

セルオートマトン法による3次元騒音伝搬解析

環境防災研究室 山崎 翔太

指導教官 宮木 康幸

1.はじめに

1-1.研究背景

騒音対策における遮音壁設計を効率的に進めるためには、精度の高いシミュレーション技術が必要不可欠である。そこで、複雑系の解析手法として有力視されているセルオートマトン法(以下CA法)を用いて騒音伝搬解析を行い、その精度について検証を行ってきた。しかし、解析領域が2次元であったため、実用上の騒音伝搬解析には適用できない点がいくつか挙げられる。以下にそれらを示す。

①遮音壁の効果を予測する際に、遮音壁は有限長であり、壁の長さを考慮することは重要となる。2次元領域では壁が奥行き方向に無限に伸びたモデルの計算を行っていることになるため、壁の横からの音の回り込みを表現できず、遮音効果を過大評価することにつながってしまう。

②交通騒音の主な騒音源である自動車や新幹線は有限長遮音壁に対して平行に移動しており、移動速度に伴いドップラー効果によって騒音源の周波数が伝播中に変化してしまう。これらの効果を考慮しないと遮音壁の効果が正確なものとならず、2次元領域ではそれらが表現できなかった。

③騒音対策において、回折による遮音効果の低下や騒音の増大に対し、遮音壁を高くすることで対処してきた。しかし、それにより壁面の面積が増大し、風圧荷重の影響が大きくなってしまふ。対処としては、根元部分の強度を上げる必要があるが、重量や部材のコストが増加するという問題が発生する。風圧荷重の影響を小さくするには遮音壁にスリットを入れて、風を逸らす工夫などが考えられる。しかし、このような特殊な遮音壁に対しても奥行きを考慮した3次元領域での解析が必要となる。

1-2.研究目的

本研究では、前述した様々な問題に対し、CA法を用いた騒音伝搬解析においてより実用上使用可能なモデルに近づけるために、3次元音場での解析手法を構築し、妥当性の検証を行った。また、3次元領域での解析を可能としたところで、遮音壁の配置方法や音源の移動速度等の各種条件を変化させ、効果的な遮音壁の提案を行う。

2.セルオートマトン法(CA法)

2-1.概念

CA法は、図-1に示すように計算対象となる領域をセルと呼ばれる要素に分割する。真ん中の注目セルとその周りの近傍セル間に局所的な関係式を定義し、領域全体へ適用すると共に時間を追って計算を行い、状態量を求めていく手法である。3次元CA法においては、立方体のセルを積み上げることで領域を形成していき、前後上下左右の6セルを近傍セルとする。

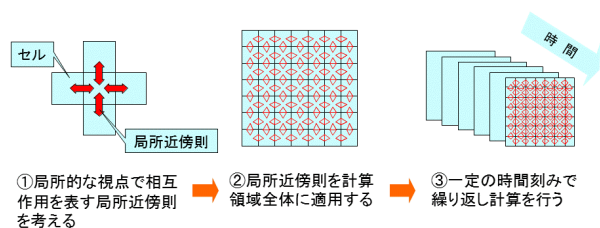


図-1 セルオートマトン法

2-2.音圧値P, 時間変化量Gの求め方

音圧値 $P[\text{Pa}]$ と時間変化量 $G[\text{Pa}]$ は式(2-1), (2-2)より求める。各パラメータとして N は近傍セル数(3次元ノイマン近傍においては $N=6$)、 C_{ca} は伝搬速度(3次元では $C_{ca} \leq 1/\sqrt{3}$)、 x は近傍セルの位置、 t は時間ステップ、添字 a は近傍セルを表している。 m は差分法における差分スキームを表したパラメータであり、次元に関わらず2であるとする。

・時間変化量 G

$$G(x,t+1) = G(x,t) + m \left\{ \frac{\sum_{a=1}^n P(x+dx_a, t)}{N} - P(x,t) \right\} \quad (2-1)$$

・音圧 P

$$P(x,t+1) = P(x,t) + G(x,t+1) \quad (2-2)$$

近傍セルが壁の場合は式(2-3)に従う。

$$P(x+dx_a, t) = P_{\text{wall}} = P_{\text{notice}} \quad (2-3)$$

ここで、添字 wall は壁の近傍セル，添字 notice は注目セルを表す。

3.3 次元 CA モデルの妥当性の検証

3-1.解析方法

3次元CAモデルの妥当性を検証するために、木戸(2008, 長岡技大)が行った屋外実験(図-2)に対応した3次元CAモデルを作成し、実環境での騒音伝搬解析が表現できているかを調べることにした。セル幅を0.04[m]として、図-3に示すような解析領域を作成し、音源と受音点の間に壁を設置して回折減衰量を算出した。さらに、3次元CAモデルの有用性の比較を目的として、2次元CAモデルでの解析も行った。

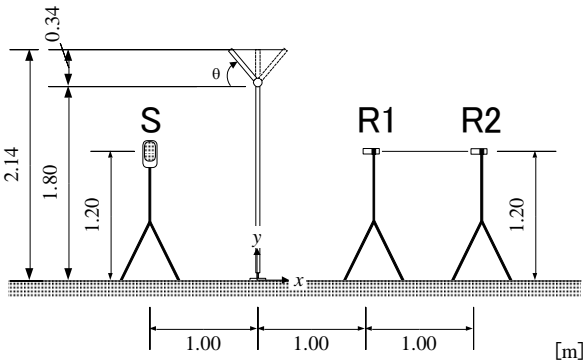


図-2 試験概略図(木戸, 2008)

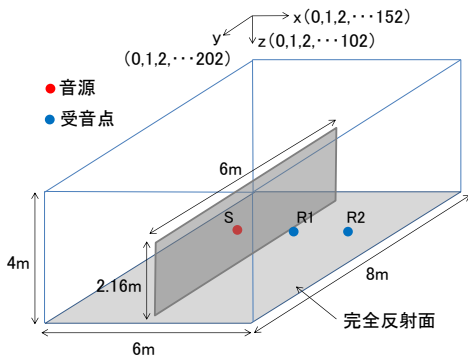


図-3 解析対象

ここで、回折減衰量とは、無障壁での受音点の音圧値と壁を設置した際の音圧値との差を言う。計算条件を表-1に示す。

表-1 計算条件(3次元CAモデル)

計算領域 x[m]	6.08(153[cell])
計算領域 y[m]	8.08(203[cell])
計算領域 z[m]	4.08(103[cell])
音速 c[m/sec]	340
分割幅 dx,dy,dz[m]	0.04
時間ステップ dt[s]	6.79×10 ⁻⁵
計算ステップ数 jt[step]	1000
入力音圧 p[Pa]	1.0
音源周波数 f[Hz]	500,1000,2000

3-2.計算結果と考察

測定値とCA法による計算値はケースによって精度に差異が見られることが分かった。図-4に示すように高周波数(2000Hz)においては、減衰量自体の誤差は見られるものの、受音点における音圧値の大きさの傾向は反映できていると言える。これらの誤差は、セル幅が粗かったことが原因の一つと考えられる。また、図-5に示すように低周波数(500Hz)では概ね測定値に近い結果を得ていることが分かる。計算値のほとんどのケースにおいて、2次元CAモデルよりも3次元CAモデルの値のほうが低く、測定値に近づいている。これらは、2次元CAモデルでは表現できなかった壁の横からの音の回り込みが反映できた結果と言える。

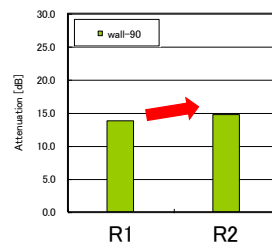


図-4(a) 測定値

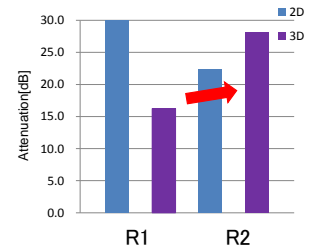


図-4(b) CA法

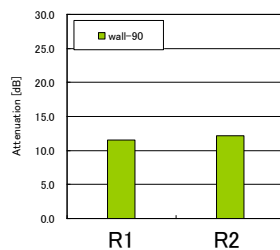


図-5(a) 測定値

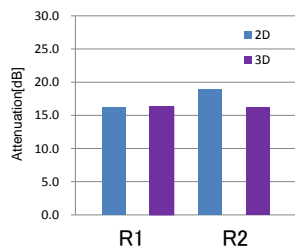


図-5(b) CA法

4.効果的なスリット型遮音壁の提案

4-1.解析方法

3次元半自由音場を想定し、図-6に示す解析領域を対象に、スリット型の遮音壁を配置させた場合や音源が移動する場合など様々な条件を変化させた際の回折減衰量の比較を行った。その中で、設定した受音点が音の回折や干渉の影響により大きく影響してくることが予想される。それらの諸現象による差異を除くために受音点は1点ではなく、複数の点の実効値を採って評価した。そこで、図-6の青色で示してある箱形の領域内のセル全てを受音点とし、回折減衰量を算出した。図-7に受音領域、表-2に計算条件を示す。

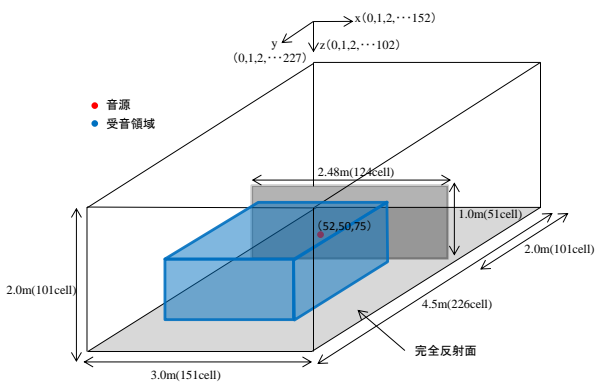


図-6 解析対象

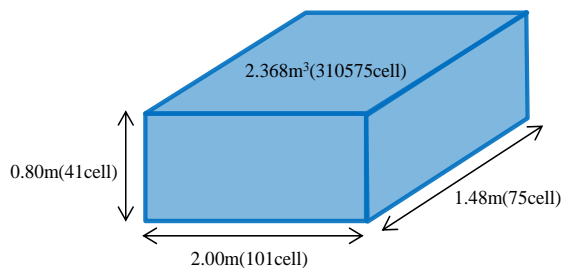


図-7 受音領域

表-2 計算条件

計算領域 x[m]	3.04(153[cell])
計算領域 y[m]	4.54(228[cell])
計算領域 z[m]	2.04(103[cell])
音速 c[m/sec]	340
分割幅 dx,dy,dz[m]	0.02
時間ステップ dt[s]	3.40×10^{-5}
計算ステップ数 jt[step]	1000
入力音圧 p[Pa]	1.0
音源周波数 f[Hz]	250,500,1000,2000

4-2.計算結果と考察

4-2-1.高さ方向スリット間隔による回折減衰量の差異

図-8に示す解析ケースで高さ方向のスリット間隔を変化させた際の回折減衰量を比較した。音源は固定し、周波数は1000Hzとした。図-9に高さ方向スリット間隔による回折減衰量を示す。

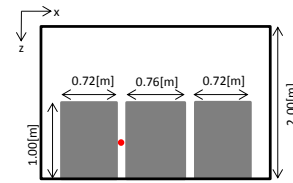


図-8(a) 0.14mslit

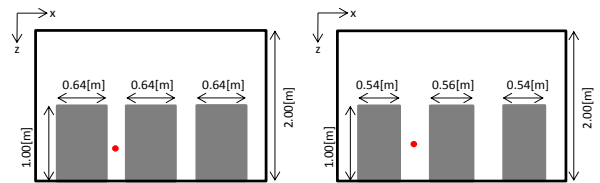


図-8(b) 0.28mslit

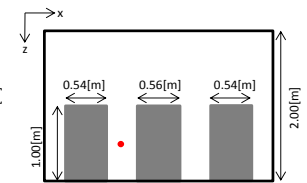


図-8(c) 0.42mslit

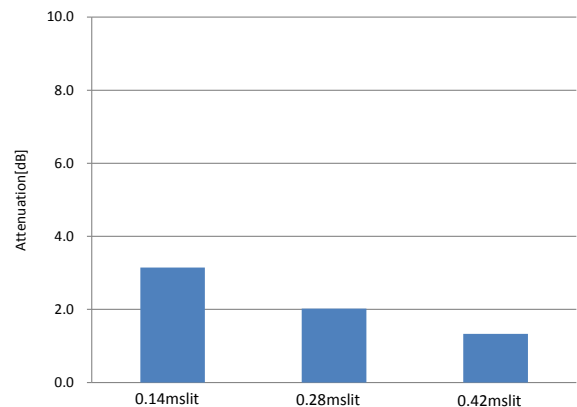


図-9 回折減衰量

表-3 音圧減衰量

	fix(slit_z_wall)			
	no wall	0.14mslit	0.28mslit	0.42mslit
実効値(Pa)	0.00247	0.00120	0.00155	0.00182
減衰比	1.00	0.48	0.63	0.74
減衰率(%)	0.00	51.5	37.2	26.4
減衰量(dB)	0.00	3.15	2.02	1.33

図-9、表-3より高さ方向のスリット間隔が0.14mの回折減衰量が3.15dB、0.28mが2.02dB、0.42mが1.33dBであり、スリット間隔が狭ければ狭いほど音圧低減の効果が表れた。

図 - 10 に各ケースにおける 150step 及び 500step 経過時の音圧分布(x-y 面:z=75)を示す。

150step 経過時

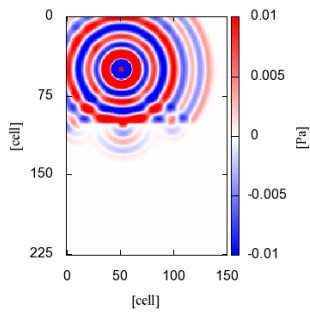


図 - 10(a) 0.14mslit

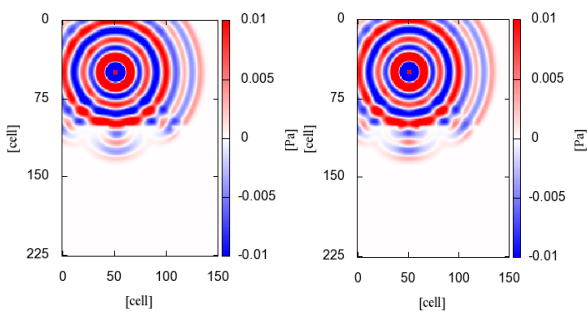


図 - 10(b) 0.28mslit 図 - 10(c) 0.42mslit

500step 経過時

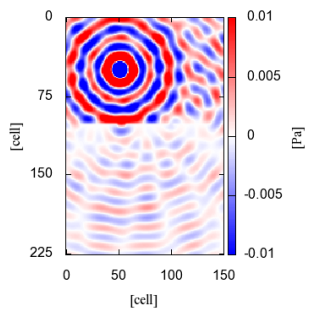


図 - 10(d) 0.14mslit

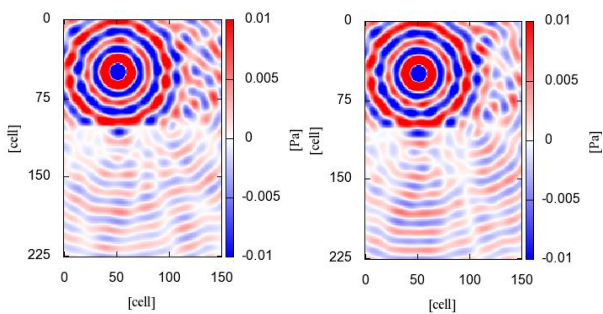


図 - 10(e) 0.28mslit 図 - 10(f) 0.42mslit

4-2-2. 横方向スリット設置位置による回折減衰量の差異

横方向のスリットを入れる位置を変化させて遮音効果の差異を調べた。図 - 11 に比較したケース、図 - 12 に横方向スリット設置位置による回折減衰量を示す。音源は固定し、周波数は 1000Hz とした。

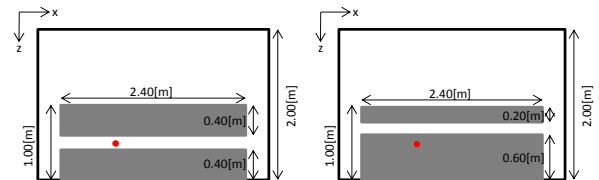


図 - 11(a) center

図 - 11(b) upper

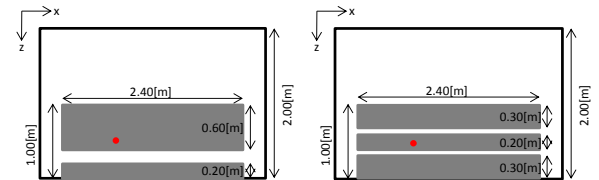


図 - 11(c) lower

図 - 11(d) slit×2

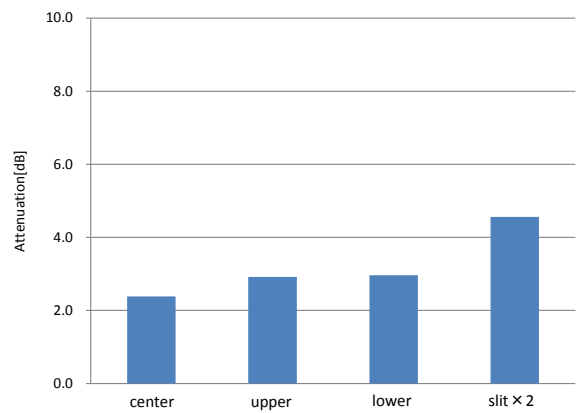


図 - 12 回折減衰量

図 - 11 より横方向スリットを壁中間に入れたモデルの回折減衰量が 2.39dB, 壁上部に入れたモデルが 2.92dB, 壁下部に入れたモデルが 2.96dB, スリットを 2 段設けたモデルが 4.56dB であり, 受音側から音源が見通せないモデルの音圧低減の効果が顕著に表れた。また, 今回のケースではスリット部の面積を等しくしているが, スリット間隔を小さくし, 複数設置することでより音圧低減の効果が見られた。

図 - 13 に各ケースにおける 120step 経過時の音圧分布(y-z 面:x=52), 図 - 14 にスリットを複数設けたケースにおける 500step 経過時の音圧分布(y-z 面:x=52)を示す.

120step 経過時

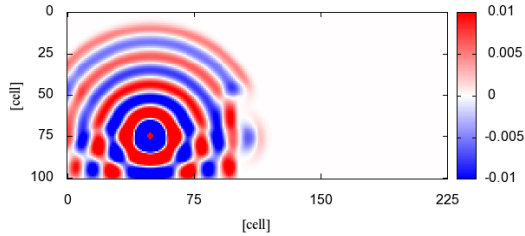


図 - 13(a) center

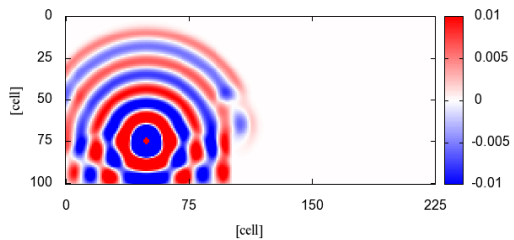


図 - 13(b) upper

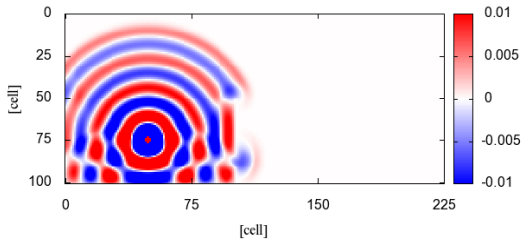


図 - 13(c) lower

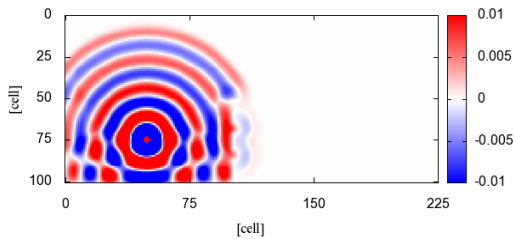


図 - 13(d) slit×2

500step 経過時

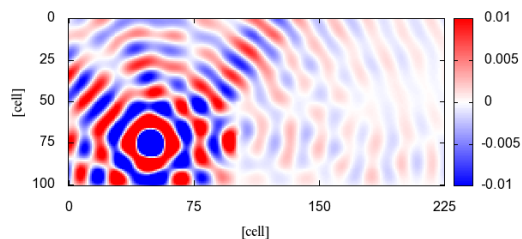


図 - 14 slit×2

4-2-3. 音源移動速度による回折減衰量の差異

音源の移動速度を変化させ、遮音壁の形状による回折減衰量を比較した. 図 - 15 に比較したケース, 図 - 16 に音源移動速度による回折減衰量を示す. 周波数は 1000Hz とした.

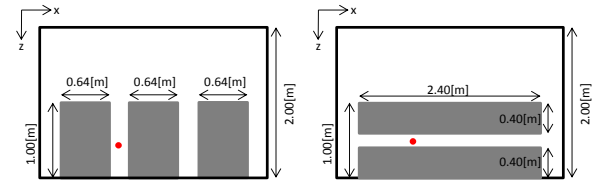


図 - 15(a) slit_z_wall 図 - 15(b) slit_x_wall

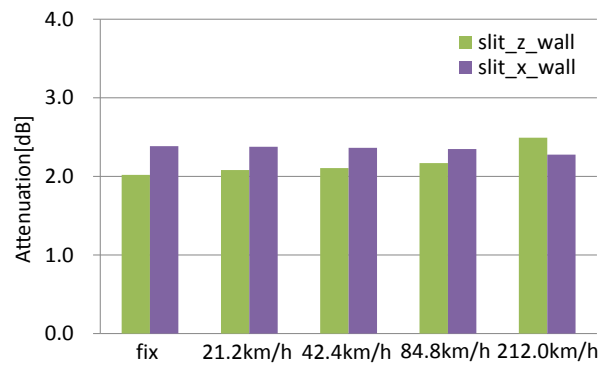


図 - 16 回折減衰量

図 - 16 より, 高さ方向にスリットを入れた遮音壁は音源移動速度が速くなるほど回折減衰量が増加し, 逆に, 横方向にスリットを入れた遮音壁は音源移動速度が速くなるほど回折減衰量が減少している. 図 - 14 に各ケースにおける 100step 及び 500step 経過時の音圧分布(x-y 面:z=75)を示す.

100step 経過後

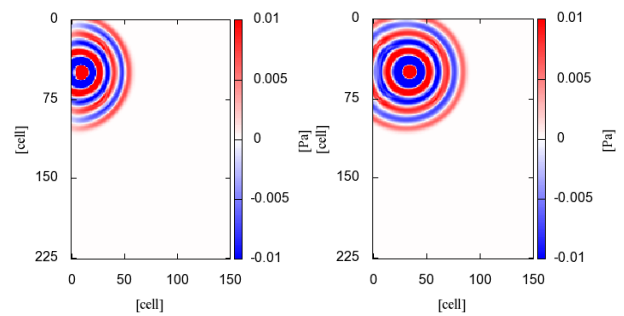


図 - 14(a) 212.0km/h

図 - 14(b) 84.8km/h

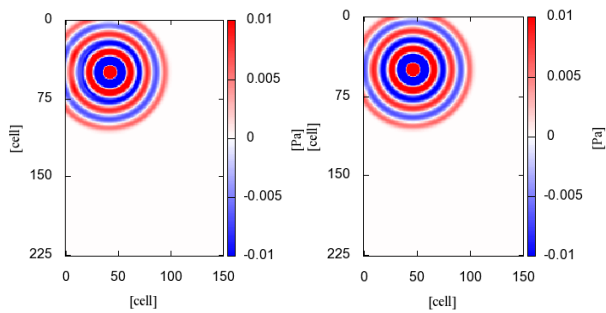


図 - 14(c) 42.4km/h 図 - 14(d) 21.2km/h

500step 経過時

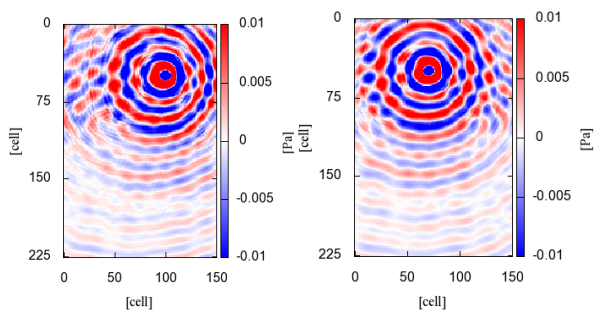


図 - 14(e) 212.0km/h 図 - 14(f) 84.8km/h

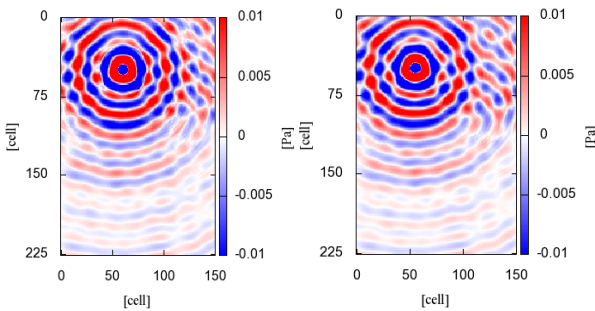


図 - 14(g) 42.4km/h 図 - 14(h) 21.2km/h

4-2-4.考察

本解析方法(セル幅 0.02m, 受音点として複数の点を取って受音領域を形成)においては、遮音壁として同一の面積であるという条件のもとで、高さ方向にスリットを導入した遮音壁に対し、横方向にスリットを設置した遮音壁の方が遮音効果が見られた。また、横方向のスリット面積を固定してスリット間隔を狭くし、複数設置することで一層高い効果が得られることが分かった。このことから、一般的に遮音性が劣ると言われる横方向スリットに関しても設置方法を考慮することで遮音壁として効果が期待できることが分かった。

そこで、スリット型遮音壁の効果をさらに検討することを目的として、図 - 15 に示すように、壁面に一様な等分布荷重が作用していると想定し、AB 間に作用する曲げモーメントを簡易的に算出し、遮音壁に作用する風圧荷重と回折減衰量の関係性を調べた。縦軸に今回行った全ての解析ケースの中で最もモーメントが高かったものを 100 とした割合を表し、横軸に回折減衰量を示す。

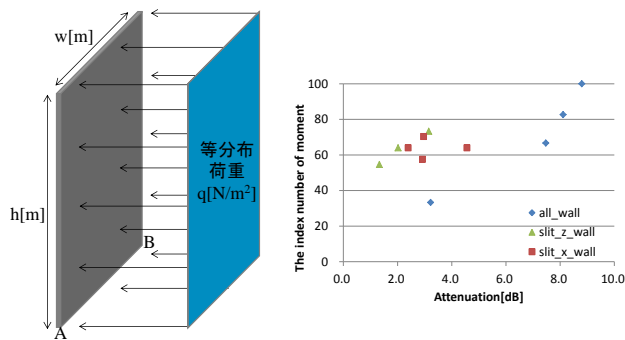


図 - 15 回折減衰量と曲げモーメント

遮音壁の風圧荷重と回折減衰量の関係として、図 - 15 より通常の遮音壁は遮音効果は高いが、風圧荷重の影響が高いことが分かる。しかし、スリットを導入したことにより、風圧荷重を抑えることができた。本研究における解析モデル及び解析条件においては、同程度の風圧荷重が作用する場合においても遮音性は遮音壁に横方向スリットを設置したものが有効であることが確認できた。

5.おわりに

本研究では、3次元 CA モデルを構築し、計算値と実測値との比較により妥当性を示した。また、スリット型遮音壁の遮音効果を確認し、本解析方法では、横方向スリットを設置した遮音壁が風圧荷重と遮音の面でも設置方法によって有効であることが分かった。今後の課題として解析領域の拡大により更なる実用性の向上が期待できる。

参考文献

富樫孝介：セルオートマトン法による騒音伝搬解析手法の開発とその検証，長岡技術科学大学大学院工学研究科博士論文，2010