

マイクロコンピュータを用いた屋外音場予測 (音源が屋外にある場合)

小嶋直哉*・小林啓二*・古田裕重**・大沢英尚**

Prediction of Exterior Sound Fields Using Micro-Computer

Naoya KOJIMA, Keiji KOBAYASHI, Hiroshige FURUTA and Hidenao OSAWA

Abstract

As industrial activity expands noise emissions from factories or power plants has become a serious social problem. Once facilities have been constructed effective countermeasures for noise reduction become difficult, due to the arrangement of machines, space and cost factors. It is useful to predict exterior noise emission prior to the construction of facilities for noise assessment purposes and effective investment.

This paper presents techniques for the prediction of exterior sound fields with the aid of micro-computers. Examples of calculated results are provided.

1. まえがき

道路や空港の整備, 工場・発電所の建設など人間の経済活動の発展に伴い, 豊かな生活がおくられるようになった。しかし, 人間が快適に生活するうえで環境問題がクローズアップされてきた。

特に騒音公害は, 大気汚染・水質汚濁といった物質により生活環境が損なわれるものとは性格が異なり, 人間の感覚により評価される感覚公害であり, 深刻な社会問題の一つとなっている。

騒音問題は, 一度発生してから対策を講じようとしても技術的・経済的制約が多く, 十分な防音効果が得られない場合がほとんどである。また最近では, 一定規模以上の工場を新設, 増設するに当たっては, 工場騒音防止を目的とした騒音アセスメントが義務づけられており, 有効な予測計算に基づいた防止計画により, 騒音問題の発生を事前に防止することが必要となってきた。

そこで本研究では, 効率的・効果的(時間・コスト

など)な騒音防止計画をたてることを目的とし, マイクロコンピュータを用いて屋外音場予測計算のプログラムを作成することを目的とした。

2. 音場予測計算の概略

2.1 騒音の予測

騒音の予測は, 次の二つに大別される。一つは, 個々の騒音源をもとに, 回折・遮蔽・距離減衰等の効果を計算して目的の地点での騒音レベルの計算をしようというものである。もう一つは, 次々刻々の騒音レベルを線形または非線形システムの出力と見なし, システム同定理論により次の時刻の騒音レベルを推定しようというものである。本研究では, 前者の手法の音響理論をコンピュータに取り込み, 騒音の音場予測を試みた。

音源から放射された音波は, 減衰しながら測定地点に到達する。音波は空気中の波動であり, その伝搬には反射・回折及び干渉など複雑な現象を伴うが, 騒音の伝搬予測でこれらを厳密に扱うのは現実的に不可能である。このため位相関係を考えず, 音の伝搬エネルギーの流れと考えると幾何学的な拡散による音の減衰量(距離減衰)を求め, 後述の超過減衰を差し引く方法

*機械工学科

**機械工学科(現:日本電装株)

が一般的に用いられる。

$$[\text{受音点の音圧レベル}] = [\text{音源のパワーレベル}] - [\text{距離減衰}] - [\text{超過減衰}]$$

上記の計算は、音源別・周波数別に行うため、音源の数、周波数帯域数、受音点数、音の伝播経路数の相乗回の計算回数が必要となる。

2.2 距離減衰

騒音の距離減衰を計算する際、音源として点音源、線音源、面音源あるいは立体音源と種々の形が考えられる。しかし、音源寸法に比べて十分離れた点からの音源は一つの点と見なすことができる。本研究では、プログラムの簡略化のため点音源のみを扱うものとする。この時、点音源からの距離減衰の計算式として次式が得られる。Qは音源の指向係数であり、音源の配置によって Fig. 1 に示すような値をとる。

$$L_p = L_w - 20 \log(r) - 11 + 10 \log(Q) \quad (1)$$

- L_p : 受音点の音圧レベル (dB:re20 μ Pa)
- L_w : 音源のパワーレベル (dB:re20 μ Pa)
- r : 音源と受音点間の距離 (m)

Fig. 2 はパワーレベル L_w が 94dB である音源を、解析領域の中心で地表に設置した場合の音圧レベル分布を計算により求めた結果を示す。○印が音源で、障壁など周りになにもない状態である。コンタマップの下には計算範囲・音源の位置・受音点の高さを表示する。これより、音源を中心にして円状に音が広がっており、騒音の減衰は距離に比例していることがわかる。

2.3 壁による音の反射

音源と壁の間では、音が壁に反射する影響を考える必要がある。まず、壁により音の反射の計算をする条件を求める。Fig. 3 (a) に示すように、音源から発せられた音波は、音源と壁の両端を結んだ直線に到達すると、壁によって等角度反射されると考えられる。この2直線(直線 AA', BB') と壁とで囲まれた範囲(音源側)の斜線部分について壁体による音の反射の影響を考慮した。

音の反射の計算方法として、Fig. 3 (b) に示すように音源が壁を反射して受音点に到達する場合の伝播距離は、音源 S から壁に当り受音点 P に到達する距離を鏡像受音点 P' と考え、距離減衰の式に代入し、受音点における反射音の音圧レベルとした。

斜線部分について壁からの反射音をすべて計算すると時間がかかりすぎる。斜線部分の中でも反射の影響

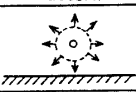
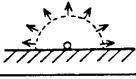
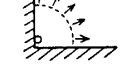
Pattern	Q	Condition
	1	Point source in free field (Without reflection surface)
	2	Point source on reflection surface (1/2 area radiation)
	4	Point source on corner (1/4 area radiation)

Fig. 1 Directivity factor Q of noise source

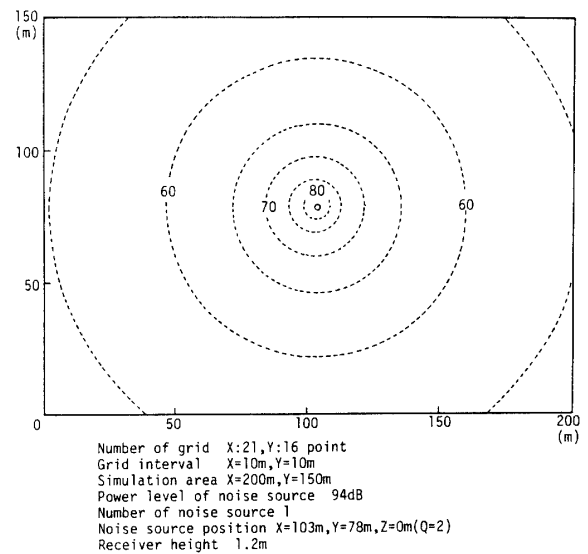
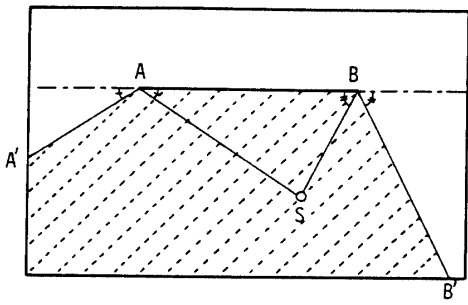


Fig. 2 Effect of ground on sound pressure distribution

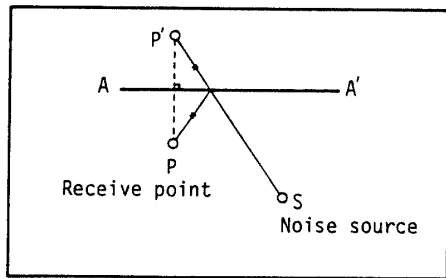
を考えなくてもよい部分があるものと思われる。そこで、どのような条件の時に反射の影響を考慮しなくてもよいか検討を行った。単純に考えると、音源と壁との間が遠く、音源と受音点が近い場合には直接到達音の音圧が高くなり、反射音の影響が小さくなる。これらの影響をパラメータとして取り扱うために、音源 S から壁に当たり受音点 P に到達する距離と、音源 S から直接受音点に到達する距離の比で考えることにし、この距離の比がいくら以上になると反射の計算をしなくてもよいかについて調べた。

Fig. 4 に簡単なシュミレーションとして、音源 1 つと壁面 1 つの場合の等音圧線図の結果を示す。このときの計算範囲、音源の位置、障壁の位置、受音点の高さなどをコンタマップの下に示す。

Fig. 4 の破線は壁による反射を考えない場合、一点鎖線は距離比 1.5 の場合、実線は距離比 3 と 5 の場合を



(a) Calculation area of reflect noise



(b) Mirror theory on reflect noise calculation

Fig. 3 Calculation of reflect noise causer by wall

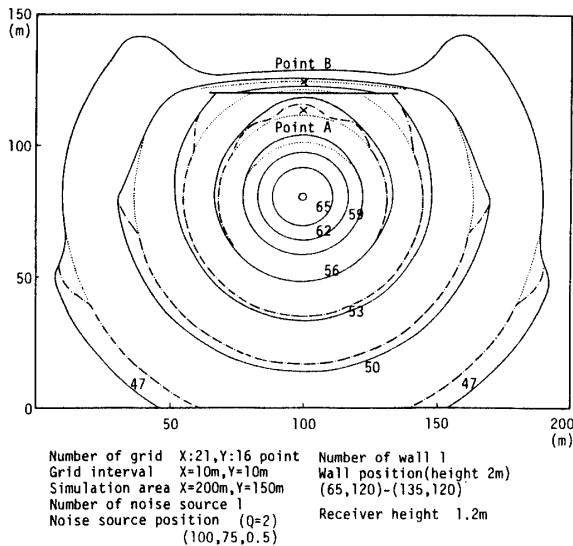


Fig. 4 Effect of reflect noise by wall

示す。これより、反射を考慮しないと音源と壁の間に誤差を生じることがわかる。距離比1.5と距離比3では、音源と障壁の間に誤差を生じるが距離比3と距離比5の間では壁による反射の差は現われていない。従って、計算時間を短縮し、正確な音場予測を行うためには距

離比3以下の場合に壁体からの反射の計算を行うことにした。なお壁に対し音源と反対側の領域については、壁による回折効果を考慮しているが、これについては次の2.4節において述べる。

2.4 超過減衰

屋外の騒音伝搬では種々の要因によって距離減衰以上の減衰を示す。これを超過減衰と呼び、次の要因からなり騒音予測精度を左右する。

$$\text{超過減衰} = A_{e1} + A_{e2} + A_{e3} + A_{e4} + \dots \dots \dots (2)$$

- A_{e1} : 建物などの障壁による回折減衰量
- A_{e2} : 空気分子の吸収による減衰量
- A_{e3} : 地表面の吸収による減衰量
- A_{e4} : 気象条件による減衰量

A_{e1} の障壁による回折減衰量については Fresnel-hoff の解析理論を基本とした半無限障壁に対する前川³⁾の実験値を用いる。これは Fig. 5 に示すように経路差 δ から Fresnel 数 N を求め、これにより減衰量を求めるものであるが、これをコンピュータで計算させるために近似式(3)を用いる。

$$\text{ATT} = 5 \pm 20 \log (2\pi | N | / (\tanh 2\pi | N |)) \quad (3)$$

$$(N > 0 : +, N < 0 : -)$$

ATT : 減衰量 (dB)

$$N = 2\delta / \lambda \quad (\lambda : \text{波長 (m)}, \delta : \text{行路差 (m)})$$

騒音の予測においては通常安全側の値となるように、 $A_{e2} \sim A_{e4}$ の項は、無視して計算する場合が多い。本研

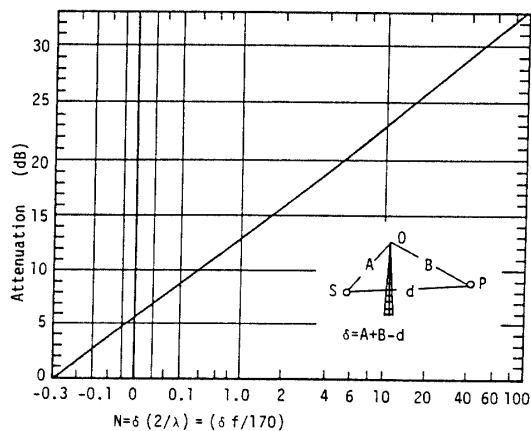


Fig. 5 Attenuation of half-infinity wall in free space

究では、プログラムの簡略化のため超過減衰項のうち A_{e1} のみを考慮し、 $A_{e2} \sim A_{e4}$ についての計算は行わないことにする。

なお、この式により算出される値は、自由空間における半無限障壁による減音量であるので、Fig. 6に示すような修正を行い、地上にある有限障壁の減音量として取り扱う。なお点 P' は P の地面に対する鏡像点である。このとき左右からの回折を考える際には、 O_2, O_2', O_3 及び O_3' を求めなければならない。厳密には O_2 と O_3, O_2' と O_3' の高さは異なるが、近似的に $O_1=O_2=O_3, O_1'=O_2'=O_3'$ として減音計算には O_1 と O_1' を用いることにする。

Fig. 7は、有限長下障壁がある場合の音圧レベル分布を、これまで述べてきた方法により求めた計算例である。建物の周辺における音圧分布を求めるためには、建物を構成するそれぞれの稜において仮想音源を並べて回折を計算する方法も考えられるが、立体まわりの多重回折については音響的には不明な点が多く、かつ計算時間が膨大となる。そこで本報においては、建物による減音量はFig. 8に示すような仮想障壁の理論⁹⁾から、障壁による減音量と同じ計算方法を用いて求めた。

先に示したFig. 4に、障壁後方の減音効果が現れていることがわかる。図中のA点B点において各周波数別の音の大きさを示したのがFig. 9である。音源として、各周波数帯域ともに同じレベルのホワイトノイズとした。これにより、音源から受音点Aまでの音の減衰及び壁の反射には周波数による影響はない。しかし、受音点Bまでの障壁による減音量には、周波数が高くなるにつれて減音量が増加する傾向が明らかである。

2.5 音の合成式

n 個音源から受音点へ到達する音圧レベルをそれぞれ $L_1, L_2, L_3, \dots, L_n$ とすると、受音点での音圧レベルの合成値は次式のように示される。

$$L = 10 \cdot \log(10^{L_1/10} + 10^{L_2/10} + \dots + 10^{L_n/10}) \quad (\text{dB}) \quad \dots\dots (4)$$

L : 音圧レベルの合成値 (dB: re. 20 μ Pa)

式(4)により、音源から各方面からの回折音の合成音圧レベルを算出し、その点を音圧レベルとする。

3. 音場予測プログラム

3.1 入力データ

本研究で作成したシュミレーションプログラムのフローチャートをFig.10に示す。使用したマイクロコン

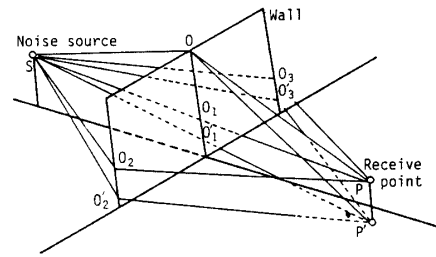


Fig. 6 Calculation of diffraction effect around wall with finite length

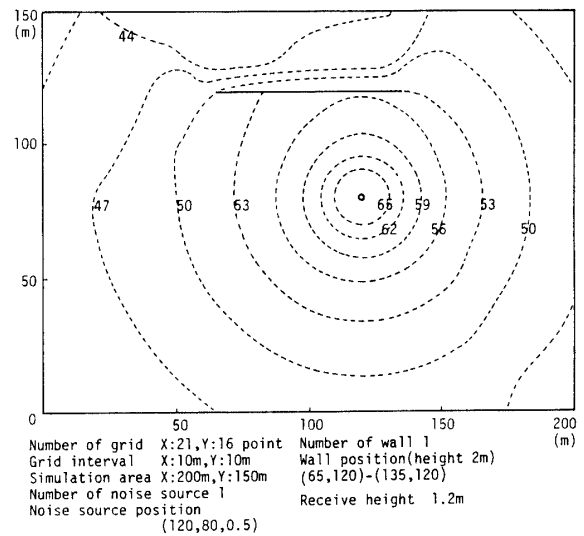


Fig. 7 Calculated example of sound pressure distribution around wall

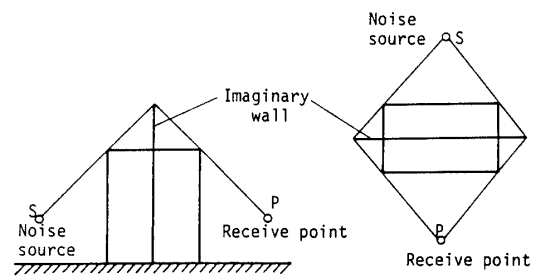


Fig. 8 Calculation of diffraction effect around building

ピュータは、PC-9801シリーズで数値演算プロセッサを組み込んである。

音場予測計算は、計算範囲を格子状に分割し、音源・障壁及び建物の入力データから各格子点における音圧レベルを計算するようになっている。この格子データ

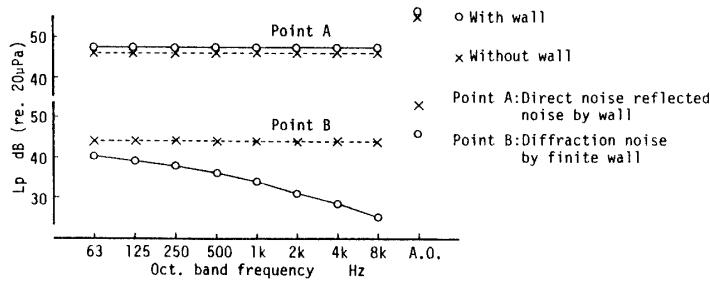


Fig. 9 Frequency characteristics of diffraction effect of wall

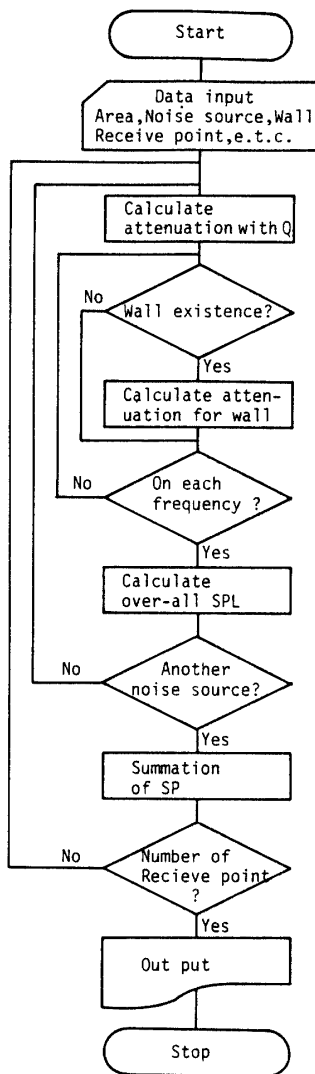


Fig. 10 Flow-chart of prediction program on noise distribution

は、プログラムを起動させると X 方向, Y 方向それぞれ別々に格子点及び格子間隔を任意に設定できる。

音源データは、音源の数、位置、パワーレベルおよび指向係数 Q を入力する。音源の位置は、原点からの距離を X 方向, Y 方向, 地面からの高さを順次入力する。パワーレベルは、周波数特性を持たせるために 63~8 kHz まで 8 段階の周波数帯域(オクターブバンド)におけるパワーレベルの値を入力する。受信点の高さは一般的に人間の耳の位置 1.2m 前後であるが、ここでは、1.2m 以外の値も計算できるようにした。

障壁データは、障壁の数とその位置・高さを入力する。また、建物のデータ入力も障壁と同様に行う。

3.2 音場計算

距離減衰量は、直接音と地面・壁からのそれぞれ一次反射までの反射音を計算し、この三つの音を合成する。反射音は、反射面(地面・壁)に対する受信点の鏡像を考えることによって計算する。地面・壁体の反射係数は、計算値が安全側(予測値において過大評価)になるためと計算の簡略化のため 1 とする。

次に、障壁による減音計算について述べる。音源と受信点の間に障壁があるかどうかの判断としては、まず音源と受信点を結ぶ直線と障壁の両端を結ぶ直線の交点を求める。次にこの交点と障壁との位置関係により、音源と受信点までの経路の途中に障壁があるか判別を行う。

障壁による減音量については、以下の計算を行った。まず、障壁の上方からの回折によるもので、これには障壁から受信点へ直接いくもの、地面を反射して受信点へ到達するものと、障壁の左右から回折し受信点へ到達するものがある。音源から受信点へ直接音が到達する距離と障壁を回折して到達する距離の行路差を求め、式(3)を用いて減音量を求める。

距離減衰と全ての障害物により減音有無の判別及び

減音の計算が終了すれば、その音源から受音点に到達するまで各周波数における音圧レベルのオーバーオール値を算出する。これで一つの音源から受音点に到達する音圧レベルの計算が終了したことになる。

もし、音源が複数個ある場合は以上の計算を全ての音源について繰り返す。それぞれの音源からの音圧レベルを全て合成し受音点での音圧レベルの計算が終了となる。

3.3 計算結果の出力

音場予測の計算が終了すると、計算結果と共に音源・障壁及び建物のデータもプリントアウトさせる。ここで受音点での音圧レベルの値を視覚的に捕らえるため、音場予測結果の音圧レベルの値をコンタマップ⁵⁾で表示させるようにし、音源及び建物の位置も同一画面に重ね書きするようにした。

4. 音場予測結果例

Fig.11は、音源を3つ、建物を2つ、障壁を3つ加えた場合で、ここでの音源1・2は、クーリングタワーやコンプレッサなど、音源3は煙突を想定した音源の高さを入力してある。複雑な音場を示すが、建物の後方、障壁の後方では減音効果が現れている。ここで障壁の間から騒音がもれ出ているため、この場所だけ騒音レベルは大きな値を示している。ここでの計算時間は約20分であった。

5. まとめ

マイクロコンピュータを用いて屋外音場予測を行うプログラムの作成と計算例を示した。

マイクロコンピュータを用いて屋外音場予測を行うと様々な試行を繰り返すことができ、工場等における音源ならびに建物等の配置について効果的な防音対策を施すことが可能となる。

今後の課題としては、超過減衰の項の減音量を厳密に計算できれば、このプログラムの計算精度も向上すると思われる。また、屋内からの音源が建物を通過し屋外へ出る時の透過損失を計算できるようになればより実践的な音場予測計算ができるものと期待できる。

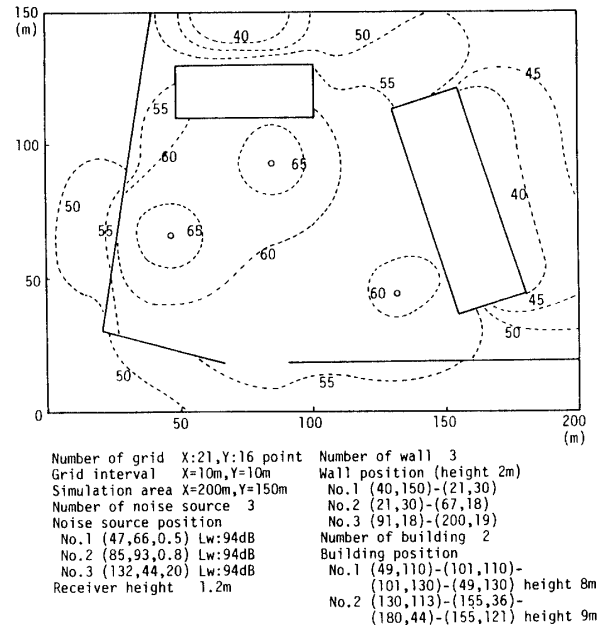


Fig.11 Calculated example of sound pressure level distribution

参考文献

- (1) 福田基一, 騒音防止工学, 日刊工業, 昭和51年
- (2) 前川純一, 有限障壁(衝立)による騒音の回折, 日本音響学会誌, 21-1(1965)
- (3) 前川純一, 障壁(堀)の遮音設計に関する実験的研究, 日本音響学会誌, 18-4(1962)
- (4) 齊藤保夫他4名, 屋外の騒音伝ば予測, 三菱重工技報, Vol.10, No.5 (1973-9)
- (5) 塩野清治他2名, パソコンによる格子データのコンタマップ作成プログラム, 情報地質(10), 1985
- (6) 大倉清, 工場騒音, 騒音制御, Vol.12, No.3, 1988
- (7) 丸田芳幸, パソコンによる工場騒音の予測, 騒音制御, Vol.12, No.3, 1988
- (8) 藤原恭司, 厚さのある障壁による騒音減衰, 日本音響学会誌, 31-12(1975)

(平成3年4月15日受理)