

トンネル走行時の列車周りの流れの数値解析

Three Dimensional CFD Analysis of Transient Compressible Flows
Around a Train Passing Through a Tunnel

大津山澄明*・楊 笑風**・岡島 厚***

Sumiaki OHTSUYAMA, Xiaofeng YANG and Atsushi OKAJIMA

* 西日本旅客鉄道株式会社(〒530-8341 大阪市北区芝田2丁目4番24号)

** 工博 金沢大学大学院自然科学研究科助手(〒920-8667 金沢市小立野2丁目40番20号)

*** 正会員 工博 金沢大学工学部機能機械工学科教授(〒920-8667 金沢市小立野2丁目40番20号)

Three dimensional computations were performed using the KIVA-3 code to investigate the unsteady compressible turbulent flows about a practical train passing through a single-track tunnel. Both length of the train-tunnel and speed of the train were considered to investigate their effects on the train-tunnel interaction. In order to understand the whole process of the train-tunnel aerodynamic interaction, we studied the formation and propagation of the pressure waves, the reflection and radiation of the waves at the tunnel portals and the histories of aerodynamic forces on the train. The experimental results were compared well with the computational data. The code can be used to predict the aerodynamic phenomena of the train-tunnel system.

Key words : Compressible Flow, Turbulent Flow, Unsteady Flow, Computational Fluid Dynamics, Train-Tunnel Interaction

1. 緒言

列車がトンネル内を高速で走行する際に、トンネル内の圧力変動、空気抵抗の増加、トンネル出口での破裂音の発生等の空力的な種々の問題が生じる。これらの問題は、列車とトンネルの相互作用によって生じ、近年の著しい列車の高速化によりその重要性が増している。圧力波は列車がトンネルに入り、トンネル内を走行することによって発生する。この圧力波によって起こる圧力変動は、車両の気密が不十分であれば車内の乗客の不快感をまねく原因にもなる。また、圧力波はトンネル内を音速で伝播するが、特にトンネルがスラブ軌道の場合にはその圧力勾配が徐々に大きくなり、トンネル出口で破裂音の発生や断続的な圧力波の放出が起きる。この破裂音はトンネル微気圧波と呼ばれ、パルス状の圧力波がトンネル出口付近で発生し、付近の居住地に大きな影響を及ぼすこともある^{1) 2)}。

このような列車とトンネル内の流れとの干渉現象については、トンネル内の圧力波伝播を一次元的に近似して解析されている^{2) 3)}。しかし、列車の先頭部と後尾部の周りや列車突入直後や通過直後のトンネル出入口付近での流れは、非定常、圧縮性で乱れを持つ三次元流れであり、さらに、動く境界条件と流れの非

定常性は現象を複雑にしている。

一方、数値流体力学(CFD)技術の進歩とコンピュータ容量の向上により、動く境界条件による複雑な非定常流れの三次元シミュレーションが可能となり、列車とトンネル相互の作用による非定常流れに関する二次元または三次元のいくつかの報告がなされている。飯田⁴⁾は、軸対称で圧縮性オイラー方程式を解くことにより、半無限のトンネル内を走る半無限の列車のシミュレーションをした。そこでは、列車先頭部で発生する圧縮波のみが扱われている。Mestreauら⁵⁾は、動く列車を考慮した自動メッシュ形成法による有限要素法を用いて、仏国TGV列車のトンネル走行時の三次元非定常空力シミュレーションを行った。小川ら⁶⁾はトンネル内を走行する列車によって起きる軸対称非粘性流れを解強制置換法(FSA)を組み合わせたゾーン法を用いて計算した。小川と藤井⁷⁾は、トンネル内を走行する高速列車による三次元流れの圧縮波に注目して詳細に研究している。

本研究では、KIVA-3コード^{8) 9)}を用いてトンネル内を走行する列車周辺の流れを計算する。KIVA-3コードは元来、往復内燃機関のエンジン内の流れを解くために開発されたものであるが、流れを列車がトンネルを通過する際の非定常、圧縮性

で、 $k-\epsilon$ 乱流モデルによって乱れも考慮した三次元流れとして、空力的相互作用を研究するためにコードを改良して適用した。

まず、計算結果を実験室における模型試験結果との比較を行い、改良したコードの正確性を検証する。次に、実際の列車による走行測定結果と比較するために、トンネル内を走る列車による流れの場を三次元計算する。そして、列車による圧力波の形成、トンネル内の圧力波の伝播、トンネル出入口における反射と放出、列車の先頭部、後尾部及びトンネル出入口との関連等の一連の現象を明らかにする。

2. 数値解析

2・1 列車とトンネル形状

計算例として用いる列車形状はJR西日本でサンダーバード号として使用されている681系交直流特急電車であり、トンネルは一般的な電車で単線トンネルである。図-1に先頭車両とトンネル断面の幾何的形狀を示す。列車断面のトンネル断面に対する比率(占有率)は、0.383であり、列車とトンネルの断面はそれぞれ、 8.723m^2 と 22.805m^2 である。列車の速度は681系電車の最高速度 $160\text{km/h}(44.4\text{m/s})$ と将来の高速化を考慮して $252\text{km/h}(70\text{m/s})$ とした。表-1は、本論文における列車とトンネルの4つのケース別諸元である。なお、列車長さとトンネル長さの決定は、計算機の容量と計算時間等を考慮して編成両数は1または2両、車両長さは21mまたは41mとした。

2・2 コンピューターコードの改良と適用

計算はKIVA-3コードによるブロック構造格子を用いた有限体積法により、低マッハ数域のオイ

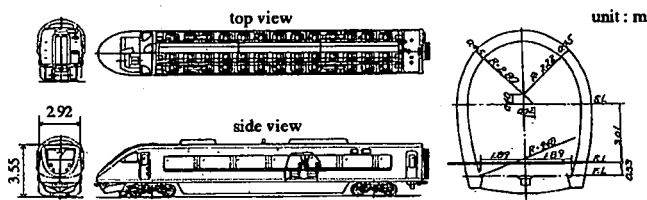


図-1 681系電車先頭車両と単線トンネル形状

表-1 列車とトンネルの諸元 (ケース1～ケース4)

	Blockage ratio	Train length	Tunnel length	Train speed
Case1	0.383	21 m	100 m	44.4 m/s (160km/h)
Case2				70.0 m/s (252km/h)
Case3		41 m	300 m	44.4 m/s (160km/h)
Case4				70.0 m/s (252km/h)

ラー陰解法によるALE法に基づき、乱れは標準 $k-\epsilon$ モデルを用いて考慮する。KIVA-3コードについての詳細はAmsdenらによる1989年と1993年の文献^{8) 9)}に示されているが、本研究ではKIVA-3コードを列車とトンネルの問題を解くために種々なコードの改良を行った。元来KIVA-3コードは、内燃機関についての問題を解くために開発されたものである。本研究ではトンネル内を走行する列車の問題に適用するために、列車周囲全体にピストンの動きを取り扱う「スナッパー法」^{8) 9)}を適用した。

2・3 流れ場のブロック構成と初期条件、境界条件

列車による流れの場は、7つのブロックで構成し、垂直中心面で対称とした。列車表面、トンネル壁内側、地上面や流れの場のメッシュ配置の詳細は図-2に示すとおりである。ケース1とケース2における計算上のメッシュの数は合計100,428個であり、ケース3とケース4では合計185,110個を必要とする。初期条件は全ての物理量が一樣で計算開始時の列車先頭部とトンネル入口までの距離は10mとし、列車速度は約0.04秒(50ステップ)の間でそれぞれ 44.4m/s 、 70m/s に直線的に一定速度になるようにした。また、入口、出口条件では、圧力は大気圧とし、流速及び乱流エネルギー k の勾配は0とした。

3. 数値解析結果の実験室における模型試験との比較

計算コードによるシミュレーション結果を、軸対称列車-トンネルモデルによる列車のトンネル突入時の圧縮波の確認のための実験室における模型試験²⁾の結果と比較することによって計算コードの検証、確認をした。模型試験は、円筒形の発射体(列車モデルで直径64.5mm、長さ920mm)を円筒形のパイプ(トンネルモデルで内径147mm、長さ11,600mm)の中に、 60.36m/s (マッハ数0.18)の速度で打ち込んだ。本モデル試験における発射体の断面のパイプの断面に対する比率(占有率)は0.193で、先頭部は回転楕円体で後尾部は平面で垂直に切った形状である。発射体はパイプ中心に張られたワイヤに沿って駆動される。圧力は試験中パイプ内側の2つの圧力計設置位置で測定し、各々トンネルモデルの入口から0.9mと1.5mである。一方、シミュレーションにおけるメッシュ形成の過程や初期条件、境界条件は、次に示す列車周りの流れの計算の場合と同様にした。図-3に示すように、模型試験の計算に用いたメッシュの数は79,462個である。

模型試験と数値解析結果のモデルトンネル壁の2測

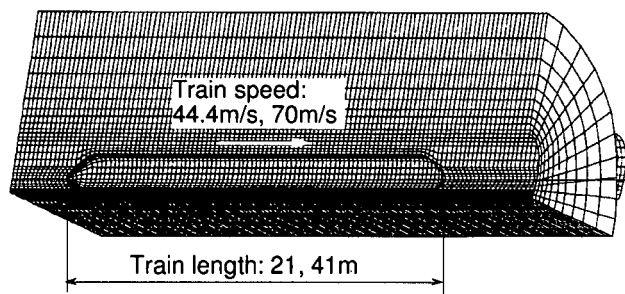


図-2 メッシュ配置

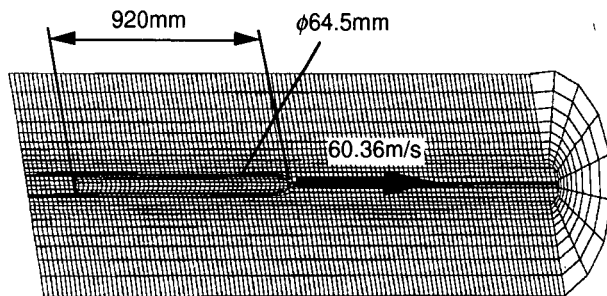
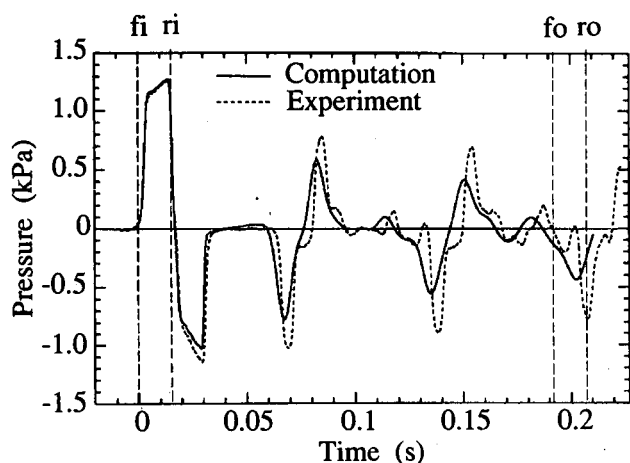
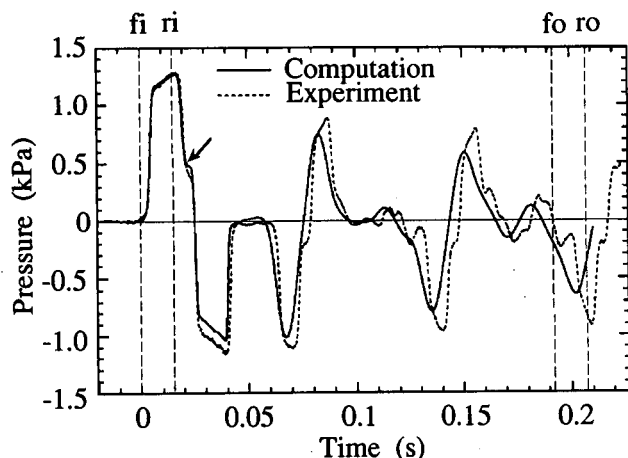


図-3 模型試験時のメッシュ配置



(a) 入口から 0.9 m 地点



(b) 入口から 1.5 m 地点

図-4 模型試験と数値解析結果の2測定点での圧力変化

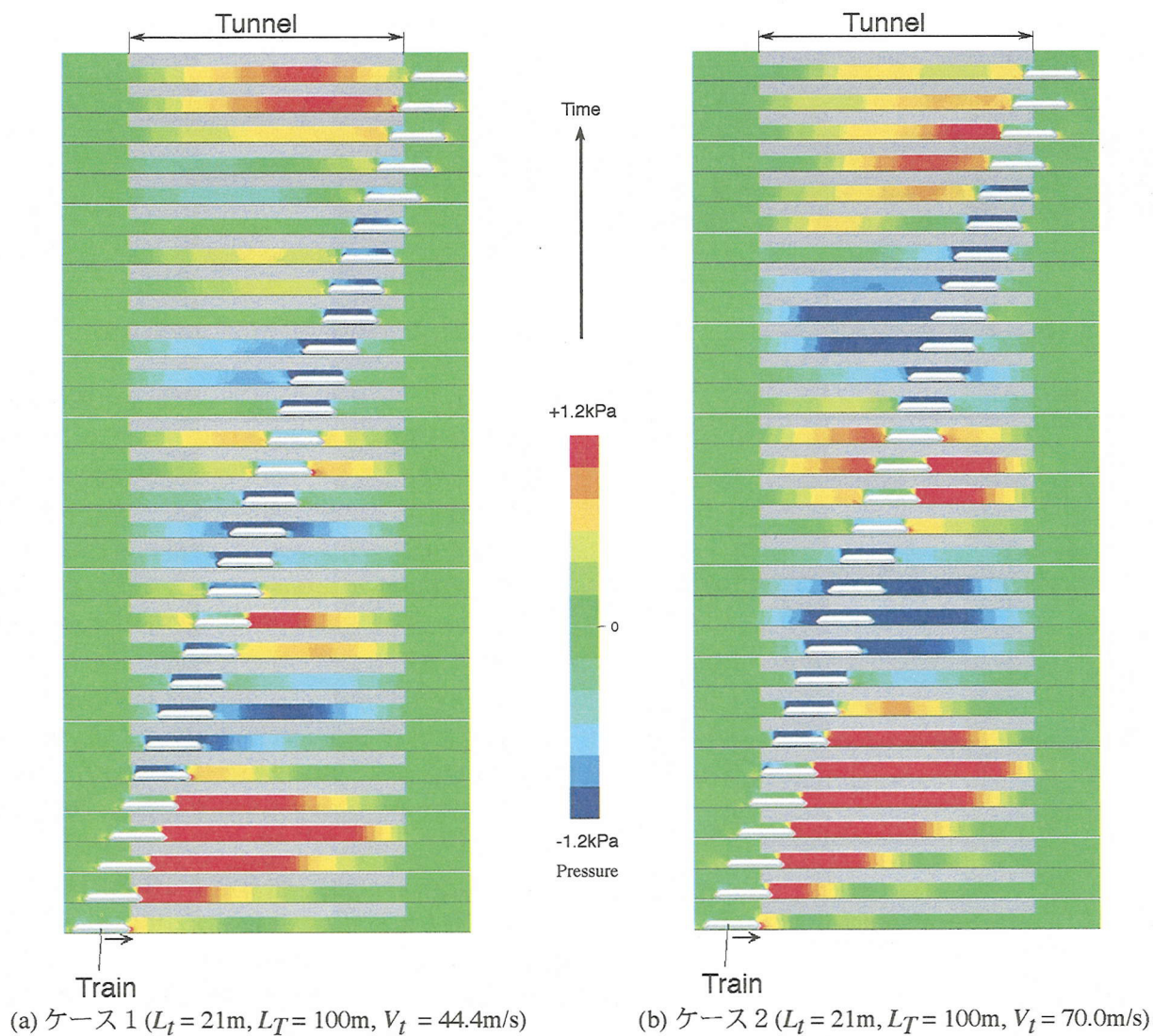
定点における圧力変化を図-4に示す。図の上部に示すfiとriはそれぞれ先頭部及び後尾部がトンネル入口に進入した時刻で、foとroはそれぞれ出口から先頭部及び後尾部が出た時刻を示す。図-4(a)に示すように、入口から0.9m測定点における圧力の変化はfi時に圧力が立ち上がった後、発射体の進行に伴い先頭部が測定点に到達するまで漸増する。先頭部が測定点を行き過ぎると圧力は急激に下がり、発射体の後尾部がトンネル内に進入したri時に、膨張波が発生して伝

播してくると圧力は負圧の低いレベルまで降下する。この負圧は、後尾部が測定点に着くまでさらに下がり最小圧となる。そして、後尾部が測定点を行き過ぎると圧力は上昇してゼロのレベルまで回復する。このような変化が、トンネル内での最初のピークとそれに続く最初の谷の典型的な圧力の変化である。2つ目以降のピークと谷は、圧力波がトンネルの出入口や列車に当たって発生する反射波によるものである。図-4(b)に示す1.5m測定点における圧力波形の0.9m点における図-4(a)との大きな違いは、発射体の後尾部がトンネル入口に進入する時に発生する膨張波が図中に矢印で示す列車先頭部の測定点到達より早いことである。

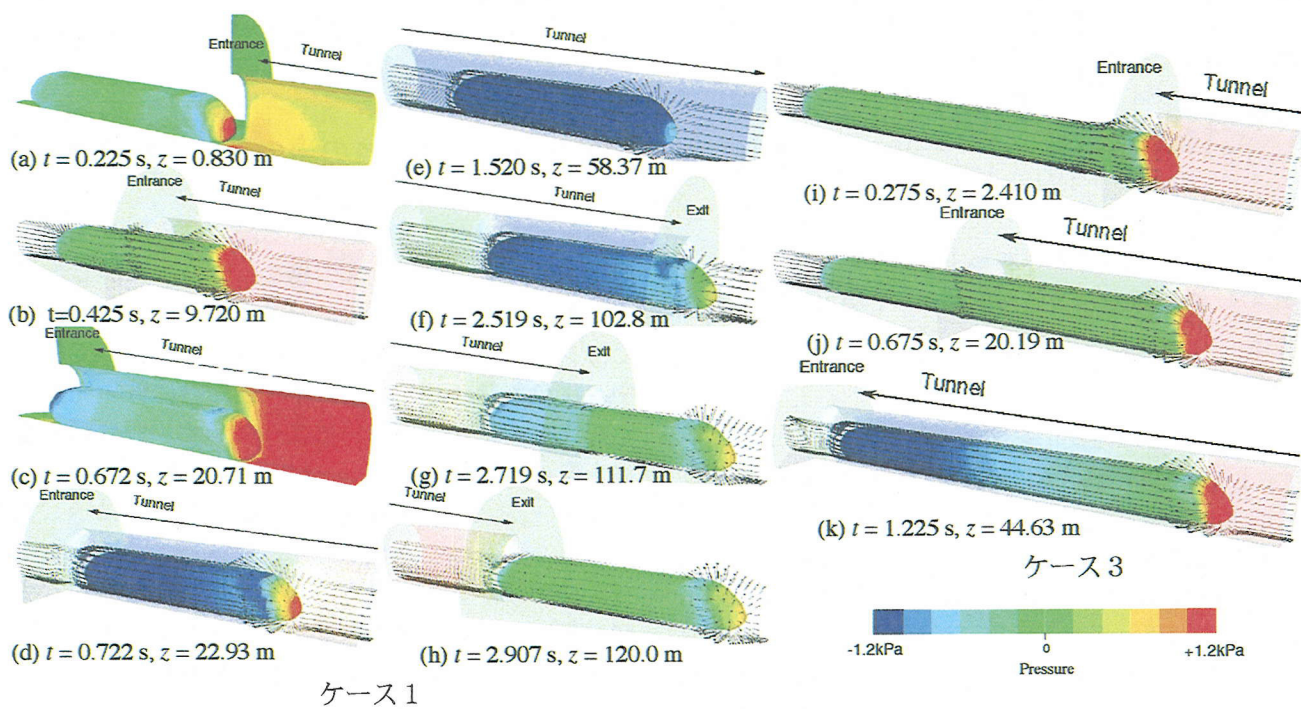
図-4に示すように、計算結果は実験によって得られたものと極めてよい一致を示している。ただし、後半部では両者の圧力波形に位相のずれが見られるが、実験室のモデル試験では、空気抵抗及び発射体とガイド用ワイヤ間の摩擦によって発射体の速さが徐々に遅くなるが、計算においては発射体は一定の速度で走行しており、これらの相違によるものと考えられる。

4. トンネル内流れの場の数値解析結果

列車がトンネル内を走行する際に列車周り及びトンネル内に発生する流れの場を、表-1に示した諸元の異なる4つのケースについて解析した。図-5には、走行速度の異なる2つのケースについて、図中、灰色で示す列車がトンネル内走行に伴い発生する圧力の変化を色の違いによって示す。図は圧力波の伝播の様子を示し、ケース1(列車速度、 $V_f=44.4\text{m/s}$)とケース2($V_f=70\text{m/s}$)の場合を特徴的に示している。これらは左からトンネルに入ってくる列車に伴い圧力波が音速で前方に進み、出口で反射する様子が解る。圧縮波は先頭部がトンネルに進入した時に発生し、トンネル内を伝播し(赤色と黄色)、トンネル内の圧力が上昇する。そして、この圧縮波がトンネル出口に到達して反射し、膨張波となってトンネ



図－5 数値解析によるトンネル内走行時の圧力変化



図－6 数値解析による列車とトンネル間の圧力変化及び列車周囲の流速ベクトル

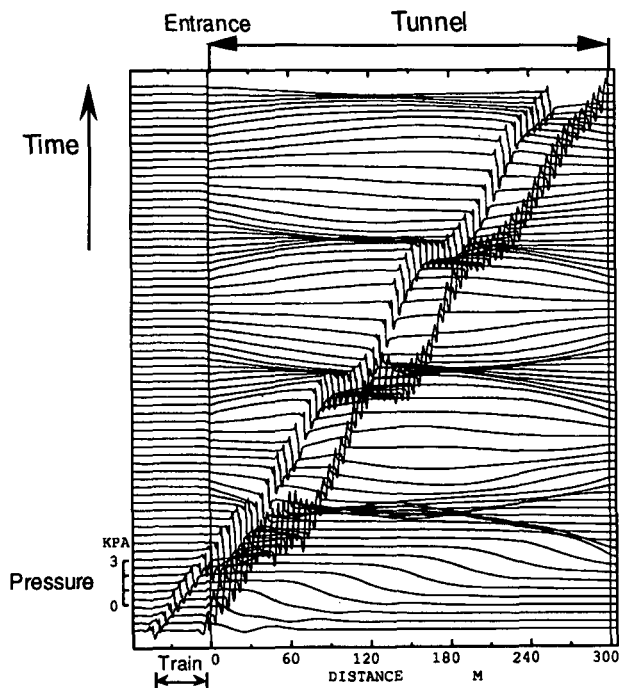


図-7 数値解析によるトンネル中心及び列車上部での圧力変化（ケース3）

ル内を戻って来る（緑色）。また、後尾部のトンネル進入に伴い、もう一つの膨張波が発生してトンネル内を伝播する（青色）。

図-6に示すケース1とケース3は、列車の速度は同じで、列車の長ささとトンネル長さの異なる場合の種々な時刻における圧力分布を示しており、列車とトンネル壁との間に生ずる圧力変化及び列車周囲の流速ベクトル変化を表す。図中の列車位置 z はトンネル入口から列車先頭部までの距離を示す。図-6(a)と図-6(b)により、列車のトンネル突入時のトンネル内圧力波の形と列車表面の圧力上昇の様子が解る。列車前面の流れはトンネル出口に向かって押し出され、一方、列車通過中のトンネル壁近くではトンネル内からトンネル入口へ向かう逆の流れも観察される。図-6(c)と図-6(d)は、列車の後尾部がトンネルに入り膨張波が発生し、列車表面の圧力が減少しているところを示す。図-6(e)はトンネル内を走行中のものである。列車がトンネル内を走行する際、列車の前方と後方の空気の流れは列車のピストン運動によって出口に向かい、一方列車側面の流れは高速で入口へ向かう。この場合、列車側面の高速流れと膨張波との相乗効果により、列車周囲ではかなり圧力降下をもたらされる（青色）。さらに列車後尾部ではトンネル内列車走行中は、速度ベクトルの方向から流れの剥離がより顕著に現れる。列車の先頭部がトンネル出口を出る時、膨張波が発生しており、図-6(f)に示す様に列車表面の圧力減少が見られる。列車がトンネルを出る際には図-6(h)に示す

ように、列車後尾部による入口に向かう圧縮波が生じると共に、流れはトンネル内から外へ吸い出される。圧力は列車の側面、特に肩の部分で低圧となる。図-6(a)(b)(d)のケース1と図-6(i)(j)(k)のケース3の流れは、列車及びトンネル内表面上の圧力変化の状況と速度ベクトルの様子が、列車の速度は同じで列車長ささとトンネル長さ異なるにもかかわらず類似していることが解る。すなわち、列車速度が一定であれば、トンネル内における圧力変動や速度ベクトルの様相は列車長さやトンネル長の相違はほとんど影響しない。図-7には、ケース3を例としてトンネル内の距離と時刻に対応する列車走行時における圧力変化の様子を示す。図-7は図-5のような圧力波の形と伝播の様子を定量的にも表している。図では、先頭部がトンネルに突入した時に発生する圧縮波が音速でトンネル出口まで進み、反射して膨張波となって戻って来る様子を示す。また、後尾部がトンネルに進入した時に発生する膨張波がその進行中にトンネル出口で反射した膨張波とすれ違い、さらにトンネル出口で反射して圧縮波となって戻る様子が解る。

5. トンネル内圧力伝播及び実車測定結果との比較

列車がトンネル内を速度 V_l で走行している間、圧力波がトンネル内を往復しながら伝播する様子を調べる。トンネル内を列車が走行している時間内 $(L_T/V_l, L_T$ はトンネル長)にトンネル内を圧力波が1往復する時間は $(2L_T/a)$ である。そこで、圧縮波や膨張波の伝播によって生じる圧力の変動する回数 N_1 は、

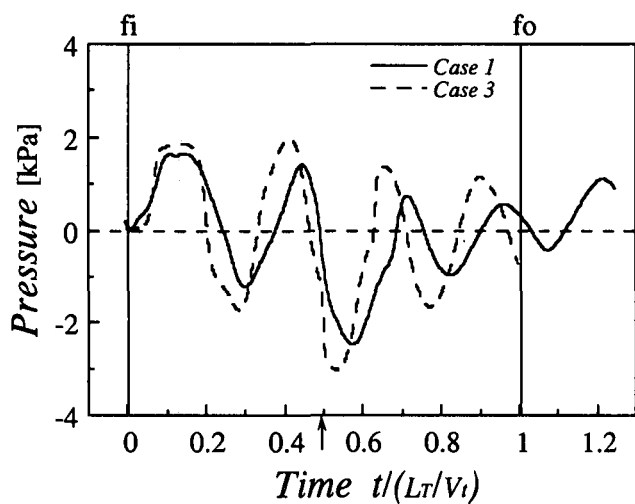
$$N_1 = \frac{1}{2} \frac{1}{M} \quad (1)$$

で表される。ここで M は列車走行速度のマッハ数である。また、走行中の列車表面上の測定点においてトンネル内の圧力波が1往復する時間は $(2L_T/(a-V_l))$ となり、走行している列車表面における圧力変動の回数 N_2 は、

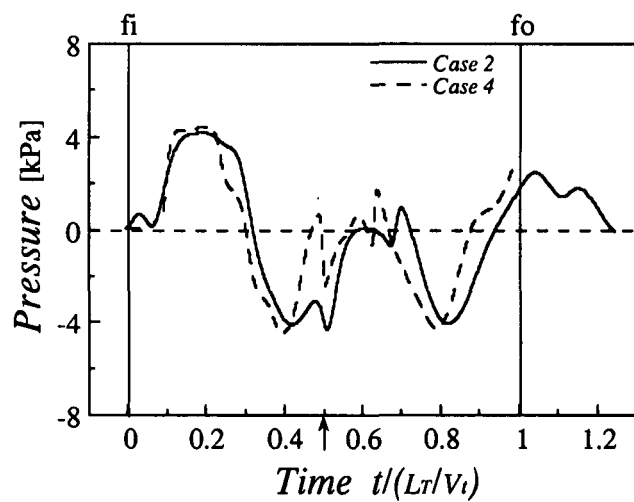
$$N_2 = \frac{1}{2} \frac{1-M}{M} \quad (2)$$

と表される。従って、列車速度が同一でトンネル長さの異なる図-8(a)ケース1、ケース3そして図-8(b)ケース2、ケース4の各場合、図中矢印で示す測定点を列車が通過する間の圧力の低下を除くと列車やトンネルの長さには無関係に、トンネル内の定位置における圧力変化の回数は「式(1)」より $N_1 = 3.8$ 、及び2.4で列車速度のみに依存している。

さらに「式(2)」により、走行している列車の表

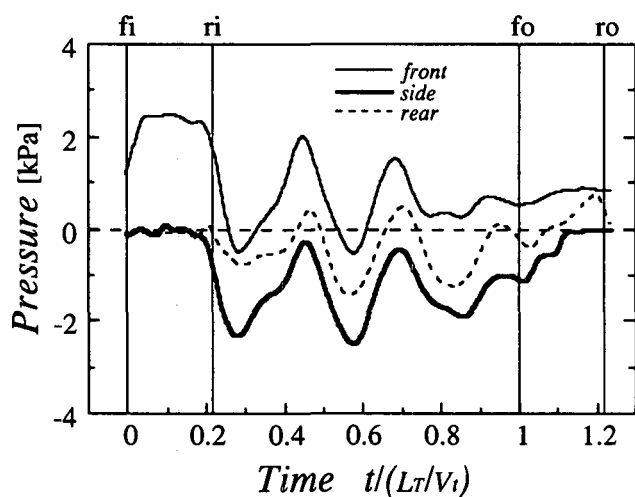


(a) ケース 1 と ケース 3

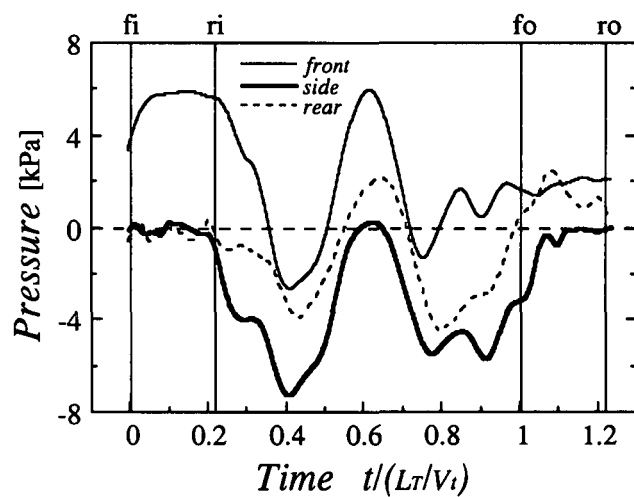


(b) ケース 2 と ケース 4

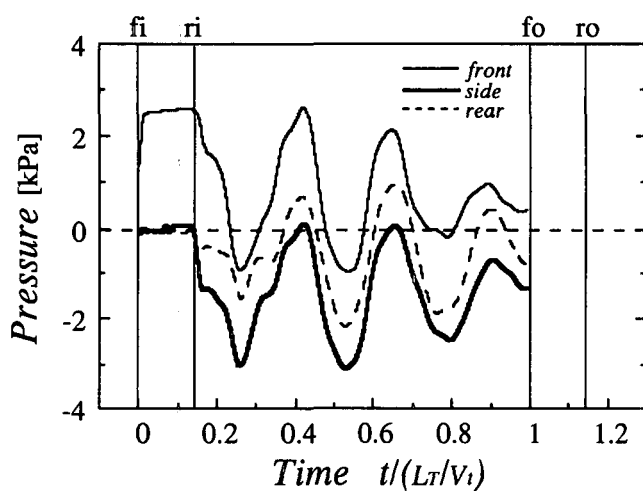
図-8 トンネル表面での圧力変化の数値解析結果 (→は測定点)



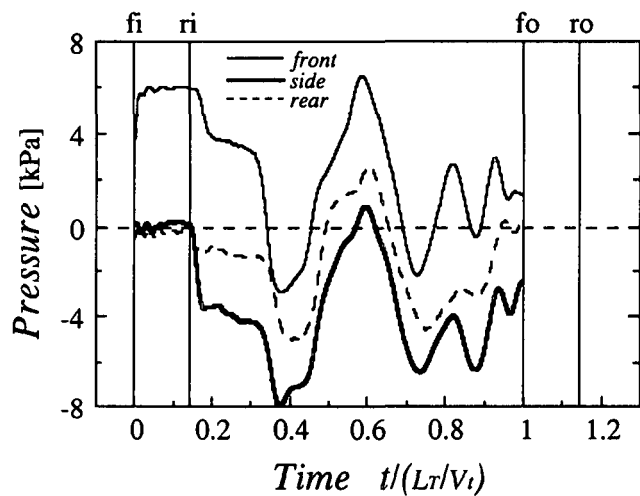
(a) ケース 1



(b) ケース 2



(c) ケース 3



(d) ケース 4

図-9 列車表面での圧力変化の数値解析結果

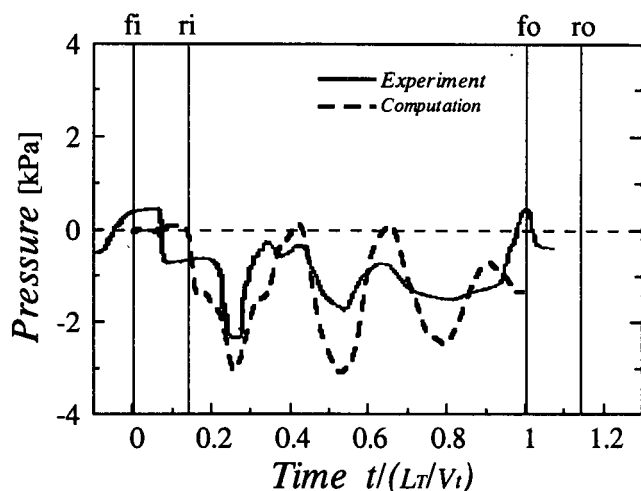


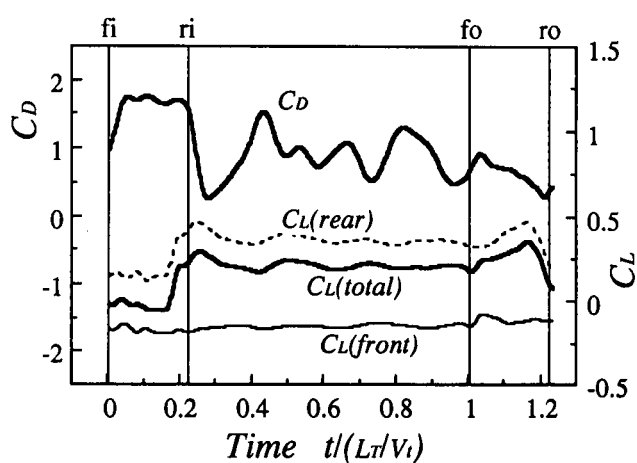
図-10 列車表面での圧力変化の数値解析結果と実測値

面圧力の変動回数 N_2 も、同様に図-9に示すように列車速度の等しい(a)ケース1と(c)ケース3の場合 $N_2=3.3$ そして(b)ケース2と(d)ケース4は $N_2=1.9$ でそれぞれ等しく、また、同様な圧力変化を呈している。なお図中、時間 t は L_T/V_i で無次元化している。図-9に示す各ケースの列車表面における変化のパターンは、圧力波の伝播により一定周期で変動し、同じ列車速度の場合の(a)と(c)及び(b)と(d)はほとんど同じ変化を示す。

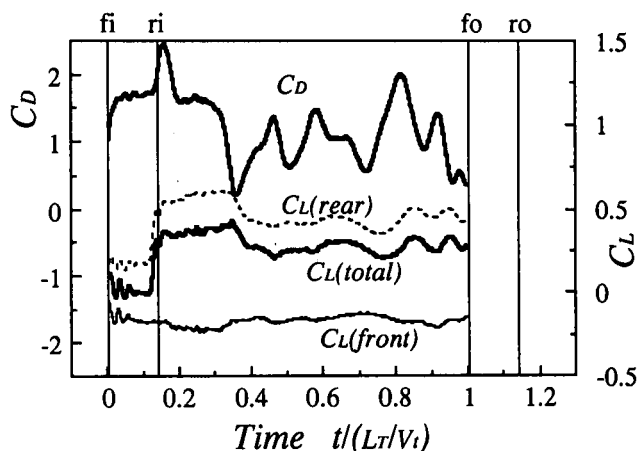
次に、数値解析結果と実際にトンネル内を走行する列車の側面圧の変化の結果と比較する。図-10は、681系電車（高速走行試験用特別編成5両で100mの列車）が長さ1,582mのトンネル内を44.4m/s (160km/h)で走行した時の実測の圧力変化を示す¹⁰⁾。実車測定点は列車の後尾部から10m前方の列車側面であり、その結果を図-9の(c)ケース3の場合の側面圧の変動と比較する。列車側面の圧力変化のシミュレーション結果は、列車速度は同じで列車とトンネルの長さは両者全く異なっているにもかかわらず、実車による測定結果の大きさ、位相共にほぼ一致している。ただし、実測値では後半の圧力変動値が小さくなっているが、これは実際のトンネルではレール、マクラギその他の突起物やトンネル内構造物の存在により計算の条件とは異なり圧力変動の実測値は減衰が大きいものと考えられる。

6. 列車に作用する抗力と揚力

図-11に、(a)ケース1と(b)ケース4に対する、抗力と揚力の変化を示す。列車のトンネル進入時において図-11(a)ケース1の場合後尾部がトンネルに進入するほぼ同時点にトンネル出口で反射して来た膨張波の影響が打ち消し合った状態（図-5(a)ケース



(a) ケース 1



(b) ケース 4

図-11 列車に作用する空気力の変化の数値解析結果

1)で抗力は上昇後一定し、その後下降する。図-11(b)ケース4の場合、先頭部のトンネル突入時、圧縮波が生じて抗力は上昇した後一定となり、後尾部がトンネルに進入して膨張波が生じる際に最高値となる。その後、元の値に戻り一定になった後、膨張波がトンネル出口より反射して来た時点で急激に最低の値となる。その後、(a)ケース1及び(b)ケース4共に、列車の走行に従い、圧力変動により複雑な変化を示す。この場合、抗力係数は約 $C_D = 1$ の抗力値($1/2 \cdot \rho V^2$)の値を中心として変動している。揚力の変化については、車体の前半部分の揚力はトンネル走行中、ほとんど負（下向き）で変化せず、ほぼ一定であり、後半部分の車体の揚力は後尾部において流れの剥離によって生じる負圧のために増加していると考えられる。

7. 結論

単線用トンネル内を走行する列車周りの非定常、

圧縮性、乱流流れをKIVA-3コードを使って三次元数値計算により解析し、以下の結論を得た。

(1) 実験室におけるパイプ内に発射体を打ち込む試験の結果と本数値計算結果と比較して良好な一致を見た。

(2) 列車とトンネル相互作用による圧力波の形と伝播、トンネル出入口での圧力波の反射と放出、列車表面の圧力変化という空力現象の特性が解析できた。

(3) 列車とトンネル相互の圧力変化の回数は列車の速度のみに依存している。

(4) 列車の表面圧力の計算結果は実車による測定結果とほぼ一致することを示した。

(財) 鉄道総合技術研究所・前田達夫氏には、実験室におけるモデル試験データを、また、西日本旅客鉄道(株)から、681系電車の諸元や各種データの提供を、さらに、群馬大学工学部の小保方富夫教授には、KIVA-3コードの助言を受けた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 小沢 智, 鉄道技術研究報告, No.1121, pp.1 - 20, 1979.
- 2) 前田達夫, 鉄道総研報告, 特20, pp.11 - 22, pp.184 - 303, 1998.
- 3) 山本彬也, 鉄道技術研究報告, No.1230, pp.6 - 14, 1983.
- 4) 飯田雅宣, 鉄道総研報告, Vol.8, No6, pp.25 - 30, 1994.
- 5) Mestreau,E.,Lohner,R.and Aita,S. , *AIAA Paper* 93-0890, 1993.
- 6) 小川隆申ほか2名, 航空宇宙技術研究所 特別資料 19, pp.115 - 120, 1992.
- 7) 小川隆申・藤井孝蔵, 航空宇宙技術研究所 特別資料 22, pp.203 - 208, 1995.
- 8) Amsden,A.,O'Rourke,P.and Butler,T., *Los Alamos National Laboratory Report* LA-11560-MS, 1989.
- 9) Amsden,A., *Los Alamos National Laboratory Report* LA-12503-MS, 1993.
- 10) (財) 鉄道総合技術研究所, 北越北線高速走行試験(車両関係)(報告書), pp.142 - 156, 1997.

(1999年4月23日受付)