

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560488

研究課題名(和文) トンネル突入波の3次元数値解析

研究課題名(英文) Three Dimensional Numerical Analysis of Tunnel Inrushing Wave

研究代表者

北村 敏也 (KITAMURA TOSHIYA)

山梨大学・大学院医学工学総合研究部・准教授

研究者番号：80224971

研究成果の概要(和文)： 高速列車がトンネルに突入する際に、トンネル入り口周辺に圧力波(トンネル突入波)を放出する。本研究では、高速列車がトンネルに突入する過程をシミュレーションし、トンネルに対してオフセットした状態での突入や、トンネル入り口における地理の影響を評価することを目的とし、CIP法による3次元シミュレーションシステムを構築し、簡単なモデルについてのシミュレーションを行った。シミュレーションシステムでは、高速列車の突入に関する流体解析部分と突入波の放射に関する音響解析部分で分けて構成した。両解析システムとも距離減衰が理論通り現れず、保存則の適用に問題があることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)： When a high speed train intrushes a tunnel, pressure wave is emitted around the tunnel entrance as Tunnel Inrushing Wave. An objective of this research is to analysis influences on the emission of the wave by offset between the tunnel centre and rail way and by landform around the tunnel entrance. A three dimensional computer simulation system for analysis the objective was set up with CIP method. A simple model of emission by rush of high speed train into a tunnel was calculated by the system. The system split into fluid analysis system to simulate intrushing of train into tunnel and acoustic analysis system to simulate emission of intrushing wave. A difference of distance attenuation between a theory and results of simulation made clear that the systems have problems in conservation rule.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・土木計画学・交通工学

キーワード：高速列車、低周波音、数値解析、環境影響

## 1. 研究開始当初の背景

高速列車網の整備と高速化は日本経済の高度化の上で強く求められているが、一方で高速列車軌道周辺では住環境の悪化が指摘されている。特に高速列車による低周波騒音は大きな社会的な問題となっており、高速列車により発生する低周波音の対策が列車網

の整備や高速化の上の最大の障害となっている。高速列車による低周波音としては、高速列車がトンネルに突入した際にトンネル出口から発生するトンネル微気圧波についての対策が最も重要であるが、研究代表者や鉄道総合技術研究所等の研究機関により列車形状やトンネル入り口形状などの対策と

して多くの研究が進められている。一方でトンネル微気圧波の次にレベルが大きいと考えられているトンネル突入時にトンネル入り口周辺部に放射する低周波音（トンネル突入波）については、研究代表者らによる実地測定などのほかには十分な研究例が見られない。東北新幹線、北海道新幹線、北陸新幹線の伸長計画や中央リニア新幹線の計画とともにリニア新幹線のように従来の新幹線よりも高速で走行する車両計画が進める中で、トンネル突入波も明確な環境問題となることが懸念される。研究代表者の持つトンネル突入波について模型実験および山梨リニア実験線での測定データを生かし、トンネル突入波の生成と放射について明らかとし、軌道周辺の環境影響を適切に評価することが重要となっていた。

## 2. 研究の目的

列車が高速でトンネルに突入する際に発生しトンネル周辺部に放射するトンネル突入波について、3次元数値解析システムを構築し、これまで測定された模型実験での測定値及び山梨リニア実験線での測定値と比較しその有効性を評価するとともに、高速列車のトンネルに対するオフセット突入、トンネル入り口周辺の地理のトンネル突入波への影響について評価することを目的とする。

## 3. 研究の方法

これまで研究代表者はTVD法による2次元トンネル突入波の解析を行っていたことから、研究開始当初はこの方法を拡張し3次元によるトンネル突入解析システムを構築することとした。この解析スキームとして、オイラー方程式をRoeの平均を用いたFDS法をMUSCL内挿による高精度化したTVD風上差分法を用いた。

しかしながら、本解析には開発した解析システムは、3次元化することによる安定化条件が厳しくなったことから計算単位時間を短くせざるを得なくなったが、列車突入という非定常状態をシミュレーションするために長い解析時間をシミュレーションする必要があるため計算ステップ数が極めて多くなり、その間の累積誤差等による数値発散が発生し、計算パラメータを操作し安定化を試みたが本手法での解析は困難であるという結論に達した。

そこで、2年目以降は解析手法をCIP法に変更し、また解析にあたり、列車周回およびトンネル周辺の解析空間が狭く速度の低い流体の問題と、解析空間が広く速度の速い音響放射問題を同時に取り扱った場合、解析すべき空間（格子サイズ）、計算時間ステップに無理が生じることから、lighthill方程式による流体の渦度から音波を分離する

手法を用いて、問題を流体と音響の問題と分離して解析するシステムに変更することを検討した。そこでまず2次元モデルによるトンネル突入についてはオイラー方程式を基礎方程式としてCIP-CUP法、音響放射の解析については、波動方程式を基礎方程式としてCIP-CSL法によりシステムを構築し、その性能の評価を行うとともに3次元に拡張を行った。

最終年度には、3次元拡張を行ったシステムの有効性の評価を単純なモデルについて行い、オフセット突入や地理影響を評価できるモデルに改良することとした。

## 4. 研究成果

(1)TVD法による解析システムを構築することで、本研究の目的とするトンネル突入波の生成と伝播過程の解析には、以下の問題があることが明らかとなった。

- ・シミュレーション開始から高速列車に速度を与えておくと、列車周りの圧力・密度が急激に増加し、計算の初期段階で発散する。したがって実際の列車同様に停止状態から加速する必要がある。

- ・3次元化することにより1.25倍ほど安定条件が厳しくなることを予想していたが、実際はそれ以上に安定条件が厳しくなる。これは3次元化したことによる1要素について1計算ステップ当たりの計算量が増加し、それに伴う誤差の累積が大きくなったためと思われる。

- ・安定条件を満たすため計算単位時間を小さくした場合必要となる計算ステップ数が増加することと、3次元化による累積誤差の増加より列車モデルが十分な速度に達する前或いはトンネルに突入する前に計算値が発散する。

以上の結果から、本研究対象への3次元TVD法の適用は難しいと結論付けた。

(2)TVD法では安定条件が厳しく単位時間ステップ数が膨大になることから、安定条件の緩いCIP法により、流体と音響で問題を分けた解析システムの構築をおこなった。

- ・2次元流体解析ソルバにより、列車突入による圧力の発生について、圧力派の生成、伝播の過程を図1に示すように再現された。圧力波の生成及び伝搬過程をシミュレーションによりみることができたが、発生する圧力波の絶対値については、模型実験、実列車の測定値やTVD法による結果と比較し大きく異なる値となった。

この原因は、CIP法は特性曲線法に準ずる手法であり、開発したプログラムでは保存則の取り扱いが不完全であることと、列車突入という非定常な現象を格子重ね合わせ法により実現しているが、この格子重ね合わせの

手段が不完全であることが疑われる。そこでこの問題を解消するためにプログラムに改良を施したものの、本研究では有効な改良をすることができなかった。

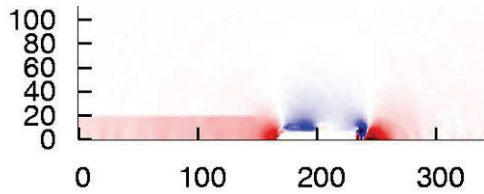


図1 突入波の生成

・そこで問題をトンネルからの圧力波放射の問題に切り替え、シミュレーションを行った。このシミュレーションでは、トンネル側から圧力波を出力し、トンネル入り口での放射の過程を評価した(図2)。また距離減衰について図3に示すようにトンネル入り口を基準位置とし、水平方向、鉛直方向及び斜め方向に評価地点を設け、各評価地点間における距離減衰を求めた。評価地点での測定は系の例として、水平方向の測定地点の圧力波形を図4に、鉛直方向の測定地点の圧力波形を図5に示す。水平方向の距離減衰を表1に示す。2次元問題とした場合、通常の圧力波ではトンネル口から倍距離で3dBの減衰を示すが、本モデルでは倍距離1.3(トンネル口近傍)~4.1dB(遠方)と、特に遠方において理論の3dBよりも大きい減衰を示し、少なくとも保存則に問題があることを示した。なお圧力の伝搬特性について評価したところ、CIP法が特性曲線法であることから音速での伝搬が確認できた。

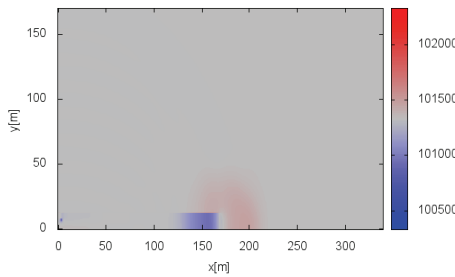


図2 トンネルからの圧力波放射

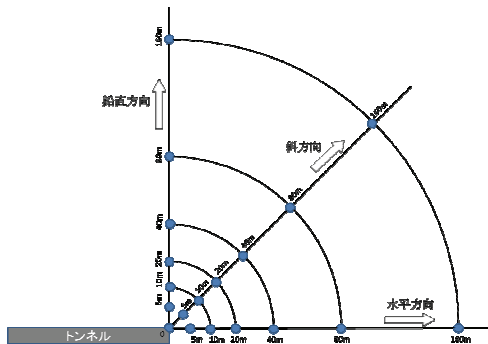


図3 トンネルからの圧力波放射

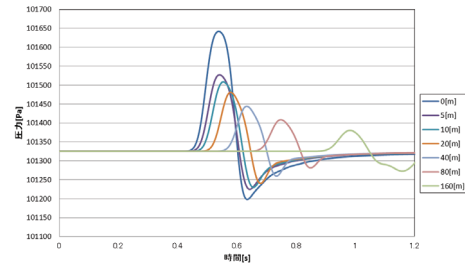


図4 トンネルからの圧力波放射(水平)

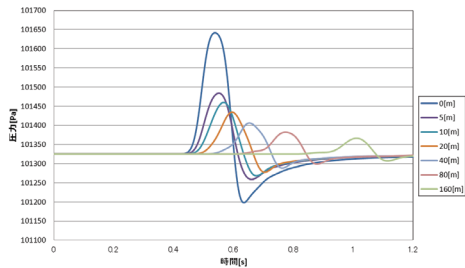


図5 トンネルからの圧力波放射(垂直)

表1 水平方向における距離減衰

距離(m)	10	20	40	80	160
減衰(dB)	0.8	1.3	2.3	3.4	4.1

・音響放射のシミュレーションにおいて、2次元モデルは放射過程に於いて概ね妥当なシミュレーション結果が得られた。そこで、即座に3次元モデルへの拡張を行った。点音源からの音響放射過程の3次元シミュレーションでは、図6(上から2ms, 10ms, 26ms)に示す放射過程を得ることができた。発生音は音源を中心にほぼ均等に球を描くように放射しており、放射過程について概ねシミュレーションできることを確認した(図中では地面に凹凸を設けた条件での放射を解析)。音速についても流体シミュレーションと同様に概ね正確な値が得られた。しかし表2に示すように音源から水平方向に5m, 10m, 20m, 40mに観測地点を設け距離減衰を求めたところ、理論では倍距離6dBの減衰を示すべきところを、倍距離7.6dB~9.3dBの距離減衰を示し、やはり保存則に問題があることを示した。

表2 水平方向における距離減衰

距離(m)	10	20	40
減衰(dB)	9.3	8.6	7.6

・高速列車のトンネル突入を流体モデルとして解析する3次元ソルバの開発を試みた。2次元モデルで問題となった保存則と格子重ね合わせ法の改良および、また多次元化の手法についても試行錯誤したものの、本研究期間内に於いて十分な精度が得られるソルバの開発ができなかった。また3次元化により

計算誤差の累積が大きくなり、解析開始から列車モデルのトンネル突入に達する前に計算が発散する結果となった。

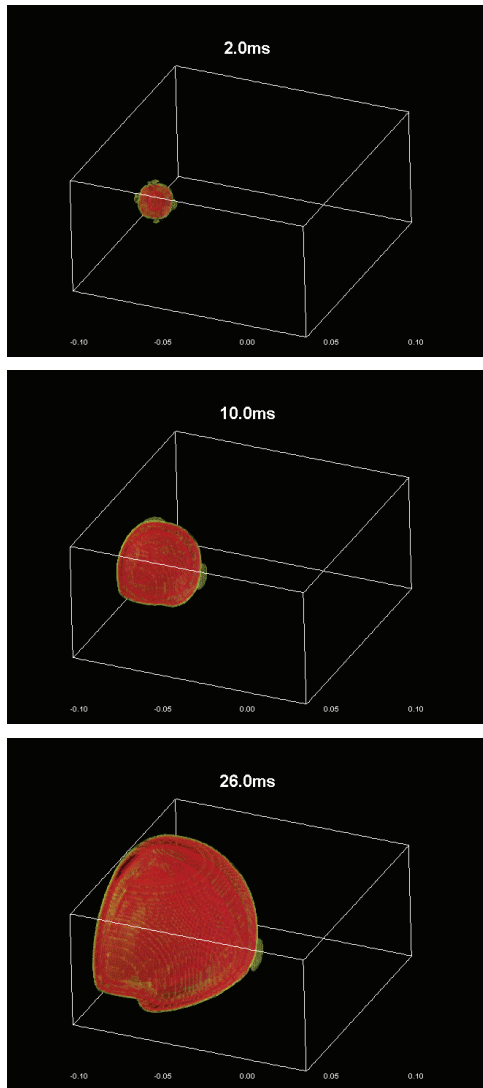


図6 音響放射過程

以上の結果より、CIP法による2次元の列車のトンネル突入モデルと3次元の音響モデルを組み合わせることにより、列車がトンネルに突入する過程におけるトンネル突入波の生成と放射について概ねの様子をシミュレーションすることはできた。またこの結果から列車突入音の伝播過程への地形影響についてはシミュレーション可能となった。しかし保存則と安定性に問題があることから、その圧力波のレベル等について量的に正しくないものとなっており、本研究においてこの問題を解決することはできなかった。またオフセット突入の解析についても問題を残した。

本補助金の研究期間は終了するが、本問題の解消に引き続き取り組んでいる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計1件)

- ① 矢部治貴、佐野太洋、北村敏也、2次元圧力波伝播シミュレーションの試み、日本機械学会関東支部山梨講演会P80-81、2010年10月23日、山梨大学

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

北村 敏也 (KITAMURA TOSHIYA)

山梨大学・大学院医学工学総合研究部・准教授

研究者番号：80224971

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し