

火災加熱を受ける鋼構造部材の  
変形性状に関する実験的研究

2003年2月

平島 岳夫

# 目次

第1章 序論	
1.1 研究の背景	1
1.2 既往の研究	6
1.2.1 高温時における鋼材の力学的特性	6
1.2.2 鋼構造部材の耐火性	8
1.2.3 火災加熱を受ける鋼構造骨組の挙動	14
1.2.4 鋼構造建物の火災実験	17
1.3 本研究の目的	18
1.4 本論文の構成	20
第1章の参考文献	21
第2章 溶接構造用圧延鋼材の高温引張試験	
2.1 概要	25
2.2 高温引張試験	26
2.2.1 試験条件	26
2.2.2 試験片	27
2.2.3 試験方法	28
2.2.4 試験結果	31
2.3 引張域における応力-ひずみ曲線の数式化	49
2.3.1 数式化の方法	49
2.3.2 試験結果との比較	54
2.4 結語	62
第2章の参考文献	63
第3章 高温時におけるH形断面・箱形断面部材の短柱圧縮実験	
3.1 概要	65
3.2 短柱圧縮実験	67
3.2.1 実験条件	67
3.2.2 試験体	68

3.2.3	実験方法	73
3.2.4	H形断面部材の実験結果	86
3.2.5	箱形断面部材の実験結果	98
3.3	局部座屈を考慮した圧縮域における応力・ひずみ曲線	111
3.3.1	応力・ひずみ曲線の数式化	111
3.3.2	実験結果との比較	116
3.4	結語	122
	第3章の参考文献	123
<b>第4章 高温時におけるH形断面部材の純曲げ実験</b>		
4.1	概要	125
4.2	純曲げ実験	126
4.2.1	実験条件	126
4.2.2	試験体	127
4.2.3	実験方法	130
4.2.4	実験結果	137
4.3	純曲げ実験の数値解析	145
4.3.1	数値解析の方法	145
4.3.2	解析結果と実験結果の比較	146
4.4	結語	149
	第4章の参考文献	150
<b>第5章 高温時におけるH形断面・箱形断面部材の曲げ圧縮実験</b>		
5.1	概要	153
5.2	曲げ圧縮実験	155
5.2.1	実験条件	155
5.2.2	試験体	157
5.2.3	実験方法	164
5.2.4	H形断面部材の実験結果	177
5.2.5	箱形断面部材の実験結果	196
5.3	曲げ圧縮実験の数値解析	218
5.3.1	数値解析の方法	218

5.3.2 解析結果と実験結果の比較	220
5.4 結語	238
第5章の参考文献	240
<b>第6章 耐火設計への適用</b>	
6.1 概要	243
6.2 鋼構造骨組の熱応力変形解析	244
6.2.1 設計例および解析条件	244
6.2.2 解析結果	249
6.3 耐火性の決定	257
6.4 結語	260
第6章の参考文献	261
<b>第7章 結論</b>	
7.1 研究成果	263
7.1.1 高温引張試験に関して	263
7.1.2 高温時における短柱圧縮実験に関して	263
7.1.3 高温時における純曲げ実験に関して	264
7.1.4 高温時における曲げ圧縮実験に関して	265
7.2 結論	267
7.3 今後の課題	268
資料編 曲げ圧縮実験の全結果	269
謝辞	325
発表論文	327
付録1 熱応力変形解析手法の概要	329
付録2 論文内容の要旨	335
付録3 SYNOPSIS	343

# 第1章 序論

1.1 研究の背景	1
1.2 既往の研究	6
1.2.1 高温時における鋼材の力学的特性	6
1.2.2 鋼構造部材の耐火性	8
1.2.3 火災加熱を受ける鋼構造骨組の挙動	14
1.2.4 鋼構造建物の火災実験	17
1.3 本研究の目的	18
1.4 本論文の構成	20
第1章の参考文献	21

## 1.1 研究の背景

### (1) 建物の耐火性について

建物の耐火性を持たせる基本方策は、防火区画により火を封じ込めて、火災の延焼拡大を防止することである<sup>1),2)</sup>。防火区画により火災の延焼拡大を防止できれば、避難と消防活動が安全に行われ、財産が守られる。耐火設計の出発点は、防火区画による火災の延焼拡大防止にあると考える。

我が国の建築法規では、用途・規模・地域に応じて、耐火建築物とすることを義務付けている。具体的には、床・壁・柱・梁などの主要構造部を耐火構造とし、防火区画を設けることを義務付けている<sup>3)</sup>。これより、耐火建築物においては、区画火災を対象として耐火設計が行なわれる。

火災の延焼拡大を防止するために、建築物を構成する区画部材には、炎と熱を遮る性能が求められる。構造部材には、火災時に破壊することなく、区画部材に隙間を生じさせない構造安定性が求められる。本研究は、火災の延焼拡大を防止する区画部材を支える構造部材の耐火性を対象としている。

### (2) 標準耐火試験と要求耐火時間に基づく耐火設計

標準耐火試験ならびに要求耐火時間に基づく耐火設計の概略を図 1.1 に示す。標準耐火試験により構造部材の耐火時間を決定し、建築法規で定められた要求耐火時間に応じて、構造部材を決定する方法である。ほとんどの国で採用されている一般的な方法である<sup>1)</sup>。

我が国の建築法規では、表 1.1 に示すように、最上階から数えた階数と建築物の部分に応じて、要求耐火時間が定められている<sup>3)</sup>。標準耐火試験とは、図 1.2 に示すような標準火災温度曲線に制御された耐火試験炉内において、構造部材を加熱する試験である。耐火時間とは、長期許容応力度に相当する荷重を受ける構造部材の変形量が、許容変形量に達する時間である<sup>4),5)</sup>。

標準耐火試験と要求耐火時間に基づく耐火設計は、設計者にとって簡便で分かりやすいが、火災時における建物の実挙動を反映するものではない。このような設計方法に対して、設計自由度と建物安全性の確立をめざした数値解析に基づく耐火設計が提案されている<sup>6)</sup>。

### (3) 数値解析に基づく耐火設計

建設省総合技術開発プロジェクト「建築物の防火設計法の開発」(1982年～1987年)の成果として、数値解析に基づく耐火設計方法が提案されている<sup>6)</sup>。実際の建物条件に応じた火災挙動を数値解析により予測して、構造部材の耐火性を決定する設計方法である。文献6)に示される耐火設計方法の模式図は詳細に描かれすぎているので、簡潔に描いた文献2)の模式図を図1.3に示す。数値解析に基づく耐火設計においては、まず安全係数を設定し、数値解析により火災性状予測・部材温度予測・力学性状予測を行い、最後に耐火性能評価基準に基づいて、構造部材の耐火性を決定する。

本研究は、数値解析に基づく耐火設計に適用することを前提とした。図1.3における力学性状予測と耐火性能評価基準に関する資料を、実験により蓄積したものである。

### (4) 鋼構造部材の耐火設計

鋼は、大きな強度と粘りを有するが、400℃位を超えると急激に強度が低下する。よって、鋼構造部材の耐火性を確保するために、一般には、耐火被覆を施して鋼材温度を抑制している。従来の標準耐火試験においては、耐火被覆が施された鋼構造部材の鋼材温度が平均350℃以下かつ最高450℃以下に収まるか否かによって、鋼構造部材の耐火時間を決定している<sup>4)</sup>。建築基準法施行令改正(2000年)以降の標準耐火試験<sup>5)</sup>においては、長期許容応力度に相当する荷重を受ける鋼構造部材の変形量が許容変形量(柱の場合は軸変形量が柱長さの1/100、梁の場合は中央部のたわみが梁長さの2乗を梁せい×400で除した値)以下に収まるか否かによって、鋼構造部材の耐火時間を決定している例が多い。

一方、数値解析に基づいて鋼構造部材の耐火性を決定する設計方法については、図1.3に示す耐火設計方法を簡略化した設計方法が1999年に提案されている<sup>7)</sup>。力学性状予測で得られる鋼構造骨組の崩壊温度に鋼材温度が達しないように、鋼構造部材を設計する方法である。鋼構造の耐火設計においては、鋼構造部材が破壊するときの耐火時間ではなく、鋼材温度を指標とする方が簡便である。

本研究は、構造部材の耐火時間を決定する標準耐火試験とは異なり、一定高温加熱を受ける鋼構造部材の変形性状を実験で確認したものである。

## (5) 研究の背景

1990年頃より、数値解析に基づく耐火設計手法<sup>6)</sup>を鋼構造に適用した例が増えている。最も代表的な例は、一般鋼の代わりに耐火鋼を用いることで耐火被覆の無い鋼構造骨組を実現した、自走式立体駐車場である。開放性を有する自走式立体駐車場において、自動車火災の延焼拡大が遅くなることと火災加熱を受ける部分の鋼材温度が600℃以下になることを確認し、鋼材温度600℃において長期許容応力度以上の降伏強度を保証する耐火鋼を用いて、実現された例である<sup>8)</sup>。

数値解析に基づく耐火設計において、構造部材の耐火性は、長期荷重に対する余力で決まる。鋼構造部材が負担している長期荷重が小さければ、一般鋼においても600℃位までの耐火設計が可能ではないかという思いが本研究の発端であった。高層鉄骨架構48棟を対象とした熱応力変形解析の報告では、耐震設計された鋼構造骨組は600℃位までの耐火性を有する可能性が示された<sup>9),10)</sup>。ただし、同じ報告において、火災加熱を受ける鋼柱の柱頭と柱脚および鋼梁の端部と中央部には、大きな曲率が生じることが指摘され、局部座屈が発生することが指摘された。これより、局部座屈後における鋼柱と鋼梁の変形性状を、高温実験で確認する必要があるとの課題が挙げられた。

本研究における実験は、この課題に基づいて計画され、1997年に実施された。鋼材温度600℃までにおける一般鋼の実験資料を蓄積し、鋼構造部材の局部座屈後における残存耐力と荷重支持能力を実験により明らかにしたものである。

従来、鋼材温度600℃位までの耐火設計が一般鋼において殆どなされなかったのは、鋼構造部材の耐火性を裏付けるための350℃を超える実験資料が極めて少なかったことが理由と考えられる。本研究はこの点を補充したものである。

なお、現在では、建築基準法施行令・告示(2000年制定)において耐火性能検証法が示され、鋼構造においては、鋼材温度550℃までの耐火設計が可能となっている<sup>3)</sup>。これより、鋼材温度600℃位までの実験資料は、ますます貴重な情報となっている。



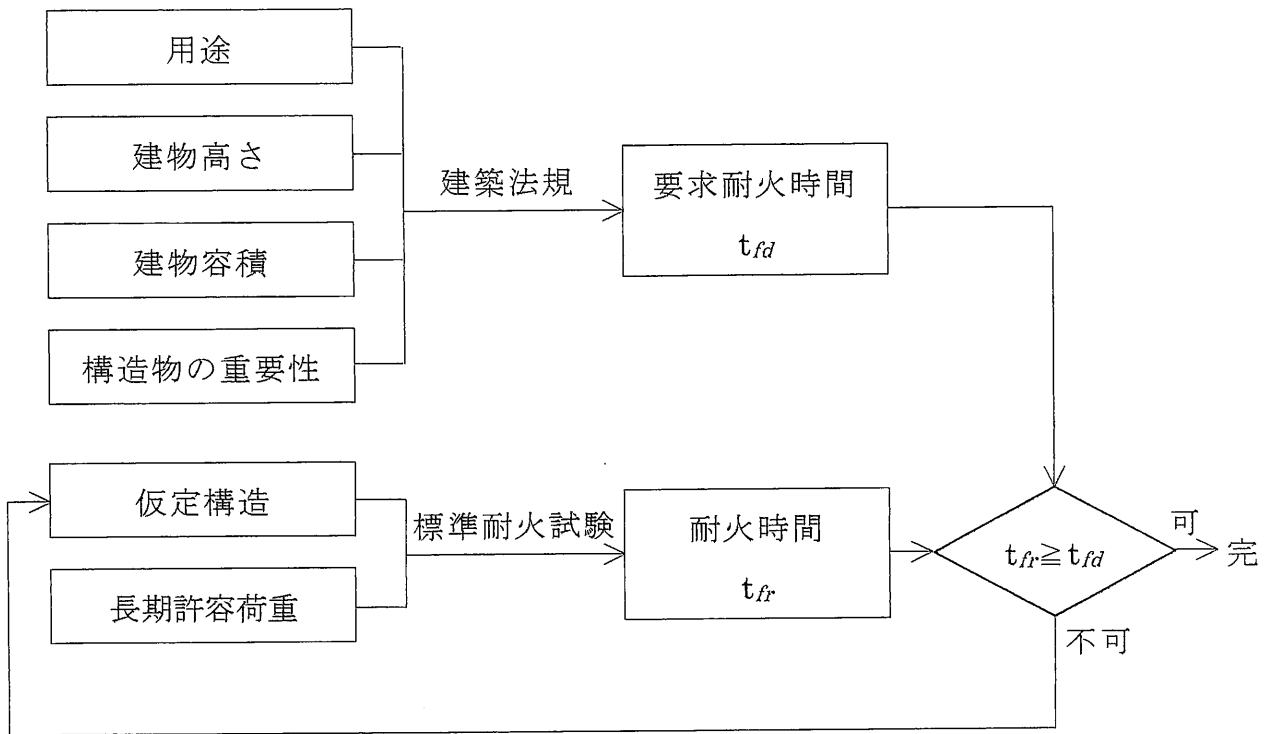


図 1.1 標準耐火試験ならびに要求耐火時間による耐火設計方法<sup>1)</sup>

表 1.1 我が国の建築法規における要求耐火時間<sup>3)</sup>

建築物の部分		建築物の階		
		最上階及び最上階から数えた階数が2以上で4以内の階	最上階から数えた階数が5以上で14以内の階	最上階から数えた階数が15以上の階
壁	間仕切壁(耐力壁に限る)	1 時間	2 時間	2 時間
	外壁(耐力壁に限る)	1 時間	2 時間	2 時間
床		1 時間	2 時間	2 時間
柱		1 時間	2 時間	3 時間
はり		1 時間	2 時間	3 時間
屋根		30 分間		
階段		30 分間		

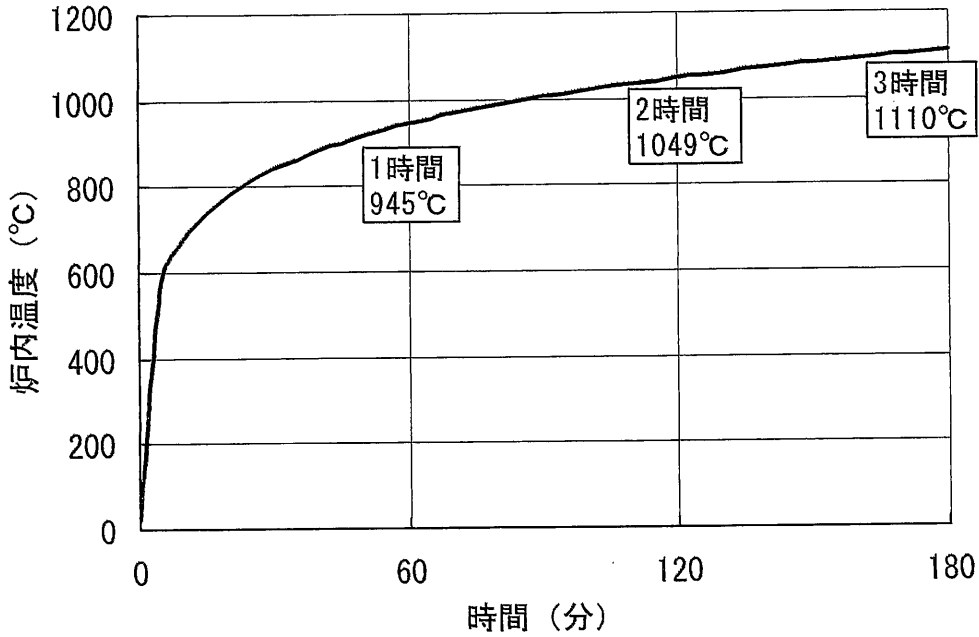


図 1.2 標準耐火試験における標準火災温度曲線<sup>5)</sup>

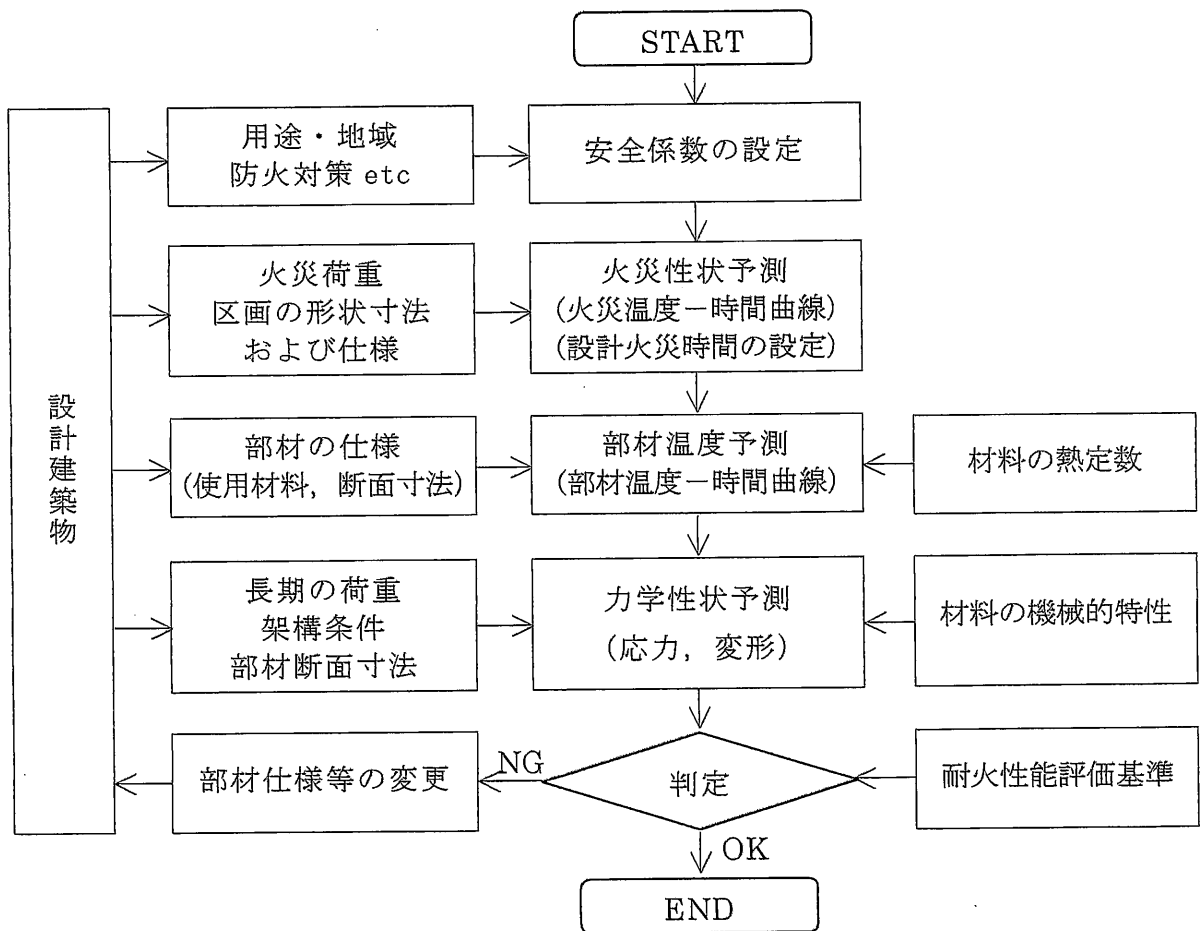


図 1.3 数値解析手法に基づく耐火設計方法<sup>2)</sup>

## 1.2 既往の研究

### 1.2.1 高温時における鋼材の力学的特性

鋼構造の耐火設計を行なう際に、高温時における鋼材の力学的特性は、最も基本的なデータとなる。我が国においては、1960年代の後半頃より、原田・藤本・古村・安部・篠原<sup>11)~14)</sup>や日本鋼構造協会に設置された技術委員会・耐久性分科会・耐火小委員会・高温強度班（藤本主査・川越・齋藤ら）によって、高温時における鋼材の力学的特性に関する実験データが蓄積された<sup>15)</sup>。1982年度～1986年度の建設省総合技術開発プロジェクト「建築物の防火設計法の開発－耐火設計法の開発」においては、既往の研究資料<sup>11)~17)</sup>が耐火設計データベースとして取りまとめられた<sup>6)</sup>。近年では、更にデータが蓄積され<sup>18)~22)</sup>、1999年に日本建築学会より発行された「鋼構造耐火設計指針」において、鋼材の高温降伏強度および高温時における応力-ひずみ曲線が提案されている<sup>7)</sup>。

以下、高温時における鋼材の力学的特性について簡単に紹介する。

#### (1) 応力-ひずみ曲線

一般構造用圧延鋼材(SS400)の高温時における応力-ひずみ曲線を図 1.4 に示す。常温から 200℃位においては、1.5%ひずみ位まで降伏棚が見られ、その後ひずみ硬化による耐力の上昇が見られる。300℃から 400℃においては、明瞭な降伏棚が見られなくなり、1.5%ひずみ位で常温時の曲線に近づき、その後は常温時と似たような曲線を示している。500℃以降においては、明瞭な降伏点は無くなり、引張耐力の著しい低下が見られる。

#### (2) 弾性係数

溶接構造用圧延鋼材(SM490)の弾性係数比を図 1.5 に示す。ここで弾性係数比とは、高温時の弾性係数を常温時の弾性係数で除して無次元化した値である。試験結果より得られた弾性係数には、測定方法や化学成分など種々の要因によるバラツキが見られる<sup>6)</sup>。500℃における弾性係数は、常温時に対して 0.7 倍～0.8 倍の値を示している。

#### (3) 降伏応力度

溶接構造用圧延鋼材(SM490)の降伏応力度比を図 1.6 に示す。ここで降伏応力度比とは、高温時の降伏応力度を常温時の降伏応力度で除して無次元化した値である。300℃以上においては、構造用鋼材の応力-ひずみ曲線に明瞭な降伏棚が見られなくなるので、0.2%オフセット耐力を降伏応力度としている<sup>6)</sup>。鋼構

造耐火設計指針では、1%ひずみ時の応力度を鋼材の高温強度としている<sup>7)</sup>。  
500℃における降伏応力度は、常温時に対して0.5倍~0.7倍の値を示している。

#### (4) 引張強度

鋼材の引張強度は400℃位から低下しはじめて、600℃においては常温時に対して約1/3まで低下して、800℃においては殆ど強度を期待できないことが明らかされている。

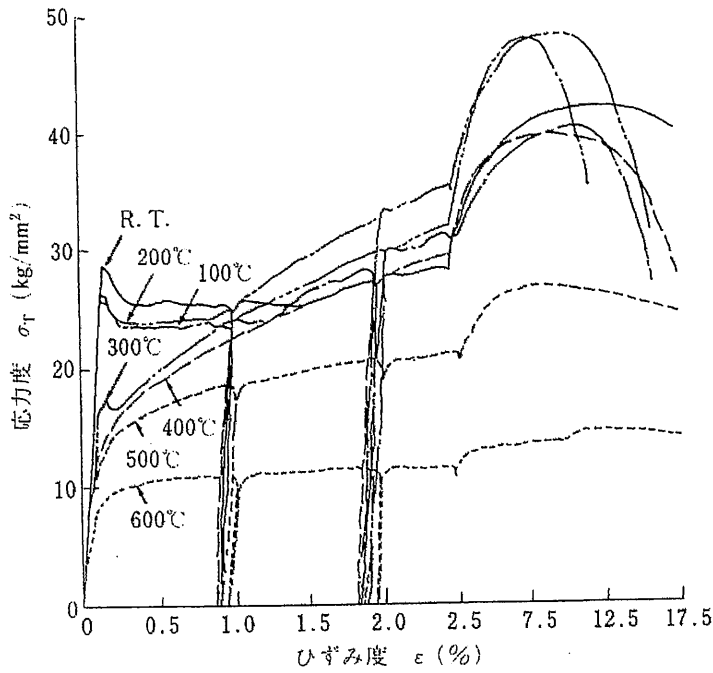


図 1.4 高温時における応力-ひずみ曲線 (SS400)<sup>6)</sup>

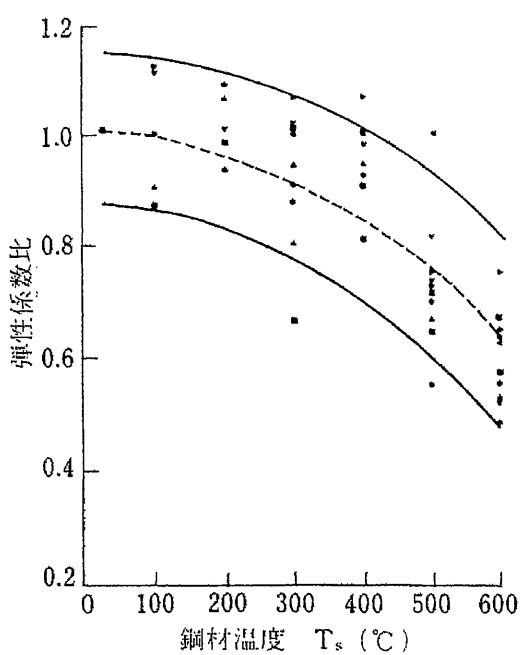


図 1.5 弾性係数比(SM490)<sup>6)</sup>

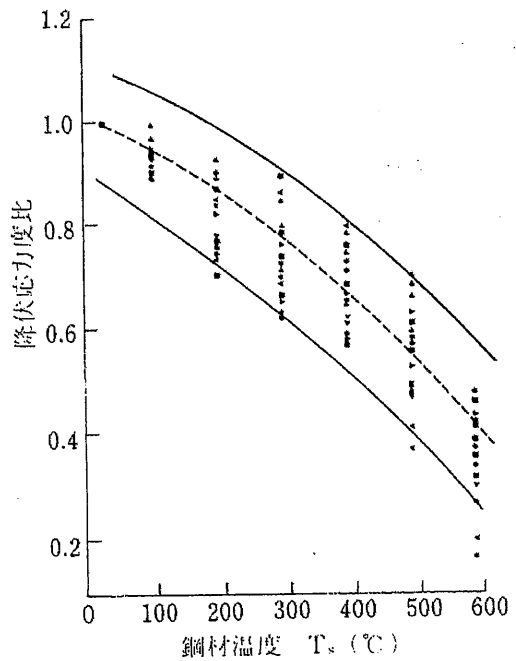


図 1.6 降伏応力度比(SM490)<sup>6)</sup>

## 1.2.2 鋼構造部材の耐火性

鋼構造部材の耐火性に関する研究は、超高層建物の需要が高まった 1960 年頃より活発に行なわれるようになった。八幡製鉄建設用鋼材研究会に防火グループ（碓井主査・川越・高野・齋藤）が 1958 年に設けられたのが本格的な研究の始まりと言われている<sup>16)</sup>。1961 年には、鋼材倶楽部にも鉄骨耐火構造研究会（碓井主査・川越・高野・齋藤・若松）が設けられ、S.H.Ingberg らの報告書「Fire Test of Building Columns」<sup>23)</sup>が翻訳された。以来、数多くの耐火試験が実施されている。近年では、1993 年度～1997 年度の建設省総合技術開発プロジェクト「防・耐火性能評価技術の開発」において、ISO の規格を日本に取り入れる研究の一環として、鋼構造部材を用いた載荷加熱試験が実施された。

以下、既往の文献より得られている知見を簡単に紹介する。

### (1) 高温時における鋼柱の座屈耐力

高野は、標準耐火試験結果より得た一定応力下における鋼柱の座屈温度を整理した<sup>16)</sup>。その結果を図 1.7 に示す。長期許容応力度に相当する軸力を受ける柱において、火災時の許容鋼材温度を平均 350°C と規定した根拠が伺える。最近では、茂木らが、ISO 判定基準<sup>5)</sup>に基づいて、H 形鋼柱の標準耐火試験結果を整理し、長期許容荷重を受ける鋼柱の崩壊温度を 513°C と提案した<sup>24)</sup>。その結果を図 1.8 に示す。図中に示す崩壊荷重比とは、試験時の崩壊荷重を常温時の座屈荷重で除して無次元化したものである。以上の研究は、細長比 50 前後の柱を用いた中心圧縮試験結果が主である。

### (2) 高温時における鋼梁の荷重支持能力

長期許容応力度一杯の荷重を受けた梁が、鋼材温度が 400°C 位に達するまで荷重を支持できることを齋藤・清水は示した<sup>25)</sup>。その結果を図 1.9 に示す。最近では、繁永・齋藤らが、鋼梁の ISO 載荷加熱試験結果より梁の応力度比と崩壊温度の関係を示し、長期許容荷重を受ける鋼梁の崩壊温度を 532°C と提案している<sup>26)</sup>。その結果を図 1.10 に示す。図中に示す応力度比とは、常温時における鋼材の引張試験より得た上降伏点に対して 2/3 倍の応力度が H 形鋼梁の下フランジに生じる場合を 1.0 としたものである。以上の研究は、単純梁を 2 点載荷した標準耐火試験より得られたものである。

### (3) 局部座屈を対象とした高温時における鋼構造部材の変形状

齋藤・上杉・宮本は、鋼材温度(常温～600°C)・鋼種(SS400, SM490)・H 形鋼におけるフランジの幅厚比( $b/t=5.2, 10.4, 15.0$ )を実験要因として純圧縮実

験・純曲げ実験・曲げ圧縮実験を行なった<sup>27)</sup>。その結果の一例として、純圧縮実験結果を図 1.11 に、純曲げ実験結果を図 1.12 に、曲げ圧縮実験結果を図 1.13 に示す。高温になるに従い耐力が低下していく傾向や、局部座屈の発生に伴い耐力が低下していく傾向が見られる。この研究により、H形断面部材における局部座屈後の変形性状に関する大まかな傾向が把握された。本研究は、文献 27) における実験計画を再編整理し、加力装置や変形測定装置を改良して、的確な実験データを蓄積したものである。

1990 年頃になると耐火鋼の開発が進められ、加熱梁の伸びだしを考慮した耐火鋼柱の曲げ圧縮実験など数多くの実験データが示された<sup>28)~30)</sup>。それらの報告では、ECCS 基準<sup>31)</sup>で推奨されている柱の許容水平変形値（階高の 1/30）の範囲内であれば、公称降伏軸力に対して 3 割以下の軸力を受ける耐火鋼柱が 650℃まで使用可能であることなどが示された。

鈴木らは、一般鋼を用いた高温時における短柱圧縮実験について、箱形断面柱<sup>32)</sup>と円形鋼管柱<sup>33)</sup>の結果を報告した。そして、局部座屈後における応力-ひずみ曲線を次式のように提案した<sup>33),34)</sup>。

$$\sigma(\varepsilon_0) = \frac{\sigma_0(\varepsilon_0)}{b/t} \left( \sqrt{\frac{\xi}{\varepsilon_0}} + \zeta \right)$$

記号の意味を以下に示す。

- $\varepsilon_0$  : 圧縮ひずみ（正值とする）
- $\sigma(\varepsilon_0)$  : 局部座屈後の残存圧縮応力（正值とする）
- $\sigma_0(\varepsilon_0)$  : ひずみ  $\varepsilon_0$  時における引張応力（正值とする）
- $b/t$  : 板要素の幅厚比
- $\xi, \zeta$  : 断面形状によって定まる実験定数

箱形断面の場合 :  $\xi = 6.25, \zeta = 3.0$

円形断面の場合 :  $\xi = 19.4, \zeta = 0$

この提案式の特徴は、高温時における素材の強度と板要素の幅厚比を同時に含めた合成要因  $b/t \times \{\sigma(\varepsilon_0) / \sigma_0(\varepsilon_0)\}$  を用いることにあり、鋼種・温度・幅厚比に関わらず 1 つの式で対応できる点にある。鈴木らは、鋼種・温度・幅厚比を試験条件として行なった短柱圧縮実験において、 $b/t \times \{\sigma(\varepsilon_0) / \sigma_0(\varepsilon_0)\}$  と  $\varepsilon_0$  の関係が 1 つの曲線に収斂することを見出した。その例として、箱形断面部材の結果を図 1.14 に、円形断面部材の結果を図 1.15 に示す。

以上、鋼構造部材の耐火性に関して様々な研究が行なわれてきたが、耐火鋼において行なわれたような加熱梁の伸びだしを考慮した鋼柱の荷重支持能力に関する実験については、一般鋼の実験資料が皆無である。

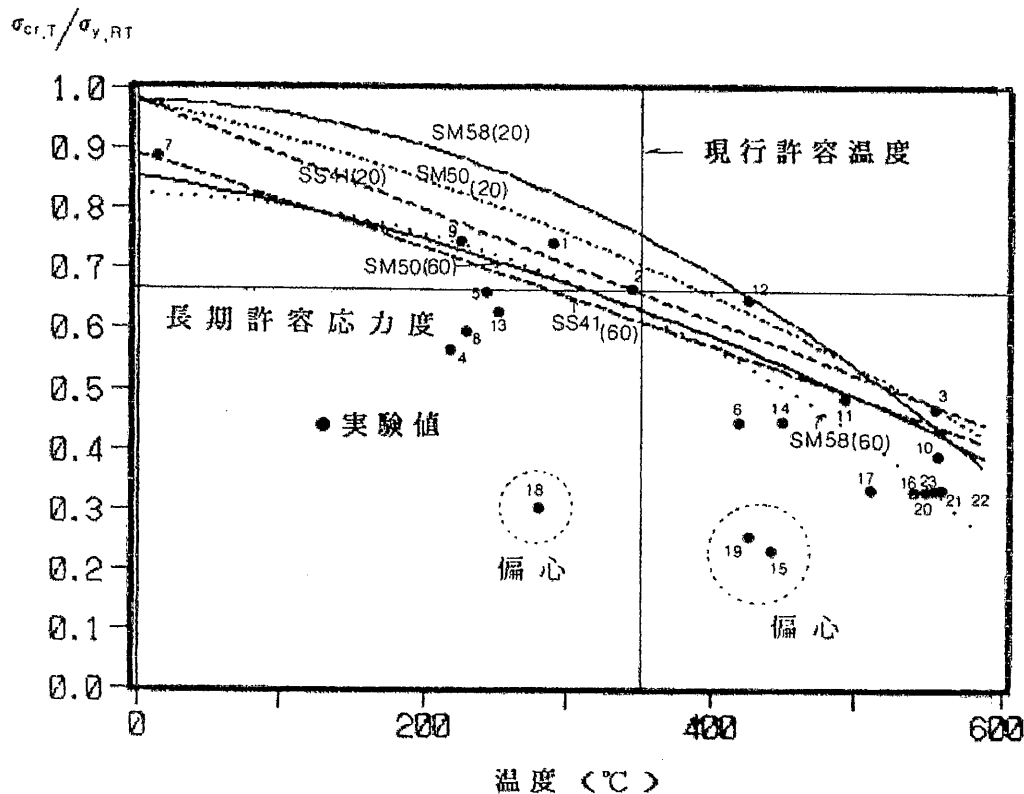


図 1.7 標準耐火試験より得た座屈応力度と座屈温度<sup>16)</sup>

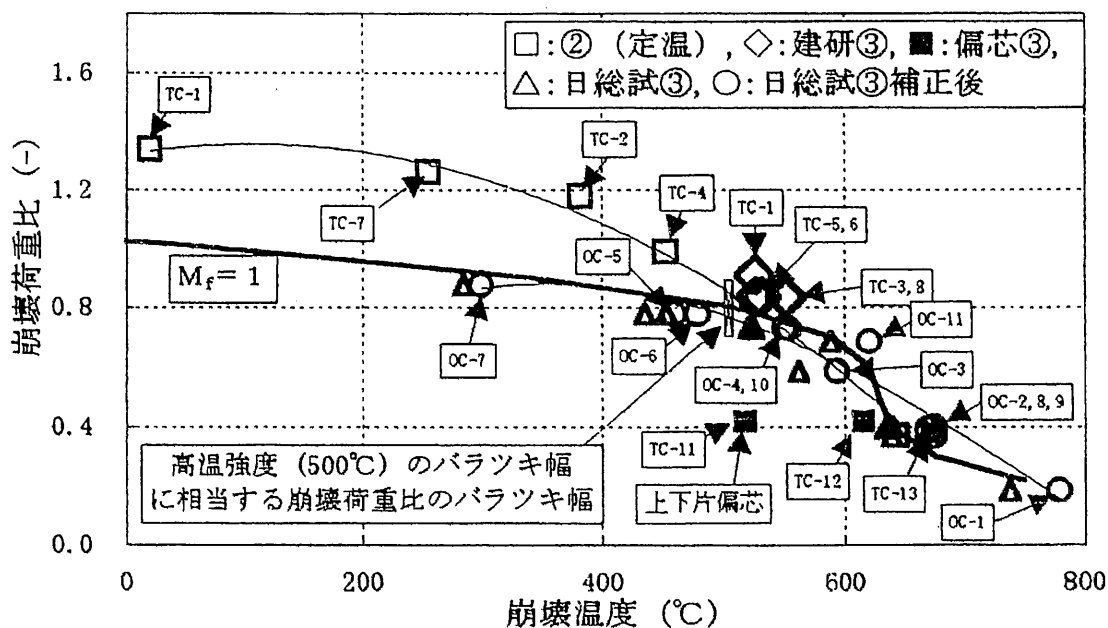


図 1.8 ISO 標準耐火試験より得た崩壊荷重比と崩壊温度<sup>24)</sup>

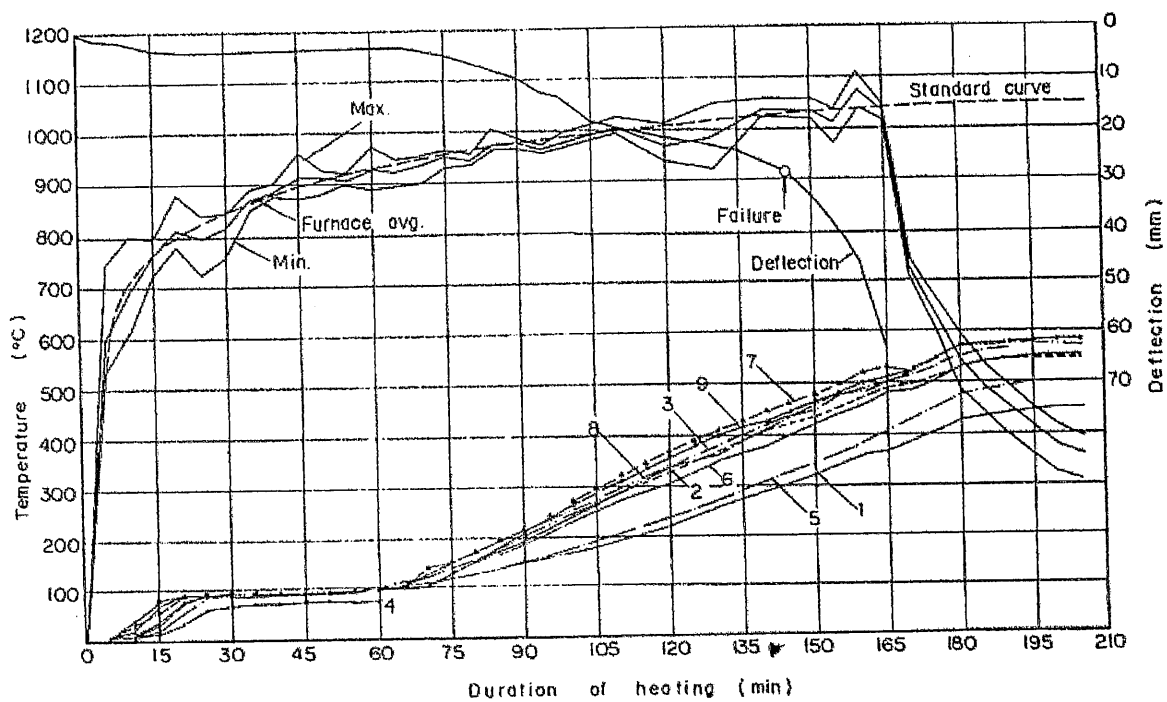


図 1.9 鉄骨梁の標準耐火試験結果 25)

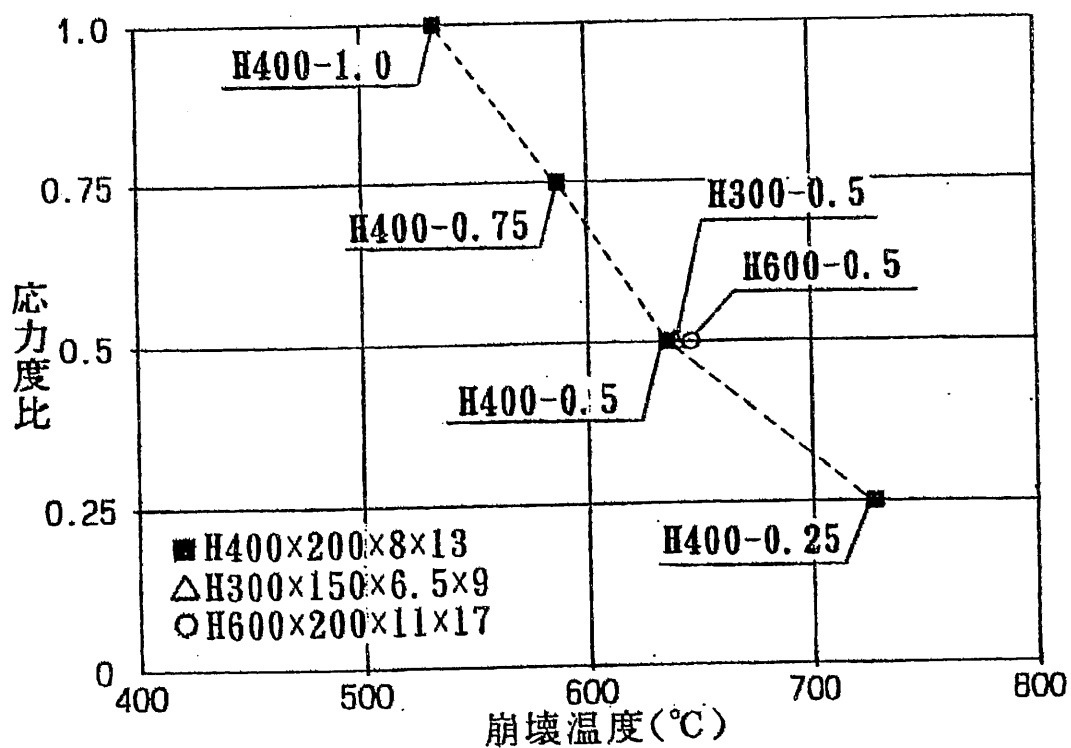


図 1.10 ISO 標準耐火試験より得た応力度比と崩壊温度 26)



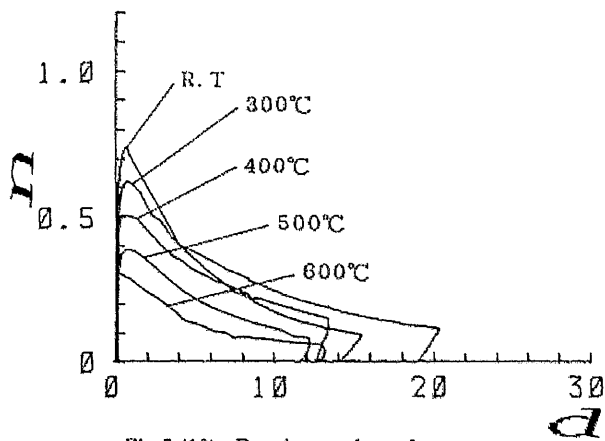


Fig.5 (10) Envelopes of  $n-d$  curves

Steel grade : SM50  
 $b/t$  : 10.4

図 1.11 H形鋼材の純圧縮実験結果 27)

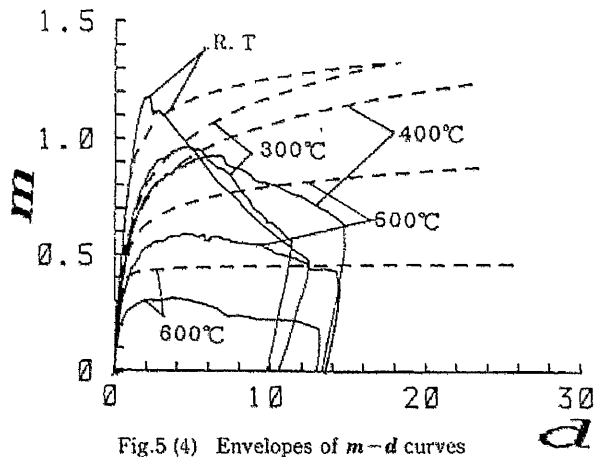


Fig.5 (4) Envelopes of  $m-d$  curves

Steel grade : SM50  
 $b/t$  : 10.4  
 — Experiment  
 - - - Calculated

図 1.12 H形鋼材の純曲げ実験結果 27)

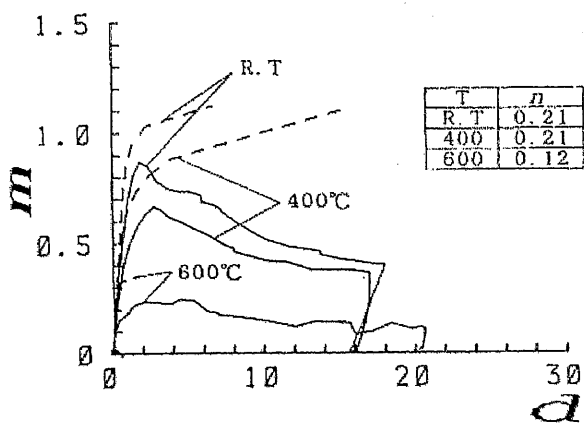


Fig.5 (15) Envelopes of  $m-d$  curves

Steel grade : SM50  
 $b/t$  : 10.4  
 — Experiment  
 - - - Calculated

図 1.13 H形鋼材の曲げ圧縮実験結果 27)

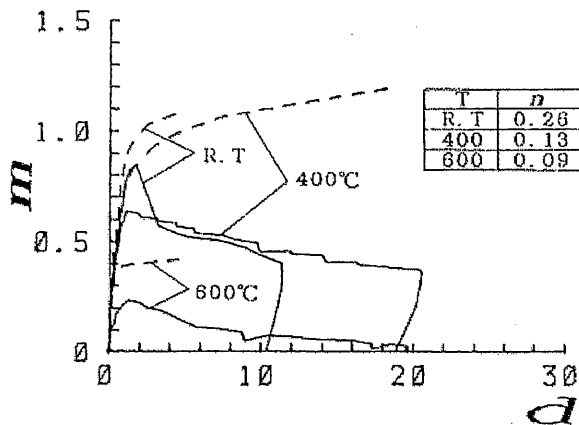


Fig.5 (16) Envelopes of  $m-d$  curves

Steel grade : SM50  
 $b/t$  : 15.0  
 — Experiment  
 - - - Calculated

[図 1.11~図 1.13 の注釈]

- 純圧縮実験における「n」は、実験時に測定された圧縮軸力を常温時降伏軸力で除した値である。
- 曲げ圧縮実験における「n」は、実験時に保持した一定圧縮軸力を常温時降伏軸力で除した値である。
- 「m」は、実験時に測定された曲げモーメントを常温時降伏モーメントで除した値である。
- 「d」は、実験時に測定された変形量を常温時降伏変形値で除した値である。

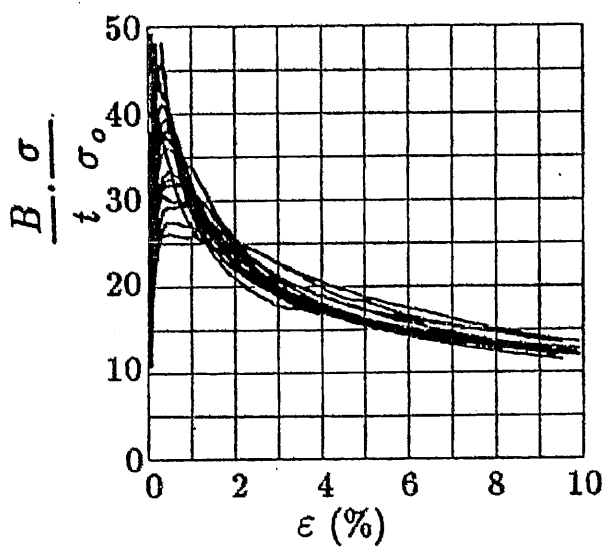


図3 SS400の  $\frac{B}{t} \cdot \frac{\sigma}{\sigma_0} \sim \epsilon$  関係

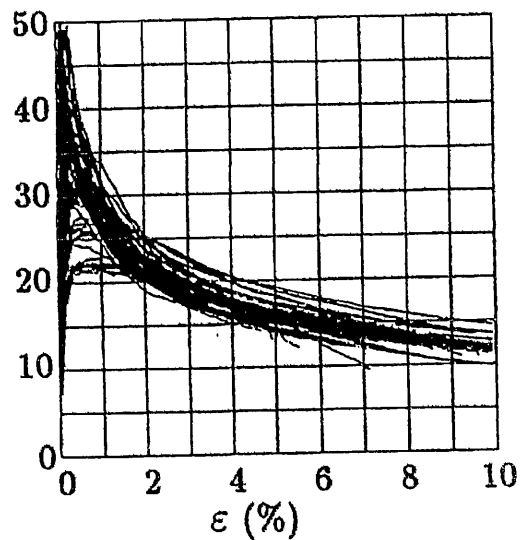
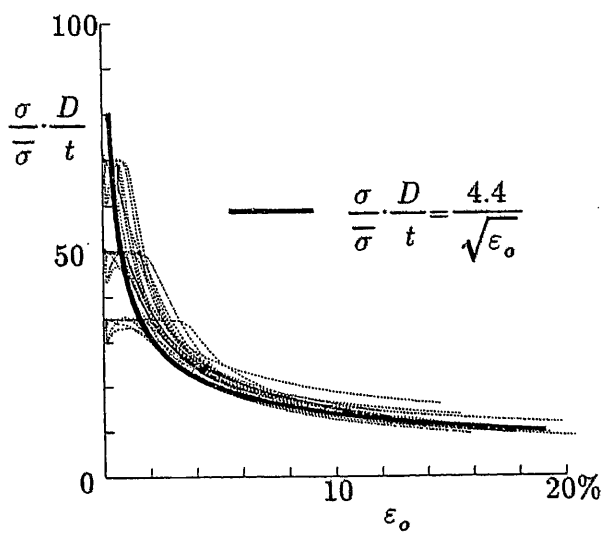
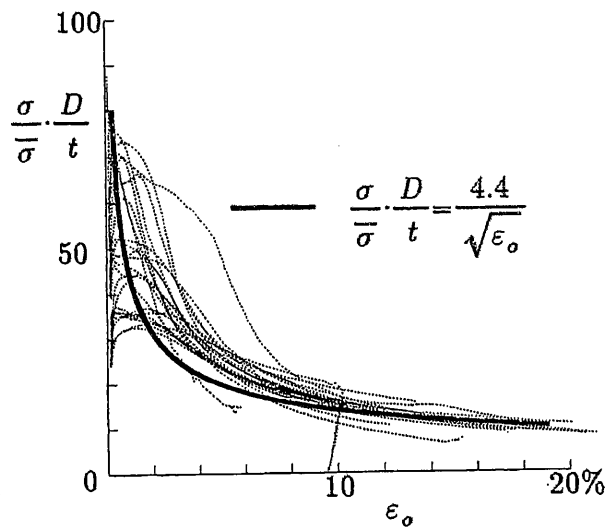


図4 全試験体の  $\frac{B}{t} \cdot \frac{\sigma}{\sigma_0} \sim \epsilon$  関係

図 1.14 箱形断面材における  $b/t \times (\sigma / \sigma_0) \sim \epsilon$  関係<sup>34)</sup>



(a) 解析結果に対する  $\frac{\sigma}{\sigma} \cdot \frac{D}{t} \sim \epsilon_0$  関係



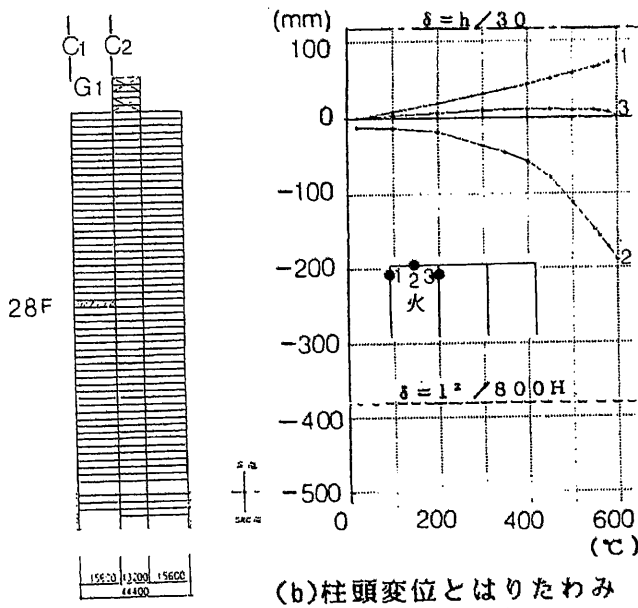
(b) 実験結果に対する  $\frac{\sigma}{\sigma} \cdot \frac{D}{t} \sim \epsilon_0$  関係

図 1.15 円形断面材における  $b/t \times (\sigma / \sigma_0) \sim \epsilon$  関係<sup>33)</sup>

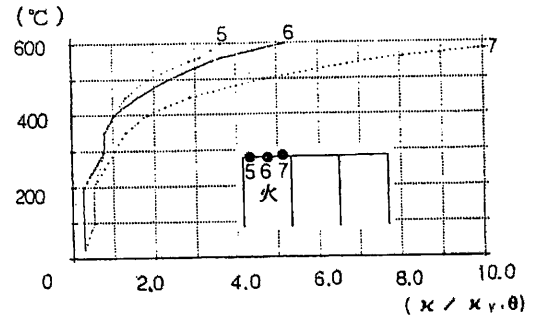
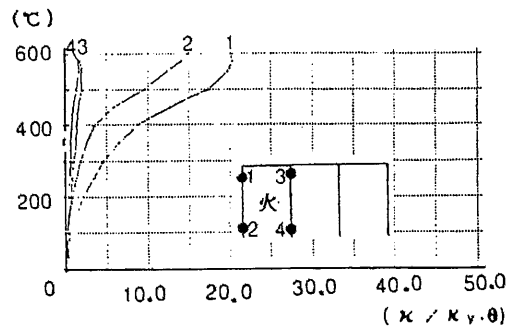
### 1.2.3 火災加熱を受ける鋼構造骨組の挙動

火災加熱を受ける鋼構造骨組の挙動に関する研究について以下に紹介する。1966年、齋藤は、材端を拘束した状態における鋼構造部材の加熱実験結果を示し、350℃以下においても鋼柱が座屈する可能性のあることを指摘し、鋼柱の損傷を少なくするために意図的に鋼梁を局部破壊させる設計方法を主張した<sup>35)</sup>。1969年、齋藤は、数スパンの鋼構造骨組が火災加熱を受けた場合の熱応力と熱変形に関する弾性解析手法を示し、スパン長・スパン数・柱断面の要因が外柱の変位と中央梁の熱応力に与える影響について検討し、3スパン以上になるとスパン数の影響をあまり受けなくなることを示した<sup>36)</sup>。1986年、古村・右田・安部・岡部・金は、鋼構造骨組の弾塑性クリープ熱変形解析を示し、耐震設計された鋼構造骨組において600℃まで耐力を有することを示した<sup>37)</sup>。1987年、上杉・小池は、J.Becker・B.Breslerの弾塑性熱応力解析手法<sup>39)</sup>に端部拘束力の概念を導入し、弾塑性解析を必要とする局部架構を切り離して解析する手法を提案し、高層鉄骨架構における弾塑性熱応力解析を可能とした<sup>38)</sup>。1992年、上杉らは、高層鉄骨架構48棟における600℃までの熱応力変形解析結果を示した。その結果、耐震設計された鋼構造骨組の大部分は600℃までの耐火性を有することを明らかにし、火災加熱を受ける鋼柱の柱頭と柱脚および鋼梁の端部と中央部に大きな塑性変形が生じて局部座屈が発生する恐れを指摘した<sup>9)</sup>。1995年、鈴木は、塑性設計手法<sup>41)</sup>に基づく鋼構造骨組の崩壊温度算定方法を提案した<sup>40)</sup>。この手法は、1999年に発行された鋼構造耐火設計指針<sup>7)</sup>に反映されている。

火災加熱を受ける鋼構造骨組の挙動に関する代表的な例として、加熱梁に外柱が外側へと押し出される例を図1.16に、加熱梁が周辺部材に拘束されて梁自身がたわみ込む例を図1.17に示す。図1.16(c)に示す曲率を見ると、鋼材温度が600℃位に達した場合には、外柱柱頭部「1」には常温時降伏曲率の20倍位の曲率が発生し、外柱柱脚部「2」には常温時降伏曲率の15倍位の曲率が発生している。図1.17(c)に示す曲率を見ると、鋼材温度が600℃位に達した場合には、加熱梁の両端部「5」・「7」には常温時降伏曲率の25倍位の曲率が発生し、加熱梁の中央部「6」には常温時降伏曲率の12倍位の曲率が発生している。このように、火災加熱を受ける部分の鋼構造部材においては極めて大きな熱変形が生じることが明らかにされている。



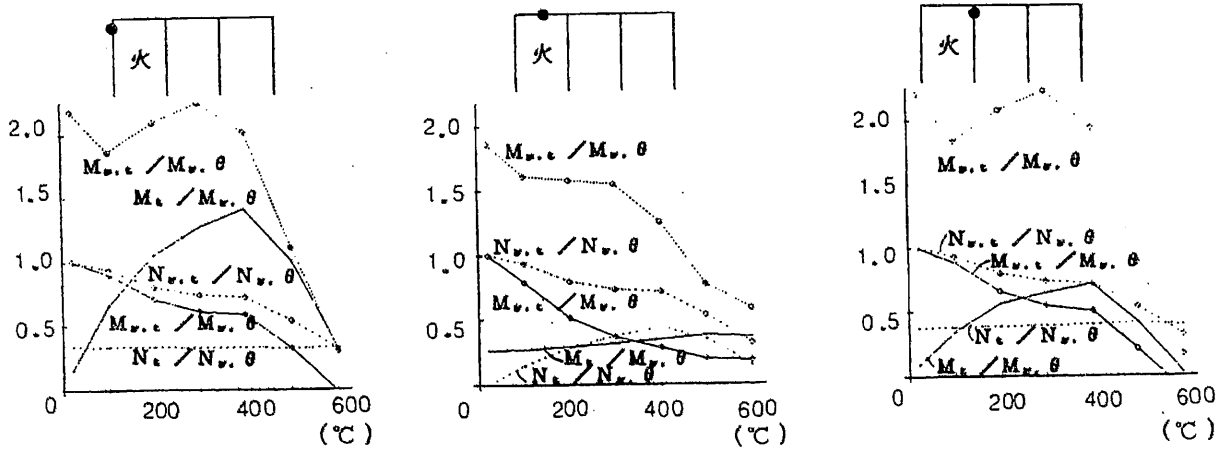
(b)柱頭変位とはりたわみ



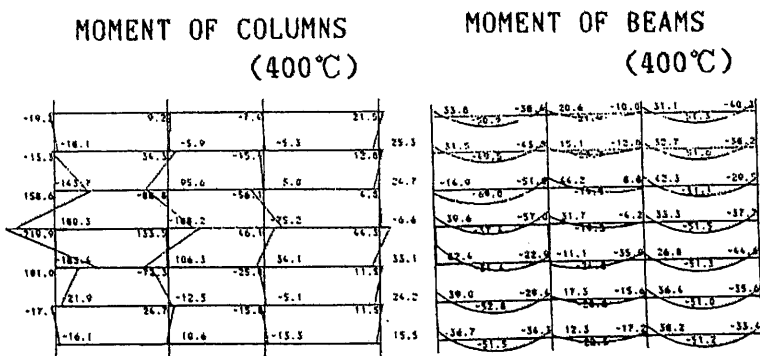
(c)曲率

C <sub>1</sub>	□-500×500×19
C <sub>2</sub>	□-500×500×25
G <sub>1</sub>	H-800×199×10×15

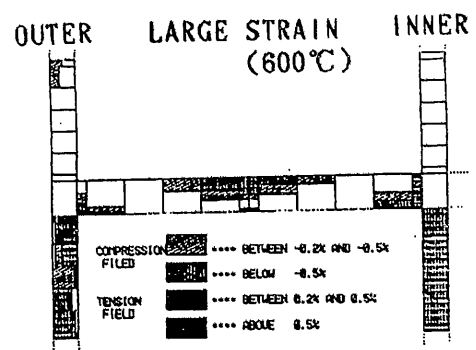
(a)架構概要と加熱部材断面リスト



(d)応力変動



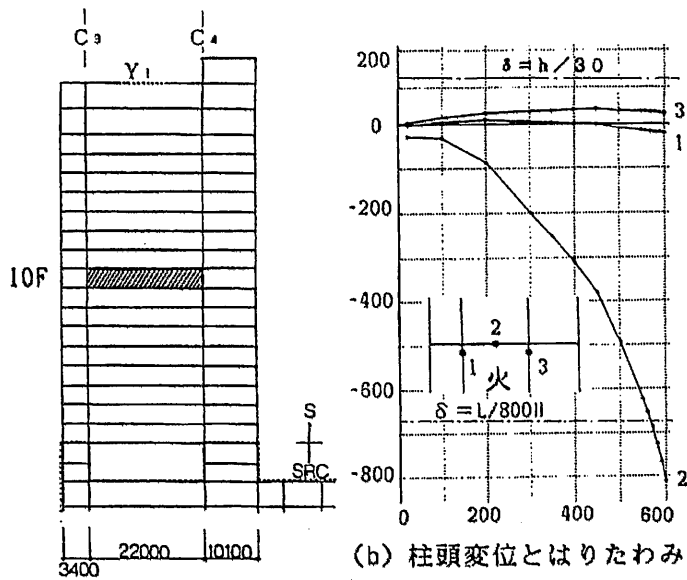
(e)モーメント分布



(f)大ひずみ分布

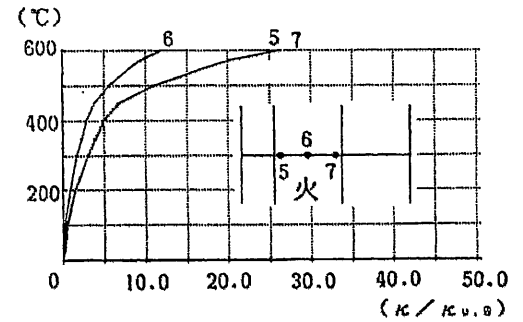
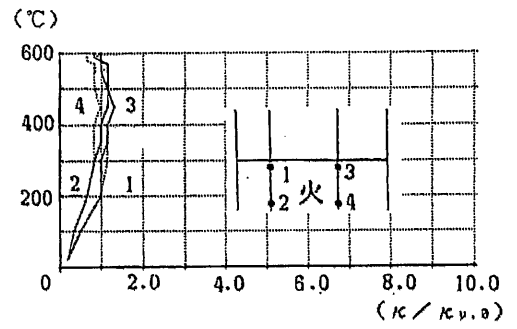
付図4 1 A-28

図 1.16 熱応力変形解析結果の一例 (外柱が外側に押し出される例) 10)

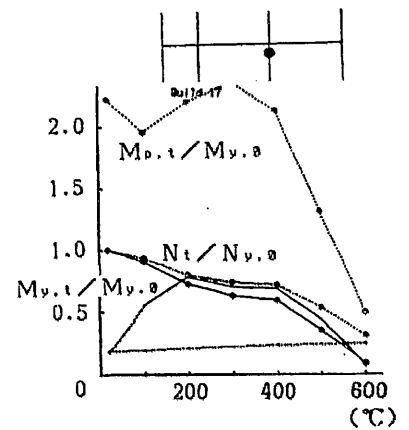
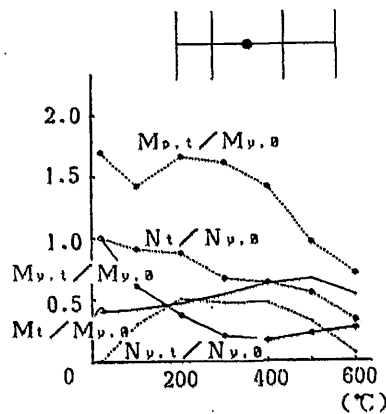
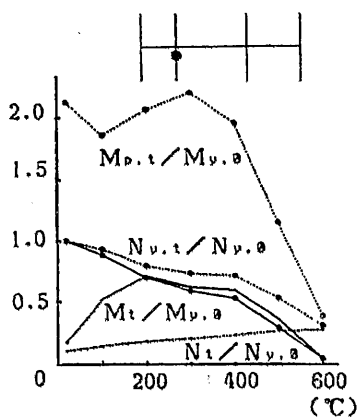


C <sub>3</sub>	□-500×400×32
C <sub>4</sub>	□-500×400×32
Y <sub>1</sub>	WH-900×300×9×19 (SS41)

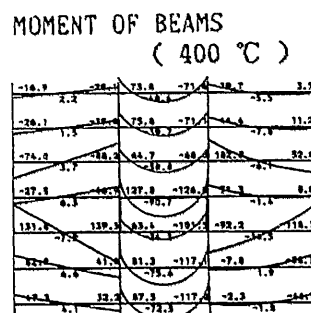
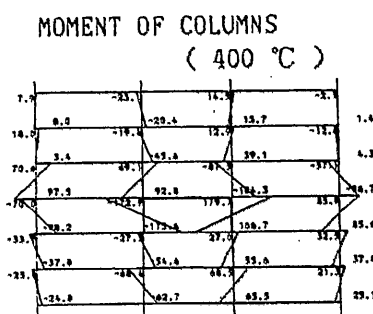
(a) 架構概要と加熱部材断面リスト



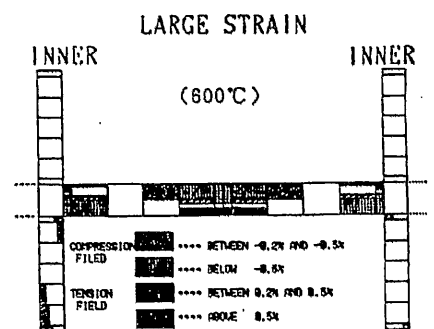
(c) 曲率



(d) 応力変動



(e) モーメント分布



(f) 大ひずみ分布

付図 17B-10

図 1.17 熱応力変形解析結果の一例 (加熱梁がたわみ込む例) 10)

### 1.2.4 鋼構造建物の火災実験

鋼構造建物の火災実験について以下に紹介する。

1978年、日本鋼構造協会・鉄骨耐火特別委員会は、鋼構造実大建物（平屋建て 63m<sup>2</sup>）の火災実験について報告した<sup>42)</sup>。柱の拘束が小さい門形架構においては梁の伸びだしが鋼材温度上昇による自由膨張に等しいこと、柱の拘束・柱の内外フランジ温度差・梁の上下フランジ温度差が梁のたわみに影響することなど、この報告では指摘された<sup>42)</sup>。

1985年、中村らは、実大架構の1/3に相当する2層2スパンの平面骨組と3層2スパンの立体骨組における電気炉による柱・梁の加熱実験ならびに実大架構の電気炉による柱の加熱実験を示した<sup>43)</sup>。この報告では、数値解析による変形予測が可能であること、実大架構の1/3模型における実験において梁の弱軸座屈が確認されたこと、図1.18に示すように実大架構実験において柱フランジの局部座屈が確認されたことが述べられている<sup>43)</sup>。

1997年、B.R.KIRBYは、イギリスCardingtonにて行なわれた8階建て鋼構造骨組の実大火災実験について報告し、柱・梁接合部の近傍において激しい局部座屈が生じた様子や梁が大きくたわみ込んでいる様子を示した<sup>44)</sup>。

2000年、北野らは、3層4段型自走式プレハブ駐車場の実大火災実験を報告した<sup>45)</sup>。大梁が500℃～600℃位で柱が400℃～500℃位まで温度上昇した状況下において、外柱の水平変形がECCSにおける許容値<sup>31)</sup>に対して1/4～1/3であったことなどがこの報告では述べられ、耐火被覆を用いない一般鋼による建物の可能性が示された<sup>45)</sup>。

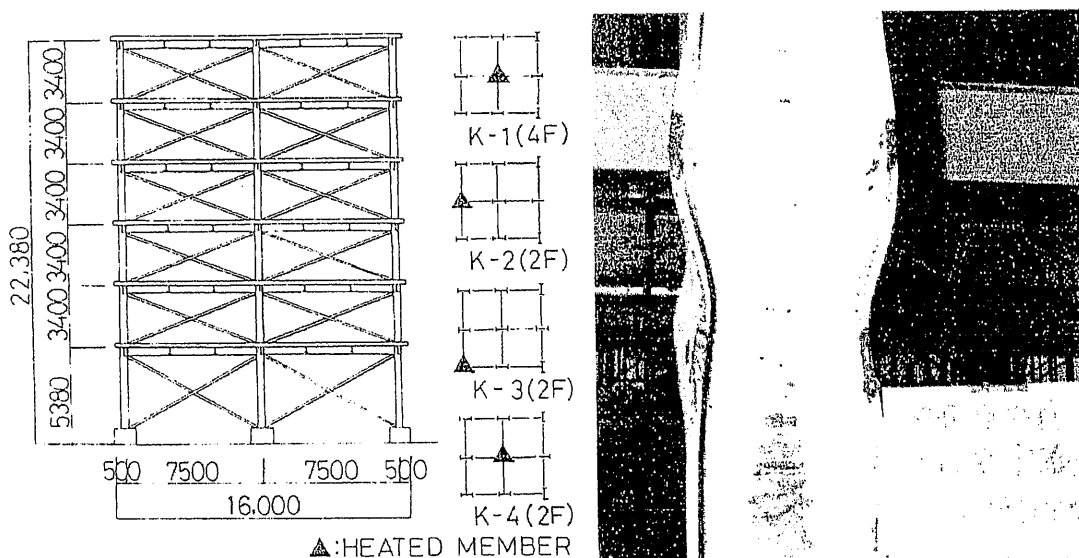


図 1.18 火災実験終了後に観測された柱の局部座屈<sup>43)</sup>

### 1.3 本研究の目的

鋼構造建物において火災が発生すると、加熱を受ける鋼構造部材には、鋼材の熱膨張と熱劣化さらには周辺部材からの拘束により、極めて大きな熱変形が生じる。火災加熱を受ける鋼構造骨組の一般的な挙動を図 1.19 に示す。外柱を含む区画に火災が発生すると、加熱梁が伸びだすことにより、外柱は外側へと押し出される。このとき、曲げ変形が集中する外柱の柱頭・柱脚には、局部座屈が生じる可能性がある。加熱梁が外側へと伸びだすことができない場合は、梁自身がたわみ込む。このとき、曲げ変形が集中する梁の両端部と中央部には、局部座屈が生じる可能性がある。高層鉄骨架構 48 棟における 600℃までの熱応力変形解析を行った報告<sup>9)</sup>によると、外柱柱頭における水平変形量は、15 棟の例において階高の 1/50 位にまで達しており、半数以上の例において階高の 1/120 を大きく上回っている。また同じ報告において、梁中央部におけるたわみ量は、5 棟の例において梁スパンの 1/30 位にまで達しており、ほとんどの例において梁スパンの 1/300 を大きく上回っていることが示されている。このように、火災加熱を受ける鋼構造骨組には、地震時をはるかに上回る変形が生じる。よって、鋼構造部材に発生する局部座屈は避けがたい。鋼構造の耐火設計においては、板要素の幅厚比を制限して局部座屈を防止する設計とは異なり、局部座屈後における鋼構造部材の変形性状を考慮した設計を行なうこととなる<sup>7)</sup>。

本研究の目的は、従来不足していた一般鋼部材に関する 600℃までの変形性状を実験により蓄積することであり、局部座屈後における鋼構造部材の残存耐力と荷重支持能力を明らかにすることである。この目的を達成するために、以下に示す 4 種類の実験を行なった。

#### (1) 溶接構造用圧延鋼材 (SM490A) の高温引張試験

火災加熱を受ける鋼構造部材の変形性状を把握する上で、鋼材の高温時引張特性は最も基本的な資料である。高温部材実験に用いた溶接構造用圧延鋼材について、常温～800℃までの高温引張特性を実験により明らかにする。

#### (2) 高温時における H 形断面・箱形断面部材の短柱圧縮実験

常温・400℃・500℃・600℃と鋼材温度を一定に保った状態において短柱圧縮実験を行い、鋼構造部材の局部座屈後における残存圧縮耐力を定量的に把握する。また、実験結果に基づいて、局部座屈後の応力・ひずみ曲線を数式化する。

### (3) 高温時におけるH形断面部材の純曲げ実験

図 1.19 に示す鋼構造骨組の火災時挙動において、加熱梁が外側へと伸びだすことができない場合は、梁自身がたわみ込む。このとき、曲げ変形が集中する梁の両端部と中央部には、局部座屈が生じる可能性がある。純曲げ実験の目的は、局部座屈後における鋼梁の残存曲げ耐力を明らかにすることである。

### (4) 高温時におけるH形断面・箱形断面部材の曲げ圧縮実験

常温・400℃・500℃・550℃・600℃と鋼材温度を一定に保った状態において、H形断面部材および箱形断面部材の曲げ圧縮実験を行なう。図 1.19 に示すように、外柱を含む区画に火災が生じると、加熱梁が伸びだすことにより、外柱は外側へと押し出される。このとき、曲げ変形が集中する外柱の柱頭・柱脚には、局部座屈が生じる可能性がある。このような状況下で最も懸念される事態は、局部座屈の発生により外柱の軸方向耐力が急激に低下して、外柱が軸力を支えられなくなることである。曲げ圧縮実験の目的は、高温時における鋼構造部材の局部座屈後における曲げ圧縮変形性状を明らかにし、加熱梁の伸びだしを受ける鋼柱の荷重支持能力を明らかにすることである。

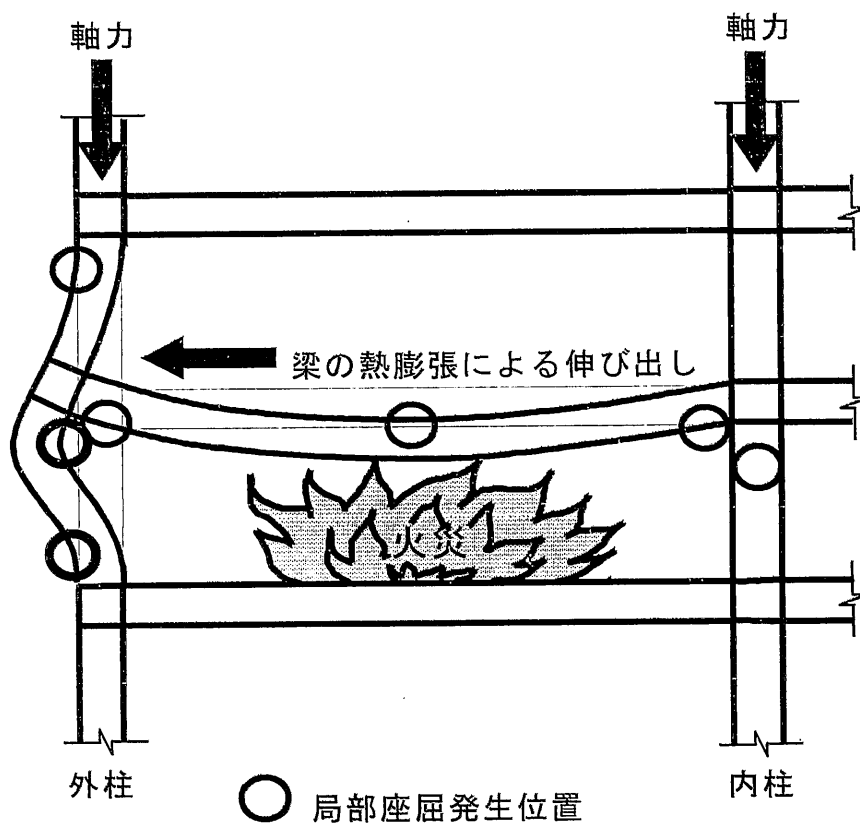


図 1.19 火災加熱を受ける鋼構造骨組の挙動



## 1.4 本論文の構成

本論文は、以下の7章より構成されている。

- 1章：本研究の序論として、火災加熱を受ける鋼構造部材の変形性状に関連する既往の研究を紹介し、本研究の目的を示した。
- 2章：溶接構造用圧延鋼材の常温～800℃における力学的特性を示し、高温時における応力-ひずみ曲線を数式化する。
- 3章：H形断面部材および箱形断面部材の短柱圧縮実験について述べ、常温・400℃・500℃・600℃における局部座屈後の残存圧縮耐力を示し、局部座屈の応力-ひずみ曲線を数式化する。
- 4章：H形断面部材の純曲げ実験について述べ、常温・400℃・500℃・600℃における局部座屈後の残存曲げ耐力を示す。また、2章と3章より得られた応力-ひずみ曲線を用いて数値解析を行い、実験結果と解析結果の比較を試みる。
- 5章：鋼梁の伸びだしを受ける鋼柱を対象としたH形断面部材および箱形断面部材の曲げ圧縮実験について述べ、常温・400℃・500℃・550℃・600℃における局部座屈後の鋼柱の荷重支持能力を明らかにする。また、2章と3章より得られた応力-ひずみ曲線を用いて数値解析を行い、実験結果と解析結果の比較を試みる。
- 6章：2章～5章に示す実験結果を鋼構造骨組の耐火設計に適用する方法を示す。
- 7章：各章での結論を総括して本研究の成果を述べ、今後の課題を示す。

## 第1章の参考文献

- 1) 齋藤光：「新しい防火設計と鋼構造」，社団法人日本鉄鋼協会，西山記念技術講座，pp39-50，1990年5月
- 2) 日本火災学会：「火災便覧 第3版（第20章 建築防火設計，20.4.4 耐火設計）」，共立出版，pp.1358-1370，1997年5月
- 3) 建築基準法 第2条五号「主要構造部」，法第2条九号の二「耐火建築物」，法第27条「耐火建築物又は準耐火建築物としなければならない特殊建築物」，法第61条「防火地域内の建築物」，法第62条「準防火地域内の建築物」，同施行令 第107条「耐火性能に関する技術的基準」，令第108条の3「耐火建築物の主要構造部に関する技術的基準」，令第112条「防火区画」，建設省告示第1433号「耐火性能検証法に関する算出方法等を定める件」
- 4) 建設省告示 2999号「建築構造部分の耐火試験方法」，1969年制定～2000年廃止
- 5) ISO834,"Fire-Resistance Tests -Elements of Building Construction"，1999年
- 6) 日本建築センター：「建築物の総合防火設計法 第4巻 耐火設計法」，1989年4月
- 7) 日本建築学会：「鋼構造耐火設計指針」，1999年1月
- 8) 窪田伸，猪砂利次，梅沢誠芳，渡辺伸生，塩飽豊明：「FR鋼を用いた自走式駐車場の無耐火被覆鉄骨構造（一般認定概要及び耐火設計内容について）」，日本建築センター，ビルディングレター，1996年4月
- 9) Uesugi,H., Saito,H. and Kodaira,A. : "Fire Resistance of Steel Structures of High Rise Buildings Exposed to Compartment Fire", Proceedings of the Third Pacific Structural Steel Conference, pp.329-336, 1992.10
- 10) 上杉英樹：「高層鉄骨架構の火災時の応力変形性状に関する研究」，学位論文，1990年1月
- 11) 原田有，古村福次郎：「高温度における建築用鋼材の力学的性質に関する研究」，日本建築学会論文報告集 第185号，pp.1-7，1971年7月
- 12) 藤本盛久，古村福次郎，安部武雄，篠原保二：「Primary Creep of Structural Steel (SS41) at High Temperatures」，日本建築学会論文報告集 第296号，pp.145-157，1980年10月

- 13) 藤本盛久, 古村福次郎, 安部武雄: 「Primary Creep of Structural Steel (SM50) at High Temperatures」, 日本建築学会論文報告集 第 306 号, pp.148-155, 1981 年 8 月
- 14) 藤本盛久, 古村福次郎, 安部武雄: 「Primary Creep of Structural Steel (SM58Q) at High Temperatures」, 日本建築学会論文報告集 第 319 号, pp.147-155, 1982 年 9 月
- 15) 日本鋼構造協会 技術委員会 耐久性分科会 耐火委員会 高温強度班: 「構造用鋼材の高温時ならびに加熱後の機械的性質」, JSSC, Vol.4, No.33, 1968 年
- 16) 高野孝次: 「鉄骨構造の部材の耐火性能に関する研究」, 学位論文, 1983 年
- 17) 建設省建築研究所: 「建築物の防火設計法の開発(耐火設計法の開発)」, 昭和 59 年度, 昭和 61 年度総合技術開発プロジェクト 報告書, 1985 年 3 月, 1987 年 3 月
- 18) 建設省建築研究所, 日本建築センター: 「防・耐火性能評価技術の開発(構造分科会)」, 総合技術開発プロジェクト No.6-4, pp.40-41,76-84, 1995 年 3 月, 総合技術開発プロジェクト No.7-4, pp.135-192, 1996 年 3 月
- 19) 岡部猛: 「漸増温度下の鋼柱の座屈強度に及ぼす高温クリープの影響評価」, 日本建築学会, 構造工学論文集 Vol.43B, pp.367-376, 1997 年 3 月
- 20) 岡部猛: 「矩形断面を持つ鋼柱模型(SM490)の高温時の座屈強度」, 日本建築学会構造系論文集 第 515 号, pp.169-176, 1999 年 1 月
- 21) 雑喉良助, 村上行夫, 平山博巳, 塩飽豊明, 猪砂利次: 「建築構造用鋼材の高温特性」, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.113-114, 2000 年 9 月
- 22) 岡部猛, 茶圓敦, 安部武雄, 「鋼圧縮材の高温時の座屈強度に関する研究(その 8. SN490B 鋼柱の高温座屈実験と数値解析法)」, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp.55-56, 2001 年 9 月
- 23) S.H.Ingberg, H.K.Griffin, W.C.Robiwson, R.E.Wilson: "Fire Test of Building Columns", Technologic Paper of the Bureau of Standards No.184, April 21.1921
- 24) 茂木武, 遊佐秀逸, 西田一郎, 岡村義徳, 仲谷一郎: 「実大鉄骨柱の高温座屈耐力に関する実験的研究」, 日本建築学会構造系論文集 第 538 号, pp.187-194, 2000 年 12 月

- 25) 齋藤光, 清水洋平:「高温時鉄骨構造はりの曲げ実験」, 日本建築学会論文報告集 第89号, 1963年9月
- 26) 繁永英毅, 遊佐秀逸, 棚池裕, 齊藤春重:「防・耐火性能評価技術の開発 鋼製はりの載荷加熱実験(その1, その2)」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998年9月
- 27) Hikaru. SAITO, Hideki. UESUGI, Keiiti. MIYAMOTO: "Load Bearing and Deformation Capacity of H Shaped Steel Members at Elevated Temperature", Fire Science & Technology Vol.7 No.2, pp.43-52, 1987
- 28) 染谷朝幸, 窪田伸, 作本好文, 上杉英樹, 齋藤光:「耐火鋼を用いたH形・箱形断面柱の高温時耐力」, 構造工学論文集 Vol.39B, pp.393-404, 1993年3月
- 29) 上杉英樹, 鈴木隆生, 平島岳夫, 倉本真介, 齋藤光:「耐火鋼を用いた角形・H形断面柱の耐火性」, 構造工学論文集 Vol.42B, pp.407-414, 1996年3月
- 30) 上杉英樹, 鈴木隆生, 平島岳夫, 齋藤光:「高温時における耐火鋼部材の応力変形性状」, 構造工学論文集 Vol.43B, pp.359-366, 1997年3月
- 31) Design Manual on the European Recommendations for the Fire Safety of Steel Structure, ECCS-Technical Committee3 Fire Safety of Steel Structure, 1985
- 32) 平山博巳, 高田啓一, 鈴木弘之, 近藤明洋, 石田雄一:「400N/mm<sup>2</sup>級鋼箱型断面短柱の高温圧縮実験」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1992年8月
- 33) 鈴木弘之, 岩井昭夫:「円形鋼管短柱の高温圧縮試験」, 構造工学論文集 Vol.40B, pp.585-593, 1994年3月
- 34) 瀬川貴志, 鈴木弘之, 岩井昭夫, 小林厚:「火災加熱を受ける鋼構造骨組の崩壊温度(その5 箱型断面柱鋼短柱の高温時応力~ひずみ関係)」, 日本建築学会大会学術講演梗概集 pp.1371, 1993年8月
- 35) 齋藤光:「端部拘束鋼構造部材の火災時の性状」, 日本火災学会論文集 Vol.15, No.1, pp.7-19, 1966年1月
- 36) 齋藤光:「鋼構造架構の熱応力」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1969年
- 37) 古村福次郎, 右田健児, 安部武雄, 岡部猛, 金和中:「塑性設計された鋼構造骨組の弾塑性クリープ熱変形挙動」, 日本建築学会構造系論文報告集 第

368号, pp.68-77, 1986年10月

- 38) 上杉英樹, 小池浩:「高層鉄骨架構の熱応力解析(その1) 区画火災を受ける超高層鉄骨架構の熱応力解析手法」, 日本建築学会構造系論文報告集 第381号, pp.73-80, 1987年11月
- 39) Becker, J., Bresler, B., "FIRES-RC A Computer Program for the Fire Response of Structure - Reinforced Concrete Frames", Report No.UCB FRG 74-3, University of California Berkley, July, 1974
- 40) 鈴木弘之:「火災時における鋼骨組の崩壊温度」, 日本建築学会構造系論文報告集 第477号, pp.147-156, 1995年11月
- 41) 日本建築学会:「鋼構造塑性設計指針」, 1975年11月
- 42) 日本鋼構造協会鉄骨耐火特別委員会:「鋼構造実大建物の火災実験」, JSSC Vol.14, No.148, pp.20-47, 1978年4月
- 43) K.NAKAMURA, K.SHINODA, M.HIROTA, K.KAWAGOE: "Structural Behaviour of Steel Frame in Building Fire", FIRE SAFETY SCIENCE-PROCEEDINGS OF THE FIRST INTERNATIONAL SYMPOSIUM, pp.271-280, 1985
- 44) B.R.KIRBY: "Large Scale Fire Tests: the British Steel European Collaborative Research Programme on the BRE 8-Storey Frame", FIRE SAFETY SCIENCE-PROCEEDINGS OF THE FIFTH INTERNATIONAL SYMPOSIUM, pp.1129-1140, 1997
- 45) 北野貴之, 須川修身, 増田秀昭, 安部武雄, 上杉英樹:「3層4段型自走式プレハブ駐車場の実大火災実験」, 構造工学論文集 Vol.46B, pp.747-757, 2000年3月

## 第2章 溶接構造用圧延鋼材の高温引張試験

2.1 概要	25
2.2 高温引張試験	26
2.2.1 試験条件	26
2.2.2 試験片	27
2.2.3 試験方法	28
2.2.4 試験結果	31
2.3 引張域における応力-ひずみ曲線の数式化	49
2.3.1 数式化の方法	49
2.3.2 試験結果との比較	54
2.4 結語	62
第2章の参考文献	63

## 2.1 概要

火災加熱を受ける鋼構造部材の変形性状を把握する上で、鋼材の高温引張特性は最も基本的な資料である。我が国においては、1960年代の後半頃より、鋼材の高温引張試験が行なわれるようになり、鋼材の高温引張特性に関する資料が蓄積されている<sup>1)~16)</sup>。また、これらの研究結果に基づき、高温時における鋼材の強度と応力-ひずみ曲線式が提案されている<sup>17),18)</sup>。

しかし、規格別に鋼材を分類して実験結果を整理すると、公表されている実験結果は比較的少ない。建築構造物で頻繁に利用される溶接構造用圧延鋼材(SM490)についても、鋼板のロット数で20個程度しか見当たらない<sup>2),4),7)~10),12),15)</sup>。既往の研究では、同じ規格の鋼材においても、高温強度にバラツキのあることが指摘されている<sup>2),17),18)</sup>。現在に至っても、鋼材の高温引張特性に関するさらなる資料の蓄積が望まれている。

本章では、高温部材実験に用いた溶接構造用圧延鋼材について、常温~800℃までの高温引張特性を実験により明らかにする。また、試験結果に基づいて、応力-ひずみ曲線を数式化する。

## 2.2 高温引張試験

### 2.2.1 試験条件

試験条件を表 2.1 に示す。5 種類の板材 (PL-9~PL-4.5B) および裏当て金に用いた平鋼 (FB-9) について高温引張試験を行った。鋼種は SM490A とした。試験片は、高温部材実験に用いた鋼板より採取した。温度条件は常温~800℃とし、高温部材実験の試験温度である常温, 400℃, 500℃, 550℃, 600℃では全ての試験片について試験を行った。同一条件における試験数は 2 回とした。

鋼材検査証明書による鋼材の機械的性質および化学成分を表 2.2 に示す。なお、PL-4.5A, PL-4.5B, FB-9 については鋼材検査証明書が得られなかった。

表 2.1 試験条件

試験片	板厚	鋼種	試験温度 (°C)											計	
			常温	100	200	300	400	450	500	550	600	700	800		
PL-9	9 mm	SM490A	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	22
PL-6A	6 mm	SM490A	2				2		2	2	2				10
PL-6B	6 mm	SM490A	2				2		2	2	2				10
PL-4.5A	4.5 mm	SM490A	2				2		2	2	2				10
PL-4.5B	4.5 mm	SM490A	2				2		2	2	2				10
FB-9	9 mm	SM490A	2				2		2	2	2				10
試験数			12	2	2	2	12	2	12	12	12	2	2	72	

表 2.2 鋼材の機械的性質および化学成分

試験片	引張試験			化学成分 (%)					炭素当量
	降伏点	引張強度	伸び	C	Si	Mn	P	S	Ceq
	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%	×100	×100	×100	×1000	×1000	%
PL-9	362	516	29	16	31	131	12	5	0.39
PL-6A	362	519	27	16	29	132	12	5	0.39
PL-6B	362	516	29	16	31	131	12	5	0.39



## 2.2.2 試験片

SM490A (PL-9~PL-4.5B) の試験片形状を図 2.1(a)に、裏当て金に用いた平鋼 (FB-9) の試験片形状を図 2.1(b)に示す。SM490A の試験片は圧延方向より採取した。どちらの試験片も、標点距離を 50mm とし、平行部の幅を 12.5mm とした。

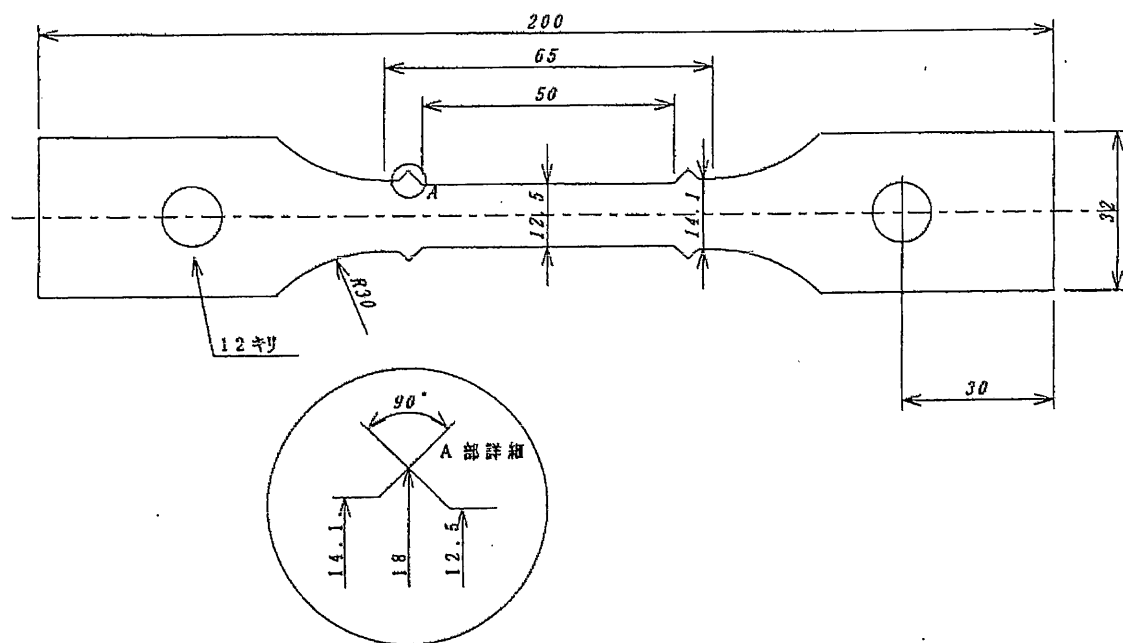


図 2.1(a) 試験片の形状 (SM490A)

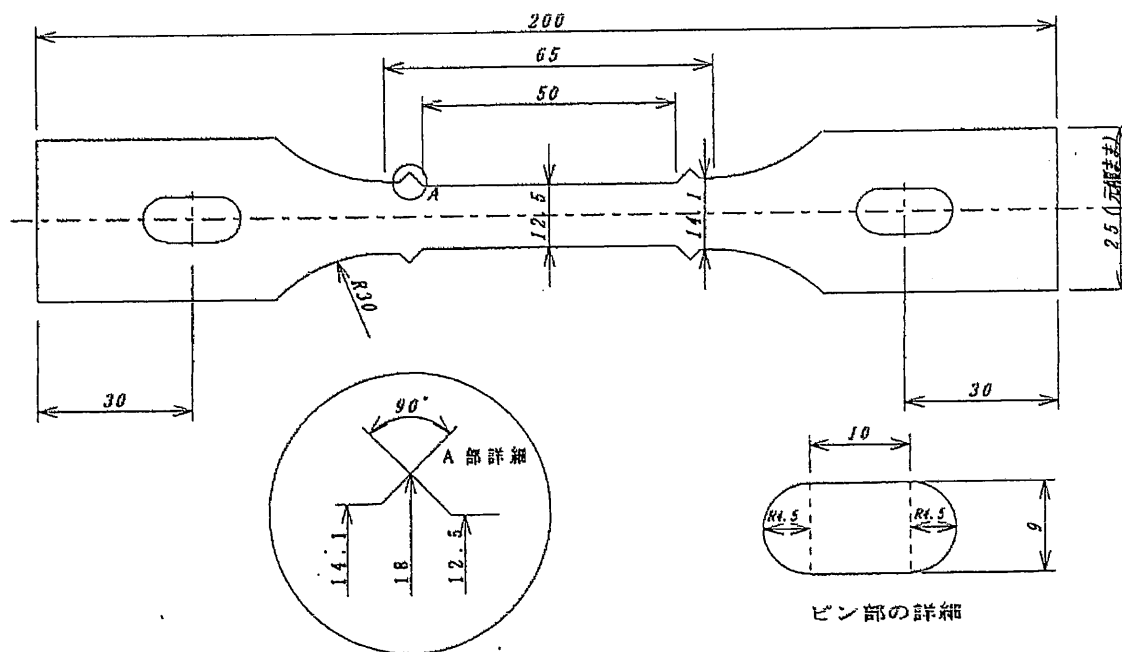


図 2.1(b) 試験片の形状 (裏当て金に用いた平鋼)

## 2.2.3 試験方法

### (1) 試験方法の概要

JIS G 0567「鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験方法」(1993年)に基づいて試験を行った。試験機器の一覧を表 2.3 に示す。

### (2) 試験片の寸法測定

試験片の寸法測定は、JIS Z 2241「金属材料引張試験方法」に基づいて行った。寸法測定の結果は表 2.4(a)～表 2.4(f)に示す。

### (3) 加熱方法

上・中・下段の 3 系統で温度を制御する筒型電気炉により加熱を行った。筒型電気炉の寸法は、外径:  $\phi$  300mm, 内径:  $\phi$  150mm (炉の上下部は  $\phi$  70mm), 高さ: 400mm である。試験片が試験温度を超えないように加熱を制御し、試験温度に達して約 15 分後に加力を開始し、加力中は試験温度を保持した。試験片温度の許容誤差は  $\pm 3^{\circ}\text{C}$  以内とした。

### (4) 温度測定方法

鋼材温度の測定には R 熱電対 (素線系 0.50 mm) を用いた。JIS Z 8704「温度測定方法—電気的方法」(1993年)によると、素線系 0.50 mm の R 熱電対の常用限度 (空気中において連続使用できる温度の限度) は  $1400^{\circ}\text{C}$  である。熱電対は試験片中央部の表裏に 2 本設置した。熱電対の設置にあたっては、耐火用の布と紐を用いて試験片に密着させた。本来は標点区間両端部の温度についても測定する必要があるが、過去の試験において標点区間の温度分布は許容誤差  $\pm 3^{\circ}\text{C}$  以内となることが確認されていたため、標点区間両端部の温度測定は割愛した。

温度測定結果の一例を図 2.2 に示す。図は温度記録用紙の写しであり、図中の温度は試験中央部の表裏より得られた温度の平均値である。

### (5) 加力方法

加力には、ひずみ制御型の 10ton 引張試験装置を用いた。図 2.1 に示す試験片の  $\phi$  12mm の孔に耐熱鋼の治具を通して、試験片に引張力を与えた。ひずみ速度は、0.5%ひずみまでは 1 分あたり 0.3%とし、0.5%ひずみ以降は 1 分あた

り 10%とした。なお、治具間の緩みによる変形が生じないように、ひずみ制御を行う前に約 2940N(300kgf)の余荷重を加えた。

#### (6) 伸び測定方法

標点区間における伸びの測定は、差動トランス式の圧板間変位測定装置を用いて行った。図 2.1 に示す試験片の標点区間両端の「つば」に耐熱鋼圧板をネジで固定し、その圧板間の差を差動トランスにより検出した。本試験は、初期ひずみ時 (0%~1%) における精確な応力・ひずみ曲線を得ることと、大ひずみ (20%) までの応力・ひずみ曲線を得ることを目的としている。よって伸びの測定は、0.5mm フルスケールの変位測定装置 (以下、高感度変位計) および 10mm フルスケールの変位測定装置 (以下、低感度変位計) をそれぞれ 2 個、計 4 個の変位計を用いて行った。この伸び量を標点距離で除すことによりひずみを算定した。

荷重および伸びの測定間隔は 1 秒あたり 20 回とした。

表 2.3 試験機器の一覧

項目		製造元	型式
加力	載荷	島津製作所	AUTOGRAPH IS10T 型
	計測	横河電機	AR4400 アナライジングレコーダー
変形	変位計	新光電気	高感度:DTS5S 形, 低感度:DTS10S 形
	増幅器	島津製作所	高感度:STA-5M-4 形, 低感度:STA-10M-4 形
温度	加熱	島津製作所	島津オートグラフ用 電気炉
	計測	石福金属工業	R 熱電対

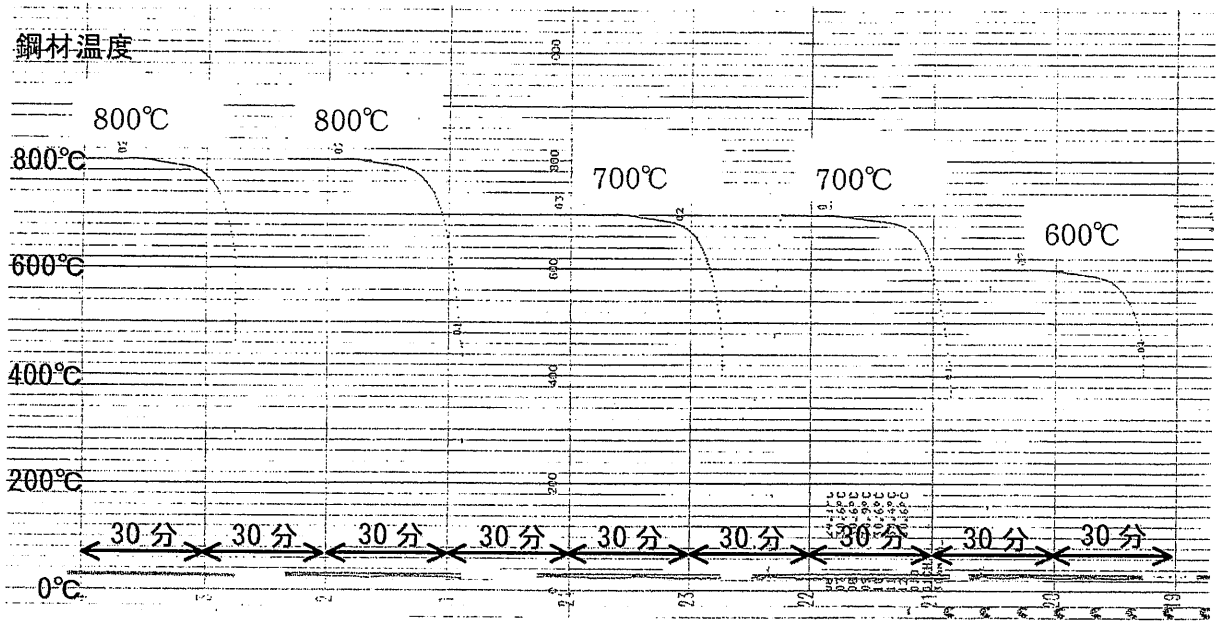


図 2.2 温度測定結果の一例 (PL-9)

## 2.2.4 試験結果

### (1) 試験結果の概要

試験結果の一覧として、試験時に記録された値を表 2.4(a)～図 2.4(f)に示す。表中に示す降伏荷重は、0.2%オフセット時の荷重で、\*印のあるものは下降伏点の値である。破断位置については、JIS Z 2241 に示される A,B,C 破断の 3 区分に分けた。

A 破断：標点間の中心から標点距離の 1/4 以内で破断

B 破断：標点間の中心から標点距離の 1/4 以内を超え標点以内で破断

C 破断：標点外で破断

本試験における破断は、全て標点内の破断であった。

常温時については、参考値として標準的な素材試験も行った。載荷装置は 100t 用アムスラー試験機(載荷レンジ 200N)、ひずみゲージは FLA-5-11(東京測器)、試験片は 1 号試験片、試験数は 3 回である。本試験結果と標準的な素材試験結果の比較を表 2.5 に示す。降伏応力の値は概ね対応しているが、本試験の方が、弾性係数が小さく、引張強度が若干大きく、伸びが大きくなっている。

試験終了後における試験片の一例を写真 2.1 に示す。

### (2) 応力-ひずみ曲線

応力-ひずみ曲線を図 2.3(a)～図 2.3(f)に示す。高感度変位計による結果(0~1%の結果)を各図の上段に示し、低感度変位計による結果(0~20%の結果)を下段に示した。高感度変位計による結果を見ると、全ての試験片において、0.5%ひずみ時に応力が急激に上昇している。これは、0.5%ひずみ時にひずみ速度を 0.3%/分から 10%/分に切替えたためである。応力の急激な上昇は、高温になるほど顕著に見られる。

図 2.3(a) PL-9 の結果を見ると、常温および 100°Cにおいて明瞭な降伏棚が見られる。200°Cの試験では降伏後に応力が振動しているような結果となった。この現象について、文献 2)における説明を以下に記す。「この現象は歪時効型の鋼に見られる”Serrated yielding”を示したものである。100°C以上の温度で試験を行なった場合歪時効が急激であるため、上降伏点から下降伏点に応力が降下する間に、直ちに時効現象を起し、降伏面をより変形させるためには高い応力が必要とされる。この下降伏応力より高い値の応力は”Strain aged lower yield

stress”と呼ばれている。その応力で再び降伏が起こったとき歪の第2のジャンプが起り、再び応力はゆっくり降下する。この過程は試験片の標点距離全てにわたって繰り返されるので、鋸歯状の降伏棚が現われる。」200℃および300℃では、青熱脆性によるひずみ硬化が見られる。400℃になると常温時の応力を下回る。500℃では、常温時に対して1/2~2/3の応力となる。600℃では、常温時に対して約1/3の応力となる。700℃および800℃では、常温時に対して1/5以下の応力となっている。

図2.3(b)および図2.3(c)のPL-6AおよびPL-6Bの結果を見ると、両者にほとんど相違は無い。また、図2.3(a) PL-9の結果とも似かよっている。

図2.3(d)および図2.3(e)のPL-4.5AおよびPL-4.5Bの結果を見ると、両者にほとんど相違は無い。9mmおよび6mmの鋼板と異なり、常温において降伏棚が見られない。

図2.3(f)のFB-9の結果を見ると、PL-4.5AおよびPL-4.5Bと同様に、常温において降伏棚が見られない。裏当て金に用いた平鋼の高温時耐力は、他5種類のSM490Aの結果よりやや大きな値を示している。

### (3) 弾性係数

表2.6および図2.4に弾性係数を示す。常温~450℃は降伏応力の1/4, 500℃および550℃は降伏応力の1/3, 600℃は降伏応力の1/2までの勾配を用いて算出した。700℃および800℃は、初期に与える余荷重が降伏応力の1/2を超えており、弾性係数を算出できなかった。高温引張試験の方法では、精確な弾性係数を得ることは難しい。表2.6に示すように、本試験では、同一試験①と②において値が大きくばらついている。図2.4のグラフは、図中の左段に試験①と②より得られた弾性係数の平均値を示し、右段に対常温比を示している。また、参考に既往のデータも示した<sup>4),9),10)</sup>。温度が上昇するに従い、弾性係数は低下していく傾向が伺える。

### (4) 0.2%オフセット強度

表2.7および図2.5に0.2%オフセット強度を示す。図2.5のグラフは、図中の左段に試験①と②より得られた0.2%オフセット強度の平均値を示し、右段に対常温比を示したものである。また、参考に既往のデータも示した<sup>2),4),7),8),9),10)</sup>。全ての試験において、温度上昇に伴い、0.2%オフセット強度が低下している。

PL-9, PL-6A, PL-6B では、常温時の強度に対して、400℃で 0.6~0.7, 500℃で半分程度, 600℃で 0.3~0.4 にまで低下している。既往のデータと比較すると、高温時の 0.2% オフセット強度はやや小さい部類に入る。PL-4.5A, PL-4.5B では、常温時の強度に対して、400℃で 0.8 程度, 500℃で 0.6 程度, 600℃で 0.4 程度まで低下している。既往のデータと比較すると、高温時の 0.2% オフセット強度はやや大きい部類に入る。裏当て金の FB-9 は、温度上昇に伴う強度低下がやや小さく、高温時の 0.2% オフセット強度がやや大きい。

#### (5) 引張強度

表 2.8 および図 2.6 に引張強度を示す。また、図 2.6 のグラフは、図中の左段に試験①と②より得られた引張強度の平均値を示し、右段に対常温比を示したものである。また、参考に既往のデータも示した<sup>2)</sup>。PL-9 の結果を見ると、100℃で強度がやや低下している。200℃および 300℃では、青熱脆性による強度上昇が見られる。400℃以降で引張強度は急激に減少し、常温時の引張強度に対して、500℃で 0.6 程度, 600℃で 0.3~0.4 にまで低下している。PL-6A, PL-6B, PL-4.5A, PL-4.5B に関しても、PL-9 の結果とほぼ同じである。既往のデータと比較すると、本試験において用いた鋼材の高温時引張強度は、平均または若干小さい部類に入る。

尚、高温時の引張強度は、ひずみ速度の影響を大きく受ける<sup>15,16)</sup>。本試験の引張強度は、ひずみ速度 10%/分における値であるから、ひずみ速度を小さくして載荷した場合に比べて、大きな値を示していると考えられる。

#### (6) 破断伸び

JIS Z 2241「金属材料引張試験方法」に基づいて測定した、破断伸びを表 2.9 および図 2.7 に示す。PL-9 では、200℃において破断伸びが小さくなっているが、300℃および 400℃では再び常温に近い値を示している。400℃以降で破断伸びは急激に大きくなり、600℃で 40~60%, 800℃では 100%にまで上昇している。PL-6A, PL-6B は、PL-9 の結果とほぼ同じである。PL-4.5A, PL-4.5B, FB-9 の破断伸びは、PL-9 の結果より若干小さめの値を示している。

表 2.4 (a) 試験結果 (PL-9)

試験番号	板厚 (mm)	幅 (mm)	断面積 (mm <sup>2</sup> )	標点距離 (mm)	温度 (°C)	降伏荷重 (N)	最大荷重 (N)	破断後標点間 の伸び量(mm)	破断 位置
PL-9-1	8.77	12.51	109.713	49.7	常温	38932*	57565	18.3	A
PL-9-2	8.71	12.53	109.136	49.7		38638*	56879	17.8	A
PL-9-3	8.75	12.50	109.375	49.9	100	34225*	53348	16.7	A
PL-9-4	8.65	12.51	108.212	50.1		33931*	52662	16.7	A
PL-9-5	8.76	12.50	109.500	49.8	200	34716	59919	11.0	A
PL-9-6	8.72	12.50	109.000	50.0		33735	59428	11.2	A
PL-9-7	8.71	12.52	109.049	50.0	300	22163*	61684	15.9	A
PL-9-8	8.74	12.50	109.250	50.0		22948*	61978	14.6	A
PL-9-9	8.71	12.53	109.136	49.7	400	20300*	53544	16.6	B
PL-9-10	8.76	12.54	109.850	49.7		27066	53937	16.1	B
PL-9-11	8.68	12.54	108.847	50.0	450	23242	45601	17.0	B
PL-9-12	8.57	12.51	107.211	50.0		24124	46091	16.8	B
PL-9-13	8.76	12.52	109.675	50.0	500	20888	37265	19.5	B
PL-9-14	8.78	12.53	110.013	50.0		20741	36873	19.0	B
PL-9-15	8.68	12.54	108.847	50.0	550	17260	28243	23.8	B
PL-9-16	8.68	12.51	108.587	50.0		17946	28047	24.5	B
PL-9-17	8.72	12.49	108.913	50.0	600	14710	20398	28.1	B
PL-9-18	8.76	12.53	109.763	50.0		14514	20202	29.3	B
PL-9-19	8.74	12.53	109.512	49.8	700	6178	9807	39.0	B
PL-9-20	8.70	12.53	109.011	49.8		6178	9905	40.1	B
PL-9-21	8.63	12.50	107.875	50.0	800	3825	7257	51.1	B
PL-9-22	8.71	12.51	108.962	49.9		3628	7355	48.4	B



表 2.4 (b) 試験結果 (PL-6A)

試験番号	板厚 (mm)	幅 (mm)	断面積 (mm <sup>2</sup> )	標点距離 (mm)	温度 (°C)	降伏荷重 (N)	最大荷重 (N)	破断後標点間 の伸び量(mm)	破断 位置
PL-6A-1	5.68	12.55	71.284	49.7	常温	27655*	37559	15.8	A
PL-6A-2	5.66	12.53	70.920	49.7		27753*	37363	16.6	A
PL-6A-3	5.60	12.50	70.000	49.9	400	16181	34617	15.6	B
PL-6A-4	5.63	12.54	70.600	49.9		14024*	34421	14.4	B
PL-6A-5	5.62	12.51	70.306	49.9	500	13533	23634	20.1	B
PL-6A-6	5.61	12.52	70.237	49.9		13435	23438	19.6	B
PL-6A-7	5.65	12.52	70.738	49.9	550	11474	17750	23.5	B
PL-6A-8	5.67	12.52	70.988	49.7		10983	17750	22.6	B
PL-6A-9	5.62	12.52	70.362	49.8	600	8140	12454	28.8	B
PL-6A-10	5.60	12.53	70.168	49.9		8336	12651	28.5	B

表 2.4 (c) 試験結果 (PL-6B)

試験番号	板厚 (mm)	幅 (mm)	断面積 (mm <sup>2</sup> )	標点距離 (mm)	温度 (°C)	降伏荷重 (N)	最大荷重 (N)	破断後標点間 の伸び量(mm)	破断 位置
PL-6B-1	5.70	12.54	71.478	49.6	常温	26772*	37363	16.6	A
PL-6B-2	5.67	12.54	71.102	49.7		27262*	37363	16.6	A
PL-6B-3	5.70	12.54	71.478	49.9	400	16377	35010	14.4	B
PL-6B-4	5.71	12.53	71.546	49.9		16867	34716	15.6	B
PL-6B-5	5.65	12.54	70.851	49.9	500	13239	23046	19.9	B
PL-6B-6	5.66	12.54	70.976	50.0		13925	24026	20.4	B
PL-6B-7	5.71	12.51	71.432	50.0	550	11964	18044	23.8	B
PL-6B-8	5.70	12.52	71.364	50.0		11670	18240	22.9	B
PL-6B-9	5.71	12.50	71.375	50.0	600	7649	12651	28.9	B
PL-6B-10	5.70	12.51	71.307	50.0		8532	13141	28.8	B

表 2.4 (d) 試験結果 (PL-4.5A)

試験番号	板厚 (mm)	幅 (mm)	断面積 (mm <sup>2</sup> )	標点距離 (mm)	温度 (°C)	降伏荷重 (N)	最大荷重 (N)	破断後標点間 の伸び量(mm)	破断 位置
PL-4.5A-1	4.34	12.51	54.293	49.5	常温	22457	27557	13.6	A
PL-4.5A-2	4.33	12.50	54.125	49.7		23242	28243	13.1	A
PL-4.5A-3	4.34	12.48	54.163	49.5	400	18633	23928	13.0	B
PL-4.5A-4	4.30	12.53	53.879	49.7		19613	24222	12.4	B
PL-4.5A-5	4.33	12.53	54.255	49.9	500	14318	17946	15.9	B
PL-4.5A-6	4.34	12.51	54.293	50.0		13925	18142	15.9	B
PL-4.5A-7	4.34	12.53	54.380	49.8	550	12062	15298	16.0	B
PL-4.5A-8	4.34	12.54	54.424	49.7		11572	14710	16.7	B
PL-4.5A-9	4.30	12.53	53.879	49.5	600	9120	11866	19.2	B
PL-4.5A-10	4.33	12.51	54.168	49.6		9611	12356	17.4	B

表 2.4 (e) 試験結果 (PL-4.5B)

試験番号	板厚 (mm)	幅 (mm)	断面積 (mm <sup>2</sup> )	標点距離 (mm)	温度 (°C)	降伏荷重 (N)	最大荷重 (N)	破断後標点間 の伸び量(mm)	破断 位置
PL-4.5B-1	4.34	12.55	54.467	49.7	常温	23536	28832	13.1	A
PL-4.5B-2	4.36	12.51	54.544	50.1		22555	28145	13.6	A
PL-4.5B-3	4.34	12.48	54.163	49.5	400	19515	24124	11.5	B
PL-4.5B-4	4.30	12.53	53.879	49.7		18927	23928	12.8	B
PL-4.5B-5	4.32	12.51	54.043	49.8	500	13925	18142	16.6	B
PL-4.5B-6	4.32	12.50	54.000	49.9		14024	18044	14.2	B
PL-4.5B-7	4.33	12.50	54.125	50.0	550	11474	15004	16.6	B
PL-4.5B-8	4.35	12.50	54.375	49.9		11180	15004	18.0	B
PL-4.5B-9	4.29	12.50	53.625	49.8	600	8532	11474	24.0	B
PL-4.5B-10	4.35	12.54	54.549	49.7		9120	12258	18.6	B

表 2.4 (f) 試験結果 (FB-9)

試験番号	板厚 (mm)	幅 (mm)	断面積 (mm <sup>2</sup> )	標点距離 (mm)	温度 (°C)	降伏荷重 (N)	最大荷重 (N)	破断後標点間 の伸び量(mm)	破断 位置
FB-9-1	8.83	12.52	110.552	49.6	常温	35402	63057	15.7	A
FB-9-2	8.82	12.51	110.338	49.5		34617	62763	15.8	A
FB-9-3	8.85	12.53	110.891	49.5	400	29420	63057	14.0	B
FB-9-4	8.82	12.55	110.691	49.5		30303	63057	14.8	B
FB-9-5	8.83	12.54	110.728	49.6	500	27164	46876	13.0	A
FB-9-6	8.85	12.57	111.245	49.6		28341	46876	13.5	B
FB-9-7	8.84	12.54	110.854	49.6	550	24811	36579	15.6	B
FB-9-8	8.83	12.52	110.552	49.4		23928	36579	16.5	B
FB-9-9	8.84	12.53	110.765	49.4	600	19123	26478	22.4	B
FB-9-10	8.84	12.53	110.765	49.4		18338	25693	23.3	B

表 2.5 常温時における本試験結果と標準的な試験結果との比較

試験片	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )		降伏応力 (N/mm <sup>2</sup> )		引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )		破断伸び (%)	
	試験①	試験②	試験①	試験②	試験①	試験②	試験①	試験②
PL-9	188	203	355	355	523	511	36	27
PL-6A	178	192	390	383	527	519	33	25
PL-6B	174	193	379	349	524	508	33	26
PL-4.5A	179	190	422	420	515	507	27	21
PL-4.5B	181	187	423	412	523	496	26	21

注) 試験①: 高温引張試験と同じ装置による試験結果の平均値 (試験数 2 回)

試験②: 標準的な引張試験方法による試験結果の平均値 (試験数 3 回)

なお、FB-9 については、標準的な引張試験を行っていない。



(a) 常温 PL-9



(b) 200°C PL-9



(c) 300°C PL-9



(d) 400°C PL-9



(e) 500°C PL-9



(f) 600°C PL-9



(g) 700°C PL-9



(h) 800°C PL-9



(i) 常温 FB-9



(j) 600°C FB-9

写真 2.1 試験終了後における試験片の一例 (PL-9, FB-9)

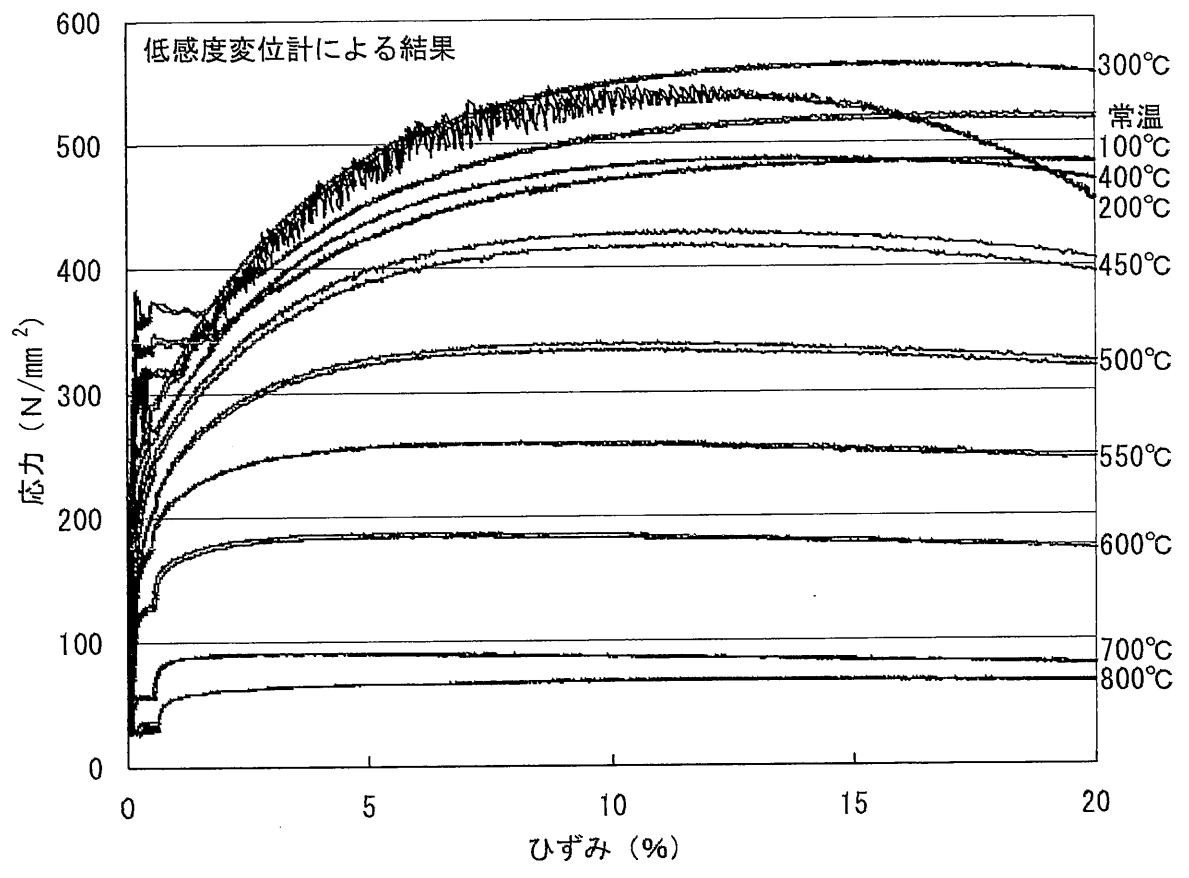
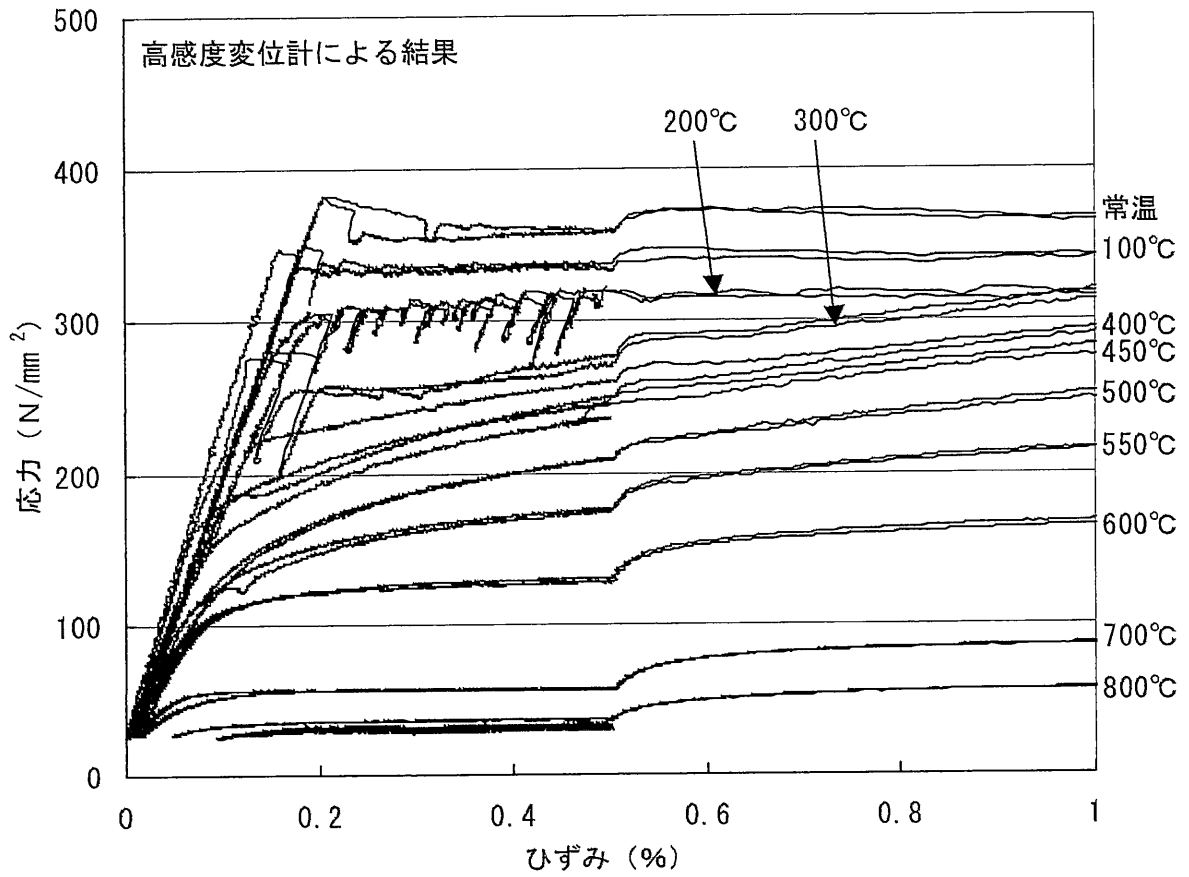


図 2.3(a) 応力-ひずみ曲線 (PL-9)

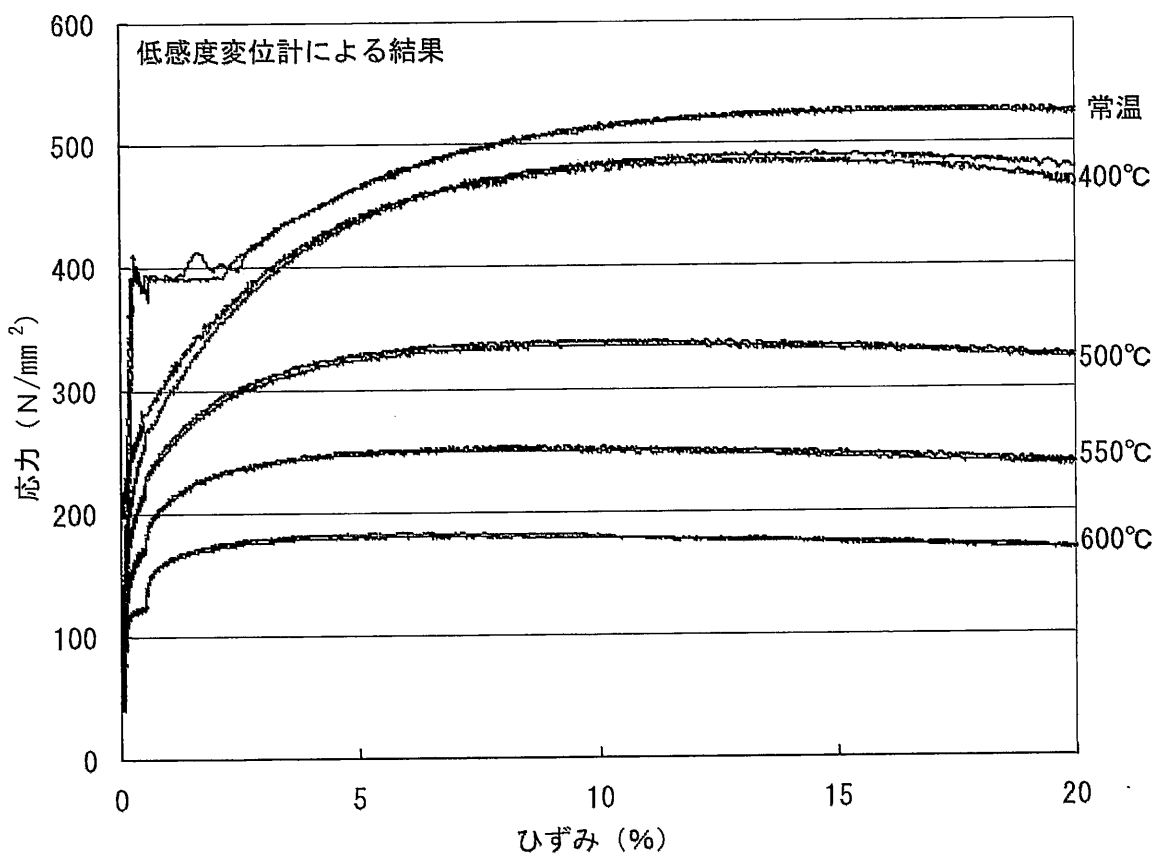
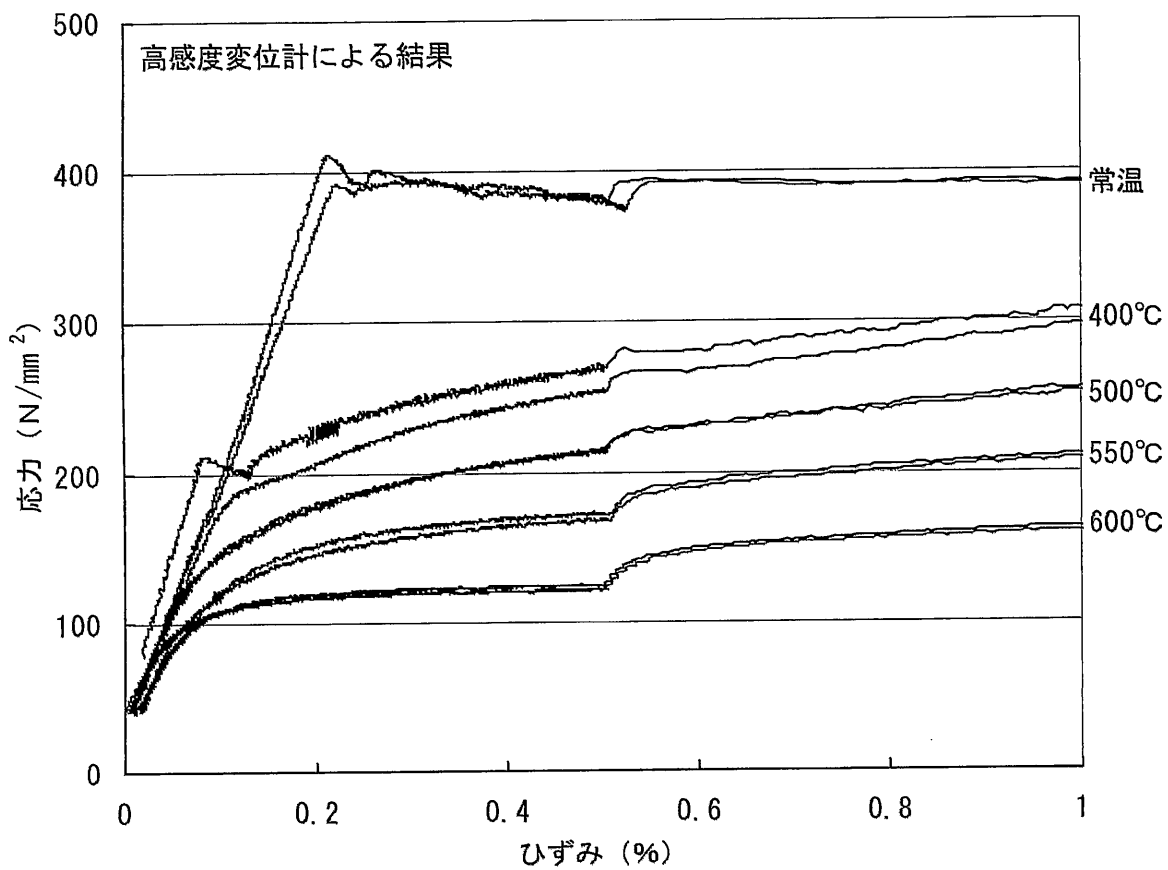


図 2.3(b) 応力-ひずみ曲線 (PL-6A)

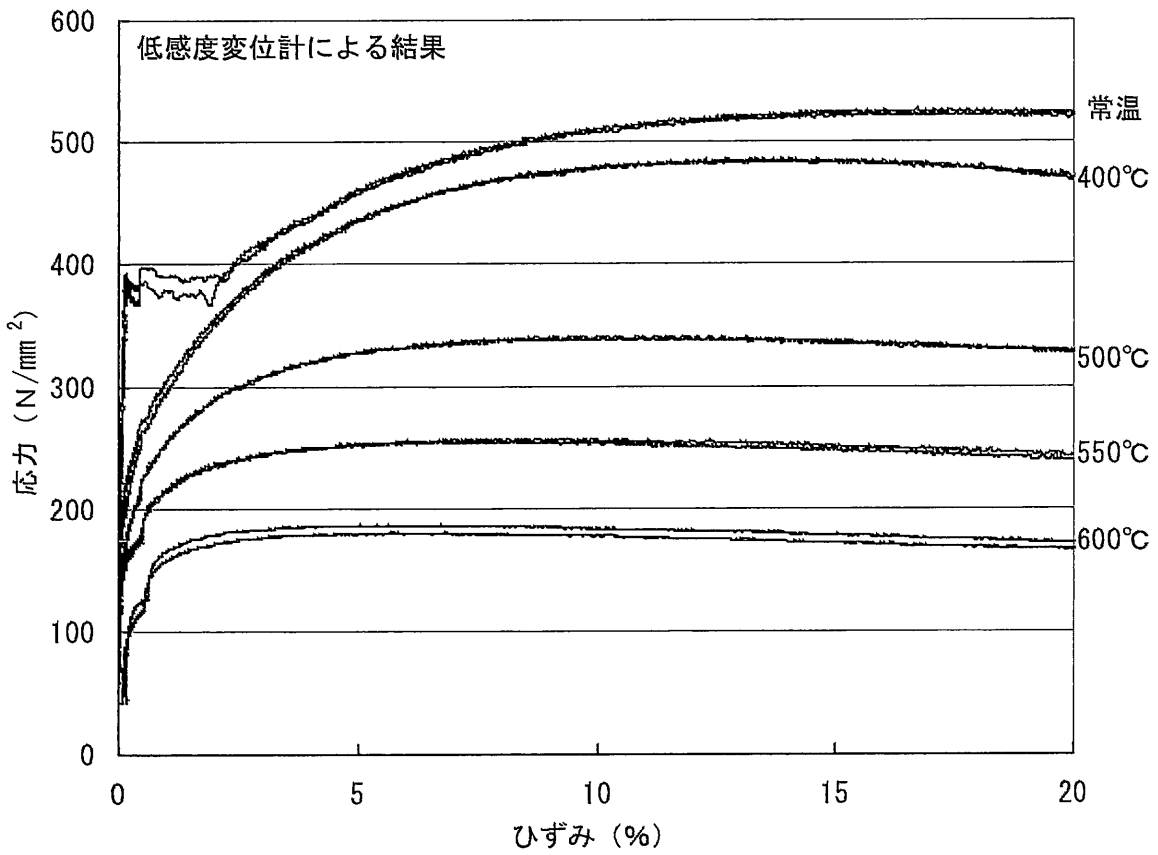
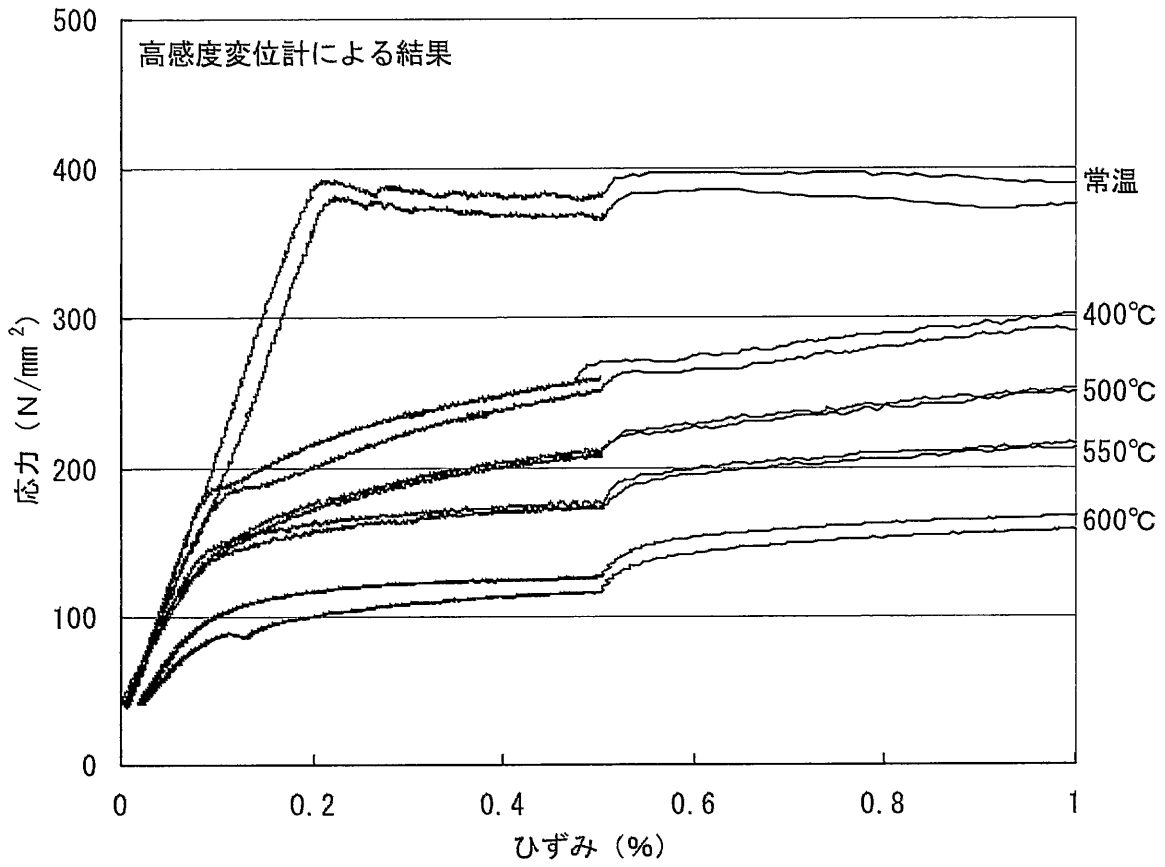


図 2.3(c) 応力-ひずみ曲線 (PL-6B)

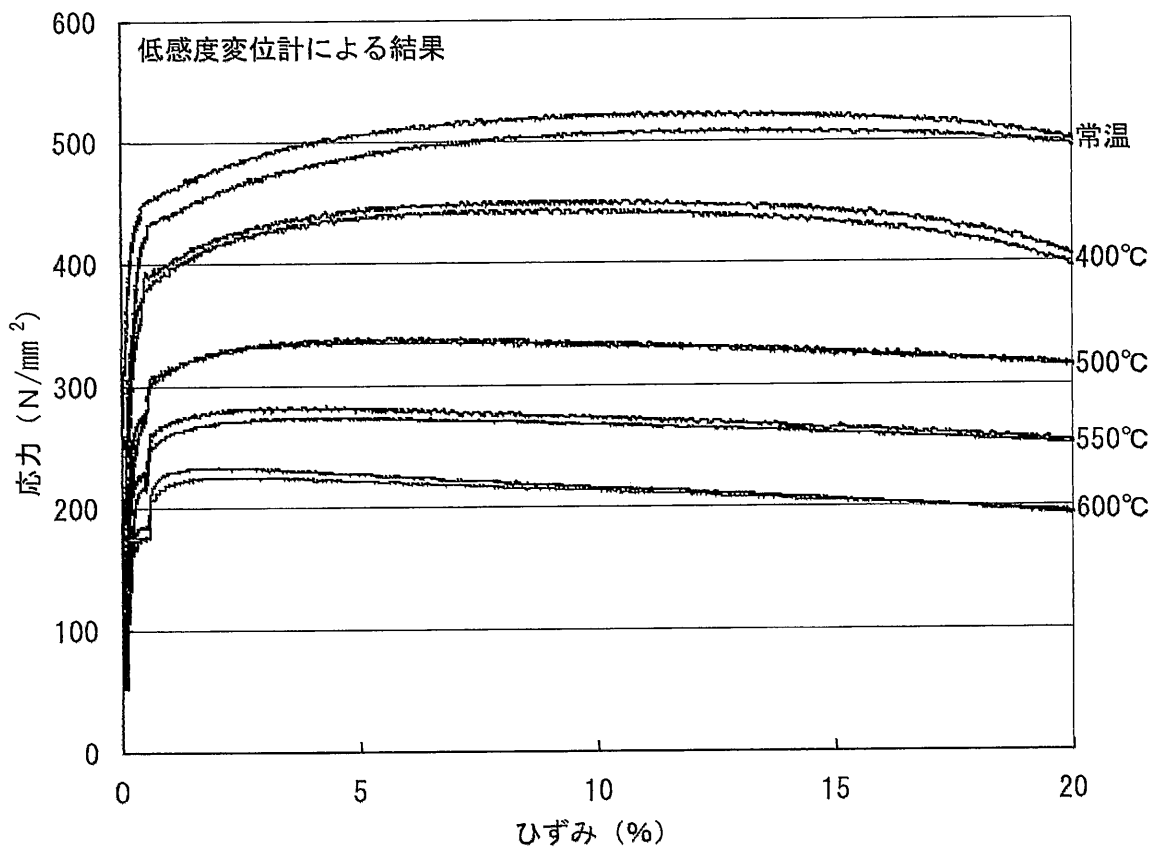
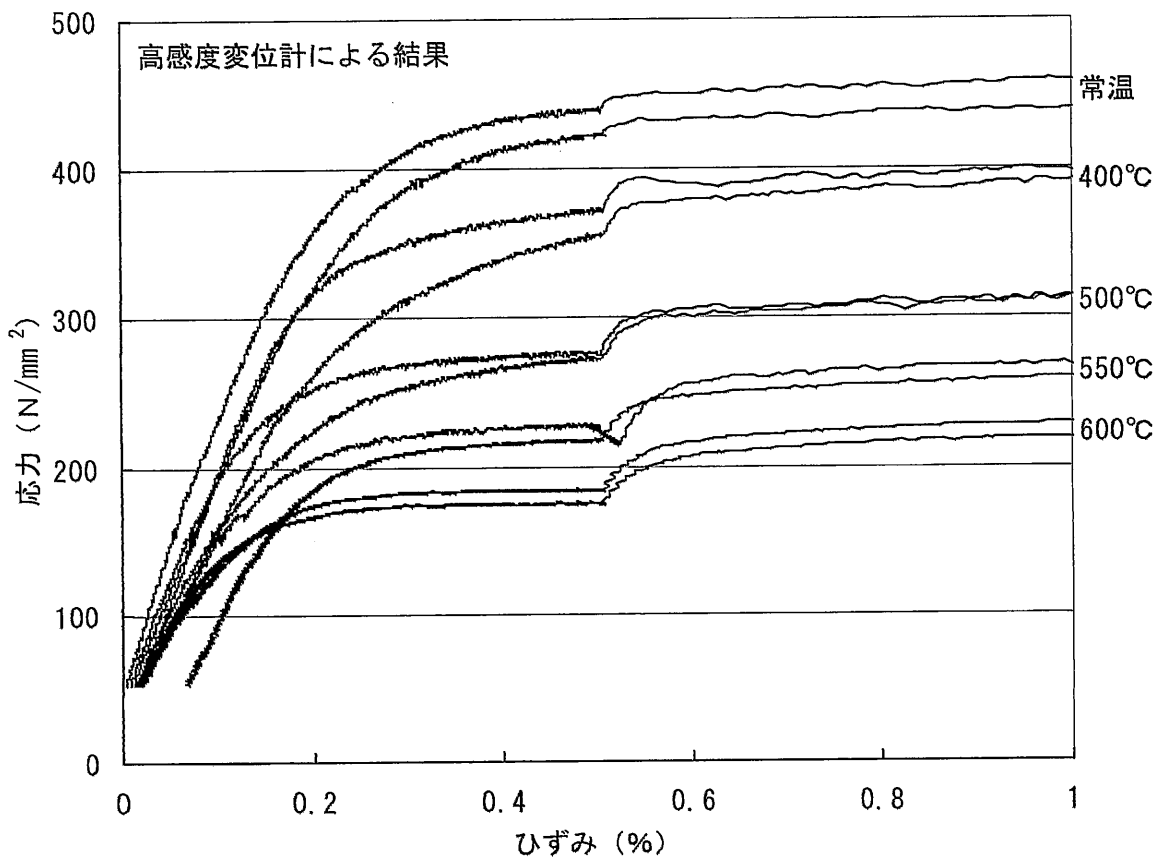


図 2.3(d) 応力-ひずみ曲線 (PL-4.5A)



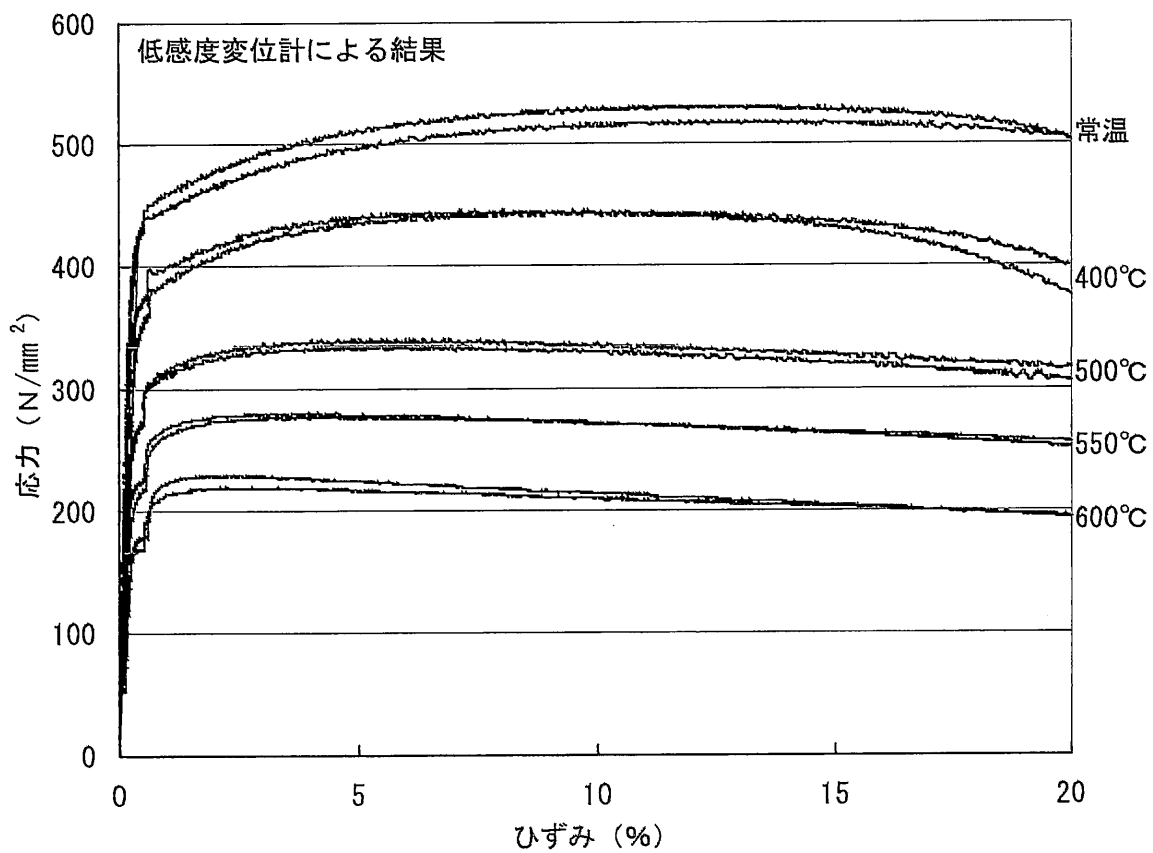
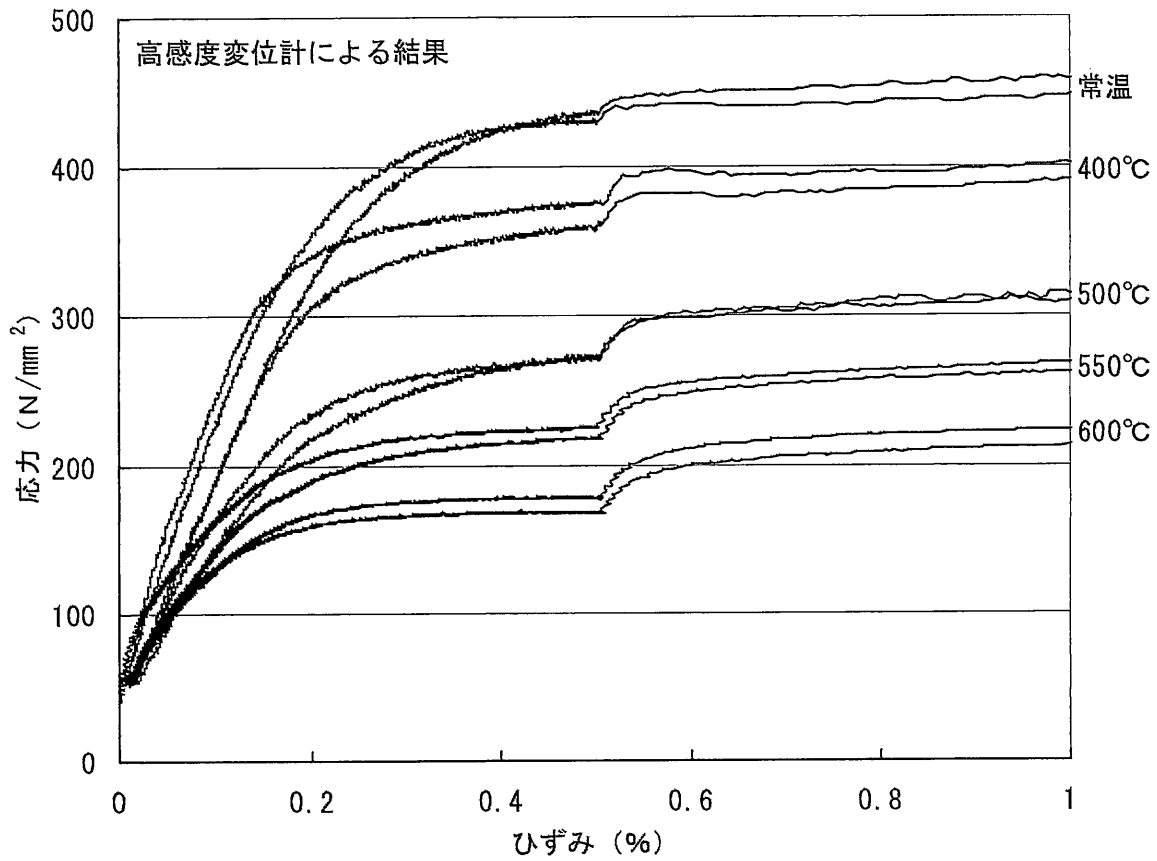


図 2.3(e) 応力-ひずみ曲線 (PL-4.5B)

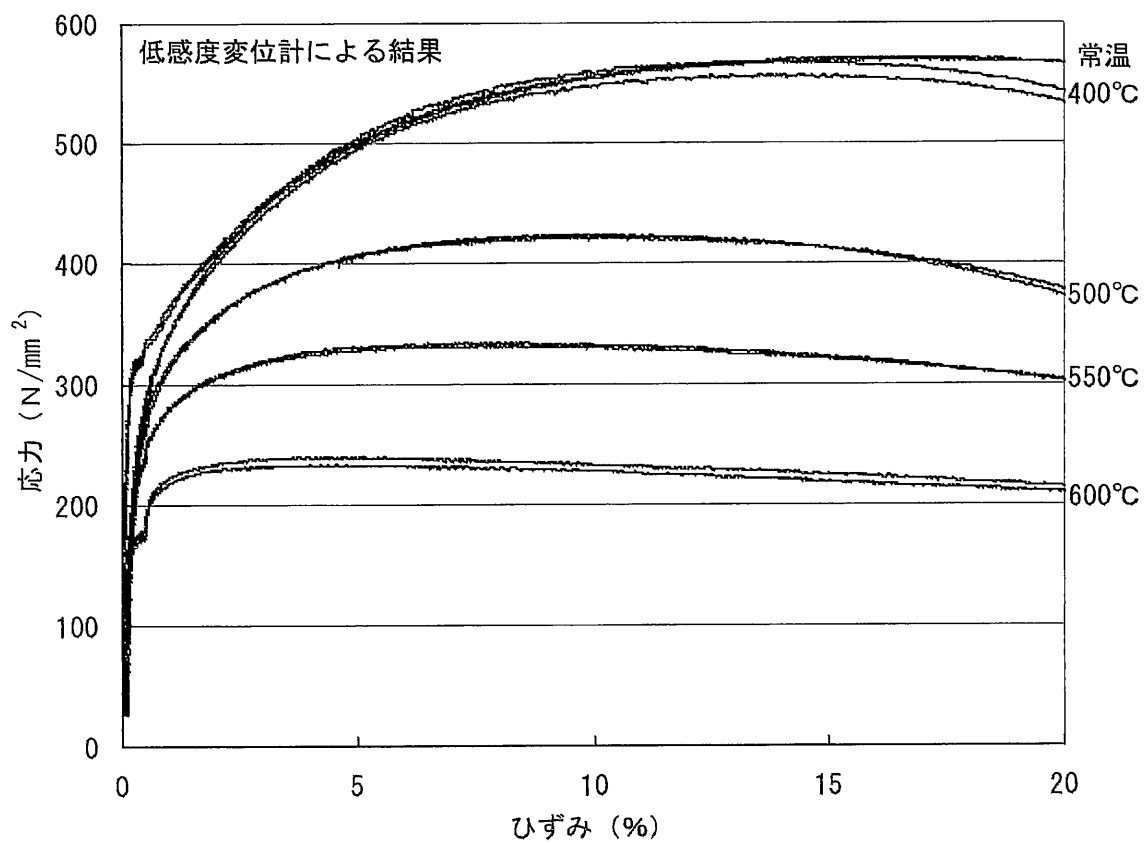
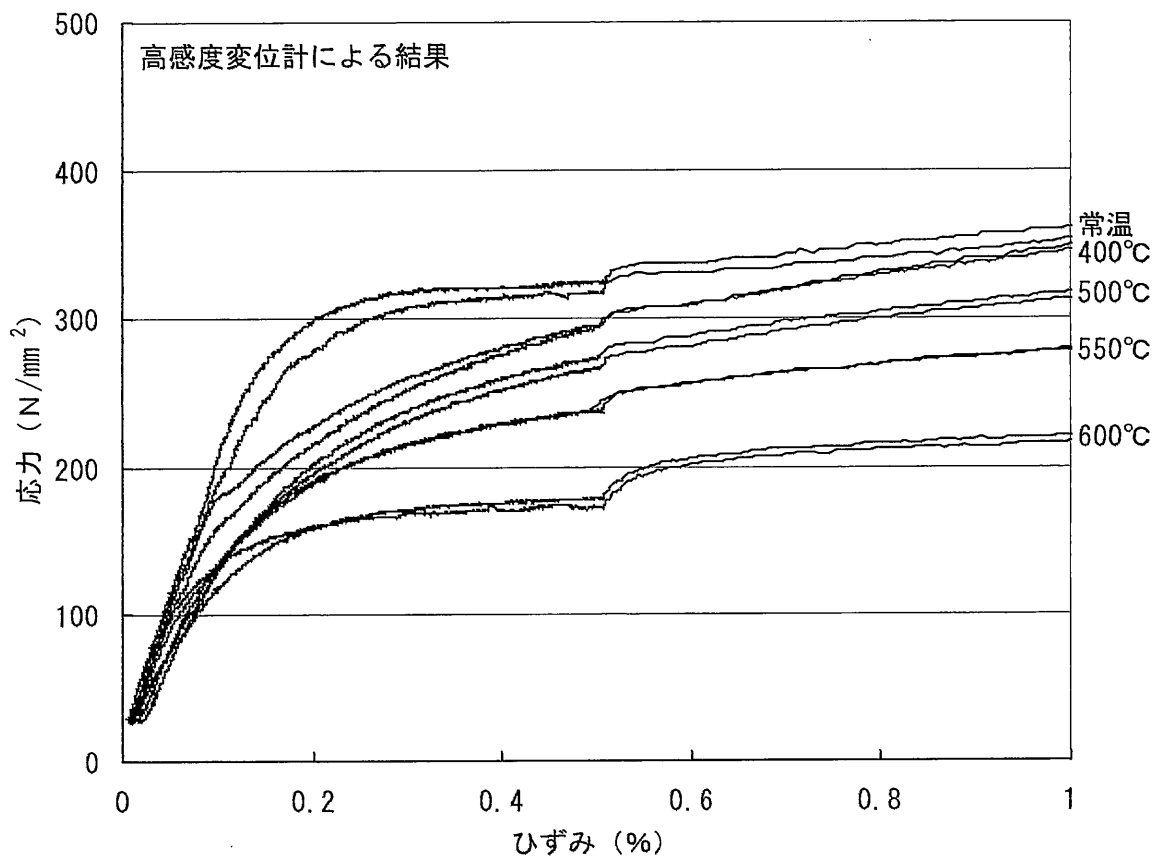
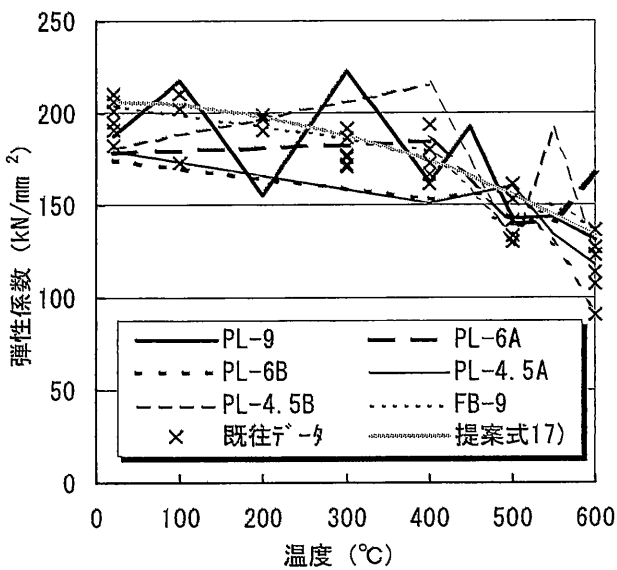


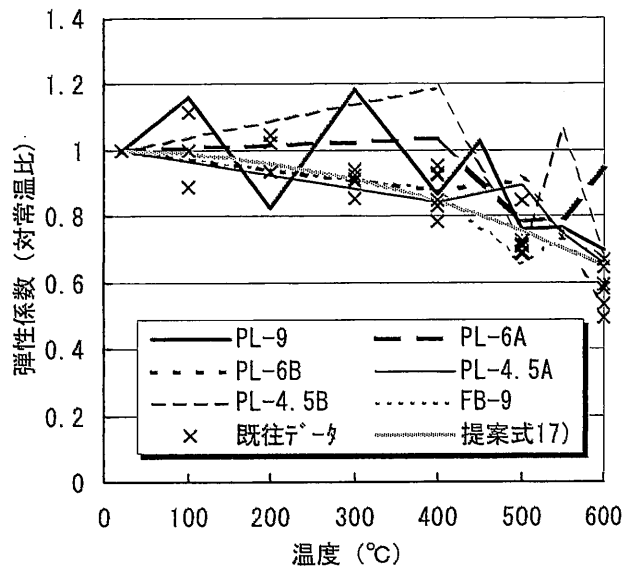
図 2.3(f) 応力-ひずみ曲線 (FB-9)

表 2.6 弹性系数 [kN/mm<sup>2</sup>]

試験片	試験温度 (°C)										
	常温	100	200	300	400	450	500	550	600	700	800
PL-9-①	179	188	160	191	170	182	154	162	125	—	—
PL-9-②	197	248	151	256	156	205	133	126	137	—	—
PL-9 平均	188	218	155	223	163	193	143	144	131		
PL-6A-①	187				158		126	117	171		
PL-6A-②	169				210		155	167	162		
PL-6A 平均	178				184		140	142	166		
PL-6B-①	171				153		149	136	83		
PL-6B-②	177				154		167	123	102		
PL-6B 平均	174				153		158	129	92		
PL-4.5A-①	152				135		181	134	119		
PL-4.5A-②	206				167		139	135	117		
PL-4.5A 平均	179				151		160	134	118		
PL-4.5B-①	158				272		116	215	134		
PL-4.5B-②	204				160		141	167	110		
PL-4.5B 平均	181				216		128	191	122		
FB-9-①	219				164		134	124	111		
FB-9-②	189				196		134	178	164		
FB-9 平均	204				180		134	151	137		



(a) 実測値



(b) 对常温比

图 2.4 弹性系数

表 2.7 0.2%オフセット強度 [N/mm<sup>2</sup>]

試験片	試験温度 (°C)										
	常温	100	200	300	400	450	500	550	600	700	800
PL-9-①	362	339	317	263	230	214	190	159	135	56	35
PL-9-②	358	337	309	259	246	225	189	165	132	57	33
PL-9 平均	360	338	313	261	238	219	189	162	133	56	34
PL-6A-①	388				231		192	162	116		
PL-6A-②	391				251		191	155	119		
PL-6A 平均	389				241		191	158	117		
PL-6B-①	375				229		187	167	107		
PL-6B-②	383				236		196	164	120		
PL-6B 平均	379				232		191	165	113		
PL-4.5A-①	414				344		264	222	169		
PL-4.5A-②	429				364		256	213	177		
PL-4.5A 平均	421				354		260	217	173		
PL-4.5B-①	432				360		258	212	159		
PL-4.5B-②	414				351		260	206	167		
PL-4.5B 平均	423				355		259	209	163		
FB-9-①	320				265		245	224	173		
FB-9-②	314				274		255	216	166		
FB-9 平均	317				269		250	220	169		

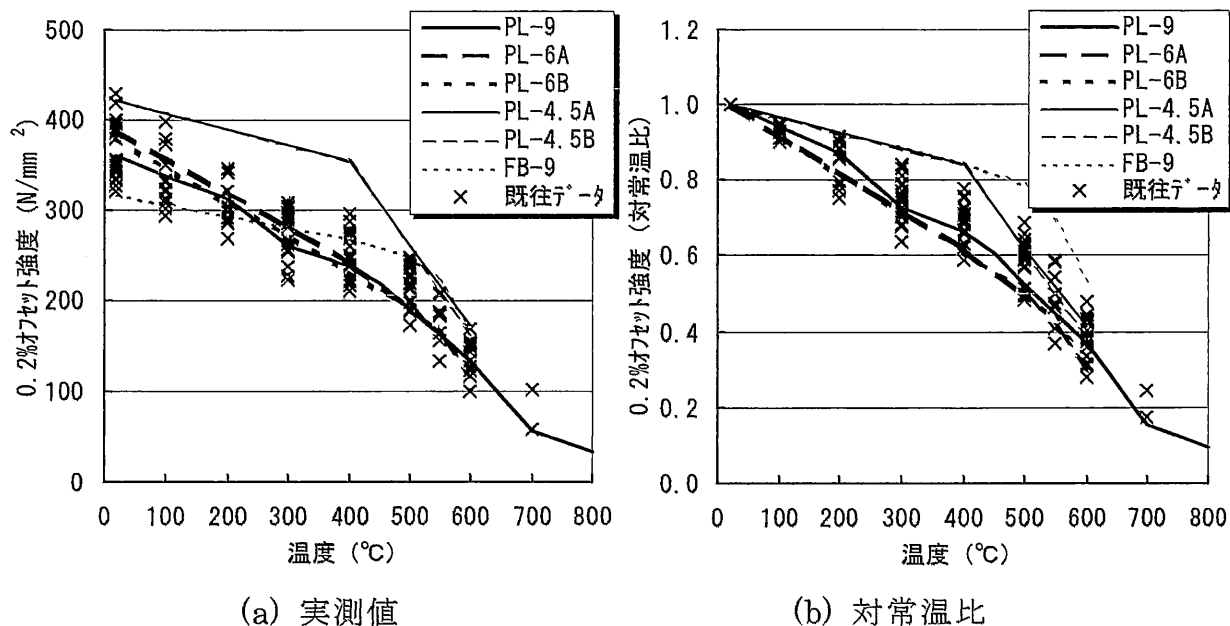
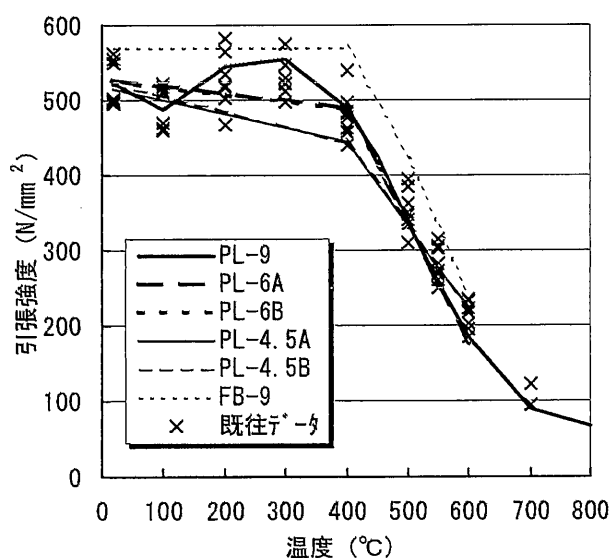


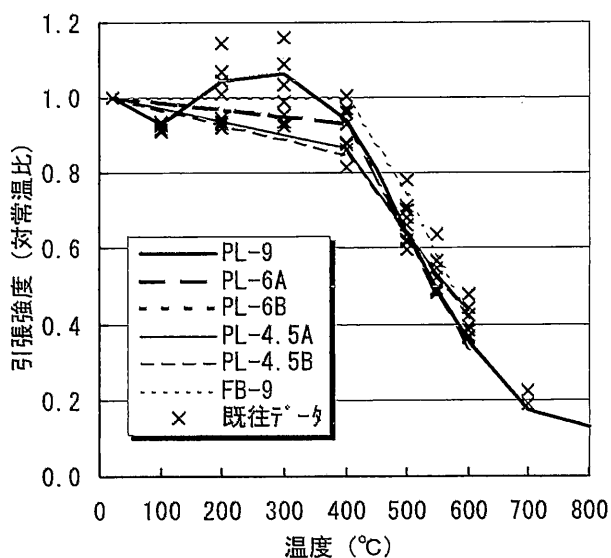
図 2.5 0.2%オフセット強度

表 2.8 引張強度 [N/mm<sup>2</sup>]

試験片	試験温度 (°C)										
	常温	100	200	300	400	450	500	550	600	700	800
PL-9-①	525	488	547	566	491	419	340	259	187	90	67
PL-9-②	521	487	545	567	491	430	335	258	184	91	68
PL-9 平均	523	487	546	566	491	424	337	258	185	90	67
PL-6A-①	527				495		336	251	177		
PL-6A-②	527				488		334	250	180		
PL-6A 平均	527				491		335	250	178		
PL-6B-①	523				490		325	253	177		
PL-6B-②	525				485		339	256	184		
PL-6B 平均	524				487		332	254	180		
PL-4.5A-①	508				442		331	281	220		
PL-4.5A-②	522				450		334	270	228		
PL-4.5A 平均	515				446		332	275	224		
PL-4.5B-①	529				445		336	277	214		
PL-4.5B-②	516				444		334	276	225		
PL-4.5B 平均	522				444		335	276	219		
FB-9-①	570				569		423	330	239		
FB-9-②	569				570		421	331	232		
FB-9 平均	569				569		422	330	235		



(a) 実測値

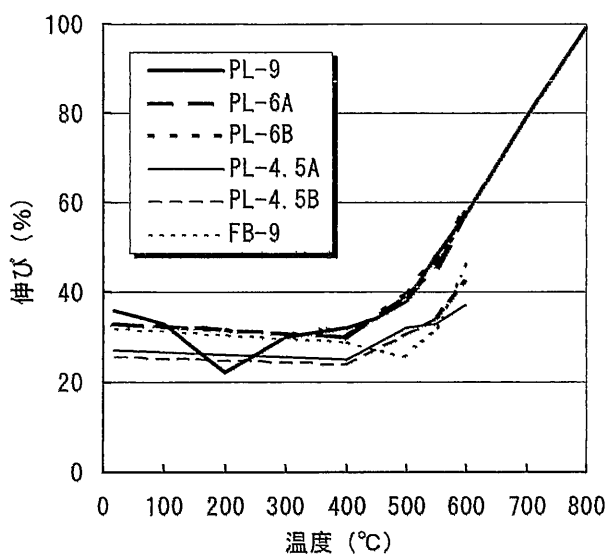


(b) 対常温比

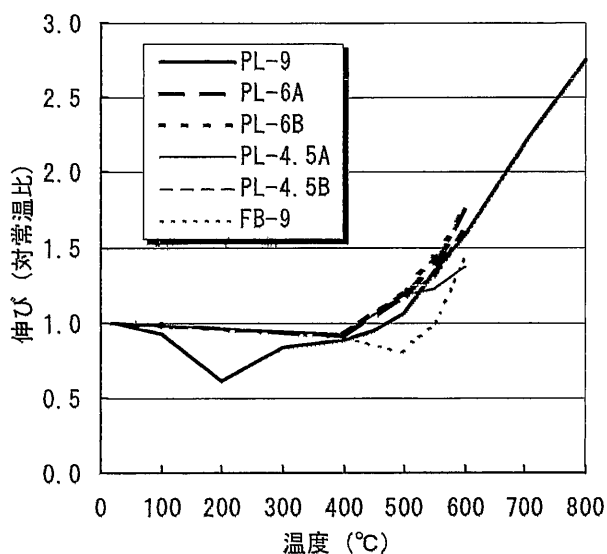
図 2.6 引張強度

表 2.9 破断伸び [%]

試験片	試験温度 (°C)										
	常温	100	200	300	400	450	500	550	600	700	800
PL-9-①	37	34	22	32	33	34	39	48	56	78	102
PL-9-②	36	33	22	29	32	34	38	49	59	80	97
PL-9 平均	36	33	22	30	32	34	38	48	57	79	99
PL-6A-①	32				31		40	47	58		
PL-6A-②	34				29		39	46	57		
PL-6A 平均	33				30		39	46	57		
PL-6B-①	34				29		40	48	58		
PL-6B-②	33				31		41	46	58		
PL-6B 平均	33				30		40	47	58		
PL-4.5A-①	28				26		32	32	39		
PL-4.5A-②	26				25		32	34	35		
PL-4.5A 平均	27				25		32	33	37		
PL-4.5B-①	26				23		33	33	48		
PL-4.5B-②	27				26		29	36	37		
PL-4.5B 平均	26				24		31	34	42		
FB-9-①	32				28		26	31	45		
FB-9-②	32				30		27	33	47		
FB-9 平均	32				29		26	32	46		



(a) 実測値



(b) 対常温比

図 2.7 破断伸び

## 2.3 引張域における応力-ひずみ曲線の数式化

### 2.3.1 数式化の方法

#### (1) 応力-ひずみ曲線のモデル式

高温引張試験の結果に基づいて、高温時の応力-ひずみ曲線を数式化する。数式化に当たっては、下の(2.1)式を用いることとした<sup>17),19)</sup>。

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p = \frac{\sigma}{E_T} + \left( \frac{\sigma}{\sigma_K} \right)^k \quad \dots (2.1) \text{式}$$

記号の意味を以下に示す。

$\varepsilon$  : ひずみ

$\varepsilon_e$  : 弾性ひずみ

$\varepsilon_p$  : 塑性ひずみ

$\sigma$  : 応力

$E_T$  : 高温時  $T^\circ\text{C}$ における弾性係数

$\sigma_K, k$  : 応力-ひずみ曲線を近似するための定数

ひずみは、弾性ひずみと塑性ひずみの和で表される。弾性ひずみは、応力を高温時のヤング係数で除したものである。塑性ひずみは、高温引張試験結果を指数近似して、 $\sigma_K$ と $k$ を定めることで得られる。 $\sigma_K$ は素材の高温強度に依存する値であり、 $k$ は2次勾配のひずみ硬化に依存する値である。

#### (2) 高温時における弾性係数の設定

表 2.6 および図 2.4 に示したように、試験結果より得られた高温時の弾性係数は大きくばらついている。よって、高温時の弾性係数には、既往の研究結果における統計値より得た、下の(2.2)式を用いることとした<sup>17)</sup>。

$$E_T = E_{RT} \times (1.0 - 0.978 \times 10^{-6} \times T^2) \quad \dots (2.2) \text{式}$$

記号の意味を以下に示す。

$E_T$  : 高温時  $T^\circ\text{C}$ における弾性係数

$E_{RT}$  : 常温時における弾性係数 (205800 N/mm<sup>2</sup>)

$T$  : 鋼材温度 ( $^\circ\text{C}$ )

### (3) $\sigma_K$ , $k$ の決定

$\sigma_K$  と  $k$  は、応力・ひずみ曲線上の代表的な任意の 2 点を決めると求まる<sup>17)</sup>。図 2.8 に示すように、0.2% オフセット強度 (A 点) と 20% ひずみ時の応力 (B 点) を通るように、各ロットおよび温度ごとに  $\sigma_K$  と  $k$  を定めた。 $\sigma_K$  と  $k$  の値を表 2.10(a)～表 2.10(f) に示す。

$\sigma_K$  と  $k$  を定める際、20% ひずみ時の応力を合わせた理由を以下に述べる。1 つ目の理由は、「1.2 既往の研究」で述べたように、火災加熱を受ける鋼構造部材には極めて大きな熱変形が生じることによる。この際、局部座屈が発生した部分に変形が集中すると、20% 位のひずみが生じる可能性がある。2 つ目の理由は、本試験では 0.5% ひずみ時においてひずみ速度を 0.3%/分から 10%/分に切り替えたため、図 2.3 に示したように、500°C 以降の応力・ひずみ曲線において 0.5% ひずみ以降の応力が大きく上昇したことによる。本試験より得た 0.5% ひずみ以降の応力は、ひずみ速度を 0.3%/分のまま行った試験結果に対して、大き目の値を示していると考えられる。実際の火災においては、部材内部のひずみはゆっくりと変化する。よって、高温部材実験においては、ゆっくりと変形を与えた。これより、高温部材実験を解析するための応力・ひずみ曲線は、ひずみ速度を 0.3%/分で行った試験結果を予測して、式を定める方が良いと考えた。応力・ひずみ曲線を数式化するにあたり 1 点を 10% ひずみ位で合わせると、400°C 以下の応力・ひずみ曲線は試験結果に対応するが、500°C 以上の応力・ひずみ曲線を上側に評価することとなる。1 点を 20% ひずみ位で合わせると、400°C 以下の応力・ひずみ曲線は下側に評価するが、500°C 以上の応力・ひずみ曲線についてはひずみ速度を 0.3%/分のまま行なう試験結果を概ね模擬できると考えられる。本研究では、鋼材温度 500°C～600°C を主たる対象範囲としている。よって、20% ひずみ時の応力に合わせて、応力・ひずみ曲線を数式化した。

なお、鋼材温度 100°C 毎に応力・ひずみ曲線を定めているが、その間における応力ひずみ曲線は  $\sigma_K$  と  $k$  を線形補間して定めることとする。



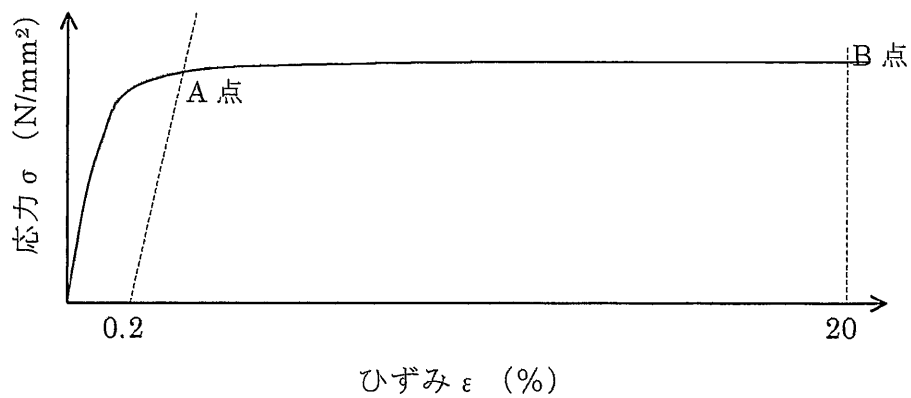


図 2.8 応力・ひずみ曲線上の代表的な 2 点

表 2.10(a)  $\sigma_K$  と  $k$  の値 (PL-9)

温度 (°C)	$\sigma_A$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\epsilon_A$ (-)	$\sigma_B$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\epsilon_B$ (-)	$E_T$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_K$	$k$
常温	360	0.0038	521	0.2	205800	594	12.4
100	338	0.0037	485	0.2	203787	551	12.7
200	313	0.0036	455	0.2	197749	504	13.0
300	261	0.0035	556	0.2	187685	728	6.0
400	238	0.0033	469	0.2	173596	595	6.8
450	219	0.0032	396	0.2	165042	487	7.9
500	189	0.0032	323	0.2	155482	390	8.6
550	162	0.0031	247	0.2	144915	286	10.9
600	133	0.0030	174	0.2	133342	191	17.1
700	56	0.0032	80	0.2	107177	91	12.1
800	34	0.0038	66	0.2	76986	84	6.5

表 2.10(b)  $\sigma_K$  と  $k$  の値 (PL-6A)

温度 (°C)	$\sigma_A$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\epsilon_A$ (-)	$\sigma_B$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\epsilon_B$ (-)	$E_T$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_K$	$k$
常温	389	0.0039	523	0.2	205800	581	15.5
400	241	0.0031	480	0.2	173596	607	6.9
500	191	0.0029	326	0.2	155482	391	8.9
550	158	0.0028	237	0.2	144915	272	11.7
600	117	0.0028	167	0.2	133342	189	13.0

表 2.10(c)  $\sigma_K$  と  $k$  の値 (PL-6B)

温度 (°C)	$\sigma_A$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\epsilon_A$ (-)	$\sigma_B$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\epsilon_B$ (-)	$E_T$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_K$	$k$
常温	379	0.0038	521	0.2	205800	583	14.5
400	232	0.0033	469	0.2	173596	601	6.6
500	191	0.0032	329	0.2	155482	398	8.5
550	165	0.0032	240	0.2	144915	274	12.2
600	113	0.0031	166	0.2	133342	190	11.7

表 2.10(d)  $\sigma_K$  と  $k$  の値 (PL-4.5A)

温度 (°C)	$\sigma_A$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\epsilon_A$ (-)	$\sigma_B$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\epsilon_B$ (-)	$E_T$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_K$	$k$
常温	421	0.0044	495	0.2	205800	525	27.4
400	354	0.0042	396	0.2	173596	412	40.3
500	260	0.0035	314	0.2	155482	335	24.8
550	217	0.0036	255	0.2	144915	270	28.2
600	173	0.0038	195	0.2	133342	204	36.5

表 2.10(e)  $\sigma_K$  と  $k$  の値 (PL-4.5B)

温度 (°C)	$\sigma_A$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\varepsilon_A$ (-)	$\sigma_B$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\varepsilon_B$ (-)	$E_T$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_K$	$k$
常温	423	0.0044	504	0.2	205800	537	25.3
400	355	0.0040	400	0.2	173596	417	38.7
500	259	0.0042	317	0.2	155482	342	21.6
550	209	0.0033	252	0.2	144915	269	25.0
600	163	0.0033	194	0.2	133342	206	26.2

表 2.10(f)  $\sigma_K$  と  $k$  の値 (FB-9)

温度 (°C)	$\sigma_A$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\varepsilon_A$ (-)	$\sigma_B$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\varepsilon_B$ (-)	$E_T$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_K$	$k$
常温	317	0.0036	570	0.2	205800	702	7.8
400	269	0.0034	537	0.2	173596	683	6.8
500	250	0.0037	375	0.2	155482	433	11.2
550	220	0.0035	303	0.2	144915	339	14.4
600	169	0.0031	212	0.2	133342	229	20.7

### 2.3.2 試験結果との比較

試験結果と計算値の比較を図 2.9(a)～図 2.9(f)に示す。図中の左段に高感度変位計による結果(0~1%の結果)を示し、右段に低感度変位計による結果(0~20%の結果)を示す。

図 2.9(a) PL-9 では、常温および 100℃においては、降伏棚の部分で計算値が試験結果をやや上回っているが、概ね良好に近似できている。200℃～400℃では、大ひずみ領域において、計算値が試験結果を下回っている。500℃～800℃の試験結果では、0.5%ひずみ時において、ひずみ速度切替えによる急激な応力上昇を生じた。一方、計算値においては、この応力上昇を含まないような結果となっている。実際の火災においては、部材内部のひずみはゆっくりと変化する。高温部材実験においてはゆっくりと変位を与えており、その数値解析に用いる応力・ひずみ曲線には、ひずみ速度の上昇による応力上昇を含まないほうが妥当であると考えられる。

図 2.9(b)および図 2.9(c)の PL-6A では、前述した PL-9 の結果とほぼ同じような傾向を示している。

図 2.9(d)および図 2.9(e)の PL-4.5A および PL-4.5B では、常温において降伏棚が見られないため、計算値が試験結果と良く近似している。400℃以降においては、前述した PL-9 の結果とほぼ同じような傾向を示している。

図 2.3(f)の FB-9 では、PL-4.5A および PL-4.5B の結果とほぼ同じような傾向を示している。

以上、高温部材実験の数値解析に用いる応力・ひずみ曲線を試験結果に基づいて数式化した。

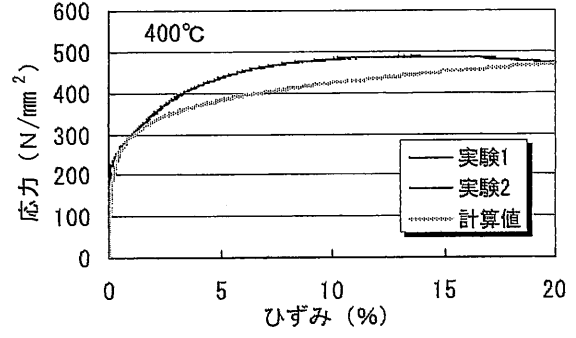
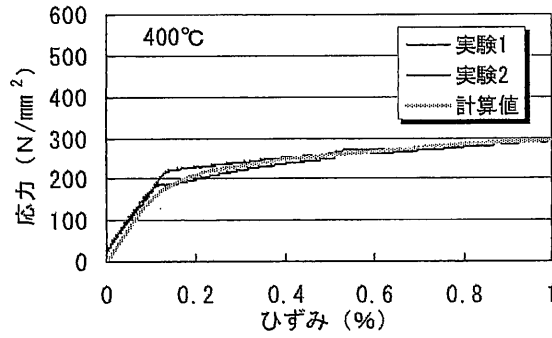
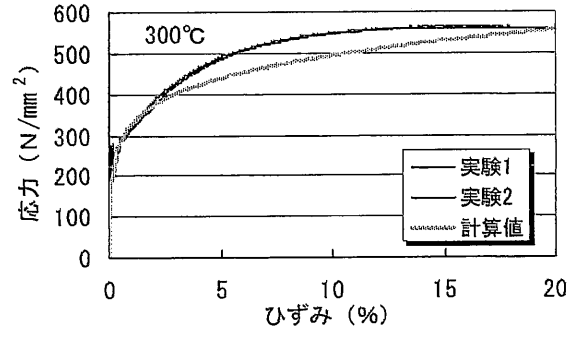
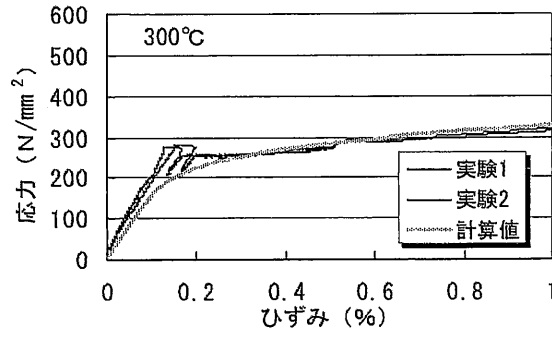
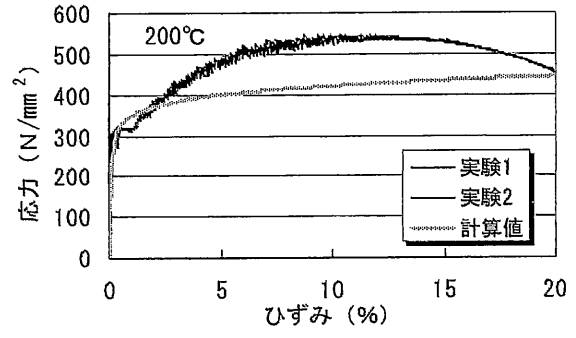
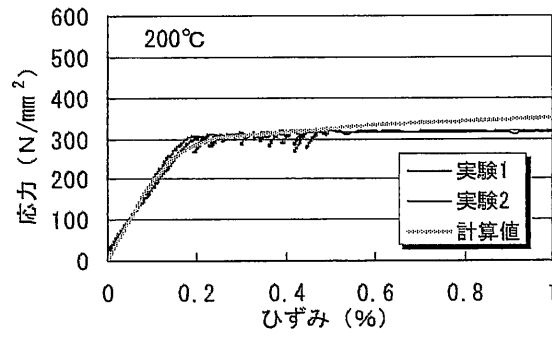
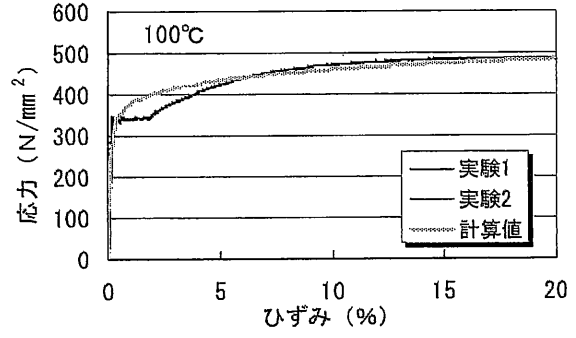
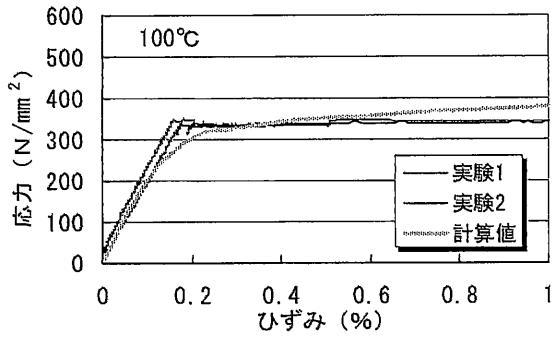
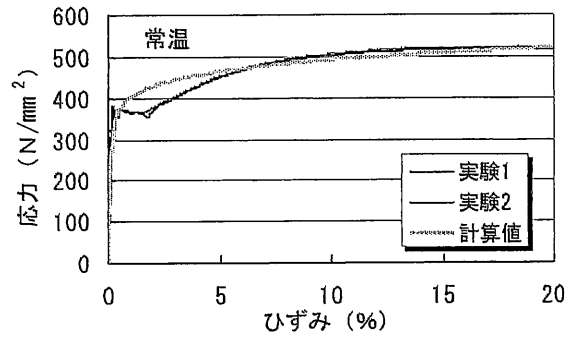
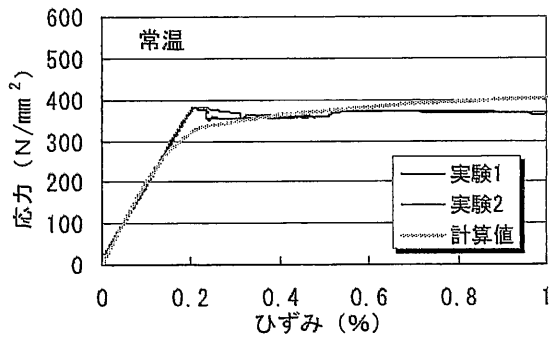


図 2.9(a) 試験結果と計算値の比較 (PL-9)

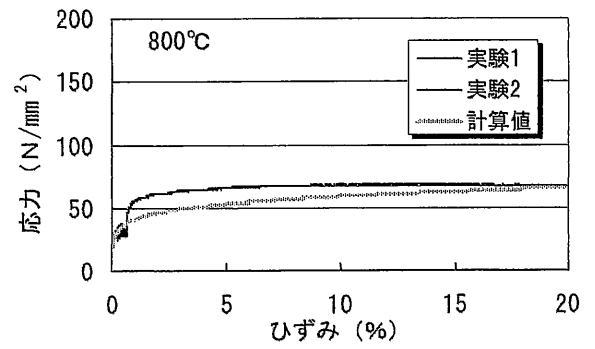
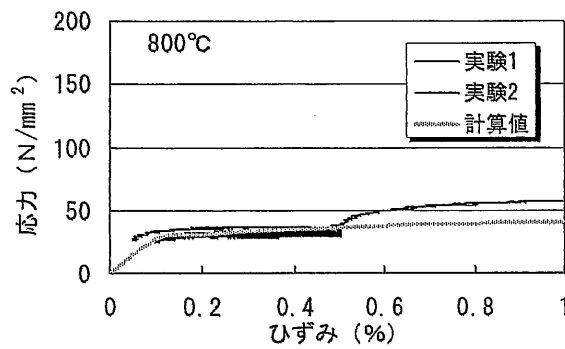
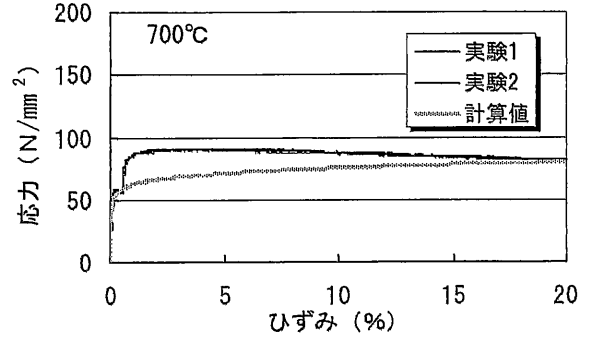
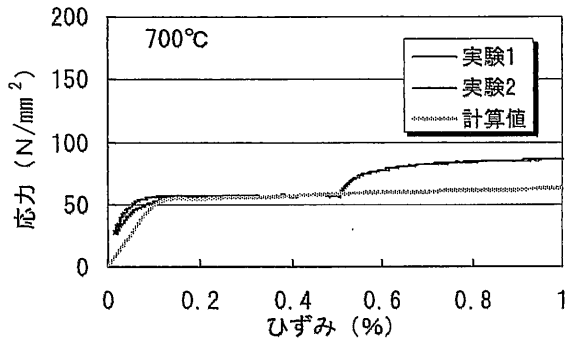
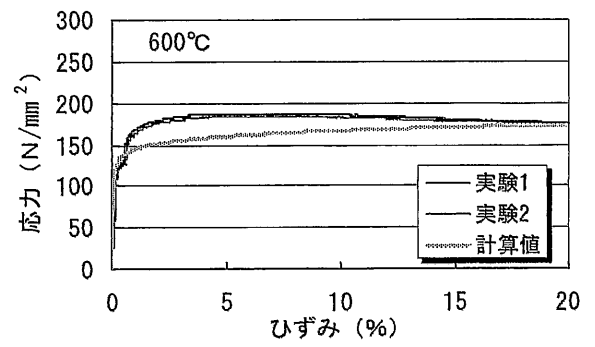
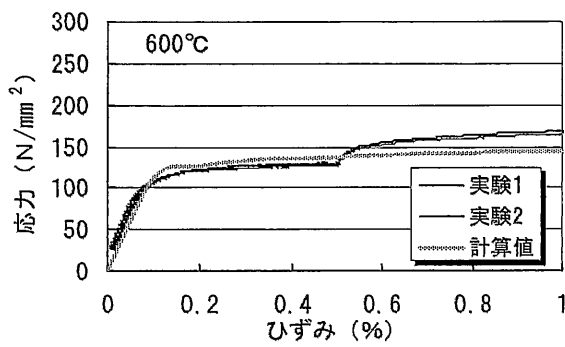
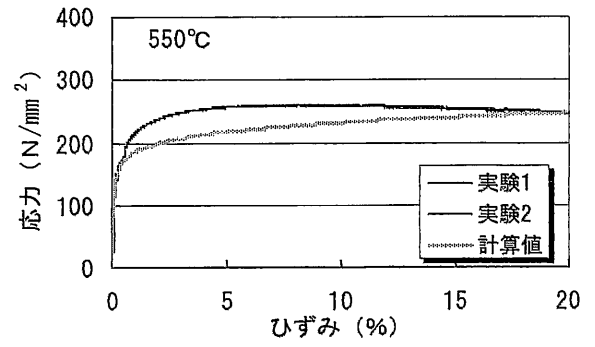
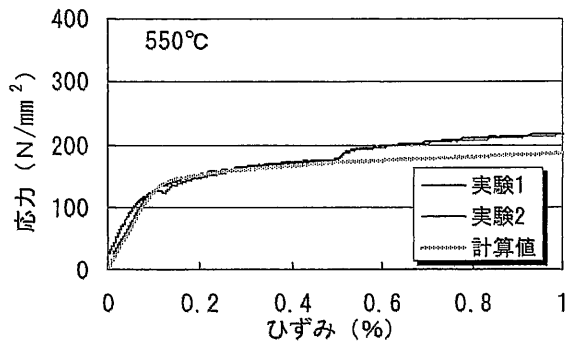
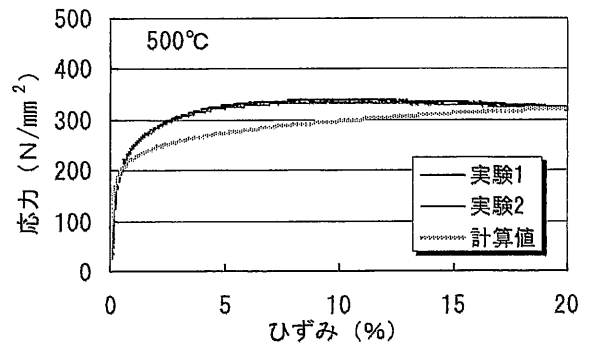
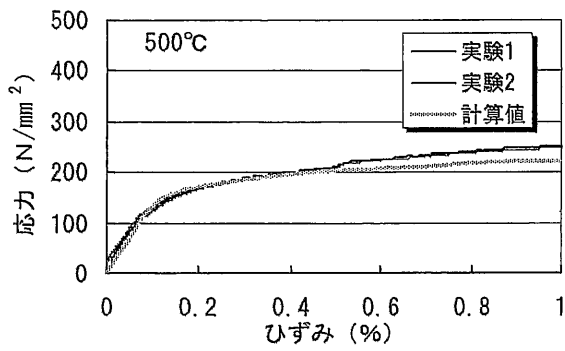


図 2.9(a) 試験結果と計算値の比較 (PL-9 の続き)

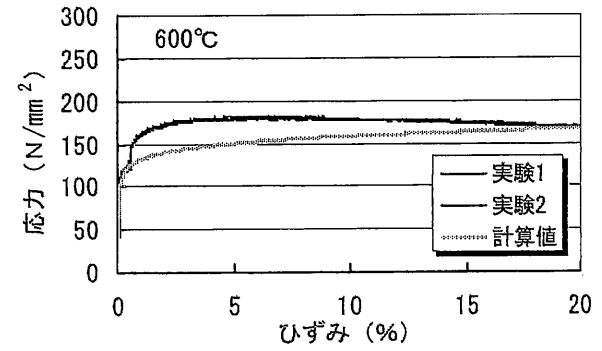
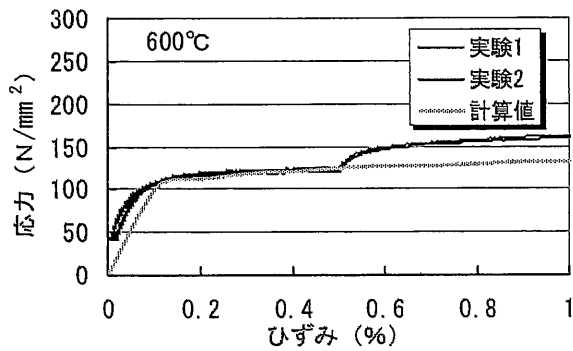
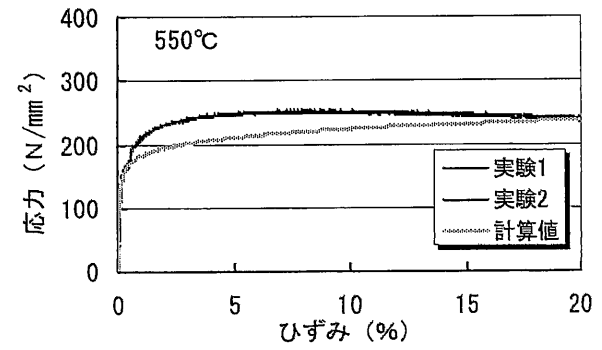
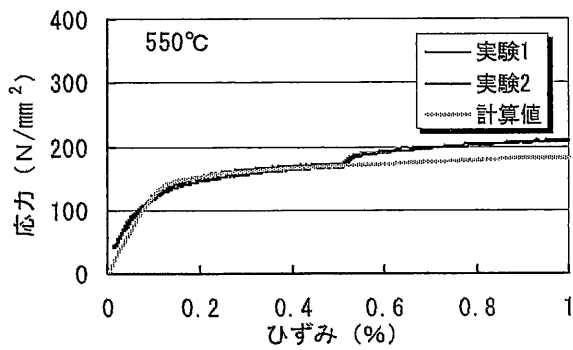
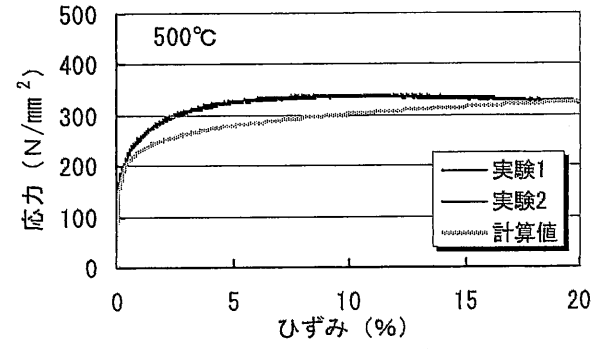
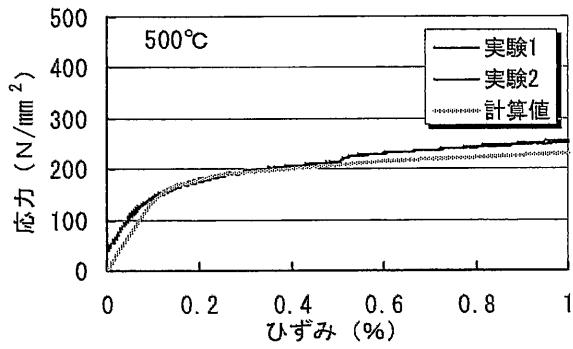
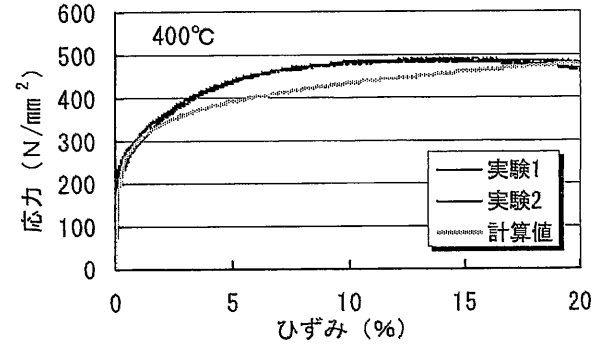
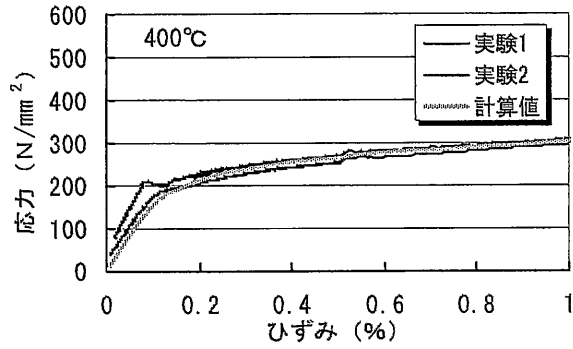
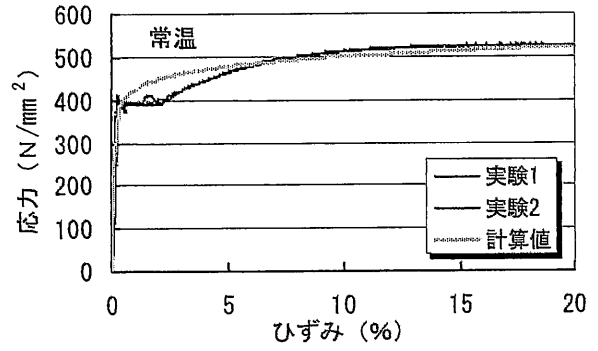
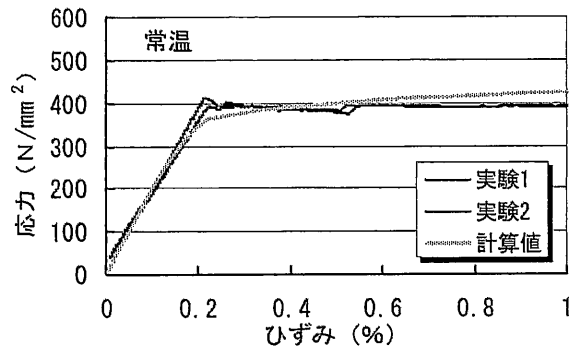


図 2.9(b) 試験結果と計算値の比較 (PL-6A)

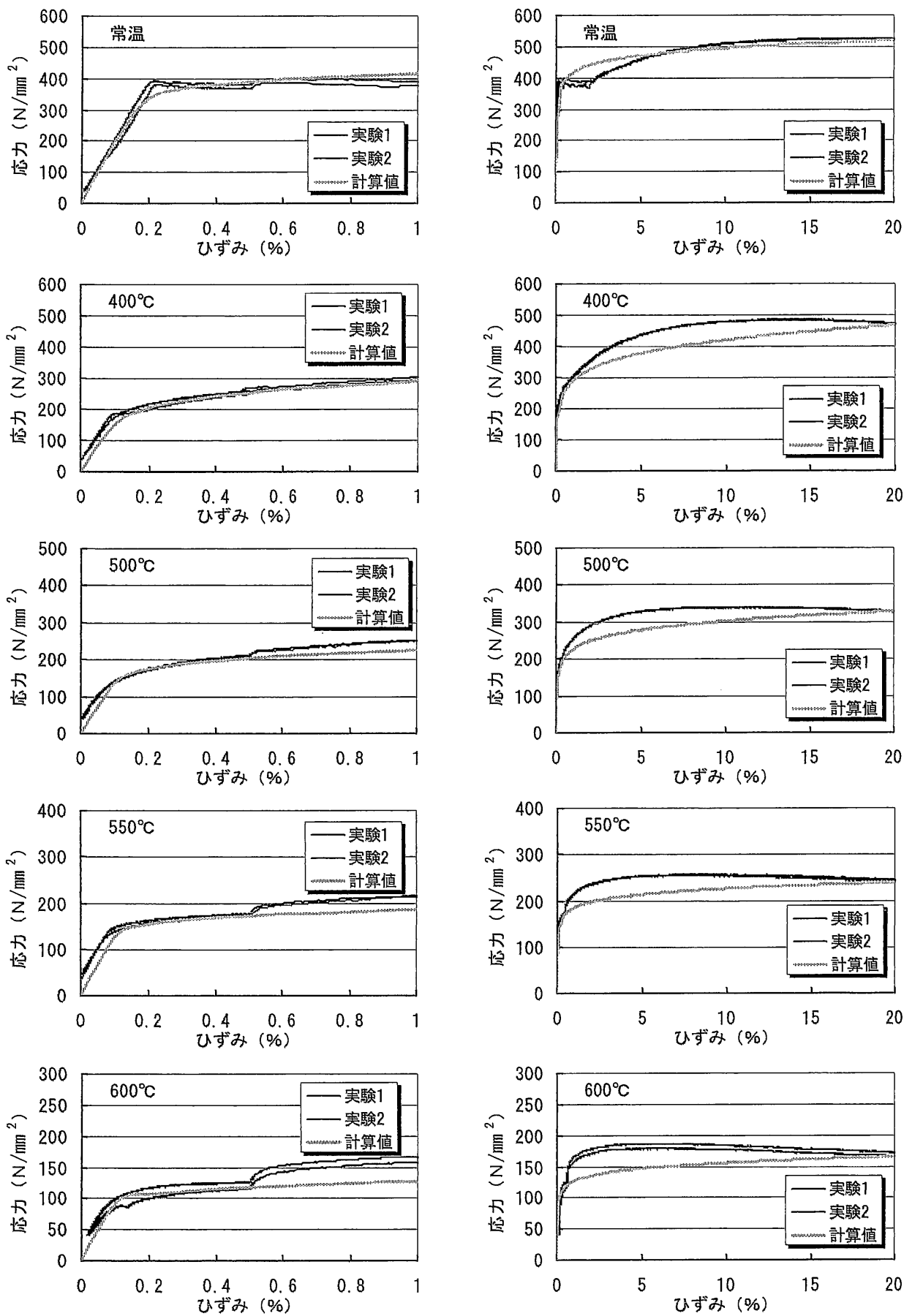


図 2.9(c) 試験結果と計算値の比較 (PL-6B)



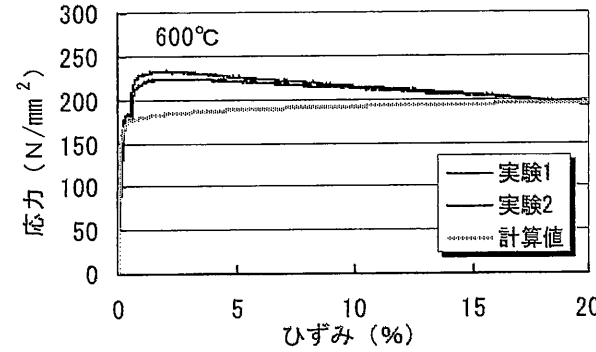
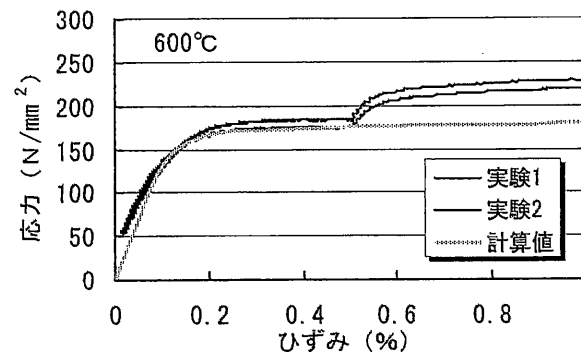
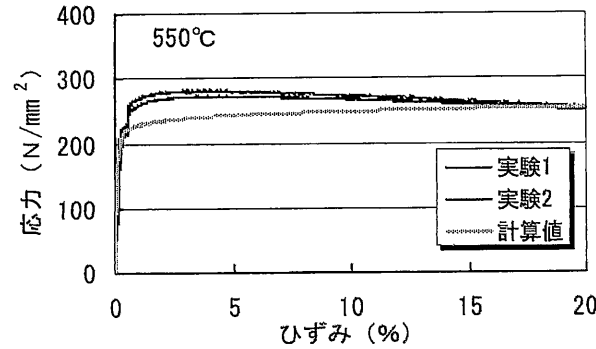
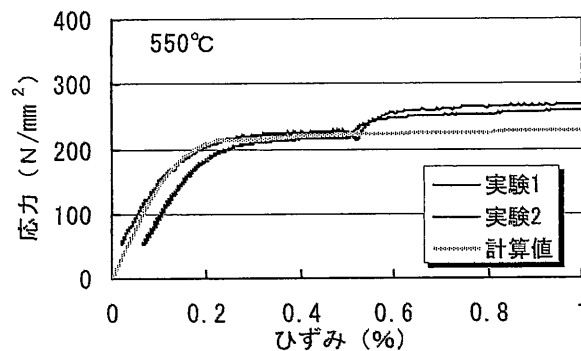
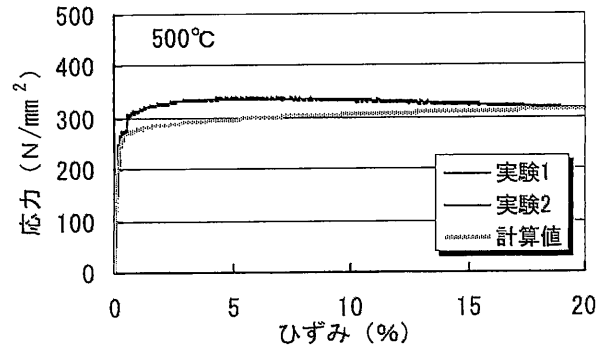
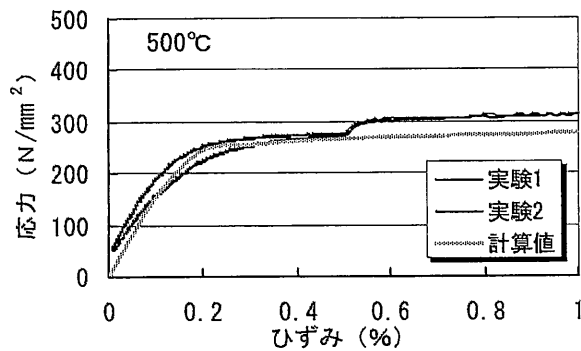
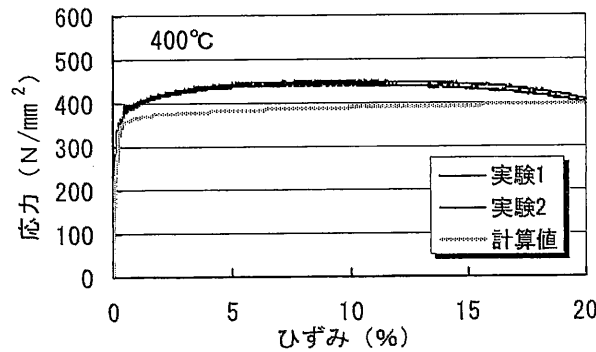
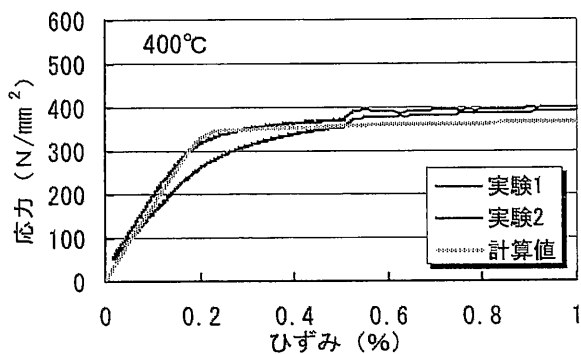
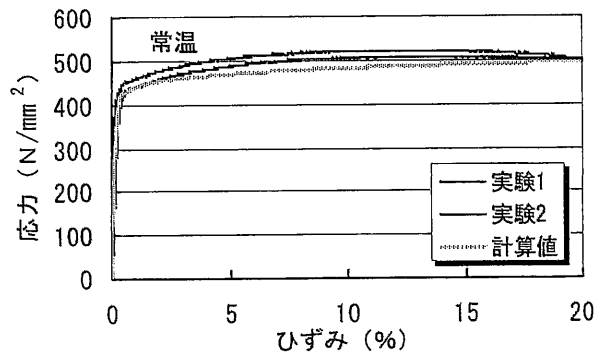
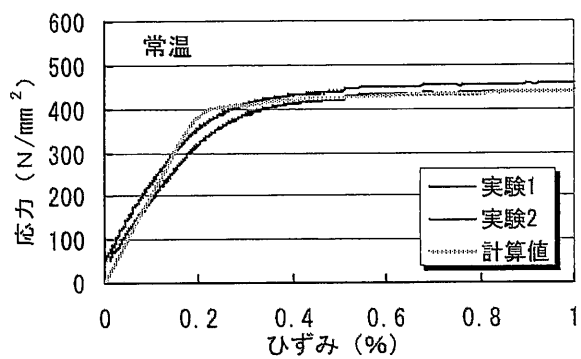


図 2.9(d) 試験結果と計算値の比較 (PL-4.5A)

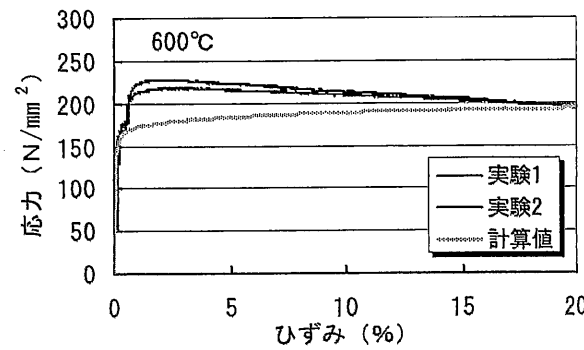
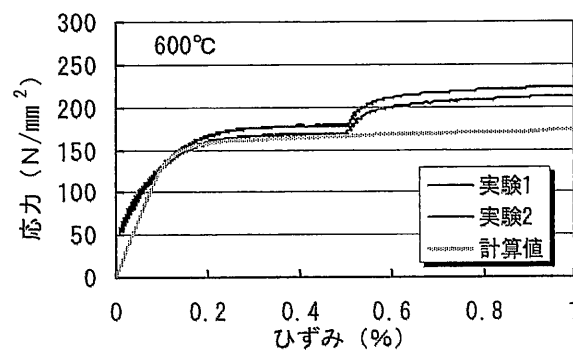
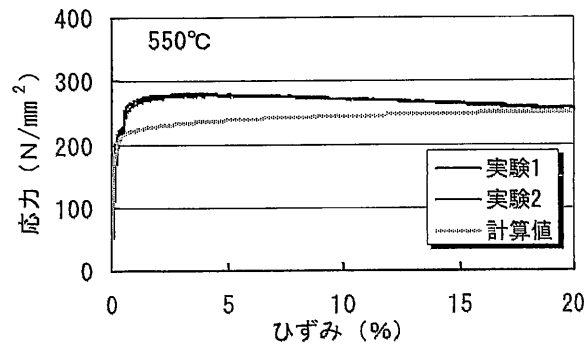
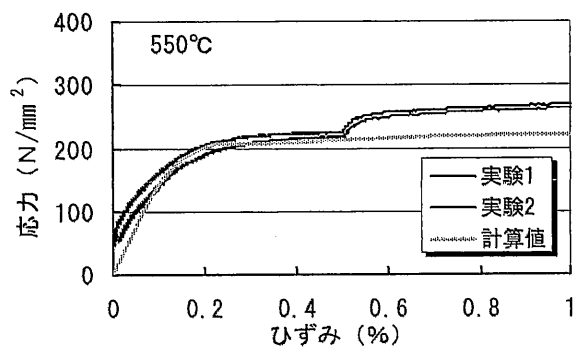
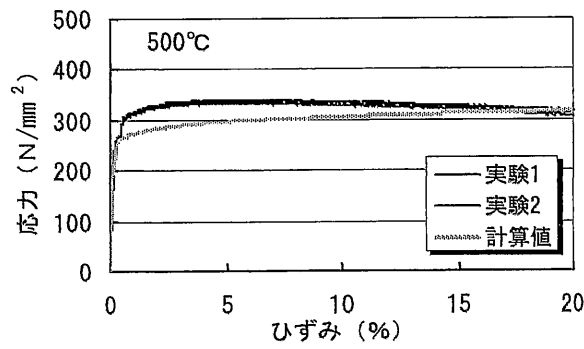
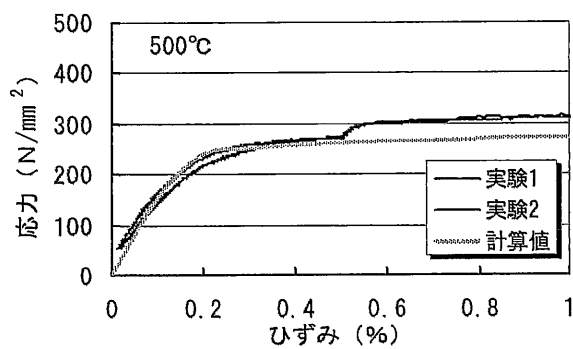
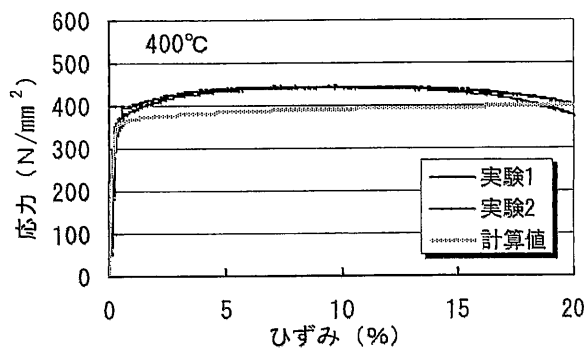
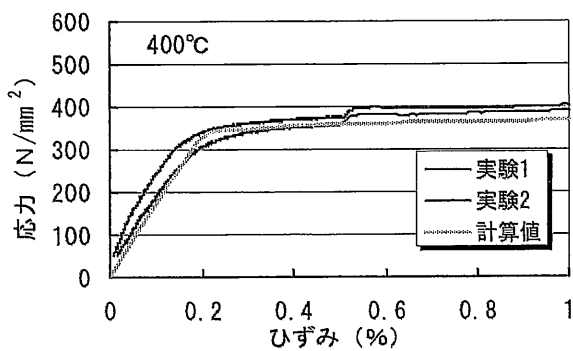
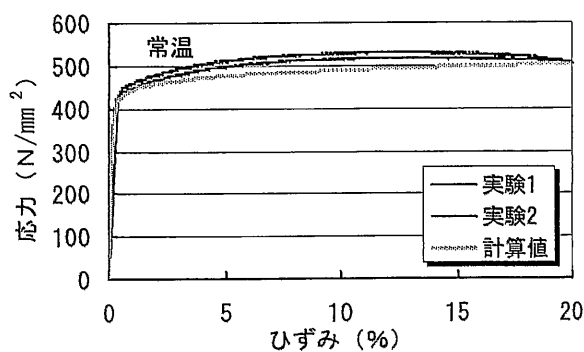
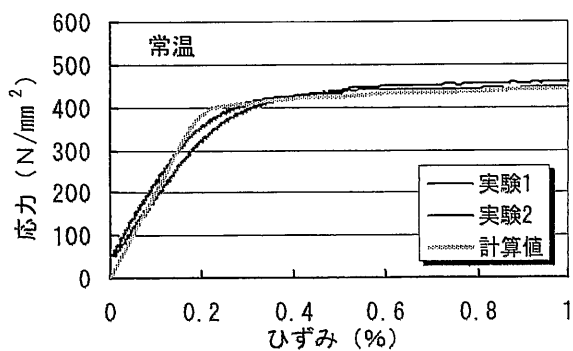


図 2.9(e) 試験結果と計算値の比較 (PL-4.5B)

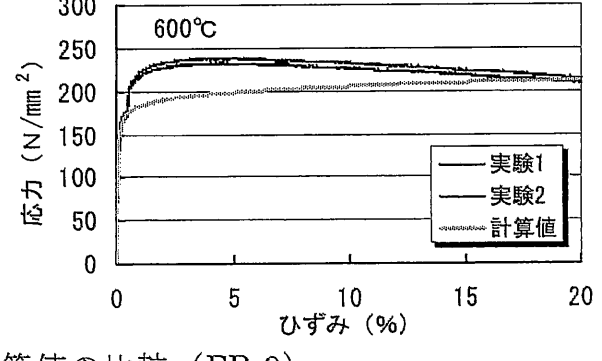
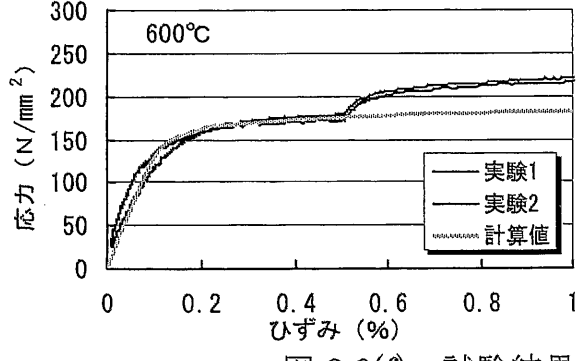
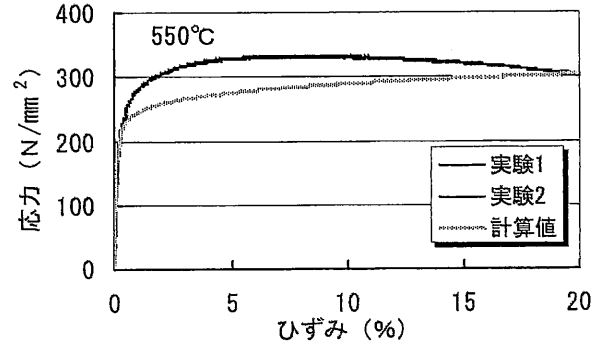
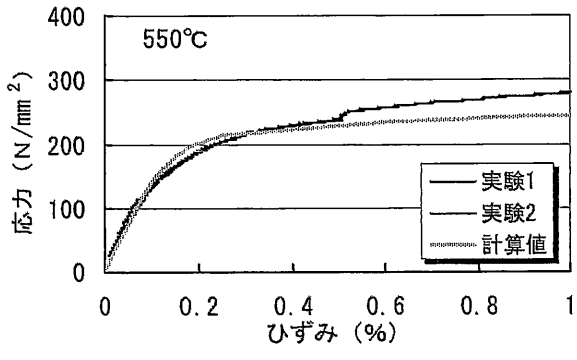
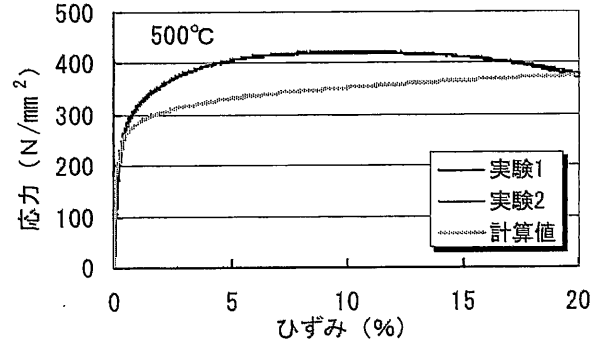
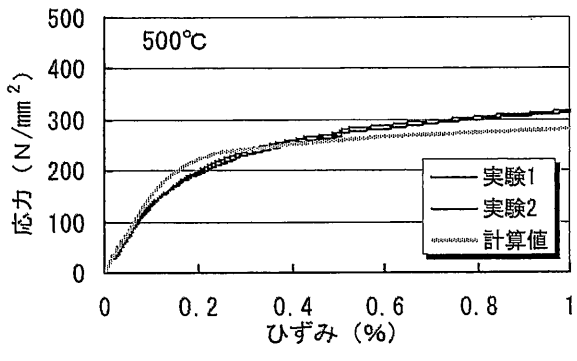
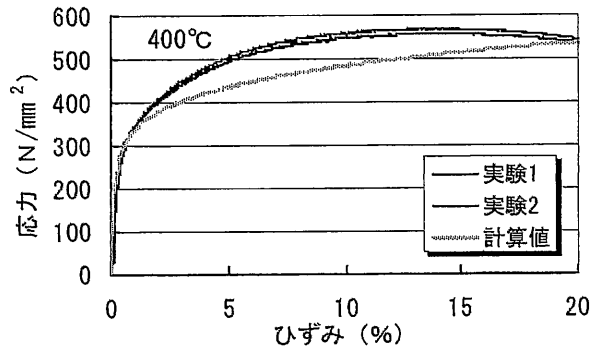
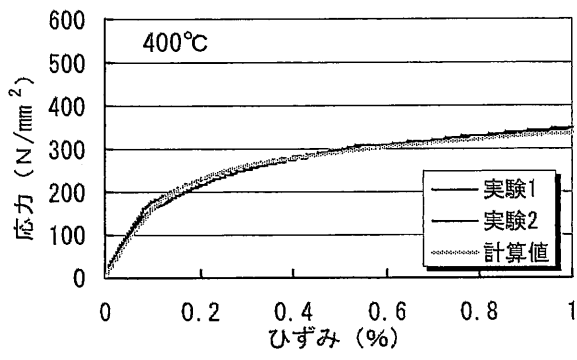
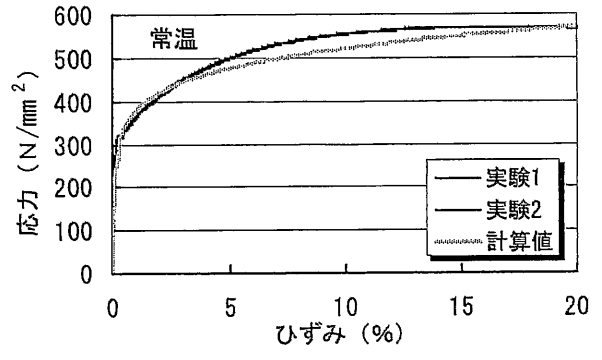
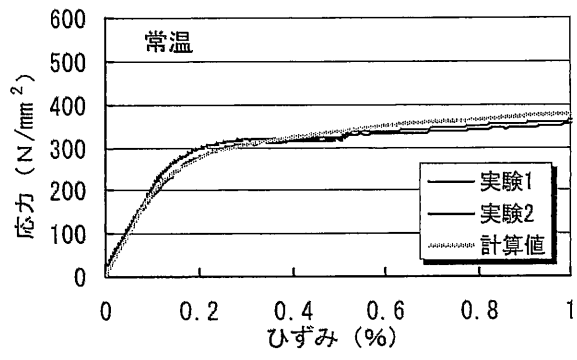


図 2.9(f) 試験結果と計算値の比較 (FB-9)

## 2.4 結語

本章では、溶接構造用圧延鋼材(SM490A)について5種類、裏当て金に用いた平鋼について1種類、計6種類のロットにおける高温引張試験結果を示した。これより、高温時の応力・ひずみ曲線をはじめ、弾性係数・0.2%オフセット強度・引張強度・破断伸びなどの高温時引張特性が得られた。本試験に用いた鋼材の高温時耐力は、既往の試験結果に対して同程度またはやや小さ目であった。

また、高温引張試験結果に基づいて応力・ひずみ曲線を数値化し、高温部材実験の数値解析に用いる応力・ひずみ曲線式を得た。

## 第2章の参考文献

- 1) 原田有, 古村福次郎:「高温度における建築用鋼材の力学的性質に関する研究」, 日本建築学会論文報告集 第185号, pp.1-7, 1971年7月
- 2) 日本鋼構造協会 技術委員会 耐久性分科会 耐火委員会 高温強度班:「構造用鋼材の高温時ならびに加熱後の機械的性質」, JSSC, Vol.4, No.33, 1968年
- 3) 藤本盛久, 古村福次郎, 安部武雄, 篠原保二:「Primary Creep of Structural Steel (SS41) at High Temperatures」, 日本建築学会論文報告集 第296号, pp.145-157, 1980年10月
- 4) 藤本盛久, 古村福次郎, 安部武雄:「Primary Creep of Structural Steel (SM50) at High Temperatures」, 日本建築学会論文報告集 第306号, pp.148-155, 1981年8月
- 5) 藤本盛久, 古村福次郎, 安部武雄:「Primary Creep of Structural Steel (SM58Q) at High Temperatures」, 日本建築学会論文報告集 第319号, pp.147-155, 1982年9月
- 6) Fukujiro FURUMURA, Takeo AVE, Takeshi OKABE and Wha Jung KIM: "A Uniaxial Stress-Strain Formula of Structural Steel at High Temperature and its Application to Thermal Deformation Analysis of Steel Frames", Report of the Research Laboratory of Engineering Materials of Tokyo Institute of Technology, No.11, 1986
- 7) 高野孝次:「鉄骨構造の部材の耐火性能に関する研究」, 学位論文, pp.84-109, 1983年
- 8) 上杉英樹:「高層鉄骨架構の火災時の応力変形性状に関する研究」, 学位論文, pp.327-329, 1990年1月
- 9) 建設省建築研究所:「建築物の防火設計法の開発(耐火設計法の開発)」, 昭和59年度総合技術開発プロジェクト 報告書, 1985年3月
- 10) 建設省建築研究所:「建築物の防火設計法の開発(耐火設計法の開発)」, 昭和61年度総合技術開発プロジェクト 報告書, 1987年3月
- 11) 岡部猛:「漸増温度下の鋼柱の座屈強度に及ぼす高温クリープの影響評価」, 日本建築学会, 構造工学論文集 Vol.43B, pp.367-376, 1997年3月

- 12) 岡部猛：「矩形断面を持つ鋼柱模型(SM490)の高温時の座屈強度」，日本建築学会構造系論文集 第 515 号，pp.169-176，1999 年 1 月
- 13) 建設省建築研究所，日本建築センター：「防・耐火性能評価技術の開発(構造分科会)」，総合技術開発プロジェクト No.6-4，pp.40-41,76-84，1995 年 3 月
- 14) 建設省建築研究所，日本建築センター：「防・耐火性能評価技術の開発(構造分科会)」，総合技術開発プロジェクト No.7-4，pp.135-192，1996 年 3 月
- 15) 雑喉良助，村上行夫，平山博巳，塩飽豊明，猪砂利次：「建築構造用鋼材の高温特性」，日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)，pp.113-114，2000 年 9 月
- 16) 岡部猛，茶圓敦，安部武雄，「鋼圧縮材の高温時の座屈強度に関する研究(その 8. SN490B 鋼柱の高温座屈実験と数値解析法)」，日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)，pp.55-56，2001 年 9 月
- 17) 日本建築センター：「建築物の総合防火設計法 第 4 巻 耐火設計法」，pp.118-151，1989 年 4 月
- 18) 日本建築学会：「鋼構造耐火設計指針」，pp11-21，1999 年 1 月
- 19) Jan Hult 著，村上澄男訳：「固体の力学シリーズ 4 構造物のクリープ」，培風館，昭和 48 年 12 月