

# トンネル内における貨物コンテナの内圧予測モデル

齊藤 実俊\*

## Pressure Tightness Model for Freight Containers Passing in Tunnel

Sanetoshi SAITO

In mixed traffic, high-speed and conventional trains share the same tracks. This exacerbates the problem of aerodynamic loads due to pressure variations in the tunnel on conventional trains when they pass high-speed trains in a tunnel. In particular, freight cars, such as containers and wagons, may be damaged by these loads, as their structural strength is lower than that of passenger trains. To predict the aerodynamic loads, it is necessary to estimate not only the external pressure (i.e., the pressure in the tunnel) but also the internal pressure. This study involved conducting an experiment using a train model launcher to measure the pressure inside and outside a model freight container. The pressure tightness model proposed in previous studies was validated quantitatively using experimental results. It was also confirmed that the pressure tightness model which takes into account the influence of the elastic deformation of vehicle bodies is suitable for predicting the internal pressure in vehicles with low rigidity, such as freight cars.

キーワード：気密，トンネル内圧力変動，高速列車，コンテナ，貨物，共用走行

## 1. はじめに

北海道新幹線の一部区間では新幹線と貨物列車が共用走行しており，青函トンネルなどのトンネル内で両者がすれ違う可能性がある．高速で走行する新幹線によってトンネル内に生じた圧力変動（トンネル内圧力変動）は同一トンネルを走行する貨物列車（コンテナ）に作用し，その圧力変動に応じてコンテナ内部の圧力（内圧）も変化する．在来線車両や貨物コンテナなどの非気密車両の場合，内圧変動は気密度に応じて変化し，一般に外圧変動より振幅が小さく時間的な遅れが生じる．その結果，非気密車両の車体やコンテナには内外差圧による変動荷重が作用することになり，これらの強度設計のためには外圧（トンネル内圧力変動）だけでなく内圧を予測する必要がある．

これまで高速列車の車両構体に作用する変動荷重算出のために多くの研究がなされており，車両の内圧を予測するための気密モデルとして等価開口面積モデル<sup>1)</sup>や動的気密係数モデル<sup>2)</sup>，さらには構体の変形を考慮したモデル<sup>3)</sup>など，いくつかのモデルが提案されている．車両構体に比べて剛性が低く，容積の小さいコンテナのような箱状構造物の場合には構体変形による内圧変化の影響が大きくなり，変形を考慮したモデルが有効になると考えられる．しかしながら，このモデルの妥当性を検証した事例としては剛性が高く構体変形の小さい高速鉄道の高気密度車両による現地試験結果<sup>4)</sup>を使用したもののみであり，コンテナなどの低剛性の箱状構造物に対する検証としては十分ではない．そこで本研究では，コンテナと力学的に相似な模型を用いて発射装置による模型実験を行い，トンネル内とコンテナ模型内の圧力およびコンテナ模型構成板の振動加速度を測定し，その結果を用いて，コンテナのように剛性が低い箱状構造物に適応する気密モデルについて検討した．

\* 環境工学研究部

## 2. 気密モデル

高速鉄道車両など高剛性の車両構体の内圧を予測するために提案された気密モデルを以下に示す。

$$\frac{dp_{in}(t)}{dt} = \text{sgn}(\Delta p(t)) \frac{SP_{in}(0)}{V} \sqrt{\frac{2|\Delta p(t)|}{\rho}} \quad (\text{等価開口面積モデル})^{1)}$$
 (1)

$$\frac{dp_{in}(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_{dyn}} \Delta p(t) \quad (\text{動的気密係数モデル})^{5)}$$
 (2)

ここで、 $P$ ：絶対圧， $p$ ：圧力（ゲージ圧）， $S$ ：等価開口面積， $V$ ：車両構体の内容積， $\rho$ ：空気密度， $\Delta p(t) = p_{ext}(t) - p_{in}(t)$ ， $\tau_{dyn}$ ：動的気密係数で， $x > 0$  のとき  $\text{sgn}(x) = 1$ ， $x < 0$  のとき  $\text{sgn}(x) = -1$ ， $x = 0$  のとき  $\text{sgn}(x) = 0$  である。また，添え字の  $ext$  は構体の外側を， $in$  は内側を示す。式(1)，(2)はいずれも構体の隙間（以下，開口部）を出入りする空気の流れによって内圧が変化することを表しており，本質的には両者は同様のモデルである。その後，以下に示す構体変形を考慮した気密モデルが提案された<sup>3)</sup>。

$$\frac{dp_{in}(t)}{dt} = \frac{k}{1+k} \frac{dp_{ext}(t)}{dt} + \text{sgn}(\Delta p(t)) \frac{c^2 S}{V(1+k)} \sqrt{2\rho|\Delta p(t)|}$$
 (3)

ここで， $k$ ：剛性を表す定数（以下，剛性係数）で， $dp_{in}(t)/dt \equiv k \cdot dp_{ext}(t)/dt$ ， $c$ ：音速である。式(3)の右辺第1項が構体の変形による体積変化に起因する内圧変化，第2項が内外差圧によって開口部に生じる流れによる内圧変化を表している。式(3)右辺第2項では内圧変化において断熱過程を仮定しているが，日本では式(1)に示されるように等温過程のモデルが長く用いられてきている。そこで式(3)右辺第2項を等温過程モデルに変更した以下に示す式(4)を本研究での検討対象とする。

$$\frac{dp_{in}(t)}{dt} = \frac{k}{1+k} \frac{dp_{ext}(t)}{dt} + \text{sgn}(\Delta p(t)) \frac{SP_{in}(0)}{V(1+k)} \sqrt{\frac{2|\Delta p(t)|}{\rho}}$$
 (4)

## 3. 模型実験

### 3.1 実験諸元

トンネル内に設置したコンテナ模型内外に作用する圧力変動を測定するために，列車模型発射装置<sup>6)</sup>による模型実験を行った。実験の状況およびコンテナ模型の写真を図1に，測定点を図2に，模型の主要諸元を表1に示す。トンネル模型は全長14.7m，内径0.2mの亚克力パイプである。全長はコンテナ模型の設置位置において，列車模型がトンネルに突入したときに発生しトンネル出口で反射した圧力波と，通過中の列車模型によって生じる圧力変動が重畳しないように決定した。高速列車を模擬した列車模型（全長1m，直径0.0614m）はピアノ線にガイドされ，トンネル内を速度290km/hで通過する。コンテナ模型（図1右）の設置位置はトンネル入口から2.29m地点であり，図2のとおり，前後2カ所の支持棒で支え，かつ，片側の上下角部をトンネル壁面に接触するように設置することで固定されている（静止状態）。高速列車と貨物列車のすれ違いを模擬するためにはコンテナ模型も走行させる必要があるが，本研究の目的はコンテナ模型に作用する圧力変動を実際のすれ違い状況と等価にすることであり，必ずしもコンテナ模型を走行させる必要はない。

コンテナ模型は代表的なコンテナである31ftコンテナ（全長9.25m，幅2.35m，高さ2.21m）を模擬し，

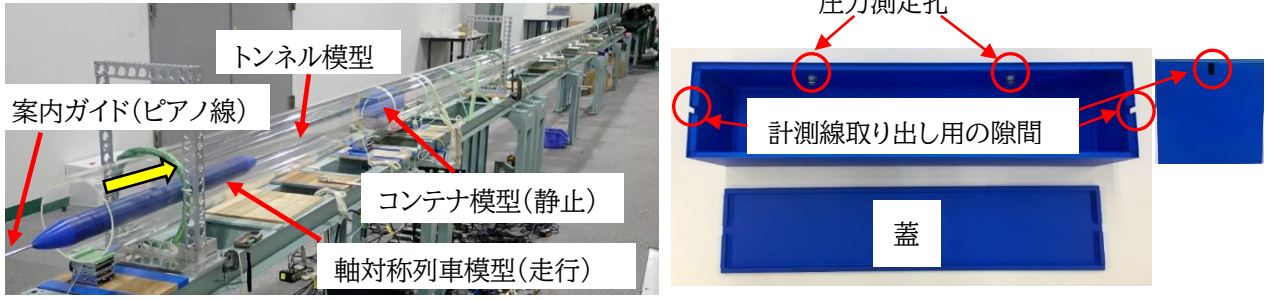


図1 発射装置による模型実験（左）とコンテナ模型（右）

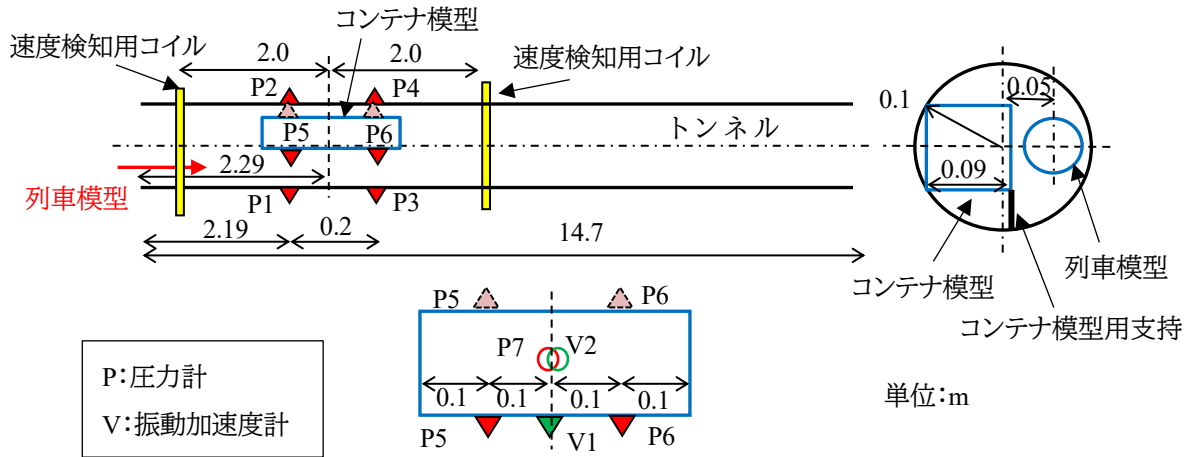


図2 模型と計測点の配置図

表1 模型の主要諸元

トンネル模型	断面積, $A_{\text{tun}}$	0.0314 m <sup>2</sup>	列車模型	断面積, $A_t$	0.00296 m <sup>2</sup>
	内径, $d_{\text{tun}}$	0.20 m		直径, $d_t$	0.0614 m
	長さ, $l_{\text{tun}}$	14.7 m		長さ, $l_{\text{tra}}$	1.0 m
コンテナ模型	断面積, $A_c$	0.0081 m <sup>2</sup>		先頭部長さ, $l_n$	0.103 m
	幅×高さ, $w \times h$	0.09 × 0.09 m		先頭部形状	回転楕円
	長さ, $l_c$	0.4 m		速度, $U$	290 km/h
	トンネルとの断面積比, $R_c$	0.26		トンネルとの断面積比, $R_t$	0.094

全長 0.4m, 幅 0.09m, 高さ 0.09m, 板厚 0.5mm の鋼板で構成されている。断面積で換算すると縮尺 1/25 に相当する。コンテナ模型上部は蓋になっており、内部に設置したセンサーからの計測線を取り出すための隙間を妻面上部に設けている（計測線を通した後、隙間を粘土にて密閉）。側面には圧力測定用の孔が 2カ所あり、反対側の側面には気密度を調整するための微小な開口部が 4 個（直径 3, 4, 5, 7mm）設けられており、テープで塞ぐことによって開口面積を変更できる。

図2のように、トンネル内の圧力 4 点（P1～P4, 中央高さ）、コンテナ外圧 2 点（P5, P6）、内圧 1 点（P7）を測定するための圧力計（Kulite XCS-190-5G）と、コンテナ変位を算出するための振動加速度計（RION PV-91C）2 点（コンテナ模型内側の列車通過側面 V1, 上面蓋 V2）を設置した。コンテナ外圧測定点（P5, P6）は試番によって列車模型通過側とトンネル壁面側に変更して実験を行った（表 2 参照）。列車模型速

度は、通過する列車模型内部の磁石によって、コンテナ模型の前後に 4m 間隔で設置した速度検知用コイルに誘起される電圧の時間差から求めた。測定したデータはサンプリング周波数 100kHz でデータロガー (Graphtec GL7000) に収録し、解析時には 2kHz のローパスフィルタによって高周波成分を除去した。

トンネル内圧力変動に関する相似則は列車のマッハ数と列車・トンネル断面積比である<sup>7)</sup>。列車模型の速度は実際の新幹線レベルの 290km/h であるが、列車模型のトンネルとの断面積比は 0.094 と実際の断面積比 0.17<sup>8)</sup> より小さく、コンテナ模型のトンネル断面積比は 0.26 と実際の値 0.10<sup>9)</sup> より大きい。コンテナ模型は内圧を測定するセンサー類設置のスペース確保のために実際より大きくしており、また、列車模型はコンテナ模型と接触しないよう十分な離隔を確保する必要性から実際より小さくした結果である。しかしながら、本実験の目的はコンテナ模型に作用する外圧および変形量を再現することであり、発生する圧力波形が実際の波形と等価であればよい。コンテナ模型強度に関する相似性については 3.2 節で、圧力波形の等価性については 4.1 節で述べる。

### 3.2 コンテナ模型の相似性

コンテナ模型の剛性は内外圧差による変形量が実際のコンテナと等価になる必要がある。変動荷重に対する変形量を等価にするためには慣性力と弾性力を相似にする必要があるが、模型の材質が実物と同じ場合には幾何学的に相似にすることで、両者の相似性を保つことができる。そこで、今回の模型には実際のコンテナで使用されている鋼板と同程度の密度  $\rho$  とヤング率  $E$  を有する冷間圧延鋼板を使用した。

実際のコンテナの外板には 2mm 厚の鋼板が使用されるが、補強リブや内壁 (木製の板材) などがあるため、全体の剛性 (等価剛性) は単純な 2mm 厚の鋼板より高いと考えられる。そこで、過去の実験事例をもとに実コンテナの等価剛性を概算し、コンテナ模型の相似性を調べた。等分布荷重を受ける長方形平板の中心の変位量は以下の式で示される<sup>10)</sup>。

$$w_{\max} = \beta \frac{ql^4}{Et_h^3} \quad (5)$$

ここで、 $w_{\max}$ : 平板中心の変位、 $q$ : 等分布荷重 (単位面積当たりの荷重)、 $l$ : 平板の短辺長さ、 $E$ : ヤング率 (鋼板  $E=210\text{GPa}$ <sup>10)</sup>)、 $t_h$ : 板厚、 $\beta$ : 短辺と長辺の比と板周囲の境界条件で決まる定数である。40ft コンテナの側壁 (長さ 12m、高さ 2.6m) に 160kN の等分布荷重を負荷したときの、側壁中心の変位量が 78.8mm となる結果が報告されている<sup>11)</sup>。長辺 12m、短辺 2.6m の平板の場合、係数  $\beta$  は周辺支持の場合 0.14、周辺固定の場合 0.028 であり<sup>10)</sup>、それぞれの  $\beta$  について式(5)を用いて板厚 (等価板厚) を求めると 12.8mm と 7.5mm となる。箱状のコンテナにおける側壁の境界条件を考えると変位量は周辺支持と周辺固定の間になると推定される。今回コンテナ模型に使用した鋼板の板厚は 0.5mm、コンテナ模型の縮尺が 1/25 であることから板厚は実寸で 12.5mm 相当となり、概ね等価板厚と等しく、相似則を満たしていると考えられる。

### 3.3 実験条件

コンテナ模型の気密度をパラメータとした実験条件を表 2 に示す。コンテナ模型側面に設けた 4 個の開口部 (直径 3, 4, 5, 7mm) の一部または全部をビニールテープで閉鎖することで開口面積を調整した。側面開口部は列車模型の通過する側と反対側 (トンネル壁面側) に位置するようコンテナ模型を設置したが、実験 7, 8 のみ列車模型通過側である。

表2 実験条件

実験番号	開口面積 $S_M$ (mm <sup>2</sup> )	開口部の直径 $d$ (mm)	開口部の位置	P5, P6 の位置
1	0.0	開口部なし	————	列車模型 通過側 (トンネル中心側)
2	7.07	3.0	トンネル 壁面側	
3	19.6	5.0		
4	38.5	7.0		
5	39.3	3.0, 4.0, and 5.0		
6	70.7	4.0, 5.0, and 7.0		
7	19.6	5.0	列車模型 通過側(トンネル中心側)	トンネル 壁面側
8	70.7	4.0, 5.0, and 7.0		

## 4. 実験結果

### 4.1 コンテナ外圧（トンネル内圧力）波形

コンテナ模型に作用するトンネル内圧力変動波形の代表例として、実験6, 8の結果を併せて図3に示す。P5, P6は実験6では列車模型通過側、実験8ではトンネル壁面側になる。また、トンネル内の圧力(P1~P4)の波形は両実験でほぼ同じ波形であったので実験8の波形を示している。

トンネル内の圧力は列車のトンネル突入によって発生した圧力波（圧縮波、膨張波）の往復および列車通過に伴う圧力変動によって大きく変化する。図3より、圧力変動波形はそれぞれの断面において列車通過中を除き同じ波形となっている。圧力波はほぼ平面波とみなすことができるためトンネル断面内で一様であるのに対し、列車通過に伴う圧力変動は列車からの距離に依存するためである。

次に本実験によって得られたコンテナ外圧波形が実際の新幹線と貨物列車のすれ違い状況を再現しているか検証する。図3より、列車先頭部突入によって発生した圧縮波（ $t=0.02s$ 付近、図3の赤丸）による圧力上昇量  $p_c$  は約1kPa、その波面の時間幅  $t_c$  は約6msであった。これらは以下に示す理論式によって計算できる<sup>12)13)</sup>。

$$p_c = \frac{1 - (1 - R_t)^2}{(1 - M_t)\{M_t + (1 - R_t)^2\}} \frac{1}{2} \rho U^2 \tag{6}$$

$$t_c = \frac{\sqrt{A}}{U} \tag{7}$$

ここで、 $R_t$ ：列車・トンネル断面積比、 $M_t$ ：列車のマッハ数= $U/c$ 、 $U$ ：列車速度、 $c$ ：音速、 $A$ ：トンネル断面積である。式(6)より、新幹線の列車・トンネル断面積比  $R_t=0.17$  を用いると、 $p_c=1kPa$  のときの新幹線の速度は  $U=220km/h$  に相当する。さらに、式(7)より、 $U=220km/h$  における圧縮波の波面時間幅は  $t_c=0.18s$  程度、波面幅は  $l_w=63m$  程度となる。貨物列車の速度を  $105km/h=29m/s$  と仮定すると、波面幅  $l_w=63m$  の圧縮波とすれ違い場合にコンテナで測定される波面の時間幅は  $t_c=l_w/(c+U_{con})=0.17s$ 、模型寸法に換算すると6.8msであり、実験結果の6msより約13%長い程度である。よって、今回の圧縮波の波形は実際の貨物列車のコンテナで測定される波形と大きな差はなく、実現象を概ね再現していると考えられる。

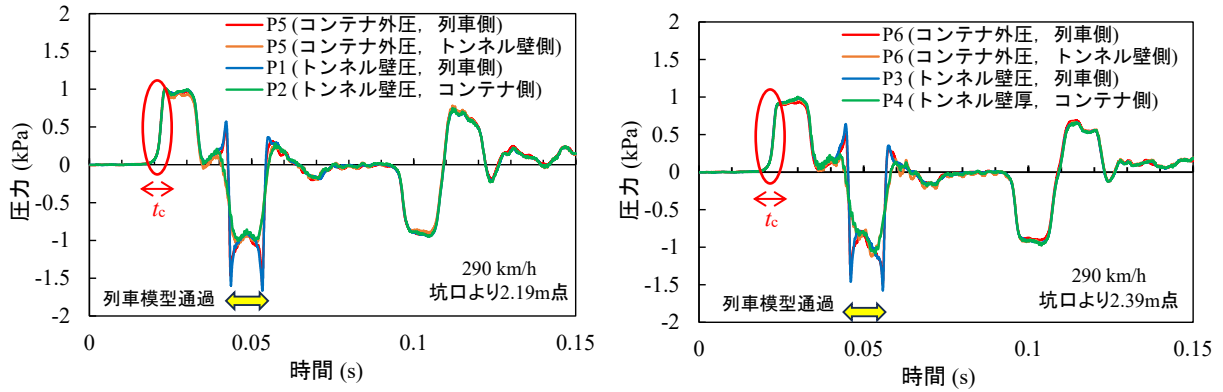


図3 トンネル内圧力変動の測定波形（開口部  $d=4+5+7\text{mm}$ ，実験6,8）

## 4.2 コンテナ内圧測定結果

### 4.2.1 開口面積の影響

図4に開口面積を変化させたときのコンテナ外圧と内圧の測定結果を示す。当然であるが、コンテナ外圧は開口面積によらずほぼ同じであることが確認できる。図4より、コンテナ内圧(P7)は外圧変動(P5,6)にしたがって変化しており、その変化には急激な変化( $t=0.02, 0.045\text{s}$ など、図4右下図の赤矢印箇所)とゆるやかな変化( $t=0.024-0.030, 0.045-0.055\text{s}$ など、図4右下図の赤丸箇所)がある。前者は式(3)(4)の右辺第1項で示されるコンテナの変形に伴う変化、後者は式(3)(4)の右辺第2項で示される開口部を介した空気の流出入による変化である。よって、開口部のない実験1の内圧波形には急激な変化のみ観測されている。また、実験3, 4, 6の内圧波形を比較すると、急激な変化はほぼ同じであるのに対し、ゆるやかな変化は開口面積が大きくなるほど変化の傾きが急に（圧力の時間変化率が大きく）なっている。これは開口面積が

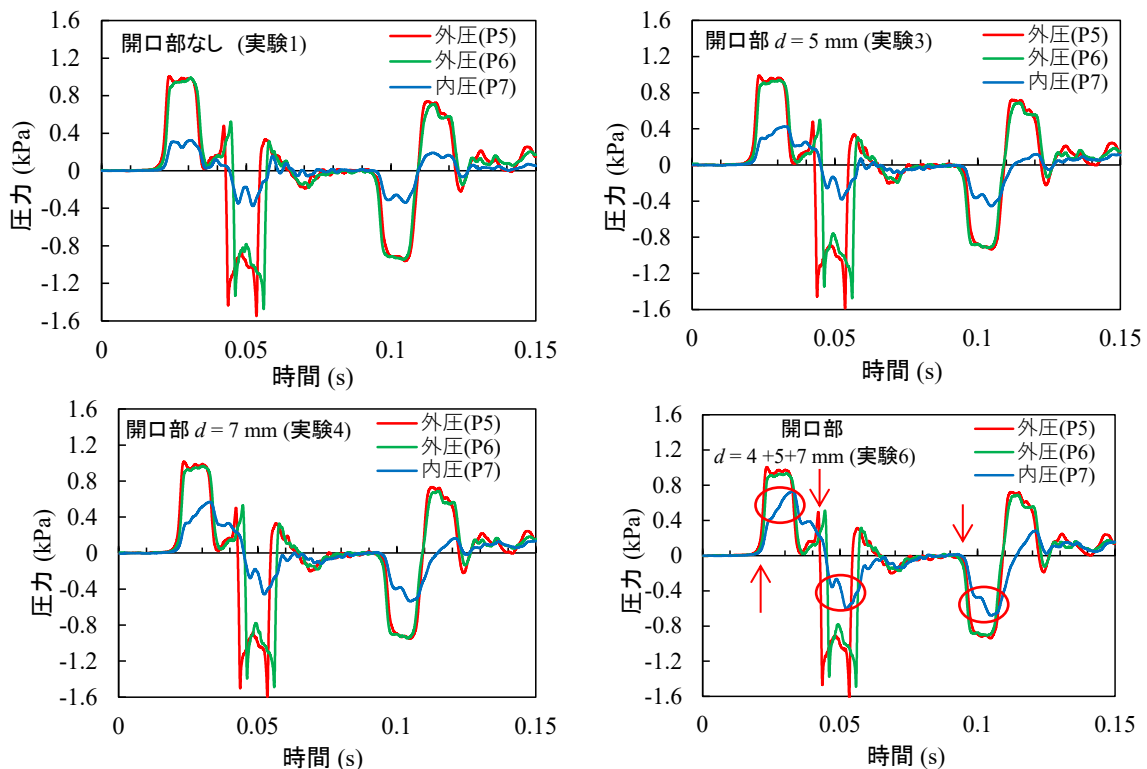


図4 コンテナ内外圧の測定波形（開口面積の影響）

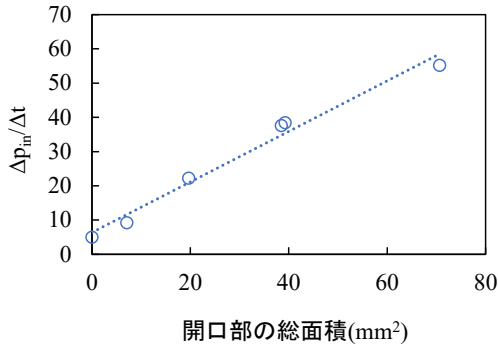


図5 コンテナ内圧の変化率と開口面積の関係

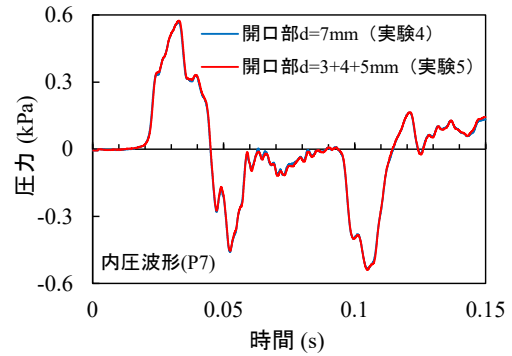


図6 内圧波形に対する開口部数の影響

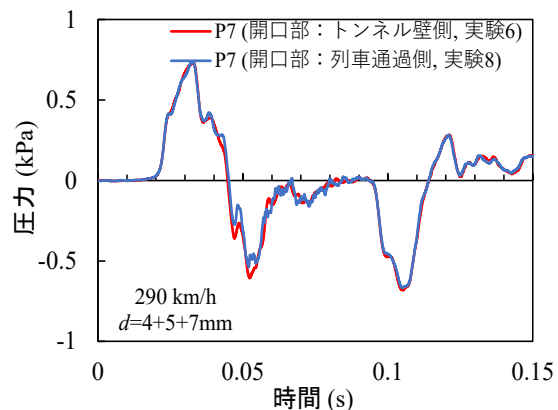
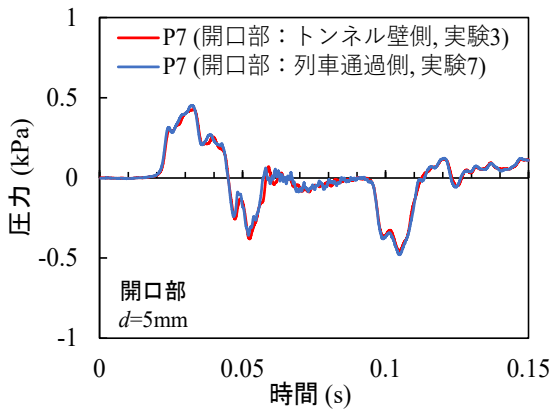


図7 内圧波形に対する開口部位置の影響

大きいほど流入する空気質量流量が増加するためである。図5に実験1～6における  $t=0.024-0.030$ s 間のゆるやかな変化の圧力変化率  $\Delta p_m/\Delta t$  と開口面積の関係を示す。両者は線形関係にあることがわかる。また、切片が0ではなく、開口面積が  $0\text{mm}^2$  においても内圧が変化しているが、これは、粘土による密閉措置を実施したものの、コンテナ模型妻面上部に設けた計測線用の隙間からの漏れがあったためと推定される。

#### 4.2.2 開口部の位置と数の影響

実際の車両やコンテナには接合部やドア、窓など多数の隙間がさまざまな箇所に存在するが、今回の実験条件では1個または3個の開口部がコンテナ模型の同一側面に配置されている(表2)。本節では開口部の数と設置位置の影響について調べる。

実験4と実験5は開口面積がほぼ同じで開口部数が異なる。両条件の内圧測定結果の比較を図6に示す。両条件の波形はほぼ一致しており、内圧波形に対する開口部数の差異は無視でき、内圧変動は全開口面積によって決まることがわかる。ただし、孔径を代表長さとしたレイノルズ数が大きく異なる場合、たとえば、非常に微小な多数の隙間の場合、同じ面積の単一の開口部の内圧波形とは異なる可能性があり、注意が必要である。

他の実験と異なり開口部がトンネル壁面側に対向している実験7と実験8の結果を、同じ開口面積で列車通過側に対向している実験3、6の結果と比較したものを図7に示す。両条件の内圧波形は列車通過中も含めほぼ一致しており、開口部の位置が内圧に与える影響はほとんどないといえる。

#### 4.2.3 コンテナ模型の変形量

コンテナ模型の上面板、側面板の中央点で測定した振動加速度から数値積分によって求めた変位量と内外差圧(外圧-内圧)の波形を図8に示す。図8において、変位の正はコンテナ模型の内側方向の変位を示す。また、外圧についてはコンテナ模型の4点(P5、P6のトンネル壁面側、列車模型通過側)で測定し

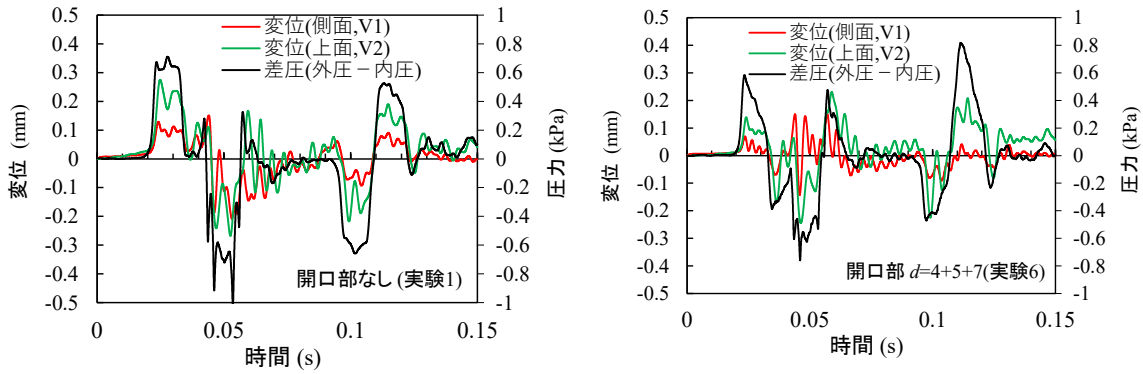
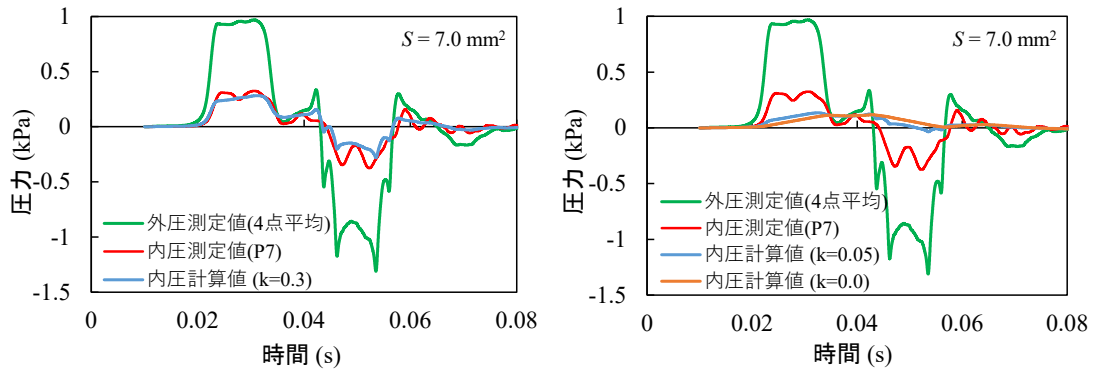


図8 変位と内外差圧 (外圧-内圧)



(a) 実験1による計算パラメータ  $S$  と  $k$  の同定

(b) 剛性係数  $k$  の影響

図9 実験1による計算パラメータ  $S$  と  $k$  の同定

た平均値を用いた。図8より、変位は内外差圧波形と概ね同期して変化しており、内外差圧による荷重によってコンテナ模型が弾性変形していることがわかる。上面V2の変位は側面V1の変位の2倍程度となっているが、これは側面板の3辺が接着によって固定されているのに対し、上面の蓋は周囲をビニールテープで固定されており、変形しやすかったものと推察される。なお、列車模型通過中 ( $t=0.045-0.055s$ ) の両者の変位はほぼ一致しているが、これは列車が側面板近傍を通過しているために側面板に作用する圧力の方が蓋に作用する圧力より大きく、その結果、側面板の変位量が増えたためと考えられる。

## 5. 気密モデルの適用

コンテナのように剛性の低い箱状構造物に適用する気密モデルを検討するため、模型実験で得られた外圧測定波形を入力値として気密モデル(式(4))を使用して内圧を計算し、内圧測定結果と比較を行った。入力として用いた外圧波形は4.2.3節で差圧を求めた際と同様、4点における測定結果の平均値である。

まず、開口部のない実験1の内圧測定結果と比較することで、計算パラメータ  $S$  と  $k$  を同定した結果を図9(a)に示す。前述のとおり、等価開口面積  $S$  はゆるやかな内圧変化 ( $t=0.024-0.030, 0.045-0.055s$  など) に、剛性係数  $k$  は急激な変化 ( $t=0.02, 0.045s$  など) に影響を与える。そこで、前者は  $t=0.024-0.030s$  の内圧測定波形に、後者は  $t=0.02s$  の内圧波形に計算結果が一致するようにパラメータを同定した。その結果、図9(a)に示したとおり、 $S=7.0mm^2, k=0.3$  で計算結果は測定結果と良く一致した。実験1は開口部がないにもかかわらず、同定した等価開口面積  $S$  は  $7.0mm^2$  となったが、これは4.2.1節でも述べたとおり、コンテナ模型妻面上部に設けた計測線用の隙間等の影響と考えられる。また、構体変形の影響を表す剛性係数  $k$  は0.3であり、既往研究で示されている高速鉄道用車両の数値(たとえば文献4)では  $k=0.05$  より一桁大きい

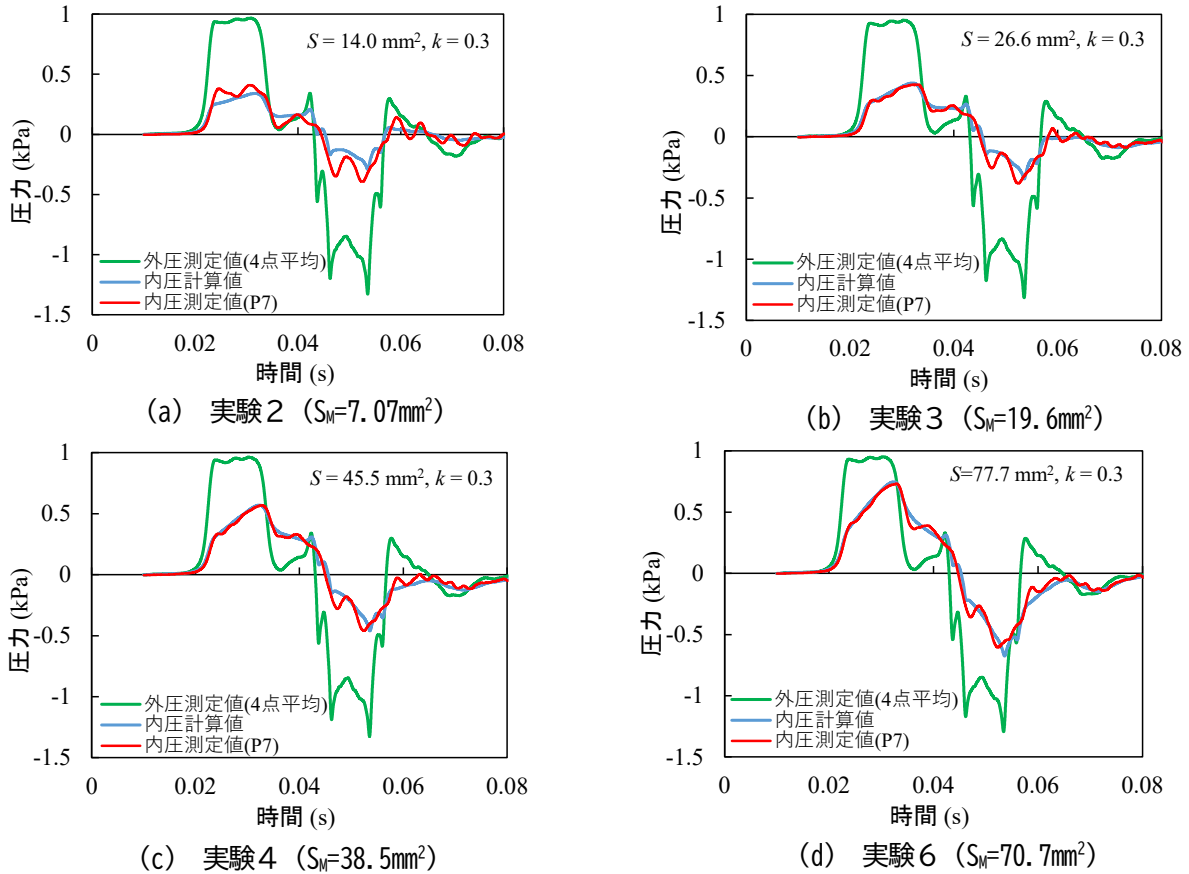


図10 実験結果と計算結果の比較 (開口面積の影響)

値となった。比較のため、 $k=0.05$  による計算結果と、構体変形を考慮しない気密モデル ( $k=0$ , 式(1)に相当) による計算結果を図 9(b)に示す。変形を考慮しない気密モデルの計算結果は測定結果と大きく異なっており、コンテナのような剛性の低い構造物の内圧を正確に予測できないことがわかる。また、 $k=0.05$  の結果は  $k=0$  の場合とほぼ同じであり、高速鉄道車両の車内圧予測については従来の構体変形を考慮しない気密モデル (式(1)) でも可能であると考えられる。

開口部なし条件の実験結果から同定した等価開口面積  $7.0\text{mm}^2$  を開口部以外の隙間面積  $S_0$  に相当すると仮定し、開口部の面積を変化させた場合について実験結果と計算結果を比較する。比較結果を図 10 に示す。ここで、計算に使用した等価開口面積  $S$  は実験条件の開口面積  $S_M$  に  $S_0$  を加えた値である。図 10 より、いずれの条件でも内圧の計算結果は実験結果と良く一致しており、気密モデルは実際の開口面積の影響を正確に反映していること、剛性係数  $k$  は開口面積にかかわらず一定であることが確認できる。

つぎに、同定した剛性係数  $k=0.3$  の妥当性について検証する。車体やコンテナを箱形の薄板構造物と仮定すると、等分布荷重が外表面に作用した場合の変位量が微小であれば体積変化量は荷重に比例し、

$$dV = a \cdot d\Delta p(t) \tag{8}$$

と表すことができる。ここで、 $a$  : 比例係数である。気体の状態方程式から以下の関係が得られる。

$$dp_{in}(t) = -a \frac{P_{in}(0)}{V} d\Delta p(t) \tag{9}$$

剛性係数の定義式 (2章参照) より、 $k$  は以下のように求まる。

$$k = -a \frac{P_{in}(0)}{V} \tag{10}$$

よって、内外差圧の変化量と体積変化量の比  $a$  から剛性係数  $k$  を見積もることができる。図 8 左図より、圧縮波がコンテナ模型を通過している  $t=0.024-0.030s$  間の変位量は、側面で約 0.1mm、上面で約 0.2mm である。これらは振動加速度測定位置である平板中央の変位量であることから、平板全体の平均変位量をこれらの数値の 1/2 と仮定する。また、測定していない他の平板は側面と同程度の変位量と仮定すると、体積変化量は  $-9.8 \times 10^{-6}m^3$  程度となる。なお、妻面は側面に比べて長辺/短辺が小さいことから変位量も小さいと考えられるが、式(5)から概算すると体積変化量の差はただだか 6%程度と推定され影響は大きくないと考えられる。このときの内外差圧は図 8 左図より  $d\Delta p=650Pa$  程度であることから、式(8)より  $a=1.5 \times 10^{-8}$  となる。よって、式(10)より、剛性係数  $k=0.47$  が求まる。簡易な計算による概算値であるが、実験結果で同定した値  $k=0.3$  に近い数値であり、式(4)による気密モデルは実際の剛性を反映していると考えられる。参考として、 $k=0.47$  による内圧の計算結果を図 11 に示す。 $k=0.47$  による内圧計算値は  $k=0.3$  の場合とほぼ同じであり両者の差が内圧の計算結果に与える影響は小さいといえる。このことは、構体の剛性を把握することができれば、剛性係数  $k$  を見積もることが可能であることを示唆している。

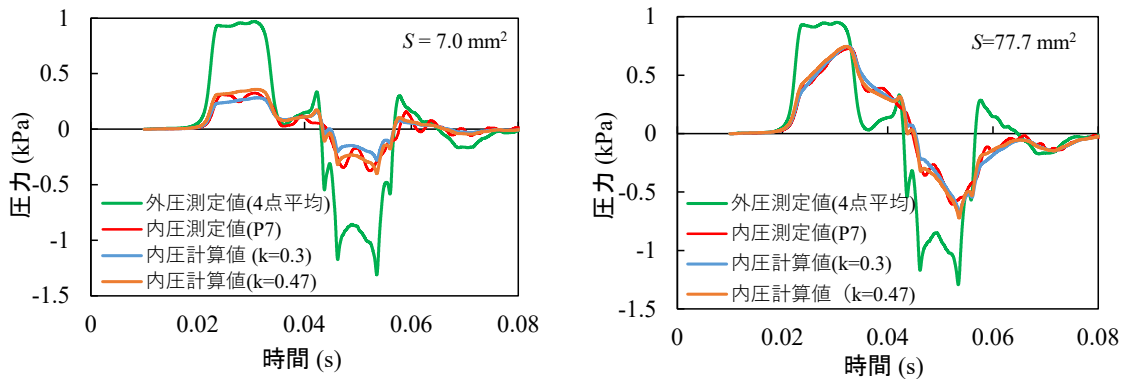


図 11 変位量から推定した剛性係数による内圧の計算結果

## 6. まとめ

貨物用コンテナのように剛性の低い箱状構造物の外側に圧力変動が作用したときに内部に発生する圧力変動を予測する気密モデルについて、実コンテナと力学的に相似な模型を用いた実験により検討した。結果を以下にまとめる。

- ①コンテナのような剛性の低い箱状構造物に対しては、開口部の等価開口面積と弾性変形に伴う体積変化の影響を考慮した気密モデルを適用する必要があることが確認された。
- ②計算に必要なパラメータである開口面積と剛性係数は実際の開口面積、剛性を反映しており、構造物の材質、寸法から推定可能である。ただし、実機では特に開口面積の正確な推定は困難であり、実際には実機による気密試験、走行試験などによって推定する必要がある。
- ③内圧に対する開口部の数や位置の影響は小さく、総開口面積に依存することが模型実験により確認された。ただし、非常に微小な孔などレイノルズ数が大きく異なる場合には総開口面積が同じでも単一開口部とは状況が異なる可能性があることに注意が必要である。

本研究ではトンネル内を通過する貨物コンテナを対象としたが、得られた知見はトンネル内に設置されている機器箱のような箱状構造物にも適用可能である。

## 文献

- 1) 日本国有鉄道 鉄道技術研究所：高速鉄道の研究，pp.374-377，1967
- 2) International Union Railway, "Determination of railway tunnel cross-sectional areas on the basis of aerodynamic considerations," UIC CODE 779-11. Appendix F. p.24. 2005.
- 3) M., Sima, "New unifying procedure for working with pressure tightness of rail passenger vehicles," Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, pp.743-757, 2003.
- 4) M., Sima, L., Barbone, G., Galeazzo, P. Golz, "Dynamic Pressure Tightness of Very High Speed Train ETR1000/V300ZEFIRO," Proceeding of 11<sup>th</sup> World Congress on Railway Research, 2016.
- 5) ERRI C218/RP2 Annexe5, "The pressure-tightness coefficient,  $\tau$ ," p.5-3, 1998.
- 6) 福田傑，飯田雅宣：列車・トンネル系の空気力学に関する模型実験，日本音響学会誌，Vol.63, No.9, pp.543-548, 2007
- 7) 原朝茂：高速でトンネルに突入する場合に列車に作用する空気力，日本機械学会論文集（第2部），Vol.26, No.171, pp.1581-1586, 1960
- 8) 田島信一郎：JR 東日本 E5 系新幹線電車量産先行車の概要(1)，鉄道車両と技術，No.155, pp.2-7, 2009
- 9) 日本貨物鉄道株式会社：<https://www.jrfreight.co.jp/service/container.html> (参照日：2024年10月25日)。
- 10) 寺沢一雄，松浦義一：材料力学（上巻），海文堂，pp.56, pp.227-229, 1984
- 11) Sinha, S. C., Prakash, V., Ravikumar, P. B., Raman, R., "Modeling and simulation of cargo containers. Computers & Structures," Vol.33, No.4, pp.1065-1072, 1989.
- 12) Hara, T., Aerodynamic force acting on a high speed train at tunnel entrance, "Bulletin of the Japan Society of Mechanical Engineering," Vol.4, No.15, pp.547-555, 1961.
- 13) Howe, M. S., Iida, M., Maeda, T., Sakuma, Y., "Rapid calculation of the compression wave generated by a train entering a tunnel with a vented hood," Journal of Sound and Vibration, Vol.297, No.1-2, pp.267-292, 2006.