



第 7 回共通高温引張試験結果について

田 村 今 男*

On the 7th Comparative High Temperature Tensile Testings

Imao TAMURA

1. はじめに

日本鉄鋼協会高温強度研究委員会(旧クリープ委員会)で原案を作成した JIS G 0567 (鉄鋼材料の高温引張試験法)は 1966 年に制定されたが、その後本委員会に高温引張試験分科会を作つて数回に及ぶ共通試験を行い^{1)~4)}、精度、再現性その他の不備な問題点について検討してきた。さらに、1000°C 以上で使用される耐熱合金の開発、実用化が進められている状況にかんがみ、これらの超高温にも JIS G 0567 を適用できるかどうかなどについて検討し(第 5 回および第 6 回共通試験)^{5)~7)}、それらの結果をふまえて JIS G 0567 の見直し案を工業技術院に答申し、昭和 53 年(1978)3 月 1 日付をもつてこの規格が改訂公布されるに至つた。(JIS G 0567-1978: 鉄鋼材料および耐熱合金の高温引張試験方法)

その後、本分科会では昭和 53 年度以降の事業計画について検討をおこなつた結果、代表的な鋼の高温での加工硬化特性について第 7 回共通試験をおこなうことが決定された。この共通試験の目的は、代表的な耐熱鋼、耐熱合金につき種々な温度で JIS G 0567 に準拠して高温引張試験をおこない、試験温度の上昇にともなう加工硬化指数(n 値)の変化を測定することにより、高温構造物設計に必要な情報のひとつと考えられる n 値の信頼すべき値を求めることを主たるものとする。同時に、温度が高くて加工硬化が認められなくなるような場合には、耐力および引張強さがひずみ速度によつて一義的に決められるようになり、JIS G 0567 によつて求めた耐力あるいは引張強さを、設計において基準とする材料特性として用いる意味が不明確になる。そのような限界温度についても本共通試験により検討することになつた。

昭和 53 年度は本共通試験に関する試験方案の検討、鋼種の決定等の準備作業をおこない、昭和 54 年~昭和 55 年にかけて共通試験が実施された。試験結果のとりまとめは昭和 55 年 12 月に終了し、その後データの整理、検討をおこない、その結果の報告書は高温強度研究委員会から関係機関に配布された⁸⁾。これを機会に、第

7 回共通高温引張試験結果の概要について報告する。

2. 共通試験方法

2.1 参加機関

本共通試験は表 1 に示す 14 機関の参加により実施された。これらの機関は共通試験を行うにあたり、実施に協力、参加できる機関の問い合わせを行つた結果、積極的に参加の申し出をいただいたものである。

2.2 試験材料

試験材料はできるだけ多くの種類についてのデータを得ることができるように、①各試験機関で重複しないように調整する、②各試験機関あたり 2 種とし、各機関で調達する、③種々な耐熱鋼、耐熱合金のうち代表的な材料がカバーできるように選定する、という方針で各参加機関に対し手持ちのかつ関心の高い材料についてのアンケート調査を行つた。それをもとに表 2 に示すような 27 種類を決定し、それぞれの担当機関を決めた。これらの材料は 6 グループに大別される。つまり、①炭素鋼、②Mn-Mo 鋼、③Cr-Mo 鋼、④12Cr 鋼、⑤オーステナイト系ステンレス鋼、⑥Fe 基、Ni 基、Co 基超合金の各グループからなつている。

2.3 高温引張試験方法

(a) 高温引張試験方法は JIS G 0567-1978 に従う

表 1 第 7 回共通試験参加機関名

石川島播磨重工業(株)技術研究所
川崎重工業(株)技術研究所
川崎製鉄(株)技術研究所
金属材料技術研究所クリープ試験部
久保田鉄工(株)鋳物技術研究所
(株)神戸製鋼所 中央研究所
山陽特殊製鋼(株)技術研究所
新日本製鉄(株)製品技術研究所
住友金属工業(株)中央技術研究所
大同特殊鋼(株)中央研究所
日新製鋼(株)周南製鋼所
日本鋼管(株)技術研究所
(株)日立製作所 日立研究所
三菱重工業(株)高砂研究所
(50 音順)

昭和 56 年 12 月 4 日受付 (Received Dec. 4, 1981)

* 本会高温強度研究委員会高温引張試験分科会委員長兼主査
京都大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Kyoto University, Yoshidahonmachi Sakyo-ku Kyoto 606)

表2 試験材料および試験担当機関

グループ	No.	材料名	代表成分	担当機関
(1)	1	SB 49	0.3C	1
	2	STB 42	0.2C	2
(2)	3	SBVIB (ASTM A302 Gr. B)	1.3Mn-0.5Mo	3
(3)	4	SCMV 2 (ASTM A387 Gr. 12)	1.25Cr-0.5Mo	3
	5	SCMV 4 (ASTM A387 Gr. 22 Cl. 1)	2.25Cr-1Mo	4
	6	STBA 24	"	5
(4)	7	SUS 403	12Cr	1
	8	X20CrMoV 121	12Cr-1Mo-0.3V	6
(5)	9	SUS 304	18Cr-8Ni	6
	10	SUS 310	25Cr-20Ni	5
	11	SUS 316	18Cr-12Ni-Mo	7
	12	SUS 321	18Cr-8Ni-Ti	8
	13	SUS 347	18Cr-8Ni-Nb	2
	14	SUS XM 15 J1	17Cr-13Ni-4Si	8
	15	SCS 14 (CF8M)*	18Cr-12Ni-Mo	9
	16	SCH 13 (HH)*	26Cr-12Ni-0.35C	9
	17	SCH 22 (HK40)*	25Cr-20Ni-0.4C	10
(6)	18	SUH 660 (A286)	Fe-15Cr-25Ni-Mo-Ti-V	11
	19	NCF 800 (Incoloy 800)	Fe-20Cr-32Ni-Ti-Al	11
	20	"	"	12
	21	Incoloy 825	Fe-20Cr-42Ni-Mo-Ti-Al-Cu	12
	22	Hastelloy X	Ni-22Cr-18Fe-9Mo-Co-W	7
	23	Inconel 617	Ni-22Cr-12Co-9Mo-Al	4
	24	Nimonic 80A	Ni-20Cr-5Fe-Co-Ti-Al	13
	25	Waspoloy	Ni-30Cr-14Co-4Mo-Ti-Al	10
	26	IN738LC*	Ni-16Cr-8Co-Mo-W-Nb-Ti-Al	14
	27	L605	Co-20Cr-10Ni-15W	13

注1) * は鋳造材
 注2) グループ(1)炭素鋼, グループ(2) Mn-Mo鋼, グループ(3) Cr-Mo鋼, グループ(4) 12Cr鋼, グループ(5) オーステナイト系ステンレス鋼グループ(6) Fe基, Ni基, Co基超合金とする。

ものとする。

(b) 試験温度は原則として5温度とする。試験温度は各担当機関において適当に決めるものとするが、その温度選定基準は加工硬化指数の温度に対する変化から、その値が0に等しくなる温度を決定できるような温度とする。従つて、試験温度にはその材料の通常使用温度よりもかなり高温が含まれるはずである。

(c) 負荷方法 ひずみ速度は全ひずみ量が約1%までは0.3%/min, 約1%をこえた後は7.5%/minとする。その間のひずみ速度は、試験片を均熱して平行部の変位を直接測定できるような伸び計を用いて一定値に制御することを原則とする。

(d) 報告事項としては供試材、試験方法の詳細ならびに試験結果(n値, 0.2%耐力, 引張強さ, 伸び, 絞り)および真応力-真ひずみ関係の数値データとする。

表3に各試験機関での試験機の型式, 試験片寸法, ひずみ速度制御方法をまとめて示す。

表3 各試験機関における高温引張試験方法一覧

試験機関	試験機の形式*	試験片標点部寸法(mm)	ひずみ速度制御方法**	
			1% ひずみまで	1% ひずみ以後
1	I-10 H-30	10φ×50 l	A	A
2	I-10	6φ×30 l	A	B
3	I-10	10φ×50 l	A	A
4	I-10	6φ×30 l	B	B
5	I-10	6φ×30 l 10φ×50 l	A	A
6	I-10	6φ×30 l 10φ×50 l	A	A
7	I-10	6φ×30 l	A	A
8	I-10	10φ×50 l	A	A
9	I-10	10φ×50 l	A	B
10	H-10	8φ×40 l	A	A
11	I-10	10φ×50 l	A	B
12	H-50	10φ×50 l	A	B
13	I-20	10φ×50 l	A	A
14	I-10	6φ×30 l	A	B

注1) * Iはインストロン型, Hは油圧型試験機を表し, 後の数字は荷重容量(単位t)を示す。
 注2) ** 次のひずみ速度制御方式であることを示す。
 A: 伸び計による標点間ひずみ速度自動制御
 B: クロスヘッド速度を一定に自動制御
 注3) 全機関とも加熱装置は電気抵抗炉, 試験雰囲気は大気中である。

表4 共通試験小委員会委員

主査兼小委員長	委員	田村 今男 (京都大学)	斎藤 誠 (大同特殊鋼)	豊田 裕至 (神戸製鋼)	平石 久志 (久保田鉄工)	藤原 昌晴 (三菱重工)	村瀬 宏一 (川崎重工)	横井 信 (金材技研)	吉川 州彦 (住友金属)	幹事 牧 正志 (京都大学)	大曾根 弘毅 (鉄鋼協会)
---------	----	--------------	--------------	--------------	---------------	--------------	--------------	-------------	--------------	----------------	---------------

なお、上述の共通試験方案の作成ならびに試験結果の取りまとめのためには、表4に示したメンバーで小委員会を編成し、実際の作業を行った。

3. 試験結果および考察

各試験機関より報告された結果のうち、いくつかの代表的なものを図1~12に示す。図中、耐力は0.2%耐力†を意味し、これは0.3%/minのひずみ速度で求めたものであり、引張強さは7.5%/minのひずみ速度で求めたものである。n値は $\dot{\epsilon}=0.3\%/min$ のときは $\epsilon=0.5\sim 1.0\%$ の間で、 $\dot{\epsilon}=7.5\%/min$ のときは $\epsilon=4.0\sim 6.0\%$ 間で求めた値である。

ここではすべての材料についての結果を示すことはできないが、本共通試験により得られた結果をもとに、材料間での概括的特徴、傾向をまとめると次のようになる。

炭素鋼, 低合金鋼, 高Cr鋼においては(図1~4), 大体の傾向として400~700°Cの間でn値のひずみ速度逆依存性が現れている。C, N, Cr, Moなどによる動的

† 荷重-伸び曲線にセレーションが現れる場合の耐力, 引張強さの求め方については一つの提案を付録に示す。

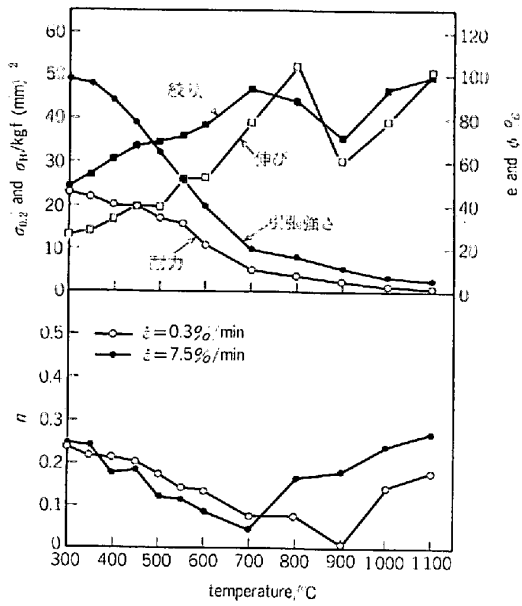


図1 SB49 (No. 1)

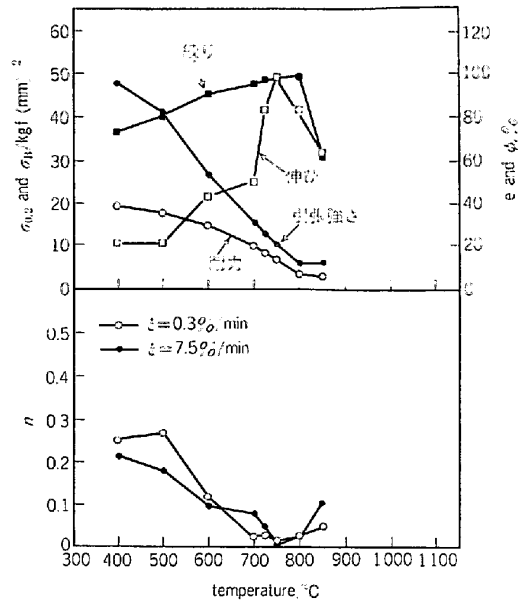


図3 STBA 24 (No. 6)

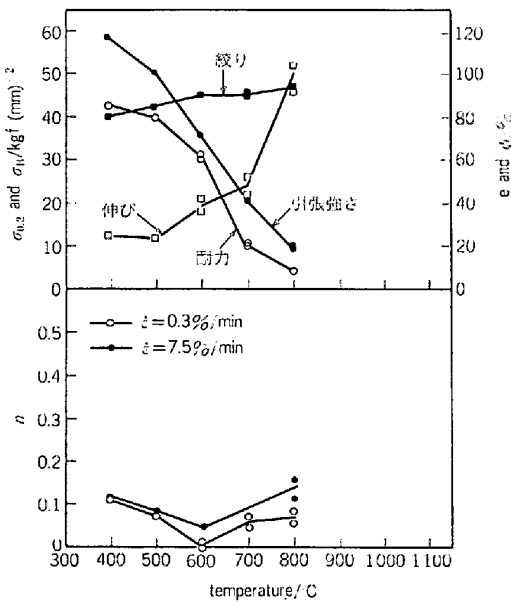


図2 SBV 1B (ASTM A302 Gr.B) (No. 3)

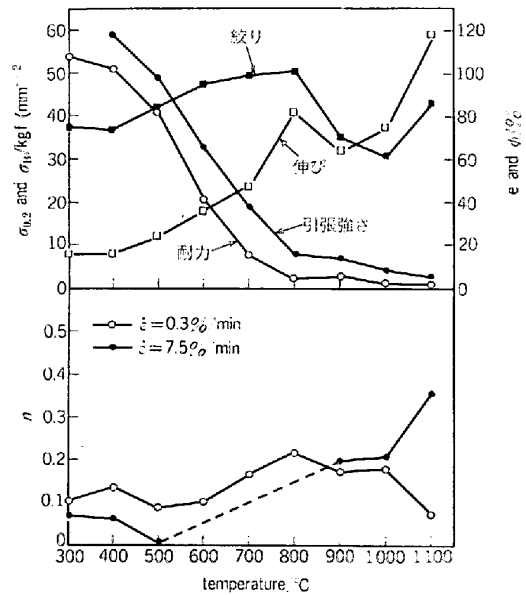


図4 SUS 403 (No. 7)

ひずみ時効の効果であろうと思われる。また、700°C以上で温度が高くなるほどn値が大きくなる傾向がある。オーステナイト共存による効果であると考えてよい。12Cr鋼では850°C付近まで逆ひずみ速度依存性を示す。

オーステナイト系ステンレス鋼では(図5~7)、全般に非常に正常で、同じ温度ではひずみ速度が大きいほどn値は大きく、温度が高くなるほどn値は低下し、Fe-Cr-Ni系(304, 310)では大体900°C以上でn=0になるようであり、Mo, Ti, Nbを含有する鋼ではその温度は1000°C以上になるように見られる。铸造材(図8 HK40)はかなり複雑で、ひずみ速度逆依存性もみられる。

超合金になると(図9~12)、それぞれの組成に応じて特徴ある挙動を示すが、n=0となる温度は案外に低温で、800~1000°C付近にあるものもある。しかし、n値が小さくてほとんど0であつてもかなり高い耐力、引張強さを高温で示すのが特徴である。

本共通試験により得られた各種材料の結果の特徴を考察するために、高温引張試験時の加工硬化挙動と関連する諸現象ならびに諸因子について簡単に考えてみる。

アームコ鉄を700°Cで種々なひずみ速度で引張試験すると図13(a)⁹⁾のように、最初加工硬化するが、回復軟化が大きくて、あるひずみ量以上になると加工硬化と回復軟化が釣り合うようになり(動的回復)、みかけの加工硬化がおこらなくなる。温度が高くなるほど小さいひ

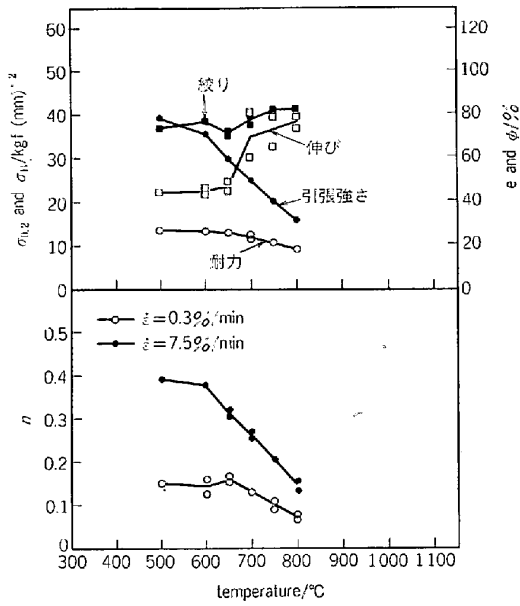


図 5 SUS 304 (No. 9)

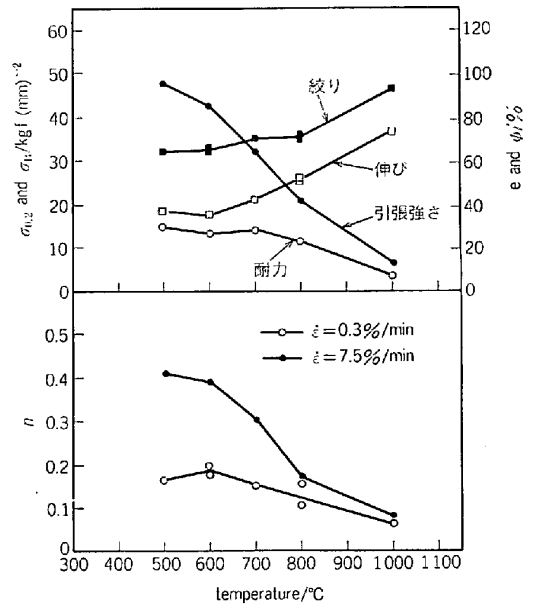


図 7 SUS 347 (No. 13)

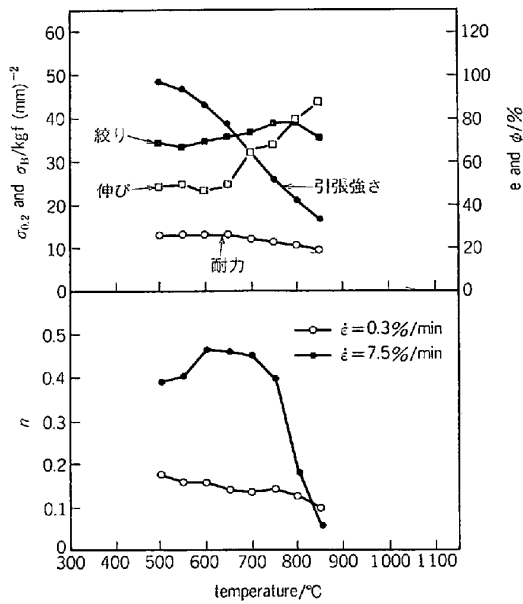


図 6 SUS 310 (No. 10)

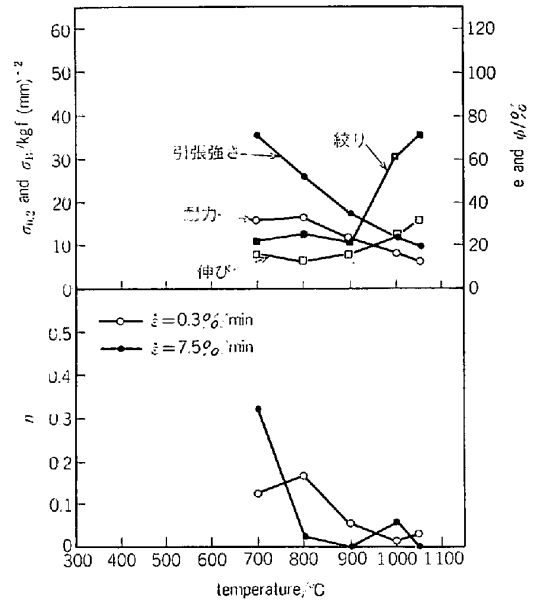


図 8 SCH 22 (HK40) (No. 17)

ずみ量から低い応力で釣り合うようになってくる。もし、この釣り合い開始ひずみが0.5%以下になるようなひずみ速度以下では0.5~1.0%の間の加工硬化を測定しても $n=0$ という値が得られる。すなわち、加工硬化がおこらないという結果となる。このような真応力-真ひずみ曲線を示す金属・合金をA1型と呼び、フェライトはこの部類に属するといわれている¹⁰⁾。すなわち、フェライトを0.3%/minで引張試験した場合 $n=0$ になる温度があるはずであると考えられる。しかし、現実には $n=0$ になる温度に達するまでにオーステナイトを生成することが多いので、炭素鋼や低合金鋼では $n=0$ になる温度を見出すことはむずかしく、さらに7.5%/minではもつと高温になるはずで、一層困難であろう。

0.68% C鋼をオーステナイト状態における種々な温度及びひずみ速度で引張試験をすると、図13(b)¹¹⁾のように、最初加工硬化するが、ある程度以上加工硬化すると再結晶をおこして軟化し、あるひずみ以上になると加工硬化と再結晶軟化が釣り合うようになる(動的再結晶)。この釣り合った状態では見かけの加工硬化はおこらず $n=0$ となる。しかし、一般にピーク応力までは加工硬化するわけで、この加工硬化は温度が低いほどひずみ速度が大きいほど大きいと考えられる。このような真応力-真ひずみ曲線を示す金属・合金をCu型といい、オーステナイトはこの部類に属する¹⁰⁾。ひずみ速度を一定として温度を上げてゆくと、ピークひずみ及び釣り合い開始ひずみは低ひずみになってくる。更に温度が上が

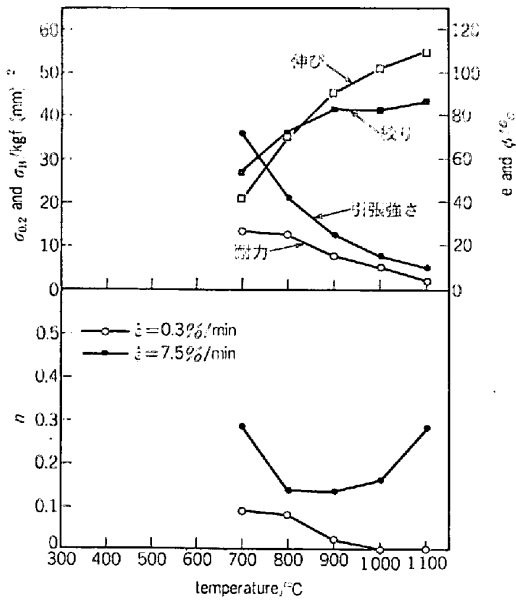


図9 NCF 800 (Incoloy 800) (No. 20)

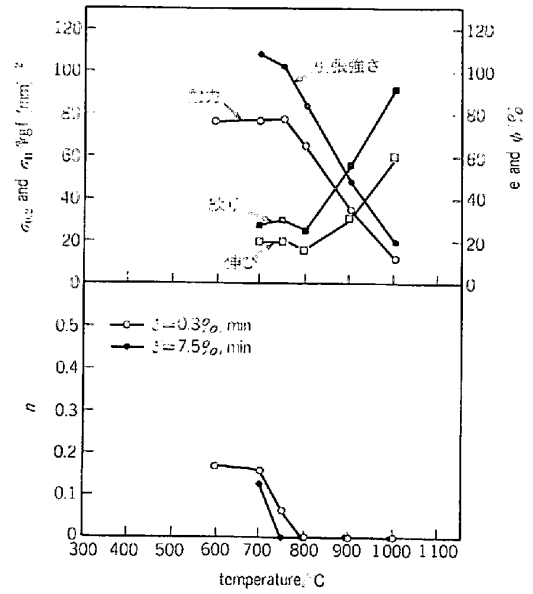


図11 Waspaloy (No. 25)

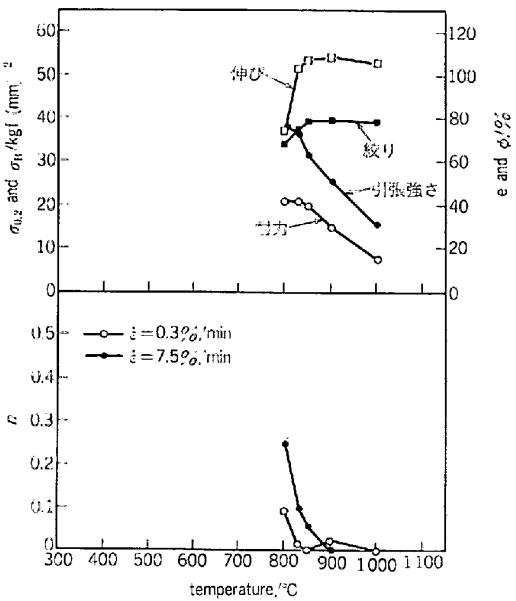


図10 Hastelloy X (No. 22)

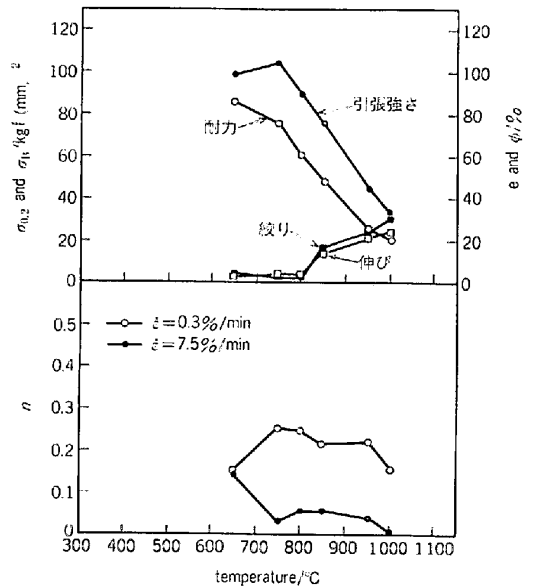
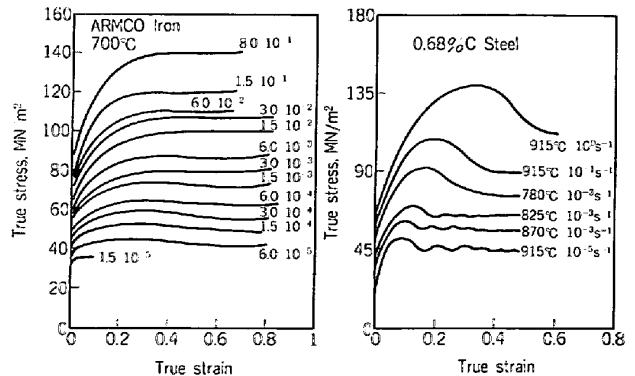


図12 IN738LC (No. 26)

るともはや再結晶はおこらなくなり、Al型と同じように動的回復だけで釣り合う状態になるものと考えられる。しかし、オーステナイトで動的回復のみで加工硬化と釣り合ったという実験事実を示した研究は見当たらない。しかし、クリープのように高温・低ひずみ速度での定常クリープでは、オーステナイトでも動的回復のみで加工硬化と釣り合っているものと考えられる。これらを総合して考えると、釣り合い開始ひずみが0.5%以下であれば、やはり加工硬化のおこらない $n=0$ の温度範囲があつてもよいはずである。

今ひとつ考慮せねばならないのは動的ひずみ時効現象である。動的ひずみ時効をおこす温度及びひずみ速度の範囲では加工硬化のひずみ速度及び温度の逆依存性がお



(a) フェライト (b) オーステナイト

図13 フェライト (Al型) およびオーステナイト (Cu型) の典型的な真応力-真ひずみ曲線

こる。すなわち、ひずみ速度が大きいほど加工硬化が小さいという現象がおり得る。また、温度が高いほど加工硬化が大きいこともおり得ると思われる。さらに、炭素鋼などにおいては 700~800°C 付近で ($\alpha+\gamma$) 二相となり、オーステナイトはフェライトより強くてしかも加工硬化率が大きいので、この範囲では温度が上がるほどオーステナイト量が多くなり、逆温度依存性がおり得るわけである。

以上のような基本的考えに沿って本試験結果を見れば、実験の誤差も考慮して十分に理解できる結果が得られていると思われる。

最後に $n=0$ の意味と問題点について簡単に触れておく。 n 値が 0、つまり加工硬化がおこらなくなる場合にはその温度の耐力および引張強さはひずみ速度のみによって決定されるようになるので、高温引張試験より求める 0.2% 耐力及び引張強さで示される機械的性質が加工硬化をおこすような低温試験の場合とその持っている意味が異なってくるので注意せねばならない。つまり、加工硬化が認められなくなるような温度での JIS G 0567 の結果を設計のための材料評価に用いるときは、そのデータの判断に注意せねばならない。ただし、 $n=0$ となる温度は超合金を除き一般に各材料ともその標準使用温度よりかなり高温側にある。

$n=0$ となる温度以上における条件での高温引張試験として JIS G 0567-1978 を適用しても差し支えはないが、その結果の判断を間違えないように配慮する必要があると同時に、そのような場合の引張試験について今後とも検討を続ける必要がある。

4. ま と め

代表的な耐熱鋼、耐熱合金の高温における加工硬化指数 (n 値) を試験温度の関数として測定して、高温構造物設計のためのデータを提供することを主目的とし、さらに、JIS G 0567-1978 の適用は $n=0$ となる温度以下が合理的であるという考えに基づいて、その適用限界の目安を各種材料について決めることを副次的目的として第7回共通高温引張試験を実施し、次のような結果を得た。

(1) 耐熱鋼として使用される代表的な炭素鋼、Mn-Mo 鋼、Cr-Mo 鋼、12Cr 鋼、オーステナイト系ステンレス鋼 (鋳鋼を含む)、各種超合金の JIS G 0567-1978 に基づく引張試験を行ったときの n 値と温度の関係を具体的な有用なデータとして作成した。

(2) 動的ひずみ時効または $\alpha\rightarrow\gamma$ 変態に起因すると思われる、 n 値の逆ひずみ速度依存性や逆温度依存性を明らかにした。この現象は主として炭素鋼、低合金鋼、Cr 鋼において観察された。

(3) $n=0$ になる温度をすべての鋼、合金について求めることは困難であったが、だいたいの温度を予測しう

る基準を作ることができた。すなわち、オーステナイト系 (304, 316) ステンレス鋼では約 900°C 付近、Mo, Ti, Nb 含有オーステナイト系ステンレス鋼では 1000°C~1100°C にあつた。超合金では案外に低温で、800°C~1000°C 付近にあるものもあるが、0.2% 耐力及び引張強さはほとんど加工硬化をおこさないような高温にあつても高い強度水準を示すことを明確にした。

(4) $n=0$ になる温度以上の温度で JIS G 0567-1978 を適用して引張試験をした場合の結果の判断に注意せねばならないという問題提起を行った。

これらの結果は高温構造物設計に有用な情報を提供するものと信ずるものである。このような有益な成果をあげることができたのは、この共通試験に参加して御協力いただいた 14 機関およびその試験担当者の皆様、データ整理に当たっていただいた小委員各位の御努力のお陰である。厚く感謝いたします。

付 録

鋸歯状荷重-伸び曲線からの耐力及び引張強さ読み取り法の一案

高温強度研究委員会 (旧クリープ委員会) 高温引張試験分科会の第5回共通引張試験 B 試験 (1972)⁵⁾⁷⁾ において、ボイラー用圧延鋼材 SB 42 を用いて JIS G 0567 に沿って、動的ひずみ時効をおこす条件 (試験温度 200°C) で種々な試験を行った。そして、試験機の種類、ひずみ速度制御法の相違による鋸歯状 (セレーション) 荷重-伸び曲線の現れ方を検討した。セレーションをおこす条件では標点間ひずみ速度自動制御法ではハンチングをおこして異常に不規則な荷重-伸び曲線となるので、このような場合にはクロスヘッド移動速度一定制御を行うことが好ましいことを示した。1つの問題を提起したわけである。この共通試験結果をふまえて 1978 年に改訂された JIS G 0567 の解説では、セレーションを生ずるような材料及び試験温度ではクロスヘッド一定速度による引張試験が推奨された。そして、このような場合の降伏点または耐力の求め方については当事者間の協定によることが示されている。

クロスヘッド移動速度一定制御をしても、動的ひずみ時効をおこす条件ではセレーションをおこす事は避けられない。試験法に関係せずに材質によると考えられるセレーションを示す場合、当事者間の協定によるとしてもその拠り所とする読み取り法の基準を作っておくことが望まれる。そこで 1978 年 (昭和 53 年) に各機関で、このような場合どのようにして耐力や引張強さを求めているかについて実情をアンケート調査した結果、回答のあつた 10 機関のうちセレーションの上端を連ねた線で求めるものが 5 機関、セレーションの振幅の平均値をとっているものが 5 機関あり、完全に 2つの方法に割れていた。本分科会として意見を集約し、1つの基準をつくることが望まれたので、1979 年 (昭和 54 年) 5 月 23 日

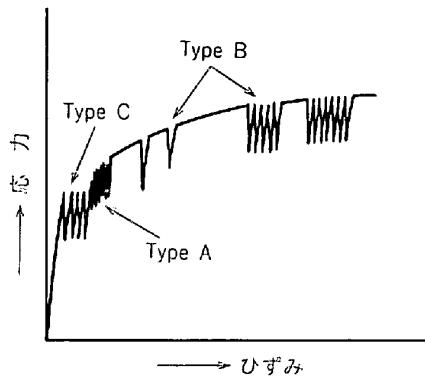


図14 侵入型の不純物を含む体心立方金属に観察される三種のセレーションの模式図¹²⁾

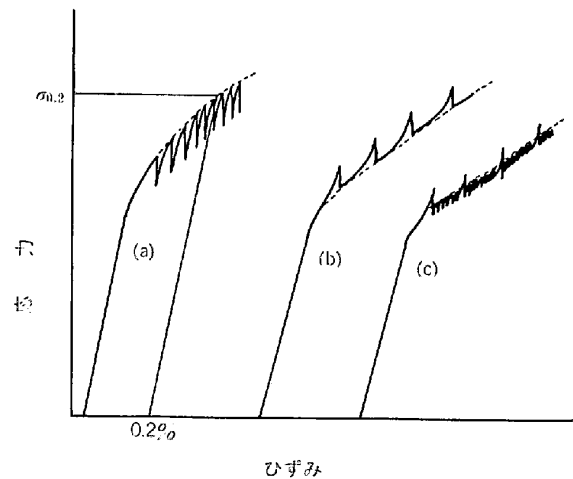


図17 0.2% 耐力の求め方の提案図

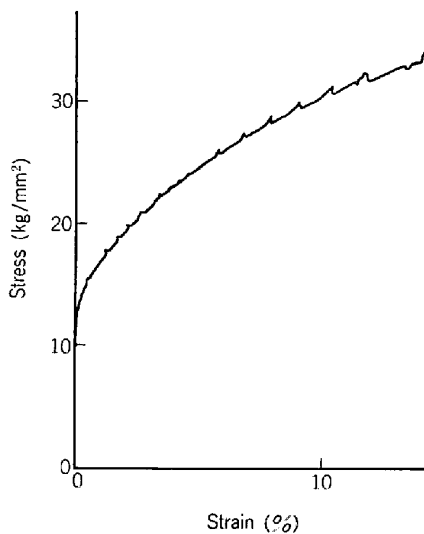
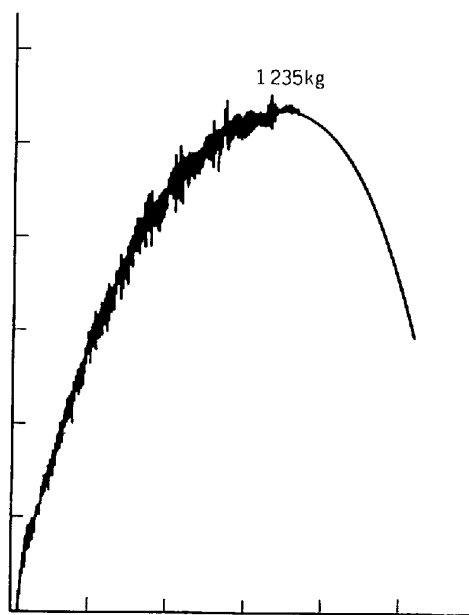


図15 304 ステンレス鋼に現れたセレーションの例
試験温度600°C, ひずみ速度 7.5%/min



鋼種: 0.61%C-0.21%Si-0.5%Mn 鋼
試験温度 200°C, ひずみ速度 10%/min
図16 不規則な形状のセレーションの例

に開催された小委員会(表4)において検討し、さらに時間をおいて、1981年(昭和56年)11月20日の分科会においてかなり突込んだ検討を行った。

このような検討の結果、比較的整然としたセレーションを示す場合についてのみその読み取り基準を提案することになった。すなわち、セレーションをおこしている荷重-伸び曲線から耐力及び引張強さを読み取る基準として、次の方法を高温引張試験分科会として提案する。

(1) 上降伏点、下降伏点が現れるときは降伏点として下降伏点を採用する。これは JIS G 0567-1978 に規定されている(細部についてはその解説を参照)。

(2) 荷重-伸び曲線にセレーションが現れる場合、吉永¹²⁾によると侵入型不純物を含む体心立方金属(鋼)において現れるセレーションの形には、図14に示すような3つのタイプがある。A型は振幅が比較的小さく、加工硬化が大きい。B型は比較的高温領域でおこるもので、振幅が大きく加工硬化は小さい。C型は比較的高温でひずみの小さい領域(変形初期)におこり、振幅は比較的大きい。もちろん、実際の鋼の場合にはこれらの混合型も現れる。置換型原子が原因する場合には図15に示すようなセレーションも現れる。さらに、図16の最高荷重付近にて示されるような不規則な型のセレーションが現れる場合もある。このようなセレーションを伴うときの耐力の求め方として、図14のA、B、C型のものでは図17(a)に示すようにセレーションの上端を連ねた線で求める。図15またはそれと図14が混合したような場合は図17(b)(c)のように求める。すなわち、突出部を除いたセレーションの上限とする。図16の最高荷重付近の例や、その他の複雑な不規則な曲線の場合には当事者相互の判断による協定によらねばならない。

(3) 引張強さ(σ_B)に関しても上記(2)に準ずるものとする。

文 献

- 1) 平 修二: 鉄と鋼, 54 (1968), p. 87
- 2) 平 修二: 鉄と鋼, 55 (1969), p. 932
- 3) 平 修二: 第3回共通高温引張試験結果について
日本鉄鋼協会クリープ委員会 (1970年7月)
- 4) 平 修二: 第4回共通高温引張試験結果について
日本鉄鋼協会クリープ委員会 (1971年3月)
- 5) 田村今男: 第5回共通高温引張試験結果について
日本鉄鋼協会クリープ委員会 (1972年3月)
- 6) 田村今男: 第6回共通高温引張試験結果について
日本鉄鋼協会クリープ委員会 (1977年3月)
- 7) 田村今男: 鉄と鋼, 64 (1978), p. 338
- 8) 田村今男: 第7回共通高温引張試験結果について
日本鉄鋼協会高温強度研究委員会 (1981年3月)
- 9) J-P. A. IMMARIGEON and J. J. JONAS: Acta
Met., 22 (1974), p. 1235
- 10) 牧 正志, 田村今男: 材料, 30 (1981), p. 211
- 11) R. A. PETKOVIC, M. J. LUTON, and J. J.
JONAS: Can. Met. Quart., 14 (1975), p. 137
- 12) 吉永日出男: 日本金属学会会報, 10(1971), p. 519