

Supported by  日本 THE NIPPON  
財団 FOUNDATION

# 船舶建造高品質化・効率化技術の調査研究 (レーザー溶接技術の調査研究)

2012年度 成果概要報告書



2013年9月

一般財団法人 日本船舶技術研究協会

# 目 次

1. 背景及び目的	1
2. 研究内容	1
2. 1 適用工程の検討	1
2. 2 レーザ・アークハイブリッド溶接研究室実験	2
2. 3 継手の評価・検査方法の検討	3
2. 4 レーザ・アークハイブリッド溶接継手の性能評価試験	3
2. 5 レーザ・アークハイブリッド溶接に適した船体構造・建造工程の ケーススタディ	4
3. 研究体制	4
4. 研究期間と研究スケジュール	5
5. 欧州視察報告	7
6. 研究成果の概要	11
6. 1 レーザ・アークハイブリッド溶接研究室実験	11
6. 2 継手の評価・検査方法の検討	12
6. 3 レーザ・アークハイブリッド溶接継手の性能評価試験	13
6. 4 レーザ・アークハイブリッド溶接に適した船体構造・建造工程の ケーススタディ	14
参考資料 事業活動状況報告	15

## 1. 背景及び目的

我が国造船業界は、韓国、中国との激しい国際競争を続けているが、生産規模や生産コストで勝る韓中に対し厳しい戦いを迫られており、国際シェアは低下している。また、今後数年内に、中国等で大拡張された建造能力が需要に対して過剰になる需給ギャップ問題が顕在化する見込みであり、一定の規模をもった産業として造船業を国内に維持できるかどうかの瀬戸際の段階にきている。

こういった状況を克服するためには、建造工程の生産性を高め、生産コストの低減を図る取組みを進めていくことが不可欠である。既存技術の改善に留まらず、新しい技術を積極的に取り入れ、船舶建造工程に適用することで、次世代の船舶建造技術の基盤を築いていくことも重要である。

このため、船舶建造高品質化・効率化技術の調査研究として、生産技術の面では、レーザー溶接技術の船舶建造工程への適用に係る調査研究、生産管理の面では、モニタリング技術等の船舶建造工程への適用に係る調査研究の2つのプロジェクトを実施する。本研究は、この内、レーザー溶接技術の船舶建造工程への適用に係る調査研究と船舶建造高品質化・効率化技術の調査研究プロジェクト全体の管理・運営を実施するものである。

レーザー・アークハイブリッド溶接は入熱量が小さくひずみを抑えることが出来る高精度・高品質の溶接技術であり、自動化や情報技術との組合せにより、現行のブロック建造工程自体も大きく合理化できる可能性を持った技術である。一方で、レーザー・アークハイブリッド溶接はアーク溶接と比較して、接合部材間のギャップ裕度が非常に小さいことや、厚板の溶接が困難なこと等の課題を抱えている。

以上のことより、これらの課題を解決し、我が国造船業の競争力強化に資することを目的として、レーザー溶接技術の船舶建造工程への適用に係る調査研究を2012年度～2013年度にかけて実施するものとする。

## 2. 研究内容

### 2.1 適用工程の検討

レーザー・アークハイブリッド溶接は、汎用的な技術であり、造船工程での溶接作業に広く適用できる技術であるが、実験条件を定めるうえでは、適用工程について一定の想定を持っていく方が現実的かつ具体的な検討が行える。適用を想定する工程を絞り込むために、以下の3点を考慮した。

- ①自動化が比較的容易な工程に的を絞る ⇒ 小組立、大組立工程
- ②ボリュームゾーンをターゲットに効果の最大化を狙う ⇒ 繰返しの多い構造・部位

- ③自動化一貫ラインにレーザー技術を導入することで  
工程能力を高め、高品質、高効率な施工を目指す ⇒ 平行部ライン

これらの条件に当てはまる以下の工程を、当面の適用対象工程として想定するものとする。

- ア) 平板板継ぎ
- イ) ビルドアップロンジ製作・取付
- ウ) サブパネル製作 (パネル×スティフナ)
- エ) 上部構造のデッキ

## 2.2 レーザ・アークハイブリッド溶接研究室実験

### (1) 研究目標

上記の適用工程に用いられる溶接継手は、すみ肉継手と突合せ継手である（多くはすみ肉継手）。そこで、これらに対する要求条件を造船所からヒアリングしてとりまとめ、研究目標を表 2.1 のように設定した。

表 2.1 研究目標

	板厚 (mm)	溶接速度 (mm/min)	溶接方向	ギャップ裕 度(mm)	その他
すみ肉溶接	ウェブ厚 ~15	1000~ 2000	両側溶接及び 片側貫通溶接	~1	・大気圧 ・水平すみ肉
突合せ溶接	~22	1000~ 2000	片側貫通溶接	~2(3) ( )は希望値	・大気圧 ・裏当て可

注) すみ肉溶接は完全溶込みを目標とした

### (2) 実験概要

表 2.1 に示された研究目標を達成するための溶接条件を導出することを目的として、研究室においてレーザ溶接プロセス実験を実施した。

#### ①溶接継手の材質及び大きさ

材質はNK規格材のKD36とした。大きさは、次の通りである。

##### ア) 溶接条件導出用継手

- すみ肉継手 . . . フランジ ; 300mm(長さ)×200mm (幅) ×14mm&21mm(板厚)  
ウェブ ; 300mm(長さ)×100mm(高さ) ×9mm &14mm(板厚)
- 突合せ継手 . . . 板 300mm(長さ)×100mm (幅) ×7mm&14mm&21mm (板厚)  
2枚の突合せ

##### イ) 強度等評価用試験体

溶接条件出しが達成された場合、この条件で溶接された継手の強度等評価するために以下の大きさの試験体を製作した。

- すみ肉継手 ・ フランジ ; 1000mm (長さ) ×400mm (幅) ×21mm(板厚)  
ウェブ ; 1000mm (長さ) ×200mm (高さ) ×9mm&14mm(板厚)
- 突合せ継手 ・ 板 1000mm (長さ) ×200mm (幅) ×7mm&14mm&21mm(板厚)  
2枚の突合せ

#### ②実験パラメーター

溶接条件を導出するために、以下のパラメータを考慮した。

- ア) レーザ溶接条件 (出力、ビーム径、レーザ焦点位置等)
- イ) アーク溶接条件 (電流・電圧、ワイヤ径、連続/パルス等)
- ウ) レーザトーチとアークトーチの相対配置 (溶接方向へのトーチ順序、縦横方向角度、トーチ間距離等)
- エ) プライマーの有無
- オ) 継手の溶接面の性状の影響 (機械加工面、レーザ切断面等)

### ③実験場所

大阪大学接合科学研究所

#### (3) 実験用設備・機器

レーザー・アークハイブリッド溶接実験装置及び周辺機器を設計製作した。レーザー発振器は、IPG社製の20kWのファイバーレーザーとした。実験システムの全体構成を図2.1に示す。

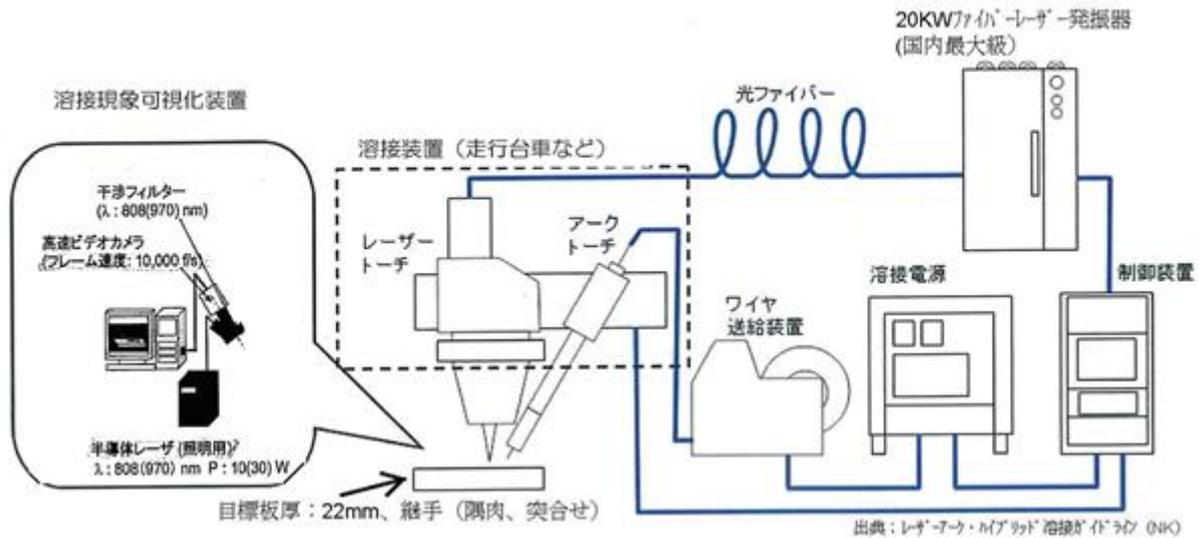


図2.1 実験システムの全体構成

#### 2.3 継手の評価・検査方法の検討

現行のアーク溶接の施工法承認、レーザー・アークハイブリッド溶接に関する各船級協会のルール及び既存文献等を参考にして、研究室実験で条件出しが出来た継手の評価・検査方法を決定した。

- ・すみ肉溶接部の評価・検査方法は各船級協会のルールを参考にして決定した。
- ・突合せ溶接部の評価・検査方法は既存の(一財)日本海事協会のガイドライン(レーザー・アークハイブリッド溶接ガイドライン、2009)等を参考にして決定した。

#### 2.4 レーザ・アークハイブリッド溶接継手の性能評価試験

研究室実験で条件出しが出来た2種類の継手、即ち、完全溶込みT継手(両側からすみ肉溶接を行い完全溶込みが達成された溶接継手)及び突合せ溶接継手に関して、強度等評価用試験体を製作し、本研究で決定した継手の評価・検査方法に従い、強度等の性能を評価した。

試験条件を表2.2に示す。

表2.2 試験条件

NO.	継手種類	板厚(mm)	ギャップ(mm)	溶接方法	ガス	プライマー	開先	切断面	裏当て板
1	完全溶込みT継手	9	0	両側水平すみ肉	CO2	無	無	機械加工	—
2	完全溶込みT継手	9	1	両側水平すみ肉	CO2	無	無	機械加工	—
3	完全溶込みT継手	14	0	両側水平すみ肉	CO2	無	無	機械加工	—
4	完全溶込みT継手	14	1	両側水平すみ肉	CO2	無	無	機械加工	—
5	完全溶込みT継手	14	0	両側水平すみ肉	CO2	有	無	機械加工	—
6	完全溶込みT継手	14	1	両側水平すみ肉	CO2	有	無	機械加工	—
7	突合せ継手	14	0	片面下向き1パス	CO2	無	I形	機械加工	無
8	突合せ継手	17	0	片面下向き1パス	CO2	無	I形	機械加工	無
9	突合せ継手	21	0	片面下向き1パス	CO2	無	I形	機械加工	無

注) 突合せ溶接の場合、ギャップ0(ギャップ無し)の条件は、厳密には≒0.5mm程度のギャップに相当する

## 2.5 レーザ溶接に適した船体構造・建造工程のケーススタディ

レーザー・アークハイブリッド溶接によるメリットを最大限に生かすためには、現状のアーク溶接を単純にレーザー・アークハイブリッド溶接で代替するだけでなく、レーザー・アークハイブリッド溶接技術に適した船体構造・建造工程の検討が不可欠である。

そこで、レーザー・アークハイブリッド溶接に適した船体構造として、ガーダー方式ダブルハル構造(HOLDには横構造部材を配置せず、ガーダーをロンジスペースの間隔に配置した構造、構造が単純で自動化し易い構造である。日立造船が約20年前に発表し、プロダクト・オイルキャリアーとして数隻実用化された)を選定し、これをアフラマックスタンカーの船体平行部に採用した場合の船舶建造のケーススタディを実施した。

2012年度は、本構造の強度照査を(一財)日本海事協会のルールに基づいて行い、構造強度的に成立することを確認した。

## 3. 研究体制

船技協をプラットフォームとする調査研究委員会を組織し、下記の体制において、4回の委員会を実施した。また、調査研究委員会の下部に「レーザー溶接継手の評価・検査ワーキング・グループ」を設置して、個別の課題に対する具体的な検討を2回に亘って実施した。

<レーザー溶接技術の船舶建造工程への適用に関する調査研究委員会>

(以下順不同)

- ・ 国立大学法人 大阪大学 片山教授 (委員長)
- ・ 国立大学法人 九州大学 後藤准教授
- ・ 国立大学法人 東京大学 青山教授
- ・ (独) 海上技術安全研究所

- ・（一社）日本造船工業会
- ・（一財）日本海事協会
- ・ジャパンマリンユナイテッド株式会社
- ・株式会社 名村造船所
- ・住友重機械マリンエンジニアリング株式会社
- ・三井造船株式会社
- ・三菱重工業株式会社
- ・J F E スチール株式会社
- ・国土交通省海事局船舶産業課
- ・（一財）日本船舶技術研究協会（事務局）

< レーザ溶接継手の評価・検査ワーキング・グループ >

- ・国立大学法人 九州大学 後藤准教授（主査）
- ・国立大学法人 大阪大学 水谷技術専門職員
- ・（独）海上技術安全研究所
- ・（一財）日本海事協会
- ・ジャパンマリンユナイテッド株式会社
- ・株式会社 名村造船所
- ・住友重機械マリンエンジニアリング株式会社
- ・三井造船株式会社
- ・三菱重工業株式会社
- ・J F E スチール株式会社
- ・（一財）日本船舶技術研究協会（事務局）

#### 4. 研究期間と研究スケジュール

研究期間は以下の通り。研究スケジュールを表 4.1 に示す。

2012 年 4 月 1 日 ～ 2013 年 9 月 30 日（研究期間を延長）



## 5. 欧州視察報告

### 5.1 出張目的

「レーザ溶接技術の船舶建造工程への適用に関する調査研究」プロジェクトに資するため、片山はレーザ加工の国際会議（LANE 2012）に参加し、その後、4名でレーザ溶接技術が世界で最も進んでいる欧州（主にドイツ）の関連機関を視察した。溶接機メーカー、レーザ発振器メーカー、造船向けレーザ関連設備メーカー、レーザセンターおよび造船所と非常に広範囲の関連機関を訪問し、欧州（主にドイツ）のレーザ技術の最新動向等について情報収集を行った。

### 5.2 出張者

片山 聖二	大阪大学 接合科学研究所 教授
大井 健次	J F E スチール株式会社 スチール研究所 接合・強度研究部 部長
菊池 淳史	I P G フォトニクスジャパン株式会社 営業部 部長
森山 厚夫	(一財) 日本船舶技術研究協会 研究開発プロジェクトリーダー

### 5.3 日程、訪問先及び面談者等

11月13日（火）～

11月15日（木）・・・片山のみ、ドイツ・フュルト市で開催された LANE2012 に基調講演者として講演を行った。

11月16日（金）・・・9:00～16:00 **FRONIUS 社**（世界最大級の溶接機メーカー）  
Heinz Hackl（Member of Board, Chief Technology Officer）  
他4名

11月19日（月）・・・9:00～12:00 **SLV 研究所**（造船関係の民間の研究所）  
Dr. Rigo Peters（Head of Research and Development）

・・・13:00～15:00 **IMG**（造船向けレーザ関連設備のメーカー）  
Dr. Franz Haentze（Asia Manager）他2名

11月20日（火）・・・9:00～12:00 **LZN**（レーザセンター）  
Dr. Claus Emmelmann（所長）他1名

11月21日（水）・・・14:00～16:30 **Meyer Werft 造船所**（大型客船の建造所）  
Thomas Witolla（Head of Department Research and Development）

11月22日（木）・・・14:00～16:30 **IPG フォトニクス ジャーマニー**  
（ファイバーレーザ発振器メーカー）  
Dr. Eugene Scherbakov（社長）他1名

11月23日(金)・・・14:00～17:00 Fraunhofer ILT (レーザセンター)

Dr. Dirk Petring (Group Manager Macro joining and Cutting)

#### 5.4 主な調査結果

##### (1) レーザ技術開発に対するドイツの取組

レーザ技術は始め米国で発展したが、1990年代初頭に日本が一時世界のレーザ市場をリードした。1980年代にドイツでレーザセンターの設立が始まり、1990年代には固体レーザ技術の飛躍的進歩と強力な国プロの支援によってドイツのレーザ技術が開花した。バブル経済の崩壊以後の失われた10年の中で停滞する日本と入れ替わってドイツが世界一に躍進し、現在に至っている。

ドイツはレーザ産業を将来の「雇用を生み出す産業」と位置づけ、国家、産業界、学界が緊密な連携の中でレーザ技術開発を進めている。例えば、レーザ専門の研究機関であるレーザセンターが7機関(下表参照、今回この内片山のみ3機関、4名で2機関を訪問)あり、国や企業からの受託研究・共同研究を行うとともに、レーザ技術の教育・訓練も行っている。レーザ技術開発には多大の費用と設備が必要であり、1企業が単独で開発するには負担が大きすぎ、研究開発設備等を業界全体で共有することが効率的であるが、この役割をレーザセンターが果たしていると考えられる。レーザセンター全体の研究者の数は2010年のデータで約500名であり、機械工学系が多く、物理系は少ない。また、近郊の大学の教授がレーザセンターの幹部を兼務している場合が多く、大学との密接な関係を保ち、人材の交流を行うとともに、基礎研究は大学で行い、応用研究・実用化研究はレーザセンターで行うという役割分担が確立している。一方でレーザセンターは世界に開かれており、今回訪問したLZNのEmmelmann所長は以前日本のレーザメーカーと共同研究を実施していたとのことであった。

表 5.1 ドイツのレーザセンターと関連大学

レーザセンター	関連大学
BIAS(Bremer Institute fur Angewandte Strahltechnik GmbH)	University of Bremen
Fraunhofer ILT(Institute Laser Technik)	RWTH Aachen University
IFSW(Institute fur Strahl Werkzeug)	University of Stuttgart University of UIm Karlsruhe Institute of Technology
LZH(Laser Zentrum Hannover)	University of Hannover
Fraunhofer IWS(Institute fur Werkstoff- und Strahltechnik)	Technical University of Dresden University of Science Mitweida
BLZ(Bayerisches Laser Zentrum GmbH)	University of Erlangen-Nuremberg ( <a href="#">German</a> : Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg)

LZN(Laser Zentrum Nord)	TUHH Hamburg University of Technology
-------------------------	--

上述のように、ドイツがレーザ加工技術で世界一に躍進した理由は、国家、産業界、学界の緊密な連携（多数のプロジェクトの実施）と多額の投資、その象徴であるレーザセンターの存在が大きいと考えられる。研究者の育成についても十分にされており、日本の学ぶべき点は多い。

## (2) ヨーロッパ造船業におけるレーザ技術開発の動向

レーザ技術の応用分野は自動車、航空機、造船、機械、医療等多岐に亘るが、この内ヨーロッパの造船業におけるレーザ技術の動向について調査した結果を述べる。まず、全体的な技術開発としては、造船関係のレーザ技術開発プロジェクトとして、次のプロジェクトが行われている。

**DockLaser(2001～2004)**：建造ドック内で使える可搬型のレーザ溶接装置の開発

**BESST (2009～2013)**：突合せ溶接、片側隅肉溶接の疲労強度の問題を研究、また、移動型のレーザ溶接装置（三菱重工タイプ）の開発を実施。

ヨーロッパの造船所はこれらのプロジェクトに参画することにより、レーザ技術の造船への実適用を図ってきている。

### 造船へのレーザ適用の経緯

1980-1995	サンドイッチパネル
1994	CO <sub>2</sub> レーザのガイドラインができる
1997-1998	オデンセ（デンマーク）、フィンカンティエリ（イタリア）の適用
1999	フラットパネルの採用 Blohm&Voss（ドイツの造船 Tyssenn グループ）
2001-2002	サンドイッチパネル Meyer（ドイツ） 造船突合せ継手（CO <sub>2</sub> レーザハイブリッド）
2002	Dock Laser（EU Project）
2006	Aker Shipyard（フィンランド）BMBF Project（韓国 3 位の STX 造船が買収） 6 - 10 mm <sup>t</sup> の突合せ継手（10 k W ファイバーレーザ + Cu バックリング方式）
2008	フィンカンティエリ（イタリア）2008.1 月にスタート 4 - 20 mm <sup>t</sup> の突合せ継手（10 k W ファイバーレーザ + GMAW）

## 5.5 所感

ヨーロッパでは客船の建造にレーザー MAG アークハイブリッド溶接を既に適用しており、引き続き船殻の溶接にもレーザー・アークハイブリッド溶接を適用すべく、厚板のレーザー・アークハイブリッド溶接を研究開発中である。更に、リモート溶接技術を用いた3次元ブロック（新構造様式）の全自動溶接にもチャレンジしている。

現状では造船会社3社程度が板継溶接にレーザーを適用しており、板厚 20-25 mm<sup>t</sup> への拡大を進めているところであった。板厚の拡大にはレーザー・アークハイブリッド溶接+MAG（ツイン）が検討されており、12 mの試作機もすでに見られた。さらにはミリングでこれまで進めてきたものをレーザー切断に置き換えるべく、検討を進めているようであった。

すみ肉溶接については現状では Meyer 社のみが実用化しているが、多くの研究機関やシステムメーカーで研究開発が進められており、実適用は加速して進むように感じられた。この背景としては、ヨーロッパでの客船、フェリーを主体とする建造における薄肉材での歪みの発生抑制が開発のベースにあると思われる。

一方、我が国は、三菱重工が板厚（ $\leq 14$  ミリ）までのレーザー・アークハイブリッド溶接の実用化を達成しているものの、厚板（ $\leq 22$  ミリ）のレーザーハイブリッド溶接については船技協のプロジェクトにおいて、研究室実験に着手したばかりである。このように彼我の差はかなり大きく、ヨーロッパに学ぶべきことは多いと感じられた。

しかし一方で、厚板のレーザー・アークハイブリッド溶接に関しては、ヨーロッパも日本もまだ研究開発段階でありまだキャッチアップ可能である、とも感じた。

それから、ヨーロッパではレーザーセンターのような産・官・学の協力体制の受け皿があって、レーザー技術開発を全体として効率的に進めている。船技協のプロジェクトが終了すると、船技協には 20 kW レーザ・アークハイブリッド溶接装置が残される。船技協がレーザーセンターになれないにしても、今後のためにこの資産を学会・産業界が有効に使っていける仕組みを検討することは極めて重要であると感じた。

## 6. 研究成果の概要

### 6.1 レーザ・アークハイブリッド溶接研究室実験

得られた主な研究成果は、以下にまとめるとおりである。

#### (1) 裏当なし I 開先突合せ 1 パス溶接

- ① 炭酸ガスレーザー・アークハイブリッド溶接を用いて 9t, 14t, 17t, 21t (プライマー無) の各板厚及びギャップ : 0.5 mm で、外観評価において良好な継手を作製することができた。
- ② 15t, 22t (プライマー有) の各板厚及びギャップ : 0.5 mm で、外観評価において良好な継手を作製することができた。
- ③ 14t, 17t, 21t (プライマー無) の各板厚及びギャップ : 0.5 mm で、強度等評価試験体 (1 m) を作製することができた。

但し、22t (プライマー有) 並びに 21t (プライマー無) の板厚においては、次に述べる性能評価試験の結果、不健全部が存在することが確認され、健全な継手の製作には至らなかった。

#### (2) 完全溶込み T 継手溶接

- ① MAG ガスレーザー・アークハイブリッド溶接を用いて付加物 9t, 14t 厚さである表面研削・端面研磨材継手を作製することができた。
- ② 炭酸ガスレーザー・アークハイブリッド溶接を用いて付加物 9t, 14t 厚さである表面研削・端面研磨材継手を作製することができた。特に、ギャップが 0, 0.5, 1.0 mm において実験を行い、それぞれ最適条件があることを見出した。
- ③ 炭酸ガスレーザー・アークハイブリッド溶接を用いて付加物 15t 厚さであるプライマー付端面研磨材継手を作製することができた。特に、ギャップが 0, 0.5, 1.0 mm において実験を行い、それぞれ最適条件があることを見出した。
- ④ 上記のそれぞれの条件で強度等評価試験体 (1 m) を作製することができた。

#### (3) 炭酸ガスレーザー・アークハイブリッド溶接を用いたレーザー切断面を有する継手の作製

- ① レーザ切断面を有する継手の裏当なし I 開先突合せ 1 パス溶接において、レーザー切断のままの面では、外観評価も RT 評価も悪く実用化が困難なことが判明した。
- ② レーザ切断面をブラシがけした継手では、外観、内部とも良好であり、各ギャップ幅に対する適正溶接条件を導出することができた。
- ③ レーザ切断面を有する完全溶込み T 継手溶接においては、外観評価も RT 評価も悪くなかった。ただし、I 型突合せの結果を考慮して、強度等評価試験体 (1 m) の作製時には、レーザー切断面をブラシがけした継手を用いるように提案した。各ギャップ幅に対する適正溶接条件も導出した。

#### (4) 高速度ビデオ観察にて、

- 1) MAG ガスレーザー・アークハイブリッド溶接と炭酸ガスレーザー・アークハイブリッ

ド溶接の現象差を明らかにした。また、2) ワイヤーとレーザ間距離、レーザ出力とスパッタ生成挙動の関係も示した。さらに、3) I型突合せ溶接時の埋もれアーク現象や 4) アーク力による溶融池後方への強い流れが、高い余盛りを生成するのに寄与していること等を示した。

(5) 完全溶込みT継手溶接においてもI型突合せ溶接においてもレーザ・アークハイブリッド溶接における様々な施工法を提案し、実験的検討を行った。いくつかの施工法で将来性が期待できることがわかった。

(6) レーザ・アークハイブリッド・ステイク溶接を提案し、種々実験を行った。その結果サンドイッチ工法への応用の可能性が示された。

## 6.2 継手の評価・検査方法の検討

完全溶込みT継手に対する評価試験の試験項目、試験方法及び判定基準の一覧を表6.1に示す。

表6.1 完全溶込みT継手に対する試験項目、試験方法及び判定基準

完全溶込み T 継手に対する試験項目/試験方法/判定基準		
試験項目	試験方法	判定基準
硬さ試験	採取位置：溶接中断/再開箇所(中央部)+両端削除部近傍 測定荷重：HV10 測定位置：参照図省略 試験数：3断面	380 以下 (HV10)
マクロ試験	採取位置：溶接中断/再開箇所(中央部)+両端削除部近傍 マクロ試験片には、溶接熱影響のない母材を 10mm 以上含めること 試験数：3断面	き裂、溶込み不良、融合不良、その他有害と認められる欠陥があってはならない
外観試験	試験材全長	溶接部の表面は、整一で、割れ、アンダカット、オーバーラップ等有害と認められる欠陥があってはならない [適用検討]欠陥の判定基準：ISO5817 Level B (余盛り及び裏波の形状：ISO5817 Level C)
磁粉探傷試験	試験材全長 ISO 9934-1(2001), -2(2002), -3(2002) 又は JIS Z 2320-1(2007), -2(2007), -3(2007)	割れ、アンダカット、溶込み不良及び融合不良等有害と認められる欠陥があってはならない [適用検討]欠陥の判定基準：ISO5817 Level B
放射線透過試験	試験材全長 ISO 17636(2003) 又は JIS Z 3104(1995)	割れ、アンダカット、溶込み不良及び融合不良等有害と認められる欠陥があってはならない [適用検討]欠陥の判定基準：ISO5817 Level B
超音波探傷試験	試験材全長 UT: JIS Z 3060(2002) 評価対象きず：L 検出レベル	割れ、アンダカット、溶込み不良及び融合不良等有害と認められる欠陥があってはならない

次に突合せ継手に対する評価試験の試験項目、試験方法及び判定条件を表 6.2 に示す。

表6.2 突合せ溶接継手に対する試験項目、試験方法及び判定基準

突合せ溶接継手に対する試験項目/試験方法/判定基準		
試験項目	試験方法	判定基準
引張試験	試験片: NK U2A 号又は U2B 号 (参照図省略) 試験数: 2 本	母材の規定最小引張強さ以上
シャルピー 衝撃試験	試験片: NK U4 号 採取位置: 参照図省略 試験温度: 参照図省略 試験数: 3~4 組 (1 組 3 本)	最小平均吸収エネルギー値(参照表省略): MS, HT32, HT36: 34J HT40: 39J
曲げ試験	試験片: NK UB-1 号又は UB-2 号 (表省略) 内側半径: 2t (t: 試験板厚) 曲げ角度: 180 度 試験数: (表曲げ 2 本 + 裏曲げ 2 本) [表曲げ・裏曲げ試験が実施困難な場合、 側曲げ 4 本]	いかなる方向にも 3mm 以上の割れその他の 欠陥があってはならない
硬さ試験	採取位置: 溶接中断/再開箇所(中央 部)+両端削除部近傍 測定荷重: HV10 測定位置: 参照図省略 試験数: 3 断面	380 以下 (HV10)
マクロ試験	採取位置: 溶接中断/再開箇所(中央 部)+両端削除部近傍 マクロ試験片には、溶接熱影響のない 母材を 10mm 以上含めること 試験数: 3 断面	き裂、溶込み不良、融合不良、その他有害 と認められる欠陥があってはならない
外観試験	試験材全長	溶接部の表面は、整一で、割れ、アンダカ ット、オーバーラップ等有害と認められる欠 陥があってはならない [適用検討]欠陥の判定基準: ISO5817 Level B (余盛及び裏波の形状: ISO5817 Level C)
磁粉探傷 試験	試験材全長 ISO 9934-1(2001), -2(2002), -3(2002) 又は JIS Z 2320-1(2007), -2(2007), -3(2007)	割れ、アンダカット、溶込み不良及び融合 不良等有害と認められる欠陥があってはな らない [適用検討]欠陥の判定基準: ISO5817 Level B
放射線透過 試験	試験材全長 ISO 17636(2003) 又は JIS Z 3104(1995)	割れ、アンダカット、溶込み不良及び融合 不良等有害と認められる欠陥があってはな らない [適用検討]欠陥の判定基準: ISO5817 Level B

### 6.3 レーザ・アークハイブリッド溶接継手の性能評価試験

表 2.2 に示す 9 個の試験体(No.1~No.9) について、表 6.1 及び表 6.2 の条件で性能評価試験を行い次の結果を得た。

- (1) 試験体 No.1~No.8 は合格であった。試験体 No.9 は、内部に無数の溶込み不良が発見され不合格であった。
- (2) 完全溶込み T 継手の超音波探傷試験において、溶接線全線にわたるキズらしき UT エコーのインジケーションが一部の継手に見られたが、断面を詳細に調べた結果、内部欠陥でないことが分かった。これより、完全溶込み T 継手に対する超音波探傷試験の

適用可否については、試験結果が出揃った時点で再度検討する必要がある。

- (3) シャルピー衝撃試験においては、Fracture Pass Deviation(FPD)が発生しないことを前提にサイドグループ無しの試験片で衝撃試験を実施したが、複数の突合せ溶接継手試験体に対する衝撃試験結果において、FPDが発生した可能性が示唆されたため、今後サイドグループ付き試験片を用いた衝撃試験の実施の可否を含めて検討する必要がある。

#### 6.4 レーザ溶接に適した船体構造・建造工程のケーススタディ

本ケーススタディにより、次の研究成果が得られた。

- (1) レーザ・アークハイブリッド溶接に適した船体構造様式の一つとして、ガーダー方式ダブルハル構造を選定し、これを船体平行部に適用したアフラマックスタンカーの構造設計を行った。本構造は横構造部材が省略されているために部材数が少なく、レーザ・アークハイブリッド溶接による自動化や工数の低減の可能性があるシンプルな構造である。

ガーダー方式ダブルハル構造の概要を図 6.1 に示す。

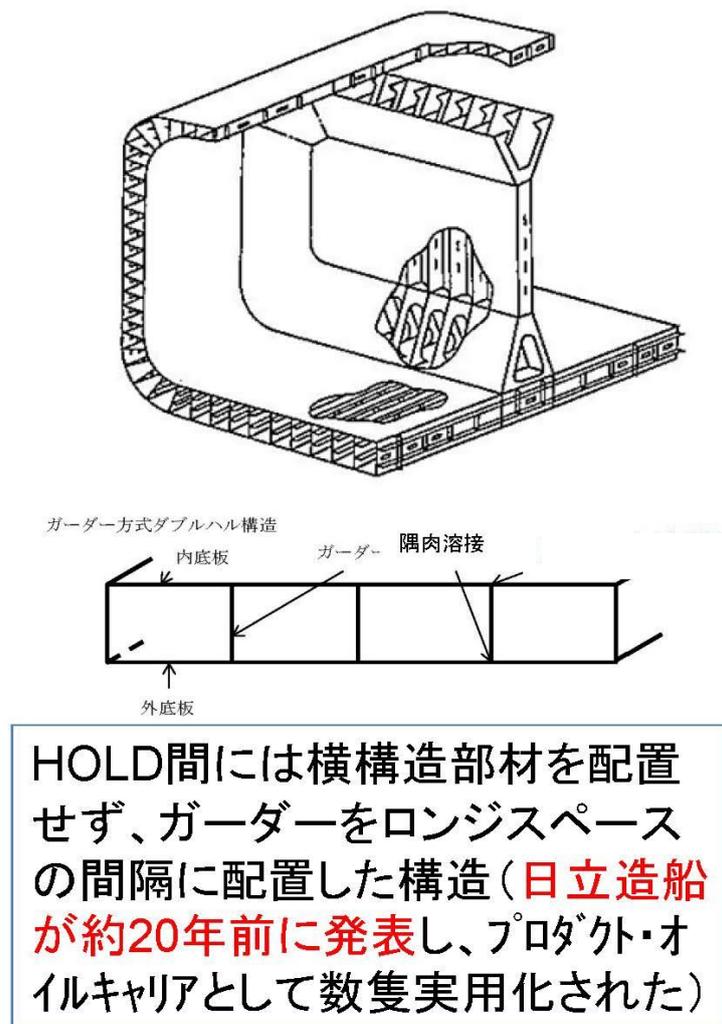


図6.1 ガーダー方式ダブルハル構造

- (2) その結果、コーナー部を除き船底、船側、上甲板、縦通隔壁及び横隔壁等全ての船体平行部構造にガーダー方式ダブルハルを適用した構造設計を行った。
- (3) CSR-T のルール計算プログラム及び FEM により構造強度照査を行い、本構造が構造強度的に十分成立することが確認された。  
FEM による本構造の全体鳥瞰図を図 6.2 に示す。

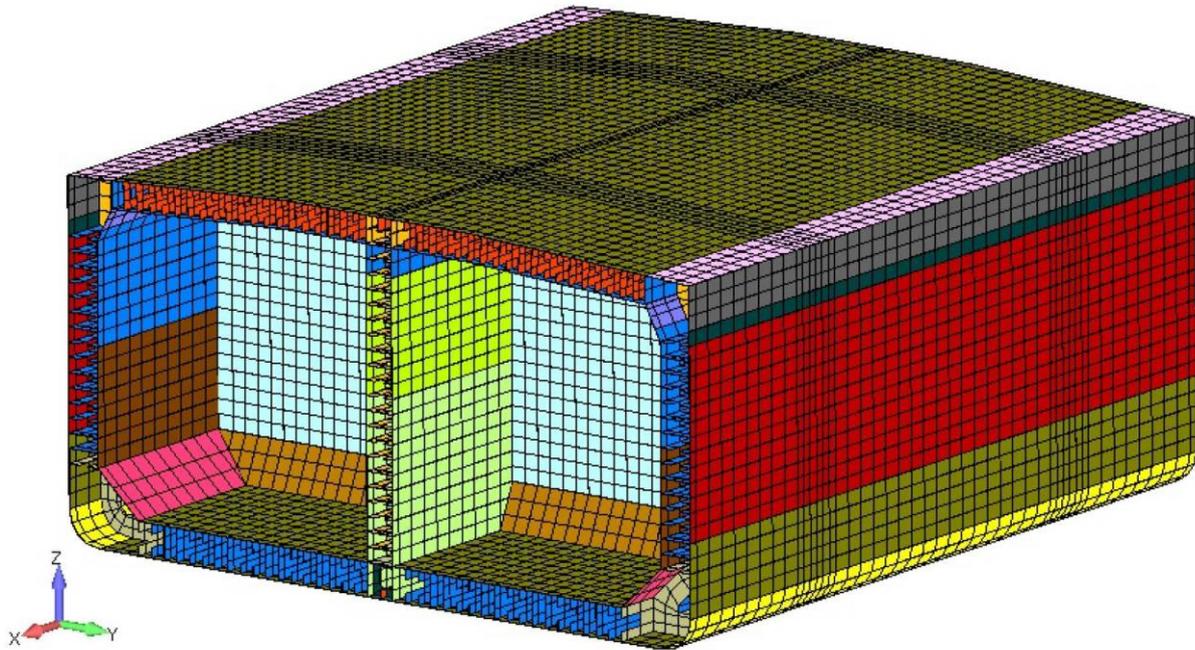


図6.2 全体鳥瞰図

- (4) 次年度は本構造をベースに建造工程等の検討を行い、本構造のメリットを明らかにする予定である。

本事業を円滑にすすめるため、大学・研究機関・造船所他から委員として参画いただき、「レーザ溶接技術の船舶建造工程への適用に関する調査研究委員会」を設置し、実験室レベルのプロセス実験による溶接条件の導出に関する検討をおこなった。また、プロセス実験で得られた結果に基づき試験片を製作したが、この試験片をどのように評価・検査をするかの具体策の検討については、別途、「レーザ溶接継手の評価・検査ワーキング・グループ」を設置して調査研究委員会を側面から補完することにした。このワーキング・グループの検討内容は調査研究委員会に報告され、相互に情報共有することで方向性を一致させた。

一方、レーザ溶接技術の研究と同時並行で、東京大学によって検討されているモニタリング技術の研究をとりまとめる「モニタリング技術等の船舶建造工程への適用に関する調査研究委員会」（委員委嘱を含めた委員会運営は日本船舶技術研究協会によって実施した）と密接に連携を図りながらすすめた。「モニタリング技術等の船舶建造工程への適用に関する調査研究委員会」の2012年度の研究成果は、船舶建造高品質化・効率化技術の調査研究（工程管理システムの調査研究）2012年度成果報告書として(一財)日本船舶技術研究協会のHPにアップされているのでそちらを参照されたい。

## 1. 調査研究委員会

### 1.1 レーザ溶接技術研究

#### ○「レーザ溶接技術の船舶建造工程への適用に関する調査研究委員会」

委員名簿（敬称略・順不同）

委員長	片山 聖二	国立大学法人大阪大学	大学院工学研究科 機械工学専攻 レーザ接合機構学分野 教授 兼 接合科学研究所 所長
委員	青山 和浩	国立大学法人東京大学	大学院工学系研究科 システム創成学専攻 教授
	後藤 浩二	国立大学法人九州大学	大学院工学系研究院 海洋システム工学部門 准教授
	村上 睦尚	(独)海上技術安全研究所	構造系構造解析・加工研究グループ 主任研究員
	福井 努	(一財)日本海事協会	材料艤装部 主管
	大井 健次	JFEスチール株式会社	スチール研究所 接合・強度研究部 部長
	辻井 浩	三菱重工業(株)	船舶海洋事業本部 香焼船海工作部 生産計画課 技管チーム 主席統括
	濱崎 俊之	(株)名村造船所	船舶海洋事業部 生産管理部 溶接技術課 課長
	平野 淳平	三井造船(株)	船舶・艦艇事業本部 千葉造船工場 管理部 技術開発グループ

篠原 紀昭 ジャパンマリンユナイテッド(株) 技術研究所  
生産技術研究グループ 主幹  
浪越 正至 住友重機械マリンエンジニアリング(株) 製造本部 工作部  
(2013年3月まで) 計画グループグループリーダー補佐  
高橋 寛 住友重機械マリンエンジニアリング(株) 製造本部 工作部  
(2013年4月より) 計画グループ溶接管理技術者特別級

関係者 山口 祐二 (一社)日本造船工業会 技術部 部長  
岩田 知明 (独)海上技術安全研究所 構造系構造解析・加工研究グループ  
グループ長  
沢登 寛 (一財)日本海事協会 材料艀装部 国際溶接技術者  
辻 正和 IPGフォトニクスジャパン(株) 代表取締役  
(2012年10月まで)  
菊地 淳史 IPGフォトニクスジャパン(株) 営業部 部長  
(2012年11月から)

事務局 田村 顕洋 (一財)日本船舶技術研究協会 研究開発ユニット ユニット長  
森山 厚夫 (一財)日本船舶技術研究協会 研究開発ユニット  
プロジェクトリーダー  
杉山 哲雄 (一財)日本船舶技術研究協会 研究開発ユニット  
諸富 恭子 (一財)日本船舶技術研究協会 研究開発ユニット  
(2013年4月まで)  
片山 敦子 (一財)日本船舶技術研究協会 研究開発ユニット  
(2013年5月から)

○「レーザ溶接継手の評価・検査ワーキング・グループ」

委員名簿 (敬称略・順不同)

主査 後藤 浩二 国立大学法人九州大学 大学院工学系研究院  
海洋システム工学部門 准教授  
委員 水谷 正海 国立大学法人大阪大学 接合科学研究所 技術部  
技術専門職員  
岩田 知明 (独)海上技術安全研究所 構造系構造解析・加工研究グループ  
グループ長  
村上 睦尚 (独)海上技術安全研究所 構造系構造解析・加工研究グループ  
主任研究員  
福井 努 (一財)日本海事協会 材料艀装部 主管  
沢登 寛 (一財)日本海事協会 材料艀装部 国際溶接技術者  
大井 健次 JFEスチール株式会社 スチール研究所  
接合・強度研究部 部長  
辻井 浩 三菱重工業(株) 船舶海洋事業本部 香焼船海工作部  
生産計画課 技管チーム 主席統括

	濱崎 俊之	(株)名村造船所	船舶海洋事業部 生産管理部 溶接技術課 課長
	平野 淳平	三井造船(株)	船舶・艦艇事業本部 千葉造船工場 管理部 技術開発グループ
	篠原 紀昭	ジャパンマリンユナイテッド(株)	技術研究所 生産技術研究グループ 主幹
	浪越 正至	住友重機械マリンエンジニアリング(株)	製造本部 工作部 (2013年3月まで) 計画グループグループリーダー補佐
	高橋 寛	住友重機械マリンエンジニアリング(株)	製造本部 工作部 (2013年4月より) 計画グループ溶接管理技術者特別級
事務局	田村 顕洋	(一財)日本船舶技術研究協会	研究開発ユニット ユニット長
	森山 厚夫	(一財)日本船舶技術研究協会	研究開発ユニット プロジェクトリーダー
	杉山 哲雄	(一財)日本船舶技術研究協会	研究開発ユニット
	諸富 恭子	(一財)日本船舶技術研究協会	研究開発ユニット (2013年4月まで)
	片山 敦子	(一財)日本船舶技術研究協会	研究開発ユニット (2013年5月から)

## 1.2 船舶建造モニタリング研究

- 「モニタリング技術等の船舶建造工程への適用に関する調査研究委員会」  
委員名簿 (敬称略・順不同)

委員長	青山 和浩	国立大学法人東京大学	大学院工学系研究科 システム創成学専攻 教授
委員	白山 晋	国立大学法人東京大学	大学院工学系研究科 システム創成学専攻 准教授
	稗方 和夫	国立大学法人東京大学	大学院新領域創成科学研究科 人間環境学専攻 准教授
	篠田 岳思	国立大学法人九州大学	大学院工学研究院 海洋システム工学部門 教授
	松尾 宏平	(独)海上技術安全研究所	構造系構造解析・加工研究グループ 主任研究員
	尾上 仁久	ジャパンマリンユナイテッド(株)	技術総括部 (2013年3月まで) 生産技術開発グループ 主査
	宇野 清隆	ジャパンマリンユナイテッド(株)	技術研究所 (2013年4月から) 生産技術研究グループ グループ長
	山口 雄嗣	住友重機械マリンエンジニアリング(株)	製造本部工作部 計画グループ計画セクション
	大迫 貴庸	(株)名村造船所	船舶海洋事業部 生産管理部 生産技術課 課長

	赤池 泰暢	三井造船(株)	船舶・艦艇事業本部 千葉造船工場 製造部 計画グループ
関係者	山口 祐二	(一社)日本造船工業会	技術部 部長
	藤本 修平	(独)海上技術安全研究所	構造系構造解析・加工研究グループ 研究員
事務局	田村 顕洋	(一財)日本船舶技術研究協会	研究開発ユニット ユニット長
	森山 厚夫	(一財)日本船舶技術研究協会	研究開発ユニット プロジェクトリーダー
	井下 聡	(一財)日本船舶技術研究協会	研究開発ユニット チームリーダー
	諸富 恭子	(一財)日本船舶技術研究協会	研究開発ユニット
	(2013年4月まで)		
	片山 敦子	(一財)日本船舶技術研究協会	研究開発ユニット
	(2013年5月から)		

## 2. 調査研究の作業状況

### 2.1 レーザ溶接技術研究

#### 2012年度

- 4月1日 日本財団の助成を得て事業開始
- 4月4日 レーザ溶接実験システム仕様書検討会実施
- 5月7日 国立大学法人大阪大学との間でレーザ溶接実験に関する委託契約締結
- 5月9日 (一社)日本造船工業会生産部会にて協力造船社参加依頼のための説明会実施
- 6月15日 溶接現象可視化装置一式を(株)ナックイメージテクノロジーに発注
- 6月18日 ファ이버レーザ装置一式をIPGフォトニクスジャパン(株)に発注
- 6月26日 レーザ・アークハイブリッド溶接装置一式を愛知産業(株)に発注
- 7月5日 第1回レーザ溶接技術の船舶建造工程への適用に関する調査研究委員会開催
- 8月7日 レーザ溶接継手評価・検査ワーキング・グループ立ち上げ準備会合
- 8月29日 第1回レーザ溶接継手評価・検査ワーキング・グループ開催
- 8月29日 (独)海上技術安全研究所との間で実験用継手設計製作ならびに性能確認試験に関する委託契約締結
- 10月13日 大阪大学接合科学研究所にレーザ溶接実験システムの設置・性能確認検収
- ～23日 (検収後、実験進展に伴い実験システムへの追加機器の発注あり)
- 10月18日 (独)海上技術安全研究所の研究員を実験補助者として大阪大学に派遣
- ～3月29日 (計18回・延67人日)
- 10月24日 第2回レーザ溶接技術の船舶建造工程への適用に関する調査研究委員会開催
- 11月12日 欧州地区レーザ溶接技術現地調査団派遣

～25日

- 12月4日 三井造船(株)職員を突合せ溶接時の裏当て実施方法説明のため大阪大学に派遣
- 12月17日 第2回レーザ溶接継手評価・検査ワーキング・グループ開催
- 1月8日 (株)海との間でレーザ溶接に適した船体構造FSに関する請負契約締結
- 2月22日 日本財団より事業期間変更(延長)に関する確認書受領
- 2月28日 国立大学法人大阪大学との間で溶接実験の期間延長に関する委託変更契約締結
- 3月6日 第3回レーザ溶接技術の船舶建造工程への適用に関する調査研究委員会開催
- 3月19日 第4回レーザ溶接技術の船舶建造工程への適用に関する調査研究委員会開催  
(モニタリング技術等の船舶建造工程への適用に関する調査研究委員会と合同開催)

2013年度

- 5月8日 第3回(2013年度第1回)レーザ溶接継手評価・検査ワーキング・グループ開催
- 5月9日 (独)海上技術安全研究所の研究員を実験補助者として大阪大学に派遣
- ～8月1日 (計7回・延42人日)
- 5月31日 国立大学法人大阪大学との間で溶接実験の経費増額に関する委託変更契約締結
- 6月12日 (独)海上技術安全研究所との間で性能確認試験の追加調査に関する委託契約を締結
- 6月27日 第5回(2013年度第1回)レーザ溶接技術の船舶建造工程への適用に関する調査研究委員会開催
- 7月26日 第4回(2013年度第2回)レーザ溶接継手評価・検査ワーキング・グループ開催
- 9月9日 第6回(2013年度第2回)レーザ溶接技術の船舶建造工程への適用に関する調査研究委員会開催
- 9月30日 事業終了(2013年度財団助成事業として事業継続で実施中)

## 2.2 船舶建造モニタリング研究

2012年度

- 4月1日 日本財団の助成を得て事業開始
- 4月～6月 委員会設置準備、調査研究計画等についての打合せ実施(計5回)
- 5月9日 (一社)日本造船工業会生産部会にて協力造船社参加依頼のための説明会実施
- 6月27日 第1回モニタリング技術等の船舶建造工程への適用に関する調査研究委員会開催
- 7月～3月 建造マネージメント高度化の技術課題調査実施

- 8月～1月 造船所向け基本システム開発
- 8月23日 造船所におけるモニタリング環境調査の実証実験実施（三井造船千葉事業所）
- ～24日
- 10月～2月 モニタリングデータの解析法検討
- 10月2日 造船所におけるモニタリングシステム適用調査の実証実験実施（名村造船所伊万里事業所）
- ～4日
- 11月5日 第2回モニタリング技術等の船舶建造工程への適用に関する調査研究委員会開催
- 12月10日 造船所におけるモニタリングシステム適用調査の実証実験実施（ジャパンマリンユナイテッド津事業所）
- ～11日
- 2月20日 第3回モニタリング技術等の船舶建造工程への適用に関する調査研究委員会開催
- 3月19日 第4回モニタリング技術等の船舶建造工程への適用に関する調査研究委員会開催（レーザ溶接技術の船舶建造工程への適用に関する調査研究委員会と合同）

### 3. 委員会議事概要

#### 3.1 レーザ溶接技術研究

- (1) 「レーザ溶接技術の船舶建造工程への適用に関する調査研究委員会」は2012年度内に以下に示す通り、計4回開催した。

- 第1回「レーザ溶接技術の船舶建造工程への適用に関する調査研究委員会」

日時：2012年7月5日（木）14：00～17：10

場所：（一財）日本船舶技術研究協会 4F大会議室

議題：①調査研究に係る知的財産権の取り扱いについて

②レーザ溶接技術の船舶建造工程への適用に関する調査研究計画について

③レーザ・アークハイブリッド溶接実験システムについて

④レーザ溶接継手の評価・検査方法の検討の研究の進め方について

⑤レーザ溶接現象の3次元可視化について

⑥ドイツにおけるQulnLasプロジェクトの概要について

⑦海外視察計画（案）について

- 第2回「レーザ溶接技術の船舶建造工程への適用に関する調査研究委員会」

日時：2012年10月24日（水）13：30～16：35

場所：国立大学法人大阪大学 接合科学研究所 特別会議室

議題：①レーザ溶接実験装置によるデモ実験見学について

②研究進捗状況について

- ③次年度計画（案）について
- ④海外視察計画（最終案）について

○ 第3回「レーザ溶接技術の船舶建造工程への適用に関する調査研究委員会」

日時：2013年3月6日（水）12：00～16：10

場所：（一財）日本船舶技術研究協会 4F大会議室

- 議題：①全体研究スケジュールと進捗状況について
- ②プロセス実験結果と今後の計画について
  - ③JMU独自実験結果について
  - ④継手の強度等評価試験結果について
  - ⑤継手の強度等評価試験分担状況（案）について
  - ⑥継手の疲労試験方案について
  - ⑦次年度実証試験計画（案）について
  - ⑧レーザ溶接に関する欧州調査報告について

○ 第4回「レーザ溶接技術の船舶建造工程への適用に関する調査研究委員会」

（モニタリング技術等の船舶建造工程への適用に関する調査研究委員会と合同開催）

日時：2013年3月19日（火）13：30～17：00

場所：TKP赤坂ツインタワーカンファレンスセンター9Fカンファレンスルーム9C

- 議題：①研究スケジュールと進捗状況について
- ②レーザ溶接技術に関する研究成果報告について
  - ③モニタリング技術に関する研究成果報告について
  - ④レーザ溶接とモニタリング技術の船舶建造への活用について

(2) 「レーザ溶接継手の評価・検査ワーキング・グループ」は2012年度内に以下に示す通り計2回開催した。

○ 第1回「レーザ溶接継手の評価・検査ワーキング・グループ」

日時：2012年8月29日（水）13：30～15：30

場所：（一財）日本船舶技術研究協会 4F大会議室

- 議題：①レーザ溶接継手の造船への適用における建造効率化の可能性と検討課題について
- ②研究スケジュール（案）について
  - ③レーザ溶接継手の評価・検査方法の検討について
  - ④レーザ・アークハイブリッド溶接法（WPS承認試験項目等）について

○ 第2回「レーザ溶接継手の評価・検査ワーキング・グループ」

日時：2012年12月17日（月）13：30～17：10

場所：（一財）日本船舶技術研究協会 4F大会議室

- 議題：①レーザ・アークハイブリッドすみ肉溶接実験レポートについて  
②レーザ・アークハイブリッド溶接継手の強度評価の分担について  
③溶接条件に関する検討事項について  
④次年度実証試験計画について  
⑤レーザ溶接に関する特許調査について  
⑥レーザ溶接の実機への適用（文献紹介）について  
⑦レーザ溶接に適した船体構造のFS計画書（案）について  
⑧レーザ溶接の造船所実適用までの課題と本研究の達成目標（案）について

### 3.2 船舶建造モニタリング研究

- (1) 「モニタリング技術等の船舶建造工程への適用に関する調査研究委員会」は2012年度内に以下のとおり計4回開催した。

- 第1回「モニタリング技術等の船舶建造工程への適用に関する調査研究委員会」

日時：2012年6月27日（木）14：00～17：00

場所：（一財）日本船舶技術研究協会 4F大会議室

- 議題：①研究計画について  
②モニタリングシステム開発/工程分析計画について  
③モニタリング実証試験計画（その1）について  
④モニタリング実証試験計画（その2）について  
⑤事例紹介 造船プレス作業の画像解析による分析について  
⑥事例紹介 カメラ自動計測の稼働分析への活用事例について

- 第2回「モニタリング技術等の船舶建造工程への適用に関する調査研究委員会」

日時：2012年11月5日（月）13：00～17：00

場所：東京大学本郷キャンパス 工学部8号館324演習室

- 議題：①研究進捗状況について  
②造船所でのモニタリング実験（2件）について  
③市販モニタリングシステムの調査/簡易実験について  
④ユニバーサル造船（現JMU）で実施するモニタリング実証試験計画について  
⑤ZigBeeを利用したモニタリングについて  
⑥国際会議出席報告  
⑦次年度計画について

○ 第3回「モニタリング技術等の船舶建造工程への適用に関する調査研究委員会」

日時：2013年2月20日（木）13：30～16：30

場所：（一財）日本船舶技術研究協会 4F大会議室

議題：①名村造船所でのモニタリング実証試験（その1）について

②JMUでのモニタリング実証試験（その2）について

③モニタリングデータ解析法の検討について

④報告書（案）および執筆分担について

⑤研究進捗状況について

⑥次年度計画の方針について

⑦Monitoring Experiments at Shipyardsについて

○ 第4回「モニタリング技術等の船舶建造工程への適用に関する調査研究委員会」

（レーザ溶接技術の船舶建造工程への適用に関する調査研究委員会と合同開催）

日時：2013年3月19日（木）13：30～17：00

場所：TKP赤坂ツインタワーカンファレンスセンター9Fカンファレンスルーム9C

議題：①研究スケジュールと進捗状況について

②レーザ溶接技術に関する研究成果報告について

③モニタリング技術に関する研究成果報告について

④レーザ溶接とモニタリング技術の船舶建造への活用について

Supported by  日本 THE NIPPON  
財団 FOUNDATION

この報告書は、日本財団の助成金を受けて作成しました。

— 船舶建造高品質化・効率化技術の調査研究（レーザ溶接技術の調査研究） —

2013年（平成25年）9月発行

発行 一般財団法人 日本船舶技術研究協会

〒107-0052 東京都港区赤坂2丁目10番9号 ラウンドクロス赤坂

TEL 03-5575-6428

FAX 03-5114-8941

URL <http://www.jstra.jp/>

E-mail [info@jstra.jp](mailto:info@jstra.jp)

本書の無断転載、複写、複製を禁じます。