高温用鋼管材料の高温強度*

行 俊 照 夫** 阿 部 隆**
西 田 和 彦** 吉 川 州 彦**

High-Temperature Properties of Steel Tubing for High-Temperature and High-Pressure Service

by

Teruo YUKITOSHI, Takashi ABE, Kazuhiko NISHIDA and Kunihiro YOSHIKAWA
(Central Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., Amagasaki)

The creep rupture strength and metallurgical microstructures of tube and pipe steels used for high-temperature and high-pressure service were investigated. A total of 127 kinds of test materials were selected from 17 groups of carbon steel, low alloy steel or austenitic stainless steel. The test specimens were taken from the wall of the tubes and pipes which were commercially produced in our tubing plant.

The average creep rupture strength of each steel was obtained from the creep rupture test performed for the period longer than 10 000 hrs with a multiple-type testing machine.

The metallurgical microstructures after the creep rupture test were investigated by optical- and electron-microscopy as well as X-ray and chemical analyses of the extracted residues.

The results obtained were used to discuss the relations between creep rupture strength and microstructures. In carbon steel, active N and Mn are effective for strengthening but C and pearlites of both lamellar and spheroidal types are not so effective at high temperatures in an extended time. In low alloy steel, the carbide distributions and carbide types play important roles in the strengthening. MC carbide in austenite stainless steel increases the creep rupture strength but at high temperatures this effect disappears.

(Received Nov. 7, 1972)

1 緒 言

高温用材料の高温強度特性についてはこれまでに多くの報告^{1)~9)}があり筆者等も実験室的に試作した材料^{10)~12)}についてはすでに報告したが最近ではさらに設計の観点から、製造チャンスの異なる多数の製品について高温強度特性を求めることが要望されており、各国で精力的に試験が進められている。筆者等は現場で製造されたボイラ用および化学工業用高温用鋼管を対象とし、高温強度だけでなく、広範囲にわたる試験¹³⁾を実施し、機械的性質、高温強度、組織等を検討した。試験の実施に際しては、(1)同一鋼種に対し多数溶解材による試験、(2)試験片を鋼管肉厚部より採取、(3)長時間クリーブ破断試験、(4)試験後の組織の検討、の4項目に主眼を置いた。

試験内容は各鋼種の管の常温における諸性質、高温

引張試験、クリーブ破断試験および破断材についての光学顕微鏡、電子顕微鏡観察、抽出残渣の成分分析、X線解析、電子線解析等であり、これらの結果から現場製品のチャージのパラッキを含めた高温強度および組織変化を求め、高温強度と組織の関係を総合的に検討した。本報ではクリーブ破断強度と組織の関係を中心に述べる。

2 供 試 材

供試材はすべて現場溶解材で、炭素鋼では電気炉および転炉材を、低合金鋼およびステンレス鋼では電気炉材を用いた。これらは通常の製造工程にしたがって造塊圧延、製管され、さらに冷間抽伸を行なった後現場熱処理を施した。ただし STB 35 材のみは 20 mm ϕ 棒材を供試材とした。Table I, II に供試材の鋼種、チャージ数、形状、熱処理、成分範囲をまとめて示した。全部で 17 鋼種、127 チャージの試験材であり、この中 3 鋼種は JIS では規格化されていないが ASTM

* 原稿受理 昭和47年11月7日

** 住友金属中央研究所 尼崎市西長洲本通

Table I. Chemical composition of test materials.

Steel classification	Designation	Number of charge	Form and size (mm)	Heat treatment	Chemical composition (%)									
						C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo
Carbon steel	STB 35	11	20 ϕ bar	Nor.	Range	0.11 ~0.13	0.21 ~0.32	0.46 ~0.55	0.016 ~0.029	0.020 ~0.024	0.06 ~0.12	—	—	—
					Ave	0.12	0.26	0.49	0.022	0.022	0.09	—	—	—
Carbon steel	STB 42	5	60 ϕ ×8t	Nor.	Range	0.18 ~0.22	0.27 ~0.32	0.53 ~0.68	0.011 ~0.022	0.012 ~0.022	0.03 ~0.12	—	—	—
		6	50.8 ϕ ×8t		Ave.	0.20	0.30	0.62	0.016	0.015	0.06	—	—	—
Carbon steel	(HCS)	5	50.8 ϕ ×8t	Nor.	Range	0.20 ~0.22	0.22 ~0.28	1.16 ~1.43	0.011 ~0.019	0.004 ~0.007	0.10	—	—	—
		1	63.5 ϕ ×12t		Ave	0.21	0.26	1.26	0.015	0.005	0.10	—	—	—
		4	15 ϕ bar											
		1	20 ϕ bar											
1/2 Mo	STBA 12	5	60 ϕ ×8t	Ann	Range	0.12 ~0.15	0.28 ~0.32	0.41 ~0.53	0.011 ~0.013	0.016 ~0.019	0.07 ~0.11	—	—	0.50 ~0.54
					Ave.	0.14	0.31	0.48	0.011	0.017	0.09	—	—	0.52
1/2 Mo	(HCKT)	3	60 ϕ ×8t	Ann.	Range	0.16 ~0.20	0.26 ~0.30	0.47 ~0.54	0.012 ~0.020	0.012 ~0.013	0.07 ~0.10	0.02 ~0.03	—	0.50 ~0.51
					Ave.	0.19	0.29	0.52	0.015	0.013	0.08	0.03	—	0.50
0.2 Cr -0.3 Mo -0.05 V	(HC-MV)	7	54 ϕ ×4t 60 ϕ ×8t 318.5 ϕ ×49t 457.2 ϕ ×77t 500 ϕ (foging)	Nor.	Range	0.10 ~0.15	0.21 ~0.34	1.12 ~1.25	0.009 ~0.013	0.005 ~0.012	0.04 ~0.06	0.19 ~0.26	—	0.30 ~0.32
					Ave	0.13	0.29	1.19	0.011	0.009	0.05	0.21	—	0.31
														0.04 ~0.05
1/2 Cr -1/2 Mo	(HC-MK)	7	60 ϕ ×8t	Ann	Range	0.12 ~0.14	0.21 ~0.25	0.42 ~0.50	0.015 ~0.020	0.007 ~0.013	0.05 ~0.06	0.60 ~0.71	—	0.49 ~0.52
					Ave	0.13	0.24	0.46	0.017	0.010	0.05	0.66	—	0.51
1 Cr -1/2 Mo	STBA 22	6	60 ϕ ×8t	Ann	Range	0.10 ~0.14	0.34 ~0.39	0.44 ~0.47	0.015 ~0.020	0.008 ~0.009	0.08 ~0.10	0.86 ~0.98	—	0.51 ~0.60
					Ave	0.11	0.37	0.46	0.018	0.009	0.09	0.93	—	0.53
1 Cr -1/2 Mo	STBA 22	6	60 ϕ ×8t	N T.	Range	0.11 ~0.15	0.34 ~0.39	0.45 ~0.48	0.014 ~0.020	0.006 ~0.007	0.09 ~0.10	0.86 ~1.00	—	0.51 ~0.60
					Ave	0.12	0.37	0.47	0.017	0.007	0.10	0.94	—	0.54
1 1/4 Cr -1/2 Mo -3/4 Si	STBA 23	6	60 ϕ ×8t	Ann.	Range	0.12 ~0.14	0.65 ~0.71	0.44 ~0.49	0.014 ~0.020	0.006 ~0.007	0.09 ~0.10	1.14 ~1.20	—	0.51 ~0.54
					Ave	0.13	0.67	0.46	0.018	0.006	0.09	1.16	—	0.52
1 1/4 Cr -1/2 Mo -3/4 Si	STBA 23	6	60 ϕ ×8t	N T.	Range	0.10 ~0.14	0.60 ~0.69	0.43 ~0.50	0.013 ~0.020	0.007 ~0.008	0.09 ~0.10	1.13 ~1.19	—	0.48 ~0.53
					Ave	0.13	0.66	0.46	0.016	0.008	0.09	1.17	—	0.51

で規格化されている鋼種，2鋼種は新しく開発した鋼種である。

3 試験結果

3・1 炭素鋼

クリープ破断および高温引張試験結果の一例として，0.20 C-1.25 Mn 鋼 (HCS) のデータをFig. 1, 2に示した。また各鋼種について求めたクリープ破断強度をTable III に示した。いずれも規格許容引張応力を満足している。強度のバラツキは約±10%でありこれは後に示す低合金鋼，ステンレス鋼でも同程度である。C量の低いSTB 35は高温引張強度および比較的短時間のクリープ破断強度はSTB 42よりかなり低いが，応力-破断時間曲線のこう配がゆるやかであるため長時間では差が小さくなり，450℃の10⁴hrではSTB35の方がやや高い値を示す。これに対してMnの高いHCS鋼は短時間，長時間ともSTB 42よりかなり高い値を示す。炭素鋼のクリープ強度に対してはactive Nが大きい影響を及ぼすがHCS鋼とSTB 42の室

Fig. 1. Rupture stress-time curves for 0.20C-1.25 Mn steel (Nor.).

Table II. Chemical compositions of test materials.

Steel classification	Designation	Number of charge	Form and size (mm)	Heat treatment	Chemical composition (%)									
						C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo
2 ¼Cr -1 Mo	STBA 24	6	60φ×8t	Ann.	Range	0.10 ~ 0.12	0.34 ~ 0.44	0.43 ~ 0.50	0.010 ~ 0.023	0.007 ~ 0.013	0.09 ~ 0.13	2.04 ~ 2.22	—	0.90 ~ 0.98
					Ave	0.11	0.39	0.49	0.016	0.009	0.10	2.13		0.95
2 ¼Cr -1 Mo	STBA 24	6	60φ×8t	N T.	Range	0.10 ~ 0.12	0.35 ~ 0.44	0.43 ~ 0.51	0.010 ~ 0.022	0.007 ~ 0.012	0.09 ~ 0.12	2.01 ~ 2.26	—	0.91 ~ 0.99
					Ave	0.11	0.39	0.48	0.015	0.009	0.10	2.14		0.94
5 Cr -½ Mo	STBA 25	5	60φ×9t	Ann.	Range	0.10 ~ 0.11	0.37 ~ 0.42	0.49 ~ 0.57	0.015 ~ 0.018	0.005 ~ 0.007	0.04 ~ 0.05	4.20 ~ 4.37	—	0.47 ~ 0.48
					Ave	0.11	0.39	0.51	0.017	0.006	0.04	4.32		0.47
9 Cr -1 Mo	STBA 26	5	60φ×9t	Ann.	Range	0.10 ~ 0.13	0.63 ~ 0.66	0.44 ~ 0.47	0.017 ~ 0.026	0.005 ~ 0.007	0.05 ~ 0.07	8.40 ~ 8.78	—	0.96 ~ 0.97
					Ave	0.11	0.64	0.45	0.021	0.006	0.05	8.65		0.97
18 Cr -8 Ni	SUS 27 HTB	6	60φ×8t	S T	Range	0.06 ~ 0.08	0.51 ~ 0.59	1.35 ~ 1.60	0.023 ~ 0.028	0.006 ~ 0.007	0.07 ~ 0.09	17.95 ~ 18.95	9.10 ~ 9.92	—
					Ave	0.06	0.55	1.50	0.026	0.006	0.09	18.50	9.50	
18 Cr -8 Ni -Ti	SUS 29 HTB	6	60φ×8t	S T	Range	0.06 ~ 0.07	0.44 ~ 0.56	1.48 ~ 1.56	0.020 ~ 0.022	0.006 ~ 0.006	0.08 ~ 0.09	17.25 ~ 17.70	11.93 ~ 12.01	—
					Ave	0.07	0.56	1.56	0.022	0.006	0.09	17.70	12.01	Ti 0.34 ~ 0.60
18 Cr -8 Ni -Nb	SUS 43 HTB	3	54φ×12 1t 44φ×8 5t	S T.	Range	0.07 ~ 0.07	0.55 ~ 0.59	1.64 ~ 1.72	0.020 ~ 0.021	0.005 ~ 0.005	0.03 ~ 0.07	17.60 ~ 17.80	11.70 ~ 12.60	Nb 0.64 ~ 0.76
					Ave	0.07	0.57	1.67	0.021	0.005	0.04	17.67	11.93	0.71
16 Cr -13 Ni -Mo	SUS 32 HTB	6	60φ×8t	S T.	Range	0.06 ~ 0.06	0.50 ~ 0.68	1.45 ~ 1.75	0.024 ~ 0.027	0.006 ~ 0.006	0.22 ~ 0.29	16.50 ~ 17.45	12.79 ~ 13.54	2.10 ~ 2.25
					Ave	0.06	0.56	1.66	0.025	0.006	0.24	16.87	13.33	2.14
20 Cr -30 Ni -Ti-Al	(HR 7 -TA)	4	50 8φ×8t	S T	Range	0.05 ~ 0.07	0.56 ~ 0.71	1.19 ~ 1.28	0.015 ~ 0.019	0.005 ~ 0.007	0.06 ~ 0.10	20.65 ~ 20.85	32.08 ~ 32.48	Ti 0.29 ~ 0.35
					Ave	0.06	0.61	1.22	0.017	0.006	0.09	20.73	32.32	Al 0.25 ~ 0.39

Fig. 2. Results of short time tensile test for 0.20C-1.25 Mn steel (Nor.).

Table III. Estimated 10³, 10⁴ and 10⁵ hr rupture strengths for carbon steels.

Designation	Heat treatment	Rupture strengths (kg/mm ²)					
		400°C			450°C		
		10 ³ hr	10 ⁴ hr	10 ⁵ hr	10 ³ hr	10 ⁴ hr	10 ⁵ hr
STB 35	Nor.	27.4	(22.9)	—	19.3	14.8	(11.1)
STB 42	Nor.	33.4	25.8	(18.1)	21.3	13.7	(9.7)
(HCS)	Nor.	40.0	30.5	(22.0)	25.1	17.1	(11.7)

() Extrapolated values

化物の析出傾向を比較すると Fig. 3 に示すようにほとんど差はなく、両者の差は主として Mn 量および N と Mn の交互作用によるものと思われる。Table IV, Fig. 4 は同一 C 量の炭素鋼の代表的な 4 種の材料を比較したものであるが、active N (total N-N as nitride), Mn 量の影響が著しいことがわかる。しかし、パーライト球状化の影響は C 鋼と D 鋼の比較にみられるように比較的小さい。長時間におけるクリープ破断伸びは STB 35 よりも STB 42, HCS 鋼の方が高く、とくに 450°C において顕著である。

Fig. 3. Variation of nitrogen amount in residue extracted from creep ruptured carbon steel.

Table IV. Tested materials of carbon steel.

Mark	Chemical composition (%)						Micro-structure	T.S. at R. T. (kg/mm ²)
	C	Si	Mn	Al	N	Active N		
A	0.21	0.26	1.22	0.0010	0.0098	0.0083	F+L P.	57
B	0.21	0.30	0.65	0.0020	0.0085	0.0077	F+L P.	50
C	0.22	0.20	0.55	0.0120	0.0041	0	F+L P.	48
D	0.22	0.30	0.55	0.0010	0.0050	0	F+S P.	46

F Ferrite
L P Lamellar pearlite
S. P Spheroidized pearlite

Fig. 4. Comparison of rupture stress-time curves for carbon steels (Details of A, B, C and D are shown in Table IV).

3・2 低合金鋼

クリープ破断および高温引張試験結果の一例として STBA 22 のデータを Fig. 5, 6 に、各鋼種について求めたクリープ破断強度を Table V に示した。1/2 Mo 鋼では C 量が高く、常温強度の高い HCKT 鋼の強度が STBA 12 よりやや低目になっている。0.2Cr-0.3Mo-0.05V 鋼 (HCMV) は 500°C 以下での使用を目標に新しく開発した鋼種である。STBA 22, STBA 23, STBA 24 では Ann. 材と NT 材について試験

Fig. 5. Rupture stress-time curves for 1Cr-1/2Mo steel (Ann.).

Fig. 6. Results of short time tensile test for 1Cr-1/2Mo steel (Ann.).

Table V. Estimated 10³, 10⁴ and 10⁵ hr rupture strength for low alloy steels.

Designation	Heat treatment	Rupture strengths (kg/mm ²)											
		500°C			550°C			600°C			650°C		
		10 ³ hr	10 ⁴ hr	10 ⁵ hr	10 ³ hr	10 ⁴ hr	10 ⁵ hr	10 ³ hr	10 ⁴ hr	10 ⁵ hr	10 ³ hr	10 ⁴ hr	10 ⁵ hr
STBA 12	Ann.	31.2	23.0	(17.0)	17.5	(8.2)	—						
(HCKT)	Ann.	29.2	(20.2)	—	15.2	(6.3)	—						
(HCMV)	Nor.	34.3	23.4	(15.3)	17.0	9.3	(5.1)						
(HCMK)	Ann.	35.5	(24.3)	—	19.5	9.4	(5.1)						
STBA 22	Ann.	35.4	25.3	(15.7)	19.1	10.1	(6.6)	8.6	4.8	(2.8)			
STBA 22	N.T.	34.1	24.0	(14.6)	17.5	10.4	(7.0)	9.0	(5.5)	—			
STBA 23	Ann.	34.0	23.3	(13.8)	16.0	9.8	(7.0)	8.7	5.3	(3.0)			
STBA 23	N.T.	32.7	(23.3)	—	16.3	(9.8)	—	8.8	(5.2)	—			
STBA 24	Ann.	22.4	(16.4)	—	14.9	11.5	(8.8)	10.5	7.1	(4.7)	6.1	2.8	(1.3)
STBA 24	N.T.	23.6	18.0	(13.8)	16.1	11.5	(8.2)	10.2	(6.5)	—	5.6	(2.8)	—
STBA 25	Ann.				11.1	(8.4)	—	7.2	(4.9)	—	4.4	(2.9)	—
STBA 26	Ann.							7.6	(5.7)	—	4.4	(3.1)	—

() Extrapolated values

しているが, STBA 22 では低温, 短時間側では Ann. 材の強度が高く, 高温長時間側では NT 材が高くなっているが, STBA 24 では, この傾向が逆転している。

このように低合金鋼では成分, 熱処理により強度特性が著しく異なっている。この要因としてはフェライト中の炭化物の分布状況およびパーライト (またはベイナイト) 中の炭化物の分布状況が考えられる。炭素鋼において大きな影響を及ぼした active N については Cr を含有している場合, 最初から窒化物を形成しているためほとんど存在せず, クリープ破断強度にはほとんど影響を及ぼさない。これらの関係については前に報告した⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾がおもな鋼種について考察すると次のようである。

STBA 22 では Ann. 材, NT 材ともフェライト + パーライト組織であるが, フェライト中の炭化物は短時間側では Ann. 材の方が多数の微細な炭化物が存在するのに対し, 長時間側では NT 材の方が多数の微細な炭化物の析出が認められる。このフェライト中における析出状況の差がクリープ破断強度に影響を及ぼしていると思われる。STBA 24 は Ann. 材ではフェライト + パーライト組織, NT 材ではフェライト + ベイナイト組織であり, フェライト中については STBA 22 と同様であるが, NT 材の焼もどしベイナイトはパーライトよりも多数の微細な炭化物を含有するため, 低温, 短時間クリープ破断強度を上げるが, 高温長時間側では粗大化しやすいため強度が低下すると考えられる。Cr 含有量の高い STBA 25, STBA 26 ではフェライト中に比較的大きい炭化物が析出しており, その数も少ないため, STBA 22, STBA 24 よりも強度が低くなっていると考えられる。

クリープ破断伸びは一般に長時間側で低下する傾向があり, とくに $\frac{1}{2}$ Mo 鋼はかなり低い値を示すが, STBA 25, STBA 26 はかなり高い値を示している。

3・3 オーステナイト, ステンレス鋼

クリープ破断および高温引張試験結果の例として 18-8-Ti および 16-13-Mo 鋼のデータを Fig. 7~10 に, 各鋼種について求めたクリープ破断強度を Table VI に示した。ただし HR7-TA については 1000°C までの試験を行なっている。SUS 27HTB と SUS 32HTB および SUS 29HTB と SUS 43HTB はそれぞれ類似した応力-破断時間曲線を示し前者は各温度とも安定した挙動を示すが, C 安定化鋼種の後者は, 700°C 以上の長時間側でそのよう配が大きく, 強度が逆転する傾向が認められた。

Fig. 11, 12 に残渣分析結果を示した。SUS 27HTB, SUS 32HTB では $M_{23}C_6$ の析出が主体であるが, これは強度特性にはあまり影響を与えていないと思われる。⁽¹²⁾一方 SUS 29HTB, SUS 43HTB では TiC, NbC,

Fig. 7. Rupture stress-time curves for 18Cr-8Ni-Ti steel.

Fig. 8. Results of short time tensile test for 18Cr-8Ni-Ti steel.

Fig. 9. Rupture stress-time curves for 16Cr-13Ni-Mo steel.

Table VI. Estimated 10^3 , 10^4 and 10^5 hr rupture strengths for austenitic stainless steels.

Designation	Heat treatment	Rupture strengths (kg/mm ²)											
		600°C			650°C			700°C			800°C		
		10 ³ hr	10 ⁴ hr	10 ⁵ hr	10 ³ hr	10 ⁴ hr	10 ⁵ hr	10 ³ hr	10 ⁴ hr	10 ⁵ hr	10 ³ hr	10 ⁴ hr	10 ⁵ hr
SUS 27 HTB	S. T	18.8	14.2	(10.9)	13.3	9.7	(7.0)	8.7	(6.1)	—	3.9	(2.5)	—
SUS 29 HTB	S. T.	28.0	19.8	(13.5)	19.5	12.5	(7.3)	12.3	7.0	(3.9)	4.7	(2.5)	—
SUS 43 HTB	S. T.	28.2	(22.5)	—	20.8	(16.0)	—	12.0	(6.9)	—	4.3	(2.3)	—
SUS 32 HTB	S. T.	24.6	19.6	(15.2)	16.4	11.7	(8.4)	10.6	7.4	(5.2)	4.9	3.1	(2.0)
(HR7-TA)	S. T.							9.6	6.8	(5.0)	5.4	3.5	(2.3)

() Extrapolated values

Fig. 10. Results of short time tensile test for 16 Cr-13 Ni-Mo steel.

$M_{23}C_6$, σ 相が析出した後, L. M. 値が 22 付近で針状析出物が析出し, この時期は Fig. 12 の残渣中の Ti, Nb がほぼ一定になる点およびクリープ破断強度が低下しはじめる点に対応していると思われる。

また残渣分析結果から, 析出物を炭化物 ($Cr_{23}C_6$, Cr_3C_2 , TiC, NbC), 窒化物 (TiN, NbN), 硫化物 (Ti_2S) と仮定して固溶 C 量を概算すると L. M. 値が 22 以上では SUS 27HTB および SUS 32HTB は 0.02 ~ 0.03%, SUS 29HTB および SUS 43HTB は 0% となり, かなりの差が認められる。700°C 以上の長時間側で C 安定化鋼種の強度が低下するのは, この固溶 C 量および炭化物の析出状態が関係していると考えら

Fig. 11. Results of residue analysis in ruptured 18 Cr-8 Ni and 16 Cr-13 Ni-Mo stainless steel.

Fig. 12. Results of residue analysis in ruptured 18 Cr-8 Ni-Ti and 18 Cr-8 Ni-Nb stainless steel.

れる。

4 結 言

ボイラ用および化学工業用として使用される炭素鋼, 低合金鋼, オーステナイトステンレス鋼の 17 鋼種の鋼管について, それぞれ多数チャージの試験材を採取し, 長時間クリープ破断試験を行ない, さらに試験後の組織観察, 析出物の解析により, クリープ破断強度と組織の関係を総合的に検討した。

(昭和 47 年 10 月 6 日 第 11 回高温強度シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) ASTM Special Technical Publication, No. 180 (1955).
- 2) ASTM Special Technical Publication, No. 151 (1953).
- 3) ASTM Data Series Publication, No. DS 6S1 (1966).
- 4) ASTM Data Series Publication, DS6-S1 (1965).
- 5) Const. A., Arch Eisenhütten, 28, p.695 (1957).
- 6) Verein Deutscher Eisenhüttenleute, Ergebnisse Deutscher Zeitstandversuche Langer Dauer.
- 7) Glen, J., et al., ISI Publication 97, p.159 (1966).
- 8) Johnson, R. F., et al., ISI Publication 97, p.229 (1966).
- 9) Truman, R. J., et al., ISI Publication 97, p.265 (1966).
- 10) 住友金属工業 (株), 住友金属別冊, “高温用鋼管材料の高温強度特性について” (1962).
- 11) 三好栄次, 岡田隆保, 住友金属, 18, p.393 (1966).
- 12) 三好栄次, 行俊昭夫, 住友金属, 19, p.503 (1967).
- 13) 住友金属工業 (株), 住友金属別冊, “高温用鋼管材料の高温強度特性” (1972).
- 14) 行俊昭夫, 西田和彦, 材料, 21, 204 (1972).
- 15) Yukitoshi, T., and K. Nishida, Trans. ISIJ 12, p.283 (1972).