

東京大学博士論文

# 障壁による回折音の能動制御に関する研究

1995 年 1 月

尾 本 章



# 障壁による回折音の能動制御に関する研究

尾本 章

## 目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究方針と本論文の構成	4
参考文献	8
第2章 半無限障壁による回折場	11
2.1 概要	11
2.2 音源が線音源の場合	11
2.2.1 厳密解	12
2.2.2 漸近解	16
2.2.3 数値計算例	19
2.3 音源が点音源の場合	24
2.3.1 厳密解	24
2.3.2 漸近解	28
2.3.3 数値計算例	30
2.4 表面の音響特性を変化させた場合	34
2.4.1 音源が線音源の場合	35
2.4.2 音源が点音源の場合	41
2.4.3 数値計算例	44
2.5 まとめ	52
参考文献	53
第3章 能動制御の適用	55
3.1 概要	55
3.2 回折音消去の原理	55
3.3 音源が線音源の場合	60
3.3.1 制御の方法及び2次音源が持つ係数について	60
3.3.2 2次音源配置位置が制御の効果に与える影響	61
3.3.3 数値計算例	64
3.3.4 障壁表面の音響特性を変化させた場合	70
3.4 音源が点音源の場合	75
3.4.1 制御の方法	75
3.4.2 2次音源群が持つ係数について	75



3.4.3	エッジ上キャンセルポイントの間隔について	76
3.4.4	2次音源群配置位置が制御の効果に与える影響	78
3.4.5	数値計算例	79
3.4.6	障壁表面の音響特性を変化させた場合	86
3.5	音響インテンシティを用いた制御効果の解釈について	91
3.5.1	音源が線音源の場合	91
3.5.2	音源が点音源の場合	110
3.6	まとめ	123
	参考文献	125
<b>第4章</b>	<b>実験的検討</b>	<b>126</b>
4.1	概要	126
4.2	2次元音場における実験	126
4.2.1	2次元音場自由音場の実現	126
4.2.2	実験条件	131
4.2.3	2次音源振幅・位相の決定方法	132
4.2.4	実験結果及び考察	133
4.2.5	音源信号にノイズを用いた場合	140
4.3	3次元音場における実験	144
4.3.1	実験条件	144
4.3.2	適応信号処理の導入	145
4.3.3	実験結果及び考察	147
4.3.4	数値計算結果との比較検討	156
4.3.5	多数点消去のための複数システム導入について	162
4.4	まとめ	163
	参考文献	165
<b>第5章</b>	<b>反射性地面の影響を考慮した場合</b>	<b>166</b>
5.1	概要	166
5.2	問題のモデル化	166
5.3	2次元音場における考察	168
5.3.1	2次音源が持つ係数について	168
5.3.2	地面が制御の効果に与える影響	169
5.3.3	複数の2次音源を用いる方法の有効性	174
5.3.4	数値計算例	176
5.4	2次元音場における実験	179
5.4.1	実験条件	179
5.4.2	実験結果	180
5.5	3次元音場への拡張	182
5.5.1	2次音源群が持つ係数について	182
5.5.2	地面が制御の効果に与える影響	183
5.5.3	複数のシステムを用いる方法の有効性及び数値計算例	187
5.5.4	付加的な2次音源を用いない反射音成分除去の方法	191

5.6	3次元音場における実験	193
5.6.1	実験条件	193
5.6.2	実験結果	194
5.7	まとめ	200
<b>第6章</b>	<b>屋外における実験</b>	<b>202</b>
6.1	概要	202
6.2	実験1の条件	203
6.2.1	障壁、音源配置及び受音点	203
6.2.2	適応信号処理システムについて	207
6.2.3	音源信号及び測定方法について	208
6.3	実験1の結果及び考察	209
6.4	実験2の条件	230
6.4.1	騒音源について	230
6.4.2	音源配置及び受音点	232
6.4.3	音源信号の検出方法	235
6.5	実験2の結果及び考察	241
6.5.1	障壁が有限長であることの影響及びその対策について	241
6.5.2	遠方受音点での制御効果	247
6.6	風や気温の変化がシステムの収束に及ぼす影響	252
6.6.1	問題のモデル化	253
6.6.2	結果及び考察	254
6.6.3	適応を途中で打ち切る方法の効果	264
6.7	まとめ	267
	参考文献	272
<b>第7章</b>	<b>総括</b>	<b>273</b>
<b>謝 辞</b>		<b>279</b>



## 第 1 章

### 序 論

#### 1.1 研究の背景

障壁は、騒音の伝搬を制御する上での基本的な方法であり、新幹線に代表される鉄道騒音、道路交通騒音、工場騒音などの制御に数多く適用されている。またそれ故、制御効果、つまり騒音の減衰量を予測する方法も、前川チャートに代表される厚さを無視できる半無限障壁に対するもの [1, 2] から、厚みの効果を考慮したもの [3]、また楔型 [4, 5] や複数の Edge を持つような形態のもの [6, 7] まで、様々なものが与えられている。従来、これら騒音制御の為の障壁は、騒音源のパワーレベルの増加に伴って、主としてその高さを上げる方法で対処してきた。特に道路交通騒音に対処するための防音壁では、近年の交通量の増加、車両の高速化に伴って、現在 3 m, 5 m といった高さが普通のこととなっており、更に 8 m, 10 m というものまで存在する。これは確かに有効な方法であるが、本格的に高くするには、例えば以下に示すような制限があり、明らかに限界が存在する。

- 構造的な強度不足から障壁の基礎部分から考え直さねばならない。これは現実的な施工の困難さ、コストの問題を伴う。
- 日照権の問題など周囲の環境に与える影響が大きい。
- 例えば、“車窓からの景色を楽しむ”といったことは不可能となり、人間に対する心理的な側面からも望ましいことではない。

このため、高さを上げることなく障壁自体の遮音性能を改善するために、以下に示すような方法が試みられている。



まず、現在実際の高速道路における防音壁に用いられている表面を吸音性にする方法である。藤原ら [8] は障壁を吸音性とする事による遮音量の増分を、回折角及び障壁表面の反射係数をパラメータとして図表の形で与えている。これによれば、効果は音源及び受音点の位置関係で変化する。回折角が大きいほど、また障壁表面の反射係数が小さいほど（つまり吸音率が大きいほど）その効果は大きいと予測されている。井清ら [9] は、Edge に沿って音源側に幅のせまい吸音材を取り付けたときの障壁の減音効果に関して、ノイズを音源として実験的に検討している。その結果、障壁の減音効果は Edge 近傍の吸音処理に大きく依存しているというデータを示している。Rawlins [10] は障壁の両面を井清らの実験と同様に吸音処理したときの減音効果に関して、入射波を平面波として近似解を導出し、幾つかの条件に対する計算を行っている。結果として、Edge 近傍を波長程度の幅で吸音処理すれば、全面を吸音処理した場合とほぼ同等の減音効果が得られることを示している。湯沢ら [11, 12] は Rawlins の結果を受けて、障壁を障壁の片面が吸音性である場合、あるいは Edge 近傍のみを吸音処理した場合などの回折場を近似的に表し、吸音の効果を実定化している。この様に吸音性の障壁による遮音性能の上昇は詳細に調べられており、その効果が期待されている。しかしその程度が余り大きくないため遮音設計段階で算入されないのが一般的となっている。

次に吸音性と同様障壁表面の音響特性によるものであるが表面をソフトにする方法がある。ソフトな条件とは、エネルギー的には完全反射であり位相のみが逆転して反射する（音圧反射率：-1）というものである。音源側、受音側双方共に完全にソフトな場合の回折場は、電磁波の回折問題において、完全導体の障壁に電気ベクトルが入射した場合の解として与えられている。空気中における音響問題で考えれば、境界条件としてのソフトな条件は考えにくい。空気よりも固有音響インピーダンスがはるかに小さい建築材料が考えられないからである。藤原ら [13-16] はこの条件を、障壁表面に 1/4 波長音響管を配置することにより近似的に実現し、その効果を検討している。半無限障壁を仮定した上での数値シミュレーション及び実験の結果によれば、回折角が大きく障壁に近い場所において、10 dB 以上という充分設計に算入され得る効果が得られている。しかし、音響管を使うことによる周波数選択性や、反射性地面の影響を考慮した場合の効果の減少など考慮すべき問題は多い。

音波の破壊的干渉を利用したものとして、飯田ら [17] は Edge 付近に長さの異なる 4 段構造の中空管群を取り付けた障壁を提案している。これは騒音源から放射される様々な波長の音波を屈折さらには干渉させ、また屈折波を遮断、吸音する小防音壁と組み合わせて高い防音効果を得よ

うというものである。実際の車両走行音を用いた実験では、単なる防音壁を用いた場合と比べて 5 - 8 dB(A) 程度の遮音改善が得られると報告されている。

このほか障壁の Edge が障壁による影の領域に対する仮想的な音源とみなせることに注目し、ここに吸音性円筒を取り付けたものが藤原ら [18, 20] によって考案され、一部実用化されている。この円筒の効果は吸音率が 1 に近いほど大きく、また回折角の大きな領域で顕著になると報告されている。また、実際の高速道路における実験も行われ、平均して 2 - 3 dB(A) 程度の効果が得られることが明らかになっているが、これは障壁の高さを 2 m 程度上昇させたことと等価である。現在では耐候性を考慮した円筒を用いて一部の高速道路において利用されている。

以上述べてきた様に、様々な障壁が考案され遮音効果の増大が期待されている。しかしこれらの方法はいずれもパッシブな方法を用いており、原理的に低音域になるほど効果は低くなる。また、例えば 10 dB 以上の効果が安定して得られる様な方法はほとんど実存しないのが現状である。

そこで、既存の防音壁のような高さを必要とせず、音源がわずかに隠れる程度の高さがあれば、つまり音源が直接見えさえしなければ、充分な遮音量が得られるような防音壁を開発することは非常に意義深いことと考えられる。本研究では、この目的のために障壁による回折音に対して能動制御を適用する。

周知のように、能動制御は 1930 年代からアイデアとして提唱され、60 年代、70 年代の理論的研究の時代を経て [21, 22]、現在では一部で実用化も行われている技術 [23] である。なお、本研究と同様、障壁による回折音を能動制御によって低減させる試みは既に伊勢らによって行われており、報告されている [24-27]。伊勢らの方法は、障壁自身に付加音源（2 次音源）を取り付け、障壁を越えて回折してきた音を音場内に設置したエラーセンサ（マイク）の出力を最小にするように制御するというものであるが、結果として周波数が低いほど制御が有効となる範囲が広く、その範囲は 2 次音源を中心とした扇型に広がること等が示されている。更に実騒音を想定したエアークンプレッサを音源とした実験や、複数の 2 次音源を用いた実験などから、回折音低減に対して能動制御は有効であり、例えばクーリングタワーによる騒音や、鉄道におけるレールの継目から生じる騒音などに適応可能であると結論している。なお、この方法に関して、低音域においては 2 次音源による音響エネルギーの吸収、中音域においては音響インピーダンスゼロ面によるエネルギーの反射によってその効果が得られているとの解釈が行われている [28]。

本研究においては、伊勢らの方法で音場内の特定の位置に設置されていたエラーセンサを障壁の Edge に設置し、更に付加音源（2 次音源）も障壁から離して音源側に設置する。第 2 章、第



3章において詳述するが、回折場、特に障壁によって影になる領域に対して、障壁の Edge はあたかも仮想的な音源の様に振舞う。本研究ではここに注目し、仮想音源である Edge での音圧を2次音源を用いてキャンセルすることにより、音場でのグローバルな減衰を得ることを試みる。

## 1.2 研究方針と本論文の構成

本論文は上述の方法、つまり障壁の Edge での音圧を2次音源によってキャンセルする方法の回折音低減に対する有効性を示すことを目的とし、更に制御の效果に影響を与える種々のパラメータの最適化の可能性、及び現実的な応用の可能性について、基礎的な検討を行ったものである。Fig. 1.1 に本論文の構成を示す。

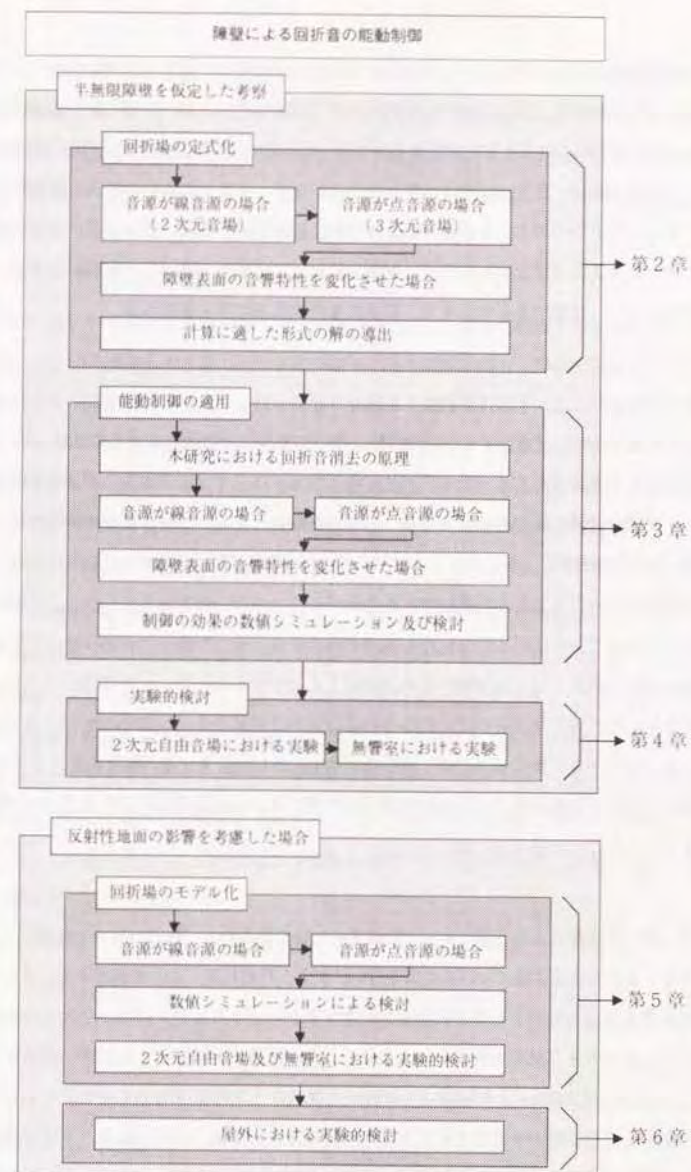


Figure 1.1: 本論文の構成



まず音場を2次元に限定し、しかも地面が存在しない場合で基本的な検討を行った後に3次元音場、更に地面が存在する場合に拡張する形式で議論を進めるが、併せて障壁表面の音響特性を変化させた場合についても適宜考察する。なお、本研究で扱う音源は2次元音場の場合線音源、3次元の場合点音源であり、障壁はいずれも厚さが無視出来る。あるいは波長と比較して十分に薄いと仮定したものである。2次元音場及び干渉性無限長線音源は、直接実際の音場に対応するものではなく現実的ではない。しかし、本研究においては問題を単純化し解析的な見通しを良くするためにしばしば用いるものとする。以下具体的に各章の構成を述べる。

第2章においては、本論文を通じて数値シミュレーションに用いる“厚みのない半無限障壁による回折場”について考察する。この問題に関しては既に今世紀初頭から多くの文献で論じられ、また幾つかの成書 [29] にもまとめられている。従ってここでは解の導出を詳述せず概説するにとどめ、実際に計算し易い形に整理することを主な目的とする。なお、剛な半無限障壁を仮定した場合、解を「厳密解」、[漸近解1]、[漸近解2]という3種類に分類する。「厳密解」は回折音場の内音源を除くいたるところで連続であり発散することのない解である。しかし、半無限積分の形式で与えられており実際の計算速度の点で不利である。そこで通常の音場計算及び後述する能動制御の効果の計算には、「厳密解」との差がほとんど認められないことを確認の上、主に「漸近解1」を用いる。但し Edge のごく近傍など漸近解では計算できない条件の場合には「厳密解」を用いるものとする。「漸近解2」は、回折場が Edge から放射される円筒波の形式で表されており、本研究における能動制御による回折音消去の原理、及び2次元音源配置位置最適化の可能性を明確化するためにここで導出しておく。

第3章では実際に2次元音源によって制御された場を定式化し、制御の効果を数値シミュレーションする。まず2次元音場において考察を行い、制御が有効に働くことを確認する。また、制御の效果に影響を与えるものとして2次元音源の配置位置が考えられるが、音場が2次元の場合には、より広く、より大きな減衰を得るという意味でこれが最適化出来ることを示す。音場を3次元に拡張した場合には、Edge 上の複数点での音圧を複数の2次元音源を用いてキャンセルすることにより、制御を有効に働かせることを試みる。更に複数点の間隔と波長の関係、2次元音源群の配置位置と制御効果の関係について考察する。また能動制御の効果が得られる物理的な要因を探るために、音響インテンシティを用いてエネルギーの観点から考察を行う。

第4章では、制御の效果を実験的に検証する。近似的な2次元自由音場、及び無響室において実験を行い、数値シミュレーションによって予測される様な制御の効果が得られるのか。また2次元音源配置位置などの変化が制御効果にどう影響するかを考察する。2次元音場において音源信号としてノイズを用いる場合、及び3次元音場における実験に際しては適応信号処理を導入し、2次元音源(群)に持たせるキャンセルのための振幅及び位相を決定する。

第5章では、反射性地面の影響を考察する。地面が剛であり、鏡面反射をするものと仮定すれば、地面による音源の鏡像を考えることにより問題を半無限障壁の場合と同様に扱うことが出来る。ここではまず地面が制御の效果に及ぼす影響を数値シミュレーションによって考察し、2次元音源位置などの条件によっては制御効果が得られない場合も存在することを示す。次いで地面からの反射音のみをキャンセルするために付加的な音源を地面に設置することを試み、その効果を検討する。また、付加的な音源の代わりに吸音材を用い、実験的にその効果を検証する。

第6章では、現実の騒音制御に近い状況を想定し、屋外において二つの実験を行う。実験1においては、騒音源をスピーカから放射されるオクターブバンドノイズとし、二つの多チャンネル適応信号処理システムを用いて Edge 上合計10ポイントにおける音圧をキャンセルすることで、広い領域での減衰を得ることを試みる。実験2においては、騒音源を実音源(プロワァー)とし、より現実的な条件での考察を行う。また、特に屋外における適用で問題となるであろう風の影響について、適応信号処理を模擬した数値シミュレーションによって考察する。更に、実験及び数値シミュレーション結果を通じて、回折音に能動制御を適用する方法の有効性、実用化に対するこれからの問題点などについて述べる。



## 参考文献

- [1] 前川純一, "障壁(塙)の遮音設計に関する実験的研究" 音響学会誌 vol.18, pp.187-196, 1962
- [2] 川井孝雄, 伊藤 毅, "半無限障壁による回折音場" 音響学会誌 vol.32, pp. 319-327, 1976
- [3] 藤原恭司, 安藤四一, 前川純一, "厚みのある障壁による騒音減衰(障壁による騒音制御に関する研究 その1)" 音響学会誌 vol.31, pp.725-729, 1975
- [4] F. Oberhettinger, "Diffraction of Waves by a Wedge," Commun. Pure Appl. Math. vol.7, pp.551-563, 1954
- [5] 川井孝雄, "ウェッジによる回折音場の漸近解に関する検討" 音響学会誌 vol.35, pp.544-553, 1979
- [6] D. C. Hothersall, S. N. Chandler-Wilde, M. N. Hajmirzae, "Efficiency of Single Noise Barriers" J. Sound Vib. vol. 146, pp.303-322, 1991
- [7] D. C. Hothersall, D. H. Crombie, S. N. Chandler-Wilde, "The Performance of T-Profile and Associated Noise Barriers" Applied Acoustics, vol.32, pp.269-287, 1991
- [8] 藤原恭司, 安藤四一, 前川純一, "吸音性障壁による騒音減衰(障壁による騒音制御に関する研究 その2)" 音響学会誌 vol.32, pp.430-435, 1976
- [9] 井清武弘, 清正 稔, 田中 誠, "吸音性障壁の効果に関する実験" 音講論集, pp. 597-598, 1976.10
- [10] A. D. Rawlins, "Diffraction of Sound by a Rigid Screen with an Absorbent Edge" J. Sound Vib., vol.47, pp. 523-541, 1976
- [11] 湯沢睦茂, "吸音性半無限障壁による音波の回折減衰" 音響学会誌 vol.33, pp.664-666, 1977
- [12] 湯沢睦茂, 鈴木博司, "エッジに平行な狭い領域を吸音処理した障壁の減音効果" 音響学会誌 vol.41, pp.248-255, 1985
- [13] K. Fujiwara, "Sound shielding efficiency of a barrier with soft surface," Proc. Inter Noise'90, pp.343-346, 1990
- [14] 藤原恭司, "ソフトな表面を持つ障壁の遮音性能" 騒音制御工学会技術発表会講論集, pp. 265-268, 1990
- [15] 藤原恭司, "ソフトな表面を持つ障壁の遮音性能 その2" 騒音制御工学会技術発表会講論集 pp. 73-76, 1991
- [16] 藤原恭司, "ソフトな表面を持つ防音壁について" 音響学会騒音研資 N-92-07, 1992
- [17] 飯田一嘉, 水野恵一郎, 近藤和夫, 野本貞夫, "干渉型防音装置" 音響技術 Vol. 13, No.2, pp. 75-80, 1984
- [18] 藤原恭司, "吸音性円筒エッジをもつ防音塙の遮音性能について" 騒音制御工学会技術発表会講論集, pp. 252-260, 1987
- [19] 田矢晃一, 金沢純一, 山本貞平, 田中克則, 藤原恭司, "回折エッジに吸音材を取り付けた遮音塙の効果について" 音響学会騒音研資, N-88-07-03, 1988
- [20] Kyoji Fujiwara, Naoyuki Furuta, "Sound shielding efficiency of a barrier with a cylinder at the edge" Noise Control Engineering Journal, vol. 37, No.1, pp.5-11, 1991
- [21] Ken'iti Kido, "From one point control to three dimensional control," Proc. 1991 Acoust. Soc. Jpn. Int. Symp. Active Control of Sound and Vibration, pp. 1-10, 1991
- [22] 浜田晴夫, 三浦種敏, "騒音のアクティブコントロールに関する現状と課題" 信学技報, EA88-25, 1988
- [23] 例えば, M. Takahashi, R. Gotohda, T. Yamadera, K. Asami, "Broadband active noise control of air-conditioning duct system in auditoriums" Proc. 1991 Acoust. Soc. Jpn. Int. Symp. Active Control of Sound and Vibration, pp. 273-278, 1991
- [24] 伊勢史郎, 金井昇弘, 矢野博夫, 橋秀樹, "塙の遮音に対するアクティブ制御の試み" 騒音制御工学会技術発表会講論集 pp. 77-80, 1989
- [25] 伊勢史郎, "建築音響におけるアクティブノイズコントロールに関する研究" 東京大学博士論文, 1990
- [26] Shiro Ise, Hiroo Yano, Hideki Tachibana, "Applocation of active control to noise barrier" Proc. 1991 Acoust. Soc. Jpn. Int. Symp. Active Control of Sound and Vibration, pp.309-314, 1991
- [27] Shiro Ise, Hiroo Yano, Hideki Tachibana, "Basic study on active noise barrier," J. Acoust. Soc. Jpn. (E), vol. 12, pp. 299-306, 1991
- [28] 伊勢史郎, 橋秀樹, "エネルギーを視点としたアクティブ制御の分類" 音響学会講論集, pp. 689-690, 1993

- [29] 例えば, J. J. Bowman, T. B. A. Senior and P. L. E. Uslenghi, *Electromagnetic and Acoustic Scattering by Simple Shapes* North-Holland Publishing Co., Amsterdam, 1969

## 第 2 章

### 半無限障壁による回折場

#### 2.1 概要

本章では, 本論文を通じて用いる回折音場の解を定式化することを目的とし, 無限に薄い半無限障壁による回折場の計算方法について考察する. この問題に関しては, 平面波入射に対する Sommerfeld の波動関数 [1] をはじめ, Carslaw [2], Macdonald [3], Clemmow [4, 5] らによって厳密解, 漸近解など様々な形で解が与えられており, 更にそれらの精度に関する詳細な検討 [6] も行われている. 本論文では音源が線音源及び点音源の場合を扱うが, ここでは Clemmow によって示された方法を用いて, 数値計算可能な厳密解及びその漸近解の導出を概説する. この方法は円筒波, あるいは球面波を平面波の波束の形で表現し, 平面波入射に対する解に同様な演算を施すことにより等価的に解を求めるものである.

なお, 障壁表面の音響的特性をソフト, 吸音性に変化させた場合の回折場についても併せて考察するが, この場合には Oberhettinger [7] によって示された任意の開き角を持つ楔型障壁に対する解を応用する. 楔型障壁による解は, その開き角を  $2\pi$  とすればそのまま半無限障壁による解となるものであり, 回折問題において非常に重要かつ一般的なものである.

#### 2.2 音源が線音源の場合

ここでは無限長線音源に対する回折場の解の導出を Clemmow [4, 5] による方法に従って概説する. 音源が無限長線音源である場合, 問題を 2 次元音場で扱うことが出来る. そこで, Fig. 2.1 に示す様な 2 次元音場を仮定し  $x=0, y \leq 0$  で障壁を表す. また, 便宜上同じく Edge を原点とする円筒座標系を考え, 音源  $S$  は  $(r_0, \theta_0)$  に, 受音点  $P$  は  $(r, \theta)$  に存在するものとする. ちなみに円筒座標系  $(r, \theta)$  で障壁を表現すれば  $\theta = 0$  (音源と同じ側の表面),  $\theta = 2\pi$  (音源と反対



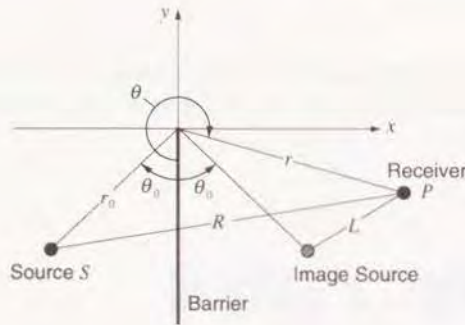


Figure 2.1: 2次元音場における障壁, 音源S, 受信点P

側の表面)である。

### 2.2.1 厳密解

Fig. 2.1 で表される音場において、音源が時間項  $e^{-j\omega t}$  を省略して、(2.1) 式で表される正弦円筒波を放射しているものとする。

$$\phi_i = H_0^{(1)}(kR) \cong \sqrt{\frac{2}{\pi}} e^{-j\frac{\pi}{4}} \frac{e^{jkR}}{\sqrt{kR}} \quad (2.1)$$

ここに  $\phi$  は速度ポテンシャルであり、 $k$  は波数、 $R$  は音源からの距離を表す。ちなみに  $\cong$  で結ばれた両者の差は、 $kR > 2$  の範囲で 0.1 dB 以内となり、この範囲では Hankel 関数を用いなくとも実用上問題ない精度が得られるものと考えられる。

まず Hankel 関数が以下のように積分の形で表せることに着目する。

$$H_0^{(1)}(kR) = \frac{1}{\pi} \int_{S(\frac{\pi}{2})} e^{jk r_0 \cos(\theta_0 - \alpha)} e^{-jkr \cos(\theta - \alpha)} d\alpha \quad (2.2)$$

これはいわゆる Sommerfeld の積分表示といわれるものであり、円筒波を  $\alpha$  方向に進行する平面波の角スペクトルで表し、更に、

$$e^{jk r_0 \cos(\theta_0 - \alpha)} \quad (2.3)$$

なる位相因子を乗じて  $\alpha$  に関する積分を行ったものとして表現している。ここで  $\alpha$  は複素平面上で定義された変数であり、もはや角度という物理的な意味を持たないものである。また  $S(\frac{\pi}{2})$  は、解析の都合上選んだものであり、実軸と  $\frac{\pi}{2}$  で交わり、最急降下路と平行な積分路である。

(2.2) 式の表現より、入射場が (2.1) 式で与えられる回折問題の解は、入射場が平面波、つまり、

$$\phi_i = e^{-jkr \cos(\theta - \alpha)} \quad (2.4)$$

の場合の解に、(2.2) 式と同様に位相因子を掛け、複素積分を行うことによって求めることが出来ると考えられ、

$$\phi(P) = \int_{S(\frac{\pi}{2})} \phi^p(P) e^{jk r_0 \cos(\theta_0 - \alpha)} d\alpha \quad (2.5)$$

で与えられる。ここに、 $\phi^p$  は Sommerfeld によって与えられた入射波が平面波の場合の回折場の解であり、以下で与えられている [1]。

$$\phi^p(P) = \phi_g^p(P) + \phi_d^p(P) \quad (2.6)$$

$$\phi_g^p(P) = \begin{cases} e^{-jkr \cos(\theta - \alpha_0)} + e^{-jkr \cos(\theta + \alpha_0)} & \text{for } 0 \leq \theta < \pi - \alpha_0 \\ e^{-jkr \cos(\theta - \alpha_0)} & \text{for } \pi - \alpha_0 < \theta < \pi + \alpha_0 \\ 0 & \text{for } \pi + \alpha_0 < \theta \leq 2\pi \end{cases} \quad (2.7)$$

$$\phi_d^p(P) = \frac{j}{\pi} \int_{S(0)} \frac{\sin \frac{\alpha}{2} \sin \frac{\theta + \beta}{2}}{\cos \alpha + \cos(\theta + \beta)} e^{jkr \cos \beta} d\beta \quad (2.8)$$

但し、 $\phi_g^p$  は音源からの直接波、及びその障壁による鏡像からの寄与を表す幾何光学的な場であり、 $\phi_d^p$  は全体の場合から幾何光学的な場を引いた回折場である。また、 $\alpha_0$  は平面波の入射角度を示す。

(2.6) ~ (2.8) 式を (2.5) 式に代入し、留数定理などを適用することにより、入射場 (2.1) 式に対する解として、

$$\phi(P) = \phi_g(P) + \phi_d(P) \quad (2.9)$$

$$\phi_g(P) = \begin{cases} H_0^{(1)}(kR) + H_0^{(1)}(kL) & \text{for } 0 \leq \theta \leq \pi - \theta_0 \\ H_0^{(1)}(kR) & \text{for } \pi - \theta_0 < \theta \leq \pi + \theta_0 \\ 0 & \text{for } \pi + \theta_0 < \theta \leq 2\pi \end{cases} \quad (2.10)$$

$$\phi_d(P) = \frac{2j}{\pi} \left\{ \text{sgn}(\cos \frac{\theta_0 - \theta}{2}) e^{jkR} \int_{\sqrt{k(R_1 - R_1)}}^{\infty} \frac{e^{j\mu^2}}{\sqrt{\mu^2 + 2kR}} d\mu \right. \\ \left. + \text{sgn}(\cos \frac{\theta_0 + \theta}{2}) e^{jL} \int_{\sqrt{k(R_1 - L)}}^{\infty} \frac{e^{j\mu^2}}{\sqrt{\mu^2 + 2kL}} d\mu \right\} \quad (2.11)$$

$$\text{sgn}(\alpha) = \begin{cases} -1 & \text{for } \alpha < 0 \\ +1 & \text{for } \alpha \geq 0 \end{cases} \quad (2.12)$$

が求められる [4, 5, 8]。ここで、 $R$  は音源と受信点の直接の距離、 $L$  は音源の障壁による鏡像 (虚音源) から受信点までの距離であり、それぞれ以下で与えられる。

$$R = \sqrt{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos(\theta - \theta_0)} = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \\ L = \sqrt{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos(\theta + \theta_0)} = \sqrt{(x + x_0)^2 + (y - y_0)^2} \quad (2.13)$$

更に、入射場 (2.1) が、

$$H_0^{(1)}(kR) = \frac{2}{\pi} e^{-j\frac{\pi}{2}} e^{jkR} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{j\mu^2}}{\sqrt{\mu^2 + 2kR}} d\mu \quad (2.14)$$

とも表現できる [9, 10] こと<sup>1</sup>から、(2.10)、(2.11) 式を以下のようにまとめることができる。

$$\begin{aligned} \phi(P) &= \phi_g(P) + \phi_d(P) \\ &= \frac{-2j}{\pi} \left\{ e^{jkR} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{j\mu^2}}{\sqrt{\mu^2 + 2kR}} d\mu + e^{jL} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{j\mu^2}}{\sqrt{\mu^2 + 2kL}} d\mu \right\} \end{aligned} \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned} m &= 2\sqrt{\frac{krr_0}{R_1 + R}} \cos \frac{1}{2}(\theta - \theta_0) = \pm \sqrt{k(R_1 - R)}, \quad \pm \text{ for } \cos \frac{1}{2}(\theta - \theta_0) < 0 \\ m' &= 2\sqrt{\frac{krr_0}{R_1 + L}} \cos \frac{1}{2}(\theta + \theta_0) = \pm \sqrt{k(R_1 - L)}, \quad \pm \text{ for } \cos \frac{1}{2}(\theta + \theta_0) < 0 \\ R_1 &= r_0 + r \end{aligned} \quad (2.16)$$

以下、(2.15) 式を線音源の場合の「厳密解」と称することとする。ちなみに、文献 [5, 8] においては  $\phi_g$  が、

$$\phi_g(P) = \begin{cases} H_0^{(1)}(kR) + H_0^{(1)}(kL) & \text{for } 0 \leq \theta < \pi - \theta_0 \\ H_0^{(1)}(kR) & \text{for } \pi - \theta_0 < \theta < \pi + \theta_0 \\ 0 & \text{for } \pi + \theta_0 < \theta \leq 2\pi \end{cases} \quad (2.17)$$

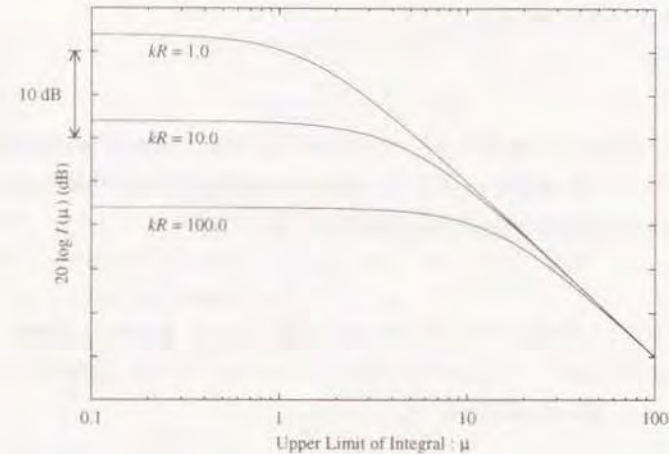
で与えられており、また符号関数  $\text{sgn}(\alpha)$  も  $\alpha = 0$  で定義されていない。幾何光学的な影の境界では、 $\phi_g, \phi_d$  それぞれは不連続であり、不連続同士が互いに補いあった結果、両者を加えた形の  $\phi$  ((2.9) 式) は連続になるという説明が行われている。しかしこのままでは特に後述する漸近解において  $\phi_g, \phi_d$  を分離して考える場合に不便である。本論文では便宜上不等号に等号を含め、更に  $\text{sgn}(0) = +1$  と定義した場合にも、(2.15) 式と等しい解が得られることを確認の上、(2.10) 式の通り表記した。(2.10) 式の仮定から得られる境界上での厳密解は、文献 [8] で示されている境界上の解と完全に一致する。

(2.15) の厳密解は半無限積分を含む形であり、実際の数値計算においては積分の上限を適当な値で打ち切らねばならない。その値を決定するために、(2.15) 式の被積分関数の大きさである (2.18) 式がどのように変動するかを、幾つかの  $kR$  に対して計算する。

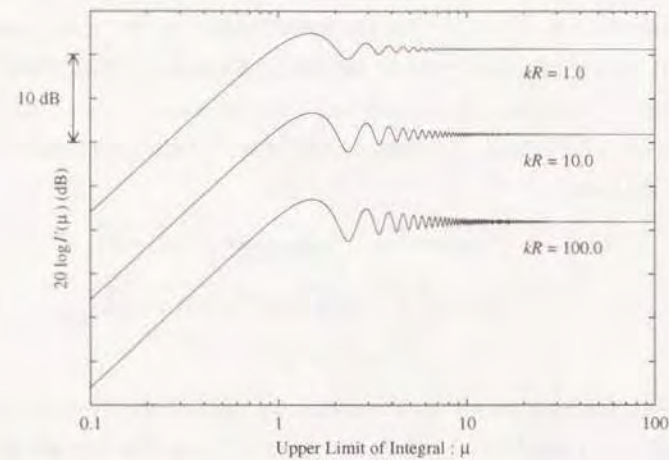
$$I(\mu) = \left| \frac{e^{j\mu^2}}{\sqrt{\mu^2 + 2kR}} \right| \quad (2.18)$$

$kR$  の値としては 1, 10, 100 の 3 通りを選び、 $\mu$  を 0.1 から 100 まで変化させる。結果を Fig. 2.2 (a) に示す。

<sup>1</sup>この関係は一部の文献では公式として示されている。文献 [10] にその導出がやや詳しく述べられているが、手順としては、1: 2次元波動方程式を、Laplace 変換を用いて解く。2: 1 で得られた解は、波動方程式の解である Hankel 関数の Laplace 変換でもあると考え、解を逆 Laplace 変換し、Hankel 関数の複素積分表示を得る。3: 積分路の変形、座標系の変換などを行い (2.14) 式を得る。というものである。



(a) 被積分関数の振る舞い



(b) 積分値の振る舞い

Figure 2.2: 被積分関数及び積分値の振る舞い



両軸共に対数であり、縦軸は  $20 \log I(\mu)$  である。 $kR$  によって異なるが、 $\mu = 10$  以上では値が急速に減少していることが分かる。

また、併せて

$$I'(\mu) = \left| \int_0^\mu \frac{e^{j\mu^2}}{\sqrt{\mu^2 + 2kR}} d\mu \right| \quad (2.19)$$

も計算した。結果を Fig. 2.2 (b) に示す。実際の計算に際しては、以下に示す通り積分区間 0.1 で積分を行い、その途中経過をプロットした。被積分関数の実数部、虚数部が非常に振動性の強い性質であり、安定した計算を行うために用いた方法である。

$$I'(\mu) = \int_0^{0.1} + \int_{0.1}^{0.2} + \int_{0.2}^{0.3} + \cdots + \int_{99.9}^{100.0}$$

結果によれば  $\mu$  として無限大の代わりに 100 程度まで考えておけば、積分値はほぼ収束し、その変動も音圧レベルに換算して 0.1 dB 以内である。これらの結果から、今後「厳密解」を用いた計算を行う場合、積分の上限値は 100 で行うものとする。

## 2.2.2 漸近解

前項で求めた「厳密解」について、より簡便な漸近解を示す。内容的には成書 [5] にもまとめられているものであるため、ここではその導出を詳述せず結果のみを示す。まず (2.15) 式の厳密解を再び (2.9) 式に示す 2 項に分離して考える。幾何光学波を表す (2.10) 式は容易に計算可能でありこのまま用いることとする。一方、(2.11) 式の  $\phi_d$  については、 $kR \gg 1, kL \gg 1$  であれば、被積分関数の  $\mu$  のうち分子以外は、これを積分の下限値で置換しても十分な精度が得られるため、次のように近似出来る。

$$\phi_d(P) = \frac{2j}{\pi} \left\{ \operatorname{sgn}(\cos \frac{\theta_0 - \theta}{2}) \frac{e^{jkR}}{\sqrt{k(R_1 + R)}} F \left[ \sqrt{k(R_1 - R)} \right] + \operatorname{sgn}(\cos \frac{\theta_0 + \theta}{2}) \frac{e^{jL}}{\sqrt{k(R_1 + L)}} F \left[ \sqrt{k(R_1 - L)} \right] \right\} \quad (2.20)$$

$$F[\tau] = \int_{-\tau}^{\infty} e^{j\mu^2} d\mu \quad (2.21)$$

この式から、音源と受音点が共に *Edge* から少なくとも 1 波長以上離れていれば、回折場は Fresnel 積分によって表現できることが解る。以下、(2.10) 式と (2.20) 式を併せて線音源の場合の「漸近解 1」と称する。

更に、 $k(R_1 - R), k(R_1 - L) \gg 1$  であれば、Fresnel 積分の漸近展開、

$$F[w] \cong \frac{j}{2w} e^{jw^2} \left[ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 \cdot 3 \cdots (2n-1)}{(2jw^2)^n} \right] \quad (2.22)$$

を適用することにより  $\phi_d$  は、

$$\phi_d(P) \cong -\frac{e^{jkR_0}}{\sqrt{\pi k R_0}} \frac{e^{jkR}}{\sqrt{\pi k R}} \frac{2 \cos \frac{1}{2} \theta \cos \frac{1}{2} \theta_0}{\cos \theta + \cos \theta_0} \quad (2.23)$$

と表せる。

この (2.23) 式は *Edge* から放射する円筒波を表しているとも解釈出来、*Edge* は遠方回折場に対して、あたかも円筒波を放射する仮想的な音源のように振舞うことを示している。また、 $k(R_1 - R), k(R_1 - L) \gg 1$  という条件からも明らかであるが、この式は  $\theta = \pi + \theta_0$ 、及び  $\theta = \pi - \theta_0$ 、つまり幾何光学的な影の境界においては近似が成立せず、発散するものである。以下、(2.10) 式と (2.23) 式を併せて線音源の場合の「漸近解 2」と呼ぶ。

これまでの結果をまとめて Table 2.1 に示す。



Table 2.1: 線音源の場合の回折場を表す解

[厳密解]
$\phi(P) = \frac{-2j}{\pi} \left\{ e^{jkR} \int_{-m}^{\infty} \frac{e^{j\mu^2}}{\sqrt{\mu^2 + 2kR}} d\mu + e^{jL} \int_{-m'}^{\infty} \frac{e^{j\mu^2}}{\sqrt{\mu^2 + 2kL}} d\mu \right\}$ $m = 2\sqrt{\frac{krr_0}{R_1 + R}} \cos \frac{1}{2}(\theta - \theta_0) = \pm \sqrt{k(R_1 - R)}, \quad \pm \text{ for } \cos \frac{1}{2}(\theta - \theta_0) \gtrless 0$ $m' = 2\sqrt{\frac{krr_0}{R_1 + L}} \cos \frac{1}{2}(\theta + \theta_0) = \pm \sqrt{k(R_1 - L)}, \quad \pm \text{ for } \cos \frac{1}{2}(\theta + \theta_0) \gtrless 0$ $R_1 = r_0 + r$
[漸近解 1]
$\phi(P) = \phi_g(P) + \phi_d(P)$ $\phi_g(P) = \begin{cases} H_0^{(1)}(kR) + H_0^{(1)}(kL) & \text{for } 0 \leq \theta \leq \pi - \theta_0 \\ H_0^{(1)}(kR) & \text{for } \pi - \theta_0 < \theta \leq \pi + \theta_0 \\ 0 & \text{for } \pi + \theta_0 < \theta \leq 2\pi \end{cases}$ $\phi_d(P) = \frac{2j}{\pi} \left\{ \text{sgn}\left(\cos \frac{\theta_0 - \theta}{2}\right) \frac{e^{jkR}}{\sqrt{k(R_1 + R)}} F\left[\sqrt{k(R_1 - R)}\right] \right.$ $\left. + \text{sgn}\left(\cos \frac{\theta_0 + \theta}{2}\right) \frac{e^{jL}}{\sqrt{k(R_1 + L)}} F\left[\sqrt{k(R_1 - L)}\right] \right\}$ $F[\tau] = \int_{\tau}^{\infty} \frac{e^{j\mu^2}}{\mu} d\mu$ $\text{sgn}(\alpha) = \begin{cases} -1 & \text{for } \alpha < 0 \\ +1 & \text{for } \alpha \geq 0 \end{cases}$
[漸近解 2]
$\phi(P) = \phi_g(P) + \phi_d(P)$ $\phi_g(P) = \begin{cases} H_0^{(1)}(kR) + H_0^{(1)}(kL) & \text{for } 0 \leq \theta \leq \pi - \theta_0 \\ H_0^{(1)}(kR) & \text{for } \pi - \theta_0 < \theta \leq \pi + \theta_0 \\ 0 & \text{for } \pi + \theta_0 < \theta \leq 2\pi \end{cases}$ $\phi_d(P) \cong -\frac{e^{jkR}}{\sqrt{\pi k r_0}} \frac{e^{jkr}}{\sqrt{\pi k r}} \frac{2 \cos \frac{1}{2}\theta \cos \frac{1}{2}\theta_0}{\cos \theta + \cos \theta_0}$

## 2.2.3 数値計算例

以上求めてきた「厳密解」,「漸近解 1」を用いて数値計算を行う。なお「厳密解」における半無限積分の計算に際しては、(2.19) 式の計算において行ったのと同様の方法、つまり以下に示す様に積分区間を 0.1 ステップとし、その上限値が 100 を越えるまでの積分値を加える方法を用いた。

$$\phi = \int_{-m}^{-m+0.1} + \int_{-m+0.1}^{-m+0.2} + \int_{-m+0.2}^{-m+0.3} + \cdots + \int_{-m+0.1 \times n}^{100.0}$$

$$+ \int_{-m'}^{-m'+0.1} + \int_{-m'+0.1}^{-m'+0.2} + \int_{-m'+0.2}^{-m'+0.3} + \cdots + \int_{-m'+0.1 \times n'}^{100.0}$$

ここに  $n, n'$  は (2.16) 式で与えられる積分下限値  $-m, -m'$  によって決まる数であり、それぞれ

$$-m + 0.1 \times n < 100.0,$$

$$-m' + 0.1 \times n' < 100.0$$

を満たす最大の整数である。以後点音源の場合、及び障壁表面の音響特性を変化させた場合等、本研究で行う数値積分においては同様の方法を用いるものとする。なお、0.1 は計算時間の短縮を目的に試行錯誤的に設定した値である。

まず、厳密解と漸近解での値の違いを把握することを考える。Fig. 2.3 に示す幾何的条件、つまり音源  $S$  は  $(r, \theta) = (0.5 \text{ m}, 60^\circ)$ 、受音点  $P$  は  $(r, \theta) = (1.0 \text{ m}, 300^\circ)$  に存在すると仮定し、周波数を 10 Hz ~ 1000 Hz まで変化させた。これは  $kR \gg 1$  の成立状況を確認する意味で仮定したものであり、 $kR$  では 0.24 ~ 24.18 の範囲にあたる。

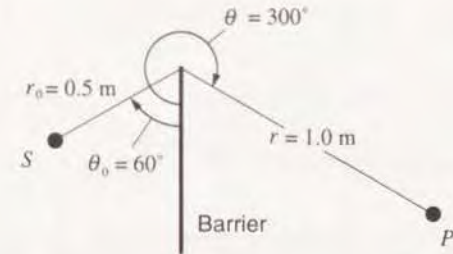
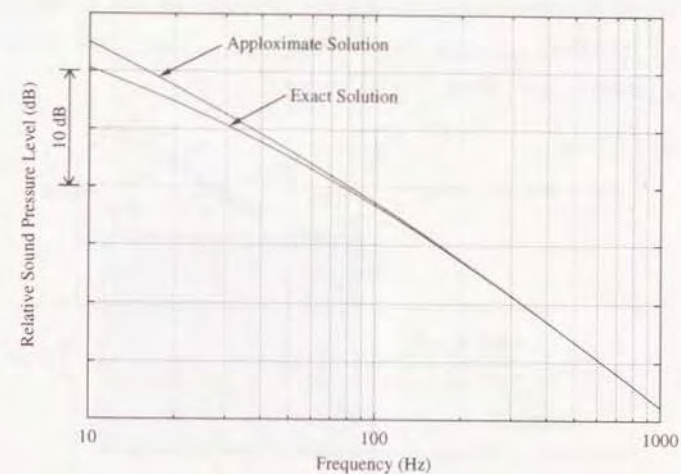


Figure 2.3: 音源及び受音点位置

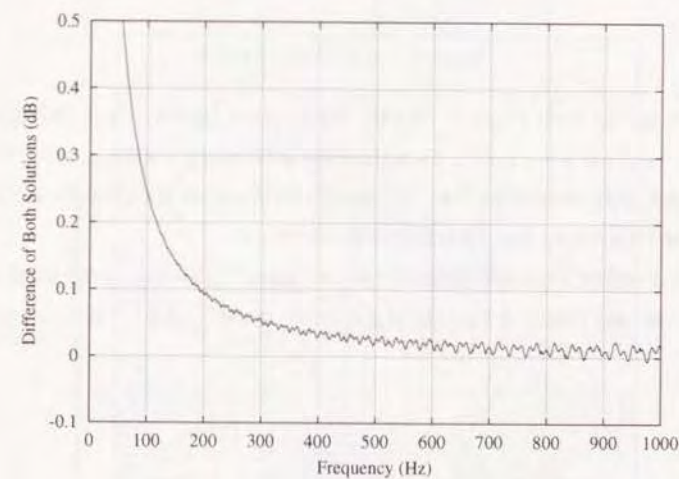
なお、本章においては半無限障壁を仮定しているため、現実の騒音制御問題における音源、受音点位置との対応は直接取れるものではない。しかし、一般的な状況として、Edge から音源まで

5 m, 受音点まで 10 m という距離を仮定し, 更に第 4 章において行う 1/10 縮尺模型実験との整合性を考慮して  $r_0=0.5$  m,  $r=1.0$  m という条件を設定した。

結果を Fig. 2.4 に示す。(a) は横軸を log として両者の値をプロットしたもの, (b) は両者の差を横軸リニアで示したものであり, いずれも横軸の値は周波数である。これによると, 周波数で言えば 190 Hz 程度,  $kR$  で 4.6 程度以上であれば厳密解と漸近解の差は 0.1 dB 以内に収まり, 実用上 2 つはほぼ同一とみなしてよいことが明らかである。



(a) [厳密解] 及び [漸近解 1] の変化



(b) [厳密解] 及び [漸近解 1] の差

Figure 2.4: [厳密解] 及び [漸近解 1]



次に Fig. 2.5 に示す受信領域を設定し、領域内での音圧分布を計算してみる。障壁は完全に剛であるとし、周波数は 5 kHz を仮定した。この領域での  $kR, kL$  の値は 4.83 ~ 115.69 であり、ここでは「厳密解」、及び「漸近解 1」を使って計算した。

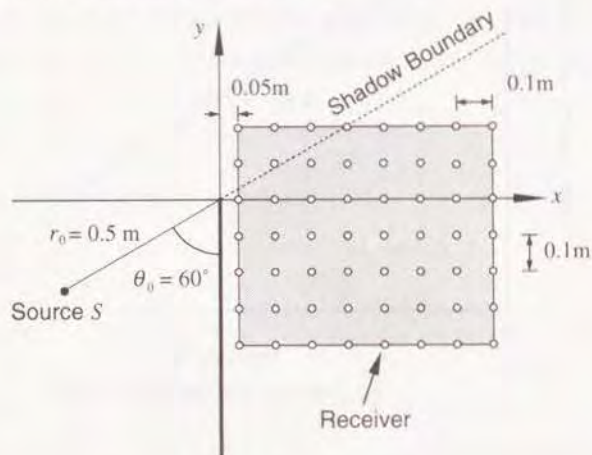
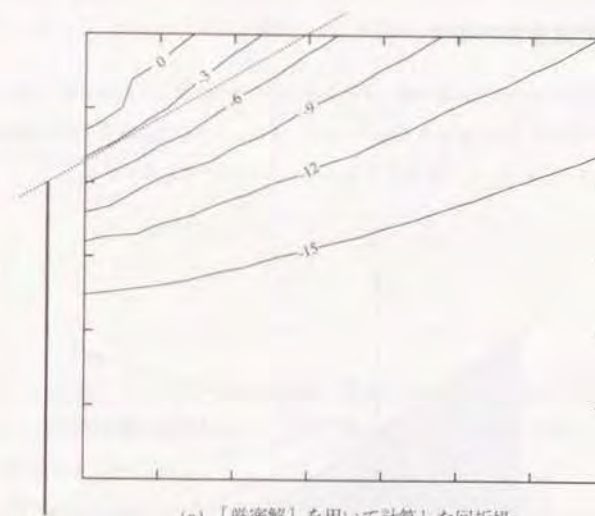


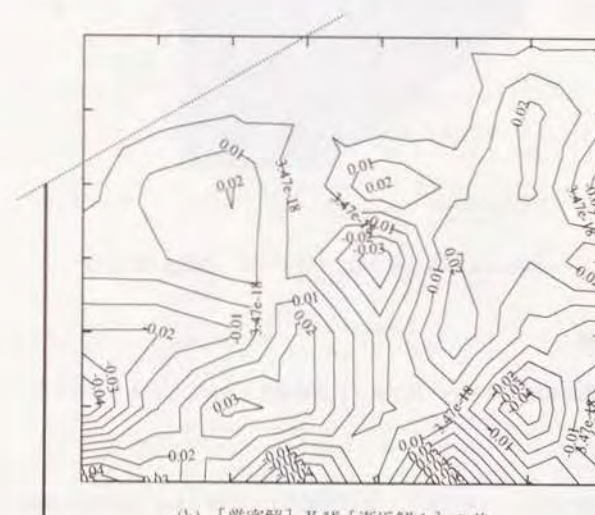
Figure 2.5: 音源位置及び受信領域

結果を Fig. 2.6 に示すが、(a) は「厳密解」の結果、(b) は「厳密解」、及び「漸近解 1」の差である。(a) におけるコンターのラインは自由音場 1 m 点での音圧で規準化した相対的な音圧レベルであり、3 dB 毎に引かれている。また (b) については 0.01 dB 毎に引かれている。また、図中の直線は障壁の位置、破線は幾何光学的な影の境界を示す。

結果によれば音圧レベルは影の領域の中で緩やかに減少しており、また、この受信領域では「厳密解」、[漸近解 1] の間にほとんど違いは認められず、ほぼ同一とみなして良いことが分かる。



(a) 「厳密解」を用いて計算した回折場



(b) 「厳密解」及び「漸近解 1」の差

Figure 2.6: 障壁による回折場及び「厳密解」と「漸近解 1」との差



## 2.3 音源が点音源の場合

ここでは点音源に対する回折場の解の導出を線音源の場合に準じて概説する。Fig. 2.7 に示す音場を仮定し、やはり  $x=0, y \leq 0$  で障壁を表す。また、エッジ上に原点を持つ円筒座標系も考え、点音源  $S$  は  $(r_0, \theta_0, z_0)$  に、受音点  $P$  は  $(r, \theta, z)$  に存在するものとする。

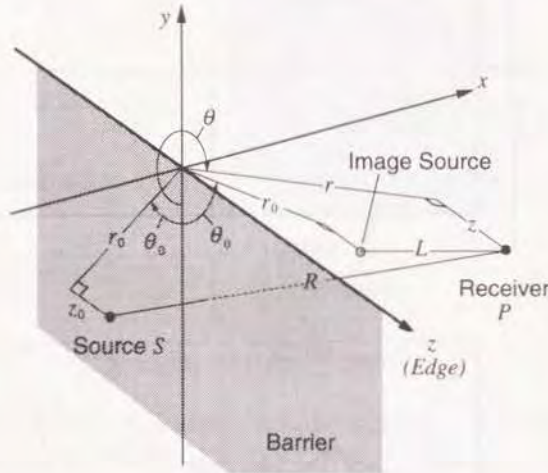


Figure 2.7: 3次元音場における障壁、音源  $S$ 、受音点  $P$

### 2.3.1 厳密解

音源が時間項を省略して (2.24) 式で表される球面波を放射しているものとする。

$$\phi_i = \frac{e^{jkR}}{kR} \quad (2.24)$$

ここに  $\phi$  は速度ポテンシャルであり、 $R$  は音源からの距離である。線音源の場合に従って、球面波を平面波の集まりとして表現する。この場合、

$$\frac{e^{jkR}}{kR} = \frac{j}{2\pi} \int_{S(\frac{\pi}{2})} \int_{S(\frac{\pi}{2})} \cos \beta \cdot e^{-jk[(x-x_0) \cos \alpha \cos \beta + (y-y_0) \sin \alpha \cos \beta - (z-z_0) \sin \beta]} d\alpha d\beta \quad (2.25)$$

なる関係を用いる [11]、 $S(\pi/2)$  はやはり実軸と  $\pi/2$  で交わる積分路である。ここで、円筒座標系を導入して、

$$x = r \cos \theta, y = r \sin \theta \quad (2.26)$$

を代入すると、(2.25) 式は、

$$\frac{e^{jkR}}{kR} = \frac{j}{2\pi} \int_{S(\frac{\pi}{2})} \int_{S(\frac{\pi}{2})} e^{-jk \cos \beta \cdot r \cos(\theta-\alpha)} F(\alpha, \beta) d\alpha d\beta \quad (2.27)$$

と変形できる。ここに、

$$F(\alpha, \beta) = e^{jk \cos \beta \cdot r_0 \cos(\theta_0-\alpha)} \cdot e^{jk(z-z_0) \sin \beta} \cdot \cos \beta \quad (2.28)$$

である。従って、球面波 (2.24) 式に対する回折場の解は、入射波が (2.4) 式の平面波に対する解 (2.6) ~ (2.8) において、波数  $k$  を  $k \cos \beta$  と置換し、 $jF(\alpha, \beta)/2\pi$  を乗じた後に  $\alpha, \beta$  について積分すれば求められることになる。

結果のみを示すと、球面波入射に対する解として、直接波成分  $\phi_g$  と回折波成分  $\phi_d$  の和として、

$$\phi(P) = \phi_g(P) + \phi_d(P) \quad (2.29)$$

$$\phi_g(P) = \begin{cases} \frac{e^{jkR}}{kR} + \frac{e^{jkL}}{kL} & \text{for } 0 \leq \theta \leq \pi - \theta_0 \\ \frac{e^{jkR}}{kR} & \text{for } \pi - \theta_0 < \theta \leq \pi + \theta_0 \\ 0 & \text{for } \pi + \theta_0 < \theta \leq 2\pi \end{cases} \quad (2.30)$$

$$\phi_d(P) = -j \left\{ \text{sgn}(\cos \frac{\theta_0 - \theta}{2}) \int_{\sqrt{k(R-L)}}^{\infty} \frac{H_1^{(1)}(\mu^2 + kR)}{\sqrt{\mu^2 + 2kR}} d\mu + \text{sgn}(\cos \frac{\theta_0 + \theta}{2}) \int_{\sqrt{k(R+L)}}^{\infty} \frac{H_1^{(1)}(\mu^2 + kL)}{\sqrt{\mu^2 + 2kL}} d\mu \right\} \quad (2.31)$$

$$\text{sgn}(\alpha) = \begin{cases} -1 & \text{for } \alpha < 0 \\ +1 & \text{for } \alpha \geq 0 \end{cases} \quad (2.32)$$

が求められる。ここに、 $R, L$  は、

$$\begin{aligned} R &= \sqrt{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos(\theta - \theta_0) + (z - z_0)^2} \\ &= \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2} \end{aligned} \quad (2.33)$$

$$\begin{aligned} L &= \sqrt{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos(\theta + \theta_0) + (z - z_0)^2} \\ &= \sqrt{(x + x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2} \end{aligned} \quad (2.34)$$

で与えられる。更に、

$$\frac{e^{jkR}}{kR} = j \int_{-\infty}^{\infty} \frac{H_1^{(1)}(\mu^2 + kR)}{\sqrt{\mu^2 + 2kR}} d\mu \quad (2.35)$$

なる関係<sup>1</sup>から、全体を

$$\phi(P) = j \int_{-m}^{\infty} \frac{H_1^{(1)}(\mu^2 + kR)}{\sqrt{\mu^2 + 2kR}} d\mu + j \int_{-m'}^{\infty} \frac{H_1^{(1)}(\mu^2 + kL)}{\sqrt{\mu^2 + 2kL}} d\mu \quad (2.36)$$

$$\begin{aligned} m &= 2\sqrt{\frac{krr_0}{R_1 + R}} \cos \frac{1}{2}(\theta - \theta_0) = \pm \sqrt{k(R_1 - R)}, \quad \pm \text{ for } \cos \frac{1}{2}(\theta - \theta_0) \gtrless 0 \\ m' &= 2\sqrt{\frac{krr_0}{R_1 + L}} \cos \frac{1}{2}(\theta + \theta_0) = \pm \sqrt{k(R_1 - L)}, \quad \pm \text{ for } \cos \frac{1}{2}(\theta + \theta_0) \gtrless 0 \\ R_1 &= \sqrt{(r + r_0)^2 + (z - z_0)^2} \end{aligned} \quad (2.37)$$

とまとめることが出来る [12]。以下、(2.36) 式を点音源の場合の [厳密解] と称する。なお、線音源の場合と同様に、文献 [12] では (2.30) 式中の  $\theta$  の範囲が

$$\begin{cases} 0 \leq \theta < \pi - \theta_0 \\ \pi - \theta_0 < \theta < \pi + \theta_0 \\ \pi + \theta_0 < \theta \leq 2\pi \end{cases} \quad (2.38)$$

で与えられており、後述する漸近解の計算においては境界の影の境界上での計算が行えず不便である。そこでこの場合にも (2.36) 式の解が得られることを確認の後、(2.30) 式の通り表記した。

線音源の場合と同様に、この厳密解は半無限積分を含むものであり、実際の数値計算においては積分上限を有限の値で打ち切る必要がある。このために、(2.36) 式の被積分関数の大きさ、

$$I(\mu) = \left| \frac{H_1^{(1)}(\mu^2 + kR)}{\sqrt{\mu^2 + 2kR}} \right| \quad (2.39)$$

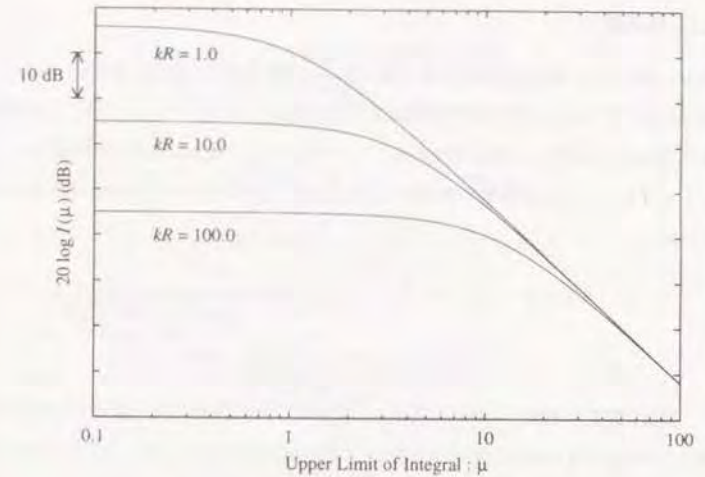
及びその積分値、

$$I'(\mu) = \left| \int_0^{\mu} \frac{H_1^{(1)}(\mu'^2 + kR)}{\sqrt{\mu'^2 + 2kR}} d\mu' \right| \quad (2.40)$$

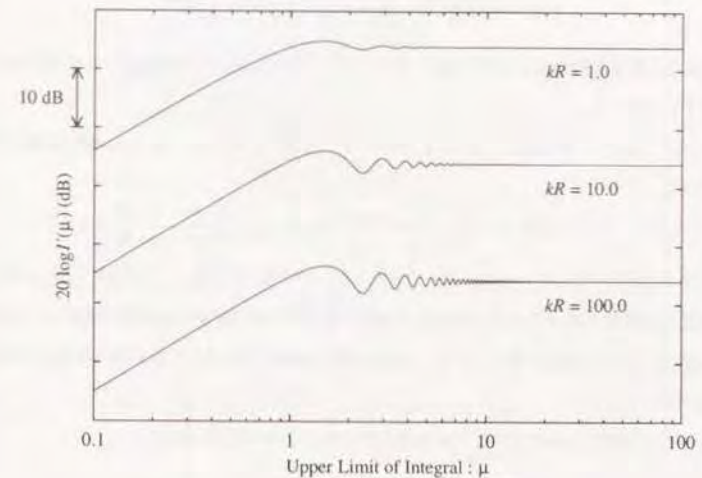
を計算した。結果をそれぞれ Fig. 2.8 (a), (b) に示す。線音源の場合と同様、積分値の計算は 0.1 ステップで行った。

これによるとやはり線音源の場合と同様に、被積分関数は  $\mu$  が 10 を越えるあたりから急速に減少し、それに伴って積分値も収束することが分かる。以下 [厳密解] を用いて計算する場合、積分上限値は 100 で行うものとする。

<sup>1</sup> これも文献 [10] にその導出が述べられている。手順は (2.14) 式の場合と同様である。



(a) 被積分関数の振る舞い



(b) 積分値の振る舞い

Figure 2.8: 被積分関数及び積分値の振る舞い



### 2.3.2 漸近解

(2.36) 式の、より簡便な漸近解を考える。やはり成書 [12] にもまとめられている内容のため、結果のみを示す。まず、解を再び直接波成分と回折波成分に分離する。この場合も、幾何光学波を表す (2.30) 式は容易に計算可能であり、そのまま用いる。(2.31) 式と同折波成分については、 $kR_1 \gg 1$  であれば Hankel 関数をその漸近展開式の第 1 項で近似することが出来、以下のように表される、

$$\phi_d = -\sqrt{\frac{2}{\pi}} e^{-j\frac{\pi}{4}} \left\{ \int_{\sqrt{k(R_1-R)}}^{\infty} \frac{e^{j(\mu^2+kR)}}{\sqrt{\mu^2+kR}\sqrt{\mu^2+2kR}} d\mu + \int_{\sqrt{k(R_1-L)}}^{\infty} \frac{e^{j(\mu^2+kL)}}{\sqrt{\mu^2+kL}\sqrt{\mu^2+2kL}} d\mu \right\} \quad (2.41)$$

更に、被積分関数の分母は、分子の  $\exp(j\mu^2)$  に比べて非常に速く変化するものであり、 $\mu$  を積分の下限値で置き換えて積分の外に出しても十分な精度が得られる。従って、(2.41) 式は、

$$\phi_d = -\sqrt{\frac{2}{\pi k R_1}} e^{-j\frac{\pi}{4}} \left\{ \operatorname{sgn}\left(\cos \frac{\theta_0 - \theta}{2}\right) \frac{e^{jkR}}{\sqrt{k(R_1+R)}} F\left[\sqrt{k(R_1-R)}\right] + \operatorname{sgn}\left(\cos \frac{\theta_0 + \theta}{2}\right) \frac{e^{jkL}}{\sqrt{k(R_1+L)}} F\left[\sqrt{k(R_1-L)}\right] \right\} \quad (2.42)$$

と Fresnel 積分の形で表現出来る [12]。以下、(2.30) 式と (2.42) 式を併せて点音源の場合の [漸近解 1] と称する。

さらに、 $k(R_1-R), k(R_1-L) \gg 1$  であれば、(2.22) 式で示した Fresnel 積分の漸近展開を用いて、

$$\phi_d(P) = -\sqrt{\frac{2}{\pi k R_1}} e^{j(kR_1 + \frac{\pi}{4})} \frac{1}{\sqrt{k r_0}} \frac{1}{\sqrt{k r}} \frac{\cos \frac{1}{2}\theta \cdot \cos \frac{1}{2}\theta_0}{\cos \theta + \cos \theta_0} \quad (2.43)$$

と表すことが出来る [12]。(2.43) 式も円筒波入射に対する [漸近解 2] と同様に Edge から放射する円筒波の性質を持っており、やはり Edge が遠方回折場に対する仮想的な音源として振舞うことを示していると解釈できる。以下、(2.30) 式と (2.43) 式を併せて点音源の場合の [漸近解 2] と称する。

音源が点音源である場合に対する結果をまとめて Table 2.2 に示す。

Table 2.2: 点音源の場合の回折場を表す解

[厳密解]	
$\phi(P) = j \int_{-m}^{\infty} \frac{H_1^{(1)}(\mu^2 + kR)}{\sqrt{\mu^2 + 2kR}} d\mu + j \int_{-m'}^{\infty} \frac{H_1^{(1)}(\mu^2 + kL)}{\sqrt{\mu^2 + 2kL}} d\mu$	
$m = 2\sqrt{\frac{krr_0}{R_1+R}} \cos \frac{1}{2}(\theta - \theta_0) = \pm \sqrt{k(R_1-R)}, \quad \pm \text{ for } \cos \frac{1}{2}(\theta - \theta_0) \gtrless 0$	
$m' = 2\sqrt{\frac{krr_0}{R_1+L}} \cos \frac{1}{2}(\theta + \theta_0) = \pm \sqrt{k(R_1-L)}, \quad \pm \text{ for } \cos \frac{1}{2}(\theta + \theta_0) \gtrless 0$	
$R_1 = \sqrt{(r+r_0)^2 + (z-z_0)^2}$	
[漸近解 1]	
$\phi(P) = \phi_g(P) + \phi_d(P)$	
$\phi_g(P) = \begin{cases} \frac{e^{jkR}}{kR} + \frac{e^{jkL}}{kL} & \text{for } 0 \leq \theta \leq \pi - \theta_0 \\ \frac{e^{jkR}}{kR} & \text{for } \pi - \theta_0 < \theta \leq \pi + \theta_0 \\ 0 & \text{for } \pi + \theta_0 < \theta \leq 2\pi \end{cases}$	
$\phi_d = -\sqrt{\frac{2}{\pi k R_1}} e^{-j\frac{\pi}{4}} \left\{ \operatorname{sgn}\left(\cos \frac{\theta_0 - \theta}{2}\right) \frac{e^{jkR}}{\sqrt{k(R_1+R)}} F\left[\sqrt{k(R_1-R)}\right] + \operatorname{sgn}\left(\cos \frac{\theta_0 + \theta}{2}\right) \frac{e^{jkL}}{\sqrt{k(R_1+L)}} F\left[\sqrt{k(R_1-L)}\right] \right\}$	
$F[\tau] = \int_{\tau}^{\infty} e^{-j\mu^2} d\mu$	
$\operatorname{sgn}(\alpha) = \begin{cases} -1 & \text{for } \alpha < 0 \\ +1 & \text{for } \alpha \geq 0 \end{cases}$	
[漸近解 2]	
$\phi(P) = \phi_g(P) + \phi_d(P)$	
$\phi_g(P) = \begin{cases} \frac{e^{jkR}}{kR} + \frac{e^{jkL}}{kL} & \text{for } 0 \leq \theta \leq \pi - \theta_0 \\ \frac{e^{jkR}}{kR} & \text{for } \pi - \theta_0 < \theta \leq \pi + \theta_0 \\ 0 & \text{for } \pi + \theta_0 < \theta \leq 2\pi \end{cases}$	
$\phi_d(P) = -\sqrt{\frac{2}{\pi k R_1}} e^{-j(kR_1 + \frac{\pi}{4})} \frac{1}{\sqrt{k r_0}} \frac{1}{\sqrt{k r}} \frac{\cos \frac{1}{2}\theta \cdot \cos \frac{1}{2}\theta_0}{\cos \theta + \cos \theta_0}$	

### 2.3.3 数値計算例

まず、厳密解、漸近解の値の違いを検討する。Fig. 2.9 に示す条件を仮定し、周波数を 10 Hz から 1000 Hz まで変化させる。この範囲は  $kR$  でいえば 0.24 ~ 24.18 にあたり、これらの条件は線音源の場合と同様に、Edge から音源まで 5 m、受音点まで 10 m の 1/10 を想定したものである。結果を Fig. 2.10 に示す。線音源の場合と同様に (a) は横軸を log として両者の値をプロッ

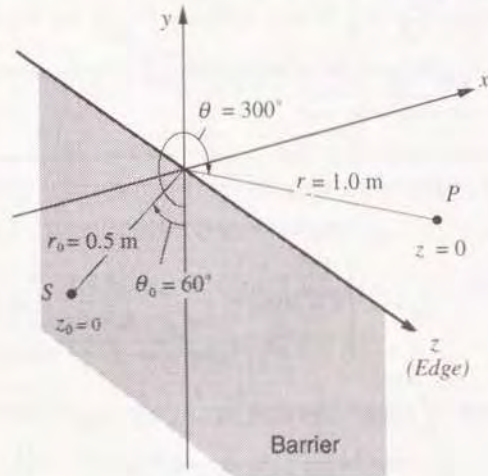
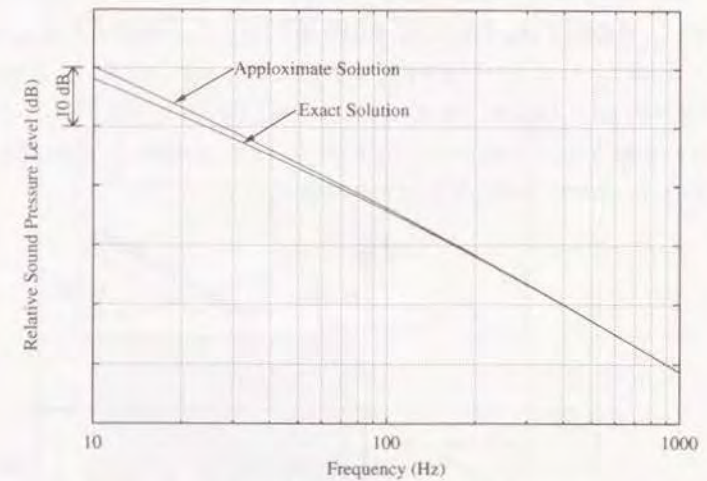
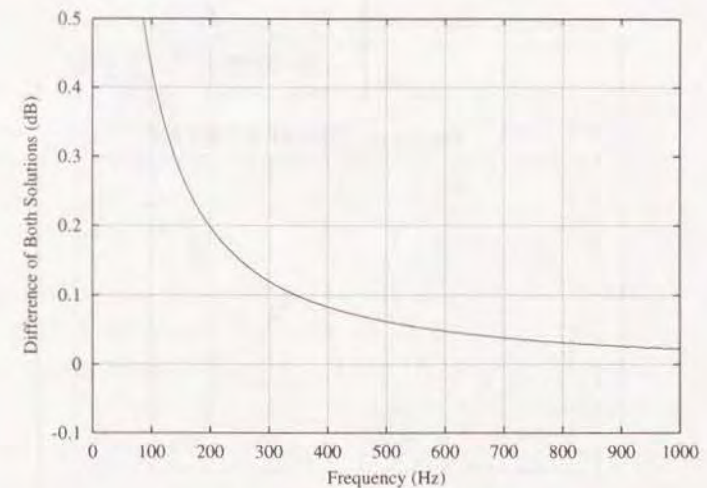


Figure 2.9: 音源及び受音点位置

トしたもの、(b) は両者の差を横軸リニアで示したものである。これによると、周波数で言えば 350 Hz 程度、 $kR$  で 8.4 程度以上であれば厳密解と漸近解の差は 0.1 dB 以内に収まり、2つは実用上ほぼ同一とみなしてよいことが明らかである。



(a) [厳密解] 及び [漸近解 1] の変化



(b) [厳密解] 及び [漸近解 1] の差

Figure 2.10: [厳密解] 及び [漸近解 1]



次に Fig. 2.11 に示す受信領域を設定し、領域内での音圧分布を計算する。障壁は完全に剛であるとし、周波数は 5 kHz を仮定した。線音源の場合と同じく、この領域での  $kR, kL$  の値は 4.83 ~ 115.69 であり、ここでは「厳密解」、及び「漸近解 1」を使って計算した。結果を Fig. 2.12 に示すが、(a) は「厳密解」の結果、(b) が「厳密解」、「漸近解 1」の差である。(a) のコンターは 3 dB 毎に、(b) は 0.002 dB 毎に引かれている。 $kR$  がこの範囲では、両者に目立った違いは見られず、ほぼ同一とみなして良いことが分かる。

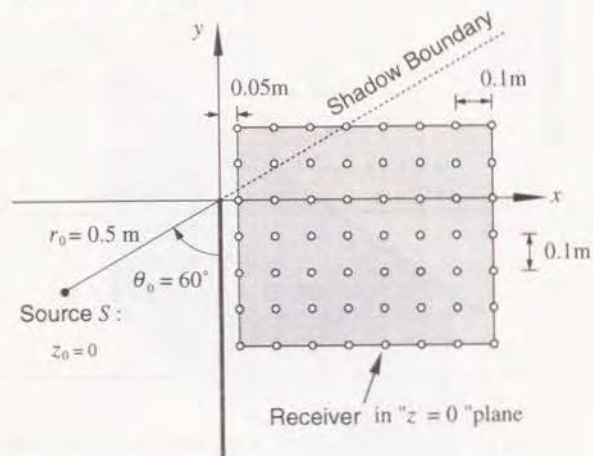
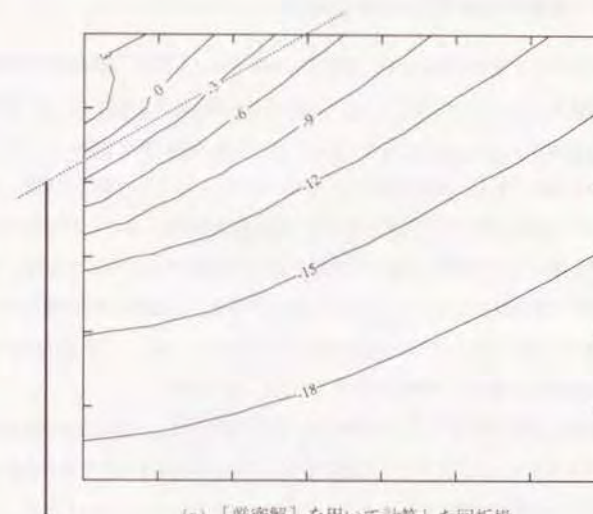
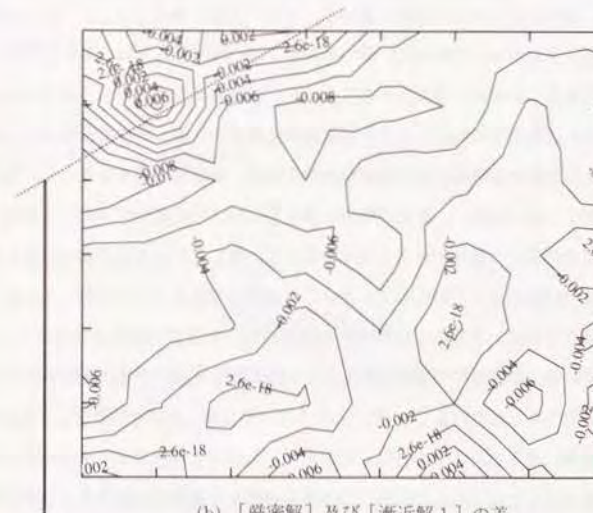


Figure 2.11: 音源位置、及び受信領域



(a) 「厳密解」を用いて計算した回折場



(b) 「厳密解」及び「漸近解 1」の差

Figure 2.12: 障壁による回折場、及び「厳密解」と「漸近解 1」の差

## 2.4 表面の音響特性を変化させた場合

障壁自体の遮音性能を増加させるため、障壁表面を吸音性にした、近似的にソフトな条件を実現することがある。ここでいうソフトとは、エネルギー的には完全反射、位相のみが逆転して反射する（音圧反射率： $-1$ ）のものであり、従ってその境界上での速度ポテンシャル、つまりは音圧がゼロとなる条件である。音響問題においては、直接的にソフトの条件は実現しにくい、空気より遥かに小さい固有音響インピーダンスを持つ建築材料が考えられないからである。そこで、 $1/4$  波長音響管を用いてこの条件を近似的に実現することが試みられている [13, 14]。ちなみに障壁表面が音源側、受音側共に完全にソフトな場合の回折場は、電磁波の回折問題において、完全導体の障壁に電気ベクトルが入射した場合の解として与えられており、これは (2.15) 式、(2.36) 式で表される厳密解の2項を  $-$  で結んだものとして表される [15]。

ところで、実際には完全吸音、完全ソフトなどの条件は実現し難く、障壁表面はある有限の反射係数を持つものと考えられる。こういった複雑な条件の障壁に対応する回折場を求める為に、剛な半無限障壁による回折場の解を応用することが行われてきた。つまり、(2.15) 式、(2.36) 式に見られる2項の内、第1項を実音源からの寄与、第2項を障壁による音源の鏡像からの寄与と解釈し、第2項に障壁表面での反射係数を掛ける、という方法である [16, 17]。これは障壁が剛の場合、つまり反射係数が  $+1$  の場合に、解の形態が2項の和で与えられ、しかもソフトな場合にその反射係数である  $-1$  が第2項に掛かることから、類推された方法であると考えられる。

しかし、現実には施工上の問題やコストの問題から障壁の片側、特に音源側のみに処理を施すことが多く、この方法では障壁表面の境界条件が音源側、受音側で異なる場合に対処できないため、効果的な方法とはいえない。また、松井ら [18] はこの方法を用いて計算した場合、条件の設定によっては測定結果との差異が大きくなり得ること、更にこれは2項の和で与えられる解の形態と実際の音波の経路が正しく対応していないことが原因であることを指摘している。

この欠点を補うために、本論文では松井らの方法に従って任意の開き角を持つウェッジによる回折場の解を用いる。これはその開き角を  $2\pi$  とすれば直接半無限障壁に適用できるものであり、4項の和の形式で与えられている [18, 19]。この4項は実音源、及びその障壁による鏡像から、受音点及びその鏡像に至る合計4つの経路に対応しているものと解釈出来、それぞれに障壁表面での反射係数を掛けることにより、近似的にはあるが様々な条件に対応することが出来る。

ここでは、Oberhettinger [7] によって示された方法に従って障壁表面が両面ともハードな場合の楔型障壁による解の導出を概説し、続いて両面ソフト、あるいは両面吸音性の場合の解につい

て考察する。また、それらの結果を用いて表裏で特性が違ふ場合の解を定式化する。

### 2.4.1 音源が線音源の場合

まず、音源が線音源の場合、つまり2次元音場において考察するものとする。Fig. 2.13 に示す様な音場において、ウェッジの開き角が  $\pi$  以下であり、その内部の音場を考えるものとする。こ

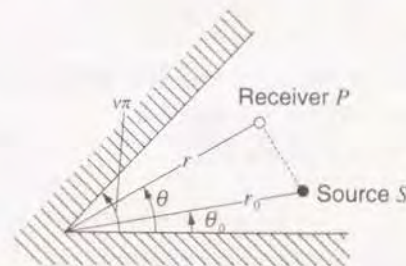


Figure 2.13: 楔型障壁、音源  $S$ 、及び受音点  $P$

こで音場内の受音点  $P$  における速度ポテンシャル  $F$  は、

$$F = \phi(P)e^{-j\omega t} \quad (2.44)$$

で表されるものとする。 $\phi$  は波動方程式

$$(\nabla^2 + k^2)\phi = 0 \quad (2.45)$$

を満たすように以下の形式で与えられる。

$$\phi(P) = e^{\pm j\mu\theta} H_{\mu}^{(1)}(kr) \quad (2.46)$$

但し、 $H_{\mu}^{(1)}$  は  $\mu$  次第1種 Hankel 関数であり  $\mu$  は任意のパラメータである。ここで便宜上波数  $k$  を、

$$k = j\gamma \quad (2.47)$$

と置換することにより、波動方程式の解 (2.46) 式は、変形された Hankel 関数を用いて以下のような形式で表すことが出来る。

$$\phi(P) = e^{\pm j\mu\theta} K_{\mu}(\gamma r) \quad (2.48)$$



ここに,

$$K_\mu(z) = j \frac{\pi}{2} e^{j\mu\frac{\pi}{2}} H_\mu^{(1)}(jz) \quad (2.49)$$

である。以下、最終的には (2.46) あるいは (2.48) 式の形式にまとめられる様な回折場の解を求めていく。

まず、全音場  $\phi(P)$  が音源からの直接波成分  $\phi_i$  と障壁からの反射波成分  $\phi_r$  の和として,

$$\phi(P) = \phi_i + \phi_r \quad (2.50)$$

で表せることに着目する。 $\phi_i$  と  $\phi_r$  の形式は境界条件を満たすように任意に決定されれば良い、但し  $\phi_r$  はこの音場内部に特異点を持たない関数である。

ここに、音源  $S$  と、受音点  $P$  との距離  $R$  は,

$$R = \sqrt{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos(\theta - \theta_0)} \quad (2.51)$$

で与えられ、音源から受音点への直接の入射円筒波は,

$$\begin{aligned} \phi_i &= H_0^{(1)}(kR) \\ &= -j \frac{2}{\pi} K_0(\gamma r) \\ &= -j \frac{2}{\pi} K_0 \left( \gamma \sqrt{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos(\theta - \theta_0)} \right) \end{aligned} \quad (2.52)$$

と表現できる。更に、この変形された Hankel 関数はいわゆる加法定理 [7, 20] から積分を含む形として,

$$\phi_i = -\frac{4j}{\pi^2} \int_0^\infty K_{j\lambda}(\gamma r) K_{j\lambda}(\gamma r_0) \cosh[\lambda(\pi - |\theta - \theta_0|)] d\lambda \quad (2.53)$$

と表されるため、反射波成分  $\phi_r$  もこれと同様な形式として,

$$\phi_r = -\frac{4j}{\pi^2} \int_0^\infty K_{j\lambda}(\gamma r) K_{j\lambda}(\gamma r_0) [f_1(\lambda) e^{j\lambda\theta} + f_2(\lambda) e^{-j\lambda\theta}] d\lambda \quad (2.54)$$

で与えられれば、結果的に全音場を (2.48) 式の形式で定めることが出来る。

以下、未知関数  $f_1$  及び  $f_2$  を、境界条件を満たすように求めるわけであるが、局所作用を仮定した各境界面 ( $\theta = 0$  及び  $\nu\pi$ ) で、 $\phi_r$  が満たすべき条件は  $\beta$  を障壁表面の比音響アドミッタンスとして以下で与えられる [21].

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} - jk\beta\phi = 0 \quad (2.55)$$

この式に (2.53) 及び (2.54) 式を加えた形の  $\phi$  を代入し、整理すると,

$\theta = 0$  に対して,

$$\begin{aligned} &-\frac{4j}{\pi^2} \int_0^\infty K_{j\lambda}(\gamma r) K_{j\lambda}(\gamma r_0) [\lambda \{ \sinh[\lambda(\pi - \theta_0)] + f_1(\lambda) - f_2(\lambda) \} \\ &-jk\beta_1 \{ \cosh[\lambda(\pi - \theta_0)] + f_1(\lambda) + f_2(\lambda) \}] d\lambda = 0 \end{aligned} \quad (2.56)$$

$\theta = \nu\pi$  に対して,

$$\begin{aligned} &-\frac{4j}{\pi^2} \int_0^\infty K_{j\lambda}(\gamma r) K_{j\lambda}(\gamma r_0) [\lambda \{ -\sinh[\lambda(\pi - \nu\pi + \theta_0)] + f_1(\lambda) e^{j\lambda\nu\pi} - f_2(\lambda) e^{-j\lambda\nu\pi} \} \\ &-jk\beta_2 \{ \cosh[\lambda(\pi - \nu\pi + \theta_0)] + f_1(\lambda) e^{j\lambda\nu\pi} + f_2(\lambda) e^{-j\lambda\nu\pi} \}] d\lambda = 0 \end{aligned} \quad (2.57)$$

という2つの方程式が得られる。但し  $\beta_1, \beta_2$  はそれぞれ  $\theta = 0, \nu\pi$  における障壁表面の比音響アドミッタンスである、まず、 $\beta_1 = \beta_2 = \beta$  であり、更に、完全に剛 ( $\beta = 0$ ) あるいは完全にソフト ( $\beta = \infty$ ) の場合に条件を限定して考察する。

それぞれの場合について、(2.56) 及び (2.57) 式は以下のように1組の連立1次方程式にまとめられる。

#### 1. 障壁表面が完全に剛な場合

$$\begin{aligned} f_1(\lambda) - f_2(\lambda) &= -\sinh[\lambda(\pi - \theta_0)] \\ f_1(\lambda) e^{j\lambda\nu\pi} - f_2(\lambda) e^{-j\lambda\nu\pi} &= \sinh[\lambda(\pi - \nu\pi + \theta_0)] \end{aligned} \quad (2.58)$$

#### 2. 障壁表面が完全にソフトの場合

$$\begin{aligned} f_1(\lambda) + f_2(\lambda) &= -\cosh[\lambda(\pi - \theta_0)] \\ f_1(\lambda) e^{j\lambda\nu\pi} + f_2(\lambda) e^{-j\lambda\nu\pi} &= -\cosh[\lambda(\pi - \nu\pi + \theta_0)] \end{aligned} \quad (2.59)$$

これらの方程式を解いて、 $f_1, f_2$  を求めることが出来、更にそれらの結果を (2.54) に代入し、(2.53) と結び付けることにより,

$$\begin{aligned} \phi(P) &= -\frac{4j}{\pi^2} \int_0^\infty K_{j\lambda}(\gamma r) K_{j\lambda}(\gamma r_0) \frac{\sinh(\pi\lambda)}{\sinh(\nu\pi\lambda)} \\ &\quad \times \{ \cosh[\lambda(\nu\pi - |\theta - \theta_0|)] \pm \cosh[\lambda(\nu\pi - |\theta + \theta_0|)] \} d\lambda \end{aligned} \quad (2.60)$$

という解が得られる。被積分関数中のプラス及びマイナスはそれぞれ剛、ソフトの場合に対応する。以後、ウェッジの開き角  $\nu\pi$  を  $\nu\pi = 2\pi$  と限定して半無限障壁による回折場と対応させることとする。

次に (2.60) 式を実際に数値計算可能な形に変形することを考える。(2.60) 式は,

$$\phi(P) = -\frac{4j}{\pi^2} \int_0^\infty \frac{K_{j\lambda}(\gamma r) K_{j\lambda}(\gamma r_0)}{\sinh(2\pi\lambda)} \times \left[ \begin{aligned} &\{\sinh[\lambda(3\pi - |\theta - \theta_0|)] + \sinh[\lambda(-\pi + |\theta - \theta_0|)]\} \\ &\pm \{\sinh[\lambda(3\pi - |\theta + \theta_0|)] + \sinh[\lambda(-\pi + |\theta + \theta_0|)]\} \end{aligned} \right] \quad (2.61)$$

と変形できるため,

$$I = \int_0^\infty K_{j\lambda}(\gamma r) K_{j\lambda}(\gamma r_0) \frac{\sinh(\lambda q)}{\sinh(\lambda p)} d\lambda \quad (2.62)$$

という形式の関数の振舞いについて考察する。ここに,

$$p = 2\pi, q = \pi \pm p \mp |\theta \pm \theta_0| \quad (2.63)$$

である, まず,

$$K_{j\lambda}(a) K_{j\lambda}(b) = \int_0^\infty K_0(\sqrt{a^2 + b^2 + 2ab \cosh x}) \cos(x\lambda) dx \quad (2.64)$$

という関係式を代入すると,  $I$  は,

$$I = \int_0^\infty \frac{\sinh(\lambda q)}{\sinh(\lambda p)} d\lambda \int_0^\infty K_0(\gamma \sqrt{r^2 + r_0^2 + 2rr_0 \cosh x}) \cos(x\lambda) dx \quad (2.65)$$

となる。更に,  $-p < q < p$  であれば, 積分の順序を入れ換えることが出来て,

$$I = \int_0^\infty K_0(\gamma \sqrt{r^2 + r_0^2 + 2rr_0 \cosh x}) dx \int_0^\infty \frac{\sinh(\lambda q)}{\sinh(\lambda p)} \cos(x\lambda) d\lambda \quad (2.66)$$

となる。後半の積分は余弦フーリエ積分として,

$$\int_0^\infty \frac{\sinh(\lambda q)}{\sinh(\lambda p)} \cos(x\lambda) d\lambda = \frac{\pi}{2p} \frac{\sin(\pi q/p)}{\cosh(\pi x/p) + \cos(\pi q/p)} \quad (2.67)$$

for  $-p < q < p$

であることが知られており [22], この結果から (2.66) 式は,

$$\begin{aligned} I &= \int_0^\infty K_{j\lambda}(\gamma r) K_{j\lambda}(\gamma r_0) \frac{\sinh(\lambda q)}{\sinh(\lambda p)} d\lambda \\ &= \frac{\pi}{2p} \sin(\pi q/p) \int_0^\infty \frac{K_0(\gamma \sqrt{r^2 + r_0^2 + 2rr_0 \cosh x})}{\cosh(\pi x/p) + \cos(\pi q/p)} dx \end{aligned} \quad (2.68)$$

と変形出来る。これに  $p, q$  の値を代入し, (2.61) 式の形に戻せば数値積分可能な解が求まる。しかし, このままでは (2.67) 式における  $-p < q < p$  という制限から, (2.68) 式は  $\theta$  に関して全領域で成立するものではない。そこで, Fig. 2.14 及び (2.69) 式に示すように領域を 3 分割して考える。

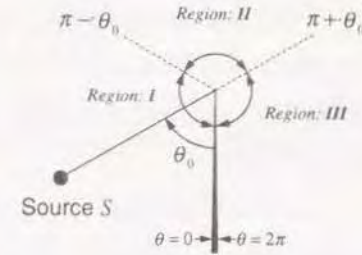


Figure 2.14: 解の導出のための領域分割

$$\begin{aligned} I. & 0 < \theta < \pi - \theta_0 \\ II. & \pi - \theta_0 < \theta < \pi + \theta_0 \\ III. & \pi + \theta_0 < \theta < 2\pi \end{aligned} \quad (2.69)$$

3つの領域の境界は, 実音源, 及びその鏡像による幾何光学的な影の境界である。実際に (2.63) 式の  $q$  を代入して考えると,  $I$ , の領域において,  $q = \pi + p - |\theta - \theta_0|$ , 及び  $\pi + p - |\theta + \theta_0|$  が, また  $II$ , において,  $q = \pi + p - |\theta - \theta_0|$  が条件を満たさない。そこで双曲線関数の加法定理から,

$$\begin{aligned} &\frac{\sinh[\lambda(\pi + p - |\theta \pm \theta_0|)]}{\sinh(\lambda p)} \\ &= 2 \cosh[\lambda(\pi - |\theta \pm \theta_0|)] - \frac{\sinh[\lambda(p - \pi + |\theta \pm \theta_0|)]}{\sinh(\lambda p)} \end{aligned} \quad (2.70)$$

と変形する。(2.70) 式の第1項目は, (2.68) 式に戻した結果, (2.53) 式の関係から音源及びその鏡像からの直接波成分を表すものとなる。

以上の議論をまとめると, 楔型障壁による回折場の解は, (2.71) ~ (2.75) 式に示すように Hankel 関数の無限積分を含む4つの項に, 領域によっては音源あるいはその鏡像からの寄与を加えたもので表現出来ることとなる。

$$\phi(P) = \phi_g(P) + \phi_d(P) \quad (2.71)$$

$$\phi_g(P) = \begin{cases} H_0^{(1)}(kR) \pm H_0^{(1)}(kL) & \text{for } 0 < \theta < \pi - \theta_0 \\ H_0^{(1)}(kR) & \text{for } \pi - \theta_0 < \theta < \pi + \theta_0 \\ 0 & \text{for } \pi + \theta_0 < \theta < 2\pi \end{cases} \quad (2.72)$$



$$\begin{aligned}\phi_d(P) = & \{V(-\pi - \theta + \theta_0) - V(\pi - \theta + \theta_0)\} \\ & \pm \{V(-\pi - \theta - \theta_0) - V(\pi - \theta - \theta_0)\}\end{aligned}\quad (2.73)$$

$$V(q) = \frac{1}{4\pi} \int_0^\infty H_0^{(1)}(k\tilde{R}(jt)) \frac{\sin(q/2)}{\cosh(t/2) - \cos(q/2)} dt \quad (2.74)$$

$$\tilde{R}(\varphi) = \sqrt{r^2 + r_0^2 + 2rr_0 \cos \varphi} \quad (2.75)$$

但し、 $\phi_g, \phi_d$  の  $\pm$  は障壁表面が剛、ソフトの場合にそれぞれ対応する。 $R$  は (2.51) で与えられる音源と受音点との距離であり、 $L$  は、

$$L = \sqrt{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos(\theta + \theta_0)} \quad (2.76)$$

で与えられる音源の障壁による鏡像と受音点との距離である。

$\phi_d$  の 4 項は、Fig. 2.15 及び (2.77) 式に示すように、実音源  $S$  及びその障壁による鏡像  $S'$  から、受音点  $P$  及びその鏡像  $P'$  に至る 4 つの経路に対応しているものと解釈できる [18]。

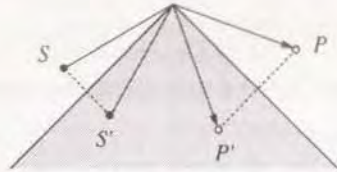


Figure 2.15: 音源  $S$  及びその鏡像  $S'$  から受音点  $P$  及びその鏡像  $P'$  に至る 4 つの経路

$$\begin{aligned}S \rightarrow P &: V(\pi - \theta + \theta_0) \\ S' \rightarrow P &: V(\pi - \theta - \theta_0) \\ S \rightarrow P' &: V(-\pi - \theta + \theta_0) \\ S' \rightarrow P' &: V(-\pi - \theta - \theta_0)\end{aligned}\quad (2.77)$$

これは、ソフトな場合の解が、障壁での 1 回反射成分の項、つまり、 $S \rightarrow P'$ 、及び  $S' \rightarrow P$  の項にソフトな表面の音圧反射係数  $-1$  が掛かった形で表されることから明らかである。

この結果を利用して、障壁表面が有限のインピーダンスを持つ場合、また障壁の片面ずつ特性が異なる場合を定式化することが出来る。なお、障壁表面での音響特性の記述に関しては、アドミッタンスと、

$$\rho = \frac{1 - \beta}{1 + \beta} \quad (2.78)$$

という関係にある音圧反射係数  $\rho$  を用いることとする。ちなみに、

$$\left. \begin{aligned} \text{障壁表面が剛な場合} &: \rho = +1 \\ \text{障壁表面がソフトな場合} &: \rho = -1 \\ \text{障壁表面が吸音性の場合} &: \rho = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.79)$$

である。また、障壁表面の反射係数を、音源側で  $\rho_1$ 、受音側で  $\rho_2$  と表す。

直接波成分  $\phi_g$  においては、障壁による鏡像を表す項に  $\rho_1$  が掛かり、また回折波成分  $\phi_d$  においてはその経路に応じて  $\rho_1$  または  $\rho_2$  が掛かることとなる。つまり、解としては、

$$\phi(P) = \phi_g(P) + \phi_d(P) \quad (2.80)$$

$$\phi_g(P) = \begin{cases} H_0^{(1)}(kR) + \rho_1 H_0^{(1)}(kL) & \text{for } 0 < \theta < \pi - \theta_0 \\ H_0^{(1)}(kR) & \text{for } \pi - \theta_0 < \theta < \pi + \theta_0 \\ 0 & \text{for } \pi + \theta_0 < \theta < 2\pi \end{cases} \quad (2.81)$$

$$\begin{aligned}\phi_d(P) = & \{\rho_1 \rho_2 V(-\pi - \theta + \theta_0) - V(\pi - \theta + \theta_0)\} \\ & \pm \{\rho_2 V(-\pi - \theta - \theta_0) - \rho_1 V(\pi - \theta - \theta_0)\}\end{aligned}\quad (2.82)$$

$$V(q) = \frac{1}{4\pi} \int_0^\infty H_0^{(1)}(k\tilde{R}(jt)) \frac{\sin(q/2)}{\cosh(t/2) - \cos(q/2)} dt \quad (2.83)$$

$$\tilde{R}(\varphi) = \sqrt{r^2 + r_0^2 + 2rr_0 \cos \varphi} \quad (2.84)$$

という形式でまとめられる。

ちなみに、完全吸音の場合や、有限音響インピーダンスの場合などは、(2.55) 式における  $\beta$  にその値を入れて演算を行えば良いが、実際には解析的に解くことが出来ず、実用的とはいえない。

なお、この解の回折波成分を表す  $\phi_d$  は、音源及びその鏡像による幾何光学的な影の領域で発散し、また、 $\phi_g$  も影の境界では不連続である。この様にその振舞いに多少不備な点もあるが、式の物理的な意味が理解し易いことから、本論文では 3 次元音場の場合を含めて障壁表面の音響特性について議論する場合は (2.80) ~ (2.84) 式の形の解を用いるものとする。

#### 2.4.2 音源が点音源の場合

次に、音源が点音源、つまり音場が 3 次元の場合について考察する。Fig. 2.16 に示す音場において、 $S: (r_0, \theta_0, z_0)$  の位置で音源が、

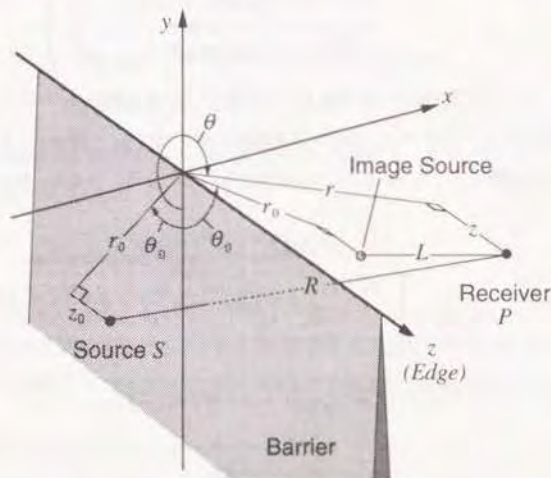


Figure 2.16: 3次元音場における楔型障壁、音源  $S$ 、及び受信点  $P$

$$\phi_i = \frac{e^{jkR}}{kR} \quad (2.85)$$

で表される正弦球面波を放射しているものとする。ここに、 $R$  は音源と受信点の距離を表し、以下で与えられる。

$$\begin{aligned} R &= \sqrt{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos(\theta - \theta_0) + (z - z_0)^2} \\ &= \sqrt{r'^2 + (z - z_0)^2} \end{aligned} \quad (2.86)$$

但し、

$$r'^2 = r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos(\theta - \theta_0) \quad (2.87)$$

である。ここで、(2.85) 式が

$$\frac{e^{jk\sqrt{r'^2 + (z - z_0)^2}}}{k\sqrt{r'^2 + (z - z_0)^2}} = -\frac{j}{2k} \int_{-\infty}^{\infty} H_0^{(1)}(r'\sqrt{k^2 - \tau^2}) e^{j\tau|z - z_0|} d\tau \quad (2.88)$$

と表現出来ることから、(2.5) 式で行った手続きと同様に、円筒波入射に対する解 (2.80) 式に対して、波数  $k$  を

$$k \rightarrow \sqrt{k^2 - \tau^2} \quad (2.89)$$

と置換し、更に

$$-\frac{j}{2k} e^{j\tau|z - z_0|} \quad (2.90)$$

を乗じ、 $\tau$  について  $-\infty$  から  $\infty$  まで積分することによって回折場の解を求めることが出来る [23]。ここでは結果のみを以下に示す。

$$\phi(P) = \phi_g(P) + \phi_d(P) \quad (2.91)$$

$$\phi_g = \begin{cases} \frac{e^{jkR}}{kR} \pm \frac{e^{jL}}{kL} & \text{for } 0 < \theta < \pi - \theta_0 \\ \frac{e^{jkR}}{kR} & \text{for } \pi - \theta_0 < \theta < \pi + \theta_0 \\ 0 & \text{for } \pi + \theta_0 < \theta < 2\pi \end{cases} \quad (2.92)$$

$$\begin{aligned} \phi_d(P) &= \{V(-\pi - \theta + \theta_0) - V(\pi - \theta + \theta_0)\} \\ &\quad \pm \{V(-\pi - \theta - \theta_0) - V(\pi - \theta - \theta_0)\} \end{aligned} \quad (2.93)$$

$$V(q) = \frac{1}{4\pi} \int_0^\infty \frac{e^{jkR(jt)}}{kR(jt)} \frac{\sin(q/2)}{\cosh(t/2) - \cos(q/2)} dt \quad (2.94)$$

$$\tilde{R}(\varphi) = \sqrt{r^2 + r_0^2 + 2rr_0 \cos \varphi + (z - z_0)^2} \quad (2.95)$$

ここに  $L$  は音源の障壁による鏡像と受信点との距離であり、以下で与えられる。

$$L = \sqrt{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos(\theta + \theta_0) + (z - z_0)^2} \quad (2.96)$$

また、 $\phi_g, \phi_d$  のプラスマイナスは、やはりそれぞれ剛、ソフトな障壁に対応している。 $\phi_d$  はやはり4項の和あるいは差で与えられているが、この場合も4項はそれぞれ音源、及びその鏡像から、受信点及びその鏡像への経路に対応するものと考えられる。従って、やはり上記の結果を利用して、障壁表面が有限のインピーダンスを持つ場合を定式化することが出来る。

直接波成分  $\phi_g$  においては、障壁による鏡像を表す項に  $\rho_1$  が掛かり、また回折波成分  $\phi_d$  では、その経路に応じて  $\rho_1, \rho_2$  が掛かることになり、解としては、

$$\phi(P) = \phi_g(P) + \phi_d(P) \quad (2.97)$$



$$\phi_g = \begin{cases} \frac{e^{jkR}}{kR} \pm \rho_1 \frac{e^{jkL}}{kL} & \text{for } 0 < \theta < \pi - \theta_0 \\ \frac{e^{jkR}}{kR} & \text{for } \pi - \theta_0 < \theta < \pi + \theta_0 \\ 0 & \text{for } \pi + \theta_0 < \theta < 2\pi \end{cases} \quad (2.98)$$

$$\phi_d(P) = \{ \rho_1 \rho_2 V(-\pi - \theta + \theta_0) - V(\pi - \theta + \theta_0) \} \\ \pm \{ \rho_2 V(-\pi - \theta - \theta_0) - \rho_1 V(\pi - \theta - \theta_0) \} \quad (2.99)$$

$$V(q) = \frac{1}{4\pi} \int_0^\infty \frac{e^{jk\tilde{R}(jt)}}{k\tilde{R}(jt)} \frac{\sin(q/2)}{\cosh(t/2) - \cos(q/2)} dt \quad (2.100)$$

$$\tilde{R}(\varphi) = \sqrt{r^2 + r_0^2 + 2rr_0 \cos \varphi + (z - z_0)^2} \quad (2.101)$$

という形式でまとめられる。

### 2.4.3 数値計算例

これまでの結果を用いて数値シミュレーションを行う。まず、線音源、点音源いずれの場合にも必要となる無限積分について考察する。この場合は、被積分関数に音源と受音点間の距離が含まれており、その位置を特定しなければならない。そこで Fig. 2.17 に示すような位置関係を仮定する。音源がエッジから 0.5 m、受音点が 1 m の距離であり、角度はそれぞれ  $\theta_0 = 60^\circ$ ,  $\theta = 300^\circ$

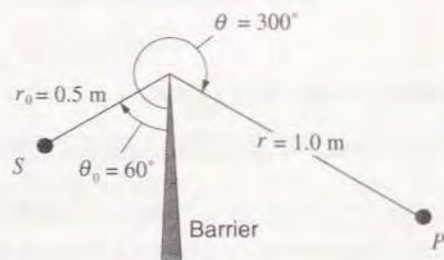


Figure 2.17: 数値計算のための音源及び受音点位置

である。周波数は 50, 500, 5kHz の 3 種類とした。なお、この位置関係は線音源、点音源で共通であるものとし、点音源の場合には、更に  $z_0 = z = 0$  の条件が加わる。これらの条件は、半無限障壁の場合と同様、1/10 縮尺を想定したものである。周波数については二桁の範囲を調べるために設定した。これらの条件で、 $V(\pi - \theta + \theta_0)$ 、つまり実音源から受音点への寄与を表す回折項に

ついて被積分関数の振舞い、及び積分値の変動の様子を、積分上限値の関数として計算する。具体的に示すと、線音源の場合、

$$I(t) = \left| H_0^{(1)}(k\tilde{R}(jt)) \frac{\sin(\frac{\pi - \theta + \theta_0}{2})}{\cosh(\frac{t}{2}) - \cos(\frac{\pi - \theta + \theta_0}{2})} \right| \quad (2.102)$$

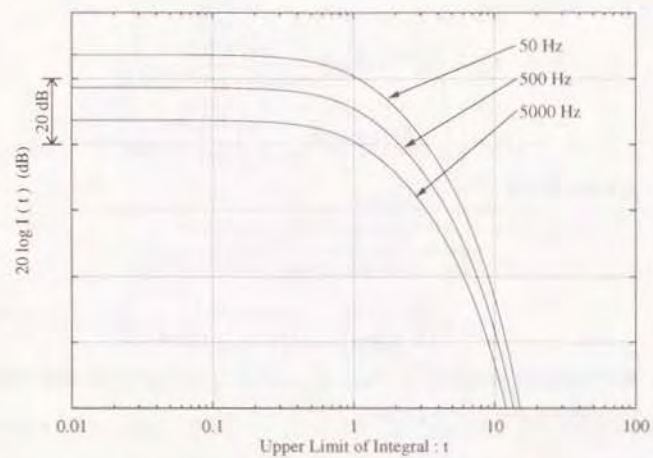
$$I'(t) = \left| \int_0^t H_0^{(1)}(k\tilde{R}(jt)) \frac{\sin(\frac{\pi - \theta + \theta_0}{2})}{\cosh(\frac{t}{2}) - \cos(\frac{\pi - \theta + \theta_0}{2})} dt \right| \quad (2.103)$$

であり、点音源の場合は、

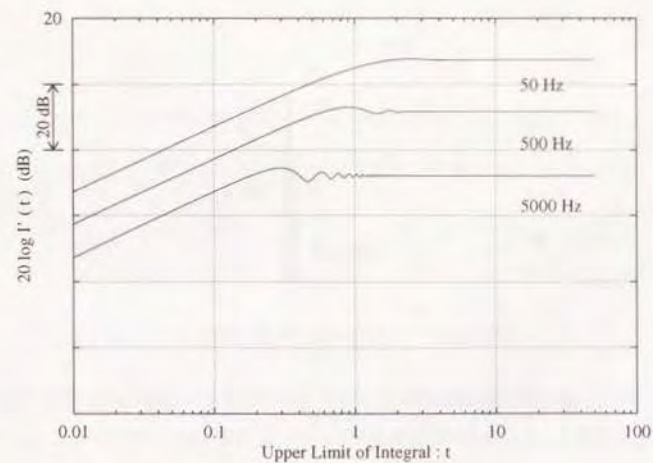
$$I(t) = \left| \frac{e^{jk\tilde{R}(jt)}}{k\tilde{R}(jt)} \frac{\sin(\frac{\pi - \theta + \theta_0}{2})}{\cosh(\frac{t}{2}) - \cos(\frac{\pi - \theta + \theta_0}{2})} \right| \quad (2.104)$$

$$I'(t) = \left| \int_0^t \frac{e^{jk\tilde{R}(jt)}}{k\tilde{R}(jt)} \frac{\sin(\frac{\pi - \theta + \theta_0}{2})}{\cosh(\frac{t}{2}) - \cos(\frac{\pi - \theta + \theta_0}{2})} dt \right| \quad (2.105)$$

である。結果を線音源の場合について Fig. 2.18 (a),(b) に、点音源の場合を Fig. 2.19 (a),(b) に示す。(a), (b) はそれぞれ  $I, I'$  に対応する。

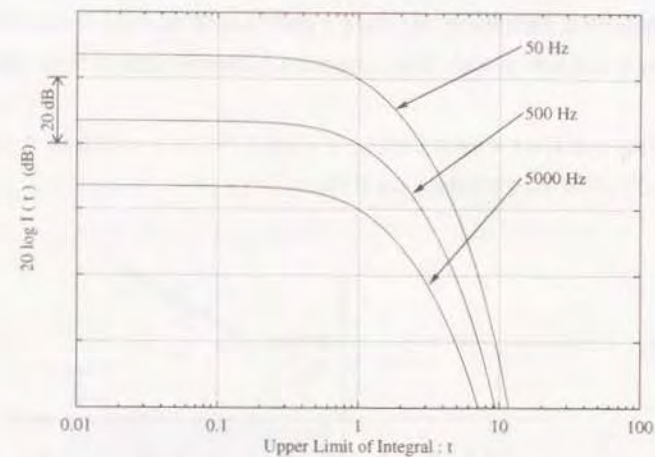


(a) 被積分関数の振る舞い

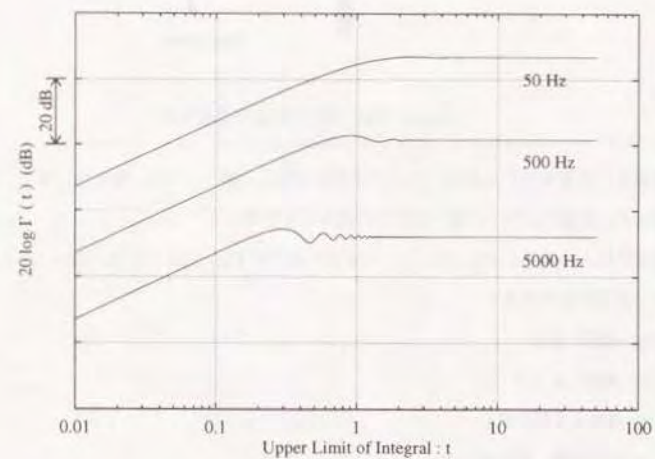


(b) 積分値の振る舞い

Figure 2.18: 被積分関数及び積分値の振る舞い (線音源の場合)



(a) 被積分関数の振る舞い



(b) 積分値の振る舞い

Figure 2.19: 被積分関数及び積分値の振る舞い (点音源の場合)



結果を見ると、関数の値は  $t$  が 1 程度から急激に減少し、積分上限値として 10 程度考えれば被積分関数及び積分値は十分に収束していることが明らかである。また、この付近での積分値の変動幅は 0.1 dB 以内に収まっており、この結果から、以後積分上限値として 10 を用いるものとする。

次に Fig. 2.20 に示す受音領域を設定し、その領域内での音圧レベル分布を計算する。先程と同様に点音源の場合は受音領域が  $z = 0$  の平面内に存在するものとする。

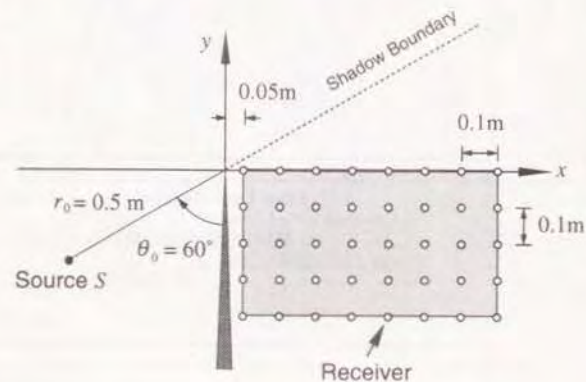


Figure 2.20: 音源位置及び受音領域

障壁表面の音響特性であるが、ここでは両面が完全に剛、ソフト、吸音性、また、片面ずつ異なる場合として剛-ソフト、剛-吸音性の組み合わせを考える。

線音源の場合の結果を Fig. 2.21 に、点音源の場合を Fig. 2.22 に示す。(a)~(g) と表面の特性の対応は以下の通りである。

- (a) 両面とも剛,
- (b) 両面ともソフト,
- (c) 両面とも吸音性,
- (d) 音源側剛, 受音側ソフト,
- (e) 音源側ソフト, 受音側剛,
- (f) 音源側剛, 受音側吸音性,

(g) 音源側吸音性, 受音側剛,

なお、コンターのレベルは自由音場 1 m 点での音圧を基準にした相対的な音圧レベルである。(a) の両面とも剛の場合の結果は、当然半無限障壁による回折場として求めた Fig. 2.5 及び Fig. 2.12 の結果と一致する。

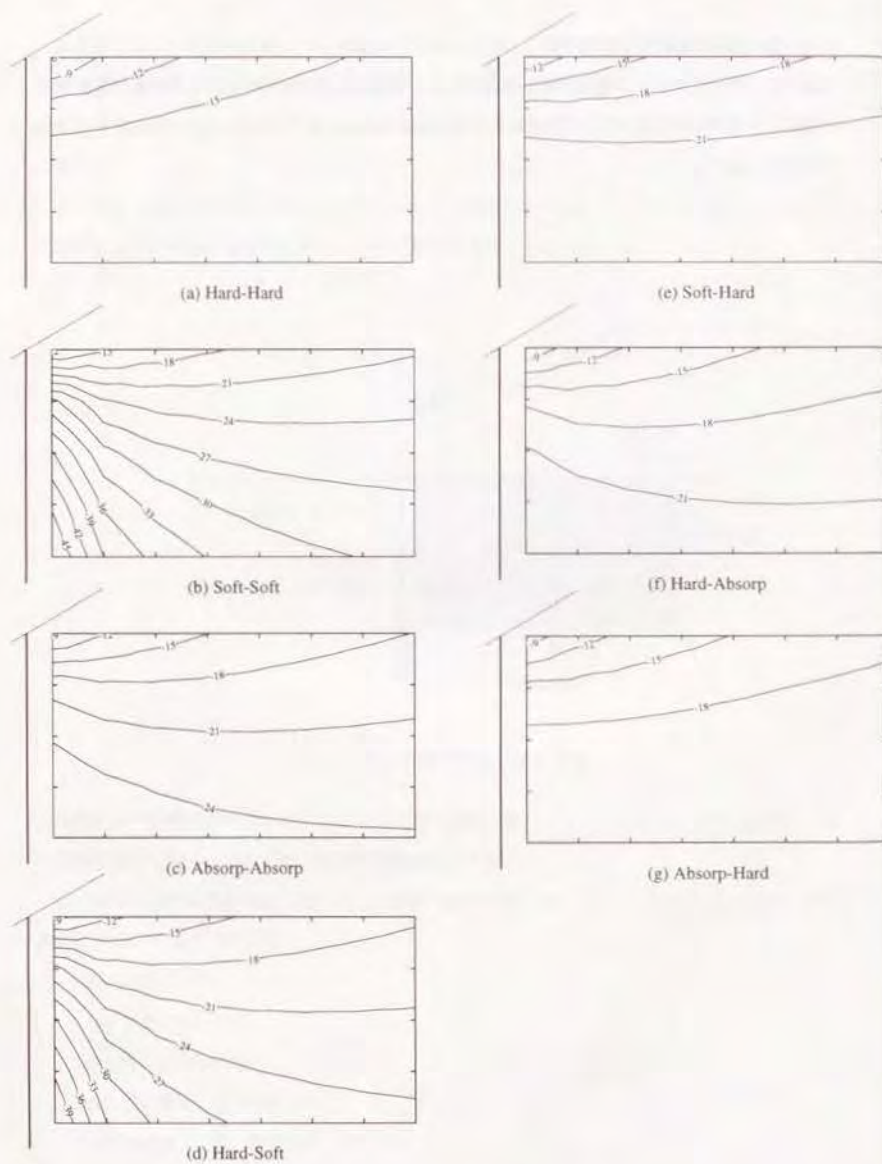


Figure 2.21: 異なる表面音響特性を持つ障壁による回折場（線音源の場合）

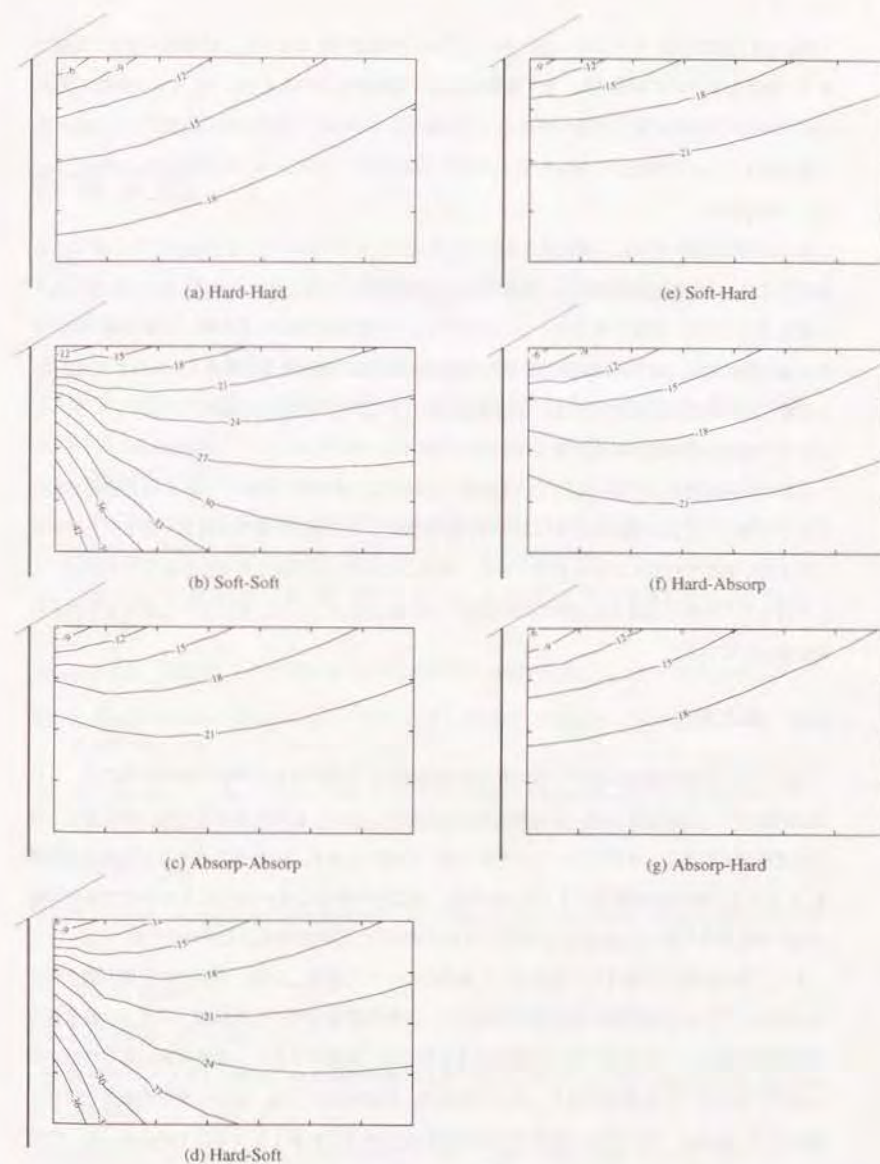


Figure 2.22: 異なる表面音響特性を持つ障壁による回折場（点音源の場合）



Fig. 2.21 及び 2.22 でコンターのパターンに若干の相違はあるものの、傾向的には全く同様であり、両者をまとめて考察する。まず障壁の両側で特性が同じである (a), (b), (c) を比較するが、障壁自体の遮音性能が最も大きいのは (b) の両面ソフトの場合であり、特に障壁に近く Edge から遠い部分で (a) と比較して 20 dB 以上の大きな減衰が得られていることが分かる。次いで (c), (a) の順である。

(b) と同様な傾向を示し、減衰が大きいのは受音側をソフトとした (d) の場合であるが (b) と比較して 3 ~ 6 dB 減衰が少ない。なお、(e) の音源側をソフトとした場合は、(b), (d) ほど大きな減衰は得られず、障壁を吸音性とした場合の (f) と同程度である。この様に、受音側、特に障壁による影の領域での音波減衰には障壁の受音側表面の特性が大きな影響を与えることが分かる。この傾向は、障壁の片面を吸音性とした場合 (f), (g) においても僅かに認められるが、いずれもソフトな場合ほどの大きな減衰量は得られていない。

実際の高速道路などで用いられている障壁においては、道路側 (音源側) のみを吸音処理していることが多い。これは道路の両端に立てられた障壁によって騒音が相互反射し、音圧が上昇することを防ぐ目的で行われている処理である。実際にはコストの問題などで行われていないが、ここで得られた結果は道路と反対側の障壁表面も吸音性とする事で、更に大きな遮音量を得る可能性を示している。

## 2.5 まとめ

本章では、以後本論文において用いる半無限障壁による回折場を表す解の導出を概説し、これを定式化した。音源が線音源、点音源それぞれの場合について厳密解及びその漸近解を求め、特に漸近解が有効となる条件についても考察した。結果によると、 $k$  を波数、音源と受音点の距離を  $R$  として、線音源の場合には  $kR = 5$  程度、点音源の場合には  $kR = 10$  程度以上であれば厳密解、漸近解の差が 0.1 dB 以内となり、両者はほぼ同一とみなせることが分かった。

また、障壁表面の音響特性を変化させた場合についても考察したが、そこでは任意の開き角を持つウェッジによる回折場を表す解を応用した。障壁の音響特性としては剛、ソフト、吸音性の 3 種類を仮定し、それぞれについて数値計算を行った。結果によると、障壁自体の遮音性能が最も大きいのはソフトな場合であり、次いで吸音性、剛な場合となる。なお、障壁の裏表で特性を変化させた場合は、受音側での特性がその遮音性能に大きな影響を与えることが分かった。この傾向は特に障壁に近くエッジから遠い領域において顕著に認められる。

## 参考文献

- [1] Arnold Sommerfeld, (瀬谷正男, 波岡武 訳) ノンマッフェルト理論物理学講座 IV 光学 (講談社, 昭和 47 年) pp. 264 - 292.
- [2] H. S. Carslaw, "Some Multiform Solutions of the Partial Differential Equations of Physical Mathematics and their Applications" Proc. London Math. Soc., vol.30 pp.121-163,1898.
- [3] H. M. Macdonald, "A Class of Diffraction Problems" Proc. London Math. Soc., vol. 14, pp.410-427,1915.
- [4] P. C. Clemmow, "A Note on the Diffraction of a Cylindrical Wave by a Perfectly Conducting Half-Plane," Q. J. Mech. Appl. Math. vol.3, pp. 377-384,1950.
- [5] Max Born, Emil Wolf, (草川徹, 横田英嗣 訳) 光学の原理 III (東海大学出版会, 1975), 第 11 章
- [6] 川井孝雄, 伊藤毅, "半無限障壁による回折音場" 音響学会誌, pp. 319 - 327,1976.
- [7] F. Oberhettinger, "Diffraction of Waves by a Wedge" Commun. Pure Appl. Math. vol.7, pp.551-563,1954.
- [8] J. J. Bowman, T. B. A. Senior and P. L. E. Uslenghi, *Electromagnetic and Acoustic Scattering by Simple Shapes*, (North-Holland Publishing Co., Amsterdam, 1969) pp.323-330.
- [9] 前出 [5] p. 862.
- [10] D. S. Jones, *Acoustic and Electromagnetic Waves*, (Clarendon Press, Oxford, 1986) pp.540-548.
- [11] 前出 [5] p. 864.
- [12] 前出 [8] pp. 330 - 335.
- [13] 藤原恭司, "ソフトな表面を持つ障壁の遮音性能" 騒音制御工学会技術発表会講演集, pp. 265-268,1990.
- [14] 藤原恭司, "ソフトな表面を持つ防音壁について" 音響学会騒音研資 N-92-07, 1992.
- [15] 前出 [8] p. 323 及び p. 330.

- [16] 藤原恭司, 安藤四一, 前川純一, “吸音性障壁による騒音減衰(障壁による騒音制御に関する研究 その2)” 音響学会誌, vol.32, pp.430-435, 1976.
- [17] 湯沢睦茂, “吸音性半無限障壁による音波の回折減衰” 音響学会誌 vol.33, pp.664-666, 1977.
- [18] 松井利仁, 高木興一, 平松幸三, 山本剛夫, “吸音性ウェッジ上での音波の伝搬” 音響学会誌 vol.44, pp.581-587, 1988.
- [19] 前出 [8] pp.252-275.
- [20] G. N. Watson, *A Treatise on the Theory of Bessel Functions*, (Cambridge University Press, 1966) pp.361.
- [21] 前川純一, 建築音響, (共立出版, 昭和59年), p.196.
- [22] 森口繁一, 宇田川金久, 一松信, 数学公式 II 級数・フーリエ解析 (岩波書店, 1989年), p.278.
- [23] 前出 [7] p. 560

## 第3章

# 能動制御の適用

## 3.1 概要

第2章で定式化した障壁による回折音に対して、能動制御を適用する。まず、付加的な音源(2次音源)を用いた回折音消去の原理を述べ、音源が線音源、点音源の場合について、制御を行った状態での回折場、及び制御の効果としての音圧減衰量を定式化する。また、それぞれの場合について数値シミュレーションを行い、検討を行うが、併せて障壁表面の音響特性を変化させた場合についても考察する。更に、制御の効果が得られる要因を、音響インテンシティを用いてエネルギーの流れの視点から考察する。

## 3.2 回折音消去の原理

本研究では、能動制御によって音源と反対側、特に音源が直接見えない領域(幾何光学的な意味での障壁による影の領域)での音圧レベルを低減させることを主な目的とし、この領域を受音側領域と称する。前章の漸近解の項で示したように、この受音側領域で、Edgeからの距離が波長に比べて充分大きい場合の回折波成分は、Edgeから放射する円筒波の形式で記述できる。このことは、受音領域に対してEdgeの音圧が支配的な寄与を持ち、あたかも仮想的な音源のように振舞うものとも解釈出来る。

もちろんこれは受音点がEdgeから十分に遠いと仮定した式の近似的な解釈であり、物理的にはEdgeのまわりの有限の大きさを持った領域が影響しているものと考えるべきである。この領域の大きさについては、定性的にはあるがFresnel Zone(半波長帯)の考え方で説明することが出来る。



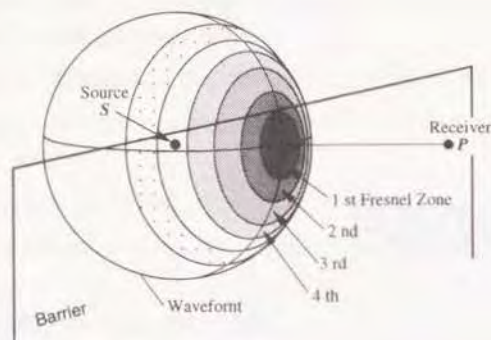


Figure 3.1: 障壁, 音源, 受信点及び Fresnel Zone

Fig. 3.1 に示すような音源, 受信点, 及び Edge の位置関係で Fresnel Zone を構成する, この場合, 受信点に対する影響は, 障壁表面からの反射波を無視すれば (3.1) 式に示すように第2 Zone 以降の各 Zone のうち, 受信点から見える部分からの寄与 (ここではこの値を  $\phi_n$  と表す) を足し合わせることで求められる [1-9]. もちろん, これは

- 第  $n$  Zone からの寄与は, Zone の中で大きく変化せず  $\phi_n$  で代表出来る.
- $n$  の増加に伴って  $\phi_n$  はゆっくりと減少し, ゼロに近づく.

という2つの近似のもとに成立する式である.

$$\phi(P) = \sum_{n=2}^N \phi_n \quad (3.1)$$

ところで, 各 Zone は音波の経路が半波長ずつ異なるように構成されているので, 隣あう Zone からの寄与は相反する符号を持ち, Fig. 3.2 に示すように受信点においてはその半分に相当する領域が互いにキャンセルしあい, 弱めあうことになる. 結果的には,

$$\phi(P) \cong \phi_2 + \frac{1}{2}\phi_3 \quad (3.2)$$

となり, この場合, 受信点に対しては Fig. 3.2 において斜線で示した第2及び第3 Zone の内側半分が支配的な影響を及ぼす領域であることがわかる. この Edge 近傍の領域は音源や受信点の相対的な位置関係によって変化するものであり, 受信側での広い領域を考える場合には更に面積

の大きいものともなり得る.

ここで受信側領域での大きな減衰を得るためには, この支配的な寄与を持つ領域のみを消去すれ

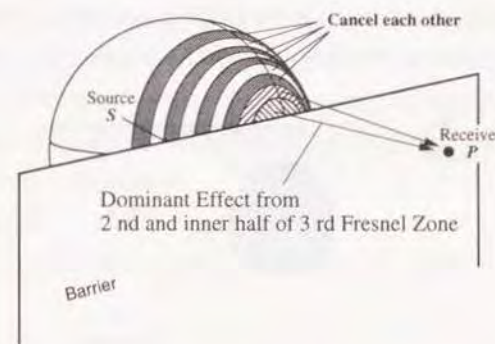


Figure 3.2: 受信点に支配的な寄与を与える Zone

ば良いと言う訳ではない. 例えば Fig. 3.3 に示すように第2及び第3 Zone の内側を完全吸音の板で被い隠してしまっても, 次の第3 Zone の外側半分が代わりに支配的となるだけであり, 結果的に受信点で観測される波動の影響に大差は無いことになる.

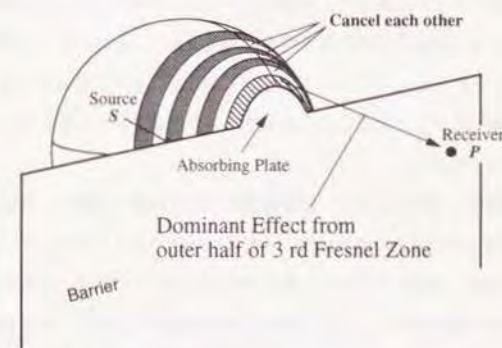


Figure 3.3: 第2 Zone 及び第3 Zone の内側を覆い隠した場合

なお、光学や物理学の幾つかの教科書においては、Fig. 3.4 の様に自由音場中に音源と受信点が存在する場合、受信点での波動の影響が、第1 Zone の内側半分からの寄与にはほぼ等しいため、この部分のみを被い隠してしまえば受信点での波の影響はほとんど無くなると説明されている [1,3]。しかしこれは明らかに誤った解釈であり、その場合は第1 Zone の外側からの影響で受信点では遮蔽が存在しない場合とほとんど同じ程度の振幅が観測される [5, 10]。

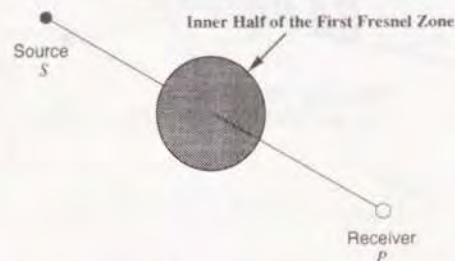


Figure 3.4: 音源と受信点の間に、第1 Fresnel Zone の内側半分を覆う障害物を置いた場合

以上の考察から、能動制御を適用して障壁による回折音を受音側で大きく減衰させるためには、音源によって生成される波面の、受信点から見える部分を出来るだけ広くキャンセルする必要があると考えられる。もちろんこれは、特定の受信点のみを対象に制御を行う場合、しかも音源の位置や周波数も特定されている場合の、理想的なキャンセリングについての議論である。この場合、支配的な寄与を持つ波面の形状をある程度推定出来れば、それに応じて効果的な波面キャンセルの為の基準点(キャンセルポイント)の設定が可能になるものと考えられる。あるいは本研究の主旨からはやや離れるが、その受信点自身をキャンセルポイントとする事で、より直接的な制御を行うことも可能である。

しかし、実際問題として考えた場合、障壁表面からの反射波の影響や、音源の位置、形態の違いなどから、騒音源信号の波面の形状は常に一義的に決定できるものではない。更に障壁による騒音制御を考えた場合、制御すべき場所は特定の受信点のみではなく、任意の大きさを持った受音領域である場合が一般的であり、また出来るだけ広い領域において、大きな減衰が得られることが望ましい。そこで一般性が高く、様々な場合に対応できるキャンセルのための基準点を考える必要があり、本研究においてはこれを Diffraction Edge (以後単に Edge と称する) に設定する

ものとする。

Edge 自身、あるいは波長と比較した意味でのその近傍は、受信点に対して支配的な寄与を持つ領域に必ず含まれる点であり、音源位置、受信点位置を選ばないという意味では非常に一般性の高い設定である。更に、次節において詳述するが、Edge をキャンセルポイントとして、第2章で示した「漸近解2」を用いて制御された場を定式化した場合、制御のために設置する付加的な音源(2次音源)の配置位置によっては回折場を恒等的にゼロとする事が可能である。これは遠方回折場の広い領域で大きな減衰が得られる可能性を示しているものと考えられ、本研究ではこの設定を妥当なものとして議論を進める。

以後、2次音源を用いて Edge での音圧をゼロあるいは最小にすることを制御の基本的な方法とし、更に2次音源位置等の種々のパラメータを変化させ、最良の結果を得ることを考察する。



### 3.3 音源が線音源の場合

#### 3.3.1 制御の方法及び2次音源が持つ係数について

まず、音源が無限長線音源の場合、つまり音場が2次元の場合を考察する。Fig. 3.5 に示すように2次音源を配置したとする。このとき、Edge における1次音源からの寄与は  $\phi$  を速度

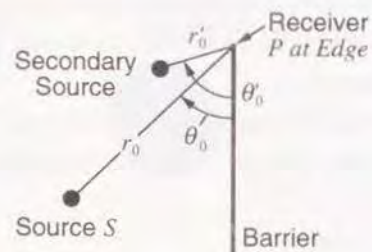


Figure 3.5: 2次元音場における2次音源配置

ポテンシャルとして（厳密解を用いて）次のように与えられる。(2.15) 式において  $r=0$  及び、 $R_1=R=L=r_0$  であることから、

$$\phi(P) = -\frac{2j}{\pi} 2e^{jkR} \int_0^\infty \frac{e^{j\mu^2}}{\sqrt{\mu^2 + 2kR}} d\mu \quad (3.3)$$

となり、更にこれは (2.14) 式の関係から、

$$\phi(P) = H_0^{(1)}(kR) \cong \sqrt{\frac{2}{\pi}} e^{-\frac{1}{4}j\pi} \frac{e^{jkR}}{\sqrt{kR}} \quad (3.4)$$

と変形できる。つまり、Edge における音圧は、音源からの直接波によって記述できることになる。これは2次音源による影響についても同様であり、やはり

$$\phi'(P) = H_0^{(1)}(kR') \cong \sqrt{\frac{2}{\pi}} e^{-\frac{1}{4}j\pi} \frac{e^{jkR'}}{\sqrt{kR'}} \quad (3.5)$$

で与えられる。ここに、 $\phi'$  は2次音源が Edge に及ぼす影響であり、速度ポテンシャルである。また、 $R'$  は2次音源から Edge までの距離である。以後本章においては、 $'$ （ダッシュ）は2次音源に関する量を表すものとする。ここで、2次音源に持たせるキャンセルのための複素係数を  $A$  とし、(3.4)、(3.5) 式の和をゼロとすることを考えると、

$$\begin{aligned} \phi(P) + A \cdot \phi'(P) &= H_0^{(1)}(kR) + A \cdot H_0^{(1)}(kR') \\ &= 0 \end{aligned} \quad (3.6)$$

従って2次音源が持つべき複素係数  $A$  が、

$$\begin{aligned} A &= -\frac{\phi(P)}{\phi'(P)} \\ &= -\frac{H_0^{(1)}(kR)}{H_0^{(1)}(kR')} \cong -\frac{e^{jkR}}{\sqrt{kR}} \bigg/ \frac{e^{jkR'}}{\sqrt{kR'}} \end{aligned} \quad (3.7)$$

と決定される。なお、本論文における数値計算には、Hankel 関数を用いた形式の係数を用いるものとする。

以後、能動制御を行った場合の回折場を、

$$\phi^{OB} = \phi(P) + A \cdot \phi'(P) \quad (3.8)$$

で表す。また、1次音源のみの場合の  $\phi$  を  $\phi^{OH}$  と表現し、制御の効果としての音圧減衰量を以下で定義する。

$$\Delta L = 20 \log_{10} \frac{\phi^{OB}(P)}{\phi^{OH}(P)} \quad (3.9)$$

#### 3.3.2 2次音源配置位置が制御の効果に与える影響

制御の効果に影響を与えるものとして、2次音源の配置位置が考えられる。ここではまず、遠方回折場を表す〔漸近解2〕、つまり (2.23) 式を用いてその影響を調べる。この場合の合成回折場は、(3.8) 式に (2.23) 式を代入することにより、以下のように表される。

$$\phi^{OB} = -\frac{e^{jkR_0}}{\sqrt{\pi k R_0}} \frac{e^{jkR}}{\sqrt{\pi k R}} \left\{ \frac{2 \cos \frac{1}{2}\theta \cos \frac{1}{2}\theta_0}{\cos \theta + \cos \theta_0} - \frac{2 \cos \frac{1}{2}\theta \cos \frac{1}{2}\theta'_0}{\cos \theta + \cos \theta'_0} \right\} \quad (3.10)$$

これは明らかに  $\theta'_0$  によって変化するものであり、2次音源の配置角に依存している。いうならば能動制御が有効となるエリアに指向性が表れていると解釈出来る。

しかし、 $\theta'_0 = \theta_0$  の場合、つまり2次音源を1次音源と Edge を結ぶ線分上に配置した場合に限って (3.10) 式は恒等的にゼロとなり、2次音源及び受音点の配置位置に依存しない、広いエリアにわたっての音圧低減が期待出来ることになる。本研究では、“ $\theta'_0 = \theta_0$ ”つまり2次音源を1次音源と同じ角度に配置することを角度に関する最適位置と仮定する。

制御の効果を計算する式として (2.23) 式を用いれば、変数  $r'_0$  が消去されているため角度  $\theta'_0$  のみを問題にすることが出来る。しかし、より厳密なものとして (2.15) あるいは (2.20) 式を用いれば、これを無視することは出来ない。そこで次に、2 次音源配置に対するもう 1 つの要素である  $r'_0$  も併せて考える。

ここでは  $r'_0/r_0$  をパラメータとして採用する。Fig. 3.6 に示すように受音点を固定し、 $\theta'_0$  に関しては  $\theta_0 \pm 30^\circ$ 、 $r'_0/r_0$  に関しては 0.1 ~ 0.9 の範囲で変化させる。この場合の制御の効果を (3.9) 式によって計算するが、周波数は 5 kHz を仮定し回折場は「漸近解 1」である (2.20) 式を用いて計算した。

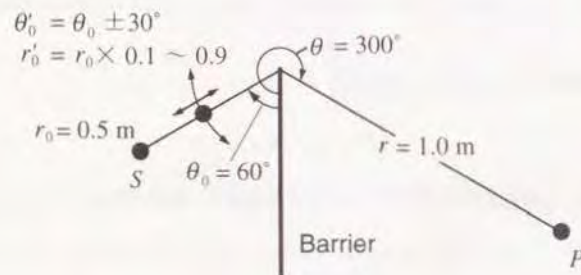


Figure 3.6: 2 次音源配置位置変化範囲

結果を Fig. 3.7 に示す。横軸は 1 次音源と 2 次音源との角度の差  $\theta'_0 - \theta_0$  であり、縦軸はグラフの見易さを考慮してこの場合  $-\Delta L$  ( $-\Delta L$ ) としている。また 9 本の曲線は  $r'_0/r_0 = 0.1 \sim 0.9$  に対応している。

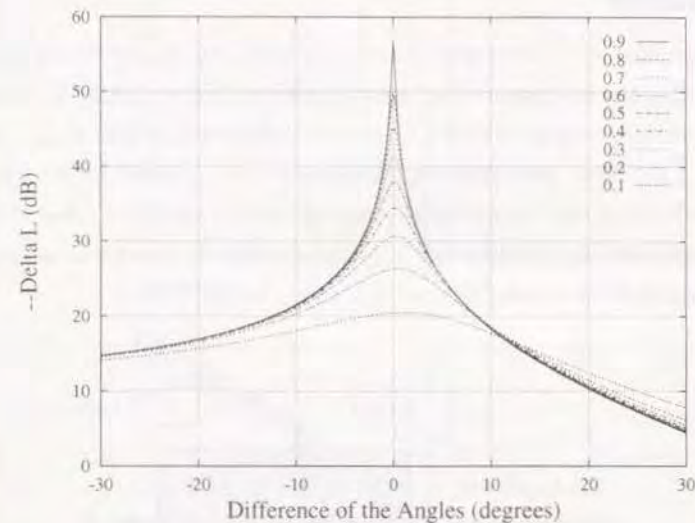


Figure 3.7: 2 次音源配置位置による制御の効果の変化 (線音源の場合)

結果によると、 $r'_0/r_0 \rightarrow 1$  とすることで減衰量が大きくなり、また  $r'_0/r_0$  がいずれの場合にも  $\theta'_0 = \theta_0$  がその極大値を与えている。これは  $r'_0/r_0 \rightarrow 1$ 、また  $\theta'_0 \rightarrow \theta_0$  となることで、2 次音源によるキャンセルの為の波面の形状と 1 次音源による波面の形状が Edge の周りにおける比較的広い領域で一致するためであると考えられる。

なおこの結果は、2 次音源が 1 次音源に近づくことによる 1 次音源の放射インピーダンスの低減が原因であるとも考えられる。しかしシミュレーションを行った範囲で議論するならば、 $r'_0/r_0 = 0.9$  の場合でも 1 次音源と 2 次音源の距離は 0.05 m であり、波長 (0.064 m) と同程度である。従ってこの結果については放射インピーダンスの低減よりも、Edge 近傍での波面の一致が主な原因と解釈するのが妥当であると考えられる。

現実的な問題として考えると、 $r'_0/r_0 \rightarrow 1$ 、つまり 2 次音源を 1 次 (騒) 音源に近づけることは様々な制限から不可能な場合が多い。しかし、どのような距離関係であろうと  $\theta'_0 = \theta_0$  とすることが、回折音に対する能動制御をより有効とするために必要な条件であると言えよう。



### 3.3.3 数値計算例

能動制御の効果について、幾つか数値シミュレーションを行う。Fig. 3.8 に示すような1次音源位置、つまり Edge からの距離は 0.5 m、障壁からの距離が  $60^\circ$  及び  $90^\circ$  を設定する。受信領域については Fig. 2.5 の場合と同じである。これらの条件は第2章で述べた通り、約 1/10 の縮尺を仮定したものである。制御の効果の角度依存性を確認するため、2次音源位置に関しても障壁からの角度が  $60^\circ$  及び  $90^\circ$  の2通りを想定し、角度の組み合わせを計4通り考える。Edge からの距離は一般的に実現可能な位置関係を考慮して1次音源との距離比が 0.2、つまり 0.1 m で一定とした。周波数は後で述べる実験との対応から 4.5, 6.3 kHz を仮定している。

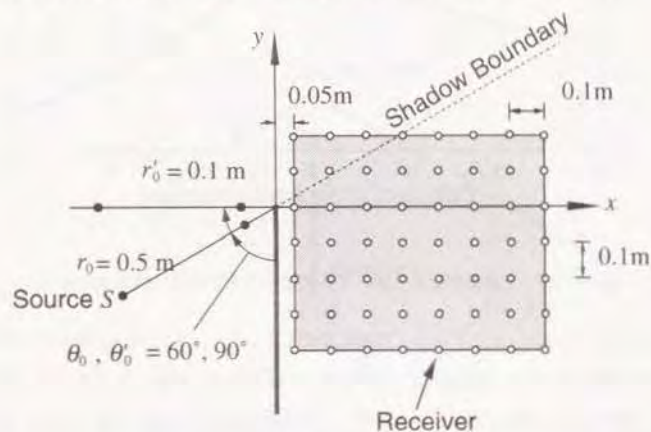
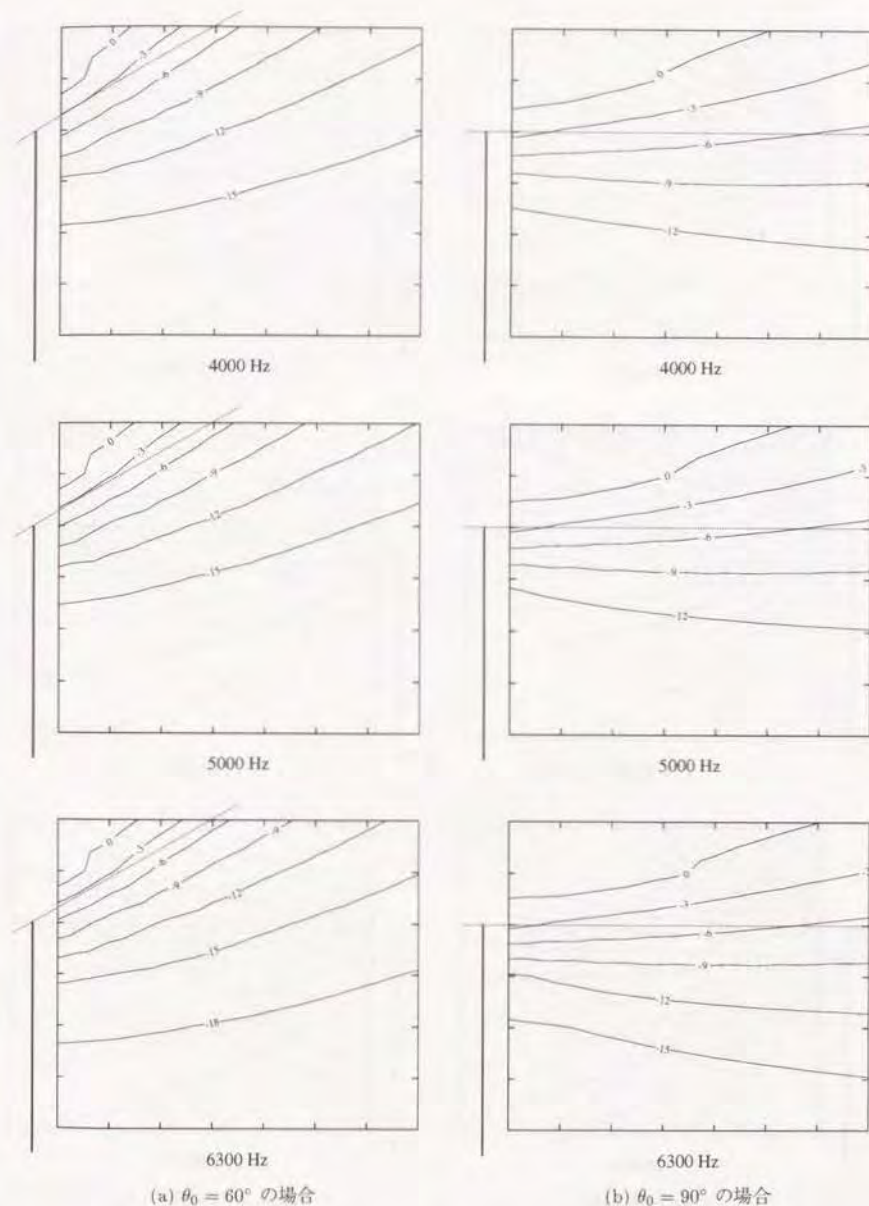


Figure 3.8: 音源位置及び受信領域

結果を領域内のコンターマップとして Figs. 3.9 ~ 3.13 に示す。Fig. 3.9 は2次音源が存在せず、1次音源のみの場合の音圧レベル分布であり、(a), (b) はそれぞれ1次音源の角度  $60^\circ, 90^\circ$  に対応する。Fig. 3.10 は1次音源が  $60^\circ$  の場合に、また Fig. 3.11 は  $90^\circ$  の場合に能動制御を行った状態の音圧レベル分布であり、(a), (b) は2次音源の角度が1次音源と同じ場合、違う場合に対応している。なお、ここでいう音圧レベルとは、2次元自由音場 1 m 点の音圧で規準化した相対的なものである。また、Figs. 3.12, 3.13 は制御の効果の分布である、図中の直線は障壁の位置、破線は1次音源に対する影の境界を示す。



(a)  $\theta_0 = 60^\circ$  の場合

(b)  $\theta_0 = 90^\circ$  の場合

Figure 3.9: 受信領域における音圧レベル分布 (制御 off の状態)



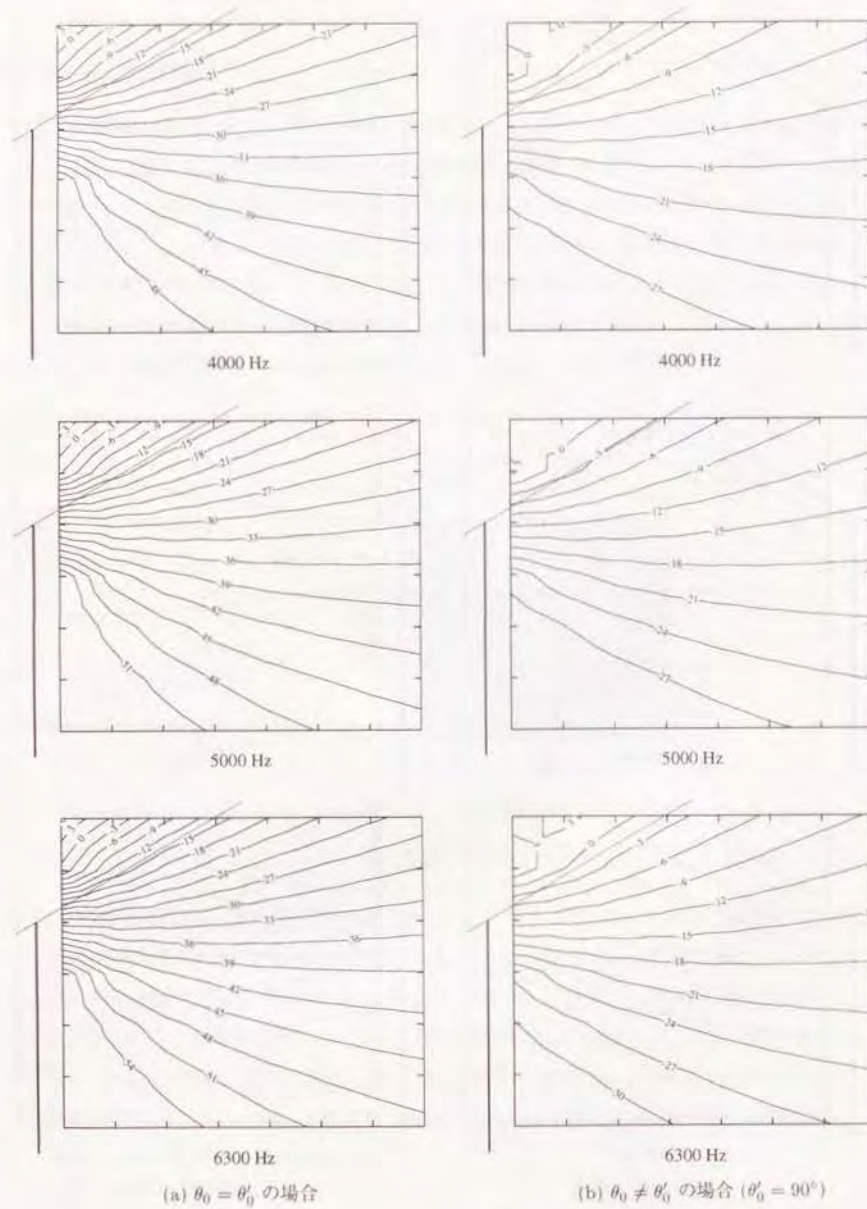


Figure 3.10: 受音領域における音圧レベル分布 (制御 on の状態) :  $\theta_0 = 60^\circ$

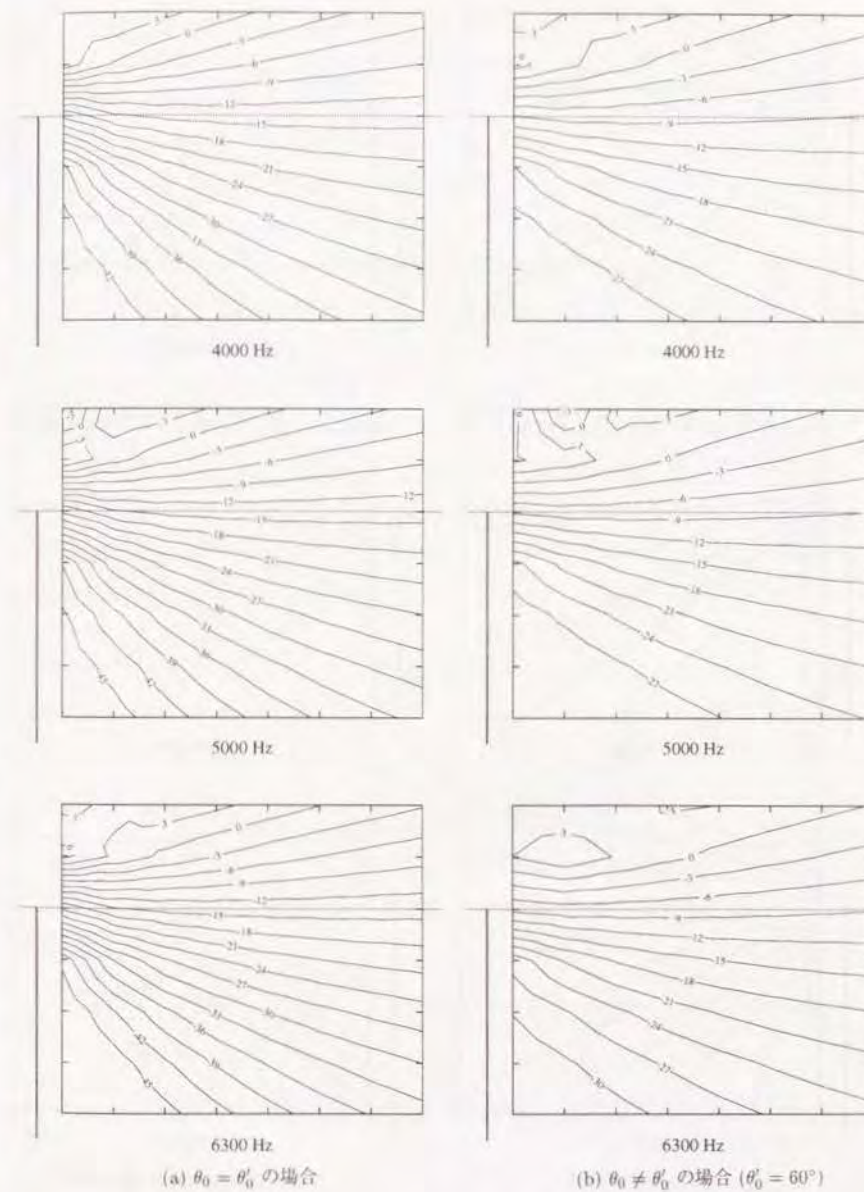


Figure 3.11: 受音領域における音圧レベル分布 (制御 on の状態) :  $\theta_0 = 90^\circ$



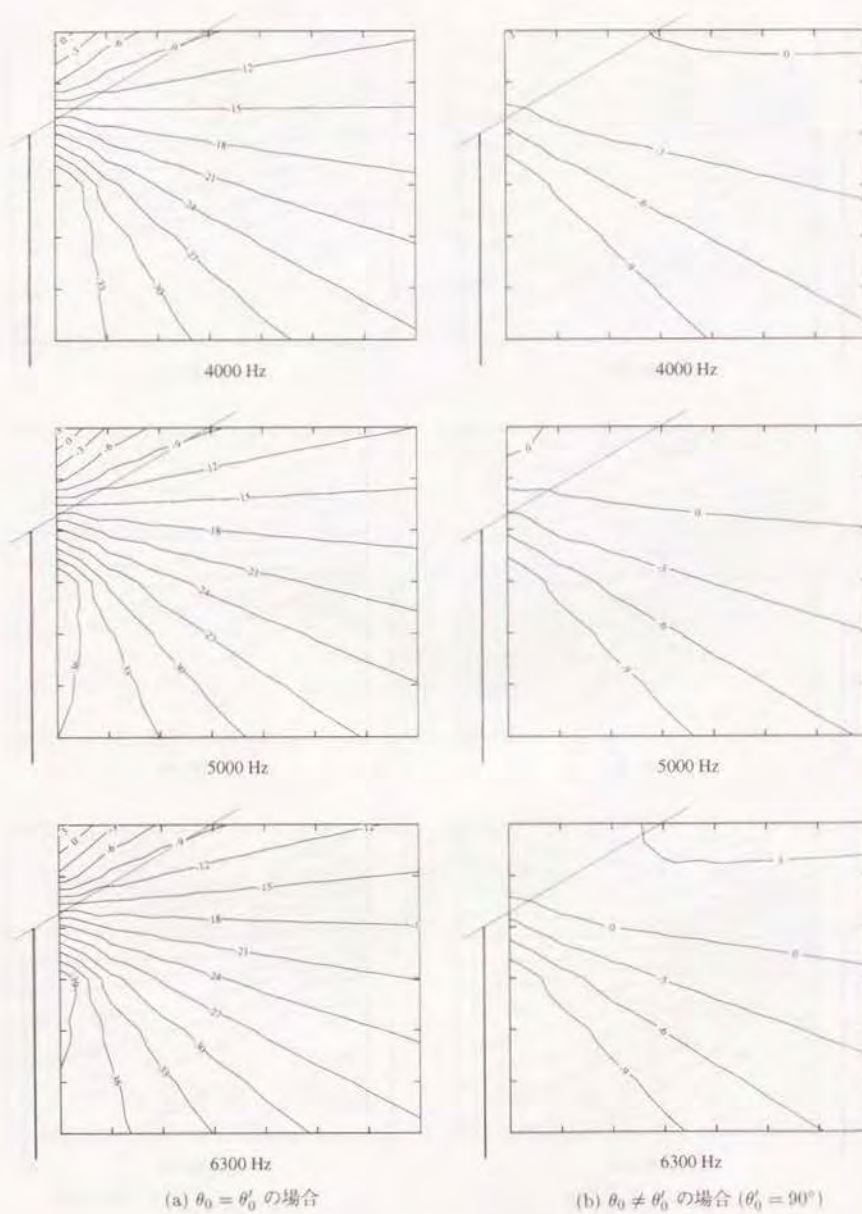


Figure 3.12: 能動制御による音圧減衰量分布:  $\theta_0 = 60^\circ$

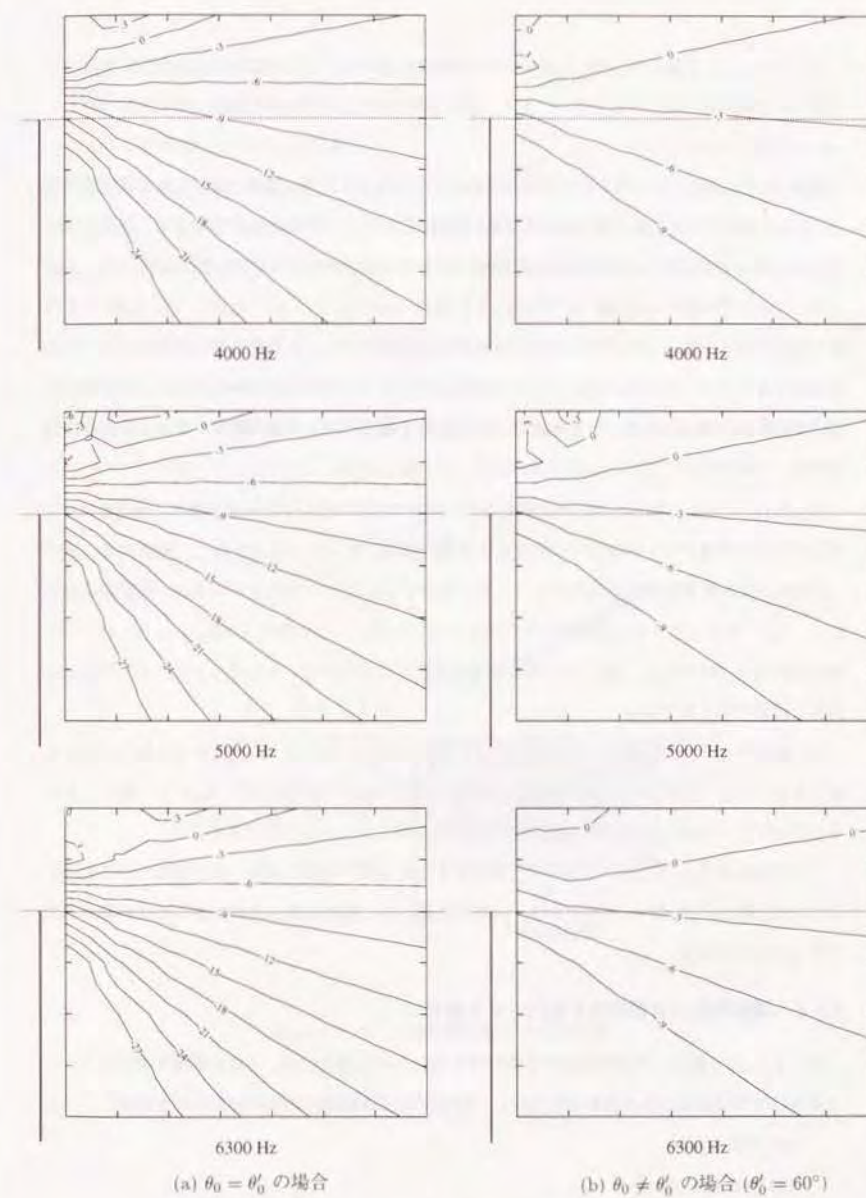


Figure 3.13: 能動制御による音圧減衰量分布:  $\theta_0 = 90^\circ$



まず、Fig. 3.9を見ると、音圧レベルは影の境界から離れるに従って緩やかに減少しており、その度合いは周波数が高いほど大きい。また、影の境界付近ではいずれの周波数でもレベルが $-3 \sim -6$  dB程度である。

次に Figs. 3.10, 3.11 であるが、いずれにおいても (a), (b) の差が顕著に認められる。双方とも (a) の2次音源を1次音源と同じ角度に配置した場合にはコンターの密度が高くなり、急激に音圧レベルが減少していることがわかる。影の境界付近で (a), (b) のレベルを比較すると、Fig. 3.10 において (a) で $-12 \sim -15$  dB, (b) で $-3 \sim -6$  dB (6300 Hz では $0 \sim -3$  dB) と、9 dB以上の差が生じている。Fig. 3.11 でも同様に6 dB程の差が認められ、2次音源を1次音源と同じ角度に配置することで、より低い音圧レベルを実現していることが明らかである。また、いずれの結果においても、領域の左下、つまり障壁に近い部分で最も低いレベルが得られていることが特徴である。

Fig. 3.12. においては (a), (b) を比較すると、制御の効果の差はより明確である。(a) すなわち双方の音源の角度が等しい場合には障壁による影の領域において $-12$  dB以上、場所によっては $-30$  dB以上の減衰量も得られている。これに対して (b) においては $0 \sim -9$  dB程度の領域が広く、(a) と比べて大きな効果が得られているとは言い難い。この傾向は Fig. 3.13 (a), (b) の比較においても同様であり、Fig. 3.12 程の極端な変化は認められないものの、やはり (a) の場合に大きな減衰が得られている。

以上の考察は3つの周波数全てについて当てはまることであるが、減衰量を周波数について比較すると、Edgeと同じ高さ近辺の領域ではほとんど差がない。障壁に近く Edge から離れたあたり (図中の左下の部分) で僅かに高周波で大きな値が得られている程度である。

ここで例えば Fig. 3.12(a) で得られた様な大きな減衰は、従来の障壁の高さを高くする方法などでは成し得ないほどのレベルであり、回折音低減の為に能動制御を適用することは非常に有効であることが分かる。

### 3.3.4 障壁表面の音響特性を変化させた場合

次に 2.4. 節で検討した障壁表面の音響特性を変化させた場合について能動制御を適用する。ここでは以下の5種類の組み合わせを仮定し、結果としては制御の効果の分布のみを示す。

- (a) 両面とも剛
- (b) 両面ともソフト

(c) 両面とも完全吸音性

(d) 音源側剛、受音側ソフト

(e) 音源側剛、受音側完全吸音性

制御の効果は (3.9) 式を用いて計算するが、この場合の回折場を表す  $\phi$  は、(2.82) 式で定義された楔型障壁による解に表面の特性に応じた反射係数 ( $\pm 1$  及び  $0$ ) を代入して用いるものとする。なお、2次音源が持つキャンセルのための係数は、障壁表面の音響特性に関係なく (3.7) 式と同じであるとした。

また、この場合は解の特性から、障壁による影の境界近傍では計算が行えない。そのため、1次音源位置を  $(r_0, \theta_0) = (0.5 \text{ m}, 60^\circ)$  に、また受音領域を Fig. 3.14 に示すように限定する。2次音源位置についても制御の効果が最大限得られるものとして  $(r'_0, \theta'_0) = (0.1 \text{ m}, 60^\circ)$  に固定する。(a) については Fig. 3.12 (a) と同じ結果であるが、受音領域を統一した上での比較用として再掲する。周波数は5 kHzに限定している。

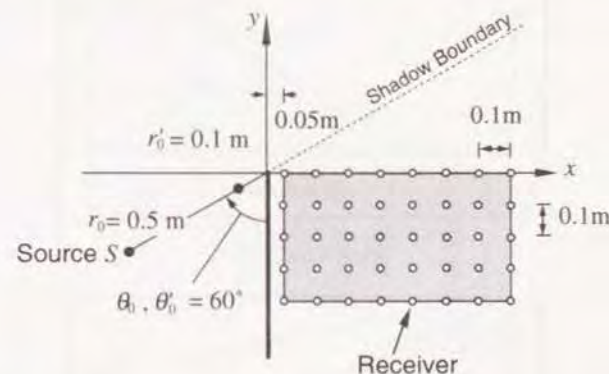
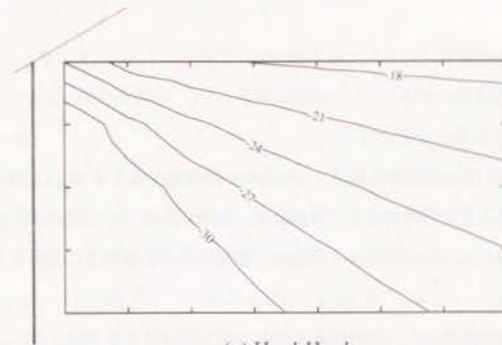


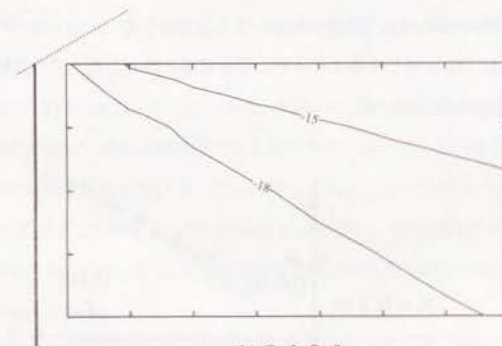
Figure 3.14: 音源配置位置及び受音領域

結果を Fig. 3.15.(a) ~ (c), Fig. 3.16 (d), (e) に示す。(a) ~ (e) は上に示した特性の組み合わせに対応する。

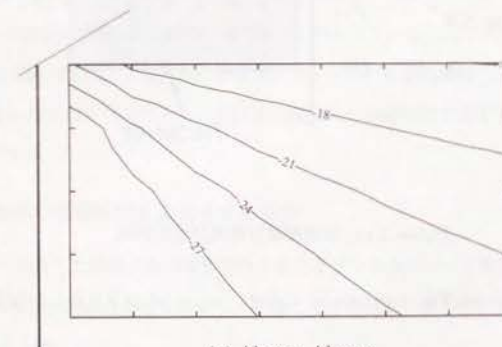




(a) Hard-Hard

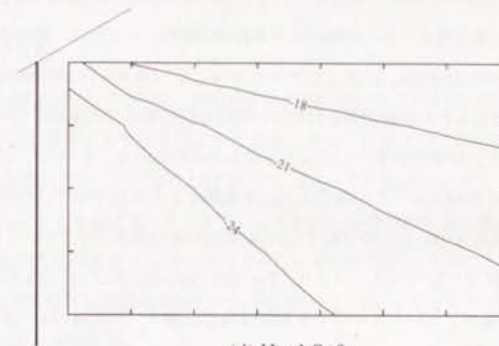


(b) Soft-Soft

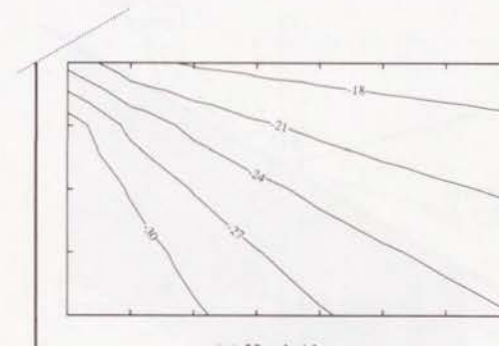


(c) Absorp-Absorp

Figure 3.15: 障壁表面の音響特性を変化させた場合の能動制御による音圧減衰量分布



(d) Hard-Soft



(e) Hard-Absorp

Figure 3.16: 障壁表面の音響特性を変化させた場合の能動制御による音圧減衰量分布

まず障壁表面が両面とも同じ特性であるものとして (a) 及び (b), (c) の3つを比較検討する。領域全体に渡って、剛>吸音性>ソフトの順に大きな減衰量が得られている。その差を見ると、剛の場合は、吸音性に比べて全体で約 3 dB、ソフトに比べて 3 ~ 6 dB 以上制御の効果が大きい。これは丁度 Fig. 2.21 で見られた能動制御を行わない場合の回折場のレベル差に相当し、制御を行う前のレベルが高いほど、制御の効果としては大きなものが得られる、ということを示している。

次に (d), (e) の場合を考察する。この場合も (a) を規準として比較するが、やはり同様の傾向が確認される。(d) では約 3 dB, (e) では約 1~2 dB 程度制御の効果は小さい。これは Fig. 2.21 において観察される回折場のレベル差、つまり、Fig. 2.21 (a) (d) 及び (a) (f) の差に相当する。

これらの結果は、障壁がどのようなタイプでも制御は有効に働き、回折場のレベルをある一定のレベルまで落とせることを示していると解釈できる。

### 3.4 音源が点音源の場合

#### 3.4.1 制御の方法

3.2 の原理の項でも述べたように、回折音を効果的に消去するためには、Edge 近傍の出来るだけ広い領域で 1 次音源による波面を消去する必要がある。音源として点音源を仮定した場合には、Edge に沿った方向についても考慮せねばならず、Edge 上の複数点にキャンセルのための基準点 (キャンセルポイント) を設けることとする。このため、2 次音源も複数考えるが、ここでは Fig. 3.17 に示す通り 2 次音源とキャンセルポイントは一対一に対応しており、その数は  $N$  であるものとする。また全ての 2 次音源は Edge から等距離  $r_0$ 、障壁から等角度  $\theta_0$  に存在し、全て等間隔  $d$  で並んでいると仮定する。

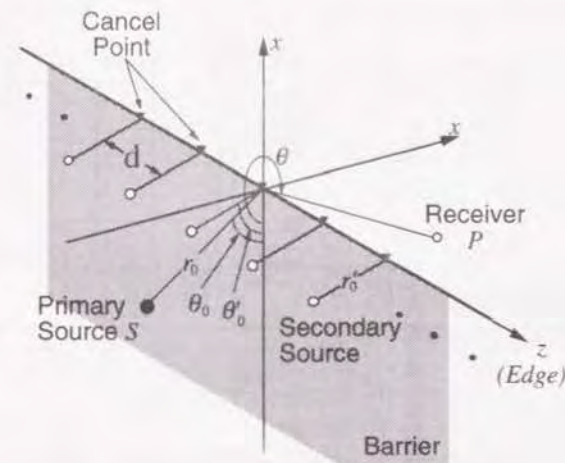


Figure 3.17: 3次元音場における2次音源群配置位置について

#### 3.4.2 2次音源群が持つ係数について

3次元音場の場合にも、Edge 上の音圧が各音源からの直接波の和で表されることにかわりはなく、各キャンセルポイントにおける音圧は  $n$  番目の 2 次音源が持つ複素係数を  $A_n$  として以下のような一連の式で表すことが出来る。



$$\begin{aligned}
\phi(P_1) &= \frac{e^{jkr_1}}{kr_1} + A_1 \frac{e^{jkr_{11}}}{kr_{11}} + A_2 \frac{e^{jkr_{21}}}{kr_{21}} + \dots + A_N \frac{e^{jkr_{N1}}}{kr_{N1}} \\
\phi(P_2) &= \frac{e^{jkr_2}}{kr_2} + A_1 \frac{e^{jkr_{12}}}{kr_{12}} + A_2 \frac{e^{jkr_{22}}}{kr_{22}} + \dots + A_N \frac{e^{jkr_{N2}}}{kr_{N2}} \\
&\vdots \\
\phi(P_N) &= \frac{e^{jkr_N}}{kr_N} + A_1 \frac{e^{jkr_{1N}}}{kr_{1N}} + A_2 \frac{e^{jkr_{2N}}}{kr_{2N}} + \dots + A_N \frac{e^{jkr_{NN}}}{kr_{NN}}
\end{aligned} \quad (3.11)$$

ここに  $P_n$  は Edge 上  $n$  番目のキャンセルポイントの位置を示し、 $r_n$  は 1 次音源から  $n$  番目のキャンセルポイントまでの距離、 $r_{mn}$  は  $m$  番目の 2 次音源から  $n$  番目のキャンセルポイントまでの距離を表す。

(3.11) 式において  $\phi(P_1) \sim \phi(P_N) = 0$  とすると、

$$\begin{pmatrix} \frac{e^{jkr_{11}}}{kr_{11}} & \frac{e^{jkr_{21}}}{kr_{21}} & \dots & \frac{e^{jkr_{N1}}}{kr_{N1}} \\ \frac{e^{jkr_{12}}}{kr_{12}} & \frac{e^{jkr_{22}}}{kr_{22}} & \dots & \frac{e^{jkr_{N2}}}{kr_{N2}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{e^{jkr_{1N}}}{kr_{1N}} & \frac{e^{jkr_{2N}}}{kr_{2N}} & \dots & \frac{e^{jkr_{NN}}}{kr_{NN}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_N \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \frac{e^{jkr_1}}{kr_1} \\ \frac{e^{jkr_2}}{kr_2} \\ \vdots \\ \frac{e^{jkr_N}}{kr_N} \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

となり、この連立一次方程式を解くことによって  $A_n$  を決定出来る。

以下、能動制御を行った場合の回折場を、

$$\phi^{on}(P) = \phi(P) + \sum_{n=1}^N A_n \cdot \phi'_n(P) \quad (3.13)$$

で表すものとする。ここに  $\phi(P)$  は 1 次音源による寄与、 $\phi'_n(P)$  は  $n$  番目の 2 次音源からの寄与である。また、2 次元音場の場合と同様に 1 次音源のみによる  $\phi$  を  $\phi^{off}$  と表し、制御の効果としての音圧減衰量を以下で定義する。

$$\Delta L = 20 \log_{10} \frac{\phi^{on}(P)}{\phi^{off}(P)} \quad (3.14)$$

### 3.4.3 エッジ上キャンセルポイントの間隔について

2 次音源の数も複数であり、制御の効果に影響するものとして様々な要因が考えられるが、ここでは特に Edge 上キャンセルポイントの間隔について考察する。実際に数値シミュレーション

を行うが、その際の条件としては、1 次音源が  $(r_0, \theta_0, z_0) = (0.5 \text{ m}, 60^\circ, 0)$  に、また受信点が  $(r, \theta, z) = (1.0 \text{ m}, 300^\circ, 0)$  にあり、2 次音源は原点を中心に左右 25 個ずつ、合計  $N = 51$  個存在し、その位置は  $(r'_0, \theta'_0) = (0.1 \text{ m}, 60^\circ)$  で  $z'_0$  を変化させるものとする。また、周波数は 5 kHz を仮定した。回折場を表す  $\phi$  の計算には、[漸近解 1] である (2.42) 式を用いた。

間隔  $d$  を 10 mm ~ 100 mm まで変化させた場合の結果を Fig. 3.18 に示す。この場合、 $kd$  は 0.91 ~ 9.14 の範囲となる。グラフの縦軸は減衰量 ((3.14) 式の  $\Delta L$ ) である。

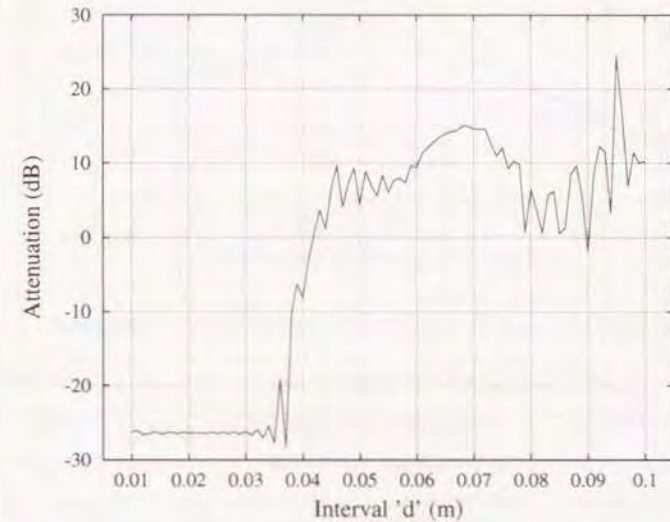


Figure 3.18: キャンセルポイント及び2次音源の間隔を変化させた場合の音圧減衰量

明らかに、キャンセルポイントの間隔が半波長以上、つまり  $kd > \pi$  になると制御効果は極端に悪化し、更に制御によって音圧レベルが上昇する場合も存在する。逆に間隔がこれ以下であると、-26 dB 程度の比較的安定した減衰が得られている。この結果から、2 次音源及びキャンセルポイントの間隔は少なくとも波長の半分以下であるべきことが結論できる [12]。

この結果の物理的要因としては、キャンセルポイント間の音圧分布が考えられる。そこで、間隔  $d$  が 20 mm の場合、及び 50 mm の場合について、制御を行った状態での Edge 上の音圧分布  $\phi^{on}$  を計算してみる。実際には Edge の真上 0.1 mm の位置で原点を中心に -100 mm ~ +100 mm までの範囲を [厳密解] (2.36) 式を用いて計算した。



結果を Fig. 3.19 に示す。レベルは  $\phi^{0m}$  を自由音場 1 m 点の音圧で規準化したものである。間隔が 20 mm の場合には音圧がほぼ一様に低減している。しかし 50 mm の場合には、キャンセルポイント上では確かに音圧は減少しているもののその間においては大きなピークが見られる。この、キャンセルポイント間の音圧の高い領域が、制御の効果を低減させる原因であると考えられる。

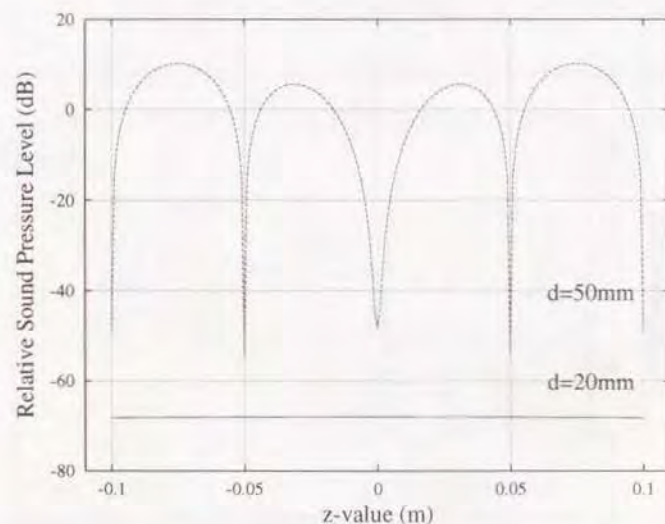


Figure 3.19: 間隔  $d$  が異なる場合の Edge 上における音圧分布

#### 3.4.4 2 次音源群配置位置が制御の効果に与える影響

次に 2 次音源群の配置位置について考える。ここでは全ての 2 次音源が Edge から等距離、障壁から等角度に存在するものと仮定しているが、これらを連続的に変化させた場合、制御の効果としての音圧減衰量がどう変化するかを数値シミュレーションする。

前節の結果を受けて間隔  $d$  を 20 mm に固定する。2 次音源群の位置は、角度については  $\theta_0 = \theta_0 \pm 30^\circ$  の範囲で、また距離については線音源の場合と同様に  $r_0'/r_0$  をパラメータとしてこれを 0.1 ~ 0.9 の範囲で変化させる。これらの条件で「漸近解 1」を用いて計算した結果を Fig. 3.20 に示す。

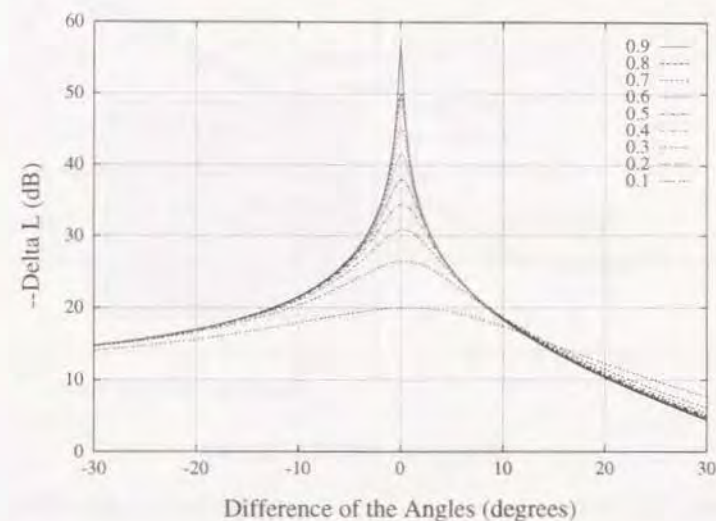


Figure 3.20: 2 次音源配置位置による制御の効果の変化 (点音源の場合)

横軸は角度の差  $\theta_0' - \theta_0$  であり、縦軸はこの場合グラフの見易さを考えて  $-\Delta L$  ( $-\Delta L$ ) である。この場合も、 $r_0'/r_0 \rightarrow 1$  となるに従って大きな減衰量が得られ、どの距離比についても  $\theta_0' = \theta_0$  付近でその最大値が得られている。やはり 2 次音源群が 1 次音源に距離、角度共に近付くにつれて、Edge 周辺で生成されるキャンセルのための波面の形状が、1 次音源の波面に近づくためにこの様な結果が得られたものと考えられる。しかし、この場合は音源の数も多いため波面の形状も線音源の場合ほど単純ではないと思われ、Fig. 3.20 の結果においても減衰量のピークは丁度  $\theta_0' = \theta_0$  となる角度ではなく  $0.4^\circ$  程度ずれた場合に得られているものもある。

#### 3.4.5 数値計算例

これまでの結果から、Edge 上キャンセルポイント及び 2 次音源の間隔  $d$  を半波長より短い 20 mm に、また 2 次音源群の Edge からの距離を 0.1 m に固定し、線音源の場合と同様に各音源の角度を  $60^\circ, 90^\circ$  の組み合わせとした場合の制御の効果を計算した。2 次音源の数  $N$  は前節と同じく 51 個である。受信領域は Fig. 3.21 に示す通りであり、周波数はキャンセルポイントの間隔と波長との関係をより明確にするため 2.5 kHz, 5 kHz, 10 kHz の 3 種類とした。



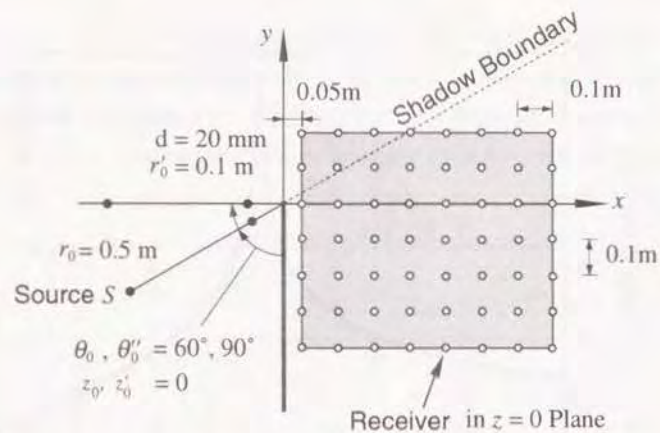
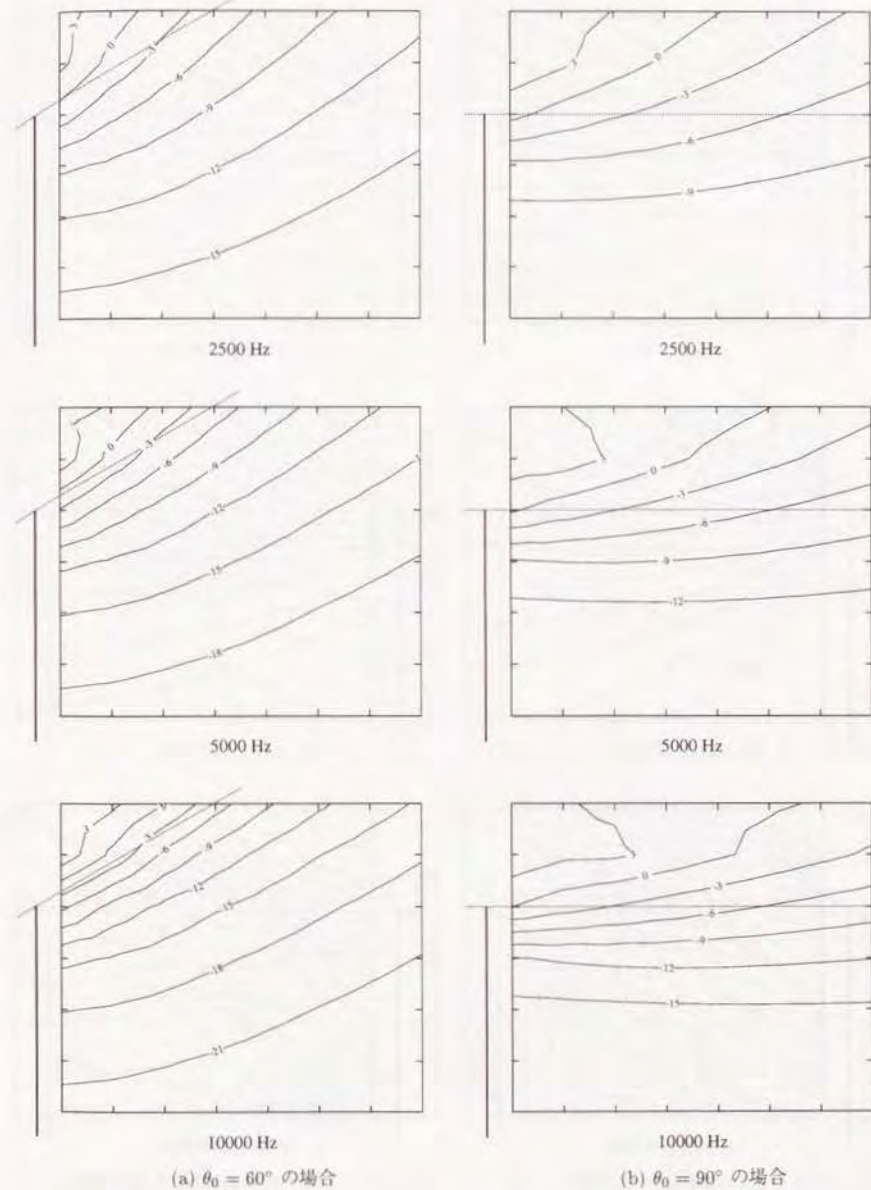


Figure 3.21: 音源配置及び受信領域

結果を Figs. 3.22 ~ 3.26 に示す。Fig. 3.22 は 2 次音源群が存在しない場合の音圧レベル分布であり、(a), (b) は 1 次音源の角度  $60^\circ$  と  $90^\circ$  に対応する。Fig. 3.23 は 1 次音源が  $60^\circ$ 、また Fig. 3.24 は  $90^\circ$  の条件で能動制御を行った状態の音圧レベル分布であり、(a), (b) は 2 次音源の角度が 1 次音源と同じ場合、異なる場合に対応する。なお、ここでの音圧レベルは自由音場 1 m 点の音圧で規準化した相対的なものである。なお、Figs. 3.25, 3.26 は上記の結果から求めた制御の効果の分布である。



(a)  $\theta_0 = 60^\circ$  の場合

(b)  $\theta_0 = 90^\circ$  の場合

Figure 3.22: 受信領域における音圧レベル分布 (制御 off の状態)



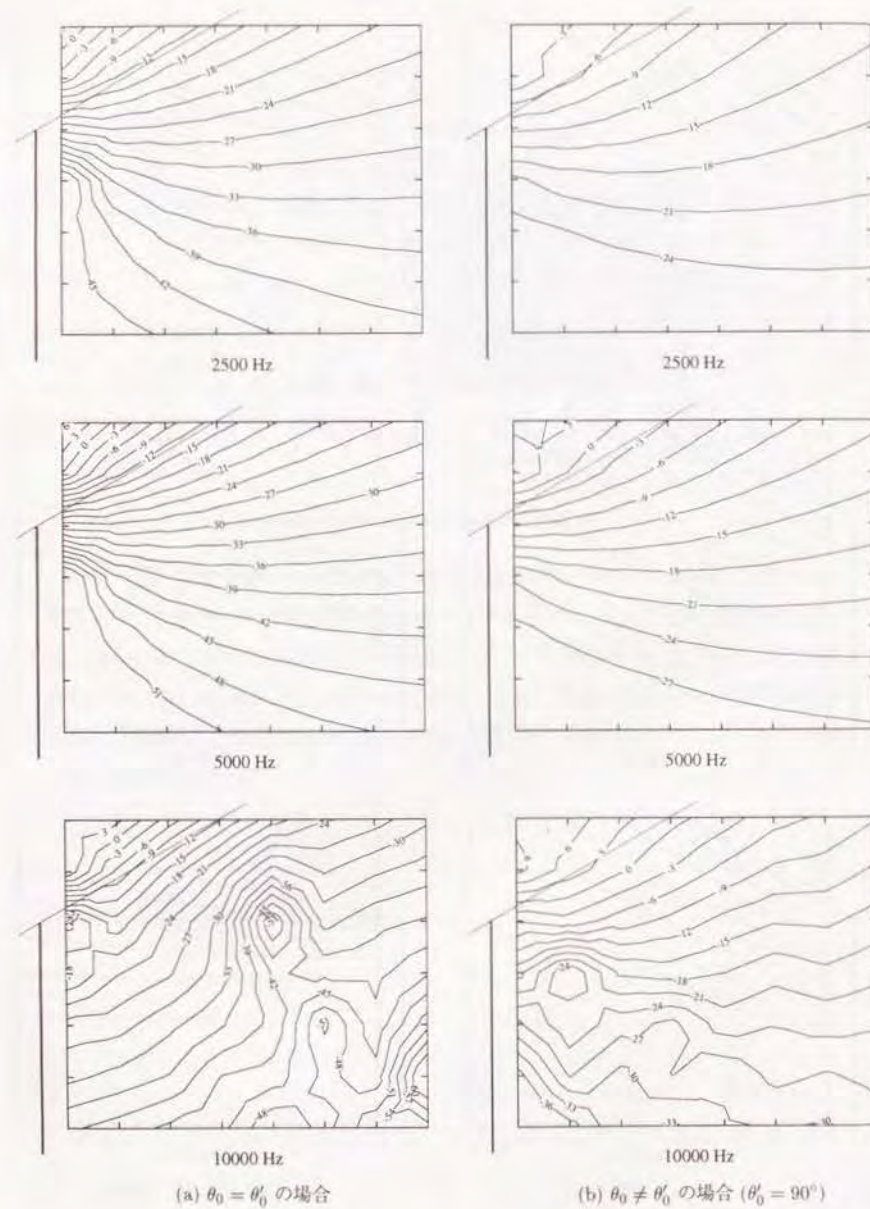


Figure 3.23: 受音領域における音圧レベル分布 (制御 on の状態) :  $\theta_0 = 60^\circ$

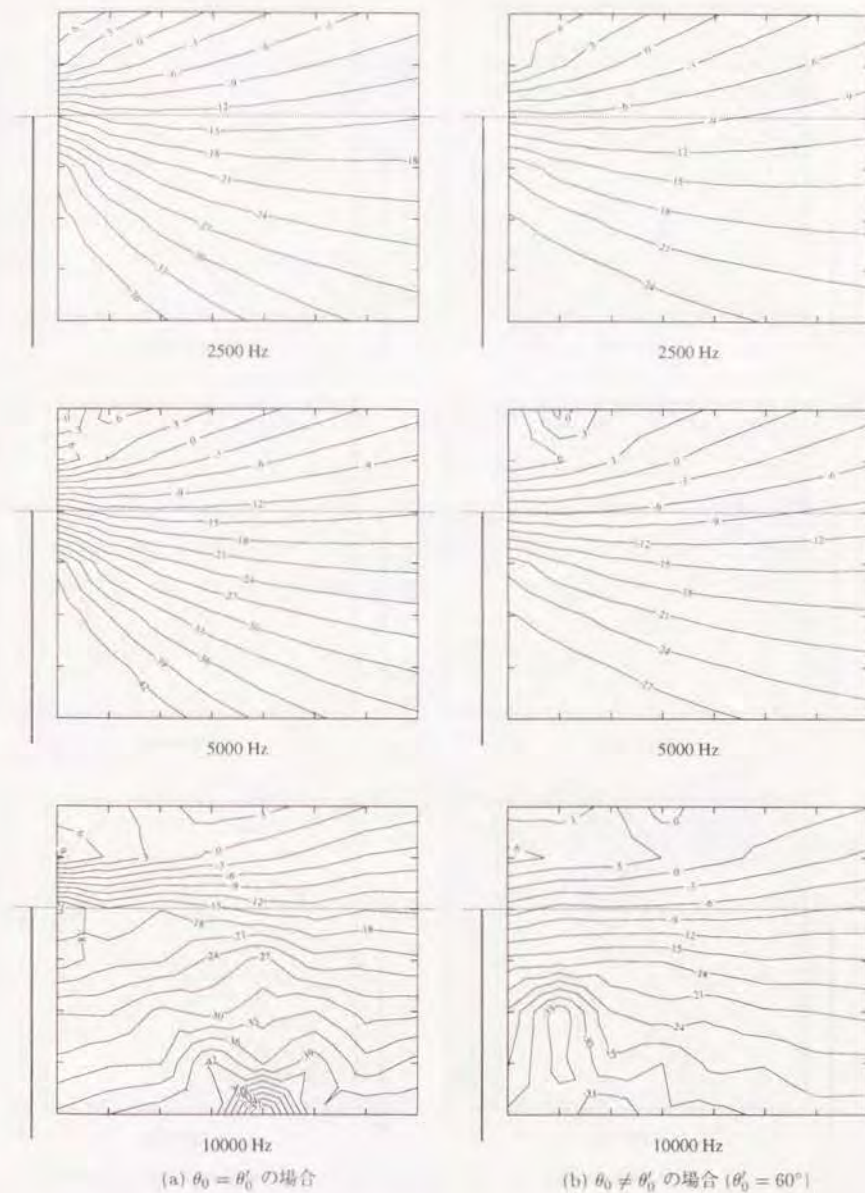


Figure 3.24: 受音領域における音圧レベル分布 (制御 on の状態) :  $\theta_0 = 90^\circ$



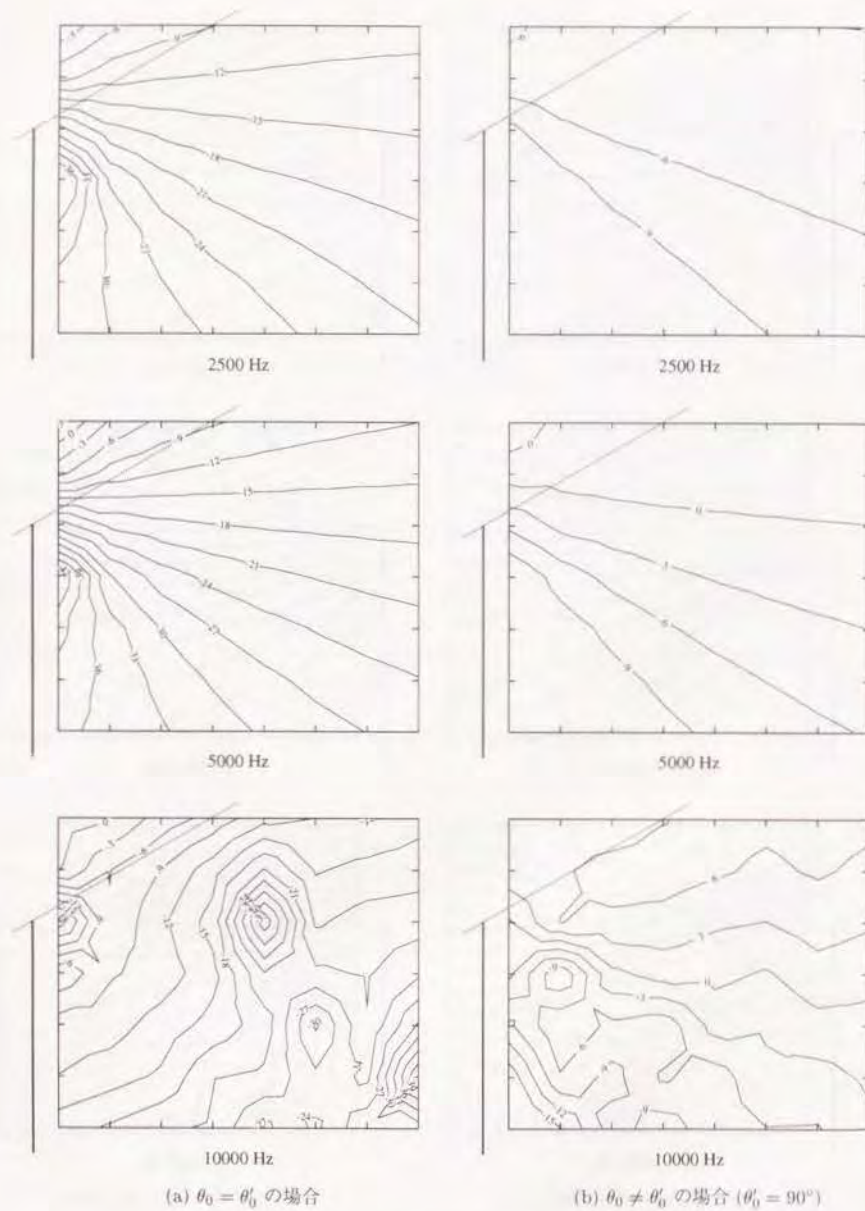


Figure 3.25: 能動制御による音圧減衰量分布:  $\theta_0 = 60^\circ$

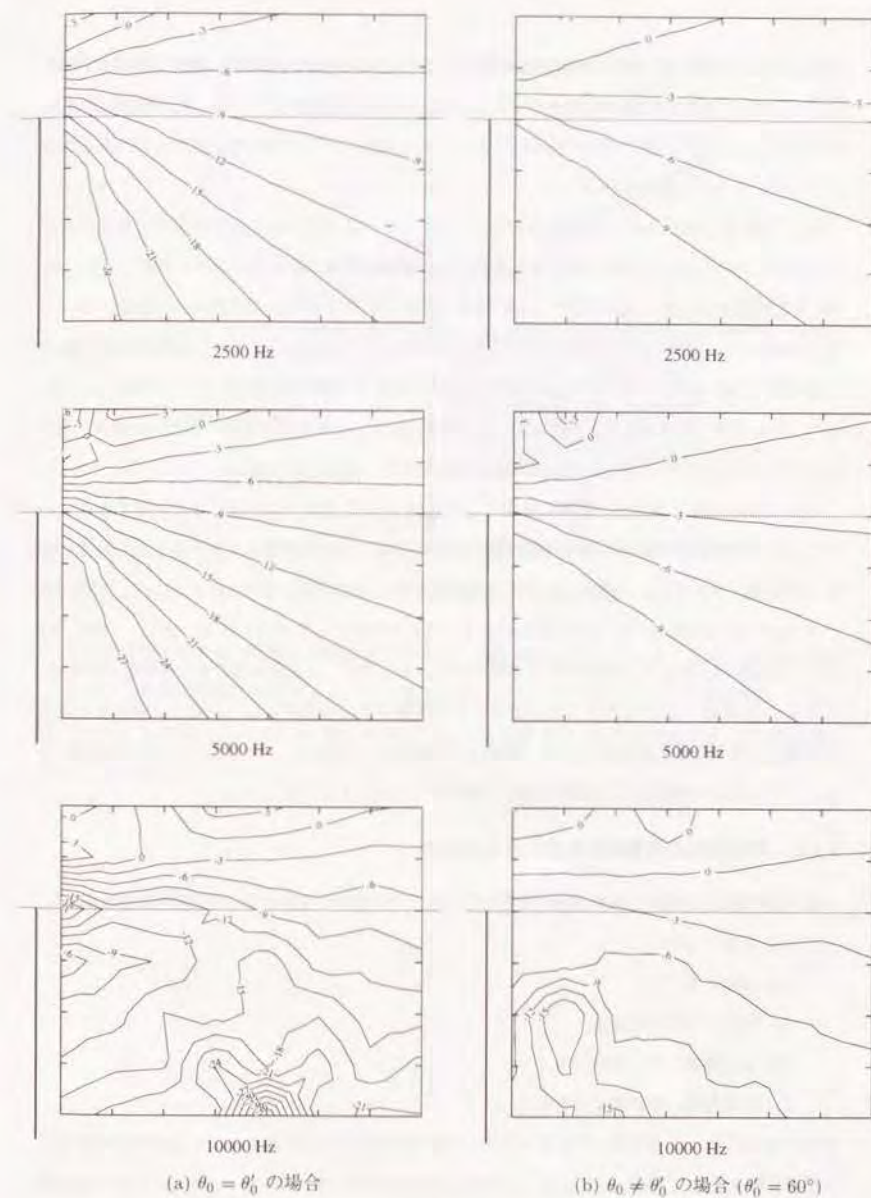


Figure 3.26: 能動制御による音圧減衰量分布:  $\theta_0 = 90^\circ$



Fig. 3.22 によれば、線音源の場合と同様に、音圧レベルは影の境界から離れて領域の下部に向かうに従って緩やかに減少しており、またそのレベルは周波数がオクターブ上がる毎に約 3 dB 減少している。これは影の領域の音場が、Edge から放射される円筒波の形式で近似出来ることを示しているものと考えられる。

Fig. 3.23 の 2500, 5000 Hz の結果においては、(a) の 2 次音源を 1 次音源と同じ角度に配置した場合で音圧レベルの急激な減少が見られ、特に領域左下部で最も低いレベルが得られている。(b) と比較すると、影の境界付近で 9 dB 程度、領域下部では 20 dB 以上のレベル差がある。一方、10000 Hz においては、領域の途中でレベルが低くなる点が見られるが、他の周波数の様に様な分布は得られていない。Fig. 3.24 でも Fig. 3.23 と同様の傾向であり、この場合 (a), (b) 間のレベル差は、影の境界付近で約 6 dB、領域の下部で 10 dB 程度である。また、やはり 10000 Hz においてはコンターに乱れが生じ、他の周波数は均一な分布ではない。

Figs. 3.25, 3.26 において、制御の効果として比較すれば、(a), (b) の差はより明確である。これによると、線音源の場合と全く同様の傾向が認められ、2 次音源群を 1 次音源と同じ角度に配置した場合、つまり (b) よりも (a) で大きな減衰が得られている。また (a) において、5000 Hz では 2500 Hz と比較して約 3 dB 減衰が大きいことも傾向として認められる。また、10000 Hz では、30 dB 以上の大きな減衰が数点で得られているものの、減衰量分布にかなりの乱れがある。これは Fig. 3.18 においてキャンセルポイントの間隔が半波長程度になった場合に減衰量が急激に不安定になることと対応しており、(間隔  $d$  が 20 mm に対して、10 kHz での半波長は約 17 mm) これ以上の周波数では制御が有効に働かなくなることが予想できる。

### 3.4.6 障壁表面の音響特性を変化させた場合

線音源の場合と同様に、障壁表面の音響特性が以下の 5 通りの場合について能動制御を適用する。

- (a) 両面とも剛
- (b) 両面ともソフト
- (c) 両面とも完全吸音性
- (d) 音源側剛、受信側ソフト
- (e) 音源側剛、受信側完全吸音性

制御の効果は (3.14) 式を用いて計算するが、回折場を表す  $\phi$  には (2.99) 式に表面の特性に応じた反射係数を代入して用いた。なお、この場合も 2 次音源が持つべきキャンセルのための複素係

数は (3.12) 式を解いて求められるものとする。また解の特性から、ここでも障壁による影の境界では計算が行えず、従って受信領域を Fig. 3.27 に示すように限定する。

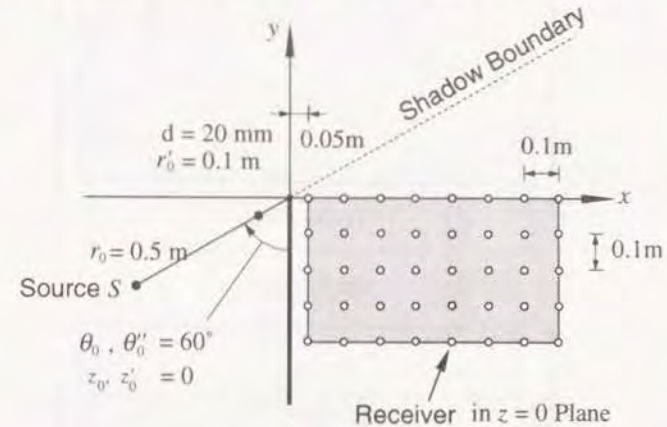
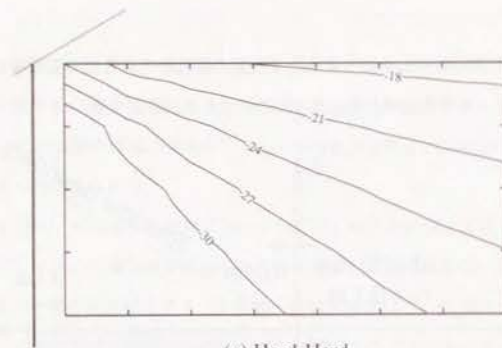


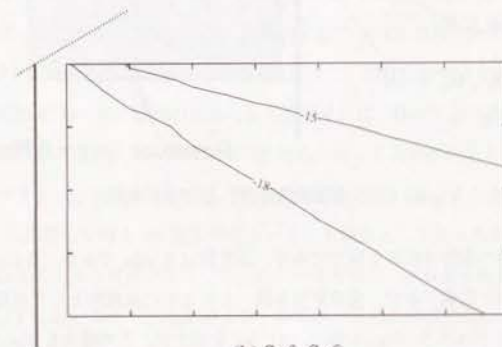
Figure 3.27: 音源配置位置、及び受信領域

音源位置などその他の条件は前節と同じであり、周波数は 5 kHz である。なお、(a) の両面剛の場合は、前節の結果と重複するが、受信領域を統一した上での比較用として再掲する。結果として、Fig. 3.28 に (a) ~ (c) を、Fig. 3.29 に (d), (e) を示すが、この場合も Fig. 2.22 の結果を併せて検討する。

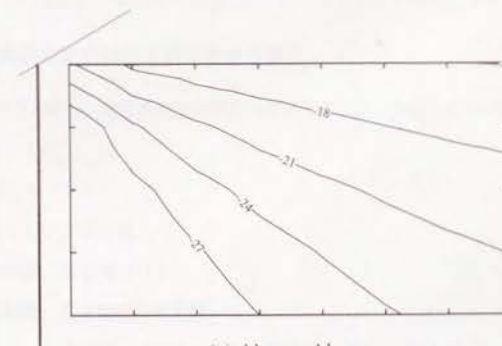




(a) Hard-Hard

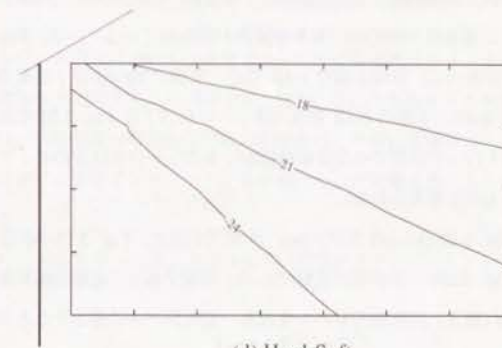


(b) Soft-Soft

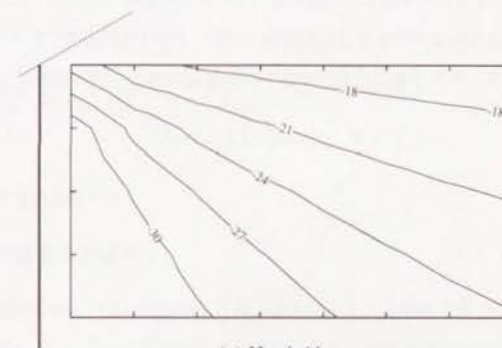


(c) Absorp-Absorp

Figure 3.28: 障壁表面の音響特性を変化させた場合の能動制御による音圧減衰量分布



(d) Hard-Soft



(e) Hard-Absorp

Figure 3.29: 障壁表面の音響特性を変化させた場合の能動制御による音圧減衰量分布

まず両面とも同じ特性である (a) ~ (c) についてであるが、Fig. 2.22で、障壁自体の遮音性能で比較すれば、ソフト>吸音性>剛の順に大きな減衰が得られている。一方、Fig. 3.28によれば、剛な場合はソフトに比べて、領域上部で6 dB程度、下部で10 dB以上効果が大きく、吸音性と比べて上部で2~3 dB、下部で6 dB程度大きい。これは丁度 Fig. 2.22で認められる差を補うものであり、制御を行った状態での受音領域における音圧レベルはどのタイプに対してもほぼ同様な値が得られるものと考えられる。

また、この傾向は Fig. 2.22 (a), (d) 及び (a), (g) 間での差と、Fig. 3.28 (a) と Fig. 3.29 (d) 及び Fig. 3.28 (a) と Fig. 3.29 (e) での差の比較でも全く同様であり、能動制御が障壁表面の音響特性にかかわらず有効に働き、回折場のレベルをある一定のレベルに落とすことが出来ることを示している。

### 3.5 音響インテンシティを用いた制御効果の解釈について

前述したように、本研究においては障壁 Edge における音圧をキャンセルすることを基本的な方法として能動制御を適用する。この場合に、Edge 周辺の音場をエネルギーの流れの視点から考察することは、能動制御の物理的な解釈の意味からも非常に意義深いことである。そこで本節では、回折場における音響インテンシティを求め、これが制御を加えることでどのように変化するかを考察する。

周知のように、エネルギーの流れを表す音響 (アクティブ) インテンシティは、以下で与えられる。

$$I_A = \frac{1}{2} \Re \{ p \cdot u^* \} \quad (3.15)$$

ここに、 $p$  は音圧、 $u$  は粒子速度であり、 $\Re$  は実数部、 $*$  は複素共役を示す。以後、太文字 ( $I_A$ ,  $u$  等) はベクトル量であることを示す。更に、時間項として  $e^{-j\omega t}$  を仮定しているため、(3.15) 式は第2章で示した速度ポテンシャル  $\phi$  を用いて以下のように書き直すことが出来る。

$$I_A = \frac{1}{2} \Re \{ (-j\omega \rho \phi) (-\nabla \phi)^* \} \quad (3.16)$$

ここで、 $\rho$  は媒質の密度である。

#### 3.5.1 音源が線音源の場合

まず音場を2次元に、つまり音源として線音源を仮定して考察するが、この場合は (3.16) 式で  $\nabla$  の部分を  $\partial/\partial x$ ,  $\partial/\partial y$  として計算を行えばよい。また、障壁表面の音響特性は剛であるとする。

実際の計算を行うための解であるが、ここでは Edge の比較的近傍を計算する必要があるため、(2.15), (2.16) 式で表される [厳密解] を用いる。この場合、 $x$  方向の偏微分は以下の通りとなる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi(P)}{\partial x} = & -\frac{2jk}{\pi} \left[ e^{jkR} \left\{ j \frac{x-x_0}{R} \int_{-m}^{\infty} \frac{e^{j\mu^2}}{\sqrt{\mu^2+2kR}} d\mu \right. \right. \\ & + \operatorname{sgn} \left[ \cos \left( \frac{\theta-\theta_0}{2} \right) \right] \frac{e^{jm^2}}{2\sqrt{m^2+2kR}\sqrt{k(R_1-R)}} \left( \frac{x}{\rho} - \frac{x-x_0}{R} \right) - \frac{x-x_0}{R} \int_{-m}^{\infty} \frac{e^{\mu^2}}{(\mu^2+2kR)^{\frac{3}{2}}} d\mu \Big\} \\ & + e^{jL} \left\{ j \frac{x+x_0}{L} \int_{-m'}^{\infty} \frac{e^{j\mu'^2}}{\sqrt{\mu'^2+2kL}} d\mu' \right. \\ & \left. \left. + \operatorname{sgn} \left[ \cos \left( \frac{\theta+\theta_0}{2} \right) \right] \frac{e^{jm'^2}}{2\sqrt{m'^2+2kL}\sqrt{k(R_1-L)}} \left( \frac{x}{\rho} - \frac{x+x_0}{L} \right) - \frac{x+x_0}{L} \int_{-m'}^{\infty} \frac{e^{\mu'^2}}{(\mu'^2+2kL)^{\frac{3}{2}}} d\mu' \right\} \right] \end{aligned} \quad (3.17)$$



$y$  方向に関しても同様に求めることが出来る。なお、その他の記号は第2章に示した通りである。

更に、キャンセルのための係数  $A$  を持つ2次音源による速度ポテンシャル  $\phi'$  が加わった場合、インテンシティは (3.18) 式となる。

$$I'_A = \frac{1}{2} \Re \left[ \{ -j\omega p(\phi + A \cdot \phi') \} \{ -\nabla(\phi + A \cdot \phi') \}^* \right] \quad (3.18)$$

この (3.18) 式を用いて数値計算を行うが、これには Fig. 3.30 に示す約 1/10 スケールの音源位置、受音点を仮定した。音源位置は Fig. 3.8 で用いたものと同様であるが受音点位置は音源側にも及んでおり、またその間隔は 0.005 m である。また、周波数は 5 kHz を仮定した。

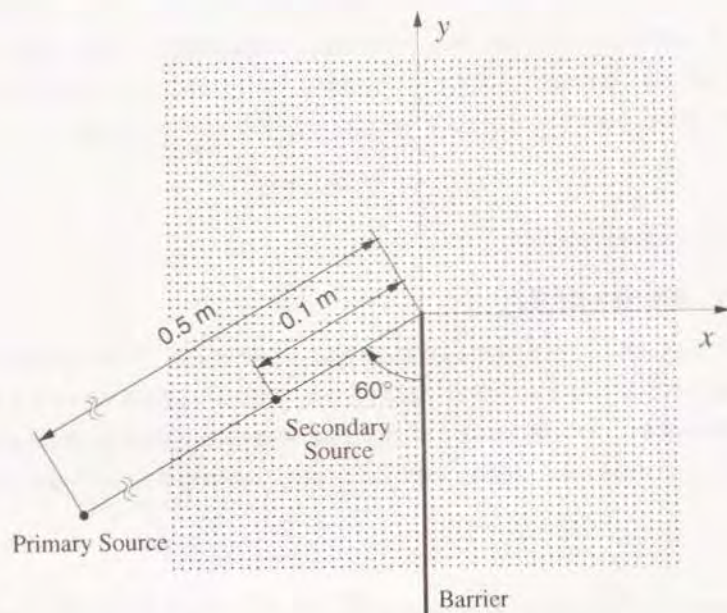


Figure 3.30: 音響インテンシティを計算するための音源位置、受音点位置

制御 off, on の場合のインテンシティベクトルの様子を、それぞれ Figs. 3.31, 3.32 に示す。なお、ベクトルの大きさは対数圧縮したレベルであり、その基準となる値は (制御 off, on で統一し

てあるが) 図の見易さを考えて任意に決定したものである。目安として、インテンシティレベルが 10 dB 減衰すると、ベクトルの大きさがどの程度小さくなるかを図中に例示している。また、制御が on の場合と、off の場合のベクトルの差 ( $I'_A - I_A$ ) を Fig. 3.33 に示す。これは、2次音源によってインテンシティベクトルがどのような変化を受けたかを示すものであり、具体的に示せば以下の通りとなる。

簡単のためインテンシティを再び音圧、粒子速度で表す。1次音源のみが存在する場合のインテンシティは、添字  $r, i$  がそれぞれ実数部、虚数部を示すものとして、

$$\begin{aligned} I_A &= \frac{1}{2} \Re [p \cdot u^*] \\ &= \frac{1}{2} \Re [(p_r + jp_i) \cdot (u_r - ju_i)] \\ &= \frac{1}{2} (p_r u_r + p_i u_i) \end{aligned} \quad (3.19)$$

となる。一方、制御を行った場合のインテンシティは、' (ダツシュ) がキャンセルの為の係数を含んだ形で2次音源に関する量を示すものとして、

$$\begin{aligned} I'_A &= \frac{1}{2} \Re [(p + p') \cdot (u + u')^*] \\ &= \frac{1}{2} \Re [(p_r + jp_i + p'_r + jp'_i) \cdot (u_r - ju_i + u'_r - ju'_i)] \\ &= \frac{1}{2} (p_r u_r + p_r u'_r + p'_r u_r + p'_r u'_r + p_i u_i + p_i u'_i + p'_i u_i + p'_i u'_i) \end{aligned} \quad (3.20)$$

となる。ここで、 $I'_A - I_A$  を求めると、以下の6項が残ることとなる。

$$I'_A - I_A = \frac{1}{2} (p'_r u'_r + p'_r u_r + p_r u'_r + p_r u_i + p'_i u_i + p'_i u'_i) \quad (3.21)$$

このうち、 $p'_r u'_r, p'_i u'_i$  の2項は、1次音源が存在せず、2次音源のみが働いている場合に生じるインテンシティであり、その他は1次音源と2次音源間での相互作用を表す項である。[13]

(3.21) 式で表される差のベクトルと、1次音源のみの場合のベクトル  $I_A$  の方向が近い場合は、(制御を行った状態で) エネルギーはその方向に流れやすいものと考えられる。これが逆方向であればエネルギーは流れにくく、更にインテンシティレベルも低くなるものと考えられる。

また、 $I'_A$  及び  $I_A$  でのインテンシティレベルの差、

$$10 \log_{10} \frac{|I'_A|}{|I_A|} \quad (3.22)$$

を計算した。結果をコンターマップとして Fig. 3.34 に示す。この図においては方向情報が失われているため、直接的にインテンシティに関する評価は出来ないが、Figs. 3.31, 3.32 でのレベル差を考察する上での参考データとして示すものとする。



更に、対応する領域での音圧レベル分布を Fig. 3.35 に示すが、(a)、(b) はそれぞれ制御 *off*、*on* の場合である。この場合のコンターのレベルは自由音場 1 m 点の音圧で規準化した相対的なものである。また、いずれの結果においても図中の直線は障壁の位置、●は 2 次音源の位置を示し、波線は音源に対する影の境界である。

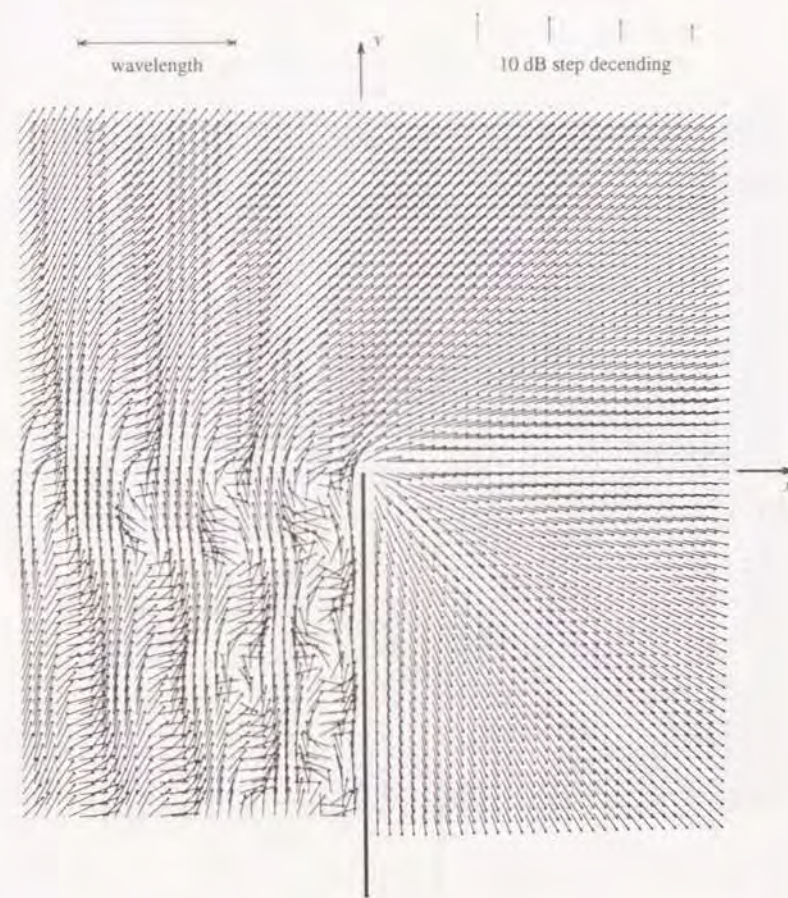


Figure 3.31: Edge 付近のインテンシティベクトル (制御 *off*) : 5 kHz



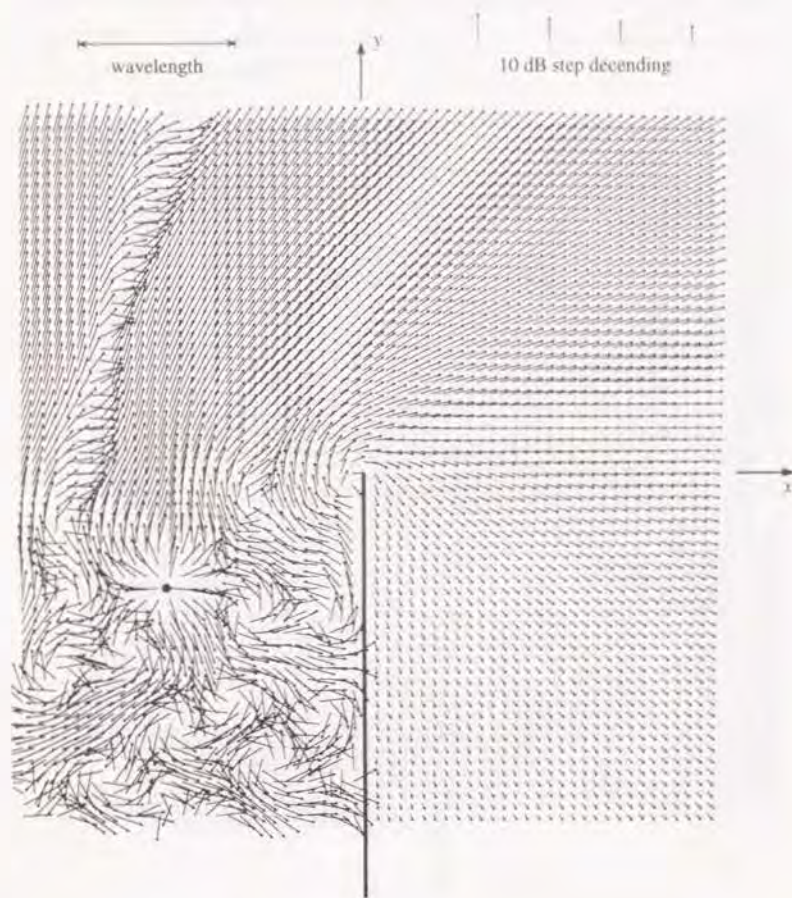


Figure 3.32: Edge 付近のインテンシティベクトル (制御 on) : 5 kHz

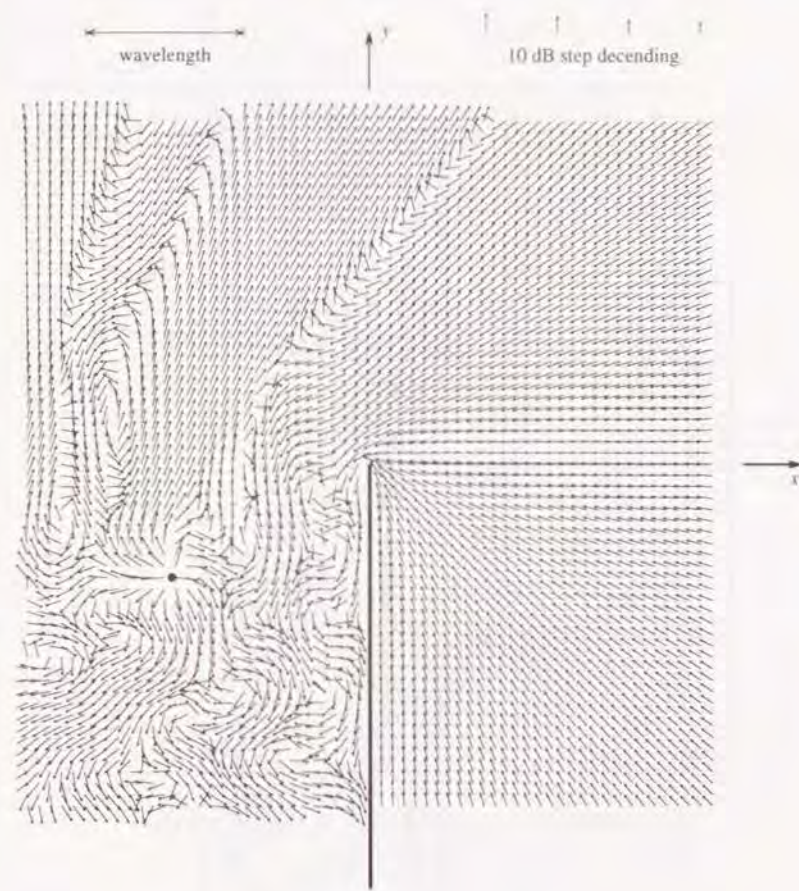
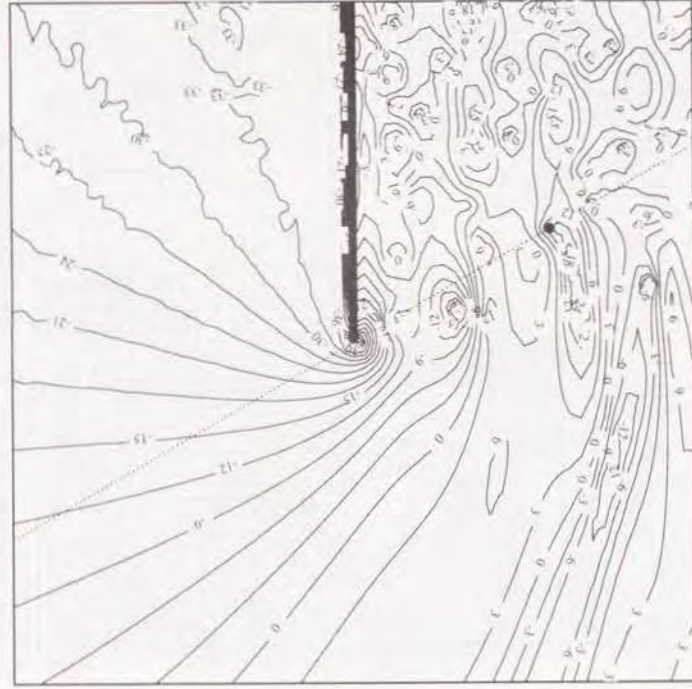


Figure 3.33: 制御 on, off でのベクトルの差 ( $I_A^{\text{on}} - I_A^{\text{off}}$ ) : 5 kHz

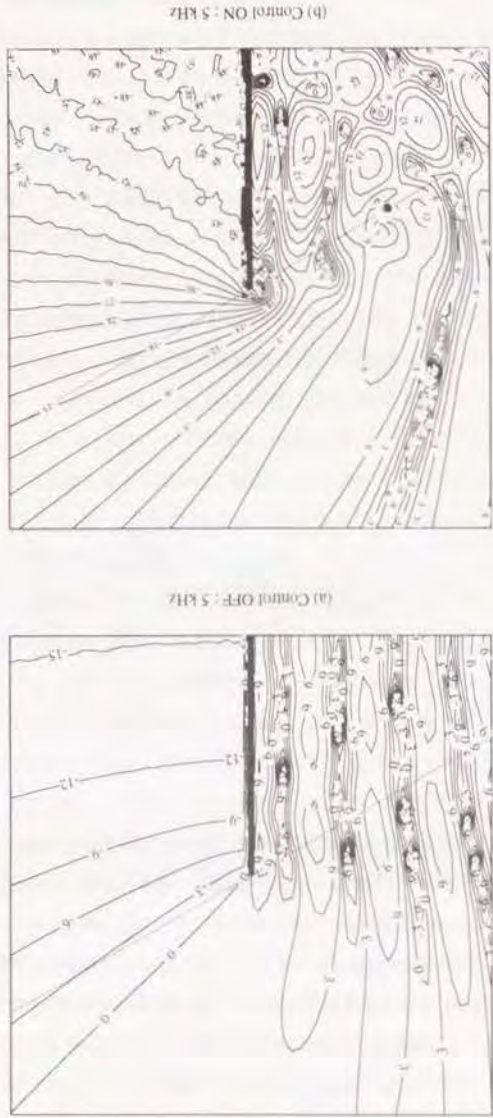


Figure 3.34: 制御 on, off でのインテンシティレベル差: 5 kHz



Difference of Intensity Level ( on - off, dB ): 5 kHz

Figure 3.35: Edigeo 付近の音圧レベル分布: 5 kHz



(a) Control OFF: 5 kHz

(b) Control ON: 5 kHz



Fig. 3.31 の制御 off の場合、受信側においてインテンシティは Edge を中心として放射状に広がっている。その大きさとしては、幾何光学的に照射された領域に向かうものが大きめである。音源側においては、音圧レベルを表す Fig. 3.35 (a) でも明らかなように、障壁による反射音との干渉で、定在波的なパターンが見られる。インテンシティベクトルは、定在波の節となる部分では乱れ、その方向も不揃いとなるが、逆に腹の部分では比較的スムーズに上方を目指している。また音源側上部の多くのベクトルが、(領域の左端のものから) ほぼ揃って受信側に向かっている。

これに対し、制御が on の Fig. 3.32 においては、障壁の影の領域に向かうベクトルが明らかに小さくなり、制御が有効に働いていることを示している。制御 on, off でのベクトルの差を示す Fig. 3.33 によれば、障壁による影の領域のほとんどで、ベクトルが Edge の方向、つまり制御 off の場合と反対方向を向いていることが解る。(3.21) 式で表される、2 次音源によって生じるベクトルによって、Edge 近辺や影の領域で、エネルギーが非常に流れにくい状況が生じているものと考えられる。これを Fig. 3.34 に示すインテンシティレベルの差で評価すれば、Edge 近辺で -30 dB 以上の減衰である。特に Edge 上部に注目すれば、エネルギーの流れにくい領域は、 $y$  方向について、ほぼ波長程度の幅を持っている。

また、Fig. 3.31 では揃って受信側を向いている音源側上部のインテンシティが、Fig. 3.32 では大きく乱れ、2 次音源左側から境界線の様なパターンが生じている。この境界線の場所は Fig. 3.33 においてベクトルの方向が大きく変化する場所であり、また Figs. 3.34, 3.35 (b) においては、インテンシティレベル及び音圧レベルが比較的低い場所である。

一方、Fig. 3.32 において、特に前述の境界線の右側で比較的ベクトルの大きな領域がある。Fig. 3.33 によれば、この領域でのベクトルは制御 off の場合 (Fig. 3.31) に近い方向を向いている。また Fig. 3.34 を見れば、この領域でのインテンシティレベルは、制御が on となることで 3 ~ 6 dB 上昇している。これらの結果から、制御を行った状態では、エネルギーはその流れのパターンを変化させられ、限られた領域においてのみスムーズに流れていることが確認できる。

また制御 off の状態 (Fig. 3.31) では、音源側で障壁近傍のインテンシティは、障壁に沿って Edge に向かっている。しかし制御 on の状態 (Fig. 3.32) では、特に Edge に近い部分で、これを避けてあたかも迂回しようとするかのような傾向が認められる。Fig. 3.33 においては、音源側で Edge 近くのベクトルは揃って音源方向を向いている。これによって Edge を避けようとするインテンシティが生じたものと考えられる。

伊勢ら [14, 15] による回折音の能動制御においては、特に低周波において 2 次音源によるアク

ティブ吸音が観測され、これによって制御効果が得られると解釈されている。しかし、Fig. 3.32 の場合には明らかに 2 次音源の近傍でベクトルは音源から外への方を向いており、アクティブ吸音は行われていない。伊勢らとは制御の方法が異なるため、直接的な比較検討は出来ないが、低周波での振る舞いを確認するために周波数を一桁下げ、500 Hz として同様の計算を試みる。これは実物換算で 50 Hz に相当する。

Figs. 3.36, 3.37 に、制御 off, on の場合のインテンシティベクトルを示す。また、Fig. 3.38 にそれぞれのベクトルの差を、Fig. 3.39 にインテンシティレベルの差を示す。更に、Fig. 3.40 は音圧レベル分布である。



Figure 3.36: Edge 付近のインテグレーション (制御 off) : 500 Hz

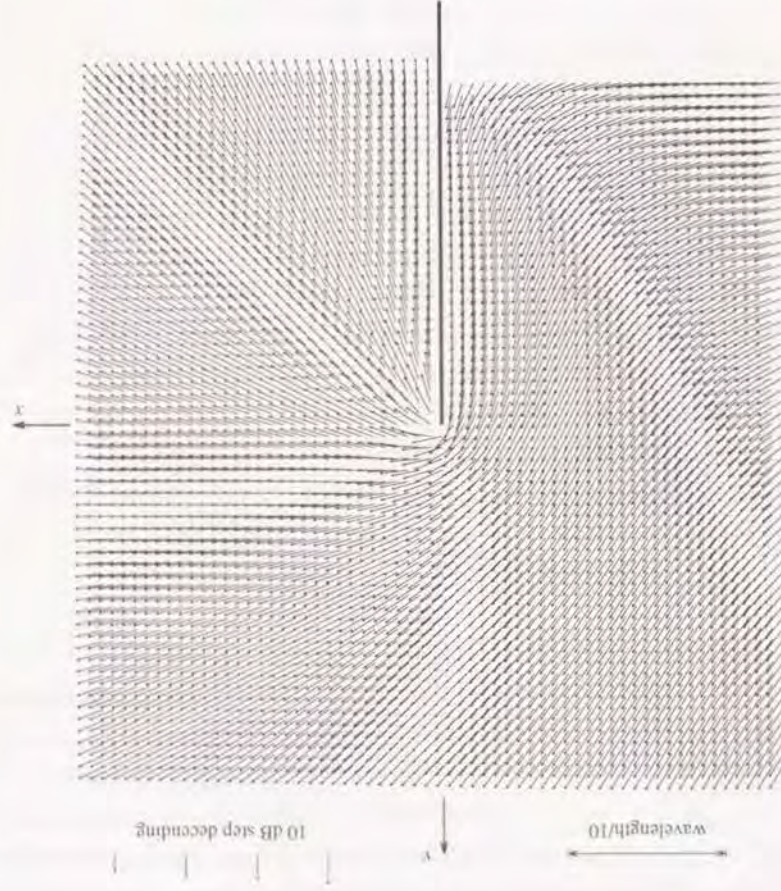
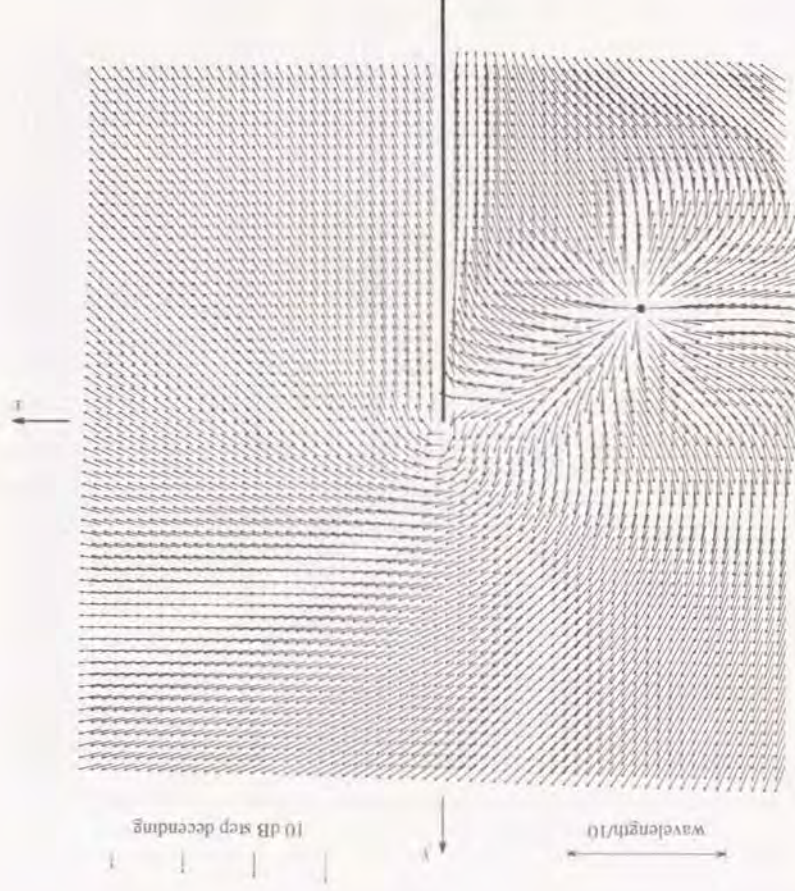


Figure 3.37: Edge 付近のインテグレーション (制御 on) : 500 Hz





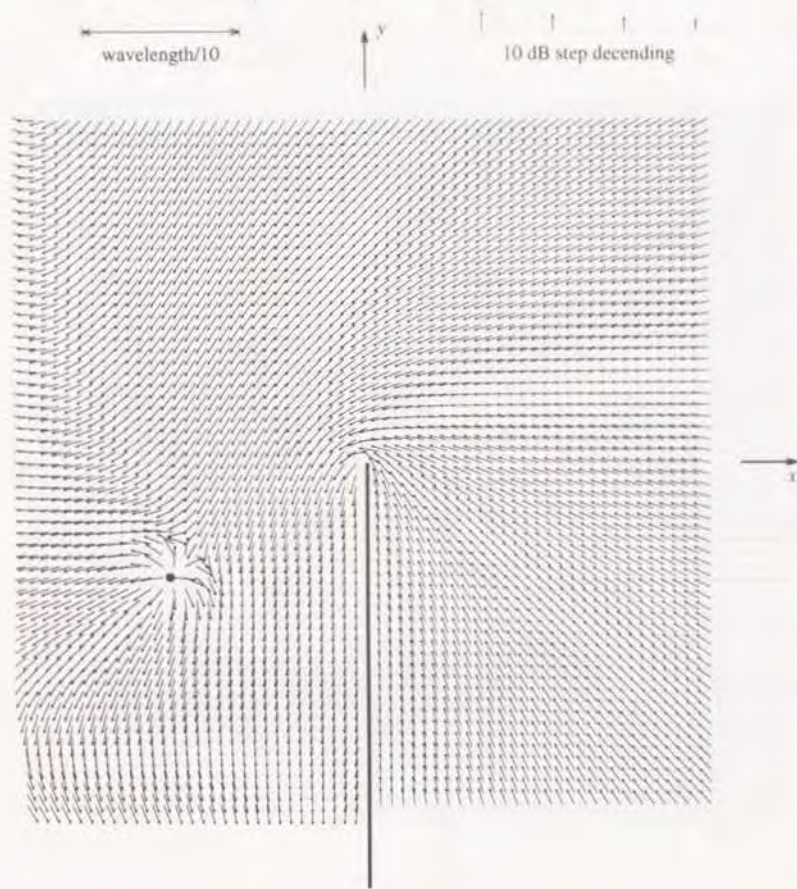


Figure 3.38: 制御 on, off でのベクトルの差 ( $I'_A - I_A$ ) : 500 Hz

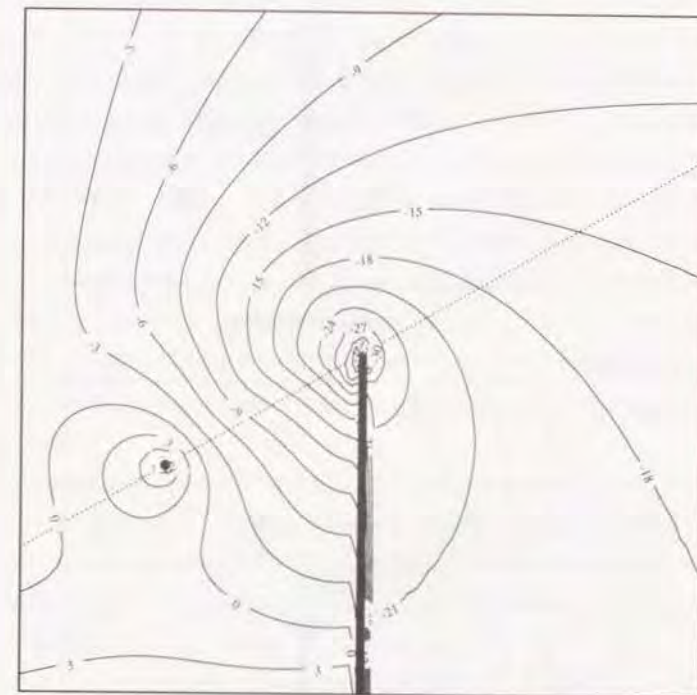


Figure 3.39: 制御 on, off でのインテンシティレベル差 : 500 Hz





(a) Control OFF : 500 Hz



(b) Control ON : 500 Hz

Figure 3.40: Edge 付近の音圧レベル分布 : 500 Hz

制御が off の Fig. 3.36 におけるインテンシティは、5 kHz の場合と同様に、回折場に対して Edge を中心に放射状に拡がっている。また、音源側において定在波的なパターンは認められず、インテンシティは障壁に沿って上昇し、Edge を緩やかに回り込んでいる。

一方、Fig. 3.37 においては、回折場におけるベクトルは小さくなり、やはり制御が有効に働いていることを示している。またこの場合も 2 次音源はエネルギーを吸収してはおらず、明らかにベクトルは外に向かっている。更に障壁近辺、特に Edge から離れた下方のベクトルは制御 off の場合と反対に下方向を向いている。また、受信側においてインテンシティがほぼ水平に流れる部分が、制御 off の場合 (Fig. 3.36) と比べて幾分上方に移動している。あたかも Edge を避けようとしたかのようにあり、障壁に仮想的な付加高さが加わったとも解釈できる結果である。

制御 on, off でのベクトル差である Fig. 3.38 を見ると、領域のほぼ全域で Fig. 3.36 と逆方向、あるいは大きく方向の異なるベクトルが得られている。この場合は、ほぼ全域でエネルギーが流れにくい状況が生じているものと考えられる。特に Edge 近辺では逆方向のベクトルが大きく、Fig. 3.39 によればインテンシティレベルが -30 dB 以上減衰している。また、レベルの減衰は Edge を中心にほぼ同心円状に拡がり、特に影の領域では -18 dB 以上の減衰が大きく拡がっている。これに対応して、Fig. 3.40 (b) での音圧レベルも、(a) と比べてほとんどの場所で大きく減衰している。

この様に線音源を仮定した場合には、2 次音源によって回折場に流れ込むインテンシティベクトルのパターンが変化させられていることが確認された。この変化は、(3.21) 式で表されるベクトル、つまり 2 次音源によるインテンシティ、及び 2 次音源と 1 次音源の相互作用によって生じるものであり、レベルを下げる方向に働くものである。また、ここでの数値シミュレーションにおいては、2 次音源によるアクティブ吸音は認められなかった。

本研究において設置する 2 次音源は、Edge における速度ポテンシャル (音圧) をゼロとする為に動作する。この 2 次音源を付加する事で、(3.21) 式で表されるベクトルが生じる。このベクトルがどのような規則に従って 1 次音源によるインテンシティに作用するのか、という問題を、ここで得られた結果のみで、一義的に解釈することは困難である。

しかし、結果的に生じた制御 on の状態でのインテンシティは、あたかも Edge を避けようとするかのような振る舞いを見せた。制御が on の状態での Edge は、音圧がゼロの点であり、音場においては音響インピーダンスの不連続点であると考えられる。2 次音源の存在によって生じるベクトルは、1 次音源のインテンシティに対して、この不連続点を避ける様な作用を行っている



と解釈することも出来る。

3.3 節では、2 次音源配置位置の最適化を試みた。この際、2 次音源によって生じるキャンセルのための波面が、1 次音源による波面と最も近い形状を持つ場合 (2 次音源を 1 次音源に近づけた場合) に、最良の結果が得られることを示した。これは、Edge 近傍の比較的広い領域で音圧が極端に下がるため、インピーダンスが不連続となる場所が大きくなり、エネルギーの流れをより効果的に妨げているために生じた結果であるとも考えられる。

一つの例として、再び 5 kHz を仮定し、2 次音源が Edge から 0.2 m の距離に存在する場合を考える。この場合の、制御 on. off でのベクトル差  $I'_A - I_A$  を、Fig. 3.41 に示す。

結果によれば、Edge 上部でのエネルギーが流れにくくなる領域 (ベクトルが音源側を向く領域) が、Fig. 3.33 と比較して明らかに広がっている。これによって、回折場へ流れ込むエネルギーは、より効果的に減少させられ、大きな減衰が得られるものと考えられる。

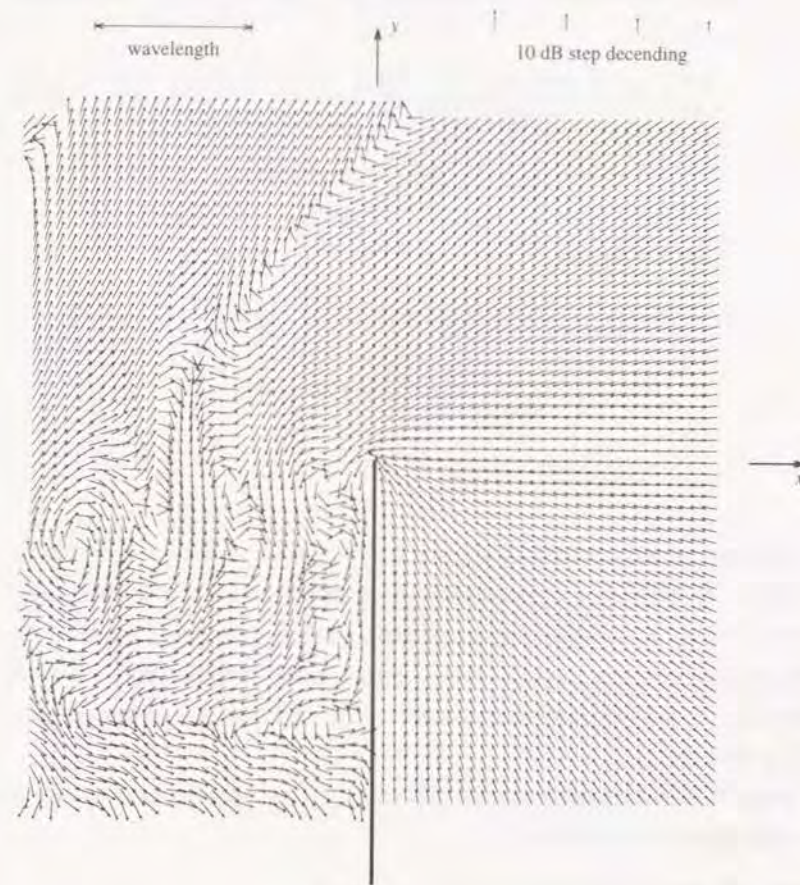


Figure 3.41: 制御 on. off でのベクトルの差 ( $I'_A - I_A$ ) : 5 kHz,  $r'_0 = 0.2$  m の場合

### 3.5.2 音源が点音源の場合

続いて音源が点音源の場合を考察する。この場合も第2章で示した【厳密解】(2.36), (2.37) 式を  $x, y, z$  各変数について偏微分し、粒子速度を求めるものとした。例として  $x$  に関する微分を行うと、以下の通りとなる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi(P)}{\partial x} = & j \left\{ \int_{-m}^{\infty} \left[ \frac{k(x-x_0)}{2R\sqrt{\mu^2+2kR}} \left\{ H_0^{(1)}(\mu^2+kR) - H_2^{(1)}(\mu^2+kR) \right\} \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{k(x-x_0)}{R(\mu^2+2kR)^{\frac{3}{2}}} H_1^{(1)}(\mu^2+kR) \right] d\mu \right. \\ & \left. + \frac{H_1^{(1)}(m^2+kR)}{\sqrt{m^2+2kR}} \left[ \operatorname{sgn} \left[ \cos \left( \frac{\theta_0-\theta}{2} \right) \right] \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k}{R_1-R}} \left\{ \frac{x(r+r_0)}{R_1 r} - \frac{x-x_0}{R} \right\} \right] \right\} \\ & + j \left\{ \int_{-m'}^{\infty} \left[ \frac{k(x+x_0)}{2L\sqrt{\mu^2+2kL}} \left\{ H_0^{(1)}(\mu^2+kL) - H_2^{(1)}(\mu^2+kL) \right\} \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{k(x+x_0)}{L(\mu^2+2kL)^{\frac{3}{2}}} H_1^{(1)}(\mu^2+kL) \right] d\mu \right. \\ & \left. + \frac{H_1^{(1)}(m'^2+kL)}{\sqrt{m'^2+2kL}} \left[ \operatorname{sgn} \left[ \cos \left( \frac{\theta_0+\theta}{2} \right) \right] \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k}{R_1-L}} \left\{ \frac{x(r+r_0)}{R_1 r} - \frac{x+x_0}{L} \right\} \right] \right\} \end{aligned} \quad (3.23)$$

計算に際しての音源、受音点位置を Fig. 3.42 に示す。座標系はこれまでと同様に、図中に示す通りである。ここでは  $z=0$  を中心に 11 個の 2 次音源が存在するものとし、その間隔は Edge 上のキャンセルポイントの間隔とともに 0.02 m である。また Edge と各音源までの距離は線音源の場合と同じくそれぞれ 0.5 m, 0.1 m である。受音点は線音源の場合と同じ領域を  $z=0$  の平面内に設定し、更に 2 次音源群の振る舞いを把握するために 2 次音源と同じ  $y$  座標 ( $y=-0.05$  m) の平面を設定した。

周波数 5 kHz の場合の計算結果を Figs. 3.43 ~ 3.50 に示すが、それぞれと制御 off, on, 受音領域の関係等は以下の通りである。

Fig. 3.43 : 制御 off :  $x-y$  平面,  $z=0$

Fig. 3.44 : 制御 on :  $x-y$  平面,  $z=0$

Fig. 3.45 : 制御 on, off でのベクトルの差 ( $I_A' - I_A$ ) :  $x-y$  平面,  $z=0$

Fig. 3.46 : 制御 on, off でのインテンシティーレベル差 :  $x-y$  平面,  $z=0$

Fig. 3.47 : 制御 off :  $z-x$  平面,  $y=-0.05$  m

Fig. 3.48 : 制御 on :  $z-x$  平面,  $y=-0.05$  m

Fig. 3.49 : 制御 on, off でのベクトルの差 ( $I_A' - I_A$ ) :  $z-x$  平面,  $y=-0.05$  m

Fig. 3.50 : 制御 on, off でのインテンシティーレベル差 :  $z-x$  平面,  $y=-0.05$  m



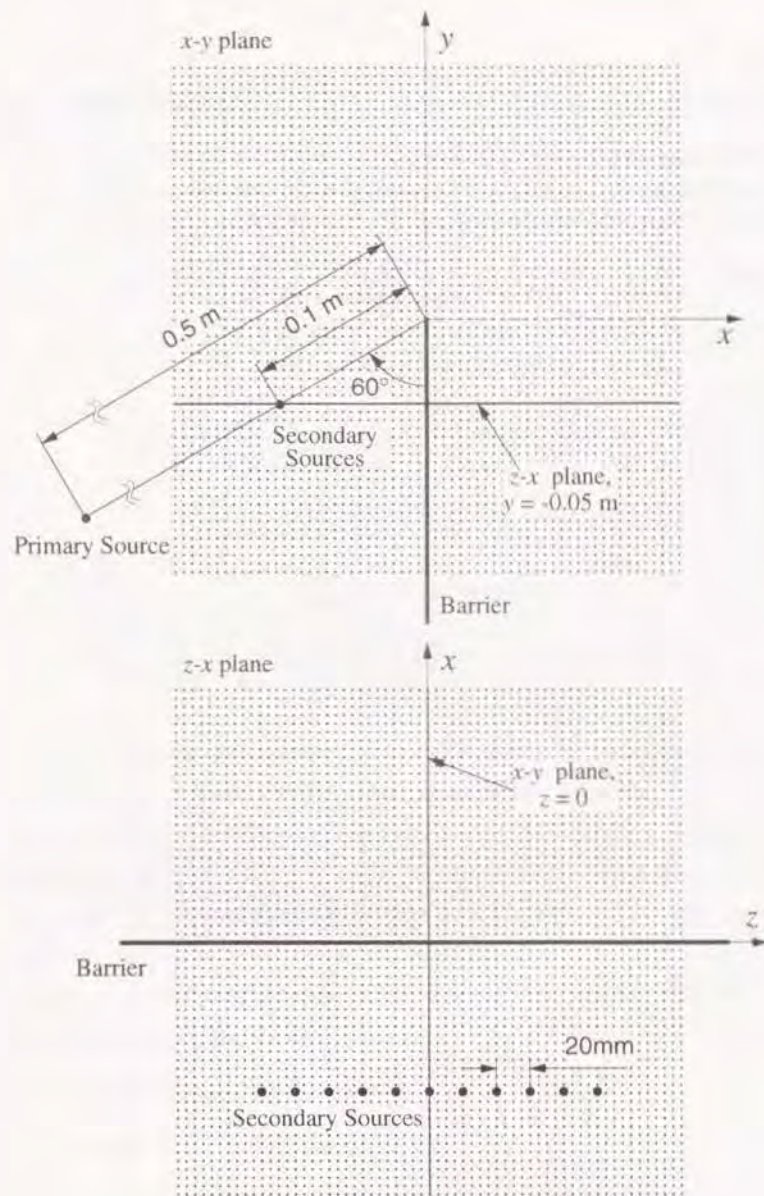


Figure 3.42: インテンシティを計算するための音源、受音点位置

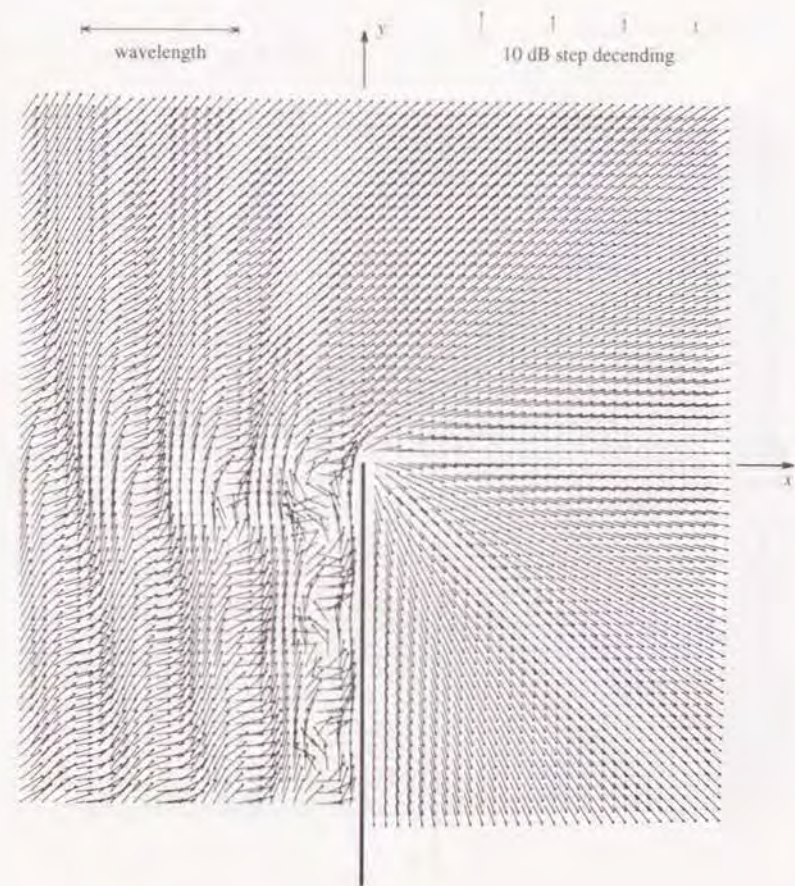


Figure 3.43: Edge 付近のインテンシテクトル (制御 off) :  $x$ - $y$  平面内,  $z = 0$



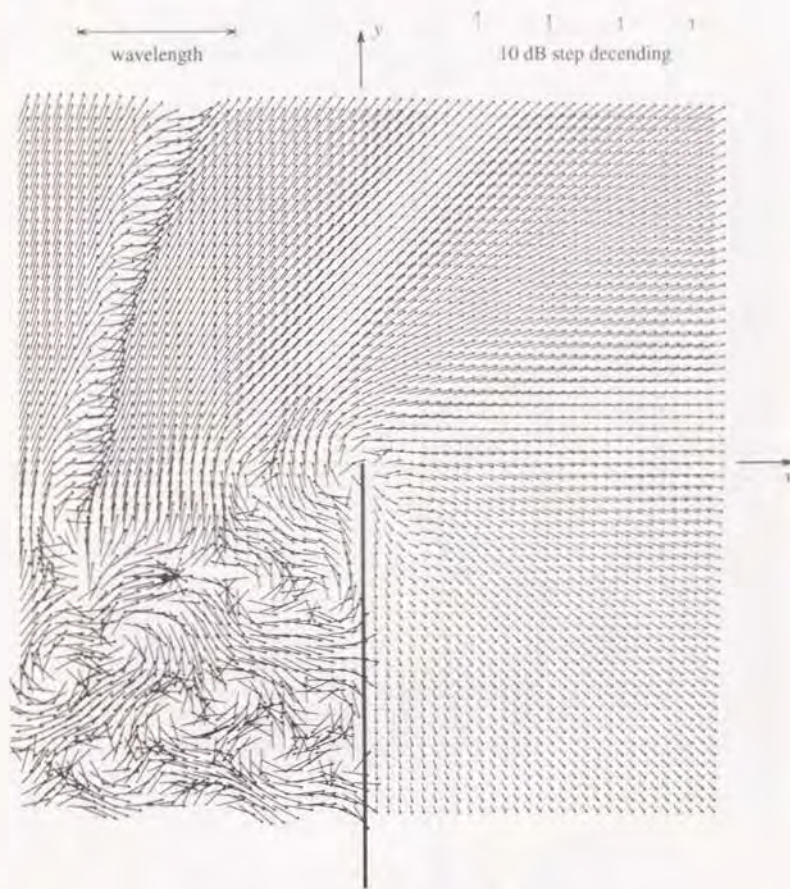


Figure 3.44: Edge 付近のインテンシティベクトル (制御 on) :  $x-y$  平面内,  $z=0$

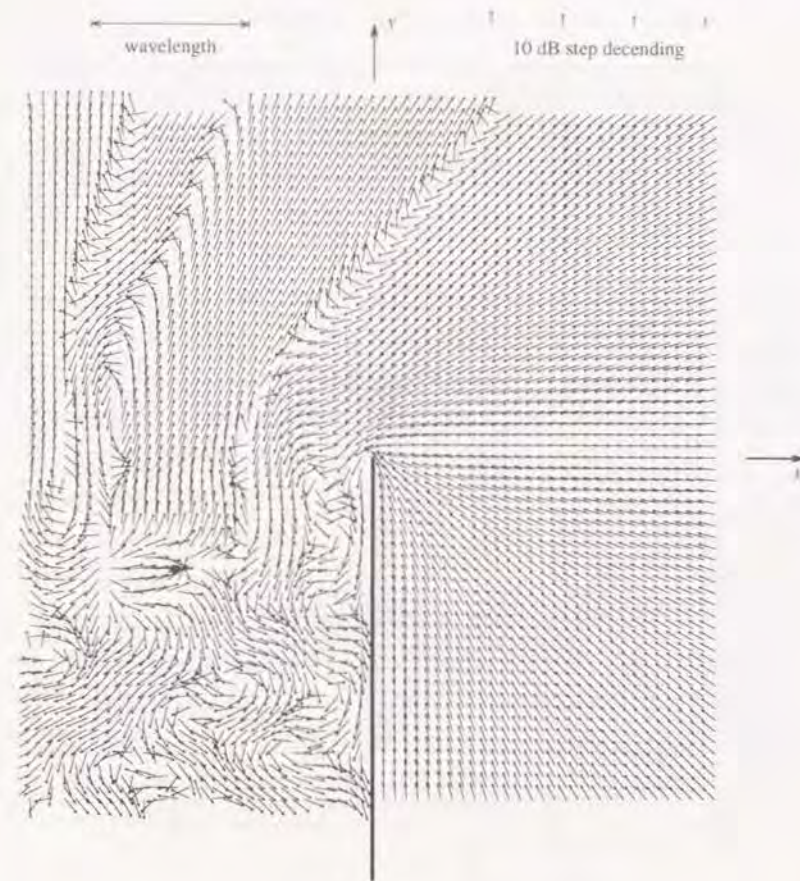
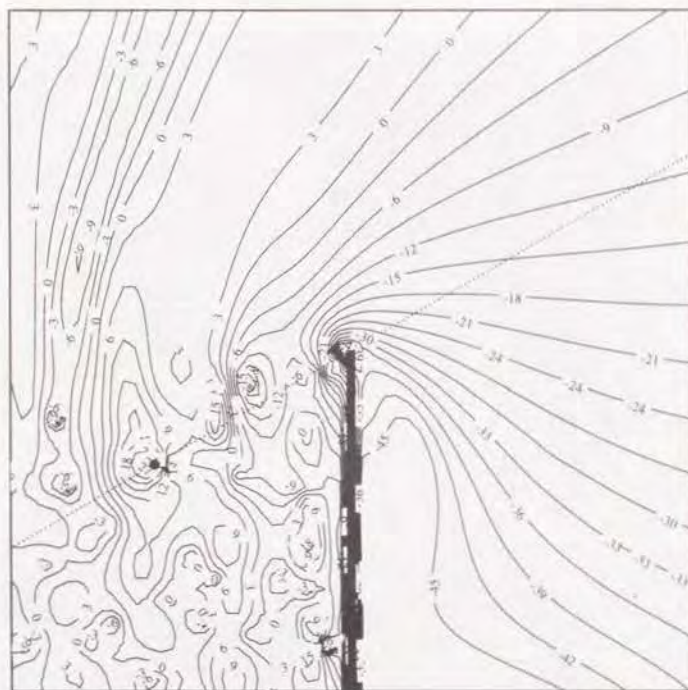


Figure 3.45: 制御 on, off でのベクトルの差 ( $I_A' - I_A$ ) :  $x-y$  平面内,  $z=0$





Difference of Intensity Level ( on - off, dB ) : x-y plane

Figure 3.46: 制御 on, off でのインテンシティレベル差 :  $x-y$  平面内,  $z=0$

まず,  $x-y$  平面における結果について考察する, Fig. 3.43 の制御 off の場合, 線音源の場合とほとんど同じ様子であり, やはり受音側に対して Edge を中心にして放射状にエネルギーが流れていることが明らかである. また, 音源側においては定在波のようなパターンが確認出来る. 障壁近辺のインテンシティ, 特に障壁の左の一系列は, 揃って Edge 方向に向かい, Edge において緩やかに曲がっている.

制御が on の Fig. 3.44 においても, 線音源の場合に似たパターンであり, 影の領域に向かうベクトルは明らかに小さくなり, 制御が有効に働いていることを示している. 更に, 音源側上部の境界線のようなパターンも同様に観察出来る. また障壁の左側の一系列では, インテンシティの方向に乱れが生じ, 特に Edge 近辺においては, これを避けて遠回りするような様子が見られる.

Fig. 3.45 においては, 障壁による影の領域のほとんどの部分で, 制御が off である Fig. 3.43 と反対方向のベクトルが生じている. Fig. 3.46 のインテンシティレベルの差で見れば, Edge 近辺で  $-30$  dB 程度, その下方では  $-45$  dB を越える非常に大きな減衰が得られている. また, 左上部の境界線のような部分では, ベクトルの方向の極端な変化が見られる. その右側においては, ベクトルが制御 off の場合とほぼ同じ方向を向いている領域がある. Fig. 3.46 によれば, この部分で  $3$  dB 程度のレベルの上昇が見られ, この領域でのエネルギーのスムーズな流れが確認できる. 更にその領域の右の部分では, ベクトルは反転している. Edge の上では, 波長程度の幅を持つ領域で, エネルギーが流れにくくなっていることが明らかである.

線音源の場合と大きく異なるのは, 制御 on の状態 ( Fig. 3.44 ) での 2 次音源近辺の様子である. この場合は 2 次音源左側のベクトルが揃って音源方向を向いており, アクティブ吸音が生じているとも考えられる結果である. Fig. 3.45 においても, この近辺のベクトルは, 2 次音源方向に向いており, 同様の傾向が確認できる. ちなみに Fig. 3.46 によれば, 2 次音源近傍では  $20$  dB 以上のレベル増加が見られる. これは, Fig. 3.45 で生じたベクトルが, 制御が off の場合のインテンシティとほぼ同方向である為と考えられる.



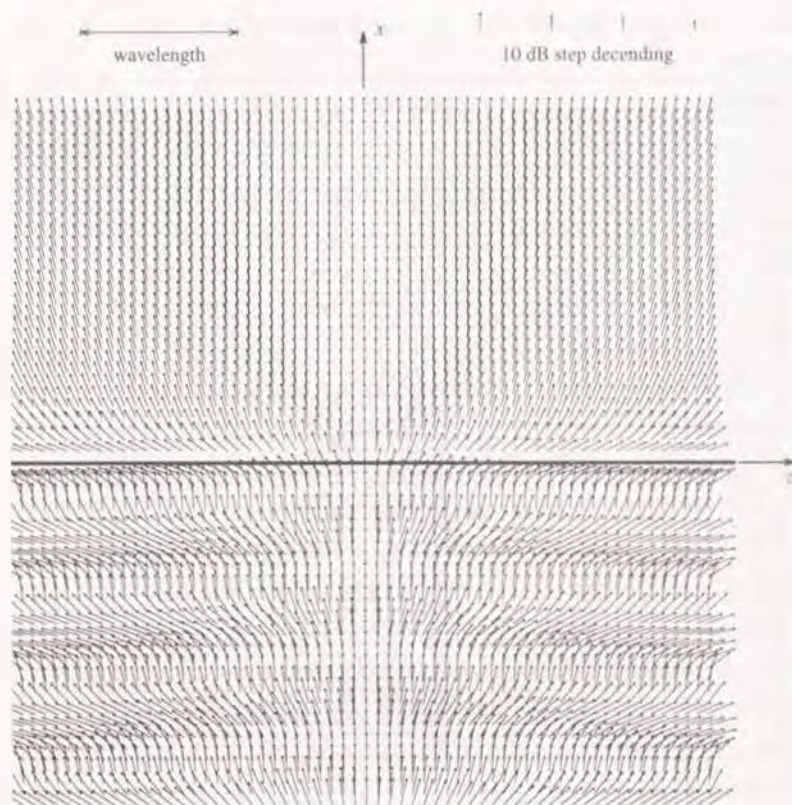


Figure 3.47: Edge 付近のインテンシティベクトル (制御 off) :  $x-z$  平面内,  $y = -0.05$  m

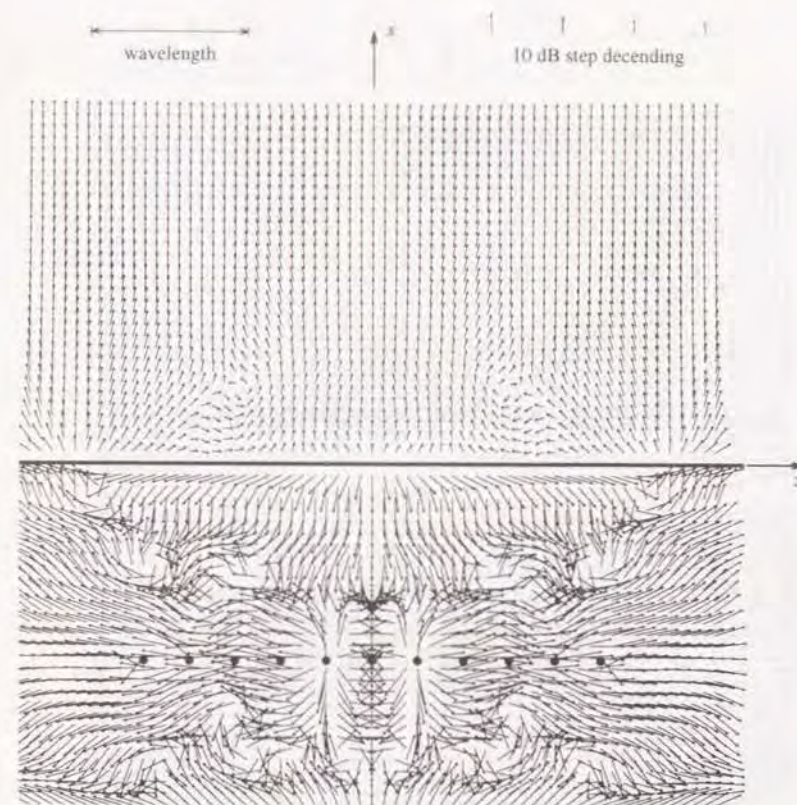


Figure 3.48: Edge 付近のインテンシティベクトル (制御 on) :  $x-z$  平面内,  $y = -0.05$  m



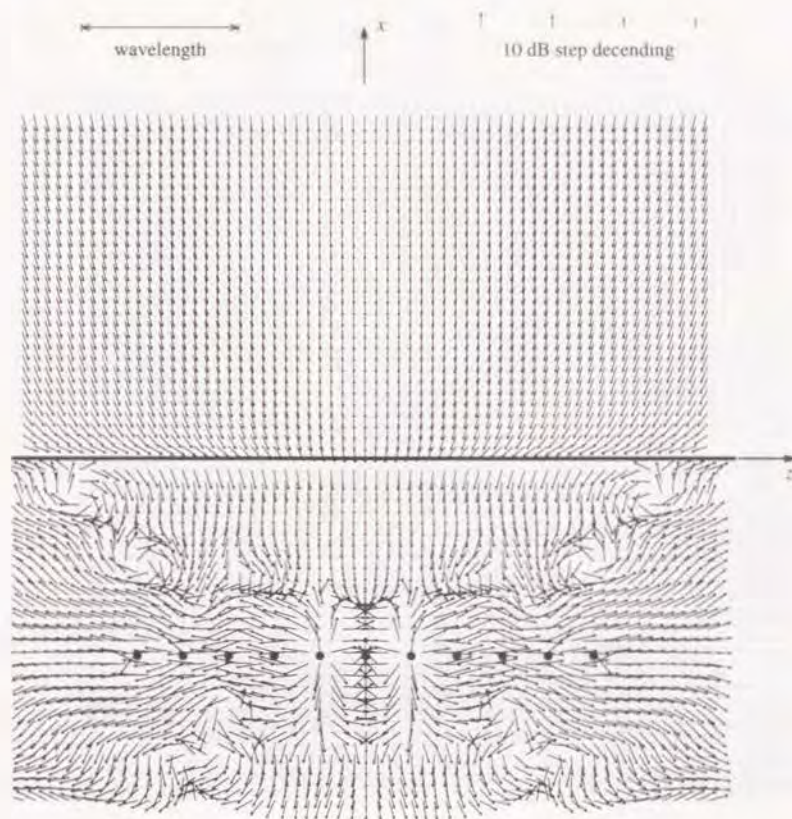
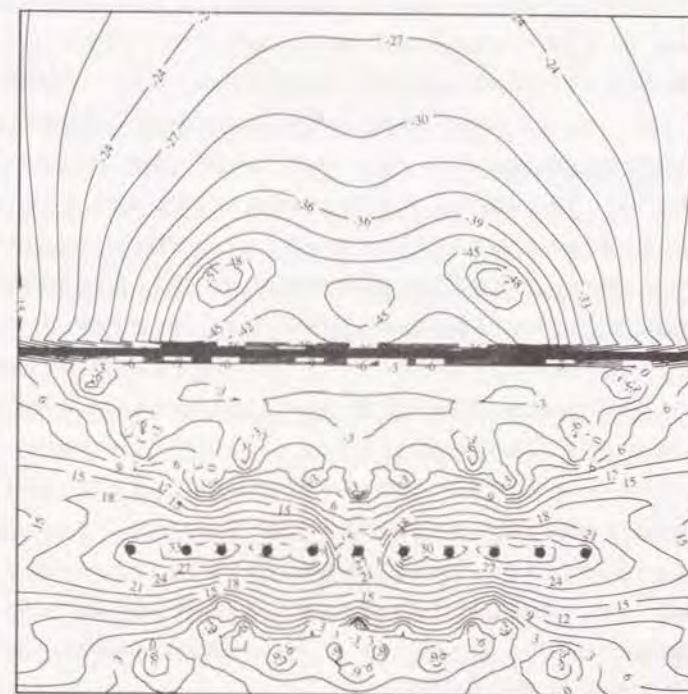


Figure 3.49: 制御 on, off でのベクトルの差 ( $I'_A - I_A$ ):  $z-x$  平面内,  $y = -0.05$  m



Difference of Intensity Level ( on - off, dB ) :  $z-x$  plane

Figure 3.50: 制御 on, off でのインテンスティレベル差:  $z-x$  平面内,  $y = -0.05$  m



続いて、 $x-y$  平面での結果について考察する。制御が off である Fig. 3.47 の音源側においては定在波のなパターンが確認出来る。また 1 次音源が存在する  $z=0$  に沿ってはエネルギーが比較的スムーズに流れていることがわかる。受音側においては、インテンシティが  $z=0$  を中心として  $x-y$  平面上を放射状に拡がっている。

一方、制御を行った状態の Fig. 3.48 では、受音側におけるインテンシティが小さくなり、制御が有効に働いていることが明らかである。制御 on/off でのベクトル差である Fig. 3.49 では、受音側のベクトルが全て音源側を向いており、この作用によって、大きなレベル減衰が生じていることが解る。Fig. 3.50 を見れば、場所によっては  $-40$  dB 以上のレベル減衰も得られている。

音源側で、障壁近辺 (障壁の下 2~3 列) のインテンシティは、制御が off ではほとんどが受音側を向いていた。しかし制御が on の場合には方向が反転し、音源方向を向いている。Fig. 3.44 で見られた、あたかも Edge を避けようとするインテンシティの方向変化に対応するものと考えられる。この傾向は、2 次音源が存在する  $z$  座標の範囲にわたって見られ、その範囲から離れると、再びインテンシティは受音側へ向かう。それに伴って、Fig. 3.48 の受音側において、丁度一番端の 2 次音源が存在する  $z$  座標の辺りを中心に、インテンシティが放射状に拡がる部分がある。もちろんそのレベルは低く、制御が有効に働いていることは明らかであるが、この付近に新たな音源が生じたかのような結果である。

また、中央 ( $z=0$ ) の 2 次音源には両側からベクトルが向かっている。やはりアクティブ吸音とも考えられる結果であるが、その両隣の 2 次音源においてはベクトルは外側を向いている。あたかも 2 次音源間でエネルギーのやりとりが行われているかのようなのである。この様に音源が点音源の場合、一部の 2 次音源においてはアクティブ吸音とも考えられる振る舞いが見られた。しかし、他の音源では明らかにエネルギーを放射しており、本研究における制御の場合、アクティブ吸音が制御効果の主な原因とは考えにくい。

本節においては、音響インテンシティを用いて、制御効果の物理的な解釈を試みた。2 次音源を設置することで生じたベクトル (3.21 式) は、Edge 上のある領域、及び回折場において、1 次音源のインテンシティとはほぼ反対の方向を持つ。エネルギーが非常に流れにくい領域を生成している訳である。このベクトルが作用し、そのレベルが減少することで、結果的に回折場で大きな減衰が得られていることが明らかとなった。しかし、2 次音源によって生じるベクトルが、どのような規則に従って 1 次音源のインテンシティに作用するのかを、ここで得られた結果のみから一義的に解釈することは非常に困難であると考えられる。

またもう一つの特徴として、特に Edge 近辺のベクトルは、レベルと共にその方向を変化させられていた。その方向の変化は、あたかも Edge を避けようとしているかのようなものであった。2 次音源を用いて Edge の音圧をゼロとしたことにより、エネルギーが流れる場所にインピーダンスの不連続点が生成される。定性的な説明でしかないが、2 次音源を設置することで生じるベクトルは、Edge 近辺において、この不連続点を避ける様な作用を行っているとも考えられる。

### 3.6 まとめ

本章では、障壁による回折音に対して能動制御を適用した。まず、Fresnel Zone の考え方をを用いて、回折音を広い受音領域について大きく減衰させるためには、Edge の周りの出来るだけ広い領域で 1 次音源によって生成される波面を消去すべきことを述べた。この波面消去の為の基準点として、本論文では Diffraction Edge を設定し、制御のための 2 次音源には、ここでの音圧がゼロとなるような複素係数を持たせるものとした。なお、音源が点音源である場合には、Edge に沿った方向についても考慮する必要があるため、複数の 2 次音源を用いて、Edge 上の複数点で、音圧を同時にキャンセルすることを考えた。

この方法で実際に幾つかの条件を設定して数値シミュレーションを行ったが、結果として制御は非常に有効に働き、従来から行われてきた障壁の高さを高くする方法では成し得ない程の大きな減衰量を達成出来る可能性が明らかとなった。

能動制御の効果としての音圧減衰量に影響するものとして 2 次音源の配置位置、及び点音源の場合には Edge 上のキャンセルポイントの間隔等の幾つかのパラメータが考えられる。音源が線音源の場合には、遠方回折場を表す近似解を用いて考察することにより、2 次音源を 1 次音源と同じ角度に配置することで、最大の減衰量が得られることが明らかになった。また、2 次音源を 1 次音源に距離的にも近付けることにより、より大きな減衰量が得られた。これは 2 次音源によって生成されるキャンセルのための波面の形状が、Edge の周りの広い領域において、1 次音源の波面の形状に近付いてくるためと考えられる。

点音源の場合には、数値シミュレーションによって、Edge 上のキャンセルポイントの間隔が、問題とする周波数での半波長以下であれば制御は有効に働き、安定した効果が得られることが分かった。これには、Edge 上キャンセルポイント間の音圧分布が影響しているものと思われる。また、この場合は複数の音源を用いるため条件が複雑になり、解析的に求めることは出来ないが、やはり 2 次音源群を、距離、角度共に 1 次音源に近付けることでより大きな減衰量が得られること



が分かった。

更に、制御の効果が得られる物理的な意味を、音響インテンシティを計算することでエネルギーの流れの観点から考察した。結果として、次のことが明らかになった。2次音源を設置することで、回折場に新たなベクトルが生じる。これは2次音源によるインテンシティ、及び1次音源と2次音源の相互作用を表す成分を持つものである。このベクトルは、Edge上のある領域、あるいは障壁による影の領域において、1次音源によるインテンシティとはほぼ反対の方向を持つ。この作用によって、エネルギーが非常に流れにくい領域が生成される。結果的に、影の領域に流れ込むインテンシティのレベルが低下し、制御の効果が得られているものと考えられる。

特に、障壁のEdge付近におけるこのベクトルの作用は顕著であり、インテンシティがあたかもEdgeを避けようとしているかのような傾向が見られた。2次音源を設置することで生じたベクトルが、どのような規則に従って1次音源のインテンシティに作用するのかを、ここで得られた結果のみから厳密に解釈することは困難である。本研究においては、障壁Edgeでの音圧をゼロとすることを、制御の基本的な方法としている。この場合、Edgeは音響インピーダンスの不連続点であると考えられる。定性的な説明にとどまるが、2次音源を設置することで生じるベクトルは、この不連続点を避けようとする作用を行っているとも考えられる。

## 参考文献

- [1] 有山正孝, 振動・波動, (裳華房, 1970年), pp.253-262.
- [2] Max Born, Emil Wolf, 草川徹, 横田英嗣 訳, 光学の原理 II, (東海大学出版, 1976年), pp.568-574.
- [3] 小出昭一郎, 兵藤申一, 阿部龍蔵, 物理概論 上巻 (裳華房, 1984年), pp.161-163.
- [4] 辻内順平, 光学概論 II (朝倉書店, 1979年), pp.96-106.
- [5] A. Sommerfeld, 瀬谷正男, 浪岡武 訳, 光学 (講談社, 1969年), pp.209-237.
- [6] F.W.Sears, *Optics*, (ADDISON-WESLEY PUBLISHING COMPANY, INC., 1964), pp.245-252.
- [7] V.F.Spandock, "Experimentelle Untersuchung der akustischen Eigenschaften von Baustoffen durch die Kurztonmethode" *Annalen der Physik*, vol.5. Folge. Band 20, pp. 328-344.1934.
- [8] L.Cremer, H.A.Muller, Translated by T.J.Schultz, *Principle and Applications of Room Acoustics*, (APPLIED SCIENCE PUBLISHERS LTD., 1982), pp.20-24.
- [9] E.Skudrzyk, *The Foundations of Acoustics*, (Springer-Verlag, 1971), pp.513-515.
- [10] 尾本章, 藤原恭司, "Fresnel Zone について", 音講論集, pp.777-778.1992, 10
- [11] J. J. Bowman, T. B. A. Senior and P. L. E. Uslenghi, *Electromagnetic and Acoustic Scattering by Simple Shapes*, (North-Holland Publishing Co., Amsterdam, 1969) p.330.
- [12] 伊勢史郎, "建築音響におけるアクティブノイズコントロールに関する研究" 東京大学博士論文 (平成2年12月), p. 124.
- [13] P. A. Nelson, S. J. Elliott "Active Control of Sound" (ACADEMIC PRESS Ltd., 1993), p.238
- [14] 前出 [12] p. 110.
- [15] 伊勢史郎, 橘秀樹, "エネルギーを視点としたアクティブ制御の分類" 音響学会講論集, pp. 689-690.1993

## 第4章

### 実験的検討

#### 4.1 概要

前章においてシミュレートした回折音に対する能動制御の効果、及び2次音源位置による制御の効果の変化を、実験的に検証する。音源が線音源である場合には、近似的な2次元音場を実現し、実物の約1/10のスケールモデルを仮定して実験を行った。また、点音源の場合には無響室内において実験し、Edge上複数点での同時音圧消去を実現するため、多チャンネル適応信号処理を導入した。

#### 4.2 2次元音場における実験

##### 4.2.1 2次元音場自由音場の実現

Fig. 4.1に示すように、約20mmの間隔を開けて、 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ の大きさをもつ2枚の表面の滑らかな剛板（10mm厚の亚克力板）を2枚配置し、その間の空間を2次元音場とした。また、障壁を設置しない状態で自由音場を実現するために、周囲に密度 $36\text{ kg/m}^3$ 、 $24\text{ kg/m}^3$ のグラスウールで作製した長さ約10cmの楔を配置した。

音源は市販のツイータ（FOSTEX T925）を改良し、先端に内径9mmのステンレスパイプを取り付けたものを一方の板から差し込んで使用した。マイクロホンは、直径5mm、長さ10mmの無指向性コンデンサマイク（SONY ECM-155）を使用した。実際の設置状況はFig. 4.2に示す通りであり、マイクに関しては常に一定方向を向くようなサポート治具を作製し、その移動には磁石を用いた。

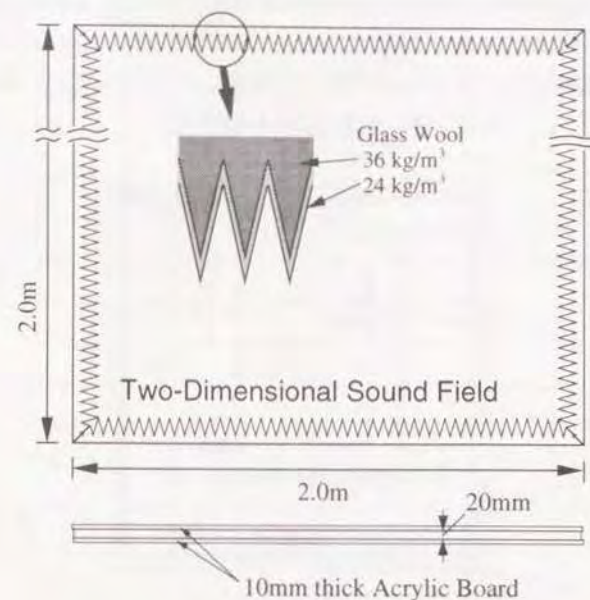


Figure 4.1: 2次元無響室

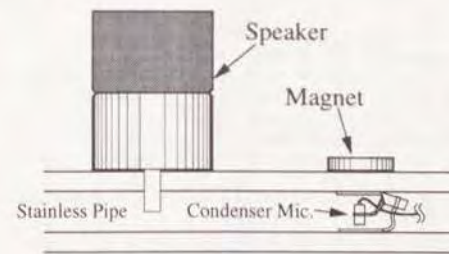


Figure 4.2: 音源スピーカ、及びマイクロホン設置状況



この音場における障壁がない場合の自由音場距離減衰特性を測定した。音源位置、及び測定方向は Fig. 4.3 に示す通りであり、音源には 1 kHz ~ 10 kHz までの 1/3 オクターブステップの純音を用いた。結果を Figs. 4.4, 4.5 に示すが、二つの結果はそれぞれ Fig. 4.3 中の測定方向 (a), (b) に対応する。また、図中の実線は倍距離 -3 dB の直線である。

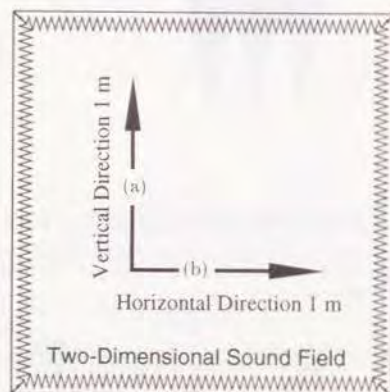


Figure 4.3: 自由音場距離減衰特性測定方向

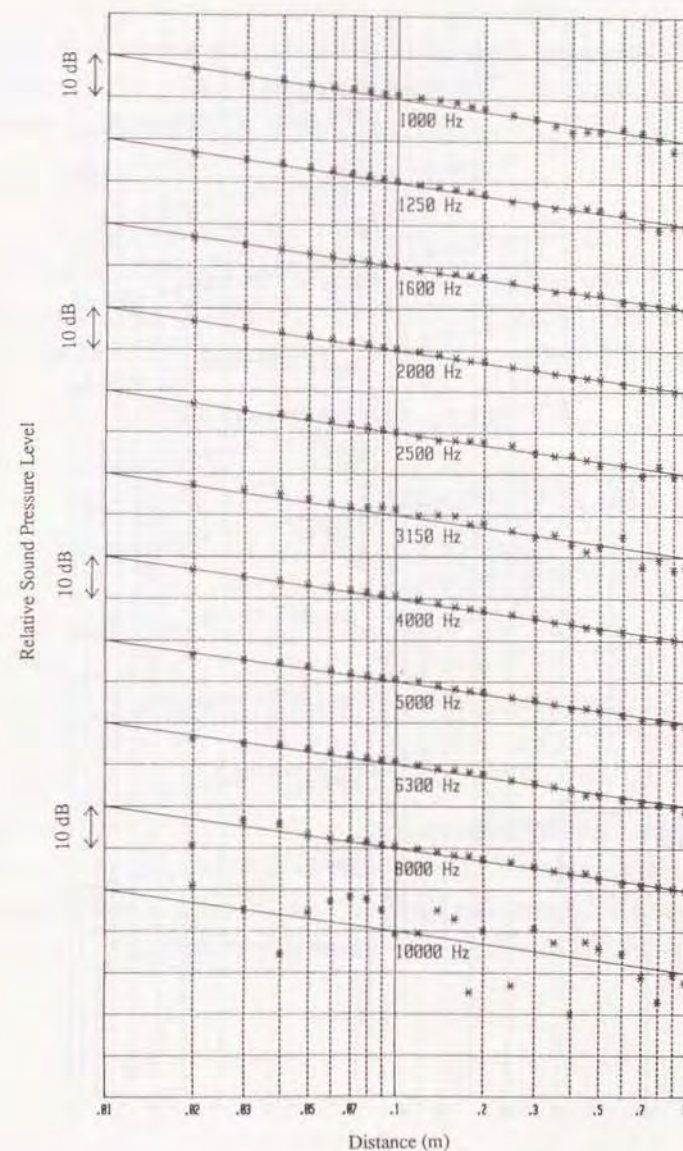


Figure 4.4: 2次元音場における自由音場距離減衰特性: Direction (a)

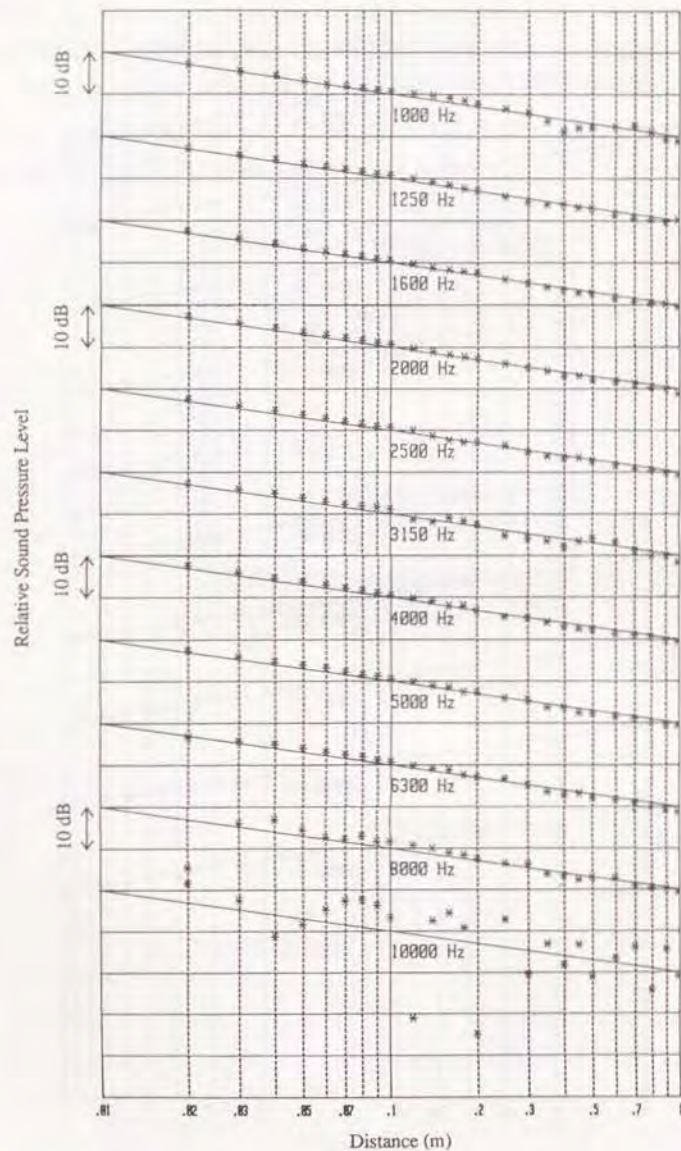


Figure 4.5: 2次元音場における自由音場距離減衰特性: Direction (b)

結果によると、3.15 kHzを除く 1.25 kHz ~ 6.3 kHz の範囲で、直線からの偏差が  $\pm 1$  dB 以内に押さえられており、近似的に自由音場が成立している。この結果と、実験に用いるスピーカの周波数特性、能率等を考慮して、以後測定には 4.5, 6.3 kHz の純音を用いるものとする。

#### 4.2.2 実験条件

上述の2次元自由音場において、障壁として厚さ 4 mm の鉄板を Fig. 4.6 に示す位置に取り付けた。音源位置は、やはり図に示すように、Edge から 0.5m の位置に 1 次音源、0.1 m の距離に 2 次音源を配し、角度はそれぞれ  $60^\circ, 90^\circ$  を選択できるものとした。受音領域は図中に斜線で示される範囲であり、0.1 m 毎に横方向 8 ポイント、縦方向 7 ポイントの計 56 ポイントである。

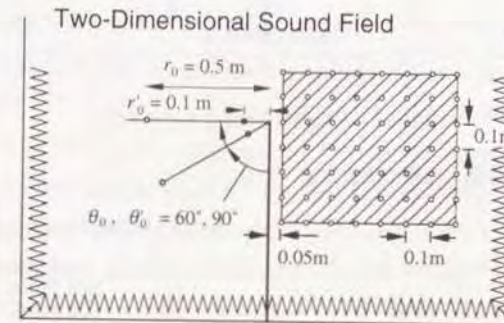


Figure 4.6: 音源配置位置及び受音領域

測定系のブロックダイアグラムを Fig. 4.7 に示す。音源信号発生装置として 2 ch 振幅位相可変のファンクションジェネレータ (NF DF-194A) を用い、音圧レベル測定には FFT アナライザ (小野測器 CF-910) を、またデータ取り込み、及び結果の整理など後処理は、IEEE-488 (GP-1B) インターフェースを介してデスクトップコンピュータ (HP9000 Model 310) で行った。



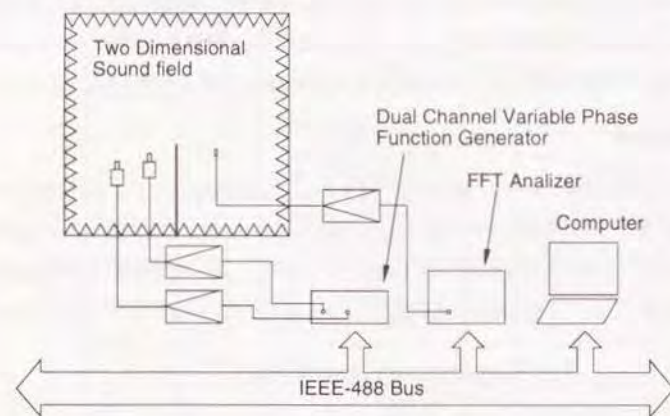


Figure 4.7: 測定系ブロックダイアグラム

#### 4.2.3 2次音源振幅・位相の決定方法

数値シミュレーションにおいては、Edge 上の広い領域で1次音源による波面を消去するための基準点として Edge そのものを選び、ここでの音圧がゼロとなるような複素係数を2次音源に持たせた。実験においても、同様に Edge での音圧が最小となるように2次音源の振幅及び位相を調節する。具体的には、受音点での測定に先だって Fig. 4.8 に示す Edge のごく近傍にマイクを設置し、1次音源及び2次音源双方を on にした状態で、ここでの音圧が最小となるように2次音源の振幅、位相を手動で調整した。

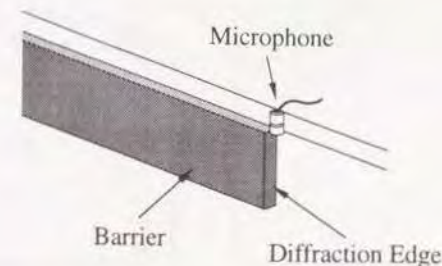


Figure 4.8: 2次音源振幅・位相決定用マイクロホン設置状況

この調整は、振幅についてはスピーカ印加電圧を 1 mV ステップで、位相については 0.1° ステップで行い、振幅一位相の順で最小の音圧が得られるまで繰り返した。この操作によって、Edge 近傍に設置したマイクで、-50 ~ -60 dB 以上の音圧レベル減衰を観測することが出来るが、この状態は非常に不安定であり、測定に用いたアンプや、スピーカの動特性によるものと考えられるかなりの音圧レベル変動が見られた。そこである程度の時間待ち、レベルが安定することを確認の後、2次音源の振幅・位相を決定した。

#### 4.2.4 実験結果及び考察

前述の振幅・位相を持つ2次音源が on の時、off の時それぞれの場合に各受音点において音圧レベルを測定し、その差を能動制御の効果とする。結果として、まず2次音源が off の場合の音圧レベル分布を Fig. 4.9 に示す。(a), (b) はそれぞれ1次音源の角度 60°, 90° に対応する。図中のレベルは2次元自由音場において音源から 1 m 点の音圧を 0 dB とした相対的なものであり、直線は障壁の位置、破線は1次音源に対する影の境界である。

数値シミュレーションの結果である Fig. 3.9 と比較すると、両者は音圧レベルで -12 dB 程度まで比較的良く一致しており、それ以降のレベルでは多少乱れが見られるようになる。また、いずれの場合にも、影の境界付近では -6 dB 前後のレベルである。

次に制御を行った状態での音圧レベル分布を示す。Fig. 4.10 は1次音源の角度が 60°, Fig. 4.11 は 90° の場合であり、(a), (b) はそれぞれ2次音源が1次音源と同じ角度の場合、異なる場合に対応する。



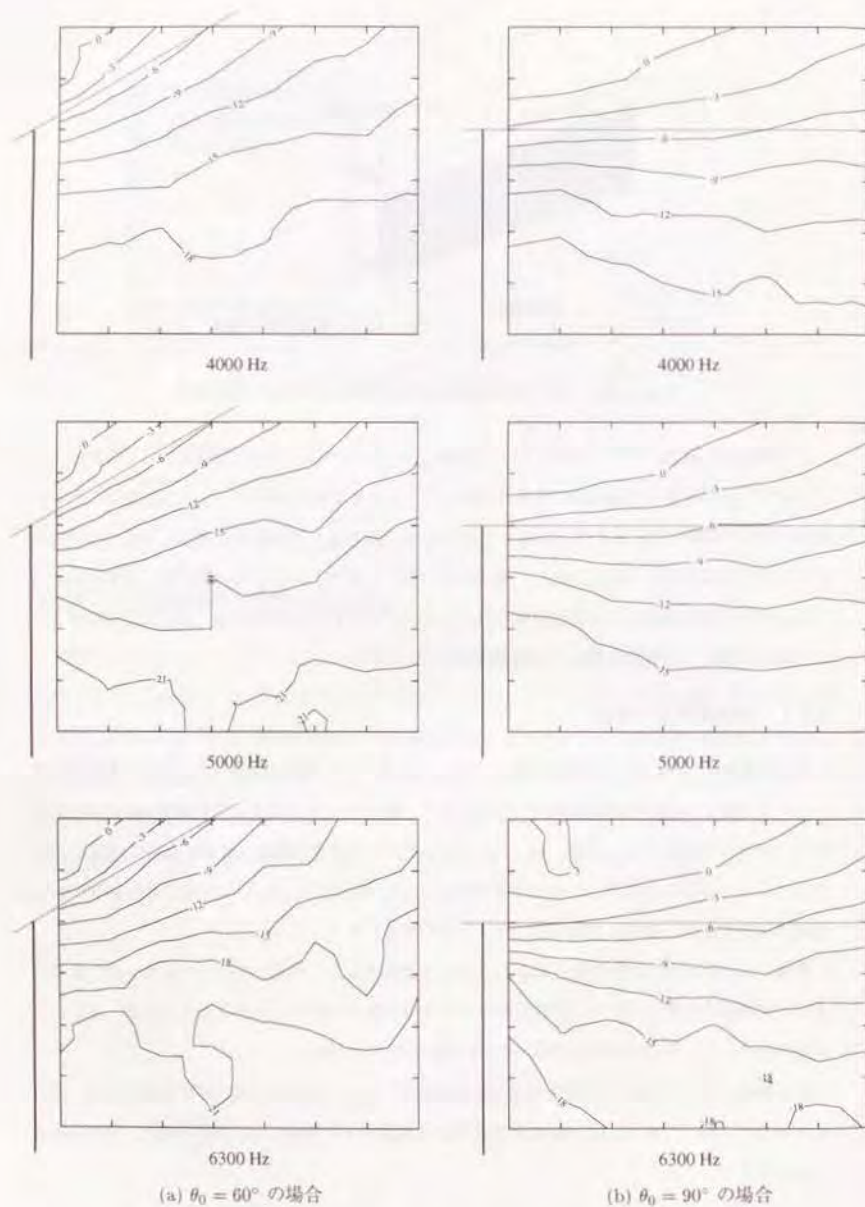


Figure 4.9: 受音領域における音圧レベル分布 (制御 off の状態)

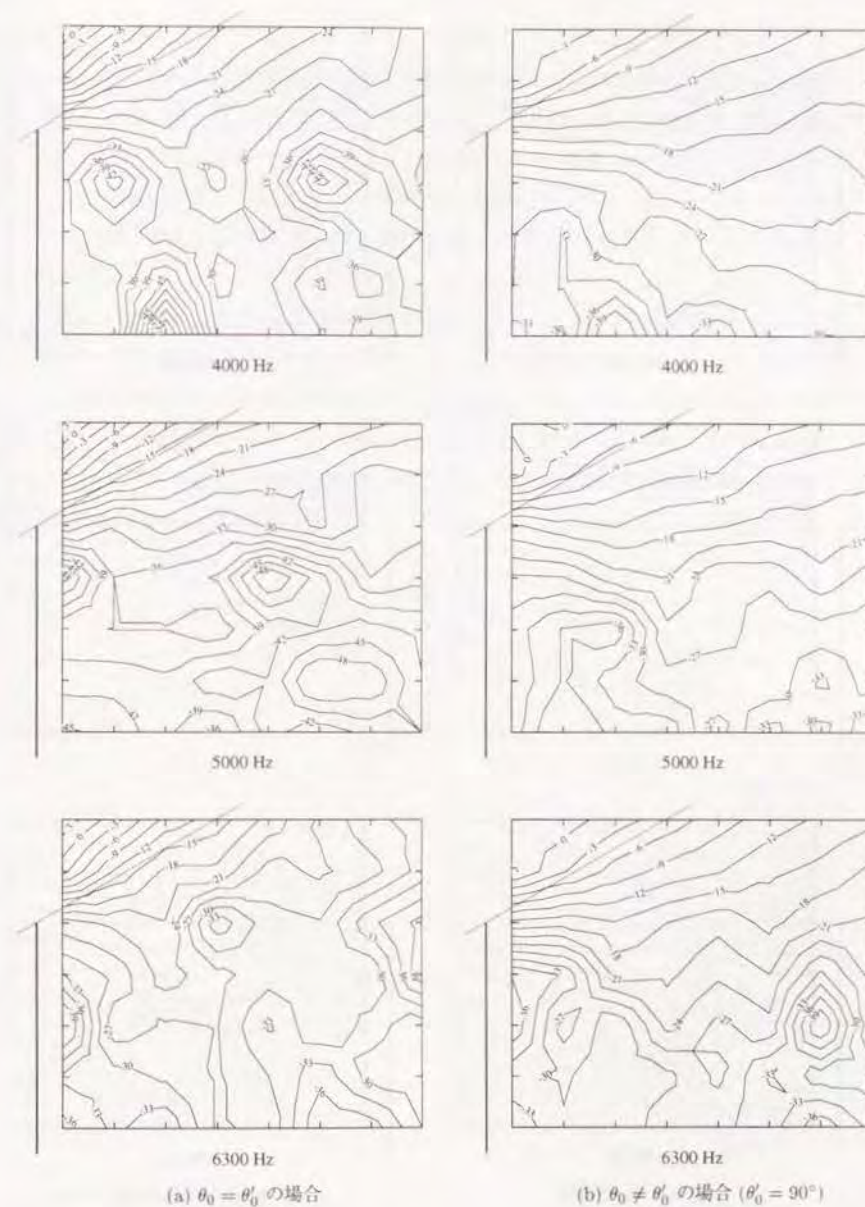


Figure 4.10: 受音領域における音圧レベル分布 (制御 on の状態):  $\theta_0 = 60^\circ$



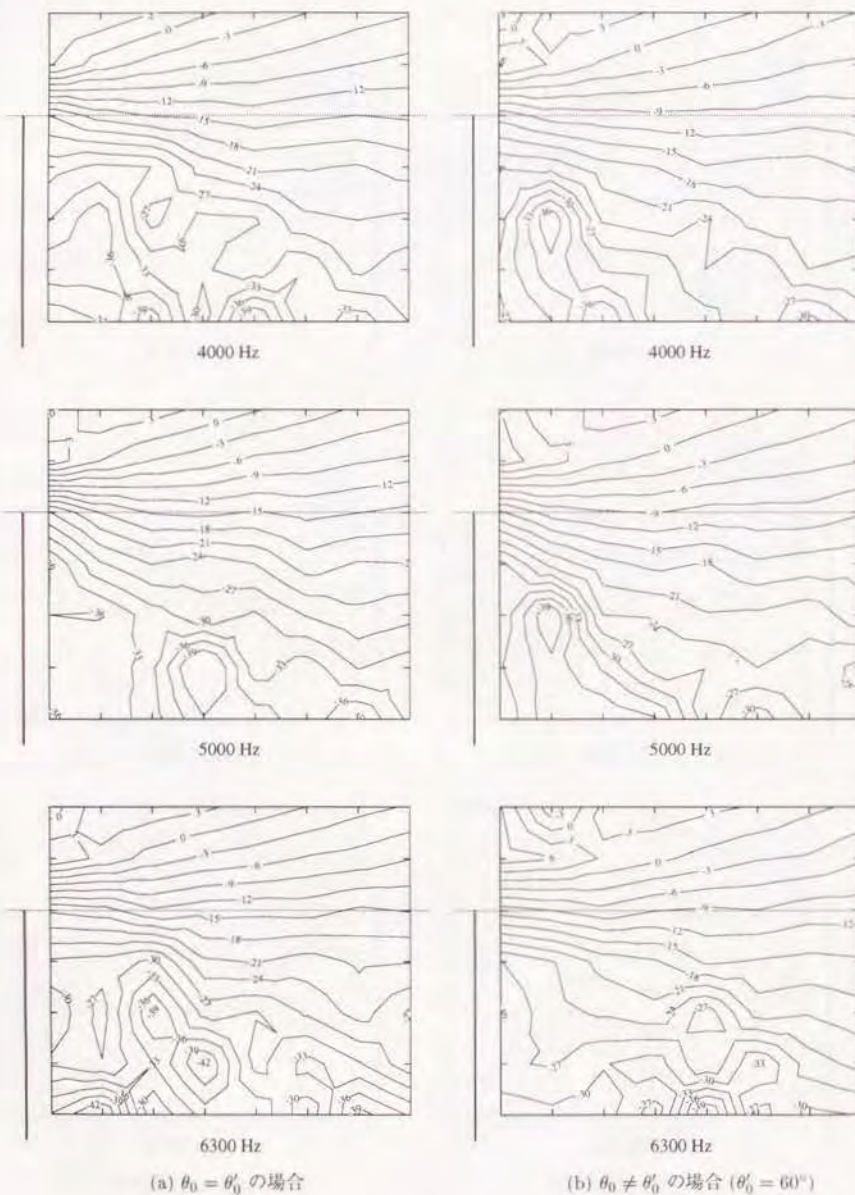


Figure 4.11: 受音領域における音圧レベル分布 (制御 on の状態):  $\theta_0 = 90^\circ$

Fig. 4.10 では, (a), (b) 間の差は明らかであり, 影の境界付近で比較すれば (a) では  $-15$  dB 程度のレベルであるのに対し, (b) では  $-6$  dB 程度と, 約  $9$  dB の差が認められる. これは Fig. 3.10 (a), (b) で見られた差とほぼ一致する. また, 特に (a) では領域の中ほどの数ポイントで非常に音圧の低い点が見られる. これは広い領域で大きな減衰を得るという観点からは望ましい傾向ではないが, 後述するように自由音場を構成する楔からの反射音との干渉によって生じているものと考えられる.

Fig. 4.11 においても, Fig. 4.10 程ではないが, やはり (a), (b) に差は認められ, (a) の 2 次音源を 1 次音源と同じ角度に配置した場合に, より低い音圧レベルが実現されている. 両者の差は, 影の境界付近で  $6$  dB 程度である. また, この結果も Fig. 3.11 と  $-21$  dB 程度のレベルまでよい一致を見せている.

上記の結果から求めた, 制御の効果の分布を, Figs. 4.12, 4.13 に示す. 角度の組み合わせなどは, Figs. 4.10, 4.11 と同じである.



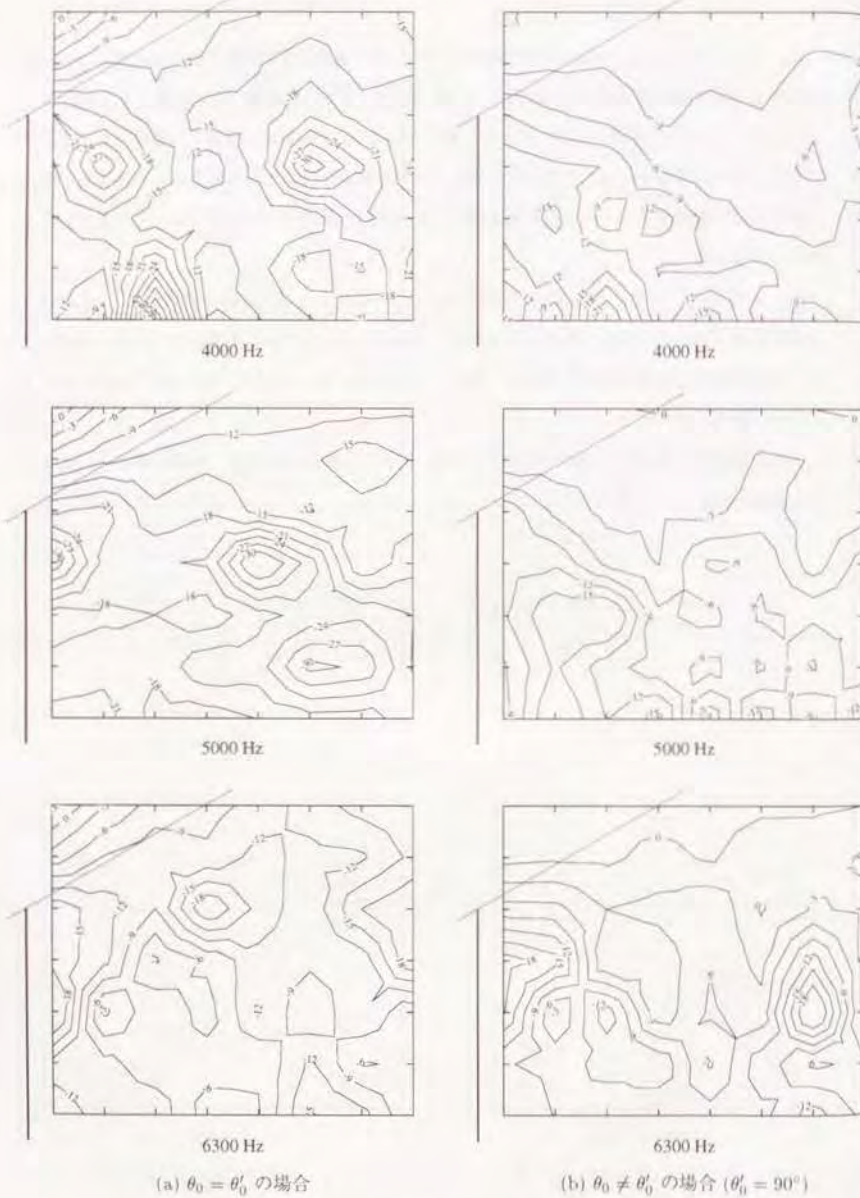


Figure 4.12: 能動制御による音圧減衰量分布:  $\theta_0 = 60^\circ$

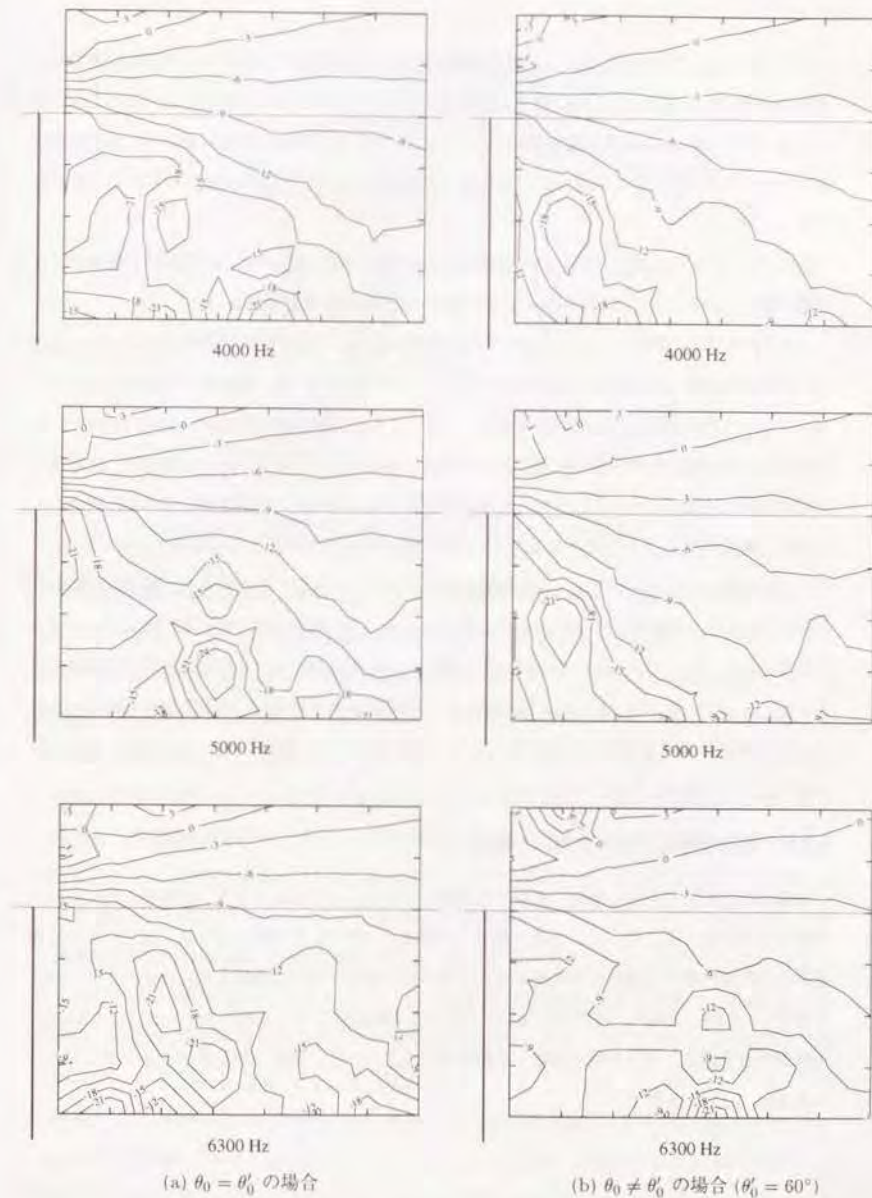


Figure 4.13: 能動制御による音圧減衰量分布:  $\theta_0 = 90^\circ$



まず Fig. 4.12 であるが、(a)、(b) 間の制御の効果の差は明らかであり、(a) の音源位置では受音領域全般で  $-12$  dB 以上の制御効果が得られており、 $-30$  dB 以上の点も存在する。これに対して (b) では  $-6 \sim -9$  dB 程度の領域が広く見られ、(a) ほど制御が有効に働いているとはいえない。やはり 2 次音源を 1 次音源と同じ角度に配置することで、大きな減衰が得られることが分かる。

次に Fig. 4.13 であるが、Fig. 4.12 程の顕著な差は無いが、明らかに (a) において制御はより有効に働いている。(a)、(b) 両者の差は影の境界付近で 6 dB 程度である。

これらの結果を、数値シミュレーションの結果である Figs. 3.12, 3.13 と比較すると、Fig. 4.12 (b) を除いては  $-12$  dB あたりまで比較的良い対応を見せている。実験結果ではそれ以下のレベルにおいて大きな乱れが認められるようになる。これは実験を行った 2 次元音場において、周りの楔からの反射音との干渉が顕著に表れた結果と推測される。障壁が無い状態では、距離減衰特性が十分に成立していた。しかし、実際に障壁を設置した状況での受音側における回折音のレベルは、例えば Fig. 3.9 で分かるように、自由音場で音源が直接見えている場合に比べて  $12 \sim 21$  dB 程度低い。このレベルは、能動制御によって更に低いものに押さえられ、結果的に楔からの僅かな反射音とも容易に干渉するものと考えられる。この傾向は特に周波数が高くなるに従って顕著となり、Fig. 4.12 (a) の 6300 Hz では他の 2 つの周波数における結果に比べて減衰量が小さな値となっている。Fig. 4.13 (b) の 6300 Hz で他の周波数と遜色ない減衰量が得られているのは、1 次音源が  $90^\circ$  の角度に設置されており、制御を行わない状態での音圧レベルが Fig. 4.12 の場合に比べて高かった為であろう。

#### 4.2.5 音源信号にノイズを用いた場合

実際の騒音制御を考えた場合、音源信号が純音であることはまれであり、広帯域に及ぶものがほとんどである。そこで、ここでは音源信号を帯域ノイズとして実験を行うが、スピーカの位相遅れの非直線性等から適応信号処理を導入する必要がある。原理は数多く見られるダクトにおける消音 [1] と同じであり、この場合 Edge での音圧を誤差信号として適応フィルタ (mtt Reasp) の係数を書き換え、2 次音源の振幅・位相を変化させていく。実際の測定系ブロックダイアグラムを Fig. 4.14 に示す。

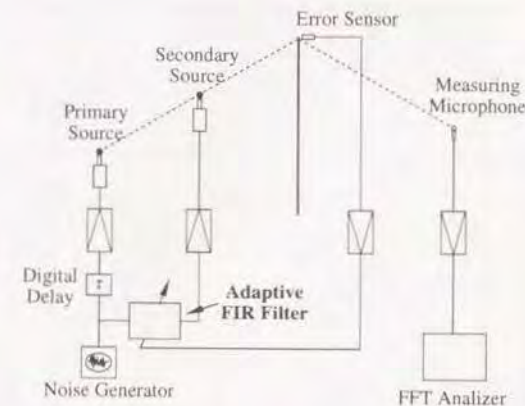


Figure 4.14: 音源信号にノイズを用いた場合のブロックダイアグラム

実用的な側面から考えれば、適応フィルタには 1 次音源の信号をマイク等のセンサーで拾い、入力すべきである。しかし、その場合制御の効果左右するものとして、信号をピックアップする位置が新たなパラメータとなり、問題が複雑になる。そこで、ここでは 2 次音源の配置位置による制御効果の変化を確認することを主眼として、音源信号は既知であると仮定し、直接適応アルゴリズムに入力するものとした。

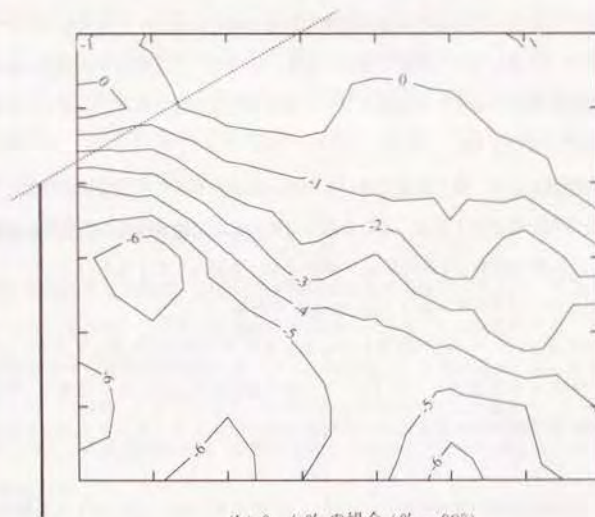
また技術的な問題として、縮尺模型を用いるため、係数の算出に必要な計算時間と比較して 1 次音源と 2 次音源の距離が近すぎる。これを補うため、ここでは音源から仮想的な距離を与えるために約 2 ms (距離に換算して約 0.7 m) のディレイを挿入したとするものとした。このディレイは群遅延一定のデジタルディレイ (mtt Stork) である。

音源信号としては 5 kHz を中心周波数とする 1/3 オクターブバンドノイズ (ノイズジェネレータ B&K Type 1405 + 1/3 オクターブバンドフィルタ B&K Type 2113) であり、純音の場合と同様に、4 種類の音源配置組み合わせについて測定を行った。スピーカ、マイクなどは前節と同様である。

結果として、制御の効果の分布を Figs. 4.15, 4.16 に示す。Fig. 4.15 は 1 次音源が  $60^\circ$ 、Fig. 4.16 は  $90^\circ$  の場合であり、(a)、(b) は Figs. 4.12, 4.13 と同様、それぞれ 2 次音源の角度が 1 次音源と同じ場合、異なる場合に対応する。また、この場合コンターは 1 dB 毎に引かれている。



(a)  $\theta_0 = \theta'_0$  の場合

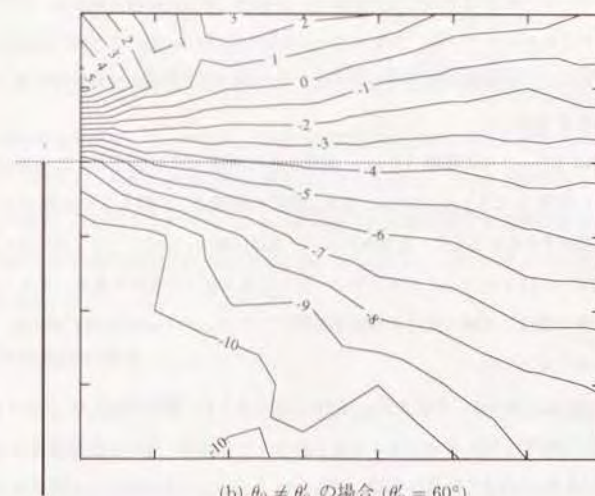


(b)  $\theta_0 \neq \theta'_0$  の場合 ( $\theta'_0 = 90^\circ$ )

Figure 4.15: 能動制御による音圧減衰量 (音源信号に帯域ノイズを用いた場合) :  $\theta_0 = 60^\circ$



(a)  $\theta_0 = \theta'_0$  の場合



(b)  $\theta_0 \neq \theta'_0$  の場合 ( $\theta'_0 = 60^\circ$ )

Figure 4.16: 能動制御による音圧減衰量 (音源信号に帯域ノイズを用いた場合) :  $\theta_0 = 90^\circ$



まず, Fig. 4.15 (a), (b) を比較する。(a) では,  $-9$  dB 程度の効果が広範囲で得られており, 純音の場合ほどではないが制御が有効に働いていることが分かる。これに対して (b) では音圧の上昇する領域もかなり見られ, 2 次音源配置位置による制御効果の違いが明らかに認められる。この傾向は Fig. 4.16 においても同様である。(a) では影の領域で  $-9 \sim -12$  dB 程度の領域が支配的であるが, (b) では  $-4 \sim -10$  程度であり, 約  $2 \sim 5$  dB の差があることが分かる。

減衰量が純音での数値計算結果, 及び実験結果に比べて少ないことの原因としては, デイレイによって付加した仮想的なものも含めて, 1 次音源と誤差信号検出マイク間の距離が, 最適な結果を得るために必要な距離(時間)に比べて短かったことが考えられる。将来的に計算時間の短縮が可能であれば, デイレイ等を用いない, 更に現実的なモデルでの実験も可能となる。

### 4.3 3次元音場における実験

#### 4.3.1 実験条件

3次元音場における半無限障壁を実現するために, 無響室において障壁を Fig. 4.17 に示すように設置した。無響室の床面はスチールグリッドである。障壁は  $3$  mm の鉄板を,  $12$  mm のプラスターボード 2 枚ではさんだものである。音源側の床面には硬質繊維板, プラスターボードを敷き, その上にロックウール, グラスウールの層を約  $30$  cm 設けて下方への音の透過及び上方への反射を防いだ。音源側の床面については, マイクロホン移動の簡便さを考えてスチールグリッドのままである。

1 次音源は Edge からの距離  $1.0$  m, 障壁からの角度  $60^\circ$  に固定し, 2 次音源及びキャンセルポイントの間隔  $d$  は  $0.3$  m である。2 次音源群の位置は, 距離を  $0.2$  m 及び  $0.5$  m, 角度を  $60^\circ, 90^\circ$  に選択するものとした。ちなみにスピーカは口径  $8$  cm のフルレンジスピーカ (FOSTEX FE87) を  $135 \times 115 \times 85$  mm<sup>3</sup> のエンクロージャに取り付けたものである。キャンセルポイント, 及び 2 次音源の数は, 実験に使用する信号処理ハードウェア (mtt LORY PLUS) の演算速度の制限から, 共に 4 とした。

受音点についてであるが, やはり Fig. 4.17 に示すように, 鉛直面内に  $48$  点  $\times 2$  ( $z = 0, -0.45$  m), また水平面内に  $104$  点  $\times 2$  ( $y = 0, -0.4$  m) とした。なお, 音源信号は  $250, 500, 1000$  Hz の純音であり,  $kd$  はそれぞれ  $1.37, 2.74, 5.48$  となる。前章で述べた結果によれば,  $250, 500$  Hz では  $1$  kHz に比べて安定した減衰が得られ, 更に 2 次音源の位置について, 距離が  $0.2$  m よりも  $0.5$  m の方が, 角度が  $90^\circ$  よりも  $60^\circ$  の方が大きな減衰が得られることが予想される。

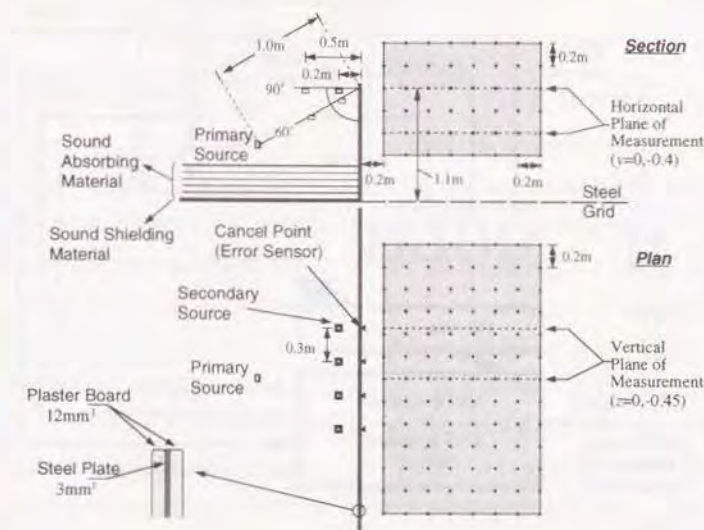


Figure 4.17: 無響室内に設置された障壁, 音源及び受音領域

ここでは半無限障壁を仮定しているため, 上記の位置関係を直接に現実の音場と対応させることは出来ないが, はほぼ  $1/5$  の縮尺模型実験と考えることも出来る。これは実験を行った無響室の大きさによって決定したものである。それにもかかわらず, 音源周波数を通常の障壁による騒音制御問題の代表的な周波数である  $250, 500, 1000$  Hz としたのは, ハードウェアの演算能力の限界によるものである。

#### 4.3.2 適応信号処理の導入

数値シミュレーションにおいては, 各 2 次音源に持たせるキャンセルのための係数を (3.12) 式を数値的に解いて定めれば良いが, 実験に際しては Edge 上の各キャンセルポイントでの音圧が最小となるように 2 次音源の振幅・位相係数を何等かの方法によって定めなければならない。そこで多チャンネルの適応信号処理 [2-5] を導入する。

ここで用いたシステムのブロックダイアグラムを Fig. 4.18 に示す。以下信号を全て離散化した



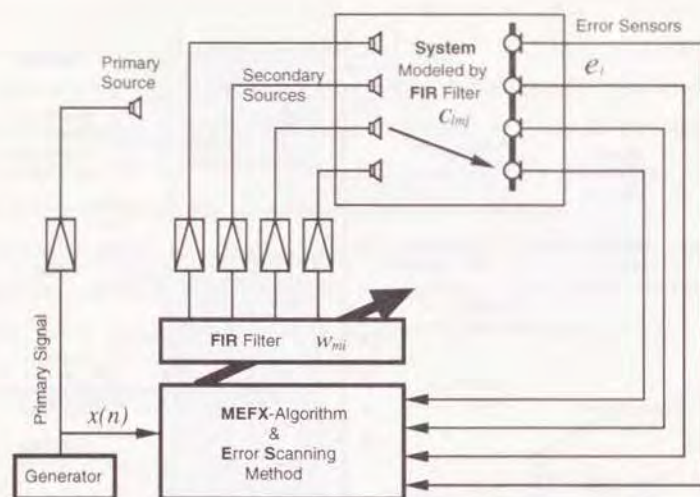


Figure 4.18: 多チャンネル適応システムブロックダイアグラム

デジタル信号として扱い、A/D、D/A 変換、アンチエイリアジングフィルタ等の特性は全てシステム C に含まれるものとする。また、このシステム C 及び 2 次音源の振幅位相コントロール用フィルタ  $w$  は、それぞれ  $J, I$  次の FIR フィルタでモデル化出来、 $C_{lmj}$  は、 $m$  番目の 2 次音源から  $l$  番目のキャンセルポイントに至るシステムのインパルスレスポンスの  $j$  番目の係数、 $w_{mi}$  は  $m$  番目の 2 次音源用フィルタの  $i$  番目の係数を示すものとする。

このフィルタ係数  $w_{mi}$  は、以下に示す Multiple Error Filtered- $x$  LMS アルゴリズム [2, 3] によって、各キャンセルポイントでの音圧  $e_l$  の二乗和を最小にするように逐次的に更新される。

$$w_{mi}(n+1) = w_{mi}(n) - \alpha \sum_{l=1}^L e_l(n) \sum_{j=1}^J C_{lmj} x(n-i-j) \quad (4.1)$$

なお、 $x$  はシステムへの入力、 $\alpha$  は収束の速さと安定度を定める係数であり、 $n$  はサンプルの番号である。

このアルゴリズムで係数を更新する手続きは、(3.12) 式の右辺が不確定、あるいは変動する状況で、これを最小二乗の意味で解くことに相当する [2]。

実際のハードウェア上での計算においては、エラーキャンニング法 [4, 5] を導入し、(4.1) 式

右辺における最初の  $\sum$  を省略することで計算量の削減を図った。なお、サンプリング周波数は 5 kHz であり、 $C_{lmj}$  のタップ数  $J$  は 64、 $w_{mi}$  のタップ数  $I$  は純音を用いた実験のため 2 とした。

#### 4.3.3 実験結果及び考察

Fig. 4.19 (a), (b) に 2 次音源群が Edge から 0.2 m の距離にあり、角度がそれぞれ  $60^\circ, 90^\circ$  の場合の  $z=0$  の鉛直面内、また Fig. 4.20 (a), (b) に  $z=-0.45$  m の面内における減衰量分布を示す。図中の実線は障壁の位置、破線は障壁による 1 次音源に対する影の境界を示す。

Figs. 4.19, 4.20 双方とも、250 Hz においては 2 次音源群の角度の変化による減衰量の変化はほとんど見られないが、500 Hz では角度が等しい (a) で  $-12$  dB 以上の大きな減衰量が広い領域で得られている。これに対し 1 kHz においては、ほとんど全領域にわたって音圧が上昇しており、制御が有効に働いているとは言い難い。この結果は、3.4.3 節で議論した安定した減衰を得るためには、キャンセルポイントの間隔を、問題とする周波数での半波長以下にすべきである、というシミュレーション結果を裏付けるものといえる。ただしこの 1 kHz の場合でさえも (a) において音圧上昇量が少なく、500 Hz と同様に 1 次音源と 2 次音源の角度が同じ場合に、有利な結果が得られるという傾向が表れていると考えられる。また、Figs. 4.19, 4.20 の比較を行うと、 $z$  の違いによって減衰量分布は大きく異なっているが、2 次音源配置に関する傾向は全く同様であるということが出来る。



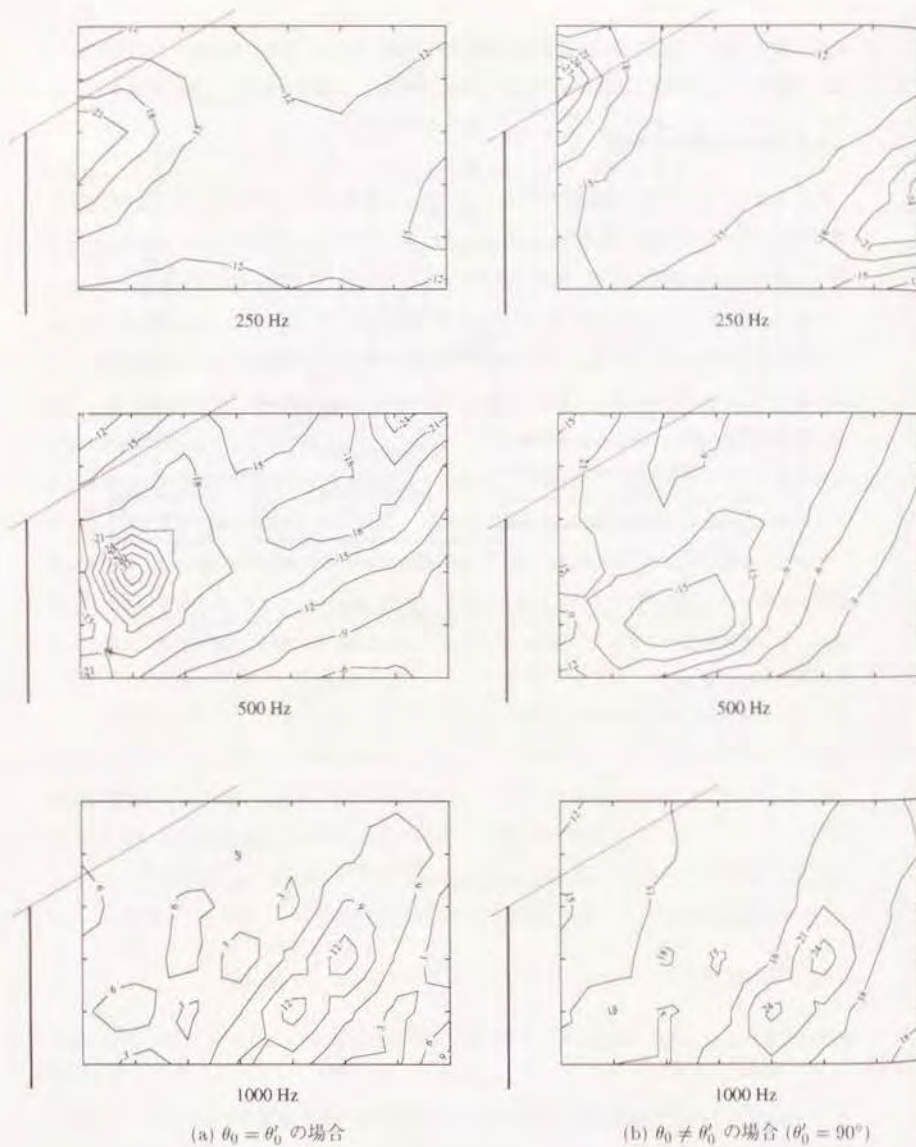


Figure 4.19: 能動制御による音圧減衰量 (実験結果):  $r'_0 = 0.2$  m,  $z = 0$  平面内

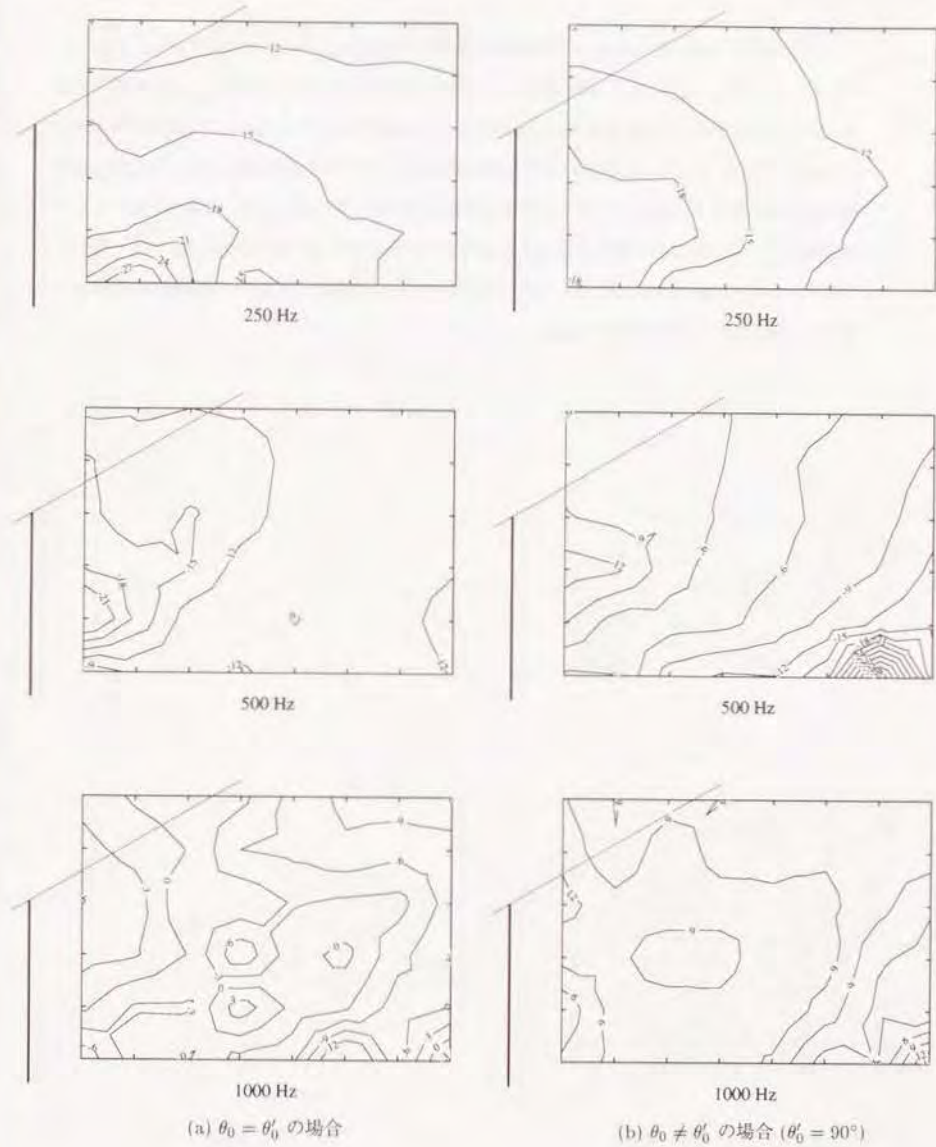


Figure 4.20: 能動制御による音圧減衰量 (実験結果):  $r'_0 = 0.2$  m,  $z = -0.45$  m 平面内

2次音源群が *Edge* から 0.5 m の距離にある場合の結果を、 $z = 0$  について Fig. 4.21 (a), (b) に、 $z = -0.45$  m についてを Fig. 4.22 (a), (b) に示す。(a), (b) はやはり2次音源群の角度  $60^\circ, 90^\circ$  に対応する。この場合は (a), (b) 間の差が 250 Hz でもかなり認められる様になり、明らかに (a) で  $-15 \sim -18$  dB 程度の大きな減衰量が得られている。500 Hz, 1 kHz でも傾向は同様であるが、やはり 1 kHz では全ての受音点で音圧が上昇している。なお、制御が有効である領域、例えば  $-12$  dB 以上の減衰が得られる領域を考えると 500 Hz よりも 250 Hz の方が明らかに広い。また、Figs. 4.21, 4.22 で  $z$  の違いによるパターンの相違はあるが、音源配置や周波数について、双方で同じ傾向が認められる。

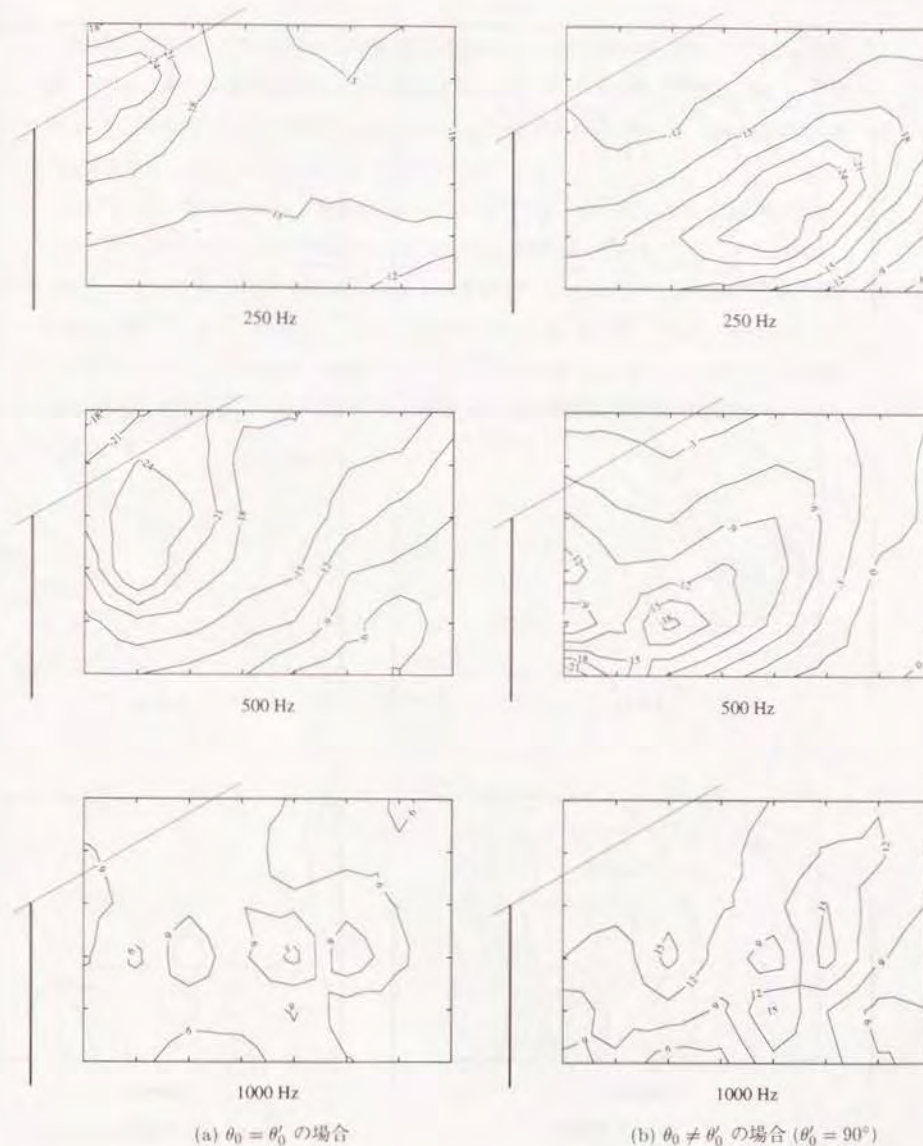


Figure 4.21: 能動制御による音圧減衰量 (実験結果):  $r'_0 = 0.5$  m,  $z = 0$  平面内



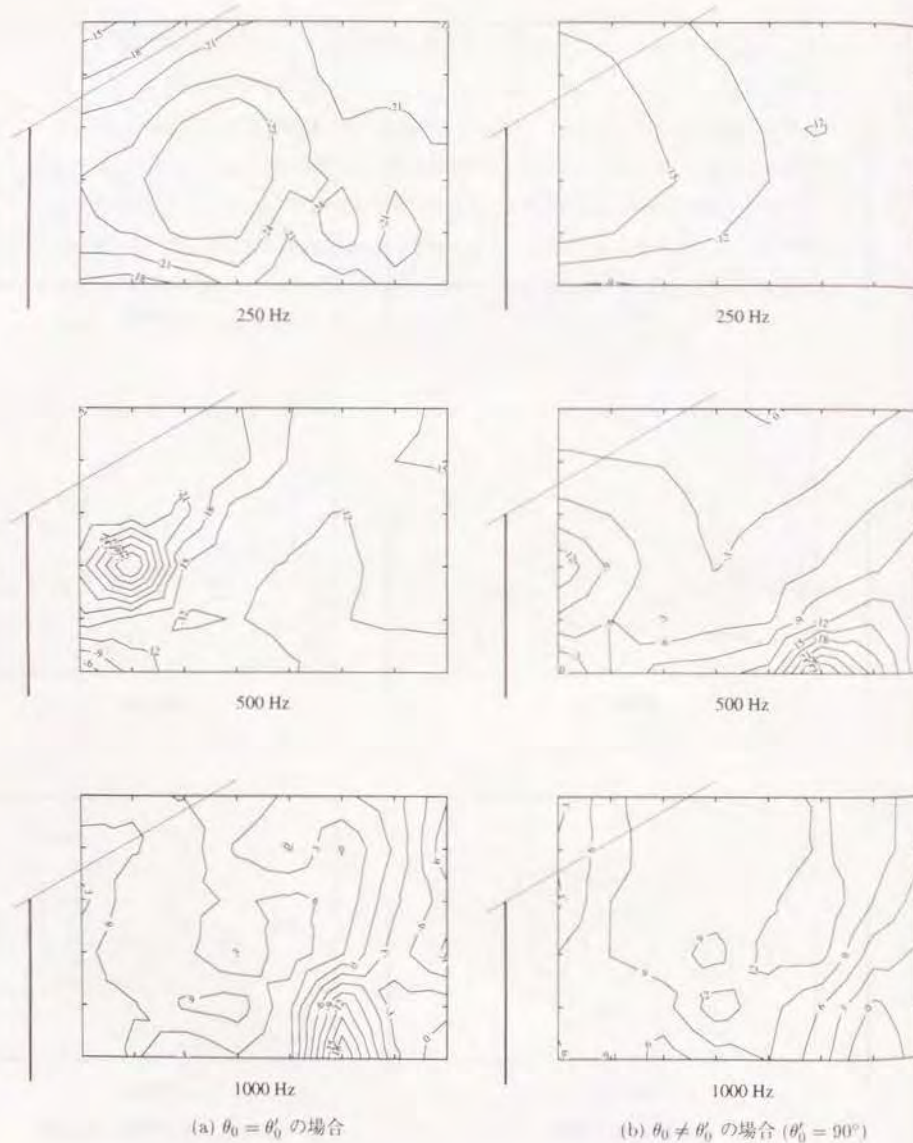


Figure 4.22: 能動制御による音圧減衰量 (実験結果):  $r'_0 = 0.5$  m,  $z = -0.45$  m 平面内

次に上記の結果における制御の効果が大きい場合として、2次音源群が Edge から 0.5 m の距離、障壁から  $60^\circ$  の角度にある場合の、水平面内での減衰量分布を示す。周波数は 500 Hz に限定し、Fig. 4.23 に  $y = 0$  の場合を、Fig. 4.24 に  $y = -0.4$  m の場合を示す。図中の直線は障壁の位置を示し、 $\nabla$  はキャンセルポイントの位置を示す。

Fig. 4.23 の、障壁の Edge と同じ高さの平面内においても、 $-30$  dB 以上の大きな減衰が数ポイントで得られており、ほぼ全域にわたって  $-12$  dB 以上の減衰が得られている。また、Edge 上キャンセルポイントが存在する長さは 0.9 m にすぎないが、2.4 m にわたる測定面内全域で制御は有効に働いていることが分かる。こういった制御が有効に働く領域と、Edge 上キャンセルポイントが存在する長さとの関係を一義的に定式化することは困難であるが、1次音源と2次音源群の相対的な位置関係やキャンセルポイントの間隔、また周波数等の関数の形で表現出来るものと予想される。

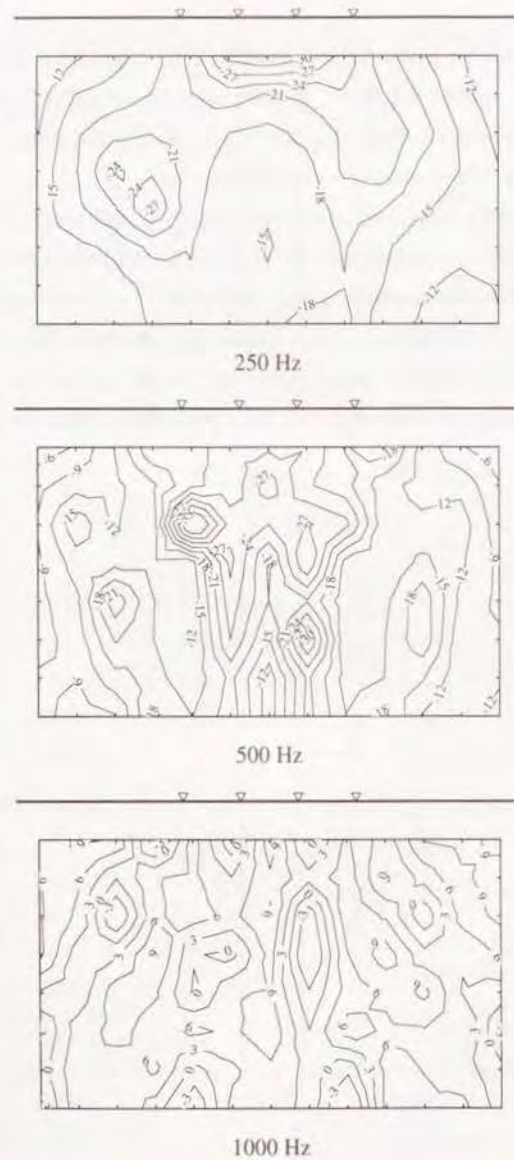


Figure 4.23: 能動制御による音圧減衰量 (実験結果):  $y = 0$  平面内  
154

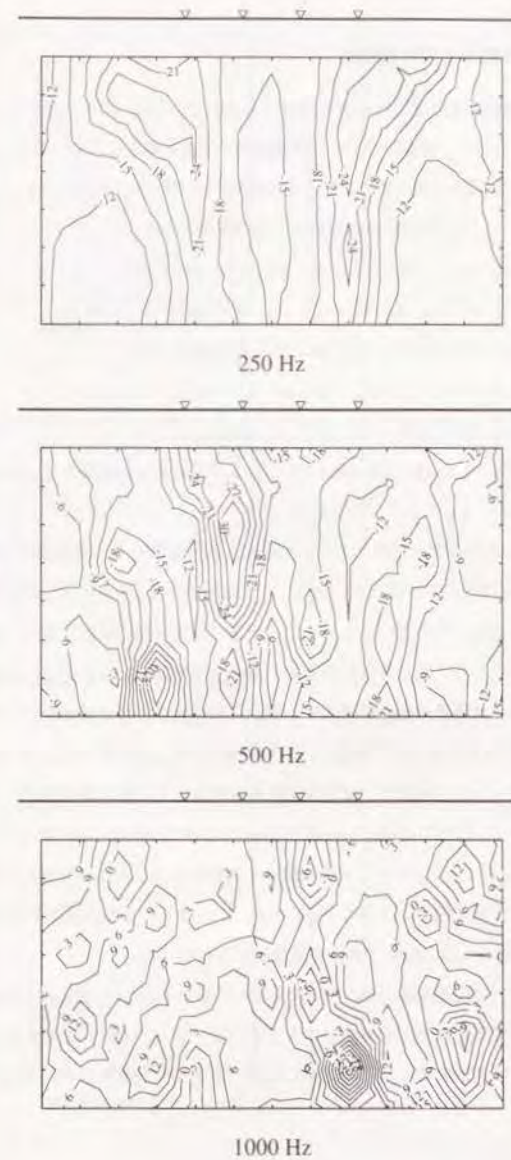


Figure 4.24: 能動制御による音圧減衰量 (実験結果):  $y = -0.4$  m 平面内  
155



#### 4.3.4 数値計算結果との比較検討

前節で示した測定結果の妥当性を更に検討するために、Fig. 4.17 の条件を仮定して、数値シミュレーションを行った。音源については無指向性点音源を仮定し、(3.14) 式を用いて計算した。なお、回折場を表す解は、[漸近解 1] である (2.42) 式を用いた。結果を Figs. 4.25 ~ 4.29 に示す。図の順序や、(a), (b) は前節の測定結果と対応させており、

Fig. 4.25 :  $r'_0 = 0.2$  m, (a) :  $\theta'_0 = 60^\circ$ , (b) :  $\theta'_0 = 90^\circ$ ,  $z = 0$

Fig. 4.26 :  $r'_0 = 0.2$  m, (a) :  $\theta'_0 = 60^\circ$ , (b) :  $\theta'_0 = 90^\circ$ ,  $z = -0.45$  m

Fig. 4.27 :  $r'_0 = 0.5$  m, (a) :  $\theta'_0 = 60^\circ$ , (b) :  $\theta'_0 = 90^\circ$ ,  $z = 0$

Fig. 4.28 :  $r'_0 = 0.5$  m, (a) :  $\theta'_0 = 60^\circ$ , (b) :  $\theta'_0 = 90^\circ$ ,  $z = -0.45$  m

Fig. 4.29 :  $r'_0 = 0.5$  m,  $\theta'_0 = 60^\circ$ , (a) :  $y = 0$ , (b) :  $y = -0.4$  m

である。なお、Fig. 4.26 (b), 500 Hz に関しては、これまでと同様の 3 dB ステップではコンターが描けないため、1 dB ステップとした。

Figs. 4.19 ~ 4.24 の結果と比較すると、鉛直面、水平面双方で、減衰量分布のパターンが 250 Hz の一部を除いてほとんど一致していない。これは数値シミュレーションにおいて実験に用いた各音源の指向性を考慮していないこと、また、実験では受信側の床面に遮音・吸音といった音響的処理をしていないために生じた反射音との干渉が原因ではないかと考えられる。更に、2次元音場の場合と同様に無響室の壁面を構成する楔からの反射音との干渉も充分に考えられる。

この様に Figs. 4.19 ~ 4.24 と Figs. 4.25 ~ 4.29 では、減衰量の分布は一致していないものの、キャンセルポイントの間隔や、2次元音源配置位置等による減衰量の変化についての傾向は全く同様である。まず、全ての場合について 1 kHz では有効な減衰が得られていない。Figs. 4.25 ~ 4.28 では (b) より (a)、つまり 2次元音源群を 1次元音源と同じ角度に配置した場合に大きな減衰量が得られており、更に同じ (a) でも Figs. 4.25, 4.26 より、2次元音源群を Edge から 0.5 m の距離に配置した Figs. 4.27, 4.28 で大きな減衰が得られている。

以上の結果から、3次元音場において制御を有効に働かせるには、Edge 上のキャンセルポイントの間隔が問題とする周波数での半波長以下とすべきであり、また、より大きな減衰を広い領域で得るために、2次元音源群を 1次元音源と同じ角度に配置すべきであるということが確認された。

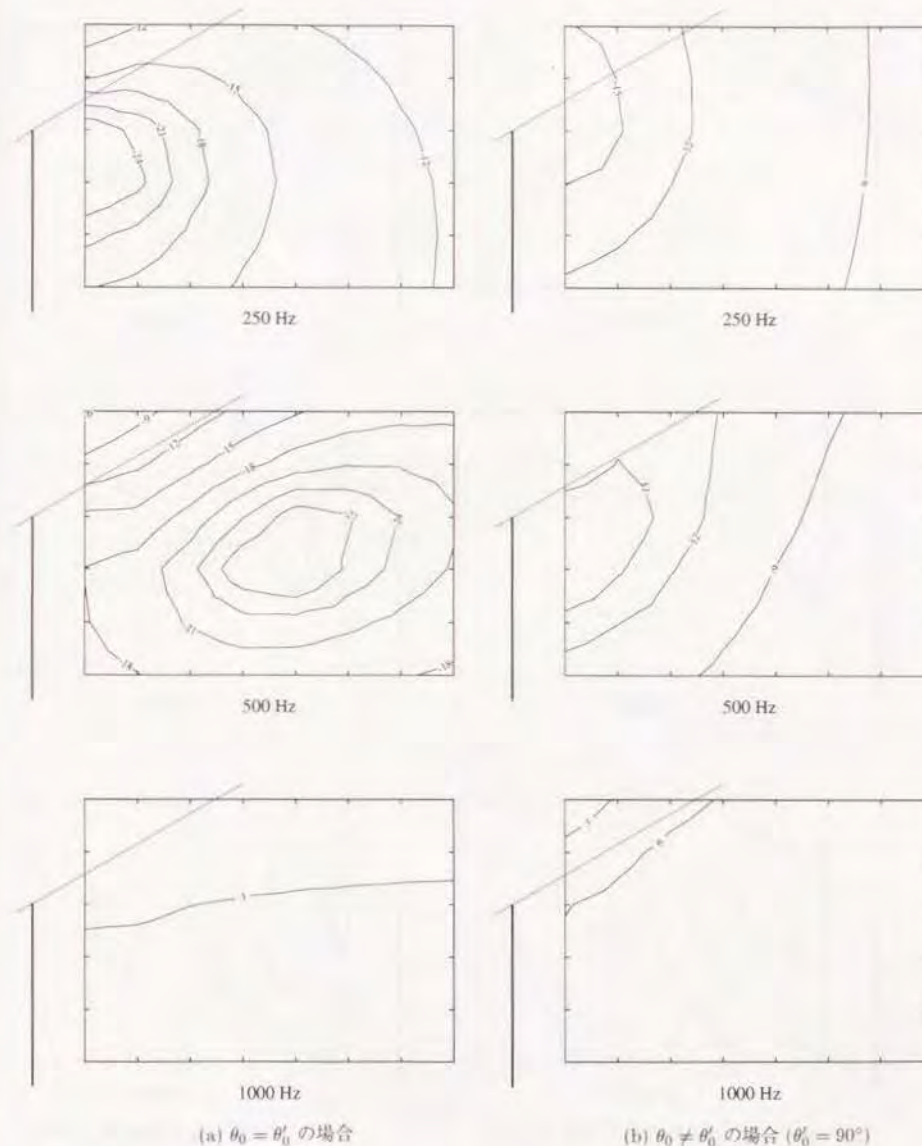


Figure 4.25: 能動制御による音圧減衰量 (数値シミュレーション) :  $r'_0 = 0.2$  m,  $z = 0$  平面内

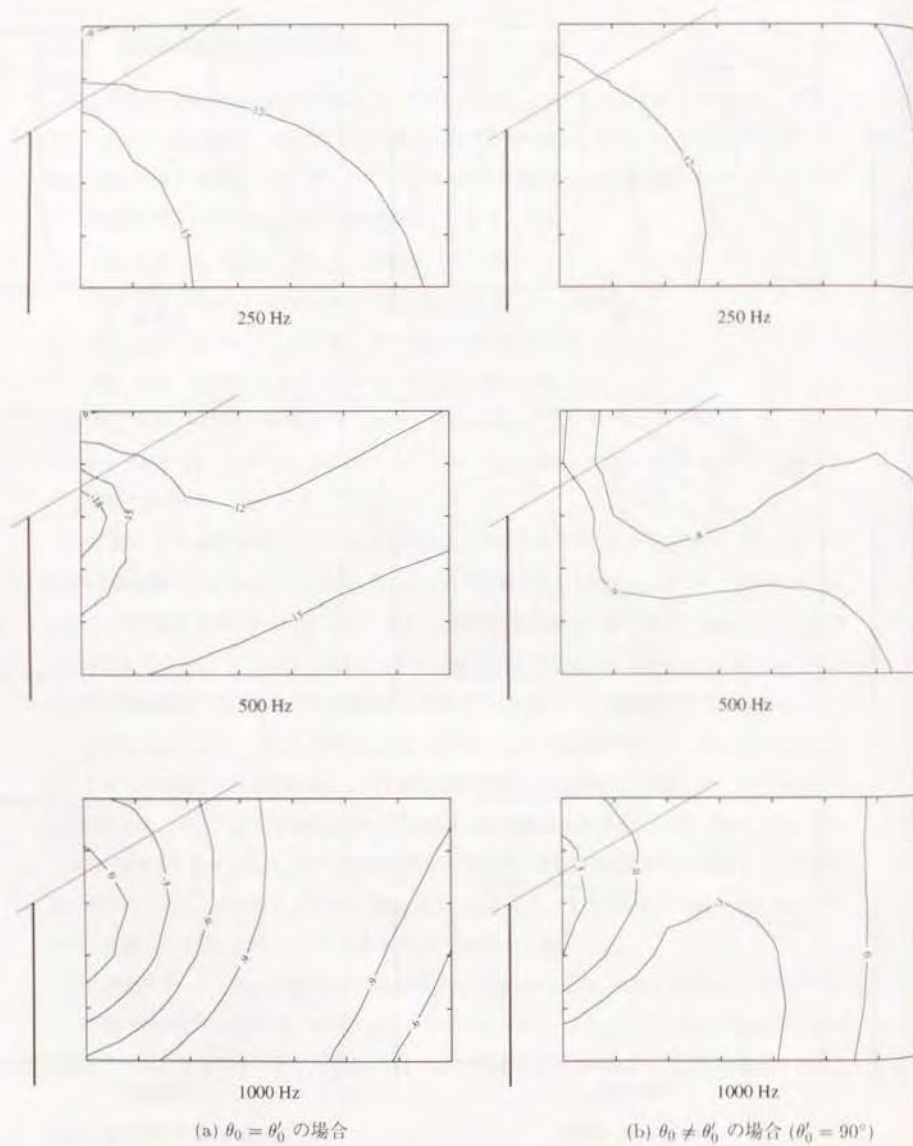


Figure 4.26: 能動制御による音圧減衰量 (数値シミュレーション):  $r'_0 = 0.2$  m,  $z = -0.45$  m 平面内

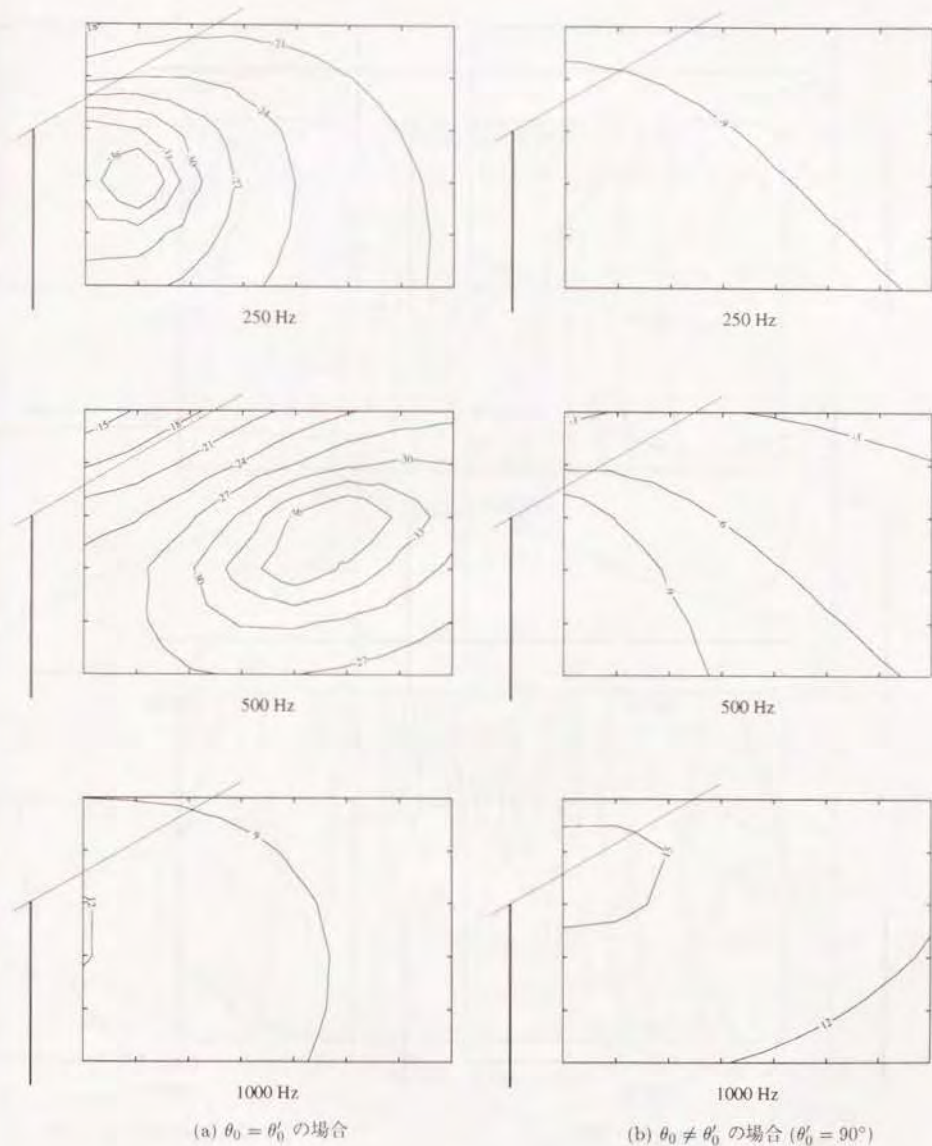


Figure 4.27: 能動制御による音圧減衰量 (数値シミュレーション):  $r'_0 = 0.5$  m,  $z = 0$  平面内



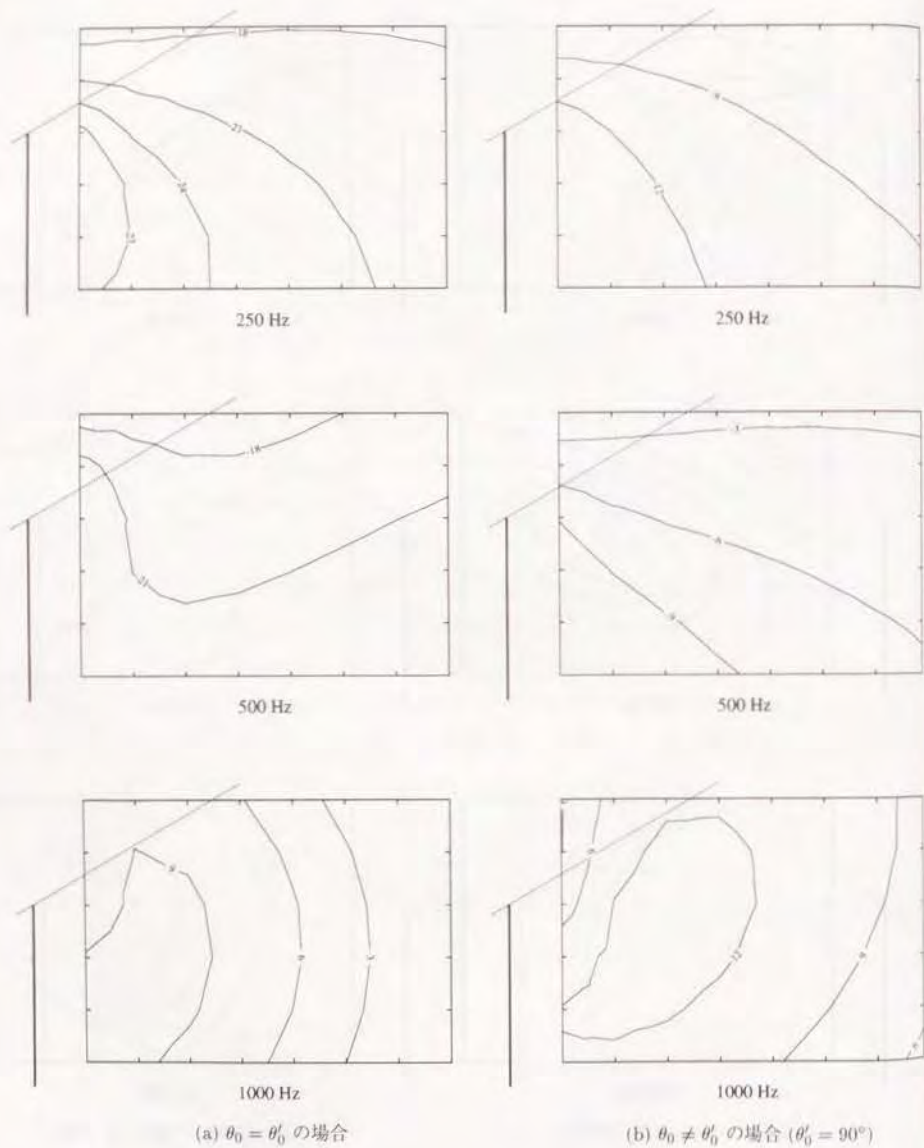


Figure 4.28: 能動制御による音圧減衰量 (数値シミュレーション):  $r'_0 = 0.5$  m,  $z = -0.45$  m 平面内

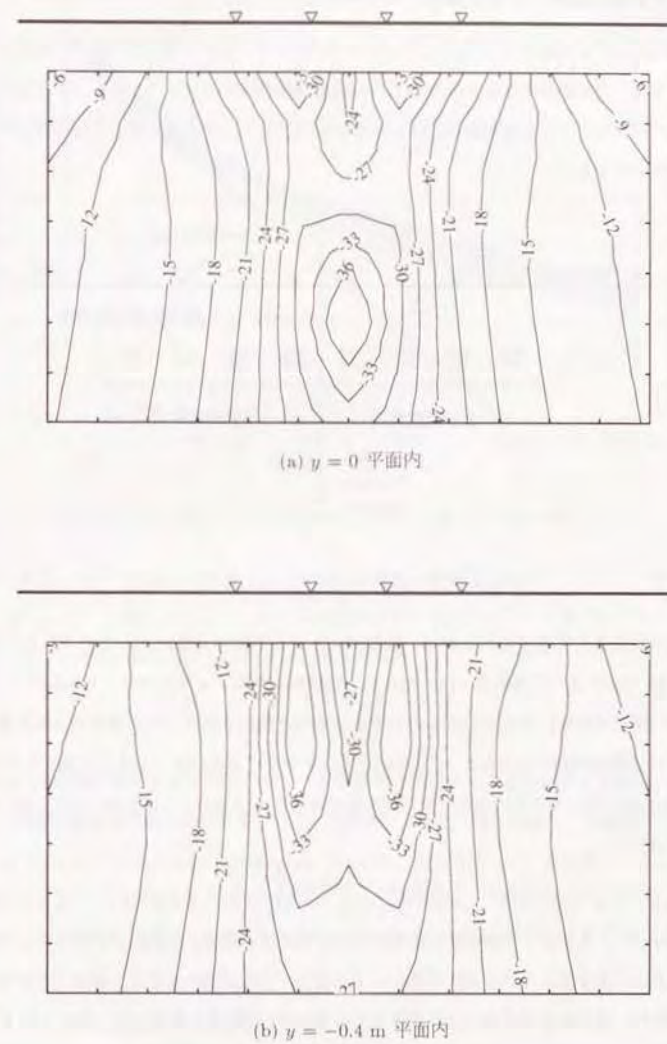


Figure 4.29: 能動制御による音圧減衰量 (数値シミュレーション):  $r'_0 = 0.5$  m, 水平面内

#### 4.3.5 多数点消去のための複数システム導入について

本研究における実験では、Edge 上キャンセルポイント、及び2次音源の数が、使用する信号処理ハードウェアの限界から制限された。能動制御を用いるアプリケーションにおける、こういったハードウェアによる制約は避けられないものであり、実用化に際しては何等かの対策を講じなければならない。

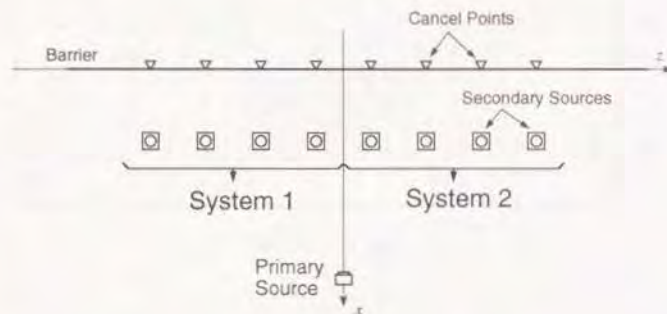


Figure 4.30: 複数の適応システムを用いる方法

一つの方法として考えられるのは、複数のシステムを同時に働かせることである。例として、Fig. 4.30 に示すように本研究で用いたものと同様な4チャンネルの適応システムが2つ、 $z$  軸上に原点に関して対称に並んでいるものとする。それぞれのシステムは、各キャンセルポイントでの音圧の二乗和が最小になるように、(4.1) 式のアルゴリズムに従って独立に働くものと仮定し、System-1 のエラーセンサの出力がサンプル数の増加と共にどのように振舞うかを、以下の式を用いて検討した。

$$T.E.L.(n) = 10 \log_{10} \left\{ \sum_{l=1}^L e_l^2(n) \right\} \quad (4.2)$$

ここに、 $T.E.L.(n)$  は System-1 の Total Error Level であり、 $e_l$  は  $l$  番目のエラーセンサの出力であることを示す。1次音源の位置や、2次音源、及び Edge 上キャンセルポイントの間隔などの条件は、実験と同様であり、音源信号には 500 Hz の純音を仮定した。Fig. 4.31 に結果を示す。参考として実験と全く同じ条件で、システムが1つだけで働いている場合の  $T.E.L.(n)$  の収束の様子も示す。横軸は繰り返し回数である。

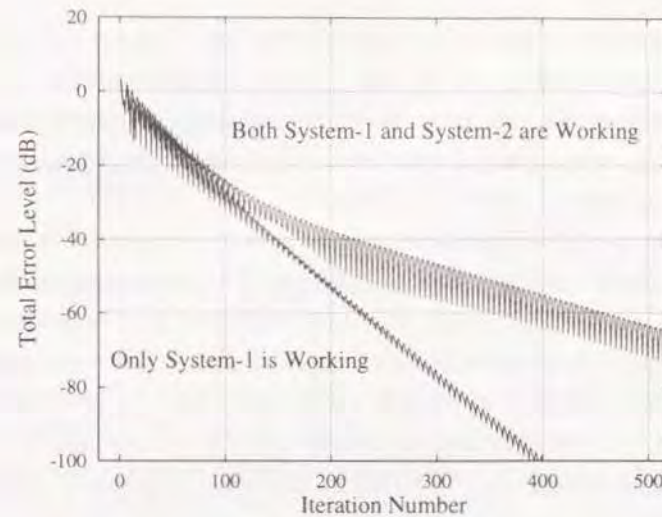


Figure 4.31: 多チャンネル適応信号処理システムの収束の様子

結果によると、収束のスピードは異なるものの、システムは確実に収束している。同様な結果は Elliot らによっても報告されており [6]、この方法は多くのチャンネルを必要とするシステムの実用化に対する非常に現実的な方法の一つと考えられる。

#### 4.4 まとめ

本章では、半無限障壁による回折音に対して能動制御を適用することの効果を実験的に検証した。まず、音源が線音源である場合を想定して、近似的な2次元音場を構成し、実験を行った。回折音を消去するための基準点として Diffraction Edge のごく近傍にマイクを設置し、ここでの音圧が最小となるように、音源信号が純音の場合は2次音源の振幅・位相を手動で調整することで、また帯域ノイズの場合は適応信号処理を導入することで制御を働かせた。結果として、制御は非常に有効に働き、障壁による影の領域の広い部分で -12 dB を越える大きな減衰量を得ることが出来た。また、2次音源の配置位置を変化させることによる制御の効果の変化も調べたが、前章で得られた結果、つまり、2次音源が1次音源に近いほど大きな減衰量が得られ、また広い領域での減衰を得るために、2次音源は1次音源と同じ角度に配置されるべきであることが実験的にも確認された。



次に音源が点音源である場合に対応して、無響室内に障壁を設置し、実験を行った。この場合は、Edge 上複数点で同時に音圧を最小とするために、多チャンネル適応信号処理を導入した。この場合も前章の結果である、Edge 上キャンセルポイントの間隔は問題とする周波数での半波長以下とすべきこと。また大きな減衰を広い領域で得るために、2 次音源群はその配置角度、距離共に 1 次音源に近付けるべきであるということが確認された。

本章の実験において得られた減衰量は非常に大きなものであり、従来から行われてきた障壁の高さを高くする方法では成し得ない程度のものも存在する。また、3 次元音場における実験の結果である Fig. 4.19 (a) で、250, 500 Hz においては、影の境界付近で  $-15 \sim -18$  dB 程度の減衰が得られている。これを壁の高さを高くする方法で達成しようとするれば、前川チャートを用いて試算すると約 4 m もの付加高さが必要となり、かなり大がかりな話になってしまう。この例からも明らかなように、半無限障壁による回折音に能動制御を適用することは非常に有効であり、大きな減衰量を得るという観点からは、高さを高くする方法よりかえって現実的といえる場合も存在するであろう。

なお、本章においては、音源信号にノイズを用いた場合にも音源信号は既知であると仮定し、直接適応信号処理システムに入力した。これは、本研究で提唱する、Edge での音圧を消去する方法の有効性を明らかにし、更に 2 次音源配置位置が制御の効果に及ぼす影響を明確に把握するために、問題を単純化する意味で行ったものである。

実用的な見地から言えば、騒音源信号のピックアップ方法は制御の効果を左右する非常に重要なファクターであると考えられる。また、主に閉空間内のアクティブコントロールにおいて問題となることが多いが、ピックアップのためのセンサーが、2 次音源系と不安定な閉ループを構成した場合は、ハウリングなどの付加的な問題を生じることもある。これらに対処するために、ハウリングキャンセラーを併用したり [7]、更に騒音源が振動を伴う場合は、音信号のみでなく振動ピックアップを補助的なセンサーとして用いるなど [8,9]、様々な手法が試みられている。本研究を実際の音源に適用する場合においても、個々の騒音源に対して、適したピックアップ方法を実験的に検証する必要がある。

## 参考文献

- [1] 例えば、高橋稔、他、“空調ダクト騒音に対する適応型電子消音システム” 信学技報 EA88-31, 1988.
- [2] S. J. Elliott, I. M. Stothers, P. A. Nelson “A Multiple Error LMS Algorithm and Its Application to the Active Control of Sound and Vibration” IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process. ASSP-35, pp.1423-1434, 1987.
- [3] S. J. Elliott, P. A. Nelson “Multiple-Point Equalization in a Room Using Adaptive Digital Filters” J. Audio Eng. Soc. vol. 37, No.11 pp.899-907, 1989.
- [4] 浜田晴夫、他“アクティブノイズコントロールチェアの実現” 信学技報 EA90-2, 1990.
- [5] H. Hamada “Signal Processing for Active Control,” Proc. 1991 Acoust. Soc. Jpn. Int. Symp. Active Control of Sound and Vibration, pp.33-44, 1991.
- [6] S. J. Elliott, C. C. Boucher, P. A. Nelson “The Effect of Acoustic Coupling on the Stability and Convergence of Independent Controllers” Proc. Inter Noise '91, pp.157-160, 1991.
- [7] 伊勢史郎, “建築音響におけるアクティブノイズコントロールに関する研究” 東京大学博士論文 (平成 2 年 12 月), p. 58.
- [8] Y. Sato, M. Abe, T. Sone, K. Kido, “3-D space active noise control of sounds due to vibration sources” Proc. 1991 Acoust. Soc. Jpn. Int. Symp. Active Control of Sound and Vibration, pp.315-320, 1991.
- [9] Y. Kurata, N. Koike, “Adaptive active attenuation of interior car noise” Proc. 1991 Acoust. Soc. Jpn. Int. Symp. Active Control of Sound and Vibration, pp.297-302, 1991.

## 第 5 章

### 反射性地面の影響を考慮した場合

#### 5.1 概要

これまで、障壁は半無限であるものとして考察を行ってきた。本章においては、障壁が表面が剛な地面の上に設置されているものとし、更に現実的な条件での能動制御の効果について検討を行う。地面からの反射波成分の為に問題は複雑になり、2次音源（群）配置位置の僅かな変化により、制御の効果が大きく左右されることが予想される。このため、地面からの反射波成分のみをキャンセルするような付加的音源を設置することにより、制御を安定に働かせることを試みる。更に、この方法の簡略版として、地面の一部を吸音性にする方法を提案し、その効果を実験的に検証する。なお、本章で提案する方法は、騒音源と障壁の間の地面が容易に取り扱えることが前提となっており、従って道路交通騒音などへの適用は困難であると考えられる。しかし、例えば工場、プラント内での各種機器の騒音制御、あるいはオフィス空間内での O.A. 機器の騒音制御など、適用可能な事例も多いと考えられる。

#### 5.2 問題のモデル化

Fig.5.1 に示すように、表面が剛な地面の上に障壁が設置されているものとする。地面において音波が幾何光学的に鏡面反射するものとするれば、反射波成分は図中の破線で示すように、音源側については地面による音源の鏡像  $S_{image}$  からの寄与として、受信側については受信点の鏡像  $P_{image}$  に及ぼす影響として記述出来る。

つまり受信点  $P$  での波動は、等価的に地面が存在せず、 $S$  及び  $S_{image}$  から  $P$  及び  $P_{image}$  に至る合計 4 つの経路の和として、(5.1) 式のように表すことが出来ることになる。

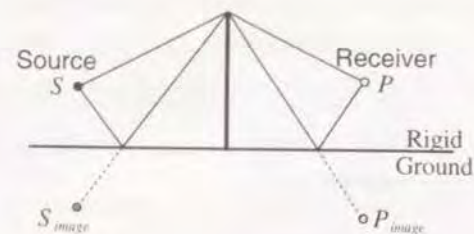


Figure 5.1: 音源、受信点及びそれらの鏡像

$$\phi(P) = \phi(S \rightarrow P) + \phi(S_{image} \rightarrow P) + \phi(S \rightarrow P_{image}) + \phi(S_{image} \rightarrow P_{image}) \quad (5.1)$$

ここに、 $\phi$  は半無限障壁による回折場を表す解であり、第 2 章で議論したものをそのまま用いることが出来る。なお、 $S \rightarrow P$  は音源として  $S$  の座標を、また受信点として  $P$  の座標を用いて計算することを示すものである。

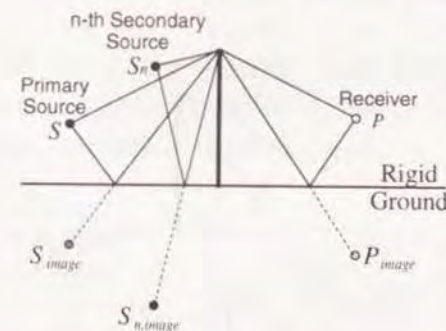


Figure 5.2: 2 次音源を設置した場合の鏡像

2 次音源（群）を設置した場合も同様であり、Fig.5.2 に示すようにそれぞれの音源、及び受信点について鏡像を考えて、それらの和をとれば良い。N 個の 2 次音源を設置した場合に、これを



式で表せば、

$$\begin{aligned} \phi(P) = & \phi(S \rightarrow P) + \phi(S_{image} \rightarrow P) + \phi(S \rightarrow P_{image}) + \phi(S_{image} \rightarrow P_{image}) \\ & + \sum_{n=1}^N A_n \cdot \{ \phi(S_n \rightarrow P) + \phi(S_{n,image} \rightarrow P) + \phi(S_n \rightarrow P_{image}) + \phi(S_{n,image} \rightarrow P_{image}) \} \end{aligned} \quad (5.2)$$

となる。但し、 $S_n$  は  $n$  番目の 2 次音源を表し、 $S_{n,image}$  はその鏡像、 $A_n$  はそれぞれの 2 次音源が持つキャンセルのための複素係数である。

### 5.3 2次元音場における考察

2次元音場において地面が存在する場合について考察する。まず、これまでと同様な方法で制御を行い、地面からの反射波が制御の効果に及ぼす影響について考察する。続いて、反射波をキャンセルするための付加的な 2 次音源を設置することを試み、その有効性を検証する。

#### 5.3.1 2次音源が持つ係数について

2次元音場内において (5.2) 式における  $N = 1$ 、つまりこれまでと同様に 1 つの 2 次音源が Fig. 5.3 に示すように存在するものとする。ここでは便宜上、Fig. 5.3 に示すように音源及びその鏡像に  $S1 \sim S4$  の番号を付けるものとする。これに伴い、本章においては  $Edge$  から各音源までの距離を  $r_n$ 、障壁からの角度を  $\theta_n$  と表記する。

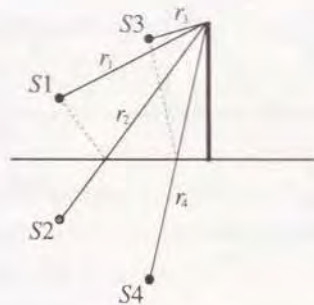


Figure 5.3: 2次音源が持つ係数の決定について

やはり  $Edge$  での音圧をゼロとする係数を 2 次音源に持たせるが、この場合、 $Edge$  での音圧は

(3.3), (3.4) 式と同様な考察から各音源、及びそれぞれの鏡像からの直接波成分で表されるものと考えられ、以下で与えられる。

$$\begin{aligned} & \phi(S1 \rightarrow Edge) + \phi(S2 \rightarrow Edge) + A \cdot \{ \phi(S3 \rightarrow Edge) + \phi(S4 \rightarrow Edge) \} \\ & = H_0^{(1)}(kr_1) + H_0^{(1)}(kr_2) + A \cdot \{ H_0^{(1)}(kr_3) + H_0^{(1)}(kr_4) \} \end{aligned} \quad (5.3)$$

但し、 $A$  は 2 次音源が持つ複素係数を表す。ここで (5.3) 式をゼロとすることで、 $A$  が以下のように求められる。

$$A = - \frac{H_0^{(1)}(kr_1) + H_0^{(1)}(kr_2)}{H_0^{(1)}(kr_3) + H_0^{(1)}(kr_4)} \quad (5.4)$$

この係数を (5.2) 式に代入して求めた  $\phi(P)$  を  $\phi^{on}$ 、 $A = 0$  つまり 1 次音源のみの場合の  $\phi$  を  $\phi^{off}$  として、制御の効果としての音圧減衰量を以下で定義する。

$$\Delta L = 20 \log_{10} \frac{\phi^{on}(P)}{\phi^{off}(P)} \quad (5.5)$$

#### 5.3.2 地面が制御の効果に与える影響

Fig. 5.4 に示す音源位置、受音点を考える。障壁の高さは実物の 1/10 縮尺を考慮して 0.3 m であり、1 次音源の位置は半無限障壁の場合と同様である。また周波数は 5 kHz を仮定している。受音点は  $Edge$  から 0.5 m の距離、障壁から  $300^\circ$  の角度に存在する。この条件の下で、2 次音源の位置を  $Edge$  からの距離、障壁からの角度共に変化させ、制御の効果がどのように変化するかを計算してみる。距離に関しては  $r_3/r_1 = 0.1 \sim 0.7$  の範囲で、角度については  $\theta_3 = \theta_1 \pm 30^\circ$  の範囲で変化させるものとし、音場の計算には「漸近解 1」を用いた。

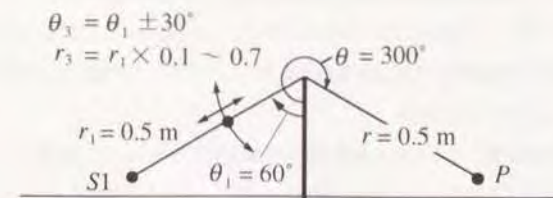


Figure 5.4: 2次音源配置位置変化範囲

結果を Fig. 5.5 に示す。この場合も、グラフの見易さを考慮して縦軸は  $-\Delta L$  ( $-\Delta L$ ) としている。これによると、制御の効果は2次音源の距離、角度によって一様な変化をせず、つまり制御によって音圧が上昇してしまう位置関係も存在することが明らかである。また、距離の比が小さいほど、つまり2次音源が Edge に近いほど減衰量の絶対値は小さいが、角度の変化に対して安定であることが分かる。

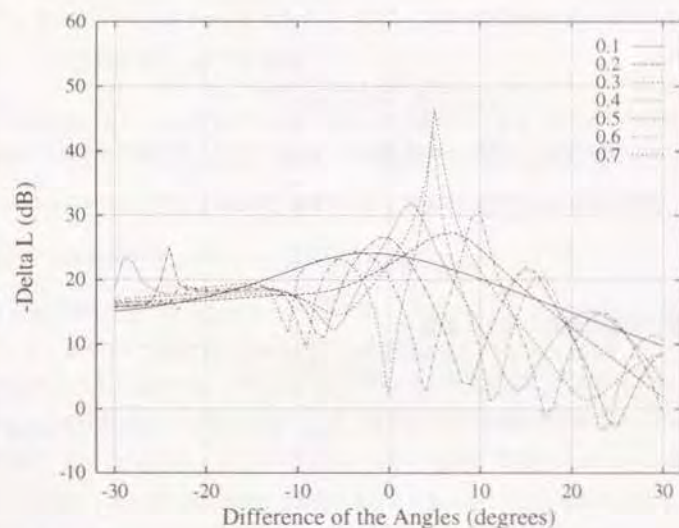


Figure 5.5: 2次音源配置位置による制御の効果の変化

また、この場合は減衰量の最大値が角度の差がゼロの場合に得られるとはいえず、特に距離の比が大きくなるに従って、減衰量は多くのピークやディップを持つようになる。これらの傾向は、半無限障壁の場合には認められなかったものであり、2次音源とその地面による鏡像との干渉によって生じているものと考えられる。

2次音源配置位置の僅かな変化による減衰量の極端な変化の例として、距離比  $r_3/r_1$  が 0.7 の場合に、2次音源を1次音源と同じ角度に配置した場合、及びその角度を  $4^\circ$  ずらした場合の減衰量分布を計算する。受信領域は Fig. 5.6 に示す通りであり、地面からの反射波との干渉により、音場が複雑になることが予想されるため受音点の間隔を 0.05 m としている。周波数は 5 kHz である。

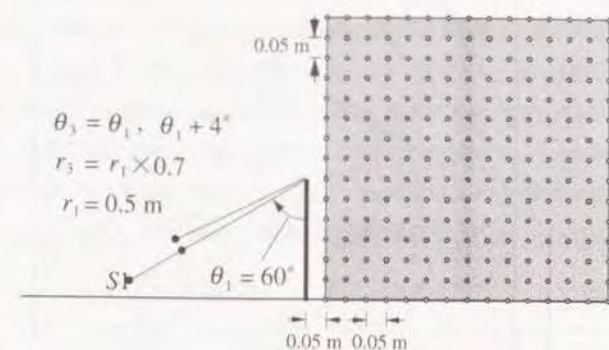
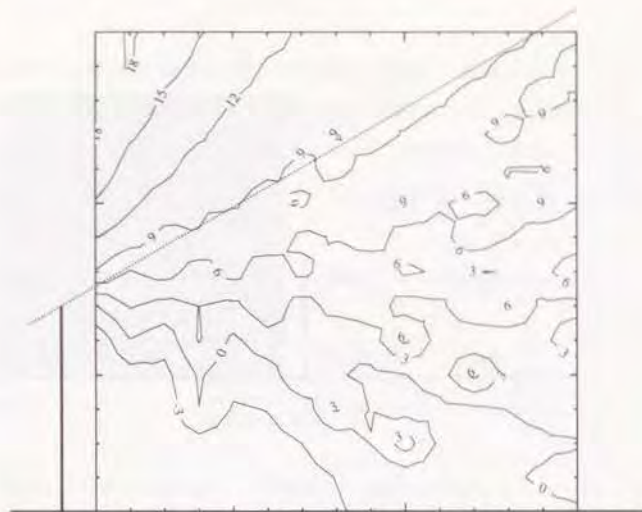


Figure 5.6: 2次音源の角度が1次音源と同じ場合及び  $4^\circ$  ずらした場合

結果を Fig. 5.7 (a), (b) に示す。半無限障壁の場合には最も大きな減衰量が得られていた条件である、1次音源と2次音源の角度が等しい場合に、領域の大部分において制御により音圧が上昇している。これに対し、 $4^\circ$  ずらした場合には一転して  $-21$  dB 以上の大きな減衰量が影の領域のほぼ全域で得られている。





(a)  $\theta'_0 = \theta_0$  の場合



(b)  $\theta'_0 = \theta_0 + 4^\circ$  の場合

Figure 5.7: 2次音源配置位置による制御効果分布の変化

このように、2次音源配置位置の僅かな変化によって、減衰量が極端に小さくなったり、あるいは逆効果となったりすることに関しては、2次音源が持つ係数に関する以下の説明が考えられる。つまり、2次音源  $S_3$  がある位置に存在する場合、その位置からの直接波成分の経路と鏡像  $S_4$  からの直接波成分の経路が半波長分ずれていた場合、両者が *Edge* で打ち消しあうことが考えられる。この場合、(5.4) 式の方母の絶対値が極端に小さくなり、結果的に2次音源が持つ係数の絶対値が非常に大きなものとなる。例として Fig. 5.8 に Fig. 5.4 に示す範囲で2次音源を動かした場合の、(5.4) 式によって計算される係数の絶対値の変化を示す。

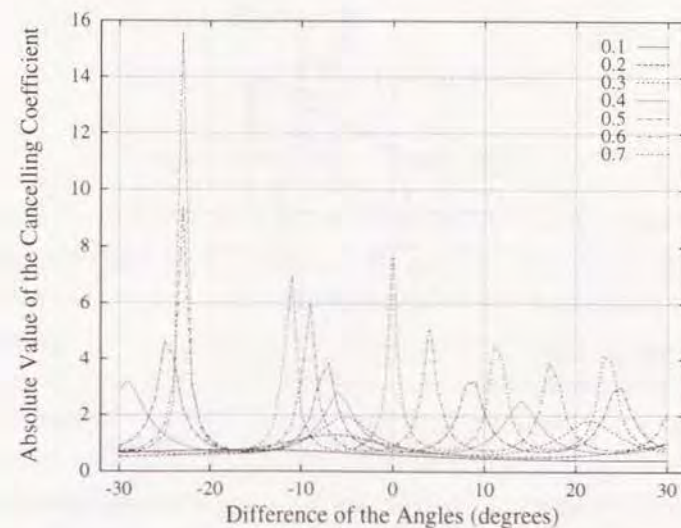


Figure 5.8: 2次音源配置位置変化によるキャンセルのための係数の絶対値の変化

結果には明らかに多くのピークが認められ、Fig. 5.7 (a) で示した距離比 0.7、角度の差ゼロ付近においても係数は 8 程度の大きな絶対値を持っている。このため、*Edge* 自体では音圧が消去されるものの、そのごく近傍においても比較的大きな音圧が存在することとなり、これが新たに受音点に対する仮想的な音源として働き、結果的に制御の効果としての音圧減衰量が小さくなるものと考えられる。

また、上記の傾向は、Fig. 5.8 において距離比が大きい場合にピークが急峻となることから明らかに、2次音源が1次音源に近い場合に顕著である。Fig. 5.9 に示すように、2次音源が1次音源に近いということは、結果的に地面に近いということであり、このため地面による鏡像 S4 と実際の音源 S3 からの寄与の振幅が、大きくは変わらないことになる。このため、両者の経路差が半波長（あるいはその整数倍）異なる場合に、(5.4) 式の実分母がよりゼロに近くなり、係数の絶対値は大きなものになってしまう。

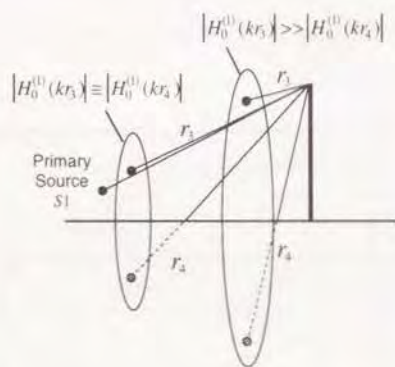


Figure 5.9: 2次音源が1次音源に近い場合、及び遠い場合

これに対し、2次音源が Edge に近ければ、鏡像 S4 から Edge までの距離が、実音源 S3 から Edge までの距離に比べて充分大きくなり、距離減衰によってその影響をほぼ無視することが出来るものと考えられる。このため (5.4) 式の実分母は、実音源 S3 からの寄与が支配的となり、係数の絶対値はある程度の値におさえられ、安定した効果が得られるものと考えられる。

### 5.3.3 複数の2次音源を用いる方法の有効性

前節においては、2次音源を Edge の近くに配置することにより比較的安定した減衰が得られることを示した。しかし、どの程度近ければ良いのかということは障壁の高さや、周波数によって大きく変化するものと予想され、一義的に決定できるものではない。そこで、ここでは複数の

2次音源を設置して、地面からの反射音成分、つまり鏡像からの寄与を個別にキャンセルすることを考える。

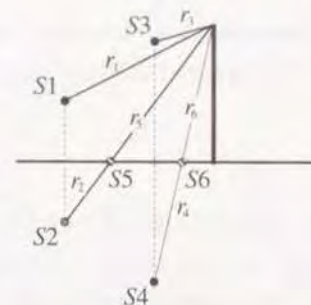


Figure 5.10: 新たに設置した2次音源 S5 及び S6

Fig. 5.10 に示すように、新たに S5, S6 の2つの2次音源を設置する。S5 及び S6 の新たな2次音源は、自身の鏡像を生じないように地面に設置することとし、また像音源と Edge を結ぶ線分上に配置するものとした。これは、半無限障壁の場合に得られた、最大の効果を得るための配置角度である。なお、S1 が地面上に存在する場合は2次音源 S5 は必要ではなくなる。

ここで、S3 の2次音源が持つキャンセルのための係数は、半無限障壁の場合と同様に、S1 の1次音源のみが存在するものとして決定する。また、S5, S6 の2次音源についても同様であり、それぞれ S2, S4 の音源のみが存在するものとして決定されれば良い。具体的には、 $n$  番目の2次音源が持つ係数を  $A_n$  とすれば、

- 3番の2次音源が持つ係数は、

$$A_3 = -\frac{H_0^{(1)}(kr_1)}{H_0^{(1)}(kr_3)} \quad (5.6)$$

- 5番の2次音源は、

$$A_5 = -\frac{H_0^{(1)}(kr_2)}{H_0^{(1)}(kr_5)} \quad (5.7)$$

- 6番目は、

$$A_6 = -\frac{A_3 \cdot H_0^{(1)}(kr_4)}{H_0^{(1)}(kr_6)} \quad (5.8)$$



という係数を持つことになる。つまり3つの2次音源それぞれが、独立に1つの音源の影響をキャンセルするように係数を設定する。なお、 $S_4$  は  $S_3$  の鏡像であるため、 $S_3$  と同じ係数を持つことになる ( $A_4 = A_3$ )。

この方法によって、等価的に地面の影響を考慮することなく、半無限障壁の場合と同様に問題を扱うことが出来る。また、全ての2次音源が1次音源と同じ角度に配置されており、受信側領域での大きな減衰が期待される。

### 5.3.4 数値計算例

Fig. 5.7 (a) に示した、制御の効果が受信領域の大部分で負になってしまう状況において、更に2つの2次音源を設置して数値シミュレーションを行う。音源位置、受信領域などは Fig. 5.11 に示す通りである。この場合も受信点での波動は、各音源から受信点、及びその地面による鏡像までの寄与の和として記述出来、(5.9) 式に示す通りとなる。

$$\begin{aligned} \phi(P) = & \phi(S1 \rightarrow P) + \phi(S1 \rightarrow P_{image}) + \phi(S2 \rightarrow P) + \phi(S2 \rightarrow P_{image}) \\ & + \sum_{n=3}^N A_n \cdot \{ \phi(Sn \rightarrow P) + \phi(Sn \rightarrow P_{image}) \} \end{aligned} \quad (5.9)$$

制御の効果もこれまでと同様に、 $A_n$  が (5.6) ~ (5.8) 式の値である場合の (5.9) 式の値を  $\phi^{on}$ 、 $A_n = 0$  である場合を  $\phi^{off}$  として、(5.5) 式で定義するものとする。

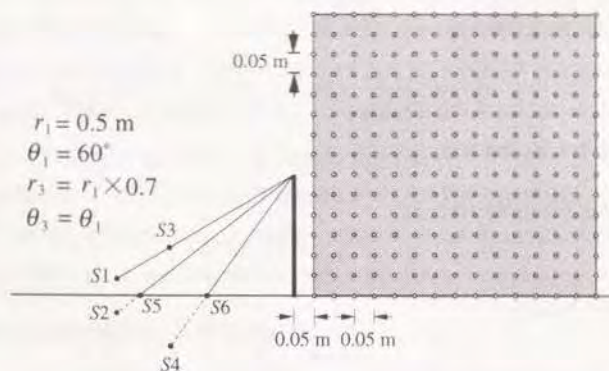


Figure 5.11: 音源位置及び受信領域

結果を Fig. 5.12 に示す。Fig. 5.7 (a) と比較して、制御の効果が大幅に増加し、障壁の近くで

は -50 dB 以上という非常に大きな減衰量が得られている。また受信領域全域にわたって制御は有効に働いている。

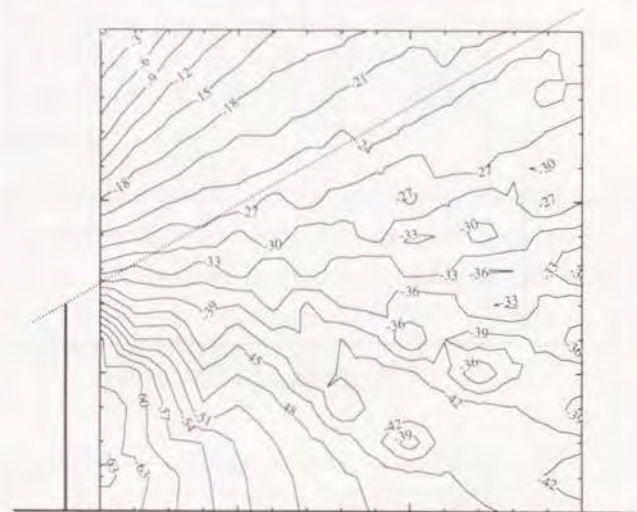
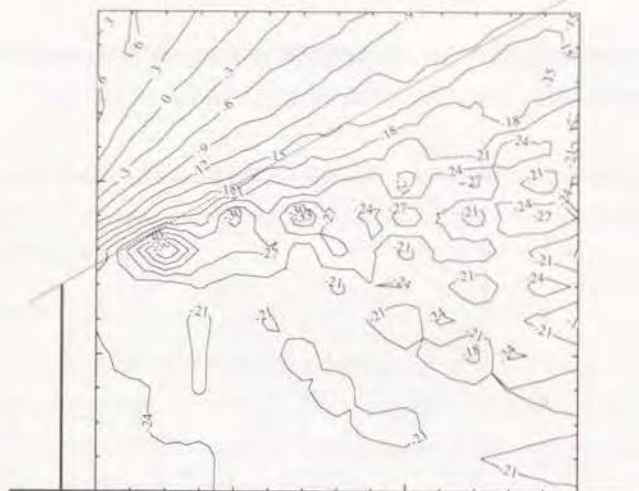
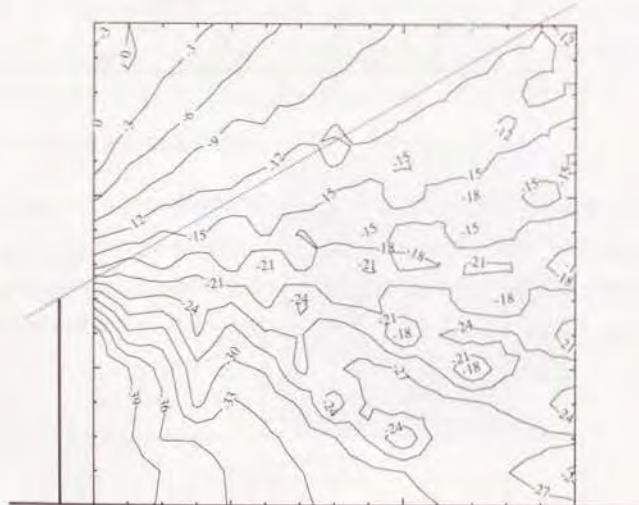


Figure 5.12: 付加的な2次音源を設置した場合の音圧減衰量分布

また、付加的な2次音源が存在しない状況でも制御の効果が得られている場合に、これらの新たな音源が効果に及ぼす影響を調べるため、 $r_3/r_1 = 0.2$  の条件でシミュレーションを行う。1次音源位置などは Fig. 5.6 と同様であり、元々の2次音源の角度は1次音源と同じ  $60^\circ$  である。結果を Fig. 5.13 (a), (b) に示す。(a) は  $S_3, S_6$  の音源が存在しない場合、(b) は存在する場合である。



(a) 付加的な音源を設置しない場合



(b) 付加的な音源 (S5, S6) を設置した場合

Figure 5.13: 付加的な2次音源の有無による音圧減衰量分布の変化

両者ともに制御の効果が得られているが、明らかに (b) でその減衰量は大きく、付加的な音源により制御がより有効に働いていることが分かる。

このように付加的な2次音源を用いて地面からの反射波成分をキャンセルする方法は非常に有効であり、制御の効果に対する反射波の影響を効果的に除去出来ることが明らかとなった。

## 5.4 2次元音場における実験

### 5.4.1 実験条件

付加的な2次音源の有効性を更に検証するため、前章で用いた2次元音場において実験を行った。Fig. 5.14 に示す通り、障壁の高さが0.3 m となる位置に20 × 30 mm のアクリル棒を設置し、剛な地面とする。1次音源 S1 は Edge から0.5 m の距離、障壁から60° の位置、2次音源は  $r_3/r_1 = 0.7$  である0.35 m、60° の位置に存在するものとする。この位置は Fig. 5.7 (a) で予想された、制御が有効に働かない位置関係である。

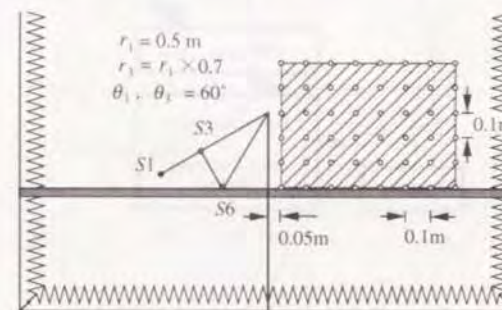


Figure 5.14: 音源配置位置及び受音領域

付加的な音源 S6 は S3 の鏡像 S4 と Edge を結ぶ直線が地面と交わる位置（実際には挿入するパイプが地面に触れる程度の位置）に設置した。数値シミュレーションにおいては、各2次音源に、それぞれが受け持つ1次音源、あるいはその鏡像からの音圧を Edge でキャンセルするような係数を持たせていた。しかし実験においては、Edge での音圧が最小となるように S3 と S6 を同時に駆動しなくてはならない、このため、Fig. 5.15 に示す様に多チャンネル適応信号処理を導入した。Fig. 4.18 と同様 Edge 近傍に設置したエラーセンサ（マイク）の出力を最小にするよ



うに2次音源群の振幅・位相をFIRデジタル適応フィルタを用いて調整する。

ここで本来は、1次音源の鏡像をキャンセルするための付加音源S5も設置すべきであるが、信号処理ハードウェアの制限からここではS6のみを設置することとした。音源信号は5kHzの純音である。

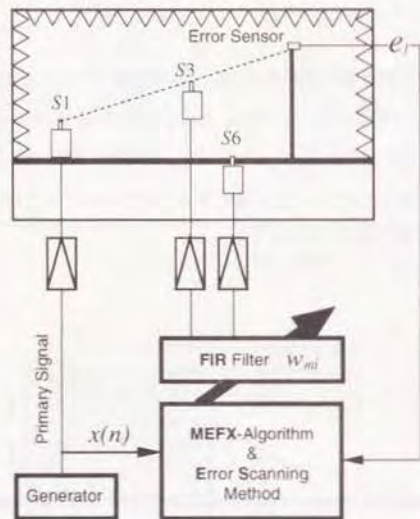
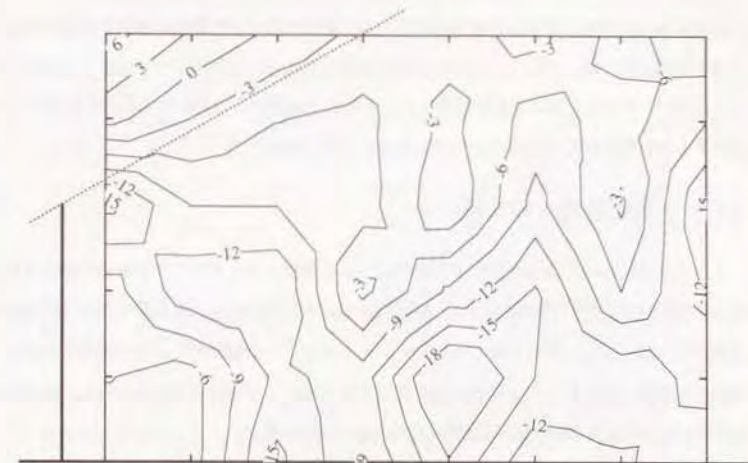


Figure 5.15: システムブロックダイアグラム

#### 5.4.2 実験結果

結果をFig. 5.16に示す。(a)はS6が存在せず、S3のみが働いている場合、(b)がS3、S6 2つの音源が同時に働いている場合である。



(a) 付加的な音源を設置しない場合



(b) 付加的な音源(S6)を設置した場合

Figure 5.16: 付加的な2次音源の有無による音圧減衰量分布の変化

結果によれば障壁による影の境界付近で (b) において約 6 dB 程度の減衰量増加が見られ、また受信領域全域に関しても 3 ~ 6 dB の改善が見られる。

この様に、付加的な 2 次音源を設置することにより地面からの反射波の影響を効果的に除去し、制御をより有効に働かせることが可能であることが分かった。

### 5.5 3 次元音場への拡張

3 次元音場において地面が存在する場合について考察する。まず半無限障壁の場合と同様に 1 組の 2 次音源群を用いて制御を行い、地面の影響によって、制御の効果がどのように変化するかを調べる。続いて反射波の影響のみをキャンセルするような付加的な 2 次音源群を設置し、その有効性を数値シミュレーションによって検討する。更に、付加的音源の代わりに、地面の一部を吸音性にする方法を試み、その効果を実験によって検証する。

#### 5.5.1 2 次音源群が持つ係数について

Fig. 5.17 に示すように 1 組 ( $N$  個) の 2 次音源群が、1 次音源と同じ角度で配置されており、またそれぞれに対応したキャンセルポイントを Edge 上に考えるものとする。ここでも図に示す通り、音源あるいは音源群に S1~S4 までの番号を付ける。

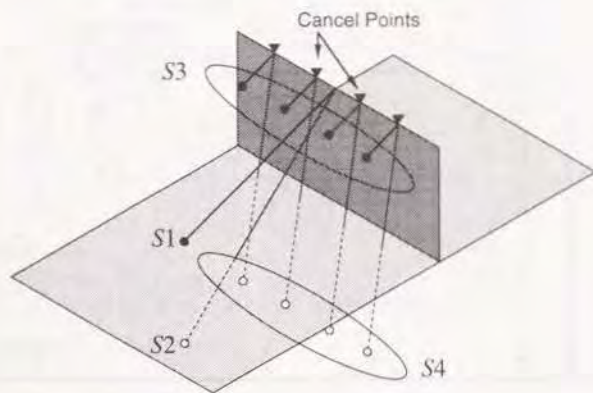


Figure 5.17: 3 次元音場において地面が存在する場合

この場合、各キャンセルポイントにおける音圧は、 $A_n$  を  $n$  番目の 2 次音源が持つキャンセルのための係数として以下の通り与えられる。

$$\begin{aligned}\phi(P_1) &= \frac{e^{jkr_{1,1,1}}}{kr_{1,1,1}} + \frac{e^{jkr_{2,1,1}}}{kr_{2,1,1}} + A_1 \left\{ \frac{e^{jkr_{3,1,1}}}{kr_{3,1,1}} + \frac{e^{jkr_{4,1,1}}}{kr_{4,1,1}} \right\} + \cdots + A_N \left\{ \frac{e^{jkr_{3,N,1}}}{kr_{3,N,1}} + \frac{e^{jkr_{4,N,1}}}{kr_{4,N,1}} \right\} \\ \phi(P_2) &= \frac{e^{jkr_{1,1,2}}}{kr_{1,1,2}} + \frac{e^{jkr_{2,1,2}}}{kr_{2,1,2}} + A_1 \left\{ \frac{e^{jkr_{3,1,2}}}{kr_{3,1,2}} + \frac{e^{jkr_{4,1,2}}}{kr_{4,1,2}} \right\} + \cdots + A_N \left\{ \frac{e^{jkr_{3,N,2}}}{kr_{3,N,2}} + \frac{e^{jkr_{4,N,2}}}{kr_{4,N,2}} \right\} \\ &\vdots \\ \phi(P_N) &= \frac{e^{jkr_{1,1,N}}}{kr_{1,1,N}} + \frac{e^{jkr_{2,1,N}}}{kr_{2,1,N}} + A_1 \left\{ \frac{e^{jkr_{3,1,N}}}{kr_{3,1,N}} + \frac{e^{jkr_{4,1,N}}}{kr_{4,1,N}} \right\} + \cdots + A_N \left\{ \frac{e^{jkr_{3,N,N}}}{kr_{3,N,N}} + \frac{e^{jkr_{4,N,N}}}{kr_{4,N,N}} \right\}\end{aligned}\quad (5.10)$$

ここに、 $P_n$  は Edge 上  $n$  番目のキャンセルポイントの位置を示し、 $r_{l,m,n}$  は  $l$  番目の音源群 (S $l$ ) の  $m$  番目の 2 次音源から  $n$  番目のキャンセルポイントまでの距離を示す。なお、S1 及び S2 はそれぞれ 1 つずつの音源しか仮定していないが、この場合も距離は  $r_{1,1,n}$  の様に ( $m=1$ ) 表記するものとする。

(5.10) 式で全ての  $\phi$  をゼロと置き、 $A_n$  について数値的に解けば係数が一義的に求まる。ここでもやはり、これらの係数を (5.2) 式に代入した場合の  $\phi(P)$  を  $\phi^{on}$ 、 $A_n = 0$  ( $n=1 \sim N$ ) の場合の  $\phi(P)$  を  $\phi^{off}$  として、制御の効果を (5.5) 式で定義する。

#### 5.5.2 地面が制御の効果に与える影響

Fig. 5.18 に示す音源位置、受信点を仮定する。やはり障壁の高さは 0.3 m とし、1 次音源は  $(r_0, \theta_0, z_0) = (0.5 \text{ m}, 60^\circ, 0)$  に、また、受信点  $P$  は  $(r, \theta, z) = (0.5 \text{ m}, 300^\circ, 0)$  に存在するものとする。これらの条件で、2 次音源群の位置を距離、角度共に変化させ、制御の効果がどう変化するかを計算した。

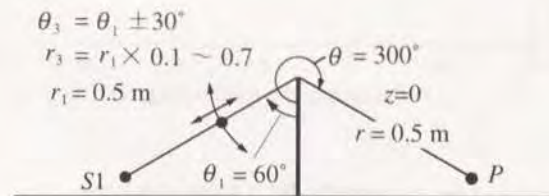


Figure 5.18: 2 次音源群配置位置変化範囲



なお、半無限障壁の場合の結果を考慮し、音源周波数を 5 kHz に、2 次音源及び Edge 上キャンセルポイントの間隔は 20 mm に固定した。また、2 次音源群位置の変化の範囲は、 $r_3/r_1 = 0.1 \sim 0.7$ 、及び  $\theta_3 = \theta_1 \pm 30^\circ$  であり、音源、受音点共  $z = 0$  の平面内に存在するものとした。音場を表す  $\phi$  の計算には「漸近解 1」を用いた。

結果を Fig. 5.19 に示す。この場合も縦軸は  $-\Delta L$  ( $-\Delta L$ ) である。線音源の場合と同様に距離比が大きくなるに従って減衰量は大きなピークを持つようになり、角度の変化に対して非常に不安定なものとなる。距離比が大きくなるに従って、つまり 2 次音源群が 1 次音源に近付くにつれて、実音源及びその鏡像から Edge に至る影響の振幅差が小さくなるため、例えばその経路差が半波長の整数倍であれば、お互いはより効果的にキャンセルしあう。これは (5.10) 式右辺の  $\{ \}$  の中がゼロに近付くことに対応しており、その結果キャンセルのための係数の絶対値が非常に大きくなり、制御の効果が不安定になるものと考えられる。

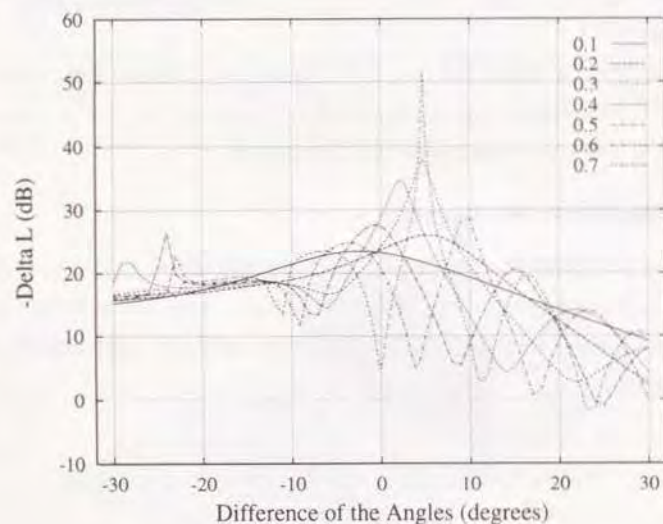


Figure 5.19: 2 次音源配置位置による制御の効果の変化

この結果を受けて、距離の比  $r_3/r_1$  が 0.7 の場合に、 $\theta_3 = \theta_1$  の条件で、Fig. 5.20 に示す受音領域を設定して制御の効果を計算した。周波数は 5 kHz である。

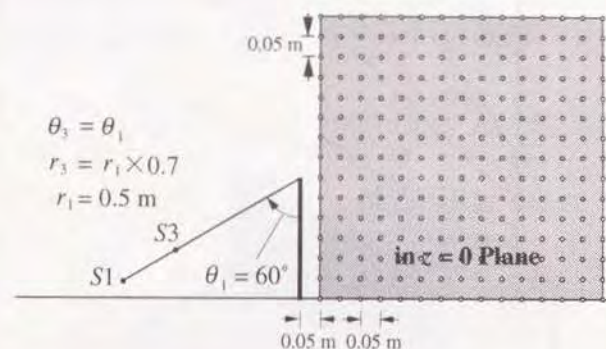


Figure 5.20: 音源配置位置及び受音領域

結果を Fig. 5.21 に示す。これによると、障壁による影の領域においても、制御によって音圧が上昇してしまう点が多数存在し、制御が有効に働いているとはいえない。この様に、地面が存在することにより制御の効果は大きく影響され、条件によっては、制御の効果がほとんど得られない場合があることが分かる。

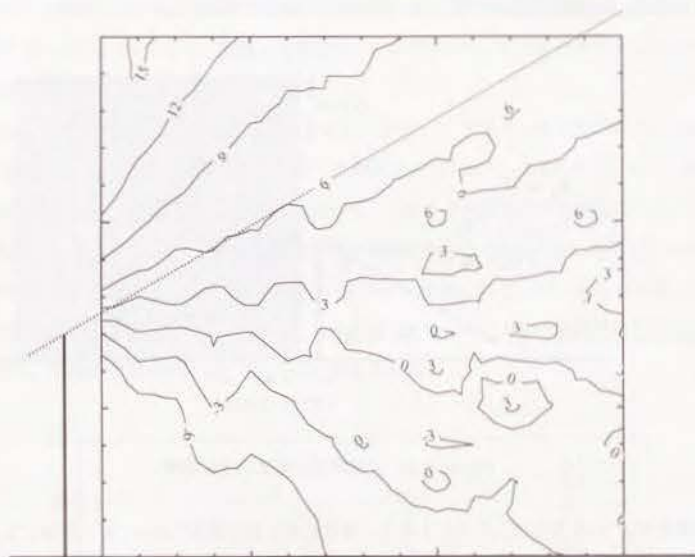


Figure 5.21: 能動制御による音圧減衰量分布:  $r_0'/r_0 = 0.7$  の場合

### 5.5.3 複数のシステムを用いる方法の有効性及び数値計算例

複数の2次音源群を設置して、地面からの反射波成分をキャンセルし、制御を有効に働かせることを試みる。2次元音場の場合と同様に、Fig. 5.22 に示す2組の2次音源群  $S5, S6$  を新たに設置する。ここに、全ての音源群及び Edge 上のキャンセルポイントの数は等しく  $N$  であると仮定する。

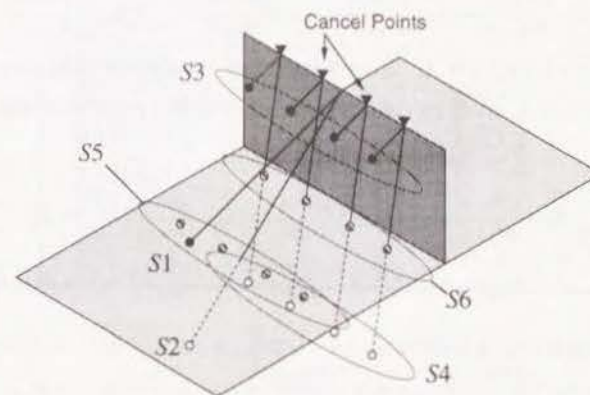


Figure 5.22: 新たに設置した2次音源群  $S5, S6$

$S3$  は半無限障壁の場合と同様な2次音源群であり、ここでは1次音源  $S1$  の影響をキャンセルするために働く。  $S5$  は1次音源の鏡像である  $S2$  の、また  $S6$  は  $S4$  つまり  $S3$  の鏡像からの寄与をキャンセルするために設置されたものである。それぞれは最大の効果を得るために、対応する音源と同じ角度に配置し、また  $S5$  及び  $S6$  はそれ自身の鏡像を作らないように地面に設置する。

各音源群のそれぞれの音源がもつキャンセルの為の係数は、半無限障壁の場合と同様に係数  $A_{mn}$  を未知数とする連立一次方程式を解くことによって求められる。なお、 $A_{mn}$  は  $m$  番目の音源群 ( $S_m$ ) の  $n$  番目の音源が持つ係数を表している。ここでは  $S3, S6$  を例に説明する。

Edge 上のキャンセルポイントにおいて観測される、 $S1$  及び  $S3$  からの波動の影響は、以下で与えられる。



$$\begin{aligned}\phi(P_1) &= \frac{e^{jkr_{1,1,1}}}{kr_{1,1,1}} + A_{3,1} \cdot \frac{e^{jkr_{3,1,1}}}{kr_{3,1,1}} + A_{3,2} \cdot \frac{e^{jkr_{3,2,1}}}{kr_{3,2,1}} + \cdots + A_{3,N} \cdot \frac{e^{jkr_{3,N,1}}}{kr_{3,N,1}} \\ \phi(P_2) &= \frac{e^{jkr_{1,1,2}}}{kr_{1,1,2}} + A_{3,1} \cdot \frac{e^{jkr_{3,1,2}}}{kr_{3,1,2}} + A_{3,2} \cdot \frac{e^{jkr_{3,2,2}}}{kr_{3,2,2}} + \cdots + A_{3,N} \cdot \frac{e^{jkr_{3,N,2}}}{kr_{3,N,2}} \\ &\vdots \\ \phi(P_N) &= \frac{e^{jkr_{1,1,N}}}{kr_{1,1,N}} + A_{3,1} \cdot \frac{e^{jkr_{3,1,N}}}{kr_{3,1,N}} + A_{3,2} \cdot \frac{e^{jkr_{3,2,N}}}{kr_{3,2,N}} + \cdots + A_{3,N} \cdot \frac{e^{jkr_{3,N,N}}}{kr_{3,N,N}}\end{aligned}\quad (5.11)$$

ここで全ての  $\phi$  をゼロとして  $A_{3,n}$  について解けば、S3 の音源群が持つ係数は求まる。

一方 S6 については、S4 と S6 の組み合わせで考えるので、解くべき方程式群が以下のようになる。

$$\begin{aligned}\phi(P_1) &= A_{4,1} \cdot \frac{e^{jkr_{4,1,1}}}{kr_{4,1,1}} + \cdots + A_{4,N} \cdot \frac{e^{jkr_{4,N,1}}}{kr_{4,N,1}} + A_{6,1} \cdot \frac{e^{jkr_{6,1,1}}}{kr_{6,1,1}} + \cdots + A_{6,N} \cdot \frac{e^{jkr_{6,N,1}}}{kr_{6,N,1}} \\ \phi(P_2) &= A_{4,1} \cdot \frac{e^{jkr_{4,1,2}}}{kr_{4,1,2}} + \cdots + A_{4,N} \cdot \frac{e^{jkr_{4,N,2}}}{kr_{4,N,2}} + A_{6,1} \cdot \frac{e^{jkr_{6,1,2}}}{kr_{6,1,2}} + \cdots + A_{6,N} \cdot \frac{e^{jkr_{6,N,2}}}{kr_{6,N,2}} \\ &\vdots \\ \phi(P_N) &= A_{4,1} \cdot \frac{e^{jkr_{4,1,N}}}{kr_{4,1,N}} + \cdots + A_{4,N} \cdot \frac{e^{jkr_{4,N,N}}}{kr_{4,N,N}} + A_{6,1} \cdot \frac{e^{jkr_{6,1,N}}}{kr_{6,1,N}} + \cdots + A_{6,N} \cdot \frac{e^{jkr_{6,N,N}}}{kr_{6,N,N}}\end{aligned}\quad (5.12)$$

ここに S4 は S3 の鏡像であるため、 $A_{3,n} = A_{4,n}$  であり、(5.11) 式で得られた  $A_{3,n}$  を用いて (5.12) 式を解くことが出来る。同様に S5 の音源群についても S2 の音源をキャンセルするような係数を定めることが出来る。またこれまでと同様に、係数が上記の全ての  $\phi$  をゼロとして求められた値の場合の受音点における音圧を  $\phi^{on}$ 、係数がゼロである場合を  $\phi^{off}$  として制御の効果を (5.5) 式で定義する。

Fig. 5.21 で示した制御が有効に働かない条件において、付加的な 2 次音源を設置した場合の制御の効果を計算した。結果を Fig. 5.23 に示す。これによると結果は一転し、ほぼ全領域において大きな減衰が得られていることが明らかである。障壁の近くにおいては -60 dB 以上という大きな値も得られている。

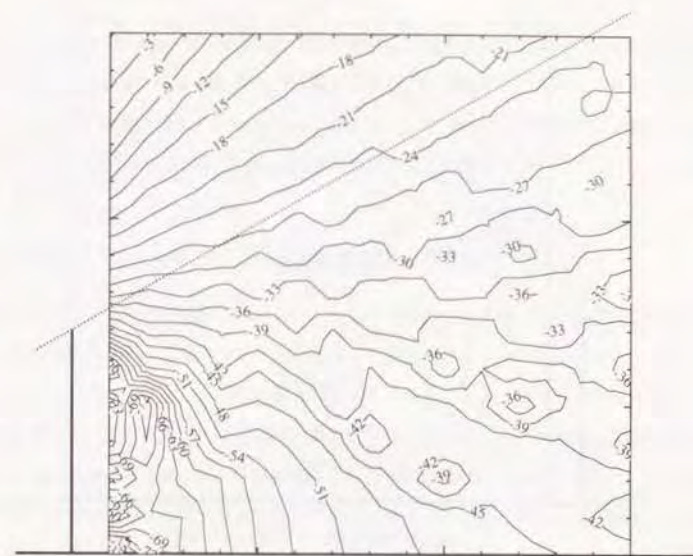
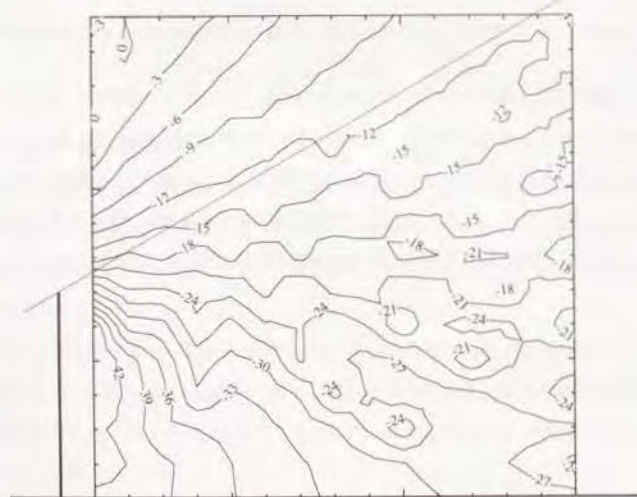


Figure 5.23: 付加的な 2 次音源を設置した場合の能動制御による音圧減衰量分布

また、1 組の 2 次音源だけでも有効な減衰が得られていた条件において、付加的な 2 次音源群を設置することによる効果を調べた。ここでは 2 次音源群 S3 が Edge から 0.1 m にある場合を想定した。結果は Fig. 5.24 (a), (b) に示す通りである。(a) は S3 のみの場合、(b) は S5, S6 も設置した場合に対応する。これによると、影の領域における減衰量自体には大きな変化は見られないが、影の境界付近において制御が有効な領域が広がっていることが分かる。



(a) 付加的な音源を設置しない場合



(b) 付加的な音源 (S5, S6) を設置した場合

Figure 5.24: 付加的な2次音源の有無による音圧減衰量分布の変化

この様に3次元音場においても付加的な2次音源群を設置する方法は非常に有効であり、地面からの反射波が制御に及ぼす影響を効果的に除去できることが明らかになった。また、2次音源 S3 のみでも有効な減衰が得られている場合においても、付加的な2次音源群を設置することによって制御が有効となる領域が拡大し、更に制御の効果に悪影響を及ぼすことはないことが明らかとなった。

#### 5.5.4 付加的な2次音源を用いない反射音成分除去の方法

上に述べた方法を実験的に検証する場合や、現実の音場に対して適用する場合においては、複数の適応信号処理システムを導入することになる。この場合にもシステムが収束し得ることは既に第4章において述べた。しかし実際問題として考えた場合、1次(騒)音源は地面の近くに存在する 경우가多く、付加音源 S5 は必要無い場合が多い。更にほとんどの場合、1次音源近傍の地面上に、付加的な2次音源(群)を設置することは不可能であるとも考えられる。また同時に、半無限障壁の場合の結果から考えれば減衰量は少なくなるが、2次音源 S3 は出来るだけ障壁の近くに設置する方が現実的である。

そこで、以後行う実験的な検証においては、1次音源は地面のごく近傍に存在するものとし、2次音源 S5 は設置しないものとする。また、2次音源 S3 はなるべく Edge の近くに設置するものとし、更に S6 についても、等価的に必要が無いように、以下の方法で S3 の鏡像である S4 の影響をキャンセルすることを考える。

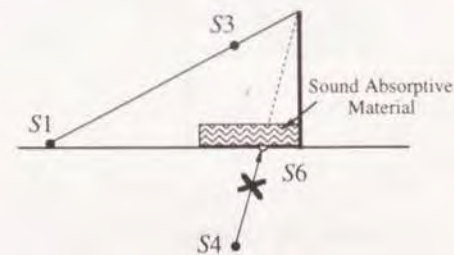


Figure 5.25: 障壁近辺での吸音材の設置

ここではその具体的な方法として Fig. 5.25 に示すように、障壁の真下からある程度の領域の



地面を吸音材で覆い、 $S3$  の鏡像が生成されないようにする。これによって地面からの反射波の影響をキャンセルし、2次音源  $S6$  をも省略可能にすることを試みる。

吸音材を設置する領域の大きさであるが、これは Fresnel Zone の考え方から決定されるべきである。つまり、Fig. 5.26 に示すように、吸音材の幅が音波が十分に鏡面反射させるとみなせる領域、つまり鏡像音源と受音点の間で少なくとも数個の Zone を含むような領域をカバーすれば良い。以後無響室内において地面に吸音材を設置する方法の有効性を実験的に検証する。

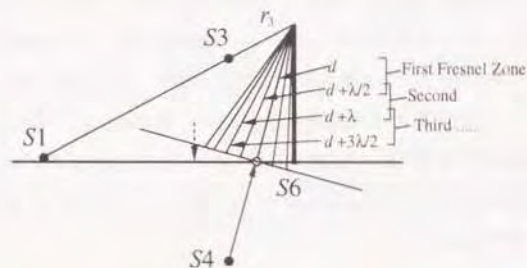


Figure 5.26: 設置する吸音材の幅の決定方法

## 5.6 3次元音場における実験

### 5.6.1 実験条件

半無限障壁の場合と同様に、無響室内に障壁を設置し、地面が存在する場合の能動制御の効果を実験的に検討する。Fig. 5.27 に示す様に、無響室内のグリッド床に硬質繊維板、プラスターボード、及び30 mm 厚のホモゲンボードを敷き詰め、剛な床面とした。障壁は半無限障壁の実験の場合と同様に3 mm 厚の鉄板を12 mm のプラスターボード2枚ではさんだものであり、その高さは1.1 m である。

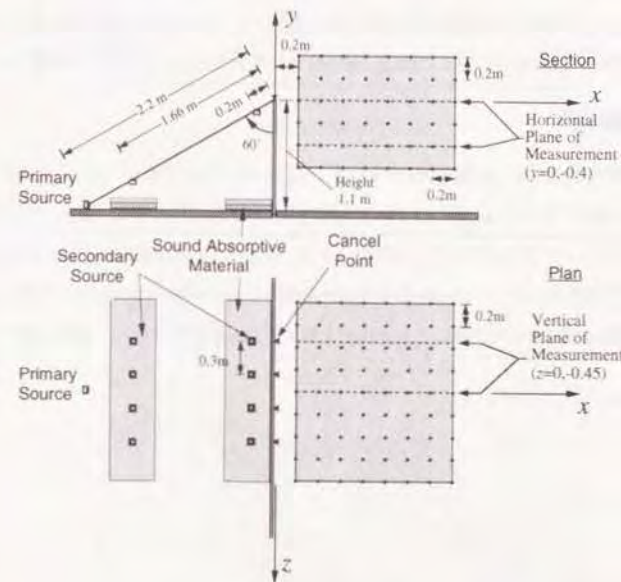


Figure 5.27: 音源位置、及び受音領域

1次音源は Edge から 2.2 m の距離の地面上に障壁方向を向けて設置し、また2次音源は上向きに設置するものとした。2次音源の設置位置であるが、Edge から 1.66 m の位置、及び 0.2 m の2通りを設定した。1.66 m の位置は、あらかじめ数値シミュレーションによって予想された、

制御が有効に働かない位置であり、吸音材の効果を明確にするために設定した。また、0.2 m は実用的な側面から設定したものである。いずれの場合にも 2 次音源群の角度は 1 次音源と同じ  $60^\circ$  とした。

2 次音源及び Edge 上に設置するキャンセルポイントの数は半無限障壁の場合と同じ 4 であり、その間隔は 0.3 m である。音源信号には 500 Hz の純音を用い、適応信号処理によってこれらのポイントにおける音圧を同時に最小とする。また、受音点は図に示す通り鉛直面  $8 \times 7$  の 56 ポイントを 2 面、水平面  $9 \times 8$  の 72 ポイントを 2 面とし、これらの点で、2 次音源が on の場合と off の場合の音圧レベル差を求め、制御の効果とした。なお、2 次音源の鏡像をキャンセルするための吸音材は  $24 \text{ kg/m}^3$  及び  $32 \text{ kg/m}^3$  のグラスウールを Fig. 5.27 に示すように設置した。この設定も、4.3 節の半無限障壁の場合と同様に約 1/5 のスケールモデル実験と考えることが出来る。しかし周波数を 500 Hz と設定したのは、適応信号処理を行うハードウェアの限界からである。

### 5.6.2 実験結果

まず吸音材を設置しない状況での結果を示す。Fig. 5.28 が 2 次音源が 1.66 m の場合、Fig. 5.29 が 0.2 m の場合であり、(a)、(b) はそれぞれ鉛直面、水平面に対応する。なお、鉛直面は  $z = 0$  を、水平面は  $y = 0$  のみを示した。結果によれば、Fig. 5.29 では制御はかなり有効に働いており、領域の大部分で  $-9 \sim -12 \text{ dB}$  以上の減衰量が得られている。これに対して Fig. 5.28 では、特に (a) の鉛直面において制御により音圧が上昇する点もかなりみられ、有効に働いているとは言い難い。

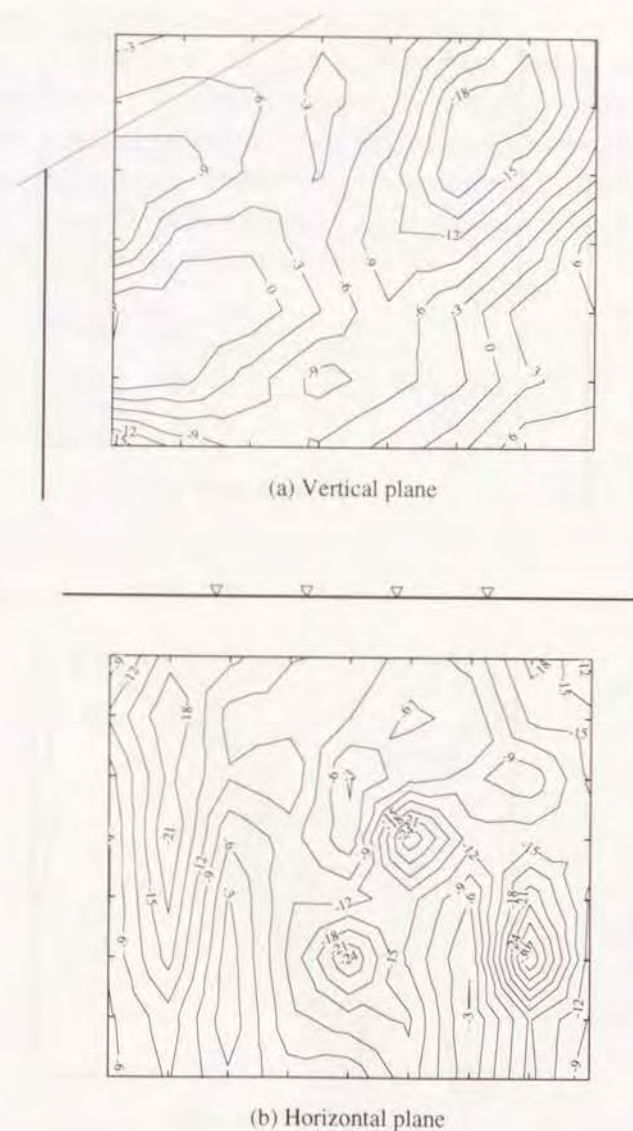


Figure 5.28: 能動制御による音圧減衰量分布:  $r_d = 1.66 \text{ m}$



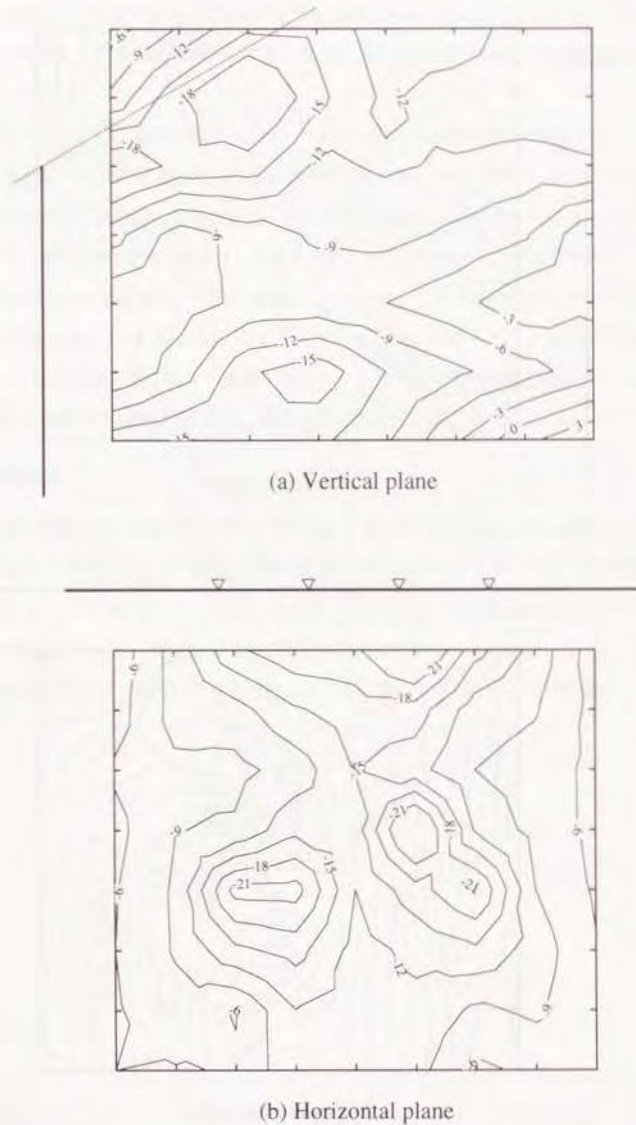


Figure 5.29: 能動制御による音圧減衰量分布:  $r_3 = 0.2$  m

続いて地面に吸音材を設置した場合の結果を Figs. 5.30, 5.31 に示す。それぞれ2次音源の位置が1.66 m, 0.2 m の場合であり, (a), (b) は鉛直面, 水平面である。今回は Fig. 5.30 においてもほぼ全域にわたって  $-9 \sim -12$  dB 程度の減衰が得られおり, 吸音材によって地面からの反射波が効果的に消去され, 半無限障壁の場合と同様に制御が有効に働いたものと考えられる。Fig. 5.31 においては吸音材の有無による効果の違いがほとんど認められない。これは元々制御が有効に働いている場合には, 付加音源は顕著な影響を与えないという, 5.5.3 節において示した数値シミュレーションの結果に対応するものと考えられる。

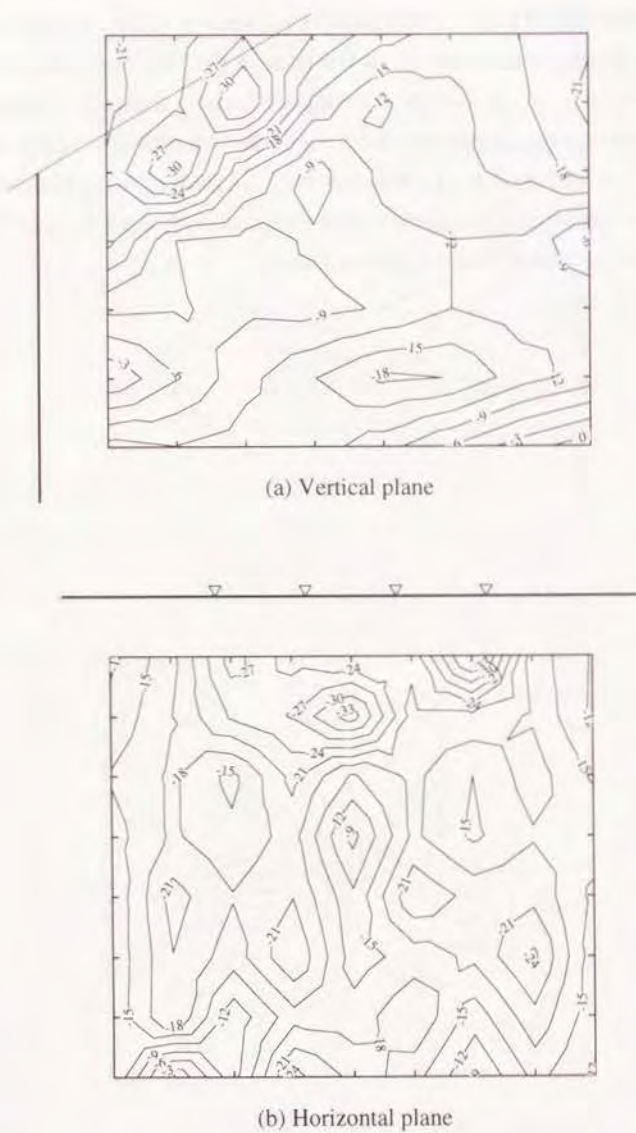


Figure 5.30: 地面に吸音材を設置した場合の能動制御による音圧減衰量分布:  $r_3 = 1.66$  m

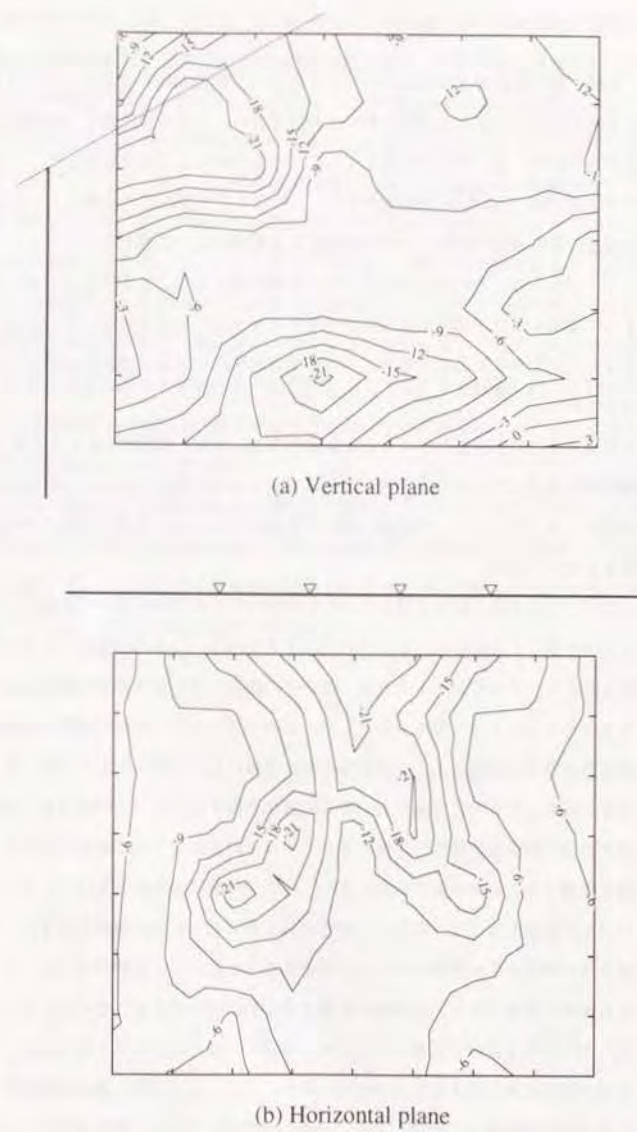


Figure 5.31: 地面に吸音材を設置した場合の能動制御による音圧減衰量分布:  $r_3 = 0.2$  m



## 5.7 まとめ

本章では、障壁が剛な地面の上に設置されている場合の、能動制御の効果について考察を行った。まず、線音源を仮定した2次元音場において検討を行い、2次音源位置などの条件によっては制御の効果を得られず、逆に音圧が上昇してしまう可能性があることが分かった。この傾向は特に2次音源が1次音源に近い状況で顕著である。これは2次音源の配置位置によっては、Edgeにおける2次音源自身の波動の影響と、その地面による鏡像からの影響が互いにキャンセルしあい、結果的にキャンセルのための係数が非常に大きな絶対値をもつことが原因であると考えられる。係数によってEdge 1点では確かに音圧がキャンセルされているものの、その近傍においては非常に大きな音圧が存在することとなり、これが受音領域に対する仮想的な音源として働いているものと推測される。

この現象を回避するための方法として、2次音源をEdgeの近くに設置することが考えられる。これは半無限障壁の場合に得られた「大きな減衰量を広い領域で得るためには2次音源を1次音源の近くに設置すべきである」という結論と相反するものであるが、実際の音場への応用を考慮すれば現実的な方法と言える。

しかし、ここでは更に大きな減衰を得るために、付加的な2次音源を用いて地面からの反射波成分をキャンセルすることを試みた。この付加的な2次音源は、自身の鏡像を作らないように地面に設置するものとし、それぞれが1次音源、及びその鏡像、また2次音源の鏡像など1つの音源の影響をキャンセルするように働くものとした。この方法により、地面の影響は効果的に除去され、半無限障壁の場合と同様に大きな減衰量を広い領域において得ることが可能となった。

続いて点音源を仮定した3次元音場においても同様な考察を行った。この場合も、地面の影響によって制御が有効に働かない条件が存在するが、やはり付加的な2次音源群を設置することによりこの問題を回避することが可能である。また、ここでは更に現実的な方法として、2次音源群をEdgeの近くに設置すると同時に、障壁の真下からある程度の領域を吸音性にする事で、2次音源自身の鏡像からの影響をキャンセルすることを試みた。無響室内で行った実験によればこの方法も非常に有効であり、反射波の影響を効果的に除去できることが明らかになった。

本章で提案した付加的な音源を設置する方法や、地面の一部を吸音性にする方法は、騒音源と障壁の間の地面が容易に取り扱えることが前提となっており、従ってその適用範囲にも限界が存在する。例えば道路交通騒音などでは、実際に車両が走行する道路に2次音源スピーカを設置したり、その一部を吸音性にするのは不可能であり、適用は困難であると考えられる。しかしオ

フィス空間内でのO.A.機器、あるいは工場、プラントに設置された各種機器の騒音制御など、地面が比較的自由に取り扱える場合には充分適用可能であり、また有効な方法である。

オフィスでの適用の例としては、プリンタ、プロッタ騒音の制御などが考えられる。近年、レーザープリンタの普及により、大幅なレベル減少が達成されたものの、依然として大きなインパクト音を伴うドットマトリクスプリンタの需要は多い。カーボン紙を用いた複写をプリンタで行うことが多いからである。またプロッタに関してもCADなどの精密化に伴い、より高速なもの、より大型のものが多用されている。これまでのプリンタ、プロッタの騒音対策といえば、防音箱の中に閉じこめる形式のものがほとんどであり、操作性という面では制約を伴うものであった。

本研究の方法を適用すれば、例えばパーティションなどを用い、そのEdgeでの音圧を最小にするように2次音源を設置すれば機器の操作性を損なうことなく騒音レベルを減少できる可能性がある。また床面からの反射音が影響する場合などは、その一部にカーペットを設置するなどの対策も比較的容易にとることが出来る。

もちろん騒音源信号は不規則であり、適応信号処理を導入するに際してもその音源信号の検知方法、人が出入りすることによるアルゴリズムの不安定性、あるいは処理スピードの問題など検討すべき課題は多い。将来における充分高速なハードウェア、及びより安定なアルゴリズムの開発が前提であるが、実用可能な応用例の一つである。



## 第6章

### 屋外における実験

#### 6.1 概要

現実の、特に屋外における能動制御においては、風の影響、目的とする騒音源以外からの外来騒音の影響など様々な困難が伴う。また、適応信号処理の観点からも、気温の時間変化、あるいは外来騒音等による2次音源とキャンセルポイント間の伝達関数の変化が、アルゴリズムの収束に与える影響など検討すべき事項は多い。更に第4章で示した、広い領域での減衰を得るために、複数のシステムを同時に働かせた場合の振舞いも実験的に検証する必要がある。

本章において、上述の全ての問題についての詳細な検討を行う訳ではない。ここでは障壁による回折音を能動制御する方法に関して、実用化の可能性の確認、及び問題点の抽出を主な目的とし、屋外に障壁を設置し、より現実に近い状況での実験的検討を行う。

まず実験1として、二つの多チャンネル適応信号処理システムを導入し、双方を独立に働かせて Edge 上合計 10 ポイントにおける音圧を最小とすることで、広範囲にわたる効果を得ることを試みた。なお、現実の音場を理想化した条件として1次音源はオクターブバンドノイズを放射するスピーカであり、更に音源信号は既知であるものとして実験を行った。

続いて実験2では実音源を用いた場合に制御を試みた。ここでは工場の排気設備などに用いられる送風機(ブロワー)を音源とし、騒音信号のピックアップ方法などについて検討を行った。この場合、騒音源が放射する音がほとんど純音性であったためその検知は比較的容易であったが、センサーとしてマイクロホンを用いた場合、及び振動ピックアップを用いた場合のキャンセルポイントで観測される信号とのコヒーレンシーを調べた。また、これまでは障壁は無限に長いものと仮定して検討を行ってきた。しかし、実際に設置される障壁の長さが充分でない場合、その横方向からの回折波の影響も考慮しなければならない。ここでは音源を囲む形で付加的な障壁を設置

し、その効果についての検討を行った。

なお、前章で2次音源群を障壁の Edge の近くに配置することで、安定した制御効果が得られること。また地面の一部を吸音性とする事で、地面からの反射波の影響を効果的に除去出来、更に大きな減衰が得られることが明らかになっている。本章ではより簡便なシステムを実現することを目的として、地面に吸音材を設置することなく、2次音源群を Edge に近く配置することで、制御を安定に働かせることを試みた。

#### 6.2 実験1の条件

##### 6.2.1 障壁、音源配置及び受音点

実験には、Fig. 6.1 に示す構造の障壁を用いた。これは密度  $150 \text{ kg/m}^3$ 、厚さ  $25 \text{ mm}$  のロックウールを、 $0.8 \text{ mm}$  厚の鋼板及び  $0.6 \text{ mm}$  厚のパンチングメタル板で挟んだパネルの2層構造となっており、空気層は  $150 \text{ mm}$  である。ちなみにこの構造での透過損失は  $125 \text{ Hz}$  において  $38 \text{ dB}$  程度である。障壁としての高さは  $2 \text{ m}$ 、長さは約  $20 \text{ m}$  であり、これを、比較的柔らかい地面(休耕田)の上に設置し、実験を行った。なお、図中の L 字鋼 (Angle Steel) は障壁の自立を支えるために、約  $3 \text{ m}$  毎に設置したものである。

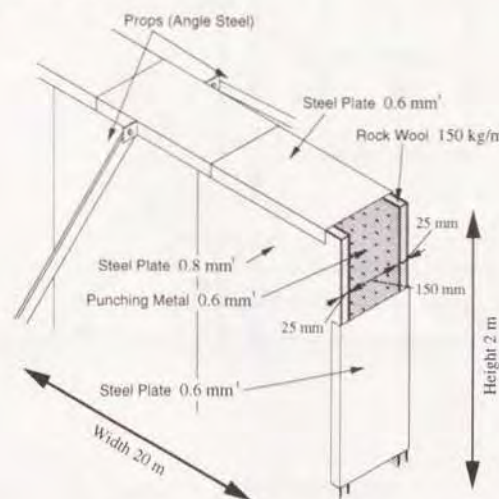


Figure 6.1: 実験に用いた障壁の構造



音源位置、受音点などの概要を Fig. 6.2 に示す。1 次音源 (BOSE-802) は障壁の Edge から 4 m の距離、障壁からの角度  $60^\circ$  で、Edge に沿った方向の中心の地面上に設置した。図中に示す通り、System-1 は 4 チャンネル、System-2 は 6 チャンネルの適応信号処理システムである、いずれも、2 次音源 (DIATONE DS-5) は Edge から 0.5 m の距離、障壁からの角度は 1 次音源と同じ  $60^\circ$  であり、キャンセルポイントと共に 1 m 間隔で並んでいる。キャンセルポイントは音波が最初に回折する場所として障壁の音源側の Edge とした。

受音点に関してであるが、測定結果をコンターマップとして評価するための領域を 1 m 間隔の格子点での領域 A、及び 2 m 間隔での領域 B の 2 種類選んだ。領域 A は双方の System を同時に働かせた場合の減衰量を細かく評価するために、領域 B は System-1、2 をそれぞれ単独で働かせた場合、また双方を同時に働かせた場合の制御効果の分布の変化を調べるため設定した。なお、受音点を表現するために、図中に示す通り障壁に沿った方向に  $z$  軸、障壁の中心を通る垂直方向に  $x$  軸、高さ方向に  $y$  軸を設定し、原点は  $x$  軸上で障壁から 1 m 離れた地面上の点とした。

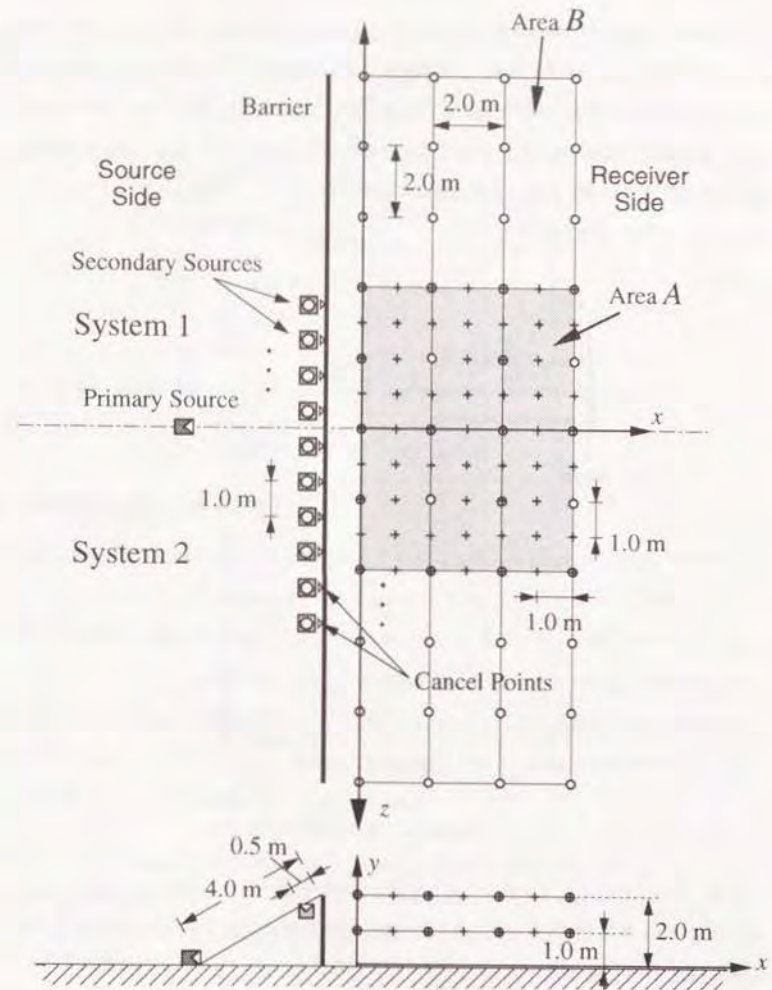


Figure 6.2: 音源位置及び受音領域

このほか、遠方での効果を調べるために、Fig. 6.3 に示す通り  $x$  軸方向に 20 m の距離まで 2 m 間隔で計測した。それ以降 80 m の距離まで 5 m 間隔で、また  $x = 50$  m の点から障壁と平行な方向に左右それぞれ 15 m と 50 m の範囲を 5 m 間隔で測定した。なお、いずれの点においても、地面からの高さ 1 m 及び 2 m の 2 点を測定するものとした。全ての測定点は障壁による幾何光学的な影の領域にあり、1 次音源は直接見えない。

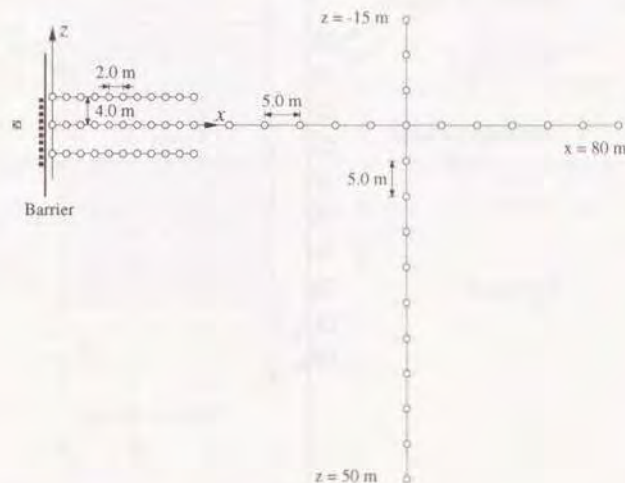


Figure 6.3: 遠方での受音点

なお、このほか Fig. 6.4 に示す通り制御を行った状態で、音源側及び受音側の Edge 上の音圧分布を 0.2m 間隔で測定した。ちなみに実験を行った際の気温は 24°C~27°C 程度であり、また風は風速 2~3 m/s 程度であった。

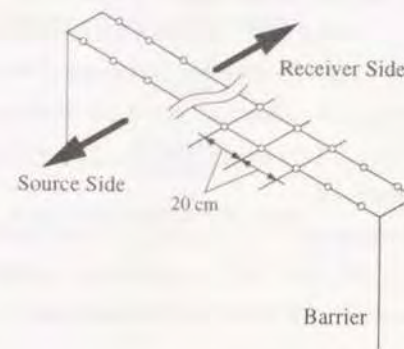


Figure 6.4: Edge 上での受音点

## 6.2.2 適応信号処理システムについて

実験には 4.3 節及び 5.6 節で用いたものと同じ、Multiple Error Filtered-x LMS アルゴリズムを実行するハードウェア (mtt LORY PLUS) を用いた。なお、二つのシステムでのチャンネル数の違いは、処理能力の差によるものである。双方のシステムともブロックダイアグラムは Fig. 4.18 で示されるものであり、DSP チップとしては同等の能力を持つもの (AT&T 社製 DSP32C 及び TI 社製 TMS320C30) を搭載している。しかし、System-2 はたたみ込み演算処理専用ボードを有しており、以下に再掲する (4.1) 式で表される適応フィルタの係数更新処理のうち、後半の  $C_{lmj}$  に関する  $\sum$  の部分を省略することが可能である。

$$w_{mi}(n+1) = w_{mi}(n) - \alpha \sum_{l=1}^L e_l(n) \sum_{j=1}^J C_{lmj} x(n-i-j) \quad (4.1)$$

このため、チャンネル数を増やして 6 とすることが可能となった。なお、いずれのシステムもサンプリング周波数は 1 kHz であるが、2 次音源とキャンセルポイント間のインパルスレスポンスをモデル化した  $C_{lmj}$ 、及び実際の適応フィルタ  $w_{mi}$  のタップ数においても差は生じており、System-1 では 50 タップ、System-2 では 64 である。また各システムの配置を障壁の中心に対して左右非対称としたのは、それぞれが有効に働く領域を明確に把握するためである。また、各受音点における測定は常に適応を続けている状態で行った。

この実験においては、音源信号は後述するようにオクターブバンドノイズであり、更に理想化



した条件として、音源信号は適応システムに対して既知であるものとした。これは騒音源信号の検出方法及びその(ノイズ)センサー位置などのパラメーターを減らす目的で設定したものである。

このため、Edge 上のエラーセンサー(マイクロホン)に帯域外のスペクトルを持つ外来騒音が混入した場合、システムが不安定になることがある。騒音源信号と認識している信号(参照信号)に含まれない周波数成分を消去しようとするため、上記(4.1)式で表される適応フィルタ係数の絶対値が大きくなるのが原因である。

本実験においても、上記の現象が原因であると思われるシステムの発散が準備段階で何度か観察された。測定を行う人の話し声や、まれに観測された強めの風による影響であると考えられる。しかし測定中は顕著な外来騒音も無く、また結果の項で示すとおり暗騒音も 45 dB 程度と低めであったため特別な対策は行わずシステムを動作させた。

上述の不安定さは、マイクロホンなどのノイズセンサーを用い、外来騒音も含めて騒音源信号として認識する場合にはある程度抑えることが出来る。しかし 2 次音源として用いるスピーカの周波数特性が充分でない場合には、同様に適応フィルタの係数が大きくなるのが明らかである。対策としては、キャンセルポイントにおけるエラーセンサーの出力、及びノイズセンサーの出力を、目的とする帯域のバンドパスフィルタを通して適応システムに入力する方法が考えられる。この場合、バンドパスフィルタを通すことによって生じる信号の時間遅れが、システムの振る舞いに与える影響などについて、個々の状況に応じた実験的な検討が必要となる。

### 6.2.3 音源信号及び測定方法について

音源信号には 125 Hz を中心周波数とする 1/1 オクターブバンドノイズを用いた。上記の受音点において、制御が on の場合、及び off の場合それぞれについて、音圧レベルを FFT アナライザ(小野測器 CF-940)を用いて 1/3 オクターブバンド毎に測定し、両者の差を制御の効果とした。測定系のブロックダイアグラムを Fig. 6.5 に示す。また、特に遠距離での制御効果の測定には、Fig. 6.5 でマイクアンプとして用いている騒音計(RION NA-29)を直読するものとし、この場合は 1/1 オクターブバンドで評価することとした。

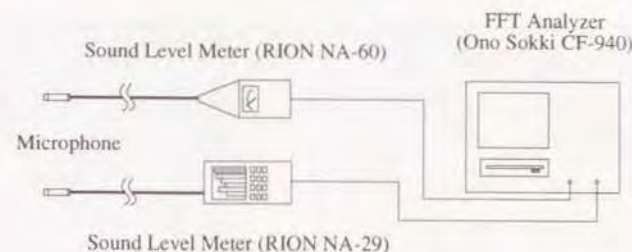


Figure 6.5: 測定系ブロックダイアグラム

## 6.3 実験 1 の結果及び考察

まず音場の様子を把握するために、領域 A における制御を行わない場合の音圧レベル分布を調べた。結果をコンターマップとして Fig. 6.6 に示す。コンターの間隔は 1 dB である。また、図中の直線は障壁の位置を表し、直線上の逆三角形はキャンセルポイントの位置を示す。なお、以降の結果の図において、▽ は制御が働いていない場合、▼ は制御が働いていることを示すものとする。(Figs. 6.6, 6.7 においては、図の大きさの関係から 9 チャンネルしか示されていない。)

(a) が地面からの高さ 1 m の場合、(b) が 2 m の場合であり、周波数は図中に示す通りである。これによると、特に (a) においてレベル分布に乱れが見られる。これは障壁による回折によって音圧が比較的低く、地面からの不規則な反射音との干渉が顕著に現れているものと考えられる。しかし (b) においては地面から受音点への高さもあり、音圧レベルの乱れは少なくなり、ほぼ左右対称の分布である。また、定在波のような音圧のピーク・ディップもなく、障壁から離れるに従ってなだらかに減少する傾向が認められる。高さ 2 m では地面からの反射音の影響も無視できる程度となり、ほぼ半無限障壁の場合と同様な状況が実現されていることがわかる。次に Fig. 6.7 に同じ領域における制御の効果としての音圧減衰量分布を示す。



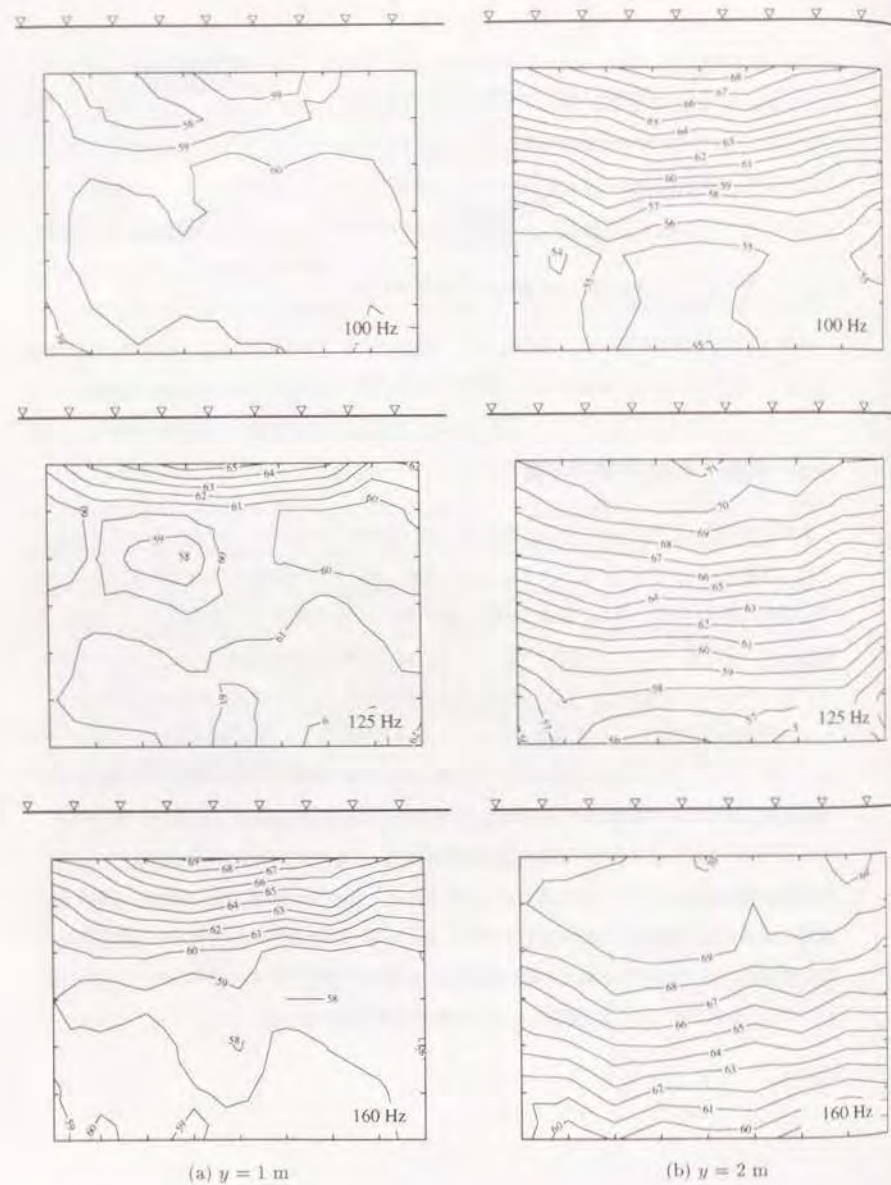


Figure 6.6: 制御を行わない状態での回折音場 (領域 A)

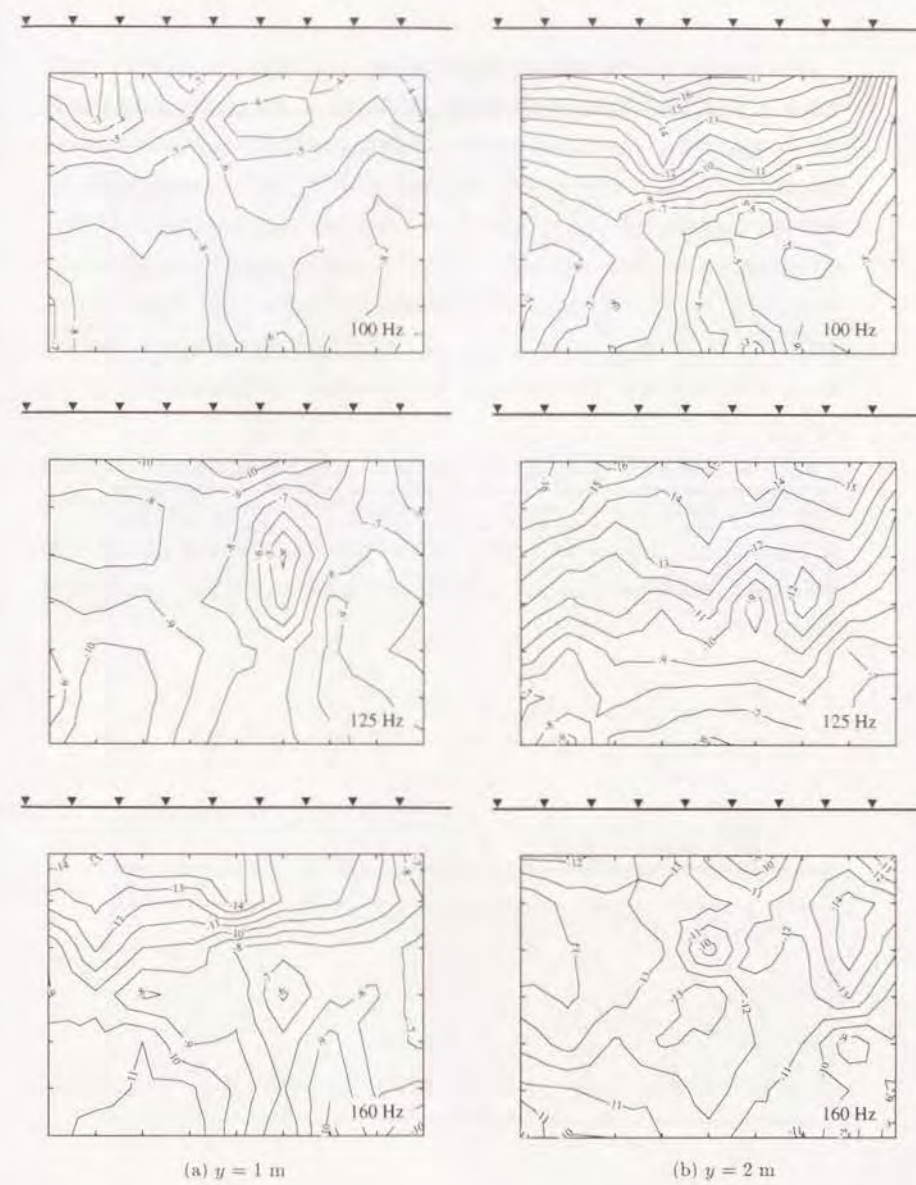


Figure 6.7: 能動制御による音圧減衰量分布 (領域 A)



これは System-1, 2 を同時に働かせた場合の結果であり、(a) が高さ 1 m、(b) が 2 m の結果である。いずれの場合にも測定領域の全域で減衰が得られており、どの周波数についても制御を行わない状態での音圧レベルが高い場所ほど、つまり障壁に近い場所ほど大きな減衰が得られる傾向がある。また、(b) の高さ 2 m では、(特に 100, 125 Hz で) 音圧レベルの変化に対応した、比較的なだらかな分布を見せており、効果としては  $-10$  dB 程度の減衰量が得られている。また、いずれの場合にも領域の中心付近、つまり二つのシステムの間で、比較的大きな減衰が得られていることから、お互いのシステムはそれぞれに悪影響を及ぼすことなく、独立に収束していることが確認できる。この様に、Edge に沿ってシステムが存在する幅と同程度の幅を持つ領域 A において、制御は有効に働き、障壁と同じ高さにおいて約  $-10$  dB 程度の減衰量が得られることがわかった。

次に、System-1, 2 それぞれを単独で動作させた場合、及び双方を同時に動作させた場合の領域 B における減衰量分布を示す。Figs. 6.8, 6.9 に System-1 の 4 チャンネルのみを動作させた場合、Figs. 6.10, 6.11 に System-2 の 6 チャンネルのみの場合、また、Figs. 6.12, 6.13 に双方同時の場合を示す。図の番号 6.8・6.9, 6.10・6.11, 6.12・6.13 は地面からの高さ 1 m, 2 m にそれぞれ対応している。

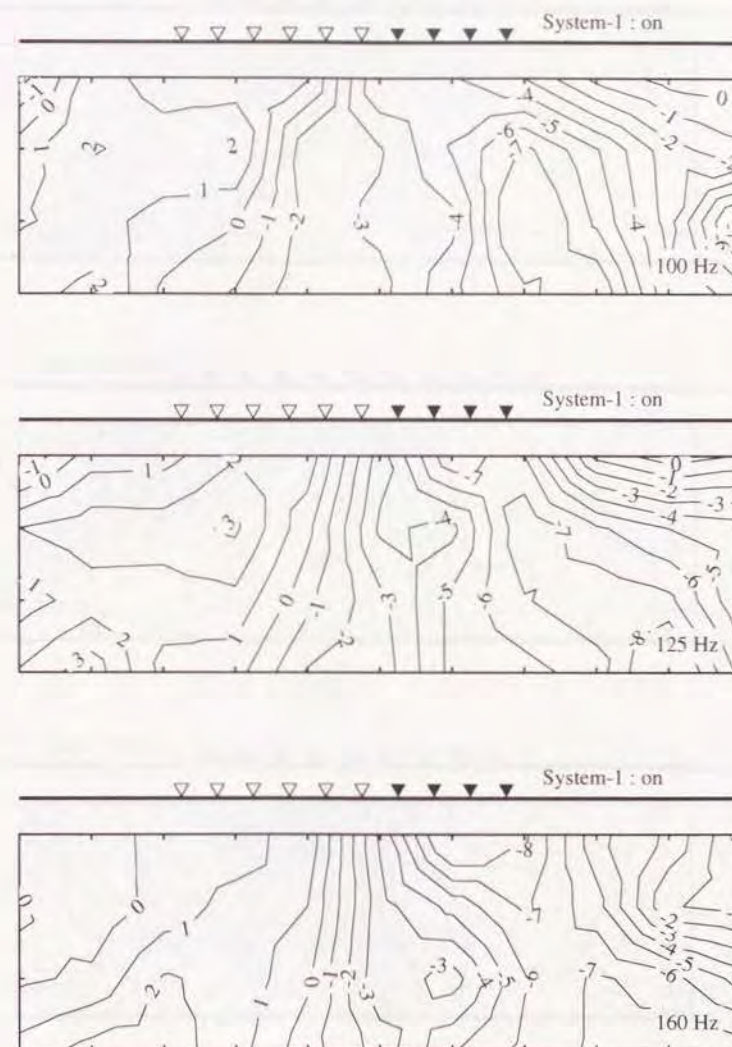


Figure 6.8: System-1 のみ動作させた場合の音圧減衰量 (領域 B :  $y = 1$  m)

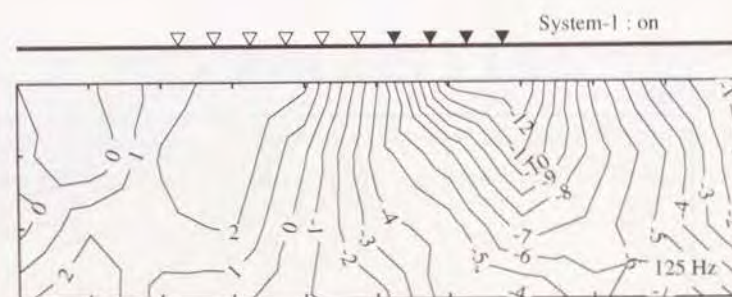
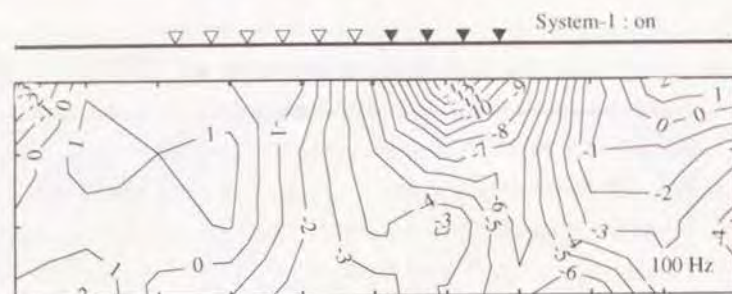


Figure 6.9: System-1 のみ動作させた場合の音圧減衰量 (領域  $B$  :  $y = 2$  m)

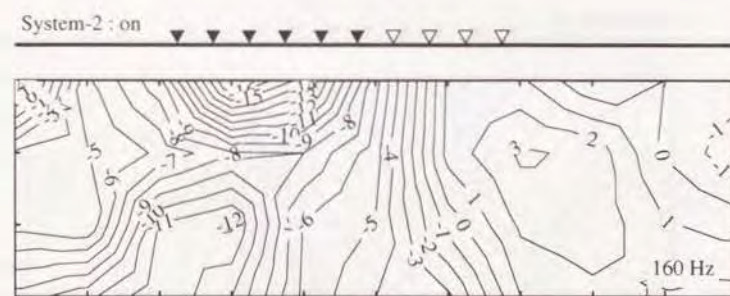
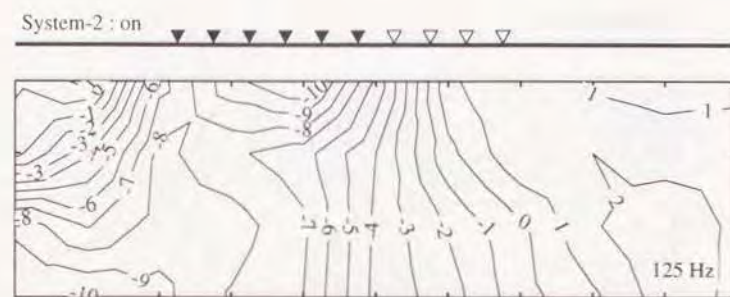
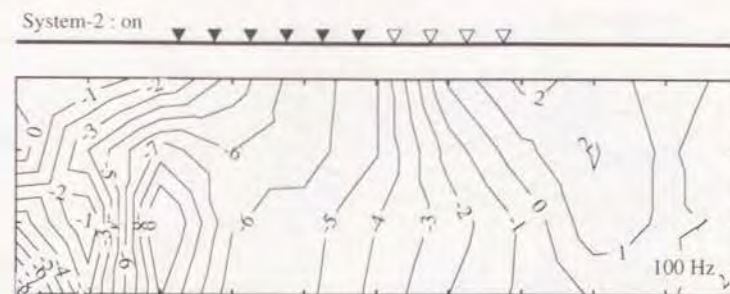


Figure 6.10: System-2 のみ動作させた場合の音圧減衰量 (領域  $B$  :  $y = 1$  m)



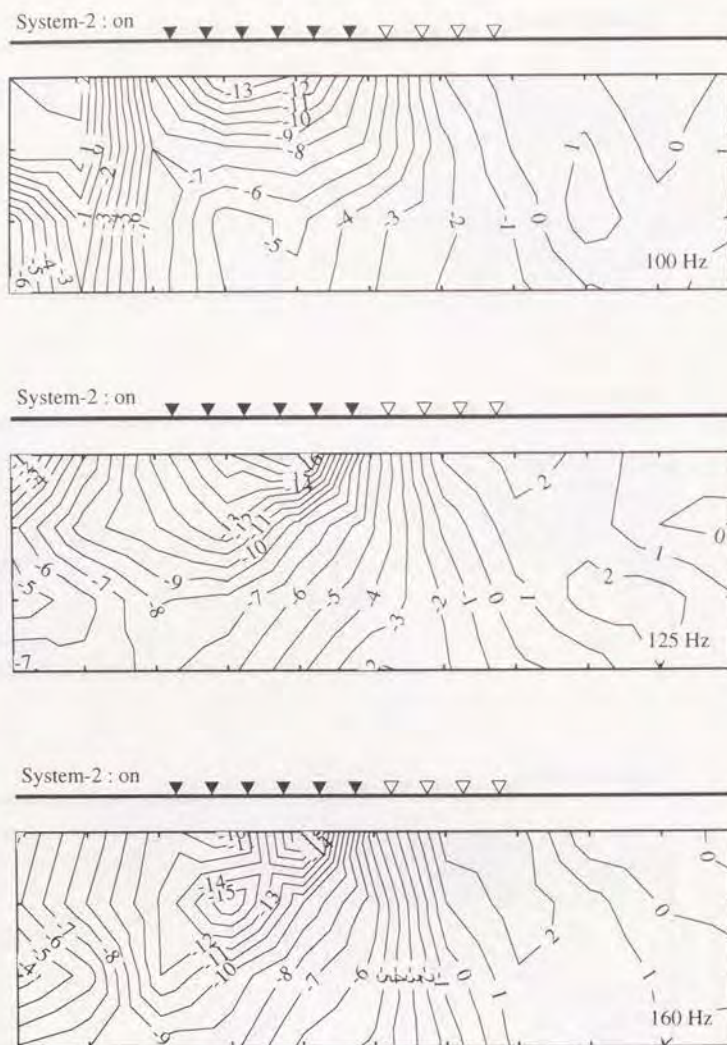


Figure 6.11: System-2 のみ動作させた場合の音圧減衰量 (領域 B:  $y = 2$  m)

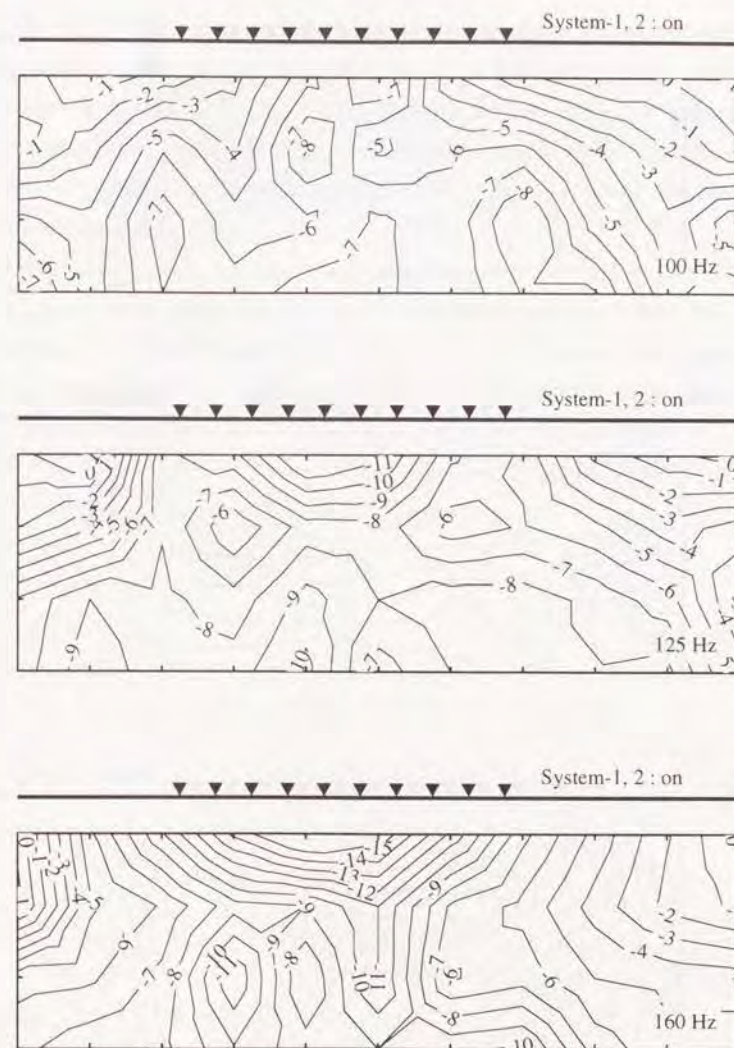


Figure 6.12: System-1, 2 同時に動作させた場合の音圧減衰量 (領域  $B : y = 1 \text{ m}$ )



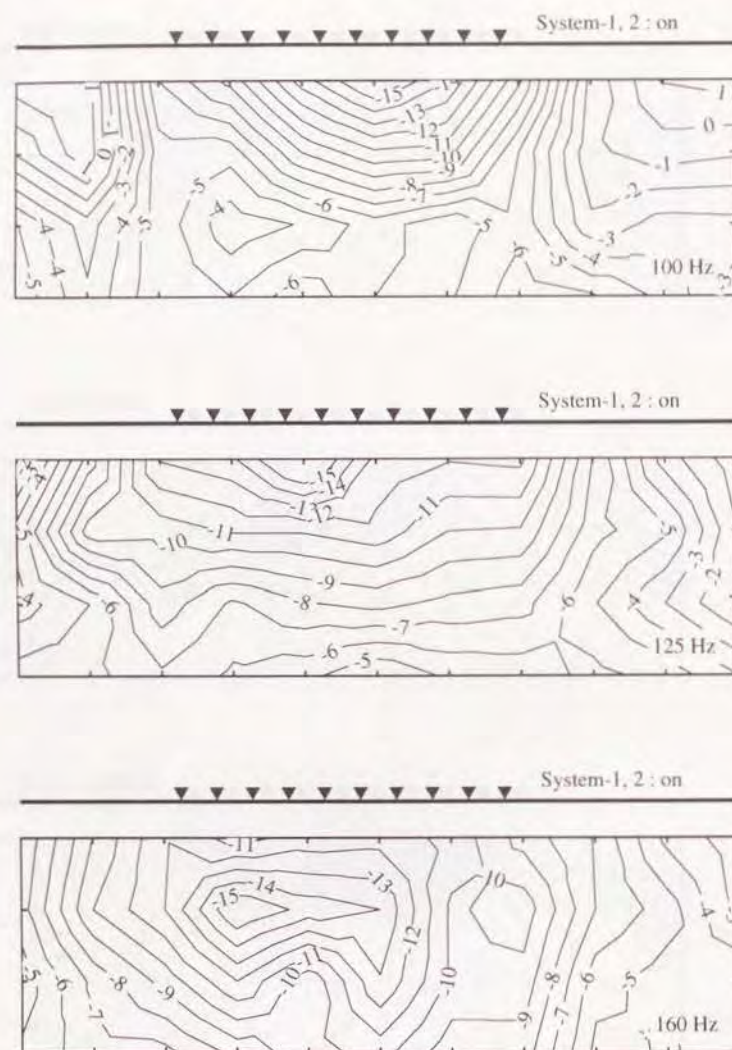


Figure 6.13: System-1, 2 同時に動作させた場合の音圧減衰量 (領域  $B: y = 2$  m)

Figs. 6.8 ~ 6.11 の結果によれば、それぞれ対応するシステムのほぼ中心で最大の効果が得られており、有効となる領域は、システムから離れるに従って、減衰量を低下させながら扇型に広がることがわかる。更に離れるに従って、一度制御が逆効果となる領域が現れる。この傾向は特に  $x$  方向に関して障壁に近い部分で顕著である。またその先の障壁の端に近い部分では、効果はゼロに向かうことが確認できる。ここで効果の絶対値としては System-2 の 6 チャンネルを動作させた場合の方がやや大きめである。

これに対して Figs. 6.12 - 6.13 の結果によると、効果は障壁の中心付近や System-2 付近を最大として、ほぼ左右対称に扇型状に広がり、逆効果となる領域は障壁の端において僅かに認められる程度である。二つのシステムが同時に動作した結果、一つの 10 チャンネルシステムが動作していることと等価の効果が得られ、結果的に制御が有効となる領域が拡大したものと考えられる。

次に、二つのシステムを同時に働かせた場合の Edge 上音圧分布を、Fig. 6.14 に示す。



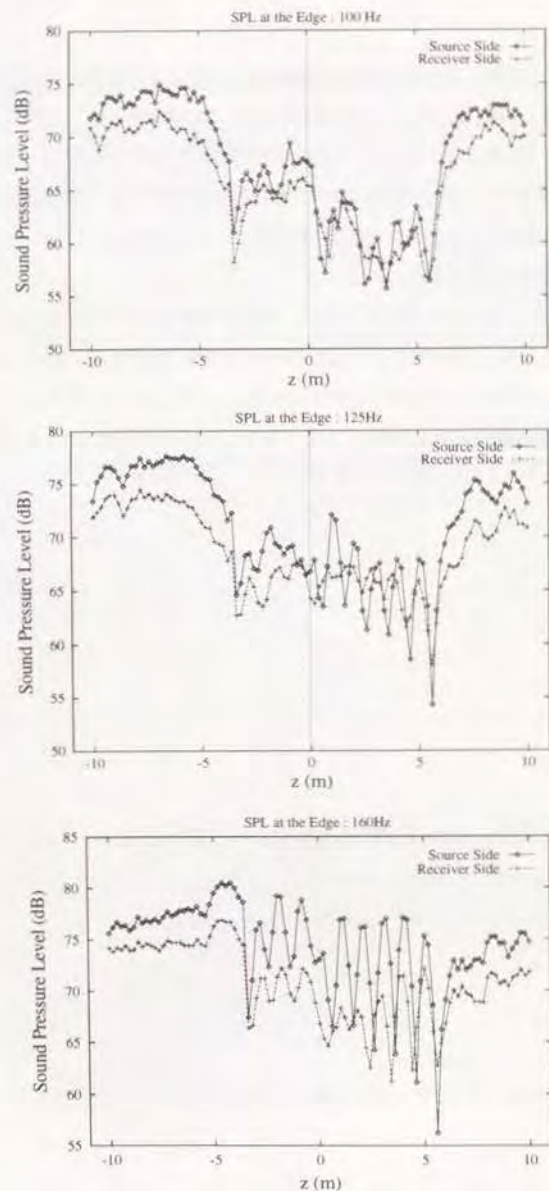


Figure 6.14: 制御が on の状態での Edge 上音圧レベル分布

結果によれば、キャンセルポイントにおいて音圧が急激に下がっており、音源側のみではなく受音側の Edge においても同様なディップが存在していることが確認出来る。また、System-1, 2 の間において音圧が急峻なピークを持つこともなく、Figs. 6.12・6.13 の制御効果で明らかなように、二つのシステムが、互いに悪影響を及ぼしあうことなく動作していることがわかる。キャンセルポイントにおける音圧レベル減衰の程度から、6 チャンネルの System-2 の方がより有効に働いていることが明らかであるが、これは Figs. 6.8・6.9, 6.10・6.11 の比較で得られた制御効果の差に対応している。この二つのシステム間の差は、適応フィルタのタップ長の差によるものと考えられる。

キャンセルポイントにおける音圧のディップと、それと隣あうピークの音圧レベルの差は、高い周波数ほど大きい。これは、第 3 章の 4.4 節で検討した通り、キャンセルポイントの間隔と、波長との相対的な関係によって生じているものと考えられる。しかし、いずれの周波数においてもキャンセルポイントの間隔は半波長以下であり、制御は有効に働く範囲である。また、システムが存在する領域のすぐ外では、音圧が上昇しており、更に外側に向かうに従って、再び音圧が減少している。この音圧の山が、Fig. 6.12 においてわずかに認められた制御が逆効果になる領域が存在する原因であると思われる。

次に制御の遠方での効果を調べる。Figs. 6.15, 6.16 に  $x=0 \sim 20$  m の範囲で、2 m ステップで測定した制御の効果を示す。図の番号 6.15, 6.16 は地面からの高さ 1 m, 2 m に対応しており、図中の 3 本の結果はそれぞれ  $z=-5$  m, 0, +5 m に対応している。いずれの  $z$  の値もシステムの存在する範囲、あるいはシステムの端から 50 cm 程度離れた場所であり、制御は測定点全てにおいて有効に働いている。

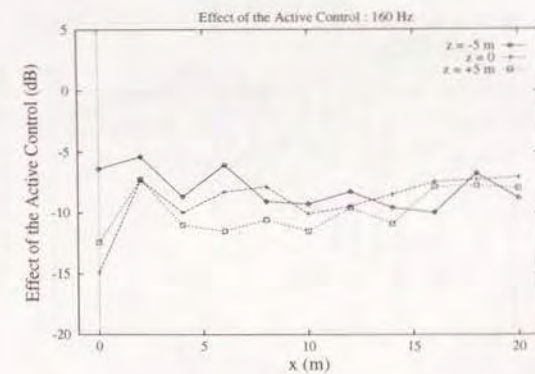
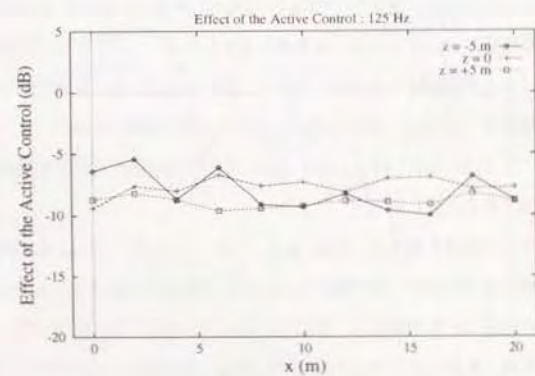
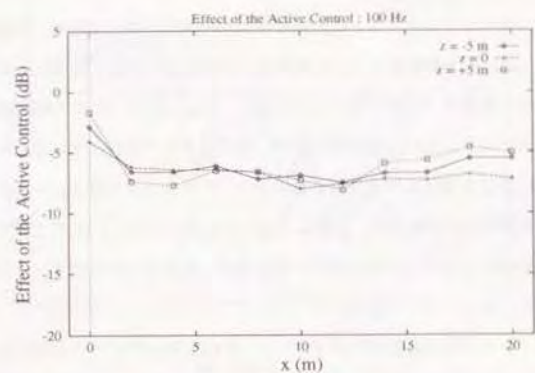


Figure 6.15:  $x = 0 \sim 20$  m までの音圧減衰量 ( $y = 1$  m)

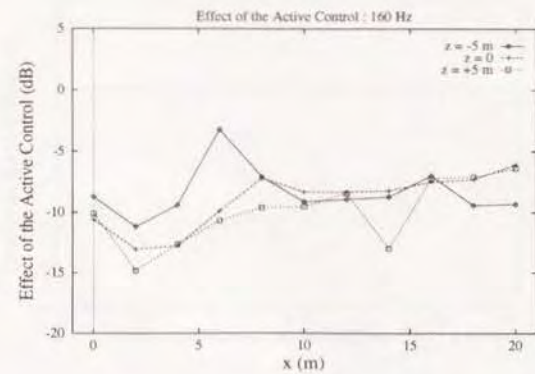
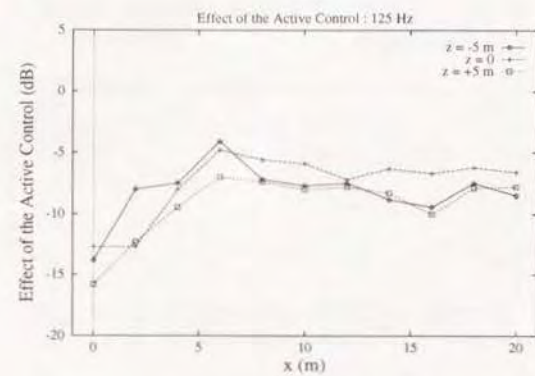
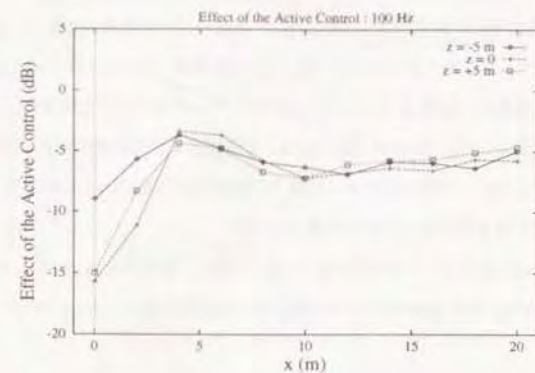


Figure 6.16:  $x = 0 \sim 20$  m までの音圧減衰量 ( $y = 2$  m)



Fig. 6.15 の 100 Hz, 125 Hz での結果以外は、障壁の近くで効果が大きく、障壁から離れて一度急に小さくなり、更に離れるに従って  $-6 \sim -8$  dB 程度に落ち着いている。この、一度制御効果が小さくなる現象は、領域 B において一つのシステムを動作させた場合に、 $z$  方向においても見られたものである。Fig. 6.15 の 100, 125 Hz で障壁近くでの効果が小さいのは、Fig. 6.6 (a) において示される様に、制御を行わない状態での障壁付近の音圧レベルが周りに比べて低いために、制御が有効に働き得なかったものと考えられる。

Fig. 6.17 に  $z = 0$  において  $x = 20$  m  $\sim$  80 m まで、また Fig. 6.18 に  $x = 50$  m において、 $z = -15$  m  $\sim$  50 m まで 5 m ステップで測定した結果を示す。

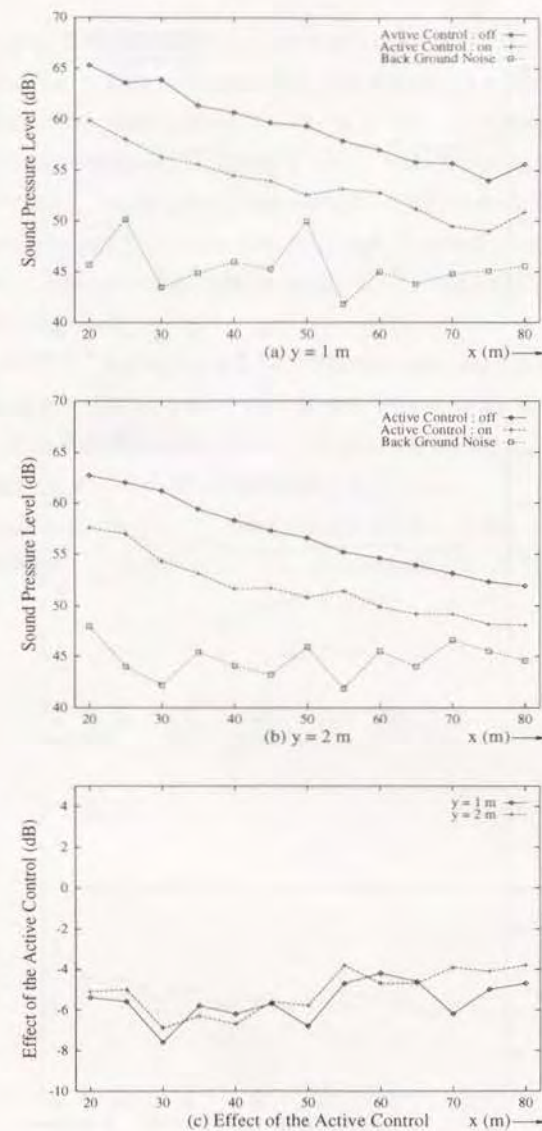


Figure 6.17:  $x = 20 \sim 80$  m までの音圧レベル分布及び音圧減衰量: 125 Hz 中心の 1/1 オクターブ分析結果

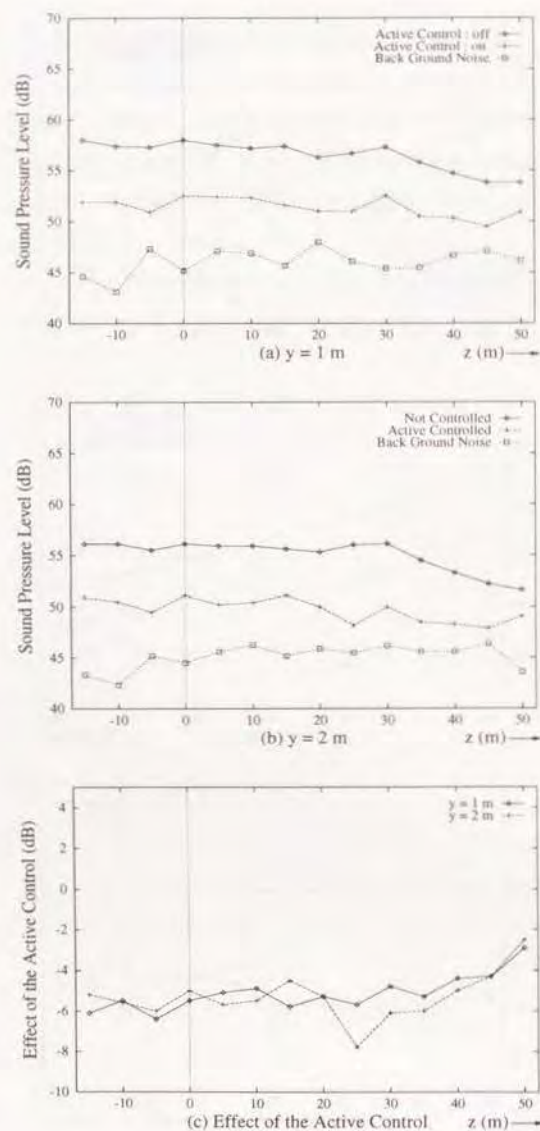


Figure 6.18:  $z = -15 \sim 50$  m までの音圧レベル分布及び音圧減衰量: 125 Hz 中心の 1/1 オクターブ分析結果

この場合は 125 Hz を中心周波数とする 1/1 オクターブバンドで測定したものである。(a) は地面からの高さ  $y = 1$  m, (b) が 2 m の結果であり, それぞれ図中の 3 本の結果は, 暗騒音, 制御 off の場合の音圧レベル, 制御 on 時の音圧レベルである。また, (c) は (a), (b) それぞれの結果から計算された制御の効果である。Fig. 6.17 によれば, 制御を行わない状態での音圧は, 距離と共に緩やかに減少し, 制御を on にした場合の音圧も, ほぼそれと平行に遷移していることが明らかである。制御の効果としては  $z = 50$  m 辺りまでは -6 dB 程度, それ以降は -4 ~ -5 dB 程度である。この特に 50 m 以降の領域での減衰量の低下は, 暗騒音との  $S/N$  低下によって生じているものと考えられる。

Fig. 6.18 においても, 同様に全ての測定点において制御は有効に働いており, やはり制御を on にした場合の音圧は, 制御 off の場合と平行に近い変化をしている。ここでも  $z = 30$  m 程度までは -5 ~ -6 dB 程度の効果が得られている。また 30 m 以降の領域については制御が off の場合の音圧が減少しており, それに伴って制御の効果も低下している。

参考として Figs. 6.17, 6.18 について, 暗騒音との  $S/N$  補正を行った場合, つまりエネルギー的に暗騒音の影響を差し引いた場合の音圧レベル, 及び制御効果を計算した。結果を Figs. 6.19, 6.20 に示す。



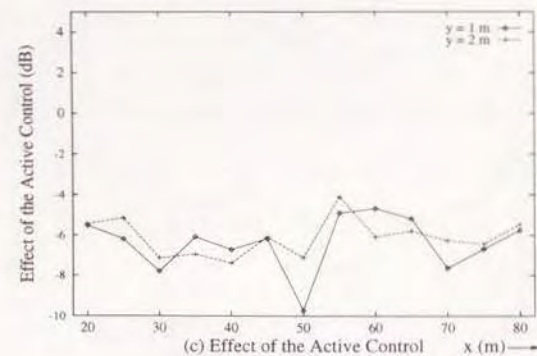
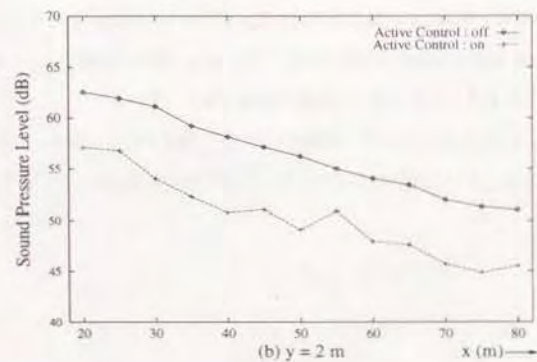
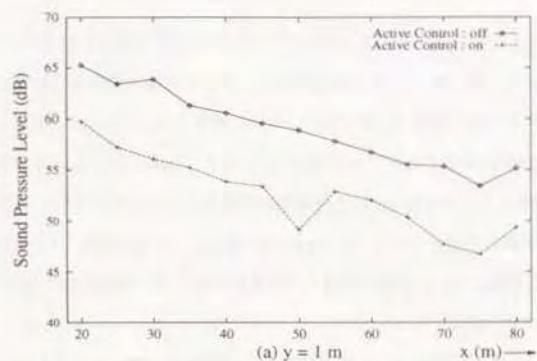


Figure 6.19:  $x = 20 \sim 80$  m までの音圧レベル分布及び音圧減衰量 (暗騒音補正後): 125 Hz 中心の 1/1 オクターブ分析結果

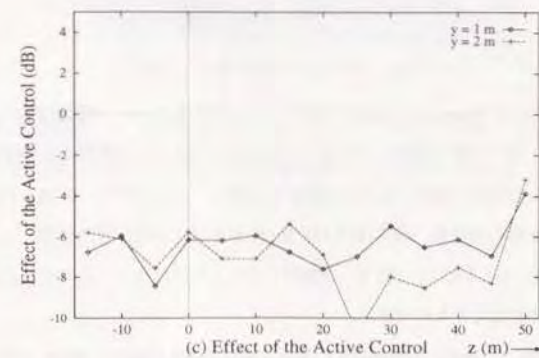
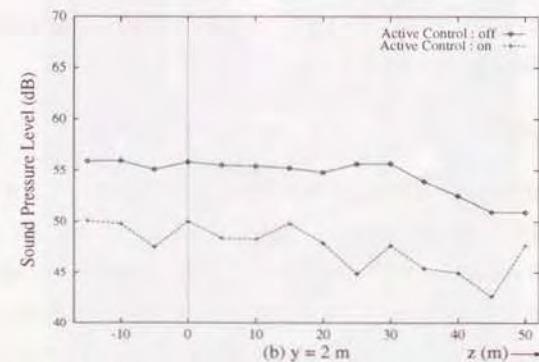
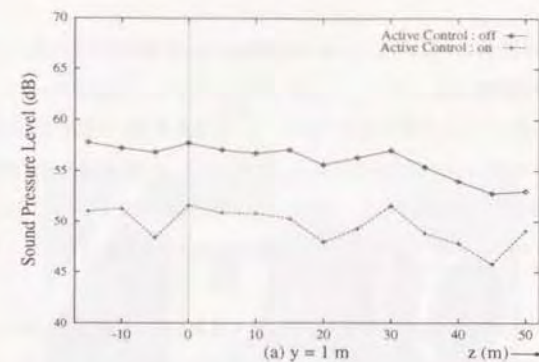


Figure 6.20:  $z = -15 \sim 50$  m までの音圧レベル分布及び音圧減衰量 (暗騒音補正後): 125 Hz 中心の 1/1 オクターブ分析結果

Figs. 6.17, 6.18 と同様に、(a) が  $y = 1 \text{ m}$ 、(b) が  $y = 2 \text{ m}$  の結果であり、(c) が (a)、(b) から求められる制御の効果である。

これによれば、 $\alpha$ 、あるいは  $\beta$  の値が大きくなっても、つまり障壁から離れても制御は安定して働いており、概ね  $-6 \text{ dB}$  以上の減衰が得られることがわかる。 $6 \text{ dB}$  の遮音量改善は騒音制御において非常に大きな意味を持つ値であり、前川チャートを用いた試算によると、例えば障壁から  $50 \text{ m}$  離れた位置における  $6 \text{ dB}$  の遮音量改善は、障壁の高さを約  $3 \text{ m}$  上昇させることと等価である。

障壁の近くにおいては制御が逆効果となるポイントも存在したが、遠距離における測定においては、全ての測定点において制御は有効に働くことが確認された。遠方から見て音源として働く障壁の Edge 近傍における音圧をキャンセルすることにより、あたかも音源自体の放射パワーが減少したことと同等の効果が得られているものと解釈できる。

#### 6.4 実験 2 の条件

続いて実音源を用いた実験を行う。用いた障壁は前節と同じものであるが、設置した場所は異なり、その土地（野菜畑）の大きさの関係から、長さを  $15.8 \text{ m}$  とした。また、用いた適応信号処理システムは前節の System-2 (6 チャンネル) である。サンプリング周波数、及び適応フィルタのタップ数も、それぞれ  $1 \text{ kHz}$ 、64 タップのままである。測定系や測定方法も実験 1 とほぼ同様であり、本節で結果として示す音圧レベル、及び制御の効果はすべて  $1/3$  オクターブ分析した結果である。

##### 6.4.1 騒音源について

ここでは、音源として Photo.6.1 に示すブロワー（ニチアス PF-S-7 型銅板製プレートファン）を用いた。これは工場での排気設備などに用いられるものである。送風機の部分は 8 枚の羽根で構成されており、この羽根の風切り音が主な騒音源である。このブロワーを  $15.6 \text{ r.p.s.}$  で回転させることで、その 8 倍の周波数、即ちほぼ  $125 \text{ Hz}$  の音を発生させ、音源信号とした。サンプリング周波数が  $1 \text{ kHz}$  であるので、 $125 \text{ Hz}$  が制御できる上限ではない。ここでは 2 次音源間隔との相対的な関係から決定したものである。

第 3 章 4 節で考察した様に、回折場の広い領域で減衰を得るためには Edge 上キャンセルポイント及び 2 次音源の間隔が、半波長以下である必要がある。ここでは測定出来る領域（障壁の長

さと同等の長さの領域）の出来るだけ広い領域で減衰を得ることを目的として、2 次音源の間隔を後述のように  $1 \text{ m}$  に設定した。それに伴い、波長が  $2 \text{ m}$  以上の周波数という意味で、騒音源信号を  $125 \text{ Hz}$  に設定した。

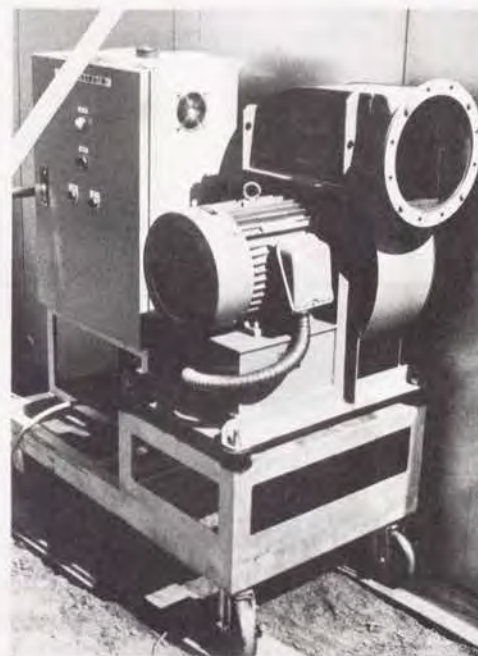


Photo.6.1: 実験に用いた騒音源（ブロワー）

障壁の Edge 上で観測した、音源信号のスペクトルを Fig. 6.21 に示す。これによれば、 $125 \text{ Hz}$  付近、及びその倍音成分に鋭いピークを持つ性質であることが明らかである。



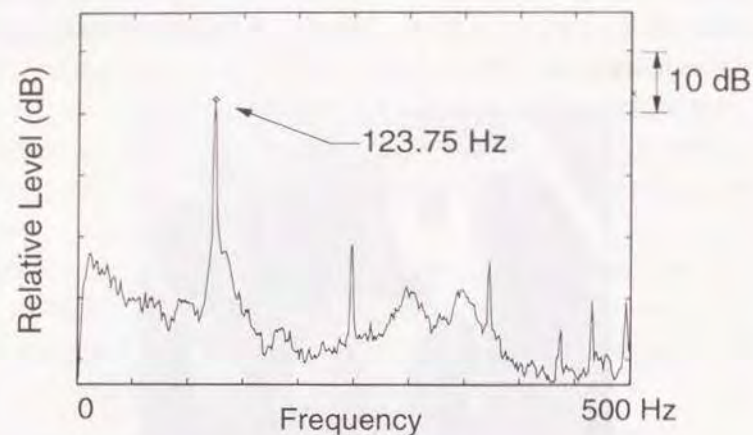


Figure 6.21: 障壁 Edge で観測された音源信号のスペクトル

#### 6.4.2 音源配置及び受音点

Fig. 6.22 に示すように、音源は障壁から 2.94 m の地面上に設置した。Edge からブロー吸い込み口中心までの距離は 3.15 m である。2 次音源は障壁の中心から左右対称に 3 チャンネルずつ、実験 1 と同様に 1 m 間隔で並んでいる。また、ここでは取り付け治具の関係から、2 次音源スピーカーは Edge 方向を向いている。Edge から 2 次音源までの距離は 0.5 m であり、ほぼ Edge と吸い込み口を結ぶ線上に配置した。また、エラーセンサーであるマイクロホンは各 2 次音源正面の、音源側の Edge に設置した。

受音点は、図中に示す通り制御効果をコンターで評価するための領域を  $3 \times 9$  点、2 m 間隔で、また障壁と垂直な方向に 1 m 間隔と 2 m 間隔で合計 3 本の直線を設定した。3 本でそれぞれ長さが異なるのは、周りに存在する建物（ビニールハウス等）との関係からであり、測定用のマイクを設置できる最大の距離まで設定したものである。受音点を記述するための座標系は、障壁の中心線を通り、障壁から 2 m の点を原点として設定した。なお、いずれの測定点においても地面からの高さ  $y = 1$  m と 2 m の双方を測定した。

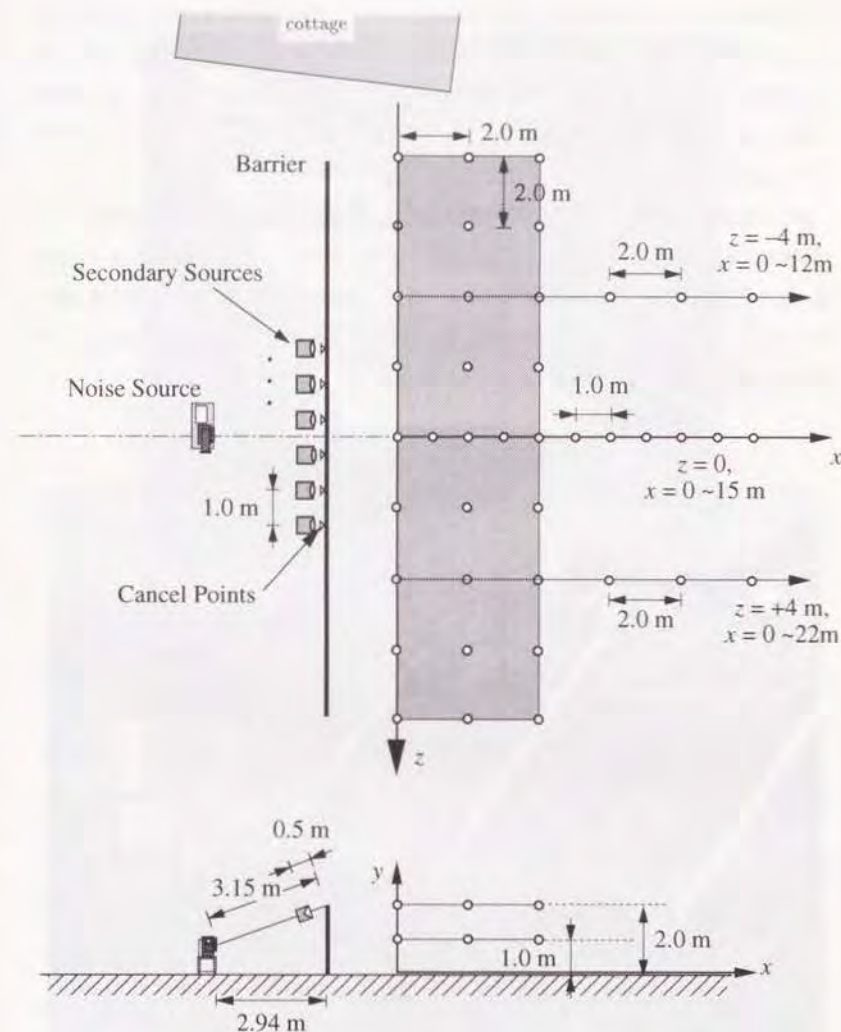


Figure 6.22: 音源位置及び受音点配置

実際の騒音源、2次音源設置の状況を Photo.6.2 に示す。写真には合計8台の2次音源が見られるが、実際には両端の2台を除いた6台が駆動している。なお、実験当日の気温は  $24^{\circ}\text{C}$  であり、風速  $6\sim 7\text{ m/s}$  と、やや強めの風が騒音源から障壁に向かう方向に吹いていた。そこで測定に際しては、風による雑音成分の影響を極力抑えるために、Photo.6.3に示すようなウインドスクリーン(50 mm 厚ウレタンフォーム)を設置した。

風による影響については、風自身が持つ雑音成分がエラーセンサーに混入する事以外にも、音速が変化することによる信号の振幅、位相変化などが考えられる。これらの要因がシステムの収束に及ぼす影響については、6.6 節で検討する。なお、本実験においては、風の影響を最小限にとどめることを目的として、風速が小さく、ある程度安定した状態でシステムを収束させ、そのまま適応処理を中断して(適応フィルタの係数を固定して)測定を行った。



Photo.6.2: 騒音源、2次音源の設置の様子

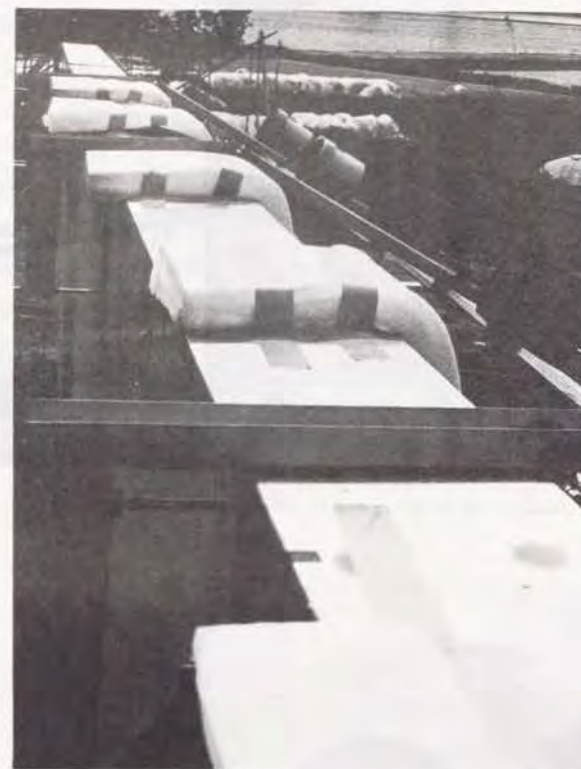


Photo.6.3: エラーセンサーに設置したウインドスクリーン

#### 6.4.3 音源信号の検出方法

騒音源信号をピックアップするノイズセンサーとして、ここではマイクロホンを用いる方法と、振動ピックアップをブロー自体に設置する方法を試みた。それぞれの設置状況を Photo.6.4. 6.5 に示す。いずれも、ブローの吸い込み口付近に設置している。



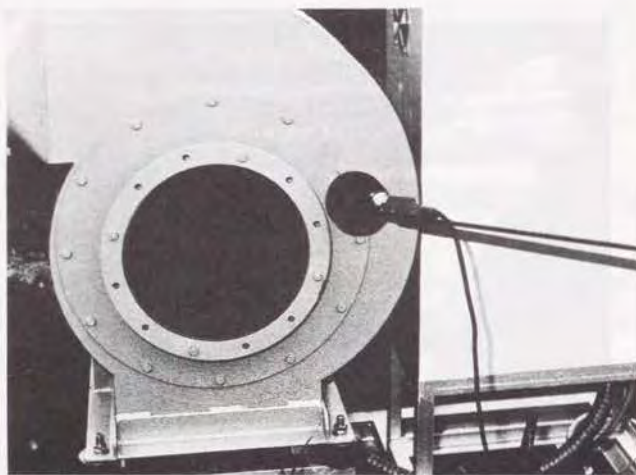


Photo6.4: 騒音信号のピックアップ：マイクロホンを用いた場合

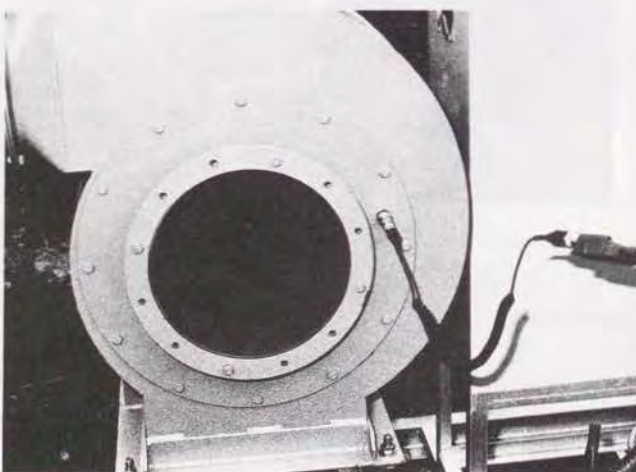
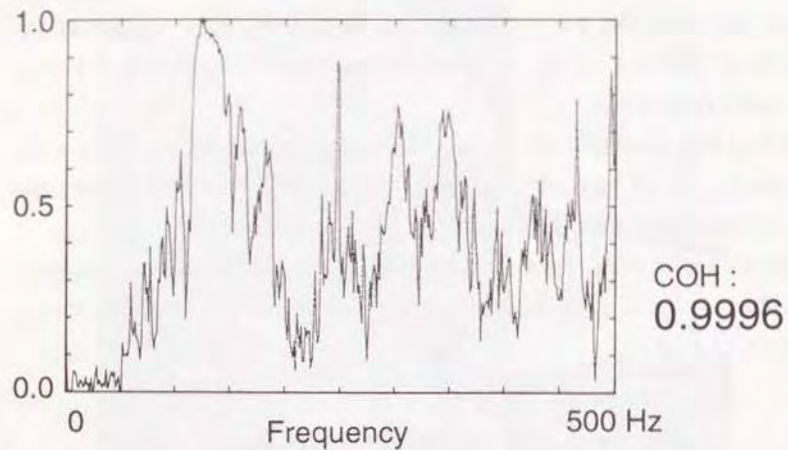


Photo6.5: 騒音信号のピックアップ：振動ピックアップを用いた場合

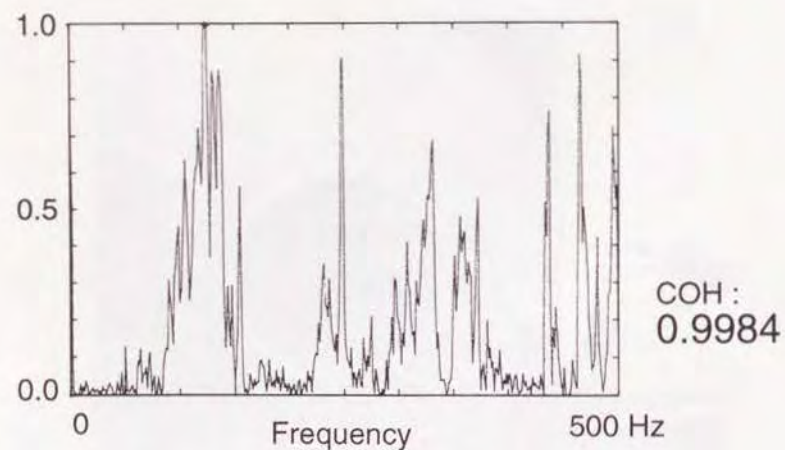
それぞれの場合に、ノイズセンサーから得られた信号と、Edge上エラーセンサーの位置で検出される信号とのコヒーレンシーを測定した。なお、振動ピックアップからの出力信号は速度を用いている。用いたエラーセンサーは、隔壁の中心に近い $z = 0.5 \text{ m}$ の位置に設置したものである。結果を Fig. 6.23に示す。

結果によれば、125Hz付近において、マイクロホンの場合：0.9996、振動ピックアップの場合：0.9984 という1に非常に近い値を示しており、この場合はいずれの方法でも音源信号と相関の高い信号が検出可能であることが明らかである。

そこで本実験においては、外來騒音の影響を受けず、しかも2次音源との間で不安定な閉ループを構成することがない、等の理由から、騒音信号のノイズセンサーとして振動ピックアップを採用することとした。



(a) ノイズセンサーにマイクロホンを用いた場合

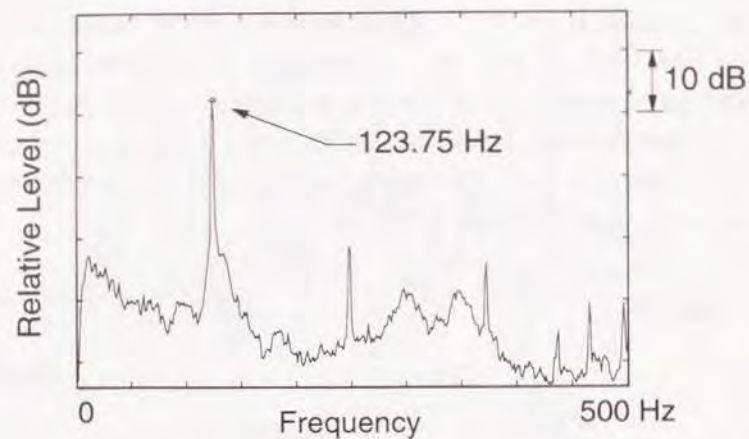


(b) ノイズセンサーに振動ピックアップを用いた場合

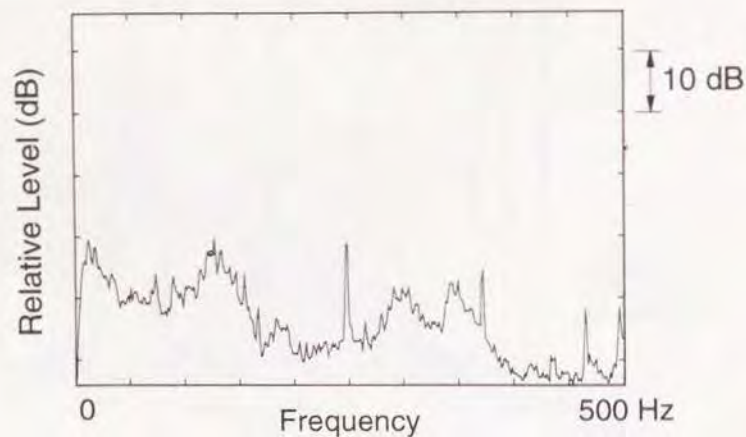
Figure 6.23: ノイズセンサー出力とエラーセンサー出力信号のコヒーレンシー

この場合に、Edge 上キャンセルポイントの一つで観測される音圧を Fig. 6.24 に示す。(a) は適応システム off の場合であり、(b) は制御 on の場合である。図の縦軸は相対的な音圧レベルであり、10 dB/div である。結果によると、(a) で最も大きいピークである 125 Hz 近辺の成分は効果的に減衰させられており、そのレベル差は約 25 dB 程度である。その他の倍音成分についてはほとんど減衰が見られない。この様に制御の効果がある一定のレベル以上得られないことの原因としては、適応フィルタのタップ数が充分でないことや、外來騒音、あるいは風の影響など様々なことが考えられる。詳しくは 6.6 節で考察する。





(a) 制御 off の状態



(b) 制御 on の状態

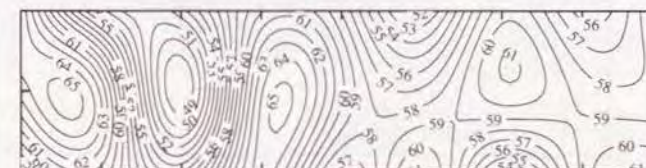
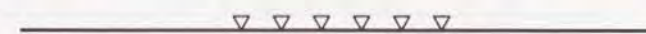
Figure 6.24: キャンセルポイントにおける制御 on, off 時の音圧レベル

## 6.5 実験 2 の結果及び考察

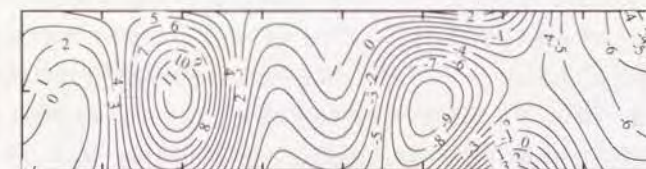
### 6.5.1 障壁が有限長であることの影響及びその対策について

実験 1 においては、障壁の長さが 20 m であり、更に近くに反射体となるものも存在しなかったことから、障壁横側からの回折波の影響は無視できるものとして特に考察を行わなかった。本実験においては障壁の長さも 15.8 m と短く、更に建物が障壁近くに存在することもあり、この影響を無視することは出来ないものと考えられる。そこで、ここでは障壁の端に騒音源を取り囲む形で付加的な障壁を設置し、制御をより有効に働かせることを試みた。

まず何も対策を講じない状態で測定を行った。結果を Figs. 6.25, 6.26 に示す。

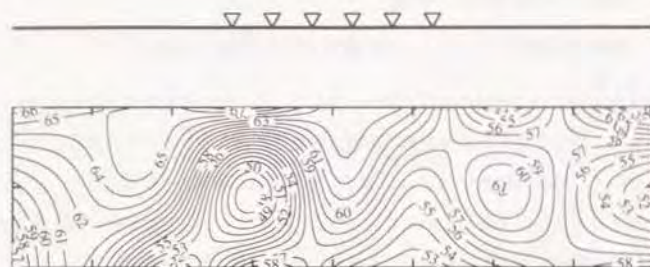


(a) Sound Pressure Level (System : off)

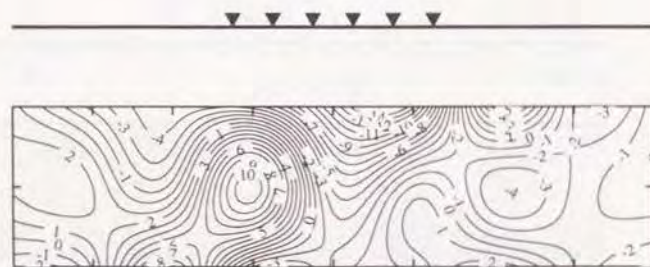


(b) Effect of the Active Control

Figure 6.25: 音圧レベル分布、及び制御による音圧減衰量 - 125 Hz 中心の 1/3 オクターブ分析結果 - (横からの回折音に対して対策をしなかった場合) :  $y = 1$  m



(a) Sound Pressure Level (System : off)



(b) Effect of the Active Control

Figure 6.26: 音圧レベル分布, 及び制御による音圧減衰量 125 Hz 中心の 1/3 オクターブ分析結果 - (横からの回折音に対して対策をしなかった場合):  $y = 2$  m

それぞれ  $y = 1$  m,  $2$  m の結果であり, (a), (b) は制御を行わない状態での音圧レベル分布, 制御の効果としての音圧減衰量分布に対応する. Fig. 6.25 (a) によれば横からの回折波との干渉によると思われる, 大きなピークディップが見られる. また (b) では (a) のディップに対応した位置で, 減衰量が小さい, あるいは音圧レベルが上昇する結果となっており, 制御が領域全体で有効に働いているとは言い難い状況である. これは Fig. 6.26 においても同様であり, (a) において見られる, 中央やや左の大きなディップの位置では, 制御によって音圧が 10 dB 以上上昇している.

この場合の制御が off, on それぞれの状態での Edge 上音圧レベル分布を Fig. 6.27 に示す. 横軸の a~x は, 図中に示す Edge 上の位置に対応する.

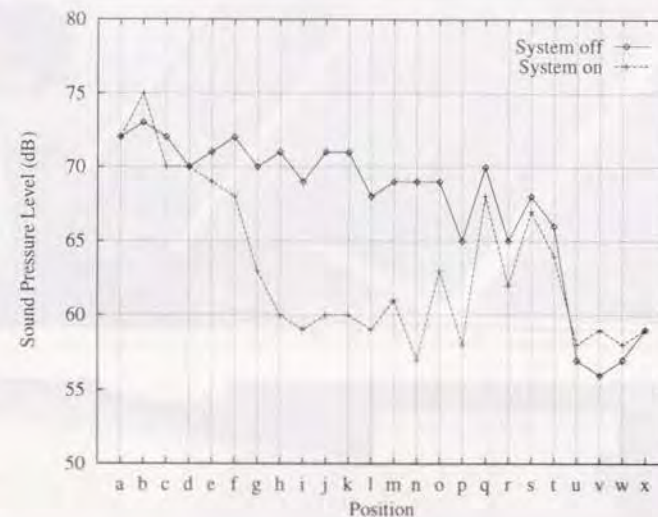
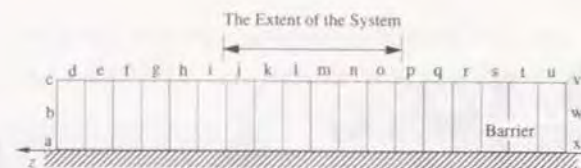


Figure 6.27: Edge 上の音圧レベル分布 (125 Hz 中心 1/3 オクターブ分析結果)

結果によれば, a ~ e, q ~ t の部分で, 制御 on の状態でも off の場合と同等の音圧レベルであり, i ~ p の System が存在する領域と比較して 5 ~ 10 dB ほど音圧が高くなっている. この部分が制御の効果に影響を及ぼしているものと考えられる.

そこで, 対策として Photo. 6.6 に示す様に騒音源を取り囲む形で, 付加的な障壁を取り付ける. これによって, 騒音源から障壁の横の部分へ回折してくる波は, 二つの Edge を通過せねばならず, 大幅なレベル減衰が期待できる.



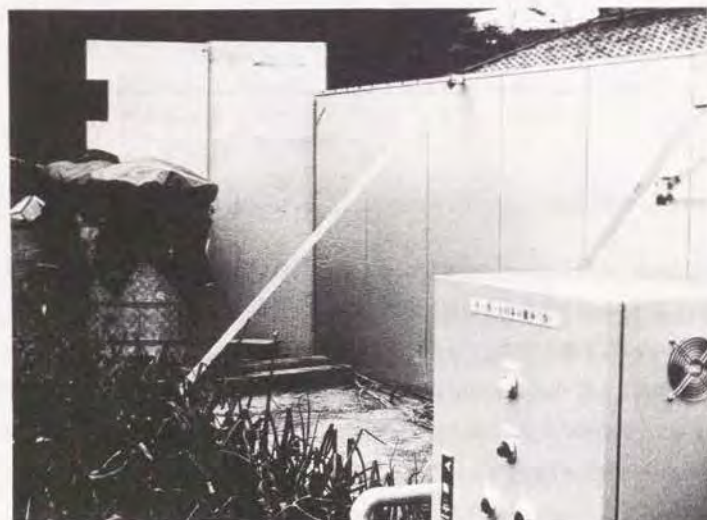
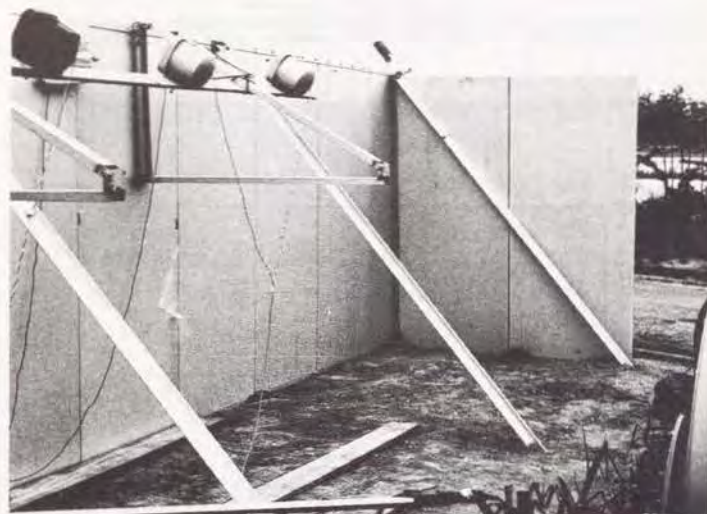
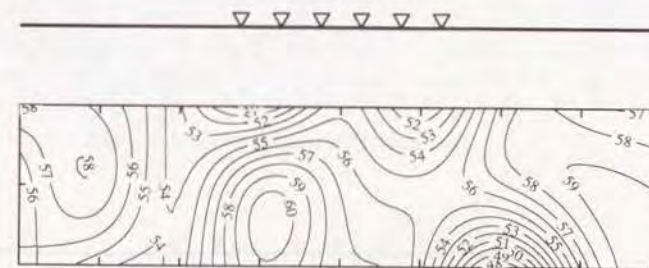


Photo6.6: 音源を囲む形で設置した付加的な障壁

対策を行った後での、音圧レベル分布、及び制御による音圧減衰量を Figs. 6.28, 6.29 に示す。それぞれ  $y = 1 \text{ m}$ ,  $2 \text{ m}$  に対応しており、(a) は制御 off の状態での音圧レベル、(b) は制御効果である。



(a) Sound Pressure Level (System : off)



(b) Effect of the Active Control

Figure 6.28: 音圧レベル分布、及び制御による音圧減衰量 - 125 Hz 中心の 1/3 オクターブ分析結果 - (横からの回折音に対して対策を行った場合):  $y = 1 \text{ m}$

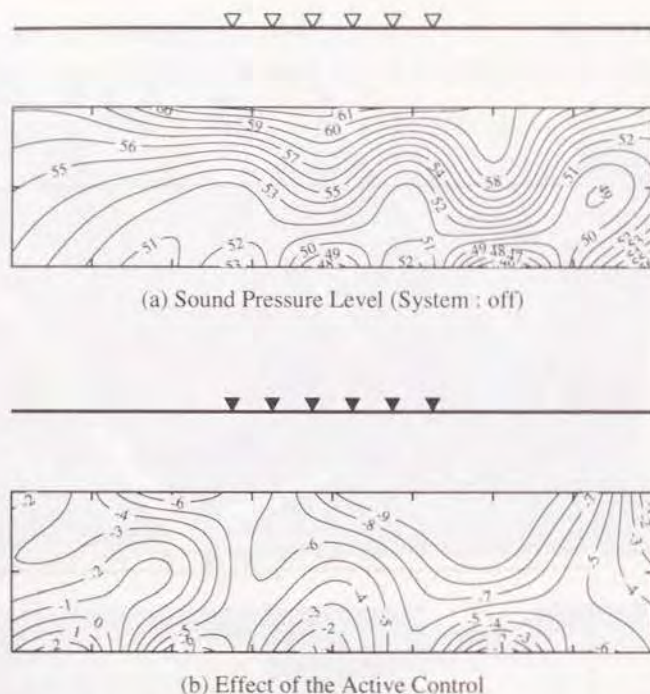


Figure 6.29: 音圧レベル分布, 及び制御による音圧減衰量 125 Hz 中心の 1/3 オクターブ分析結果 - (横からの回折音に対して対策を行った場合):  $y = 2$  m

Fig. 6.28 によれば, Fig. 6.25 と比較してピークディップが抑えられていることが明らかであり, それに伴って (b) の制御効果も安定し, 領域の大部分で有効な減衰が得られている. Fig. 6.29 では, 付加的な障壁の効果がより顕著である. 障壁の中心付近で最大のレベルが得られ, 障壁から離れるに従ってレベルが緩やかに減少する傾向が見られる. 領域の右側でやや乱れが見られるが, これは隣接する倉庫の壁面からの反射音との干渉で生じているものと考えられる. またこの場合も制御効果は安定しており, 大部分で  $-3 \sim -9$  dB 程度の減衰が得られている.

この様に, 実音源に対して能動制御を適用する際に, 障壁の長さが充分でないなど, Edge 以外からの寄与が無視できない場合にも, 音源を囲む形で付加的な障壁を設置することなどの対策でその影響を低減出来ること, またそれに伴って制御効果を増大出来ることが明らかとなった.

## 6.5.2 遠方受音点での制御効果

続いて, 上述の対策を施した状態において, 障壁と垂直な方向に設定した受音点での制御効果を調べる. まず, 障壁正面の原点から  $x = 0 \sim 15$  m まで, 1 m 間隔で測定した結果を Fig. 6.30 に示す. (a), (b) は  $y = 1$  m, 2 m に対応し, 図中の 3 本の結果は, 制御が off の場合の音圧レベル, on の場合の音圧レベル, 及び暗騒音に対応する. また (c) は両者から求めた制御の効果である.



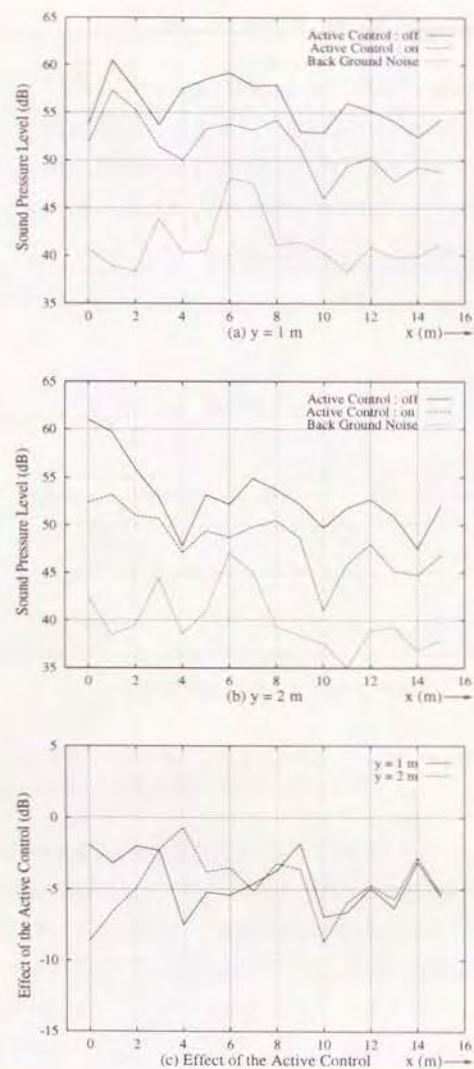


Figure 6.30:  $x = 0 \sim 15 \text{ m}$  までの音圧レベル分布, 及び音圧減衰量 - 125 Hz 中心 1/3 オクターブ分析結果 -;  $z = 0$

結果によれば, 制御 *off* の状態での音圧は, 若干のピークディップを示し, 制御 *on* 時の音圧もほぼそれと平行に推移している. これは  $y = 1 \text{ m}, 2 \text{ m}$  双方とも同じ傾向であり, また Fig. 6.30 の制御効果では最大で  $-8 \text{ dB}$  程度, 平均して  $-5 \text{ dB}$  程度の減衰が得られている.

Fig. 6.31 に  $z = -4 \text{ m}$ , Fig. 6.32 に  $z = +4 \text{ m}$  での結果を示す. ここでは制御 *off* 時の音圧と, *on* 時の音圧のみを示している. なお,  $z = -4 \text{ m}$  では  $x = 0 \sim 12 \text{ m}$  まで,  $z = +4 \text{ m}$  では  $x = 0 \sim 22 \text{ m}$  まで, それぞれ  $2 \text{ m}$  間隔で測定している. 同様に (a), (b) は  $y = 1 \text{ m}, 2 \text{ m}$  に対応し, また (c) は両者から求めた制御の効果である.

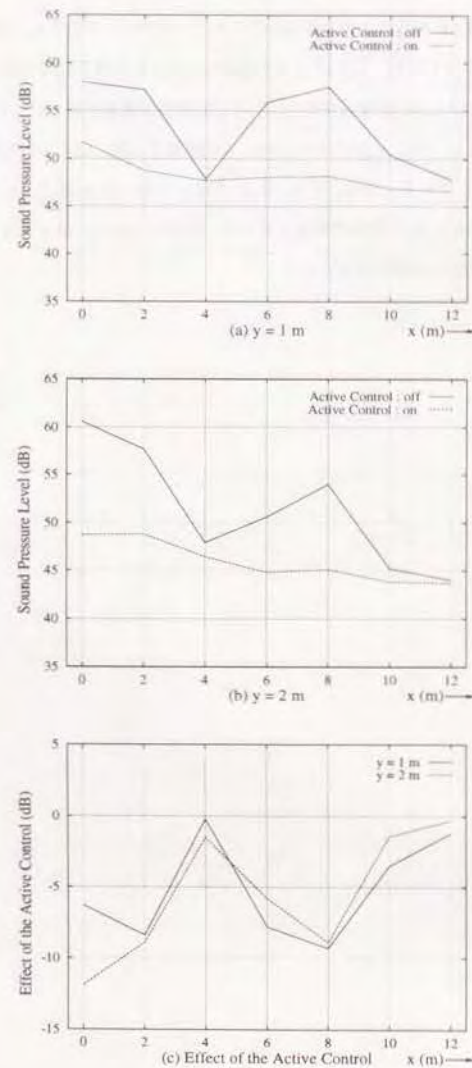


Figure 6.31:  $x = 0 \sim 12$  m までの音圧レベル分布, 及び音圧減衰量 - 125 Hz 中心 1/3 オクターブ分析結果 -  $z = -4$  m

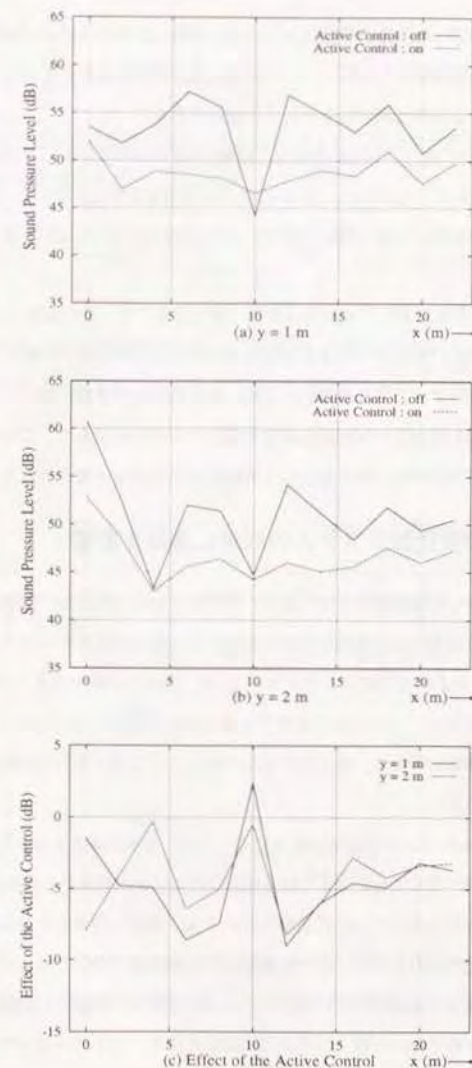


Figure 6.32:  $x = 0 \sim 22$  m までの音圧レベル分布, 及び音圧減衰量 - 125 Hz 中心 1/3 オクターブ分析結果 -  $z = +4$  m



Fig. 6.31によれば制御 on の場合の音圧レベルは、制御 off 時の音圧レベルのピークを抑える形で得られており、制御効果としては 0 ～ -10 dB 近辺の間を変動している。元々音圧レベルの低い場所では、大きな制御効果が得られにくい傾向である。

この傾向は Fig. 6.32においても同様であり、制御が off の時の音圧レベルが低い点では、制御効果がほとんど認められず、(a) の  $x = 10$  m の点では逆効果が得られている。しかし (c) によれば、そのほかの点では制御は有効に働いており、平均して -3 ～ -5 dB 程度の減衰量が得られている。

以上の結果から、実音源に対しても制御は有効に働き得ること、また実験 1 と同様、制御が off の状態で音圧レベルが高い点ほど、大きな制御効果が得られる傾向などが明らかとなった。なお本実験では、キャンセルポイントを設置した Edge からの寄与が音場に対して支配的となるように、障壁の横に騒音源を囲む形で付加的な障壁を設置する方法を試みた。これは現実的な応用において、障壁の長さが充分でない場合などには有効な方法であると考えられる。

## 6.6 風や気温の変化がシステムの収束に及ぼす影響

適応信号処理を導入して能動制御を行う場合、システム収束の程度は、制御の効果を直接左右するものである。第 4 章で行った実験室実験においては、各 2 次音源からエラーセンサーまでの伝達関数の予測誤差、いわゆるモデリングエラー [1] や、適応フィルタのタップ長、またステップサイズパラメータ  $\alpha$  などが、この収束に影響する主な要因であると考えられる。本章における実験の様な屋外での制御においては、更に風や気温の変化による騒音源信号の振幅、位相の変動をも考慮しなければならない。

実験で用いた Filtered-x LMS アルゴリズムにおいては、2 次音源とエラーセンサー間のモデリングエラーが位相で  $90^\circ$  近くても、つまり打ち消しのために 2 次音源から放射される音の位相が、本来放射されるべきものと比べて  $90^\circ$  近くずれていても、収束し得ることは知られている [2, 3]。しかし騒音源から放射された信号が、その伝搬途中で位相変動を受けた場合のアルゴリズムの振る舞いについては、あまり議論されていない。ちなみに実験 2 で測定中に観測された風は、風速 6 ～ 7 m/s とやや大きめであったが、システムは確実に収束し、エラーセンサーにおける音圧がほぼ 25 dB 程度減少することが確認された。

ここでは、単純なモデルとして風によって生じる擾乱は音速の変化のみと仮定し、それに伴う騒音源信号の位相変化が、適応アルゴリズムの収束にどのように影響するかを数値シミュレーション

によって検討する。

### 6.6.1 問題のモデル化

まず、実験 2 と同様な位置関係を考え、Fig. 6.33 のように問題をモデル化する。1 次音源は障壁 Edge から 3 m の距離にあり、

$$\begin{aligned} x(n) &= \frac{\cos(\omega n - kr)}{kr} \\ \omega &= \frac{2\pi f}{f_s} \end{aligned} \quad (6.1)$$

で表される  $f=125$  Hz の正弦球面波を放射しており、2 次音源は Edge から 0.5 m の距離に、1 m 間隔で 6 個存在すると仮定する。 $f_s$  はサンプリング周波数であり、ここでは 1 kHz である。

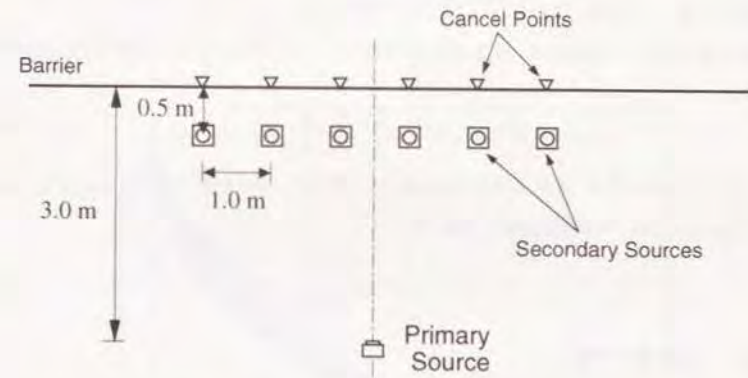


Figure 6.33: 風による音速の変化がアルゴリズムに及ぼす影響をシミュレートするための音源配置モデル

以下信号はすべてデジタルとして扱い、 $n$  はサンプルの番号である。このとき、Edge 上の  $l$  番目のキャンセルポイントで観測される音圧  $e_l(n)$  は、 $r_l$  を 1 次音源との距離として (6.2) 式で

表される。

$$e_l(n) = \frac{\cos(\omega n - k' r_l)}{k' r_l} + \sum_{m=1}^6 \sum_{i=0}^{I-1} w_{mi} \sum_{j=0}^{J-1} C_{lmj} x(n-i-j) \quad (6.2)$$

ここに、 $C_{lmj}$  は  $m$  番目の 2 次音源と  $l$  番目のキャンセルポイント間のインパルスレスポンスの  $j$  番目の係数であり、これは風による影響を受けないものと仮定する。また、 $w_{mi}$  は  $m$  番目の 2 次音源が持つ適応フィルタの  $i$  番目の係数である。ここでは簡単のため地面からの反射波の影響は考慮していない。ちなみに、適応フィルタのタップ数、及び 2 次音源とキャンセルポイント間のインパルスレスポンスの長さ  $I, J$  は、純音を仮定したシミュレーションであるためいずれも 2 でモデル化した。

$k'$  は風による音速の変化を考慮に入れた波数であり、 $c_0$  を通常の音速、 $\Delta c$  を音速の変化分として以下で与えられる。

$$k' = \frac{\omega}{c_0 + \Delta c} \quad (6.3)$$

$$c_0 = 331.5 + 0.61t$$

温度  $t$  は  $20^\circ\text{C}$  を仮定している。

また適応フィルタの係数は、(6.2) 式の  $e_l$  を用いて、以下に再掲するアルゴリズムで逐次更新される。

$$w_{mi}(n+1) = w_{mi}(n) - \alpha \sum_{l=1}^6 e_l(n) \sum_{j=1}^J C_{lmj} x(n-i-j) \quad (6.4)$$

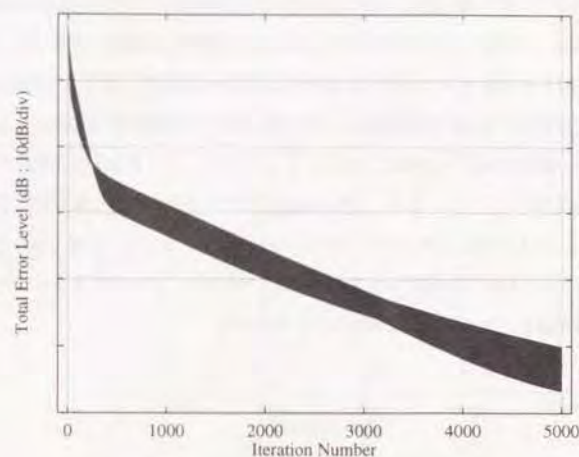
これらの条件の下で、(6.5) 式で表される各エラーセンサーでの音圧の二乗和 (Total Error Level : T.E.L.) を求め、その収束の様子を調べる。

$$T.E.L.(n) = 10 \log_{10} \left\{ \sum_{l=1}^6 e_l^2(n) \right\} \quad (6.5)$$

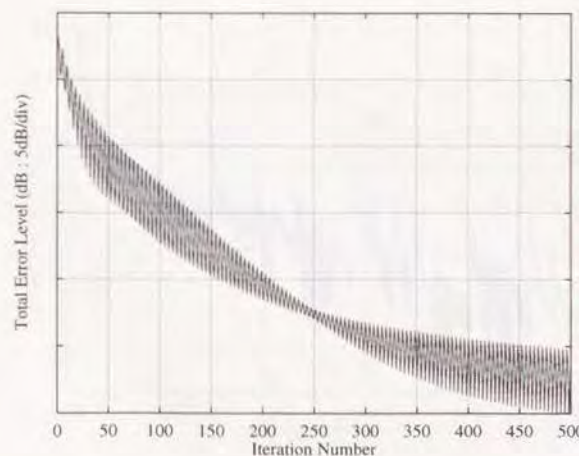
## 6.6.2 結果及び考察

まず、音速の変動がない場合の収束の様子を Fig. 6.34 に示す。横軸はサンプルの番号であり、縦軸は一目盛り 10 dB の相対的なレベルである。

これによれば、システムは安定して収束しており、5000 回の係数更新で約 50 dB 程度の減衰が得られている。ちなみに、(6.4) 式のステップサイズパラメータ  $\alpha$  は 0.05 に設定している。結果が太い線に見えるが、実際は (b) に示すように振動しているものである。(b) は繰り返し回数 0 ~ 500 回までを拡大したものである。



(a) T.E.L. の収束の様子

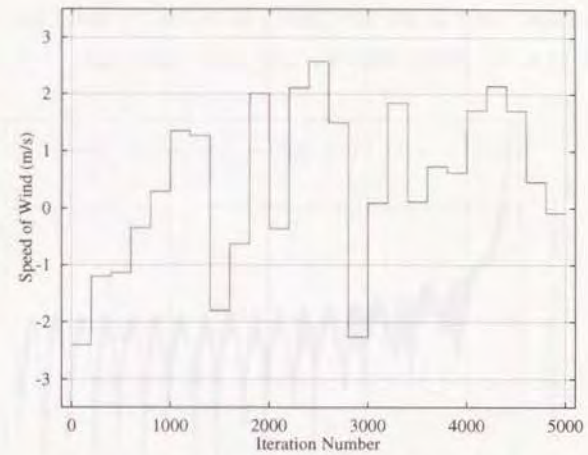


(b) Iteration Number 0 ~ 500 を拡大した場合

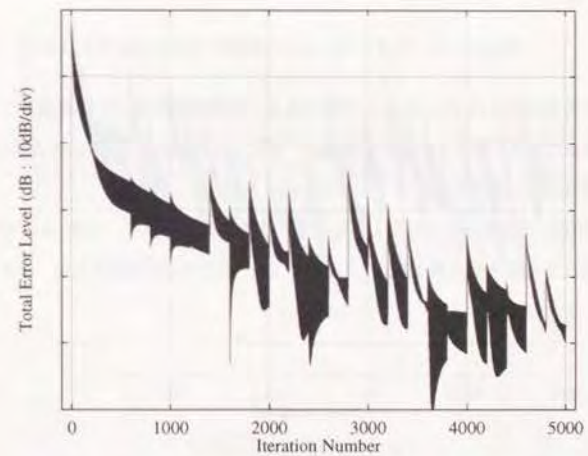
Figure 6.34: 風による音速変動がない場合の収束の様子



続いて  $\Delta c$ 、つまりは風速が、最大  $\pm 3$  m/s で 0.2 秒毎にランダムに変動する場合を計算した。この変動幅は、一番端の 2 次音源において  $\pm 0.025\pi$  程度の位相変化に相当する。風速の変動の様子と共に、結果を Fig. 6.35 に示す。この場合は収束の初期段階（繰り返し回数 0~1000 回程度）まではほぼ安定して 30 dB 程度減衰し、その後位相変化の影響が顕著にみられるようになる。動向としては、音速が変化する瞬間に *T.E.L.* が一度上昇し、0.2 秒間の定常状態の間に収束に向かうという傾向を示している。なお、実際の風速変化は本モデルの様に離散的に生じるものではないので、Fig. 6.34 の様に急峻なピークがいくつも生じることはないと考えられる。しかし、これがアルゴリズムの収束に影響を与えることは明らかであり、また特にあるレベルだけ減衰してからその影響が顕著に表れることは興味深い結果である。



(a) 0.2 秒毎に変動する風速



(b) *T.E.L.* の収束の様子

Figure 6.35: 風速が  $\pm 3$  m/s の範囲でランダムに変動した場合

参考として風速、つまり  $\Delta c$  が正弦的に変動する場合を計算した。結果を Fig. 6.36 に示す。変動の周波数は 2 Hz としており、振幅は Fig. 6.35 と同じ 3 m/s である。

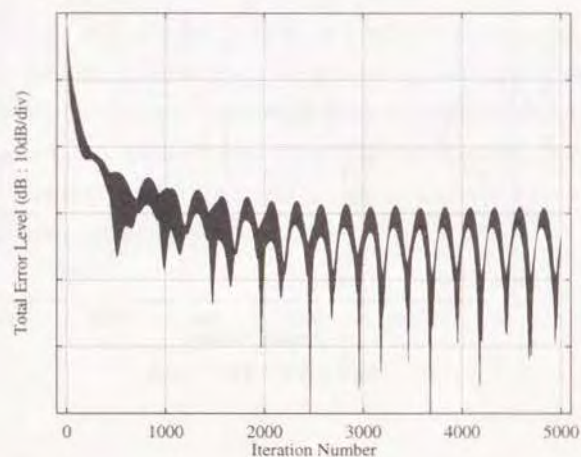
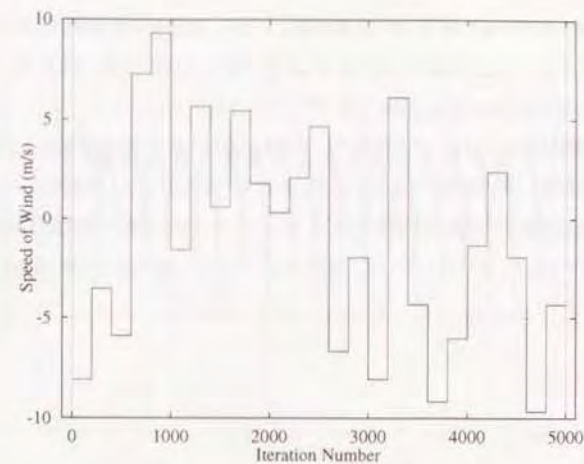


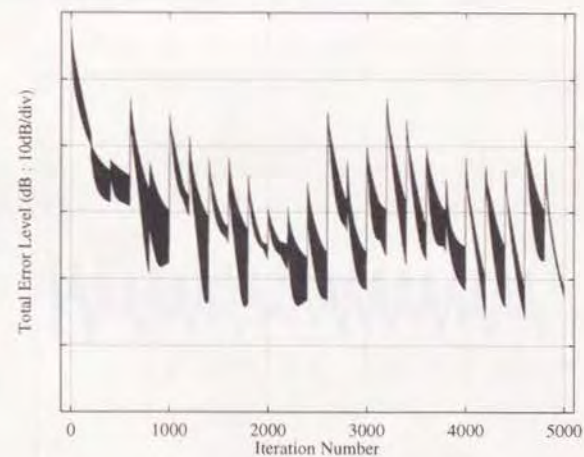
Figure 6.36: 風速が  $\pm 3$  m/s の範囲で正弦的に変動した場合

この場合も傾向的には Fig. 6.35 と同様であり、初期段階で 30 dB 弱減衰した後に、風速変化の影響が表れている。またこの場合は風速が一定となる期間がないため、 $T.E.L.$  は振動的な振る舞いを見せながら、非常にゆっくりと収束へ向かっている。

次に、実験 2 で観測されたものよりもやや大きめの変動として、風速 ( $\Delta c$ ) が  $\pm 10$  m/s でランダムに変化する場合を計算した。これは  $\pm 0.09\pi$  程度の位相変動である。結果を Fig. 6.37 に示す。



(a) 0.2 秒毎に変動する風速



(b)  $T.E.L.$  の収束の様子

Figure 6.37: 風速が  $\pm 10$  m/s の範囲でランダムに変動した場合



この場合は初期段階で 20 ~ 25 dB 程度減衰した後、風速変化の影響を大きく受けていることが明らかである。また、風速が一定である 0.2 秒の間には収束に向かうものの、風速が変化した瞬間の *T.E.L.* の変化は、Fig. 6.35 に比べてやや大きめである。

収束の初期段階において、どの程度のレベルまで減衰することが出来るかは、風速、つまり位相の変動の振幅、及び周期によるものと考えられる。参考として、風速が  $\pm 10$  m/s の範囲で正弦的に変化した場合の収束の様子を Figs. 6.38, 6.39 に示す。変動の周波数は Fig. 6.38 で 2 Hz、Fig. 6.39 で 0.2 Hz を仮定している。また Fig. 6.39 では繰り返し回数 50000 回まで計算している。

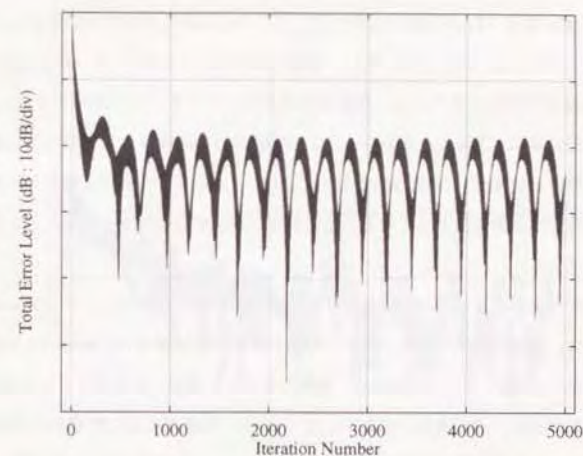


Figure 6.38: 風速が  $\pm 10$  m/s の範囲で正弦的に変動した場合 : 2 Hz

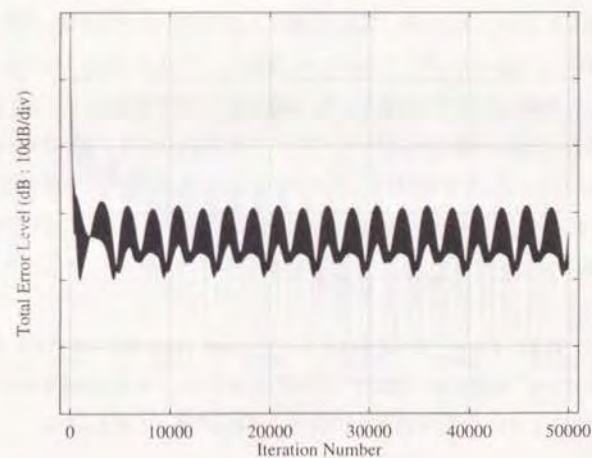


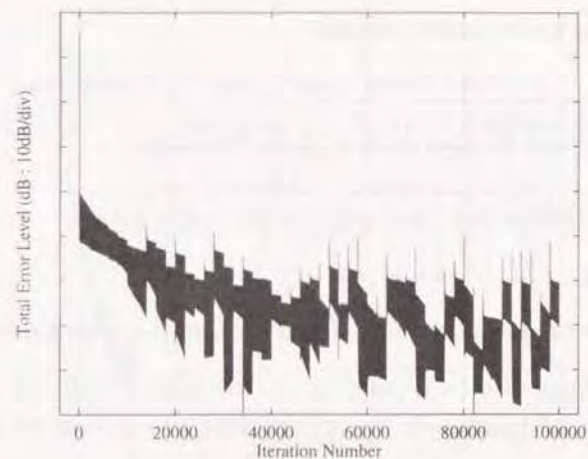
Figure 6.39: 風速が  $\pm 10$  m/s の範囲で正弦的に変動した場合 : 0.2 Hz

Fig. 6.38 においては、Fig. 6.36 と比較して、明らかに減衰するレベルが減少しており、約 20 dB 弱である。一方、Fig. 6.39 においては、振幅が  $\pm 10$  m/s であっても、Fig. 6.36 とほぼ同じ 30 dB 程度の減衰が達成されている。変動の振幅が大きくても、その周期がゆっくりであれば、ある程度の減衰は確保できることがわかる。この傾向は、後述するように適応信号処理における係数更新の周期と、位相変化の周期の相対的な関係から決定されるものと考えられる。この結果から、気温の変化など非常にゆっくりとした変動は、システムの収束に直接大きな影響を与えないことが予想される。

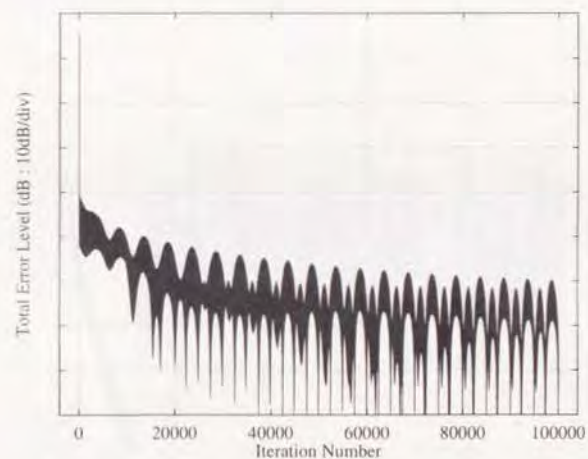
以上の結果から、風による音速の変動はアルゴリズムの動向に影響し、システムは収束の方向に向かうものの、実質的にエラーセンサーでの減衰レベルが制限され、制御の效果に影響を与えることが明らかになった。ここでの結果は、単純なモデルを仮定しアルゴリズムの動向を探るために得られたものであり、そのまま一般論として「何 m/s 程度の風速変動であれば減衰量が何 dB 変動する」、といった定量的な指標を示すことは出来ない。本章の実験 2 においては、Fig. 6.24 に示したように適応システムは確実に収束し、キャンセルポイントにおいて音圧の減衰を得ることが出来た。しかしその減衰量は約 25 dB 程度に制限され、倍音成分などに対しては効果が見られなかった。もちろん、適応フィルタのタップ長が充分でないことや、外來雑音の影響など、そのほかの要因も多く考えられるため、風速の変動による位相変化のみで減衰レベルが制限されていると結論することは出来ないが、これが大きな原因の一つであるとは考えられる。

これらの位相変動などに対する対策として、現在のところ信号処理ハードウェアの処理能力によって制限されて実現は困難であるが、サンプリング周波数を上げる方法が考えられる。例として、Fig. 6.40 にサンプリング周波数をこれまでの 10 倍の 10000 Hz とした場合の収束の様子を示す。(a) は風速がランダムに 0.2 秒毎に、(b) は正弦的に 2 Hz で変動した場合であり、いずれも変動の振幅は 10 m/s である。またこの場合、ステップサイズパラメータ  $\alpha$  も 0.1 と大きめに設定している。

結果として、収束によるレベルの減衰は大きくなり、(a)、(b) いずれにおいても 50 dB 近くの減衰が得られている。係数更新の周期が、位相変化の周期に比べて充分高速であれば、あたかも変動の無い信号として扱うことが出来るために生じた結果であると考えられる。



(a) 風速が 0.2 秒毎にランダムに変動した場合



(b) 風速が 2 Hz で正弦的に変動した場合

Figure 6.40: サンプリング周波数を 10000 Hz とした場合の収束の様子

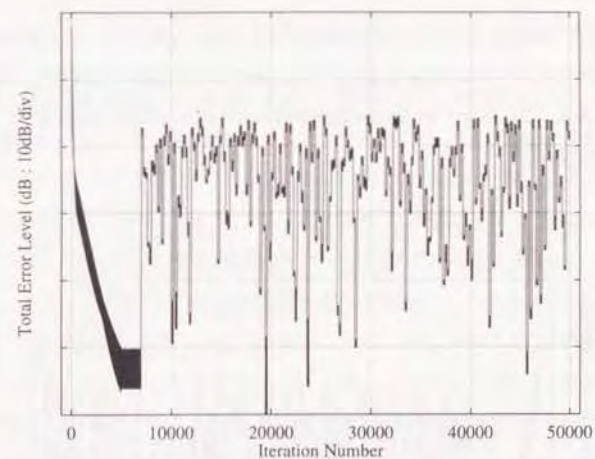


### 6.6.3 適応を途中で打ち切る方法の効果

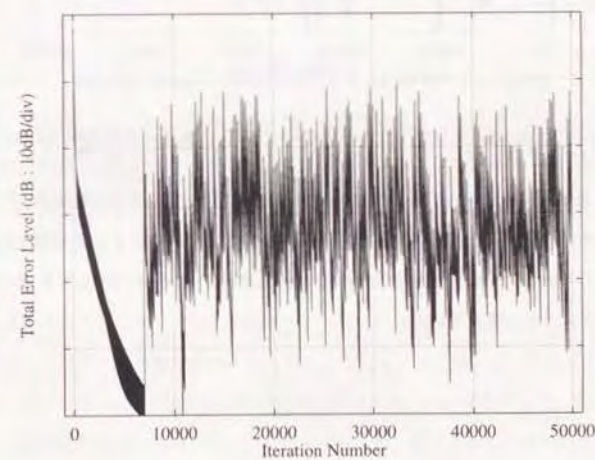
実験2では、システムがある程度収束した状態で、適応フィルタの係数を固定して測定を行った。最後にこの方法の効果について考える。Fig. 6.41 (a) にシミュレーションの結果を示す。これは、

- 風などの影響が全く無い状態で、5000 回 (5 秒間) の適応を繰り返す。
- その後適応フィルタの係数を固定する。
- 繰り返し回数7000 回目 (7 秒目) から、 $\pm 10$  m/s の範囲で 0.2 秒毎に風速が変化する。

という条件を仮定したものであり、全体での繰り返し回数は 50000 回である。また (b) は適応を止めることなく続けた状態で、やはり 7 秒後から風の影響を受けた場合の結果である。



(a) 適応を途中で止めた場合



(b) 適応を続けた場合

Figure 6.41: 適応を途中で止める方法の効果

結果によれば、適応を止めたことによる効果はほとんど認められず、 $T.E.L.$ の減衰量は(a)、(b)共に20 dB弱である。ちなみにFig. 6.42は、同様の動作条件で風速の変動範囲を $\pm 3$  m/sとした場合の結果である。この場合は30 dB弱の減衰が得られており、やはり適応を続けた場合のFig. 6.35と同程度である。

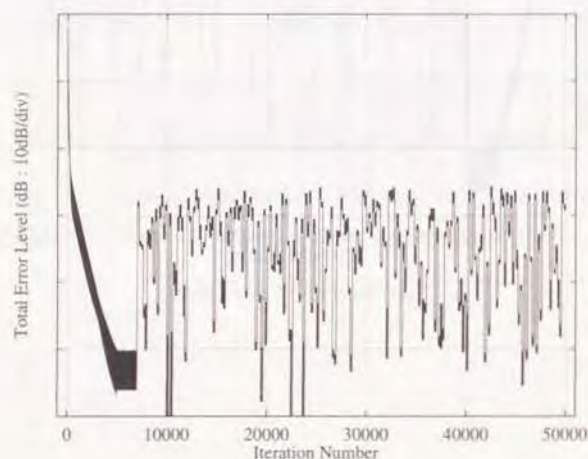


Figure 6.42: 適応を途中で止めた場合の  $T.E.L.$  : 風速の変動範囲  $\pm 3$  m/s

この様に、適応を途中で打ち切る方法は、制御の効果に対して顕著な影響を与える方法ではない。しかし、大きな利点として発散する危険が無くなることが考えられ、実用的な側面から、例えばある一定の風速以上の風が検知された場合にのみ適応を一時止めるなど、一種の安全装置的な使い方は有効であると考えられる。

## 6.7 まとめ

本章では、現実の騒音制御に近い状況を想定し、屋外において実験的検討を行った。まず実験1として、騒音源にスピーカーから放射されるオクターブバンドノイズを用いた場合を検討した。ここでは二つの多チャンネル適応信号処理システムを用いて、Edge上合計10ポイントの音圧を最小とすることで、広い領域での減衰を得ることを試みた。結果によれば、制御はほとんど全ての測定ポイントにおいて有効に働き、制御を行わない状態で音圧の高い場所ほど、大きな減衰量が得られた。また、二つのシステムを独立に働かせた訳であるが、これらは互いに悪影響を及ぼしあうことなく、あたかも一つのシステムが動作しているように振舞うことが確認された。

障壁に近い領域においては、制御が有効に働く領域は、システムが存在する場所を中心にほぼ扇型に広がること、またその端において一度制御が逆効果となる領域が存在し、更に外側に拡がるに従って、効果がゼロに向かう傾向があることがわかった。

これに対し、遠方での制御効果は安定しており、障壁から50～80 m程度離れた場所においても、 $-4 \sim -5$  dB程度以上の減衰が全測定点において得られた。また暗騒音の影響を差し引いた場合には $-6$  dB程度の減衰であり、これは障壁の高さを約3 m高くしたことに相当する効果である。

障壁から50 mの距離は、125 Hzでの波長で規準化した値 $kR$  ( $k$ は波数、 $R$ はEdge-受音点間の距離)で115、また80 mにおいては185程度となる。この領域では、充分遠方という近似が成立し、また地面が比較的大きな吸音力を持つことにより、音場は第2章で示した[漸近解2]、つまり障壁のEdgeから放射する円筒波の形式で記述出来るものと考えられる。このため、制御によってEdge付近における音圧をキャンセルすることにより、あたかも(仮想的な)音源の放射パワーを低減していることと同等の効果が得られているものと考えられる。

次に、1次音源にスピーカーでなく実音源(プロウ)を用いた実験2を行った。この場合は騒音源信号のピックアップ方法が問題となるが、ここではノイズセンサーとしてマイクロホンを用いる方法、及び振動ピックアップを用いる方法の双方を試みた。結果として、Edge上キャンセルポイントで観測される騒音源信号とのコヒーレンシーが、双方ともに大差無いことを確認の上、2次音源系と不安定な閉ループを構成する危険が少ない、振動ピックアップを用いることとした。

また、この場合用いた障壁の長さが短く、障壁の横から回折してくる波の影響で、制御が有効に働かない現象が観察された。このため、障壁の端に音源を囲う形で付加的な障壁を設置し、受音点においてキャンセルポイントを設置したEdgeからの寄与が支配的となり、制御の効果が明



確になるような工夫をした。ここでは付加的な障壁というパッシブな方法を用いたが、将来的には高速な信号処理ハードウェアの実現と共に、多くのチャンネルを同時に制御することが可能になれば、横の Edge にもキャンセルポイントを設置し、ここからの影響を能動的に消去することも可能になると考えられる。

実音源を用いた実験2においても、実験1と同様ほとんどの受音点で制御は有効に働き、障壁から20m程度離れた受音点まで、約-4~-5dB程度の減衰量が得られた。また、やはり制御を行っていない状態で音圧レベルが高いポイントほど、制御効果が大きいことが確認された。

本章で行った実験の様に、適応信号処理を用いた能動制御を行う場合、特に屋外での適用を考えれば、風による振幅・位相の変動が、システムの収束に与える影響は無視できないものと考えられる。そこで、風は音速にのみ影響し、これが1次音源からキャンセルポイントに到る音波に位相変動を生じる、という仮定の下に、実験で用いた Filtered-x LMS アルゴリズムの振る舞いを、数値シミュレーションで検討した。結果によれば、風による位相変動は直接制御効果に影響し、また変動の振幅及び周期が、制御によって達成される減衰レベルを制限することがわかった。

変動の振幅が大きければ、それだけ制御効果を減少させる。しかしその周期がゆっくりであれば、制御効果は増大する傾向があり、このことから、例えば気温が変化することによる音速のゆっくりとした変化は、制御の効果に対して大きな影響を与えないことが考えられる。またこの傾向は、適応信号処理のサンプリング周波数が十分に高速であれば、ある程度大きな風速の変化などにも対応できる可能性を示している。

以上、本章の結果から、風などの外來要因による限界は存在するものの、障壁による回折音に対して能動制御を適用することは有効であること、またその方法として、回折場に対する仮想的な音源である Edge での音圧をキャンセルすることにより、特に障壁から離れた領域においても大きな減衰が得られることが実験的に検証された。

最後に、本章の実験を通じて明らかとなった、実用化に際して問題となるであろう幾つかの点について述べる。風による位相変動の影響については前述したが、このほかに風自身が持つ雑音成分などの、外來騒音の影響が考えられる。実験1においては、風速が2~3 m/s と小さめであったことに加えて、他に目立った外來騒音もなく、その影響がシステムの収束に顕著に表れることはなかった。

実験1の現場において観測された風による暗騒音の変化は、63 Hz 以下に集中しており、特に31.5 Hz 辺りで、10 dB 程度の変動もまれに観測された。これらの低周波音をキャンセルポイント

のマイクが拾えば、当然システムはこの音も最小にする方向に働く。実験1では音源信号が125 Hz の帯域ノイズであり、しかも音源信号を直接適応システムに入力する方法を採用した。この場合、騒音源信号より低い周波数の雑音が混入すれば、システムは存在しない音を消去すべく、明らかに動作が不安定となる。実際に実験1においても、上記の現象が原因と思われるシステムの発散が何度か認められた。

この問題は、外來騒音もノイズセンサーによって検出し、併せて適応システムに入力すれば、ある程度抑制されるものと考えられる。しかし、2次音源スピーカの周波数特性によって、低周波音の放射効率が悪い場合には同様であり、適応フィルタの係数が非常に大きくなり、結果的にアルゴリズムが不安定となることが考えられる。

実験2においては、エラーセンサーに大きめのウィンドスクリーンを設置することで、高周波成分の影響は改善できたものの、低周波においてやはり大きな変動が認められた。実験2では、騒音源信号を抽出するセンサーとして振動ピックアップを用いた。マイクロホンを用いた場合に生じ得る、2次音源スピーカとの不安定な閉ループ構成を避けるためである。しかしこの場合も問題は同様であり、騒音源信号にあるはずのない周波数成分がエラーセンサーで観測されれば、システムは安定しない。音速の変化による位相変動と共に、制御の効果を制限した一つの要因であると考えられる。

これらの問題の対策としては、ノイズセンサー及びエラーセンサーの出力を、目的とする帯域のフィルタに通して、適応システムに入力する方法が考えられる。しかしこの場合は、フィルタによって生じる信号の時間遅れがシステムの動作に影響し、ノイズセンサーや2次音源の位置を制限することが考えられる。個々の事例に応じた、実験的な検討が必要である。

また詳しくデータをとるには至らなかったが、実際の（停止した）車両のアイドリング音を音源として制御を行うことを試みた際にも、同様の現象が観測された。この場合適応アルゴリズムに入力する騒音源信号は、エンジンルーム付近にノイズセンサー（マイク）を設置することで得るものとしたが、結果として、制御は一旦有効に働き、キャンセルポイントにおいて音圧が低下することが確認されるものの、次第に発散へと向かうことが観測された。ステップサイズパラメータを調整しても同様の結果であり、エンジンの発する音源信号が、2次音源が放射出来ない低周波音を多く含むことが原因であると考えられた。また、障壁を支えるL字鋼の一つが車両のタイヤ近くに位置していたが、エンジンによって生ずる振動が、このL字鋼を経てエラーセンサに伝わり、エラーセンサが手で触れて明らかに分かるほど振動しているのが認められた。この振動が



低周波音として入力してしまうことも原因の一つと考えられる。2次音源として用いるスピーカの周波数特性が十分に広帯域で無い場合は、キャンセルポイントにおけるエラーセンサの出力を、目的とする帯域のバンドパスフィルタに通すなどの対策の他に、エラーセンサと障壁の振動的な絶縁等の対策も必要となろう。

次にシステムの安定性についてである。実用化に際しては、システムの発散に対する対策も十分に検討すべきである。実験1において、二つの適応処理システムを同時に動作させた。これらは安定な状態においては、互いに悪影響を与えることなく収束する。しかし、もし何らかの原因で一つのシステムが発散すると、それに伴ってもう一つのシステムも発散してしまう現象が観測された。エラーセンサに、発散に伴って生じる過大な音が入力することが原因と考えられる。現実の騒音制御においては、発散しない安定したシステムの構築が必須の条件であるが、特に屋外での使用など外的要因が多い場合、適応を続けている限り、何らかの原因によってシステムが不安定となる危険性は完全には否定できない。

実験2においてはこの危険性を回避するために、システムがある程度収束した状態で、適応フィルタの係数更新を停止する方法を試みた。この方法は、数値シミュレーションの結果によれば、騒音源信号の位相変動などによる制御効果の減少に対してはあまり効果がない。適応を行っていないために、外的要因の影響が直接的に表れるためである。しかしその限界を踏まえた上で、屋内など外的な擾乱が少ない状況で使用するものとすれば、発散することのない有効な方法と考えられる。更に、システムの発散あるいはその傾向を検知して適応を止めるなど、これをおさえる方向に働きリミッター回路的な使い方も有効であると考えられる。

現状の適応信号処理を用いた能動制御においては、システムの性能あるいはその限界は、基本的に用いるDSPの性能に依存している。そこで、より複雑なシステムで大きな減衰を得るといふシステムの「精密化」と共に、より簡単にrobustな制御アルゴリズムの開発という「簡略化」も、コストの観点などから意義深いものと考えられる。上記の適応を止める方法も一つの例であるが、このほかにも騒音源信号が純音性の強いものであれば、2次音源～エラーセンサ間のインパルスレスポンスを単なるディレイと考慮して2タップフィルタで代表する、等の方法が考えられる。もちろんこれには簡略化がもたらすパフォーマンスの低下を定量的に議論し、把握しておく必要があり、個々の事例に応じた検討が必要となる。

更に、音源が移動する場合、あるいは騒音が時間的に大きく変動する場合など、音源信号の非定常性に対する問題がある。今回の実験においては1次音源は一つであり、また一箇所に停止して

定常騒音を放射しているものとした。しかし特に将来的な道路交通騒音への適用を考えると、複数の音源が、しかも高速で移動しているという状況が一般的である。このような状況に対処するには、現在のところ信号処理ハードウェアの能力に制限されており不可能であるが、非定常音が定常とみなせる程度の高速なサンプリング周波数で、適応を続ける方法が最も効果的であると考えられる。

道路に沿った長い距離にわたって制御を有効に働かせるには、複数のシステムを同時に働かせておく方法で、ある程度対処できるものと予想される。またこの方法でもシステムが収束しうることは第4章、及び本章の実験結果からも明らかである。問題は一つのシステムの前を、車両などの移動音源が通過する時間の間に、システムが適応し、収束出来るかどうかである。実際に本章の実験で用いたハードウェア(System-1)においては、一秒間に約2500万回程度の積和演算を行っている。また、システムが十分に収束するのに要した時間は、概ね20～30秒程度であった。(もちろんこれはステップサイズパラメータの設定などで、大きく変動しうる値である。) 大まかな試算であるが、時速100 km/hで走行する車両が、システムの前方1 mの区間を通過するのに要する時間は約36 msecである。この時間に、既存のシステムが収束するのに必要な繰り返し回数だけ計算を行うには、単純に計算しても1000倍弱の演算能力が必要となる。既存するシステムで、こういった状況に対応するのは非常に困難であるが、将来的に非常に高いサンプリング周波数に対応し、リアルタイム処理が可能な高速ハードウェアの開発、及び上述の「簡略化」をも考慮に入れたアルゴリズムの開発によって可能になるものと考えられる。

また、道路交通騒音への適用を考えた場合、上記の信号処理の問題だけでなく、騒音源信号の検出方法という物理的な問題も存在する。これも、現状では走行中の車両の近くにマイクロホンを設置することは不可能であり、何らかの工夫が必要である。いずれも現在のところやや非現実的なアイデアではあるが、道路にマイクロホンを埋設する方法、更には車両自体にノイズセンサーをとりつける方法などが考えられる。後者は、車両の中で音源としてのパワーが大きいと考えられる部位、例えばタイヤの近くにノイズセンサーを取り付け、ここで検出した音源信号を、電波によってシステムに送るという方法である。

この様に、検討すべき課題はあるが、本研究で行った障壁による回折音の能動制御は、各種プラントや発電所のタービンから放射される定常的な騒音や、オフィス空間内の各種O.A.機器騒音等に適用が可能であると考えられる。本研究によって、背が低く、しかもこれまでになく遮音性能の高い障壁を実現し得るという可能性が明らかになったと言える。



## 参考文献

- [1] 齊藤望, 曾根敏夫, 秋保政一, 滑川誠 "モデリングエラーに伴うフィルタード X LMS アルゴリズムの誤動作について" 騒音・振動研究会資料 N-93-65, 1993
- [2] P. A. Nelson, S. J. Elliott "Active Control of Sound" (ACADEMIC PRESS Ltd., 1993), p. 197
- [3] D. R. Morgan "An Analysis of Multiple Correlation Cancellation Loops with a Filter in the Auxiliary Path" IEEE TRANSACTION ON ACOUSTICS, SPEECH, AND SIGNAL PROCESSING, Vol. ASSP-28, No. 4, pp.454-467, 1980.

## 第 7 章

### 総 括

本論文の概要を以下に示す。

第 1 章では、騒音制御の為に設置されている障壁について、その現状及び問題点を列記し、遮音性能の向上を目的とする幾つかの研究について紹介した。それは障壁表面の音響特性を吸音性、あるいはソフトにするもの、音波の経路差を設けた音響管を並べることによって生じる破壊的干渉を利用するもの、更に回折場に対して仮想的な音源のように振舞う Edge に吸音性の円筒を取り付けたものなどである。これらはいずれもパッシブな方法を用いているため、原理的に低音域になるほどその効果は小さくなる。また例えば、障壁の高さを変えることなく、10 dB を越える遮音量の向上が安定して得られる方法は存在しないのが現状である。この様な考察に基づいて、障壁による回折音の低減に能動制御を適用することの意義、及び本研究の方針、本論文の構成について述べた。

第 2 章では、半無限障壁による回折場について考察した。音源が線音源及び点音源の場合、つまり音場が 2 次元及び 3 次元の場合を扱ったが、併せて障壁表面の音響特性をソフト、吸音性に変化させた場合についても考察した。既に数多くの文献で論じられた問題であるため、解の導出は詳述せず、数値計算に適した形式に整理することを主眼とした。また、特に厳密解は半無限積分を含む形であるため、以後行う実際の数値計算に際して便利のように、積分上限値に関する考察を行った。



第3章では、実際に能動制御を行った回折場を定式化し、その効果について数値シミュレーションによって考察した。制御は、回折場に対して仮想的な音源の様に振舞う Edge での音圧を、適当な振幅・位相係数を持つ2次音源によってゼロにする方法で行った。また3次元音場においては、広い領域での減衰を実現するため、Edge 上の複数点での音圧を同時にキャンセルするような係数を2次音源群に持たせた。結果によれば制御は有効に働き、場所によっては -30 dB 以上という、従来から行われてきた障壁の高さを高くする方法ではなし得ない程度の減衰を得る可能性が明らかになった。

また、2次元の場合は解析的に、3次元の場合は数値シミュレーションの結果から、より広い領域でより大きな減衰を得るという意味で、2次音源の配置位置を最適化出来ることが分かった。これは、2次音源を1次音源と同じ角度に配置するものであり、回折場に対して支配的な寄与を及ぼす Edge 近傍において、2次音源によって生成されるキャンセルのための波面の形状が、1次音源による波面の形状に近づくためであると考えられる。

併せて、障壁表面の音響特性を、ソフト、吸音性と変化させた場合についても考察した。結果によれば、制御は表面の特性によらず有効に働き、制御によって障壁による影の領域での音圧はある一定のレベルまで落とすことが分かった。

更に制御の効果が得られる物理的な要因を探るために、音響インテンシティを用いて Edge 近辺のエネルギーの流れについて考察した。結果として、一部の2次音源ではアクティブ吸音が行われていることが確認された。しかし同時にエネルギーを放射する音源も存在し、アクティブ吸音が制御の効果をもたらす主たる要因とは考えにくい。2次音源を設置することで、回折場に2次音源によるインテンシティ、及び1次音源と2次音源の相互作用成分を持つベクトルが生じる。このベクトルは、Edge 上のある領域、あるいは障壁による影の領域において、1次音源によるインテンシティとはほぼ反対の方向を持つ。この作用によって、エネルギーが非常に流れにくい領域が生成される。結果的に、影の領域に流れ込むインテンシティのレベルが低下し、制御の効果が得られているものと考えられる。

特に、障壁の Edge 付近におけるこのベクトルの作用は顕著であり、インテンシティがあたかも Edge を避けようとしているかのような傾向が見られた。2次音源を設置することで生じたベクトルが、どのような規則に従って1次音源のインテンシティに作用するのかを、ここで得られた結果から厳密に解釈することは困難であると考えられる。本研究においては、障壁 Edge での音圧をゼロとすることを、制御の基本的な方法としている。この場合、Edge は音響インピーダ

ンスの不連続点であると考えられる。定性的な説明にとどまるが、2次音源を設置することで生じるベクトルは、この不連続点を避けようとする作用を行っているとも考えられる。

第4章では、能動制御の効果を、近似的に実現した2次元音場、及び無響室において実験的に検証した。いずれの場合にも、前章で予測された傾向、つまり回折音低減に能動制御は有効であること、また2次音源を1次音源と同じ角度に配置することによって、より大きな減衰が得られることが確認された。2次元音場におけるノイズを用いた実験、及び3次元音場における実験においては、適応信号処理を導入した。特に3次元音場の場合は、Edge 上での複数の点で同時に音圧をキャンセルするために、多チャンネル適応アルゴリズムを用いて2次音源の振幅・位相を逐次的に決定した。なお、実験に用いた信号処理ハードウェアの能力から、1つのシステムで処理できるチャンネル数には限界が存在する。これは現実の音場への適用を考慮する上で、不可避免な問題である。そこで複数のシステムを独立に、かつ同時に働かせることを考え、数値シミュレーションによってその振舞いを調べた。結果として収束スピードの低下はみられるものの、システムは安定に収束することが明らかとなった。この複数システムを用いる方法は、規模の大きな能動制御システムを実現する上で、現実的かつ有効な方法の一つであると考えられる。

第5章では、反射性地面の影響を考慮に入れて考察を行った。ここでは音場が2次元の場合、3次元の場合双方とも地面が完全に剛であり、音波を鏡面反射すると仮定して問題を取り扱った。数値シミュレーションの結果によれば、音源位置などの条件によって、制御が有効に働かず、逆に制御によって音圧が上昇してしまう場合も存在することが予想された。また、半無限障壁の場合に求められた、制御を最も有効に働かせる2次音源位置の条件、つまり2次音源を1次音源に障壁からの角度、Edge からの距離共に近くすべきであるという条件もこの場合には成立せず、2次音源位置などのパラメータのわずかな変化により、効果が大きく変動することが明らかとなった。更に、地面が存在する場合に制御を安定に働かせるには、2次音源を1次音源でなく Edge に近付けるべきであることが分かった。

そこで、第3章で導入した2次音源（3次元音場の場合には2次音源群）の他に、地面からの反射波成分のみをキャンセルする為の付加的な音源群を設置した。これらの音源は、自身の鏡像を作らない様に地面上に設置するものとし、それぞれ独立に1次音源及びその鏡像、また2次音源の鏡像をキャンセルするものとした。なお、付加的な音源群は、その効果を最大とするために、



それぞれが受け持つ音源と同じ角度に設置した。数値シミュレーションの結果によると、付加的な音源は非常に有効に働き、設置しない場合に効果が得られない様な音源の位置関係においても、一転して大きな減衰を得られることが分かった。また、設置しなくても制御の効果が得られている場合でも、その効果を減少させることはないことが明らかとなった。この付加的な音源の効果は、2次元音場における実験によって検証された。

更に、上記の付加的な音源群を設置する代わりに、障壁近辺の地面を吸音性とし、2次元音源の鏡像の影響をキャンセルすることも試みた。3次元音場における実験の結果、この方法も有効であり、能動制御を安定に働かせる効果があることが確認された。

第6章においては、現実の障壁による騒音制御に近い状況を想定し、屋外において二つの実験を行った。実験1では、騒音源としてスピーカから放射されるオクターブバンドノイズを用い、二つの多チャンネル適応信号処理システムを独立に動作させて合計10チャンネルの制御を行った。結果としてあたかも一つの10チャンネルシステムが働いているのと同等の効果が得られ、ほとんどの受音点において制御が有効となることが確認された。

障壁近辺の領域においては、制御が有効となる領域がシステムの存在する場所を中心にほぼ扇型に広がり、その端においては僅かに逆効果となる点も見られた。これに対し、特に障壁から50~80mといった遠距離において制御効果は安定しており、全測定点において-4~-5dB程度以上の減衰量を得ることが出来た。暗騒音の影響を差し引いて考えた場合は-6dB以上の減衰量である。障壁から50m離れた場所で、障壁による遮音量に6dBの付加的な減衰を得ることは、障壁の高さを3m以上高くすることと等価であり、6dBという値は騒音制御において大きな意味を持つものである。障壁から十分に離れた遠距離音場においては、仮想的な音源であるEdgeでの音圧をキャンセルすることにより、音源の放射パワーを低減していることと同等の効果が得られているものと解釈できるが、この結果は本研究で用いた方法の有効性を示すものといえる。

続いて実験2では騒音源に送風機(ブローヤ)を用い、騒音源信号のピックアップ方法などについても併せて検討した。この場合は、2次元音系と不安定な閉ループをつくることのない、振動ピックアップを用いて検出を行った。また障壁が有限長であることの影響から、制御効果が十分に得られない現象が観測され、その対策として音源を囲む形で付加的な障壁を設置することを試みた。更にここでは適応システムが外來騒音等何らかの要因で不安定となることを避けるために、アルゴリズムがある程度収束した状態で適応を止める方法を用いた。測定結果として、実験1と

同様にほとんどの受音点において制御は有効に働くことが確認され、この場合障壁から20m程度離れた位置で、約-4~-5dBの減衰を得ることが出来た。

次に、屋外において適応信号処理を用いた能動制御を行う場合には不可避な問題である風の影響について考察した。ここでは風速がそのまま音速の変化にあたると仮定し、この変動を考慮した場合に、適応信号処理システムがどのように振る舞うかを、数値シミュレーションによって検討した。結果として、変動の振幅、及び周期は直接制御効果に影響し、達成し得る減衰レベルを制限してしまう可能性が示された。また、変動の周期が適応処理の周期に比べて遅ければ、比較的大きな減衰を得ることが出来た。これは、サンプリング周波数が充分高速であれば、ある程度大きな風速の変化などにも対応出来ることを示しているとも解釈できる。

また実験を通して明らかとなった、実用化において問題となるであろう点について述べ、その対策について考察した。まず、システムの安定性についてである。音源信号に、2次元音源が放射することの出来ない低周波音が含まれる場合、適応フィルタの係数が過大となることによりシステムは発散し得る。特に広い領域での減衰を目的として、複数の適応システムを用いている場合、一つのシステムが発散すれば他もこれに従う。2次元音源として用いるスピーカの周波数特性が十分に広帯域ではない場合、キャンセルポイントにおけるエラーセンサの出力を、目的とする帯域のみ通過させるフィルタに通すなどの対策をすべきである。もちろんこの場合には、フィルタを通すことによる信号の時間遅れが、適応システムに及ぼす影響を考慮せねばならず、個々の事例に応じた実験的な検討が必要となる。また、特に屋外での使用を考慮した場合、風による音速変化だけでなく、風自身が持つ雑音成分や、その他の外來騒音の影響を無視することは出来ない。これらに対処出来、決して発散することのない、よりrobustなアルゴリズムの開発が必要となる。また、特に将来的な道路交通騒音等への適用を考えて、音源が移動する場合、つまり騒音源信号が非定常である場合に対する考察も必要である。現状のシステムでこの様な状況に対応することは不可能であるが、将来的に高速のハードウェア、つまり非定常音が定常とみなせる程度の短い時間に適応処理を完了できる能力を持ったハードウェア、あるいはそれに対応したアルゴリズムを開発することによって、充分対応出来るものと考えられる。

以上、障壁による回折音に対して能動制御を適用し、その効果、また制御が有効に働くための条件などについて考察してきた。本研究において得られた制御の効果は、遮音設計に充分算入され得る値である。本研究で用いた方法を導入することは、これと同等の効果を得るために必要と



なる障壁の高さの上昇と比較して、かえって現実的であるともいえる。また、第6章の実験において明らかになった様に、本研究で用いた障壁の Edge での音圧をキャンセルする方法は、障壁の近くの領域のみならず、障壁から離れた領域においても安定かつ有効に働く。障壁による回折音に能動制御を適用することは非常に有効であり、本研究によって、大きな減衰を得られる低い防音棚実現の可能性が明らかになったといえる。

## 謝 辞

本研究を進めるにあたり、常に的確な御助言、懇切な御指導を頂きました東京大学生産技術研究所 橋 秀樹教授に心から御礼申し上げます。また、本論文を纏めるにあたり、東京大学 安岡正人教授、大野進一教授、松尾 陽教授、鎌田元康教授に有益なる御教示、御助言を頂きました。心より御礼申し上げます。

九州芸術工科大学 藤原恭司教授には、筆者の卒研時代より指導教官として御指導頂きました。また、助手として採用して頂き、本研究を始めるきっかけを与えて頂きました。更に、研究の上で生じる疑問や問題について、いつでも気軽に相談に応じて頂き、多くの有益な御助言、御指導を頂きました。ここに謹んで御礼申し上げます。

九州芸術工科大学 島原秀男技官には、実験等における数多くの便宜を図って頂くと共に、公私に亘る激励の言葉を頂きました。日東紡音響エンジニアリング（株）茂田敏昭代表取締役をはじめ、大橋心耳部長、大山 宏課長、技術部各位には、筆者の研究遂行に対し暖かい御支援、御配慮を頂きました。九州芸術工科大学大学院生 高島和博氏、阿部宏一氏、中原雅孝氏をはじめ院生及び卒研各位には、研究遂行に際して多大な御援助を頂きました。ニチアス（株）清水康男課長、青木応用音響（有）青木雅夫代表取締役及び関係各位には、屋外での実験に際して多大なる御援助を頂きました。また、適応信号処理を用いた実験に際しては、エムティティ（株）から機材を提供して頂きました。その他にも、音響学会、建築音響、騒音研究会等におきまして、神戸大学 森本政之助教授、阪上公博助手をはじめ、多くの方々に有益な御討議並びに御助言を頂きました。本研究を纏めるにあたり、上記の各位に対して心より感謝いたします。



