

(解説)

# 海洋構造物用溶接材料

## Welding Consumables for Offshore Structures



末永和之\*  
Kazuyuki Suenaga



杉野 毅\*  
Takeshi Sugino

Ocean energy conversion systems have made great progress in recent years, and will, undoubtedly, play an important role in the future. As energy harvesting has progressively moved into deeper and colder waters, the demand for more specialized welding consumables has risen sharply. This paper reviews newly developed welding consumables suitable for drilling equipment and/or oil and gas production equipment.

まえがき = 石油・天然ガスなどのエネルギー資源を求めて、北海・メキシコ湾をはじめとし、渤海やサハリン沿岸などで海洋開発が進められており、海洋におけるエネルギー資源開発は今後ますます重要性が高まっていくと考えられる。洋上でのエネルギー資源開発を進めていくうえで海洋構造物の役割は大きいですが、その一方で、設置される海域の環境はより厳しさを増しており、構造物への設計要求もより厳しいものとなっている。本稿では、石油・天然ガスの掘削・生産設備とそれに関連した溶接材料について述べる。

### 1. 海洋構造物の種類と変遷

#### 1.1 海洋構造物の種類

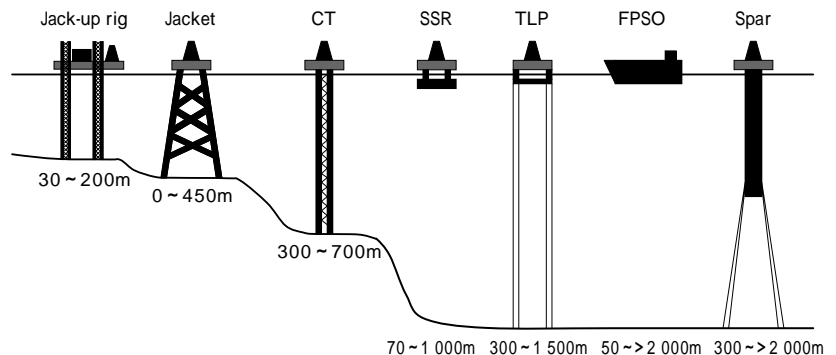
海洋における石油・天然ガスの掘削施設としては、ジャッキアップ・リグ(Jack-up Rig)、セミサブ・リグ(Semi-Submersible Rig; SSR)などがあげられ、また、生産施設としては、ジャケット(Jacket)、コンプライアント・タワー(Compliant Tower; CT)、TLP(Tension Leg Platform)、浮体式石油生産・貯蔵・積出し施設(Floating Production, Storage and Offloading facility; FPSO)、スパー(Spar)などがあげられる。

構造物の概略図および各構造物における稼働水深を図1に示す<sup>1)2)</sup>。ジャッキアップ・リグやジャケットは古く

から掘削・生産に利用されており、それぞれ着底式および固定式構造物である。ジャッキアップ・リグは、甲板昇降式石油掘削装置とも呼ばれ、レグに取付けられたラックとプラットフォームに取付けられたピニオンとで構成されており、プラットフォームを昇降できるようになっている。ラックおよびピニオンでプラットフォーム全体を支えるため、これらの材料としては降伏強度690MPa級(以下、YP690MPa級と表す)の高強度鋼が使用されている。

ジャケットは、パイプを多用したレグを特徴とする固定式プラットフォームであり、パイプ同士の接合部(格点部)が数多く存在する。格点部はその形状からTKY-ジョイントとも呼ばれるが、曲面を接合するため継手のギャップ精度が低くなりやすく、全姿勢での溶接となり溶接施工が難しく、かつ応力集中部となりうることから、継手に対する要求は極めて厳しいものである。鋼材は主にYP460MPa級以下のものが使用されてきたが、最近では使用海域への設置工数の低減のため上部構造の軽量化が図られるようになり、上部構造へYP500MPa級鋼も適用されつつある。なお、ジャケットの最大稼働水深は、その固有周期から450m程度が限界とされている<sup>1)</sup>。この限界を克服したのがCTであり、下部構造の変形が大きくなるように設計されている。構造変形によって固有周

図1 海洋構造物の種類と稼働水深<sup>1)2)</sup>  
Fig. 1 Types of offshore structures and their working water depth<sup>1)2)</sup>



\*溶接カンパニー 技術開発部

期が長くなり、水深がジャケットの2～3倍へと高められた。建造実績は少ないが、水深300～700m程度でのコスト競争力で有利とされている<sup>2)</sup>。

近年では、より水深の深い海域での石油・天然ガス開発が進められ、浮体式構造物の実用化が目立つようになっている。SSRは浮体式としては比較的早くから試掘・生産用として使用されてきたが、これと類似した構造のTLPは上部浮体をテンドンによって緊張係留した構造となっている。FPSOは箱型の浮体式構造物であり、構造上はタンカと類似している。このため、タンカの改造によって建造される場合もある。スパーは最近実用化された海洋構造物であり、下部構造が円筒形の浮体式構造物である。TLP、FPSO、スパーともに、YP460MPa級以下の鋼材が主に使用されている。

### 1.2 海洋構造物の変遷

主な石油生産設備の稼働水深推移を図2に示す<sup>2)</sup>。1980年代までは稼働水深は500m程度以下であり、そのほとんどは固定式構造物であったが、1990年代後半から急激に大水深化していることが分かる。大水深化にはTLP、FPSOやスパーなどの浮体式構造物が採用されており、水深1000mを超える大水深海域へも適用可能である。

これに伴い、海洋から陸上への輸送方式も変化してきた。すなわち、沿岸海域や大陸棚など水深の浅い海域では主に海底パイプラインが活用されてきたが、大水深化とともにシャトルタンカやガス船による輸送方式に変わってきた。最近では、天然ガスを液化せずに常温で圧縮し輸送にかかわる初期コストを低減しようとするCNG (Compressed Natural Gas) 船による輸送方式も検討されている。

一方、稼働海域としては、北欧において“スノーピットLNGプロジェクト”が、アジアにおいては“サハリン大陸棚石油・天然ガス開発プロジェクト<sup>3)</sup>”がそれぞれ具体化してきており、海洋開発は氷海域にまで広がつつある。

### 1.3 海洋構造物の設計概念

1980年に起きたAlexander Kielland号の転覆事故<sup>4)</sup>を契機として、1980年代には構造物の設計思想に弾塑性破壊力学が導入され、溶接継手にCTOD (Crack-Tip Opening Displacement) が要求されるようになった。1980年代後半以降、信頼性工学にもとづく設計が提案されて

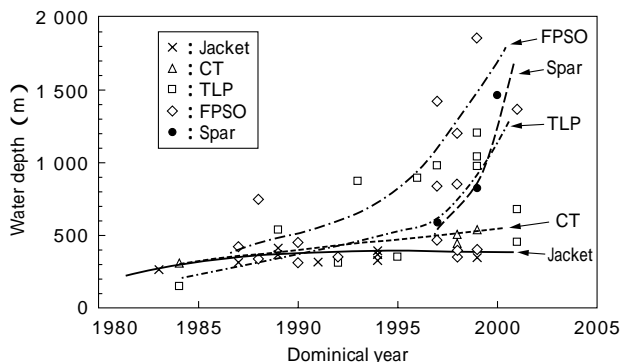


図2 海洋構造物の稼働水深推移<sup>2)</sup>  
Fig. 2 Water depth transition of offshore structures<sup>2)</sup>

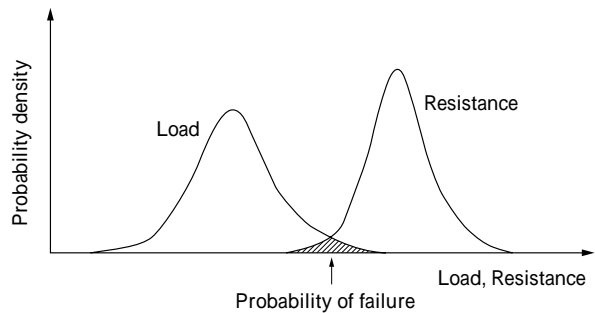


図3 荷重、抵抗と破壊確率の関係<sup>2)5)</sup>  
Fig. 3 Relationship among load, resistance and probability of failure<sup>2)5)</sup>

おり<sup>5)</sup>、近年では信頼設計の概念へ移行しつつある。これは、強度の算定法にばらつきや不確実性を考慮した部分安全係数を導入するとともに、材料や継手の強度（抵抗）また外部荷重を確率密度関数で表し破壊確率を算定するものである。図3は荷重、抵抗と破壊確率の関係を示したものであり、図中のハッチング部分が破壊確率を示す<sup>2)5)</sup>。

最近では、この概念が母材・継手へも展開されているようであり、構造物の破壊は母材破断を前提とした設計も取入れられている。例えば鋼材の強度クラスがYP420MPa級であっても、溶接継手に要求される強度クラスは鋼材の引張強さ以上すなわちYP550MPa級の強度が要求されるなど、一部ではあるが継手強度に関してオーバマッチを要求されるケースもある。更に、じん性への要求も高くなっており、溶接材料に要求される性能としてはより厳しいものとなっている。

## 2. 海洋構造物用溶接材料

### 2.1 溶接材料のラインナップ

海洋構造物の溶接には、YP320～420MPa級、460～500MPa級および690MPa級高強度鋼用と幅広い強度クラスの溶接材料が用いられる。YP690MPa級高強度鋼を除く上記の溶接材料は、造船用として取得した船級協会認定材料も用いられるが、厳寒海域での使用、構造部材の厚板化と高強度鋼材の使用など、海洋構造物に特有の設計要求を満足するためには既取得の認定品質以外の品質を要求される場合が多い。特に低温じん性への要求が厳しいため、海洋構造物の溶接には低温用鋼用溶接材料が多く用いられる。

当社における海洋構造物用として代表的な低温仕様溶接材料を表1に示す。表中のほとんどの材料は、-60程度までのシャルピ衝撃性能要求に対応可能であり、YP690MPa級鋼用および一部の材料を除き、-10以下でのCTOD要求にも対応可能である。

### 2.2 溶接材料の設計と性能

溶接金属の基本的な成分設計は、YP500～600MPa程度を境にして大きく異なっている。これは強度レベルによって溶接金属のじん性向上手段が異なるためである。じん性の向上には低酸素化とともに溶接金属組織の微細化が必須であり、これは強度に関係なく共通の課題であ

表 1 海洋構造物用溶接材料

Table 1 Welding consumables for offshore structures

Welding procedure	Welding consumable	Yield strength level (MPa)	$\sqrt{E_{Temp.}}$ 27J		Temp. 0.25mm		Chemical composition (%)							Note		
			-20	-40	-60	-80	0	-20	-40	-60	Si	Mn	Ni		Cr	Mo
SMAW	LB-52NS	400	✓	✓	✓	✓	✓	✓	0.4	1.4	0.5	-	-	0.02	0.002	AC power source
	NB-1SJ	420	✓	✓	✓	✓	✓	0.3	1.3	1.3	-	-	0.02	0.002		
	LB-62L	500	✓	✓	✓	✓	✓	0.3	1.0	2.1	-	0.1	0.02	0.002		
	LB-88LT	700	✓	✓	✓	✓	✓	0.6	1.8	2.6	-	0.7	-	-		
SAW	PFH-55LT/US-36	400	✓	✓	✓	✓	✓	0.2	1.4	-	-	-	0.02	0.003	AC power source	
	PFH-55LT/US-36J	420	✓	✓	✓	✓	✓	0.3	1.6	-	-	-	0.02	0.004		
	PFH-80AK/US-56B	500	✓	✓	✓	✓	✓	0.4	1.4	0.8	-	0.5	0.02	-		
	PFH-80AK/US-80LT	700	✓	✓	✓	✓	✓	0.3	1.7	2.5	0.1	0.7	-	-		
GMAW	MGS-50LT	400	✓	✓	✓	✓	✓	0.3	1.4	-	-	-	0.02	0.003	Ar + 20%CO <sub>2</sub> shielding gas	
	MGS-88A	700	✓	✓	✓	✓	✓	0.3	1.2	3.4	-	0.8	-	-		
FCAW	DW-55L	400	✓	✓	✓	✓	✓	0.4	1.3	1.4	-	-	0.05	0.003	CO <sub>2</sub> shielding gas	
	DW-55LSR	420	✓	✓	✓	✓	✓	0.4	1.4	1.4	-	-	0.05	0.004		
	DWA-55L	460	✓	✓	✓	✓	✓	0.5	1.3	1.4	-	-	0.05	0.003	Ar + 20%CO <sub>2</sub> shielding gas	
	DWA-55LSR	420	✓	✓	✓	✓	✓	0.4	1.3	0.9	-	-	0.05	0.003		
	DWA-65L	550	✓	✓	✓	✓	✓	0.4	1.2	1.8	-	0.1	0.05	0.003		

る。その手段として、図4に示すように YP550MPa 以下では主に Ti-B 複合添加によって、また YP600MPa 以上では、主に Ni の添加によって組織の微細化を図っている。

Ti-B 複合添加によるじん性向上手段は、前述の CTOD をはじめとした高じん性要求に応えるべく 1980 年代当初に開発・実用化されたものであり、現在 YP550MPa 級以下の溶接材料に広く実適用されている。Ti-B 複合添加による組織微細化のメカニズムは、固溶 B の旧オーステナイト粒界への偏析による初析フェライト生成抑制作用と、Ti 酸化物による旧オーステナイト粒内でのフェライ

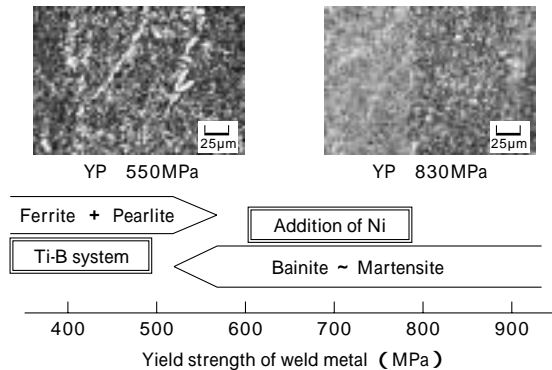


図4 溶接金属のじん性向上手段  
Fig. 4 Methods to increase toughness of weld metal

ト核生成作用とによって、微細なアシキュラフェライトを生成することによるものである。図5は、低温用鋼の溶接に用いられているサブマージアーク溶接 (SAW) 材料の溶接金属におけるシャルビ遷移曲線を示している<sup>6)</sup>。塩基性ポンドフラックスの採用によって溶接金属中の酸素量を 600ppm 前後から 250 ~ 300ppm へと低減し、焼入れ性を向上することによってじん性の向上が図られた。更に、この酸素量レベルにて Ti-B 系を採用することにより高じん性が図られた。ほかの溶接プロセス、すなわち被覆アーク溶接 (SMAW) 材料やガスマタルアーク溶接 (GMAW) 材料においても、同様に Ni や Ni-Mo を添加する手段から Ti-B 系をベースとした高じん性が図られた。施工上溶接金属の窒素量が変動しやすい SMAW 材料や、溶接金属の酸素量が高いフラックスコードアーク溶接 (FCAW) 材料は、Ni を添加し C-Si-Mn-Ni-Ti-B 系とすることによってマトリックスの強じん化も図られている。反面、施工上での外乱が比較的少ない SAW 材料や、溶接金属の酸素量が低い GMAW 材料では、Ti-B 複合添加の効果で安定したじん性が得られることから、Ni フリーとなっている。

図6は、溶接金属の酸素量および Ti 量とじん性の関係<sup>7)</sup>を示したものであり、溶接金属の酸素量に応じた最

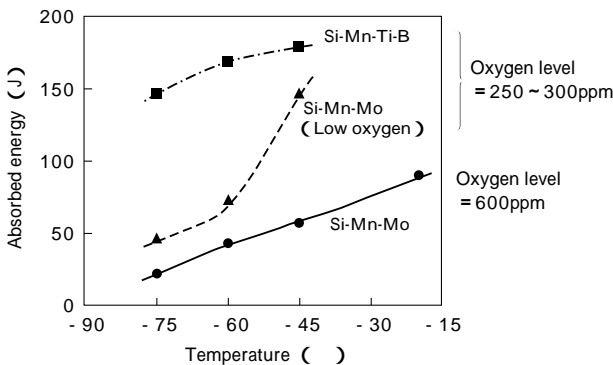


図5 YP360 ~ 400MPa 級 SAW 材料における溶接金属のシャルビ遷移曲線<sup>6)</sup>  
Fig. 5 Charpy transition curves of YP360 ~ 400MPa class SAW weld metals<sup>6)</sup>

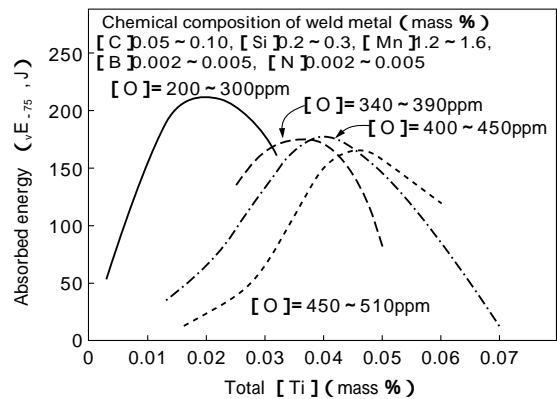


図6 じん性に及ぼす溶接金属の Ti および酸素量の影響<sup>7)</sup>  
Fig. 6 Influences of Ti and oxygen content in weld metals on notch toughness<sup>7)</sup>

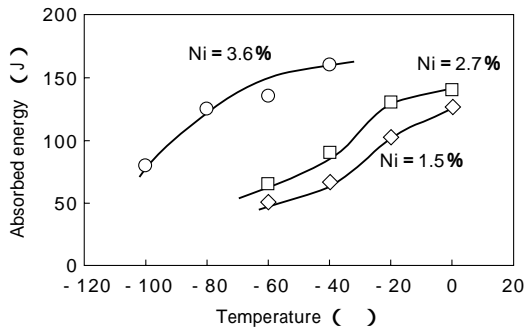


図7 YP690MPa級溶接金属のじん性に及ぼすNi量の効果 (GMAW)  
 Fig. 7 Effect of Ni content in YP690MPa class weld metals on notch toughness (GMAW)

適なTi量が存在することが明らかである。これは溶接材料を設計する上で非常に重要であり、Ti-B系の各種溶接材料はこの点に十分配慮して設計されている。例えば、FCAW材料においては、全姿勢での溶接作業性を考慮する理由からチタニヤ系のフラックスを用いており、溶接金属の酸素量は低水素系SMAW材料や塩基性のポンドフラックスを使用するSAW材料などの300ppm程度に比較して500~600ppm前後と高いレベルにある。したがって、FCAW材料では、これらの材料に比較してTi添加量を多くした設計がなされている。

一方、YP600MPa級以上の溶接金属マイクロ組織はベイナイト~マルテンサイトであり、フェライト微細化技術であるTi-B系は適用できない。基本的には、変態点の低下によるマイクロ組織微細化とマトリックスを強じんにする目的でNiが活用されている。YP690MPa級GMAW材料におけるじん性に及ぼすNi添加の効果の一例を図7に示すが、シャルピ遷移曲線はNi量の増加に伴って低温側へと移行している。YP690MPa級溶接材料は、1980年代後半に開発され、ジャッキアップ・リグの大形化に寄与してきた。溶接金属化学成分は、C-Si-Mn-2.5~3.5% Ni(-Cr)Mo系が採用されており、SMAW材料とGMAW材料については、低C、高Ni系とすることによって溶接金属の強じん化が、SAW材料については、高Ni系ワイヤと低酸素溶接金属が得られる高塩基性のポンドタイプフラックスとの組み合わせによって強じん化が図られてい

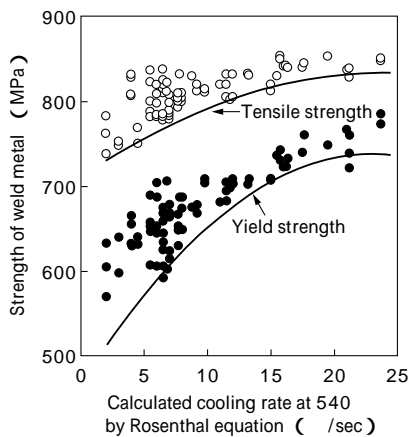


図8 溶接金属の強度に及ぼす冷却速度の影響(SAW)<sup>3)</sup>  
 Fig. 8 Influence of cooling rate on strength of weld metals(SAW)<sup>3)</sup>

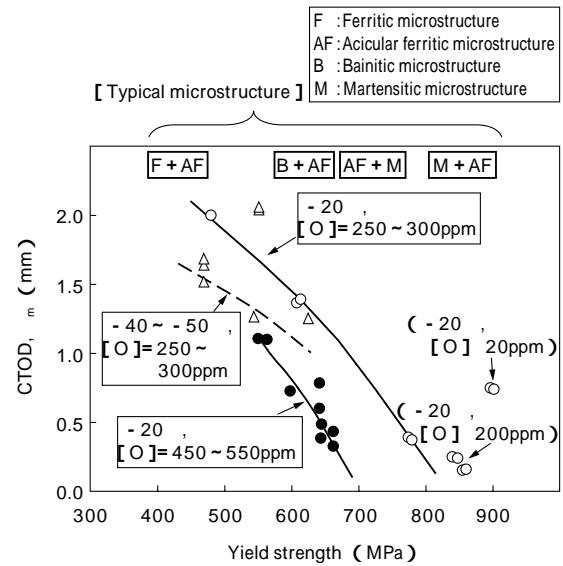


図9 CTODに及ぼす溶接金属の強度・酸素レベルの影響(板厚50mm)  
 Fig. 9 Influences of strength and oxygen level of weld metals on CTOD (plate thickness 50mm)

る。ただし、図8に示すSAW材料における例<sup>3)</sup>のように、この強度クラスの溶接材料の溶接金属強度は溶接時の冷却速度と密接に関係しており、所定の強度を得るためにはある程度の施工条件の管理が必要である。

更に、この強度クラスの溶接金属は、それに含まれる拡散性水素レベルや継手拘束度によっては低温割れ(水素誘起割れ)を生じる場合がある。このため、SMAW材料の被覆やSAWフラックスにおいては超低水素化も同時に図られている。

また、溶接金属の破壊じん性は、強度レベル・酸素量と密接に関係している。溶接金属の耐力レベル、酸素量と安定破壊モードでのCTODの関係を図9に示す。高酸素になるほど、更に高強度になるほど、安定破壊モードでのCTOD値は小さくなるのが分かる。これは、より高酸素あるいはより高強度になるほど、真ひずみが小さくなり、延性破壊エネルギーが低下することによる。したがって、高強度化および高じん性化への対応としては、特に破壊じん性の向上が課題となり、遷移温度の低下とき裂先端における延性き裂抵抗をいかに増大させるかが鍵となる。

### 3. 今後の動向と課題

最近では、新たな生産設備の開発や新しいエネルギー資源の開発が活発に研究されている。新しい生産設備としては大水深用として海底生産システム(Subsea Production System;SPS)も利用されるようになっており、今後エネルギー資源生産設備としての利用は拡大していくものと考えられる。

また、新エネルギー資源として、天然ガスの利用がクローズアップされている。メタンを主成分とする天然ガスは、石油資源に比べて低公害性であること、埋蔵量が豊富であること、日本近海にも多量に埋蔵していることなどの理由で、新エネルギー資源として注目されている。特

に天然ガスからジメチルエーテル(DME)やエタノールを製造するGTL(Gas To Liquid)技術が検討されている。一方、深海域の天然ガス田に多く存在しているメタンハイドレートの採取や運送・貯蔵、また天然ガスからメタンハイドレートを製造する技術の開発・実用化に関する研究が活発化している<sup>9)</sup>。メタンハイドレートは、自己保存効果により大気圧下、-5℃前後でもほとんど分解せずに存在できることから、その輸送・貯蔵の面でLNGより低コストとなることが期待されている。

今後の海洋構造物用溶接材料開発は、上記のような新たな生産設備・新エネルギー資源開発への対応とともに、既存の掘削・生産システムでの寒冷域化・大水深化・大型化・軽量化など、構造形式の変化も含め高強度化・高じん性化の要求がどこまで進むのかを見極めたくておこなっていく必要がある。しかしながら、高強度化に加え更なる高じん性化は今後も強く要求されることが予想され、これらに対する解決手段の検討が大きな課題となる。

むすび=海洋における石油・天然ガスの掘削・生産設備とそれに関連した溶接材料について概説した。現状、ほとんどの要求に対し既存の溶接材料で対応可能である

が、今後の更なる高強度化・高じん性化あるいは高能率化の要求に対しても、新技術の検討、それに基づく溶接材料の開発に取り組んでいく予定である。

#### 参 考 文 献

- 1) 関田欣治：海洋構造物 - その設計と建設 - ,(2002)成山堂書店.
- 2) 石油公団技術部編：海洋工学ハンドブック 第2版,(2002)
- 3) 村上 隆：北方海域技術研究会 講演会報告(サハリン大陸棚における石油・天然ガスの開発と環境)(2000)
- 4) 矢島 浩：溶接学会誌(溶接構造物の破損事例とその教訓(1)) Vol.68, No.7, (1999) p.503.
- 5) ARSEM:Design guides for offshore structures -welded tubular joints-, (1987) p.103, Editions Technip.
- 6) 和田 俊ほか：配管技術(低温用鋼用溶接材料) No.4(1991) p.112.
- 7) 原 則行：神戸製鋼 技術がいど, Vol.28, No.214,(1988) p.10.
- 8) 原 則行：溶接技術(溶接材料面から見た溶接施工管理について) No.9, (1999) p.91.
- 9) 日本海事協会海洋開発室：日本海事協会誌(メタンハイドレートに関する技術動向) No.261, (2002) p.292.