

間仕切り設置による音の低減に関する研究

CFDによる音響解析と実測を対象として

A Study on Sound Reduction by Partitions

Comparison between CFD-based acoustic analysis and actual measurement

○内田 英寿*1, 小笠原 正豊*2, 秋田 剛*3

Hidetoshi UCHIDA *1, Masatoyo OGASAWARA *2, and Takeshi AKITA *3

*1 東京電機大学大学院 未来科学研究科 建築学専攻

Graduate Student, Department of Architecture, Tokyo Denki University Graduate School.

*2 東京電機大学未来科学部建築学科 准教授 博士(工学)

Associate Professor, Department of Architecture, Tokyo Denki University, Dr. Eng.

*3 東京電機大学未来科学部建築学科 教授 博士(工学)

Professor, Department of Architecture, Tokyo Denki University, Dr. Eng.

キーワード: CFD; シミュレーション; 解析条件; 実測; 音響

Keywords: CFD; simulation; Analysis condition; Actual measurement; acoustic.

1. 背景・目的

現在コロナウイルスによりリモートワークが増加し、オフィス以外の場で作業することが増え、音に関する様々な問題が発生している。間仕切りの設置は、周辺に影響する音を軽減すると考えられるが、間仕切りの大きさや材質の変化で、どれ程周辺に影響する音に変化が生じるか、感覚的に理解することは難しい。従来、音環境の検討には、音響コンサルタントによって音響解析が行われるか、実測によるものが多い。一方、近年普及してきた CFD によるシミュレーションにより、非専門家でも簡易的に音響解析を行うことができるものの、設定の違いによって解析に要する時間や精度に大きな差が生じる可能性が高い。

本研究では、間仕切りの設置や大きさの変化でどの程度音が軽減するか CFD による音響解析を用いて検証し実測で再確認すること、および今回使用するソフトウェア内の設定を変更することによって解析に要する時間と精度にどのような相関関係があるのか確認することを目的とする。

2. 研究方法・手順

東京電機大学東京千住キャンパスの 1 号館 14 階 11414 教室(7.5×6.5×2.8m) (Figure 1)を対象として解析・実測を行う。解析・実測は同条件で測定を行う。CFD による音響解析には株式会社アドバンスドナレッジ研究所の FlowDesigner を用い、実測では BOSE 社のスピーカー、アンプ、RION 社の騒音計 (Figure 3)を用いる。FlowDesigner では有限体積法を用い、低周波を対象としたソフトウェアである (Table 1)。

対象とする空間において、音源から 60 dB の音を発生させ、A 点、B 点、C 点の位置から測定を行う。実測の 60 dB の音は音源付近に騒音計を置き、3 回の測定結果の平均から算定した。設定した 60dB の音は通常の会話程度というデータ³から

設定した。

次に、音源を囲うように前面と側面を間仕切りで囲う。その後、同様に測定を行う。間仕切りはポリスチレン板を用い、高さに変化を加えた。音源や計測器の位置は図(Figure 1)に示す。音響解析及び実測では、音源の高さ位置を、着席時の人の口の位置(110cm)とした。また、騒音計の高さを、着席時の人の耳の位置(115cm)とした。実測では、各位置での計測を 3 回行い、平均を記録した。

対象とする周波数は声の周波数の概ねの範囲である 100Hz ~1000Hz というデータ²から、実測の際に用いた RION 社の騒音計の結果に表示される 125, 250, 500, 1000Hz とし、解析も同周波数を用いた。周波数の目安として、250Hz は冷蔵庫のブーンという音、500Hz は男性の話し声、1000Hz は女性の話し声とされる²。

3. ソフトウェア内の詳細設定

FlowDesigner にて解析を行う際に、吸音率、メッシュ分割、収束判定、最大計算回数、音の詳細の設定を行う。

吸音率の設定では、モデルを作成した際に、壁、床、椅子、机、窓ガラス、扉、天井、間仕切り、の数値をそれぞれ設定した。数値については「建築の音環境設計」⁸を参照し用いた。

メッシュ分割の設定では、オートメッシュ間隔(最大間隔指定)を選択した。オートメッシュ間隔では、125, 250, 500Hz は最短波長の 1/10, 1000Hz はメッシュ制限(有償オプション有り)があり最短波長の 1/8 を設定した。

収束判定とは、収束判定=2.0 の時、解析領域全体での計算誤差が 1%程度になったら計算が終了するというものである。収束判定は-4.0 から-1.0 まであり 0 から遠くなるほど精度が高いとされる。今回はデフォルトの-2.5 を設定した。

最大計算回数とは、最大計算回数を 10000 回とした時に上

限を 10000 回として計算を行い、その計算回数内に収束判定で設定した値に収束した場合に計算が終了するものである。収束判定で設定した値に収束しなかった場合には計算回数終了時の結果となる。今回はデフォルトの 10000 回を設定した。音の詳細については、A, B, C, Z 特性⁹⁾¹⁰⁾があり、それぞれ使い分けが行われる。今回は、騒音計そのものの出力において周波数を分析する場面などで使用される Z 特性と設定した。

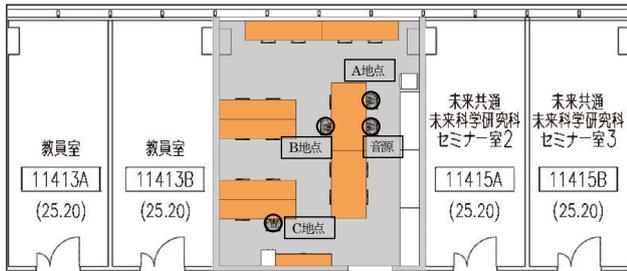


Figure 1. 計測位置



Figure 2. 実測の様子(全体、A 地点)



Figure 3. 計測機器

3. 間仕切りの検討

今回の研究では、コロナウイルスにより飲食店で多く利用された、プラスチック板の使用を検討した。材質は、今回は加工のしやすい、また安価で手に入るポリスチレン板(厚み; 0.1cm 幅; 90cm 高さ; 30, 60cm)を用いることとする。間仕切りの高さは日本人の平均座高高さから、顔がすべて隠れ、音を遮れる 60cm、またその半分の 30cm とする。(Figure 4)

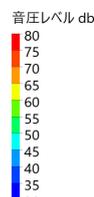
次に、実測の数値とソフトウェアによる解析結果の数値の比較を行う。



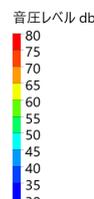
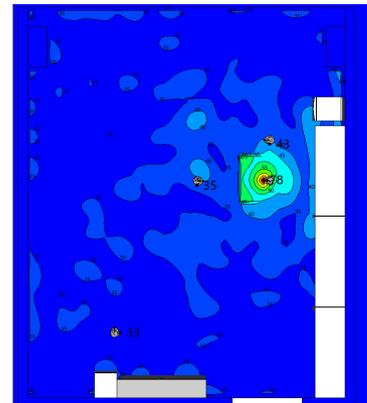
Figure 4. 間仕切り

Table 1. 解析手法・概要⁴⁾

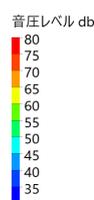
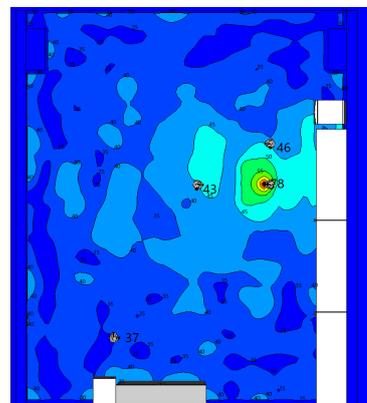
FlowDesigner 音響解析手法				
計算方法	幾何学的方法	波動論的方法		
		時間領域法	周波数領域法	
音線法 鏡像法	×	FDTD法	有限、境界要素法 有限体積法	
波動性	×	○	○	
対象周波数	高周波	低周波	低周波	
適用範囲	大空間	小規模空間 の過度解析	小規模空間 の定常解析	
逆解析	×	×	○	
FlowDesigner 概要				
室内解析範囲	8 × 6 × 2.5m ³			
周波数(低周波)(Hz)	125	250	500	1000
メッシュの間隔(m)	0.34	0.17	0.068	0.034



断面位置
Z=1.150



断面位置
Z=1.150



断面位置
Z=1.150

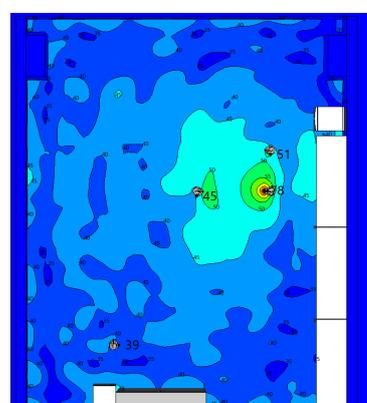


Figure 5. 250Hz 時のソフトウェアによる解析結果
(上から順にポリスチレン板 60cm、30cm、間仕切り無し)

Table 2. 実測の数値結果とソフトウェアによる解析結果

収束判定-2.5 最大計算回数10000 (数値)は60dBとの差	ソフトウェア (dB)				実測 (dB)				
	音源	A点	B点	C点	音源	A点	B点	C点	
PS板 60cm	1000Hz 3.9h	77 (+17)	50 (-10)	43 (-17)	42 (-18)	55 (-5)	38 (-22)	37 (-23)	37 (-23)
	500Hz 26m	77 (+17)	53 (-7)	45 (-15)	43 (-17)	56 (-4)	38 (-22)	38 (-22)	38 (-22)
	250Hz 3a	78 (+18)	43 (-17)	35 (-25)	33 (-27)	51 (-9)	38 (-22)	38 (-22)	39 (-21)
	125Hz 47s	77 (+17)	55 (-5)	46 (-14)	41 (-19)	39 (-21)	35 (-25)	34 (-26)	37 (-23)
PS板 30cm	1000Hz 3.2h	計算回数不足により表示不可				55 (-5)	39 (-21)	41 (-19)	38 (-22)
	500Hz 25m	77 (+17)	55 (-5)	48 (-12)	46 (-14)	56 (-4)	40 (-20)	39 (-21)	40 (-20)
	250Hz 4a	78 (+18)	46 (-14)	43 (-17)	37 (-23)	51 (-9)	39 (-21)	39 (-21)	39 (-21)
	125Hz 45s	77 (+17)	49 (-11)	45 (-15)	38 (-22)	39 (-21)	35 (-25)	34 (-26)	37 (-23)
間仕切 無し	1000Hz 3.6h	78 (+18)	51 (-9)	46 (-14)	44 (-16)	55 (-5)	40 (-20)	43 (-17)	38 (-22)
	500Hz 29m	77 (+17)	55 (-5)	49 (-11)	47 (-13)	56 (-4)	39 (-21)	41 (-19)	39 (-21)
	250Hz 5a	78 (+18)	51 (-9)	45 (-15)	39 (-21)	51 (-9)	38 (-22)	40 (-20)	38 (-22)
	125Hz 42s	77 (+17)	48 (-12)	44 (-16)	37 (-23)	39 (-21)	34 (-26)	34 (-26)	37 (-23)

Table 3. 解析条件

室内解析範囲	7.5 × 6.5 × 2.8m ³			
周波数(Hz)	125	250	500	1000
メッシュの間隔(m)	0.34	0.17	0.068	0.034
収束判定	-1.5	-2.0	-2.5	
最大計算回数	10000		100000	

実測の数値結果は、研究手順で述べた、3回の測定結果平均を示している。また、今回は実測の数値結果を正しいものとして、ソフトウェアの数値結果と比較することとする。

まず、音響解析と実測を考慮せず、間仕切りの大きさや材質の変化から得られる効果を挙げると、間仕切りが存在すれば、大きければ、周辺に影響する音は小さくなる効果が挙げられる。

次に、音響解析と実測を考慮し、その結果から比較をすると、図からは間仕切りが存在することで音の広がりに変化をもたらすことが分かる。(Figure 5)

今回、実測とソフトウェアでの数値結果は音源 60dB からの差より音の減衰、分布を比較する。比較してみると、ソフトウェアでは音源での数値が音源 60dB より高いことや高い数値と低い数値の差が大きいことが分かる結果となった。原因として、実測とソフトウェアの解析方法(定常解析、非定常解析)の違いや、デフォルト設定の精度の悪さが考えられる。

音の専門家に聞くと、図(Figure 5)を見ると実測での音の分布と似た分布になっているということが分かった。しかし、数値はそれに伴わず、近似した数値の箇所とそうでない箇所があり、ソフトウェア内での設定の変化を行う必要があることが言える。

4. ソフトウェア内の設定値の検討

前文の結果から、FlowDesigner 内で設定を変更し(Table 3.)、精度や解析時間にどのように影響するのかを間仕切り無し状態で検証する。

設定の中で変更する値を、精度に影響するとされる、収束判定、および最大計算回数の2つとして検証を行う。

変更する収束判定、最大計算回数は以下のように設定した。

収束判定において、デフォルトである-2.5 とともに、-2.0 および-1.5 で検証を行う。収束判定を精度が悪くなるほうへ変更する理由として、下げたどの値から大きく数値に変化がでるかという点から設定した。また、精度を高くする方へ変更することでメッシュ制限に制限されたことから上記の設定にした。

最大計算回数において、デフォルトである 10000 回とともに、100000 回で検証を行う。計算回数をあげる理由としては、解析結果の精度が上がる可能性があるということから上げ、デフォルトの 10 倍の回数と設定した。

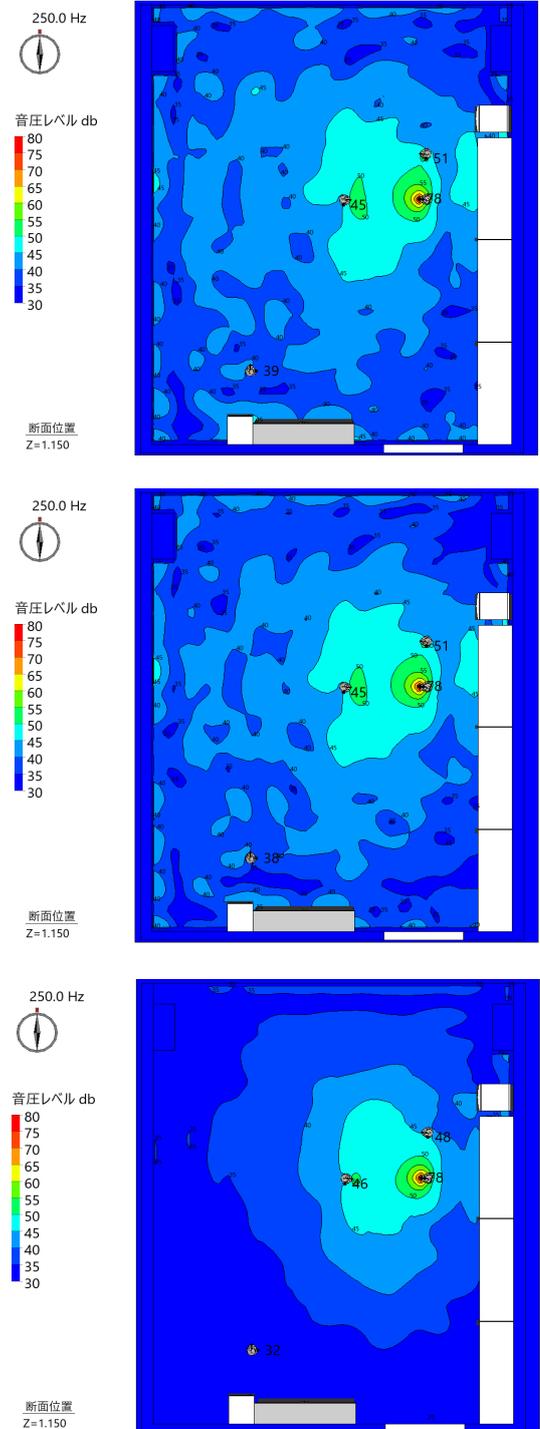


Figure 6. 250Hz 時のソフトウェアによる解析結果 (上から順に収束判定-2.5、-2.0、-1.5、最大計算回数 100000)

Table 4. ソフトウェア内の設定を変化させた解析結果と実測の数値結果

音源60dB (数値)は60dBとの差	ソフトウェア (dB)				実測 (dB)					
	音源	A点	B点	C点	音源	A点	B点	C点		
間仕切り無し 収束判定-2.5 最大計算回数 100000	1000Hz	4h49m	78(+18)	51(-9)	46(-14)	44(-16)	55(-5)	40(-20)	43(-17)	38(-22)
	500Hz	29m	77(+17)	55(-5)	49(-11)	47(-13)	56(-4)	39(-21)	41(-19)	39(-21)
	250Hz	4m46s	78(+18)	51(-9)	45(-15)	39(-21)	51(-9)	38(-22)	40(-20)	38(-22)
間仕切り無し 収束判定-2.0 最大計算回数 10000	1000Hz	3h36m	78(+18)	51(-9)	46(-14)	44(-16)	55(-5)	40(-20)	43(-17)	38(-22)
	500Hz	35m57s	77(+17)	55(-5)	49(-11)	47(-13)	56(-4)	39(-21)	41(-19)	39(-21)
	250Hz	4m44s	78(+18)	51(-9)	45(-15)	39(-21)	51(-9)	38(-22)	40(-20)	38(-22)
間仕切り無し 収束判定-2.0 最大計算回数 100000	1000Hz	1h31m	78(+18)	51(-9)	46(-14)	44(-16)	55(-5)	40(-20)	43(-17)	38(-22)
	500Hz	16m26s	77(+17)	55(-5)	48(-12)	44(-16)	56(-4)	39(-21)	41(-19)	39(-21)
	250Hz	2m2s	78(+18)	51(-9)	45(-15)	38(-22)	51(-9)	38(-22)	40(-20)	38(-22)
間仕切り無し 収束判定-2.0 最大計算回数 10000	1000Hz	1h23m	78(+18)	52(-8)	46(-14)	44(-16)	55(-5)	40(-20)	43(-17)	38(-22)
	500Hz	16m18s	77(+17)	55(-5)	48(-12)	44(-16)	56(-4)	39(-21)	41(-19)	39(-21)
	250Hz	2m3s	78(+18)	51(-9)	45(-15)	38(-22)	51(-9)	38(-22)	40(-20)	38(-22)
間仕切り無し 収束判定-1.5 最大計算回数 100000	1000Hz	39m27s	78(+18)	52(-8)	46(-14)	44(-16)	55(-5)	40(-20)	43(-17)	38(-22)
	500Hz	4m11s	77(+17)	54(-6)	45(-15)	40(-20)	56(-4)	39(-21)	41(-19)	39(-21)
	250Hz	34s	78(+18)	48(-12)	46(-14)	32(-28)	51(-9)	38(-22)	40(-20)	38(-22)
間仕切り無し 収束判定-1.5 最大計算回数 10000	1000Hz	39m35s	78(+18)	52(-8)	46(-14)	44(-16)	55(-5)	40(-20)	43(-17)	38(-22)
	500Hz	4m14s	77(+17)	54(-6)	45(-15)	40(-20)	56(-4)	39(-21)	41(-19)	39(-21)
	250Hz	34s	78(+18)	48(-12)	46(-14)	32(-28)	51(-9)	38(-22)	40(-20)	38(-22)
	125Hz	9s	77(+17)	51(-9)	41(-19)	0(-60)	39(-21)	34(-26)	34(-26)	37(-23)

収束判定の変更から、図では収束判定-2.5、-2.0 は似た分布、-1.5 では大きく変化した分布であることが見てわかる。(Figure 6)

ソフトウェアの数値結果(Table 4.)から収束判定、最大計算回数の違いによる影響を比較する。

最大計算回数の変更からは数値に与える影響はなく、どちらも同じ数値となる事が分かる。

収束判定の変更から、精度の低い-1.5 では他 2 つに比べ明らかに数値が異なり、音源から遠い C 点の数値に大きな影響がみられる。これは、図で収束判定-2.5、-2.0 が似た分布だったということからもわかる。以上のことから、最大計算回数は変更する必要はなく、収束判定を精度の高いものへと変更することがソフトウェアでの解析に必要な設定である事が分かる。

次に、ソフトウェアと実測の数値結果の比較を行う。ここでは解析結果内で一番精度が高い収束判定-2.5 と比較を行う。

結果からわかることとして、音源から遠い点(B,C 点)は実測の数値に近づき、音源に近い点(音源A 点)は実測と離れた数値になる事が分かる。

時間への影響は、収束判定、最大計算回数どちらも影響を与えていることが表(Table 4.)からわかる。収束判定を精度の低いほうへと変更することで解析時間の短縮に大きく繋がることが言える。しかし、収束判定を精度の低いほうへと変更することは精度が悪くなり結果として参考にならない結果となる。よって、収束判定を精度が低い方へと変更するのではなく最大計算回数を減らすことが得策だといえる。上記にも例外があり、最大計算回数を減らすことで Table 2.のように表示できないものも出てくるため、むやみに最大計算回数を減らすことも避けるべきだといえる。

解析時間の短縮には収束判定、最大計算回数を減少させる

ことが上記で分かったが、増加させることで解析に要する時間が増えることも分かる。

5.まとめ

本研究では、初めに、間仕切りの設置や大きさの変化でどの程度音が軽減するか CFD による音響解析を用いて検証し、実測で再確認した。また、間仕切りの設置や大きさの変化によって、シミュレーションでは大きく影響する結果になるのに対して、実測ではあまり影響しないことを確認した。

次に、今回使用するソフトウェア内の設定を変更することによって解析に要する時間と精度にどのような関係があるのか確認をした。今回の設定での変更は、解析に要する時間は減少するが、精度が悪くなるという関係があることを確認した。やはり、精度を高くするためには、解析に要する時間を増加させるほかないという結果を確認した。

ソフトウェアによる解析結果と実測の数値結果を比較することで、数値の差が分かり、2 つの解析・測定時の設定(吸音率、メッシュ分割、収束判定、最大計算回数、音の詳細)にズレが生じ、そのズレが数値の差に影響していることが言える。また、ソフトウェアによる解析結果が実測結果と異なる要因として、今回検証した収束判定、最大計算回数ではなく、その他、メッシュ数や対象空間の大きさが影響していることが今回の研究から挙げられる。

今後の課題として、収束判定を精度の高いものへと変更すること、最大計算回数を増やすこと、メッシュ数や対象空間の変更をし、検証することが挙げられる。

以上のソフトウェアによる解析結果や実測結果の数値から、音響コンサルタントが専門のソフトウェア、実測を用いる理由が明白となった。

謝辞

株式会社アドバンスドナレッジ研究所様にはFlowDesigner 操作の助言を賜り、この場をお借りしお礼申し上げます。

【参考文献】

- 1) 前川純一、森本正之、阪上公博「建築・環境音響学第 3 版」共立出版株式会社、2011
- 2) チョダウエ株式会社「音とは・音エネルギーと遮音特性・界壁の遮音特性」<http://www.chiyoda-ue.co.jp/data/syaon.html>
- 3) 日本騒音調査「騒音値の基準と目安」https://www.skddlab.com/standard_value
- 4) 株式会社アドバンスドナレッジ研究所「FlowDesigner2021 リファレンスガイド」
- 5) 日本建築学会「音環境の数値シミュレーション-波動音響解析の技法と応用」
- 6) 株式会社コロナ社「はじめての音響数値シミュレーションプログラミングガイド日本建築学会編」
- 7) 永田徳「日本建築学会編音響工学講座建築音響」株式会社コロナ社
- 8) 日本建築学会「建築の音環境設計(設計計画パンフレット 4)」
- 9) 一般社団法人日本音響学会 矢野博夫「音のなんでもコーナー Q and A」<https://acoustics.jp/gandanswer33.html>
- 10) 株式会社レックス「A 特性とは? C 特性や Z 特性など音圧レベル各特性の違いと使い分けについて」<https://www.lex-renal.jp/feature/1073/06/ac-weighting>