

軽量ステンレス車両構体の開発

Development of Lightweight Stainless Steel Carbodies

このたび日立製作所では、車両構体全体をステンレス化することによる保守面での省力化と、アルミニウム合金製に近い軽量化による省エネルギーの両面を兼ね備えた軽量ステンレス構体を開発した。

この軽量ステンレス構体は、20mの通勤電車用として開発したもので、設備品取付金を除いた中間車で構体質量は4.5tである。軽量化のために対話形3次元構体強度解析による最適設計を行なうことはもちろんのこと、高抗張力ステンレス鋼の採用、軽量化に最適な立体骨組継手、長尺の平板外板へのピーディング加工導入など、新しい構想を採り入れたものである。

藤田正美* Masami Fujita
福寄一成* Kazushige Fukuyori
奥野澄生** Sumio Okuno

1 緒言

車両構体の軽量化については、従来から多くの開発研究^{1),2)}が行われてきた。これらは比重の小さい材料を用いて、鋼製構体よりも4～5t軽くしたアルミニウム合金製構体が主である。しかし、材料費高、汚れやきず付き防止などでコストアップになっているのが実情である。このため、大形形材を用いることにより製作コストの低減を図る努力がなされている。

一方、このような状況下で、近年車両保守の面での省力化のニーズが高まっている。そこで最近開発、改良された耐応力腐食割れ性の優れた、高抗張力のステンレス鋼(SUS301)を用いることにより、耐食性の向上と無塗装化を図るとともに、信頼性の高い高精度の強度解析技術を駆使して薄肉構造化設計を行ない、図1に示すアルミニウム合金製構体質量に近い、軽量ステンレス構体を完成したので、軽量化を中心に構体の特徴と強度評価について述べる。

従来の代表的なアルミニウム合金製構体及びステンレス鋼製構体の質量レベル³⁾の比較を図2に示す。

2 軽量ステンレス構体の仕様と特徴

2.1 仕様概要

開発対象車両は、車体構造上、強度的条件が最も厳しく、また、各部の基本構造が他車種に比較的容易に適用できる、出入口片側4箇所、屋根上中央部に集中式冷房装置を搭載可能な全長20mの標準通勤形電車用の構体を選んだ。

荷重条件のうち垂直負荷は従来の負荷荷重の考え方を踏襲し、乗客定員の2.5倍とした。車端圧縮負荷としては、外国では980kN {100tf}以上の値を超えるものもあるが、本開発構体は国内私鉄の一部や日本国有鉄道の在来線電車に適用している490kN {50tf}としていた。

開発対象構体の仕様概要は、表1に示すとおりである。

2.2 軽量化の考え方と特徴

従来の鋼製車の構体質量は8～9tであり、これをステンレス化して4.5tに軽量化するためには、使用材料の選定、剛性及び強度の確保、薄肉化に伴う製作技術の確立が必要である。材料選定については、構体に高抗張力ステンレス鋼を用いる

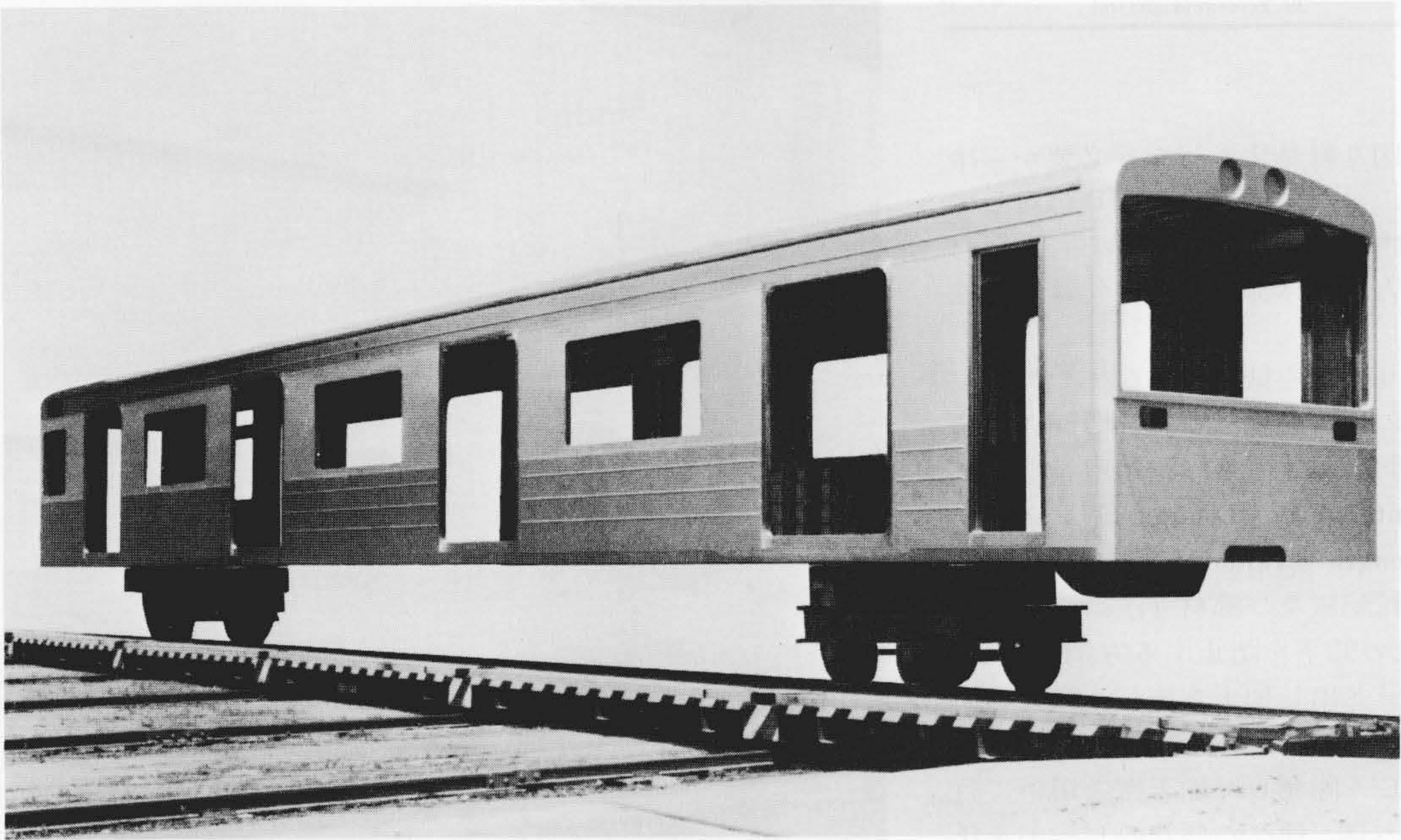


図1 軽量構体の外観 構体は床根太や機器受金、前頭部運転士保護強化対策などを除いた基本骨組で構成しているもので、質量4.5tで完成している。

* 日立製作所笠戸工場 ** 日立製作所機械研究所

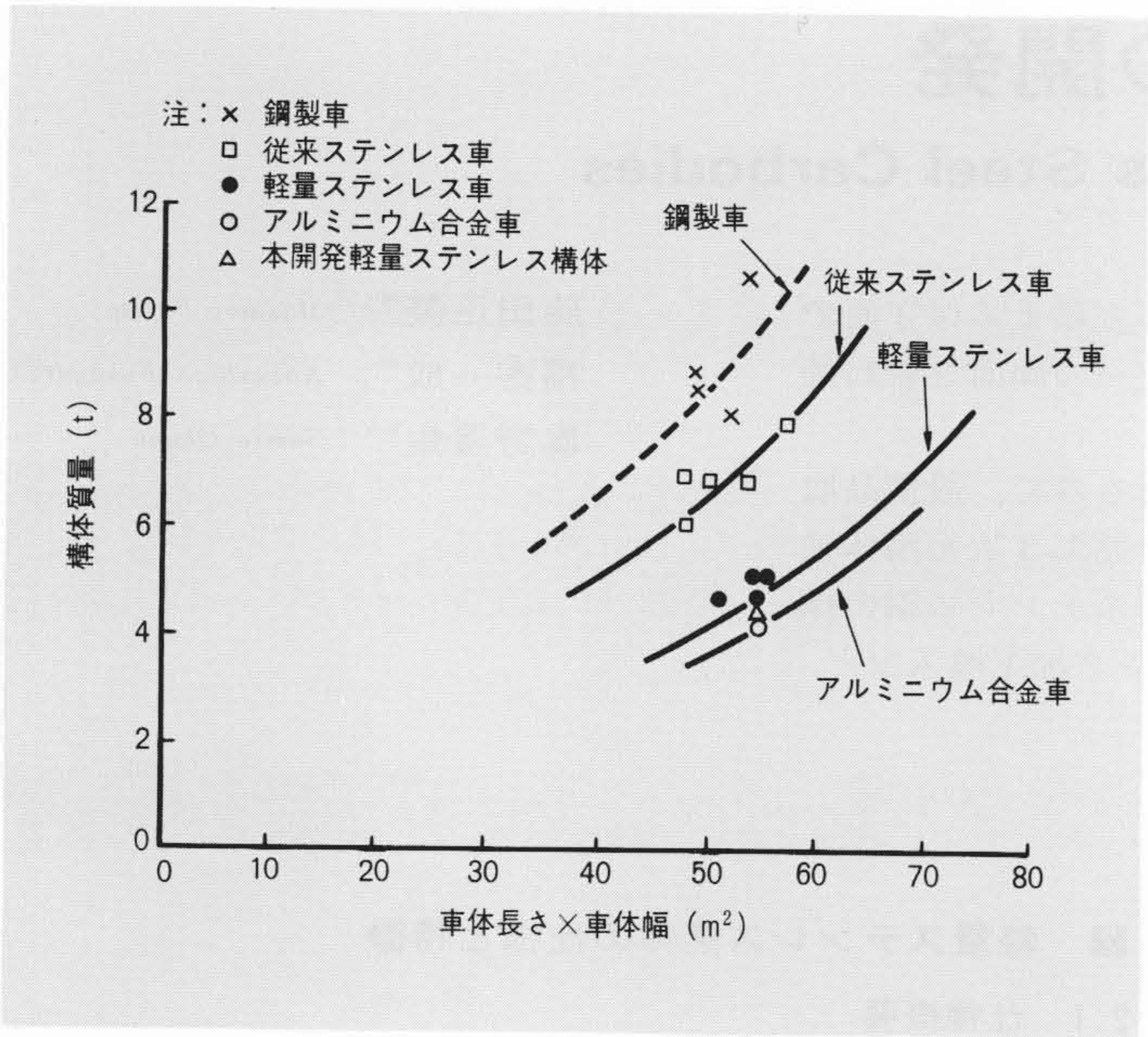


図2 各種構体質量レベルの比較 ステンレス車の構体質量は、徐々にアルミニウム合金車の構体質量に近づいていることが分かる。

表1 軽量ステンレス構体の概要仕様 出入口を片側に4箇所設けた通勤形電車の標準的な仕様で、垂直負荷は乗客定員の2.5倍を考慮している。

項 目		仕 様
寸 法	全 長	19,500mm
	全 幅	2,800mm
	全 高	3,650mm
	心 皿 間 離	14,000mm
関連設備	側 出 入 口	1,300mm, 両引戸, 片側4箇所
	側 窓	2連ユニット窓
	冷 房	屋根上集中式搭載
荷重条件	垂 直 負 荷	375kN {38.2tf} (定員の250%乗車)
	車 端 圧 縮 負 荷	490kN {50.0tf}
	ね じ り 負 荷	39.2kN・m {4.0tf・m}

ことにより、部材の薄肉化を図り軽量化を行なう必要から冷間調質圧延で高強度が得られ、また、応力腐食割れに対しても十分検討を加えたSUS301材を採用した。表2に主要部材の使用材料一覧表を示す。一方、構体部材の薄肉化は、剛性及び座屈強度の低下を招く。

このうち、剛性の低下は乗り心地を低下させるだけでなく、窓など開口部付近の局部応力の増大を生じる。この問題を解決するため、日立製作所で開発した対話形構造解析プログラム“HIDESS”(Hitachi Interactive Design System for Structure Analysis and Strength Evaluation)を用い、剛性低下を極力抑えるように、部材配置及び部材寸法の適正化を図った。また、部材の座屈強度の低下を防止する方策として、外板には図3に示すようなビード出し加工を施し、剛性の向上を図った。

このビード出し加工は、新しく開発した加工機を用いて行なったもので、この加工機によれば、種々の形状のビードを任意の位置に配置できる。図3に示したビードは、末端処理が不要で外観が美しく、洗浄が容易であるという特徴をもっている。

また、骨組では局部座屈を防止するため全面的に閉断面構

表2 構体主要部材のSUS301材使用一覧表 アーク溶接採用部分には、極低炭素材を用いている。

部 位	部 材 名 称	調 質					材 質		表面仕上
		LT	DLT	ST	MT	HT	極低炭素材	中炭素材	
台	側 梁	—	—	—	—	○	○	—	2 B
	横 梁	—	—	—	—	○	○	—	〃
	端 梁	—	—	—	—	○	○	—	〃
	中 梁						SMA材		
枠	枕 梁								
	キーストンプレート	—	—	—	—	○	—	○	2 B
側	幕 外 板	○	—	—	—	—	—	○	No. 4
	腰 外 板	○	—	—	—	—	—	○	〃
	吹 寄 板	—	○	—	—	—	—	○	DF仕上
	長 土 台	—	—	—	—	○	—	○	2 B
構	入 口 柱	—	—	—	—	○	—	○	〃
	入 口 フ レ ー ム	○	—	—	—	—	○	—	No. 4
	骨 組 継 手	—	○	—	—	—	—	○	2 B
	そ の 他 骨 組	—	—	○	—	—	—	○	〃
屋	屋 根 外 板	—	—	○	—	—	—	○	〃
	た る 木	—	—	—	—	○	—	○	〃
	長 桁	—	—	—	—	○	—	○	〃

注：略語説明
LT(Low Tensile), DLT(Deadlite Stock), ST(Special Tensile)
MT(Medium Tensile), HT(High Tensile), DF(Dull Finish)
SMA(溶接構造用耐候性鋼板)

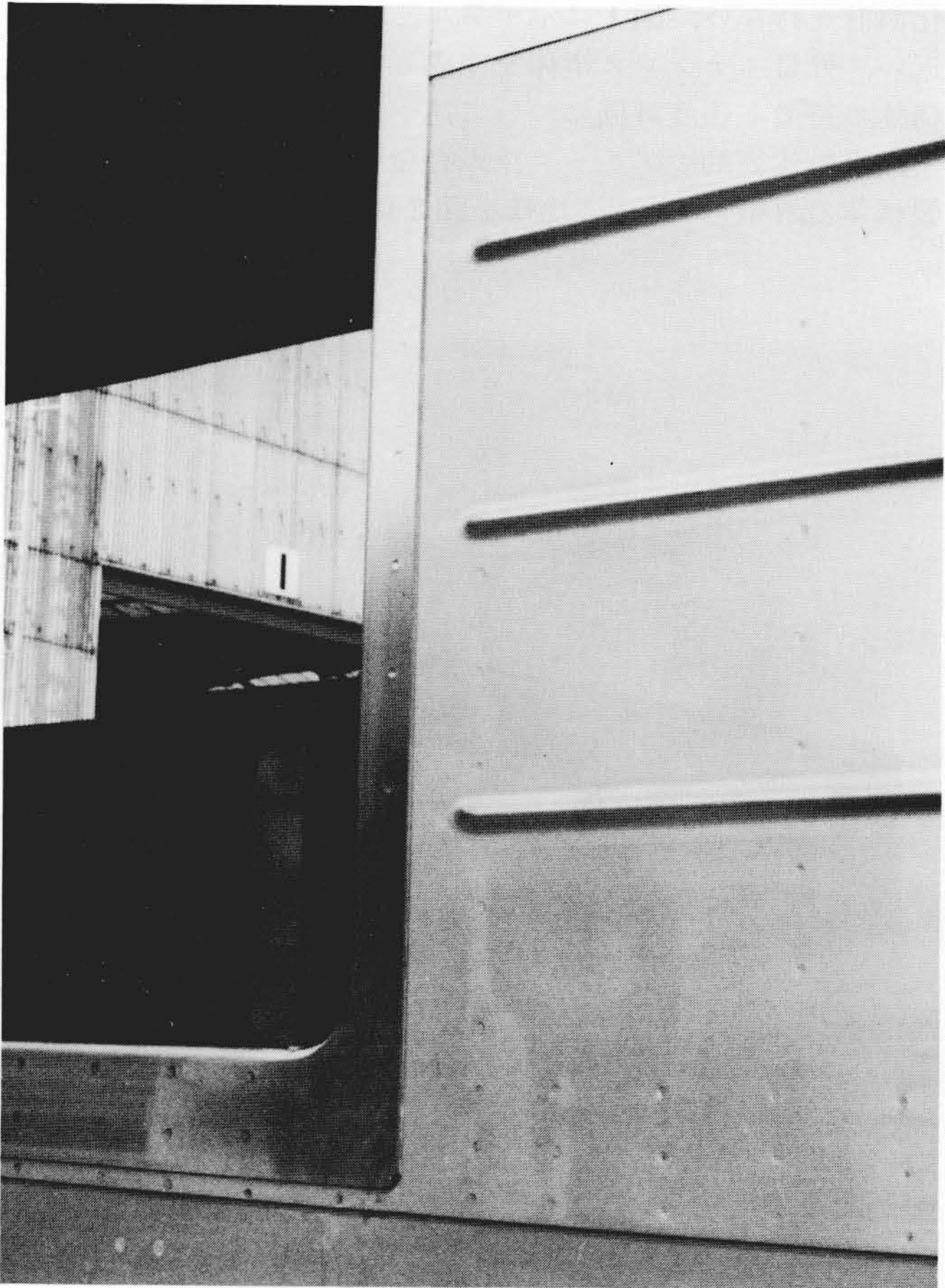


図3 ビード出し外板の使用例 本図は出入口横の腰板を示している。外板ビード末端は末端処理を不要とし、仕上げが優美であり、洗浄も容易となる。



図4 立体骨組継手使用例 側柱と腰帯を立体継手を用いてスポット溶接で結合して、ひずみ発生を抑制している。

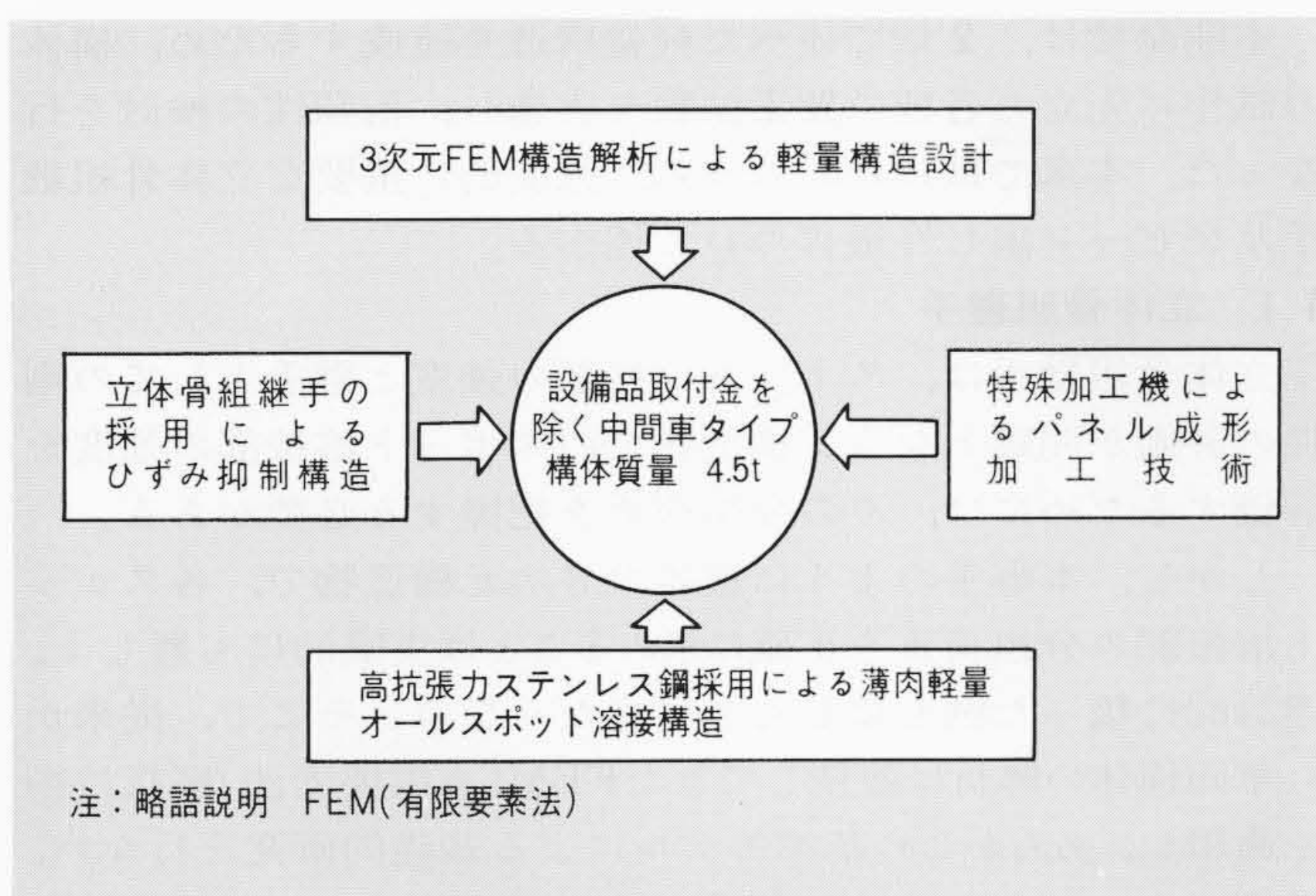


図5 軽量ステンレス構体を支える技術 軽量ステンレス構体のねらいは、無塗装を生かした保守費低減による省力化と軽量化である。その土台となる技術としては、ひずみを抑制する製作技術に加えて薄肉軽量構造物の強度を評価する技術が不可欠である。

造とするとともに、その結合には、ひずみ発生抑制のためスポット溶接組立構造に有効な立体式骨組継手(図4参照)を採用している。

以上述べた軽量化の考え方と特徴をまとめると、図5に示すとおりである。

3 軽量ステンレス構体の構造

ステンレス構体は無塗装で用いられるため、製作に当たってはひずみを出さないようにしなければならない。ステンレス鋼は熱伝導率が小さく熱膨張係数が大きいため、溶接時の

入熱によりひずみを発生しやすい。更に、軽量化のため骨組部材と外板の薄肉化を図るので、構体の強度を支配している窓隅部などの骨組結合部の応力を緩和させる必要がある。そのため、ステンレス構体には、構造が簡単で、ひずみ発生の抑制と窓隅部などの応力緩和に優れた立体骨組継手を開発し、スポット溶接組立構造を採用した。軽量構体の構造は図6に示すとおりである。

3.1 骨組構造

車両の構体の場合、出入口や窓などの設備によって主要骨組の基本的な配置を決め、詳細設計で更に最適骨組配置を選択して、骨組断面形状や寸法を設定している。

軽量ステンレス構体の骨組構造の設計主要点は次のとおりである。

- (1) 柱などの基本骨組の板厚は、従来の3.2～6mmに対し1mmに薄肉化して軽量化を図り、座屈強度をアップするため閉断面構造としている。
- (2) 熱ひずみの発生を防ぎ、窓隅部などの全体強度を支配す

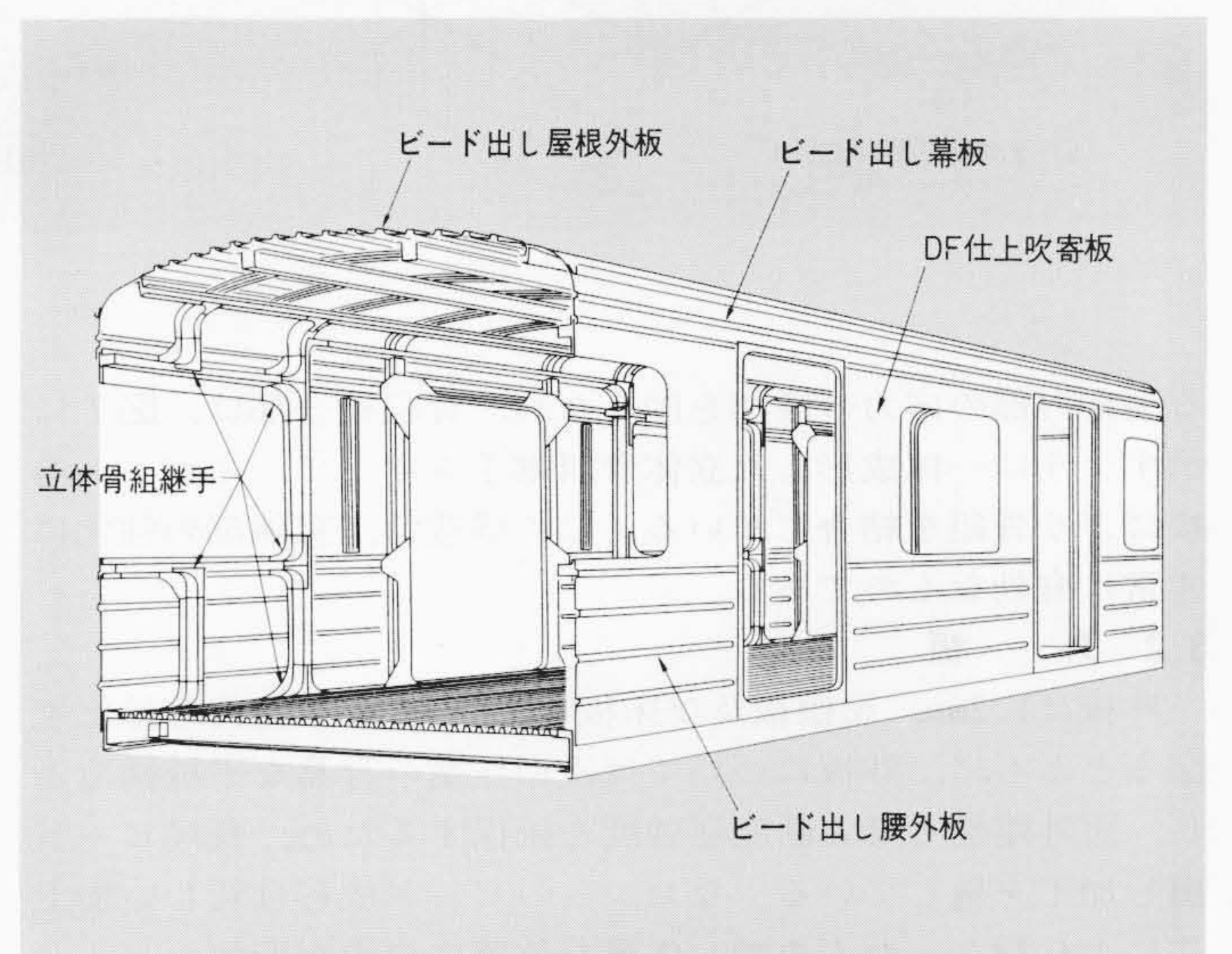


図6 軽量構体の構造 構体は、ビード出し長尺外板と立体骨組継手で結合した薄肉骨組で構成され、各々はスポット溶接で結合される。

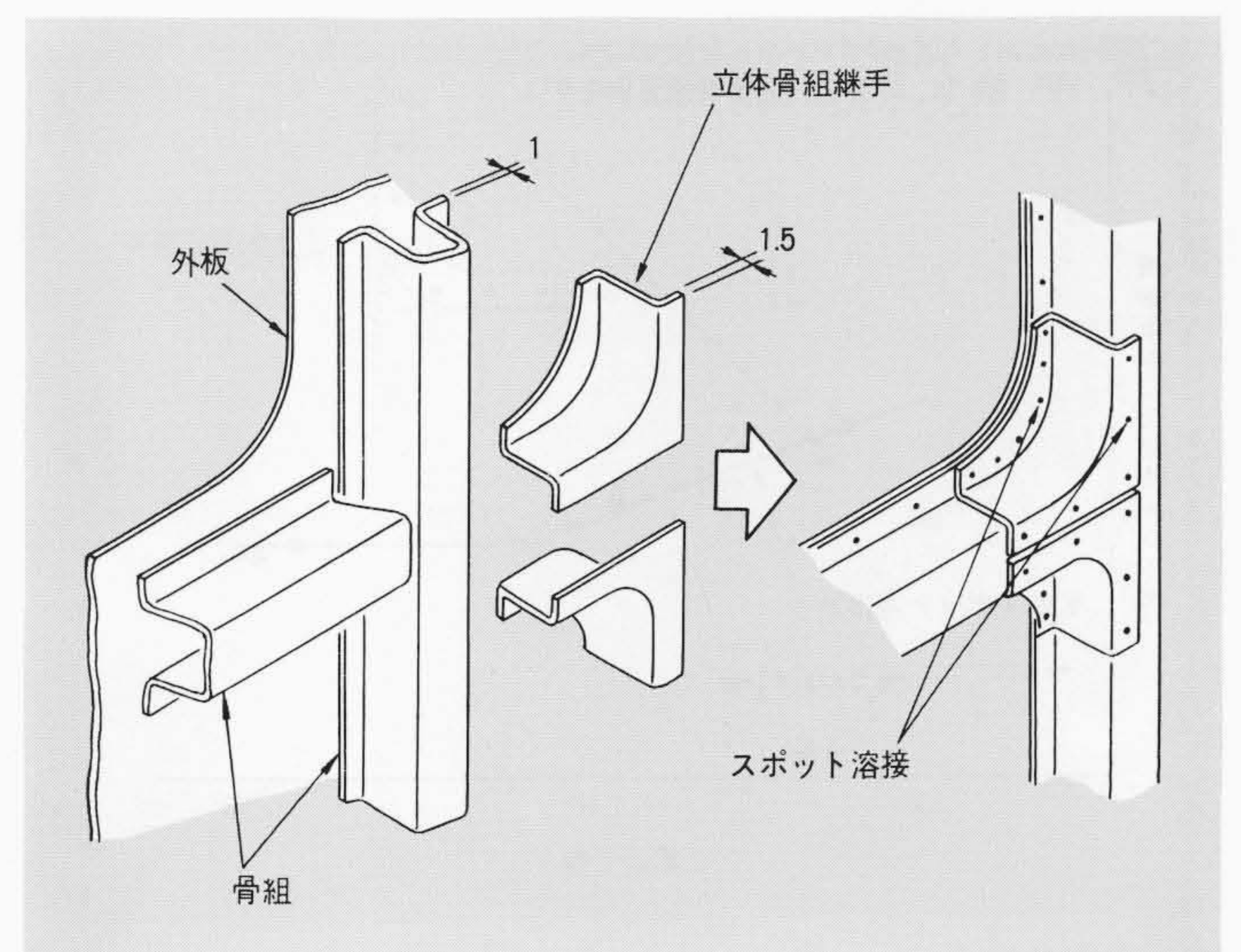


図7 立体骨組継手による骨組の結合 窓隅部外板は、立体骨組継手と2枚重ねとなり、応力が緩和される。

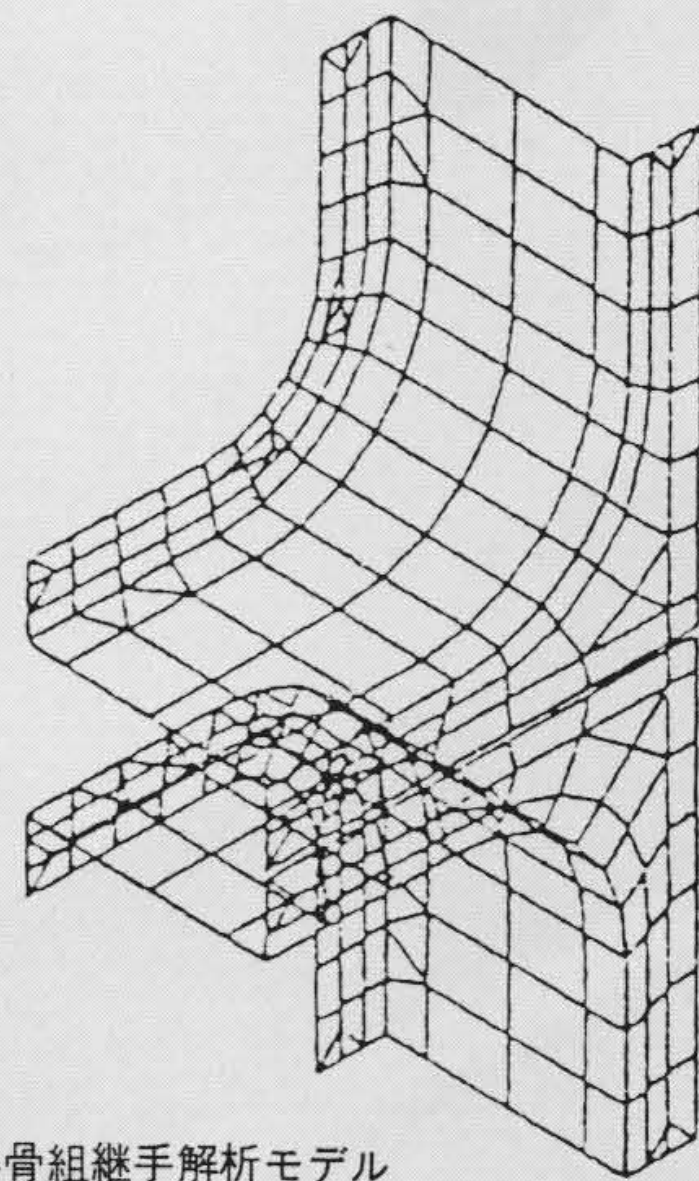
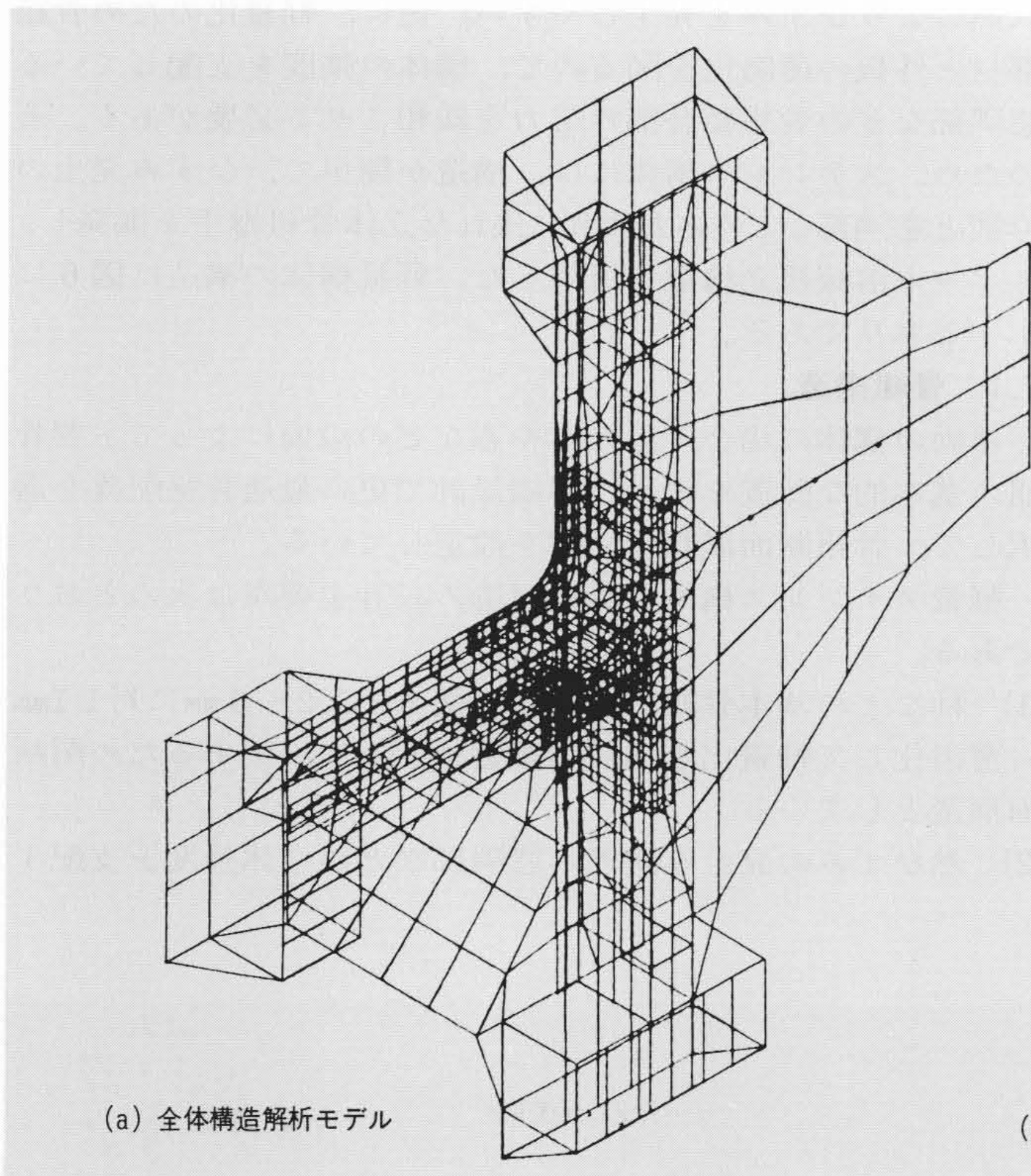


図8 スポット溶接構造要素のFEM解析モデル

3次元構造物でのスポット溶接部の分担荷重を求める計算モデルで、その要素分割状況を示したものである。

る高応力部の応力の緩和を図るため、骨組結合部は、図7に示すように一体成形した立体骨組継手を用いて、スポット溶接により骨組を結合している。この構造は、窓隅部の強化に非常に有効なものである。

3.2 外板

外板は1.2mm、屋根板及び床板は0.6mmとして薄肉軽量化を図るとともに、外板については洗浄作業の容易な平板構造とし、面外剛性とせん断座屈強度を確保するため、長尺ビード出し加工を施している。なお、このビード成形は新しい加工法により行なったもので、任意な位置に自由な形状のビード加工ができ、また、異なったビード加工の組合せができるなどいろいろな利点をもっている。

4 実物大要素モデルによる強度試験

本開発では、2章で述べた軽量構造を達成するため、構体の試作に先立ち各種の要素試験を実施し、信頼性の検討を行なった。本章ではこれらのうち、強度的に重要な立体骨組継手及びビード出し外板について述べる。

4.1 立体骨組継手

立体骨組継手は、スポット溶接部の強度と継手としての剛性の評価が問題となる。構造物でのスポット溶接部の強度を評価するためには、その分担荷重を把握する必要がある。

しかし、本継手のように複雑な3次元構造物で、各スポット溶接部の分担荷重を正確に求めることは実験的にも難しく、理論的に扱った例もほとんど見当たらない。そこで、従来から車両構体の解析に蓄積してきたFEM(有限要素法)解析技術を適用し、あらかじめ基本モデルによる基礎的研究を行ない、精度の良いスポット分担荷重の計算法及びスポット強度の評価法を確立した。図8に立体骨組継手を含む構造要素のFEMによる詳細解析モデルを、図9に上記の構造要素及び単点スポット溶接継手の疲労試験結果を示す。図10は本計算法の実車の構造に近い状態での検証を行なうための構造要素の疲労強度試験状況を示したものである。図9から、本解析手法により予想したスポット溶接位置で所定の分担荷重によりき裂が発生し、解析値と良く一致することが分かった。そこで、以上の検討結果による評価法をもとに、“HIDESS”を用いて実車の解析を行ない、強度的に信頼性の高い適正なスポット溶接構造を決定した。

一方、継手の剛性についても従来のアーク溶接継手と比較して、ほぼ同等であることが明らかとなった。

4.2 ビード出し外板

外板の構造については、薄肉化に伴い、変形の防止及び座屈強度を確保する必要があり、図11に示すような要素モデルによる座屈試験を行ない、軽量化の面から適正なビード形状、

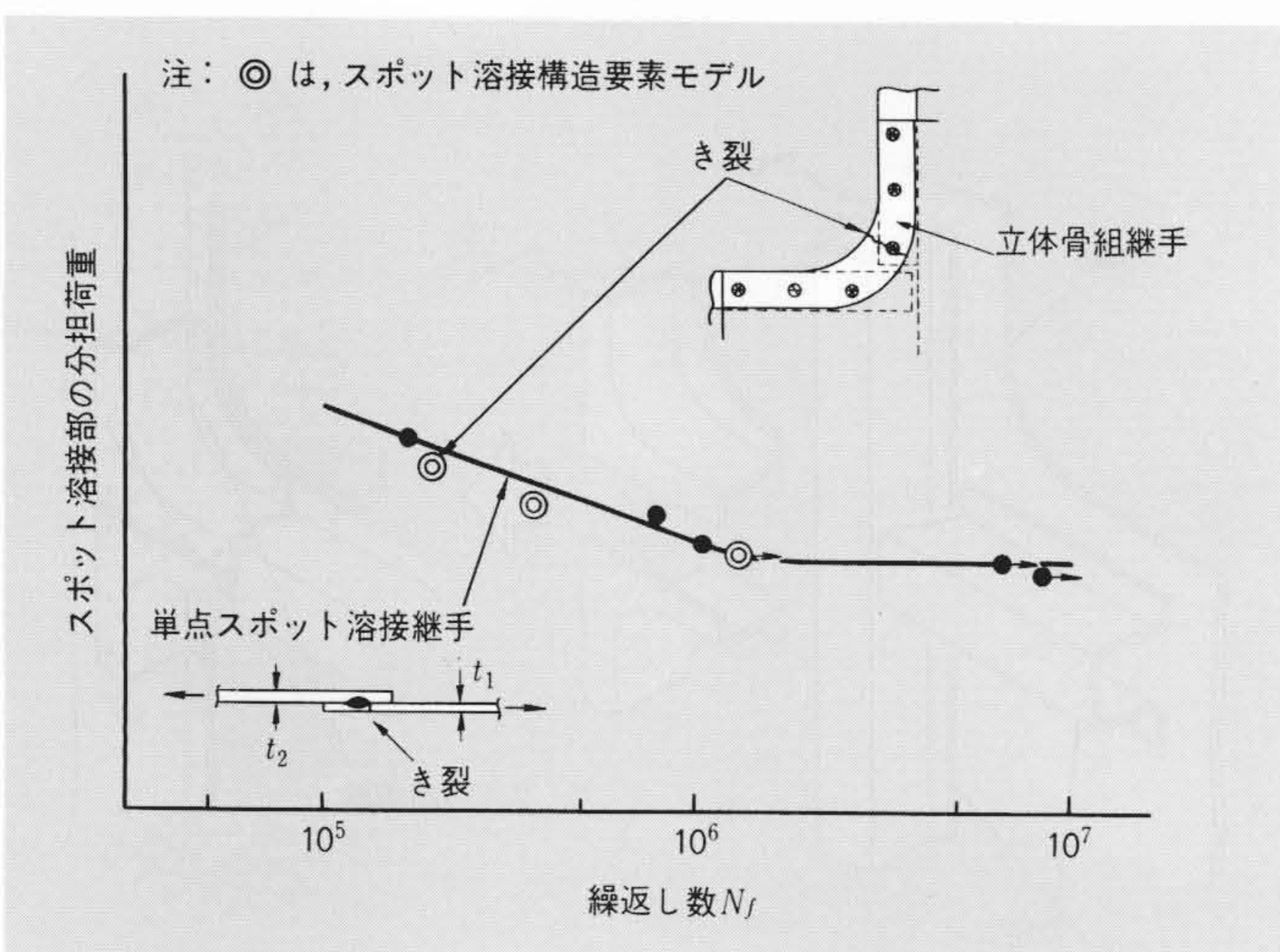


図9 高抗張力ステンレス鋼(SUS301材)のスポット溶接強度構造要素モデルの疲労試験結果は、き裂が発生する外板と同材質、同板厚の単点スポット溶接継手の疲労データとほぼ一致することが分かる。

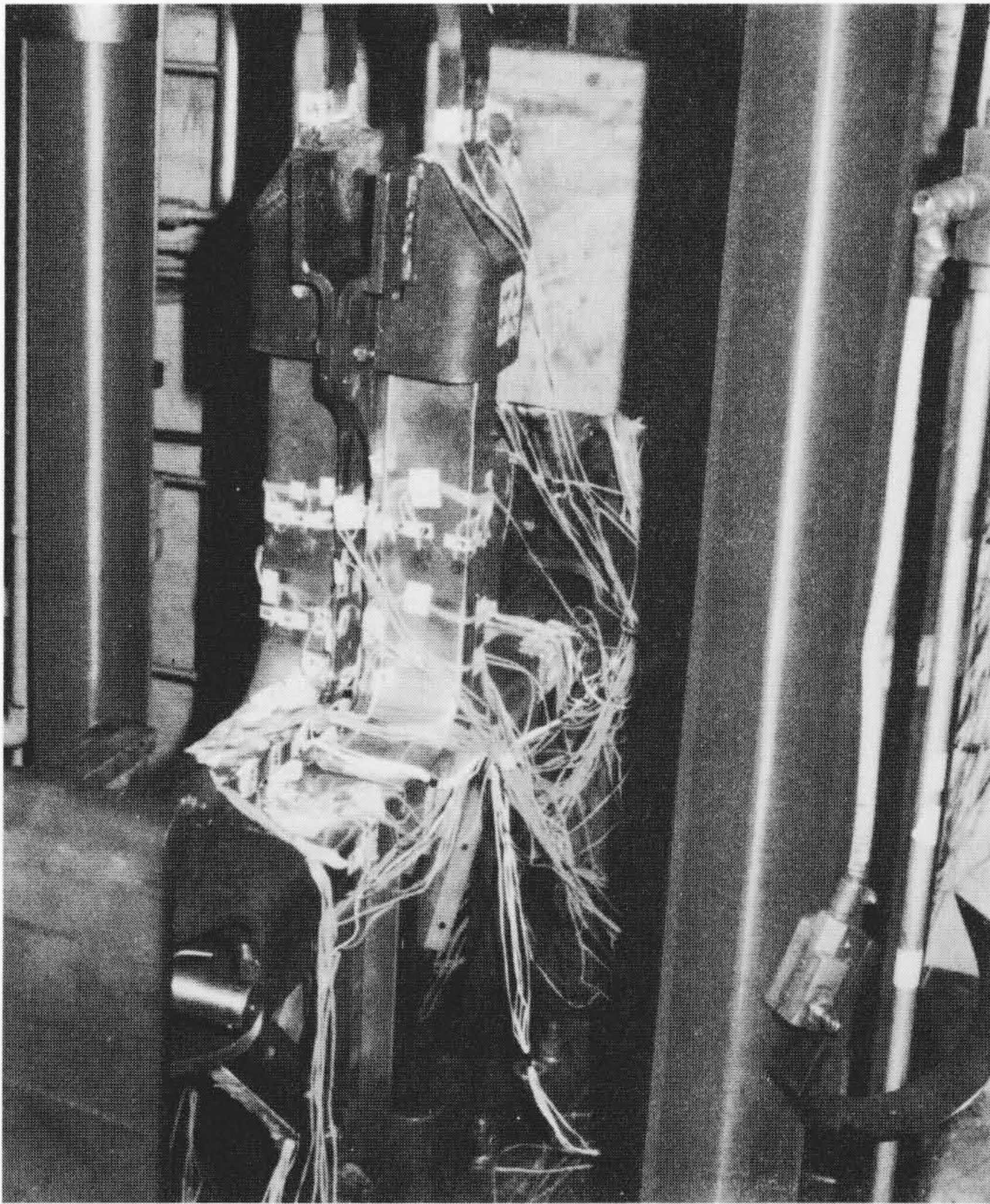


図10 立体骨組継手構造モデルの疲労強度試験状況 実物と同じ模型を作り，信頼性確認のため疲労強度試験を実施し，解析値との比較評価を行っている。

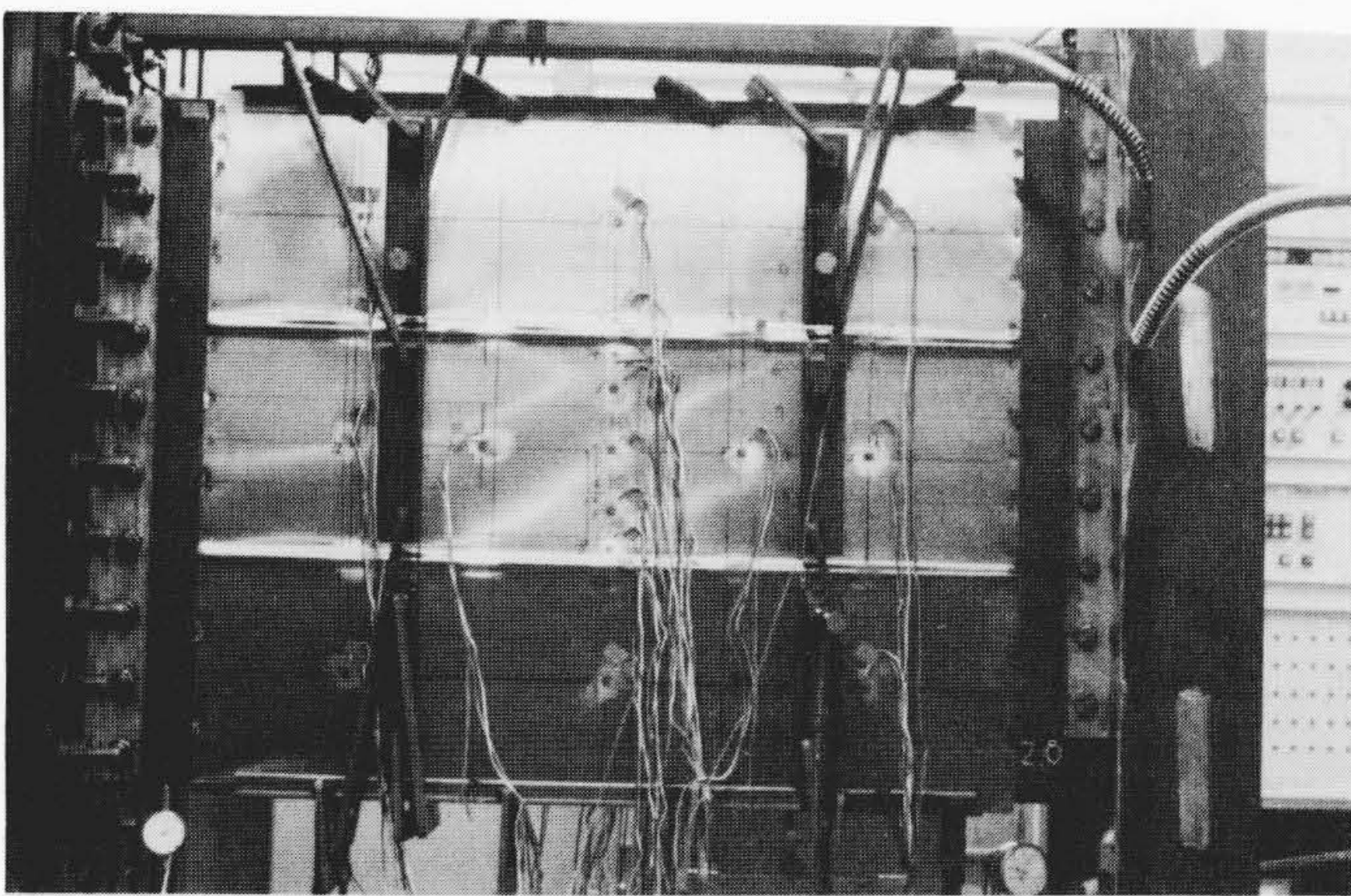


図11 外板要素モデルによる座屈強度試験 本試験により適正なビードの形状，ピッチ及び外板補強法を検討した。

ピッチ及び最小限の補強で外板の見ええを確保できる構造を明らかにした。

5 軽量ステンレス構体の強度評価

構体は軽量化を進めてゆくと剛性が低下するが，ステンレス構体のように降伏点の大きい材料では応力値よりも剛性値が問題となる。したがって，剛性低下で乗り心地を害さないように，従来の経験から構体の相当曲げ剛性の目標値を $0.59 \text{ GN}\cdot\text{m}^2$ $\{0.6 \times 10^{14} \text{ kgf}\cdot\text{mm}^2\}$ 以上とするように設定した。構体の全体強度，剛性の解析は精度を向上させるため，ビード出し外板やコルゲート床板などは異方性板に置換して，“HIDESS”

によるFEM解析を実施した。図12に外板応力解析例「等応力線図」を示す。実物構体では信頼性確認のため，垂直荷重 375 kN $\{38.2 \text{ tf}\}$ ，車端圧縮 490 kN $\{50 \text{ tf}\}$ ，ねじり負荷 $39.2 \text{ kN}\cdot\text{m}$ $\{4 \text{ tf}\cdot\text{m}\}$ について荷重試験を行ない，計画値に対し満足できる結果を得た。図13に垂直荷重に対する変形状況を示す。

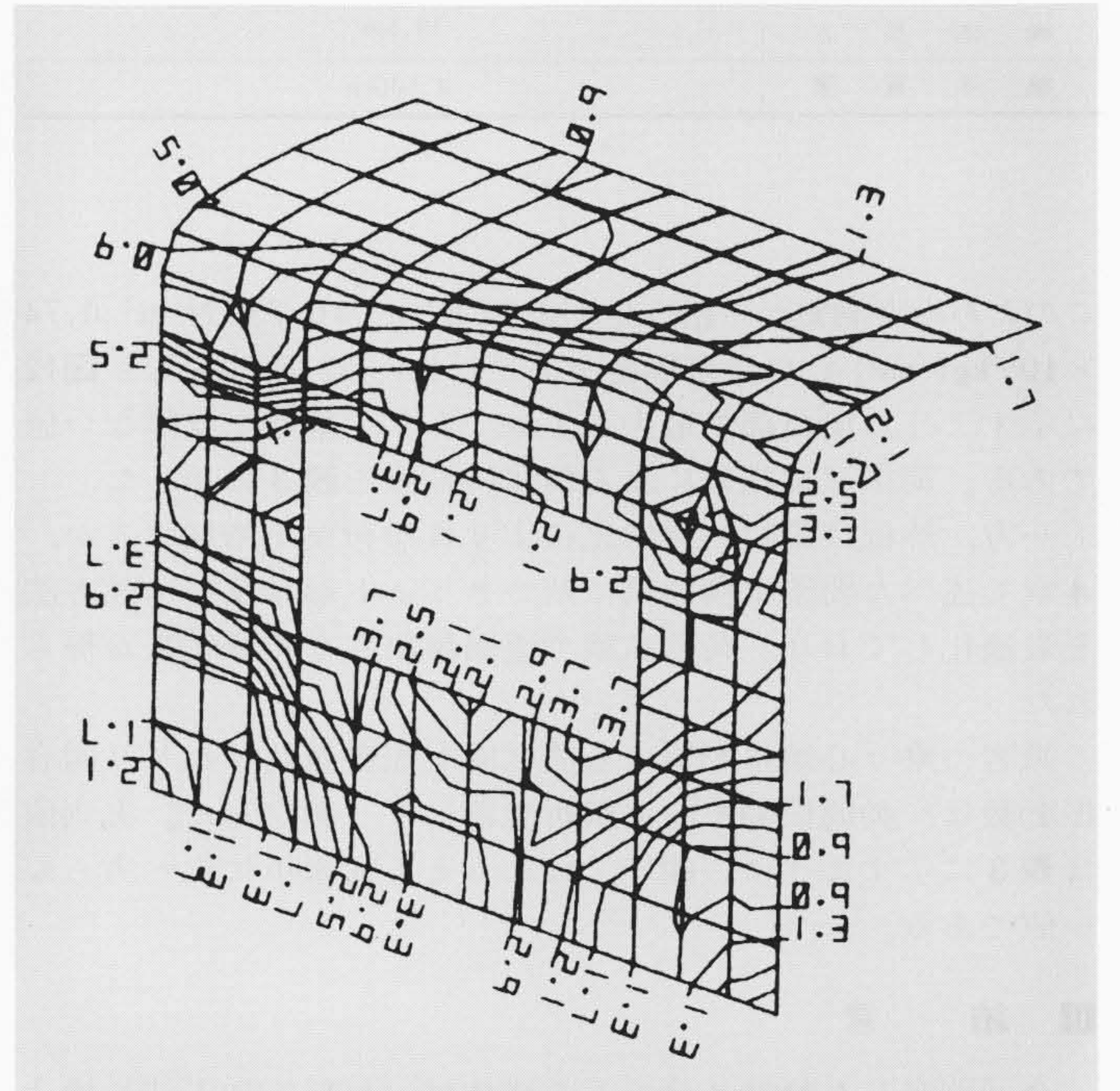


図12 FEM解析による外板等応力線図の一例 構体の強度解析は新しく開発した対話形構造解析強度設計プログラム“HIDESS”により解析した。本図は全体解析の一部をズームしたアウトプットの一例で，外板の応力分布状態がよく分かる。

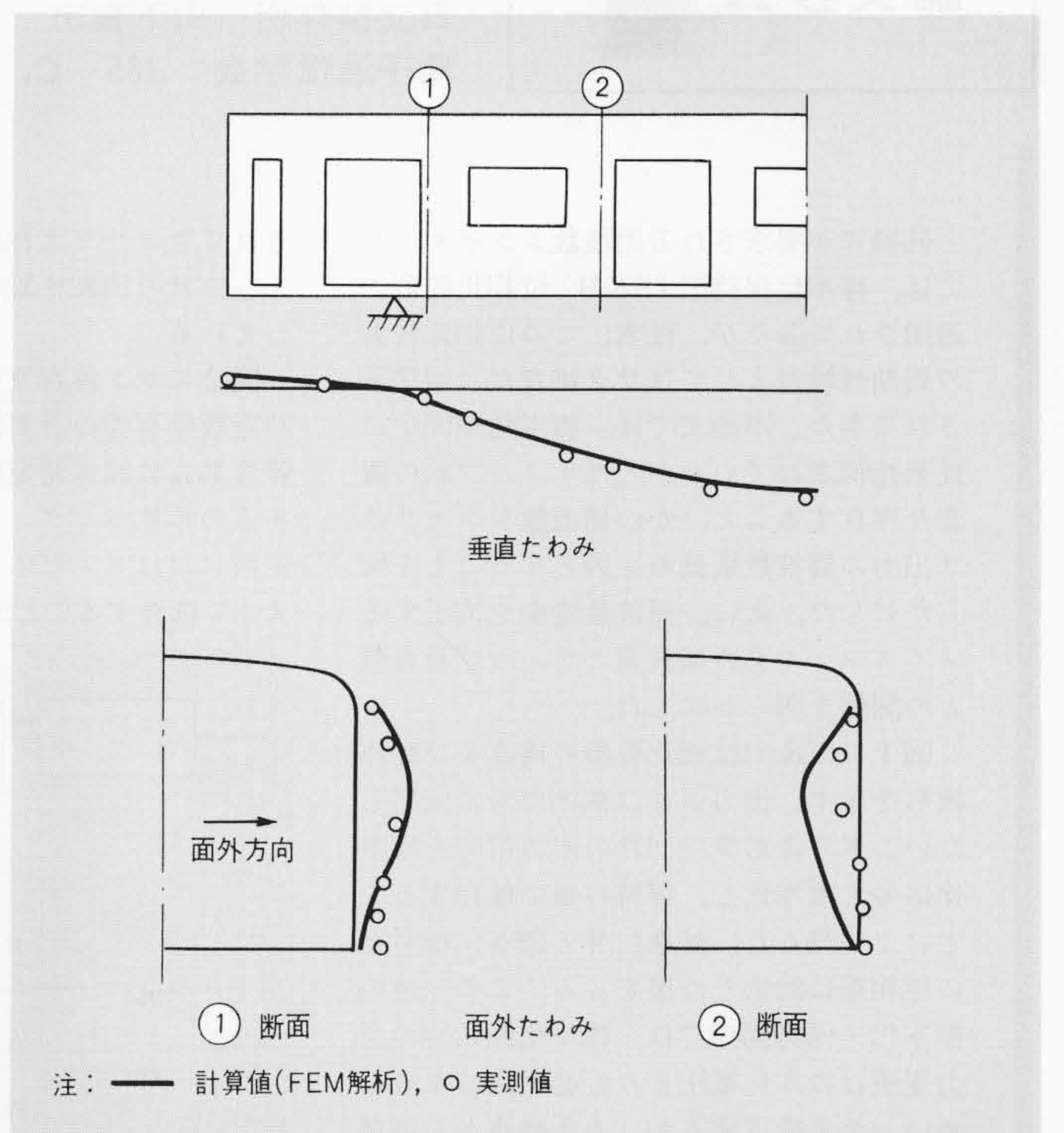


図13 車体剛性計算値と実測値の比較 垂直たわみはFEM解析値と実測値がよく一致している。

表3 軽量ステンレス構体の特性値 車体長19.5mの標準通勤形電車で構体質量4,500kgを達成し、曲げ剛性は当初目標値を満足している。

項 目	特 性 値
相当曲げ剛性	$0.72\text{GN}\cdot\text{m}^2 \{0.74 \times 10^{14}\text{kgf}\cdot\text{mm}^2\}$
相当ねじり剛性	$0.12\text{GN}\cdot\text{m}^2/\text{rad} \{12.5 \times 10^{12}\text{kgf}\cdot\text{mm}^2/\text{rad}\}$
曲げ固有振動数	15.1Hz
ねじり固有振動数	8.0Hz
構 体 長 さ	19.5m
構 体 質 量	4,500kg

このたわみ実測値から相当曲げ剛性(EI_{eq})は $0.72\text{GN}\cdot\text{m}^2 \{0.74 \times 10^{14}\text{kgf}\cdot\text{mm}^2\}$ となり目標値を満足している。面外変形も図12に示すように出口部で最大2.1mmであり、構造上支障ない値である。荷重試験結果による構体特性値を表3に示した。

一方、外板は骨組の薄肉化により負担荷重が増加するが、4章で述べた要素試験結果に基づきビード形状及び補強方法を最適化しており、荷重試験で座屈現象もなく好結果が得られた。

乗客の乗り心地に影響する曲げ固有振動数及びねじり固有振動数は、動的振動モード解析装置により測定した。実測値は表3に示すように、曲げ、ねじりとも従来車に比べ劣らない値である。

6 結 言

今回開発した軽量ステンレス構体は、材料、加工法や構造解析手法など、広範囲にわたる研究を行ない、開発過程では、

外板、骨組継手の要素試作などの基礎的な検討を積み上げ、次に示すような新しい技術を確立し、当初の目標を達成することができた。

- (1) 新たに開発した塑性加工による立体骨組継手は構造的には、スポット溶接が容易に行なえるとともに、オールスポット溶接構造化により、熱によるひずみを抑制できる構造であること、強度面では、応力集中などで条件が厳しい窓隅部で、外板と立体骨組継手フランジの2枚重ねとなることと窓隅コーナーの大きい曲率とがあいまって、応力集中緩和に対して有利であること、かつ窓隅部が母材化されているため、許容応力が高くとれるなど有効な軽量化構造技術である。
- (2) 高抗張力ステンレス鋼採用による薄肉骨組構体に高精度な3次元有限要素法による対話形構造強度解析を駆使した、軽量オールスポット溶接構体の構造設計技術を確立した。
- (3) ステンレス構体のポイントとなる外板は新しく開発した特殊加工機により、末端処理を要しない、しかも任意の位置に自由な形状のビードが配置できる成形技術を確立し、品質、外観の向上、洗浄の容易化などを図った。

今後、これらの開発技術を駆使して、荷重負荷条件の異なる外国向け車両などにも幅広く適用を図ってゆきたい。

参考文献

- 1) 田中，外：輸出向け地下鉄電車の開発，日立評論，60，5，321～326（昭54-5）
- 2) 笠井，外：962形新幹線試作電車の車両構造，日立評論，60，7，471～476（昭54-7）
- 3) 例えば，Lea. Transit Compendium, Vol. 11, No. 6, 75～76, 1975

論文抄録

周波数シンセサイザ用 標本化保持型位相比較器の雑音特性

日立製作所 山下喜市

電子通信学会 J65—C, 5, 403～404（昭57-5）

低雑音が要求される周波数シンセサイザには、標本化保持型(S&H)位相比較器が適用されてきたが、従来、この位相比較器の周期性雑音としてはサグ雑音だけが議論されてきた。本論文では、標本化期間中に従来指摘されていなかったディップ状の雑音が存在すること、かつ周波数シンセサイザ出力の周波数変動の主因となることを明らかにした。次に、周波数変動を抑圧するノイズフィルタの減衰量とディップ雑音量との関係を明らかにした。

図1にS & H位相比較器の構成及び動作波形を示す。出力信号は基準信号に同期したのこぎり波形発生回路の出力信号を標本化信号で標本化し、保持容量で保持することにより得られ、基準信号と標本化信号との位相差に対応した値をとる。この一連の標本化・保持動作では、標本化開始時の出力電圧は標本化電圧よりも必ず高くなるためいったん低下するが、ある時点から再び上昇を始める。すなわち、これは従来議論

されてきたサグ雑音のほかに標本化中にディップ状の周期性雑音が生じることを意味している。

図2にサグ雑音及びディップ雑音の放電時定数依存性の計算例を示す。同図でサグ雑音 V_{sag} は放電時定数の増大とともに急減するの比べ、ディップ雑音 V_{dip} は放電時定数にはほとんど依存せず、充電時定数に大きく依存することが分かる。実際の場合、

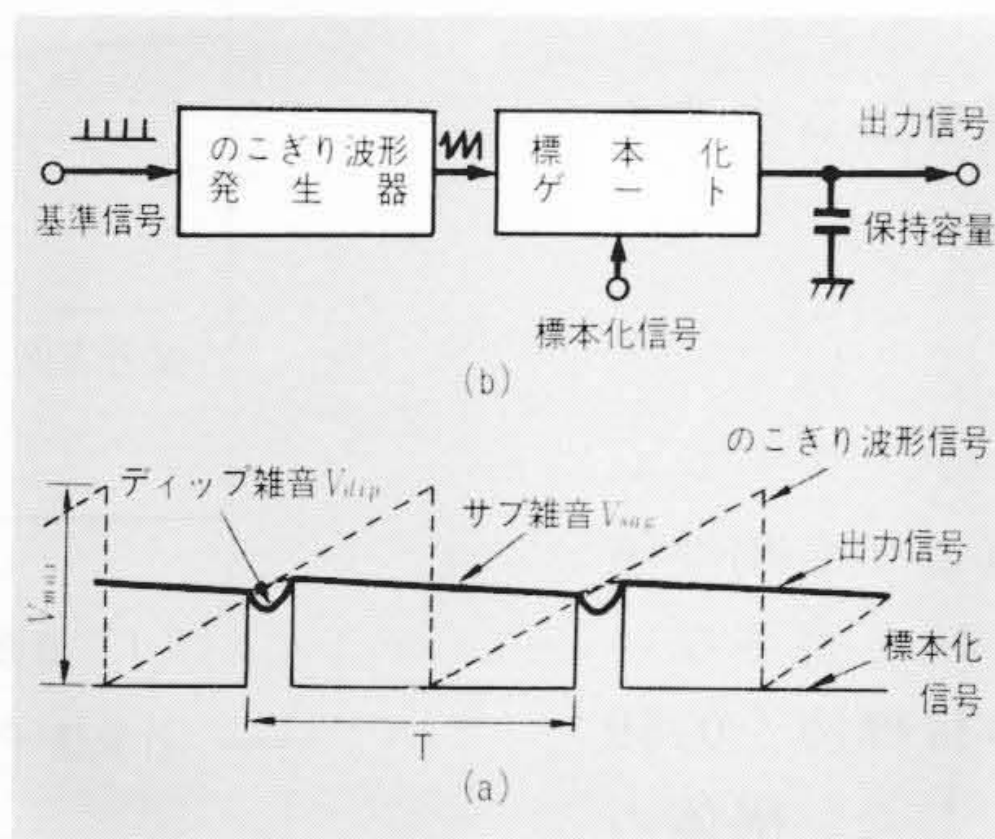


図1 標本化保持型位相比較器の動作波形

τ_β/T を 10^3 以上に設定することは容易に実現できるから、ディップ雑音はサグ雑音よりも一桁以上大きくなり、S & H位相比較器の発生する雑音の支配項、すなわち、周波数シンセサイザの周波数変動を惹起する主因となることが分かる。なお、ディップ雑音が10mVのとき、周波数シンセサイザの所要スプリアスレベル-85dBを満たすには60dB以上のフィルタ減衰量が必要となる。

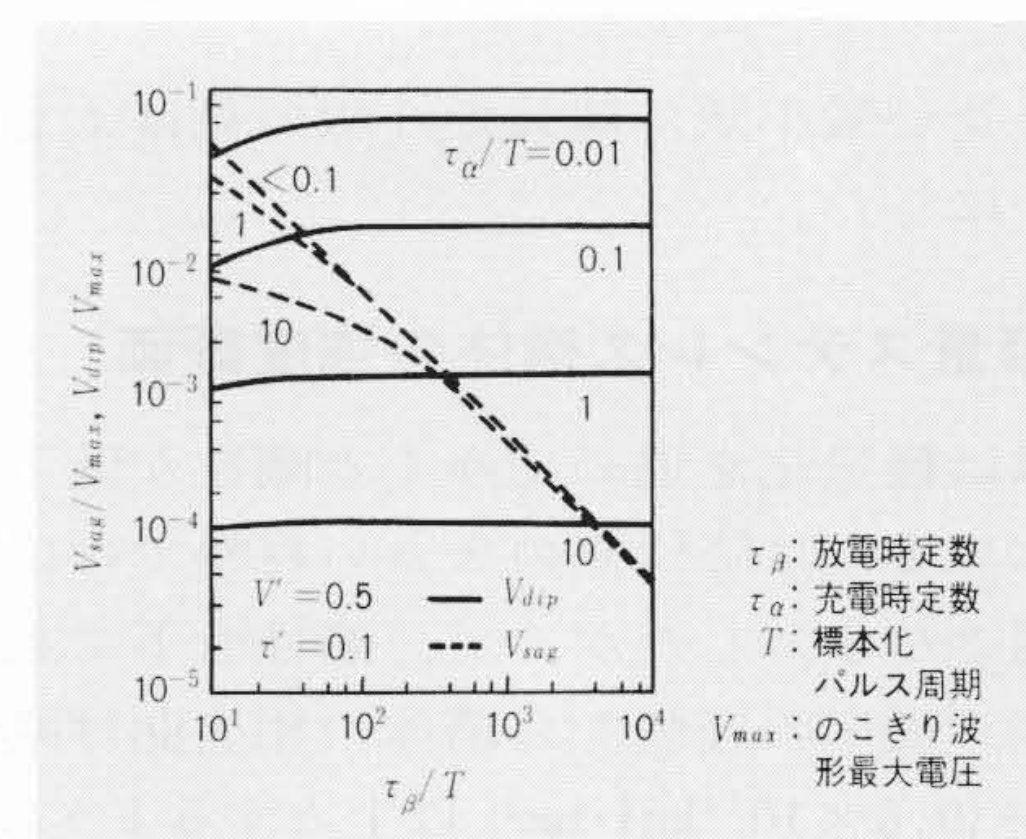


図2 雑音特性