

称号及び氏名 博士（工学） 宮地 徳蔵

学位授与の日付 平成 24 年 3 月 31 日

論文名 「トンネル微気圧波に関する理論的および実験的研究」

論文審査委員 主査 新井 隆景

副査 辻川 吉春

副査 大久保博志

## 論文要旨

列車が高速でトンネルに突入すると、トンネル内に圧縮波が形成される。この圧縮波は、トンネル内を入口から出口までおよそ音速で伝播する。そして、この圧縮波がトンネル出口に到達すると、圧縮波は坑口で開口端反射し、膨張波となってトンネル内を入口に向かって伝播する。この際、トンネルの外にはパルス状の圧力波が放射される。このパルス状の圧力波のことをトンネル微気圧波あるいは単に微気圧波とよぶ。微気圧波は、そのピーク値（微気圧波の大きさ）が大きくなると発破音を生じたり、家屋の建具などを揺らしてガタンと音をさせたりするなど環境問題の原因となる。例えば、営業中の新幹線の高速化や整備新幹線などの高速鉄道の建設の際には、微気圧波が沿線での環境問題とならないために、その大きさを予測し、沿線環境へ及ぼす影響とその低減対策を検討しなければならない。この微気圧波の大きさはトンネル出口に到達した圧縮波の圧力の時間微分 $(\partial p/\partial t)_{\text{exit}}$ の最大値にほぼ比例する。微気圧波対策の原理はこの $(\partial p/\partial t)_{\text{exit}}$ を小さくすることであり、例えば新幹線高速化の際には、トンネル緩衝工の設置・延伸・開口部の最適化や列車の先頭部形状の延伸・最適化といった低減対策が検討される。

このように微気圧波の現象は、その音源の形成過程も含めると、(1) 列車のトンネル突入による圧縮波の形成、(2) 圧縮波の伝播、(3) 微気圧波の放射という3つの過程に分けて考えることができる。微気圧波の現象を理解し、その問題を解決するためには、これらの3つの過程における現象を表す物理モデルを構築し、それをもとに新たな低減対策法と予測手法を開発していかなければならない。従来の微気圧波の現象に関する基礎理論としては、(1) 列車のトンネル突入による圧縮波の形成過程に関する Howe の音響学的手法、(2) 圧縮波の伝播過程に関する小沢の解析方法および福田らの 1D CFD (1次元の直接数値シミュレーション)、(3) 微気圧波の放射過程に関する山本の解析モデル（放射立体角モデル）がある。

Howe の音響学的手法は、3次元の数値計算に比べると短時間（現在の PC であればほぼ一瞬）で結果が得られるため、列車の先頭部開発への適用が期待されている。しかし、従来の Howe の音響学的手法では、理論の単純化のために音源項として列車の断面積分布のみが考

慮されており、列車の形状に関連する音源項の影響が明らかにされていない。

スラブ軌道トンネルにおける圧縮波の伝播過程において、圧縮波の波面は、圧縮波の伝播とともに切り立つため、長大トンネルにおける微気圧波対策は大規模なものとなる。したがって、圧縮波の波面の切り立ちを抑制する原理が得られれば、微気圧波をより効果的に低減することができる。しかし、圧縮波の伝播特性については、現地試験結果や従来の経験則について未解明な部分も多く残されている。

微気圧波の放射過程における放射立体角モデルは、極端な低周波近似を課しているため、微気圧波の音響学的な特性が卓越する場合には、新たな解析モデルが必要となる。

本研究は微気圧波の現象解明および微気圧波問題の解決に役立てることを目的とし、微気圧波形成に関する従来の基礎理論の発展に関する研究を行った。そのため、本研究では従来の基礎理論を拡張するための解析を行い、模型実験、現地試験、数値計算などによってその結果を検証した。

第1章では、研究の背景と目的を述べている。

第2章では、トンネル微気圧波について詳しく解説している。まず、列車の空気力学的諸問題と微気圧波の問題の関わりを明らかにした。さらに、微気圧波の現象を解説し、その後、微気圧波形成の3つの過程毎に従来の知見とその低減対策法について詳しく述べている。

第3章では、列車のトンネル突入による圧縮波の形成過程に関して、トンネル内圧縮波の解析手法である Howe らの音響学的手法を発展させ、理論解析と模型実験を行った。

まず、Howe の音響学的手法と比較検証するために、圧縮波の圧力上昇量のみに着目する空気力学的な定常解析を精査した。ここでは、線形近似を課した解析（非線形項を無視した解析）から得られる圧力上昇量予測式と、非線形項を考慮した解析から得られる原の式を同じ手順で導出し、それらの違いはトンネル坑口からの噴き出し風速の2次の項の取り扱い方にのみ依存することを示した。そして、新幹線のような低ブロック比問題の場合には、非線形項の影響が小さいことを示した。次に、Howe の音響理論における高次の音源項を同定し、圧力上昇量に関して、非線形項を考慮した定常解析の結果と非線形項を考慮した Howe の音響理論から得られる結果が同じになることを示した。すなわち、非線形の音響理論を用いて空気力学的な解析から得られた結論を導いた。

この結果をもとに、まず、新幹線を想定した軸対称長先頭部・低ブロック比問題において、圧縮波の波形を求める解析を行った。この場合には、従来無視されていたブロック比のオーダー ( $O[R]$ ) となる音源項が、列車が大きさをもちことに起因する2重極、4重極の影響などで表されることを示した。そして、これらの音源項の影響は、軸対称3形状（回転楕円体、回転放物体、円錐体）の先頭部の中では円錐体の場合に特に大きくなることを明らかにした。さらに、新たな音源を考慮したモデルによる解析結果と模型実験結果、数値計算結果を比較し、これらがよく一致することを確認した。

また、在来線単線の問題を想定した短先頭部・高ブロック比問題の場合には、圧力上昇量に寄与する音源項のみを考慮した解析方法を示した。そして、拡張した理論から得られた波形と現地試験結果が比較的好く一致することを示し、Howe の音響学的手法が高ブロック比問題にも適用可能であることを明らかにした。

第4章では、圧縮波の伝播過程に関して、それに伴う波面の変形の特徴（伝播特性）を調べるため、理論解析、現地試験、数値計算を行った。

まず、車両条件やトンネル緩衝工の開口部を変更した現地試験を実施し、圧縮波波面の変形がトンネル入口での圧力勾配波形に依存することを確認した。特に圧力勾配波形の谷部が浅い場合には、圧縮波の切り立ちが大きいことが分かった。次に、過去の同様の解析を参考にして従来の基礎方程式を簡略化し、音圧（大気圧からの差）のみに着目した空間発展型の偏微分方程式を導出した。この方程式では、トンネル壁面の摩擦と熱伝達を考慮している。さらに、この摩擦項に層流型のモデルを適用することで、現地試験結果とよく一致する数値計算結果が得られることを示した。

さらに、得られた方程式と摩擦モデルをもとに、トンネル内を伝播する圧縮波の伝播特性を理論解析および数値計算により調べた。まず理論解析によって伝播特性の初期波形依存性は非定常摩擦に起因することを示した。また、切り立ち効果の小さい圧縮波の圧力勾配波形は、谷部をもち、波形が前上がりである傾向にあることを示した。この傾向は、圧力勾配波形の平坦な部分（圧力の2階時間微分値が小さい部分）では、その減衰効果が小さくなるという非定常摩擦項の性質に起因している。

次に、列車速度、断面積が伝播特性に与える影響を数値計算により調べ、高速列車（あるいは大断面列車）による初期波形は谷部が浅くなるため切り立ちやすい性質をもつことを示した。これらの性質から、実際の微気圧波対策においては、トンネル長さによって適切な緩衝工開口部が異なるという重要な性質があることを明らかにした。

第5章では、微気圧波の放射過程に関して、微気圧波の音響学的な特性を明らかにするため、理論解析、数値計算、模型実験を行った。

まず、高速模型発射装置を用いた微気圧波放射に関する模型実験より、自由空間に放射される微気圧波の指向性が示された。また、坑口付近にバツフル板がある場合には、バツフル板による反射を考慮していない放射立体角モデルでは、微気圧波を正確に予測できない場合があることがわかった。一方、模型実験と軸対称線形波動方程式を差分法で解いた結果はよく一致した。したがって、微気圧波放射の問題は線形の音響理論が適用可能であることがわかった。

次に、線形の音響学の基礎方程式である Kirchhoff の境界積分表示から、分離解法により、微気圧波放射の音響学的なモデル（多重極音源モデル）を構築した。ここでは、トンネル内圧縮波が平面波として1次元的に開口端反射することを仮定した。このとき、微気圧波の指向性は開口端補正量を用いた2重極音源、地形による散乱効果はグリーン関数によって表現することができる。多重極音源モデルの導出においては、微気圧波の観測点が遠方であることを仮定した多重極展開を用いており、必要に応じて高次の音源項を考慮することができる。

そして、グリーン関数が解析的に得られる限られた場合について、模型実験、波動方程式を差分法で解いた数値計算結果、多重極音源モデルによる予測結果を比較した。これらの結果はよく一致しており、モデルの妥当性を確認することができた。

第6章では本研究で得られた成果を総括している。

## 審査結果の要旨

本論文は、列車が高速でトンネルに突入するとき生じる微気圧波について、列車のトンネル突入による圧縮波の形成、トンネル内の圧縮波の伝播、トンネル出口からの微気圧波の放射の3つの過程について、現象を表す物理モデルを構築し、それをもとに新たな低減対策法と予測手法を論じたものである。

得られた成果は以下のとおりである。

- (1) Howe の音響理論における高次の音源項を同定し、圧力上昇量に関して、空気力学的な解析から得られた予測式が Howe の音響理論から導かれることを示した。
- (2) 新幹線を想定した軸対称長先頭部・低ブロッケージ比問題では、ブロッケージ比のオーダーとなる音源項が、列車が大きさをもちことに起因する多重極の影響で表されることを示した。高ブロッケージ比問題では、圧力上昇量に寄与する音源項のみを考慮した解析方法を示し、Howe の音響学的手法が高ブロッケージ比問題にも適用可能であることを明らかにした。
- (3) トンネル内を伝播する圧縮波の伝播特性の初期波形依存性は非定常摩擦に起因することを示した。また切り立ち効果の小さい圧縮波の圧力勾配波形は、谷部をもち、波形が前上がり

である傾向にあることを示した。

- (4) 高速列車（あるいは大断面列車）によって形成される圧縮波の初期波形は谷部が浅くなるため切り立ちやすい性質をもつことを示した。そして、トンネル長さによって適切な緩衝工開口部が異なるとことを明らかにした。
- (5) 微気圧波放射の問題は線形の音響理論が適用可能であることを示し、**Kirchhoff** の境界積分表示から、微気圧波放射の音響学的なモデル（多重極音源モデル）を構築し、微気圧波の指向性は開口端補正量を用いた **2** 重極子音源、地形による散乱効果はグリーン関数によって表現することができることを示した。
- (6) グリーン関数が解析的に得られる限られた場合について、模型実験、**FDM**、多重極音源モデルによる予測結果を比較し、多重極音源モデルの妥当性を確認した。

本論文は、高速列車がトンネルに突入した際の、圧縮波の形成、トンネル内の伝播、トンネル出口からの放射の一連の過程を明らかにし、微気圧波の環境影響への影響を低減する方法を提示したもので、高速鉄道のさらなる高速化に寄与するとともに、圧縮性流体力学の発展に寄与すること大である。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。本委員会は、本論文の審査ならびに最終試験の結果から、博士(工学)の学位を授与することを適当と認める。