(昭和 57 年 11 月 日本造船学会秋季講演会において講演)

球殻構造における溶接変形の研究 (第 3 報)

—貫通部材溶接時の溶接変形防止法—

正員 藤 田 譲* 正員 野 本 敏 治*
 正員 松 村 裕 之** 正員 長 谷 川 壽 男**
 正員 山 田 桑 太 郎*** 正員 田 所 修 一***
 正員 今 村 光 利***

Research on Welding Deformations of Spherical Shell Structure (3rd report)

—Study on reducing methods of welding deformation—

by Yuzuru Fujita, *Member* Toshiharu Nomoto, *Member*
 Hiroyuki Matsumura, *Member* Hisao Hasegawa, *Member*
 Sotaro Yamada, *Member* Syuichi Tadokoro, *Member*
 Mitsutoshi Imamura, *Member*

Summary

Welding deformations and residual stresses are major factors which affect the collapse strength of externally pressurized vessels. Deflections in spherical shell welded along the equator have been already investigated by some of the authors²⁾.

In many cases of actual structures, a penetrator is welded circumferentially to a spherical shell. In these cases, the spherical shell near the weld line and the penetrator tend to sink inward.

In the 1st report³⁾, the deformations of spherical shell caused by the welding of penetrator were investigated. Experiments were carried out in order to clarify the characteristics of welding deformations under the effects of shell and penetrator dimensions and welding procedures.

In the 2nd report⁴⁾, one-dimensional thermal elasto-plastic analysis using Rayleigh-Ritz method was carried out to solve this problem theoretically. It was clarified by the analysis that the parameter λ and $\lambda\alpha$, which correlate the rigidity of shell and penetrator, and the parameter $(Q/h)\beta$, which correlates welding thermal cycle, are governing the welding deflections.

In this report, a method of reducing the welding deformations in spherical shell structures is discussed. Some deflection control methods are considered based on the results obtained by the previous reports. It is proved by experiments that the "thermal-shrinkage-fit method" is effective to produce initial reverse deflection and the "restraint load method" is more effective to reduce welding deflections. The Welding deformations in spherical shells can be prevented almost perfectly by controlling the restraint load together with adopting the initial reverse deflection, and the effectiveness of this proposed method is confirmed by experiments.

1 緒 言

球殻構造は、潜水船の耐圧殻、球形ガスホルダなどの圧力容器などの耐圧構造物に多く用いられている。このような構造物はその半径に比べて板厚が薄い場合が多く、

曲げ加工、切削、溶接施工などにより変形や残留応力などのいわゆる初期不整が発生する。これらが生じた場合は構造物の疲労強度、脆性破壊強度などに影響を及ぼすが、構造物が外圧を受ける場合には座屈・圧壊強度に特に大きな影響を与えるものと予想される。

したがって、その溶接変形量を把握するとともに、球殻の形状精度を確保するための溶接変形の有効な制御方法を見出し、工作時の寸法精度管理限界を明らかにする

* 東京大学工学部

** 川崎重工業(株)技術研究所溶接研究室

*** 川崎重工業(株)造船工作部

ことは極めて重要であると考える。

著者らは既に円筒殻円周溶接を対象とした研究¹⁾を実施しているが、球殻構造における溶接変形の問題をも解明すべく、まず球殻赤道溶接時の溶接変形について解析および実験を実施した²⁾。

これに引き続き、球殻に部分球殻や種々の形状の貫通部材をはめ込み円周溶接する場合を対象に、その溶接変形に関して実験的検討を行い³⁾、溶接による撓み変形の分布形状および変形の発生機構を明らかにするとともに、球殻および貫通部材の寸法形状や取付状態など各種因子が撓み変形に及ぼす影響を調査した。さらに、この問題に対して Rayleigh-Ritz 法にもとづく1次元熱弾塑性解析を用いた理論的研究を実施し⁴⁾、溶接変形を支配するパラメータを明らかにするとともに、各パラメータの影響を調査した。これらの研究により、球殻構造の溶接施工時に発生する溶接変形量を把握するとともに、球殻の工作精度を推定することができるようになった。

本報ではより実用的な課題であるこのような球殻構造における溶接変形の防止法を検討する。まず、一連の研究により明らかになった貫通部材溶接による撓み変形の特徴をふまえ、貫通部材溶接時の溶接変形防止に関する基本的な考え方を示す。次にその考え方のもとに種々の変形防止法の効果を実験的に検討し、得られた結果にもとづき有効な溶接変形の制御・防止方法を提言する。

2 球殻構造における溶接変形

溶接変形は構造物の所要性能に種々の影響を及ぼすが、本節では球殻構造が外圧を受ける場合を例にとり、溶接変形の制御・防止の重要性を述べるとともに、変形の抑制・防止法を考えるうえで不可欠な球殻における溶接変形の特徴について、既報で得られた主な知見を述べる。

2.1 溶接変形と圧壊強度

一般に、溶接により発生する溶接変形や溶接残留応力は、溶接構造物の疲労強度、脆性破壊強度、耐応力腐食割れ性能など種々の性能に影響を及ぼす。球殻構造は耐圧構造に用いられることが多く、球殻構造の溶接変形や残留応力は球殻の座屈・圧壊強度に最も大きな影響を及ぼすと考えられる。

球殻が一樣な外圧を受ける場合、機械加工によって正確に製作された球殻においても測定しえないような初期不整が存在し、このときの座屈圧力が古典理論値の約70%程度しか示さないことは、よく知られている。Krenzkeら⁵⁾は、一般の球殻では初期形状不整による局部曲率半径(R_L)を用いて座屈圧力を計算すべきであることを指摘し、数多くの機械加工球の圧壊実験にもとづき実験式を提案している。球殻の圧壊強度は、この局部

曲率半径のほか、球殻の材料特性や球殻の板厚などにも依存するが、この実験式を用いた試算⁶⁾によれば、球殻の形状不整量(d/t)に対応する局部曲率半径が圧壊強度の変化に極めて大きく影響する。

溶接により製作された球殻についてもいくつかの実験⁷⁾が実施されているが、溶接により製作された球殻では形状不整が大きく、その圧壊強度が機械加工球に比べてさらに低下することが報告されている。また、このような実験的な研究と同時に理論的な研究も実施されており、安川ら⁸⁾は貫通部材溶接による撓み変形の形状をモデル化した座屈解析を実施している。

このように、球殻構造における溶接変形は、その座屈圧壊強度に極めて大きな影響を与えるため、溶接変形を制御・抑制し、良好な精度(真球度)を確保しうる工作法の確立がぜひとも必要である。

2.2 球殻構造における溶接変形

一般に溶接による変形は面内の収縮変形と面外の角変形に大別されるが、殻構造においては収縮変形のみによっても面外の撓み変形が誘起される。既報^{2)~4)}によって調査した球殻構造における溶接変形の特徴は以下のとおりである。

- 1) 貫通部材溶接時には貫通部材および溶接線近傍の球殻部が球殻中心に向かって陥没する。球殻部の撓み形状は赤道溶接の場合のそれと酷似しているが、貫通部材溶接においては、あたかも溶接線上で段差を生じたかのような撓み形状を示し、貫通部材内で撓み量が最も大きくなる。
- 2) この撓み変形は主に溶接部の溶接線方向の収縮(いわゆる縦収縮)に起因するものであり、溶接の積層とともに撓み量が増大する。多層溶接では角変形も撓み変形の要因となる。
- 3) 撓み変形は球殻寸法、貫通部材寸法、溶接入熱量に依存するが、撓み変形を整理するパラメータとしては球殻の剛性を表わす $\lambda (= \sqrt[3]{3(1-\nu^2)}(R/h)^2)$ 、貫通部材寸法を表わす $\lambda\alpha$ 、溶接熱履歴を表わす $(Q/h) \cdot \beta$ が有効である(ただし、 R : 球殻半径、 h : 球殻板厚、 Q : 溶接入熱量、 2α : 貫通部材の占める角度($=d/R$)、 d : 貫通部材径、 $\beta=\lambda/R$)。
- 4) 撓み変形量は、球殻寸法のパラメータ λ が大きい(径が大きく、薄板)ほど大きい。また、貫通部材寸法のパラメータ $\lambda\alpha=0.7\sim1.3$ の場合に最も大きな撓み量を示し、同一寸法の球殻の赤道溶接の約3倍の撓み量を示す。
- 5) 球殻側の撓み変形は、球殻・貫通部材寸法、溶接入熱量の如何にかかわらず、溶接線からの無次元角度 $\lambda\varphi'=2.0\sim2.5$ で撓み量が零になる。

このように、球殻構造の溶接では赤道溶接よりむしろ

貫通部材溶接による溶接撓み変形が問題であり、本報では上記のような溶接変形の特徴をふまえ、貫通部材溶接時の溶接変形防止策について次節以降で検討を行う。

3 溶接変形防止の考え方

前節で述べた貫通部材溶接による変形の挙動やその特徴をもとに溶接変形の防止法について考えると、基本的には次のような条件を満足すればよいことになる⁹⁾。

- 1) 変形の発生原因となる溶接収縮量を減少もしくは制御すること
- 2) 溶接施工後の形状を改善するために、予め逆変形を与えること
- 3) 変形が生じないように外部からの拘束荷重によって変形を抑制・制御すること

このような条件を満たす具体的な方策を以下に述べる。

3.1 溶着量の低減について

第1報 (Fig. 3) に示したように、溶接積層にともない溶接撓み変形量は増大する。したがって変形の抑制方法としては、撓み変形の主因である収縮量に直接対応する溶着量を減少させるために、溶接部の開先を狭開先とする方法や撓み変形を助長する因子である溶接による角変形をできるだけ少なくなるように表裏面から交互に溶接施工を行うバランス溶接法の採用が考えられる。

開先形状については、本来、溶接施工の能率の観点からできるだけ狭開先とすることが望ましく、基本的には溶接実施工上さしつかえない範囲内でこの思想が既に取り入れられているものと考えられる。バランス溶接の採用は、種々の実験結果によれば、積層数が多い場合にはわずかながら変形量が低減しており、バランス溶接を採用することが望ましいといえる。

3.2 初期逆変形の設定について

従来から、溶接変形、特に角変形が問題となるような板構造物にはいわゆる逆歪法がしばしば用いられてきた。板構造の場合に逆歪(変形)を付加することは比較的容易であるが、球殻の貫通部材溶接部近傍に、先に述べたような形状の逆変形をプレスなどにより付加することは極めて困難である。

そこで、貫通部材取付け用の開口を有する球殻の開口部近傍を加熱し、開口部近傍が球殻の外側方向に突出し、しかも開口径が大きくなった状態で初期開口径より若干大きな貫通部材を“焼ばめ”によって嵌合させることによって逆変形を付加する方法が考えられる。

この他、貫通部材溶接では貫通部材が球殻の中心方向に陥没し、あたかも溶接線上で段差を生じたかのような変形状を呈することに着目し、貫通部材を予め球殻外方にずらして取付ける方法が考えられる。この方法は、

第1報 (Fig. 11) に示したように溶接変形量そのものの低減にも効果あるものと考えられる。

3.3 拘束荷重の負荷について

従来から溶接変形を抑制する手法として拘束治具を用いたり、拘束荷重を負荷する方法が広く用いられてきた。貫通部材溶接の場合、溶接部近傍のみならず貫通部材全体の変形を拘束する必要があるが、拘束状態を制御しようという点からは拘束荷重を負荷する方法の採用が考えられる。

外径 $D=530$ mm, 板厚 $h=9$ mm の球殻に対し、拘束荷重を種々変化させた場合の最終変形量を調査した予備試験結果を Fig. 1 に示す。拘束荷重の増大とともに最終変形量は減少する傾向にあり、拘束荷重の効果が極めて大きいことがわかる。

4 実験および考察

以上、述べたような球殻構造における溶接変形の幾つかの防止法について実験を行い、それぞれの効果を明らかにするとともに、溶接変形を制御・防止する手法についても言及する。

4.1 実験方法

供試体はすべて軟鋼製の半球殻模型とし、球殻の剛性(λ)および球殻の外径(D)が異なる4種の試験体を用いた。半球殻模型に取付ける貫通部材は第1報と同様に実構造物をモデル化した形状のものとし、溶接は10Ni-8Co 鋼および NS90 鋼用ワイヤを用い半自動 TIG 溶

Fig. 1 Effect of restraint load on welding deflections

接法で、下向姿勢にて施工した。形状計測は第1報で述べたスイングアーム法のほか、球殻外面に型板を当てて形状計測する型板法も併用した。計測は、球殻の貫通部材取付位置の穴あけ後、貫通部材の仮付溶接の前後および本溶接後のほか必要に応じて実施し、これらの差をとることによって変形量を求めた。以下の実験値はすべて最低4断面以上の平均値を用いている。

本実験では前節で述べた幾つかの変形防止法の効果を調査すべく、Table 1 に示す条件について実施した。初期逆変形を設定するための“焼ばめ”および溶接用の予熱にはストリップヒータを用い、拘束荷重は溶接部近傍の球殻部および貫通部材全体に沿う形状に加工した押し治具を介して油圧ジャッキを取付け、油圧で拘束荷重を制御した。試験状況を Fig. 2 に示す。

Fig. 2 View of test models and jigs to apply the restraint load

Table 1 Test conditions

球 殻 寸 法			貫通部材寸法			撓み形状の パラメータ		溶 接		試 験 条 件
外径 D	板厚 h	半径 R	直径 d	中央部 開口径	角度 α	λ	$\lambda\alpha$	ワイヤ	積 層 法	
530	9	260.5	100	—	11	6.915	1.336	10Ni- 8Co 鋼 用 ワイヤ	外→内	自 由
			190	—	21		2.586			拘束荷重
			100	—	11		1.336			焼ばめ
			150	—	17		2.019			
			150	—	17		2.019			
1000	22	489	200	—	12	6.060	1.248		外→内→外	自 由
			300	—	18		1.889			拘束荷重
	25	487.5	200	—	12	5.676	1.173			自 由
			300	—	18		1.775			拘束荷重
1000	6	497	110	—	—	11.699	1.297		外→内	自 由
			340	170	20		4.034		外	拘束荷重
			120	—	—		1.416		外→内	自 由
			340	170	20		4.034		外	拘束荷重
2400	15	1192.5	250	—	6	11.461	1.204	NS 90 鋼 用 ワイヤ	外→内→外	自 由
			350	—	8		1.688			拘束荷重
			250	—	6		1.204			焼ばめ
			350	—	8		1.688			焼ばめ
			200	—	5		0.962			焼ばめ
			250	—	6		1.204			焼ばめ
			300	—	7		1.445			焼ばめ
			250	—	6		1.204			焼ばめ
			350	—	8		1.688			焼ばめ+拘束荷重

4.2 焼ばめ法の効果

焼ばめの実施にあたり、球殻の開口部近傍を加熱することによって開口部がどのように挙動するかを事前調査した。Fig. 3 (a) は加熱による開口径の増加と開口部近傍の球殻外方への撓み量を示したものである。焼ばめにより逆変形をいわゆる予歪 (変形) として設定する場合、貫通部材寸法と球殻開口径の相対差はできる限り大きい方が望ましいが、焼ばめに際して開口部近傍の全周にわたって一様な逆撓み量および開口径を得るためには一様な温度分布とする必要がある。このためにはストリップヒータなどの温度制御が可能な加熱装置を用いる必要があるが、本実験に用いたストリップヒータでは約 250°C 以上にすることは困難であった。本実験の場合、貫通部材寸法を開口径より約 1 mm 前後大きくして焼ばめを実施した。Fig. 3 (b) には、(a) 図から推定される嵌合時の撓み量 (約 200°C) と仮付溶接施工後室温まで冷却した時の撓み量を示している。本試験体寸法の場合、焼ばめ法により約 1 mm 程度の初期逆撓み量 w_0 を設定することができることが明らかとなった。

Fig. 4 は、この焼ばめ法による初期逆撓み変形の形状を示したものである。この変形形状は、溶接による撓み

Fig. 3 Thermal-shrinkage-fit method to produce initial reverse deflection

変形形状と類似しており、溶接後の真球度向上という観点からは最適の逆撓み形状と考えられる。しかしながら、後で示すように本試験条件の球殻および貫通部材寸法の場合、無拘束状態では 4 mm 程度の撓み変形を生ずるため、本方法のみで溶接変形を完全に防止することは困難である。したがって次に述べる外部からの拘束荷重をいかにうまく制御・設定するかが、球殻の工作精度を確保するための重要な因子となる。

4.3 拘束荷重による溶接変形の抑制効果

拘束荷重によって貫通部材溶接時の撓み変形をどの程度にまで抑制しうるかを調査するために種々の球殻寸法、貫通部材寸法について実験した。実験結果の一部を Fig. 5~8 に示す。図の縦軸は仮付溶接後の形状を零とし、本溶接により生ずる撓み変形量のみを示したものであり、横軸は貫通部材中央からの角度で、溶接線の位置は 1 点鎖線で示している。

いずれの球殻・貫通部材寸法の場合も拘束荷重の負荷によっても溶接撓み変形量が減少している。Fig. 5 には

Fig. 4 Initial reverse deflection induced by thermal-shrinkage-fit method

Fig. 5 Effect of restraint load on welding deflections ($D=530$, $h=9$, $d=150$)

Fig. 6 Effect of restraint load on welding deflections ($D=1000$, $h=25$ or 22 , $d=300$)

Fig. 7 Effect of restraint load on welding deflections ($D=1000$, $h=6$, $d=340$)

焼ばめを採用した場合の変形をも併記している。焼ばめ法を適用した場合は初期逆撓み変形を設定しうるばかりでなく、溶接による撓み変形量をもわずかながら減少す

Fig. 8 Effect of restraint load on welding deflections ($D=2400$, $h=15$, $d=350$)

ることを示している。大きな開口部を有する貫通部材の場合、Fig. 7 に示すように無拘束では貫通部材中央の開口部で最大の変形量を示すが、拘束荷重を負荷することにより貫通部材内の変形が一樣となる。Fig. 8 にはバランス溶接法の採用による撓み変形の低減効果をも併記している。本実験の場合、溶接パス数は15パスであるが、バランス溶接法の採用により約0.6mm（通常の積層法の場合の撓み量の約10%）程度撓み変形量が低減している。

ところで、突合せ溶接およびすみ肉溶接による溶接変形量（収縮量および角変形量）に及ぼす外的拘束の影響は渡辺、佐藤らによって明らかにされている^{10), 11)}。これらはいずれも拘束時の変形量と自由変形量の比を拘束係数（継手の拘束状態を表わすパラメータ）の関数として与えており、貫通部材溶接による撓み変形に及ぼす拘束荷重の影響を整理するに際して、このような継手の拘束状態を表わす一般的なパラメータを求める必要がある。

球殻赤道溶接の場合、溶接による撓み形状は溶接線上に一樣な外圧を負荷した時の撓み形状と酷似しており、継手の拘束状態は球殻の剛性を表わすパラメータλのみで整理しうる。貫通部材溶接の場合、球殻寸法ばかりでなく貫通部材寸法によって撓み量や撓み形状が変化する。溶接線上に荷重を負荷した時の変形は第1報 (Fig.

12, 13) で示したように λ , $\lambda\alpha$ で整理しうるものの簡単な式によって拘束係数を表示することは困難である。

そこで本報では、撓み量に及ぼす球殻の剛性 λ の影響は溶接による変形も荷重による変形も同じであり、拘束時の溶接撓み変形量 $w_{\text{restraint}}$ と無拘束時の変形量 w_{free} の比は球殻の剛性に依存しないものと仮定する。また、拘束係数に対応するものとして単位溶接長当りの拘束荷重 $p(P/\pi d)$ を採用し、拘束荷重による溶接変形の抑制効果を評価することとする。

Fig. 9 は球殻寸法、貫通部材寸法および拘束荷重が種々異なる試験結果を整理したものである。拘束荷重が比較的小さい場合にはバラツキが認められるが、拘束荷重の増加とともに変形量は減少し、単位溶接長当りの拘束荷重 $p=50 \text{ kgf/mm}$ では無拘束の場合に比べ約 35~40% にまで撓み変形量が減少する。

4.4 溶接変形の制御・防止方法

以上の研究成果によれば、貫通部材溶接による撓み変形を抑制・防止するためには、主として①焼ばめ法による初期逆撓み変形の設定、②拘束荷重法による溶接撓み変形の抑制の2方法が有効であり、ほとんどあらゆる場合に適用可能と考えられる。

この2方法を採用した場合の工作手順を Fig. 10 に示すが、基本的には焼ばめ法によって得られた初期逆撓み変形量と拘束時の溶接撓み変形量が一致するように、拘束荷重を設定すれば少なくとも球殻部の変形は完全に防止できることになる。また、貫通部材内の変形は貫通部材を予め球殻外方に取付けることによって変形を防止しうるものと考えられる。

このときの拘束荷重は Fig. 9 を用いて設定するが、拘束荷重によっては貫通部材や球殻の一般部（母材部）まで降伏する可能性があり、負荷しうる拘束荷重には限界がある。さらに前述したように、焼ばめ法により設定しうる初期逆撓み変形量にも限界があり、球殻の寸法や材質（強度）、貫通部材寸法によっては溶接変形を完全に防止することができない場合もあり、この意味で工作上の寸法精度管理限界が存在することになる。

Fig. 11, 12 には焼ばめ法と拘束荷重法を併用した溶接変形制御法による試験結果を示す。Fig. 11 は試験中の撓み量と荷重の履歴を示したものであり、Fig. 12 は溶接施工後の真球度を無拘束の場合と比較して示したものである。試験は初期拘束荷重を 12ton および 15ton に設定し、油圧ジャッキのバルブをロックして実施した。このため Fig. 11 に示すように溶接変形にともない拘束荷重が若干増加している。溶接積層法としてはバランス溶接法を採用したが、裏面溶接時には角変形のためやや溶接撓み量が減少する傾向にある。試験体の材質が軟鋼であるため、変形を完全に防止しうるような所要の大き

Fig. 9 Reducing effect of restraint load on welding deflections

	Process	deflection increment	load increment	Temp.
①	Preheating (100°C)	Δw_p	0	100°C
②	Restraint load applying	Δw_l	ΔP_l	100°C
③	Welding (interpass temp.: 100°C)	Δw_w	ΔP_w	100°C
④	Cooling after finishing of weld	Δw_c	ΔP_c	R.T.
⑤	Unloading of hydraulic jack	Δw_u	ΔP_u	R.T.

Fig. 10 Schematic diagram of deflection adopting both "thermal-shrinkage-fit method" and "restraint load method"

な拘束荷重を採用できなかったが、Fig. 12 に示すように溶接変形量は大幅に低減し、ここで採用した溶接変形の制御・防止法の有効性がうかがえる。

なお、耐圧構造に用いられる実構造物での球殻構造には、一般には高張力鋼が用いられるので、本試験の2~4倍程度の拘束荷重を負荷しうる。また、高張力鋼ではマルテンサイト変態量が大きく、しかも変態点が比較的低温であるため、その溶接変形量は軟鋼に比べて一般に少ない。したがって、実構造物ではこの溶接変形制御・防止法によりさらに変形量を低減させようと考えられる。例えば、本試験と同一寸法で球殻の材料強度が高く、拘束荷重として 50ton ($p=63.7 \text{ kgf/mm}$) を負荷しうる場合を考えると、Fig. 9 より溶接のみによる撓み変形は約 -1.3 mm 程度となる。一方、貫通部材の仮付

Fig. 11 Behavior of deflection and restraint load during welding procedures

Fig. 12 Final configuration after penetrator welding by adopting proposed reducing method

溶接時の拘束荷重も増加させることができ、Fig. 3 (b)に示したように約1 mm程度の初期逆撓み変形を設定するので、最終的には約-0.3mm程度にまで溶接変形を防止でき、形状不整量 $\Delta/t \approx 0.02$ と極めて寸法精度の良好な球殻を製作しうるものと予想される。

5 結 言

本研究では、球殻に貫通部材などをはめ込み溶接する

時に生じる溶接変形について実験的および解析的に検討を加えてきたが、本報ではより実用的な課題として、溶接変形の防止法について実験的に検討を行った。本報で得られた結論を以下に示す。

(1) 球殻構造の溶接変形を抑制・防止する方法としては、基本的には溶着量を減少させること、初期逆変形を設けることおよび溶接変形を拘束することが考えられる。

(2) 初期逆変形の設定方法としては、球殻開口部を加熱し貫通部材を“焼ばめ”する方法が有効である。

(3) 拘束荷重を負荷することによって溶接変形は大幅に抑制しうる。種々の球殻・貫通部材寸法について拘束荷重による溶接変形の抑制効果を調査し、その効果を推定しうるチャートを作成した。

(4) 焼ばめ法と拘束荷重法を併用することにより溶接変形を制御しうることを示し、この変形防止法の有効性を実験によって確認した。

参 考 文 献

- 1) 藤田, 野本, 長谷川: 熱弾塑性問題に関する研究 (その4), 日本造船学会論文集, 第146号 (1979), 383.
- 2) 藤田, 野本, 長谷川: 熱弾塑性問題に関する研究 (その5), 日本造船学会論文集, 第149号 (1981), 335.
- 3) 藤田, 野本, 山田, 松村, 長谷川, 猪野, 隆杉: 球殻構造における溶接変形の研究 (第1報), 第149号 (1981), 325.
- 4) 藤田, 野本, 安澤, 山田, 松村, 長谷川, 猪野, 隆杉: 球殻構造における溶接変形の研究 (第2報), 日本造船学会論文集, 第150号 (1981), 461.
- 5) M. A. Krenzke & T. J. Kierman: The effect of initial imperfections on the collapse strength

- of deep spherical shells, David Taylor Model Basin Report 1757 (1965).
- 6) 三代, 佐野, 高見, 河部, 藤井, 浜田: 外圧を受ける耐圧殻の形状計測および形状解析システムについて, 川崎重工技報, 77 号 (1981), 52.
 - 7) 例えば, 日本船用機器開発協会: 6000m 深海潜水調査船の開発研究事業報告書 (1971), (1972).
 - 8) 安川, 川上, 吉川: 初期不整を有する球殻の圧壊強度解析, 日本造船学会論文集, 第 151 号 (1982), 197.
 - 9) C. Garland: Design and Fabrication of Deep-Diving Submersible Pressure Hulls, SNAME, Vol. 76 (1968), 161.
 - 10) 渡辺, 佐藤, 高木, 麻生: 船体ブロック溶接継手の拘束度ならびに収縮, 造船協会論文集, 第 104 号 (1959), 191.
 - 11) 渡辺, 佐藤: T 型すみ肉溶接継手の曲り変形におよぼす外的拘束の影響, 溶接学会誌, Vol. 27, No. 7 (1957), 459.