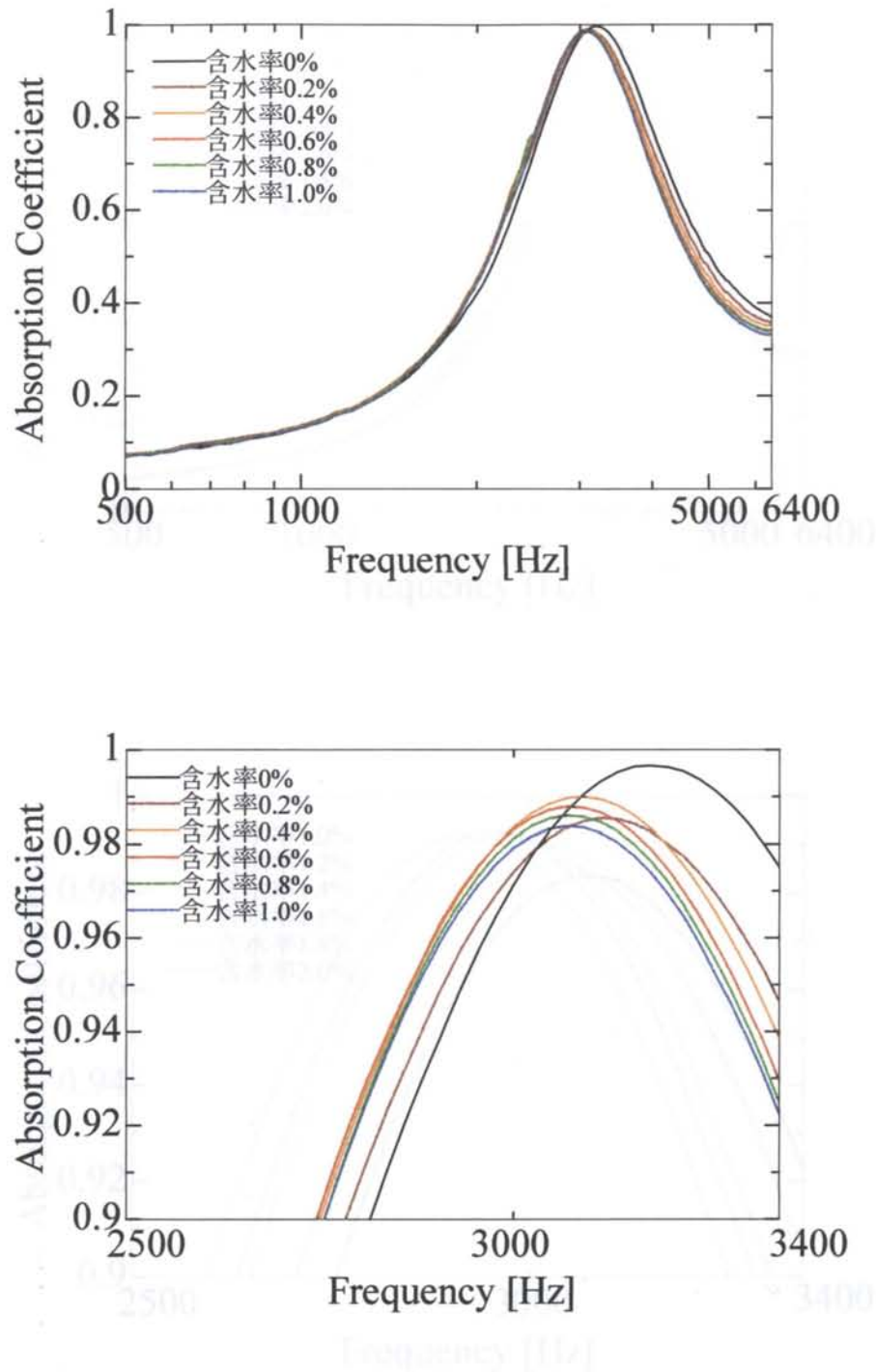


図 8-12 含水率変化による吸音率の周波数特性
粒径 1.0mm, 試料厚さ 20mm, 含水率 0~1.0%

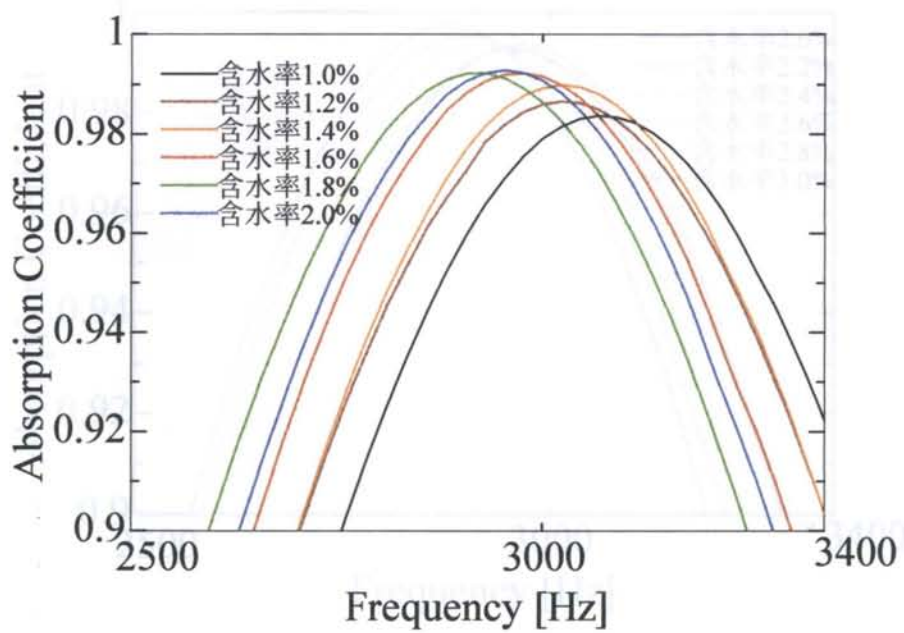
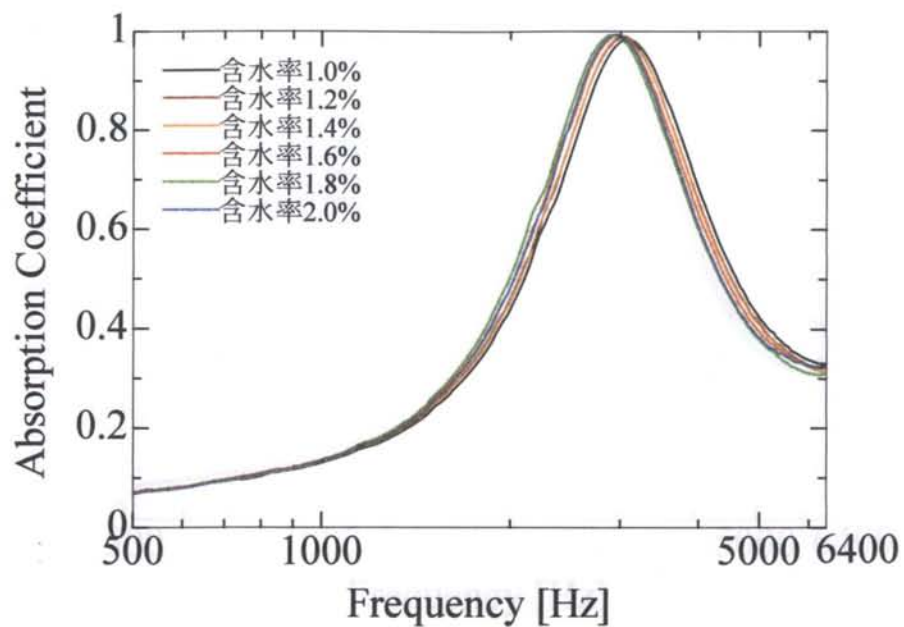


図 8-13 含水率変化による吸音率の周波数特性
粒径 1.0mm, 試料厚さ 20mm, 含水率 1.0~2.0%

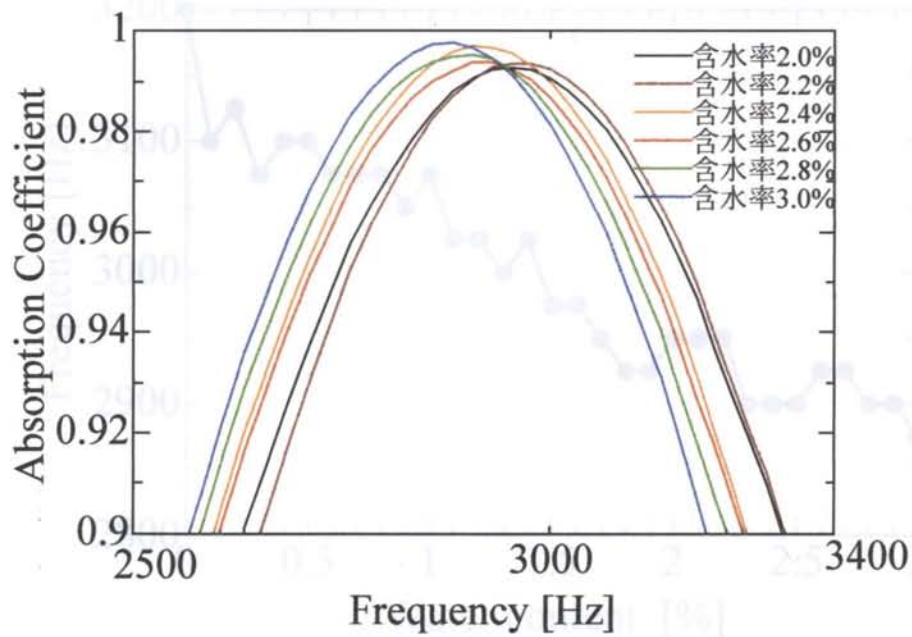
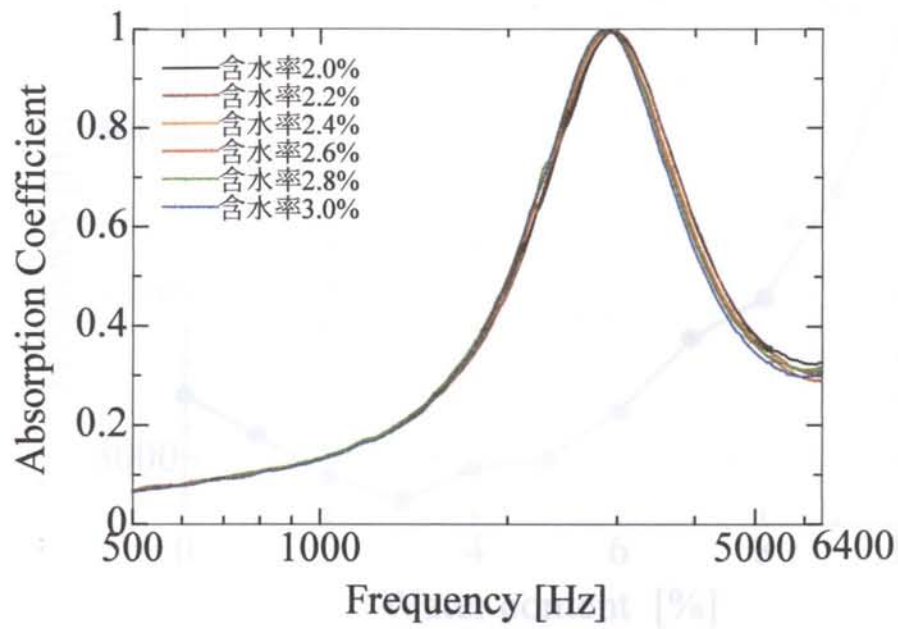


図 8-14 含水率変化による吸音率の周波数特性
粒径 1.0mm, 試料厚さ 20mm, 含水率 2.0~3.0%

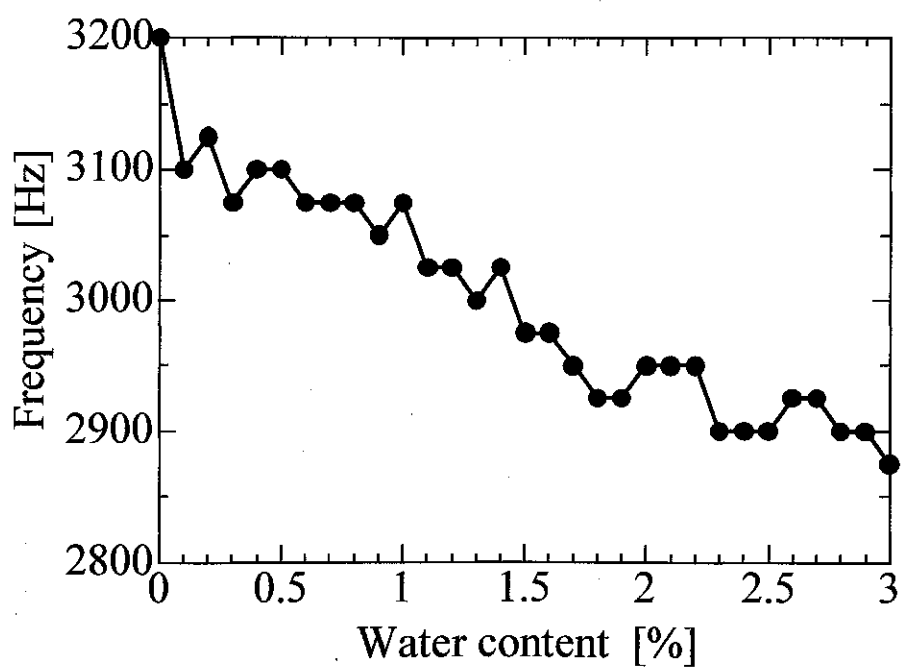
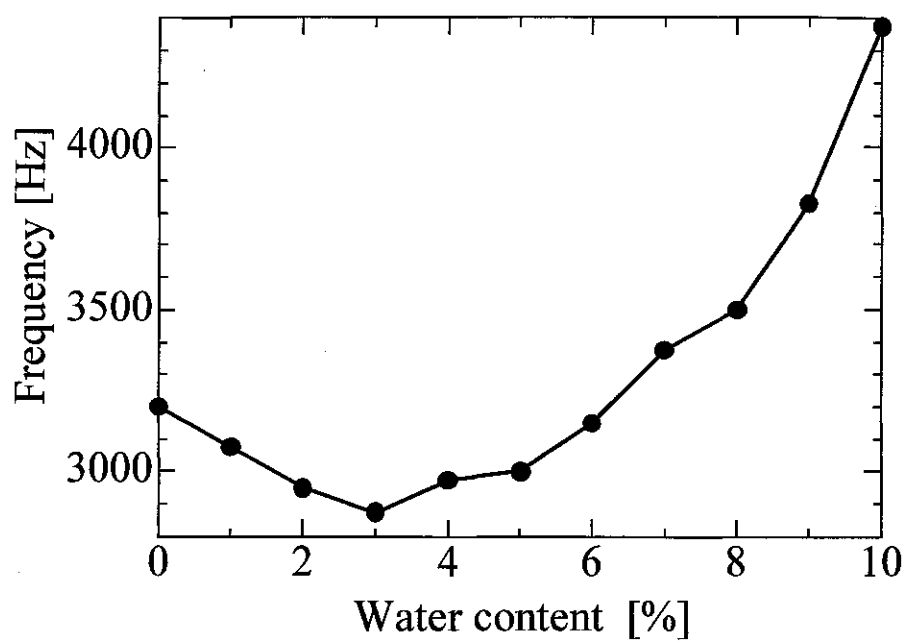


図 8-15 含水率と吸音率のピーク周波数の関係
 粒径 1.0mm 試料厚さ 20m (上)含水率 0~10%(下) 含水率 0~3.0%

第9章 4 マイクロホン法による多孔質材料の

透過損失測定

9-1 概要

本研究では、これまで試料の透過損失の計算には 2 マイクロホンインピーダンスチューブを使用し、特性音響インピーダンス・複素波定数を測定し、それらにより間接的に計算で求めていた。そこで、近年注目されている、試料に音を透過させる前後にマイクロホンを配した 4 マイクロホン法を使用した透過損失の測定を新たに行い、基礎的なデータの収集を行う。それによって、多孔質の薄膜材料の正確な透過損失を測定できることが期待される。

9-2 測定機器

本実験で使用した測定機器は以下の通りである。

1) 測定用 PC

AD 変換ボード：マイクロサイエンス社製 ADM-686zPCI

4ch 同時サンプル回路ユニット：マイクロサイエンス社製 SHU-004BRD

データ計測解析ソフトウェア：松山アドバンス社製 LaBDAQ-PRO

2) FFT デジタルスペクトルアナライザ

アドバンテスト社製 R9211C

分析レンジ 10, 20, 50, 100, 200, 500Hz

1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500Hz

1, 2, 5, 10, 20, 50, 100kHz

分解能 25～3200lines (1 channel)

25～1600lines (2 channel)

3) スピーカ駆動用アンプ

NF ELECTRONIC INSTRUMENTS 4010

High Speed Power Amplifier / Bipolar Power Supply

4) 4 マイクロホンインピーダンスチューブ (図 9-1)

ブリュエル&ケア (B&K) 社製 4206T 型

Frequency Range:

Large Tube (大型測定管): 50Hz to 1.6kHz

Small Tube (小型測定管): 500Hz to 6.4kHz

Weight (with accessories): 12kg

※スピーカ

Max. Average Power: 10W at 20°C

Max. Pulsed Power: 50W for 2 seconds

Impedance: 4 Ω

Diameter: 80mm

5) マイクロホン用増幅器

B&K 社製 2690 型 NEXUS シリーズ コンディショニングアンプ

6) 1/4 インチマイクロホン用プリアンプ

B&K 社製 2633 型

7) 1/4 インチマイクロホン

B&K 社製 4187 型

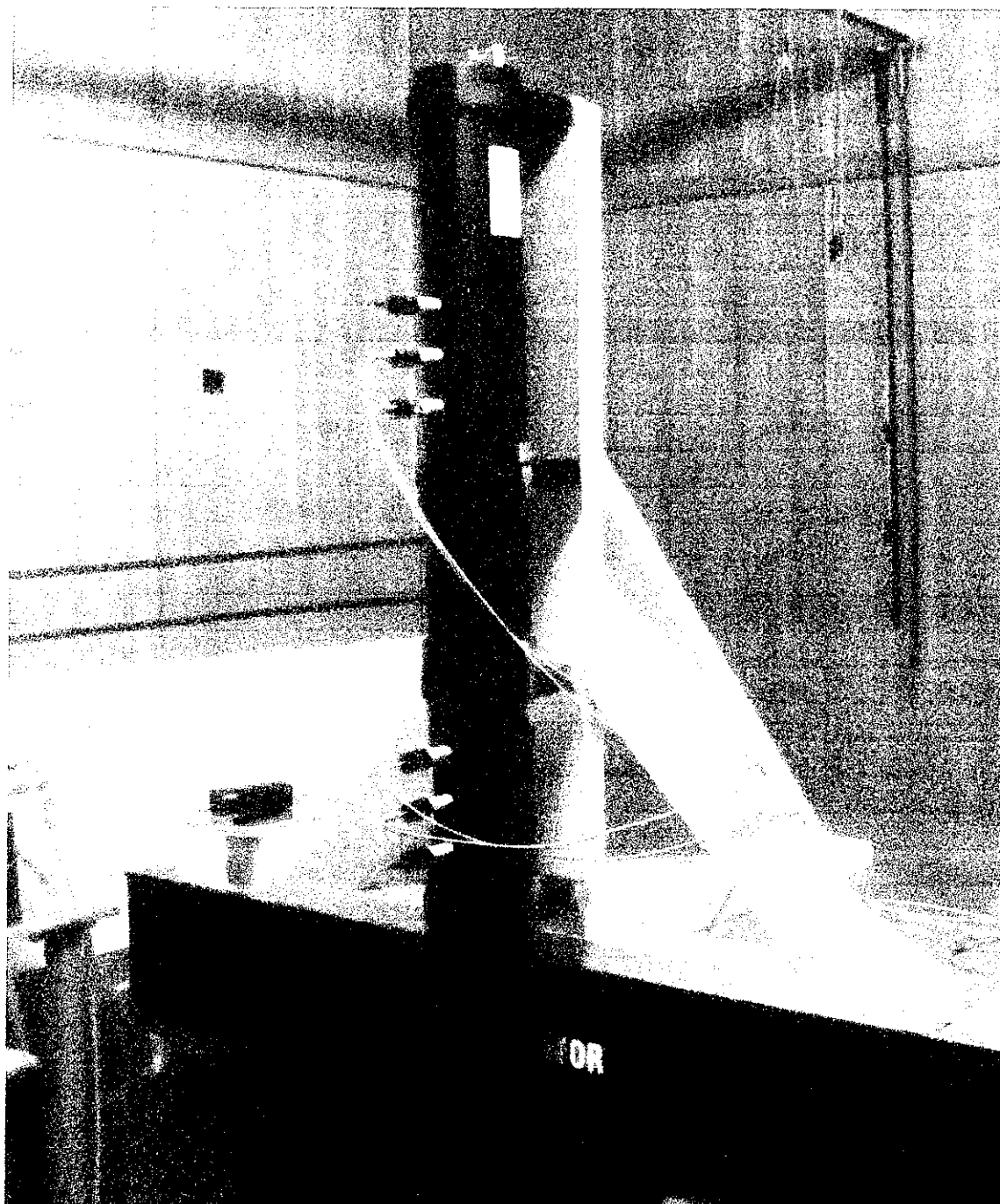


図 9-1 4 マイクロホンインピーダンスチューブ
ブリュエル・ケア (B&K) 社製 4206T 型

9-3 透過型 4 マイクロホン法

図 9-2 に 4 マイクロホン法の概念図を示す. 測定サンプルを中央に置き, 音源側と透過側にそれぞれ 2 本のマイクロホンを配置, 4 マイクロホンで同時に位相も含めた音圧データを測定する.

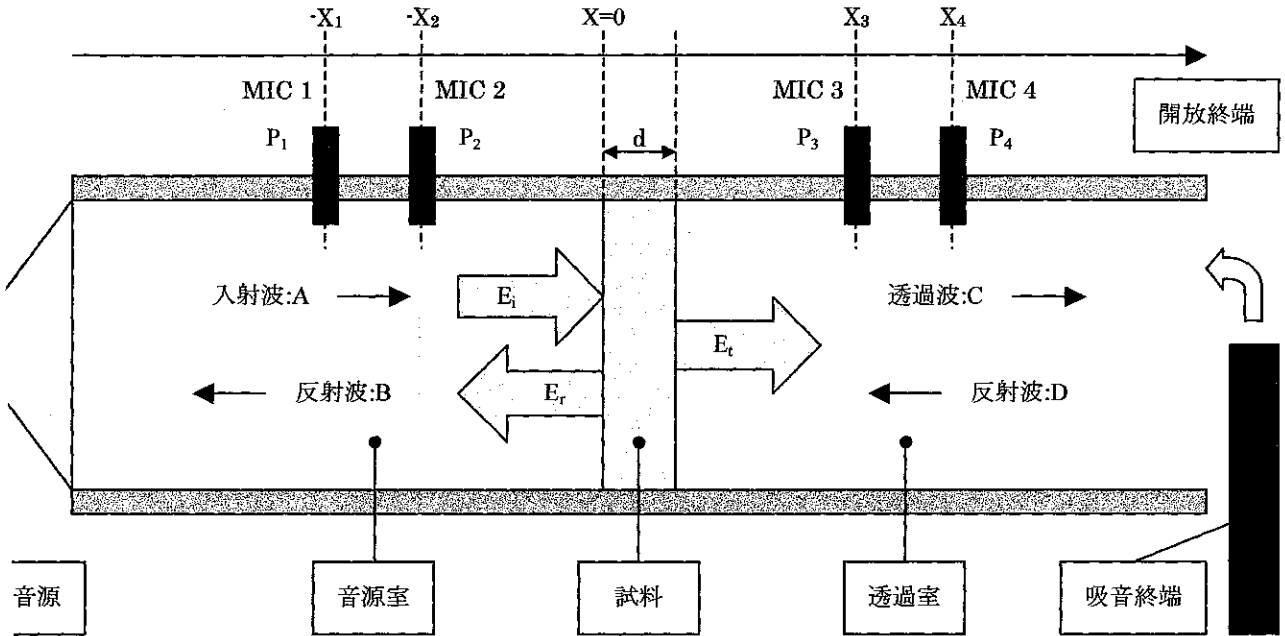


図 9-2 TL 計測システム構成図

各マイクロホンの音圧 $P_1 \sim P_4$ は次のように表せる.

$$P_1(\omega) = A(\omega)e^{-jk(-X_1)} + B(\omega)e^{jk(-X_1)} \quad (9-1a)$$

$$P_2(\omega) = A(\omega)e^{-jk(-X_2)} + B(\omega)e^{jk(-X_2)} \quad (9-1b)$$

$$P_3(\omega) = C(\omega)e^{-jk(X_3-d)} + D(\omega)e^{jk(X_2-d)} \quad (9-1c)$$

$$P_4(\omega) = C(\omega)e^{-jk(X_4-d)} + D(\omega)e^{jk(X_4-d)} \quad (9-1d)$$

音波がサンプルの内部を透過して伝搬するものとし, 位相を含んだ音波の伝搬を考える. サンプルの伝達特性を「透過損失マトリクス」として次式で表現できる.

$$\begin{pmatrix} A(\omega) \\ B(\omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha(\omega) & \beta(\omega) \\ \gamma(\omega) & \delta(\omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C(\omega) \\ D(\omega) \end{pmatrix} \quad (9-2)$$

透過損失マトリクスの要素数 4 に対し式の数が不足しており要素を確定する為, 透過室の終端条件を「開放終端: Open」と「無反射終端: Close」の 2 条件として, 各音波 (進行波) $A_0 \sim D_0, A_c \sim D_c$ を測定する.

$$\begin{pmatrix} A_o(\omega) \\ B_o(\omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha(\omega) & \beta(\omega) \\ \gamma(\omega) & \delta(\omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_o(\omega) \\ D_o(\omega) \end{pmatrix} \quad (9-3a)$$

$$\begin{pmatrix} A_c(\omega) \\ B_c(\omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha(\omega) & \beta(\omega) \\ \gamma(\omega) & \delta(\omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_c(\omega) \\ D_c(\omega) \end{pmatrix} \quad (9-3b)$$

これら(9-3a)式と(9-3b)式を連立させ、透過損失マトリクスの要素を求めると、(9-4a)式～(9-4d)式で表せる。

$$\alpha(\omega) = \frac{A_o(\omega)D_c(\omega) - A_c(\omega)D_o(\omega)}{C_o(\omega)D_c(\omega) - C_c(\omega)D_o(\omega)} \quad (9-4a)$$

$$\beta(\omega) = \frac{A_c(\omega)C_o(\omega) - A_o(\omega)C_c(\omega)}{C_o(\omega)D_c(\omega) - C_c(\omega)D_o(\omega)} \quad (9-4b)$$

$$\gamma(\omega) = \frac{B_o(\omega)D_c(\omega) - B_c(\omega)D_o(\omega)}{C_o(\omega)D_c(\omega) - C_c(\omega)D_o(\omega)} \quad (9-4c)$$

$$\delta(\omega) = \frac{B_c(\omega)C_o(\omega) - B_o(\omega)C_c(\omega)}{C_o(\omega)D_c(\omega) - C_c(\omega)D_o(\omega)} \quad (9-4d)$$

進行波 A, B, C, D は(9-1a)式～(9-1d)式より次のように表せる。

$$A(\omega) = -\frac{j}{2} \cdot \frac{P_1(\omega)e^{-jkX_2} - P_2(\omega)e^{-jkX_1}}{\sin k(X_1 - X_2)} \quad (9-5a)$$

$$B(\omega) = \frac{j}{2} \cdot \frac{P_1(\omega)e^{jkX_2} - P_2(\omega)e^{jkX_1}}{\sin k(X_1 - X_2)} \quad (9-5b)$$

$$C(\omega) = \frac{j}{2} \cdot \frac{P_4(\omega)e^{jk(X_3-d)} - P_3(\omega)e^{jk(X_4-d)}}{\sin k(X_4 - X_3)} \quad (9-5c)$$

$$D(\omega) = -\frac{j}{2} \cdot \frac{P_4(\omega)e^{-jk(X_3-d)} - P_3(\omega)e^{-jk(X_4-d)}}{\sin k(X_4 - X_3)} \quad (9-5d)$$

ここで音圧 $P_1 \sim P_4$ を瞬時スペクトラム $G_1 \sim G_4$ に置き換え、マイクロホン 1 の複素共役 G_1^* との複素積を求め、(9-6)式からクロススペクトラムを求める。更にランダム誤差の極小化、コヒーレンスの改善に平均化処理を実行。

$$\overline{G_{XY}(\omega)} = \overline{G_X^*(\omega) \cdot G_Y(\omega)} \quad (9-6)$$

$$A(\omega)G_1^*(\omega) = -\frac{j}{2} \cdot \frac{\overline{G_{11}(\omega)}e^{-jkX_2} - \overline{G_{12}(\omega)}e^{-jkX_1}}{\sin k(X_1 - X_2)} \quad (9-7a)$$

$$B(\omega)G_1^*(\omega) = \frac{j}{2} \cdot \frac{\overline{G_{11}(\omega)}e^{jkX_2} - \overline{G_{12}(\omega)}e^{jkX_1}}{\sin k(X_1 - X_2)} \quad (9-7b)$$

$$C(\omega)G_1^*(\omega) = \frac{j}{2} \cdot \frac{\overline{G_{14}(\omega)}e^{jk(X_3-d)} - \overline{G_{13}(\omega)}e^{jk(X_4-d)}}{\sin k(X_4 - X_3)} \quad (9-7c)$$

$$D(\omega)G_1^*(\omega) = -\frac{j}{2} \cdot \frac{\overline{G_{14}(\omega)}e^{-jk(X_3-d)} - \overline{G_{13}(\omega)}e^{-jk(X_4-d)}}{\sin k(X_4 - X_3)} \quad (9-7d)$$

「透過損失マトリクス」要素 $\alpha(\omega)$, $\beta(\omega)$, $\gamma(\omega)$, $\delta(\omega)$ は、以下の(9-8a)～(9-8d)式で表せる。

$$\alpha(\omega) = \frac{(A_o(\omega)G_{1o}^*(\omega))(D_c(\omega)G_{1c}^*(\omega)) - (A_c(\omega)G_{1c}^*(\omega))(D_o(\omega)G_{1o}^*(\omega))}{(C_o(\omega)G_{1o}^*(\omega))(D_c(\omega)G_{1c}^*(\omega)) - (C_c(\omega)G_{1c}^*(\omega))(D_o(\omega)G_{1o}^*(\omega))} \quad (9-8a)$$

$$\beta(\omega) = \frac{(A_c(\omega)G_{1c}^*(\omega))(C_o(\omega)G_{1o}^*(\omega)) - (A_o(\omega)G_{1o}^*(\omega))(C_c(\omega)G_{1c}^*(\omega))}{(C_o(\omega)G_{1o}^*(\omega))(D_c(\omega)G_{1c}^*(\omega)) - (C_c(\omega)G_{1c}^*(\omega))(D_o(\omega)G_{1o}^*(\omega))} \quad (9-8b)$$

$$\gamma(\omega) = \frac{(B_o(\omega)G_{1o}^*(\omega))(D_c(\omega)G_{1c}^*(\omega)) - (B_c(\omega)G_{1c}^*(\omega))(D_o(\omega)G_{1o}^*(\omega))}{(C_o(\omega)G_{1o}^*(\omega))(D_c(\omega)G_{1c}^*(\omega)) - (C_c(\omega)G_{1c}^*(\omega))(D_o(\omega)G_{1o}^*(\omega))} \quad (9-8c)$$

$$\delta(\omega) = \frac{(B_c(\omega)G_{1c}^*(\omega))(C_o(\omega)G_{1o}^*(\omega)) - (B_o(\omega)G_{1o}^*(\omega))(C_c(\omega)G_{1c}^*(\omega))}{(C_o(\omega)G_{1o}^*(\omega))(D_c(\omega)G_{1c}^*(\omega)) - (C_c(\omega)G_{1c}^*(\omega))(D_o(\omega)G_{1o}^*(\omega))} \quad (9-8d)$$

透過率 $\tau(\omega)$ は $\alpha(\omega)^2$ の逆数であるから、音響透過損失 TL は(9-9)式で表せる。

$$TL(\omega) = 10 \log_{10} |\alpha(\omega)|^2 \quad (9-9)$$

9-4 クロススペクトラム・アベレーシング

アベレーシングされていない（アベレーシング回数1）複素スペクトラム S_a をアベレーシングする回数だけ測定し、そこからクロス・スペクトラム G_{ab} を求め、アベレーシングされた $\langle G_{ab} \rangle$ を計算する。ここでの $\langle G_{ab} \rangle$ は前節 9-3. 透過型4マイクロホン法での $\overline{G_{XY}(\omega)}$ となる。

クロススペクトラム

$$\begin{aligned} G_{abn} &= S_{bn} \cdot S_{an}^* \\ &= \{ \text{Re}(S_{bn}) + j \cdot \text{Im}(S_{bn}) \} \cdot \{ \text{Re}(S_{an}) - j \cdot \text{Im}(S_{an}) \} \\ &= \{ \text{Re}(S_{an}) \cdot \text{Re}(S_{bn}) + \text{Im}(S_{an}) \cdot \text{Im}(S_{bn}) \} + j \cdot \{ \text{Re}(S_{an}) \cdot \text{Im}(S_{bn}) - \text{Im}(S_{an}) \cdot \text{Re}(S_{bn}) \} \end{aligned}$$

$$\begin{cases} \text{Re}(G_{abn}) = \text{Re}(S_{an}) \cdot \text{Re}(S_{bn}) + \text{Im}(S_{an}) \cdot \text{Im}(S_{bn}) \\ \text{Im}(G_{abn}) = \text{Re}(S_{an}) \cdot \text{Im}(S_{bn}) - \text{Im}(S_{an}) \cdot \text{Re}(S_{bn}) \end{cases}$$

クロススペクトラム・アベレーシング

$$\begin{aligned} \langle G_{ab} \rangle &= (G_{ab1} + G_{ab2} + \dots + G_{abN}) / N \\ &= \sum_{n=1}^N G_{abn} / N \\ &= \sum_{n=1}^N \text{Re}(G_{abn}) / N + j \cdot \sum_{n=1}^N \text{Im}(G_{abn}) / N \\ &= \sum_{n=1}^N \{ \text{Re}(S_{an}) \cdot \text{Re}(S_{bn}) + \text{Im}(S_{an}) \cdot \text{Im}(S_{bn}) \} / N \\ &\quad + j \cdot \sum_{n=1}^N \{ \text{Re}(S_{an}) \cdot \text{Im}(S_{bn}) - \text{Im}(S_{an}) \cdot \text{Re}(S_{bn}) \} / N \end{aligned}$$

$$\begin{cases} \text{Re}\langle G_{ab} \rangle = \sum_{n=1}^N \{ \text{Re}(S_{an}) \cdot \text{Re}(S_{bn}) + \text{Im}(S_{an}) \cdot \text{Im}(S_{bn}) \} / N \\ \text{Im}\langle G_{ab} \rangle = \sum_{n=1}^N \{ \text{Re}(S_{an}) \cdot \text{Im}(S_{bn}) - \text{Im}(S_{an}) \cdot \text{Re}(S_{bn}) \} / N \end{cases}$$

データ計測解析ソフトウェア松山アドバンス社製 LaBDAQ-PRO, および自作 FORTRAN プログラムを用いてクロススペクトラム・アベレーシングを計算する際の、簡単な計算処理フローチャートを図 9-3 に示す。

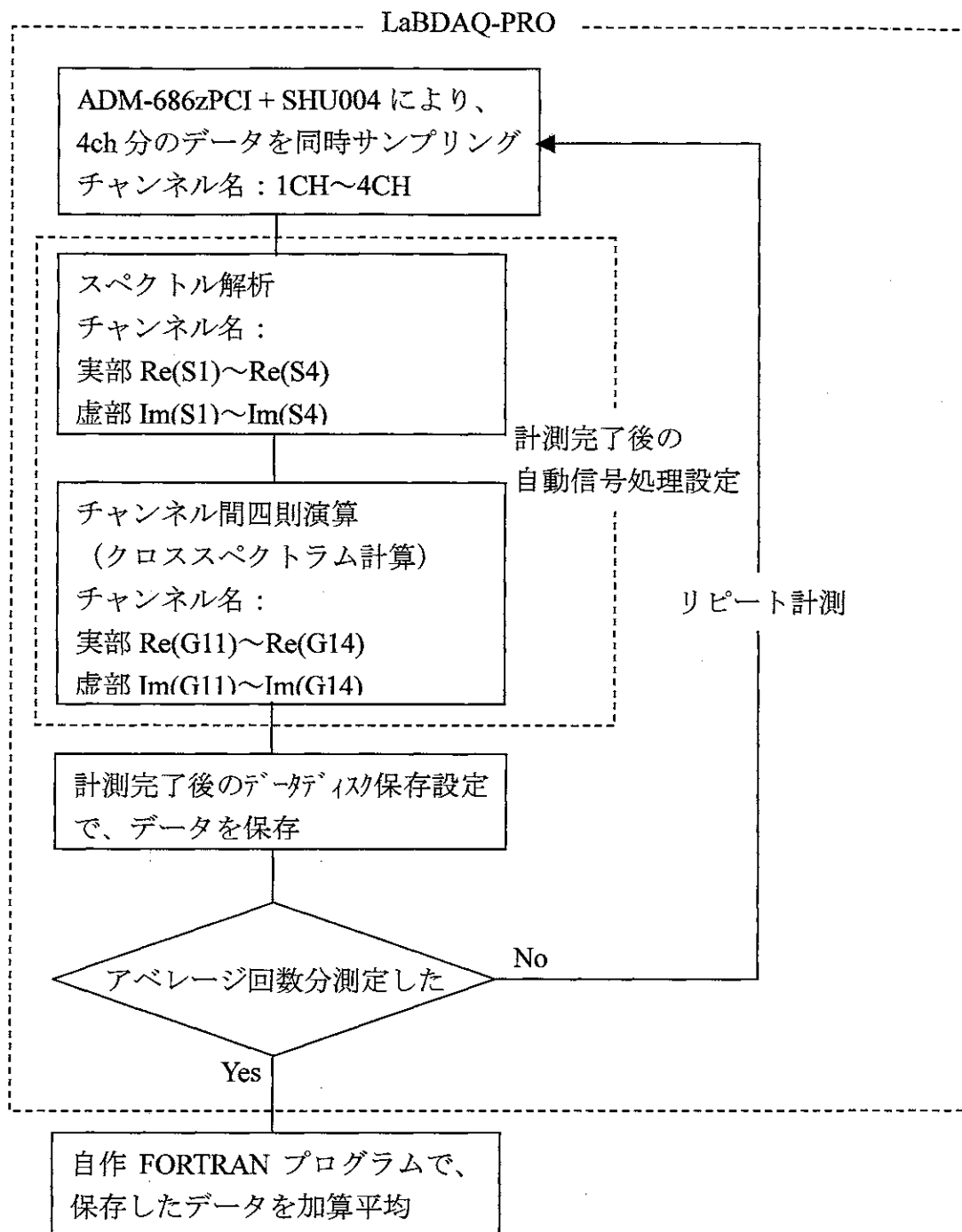


図 9-3 クロススペクトラム・アベレージング計算処理フローチャート

9-5 測定結果

4 マイクロホンインピーダンスチューブ付属の calibration sample を被測定試料とし、大型管・小型管共に測定を行った。結果を図 9-4 に示す。

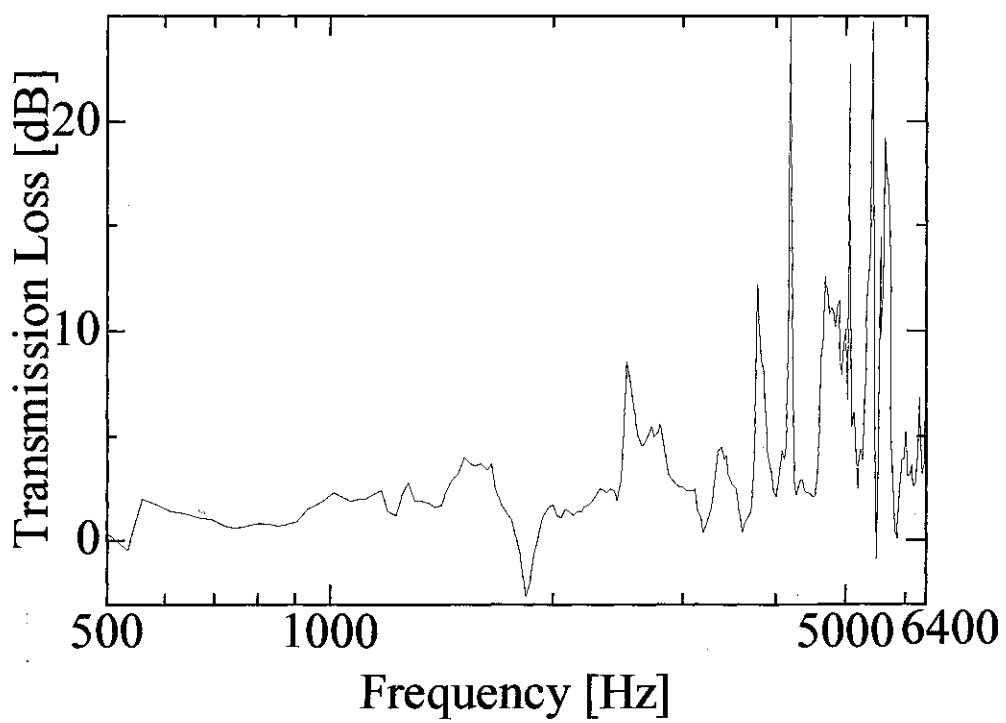
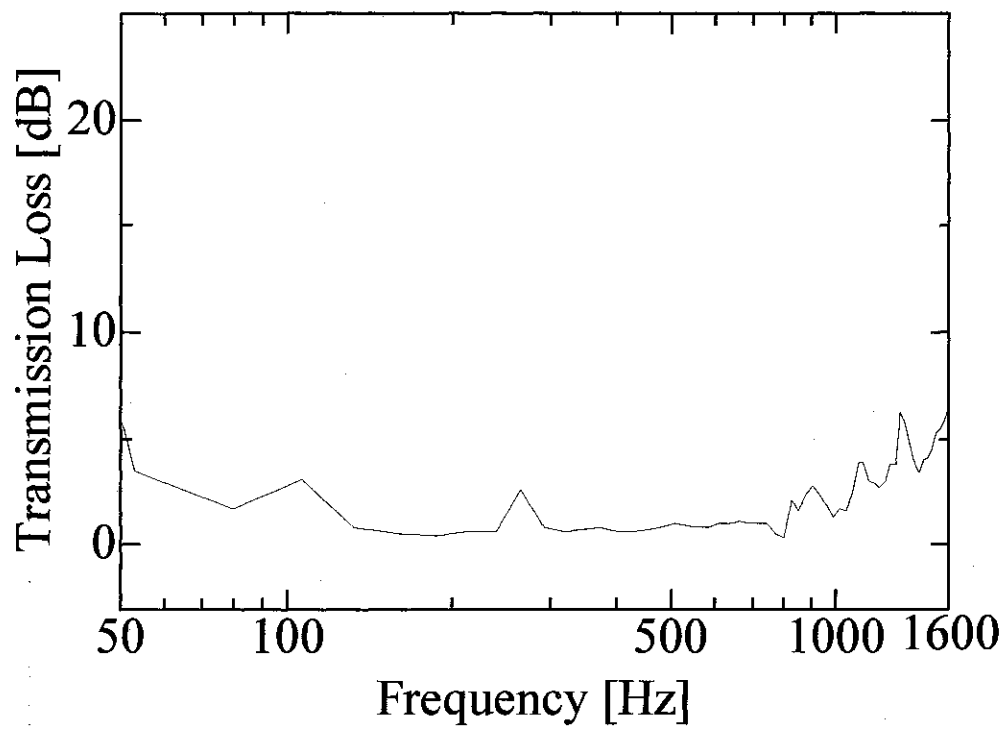


図 9-4 calibration sample 測定結果
(上図：大型管 下図：小型管)

第 10 章 結 論

多孔質薄膜材料の枚数検出に関する研究を行い、以下の結論を得た。

- (1) 布の枚数変化に伴い、布表面の入力インピーダンスは変化し、これを利用することにより非接触で布の枚数検出が可能である。
- (2) ある程度空気柱長さがある方が共振周波数付近における位相差，振幅差は大きくなり，枚数検出に適している。
- (3) 検出部の幾何学や隙間を変化させることにより非常に薄い布の枚数を検出することも可能である。
- (4) 布の音響特性を導入し数値解析を行い，実測値，理論解析値と比較した結果，位相差と振幅差それぞれの傾向は一致した。
- (5) 多孔性膜材料の積層における基礎的データとして，異なる粒径におけるガラスビーズ層を積層させた場合の垂直入射吸音率を理論的に求め，2 マイクロホンインピーダンス測定管を用いた実験結果と比較した結果，両者は良い一致が見られた。
- (6) 多孔性膜材料が湿度から受ける影響の基礎的データとして，粒状材料の吸音率ピーク周波数を求めた結果，ピーク周波数は含水率の増加に伴い低下することが明らかになった。
- (7) 4 マイクロホン法を使用した透過損失測定システムの構築を行った。これにより，多孔質の薄膜材料の透過損失を測定できる。

参考文献

- (1) 小野・一條, 機構論集, 920-78,E(1992),452.
- (2) 岡部・小野・赤見・佐々木, 織高研研究報告, 147(1985),2.
- (3) 坂本・一宮・太田, 機論, **59**-559,C(1993),819-826.
- (4) 坂本・一宮・太田, 機論, **60**-571,C(1994),994-999.
- (5) 坂本・一宮・太田・宮本, 機論, **61**-584,C(1995),1516-1521.
- (6) 坂本・一宮・玉橋, 機論, **64**-619,C(1998),986-991.
- (7) 坂本・一宮・坂井, 機構論集, 957-1(1995),241-243.
- (8) J. Y. Chung and D. A. Blaser, "Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. Theory," J. Acoust. Soc. Am. **68**(3),(1980),907-913.
- (9) J. Y. Chung and D. A. Blaser, "Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. II. Experiment," J. Acoust. Soc. Am. **68**(3),(1980),914-921.
- (10) 須山・平田, 音響学会誌, **35**(1979),165.
- (11) 須山・平田, 音響誌, **35**(1979),152.
- (12) 早川・吉川, 「音響振動論」(1974),700,丸善.
- (13) Hyper Mesh, Altair Engineering.inc.
- (14) SYSNOISE, LMS Numerical Technologies.