

(昭和56年11月 日本造船学会秋季講演会において講演)

深海潜水船耐圧殻材料の応力腐食割れの研究

正員 山田 桑太郎* 正員 松村 裕之**
正員 池田 玉治*** 正員 隆杉 憲行***

Stress Corrosion Cracking of High Strength Steel for Pressure Hull of Deep Submersible Vehicle

by Sotaro Yamada*, *Member* Hiroyuki Matsumura**, *Member*
Tamaji Ikeda***, *Member* Noriyuki Takasugi***, *Member*

Summary

As the deep submersible vehicle is subject to severe conditions in deep sea, it is essential that the materials used for pressure hull should have performance with regards to fracture toughness, fatigue properties, stress corrosion cracking properties and so on. Especially, the properties to resist the stress corrosion cracking is the most significant problem of the materials for pressure hull.

From this view point, the authors have investigated the stress corrosion cracking of 10Ni-8Co steel and its weld joint for several years and made clear the effect of heat treatment conditions, shielding conditions in GTA welding and fabrication conditions.

The conclusions are that 10Ni-8Co steel is usable as a material for the construction of the pressure hull of the deep submersible vehicle from viewpoint of stress corrosion cracking.

1 緒 言

近年、海洋開発の一環として深海域の海洋資源調査および海底地震等の学術調査など海洋調査の必要性が強調されてきており、これに対処するために深海潜水調査船の開発建造の要請が高まりつつある。

これら深海潜水船の耐圧殻に使用される材料の選定は船の潜航深度に直結する重要な課題の一つであり、またその使用条件がきわめて厳しい環境下にあることから、その材料は、破壊靱性、疲労特性および耐食性などの諸性能を十分に満足し、潜水船としての安全性を保証しておくことが肝要である。

なかでも、耐食性に関する性能は、18% Ni マルエージング鋼を使用した米国の深海潜水船 Deep Quest が耐食性の問題からその後マルエージング鋼が使用されなくなった事情があることによってもわかるごとく、性能のうちでももっとも重要な課題の一つであるということが出来る。

現在、10Ni-8Co 鋼は、深海潜水船耐圧殻のもっとも有力な候補材料と考えられているが、耐食性に関するデータは必ずしも充分であるとはいえない。

この問題に対処すべく、筆者らは数年来潜水船の耐圧殻用材料について耐食性の研究を実施してきた。

そこで、本研究においては、この 10Ni-8Co 鋼について、その母材および溶接継手部の耐食性能、とくに応力腐食割れ性能について工作上的観点から調査し、潜水船耐圧殻材料としての適用性について検討する。

2 深海潜水船耐圧殻用材料

深海潜水船に使用される耐圧殻は深深度における高圧に耐えられるために耐圧強度が高く、かつ船体重量軽量化のために軽いほど有効である。したがって、耐圧殻材料としては、比強度が高く、安全上不安定破壊を生じない高靱性な材料で、かつ海水環境下の使用条件に充分耐えられる材料でなくてはならない。また、耐圧殻建造上、工作性の優れた材料であることが必要である。

したがって、潜水船耐圧殻材料として要求される性能をまとめて示すと以下のごとくなる。

まず材料性能に関しては、

- ① 比強度が高いこと
 - ② 破壊靱性が高く、不安定破壊を生じないこと
 - ③ 海水中における耐食性が優れていること
 - ④ 繰返し高応力に対して疲労特性が優れていること
- 材料の工作性に関しては
- ⑤ 曲げ加工および機械加工が比較的容易であり、ま

* 川崎重工業(株)造船工作部

** 川崎重工業(株)技研溶接研究室

*** 川崎重工業(株)潜水艦設計部

Table 1 Characteristics of materials for pressure hull of deep submersible vehicle

材料種別	区 分	名 称	成 分 系	性 能			溶接法の適用性	深深度潜水船への適用性
				0.2% 耐力 (kg/mm ²)	韌 性 (kg·m)	比強度 (10 ⁻⁶ × mm)		
鋼	QT 型 焼戻しマルテンサイトによる強度確保	NS46	Mn-Si 系	≥46	$\sqrt{E_{-50}} \geq 2.8$	5.9	手溶接, サブマージ溶接MIG 溶接, TIG 溶接の適用が可能	比強度不足
		NS63 (HY80 相当)	3Ni-Cr-Mo 系	≥63	$\sqrt{E_{-70}} \geq 10.0$	8.0	手溶接, MIG 溶接, TIG 溶接の適用が可能	比強度不足
		NS80 (HY100 相当)	4Ni-Cr-Mo 系	≥80	$\sqrt{E_{-70}} \geq 7.0$	10.2	同上	比強度不足
		NS90 (HY130 相当)	5Ni-Cr-Mo 系	≥90	$\sqrt{E_0} \geq 7.0$	11.5	TIG 溶接の適用が可能	比強度不足
		HP9-4-20	9Ni-4Co-0.2C 系	≥110	$\sqrt{E_0} \approx 7.0$	14.0	TIG 溶接の適用が可能であるがやや困難	韌性・比強度不足
	マルエージング型 折出硬化による強度確保	12Ni マルエージング鋼	12Ni-5Cr-3Mo 系	≥126	$\sqrt{E_0} \geq 2.8$	16.0	TIG 溶接の適用が可能	韌性, 耐海水腐食性不足
		18Ni マルエージング鋼	18Ni-8Co-3Mo 系	≥133	$\sqrt{E_0} \geq 2.8$	16.9	同上	同上
		25Ni マルエージング鋼	25Ni 系	≥147	$\sqrt{E_0} \geq 2.8$	18.7	同上	同上
	Dual Strength 型 QT 型とマルエージング型の中間	10Ni 鋼	10Ni-8Co-2Cr-1Mo 系	≥120	$\sqrt{E_0} \geq 7.0$	15.3	TIG 溶接の適用が可能	候補材料として有力
チタン (Ti)	純チタン	チ タ ン	純チタン	≥21	—	4.7	MIG 溶接, TIG 溶接の適用が可能	比強度不足
	チタン合金	Ti-64	6Al-4V	≥84	$\sqrt{E_0} \geq 2.0$	18.8	MIG 溶接, TIG 溶接の適用が可能	韌性不足
		Ti-621	6Al-2Cb-1Ta	≥70	$\sqrt{E_0} \geq 4.2$	15.6	同上	候補材料として有力
アルミ (Al)	アルミ合金	A5083	4.5Mg	≥12	$\sqrt{E_0} \geq 2.5$	4.5	MIG 溶接, TIG 溶接の適用が可能	比強度, 耐食性不足
		A7079	3.5Mg-4.5Zn	≥48	$\sqrt{E_0} \geq 2.0$	17.9	—	耐食性不足

た曲げ加工により材質が損なわれないこと

- ⑥ 溶接性が優れ, 溶接継手の性能が素材性能と同等以上であること, である。

以上の要件を具備し, 潜水船の耐圧殻材料として検討対象となる材料をまとめて示すと Table 1 のごとくであり, 大別して高強度鋼, チタン合金およびアルミ合金が考えられる。表中には, それぞれの材料に対する成分系, 性能, 適用溶接法および深深度潜水船としての適用性について示した。

潜水船の潜航深度は, 耐圧殻材料の比強度に大きく影響される。Fig. 1 は, これまでに建造された潜水船について, その耐圧殻材料の比強度と深度との関係を示した

ものである。一定深度に対し, payload を最大にするには重量/排水量比が最小になる形状を選定すべきであり, この形状としては単球殻となる。換言すれば, payload 一定の条件下では, 単球殻の場合が深度がもっとも深くなる。したがって, 耐圧殻の形状によって異なるが, 同一形状であれば比強度の高い材料ほど船体重量が軽くなり, 深度を増大させることができるといえる。

Table 1 および Fig. 1 から, 潜航深度が 4,000m 以上の深深度潜水船の耐圧殻に対しては, 材料の比強度が約 15×10^{-6} mm 以上必要なことになり, この種の材料としては, Ti-64, Ti-621 などのチタン合金, 18% Ni マルエージング鋼および 10Ni-8Co 鋼である。

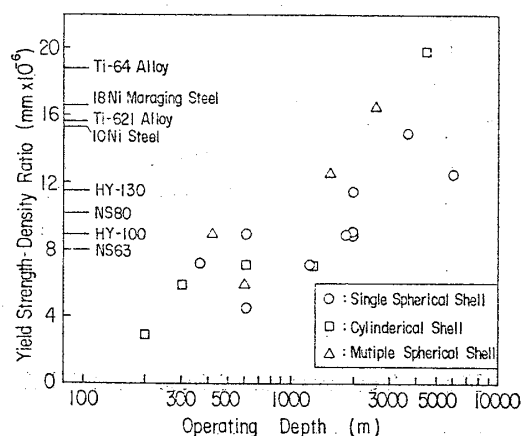


Fig.1 Relation between yield strength-density ratio and operating depth

このうち、Ti-64 合金は、比強度は高いが靱性が低く、耐応力腐食割れ性能が Ti-621 合金よりも低いため深海潜水船の耐圧殻材料としてはあまり適さないとされており、また、18% Ni マルレージング鋼については、その強度が他の鋼材に比較してもっとも高いが、切欠靱性が低く、また応力腐食割れ性能が不十分であることなどが判明し、米国の深海潜水船 Deep Quest の建造後、marine use 材料としては不適當であると判断されるようになり、今後使用される見通しはほとんどないといえる。なお、Deep Quest では腐食防止の目的で船殻表面は plastic coating されている。

これに対し、Ti-621 合金は、Ti-721 合金の耐応力腐食割れ性能を改良したものといわれており、米国の 4,000m 級潜水船 Alvin の耐圧殻に使用されている。また、10Ni-8Co 鋼は、性能、工作性が優れており、比強度も $15.3 \times 10^{-6} \text{mm}$ と比較的高いため、現在のところ深海潜水船耐圧殻の最有力候補材といえる。しかしな

がら、強度および靱性に関するデータはともかくとして、応力腐食割れ性能および耐食性に関するデータは多いとはいえない。

3 実験方法

潜水船耐圧殻の最有力候補材料である 10Ni-8Co 鋼の母材および溶接継手について、定荷重方式による応力腐食割れ試験、耐食性試験を行った。

3.1 供試材

本研究に供試した材料は板厚 100mm および 50mm の 2 段焼入れおよび焼もどし処理 (QQT) を行った降伏強度 120kg/mm² 級の 10Ni-8Co-2Cr-1Mo 系の高靱性高張力鋼である²⁾。供試材の化学成分および機械的性質を Table 2 に示す。

溶接材料については、1.2mmφ の共金系の TIG 溶接用ワイヤを供試した。

試験溶接は、下向姿勢にて自動 TIG 溶接を行った。溶接条件は、溶接施工条件選定試験において種々検討の結果、適正と認められた条件を採用し、予熱パス間温度は、50°C 以下、標準入熱量は 15kJ/cm とした。この結果、溶接金属の 0.2% 耐力は母材よりも 10~15kg/mm² 高い、いわゆる over matching 継手となっている。

3.2 実験方法

応力腐食割れ試験片は、ASTM E399 の 1CT 試験片であり、母材 (C 方向) および溶接継手部 (溶接金属、ボンド、熱影響部) より採取した。

実験は、15ton 容量の定荷重負荷方式の応力腐食割れ試験機を用いて、3.5% NaCl 水溶液の環境条件で行った。腐食セルの容量は約 15l で、その液面の水位を一定に保持するように約 2l/min の流速で循環を行って

Table 2 Chemical composition and mechanical properties of test steel

供試材	板厚 (mm)	化 学 成 分 (wt%)									引 張 試 験*				2mmV ノッチ試験*	
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co	0.2% 耐力 (kg/mm ²)	引張 強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	紋り (%)	σE_0 (kg·m)	σE_{-70} (kg·m)
A 材	100	0.12	0.12	0.16	0.004	0.004	9.78	2.20	1.01	7.98	124.8	140.5	19.5	72.5	17.6	16.2
B 材	100	0.13	0.12	0.19	0.003	0.001	9.84	1.92	1.00	7.88	127.3	147.3	18.0	68.0	15.9	11.9
C 材	50	0.11	0.12	0.14	0.004	0.004	9.74	2.18	0.98	7.98	125.1	136.8	18.5	72.0	19.4	15.9

注 *) C 方向, 1/4t の値を示す

Table 3 Composition of seawater and ionic constituents

(ppm)

採 取 場 所	pH	溶存酸素	COD	Cl ⁻	S ²⁺	NH ₄ ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	汚染度注)
神戸港 KHI 東浜	8.0	7.2	9.4	16,600	<0.03	0.71	865	1,117	7.62
正 常 海 水	8.1~8.3	7~9	10~15	18,980	~0	~0			2~13.5

注) 汚染度 10 以下は清浄海水に近い

る。このため、水溶液中の腐食力を左右するもっとも重要な因子である液中の溶存酸素量はほぼ一定(6.2~7.2ppm)に保つことができた。ちなみに、神戸港沖で測定した溶存酸素量は Table 3 に示すごとく、約 7.2ppm であり、今回の実験の場合とはほぼ同程度であった。また、塩水中における腐食速度には、液温も大きな影響を与えるが、本実験では水溶液温度を 20°C 一定に保持した。

応力腐食割れ感受性の尺度である K_{ISCC} 値の推定は、負荷状態で試験片の割れの進展にともない生じる荷重軸における変位の時間的変化が明瞭な急激増加を示す時点の K 値-時間曲線を求め、その下限包絡線の試験開始後 1,000Hr の値に対するものとした。

いっぽう、10Ni-8Co 鋼はその類似成分系の耐海水性データから推察して普通鋼よりその耐食性はすぐれていると考えられるが、潜水船の場合、他の部材にチタン合金やステンレス鋼などの異種金属が使用されることから、異種金属接触によるいわゆるガルバニック腐食の問題が考えられる。このことから、海水腐食促進試験を行い、異種金属接触による腐食への影響についても調査した。

この場合の実験は、試験片を2枚ずつ絶縁ワッシャを用いて回転体に取り付け、40°C の人工海水中に浸漬して周速 0.45 m/sec の速度で回転させ、所定期間後取出して腐食減量を測定した。

4 実験結果

4.1 10Ni-8Co 鋼および溶接継手の K_{ISCC} 値について

供試 10Ni-8Co 鋼母材および共金系溶接材料を用いた標準溶接条件による溶接継手部の応力腐食割れ感受性値 K_{ISCC} を調査した。応力拡大係数 K 値の計算については、ASTM E 399 にしたがって次式より計算した。すなわち、

$$K = \frac{P\sqrt{a}}{BW} \left[29.6 - 185.5 \left(\frac{a}{W} \right) + 655.7 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 1017.0 \left(\frac{a}{W} \right)^3 + 638.9 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \right] \quad (1)$$

ここで、 P : 荷重

W : 試験片幅

B : 試験片板厚

a : き裂長さ(板厚方向5カ所での平均値)

10Ni-8Co 鋼母材について、試験片に負荷された初期 K 値とき裂発生までの経過時間との関係で図示すると Fig. 2~Fig. 4 のようになる。き裂の発生については、荷重軸方向の変位を計測した変位-時間曲線からその急激な変化が生じた時点とした。図中黒印は、この判定方法によってき裂が発生したものを、白印は、1,000Hr 以

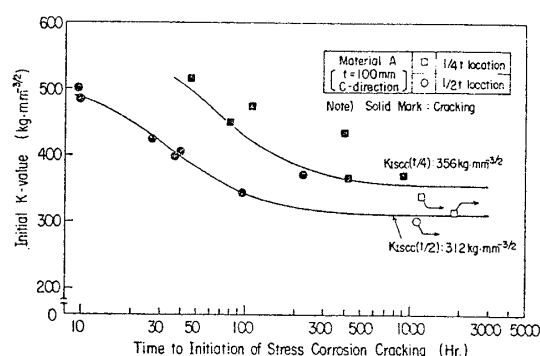


Fig. 2 Test results of base material A

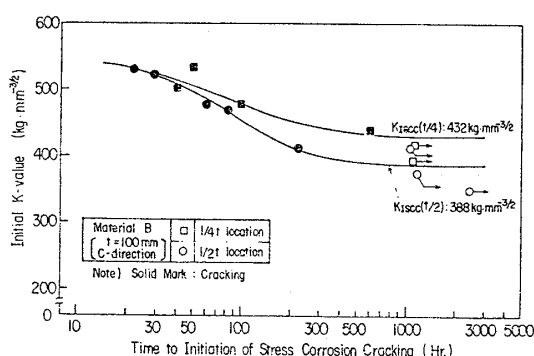


Fig. 3 Test results of base material B

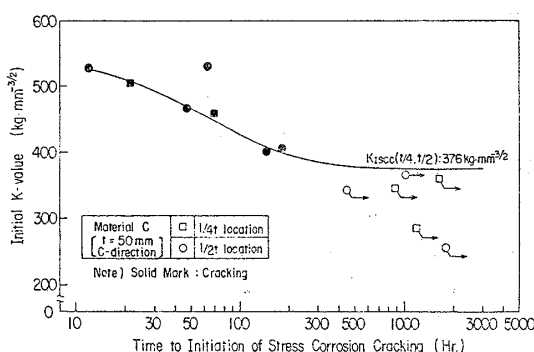


Fig. 4 Test results of base material C

上一定荷重を負荷しても応力腐食割れが生じなかったものである。

板厚 100mm の供試材 (AおよびB材) については、試験片採取位置 ($t/2, t/4$) の影響が認められ、板厚中央部が若干低い K_{ISCC} 値を示している。これに対し、板厚 50mm の供試材については、試験片採取位置の影響がない。

また、成分的に近いA材およびC材については、 K_{ISCC} 値が $356 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-3/2}$ と $376 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-3/2}$ であり、ほぼ同程度の応力腐食割れ感受性を示しているといえる。しかし、これらに比べてS量が極端に低いB材については、 K_{ISCC} 値が高くなっており、材料の成分・清浄度が応力腐食割れに大きく影響することを示している。なお、金属組織学的には3鋼材ともマルテンサイト組織であり、大きな差異はない³⁾。

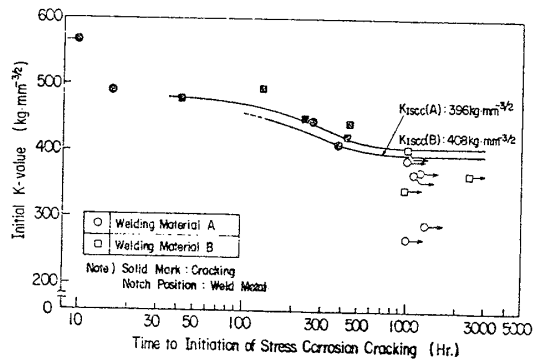
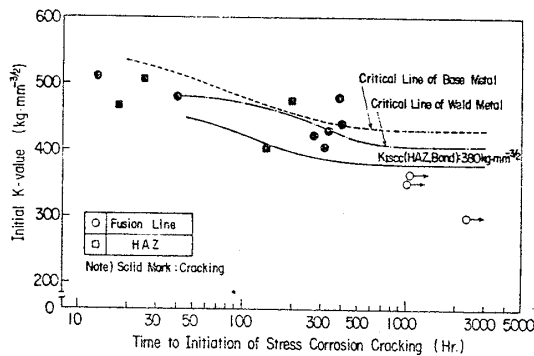
Fig. 5 K_{ISCC} of welding materialsFig. 6 K_{ISCC} of weld joint

Fig. 5 は、2種の供試溶接材料による溶接金属部の K_{ISCC} 値の調査結果を比較したものである。この2種の溶接材料については強度および成分的にもほぼ同じであり、この意味からいって、 K_{ISCC} 値がほぼ同程度であるのは、納得できる結果である。本結果と 10Ni-8Co 鋼母材とを比較すると B 材と同程度の K_{ISCC} 値を有することがわかる。

Fig. 6 は、溶接継手部（ボンドおよび熱影響部）の結果を示したものである。図中には、10Ni-8Co 鋼母材および溶接金属部の結果も比較のために示した。実験点が若干少なく一概にはいえないが、ボンド部および熱影響部については本実験に関する限り、有意差はないようである。しかしながら、母材および溶接金属部に比べて若干低い K_{ISCC} 値を示しており、溶接入熱による母材硬化の影響があらわれているものと考えられる。

4.2 熱処理条件の影響

10Ni-8Co 鋼を潜水船の耐圧殻へ適用する場合、鋼板を熱間一体曲げ加工して耐圧半球殻を製作した後、調質熱処理を行い、半球殻同士を組合わせて赤道部溶接を行うことによって球殻を製作する方法がもっとも効率的であると考えられている⁴⁾。この半球殻製作時の熱処理条件とくに焼もどし温度条件は、Fig. 7 に示すように 10Ni-8Co 鋼の強度・靱性などの基本性能に大きく影響することから耐圧殻工作上的の重要課題の一つとなっている。この熱処理条件の強度および靱性に及ぼす影響については

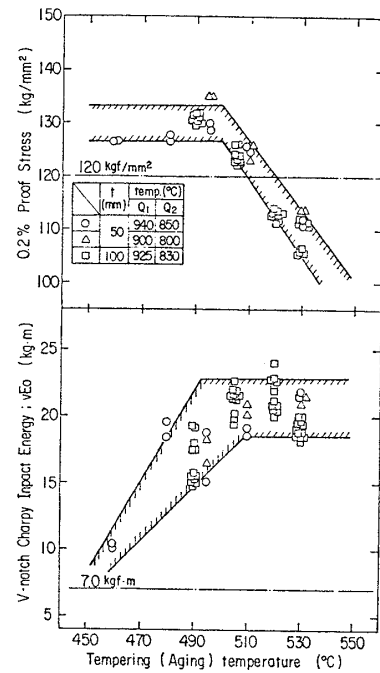
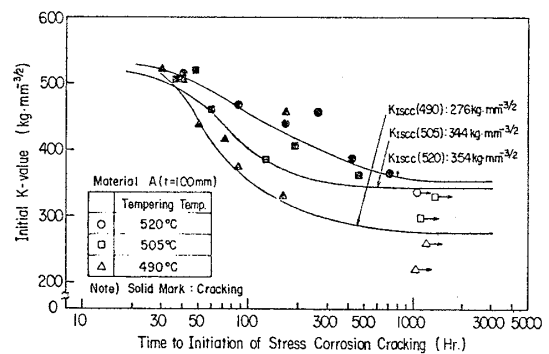


Fig. 7 Effect of tempering temperature on yield strength and Charpy impact energy

Fig. 8 Effect of tempering temperature on K_{ISCC} of base material

筆者らのグループにより詳細な実験が実施されているが⁴⁾、これらの応力腐食割れ性能への影響に関する研究はこれまでに行われていない。本実験においては、この熱処理条件のうち、焼もどし温度条件を3種類 (520°C, 505°C, 490°C) 変えて K_{ISCC} 値に及ぼす影響について調査した。

Fig. 8 は K_{ISCC} 値に及ぼす焼もどし温度の影響を調べたものである。焼もどし温度が 520°C および 505°C の場合はほとんど K_{ISCC} 値に差異がなく、本鋼材の標準焼もどし温度である 510°C の場合 (Fig. 2) とほぼ同じである。しかしながら、焼もどし温度が 490°C の場合には K_{ISCC} 値は極端に低下し約 $280 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-3/2}$ 程度となる。Fig. 7 によると焼もどし温度 490°C の場合、標準焼もどし温度 510°C の場合と比較すると強度は若干高いがシャルピ値が大きく低下している。 K_{ISCC} 値につ

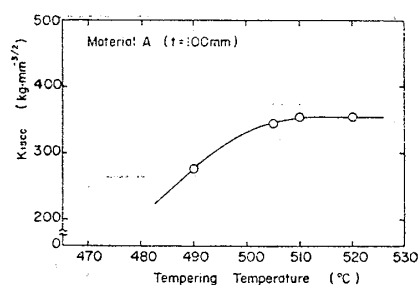


Fig. 9 Relation between K_{ISCC} and tempering temperature

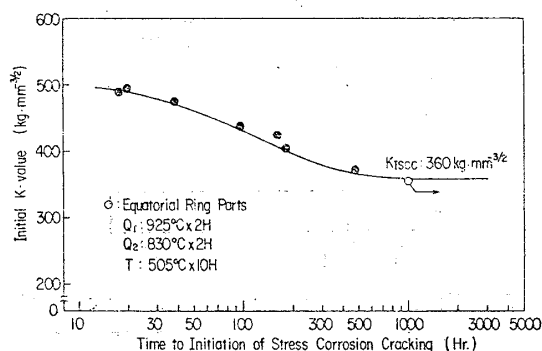


Fig. 10 K_{ISCC} of equatorial ring parts of large scale model

いては、一般に強度と密接な関係があるといわれているが、本実験に関しては必ずしも強度だけに依存しているとはいえず、むしろ靱性依存度のほうが大きいといえる。これは、焼もどしによる強化析出物が微妙に変化しているためと考えられる³⁾。いずれにしろ K_{ISCC} 値には、材料の強度、靱性および金属組織が微妙に影響するものと考えられる。

Fig. 9 は、焼もどし温度と K_{ISCC} 値との関係を示したものであり、505°C 以上の焼もどし温度で熱処理を施工すれば、10Ni-8Co 鋼の K_{ISCC} 値は約 350 kg·mm^{-3/2} 以上を確保できるといえる。事実、潜水船の実物大耐圧殻の赤道部について熱間曲げ加工およびその後の熱処理を行ったものから試験片を採取し、 K_{ISCC} 値を調査したものを Fig. 10 に示す。供試 10Ni-8Co 鋼母材と同程度の値を示している。

4.3 溶接金属中のコンタミネーションの影響

10Ni-8Co 鋼の溶接には TIG 溶接法が採用される。TIG 溶接金属部の健全性には溶接時のシールド性がきわめて大きな影響を与える。溶接施工時に何らかの影響で TIG 溶接時のシールド性が乱され、溶接金属中に微量なコンタミネーションが生じた場合のきわめて現場施工的な工作上的要因が K_{ISCC} 値に及ぼす影響について調査した。

本実験では、シールド性を攪乱させるかわりにシールドガス純 Ar ガス中に 0.1% の酸素ガスおよび窒素ガ

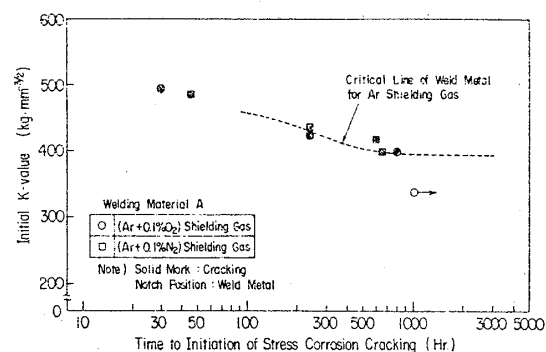


Fig. 11 Effect of shielding condition of GTA welding on K_{ISCC} of weld metal

スを混入したシールドガス (Ar+0.1% O₂ ガスおよび Ar+0.1% N₂ ガス) を使用し、その溶接金属部から試験片を採取して前項と同様の応力腐食割れ試験を行った。

なお、上記混入ガスを使用した場合の溶接金属部の非破壊検査結果ではともに JIS 1 級の判定であり、強度、靱性も標準条件による場合とほとんど同程度の値を示した⁵⁾。しかしながら、溶接金属中の O 量は約 20ppm, N 量は約 100ppm 増加していた。

O₂ および N₂ 混入ガスで溶接を行った場合の溶接金属部の応力腐食割れ試験結果を Fig. 11 に示す。図中の点線は、純 Ar シールドガスを用いて溶接を行った場合の試験結果 (Fig. 5) である。実験点が少なく、 K_{ISCC} 値が求まっているとは言い難いが、応力腐食割れ発生の挙動は、O₂ 混入ガス使用の場合と N₂ 混入ガス使用の場合ではほとんど有意差がなく、しかも純 Ar ガス使用の場合と同程度の K_{ISCC} 値を示すものと考えられ、溶接金属中に O 量および N 量がそれぞれ 20ppm および 100ppm 程度増加しても強度、靱性などの基本性能および耐応力腐食割れ性能にはほとんど影響しないものといえる。

4.4 耐食性について

4 週間、8 週間および 12 週間の浸漬試験後、各試験片について腐食減量を測定した結果を Fig. 12 および Fig. 13 に示す。Fig. 12 は単独材について示したものであり、10Ni-8Co 鋼は、SS 41 材に比べて 1/4~1/6 の腐食量となっている。また、母材と溶接継手とはほとんど差異はないが、若干溶接継手のほうが腐食量は多くなっている。

Fig. 13 は、異種金属接触腐食の場合について示したものであり、10Ni-8Co 鋼より貴な電位の金属 (チタン合金およびステンレス鋼) と接触すると当然のことながら、10Ni-8Co 鋼の腐食量は単独の場合に比較して増加し、1.5~2.5 倍になる。いっぽう、貴な電位の金属の腐食はほとんど認められない。

また、10Ni-8Co 鋼より卑な電位の耐食アルミ合金と

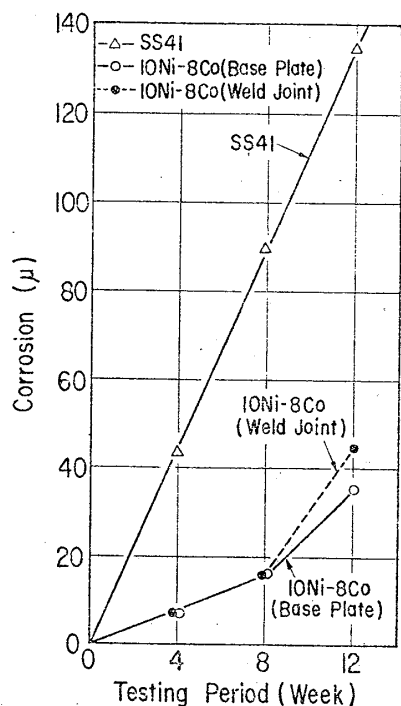


Fig. 12 Corrosion test results of base materials

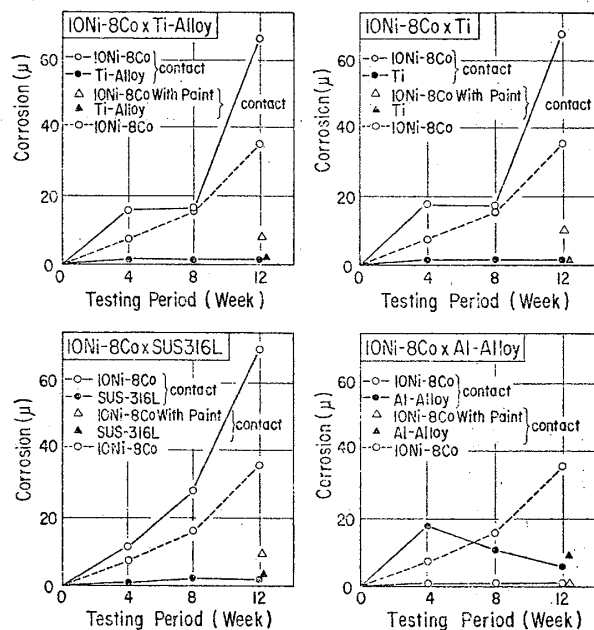
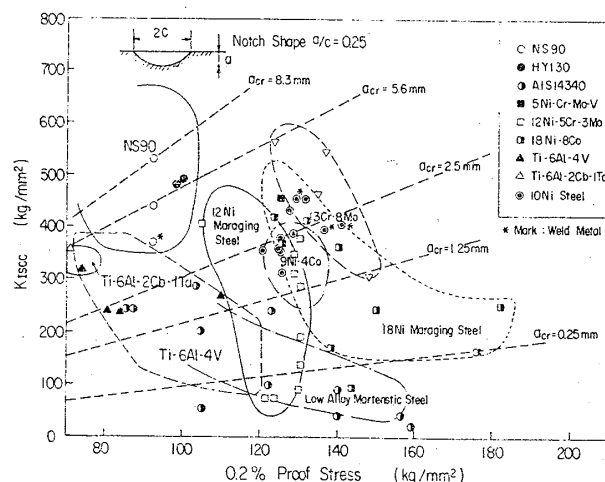
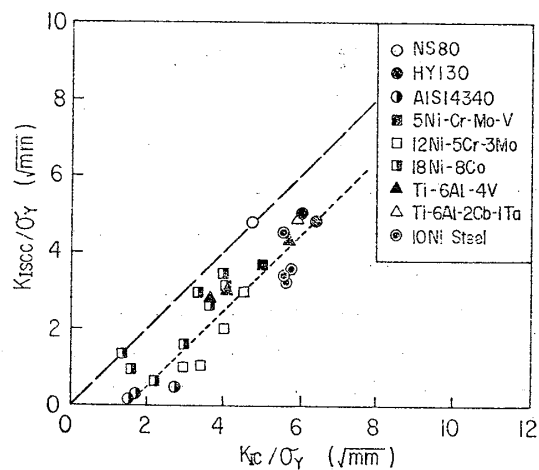


Fig. 13 Corrosion test results of galvanic couples

接触した場合には、10Ni-8Co 鋼が陰極防食の効果を受けて腐食が抑制され、耐食アルミ合金の腐食量が大きくなっている。図中には、試験片表面にタールエポキシ塗料を 300 μ 以上塗布した場合の試験結果についても示したが、この塗装の影響の試験結果から、塗装することによって異種金属接触腐食は完全に抑制することができるといえる。

Fig. 14 Relation between K_{ISCC} and 0.2% proof stress in various materialsFig. 15 Relation between (K_{ISCC}/σ_Y) and (K_c/σ_Y) in various materials

5 考 察

5.1 各種耐圧殻用材料との比較

本研究で得られた 10Ni-8Co 鋼に関する K_{ISCC} 値を従来得られている各種耐圧殻用材料の海水中における K_{ISCC} 値と比較すると Fig. 14 のようになる。巨視的にみれば降伏強度が増大するほど K_{ISCC} 値は低下する傾向にある。10Ni-8Co 鋼、9Ni-4Co 鋼については、 K_{ISCC} 値に大きな差異がなくまとまりがあるのに対して、12Ni マルエージング鋼および 18Ni マルエージング鋼は、同程度の降伏強度にもかかわらず、極端に低いものがみられ、潜水船の耐圧材としての採用に危険性があることを示している。また、低合金マルテンサイト鋼は、 K_{ISCC} 値が低いことがわかる。

図中の点線は、材料の表面に半楕円形状 ($a/c=0.25$) の欠陥が存在している場合に降伏強度に相当する応力が作用していると仮定して、次式より応力腐食割れが発生する限界のき裂深さを求めたものである。

$$a_{cr} = \frac{Q}{1.21\pi} \left(\frac{K_{ISCC}}{\sigma} \right)^2 \quad (2)$$

ここで、 Q ：き裂形状係数

σ ：作用応力

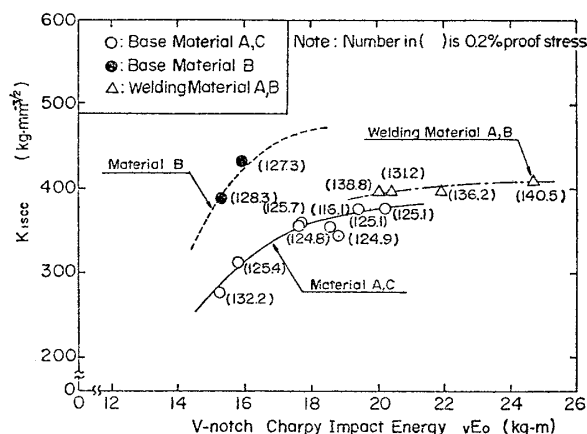
これより、10Ni-8Co 鋼に対しては限界き裂長さ $a_{cr} \approx 2.5\text{mm}$ となる。この程度の表面欠陥であれば耐圧殻製作時に非破壊検査法によって十分に検出可能な寸法である⁶⁾。

Fig. 15 は、同様に各種耐圧殻用材料について、 K_{ISCC} 値とシャルビ遷移曲線の上部 shelf 領域における破壊靱性値 K_{IC} 値との関係を本実験における 10Ni-8Co 鋼との比較でプロットしたものである。全体的には、両者の関係は比例関係にあるようであるが、潜水船の耐圧殻材料として従来使用された実績のある HY-80, HY-100 およびチタン合金などについては、 $(K_{ISCC}/\sigma_Y) \geq 0.7(K_{IC}/\sigma_Y)$ の関係があるようであり、本実験に使用された 10Ni-8Co 鋼もこの関係を満足しており、この意味からは、10Ni-8Co 鋼は耐圧殻用材料としての応力腐食割れ性能を十分に有しているといえることができる。

5.2 10Ni-8Co 鋼の腐食因子について

応力腐食割れ性能に影響を与える因子は、大きく別けて材料の強度、金属組織、化学成分および不純物などがあげられる。なかでも強度は、応力腐食割れ感受性に影響を与えるもっとも重要な因子といわれている。事実、前項 Fig. 14 に示すように、マルエージング鋼、低合金マルテンサイト鋼などは、強度依存性が大きいようである。しかしながら、10Ni-8Co 鋼については、母材および溶接継手ともその強度が安定しているためこの影響については、Fig. 14 においてはあまり明確でない。

Fig. 15 によれば、 K_{ISCC} 値は K_C 値と比例関係にあるところから、ここで対象にしている高靱性高張力材料に対しては、むしろ靱性との関係のほうが大きいようである。



調査し、母材、溶接材料の相異の影響、試験片採取位置の影響などを把握した。

2) 潜水船の耐圧殻製作時に工作技術上要求される重要な課題のうち、母材の調質処理のための熱処理条件(焼もどし温度)および溶接施工時のシールド条件を取上げ、これらの K_{ISCC} 値に及ぼす影響について調査した。焼もどし温度が 490°C と低くなると K_{ISCC} 値は急激に低下し、約 $280\text{ kg}\cdot\text{mm}^{-3/2}$ 程度となる。これは、焼もどしによる強化析出物の影響と考えられる。また、溶接金属中の微量ガス成分の影響については、比較的小さい。

3) 10Ni-8Co 鋼の応力腐食割れ感受性を各種深海潜水船耐圧殻用材料のそれと比較検討し、強度よりもむしろ靱性値との関連性が深く、耐圧殻材料として従来使用された実績のある材料についてはシャルピ遷移曲線の shelf 領域における破壊靱性値 K_{IC} と $K_{ISCC} \approx 0.7 K_{IC}$ なる関係式が成立することを示した。

4) 10Ni-8Co 鋼の腐食性は、軟鋼などの普通鋼よりも良く、 $1/4 \sim 1/6$ 程度である。

本研究の遂行にあたり、吉識名誉教授には絶大なるご支援とご指導を頂いた。また新日本製鉄(株)のご協力を得特に谷口至良氏には試験実施上有益なるご助言を頂いた。関係者各位に感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) A. D. Shankman "Materials for Pressure Hulls—Present and Future" Naval Engineer's Journal, December, 1968.
- 2) 金沢, 中島, 石黒, 山戸, 谷口他 "6,000 m 深海調査船用 10Ni-8Co 鋼の特性" 製鉄研究, No. 284, 1975.
- 3) 金沢, 森川 "10Ni-8Co 超高張力鋼の強化機構とその特性" 日本金属学会会報 Vol. 14, No. 3 (1975).
- 4) 山田他 "深海潜水船耐圧殻の熱間曲げ加工と熱処理法の研究" 日本造船学会論文集, 第 150 号 (1981) 本誌.
- 5) 武田他 "深海潜水船用超高張力鋼の溶接性に関する研究" 溶接学会誌, Vol. 50, No. 8 (1981) 投稿中.
- 6) 川崎重工業(株)社内資料.