

# レーザー溶接によるステンレス鋼製ハニカムパネルの製造技術の開発

## Development of All Laser Welded Honeycomb Structure for Civil Transports

及川 昌志<sup>\*(1)</sup> 南田 勝宏<sup>\*(2)</sup> 吉田 裕一<sup>\*(3)</sup> 鈴木 規之<sup>\*(3)</sup>  
 Masashi OIKAWA Katsuhiko MINAMIDA Yuichi YOSHIDA Noriyuki SUZUKI

### 抄 録

輸送機器の軽量化を目的にレーザー溶接ステンレス鋼製ハニカムパネルの製造技術を開発した。パネルは波板形状の芯材、内外面板、パネル端面にパネル同士などと接合するフランジで構成する。フランジは曲面パネルの提供を平面パネルと同等とし、構造物のパネル構造の面積積化を可能としている。またパネルの各構成部材同士の接合にレーザー溶接法を採用している。レーザー溶接法は溶け込み深さの高い制御性が特徴でパネル外面に溶接痕の無い耐食性に優れ、美しいパネルの提供を可能にしている。本パネルは国家プロジェクト次世代高速船実海域試験船(テクノスーパーライナー)と東日本旅客鉄道株式会社による次世代通勤列車試作車両(ACトレイン)に採用されている。

### Abstract

An all-laser-welded stainless-steel honeycomb structure was developed for civil transports. This honeycomb panel consists of corrugated sheet, face sheets and flanges. These flanges are important for manufacturing curved surface panels and enable joining panels to panels in the field. A laser-welding process was applied to manufacture this honeycomb panel. Laser welding features highly controllable depth penetration, which eliminates welding bead on the honeycomb panel external surface. Therefore, this panel has high corrosion resistance and a sturdy appearance. This honeycomb panel was employed in a prototype of a high-speed freight ship as a national project. It is also being applied in a prototype commuter train and is being examined by the East Japan Railway Company.

## 1. 背 景

ハニカムパネルは軽量、高剛性、高強度の構造材料として輸送機器に用いられてきている。基本的な構成はコアと呼ばれる芯材とそれを両面から挟み込む平板である。コアの形状により蜂の巣状のヘキサゴナル型、波板状のトラス型などがある。素材は多様でアルミニウム合金、鉄鋼材料、チタン、複合材料などがあり、それぞれ用途により使い分けている。

従来のパネルに共通する問題は、曲面パネルの製造プロセスが複雑で価格が高い、パネル同士や他部材との接合に特殊なインサート材や専用工具、工程を必要とするため現場施工性が悪い、アルミニウム合金製パネルでは耐食性や溶接性が悪いなどである。

そこでこれらの問題を解決したレーザー溶接によるステンレス鋼製ハニカムパネルを開発した。その概要図を図1に示す。基本構成はコア、内外面板、そして本パネルの特徴である4端面に配したフランジである。これまでの主な成果は、

(1)国家プロジェクト次世代高速試験船(TSL: Techno Super Liner, 1993年プロジェクト終了、運輸省(当時)注管)の実海域試験船に

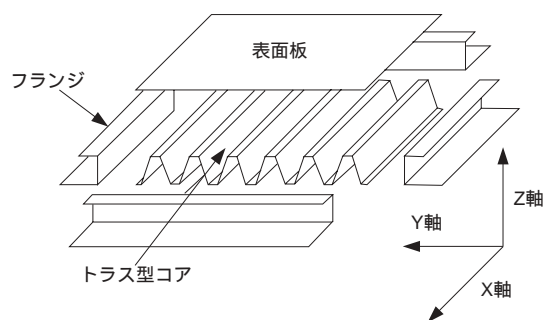


図1 レーザ溶接ステンレス鋼ハニカムパネルの概要図

搭載(図2)され評価を受けた。

(2)東日本旅客鉄道株式会社次世代通勤電車試作車両(ACトレイン, モハE993-1)の車両構体に採用(図3)され試験走行中(2003年6月現在)である。

さらにこれらの製造技術を確認するとともに、

(3)寿命予測を含めたコンピュータシミュレーションによるパネル最適化技術を確認した。

<sup>\*(1)</sup> 株式会社日鐵テクニクス レーザー技術センター  
 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL:(0439)80-2504

<sup>\*(2)</sup> 環境プロセス研究開発センター 計測制御研究開発部

<sup>\*(3)</sup> 鉄鋼研究所 加工技術研究開発センター

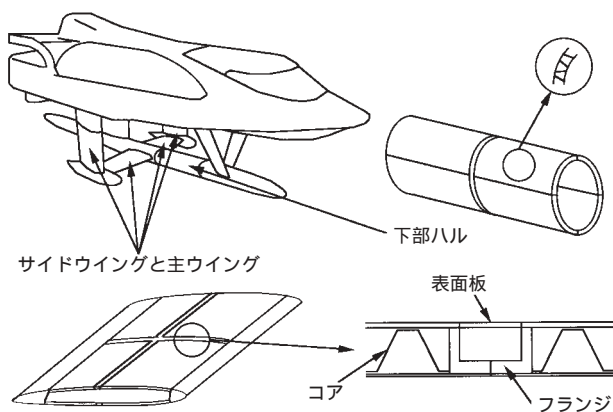


図2 次世代高速船とパネル搭載箇所の概要図



図3 次世代通勤車両試作編成のパネル搭載車両

その特徴は次の通りである。

- (1)アルミニウム合金に比較し耐食性が高い，溶接性に優れる，リサイクル率が高い，素材製造時の二酸化炭素排出量がアルミニウム合金の約1/3であるステンレス鋼板を用いている。
- (2)トラス型コアを採用することで2次曲面パネルを平面パネルと同等に製造可能とした。
- (3)パネル同士や他部材との接合用のフランジを一体化し専用工具などを必要としない現工法で現場施工を可能とした。
- (4)パネルを構成する各部材同士の接合にレーザー溶接法を採用し，特に外板とコアの溶接において溶け込み深さを制御することで外板に溶接痕のない耐食性，美観に優れたパネルの提供を可能とした。

本報では次世代高速船実海域試験船(以下，TSL)と次世代通勤電車試作車両(以下，ACトレイン)用のパネルの基本的な機械的特性と，ACトレイン用パネルのコンピュータシミュレーションによる寿命予測を行った結果について記述する。

## 2. TSL実海域試験船用ハニカムパネルの特徴と基本的機械的特性

### 2.1 TSLの特徴とパネルの採用箇所

TSLは貨物輸送の陸上から海上への移行を目的に，海上で時速93km/hでの安定航行を目標に運輸省(当時)主管の国家プロジェクトによって大手造船メーカーにて開発された。船体は水中翼型で，居住貨物空間と主要機関で構成する上部船体と，没水体，サイドストラット，水中翼で構成する下部船体である。レーザー溶接ステンレス鋼製ハニカムパネルは下部船体に採用された。特に水中翼は船全体の揚力を得るため寸法精度と軽量化が求められる部材である。従来は10μmの寸法精度を得るため無垢板からNC制御フライス加工で翼形状に成形していたが，軽量化の要求に応えられないため，図4に示す曲面形状のレーザー溶接ステンレス鋼ハニカムパネルが採用された。

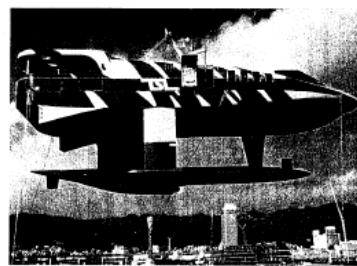


図4 次世代高速船のレーザー溶接ステンレス鋼ハニカムパネル製水中翼船

### 2.2 TSL用パネルの特徴と機械的特性

TSL実海域試験船用パネルの主な仕様を表1に示す。素材は海水に対する耐食性が高くTMCP圧延により降伏点荷重を高めたSUS317J2Lである。本パネルの最大の特徴はコアとフランジをレーザーによって接合したことである。これはパネル端面のコアの不連続部で内外面板への応力集中を避けるためである。レーザー溶接も含めた従来の溶接手法ではコアとフランジの熱容量の差が大きく溶接は不可能であった。そこで熱容量の差を緩和するレーザーペースト溶接法を採用した。本手法ではNi粉と有機溶剤で構成するペーストをフランジ溝部分に充填後，連続発振YAGレーザーを照射しペーストをシタター状とし，その後，本溶接を行う。

図5に概念図を示す。レーザー発振器は連続発振YAGレーザーで，出力は加工点で189Wである。フランジに施した溝幅を0.6mmと0.8mmとしてレーザー走査速度を変え溶接試験を行った。本レーザーペースト溶接法によるコアとフランジ溶接部(図6)の引張剪断強度試験結果を表2に示す。破断強度は235MPaから307MPaであり，コアの降伏点荷重( $Y_s$ )と溶接部の破断強度( $T_s$ )の比( $T_s/Y_s$ )は0.68から0.89となった。素材の破断強度に比較し溶接部の破断強度は低いものの降伏点荷重の約70から90%を達成し十分な強度を有していると考えられる。また内外面板とコアの溶接には連続発振炭酸ガスレーザー(主仕様については表3参照)を用いた。特に海水と接触する外面板とコアとの接合には外面板表面に溶接痕の無いハーフペネトレーション溶接法を採用した。なお内面板とコアとの接合は内面板側から貫通溶接を行っている。

本手法の概要図と溶接部断面を図7および図8に示す。図8上部に示すようにコア(薄手の板)側からのレーザー照射により外面板の溶

表1 次世代水中翼船用パネルの主な仕様

外面板	内面板	コア			
		形状	板厚	ピッチ	上辺長さ
2.0mm	1.0mm	トラス型	0.4mm	24.3mm	7.0mm

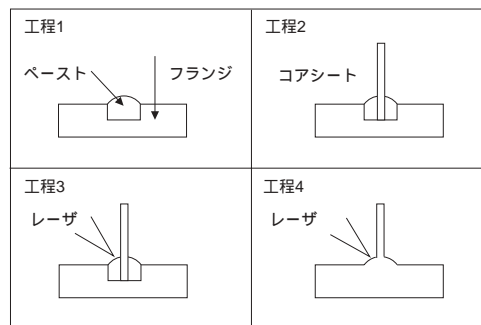


図5 レザーペースト溶接法の概念図

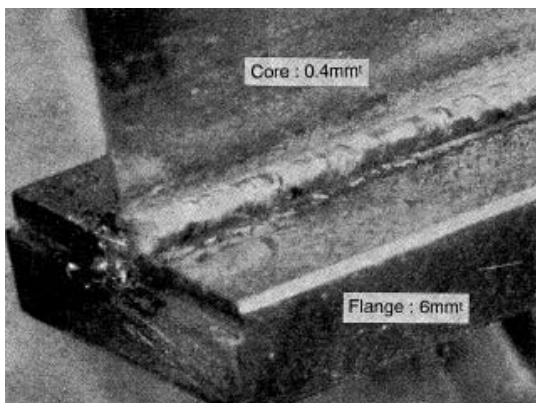


図6 レーザペースト溶接部分

表2 レーザペースト溶接法の引張剪断強度試験結果

溝幅	溶接速度 : 0.6m/min		溶接速度 : 0.8m/min	
	破断強度	Ts/Ys	破断強度	Ts/Ys
0.6mm	235MPa	0.68	290MPa	0.84
0.8mm	307MPa	0.89	300MPa	0.87

表3 炭酸ガスレーザの主な仕様

共振器種類	波長	最大出力	ビームモード
不安定型	10.6 $\mu$ m	15kW	TEM01*

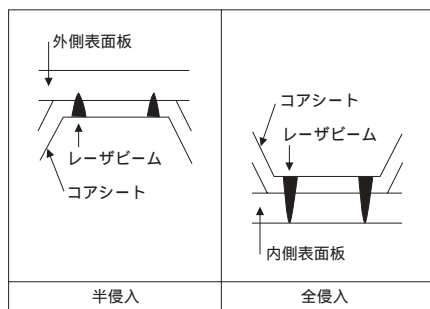


図7 レーザ溶接法の概念図

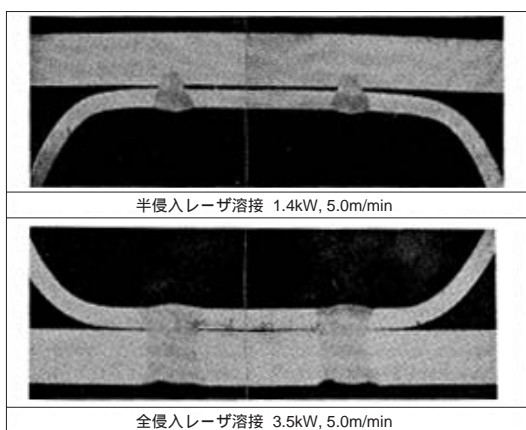


図8 レーザ溶接部

融は板厚の約1/3程度である。外面板への溶融深さを変化させた場合として溶接速度を変化させた場合のコアと外面板の引張剪断強度試験結果を図9に示す。溶接速度4.5m/min以下の速度領域での破断応力は素材の破断応力883MPaをほぼ達成している。これら3種類の溶接手法を用いパネルを製作し機械的特性試験を実施した。実施した試験項目を表4に示す。その中からパネル部分と他部材を想定した2枚の平板で構成する部材との引張試験を実施した。

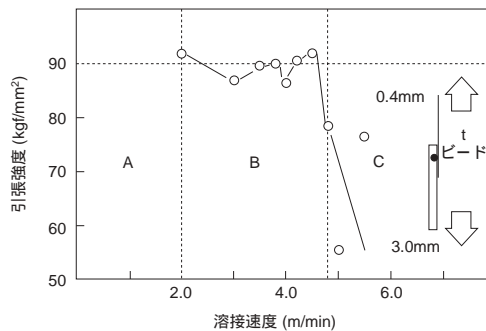


図9 コアと外面板の引張剪断強度試験結果

表4 機械的特性評価項目

	静的特性	疲労特性
	X軸方向	圧縮
引張		引張
曲げ		曲げ
X軸方向フランジ部分	引張	引張
		曲げ
Y軸方向	圧縮	
	引張	引張
	曲げ	
Y軸方向フランジ部分	引張	引張
Z軸方向	圧縮	引張
	引張	

試験体の概要図を図10に示す。試験体はパネル部(コア, 内外面板, フランジ)で構成する。そしてコアとフランジを接合した部位, 内外面板とコアを接合した部位, 内外面板とフランジを接合した部位を含む), と2枚の平板部で構成している。図11に荷重-変位線図を示す。図11中に示す $P_0$ から $P_1$ は弾性領域内で $P_1$ が降伏点となる。 $P_2$ 点がコアと内面板の破断点で $P_3$ 点がコアとフランジの破断点である。 $P_4$ はフランジと内面板の破断点である。降伏点荷重と最大荷重をコアと内外面板で構成する部位の断面積で除し応力を求めた結果は, 降伏応力の平均値が475MPa, 最大応力の平均値が554MPaとなる。パネル要求条件の降伏応力は42MPaである。疲労特性も含めた機械的諸特性は要求条件を満たしていることを確認した。

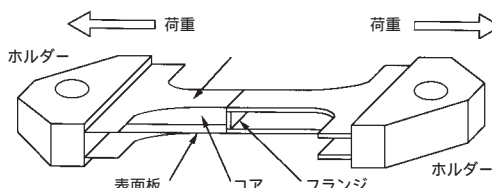


図10 引張試験体の概念図

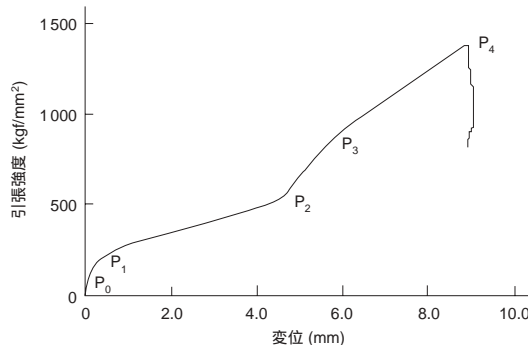


図11 荷重 変位線図

### 3. ACトレイン用ハニカムパネルの特徴と基本的機械的特性

#### 3.1 ACトレインの特徴とパネルの採用箇所

ACトレインはライフサイクルコストの低減、旅客サービスの向上、環境負荷の小さい車両の実現を目標に東日本旅客鉄道株式会社により開発されている次世代通勤電車試験車両である。様々な新技術が取り入れられ、車両構体重量と製造コストの削減の一つの目的としてレーザー溶接ステンレス鋼製ハニカムパネルが採用された。

従来の車両構体は柱、梁、外板で構成し、そのため重量低減と部品点数の多さによる製造プロセスと部品管理コストの削減には限界があると言われてきた。そこで車両構体のパネル化の検討が進み、特急列車の車体にはアルミニウム合金押し出し材が採用されている。しかしながらアルミニウム合金押し出し材はドアの多い通勤車両ではコストメリットが出にくい。このことから車両の部位ごとにパネル化を行い、無塗装で耐食性が高くリサイクル率が高いステンレス鋼板を用いたハニカムパネルが有効と考えられた。

このような背景のレーザー溶接ステンレス鋼製ハニカムパネルの鉄道車両構体への採用が検討され、機械的特性の評価、車両構体組立方法とコストメリットの検討を行うためACトレインに採用された。ACトレインは図12に示すように連節型の5両編成の車両である。特に構体は素材、構造を変えた4種類が採用されている。レーザー溶接ステンレス鋼ハニカムパネルは図12中の中間車両に用いられている。パネル搭載箇所を図13に示す。パネルの使用箇所は屋根、床、妻部を除く側面である。車両構体は側部を高い剛性の部材で構成することで車両全体の剛性を高めることができ側部に採用された。

#### 3.2 パネルの機械的特性

パネルの基本構成はトラス型コア、内外面板、フランジである。パネルの主な仕様を表5に示す。仕様決定にあたっては機械的特性



図12 ACトレインの編成

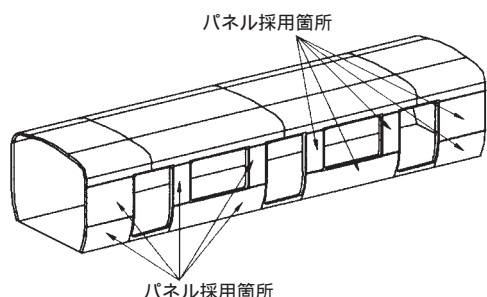


図13 レーザー溶接ステンレス鋼ハニカムパネルのACトレインへの搭載箇所

表5 パネルの主な仕様

外面板	内面板	コア			
		形状	板厚	ピッチ	高さ
1.0mm	0.8mm	トラス型	0.4mm	49.2mm	36.2mm

の要求の他に路面からの石跳ね、旅客が傘で外面板を突くなどの事態をふまえ、外面板を要求値の0.8mmより1.0mmに厚肉化している。パネルの製造には要求特性に応えYAGレーザーによるスポット溶接法を採用し溶接時に発生する熱歪みの低減を行いつつ、溶け込み深さの制御によって外板の美しさと強度を確保している。製造プロセスは大きく分け4行程である。第一は製作するパネルの曲面に合わせて成形したフランジに外板を溶接する行程、第二は外板にコアをパルス発振YAGレーザーによってスポット溶接する行程(本行程で入熱制御を行い外板に溶接痕の無い接合を得る)、第三は外板と溶接したコアに内板を溶接する行程、第四は内板とフランジを溶接する行程である。

第二行程の溶接の様子を図14に示す。レーザーはレーザー発振器から光ファイバーによって加工ヘッドまで伝送する。加工ヘッドは図中に示すようにNC加工テーブルによってパネル上を走査させている。図中の高輝度部分はレーザー加工ヘッドから照射したレーザーによるプラズマである。レーザー発振器とレーザー伝送集光光学系の主な仕様を表6に示す。

パネルの機械的特性として代表的な静的および疲労曲げ特性を記す。パネルの形状と試験の概要図を図15に示す。静的試験ではコアの形状と溶接ピッチが曲げ特性に与える影響を調査するため表7に示す組み合わせで試験を実施した。パネルの弾性係数は変位、荷重、断面2次モーメント、荷重支持スパンと載荷部形状の関係から算出した。弾性限は荷重-変位曲線の変局点とし、最大荷重は同様に最大値とした。

結果を表8から10に示す。弾性限はコア台形上底の長さにしたがい20612~16651kgf/mm<sup>2</sup>まで減少している。これは形状がコアと内外面板の拘束力に影響を与えているためである。溶接点に対しては

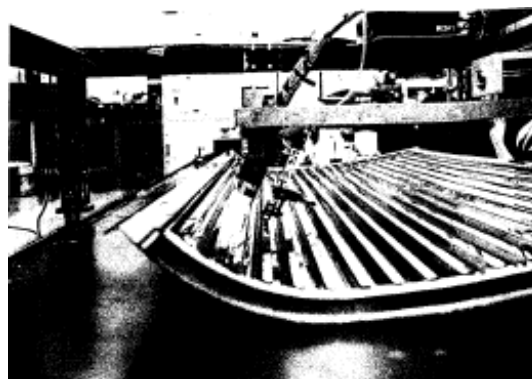


図14 コアと外面板の溶接中のパネル

表6 レーザー発振器と伝送集光光学系の主な仕様

YAGレーザー発振器		伝送光学系		集光光学系
波長	出力	形態	コア径	拡大倍率
1.06μm	400W	SI型	800μm	0.5倍

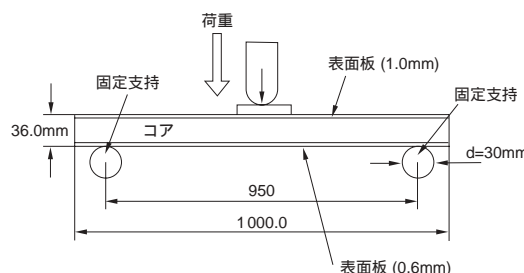


図15 曲げ特性評価試験概要図

表7 評価したパネルの仕様

	コア台形上底の長さ(mm)		
溶接ピッチ(mm)	7.5	10.0	12.5
5.0	×		×
3.3			
2.5	×		×

表8 縦弾性係数(kgf/mm<sup>2</sup>)

	コア台形上底の長さ(mm)		
溶接ピッチ(mm)	7.5	10.0	12.5
5.0		17 689	
3.3	20 612	17 537	16 651
2.5		16 942	

表9 最大荷重(kgf)

	コア台形上底の長さ(mm)		
溶接ピッチ(mm)	7.5	10.0	12.5
5.0		341	
3.3	331	361	382
2.5		372	

表10 弾性限(kgf)

	コア台形上底の長さ(mm)		
溶接ピッチ(mm)	7.5	10.0	12.5
5.0		178	
3.3	117	190	179
2.5		168	

偏差が最大でも5%であるためばらつき範囲と考える。最大荷重は溶接点数とコア台形上底の長さにしたがい増加する。弾性限は溶接点数とコア台形上底の長さには相関がないが偏差は31%と大きい。これはパネルの僅かなねじれが関係していると考えられる。コアピッチ12.5mm, 溶接ピッチ5mmの条件において疲労特性を調査した。最大荷重75kgf, 最小荷重7.5kgfの応力比0.1の条件で500万回を達成している。

静的および繰り返し引張特性, 静的圧縮特性, 静的剪断特性の調査を行いパネルの形状を決定した。

本仕様で製造したパネルは東急車輛製造株式会社によって現在の車両製造用設備をそのまま用いパネル同士, その他の窓枠, ドア枠と接合した。図16は車両約5mの側面を示している。ドアの両端部分, および窓下部分がレーザー溶接ステンレス鋼ハニカムパネルである。この後パネルは構体結合と呼ばれる側部(パネル部), 屋根部, 床部, 妻部の結合プロセスを経て車両構体が完成する。完成した車

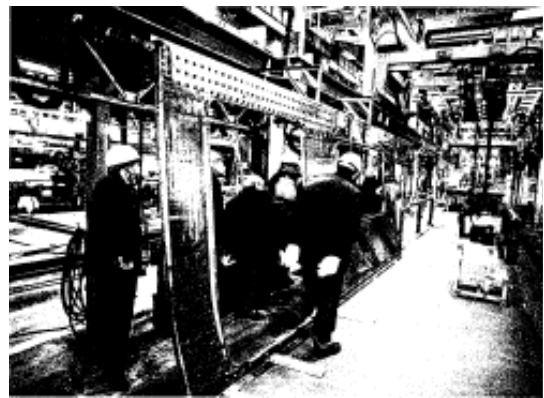


図16 車両側面部の一部のパネル

両構体は静的機械的特性と疲労特性の評価を実施している。特に疲労特性の評価では満員時の乗客の重量を再現するため床面に鋼製の錘を敷き詰め, さらにアクチュエータによって繰り返し荷重を与え歪み量測定試験を行っている。このように実車両による機械的試験と同時にコンピュータによる構造解析を実施している。

## 5. まとめ

レーザー溶接ハニカムパネルの製造技術を開発し, また寿命予測まで含めたパネル設計・構造解析技術を確立した。

- (1)国家プロジェクト次世代高速試験船の実海域試験船に搭載され評価を受け実用性を証明した。
- (2)次世代通勤電車試作車両(ACトレイン, モハE993-1)の車両構体に採用され試験走行中である。
- (3)コンピュータシミュレーションによるパネル最適化技術を確立した。

レーザー溶接法は入熱制御性に優れている特徴を持つ。そのため厚さ30μmのステンレス鋼箔から厚さ1インチ程度の厚板の健全な溶接が可能である。さらに鉄鋼材料以外の例えば金属間化合物のレーザー溶接の可能性も報告されている。金属間化合物などの新材料, その特性を損なわないレーザー溶接法, そしてハニカムパネル設計・構造解析技術との融合で新たなパネルの適用分野が広がるものと確信している。

## 6. 謝辞

東日本旅客鉄道株式会社および東急車輛製造株式会社に感謝いたします。