

新幹線電車の概要と気密方式

Air Tight Sealing System and the Outline of the Electric Car
for the JNR's New Tokaido Line

藤岡多喜男*
Takio Fujioka

内 容 梗 概

東海道新幹線の建設に当たり、車両は高速でかつ安全な運転を行なうため、試作車が作られ、モデル線区においてその性能を確認し、量産に移す計画が進められた。

試運転の結果、初期の目的を果たすに十分な性能を出し得ることが確認されたが、トンネル通過時の気圧変動が乗客に不快感を与えるので、量産車においてはこれをなくすための対策として気密構造の車体設計が行なわれ、快適な高速安全運転ができる車両にまとめる努力が払われた。本稿では気密のための各部の構造、必要な設備、関連した車体の強度についての検討結果を述べている。

1. 緒 言

昭和39年10月開通を目標に、東海道新幹線の建設は着々と進められている。なかでも、世界に例を見ない200 km/hの高速営業運転を行なう車両については、昭和37年に試作車2編成を製作し、鴨宮基地に建設されたモデル線区においてあらゆる性能試験が行なわれ、量産設計に対する基礎がかためられてきた。

試験の結果、高速運転における性能は十分満足され、乗心地もよく、営業運転用として量産に移すことも容易なことが明らかになった。ただトンネル通過時気圧の変動が大きく、これが乗客の鼓膜に作用して耳が痛くなる現象があらわれ、この対策が大きな問題となった。

この結果、車体を気密構造にし、気圧の変動に対しても車内の気圧を一定に保つような方式とし、これに必要な新しい機構が取り入れられた。しかも十分な強さと、建設条件である軸重15 tに納めるため、試作車製作時以上の各種試験を行ない、量産車として十分な機能を持つ新幹線旅客電車が設計製作された。

以下この電車の気密方式ならびにこれに関連した車体強度について述べる。

2. 車体台車一般

東海道新幹線量産車の仕様は第83頁の第1表に示すとおりである。

量産車の車体は試作車の仕様の基本となっているが、前述のように、気密方式と軽量化のため各所に改善検討がなされている。第1図は編成列車の全景である。

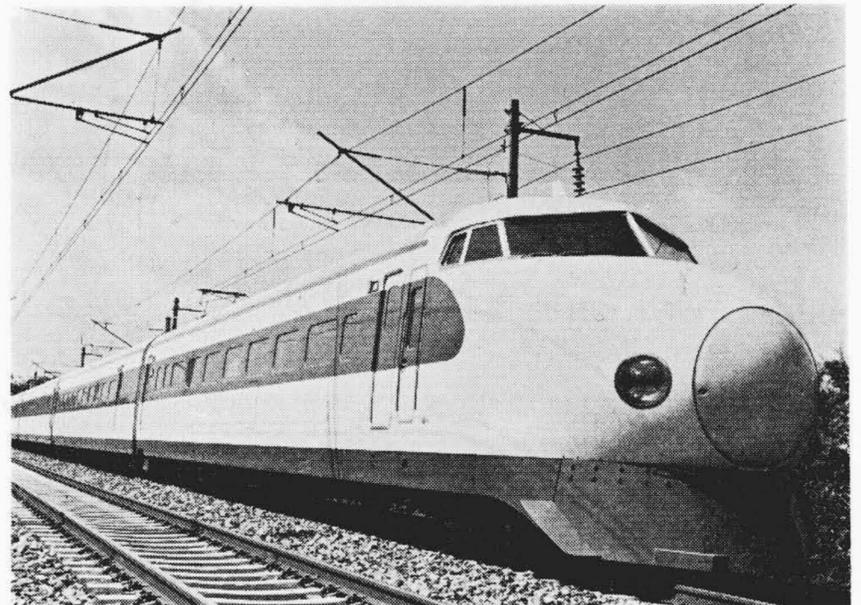
鋼体の材料には耐候性鋼板を使用し、後述のように気密のための強度の検討や荷重試験を行なって高速運転に対する安全確保に努力が払われた。

床は新しい構想として、1 mm厚耐候性鋼板のキーストンの上に木根太を置き、この上に10 mm厚の防腐処理耐水合板をはり、その間に硬質ポリウレタンフォームを全面に注入し、防音防熱とともに床構造物として利用した軽量構造としてある。床の表面は従来どおり塩化ビニル床張材で仕上げているが、1等車の床には通路に絨毯(じゅうたん)をはってある。

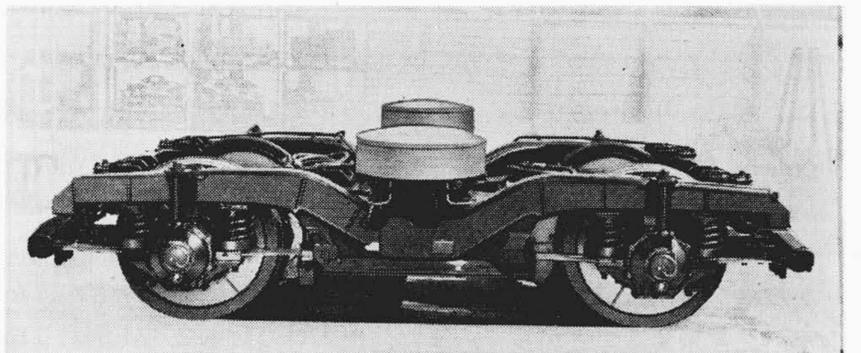
1等車には左右それぞれ2人掛のリクライニングシートを設け、2等車は海側が3人掛、山側が2人掛の転換式腰掛とし、進行方向に向きを統一して使用することができる。

窓には複層ガラス(外面5 mm厚熱線吸収普通ガラス、内面6 mm

* 日立製作所笠戸工場



第1図 編成列車



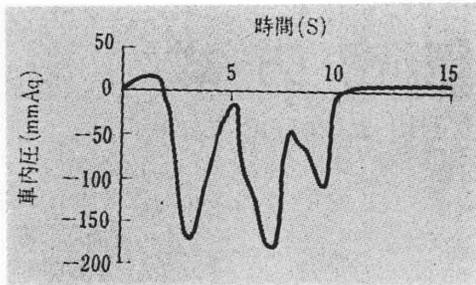
第2図 二軸ボギー空気バネ台車

厚普通強化ガラス)を使用し、横引式のカーテンを取り付け、1等車の場合にはさらにレースカーテンを併用している。

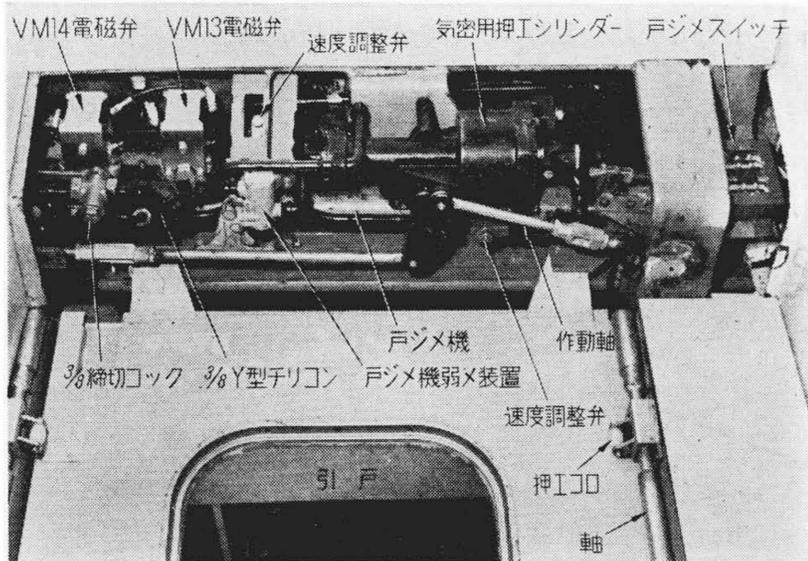
奇数車には便所、洗面所の設備がある。大便所は2室あり7号車の場合には1室を洋式としてある。大便所と向かい合って小便所が1室、その隣に2組の洗面所設備があり、三面鏡も設けてある。また出入台の所に冷水器を設け、いつでも冷たい水を飲むことができる。偶数車にはこれらの設備がなく、乗務員室、荷物保管室、車内販売準備室などがあり、2両で便利に使用できるように配置されている。

これらのほか非常の場合、車外への脱出のため車体中央付近に非常口が設けられている。

床下の機器はほとんどユニットにまとめられ、この機器取付位置に台わく横はりを配置してあるので特別な取付金がない。また配線のためスカートの内側に電線だなが設けられているので非常にスッ



第3図 車内気圧変動の例



第4図 引戸の気密構造

キリとまとめられており、各機器の点検も便利のようにぎ装されている。

台車は一体プレスわくにダイヤフラム形の空気バネを組み合わせ、独特な軸箱支持装置を採用した軽量にして、高速運転に適した構造に設計されている。第2図は台車の外形を示す。

3. 気密方式

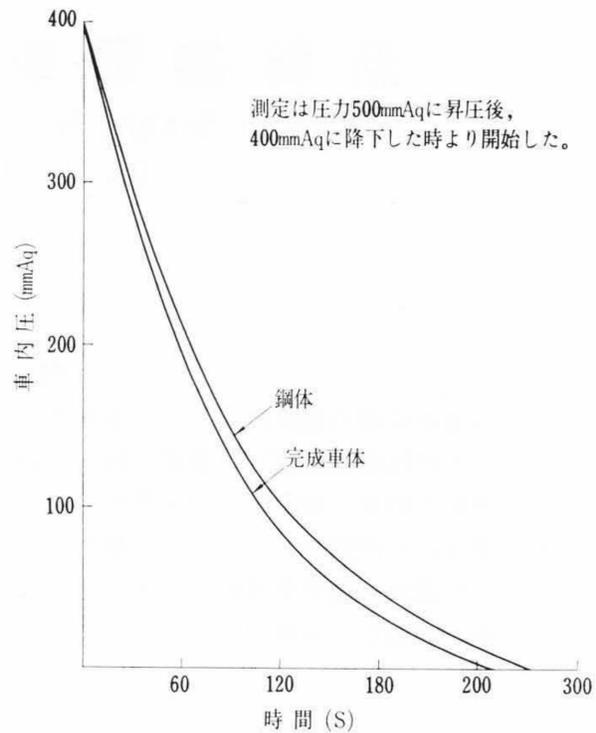
試作車における試運転の結果、トンネル通過時車内の気圧の変動は第3図⁽¹⁾のように、トンネル突入時正圧となり、列車の進行に従って負圧の変動が繰り返されて来る。この圧力変化が鼓膜に作用して痛く感じるのである。したがって車体内部の気圧を一定に保つことによって、耳を保護することができるがその方法として、次の状態が考えられる。

- (1) 車内に圧力空気を送り込む。
- (2) 車内の空気を外へ出さない。

しかしながら、鉄道車両は多数の車を連結して運転し、乗客がほかの車へ行き来することが多く、また、出入口の数も2~4個あり出入口の回りから車体の内外は通じているのが通常の構造である。特にこの車には空気調和装置を設けているので、新鮮な空気は空気調和ユニットを通じて換気するのが通例であり、1両の車においても車内の空気を一定に保つことは困難である。したがって抜ける空気だけ補給することが考えられるが、第3図からわかるように、気圧の変動は普通の場合 -200 mmAq となり、これに必要な空気量は車体の体積 (長さ 20×幅 3.2×高さ 2.2 m=140.8 m³) の2% すなわち 2.8 m³ に相当し、しかもトンネル通過時短時間に数回変動するのでこれに追従して補給するためには、相当な空気量を要し、これを気圧に応じて制御する方式にしなければならない。

検討の結果外部から空気を補給することはその制御方式に困難がある。車体を気密構造にして車内の空気を外へ出さない方式について検討してみると、車体の内外が通じている部分は

- (1) 鋼体においては骨組と外板の合わせ目のすき間
- (2) 側出入口戸、貫通仕切戸回りの車体とのすき間
- (3) 空気調和ユニットによる換気



第5図 車体気密試験結果

(4) 便所、洗面所の排泄口および換気口

(5) 配線、配管工事の車内外貫通部

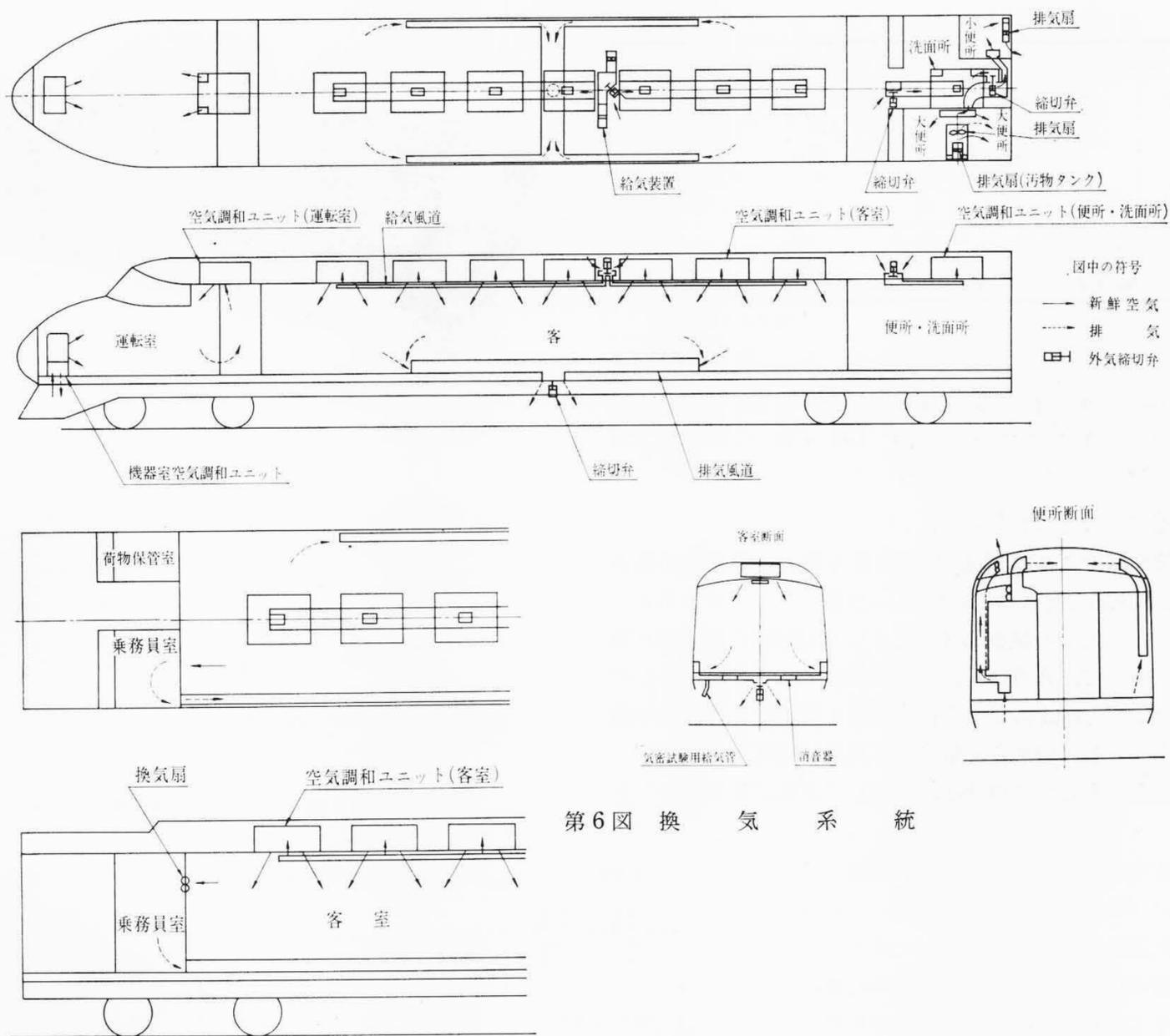
などがあげられる。このうち(1)および(5)は作業時すき間を詰めることによって気密にすることが可能であるが、そのほかの内容については根本的に構造上の検討が必要である。側出入口戸、貫通仕切戸などはほとんど引戸構造であるが、引戸と車体との間にはすき間が必要で、この間から空気がもれることになる。そのために戸が閉った場合、さらにこれを車体に押付けてすき間をなくす方式が検討され、第4図に示す構造が生れた。これは戸ジメ機械によって作動する側出入口はもちろん、手で開閉する仕切戸、貫通戸、便所戸にも用い、戸が閉ったとき別に作用する空気シリンダによって戸を押し付けるもので、十分に気密を守るとともに容易に開閉できる構造である。

換気については(後述)空気調和ユニットによって自動的に外気を取り入れ、室内の空気とともに温度調節して車内に送り込んでいるが、1両平均10台の空気調和ユニットの換気口を制御することは確実度において問題があり、空気調和ユニットとは別に換気して車内の空気を新鮮に保つ方式がとられている。

ここにおいて車体を気密にし、車内の空気を外へ出さないで一定の圧力に保つことの可能性を確認することができた。第5図は車体の気密試験の結果で、各車ごとに気密試験を実施し各部の機能が確認されている。

4. 換気装置

車内の空気を常に新鮮に保つため試作車においては空気調和ユニットを通じて車外の空気を取り入れて換気していたが、この通路は気圧の変動を容易に伝えるため出入口を制御する必要がある。すなわち、トンネルにはいる直前車外に通じた換気口を閉じることによって車内と車外を遮断し、気圧の変動から車内を守る方式である。このため空気調和ユニットは単なる空気調和だけに使用し、換気については全く別の系統を作り、給気用の送風機によって新鮮な外気を取り入れ、これを空気調和ユニットの吸込口に送気して車内の空気とともに熱交換を行なって客室へ吹き出すようにし、汚染した車内の空気は床下へ排出するものである。吸気口と排気口をそれぞれ1個ずつとし、トンネルにはいる直前に閉じ通過後開く装置としてある。第6図は換気の系統を示し、第7図は屋根上に設けられた給気装置と空気調和ユニットへの風道を示している。



第6図 換気系統

4.1 給気装置

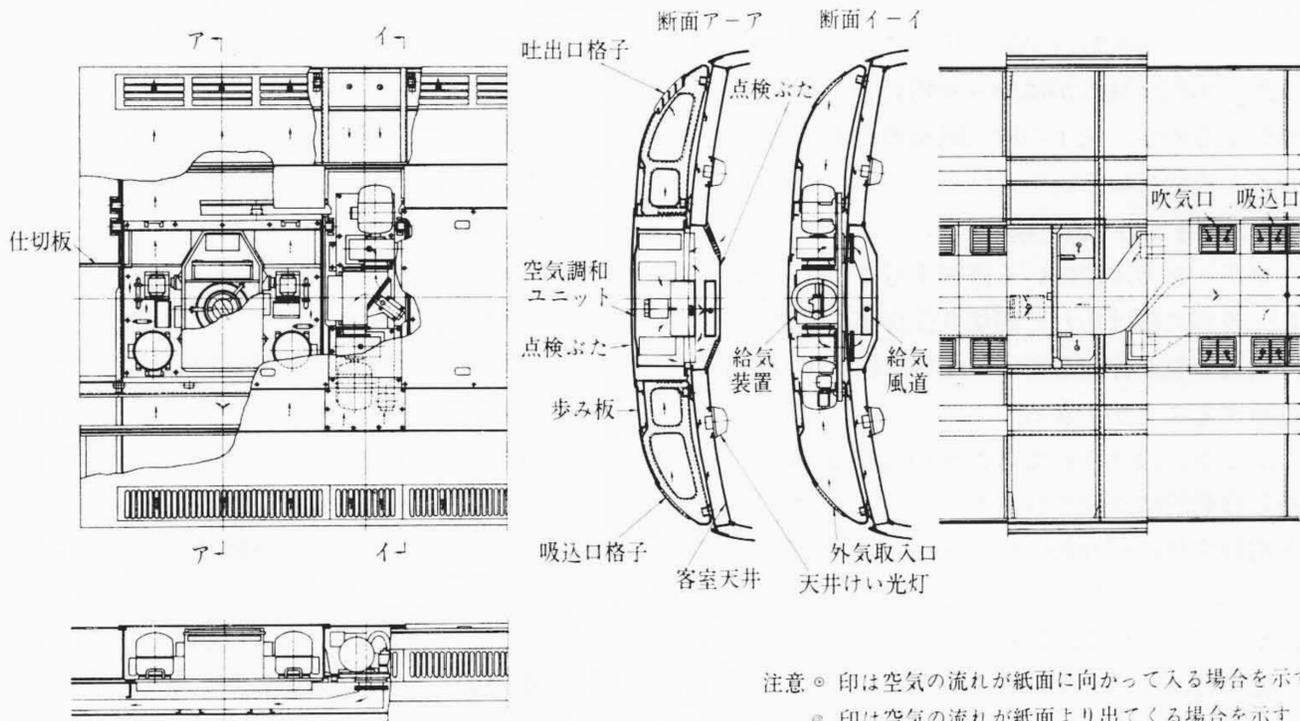
車両の構造上給気用の送風機は上屋根の中に設けるのが適当で、空気調和ユニットを設けた間で車体の中央付近に設けることにした。しかし上屋根の間は寸法的に制限があるので、これに納まって十分な換気量を持った送風機が必要である。

乗客定員は車種ごとに異なるが、乗客1人当たりの換気量 $20\text{ m}^3/\text{h}$ を目標にして同一換気装置で互換性あるように計画した。寸法の制限上小形の送風機が必要で $16\text{ m}^3/\text{min}$ の送風機2台を組み合わせ第1表のように風量を決めた。なおトンネルの全長が運転距離の約13%あるので、実際の換気量はその約87%と考える。

一方、換気系統から全風道の損失は 50 mmAq で、開閉制御しても送風機は運転したまま使用することにした。第2表は決定した多翼形送風機の仕様である。これらの条件、仕様をまとめ第8図のように空気の入入口を1個所にして縮切弁を取り付け、その両側に送風機、電動機を一つのユニットにまとめた給気装置が屋根上に取り付けられた。

4.2 換気風道

換気風道は送風機から車内にはいり、天井の中を車体の前後にとおり空気調和ユニットの下部付近に開口して外気を吹き出すが、一



第7図 給気装置と空気調和ユニット

第1表 車種別換気量

車種(号車)	1	2, 10	3, 11	4, 6	5, 9	7	8	12
定員(人)	75	100	100	110	40	64	68	80
換気量(m^3/min)	32	32	32	32	16 (他に食堂16)	32	32	32
1人当たり換気量(m^3/h)	25.6	19.2	19.2	17.4	24.0	30.0	28.2	24.0

つの風道で空気調和ユニットの3~5個に送気する、したがって各吹出口の風量をできるだけ均一にして車内の換気を一様に行なうた

第2表 給気装置仕様

多翼形送風機			電 動 機		
形 式	POS-MH		形 式	MH1043	
風 量	16 m ³ /min		電 圧	220V	
風 圧	50 mmAq		周 波 数	60~	
回 転 数	3,510 rpm		回 転 数	3,510 rpm	
温 度	20℃		出 力	0.75 kW	

第3表 吹出口の平均風速

吹 出 口	吹出口5個の場合					吹出口4個の場合			
	①	②	③	④	⑤	①	②	③	④
BCの長さ(mm)	60	45	40	30	70	60	50	40	70
測定点の平均風速(m/s)	1.17	1.17	1.28	1.11	1.23	1.16	1.33	1.40	1.51

め案内板を固定することにした。

実験のため第9図のような風道と案内板を作り、吹出口に高さ600mmの測定用風道を付け、図のように分割してアネモマスターで風速を測定した。風量の調整は図のような一定形状の案内板と風道の取り付けにおいて、A点は常に風道に接するようにし、BCの長さを変化させることによって案内板の傾斜を調整した。測定の結果は第3表に示すとおりである。量産する風道には風速がほぼ均一したBCの長さを選定し、この寸法に固定して車体に組み込むことにした。

排気風道は客室床面の車側寄に設け、車端から2~3窓部付近(車長の1/4程度の位置)に開口して車体中央付近に導き、床を貫通して床下へ抜け、台わくの横はり間を風道にして車体中心線部に排気口を設けている。この排気口にも締切弁が設けられ給気口と同時に開閉するようになっている。

排気口は常時騒音の多い床下に開いていて、ここから車内へ騒音がはいり車内騒音を高くする恐れがあるので、床下の排気風道の途中で風の損失が少ない構造の消音器を設けている。

4.3 締切機構

車がトンネルにはいる直前1号車により地上の信号を受けて増幅し、各車に設けられた締切弁操作用の電磁弁を励磁すると各締切弁に圧力空気が作用していっせいに給排気口を閉めて、外気と車内を遮断することができる。

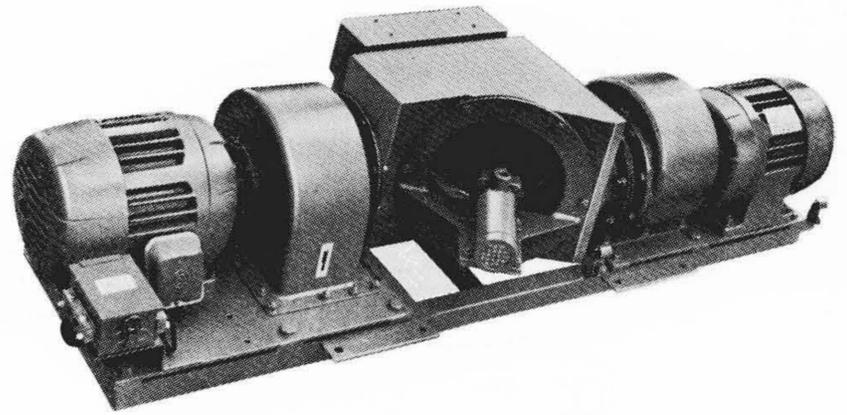
1号車に設けられた外気締切制御装置は信号を受けると60秒保持し自動的に積放されるので、トンネルの長さに応じて地上子の数を増設すれば積放前に再び保持されることになる。これは締切弁「入」と「切」の信号を作用させるよりも確実な方式として採用されたものである。第10図は作用電気回路を示す。

締切弁は圧力空気によって給排気口を閉じるもので第11図のように空気シリンダの端部に弁が固定され、型ゴムで作った弁座に押し付けて気密を保つようになっている。電磁弁が無励磁になるとシリンダの空気が排出され、弁とシリンダの間に設けたパネによって弁は開放されるものである。弁は耐久試験、低温試験の結果機能に支障ないことが確認されている。

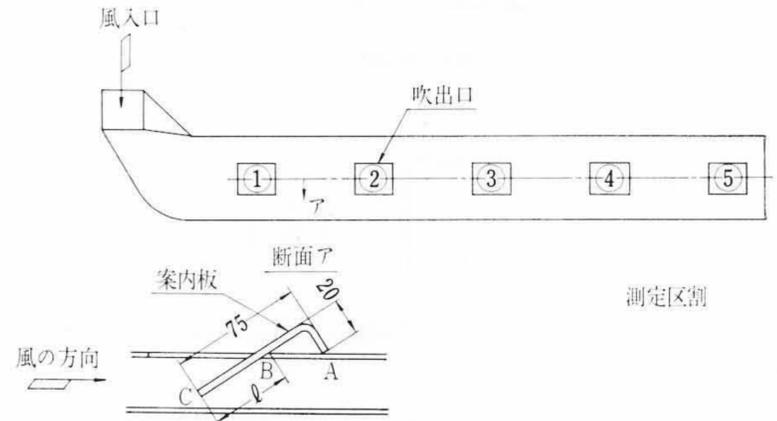
この締切弁は給気装置に組み合わせて使用されるほか、床下の排気口や便所部分の給排気口などに単独に取り付け、信号により締切作用を行なうように利用されている。

5. 車体強度

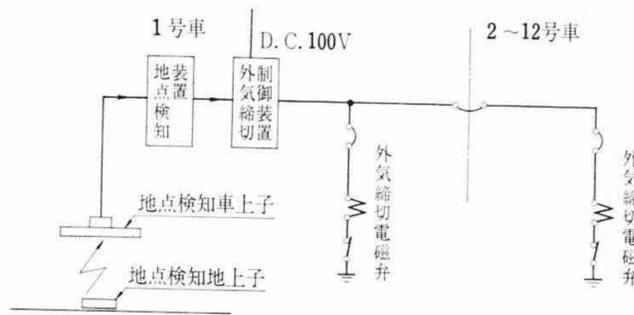
車体を気密にすることにより車内を一定の気圧に保つことが可能になったが、気圧の変動はそのまま車体に圧力として作用すること



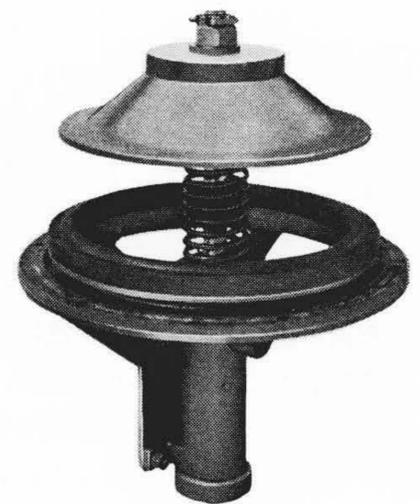
第8図 給気装置



第9図 給気風道の測定要領



第10図 締切作用電気回路



第11図 締切弁

になる。特に鋼体の側構はもちろん屋根、床にいたるまで圧力の影響を受け、これまでは垂直荷重および車端圧縮荷重に対する強度を満足すれば十分であった鋼体に対し、圧力容器と同じ条件が必要になった。

トンネル内の圧力変化は第3図のように負圧が繰り返されるが、モデル線区での試験の結果から長い列車の場合を推定し、設計の条件として16両編成で(+)250 mmAq, (-)450 mmAqであることが決定された。これに対して幾分の漏れを考慮しても300~400 mmAqの圧力に対し十分な強さの鋼体が保証されなければならない。

5.1 外板の強さ

側板には1.6mm厚、屋根板には1.2mm厚の耐候性鋼板が使用されているが、骨組との溶接には主としてスポット溶接が採用され、部分的に栓溶接が使用されている。したがって柱やたる木間にはられた板の溶接部は自由支持と考えて、応力ならびにたわみを検討してみる。

平面板の応力は一般に次式で求められる(屋根は半径6,500mmの曲面となっているが、一応平面として計算する)。

$$\sigma = \alpha \frac{p_0}{t^2} \left(\frac{b}{2} \right)^2 \dots \dots \dots (1)^{(2)}$$

また、たわみは次式で求められる。

$$\delta = \beta \frac{p_0}{Et^3} \left(\frac{b}{2}\right)^4 \dots\dots\dots (2)^{(2)}$$

ここに p_0 : 圧力
 t : 板厚
 a : 平面板の長辺
 b : 平面板の短辺
 α, β : 長短比により決まる常数

a/b	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	∞
α	1.231	1.596	1.817	1.960	1.990	2.000
β	0.221	0.318	0.384	0.422	0.443	0.454

計算の結果 400 mmAq の圧力の場合 20 kg/mm² の応力以内に納めるには 1.2 mm 厚の板では短辺 380 mm 以下の長方形か、一辺 480 mm 以下の正方形にささえるように骨組または補強を入れれば十分である。したがってこの値を目安として骨組の組み合わせを具体的に検討した。

5.2 骨組の強さ

側構においては窓の間に通された2本の柱と、屋根構においては空気調和ユニットを取り付ける開口部間に通されたたる木が長けたに溶接されてわくを構成し、外板に受けた圧力をささえることになる。

ここで鋼体の骨組である側柱、たる木、横はりでつくられる第12図のような中空断面に分布荷重 p が働く場合を考える。

部材の断面積を A 、断面二次モーメントを I とし、それぞれ添字 1, 2, 3 をつける。各剛節点で切離して第13図のような軸力、せん断力、曲げモーメントを導入すると、1, 2 節点の曲げモーメントは部材端の回転角が相接する部材相互で等しいという条件から次式のように求められる。

$$\left. \begin{aligned} M_1 &= mp \frac{a^2}{12} \\ M_2 &= np \frac{a^2}{12} \end{aligned} \right\} \text{ここに } \left. \begin{aligned} m &= \frac{\alpha^2 + k_1}{1 + k_1} \\ n &= \frac{\alpha^2 + k_2}{1 + k_2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ただし部材の剛度 K を

$$K_1 = \frac{EI_1}{a}, K_2 = \frac{EI_2}{b}, K_3 = \frac{EI_3}{b} \dots\dots\dots (4)$$

で定義し、かつ

$$\alpha = \frac{b}{a}, k_1 = \frac{K_2}{K_1}, k_2 = \frac{K_3}{K_1} \dots\dots\dots (5)$$

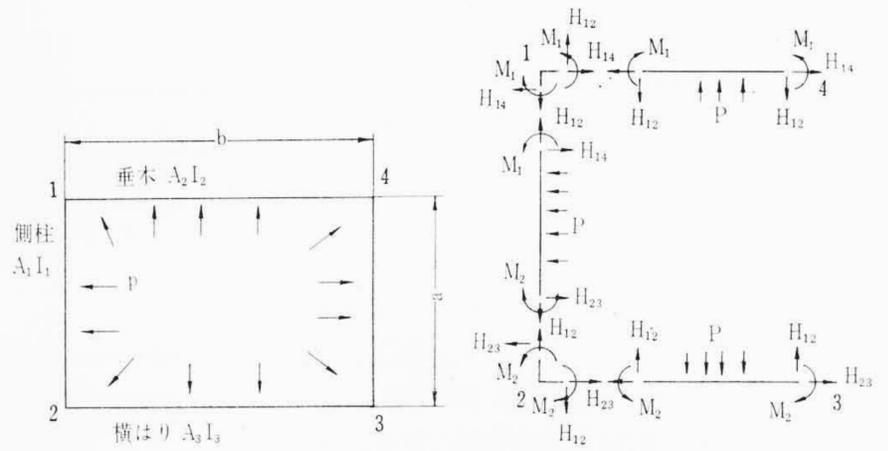
とおく。本鋼体において

$$I_1 = 73.9 \text{ cm}^4, I_2 = 55.7 \text{ cm}^4, I_3 = 2,158 \text{ cm}^4$$

$$a = 238 \text{ cm}, b = 322 \text{ cm}$$

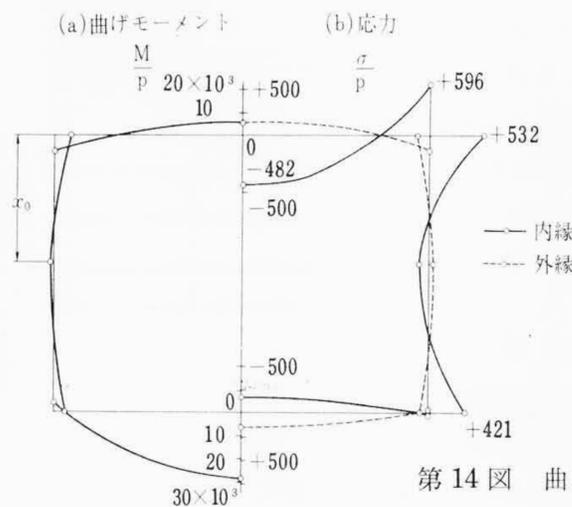
として、(3)式より曲げモーメント分布および応力分布を計算すると第14図のようになる。

分布荷重 p は、骨組のピッチ l 、内圧 p_0 とするとき、 $p = p_0 l$ とおくことはできない。なぜならば屋根に例をとると第15図において、屋根板 AB, CD に垂直に使用する内圧 p_0 は、たる木 AB, CD と長たけ BC, AD に分担され、後者の分担荷重は側柱の軸力となってたる木の曲げモーメントに寄与しないからである。そこで A, B, C, D 点で単純支持されたとしたとき、両者の分担率をたる木と長けたの剛度の比によるものと簡単に仮定すると、たる木の分担荷重は

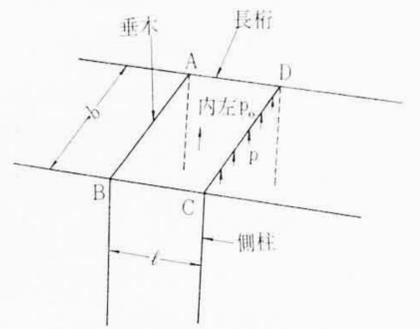


第12図 部材の基本組合せ

第13図 各節点のつり合い



第14図 曲げモーメントおよび応力の分布



第15図 垂木の荷重分布の説明

$$p = \frac{p_0 l \frac{I_2}{b}}{\frac{I_2}{b} + \frac{I'}{l}} \dots\dots\dots (6)$$

ここに I' : 長けたの断面二次モーメント

本鋼体について数値計算* すると $p = 0.49 p_0 l$ となる。側柱、横はりについても同様な考え方で求めることができ*、それぞれ $0.46 p_0 l$, $0.51 p_0 l$ となる。したがって、計算を簡単にするために第12図のように、これら3部材の分布荷重は等しく、 $p \cong 0.5 p_0 l$ として計算して差しつかえない。

最大応力は第14図(b)からわかるようにたる木および側柱の長けた結合端に生じ、鋼体に作用する内圧を前述の検討より最大 400 mmAq とすれば、 $p_0 = 0.04 \text{ kg/cm}^2$ であるから

$$p = 0.5 p_0 l = 3.8 \text{ kg/cm}$$

$$\sigma_{\max} = 596 p = 22.6 \text{ kg/mm}^2$$

となり、片振繰返し応力として働く。割合に高い応力値であるが、実際の構造はさらに複雑で荷重の変化も認められるので、この計算結果から実物試験を行なってその詳細を確認する必要があることを認めた。

5.3 気圧試験

国鉄浜松工場において試験鋼体を改造し、圧力試験が行なわれ、具体的に各部の応力が測定され、気密鋼体の実現に対する確信を固めた。

また完成した気密鋼体について直接気圧を加え、各部材の応力を測定した。第16図は各部の応力測定点を示している。第4表はその応力値を示したものである。

測定の結果、たる木中央部は前項の計算結果に近い値を得ている

* たる木の分担荷重の算出において、長けたは $I' = 35 \text{ cm}^4$ である。側柱の分担荷重の算出には、簡単のために長けた (28 cm^4) と側はり (110 cm^4) の平均値おおい $I' = 69 \text{ cm}^4$ とした。横はりの算出では、側はりは $I' = 1,213 \text{ cm}^4$ である。なお、いずれの場合も $l = 190 \text{ cm}$ である。

が、長けたと結合されたたる木、側柱においてはこれらが直接結合されていないためか、または空気調和ユニット部の短いたる木があるため計算よりこの付近の応力はいくらか低くなっている。また短いたる木の結合部には高い応力が生じているので必要個所に補強を追加した。

しかし、部分的にはまだ高い応力の点が認められ、この部分が気圧の変動により繰返し荷重として作用するのであるから第 17 図のように、たる木と柱の組合せ部分を別に作り、気圧試験の場合に生じた高い応力の部分に、これに近い応力を与えて疲労試験を行なった。第 18 図はその結果を示したものである。

車体が受ける圧力の繰返しは一応次のように考えることができる。すなわち、東京、大阪間 515.3 km のうちトンネルは 66 箇所あるが、気圧変動があると考えられる 300m 以上のトンネルは 38 箇所である。これまでの試験の結果から一つのトンネルにおける圧力変動の平均回数を 3 回と仮定すれば

$$\begin{aligned} & (\text{圧力変動}) 3 \times (\text{トンネル数}) 38 \\ & \times (1 \text{ 日 } 1.5 \text{ 往復}) 3 \times (1 \text{ 年間稼動日数}) 300 \times (\text{耐用年数}) 10 = 1.02 \times 10^6 \end{aligned}$$

となる。すれ違いのときは普通るときより圧力変化は大きくなるがその回数が少なく、しかも少ない機会でもトンネルの中央付近ですれ違うときのほかは普通の場合と変わらないので第 18 図の結果からこの車体の耐用年数に対しては十分な疲労強度を持っていることが確認できた。

6. 結 言

車両の構造を気密にするということは、これまで全く考えられなかったことであり、実施に当たっては予想しない幾多の問題に出会った。

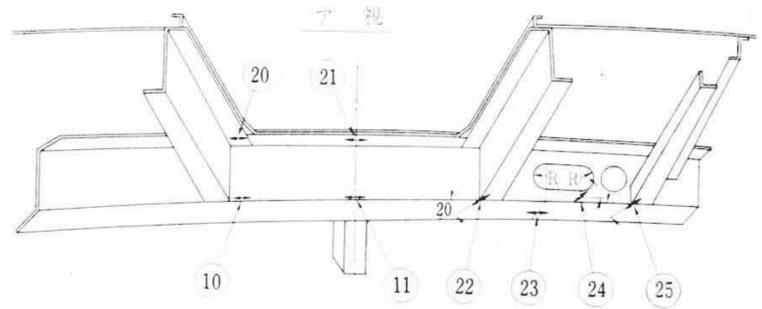
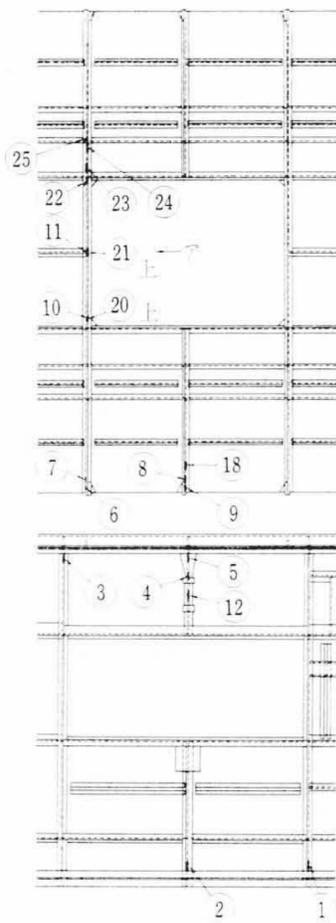
簡単に気密構造と片付けるにはあまりにも車体にはすき間が多いことである。簡単に見れば鋼板で張られた鋼体にはほとんどすき間がないようであるが、気密試験の結果では連続溶接を行なわない限り、そこにはすき間があり、空気の流通は容易であった。しかし、鋼体のすべりを連続溶接にすることは製作上難点があったが、極力これを実施し、不可能な所にはシール材を充てんすることによってこれを解決した。

通路の操作は常に一般乗客用として任意に開閉できて、しかも気密にするため新たに空気シリンダを設けて、押し付けても操作に不便を感じないものにした。

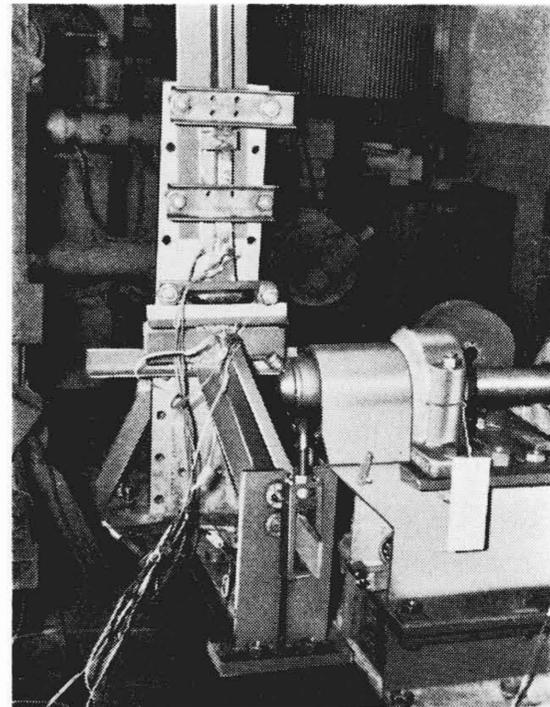
これらにもまして、車体内外を貫通している電線、配管は多数にのぼり、特に電線の束を気密にする必要が生じ、シール材の選定に

第 4 表 気密試験応力測定値
気圧 400 mmAq (単位 kg/mm²)

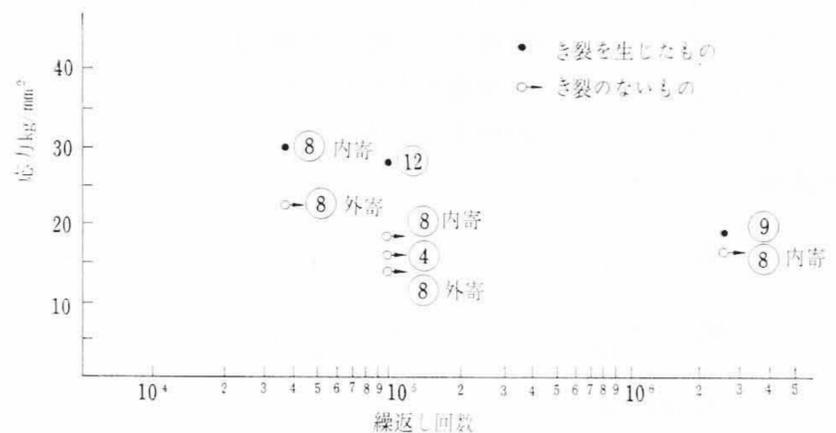
測点	補強前の応力	補強後の応力	測点	補強前の応力	補強後の応力
1	0.3	6.2	11	-14.7	-14.3
2	11.4	0.3	12	20.2	2.9
3	12.2	—	18	—	13.2
4	19.5	7.8	20	—	3.8
5	11.7	—	21	—	8.3
6	5.6	—	22	—	-14.3
7	3.9	—	23	—	-18.4
8	18.2	5.6	24	—	-12.9
9	20.8	14.7	25	—	-9.9
10	-18.3	-14.7			



第 16 図 気密試験応力測定



第 17 図 疲 勞 試 験



第 18 図 疲 勞 試 験 応 力 値

も慎重な試験が行なわれた。

かくて気密車体に対する換気、車体強度など旅客輸送のための機能を十分に満足させるための検討が行なわれ、新幹線旅客電車をまとめることができたのである。

この電車の設計製作に当たって、絶大なるご指導を賜った日本国有鉄道臨時車輛設計事務所の各位、ならびに試験、測定にご指導を賜った鉄道技術研究所の各位に深甚の謝意を表すものである。

また、新幹線旅客電車の受注製作に当たり、その推進に力を惜しまず、一致協力して完成に努力された東海道新幹線電車製作連合体の各車両会社に敬意を表する次第である。

なお、車体強度に関しては日立製作所笠戸工場飯島博士の、また疲労試験については同渡辺博士、蒲原氏のご指導とご協力を得た。ここに厚くお礼申し上げる。

参 考 文 献

- (1) 川本：機学誌 67, 27 (昭 39-1)
- (2) 日本機械学会：機械工学便覧 (昭 26 年版) 4-82