九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

Research on broadbanding, miniaturization and its application of a silencer which have acoustically soft boundaries

川瀬, 康彰
財団法人成田国際空港振興協会

https://doi.org/10.15017/17122

出版情報：九州大学, 2009, 博士（芸術工学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：

第4章　テーパー型音響管を用いたソフトダクトユニットの広帯域化と縮小化検討

3 章では設計周波数の異なる音響管を適切に組み合わせることで広帯域化が可能となることを示した。しかし，低周波数域を制御対象とする場合には，波長相応の大きさが必要となる音響管はかなりの大きさになる。そこで本章において，ソフトダクトをより実用的なものとするため，はじめに音響管の縮小化について検討し，得られた知見をもとに広帯域化の検討を行い，最後に模型実験により数値計算で得られた結果の妥当性を確認する。

ソフトダクトの縮小化や広帯域化については，音響管開口部へ膜を設置するなど研究がなされているが [15]，ここでは，ダクト延長方向に対して深さ方向が垂直になる従来の矩形型音響管形状に対し，音響管側面を傾斜させた形状のものについて検討する。以降，音響管側面が傾いた形状となったものを「テーパー型音響管」と称し，それに対して 3 章で扱った矩形型の音響管を「従来型音響管」と称することとする。

4.1　断面が平行四辺形のテーパー型音響管

図 4.1 のように，1/4 波長音響管を二次元ダクトに設置し，従来型音響管とテーパー型音響管の周波数特性について，二次元境界要素法を用いた数値計算により比較した。ダクト両端を完全吸音，その他の境界面を剛な表面とし，比較の基準となる従来型音響管の深さを 250Hz の 1/4 波長となる 340mm，音響管の幅を 1/6 波長となる 227mm とした。ダクトの幅は 300mm であり，それを半波長とする 567Hz 以下の周波数ではダクト内を音波が平面波伝搬することとなるが，音源と受音点の位置は音響管を配列した位置から十分離れた位置とした。特に受音点の位置については，音響管の配列長に応じてダクト全体長を延ばすことで，ソフトダクトユニットと十分な距離を確保するようにした。上記条件の下，音響管設置前後の基準化音圧レベルを 1/54 オクターブバンド毎に計算し，それらの差から挿入損失を求めた。なお本章においても，最小の要素となる音響管の壁厚は 1cm とした。なお，傾斜型音響管の形状を決定する寸法として，音響管の開口部と管底の垂直距離を「高さ」，音響管側壁の長さを「深さ」，音響管開口面と垂直をなす角度を 0 度として音響管側壁とのなす角を「傾斜角」と呼ぶことにする。

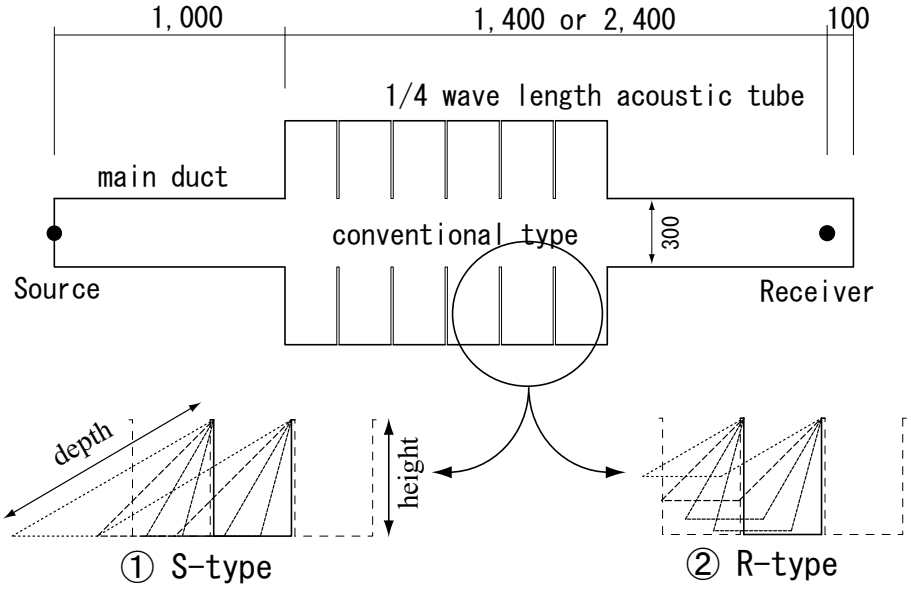

図 4.1: ソフトダクトの解析モデル音場と S-type 及び R-type テーパー型音響管の形状

4.1.1　S-type テーパー型音響管の減音特性

まず，図 4.1 で示した①のように音響管の高さを一定とし，管底をダクト延長方向にスライドさせるようにして音響管を傾斜させた（以降 Slide の意味から S-type と称する）。傾斜角は，15 度から 15 度おきに 60 度までとした。ダクト内に 1 対のみの音響管を配列した場合の計算結果を図 4.2 に示す。

傾斜角の増加と共に共鳴周波数が低域へシフトする結果となった。これは，傾斜角の増加による音響管深さ延長に伴い，共鳴周波数が低域へシフトするためと考えられる。音響管の深さを 1/4 波長とする周波数（f_0）と数値計算による共鳴周波数（f_1）は，表 4.1 のようにほぼ一致した。しかし，その一方で傾斜角の増加と共に周波数特性のディップは浅くなっている。S-type のような音響管の傾斜は，音響管の体積を一定とした形状の変化であるが，傾斜角の増加に伴い音響管深さ方向に対する垂直断面が小さくなる。さらに，共鳴周波数が低域へシフトしているため，波長に対する音響管の幅は相応に狭くなることになる。従来型音響管と 60 度傾斜させた S-type テーパー型音響管では，音響管の深さが 2 倍になるため，共鳴周波数の波長に対して開口幅は 1/2，深さ方向の垂直断面幅は 1/4 の大きさとなる。このような，共鳴周波数の波長に対する音響管寸法の変化が，ソフトダクトの効果の大きさ（減音量と帯域幅）にどの程度影響を与えることになるのかを確認するため，同じ傾斜角の音響管を 3 対配列した場合について

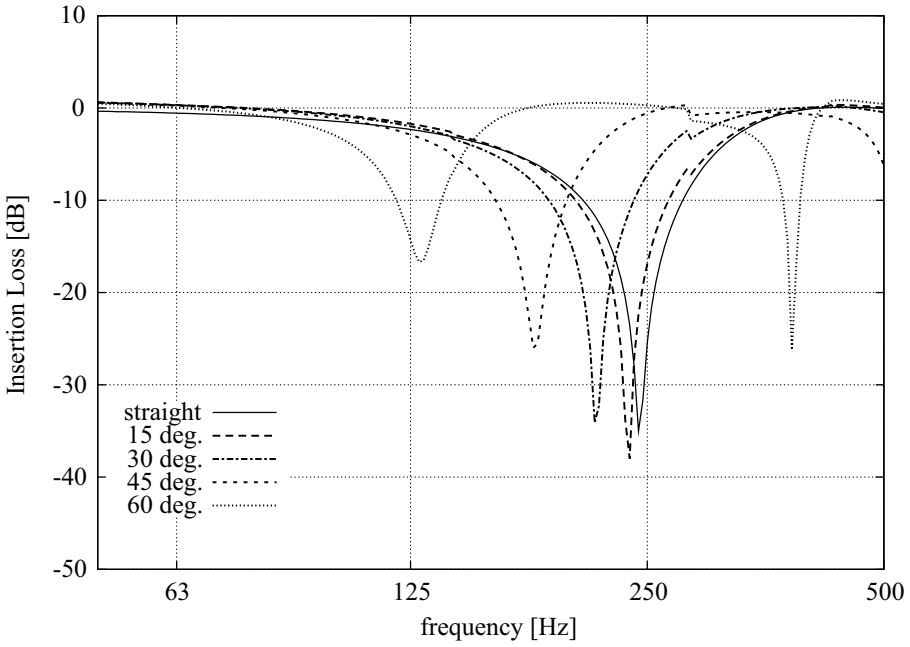

図 4.2: S-type テーパー型音響管の挿入損失（1 対配列）

計算した。結果を図 4.3 に示す。

1 対の音響管を配列した場合と同様，傾斜角が増加するのに従って効果の得られる帯域は低域にシフトした。傾斜角 30 度までは，減音量や効果の得られる帯域幅が大きく減少するといった傾向は見られないが，傾斜角 45 度では共鳴周波数付近の減音量がやや低下しており，傾斜角 60 度ではその減音量低下に加えて 20dB 以上の減音量が得られる帯域幅が狭くなっている。

傾斜角が 45 度を超えた場合に減音量の大きさや一定以上の効果が得られる帯域幅が減少したのは，共鳴周波数のシフト幅が大きくなるため，音響管を構成する各寸法がその波長に対して小さくなったことが原因であると考えられる。3 章での検討から，ダクト幅が対象周波数の波

表 4.1: S-type の音響管深さを 1/4 波長とする周波数と境界要素法による共鳴周波数の比較

angle (deg.)	Depth (mm)	f_0(Hz)	f_1(Hz)
0	340	250	243.7
15	352	241	237.5
45	481	177	179.1
60	680	125	128.3

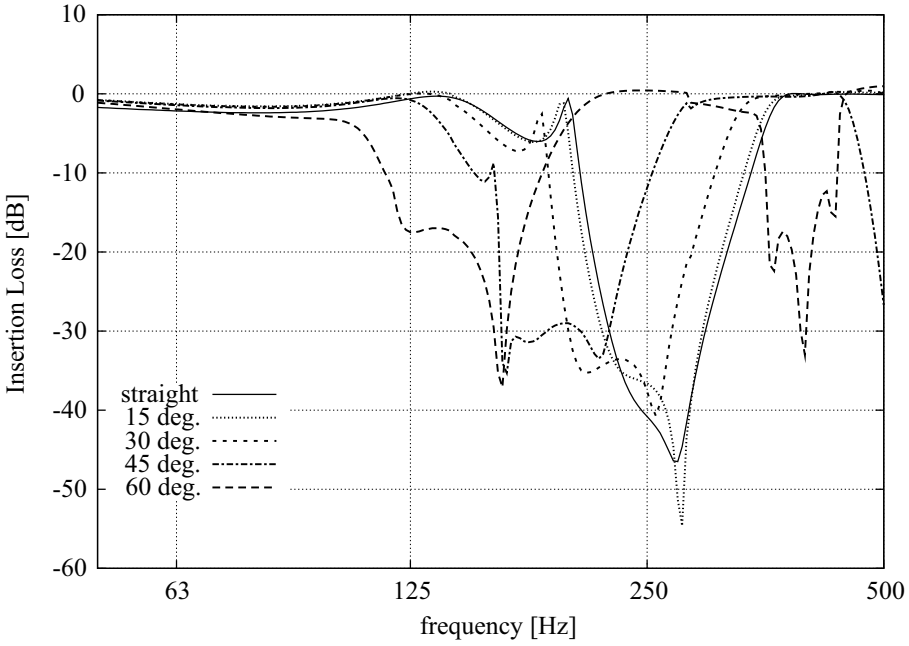

図 4.3: S-type テーパー型音響管の挿入損失（3 対配列で傾斜角を変化させた場合）

長に比べてはるかに小さい場合，十分な効果を得るためには半波長程度の配列が必要であるということがわかっている。そこで，傾斜角 60 度の S-type テーパー型音響管について，音響管の配列数を増やして音響管共鳴周波数のシフトに応じて配列長を半波長まで延長させた。傾斜角が 60 度の場合は，共鳴周波数が従来型音響管に比べて 1 オクターブ低くなるため，音響管配列長を倍にすることで波長に対する配列長が同じ比率になる。そこで，音響管の配列長を 5, 6 本と増やした場合について計算した。比較対象として，共鳴周波数がシフトするのに応じて音響管長さを 640mm にした，S-type テーパー型音響管と同じ音響管幅の従来型音響管を 3 本及び 6 本配列した場合についても計算した。計算結果を図 4.4 に示す。

従来型音響管は，配列長が短くても共鳴周波数付近の周波数特性が鍋底形状で 30dB 以上の効果が連続した帯域で安定的に得られている。また配列長を長くすることで，共鳴周波数付近で得られる減音量と一定以上で効果の得られる帯域がともに増加している。S-type テーパー型音響管は，共鳴周波数付近の周波数特性が従来型音響管で見られたような鍋底形状ではないものの，配列長の増加にともなって共鳴周波数付近で得られる減音量と一定以上で効果の得られる帯域が共に増加している。配列長を音響管共鳴周波数の半波長となる 6 本にした場合は，S-type テーパー型音響管で 30dB 以上効果が得られる帯域幅が 0.66 オクターブとなり，従来型音響管を 6 本配列した場合に得られる 0.68 オクターブより若干狭いものの概ね同じ帯域幅となってい

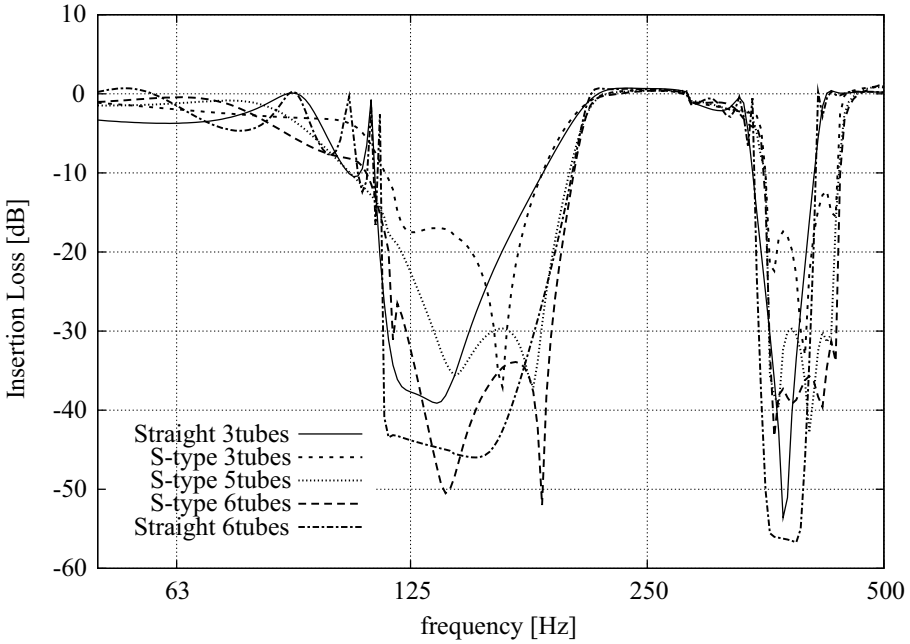

図 4.4: S-type テーパー型音響管の挿入損失（傾斜角 60 度で配列数を変化させた場合）

る。このように，傾斜角の増加に伴う音響管共鳴周波数のシフトに応じて配列長をその周波数の半波長程度とすることで，S-type テーパー型音響管は従来型音響管と概ね同程度の効果が得られることがわかった。

4.1.2 R-type テーパー型音響管の減音特性

次に，図 4.1 で示した②のように，音響管深さを変えずに音響管側壁を回転させるようにして音響管を傾斜させた（以降 Rotate の意味から R-type と称する）。R-type の形状は基本的に S-type と同じであり，傾斜させる際の変化のさせ方が異なるだけである。しかし，R-type テーパー型音響管は，共鳴周波数のシフトによる音響管の波長相対寸法変化は生じないものの，音響管深さ方向の垂直断面幅は傾斜角の増加と共に小さくなる。このように，深さは一定であるが断面寸法は変化するため，R-type を S-type と異なるものとして取り上げて，傾斜角増加に伴う断面寸法の低減が減音効果に与える影響について検討する。

傾斜角度は S-type の場合同様 15 度から 15 度おきに 60 度までとした。音響管を 3 本配列した場合の計算結果を図 4.5 に示す。

傾斜角が 30 度までは減音量や効果の得られる帯域幅が減少するといった傾向は特に見られな

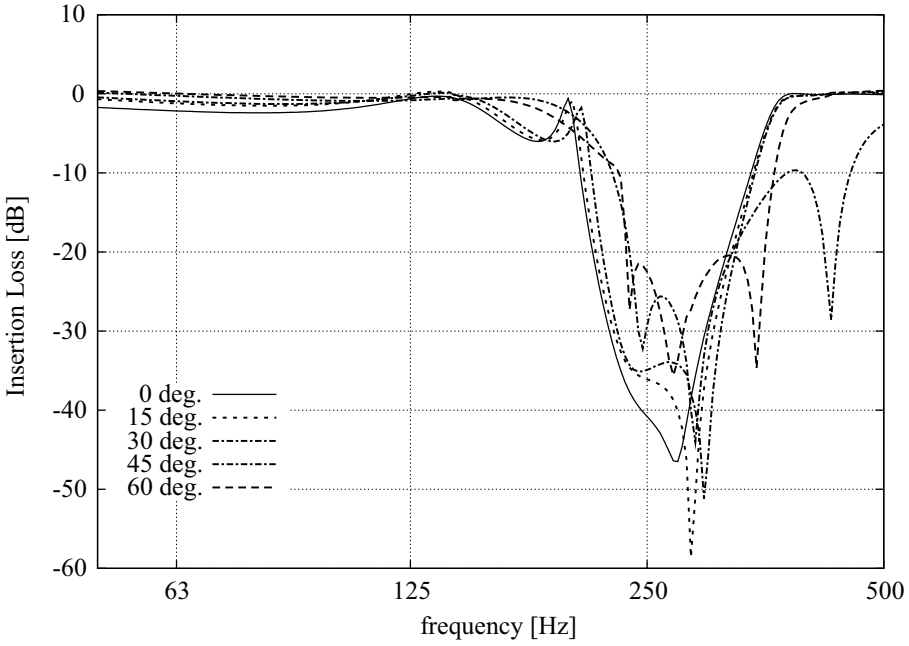

図 4.5: R-type テーパー型音響管の挿入損失（3 対配列で傾斜角を変化させた場合）

いが，傾斜角が 45 度以上の場合は共鳴周波数付近で複数のピークディップが見られ，連続した周波数で一定以上の効果が得られない結果となっている。次に，音響管断面寸法変化の影響を確認するため，傾斜角が 60 度の場合について配列長を一定として音響管の幅と本数を変化させて計算を行った。なお，これまで基本としていた 3 本の配列数では，全体の配列長を一定として音響管幅を拡げるための配列数を減らす余地が限られるため，227mm 幅の音響管 4 本配列するものを基準とし，454mm 幅を 2 本配列したもの，303mm 幅を 3 本配列したもの，151mm 幅を 6 本配列したものについて計算を行った。結果を幅 227mm の従来型音響管 4 本配列した場合とともに図 4.6 に示す。

結果より，音響管の幅が対象周波数の 1/6 波長である 227mm より拡がると 300Hz 付近の効果が小さくなり，音響管の幅が 454mm の場合は効果の得られる帯域幅も狭くなった。逆に音響管の幅を狭くすると 300Hz 付近の効果が大きくなった。このことから，傾斜角が増加した際に共鳴周波数付近で一定の効果が得られなくなる原因は，音響管深さ方向垂直断面幅の縮小では無いと考えられる。なお，傾斜角が大きく且つ音響管の幅が 1/3 波長程度に拡がった場合に良い効果が得られなくなる原因は，音響管内を平面波伝搬する波面により生成されるソフト境界面とダクト内を音波が進行する方向のなす角度が大きくなるため，実質的な音響管配列長が短くなってしまうためであると想像される。そのことを確認するために，R-type テーパー型音

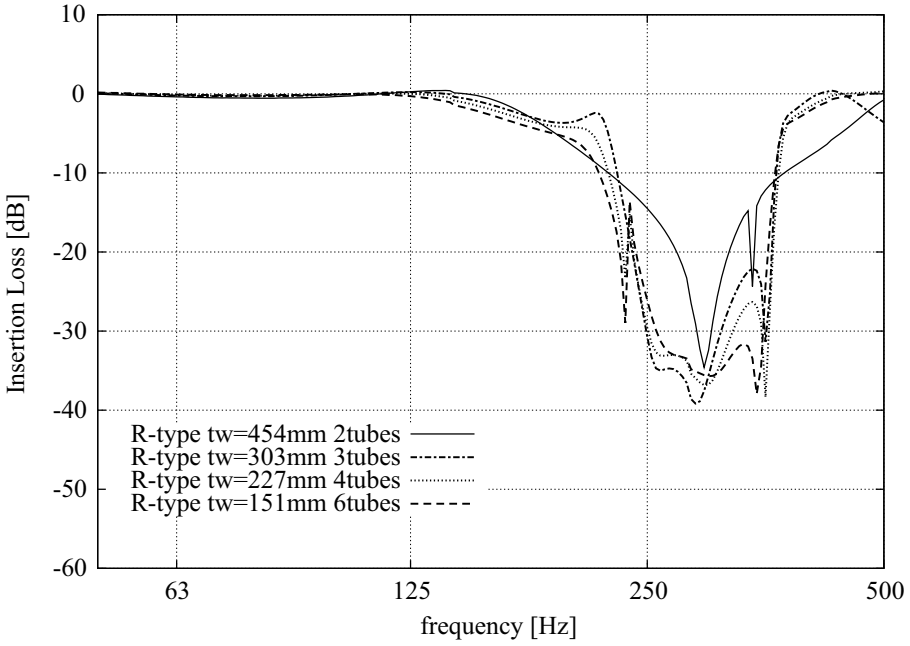

図 4.6: R-type テーパー型音響管の挿入損失（傾斜角 60 度，配列長一定で音響管幅と配列数を変化させた場合）

響間の傾斜角 30 度と 60 度，及び従来型音響管をいずれも音響管幅 227mm を 3 本配列したものについて，配列した音響管の片側とその前後を含むダクト部分の基準化音圧分布を計算した。計算周波数は，傾斜角 60 度の際に音圧が最小となる 270Hz とし，計算点間隔を 1cm 間隔とした。結果を図 4.7〜4.9 に示す。

従来型と傾斜角 30 度の場合は，音響管の共鳴現象による音圧極小部が音響管開口面に分布しており，ソフト境界が音響管開口面で概ね実現されている様子がうかがえ，音響管が配列されたダクト部分で音圧レベルが大きく減少している。しかし傾斜角 60 度の場合は，その音圧極小部が音響管開口面に沿って形成されていない。最も音源側の音響管付近では，音圧極小部がダクトの内部に湾曲しており，また音源と反対側の音響管付近でも，音圧極小部は音響管開口面に対して約 30 度の角をなして分布しており，音響管が配列されたダクト部分での音圧レベル現象がさほど大きくなっていない。音響管の共鳴現象により形成されるソフト境界面が音波伝搬方向である音響管開口面に沿って分布しないということは，音響管配列長が実質短くなることに相当するものと考えられることから，傾斜角が大きい場合には配列長を補うことが必要であると考えられる。そこで，配列長を補った場合の効果を確認するため，傾斜角 60 度の場合について 227mm 幅の音響管 3 本配列するもの，それと配列長を同じとした 136mm 幅を 5 本配列したもの，そしてそれら 2 種類の音響管配列について同じ幅の音響管を 1 本追加して配列長を長

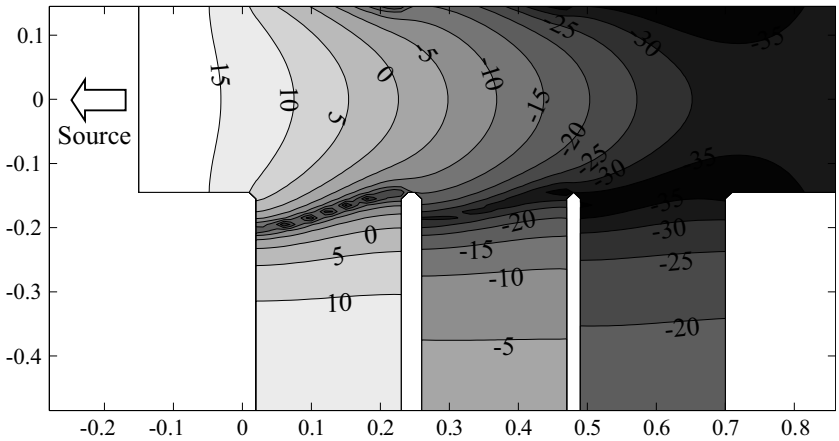

図 4.7: 従来型音響管の音圧分布

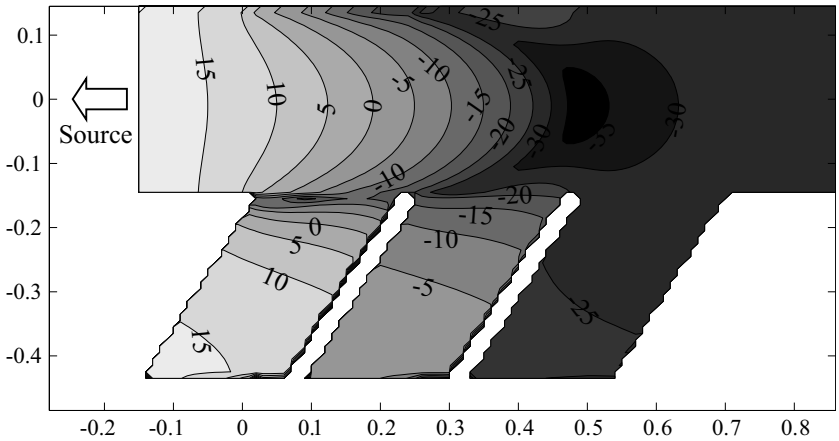

図 4.8: R-type テーパー型音響管（傾斜角 30 度）の音圧分布

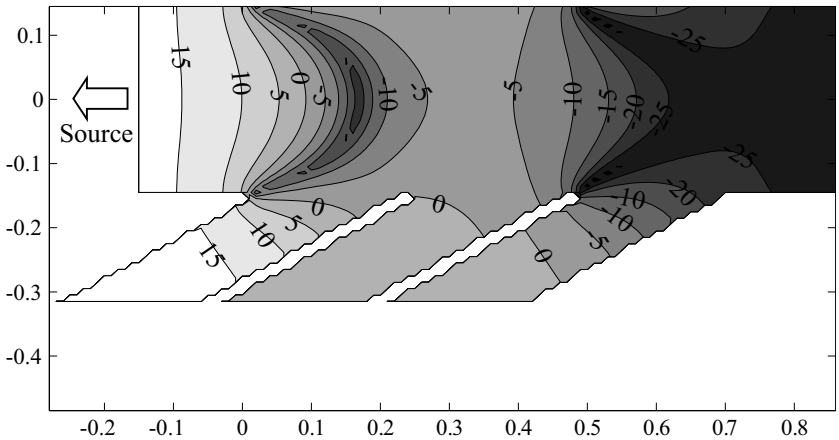

図 4.9: R-type テーパー型音響管（傾斜角 60 度）の音圧分布

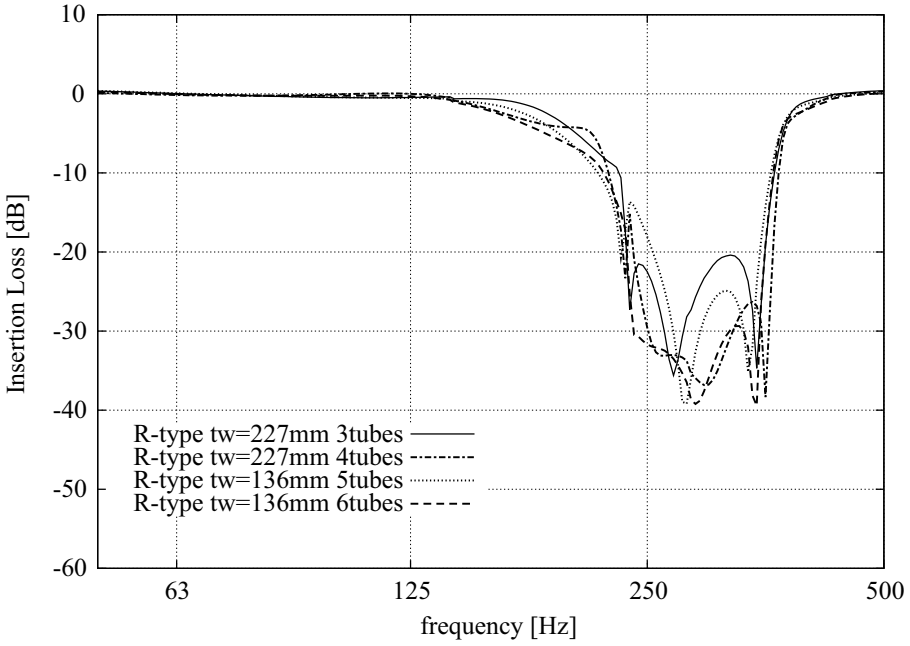

図 4.10: R-type テーパー型音響管の挿入損失（傾斜角 60 度で配列数を 1 本増やした場合の比較）

くした場合の合計 4 通りについて計算した結果を図 4.10 に示す。

どちらの音響管幅の場合も共鳴周波数付近で見られたピークとディップの差が小さくなっており，周波数帯域も低域側で拡がっている様子がわかる。なお，配列数を 1 本増やした場合の配列長は音響管幅が 136mm の場合の方が短いが，得られる効果は音響管幅 227mm の配列数を 1 本増やした場合と同程度であった。これらのことから傾斜角が大きい場合には，配列長を半波長より少し長くすると共鳴周波数付近で安定的な効果が得られるようになり，用いる音響管の幅は対象周波数の 1/6 波長より狭い方が有効であることがわる。なお，傾斜角が 60 度の場合は効果の得られる周波数帯域が高周波側へシフトしているが，同じ現象が配列数が 1 本の場合でも確認できた。この原因は，傾斜角を大きくしたことで開口部付近が音響管として機能していないことによるものと思われる。効果の得られる周波数帯域を同じにするためには，音響管を長くする必要があるが，共鳴周波数のシフトはせいぜい 0.13 オクターブ程度であり，音響管長さを増加させたとしても，60 度傾斜させたことによる体積の半減に比べればわずかなものである。

4.2　断面が台形のテーパー型音響管

4.2.1　CD-type テーパー型音響管の減音特性

最後に，図 4.11 に示すように音響管深さを 340 mm に固定し，音響管の体積を一定とするため”開口 A+ 管底 B”の長さを一定に保ち，音響管側壁の傾斜をさせて開口と管底の幅を変化させた音響管について検討した（以降 Constant depth の意味から CD-type と称する）。A:B を 1:2，2:3，3:2，2:1 と設定して行った計算結果を，A:B が 1:1 の従来型音響管の結果と併せて図 4.12 に示す。

結果より，A>B の場合は高周波へ，逆の場合は低周波へ共鳴周波数がシフトしており，比が大きくなるに従ってシフト幅も大きくなっている。このように音響管の深さと体積が一定であっても， CD-type テーパー型音響管により共鳴周波数を上下どちらにもシフトさせることが可能であることがわかった。

さらに A:B の比を拡大させ，共鳴周波数がシフトする様子を見た。A:B の比について，これまでの計算条件に加えて 1:10, 5:1, 3:1, 1:3, 1:5, 1:10 の設定を加え，1/54oct ごとに計算して各形状の共鳴周波数を調べた。更に，A:B=1:1 の共鳴周波数を基準とした各形状の共鳴周波数のシフト幅を求めた。結果を表 4.2 に示す。

A:B の比が拡大するに従い共鳴周波数のシフト幅も拡大することがわかった。開口と管底の幅を 5 倍以上に拡げるた場合，共鳴周波数は半オクターブ以上シフトしており，深さと体積が一定の音響管でも共鳴周波数をずらすことが可能であることがわかった。

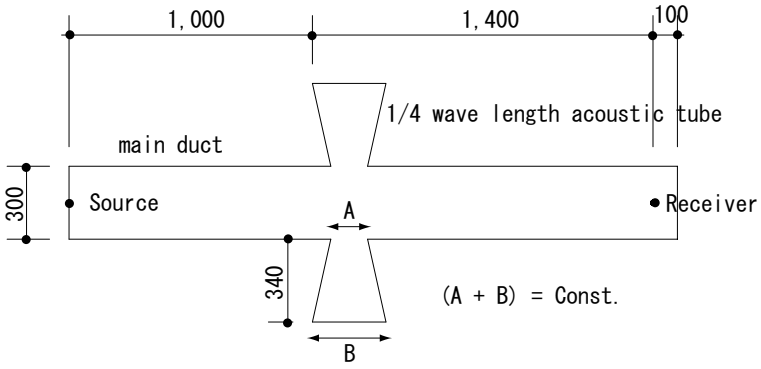

図 4.11: CD-type テーパー型音響管の形状と解析モデル

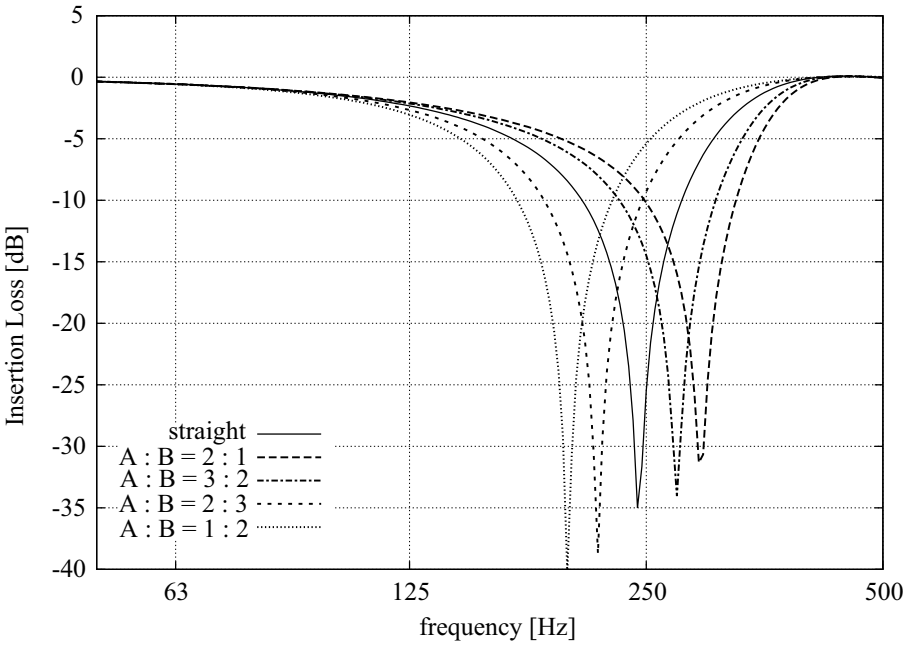

図 4.12: CD-type テーパー型音響管の挿入損失

表 4.2: CD-type テーパー型音響管の共鳴周波数とシフト幅

A:B	1:10	1:5	1:3	1:2	2:3	1:1	3:2	2:1	3:1	5:1	10:1
frequency [Hz]	128	150	177	198	217	244	273	292	319	349	377
shift [oct.]	-0.91	-0.68	-0.45	-0.28	-0.15	-	0.18	0.28	0.40	0.53	0.65

4.2.2　CD-type テーパー型音響管の共鳴周波数シフトに関する検討

CD-type テーパー型音響管は，深さを一定に保った音響管形状の変化であり，深さ以外の要素が共鳴周波数のシフトに寄与しているものと考えられる。開口部が拡がる音響管の共鳴周波数がシフトする理由は，図 4.13 の断面図左側のような芯材半径 a の剛な円筒に，長さ d の仕切り板により音響管を構成したいわゆる水車型円筒の周波数特性について，円筒進行波によって生じる定在波の解析から検討されている [17]。円筒を取り囲むように r→0 方向に伝搬する単位振幅の円筒波 $H_0^{(1)}(kr)$ が剛壁 r=a で反射することで生じる速度ポテンシャル $\Phi(r)$ は R を複素反射係数として次のように表される。

$$\Phi(r) = H_0^{(1)}(kr) + RH_0^{(2)}(kr) \tag{4.1}$$

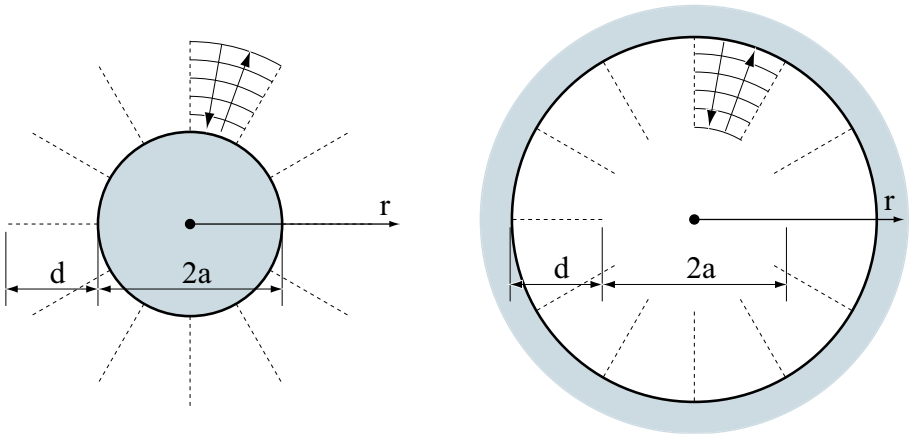

図 4.13: 円筒芯材及び中空円筒に仕切り板を付け，円筒内部及び外部に音響管を配列した断面図

剛壁の境界条件,

$$\left.\frac{\partial\Phi(r)}{\partial r}\right|_{r=a} = -k\left\{H_1^{(1)}(ka) + RH_1^{(2)}(ka)\right\} = 0 \tag{4.2}$$

より，反射係数 R は,

$$R = -\frac{H_1^{(1)}(ka)}{H_1^{(2)}(ka)} \tag{4.3}$$

と求められることから,

$$\Phi(r) = H_0^{(1)}(kr) - \frac{H_1^{(1)}(ka)}{H_1^{(2)}(ka)}H_0^{(2)}(kr) \tag{4.4}$$

となる。音響管の共鳴により水車型円筒表面 (r=a+d) の速度ポテンシャルが零，すなわち $\Phi(a+d) = 0$ となるのは，次の式を満たす周波数になる。

$$J_0\left(k(a+d)\right)Y_1(ka) - Y_0\left(k(a+d)\right)J_1(ka) = 0 \tag{4.5}$$

同様にして，開口部が狭くなる音響管についても図 4.13 断面図の右側のように半径 a+d の中空円筒の内側に仕切り板を設けて音響管を構成した場合を考える。中空円筒内を外側に向かって伝搬する単位振幅の円筒波 $H_0^{(2)}(kr)$ が剛壁 r=a+d で反射することで生じる速度ポテンシャル $\Phi(r)$ が，音響管の共鳴により r=a での速度ポテンシャルが零となるのは，次の式を満たす周波数になる。

$$J_1\left(k(a+d)\right)Y_0(ka) - Y_1\left(k(a+d)\right)J_0(ka) = 0 \tag{4.6}$$

ここで，CD-type テーパー型音響管の管底と開口の比が水車型円筒の芯材半径と溝の深さの比で決まるものとして，図 4.11 の A:B 及び B:A を 3:2, 2:1, 3:1, 5:1, 10:1 と変化させた場合に,

表 4.3: 円筒進行波による定在波の解析解と 2 次元境界要素法 (2D-BEM) による共鳴周波数の比較

A:B	10:1	5:1	3:1	2:1	3:2	2:3	1:2	1:3	1:5	1:10
f_{eq}	351	328	305	286	271	230	217	199	180	158
f_{bem}	377	349	319	292	273	217	198	176	152	128

式 (4.5) 又は (4.6) を満たす周波数 (f_{eq}) を計算した。結果を表 4.2 で示した 2 次元境界要素法による共鳴周波数 (f_{bem}) と併せて表 4.3 に示す。

f_{bem} 同様 f_{eq} についても，A:B の比が大きくなるほど 340mm を 1/4 波長とする周波数である 250Hz から低域と高域へそれぞれ大きくシフトする結果となった。このことから，音響管側壁が傾斜する CD-type テーパー型音響管の内部音場は，円筒波進行波の定在波に近い状況になっているものと推測され，共鳴周波数がシフトする原因になっているものと考えられる。なお，A:B の比が大きくなるに従い両者のずれは大きくなっているが，これは CD-type テーパー型音響管の管底が平面であるのに対し，水車型円筒の管底は A:B の比が大きくなるほど曲率が大きくなるという違いにより生じるものと考えられる。

なお，従来型音響管の共鳴周波数は，音響管深さを 1/4 波長とする周波数とその奇数倍で生じるが，CD-type テーパー型音響管では共鳴周波数が式 (4.5) や (4.6) に準ずることから，二次共鳴が一次共鳴周波数の奇数倍とならないことに注意する必要がある。A:B 及び B:A が 1:3, 1:5, 1:10 の場合の二次共鳴周波数について，二次元境界要素法による結果と式 (4.5) 及び (4.6) を満たす周波数の計算結果，及びそれぞれの結果について表 4.3 で示した結果との比率を表 4.4 に示す。表中の $f_{eq-2nd.}/f_{eq-1st.}$ 及び $f_{bem-2nd.}/f_{bem-1st.}$ は，一次共鳴周波数を基準とした二次共鳴周波数との比率を表すものである。A<B の場合は二次共鳴周波数が一次共鳴周波数の 3 倍より大きく，A>B の場合はその逆になっており，A:B の比が拡大すると共に二次共鳴周波数は一次共鳴周波数の 3 倍となる周波数からのずれが大きくなる傾向にあることがわかる。

表 4.4: 円筒進行波による定在波の解析解と 2 次元境界要素法による二次共鳴周波数の比較

A:B	10:1	5:1	3:1	1:3	1:5	1:10
f_{eq}	819	793	775	733	725	713
$f_{eq-2nd.}/f_{eq-1st.}$	2.33	2.42	2.54	3.68	4.03	4.51
f_{bem}	755	745	735	660	650	634
$f_{bem-2nd.}/f_{bem-1st.}$	2.15	2.27	2.41	3.75	4.28	4.95

4.3　テーパー型音響管の組み合わせによる広帯域化検討

前節までの結果を基に，テーパー型音響管を組み合わせることよるソフトダクトの広帯域化について検討した。図 4.14 のように，開口と管底の大きさが互いに逆になる 2 本の CD-type テーパー型音響管の中間に S-type テーパー型音響管を配置し，3 本の音響管を組み合わせたソフトダクトユニットをダクト両側に設置した。従来型音響管の効果と比較するため，音響管の高さは 250Hz の 1/4 波長となる 340mm とし，中間に設置する S-type テーパー型音響管の幅を 1/6 波長，その両側に設置される CD-type テーパー型音響管は中間に配列する S-type と同じ体積とする。従って，図 4.14 において A + B = 2/6 λ となり，音響管配列長は 1/2 波長となる。

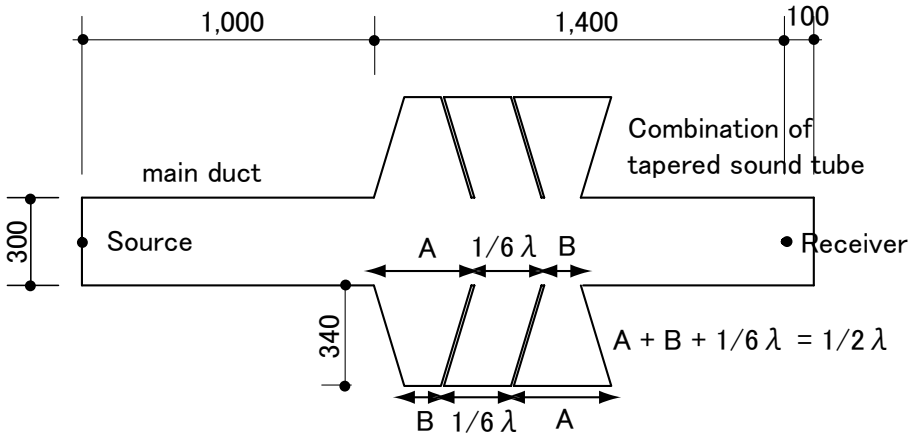

図 4.14: テーパー型音響管を組み合わせる場合の寸法及び解析モデル音場

このソフトダクトユニットの挿入損失について，前節同様に 2 次元境界要素法による数値計算を行った。図 4.14 で示した A と B の比を 2:1，7:3，8:3，3:1 とした場合の計算結果を，従来型音響管を 3 本配列した場合の結果も併せて，周波数特性を図 4.15 に，挿入損失が 20dB 及び 30dB 以上得られる帯域幅の一覧を表 4.5 に示す。

表 4.5: テーパー型音響管を組み合わせた場合に一定以上の効果が得られる帯域幅

A:B	IL ≥ 20dB	IL ≥ 30dB
1:1	0.57 oct.	0.41 oct.
2:1	0.70 oct.	0.60 oct.
7:3	0.77 oct	-
8:3	0.86 oct.	-

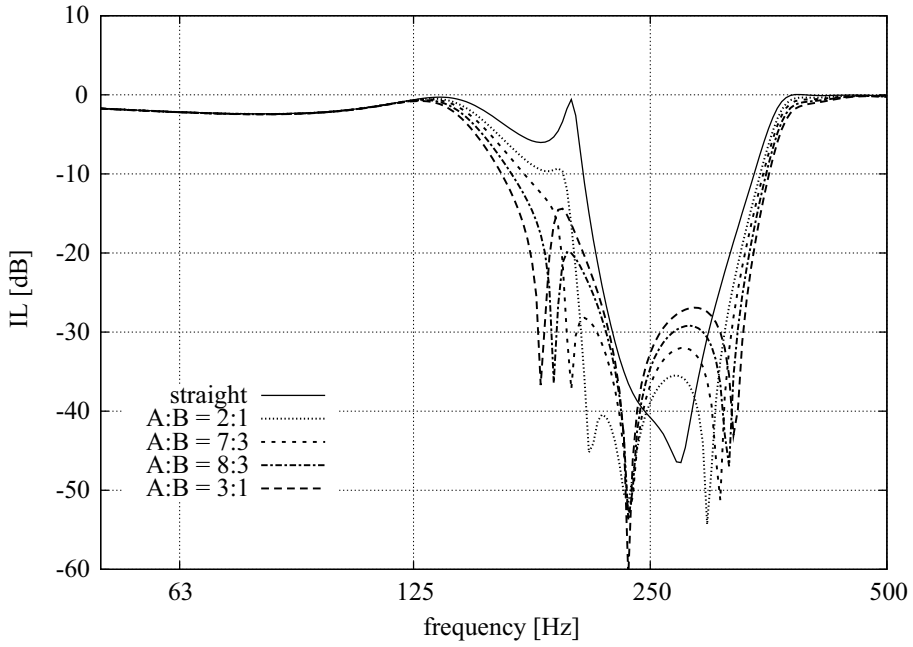

図 4.15: テーパー型音響管を組み合わせた場合の挿入損失

結果より，従来型音響管 (A:B=1:1) よりもテーパー型を組み合わせた方が，効果が広帯域に渡って得られることがわかる。開口と管底の幅を大きくするに従い効果の得られる帯域も拡がるが，幅比を大きくしすぎると周波数特性の乱れが大きくなり，連続的に一定以上の効果が得られなくなる。これは，配列した各音響管の共鳴周波数が離れすぎるために，クロスオーバーする周波数で効果が小さくなってしまうことによるものと考えられる。設計周波数の変化と共にダクトの幅も変化させた検討ではあるが，3 章の検討結果より設計周波数を連続的に変化させる音響管配列とする場合，連続した周波数で効果を得るためには隣り合う音響管の設計周波数シフト幅を一定以内に収める必要があることがわかっている。この場合において，A:B=2:1 の場合は 1/4 オクターブ以内に，A:B=8:3 の場合は 1/3 オクターブ以内にシフト幅が収まっており，A:B=2:1 の場合は連続した周波数で 30dB 以上の効果が，A:B=8:3 の場合は連続した周波数で 20dB 以上の効果が得られている。しかし，シフト幅が 1/3 オクターブを超える A:B=3:1 の場合は，周波数特性の変動が大きくなり連続して 20dB の減音効果が得られない結果であった。

連続した周波数で 30dB 以上の効果を得るには，A:B=2:1 のテーパー型音響管を組み合わせた配列により，従来の約 1.5 倍となる 0.6 オクターブ幅に渡りその効果が得られてた。同じく 20dB 以上とする場合も A:B=8:3 とすることで従来の約 1.5 倍となる 0.86 オクターブ幅に渡り効果が得られていた。なお，図 4.16 内の網掛けした範囲とする外形寸法で比較した場合は，A:B

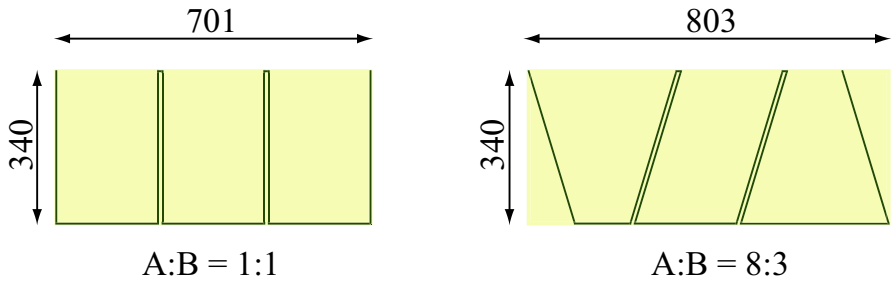

図 4.16: テーパー型音響管組み合わせによる A:B=1:1 及び 8:3 の外形寸法

の比に応じて大きくなり，A:B=8:3 のものは A:B=1:1 に比べて 1.15 倍の大きさとなる。しかし，同じ設計周波数の音響管配列で配列長を半波長から 1.15 倍配列長を延ばしても，図 3.7 や 3.8 の結果から 1.5 倍の帯域幅拡張は望めないと考えられる。従って，外形寸法はわずかに大きくなるものの，1.5 倍の帯域幅拡張は有意な広帯域化であると言える。

4.4　模型実験による検証

これまでに数値計算により検討したソフトダクトユニットについて，模型実験による検証を行った。

図 4.17 のように，ダクト中間に設置したソフトダクトユニットから十分離れた場所にスピーカとマイクロホンを設置し，ダクトのマイクロホン側終端には無反射端を設置した。ダクト及びソフトダクトユニットは全て 10mm 厚のアクリル板により構成されている。DSP System を PC でコントロールし，TSP 信号によるインパルス応答を測定した。サンプリング周波数は 48kHz, 同期加算は 3 回とした。なお，模型の奥行きは 200mm で一定である。数値計算が 2 次元音場での検討に対し模型実験は 3 次元となるが，奥行き寸法の半波長となる 850Hz 以下の周波数では奥行き方向への進行波が生じないため，その範囲では 2 次元音場と等価なものとして扱うことが出来るものとして，数値計算結果と比較検討する。

実験に使用したソフトダクトユニットのパターンは以下に記す A)〜D) の四つであり，いずれも 3 対の音響管から構成されるものである。

A) 長さ 340mm の従来型音響管を 3 対配列したもの

B) 傾斜角 45 度の S-type テーパー型音響管を 3 対配列したもの

C) 開口と管底の比が互いに逆になる組み合わせとした 2 対の CD-type テーパー型音響管（図 4.14 で A:B=2:1 としたもの）の中間に S-type テーパー型音響管を配置したもの

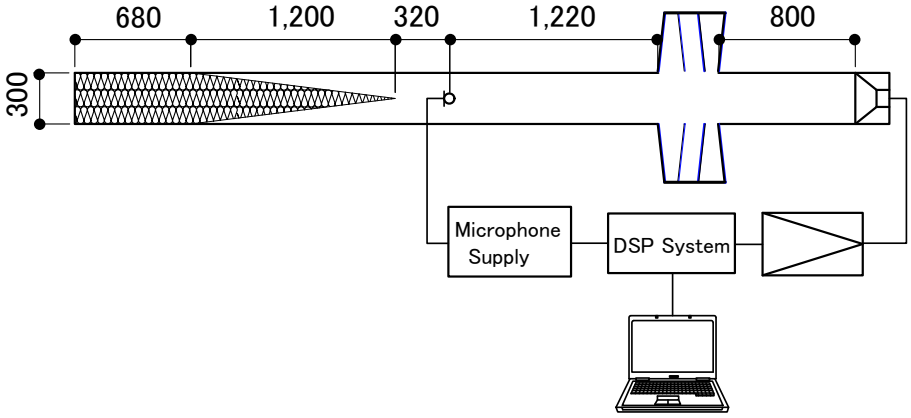

図 4.17: ソフトダクト模型実験の配置とブロックダイヤグラム

D) 深さ 414, 371, 281mm の従来型音響管を組み合わせたユニットを 1 対配列したもの

音響管の配列長は 250Hz の 1/2 波長で統一した。なお，上記ユニット D) の音響管長さはユニット C) の音響管に対応するものであり，414, 281mm は CD-type テーパー型音響管を 1 対配列した場合の共鳴周波数の 1/4 波長，371mm は S-type テーパー型音響管の深さに対応させたものである。ユニット C) 及び D) の形状と外形寸法を図 4.18 に示すが，ユニット C) の外形寸法はユニット D) の 0.91 倍の大きさである。実験の結果を図 4.19 に示す。

A) の従来型音響管に比べて，B) の S-type テーパー型音響管は効果の得られる帯域が低域へシフトしており，両者に 30dB 以上効果の得られる帯域幅にほとんど差は見られなかった。C) のテーパー型音響管の組み合わせは，各音響管の共鳴周波数が適切にクロスオーバーしていないことに起因するものと思われる効果の低下が 280Hz 付近で見られるが，それを除けば効果の

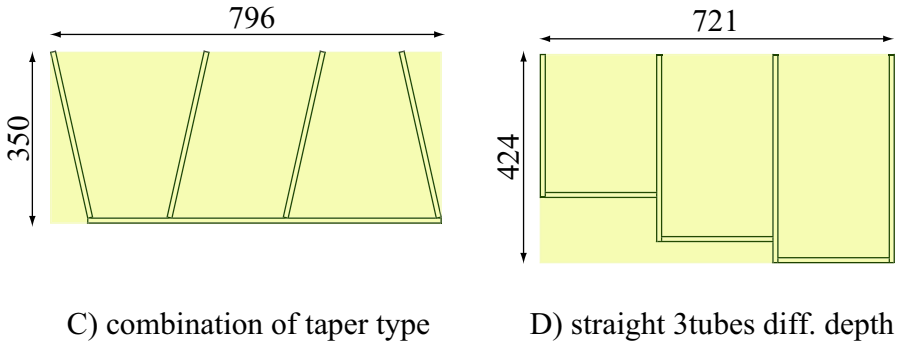

図 4.18: 模型実験に使用したユニット C) 及び D) の形状と外形寸法

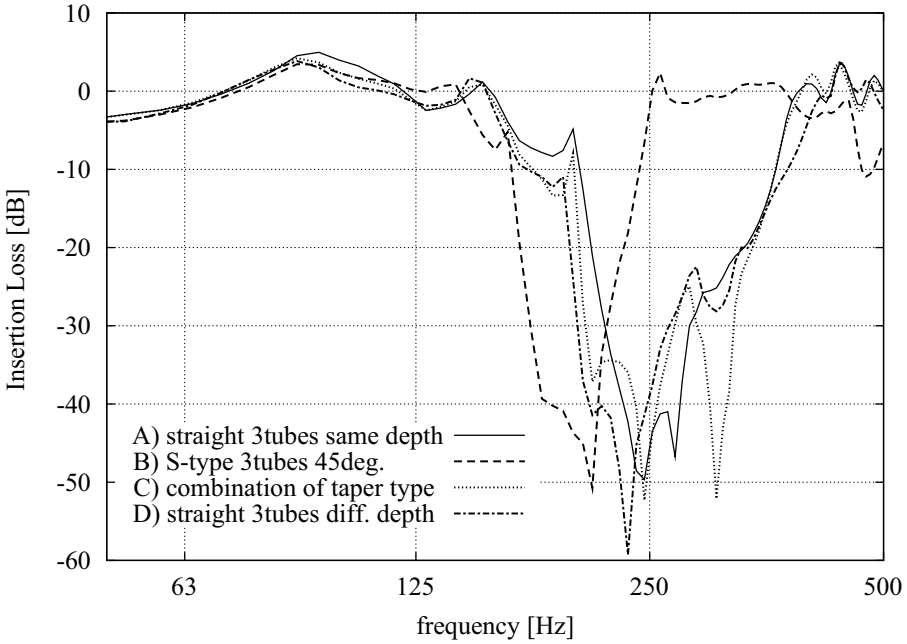

図 4.19: 模型実験結果

得られる帯域が拡がる結果となる。これらの点については 2 次元境界要素法による検討と同様の傾向であり，ソフトダクトユニットの体積を増加させることなく減音効果の広帯域化と低域へのシフトが可能であることが，実験においても確認された。また，D) の各テーパー型音響管の共鳴周波数に応じた長さの従来型音響管配列では，テーパー型音響管を組み合わせた場合と同程度の効果が得られた。このことから，音響管をテーパー型とすることが，従来型音響管の深さを調整することと等価なことであるということができる。また，ユニット C) の方が外形寸法が小さいことから，テーパー型の組み合わせにより縮小化が実現されていることになる。

なお，A) については 290Hz 以上で，C), D) については 330Hz 以上の周波数において，2 次元境界要素法の結果と比べて周波数特性の傾きが高周波側へより傾く結果となっている。このため，効果が 20dB 以上の帯域で見た場合には，A) に比べて B) の帯域は狭くなり C) の帯域は数値計算ほど拡大していない。この差異は，実験に用いた材料やソフトダクトユニットを構成する固有の寸法に起因するものと思われる。