

ダクトの消音性能向上に関する研究

関西大学 環境都市工学部 建築学科

建築環境工学第 I 研究室

建 1 8 - 1 6 海野 能矢

指導教員 豊田 政弘 教授

目次

第1章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	2
第2章 研究方法・研究条件	3
2.1 研究方法	3
2.2 研究条件	4
第3章 結果と考察	5
3.1 サイドブランチの本数、長さについて検討	5
3.1.1 サイドブランチ 1 本の場合	5
3.1.2 サイドブランチ 5 本の場合	8
3.1.3 サイドブランチ 5 本、吸音材ありの場合	10
3.1.4 サイドブランチ 13 本の場合	12
3.2 幅の細いサイドブランチについての検討	13
3.2.1 幅 0.01m、本数 5 本、吸音材なしの場合	13
3.2.2 幅 0.01m、本数 24 本、吸音材ありの場合	15
3.3 サイドブランチの形状についての検討	17
3.3.1 複雑な形の場合	17
3.3.2 ユニット化した場合 (1 面)	19
3.3.3 ユニット化した場合 (4 面)	22
3.3.4 ユニット化した場合 (4 面×2)	24
3.3.5 ユニット化した場合 (4 面×2)	26
3.3.6 ユニット化した場合 (4 面×5)	28
第4章 終わりに	29
参考文献	30

1. 序論

1.1 研究背景

近年、日常生活で空調調和設備は必要不可欠なものとなっている。しかし、空調調和設備のダクトから発せられる騒音が問題視されている。空調調和設備は、住宅やホテル、学校、病院などの建物はもちろんのこと、コンサートホールや劇場、ライブスタジオなどの音を主に扱い表現する場でも設置されている。

ダクトには、ダクトに接続された吸排気ファンが回ることによって空気が送風されるが、それと同時に音も発生する。その発生した音がダクト内部を伝搬し、さらにはダクト内部から外部へ音が放射されることで騒音となる。ファンの大きさや吹き出し口、回転数などによって騒音の音域が変わる。この騒音問題を解決するために、消音装置が設置される場合がある。消音装置には、消音チャンバや消音エルボと呼ばれるインピーダンスの急変による反射を利用した反射型と、ダクト内部に吸音材を設置して音のエネルギーを吸収する吸収型がある[1]。消音効果が生じる周波数帯が異なることなど、それぞれに特徴がある。

吸音型の消音装置はダクト内部に吸音材を設置するため、ダクト断面が小さいと吸音材を設置できる面積が小さくなるため吸音効果が得にくいと考えられる。また、空調調和設備の本来の目的である十分な送風量を確保することが難しくなると考えられる。また、消音チャンバは配置スペース、消音エルボはダクト経路の複雑化が問題になると思われる。一方、ダクト外に枝状の追加ダクトを設置するサイドブランチという対策が提案されている。この方法は送風量を維持でき、効率的に吸音することができるという利点があるが、効果の生じる周波数が極めて限定的であるという欠点がある。

1.2 研究目的

ダクト内部を伝搬する騒音を、サイドブランチを用いて低減することを目的とする。その際、幅広い音域に効果を発すること、また、設備が大きいと設置スペースが必要となり、建築コストが高くなるため、コンパクトな装置とすることを併せて考慮する。

2. 研究方法・研究条件

2.1 研究方法

本研究では COMSOL Multiphysics というソフトウェアを使って消音効果の予測計算を行う。COMSOL Multiphysics とは、有限要素法をベースとした汎用のシミュレーションシステムである。有限要素法とは解析的に解くことが難しい微分方程式の近似解を数値的に得る方法の一つである。多様な物理現象に対応でき、複雑な状況をモデル化することが可能で精度の高い検証結果を得やすくなっている。今回の検討で使用する圧力音響モジュールは音の放射、伝達、回折、散乱などの音響効果をモデル化することができる。

2.2 研究条件

本研究はサイドブランチという対策を応用する。サイドブランチとは空調ダクトに枝状の追加ダクトを設け、枝状のダクト端部から反射する音とメインダクトを伝搬する音の干渉により音圧を低減する方法である。

音圧はプラスとマイナスが交互に伝搬し、波を形成している。サイドブランチに入る前がプラスの音圧だった場合、もし、サイドブランチに音が入り、反射した（跳ね返ってきた）音がマイナスだったとすると、入る前のプラスの音と跳ね返ってきた音が打ち消し合って0になる。このように、サイドブランチを経由することで位相がちょうど逆転する周波数でのみ効果を発する。

本研究では、幅広い帯域に対応するため、図-1のような形で複数のサイドブランチをメインダクトに取り付ける。サイドブランチの「幅」と「長さ」の定義は図-1の通りとする。

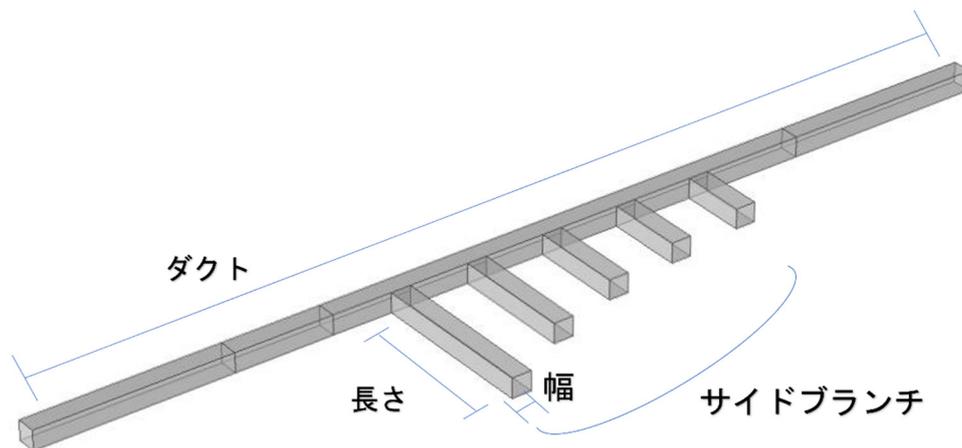


図-1 メインダクトとサイドブランチの配置

また、メインダクトの断面は0.1 m角、長さは無限とする。図-1の左手前側から音波が入射すると仮定し、右奥側の断面を透過した音波のエネルギーを消音効果の判定材料とする。COMSOLで発生させる音圧振幅は1 [Pa]、ダクト内の空気密度は1.2 [kg/m³]、音速は340 [m/s]とする。

3. 結果と考察

3.1 サイドブランチの本数、長さについて検討

3.1.1 サイドブランチ 1 本の場合

まず、サイドブランチの本数と長さが透過率にどのように影響するかを調べる。ここでは、サイドブランチ 1 本について検討する。なお、サイドブランチの幅は 0.1 [m]、長さは 0.85 [m] とする。メインダクトの原点とする場所から 0.3 [m] 離れた位置にサイドブランチを配置する。また、この検討については 2 次元音場を対象とする。



図-2 本数 1 本の配置

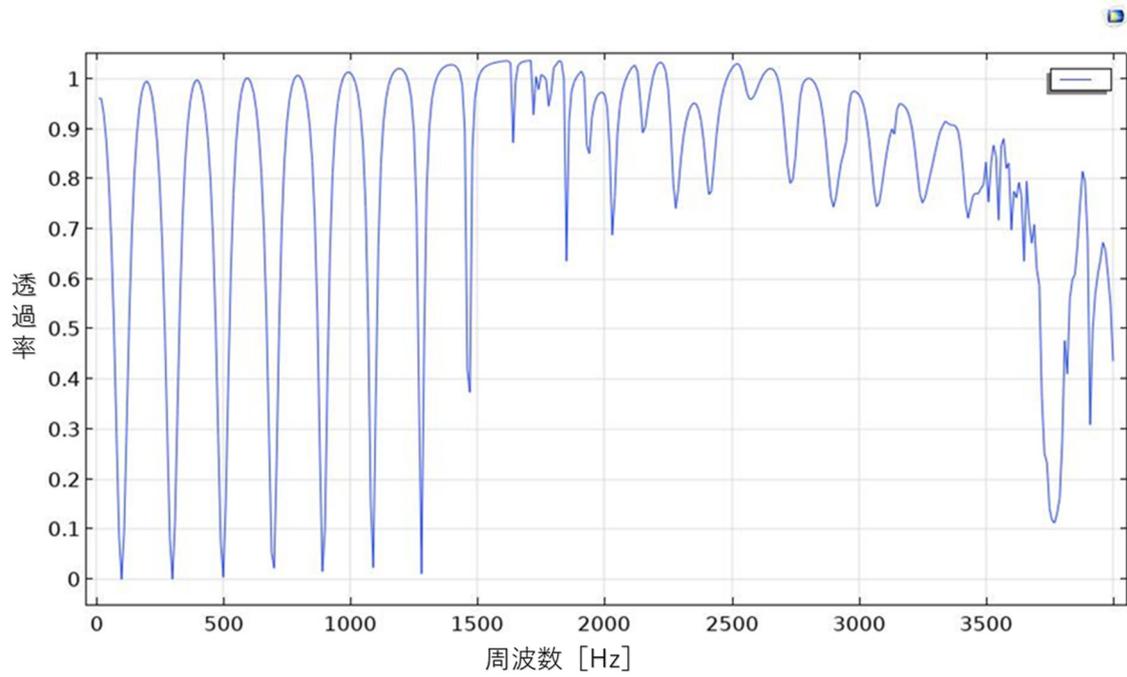


図-3 サイドブランチ 1 本のグラフ

図-3 に透過率の周波数特性を示す。これを見ると、100 Hz、300 Hz、500 Hz・・・のように約 100 Hz から 200 Hz ごとに、透過率が減少している、すなわち、消音性能が高いということが分かる。

音速を c [m/s]、周波数を f [Hz]、波長を λ [m]、とすると

$$c = f\lambda \quad (1)$$

と表すことができ、これを变形すると

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2)$$

となる。また、サイドブランチは片側閉管の気柱共鳴と関係していると考えられ、長さが $1/4$ 波長と等しくなるときに効果を発する。サイドブランチの長さを L [m] とすると、この条件は、

$$\frac{1}{4}\lambda = L \quad (3)$$

と表され、(2) 式より

$$\frac{1}{4} \cdot \frac{c}{f} = L \quad (4)$$

となる。したがって、100 Hz で消音したいのならば、

$$f = \frac{c}{4L} \quad (5)$$

$$f = \frac{340}{4L} \quad (6)$$

$$f = \frac{85}{L} \quad (7)$$

$$100 = \frac{85}{L} \quad (8)$$

$$L = 0.85 \quad (9)$$

となる。

この検討を踏まえ、長さを変えたサイドブランチを複数本付け加えると、幅広い周波数の透過率を低減できるのでないかと考えた。

3.1.2 サイドブランチ 5 本の場合

前項の方法で 100 Hz～300 Hz の帯域で透過率が減少するように計算し、幅 0.1 [m] で長さが 0.85 [m]、0.61 [m]、0.47 [m]、0.39 [m]、0.33 [m] の 5 本のサイドブランチを、最も長いサイドブランチ位置を基準として 0.4 [m] 間隔で配置する。なお、この検討も 2 次元音場を対象とする。

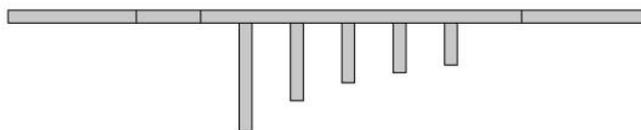


図-4 サイドブランチ 5 本の配置

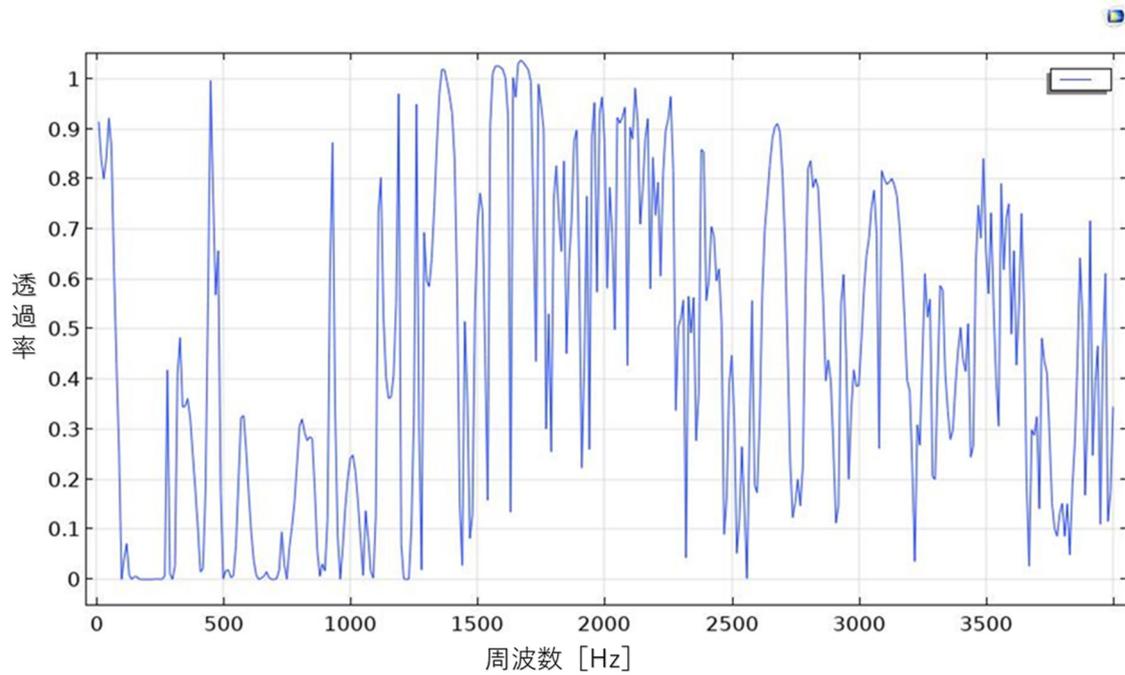


図-5 サイドブランチ 5 本のグラフ

図-5 に透過率の周波数特性を示す。長さの違うサイドブランチを複数本設置することで幅広い帯域で透過率が減少し、さらには、長さを短くすると高周波数帯域での透過率の減少にも一定の効果があることが分かる。しかし、3.1.1 で検討したように、長さによって一定周期の周波数のみでしか効果が得られないので、300 Hz 以降は消音効果にばらつきが生じる。

3.1.3 サイドブランチ5本、吸音材ありの場合

ここでは、サイドブランチ内部に多孔質吸音材を充填した場合、透過率がどのように変化するかを調べる。前項と同様にサイドブランチの幅は0.1 [m] 角、長さは0.85 [m]、0.61 [m]、0.47 [m]、0.39 [m]、0.33 [m] の5本とし、0.4 [m] 間隔で配置する。なお、吸音材の流れ抵抗は1000 [N・s/m⁴]、2000 [N・s/m⁴]、4000 [N・s/m⁴]、8000 [N・s/m⁴]、10000 [N・s/m⁴]で比較し、一番効果が表れた1000 [N・s/m⁴]を用いる。以降の吸音材の流れ抵抗については1000 [N・s/m⁴]を使用する。この検討については、3次元音場を対象とする。

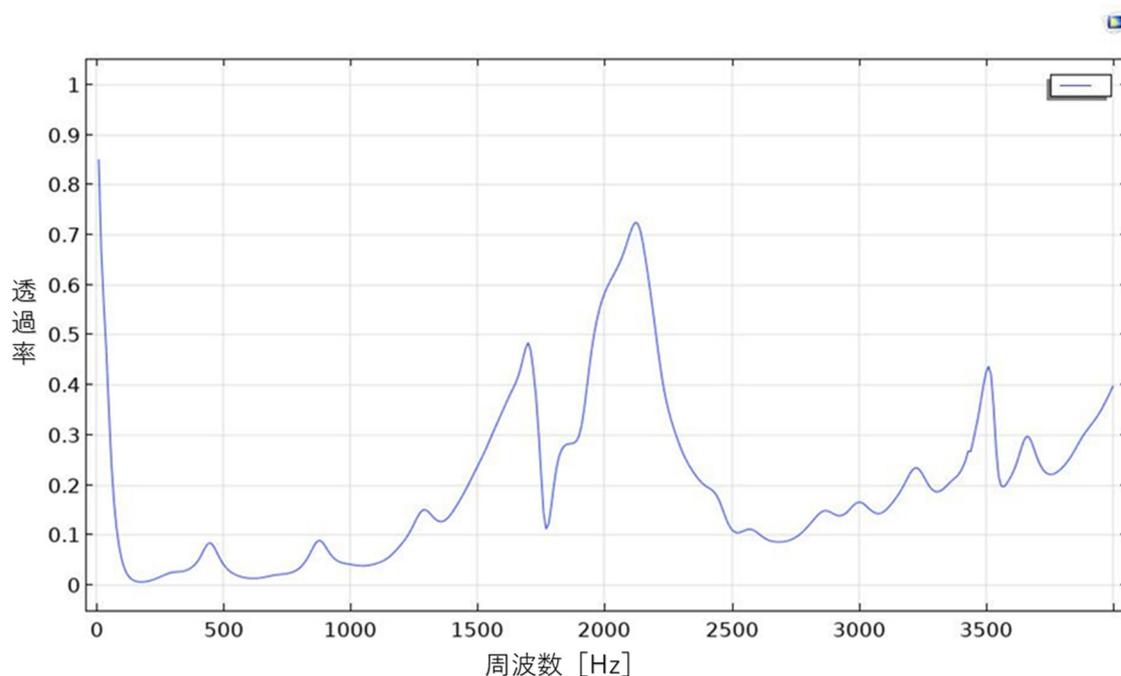


図-6 本数5本、吸音材ありのグラフ

図-6に透過率の周波数特性を示す。多孔質吸音材を充填すると大幅な透過率の低減がみられる。ここから、サイドブランチによる音の干渉効果とともに、吸音材によるエネルギー吸収効果が表れたと考えられる。しかしながら、2200 Hz付近で比較的高い透過率を示しており、これを低減するために次項では0.33 [m]より短いサイドブランチをつけることを検討する。

3.1.4 サイドブランチ 13 本、吸音材ありの場合

前項で透過率が増加していた 2200 Hz 付近の値を低減するために 0.2 [m]、ならびに、0.05 [m] の長さのサイドブランチを増やして検討する。なお、サイドブランチの幅は 0.05 [m]、長さは 0.85 [m] × 2 本、0.61 [m] × 2 本、0.47 [m] × 2 本、0.39 [m] × 2 本、0.33 [m] × 2 本、0.20 [m] × 2 本、0.05 [m] とし、メインダクトの原点とする場所から 0.1 [m] 離れた位置に 0.85 [m] を 1 本配置し、それを基準に 0.61 [m]、0.47 [m]、0.39 [m]、0.33 [m]、0.20 [m]、0.05 [m]、0.85 [m]、0.61 [m]、0.47 [m]、0.39 [m]、0.33 [m]、0.20 [m]、0.05 [m] の順で 0.2 [m] 間隔で配置する。

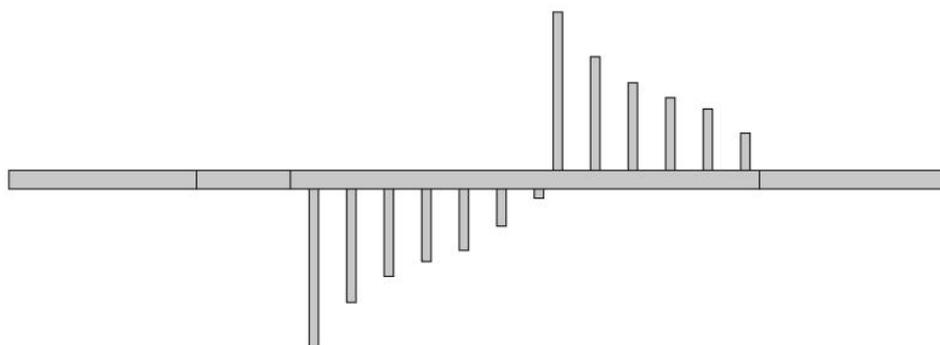


図-7 本数 13 本、吸音材ありの配置

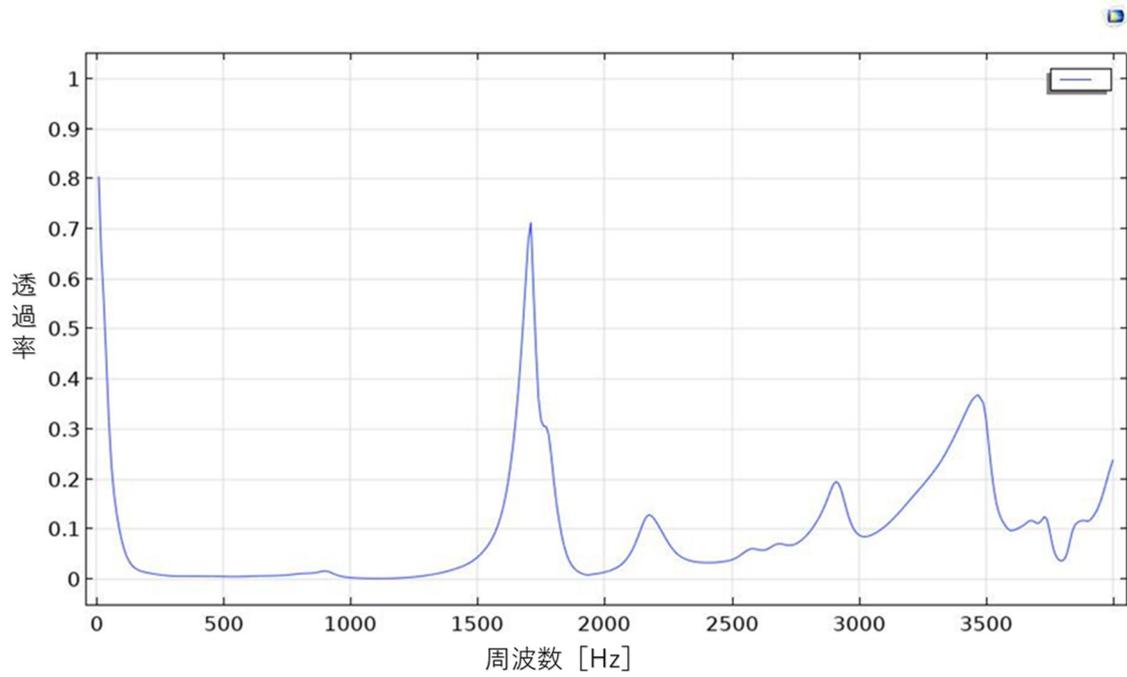


図-8 本数 13 本、吸音材ありのグラフ

図-8 に透過率の周波数特性を示す。2200 Hz 周辺、ならびに 3500 Hz 以上の透過率が低減された。

3.2 幅の細いサイドブランチについての検討

3.2.1 幅 0.01 m、本数 5 本、吸音材なしの場合

消音装置のコンパクト化のためにサイドブランチの幅を 0.1m から 0.01m に変更し、長さは 0.85 [m]、0.61 [m]、0.47 [m]、0.39 [m]、0.33 [m] とした。また、メインダクトの原点とする場所から 0.3 [m] 離れた位置に 0.85 [m] のサイドブランチを配置し、残りを 0.4 [m] 間隔で配置する。

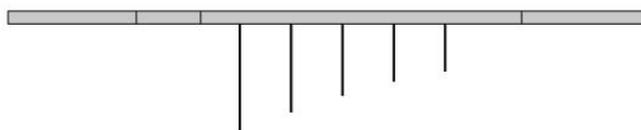


図-9 本数 5 本、幅 0.01 [m] の配置

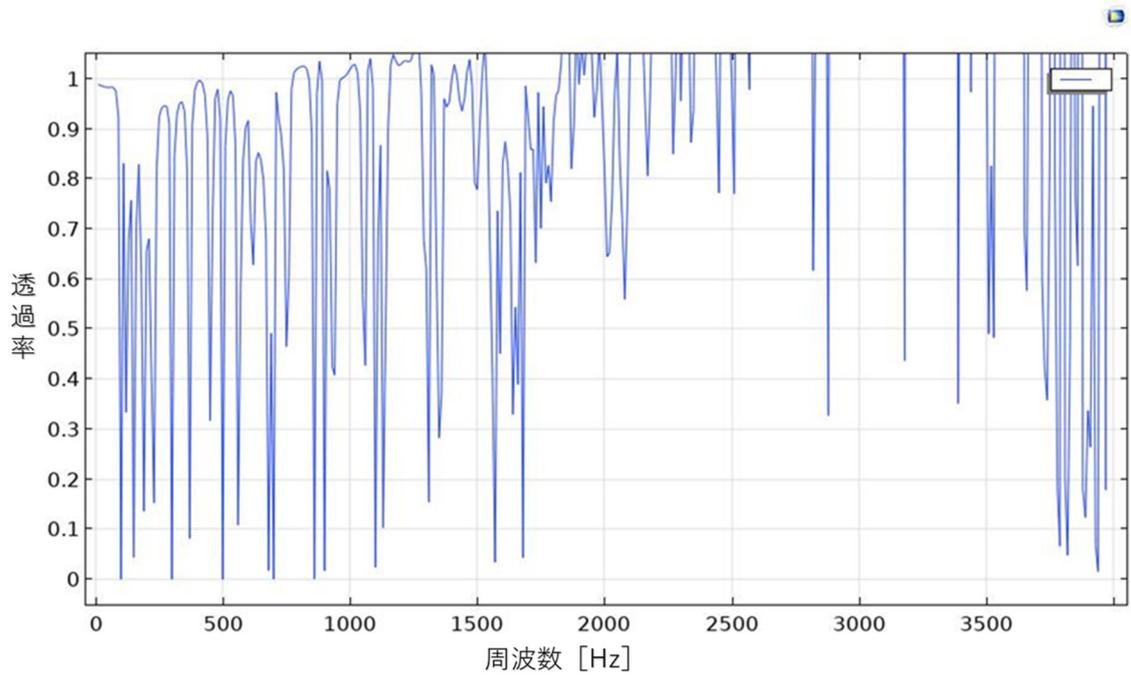


図-10 本数 5 本、幅 0.01 [m] のグラフ

図-10 に透過率の周波数特性を示す。サイドブランチの幅を細くしたときの方が、透過率は高く、消音性能が低いことが分かる。ここから、サイドブランチの幅を補足すれば、サイドブランチに入射する音波が少なくなり、効果が得にくくなるということが考えられる。

3.2.2 幅 0.01 m、本数 24 本、吸音材ありの場合

幅は 0.01 m のまま、サイドブランチの本数を増やし、多孔質吸音材を充填して計算を行った。なお、サイドブランチは図-10 のようにメインダクトの上端に 12 本、下端に 12 本付けることとし、長さ 0.85 [m]、0.61 [m]、0.47 [m]、0.39 [m]、0.33 [m]、0.2 [m] のサイドブランチを 0.1 [m] 間隔で交互になるように設ける。

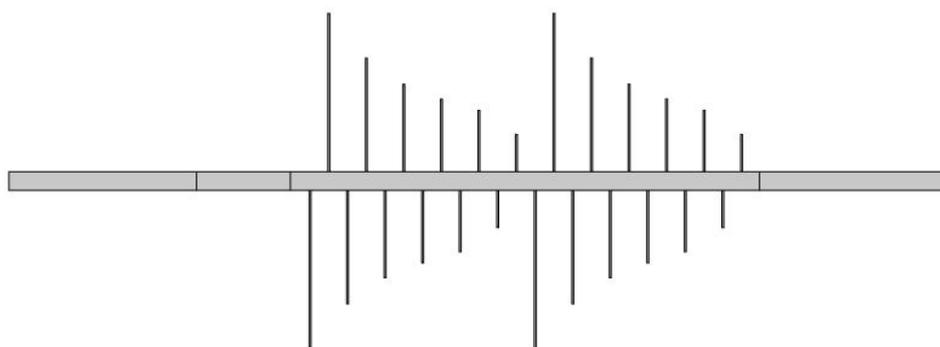


図-11 幅 0.01 [m]、本数 24、吸音材ありの配置

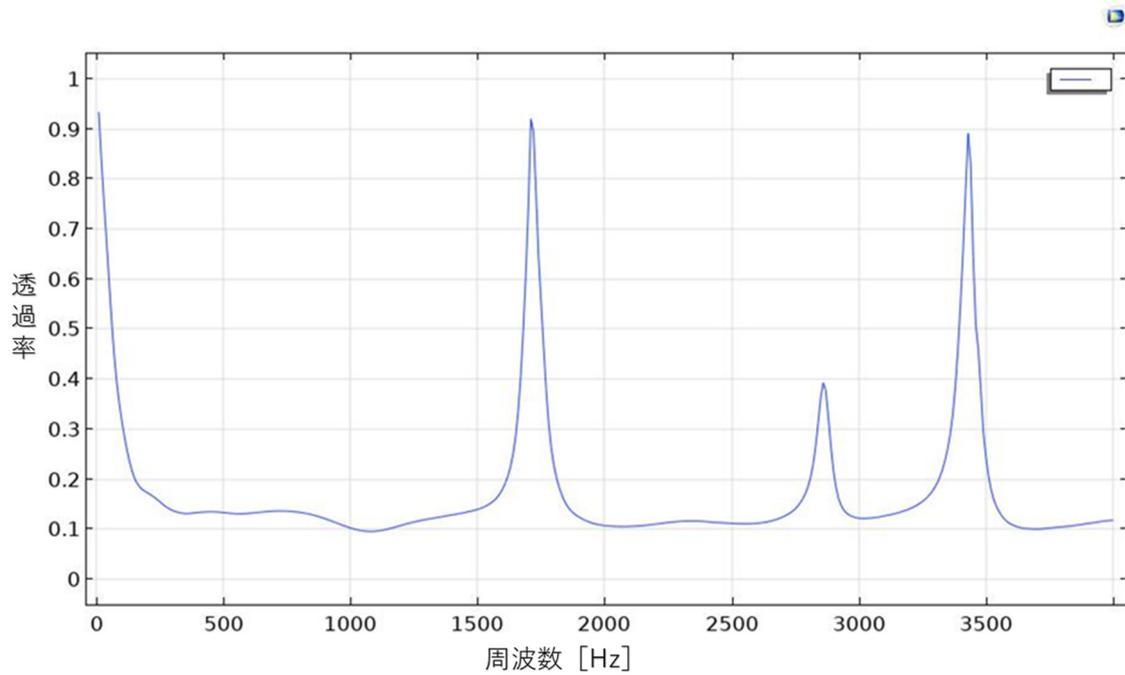


図-12 本数 24 本、幅 0.01 [m]、吸音率ありのグラフ

図-12 に透過率の周波数特性を示す。幅が細いほうが遮音性能は低くなることが 3.2.1 で分かったが、細いサイドブランチであっても本数を多くすると十分な消音性能を得られる可能性があることが分かった。

3.3 サイドブランチ形状についての検討

3.3.1 複雑な形の場合

サイドブランチをコンパクトにまとめるために、メインダクトに巻き付けるというイメージで図-8のように形状を変更した。幅は0.1 mとし、長さは0.85 [m]、0.61 [m]、0.47 [m]、0.39 [m]、0.33 [m] とする。なお、以降の検討においてサイドブランチ内部に多孔質吸音材を充填することとする。また、3次元音場を対象とする。

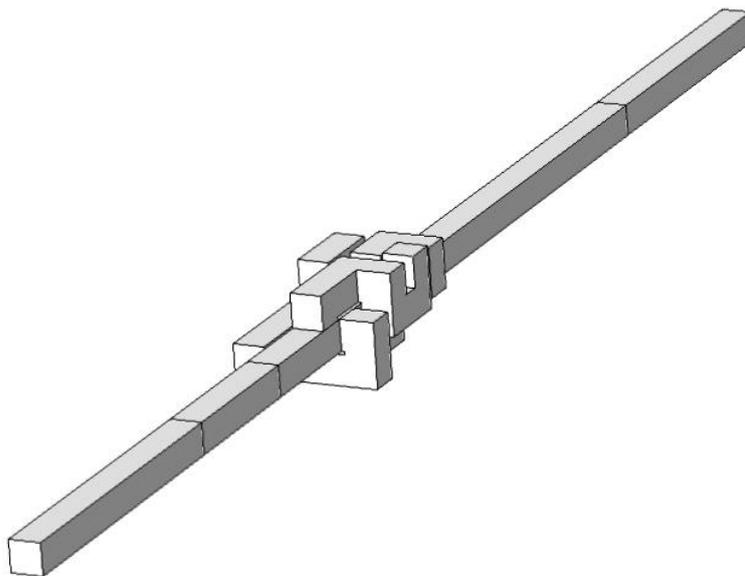


図-13 複雑な形のイメージ図

幅は十分であると考えられるが、サイドブランチが曲がっているため、入射した音波が反射し、消音効果が小さくなることが懸念される。

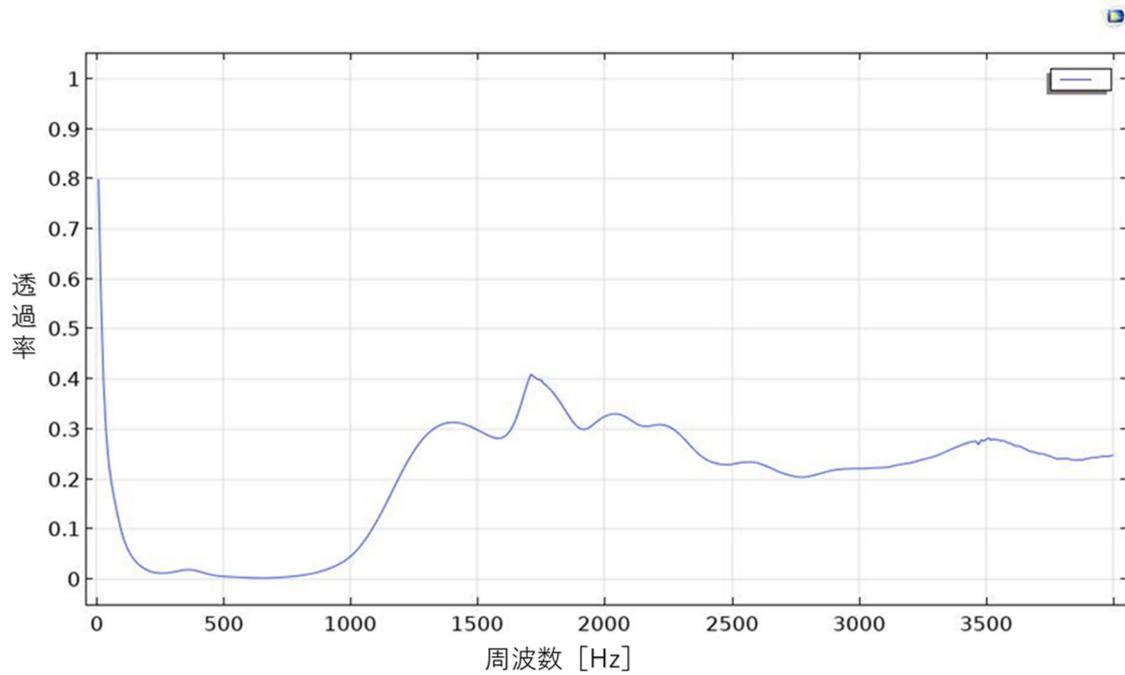


図-14 複雑な形のグラフ

図-14 に透過率の周波数特性を示す。3.1.3 の直線状のサイドブランチと比較すると、サイドブランチの形を変えた場合のほうがむしろ安定して消音できている。1700 Hz 付近や 2200 Hz 付近も透過率は 0.3 になっており、サイドブランチを曲げることが消音性能を低くするという懸念は深刻ではないものと思われる。しかし、形が複雑なためダクトによっては設置できない可能性があるため、さらにコンパクトにユニット化したものを考える。

3.3.2 ユニット化した場合（1面）

コンパクトにするために、長さ 0.85 [m]、0.61 [m]、0.47 [m]、0.39 [m]、0.33 [m]、0.20 [m]、幅 0.01m の細いサイドブランチを図-9のようにユニット化し、メインダクトに張り付けるようにした。また、図-15のように0.1 [m] のダクトの幅に合うように、ユニットサイズを0.1 [m] ×0.29 [m] にすることで収まりを良くした。

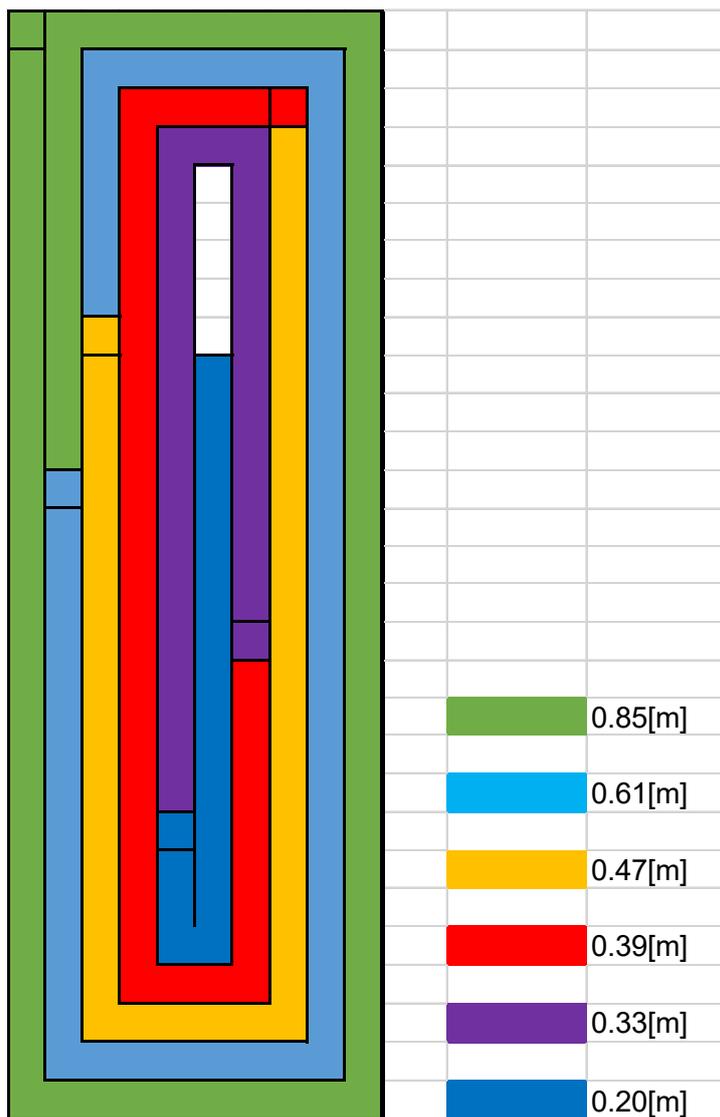


図-15 ユニットの2次元図

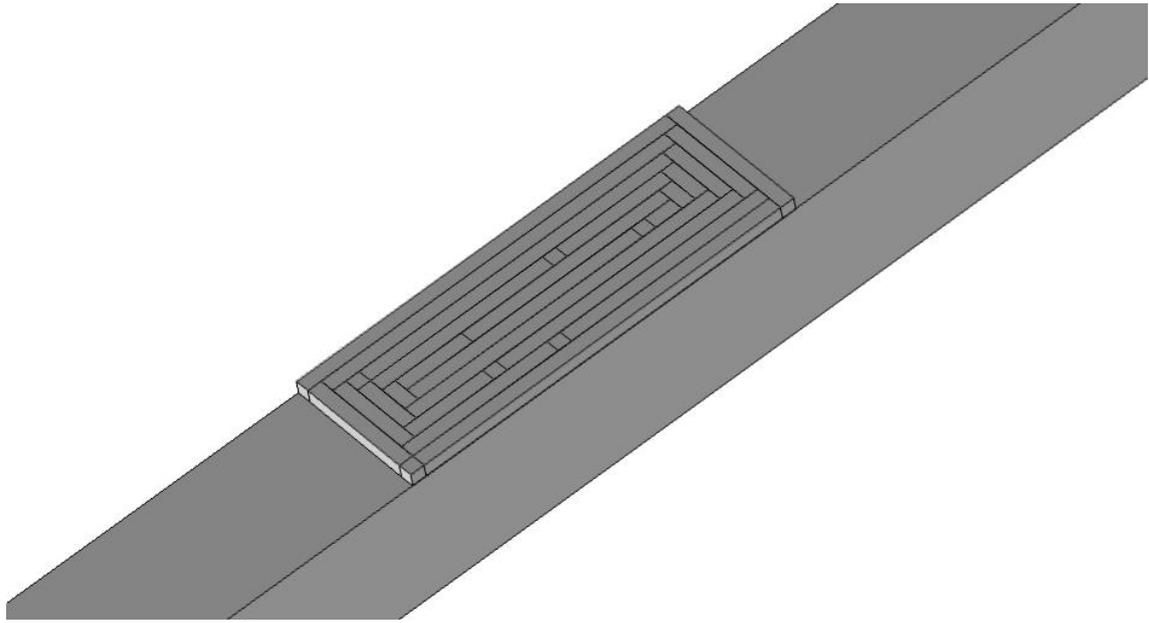


図-16 ユニットの配置

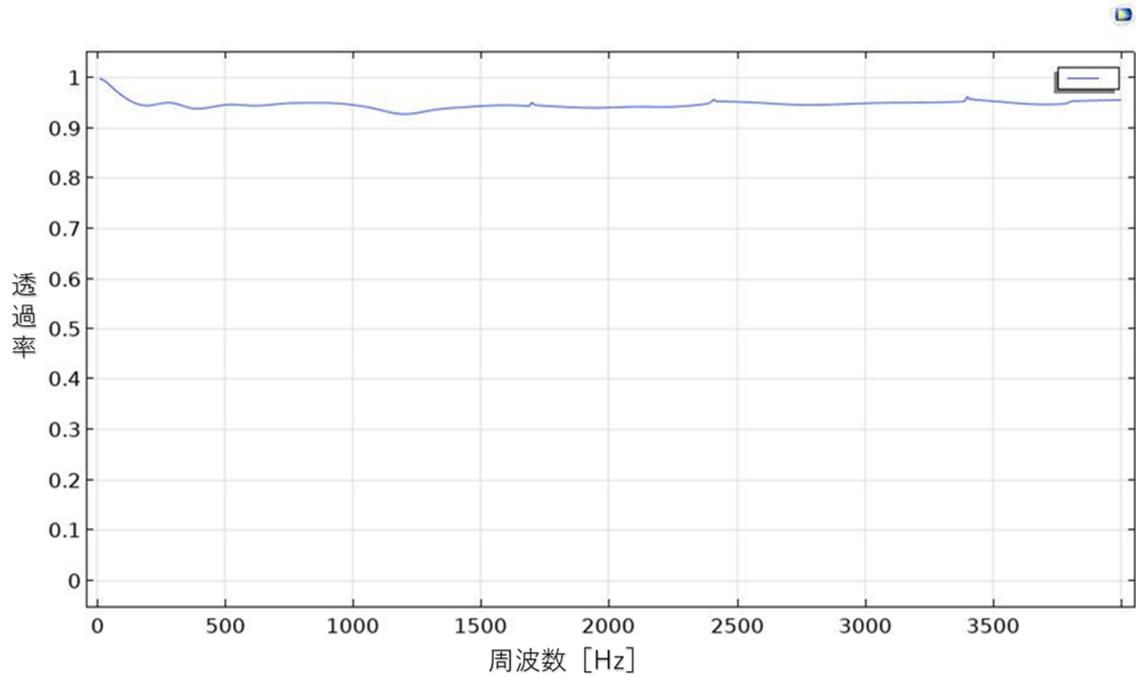


図-17 ユニット（1面）のグラフ

図-17 に透過率の周波数特性を示す。図-16 のような1面のみへのユニットの取り付けでは透過率の減少が非常に乏しいことがわかる。しかしながら、3.2.2 で見られたように、たくさんのユニットを取り付けることで消音性能が高くなる可能性がある。

3.3.3 ユニット化した場合（4面）

3.3.2 で作成したユニットをメインダクトの4側面に張り付けた。

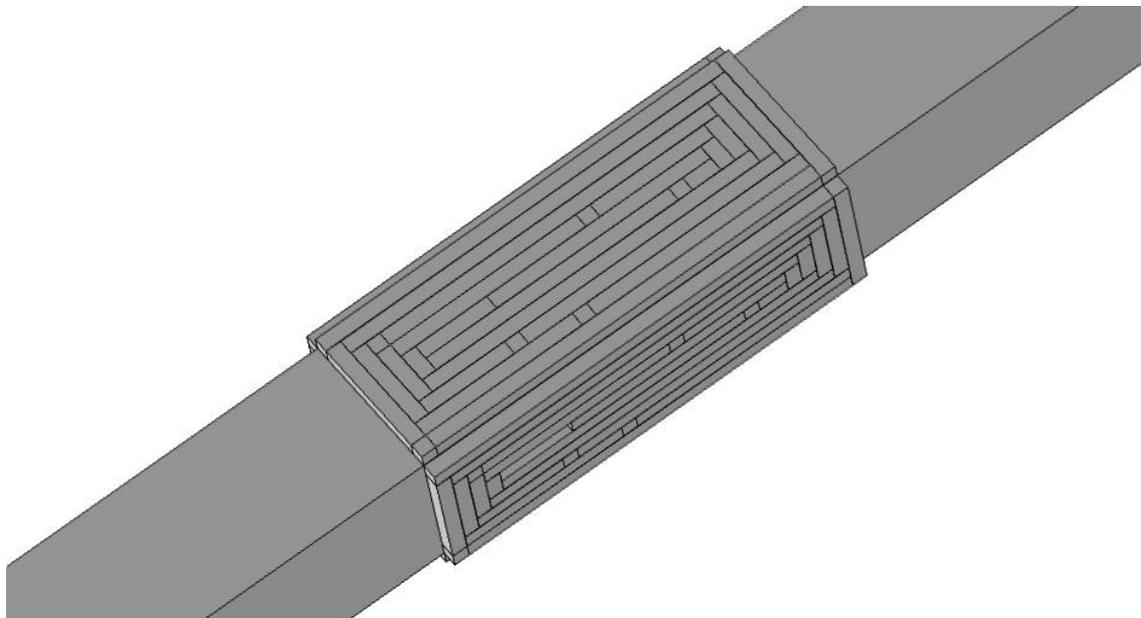


図-18 ユニット（4面）の配置

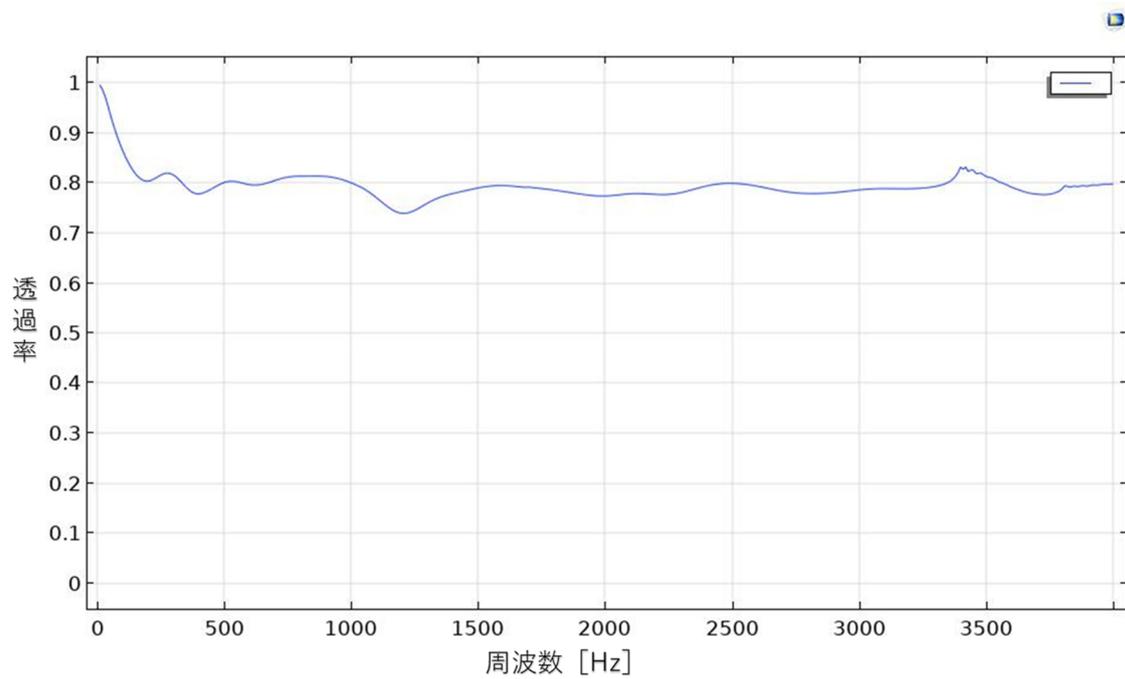


図-19 ユニット（4面）のグラフ

図-19 に透過率の周波数特性を示す。図-17 と比較して透過率が約 0.12 減少している。これより、ユニットを複数個つけると透過率が減少することが分かる。また、ユニットを 4 面つけるごとに透過率が約 0.12 ずつ低下する可能性が考えられる。

3.3.4 ユニット化した場合（4面×2）

前項と同様に4面、そこから0.2[m]離れた位置にさらに4面設置する。

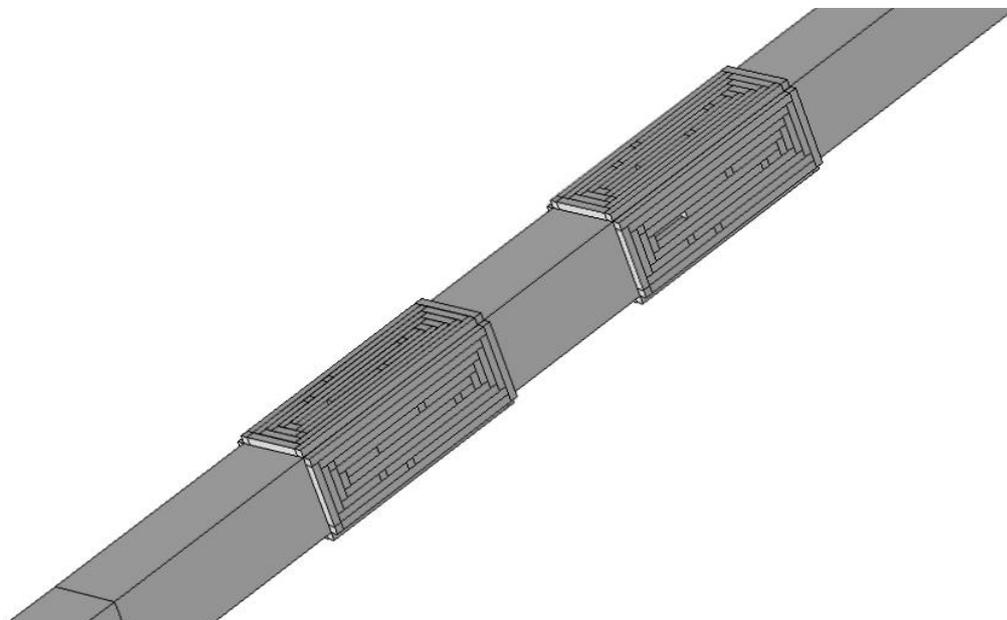


図-20 ユニット（4面×2）の配置

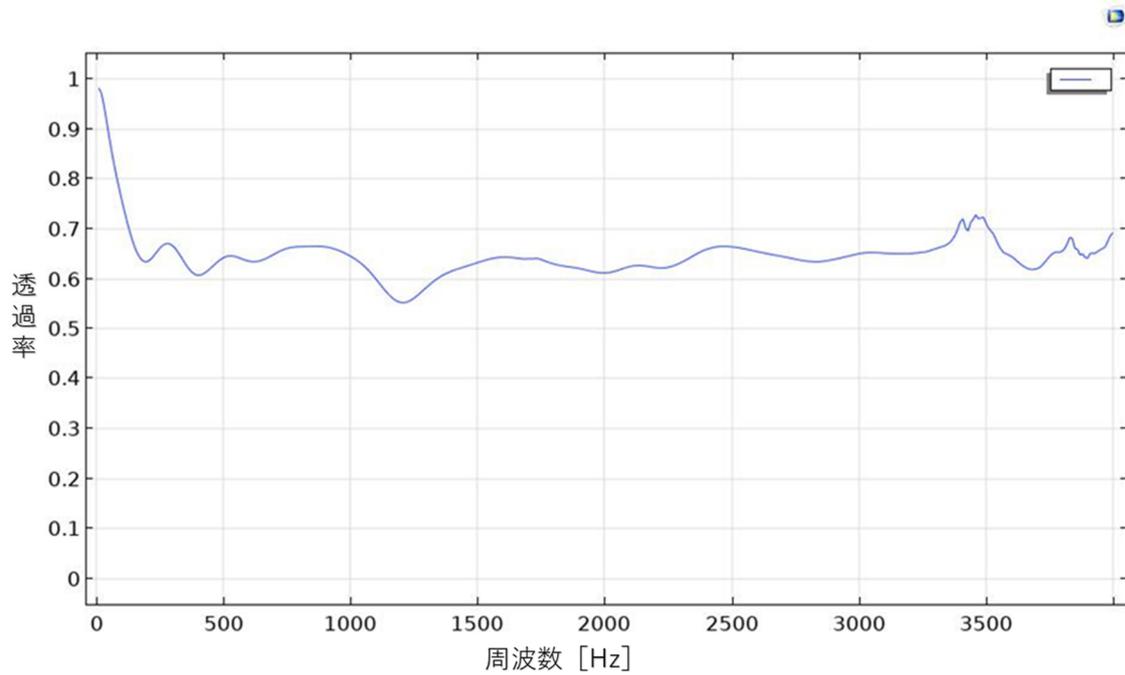


図-21 ユニット (4面×2) のグラフ

図-21 に透過率の周波数特性を示す。4面追加場合は透過率が約0.65になり、前述したように約0.12ずつ低下していることが分かる。ここから、ユニット化したサイドブランチ同士を隣り合わせに設置した場合に透過率が変化するか検討する。

3.3.5 ユニット化した場合 (4面×2)

前項の結果と比較するためにユニットを隙間を空けず隣り合わせに設置する。なお、ユニットは4面×2とする。

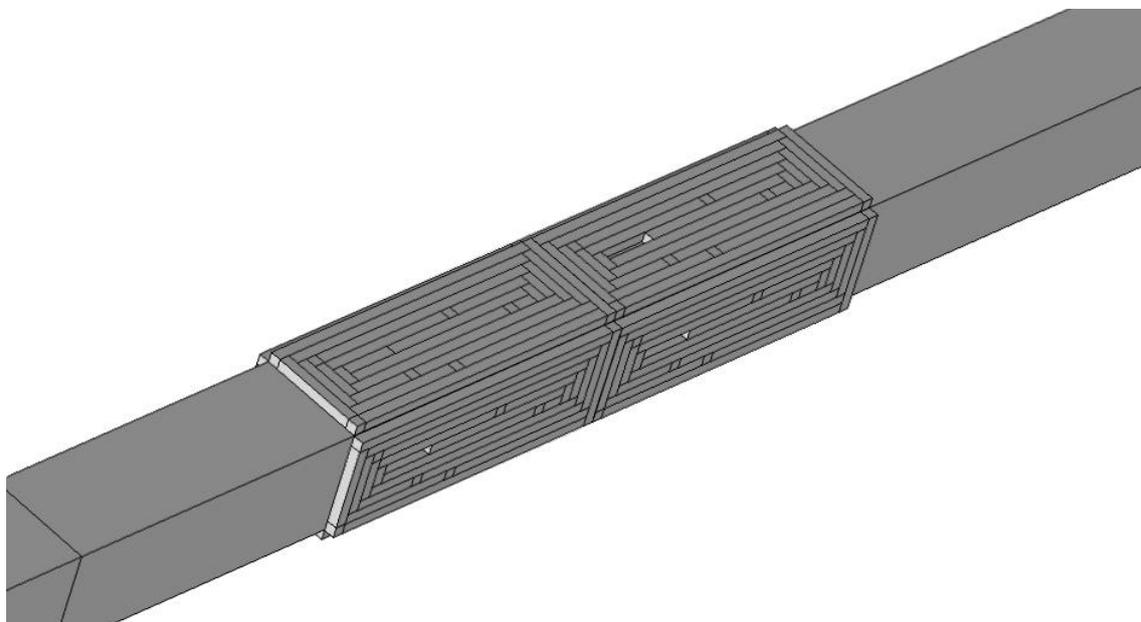


図-22 ユニット (4面×2) の配置

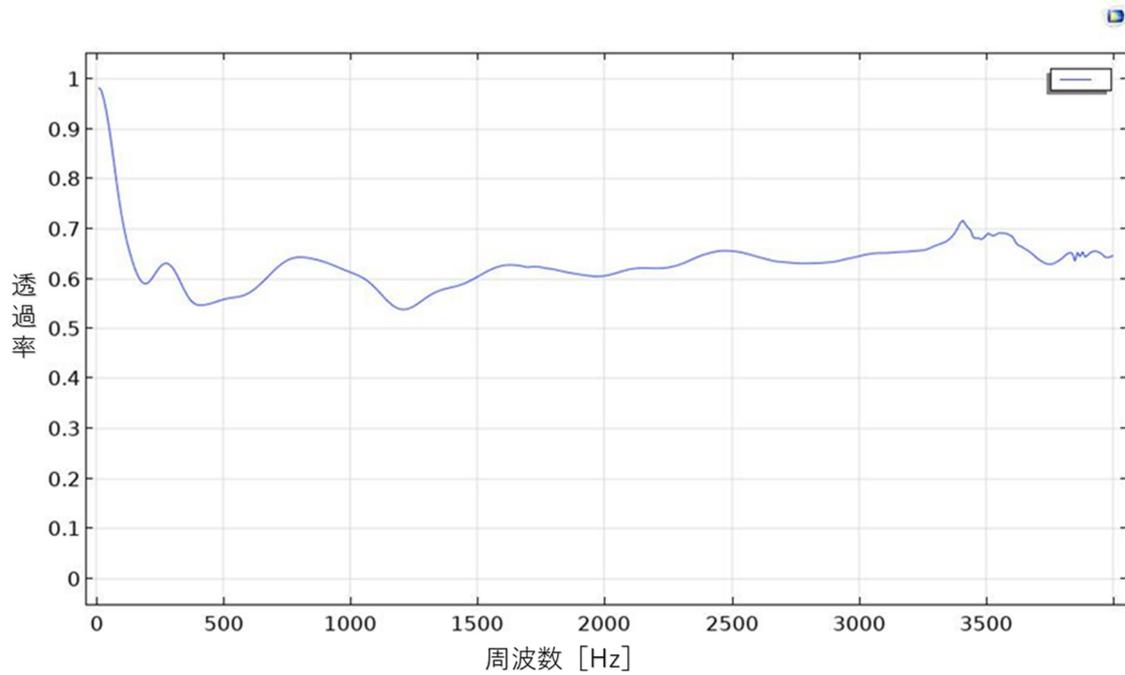


図-23 ユニット (4面×2) のグラフ

図-23 に透過率の周波数特性を示す。図-21 と比較すると、隣り合わせにする方が透過率は低くなり、消音性能が高くなる。そのため、以降の計算ではユニット管には隙間を空けず隣り合わせに配置することとする。

3.3.6 ユニット化した場合（4面×5）

前項で検討した結果を踏まえ、隙間を空けず隣り合わせで4面を5セット並べて検討する。

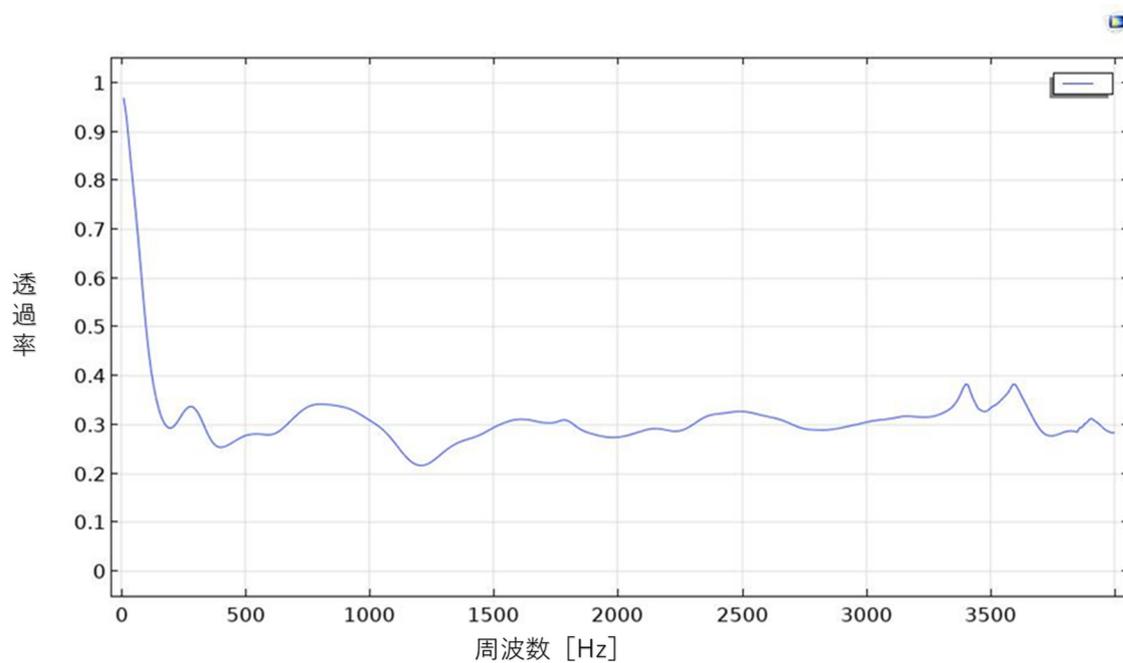


図-24 ユニット（4面×5）のグラフ

図-24 に透過率の周波数特性を示す。透過率は広帯域にわたって約 0.3 まで低下した。これよりユニットをたくさんつけると、消音性能が十分に高まることが分かった。

4. おわりに

本研究では、メインダクトにサイドブランチをつけることで、ダクト内部の音の伝搬を低減できる可能性があると考え、種々の検討を行った。

サイドブランチの長さ及び本数を変化させた場合、幅を変化させた場合、形を変化させた場合で COMSOL を用いてシミュレーションを行い、比較・検討した。

長さ及び本数を変化させた場合においては、長さが短ければ高周波数帯域、長ければ低周波数帯域での透過率が低くなる。また、本数が多いほど透過率が低くなることが分かり、消音性能が高いことが分かった。幅を変化させた場合においては、幅の大きいサイドブランチほど透過率が低くなり、消音性能が高いことが分かった。形を変形した場合においては、幅が大きいほうが少ないサイドブランチの本数で高い消音性能が得られる。しかし、設置するスペースが必要となり、建築コストもかかることからユニット化したサイドブランチを複数設置するのが最適だという結果に至った。

参考文献

- [1] 三好健太、布・筒状空洞カップリング型吸音構造を用いたダクトの消音に関する研究、関西大学修士論文、2013