

鉄道車両における車体軽量化設計の実際

—主として新幹線電車の車体について—

松 田 和 夫*
Kazuo MATSUDA

Key Words: Railway, Transport Vehicles, Car Body, Light Weight Structure

1. はしがき

石油危機に端を発した世界的なエネルギー問題は、石油の不安定な供給状態とコスト高により省エネルギー時代を迎えた。鉄道車両の分野においても省エネルギーの観点から種々見直しがなされ、実行に移されつつある。車体軽量化もその一つである。しかし、軽量化設計思想は今に始まったことではない。高速化、高性能化をはかるため、また、輸送能率を上げるため、過去においてもこの種の努力を積み重ねてきている。

ここでは、新幹線電車の車体を主な例にひきながら、その設計初期から現在にいたるまでの軽量化設計の実際面を述べる。

2. 鉄道車両軽量化の変遷

鉄道車両の軽量化を設計思想として採り上げる考え方は、今から50年ほど前、すなわち、1930年代にヨーロッパの鉄道、特にスイス国鉄において始まったようである⁽¹⁾。スイス国鉄の場合、同鉄道がこう配線区を多くもっていることから、機関車のけん引能力と客車の走行抵抗⁽²⁾の関係で、客車の軽量化に着目していたものとみられる。

日本では、昭和26年(1951年)ごろから、軽量化構造の計画が進められた。このころ、構造試験になくてはならない抵抗線ひずみ計が開発されたので、このひずみ計により、実験的に構造各部の応力を調べながら軽量化を進めてゆく道がひらけてきた。また、これと平行して、鉄道車両の車体構造計算法の研究が進み^{(3)~(6)}、さらに最近では、

計算技術の飛躍的發展により、計算の高速化とともに、より深度化した構造解析⁽⁷⁾⁽⁸⁾が行える時代を迎えた。このような軽量化設計への努力は、まず、昭和30年(1955年)前後から、初期の軽量化車となってつぎつぎと実用にはいった。国鉄においては、軽量化客車(ナハ10形、定員88名、長さ20m、自重23t)を製作し、それまでの標準客車(スハ43形、定員88名、長さ20m、自重33.5t)より10tの軽量化効果を上げ、以後、旅客用車両の車体については軽量化構造で進む方針を決定した。

その後、車体軽量化をさらに進める手段の一つとして、アルミニウム合金の車体構造への応用が平行して進められた。

ヨーロッパにおいては、1945年ごろからアルミニウム合金製車両の実用例がみられるようになったが、日本においては、昭和37年(1962年)、初のアルミニウム合金製車両、山陽電鉄2000系電車が誕生した(厳密には、戦争直後の一時期、ジュラルミン車両と称する戦時用材転用車があった)。その後20年、日本におけるアルミニウム合金製車両は年をおって増加を続けており、現在約2000両の車両が実用に供されている。

また、ステンレス鋼製車両についても、その材料特性を生かして薄板による軽量化が可能となり、さらに無塗装化のメリットも含めて研究が進み、最近ではアルミニウム合金製の重量に近い軽量化車体(表2)も実現してきている。現在、車体骨組全体〔これを「構体(こうたい)」と呼んでいる〕がステンレス鋼製のオール・ステンレス車約1000両、車体外板のみステンレス鋼製のセミ・ステンレス車約1500両が実用されている。

* 日本国有鉄道車両設計事務所 (〒151 東京都渋谷区代々木2-2-6)。

3. 車体構造軽量化の進め方

車体軽量化を実際に進めるにあたっての検討過程の一例を図1に示す。このように、車体構造決定にあたっては、種々の角度から検討が行われるが、この過程の中から、二、三の点について具体的な説明を加える。

3・1 基本設計 車体の基本設計を進めるにあたって第一に考慮すべきは、輸送機関の最大の使命である安全を確保することと良い性能、良い乗りごちを保持することである。そのため、まず車体として求められる強度・剛性を保ちつつ、軽量化をはかってゆくこととなる。

一般的な車体軽量化の手段として主なものに次のような内容がある。

- (1) 車体の負荷条件および負荷経路を見きわめ、できるだけ構造全体で荷重を負担するよう、管状または張殻状に近づけて部材を構成する。
- (2) 部材断面の変化を少なくし、応力集中を避けるようにする。
- (3) 材料を単なる画一的な選択とせず、できるだけ部材ごとの負荷条件、使用条件、経年変化の

見とおしなどに合わせて材質および部材寸法を使い分ける。

また、可能であれば、軽量の異種材料との併用も考慮する。

(4) 部材断面形状についても、規格形材による画一的な設計のみとせず、負荷条件に見合った形状のプレス材（鋼材の場合）または、押出し材（アルミニウム合金材の場合）も使用して設計する。

(5) 部材にできるだけ軽量化穴を明け、溶接もできるだけスポット溶接を用いる。

以上のような軽量化努力によってでき上がった構体の例が後述の図5、6などである。

また、一般に、構体をアルミニウム合金化することにより、軽量化効果があがることは、さきに少し触れてきたが、鋼材をそのままアルミニウム合金材に置き換えただけでは、構体剛性が弾性係数の低下分に比例して低下するので、最小限の剛性を保持するため、板厚増、部材追加などの構造強化をはかる必要がでてくる。このため、鋼製車両をアルミニウム合金化しても、構体重量をアルミニウムと鉄の比重の比（1/3）までは軽減できないが、それでもおおよそ鋼製の1/2程度となり、

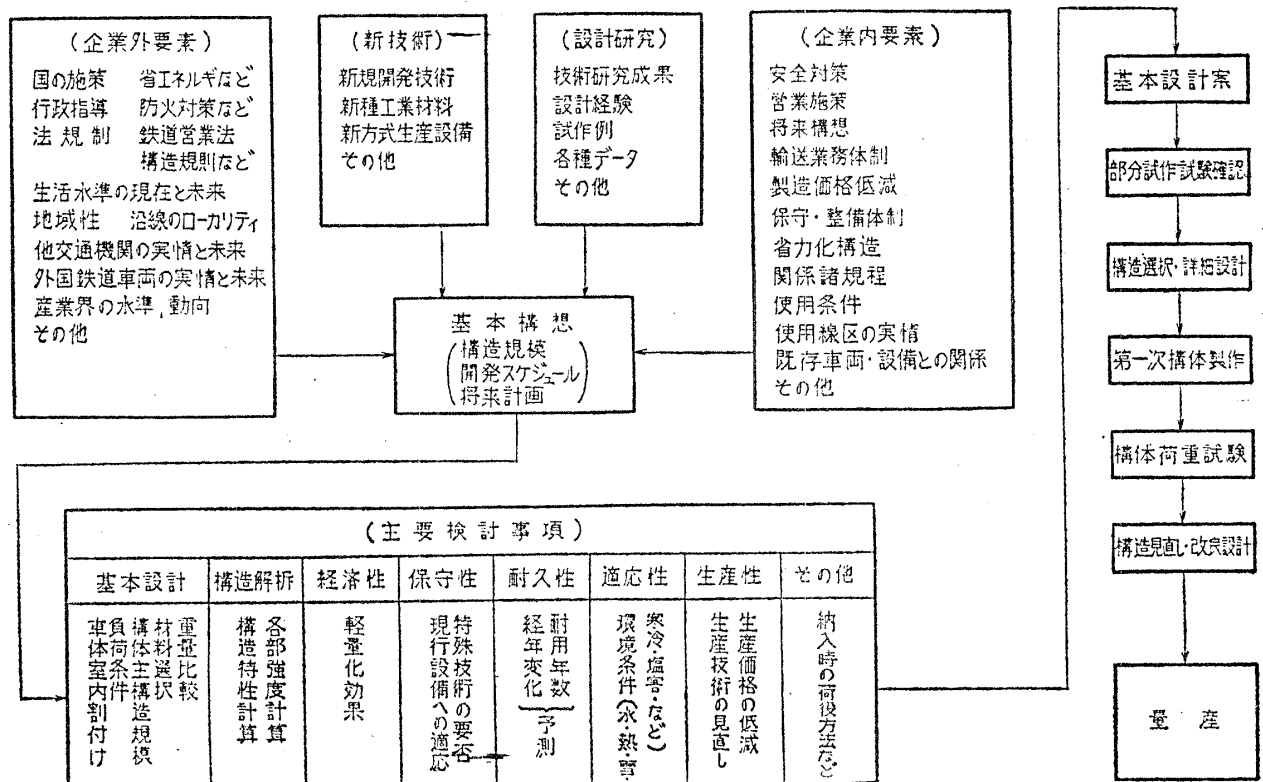


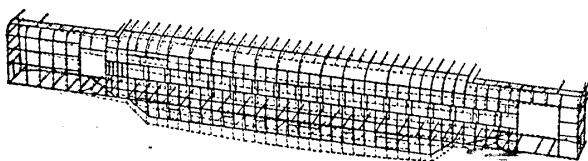
図1 車体軽量化設計の検討過程例

5~6t の軽量化がはかれる例が多い (表 1~3)。しかし、鋼製時と同程度あるいはそれ以上の構体剛性維持をはかろうとすると、構体側面部を上下方向に延伸するなどにより断面二次モーメントの増加をはかる必要が生じてくる。後述の東北・上越新幹線用 200 系電車 (図 8) はそのような構造の一例である (なお、この構体側面部下方延伸には、床下電気機器を雪寒害から保護する目的も含まれている)。したがって、このような構造変更を伴った場合は、アルミニウム合金を使用しても構体重量を 1/2 にするのは難しく、これまでの実績では鋼製設計の約 7 割程度の重量となる。

3.2 構造解析 車体構造の基本事項がひととおりまとまった段階で、通常構造解析を行い、各部の強度、構体特性の見とおしをたてている。この種の解析にあたり、以前は垂直荷重 (車体重量、乗客重量、走行時の上下方向振動加速度による増分、など) に対しては、構体側面部が有効に働くものとし、走行時の前後方向引張り・圧縮荷重に対しては、構体の床の部分が負担するものとして計算を行ってきたが、最近では、構体構造を三次元的にとらえて解析する研究が進み、大容量計算機を用いて有限要素法による立体解析を行うようになってきている⁽⁹⁾。

表 1 類似構造車両の構体材料差による自重比較

形 式	構 体	車体長 m	自重 t	自重差 t
モハ 103-1200	鋼	19.5	38.8	5.5
モハ 301	アルミ	19.5	33.3	
クハ 103-1200	鋼	19.5	29.1	6.3
クハ 301	アルミ	19.5	22.8	
モハ 183	鋼	20.0	42.0	5.9
モハ 381	アルミ	20.8	36.1	
クハ 183	鋼	20.5	41.5	7.5
クハ 381	アルミ	20.8	34.0	
キハ 35	鋼	19.5	32.0	3.6
キハ 35-900	ステンレス	19.5	28.3	



(垂直荷重によるたわみ)
図 2 構体構造解析例

図 2 は実際に行われた構造解析の一部を示したもので、得られた構体のたわみ値から剛性を算出し、走行時の乗りごちなどに対する予測を行っている。この剛性は車体中央部のたわみが等しい等分布荷重の単純ばりの剛性をとり、相当曲げ剛性と呼び、次の式⁽⁵⁾により求めている。

$$EI_{eq} = \frac{W_l l_1^3}{48\delta \cdot (l_1 + l_2)} (5l_1^2 - 6l_2^2) \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$$

ここに、 EI_{eq} : 相当曲げ剛性、 W_l : 分布荷重総量、 δ : 構体中央部たわみ、 l_1 : 台車中心間距離の 1/2、 l_2 : 台車中心・車端間距離。

また、車体のねじりに対する剛性として構体の一端を固定し、他端にねじりモーメントを与えてねじり角を測定し、次の式により相当ねじり剛性を算出している。

$$GJ_{eq} = \frac{M \cdot l}{\theta} \text{ kg} \cdot \text{mm}^2 / \text{rad}$$

ここに、 GJ_{eq} : 相当ねじり剛性、 M : ねじりモーメント、 l : ねじりを加えた二点間距離、 θ : ねじり角。

一方、固有振動数についても、次の式⁽⁵⁾ (松平式の変形) を用いて算出している。

$$f_{B1} = 7.935 \sqrt{\frac{1}{\delta} \cdot \frac{W_l}{W_t} \cdot \frac{5 - 6(l_2/l_1)^2}{1 + 1.645(l_2/l_1)^3}} \text{ Hz}$$

ここに、 f_{B1} : 一次曲げ固有振動数、 W_l : 分布荷重総量、 W_t : 総重量 (構体重量 + 荷重)、 l_1 : 台車中心間距離の 1/2、 l_2 : 台車中心・車端間距離、 δ : 車体中央部たわみ。

このような計算のほか、後述の荷重試験の際、

表 2 構体重量の比較

種 類	形 式・車 種	構体重量 t	車体長 m	単位長さ あたり構体 重量 t/m
鋼 製 車 両	国鉄 103 (M)	9.9	19.5	0.51
	京王 6000 (M ₂)	10.4	19.5	0.53
	東武 8000 (M ₂)	9.85	19.5	0.51
セミ・ ステンレス車両	営団 5000 (M ₂)	9.08	19.5	0.47
	泉北 3000 (M ₂)	9.7	20.1	0.48
オール・ ステンレス車両	南海 6200 (M ₁)	8.15	20.0	0.41
	東急 8800 (M ₂)	7.95	19.5	0.41
軽量 オール・ ステンレス車両	東急 8400 (M ₂)	6.0	19.5	0.31
	東急 8090 (M ₂)	6.3	19.5	0.32
アルミ 合金製車両	営団 6000 (M ₂)	4.3	19.5	0.22
	相模 2100 (M ₂)	4.57	19.5	0.23

固有振動数の実測も行い、過去のデータと比較しながら、車両完成後に安定した走行特性が得られることの予測をたてている。

代表車種の構体特性値を表3に示す。なお、これらの特性値に関する参考値として、「旅客車のたわみは所定の荷重に対して、支点間距離の1/1000を越えてはならない」とするドイツの車両構造研究委員会の提案がある。この内容は、車体の相当曲げ剛性は $0.554 \times 10^{14} \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$ 未満で

表3 構体特性値の比較

	新幹線電車		通勤形電車	
	鋼製 (東海道・山陽用0系)	アルミ合金製 (東北・上越用200系)	鋼製 (国鉄101系)	アルミ合金製 (営団6000系)
重量 t	10.5 (測定時8.9)	7.5 (測定時8.1)	9.6	4.36
相当曲げ剛性 $\times 10^{14} \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$	1.74	3.06	1.26	0.89
相当ねじり剛性 $\times 10^{12} \text{ kg} \cdot \text{mm}^2 / \text{rad}$	45.7	57.8	47.7	20.4
曲げ固有振動数	11.1	13.2	10	12
ねじり固有振動数	4.1	5.7	6	4.2
記事		構体側面下部延伸		

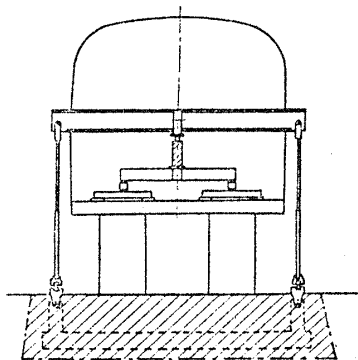


図3 垂直曲げ試験装置

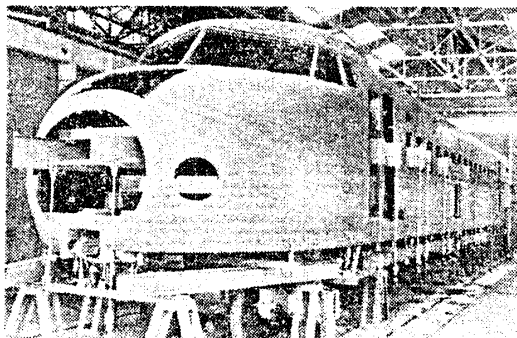


図4 垂直曲げ試験

あつてはならないことを意味する⁽⁷⁾。

3.3 構体荷重試験 前述のような検討を経て新たに構体を設計製作した場合は、その代表車種に対し、構体荷重試験を実施し、所定の荷重のもとで構体各部に欠陥が生じないことの確認と、構体諸特性の測定を行っている(図3, 4)。

新幹線電車構体に対する主要実施項目とその内容は、おおよそ表4のとおりである。

表4 構体荷重試験主要内容(新幹線電車の場合)

構体荷重試験主要項目	試験内容	試験条件
1 車圧試験 端縮験	構体を前後の支持位置で支持し、構体両端の連結器取付け位置に構体を前後から圧縮するように荷重を加え、各部の応力、たわみ、変形などを測定する	100 t の圧縮荷重を加える
2 垂直試験 直げ験	構体を前後の支持位置で支持し、構体の床の部分に垂直方向平均分布荷重を加え、各部の応力、たわみ、変形などを測定する	車体完成時の重量、乗車人員、走行中の振動加速度による増分を含め、約40 t の平均分布荷重を加える
3 ねじり試験	構体の一端の支持位置付近に死重を搭載して固定し、他端を中央一点で支持してねじりモーメントを加え、各部の応力、たわみ、変形などを測定する	4 t・m のモーメントを加える
4 三支試験 点持験	構体を支持している前後各二点のうち、一点を外して三点で支持し、構体が自重でねじれながらたわむようにし、各部の応力、たわみ、変形などを測定する	特に荷重をかけず自重により構体がたわむようにする
5 車内圧上昇試験	構体内を気密状態に保持し、内部に圧力空気を送り、各部の応力、たわみ、変形などを測定する	構体内圧力を400 mmAq に上昇させる
6 垂直固有振動測定	構体中央部下面におもりをつり下げ、瞬時に切り放して構体を自由振動させ、その波形を記録して振動数を求める。おもりのかわりに可搬式加振器を用いる場合もある	垂直荷重試験と同状態に構体を支持して実施する
7 ねじり固有振動測定	ねじり試験の荷重ばりのおもりを瞬時に切り放して構体を自由振動させ、その波形を記録して振動数を求める	ねじり試験と同状態に構体を支持して実施する

4. 新幹線電車構体構造とその材料

4.1 東海道・山陽新幹線用0系電車 東海道・山陽新幹線用電車の構体については、その計画当初から使用経験の豊富な一般構造用圧延鋼材(SS41)を使用し、軽量構造設計を進めた。板厚は最初1.6mmおよび3.2mmの2種類を使用する考えであったが、試作を重ねた結果、より軽量化を進めるため部材の板厚を細かく使い分けることとし、1mmから必要に応じ6mm程度までを使用することとした。このため、2.3mm以下の薄肉主要部材や腐食が予想される部材に対しては、高耐候性圧延鋼材(SPA-C)、同じ板厚範囲でも一般部材には熱間圧延軟鋼板(SPHC)を使用し、3.2mm以上の板厚に対しては、一般構造用圧延鋼材(SS)を使用することとして現在にいたっている。なお、これら各種の板厚の中でも、外板、骨組、などの主要部材は厚さ1.6mmの高耐候性圧延鋼材が中心となっており、4.5mm以上の板厚の使用は荷重が集中する限られた部分にとどめている。

以上の結果、車体長24.5m、車体幅3.38mという大形の鋼製構体でありながら10.5tの構体重量(単体長さ当たり構体重量0.43t/m)を得た

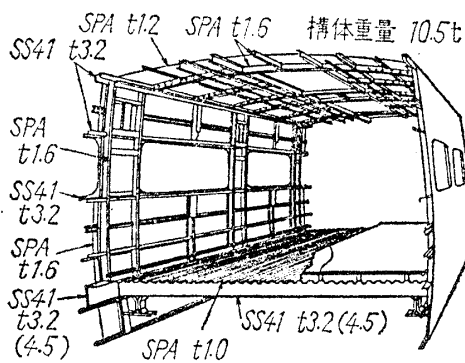


図5 東海道・山陽新幹線用初期製作車

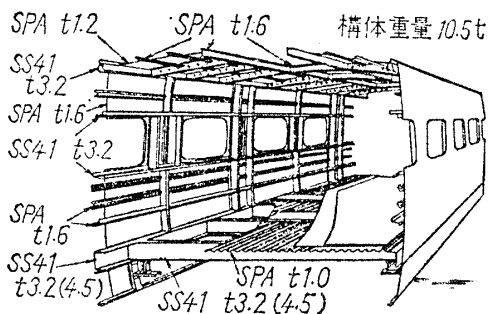


図6 東海道・山陽新幹線用22次発注以降の製作車

(図5, 6).

4.2 東北・上越新幹線用200系電車 東北・上越新幹線用車両に対しては、これらの線区固有の条件から、連続こう配・トンネル区間の走行、比較的短い駅間ごとの起動停止の繰り返し、などに対する出力増強、さらに降積雪地域走行に対する保護・付帯設備搭載が必要であり、いずれも大幅な重量増を招くこととなるので、車両の構成にあたっては0系を上まわる軽量構造が求められた。

一方、東海道新幹線開業のころからすでに250km/h高速運転将来計画があり、その試験車として高性能車両の研究を重ね、昭和44年には951形試験電車が完成した。この電車はアルミニウム合金材を用いた軽量構体をもつとともに、構体の剛性増大も含め、構体側面部を下部に延伸しながら車両床下の電気機器を外側からおおう構造として構成された(図7)。

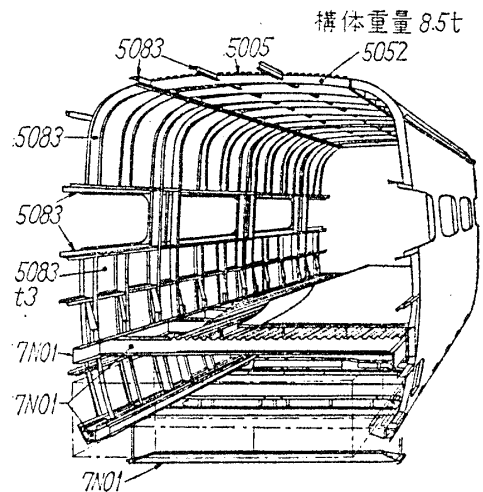


図7 951形新幹線試験電車

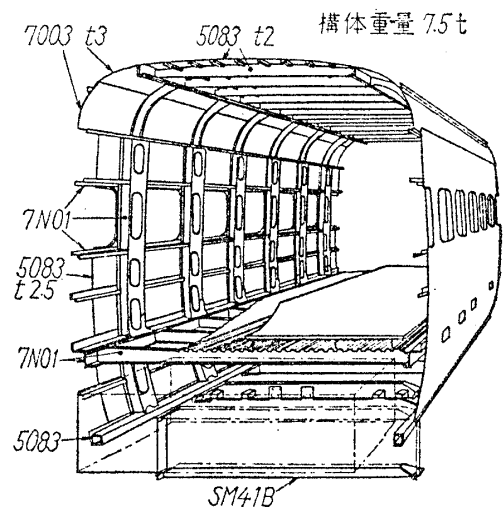


図8 東北・上越新幹線用200系電車

東北・上越新幹線用 200 系電車は、この 951 形試験電車におけるアルミニウム合金製構体の設計経験を基盤とし、その後製作された二、三の車種による改良設計を積み重ねながら、構体設計を完成させた。この構体骨組には、機械的性質のみならず溶接性、押し出し加工性のよい Al-Zn-Mg 系合金 7N01 を、車体外周部には特に耐食性のすぐれた Al-Mg 系合金 5083 を使用した。また、車体側面部から屋根にいたる円弧の部分には、押し出し加工性が 7N01 よりさらに改良された Al-Zn-Mg 系合金 7003 の薄肉広幅型材を用いて構体構成を改善した(図 8)。以上の結果、0 系電車用鋼製構体より 3t 軽い 7.5t の構体重量(単体長さ当たり構体重量 0.3t/m)で、かつ、鋼製を上まわる特性値(表 3)の構体を得た。

5. あとがき

新幹線電車の車体を例にひきながら、軽量化設計の実際面につき述べてきた。

筆者には構体設計の将来について論ずる力はないが、当面考えられる今後のテーマとして、設計面では、輸送目的に応じた車両形状(車体断面、車体長、など)の選択、構造特性面では、剛性、固有振動数、などに対する目標の見直し、材料面では、オーステナイト系ステンレス鋼(SUS 301 など)による薄板構造、Al-Mg-Si 系アルミニウ

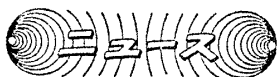
ム合金(6N01 など)による押し出し材多用構造、高分子材料成形品(GFRP, CFRP など)の利用などがある。しかしながら、従来からの鋼製構体にもそれなりの良さがあり、要は、車両の目的に応じ、構造・材料の選択が多岐にわたってゆくということであろう。また、いうまでもなく、鉄道車両の軽量化は車両を全体的にとらえて扱う問題であり、車体という一部門のみの努力で達成されるものではない。したがって、「軽く作る技術」の研究とともに、全体的に「軽くできるシステムを選ぶ」必要がある。

その意味で、ここに紹介した内容は、軽量化技術のごく一部にすぎないが、ご参考になれば幸いである。

(原稿受付 昭和 56 年 11 月 27 日)

文 献

- (1) 梶, 車両の軽量化, (昭 31), 105, 鉄道図書刊行会.
- (2) 鉄道車両の走行抵抗調査分科会, 鉄道車両の走行抵抗, (昭 39), 3, 日本機械学会.
- (3) 吉峯, 車両技術, 31 (昭 31), 22; 吉峯, 車両技術, 32 (昭 31), 2.
- (4) 吉峯, 機誌, 64-513 (昭 36-10), 1461.
- (5) 吉峯・ほか 3 名, 高速鉄道の研究, (昭 42), 171, 研友社.
- (6) 伊東, 鉄道技術研究報告, 778 (昭 46).
- (7) 吉峯・ほか 2 名, 鉄道技術研究報告, 585 (昭 42).
- (8) 松井・江口, 機誌, 81-713 (昭 53-3), 325.



日本鉄鋼協会受賞者発表(その 2)

(701 ページより)

▽瀬戸浩蔵(山陽特殊鋼製鉄技術管理部長)=高品質特殊鋼の開発普及と量産管理技術の確立, ▽田山 昭(新日鉄広畑製鉄所副所長)=製鉄技術の発展向上, ▽辻井和正(中山製鋼所統括部長)=条鋼及び鋼板, 鋼帯製造技術の発展向上, ▽福岡利和(大同特殊鋼技術部長)=特殊鋼製造技術の確立, ▽三好俊吉(日本鋼管部長)=製鋼技術, 製鉄エンジニアリング技術の進歩発展, ▽山元 深(川鉄部長)=製鉄における省エネ技術の開発と操業技術の進歩発展, ▽吉川欣弥(トピー工業)=異形鋼のロール孔型設計法の改善.

【西山記念賞】▽赤松経一(住友金属中央技術研究所副所長)=製鉄・製鋼技術の研究開発, ▽阿部尚三(大同特殊鋼次長)=快削鋼の研究開発, ▽荒井敏夫(神戸製鋼部長)=溶接材料ならびに溶接自動化に関する新製品・新技術の開発, ▽上田正雄(川鉄研究室長)=大径鋼管の品質向上に関する研究開発, ▽清水欣吾(日立金属研究所長)=工具鋼に関する研究開発,

▽小指軍夫(日本鋼管研究室長)=高張力鋼製造法に関する研究, ▽齊藤好弘(大阪大学工学部助教授)=圧延加工における材料の変形挙動に関する研究, ▽新明正弘(北大理学部助教授)=ふっ化物を含むスラグの高温物理学研究, ▽武智 弘(新日鉄研究室長)=薄鋼板の製造研究並びに基礎的研究, ▽中島浩衛(新日鉄研究室長)=鉄鋼の塑性加工及び圧延プロセスに関する研究, ▽原 行明(新日鉄部長)=直接製鉄法および高炉製鉄法に関する研究, ▽古林英一(金属材料技術研究所研究室長)=鉄鋼の塑性変形と再結晶に関する研究, ▽牧 正志(京都大学工学部助教授)=鉄鋼のマルテンサイト変態および熱間加工の金属組織学的研究, ▽宮下恒雄(日本鋼管研究室長)=試験高炉における研究と高炉操業技術への適用, ▽森 克己(九大工学部助教授)=鉄鋼精錬に関する動力学的研究.

【服部 敏夫】