

積雪軌道周辺における可聴音特性に関する一考察

依田英之、尾関俊浩、北川弘光（北大院・工）、近藤 篤（J R北海道）

1 研究の背景と目的

積雪寒冷地域において、鉄道軌道上及びその周辺の深雪は列車走行の障害となることから、然るべき除雪対策を講ずる必要がある。その際、線路沿いの積雪状況を把握することが極めて重要であるが、運行管理上に必要な積雪情報は数値化された高精度な情報である必要はなく、ビジュアル情報、即ち曖昧情報で十分であると言える。積雪状況を自動計測するシステムとして、超音波やマイクロ波による方式が知られているが、積雪モニタリングを必要とするのは列車の運行時間間隔が長い路線であり、現在の鉄道、特に在来線のおかれている経済的環境から考えると現実的であるとは言い難い。また、ビデオモニターによる監視は夜間や激しい降雪等による視界不良時には利用できない点に問題がある。そこで、経済的に実用可能であり、軌道という線状空間を考慮したモニタリングシステムを考え、可聴域音波が周囲の積雪状態や環境状況に依存することを利用した積雪モニタリングシステムの可能性を探る。

また、線路内での転撤器の除雪作業中に触車死亡事故が発生したことは記憶に新しい。このような惨事を二度と繰り返さないためには、積雪環境下における列車接近警報音の最適化を考える必要がある。警報音の最適化には積雪環境下における音場特性を知る必要があるが、そのような条件下において軌道内音場の研究はほとんど行われていないのが現状である。したがって、基礎的な部分から着手することが必要であり、まずその第一歩として、軌道内及び周辺における積雪状況、特に雪質や積雪深が可聴域音場に及ぼす影響について考察を行うこととした。

2 実験の概要

軌道内及び周辺における音場特性が周囲の環境状況、積雪状態等によりどう影響されるかを把握することを目的として、環境条件の異なる実験地（学園都市線・石狩太美、月ヶ岡）を定め、J R北海道の了解を得て、実際の軌道内を含めて実験を行った。各実験地の概略は次のとおりであり、写真を図－1 から図－4 に示す。

（a）石狩太美の軌道内（石狩太美駅 23 線踏切付近）

周囲は水田地で、平坦で広々としている。軌道内積雪状態は線間中央付近はほぼざらめ雪であったがレール近傍では氷板で、レール頭部はむき出しの状態であった。

（b）月ヶ岡の軌道内（第 4 札幌稚内踏切付近）

軌道からおよそ 16m の両側に防雪林がある。軌道内積雪状態は下層がざらめ雪で上層に新雪が堆積した状態であった。バラスト、枕木は完全に雪で覆われており、レールは頭部上面が見える程度であった。また、線路際には側雪があり、約 1m の積雪が層構造を成していた。

（c）月ヶ岡の水田地

周囲に人家はほとんどなく、平坦な所で、実験中にやや降雪があった。積雪状態は積雪深約 1m で、表層には厚さ約 20 cm の新雪が存在した。

(d) 月ヶ岡の無雪軌道内(第4札幌稚内踏切付近)

風速約 3m/s の向かい風で、あまり良い条件ではなかった。

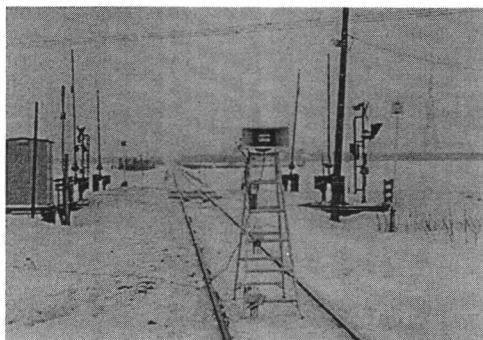


図-1 (a) 石狩太美 (軌道)

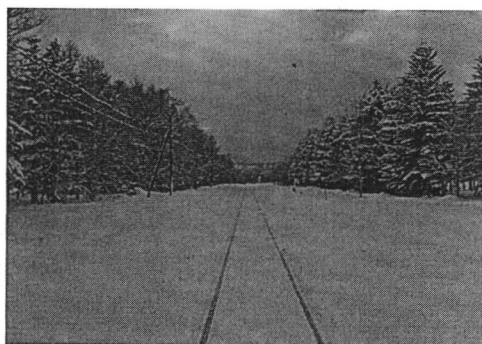


図-2 (b) 月ヶ岡 (軌道)

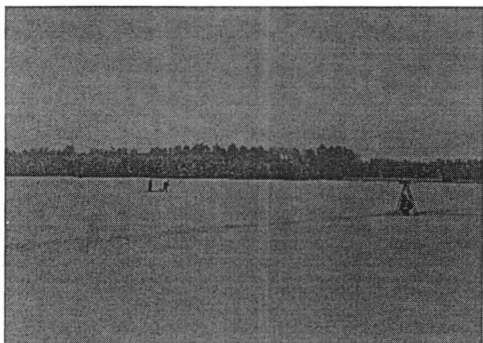


図-3 (c) 月ヶ岡 (水田地)

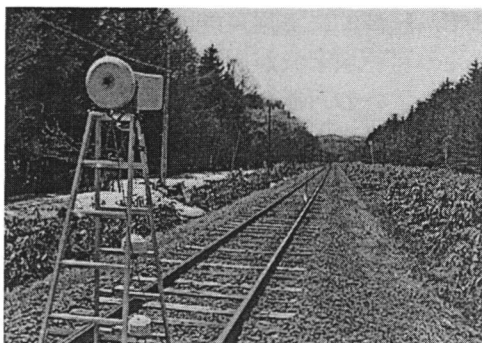


図-4 (d) 月ヶ岡 (無雪軌道)

本研究では、特定周波数の音を発信器(スピーカー)より発射し、発信器より適当距離の位置に、受信器(マイクロフォン)を設置して、騒音計の周波数補正特性を Flat 特性にして音圧レベルを読み取った。発信周波数は音波伝搬の減衰特性とスピーカーの周波数特性等を考慮して 250、500、1000、2000、4000Hz とした。発信・受信器間隔は音波の減衰及び技術的、騒音上の問題から自ずと制約があり、周囲の状況を考慮して決定した。発信器の高さは雪面に近いと音の減衰が非常に大きくなり過ぎると考えられ、雪面から 180 cm の位置に音軸を設定し、受信器も雪面から 180 cm の高さに設置した。その概略図を図-5に示す。さらに、軌道内積雪環境下における音場に及ぼす影響を明らかにするために軌道内及び周辺の積雪断面を観測し、成層状況、雪質、密度、硬度等を調査した。

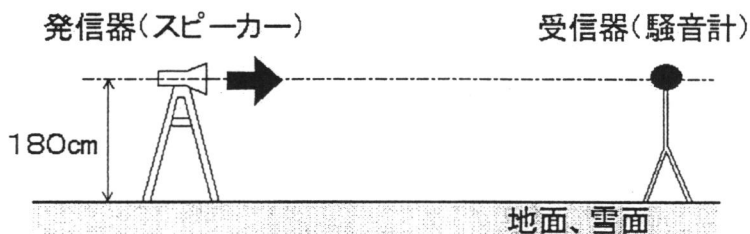


図-5 実験の概略図

3 実験結果

受信側で騒音計によって測定された音圧レベルと距離の関係の一例として、(b) 月ヶ岡 (積雪軌道) での結果を図-6に示す。なお、音圧レベルは対象とする音のみを考えることができるように暗騒音を差し引いた値である。また、図の直線は距離を対数軸としてプロットした際の近似直線である。周囲への影響等を考慮して、発信器の音圧レベルは各実験地で異なるため、音圧レベルの値自体の比較は意味がない。本研究では積雪環境によるおおよその減衰傾向を知ることを目的として、音圧レベルと対数プロットした距離の近似直線の傾きが音波の距離、空気等の影響をすべて含んだ減衰特性を表すものとして、この値(- λ)、即ち近似直線の傾きの絶対値である減衰係数 λ をひとつの指標として比較することによって音の減衰特性を評価することとした。減衰係数 λ の値が大きいほど音の減衰が大きいことを表す。各実験地における周波数と減衰係数 λ の関係を図-7に示す。

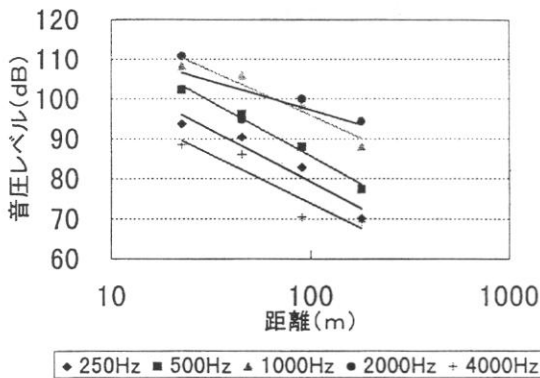


図-6 (b) 月ヶ岡(積雪軌道)における音圧レベルと距離の関係

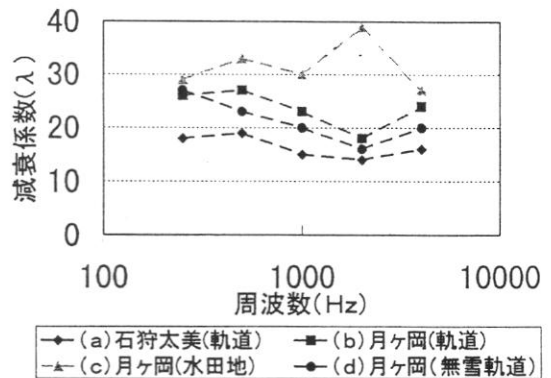


図-7 周波数と減衰係数(λ)の関係

図-7のように、減衰係数(λ)は周波数によって異なり、石狩太美及び月ヶ岡の積雪軌道内では2000Hz付近で減衰係数が小さいから、2000Hz程度の音が最も減衰しにくく遠方まで伝わっていると考えられる。石狩太美の軌道内と月ヶ岡の軌道内では、減衰係数の周波数特性は同様の傾向を示し、積雪深がおおよそ同じであったことから、減衰係数の大小は積雪の状態に依存していることが分かる。それに対し、月ヶ岡の水田地では2000Hzの減衰係数が他の実験地と比べ大きい値となって、明らかに軌道内での減衰係数と異なる周波数特性であることが分かる。また、雪の無い時の月ヶ岡の軌道内実験では、音の進行方向に対して向かい風が強かったために、無風状態よりも減衰が大きかったと考えられる。

4 積雪中の音の伝播及び吸音率^{1), 2)}

本研究において対象としている積雪状態では、積雪中の音波は主として空孔の部分を経由して伝播すると考えられるため、積雪の吸音率や音響インピーダンスに関係してくるのは積雪の弾性的性質ではなくて、積雪の多孔度、通気抵抗、空孔の形やその分布状態である。また、積雪は密度分布を持った多層構造であり、建築音響分野における多孔質材料と同じような減衰の周波数特性を示すことが知られているから、第一近似として、これらの成果を利用して積雪の吸音率を計算することとした。

雪面に対してある角度をもって入射する音波の吸音率は、斜入射吸音率を考える必要があり、音波が材料表面に入射する角度 θ によって異なるが、多孔質吸音材料の材料表面におけるインピーダンスを Z_1 として、局所作用的な境界条件の仮定を用いると、入射角 θ の斜入射吸音率 α_θ は

$$\alpha_\theta = 1 - \left| \frac{Z_1 \cos \theta / \rho c - 1}{Z_1 \cos \theta / \rho c + 1} \right|^2 \quad (1)$$

と表すことができる。ここで、 ρc は空気の特性インピーダンスである。

異なる実験地点での吸音率を比較するために発信器と受信器の距離がおおよそ 40 m での斜入射吸音率の周波数特性を計算し、図-8 に示す³⁾。

図-8 より斜入射吸音率は、低周波域では異なった周波数特性を示しているが、高周波域では明確な差は認められず、ほぼ同様の傾向を示している。さらに、石狩太美及び月ヶ岡の軌道では 500Hz 付近に極大値が存在しているが、ほぼ同じ積雪深であったことから雪質の成層構造の違いによって斜入射吸音率に差が出ていると考えられる。しかし、実験地による明確な差はみられず、この斜入射吸音率より音の減衰特性を説明するには不十分であると考えられる。

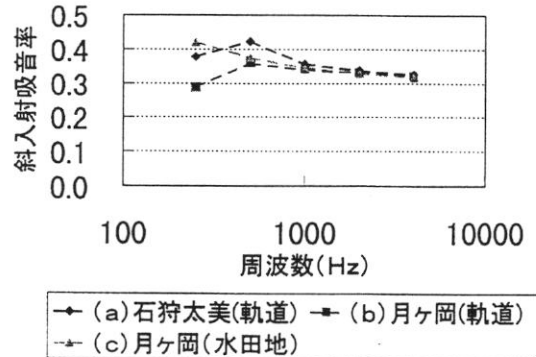


図-8 周波数と減衰係数 (λ) の関係

5 結論

- ・実際に積雪環境下の軌道内において実験を行った結果、積雪環境によって可聴音の音圧レベルは減衰し、その減衰係数には周波数依存性がある。既知の積雪環境下において音場特性の校正実験を行えば、積雪モニタリングシステムとして実用化可能である。
- ・受信器に到達する音波は伝播経路により直接音と反射音に分けられ、反射音は雪面の様々な点において反射したものであるから、完全反射面であれば幾何学的に吸音率を求めることが可能だが、実際に斜入射吸音率を求める際には、積雪表面の粗度や音波の散乱を考慮する等、何らかの処理が必要となってくる。
- ・吸音材料の特性を利用することで、密度分布の異なる様々な積雪状態を透過抵抗等で整理・分類し等価な建築吸音材料を積層にすることでモデル化して典型的な積雪状態を人工的に作ることが可能であれば、意図した積雪状態での再現実験ができる。
- ・可聴域音波を用いた積雪モニタリングシステムとしては、風や温度勾配による屈折の影響、降雪の有無等による S/N 比を改善する必要がある、気象条件による音場特性の変化も把握しなければならない。

6 参考文献

- 1) 石田完：“積雪の音響特性” 低温科学 物理編第 22 号、1964
- 2) Leo L.Beranek：“Noise and Vibration Control” McGraw-Hill、1971
- 3) 石田完、清水弘：“積雪の通気抵抗 (第 I 報)” 低温科学 物理編第 14 号、1955