

# 列車トンネル突入時に発生する圧力波の数値解析

織田 剛\*・満田正彦(工博)\*・山極伊知郎\*・田中俊光(工博)\*・名倉隆雄\*\*・大石峰生\*\*

\*技術開発本部・機械研究所 \*\*東海旅客鉄道株式会社

## Numerical Compression Wave Simulations as Generated by a Train Entering a Tunnel

Tsuyoshi Oda · Dr. Masahiko Mitsuda · Ichiro Yamagiwa · Dr. Toshimitsu Tanaka · Takao Nakura · Mineo Ooishi

The solution of two-dimensional, axi-symmetric Euler equations was undertaken to simulate the compression wave generated by a high-speed train entering a tunnel entrance. Pressure and pressure gradient variance at the tunnel entrance obtained from calculations were compared with experimental results. The calculated and experimental results corresponded closely. The effect of the cross-sectional area of the tunnel entrance was numerically investigated with this calculation method. Subsequently, the one-dimensional propagation of the compression wave along the tunnel was calculated with a double mesh method, which causes little numerical diffusion.

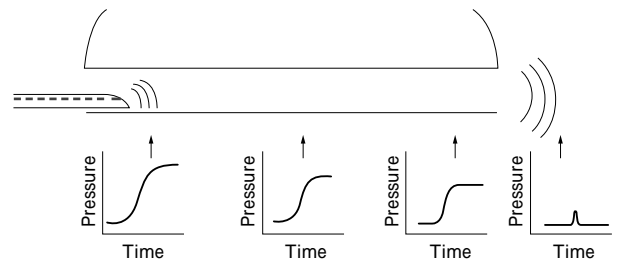
まきがき = 高速列車がトンネルに突入した際に、列車前方において圧縮圧力波が形成される。第1図に模式的に示すように、この圧力波がトンネル内を伝播する間に圧力波の前面が切り立ち、トンネル出口側において微気圧波が放出され、破裂音を感じることもある。

この微気圧波はトンネル出口における圧力勾配に比例することが報告されている<sup>1)</sup>。そこで、破裂音を防止するためにもちいられている手段が、圧縮された空気の一部を外へ解放するためのスリットを備えたトンネル入口フード(トンネル緩衝口)である。トンネル入口における圧力勾配をあらかじめ低く抑えておくことにより、トンネル出口での圧力勾配を破裂音が生じない程度に小さくすることを目的としている。

これまで、主に実験的研究からこのトンネル入口フードの形状を求めてきた。本研究では、トンネル入口フードの基本形状に関する検討を数値解析的におこなうことを目的として移動境界非定常数値解析ツールの開発をおこなったので、その解析精度について検討をおこなう。

列車がトンネルに突入してからトンネル出口において微気圧波が放出されるまでの過程は、列車がトンネルに突入して圧力波が発生する過程、圧力波がトンネル内を伝播する過程、トンネル出口において圧力波が微気圧波を放出させる過程、の三つの過程に分けて考えられている<sup>2)</sup>。第3の過程において放出される微気圧波はトンネル出口における圧力勾配に比例するので、トンネル入口で発生する圧力波形(第1の過程)と、トンネル内を伝播する間の圧力波形の変化(第2の過程)を正確に、かつ容易に数値解析から求めることができるならば、列車先頭形状やトンネル入口フードの設計ツールとすることができる。

本研究では、第1の過程である列車がトンネルに突入して圧力波が発生する過程と、第2の過程である圧力波がトンネル内を伝播する過程について別々の数値解析をおこなった。第1の過程では、二次元軸対称オイラー方程式をTVD差分法により重量格子法をもちいて解いた。第2の過程では、圧力波の非線形効果による圧力波面の切り立ち現象を正確に捉えるために、数値拡散の少



第1図 トンネル微気圧波生成過程の模式図  
Fig. 1 Schematic sketch of generating process of tunnel micro-pressure wave

ない二重格子法をもちいて、トンネル内の一次元解析をおこなった。

### 1. フード無しトンネル入口圧力波形の数値解析

トンネル入口フードがない場合に、列車がトンネルに突入する際に生じる圧力波の数値解析は、これまでに盛んにおこなわれている<sup>3)-5)</sup>。本研究においても、計算結果の検証のために、まず入口フードがない場合のトンネル入口圧力波の計算をおこなう。

#### 1.1 基礎方程式

基礎方程式として、 $x$  軸を対称軸とし、 $y$  を対称軸からの距離とするとする一般座標系( , , )表示の二次元軸対称オイラー方程式をもちいた。

$$\frac{\partial \hat{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \hat{E}}{\partial x} + \frac{\partial \hat{F}}{\partial y} + \frac{1}{y}(F - K) = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\hat{Q} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} u \\ v \\ e \end{bmatrix}, \hat{E} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} U \\ uU + xp \\ vU + yp \\ (e+p)U - ip \end{bmatrix},$$

$$\hat{F} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} V \\ uV + xp \\ vV + yp \\ (e+p)V - ip \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} v \\ uv \\ v^2 + p \\ (e+p)v \end{bmatrix}, K = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ p \\ 0 \end{bmatrix}$$

ここで、各物理量  $\rho, p, u, v$  および  $e$  は密度、圧力、 $x, y$  方向の速度成分および単位体積あたりの全エネルギーである。理想気体の状態方程式から圧力  $p$  は比熱比をもちいて式(2)で表される。

$$p = (-1) \left( e - \frac{1}{2}(u^2 + v^2) \right) \dots\dots\dots (2)$$

$J$  は変換のヤコビアンであり、反変速度成分  $U, V$  は格子が移動することを考慮して式(3)、式(4)で表される。

$$U = \dots\dots\dots (3)$$

$$V = \dots\dots\dots (4)$$

### 1.2 数値解析手法

計算は、空間微分項を中心差分法をもちいて離散化した。人工粘性には minmod 制限関数をもちいた Yee-Harten の 2 次精度風上 TVD 法をもちいた。時間積分には、安定条件からくる制限を緩やかにするために、2 段階有理ルンゲ・クッタ法をもちいた。

列車が移動することによる列車とトンネルの相対距離の変化を、重畳格子法<sup>6)</sup>をもちいて取り扱っている。トンネルを含む静止空間を主格子、列車周りの形状適合格子を補助格子とした。主格子と補助格子間の物理量の補間には二次元の線形内挿をもちい、計算中は毎回補間点の検索と線形内挿を自動的におこなっている。

### 1.3 計算結果と実験結果の比較

本計算手法の妥当性の検討のために、鉄道総合技術研究所での列車模型打ち込み実験<sup>7)</sup>との比較をおこなった。この実験では列車の模型を軸対称形状としている。

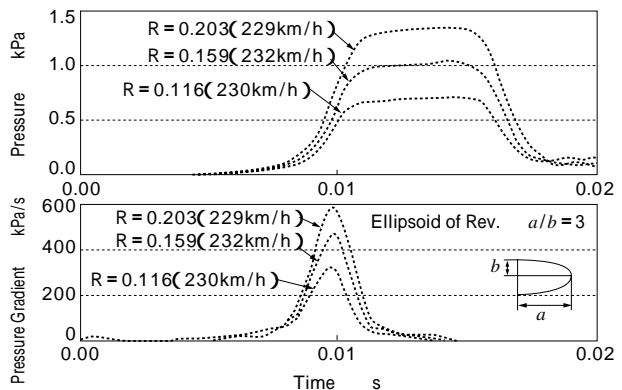
トンネル入口から 1000mm の位置における圧力波頭の時間履歴と圧力勾配を、実験結果と計算結果それぞれについて第 2 図、第 3 図に示す。ここではトンネルに占める列車の断面積比を  $R = 0.116, 0.159, 0.203$  の 3 通りに変えている。圧力と圧力勾配ともに実験結果と計算結果とは良く一致していることがわかる。圧力波の波面が通過してからも実験では圧力が徐々に上昇しているが、計算ではこの現象が表現されていない。列車が開放空間を走行中に、列車後部ほど境界層が発達して厚くなっていることが影響していると考えている。格子点数は主格子が  $2201 \times 37$  補助格子が  $317 \times 15$  である。

第 3 図より、先頭車両走行による圧力値、圧力勾配ともに実験結果と定量的にも良く一致していることがわかった。したがって、トンネル入口で発生する圧力勾配は本計算手法により十分に予測可能である。

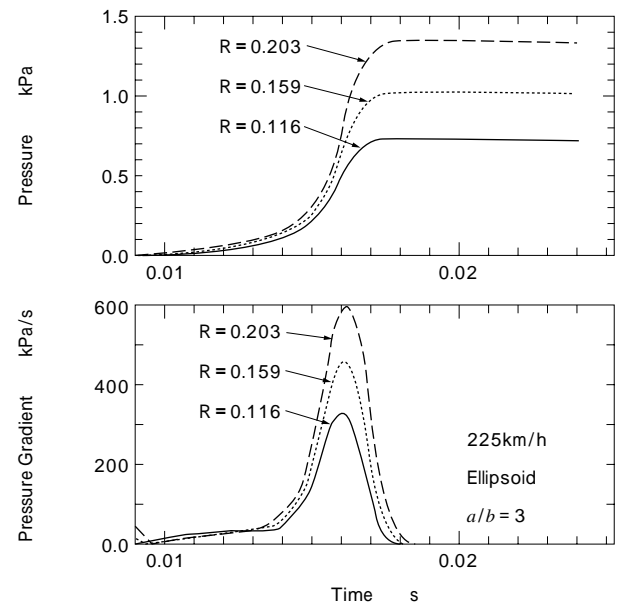
## 2.フード付きトンネル入口圧力波形の数値解析

トンネル入口フードの形状は、たとえば第 4 図に示すようなものである。入口フードの両側にはスリット状の開口部が存在するので、この形状は三次元形状である。したがって、トンネルに入口フードが付いている場合の計算には三次元計算が必要となる。

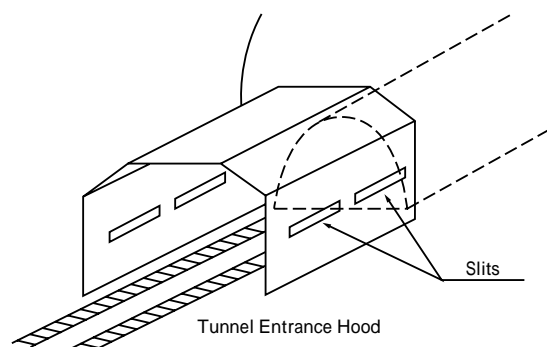
しかし、三次元計算をおこなう場合、計算に要する時間と格子作成にかかわる労力は多大なものとなる。さらに、入口フードのスリット状の開口部から流出する空気の流速を正確に計算するためには、開口部前後の圧力損失を正確に計算する必要がある。そのために、開口部近辺の格子解像度を局所的に大幅に向上させることが要求され、計算時間はますます長大化する。筆者らの知る範囲では、トンネルに入口フードが付いている場合の計算例は、鹿毛らによる一次元計算<sup>8)9)</sup>のみである。



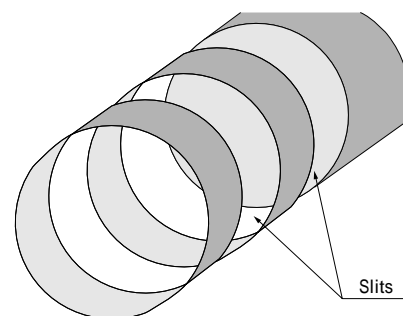
第 2 図 実験による圧力変化と圧力勾配<sup>7)</sup>  
Fig. 2 Compression wave and pressure gradient by experiment



第 3 図 計算による圧力変化と圧力勾配  
Fig. 3 Compression wave and pressure gradient by numerical simulation



第 4 図 トンネル入口フード模式図  
Fig. 4 Schematic sketch of tunnel entrance hood



第 5 図 トンネル入口フード軸対称二次元モデル  
Fig. 5 2D axi-symmetric model of tunnel entrance hood

本研究では、トンネル入口フードや列車先頭形状の基本形状に関するパラメトリックな計算をおこなうことを目的として、トンネルに入口フードが付いている場合の計算についても二次元軸対称の数値解析をおこなう。トンネル入口フード部については、入口フード断面積や開口部面積などの基本形状が理解できるようにモデル化した。

### 2.1 トンネル入口フードモデル

第4図のような三次元形状であるトンネル入口フードを、第5図のように開口部に相当する位置に壁面全周にわたって多孔体が存在するように考えて、新たに入口フードの開口部形状の影響が考慮される形で二次元軸対称にモデル化する。このモデルでは、開口部の存在するトンネル入口フードの壁部を通過する流体に対して、流体抵抗を物体力として与える。このときの開口壁部での計算基礎式を式(5)に示す。

$$\frac{\partial \hat{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \hat{E}}{\partial t} + \frac{\partial \hat{F}}{\partial t} + \frac{1}{y}(F - K) = T \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし、

$$T = \begin{bmatrix} 0 \\ f_x \\ f_y \\ uf_x + vf_y \end{bmatrix}$$

ここで、 $f_x, f_y$  はそれぞれ  $x, y$  方向の単位体積あたりの物体力であり、壁面を通過する流体の動圧に比例させて、式(6)で与えている。

$$f_x \text{ or } f_y = - \left( \frac{1}{2} |v_n| v_n \right) / l \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $v_n$  は壁面に垂直な速度成分、 $l$  は壁面の厚さ、は入口フードの開口部形状により決まる係数である。第6図に示す入口フード開口部から流出する空気の開口面内平均流速  $v_w$  を、入口フードの内側と外側の差圧  $p$  をもちいて式(7)により表す。

$$v_w = c \sqrt{\frac{2}{\rho} p} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 $c$  は開口部の流量係数である。トンネル入口フード内の圧縮された空気が、この開口面内平均流速  $v_w$  で開き角  $2\theta$  から流出する場合、第7図のように二次元軸対称モデルでは全周から均一に同一流量が流出すると考えると、壁面を通過する空気の流速  $v_n$  は

$$v_n = \frac{v_w}{180}$$

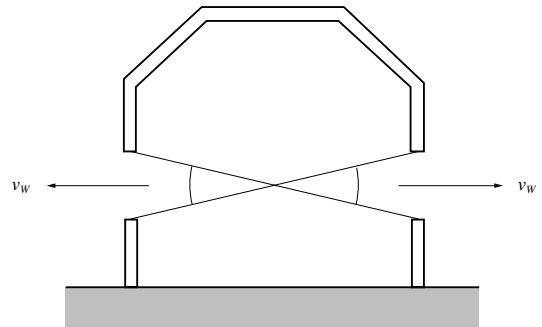
であたえられる。ただし、密度は同一であるとして考えている。したがって、式(7)から

$$p = - \left( \frac{180}{c} \right)^2 \frac{1}{2} |v_n| v_n \quad \dots\dots\dots (8)$$

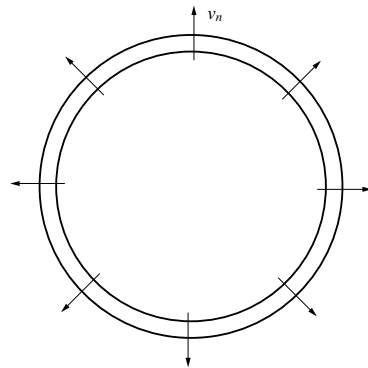
多孔体壁を通過する際の圧力損失  $p$  は流体抵抗  $f$  によるので、 $p = fl$  となる。よって、

$$= \left( \frac{180}{c} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (9)$$

実験結果との比較から、流量係数は  $c = 0.8$  で一定とした。流量係数として妥当な範囲である。なお、開口部の存在しないトンネル入口フードの壁にはすべり壁の境界条件を施している。



第6図 トンネル入口フード断面  
Fig. 6 Cross section of tunnel entrance hood



第7図 トンネル入口フード軸対称二次元モデル断面  
Fig. 7 Cross section of 2D axis-symmetric model of tunnel entrance hood

### 2.2 計算結果と実験結果の比較

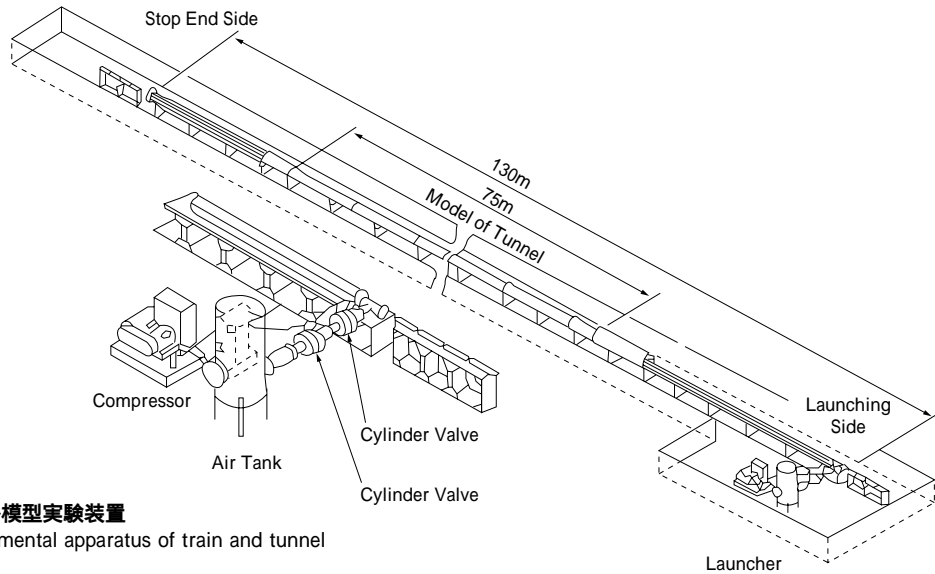
模型実験装置をもちいた実験結果と本計算手法による計算結果との比較をおこなう。模型実験装置は縮尺約  $1/30$  の入口フードおよびトンネルの模型であり、先頭形状の断面積変化が実車と相似である軸対称形状模型列車が高压空気により長さ  $75\text{m}$  のトンネル模型に向けて打ち出される<sup>10)~13)</sup>。模型実験装置全体を第8図に、模型トンネル入口を写真1にそれぞれ示す。

実験条件は、トンネル断面積に占める列車断面積比を  $10\%$ 、列車速度を  $500\text{km/h}$ 、列車先頭形状はダブルカスプ型とした。入口フード長  $L_d$  とトンネル直径  $D_t$  の比  $L_d / D_t = 5.6$ 、開口部の開き角  $\theta = 9.4^\circ$ 、入口フード両側に設けられた開口部の合計数は  $12$  個である。いずれの場合においても、トンネル入口フード断面積  $A_d$  とトンネル断面積  $A_t$  の比(以後、トンネル入口フード断面積比と呼ぶ)は  $A_d / A_t = 1.08$  である。また、開口部は入口フード全長の約  $30\%$  を占め、かつ均一に分布している。

トンネル入口から  $2.3\text{m}$  の位置における圧力と圧力勾配の時間履歴について、計算結果と実験結果の比較を第9図に示す。縦軸には、各実験条件における実験結果からえられた最大の圧力上昇幅または圧力勾配値に対する比をとっている。実験結果と計算結果は良く一致しており、トンネル入口フード長さや開口部形状からトンネル入口において生じる圧力波の波形を求めることが可能である。

### 2.3 トンネル入口フード断面積の影響

本計算手法をもちいて、トンネル入口フード断面積比の及ぼす影響について調べた。列車とトンネルに関する計算条件は前節の計算条件とまったく同じであり、トン



第8図 列車トンネル模型実験装置  
Fig. 8 Model experimental apparatus of train and tunnel



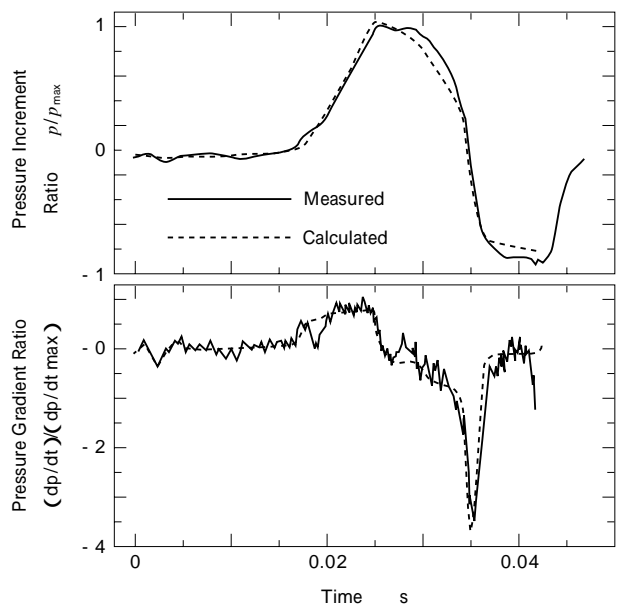
写真1 トンネルモデルの入口部  
Photo.1 Entrance of tunnel model

ネル入口フード断面積比のみ  $A_d/A_t = 1.08, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0$  の5通りに変えて検討をおこなった。この計算では、開口部の開き角  $2\theta$  を固定してトンネル入口フード断面積比を変えたので、トンネル入口フード断面積比とともに開口部面積が変化している。

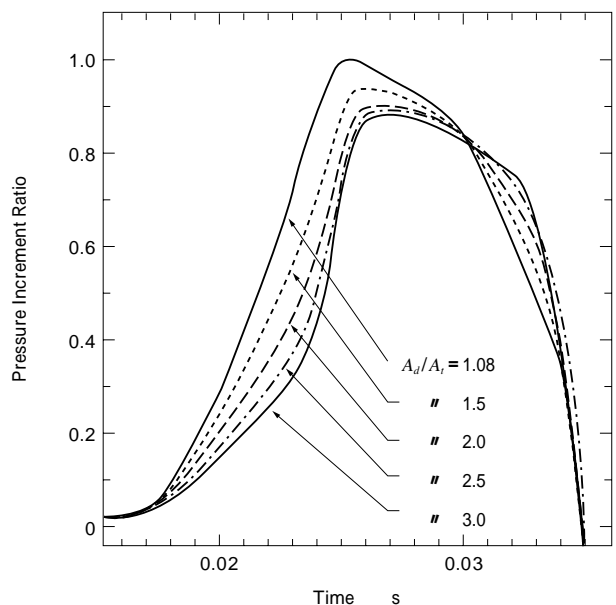
計算結果を第10図に示す。縦軸には、 $A_d/A_t = 1.08$  における最大圧力上昇幅に対する比を表わしている。トンネル入口フード断面積比が大きい場合、圧力上昇の後半において急に圧力が上昇する現象が見られる。これはトンネル入口フードとトンネルの接続点において、断面積が急に縮小するために、列車がトンネル入口フードからトンネルへ突入する際に圧力が急に上昇するからであると思われる。逆に、トンネル入口フード断面積比を小さくしてトンネル断面積とほとんど同じ断面積にすると、圧力波の最大値が上昇するとともに圧力波の最大値が到達する時刻が徐々に早くなっている。この結果、圧力勾配はかえって大きくなっている。したがって、トンネル入口フード断面積比には最適値が存在する。

### 3 トンネル内を伝播する圧力波の一次元数値解析

第2の過程である圧力波がトンネル内を伝播する過程について数値解析をおこなう。トンネル内を伝播する圧力波は、非線形効果により徐々に圧力波面が急峻になっ



第9図 圧力と圧力勾配の比較  
Fig. 9 Comparison of pressure and pressure gradient



第10図 トンネル入口フード断面積比  
Fig. 10 Pressure history vs cross-sectional area ratio of tunnel entrance hood to tunnel

ていく。トンネル出口から放出される微気圧波は、トンネル出口における圧力波の圧力勾配に比例することが報告されているので、圧力勾配を定量的に捉えることが第2の過程での課題となる。数値解析によりこの非線形効果を捉えるためには、離散化誤差にともなう数値拡散を小さく抑えなくてはならない。数値拡散が大きい場合、圧力波の波面が崩れて圧力勾配の定量的な評価が不可能となる。

### 3.1 数値解析手法

本研究では、特性曲線法のなかでも数値拡散の少ない二重格子法<sup>14)</sup>をもちいて、トンネル内の一次元圧力波伝播の数値解析をおこなった。トンネルの軸方向に滑らかに断面積が変化し、トンネル壁面での摩擦損失を考慮したトンネル任意断面での連続の式、運動方程式、エネルギー方程式は、

$$\frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} + 2 \frac{u}{d} \frac{d \ln(d)}{dx} = 0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{d} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{u|u|}{2} = 0 \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} - a^2 \left( \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} \right) = (-1) \frac{|u|^3}{d} \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 $\rho$  : ガス密度,  $u$  : 速度,  $p$  : 圧力,  $a$  : 音速,  $d$  : トンネル直径,  $t$  : 時間,  $x$  : トンネル軸方向の座標,  $f$  : 摩擦損失係数,  $\gamma$  : ガス比熱比である。

特性曲線  $\partial x / \partial t = u \pm a$  にそっての変化は、

$$du = \frac{dp}{a} + 2au \frac{d \ln(d)}{dx} dt - \frac{u|u|}{d} \left\{ 1 \mp (-1) \frac{u}{a} \right\} dt \dots\dots\dots (13)$$

特性曲線  $\partial x / \partial t = u$  にそっての変化は、

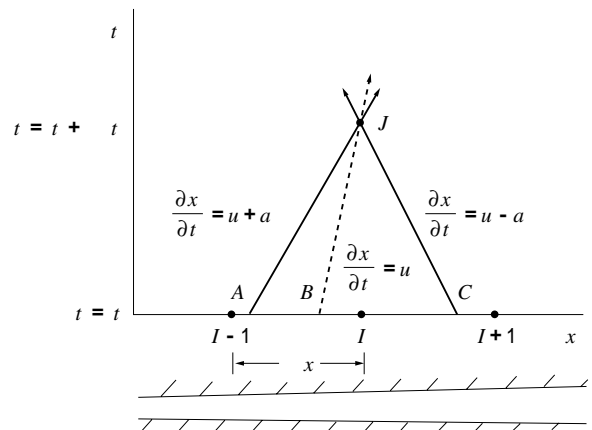
$$d \ln(a_0) = \frac{-1}{2} \frac{|u|^3}{d} \frac{dt}{p} \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここで、圧力  $p$  から基準圧力  $p_{0s}$  まで断熱変化させたときの音速を  $a_0$  としている。なお、変数を無次元化して計算をおこなっている。

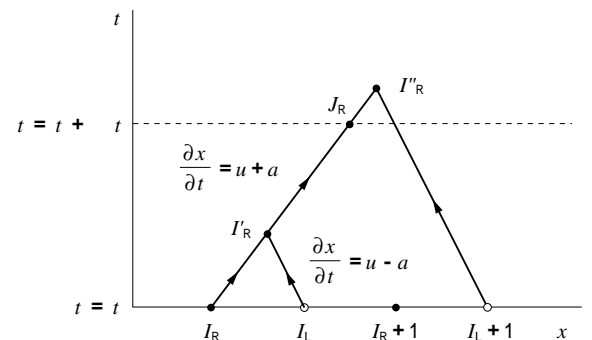
特性曲線法で広くもちいられている定格子法では、第11図に示すようにトンネルを一定格子間隔  $\Delta x$  で等分し、すべての格子点は時間に対して固定されている。

$x-t$  平面上の時間  $t + \Delta t$  における格子点  $J$  の物理量は、この点  $J$  を通る3本の特性曲線が時間  $t$  の線と交わる点  $A, B, C$  の物理量をもちいて計算される。これらの点  $A, B, C$  の物理量は格子点  $I-1, I, I+1$  の物理量から補間により求められる。この補間作業において数値拡散が生じるので、補間関数に対して様々な工夫が施される。

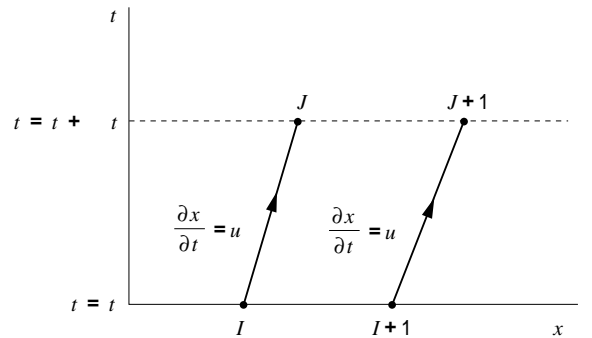
二重格子法では第12図、第13図に示すように  $(u+a)$  向きの圧力波の格子点  $I_R, (u-a)$  向きの圧力波の格子点  $I_L$ 、粒子軌跡の格子点  $I$  の3種類の格子点を独立に配置する。時間  $t$  における  $(u-a)$  向きの圧力波の格子点群  $I_L$  と格子点  $I_R$  から  $I_R', I_R''$  の順に各点での状態を式(13)から求め、 $I_R', I_R''$  間の線形内挿から時間  $t + \Delta t$  における  $(u+a)$  向きの圧力波の格子点  $J_R$  を求める。 $(u-a)$  向きの圧力波の格子点  $J_L$  は同様の操作を逆向き(左向き)におこなう。時間  $t + \Delta t$  における粒子軌跡の格子点  $J$  は、時間  $t$  における粒子軌跡の格子点  $I$  から式(14)



第11図 定格子法  $x-t$  平面  
Fig. 11 Constant mesh method on  $x-t$  plane



第12図 二重格子法  $(u+a)$  圧力波  
Fig. 12  $(u+a)$  pressure wave of double mesh method



第13図 二重格子法エントロピ波  
Fig. 13 Entropy wave of double mesh method

より求める。二重格子法の特徴は、各特性曲線にそってそれぞれの格子点を移動させることにより、格子点間の物理量の補間作業をなくしたことにある<sup>14)</sup>。

### 3.2 模型実験装置と計算条件

2章で紹介した模型実験装置をもちいた実験結果と計算結果との比較をおこなう。模型トンネルの入口からの距離が  $x = 2.3, 12.3, 49.8, 62.3\text{m}$  である4点での圧力の変化を計測した。計算との比較にもちいた実験条件はトンネル入口における圧力波の最大圧力を  $4500\text{Pa}$ 、圧力勾配を  $0.45\text{MPa/s}$  とした。

実験における  $x = 2.3\text{m}$  での圧力の時間変化を、計算ではトンネル入口端での圧力の境界条件としている。トンネル直径  $d$  にはトンネル断面積とトンネル内面周囲長さから求まる水力直径をもちいた。摩擦損失係数  $f$  は、圧力勾配のみ異なるいくつかの実験条件での実験結果との比較から、圧力レベルの減衰が計算とほぼ一致するよ

うに  $\mu = 0.13$  とした。

### 3.3 実験結果と計算結果の比較

各圧力計測点における圧力変化の計算結果と実験結果の比較を第14図に示す。図中の  $x = 62.3\text{m}$  における圧力波形を拡大して、圧力勾配とともに第15図に示す。第14図と第15図の圧力時刻歴では、縦軸には  $x = 2.3\text{m}$  での圧力最大値に対する比をとっている。同様に、第15図の圧力勾配でも縦軸には  $x = 2.3\text{m}$  での圧力勾配最大値に対する比をとっている。

これらの図より、本計算手法により圧力勾配の極大、極小をそのまま維持して計算することが可能であることがわかる。このことは、数値拡散を小さく抑えることができたので、計算により圧力波の非線形効果を十分に表現できることを意味している。

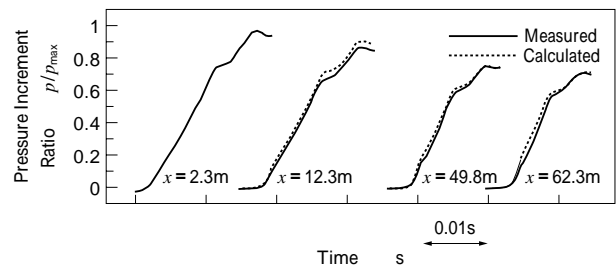
次に、圧力波面前半部分での圧力勾配は計算のほうが常に大きく、圧力波面後半部分での圧力勾配は非常に良く一致していることがわかる。圧力波面前半部分での摩擦損失係数（非定常摩擦損失係数）は圧力波面通過後の定常摩擦損失係数よりも大きい。本計算では、壁面での摩擦損失係数を  $\mu = 0.13$  で一定としているために、圧力波面前半部分での圧力の減衰が過小評価されている。

むすび=トンネル入口フードを二次元軸対称形状でモデル化して、トンネル入口圧力波の二次元軸対称数値解析をおこなった。トンネルに入口フードが付いている場合と付いていない場合の両方について、実験結果と計算結果の比較をおこなった結果、良い一致をえることができた。この計算手法をもちいてトンネル入口形状のパラメトリックな検討が可能であることを、計算例としてトンネル入口フード断面面積比の影響を取り上げて示すことができた。

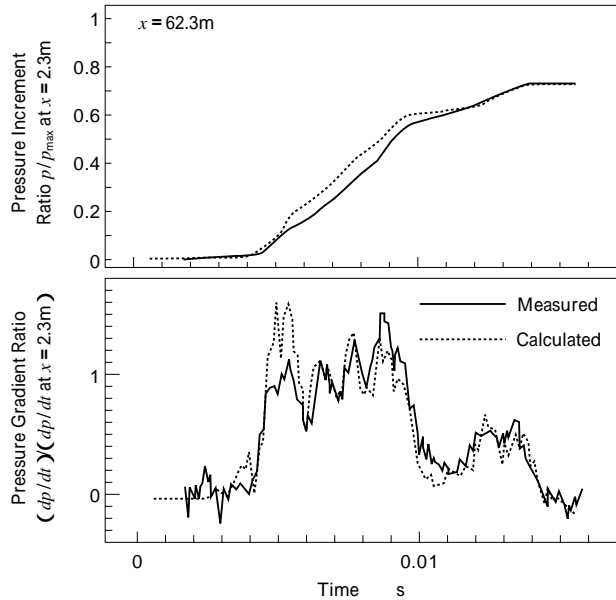
次に、二重格子法をもちいてトンネル内圧力波伝播の一次元数値解析をおこなった。実験結果と比較して、圧力波面前半部分での圧力勾配は計算のほうが常に大きく、圧力波面後半部分での圧力勾配は良く一致していることがわかった。非定常摩擦損失を考慮することにより、より精度の高い計算結果がえられると思われる。

さらに、より詳細について記した文献<sup>15)</sup>では、様々な計算条件に対してこれらの計算精度の検証をおこない、実験結果とよく一致することを確認している。以上の検討から、トンネル入口で発生する入口圧力波形とトンネル内を伝播する間の圧力波形の変化について、本計算手法による数値解析の精度を実験結果との比較を通して確認し、本計算手法の有用性と有効性を確認することができた。

なお、今回の計算にもちいた二次元重畳格子法による計算プログラムは、京都工芸繊維大学里深教授との共同研究により開発されたプログラムを使用した。ここに謝意を表す。



第14図 伝播する圧力波の時刻歴  
Fig. 14 Propagating pressure histories



第15図  $x = 62.3\text{m}$  における圧力時刻歴と圧力勾配  
Fig. 15 Pressure history and pressure gradient at  $x = 62.3\text{m}$

### 参考文献

- 1) 山本彬也：日本物理学会春の分科会，応用数学，力学，流体物理予稿集，4p-H-4 (1977)。
- 2) 小澤 智：日本機械学会講習会教材，Vol.96, No.13(1996)，p.21。
- 3) 鹿毛一之ほか：機論，Vol.62, No.598B (1996)，p.2310。
- 4) 飯田雅宣ほか：機論，Vol.62, No.596B (1996)，p.1428。
- 5) 小川隆申ほか：機論，Vol.62, No.599B (1996)，p.2679。
- 6) 小幡正規ほか：機論，Vol.59, No.562B (1993)，p.220。
- 7) T. Maeda et al.：Proc. Int. Conf. Speedup Tech. for Railway Maglev Vehicles 2 (1993)，PS3-8 p.315。
- 8) 鹿毛一之ほか：機論，Vol.59, No.560B (1993)，p.1168。
- 9) 鹿毛一之ほか：機論，Vol.60, No.578B (1994)，p.3402。
- 10) 大石峰生ほか：土木学会第51回年次学術講演会講演概要集 第 部門，(1996)。
- 11) 田中俊光ほか：日本機械学会第74期全国大会講演前刷集，(1996)，p.47。
- 12) 山極伊知郎ほか：日本機械学会第74期全国大会講演前刷集，(1996)，p.45。
- 13) 田中俊光ほか：日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集，(1997)，p.173。
- 14) 織田 剛ほか：自動車技術会論文集，Vol.24, No.1 (1993)，p.39。
- 15) 織田 剛ほか：機論，Vol.64, No.620B (1998)，p.1127。