九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

レーザ・アークハイブリッド溶接により製作されたT継手に生じる角変形に関する一検討

津村，秀一
Graduate School of Engineering, Department of Civil and Structual Engineering, Kyushu University

村上，幸治
九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門

後藤，浩二
九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門

https://hdl.handle.net/2324/4794430

出版情報：Quarterly Journal of the Japan Welding Society. 33 (2), pp.194-201, 2015. Japan Welding Society
バージョン：
権利関係：(c) 2015 社団法人 溶接学会

KYUSHU UNIVERSITY

[溶接学会論文集　第 33 巻　第 2 号　p. 194-201 (2015)]

レーザ・アークハイブリッド溶接により製作されたＴ継手に生じる角変形に関する一検討*

津村　秀一**，村上　幸治***，後藤　浩二***

A Study on The Angular Distortion in Tee Type Full Penetrated Welded Joint Fabricated by The Laser-arc Hybrid Welding*

by TSUMURA Shuichi**, MURAKAMI Koji*** and GOTOH Koji***

The reducing effect of the angular distortion in Tee type full penetrated welded joint fabricated by the laser-arc hybrid welding was investigated. The Angular distortion caused by the laser-arc hybrid welding were measured and compared with one caused by the CO_2 gas shielded arc welding. As a result, the amount of angular distortion by the laser-arc hybrid welding was the same level as one in case of forming the leg size of F1 grade regulated by Common Structural Rules for Bulk Carriers (CSR-B) by applying arc welding. In addition, numerical analysis of the welding deformation was carried out by the thermal elastic-plastic finite element analysis and these results were generally consistent with the measured results. Moreover the effect on FE result of the penetrated shape was discussed.

Key Words: laser-arc hybrid welding, angular distortion, heat input parameter, FE analysis

1. 緒　　言

レーザ溶接は，溶接変形を低減でき，かつ高速度での溶接施工が可能な溶接方法として，薄板分野での適用が拡大している．しかしギャップ間隔に対する裕度が小さいことや厚板における適切な施工条件が十分に確立していないため，重工業分野への適用例は多くない．一方，重工業分野で従来から多用されているアーク溶接は，レーザ溶接とは対照的にギャップ間隔裕度が大きく豊富な施工実績を有しているものの，レーザ溶接と比べて溶接入熱が大きいため溶接変形が大きく，エネルギー密度が低いため溶接速度が遅いという欠点を有する．

レーザ・アークハイブリッド溶接（以降では単にハイブリッド溶接と称する）は，これら二つの溶接方法を効果的に組み合わせることでレーザ溶接とアーク溶接の欠点を解消し相互の利点を得ることが可能な溶接方法であり，従来のアーク溶接法と比べて溶接入熱が小さいため，溶接変形，並びに溶接部の材質劣化を抑制できることが期待される．またハイブリッド溶接を用いることで，従来のアーク溶接で施工されるすみ肉溶接継手が強度面で優位な完全溶込み溶接継手へ置き換えられる可能性があり，これに伴い高剛性・軽量化などの新しい構造化様式の出現も期待される．

近年レーザの高出力化が進むと共にその発振効率も向上しており，優れたビーム品質の高出力レーザが従来よりも安価で利用可能となりつつあるため，ハイブリッド溶接を厚板構造物建造へ適用する場合，従来の工法に比べて溶接変形が大幅に低減でき，溶接後の手直し工数を大幅に削減できる可能性がある．

溶接変形の予測・制御に関しては，その発生要因である固有ひずみの発生特性を支配する，温度分布と溶接条件の関係を熱伝導論に基づいて考察することで溶接変形に対する支配因子（パラメータ）を検討し，これに基づいて溶接条件から溶接変形を予測する研究が古くからなされてきた．溶接変形の支配因子として古くは渡辺・佐藤[1)]により，$I/h(vh)^{0.5}$（I：溶接電流，v：溶接速度，h: 板厚）が提案され，その後，佐藤・寺崎[2)]が入熱パラメータ Q_{net}/h^2（Q_{net}：正味の溶接入熱，h：板厚）を提案しており，現在では溶接変形の評価パラメータとして後者を用いることが一般的である．ハイブリッド溶接により生じる溶接変形と入熱パラメータの関係に関する研究の報告事例[3, 4)]はあるものの，厚板構造へのハイブリッド溶接技術の積極的な導入を考慮すれば，厚板の溶接継手を対象とした溶接変形に関する研究の蓄積が必要であると考えられる．

本研究では，ハイブリッド溶接により製作されたT継手の角変形を評価対象として，実測した角変形と入熱パラメータ Q_{net}/h^2 との関係と，従来のアーク溶接で製作された継手

*受付日　平成27年 3 月25日　受理日　平成27年 6 月 7 日　平成26年12月溶接構造シンポジウム2014で発表
**学生員　九州大学大学院工学府建設システム工学専攻　Student Member, Graduate school of Engineering, Department of Civil and Structural Engineering, Kyushu University
***正　員　九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門　Member, Faculty of Engineering, Department of Maritime Engineering, Kyushu University

Table 1　Chemical compositions and mechanical properties of applied steel plate

Thickness (mm)	Mechanical properties			Chemical compositions (mass %)				
	Yield Strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	C	Si	Mn	P	S
14mm	355	490	16	0.15	0.27	1.08	0.018	0.002
21mm	355	490	18	0.15	0.27	1.08	0.018	0.002

Table 2　Welding condition

Welding current (A)	450
Welding voltage (V)	26.5
Laser power (kW)	8.0
Travel speed (mm/min)	750, 1000 (Standard condition), 1250, 1500

のそれとを比較し，ハイブリッド溶接による溶接変形低減効果について検討を行った．加えて，実験から得られた熱履歴を精度よく再現できる，Goldak による溶接熱源モデル[5]を特徴づけるパラメータ，並びにアーク熱源とレーザ熱源の位置関係を同定した．そして，この入熱モデルを使用し熱弾塑性 FE 解析によるすみ肉溶接の溶接シミュレーションを実施し，熱弾塑性 FE 解析により溶接変形を推定する際に考慮すべき課題等について若干の考察を行った．

2. 実　験　方　法

2.1　供試材

供試材は板厚 14 mm，並びに板厚 21 mm の船体用36キロ級高張力鋼（KD36）である．Table 1 に供試材の機械的性質，並びに化学組成を示す．アーク溶接には JIS 規格 YGW11 を満たすソリッドワイヤ MG50（直径 1.6 mm）を用いた．

2.2　溶接条件

ハイブリッド溶接のアーク熱源には通常 MIG 溶接や MAG 溶接が用いられる場合が多いが，本研究では国内の造船業で広く使用されている炭酸ガスアーク溶接をアーク熱源に用いた．溶接条件は，（一財）日本船舶技術研究協会において実施された「船舶建造高品質化・効率化技術の調査研究」[6]において報告されたハイブリッド溶接の実用的条件を基準条件として設定した．設定した溶接条件を Table 2 に示す．また溶接入熱を変化させるために，基準条件の溶接速度の 0.75 倍，1.25 倍，及び 1.5 倍の溶接速度を設定し，その他の溶接条件は同一とした溶接施工も実施した．溶接は付加物の左右からそれぞれ 1 パス（合計 2 パス）としたが，1 パス目の溶接を終えてから10分以上の時間を保ち，試験体全体が充分冷却したことを確認した後に 1 パス目と逆向きに 2 パス目の溶接を行った．

2.3　試験体形状，温度履歴計測位置，及び変形計測位置

試験体形状，並びに寸法を Fig. 1 に示す．フランジは板厚

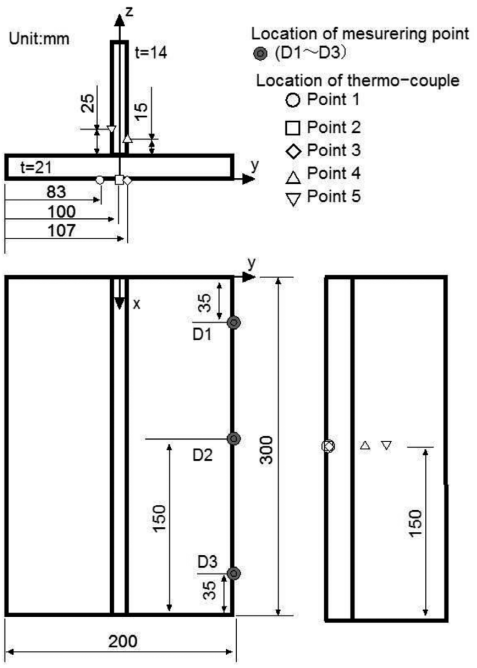


Fig. 1　Location of measuring temperature and vertical displacement

21 mm，板幅 200 mm，板長 300 mm であり，ウェブは板厚 14 mm，板幅 100 mm，板長 300 mm である．

溶接線中央のフランジ裏面の 3 点，並びにウェブの両面に 1 点ずつ熱電対を貼付し各点の温度履歴を計測した．溶接により生じた角変形量は，溶接始端，中央，及び溶接終端部の点（Fig. 1 に示す D1，D2，及び D3）の垂直方向変位量 H_i（Fig. 2 参照）を計測し，各点の垂直方向変位量の平均値と主板の半幅の比として角変形量を計算した．また基準条件で製作した継手は FE 解析結果と比較することを目的に Fig. 3 に示す位置の面外変形を計測した．

3. 実　験　結　果

3.1　基準条件の断面マクロ

基準条件の溶接条件で製作した継手の溶接線中央位置に

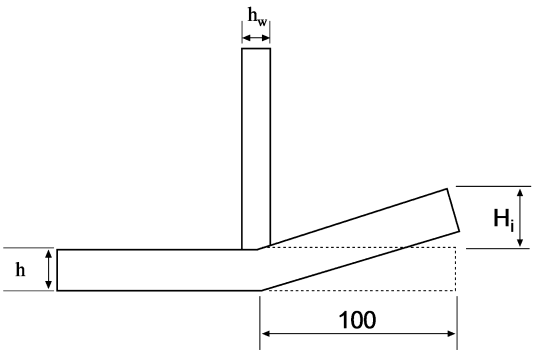


Fig. 2　Procedure for measuring the angular distortion

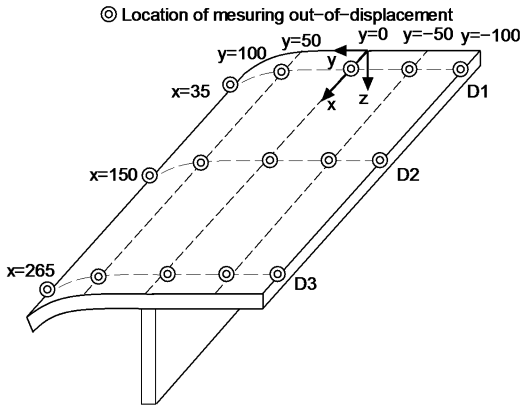


Fig. 3　Location of measuring out-of-displacement

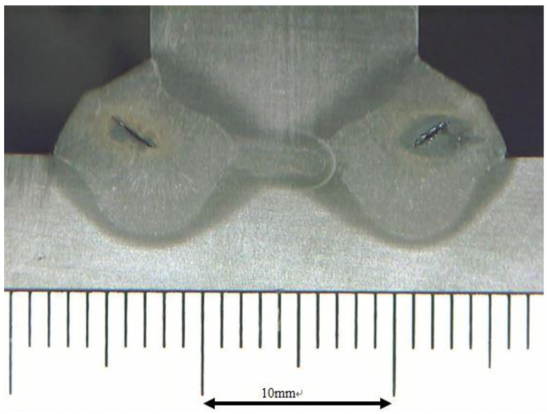


Fig. 4　Cross section of standard welding condition

おける断面マクロを Fig. 4 に示す．ハイブリッド溶接を用いて溶接施工を行うと，従来の炭酸ガスアーク溶接で施工されるすみ肉溶接継手を強度面で優位な完全溶込み溶接継手へ置き換える施工が可能である．ただし凝固割れと認められる内在欠陥が確認されており，ハイブリッド溶接を実機適用するためには溶接条件の更なる検討が必要である．

3.2　温度履歴計測結果

本実験で計測した第 1 パス目溶接中の温度履歴を Fig. 5 に示す．ただし溶接速度が基準条件の 0.75 倍，並びに 1.5 倍となる実験では，温度計測中に Fig. 1 中△印で示す位置の熱電対（Point 4）がスパッタにより切断されたため，Point 4 を除く点の温度履歴を示している．また溶接速度を基準条件の 0.75 倍と設定した実験では Fig. 1 中▽印で示す位置に貼付した熱電対（Point 5）において，熱電対の貼付状況が不良であったため溶接開始からおよそ50秒後までの計測データが安定しておらず，当該データを省略し記載している．なお50秒後以降のデータは他の実験結果と同様の挙動を示しており，平均温度上昇 T_{ave} の算出には影響を及ぼさないと考えられる．

全ての実験条件において溶接開始から 150 秒後から 250 秒後の間に各点の温度が一様となっており，本研究では Fig. 1 中◇印で示す位置の温度が最高到達温度に達したのちの 150 秒後の温度と 200 秒後の温度の平均値と溶接開始前の温度との差を平均温度上昇 T_{ave} として同定した．

3.3　入熱量の計算

3.2 節で得られた平均温度上昇 T_{ave} を (1) 式に代入し，溶接入熱 Q_{exp} を求めた．取得した Q_{exp} の値を Table 3 に示す．

$$Q_{exp} = C\rho(A_W + A_F)T_{ave} \quad \cdots\cdots(1)$$

ただし

C：比熱，ρ：密度，A_W：ウェブ断面積，A_F：フランジ断面積，T_{ave}：平均温度上昇．

すみ肉溶接継手に生じる角変形は継手全体に投下された入熱量 Q_{exp} のうちフランジに流入する溶接入熱 Q_F により生成される．フランジに流入する溶接入熱とウェブに流入する溶接入熱の割合は熱の拡散断面積比を考慮した Cottrell の式[7]（(2) 式）で近似できる．

$$Q_F = \{2h/(2h + h_W)\}Q_{exp} \quad \cdots\cdots(2)$$

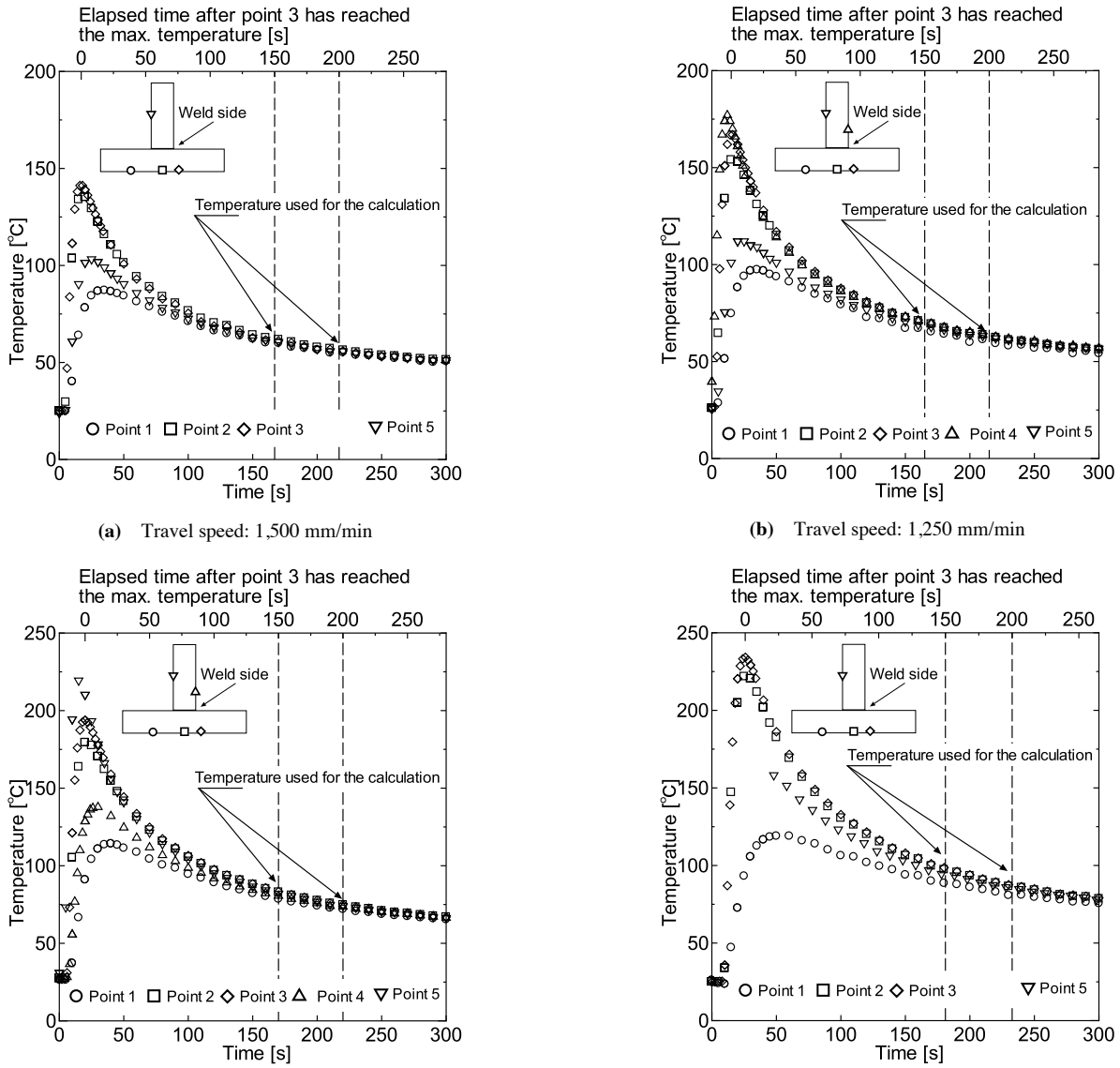
ただし

h：フランジ板厚，h_W：ウェブ板厚．

また，すみ肉溶接継手に生じる角変形[8]は，i）フランジの上に溶接位置をウェブの板厚だけずらして 2 度溶接したビード溶接による角変形と，ii）2 パス目のすみ肉溶接部の収縮力による角変形の和で与えられるが，入熱パラメータが 15 J/mm^3 程度より少ない場合は ii）の効果は少ないと思われるため[8]，ここでは i）の影響のみを考える．両面すみ肉溶接により生じる角変形は 1 パス目の溶接線をウェブの板厚分だけ板中央側へずらして再度溶接した後に生じる角変形に相当するため，本研究ではフランジに流入する溶接入熱 Q_F が 2 回与えられたとして，入熱パラメータ Q_{net}/h^2 を計算した．結果を Table 3 に示す．

3.4　CSR-B で要求されるすみ肉溶接の脚長を形成するために必要な入熱量

ばら積み船の船体構造に関する共通規則である CSR-B 編[9]では，すみ肉溶接継手の船体適用箇所ごとに溶接ビード



(a) Travel speed: 1,500 mm/min

(b) Travel speed: 1,250 mm/min

(c) Travel speed: 1,000 mm/min

(d) Travel speed: 750 mm/min

Fig. 5 Temperature histories during the welding processes

Table 3 Values of Q_{exp}, and Q_{net} / h^2

Travel speed (mm/min)	750	1000	1250	1500
Q_{exp} (J/mm)	1745	1491	1253	1163
Q_{net} / h^2 (J/mm^3)	5.94	5.07	4.26	3.96

の最小脚長を規定しており，取り付けられる板と取り付ける板のうち薄い方の板厚 t（mm）を基準として $10 \leqq t \leqq 20$ のとき，

・強度等級 F0（ブラケットを有しない桁部材，及び防撓材の端部）の場合 $0.7t$（mm）以上

・F1（水密版やブラケットを有する桁部材等）の場合 $0.4t+2.0$（mm）以上

・F2（防撓材のウエブやカラープレート等）の場合 $0.3t+2.0$（mm）以上

の脚長を形成するよう規定している．一方，ハイブリッド溶接を用いて溶接施工を行うと，すみ肉溶接継手を強度面で優位な完全溶込み溶接継手へ置き換えることが可能であるため，ハイブリッド溶接により製作された継手は最上位の強度等級である F0 等級以上の強度を有すると期待される．

Fig. 1 に示す T 継手について CSR-B 編の強度区分ごとの必要脚長 L（mm）を求め，1 パス施工の炭酸ガスアーク溶接でこの脚長を形成するために必要な溶接入熱 Q（MJ/m）を(3)式[10]に従って算出した．また(4)式のように炭酸ガスアーク溶接の入熱効率を 0.8 として，正味の入熱量 Q_{eff} を算出した．

$$Q = 0.033L^2 \quad \cdots\cdots(3)$$

$$Q_{eff} = 0.8Q \quad \cdots\cdots(4)$$

この正味の入熱量 Q_{eff} が左右 1 パスずつ，合計 2 パス与えられたとして，3.3 節で述べた手順と同様の計算を行い入熱パラメータ Q_{net} / h^2 を算出した．結果を Table 4 に示す．

Table 4　Values of heat input parameter to satisfy CSR-B

Class	F0	F1	F2
Leg length (mm)	9.8	7.6	6.2
Q_{net} / h^2 (J/mm^3)	10.8	6.5	4.3

3.5　角変形量の比較

各施工条件に対応する角変形量の測定値，並びに角変形推定曲線[8]より3.4節で算出した入熱量が付与されたすみ肉溶接継手に生じる角変形量を推定した値との比較を行った．その結果をFig. 6に示す．

炭酸ガスアーク溶接を用いてF0等級の脚長を形成するために必要な入熱パラメータの値は8.6 J/mm^{3}であり，この値に対応する角変形量はハイブリッド溶接の基準条件（溶接速度1000 mm/min）により製作された継手の実測値の1.5倍程度である．この結果から，ハイブリッド溶接法を用いて溶接施工を行うと，従来のすみ肉溶接継手を強度面で優位な完全溶込み溶接継手に置き換えつつ，角変形の低減も可能であると期待される．

F1等級の脚長を形成する場合の入熱パラメータの値は5.2 J/mm^{3}であり，この値に対応する炭酸ガスアーク溶接で生じる角変形量は，ハイブリッド溶接を用いて溶接施工した時に生じる角変形とほぼ同程度である．すなわち，同程度の溶接変形が生じるレベルでは，ハイブリッド溶接を用いることで，強度面で大幅に有利な継手を製作することが可能である．

F2等級の脚長を形成する場合，入熱パラメータの値は3.5 J/mm^{3}となりこの入熱パラメータに対応する炭酸ガスアーク溶接で生じる角変形量は，ハイブリッド溶接を用いて施工を行った時に生じる角変形量よりも小さい．すなわち，ハイブリッド溶接を用いて溶接施工を行うと，炭酸ガスアーク溶接でF2等級の継手を製作した時に生じる角変形よりも大きな角変形が生じるが，完全溶込み溶接継手を得ることが可能である．

4.　熱弾塑性FE解析による溶接変形推定

4.1　FEモデル並びに物理定数

基準条件（溶接速度1000 mm/min）に対し熱弾塑性FE解析による溶接シミュレーションを実施した．作成したFEモデルをFig. 7に示す．8節点アイソパラメトリック要素を用い，溶接線方向の分割幅2.0 mm，溶接ビードは製作した継手の実測結果を参照して脚長4.0 mmの直角二等辺三角形で近似し，Fig. 1に示したすみ肉溶接継手と同一寸法の継手のFEモデルを作成した．材料の物理定数は金らの文献[11]に示された軟鋼の値を用いた．参照した機械的性質をFig. 8に示す．

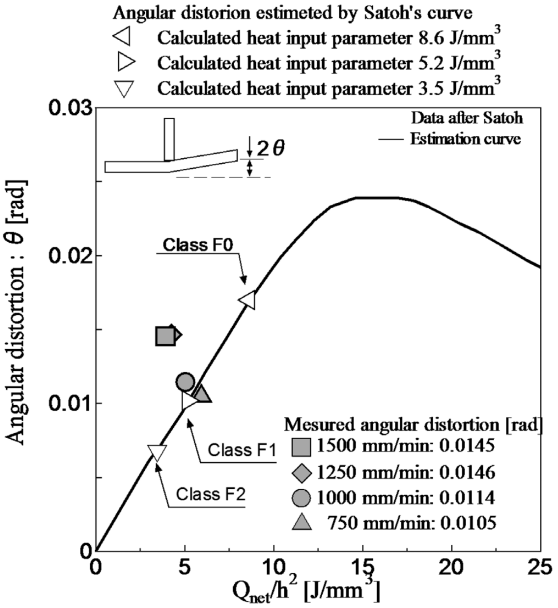


Fig. 6　Comparison of angular distortion of T-joint made by Laser-arc hybrid welding and arc welding

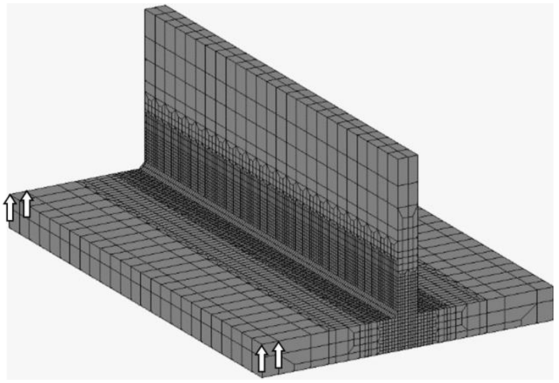


Fig. 7　FE idealization of tee joint (arrows: position for out-of-plane support)

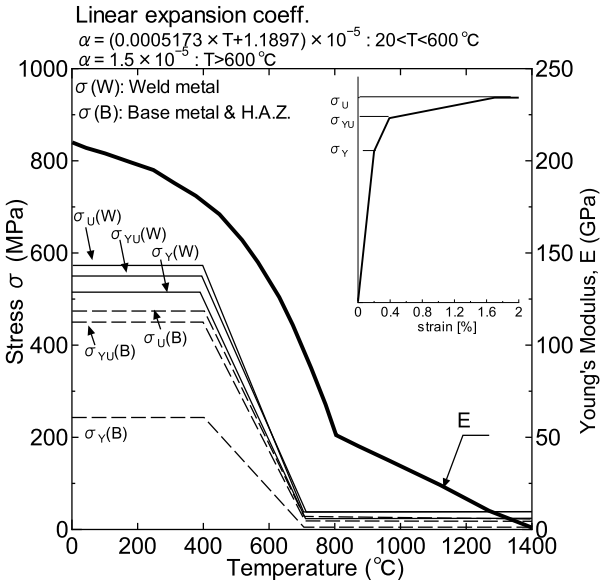
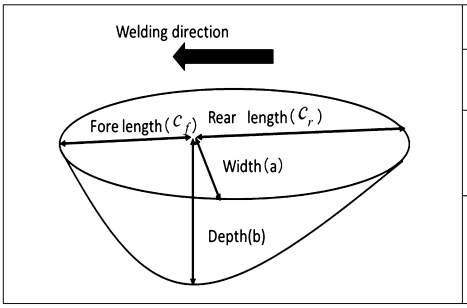


Fig. 8　Mechanical properties

Table 5　Parameter of Goldak's Model



heat source	Length of heat source parameters (mm)			
	a	b	C_f	C_r
Laser	1	12	1	1
Arc	7	7	2	6

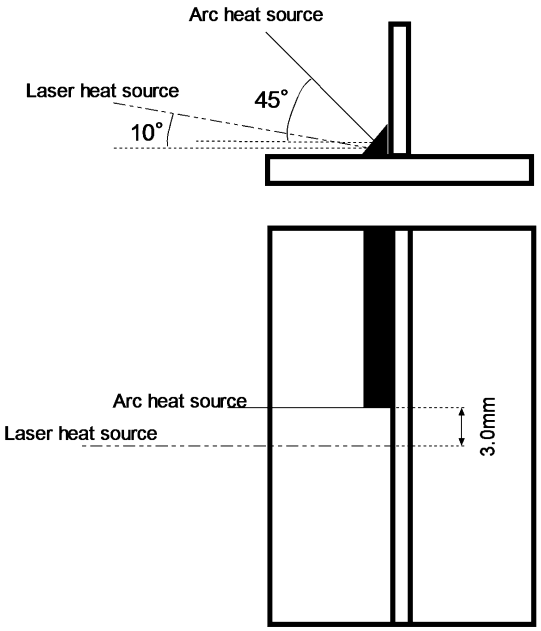


Fig. 9　Positions of the arc and laser heat sources

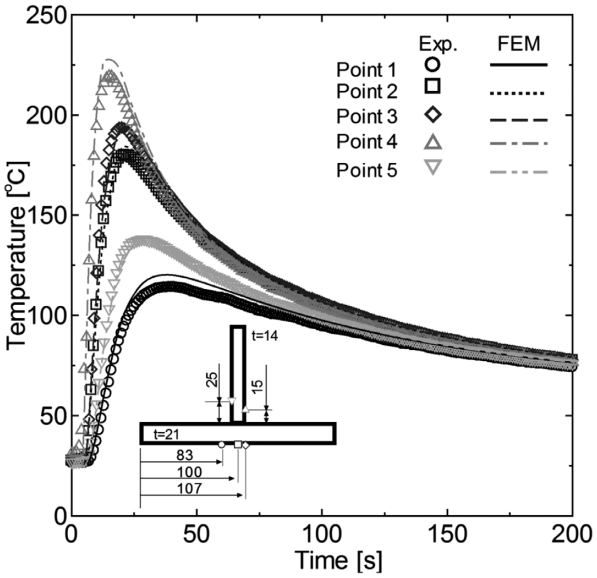


Fig. 10　Comparison of thermal history between FE result and measured one

4.2　熱源形状, 並びにレーザ熱源とアーク熱源の位置関係

溶接変形解析を行うにあたり，事前検討として実験で得られた温度履歴が精度よく再現できるまで繰り返し熱伝導解析を行い，最適な熱源形状，並びにレーザ熱源とアーク熱源の位置関係を探索した．解析には汎用解析コード MSC.Marc2013 を使用し，MSC.Marc で三次元溶接入熱モデルとして実装されている Goldak の複合楕円モデル[5]を熱源として採用した．レーザによる入熱とアークによる入熱をそれぞれ異なる複合楕円モデルで指定し，断面マクロの溶込み形状を参考に，Goldak の複合楕円モデルのパラメータ，並びにレーザ熱源とアーク熱源の位置関係を同定した．得られた Goldak 複合楕円モデルのパラメータを Table 5 に，レーザ熱源の入熱モデルとアーク熱源の入熱モデルの位置関係を Fig. 9 に示す．

アーク熱源は溶接ビードに対して左右均等に入熱するよう溶接ビード斜辺の中点を熱源モデルの中心とし，フランジに対して 45° の傾きとした．レーザ熱源は実験条件を参考にフランジに対して 10° の傾きとし，アーク熱源の 3 mm 前方に設定した．また，アーク熱源の進行に伴い溶接材料が順次充填されるよう解析を行った．ただし，レーザの後退角，並びにアークの前進角は考慮していない．

Table 5 に示すパラメータを採用し実施した熱伝導解析結果と実測結果との比較の一例を Fig. 10 に示す．記号は実験結果，曲線は解析結果を示しており，Point 4（△印），並びに Point 1（○印）における実験結果と解析結果の最高到達温度を比較すると解析結果の方がやや高いが，解析結果は実験結果を良好に再現できている．

4.3　溶込み形状を考慮した FE 解析モデル

金ら[11]はすみ肉溶接継手に生じる面外変形に関して，溶接金属を単純な三角形として取り扱った解析結果と母材溶融部を含めて溶接金属として取り扱った解析結果を比較し，母材溶融部を含めて溶接金属として取り扱うことで面外変形が実験結果とよく一致すると報告している．溶込み形状を参考に細密なメッシュ分割を行うことも可能でるが，本研究では Fig. 7 に示すような比較的簡素なメッシュ分割モデルを用いた FE 解析結果がどの程度の精度を有するかという観点から，溶接金属を単純な三角形として取り扱った

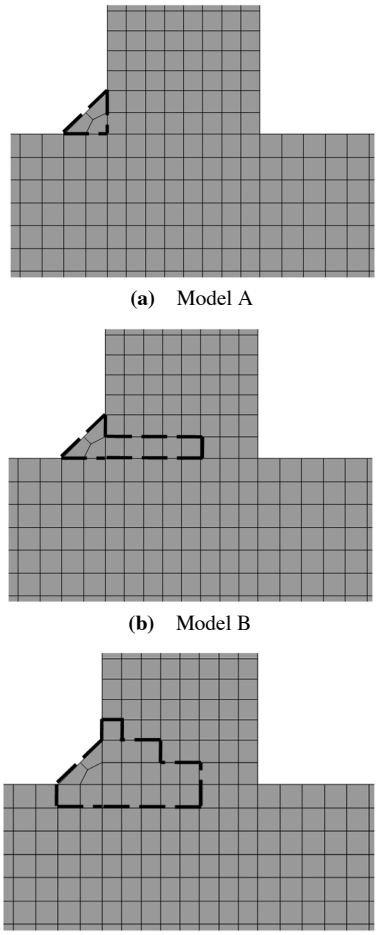
モデル（Model A），溶接金属として取り扱う領域を実際の溶込み領域よりやや小さく設定したモデル（Model B），及び溶接金属として取り扱う領域を実際の溶込み領域よりやや大きく設定したモデル（Model C）の三つのモデルについて解析を実施した．

それぞれのモデルの溶接金属の設定領域を Fig. 11 に示す．それぞれ破線部内に位置する要素を溶接金属として取り扱い解析を実施した．溶接変形解析は計算時間の都合上，両面すみ肉溶接のうち第 1 パス目の溶接に限定し，溶接終了後 600 秒が経過するまで解析を行った．解析終了時の継手温度は継手全体で一様で 50℃ 程度であり，実測結果と同程度であった．

溶込み形状を単純な三角形として取り扱った解析（Model A）から得られたフランジ裏面に位置する節点のフランジ板厚方向（z 方向）変位を 2 倍した値，並びに 2 パス溶接後の溶接変形の実測値の値を Fig. 8 に示す．なお実験における試験体の拘束状況は溶接始終端（$x = 0$，300 mm）の板端部をクランプで拘束しており，解析においてもこの拘束状況を模擬するためにクランプとの接触面に相当する節点の面外変形を拘束し解析を行った．溶接施工側板端（y= -100 mm）における変位量を比較すると，FE 解析の結果，実測値の両者においてフランジの面外変形を拘束した節点に近い点 D1 並びに点 D3 の位置ではほとんど変形が生じていないが，溶接線中央位置である点 D2 の位置では面外変形が生じている．

y= -100 mm の位置における板厚方向変位量と y= 0 mm の位置（主板中央）における板厚方向変位量との差，並びに y = 100 mm の位置における板厚方向変位量と y= 0 mm の位置における板厚方向変位量との差を溶接により生じた垂直方向変位量とし，この垂直方向変位量と主板の半幅の比として溶接止端，中央，及び溶接終端部（Fig. 1 に示す D1，D2，及び D3）の角変形量を計算した．各位置での角変形量の平均値と実験から得られた角変形量を比較した結果を Table 6 に示す．

FE 解析から得られた角変形量は 2 倍した値を示しており，解析結果は実験結果より 20% 程度小さい値を示している．また，溶接金属として取り扱う領域を単純な三角形としたモデル（Model A），実際の溶込み領域より小さく設定したモデル（Model B），及び実際の溶込み領域より大きく設定したモデル（Model C）の解析結果を比較すると，得られた解析結果にほとんど差異はなく溶接金属を単純な三角形として取り扱って解析を実施しても，実験値を誤差20%程度で予測可能であることが示された．



(a) Model A

(b) Model B

(b) Model C

Fig. 11 Supposed weld metal regions

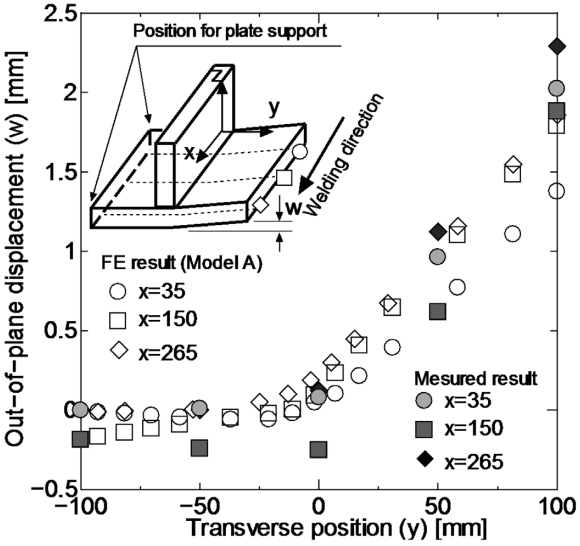


Fig. 12 Distribution of out-of-plane displacement

Table 6 Comparison of angular distortion between FE result and measured one

(Unit: radian ×10^{-2})	Measured result	FE result		
		Model A	Model B	Model C
Values of angular distortion (2θ)	1.114	0.8689	0.8602	0.8647

5. 結　　言

国内造船所で多用される板厚を有する完全溶け込み T 継手を，炭酸ガスアーク溶接を用いたハイブリッド溶接により製作し，その角変形量と溶接時の温度履歴の計測を行った．また，ばら積み船に対する共通構造規則（CSR-B 編）の規定を満たす脚長を形成するのに必要な入熱量を算出し，アーク溶接で同一寸法の継手を製作した際に生じる溶接角変形を推定して両者の比較を行った結果，ハイブリッド溶接により生じる角変形量は，アーク溶接を用いて CSR-B 編で規定される F1 等級のすみ肉溶接継手を製作した際に生じる角変形量と同程度であることが確認された．この結果より，従来のすみ肉溶接継手を強度面で優位な完全溶込み溶接継手に置き換えること，並びに角変形の低減が可能であると考えられる．

また本研究で対象としたハイブリッド溶接施工に対する温度履歴を精度よく再現できる熱源形状を同定し，これを用いた熱弾塑性 FE 解析により角変形量を推定した結果おおむね角変形の推定が可能であることを確認した．溶接変形シミュレーションの推定精度向上に関して，溶込み形状を変化させた解析を実施したが解析結果に大きな差異はなく，母材溶融部を含めて溶接金属として取り扱って解析を行っても，適切なメッシュ分割を行わなければ溶接変形の推定精度は向上しないことを確認した．

謝　　辞

本研究は，2012～2013年度に（一財）日本船舶技術研究協会において実施された「船舶建造高品質化・高効率化の調査研究」及びこれに関連した大阪大学接合科学研究所との共同研究（2013年度）の成果の一部である．本内容の公表を許可頂きました関係各位に御礼申し上げます．特に，本研究を遂行するにあたってご指導頂きました大阪大学 接合科学研究所 片山聖二教授，水谷正海技術専門員，および Mohamed Ashour Saad Wahba 氏に感謝申し上げます．また，実験供試材料を提供頂きました JFE スチール株式会社に感謝の意を表します．

参 考 文 献

1) M. Watanabe and K. Satoh: Control of Angular Distortion Due To Welding Conditions In T-fillet Welded Joints-Shrinkage Distortion in Welded Joint (Report 2), J.JWS 25-6 (1956), 37-42. (in Japanese)
2) K. Satoh and T. Terasaki: Effect of Welding Conditions on Welding Deformations in Welded Structural Materials, J.JWS, 45-4 (1976), 42-50. (in Japanese)
3) K. Inose, J Kanbayashi, K. Oowaki, T Sugino, M. Tagami and Y. Nakanishi: Study for application of Laser-arc hybrid welding for steel structure, Prep.Nat.Meet.JWS 82 (2008), 198-199. (in Japanese)
4) K. Inose: Studies for Reducing Welding Distortion and Application for Actual Fabrication, Quar.J.JWS, 80-2 (2011), 166-170. (in Japanese)
5) J. Goldak, A. Chakravarti and M. Bibby: A New Finite Element Model for Welding Heat Sources, METALLURGICAL TRANSACTIONS 15B (1984), 299-305.
6) Japan Ship Technology Research Association : 船舶建造高品質化・効率化技術のための調査研究 (2012-2014), (in Japanese)
7) Cottrell C. L. M: Controlled thermal severity cracking test simulates practical welded joints, Welding journal 32 (1953), 257-272.
8) K. Satoh. and T. Terasaki: Effect of Transformation Expansion on Welding Residual Stresses Distributions and Welding Deformation, J. JWS45-7 (1976), 560-566. (in Japanese)
9) International Association of Classification Societies: Common Structural Rules for Bulk Carriers, Chapter 11 Section 2 (2013), 403-410.
10) K. Matsuoka and T. Yoshii: Weld Residual Stress in Corner Boxing Joint, Journal of the Society of Naval Architectures of Japan 180 (1996), 759-761. (in Japanese)
11) Y. Kim, J. Lee, and K. Inose: The High Accurate Prediction of Welding Distortion Generated by Fillet Welding 23-3 (2005), 431-435. (in Japanese)