屋外での騒音伝搬に及ぼす気温と風との影響予測

坪井政義　　平野　滋

概　要

騒音源から数百メートル以上離れた地点では気温や風などの気象条件により，騒音レベルが１０dB(A)以上も変動することが知られている。そこで，気温や風により，屋外伝搬騒音レベルがどの程度の範囲で変動するのかを把握するために，ＥＷＳを用いた実用的な演算時間で予測可能な計算手法を開発した。

予測手法は音線追跡法をベースとして，点音源から放射した音エネルギーの軌跡を示す音線を追跡し，音線密度によって音圧レベルを求めた。気温と風速ベクトルの影響により，音線が連続して屈折していく様子はスネル則を拡張した式を採用した。計算結果では，地表面温度が低い温度勾配が逆転状態の地表面近傍，風下の地点で騒音レベルが大きくなることを示した。予測精度を検証するために，文献による実測データと比較したところ，１kHz以上の周波数帯域で良い対応が見られた。騒音源や受音点が地表面近傍に存在する場合には騒音レベルの変動が大きくなること，２m/s程度の弱風でも風下の地表面近傍では騒音レベルが大きくなることが分かった。これは地表面近傍は，温度勾配や風速勾配の変化が大きく音の屈折が大きいためである。

1. はじめに

地域開発開発事業に伴って，周辺にオフィスビル，ホテル，マンションがある工場跡地や遊休地等の土地有効利用のために，催し物での騒音の発生が危惧されるドームやイベントホールなどが計画されることがある。この場合には，事前に周辺に及ぼす騒音レベルを予測し，騒音低減対策とその効果とを予測して，効果的で経済的な設計仕様を検討する必要がある。

ところで，屋外での広域エリアを対象とした騒音伝搬では，媒体となる空気自身が動く風や，空気密度が変わる気温などの気象条件が大きく影響することが知られている。冬の晴れてよく冷え込んだ夜に，普段は聞こえない遠く離れた場所にある電車や自動車の音が良く聞こえることや騒音源の風下では騒音レベルが大きくなることなど，日常生活で体験している。

しかし，実際の大気は複雑な乱流構造なので，その中で音の波動伝搬を解くことは困難であり，これまで騒音伝搬予測に取り入れられていなかった。しかし，今後の複雑化した都市空間における各種イベントの騒音予測では，少なくとも大気による変動範囲を統計的に考慮する必要がある。

そこで，音環境アセスメント支援のために，騒音源から屋外伝搬する際の気象の影響による騒音レベルの増減を，屈折のスネル則を拡張し適用した音線追跡法により，ＥＷＳで予測するソフトの開発を行った。本件では気象の影響と予測ソフトの有効性について報告する。

2. 気温と風との影響予測手法

2.1 気温の影響

音が空気中を伝搬する時の速度である音速Ｃは，空気の絶対温度Ｔとすると次式で表せる。

$$C = 331.8\sqrt{((T(1+0.275\cdot e/P0))/273.0)}$$

ただし，T:絶対温度，e:水蒸気圧，P0:大気圧

一般的に大気は地表面近傍の接地境界層(地表面0m～100m)，中間の混合層(100～1,000m)，上部安定層(1,000m～)の三つに分類される。接地境界層では，地表面の日照や放射冷却の影響を受けて気温が大きく変動する。一方，上部安定層では大気が比較的安定して，温度Ｔは高さｚとともに減少する。温度勾配の近似式として次式が実験的に得られている[1]。

$\partial T/\partial z = -\Gamma - az - \delta$ より，$\delta \fallingdotseq 1$ とすると，

$$T(z) = T(z1) - \Gamma(z-z1) - a\cdot\ln(z/z1) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(1)$$

ただし，$-\Gamma \fallingdotseq -0.0098$(deg./m)，

Z1: ある基準高さ，a: 地表面ﾉ状態係数

上部安定層は，$\partial T/\partial z = -\Gamma \fallingdotseq -0.0065$(deg./m)

騒音源から放射された音線はスネル則より，水平軸となる地表面となす角度をθ，音速c(z)とすると，

$$c(z)/\cos\theta = \text{const.} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(2)$$

$$\partial x/\partial t = c(z)\cdot\cos\theta$$

$$\partial z/\partial t = c(z)\cdot\sin\theta$$

これらの式より，音速c(z)が大きくなると $\cos\theta$ も比例して増えるために，θ が小さくなるので地表面側へ屈折して伝搬するのが分かる。

2.2 風の影響

地表に沿って吹く接地境界層内の風は，地形や地表面上の樹木，建築物などのラフネスによる摩擦抵抗を受けて乱流運動をしているので，瞬時の風速は時々刻々と変化している。しかし，その平均速度の鉛直分布は比較的安定しており，一般に地表面からの高さｚにより，次の近似式で表されている[2]。

$$U(z) = U^*/K\cdot\ln(z/z_0)$$

U*: 摩擦速度，Ｋ：カルマン定数

ここで，z_0は地表面の粗さに関係するパラメータであり，粗度長(m)と呼ばれており,滑らかな土で0.005,草地で0.07,森林で1.0 程度と,熱的要因での影響が少ない場合には 地表面の凸凹が激しいほど大きな値となる。

2.3　気温と風の影響予測手法

屈折に関するスネル則は,高さ方向(z) の風速をU(z),温度勾配による音速をC(z,T) とすると,次の式に拡張することができる。

$$U(z)+(C(z,T)/\cos\theta)=\text{const.} \quad \cdots\cdots(3)$$

$$\partial x/\partial t = U(z)+C(z,T)\cos\theta,$$

$$\partial z/\partial t = C(z,T)\sin\theta$$

この式は音の進行ベクトルが音速と風速ベクトルとの重ね合わせで構成されることを示している。

開発したソフトは，風速と気温との気象条件をデータとして入力すると,音の伝搬方向を(3) 式により音線追跡して，音圧レベルの増減量を音線密度で予測計算する。

予測計算ソフトによる気象条件の影響を評価する設定条件は,追跡ステップ時間 $\partial t = 1/20$sec., 音線放射本数N＝10,000，地表面の吸音率0.10とした。

3.　気温と風との影響予測結果

3.1　気温の影響予測結果

レベル増減の基準とする気温一定で無風である理想大気中の気象条件で，地表面中央の騒音源から等放射角度ごとに音線を放射させ7秒 間(半径約2.4km)追跡した結果をFig.1 に示す。音線が騒音源から放射状に直線伝搬して完全な球面波を構成している。(1) 式の第３項が０である Neutral（中立）状態では,上空ほど気温が徐々に低くなるので，相対的に地表側の気温が高く音速が大きくなり，地表近傍で伝搬する音は上空に向けてやや屈折する。

一方，夏のよく晴れた昼間の地表の温度が日照により上昇したLapse（低減）状態では,Fig.2 に示すように地表近傍で伝搬する音は Neutral状 態よりさらに上空に向けて屈折する。

また，冬のよく晴れて地表面が放射冷却で冷やされる夜間などで，相対的に接地境界層で上空へ行くほど温度が高くなる温度勾配がInverse（逆転）状態では，Fig.3(a) に示すように音が地表面に向けて屈折して伝搬し，騒音源から200m離れた点で10dBのレベル増加が見られる。Fig.3(b)は騒音源から2,000m 点を拡大して地上から高さ732mの範囲を示した。白線は気温分布,赤線は波面である（以後同様）。地表面近傍の音圧レベルが上昇している。

3.2　風の影響予測結果

Neutral 状態で, 4.5 m/sec(地上12m)の風速ベクト ルがある場合を Fig.4 (a), (b) に示すが，風下では，音源 から200m離れた地点で10dBのレベル上昇が見られる。

（この図での白線は風速分布で，風は左から右へ吹く：以後同じ）

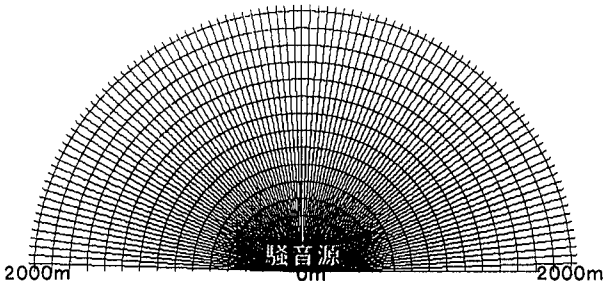

Fig. 1 気温一定,無風時の音線経路と波面
Course of Sound-ray and Wave-flont Surface
(No Wind and Constant Temperature)

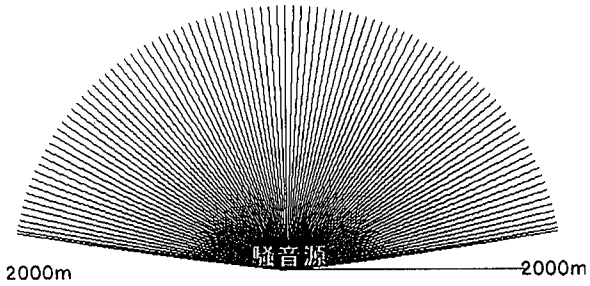

Fig. 2　Lapse時の音線経路
Course of Sound-ray (Lapse)

3.3　気温と風の影響予測結果

Fig.5 (a), (b)に示すLapse 状態で，4.5 m/secの風速 ベクトルがある場合には，風下では地表面近傍の音線が無風時のように上空へ屈折せずに伝搬する。風下では音源から200m離れた地点で10dBのレベル上昇が見られる。

（Fig.5(b) の白線は左から風速分布,気温分布）

Fig.6　に同じ気象条件の実測データの一例[3),4)]を示すが，1kHz，2kHz の周波数帯域では，音源の風下200m点で無風時に比べて約10dB上昇となっており，Fig.4 , 5 の計算データとよい対応が見られる。

Fig.7 に Neutral状態で2.0m/sec の風速ベクトルの 計算結果を示すが，2.0m/sec程度の風でも風下では騒 音レベルが上昇することが分かる。

Fig.8 に Inverse状態で4.5m/secの風速ベクトルの 計算結果を示すが，Fig.3 での気温の影響とFig.4 での 風の影響とを単純に加算したものではなく，影響度合いの大きな風の影響に近い結果となった。

3.4　３次元空間への拡張

２次元での予測計算法を拡張して３次元空間の予測計算を行った。すなわち，騒音源から風速方向に引いた直線を軸とした平面上で２次元の計算を行い，この軸を中心に平面を少しずつ回転させて前述同様に音線を追跡した。各音線の任意の同時刻の点どおしをつなぎ合わせると，その時刻での３次元空間の波頭面が構成される。そして,追跡ステップ時間ごとに３次元空間の波頭面を計算し,この波頭 面の法線ベクトル方向に騒音源から音線を等立体角に再放射して３次元空間での音線密度の変化により音圧

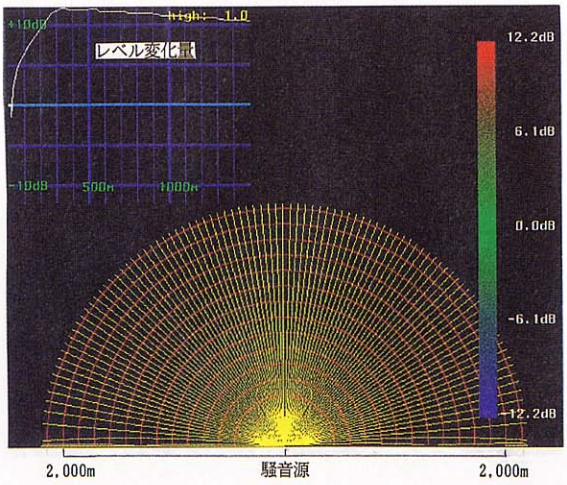

Fig. 3(a)　Inverse時の音線経路とレベル変化量
Course of Sound-ray and Value of Changed Level
(Inverse)

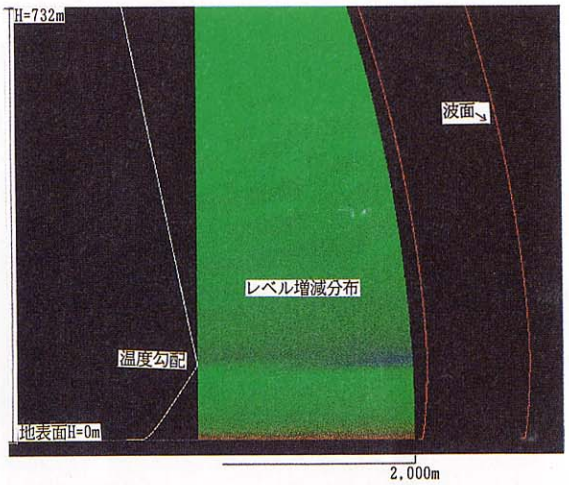

Fig. 3(b)　Inverse時の温度勾配とレベル増減分布と波面
Temperature Gradient and Changed Level Contour
and Wave-front Surface (Inverse)

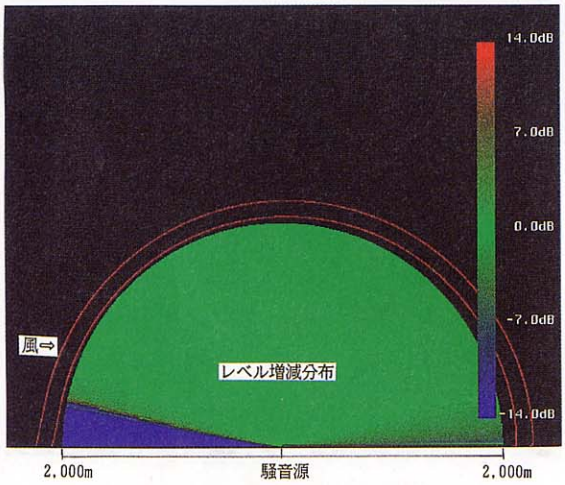

Fig. 4(a)　4.5m/s 風速時のレベル増減分布と波面
Changed Level Contour and Wave-front Surface
(Neutral,4.5m/s Wind)

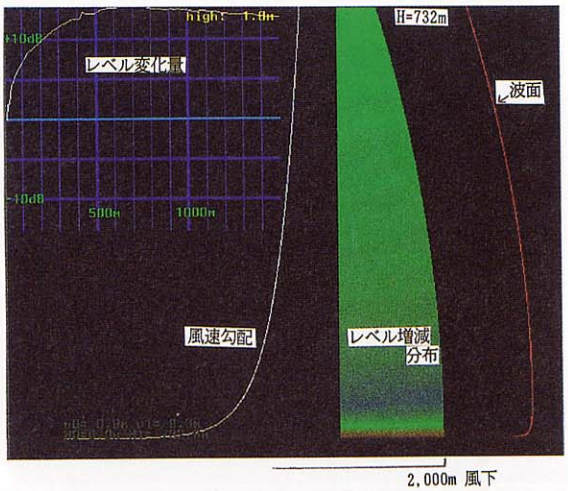

Fig. 4(b)　風速勾配とレベル変化量と波面
Wind Gradient and Value of Changed Level and
Wave-front Surface (Neutral,4.5m/s Wind)

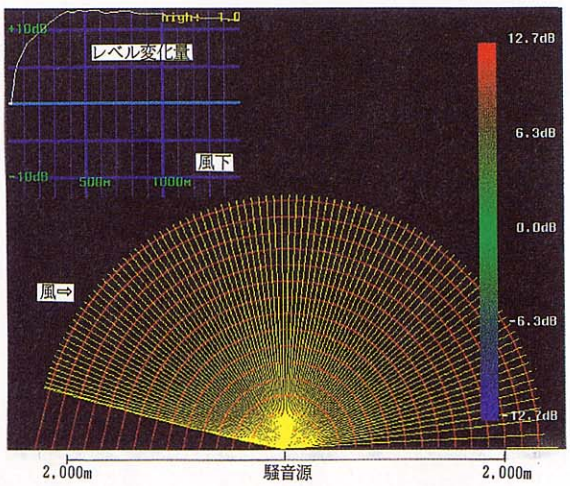

Fig. 5(a)　4.5m/s 風速時の音線経路とレベル変化量
Course of Sound-ray and Value of Changed Level
(Lapse,4.5m/s Wind)

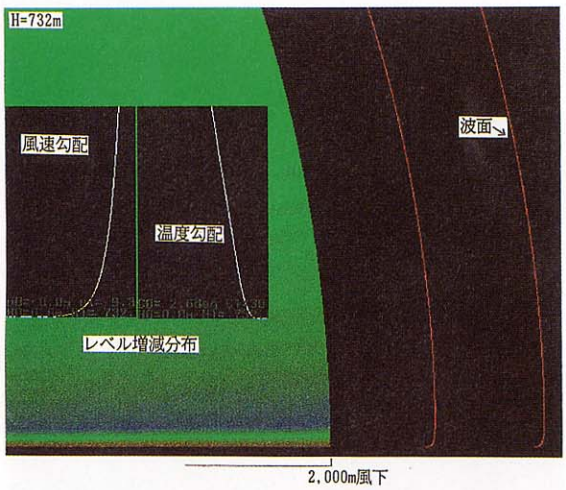

Fig. 5(b)　風速・温度勾配とレベル増減分布と波面
Changed Level Contour and Wave-front Surface
Wind Gradient and Temperature Gradient and Value of
Changed Level and Wave-front Surface
(Lapse,4.5m/s Wind)

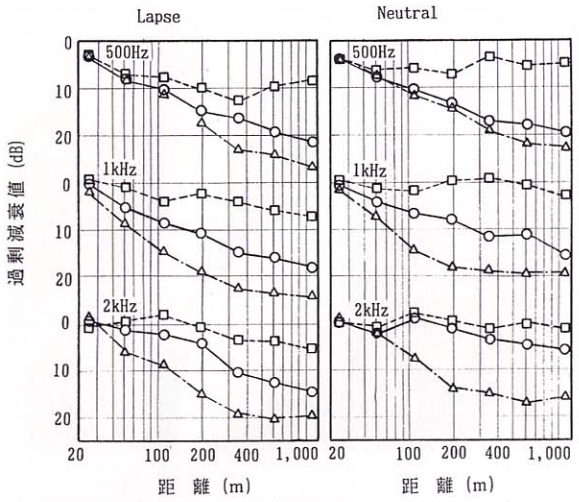

Fig. 6　草地における実測例(Parkin らによる)
□4.5m/s wind, ○ No wind, △－4.5m/s wind
An Example of Measured Value of Propagation Level

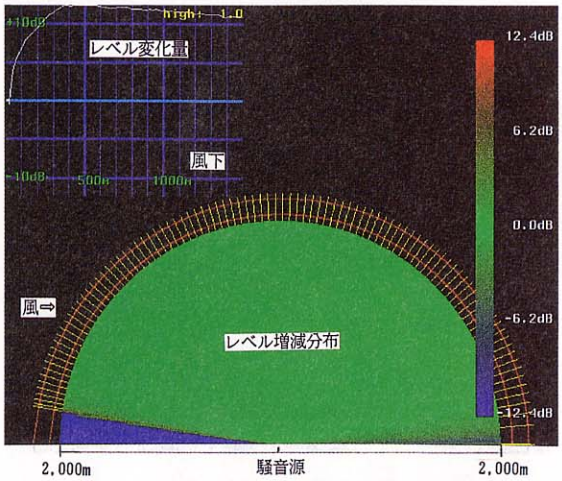

Fig. 7　2.0m/s風速時のレベル増減分布と音線経路
Changed Level Contour and Course of Sound-ray
(Neutral, 2.0m/s Wind)

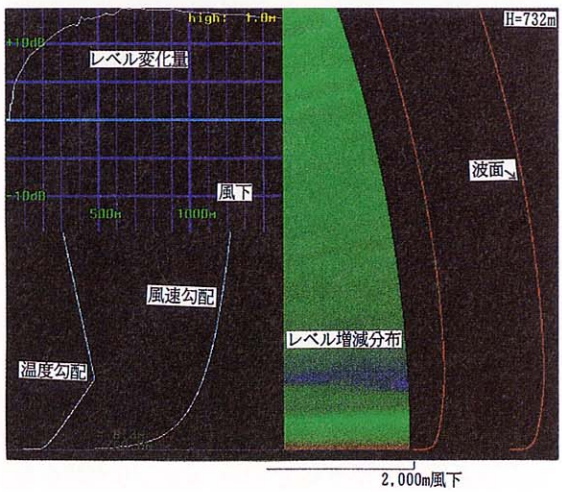

Fig. 8　4.5m/s風速,Inverse時のレベル増減分布
Changed Level Contour and Value
(Inverse,4.5m/s Wind)

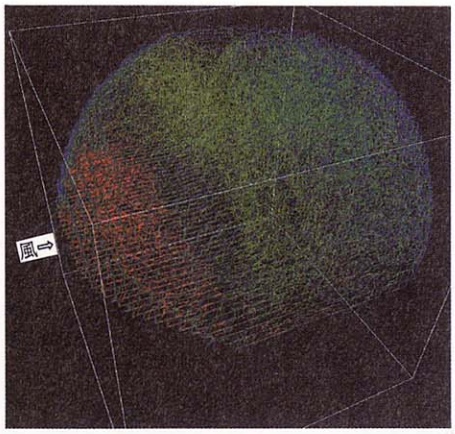

Fig. 9　3次元空間でのレベル増減分布出力例
An Example of Changed Level Contour by 3-D

レベル増減を評価した。計算結果の表示は汎用ソフトIRIS-Explorer を利用した。Fig.9 は左側から強風が吹付けた場合の計算結果（１５０ｍﾒｯｼｭ，４ｋｍ立方体ｴﾘｱ，263=17,576要素として表示）である。風上側では音線が吹き上げられ上空へ屈折するために，騒音レベルが上昇しているのが分かる。

4.　まとめ

屋外での気温や風速の気象条件の影響による伝搬騒音のレベルの増減量の予測を，屈折のスネル則を拡張した音線追跡手法により行ったところ，1 kHz 以上の高音域で実測値と良く対応した。

開発したソフトにより,気象の影響をまとめると，

1）　気象条件での影響で騒音レベルの増減量が大きいのは，騒音源が地表面近くにある場合の地表面近くである。これは，地表面近傍の温度勾配や風速勾配の急激な変化により音線が屈折するためと，地表面へ屈折し入射した音が累積し地表面近傍 を伝搬するためである。

2）　地表面近傍点での騒音予測では，弱風でも風の影響を考慮する必要があると判断される。これは，気温がNeutral状態で風速2.0m/secの影響予測したところ,地表面近傍で騒音レベルの上昇が見られたためである。

今後，このソフトを騒音アセスメントに有効に活用して,より精度の良い騒音対策に役立てる所存である。

参考文献

1）　日高孝之：騒音伝搬に対する温度勾配の影響，騒音制御, Vol. 14，No.1，p.18～22，（1990）
2）　竹内, 近藤：大気科学講座 1 ・地表に近い大気，東京大学出版会,（1981）
3）　P.H.Parkin and W.E.scholes：The Horizontal Propagation of sound from a jet Engine close to the Ground, at Hatfield, J.S.V. ,Vol.2 , No.4 , (1965)
4）　吉久光一：騒音伝搬に対する風の影響，騒音制御，Vol. 14，No.1，p.13～17,（1990）