

## トンネル微気圧波を低減する先頭形状の開発

栗田 健\* 奥村 陽一\*\* 一木 剛\*\*\*

高速化時のトンネル微気圧波を現状以下とすることを目的として、地上対策の増設を抑えるために、車両先頭形状の開発を行った。当初は、緩衝工のないトンネルにおいてシミュレーションを行い、緩衝工のあるトンネルでの性能は模型実験で検証する手法をとっていた。その後、開発を効率的に行うため緩衝工のあるトンネルでのシミュレーションによる開発手法を採用した。その結果、E2系と同じ9.1m先頭長（先頭車両のうち断面積が変化している部分の長さをいう。）では断面積変化を工夫することにより、E2系営業車の微気圧波と同等となる速度は290km/h前後となり、先頭長を13m、24mと伸ばせば、それぞれ300km/h前後、320km/h前後とすることができることがわかった。

キーワード：トンネル微気圧波、圧縮波、緩衝工

### 1 はじめに

新幹線等の高速列車がトンネルに突入すると、トンネル内に圧縮波が発生し、この圧縮波がトンネル内を音速で伝播し、トンネル出口に到達した時に、トンネル外に放射されるパルス状の波のことをトンネル微気圧波（以下、微気圧波という。）という（図1）。微気圧波は家屋の窓、建具を振動させたり、「パーン」という発破音を伴う場合もあり、騒音・振動問題の一つとなっている。

この微気圧波の低減対策は大きく分けて、入口緩衝工（列車突入側のトンネル坑口に設置される、通常トンネル断面積の1.4倍の面積をもつフードのことで、側面に空気抜きの開口部を有している。以下、緩衝工という。図2）のような地上側対策と、車両断面積の縮小や先頭長の延伸などの車両側対策がある。

そのうち、車両先頭形状を工夫することにより微気圧波を低減する車両側対策に取り組んだ。



図2：トンネル入口緩衝工

### 2 微気圧波低減の方法と開発の進め方

微気圧波は、圧縮波の時間変化率、すなわち圧力勾配（ $dP/dt$ ）が増大するにしたがって大きくなる。車両側の対策は、トンネル入口での圧力勾配を低減させる効果があり、以下の方法が考えられる。

- (1) 車両断面積を減らす。
- (2) 先頭長を伸ばす。
- (3) 先頭形状を最適化する。

ただし(1)と(2)の方法は客室の居住性、定員等との



図1：トンネル微気圧波の発生<sup>(1)</sup>

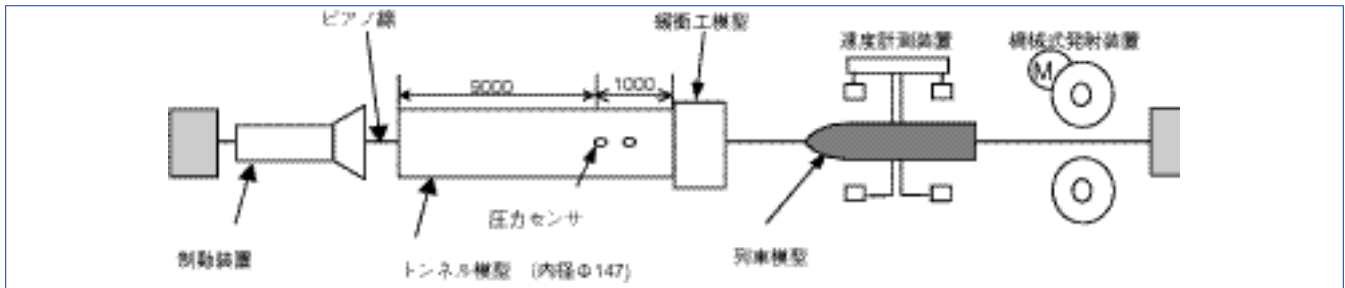


図3：模型打込み実験装置（1 / 61模型）

兼ね合いから制約を受ける。当初の開発の進め方は、先頭長や車両断面積の制約の下で、緩衝工のないトンネル条件で流体数値シミュレーションを行い模型先頭形状を決定し、緩衝工のあるトンネルに対する評価は模型打込み実験（以下、模型実験という。）により行った。車両模型は軸対称モデル、緩衝工は四角い形状で、上面に開口部を有する（図3）。微気圧波の評価指標はトンネル入口から約60m地点の圧縮波の圧力勾配最大値とした。

基本的な先頭形状と圧力勾配の関係<sup>1)</sup>を図4に示す。この図から同じ先頭長・車両断面積でも先頭形状によって、圧力勾配最大値に違いがあり、先頭形状の最適化が必要であることがわかる。またこのときの実験結果において、車両断面積の変化が大きいく所りで圧縮波も急激に変化し、圧力勾配が最大となっていたことから、車両断面積の変化率が一定である方がよく、したがって回転放物体がよいとされ、最先端部を除いて断面積の変化率が一定の図5の先頭形状が微気圧波低減に効果的な形状としてMaedaら<sup>2)</sup>から提案されている。

しかし、実際に車両を構成するには、分割・併合装置のスペース確保など、車両の制約条件を考慮する必要がある。そこで、これまでに導入された車両の諸元を参考にしながら、車両断面積 $11.2\text{m}^2 \sim 9.7\text{m}^2$ 、先頭長 $16\text{m} \sim 10$

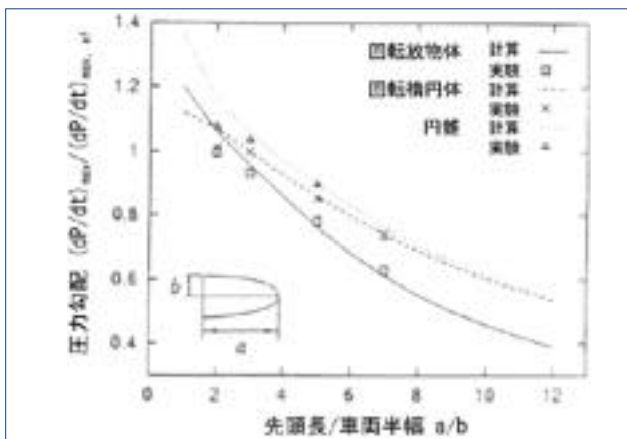


図4：基本的な先頭形状と圧力勾配の関係<sup>1)</sup>

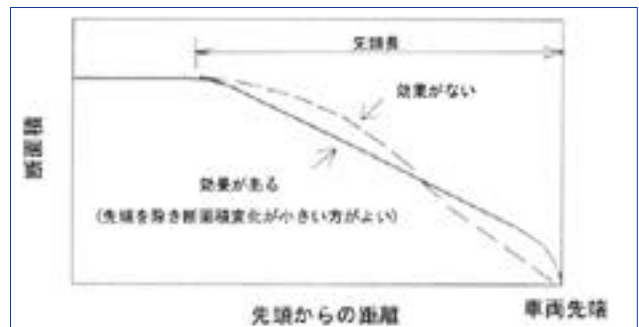


図5：緩衝工のないトンネルにおける微気圧波低減に効果的な先頭形状<sup>2)</sup>

mの範囲で種々の先頭形状を作成し、シミュレーションを行った。

### 3 緩衝工のないトンネルでのシミュレーション

#### 3.1 先頭形状案の考え方

##### (1) 車両断面積

断面積が小さいことは、微気圧波の低減に有効であるが、小さすぎると客室スペースの確保の点から好ましくない。そこで、先頭形状案の作成時には実現可能な断面積としてE2系 ( $11.2\text{m}^2$ )、STAR21 ( $9.7\text{m}^2$ )、JR西日本500系<sup>3)</sup> ( $10.2\text{m}^2$ )の断面積を用いることにした。

##### (2) 先頭部に必要な運転室等の確保

先頭部に必要な運転室等の確保が可能な形状とする。E2系を基本とし、車両先端から4mより後方部分の断面形状が同じ形状を作成した。また、断面積を削減する場合には、断面積変化率が同じになるようにした。

##### (3) 実現可能な先頭長

先頭長を長くすると、微気圧波の低減に有効であるが、逆に長すぎると客室スペースの確保が難しい。今回は20mまでとした。

#### 3.2 シミュレーションの概要

シミュレーションは、図6のように軸対称の列車先頭形状モデルがトンネルに突入した際の圧縮波の大きさを求めるものである。

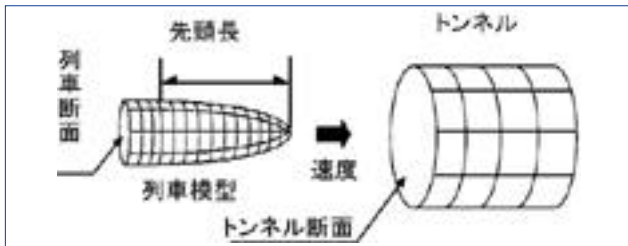


図6：シミュレーションのイメージ図

計算の手順は、図7のような流れになっており、車両の断面積変化を入力すれば、模型がトンネルに突入する際生じる圧縮波形と圧力勾配波形を求めることができる。

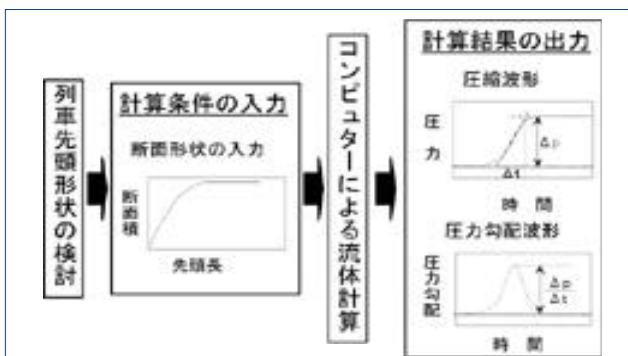


図7：シミュレーションの流れ

### 3.3 シミュレーション結果の速度換算値

先頭形状の評価に用いている速度は以下のように求める。E2系275km/hの圧力勾配値を基準値とし、各先頭形状に関する圧力勾配値を基準値に対する圧力勾配低減比として求める。圧力勾配低減比の比較ではわかりにくいいため、さらに列車速度に換算してある。

列車速度は圧力勾配低減比が突入速度の1/3乗に比例することから速度低減比を求めて、この速度低減比とE2系275km/hから速度換算値（E2系275km/hと同じ圧力勾配値となる速度）を求めている。

### 3.4 本シミュレーションにおける目標速度

実現象では、圧縮波がトンネル内を伝播する際、圧力勾配は次第に切り立つために入口と出口の値が異なる。特に、トンネル延長の長いものはこの変形が大きくなるので、出口側に到達した圧縮波の圧力勾配がシミュレーション結果よりも大きくなる。

また、緩衝工がある場合、緩衝工長さや開口部位置・面積、突入列車の先頭形状等のさまざまな要因から出口側の圧力勾配の大きさを予測するのは難しい。

これらのことから、すべてのトンネルにおいて300km/hでE2系275km/h並みの微気圧波を達成するため、シミュレーション結果から求められる列車速度は余裕を見込み、325km/hを目標とした。

### 3.5 シミュレーション結果

シミュレーションの結果から、目標レベルを満たした形状のうち先頭長が12m以下で、かつ圧力勾配最大値がE2系275km/hと同等となる速度が高い順に2つの先頭形状（図8）を選定し、模型実験を実施することとした。

## 4 模型実験（その1）

緩衝工のないトンネルに対するシミュレーションにより策定した2形状（図8）について緩衝工のある場合の模型実験を行い、圧力勾配最大値がE2系275km/hと同じ値となる速度を求めた（表2）。緩衝工長さは既存緩衝工の代表的な長さ10m、17m、25m、30mの4種類とした。

その結果、No.2形状では、E2系最適開口部（現状の地上設備条件）においてE2系275km/hと同等の微気圧波となる試験形状の速度は281～293km/hとなった。また試験形状に合わせて開口部を調整（地上設備の改良）すると、E2系275km/hと同等の微気圧波となる試験形状の速度は293～312km/hとなった。17mと25mの緩衝工の場合は300km/hを超える結果となったが、10mと30mの緩衝工の場合は300km/hには達しなかった。

そこで、さらに数種類の先頭形状案をつくって実験することとした。

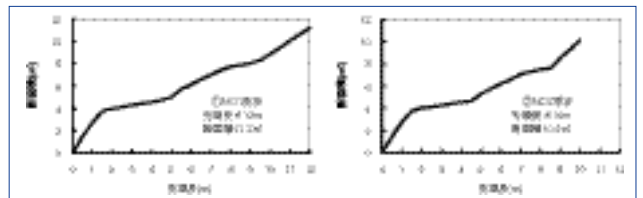


図8：No.1、No.2形状

表2：模型実験結果（その1）

形状	E2系(km/h)	No1(km/h)	No2(km/h)
緩衝工なし	275	325	328
E2系最適開口部	10m	275	283
	17m	275	268
	25m	275	269
	30m	275	274
各形状最適開口部	10m	※(275)	※(283)
	17m	269	297
	25m	262	286
	30m	263	282

※各形状に最適な開口部が見出せなかった  
\*No.2形状に最適な開口部にE2系が突入した場合

## 5 模型実験（その2）

実験に供した先頭形状案は下記のとおりである。現在の緩衝工はE2系用に調整された開口部を有するため、シミュレーションを行った先頭形状の中からE2系断面積変化を一部採用した先頭形状案（図9）

先頭から1mまではE2系と同じ断面積変化で、1mより後方はE2系と同じ断面積変化率である、車両断面積縮小や先頭長延伸を行ったさまざまな先頭形状案（図10）緩衝工のない場合にE2系275km/h並みの微気圧波となる速度が300km/h以上となる先頭長10m、断面積10.7m<sup>2</sup>で断面積変化については連結器の部分は現行E2系と同じとし、その他の部分は、E2系と直線的な変化（図5）のほぼ中間的な変化とした先頭形状案（図11）その結果を表3および表4に示すが、E2系最適開口部（現状の地上設備条件）において300km/hを達成する先頭形状はなかった。

模型諸元（実物換算）

- PLAN 1：断面積10.2m<sup>2</sup>、先頭長12m（E2系断面積を2.5mまで活用）
- PLAN 2：断面積10.2m<sup>2</sup>、先頭長12m（E2系断面積を1.5mまで活用）
- PLAN 3：断面積10.7m<sup>2</sup>、先頭長12m（E2系断面積変化を1.0mまで活用）
- PLAN 4：断面積10.7m<sup>2</sup>、先頭長10m（E2系断面積変化を1.0mまで活用）
- PLAN 5：断面積10.7m<sup>2</sup>、先頭長8.5m（E2系断面積変化を1.0mまで活用）
- PLAN 6：断面積11.2m<sup>2</sup>、先頭長12m（E2系断面積変化を1.0mまで活用）
- PLAN 7：断面積11.2m<sup>2</sup>、先頭長10m（E2系断面積変化を1.0mまで活用）
- PLAN 8：断面積10.2m<sup>2</sup>、先頭長15m（緩衝工なしで微気圧波が最小となる）
- PLAN 9：断面積14.07m<sup>2</sup>、先頭長11.5m（E4系の先頭形状）

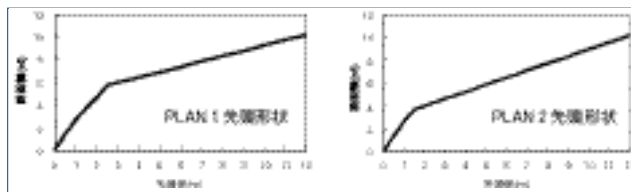


図9：PLAN1、PLAN2

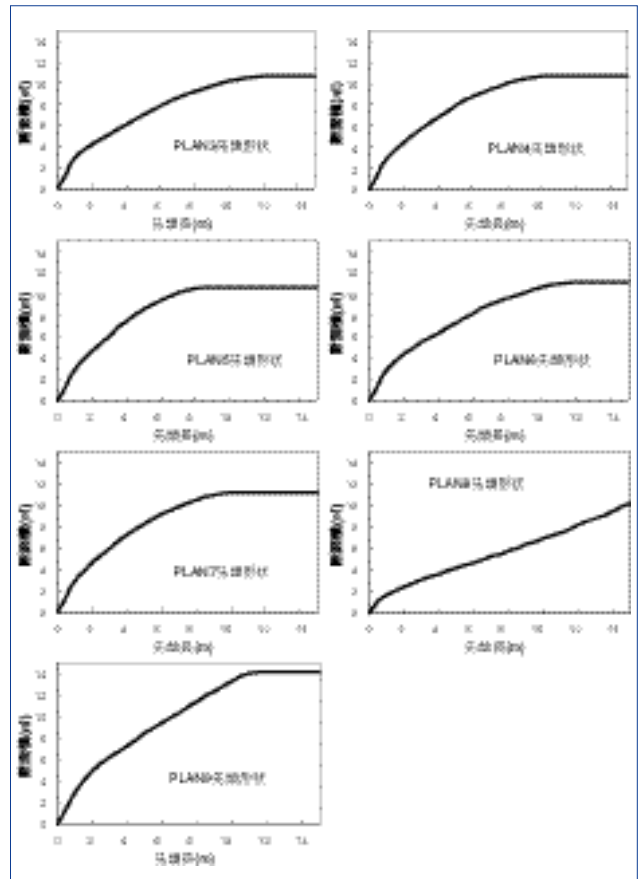


図10：PLAN3～PLAN9

表3：模型実験結果（その2）-1

	E2系 (km/h)	PLAN1 (km/h)	PLAN2 (km/h)	PLAN3 (km/h)	PLAN4 (km/h)	
緩衝工なし	275	313	330	308	296	
E2系最適開口部	10m	275	292	297	289	285
	17m	275	284	285	286	282
	25m	275	283	283	277	279
	30m	275	282	285	280	280
	PLAN5 (km/h)	PLAN6 (km/h)	PLAN7 (km/h)	PLAN8 (km/h)	PLAN9 (km/h)	
緩衝工なし	285	301	290	351	279	
E2系最適開口部	10m	285	279	281	301	249
	17m	285	278	281	283	249
	25m	281	275	278	283	249
	30m	284	277	276	282	248

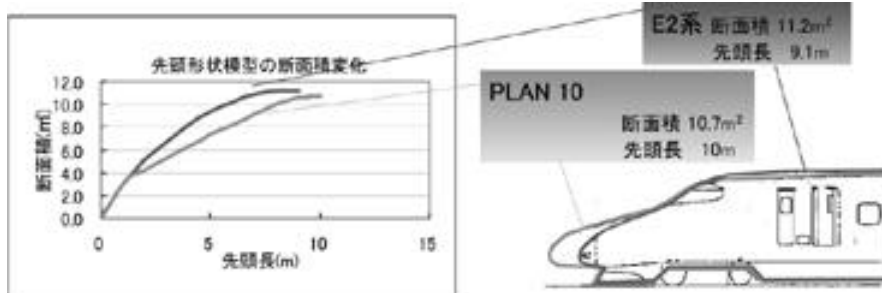


図11：PLAN 10



表4：模型実験結果（その2）-2

		E2系	Plan10	
		圧力勾配 (k Pa/s) 275km/h	圧力勾配 (k Pa/s) 300km/h	現状と同等 となる速度 (km/h)
緩衝工なし		736	701	305
E2系最速 開口部	10m	400	498	279
	17m	345	375	292
	25m	295	338	287
	30m	270	295	291

表5：緩衝工条件

No	緩衝工/トンネル 断面積比	緩衝工 長さm	開口部 面積m <sup>2</sup>
1	1.4	10	5.9
2	1.4	17	10.6
3	1.4	25	15.2
4	1.4	30	14.0

## 6 緩衝工のあるトンネルでのシュミレーション

これまで多種の先頭形状について模型実験を実施してきたが、いずれもE2系の275km/h走行時と同等の微気圧波となる速度が300km/hに達しなかった。

従来は、緩衝工のない場合のシミュレーション結果をもとに、緩衝工のあるトンネルでの性能を模型実験で検証するという手法をとっていたが、最近のスーパーコンピュータの性能向上により、緩衝工のある場合の流体数値シミュレーション（以下、CFDという。）が可能となってきたことから、軸対称CFD解析により、現行緩衝工において300km/h域の走行が可能となる先頭形状を効率的に開発することとした。

目標レベルは、E2系が320km/hで走行した場合、トンネル入口の圧力勾配最大値は275km/h走行時の約1.6倍となるので、トンネル入口の圧力勾配最大値約40%減（現行E2系比）とした。

### 6.1 軸対称CFD解析

#### (1) 解析条件

解析を行う際の、緩衝工条件、車両条件については下記の条件とした。

緩衝工条件は表5の4条件とした。

#### (2) 解析方法

基礎式：オイラー方程式（圧縮性非粘性流体）

解法：構造格子系の有限体積法によるTVD（Total Variational Diminishing）法

（3次精度MUSCL（Monotonically Ultimate Scheme based on Conservative Law）およびRoe近似）

時間積分：オイラーの陽的差分

#### (3) 評価指標

列車突入時のトンネル入口から60m地点における圧力勾配最大値とした。

### 6.2 緩衝工のモデル化



図13：二重円管モデル

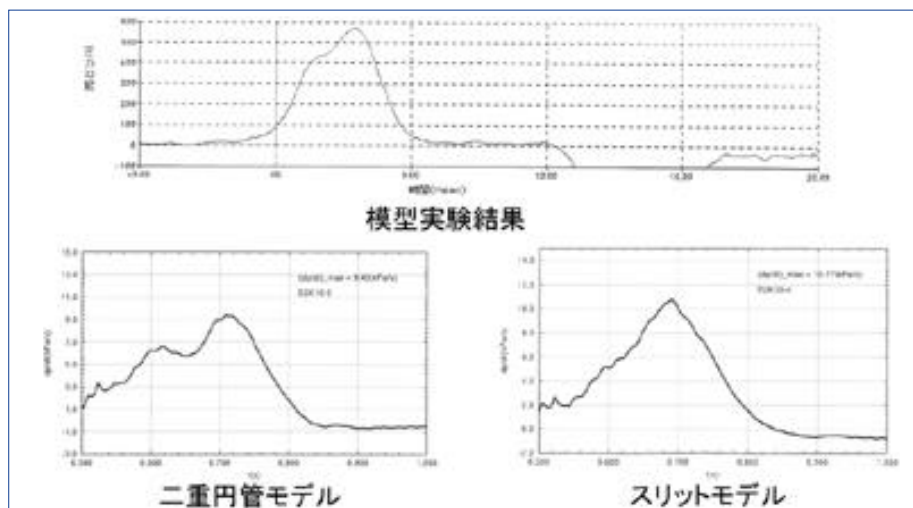


図14 模型実験結果と軸対象CFD解析結果（スリットモデルと二重円管モデル）の比較

軸対称CFD解析を行うためには、三次元構造を有する緩衝工のモデル化が非常に重要となる。開口部面積と同じ面積のスリットを全周にわたって設けたスリットモデルを使用し、模型実験結果と比較した結果、現象をうまく再現できないことがわかった。そこで新たに二重円管モデル(図13)を考案した。

これは緩衝工に相当する円管(内円管)の外側にもう一つ開口部幅をもつ円管(外円管)を設け、外円管と内円管の隙間が開口部面積に一致するようにしたものである。一部模型実験と若干差が見られるものの比較的良好一致が得られたので、この二重円管モデルを使用することにした。

一例として、10m緩衝工についての模型実験結果とスリットモデルおよび二重円管モデルを使用して軸対象CFD解析を行った結果を図14に示す。模型実験結果では2山からなる波形となっているが、スリットモデルでは1山の波形となりモデルとしては適切ではないことがわかった。一方、二重円管モデルでは2山の波形となり、現象を再現することができた。

### 6.3 先頭形状の最適化方法

車両の先頭形状を回転楕円体、回転放物体、円錐体の3つの基本的な形状(図15)とし、それぞれ緩衝工のないトンネルに突入した時の圧力勾配最大値は回転放物体が最も小さくなる<sup>(2)</sup>。また回転放物体の先端部分を切り

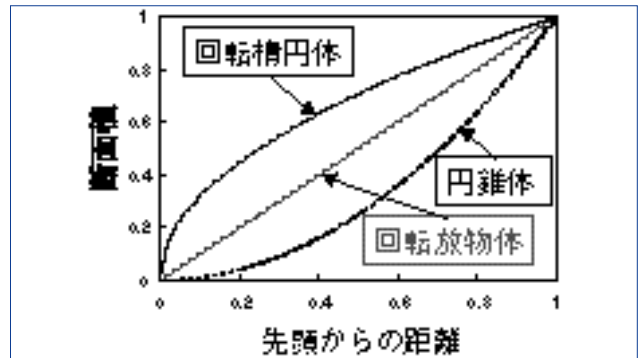


図15 3つの基本形状

取っても圧力勾配は変わらない<sup>(2)</sup>ことから、先頭形状は回転放物体の直線の変化を基本とした、2~4本の線の折れ線でない形状(以下、2段~4段の回転放物体という。)を用いて、先頭形状の最適化を行った。

例えば2段回転放物体では、第1段と第2段の接続点、すなわち2本の線の折れる位置の最適点を求めることに

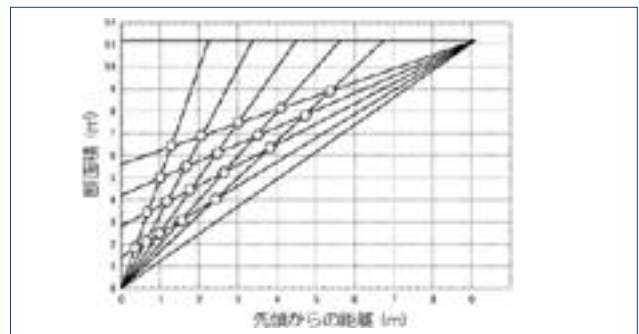


図16 : 2段回転放物体の接続点

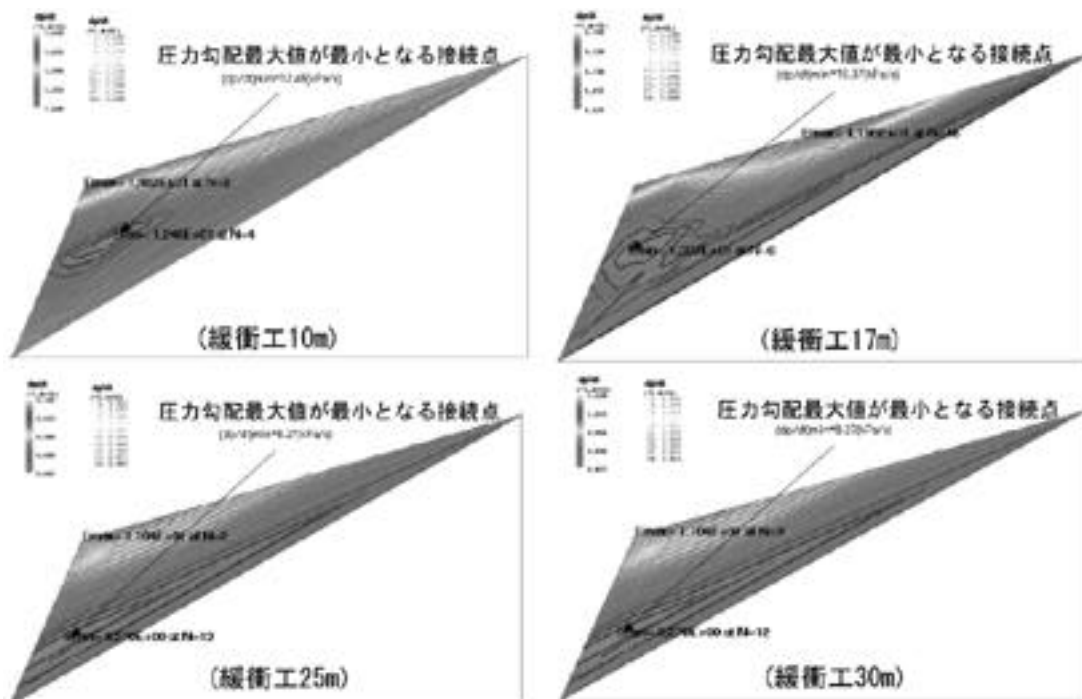


図17 : 2段回転放物体による断面面積変化の最適化(先頭長9.1mの場合)  
(圧力勾配最大値を等高線で表示)

なる。図16にパラメータスタディを行った接続点を示す。この20点、すなわち20通りの先頭形状について計算を行い、次に緩衝工条件を変更して、同様に計算した。緩衝工長さにより最適接続点が少しずつ異なる場合があるが、すべての緩衝工長さに対して平均的に良好なものを最適先頭形状とした。

### 6.4 解析結果

先頭長9.1mの2段回転放物体の解析結果を図17に示す。また先頭長9.1mの最適2段回転放物体及び最適4段回転放物体の断面積変化を図18に示す。最適2段回転放物体は先端から約2mより後ろの部分についてE2系断面を削った形になる。さらに4段回転放物体として最適化すると、2段回転放物体の場合よりも若干圧力勾配を低減できたので、先頭長9.1mの最適先頭形状はこの最適4段回転放物体とした。

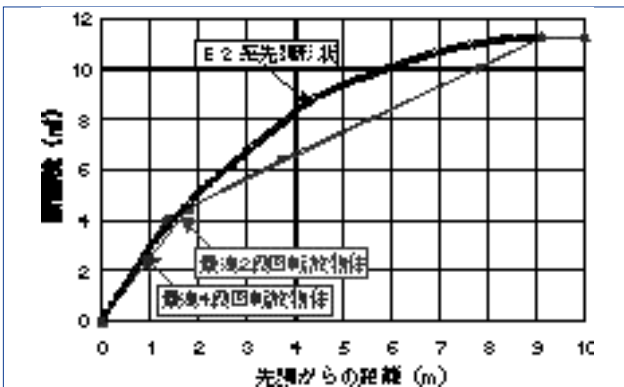


図18：先頭長9.1mの最適先頭形状

各先頭長別の最適先頭形状の断面積変化を図19に、また圧力勾配最大値を、E2系の値を100%として図20に示す。

その結果、先頭長9.1mではE2系に比べて圧力勾配を15%程度、先頭長13mとすると22%程度減らせることがわかったが、目標の40%減には先頭長16mとしても達しなかった。さらに先頭長を24mまで伸ばせば、30m緩衝工を除き、目標の40%程度減を達成できることがわかった。

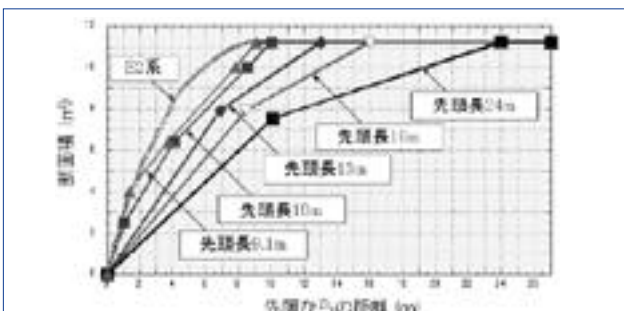


図19：各先頭長別最適形状

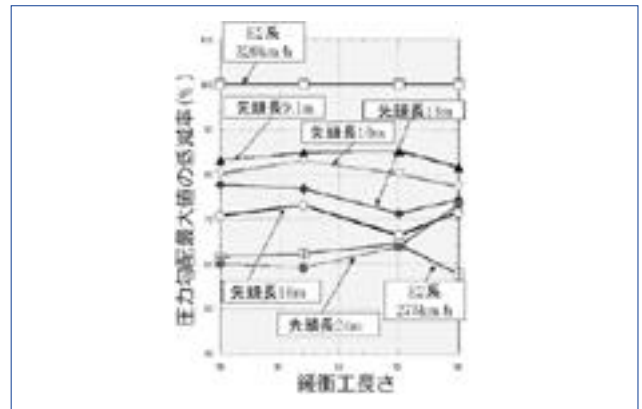


図20：各先頭長別最適形状の圧力勾配

### 6.5 軸対称CFD解析の結果

軸対称CFD解析により、以下のことがわかった。

- (1) E2系と同じ9.1m先頭長でも断面積変化を工夫することにより、E2系比15%程度微気圧波を低減することができる。E2系275km/hの微気圧波と同等となる速度は290km/h前後となる。
- (2) 先頭長を13mまで伸ばせば、E2系比20数%の低減効果が得られる。E2系275km/hの微気圧波と同等となる速度は300km/h前後となる。
- (3) 先頭長を24mまで伸ばせば、30m緩衝工を除き、E2系比40%減とすることができる。E2系275km/hの微気圧波と同等となる速度は320km/h前後となる。

## 7 今後の課題

軸対称CFD解析により、最適な断面積変化を求めることができたので、今後は、この断面積変化を満たし、かつ運転席の構成等を考慮に入れて、3次元先頭形状を開発することが必要である。

さらに今後の高速化のためには入口側対策である先頭形状、緩衝工および圧縮波伝播過程での対策等の最善の組み合わせを考えていく必要がある。

### 参考文献

- (1) 飯田他 4 名, 日本機械学会論文集, 62巻596号, B編 (1996), 148-155.
- (2) Maeda, T. et al., Proceedings of the International Conference on Speedup Technology for Railway and Maglev Vehicles, (1993), 315-319.
- (3) 吉江, 鉄道車両と技術, Vol.2-5 No.10, (1996), 3-8