

委員会報告

UDC 539.4.011 : 620.172.251.22 : 669.14.018.8 :
669.15'24'26-194.56 : 669.14.018.85

第 5 回および第 6 回共通高温引張試験結果について*

田 村 今 男**

On the 5th and 6th Comparative High Temperature Tensile Testings

Imao TAMURA

1. は じ め に

日本鉄鋼協会クリープ委員会で原案を作成した高温引張試験に関する JIS 規格が 1966 年に制定された (JIS G0567)。それ以来、6 回にわたって共通試験を行ない種々な検討がなされた。第 1 回¹⁾ (1968) はこの規格によつて試験した場合の再現性、規格の不備な点の発見などを目的として行なわれた。第 2 回²⁾ (1969)、第 3 回³⁾ (1970) および第 4 回⁴⁾ (1971) は、この規格によつて測定されたときの種々な鋼の高温引張性質をデータシートとして収録するための共通試験であつた。もちろん、その間にこの JIS 規格の問題点もクローズアップしてきた。

すなわち、(1) 試験機のエレクトロニクスの発達により標点間ひずみ速度自動制御が普及してきたので、手動制御 (クロスヘッド移動速度制御を含む) との有意差の有無、データのバラツキなどを検討する必要がある。(2) 降伏点のおどり場 (Lüders 伸び) や 200°C 付近でおこる鋸歯状応力-ひずみ曲線 (serration) のような変則的な曲線を描く場合の負荷の制御方法の検討を必要とする。さらに、(3) 高温ガス炉 (原子炉) 用耐熱材料のような 1000°C 以上で使用される耐熱材料のこのような超高温における引張試験に対して、JIS G0567-1966 を適用してよいかどうかを検討する必要性が生じてきた。

上記(1)および(2)の問題を検討するために第 5 回共通高温引張試験がクリープ委員会高温引張試験分科会で行なわれた (1972 年)。その結果はクリープ委員会から関係機関に報告された (1972 年)⁵⁾。その後、(3) についての第 6 回共通試験を行ない、同様な報告書が配布された (1977 年)⁶⁾。

また、第 5 回共通試験結果をふまえて、1973 年に JIS G0567-1966 の改正案を工業技術院に申請した。しかし 1976 年に行なわれた改訂では字句の訂正だけにとどまつ

た。それは多分、クリープ委員会でひつつづきこの規格の検討が行なわれており、再度改正案が提出されるであろうことを考慮されたものと思われる。それで、最近、クリープ委員会高温引張試験分科会では第 5 回と第 6 回の共通試験の結果を盛り込んだ改正案を完成した。近日中に工業技術院に申請する予定である。

これを機会に、これらの共通高温引張試験結果の概要について報告する。

2. 第 5 回共通高温引張試験結果

2.1 経緯と目的

過去 4 回の共通試験のあとをうけて、1971 年度のクリープ委員会高温引張試験分科会の事業として、第 5 回共通高温引張試験を行つた。これらの結果は 1972 年に報告書としてまとめ関係機関に配布した⁵⁾。この第 5 回共通試験は A 試験と B 試験に分けて行つた。

A 試験では同一鋼材を各機関に配布して、JIS の規定に従つて高温引張試験を行ない、標点間自動制御と手動制御 (クロスヘッド移動速度制御を含む) との間の有意差の有無、データのバラツキの調査を行ない、JIS 試験方法の評価を行なうことを目的とした。

B 試験では降伏点におけるおどり場 (Lüders 伸び) や 200°C 付近でおこる鋸歯状応力-ひずみ曲線 (Serration) など変則的な曲線を描く場合の負荷の制御方法の検討を目的とした。

2.2 A 試験

供試材はスペシメンバンク材としてクリープ委員会で管理している SUS27B 材 (旧規格、新規格では SUS 304) を使用した。大同製鋼から提供された鋼で製造履歴、化学成分などについてはきわめて慎重に検討された鋼である。固溶化熱処理した 38 mm ϕ $\times$ 1000 mm 材より、38 mm ϕ 長さ 130~150 mm のものを採取し、乱数表によつて各機関に 10 本宛配布した。

* 昭和 52 年 8 月 8 日受付 (Received Aug. 8, 1977)

** 日本鉄鋼協会クリープ委員会高温引張試験分科会主査
京都大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Kyoto University, Yoshidahonmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606)

表1 第5回共通試験参加機関名

愛知製鋼(株)研究部
石川島播磨重工業(株)技術研究所
川崎製鉄(株)技術研究所
川崎重工業(株)技術研究所
金属材料技術研究所材料試験部
久保田鉄工(株)鋳鋼研究部
(株)神戸製鋼所中央研究所
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
大平洋金属(株)直江津工場
大同製鋼(株)中央研究所
東京芝浦電気(株)総合研究所
日新製鋼(株)研究開発本部周南研究所
日本鋼管(株)技術研究所
(株)日本製鋼所室蘭製作所研究所
日本ステンレス(株)技術部
日本特殊鋼(株)研究所
日本冶金工業(株)川崎製造所研究部
(株)日立製作所日立研究所
三菱重工業(株)神戸研究所

表2 各機関で使用了した引張試験機
(第5回共通試験)(順不同)

試験機関名	試験機の種類
a*	インストロン型, IS-10T
b*	油圧型, RU10-10T
c*	インストロン型, IS-10T
d	油圧型(アムスラー式), 20T
e	インストロン型, IS-10T
f	インストロン型, IS-10T
g	インストロン型, 10T
h*	インストロン型, IS-20T
i	インストロン型, TTDM-L・10T
j	油圧型, RU30T
k	インストロン型, IS-10T
l*	油圧型, REH30T
m	ねじけん引式30T
n	インストロン型, IS-10T
o	インストロン型, TTDM・10T
p	インストロン型, IS-10T
q	油圧型, RH100, 100T
r	油圧型電子管式20T
s	油圧型, RU10
t	油圧型, RH10

* 印はA, B両試験に参加した機関, 他はA試験のみ参加。

各試験機関で上記素材より試験片を作成した。その形状は直径10mm, 標点間距離50mmのJIS試験片である。試験温度は室温および650°Cの二種, 試験方法はJIS G0567-1966の規定に従う。各温度で5回繰返し試験を行なう。本共通試験に参加した機関は表1に示す20機関であり, 各機関で使用了した試験機は表2に示すものであった。室温および650°Cのそれぞれの温度における0.2%耐力, 引張強さ, 破断伸び, 絞りを報告事項とした。あとで1%耐力または0.5%耐力の報告も

追加要請したが, 報告数は少なかった。

これらのデータの解析は

(1) 全機関から報告されてきた0.2%耐力, 0.5%耐力, 引張強さ, 破断伸びおよび絞りのそれぞれについての全データを室温と650°Cに分けて一元配置により解析し, F検定を行って機関間のバラツキを検討した。

(2) インストロン型と油圧型の試験機によつてデータを分けて(1)と同じ検定を行ない機関間のバラツキの試験機による相違を検討した。

(3) ひずみ速度制御を標点間自動制御と手動制御(インストロン型クロスヘッド移動速度制御を含む)に分けて(1)と同じ検定を行ない, ひずみ速度制御方法によつて機関間のバラツキの相違を検討した。

2.3 A試験の結果と考察

非常に沢山の試験結果のデータや, ヒストグラム, 分散分析表などをここで示すだけの余裕はないが, 報告書⁵⁾にはある程度くわしいデータを示しているのので, 必要に応じて参照して頂きたい。ここでは結論的な結果だけを述べる。

全データによる分散分析では

(1) 室温試験での伸びおよび絞り, 650°Cでの0.2%耐力, 0.5%耐力, 伸び, 絞りにおいて非常に少数の飛び離れて違つたデータがあつた。

(2) 0.2%耐力, 0.5%耐力, 引張強さのばらつきは比較的少ないが, 伸び, 絞りはかなりばらついている。

(3) F検定の結果, 引張強さと絞りのデータで機関間で明瞭な有意差のあることが認められた。

(4) 機関間ばらつきの大きさと, 機関内ばらつきの大きさを比較すると, 引張強さは機関間のばらつきの方が大きく, 室温と650°Cを比較するとあまりばらつきの差はないが650°Cの方が絞りのばらつきが少し多いようである。

(5) 機関によつて, 機関内ばらつきの小さい機関もあればかなり大きな機関もある。

インストロン型と油圧型に分けて検定すると,

(1) 油圧型の方が明らかにばらつきが大きい。

(2) しかし, このばらつきは機関内のばらつきが大きいので, そのために機関間のばらつきは油圧型の方が少なく現れた。

自動制御と手動制御に分けて検定すると,

(1) 0.2%耐力は自動制御の方がばらつきが少なく温度では650°Cの方が少ない。

(2) 0.2%耐力は手動制御の方が機関間の有意差が少ないようにみえる。それは機関内ばらつきが比較的大きいためである。

(3) 自動制御インストロン型, 自動制御油圧型, インストロン型クロスヘッド速度制御, 手動油圧型の4区分に分けて0.2%耐力のデータを分析すると, この順にばらつきが大きくなり, 油圧手動は最もばらつきが多

い。それは機関内のばらつきが大きいわけである。

なお、ここで標点間自動制御をした試験として取扱ったデータでも、それは0.2%を超えた所までで、それ以後はクロスヘッド制御あるいは手動制御に切換えているのが普通であるので、0.2% 耐力以外の性質を比較しても意味はないので行っていない。

以上のように JIS G0567-1966 に準拠した共通試験で比較的良好な結果が得られた。特に0.2% 耐力では機関間の有意差が少なかった。しかし細かくみると、引張強さ、伸び、絞りにおいてばらつきがあり、機関間の有意差が案外大きかった。これは、降伏点(0.2%)通過後のひずみ速度、すなわち $7.5 \pm 2.5\%/min$ の JIS 規定に問題があるのではないかと考えられる。また、油圧による手動制御を行なうときは、その作業標準を詳細に規定し、機関内ばらつきをもう少し小さくする必要がある。

2.4 B試験

供試材としてはボイラ用圧延鋼材 SB42 を用いた。これは神戸製鋼所において製造し、提供して頂いたものである。転炉大気中溶解し、Si-Al 脱酸した10 t インゴットを熱間圧延(圧延比12.4)した。化学成分は次のようである。

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Al
%	0.18	0.19	0.70	0.017	0.017	0.07	0.010

900°C 焼ならしの後、Bottom 部から圧延方向に試料採取。各機関に $50 \times 70 \times 700$ の板を配布した。これから18~20本の試片がとれる。

A試験と同じ試験片を作製し、試験温度は室温と200°Cとする。200°Cを選んだのは予備試験の結果、この温度で最も顕著な鋸歯状応力-ひずみ曲線が観察されたからである。試験方法はA試験と同様にJIS規定に従って行なうが、ひずみ速度制御方法はクロスヘッド移動速度制御によるものと、標点間ひずみ速度自動制御によるものの2種を同一試験機、同一条件で、各試験それぞれ3本宛試験を行ない、比較検討する。すなわち、2つの負荷制御方式についてそれぞれ繰返し数3、室温と200°Cで合せて12本となる。試料機はインストロン型又は油圧型を用いた。

この試験に参加した機関は表2に示す5機関であった。

2.5 B試験の結果と考察

図1~図6は代表的な荷重-伸び曲線を示す。室温では図1、図2に示すように標点間自動制御も、クロスヘッド移動速度制御もほとんど変りのない曲線を示し、しかも変則的ではない。200°Cの鋸歯状(セレーション)を示す温度では、図3または図5のように、クロスヘッド移動速度制御では試片の変形挙動に忠実と思われるようなセレーションを描くが、標点間自動制御の場合には図4、図6のように全くイレギュラーな曲線となる。

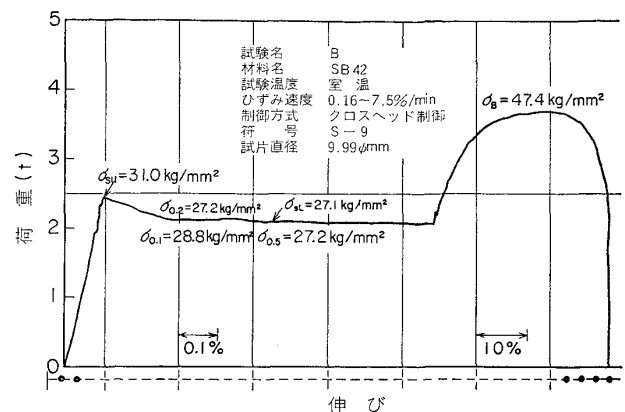


図1 第5回B試験
インストロン型 室温
クロスヘッド制御のときの荷重-伸び曲線の一例

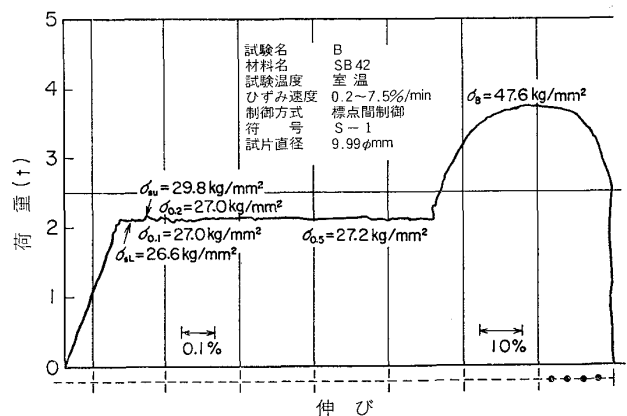


図2 第5回B試験
インストロン型 室温
標点間自動制御のときの荷重-伸び曲線の一例

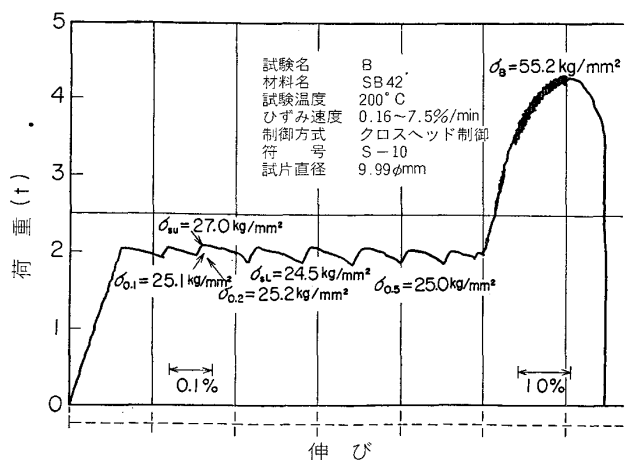


図3 第5回B試験
インストロン型 200°C
クロスヘッド制御のときの荷重-伸び曲線の一例

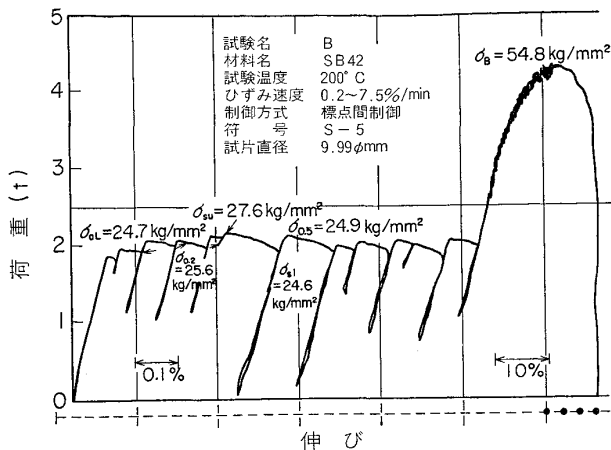


図4 第5回B試験
インストロン型 200°C 標点間自動制御のときの荷重-伸び曲線の一例

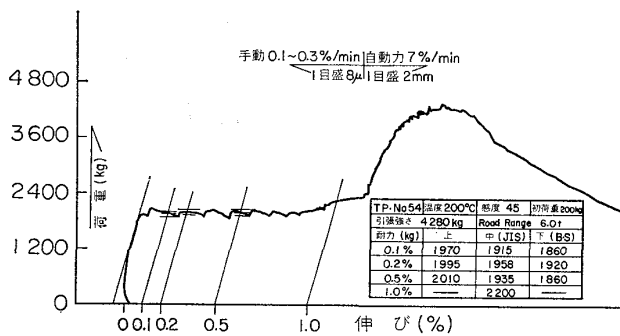


図5 第5回B試験
油圧型 200°C クロスヘッド手動制御のときの荷重-伸び曲線の一例

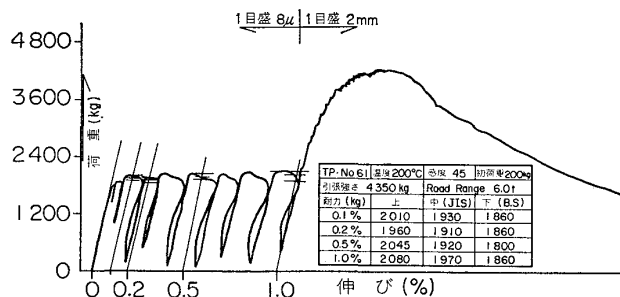


図6 第5回B試験
油圧型 200°C 標点間自動制御のときの荷重-伸び曲線の一例

以上の結果からわかるように、セレーションをおこすような条件のときには標点間ひずみ速度自動制御を行なうことには明らかに問題がある。

もともとセレーションをおこすような条件下で標点間自動制御をさせるのは試験機の性能限界を超えている。すなわち、セレーションをおこすときは試験片は急に大きく伸びたり、あまり伸びなかつたりするわけであるから、試験機は一定のひずみ速度を保持しようとして、クロスヘッドを急に停止に近い状態にしたり（場合によ

表3 第5回共通試験データ整理小委員会委員

		氏名及び所属			
主査員	田村	今男	(京大)	氏名及び所属	
	大三	南正	(立命館大)		
査員	横井	俊信	(同志社大)	氏名及び所属	
	行太	照定	(金属材料技研)		
幹事	砂本	大徳	(住友金属)	氏名及び所属	
	前田	雄造	(三菱重工業)		
幹事	松田	美三	(川崎重工業)	氏名及び所属	
	増田	鶴喜	(島津製作所)		
幹事	時実	正一	(東京製鋼)	氏名及び所属	
	大曾	弘毅	(鉄鋼協会)		

ては逆方向に走らねばならない), 次の瞬間には正方向に早く走るようにしなければならない. このような異常ひずみ信号が制御系に導入されて, ハンチングをおこすことになる. もちろん GAIN と DAMPING を微妙に調節すればある程度は応答できるようにはなるが, 不安定であり, 現実的ではない. また, 一方向自動制御方式も考えられないことはないが, セレーションをおこすような条件ではクロスヘッド移動速度制御を行なうのが現実的な解決策である.

次に, 図1, 2, 3, 5に示されるような曲線から, どのようにして降伏点や耐力を読みとるかという問題がある. これについては, 問題提起だけにとどめる.

なおこれらのデータ整理には表3に示すような小委員会を編成してこれを行なった.

3. 第6回共通高温引張試験結果

3.1 経緯と目的

石油化学プラント, ガスタービン, ジェットエンジンなどにおいては次第に高温で運転されるようになり, 使用される超合金などの耐熱材料は 1000°C 以上の高温における性能が問われるようになって来た. また, 昭和48年(1973年)から大型プロジェクトとして「原子力製鉄」が取り上げられ, この目的のための 1000°C 以上で稼動する高温ガス炉用耐熱材料が最も大きな問題の一つとしてクローズアップしてきた. そして, これらの耐熱材料の高温特性を知るための基本的な試験の一つとして高温引張試験があり, JIS G0567-1966 が唯一の試験方法である. それ故, 各機関ではこの JIS 法に則つて 1000°C を超える温度での引張試験が数多く行なわれるようになってきた. そして, 800°C 以上の超高温における試験法として JIS G 0567-1966 は必ずしも十分とはいえないという指摘がなされていた.

このような背景において, 当クリープ委員会高温引張試験分科会では昭和48年(1973年)度以降の事業として, 共通超高温引張試験をとり上げ, そのための調査として「1000°C 付近における超高温引張試験方法に関するアンケート調査」及び「現在実施している 1000°C 付

表 4 第 6 回共通試験方案作成小委員会委員

氏 名 お よ び 所 属	
主査兼小委員長	田 村 今 男 (京 都 大 学)
委 員	横 井 照 信 (金 都 大 技 研)
〃	行 俊 定 夫 (住 材 友 金 研)
〃	太 田 彰 一 (神 戸 同 製 鋼)
〃	福 井 重 正 (大 崎 重 工)
〃	清 砂 本 大 (川 崎 重 工)
〃	森 田 正 造 (ト ヨ タ 自 工)
事 務 局	大 曾 根 毅 (鉄 鋼 協 会)

表 5 第 6 回共通試験データ整理および報告書作成小委員会委員

氏 名 及 び 所 属	
小委員長	田 村 今 男 (京 都 大 技 研)
委 員	横 井 照 信 (金 都 大 技 研)
〃	行 俊 定 夫 (神 戸 同 製 鋼)
〃	太 田 彰 一 (大 崎 重 工)
〃	福 井 重 正 (川 崎 重 工)
〃	清 砂 本 大 (ト ヨ タ 自 工)
〃	森 田 正 造 (鉄 鋼 協 会)
事 務 局	大 曾 根 毅 (鉄 鋼 協 会)

表 6 第 6 回供試材の化学成分

		Heat. No.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co	Al	Fe
A	インコネル 617	XX01A3US	0.07	0.16	0.05	—	0.004	57.35	20.30	8.58	11.72	0.76	1.01
		XX01A4US	0.08	0.13	0.04	—	0.005	53.55	21.56	9.96	12.20	1.01	1.46
B	HK 40		0.41	0.98	0.58	0.014	0.015	20.58	25.96	—	—	—	残

表 7 第 6 回共通試験参加機関名 (順不同)

- 三菱重工業(株)高砂研究所
 - 日本鋼管(株)技術研究所
 - 金属材料技術研究所鉄鋼材料研究部
 - 日本特殊鋼(株)研究所
 - トヨタ自動車工業(株)第 5 技術部
 - 川崎重工業(株)技術研究所
 - 日新製鋼(株)周南製鋼所研究部
 - 大同製鋼(株)技術開発本部中央研究所
 - 大太平洋金属(株)直江津工場
 - 川崎製鉄(株)技術研究所
 - 日立金属(株)安来工場
 - 住友金属工業(株)中央研究所
 - (株)日立製作所日立研究所
 - 日本冶金工業(株)川崎製造所研究部
 - (株)神戸製鋼所中央研究所
 - 石川島播磨重工業(株)技術研究所
 - 新日本製鉄(株)製品技術研究所
 - 久保田鉄工(株)鋳物技術研究所鋳鋼研究部
- (○印は項目別取まとめ分担機関)

近における超高温引張試験に関する調査」を行つた (昭和 48 (1973), 49 (1974) 年度). これらの詳細なアンケート結果をもとに超高温共通引張試験方案の検討, 各試験機関への試験分担割当及び供試材としてインコネル 617, HK40 の 2 鋼種を決定して, 昭和 50 年 (1975) 年度に共通試験が実施された. この試験結果の取りまとめは昭和 50 年 (1975) 12 月に終了した.

第 6 回共通試験の目的は上記の背景とアンケート結果をふまえて, JIS G 0567-1966 を 800°C 以上の超高温にも適用できるように改正するための基礎的データを得ることを目的とした.

この共通試験方案の作成のために表 4 に示すメンバーよりなる小委員会を編成し, また試験結果の整理および報告書作成などのために表 5 のような小委員会を編成して実務に当つた.

3.2 試験方法

供試材としては, インコネル 617 (A 試料) と HK40 (B 試料) を用いた. インコネル 617 はハステロイ X とともに塑性加工可能で, しかも 1000°C 付近でも使用できる耐熱材料として注目されているものの一つである. HK40 は 1000°C 付近の高温で化学工業用に最も多く使用されている耐熱鋳鋼である. いずれも共通試験した結果のデータそのものも有益なものである. インコネル 617 は石川島播磨重工から, HK40 は神戸製鋼から提供して頂いた. 化学組成を表 6 に示す.

本共通試験に参加した機関は表 7 に示す 18 機関であつた. あらかじめ調査した各機関の実情を勘案して試料の種類, 試片寸法, ひずみ速度, 雰囲気などの試験条件を割当てたが, 細部の試験条件 (例えばチャックの種類, 標点のつけ方, 伸びの測定法など) については各機関の実情にまかせた. しかし試片寸法は原則として丸棒とし標点距離は特別な場合を除き直径の 5 倍とする. 試験温度は室温, 600, 800, 1000, 1100, 1200°C とし, 実情に応じて割当てた. 所定温度に達した後の保持時間は 15 min とする. ただし, 2 機関で保持時間の影響をみるために 60 min 保持後の試験も行つた. ひずみ速度の影響をみるための試験では, 次表 6 条件のひずみ速度のうち 5 条件を選択して試験した. 試験温度は 1000°C または 1200°C とした. 雰囲気は実情に応じて, 空气中, 真空中, アルゴン中を割当てた. 同一条件での試験の繰返数は 1 回ないし 3 回とした.

	0.2%耐力まで	それ以後	備 考
1	0.1%/min	7.5%/min	JIS G0567 法 速度を変えない
2	0.3%/min	7.5%/min	
3	3%/min	7.5%/min	
4	0.3%/min	3.0%/min	
5	0.3%/min	20.0%/min	
6	7.5%/min	7.5%/min	

表8にはこの共通試験に使用された試験装置と試験片の要点を示す。試験機の型式、ひずみ速度制御方法などはまちまちである。

3.3 試験結果と考察

試験温度の影響についてはJIS G 0567-1966 に従った試験法によつて測定したデータを用いて試験温度の影響をみると図7～図10のようである。温度が上るほど強さは下り、伸び、絞りは一昇するが800～900°Cの間でかなり急激な変化がある。これらのデータの統計的処理によつて、温度精度はJIS G 0567-1966 の±6°C程度でよいことがわかつた。

試験片寸法の影響では、標点距離が直径の5倍を守れば、ほとんど試片寸法効果は現れない。1000°C付近の高温におけるひずみ速度の影響をみることは最も重要で

表8 第6回共通試験における引張試験方法一覧

試験機関 番 号	試験機の 形式 1)	試 験 雰 囲 気	発熱体の 種 類	最高試験 温度 (°C) 2)	試験片 標点部寸法 (mm)	伸び計有無		負荷方法 3)		備 考
						耐力まで	耐力後	耐力まで	耐力後	
1	I 10 I 10	大気 真空	カンタル カンタル	1000 1000	10φ×50 l 10φ×50 l	○ —	— —	A C	C C	
2	I 10	大気	シリコニッ ト	1200	10φ×50 l	○	○	A	A	
3	I 2	真空	タンタル	1200	6φ×30 l	—	—	C	C	
4	H20	大気	ニクロム	1000	6φ×30 l	○	—	M	M	
5	I 2	真空	モリブデン	1200		—	—	C		
6	I 10	真空	カンタル	1100	4φ×16 l	—	—	C	C	
7	I 10	大気	シリコニッ ト	1200	6φ×30 l	—	—	C	C	
8	I 20 I 20	大気 大気	カンタル カンタル	900 1100	10φ×50 l 10φ×50 l	○ —	— —	A C	C C	
9	H10	大気	カンタル	1000	10φ×50 l	○	○	M	M	
10	I 10 I 5	大気 アルゴン	カンタル カンタル	800 1000	7φ×40 l 7φ×40 l	○ —	— —	C C	C C	
11	I 10	大気	カンタル	1000	6φ×30 l	○	—	A	C	
12	I 10	大気	カンタル	1000	6φ×30 l	○	—	A	C	
13	I 10	大気	カンタル	1100	10φ×50 l	—	—	C	C	
14	I 10 I 10	大気 大気	ニクロム ニクロム	800 1000	10φ×50 l 10φ×50 l	○ —	— —	A C	C	
15	H10	大気	カンタル	1000	10φ×50 l	○	○	M	M	
16	I 10	真空	カンタル	1100	4φ×20 l	—	—	C	C	
17	I 10	大気	カンタル	1100	6φ×30 l	—	—	C		
18	I 5 H10	大気 大気	カンタル カンタル	1100 1100	10φ×50 l 6φ×30 l	○ —	— —	C M	C M	Inconel 617 に使用 HK40に使用

注 1) I はインストロン型, H は油圧型試験機を表わし, 後の数字は荷重容量 (単位 t) を示す。

2) 本共通試験で実施した試験温度の最高であり, 必ずしも試験機の最高可能試験温度ではない。

3) 次の負荷速度制御方法であることを示す。

A: 標点間伸びの信号をフィードバックして一定速度に制御

C: クロスヘッド速度を一定に自動制御

M: ペーサーなどを使用して伸びまたは, 変位を一定速度に手動制御

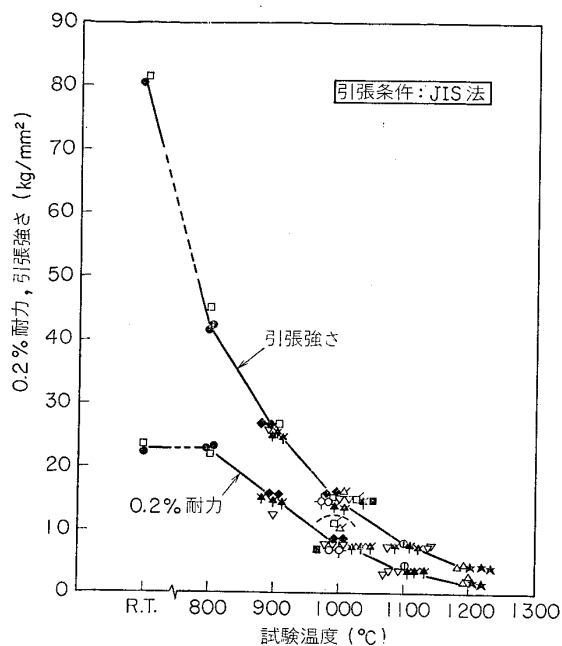


図 7 インコネル 617 の引張強さ、0.2%耐力と温度の関係 (第 6 回)

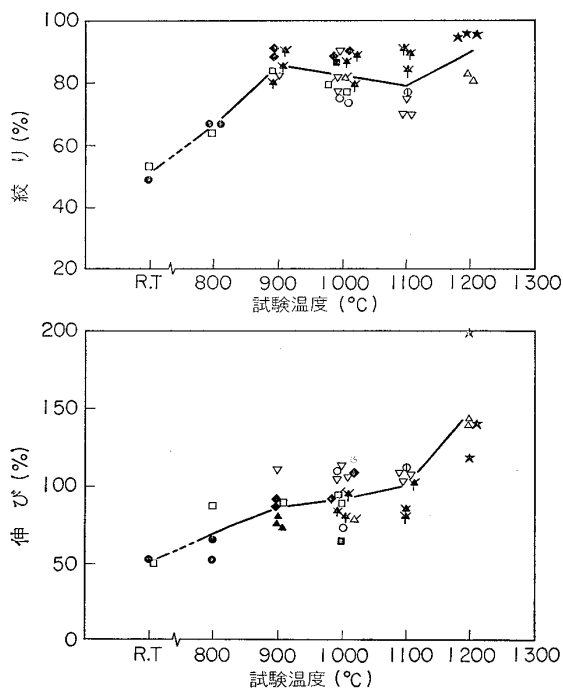


図 8 インコネル 617 の伸び、絞りと温度の関係 (第 6 回)

ある。図 11、図 12、図 13 はそれぞれインコネル 617 の 0.2% 耐力、引張強さおよび HK40 の引張強さのひずみ速度の効果を示す。温度が高くなるほどひずみ速度の依存性が大きくなる。(図で 1200°C でひずみ速度による変化が小さいように見えるが、比率で示せば 1000°C の場合より大きい。) 伸び、絞りについてはひずみ速度の影響はそれほど大きくない。この共通試験に用いた試料はいずれも高温耐酸化性が大きいので、大気中と真

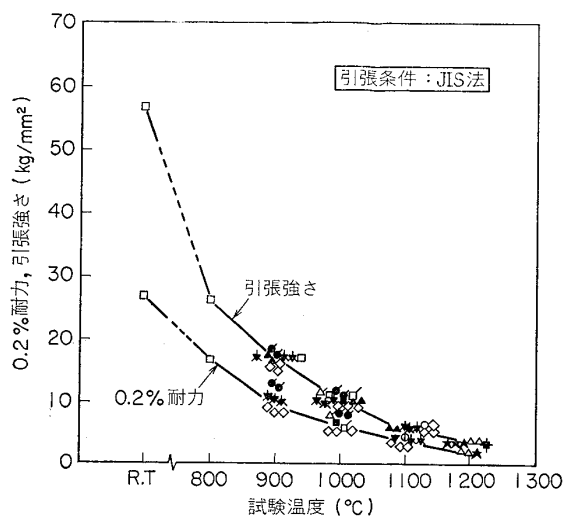


図 9 HK40 の引張強さ、0.2% 耐力と温度の関係 (第 6 回)

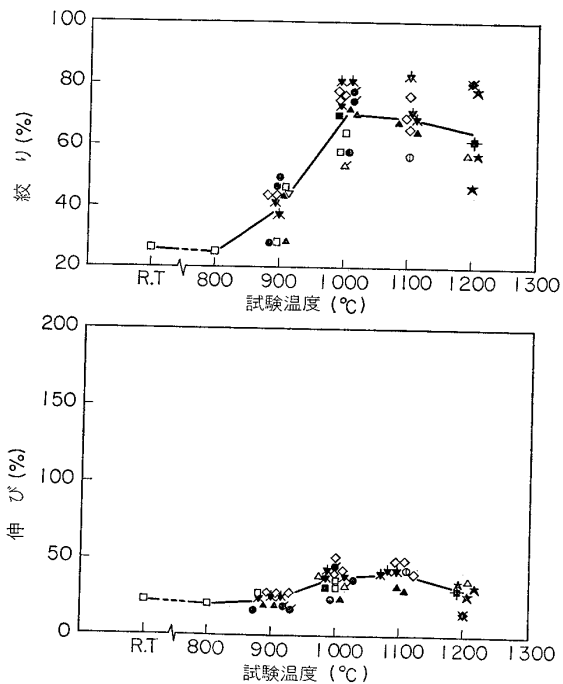


図 10 HK40の伸び、絞りと温度の関係 (第 6 回)

空中、アルゴン中で有意差がみられなかった。

以上は種々な試験条件の影響をみたものであるが、たとえば図 11 と 図 12 をみると、引張強さよりも 0.2% 耐力の方がバラツキが大きく、このバラツキは試験機の種類、ひずみ速度制御方法と関係があるようである。第 6 回共通試験でのひずみ速度制御法を大別すると、(1) 標点間自動制御、(2) クロスヘッド移動速度制御、(3) 油圧手動制御であった。インコネル 617 について 1000°C、ひずみ速度 0.3%/min の条件で上記の 3 方法で得られた荷重-伸び又は荷重時間曲線の例を図 14 に示す。(a) は標点間自動制御 (ひずみ速度切替後はクロスヘッド速度制御)、(b) はクロスヘッド移動速度制御(インス

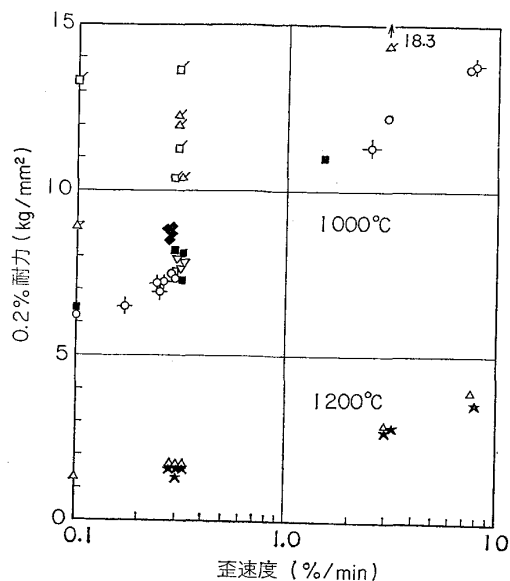


図11 インコネル 617 の 0.2% 耐力と歪速度の関係 (第6回)

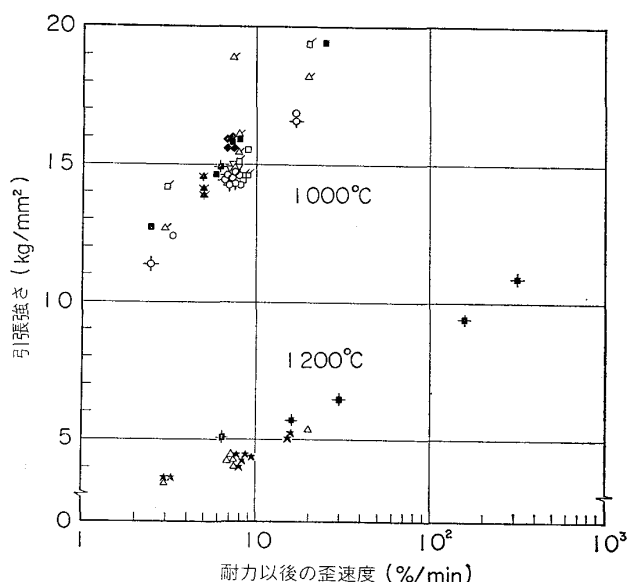


図12 引張強さと耐力以後の歪速度の関係 (インコネル 617) (第6回)

トロン型), (c)は油圧手動制御である。図 14(a)のような、一度高い応力に達して後一定の応力に落ちつく曲線を示す場合、その原因としてほぼ3つの場合が考えられる。まず、ひずみ速度が最初の0からスタートして設定された一定のひずみ速度(この場合 0.3%/min)にならなければならないが、その過渡的状態において制御に時間的ずれがあり、一時的にひずみ速度がオーバーシュートする。このような温度では応力のひずみ速度依存性が大きいのでオーバーシュートした所だけが応力が高く現われる。これは制御系の作動に原因する場合で、制御系の調整を入念に行なう必要がある。ところがいかに制御系がうまく作動しても、本質的に材料そのものの変形挙動によつてこのような曲線を示す場合もある。動的

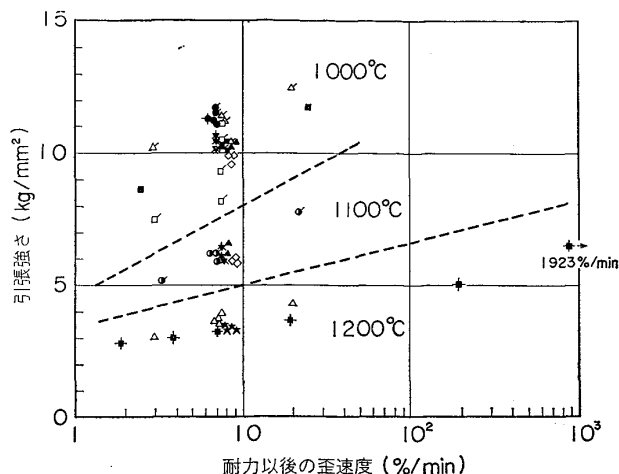


図13 引張強さと耐力以後の歪速度の関係 (HK40) (第6回)

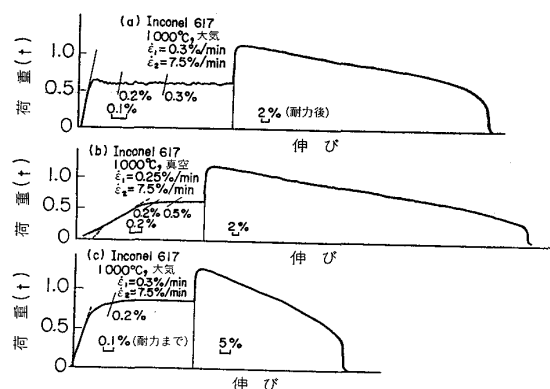


図14 負荷速度制御方法の差による荷重-伸び(時間)曲線の差 インコネル 617, 1000°C
(a) 標点間歪速度自動制御
(b) クロスヘッド等速制御 (インストロン型)
(c) 標点間歪速度手動制御 (油圧型, ストレインペーサー使用)

再結晶⁷⁾をおこす場合であるが、この場合は最大応力を示すひずみは10%以上、30%にも達する場合がある。もう一つの原因は高温降伏現象⁸⁾を示す場合で、このときは1%未満のひずみで最大応力を示すが、鋼や超合金でのこのような現象はいまだ明確でない。

クロスヘッド速度等速制御したときは、標点間ひずみ速度は初期にはひずみ速度低く次第に加速されて一定値に近付き、図 14(b) のようになるのが一般である。耐力付近での標点間ひずみ速度さえ正確であれば正しい耐力を示すわけである。油圧手動制御であつても、ひずみ速度さえ正しければ正しい値を示す。しかし油圧試験機の特長として、加工硬化が低いときは油圧弁開口を一定にしておくとも速度が次第に高くなるので、これを手動で補う必要がある。高温で加工硬化がほとんどゼロまたは負になると追従できずに本来図 14(a) のようになるべきものが図 14(c) のようになることがある。これ

がデータのばらつきの原因になっているように思われる。もちろん、油圧型でも対策はすぐにとれるわけであるから単純に試験機の優劣を断ずることはできない。図 14(a), (b), (c) でみられるように、JIS G 0567-1966 では $0.3\%/min$ 以下から $7.5 \pm 2.5\%/min$ に 0.2% 耐力を超えた所で切替えるのが普通である。この切替をスムーズに行なわないと、急速な静的再結晶をおこして軟化したりまたはクリープ試験中に見られるような内部クラックの発生と成長がおこつて、ひずみ速度が 30 倍にも大きくなるのに、応力がほとんど上昇しなかつたり、場合によつては低下することさえある。また、試片の加熱速度、加熱後の保持時間、耐力を過ぎるまでのひずみ速度によつて引張強さが多少とも変化する。このように、最高荷重に達するまでの荷重と時間の履歴が引張強さや伸び、絞りの結果に影響を及ぼす。

超高温引張試験において最も重要な因子はひずみ速度とその制御である。図 15 は 0.2% 耐力および引張強さのひずみ速度の影響を示したものである。ステンレス鋼のデータは第 1 回共通試験報告¹⁾ による。高温になるほどひずみ速度の依存性が大きい。すなわち、高温になるほど、ひずみ速度を厳密に規定しなければ耐力を求めても意味がない。しかし、規格においてひずみ速度の許容範囲をあまり狭くすることにも問題がある。標準ひずみ速度を規格の中に示すのが最良のように思われる。そして標点間ひずみ速度を自動制御することが推奨される。図 15 でわかるように、 1200°C にもなると耐力と引張強さの区別がほとんど無く、強さは一律にひずみ速度だけで決つてしまうような傾向がある。もちろん材料が変れば、ひずみ速度依存性が変わるので、そこには必ず材料因子は存在するわけであるが、もはや耐力や引張強さは材料特性としてそのまま使用できないような印象をうける。引張試験の意義の限界をみるような気がする。

4. JIS G0567 改正試案

4.1 第 5 回、第 6 回共通試験結果から得たもの

第 5 回および第 6 回共通試験結果は試験片として用いた材料の高温引張性質を示す有益なデータであるばかりではなく、材質上の種々な点についても多くの示唆を与えているが、試験方法を規定する上での重要事項を要約すると次のようである。

(1) 標点間ひずみ速度自動制御により負荷することが最もばらつきが少なく、特に 1000°C 付近の超高温においてはこれが望まれる。しかし現時点で標点間ひずみ速度自動制御を義務づけることには問題がある。

(2) 手動制御を行なうときは、各機関において詳細にその作業標準を作成して機関内のばらつきを小さくするように努力しなければならない。これは JIS 規格以前の問題である。

(3) JIS G0567 では 0.2% 耐力通過後のひずみ速

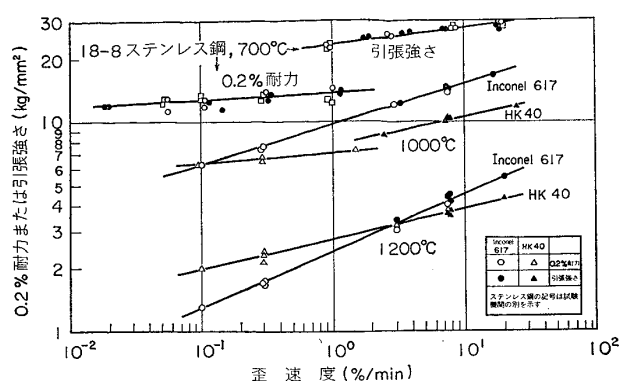


図 15 インコネル 617, HK 40 の耐力、引張強さの歪速度依存性 (1000°C , 1200°C)

度を $7.5 \pm 2.5\%/min$ と規定されているがこの規定に問題がある。ここでいう土は実験精度を示すものではなくて、選択しうるひずみ速度の範囲を示すのであるが、その自由度が広すぎる。標準速度を規定し、高精度の実験が望まれる。

(4) 動的ひずみ時効をおこして鋸歯状応力-ひずみ曲線を示すような材料と条件 (温度とひずみ速度) においては標点間手動制御またはクロスヘッド一定速度制御が好ましい。

(5) 図 1~3, 図 5, 図 14 などの特殊な条件下の変則的な応力-ひずみ曲線では、耐力をどのようにして読み取るか困難な場合が多い。

(6) 1000°C 付近の超高温ではひずみ速度の影響がきわめて大きい。

(7) 高温では室温付近では見られないような変つた形の応力-ひずみ曲線が現れることが多い。その原因としてひずみ速度制御系の調整不備なこともあるが、材料自身に原因する場合もある。制御系の調整に万全を期し原因を明確にしなければならない。このような場合も耐力の求め方はむづかしい。

4.2 主な改正(案)点

上述の共通試験結果をふまえて改正試案を作成した。その主な改正点を述べると次のようである。

(1) 名称

JIS G0567-1976 は鉄鋼材料の高温引張試験方法となっているが、3.1 節で述べたように 800°C 以上の超高温での引張試験の必要性が高くなつて来たが、そのような高温で使用される材料はニッケル基やコバルト基の超合金が中心となる。そのためこの規格をこれらの超合金にも適用できるように改めるばかりではなく、モリブデンやタンタルなどの耐火金属の引張試験の必要性もはや時間の問題と思われるので、本規格の名称を鉄鋼材料および耐熱合金の高温引張試験方法と改める。

(2) 負荷方法

前節 (4.1 節) の (1) (2) (3) (6) で述べたように負荷方法、特にひずみ速度の規定がきわめて重要であ

る。また、降伏点又は耐力を求めるためのひずみ速度として、ASTM では $0.5 \pm 0.2\%/\text{min}$ 、ISO では $0.1 \sim 0.3\%/\text{min}$ と規定しているので、これらとの関連も考えて、降伏点又は耐力に達するまでは試験片標点間ひずみ速度が $0.1 \sim 0.5\%/\text{min}$ の間の一定速度 ($0.3\%/\text{min}$ を標準とする) 又はそれに相当する引張速度で負荷を行なわなければならない。降伏点又は耐力を超えたのち破断に至るまでは、上下つかみ部間の相対移動速度が試験片平行部の $5 \sim 10\%/\text{min}$ の間の一定速度 ($7.5\%/\text{min}$ を標準とする) で負荷を行なわれなければならない。と改める。標準速度を示した所に大きな特徴がある。

(3) 降伏点又は耐力の求め方

前節 (4) (5) (7) で述べたように、変則的な応力ひずみ曲線を示すときは耐力の測定が困難である。超高温では耐力と引張強さも判断し難いことがある。このような場合、一般的な測定方法が決っていないので、当事者間の協定によることを解説の中で要望した。

(4) 報告

上述の第5回および第6回共通試験結果からもわかるように、高温引張試験結果はきわめて多くの因子によって左右されるので、試験材料、試験片寸法、試験条件をできるだけ詳細に報告するように改めた。また、試験結果も単に耐力、引張強さ、伸びにとどまらず、荷重-伸び曲線又は荷重-時間曲線なども必要に応じて報告できるようにした。

特に 800°C を超える温度での試験においてはひずみ速度切換時のひずみなども報告して結果をできるだけ正しく判断できるようにした。

(5) その他

規格本文では以上のほか、用語、言葉の訂正、試験片の寸法の許容範囲、熱電対の検定、熱電対の本数などを手なおした。

解説では、上記の共通試験をふまえて、正しい試験ができるように細部にわたって、詳細な解説とした。特に 800°C を超える超高温引張試験における注意点を多く盛り込んだ。すなわち、標点間ひずみ速度自動制御の推奨、温度測定法、計測器、熱電対、加熱速度、加熱時間、負荷方法について、旧 JIS 解説を大幅に改正したばかりでなく、セレーションをおこす場合や超高温における変則的な応力-ひずみ曲線について解説し、そのような場合の耐力の求め方の困難性を述べ、このような場合の耐力については当事者間の協定によった方が望ましいことを述べた。

5. ま と め

日本鉄鋼協会クリープ委員会高温引張試験分科会で、昭和 46 年 (1971) 以来活動して来た第5回および第6回共通高温引張試験の概要について述べ、さらにその結果をふまえて現行の JIS G0567-1976 を改定するため

の試案について述べた。

これらの共通試験の規模および結果はかなり膨大であるので、要点のみを記したが、これによつてクリープ委員会高温引張試験分科会の活動をご認識頂ければ幸いである。また、最近特に鉄鋼の高温変形挙動、高温加工性などが重要課題としてとり上げられつつある。そのための最も基本的な性質を示す高温引張試験の試験法と高温引張性質に関連した幾つかの問題点にも触れた。

これらの問題は鉄鋼を取扱う多数の技術者、研究者と深い関連をもっているものと思う。当分科会は JIS G0567-1976 の改正試案を工業技術院に申請するばかりではなく、なお残されている問題点の解決のために活発な活動を展開する所存である。今後共、関係各位の深い御理解と御協力をお願いする次第である。

第5回および第6回共通高温引張試験によつて本文記載のような大きな成果をあげ、それらをふまえて JIS G0567-1976 の改正試案をまとめることができたのは、委員各位の絶大なる御協力と、共通試験に参加して頂いた諸機関 (表1, 表7) およびその試験担当者の皆様、試験方案作成小委員会委員 (表4)、およびデータ整理小委員会委員 (表3, 表5) の献身的なご努力の賜物である。厚く感謝いたします。また、共通試験用試料を御提供頂いたクリープ委員会スペシメンバンク、株式会社神戸製鋼所および石川島播磨重工業株式会社に厚く御礼申し上げます。次第である。

なお、報告書作成に当つては、横井委員および(株)神戸製鋼所豊田裕至氏に特別な御協力を頂いた。ここに厚く御礼申し上げます。また、全般を通じて円滑に事務処理をして頂いた日本鉄鋼協会大曾根弘毅氏に御礼申し上げます。

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7月)
- 7) 例えば作井誠太, 酒井 拓, 武石和夫: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 856
- 8) 堀内 良, 吉永日出男: 日本金属学会誌, 29 (1965), p. 85 および p. 351