

# 溶接構造用圧延鋼板(SM400B)の材料特性

1996年11月

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター

システム開発推進部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor  
and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-machi, O-arai-machi,  
Higashi-Ibaraki, Ibaraki-Ken 311-13, Japan.

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development  
Corporation)1997

## 溶接構造用圧延鋼板（SM400B）の材料特性

青砥 紀身\*、加藤 章一\*\*、小峰 龍司\*

### 要 旨

本報告書は、「もんじゅ」2次系配管室の床ライナに用いられている材料である、溶接構造用圧延鋼板（旧規格名称SM41B、現規格名称SM400B）の基本材料特性を調査し、材料試験等の検討結果に基づき、ナトリウム漏えい時の強度評価に必要な平均的な材料特性を暫定的に求めたものである。

主な基本材料特性値は、以下の通りである。

- (1) 0.2%耐力(下降伏点)
- (2) 引張強さ
- (3) 縦弾性係数
- (4) 静的応力-ひずみ関係(Ludwik 型式における物性値)
- (5) クリープひずみ
- (6) 線膨張係数
- (7) 密度
- (8) 比熱
- (9) 熱伝導率

---

\* : 大洗工学センター 安全工学部 機器・構造安全工学室  
\*\* : 現 日本原子力発電株式会社

The material properties of a rolled steel for welded structure (SM400B)

Kazumi AOTO \* , Shoichi KATO \*\* , Ryuji KOMINE \*

Abstract

The basic material properties of a rolled steel for welded structure ( present standard name is SM400B , old standard name SM41B ) which is used as the liner plate in SHTS cells of " Monju plant ". Based on the material testing data for evaluation of structural integrity of the liner during sodium leakage are tentatively proposed.

Main basic material properties are shown as follows.

- (1) The 0.2 % offset yield stress ( lower yield point ).
- (2) The ultimate tensile strength.
- (3) The modulus of the longitudinal elasticity.
- (4) Static stress- strain relation. (Physical property in Ludwik equation).
- (5) The creep strain.
- (6) The linear thermal expansion coefficient.
- (7) The density.
- (8) A specific heat.
- (9) The thermal conductivity.

(SHTS ; Secondary Heat Transfer System)

---

\* Structure Safety Engineering Section, Safety Engineering Division, OEC/PNC

\*\* Presently: The Japan Atomic Power Company

目 次

1. はじめに .....	1
2. SM400Bの基本材料特性値 .....	2
(1)0.2%耐力（下降伏点） .....	2
(2)引張強さ .....	3
(3)縦弾性係数 .....	4
(4)静的応力-ひずみ関係（Ludwik型式における物性値） .....	5
(5)クリープひずみ .....	6
(6)線膨張係数 .....	7
(7)密度 .....	8
(8)比熱 .....	9
(9)熱伝導率 .....	10
3. 参考文献 .....	11
付録 .....	12
(a)静的応力-ひずみ関係の2直線近似結果（想定最大ひずみ1.0%） .....	13
(b)等時応力ひずみ関係とその2直線近似結果（想定最大ひずみ1.0%） .....	14
参考図 .....	15

## 1. はじめに

もんじゅの現設計温度（530℃）以上の健全性評価に資するために高温域におけるもんじゅ2次系ライナ材（旧規格名称SM41B、現規格名称SM400B）の基本材料特性を調査し、平成8年11月現在の材料試験等の検討結果に基づきその平均的な特性を暫定的に求めた。

本資料中の特性値は、平成7年12月に発生したもんじゅ2次系Na漏えい燃焼事故時に推定750℃に達したとされるライナ材の強度解析上の要求から急遽特定の3ヒートの値に基づいて暫定されたものであるため、今後のデータの蓄積によっては適切な見直しが必要となる。参照する場合、特に、留意されたい。

本資料に含まれる基本材料特性値は以下の通り。なお、各特性値を求めるに当たっては既存の中低温データも含め、基本的に「高速原型炉高温構造設計方針材料強度基準[1]」策定手順に従った。

- (1)0.2%耐力（下降伏点）
- (2)引張強さ
- (3)縦弾性係数
- (4)静的応力-ひずみ関係（Ludwik型式における物性値）
- (5)クリープひずみ
- (6)線膨張係数
- (7)密度
- (8)比熱
- (9)熱伝導率

なお、静的応力-ひずみ関係の2直線近似結果（想定最大ひずみ1.0%）ならびに同関係とクリープひずみから算出される等時応力ひずみ関係およびその2直線近似結果（想定最大ひずみ1.5%）を付録した。また、必要に応じて特性値の傾向等が判断できる参照図を巻末に添付した。

供試材の化学成分等を含む本資料作成の基礎データについては別途まとめられている[2]ためデータ詳細はそちらを参照されたい。

## 2. SM400Bの基本材料特性値

## (1)0.2%耐力

SM400Bの降伏応力暫定値（平均値）を表1に示す。本暫定値と文献データとの比較を図1に示す。

表1 SM400Bの0.2%耐力

温度 (°C)	0.2%耐力 (kg/mm <sup>2</sup> )
R T	2 8 . 0 *
1 0 0	2 5 . 8 *
2 0 0	2 5 . 1 *
3 0 0	1 8 . 5
4 0 0	1 7 . 2
5 0 0	1 5 . 5
6 0 0	1 0 . 0
7 0 0	5 . 2
8 0 0	3 . 1
9 0 0	2 . 5
1 0 0 0	1 . 5

\* : 下降伏点の値

5 5 0 °Cの平均値は1 3 . 1 kg/mm<sup>2</sup>

1)本値は2 ヒート (CS2, CS3 ) [2] の平均値である。なお、900 °C及び1000°CはCS3 ヒートの実験値を示した。

2)本値は方向性 (圧延方向およびその直交方向) の違いに係わらない。

## (2)引張強さ

SM400Bの引張強さ暫定値（平均値）を表2に示す。本暫定値と文献データとの比較を図2に示す。

表2 SM400Bの引張強さ

温度 (°C)	引張強さ (kg/mm <sup>2</sup> )
R T	4 5 . 5
1 0 0	4 2 . 5
2 0 0	4 8 . 4
3 0 0	5 0 . 0
4 0 0	4 3 . 0
5 0 0	2 9 . 9
6 0 0	1 6 . 3
7 0 0	8 . 2
8 0 0	4 . 8
9 0 0	5 . 2
1 0 0 0	3 . 6

5 5 0 °Cの平均値は 2 2 . 5 kg/mm<sup>2</sup>

---

1)本値は2ヒート (CS2, CS3 ) [2] の平均値である。なお、900 °C及び1000°CはCS3 ヒートの実験値を示した。

2)本値は方向性 (圧延方向およびその直交方向) の違いに係わらない。



## (3)縦弾性係数

SM400Bの縦弾性係数暫定値を表3に示す。本暫定値と文献データとの比較を図3に示す。

表3 SM400Bの縦弾性係数

温度 (°C)	縦弾性係数(kg/mm <sup>2</sup> )
R T	1 8 7 0 6
1 0 0	1 8 5 3 1
2 0 0	1 7 9 6 3
3 0 0	1 6 9 7 4
4 0 0	1 5 5 3 0
5 0 0	1 3 5 9 9
6 0 0	1 1 1 4 7
7 0 0	8 1 4 0
8 0 0	4 5 4 4
9 0 0	5 5 0 0
1 0 0 0	4 7 0 0

本値算出に用いた平均特性表示式は以下の通り。

$$E = 1.87129 \times 10^4 + 1.02101 \times 10^{-2} T - 1.76854 \times 10^{-2} T^2 - 5.58193 \times 10^{-5} T^3$$

ここで Eは縦弾性係数(kg/mm<sup>2</sup>)、Tは温度(°C)である。

- 
- 1)本値は2ヒート(CS2, CS3)の引張試験結果[2]から得られる見かけの縦弾性係数に基づいている。なお、900°C及び1000°CはCS3ヒートの実験値を示した。
  - 2)本値は方向性(圧延方向およびその直交方向)の違いに係わらない。

(4)静的応力-ひずみ関係 (Ludwik型式における物性値)

SM400Bの静的応力-ひずみ関係をLudwik型式 (下記(4.1) および(4.2) 式) で表示した場合の係数Kおよび指数mの値を表4に示す。本暫定値と実験データとの比較を図4に示す。

$$\epsilon_t = \frac{\sigma}{E} + \left( \frac{\sigma - \sigma_p}{K} \right)^{1/m} \quad (4.1)$$

$$\sigma_p = \sigma_y - K (0.002)^m \quad (4.2)$$

ここで $\epsilon_t$ 、 $\sigma$ 、 $E$ 、 $\sigma_p$  および $\sigma_y$  は、全ひずみ(mm/mm)、応力(kg/mm<sup>2</sup>)、縦弾性係数(kg/mm<sup>2</sup>)、比例限(kg/mm<sup>2</sup>)および降伏応力 (0.2%耐力: kg/mm<sup>2</sup>) である。

表4 SM400BのLudwik型式における物性値

温度 (°C)	K	m	$\sigma_p'$
RT*	111.4	0.410	7.85
100*	99.2	0.358	6.25
200*	157.8	0.408	4.25
300	342.3	0.781	
400	163.9	0.567	
500	47.2	0.297	
600	11.4	0.124	
700	3.0	0.097	
800	2.7	0.087	
900	2.77	0.160	
1000	2.23	0.201	

\* : RT~200 °Cではリュウダス帯長さを考慮するため、上記式とは異なり見かけの比例限応力 $\sigma_p'$ を用いている[1]。

- 1)本値は2ヒート (CS2, CS3) [2] の各真応力-真ひずみ関係から求められる実験値の平均値である。
- 2)本値は方向性 (圧延方向およびその直交方向) の違いに係わらない。
- 3)適用限度; 最大ひずみ ( $\epsilon_e + \epsilon_p$ ) max  $\leq$  0.03 (mm/mm)

## (5) クリープひずみ

SM400Bのクリープひずみ式を以下のように定めた。

$$\varepsilon_c = \dot{\varepsilon}_m t \quad (5.1)$$

$$\log(\dot{\varepsilon}_m) = A_0 + A_1 T + A_2 \log(\sigma) \quad (5.2)$$

(5.2) 式中の係数を表5に、定常クリープ速度と応力の関係を図5に示した。

表5 SM400Bのクリープひずみ式中の係数

	500℃ ≤ T ≤ 700℃	800℃ ≤ T ≤ 900℃
A <sub>0</sub>	-2.09407 × 10 <sup>1</sup>	3.10694 × 10 <sup>0</sup>
A <sub>1</sub>	2.37090 × 10 <sup>-2</sup>	-7.03595 × 10 <sup>-3</sup>
A <sub>2</sub>	5.49815	3.66363

ただし適用温度範囲は、当面500℃ ≤ T ≤ 700℃とする。また、参考までに800℃ ≤ T ≤ 900℃の係数を示した。

## (6)線膨張係数

SM400Bの線膨張係数を表6に示す。本暫定値と文献データとの比較を図2に示す。

表6 SM400Bの線膨張係数

単位： $\times 10^{-6}$  [1/°C]

温度 (°C)	A	B
RT	12.4	————
100	12.9	12.7
200	14.4	12.9
300	15.0	13.5
400	15.3	13.9
500	15.1	14.3
550	15.5*	14.4

\* : 530°Cの値

A : 瞬間線膨張係数

B : 室温からその温度までの平均線膨張係数

---

1)本値は焼きならし処理を施した材料の測定結果[4]である。

## (7)密度

SM400Bの密度を表7に示す。本暫定値と文献データとの比較を図7に示す。

表7 SM400Bの密度

単位： $\times 10^{-3}$  [kg/cm<sup>3</sup>]

温度 (°C)	密度
R T	7. 8 4 9
1 0 0	7. 8 2 7
2 0 0	7. 7 9 7
3 0 0	7. 7 6 3
4 0 0	7. 7 2 9
5 0 0	7. 6 9 3
5 5 0	7. 6 7 6

---

1)本値は焼きならし処理を施した材料の測定結果[4] である。

## (8)比熱

SM400Bの比熱を表 8 に示す。本暫定値と文献データとの比較を図 8 に示す。

表 8 SM400Bの比熱

単位：[cal/g・°C]

温度 (°C)	比 熱
R T	0. 1 0 6
1 0 0	0. 1 1 4
2 0 0	0. 1 2 1
3 0 0	0. 1 3 0
4 0 0	0. 1 4 0
5 3 0	0. 1 6 0

---

1)本値は焼きならし処理を施した材料の測定結果[4] である。

## (9)熱伝導率

SM400Bの熱伝導率を表9に示す。本暫定値と文献データとの比較を図9に示す。

表9 SM400Bの熱伝導率

単位：[cal/cm・sec・°C]

温度 (°C)	熱伝導率
R T	0. 1 0 1
1 0 0	0. 1 0 4
2 0 0	0. 0 9 9 1
3 0 0	0. 0 9 5 4
4 0 0	0. 0 8 9 2
5 3 0	0. 0 7 8 3

---

1)本値は焼きならし処理を施した材料の測定結果[4]である。

3. 参考文献

- [1] KOM MSS W/G、解説高速原型炉高温構造設計方針 材料強度基準等  
:PNC ZN241 84-10 (昭和59年9月)
- [2] 加藤章一他、ライナ材の高温強度試験(第1報) SM400B母材の高温引張およびクリープ特性 成果報告書:作成中(近日完成)
- [3] 電力新報社 解説 原子力設備の技術基準 通産省資源エネルギー庁編
- [4] 清川輝行他、一次収納基本構造確認試験 鋼材料の強度及び熱特性成果報告書:PNC SJ222 82-03(02)(1982)
- [5] 日本鉄鋼協会 データシートシリーズ3 高温引張試験:(1973)
- [6] 佐藤千之助他、超音波による各種構造材の高温における弾性係数の測定  
:日本機械学会、Vol.69、No.572(1966)pp.26~34.
- [7] 技術資料 金属材料の弾性係数:日本機械学会  
Galofalo, F, ASTM ST No.129(1952)10 (22)
- [8] 技術資料 金属材料の弾性係数:日本機械学会  
Date E.H.F., J.Iron & Steel Inst., 207-7(1969) (27)



## 付録

(a)静的応力-ひずみ関係の2直線近似結果(想定最大ひずみ1.0%)

(4)項で求めたSM400Bの静的応力-ひずみ関係(Ludwik型式)を想定最大ひずみ1.0%の下で2直線近似した結果を表10に示す。2直線近似と各温度における平均真応力-真ひずみ曲線との比較を図10に示す。

表10 SM400Bの2直線近似における物性値

温度(°C)	降伏点 $\sigma_y$ (kg/mm <sup>2</sup> )	加工硬化係 $H'$ (kg/mm <sup>2</sup> )
RT*	28.7	0
100*	26.2	0
200*	25.5	0
300	16.69	881.1
400	15.81	654.8
500	14.12	647.3
550	12.35	328.0
600	9.61	160.1
700	5.12	36.5
800	3.04	28.4
900	2.42	39.7
1000	1.44	31.8

\* : RT~200 °Cではリュース帯を考慮し、1.0%までは弾完全塑性としている。

(b)等時応力ひずみ関係とその2直線近似結果(想定最大ひずみ1.5%)

SM400Bの等時応力ひずみ関係を(4.1)~(5.2)式を用いて求め、想定最大ひずみを1.5%とした2直線近似を行った。求められた保持時間 $t_h$ (hr)=0.0, ~10における弾性変形限界値 $\sigma_L$ と非弾性領域の硬化係数 $H_i$ を表11に示した。SM400Bの各温度における等時応力ひずみ曲線と2直線近似結果との比較を図11に示した。

表11 等時応力ひずみ関係2直線近似における物性値

弾性変形限界値 $\sigma_L$

時間(hr)	500	550	600	650	700	800	900
0.0	14.99	12.87	9.88	7.54	5.19	3.09	2.48
0.1	14.72	11.93	8.13	4.87	2.97	1.61	2.32
0.5	13.86	9.80	5.96	3.64	2.23	1.04	1.70
1.0	13.10	8.67	5.26	3.22	1.96	0.86	1.34
2.0	12.04	7.64	4.65	2.84	1.73	0.71	1.11
4.0	10.89	6.74	4.10	2.51	1.53	0.59	0.92
6.0	10.19	6.24	3.81	2.33	1.41	0.53	0.82
8.0	9.71	5.92	3.62	2.21	1.34	0.49	0.76
10.0	9.34	5.69	3.48	2.12	1.29	0.46	0.71

非弾性領域の硬化係数 $H_i$

時間(hr)	500	550	600	650	700	800	900
0.0	471.5	227.9	109.8	64.8	24.6	21.3	27.9
0.1	458.6	246.9	180.1	158.6	96.2	90.2	33.8
0.5	424.0	279.0	197.1	118.2	70.9	57.2	65.9
1.0	398.5	270.9	173.5	103.5	62.2	47.1	72.4
2.0	377.1	247.1	151.8	90.7	54.6	39.5	60.7
4.0	344.7	218.4	132.8	79.6	48.0	32.6	51.0
6.0	325.2	206.7	122.9	73.7	45.5	29.1	45.5
8.0	311.3	195.5	116.4	69.9	43.1	26.9	42.0
10.0	300.5	187.2	111.5	67.0	41.3	25.3	39.5

特記事項

□静的関係

弾性定数 : 500~800℃まで回帰式を採用、900℃は平均値を採用

$\sigma_y$  : 500~900℃まで平均値

K : 500~900℃まで平均値

m : 500~900℃まで平均値

□定常クリープひずみ速度式

500~700℃と800~900℃につき別々の式を作成

参考図

- 図 1 SM400Bの下降伏点および0.2%耐力（他ヒートの比較）
- 図 2 SM400Bの引張強さ（他ヒートの比較）
- 図 3 縦弾性係数と温度との関係
- 図 4 静的応力－ひずみ関係
  - 図4-1 静的応力－ひずみ関係（室温）
  - 図4-2 静的応力－ひずみ関係（100℃）
  - 図4-3 静的応力－ひずみ関係（200℃）
  - 図4-4 静的応力－ひずみ関係（300℃）
  - 図4-5 静的応力－ひずみ関係（400℃）
  - 図4-6 静的応力－ひずみ関係（500℃）
  - 図4-7 静的応力－ひずみ関係（550℃）
  - 図4-8 静的応力－ひずみ関係（600℃）
  - 図4-9 静的応力－ひずみ関係（700℃）
  - 図4-10 静的応力－ひずみ関係（800℃）
  - 図4-11 静的応力－ひずみ関係（900℃）
  - 図4-12 静的応力－ひずみ関係（1000℃）
- 図 5 定常クリープひずみ速度
- 図 6 線膨張係数
  - (a)瞬間線膨張係数
  - (b)室温からその温度までの線膨張係数
- 図 7 密度
- 図 8 比熱
- 図 9 熱伝導率
- 図 10 静的応力－ひずみ関係の2直線近似結果
  - 図10-1 静的応力－ひずみ関係の2直線近似結果（300℃）
  - 図10-2 静的応力－ひずみ関係の2直線近似結果（400℃）
  - 図10-3 静的応力－ひずみ関係の2直線近似結果（500℃）
  - 図10-4 静的応力－ひずみ関係の2直線近似結果（600℃）
  - 図10-5 静的応力－ひずみ関係の2直線近似結果（700℃）

図10-6 静的応力-ひずみ関係の2直線近似結果(800℃)

図10-7 静的応力-ひずみ関係の2直線近似結果(900℃)

図10-8 静的応力-ひずみ関係の2直線近似結果(1000℃)

図11 等時応力ひずみ関係

図11-1 等時応力ひずみ関係(500℃)

図11-2 等時応力ひずみ関係(550℃)

図11-3 等時応力ひずみ関係(600℃)

図11-4 等時応力ひずみ関係(650℃)

図11-5 等時応力ひずみ関係(700℃)

図11-6 等時応力ひずみ関係(800℃)

図11-7 等時応力ひずみ関係(900℃)

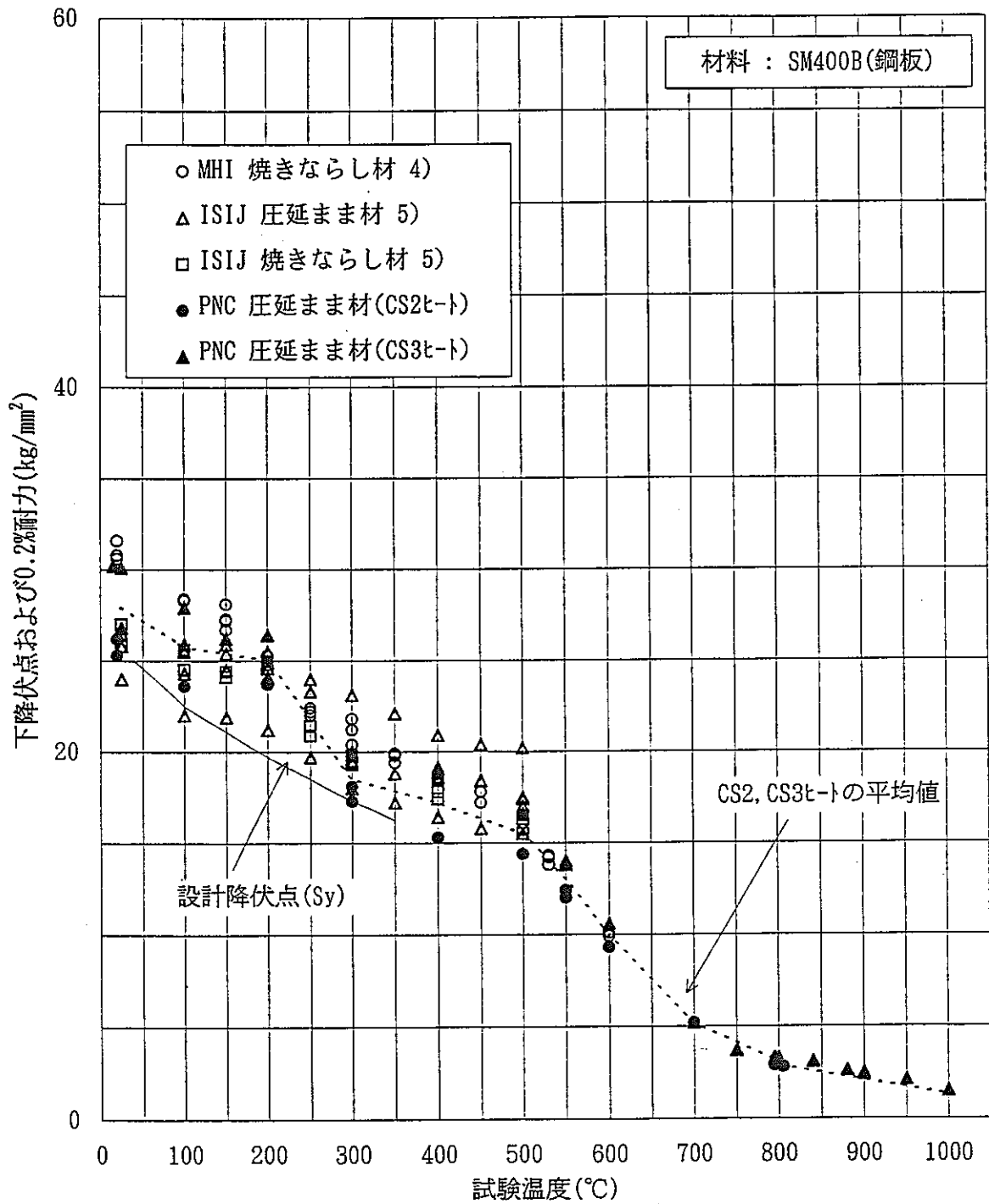


図 1 SM400Bの下降伏点および0.2%耐力 (他ヒートの比較)

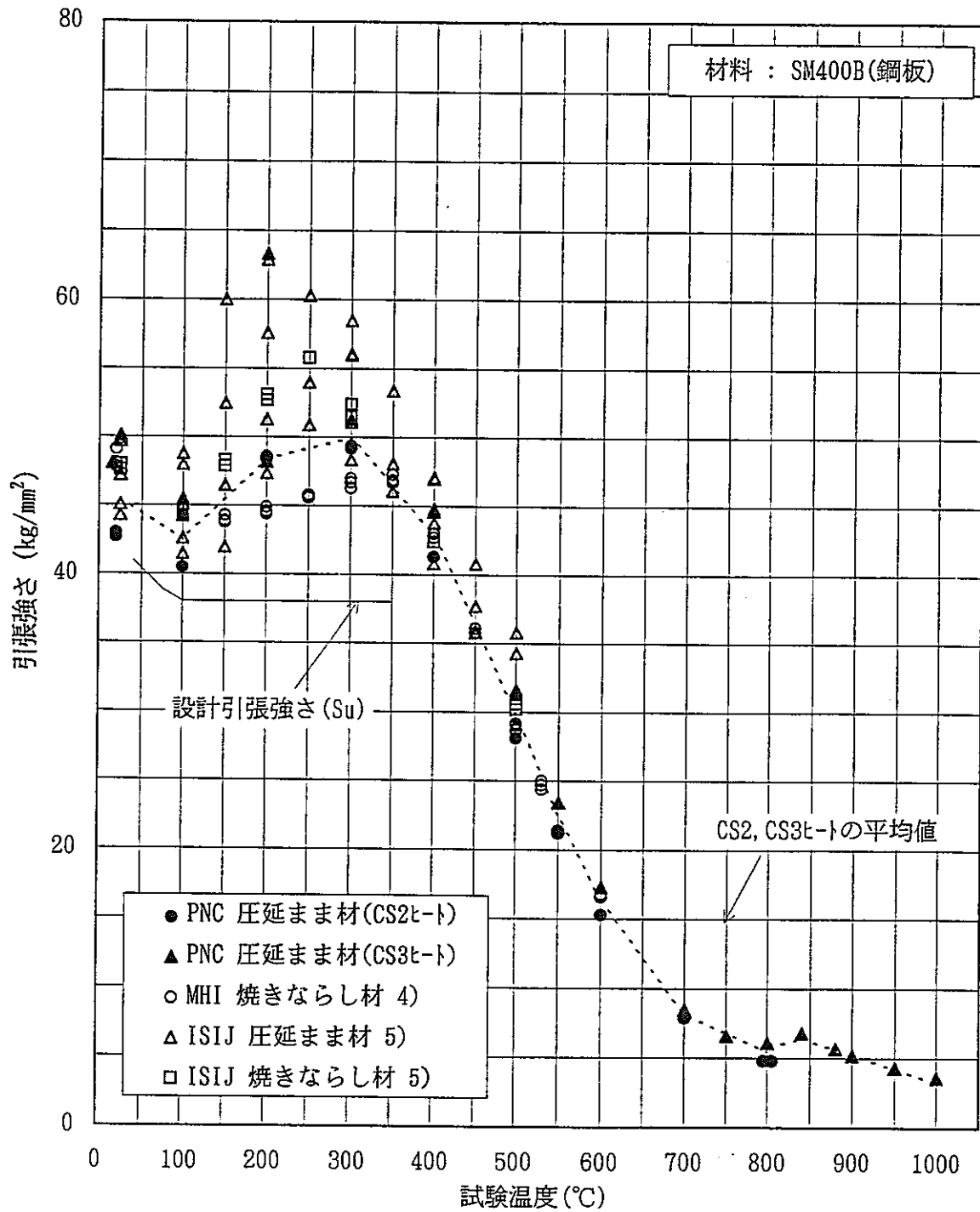


図2 SM400Bの引張強さ (他ヒートの比較)

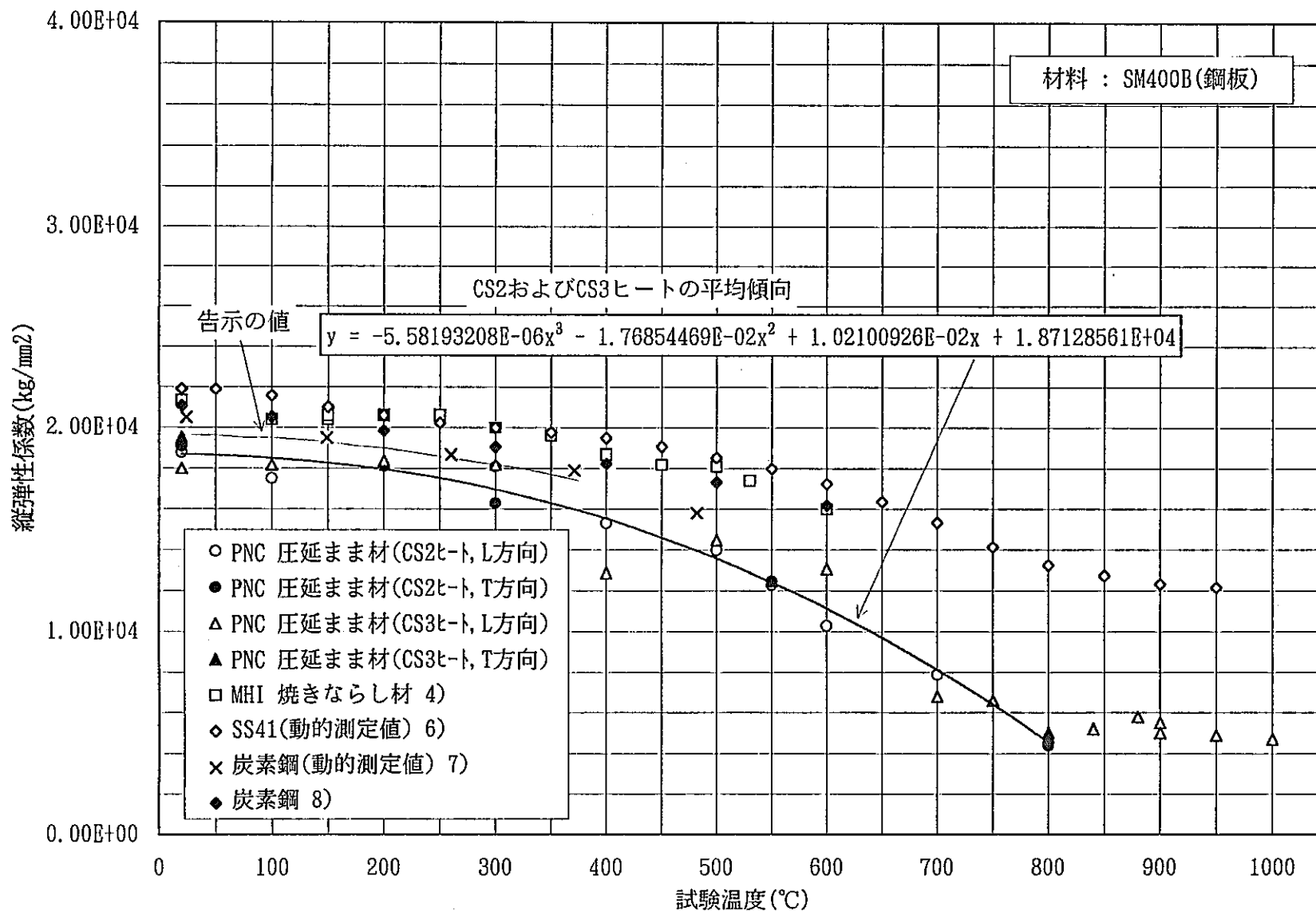


図 3 縦弾性係数と温度との関係

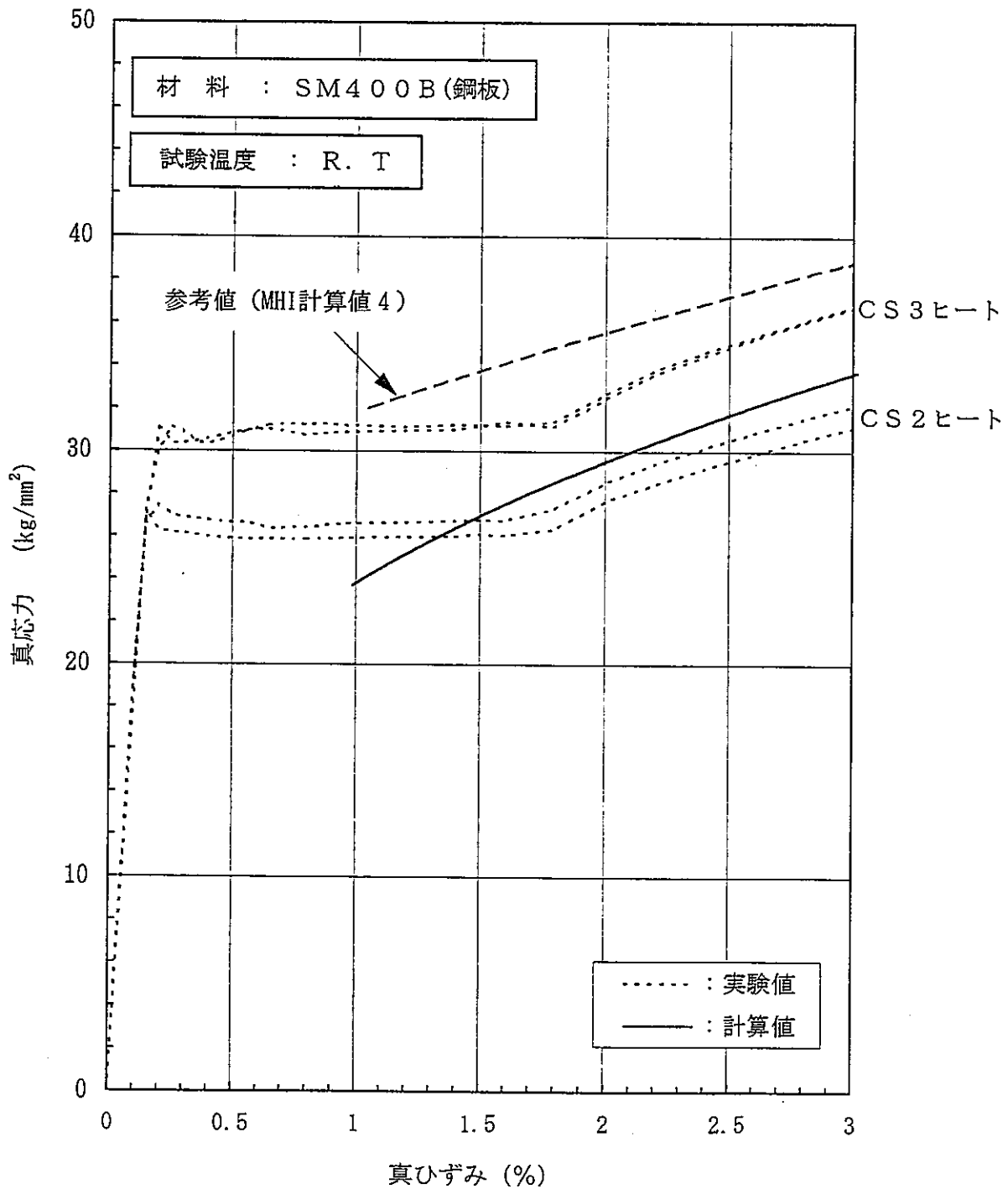


図4-1 静的応力-ひずみ関係 (室温)



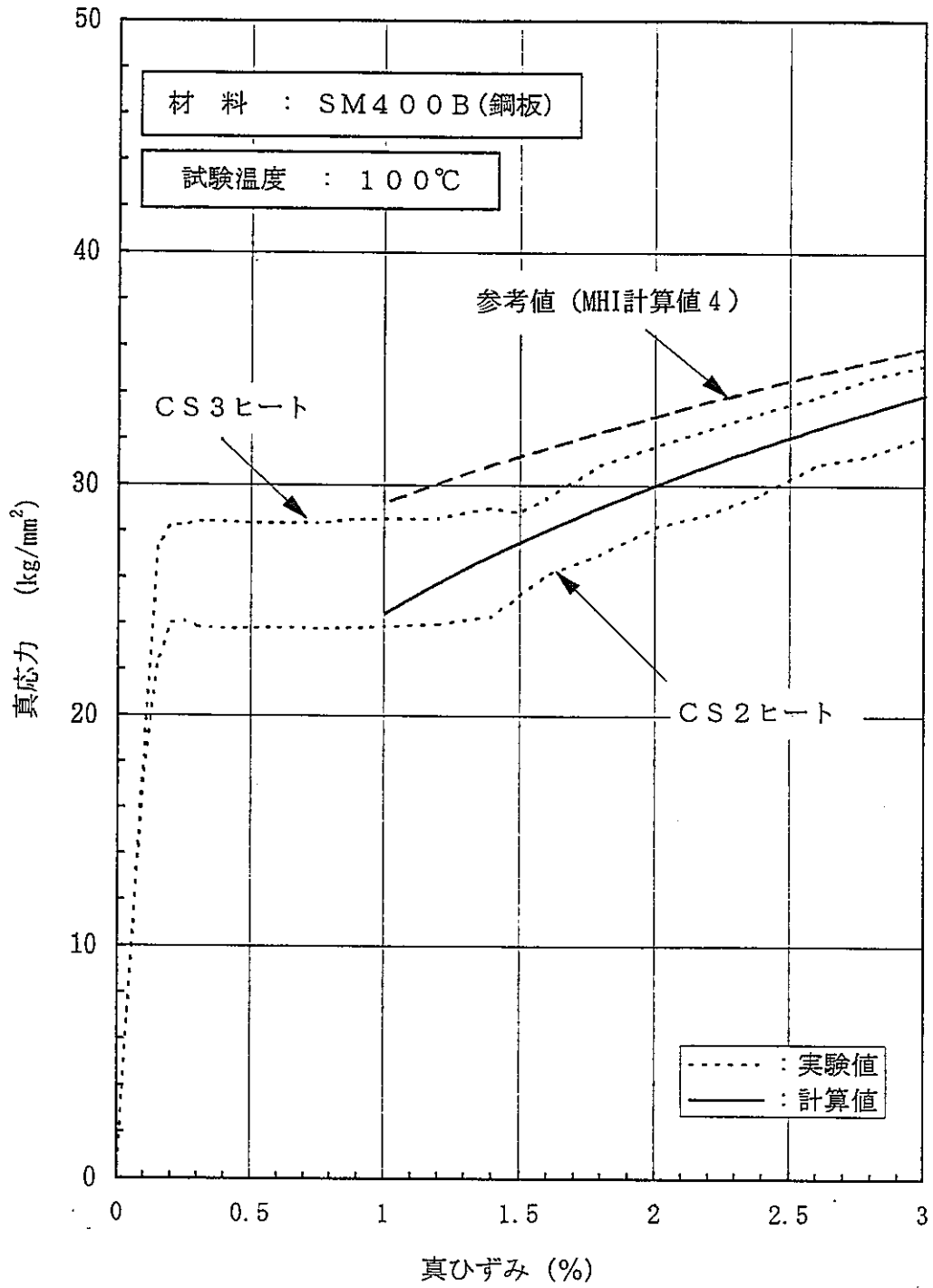


図4-2 静的応力-ひずみ関係 (100°C)

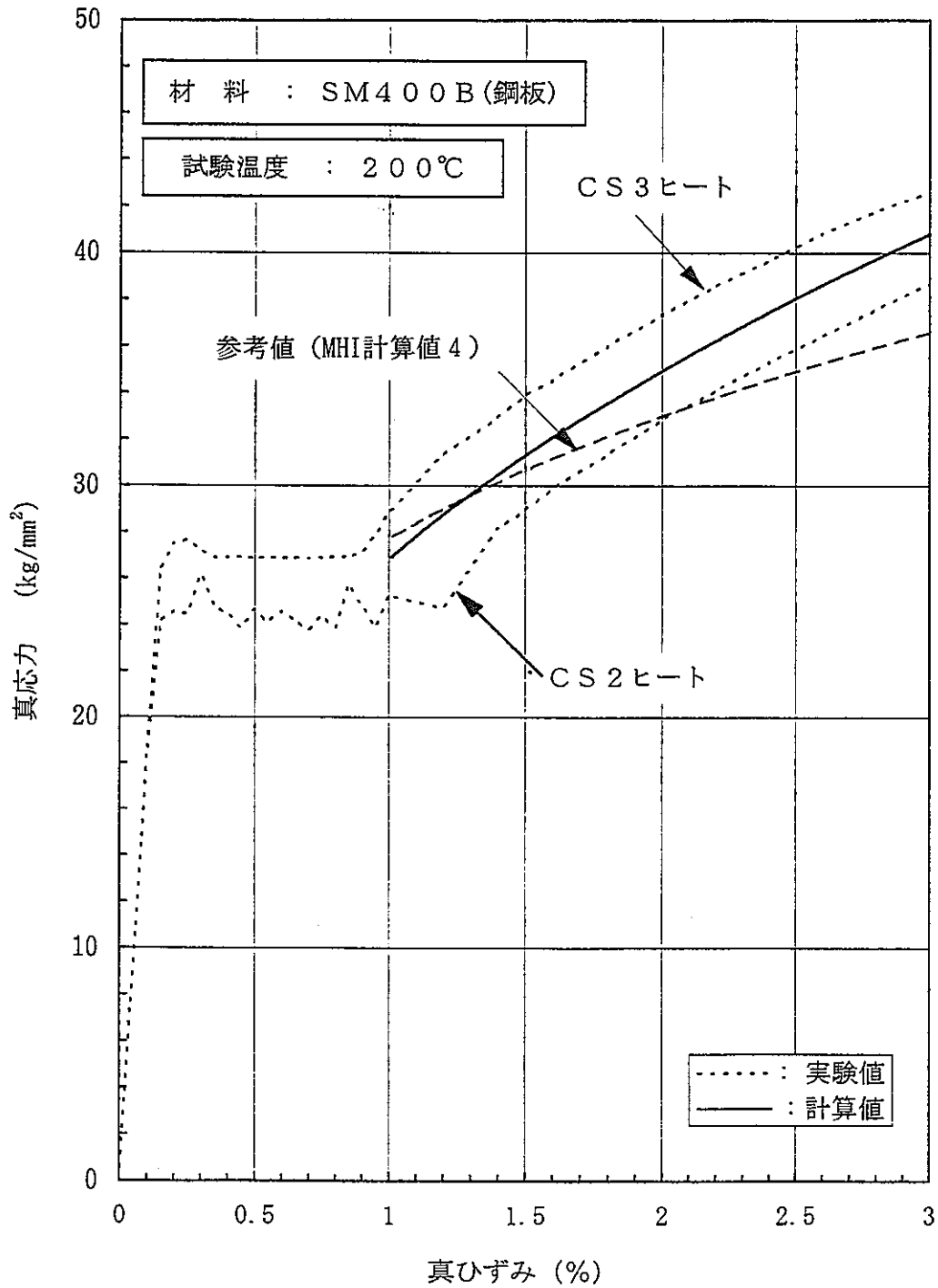


図4-3 静的応力－ひずみ関係 (200°C)

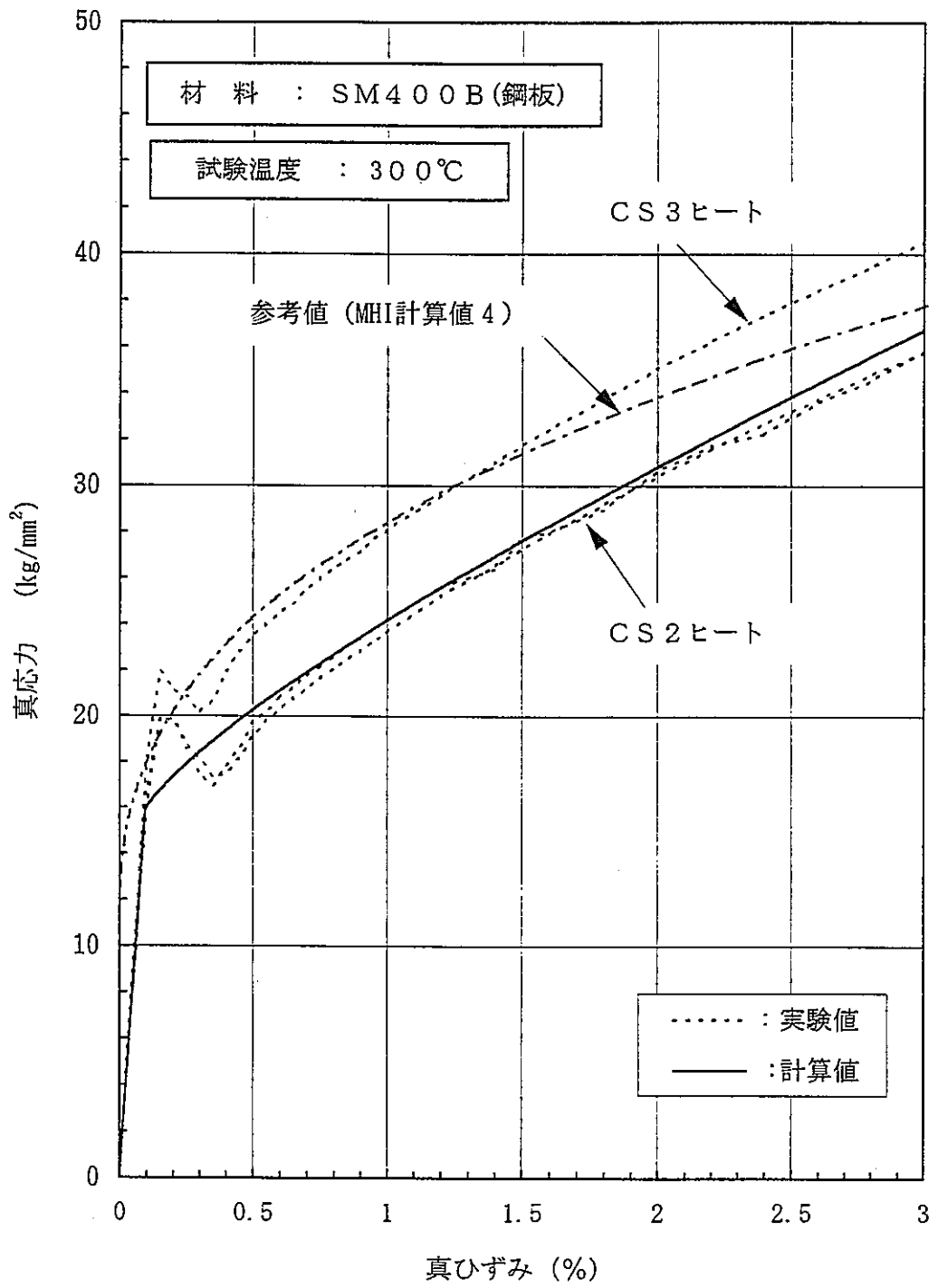


図4-4 静的応力-ひずみ関係 (300°C)

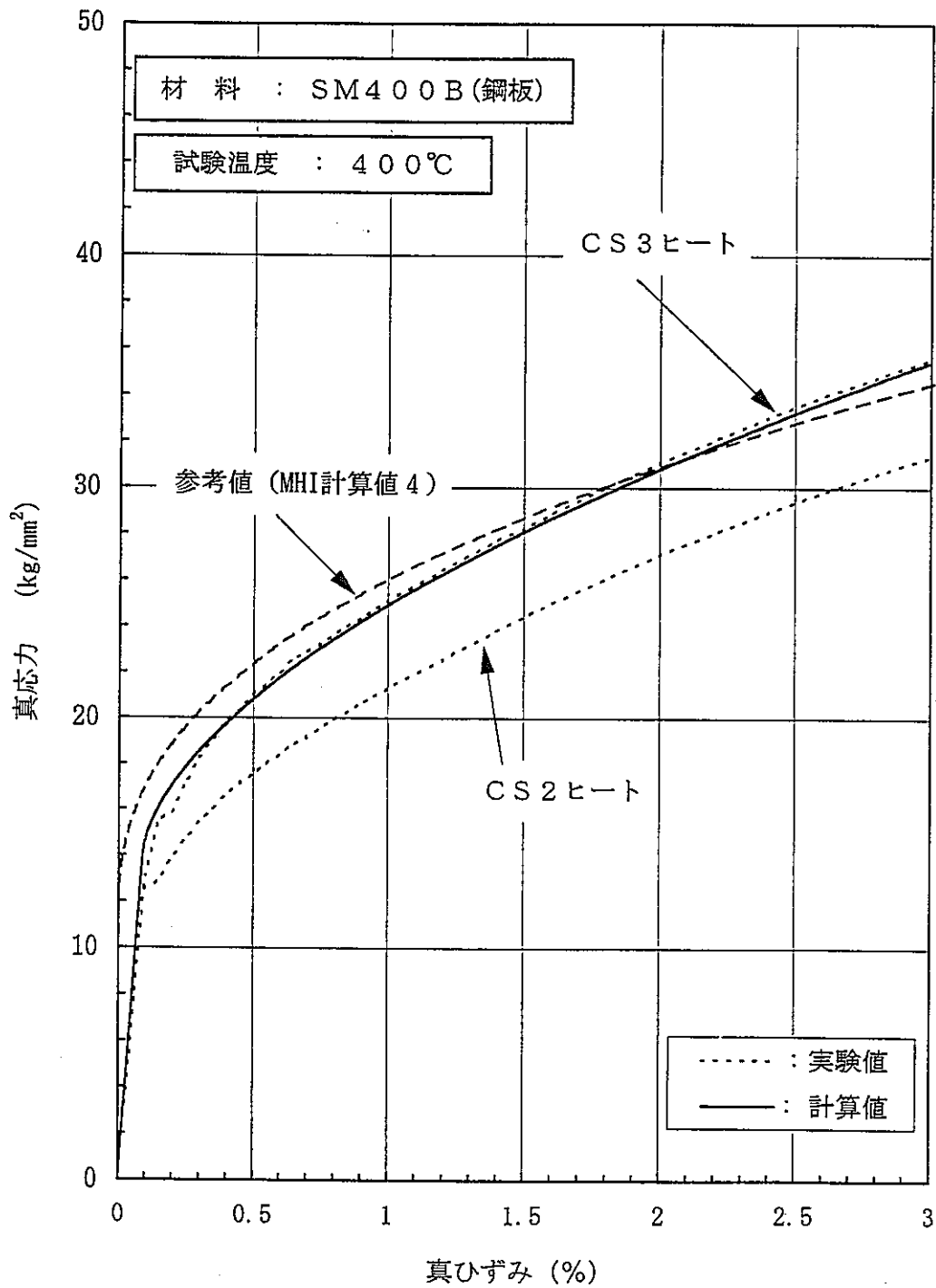


図4-5 静的応力-ひずみ関係 (400°C)

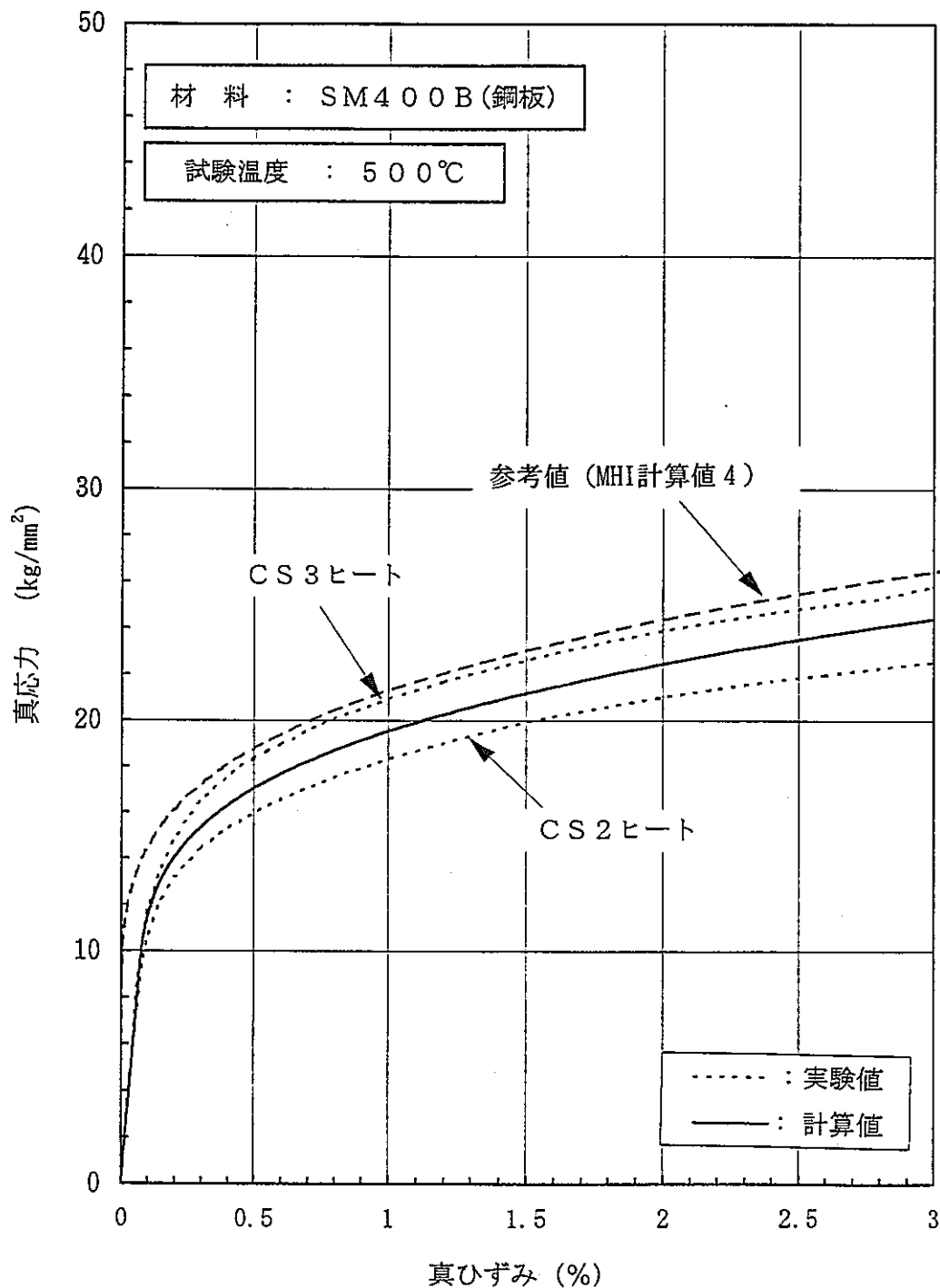


図4-6 静的応力-ひずみ関係 (500°C)

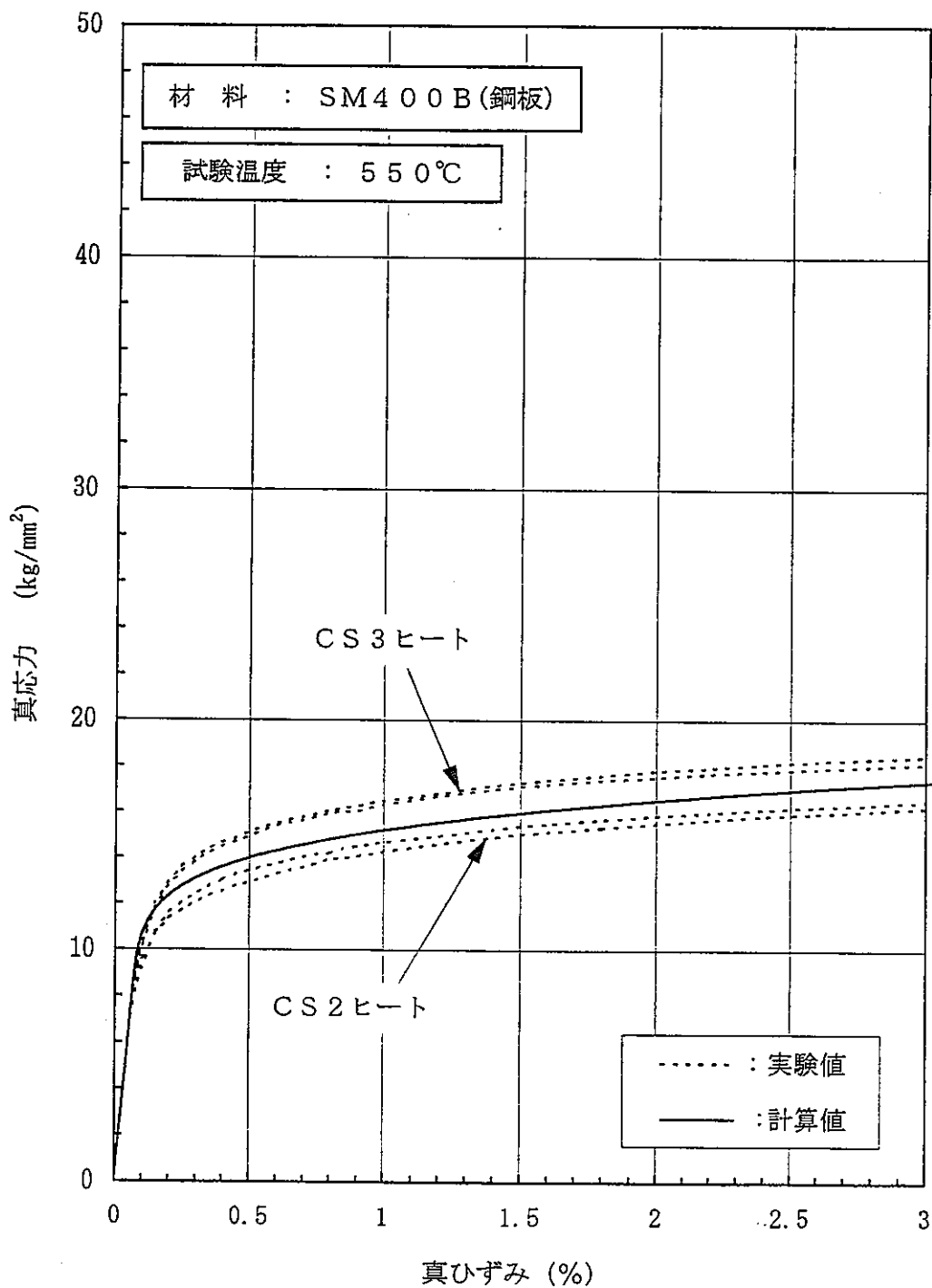


図4-7 静的応力-ひずみ関係 (550°C)

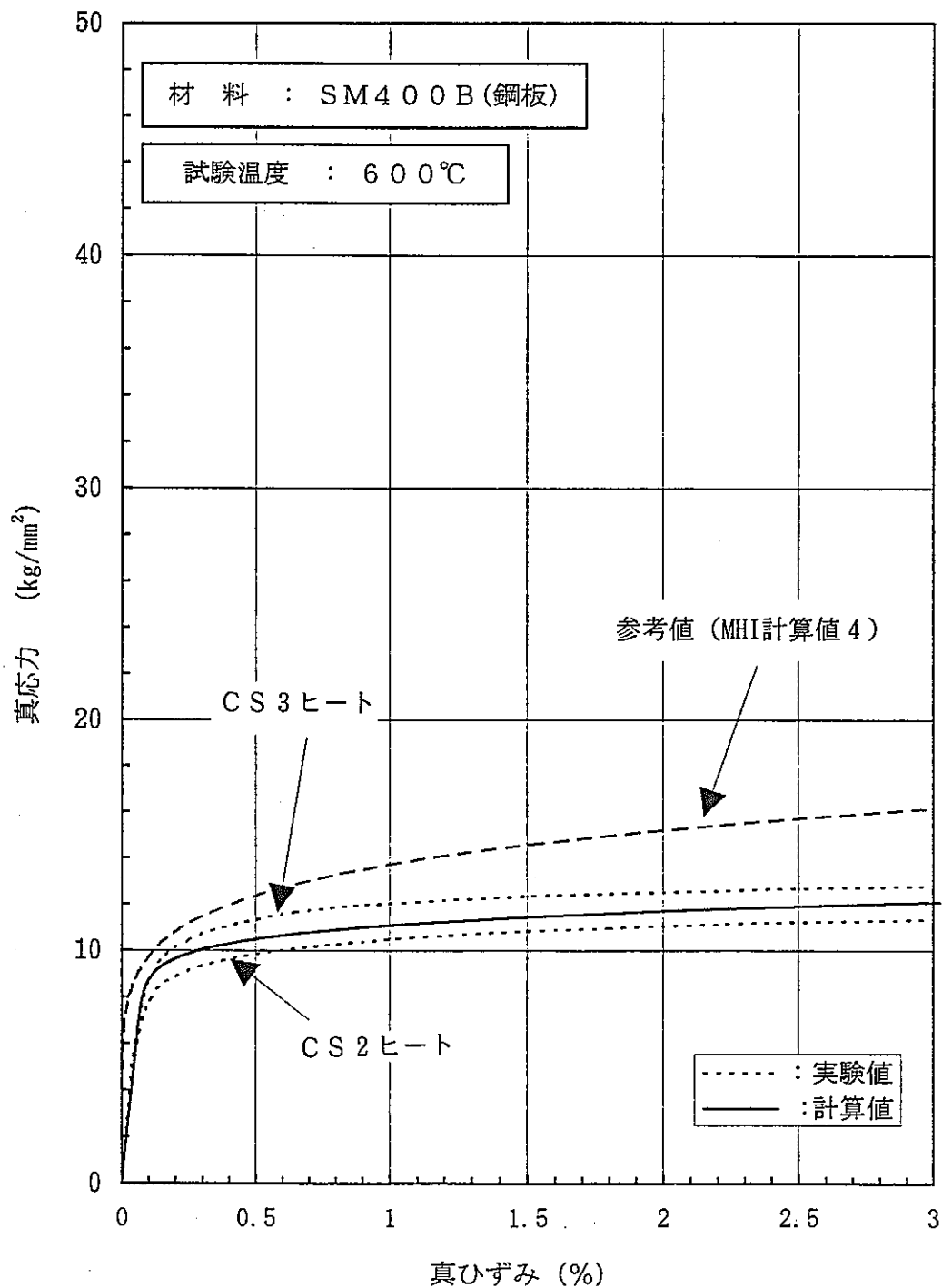


図4-8 静的応力-ひずみ関係 (600°C)

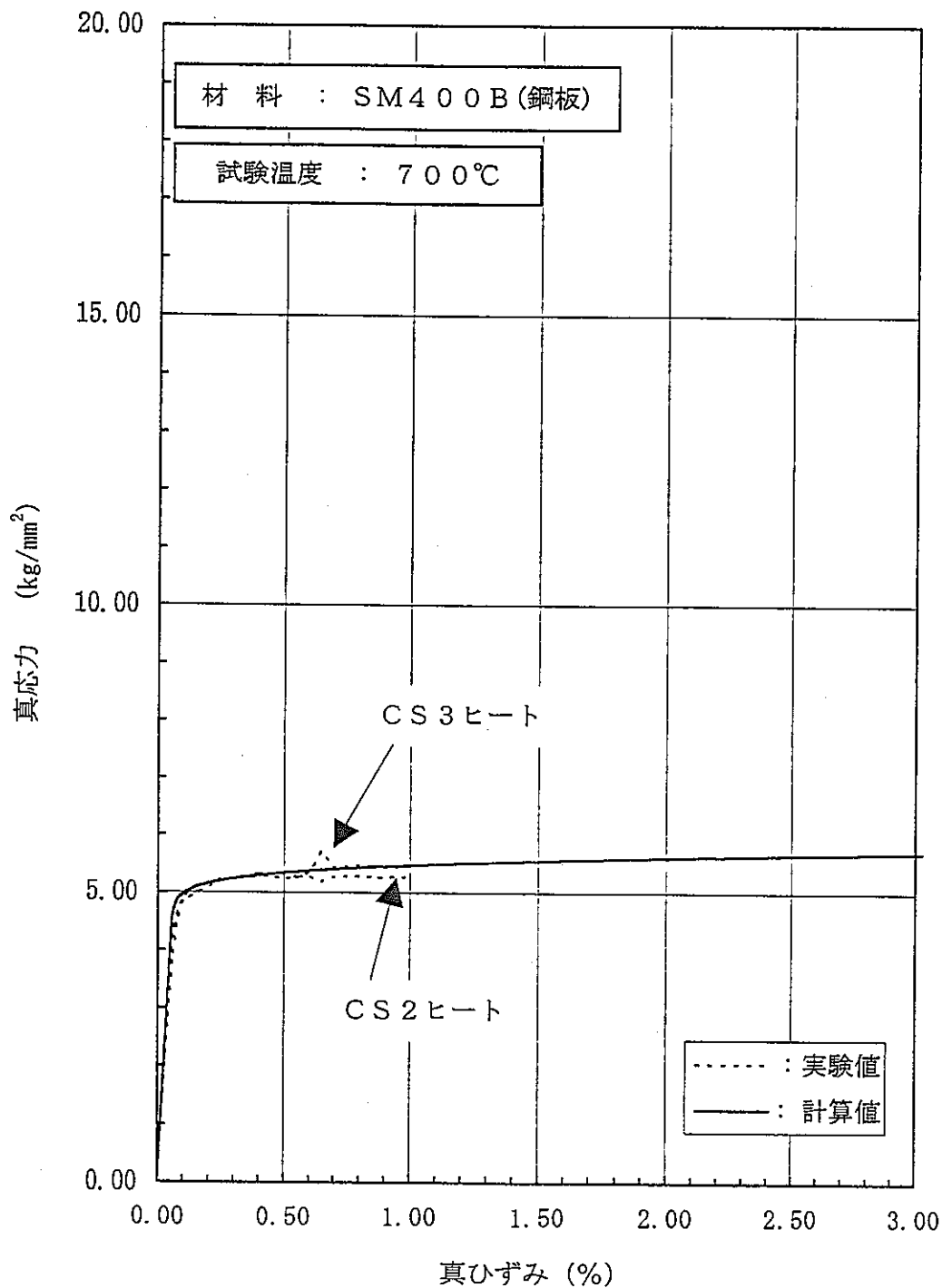


図4-9 静的応力-ひずみ関係 (700°C)



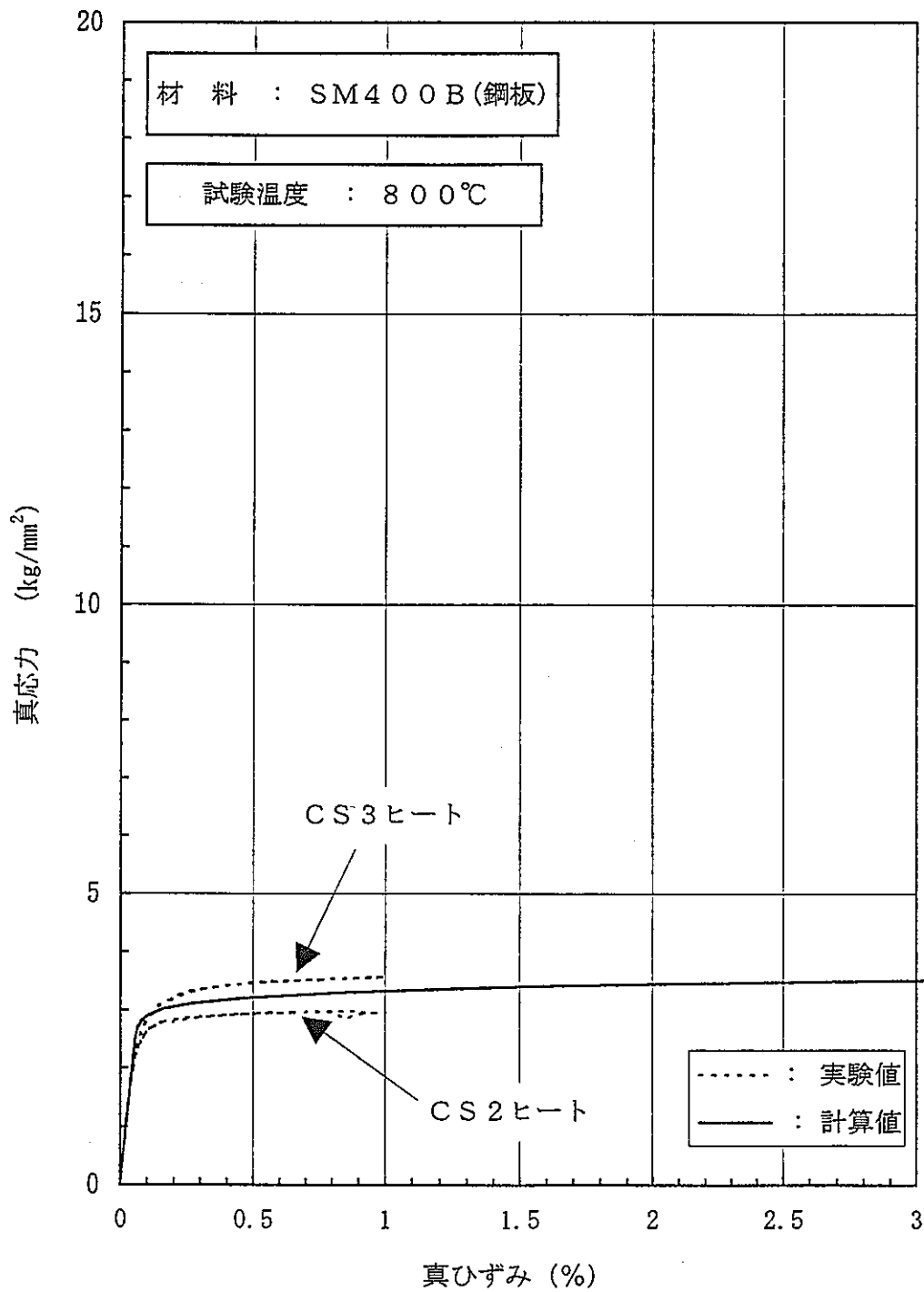


図4-10 静的応力－ひずみ関係 (800°C)

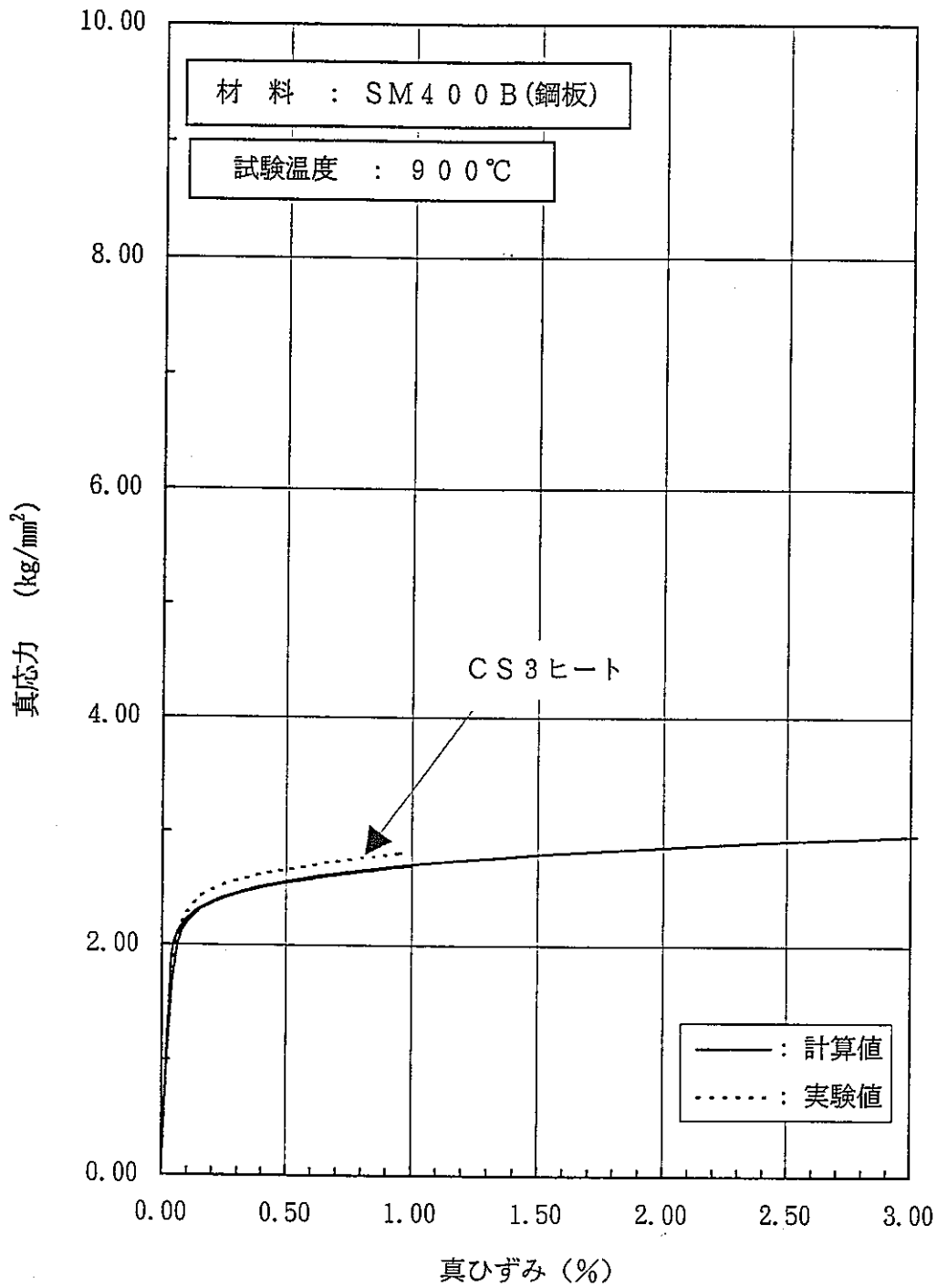


図4-11 静的応力-ひずみ関係 (900°C)

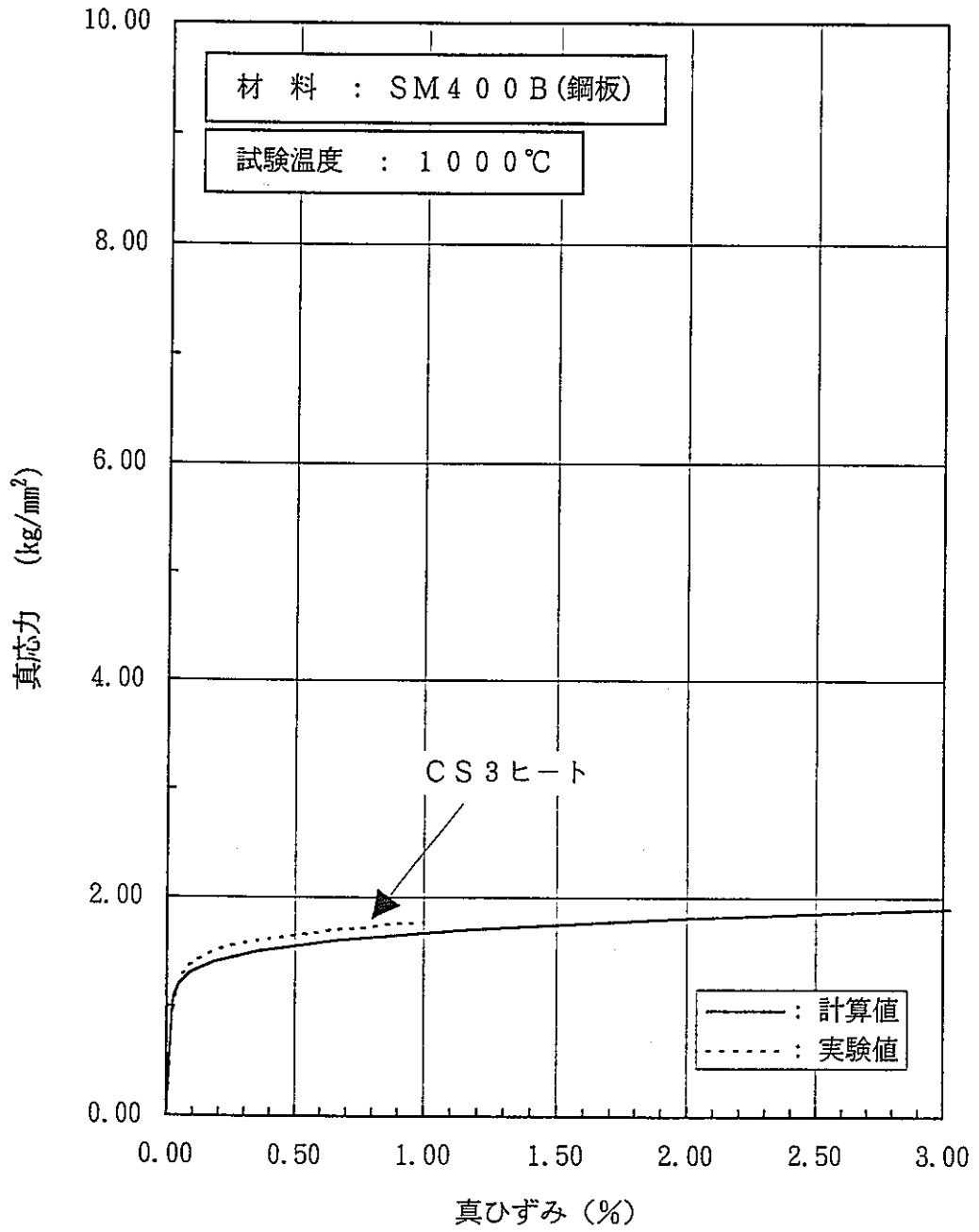


図4-12 静的応力－ひずみ関係 (1000°C)

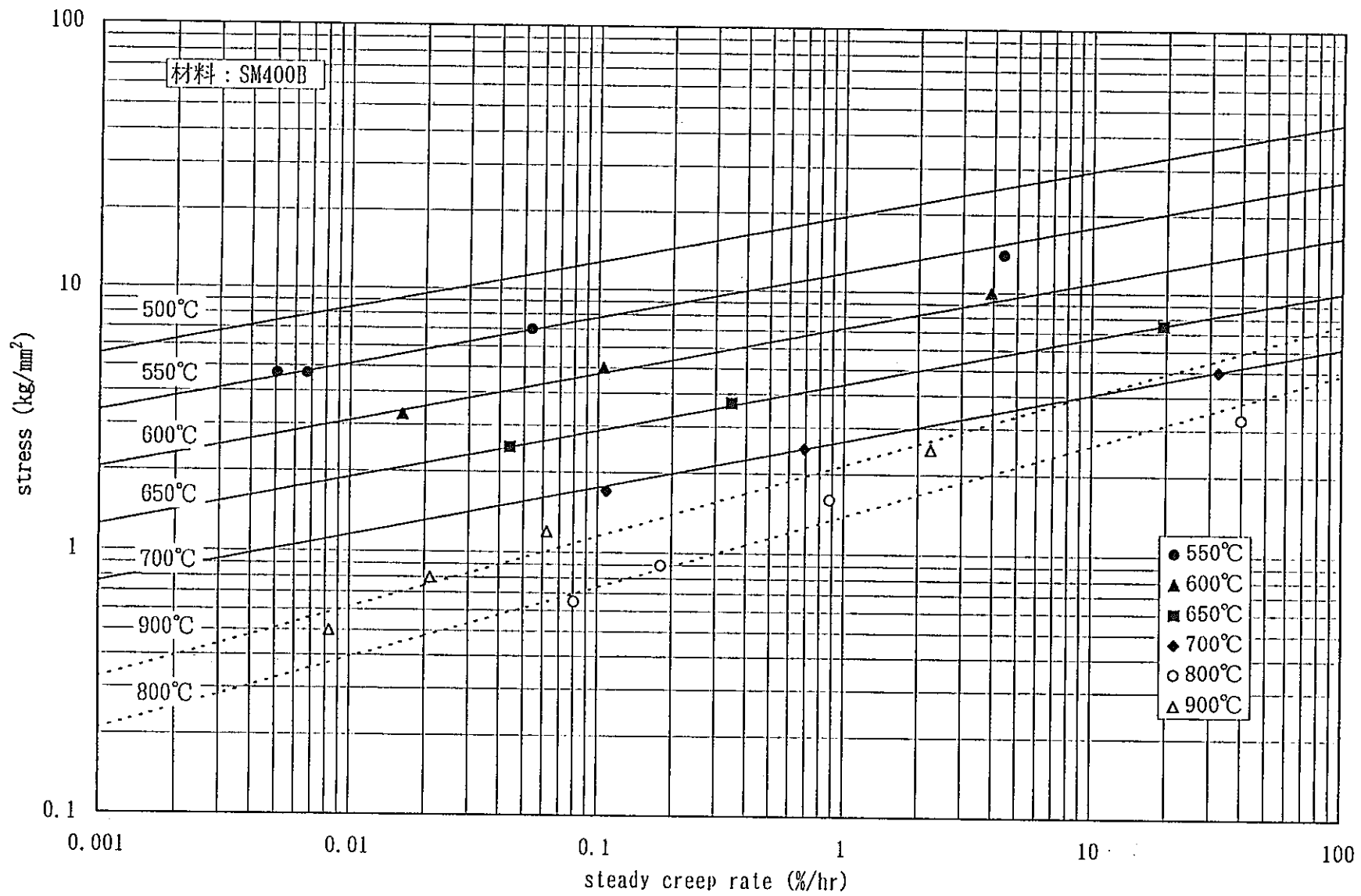
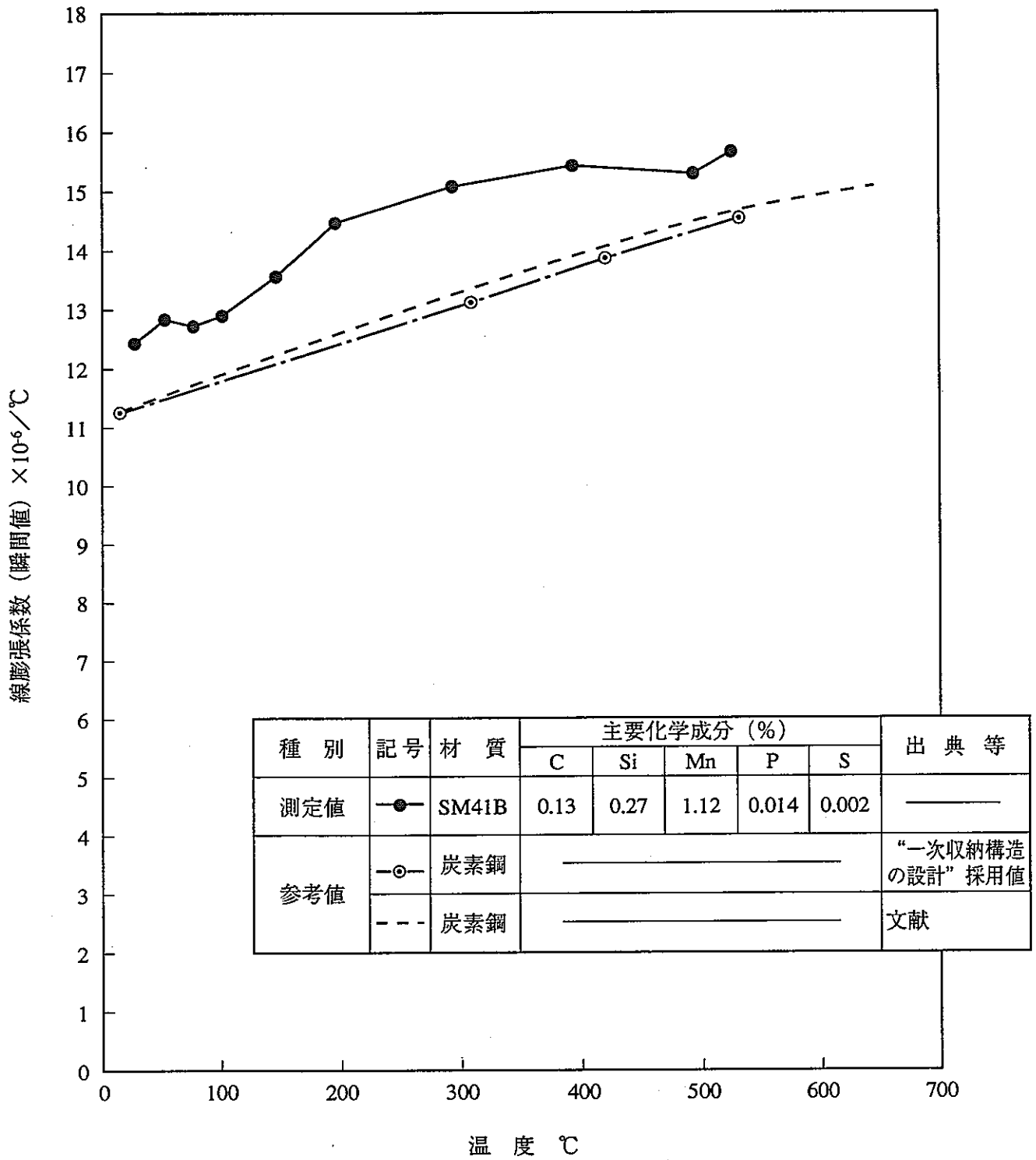
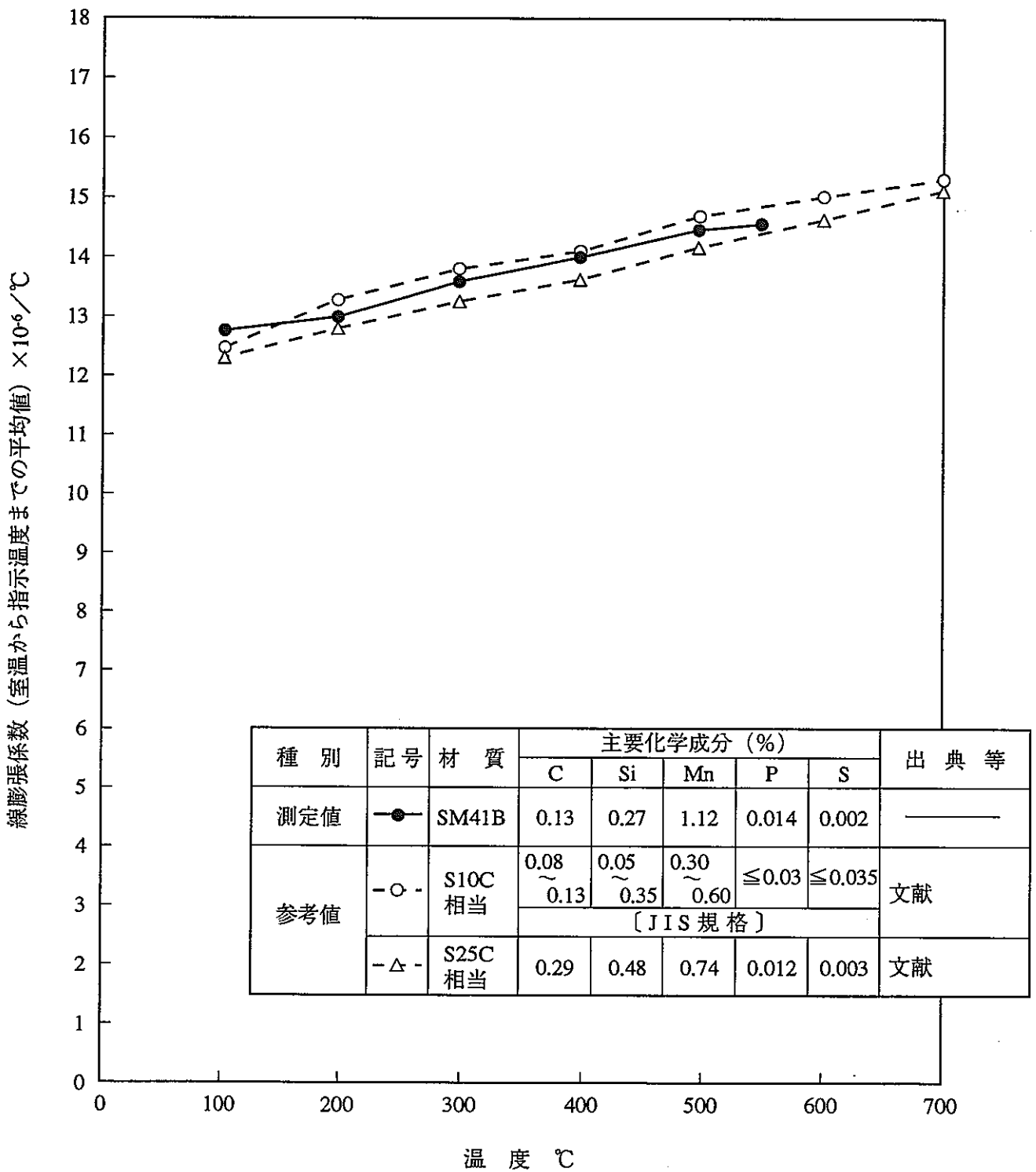


図5 定常クリープひずみ速度



(a) 瞬間線膨張係数

図 6 線膨張係数



(b) 室温からその温度までの線膨張係数

図6 線膨張係数

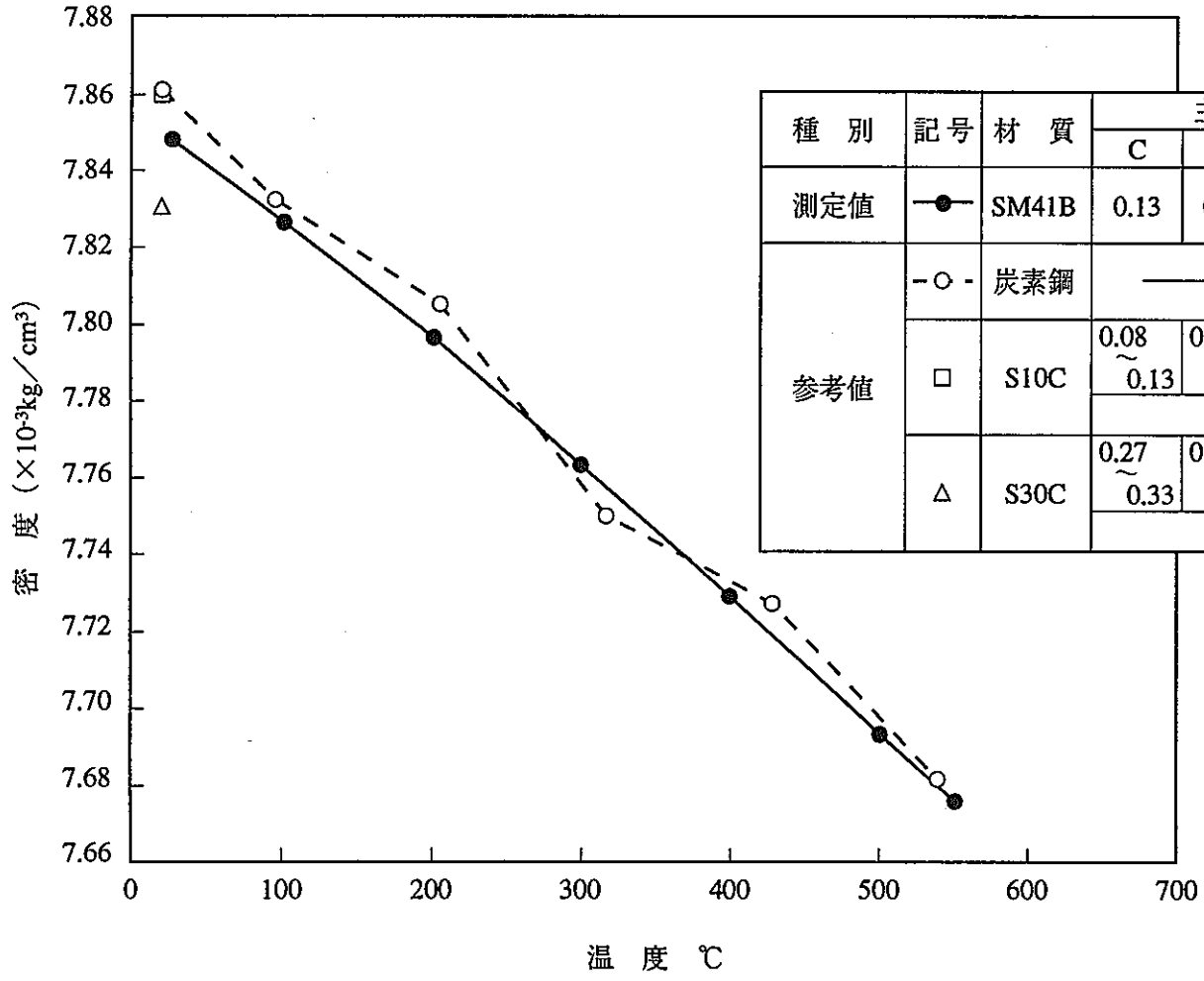


図7 密度

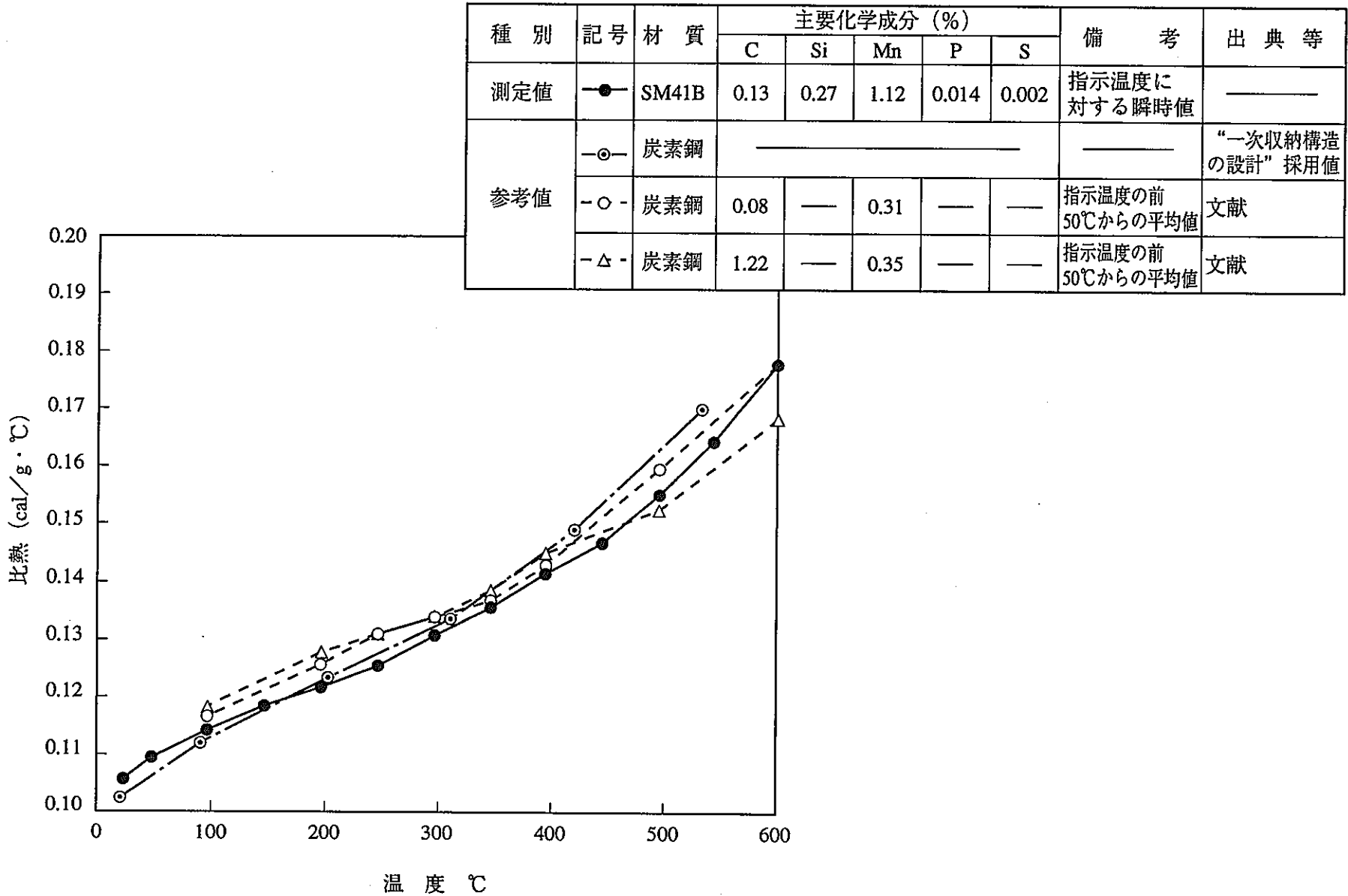


図8 比熱



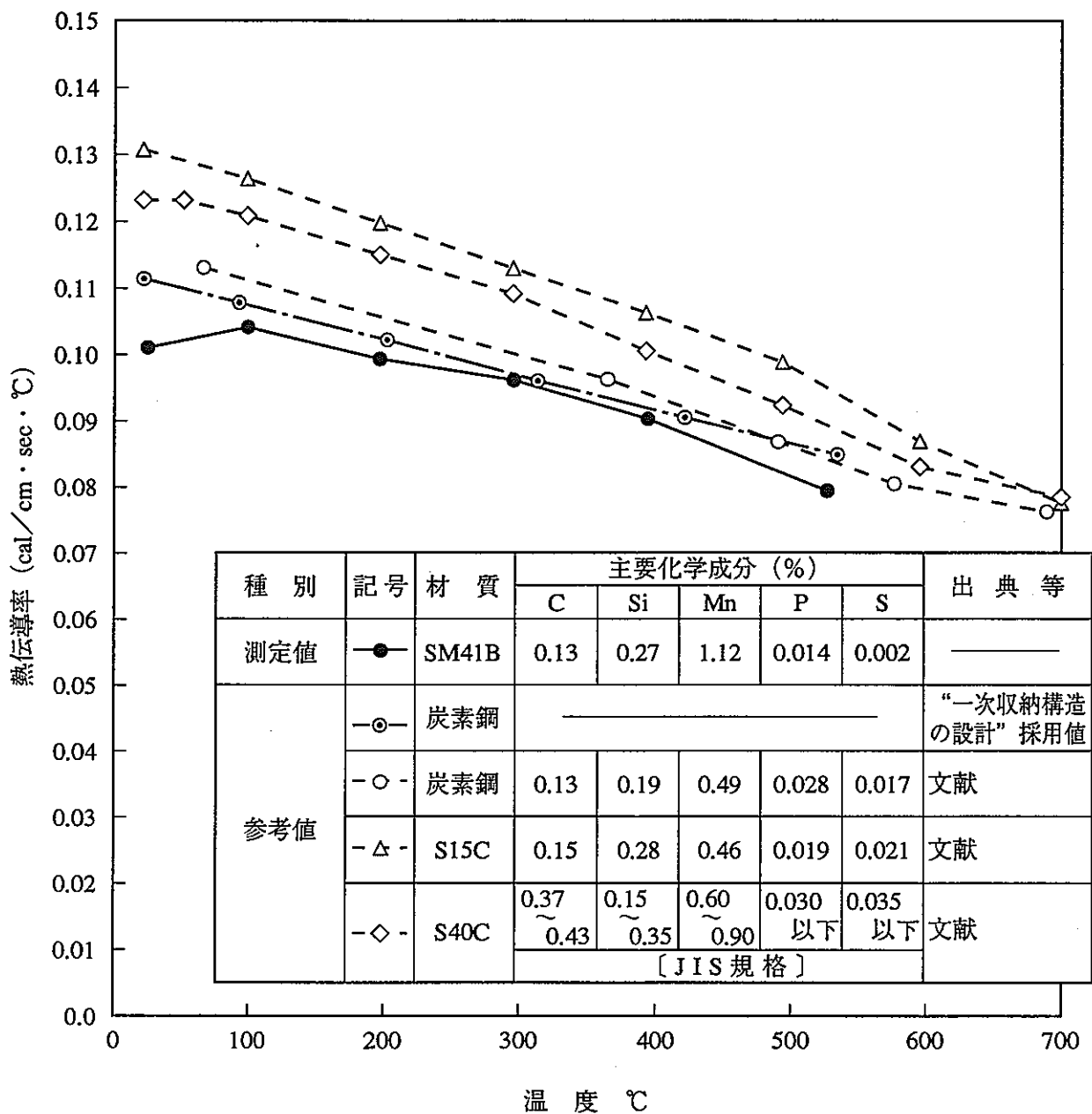


図9 熱伝導率

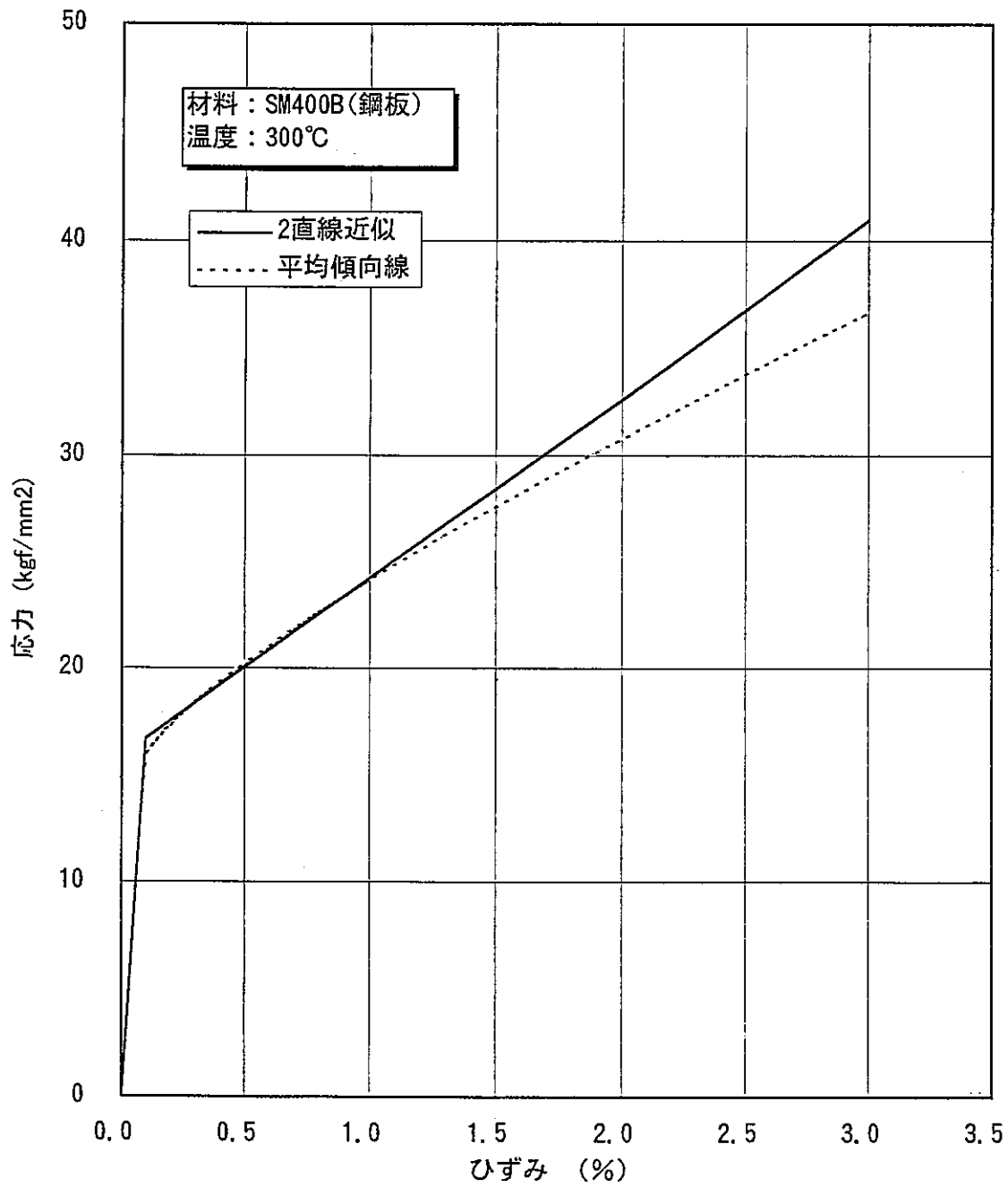


図10-1 静的応力－ひずみ関係の2直線近似結果（300℃）

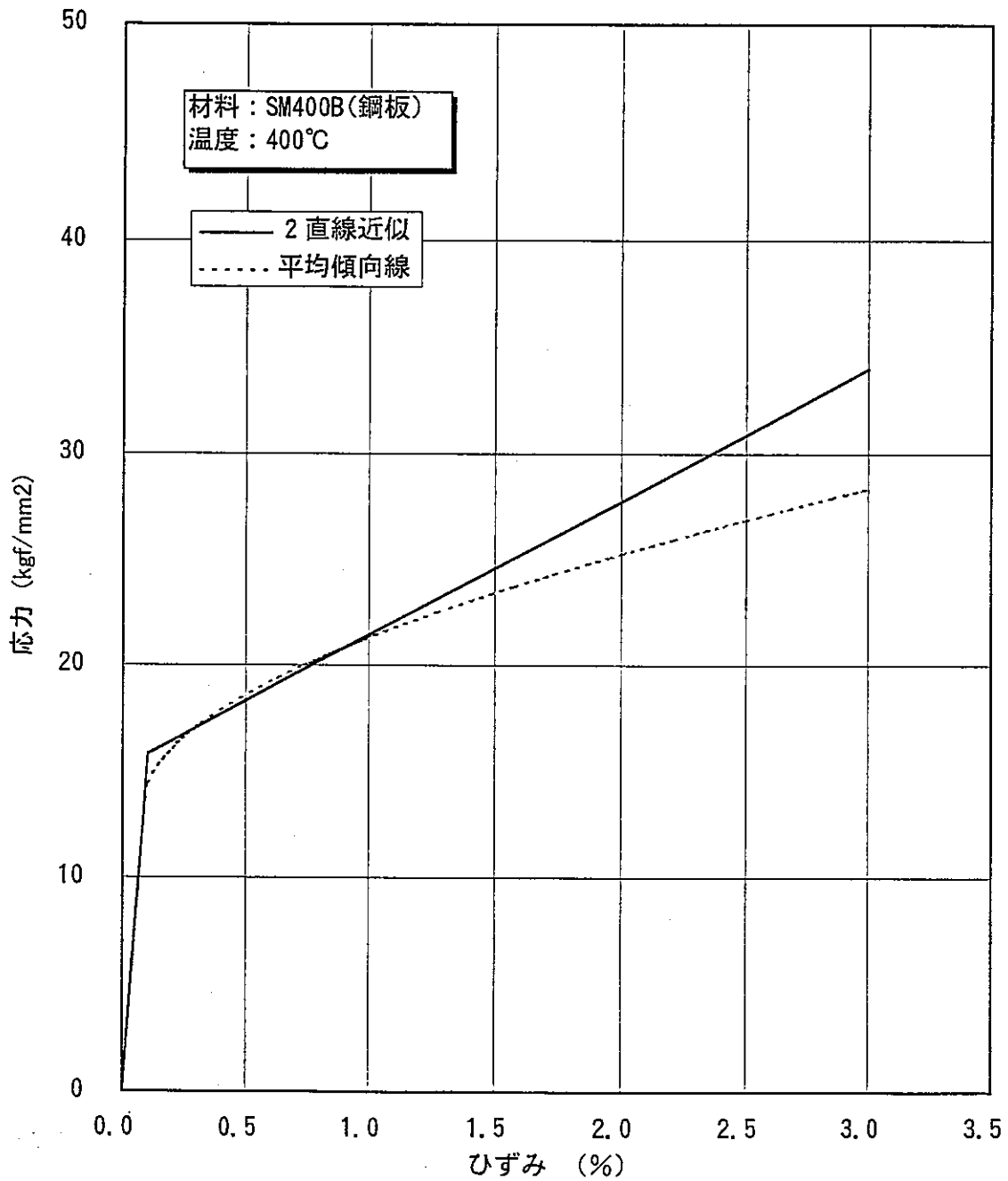


図10-2 静的応力－ひずみ関係の2直線近似結果（400°C）

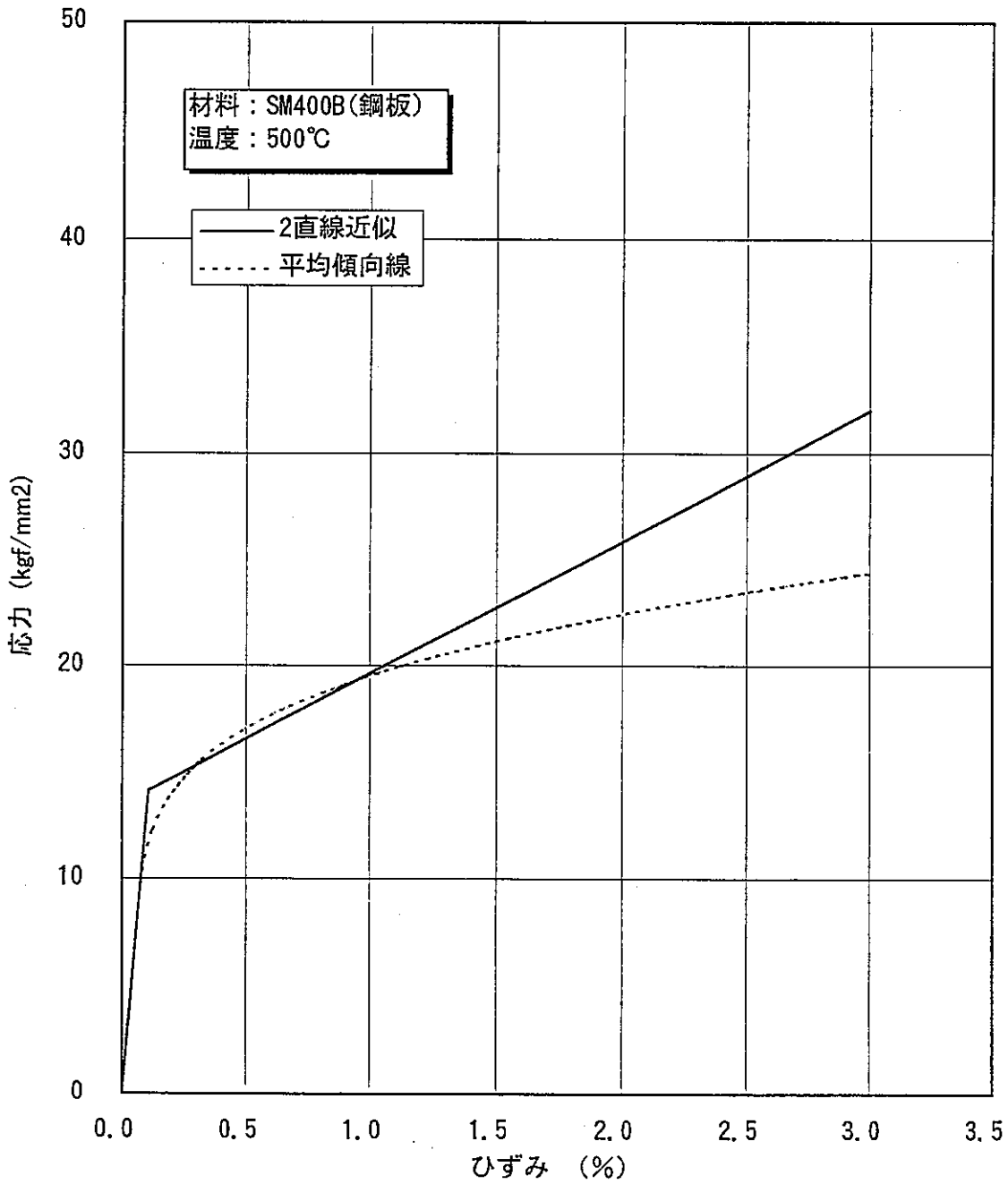


図10-3 静的応力－ひずみ関係の2直線近似結果（500°C）

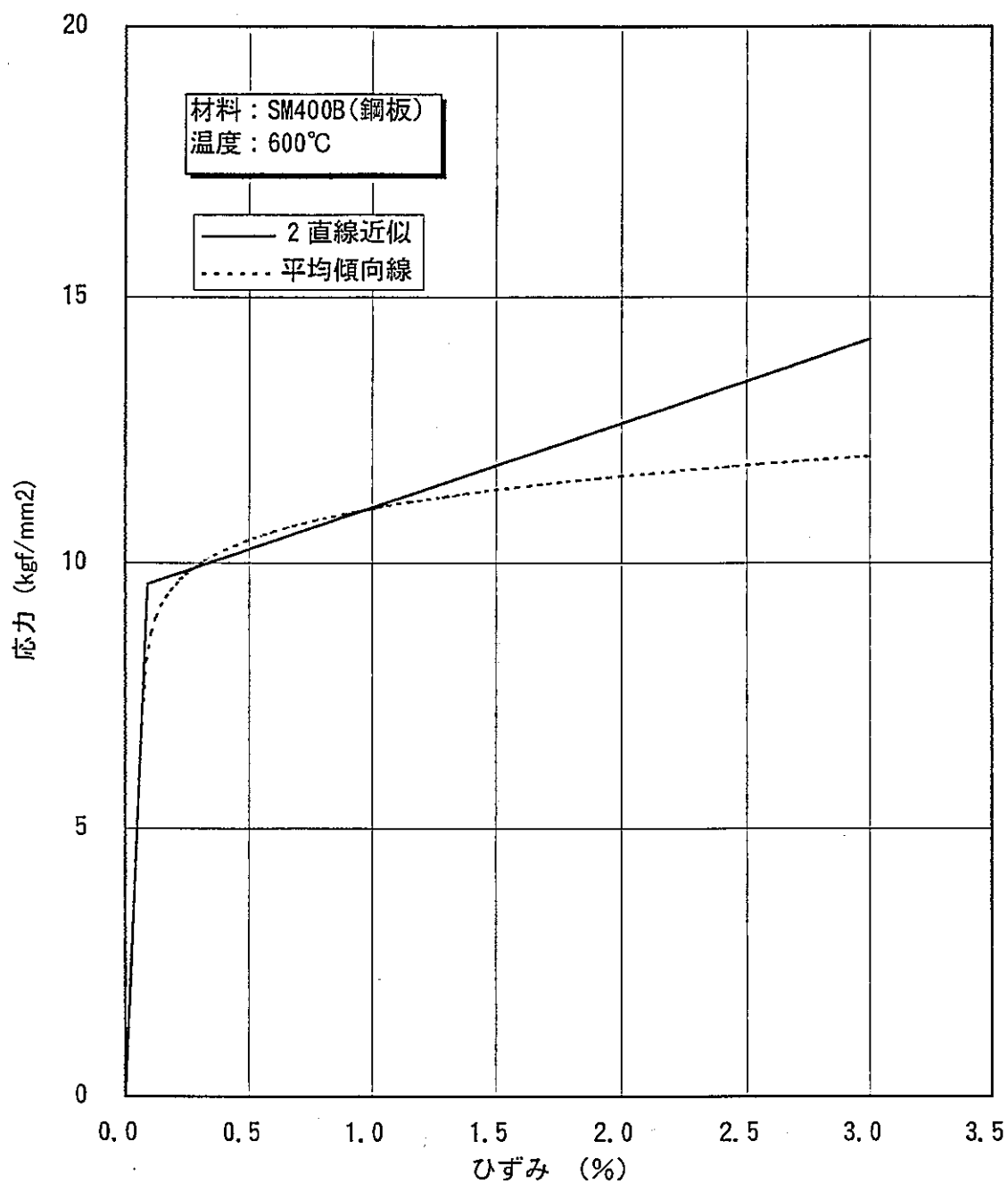


図10-4 静的応力-ひずみ関係の2直線近似結果 (600°C)

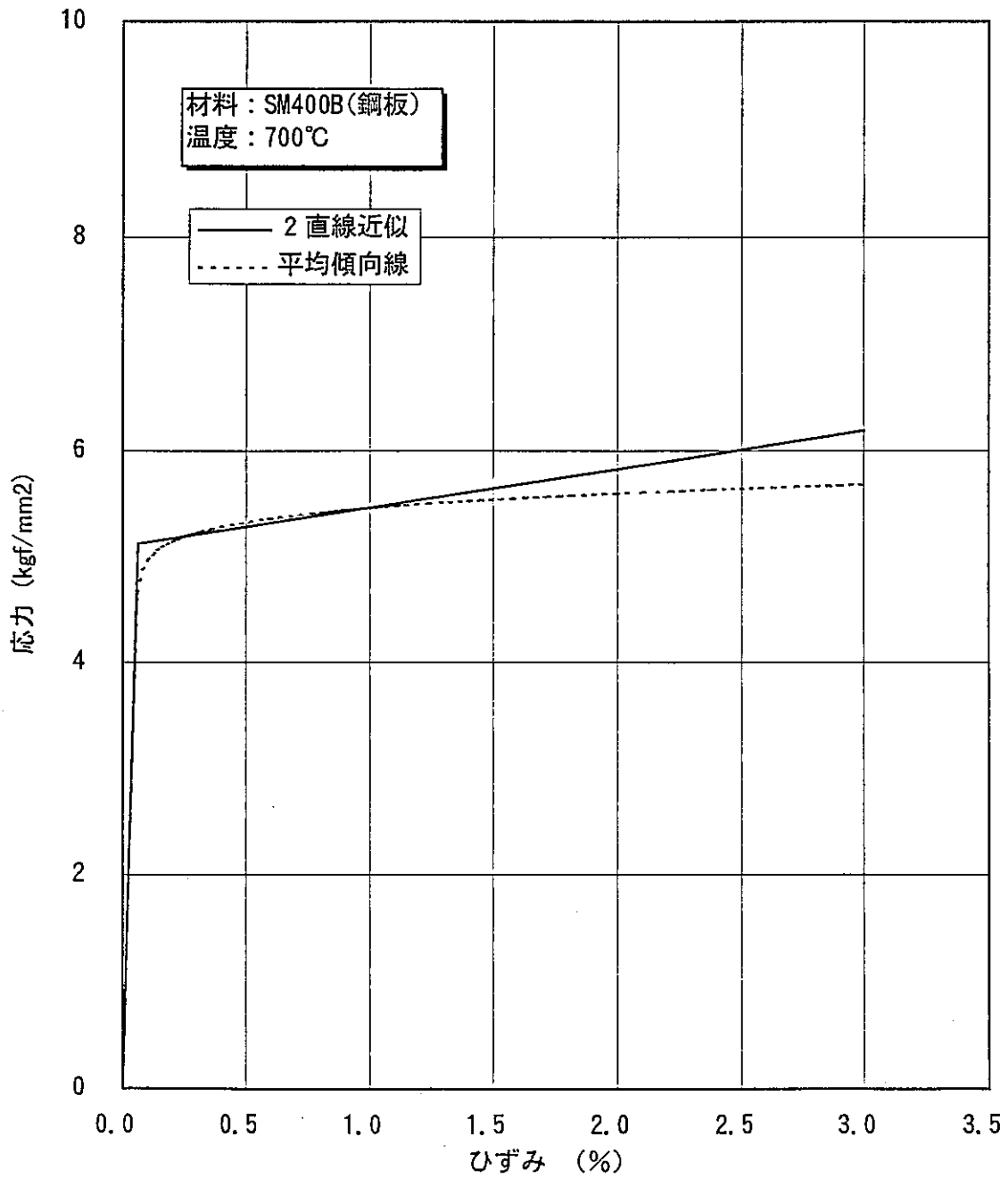


図10-5 静的応力－ひずみ関係の2直線近似結果（700℃）

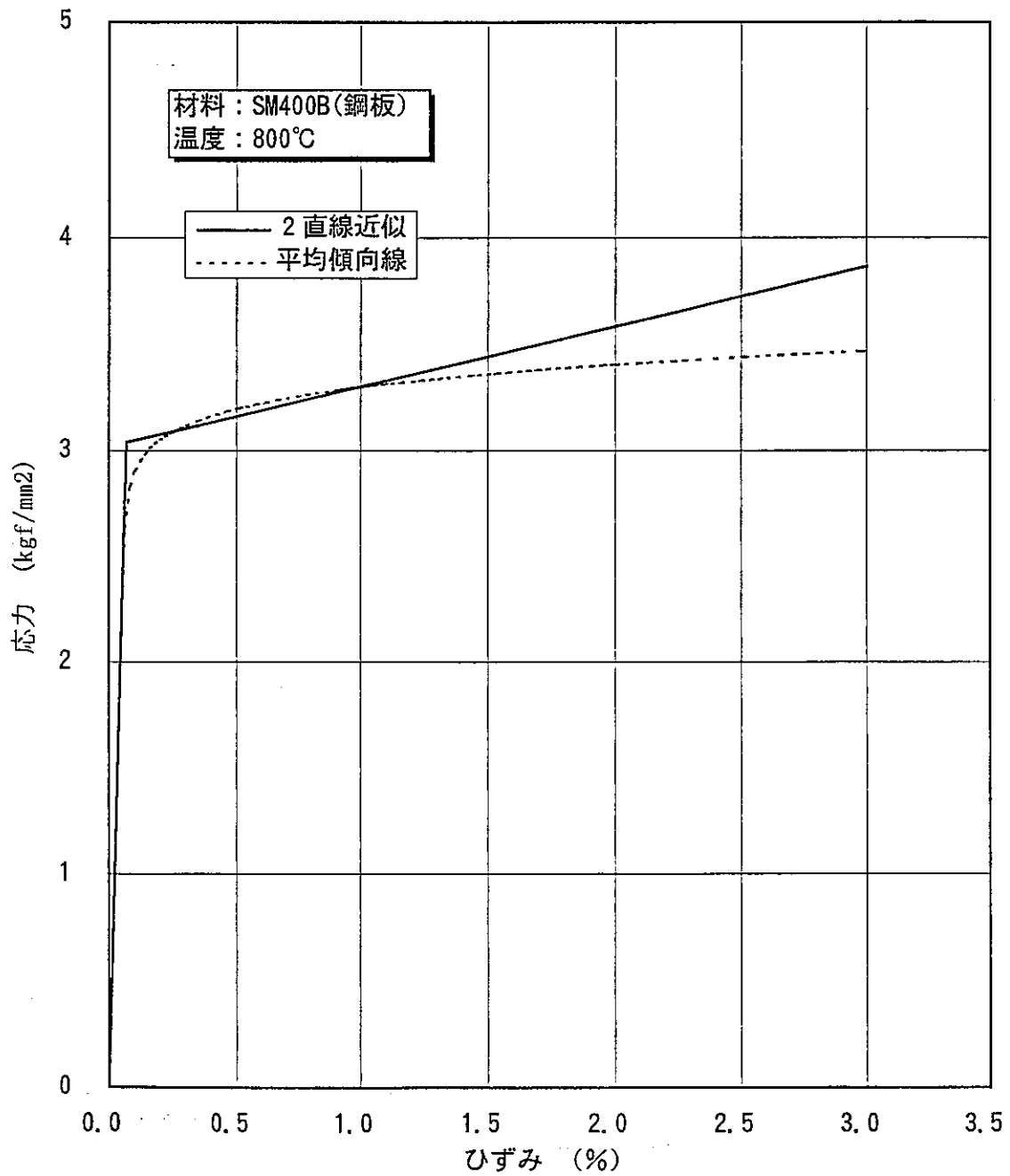


図10-6 静的応力-ひずみ関係の2直線近似結果(800°C)

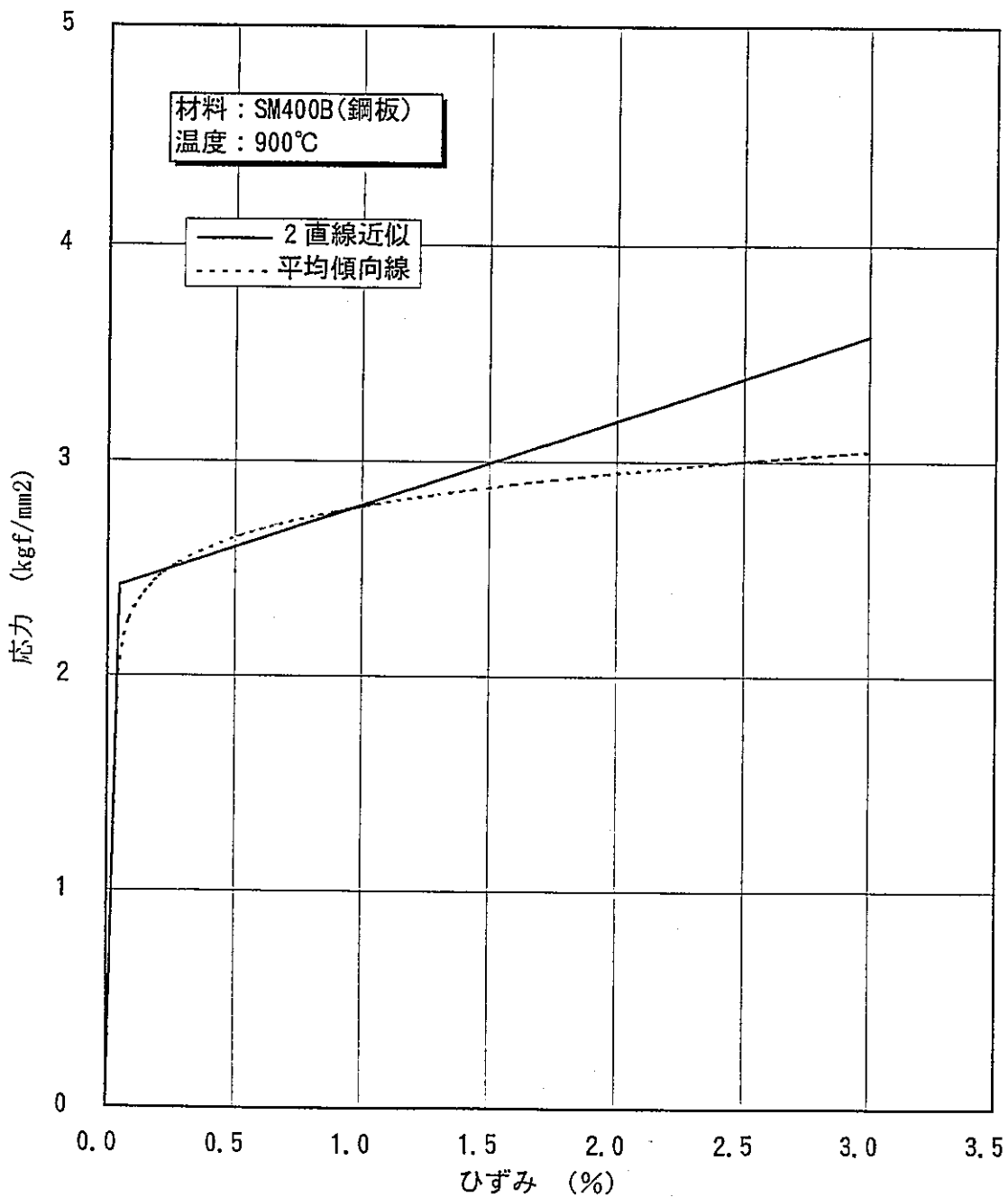


図10-7 静的応力－ひずみ関係の2直線近似結果 (900°C)



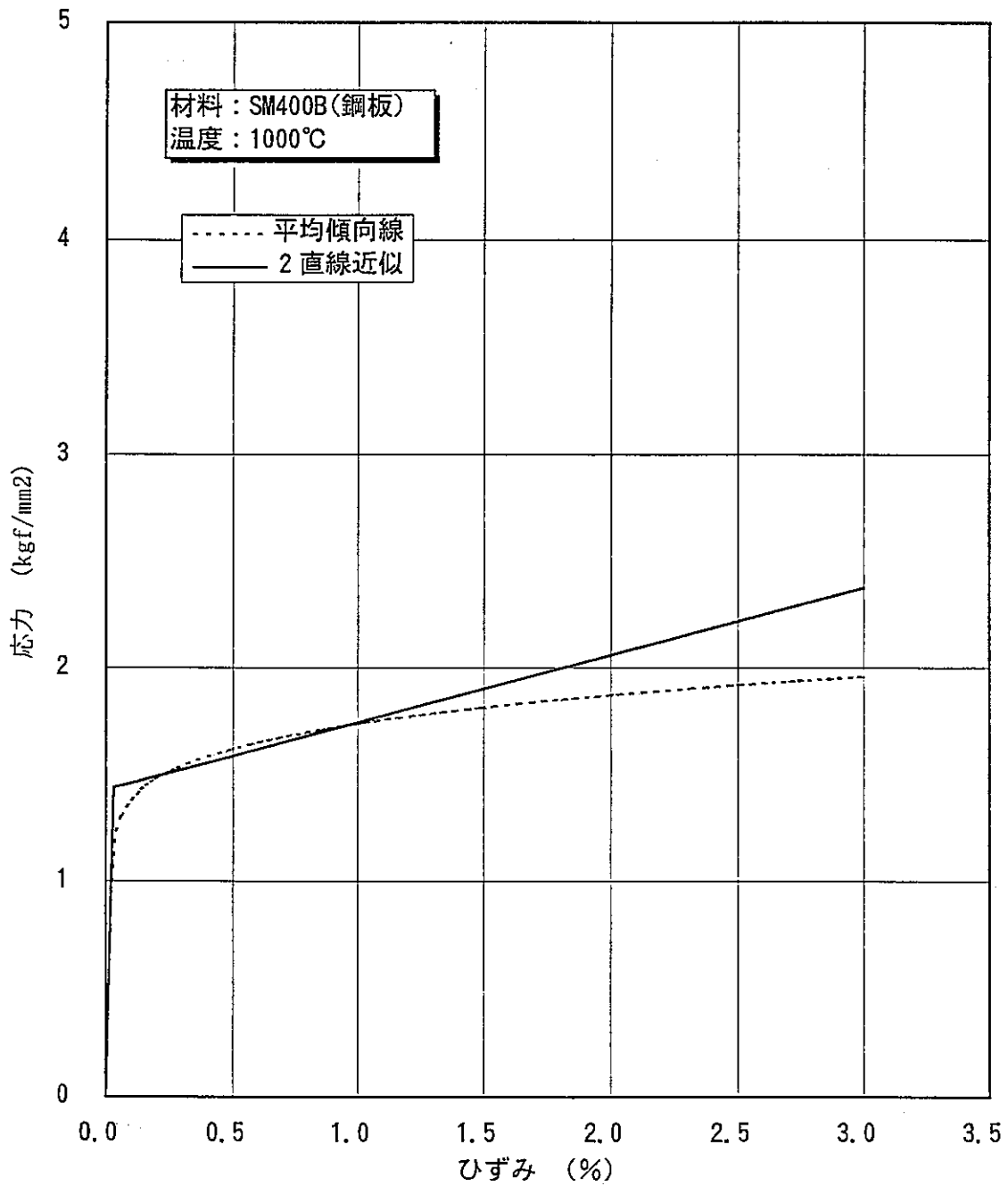


図10-8 静的応力-ひずみ関係の2直線近似結果 (1000°C)

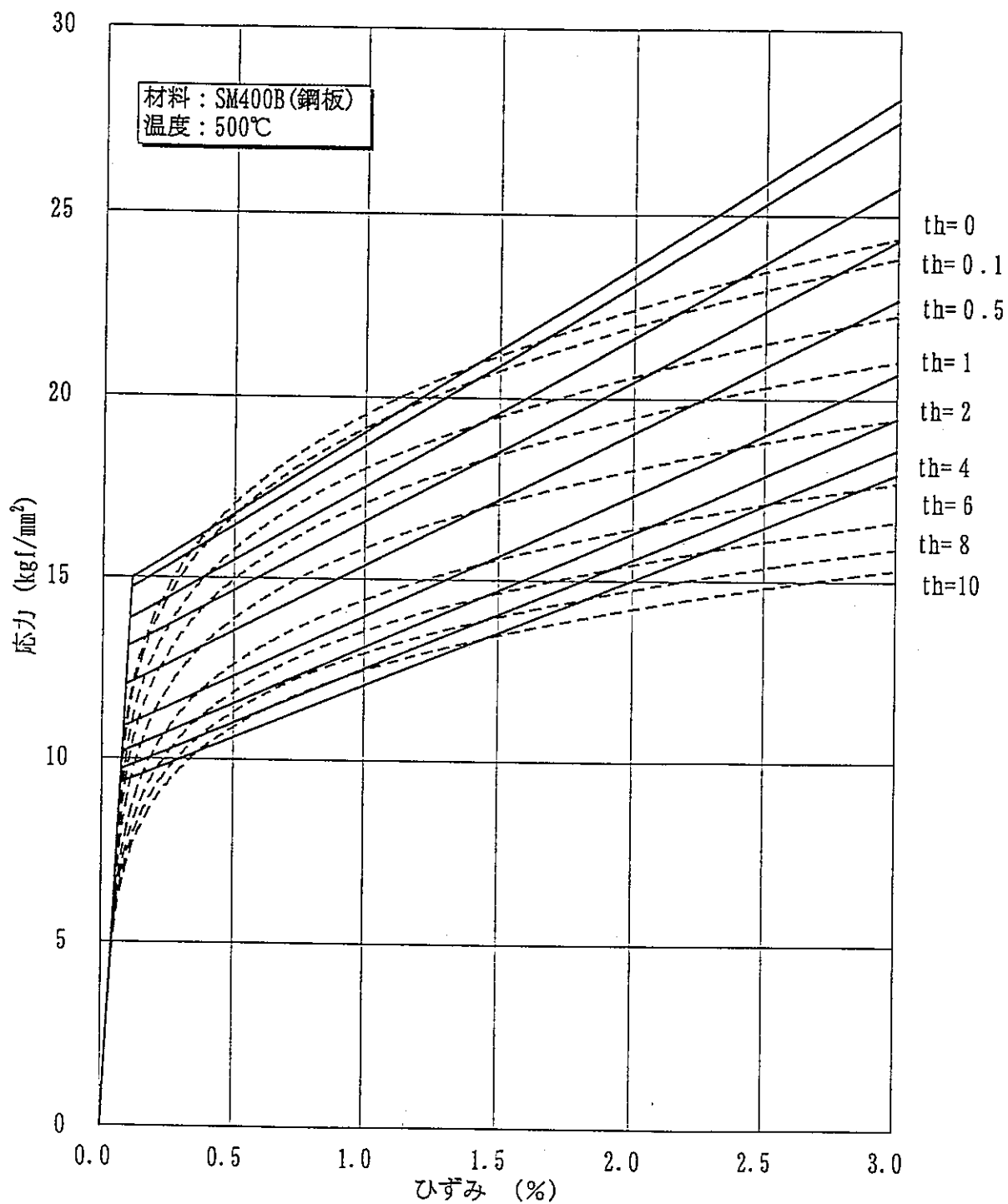


図11-1 等時応力ひずみ関係 (500℃)

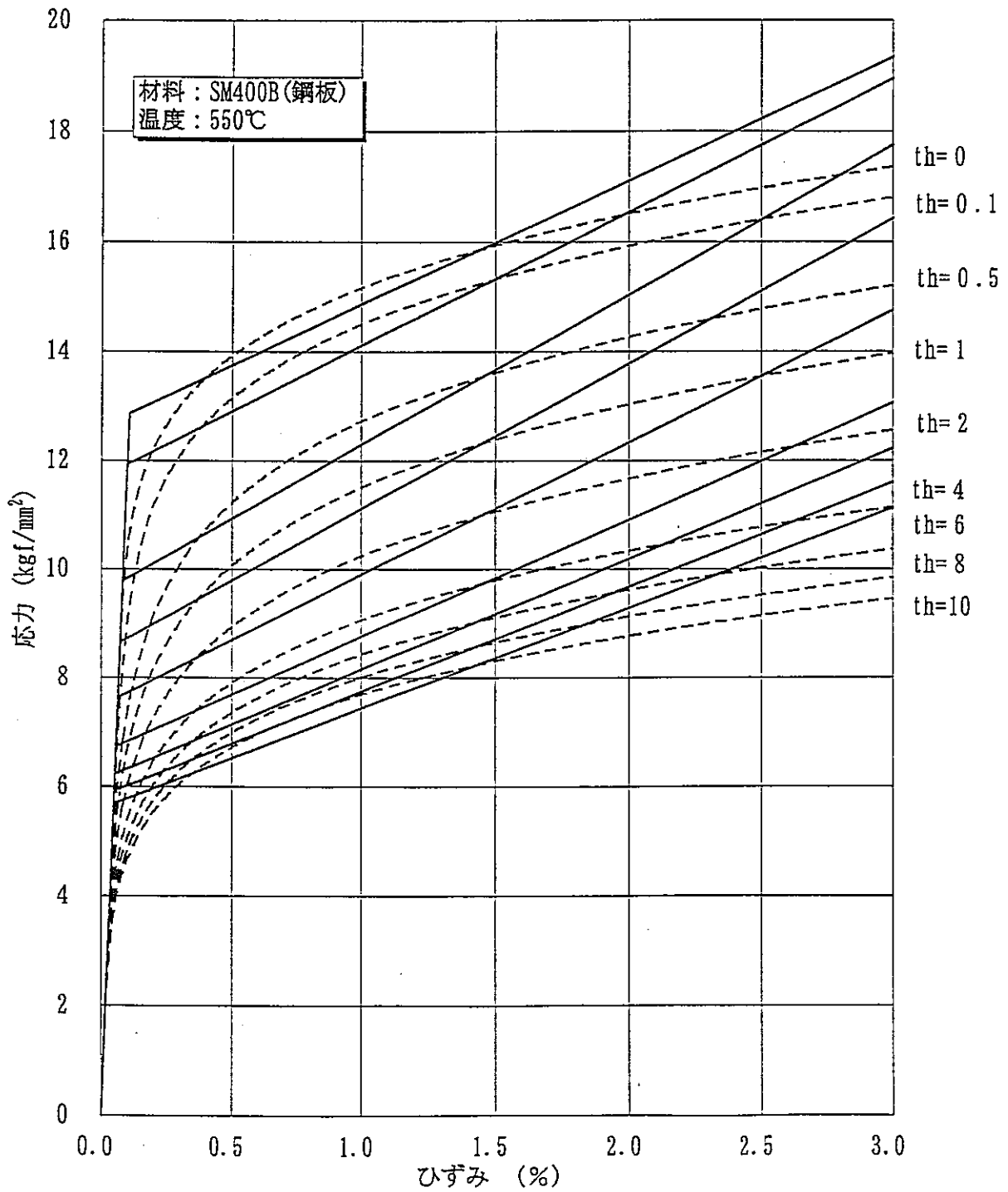


図11-2 等時応力ひずみ関係 (550℃)

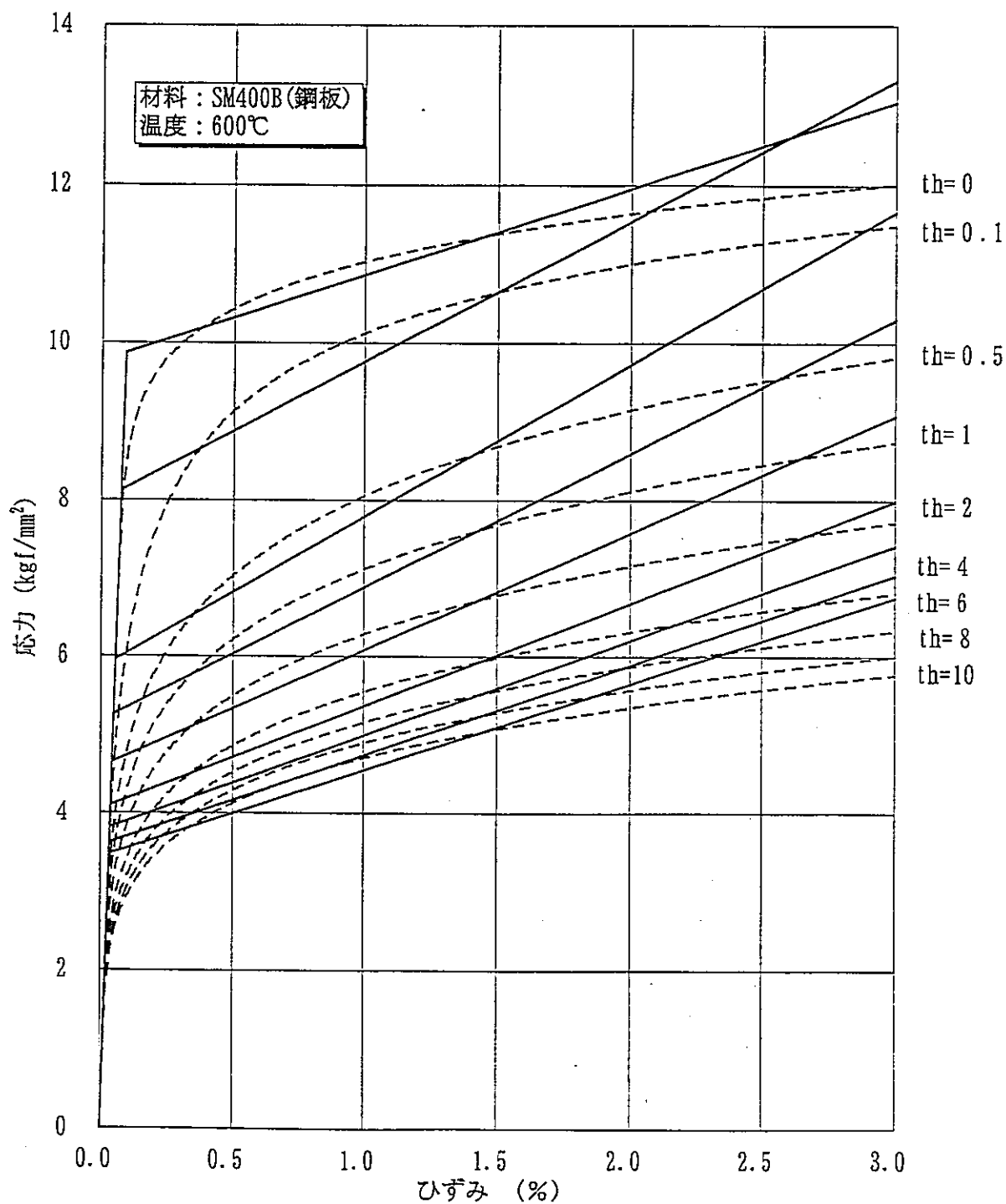


図11-3 等時応力ひずみ関係 (600℃)

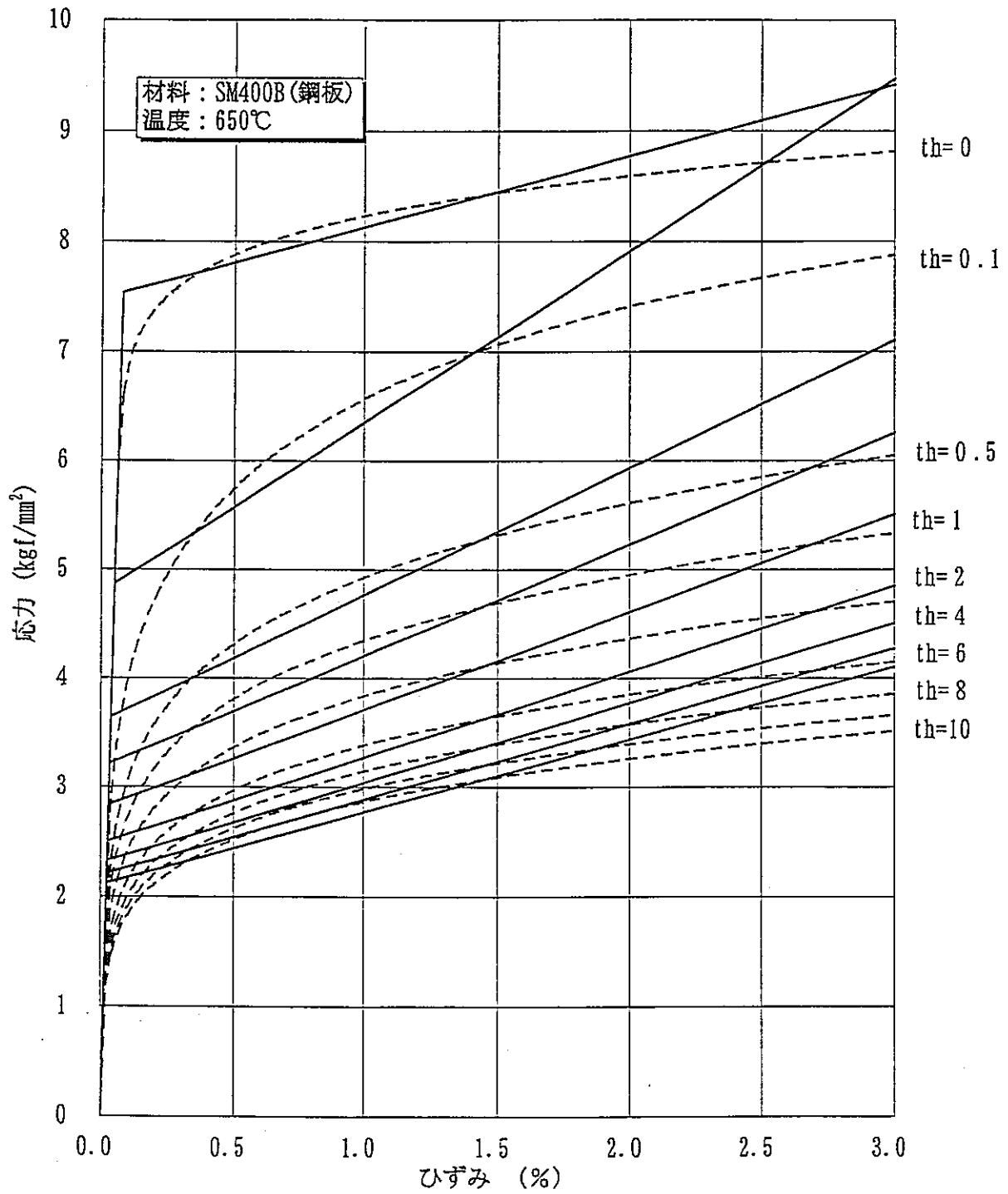


図11-4 等時応力ひずみ関係 (650°C)

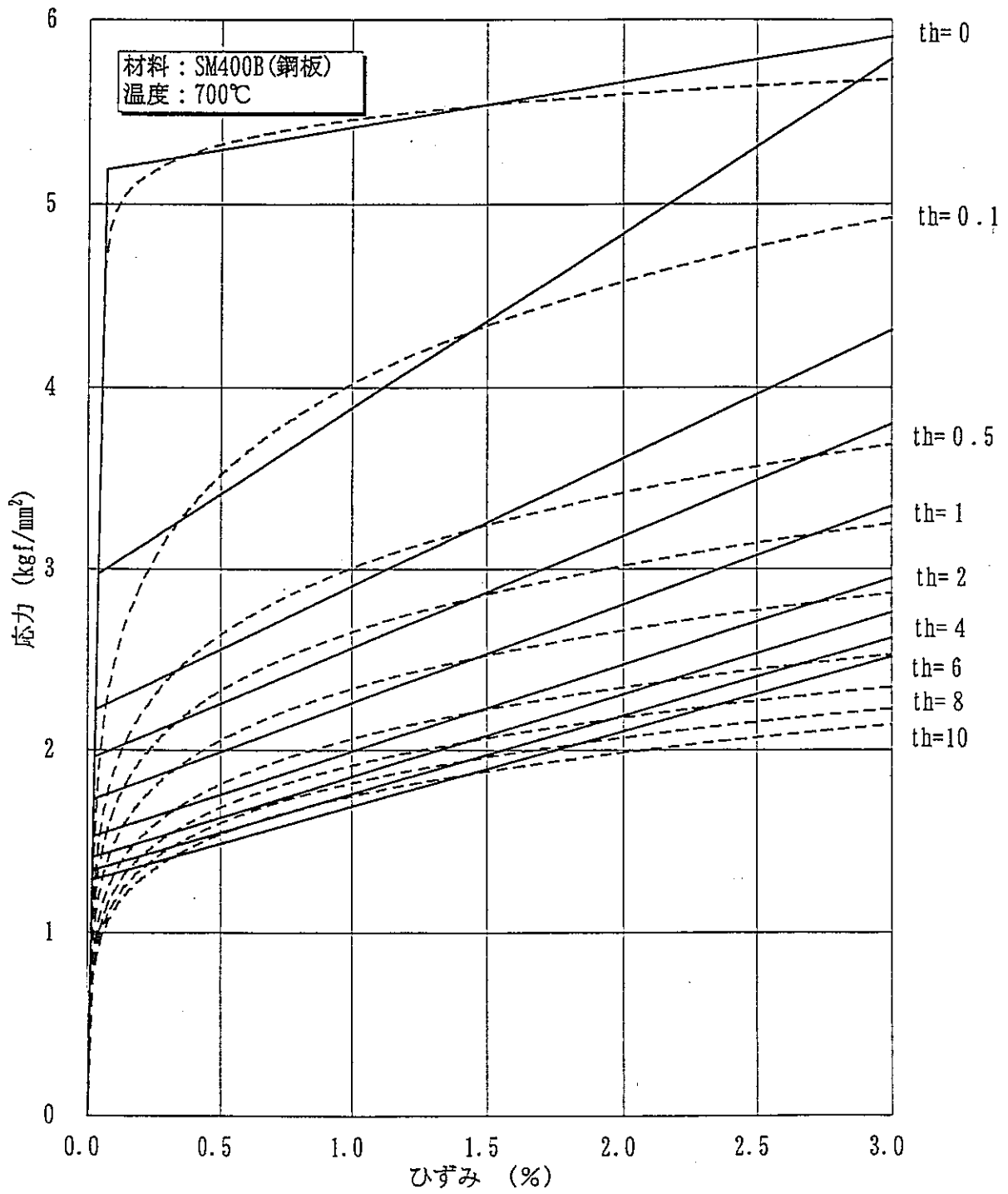


図11-5 等時応力ひずみ関係 (700°C)

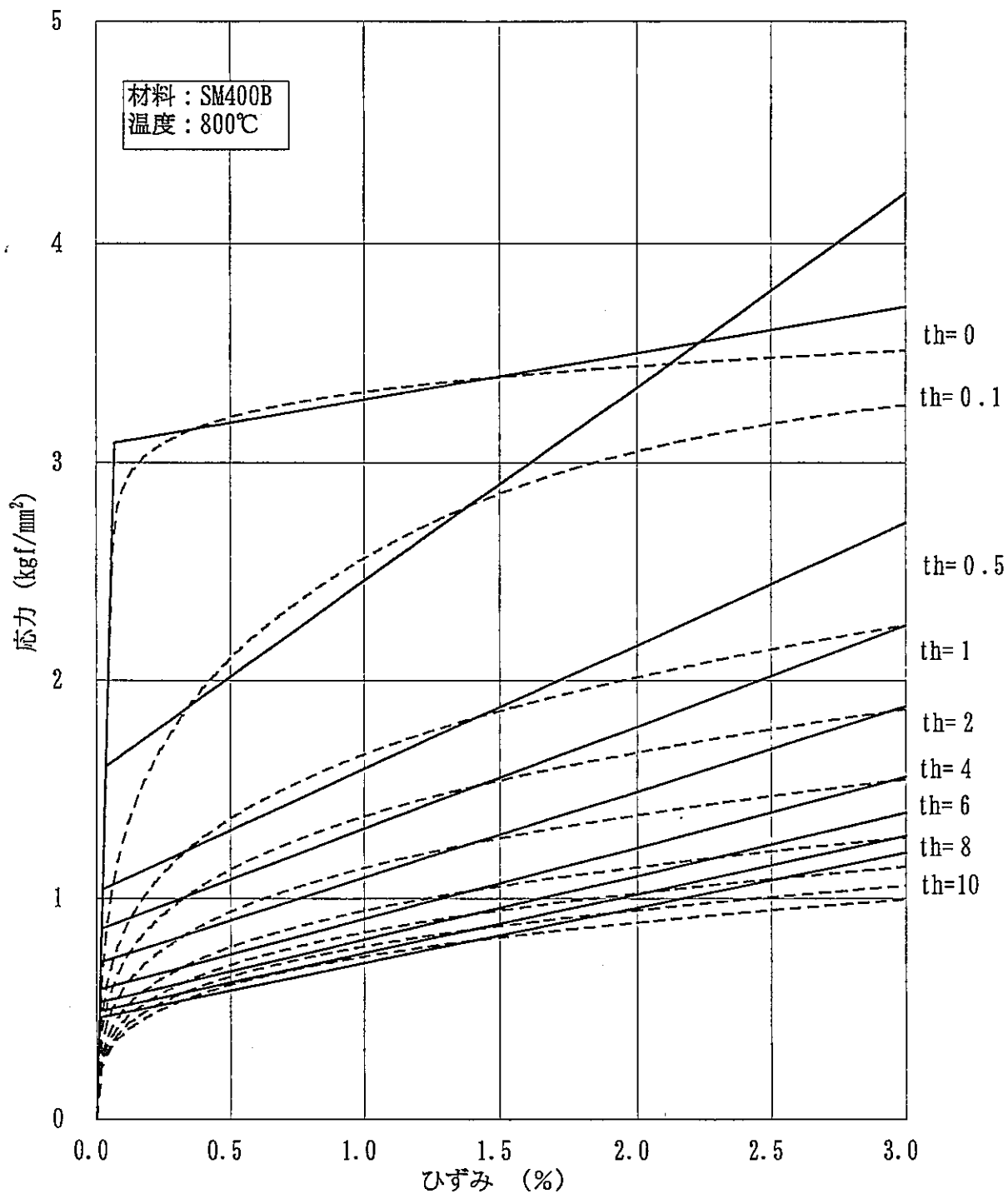


図11-6 等時応力ひずみ関係 (800°C)

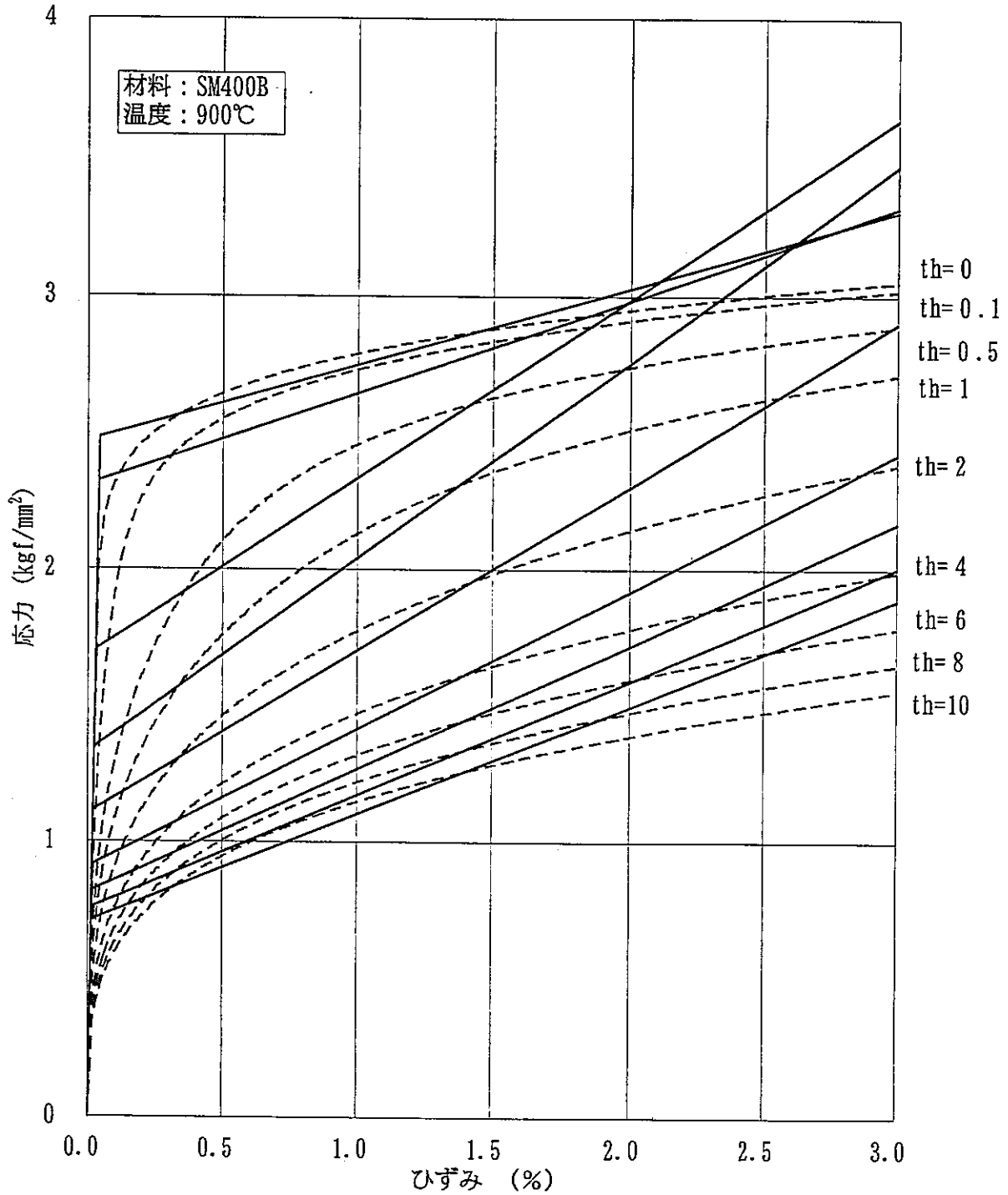


図11-7 等時応力ひずみ関係 (900°C)