

2. 自然環境による音の減衰

音の減衰をもたらす自然環境には、空気による吸収、音速に影響する温度と風速、音の反射率に関する地表面の性状、音の障害物となる樹林等がある。ここでは本研究に大いに関係ある樹林等による音の減衰に関する過去の研究、及び地表面による音の過剰減衰について記述する。

2-1 樹林帯等による音の減衰研究の足跡

- (1) 樹林による音の減衰に関して最も古いのはEyringが⁴⁾パナマのジャングルで実施したものである。これに続いてEmbletonが⁵⁾常緑樹と落葉樹を対象に研究した。常緑樹はセイヨウスギ、マツ、トウヒであり、落葉樹はカエデやポプラ、ニレの混生したものである。彼はスピーカとマイクロホンを開けた土地と樹林帯の中に設置し、マイクロホンをスピーカから50,100,150,200ft離して樹林の減音効果を求めた。そして全体の平均的効果の値として100ftで約7dB減衰するとしている。また、樹林帯の中でどの程度の距離まで見えるかという透視度尺度を用いて100ft当りの減衰量を整理しているが、結果は全く無関係であった。
- (2) ⁶⁾Aylorはトウモロコシ、アメリカツガ、アカマツ及び灌木を含む落葉樹林を対象に減衰量を求めた。トウモロコシでは音源の地上高さを1mとし、他の場合は1.5mとし、樹林を通過した音を音源から⁵⁾100ft及び200ft離れた点で測定した。結果はEmbleton等との比較のため100ft当りの減衰量で示している。アメリカツガとアカマツは低い周波数と高い周波数で減衰する傾向が似ていた。これに対しトウモロコシでは低周波数では減衰しないが、4000Hz以上では30dB以上減衰した。結論として、異なった樹林でも、つまり古いか新しいか、また植栽されたか自然かに関係なく同じ減衰量を与える。

そして騒音の減衰には木の葉、幹や地表面の状態すべてが重要であるとしている。

(3) また、⁷⁾彼は河口の多年性のアシを用いて実験を行った。実験は満潮時に行われ、地表面は完全に水に覆われていた。アシの密度は 59 ± 10 本/m²、高さ 2.5m、葉面積密度 3m^{-1} 、葉の幅 3.2cm、見通し距離 2m、幅 12.2m であった。その減衰は葉の幅が広いトウモロコシより⁶⁾高い周波数で始まり、アシの幅 12.2m 当り 1000Hz で 18.5dB の減衰量であった。

(4) ⁸⁾Carlsonらはストロブマツ(White pine)、レッドオーク、コルクガシ(Cork oak)、ヒッコリー、アメリカツガ、セイヨウブナ各樹皮の定在波管(内径 10cm)法垂直入射吸音率を求めた。使用した周波数は 400, 500, 630, 800, 1000, 1250そして1600Hzであった。吸音率は殆ど 0.02~0.10 であり、入射エネルギーの 10% 以下しか吸音されなかった。また戸外における騒音伝搬をペンシルベニアの開放地と 2 つの森で実験した。開放地はムラサキウマゴヤシの広い平地で近くに音を反射する物はなかった。No.1の森は基本的には成長したアメリカツガの樹林であり非常に密生したシャクナゲが下草としてあった。No.2の樹林は植栽密度の高いカシ、カバ、ストロブマツで成っていて、ここも下草にシャクナゲがあった。

受音点はスピーカから 15, 30, 60, 120, 240, 480及び 720ft とし、高さは 5ft と 8ft にした。スピーカの高さは一定で 6ft とした。用いた音は純音とオクターブバンドノイズで中心周波数は 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000Hz であった。

地上高さに関係なく、自由音場の減衰に対する過剰減衰は 3 地域共に 250~500Hz の低い周波数に最大ピークがあった。過剰減衰は中周波数域で最低となり、周波数と共にシャープな増加を示した。

距離減衰は開放地を含めた3地域共に同じ傾向を示し、100ft位までは自由音場の減衰と同等であり、それ以上では距離の増加と共に大きくなった。

- (5) Allenらは気象や大気中のガス等を昼夜別に考慮して、それらが植生に与える影響とその結果として生ずる昼と夜の音の伝搬について検討した。そして、これらの音響的問題を考慮すると、薄暮や夜の間には温度勾配の増加、大気中の二酸化炭素成分の非常な増大、湿度の増加及び地表面の流れ抵抗の減少が音響レンズを形成し、盛土のような音の障壁上に植物を植えると、夜間にはその効果は弱くなることが十分に考えられる。勿論我々は過去の経験から、美的改良は騒音に対する人間の受取り方を良い方向へ導く、それは驚く程ではないにしても良くすることは判っている。しかし上記のような植物プラントは障壁の実質的遮音効果を損なうかもしれないとしている。

そこで彼等は1976年6月にユタ州のソルトレイク市の土手を使って実験を行った。この土手はナラ(Scrub oak)、モモ、カエデで厚く覆われており、他に灌木と諸々の植物があり、かつ住居地域と高速道路を分離している。音源には一過性のものとしてホンダシビックをセカンドギア状態のまま時速25マイルで走行させた。測定は1時間毎に24時間、計12日間実施した。その結果は、僅かではあるがやはり夜明け前までは夜間の方が昼よりレベルが高く、例外なく夜明け時突然に最も効果的な障壁となった。ただし、彼等はこれが最初のテストであったので、実験は厳密ではなかったとしている。

- (6) Yamadaらは幅0.7~1.3mのマサキの生垣、同1.6mのヒノキとマサキの混植した生垣、及び数本から成る2列のマサキとヒノキ、そして3列のスギの木立を対象に減衰量を求めた。スピーカを対象とした生垣の前方12mに設置し、対象物の前後で得たレベル差から減衰量を求めた。オクターブ分析結果の減衰量は生垣で-2~6dB、

木立で-2～4dBとなっており、彼等は兩者共に1kHzで約1dBの減衰量であり周波数と共に増加するとしている。また残響室でニッコウヒバ、スギ、アオキ及びマサキの葉や幹等の吸音率を求めた。木の幹だけの吸音力は幹に葉が着いた場合の1/3だから音は葉だけで吸収される。そして葉の吸音率は周波数の平方根に比例するとしている。また、葉の吸音率を理論的に求め、それによる減衰量は実験の約1/5だから、林による減衰は主に葉の散乱効果が原因であり葉の吸音は少ないとしている。

- (7) ¹¹⁾ Kraghは線路沿いの幅25mと50mの防雪林を用いて減衰量を求めた。減衰量は平坦な草地をリファレンスとし、そこでの減衰と比較して求めた。

地域1では線路が地表面より0～0.5m下にあり、防雪林は樹高が高い樹令約50年のカバとニレと、それより低い樹令約15年のセイヨウブナや針葉樹で構成されている。そして現在まで管理されており全体に葉の茂った密な樹林である。リファレンスマイクロホン1とマイクロナホン3は線路中心から7.5mの距離に線路面より1.5m高く置かれた。マイクロナホン4は防雪林の後方線路中心から68m、地上1.5mに設置した。ここから250m離れたリファレンスマイクロホン2は線路中心から55m、地上1.5mに置かれた。68mでなく55mとなったのは木々に邪魔されたためであり、減衰量を求めるには補正が必要となる。線路は溶接レールでバラスト敷き枕木上のゴム板に乗っている。

地域2の防雪林はリファレンス位置から1100m離れていて、長さ1200m、幅25mあり、線路は地表面より0～0.5m下であった。樹令20年のカシやポプラや灌木が混生していた。そしてここでも葉は密であった。

リファレンスマイクロホン1とマイクロナホン3は線路の中心から7.5m、線路面上1.5mに、またリファレンスマイクロホン2とマイクロナホン4は同様に40m、地上1.5mに設けた。線路は30mの接

続レールで、バラスト敷き枕木上に直接置かれていた。

地域1では13列車を、地域2では15列車を対象に測定した。結果の平均値は地域1では、リファレンスマイクロホン1とリファレンスマイクロホン2の差が13.4dB_{Aeq}、マイクroホン3とマイクroホン4の差が22.4dB_{Aeq}、両者の差つまり樹林の効果が9.4dB_{Aeq}であった。また地域2では、マイクroホン1と2の差が12.4dB_{Aeq}、マイクroホン3と4の差が18.3dB_{Aeq}、従って樹林の効果が5.9dB_{Aeq}であった。結論として25m幅の樹林で6~7dB、50m幅の樹林で8~9dB減衰するとしている。

- (8) ¹²⁾ Kraghはまた道路交通騒音を音源として樹林による音の減衰量を求めた。選んだ植樹帯は基本的には落葉樹と灌木の計6種で、樹令は5~10年、幅は3,10,11,19,19,25mであった。道路から樹林の前面までの距離は0~90mであった。全測定地共リファレンス測定が可能な平らな地面が近くにある道路とした。そしてリファレンスは“まぐわ”でかきならされた地面から高さ50cmまでの草地に2つのリファレンスマイクroホンを設置し実施した。また2つのマイクroホンが各樹林帯の前方0~3mの範囲と樹林帯の後方3m、地上1.5mに設置された。

分析は1/3オクターブ分析であり、L_{Aeq}はその分析結果から合算した。L_{Aeq}における挿入損失は0~1dBと小さい。1つの例外はAsserboで測定した幅3m、樹令40年のシロトウヒ(White spruce)で3~5dBあった。この樹林帯は非常に濃密な構成をしており殆ど枝と葉でできた壁のようであった。そして結論として、2kHz以上では明瞭に大きな減衰が得られたが、L_{Aeq}での減衰は列車の場合に比べ小さい。これは列車音と自動車音の周波数構成や樹林の幅の差その他種々のものが原因だろうとしている。また、L_{Aeq}は殆ど低下しないが、樹林の存在は周波数構成を多少変化させること、また非音響的理由から交通騒音によるアノイアンスを低下させるとしている。

13)
(9) Martensは無響室内に鉢植えの木を持ち込み、その効果を測定した。木はNijmegen大学の植物学庭園で育ったものであり、カバが46本、ハシバミ(Hazel tree)25本、イボタノキ(Privet)12本、それと熱帯植物の混ざったものであった。測定対象としたモデルは次の7つである。

- (a) 46本の鉢に土だけを入れ無響室内の鉢の影響を調べる。
- (b) 葉を取り去ったカバの木46本。幹の直径は 8~20 mm。
- (c) 23本だけ葉を取り去ったカバの木46本。最大樹高は 2mである。
- (d) カバの木46本。葉量8.4kg、水分60%、葉の長さ70 mm以下、幅60 mm以下である。
- (e) ハシバミ25本。最大樹高1.10 m、葉量3.6kg、水分50%、葉の長さ 130 mm以下、幅 115 mm以下。
- (f) 熱帯植物26本。一部はプラスチックや陶器製のフラワーポットに植えられている。最大樹高2.30 m、葉量11.5kg、水分75%、葉の大きさは大小様々。
- (g) イボタノキ12本。最大樹高0.85 m、葉量2.5kg、水分60%、葉の長さ40 mm以下、幅20 mm以下。

実験にはホワイトノイズをスピーカから発生させ、スピーカから1.5mの位置にマイクロホンを置き、そしてその後に測定対象物を4.5m幅に置き、その直後即ちスピーカから 6mの位置に第2のマイクロホンを設置した。モデルの長さはすべて 1mとした。スピーカ中心とマイクロホンの高さはカバの木と熱帯植物の時0.89m、ハシバミ 0.6m、イボタノキ0.41mであった。

その結果、過剰減衰はカバの木で0.2dB、熱帯植物2.7dB、ハシバミ0.9dBの減衰があり、イボタノキでは1.2dBの増幅、半数だけ葉を取り去ったカバの木で増減なしであった。そして植物の量と過剰減衰の関係は見出されなかった。

1/3オクターブバンド分析結果では、ある周波数までの中域で増

幅が見られ、それ以上の周波数では周波数と共に大きく減衰する。従って、ローパスフィルタとして使用できるから、交通騒音や工場騒音の音色を変えることができるとしている。

- (10) MartensとMichelsen¹⁴⁾は理論的、実験的研究にも関わらず、植物群落の音の減衰のメカニズムは明らかではないが、その一つのメカニズムと思われる葉の振動を4樹種についてレーザ・ドップラ・バイプロメータ・システムを用いて調べた。100dB及び80dBの純音でハシバミの葉を振動させたところ、その振動速度は 10^{-4} m/s以下であり、葉の振動速度と音のエネルギーはリニアな関係にあった。またホワイトノイズでも純音と同じような結果が得られた。

振動速度のスペクトルは多くの種々の葉から得られたが、樹種により違いがあるかどうかは明確ではなく、振動モデルは非常に複雑だと思われた。

音圧100dBにおける振動速度は殆ど 10^{-5} ~ 3×10^{-4} m/sの間であって、音圧100dBで約 5×10^{-3} m/sの空気の分子振動速度と比べ1~3オクタード小さい。このように1枚の葉で吸収される音のエネルギーは小さい。しかしセイヨウブナの成木の葉は約20万枚もあり総数は非常に大きい。

- (11) Martens¹⁵⁾は6つの樹林とグライダー飛行場で音響的性質と音の減衰を調べた。5つの樹林は1954年にZuider海を埋立てたFlevopolderにあり、そのうち4樹林は単一種からなり、音場への影響を調べるのに好都合だった。各樹林は次の通りである。

1) セイヨウブナ林 1961年に植えられ、樹高はほぼ7.5m、地上1.5mの幹直径は 110 ± 24 mm、樹林中に低木や草はないが朽ちた落葉で50mm覆われている。木は2.5m間隔の列に植えられ、

1列の木と木の間隔は1.35m位で様々であった。この林で3つの方向、木の列と直角、木の列と平行、木の列との角45°方向の音の伝搬を調べた。

- 2) セイヨウトネリコ(Ash tree)林 1961年に植えられ、林の樹高6m、地上1.5mで幹の直径は 40 ± 3 mmである。木は1.4m間隔の列に植えられており、1列の木々の間隔は1.1m位で様々であった。地表面は密生のアシで覆われていた。
- 3) トウヒの林 1960年に植えられ、密生した林の樹高は8mで、地上1.5mの幹の直径は 114 ± 20 mmである。低層では葉のない枝、小枝が多くある。木は2m間隔の列に植えられ、1列の木々の間隔は1.8m位で様々。
- 4) トウヒの樹林帯 1959年に植えられ、幅4m、樹林帯の間隔は3mあり、そこは空地である。樹高は7.5m、地上1.5mの幹直径は 100 ± 20 mmである。地表は腐敗した落葉が厚さ30mm程覆っている。ここでは1つの方向だけ調べた。
- 5) 混生したポプラ林 1960年に植えられ、4つの植物層が落葉樹でできている。上層は高さ12mのポプラだけからなり、地上1.5mの幹直径は 290 ± 14 mmである。ポプラは3.3m離れた列植である。第2層は高さ7mでコナラ(*Quercus robur*)やハシバミ(*Corylus avellana*)の種類からなっている。第3層は灌木であり第4層は草本であった。
- 6) The *Stellario carpinetum* Nijmegen大学の植物学庭園内の*Stellario carpinetum* は殆ど落葉樹から成るよく成長した樹林であるが、この高さ17mの林の中には常緑樹もある。第1層はカバ(*Betula verrucosa*)やコナラ(*Quercus robur*)などからなり、第2層は10mの高さでトネリコ(*Fraxinus excelsior*)、ブナ(*Fagus sylvatica*)などで構成されている。第3層は灌木、第4層は草本である。

スピーカとマイクロホンは共に樹林の中に置かれ、スピーカは地上1.2mとし、マイクロホンは地上1.2mと3.9mとした。スピー

カとマイクロホンの距離は 6、12、24、48、96mとした。結果は次のようであった。

タイプ1 セイヨウブナとセイヨウトネリコの林 マイクロホンの高さが 1.2mの場合 100Hz以上の 1/3オクターブバンドのすべてで過剰減衰 (Ae) は100m当り10dBであり、マイクロホンが 3.9mの時は 5dB/100mである。地表面の影響はかなり低い周波数範囲に集中している。

タイプ2 ポプラの混生した林と *Stellario carpinetum* この落葉樹林のAeはマイクロホンが地上 1.2mまたは 3.9mでも2kHz近辺で 100m当りのAeはタイプ1より小さい。これは“サウンド ウィンドウ”の影響である。しかし地表面が影響する範囲はタイプ1より広がっている。

タイプ3 常緑のトウヒ林とトウヒの樹林帯 両者を比較した時最も顕著なことは樹林帯より林の方が良く減衰することである。

- (12) BullenとFricke¹⁶⁾は高さ30cm、直径2cmの紙チューブを木のモデルとし、半無響室にて樹林モデルの挿入損失を求めた。地表面には硬い地面としてハードボードを、軟らかい地面としてカーペットを使用した。4kHzと8kHzのオクターブバンドノイズを床上5cmのスピーカから発生し、同じ高さのマイクで測定した。スピーカから1mと1.5mの間に200本のチューブを幅1m×奥行0.5mの範囲に置いて樹林モデルとした。4kHzの挿入損失は硬い地面の場合モデルの後面で約12dBであった。これに対し、軟らかい地面では挿入損失は約5dBであった。また軟らかい地面の場合チューブの後方では音の減衰率がチューブの無い場合より小さくなる。これは予想されることであり、モデルの後面のエッジが線音源として作用するのだろう。従って、チューブの後面から1m以上離れた位置では、挿入損失はチューブが無い場合と比較すればマイナスになる。8kHzでも同じことが得られたとしている。

- 17,18)
 (13) 渡辺と山田は木の葉をモデル化したビニールの板と鉄板の障害物を、内面にガラスウールを取り付けた実験装置内につるし、障害物による減衰量を求めた。音源はホワイトノイズを 100Hz~20kHz の 1/3オクターブバンドフィルタに通したものでモデルの前方50cm に設置し、受音点はモデルの直後とした。障害物としたビニールは厚さ 0.4mm で大きさ (cm×cm) は 5×5、10×10、5×30、10×20、5×91.2であり、鉄板は厚さ 0.5mm、大きさは 5×5、10×10であった。

その結果、周波数が 1~2kHzまでは減衰量は殆どなく、或いはマイナスの値となっている。それ以上の周波数では直線的に減衰量は増加する。また板の数を増せば減衰量は次第に増加する。これらの傾向は板の性質や大きさに関係なく得られた。減衰量は障害物の密度 (F・L, F: 単位体積当りの障害物の表面積, L: 障害物が占める空間の通過方向の長さ) と周波数 f、それに障害物の 1 辺の長さ a との関数として表わされることが予想される。周波数 2kHz以下では減衰量 (Att) が負となるため 2.5kHz以上の減衰量を整理し、

$$\log(\text{Att}) = n \log(F \cdot L) + A$$

$$\text{Att} = B \cdot (F \cdot L)^n$$

を求めた。ここで A と B は定数である。n は障害物の縦横比が 1:1 の時 0.5 に近く、縦横比が極端に大きいと 0.7 に近いが、それ以上の値にはならないと思われる。そして、B は周波数と 1 辺の長さ⁷⁾に依存するものと判断し、Aylor と同様に波長定数 k を導入し次式を得た。

$$Att / (F \cdot L)^n = m \log(k \cdot a) + D$$

ここで m と D は定数であり、 a は板が正方形の場合はその一辺、長方形の場合は短辺とした。ただしこの式では $k \cdot a$ が1以下の場合を表現できないから問題があるかも知れないとしている。

- (14) ¹⁹⁾ Omranらは3つの防風林の減衰量を開放地における減衰と比べて求めた。音源はトラクタで防風林の前面から5mの位置に置いた。受音点は防風林の後面から3、15、30、45、60m離れた胸の高さとした。また、受音点は防風林と平行に15mずつ移動させ、計4回、60mまで移動させた。選定した防風林は次の3つである。

- 1) トキワギョリュウ (*Casuarina*) 2列植で樹高18m幅5m、地表は高さ15~20cmのムラサキウマゴヤシで覆われている。
- 2) ユーカリ (*Eucalyptus camaldulensis*) と トキワギョリュウ 3列植で外側は高さ21mのユーカリであり、内側は高さ19m、1列のトキワギョリュウである。全体の幅は15mである。辺りは高さ5~8cmの綿の苗木である。
- 3) トキワギョリュウ 7列植栽で樹高18m、幅32m (注・表では32mとあるが、図では29mとなっている。)、ただし防風林は内部の幅10m (幅2mの用水路を含む) の空地で2列に分けられている。

1) では1~12dBの減衰が得られ、防風林に垂直に音源を見る場合が最も効果があり6~12dBであった。2) では殆ど減衰せず、逆に増幅した。これはユーカリの葉が下方に垂れているためだろうとしている。3) では防風林に近い3mと15mで良く減衰したが、30m以上では0~6dB程であった。

2-2 地表面による音の過剰減衰

音源 S が自由空間（大気中）にある場合には、音源から距離 r_1 だけ離れた受音点 R における音圧は時間項を除いて次式で表わせる。

$$P_o = A \cdot (e^{i k_1 r_1} / r_1) \quad (1)$$

A : 音圧振幅

k_1 : 大気中における波長定数

$$k_1 = 2\pi / \lambda$$

λ : 波長

従って距離 r_1 が大きくなればなる程受音点 R における音圧は小さくなる。これを一般に音の距離減衰と呼ぶ。

しかし S と R が図 II-1 のように配置されている場合には、 R での音圧は S からの直接波に虚音源 T から到達すると見なせる反射波が重畳し複雑な様相を示す。そして R では式 (1) による距離減衰以上に減衰したり増幅したりする。この現象を増幅を含め音の反射面（地表面）による過剰減衰と呼ぶ。反射面が完全反射であれば、過剰減衰を示す周波数 f_n は経路長 TR (r_2) と SR (r_1) の差が半波長の奇数倍に等しいとすることにより求められ、 f_n は次式となる。

$$f_n = (2n + 1) c / (2\delta) \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

c : 大気中の音速

δ : 経路差, $TR - SR$

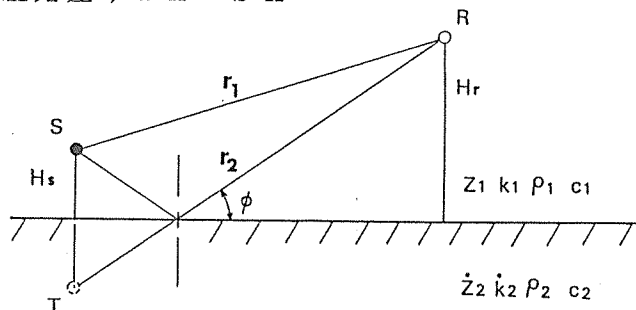


図 II-1 地表面上の音源と受音点の幾何的關係

一方、地表面が完全反射ではなく、ある有限なインピーダンス \dot{Z}_2 を有する場合は更に複雑となり、Rにおける音圧振幅を求める式として、Weyl-Van der Pol解を応用した近似式がIngard²⁰⁾やRudnick²¹⁾等によって求められている。また川井等^{22,23)}は他の方法により近似式を求めている。IngardやRudnick等によると、受音点Rにおける音圧 \dot{P} を求める音場計算式は振幅定数Aと時間項を除くと次式で示される。

$$\dot{P} = (e^{i k_1 r_1 / r_1}) + \dot{R} \cdot (e^{i k_1 r_2 / r_2}) + (1 - \dot{R}) \cdot F(\dot{w}) \cdot (e^{i k_1 r_2 / r_2}) \quad (3)$$

$$= (e^{i k_1 r_1 / r_1}) + \dot{Q} \cdot (e^{i k_1 r_2 / r_2}) \quad (4)$$

$$\dot{Q} = \dot{R} + (1 - \dot{R}) F(\dot{w}) \quad (5)$$

ここで

- \dot{Q} : 虚音源強度
- \dot{R} : 平面波の反射係数
- $F(\dot{w})$: 境界損失係数
- \dot{w} : 数値距離 (numerical distance)

境界損失係数 $F(\dot{w})$ は数値距離 \dot{w} の関数であり、Attenborough²⁴⁾によると次式で示される。

$$F(\dot{w}) = 1 + i \pi^{1/2} \dot{w}^{1/2} e^{-\dot{w}} \operatorname{erfc}(-i \sqrt{\dot{w}}) \quad (6)$$

\dot{R} や \dot{w} は、地表面の取扱い等の違いによりその定義は異なるが、Chessell²⁵⁾ や井清²⁶⁾、Embleton²⁷⁾らが実用的であるとして使用しているものは、Rudnick²¹⁾の定義によるもので以下の通りである。

$$\dot{R} = \frac{(\sin \phi - Z_1 \{ 1 - (k_1 / \dot{k}_2)^2 \} \cos^2 \phi)^{1/2}}{(\sin \phi + Z_1 \{ 1 - (k_1 / \dot{k}_2)^2 \} \cos^2 \phi)^{1/2}} \dot{Z}_2 \quad (7)$$

$$\dot{w} = i \cdot (2 k_1 r_2) \cdot (Z_1 / \dot{Z}_2)^2 \cdot \{ 1 - (k_1 / \dot{k}_2)^2 \cos^2 \phi \} / (1 - \dot{R})^2 \quad (8)$$

ここで(7), (8)式中の地表面の音響インピーダンス \dot{Z}_2 と、波長定数 \dot{k}_2 を与える式として²⁸⁾DelanyとBazleyの多孔材のインピーダンスを求める式が採用され、 $\dot{Z}_2 = R_2 + i X_2$, $\dot{k}_2 = \alpha_2 + i \beta_2$ とすると次式のようなになる。

$$R_2 / (\rho_1 c_1) = 1 + 9.08 (f / \sigma)^{-0.75} \quad (9)$$

$$X_2 / (\rho_1 c_1) = 11.9 (f / \sigma)^{-0.73} \quad (10)$$

$$\alpha_2 / k_1 = 1 + 10.8 (f / \sigma)^{-0.70} \quad (11)$$

$$\beta_2 / k_2 = 10.3 (f / \sigma)^{-0.59} \quad (12)$$

ここで f は周波数であり、 σ は単位長さ当りの流れ抵抗と呼ばれ単位はcgs単位が一般に使用され、記号はrayls/cmである。ただしcgs単位の1 raylsはMKS単位では1000Pa・s/mである。この σ は実際の測定結果

表II-2 単位長さ当りの流れ抵抗 1

表II-3 単位長さ当りの流れ抵抗 2

地表面の種類	σ rayls/cm
積雪0.4m上に新雪0.1mが積もった乾いた雪粒状になった雪(Sugar snow)	10~30
マツ(pine)やアメリカツガ(hemlock)の林	25~50
草地	20~80
(粗放牧地, 空港や公共建築物周辺など)	150~300
路肩のゴツゴツした石(大きさ0.1mまで)	300~800
車に圧密された砂のシルト	800~2500
石灰岩片を敷き詰めたきれいな厚い層(大きさ0.01~0.025m)	1500~4000
細石が詰まった古い土の道(大きさ0.05m)	2000~4000
雨や陽にさらされた大地	4000~8000
採石場が出る粉状の石が車で強固に圧密された表面	5000~20000
表面が滑らかな完成間もないアスファルト	~30000
熱伝導と粘性境界層による上限	$1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^6$

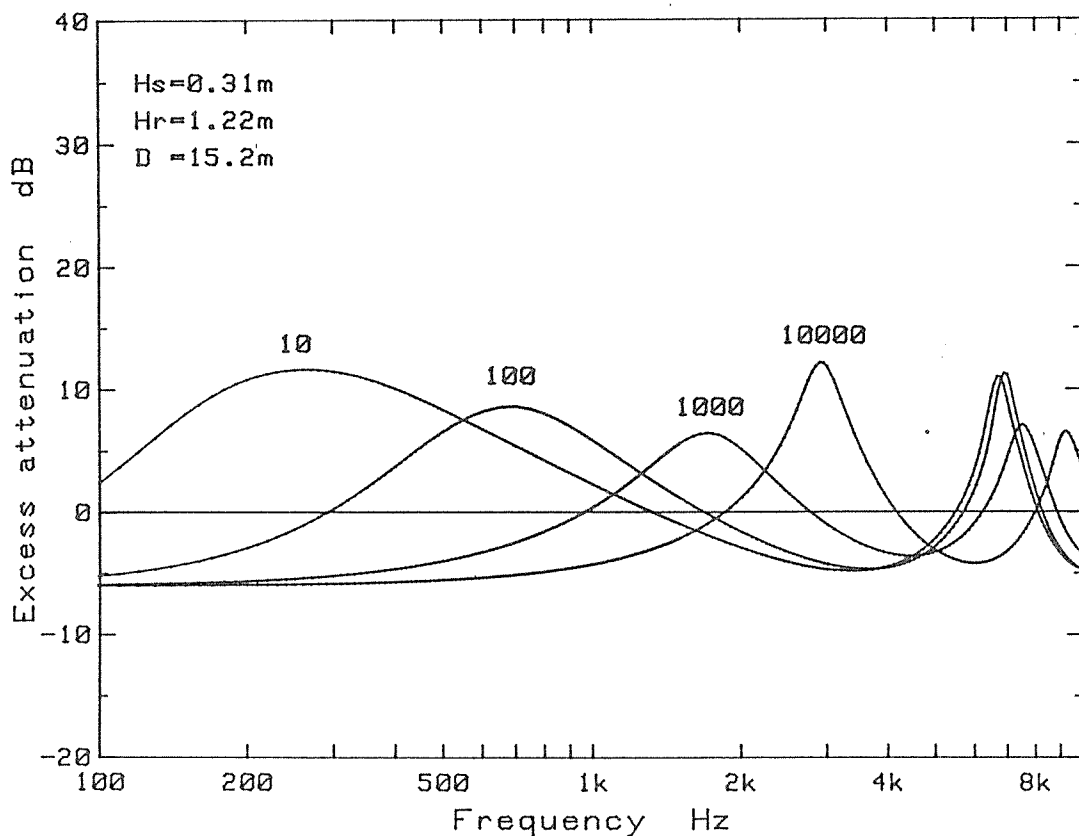
地表面の種類	σ rayls/cm
コンクリート	20000
アスファルト	20000
硬い土	5000
軟らかい土	1250
草地	300
砂利	150
雪(厚さ3cm)	75
雪(厚さ2m)	15

に最も良く合う計算値を与えるものとして適当な数値が当てられる。Embleton²⁷⁾らは各種の地表面インピーダンスを与える σ を表II-2のように示している。また井清²⁶⁾は σ を表II-3のように示している。

結局地表面による過剰減衰 L_e は (1) 式と (3) 式から次のように求められる。

$$L_e = -10 \log | \dot{P} / P_0 |^2 \quad (13)$$

図II-2にEmbleton²⁷⁾等の σ に合せた数値による計算結果を示す。音源高さは0.31m, 受信点高さは1.22mであり、両者の水平距離は15.2mである。これから σ が小さくなれば、言い換えれば地表面が軟らかくなるほど、過剰減衰を示す周波数は低域へと移動することが判る。



図II-2 式(13)による純音の過剰減衰
数値は単位長さ当りの流れ抵抗の値