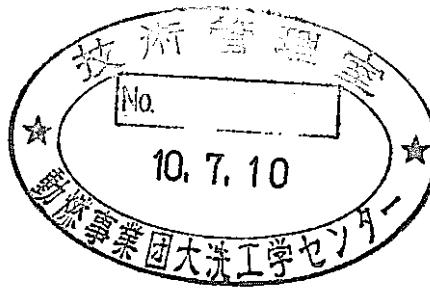


炉内音響検出試験実施のための解析作業

燃料ピンのモデル化と音源位置同定の検討

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)



1998年2月

株式会社 東芝

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター

システム開発推進部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor
and Nuclear Fuel Development Corporation 4002, Narita O-arai-machi Higashi-
Ibaraki-gun, Ibaraki, 311-14, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation)

1998年 2月

炉内音響検出試験実施のための解析作業
燃料ピンのモデル化と音源位置同定の検討

鈴木 健彦^{*1}、塩山 勉^{*1}

唐沢 博一^{*2}、小舞正文^{*2}

要 旨

高速増殖炉原子炉内ナトリウム中において沸騰音を検出するための炉内音響検出計の成立性の評価のため、音源重畠法を用いた解析コード(S O S U M)により、集合体内部及び炉心上部での音響伝播解析を行った。

平成8年度は、解析モデルとして、燃料集合体・炉内構造物のモデル化を行い、炉心中心からの沸騰音等の異常音の炉内伝播状態について燃料集合体内とプレナム部の音響伝播の2段階に分けて解析を実施した。

平成9年度は、燃料ピンの音響伝播への影響を確認するため、ワイヤをモデル化して集合体内部及び炉心上部での音響伝播を解析した。音響伝播解析では解析を合理化するため、双極子モデルを採用した。また、開口合成手法を用いて音源となっている燃料集合体位置を同定する手法についても検討を行った。

本解析結果により、燃料ピンに巻かれたワイヤーの音響伝播への影響は最大6%程度と小さいことが分かった。また、開口合成による音源燃料集合体位置の同定では4点程度の計測点があれば十分同定が可能であることが分かった。

本報告書は、株式会社東芝が動力炉・核燃料開発事業団との契約により実施した業務の成果である。

契約番号 : 09C3237

事業団担当部課室および担当者: 大洗工学センター 実験炉部技術課 市毛 聰

^{*1}: 株式会社 東芝 研究開発センター 機械・エネルギー研究所

^{*2}: 株式会社 東芝 原子力事業部 動力炉開発部

PNC-TJ9164 98-006

February 1998

**Analytical study for the in-vessel acoustic detection test
Investigation of modeling of fuel-pins and positioning of sound source**

Takehiko Suzuki (*¹), Tutomu Shioyama (*¹)
Hirokazu Karasawa (*²), Masafumi Komai (*²)

Abstract

Feasibility of a in-vessel acoustic detection system, which is used to detect boiling noise of sodium in a reactor vessel of FBR, was evaluated by means of SOSUM(Sound Source Super-imposed Method) code. In 1997 Fy propagation of abnormal sound (ex. boiling noise) was evaluated. In 1998 Fy, detail simulation model in which fuel pins with wire are involved, was evaluated.

In order to reduce calculation time, dipole model was adopted in the simulation. Adequacy of the dipole simulation model was confirmed by comparison with the simulated result acquired by normal elements division model.

With the result of this study, difference of propagation was less than about 6 %., and detecting sound source's position in reactor vessel was evaluated to be possible by Synthetic Aperture Focusing Technique with about 4 detecting points.

Work performed Toshiba Corporation under a contract with PNC (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation).

Contract No. :09C3237

PNC Liaison :Satoshi Ichige, Reactor Technology Section, Experimental Reactor Division, Oarai Engineering Center.

(*¹) Research and Development Center, Toshiba Corporation.

(*²) Advanced Reactor Engineering Department, Toshiba Corporation.

目 次

1. まえがき	1
2. 検討目的及び条件	2
2.1 検討目的	2
2.2 検討条件	3
3. 音響伝播解析	6
3.1 解析モデルの妥当性の評価	6
3.2 燃料集合体内の音響伝播	71
3.3 上部プレナム部の音響伝播	79
3.4 計測音による音源位置の同定	126
4. まとめ	145
謝 辞	146
付 錄 音響重畠法による音響伝播解析コード(SOSUM)の概要	付-1

表・図目次

表 2.1	計算条件	4
表 3.4.1	計測点の組み合わせと相関処理結果	127
図 2.1	解析体系	5
図 3.1.1	シミュレーションモデル外観	9
図 3.1.2	燃料ピンを模擬した円柱モデル（通常要素モデル）	10
図 3.1.3	燃料ピンを模擬した円柱モデル（双極子モデル）	10
図 3.1.4	音源の形状モデル	11
図 3.1.5	音源に与えた加速度波形	11
図 3.1.6	円柱断面方向の音圧分布（通常要素）	12
図 3.1.7	円柱軸方向の音圧分布（通常要素）	19
図 3.1.8(1)	入射波が円柱に入る直前 $2.04 \times 10^{-5}(\text{sec})$	26
図 3.1.8(2)	入射波が円柱に接触した瞬間 $2.24 \times 10^{-5}(\text{sec})$	26
図 3.1.8(3)	入射波が円柱を通過した瞬間 $2.44 \times 10^{-5}(\text{sec})$	26
図 3.1.8(4)	入射波と円柱の相互作用 $2.64 \times 10^{-5}(\text{sec})$	27
図 3.1.8(5)	入射波と円柱の相互作用 $2.84 \times 10^{-5}(\text{sec})$	27
図 3.1.8(6)	入射波と円柱の相互作用 $3.04 \times 10^{-5}(\text{sec})$	27
図 3.1.8(7)	入射波と円柱の相互作用 $3.24 \times 10^{-5}(\text{sec})$	28
図 3.1.8(8)	入射波と円柱の相互作用 $3.44 \times 10^{-5}(\text{sec})$	28
図 3.1.8(9)	入射波と円柱の相互作用 $3.64 \times 10^{-5}(\text{sec})$	28
図 3.1.8(10)	入射波と円柱の相互作用 $3.84 \times 10^{-5}(\text{sec})$	29
図 3.1.8(11)	入射波と円柱の相互作用 $4.04 \times 10^{-5}(\text{sec})$	29
図 3.1.8(12)	入射波と円柱の相互作用 $4.24 \times 10^{-5}(\text{sec})$	29
図 3.1.8(13)	入射波と円柱の相互作用 $4.44 \times 10^{-5}(\text{sec})$	30
図 3.1.8(14)	入射波と円柱の相互作用 $4.64 \times 10^{-5}(\text{sec})$	30
図 3.1.9	円柱断面方向の音圧分布（双極子モデル）	31
図 3.1.10	円柱軸方向の音圧分布（双極子モデル）	38
図 3.1.11(1)	入射波が円柱に入る直前（双極子モデル） $2.04 \times 10^{-5}(\text{sec})$	45
図 3.1.11(2)	入射波が円柱に接触した瞬間（双極子モデル） $2.24 \times 10^{-5}(\text{sec})$	45
図 3.1.11(3)	入射波が円柱を通過した瞬間（双極子モデル） $2.44 \times 10^{-5}(\text{sec})$	45
図 3.1.11(4)	入射波と円柱の相互作用（双極子モデル） $2.64 \times 10^{-5}(\text{sec})$	46
図 3.1.11(5)	入射波と円柱の相互作用（双極子モデル） $2.84 \times 10^{-5}(\text{sec})$	46
図 3.1.11(6)	入射波と円柱の相互作用（双極子モデル） $3.04 \times 10^{-5}(\text{sec})$	46
図 3.1.11(7)	入射波と円柱の相互作用（双極子モデル） $3.24 \times 10^{-5}(\text{sec})$	47
図 3.1.11(8)	入射波と円柱の相互作用（双極子モデル） $3.44 \times 10^{-5}(\text{sec})$	47

図 3.1.11(9)	入射波と円柱の相互作用（双極子モデル）	$3.64 \times 10^{-5}(\text{sec})$	47
図 3.1.11(10)	入射波と円柱の相互作用（双極子モデル）	$3.84 \times 10^{-5}(\text{sec})$	48
図 3.1.11(11)	入射波と円柱の相互作用（双極子モデル）	$4.04 \times 10^{-5}(\text{sec})$	48
図 3.1.11(12)	入射波と円柱の相互作用（双極子モデル）	$4.24 \times 10^{-5}(\text{sec})$	48
図 3.1.11(13)	入射波と円柱の相互作用（双極子モデル）	$4.44 \times 10^{-5}(\text{sec})$	49
図 3.1.11(14)	入射波と円柱の相互作用（双極子モデル）	$4.64 \times 10^{-5}(\text{sec})$	49
図 3.1.12	モデル外観		50
図 3.1.13	円柱モデル（通常要素）		51
図 3.1.14	円柱モデル（双極子要素）		51
図 3.1.15	音源形状モデル		52
図 3.1.16	軸方向の音圧分布（通常モデル）		53
図 3.1.17(1)	入射波が部分モデルに入った瞬間（通常モデル）		58
図 3.1.17(2)	入射波後 $4 \times 10^{-6}(\text{sec})$ 経過（通常モデル）		58
図 3.1.17(3)	入射波後 $8 \times 10^{-6}(\text{sec})$ 経過（通常モデル）		58
図 3.1.17(4)	入射波と部分モデルの相互作用 $2.0 \times 10^{-5}(\text{sec})$ （通常モデル）		59
図 3.1.17(5)	入射波と部分モデルの相互作用 $2.4 \times 10^{-5}(\text{sec})$ （通常モデル）		59
図 3.1.17(6)	入射波と部分モデルの相互作用 $2.8 \times 10^{-5}(\text{sec})$ （通常モデル）		59
図 3.1.17(7)	入射波と部分モデルの相互作用 $3.2 \times 10^{-5}(\text{sec})$ （通常モデル）		60
図 3.1.17(8)	入射波と部分モデルの相互作用 $3.6 \times 10^{-5}(\text{sec})$ （通常モデル）		60
図 3.1.17(9)	入射波と部分モデルの相互作用 $4.0 \times 10^{-5}(\text{sec})$ （通常モデル）		60
図 3.1.17(10)	入射波と部分モデルの相互作用 $4.4 \times 10^{-5}(\text{sec})$ （通常モデル）		61
図 3.1.18	軸方向の音圧分布（双極子モデル）		62
図 3.1.19(1)	入射波が部分モデルに入った瞬間（双極子モデル）		67
図 3.1.19(2)	入射波後 $4 \times 10^{-6}(\text{sec})$ 経過（双極子モデル）		67
図 3.1.19(3)	入射波後 $8 \times 10^{-6}(\text{sec})$ 経過（双極子モデル）		67
図 3.1.19(4)	入射波と部分モデルの相互作用 $2.0 \times 10^{-5}(\text{sec})$ （双極子モデル）		68
図 3.1.19(5)	入射波と部分モデルの相互作用 $2.4 \times 10^{-5}(\text{sec})$ （双極子モデル）		68
図 3.1.19(6)	入射波と部分モデルの相互作用 $2.8 \times 10^{-5}(\text{sec})$ （双極子モデル）		68
図 3.1.19(7)	入射波と部分モデルの相互作用 $3.2 \times 10^{-5}(\text{sec})$ （双極子モデル）		69
図 3.1.19(8)	入射波と部分モデルの相互作用 $3.6 \times 10^{-5}(\text{sec})$ （双極子モデル）		69
図 3.1.19(9)	入射波と部分モデルの相互作用 $4.0 \times 10^{-5}(\text{sec})$ （双極子モデル）		69
図 3.1.19(10)	入射波と部分モデルの相互作用 $4.4 \times 10^{-5}(\text{sec})$ （双極子モデル）		70
図 3.2.1	燃料集合体の壁面の要素		72
図 3.2.2	燃料ピンとラッピングワイヤーのモデル		72
図 3.2.3(a)	真上から見た燃料集合体のモデル		73
図 3.2.3(b)	斜め上から見た燃料集合体のモデル		73
図 3.2.4	音源位置で観測される音圧波形		74
図 3.2.5(1)	時刻 $6 \times 10^{-5}(\text{s})$ での燃料集合体内部の音響伝播		75

図 3.2.5(2)	時刻 $2.8 \times 10^{-4}(s)$ での燃料集合体内部の音響伝播	76
図 3.2.5(3)	時刻 $4.4 \times 10^{-4}(s)$ での燃料集合体内部の音響伝播	77
図 3.2.5(4)	時刻 $5.6 \times 10^{-4}(s)$ での燃料集合体内部の音響伝播	78
図 3.3.1	上部プレナム部の音響伝播	80
図 3.3.2(1)	第 0 列、高さ 0mm の位置で観測される音圧と伝達関数	82
図 3.3.2(2)	第 0 列、高さ 35mm の位置で観測される音圧と伝達関数	83
図 3.3.2(3)	第 0 列、高さ 70mm の位置で観測される音圧と伝達関数	84
図 3.3.2(4)	第 0 列、高さ 105mm の位置で観測される音圧と伝達関数	85
図 3.3.2(5)	第 0 列、高さ 140mm の位置で観測される音圧と伝達関数	86
図 3.3.2(6)	第 0 列、高さ 175mm の位置で観測される音圧と伝達関数	87
図 3.3.2(7)	第 0 列、高さ 210mm の位置で観測される音圧と伝達関数	88
図 3.3.2(8)	第 0 列、高さ 245mm の位置で観測される音圧と伝達関数	89
図 3.3.2(9)	第 0 列、高さ 280mm の位置で観測される音圧と伝達関数	90
図 3.3.2(10)	第 0 列、高さ 315mm の位置で観測される音圧と伝達関数	91
図 3.3.2(11)	第 0 列、高さ 350mm の位置で観測される音圧と伝達関数	92
図 3.3.3(1)	第 3 列、高さ 0mm の位置で観測される音圧と伝達関数	93
図 3.3.3(2)	第 3 列、高さ 35mm の位置で観測される音圧と伝達関数	94
図 3.3.3(3)	第 3 列、高さ 70mm の位置で観測される音圧と伝達関数	95
図 3.3.3(4)	第 3 列、高さ 105mm の位置で観測される音圧と伝達関数	96
図 3.3.3(5)	第 3 列、高さ 140mm の位置で観測される音圧と伝達関数	97
図 3.3.3(6)	第 3 列、高さ 175mm の位置で観測される音圧と伝達関数	98
図 3.3.3(7)	第 3 列、高さ 210mm の位置で観測される音圧と伝達関数	99
図 3.3.3(8)	第 3 列、高さ 245mm の位置で観測される音圧と伝達関数	100
図 3.3.3(9)	第 3 列、高さ 280mm の位置で観測される音圧と伝達関数	101
図 3.3.3(10)	第 3 列、高さ 315mm の位置で観測される音圧と伝達関数	102
図 3.3.3(11)	第 3 列、高さ 350mm の位置で観測される音圧と伝達関数	103
図 3.3.4(1)	第 5 列、高さ 0mm の位置で観測される音圧と伝達関数	104
図 3.3.4(2)	第 5 列、高さ 35mm の位置で観測される音圧と伝達関数	105
図 3.3.4(3)	第 5 列、高さ 70mm の位置で観測される音圧と伝達関数	106
図 3.3.4(4)	第 5 列、高さ 105mm の位置で観測される音圧と伝達関数	107
図 3.3.4(5)	第 5 列、高さ 140mm の位置で観測される音圧と伝達関数	108
図 3.3.4(6)	第 5 列、高さ 175mm の位置で観測される音圧と伝達関数	109
図 3.3.4(7)	第 5 列、高さ 210mm の位置で観測される音圧と伝達関数	110
図 3.3.4(8)	第 5 列、高さ 245mm の位置で観測される音圧と伝達関数	111
図 3.3.4(9)	第 5 列、高さ 280mm の位置で観測される音圧と伝達関数	112
図 3.3.4(10)	第 5 列、高さ 315mm の位置で観測される音圧と伝達関数	113
図 3.3.4(11)	第 5 列、高さ 350mm の位置で観測される音圧と伝達関数	114
図 3.3.5(1)	観測点、高さ 0mm の位置で観測される音圧と伝達関数	115

図 3.3.5(2)	観測点、高さ 0.1mm の位置で観測される音圧と伝達関数	116
図 3.3.5(3)	観測点、高さ 0.2mm の位置で観測される音圧と伝達関数	117
図 3.3.5(4)	観測点、高さ 0.3mm の位置で観測される音圧と伝達関数	118
図 3.3.5(5)	観測点、高さ 0.4mm の位置で観測される音圧と伝達関数	119
図 3.3.5(6)	観測点、高さ 0.5mm の位置で観測される音圧と伝達関数	120
図 3.3.5(7)	観測点、高さ 0.6mm の位置で観測される音圧と伝達関数	121
図 3.3.5(8)	観測点、高さ 0.7mm の位置で観測される音圧と伝達関数	122
図 3.3.5(9)	観測点、高さ 0.8mm の位置で観測される音圧と伝達関数	123
図 3.3.5(10)	観測点、高さ 0.9mm の位置で観測される音圧と伝達関数	124
図 3.3.5(11)	観測点、高さ 1mm の位置で観測される音圧と伝達関数	125
図 3.4.1(1)	高さ 0mm での、測定点 000 と 3E3 の間の相互相関値	128
図 3.4.1(2)	高さ 0mm での、測定点 000 と 5E2 の間の相互相関値	128
図 3.4.1(3)	高さ 0mm での、測定点 5E2 と 3E3 の間の相互相関値	129
図 3.4.1(4)	高さ 0mm での、測定点 5B2 と 3E3 の間の相互相関値	129
図 3.4.1(5)	高さ 0mm での、測定点 3E3 と 5C2 の間の相互相関値	130
図 3.4.1(6)	高さ 0mm での、測定点 5B2 と 5C2 の間の相互相関値	130
図 3.4.1(7)	高さ 300mm での、測定点 3E3 と 5B2 の間の相互相関値	131
図 3.4.1(8)	高さ 300mm での、測定点 3E3 と 5C2 の間の相互相関値	131
図 3.4.1(9)	高さ 300mm 同士のデータ相互相関値	132
図 3.4.1(10)	高さ 300mm と高さ 0mm のデータ相互相関値	132
図 3.4.1(11)	高さ 100mm と高さ 0mm のデータ相互相関値	133
図 3.4.1(12)	高さ 300mm と高さ 100mm のデータ相互相関値	133
図 3.4.1(13)	高さ 0mm での、測定点 3E3 と観測位置の間の相互相関値	134
図 3.4.1(14)	高さ 0mm での、測定点 5B2 と高さ 200mm での観測位置の間の相互相関値	134
図 3.4.2(1)	同一平面内の多くの測定点を用いた開口合成値	135
図 3.4.2(2)	一点に自分自身の位置を含む三点を用いた開口合成値	136
図 3.4.2(3)	音源から離れた三点を用いた開口合成値	137
図 3.4.2(4)	音源から離れた高さの同じ三点を用いた開口合成値	138
図 3.4.2(5)	音源から離れた高さの違う三点を用いた開口合成値	139
図 3.4.2(6)	同一平面内の多くの測定点からの開口合成値	140
図 3.4.2(7)	一点に自分自身の位置を含む四点を用いた開口合成値	141
図 3.4.2(8)	音源から離れた四点を用いた開口合成値	142
図 3.4.2(9)	音源から離れた高さの同じ四点を用いた開口合成値	143
図 3.4.2(10)	音源から離れた高さの違う四点を用いた開口合成値	144

1. まえがき

高速炉の原子炉容器内ナトリウム中において、燃料集合体内で発生した沸騰音を検出し原子炉の早期異常診断を行うことを目的とした炉内音響検出系を評価するため、平成8年度に引き続き、音響伝播シミュレーションを用いて「常陽」の原子炉内の音響伝播を解析的に検討した。

平成8年度は、燃料集合体・炉内構造物のモデル化を行い、炉心中心からの沸騰音等の異常音の炉内伝播状態について、燃料集合体内中の音響伝播とプレナム部の音響伝播と2段階に分けて解析を実施した。

平成9年度は、燃料集合体内部に発生した音が炉心上部に到達するまでの音響伝播の特性を詳細に検討するため、燃料ピンに巻かれたワイヤーをモデル化して音響伝播解析を行い、音圧分布、伝達関数を求めた。また、音源位置の同定については、解析により求められた信号を基に相互相関を行い、検出器配置の違いによる開口合成処理結果の違いを分析した。

2. 検討目的及び条件

2.1 検討目的

本研究は、平成 8 度に実施した、異常音の集合体内部での伝播及び、炉心上部での伝播の解析評価結果を更に詳細に検討するものである。平成 8 年度は、燃料集合体内部に発生した異常音(1000Pa の白色雑音)が集合体内部を伝播し、炉心上部に設置された音響センサーで計測されるまでの伝達特性を評価した。以上の結果に基づき、平成 9 年度は次の二点について更に検討をおこないモデルを改良する。

①燃料集合体中の伝播

平成 8 年度のモデルは、燃料集合体内部の燃料ピンをモデル化していた。しかし、実際の燃料ピンには、燃料ピンの隙間を確保するためのワイヤーが螺旋状に巻いてある。燃料集合体内部を燃料ピンにそって伝播する音波は、このワイヤーによって伝播を遮られることが予想されるため、このワイヤーによる異常音の伝播への影響を検討する。

②燃料集合体からプレナム部への伝播

平成 8 年度は、上部プレナム部の計測点（音響センサー）に到達する音波の伝達関数を評価し、音波のレベル及び周波数特性から測定の可能性が示された。しかし実際の測定点に到達する音波は、問題としている信号以外にノイズ成分として他の音が合成されていることが予想される。そのため、本解析にあたって、相関処理のような統計処理手法と、その結果を用いた開口合成手法を組み合わせて、燃料集合体上部でどの集合体が音源となっているかを検討する。

以上の 2 項目の解析モデルによる解析検討は、音響シミュレーションコード(SOSUM)を用いて実施するものとする。

(1) 解析モデル

解析モデルは以下の 2 ケースとする。

①燃料集合体中の伝搬モデル

- ・ 音源位置は、燃料集合体の炉心中心レベルとする。
- ・ 燃料ピンに螺旋状に巻いてあるワイヤーを考慮する場合と、考慮しない場合の 2 ケースを実施することとする。ピン及びワイヤーのモデルは微小散乱体とした双極子モデルとして解析を行う。
- ・ 音波が音源から燃料集合体内部に拡がって、平面波となって出口部に到達するまでの解析を行い、燃料集合体内部の最低三箇所以上の位置での音圧波形を分析し、伝播波形が平面波に近づいていく様子を検討する。
- ・ 尚、双極子モデルの使用の妥当性を確認するために、燃料ピン一本をメッシュ分割したモデルと、燃料ピン一本を双極子としたモデルをつくり、各々の燃料ピンの点音源からの散乱波形を比較して両者が一致していることを確認するものとする。

②燃料集合体からプレナム部への伝播

平成 8 年度実施した計測位置（炉内検査孔）と、炉心第 0 列、第 3 列、第 5 列の炉内上部プレナム部に音響検出計を挿入した時の音響検出位置での音圧分布と伝達関数を求めるものとする。観測位置は炉内検査孔位置では燃料集合体頂部を 0 とする 1m までの範囲(10 分割)、それ以外は 0 から 350mm の範囲(10 分割)とする。

上記計測位置で計測される受信信号をシミュレーションで評価し、得られた信号をお互いに相互相關する。更にその結果を開口合成して音源となっている燃料集合体の位置同定処理を行い、その結果を分析する。

2.2 検討条件

以下に示す条件で解析作業を実施した。

(1) 解析コード

音源重畠法による 3 次元音響伝搬シミュレーションコード (SOSUM) を使用するものとする。

(2) 音源

●音圧 : 1000 (Pa) ピーク値

●周波数 : 最高周波数 50kHz

●連続波形 : 50 kHz を最高周波数とした帯域のホワイトノイズ (波形長 2.5msec)

(3) 解析パラメータ

解析上の各パラメータは以下のとおりとする。

●媒質 : Na

●温度 : 250°C

●音速 2446m/sec (Na 温度 250°C のときの音速)

●境界の分割メッシュの大きさ

サンプリング周波数を f 、Na 中の音速を v として下記で表わされる式を目安にメッシュ分割を行うものとする。

・プレナム部の構造部境界の分割メッシュ : $\frac{v}{2f}$ (12mm 程度)

・ピンの音響散乱モデル(双極子モデル)の分割メッシュ : $\frac{v}{f}$ (10mm 程度)

注 : 0 内はサンプリング周波数 f を 100 kHz とした場合の数値例を示す。

(4) 解析体系

・図 2-1 に解析体系を示す。

表 2.1 計算条件

項目	値
媒質	Na
媒質密度	832 [kg/m ³]
音速	2446 [m/s]
サンプリング周波数	200 [kHz]
音源の波形	連続波（ホワイトノイズ）
音源の周波数	50 [kHz]
音源の振幅	1015.15 [m/s ²]

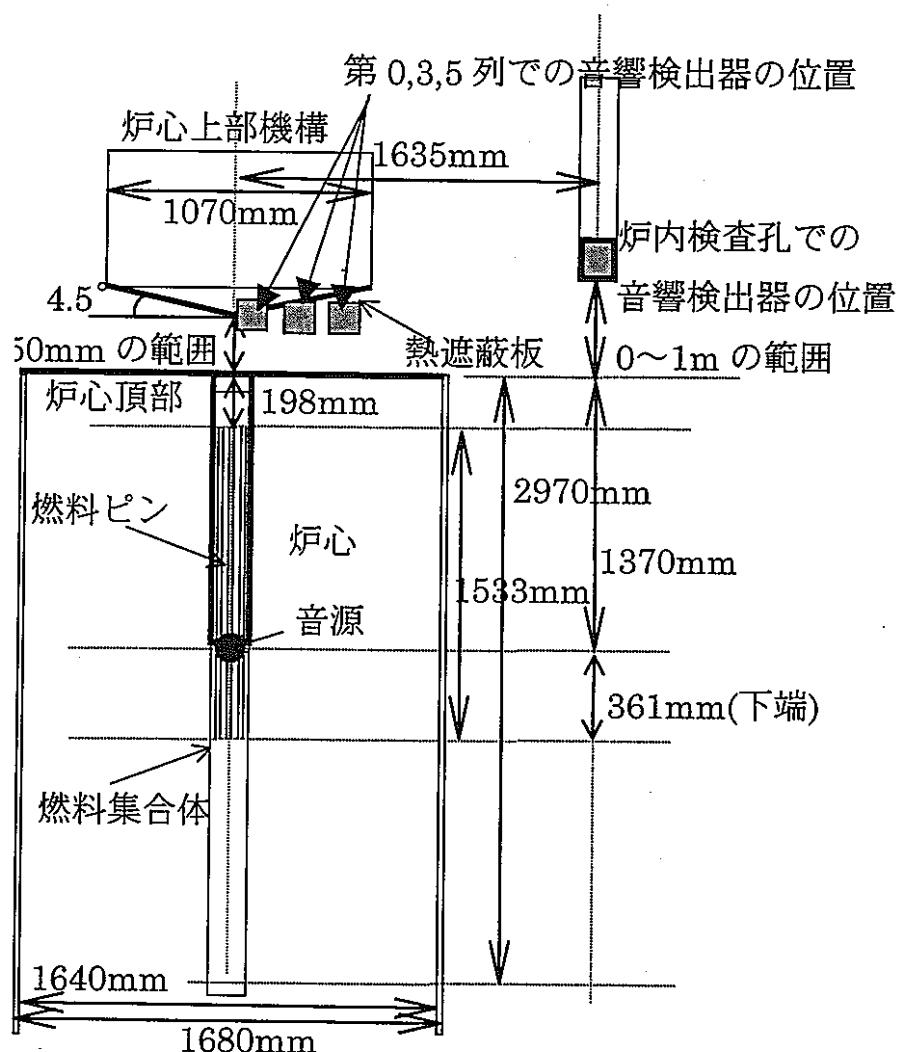


図 2-1 解析体系

解析モデルの範囲：図中の太線 で示された、燃料集合体と炉心頂部、熱遮蔽板、及び音響センサの部分を解析モデルの範囲とする。

3. 音響伝播解析

3.1 解析モデルの妥当性の評価(双極子モデルと通常要素モデルとの比較)

燃料集合体内部の音響伝播のシミュレーションにあたっては、次のことが問題となる。燃料集合体中の燃料ピンにはピン相互の接触防止のためにワイヤが螺旋状に巻かれているため、ワイヤーが燃料集合体内での音響伝播にどのような影響を与えるかを把握する必要がある。しかし、燃料集合体を構成する燃料ピンやワイヤの表面を要素分割して音波を評価すると、計算量が膨大となり、音響伝播をシミュレーションすることが困難である。そこで燃料ピン及び燃料ピンに巻いたワイヤーの径が、音源の音波の最小波長より十分小さいことを用いて、個々の要素を点反射体のつながりとして近似する。この反射体は、入射方向に入射してきた音波と同相の波を、反対方向に逆相の波を返す双極子音源とする。さらに、振幅は入射してきた音波と反射波の合成値の勾配が要素面に垂直となるようにする。(完全剛体モデル)

その結果、燃料ピン及びワイヤーは軸に沿って一列に並んだ点要素で表現できるようになり、音響伝播の評価が可能となる。そこで、波長と比較して十分細い物体を、双極子点音源の連なりとしてモデル化することの妥当性を評価するために、次の 2 ケースの検討を行った。

第 1 のケースは、1 本の燃料ピンを通常の要素分割で表現したモデルと、一列に並んだ双極子音源の散乱反射体としたモデルについて、同じ音源から出た音波が 1 本の燃料ピンを横切っていく様子を解析し、両モデルで音圧分布の比較を行う。(以下(1)~(3)項)

第 2 のケースは、三本の燃料ピンにワイヤーを巻いた構造について、通常要素で構成したモデルと、燃料ピン及びワイヤーを共に双極子モデルで構築したモデルを作り、燃料ピンの軸方向について、同じ音源からの音波に対して反射波がどのように散乱するかを比較検討し、それらの結果を基にして、双極子モデルの妥当性を検討する。(以下(4)項)

(1) 燃料ピン 1 本による音場計算結果の比較

入射してくる音波の波長と比較して、燃料ピンの太さが十分に細いとき、燃料ピンを通常の要素分割したモデルと、燃料ピンを点の連なりとみなした双極子モデルの音場計算に及ぼす影響の違いを比較検討した。

図 3.1-1 に、音源と散乱体である円筒の位置関係を示す。図 3.1-2 に、散乱体である燃料ピンを通常の方法で要素分割した図を示す。図 3.1-3 に、燃料ピンを長さ方向に 10 分割し各々の分割された要素に円筒の太さを考慮した双極子モデルを示す。反射体は 10 分割された各要素に入射波と拮抗する双極子音源として設定されている。図 3.1-4 に、音源の形状を示している。音源はこの平面が与えられた加速度で振動することで表現されている。図 3.1-5 に平面に与えた加速度波形を示す。

(2) 通常要素モデルでの燃料ピン周囲の音場

図 3.1-6～図 3.1-8 に、通常要素モデルで計算した燃料ピン周囲の音場を示す。図 3.1-6 は、燃料ピンを上から見た、燃料ピン周囲横断面の音圧分布を等高線の色表示で示しており、図 3.1-6(1)～(14)は、各時刻 2×10^{-6} sec 毎に燃料ピン周囲の横断面音圧分布が変化している様子を表す。

図 3.1-7 は、燃料ピンを横から見た、燃料ピン周囲縦断面の音圧分布を等高線の色表示で示しており、図 3.1-7(1)～(14)は、各時刻 2×10^{-6} sec 毎の燃料ピン周囲の縦断面音圧分布が変化している様子を表す。

図 3.1-8 は、音圧分布の定量的評価を行うため、音源と燃料ピンを最短でつないだ直線上の音圧分布を示しており、図 3.1-8(1)～(14)は、各時刻 2×10^{-6} sec 毎に音源と燃料ピンを結ぶ直線上の音圧分布が変化している様子を表す。尚、同図において、0mm 位置を中心とした燃料ピン配置としているため、ピン径の分だけ音圧分布が途切れている。

(3) 双極子モデルでの燃料ピン周囲の音場

図 3.1-9～図 3.1-11 に、通常要素モデルとの比較のため双極子モデルで計算した、燃料ピン周囲の音場を示す。

図 3.1-9 は、燃料ピンを上から見た、燃料ピン周囲横断面の音圧分布を等高線の色表示で示しており、図 3.1-9(1)～(14)に、各時刻 2×10^{-6} sec 毎の燃料ピン周囲の横断面音圧分布が変化している様子を表す。図 3.1-10 は、燃料ピンを横から見た、燃料ピン周囲縦断面の音圧分布を等高線の色表示で示しており、図 3.1-10(1)～(14)に、各時刻 2×10^{-6} sec 毎の燃料ピン周囲の縦断面音圧分布が変化している様子を表す。図 3.1-11 は、音圧分布の定量的評価を行うため、音源と燃料ピンを最短でつないだ直線上の音圧分布を示しており、図 3.1-11(1)～(14)は、各時刻 2×10^{-6} sec 毎に音源と燃料ピンを結ぶ直線上の音圧分布が変化している様子を表す。尚、同図において 0m 位置を中心とした燃料ピン配置としているため、ピン径の分だけ音圧分布が途切れている。

(4) 燃料集合体に巻いたラッピングワイヤーのモデル化

燃料集合体の中にある燃料ピンには、お互いの燃料ピンの接触防止のためワイヤーが巻いてある。このワイヤーが燃料集合体内部を燃料ピンに沿って伝播する音波に対し、どの程度の影響を与えるかを検討する。

燃料集合体内部の燃料ピン及び、燃料ピンに巻いたラッピングワイヤーの形状を正確に表現すると計算量が膨大になり、計算が不可能となる。そこで、燃料ピンやラッピングワイヤー各要素が、今考えている音波の波長より十分小さいことを考慮し、先に述べた双極子モデルの適用性検討を行った。

実際に、双極子モデルでシミュレーションが可能であることを示すために、燃料ピンとラッピングワイヤーのある部分モデルを通常の要素モデルと、双極子モデルの二通りのモデルを構築し比較検討した。図 3.1-12 に部分モデルの全体図を示す。燃料ピンは三本で構成され、その各々にラッピングワイヤーが一巻き巻いてある。音源は燃料ピンの下方から与え、波形は図 3.1-5 に示した加速度波形を用いている。図 3.1-13 にこの部分モデルを通常要素で分割した結果を示す。要素数は 5400 で表現している。図 3.1-14 に、このモデルを双極子要素で分割したモデルを示す。要素数は 300 で表現している。図 3.1-15 は、音源として与えた振動板のモデルを示している。

① 通常要素でモデル化した部分モデル

図 3.1-16(1)~(10)に、三本の燃料ピンの中間の縦断面の音圧分布を $8.0 \times 10^{-6}(\text{sec})$ ~ $4.4 \times 10^{-6}(\text{sec})$ まで $4 \times 10^{-6}(\text{sec})$ 毎に示す。図 3.1-17(1)~(10)に三本の燃料ピンの中心軸上の音圧を示す。また、各図で表示した音圧の時刻は、図 3.1-16 で音圧分布を示した時刻と一致している。

② 双極子要素でモデル化した部分モデル

図 3.1-18(1)~(10)に、図 3.1-16 で示した音圧分布と対比する、双極子要素で計算した音圧分布を示す。また図 3.1-19(1)~(10)に図 3.1-17 に対応した三本の燃料ピンの中心軸上の音圧を各時刻で示す。

(5) 結果

図 3.1-16 及び図 3.1-18 により、両者の音圧分布を各時刻毎に比較してみると、波面の形状は良く一致している事が分かる。更に定量的な評価として図 3.1-17 及び図 3.1-19 により音圧値を比較すると、比較する時刻によっては 10%程度の違いがあるものの、反射時刻の微妙な違いによる位相のずれである可能性が高く問題にはならないと思われる。通常要素モデルと双極子モデルの一番大きな違いは、通常要素モデルが形状を正確に表現しているのに対して、双極子モデルが形状を点に近似したことにある。そのため、散乱体に入射してきた音波に対して、双極子モデルは、反射時刻が管の半径分だけ遅れることになる。しかし元々の近似条件として、入射してくる音波の波長に対して、散乱体の管の太さは十分細いとしているため、この位相の遅れ分は音波の伝播状態の確認としては問題にならない。以上の結果から双極子モデルの適用性の確認ができた。

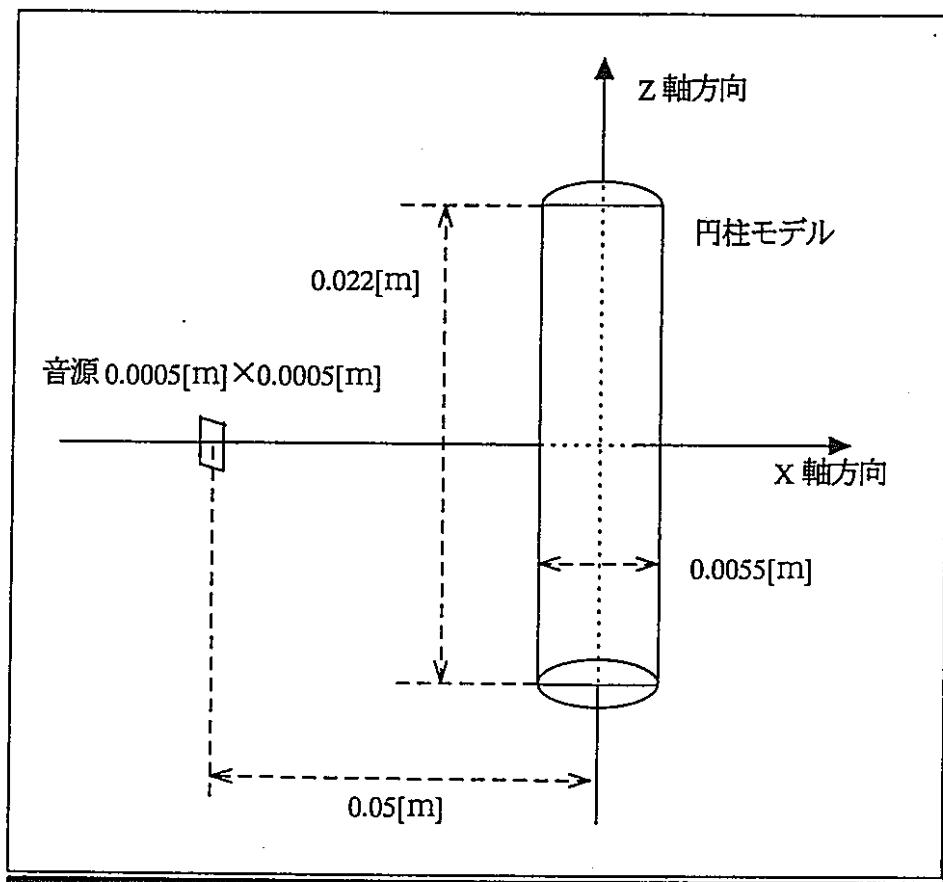


図3.1-1 シミュレーションモデル外観
音源と燃料ピンの位置関係を示す

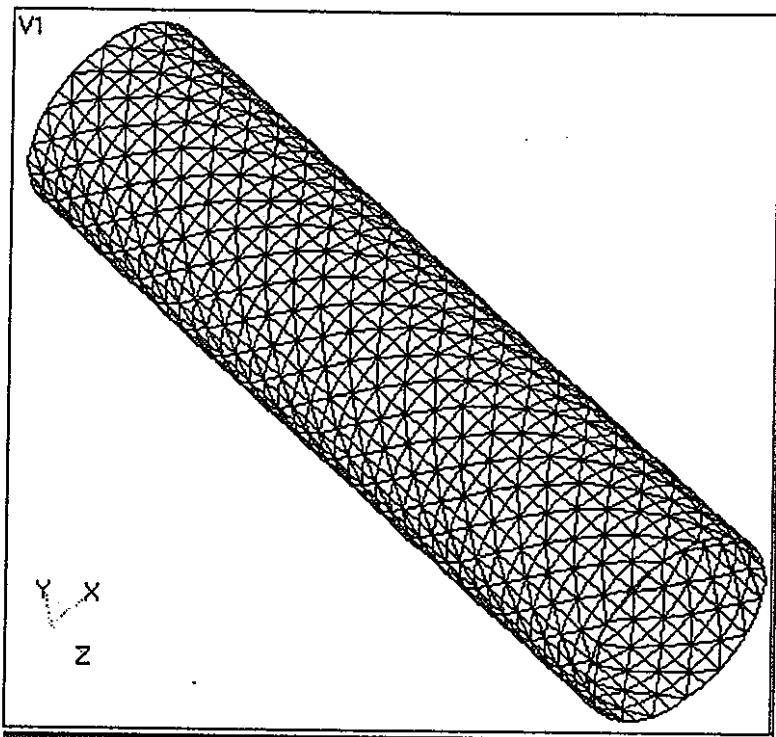


図3.1-2 燃料ピンを摸擬した円柱モデル（通常要素モデル）

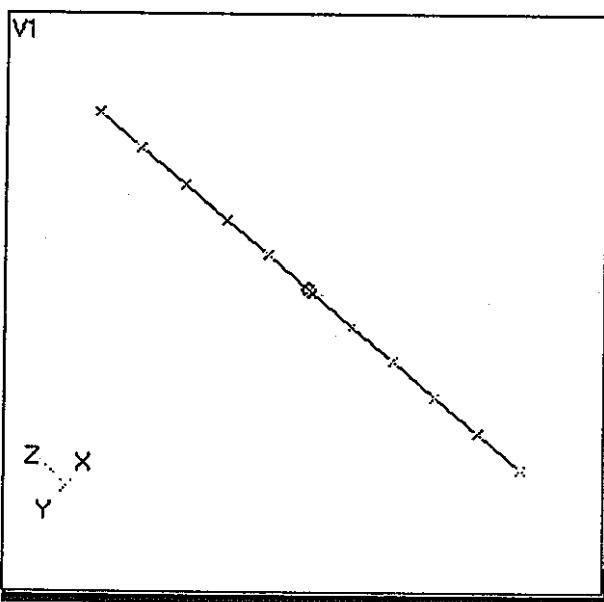


図3.1-3 燃料ピンを摸擬した円柱モデル（双極子モデル）
円柱の長さを10等分し各々の要素に入射波と拮抗する
双極子音源があるとした。

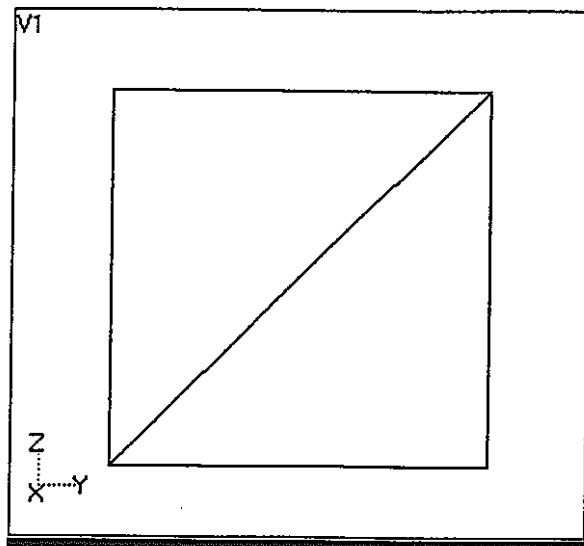


図3.1-4 音源の形状モデル
二枚の三角形を用いて正方形を作り、加速度音源とした。

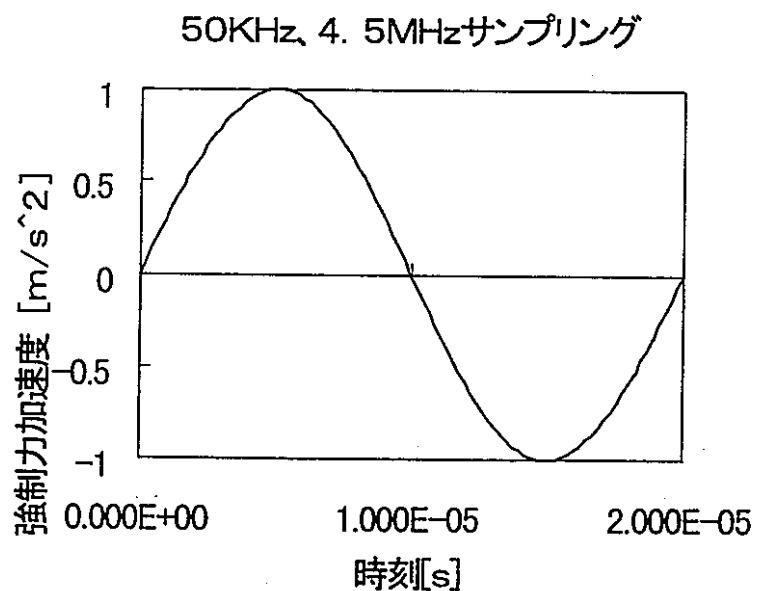


図3.1-5 音源に与えた加速度波形

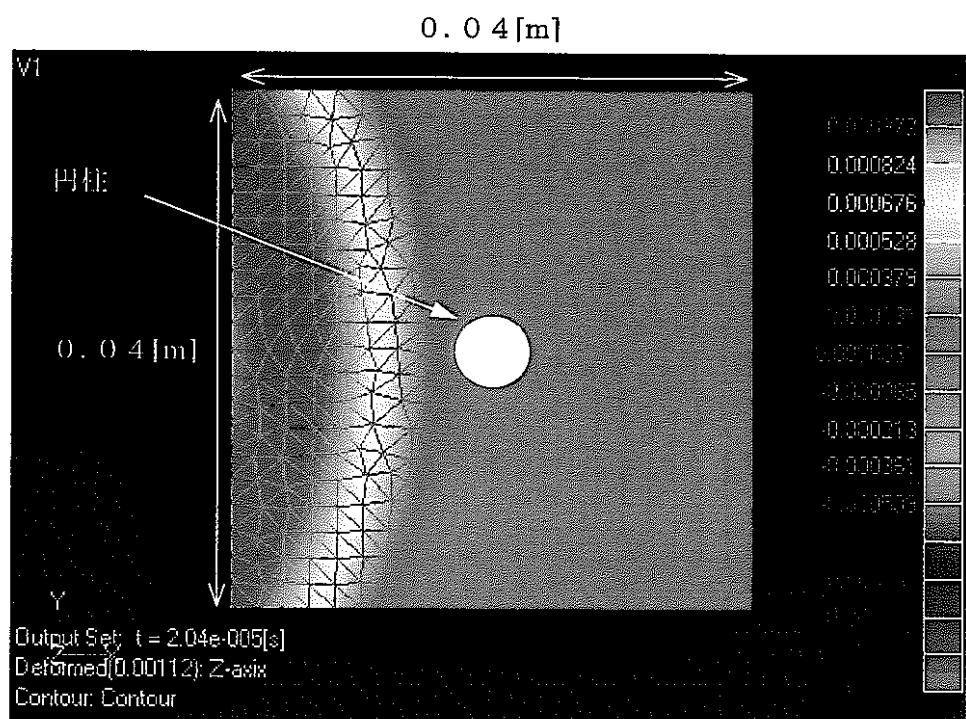


図 3.1-6(1) 円柱断面方向の音圧分布（通常要素）

時刻 : 2.04 e - 5 [s]

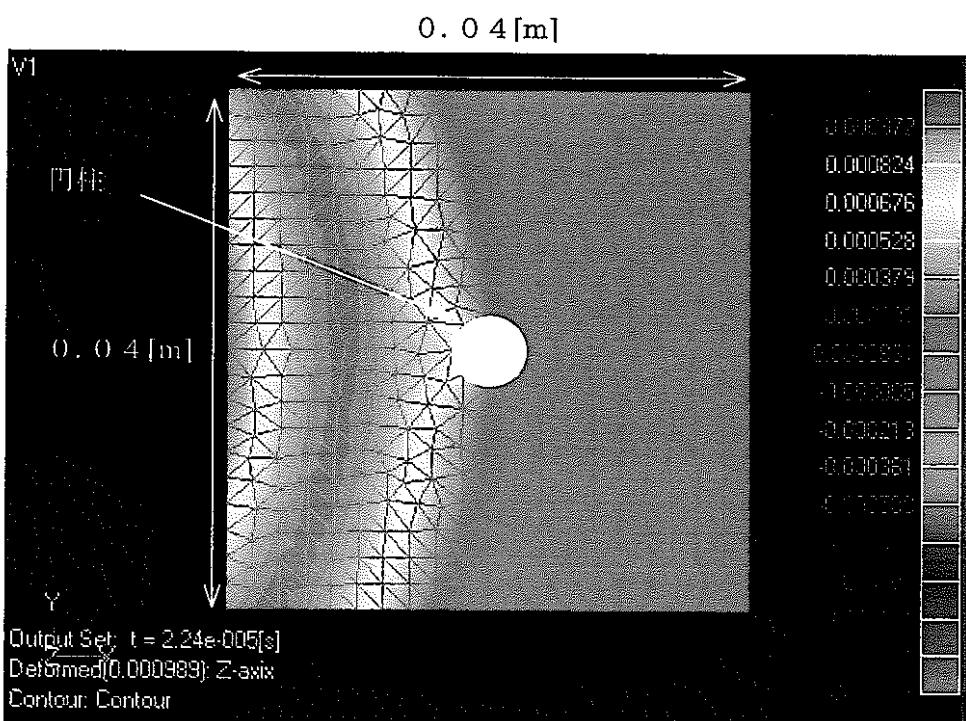


図 3.1-6(2) 円柱断面方向の音圧分布（通常要素）

時刻 : 2.24 e - 5 [s]

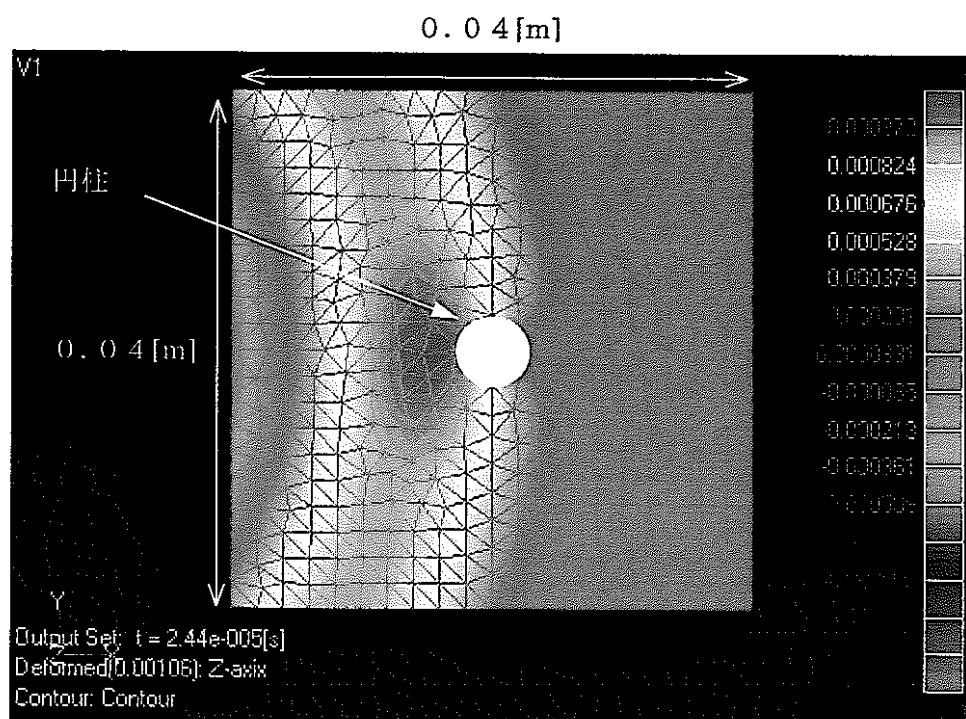


図 3.1-6(8) 円柱断面方向の音圧分布（通常要素）

時刻 : 2.4 4 e – 5 [s]

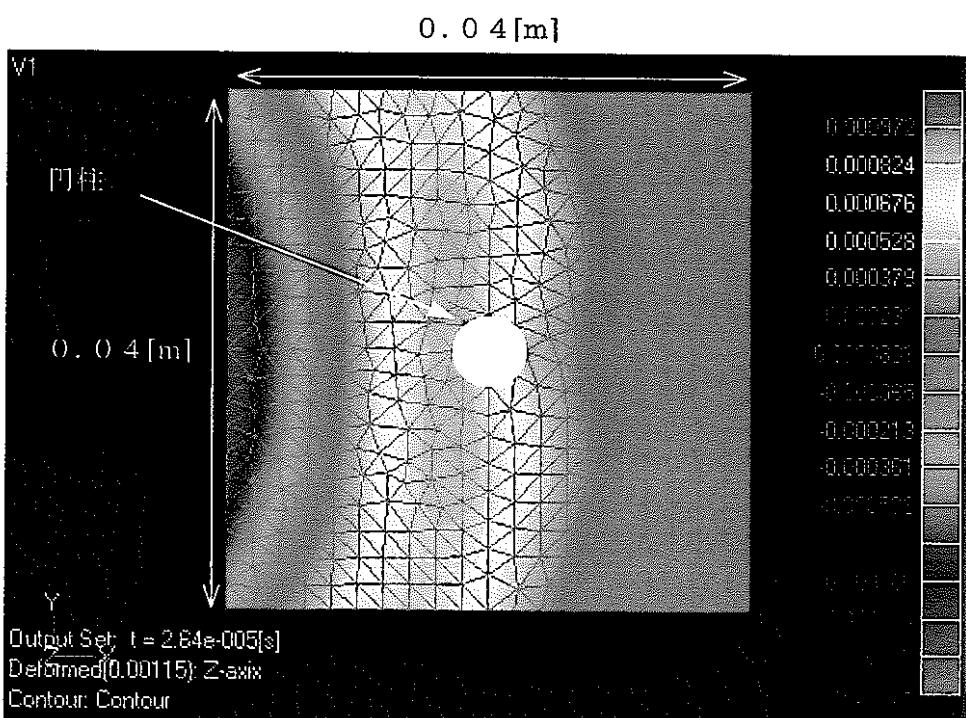


図 3.1-6(4) 円柱断面方向の音圧分布（通常要素）

時刻 : 2.6 4 e – 5 [s]

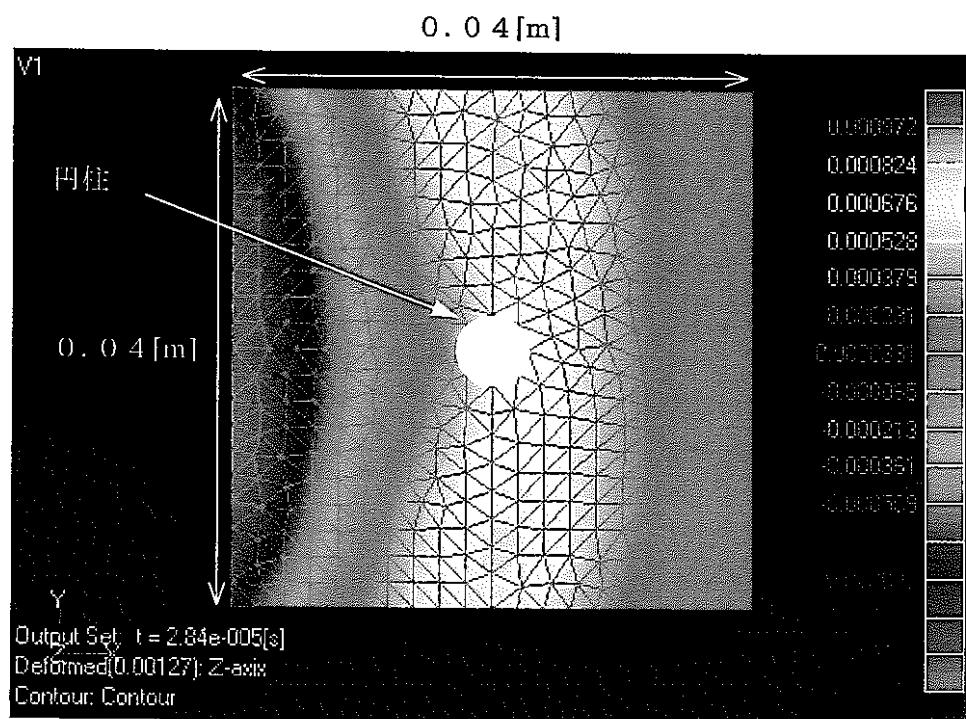


図 3.1-6(5) 円柱断面方向の音圧分布（通常要素）

時刻 : 2.84 e - 5 [s]

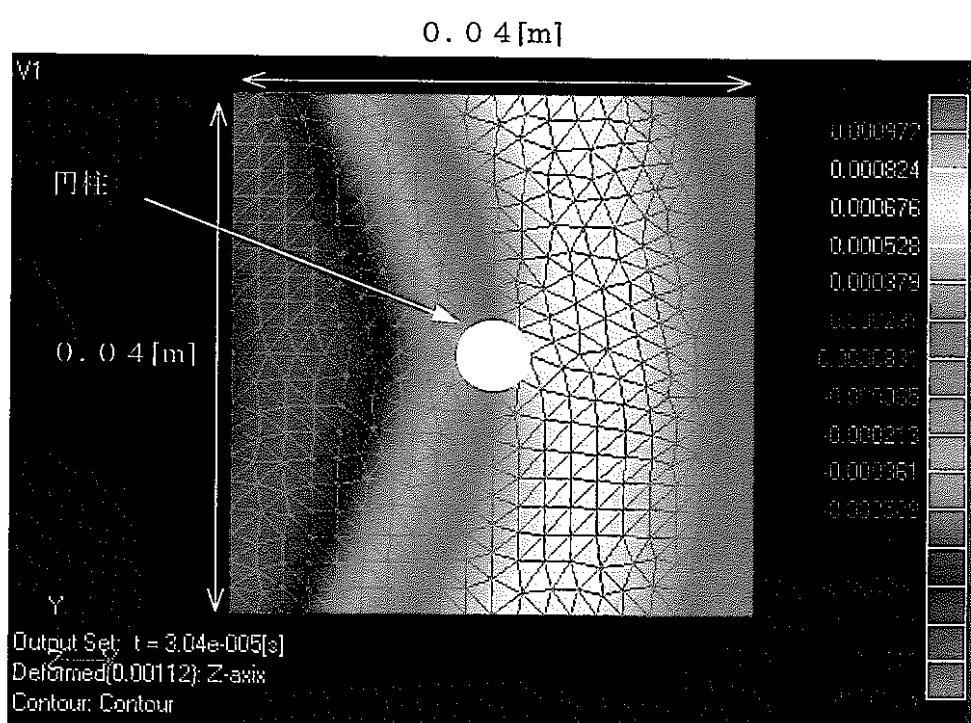


図 3.1-6(6) 円柱断面方向の音圧分布（通常要素）

時刻 : 3.04 e - 5 [s]

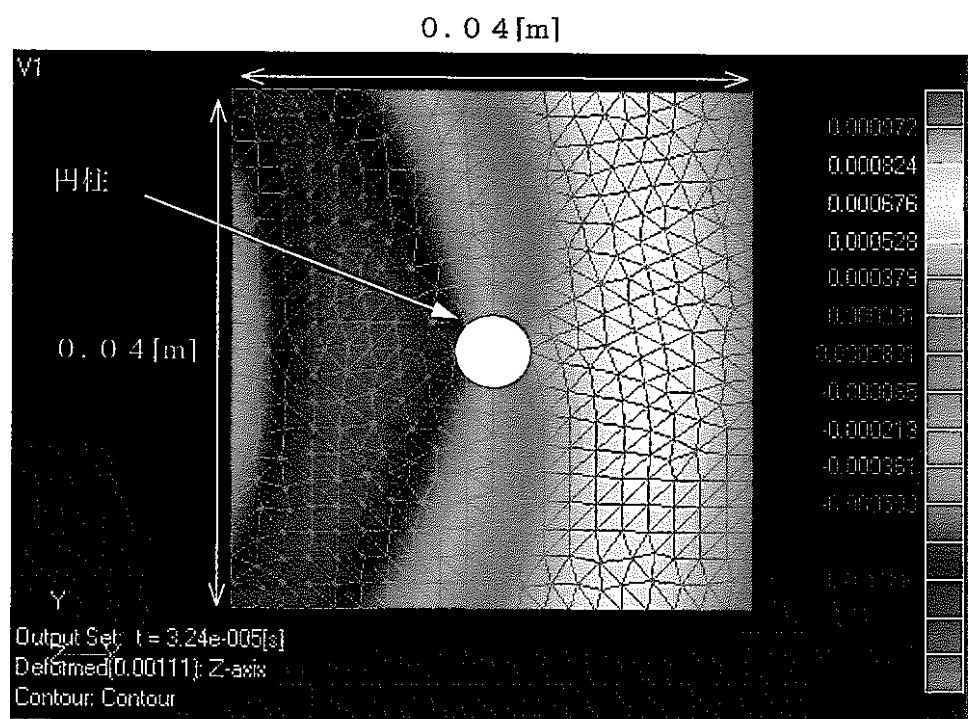


図 3.1-6(7) 円柱断面方向の音圧分布（通常要素）

時刻 : 3.24 e - 5 [s]

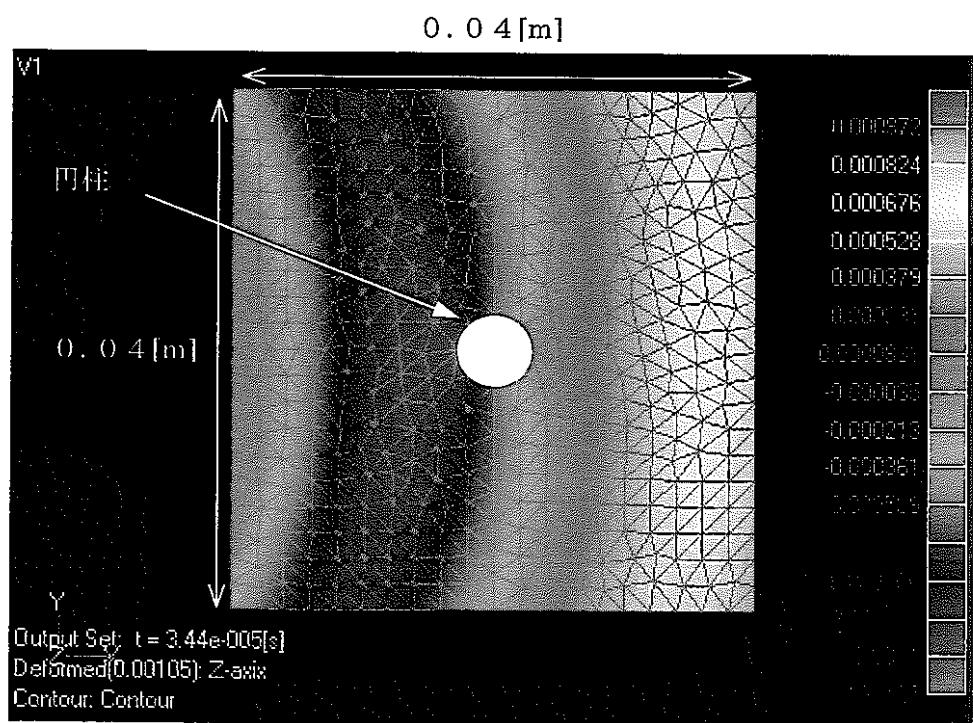


図 3.1-6(8) 円柱断面方向の音圧分布（通常要素）

時刻 : 3.44 e - 5 [s]

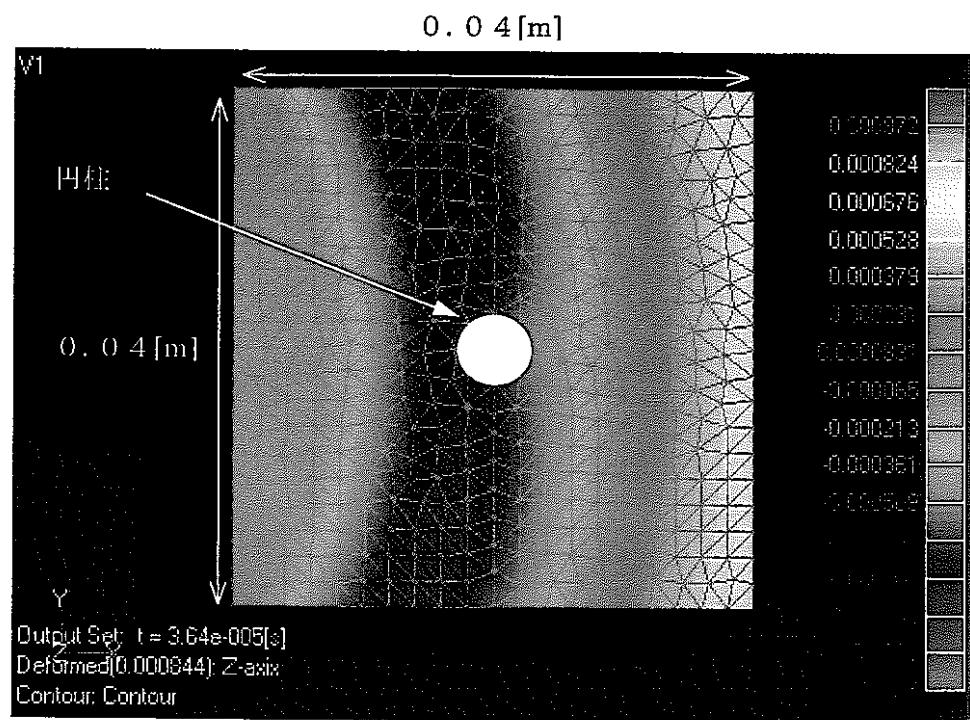


図 3.1-6(9) 円柱断面方向の音圧分布（通常要素）

時刻 : 3.64 e - 5 [s]

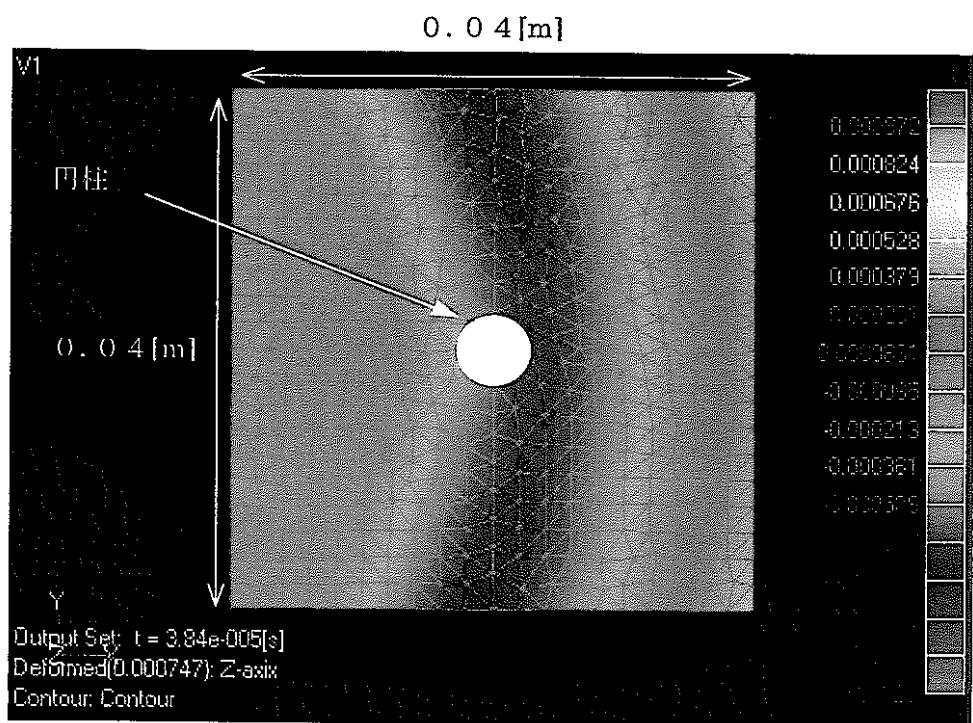


図 3.1-6(10) 円柱断面方向の音圧分布（通常要素）

時刻 : 3.84 e - 5 [s]

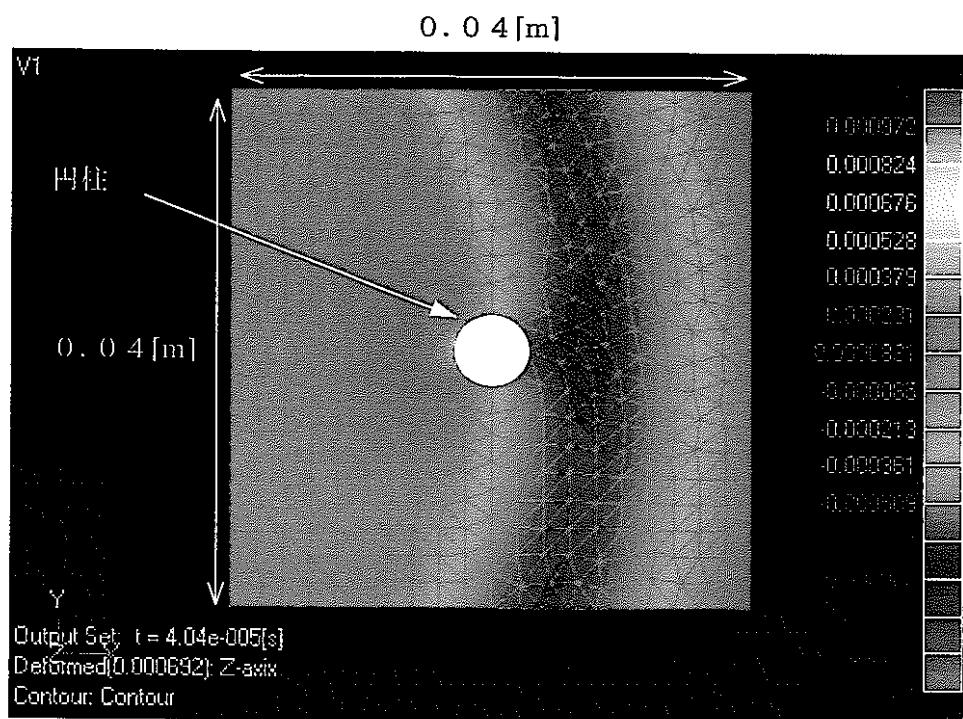


図 3.1-6(11) 円柱断面方向の音圧分布（通常要素）

時刻 : $4.04 \times 10^{-5} [s]$

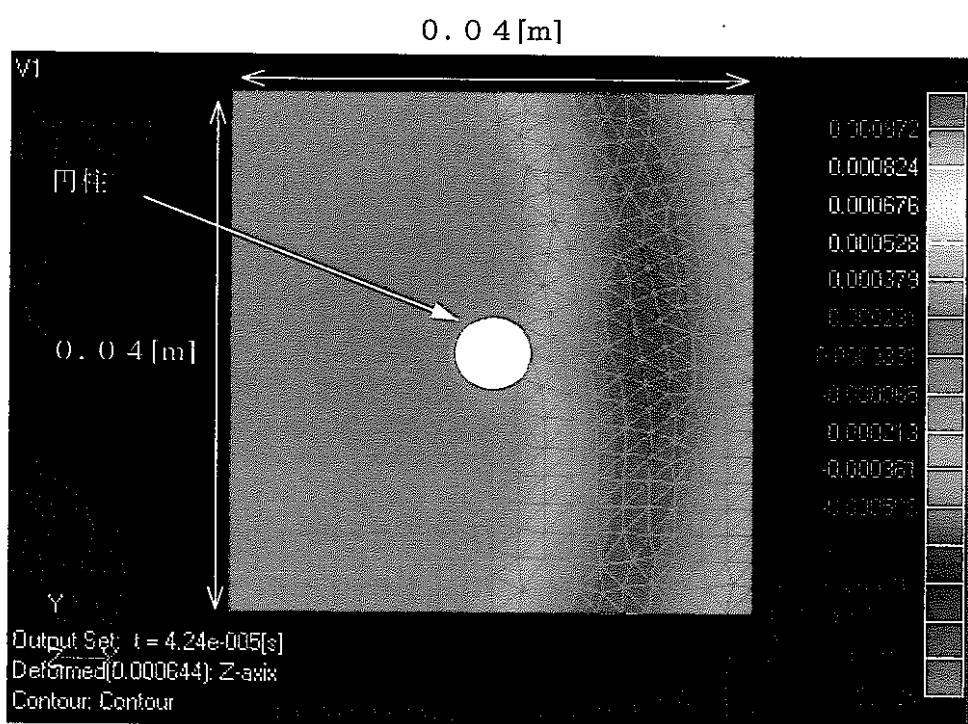


図 3.1-6(12) 円柱断面方向の音圧分布（通常要素）

時刻 : $4.24 \times 10^{-5} [s]$

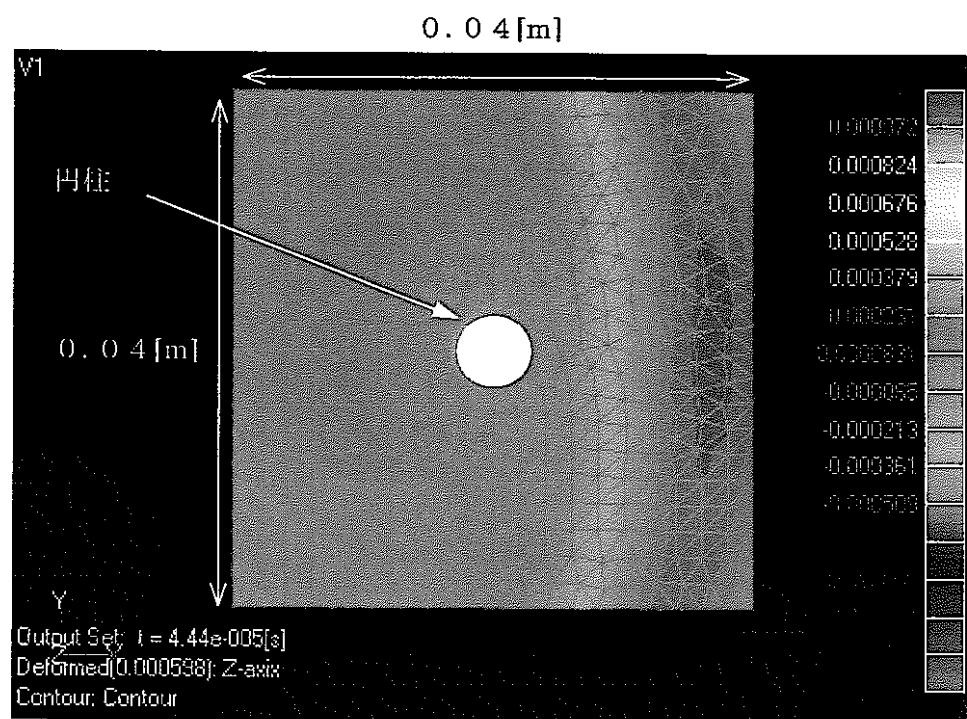


図 3.1-6(13) 円柱断面方向の音圧分布（通常要素）

時刻 : 4.44 e - 5 [s]

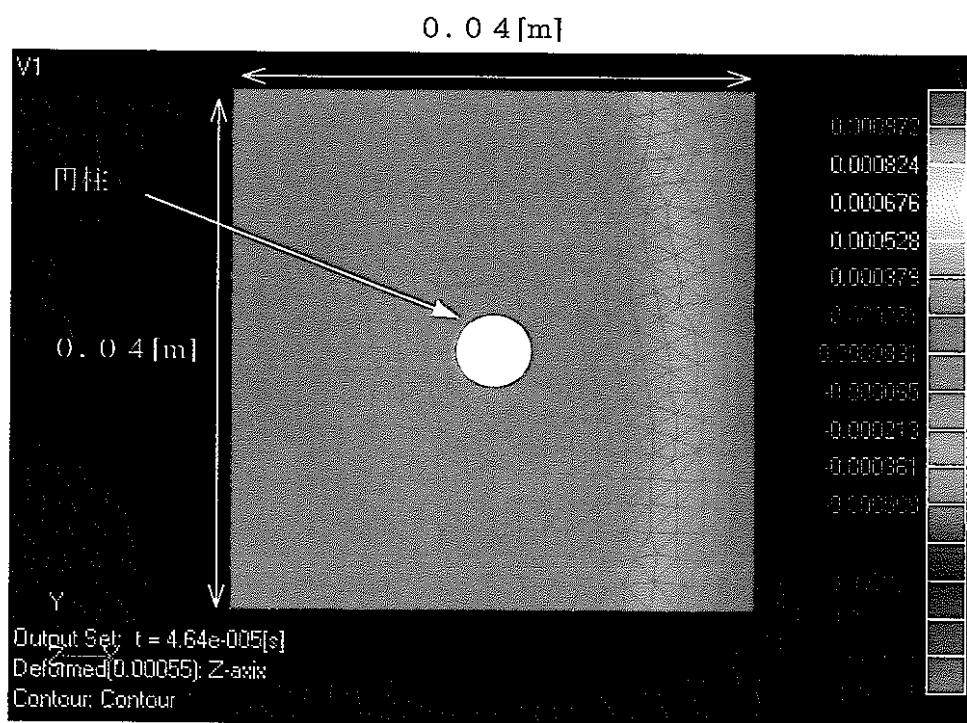


図 3.1-6(14) 円柱断面方向の音圧分布（通常要素）

時刻 : 4.64 e - 5 [s]

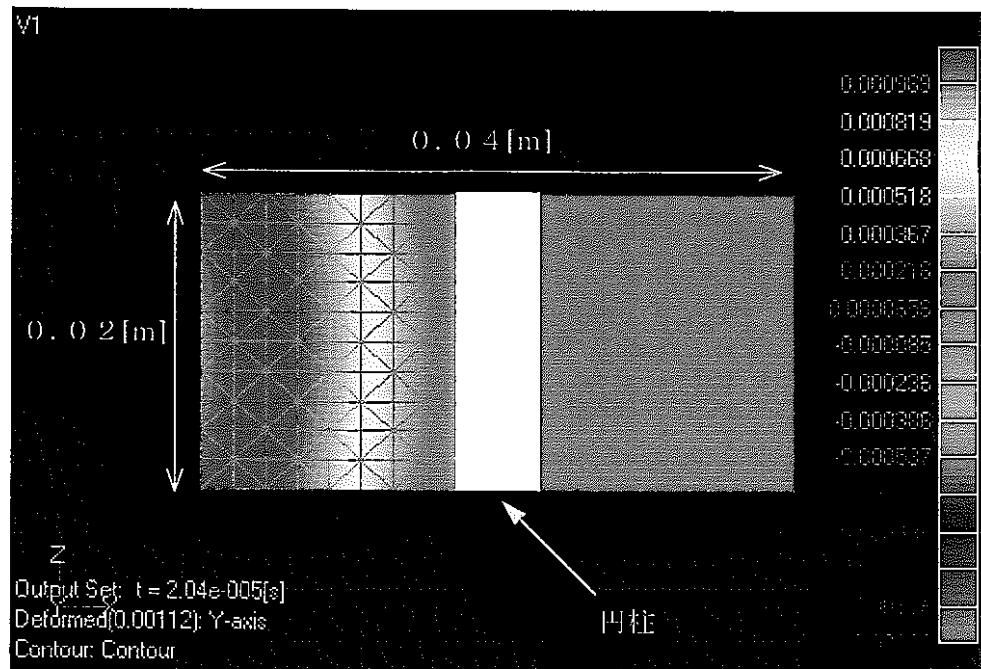


図 3.1-7(1) 円柱軸方向の音圧分布（通常要素）

時刻 : $2.04 \times 10^{-5} [\text{s}]$

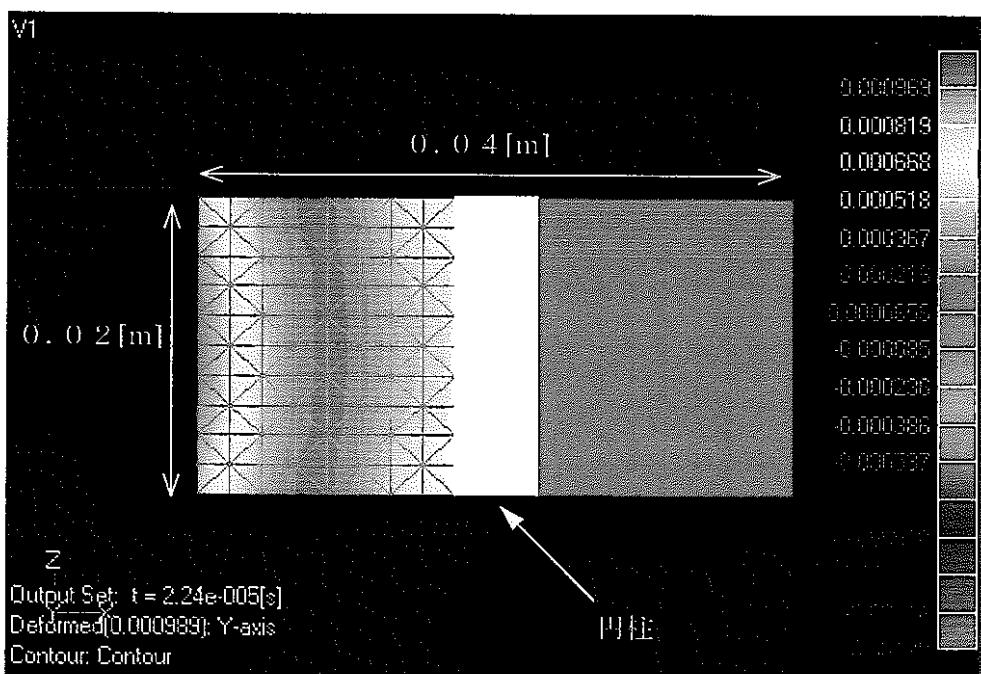


図 3.1-7(2) 円柱軸方向の音圧分布（通常要素）

時刻 : $2.24 \times 10^{-5} [\text{s}]$

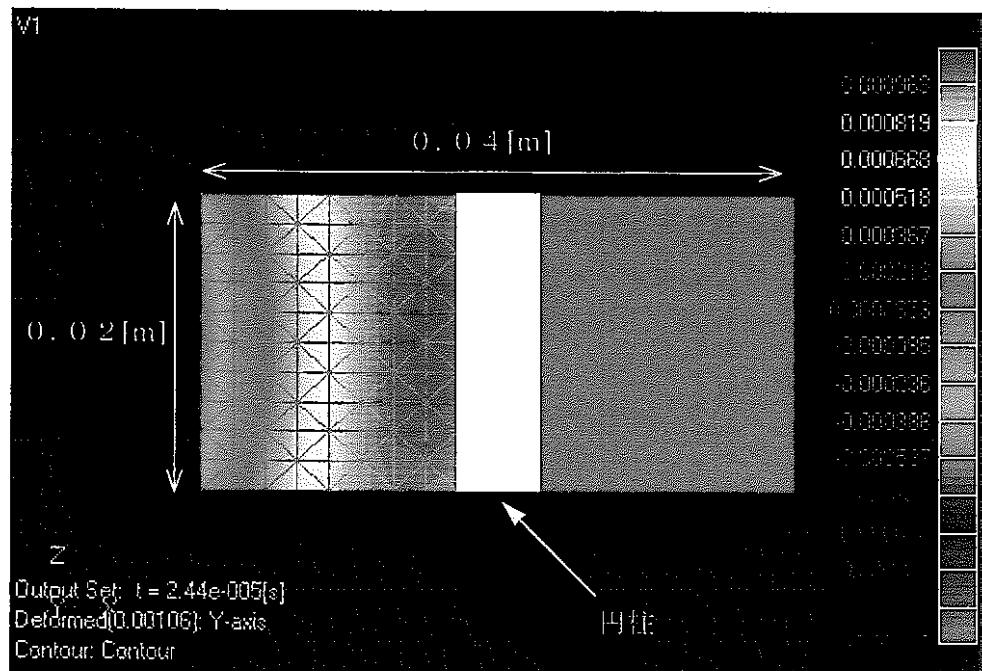


図 3.1-7(3) 円柱軸方向の音圧分布（通常要素）

時刻 : 2.44 e - 5 [s]

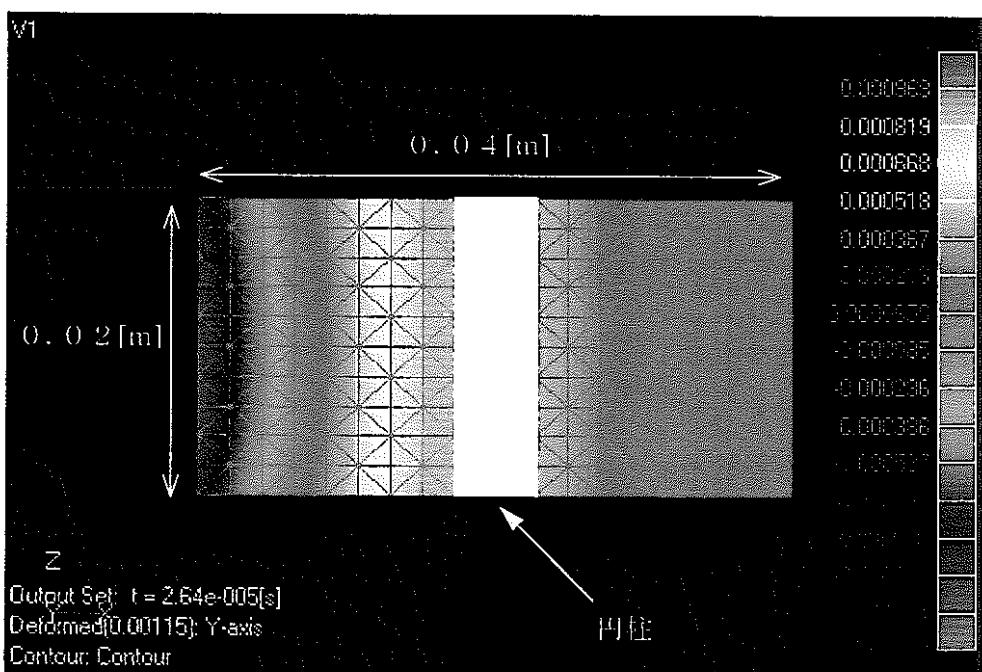


図 3.1-7(4) 円柱軸方向の音圧分布（通常要素）

時刻 : 2.64 e - 5 [s]

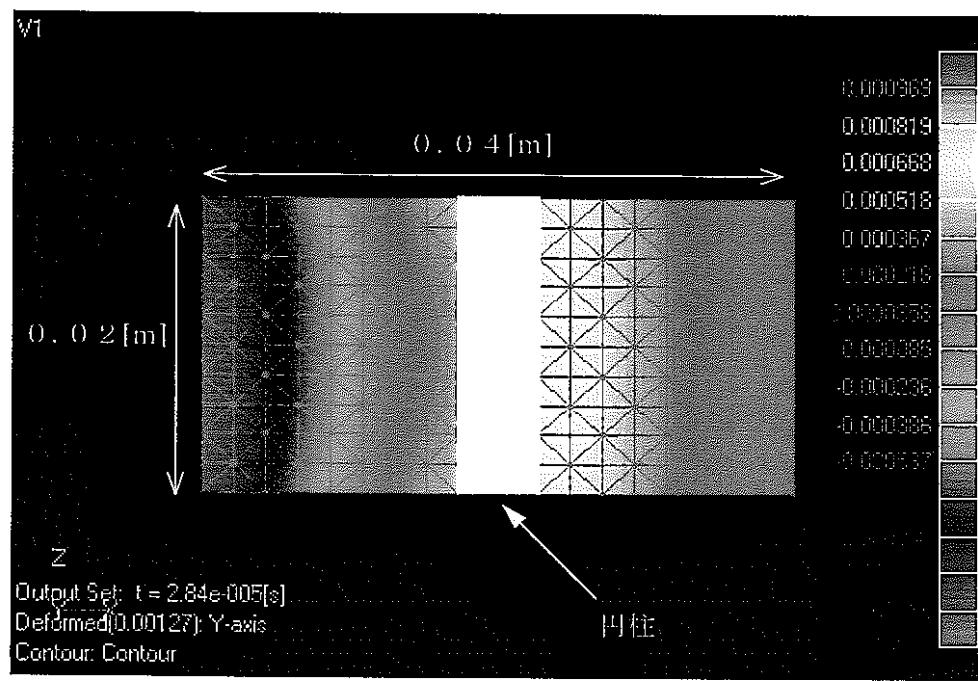


図 3.1-7(5) 円柱軸方向の音圧分布（通常要素）

時刻 : 2.84 e - 5 [s]

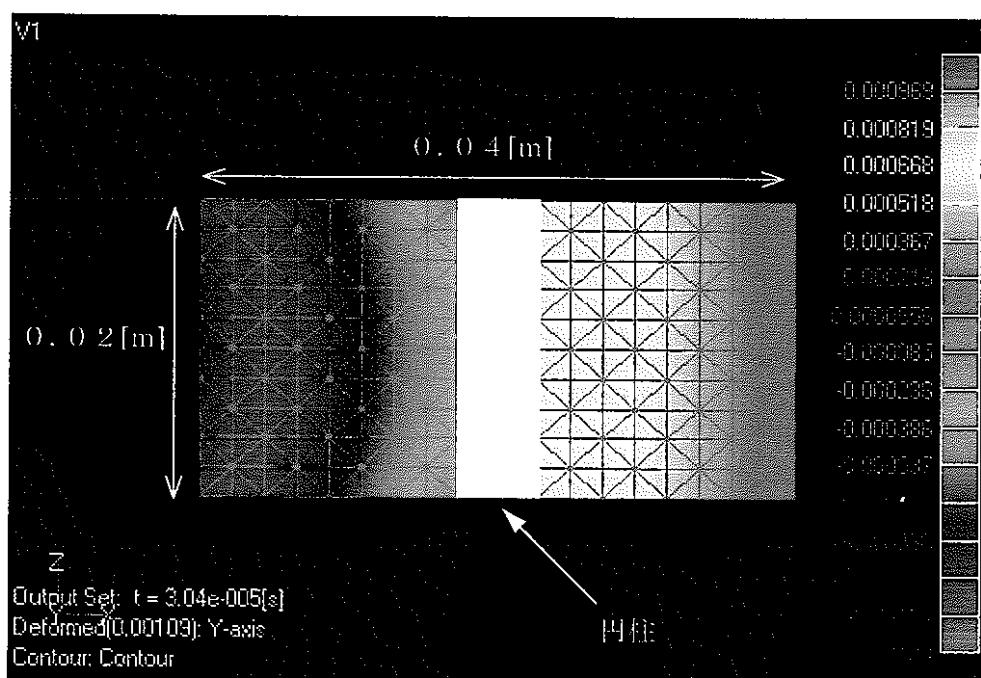


図 3.1-7(6) 円柱軸方向の音圧分布（通常要素）

時刻 : 3.04 e - 5 [s]

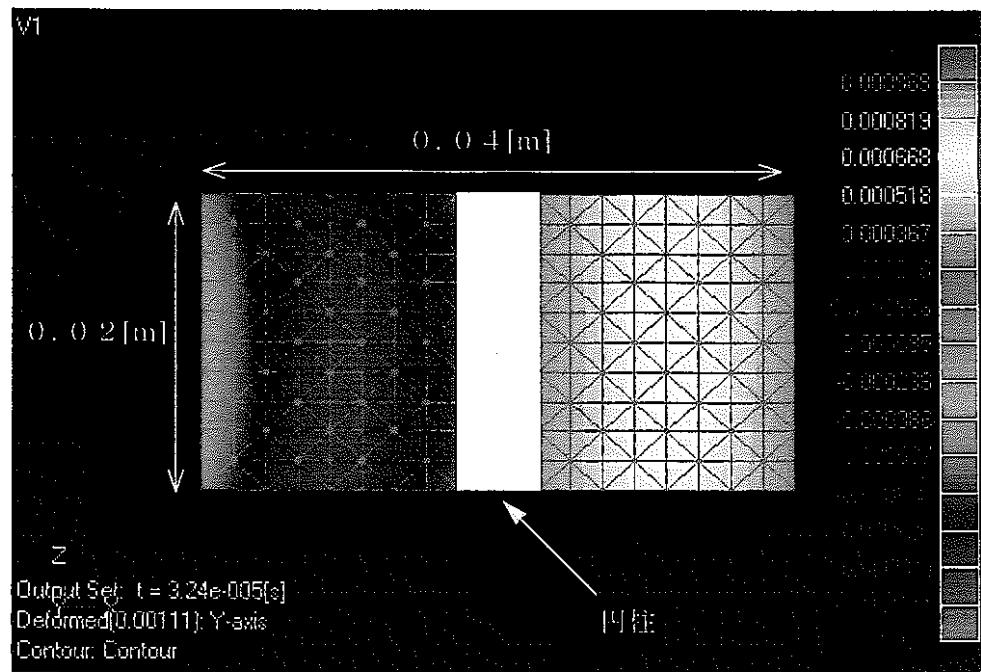


図 3.1-7(7) 円柱軸方向の音圧分布（通常要素）

時刻 : 3.24 e - 5 [s]

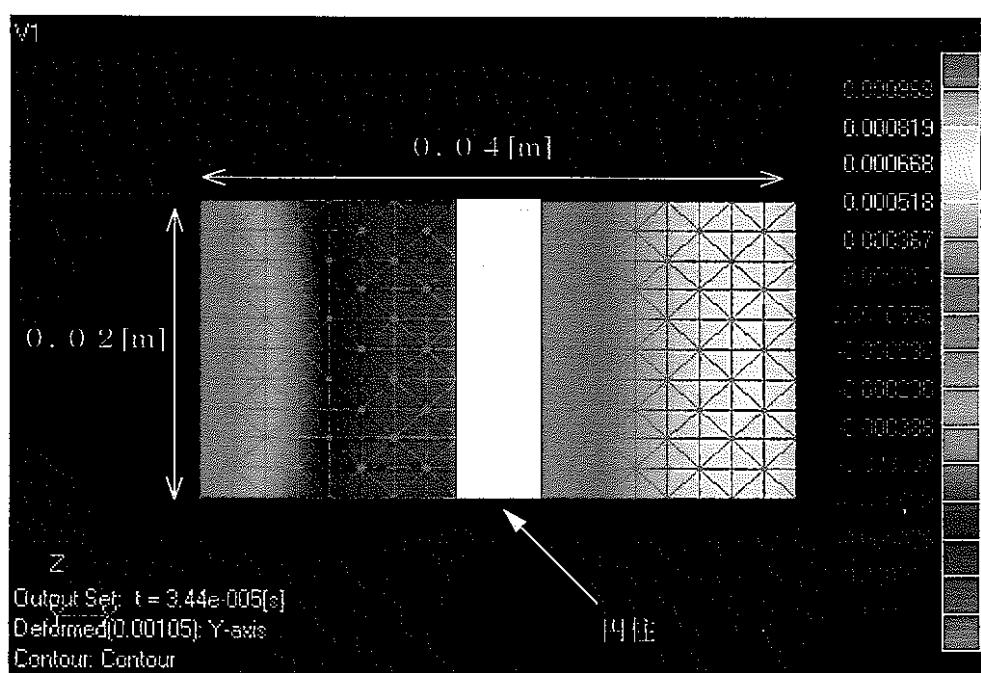


図 3.1-7(8) 円柱軸方向の音圧分布（通常要素）

時刻 : 3.44 e - 5 [s]

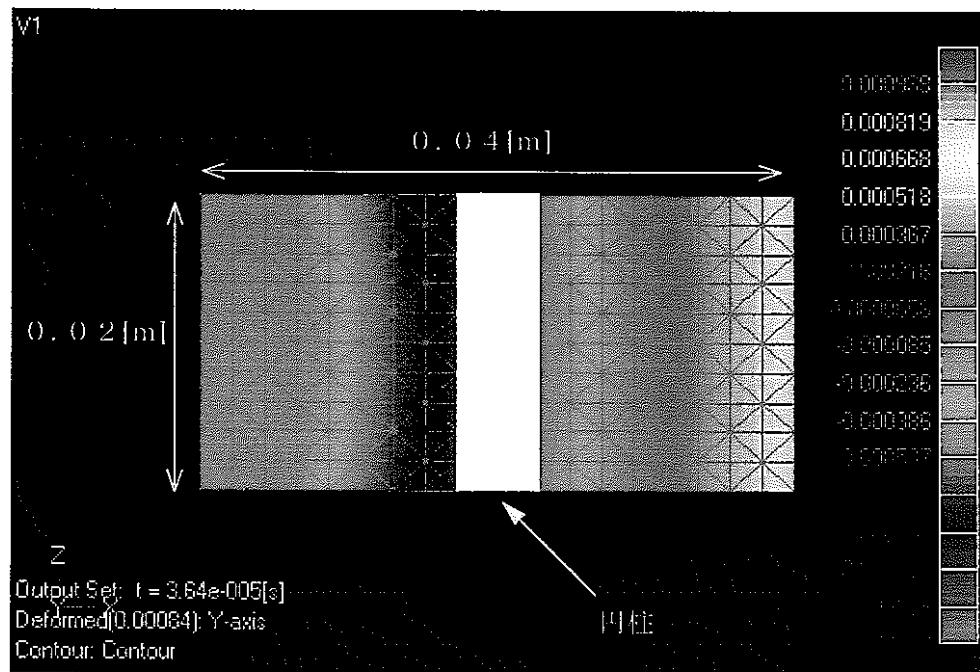


図 3.1-7(9) 円柱軸方向の音圧分布（通常要素）

時刻 : $3.64 \times 10^{-5} [\text{s}]$

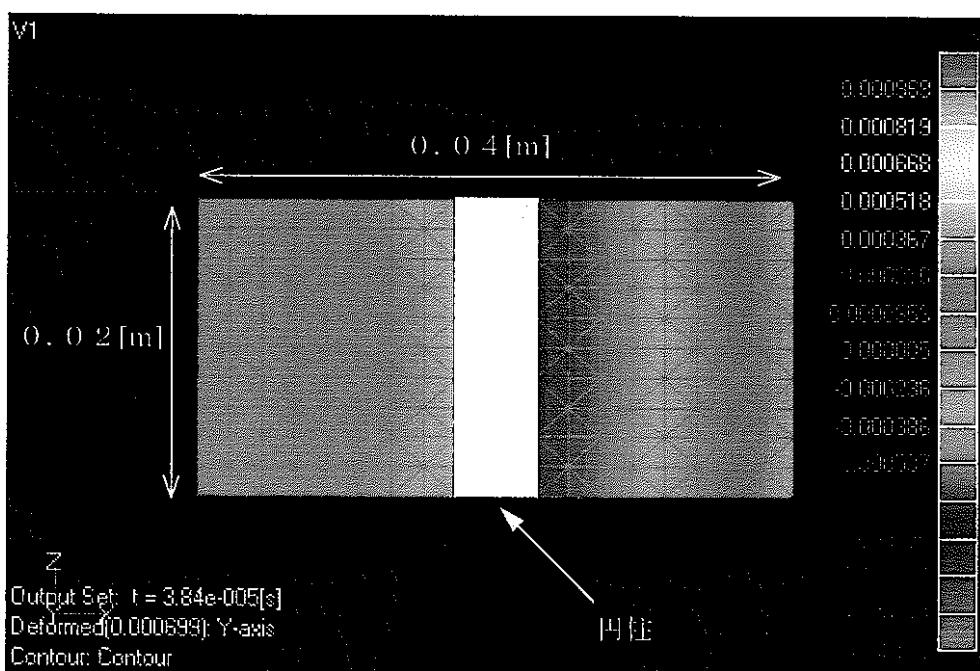


図 3.1-7(10) 円柱軸方向の音圧分布（通常要素）

時刻 : $3.84 \times 10^{-5} [\text{s}]$

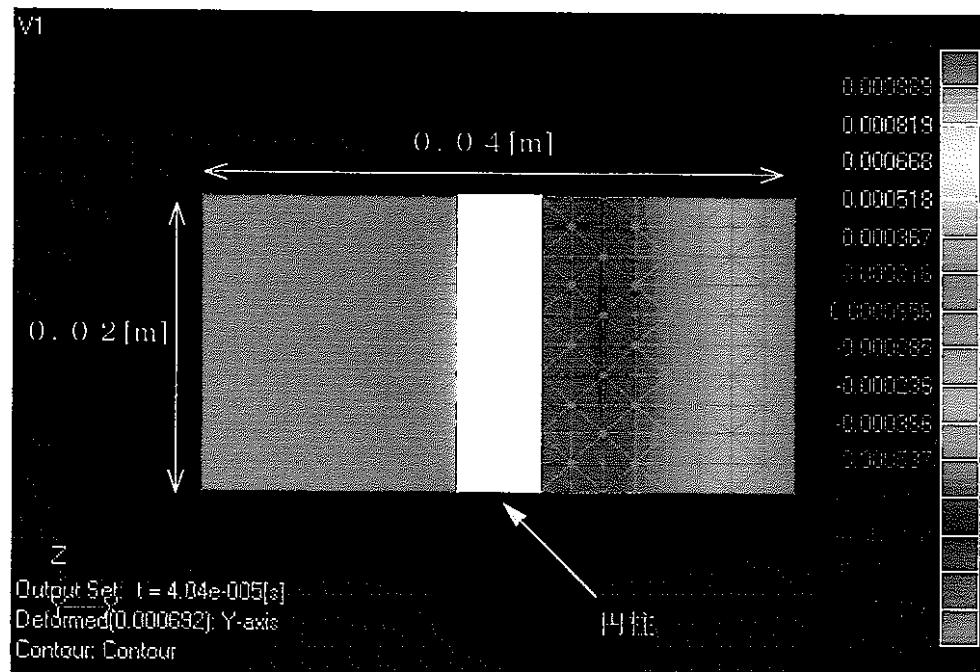


図 3.1-7(11) 円柱軸方向の音圧分布（通常要素）

時刻 : $4.04 \times 10^{-5} [\text{s}]$

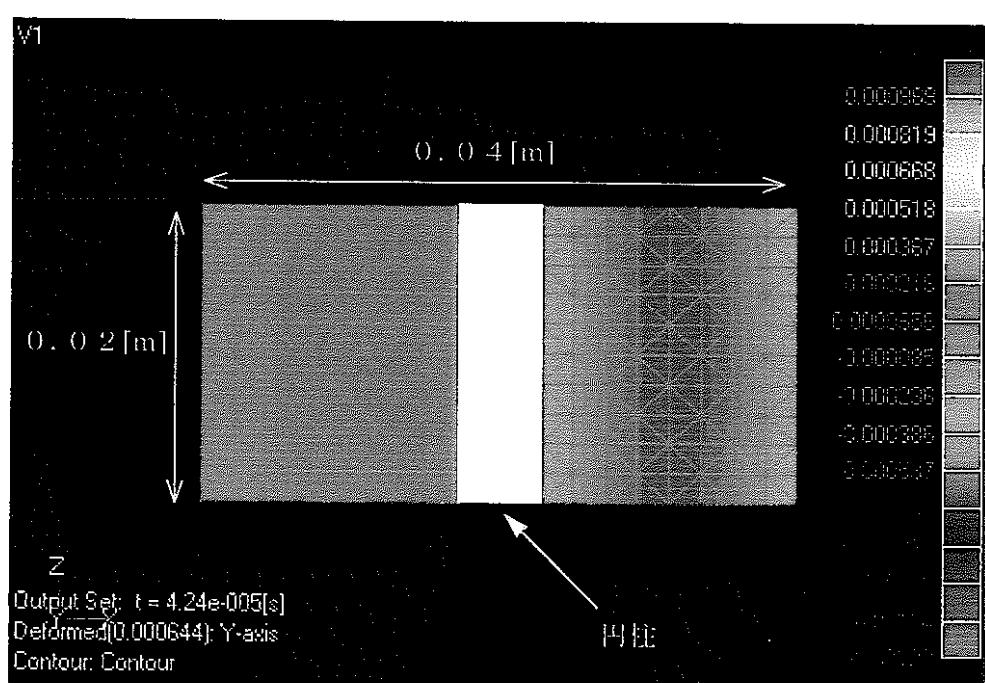


図 3.1-7(12) 円柱軸方向の音圧分布（通常要素）

時刻 : $4.24 \times 10^{-5} [\text{s}]$

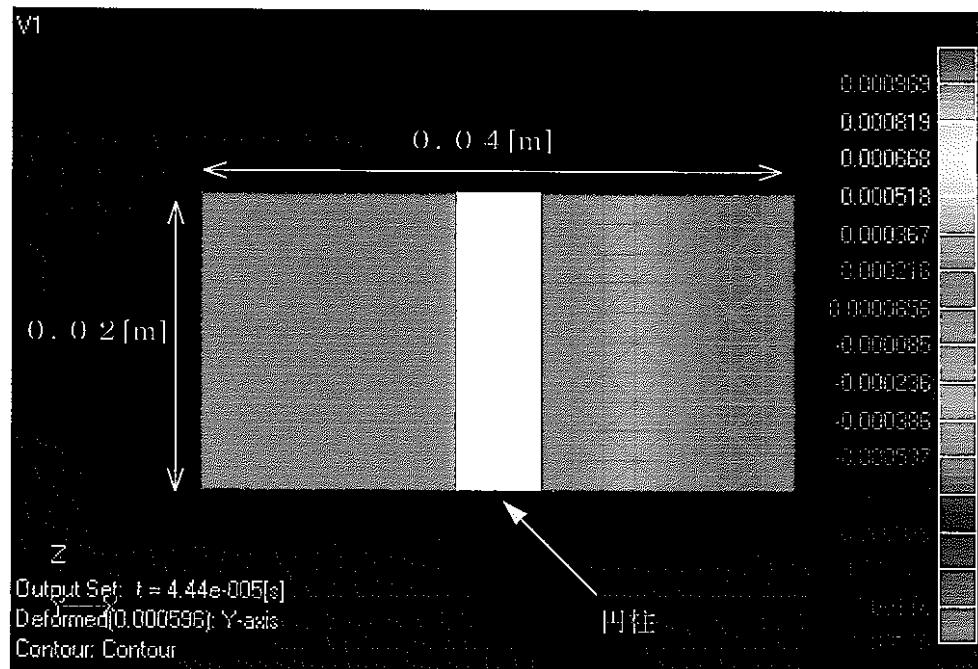


図 3.1-7(13) 円柱軸方向の音圧分布（通常要素）

時刻 : $4.44 \times 10^{-5} [\text{s}]$

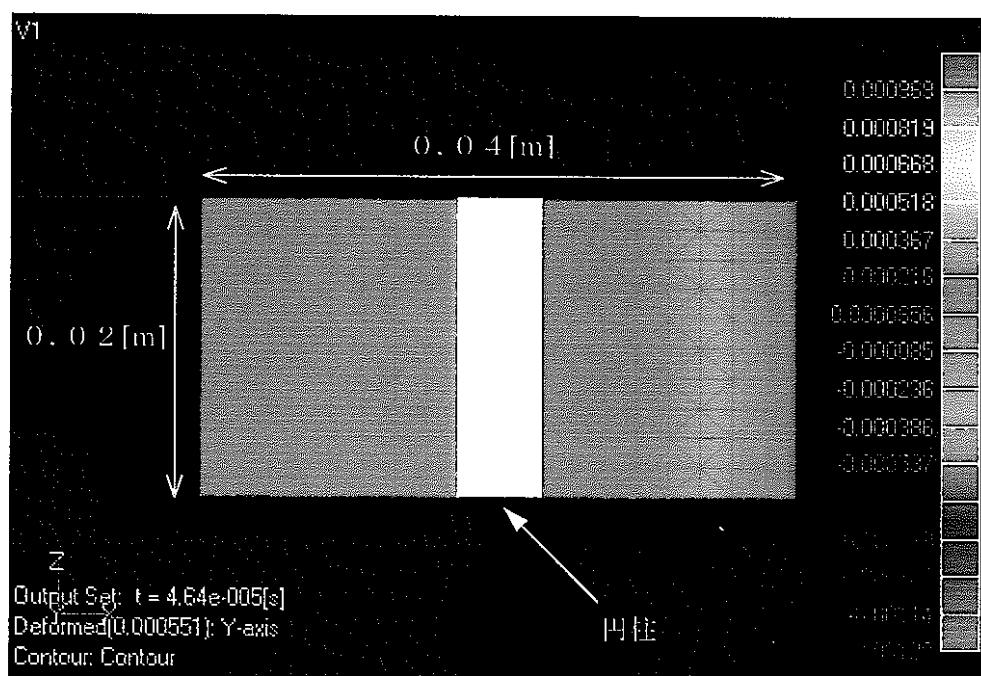


図 3.1-7(14) 円柱軸方向の音圧分布（通常要素）

時刻 : $4.64 \times 10^{-5} [\text{s}]$

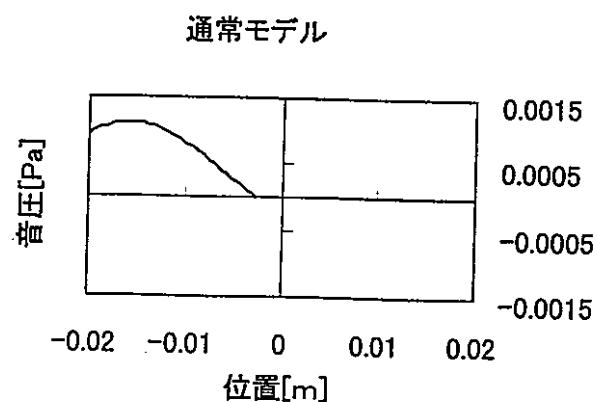


図 3.1-8(1) 入射波が円柱に入る直前
 $2.04 \times 10^{-5}(\text{sec})$

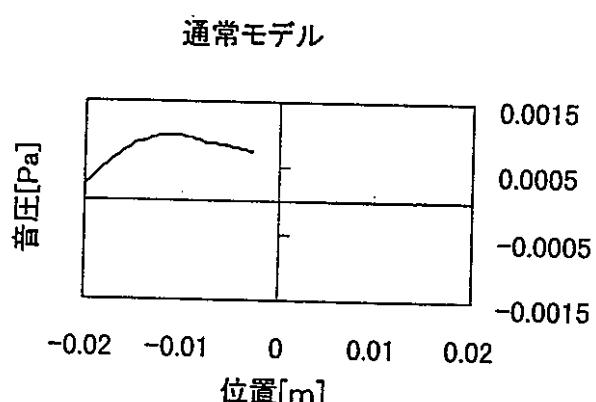


図 3.1-8(2) 入射波が円柱に接触した瞬間
 $2.24 \times 10^{-5}(\text{sec})$

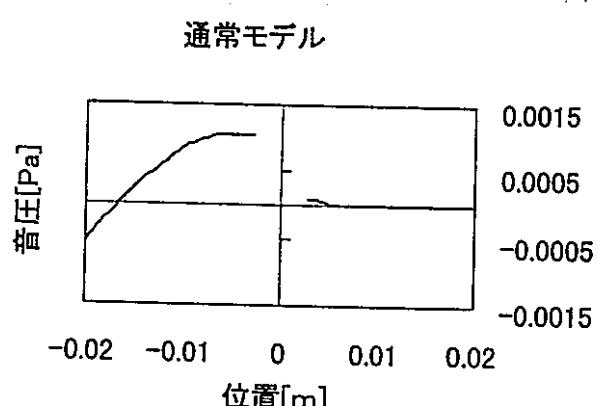


図 3.1-8(3) 入射波が円柱を通過した瞬間
 $2.44 \times 10^{-5}(\text{sec})$

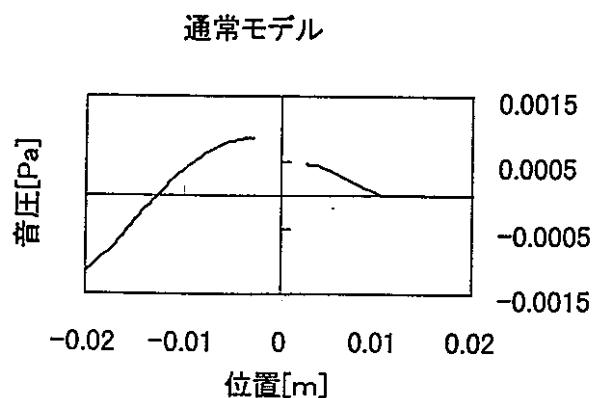


図 3.1-8(4) 入射波と円柱の相互作用

$2.64 \times 10^{-5}(\text{sec})$

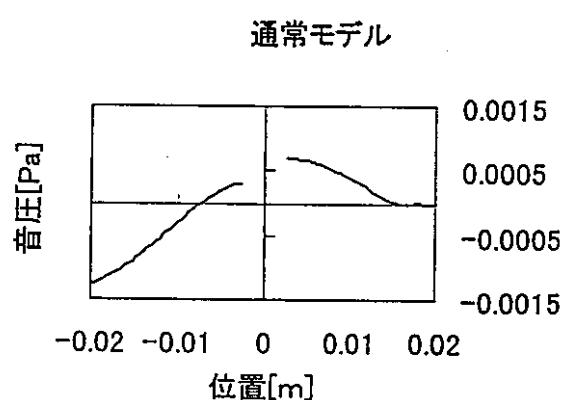


図 3.1-8(5) 入射波と円柱の相互作用

$2.84 \times 10^{-5}(\text{sec})$

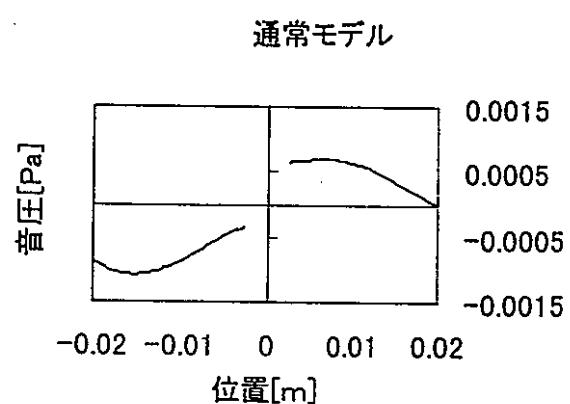


図 3.1-8(6) 入射波と円柱の相互作用

$3.04 \times 10^{-5}(\text{sec})$

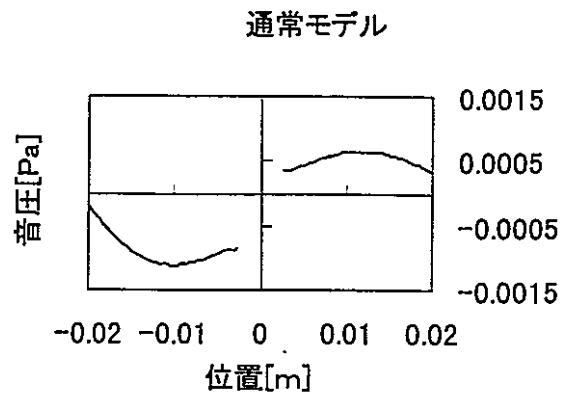


図 3.1-8(7) 入射波と円柱の相互作用

$3.24 \times 10^{-5}(\text{sec})$

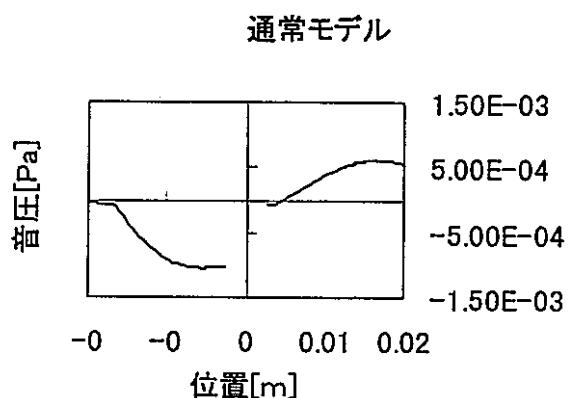


図 3.1-8(8) 入射波と円柱の相互作用

$3.44 \times 10^{-5}(\text{sec})$

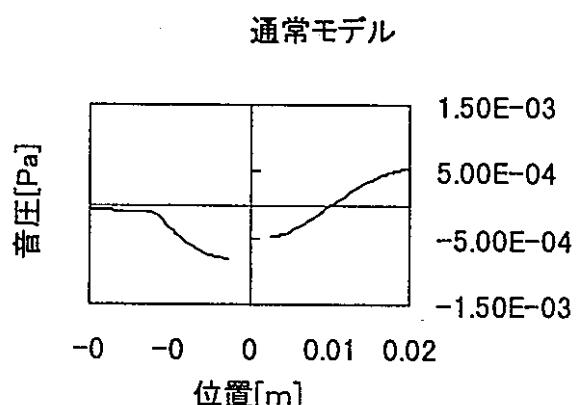


図 3.1-8(9) 入射波と円柱の相互作用

$3.64 \times 10^{-5}(\text{sec})$

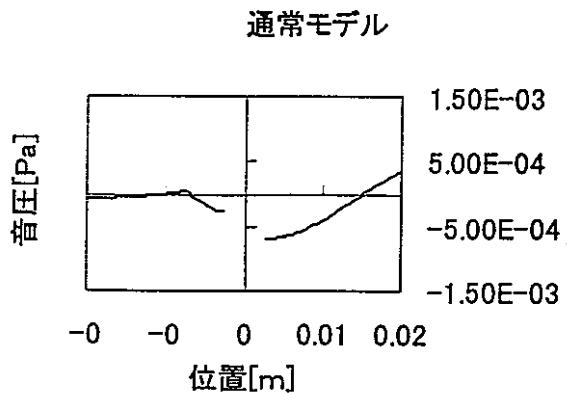


図 3.1-8(10) 入射波と円柱の相互作用
 $3.84 \times 10^{-5}(\text{sec})$

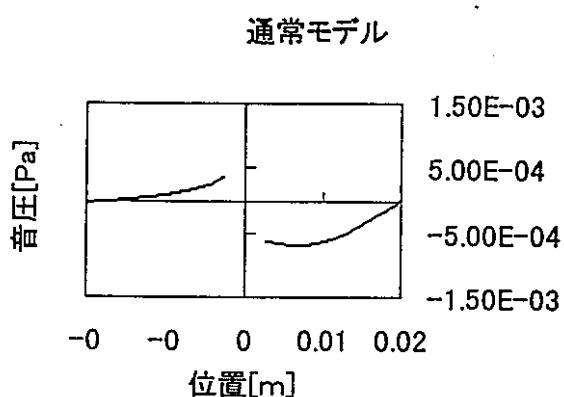


図 3.1-8(11) 入射波と円柱の相互作用
 $4.04 \times 10^{-5}(\text{sec})$

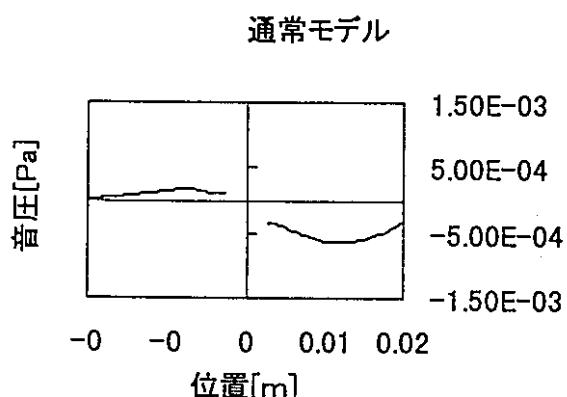


図 3.1-8(12) 入射波と円柱の相互作用
 $4.24 \times 10^{-5}(\text{sec})$

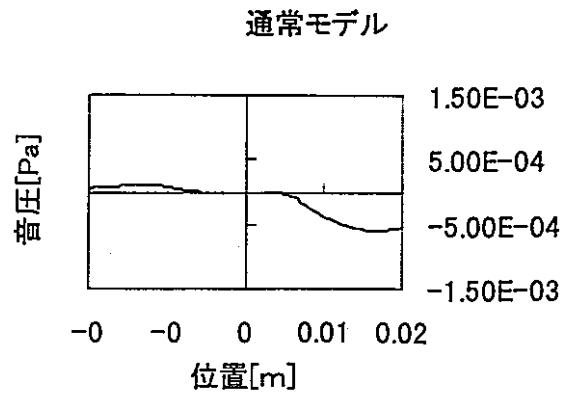


図 3.1-8(13) 入射波と円柱の相互作用

$4.44 \times 10^{-5}(\text{sec})$

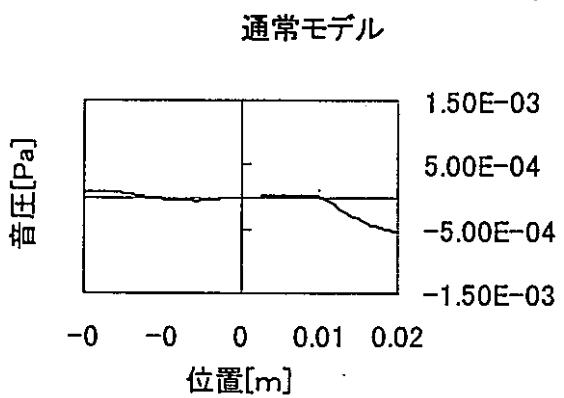


図 3.1-8(14) 入射波と 円柱の相互作用

$4.64 \times 10^{-5}(\text{sec})$

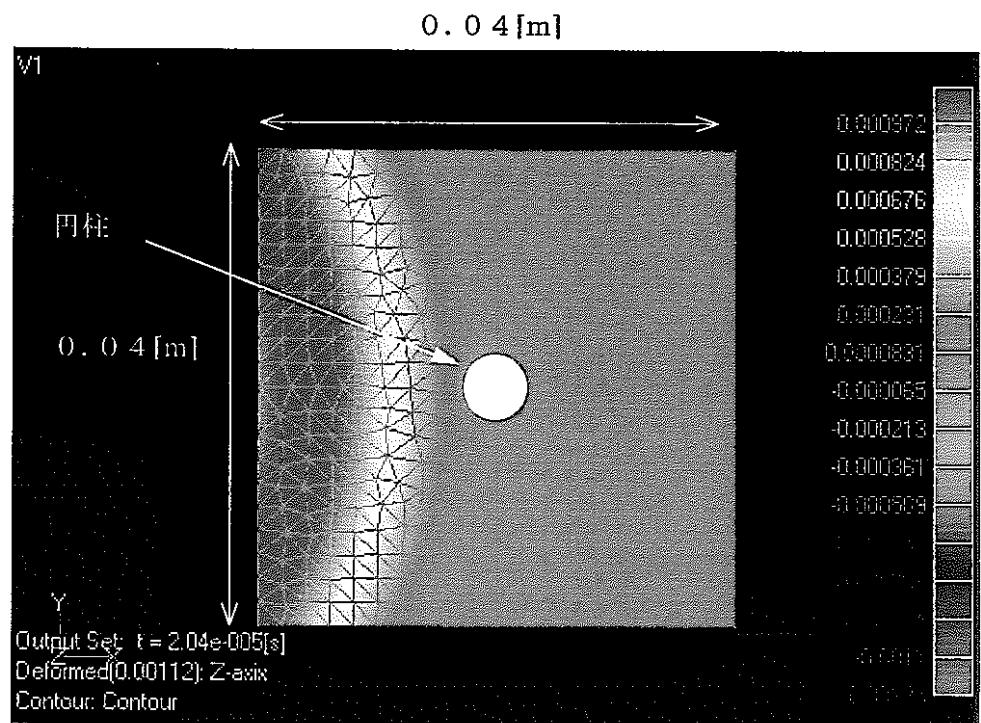


図 3.1-9(1) 円柱断面方向の音圧分布（双極子モデル）

時刻 : $2.04 \times 10^{-5} [\text{s}]$

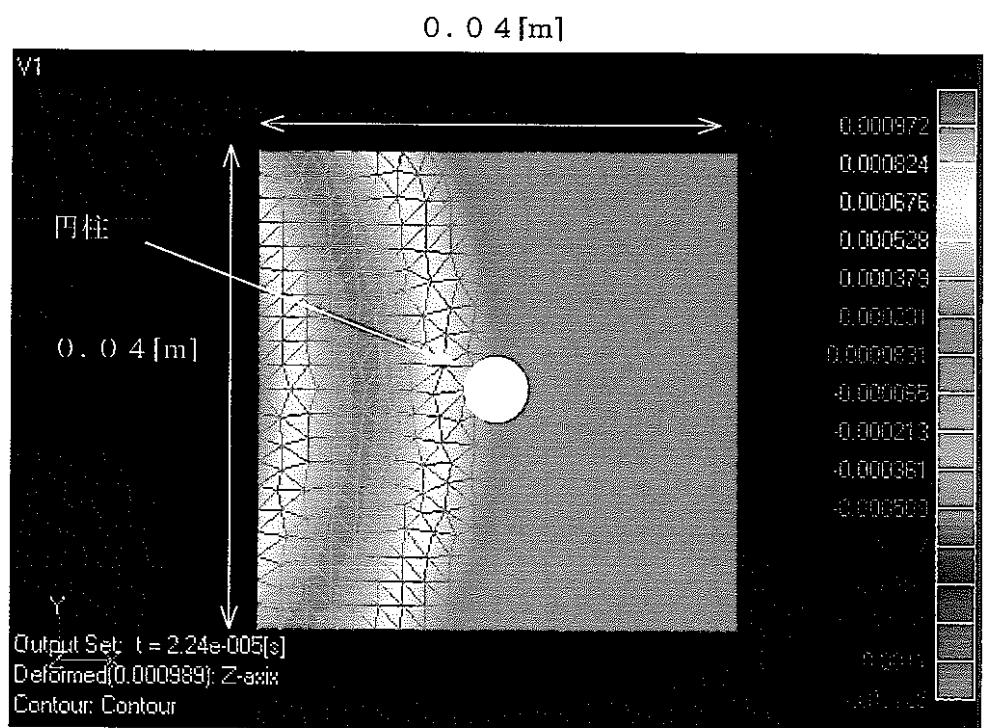


図 3.1-9(2) 円柱断面方向の音圧分布（双極子モデル）

時刻 : $2.24 \times 10^{-5} [\text{s}]$

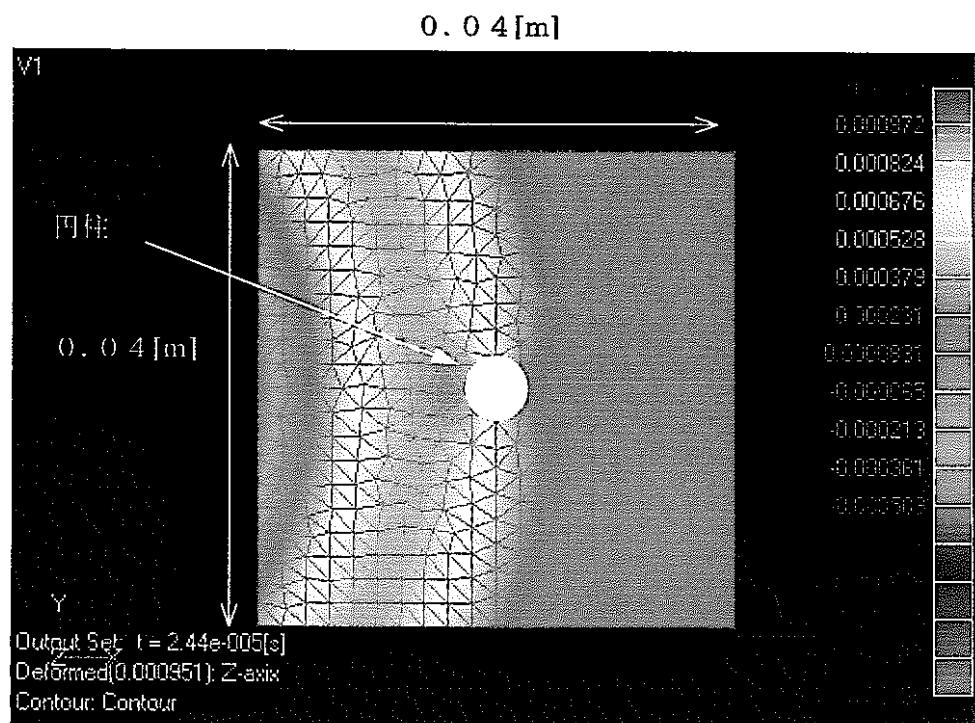


図 3.1-9(3) 円柱断面方向の音圧分布（双極子モデル）

時刻 : 2.44 e - 5 [s]

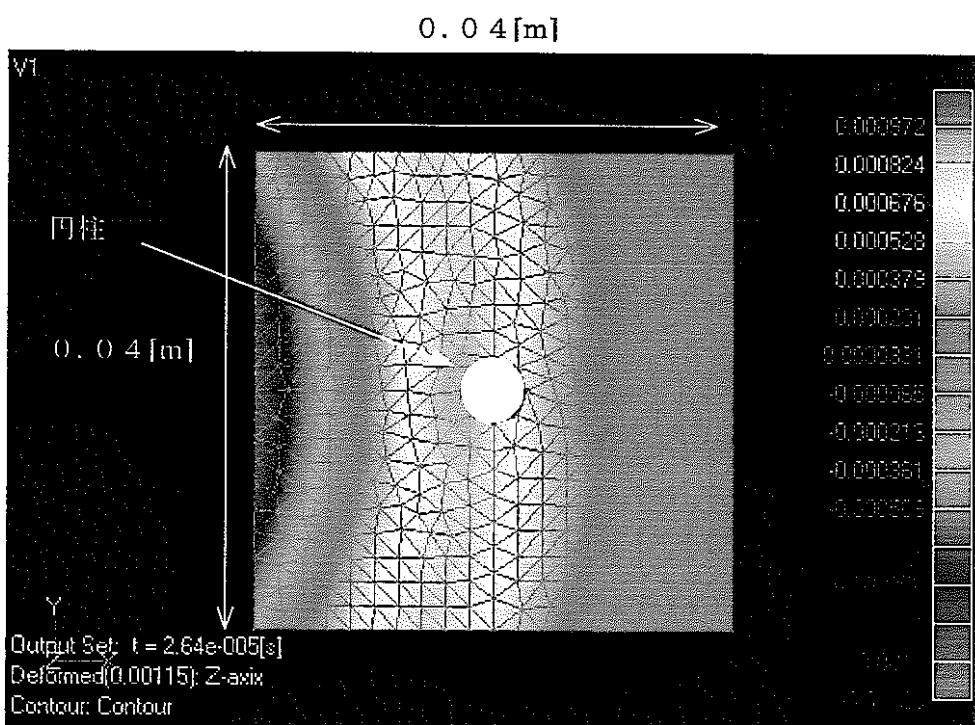


図 3.1-9(4) 円柱断面方向の音圧分布（双極子モデル）

時刻 : 2.64 e - 5 [s]

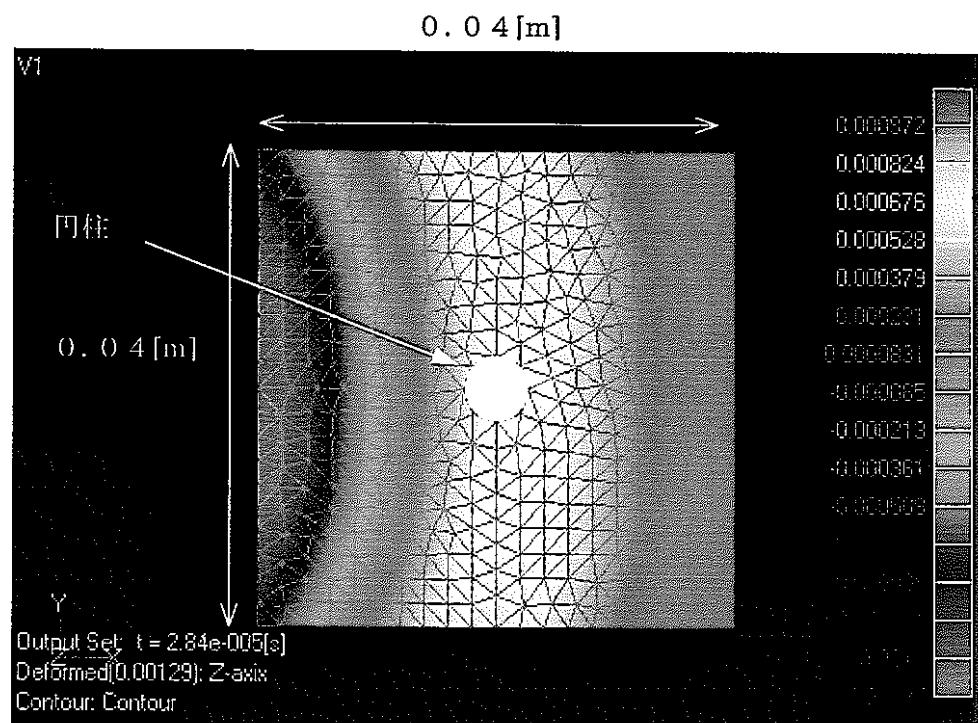


図 3.1-9(5) 円柱断面方向の音圧分布（双極子モデル）

時刻 : $2.84 \times 10^{-5} [\text{s}]$

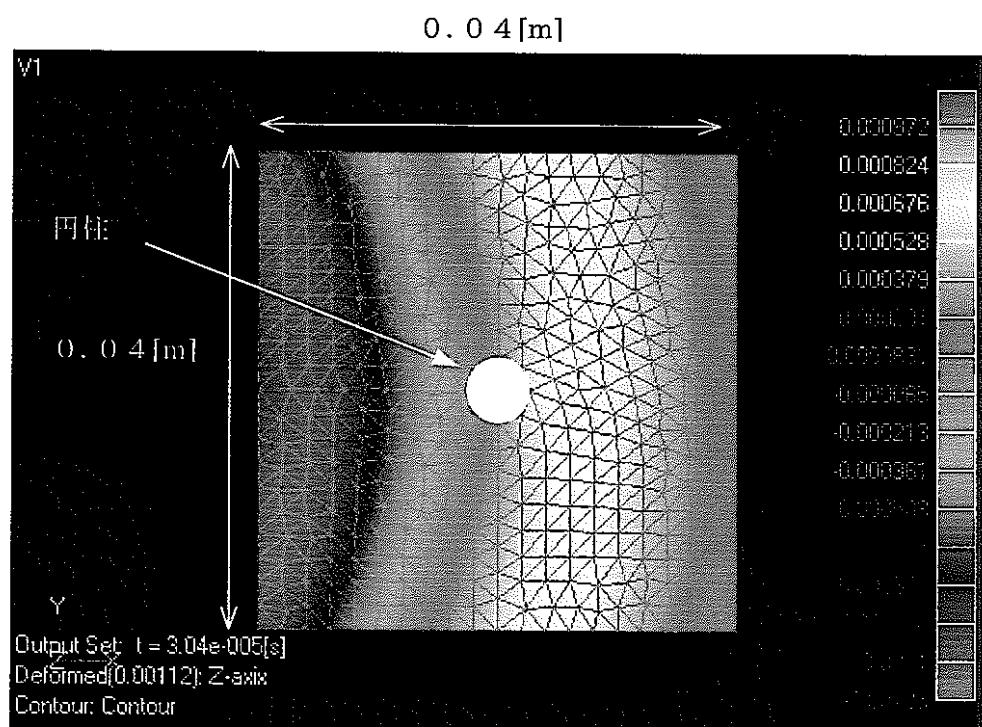


図 3.1-9(6) 円柱断面方向の音圧分布（双極子モデル）

時刻 : $3.04 \times 10^{-5} [\text{s}]$

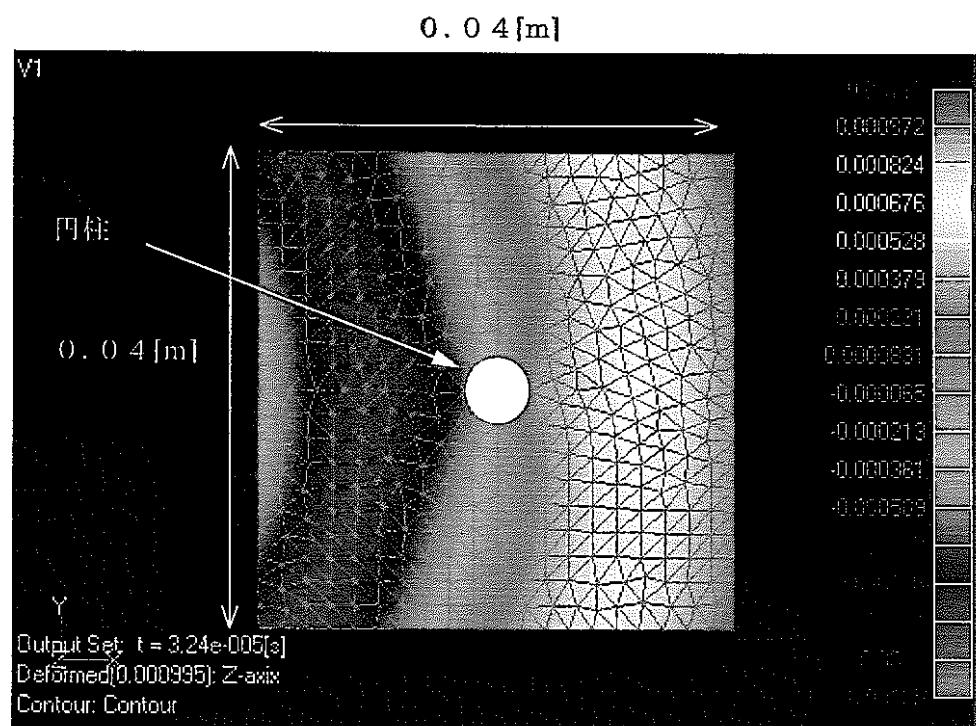


図 3.1-9(7) 円柱断面方向の音圧分布（双極子モデル）

時刻 : $3.24 \times 10^{-5} [\text{s}]$

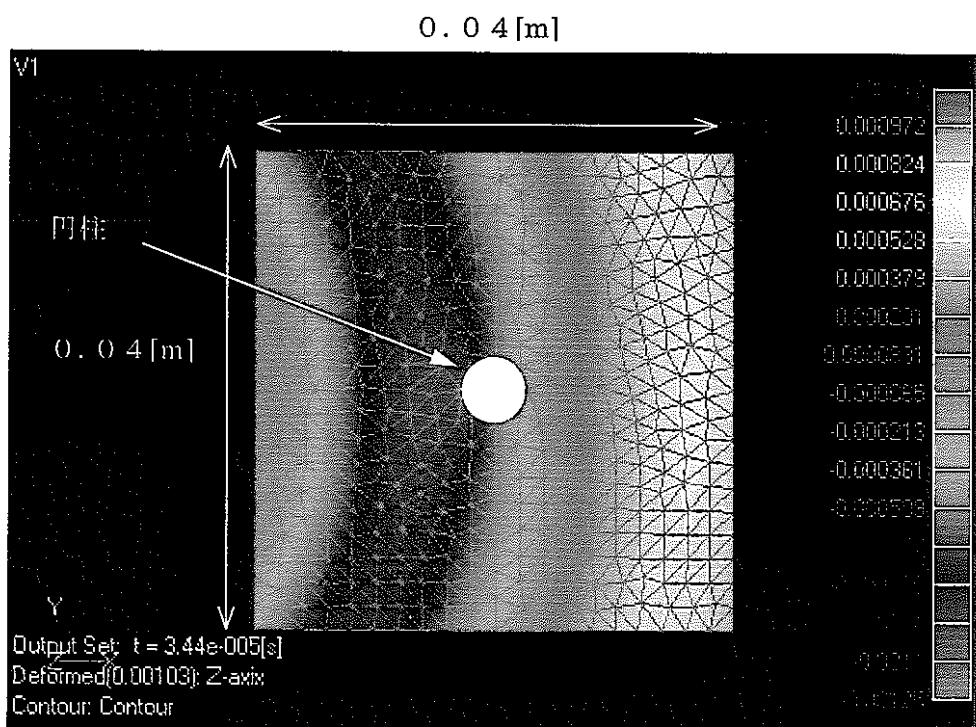


図 3.1-9(8) 円柱断面方向の音圧分布（双極子モデル）

時刻 : $3.44 \times 10^{-5} [\text{s}]$

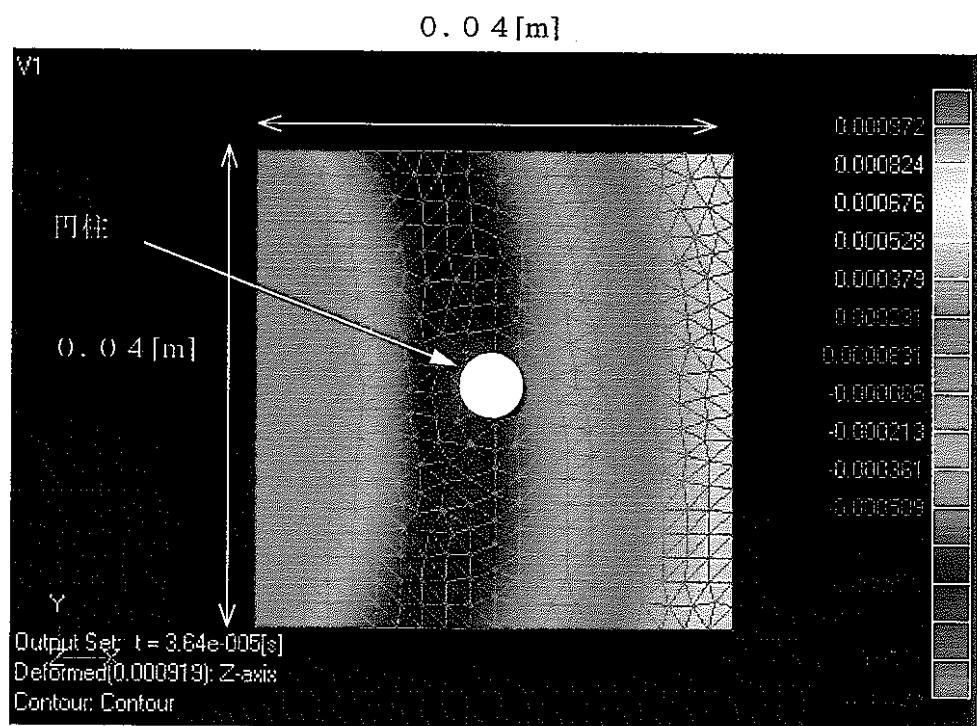


図 3.1-9(9) 円柱断面方向の音圧分布（双極子モデル）

時刻 : $3.64 \times 10^{-5} [s]$

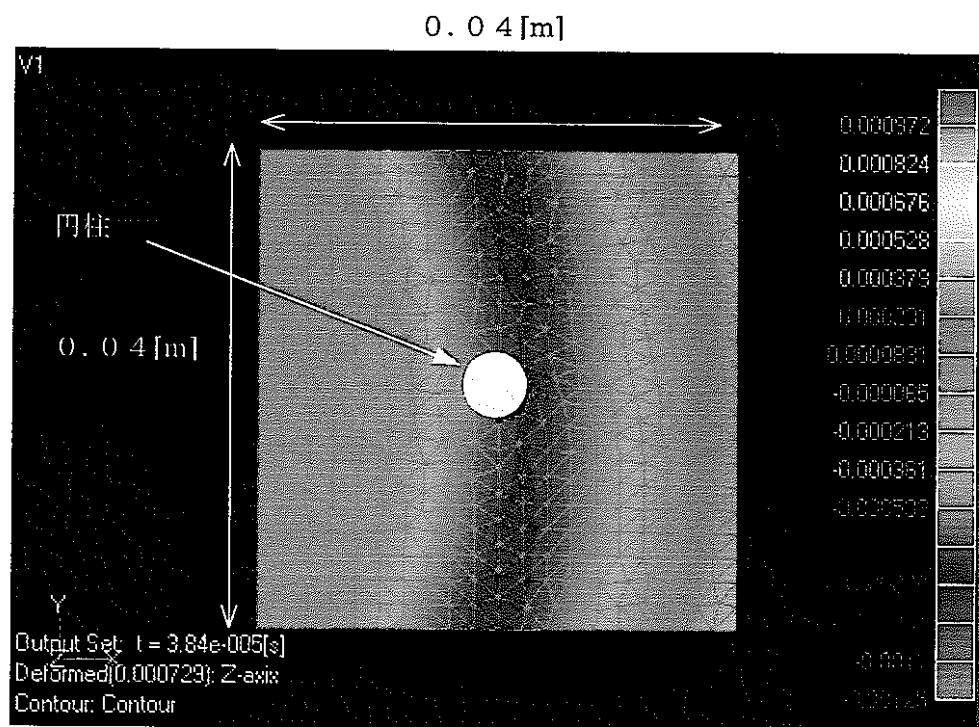


図 3.1-9(10) 円柱断面方向の音圧分布（双極子モデル）

時刻 : $3.84 \times 10^{-5} [s]$

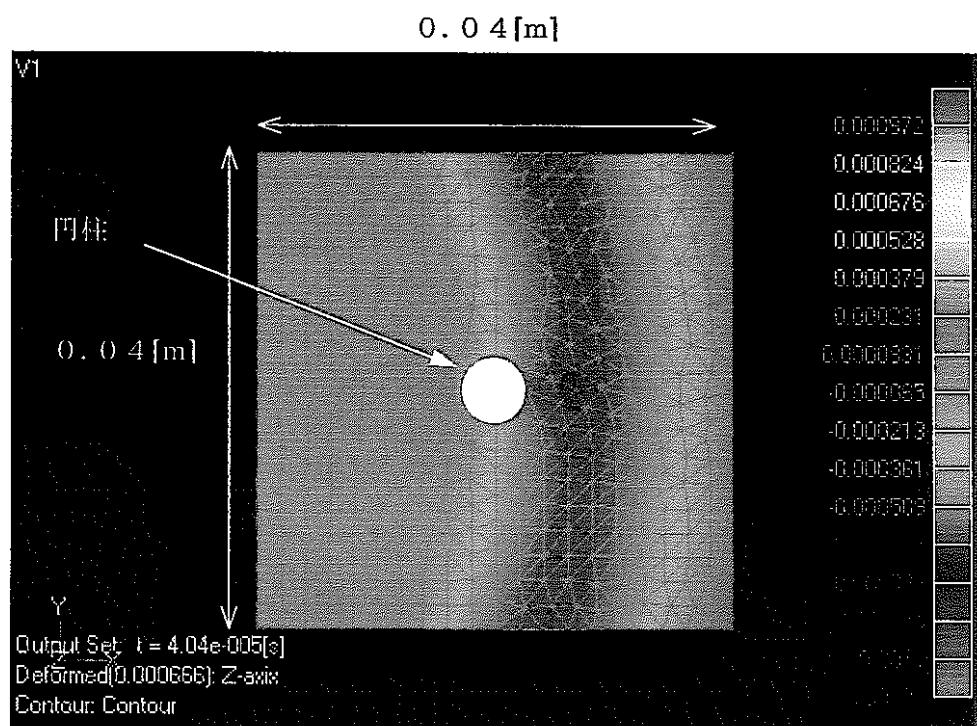


図 3.1-9(11) 円柱断面方向の音圧分布（双極子モデル）

時刻 : 4.04×10^{-5} [s]

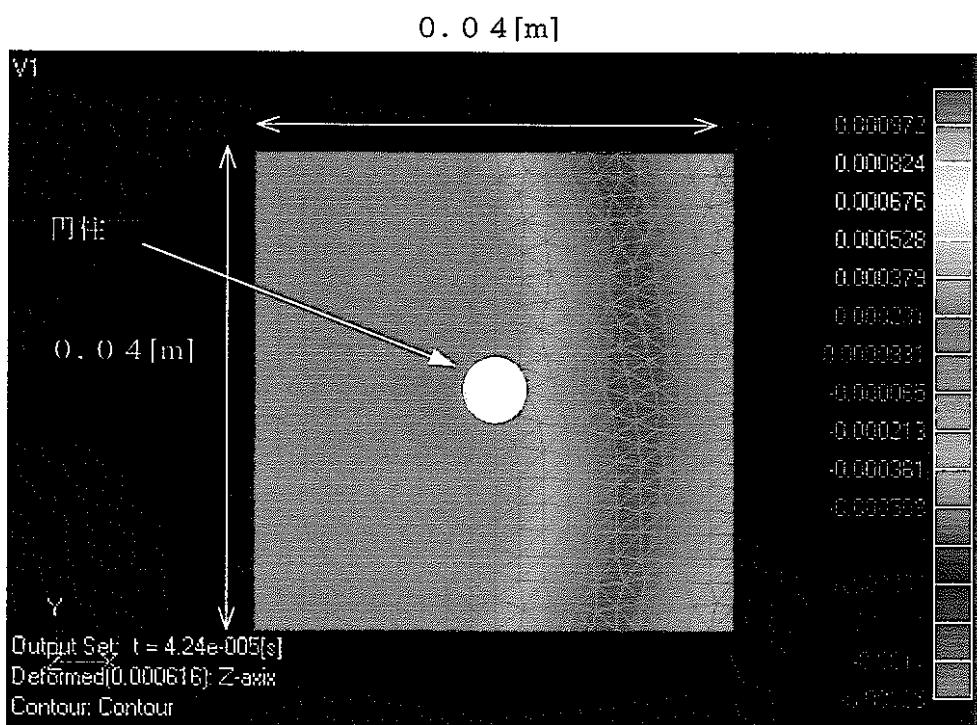


図 3.1-9(12) 円柱断面方向の音圧分布（双極子モデル）

時刻 : 4.24×10^{-5} [s]

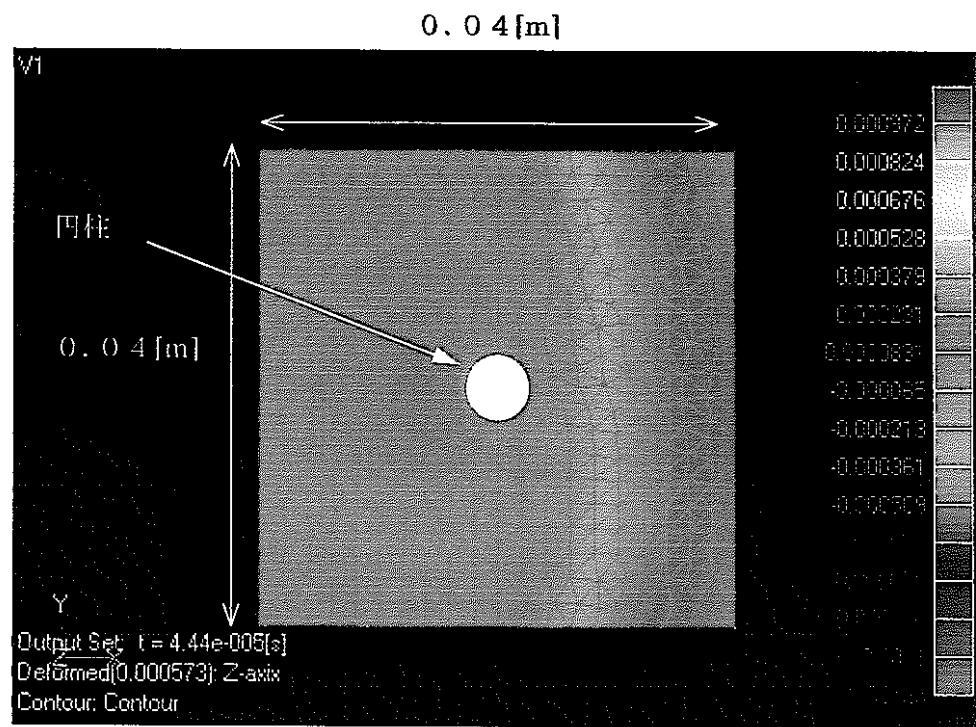


図 3.1-9(13) 円柱断面方向の音圧分布（双極子モデル）

時刻 : 4.44 e - 5 [s]

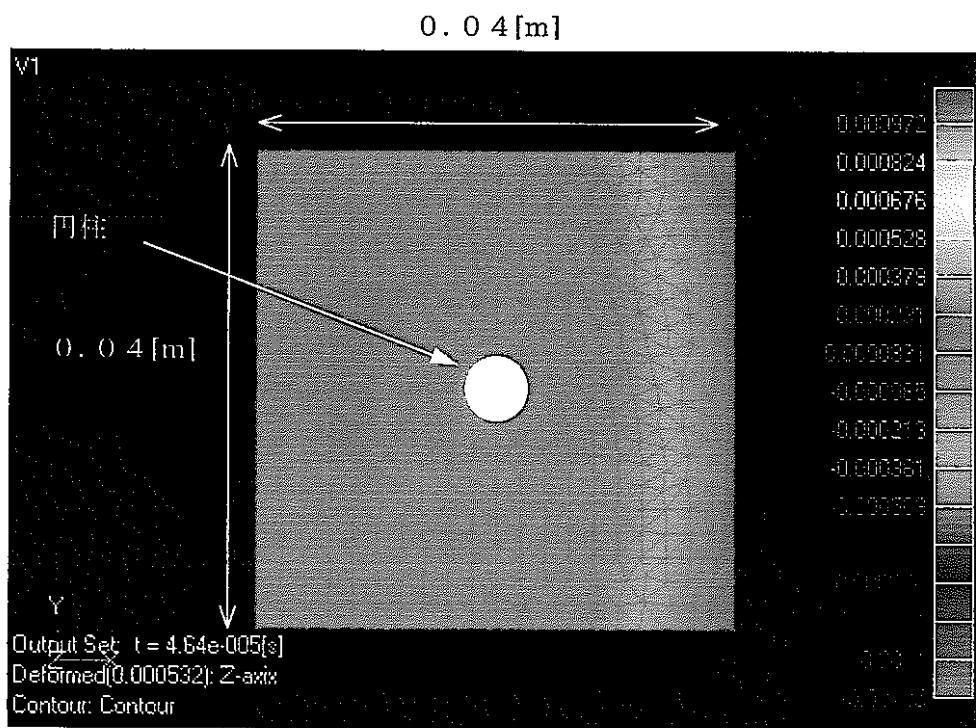


図 3.1.9(14) 円柱断面方向の音圧分布（双極子モデル）

時刻 : 4.64e-5 [s]

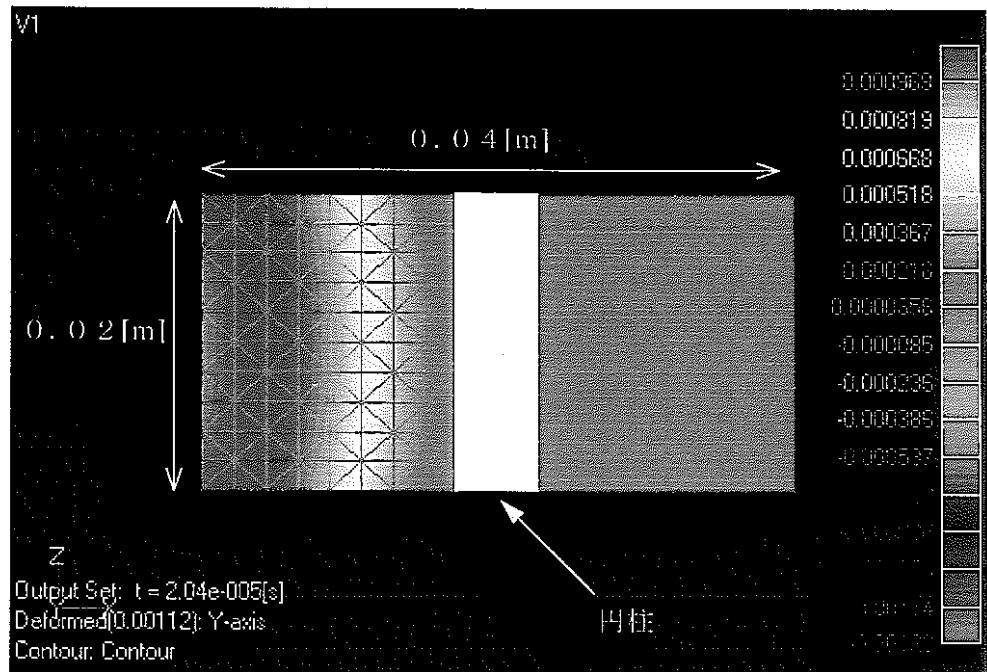


図 3.1-10(1) 円柱軸方向の音圧分布（双極子モデル）

時刻 : 2.04 e - 5 [s]

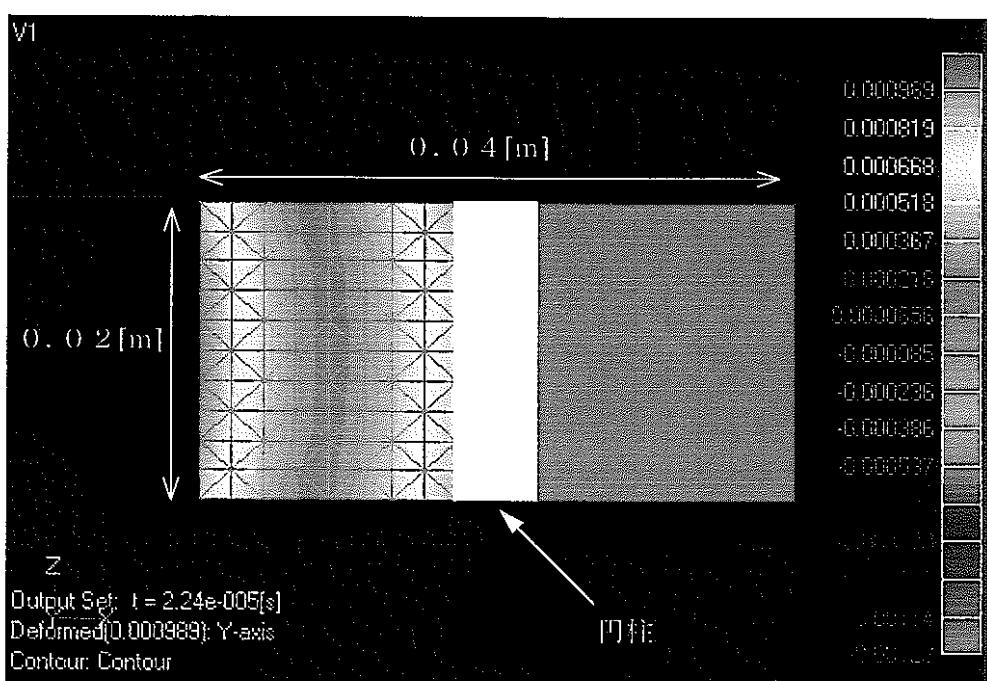


図 3.1-10(2) 円柱軸方向の音圧分布（双極子モデル）

時刻 : 2.24 e - 5 [s]

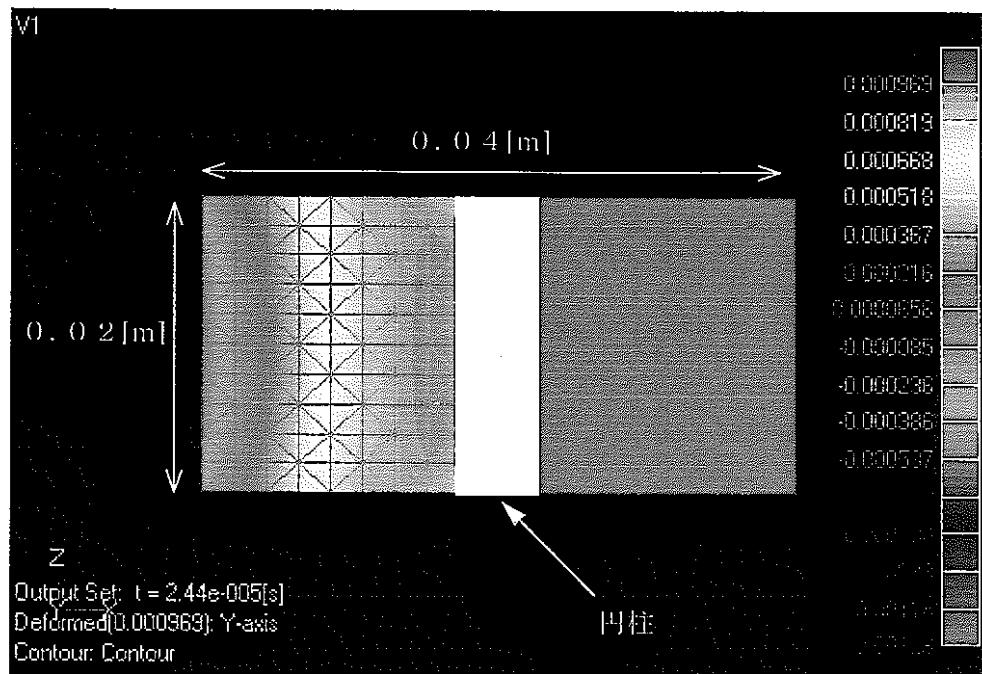


図 3.1-10(3) 円柱軸方向の音圧分布（双極子モデル）

時刻 : $2.44 \times 10^{-5} [\text{s}]$

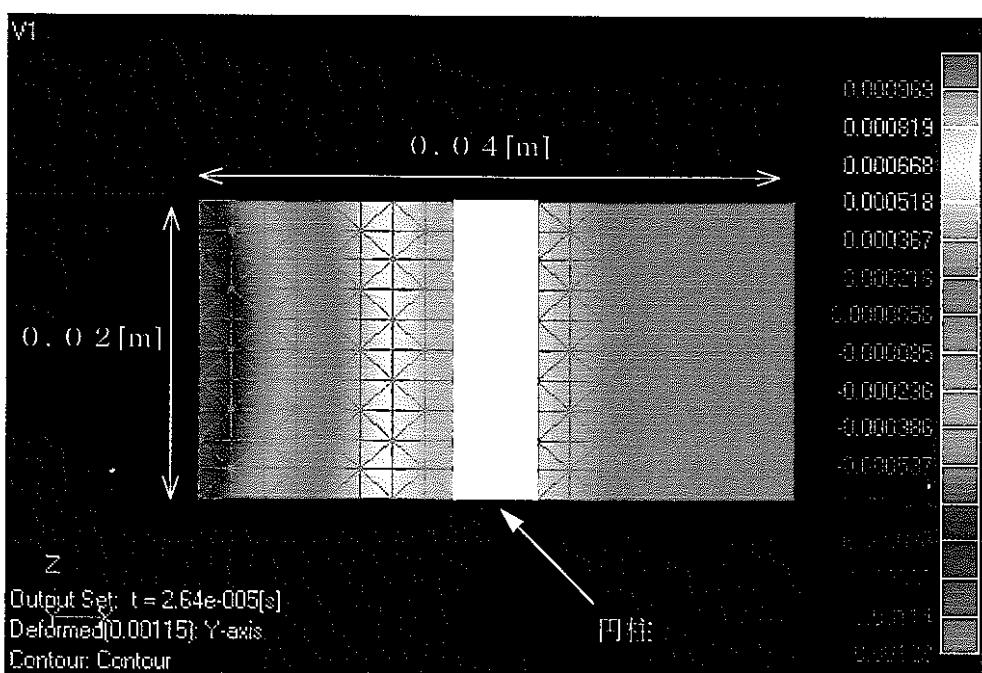


図 3.1-10(4) 円柱軸方向の音圧分布（双極子モデル）

時刻 : $2.64 \times 10^{-5} [\text{s}]$

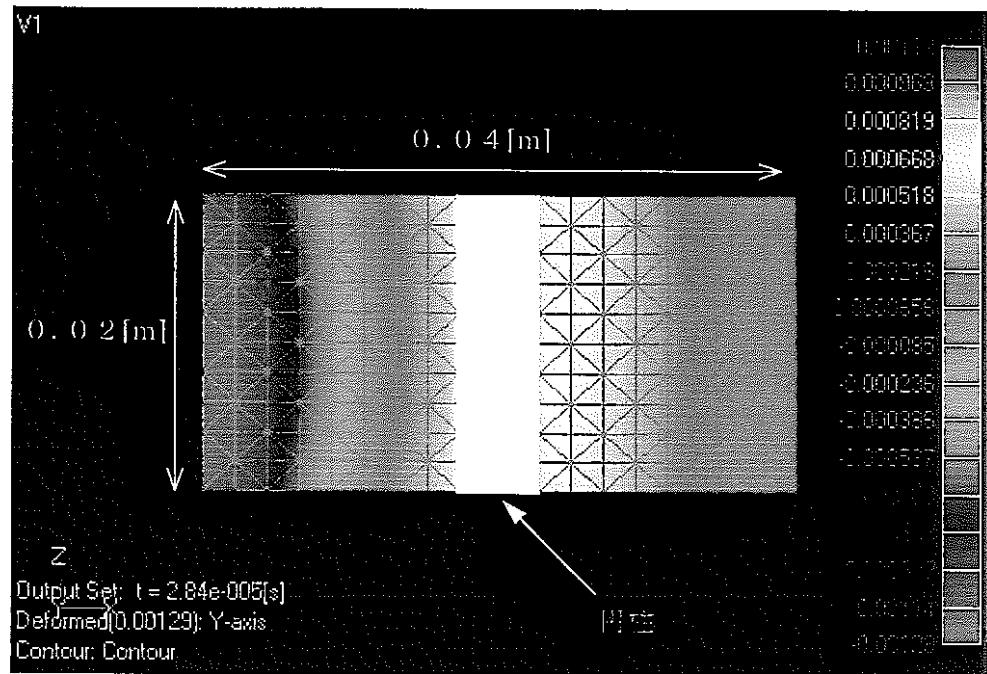


図 3.1-10(5) 円柱軸方向の音圧分布（双極子モデル）

時刻 : $2.84 \times 10^{-5} [\text{s}]$

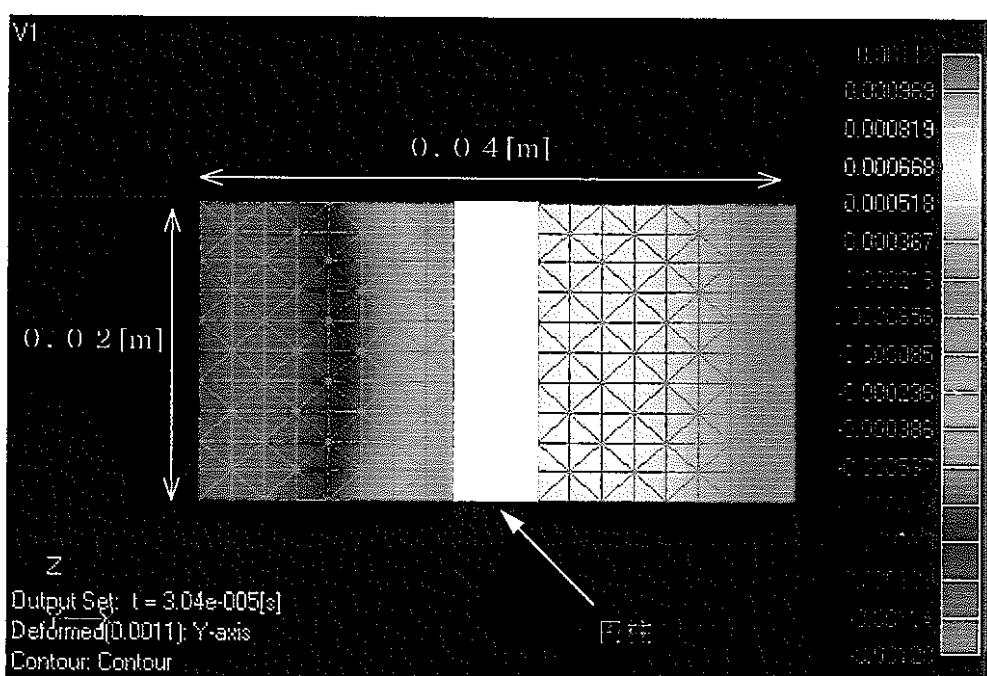


図 3.1-10(6) 円柱軸方向の音圧分布（双極子モデル）

時刻 : $3.04 \times 10^{-5} [\text{s}]$

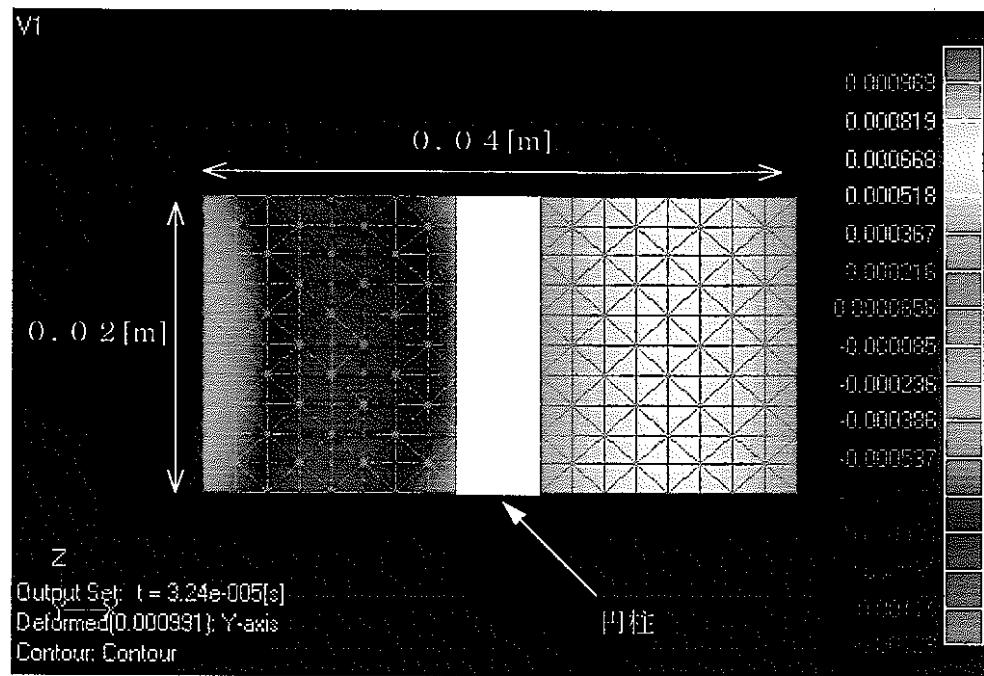


図 3.1-10(7) 円柱軸方向の音圧分布（双極子モデル）

時刻 : $3.24 \times 10^{-5} [\text{s}]$

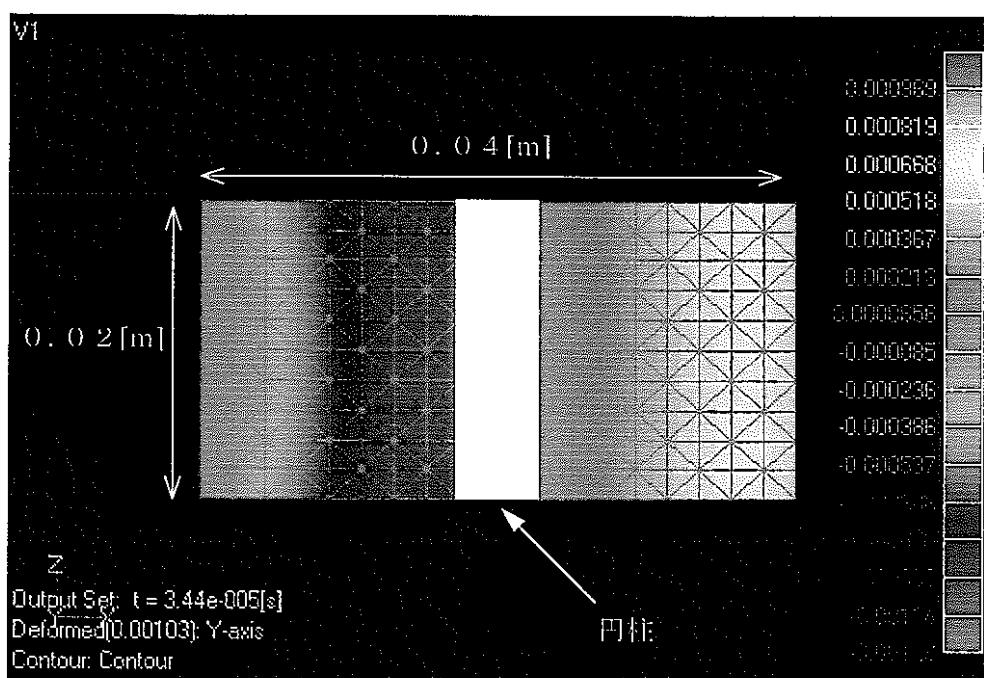


図 3.1-10(8) 円柱軸方向の音圧分布（双極子モデル）

時刻 : $3.44 \times 10^{-5} [\text{s}]$

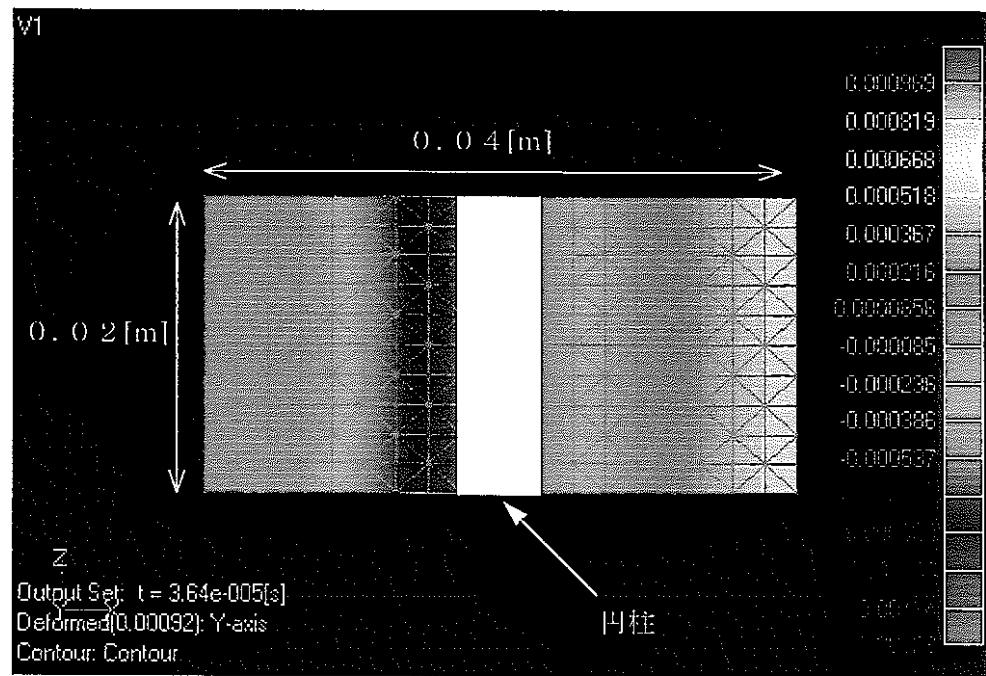


図 3.1-10(9) 円柱軸方向の音圧分布（双極子モデル）

時刻 : 3.64 e - 5 [s]

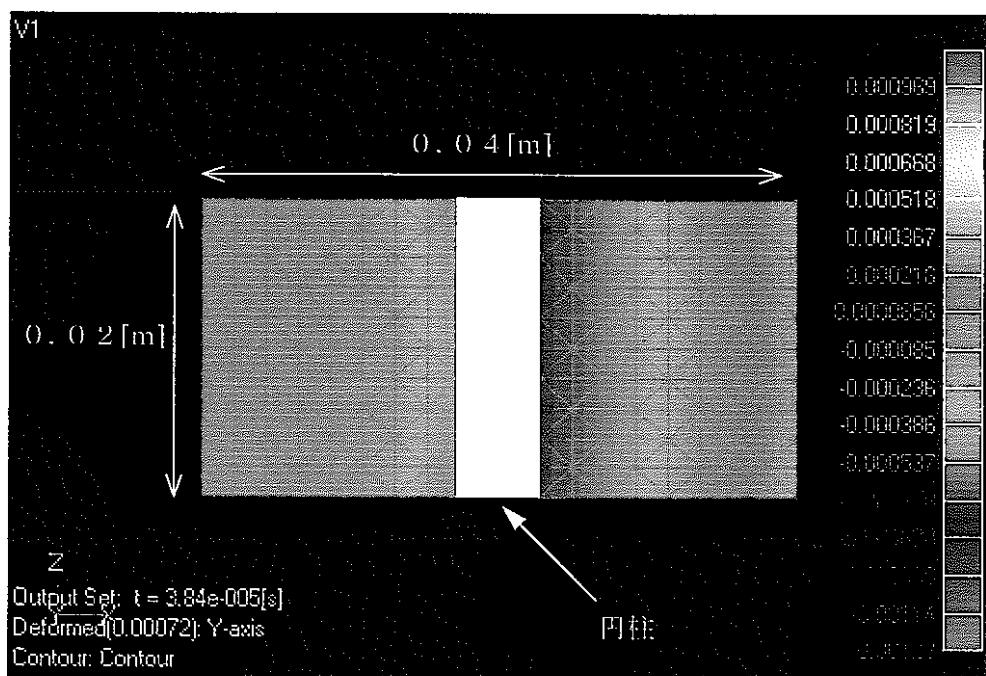


図 3.1-10(10) 円柱軸方向の音圧分布（双極子モデル）

時刻 : 3.84 e - 5 [s]

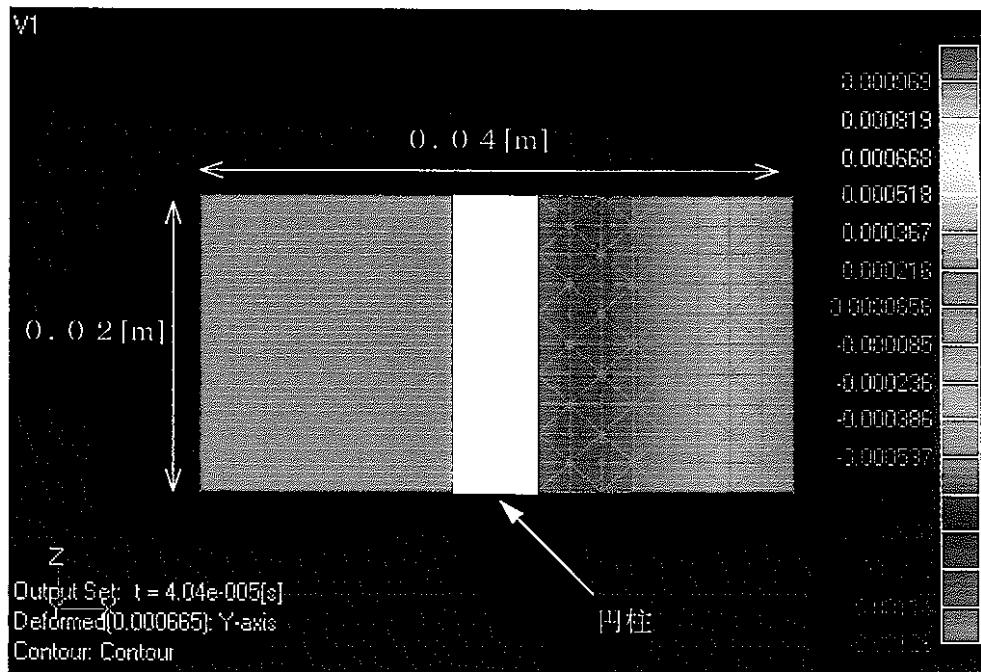


図 3.1-10(11) 円柱軸方向の音圧分布（双極子モデル）

時刻 : $4.04 \times 10^{-5} [\text{s}]$

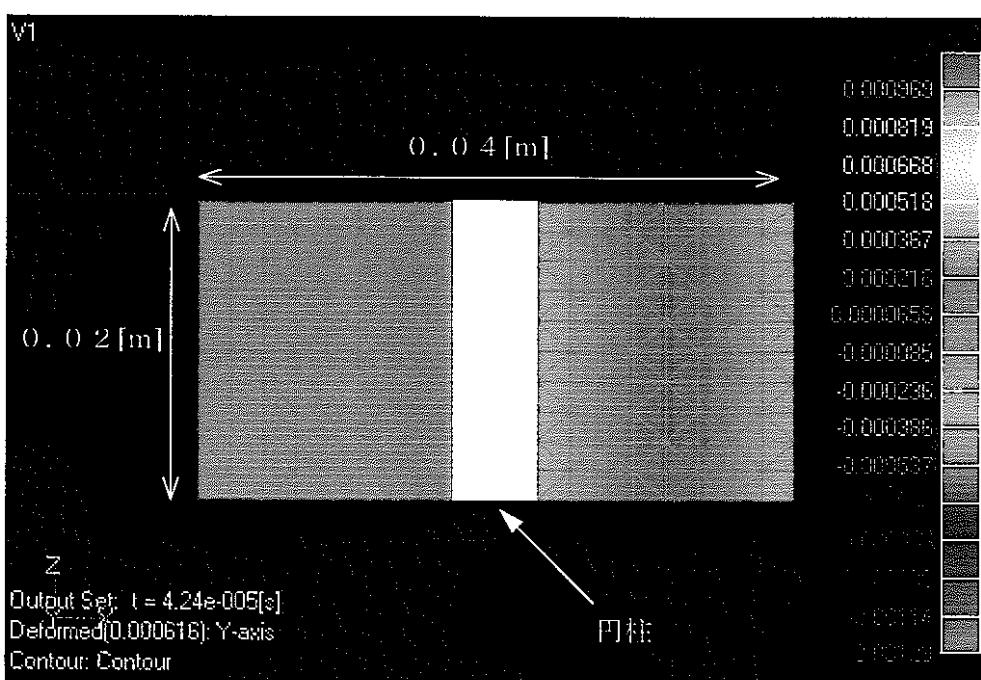


図 3.1-10(12) 円柱軸方向の音圧分布（双極子モデル）

時刻 : $4.24 \times 10^{-5} [\text{s}]$

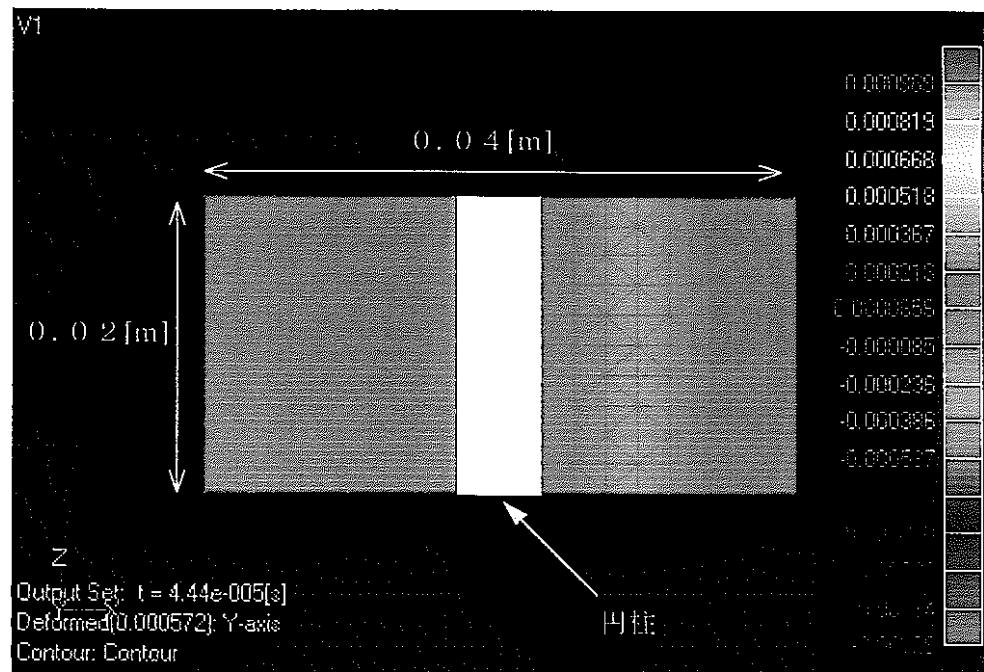


図 3.1-10(13) 円柱軸方向の音圧分布（双極子モデル）

時刻 : $4.44 \times 10^{-5} [\text{s}]$

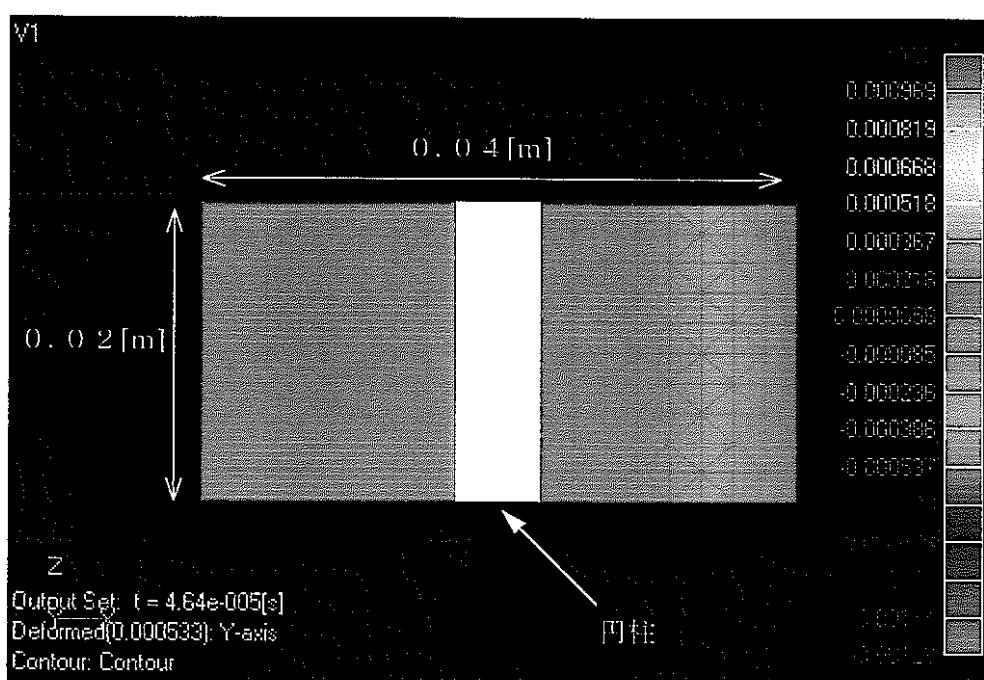


図 3.1-10(14) 円柱軸方向の音圧分布（双極子モデル）

時刻 : $4.64 \times 10^{-5} [\text{s}]$

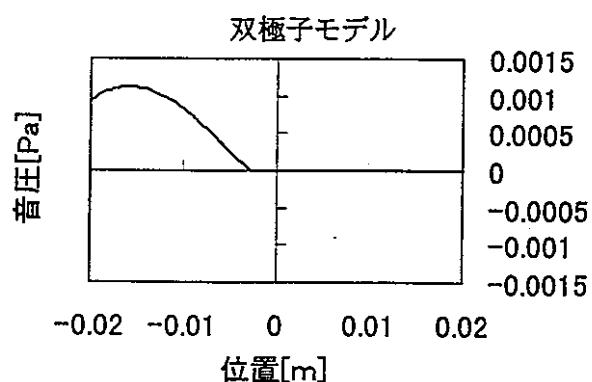


図 3.1-11(1) 入射波が円柱に入る直前
 $2.04 \times 10^{-5}(\text{sec})$

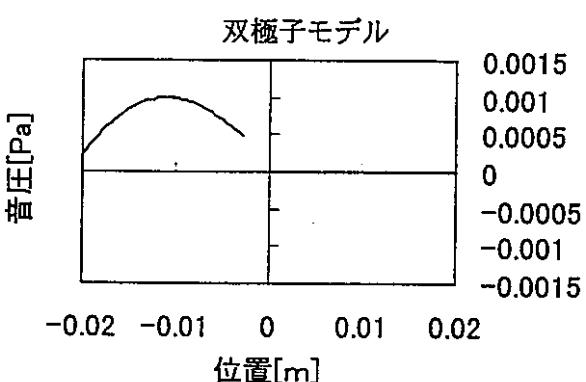


図 3.1-11(2) 入射波が円柱に接触した瞬間
 $2.24 \times 10^{-5}(\text{sec})$

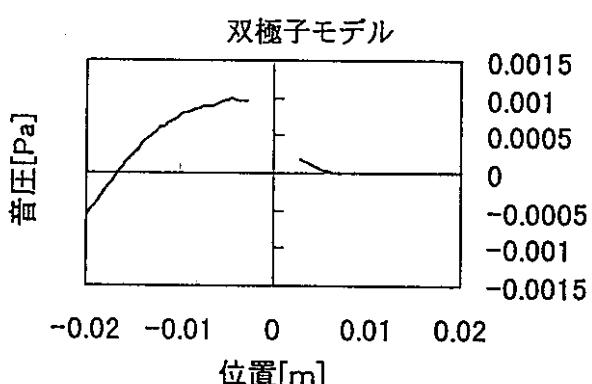


図 3.1-11(3) 入射波が円柱を通過した瞬間
 $2.44 \times 10^{-5}(\text{sec})$

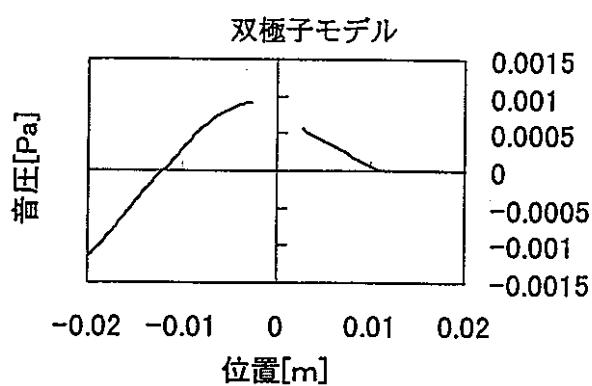


図 3.1-11(4) 入射波と円柱の相互作用

$2.64 \times 10^{-5}(\text{sec})$

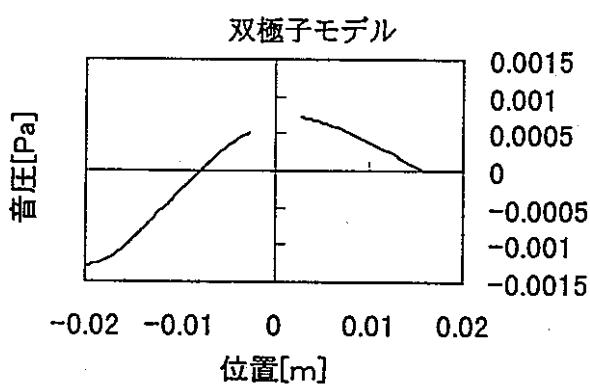


図 3.1-11(5) 入射波と円柱の相互作用

$2.84 \times 10^{-5}(\text{sec})$

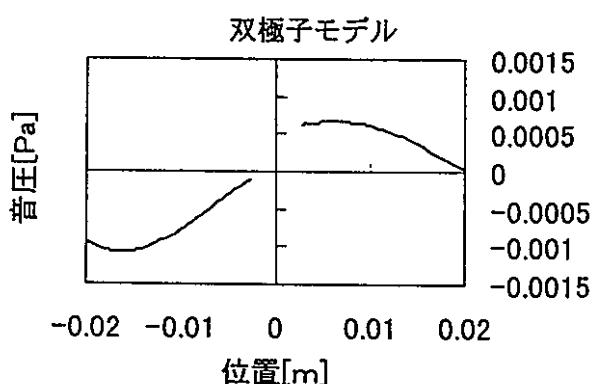


図 3.1-11(6) 入射波と円柱の相互作用

$3.04 \times 10^{-5}(\text{sec})$

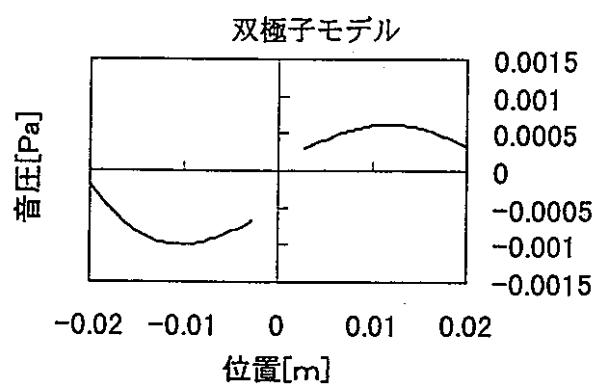


図 3.1-11(7) 入射波とが円柱の相互作用

$3.24 \times 10^{-5}(\text{sec})$

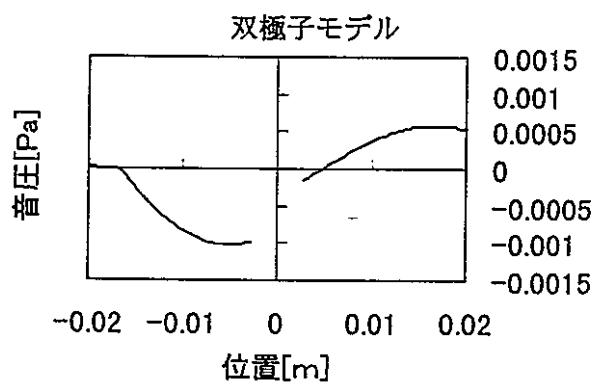


図 3.1-11(8) 入射波と円柱の相互作用

$3.44 \times 10^{-5}(\text{sec})$

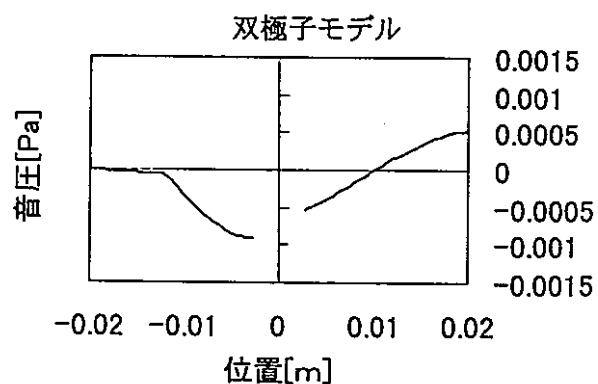


図 3.1-11(9) 入射波と円柱の相互作用

$3.64 \times 10^{-5}(\text{sec})$

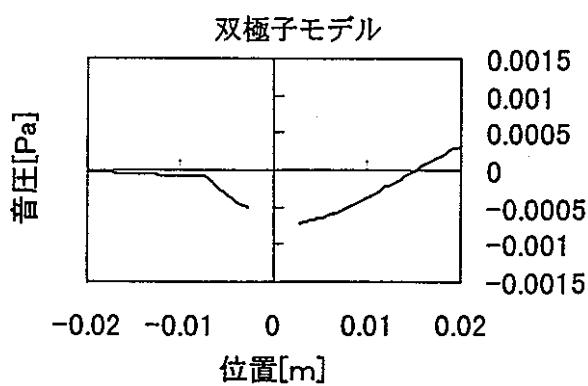


図 3.1-11(10) 入射波と円柱の相互作用

$3.84 \times 10^{-5}(\text{sec})$

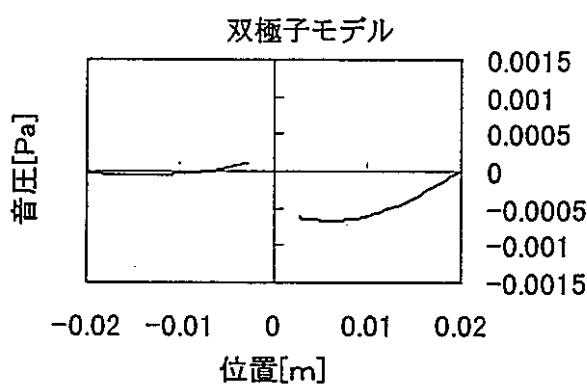


図 3.1-11(11) 入射波と円柱の相互作用

$4.04 \times 10^{-5}(\text{sec})$

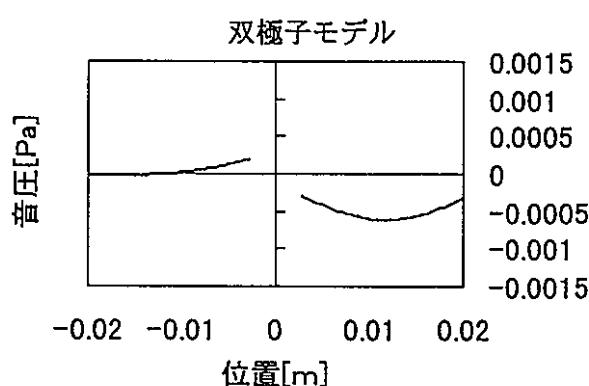


図 3.1-11(12) 入射波と円柱の相互作用

$4.24 \times 10^{-5}(\text{sec})$

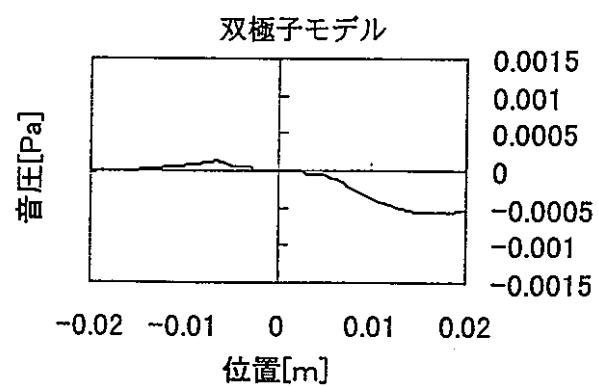


図 3.1-11(13) 入射波と円柱の相互作用

$4.44 \times 10^{-5}(\text{sec})$

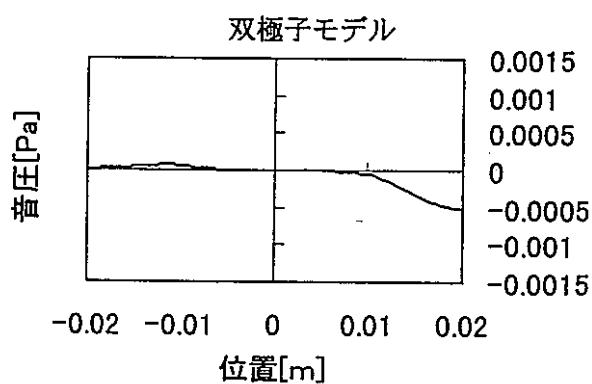


図 3.1-11(14) 入射波と円柱の相互作用

$4.64 \times 10^{-5}(\text{sec})$

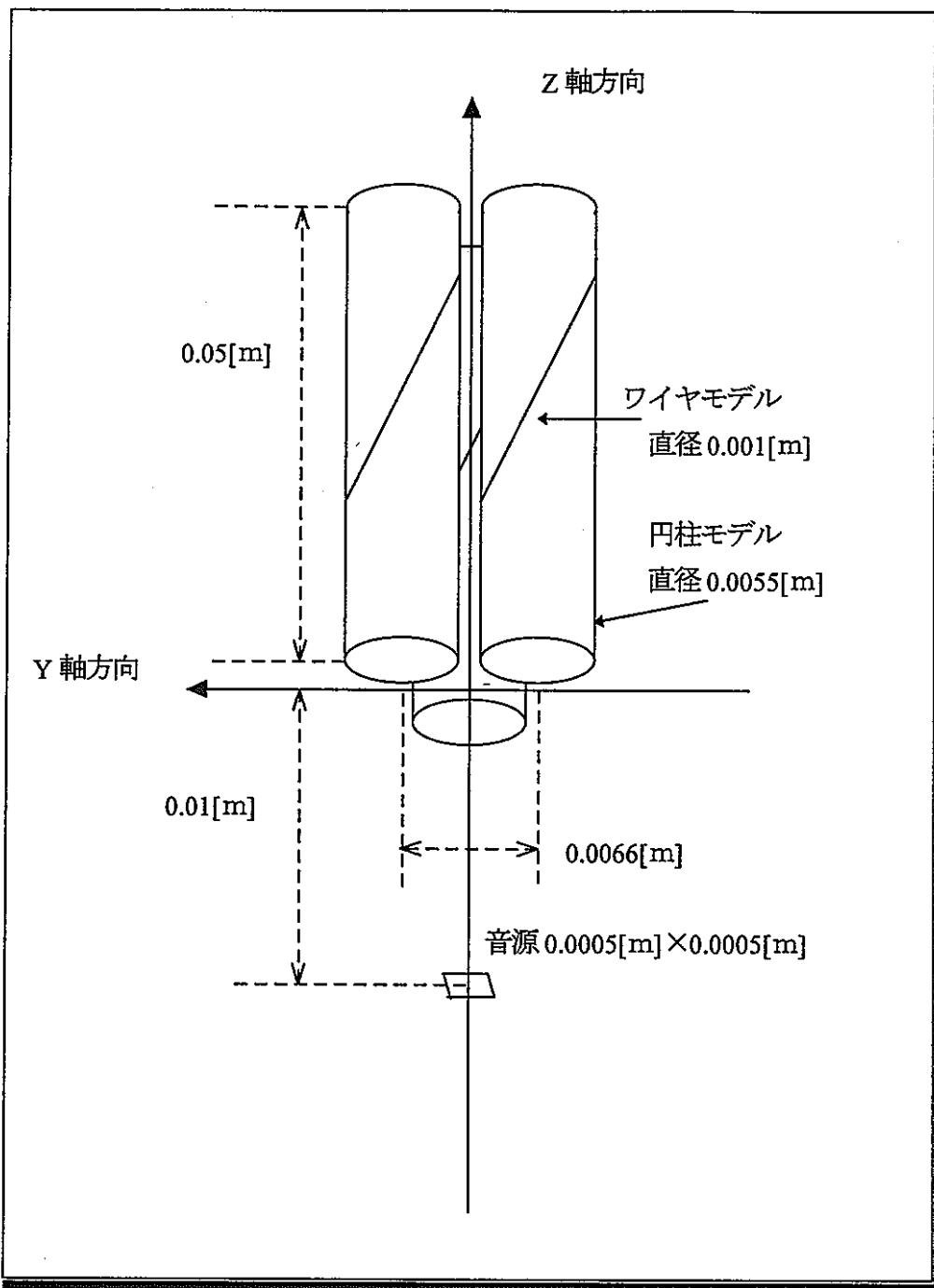


図3.1-12 モデル外観

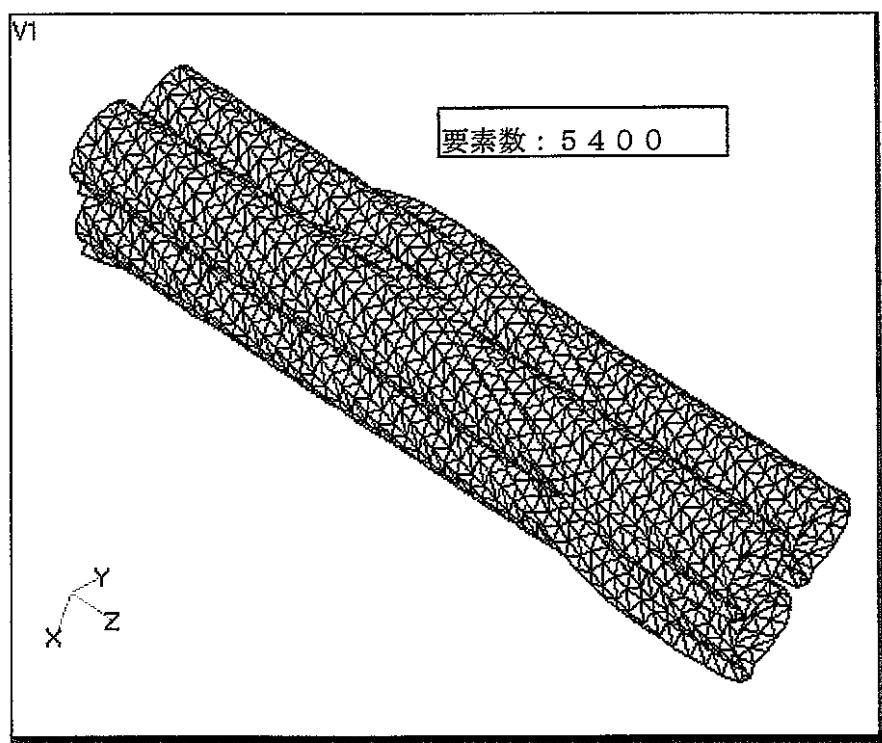


図3.1-13 円柱モデル（通常要素）

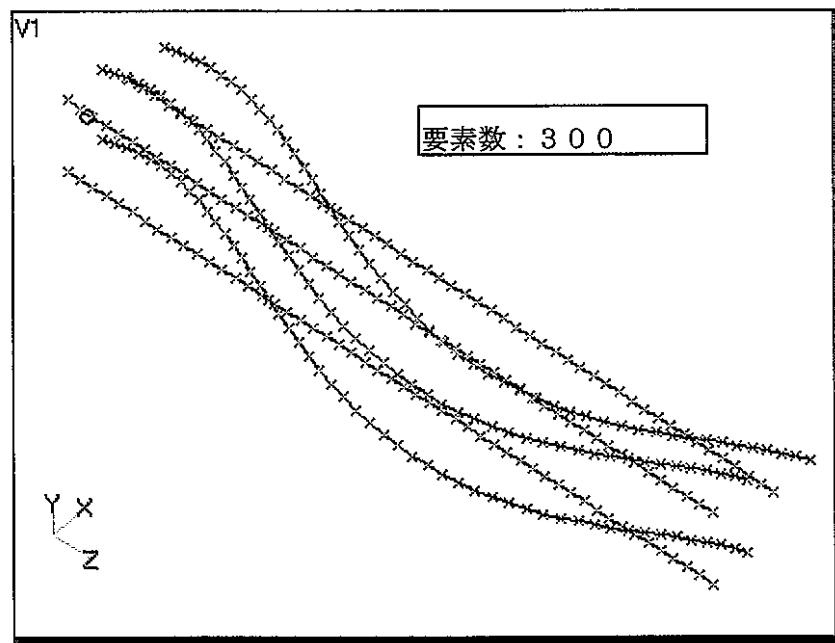


図3.1-14 円柱モデル（双極子要素）

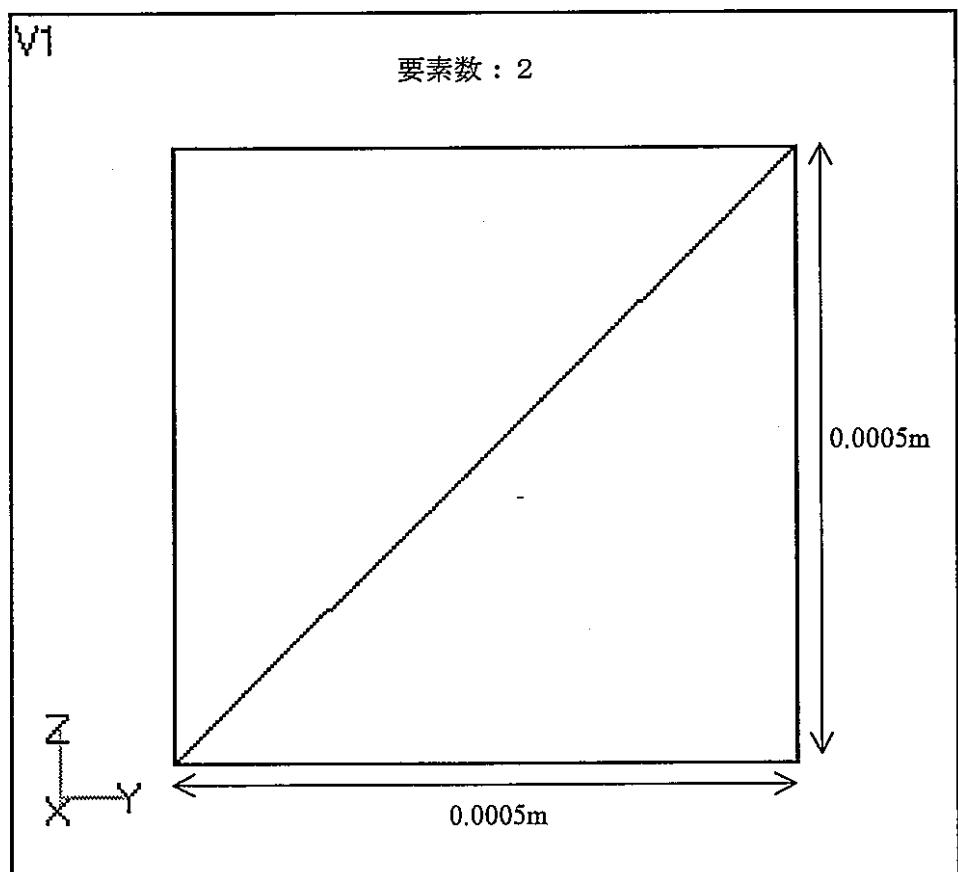


図 3.1-15 音源形状モデル

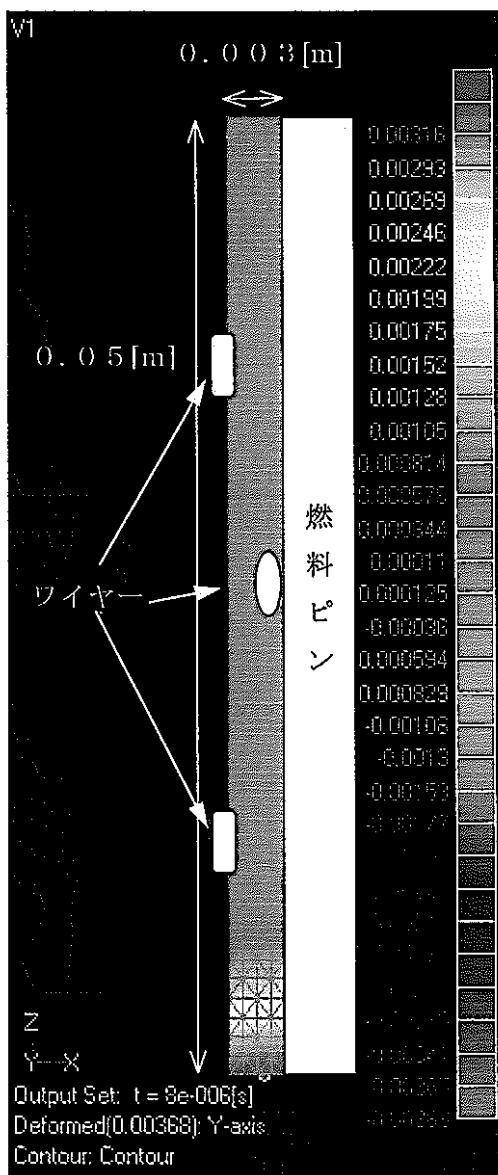


図 3.1-16(1) 軸方向の音圧分布(通常モデル) 時刻 : 0.8 e - 5 [s]

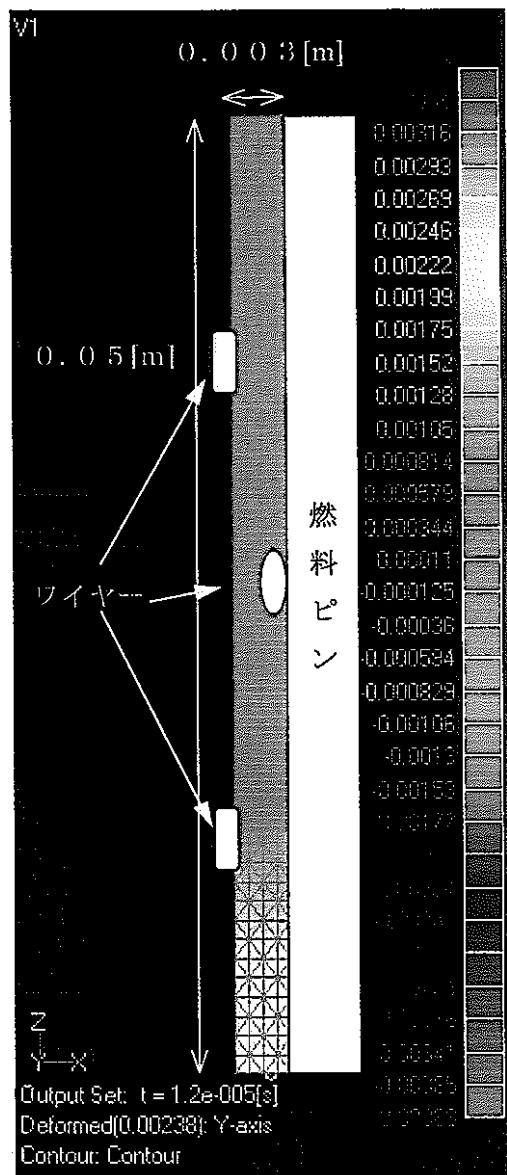


図 3.1-16(2) 軸方向の音圧分布(通常モデル) 時刻 : 1.2 e - 5 [s]

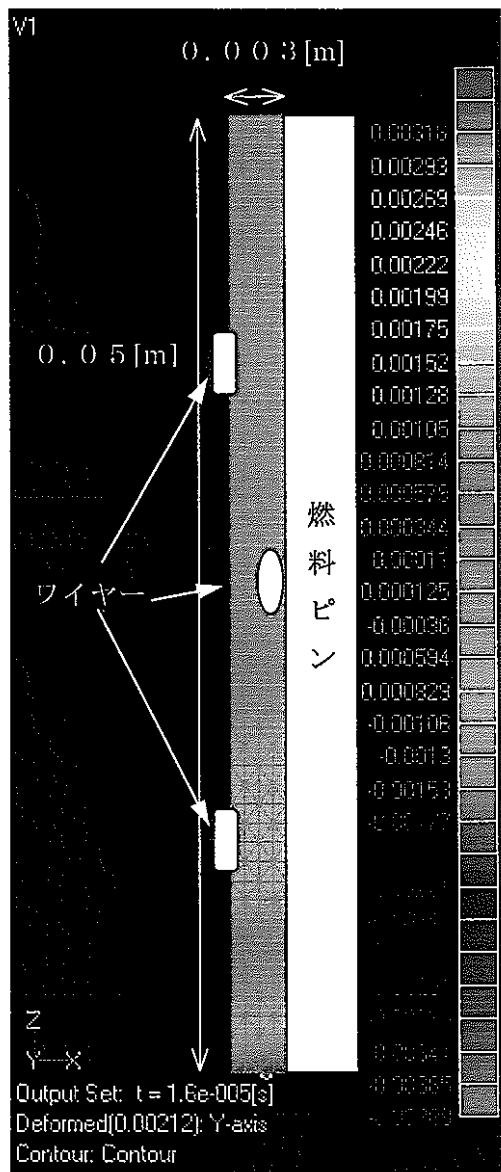
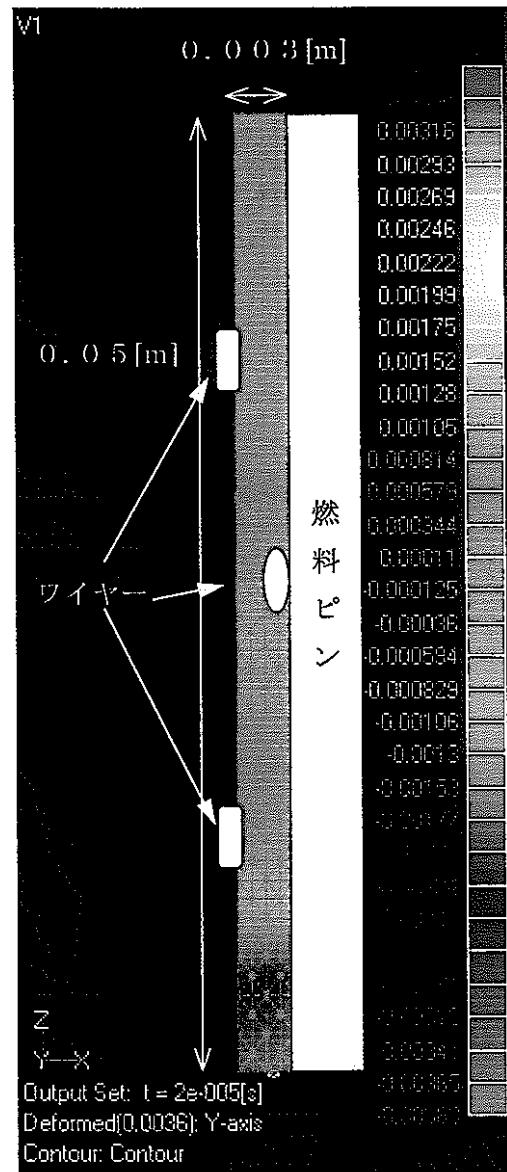


図 3.1-16(3) 軸方向の音圧分布(通常モデル)

時刻 : $1.6 \times 10^{-5} [\text{s}]$



時刻 : $2.0 \times 10^{-5} [\text{s}]$

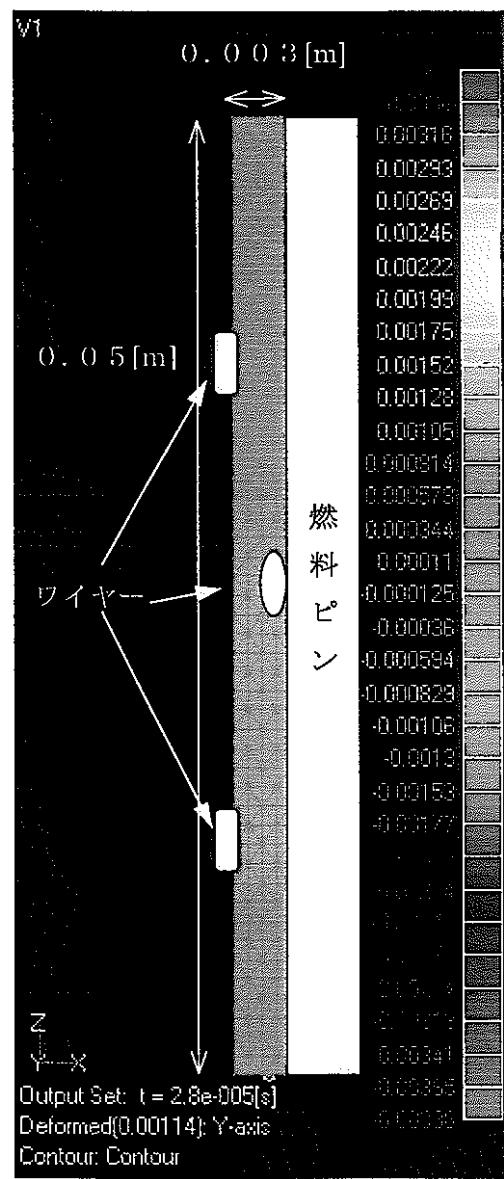
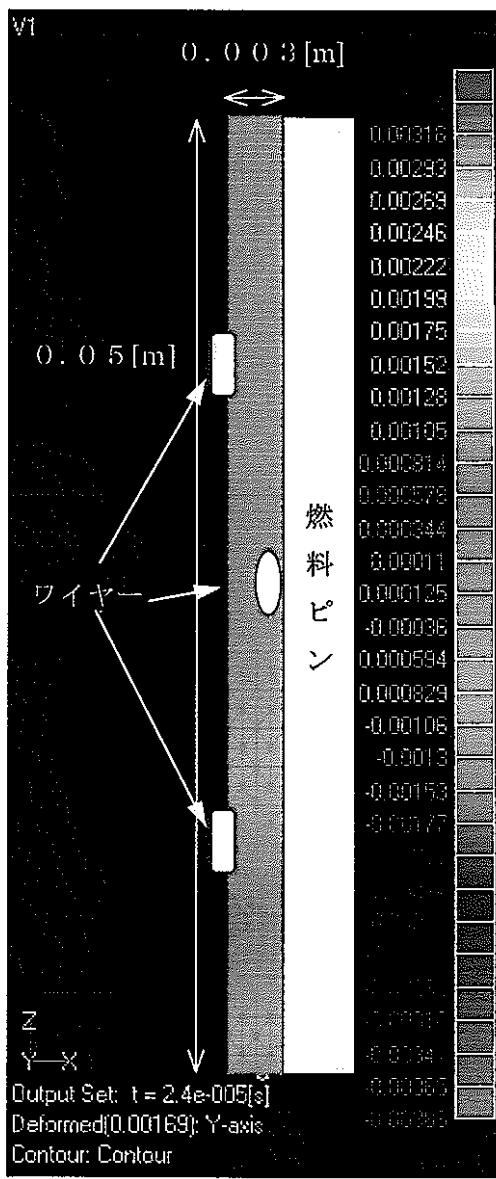


図 3.1-16(5) 軸方向の音圧分布(通常モデル) 図 3.1-16(6) 軸方向の音圧分布(通常モデル)
時刻 : 2.4 e - 5 [s] 時刻 : 2.8 e - 5 [s]

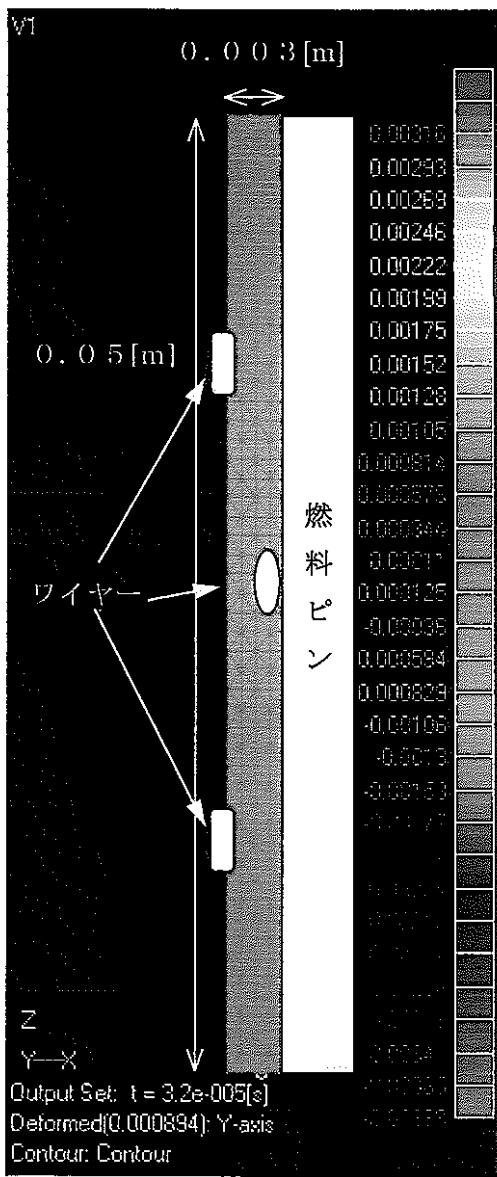


図 3.1-16(7) 軸方向の音圧分布(通常モデル) 時刻 : 3.2 e - 5 [s]

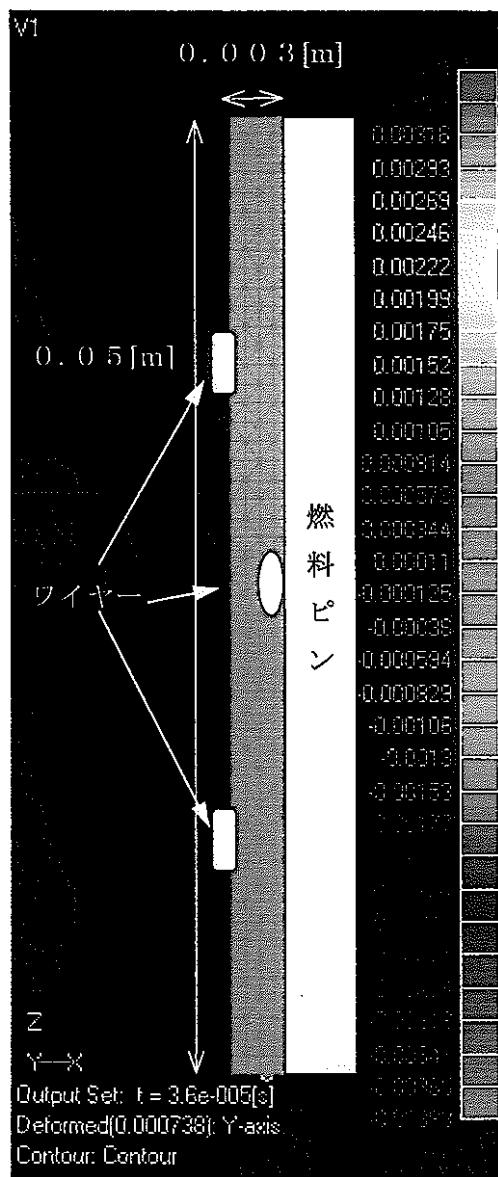


図 3.1-16(8) 軸方向の音圧分布(通常モデル) 時刻 : 3.6 e - 5 [s]

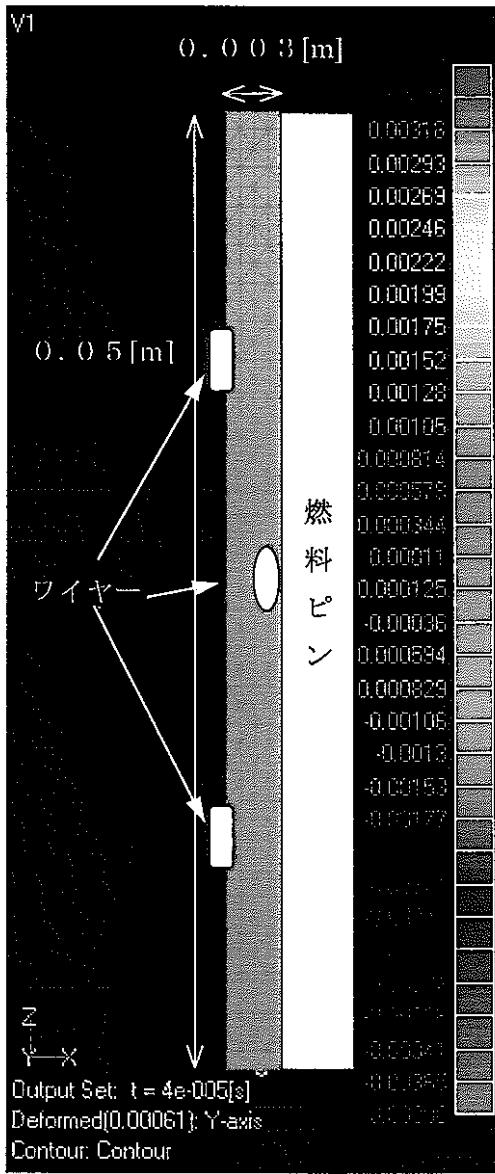


図 3.1-16(9) 軸方向の音圧分布(通常モデル)

時刻 : $4.0 \times 10^{-5} [\text{s}]$

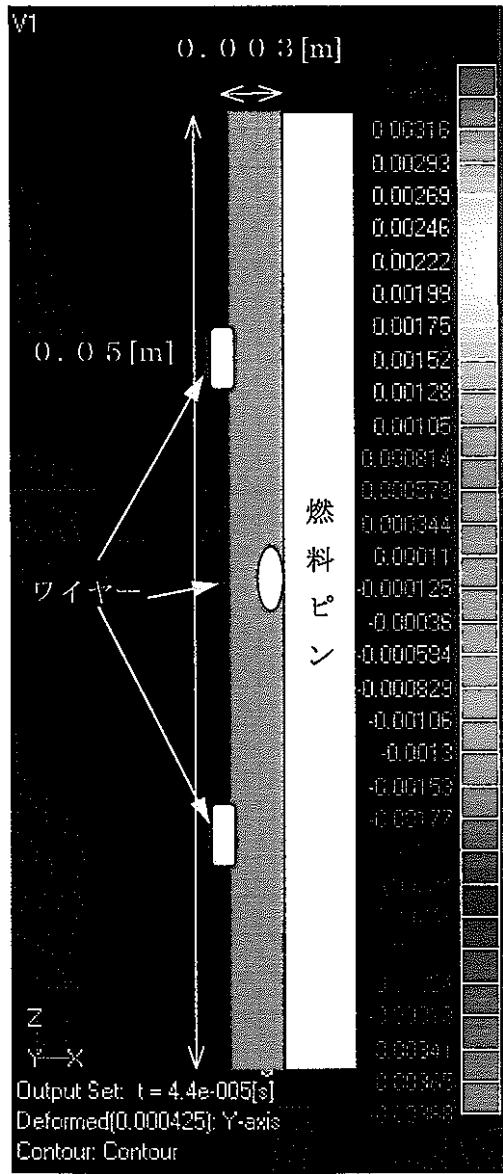


図 3.1-16(10) 軸方向の音圧分布(通常モデル)

時刻 : $4.4 \times 10^{-5} [\text{s}]$

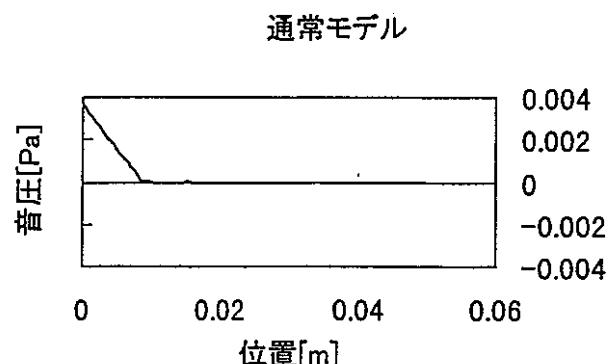


図 3.1-17(1) 入射波が部分モデルに入った瞬間
 $0.8 \times 10^{-5}(\text{sec})$

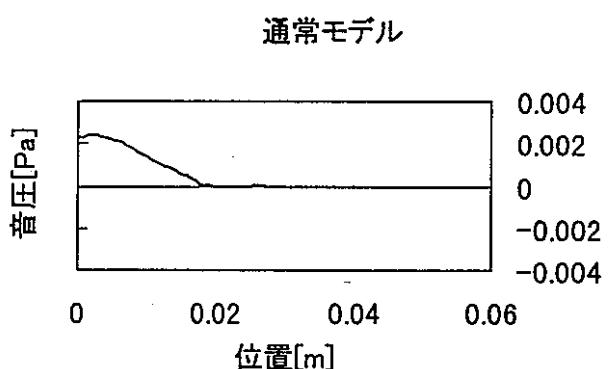


図 3.1-17(2) 入射後 $4 \times 10^{-6}(\text{sec})$ 経過
 $1.2 \times 10^{-5}(\text{sec})$

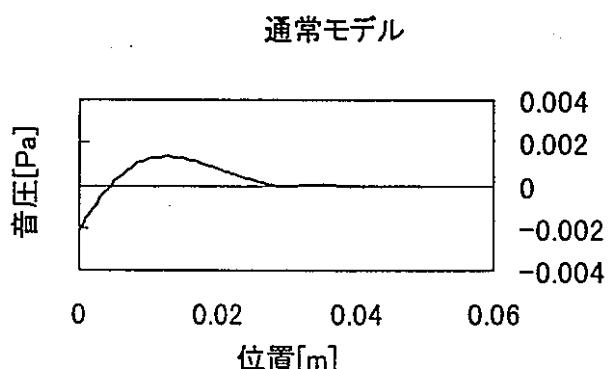


図 3.1-17(3) 入射後 $8 \times 10^{-6}(\text{sec})$ 経過
 $1.6 \times 10^{-5}(\text{sec})$

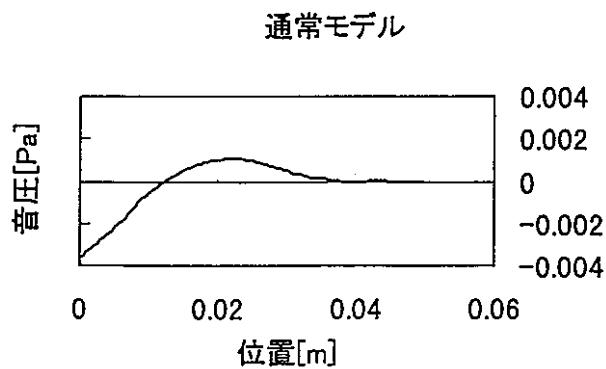


図 3.1-17(4) 入射波と部分モデルの相互作用
 $2.0 \times 10^{-5}(\text{sec})$

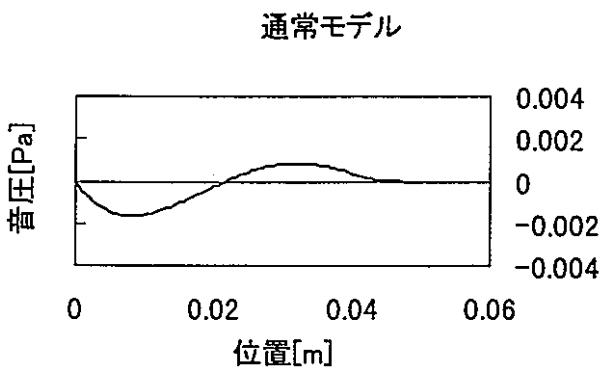


図 3.1-17(5) 入射波と部分モデルの相互作用
 $2.4 \times 10^{-5}(\text{sec})$

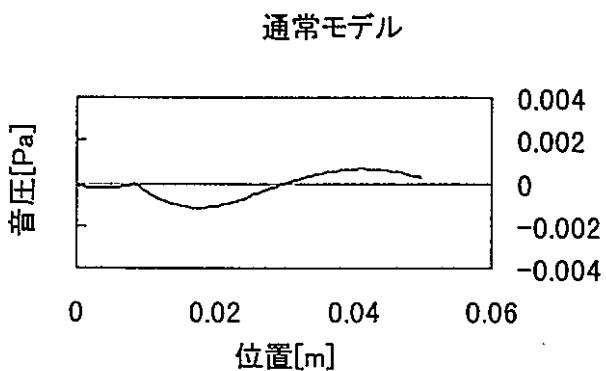


図 3.1-17(6) 入射波の先頭が部分モデルを通過する瞬間
 $2.8 \times 10^{-5}(\text{sec})$

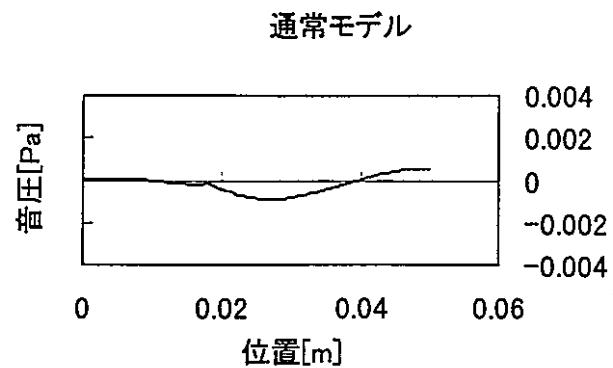


図 3.1-17(7) 入射波と部分モデルの相互作用
 $3.2 \times 10^{-5}(\text{sec})$

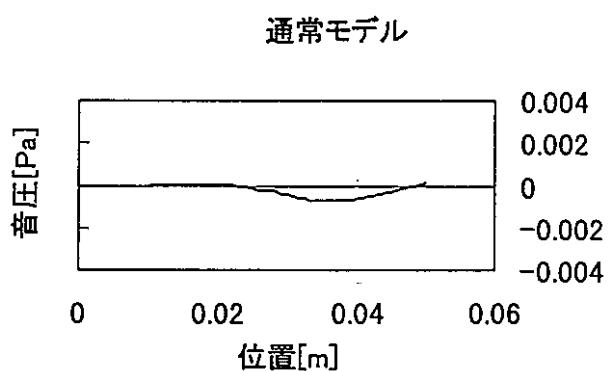


図 3.1-17(8) 入射波と部分モデルの相互作用
 $3.6 \times 10^{-5}(\text{sec})$

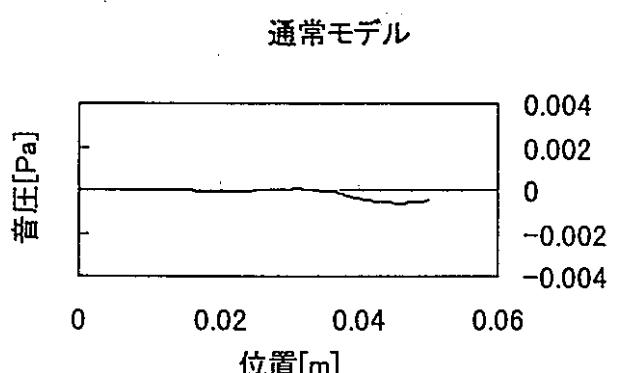


図 3.1-17(9) 入射波と部分モデルの相互作用
 $4.0 \times 10^{-5}(\text{sec})$

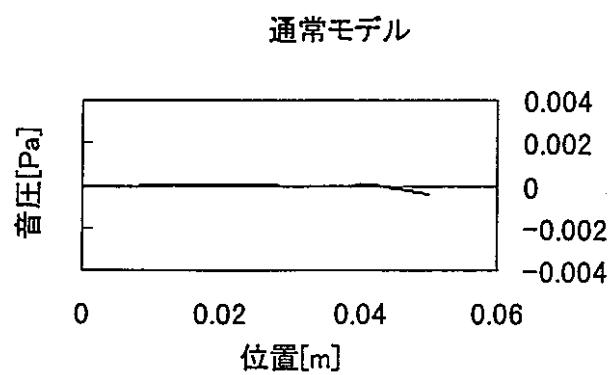


図 3.1-17(10) 入射波が部分モデルを抜ける瞬間
 $4.4 \times 10^{-5}(\text{sec})$

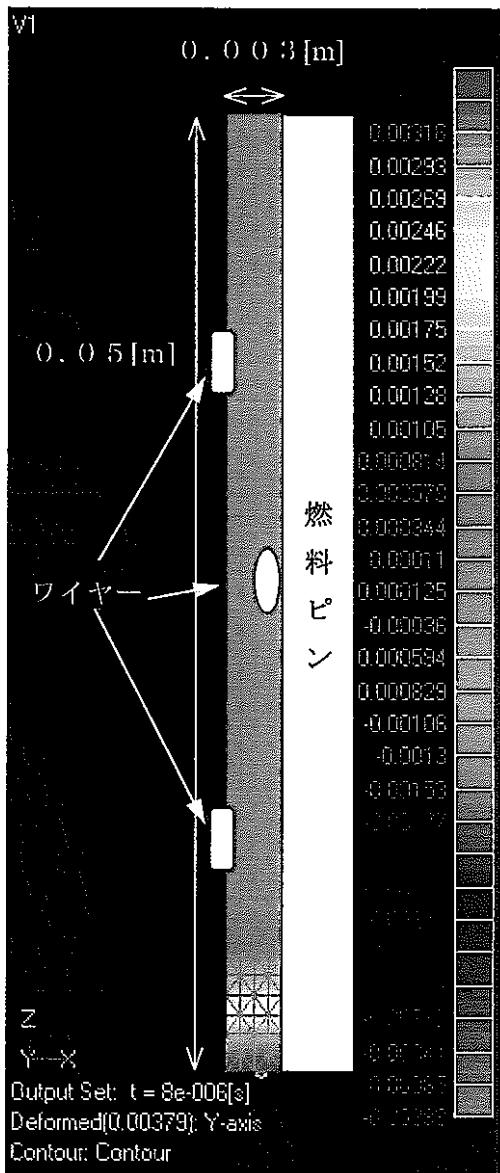
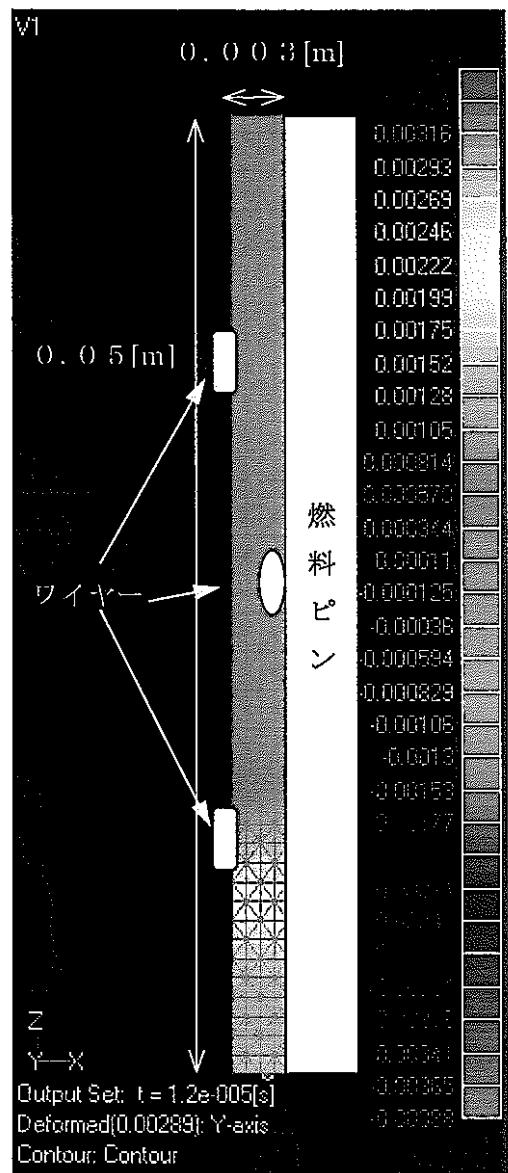


図 3.1-18(1)軸方向の音圧分布(双極子モデル)

時刻 : $0.8 \times 10^{-5} [\text{s}]$



時刻 : $1.2 \times 10^{-5} [\text{s}]$

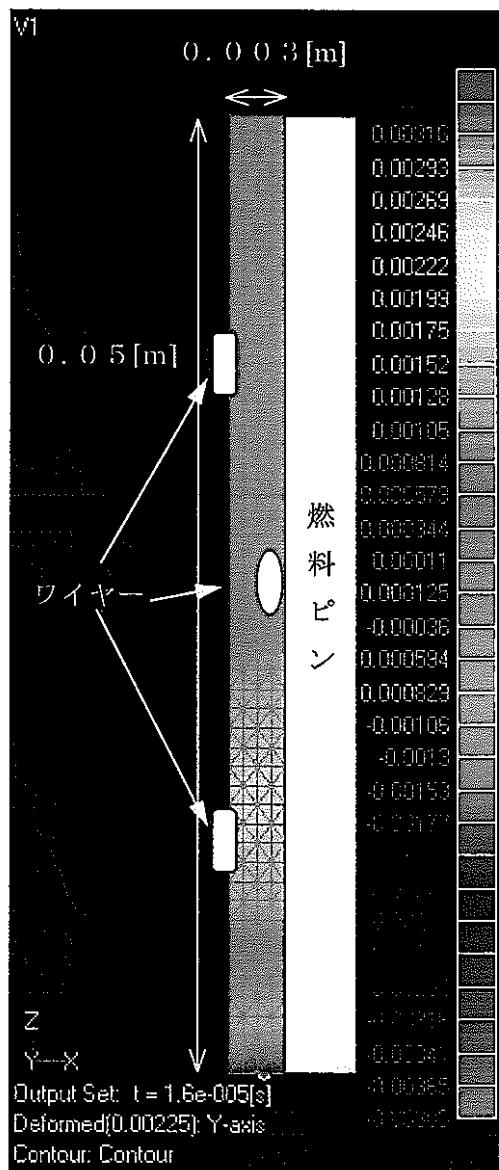


図 3.1-18(3)軸方向の音圧分布(双極子モデル)
時刻 : $1.6 \times 10^{-5} [\text{s}]$

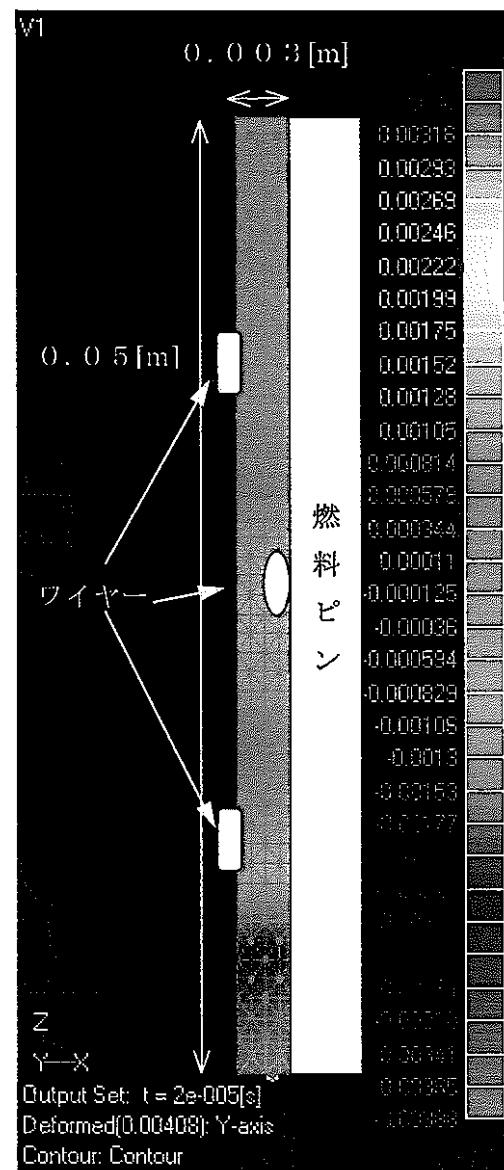


図 3.1-18(4)軸方向の音圧分布(双極子モデル)
時刻 : $2.0 \times 10^{-5} [\text{s}]$

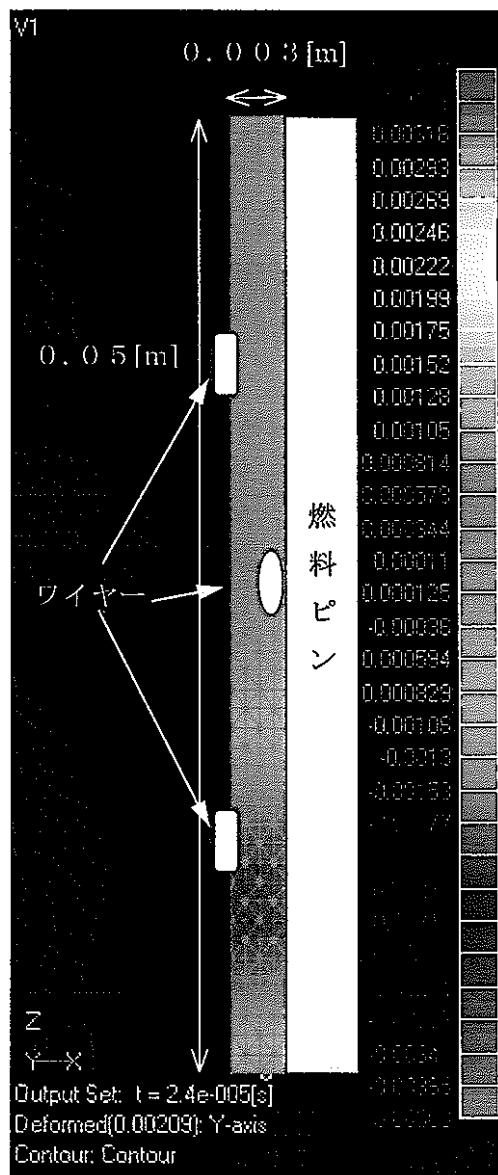


図 3.1-18(5)軸方向の音圧分布(双極子モデル)
時刻 : $2.4 \times 10^{-5}[\text{s}]$

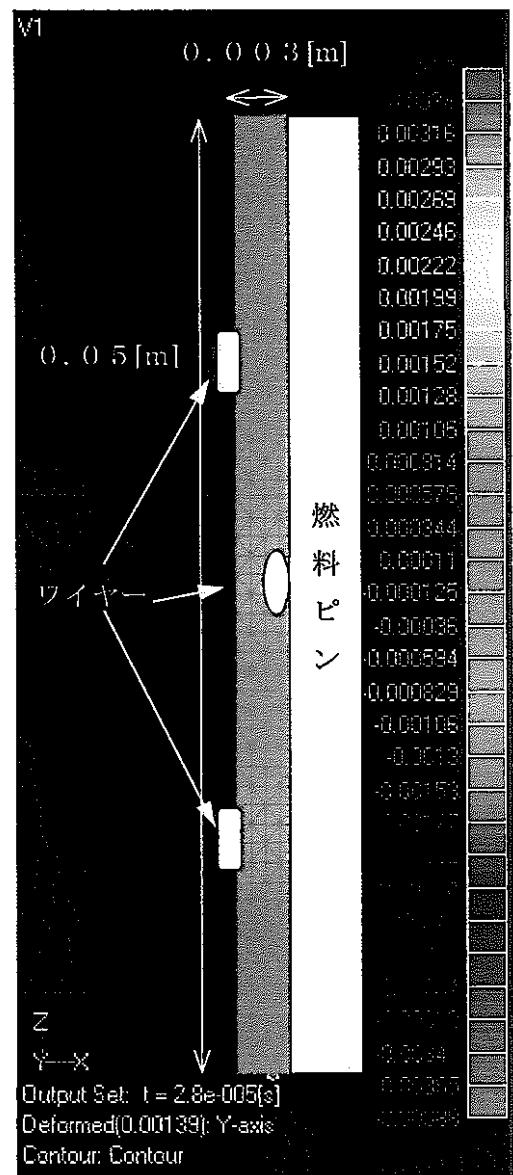


図 3.1-18(6)軸方向の音圧分布(双極子モデル)
時刻 : $2.8 \times 10^{-5}[\text{s}]$

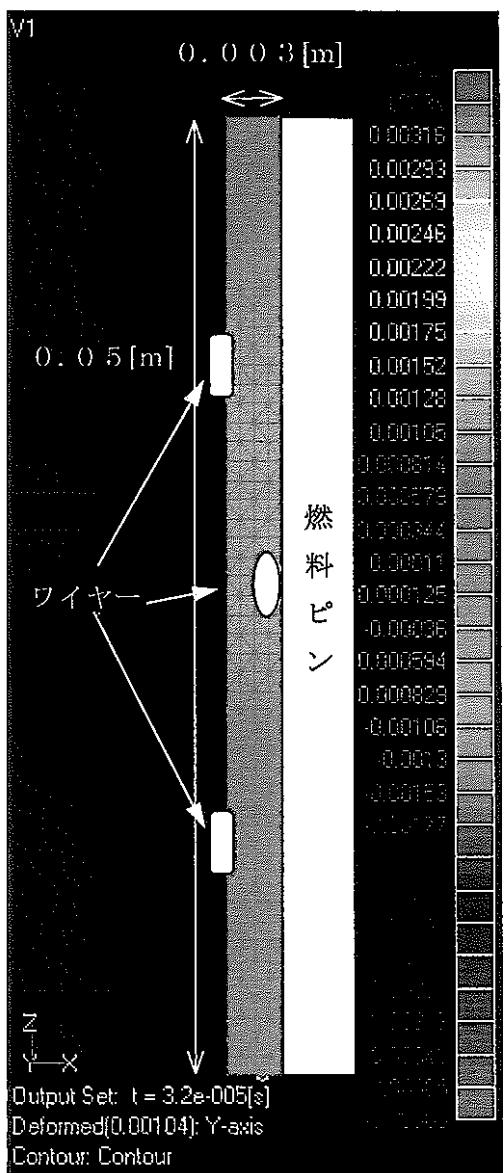


図 3.1-18(7)軸方向の音圧分布(双極子モデル)
時刻 : $3.2 \times 10^{-5}[\text{s}]$

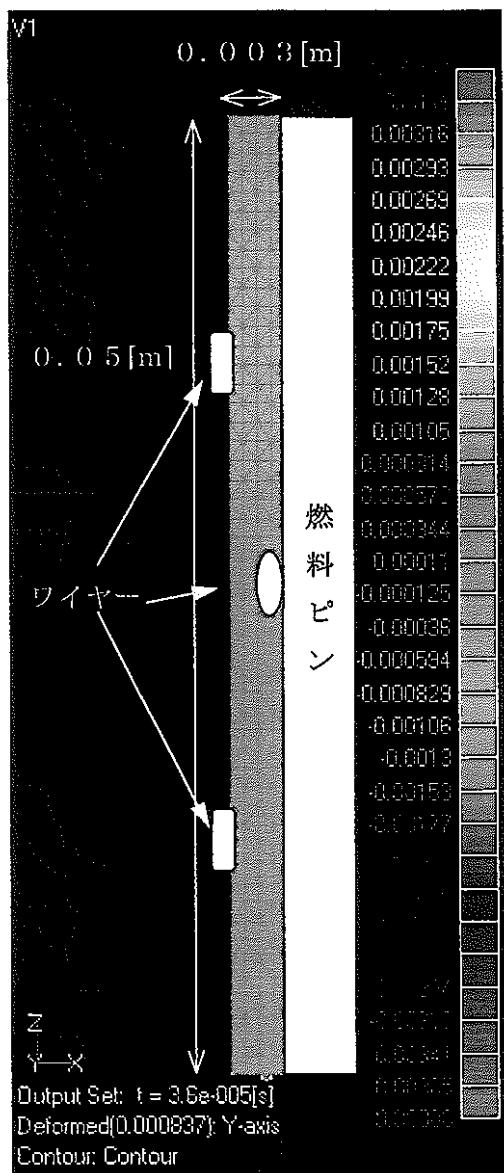


図 3.1-18(8)軸方向の音圧分布(双極子モデル)
時刻 : $3.6 \times 10^{-5}[\text{s}]$

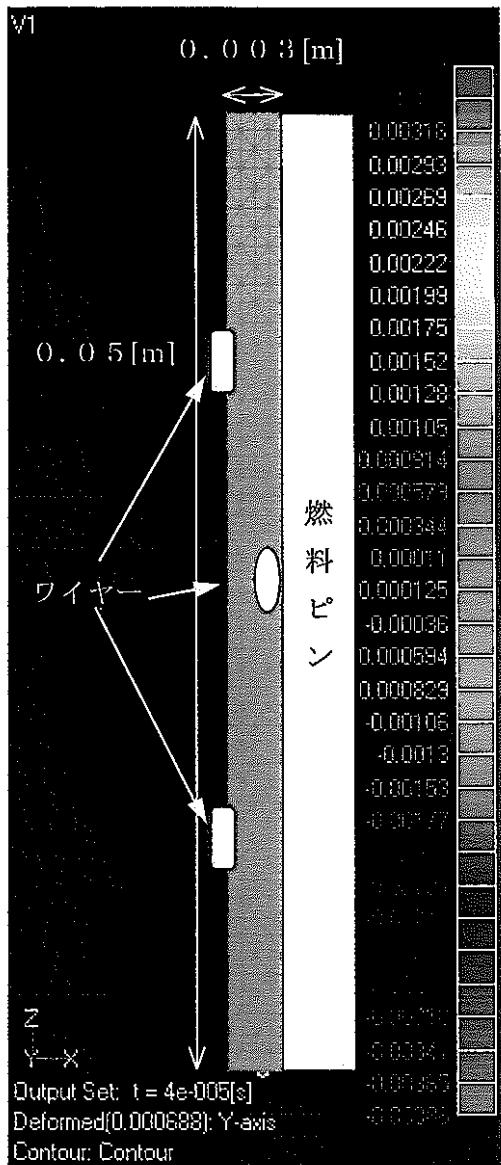


図3.1-18(9)軸方向の音圧分布(双極子モデル)

時刻 : $4.0 \times 10^{-5} [\text{s}]$

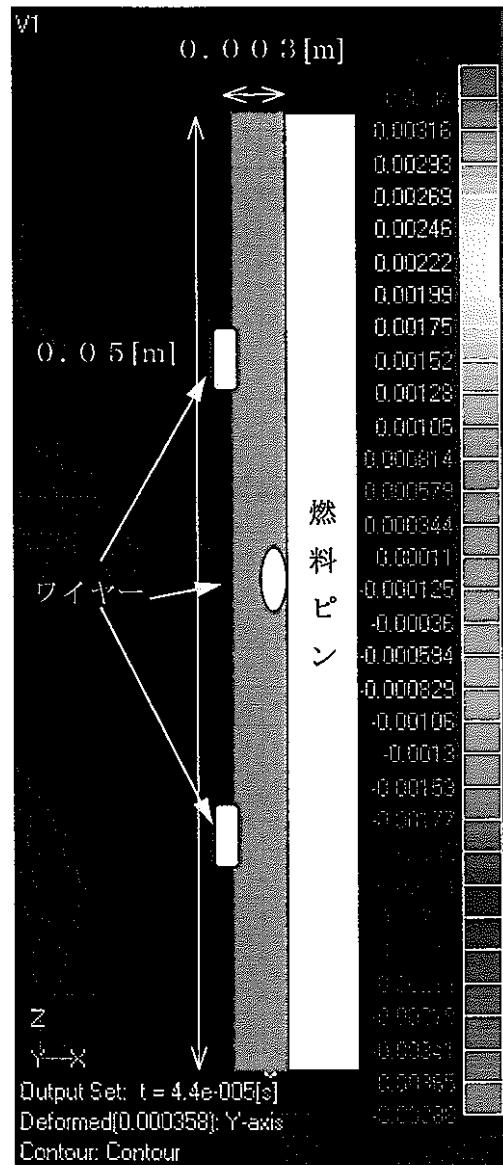


図3.1-18(10)軸方向の音圧分布(双極子モデル)

時刻 : $4.4 \times 10^{-5} [\text{s}]$

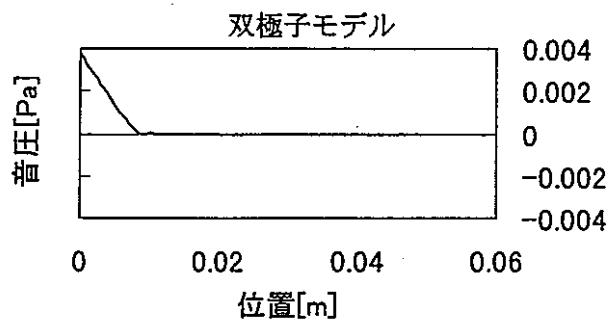


図 3.1-19(1) 入射波が部分モデルに入った瞬間
 $0.8 \times 10^{-5}(\text{sec})$

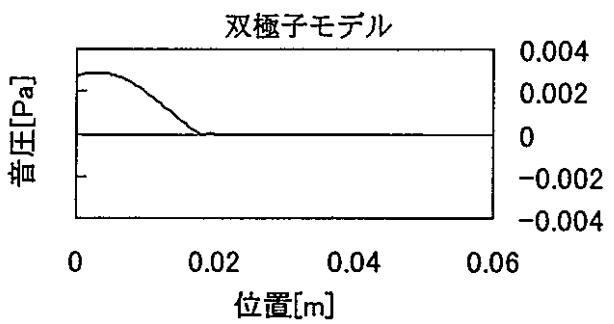


図 3.1-19(2) 入射後 $4 \times 10^{-6}(\text{sec})$ 経過
 $1.2 \times 10^{-5}(\text{sec})$

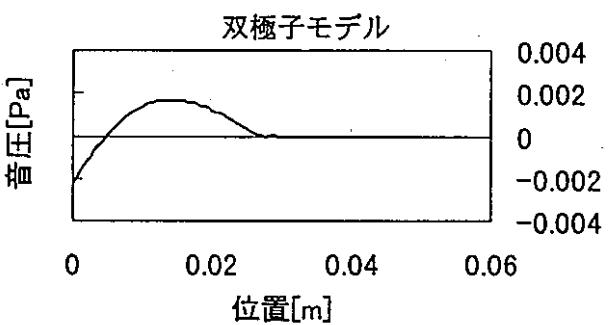


図 3.1-19(3) 入射後 $8 \times 10^{-6}(\text{sec})$ 経過
 $1.6 \times 10^{-5}(\text{sec})$

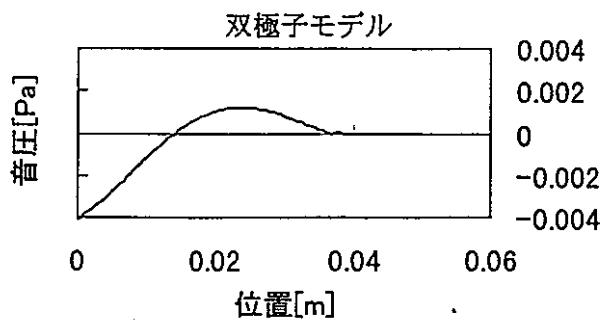


図 3.1-19(4) 入射波と部分モデルの相互作用
 $2.0 \times 10^{-5}(\text{sec})$

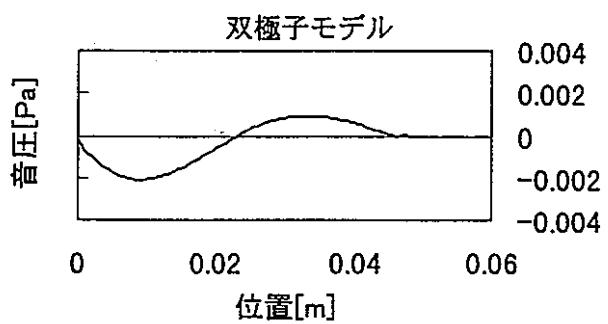


図 3.1-19(5) 入射波と部分モデルの相互作用
 $2.4 \times 10^{-5}(\text{sec})$

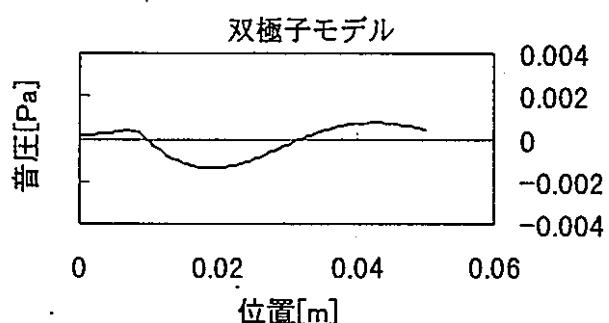


図 3.1-19(6) 入射波の先頭が部分モデルを通過する瞬間
 $2.8 \times 10^{-5}(\text{sec})$

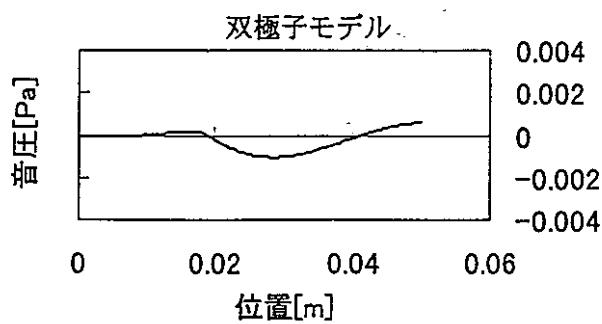


図 3.1-19(7) 入射波と部分モデルの相互作用
 $3.2 \times 10^{-5}(\text{sec})$

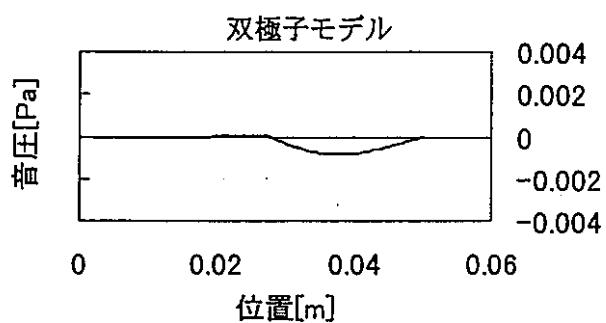


図 3.1-19(8) 入射波と部分モデルの相互作用
 $3.6 \times 10^{-5}(\text{sec})$

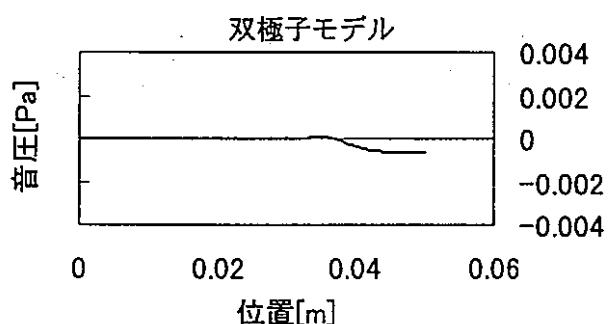


図 3.1-19(9) 入射波と部分モデルの相互作用
 $4.0 \times 10^{-5}(\text{sec})$

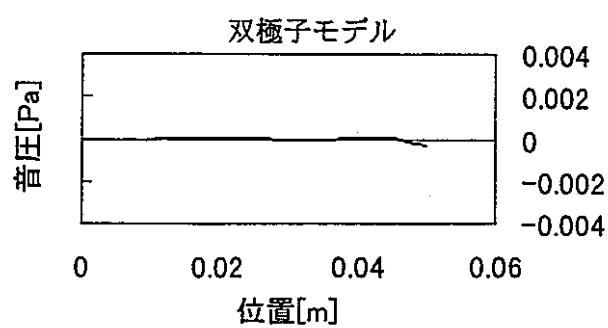


図 3.1-19(10) 入射波が部分モデルを抜ける瞬間

$4.4 \times 10^{-5}(\text{sec})$

3.2 燃料集合体内の音響伝播

通常モデルと双極子モデルとの比較検討の結果、燃料集合体内部の燃料ピンと燃料ピンに巻かれたワイヤーをモデル化して行う音響伝播の評価に、燃料ピンとワイヤーを双極子モデルとして取り扱えることがわかった。そこで、燃料集合体内部の音響伝播を次のようにモデル化して解析する。図 3.2-1 に、燃料集合体を要素分割した図を示す。要素数は 2820 である。図 3.2-2 に、一本の燃料ピンとそのピンに巻いたワイヤーを双極子モデルで表した図を示す。要素数は 160 となる。図 3.2-3(a)に燃料集合体と燃料ピン及びラッピングワイヤーを組合せた要素を真上から見た図を示す。図 3.2-3(b)には、同じ燃料集合体全要素図を斜め方向からみた鳥瞰図を示す。この組合せによる要素数は 23200 となる。

音源の表面上で得られる音圧値を図 3.2-4 に示す。音源位置で与えた音圧は最大が 1000Pa の白色雑音とした。

(1) ワイヤーの有無による燃料集合体内部の音響伝播の比較

ワイヤー無しの燃料ピンと燃料集合体の組み合わせによる音響伝播特性解析は、平成 8 年度に実施した。しかし今回のシミュレーションでは、媒質の音速を温度 500°C での音速 2315m/sec から温度 250°C での音速 2446m/sec に変えたため、本条件における音圧分布の計算を行い、ワイヤを巻いた場合と巻かない場合での音圧分布の比較を行った。

図 3.2-5 に、燃料集合体内部の沸騰音の伝播を各時刻で示す。各図の a)で示しているのがワイヤー無しの場合の燃料集合体内部の沸騰音伝播で、b)で示しているのが燃料ピンにワイヤーを巻いた時の沸騰音の伝播である。また図 3.2-5(1)と図 3.2-5(2)は燃料集合体内部の音源から燃料集合体出口までを半分に分けて、音源から燃料集合体の出口へ向かう途中までを表示している。次の図 3.2-5(3)と図 3.2-5(4)に、音源から半分進んだ位置から燃料集合体出口までを示している。

ワイヤーの有り・無しを比較してみると、伝播の様子を示す等高線分布も、中心軸に沿っての音圧波形も、見た目には差がない。実際に両者を比較すると最大 6%程度の違いとなっている。このように差が小さい理由は、次のように考えられる。

燃料集合体を上から見ると、燃料ピンに巻かれたワイヤーにより中を見通すことができない状態になっている。しかし沸騰音として想定している最高周波数の波長に比べてワイヤーの径が十分細いため、ワイヤーの存在は伝播する音波にとってあまり障害となっていないと考えられる。

以上の結果から、音源近傍の 1000Pa の音圧が出口部で 15Pa の平面波となっており、音源波形が球面波から管内の平面波に広がるときにローパスフィルターとなっていることが判った。

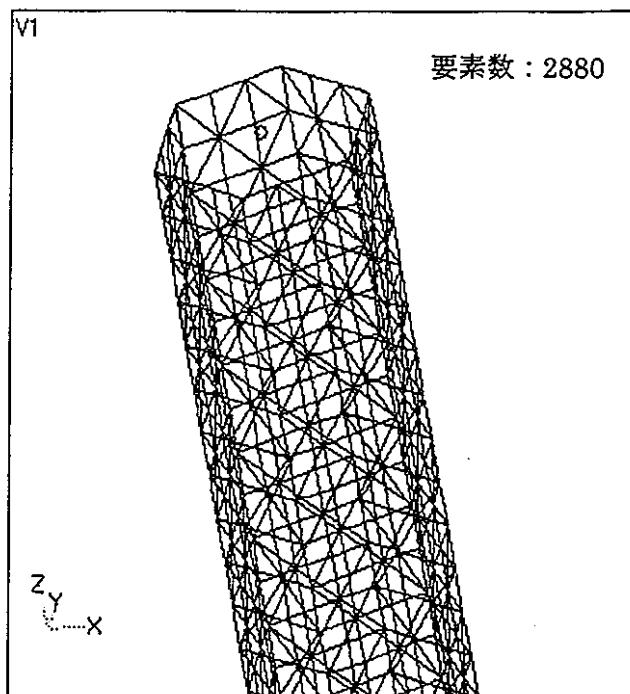


図 3.2-1 燃料集合体の壁面の要素

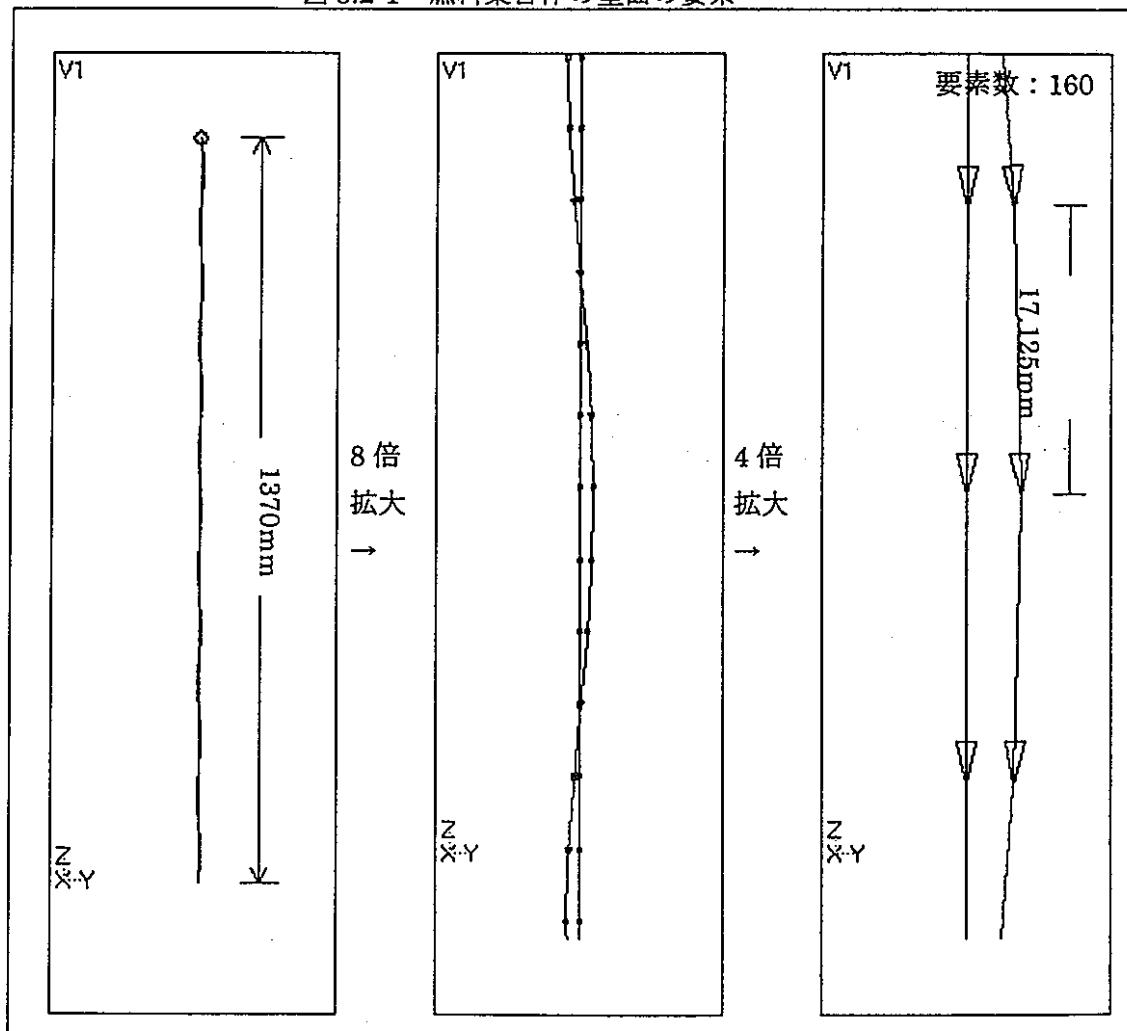


図 3.2-2 燃料ピンとラッピングワイヤーのモデル

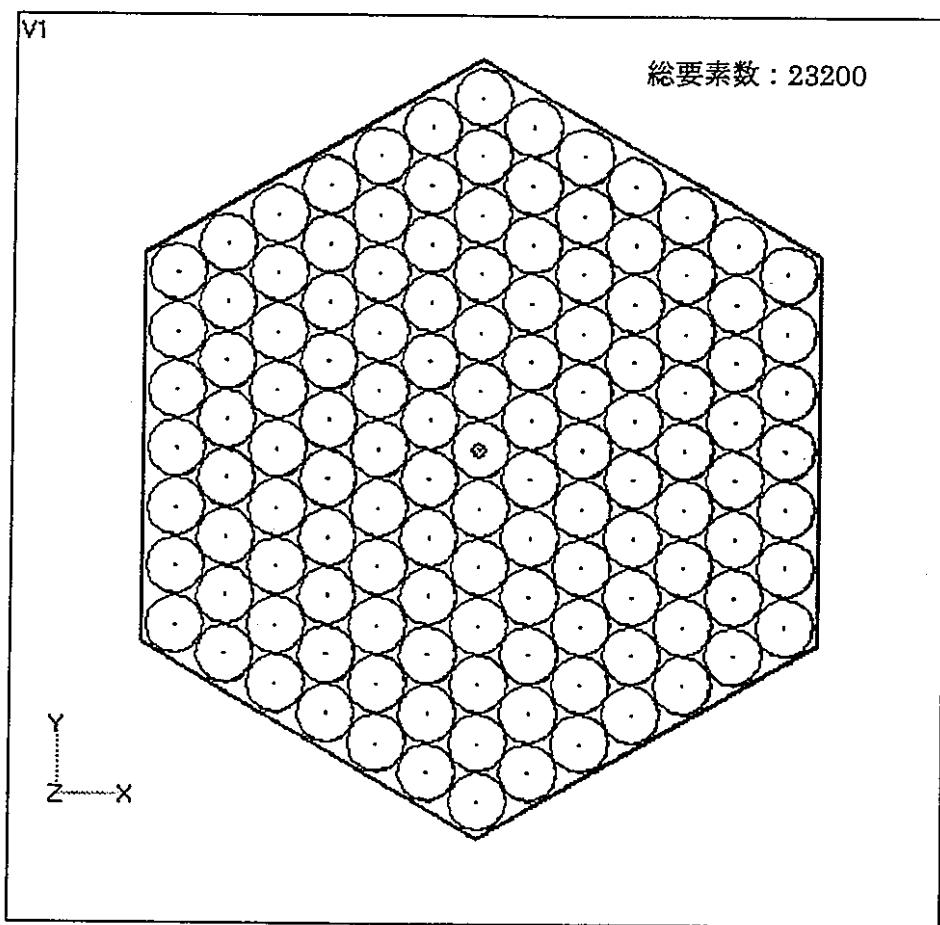


図 3.2-3(a) 真上から見た燃料集合体のモデル

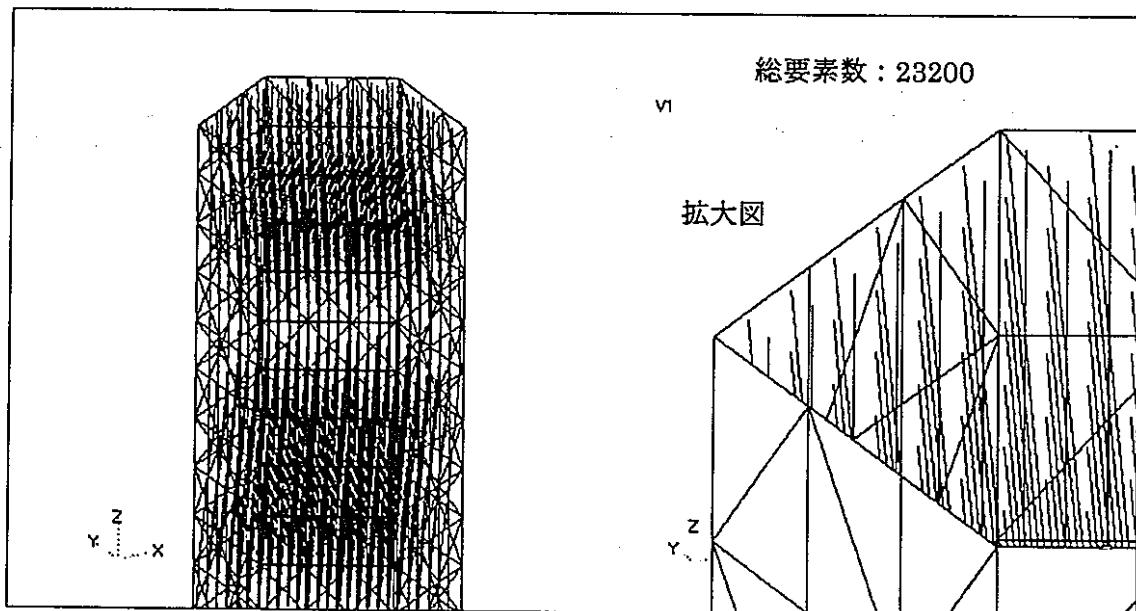


図 3.2-3(b) 斜め上から見た燃料集合体のモデル

音源位置での音圧分布

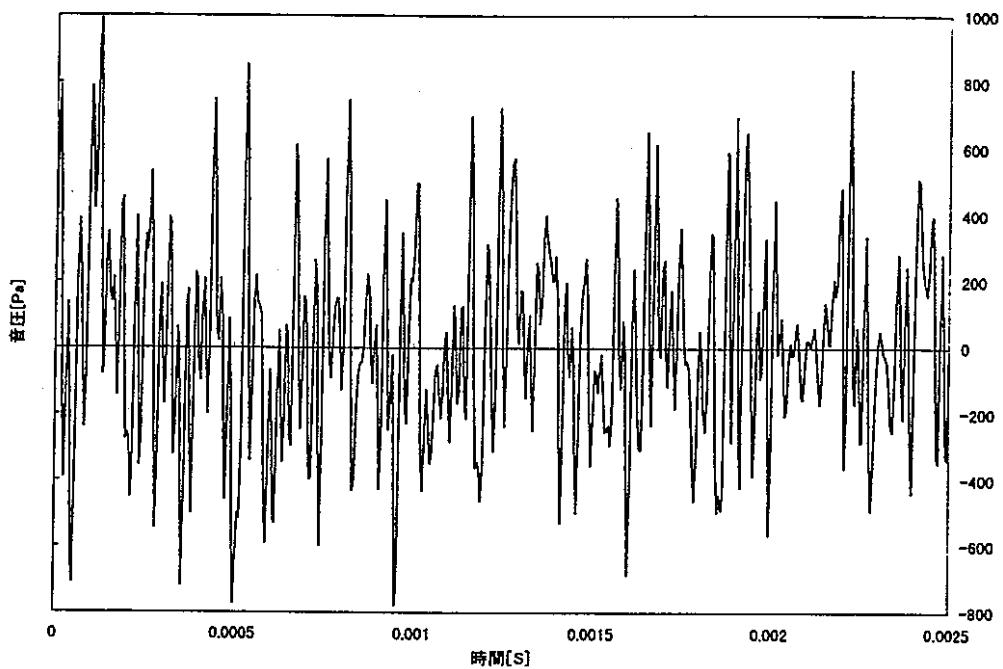


図 3.2-4 音源位置で観測される音圧波形

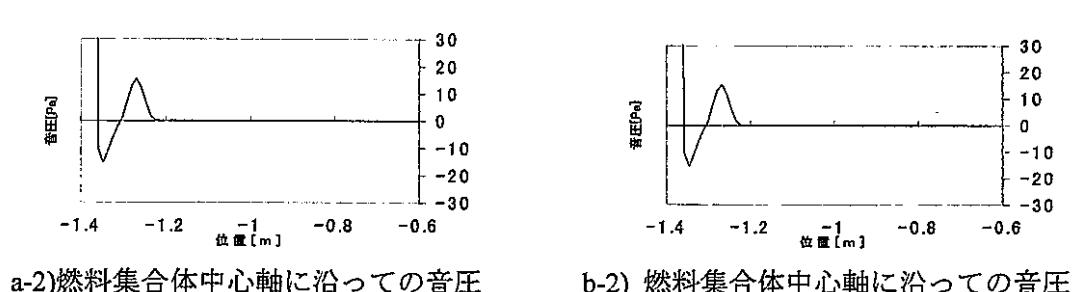
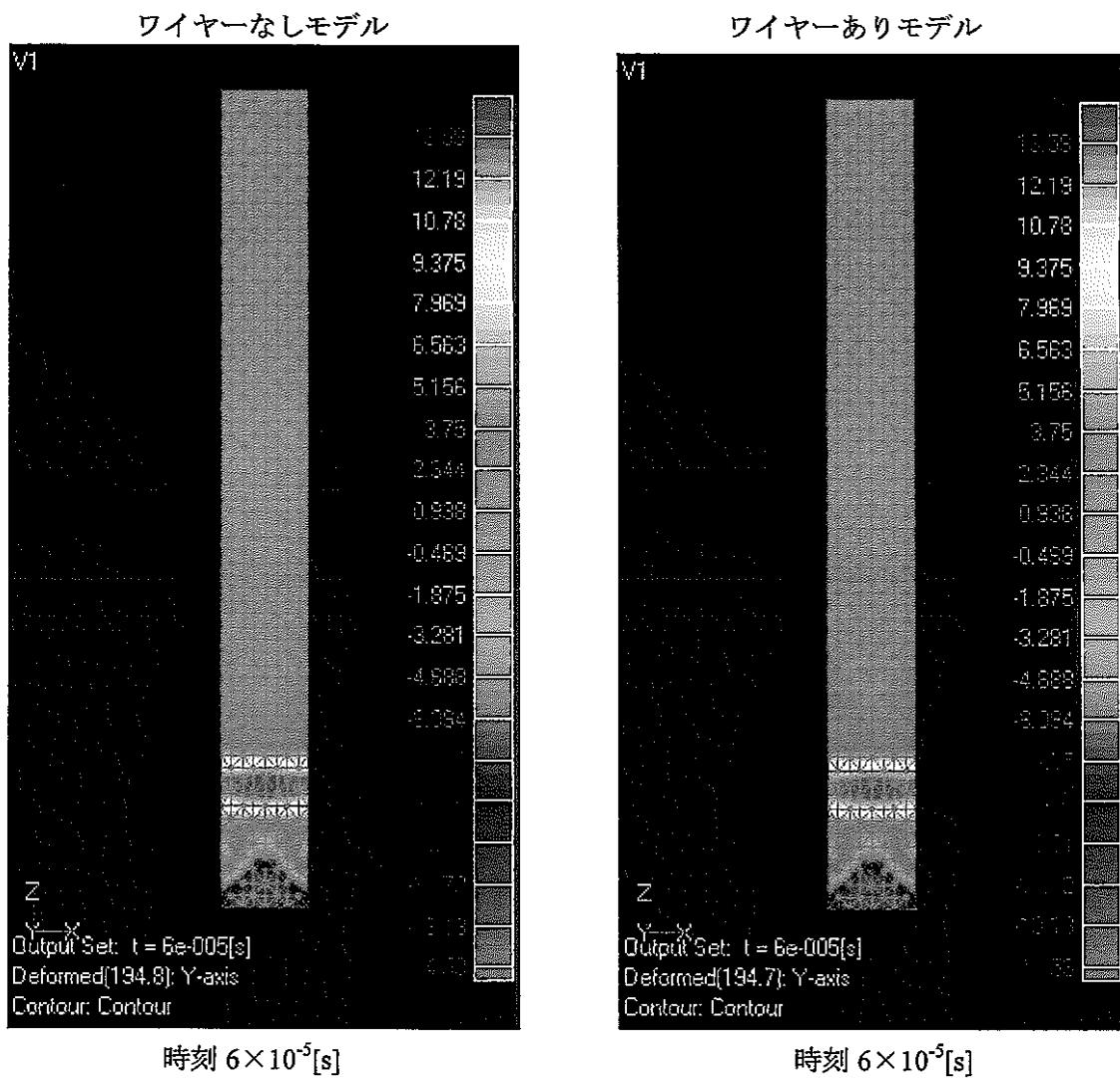


図 3.2-5(1) 時刻 $6 \times 10^{-5} [\text{s}]$ での燃料集合体内部の音響伝播
沸騰点位置-1.73m から-0.685mまでの
音源から出口までの半分の範囲を表示している。

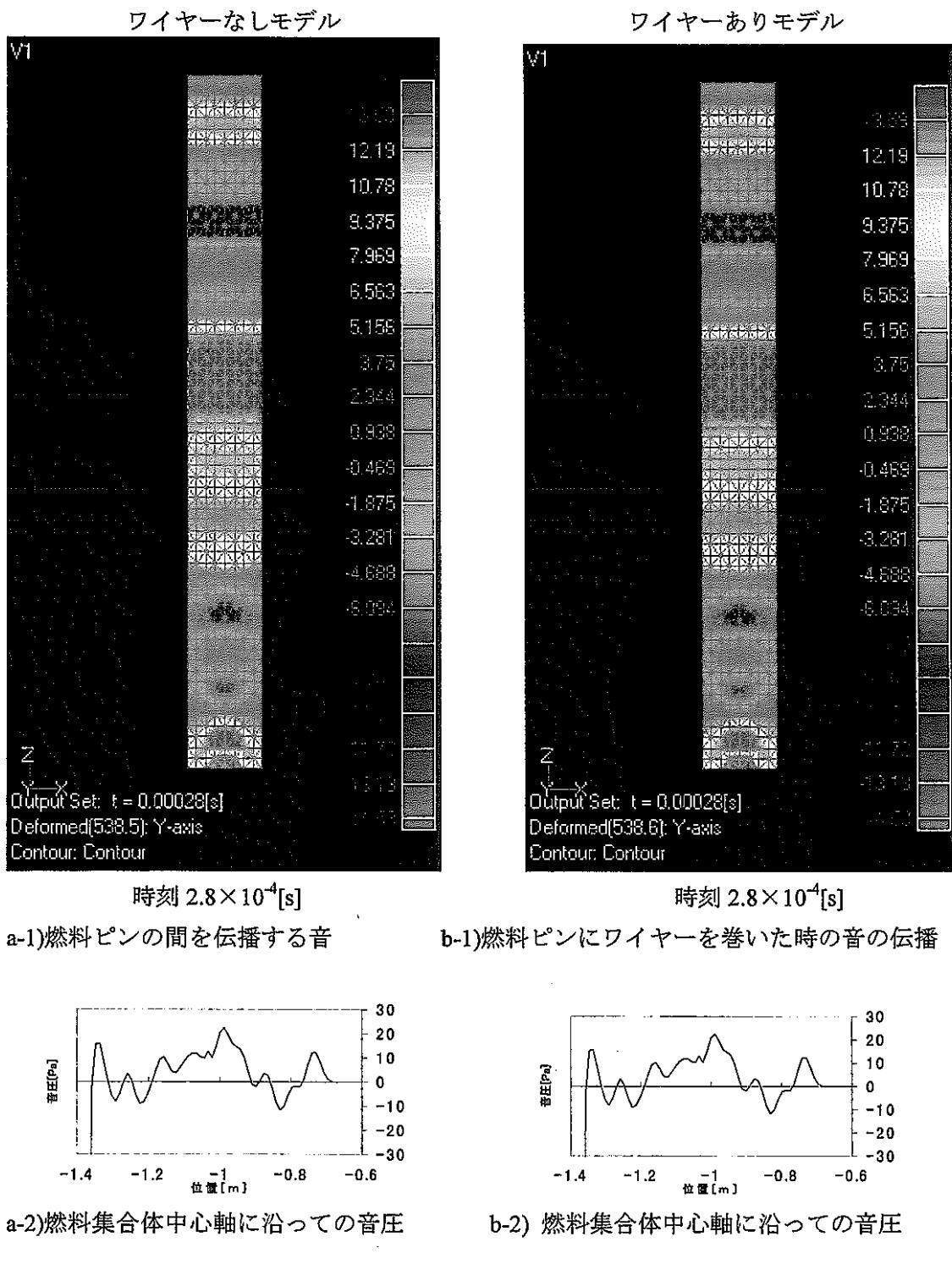
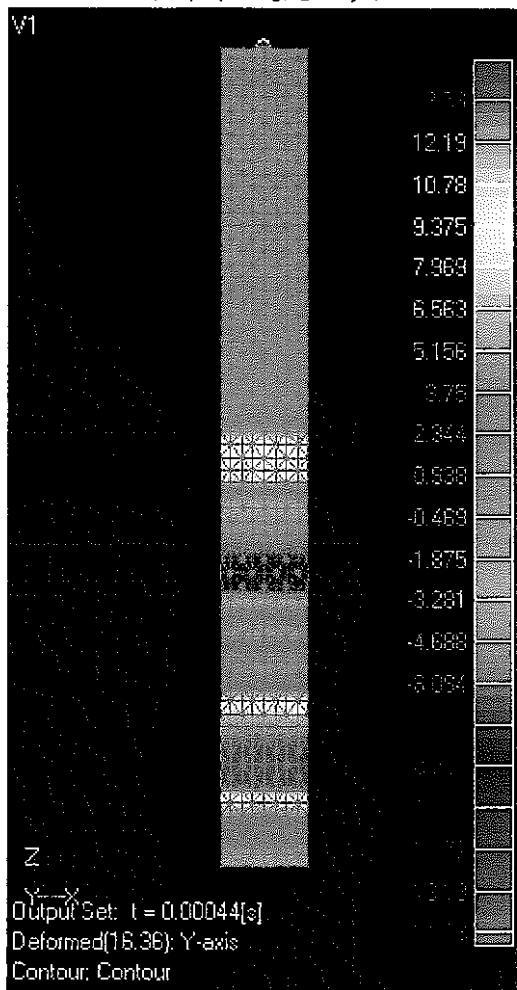


図 3.2-5(2) 時刻 $2.8 \times 10^{-4}[\text{s}]$ での燃料集合体内部の音響伝播

沸騰点位置-1.73m から-0.685m までの

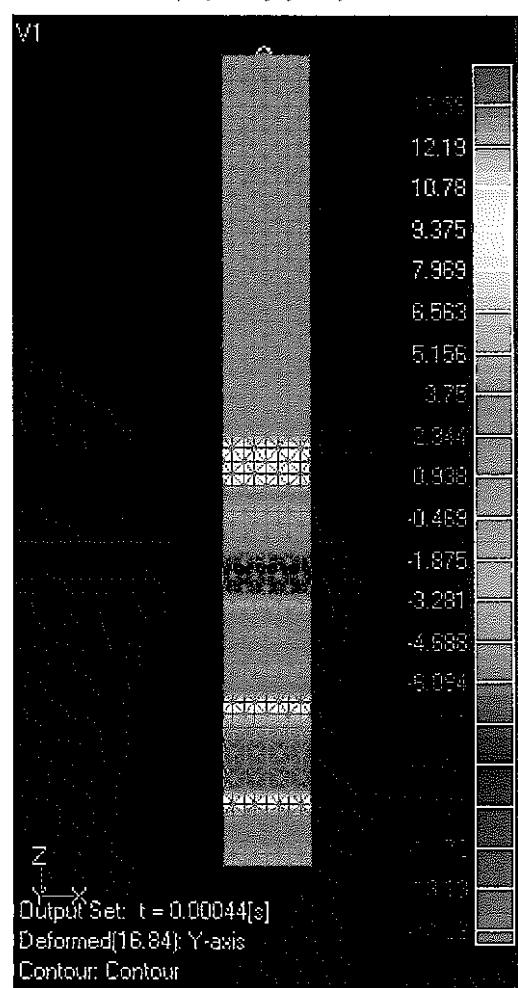
音源から出口までの半分の範囲を表示している。

ワイヤーなしモデル

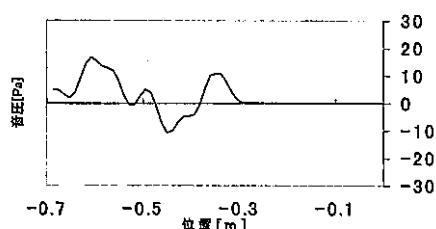
時刻 4.4×10^{-4} [s]

a-1) 燃料ピンの間を伝播する音

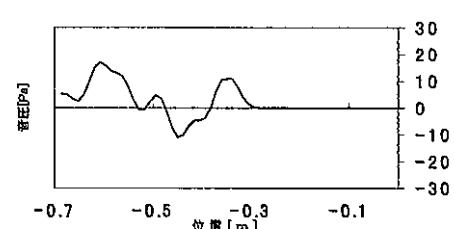
ワイヤーありモデル

時刻 4.4×10^{-4} [s]

b-1) 燃料ピンにワイヤーを巻いた時の音の伝播



a-2) 燃料集合体中心軸に沿っての音圧



b-2) 燃料集合体中心軸に沿っての音圧

図 3.2-5(3) 時刻 4.4×10^{-4} [s]での燃料集合体内部の音響伝播

位置-0.685m から燃料集合体出口 0.0m までの

燃料集合体の半分の範囲を表示している。

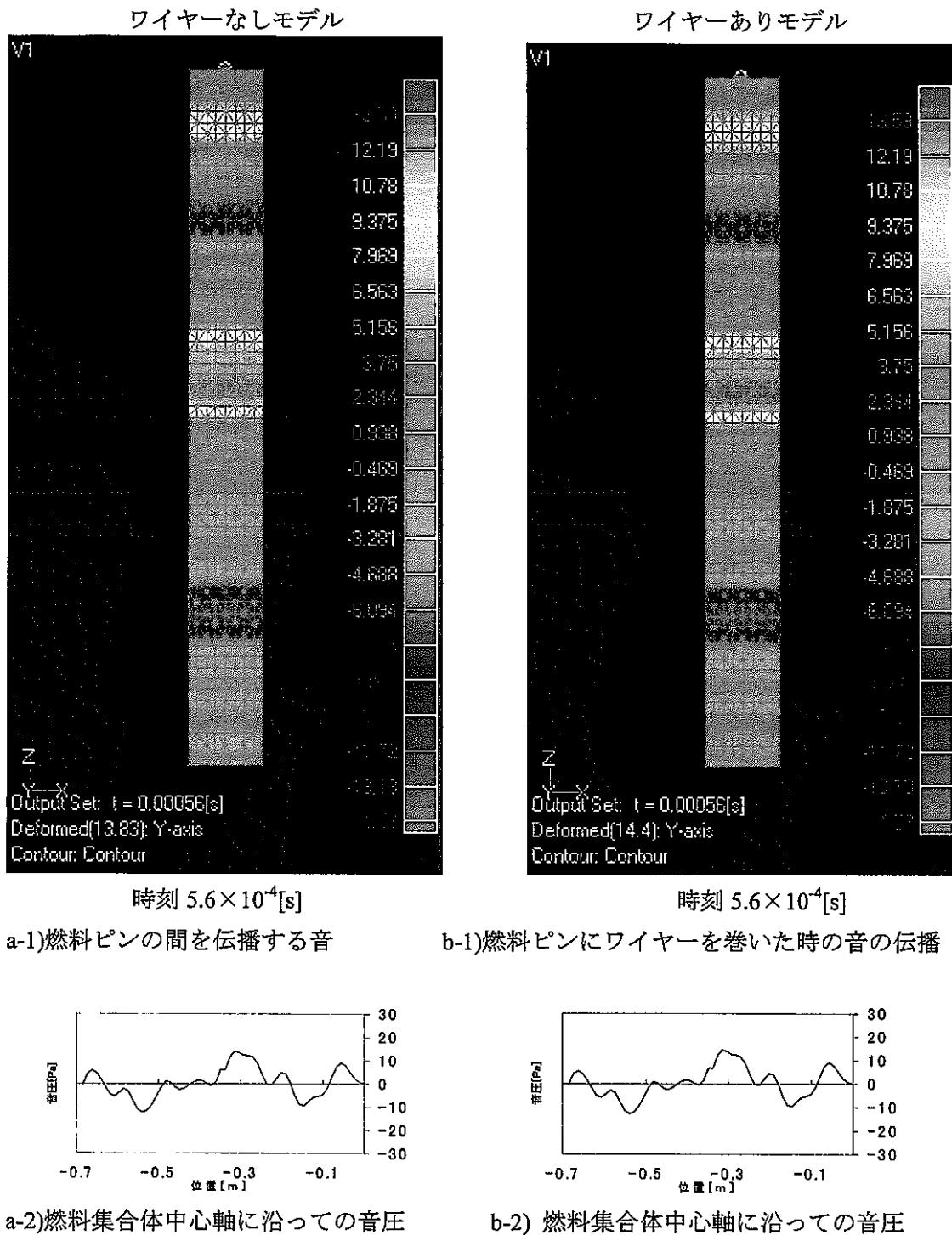


図 3.2-5(4) 時刻 5.6×10^{-4} [s]での燃料集合体内部の音響伝播

位置-0.685m から燃料集合体出口 0.0m までの

燃料集合体の半分の範囲を表示している。

3.3 上部プレナム部の音響伝播

平成8年度は、上部プレナム部の炉内検査孔位置に観測点を想定し、その点で燃料集合体出口から高さ方向1mを10等分し各点の音圧値を求めた。平成9年度のシミュレーションでは、観測点をより増やした状態での伝播特性評価を行なった。今回増やした観測点は、燃料集合体0列、3列、5列であり、燃料集合体出口の高さから350mmの高さまでを10等分して音圧値を求めた。計算に用いたモデル及び要素図は、平成8年度と同じものを使用した。また、上部プレナム部の音響伝播については、音源としてワイヤをモデル化して行った燃料集合体内の音響伝播解析結果を用いている。

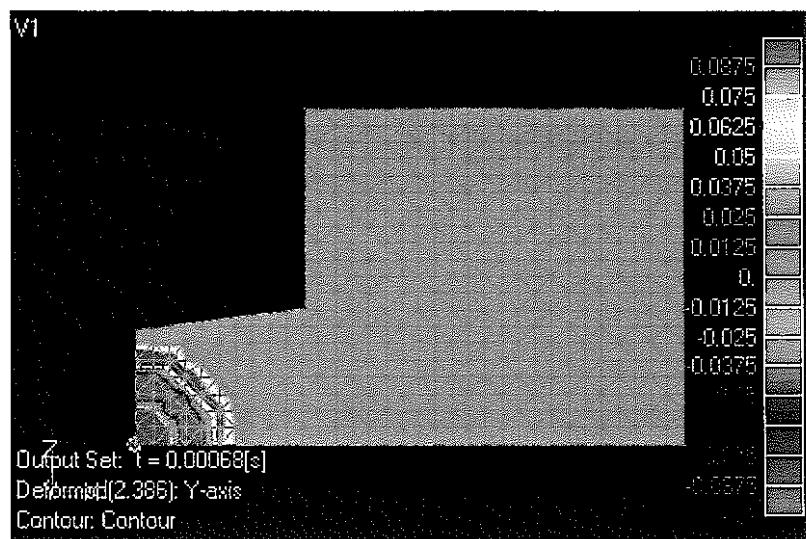
図3.3-1(1)～(4)に、各時刻でのプレナム部を伝播する沸騰音の様子を示している。伝播波形は、燃料集合体から放射され、熱遮蔽板で反射されながら上部プレナム部を広がって伝播している。

図3.3-2(1)～(11)に、上部プレナム部第0列で観測される、燃料集合体出口部を0mmとして、上に350mmまでを10等分した11箇所の音圧・伝達関数の振幅と位相を示す。

図3.3-3(1)～(11)に、上部プレナム部第3列で観測される、燃料集合体出口部を0mmとして、上に350mmまでを10等分した11箇所の音圧・伝達関数の振幅と位相を示す。

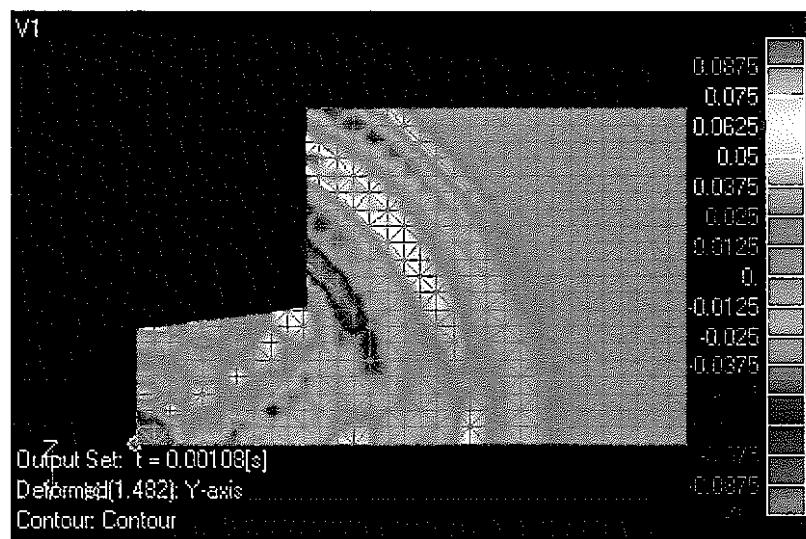
図3.3-4(1)～(11)に、上部プレナム部第5列で観測される、燃料集合体出口部を0mmとして、上に350mmまでを10等分した11箇所の音圧・伝達関数の振幅と位相を示す。

図3.3-5(1)～(11)に、平成8年度に計算した観測点と同じ位置（炉内検査孔）で観測される、燃料集合体出口部を0mとして、上に1mまでを10等分した11箇所の音圧・伝達関数の振幅と位相を示す。これらの図から燃料集合体から放射された沸騰音が上部プレナム部を広がって伝播する様子を示すことができる。これらの結果によると上部プレナム部第0、3、5列の音響検出の適性については、ほぼ同程度に沸騰音の検出が可能であることがわかった。



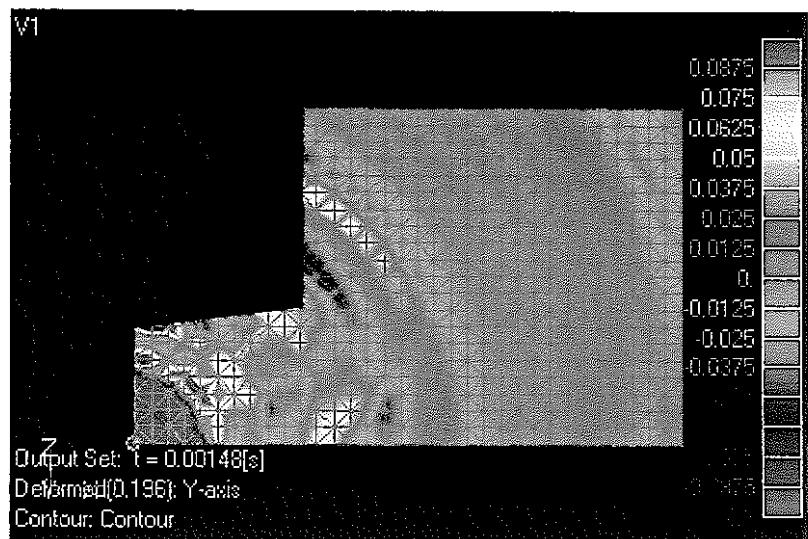
時刻 $6.8 \times 10^{-4}[\text{s}]$

図 3.3-1(1) 上部プレナム部の音響伝播
燃料集合体から音が放射された瞬間



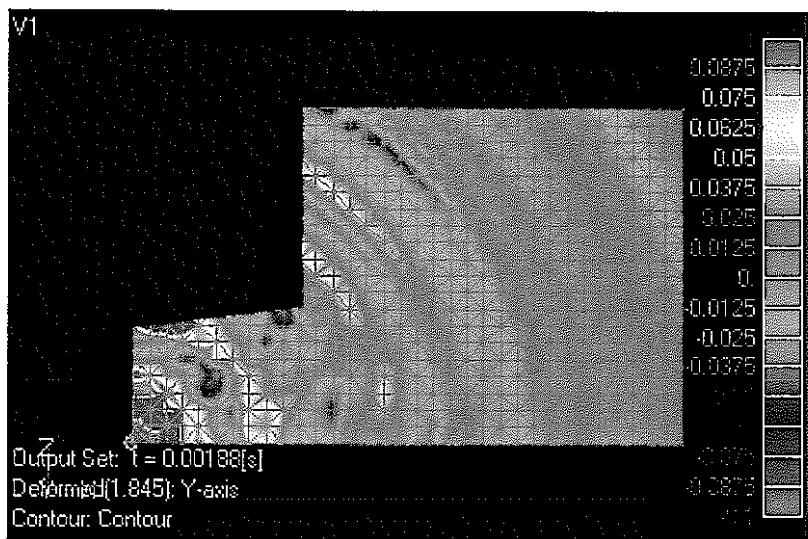
時刻 $1.08 \times 10^{-3}[\text{s}]$

図 3.3-1(2) 上部プレナム部の音響伝播
燃遮蔽版で音が反射される様子。



時刻 $1.48 \times 10^{-3}[\text{s}]$

図 3.3-1(3) 上部プレナム部の音響伝播
一番遠方の観測点まで音が届いたとき。

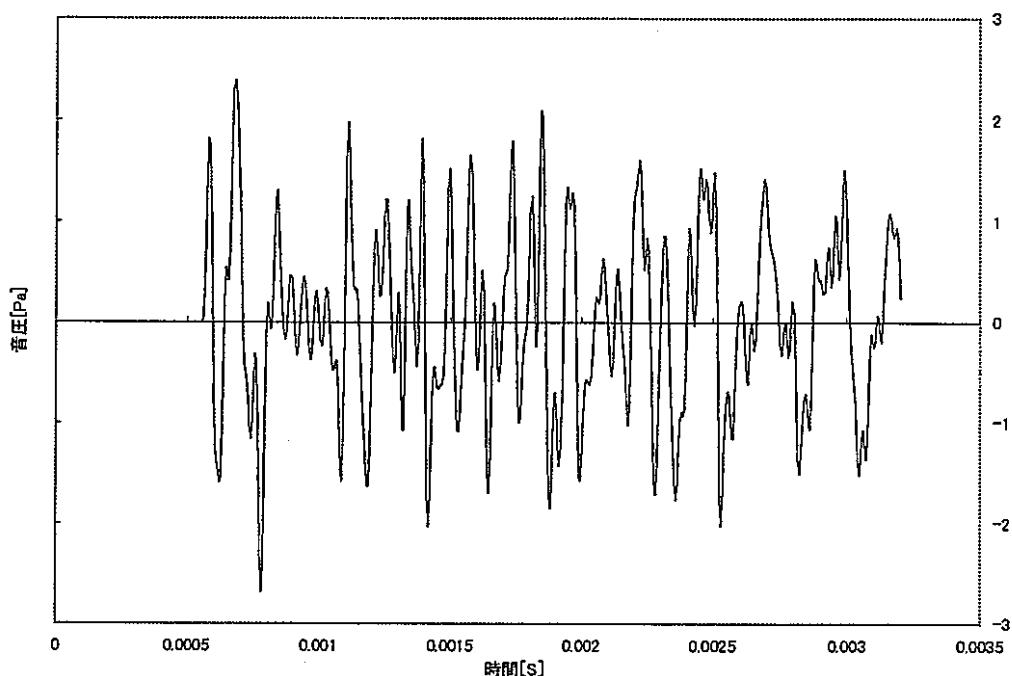


時刻 $1.88 \times 10^{-3}[\text{s}]$

図 3.3-1(4) 上部プレナム部の音響伝播
音が定常的に伝播している様子。

炉心第0列 高さ 0.0m

音圧分布



伝達関数

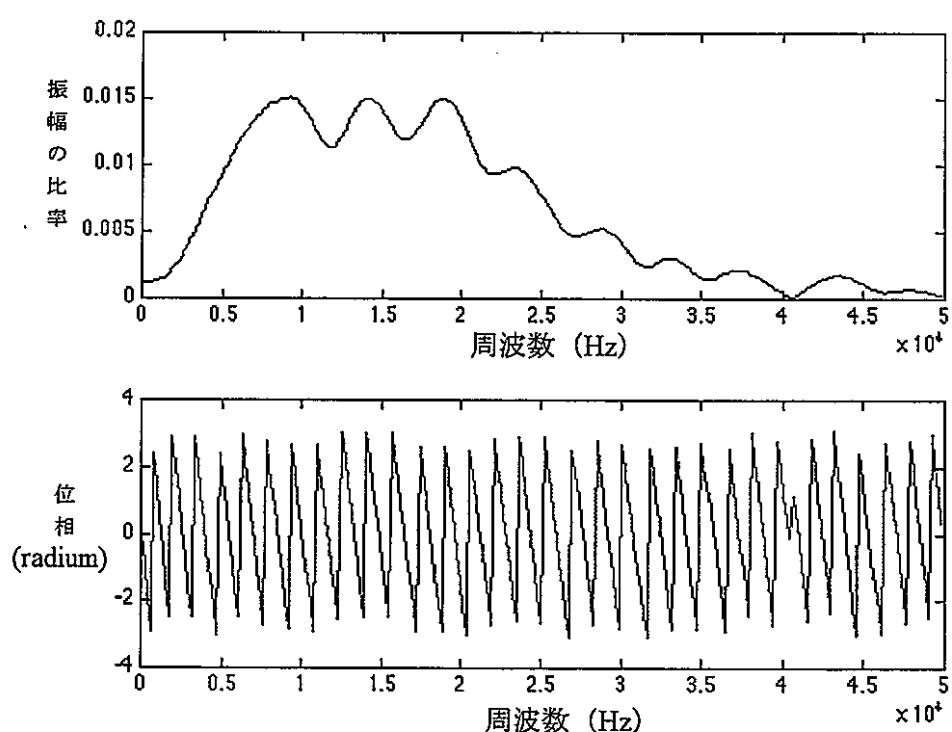
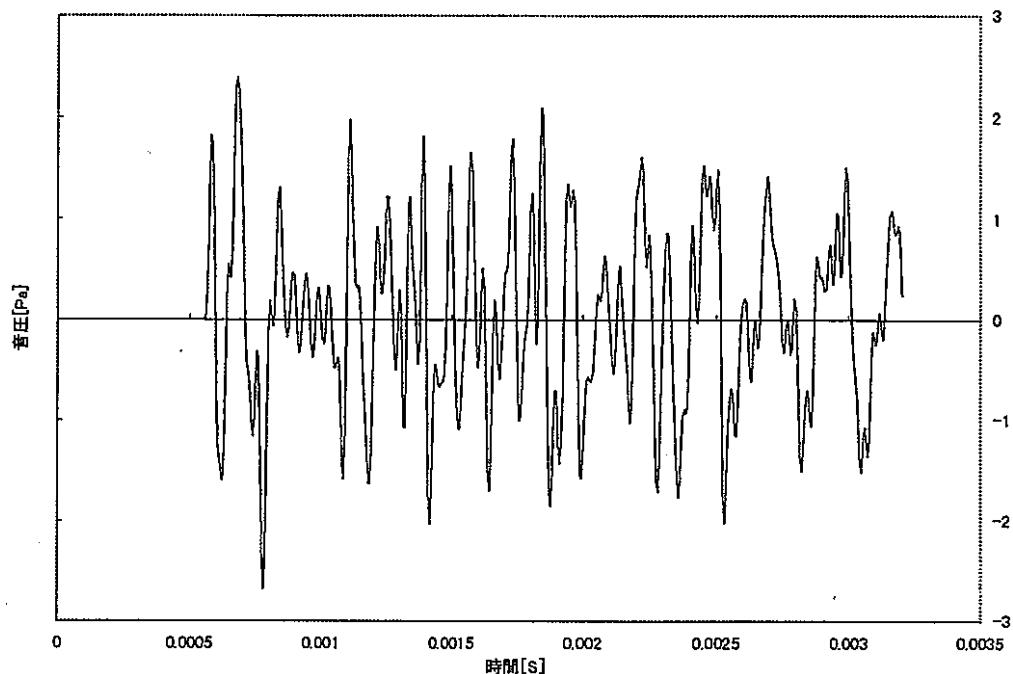


図 3.3-2(1) 第0列、高さ0mmの位置で観測される音圧と伝達関数

炉心第0列 高さ 0.035m
音圧分布



伝達関数

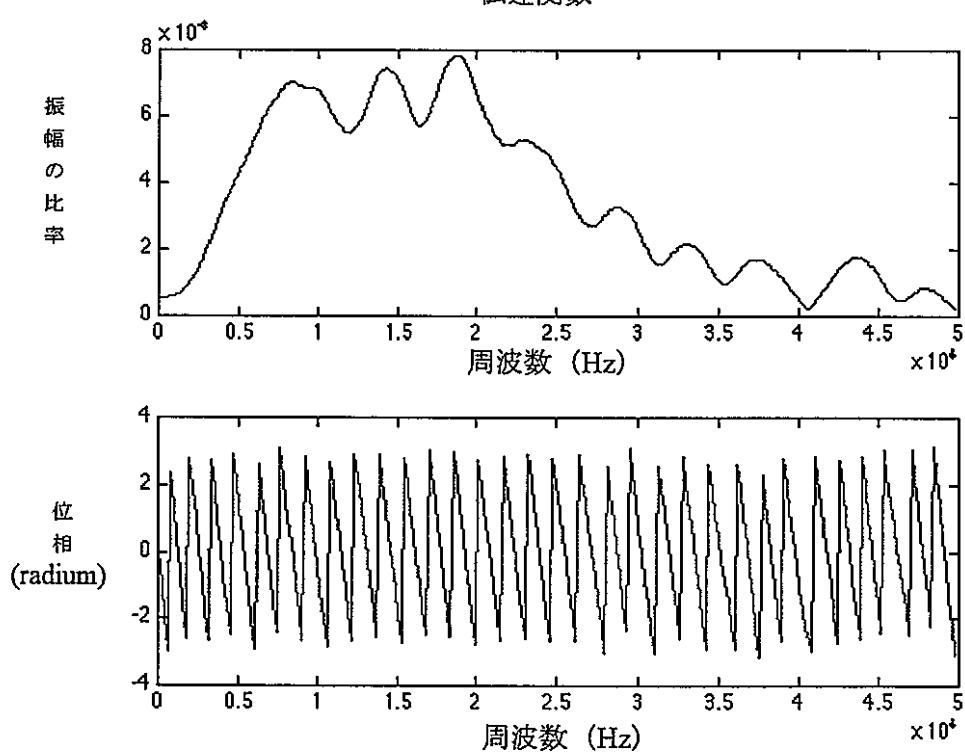
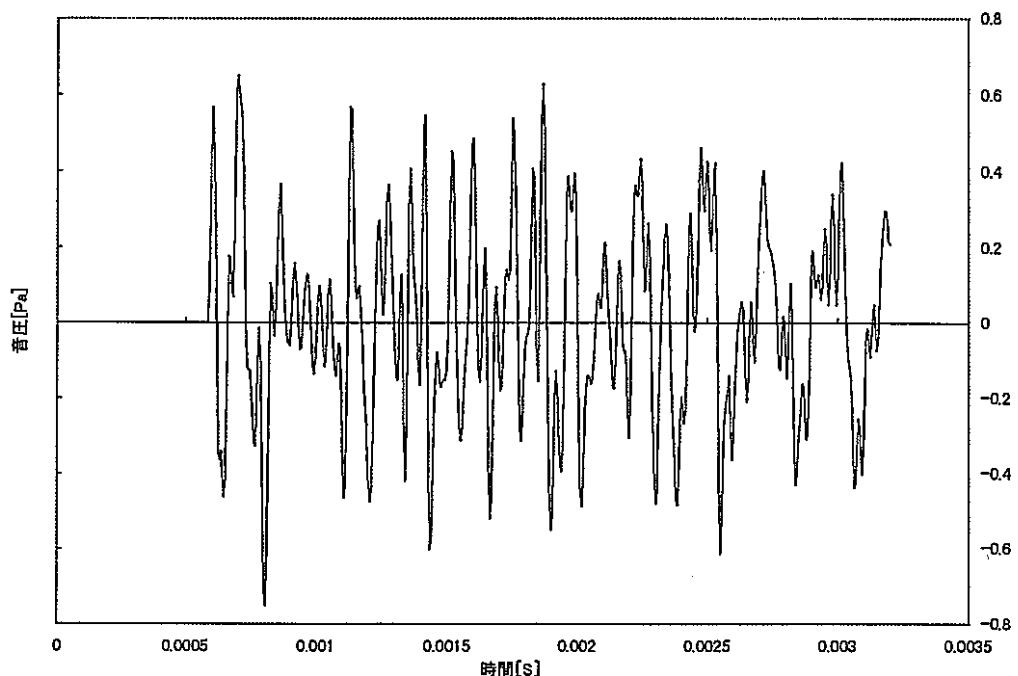


図 3.3-2(2) 第0列、高さ35mmの位置で観測される音圧と伝達関数

炉心第0列 高さ0.07m

音圧分布



伝達関数

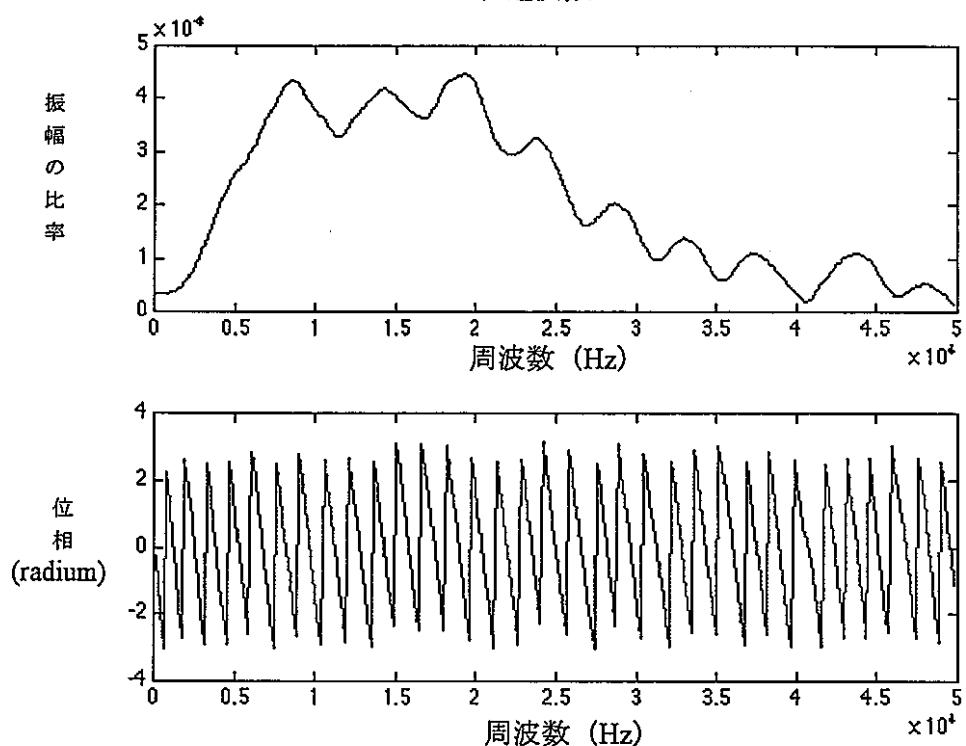
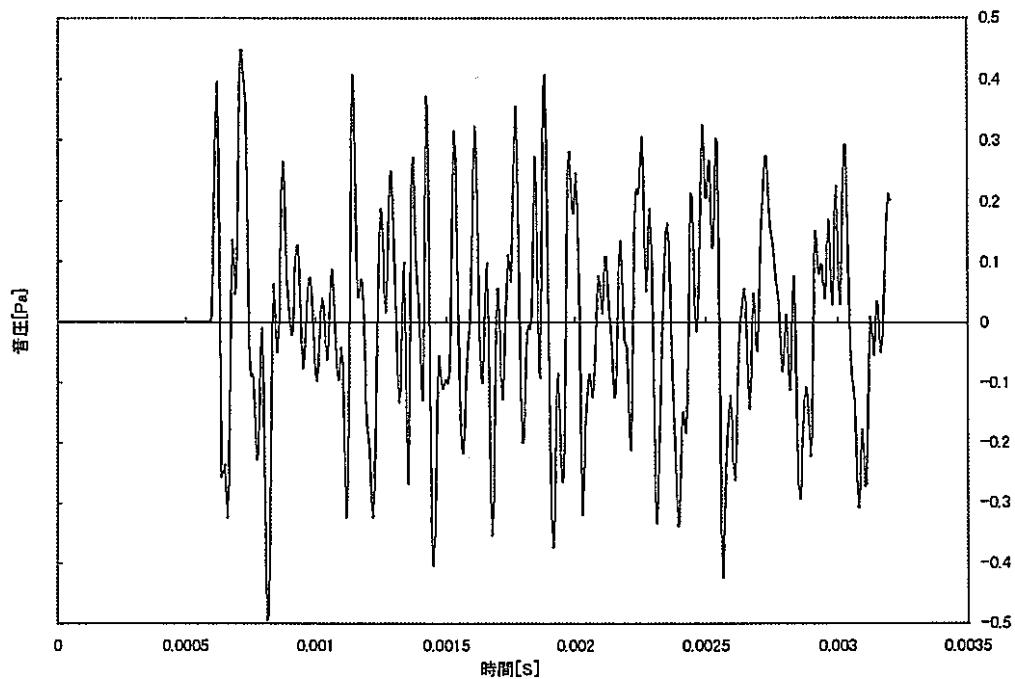


図3.3-2(3) 第0列、高さ70mmの位置で観測される音圧と伝達関数

炉心第0列 高さ 0.105m

音圧分布



伝達関数

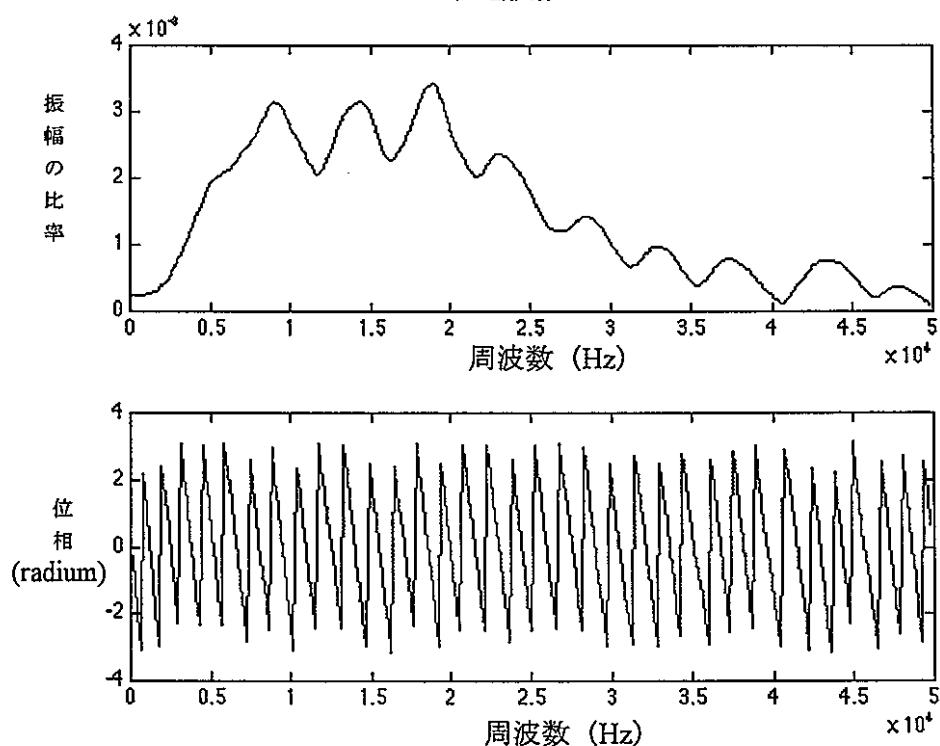
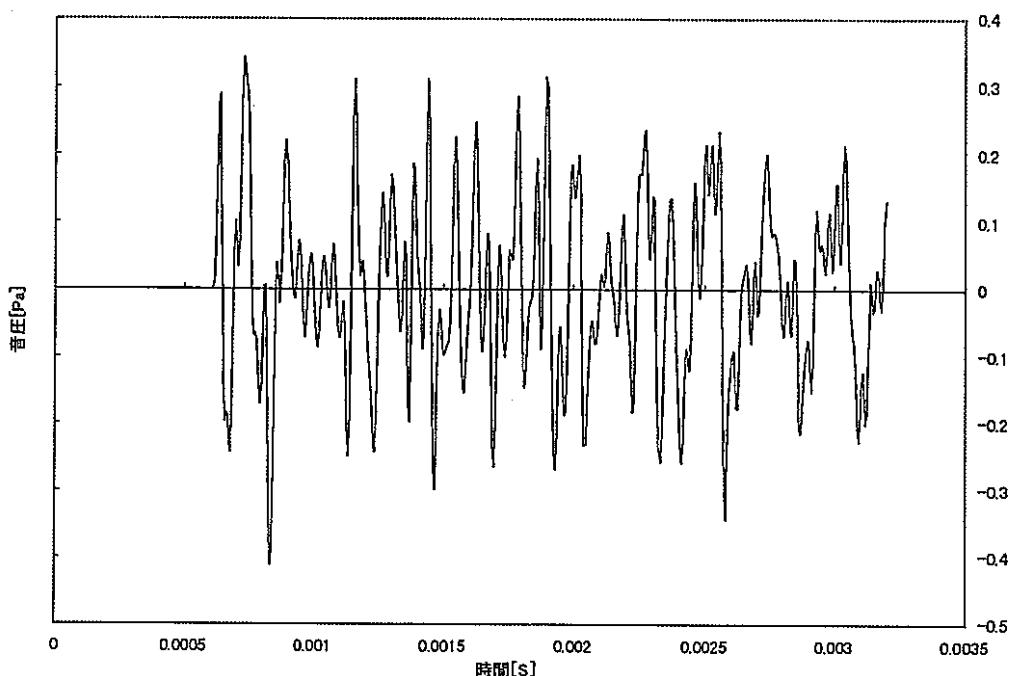


図 3.3-2(4) 第0列、高さ 105mm の位置で観測される音圧と伝達関数

炉心第0列 高さ0.14m

音圧分布



伝達関数

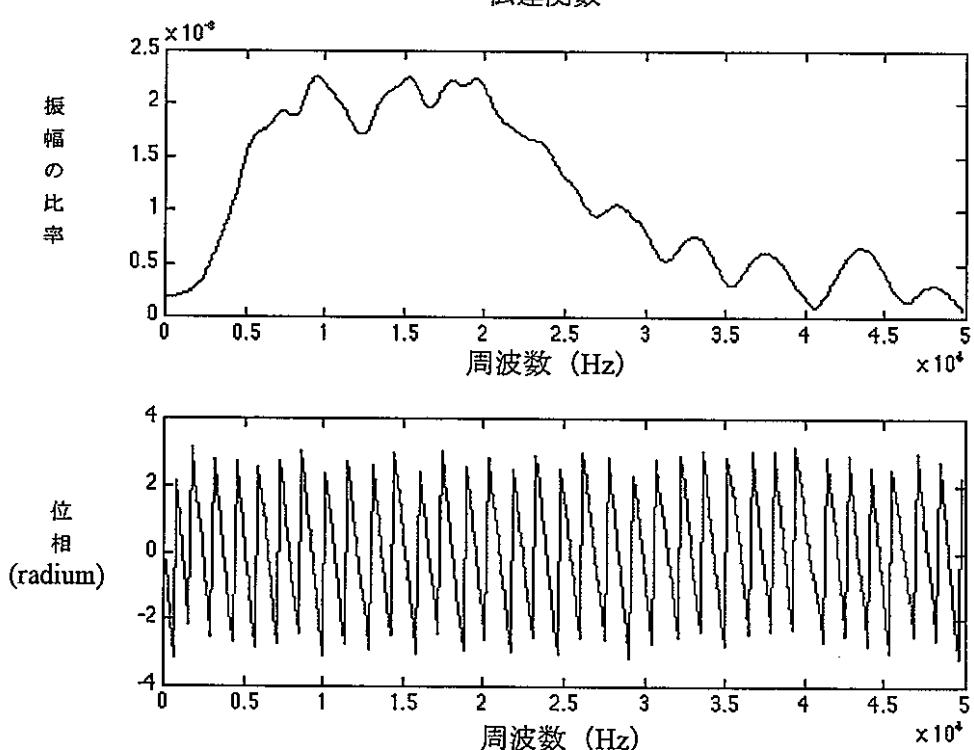
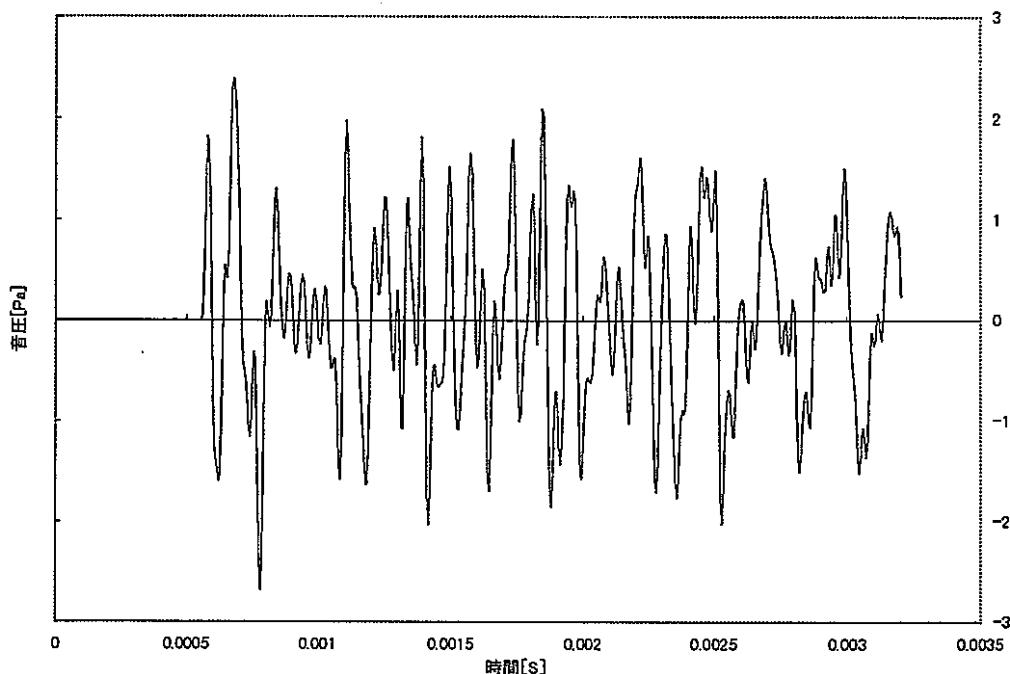


図3.3-2(5) 第0列、高さ140mmの位置で観測される音圧と伝達関数

炉心第0列 高さ 0.175m
音圧分布



伝達関数

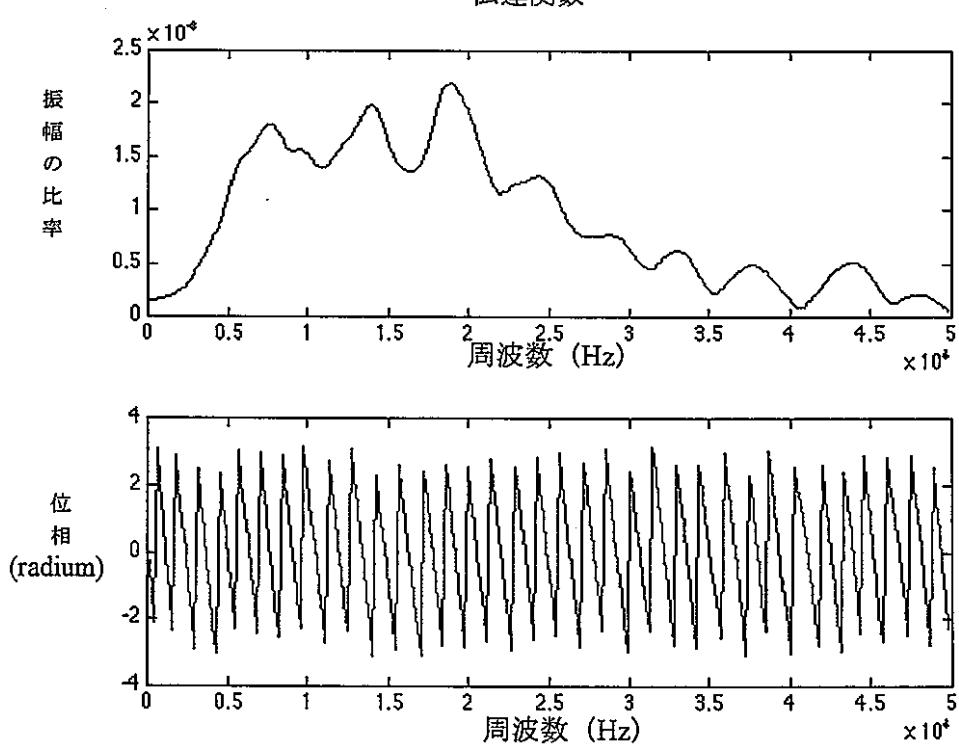
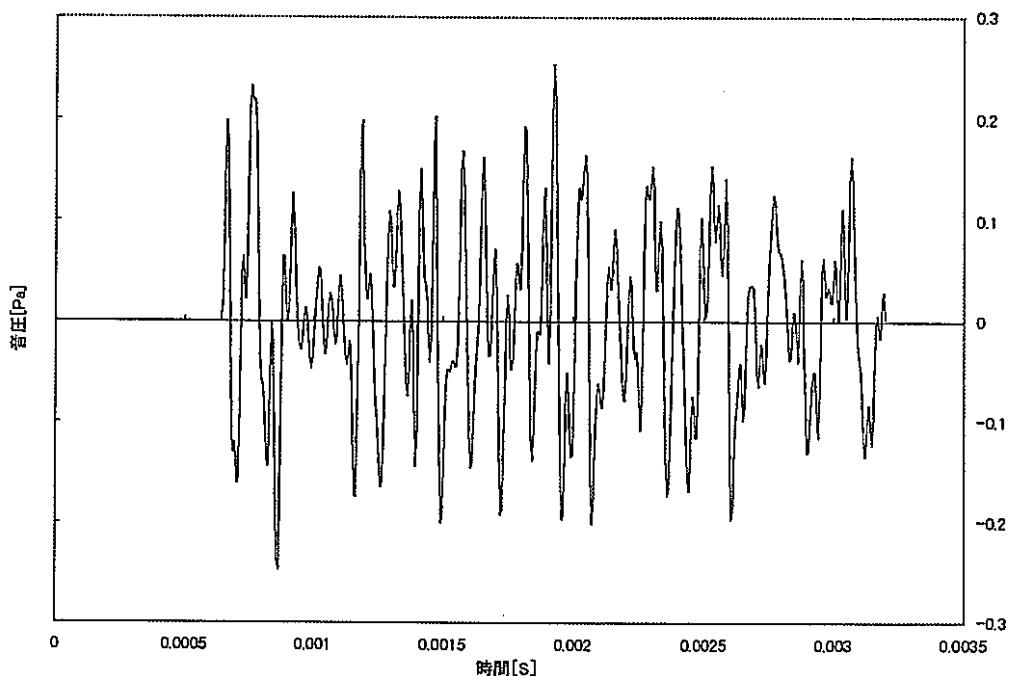


図 3.3-2(6) 第0列、高さ 175mm の位置で観測される音圧と伝達関数

炉心第0列 高さ0.21m
音圧分布



伝達関数

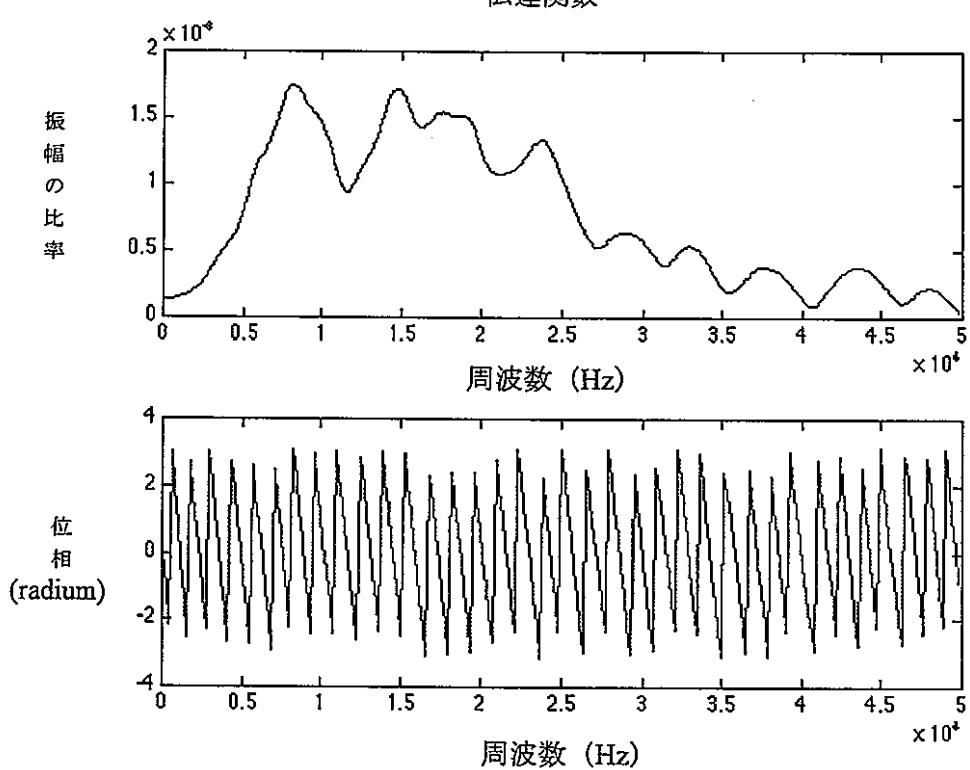
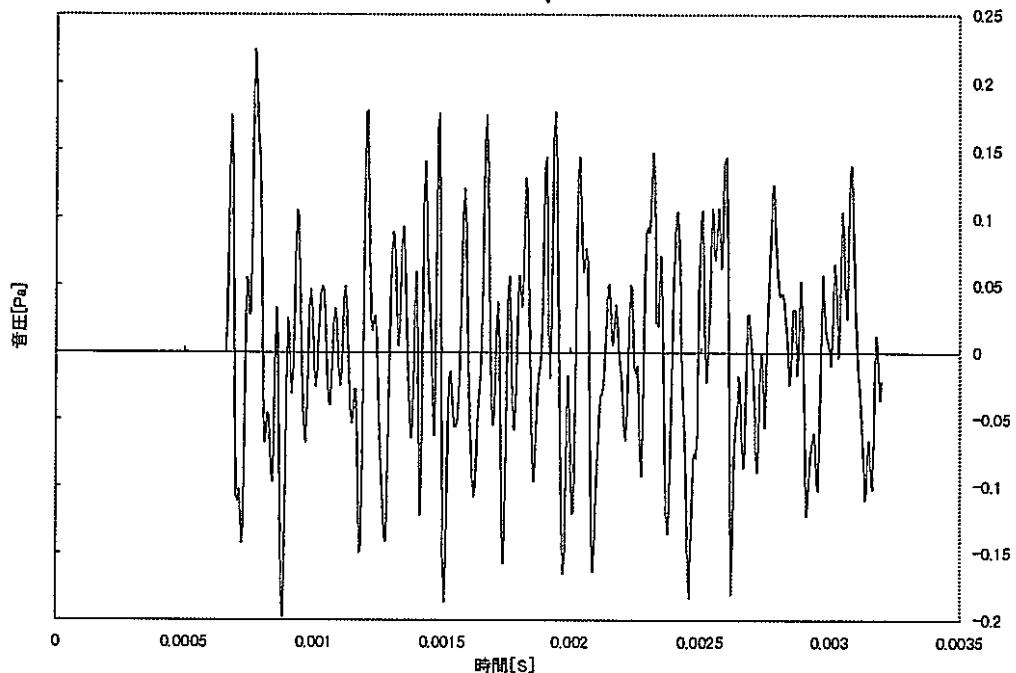


図3.3-2(7) 第0列、高さ210mmの位置で観測される音圧と伝達関数

炉心第0列 高さ 0.245m

音圧分布



伝達関数

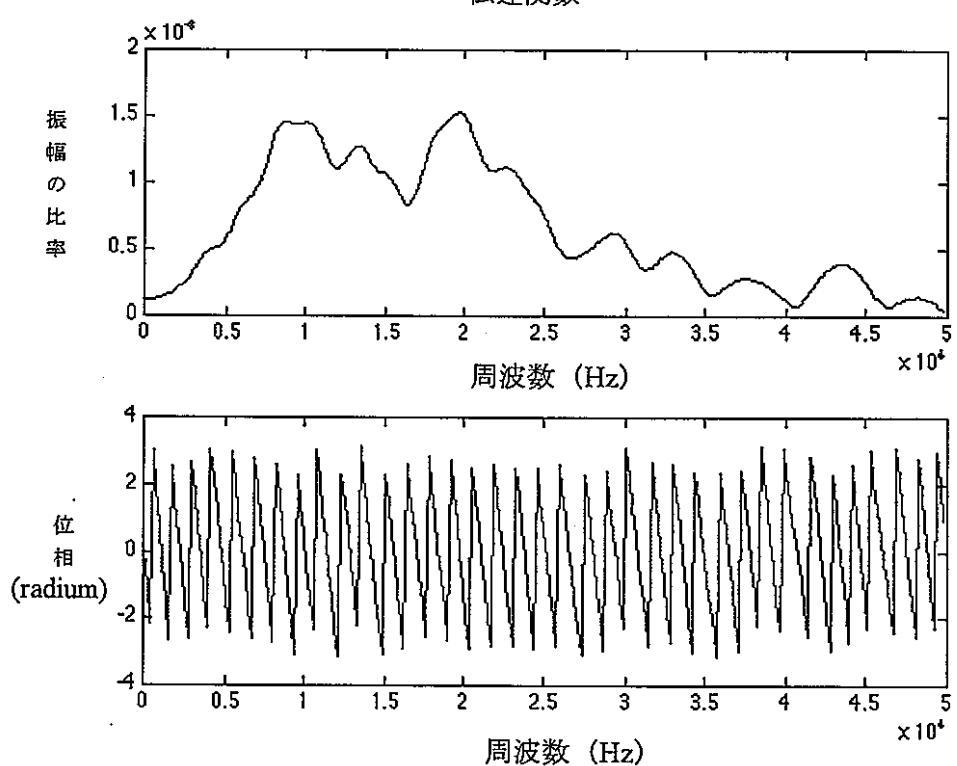
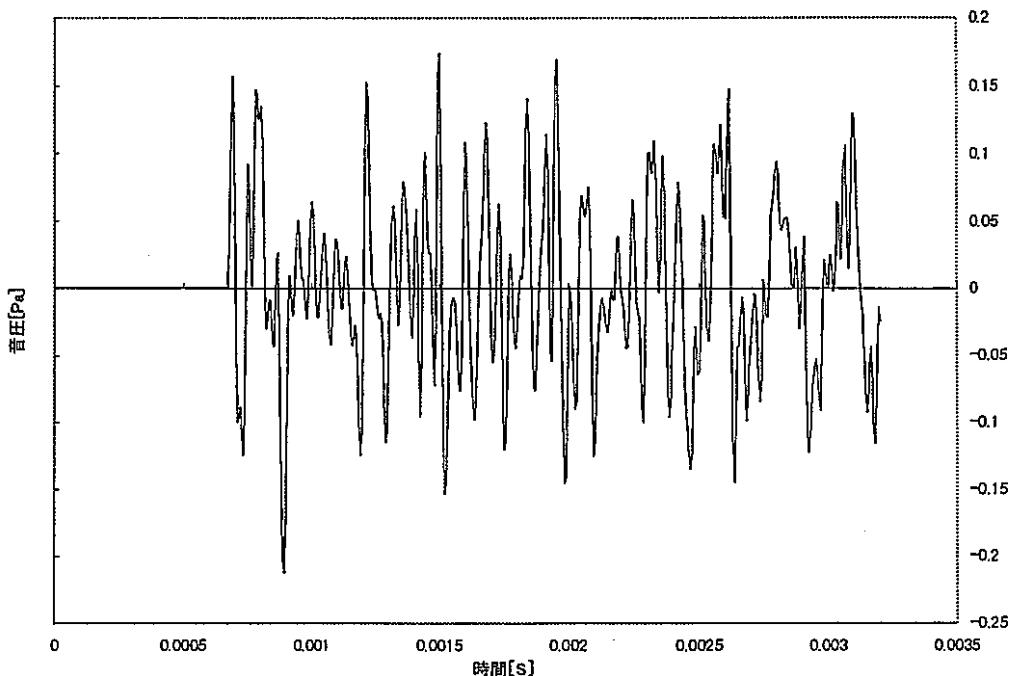


図 3.3-2(8) 第0列、高さ 245mm の位置で観測される音圧と伝達関数

炉心第0列 高さ0.28m

音圧分布



伝達関数

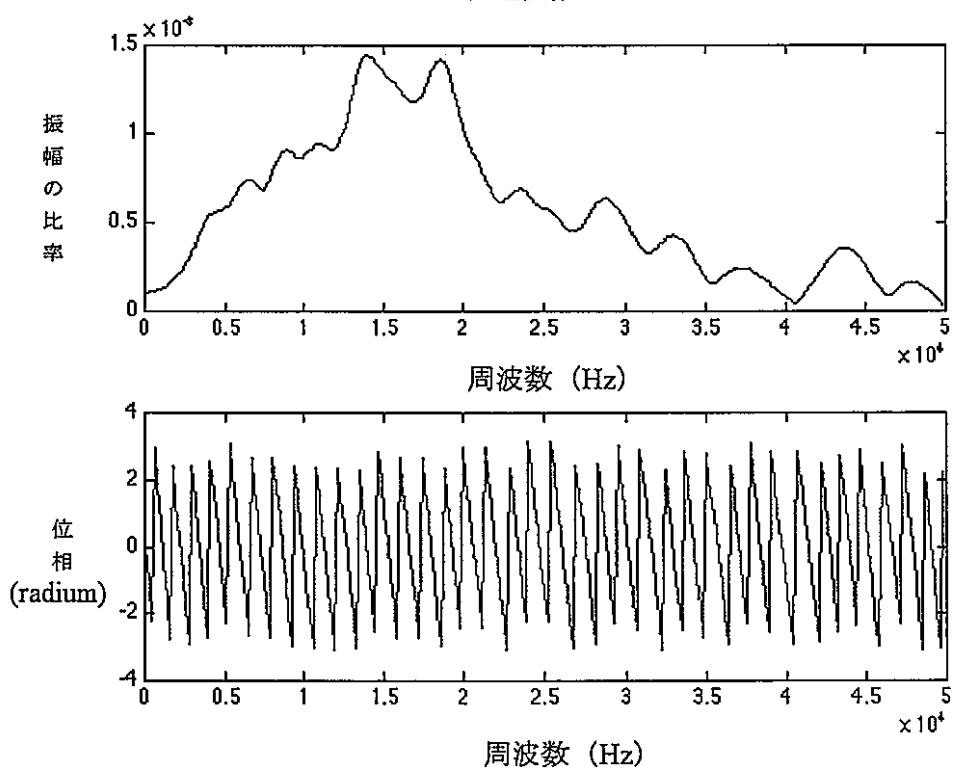
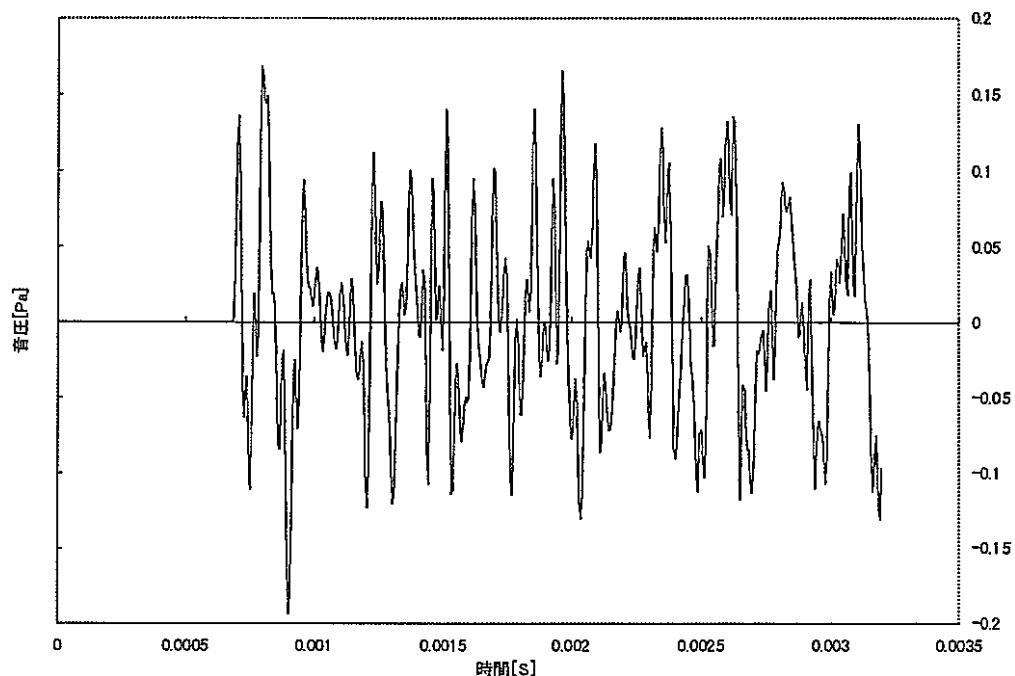


図3.3-2(9) 第0列、高さ280mmの位置で観測される音圧と伝達関数

炉心第0列 高さ 0.315m

音圧分布



伝達関数

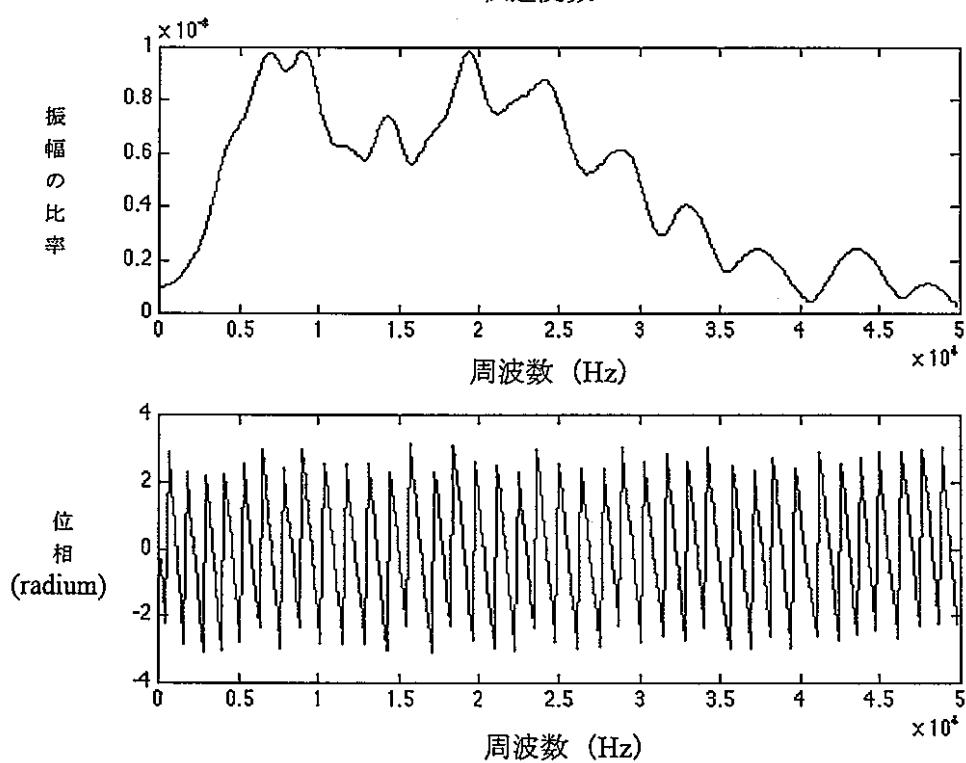
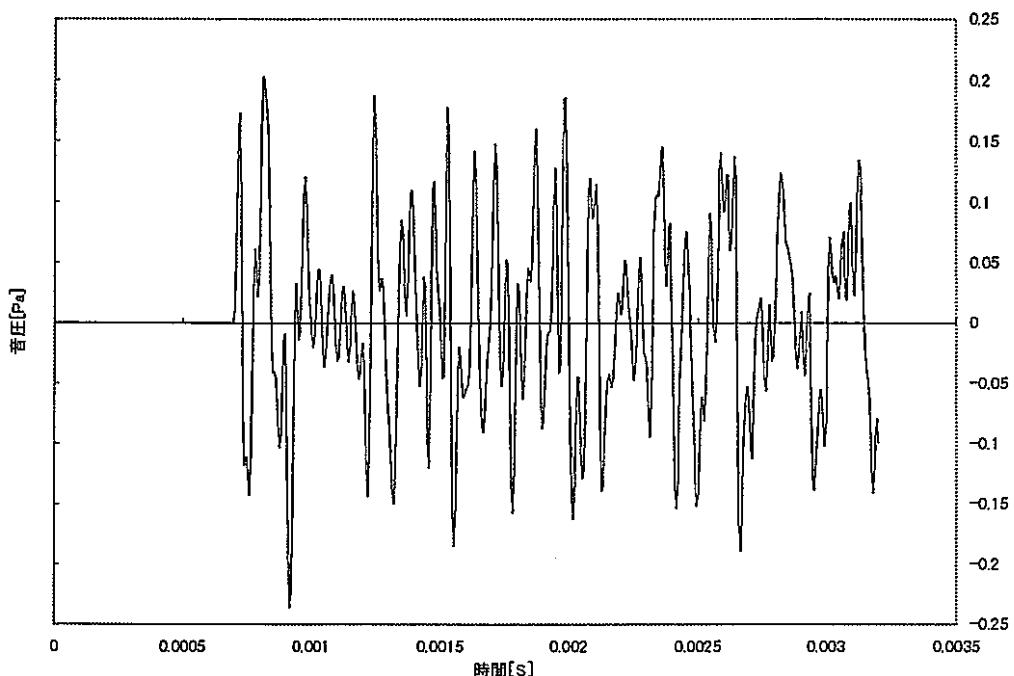


図 3.3-2(10) 第0列、高さ 315mm の位置で観測される音圧と伝達関数

炉心第0列 高さ0.35m

音圧分布



伝達関数

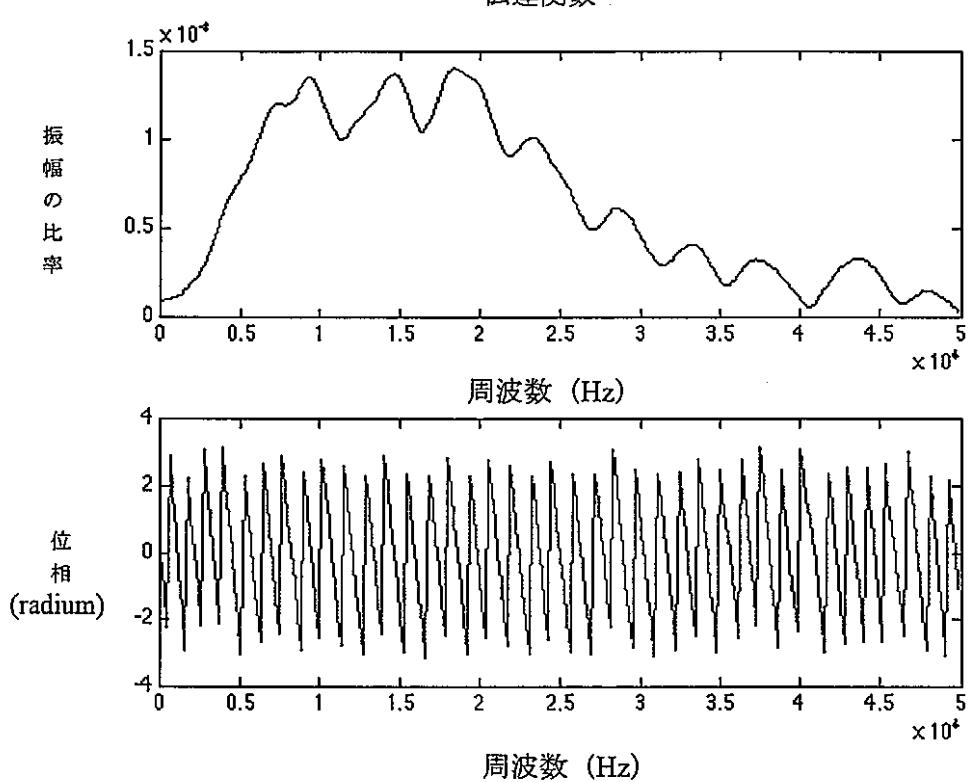
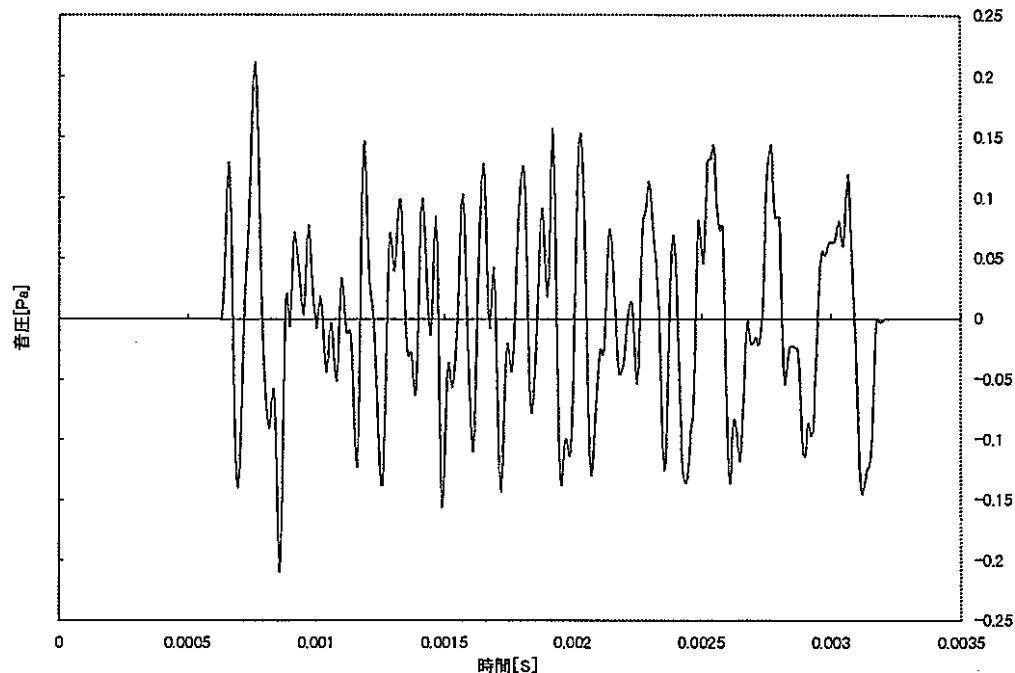


図3.3-2(11) 第0列、高さ350mmの位置で観測される音圧と伝達関数

炉心第3列 高さ 0.0m

音圧分布



伝達関数

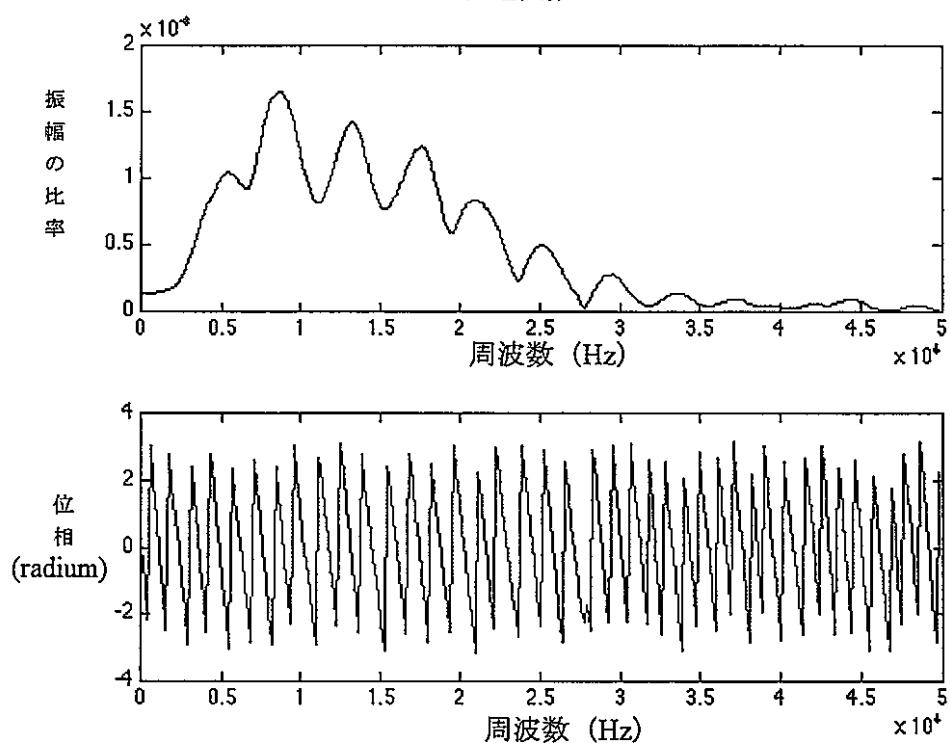
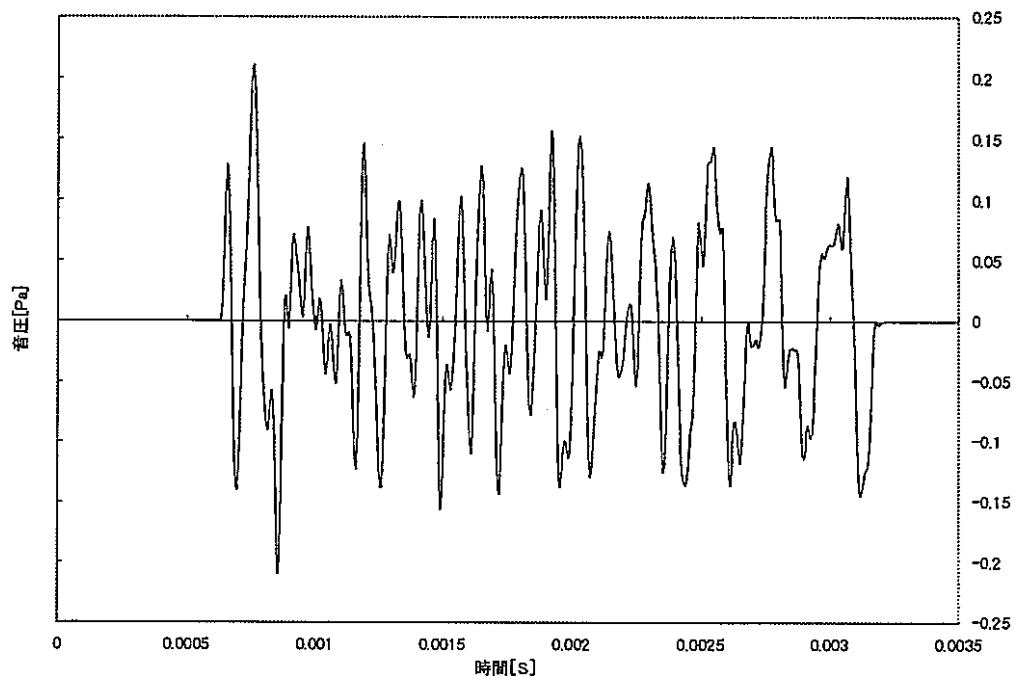


図 3.3-3(1) 第3列、高さ 0mm の位置で観測される音圧と伝達関数

炉心第3列 高さ 0.035m
音圧分布



伝達関数

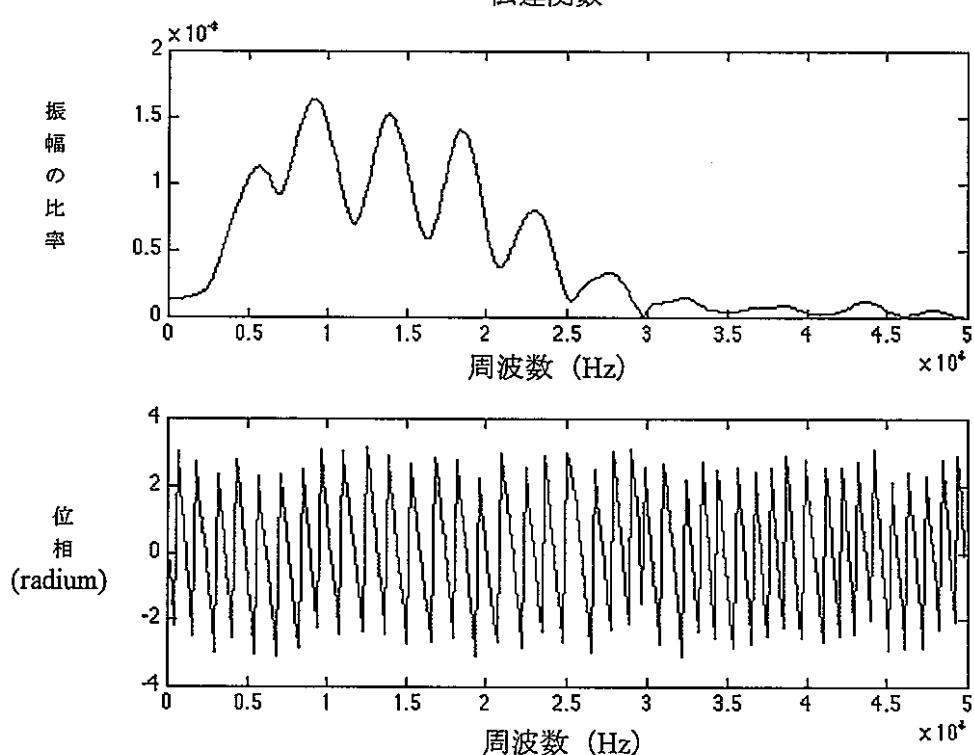
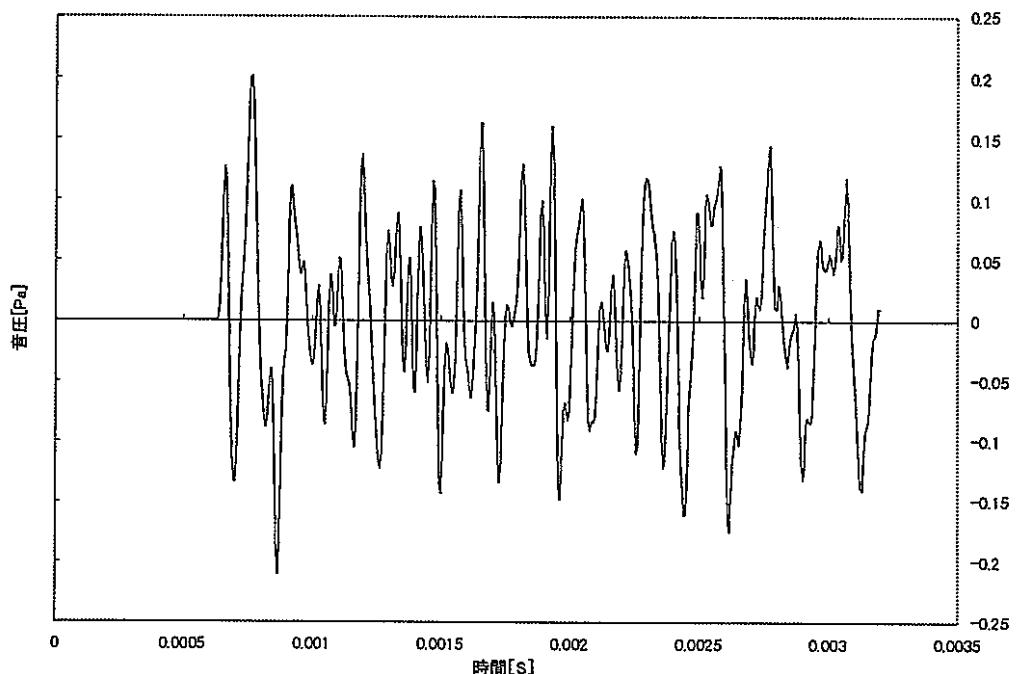


図 3.3-3(2) 第3列、高さ 35mm の位置で観測される音圧と伝達関数

炉心第3列 高さ 0.07m

音圧分布



伝達関数

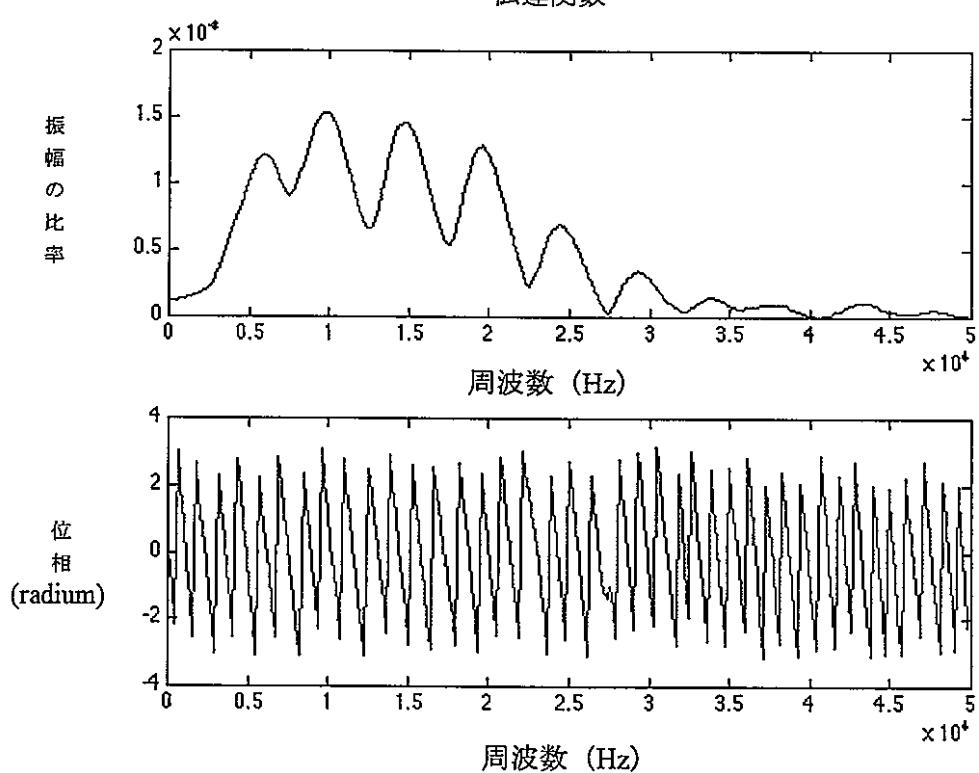
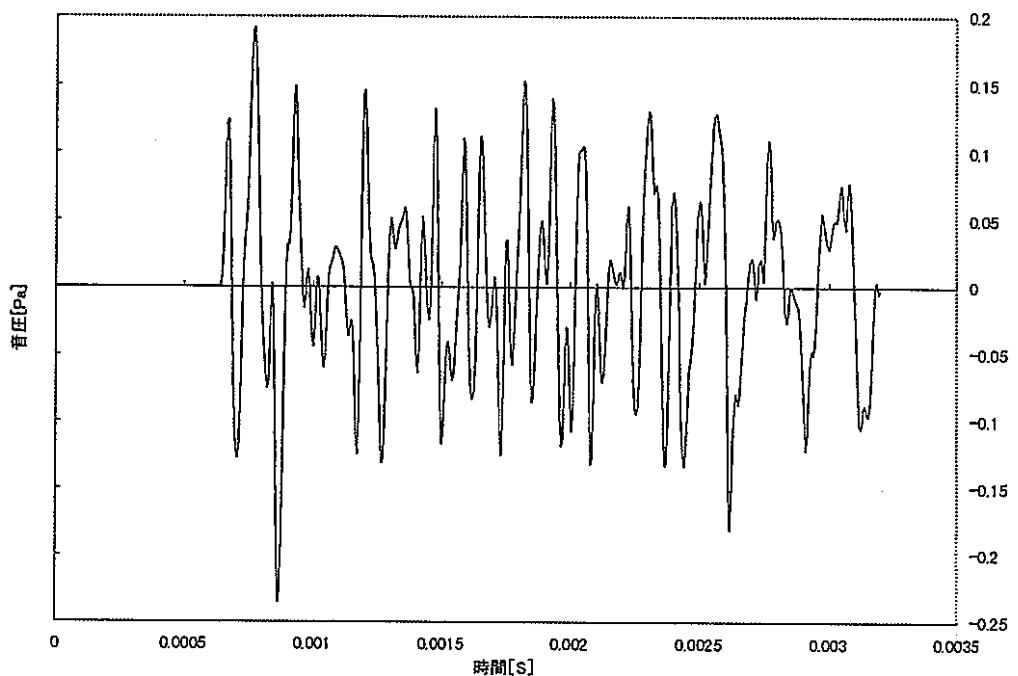


図 3.3-3(3) 第3列、高さ 70mm の位置で観測される音圧と伝達関数

炉心第3列 高さ 0.105 m
音圧分布



伝達関数

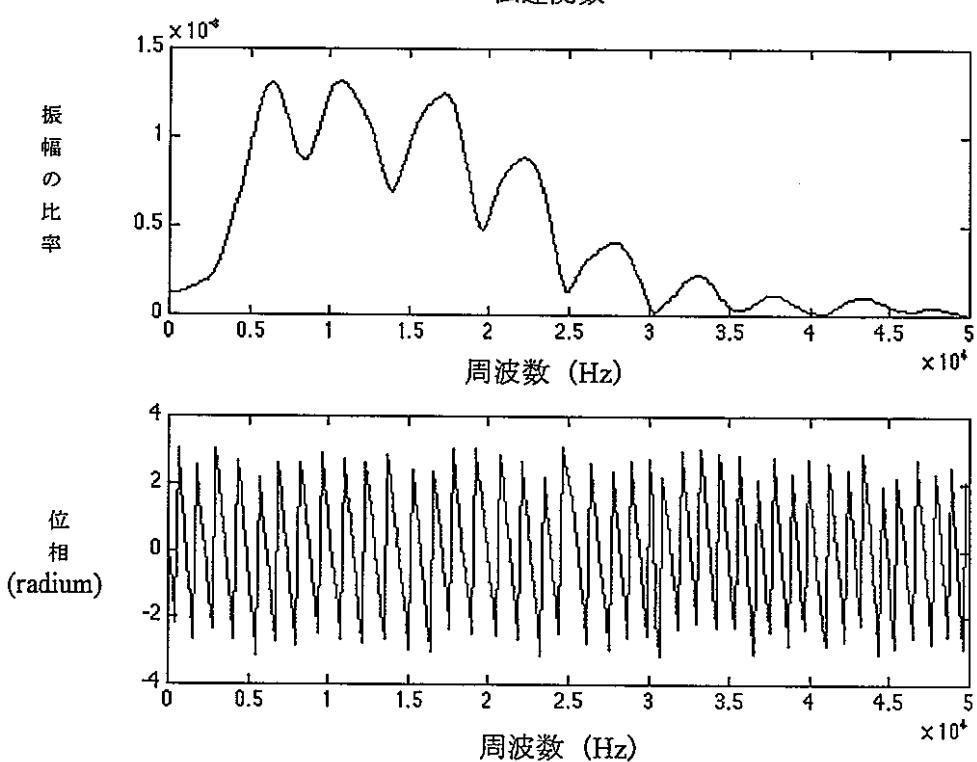
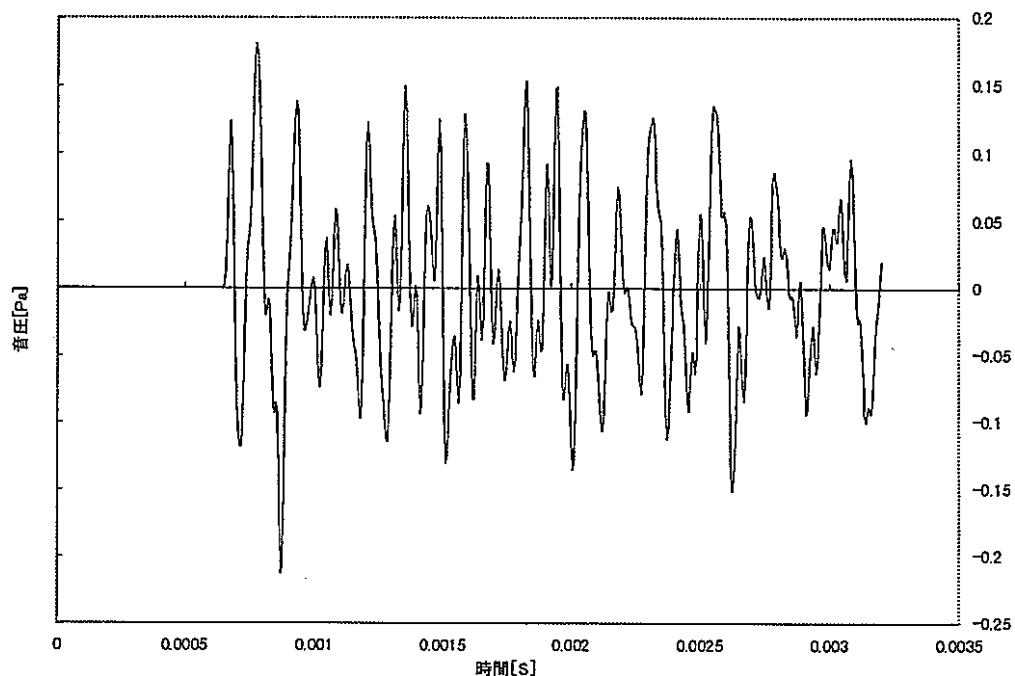


図 3.3-3(4) 第3列、高さ 105mm の位置で観測される音圧と伝達関数

炉心第3列 高さ 0.14m

音圧分布



伝達関数

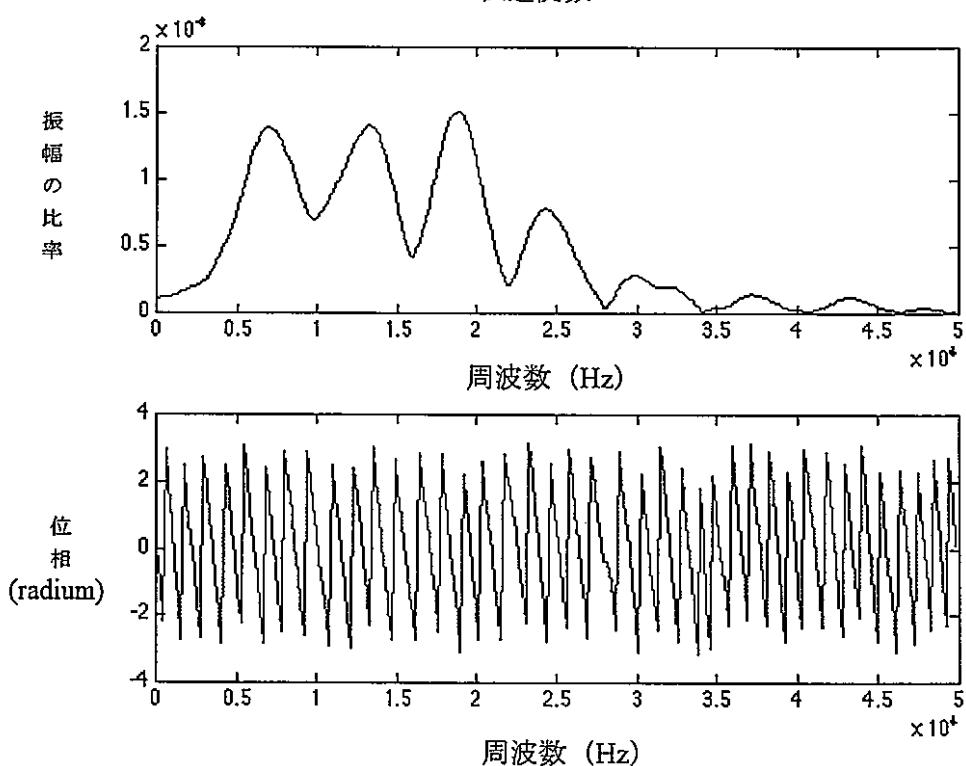
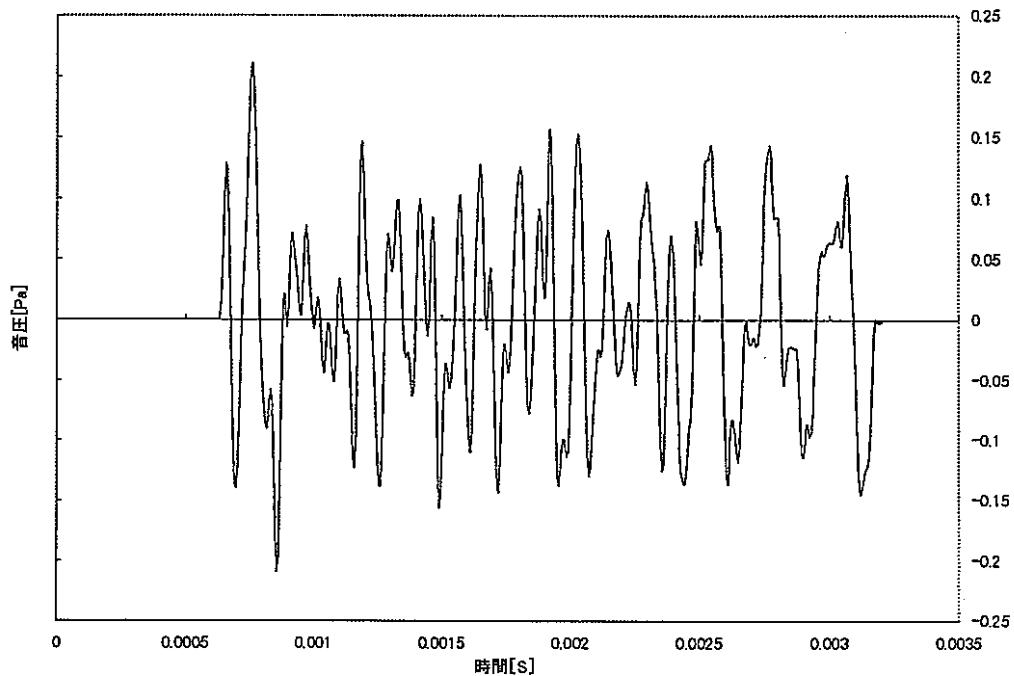


図 3.3-3(5) 第3列、高さ 140mm の位置で観測される音圧と伝達関数

炉心第3列 高さ 0.175m
音圧分布



伝達関数

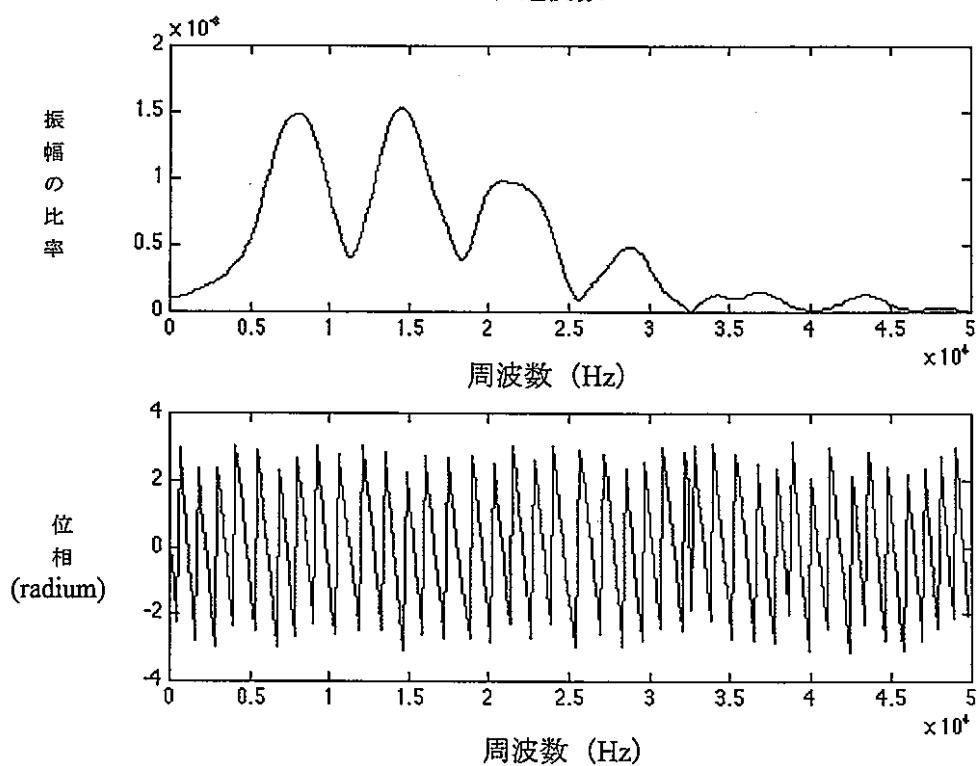
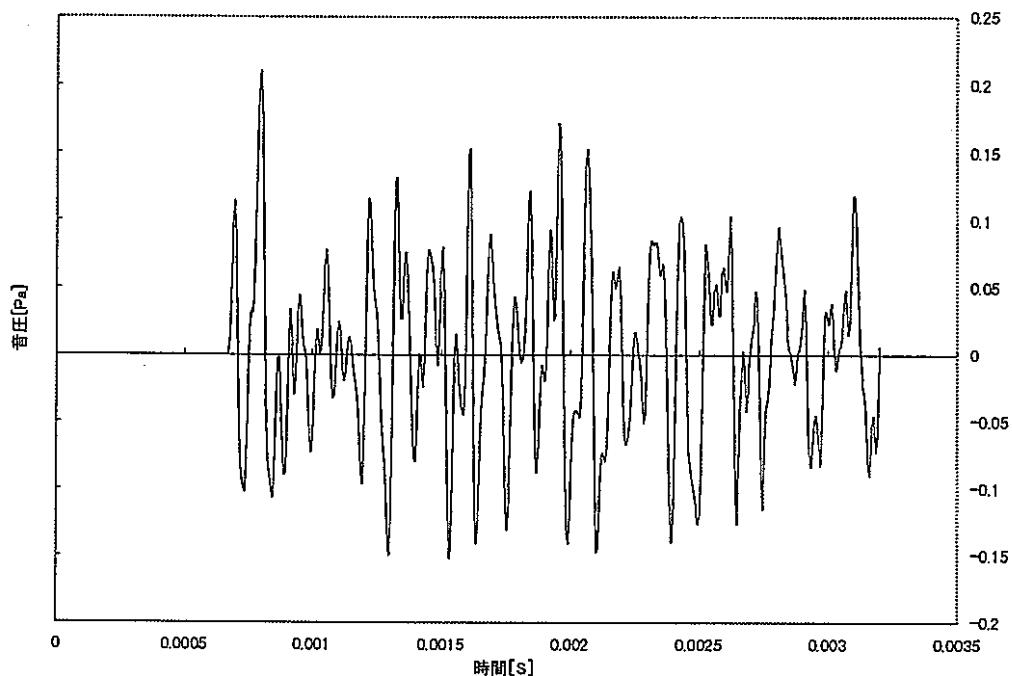


図 3.3-3(6) 第3列、高さ 175mm の位置で観測される音圧と伝達関数

炉心第3列 高さ 0.21m

音圧分布



伝達関数

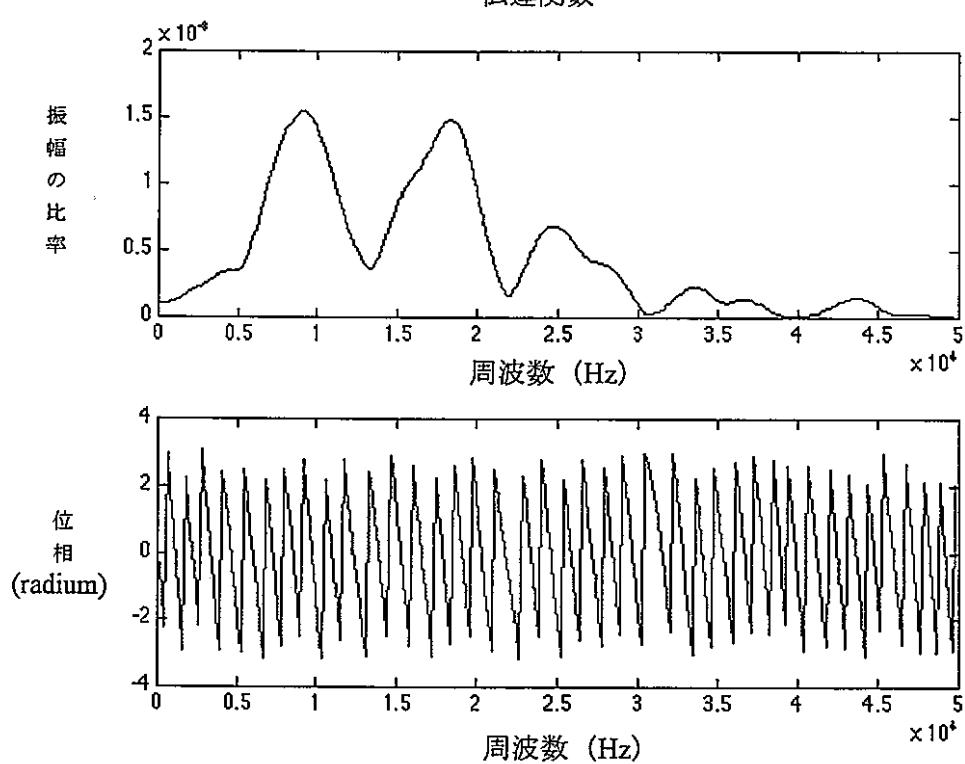
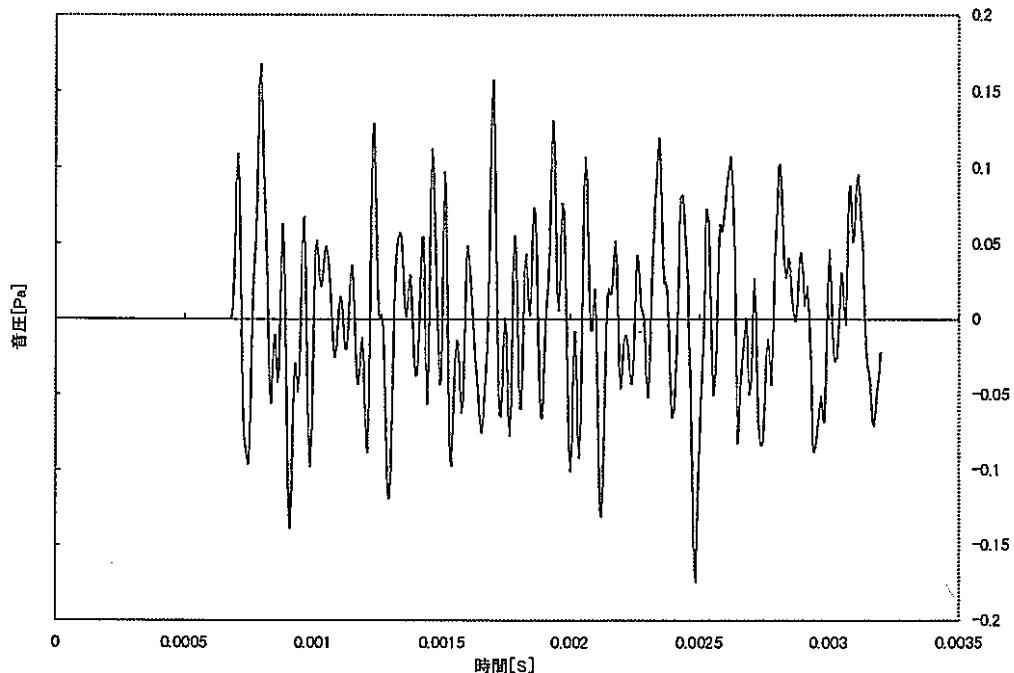


図 3.3-3(7) 第3列、高さ 210mm の位置で観測される音圧と伝達関数

炉心第3列 高さ 0.245m

音圧分布



伝達関数

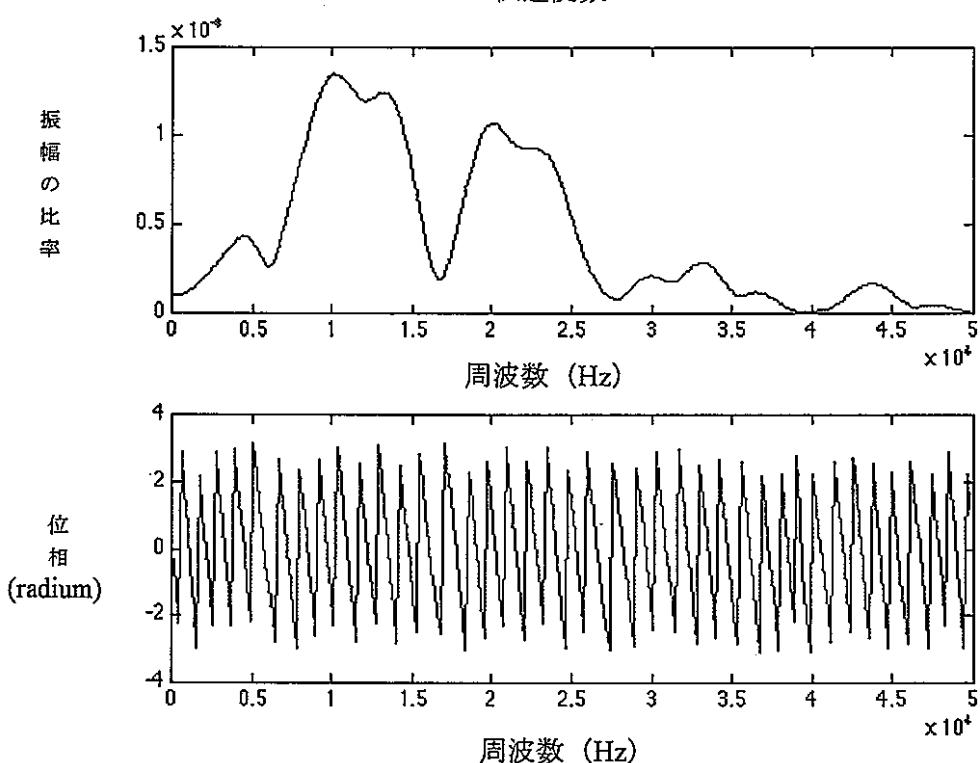
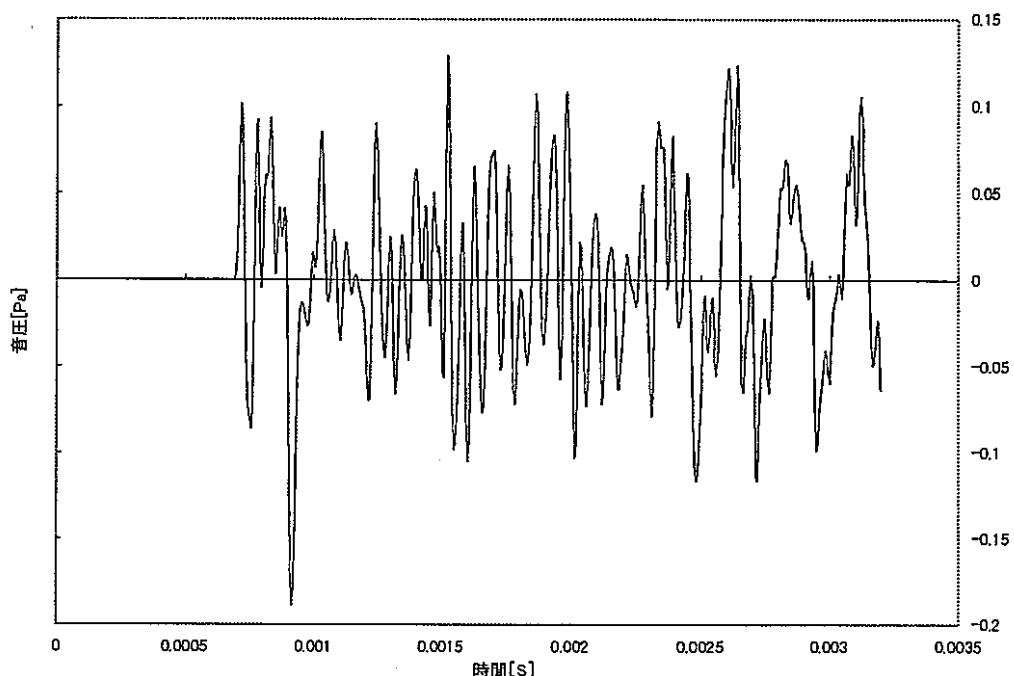


図 3.3-3(8) 第3列、高さ 245mm の位置で観測される音圧と伝達関数

炉心第3列 高さ 0.28m

音圧分布



伝達関数

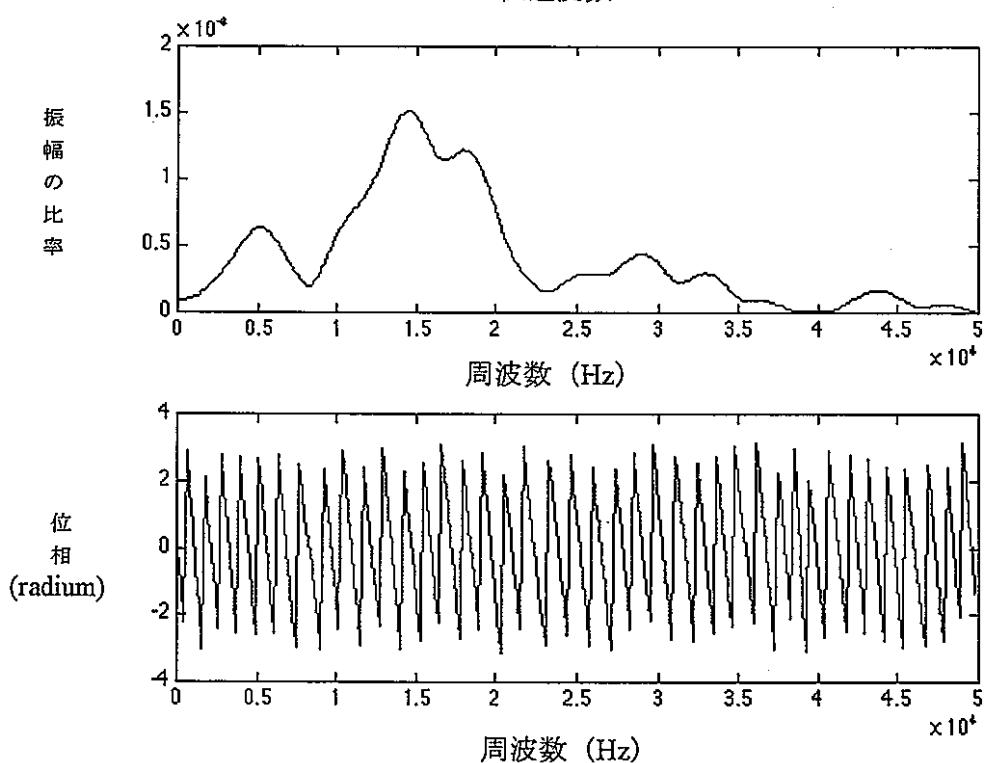
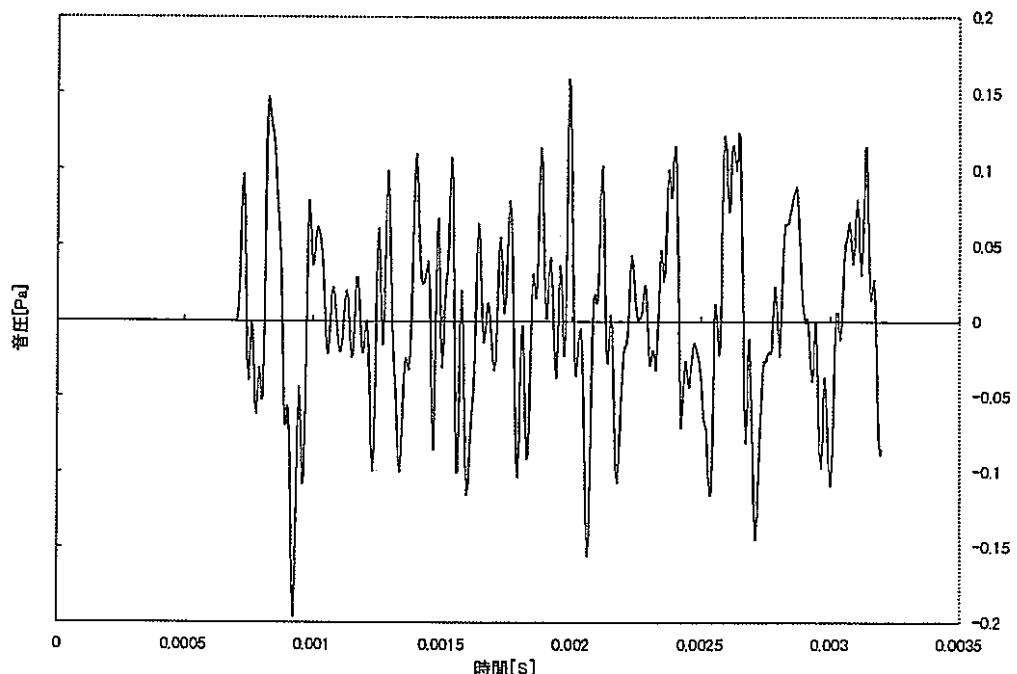


図 3.3-3(9) 第3列、高さ 280mm の位置で観測される音圧と伝達関数

炉心第3列 高さ 0.315m
音圧分布



伝達関数

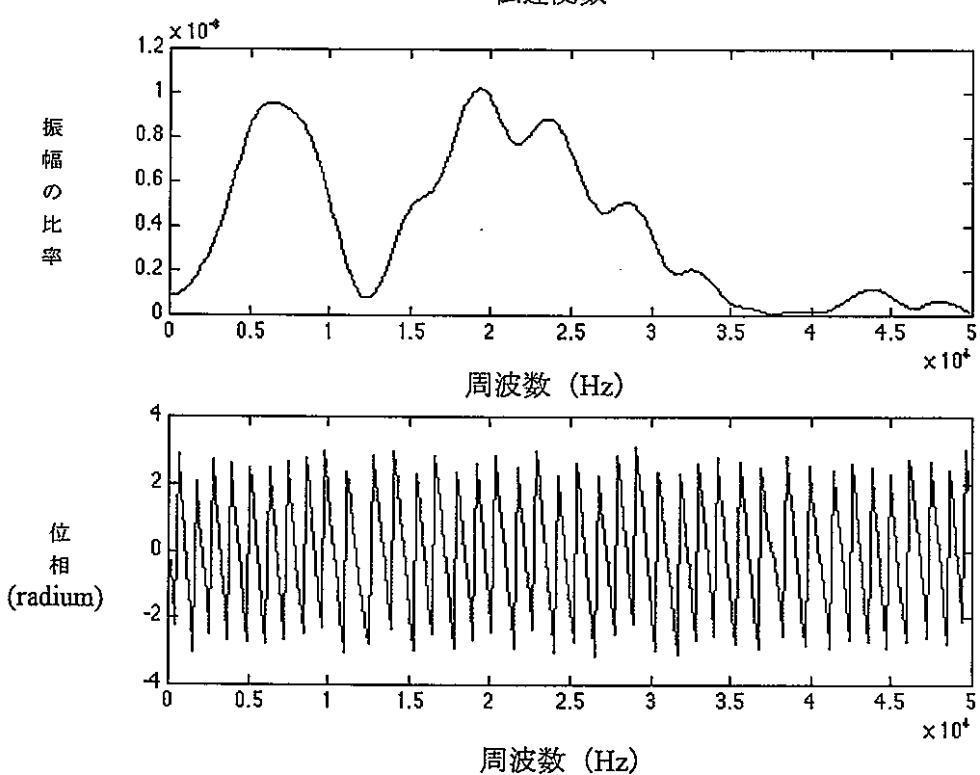
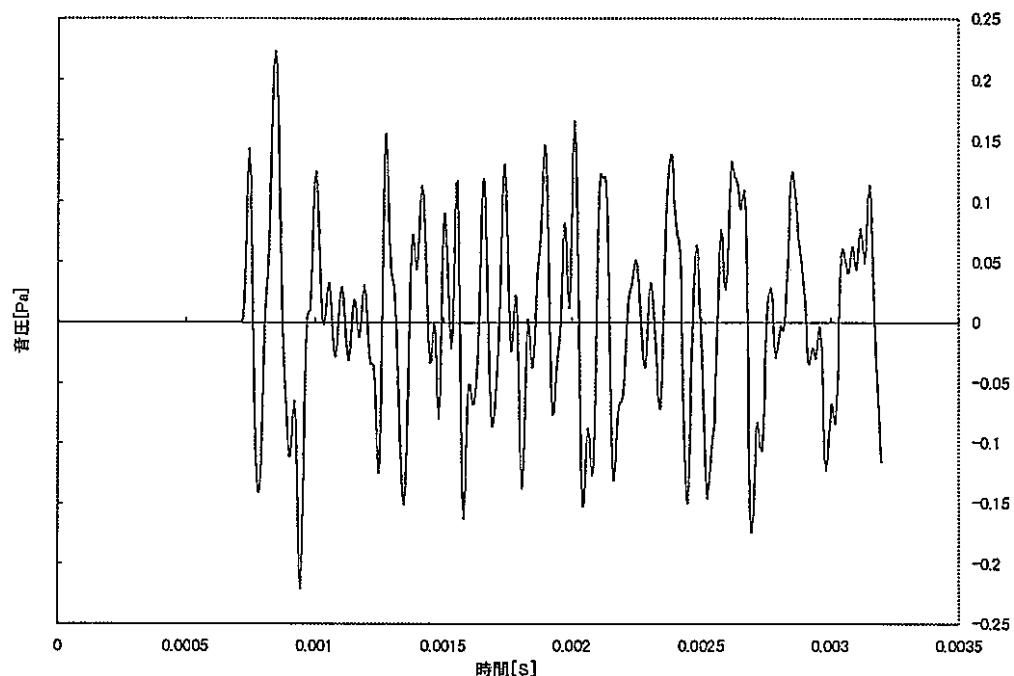


図 3.3-3(10) 第3列、高さ 315mm の位置で観測される音圧と伝達関数

炉心第3列 高さ0.35m

音圧分布



伝達関数

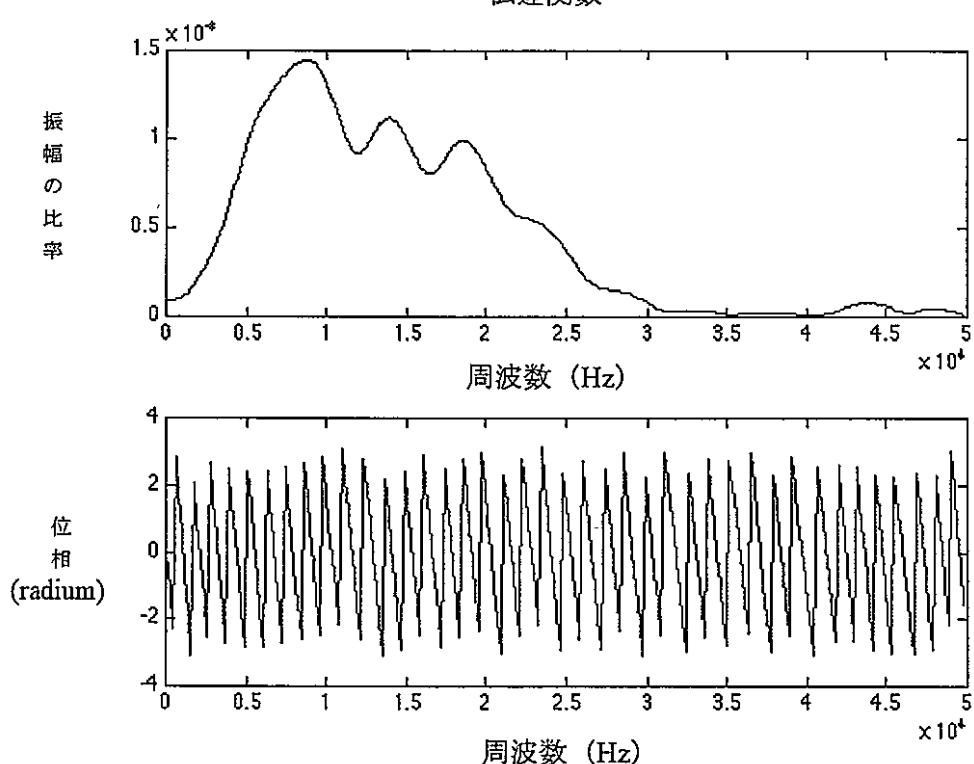
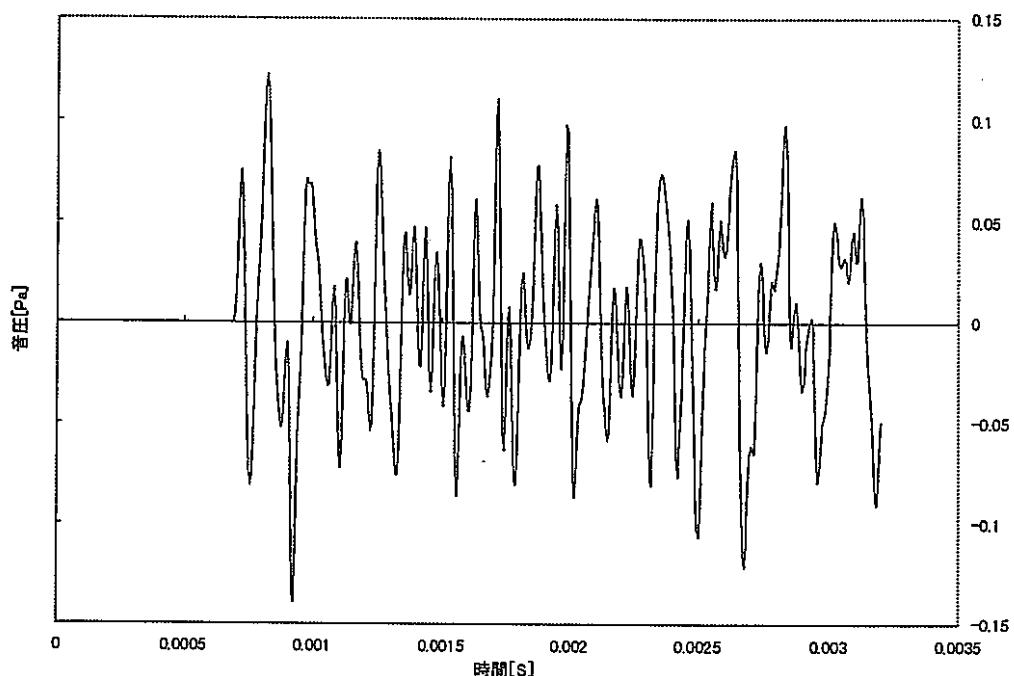


図3.3-3(11) 第3列、高さ350mmの位置で観測される音圧と伝達関数

炉心第5列 高さ 0.0m

音圧分布



伝達関数

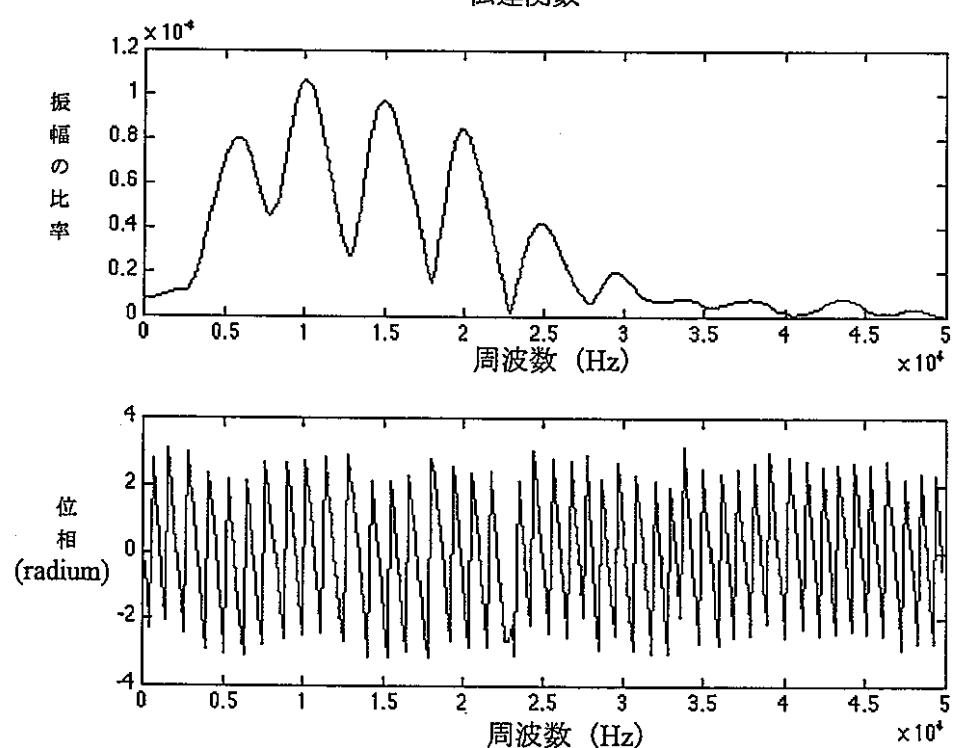
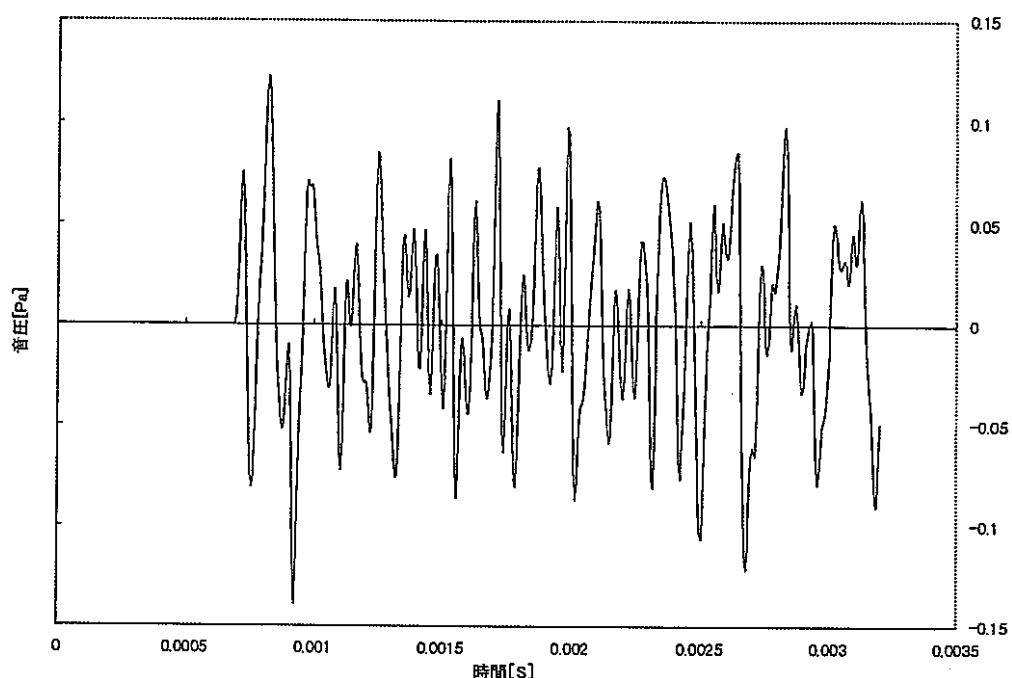


図 3.3-4(1) 第5列、高さ 0mm の位置で観測される音圧と伝達関数

炉心第5列 高さ 0.035m

音圧分布



伝達関数

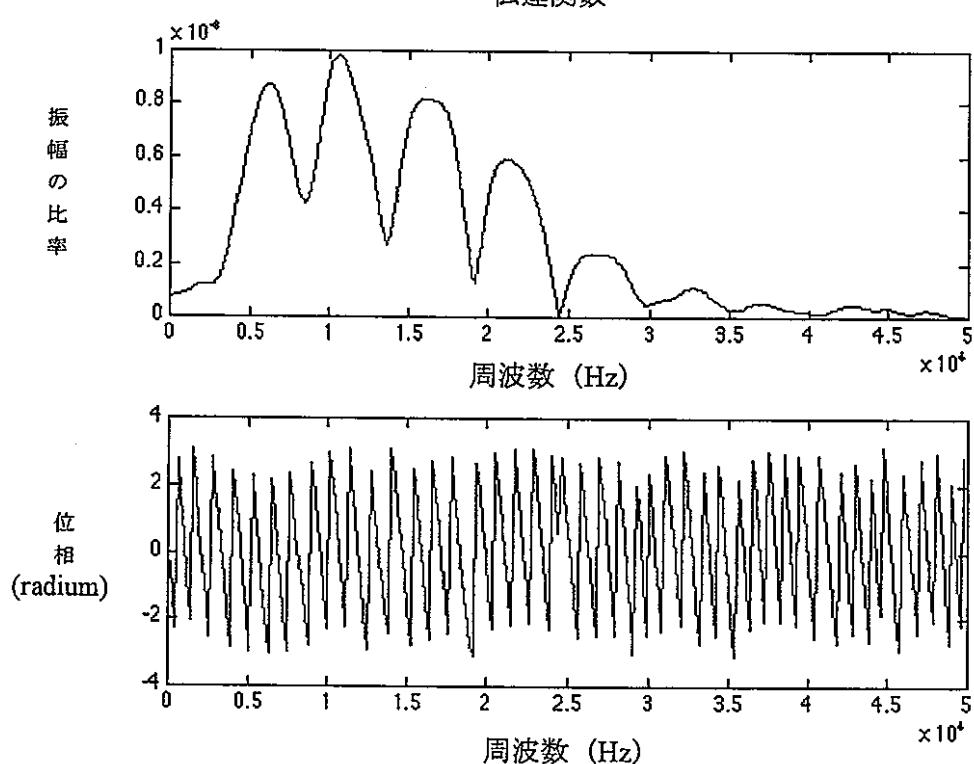
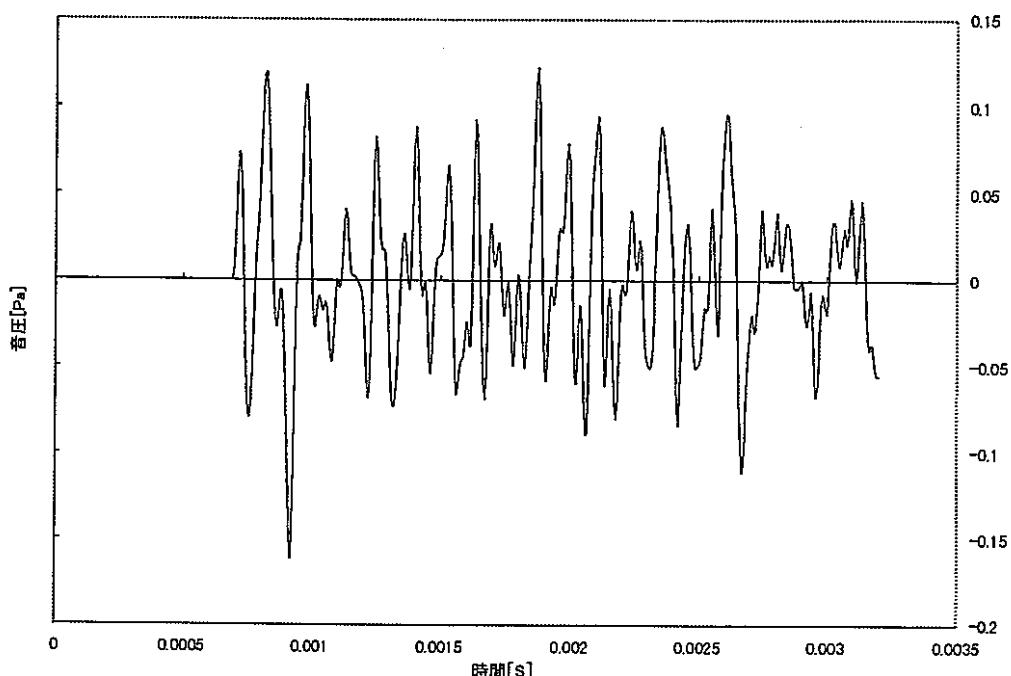


図 3.3-4(2) 第5列、高さ 35mm の位置で観測される音圧と伝達関数

炉心第5列 高さ 0.07m

音圧分布



伝達関数

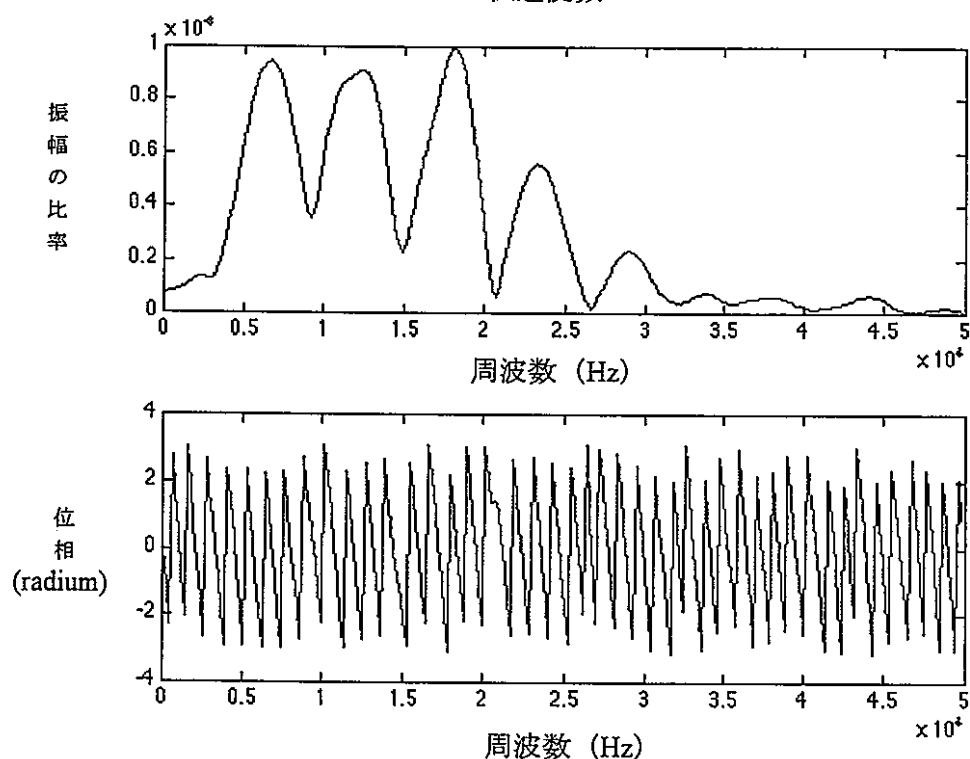
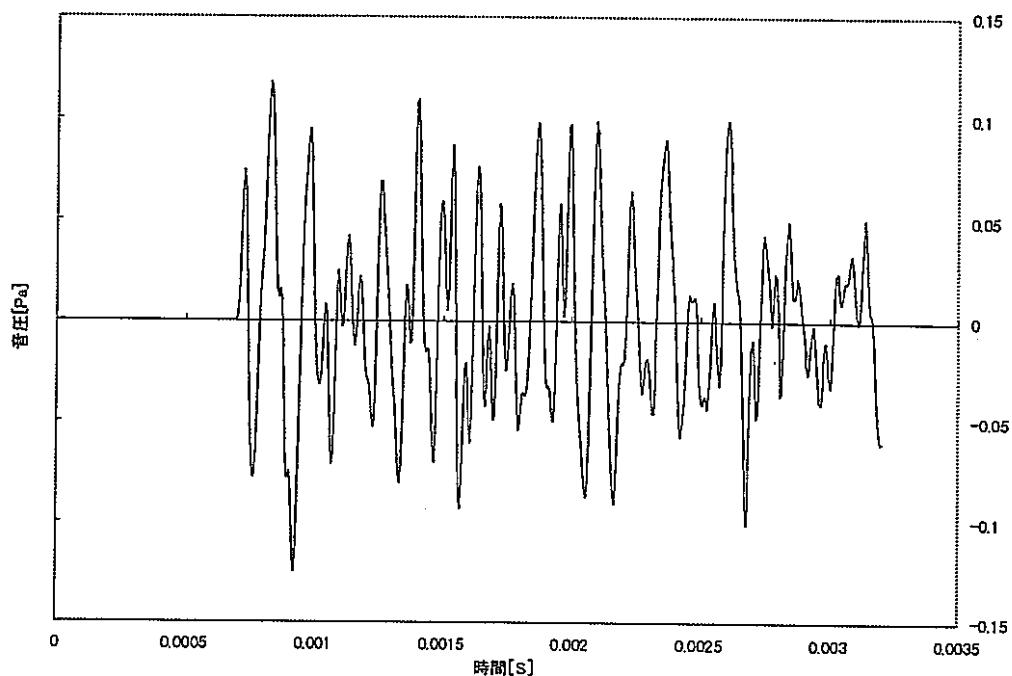


図 3.3-4(3) 第5列、高さ 70mm の位置で観測される音圧と伝達関数

炉心第5列 高さ 0.105m
音圧分布



伝達関数

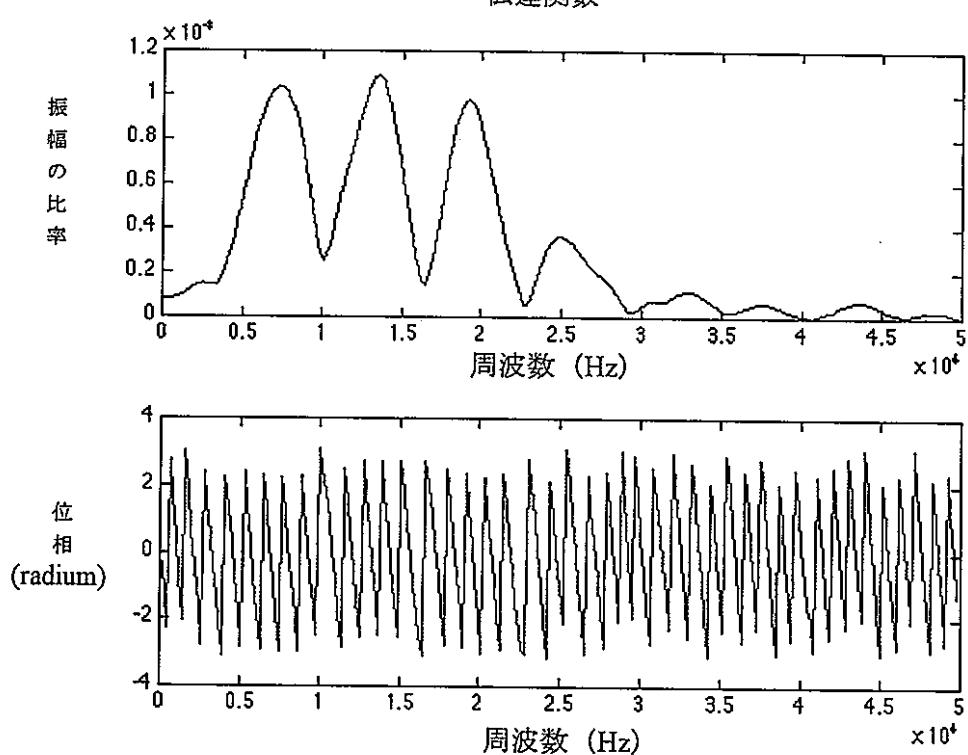
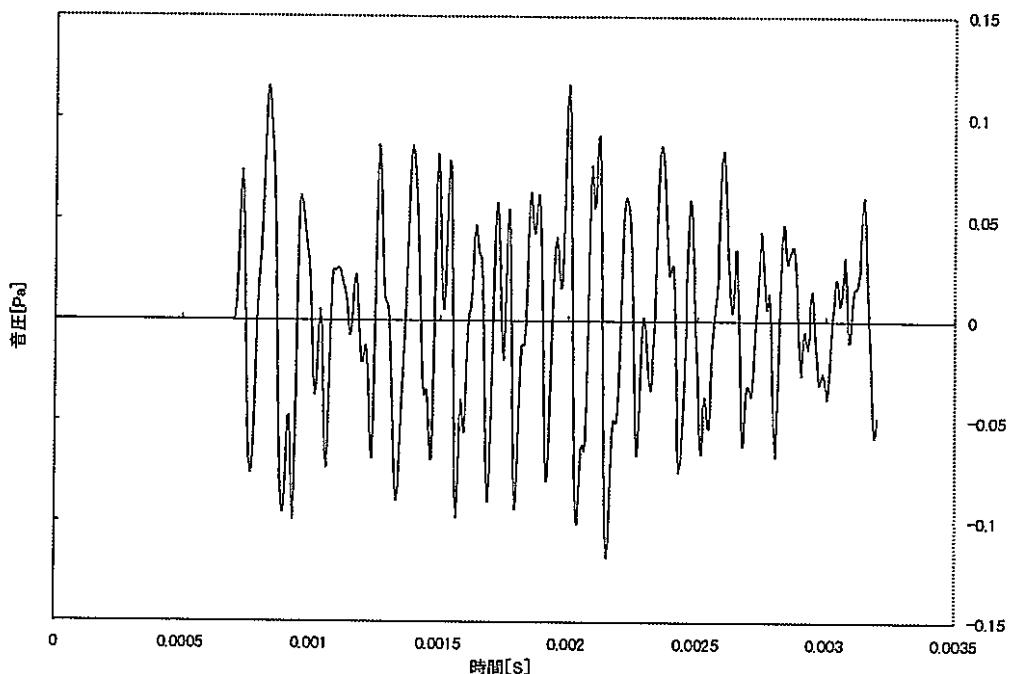


図 3.3-4(4) 第5列、高さ 105mm の位置で観測される音圧と伝達関数

炉心第5列 高さ 0.14m
音圧分布



伝達関数

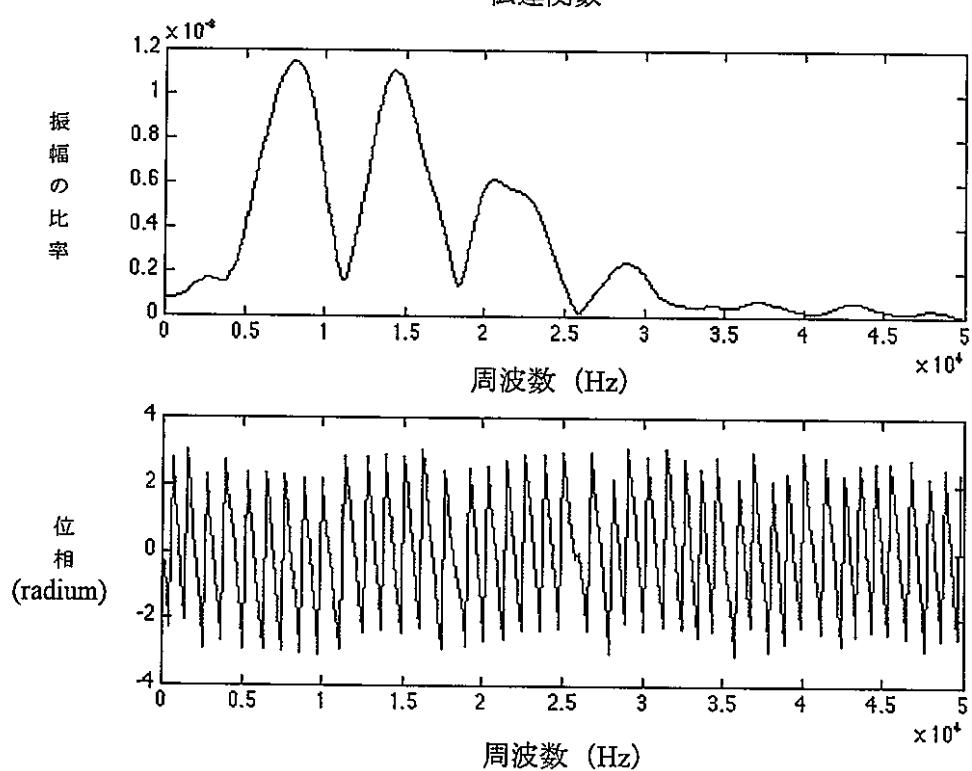
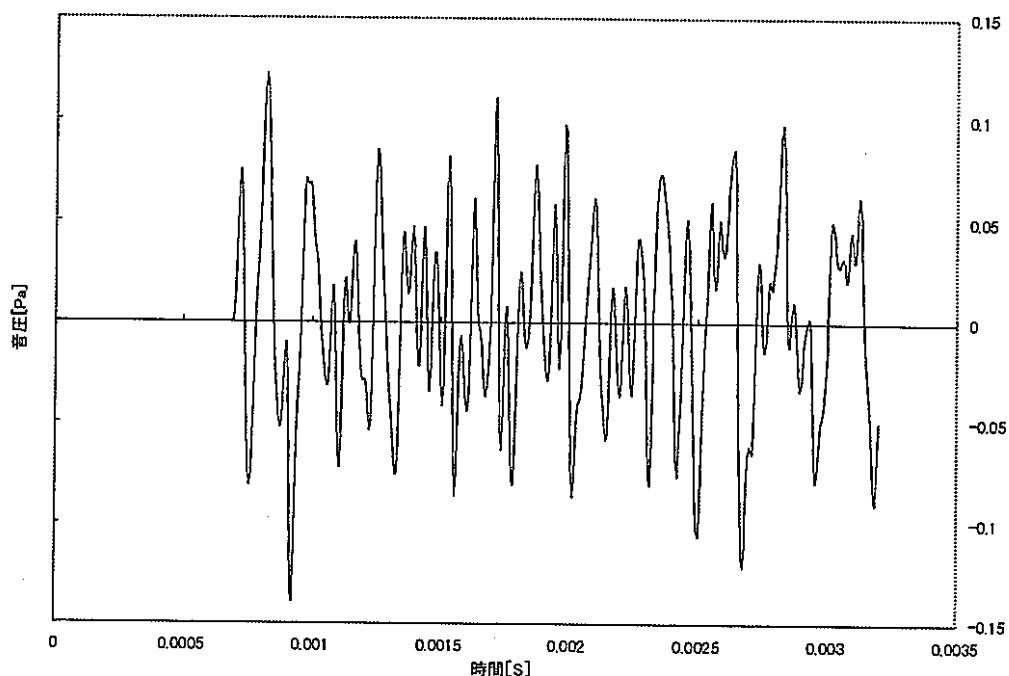


図 3.3-4(5) 第5列、高さ 140mm の位置で観測される音圧と伝達関数

炉心第5列 高さ 0.175m

音圧分布



伝達関数

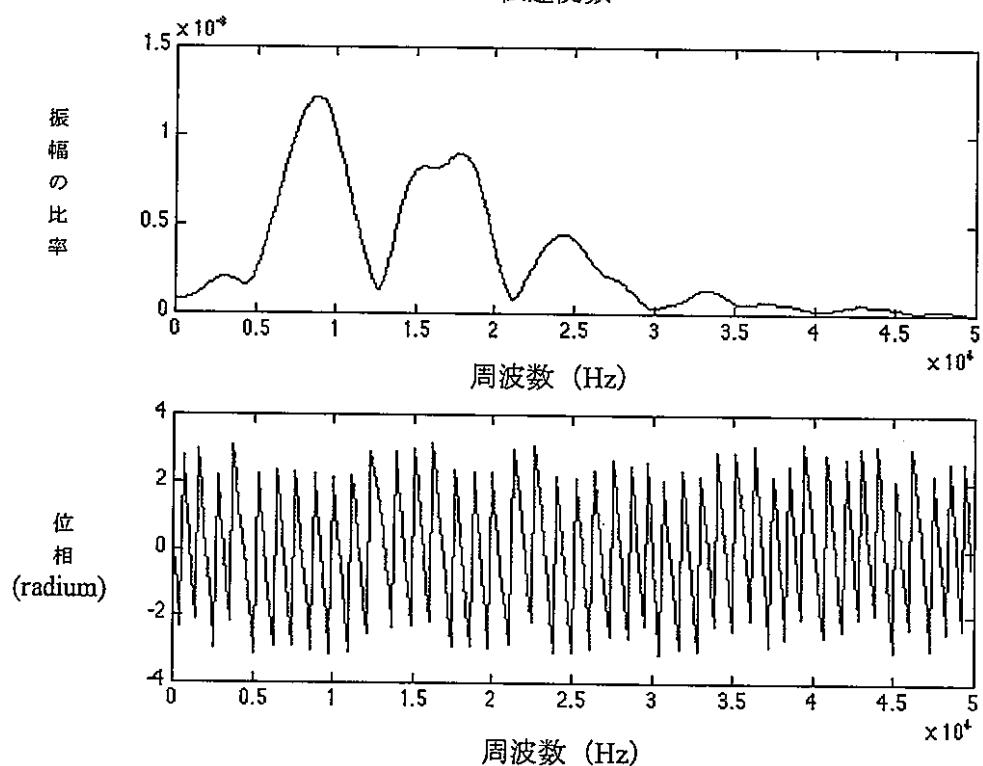
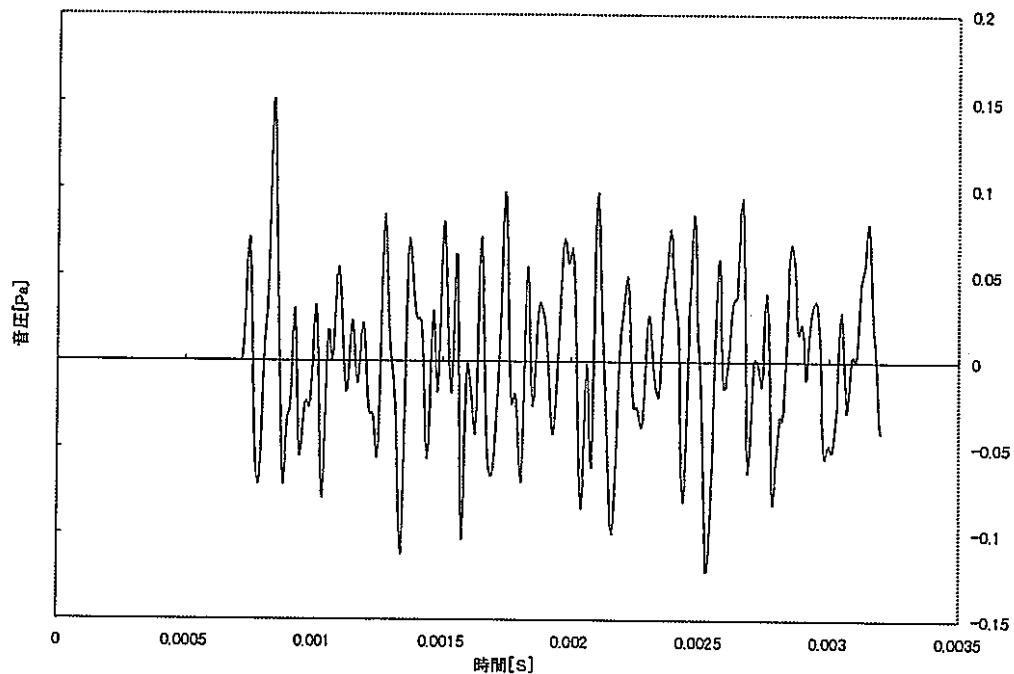


図 3.3-4(6) 第5列、高さ 175mm の位置で観測される音圧と伝達関数

炉心第5列 高さ 0.21m
音圧分布



伝達関数

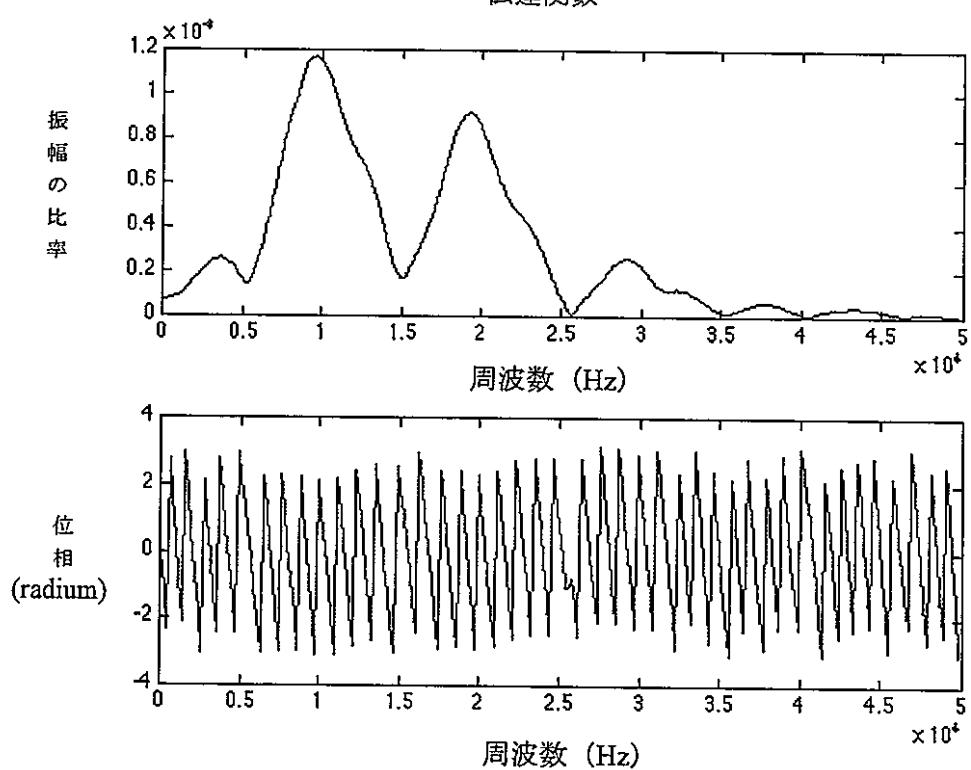
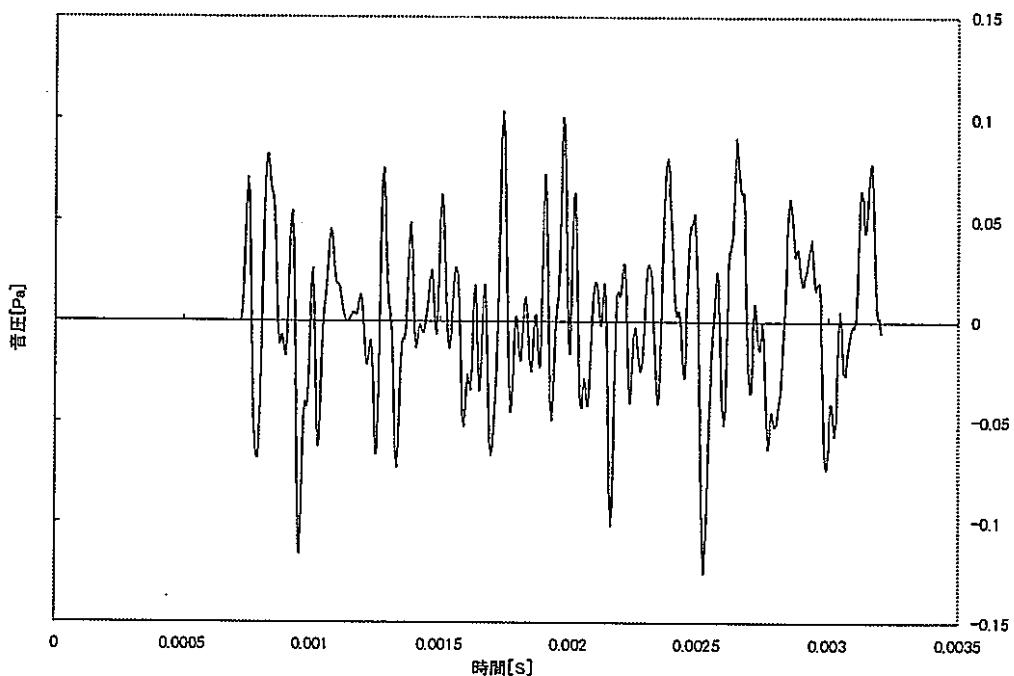


図 3.3-4(7) 第5列、高さ 210mm の位置で観測される音圧と伝達関数

炉心第5列 高さ 0.245m

音圧分布



伝達関数

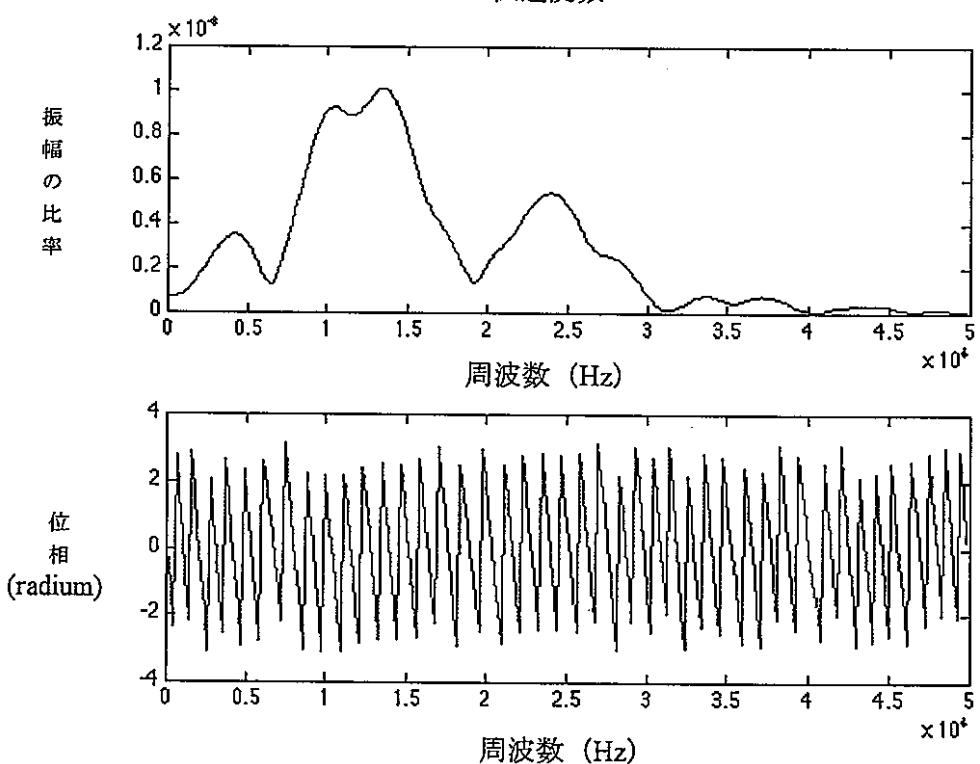
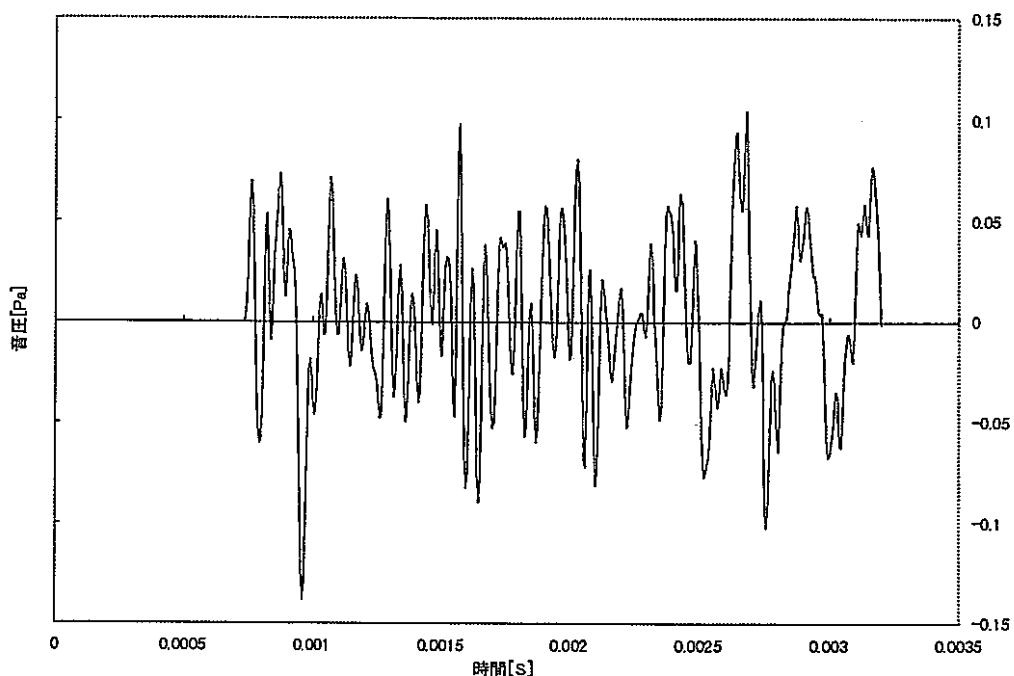


図 3.3-4(8) 第5列、高さ 245mm の位置で観測される音圧と伝達関数

炉心第5列 高さ 0.28m

音圧分布



伝達関数

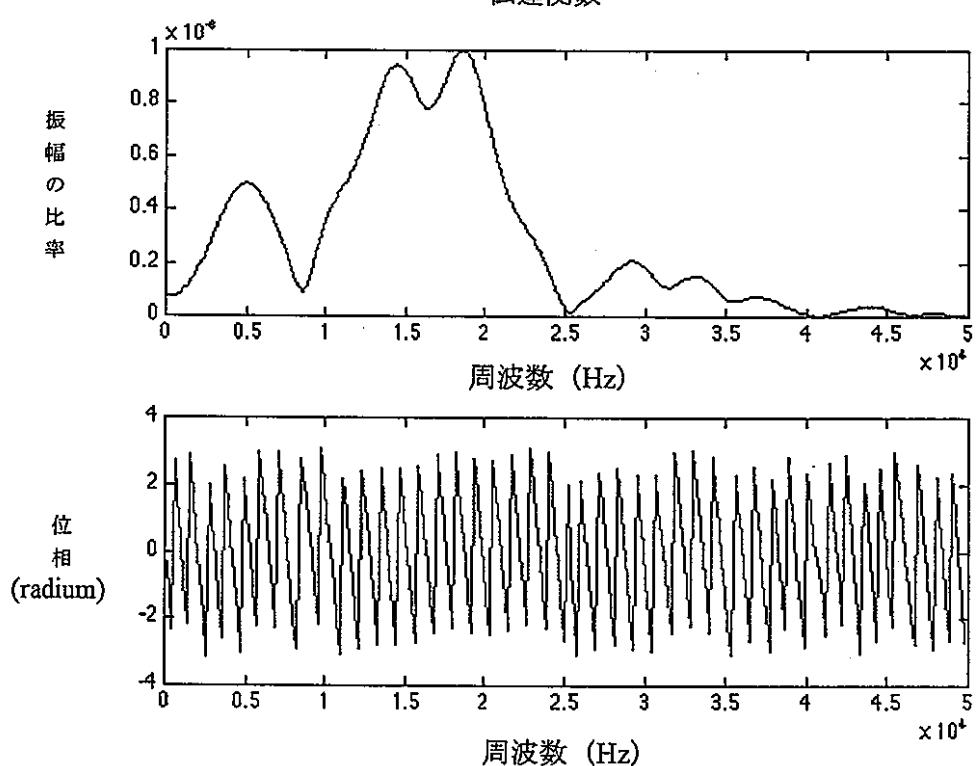
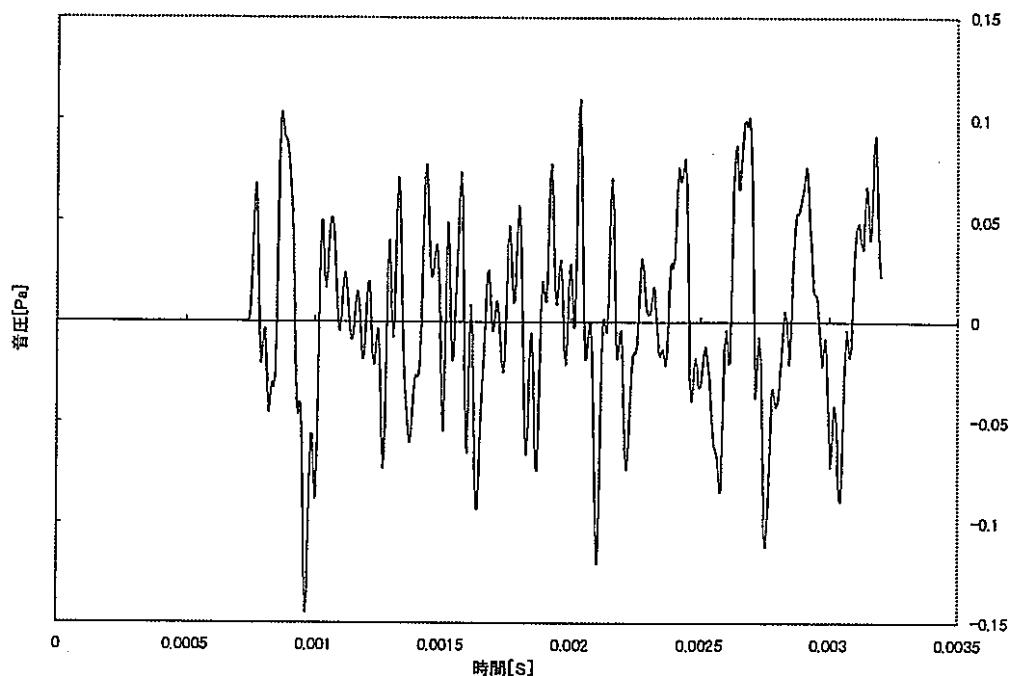


図 3.3-4(9) 第5列、高さ 280mm の位置で観測される音圧と伝達関数

炉心第5列 高さ 0.315m
音圧分布



伝達関数

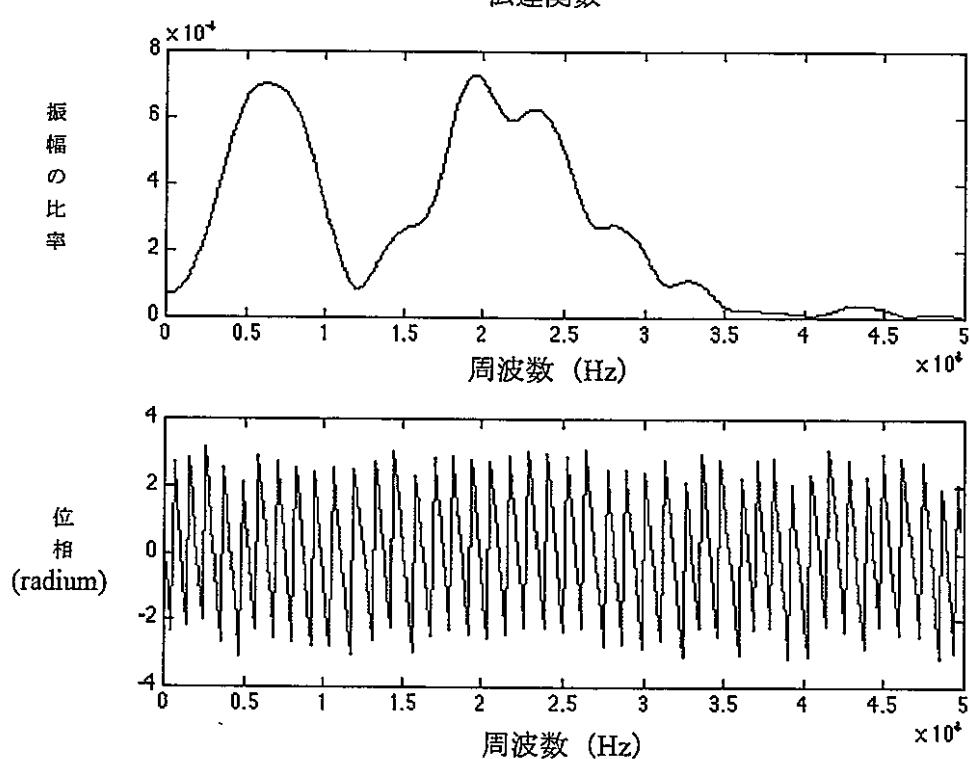


図 3.3-4(10) 第5列、高さ 315mm の位置で観測される音圧と伝達関数

炉心第5列 高さ 0.35m
音圧分布

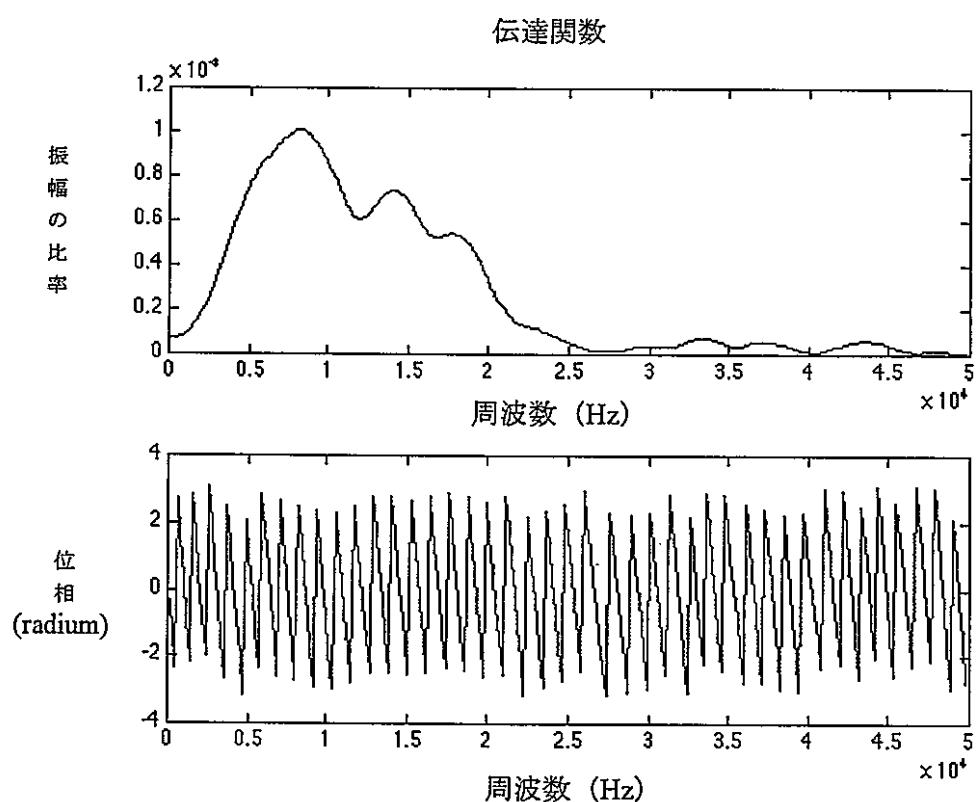
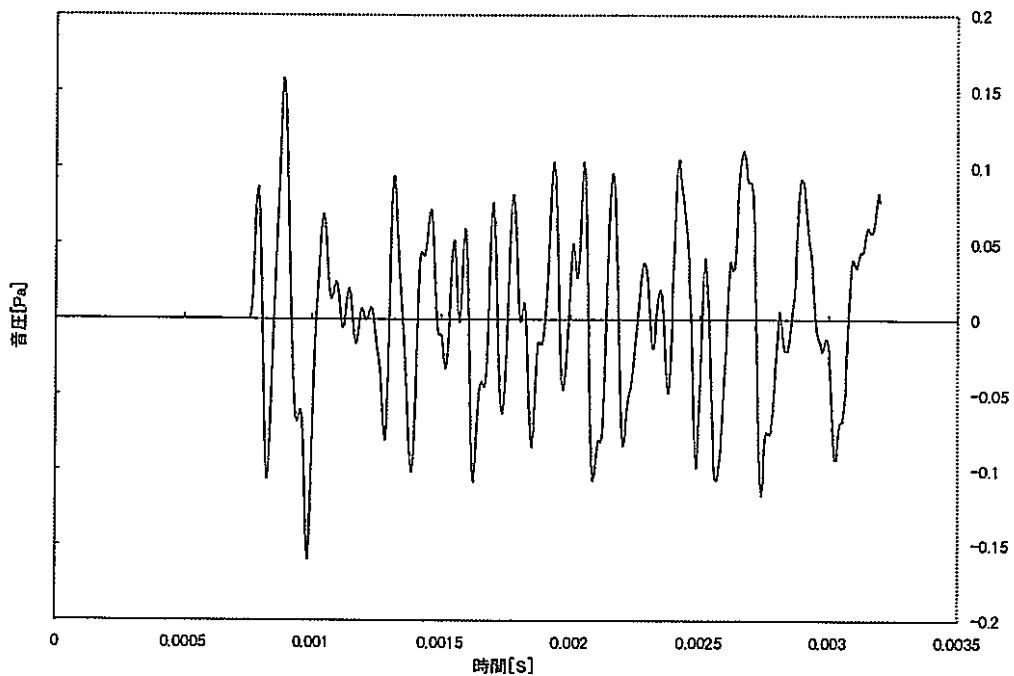
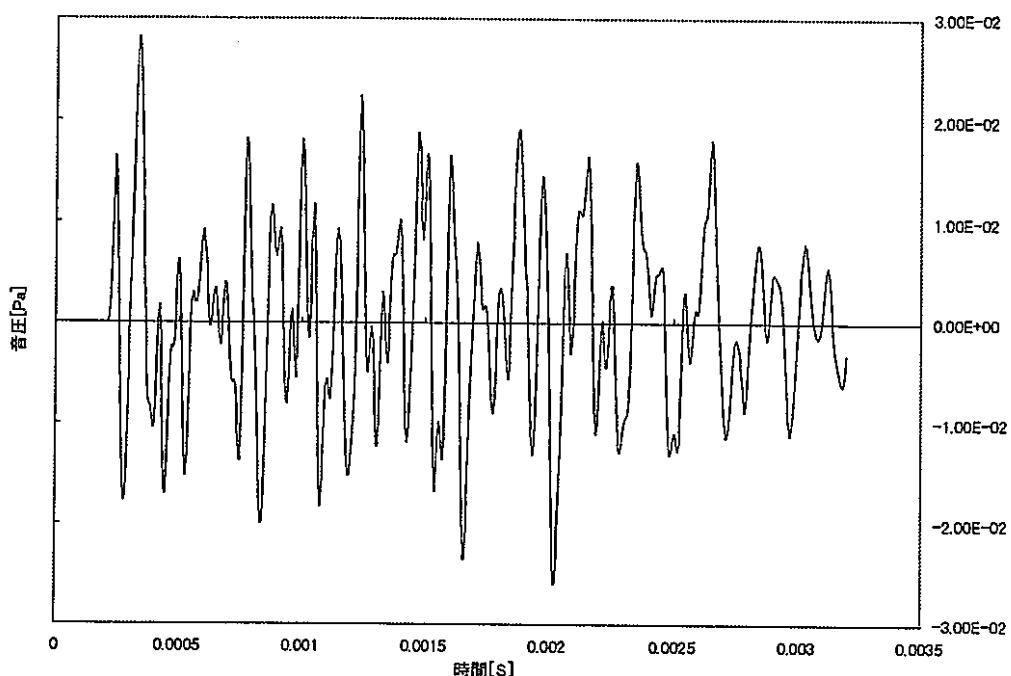


図 3.3-4(11) 第5列、高さ 350mm の位置で観測される音圧と伝達関数

観測位置 高さ 0.0 m

音圧分布



伝達関数

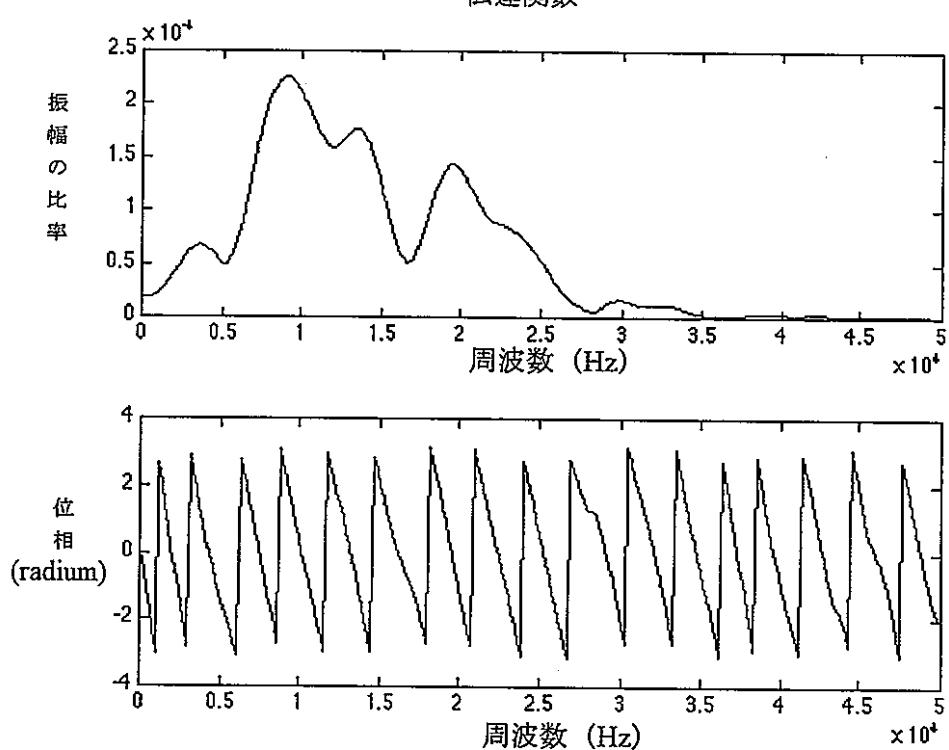
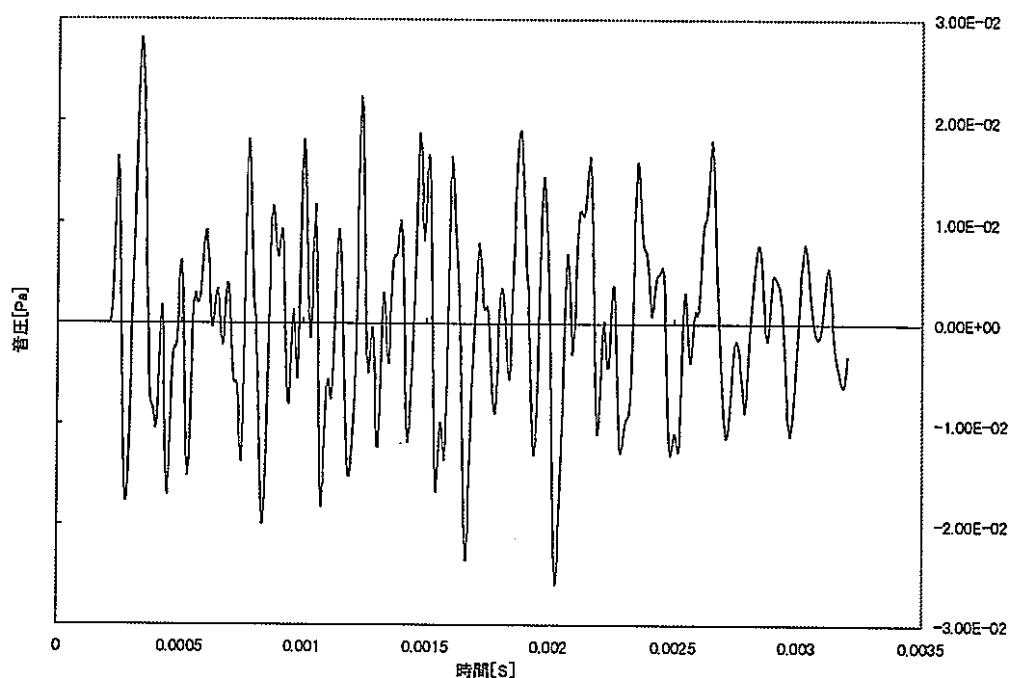


図 3.3-5(1) 観測点、高さ 0 m の位置で観測される音圧と伝達関数

観測位置 高さ 0.1 m

音圧分布



伝達関数

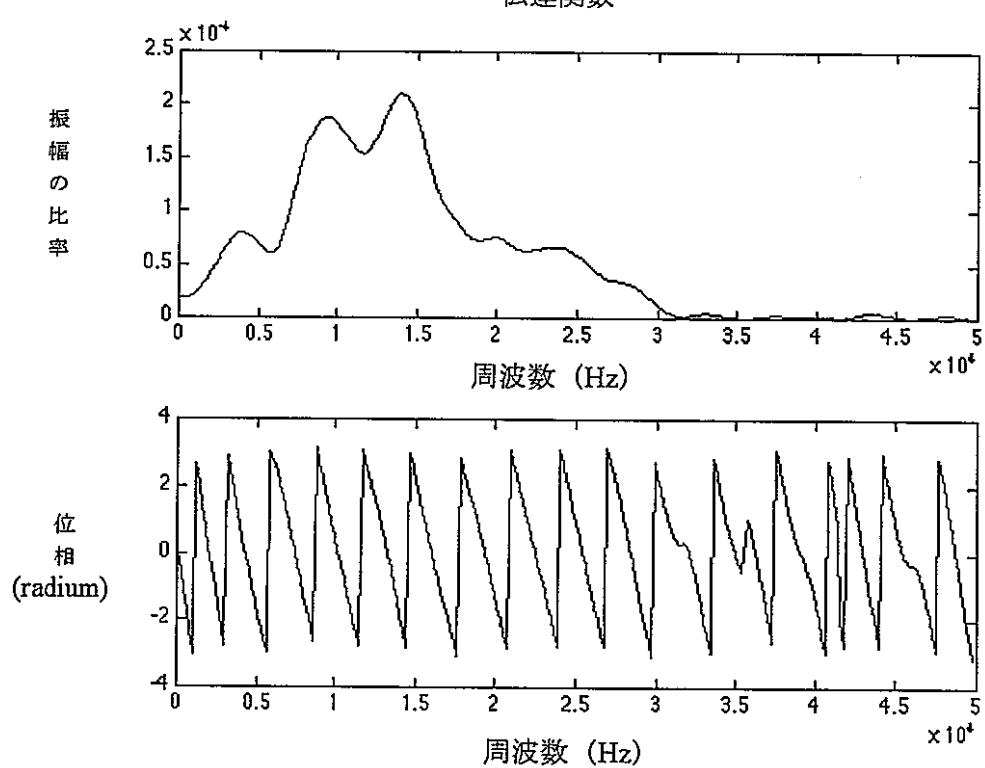
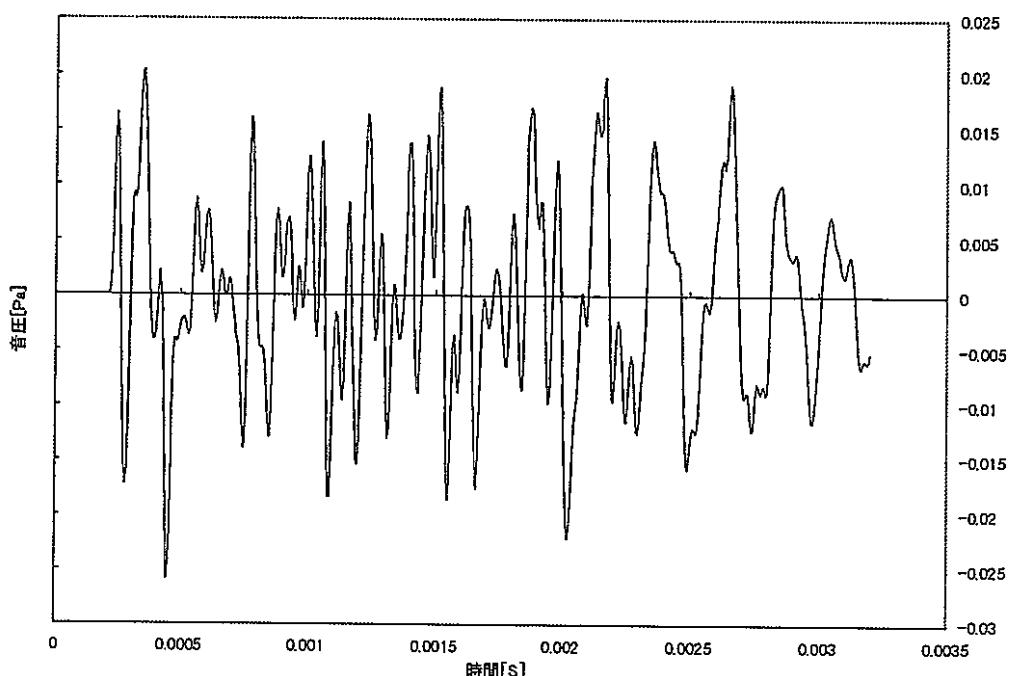


図 3.3-5(2) 観測点、高さ 0.1 m の位置で観測される音圧と伝達関数

観測位置 高さ 0.2 m

音圧分布



伝達関数

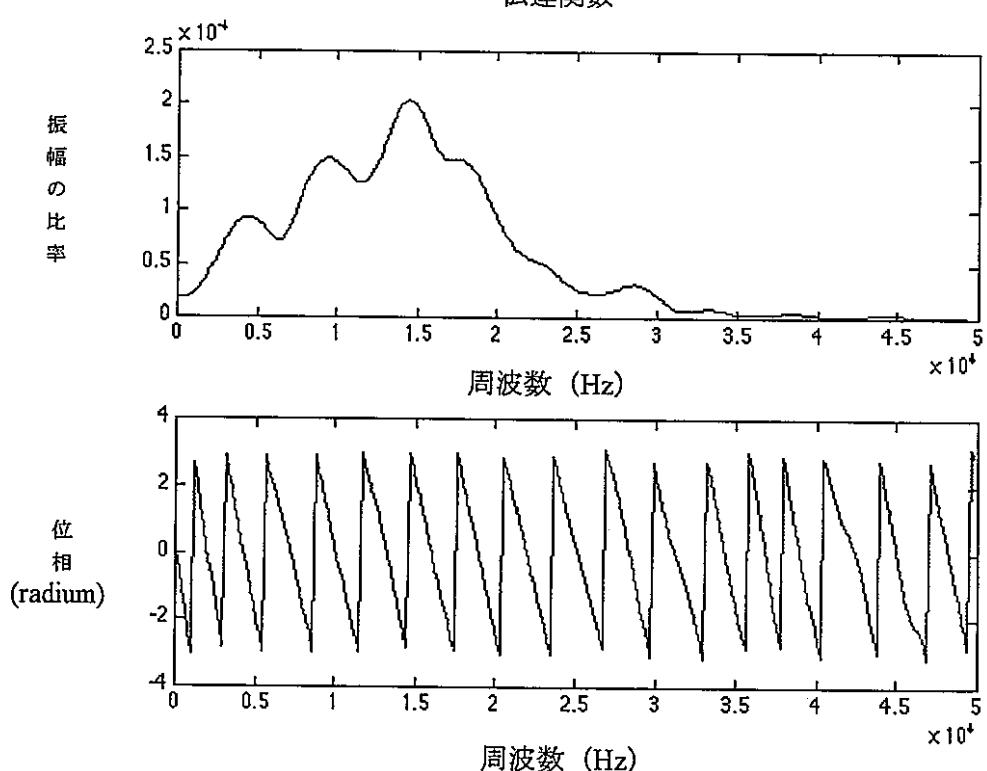
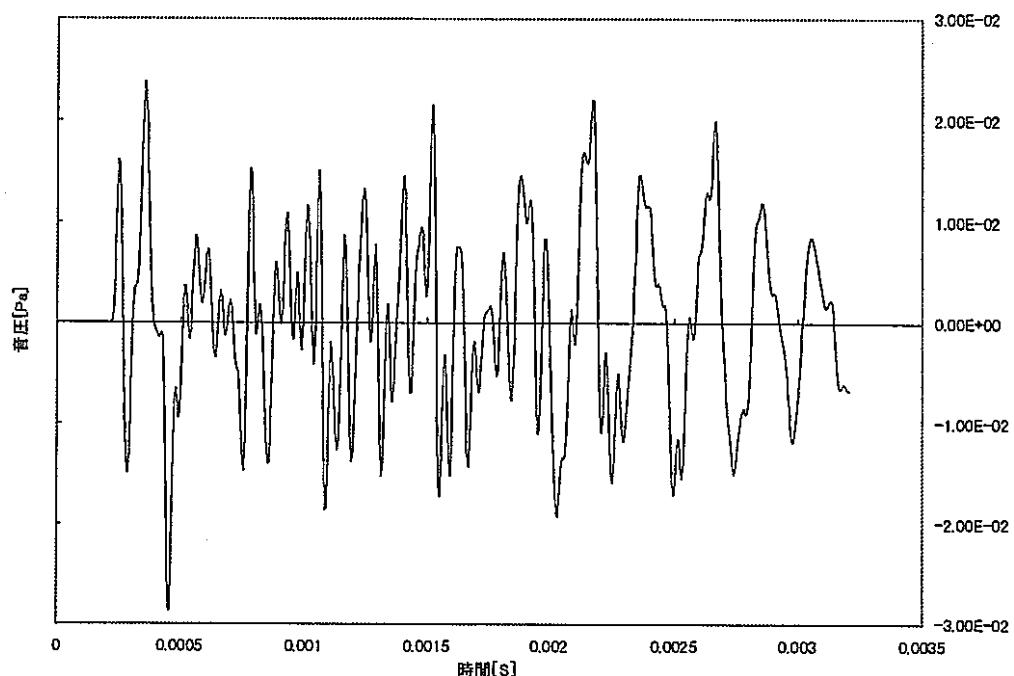


図 3.3-5(3) 観測点、高さ 0.2 m の位置で観測される音圧と伝達関数

観測位置 高さ 0.3 m

音圧分布



伝達関数

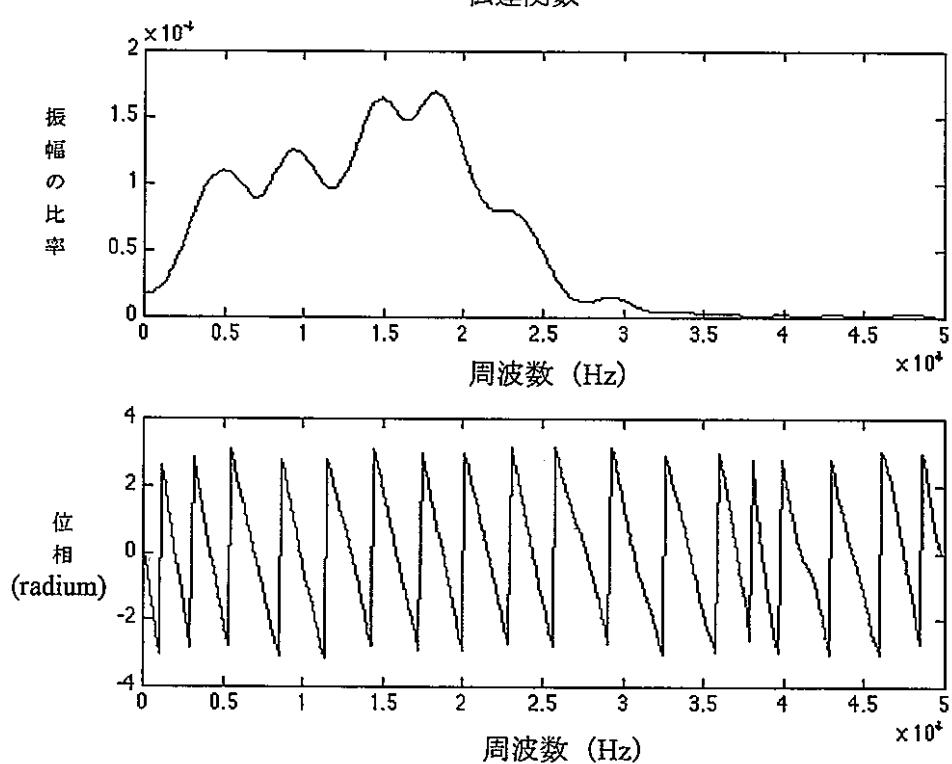
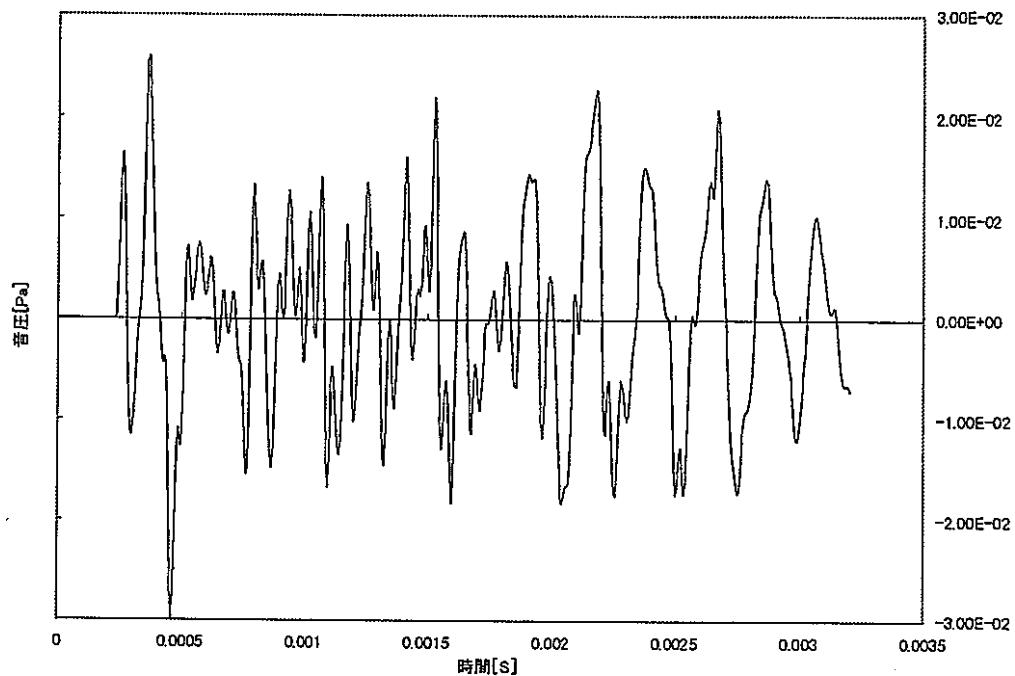


図 3.3-5(4) 観測点、高さ 0.3 m の位置で観測される音圧と伝達関数

観測位置 高さ 0.4 m

音圧分布



伝達関数

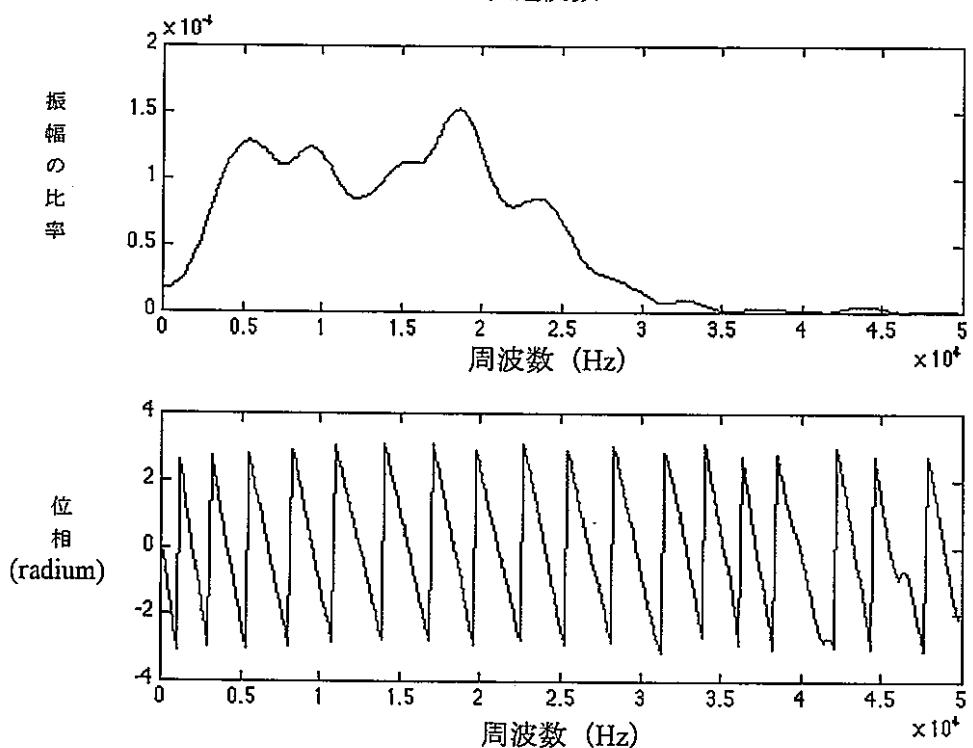
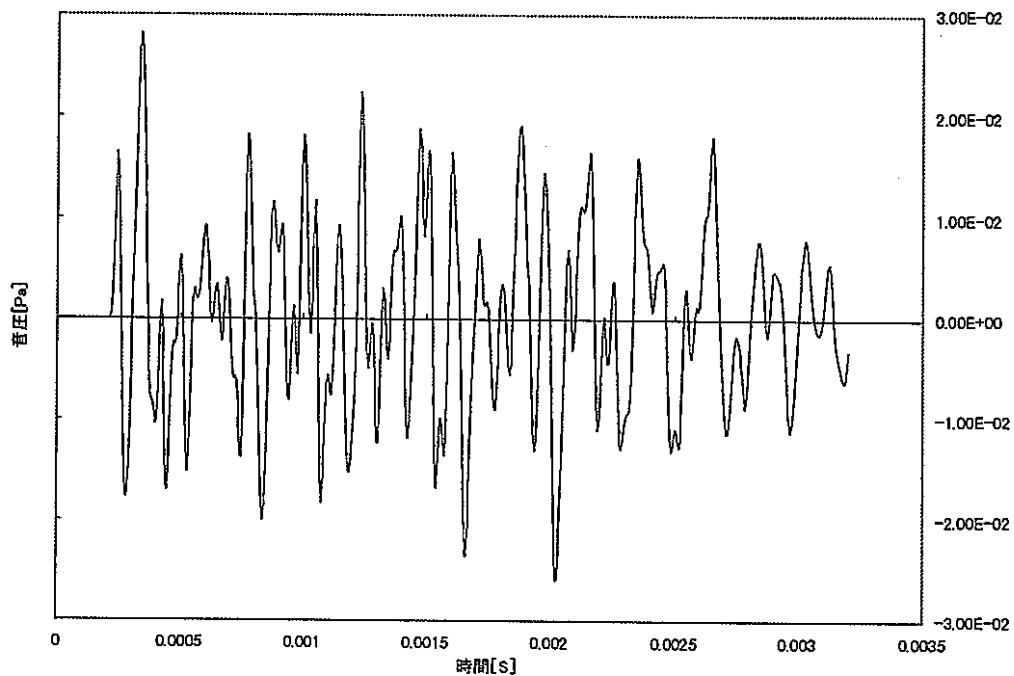


図 3.3-5(5) 観測点、高さ 0.4 m の位置で観測される音圧と伝達関数

観測位置 高さ 0.5 m

音圧分布



伝達関数

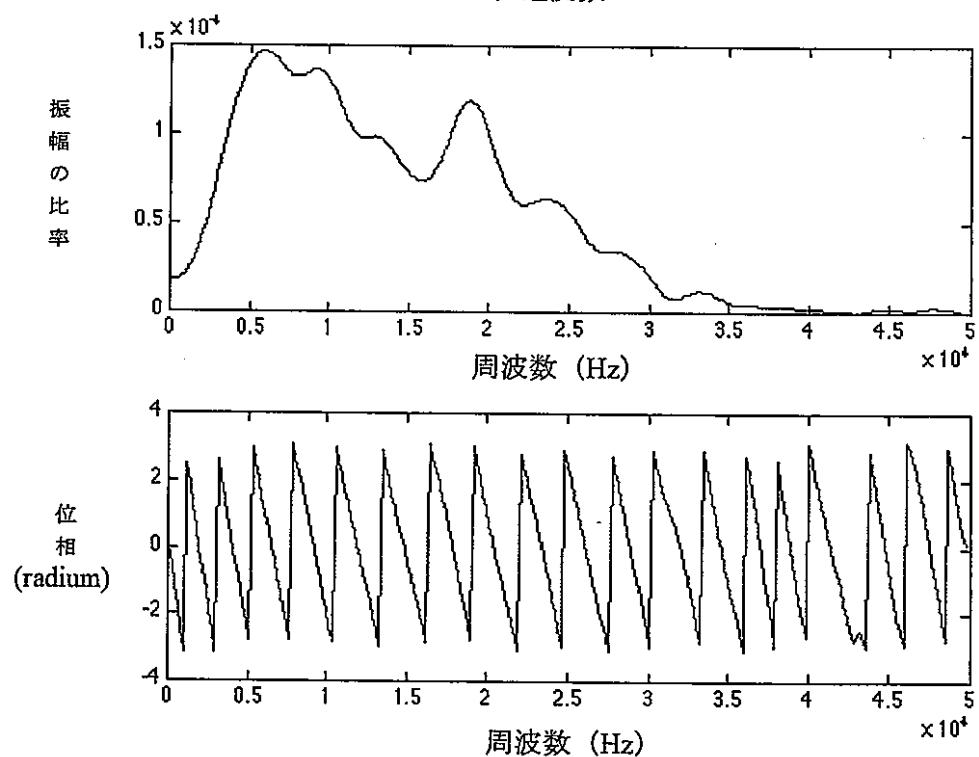
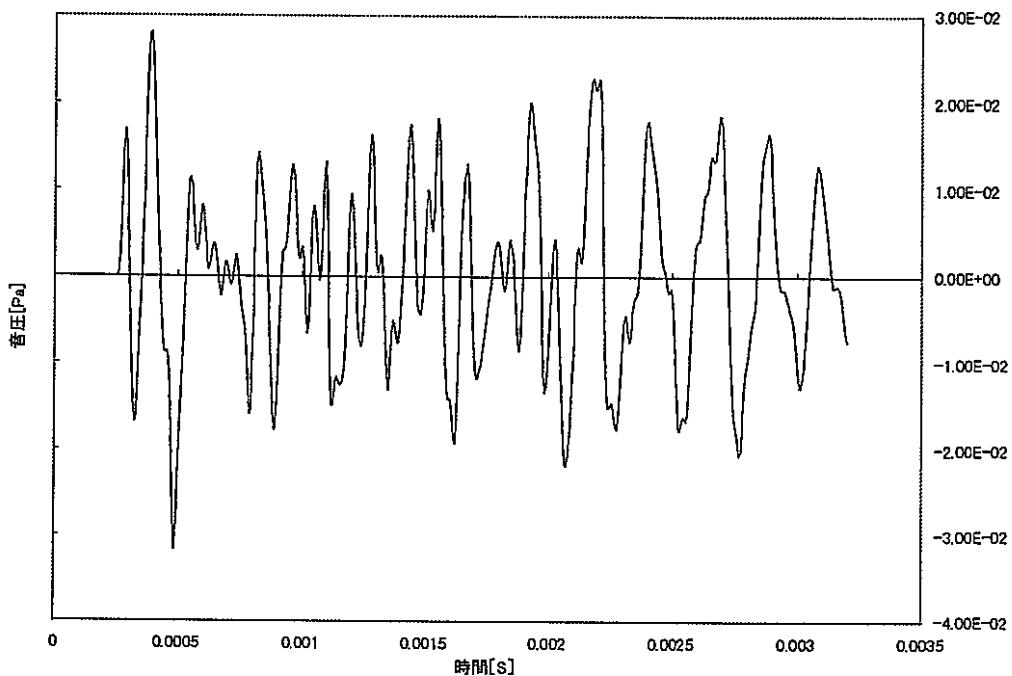


図 3.3-5(6) 観測点、高さ 0.5 m の位置で観測される音圧と伝達関数

観測位置 高さ 0.6 m

音圧分布



伝達関数

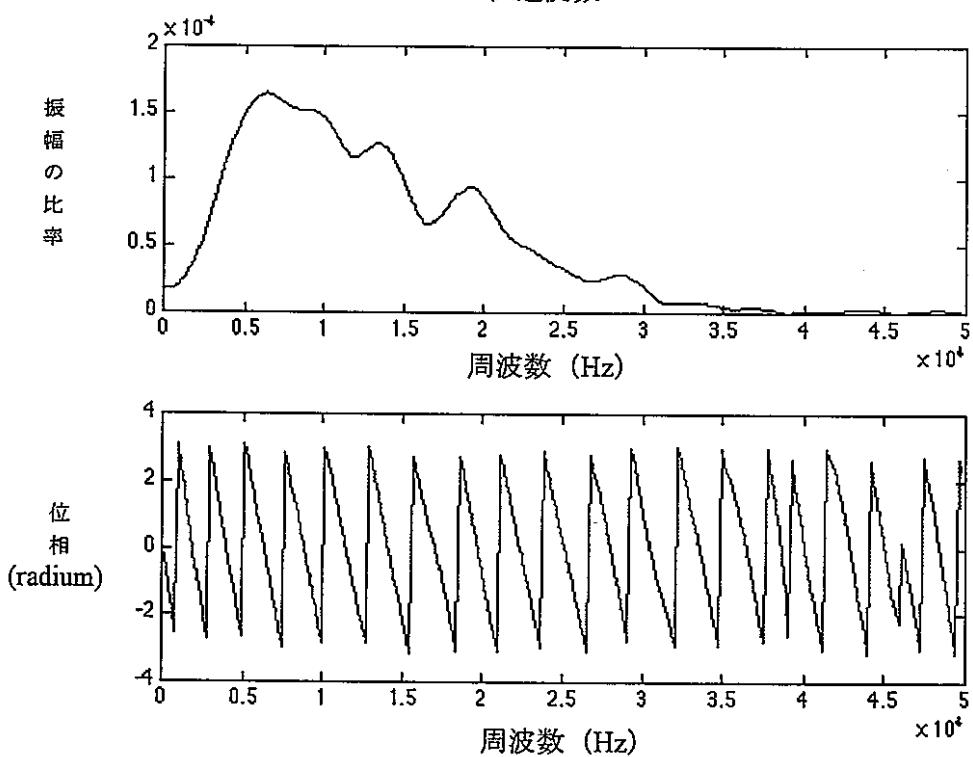
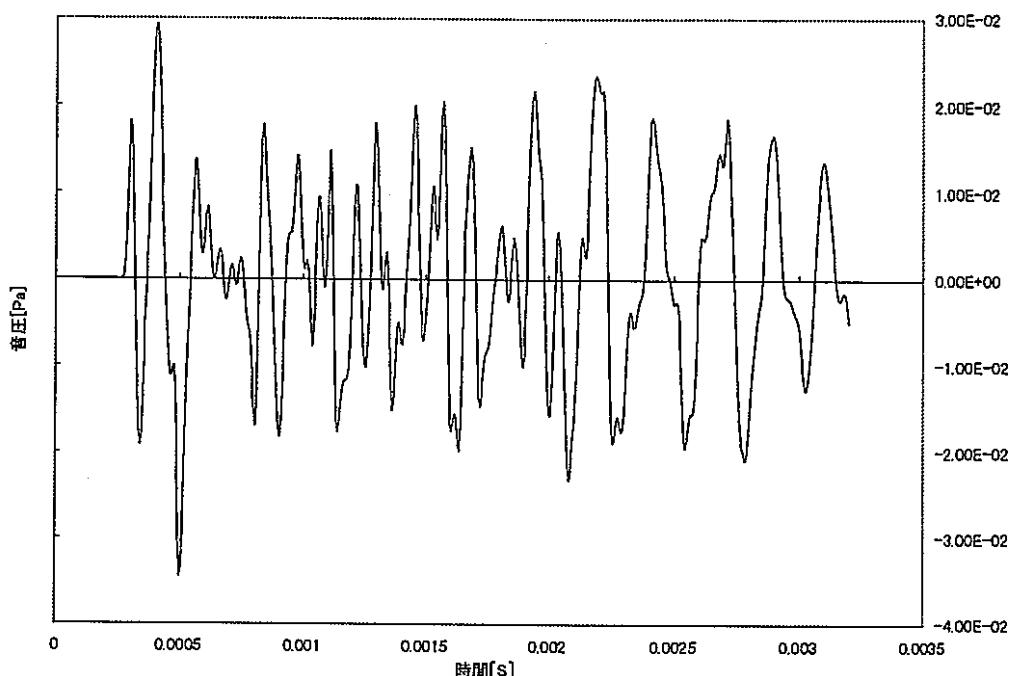


図 3.3-5(7) 観測点、高さ 0.6 m の位置で観測される音圧と伝達関数

観測位置 高さ 0.7 m

音圧分布



伝達関数

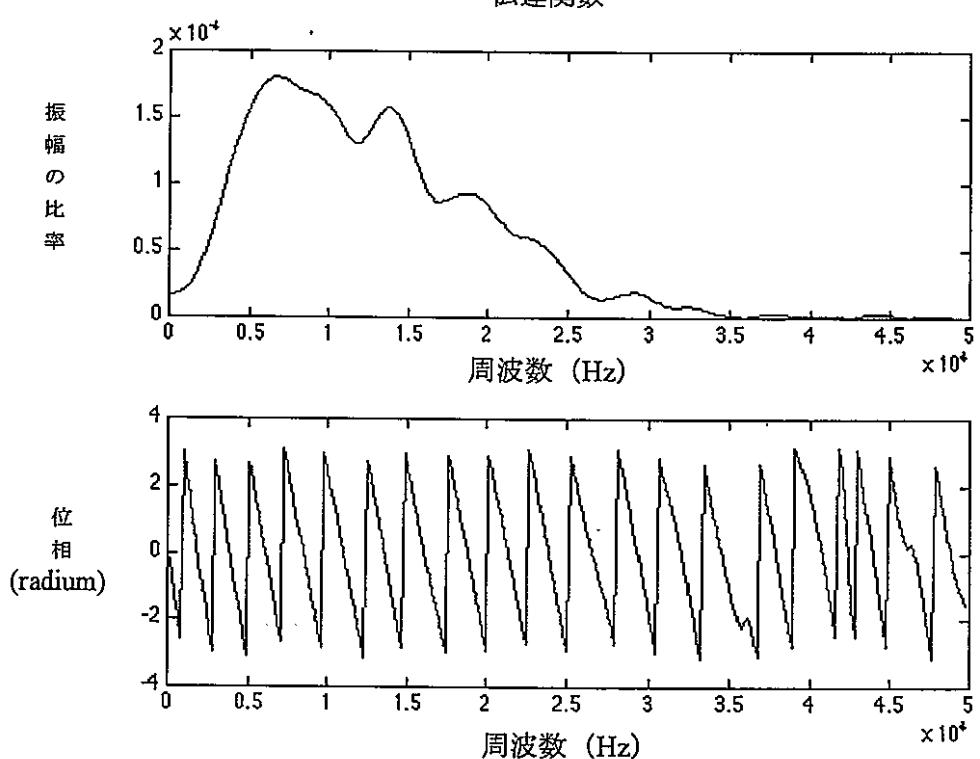
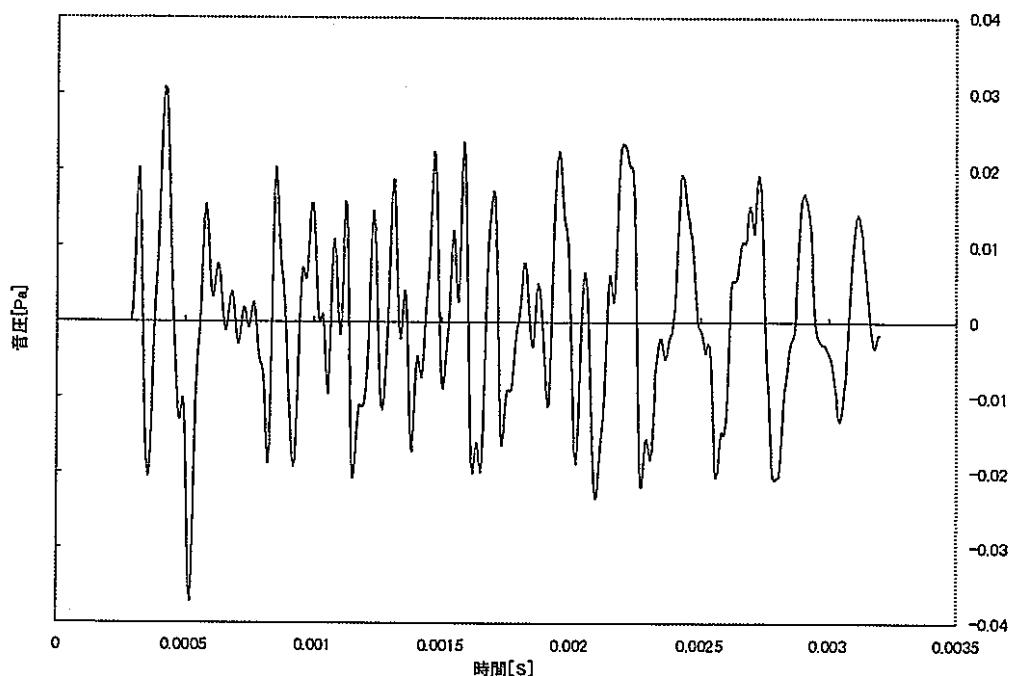


図 3.3-5(8) 観測点、高さ 0.7 m の位置で観測される音圧と伝達関数

観測位置 高さ 0.8 m

音圧分布



伝達関数

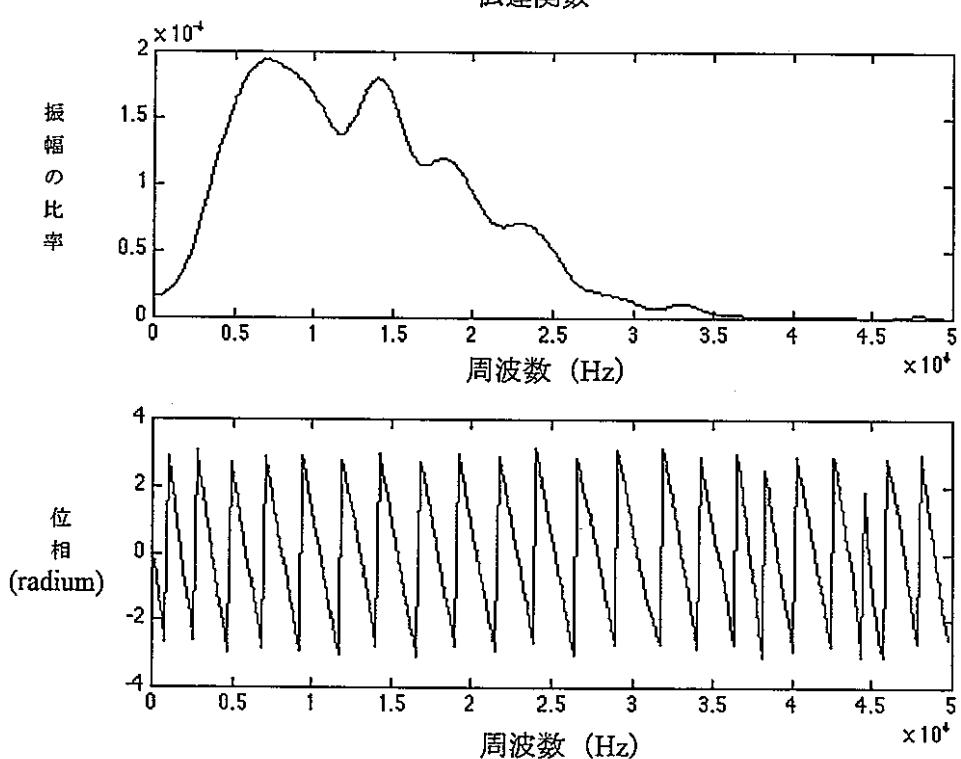
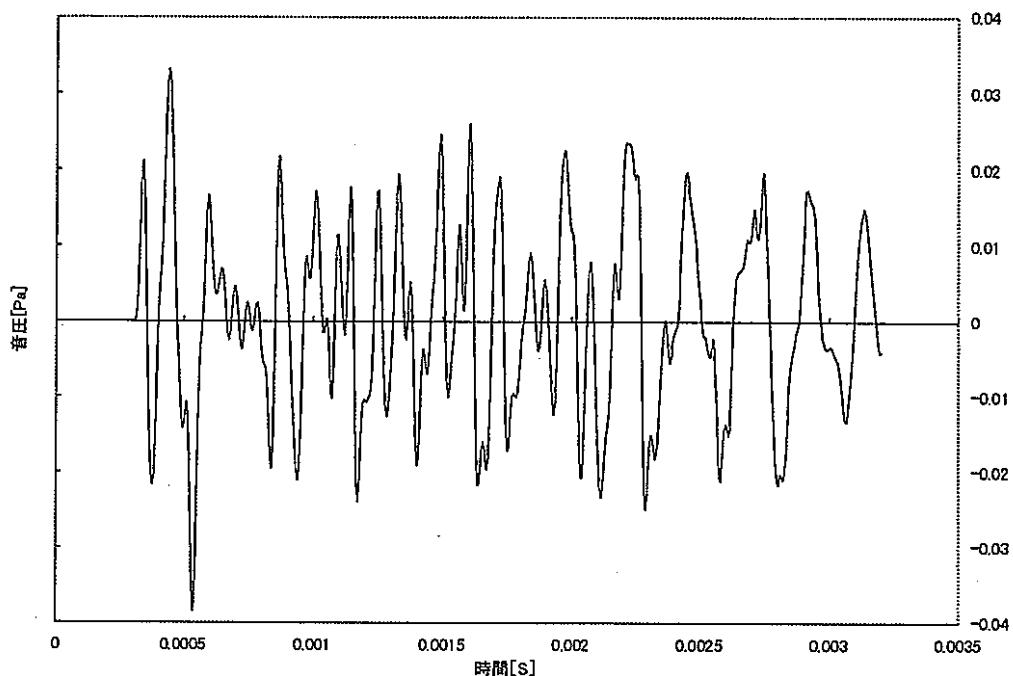


図 3.3-5(9) 観測点、高さ 0.8 m の位置で観測される音圧と伝達関数

観測位置 高さ 0.9 m

音圧分布



伝達関数

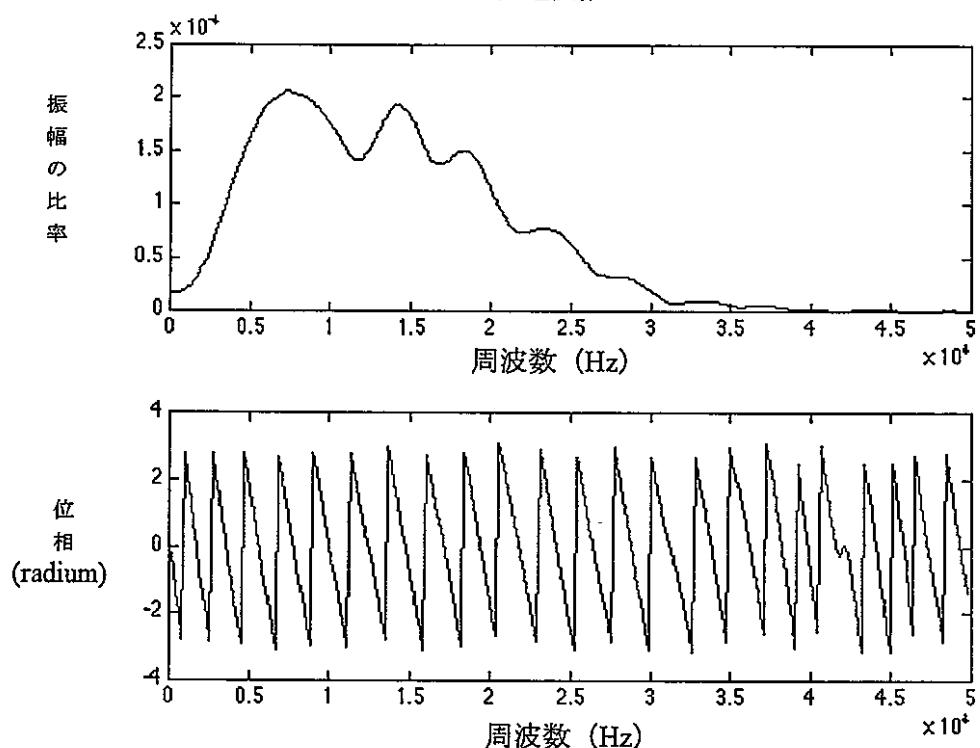
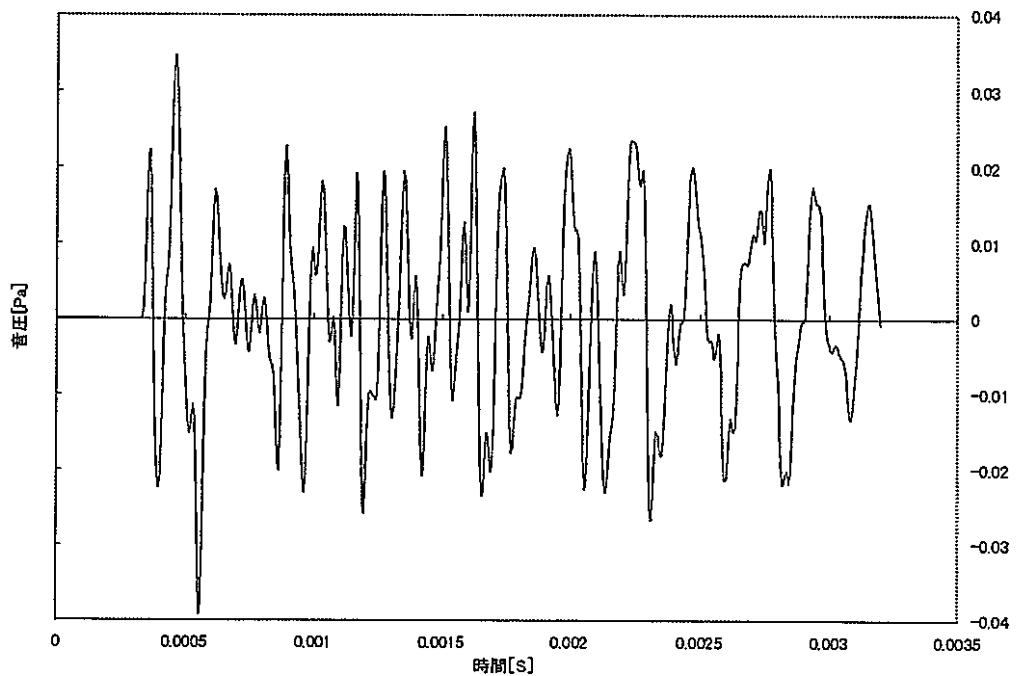


図 3.3-5(10) 観測点、高さ 0.9 m の位置で観測される音圧と伝達関数

観測位置 高さ 1.0 m

音圧分布



伝達関数

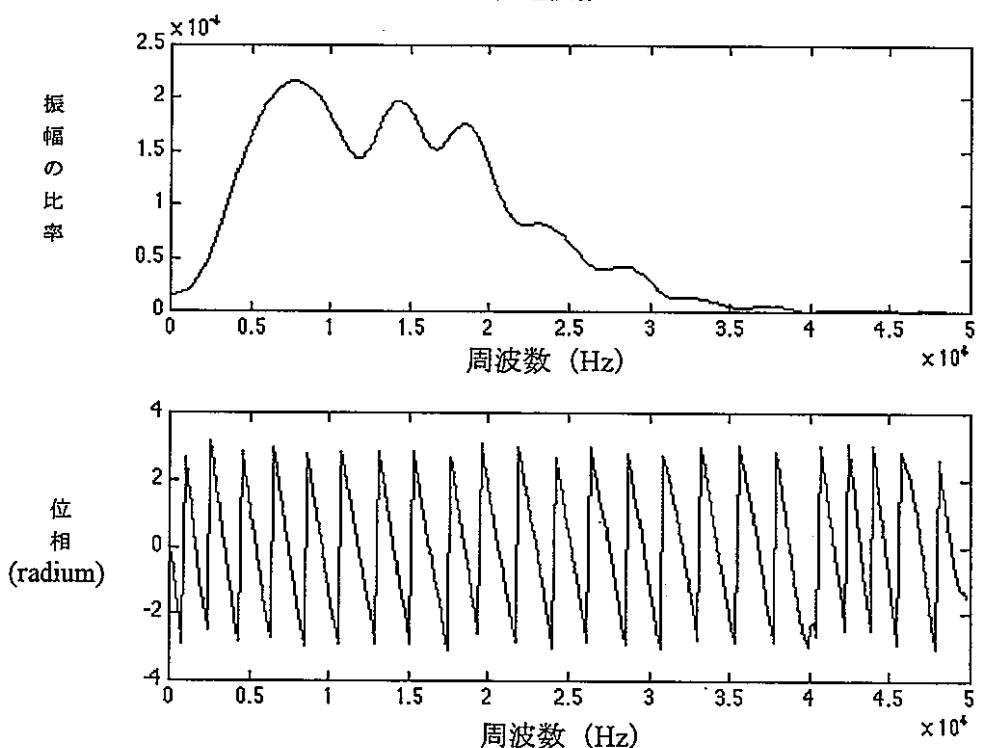


図 3.3-5(11) 観測点、高さ 1 m の位置で観測される音圧と伝達関数

3.4 計測音による音源位置の同定

3.3 項では、各計測点で、測定される音圧値をシミュレーションにより求めた。そこで求めた音圧値を用いて音源を配置した燃料集合体を信号処理によって同定できるかどうかを評価した。

最初に、各測定点で得られた信号の相互相関を求める。図 3.4-1(1)～(12)にその結果を示す。ここで示された相互通関値は開口合成するために用いた相関値である。同様に図 3.4-1(13)～(14)に一番遠い観測点を含んだ相互通関値を示す。また組み合わせによる位置関係を表 3.4-1 に示す。この相関処理結果の特徴は、観測点の距離が離れているだけ相関値の遅れ時間が出ており、相関値の振幅が観測点が遠いことによって小さくなる事がいえる。

音源位置を同定するための開口合成という手法は、測定点数が多くあれば、精度が飛躍的に良くなっていく。しかし現実にはあまり多数の測定点を選ぶことは難しいので、少ない測定点で開口合成をすると、結果にどのような違いが出るかを調べる。図 3.4-2(1)～(5)にその結果を示す。開口合成結果の画像によると、データ点数が少ないと、同一平面の、しかも音源から適当に離れたデータの組み合わせの方がより明確に位置の同定が可能であることが分かった。

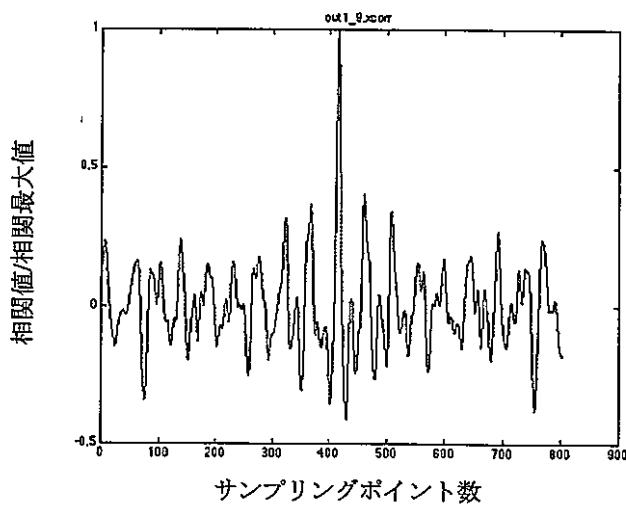
図 3.4-2(6)～(10)に、一番遠い観測点を含む開口合成結果を示す。相関結果で示したように単純な相関値だけ使うと、遠方の相関値は小さすぎて効果がない。ここで示した開口合成は最大振幅と同じ強さに正規化して開口合成を行った。その結果遠方のデータを用いて開口合成した方が観測位置から音源への角度の精度が上がり、開口合成結果は格段に明確化されることがわかった。

またバックグラウンドノイズによる、音源位置の同定への影響については、バックグラウンドノイズがホワイトノイズであれば、ノイズレベルが大きくても、計測時間を長くすることができれば統計処理を行うことにより、計測は可能となることが考えられるが、バックグラウンドノイズがある定常的な信号である場合は、計測された信号からその定常的な信号を除去する必要があると考えられる。

表 3.4-1 計測点の組み合わせと相関処理結果

△	000	3B3	3E3	5B2	5C2	5E2	検査孔観測位置
図 3.4-1(1)	0	—	0	—	—	—	—
図 3.4-1(2)	0	—	—	—	—	0	—
図 3.4-1(3)	—	—	0	—	—	0	—
図 3.4-1(4)	—	—	0	0	—	—	—
図 3.4-1(5)	—	—	0	—	0	—	—
図 3.4-1(6)	—	—	—	0	0	—	—
図 3.4-1(7)	—	—	300	300	—	—	—
図 3.4-1(8)	—	—	300	—	300	—	—
図 3.4-1(9)	—	—	—	300	300	—	—
図 3.4-1(10)	—	—	0	300	—	—	—
図 3.4-1(11)	—	—	0	—	100	—	—
図 3.4-1(12)	—	—	—	300	100	—	—
図 3.4-1(13)	—	—	0	—	—	—	0
図 3.4-1(14)	—	—	—	0	—	—	200

※表中の数字は高さ (mm) を表す。

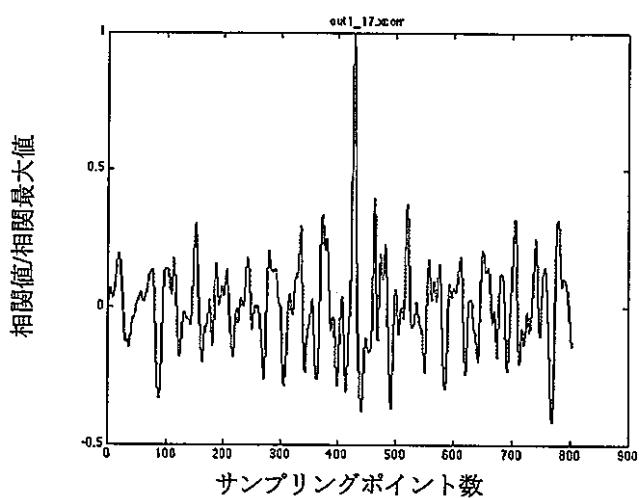


音響計挿入位置

000 : 0 mm

3E3 : 0 mm

図 3.4-1(1) 高さ 0m での、測定点 000 と 3E3 の間の相互相関値



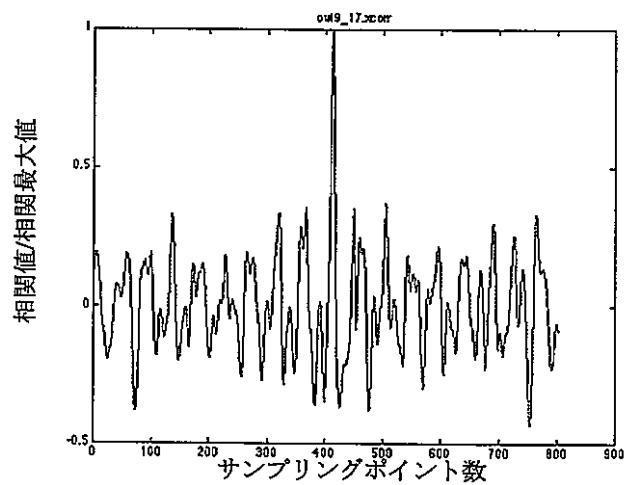
音響計挿入位置

000 : 0 mm

5E2 : 0 mm

図 3.4-1(2) 高さ 0m での、測定点 000 と 5E2 の間の相互相関値

※遅れ時間 = サンプリングポイント数 / サンプリング周波数

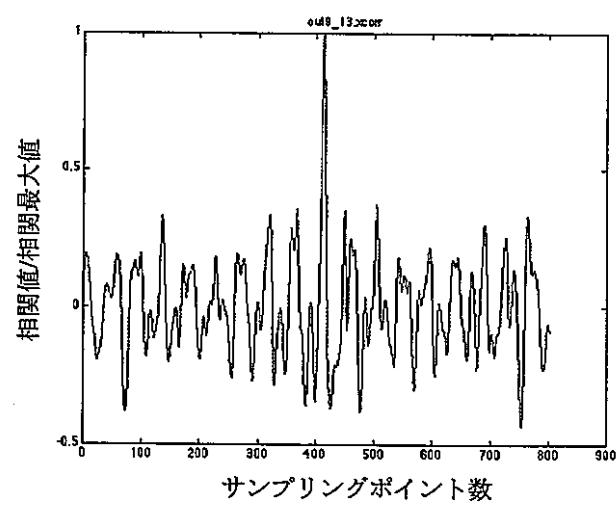


音響計挿入位置

3E3 : 0 mm

5E2 : 0 mm

図 3.4-1(3) 高さ 0m での、測定点 5E2 と 3E3 の間の相互相関値



音響計挿入位置

3E3 : 0 mm

5B2 : 0 mm

図 3.4-1(4) 高さ 0m での、測定点 5B2 と 3E3 の間の相互相関値

※遅れ時間 = サンプリングポイント数 / サンプリング周波数

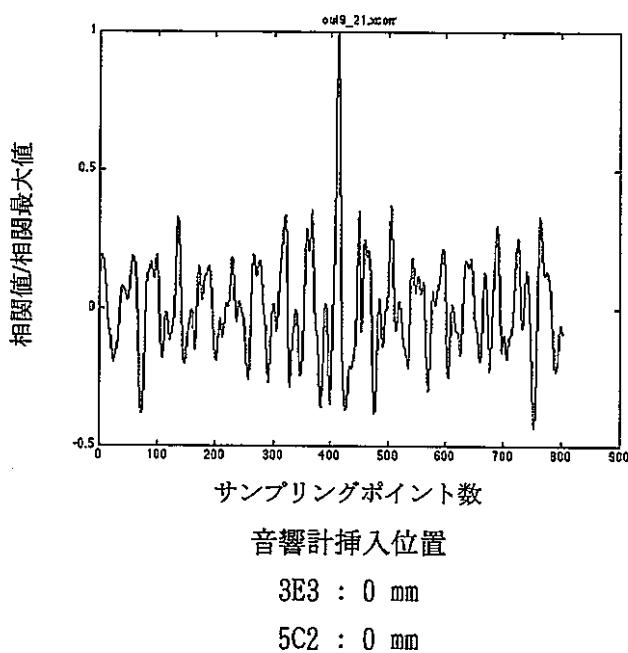


図 3.4-1(5) 高さ 0mm で測定点 3E3 と 5C2 の測定値の相互相関

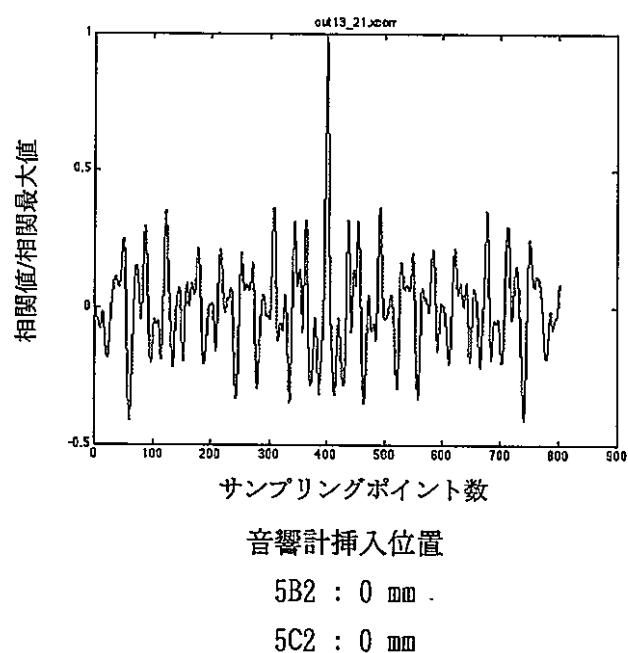


図 3.4-1(6) 高さ 0mm で測定点 5B2 と 5C2 の測定値の相互相関

※遅れ時間 = サンプリングポイント数 / サンプリング周波数

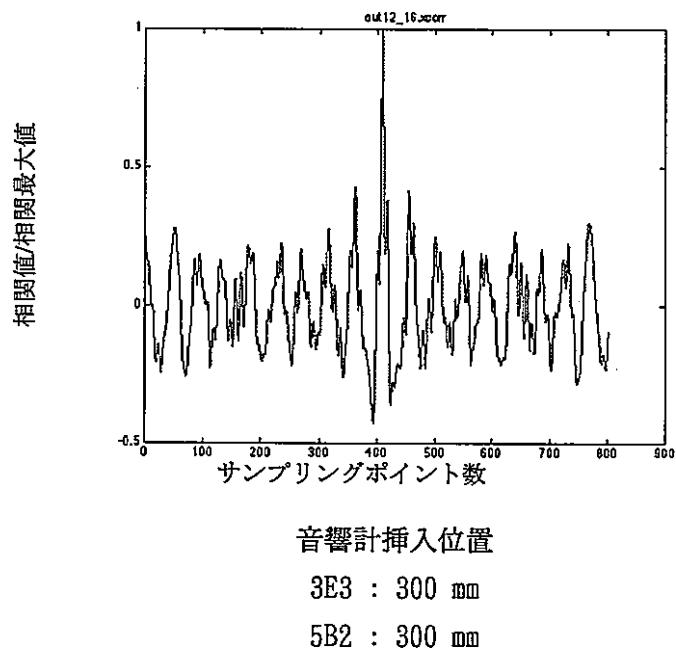


図 3.4-1(7) 高さ 300mm で測定点 3E3 と 5B2 の測定値の相互相関

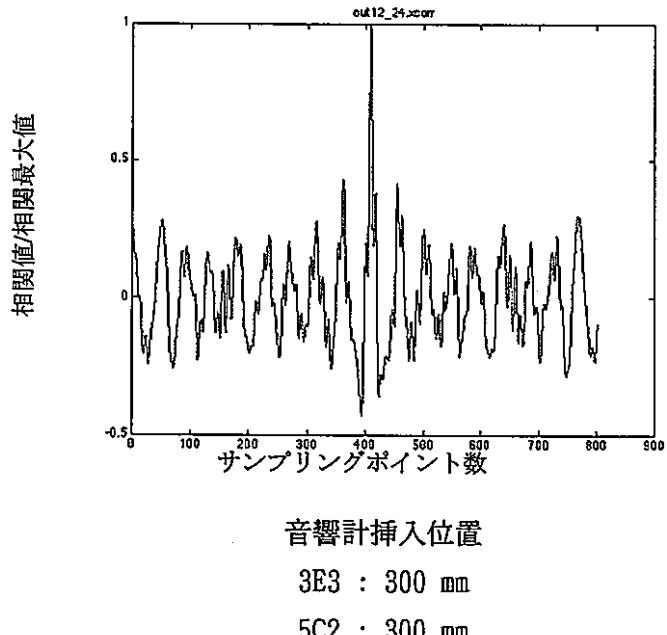


図 3.4-1(8) 高さ 300mm で測定点 3E3 と 5C2 の測定値の相互相関

※遅れ時間 = サンプリングポイント数 / サンプリング周波数

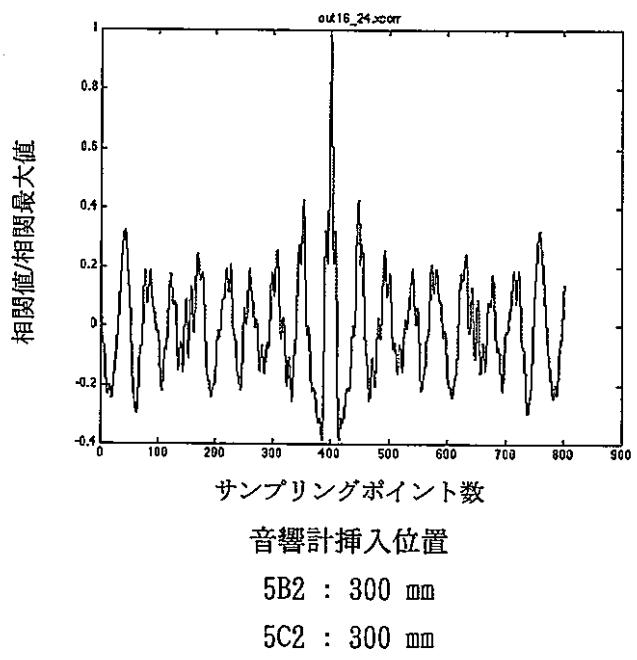


図 3.4-1(9) 高さ 300mm 同士のデータ相互相関値

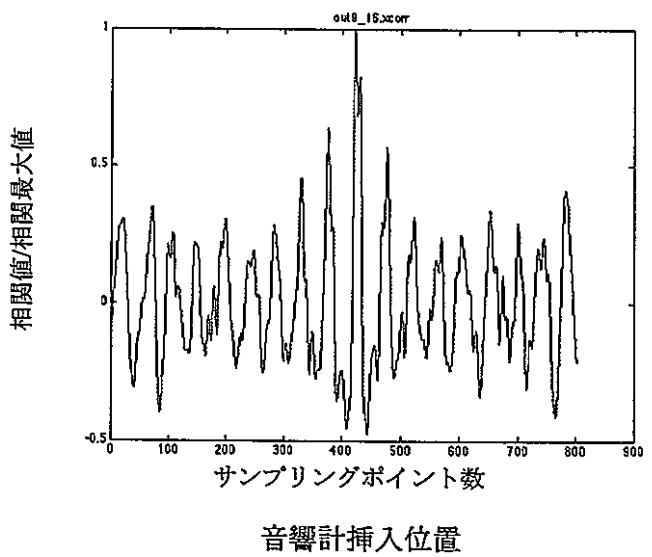
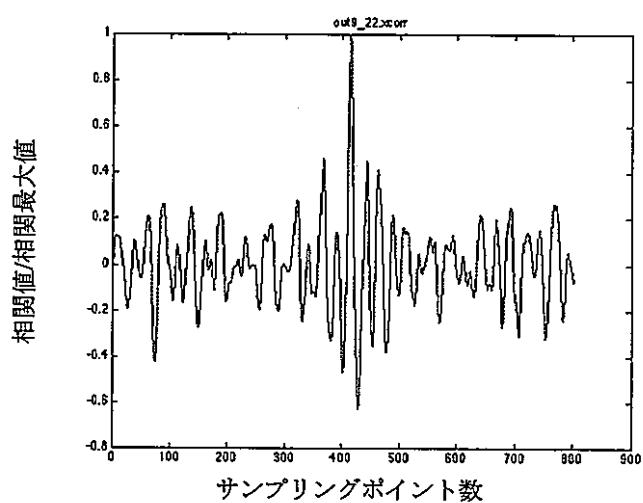


図 3.4-1(10) 高さ 300mm と高さ 0mm のデータ相互相関値

※遅れ時間=サンプリングポイント数／サンプリング周波数

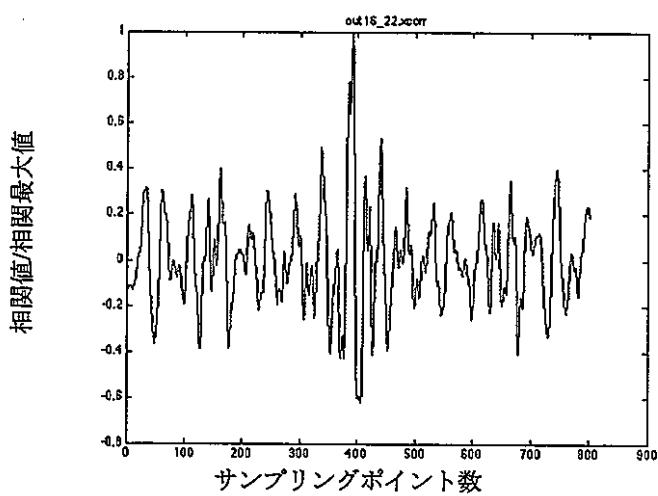


音響計挿入位置

3E3 : 0 mm

5C2 : 100 mm

図 3.4-1(11) 高さ 100mm と高さ 0mm のデータ相互相関値



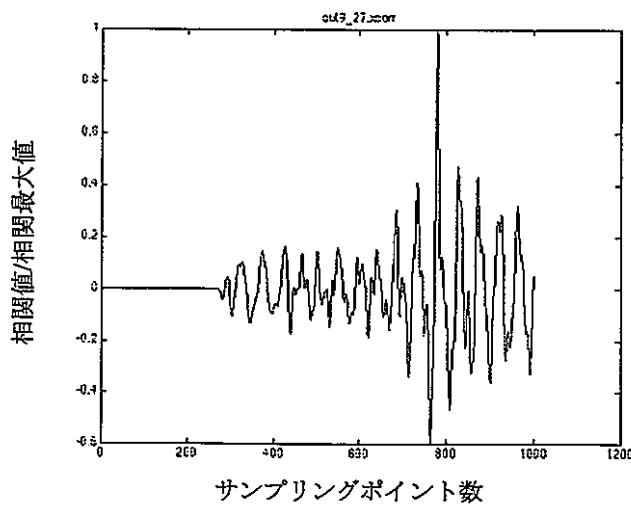
音響計挿入位置

5B2 : 300 mm

5C2 : 100 mm

図 3.4-1(12) 高さ 300mm と高さ 100mm のデータ相互相関値

※遅れ時間=サンプリングポイント数／サンプリング周波数

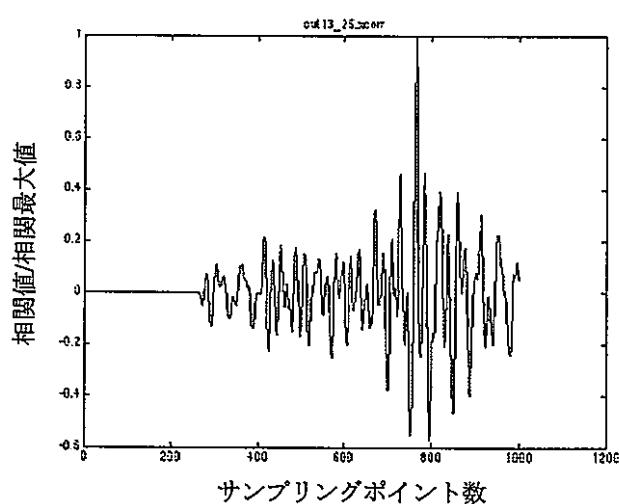


音響計挿入位置

3E3 : 0 mm

観測位置 : 0 mm

図 3.4-1(13) 高さ 0mm での、測定点 3E3 と観測位置の間の相互相関値



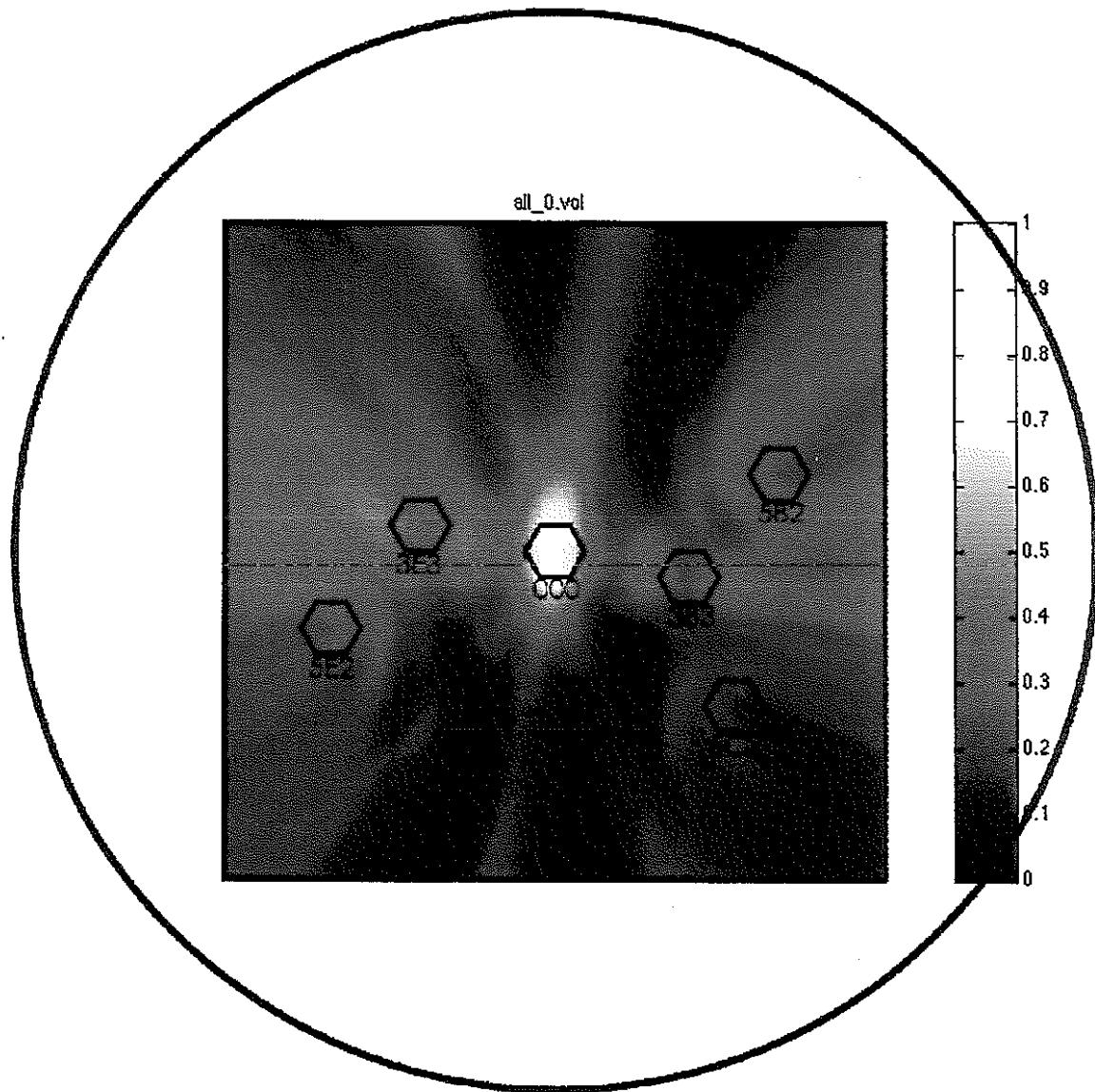
音響計挿入位置

5B2 : 0 mm

観測位置 : 200 mm

図 3.4-1(14) 高さ 0mm での、測定点 5B2 と高さ 200mm での観測位置の間の相互相関値

※遅れ時間=サンプリングポイント数／サンプリング周波数



音響計挿入位置

000 : 0 mm
3B3 : 0 mm
3E3 : 0 mm
5B2 : 0 mm
5C2 : 0 mm
5E2 : 0 mm

図3.4-2(1) 同一平面内の多くの測定点を用いた開口合成値

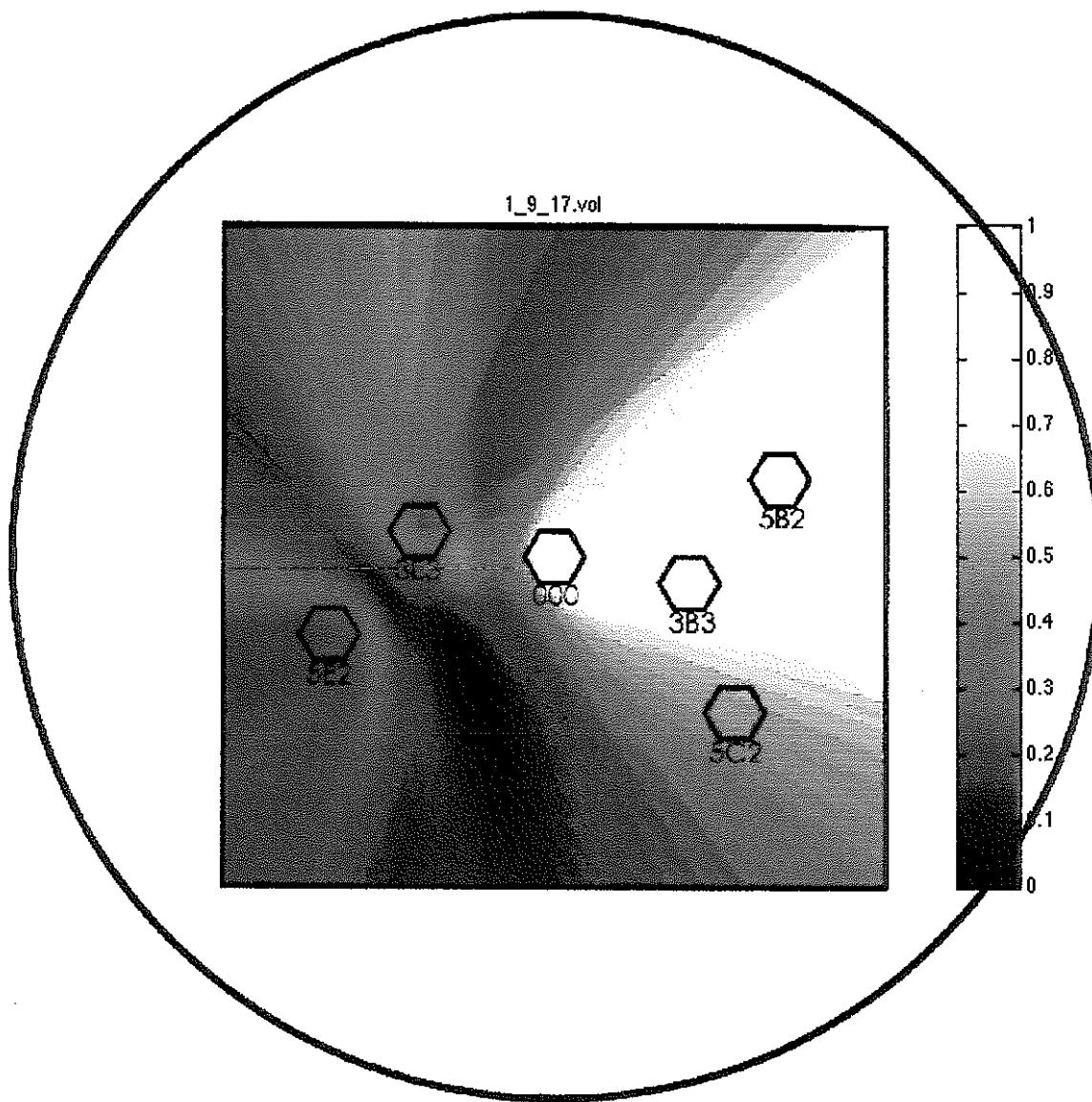
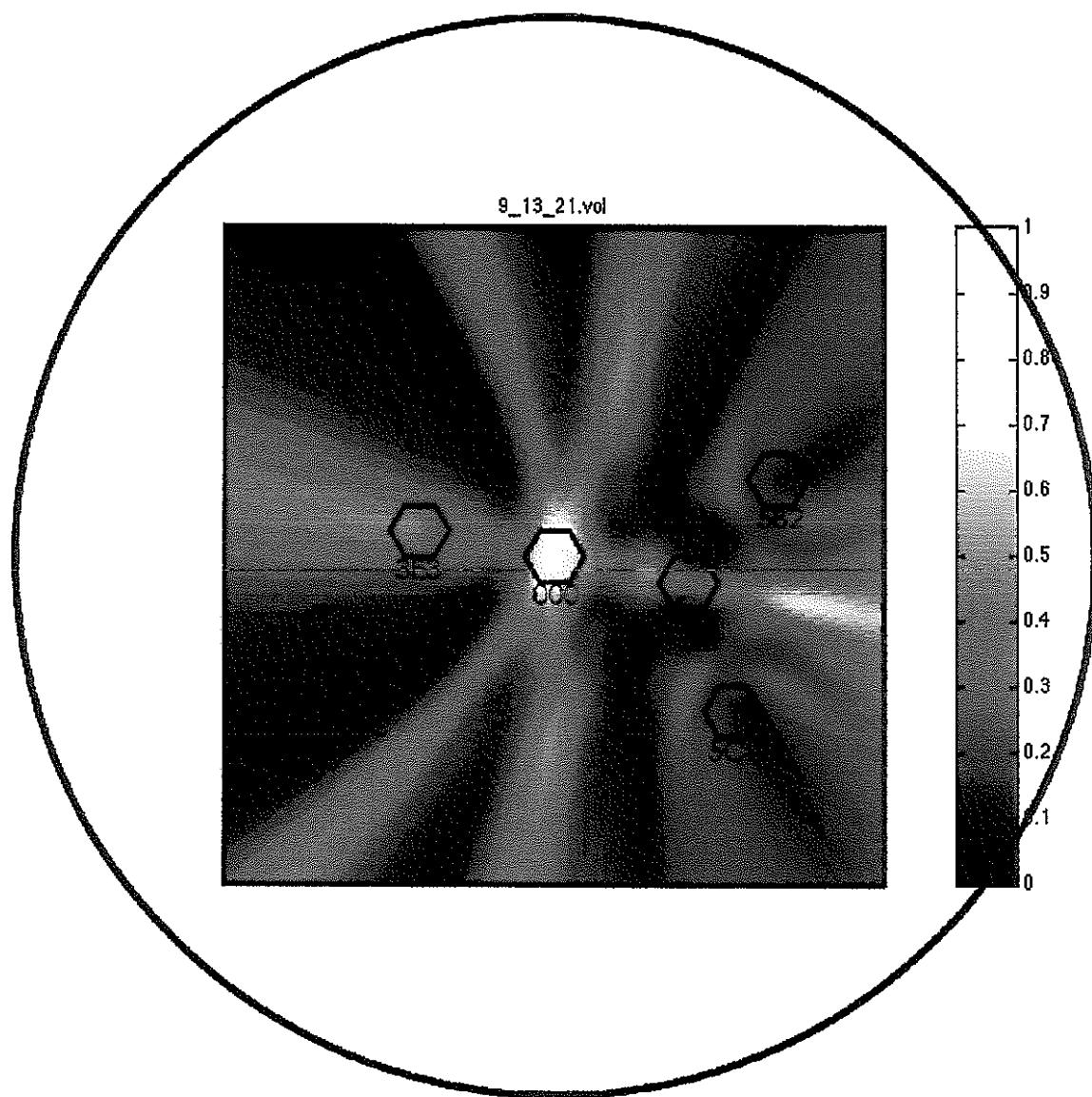


図3.4-2(2) 一点に自分自身の位置を含む三点を用いた開口合成値



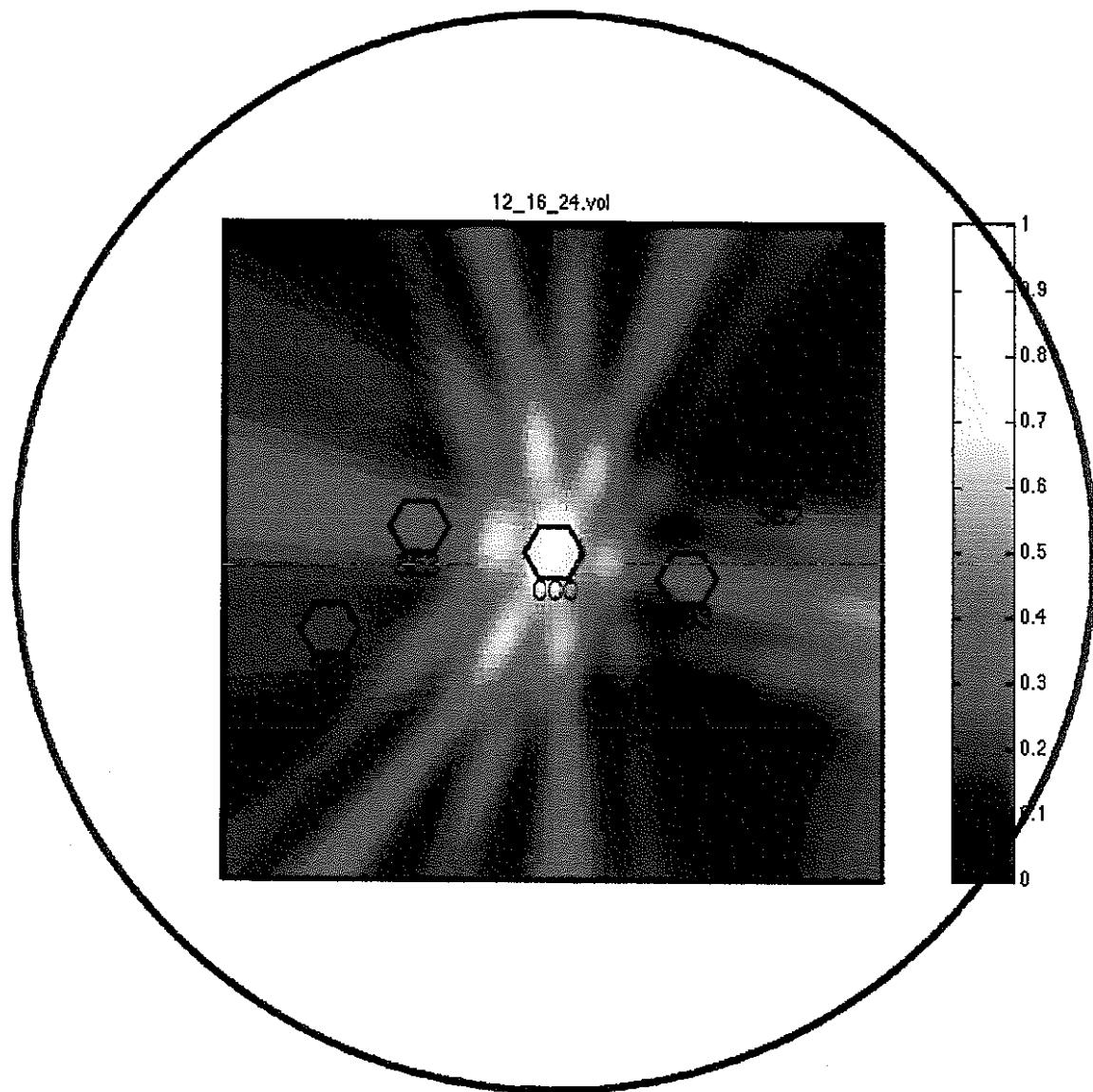
音響計挿入位置

3E3 : 0 mm

5B2 : 0 mm

5C2 : 0 mm

図3.4-2(3) 音源から離れた三点を用いた開口合成値



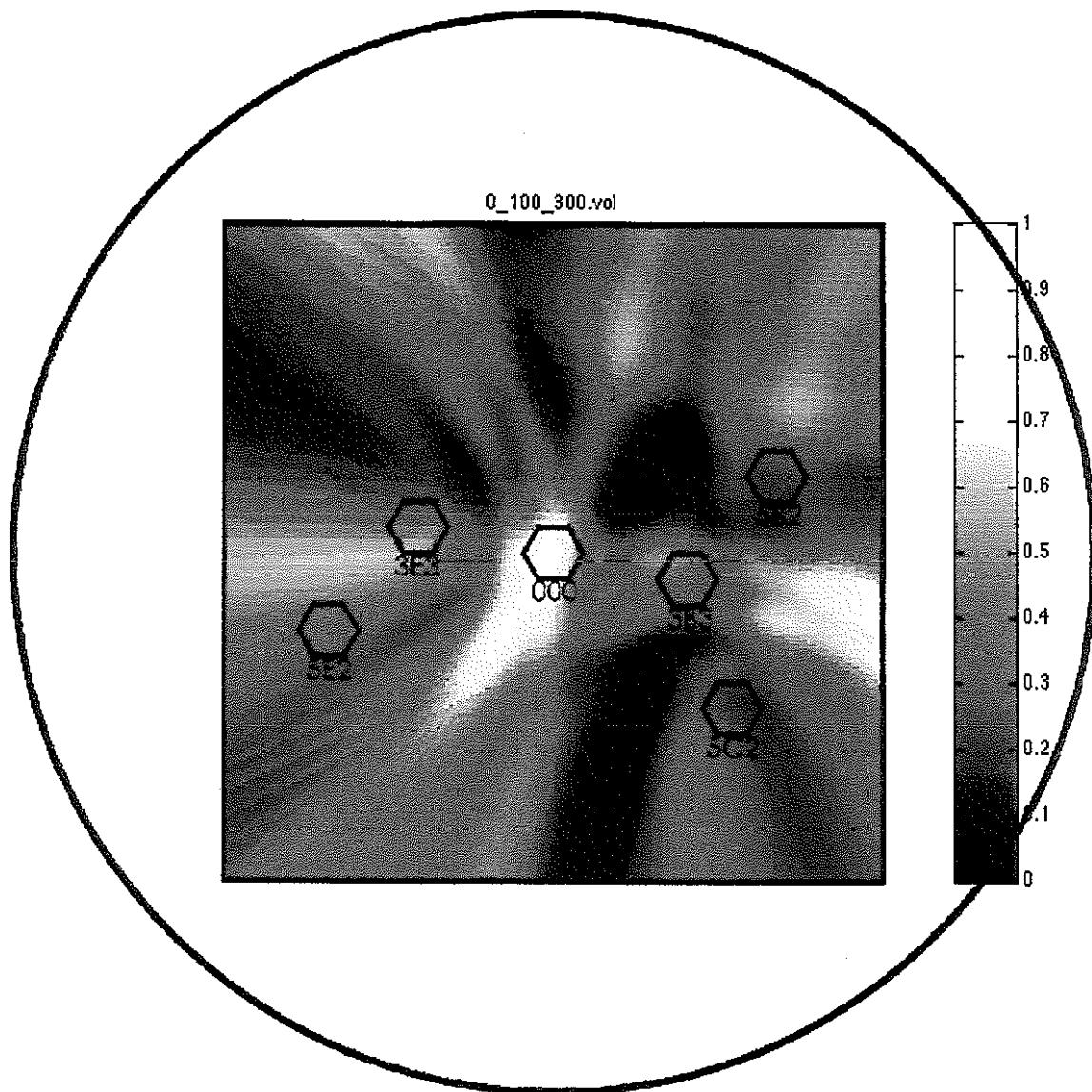
音響計挿入位置

3E3 : 300 mm

5B2 : 300 mm

5C2 : 300 mm

図3.4-2(4) 音源から離れた高さの同じ三点を用いた開口合成値 :



音響計插入位置

3E3 : 0 mm

5B2 : 300 mm

5C2 : 100 mm

図3.4-2(5) 音源から離れた高さの違う3点を用いた開口合成値

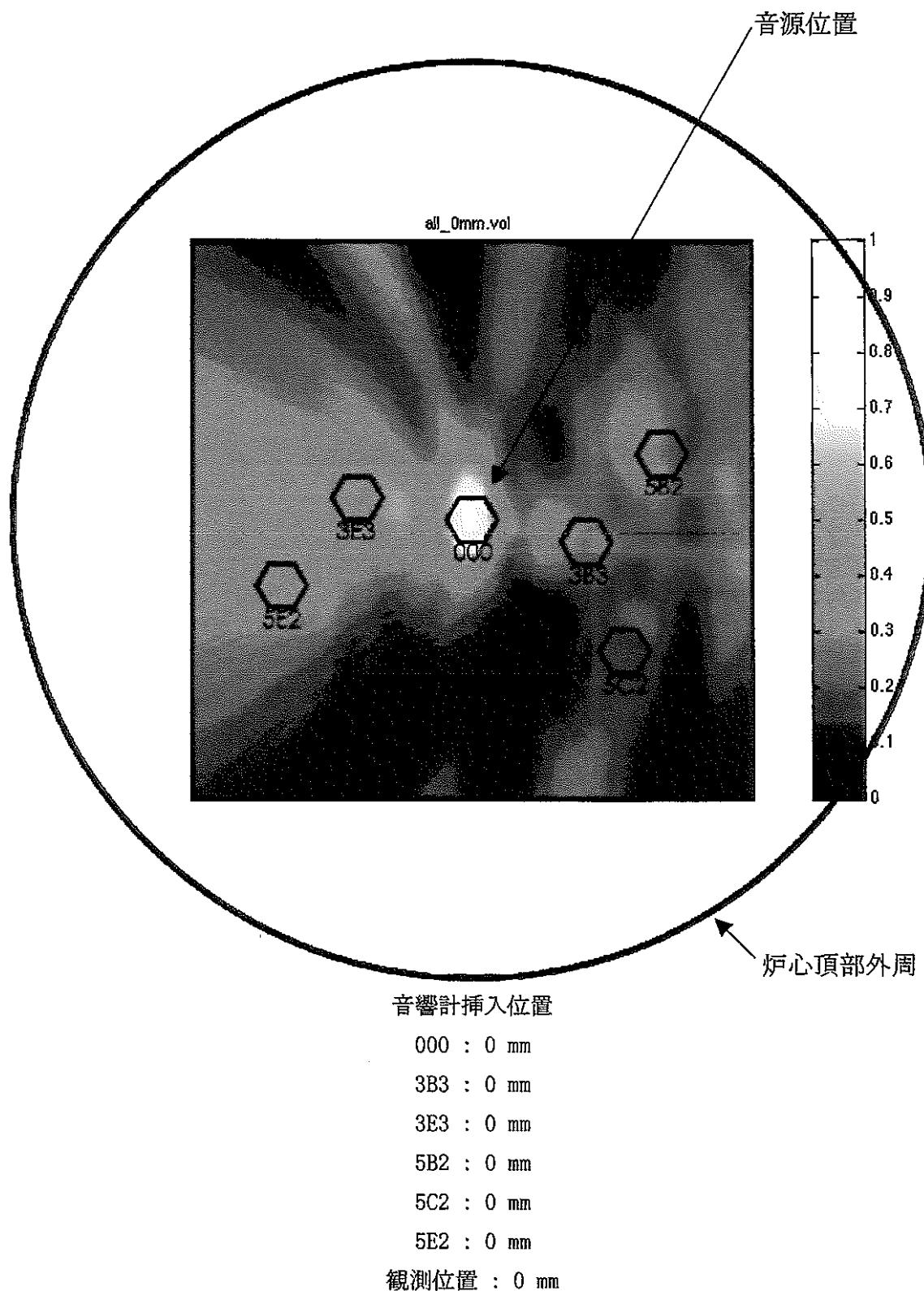


図 3.4-2(6) 同一平面内の多くの測定点からの開口合成値

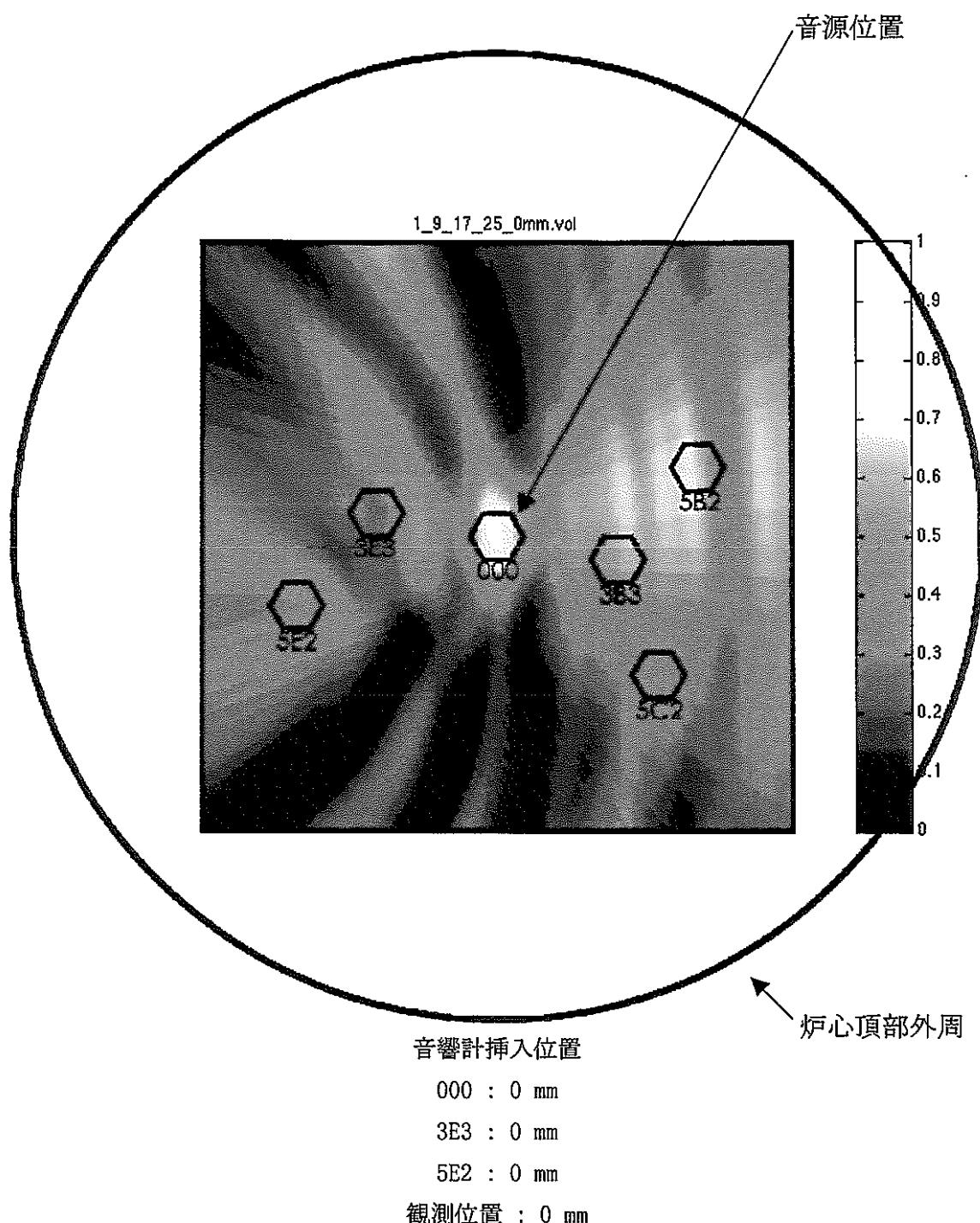


図 3.4-2(7) 一点に自分自身の位置を含む四点を用いた開口合成値

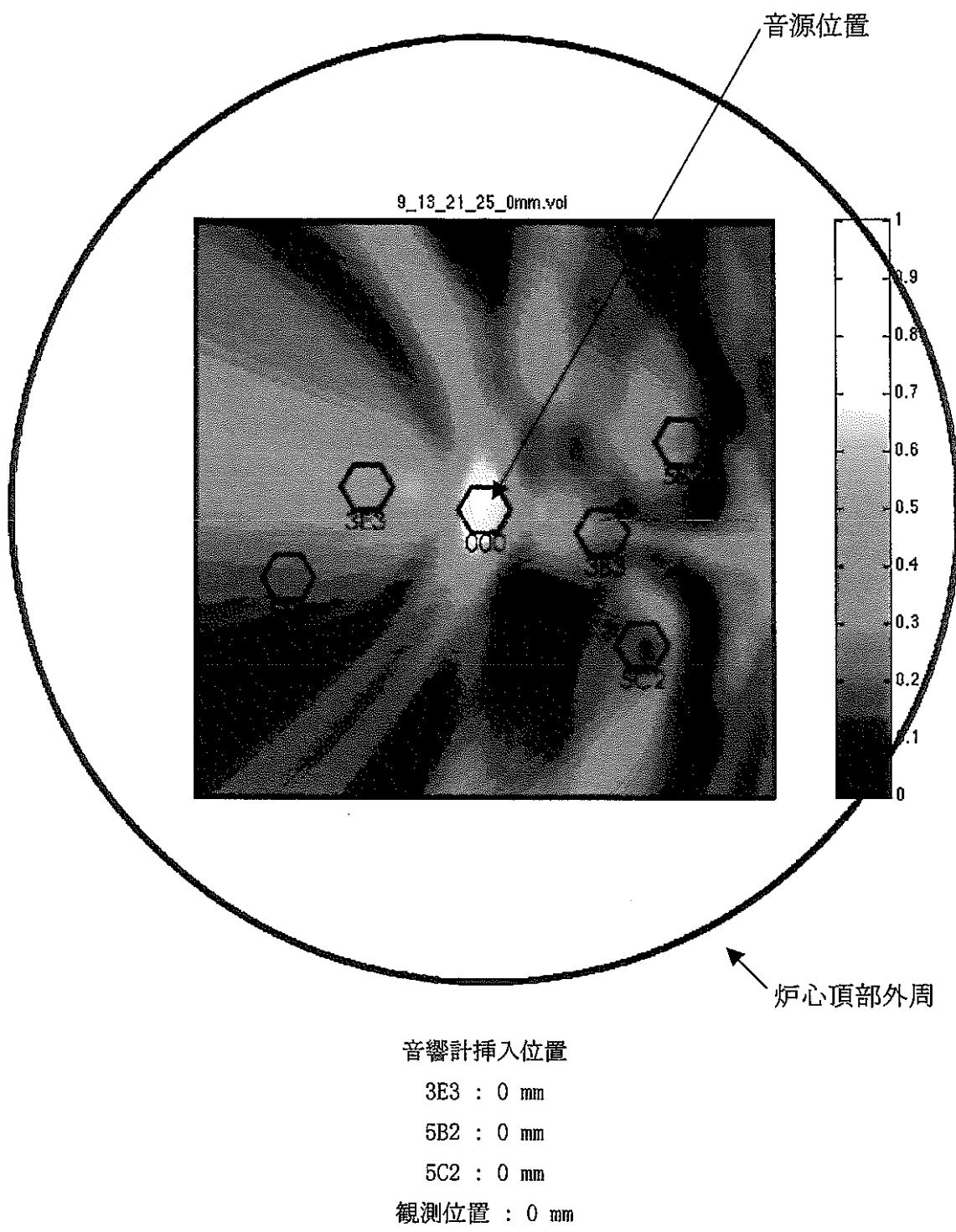
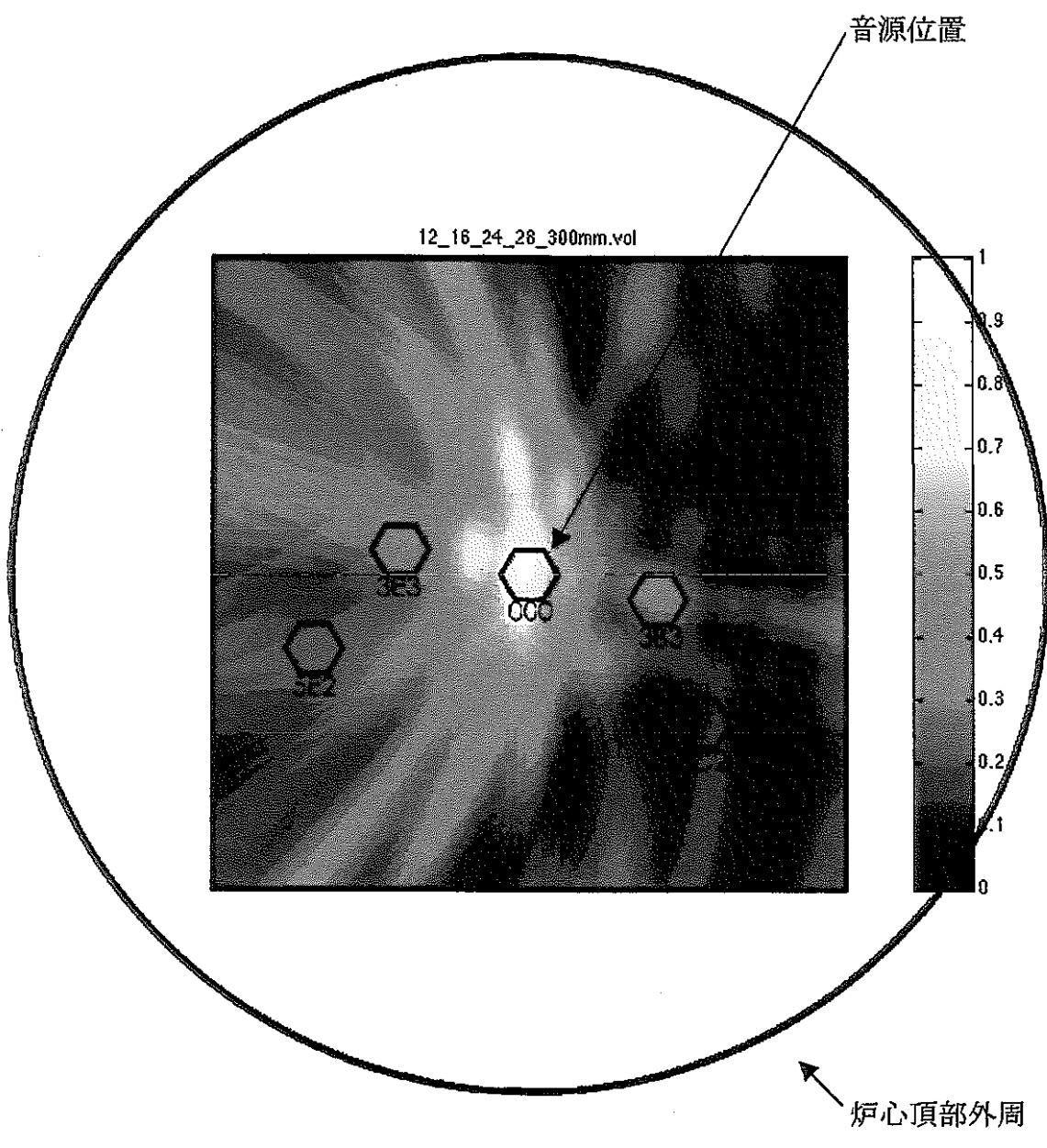


図 3.4-2(8) 音源から離れた四点を用いた開口合成値



音響計挿入位置

3E3 : 300 mm

5B2 : 300 mm

5C2 : 300 mm

観測位置 : 300 mm

図 3.4-2(9) 音源から離れた高さの同じ四点を用いた開口合成値

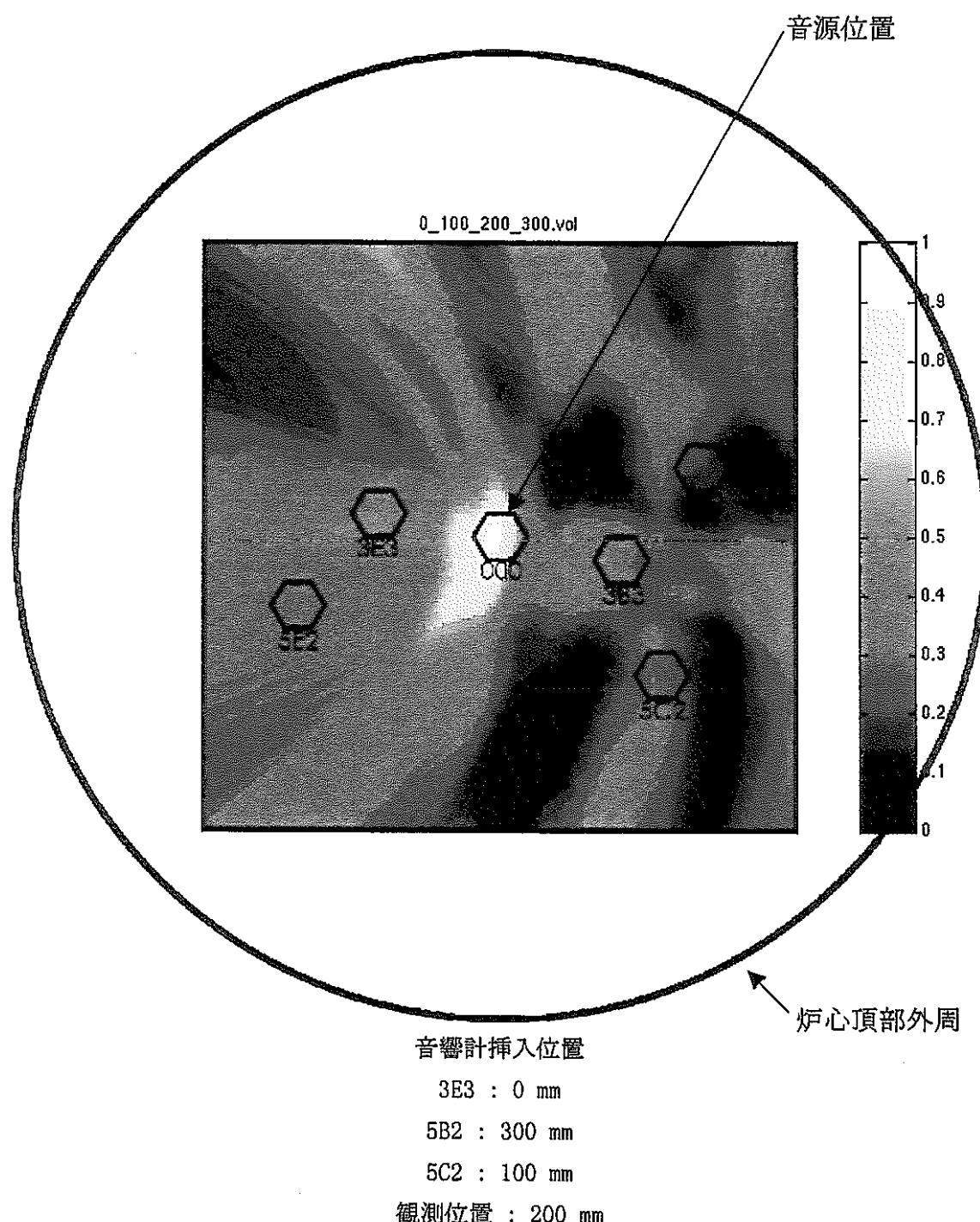


図 3.4-2(10) 音源から離れた高さの違う四点を用いた開口合成値

4. まとめ

高速増殖炉原子炉内において沸騰音を検出するための炉内音響検出計の成立性の評価のため、音源重畠法を用いた解析コード（SOSUM）により、集合体内部及び炉心頂部での音響伝播解析を行った。解析のモデルにおいて、燃料ピンに巻かれているワイヤの音響伝播への影響を確認するため、ワイヤをモデル化し解析を実施した。その結果、燃料集合体内部の音響伝播に対して燃料ピンに巻いたワイヤーが影響を及ぼす割合は最大6%程度と小さいことが解った。その理由は、燃料集合体内部を伝播している沸騰音の波長と比較して、ワイヤーの太さが非常に細く無視できるからであり、この結果から、沸騰音はプレナム部で測定可能であると思われる。シミュレーション結果で得られた、プレナム部各部での音圧値を用いて、音源となっている燃料集合体の位置同定性能を検討した結果、4点程度の計測点で1点を音源点に近く配置することが必要と思われる。

なお、本作業におけるシミュレーションは、理想的な状態(音源が白色雑音、外部雑音が無い)で行われたため実機への適用にあたっては以下の点について考慮することが必要である。

①音源の性質、特に音源の強度と周波数特性の把握が重要である。音源の強度は、プレナム部で測定する場合に、測定可能かどうかを決める重要な値である。また周波数特性は、沸騰点を同定するのに分解能として効いてくるだけでなく、外部雑音との競合となる場合でも、周波数の違いから沸騰音を分離できる可能性が有る。

②外部雑音の特性の把握が重要である。外部雑音の振幅が大きく、周波数特性が広いほど、沸騰音の検出は難しくなり高度の信号処理技術が要求されるようになる。

以上の2点を把握するためには、実験の音響データを取得し、バックグラウンド信号を評価することが必要である。その結果に基づき信号処理方法を具体化し、検出性能をシミュレーション等により評価してゆくことが今後必要と考えられる。

謝 辞

本検討にあたり、適切なご指導をいただいた実験炉部 技術課 市毛 聰 副主任研究員に感謝の意を表します。

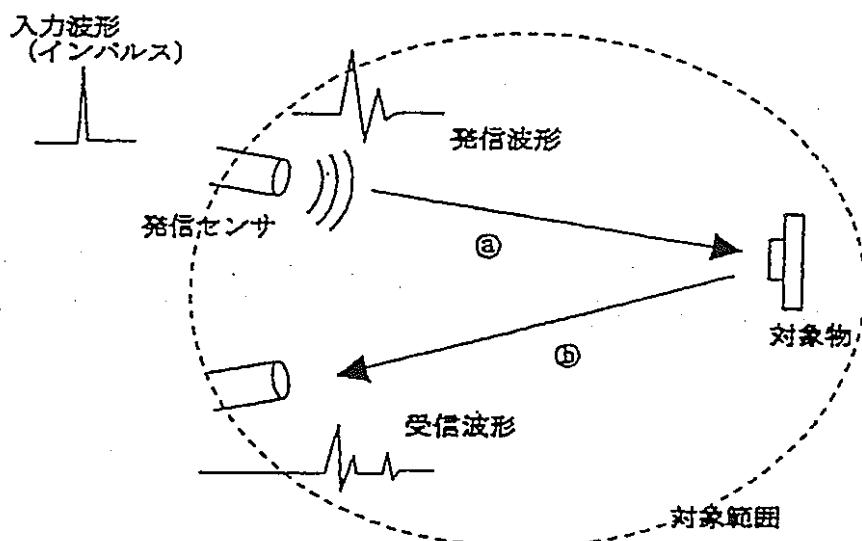
以 上

付録 音源重畠法による音響伝播解析コード (SOSUM) の概要

液体 (N_a) 中で超音波発信センサからの発信波形を音源として、測定対象物に反射し受信センサに戻ってくるまでの音響伝播をシミュレートする数値計算コードを開発している。

計算には音源重畠法を用い、以下の手順で行う。

- ④ 真の音源（発信センサ）から対象物を含む境界（反射）点の音響伝播（音圧）の時刻歴（境界音源分布）を計算する。
- ⑤ 次に境界音源分布から観測点（受信センサ）の音圧を各々計算し、受信波形を得る。



現在、音源重疊法の基本アルゴリズム部分の開発を完了している。音源重疊法の原理を以下に示す。

良く知られているように、音波は減衰の無い均一の媒質場では、その波形をくずさず、一定速度で伝わっていく。仮に点音源からの放射だとするとその波形は

$$P(\vec{r}, t) = \frac{f(\vec{r} - ct)}{|\vec{r}|}$$

と表せる。もっと一般的に面からの放射音源を考えると、

$$P(\vec{r}, t) = \frac{-1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial t} \int d\vec{s}' \frac{V_n(\vec{r} - \vec{r}') + c(t - t')}{|\vec{r} - \vec{r}'|}$$

である。ここで V_n を面の垂直方向速度として他に音源が何もないとき、この式は正確な平面からの音の放射特性を示している。そこで実際の問題にこの式を当てはめる事を考える。現実の問題に於いては、多数の音源及び境界条件から定まる反射面に依って問題が構成されている。そこで音源を含むすべての境界面を微小分割する。微小分割する面の大きさは、伝播してそこに到着する音波の波長より充分小さいとする。するとその微小分割された境界面に到着する音波の音圧はほとんど一様と見なせるであろう。そのような仮定の下に、すべての微小分割された境界面要素各々が、次のような音波を放射していると仮定する。

$$P(\vec{r}, t) = \sum_n P_n(\vec{r}, t)$$

$$P_n(\vec{r}, t) = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial t} \int_n d\vec{s}' n \frac{f_n(\vec{r} - \vec{r}' + c(t - t'))}{|\vec{r} - \vec{r}'|}$$

ここで、 f は境界条件から定まる任意の強度を持つ振幅である。また r は、音波の届いた位置を示し、 r' は音源を与えた微小境界面内の位置を示している。

次に境界条件から、任意振幅 f を次のように定める。

a. 速度境界条件

ある実際に計測する事が出来る速度 U が与えられた境界面 $r'j$ を考える。

この面から放射される、音圧を $P_{r'j}$ とする。さらに、他のすべての微小境界要素からその面に入射してくる、音波の音圧を $P_{i'j}$ とする。 $P_{i'j}$ は、 $r'i$ の要素面以外の

すべての要素面から放射されて \vec{r}' の要素面に到達する音圧の和として表せる。

$$\frac{\partial U}{\partial t} \Big|_{\vec{r}=\vec{r}_j} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial z} P_r(\vec{r}, t) - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial z} P_i(\vec{r}, t) \Big|_{\vec{r}=\vec{r}_j}$$

この入射音圧と、その面から放射する音圧の和の速度成分が、その境界面の実際
に計測される、速度と一致しなければいけないから

$$\frac{\partial U}{\partial t} \Big|_{\vec{r}=\vec{r}_j} = \frac{\partial V_j(\vec{r}-\vec{r}_j, c(t-t'))}{\partial t} \Big|_{\vec{r}=\vec{r}_j} - \sum_{n \neq j} \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P_n(\vec{r}, t)}{\partial z} \Big|_{\vec{r}=\vec{r}_j}$$

という、境界値方程式を得る。特に剛体壁（完全反射）の時は $U=0$ である。

b. 音圧境界条件

水中を伝播する音波が、大気と接触するような境界条件を考えよう。前と同じよ
うに P_i' をその微小境界面に入射してくる音圧で、 P_r' をその面から放射する音圧
だとすると、その面での境界条件は大気圧を P として以下のようになる。

$$P \Big|_{\vec{r}=\vec{r}_j} = P(\vec{r}, t) \Big|_{\vec{r}=\vec{r}_j} + P_i(\vec{r}, t) \Big|_{\vec{r}=\vec{r}_j}$$

$$\begin{aligned} P_i(\vec{r}, t) &= \int d\vec{s}'_j \frac{f_j(\vec{r}-\vec{r}_j, c(t-t'))}{|\vec{r}-\vec{r}'|} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{|\vec{r}-\vec{r}_j|} \Big|_{\vec{r}=\vec{r}_j} \\ &= f_j(t-t') \end{aligned}$$

c. 任意インピーダンス Z を与えた境界条件

一般的な境界条件として、インピーダンスを与えた境界を考えよう。この境界で
は、その境界面上で平面波入射に対する、全音圧と、全速度との比が与えられてい
る。それを実際の任意入射波について解き直すと

$$f(\vec{r}, t) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int d\omega \int d\vec{k}_s \frac{e^{i\vec{k}_s \cdot \vec{s} - i\omega t} P_i(\vec{k}_s, \omega) \left(1 - i \frac{k_z}{\rho_0} z(\vec{k}_s, \omega) \right)}{\left(1 + i\omega \frac{k_z}{\rho_0} z(\vec{k}_s, \omega) \right)}$$

となる。

以上のように、すべての微小境界要素一つ一つに、その各々の境界条件を与えて、任意振幅 f をその境界値方程式から定めれば、任意位置の音圧は次の式から求める事が出来る。

$$P(\vec{r}, t) = \sum_n P_n(\vec{r}, t)$$