

耐硫化物応力腐食割れ性油井管 および耐コラプス性油井管の開発

Development of Anti-SSC OCTG and Collapse Resistant OCTG

滝谷 敬一郎*

Keiichiro Takitani

蓮野 貞夫**

Sadao Hasuno

江島 彬夫***

Akio Ejima

川崎 博章****

Hiroaki Kawasaki

北幅 由一*****

Yoshikazu Kitahaba

西 博*****

Hiroshi Nishi

Synopsis:

The increasing energy demand has stimulated a considerable development of the high strength oil country tubular goods with superior resistance against sulfide stress corrosion cracking (SSC) and collapse failure in hostile environments.

The experimental trials of modified Cr-Mo steel casing have concluded that additions of Mo up to 1.0 %, Nb and B to 0.2 to 0.3 % C steels provide 90 ksi (63.3 kgf/mm²) yield strength pipes with superior SSC resistance.

Multiple regression analysis has been made to estimate the effects of various factors for the collapse of casing pipes and it is demonstrated that residual stress of finished pipes is one of the most significant factors. This report summarizes some metallurgical aspects in manufacturing process of these special grades of oil country tubular goods.

1. 緒 言

近年における世界の石油、天然ガスの需給関係のひっ迫から、掘削環境が厳しい油田、ガス田の探鉱がすすみ、硫化水素ガスによる応力腐食割れ (SSC) とコラプス (圧潰) に対する抵抗性が良好な高強度油井用鋼管などの需要が増大している。

当社では、小中径継目無鋼管用誘導加熱熱処理設備 (最大能力 25t/h)¹⁾ による製品の特徴、すなわち、急速加熱により鋼の焼入組織が微細化することおよび熱処理ひずみが少なく冷間矯正が不要なため残留応力がないこと、などを利用して、降伏強さが 52.7~77.3kgf/mm² (75~110ksi) クラス

の API 規格油井用ケーシング (API 規格 C-75, N-80 および P-110 など) の製造体制を確立した。

本報では、さらに特殊用途油井用鋼管として開発された降伏強さが 63.3kgf/mm² (90ksi) クラスの耐 SSC ケーシング (当社規格 KO-90 SS) および 66.8kgf/mm² (95ksi) クラスの高コラプスケーシング (同 KO-95 T など) の製造に際して必要な冶金上の諸因子について報告する。

2. 耐 SSC 性のすぐれた Cr-Mo-Nb 系油井用鋼管の開発

一般に鋼材の高張力化は、SSC 抵抗性を低下させることが知られており、調質された低合金鋼

* 技術研究所知多研究室主任研究員

*** 技術研究所知多研究室室長

***** 知多製造所管理部技術管理室

(昭和55年9月3日原稿受付)

** 技術研究所知多研究室

**** 知多製造所管理部技術管理室主査 (掛長待遇)

***** 本社ヒューストン事務所掛長

では、油井設計上の経済的および冶金的理由から、 63.3kgf/mm^2 (90ksi) から 70.3kgf/mm^2 (100ksi) クラスの油井用鋼管が最も有利である。これらの見地から API では、5AC C-90 の規格化を検討しているが、その化学成分は AISI 4130 (0.3%C-1%Cr-0.2%Mo) である。Cr-Mo 合金鋼の耐 SSC 性を改善するため、Nb, Ti, V などを添加した改良鋼が発表されている²⁻⁴⁾。本研究では、鋼の SSC 現象に最も重要な影響を与える焼入性、焼もどしパラメータおよび結晶組織の点から、Cr-Mo 合金鋼の耐 SSC 性の向上を検討した。

2.1 焼入性

0.2~0.3%C 鋼の焼入性と耐 SSC 性との関係を Fig. 1 に示す。SSC 試験は、NACE 規格⁵⁾に定められた定荷重引張試験方法により実施し、720h 保持後破断しない最大応力を SSC 臨界応力 (σ_{th}) とした。試験材の焼入れかたさの 100% マルテンサイトかたさに対する比を、焼入硬化能指数とすれば、図から降伏強さが 66.8kgf/mm^2 (95ksi) をこえると焼入性の低い材質の SSC 抵抗性は急激に劣化することがみとめられる。したがって鋼材の寸法、熱処理方法に応じた適正な焼入硬化能の選択は、鋼中のマルテンサイト比を増大させ、SSC 抵抗性を改善するうえで重要であるといえる。0.2%C-1%Cr-Mo 合金鋼の Mo 含有量と連続冷却変態図におけるマルテンサイト生成の臨界冷却速度の関係を Fig. 2 に示す。また Cr-Mo 系厚肉ケーシングを外面焼入れした場合の管断面方向のかたさ分布を Fig. 3 に示す。これらの図から、Mo の増量および B の添加は、厚肉管の焼入れに際し全厚にわたり 90% 以上のマルテンサイト比を与え、耐 SSC 性向上のための基本条件をみとめることがみとめられる。

2.2 焼もどし抵抗性

析出硬化型の合金元素の添加は、焼もどし抵抗性を増加させる。0.2%C-1.4%Cr-Mo 合金鋼における Mo, Nb の添加と焼もどしかたさとの関係を Fig. 4、および Mo, Nb 含有量と SSC 臨界応力比 (σ_{th}/σ_Y) との関係を Fig. 5 に示す。これらの結果から、焼もどし二次硬化は高温焼もどしを可能にし、耐 SSC 抵抗性を増大させることが明らか

である。

2.3 SSC 試験

Cr-Mo および Cr-Mo-Nb 系小中径継目無鋼管の SSC 試験の結果を、降伏強さと SSC 臨界応力との関係で Fig. 6 にまとめる。供試鋼は、外径 $139.7\sim177.8\text{mm}$ ($5\frac{1}{2}\sim7\text{in.}$)、厚さ $10.54\sim30.48\text{mm}$

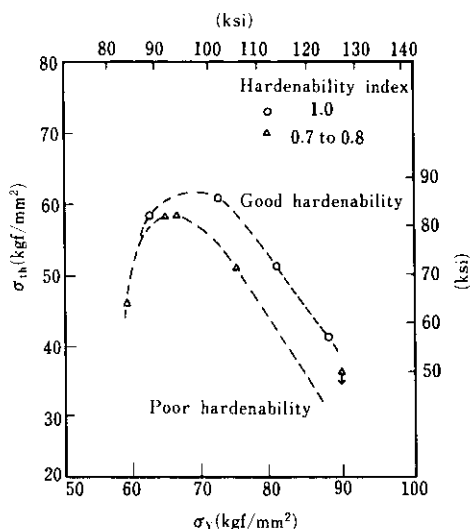


Fig. 1 Relation between SSC threshold stress σ_{th} and yield strength σ_Y of 0.2 to 0.3% C steel pipes

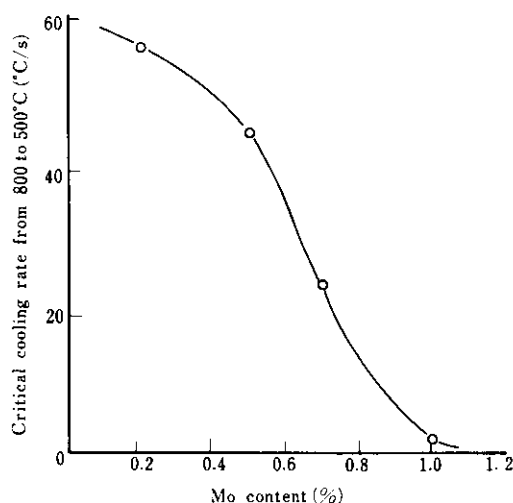


Fig. 2 Relation between critical cooling rate for martensite formation obtained by the CCT diagrams and Mo content of 0.2% C-1% Cr-Mo steels

(0.415~1.200in.), 950°C 焼入れで90%以上のマルテンサイト比であった。焼もどし条件は、化学成分と降伏強さに応じて615~702°C, 30~195min, 焼もどしまたはSR後の冷間矯正は不要であった。

図からCr-Mo系低合金鋼における臨界応力は、降伏強さ70.3kgf/mm²(100ksi)付近で最大で、Nb添加はSSC臨界応力比を増す効果を生ずることがみとめられる。

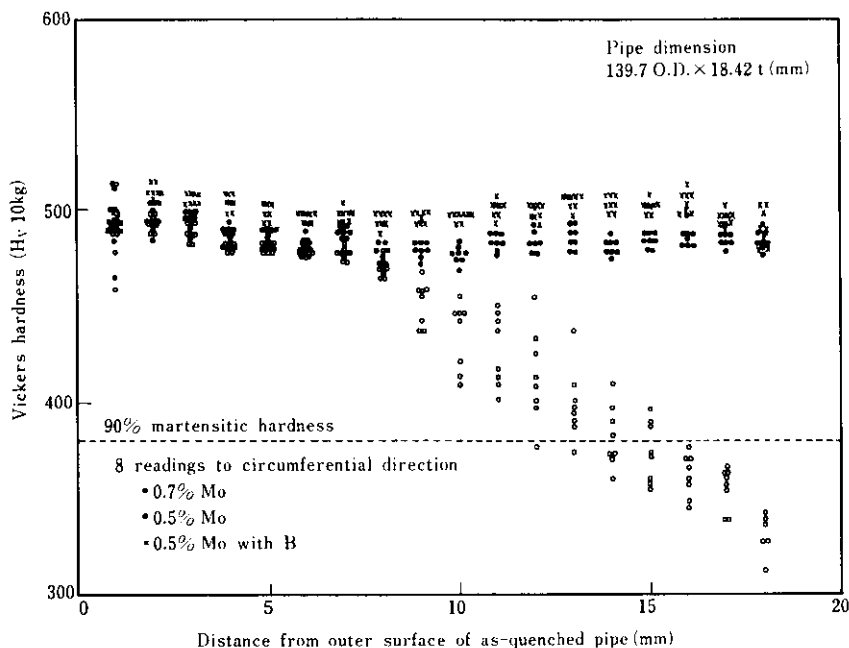


Fig. 3 Through-wall Vickers hardness distribution of as-quenched 0.2% C-Cr-Mo steel pipes

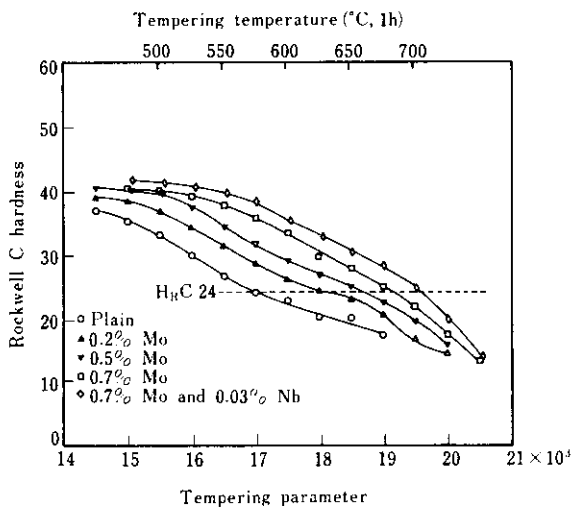


Fig. 4 Effects of Mo and Nb on the tempering resistance of 0.2% C-1.4% Cr-Mo steels

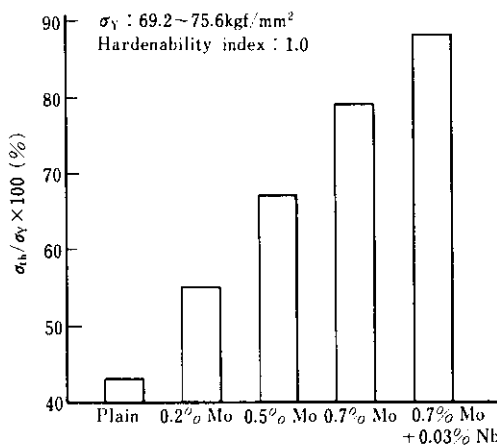


Fig. 5 Relation between Mo and Nb contents and the ratio of SSC threshold stress σ_{th} to yield strength σ_Y

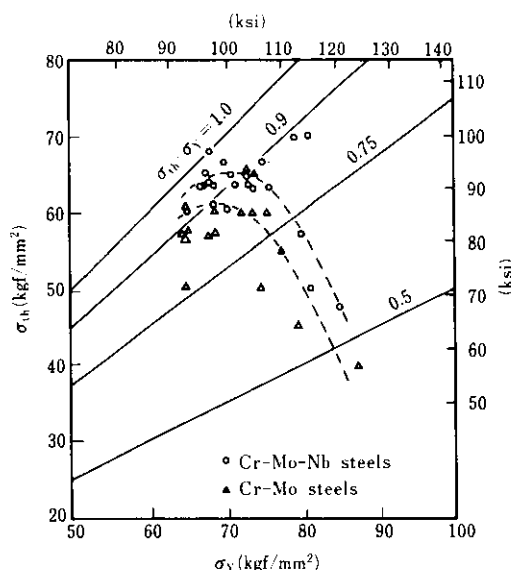


Fig. 6 Relation between SSC threshold stress σ_{th} and yield strength σ_y of Cr-Mo and Cr-Mo-Nb steels with 0.19-0.31 C, 0.50-0.85 Mn, 0.93-1.48 Cr, 0.20-1.00 Mo, 0.003-0.035 Nb, 0-0.0027 B, 0.027-0.081 Al and 0.0040-0.0059 N (%)

2.4 実 績

耐 SSC ケーシングの化学成分、機械的性質の代表例を Table 1 に示す。誘導加熱焼入, Mo, B および Nb の適正量の添加, 高温焼もどしの効果として, 均質なかたさ分布, オーステナイト結晶粒の微細化および良好な SSC 抵抗性が得られている。

3. 高コラプス油井用鋼管の開発

外圧に対する鋼管の抵抗力すなわちコラプス強度 (Collapse resistance) は, 油井用鋼管の重要な品質特性のひとつである。したがってコラプス強度のすぐれた油井用鋼管に対する需要は多く, API でも新規格の制定が討議されている。鋼管のコラプス強度が, 外径肉厚比, 降伏強さ, 真円度, へん肉率および造管, 熱処理後の冷間矯正による残留応力などの要因に依存していることは, すで

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of SSC-resistant Cr-Mo steel pipe

		Pipe dimension (mm)	Chemical composition (%)							
			C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
KO-90 SS specification			0.15/0.35	≦ 0.35	≦ 1.00	≦ 0.030	≦ 0.015	≦ 0.30	≦ 0.10	0.80/1.60
		139.7 O.D. ×18.42t	0.20	0.27	0.84	0.010	0.005	0.02	0.02	1.47

					Heat treatment	Tension testing		
Mo	Nb	B	Al	N		Yield strength psi(kgf/mm²)	Tensile strength psi(kgf/mm²)	Elongation (%)
0.15/1.10	≦ 0.050	≦ 0.0040			Tempering temp. ≧ 649°C	90 000/105 000 (63.3/73.8)	100 000/115 000 (70.3/80.8)	Same as required by API spec.
0.71	0.031	0.0007	0.069	0.0059	Quenched at 950°C Tempered at 700°C	97 700 (68.7)	106 700 (75.0)	37.9

Hardness (H _R C) testing			Prior austenitic grain size	SSC(NACE)testing
Max.	Max. variation	Ave.		Threshold/Specified min. yield strength (%)
			Min.	
24.0	4.0		5.0	≧ 75
20.5	1.7	19.8	10.5	95

に理論ないし実験的に明らかにされている⁶⁻⁸⁾。高コラプス油井用鋼管の開発に際し、まず精度のよいコラプス試験装置を製作し、上記の諸要因とコラプス強度との関係を重回帰分析により定式化した。

3.1 コラプス試験装置

コラプス試験装置の断面図を Fig. 7 に示す。試験片の長さは 1143mm (45in.)、両管端は軸方向の荷重を受けないようにクリアランスを設け、シールされる。加圧時、管内および管とベッセルとの間は水で充満され、変形にともなう管内の容積変化は外部のゲージで測定が可能である。

3.2 重回帰分析

試験に供した継目無鋼管は、誘導加熱熱処理設備で焼入れ焼もどしされ、解析を容易にする目的で真円度などの諸因子を実用上に広範囲に変化させた。外径 (D)、肉厚 (t) は管端でそれぞれ円周方向に 4 箇所、8 箇所測定され、真円度 (u)、

へん肉率 (ϵ) が計算された。外径と肉厚がコラプス強度に与える効果は D/t で評価され、 D/t が小さい領域では厚肉円筒の内面降伏条件式が適用されて降伏コラプスを生じるが、API 規格の油井用鋼管では問題にならない。 D/t が大きくなると薄肉円筒の降伏条件式が用いられ塑性コラプスを生じ、さらに D/t が大きくなると弾性コラプスへ遷移し、コラプス圧が鋼管の強度に依存しなくなる。したがって小径油井用鋼管では塑性コラプス、中径油井用鋼管では塑性および弾性コラプスが問題とされる。本研究では供試鋼の D/t は 14~20 の間に分布し、塑性コラプスの領域に属する。また降伏強さ (σ_Y) には円周方向の圧縮応力を採用するのが適切であるが、当社の熱処理設備では熱処理にともなう鋼管のひずみが最小になるように考慮されており、サイザーによる縮径加工などを不要としているため、強度の方向性を無視し、長手方向の引張降伏強さを用いた。残留応力 (σ_R) の測定にはスリット方法を適用した。API 規格 5A N-80 および 5AX P-110 ケーシングについて解析に用いたコラプス強度を Fig. 8, 9 に示す。図からコラプス強度のばらつきにはとくに σ_R が寄与していることがみとめられる。コラプス強度 (p) の重回帰分析には、

$$p = a_1 + a_2 (D/t)^{-1} + a_3 u + a_4 \epsilon + a_5 \sigma_Y + a_6 \sigma_R \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$p = b_1 + b_2 (D/t)^{-1.5} + b_3 u + b_4 \epsilon + b_5 \sigma_Y + b_6 \sigma_R \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$p = c_1 + (D/t)^{-1} (c_2 + c_3 u + c_4 \epsilon + c_5 \sigma_Y + c_6 \sigma_R) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$p = d_1 + (D/t)^{-1.5} (d_2 + d_3 u + d_4 \epsilon + d_5 \sigma_Y + d_6 \sigma_R) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$p = e_1 (D/t)^{(e_2 + e_3 u + e_4 \epsilon + e_5 \sigma_Y + e_6 \sigma_R)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$p = f_1 (D/t)^{f_2} (1 + u/100)^{f_3} (1 + \epsilon/100)^{f_4} \sigma_Y^{f_5} (1 + |\sigma_R|)^{f_6} \quad \dots\dots\dots (6)$$

であらわされる 6 とおりのモデルを仮定し、回帰係数、係数の信頼度、信頼区間および重相関係数を導き出した。その結果、重相関係数はいずれの式においても大差ないことが判明した。回帰式の一例を Table 2、回帰式と実測値との関係を Fig. 10 に示す。表からコラプス強度の要因では、 D/t 、 σ_Y 、 σ_R の効果が大で、 u および ϵ の効果は比較的小さいといえる。

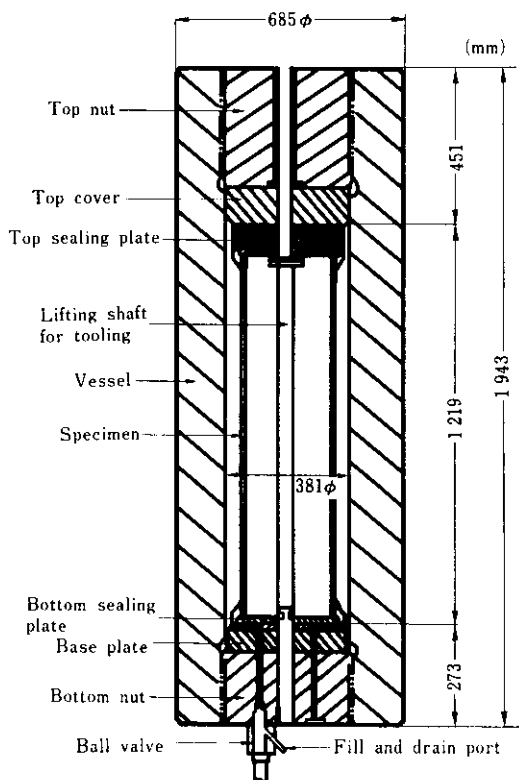
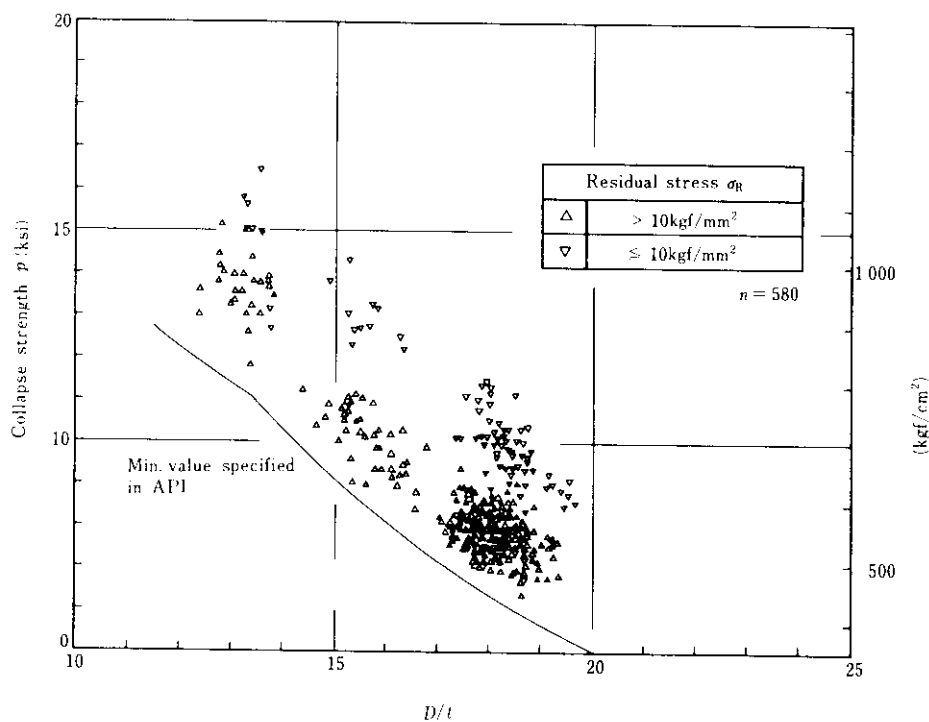
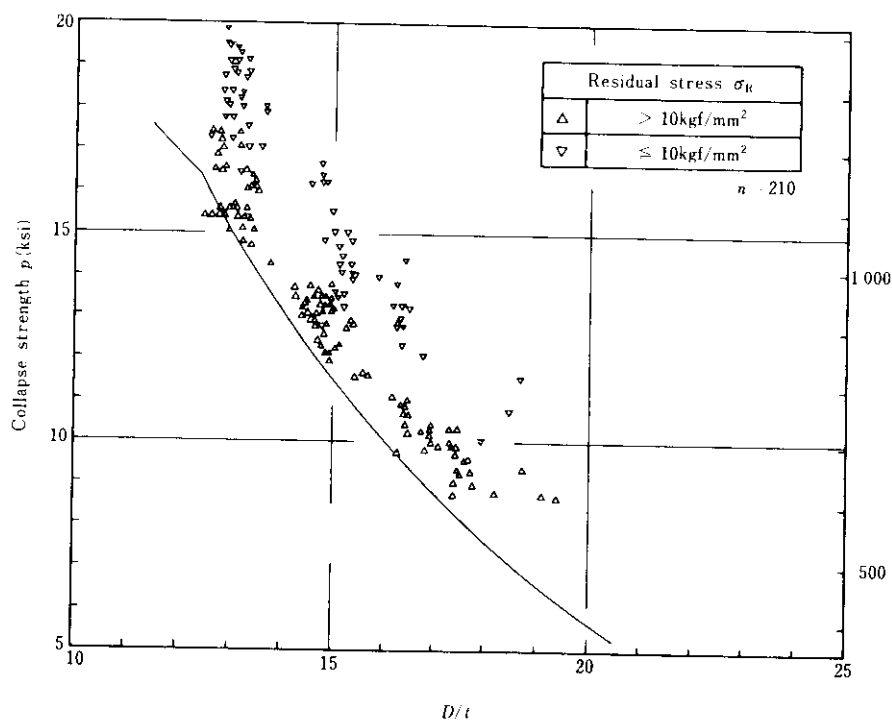


Fig. 7 Collapse tester

Fig. 8 Relation between collapse strength of N-80 casing and the ratio of pipe dia. D to wall thickness t Fig. 9 Relation between collapse strength of P-110 casing and D/t

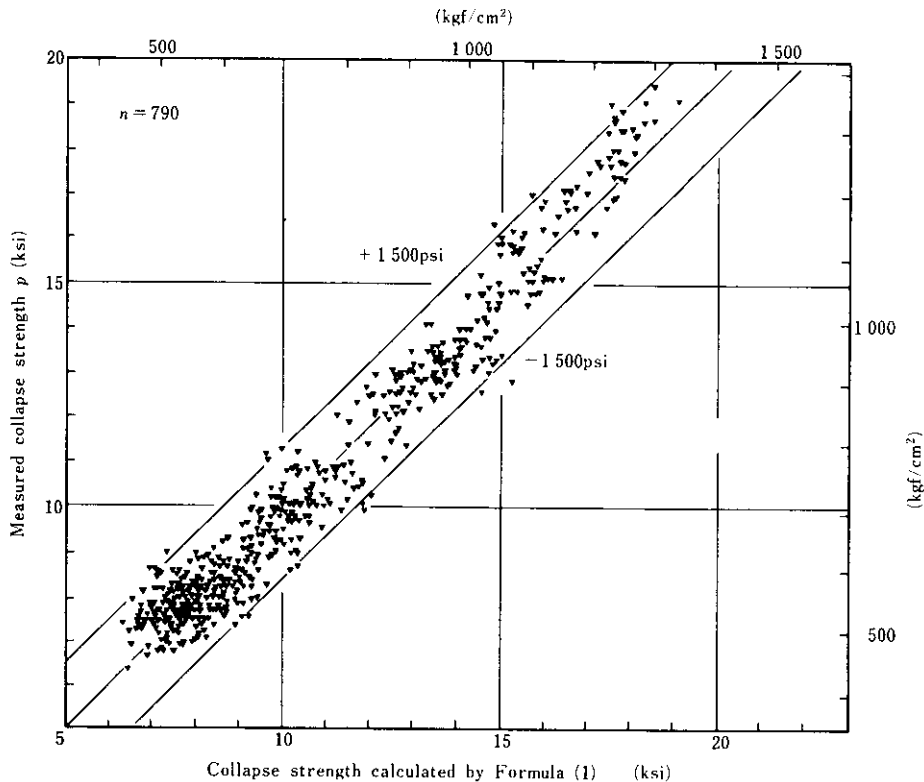


Fig. 10 Comparison of regression analysis results with measured values in collapse resistance of pipes

Table 2 Multiple regression analysis of collapse strength

Formula (1) : $p = a_1 + a_2(D/t)^{-1} + a_3u + a_4\varepsilon + a_5\sigma_y + a_6\sigma_R$
 p : Collapse strength (psi)
 u (Ovality) $= 2(D_{max} - D_{min}) / (D_{max} + D_{min})$
 ε (Eccentricity) $= 2(t_{max} - t_{min}) / (t_{max} + t_{min})$
 σ_y : Yield strength (kgf/mm²)
 σ_R : Residual stress (kgf/mm²)
 measured by slit method

Regression coefficient	95% confidence interval	Judgement	Multiple correlation coefficient
a_1	-14 050	± 508	• •
a_2	292 670	± 6 995	• •
a_3	- 450	± 288	• •
a_4	- 22	± 20	*
a_5	110	± 7	• •
a_6	- 77	± 6	• •

0.979

• • Significant at 1% level
 * Significant at 5% level

3.3 実 績

高コラプス油井用鋼管を製造するうえで、重回帰分析の結果は重要な示唆を与える。とくに造管、熱処理後の冷間加工による残留応力は、コラプス強度をいちじるしく減少させるので、誘導加熱熱処理設備では、加熱、冷却の均一化、管の搬送および変形防止の拘束方法が改良された。高コラプスケーシングに関する当社規格には、KO-95Tおよびそれより高度のコラプス強度を保证するKO-105Tがあり、化学成分、機械的性質の代表例をTable 3、コラプス強度をFig. 11に示す。

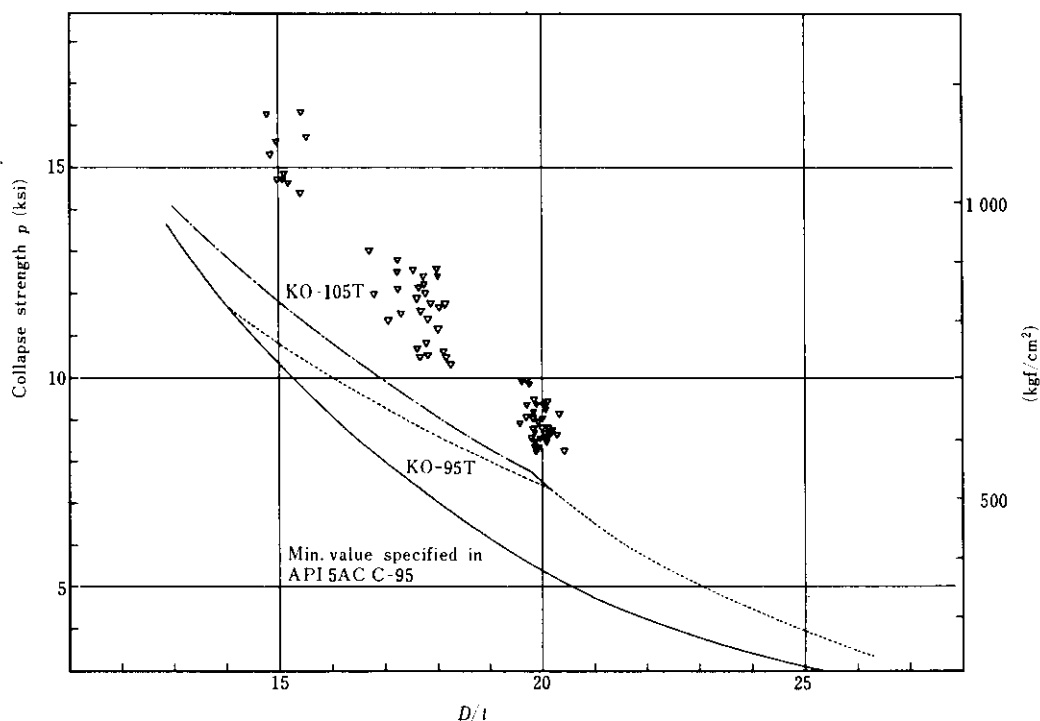
4. 結 言

耐SSC性のすぐれた特殊用途油井用鋼管の開発に際し、その冶金的要因を調査した結果、焼入性および焼もどし抵抗性を確保するための化学成分設計は、Cr-Mo-Nb-B系が最適であることおよ

Table 3 Chemical composition and mechanical properties of high collapse resistant steel pipe

	Pipe dimension (mm)	Chemical composition (%)						Tension testing	
		C	Si	Mn	P	S	Al	Yield strength psi(kgf/mm ²)	Tensile strength psi(kgf/mm ²)
Specification of KO-95T and KO-105T		≤0.35	≤0.35	≤1.60	≤0.030	≤0.030	≤0.10	95 000/125 000 (66.8/87.9)	≥110 000 (≥77.3)
	244.5 O.D. × 13.8 t	0.26	0.24	1.39	0.017	0.004	0.039	116 550 (81.9)	125 300 (88.1)

Elongation (%)	Residual stress psi(kgf/mm ²)	Collapse resistance (psi)	
		Min.	Max.
Same as required by API spec.			
30.9	0	KO-95T 8 850	13 260
		KO-105T 9 350	

Fig. 11 Relation between collapse strength and D/t of high collapse casings KO-95T and KO-105T

びコラプス抵抗性の高い油井用鋼管では熱処理後の残留応力を少なくすることが重要であることなどが判明した。

今後はさらに厳しい堀削、使用条件に耐える高品質油井用鋼管の需要に対応するため、新材料の開発ならびに製造技術の進歩が課題である。

参 考 文 献

- 1) 神崎, 黒川, 滝谷, 西, 田上: 日本金属学会会報, 18 (1979) 4, 285
- 2) P. J. Grobner, D. L. Sponseller and W. W. Cias: Material Performance, 14 (1975) 6, 35
- 3) A. Ikeda, S. Nagata, T. Tsumura, Y. Nara and M. Kowaka: Symposium on Line Pipe and Tubular Goods, API Standardization Conference, (1977)
- 4) G. M. Waid and R. J. Stiglitz: Offshore Technology Conference 3509, (1979)
- 5) NACE: NACE Standard TM-01-77, (1977)
- 6) S. Timoshenko: Theory of Elastic Stability, McGraw-Hill Co., (1936)
- 7) 西岡, 奈良, 京極, 平川, 西川, 時政: 住友金属, 26 (1974) 1, 22
- 8) 井上, 加門, 玉野, 柳本: 鉄と鋼, 63 (1977) 11, S 727-729