

11Cr- フェライト / マルテンサイト鋼 (PNC-FMS) ラッパ管材の物性値

Material Physical Properties of 11Cr-ferritic/martensitic Steel (PNC-FMS)
Wrapper Tube Materials

矢野 康英 皆藤 威二 大塚 智史 丹野 敬嗣
上羽 智之 小山 真一

Yasuhide YANO, Takeji KAITO, Satoshi OHTSUKA, Takashi TANNO
Tomoyuki UWABA and Shinichi KOYAMA

次世代原子力システム研究開発部門
燃料材料技術開発ユニット

Fast Reactor Fuels and Materials Technology Development Unit
Advanced Nuclear System Research and Development Directorate

September 2012

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2012

11Cr-フェライト/マルテンサイト鋼(PNC-FMS)ラップ管材の物性値

日本原子力研究開発機構 次世代原子力システム研究開発部門
燃料材料技術開発ユニット

矢野 康英、皆藤 威二、大塚 智史、丹野 敬嗣、上羽 智之、小山 真一

(2012年8月7日 受理)

高速増殖炉では、経済性向上の観点から燃料の高燃焼度化が求められており、これに対応した炉心材料の開発が必要不可欠である。この高燃焼度達成のための炉心材料には、耐スエリング性能の観点からオーステナイト鋼の適用は難しく、被覆管材料としては ODS フェライト鋼、ラップ管材料としては 11Cr-フェライト/マルテンサイト鋼(PNC-FMS)を第一候補材料として開発を実施している。そこで、本研究では、PNC-FMS ラップ管材の材料強度基準に資することを目的として、PNC-FMS ラップ管材の材料物性値を測定し、設計評価用物性式と今後の測定方法の標準化を整備した。

**Material Physical Properties of 11Cr-ferritic/martensitic Steel (PNC-FMS)
Wrapper Tube Materials**

Yasuhide YANO, Takeji KAITO, Satoshi OHTSUKA, Takashi TANNO,
Tomoyuki UWABA and Shinichi KOYAMA

Fast Reactor Fuels and Materials Technology Development Unit
Advanced Nuclear System Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received August 7, 2012)

It is necessary to develop core materials for fast reactors in order to achieve high-burnup. Ferritic steels are expected to be good candidate core materials to achieve this objective because of their excellent void swelling resistance. Therefore, oxide dispersion strengthened (ODS) ferritic steel and 11Cr-ferritic/martensitic steel (PNC-FMS) have been respectively developed for cladding and wrapper tube materials in Japan Atomic Energy Agency. In this study, various physical properties of PNC-FMS wrapper materials were measured and equations and future standard measurement technique of physical properties for the design and evaluation were conducted.

Keywords: PNC-FMS, Wrapper Tube Material, Material Physical Properties

目 次

1. はじめに	1
2. 試験方法	1
2.1 供試材	1
2.2 測定項目及び試験片寸法・形状	1
2.3 密度	2
2.4 比熱、熱拡散率及び熱伝導率	2
2.5 熱膨張率	3
2.6 縦弾性係数、剛性率及びポアソン比	4
2.7 変態点	5
3. 設計評価用物性式の策定 -試験結果及び考察-	6
3.1 密度	6
3.2 熱拡散率	6
3.3 比熱容量	6
3.4 熱伝導率	8
3.5 熱膨張率	8
3.6 縦弾性係数	8
3.7 剛性率	9
3.8 ポアソン比	10
3.9 変態点	10
4. 試験方法の標準化.....	11
5. まとめ	11
謝辞	12
参考文献.....	12
付録 1. 設計評価用物性式一覧	50

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental procedure	1
2.1 Material	1
2.2 Measurement methods and specimen geometries	1
2.3 Density	2
2.4 Specific heat, thermal diffusivity and thermal conductivity	2
2.5 Coefficient of thermal expansion	3
2.6 Young's modulus, Shear modulus and Poisson's ratio	4
2.7 Transformation point temperature	5
3. Formula for physical properties -Experimental results and discussions-	6
3.1 Density	6
3.2 Coefficient of thermal diffusivity	6
3.3 Specific heat	6
3.4 Coefficient of thermal conductivity	8
3.5 Coefficient of thermal expansion	8
3.6 Young's modulus	8
3.7 Shear modulus	9
3.8 Poisson's ratio	10
3.9 Transformation point temperature	10
4. Standard measurement technique of physical properties	11
5. Conclusion	11
Acknowledgements	12
References	12
Appendix 1 Equations of physical properties for the design and evaluation	50

表リスト

表 2.1-1	本研究に用いた PNC-FMS ラップ管材の化学組成	13
表 2.1-2	本研究に用いた PNC-FMS ラップ管材の熱処理条件等	14
表 2.2-1	本研究で用いた物性測定方法と試験片形状	15
表 3.1-1	室温における PNC-FMS ラップ管材の密度実測値	16
表 3.1-2	PNC-FMS ラップ管材の設計評価用密度	16
表 3.2-1	PNC-FMS ラップ管材の熱拡散率実測値	17
表 3.2-2	PNC-FMS ラップ管材の設計評価用熱拡散率	18
表 3.3-1	PNC-FMS ラップ管材の比熱容量実測値	19
表 3.3-2	PNC-FMS ラップ管材の設計評価用比熱容量	20
表 3.4-1	PNC-FMS ラップ管材の熱伝導率実測値	21
表 3.4-2	PNC-FMS ラップ管材の設計評価用熱伝導率	22
表 3.5-1	PNC-FMS ラップ管材の熱膨張率実測値	23
表 3.5-2	PNC-FMS ラップ管材の設計評価用瞬時熱膨張係数	24
表 3.5-3	PNC-FMS ラップ管材の平均熱膨張係数実測値	25
表 3.5-4	PNC-FMS ラップ管材の設計評価用平均熱膨張係数	26
表 3.6-1	各種試験方法による PNC-FMS ラップ管材の縦弾性係数実測値	27
表 3.6-2	PNC-FMS ラップ管材の設計評価用縦弾性係数	28
表 3.7-1	各種試験方法による PNC-FMS ラップ管材の剛性率実測値	29
表 3.7-2	PNC-FMS ラップ管材の設計評価用剛性率	30
表 3.8-1	各種試験方法による PNC-FMS ラップ管材のポアソン比実測値	31
表 3.8-2	PNC-FMS ラップ管材の設計評価用ポアソン比	32
表 3.9-1	PNC-FMS ラップ管材の変態点実測値	33
表 4.1-1	今後の PNC-FMS ラップ管材の標準物性測定方法	34

List of table

Table 2.1-1	Chemical compositions of PNC-FMS wrapper tube materials in this study	13
Table 2.1-2	Final heat treatment conditions of PNC-FMS wrapper tube materials in this study	14
Table 2.2-1	Physical property measurement method and specimen geometries in this study	15
Table 3.1-1	Measurement results of density at room temperature	16
Table 3.1-2	Calculated density for the design criteria of PNC-FMS wrapper tube materials	16
Table 3.2-1	Measurement results of coefficient of thermal diffusivity	17
Table 3.2-1	Calculated coefficient of thermal diffusivity for the design criteria of PNC-FMS wrapper tube materials	18
Table 3.3-1	Measurement results of specific heat capacity	19
Table 3.3-2	Calculated specific heat capacity for the design criteria of PNC-FMS wrapper tube materials	20
Table 3.4-1	Measurement results of coefficient of thermal conductivity	21
Table 3.4-2	Coefficient of thermal conductivity for the design criteria of PNC-FMS wrapper tube materials	22
Table 3.5-1	Measurement results of thermal expansion	23
Table 3.5-2	Calculated instantaneous coefficient of thermal expansion for the design criteria of PNC-FMS wrapper tube materials	24
Table 3.5-3	Measurement results of mean coefficient of thermal expansion	25
Table 3.5-4	Calculated mean coefficient of thermal expansion for the design criteria of PNC-FMS wrapper tube materials	26
Table 3.6-1	Measurement results of Young’s modulus with several methods	27
Table 3.6-2	Calculated Young’s modulus for the design criteria of PNC-FMS wrapper tube materials	28
Table 3.7-1	Measurement results of Shear modulus using by several methods	29
Table 3.7-2	Calculated Shear modulus for the design criteria of PNC-FMS wrapper tube materials	30
Table 3.8-1	Measurement results of Poisson’s ratio with several methods	31
Table 3.8-2	Calculated Poisson’s ratio for the design criteria of PNC-FMS wrapper tube materials	32
Table 3.9-1	Measurement results of transformation point temperature	33
Table 4.1-1	Future standard physical property measurement method for PNC-FMS wrapper tube materials	34

図リスト

図 2.2-1	物性値測定試験片の形状及び寸法概略図	35
図 2.4-1	レーザーフラッシュ法の測定装置の模式図	36
図 2.4-2	示差走査熱量法の測定装置の模式図	36
図 2.5-1	熱膨張測定装置の模式図	37
図 2.6-1	自由共振法による縦弾性係数測定装置の模式図	37
図 2.6-2	自由共振法による剛性率測定の模式図	38
図 2.6-3	超音波パルス法による縦弾性係数測定装置の模式図	38
図 2.7-1	フォーマスター装置の模式図	39
図 3.1-1	設計用密度と室温の実測値	39
図 3.2-1	試験温度と熱拡散率の関係	40
図 3.3-1	DSC 法とフラッシュ法による比熱容量測定結果比較	40
図 3.3-2	DSC 法による PNC-FMS ラップ管材の比熱容量測定結果	41
図 3.3-3	試験温度と比熱容量の関係	41
図 3.4-1	試験温度と熱伝導率の関係	42
図 3.5-1	PNC-FMS ラップ管材の試験片採取方向による熱膨張の比較	43
図 3.5-2	PNC-FMS ラップ管材の試験温度と熱膨張の関係	43
図 3.5-3	PNC-FMS ラップ管材の瞬時熱膨張係数	44
	温度範囲 : (a) $RT \leq T \leq 825^{\circ}\text{C}$ 、(b) $825 < T \leq 900^{\circ}\text{C}$	
図 3.5-4	PNC-FMS ラップ管材の室温からの平均熱膨張係数	45
図 3.6-1	PNC-FMS ラップ管材(lot 22WFK)の各種試験方法による縦弾性係数の比較	46
図 3.6-2	PNC-FMS ラップ管材の試験温度と縦弾性係数の関係	46
図 3.7-1	PNC-FMS ラップ管材(lot 22WFK)の各種試験方法による剛性率の比較	47
図 3.7-2	PNC-FMS ラップ管材の試験温度と剛性率の関係	47
図 3.8-1	PNC-FMS ラップ管材(lot 22WFK)の各種試験方法によるポアソン比の比較	48
図 3.8-2	PNC-FMS ラップ管材の試験温度とポアソン比の関係	48
図 3.9-1	PNC-FMS ラップ管材の変態点実測値	49

List of figure

Fig. 2.2-1	Schematic drawing of physical measurement specimens	35
Fig. 2.4-1	Illustration of equipment for the laser flash method	36
Fig. 2.4-2	Illustration of equipment for the differential scanning calorimetric method	36
Fig. 2.5-1	Illustration of equipment for the thermal expansion method	37
Fig. 2.6-1	Illustration of Young's modulus equipment for free vibration method	37
Fig. 2.6-2	Illustration of Shear modulus equipment for free vibration method	38
Fig. 2.6-3	Illustration of Young's modulus equipment for ultrasonic pulse method	38
Fig. 2.7-1	Illustration of formaster test equipment for transformation point temperature method	39
Fig. 3.1-1	Relationships between temperature and calculated density	39
Fig. 3.2-1	Relationships between temperature and coefficient of thermal diffusivity	40
Fig. 3.3-1	Comparison of specific heat capacity between DSC and laser flash method	40
Fig. 3.3-2	Measurement results of specific heat capacity in PNC-FMS wrapper tube material by DSC method	41
Fig. 3.3-3	Relationships between temperature and specific heat capacity	41
Fig. 3.4-1	Relationships between temperature and coefficient of thermal conductivity	42
Fig. 3.5-1	Comparison of thermal expansion by the difference of specimen production direction	43
Fig. 3.5-2	Relationships between temperature and thermal expansion	43
Fig. 3.5-3	Instantaneous coefficient of thermal expansion for PNC-FMS wrapper tube material	44
	Temperature range: (a) $RT \leq T \leq 825^{\circ}\text{C}$, (b) $825 < T \leq 900^{\circ}\text{C}$	
Fig. 3.5-4	Mean coefficient of thermal expansion from room temperature for PNC-FMS wrapper tube material	45
Fig. 3.6-1	Comparison of Young's modulus using by several methods for PNC-FMS (lot 22WFK)	46
Fig. 3.6-2	Relationships between temperature and Young's modulus	46
Fig. 3.7-1	Comparison of shear modulus using by several methods for PNC-FMS (lot 22WFK)	47
Fig. 3.7-2	Relationships between temperature and shear modulus	47
Fig. 3.8-1	Comparison of Poisson's ratio using by several methods for PNC-FMS (lot 22WFK)	48
Fig. 3.8-2	Relationships between temperature and Poisson's ratio	48
Fig. 3.9-1	Measurement results of transformation point temperature for PNC-FMS wrapper tube materials	49

1. はじめに

経済性に優れた高速増殖炉サイクルシステムの実用化のためには、燃料集合体の交換サイクルを長くする、すなわち、燃料の高燃焼度化が必要になる。この燃料の高燃焼度の目標として、取出し平均燃焼度 150GWd/t 程度を想定しており、それに伴って燃料集合体を構成する炉心材料のピークはじき出し損傷量としては約 250dpa に達する。このような高照射量領域まで炉心材料を使用する場合、「もんじゅ」、「常陽」で使用実績のある PNC316 に代表されるオーステナイト鋼では、耐スエリング性能の観点から適用が困難となり、フェライト鋼を採用する必要がある。そのため、被覆管材料及びラップ管材料として、酸化物分散強化型(ODS)フェライト鋼と 11Cr-フェライト/マルテンサイト鋼(PNC-FMS)をそれぞれ第一候補材料として採用し、研究開発を実施している¹⁾。フェライト鋼を炉心材料に適用するうえでは、炉心の設計評価を行うための材料強度基準を整備・策定することが最も重要となってくる。材料強度基準の中には材料そのものの特性を表わす物性値があり、通常運転時や過渡時の評価として設計用物性値を整備する必要がある。ODS フェライト鋼被覆管については、設計用物性式が策定されている²⁾が、PNC-FMS ラップ管については未だ整備が十分でない。

そこで、本研究では、PNC-FMS ラップ管材の材料強度基準に資することを目的として、PNC-FMS ラップ管材に対して各種物性測定を実施し、設計評価用物性式と今後の物性測定方法の標準化を検討した。

2. 試験方法

2.1 供試材

PNC-FMS は、火力発電のボイラー鋼やタービンロータ部材の 12Cr フェライト鋼の研究実績を踏まえ、1983 年から開発を開始した。PNC-FMS の開発経緯やその材料仕様については、参考文献 3 に詳細が記載されている。現在の目標組成は、溶接時の δ -フェライト抑制の観点から、オーステナイト形成元素である C, Mn, Si, Ni, N を規格の上限まで増やし、フェライト形成元素である Cr, Mo, W については規格の下限まで減らしている。開発当時の暫定仕様スペック³⁾は、PNC-FMS ラップ管材の今後の開発過程で変更になる可能性もある。

本研究で用いた PNC-FMS は、全てラップ管仕様のものである。Phenix サイズ(lot 2WFK)と常陽 サイズ(lot 19WFK)の実機ラップ管及びラップ管の製造方法の一つである熱間押出と 4 回の冷間抽伸加工、4 回の軟化焼鈍の繰返し加工工程を模擬して製作したラップ管模擬圧延材 4 lot、合計 6 lot を用いた。表 2.1-1 及び 2.1-2 にそれぞれ本研究で使用した供試材の化学組成と熱処理条件を示す。

2.2 測定項目及び試験片寸法・形状

本試験研究における材料物性値測定方法、測定温度及び試験片寸法を表 2.2-1 に示す。測定した材料物性値は、密度、比熱、熱拡散率、熱伝導率、熱膨張率、変態点、縦弾性係数、ポアソン比及び剛性率である。密度は、室温の値を測定し、他の物性値の測定温度は、過渡・事故時までを想定し、室温から 900°C までとした。各種試験における試験片形状を図 2.2-1 に示す。熱膨張率については、異方性を検討するため、圧延方向(以下、L 方向)と直交する方向(以下、T 方向)からそ

れぞれ採取した。その他の試験片は、試験片の長手方向がL方向となるように採取した。

2.3 密度

密度測定は、JIS Z 8007の「固体比重測定方法」及びJIS K 0061「化学製品の密度及び比重測定方法」に基づき、試験前の熱膨張試験片を用いて、室温にて、ザイトロニウス・メカトロニクス(株)製LP3200D型電子天びん及び溶媒としてイオン交換水を用いてアルキメデス法にて測定した。測定値は、繰り返し数3回の平均値とした。

本試験で用いたアルキメデス法による密度は、(1)式により算出した。

$$\rho = \frac{W_1}{W_1 - W_2} \times \rho_{H_2O} \quad (1)$$

W_1 : 空中での試料重量 [g]

W_2 : 水中での試料重量 [g]

ρ_{H_2O} : 測定温度における水の密度 [g/cm³]

2.4 比熱、熱拡散率及び熱伝導率

熱拡散率測定は、JIS H 7801「金属のレーザーフラッシュ法による熱拡散率の測定方法」に基づき、アルバック理工(株)製TC-7000型及びTC-9000型熱定数測定装置により、真空中(約 1.0×10^{-2} Pa以下)にて、設定温度 $\pm 3^\circ\text{C}$ で測定を行い、繰り返し数5回の中央値3回の平均値とした。測定原理は、**図 2.4-1**に示すように、試料表面にレーザー光を照射して熱エネルギーを与え、その際の試験片裏面の温度変化と時間を測定するものである。得られた温度履歴曲線からハーフタイム法を用いて、(2)式から熱拡散率を算出した。

$$\alpha = 0.1388 \times k \times \frac{L^2}{t_{1/2}} \quad (2)$$

α : 熱拡散率 [m²/s]

k : 形状及び装置補正係数 [-]

L : 試験片の厚さ[m]

$t_{1/2}$: 試験片裏面の最高上昇温度の半分(1/2)の温度に達するまでの時間 [sec]

比熱は、JIS R 1611「ファインセラミックスのレーザーフラッシュ法による熱拡散率、比熱容量、熱伝導率測定方法」に基づき、アルバック理工(株)製TC-7000型を用いたフラッシュ法とJIS R 1672「長繊維強化セラミックス複合材料の示差走査熱量法による比熱容量測定方法」に基づくNETSCH社製DSC404Cを用いて実施した。フラッシュ法及び示差走査熱量法(以下、DSC法)の測定雰囲気は、それぞれ、真空中(約 1.0×10^{-2} Pa以下)及び高純度Ar(純度99.999%)である。DSCの測定原理は、**図 2.4-2**に示すように、試験片及び標準物質を熱的に均一な電気炉の中に設置し、一定速度で加熱し、両者に流れる熱量の差を温度(信号変位)の関数として測定を行う。得られた温度履歴の関数から(3)式に従い、比熱容量を算出した。また、フラッシュ法の比熱容量は、(4)及び(5)式により算出した。

$$C_p = \frac{D_t}{D_s} \times \frac{m_s}{m_t} \times C_{ps} \quad (3)$$

C_p : 試験片の比熱容量 [J/(kg・K)]

D_t : 試験片の空容器測定を基準とした試験片測定の信号変位 [mW]

D_s : 標準試料の空容器測定を基準とした標準試料測定の信号変位 [mW]

m_t : 試験片の質量 [kg]

m_s : 標準試料の質量 [kg]

C_{ps} : 標準試料の比熱容量 [J/(kg・K)]

$$C_R = \frac{1}{m_t} \times \left(\frac{Q}{\Delta T} - C_2 m_2 + C_3 m_3 \right) \quad (4)$$

$$C_p = \frac{\Delta T_{ext,R}}{\Delta T_{ext,T}} \times C_R \quad (5)$$

C_R : 室温での比熱容量 [J/(kg・K)]

Q : 試験片への入力エネルギー [J]

C_2 : 受光板(グラッシーカーボン)の比熱容量 [J/(kg・K)]

C_3 : 試験片測定時の接着剤(シリコングリース)の比熱容量 [J/(kg・K)]

m_2 : 受光板の質量 [kg]

m_3 : 接着剤の重量 [kg]

$\Delta T_{ext,R}$: 室温の外挿温度上昇 [K]

$\Delta T_{ext,T}$: 試験温度の外挿温度上昇 [K]

熱伝導率は、(2)式から求めた熱拡散率、(3)あるいは(5)式から求めた比熱容量及び2.3項の密度を用いて、(6)式より算出した。(6)式に代入する密度は、JIS R1611において熱膨張が顕著で無い場合は室温の値を用いることができるとなっている。

$$\lambda = \alpha \times C_p \times \rho \quad (6)$$

λ : 熱伝導率 [W/(m・K)]

2.5 熱膨張率

熱膨張率測定は、JIS R 1618「ファインセラミックスの熱機械分析による熱膨張の測定方法」に準備して、(株)リガク製 TMA8140 型示差膨張式熱機械分析装置を用いて、高純度 He(99.999%) 中にて、設定温度 $\pm 3^\circ\text{C}$ で実施した。今回は、基準となる室温を 25°C に制御し、試験荷重 5 gf、昇温速度を $5^\circ\text{C}/\text{min}$ とした。本装置の測定原理は、**図 2.5-1**に示すように、天秤をテコとして使用し、分銅荷重により検出棒を介して試験片と標準試料が支持管に押し付けられる。差動トランスが、標準試料に固定されていることから、試験片検出棒との間の相対的な変位(伸縮)差が検出される。このように得られた変位差より、温度 $T_1 \sim T_2$ 間の熱膨張、平均熱膨張係数及び瞬間熱膨張係数は、それぞれ、以下の(7)~(9)式を用いて算出できる。

$$\frac{\Delta L_{sp}}{L_0} = \frac{\Delta L_{sp,m} - \Delta L_{ref,m} + \Delta L_{ref}}{L_0} \quad (7)$$

$$\overline{\alpha}_{sp} = \frac{\Delta L_{sp,m} - \Delta L_{ref,m}}{L_0 \times \Delta T} + \overline{\alpha}_{ref} \quad (8)$$

$$\overline{\alpha_{in,i}} = \lim_{T \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta L_{sp,i}}{L_0} \times T_i \quad (9)$$

- ΔL_{sp} : 試験片の長さ変化 [m]
 L_0 : 室温での試験片長さ [m]
 $\Delta L_{sp,m}$: 試験片を測定した際の温度 T₂, T₁ における変位計の指示値の差 [m]
 $\Delta L_{ref,m}$: 標準試料と同一寸法・同一形状の試験片を測定した際の温度変化(T₂-T₁)時における変位計の指示値 [m]
 ΔL_{ref} : 標準試料の長さ変化 [m]
 $\overline{\alpha_{sp}}$: 試験片の平均熱膨張係数 [K⁻¹]
 ΔT : 試験片の温度変化 (T₂-T₁)
 $\overline{\alpha_{ref}}$: 標準試料の平均熱膨張係数 ($\Delta L_{ref} / (L_0 \times \Delta T)$) [K⁻¹]
 $\overline{\alpha_{in,i}}$: T_i における瞬間熱膨張係数 [K⁻¹]
 $\Delta L_{sp,i}$: T_i における試験片長さ変化 [m]

2.6 縦弾性係数、剛性率及びポアソン比

縦弾性係数は、JIS Z 2280「金属材料の高温ヤング率測定試験方法」に基づき、日産アーク製 YK1100 型高温動的弾性率測定装置を用いて、大気中にて、設定温度±3℃で測定を行い、繰り返し数 5 回の中央値 3 回の平均をもって測定値とした。

自由共振法^{*)}による測定は、**図 2.6-1** に示すような測定装置を用いて横共振法の一次共振振動数を用いて縦弾性係数を求める。共振振動数は、発振器の振動数を徐々に変化させ、これに応じて試験片が振動するように駆動力を加えながら検出する。検出は、増幅された検出器の出力を観察し、オシロスコープに明確な最大の振幅を生じ、かつ、オシロスコープでの発振器の出力と検出器の出力において、共振する周波数の最も低次のものが曲げ振動の一次共振振動数である。このようにして得られた一次共振振動数を(10)式に代入することにより、縦弾性係数を算出できる。

$$E = 0.9467 \times \left(\frac{l}{h}\right)^3 \times \frac{m}{w} \times f^2 \quad (10)$$

- E : 縦弾性係数 [N/m², Pa]
 l : 試験片長さ [m]
 h : 試験片厚さ [m]
 m : 試験片質量 [kg]
 w : 試験片幅 [m]
 f : 横共振法の一次共振振動数 [s⁻¹]

剛性率は、ASTM C848-88 “Standard Test Method for Young’s Modulus, Shear Modulus and Poisson’s Ratio For Ceramic Whitewares by Resonance”に基づき、日産アーク製 YK1100 型高温動的弾性率測定装置を用いて、大気中にて、設定温度±3℃で測定を行い、繰り返し数 5 回の中央値 3 回の平均をもって測定値とした。自由共振法による測定は、**図 2.6-2** に示すような測定原理(装置は、**図 2.4-1** と同様で懸垂の仕方が異なる)を用いてうねり共振振動数を与え、剛性率を求める。うねり共振振動数は、発振器の振動数を徐々に変化させ、これに応じて試験片が振動するように駆動力を加え

ながら検出する。このようにして得られたうねり共振振動数を(11)式に代入することにより、剛性率を算出できる。

$$G = (1.0197 \times B \times m \times f_t^2 \times 10^{-8}) / (1 + A) \quad (11)$$

G : 剛性率 [N/m², Pa]

B : 試験片の長さ、厚さ、幅に依存した関数 [m⁻¹]

$$B = \frac{4l}{w \times h} \times \left[\frac{w/h+h/w}{4 \times (h/w) - 2.52 \times (h/w)^2 + 0.21 \times (h/w)^6} \right]$$

A : 試験片の幅と厚さに依存した関数 [—]

$$A = [-0.03401 - 0.60532 \times (w/h)^2 + 0.53379 \times (w/h)^3 - 0.11302 \times (w/h)^3 + 0.009825 \times (w/h)^4 - 0.00030776 \times (w/h)^5] \times 10^{-2}$$

f_t : うねり振動数 [s⁻¹]

(10)式と(11)式よりそれぞれ求めた縦弾性係数と剛性率より、弾性領域での変形における縦方向の歪と横方向の歪の比であるポアソン比は、(12)式で算出できる。ただし、ポアソン比は、2次元弾性等方体を仮定して求めている。

$$\nu = \left(\frac{E}{2G} \right) - 1 \quad (12)$$

自由共振法以外に JIS Z 2280「金属材料の高温ヤング率測定試験方法」では、超音波パルス法による測定も規定していることから、lot 22WFK について、RITEC 社製 RAM-5000 型バースト波音波測定装置を用いて、Ar ガス中にて、設定温度±3°Cで測定を行い、縦弾性率、剛性率及びポアソン比を求めた。超音波パルス法による測定は、図 2.6-3 に示すような測定装置を用いて、パルスの伝播速度から縦波速度及び横波速度を求める。求めた両速度を(13)～(15)式に代入することにより算出できる。

$$G = \rho \times V_s^2 \quad (13)$$

$$\nu = \frac{1}{2} \times \frac{V_L^2 - 2V_s^2}{V_L^2 - V_s^2} \quad (14)$$

$$E = 2 \times (1 + \nu) \times G = \rho V_s^2 \times \frac{3V_L^2 - 4V_s^2}{V_L^2 - V_s^2} \quad (15)$$

ρ : かさ密度 [kg/m³]

V_s : 横波音速 [m/s]

V_L : 縦波音速 [m/s]

*) 本試験の吊線は、アルミナファイバーを使用した。試料の長さを L とした場合、節は試料端から 0.244L であり、その位置で懸垂することが望ましいが、その位置では振動の励起・検出ともに困難であるため、外側に若干ずらした位置で懸垂した。なお、0.2～0.244L の位置で懸垂すれば、測定結果は概ね一致することが知られている。

2.7 変態点

変態点測定は、JIS 等に測定方法が規定されていない。ラップ管模擬板材から作製した試験片{図

2.2-1 (f)に該当}とラップ管から作製した試験片{図 2.2-1 (g)に該当}は、それぞれ、富士電波工機株式会社製 FTM-100 型フォーマスター試験機と同社製 FTF-500 型薄板材フォーマスター試験機を用いて、真空中(6.7×10^{-3} Pa)にて AC₁, AC₃ 変態点測定を実施した。フォーマスター変態点測定は、図 2.7-1 に示すような装置を用い、熱膨張・収縮は差動トランスにより検出し、室温から 500°Cまでを 10°C/sec、500°Cから 1050°Cまでを 5°C/min で加熱し、1050°Cで 5 分間保持後、50°C/min で N₂ ガス冷却を行った。また、薄板フォーマスター試験装置は、差動トランスの代わりに、LED 光を用いた非接触方式で試験片の幅の変化を検知している点が異なる。AC₁ 変態点は、α相から γ相に変態を始める点となるため、体積収縮が生じる。また、AC₃ 変態点は、α相と γ相の 2 相状態から完全に γ相に変態を終えるため、再度、直線的な体積膨張が生じる。この体積膨張変化は、横軸及び縦軸をそれぞれ温度、長さ変位量にすることにより測定し、その結果として、変態点を算出することが出来る。また、冷却速度 50°C/min の場合のマルテンサイト変態開始温度である Ms 点も併せて評価した。

3. 設計評価用物性式の策定 -試験結果及び考察-

3.1 密度

本試験研究において得られた密度を表 3.1-1 に示す。本データの平均値を PNC-FMS ラップ管材の室温のデータとする。また、温度 T [°C]における密度は、室温における密度 ρ_{RT} [g/cm³]、平均熱膨張係数 $\bar{\alpha}$ [K⁻¹]から、以下の式で求めることが出来る。

$$\rho_T = \frac{\rho_{RT}}{1 + 3\bar{\alpha}(T - 25)} \quad (16)$$

本式に、 ρ_{RT} として、7.888 [g/cm³]、3.5 項で求めた平均熱膨張係数 $\bar{\alpha}$ を室温から 900°Cまで代入し、PNC-FMS ラップ管材の設計評価用密度を求めた。この結果を表 3.1-2 に示し、グラフを図 3.1-1 に示す。

3.2 熱拡散率

本試験研究において得られた熱拡散率を表 3.2-1 に示す。また、図 3.2-1 に熱拡散率と温度の関係を示す。図中には、室温から 700°Cまでの 4 次式による近似曲線と 700°C~900°Cまでの 3 次式による近似曲線も併せて記載した。また、温度 T [°C]における設計評価用熱拡散率は、下記近似曲線式に温度を代入することにより求めることが出来る。この結果を表 3.2-2 に示す。

【RT ≤ T ≤ 700°C】

$$\alpha = 6.79435 \times 10^{-6} - 1.97682 \times 10^{-10}T - 1.43369 \times 10^{-11}T^2 + 3.00799 \times 10^{-14}T^3 - 2.69502 \times 10^{-17}T^4 \quad (17)$$

【700°C < T ≤ 900°C】

$$\alpha = 5.01317 \times 10^{-5} - 2.17233 \times 10^{-7}T + 3.14866 \times 10^{-10}T^2 - 1.42429 \times 10^{-13}T^3 \quad (18)$$

3.3 比熱容量

本試験研究で得られた各温度の比熱容量を表 3.3-1 に示す。

2.4 項で述べたように、今回の比熱容量測定には、JIS で定めるフラッシュ法と DSC 法があり、

両者の測定の違いをより明確にするため、同一 lot 19FK-06, 07, 08 を用いて試験データの検証を実施した。図 3.3-1 に DSC 法とフラッシュ法による比熱容量測定結果を示す。

図 3.3-1 に示すように、低温側では両者の差はほとんど見られないが、高温側では DSC 法で取得した比熱が高くなる傾向を示した。ステンレス鋼の比熱は、温度の上昇とともに、格子振動が増加するために上昇する。フェライト鋼のような磁気スピンの磁区内で一定の方向を向いている強磁性体の比熱は、温度の上昇とともに上昇するが、ある温度になると熱エネルギーが磁気スピンの相互作用を上回り、スピンのランダムな方向を向く常磁性と変化する^{4,5)}。このように、フェライト鋼では磁気変態に起因した一次ピークと更に高温側では、 $\alpha \Rightarrow (\alpha + \gamma) \Rightarrow \gamma$ のうち AC₃ 変態温度近傍で、磁性体から非磁性体である γ に相変態することにより比熱が減少するため 2 次ピークをもっている。フラッシュ法で得られたデータでは、1 次ピークは確認されるが、2 次ピークは確認できず、1 次ピーク以降、単調に減少する傾向がみられているが、DSC 法では、両者が確認されている。また、両者の試験方法として、フラッシュ法が表 3.3-1 に示しているような試験温度のデータのみを取得する不連続的な点の集まりであるのに対して、DSC 法では、連続的にデータを取得しているということが大きく異なる。これらのことから、フェライト鋼のような強磁性体の比熱測定では、より正確な物性値として確かである試験方法は DSC 法であると判断し、比熱測定の標準方法として DSC 法を採用することとした。

DSC 法により得られた試験温度と比熱容量の関係を図 3.3-2 に示す。図中では、ラップ管模擬板材 (lot 19FK-06, 07, 08, 22WFK) とラップ管材 (lot 2WFK, 19WFK) を区別したシンボルとなっている。また、図中の実線は、連続的に得られた試験データを結んだ点であり、シンボルは温度の代表点をプロットしたものである。模擬板材とラップ管材で 2 次ピークが生じる 825°C 程度までは、両者の挙動に明確な差はなく同様な傾向であった。一方、2 次ピークは、ラップ管材と模擬板材で約 10°C ほどラップ管材の方が高温側にシフトしていた。模擬板材は、ラップ管材の組成と比べ、2.1 項で述べたように溶接時に形成される δ -フェライトの抑制の観点から、オーステナイト形成元素である Mn の添加を増加させ、フェライト形成元素である Cr, Mo, W の添加を減少させている。この模擬板材の 2 次ピークが低い理由は、オーステナイト形成元素である Mn の影響が寄与し、AC₃ 変態点が若干下がっていることによるものと推察される(3-9 項参照)。

最後に、DSC 法で得られた比熱容量と近似曲線の関係を図 3.3-3 に示す。また、温度 T [°C] における設計評価用比熱容量は、下記近似曲線式に温度を代入することにより求めることが出来る。この結果を表 3.3-2 に示す。

【RT ≤ T ≤ 725°C】

$$C_p = 4.38081 \times 10^2 + 1.06249 \times 10^0 T - 1.37440 \times 10^{-2} T^2 + 1.06900 \times 10^{-4} T^3 - 4.22319 \times 10^{-7} T^4 + 8.92710 \times 10^{-10} T^5 - 9.53068 \times 10^{-13} T^6 + 4.05042 \times 10^{-16} T^7 \quad (19)$$

【725°C < T ≤ 825°C】

$$C_p = 5.35417 \times 10^6 - 2.70848 \times 10^4 T + 5.13923 \times 10^1 T^2 - 4.33424 \times 10^{-2} T^3 + 1.37076 \times 10^{-5} T^4 \quad (20)$$

【825°C < T ≤ 900°C】

$$C_p = -4.24446 \times 10^6 + 1.46731 \times 10^4 T - 1.68929 \times 10^1 T^2 + 6.47822 \times 10^{-3} T^3 \quad (21)$$

3.4 熱伝導率

本試験研究で得られた温度と熱伝導率の関係を表 3.4-1 及び図 3.4-1 に示す。なお、熱伝導率の算出の際は、各温度の密度として 3.1 項の式に 3.5 鋼の各鋼種の平均熱膨張係数を代入し使用した。また、温度 T [°C] における設計評価用熱伝導率は、下記近似曲線式に温度を代入することにより求めることが出来る。この結果を表 3.4-2 に示す。

【 $RT \leq T \leq 800^\circ\text{C}$ 】

$$\lambda = 2.40198 \times 10^1 + 2.09603 \times 10^{-2}T - 1.34876 \times 10^{-4}T^2 + 4.48044 \times 10^{-7}T^3 - 6.41997 \times 10^{-10}T^4 + 3.25790 \times 10^{-13}T^5 \quad (22)$$

【 $800^\circ\text{C} < T \leq 900^\circ\text{C}$ 】

$$\lambda = -3.72098 \times 10^3 + 8.82200T - 5.17070 \times 10^{-3}T^2 \quad (23)$$

3.5 熱膨張率

本試験研究で得られた熱膨張率を表 3.5-1 に示す。PNC-FMS (lot 22WFK) の L 方向と T 方向の熱膨張を比較したグラフを図 3.5-1 に示す。全ての試験温度で、試験片採取方向による差が生じないことを確認した。この傾向は、製造工程に過度な加工率が加えられない構造材料系の高 Cr 鋼である HCM12A においても同様である⁶⁾。このことから、今後の PNC-FMS ラップ管材の熱膨張測定は、全て L 方向から試験片を採取し試験を実施する。

試験温度と熱膨張の関係を図 3.5-2 に示す。図中の近似式は、熱膨張と温度の関係を最小二乗法により n 次式で近似したものである。瞬時熱膨張係数は、近似式を微分した $n-1$ 次式をもって各温度における瞬時熱膨張係数を計算した。瞬時熱膨張係数と温度の関係を表 3.5-2 と図 3.5-3 に示す。なお、温度 T [°C] における瞬時熱膨張係数は、下記近似曲線式に温度を代入することにより求めることが出来る。

【 $RT \leq T \leq 825^\circ\text{C}$ 】

$$\overline{\alpha_{in,T}} = 9.77866 \times 10^{-6} + 9.32665 \times 10^{-9}T - 4.86745 \times 10^{-12}T^2 \quad (24)$$

【 $825^\circ\text{C} < T \leq 900^\circ\text{C}$ 】

$$\overline{\alpha_{in,T}} = 1.32437 \times 10^{-2} - 3.15512 \times 10^{-5}T + 1.87516 \times 10^{-8}T^2 \quad (25)$$

最後に、本試験研究で得られた室温からの平均熱膨張係数を表 3.5-3 及び図 3.5-4 に示す。図中には、室温から 825°C までの 2 次式による近似曲線と 825°C~900°C までの 3 次式による近似曲線も併せて記載した。また、温度 T [°C] における設計評価用平均熱膨張係数は、下記近似曲線式に温度を代入することにより求めることが出来る。この結果を表 3.5-4 に示す。

【 $RT \leq T \leq 825^\circ\text{C}$ 】

$$\overline{\alpha_{sp}} = 9.86131 \times 10^{-6} + 4.76006 \times 10^{-9}T - 1.75302 \times 10^{-12}T^2 \quad (26)$$

【 $825^\circ\text{C} < T \leq 900^\circ\text{C}$ 】

$$\overline{\alpha_{sp}} = -3.97864 \times 10^{-3} + 1.43856 \times 10^{-5}T - 1.72267 \times 10^{-8}T^2 + 6.85290 \times 10^{-12}T^3 \quad (27)$$

3.6 縦弾性係数

本試験研究のうち自由共振法、片持ち共振法および超音波パルス法で得られた縦弾性係数の結

果を表 3.6-1 に示す。PNC-FMS (lot 22WFK)の各取得方法による縦弾性係数の比較を図 3.6-1 に示す。図 3.6-1 に示されるように、高温になると各種試験方法により、物性値に違いが生じている。片持ち共振法が最も低く、次いで自由共振法、超音波パルス法となっている。片持ち共振法と自由共振法の差については、安藤ら⁷⁾が述べているように、高温域では温度の上昇に伴い、指数関数的に内部摩擦が上昇することによる擬弾性状態の違いにより両者に差が生じていると考えられる。また、超音波パルス法では、試験片に変形力を加える試験手法ではないため、内部摩擦等による誤差が少ない点と試験体に与える周波数の差等が挙げられる。超音波パルス法と自由共振法のどちらが材料固有の値に近いかが判断するに足る情報がないが、試験データの統一性を図るため、自由共振法による試験データの拡充を図るものとする。なお、片持ち共振法については、国内外で規格化等がなされていないため、今後は試験手法として使用しないものとする。

次に、自由共振法により得られた試験温度と縦弾性係数の関係を図 3.6-2 に示す。図中には、室温から 800°Cまでの 8 次式による近似曲線と 800°C~900°Cまでの 2 次式による近似曲線も併せて記載した。また、温度 T [°C]における設計評価用縦弾性係数は、下記近似曲線式に温度を代入することにより求めることが出来る。この結果を表 3.6-2 に示す。

【 $RT \leq T \leq 800^\circ\text{C}$ 】

$$E = 2.19954 \times 10^2 - 2.31092 \times 10^{-1}T + 3.40984 \times 10^{-3}T^2 - 2.87338 \times 10^{-5}T^3 \\ + 1.28231 \times 10^{-7}T^4 - 3.27833 \times 10^{-10}T^5 + 4.79828 \times 10^{-13}T^6 - 3.73632 \times 10^{-16}T^7 \\ + 1.19759 \times 10^{-19}T^8 \quad (28)$$

【 $800^\circ\text{C} < T \leq 900^\circ\text{C}$ 】

$$E = -6.34721 \times 10^2 + 1.80626T - 1.07171 \times 10^{-3}T^2 \quad (29)$$

3.7 剛性率

本試験研究のうち自由共振法、超音波パルス法および片持ち共振法で得られた剛性率の結果を表 3.7-1 に示す。PNC-FMS (lot 22WFK)の各取得方法による剛性率の比較を図 3.7-1 に示す。図 3.7-1 に示すように、剛性率は、試験温度を問わず、試験手法により物性値に違いが出ている。高温における差については、3.6 項の縦弾性係数の差と同様なことが考えられるが、いずれの温度においても物性値が異なっていることについては、測定方法によるものであるのかを判断するだけのデータがない。しかしながら、測定方法による差等を無くすこと、並びに規格に準拠した測定方法を実施するという観点から、自由共振法に試験方法を統一し、試験データを評価する。

自由共振法により得られた試験温度と剛性率の関係を図 3.7-2 に示す。図中には、室温から 900°Cまでの 9 次式による近似曲線も併せて記載した。また、温度 T [°C]における設計評価用剛性率は、下記近似曲線式に温度を代入することにより求めることが出来る。この結果を表 3.7-2 に示す。

【 $RT \leq T \leq 900^\circ\text{C}$ 】

$$G = 8.7526 \times 10^1 - 2.2725 \times 10^{-1}T + 4.1131 \times 10^{-3}T^2 - 3.8056 \times 10^{-5}T^3 \\ + 1.9319 \times 10^{-7}T^4 - 5.8346 \times 10^{-10}T^5 + 1.0730 \times 10^{-12}T^6 - 1.1768 \times 10^{-15}T^7 \\ + 7.0571 \times 10^{-19}T^8 - 1.7771 \times 10^{-22}T^9 \quad (30)$$

3.8 ポアソン比

本試験研究のうち自由共振法、超音波パルス法および片持ち共振法で得られたポアソン比の結果を表 3.8-1 に示す。PNC-FMS (lot 22WFK) の各取得方法による剛性率の比較を図 3.8-1 に示す。

図 3.8-1 に示すように、ポアソン比も、試験温度を問わず、試験手法により物性値に違いが出ている。これは、ポアソン比が、3.6 項の縦弾性係数と 3.7 項の剛性率の両者を使用し評価しているため両者の差が、より大きな差異としてでてくる。今後は、自由共振法により取得した縦弾性係数と剛性率を使用し、ポアソン比を評価するようにすることとする。

自由共振法により得られた試験温度とポアソン比の関係を図 3.8-2 に示す。図中には、室温から 750°C までの 3 次式及び 750°C から 900°C までの 3 次式による近似曲線も併せて記載した。また、温度 T [°C] における設計評価用ポアソン比は、下記近似曲線式に温度を代入することにより求めることが出来る。この結果を表 3.8-2 に示す。

【 $RT \leq T \leq 750^\circ\text{C}$ 】

$$\nu = 2.84485 \times 10^{-1} + 6.11589 \times 10^{-5}T - 8.07574 \times 10^{-8}T^2 + 1.86486 \times 10^{-10}T^3 \quad (31)$$

【 $750^\circ\text{C} < T \leq 900^\circ\text{C}$ 】

$$E = 7.34688 \times 10^1 - 2.65114 \times 10^{-1}T + 3.19329 \times 10^{-4}T^2 - 1.27744 \times 10^{-7}T^3 \quad (32)$$

3.9 変態点

本試験研究において得られた変態点を表 3.9-1 に示し、各ロットの AC_1 及び AC_3 変態点を図 3.9-1 に示す。PNC-FMS ラップ管材の AC_1 及び AC_3 変態点は、それぞれ約 785~825°C と 865~885°C の範囲であった。2WFK に比べ、他の lot は、3.3 項で述べたように、溶接時の δ -フェライト抑制の観点から、オーステナイト形成元素である Mn の添加を増加させ、フェライト形成元素である W の添加を減少させている(表 2.1-1 参照)。Mn は γ -Fe に完全固溶し、 AC_1 及び AC_3 変態点を下げることが広く知られている⁸⁾。図 3.9-1 において、 AC_1 変態点の低下は明確に確認され、 AC_3 変態点についても低下の傾向が確認された。

PNC-FMS ラップ管材を使用する上で、過渡時の使用制限として、第一にラップ管製造時の最終熱処理温度である焼き戻し温度があげられる。ラップ管の使用温度と時間(照射を含む)により、析出や転位の回復等の組織変化が生じていく。この事象を把握し、照射中の安全裕度を確保した補正係数を策定しているが、焼き戻し温度を超えた場合、過渡に曝される時間にも左右されるが、組織変化、特に転位の回復が加速され、強度が著しく変わることが想定される。よって、材料強度基準で策定される強度特性を材料が担保出来なくなる可能性があるため、焼き戻し温度が、過渡時の第 1 使用制限温度となる。

過渡時の第 2 使用制限温度は AC_1 変態点温度となる。 AC_1 変態点を超えた場合は、相変態が生じることから、製造時の組織・強度とは完全に異なるものに変化するためである。

PNC-FMS ラップ管材の変態点は、過渡事象の最終制限温度を把握していくために重要な評価項目であることから、作製した材料毎にデータを取得していく必要がある。

4. 試験方法の標準化

3項で評価したように物性値は、JIS や ASME 等の国内外の規格に則りデータを取得した場合でも、試験方法によりデータが著しく変わることが、本研究から明らかになった。3項と重複するが、表 4.1-1 に示す今後の標準試験方法を選定した根拠、留意事項等を以下に示す。このうち、密度、熱拡散率及び熱膨張率については、表に記載の方法しか取得方法がないことから記載を割愛する。

(比熱容量)

フェライト鋼のような強磁性体の比熱測定では、レーザーフラッシュ法のような試験温度のデータ点のみを取得する不連続なデータ点の集まりであるより、連続的にデータを取得する示差走査熱量法(DSC法)が正確な物性値を取得できると判断し採用した。

(縦弾性係数)

JIS に記載されている試験方法として、超音波パルス法と自由共振法がある。両者の試験方法のどちらが正しい物性値を表しているかについて判断に足る情報がない。試験方法により差が出るのが分かったことから、今後は自由共振法に統一することにする。また、自由共振法では、試験片の平行度を 0.5%以内に抑えることがデータの信頼性を保つ上で重要となることから、試験片の加工の際には注意が必要である。

(剛性率)

縦弾性係数と併せて、自由共振法に統一した。縦弾性係数と同様に、試験データの信頼性を保つ上で、試験片の加工の際には注意が必要である。

(ポアソン比)

ポアソン比は、縦弾性係数と剛性率を使用し評価する必要があるため、両者の差がより大きな差異として評価される。そのため、自由共振法により取得した縦弾性係数と剛性率により評価することとした。

PNC-FMS ラップ管材は、比較的、物性値を取得するのに困らないサイズの板材を取ることが出来る。最も小さなサイズである「常陽」ラップ管サイズについても表 4.1-1 に示したサイズを用いれば評価可能である。今後の PNC-FMS ラップ管材の物性測定試験方法ならびに試験片形状は、表 4.1-1 に示したものを標準としデータを取得することとする。なお、試験片は、長手方向を全てラップ管の圧延方向と同一とし、作製することとする。

5. まとめ

PNC-FMS ラップ管材の材料強度基準に資することを目的として、各種物性測定を実施し、PNC-FMS ラップ管材の設計評価用の物性式を整備した。設計評価を行う際は、付録 1 に示す式を正として評価を行う。

また、試験方法を検討した結果、物性値は、JIS や ASME 等の国内外の規格に則りデータを取得した場合でも、試験方法によりデータが著しく変わることが分かった。今後の PNC-FMS ラップ管材の物性測定試験方法ならびに試験片形状は、表 4.1-1 に示したものを標準としデータを取得することとする。

謝辞

本試験を進めるにあたり、(株)コベルコ科研 中井辰良氏、柴田憲一氏、藤原優行氏、JFE テクノリサーチ(株) 西本清治氏、鈴木治雄氏、(株)神戸工業試験場にご協力を頂いた。ここに感謝の意を表します。また、本物性試験を進めるに当たり、次世代部門 構造信頼性評価 Gr の安藤勝訓氏に多大なご助言をいただきました。ありがとうございました。

参考文献

- 1) 次世代原子力システム研究開発部門, 日本原子力発電株式会社 研究開発室, “高速増殖炉サイクル実用化研究開発(FaCT プロジェクト) 一フェーズ 1 報告書”, JAEA-Evaluation 2011-003(2011)
- 2) 畠山耕一, 鶴飼重治, “ODS フェライト鋼の設計評価用物性式の策定”, JNC 研究報告, JNC TN9400 2001-108(2001)
- 3) 鹿倉栄, 野村茂雄, 鶴飼重治, 瀬下一郎, 加納洋一, 桑島幸夫, 伊藤卓志, 蔦木浩一, 藤田利夫, “高速炉炉心材料としての高強度フェライト/マルテンサイト鋼の開発”, 日本原子力学会和文誌, vol.33, No.12, pp.1157-1170(1991)
- 4) 榎本正人, “金属の相変態 –材料組織の科学入門–”, 内田老鶴圃, ISBN4-7536-5613-6 (2000)
- 5) 坂田亮, “理工学基礎 物性科学”, 培風館, ISBN4-563-03446-0 (1989)
- 6) 加藤章一, 鬼澤高志, 吉田栄一, “高クロム鋼の材料特性試験(II) HCM12A(2001 年度材)の材料物性”, JNC 研究報告書, JNC TN9400 2003-015(2003)
- 7) 安藤勝訓, 若井隆純, 青砥紀身, “12Cr 系鋼の材料物性値”, JNC 研究報告書, JNC TN9400 2003-084(2003)
- 8) 大田定雄, “フェライト系耐熱鋼-世界一へのたゆまざる研究と開発-”, 地人書館, ISBN4-8052-0577-6 C3357 (1998)

表 2.1-1. 本研究に用いた PNC-FMS ラップ管材の化学組成

材料	分析	化学成分 (wt.%)													
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	V	Nb	N	Al	Co
19FK-01	レードル	0.14	0.07	0.67	<0.005	0.0034	0.54	10.38	0.40	1.79	0.19	0.06	0.061	—	—
	チェック	0.15	0.05	0.84	0.001	0.001	0.51	10.39	0.40	1.81	0.20	0.05	0.067	—	—
19FK-06	レードル	0.14	0.07	0.67	<0.005	0.0018	0.54	10.35	0.39	1.79	0.19	0.057	0.064	—	—
	チェック	0.14	0.06	0.80	0.002	0.002	0.55	11.26	0.41	1.87	0.22	0.06	0.062	—	—
PNC-FMS ラップ管 模擬板材	レードル	0.14	0.07	0.66	<0.005	0.0020	0.54	10.36	0.39	1.79	0.19	0.059	0.063	—	—
	チェック	0.13	0.06	0.82	0.001	0.0020	0.55	11.28	0.42	1.88	0.22	0.060	0.060	—	—
19FK-08	レードル	0.15	0.08	0.67	<0.005	0.0021	0.54	10.37	0.39	1.79	0.19	0.059	0.062	—	—
	チェック	0.13	0.07	0.82	<0.001	0.0020	0.54	11.23	0.41	1.90	0.22	0.06	0.059	—	—
22WFK	レードル	0.15	0.06	0.67	<0.005	<0.0005	0.52	10.24	0.39	1.81	0.19	0.058	0.059	—	—
	チェック	0.13	0.05	0.80	<0.001	<0.001	0.52	11.02	0.40	1.86	0.22	0.06	0.059	—	—
PNC-FMS ラップ管	製品(1)	0.14	0.05	0.49	0.002	0.003	0.50	11.30	0.45	2.07	0.22	0.06	0.06	0.02	—
	製品(2)	0.14	0.05	0.49	0.002	0.004	0.50	11.2	0.45	2.07	0.23	0.06	0.06	0.02	—
常陽 サイズ	製品(1)	0.11	0.02	0.59	0.001	0.002	0.45	11.1	0.48	2.01	0.21	0.05	0.049	—	—
	製品(2)	0.10	0.02	0.59	0.002	0.003	0.40	11.11	0.48	2.01	0.21	0.05	0.049	—	—

N; 不活性ガス融解熱伝導度法、C, S; 高周波燃焼赤外線吸収法、Cr; ペニオキソニ硫化アンモニウム酸化マンガン酸カリウム滴定法

Si; 二酸化けい素重量法、P; モリブドリン酸青吸光光度法、その他; ICP 発光分光分析法

表 2.1-2. 本研究に用いた PNC-FMS ラップ管材の熱処理条件等

材料		最終熱処理条件				最終 冷間加工度 (%)	δフェライト (%)
		焼ならし 時間 (分)		焼き戻し 時間 (分)			
PNC-FMS ラップ管 模擬板材	19FK-01	1050	40	710	40	0	0
	19FK-06	1050	40	710	40	0	0
	19FK-07	1050	40	710	40	0	0
	19FK-08	1050	40	710	40	0	0
	22WFK	1050	40	710	40	0	0
PNC-FMS ラップ管	2WFK Phenix サイズ	1050	40	710	40	0	0
	19WFK 常陽 サイズ	1050	40	710	40	1.2	0

表 2.2-1. 本研究で用いた物性測定方法と試験片形状

評価項目	試験方法	対応規格	試験片形状	試験温度
密度	アルキメデス法	JIS Z 8007 JIS K 0061	熱膨張測定と同じ	室温
比熱容量	レーザーフラッシュ法	JIS R 1611	φ10.0×2.0 mm	室温, 100°C, 150°C, 200°C, 250°C, 300°C, 350°C, 400°C, 450°C, 500°C, 550°C, 600°C, 650°C, 700°C, 725°C, 750°C, 775°C, 800°C, 825°C, 850°C, 875°C, 900°C
	示差走査熱量法	JIS R 1672	φ4.0×1.3 mm	
熱膨張率	示差膨張式	JIS R 1618	φ3.5×18.0 mm 3.0 ^W ×18 ^L ×1.7 ^T mm	同上
熱拡散率	レーザーフラッシュ法	JIS H 7801	φ10.0×2.0 mm φ10.0×1.7 mm	室温, 100°C, 150°C, 200°C, 250°C, 300°C, 350°C, 400°C, 450°C, 500°C, 550°C, 600°C, 650°C, 700°C, 750°C, 800°C, 850°C, 900°C
熱伝導率	密度、熱拡散率、比熱容量 から算出	JIS R 1611	—	同上
縦弾性係数	自由共振法	JIS Z 2280	20.0 ^W ×90.0 ^L ×2.0 ^T mm 19.0 ^W ×90.0 ^L ×1.9 ^T mm	同上
	超音波パルス法	JIS Z 2280	φ15.0×5.0 mm	
	片持ち共振法	規格外	20.0 ^W ×90.0 ^L ×2.0 ^T mm	
剛性率	自由共振法	ASTM C848-88	20.0 ^W ×90.0 ^L ×2.0 ^T mm	同上
	超音波パルス法	JIS Z 2280	φ15.0×5.0 mm	
ポアソン比	剛性率、ヤング率から算出	ASTM C848-88	—	同上
	超音波パルス法	JIS Z 2280	φ15.0×5.0 mm	
変態点	フォーマスター法	規格無	φ3.0×10.0 mm 10.0 ^W ×80.0 ^L ×1.0 ^T mm	室温から1050°C

表 3.1-1 室温における PNC-FMS ラップ管材の密度実測値

試験温度	測定密度/ 鋼種						平均 密度 [g/cm ³]
	19FK-06 [g/cm ³]	19FK-07 [g/cm ³]	19FK-08 [g/cm ³]	22WFK [g/cm ³]	2WFK [g/cm ³]	19WFK [g/cm ³]	
RT	7.913	7.920	7.896	7.880	7.861	7.860	7.888

表 3.1-2 PNC-FMS ラップ管材の設計評価用密度

温度 [°C]	密度 [g/cm ³]	温度 [°C]	密度 [g/cm ³]
25	7.888	525	7.750
50	7.882	550	7.743
75	7.876	575	7.735
100	7.870	600	7.727
125	7.864	625	7.719
150	7.857	650	7.712
175	7.851	675	7.704
200	7.844	700	7.696
225	7.837	725	7.688
250	7.830	750	7.680
275	7.824	775	7.673
300	7.817	800	7.665
325	7.809	825	7.657
350	7.802	850	7.672
375	7.795	875	7.682
400	7.788	900	7.675
425	7.780	/	
450	7.773		
475	7.765		
500	7.758		

表 3.2-1 PNC-FMS ラップ管材の熱拡散率実測値

試験温度 [°C]	熱拡散率 / 鋼種						平均 熱拡散率 [m ² /s]
	19FK-06 [m ² /s]	19FK-07 [m ² /s]	19FK-08 [m ² /s]	22WFK [m ² /s]	2WFK [m ² /s]	19WFK [m ² /s]	
25	6.850E-06	6.790E-06	6.790E-06	6.760E-06	6.672E-06	6.789E-06	6.775E-06
100	6.810E-06	6.760E-06	6.780E-06	6.658E-06	6.473E-06	6.554E-06	6.673E-06
150	6.690E-06	6.590E-06	6.650E-06	6.523E-06	6.338E-06	6.392E-06	6.531E-06
200	6.560E-06	6.410E-06	6.500E-06	6.370E-06	6.190E-06	6.242E-06	6.379E-06
250	6.390E-06	6.220E-06	6.330E-06	6.096E-06	6.030E-06	6.079E-06	6.191E-06
300	6.270E-06	5.920E-06	6.230E-06	6.022E-06	5.884E-06	5.924E-06	6.042E-06
350	6.060E-06	5.720E-06	6.010E-06	5.923E-06	5.727E-06	5.768E-06	5.868E-06
400	5.820E-06	5.530E-06	5.760E-06	5.774E-06	5.510E-06	5.529E-06	5.654E-06
450	5.580E-06	5.320E-06	5.520E-06	5.623E-06	5.291E-06	5.295E-06	5.438E-06
500	5.360E-06	5.080E-06	5.300E-06	5.319E-06	5.025E-06	5.044E-06	5.188E-06
550	5.080E-06	4.810E-06	4.970E-06	4.986E-06	4.749E-06	4.758E-06	4.892E-06
600	4.690E-06	4.490E-06	4.640E-06	4.490E-06	4.382E-06	4.393E-06	4.514E-06
650	4.210E-06	4.020E-06	4.160E-06	4.036E-06	3.938E-06	3.946E-06	4.052E-06
700	3.600E-06	3.470E-06	3.520E-06	3.558E-06	3.380E-06	3.368E-06	3.483E-06
750	4.480E-06	4.320E-06	4.420E-06	4.224E-06	4.181E-06	4.186E-06	4.302E-06
800	4.980E-06	4.940E-06	4.910E-06	4.746E-06	4.715E-06	4.698E-06	4.832E-06
850	5.830E-06	5.550E-06	5.710E-06	5.562E-06	5.422E-06	5.377E-06	5.575E-06
900	5.990E-06	5.780E-06	5.880E-06	5.792E-06	5.724E-06	5.727E-06	5.816E-06

表 3.2-2 PNC-FMS ラップ管材の設計評価用熱拡散率

温度 [°C]	熱拡散率 [m ² /s]	温度 [°C]	熱拡散率 [m ² /s]
25	6.781E-06	525	5.044E-06
50	6.752E-06	550	4.887E-06
75	6.711E-06	575	4.713E-06
100	6.659E-06	600	4.519E-06
125	6.598E-06	625	4.302E-06
150	6.530E-06	650	4.058E-06
175	6.457E-06	675	3.785E-06
200	6.379E-06	700	3.478E-06
225	6.298E-06	725	3.863E-06
250	6.214E-06	750	4.232E-06
275	6.127E-06	775	4.594E-06
300	6.039E-06	800	4.936E-06
325	5.948E-06	825	5.244E-06
350	5.854E-06	850	5.505E-06
375	5.757E-06	875	5.706E-06
400	5.657E-06	900	5.833E-06
425	5.551E-06	/	
450	5.438E-06		
475	5.317E-06		
500	5.187E-06		

表 3.3-1 PNC-FMS ラップ管材の比熱容量実測値

試験温度 [°C]	比熱容量 / 鋼種								
	レーザーフラッシュ法			示差走査熱量法					
	19FK-06	19FK-07	19FK-08	19FK-06	19FK-07	19FK-08	22WFK	2WFK	19WFK
[J/(kg・K)]	[J/(kg・K)]	[J/(kg・K)]	[J/(kg・K)]	[J/(kg・K)]	[J/(kg・K)]	[J/(kg・K)]	[J/(kg・K)]	[J/(kg・K)]	[J/(kg・K)]
25	4.380E+02	4.440E+02	4.380E+02	4.600E+02	4.620E+02	4.610E+02	4.500E+02	4.560E+02	4.600E+02
100	4.560E+02	4.610E+02	4.580E+02	4.760E+02	4.820E+02	4.770E+02	4.800E+02	4.790E+02	4.730E+02
150	4.690E+02	4.820E+02	4.720E+02	4.920E+02	4.990E+02	4.910E+02	4.950E+02	4.950E+02	4.860E+02
200	4.860E+02	5.020E+02	4.860E+02	5.080E+02	5.160E+02	5.080E+02	5.130E+02	5.120E+02	5.040E+02
250	5.030E+02	5.260E+02	5.090E+02	5.250E+02	5.340E+02	5.250E+02	5.280E+02	5.290E+02	5.200E+02
300	5.210E+02	5.310E+02	5.250E+02	5.440E+02	5.540E+02	5.440E+02	5.490E+02	5.490E+02	5.390E+02
350	5.450E+02	5.540E+02	5.460E+02	5.660E+02	5.770E+02	5.670E+02	5.710E+02	5.720E+02	5.620E+02
400	5.720E+02	5.810E+02	5.670E+02	5.920E+02	6.030E+02	5.930E+02	5.980E+02	5.980E+02	5.870E+02
450	6.030E+02	6.150E+02	5.960E+02	6.200E+02	6.320E+02	6.200E+02	6.300E+02	6.290E+02	6.200E+02
500	6.360E+02	6.430E+02	6.230E+02	6.670E+02	6.790E+02	6.660E+02	6.740E+02	6.750E+02	6.670E+02
550	6.860E+02	6.960E+02	6.740E+02	7.120E+02	7.260E+02	7.120E+02	7.170E+02	7.190E+02	7.080E+02
600	7.400E+02	7.470E+02	7.220E+02	7.680E+02	7.830E+02	7.680E+02	7.740E+02	7.730E+02	7.650E+02
650	8.090E+02	8.180E+02	7.960E+02	8.470E+02	8.610E+02	8.460E+02	8.530E+02	8.520E+02	8.420E+02
700	9.370E+02	9.240E+02	9.210E+02	9.750E+02	9.880E+02	9.740E+02	9.820E+02	9.740E+02	9.690E+02
725	—	—	—	1.095E+03	1.102E+03	1.092E+03	1.108E+03	1.088E+03	1.087E+03
750	7.630E+02	7.450E+02	7.400E+02	8.380E+02	8.460E+02	8.380E+02	8.480E+02	8.650E+02	8.390E+02
775	—	—	—	7.700E+02	7.790E+02	7.680E+02	7.750E+02	7.830E+02	7.670E+02
800	6.950E+02	6.700E+02	6.750E+02	7.350E+02	7.430E+02	7.330E+02	7.400E+02	7.440E+02	7.330E+02
825	—	—	—	7.220E+02	7.270E+02	7.190E+02	7.310E+02	7.210E+02	7.120E+02
850	6.070E+02	6.240E+02	6.000E+02	1.097E+03	1.095E+03	1.094E+03	1.082E+03	7.580E+02	7.490E+02
875	—	—	—	7.020E+02	7.110E+02	7.060E+02	6.960E+02	8.960E+02	8.530E+02
900	6.03E+02	6.17E+02	5.94E+02	6.750E+02	6.770E+02	6.740E+02	6.680E+02	7.080E+02	6.970E+02

表 3.3-2 PNC-FMS ラップ管材の設計評価用比熱容量

温度 [°C]	比熱容量 [J/(kg·K)]	温度 [°C]	比熱容量 [J/(kg·K)]
25	4.581E+02	525	6.925E+02
50	4.674E+02	550	7.174E+02
75	4.733E+02	575	7.438E+02
100	4.786E+02	600	7.727E+02
125	4.847E+02	625	8.059E+02
150	4.920E+02	650	8.471E+02
175	5.004E+02	675	9.021E+02
200	5.094E+02	700	9.800E+02
225	5.188E+02	725	1.095E+03
250	5.283E+02	750	8.457E+02
275	5.377E+02	775	7.737E+02
300	5.473E+02	800	7.380E+02
325	5.572E+02	825	7.220E+02
350	5.680E+02	850	9.792E+02
375	5.801E+02	875	7.607E+02
400	5.939E+02	900	6.832E+02
425	6.096E+02	/	
450	6.274E+02		
475	6.473E+02		
500	6.691E+02		

表 3.4-1 PNC-FMS ラップ管材の熱伝導率実測値

試験温度 [°C]	熱伝導率* / 鋼種						平均 熱伝導率 [W/(m·K)]
	19FK-06 [W/(m·K)]	19FK-07 [W/(m·K)]	19FK-08 [W/(m·K)]	22WFK [W/(m·K)]	2WFK [W/(m·K)]	19WFK [W/(m·K)]	
25	2.493E+01	2.484E+01	2.472E+01	2.397E+01	2.392E+01	2.455E+01	2.449E+01
100	2.559E+01	2.575E+01	2.548E+01	2.512E+01	2.432E+01	2.431E+01	2.509E+01
150	2.594E+01	2.594E+01	2.568E+01	2.534E+01	2.457E+01	2.432E+01	2.530E+01
200	2.622E+01	2.605E+01	2.593E+01	2.560E+01	2.478E+01	2.459E+01	2.553E+01
250	2.635E+01	2.611E+01	2.605E+01	2.517E+01	2.489E+01	2.467E+01	2.554E+01
300	2.674E+01	2.574E+01	2.652E+01	2.581E+01	2.517E+01	2.488E+01	2.581E+01
350	2.684E+01	2.585E+01	2.662E+01	2.635E+01	2.548E+01	2.521E+01	2.606E+01
400	2.691E+01	2.607E+01	2.663E+01	2.685E+01	2.558E+01	2.519E+01	2.621E+01
450	2.697E+01	2.623E+01	2.663E+01	2.750E+01	2.579E+01	2.544E+01	2.643E+01
500	2.782E+01	2.686E+01	2.741E+01	2.777E+01	2.623E+01	2.602E+01	2.702E+01
550	2.809E+01	2.714E+01	2.743E+01	2.764E+01	2.636E+01	2.600E+01	2.711E+01
600	2.791E+01	2.727E+01	2.756E+01	2.681E+01	2.610E+01	2.589E+01	2.692E+01
650	2.758E+01	2.679E+01	2.717E+01	2.650E+01	2.580E+01	2.554E+01	2.656E+01
700	2.709E+01	2.648E+01	2.641E+01	2.684E+01	2.526E+01	2.504E+01	2.619E+01
750	2.892E+01	2.818E+01	2.848E+01	2.746E+01	2.770E+01	2.689E+01	2.794E+01
800	2.813E+01	2.824E+01	2.762E+01	2.687E+01	2.682E+01	2.631E+01	2.733E+01
850	4.925E+01	4.682E+01	4.802E+01	4.615E+01	3.138E+01	3.074E+01	4.206E+01
900	3.113E+01	3.015E+01	3.046E+01	2.966E+01	3.101E+01	3.051E+01	3.049E+01

*) 熱伝導率算出には、各鋼種の平均熱膨張率から試験温度毎の密度を用いた。

表 3.4-2 PNC-FMS ラップ管材の設計評価用熱伝導率

温度 [°C]	熱伝導率 [W/(m·K)]	温度 [°C]	熱伝導率 [W/(m·K)]
25	2.449E+01	525	2.682E+01
50	2.478E+01	550	2.686E+01
75	2.498E+01	575	2.687E+01
100	2.512E+01	600	2.687E+01
125	2.522E+01	625	2.685E+01
150	2.529E+01	650	2.683E+01
175	2.536E+01	675	2.682E+01
200	2.543E+01	700	2.684E+01
225	2.550E+01	725	2.690E+01
250	2.559E+01	750	2.703E+01
275	2.569E+01	775	2.726E+01
300	2.581E+01	800	2.762E+01
325	2.593E+01	825	3.798E+01
350	2.606E+01	850	4.206E+01
375	2.620E+01	875	3.956E+01
400	2.633E+01	900	3.049E+01
425	2.646E+01	/	
450	2.658E+01		
475	2.668E+01		
500	2.676E+01		

表 3.5-1 PNC-FMS ラッパ管材の熱膨張率実測値

試験温度 [°C]	熱膨張率 / 鋼種							
	19FK-06 ¹⁾ [%]	19FK-07 ¹⁾ [%]	19FK-08 ¹⁾ [%]	22WFK ¹⁾ [%]	2WFK ¹⁾ [%]	19WFK ¹⁾ [%]	22WFK ²⁾ [%]	22WFK ²⁾ [%]
25	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
50	2.521E-02	2.513E-02	2.988E-02	2.538E-02	2.509E-02	2.454E-02	2.600E-02	2.600E-02
100	7.873E-02	7.848E-02	8.223E-02	7.979E-02	7.668E-02	7.614E-02	7.900E-02	7.900E-02
150	1.341E-01	1.336E-01	1.364E-01	1.349E-01	1.301E-01	1.290E-01	1.340E-01	1.340E-01
200	1.913E-01	1.907E-01	1.924E-01	1.930E-01	1.848E-01	1.837E-01	1.910E-01	1.910E-01
250	2.499E-01	2.491E-01	2.499E-01	2.526E-01	2.415E-01	2.393E-01	2.490E-01	2.490E-01
300	3.107E-01	3.097E-01	3.095E-01	3.138E-01	2.998E-01	2.971E-01	3.090E-01	3.090E-01
350	3.731E-01	3.724E-01	3.702E-01	3.777E-01	3.596E-01	3.564E-01	3.710E-01	3.710E-01
400	4.365E-01	4.362E-01	4.330E-01	4.421E-01	4.211E-01	4.173E-01	4.350E-01	4.350E-01
450	5.021E-01	5.022E-01	4.974E-01	5.081E-01	4.841E-01	4.792E-01	5.010E-01	5.010E-01
500	5.682E-01	5.692E-01	5.634E-01	5.757E-01	5.482E-01	5.434E-01	5.690E-01	5.690E-01
550	6.356E-01	6.370E-01	6.303E-01	6.453E-01	6.132E-01	6.089E-01	6.390E-01	6.390E-01
600	7.041E-01	7.052E-01	6.987E-01	7.159E-01	6.791E-01	6.781E-01	7.100E-01	7.100E-01
650	7.736E-01	7.745E-01	7.675E-01	7.864E-01	7.455E-01	7.490E-01	7.820E-01	7.820E-01
700	8.419E-01	8.431E-01	8.346E-01	8.557E-01	8.106E-01	8.169E-01	8.520E-01	8.520E-01
725	8.744E-01	8.755E-01	8.671E-01	8.890E-01	8.419E-01	8.504E-01	8.853E-01	8.853E-01
750	9.097E-01	9.101E-01	9.013E-01	9.240E-01	8.748E-01	8.867E-01	9.210E-01	9.210E-01
775	9.461E-01	9.464E-01	9.376E-01	9.611E-01	9.098E-01	9.245E-01	9.584E-01	9.584E-01
800	9.835E-01	9.837E-01	9.744E-01	9.988E-01	9.454E-01	9.634E-01	9.960E-01	9.960E-01
825	1.019E+00	1.019E+00	1.009E+00	1.033E+00	9.810E-01	1.002E+00	1.031E+00	1.031E+00
850	9.222E-01	9.343E-01	9.132E-01	9.158E-01	9.782E-01	9.935E-01	9.030E-01	9.030E-01
875	8.893E-01	8.920E-01	8.764E-01	8.944E-01	8.966E-01	9.257E-01	8.745E-01	8.745E-01
900	9.277E-01	9.286E-01	9.125E-01	9.353E-01	9.126E-01	9.489E-01	9.110E-01	9.110E-01

試験片採取方向：1) L 方向、2) T 方向

表 3.5-2 PNC-FMS ラップ管材の設計評価用瞬時熱膨張係数

温度 [°C]	瞬時 熱膨張係数 [K ⁻¹]	温度 [°C]	瞬時 熱膨張係数 [K ⁻¹]
25	1.001E-05	525	1.333E-05
50	1.023E-05	550	1.344E-05
75	1.045E-05	575	1.353E-05
100	1.066E-05	600	1.362E-05
125	1.087E-05	625	1.371E-05
150	1.107E-05	650	1.378E-05
175	1.126E-05	675	1.386E-05
200	1.145E-05	700	1.392E-05
225	1.163E-05	725	1.398E-05
250	1.181E-05	750	1.404E-05
275	1.198E-05	775	1.408E-05
300	1.214E-05	800	1.412E-05
325	1.230E-05	825	1.416E-05
350	1.245E-05	850	-2.684E-05
375	1.259E-05	875	-6.954E-06
400	1.273E-05	900	3.637E-05
425	1.286E-05	/	
450	1.299E-05		
475	1.311E-05		
500	1.323E-05		

表 3.5-3 PNC-FMS ラップ管材の平均熱膨張係数実測値

試験温度 [°C]	平均熱膨張係数 / 銅種							
	19FK-06 ¹⁾ [K ⁻¹]	19FK-07 ¹⁾ [K ⁻¹]	19FK-08 ¹⁾ [K ⁻¹]	22WFK ¹⁾ [K ⁻¹]	2WFK ¹⁾ [K ⁻¹]	19WFK ¹⁾ [K ⁻¹]	22WFK ²⁾ [K ⁻¹]	
25 — 50	1.010E-05	1.007E-05	9.970E-06	1.013E-05	1.002E-05	9.828E-06	1.029E-05	
25 — 100	1.049E-05	1.047E-05	1.028E-05	1.063E-05	1.023E-05	1.016E-05	1.054E-05	
25 — 150	1.073E-05	1.069E-05	1.049E-05	1.079E-05	1.041E-05	1.033E-05	1.069E-05	
25 — 200	1.093E-05	1.090E-05	1.069E-05	1.103E-05	1.056E-05	1.050E-05	1.090E-05	
25 — 250	1.111E-05	1.107E-05	1.087E-05	1.123E-05	1.074E-05	1.064E-05	1.105E-05	
25 — 300	1.130E-05	1.126E-05	1.105E-05	1.141E-05	1.090E-05	1.080E-05	1.122E-05	
25 — 350	1.148E-05	1.146E-05	1.122E-05	1.162E-05	1.107E-05	1.097E-05	1.141E-05	
25 — 400	1.164E-05	1.163E-05	1.139E-05	1.179E-05	1.123E-05	1.113E-05	1.159E-05	
25 — 450	1.181E-05	1.181E-05	1.157E-05	1.195E-05	1.139E-05	1.127E-05	1.179E-05	
25 — 500	1.196E-05	1.198E-05	1.174E-05	1.212E-05	1.154E-05	1.144E-05	1.199E-05	
25 — 550	1.211E-05	1.213E-05	1.189E-05	1.229E-05	1.168E-05	1.160E-05	1.217E-05	
25 — 600	1.225E-05	1.227E-05	1.205E-05	1.245E-05	1.181E-05	1.179E-05	1.236E-05	
25 — 650	1.238E-05	1.239E-05	1.218E-05	1.258E-05	1.193E-05	1.198E-05	1.251E-05	
25 — 700	1.247E-05	1.249E-05	1.227E-05	1.268E-05	1.201E-05	1.210E-05	1.263E-05	
25 — 725	1.249E-05	1.251E-05	1.230E-05	1.270E-05	1.203E-05	1.215E-05	1.265E-05	
25 — 750	1.255E-05	1.255E-05	1.235E-05	1.274E-05	1.207E-05	1.223E-05	1.270E-05	
25 — 775	1.262E-05	1.262E-05	1.242E-05	1.281E-05	1.213E-05	1.233E-05	1.278E-05	
25 — 800	1.269E-05	1.269E-05	1.249E-05	1.289E-05	1.220E-05	1.243E-05	1.286E-05	
25 — 825	1.273E-05	1.273E-05	1.253E-05	1.291E-05	1.226E-05	1.252E-05	1.288E-05	
25 — 850	1.118E-05	1.132E-05	1.100E-05	1.110E-05	1.186E-05	1.204E-05	1.094E-05	
25 — 875	1.046E-05	1.049E-05	1.025E-05	1.052E-05	1.055E-05	1.089E-05	1.029E-05	
25 — 900	1.060E-05	1.061E-05	1.037E-05	1.069E-05	1.043E-05	1.085E-05	1.041E-05	

試験片採取方向：1) L 方向、2) T 方向

表 3.5-4 PNC-FMS ラップ管材の設計評価用平均熱膨張係数

温度 [°C]	平均熱膨張係数 [K ⁻¹]	温度 [°C]	平均熱膨張係数 [K ⁻¹]
25	—	525	1.188E-05
50	1.009E-05	550	1.195E-05
75	1.021E-05	575	1.202E-05
100	1.032E-05	600	1.209E-05
125	1.043E-05	625	1.215E-05
150	1.054E-05	650	1.221E-05
175	1.064E-05	675	1.228E-05
200	1.074E-05	700	1.233E-05
225	1.084E-05	725	1.239E-05
250	1.094E-05	750	1.245E-05
275	1.104E-05	775	1.250E-05
300	1.113E-05	800	1.255E-05
325	1.122E-05	825	1.260E-05
350	1.131E-05	850	1.142E-05
375	1.140E-05	875	1.053E-05
400	1.148E-05	900	1.059E-05
425	1.157E-05	/	
450	1.165E-05		
475	1.173E-05		
500	1.180E-05		

表 3.6-1 各種試験方法による PNC-FMS ラップ管材の縦弾性係数実測値

試験温度 [°C]	縦弾性係数 / 鋼種														
	自由共振法						超音波法								
	19FK-06 GPa	19FK-07 GPa	19FK-08 GPa	22WFK GPa	2WFK GPa	19WFK GPa	22WFK GPa	19FK-06 GPa	19FK-07 GPa	19FK-08 GPa	22WFK GPa	片持ち共振法			
25	2.163E+02	2.165E+02	2.156E+02	2.166E+02	2.167E+02	2.168E+02	2.172E+02	2.162E+02	2.145E+02	2.126E+02	2.161E+02	2.152E+02	2.149E+02	2.154E+02	2.135E+02
100	2.126E+02	2.131E+02	2.119E+02	2.134E+02	2.127E+02	2.131E+02	2.134E+02	2.125E+02	2.109E+02	2.085E+02	2.125E+02	2.128E+02	2.126E+02	2.131E+02	2.112E+02
200	2.070E+02	2.075E+02	2.061E+02	2.079E+02	2.067E+02	2.078E+02	2.080E+02	2.065E+02	2.048E+02	2.050E+02	2.073E+02	2.087E+02	2.086E+02	2.094E+02	2.070E+02
300	1.999E+02	2.011E+02	1.985E+02	2.005E+02	1.994E+02	2.007E+02	2.005E+02	1.998E+02	1.978E+02	1.990E+02	2.006E+02	2.034E+02	2.033E+02	2.040E+02	2.015E+02
400	1.910E+02	1.922E+02	1.902E+02	1.922E+02	1.909E+02	1.921E+02	1.919E+02	1.912E+02	1.922E+02	1.908E+02	1.937E+02	1.963E+02	1.963E+02	1.967E+02	1.938E+02
450	—	1.873E+02	—	1.874E+02	—	1.872E+02	—	1.867E+02	1.843E+02	1.858E+02	1.893E+02	1.918E+02	1.920E+02	1.924E+02	1.890E+02
500	1.804E+02	1.820E+02	1.800E+02	1.816E+02	1.807E+02	1.818E+02	1.815E+02	1.816E+02	1.793E+02	1.806E+02	1.859E+02	1.866E+02	1.868E+02	1.871E+02	1.832E+02
550	1.743E+02	1.759E+02	1.738E+02	1.758E+02	1.748E+02	1.759E+02	1.751E+02	1.757E+02	1.731E+02	1.743E+02	1.800E+02	1.800E+02	1.804E+02	1.807E+02	1.761E+02
600	1.669E+02	1.683E+02	1.668E+02	1.686E+02	1.677E+02	1.685E+02	1.680E+02	1.675E+02	1.663E+02	1.674E+02	1.760E+02	1.722E+02	1.731E+02	1.730E+02	1.674E+02
650	1.579E+02	1.599E+02	1.577E+02	1.604E+02	1.588E+02	1.600E+02	1.589E+02	1.601E+02	1.574E+02	1.586E+02	1.685E+02	1.631E+02	1.641E+02	1.640E+02	1.573E+02
700	1.465E+02	1.487E+02	1.461E+02	1.483E+02	1.476E+02	1.493E+02	1.473E+02	1.495E+02	1.460E+02	1.468E+02	1.589E+02	1.488E+02	1.509E+02	1.497E+02	1.420E+02
750	1.331E+02	1.348E+02	1.327E+02	1.346E+02	1.338E+02	1.354E+02	1.328E+02	1.351E+02	1.326E+02	1.321E+02	1.479E+02	1.315E+02	1.341E+02	1.325E+02	1.235E+02
800	1.245E+02	1.258E+02	1.229E+02	1.261E+02	1.251E+02	1.259E+02	1.221E+02	1.253E+02	1.236E+02	1.228E+02	1.400E+02	1.145E+02	1.172E+02	1.147E+02	1.078E+02
850	1.269E+02	1.267E+02	1.270E+02	1.288E+02	1.288E+02	1.284E+02	1.269E+02	1.277E+02	1.226E+02	1.192E+02	1.381E+02	1.161E+02	1.166E+02	1.186E+02	1.154E+02
900	1.246E+02	1.232E+02	1.228E+02	1.251E+02	1.253E+02	1.239E+02	1.228E+02	1.229E+02	1.200E+02	1.178E+02	1.365E+02	1.148E+02	1.152E+02	1.160E+02	1.123E+02

表 3.6-2 PNC-FMS ラップ管材の設計評価用縦弾性係数

温度 [°C]	縦弾性係数 [GPa]	温度 [°C]	縦弾性係数 [GPa]
25	2.159E+02	525	1.779E+02
50	2.140E+02	550	1.747E+02
75	2.130E+02	575	1.714E+02
100	2.122E+02	600	1.677E+02
125	2.112E+02	625	1.637E+02
150	2.099E+02	650	1.590E+02
175	2.084E+02	675	1.536E+02
200	2.068E+02	700	1.475E+02
225	2.050E+02	725	1.407E+02
250	2.033E+02	750	1.338E+02
275	2.015E+02	775	1.277E+02
300	1.997E+02	800	1.244E+02
325	1.978E+02	825	1.260E+02
350	1.959E+02	850	1.263E+02
375	1.938E+02	875	1.252E+02
400	1.915E+02	900	1.228E+02
425	1.891E+02	/	
450	1.865E+02		
475	1.838E+02		
500	1.809E+02		

表 3.7-1 各種試験方法による PNC-FMS ラップ管材の剛性率実測値

試験温度 [°C]		剛性率 / 鋼種														
		自由共振法					超音波法					片持ち共振法				
		19FK-06	19FK-07	19FK-08	22WFK	2WFK	19WFK	22WFK	19FK-06	19FK-07	19FK-08	22WFK	19FK-06	19FK-07	19FK-08	22WFK
		GPa	GPa	GPa	GPa	GPa	GPa	GPa	GPa	GPa	GPa	GPa	GPa	GPa	GPa	GPa
25		8.397E+01	8.425E+01	8.391E+01	8.384E+01	8.401E+01	8.399E+01	8.381E+01	8.332E+01	8.317E+01	8.398E+01	8.156E+01	8.152E+01	8.140E+01	8.110E+01	
100		8.254E+01	8.262E+01	8.238E+01	8.219E+01	8.240E+01	8.272E+01	8.211E+01	8.181E+01	8.146E+01	8.262E+01	8.199E+01	8.215E+01	8.153E+01	8.131E+01	
200		8.021E+01	8.067E+01	7.985E+01	7.970E+01	7.993E+01	7.987E+01	7.993E+01	7.957E+01	7.893E+01	8.060E+01	8.224E+01	8.221E+01	8.180E+01	8.324E+01	
300		7.648E+01	7.770E+01	7.670E+01	7.660E+01	7.699E+01	7.670E+01	7.657E+01	7.638E+01	7.649E+01	7.777E+01	8.118E+01	8.164E+01	8.102E+01	8.202E+01	
400		7.290E+01	7.308E+01	7.290E+01	7.272E+01	7.317E+01	7.309E+01	7.290E+01	7.297E+01	7.346E+01	7.484E+01	7.859E+01	7.928E+01	7.856E+01	7.909E+01	
450		—	—	7.082E+01	—	7.116E+01	—	7.091E+01	7.094E+01	7.096E+01	7.291E+01	7.677E+01	7.747E+01	7.675E+01	7.705E+01	
500		6.871E+01	6.847E+01	6.846E+01	6.822E+01	6.865E+01	6.854E+01	6.869E+01	6.867E+01	6.883E+01	7.149E+01	7.447E+01	7.514E+01	7.435E+01	7.432E+01	
550		6.586E+01	6.558E+01	6.602E+01	6.546E+01	6.609E+01	6.599E+01	6.594E+01	6.601E+01	6.633E+01	6.898E+01	7.156E+01	7.230E+01	7.142E+01	7.105E+01	
600		6.278E+01	6.243E+01	6.274E+01	6.233E+01	6.318E+01	6.294E+01	6.314E+01	6.315E+01	6.335E+01	6.729E+01	6.825E+01	6.912E+01	6.818E+01	6.751E+01	
650		5.898E+01	5.884E+01	5.928E+01	5.867E+01	5.956E+01	5.917E+01	5.937E+01	5.936E+01	5.987E+01	6.411E+01	6.392E+01	6.496E+01	6.388E+01	6.261E+01	
700		5.369E+01	5.425E+01	5.446E+01	5.400E+01	5.500E+01	5.448E+01	5.468E+01	5.431E+01	5.549E+01	6.014E+01	5.800E+01	5.926E+01	5.786E+01	5.579E+01	
750		4.829E+01	4.835E+01	4.922E+01	4.834E+01	4.934E+01	4.893E+01	4.927E+01	4.941E+01	4.998E+01	5.560E+01	5.032E+01	5.161E+01	5.013E+01	4.819E+01	
800		4.572E+01	4.803E+01	4.608E+01	4.687E+01	4.557E+01	4.555E+01	4.613E+01	4.595E+01	4.754E+01	5.258E+01	4.346E+01	4.443E+01	4.320E+01	4.203E+01	
850		4.507E+01	4.516E+01	4.560E+01	4.510E+01	4.563E+01	4.558E+01	4.565E+01	4.567E+01	4.591E+01	5.177E+01	4.326E+01	4.320E+01	4.324E+01	4.343E+01	
900		4.353E+01	4.356E+01	4.434E+01	4.370E+01	4.380E+01	4.402E+01	4.438E+01	4.439E+01	4.350E+01	5.123E+01	4.226E+01	4.258E+01	4.245E+01	4.247E+01	

表 3.7-2 PNC-FMS ラップ管材の設計評価用剛性率

温度 [°C]	剛性率 [GPa]	温度 [°C]	剛性率 [GPa]
25	8.389E+01	525	6.734E+01
50	8.273E+01	550	6.604E+01
75	8.247E+01	575	6.463E+01
100	8.232E+01	600	6.305E+01
125	8.199E+01	625	6.125E+01
150	8.143E+01	650	5.920E+01
175	8.069E+01	675	5.688E+01
200	7.987E+01	700	5.437E+01
225	7.905E+01	725	5.181E+01
250	7.825E+01	750	4.939E+01
275	7.748E+01	775	4.739E+01
300	7.672E+01	800	4.605E+01
325	7.594E+01	825	4.553E+01
350	7.509E+01	850	4.565E+01
375	7.417E+01	875	4.568E+01
400	7.317E+01	900	4.395E+01
425	7.209E+01	/	
450	7.096E+01		
475	6.979E+01		
500	6.858E+01		

表 3.8-1 各種試験方法による PNC-FMS ラップ管材のポアソン比実測値

試験温度 [°C]	ポアソン比 / 銅種										
	自由共振法					超音波法					片持ち共振法
	19FK-06	19FK-07	19FK-08	22WFK	2WFK	19WFK	22WFK	19FK-06	19FK-07	19FK-08	22WFK
25	2.878E-01	2.796E-01	2.924E-01	2.905E-01	2.873E-01	2.783E-01	2.868E-01	3.193E-01	3.181E-01	3.231E-01	3.161E-01
100	2.876E-01	2.827E-01	2.938E-01	2.933E-01	2.889E-01	2.795E-01	2.860E-01	2.977E-01	2.939E-01	3.070E-01	2.990E-01
200	2.905E-01	2.870E-01	2.968E-01	2.998E-01	2.869E-01	2.987E-01	2.863E-01	2.690E-01	2.686E-01	2.800E-01	2.435E-01
300	3.069E-01	2.938E-01	3.014E-01	3.036E-01	2.952E-01	3.009E-01	2.898E-01	2.526E-01	2.450E-01	2.589E-01	2.281E-01
400	3.099E-01	3.014E-01	3.124E-01	3.126E-01	3.129E-01	2.986E-01	2.940E-01	2.486E-01	2.383E-01	2.521E-01	2.250E-01
450	—	3.087E-01	—	3.151E-01	—	3.162E-01	2.978E-01	2.495E-01	2.394E-01	2.535E-01	2.266E-01
500	3.127E-01	3.141E-01	3.246E-01	3.239E-01	3.241E-01	3.118E-01	3.000E-01	2.529E-01	2.431E-01	2.584E-01	2.325E-01
550	3.230E-01	3.250E-01	3.355E-01	3.307E-01	3.266E-01	3.138E-01	3.055E-01	2.577E-01	2.477E-01	2.652E-01	2.394E-01
600	3.293E-01	3.356E-01	3.450E-01	3.331E-01	3.342E-01	3.213E-01	3.072E-01	2.615E-01	2.522E-01	2.686E-01	2.396E-01
650	3.386E-01	3.397E-01	3.535E-01	3.433E-01	3.423E-01	3.244E-01	3.132E-01	2.762E-01	2.631E-01	2.834E-01	2.558E-01
700	3.642E-01	3.471E-01	3.664E-01	3.568E-01	3.516E-01	3.228E-01	3.214E-01	2.829E-01	2.727E-01	2.937E-01	2.731E-01
750	3.781E-01	3.724E-01	3.845E-01	3.714E-01	3.570E-01	3.220E-01	3.311E-01	3.072E-01	2.989E-01	3.217E-01	2.816E-01
800	3.612E-01	2.790E-01	3.341E-01	3.814E-01	3.403E-01	2.916E-01	3.316E-01	3.177E-01	3.193E-01	3.275E-01	2.820E-01
850	4.075E-01	4.059E-01	4.278E-01	4.090E-01	3.922E-01	2.978E-01	3.333E-01	3.418E-01	3.499E-01	3.714E-01	3.290E-01
900	4.318E-01	4.098E-01	4.334E-01	4.128E-01	3.952E-01	3.540E-01	3.322E-01	3.587E-01	3.526E-01	3.664E-01	3.217E-01

表 3.8-2 PNC-FMS ラップ管材の設計評価用ポアソン比

温度 [°C]	ポアソン比 [-]	温度 [°C]	ポアソン比 [-]
25	2.860E-01	525	3.213E-01
50	2.874E-01	550	3.247E-01
75	2.887E-01	575	3.284E-01
100	2.900E-01	600	3.324E-01
125	2.912E-01	625	3.367E-01
150	2.925E-01	650	3.413E-01
175	2.937E-01	675	3.463E-01
200	2.950E-01	700	3.517E-01
225	2.963E-01	725	3.574E-01
250	2.976E-01	750	3.636E-01
275	2.991E-01	775	3.395E-01
300	3.006E-01	800	3.431E-01
325	3.022E-01	825	3.627E-01
350	3.040E-01	850	3.862E-01
375	3.059E-01	875	4.016E-01
400	3.080E-01	900	3.971E-01
425	3.102E-01	/	
450	3.126E-01		
475	3.153E-01		
500	3.182E-01		

表 3.9-1 PNC-FMS ラップ管材の変態点実測値

鋼種	AC ₁ [°C]	AC ₃ [°C]	Ms [°C]
19FK-01	810	880	312
19FK-06	802	888	304
	796	879	307
19FK-07	809	879	314
	787	869	294
19FK-08	802	873	310
	791	866	291
22WFK	794	868	328
2WFK	826	887	337

表 4.1-1 今後の PNC-FMS ラップ管材の標準物性測定方法

評価項目	試験方法	対応規格	試験片形状
密度	アルキメデス法	JIS Z 8007 JIS K 0061	熱膨張試験片利用
比熱容量	示差走査熱量法	JIS R 1672	φ4.0×1.3 mm
熱膨張率	示差膨張式	JIS R 1618	φ3.5×18.0 mm 3.0 ^W ×18 ^L ×1.7 ^T mm
熱拡散率	レーザーフラッシュ法	JIS H 7801	φ10.0×2.0 mm φ10.0×1.7 mm
熱伝導率	密度、熱拡散率、比熱容量 から算出	JIS R 1611	—
縦弾性係数	自由共振法	JIS Z 2280	20.0 ^W ×90.0 ^L ×2.0 ^T mm 19.0 ^W ×90.0 ^L ×1.9 ^T mm 19.0W×90.0L×1.6 ^T mm
剛性率	自由共振法	ASTM C848-88	20.0 ^W ×90.0 ^L ×2.0 ^T mm 19.0 ^W ×90.0 ^L ×1.9 ^T mm 19.0W×90.0L×1.6 ^T mm
ポアソン比	剛性率、ヤング率から算出 (自由共振法)	ASTM C848-88	—
変態点	フォーマスター法	規格無	φ3.0×10.0 mm 10.0 ^W ×80.0 ^L ×1.0 ^T mm

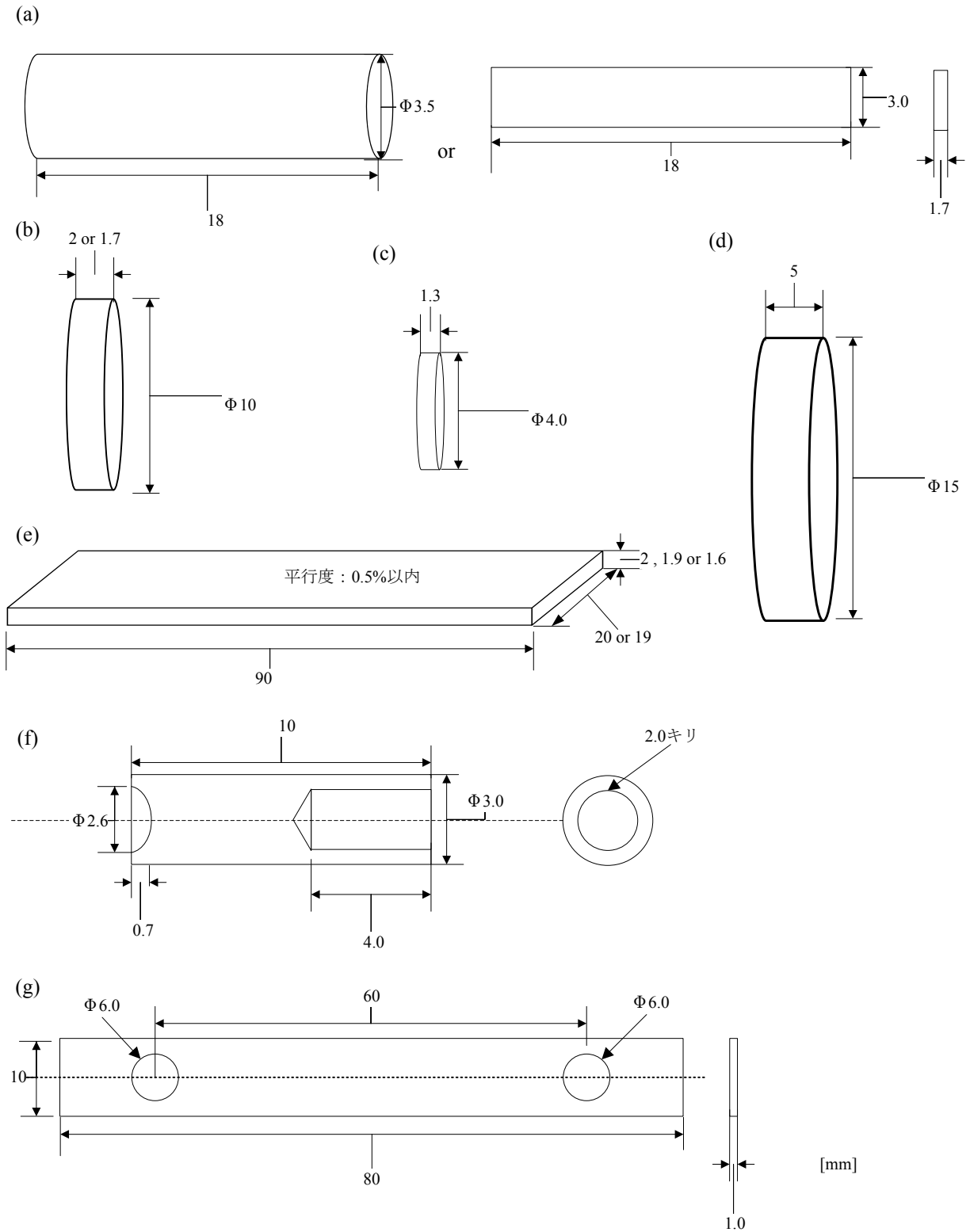


図 2.2-1 物性値測定試験片の形状及び寸法概略図

- (a) 密度及び熱膨張率、(b) 熱拡散率、(c) 比熱容量(DSC法)、(d) 縦弾性係数、剛性率及びポアソン比 (超音波パルス法)、(e) 縦弾性係数、剛性率及びポアソン比(自由共振法)、(f) 変態点測定(模擬板材)、(g) 変態点測定(ラップ管用)

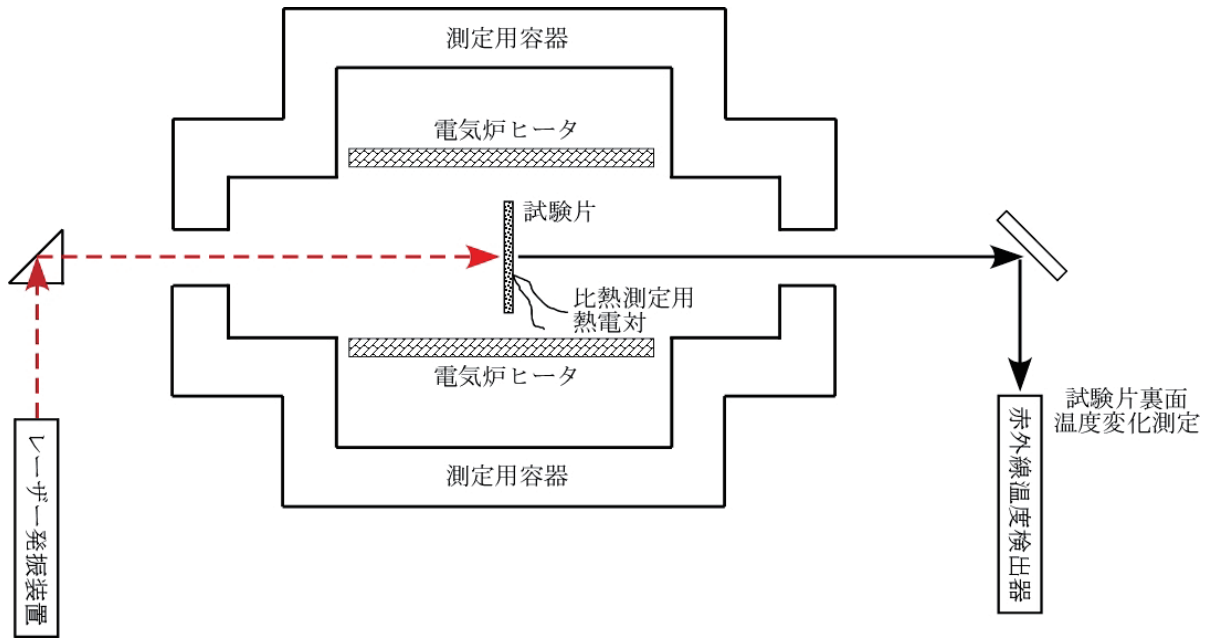


図 2.4-1 レーザーフラッシュ法の測定装置の模式図

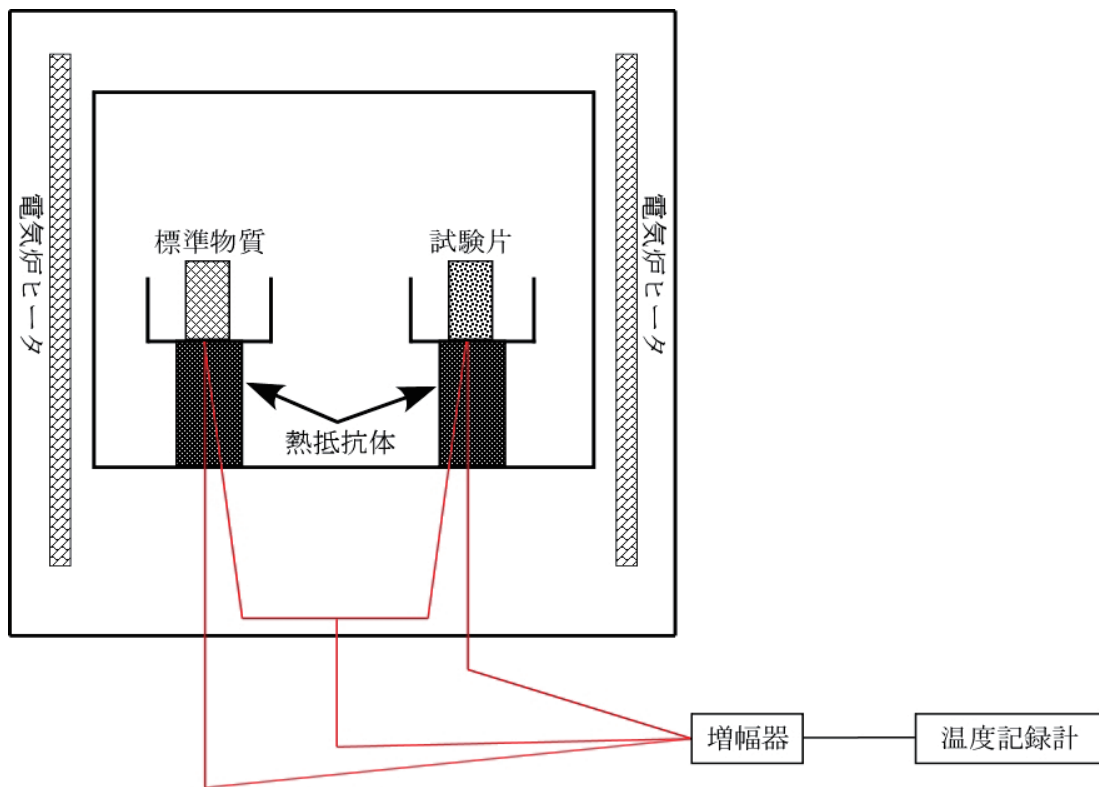


図 2.4-2 示差走査熱量法の測定装置の模式図

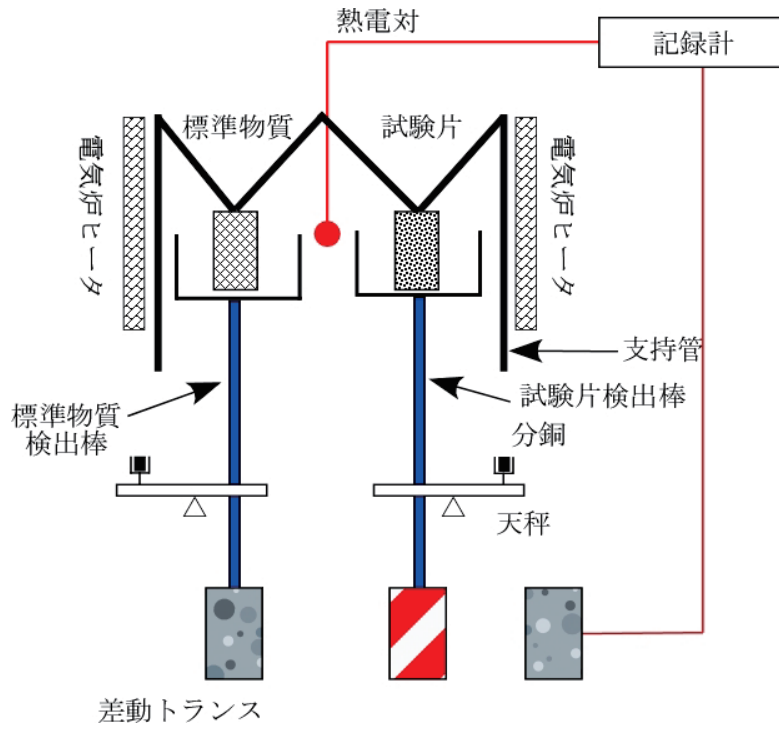


図 2.5-1 熱膨張測定装置の模式図

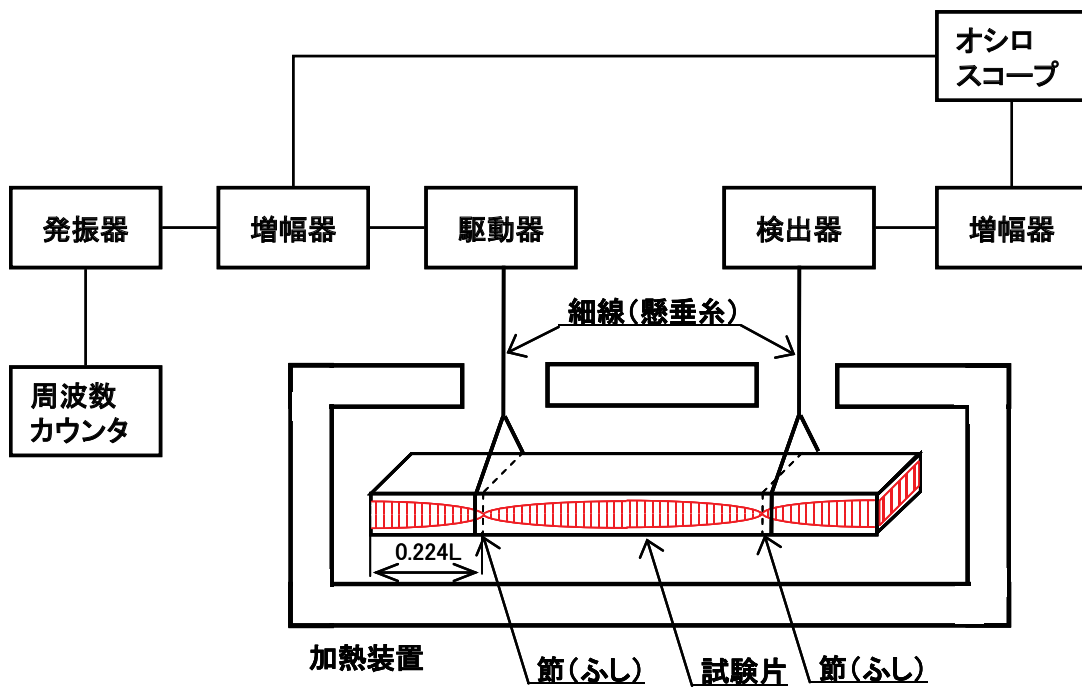


図 2.6-1 自由共振法による縦弾性係数測定装置の模式図

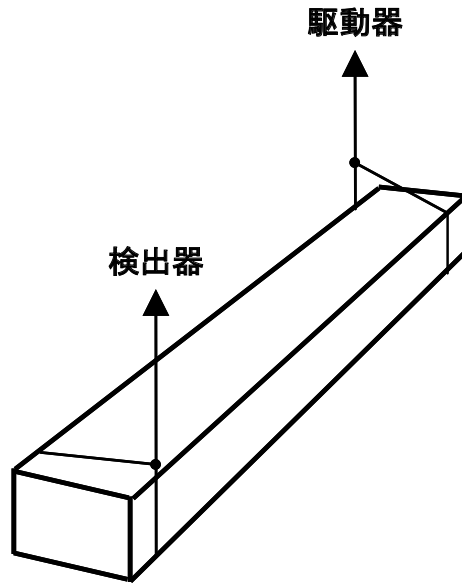


図 2.6-2 自由共振法による剛性率測定の様式図

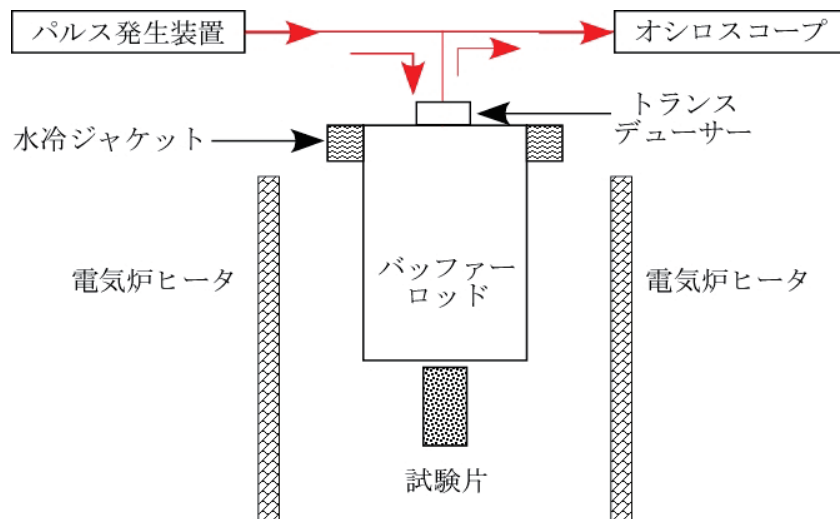


図 2.6-3 超音波パルス法による縦弾性係数測定装置の様式図

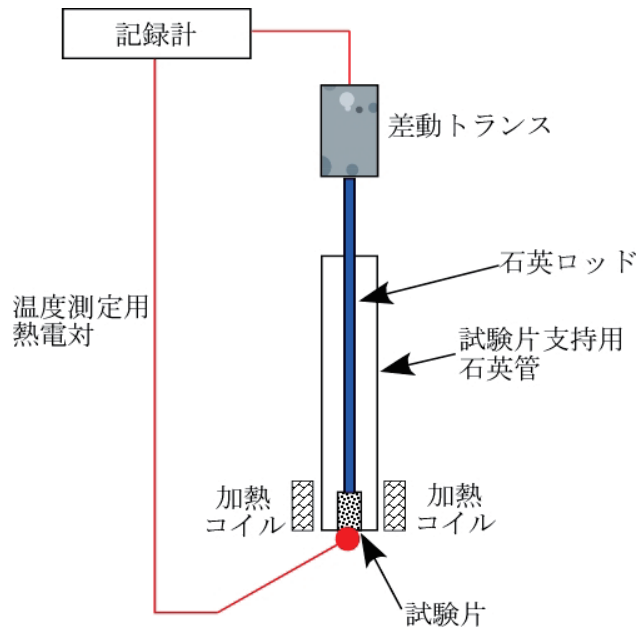


図 2.7-1 フォーマスター装置の模式図

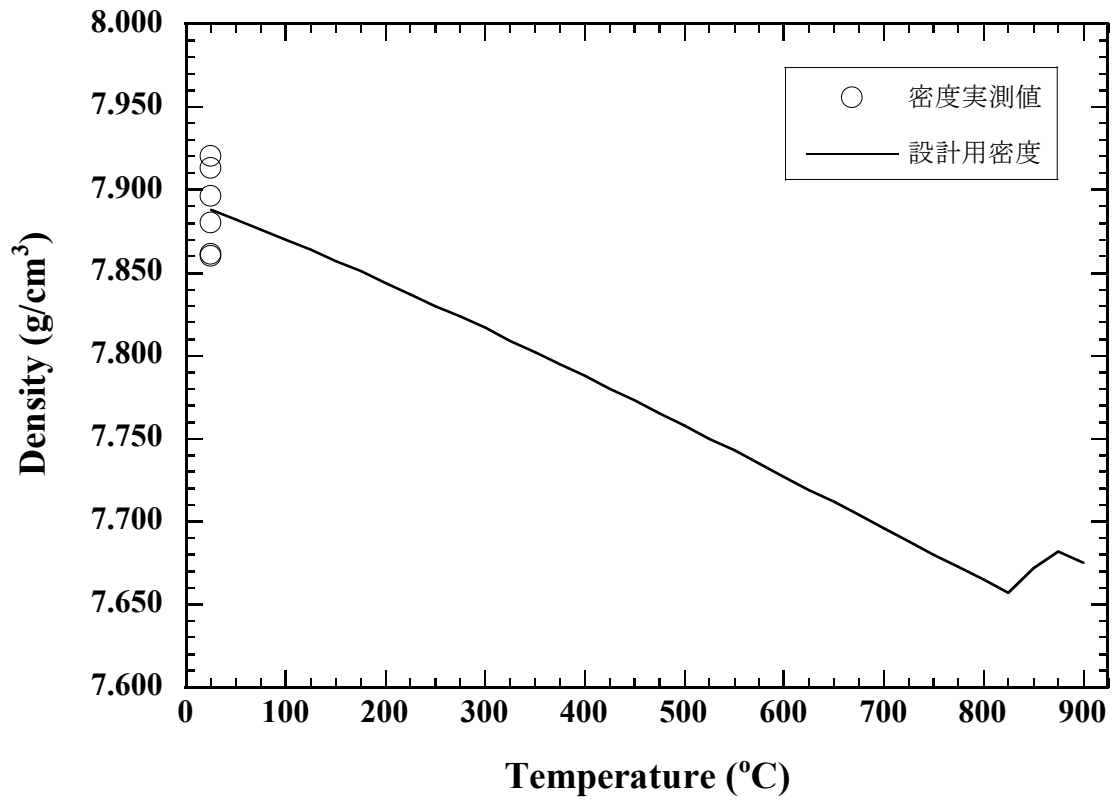


図 3.1-1 設計用密度と室温の実測値

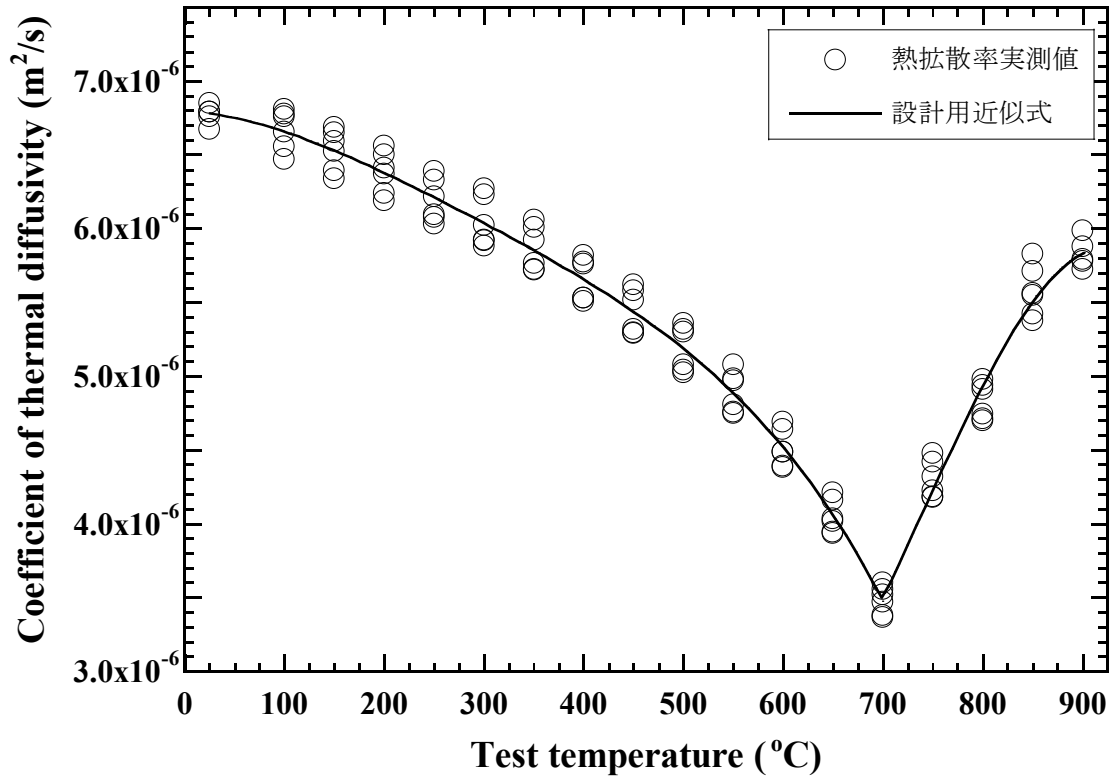


図 3.2-1 試験温度と熱拡散率の関係

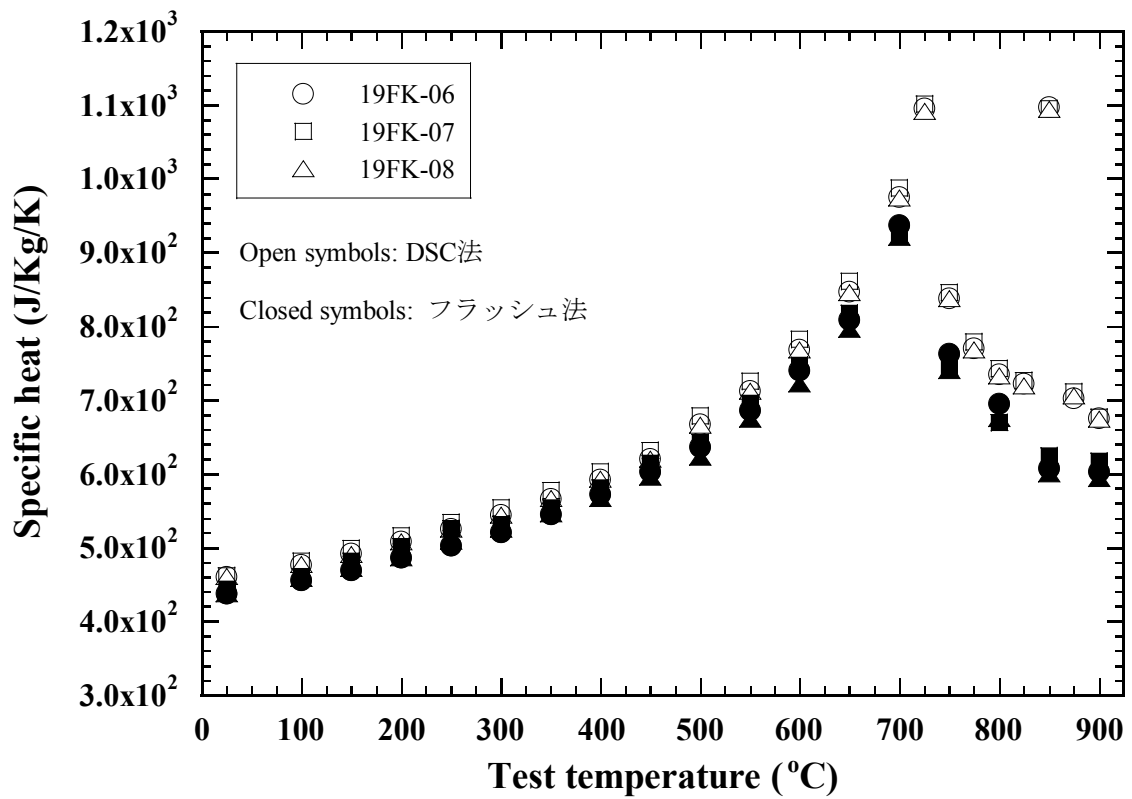


図 3.3-1 DSC 法とフラッシュ法による比熱容量測定結果比較

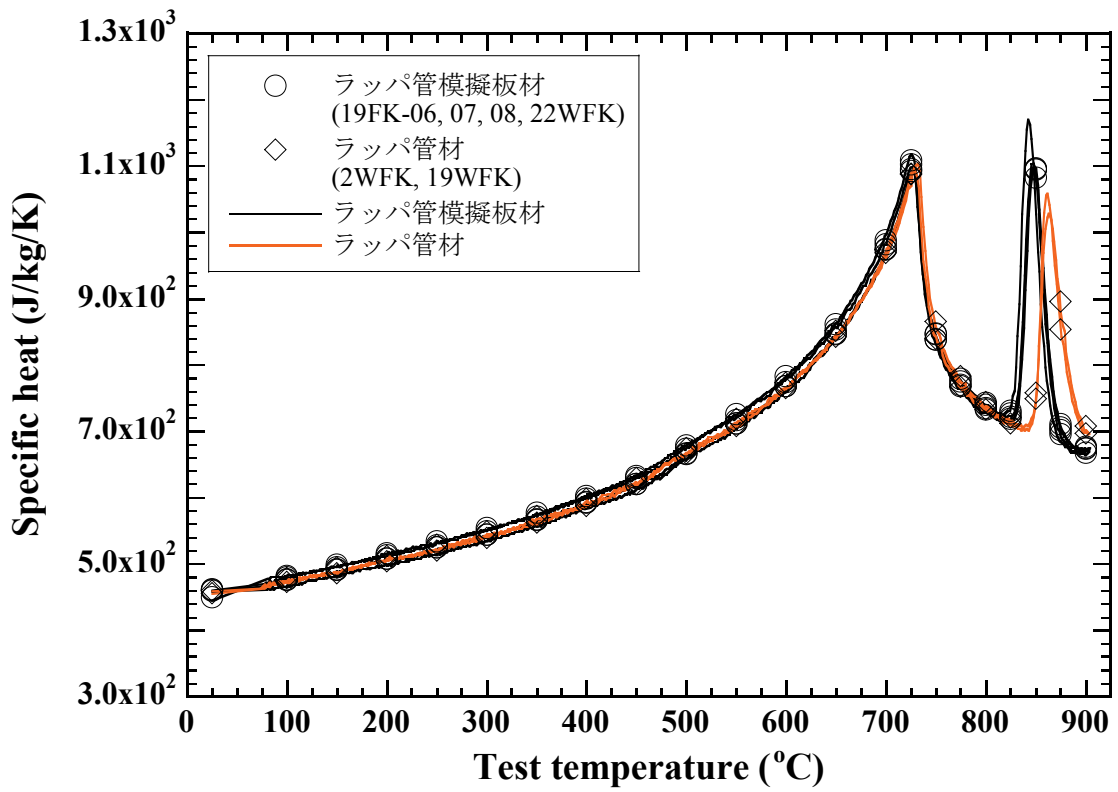


図 3.3-2 DSC 法による PNC-FMS ラップ管材の比熱容量測定結果

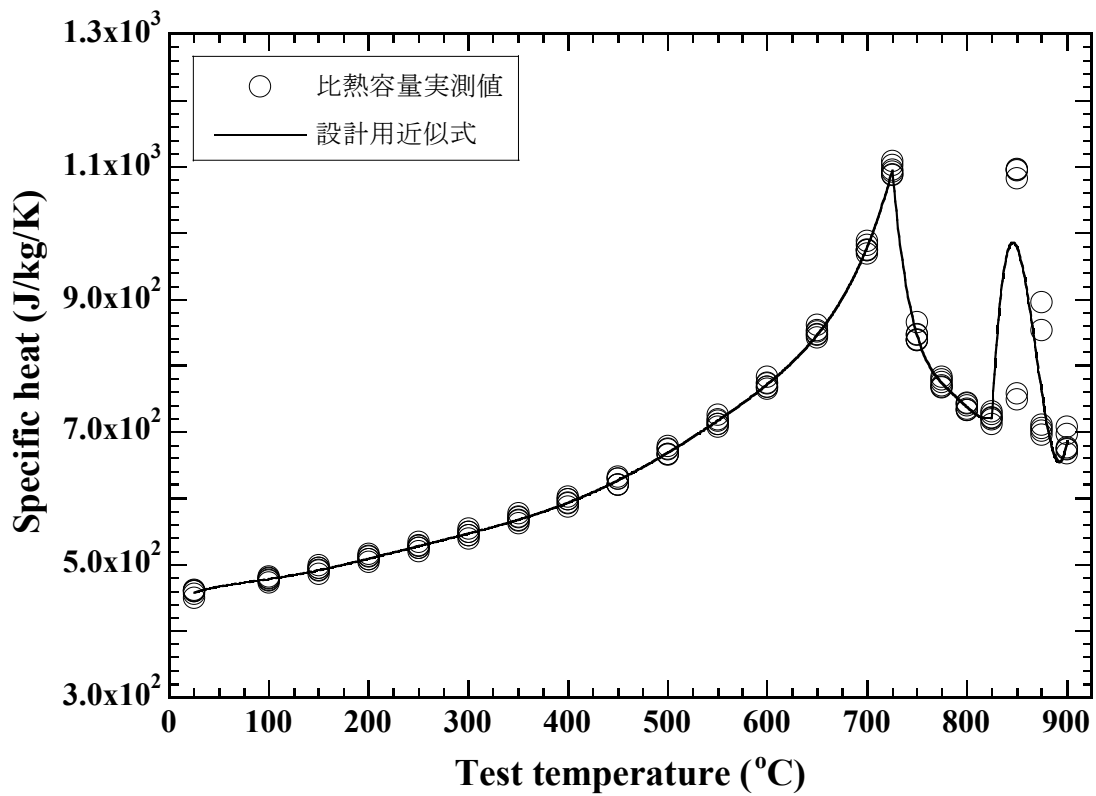


図 3.3-3 試験温度と比熱容量の関係

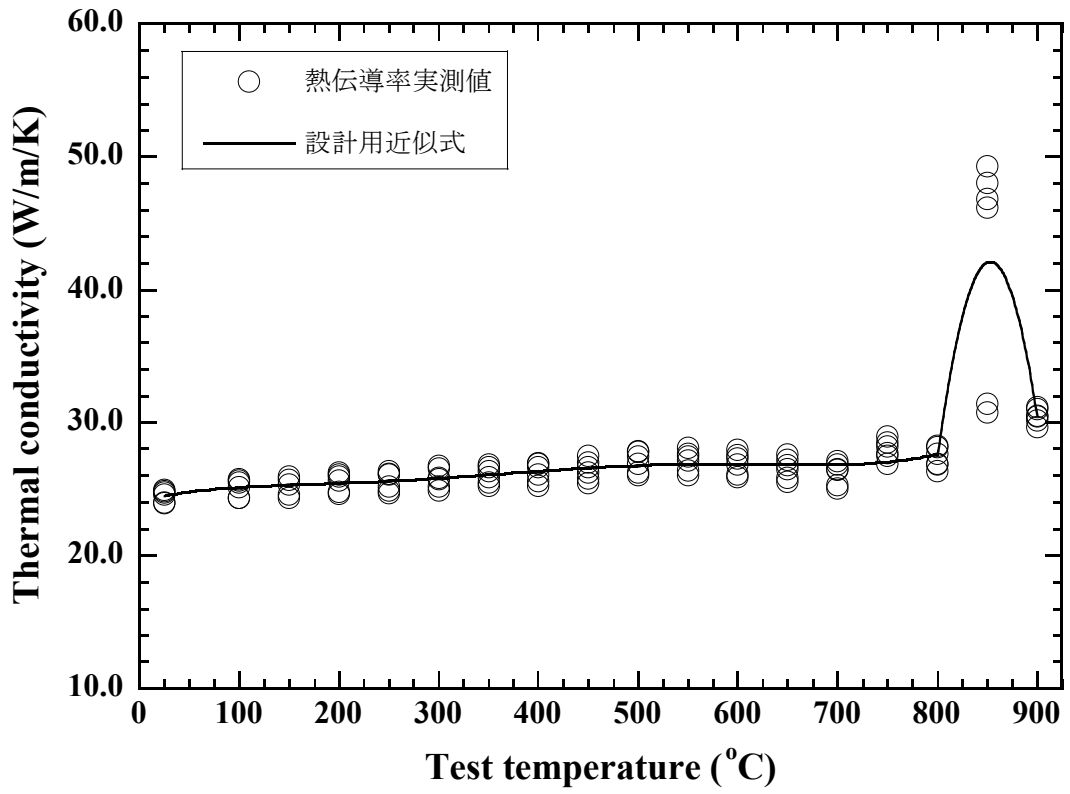


図 3.4-1 試験温度と熱伝導率の関係

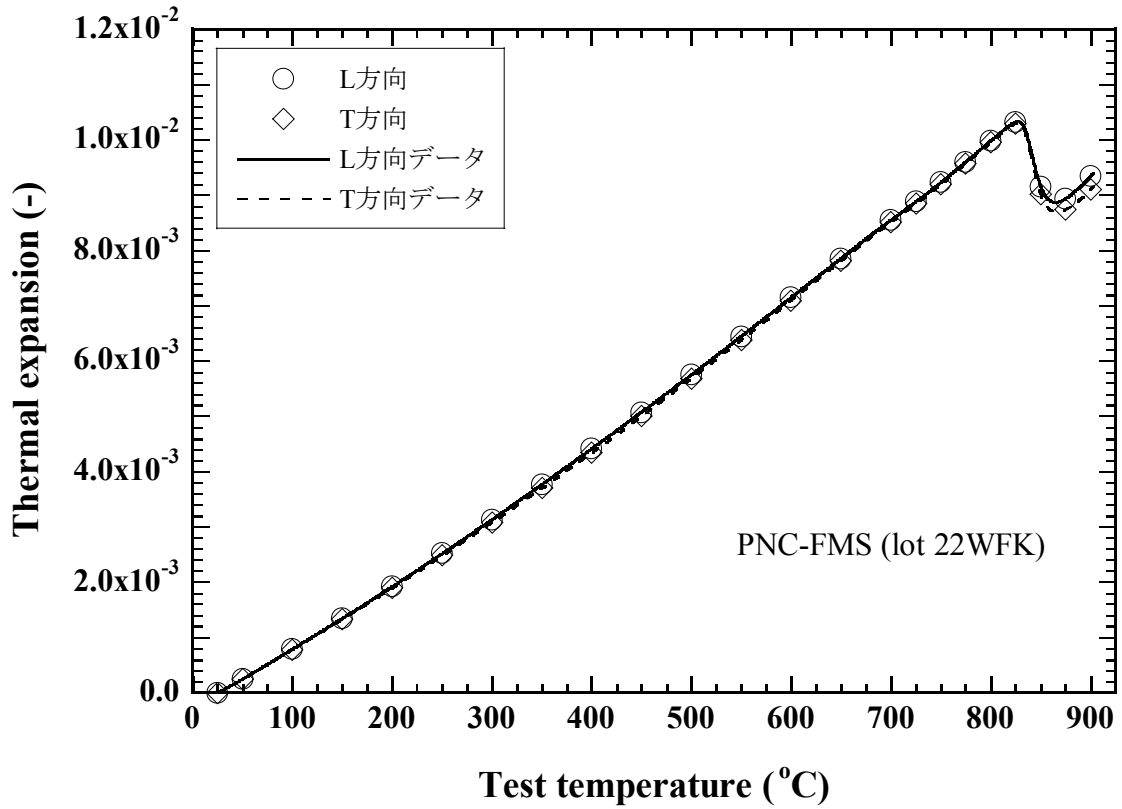


図 3.5-1 PNC-FMS ラップ管材の試験片採取方向による熱膨張の比較

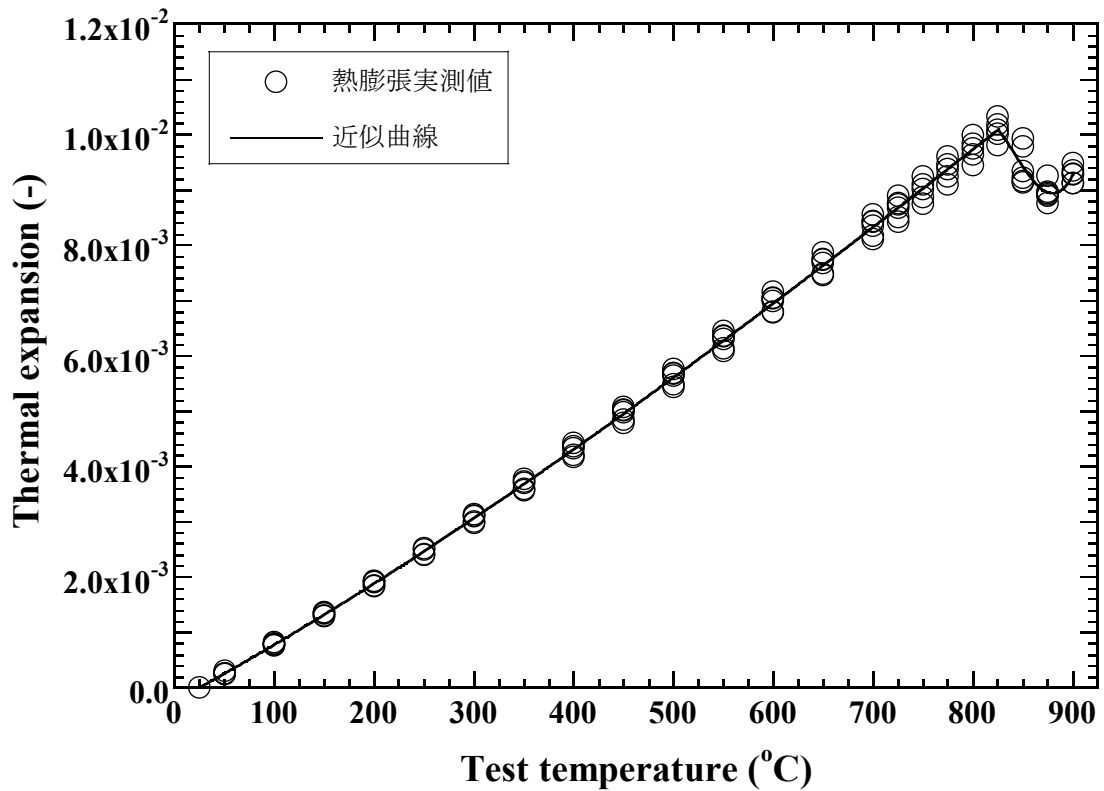


図 3.5-2 PNC-FMS ラップ管材の試験温度と熱膨張の関係

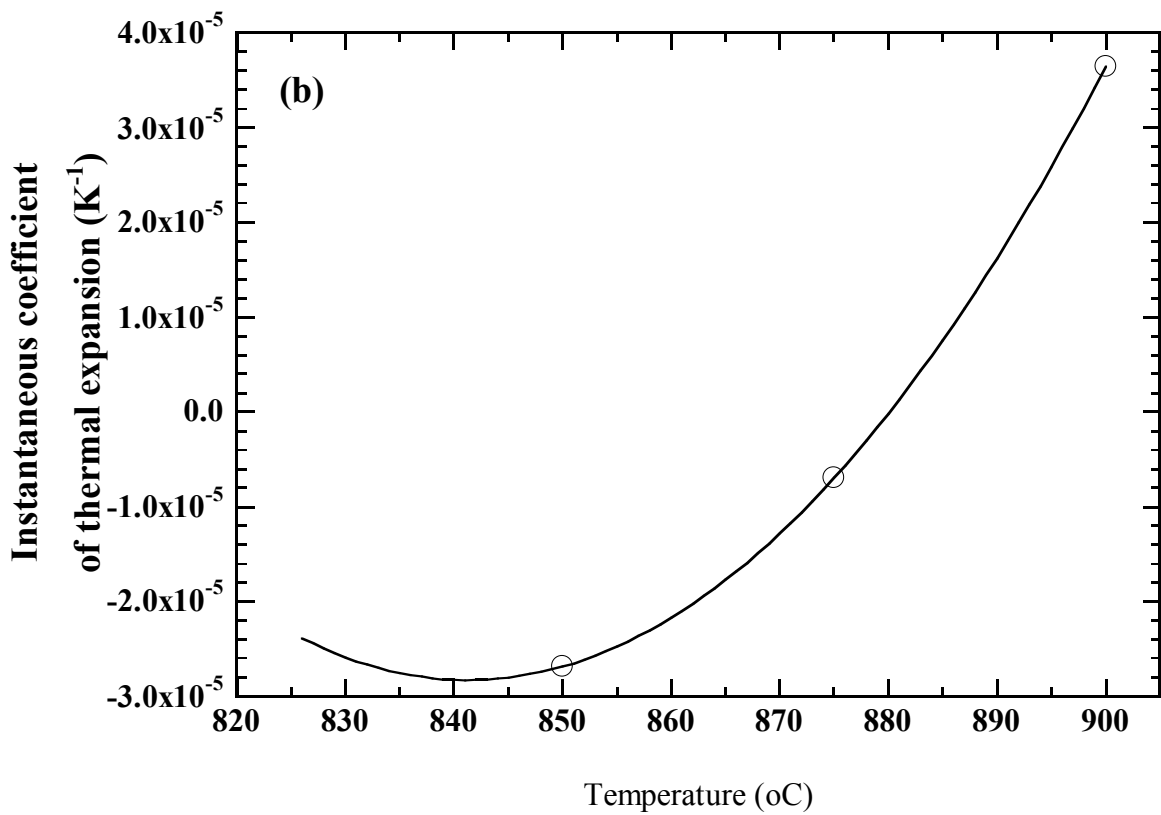
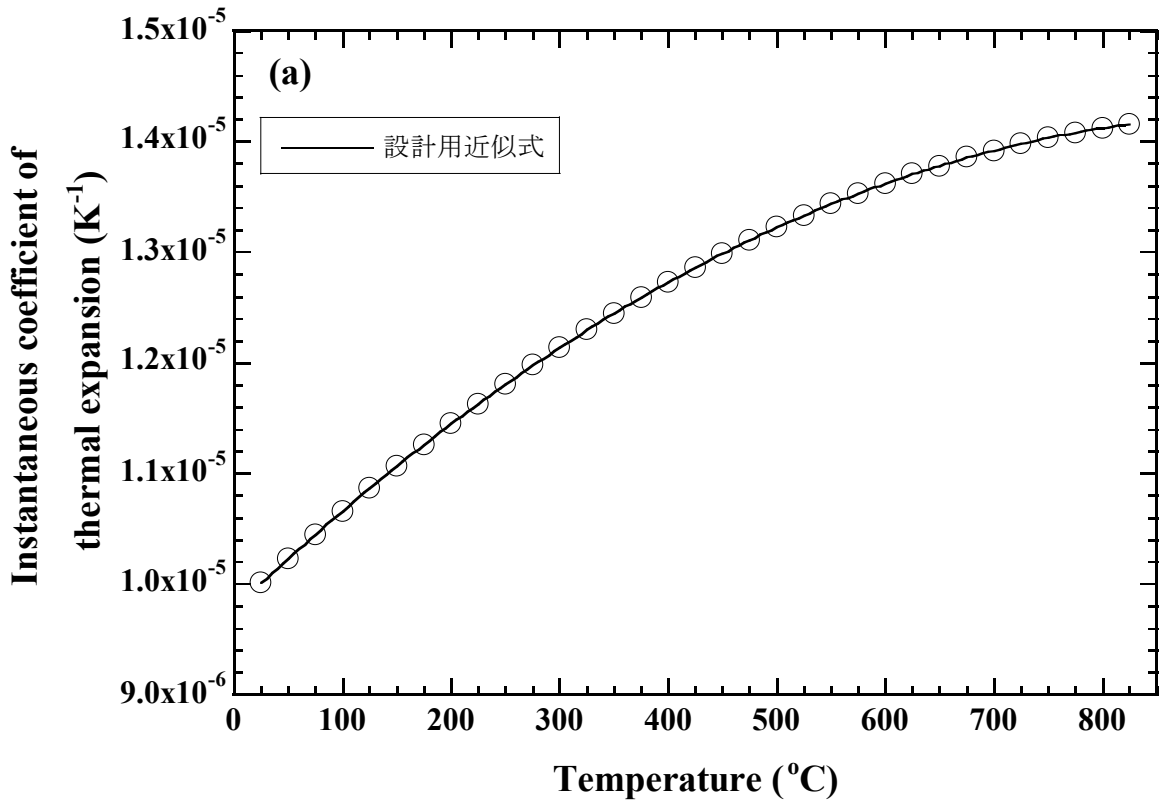


図 3.5-3 PNC-FMS ラップ管材の瞬時熱膨張係数
 温度範囲: (a) $RT \leq T \leq 825^{\circ}\text{C}$ 、(b) $825 < T \leq 900^{\circ}\text{C}$

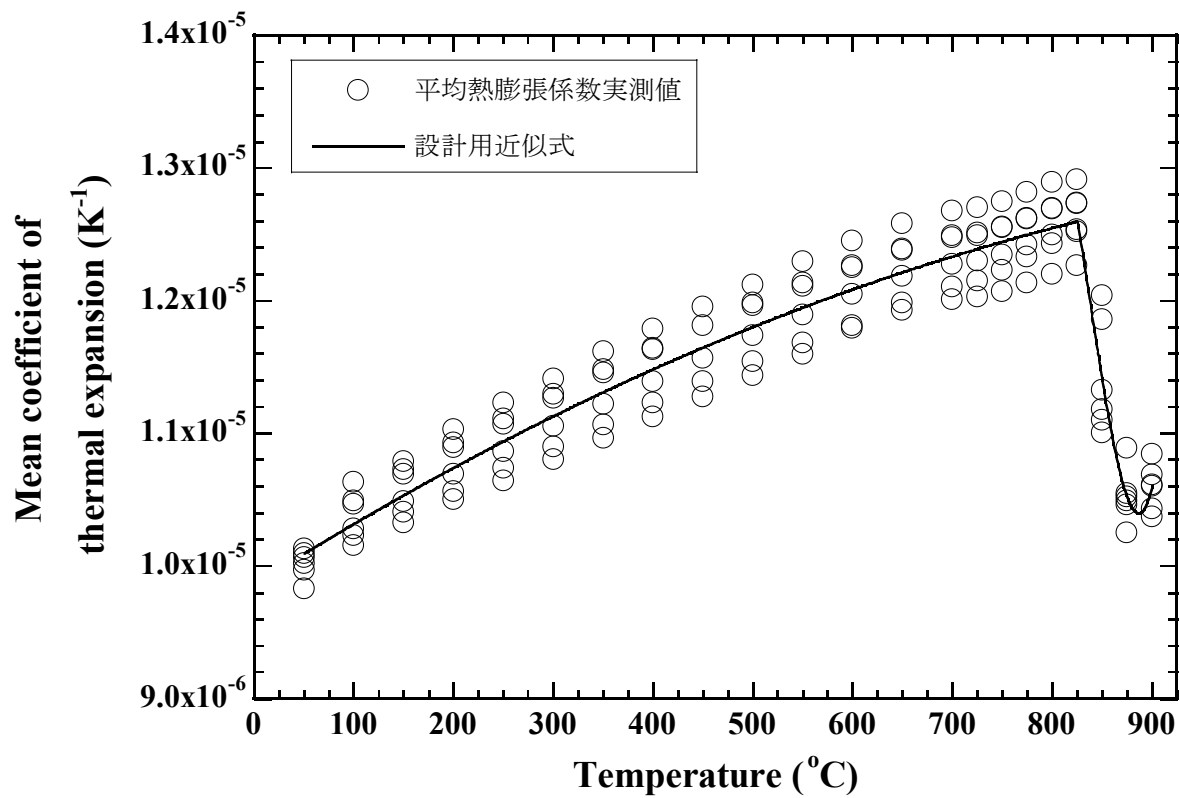


図 3.5-4 PNC-FMS ラップ管材の室温からの平均熱膨張係数

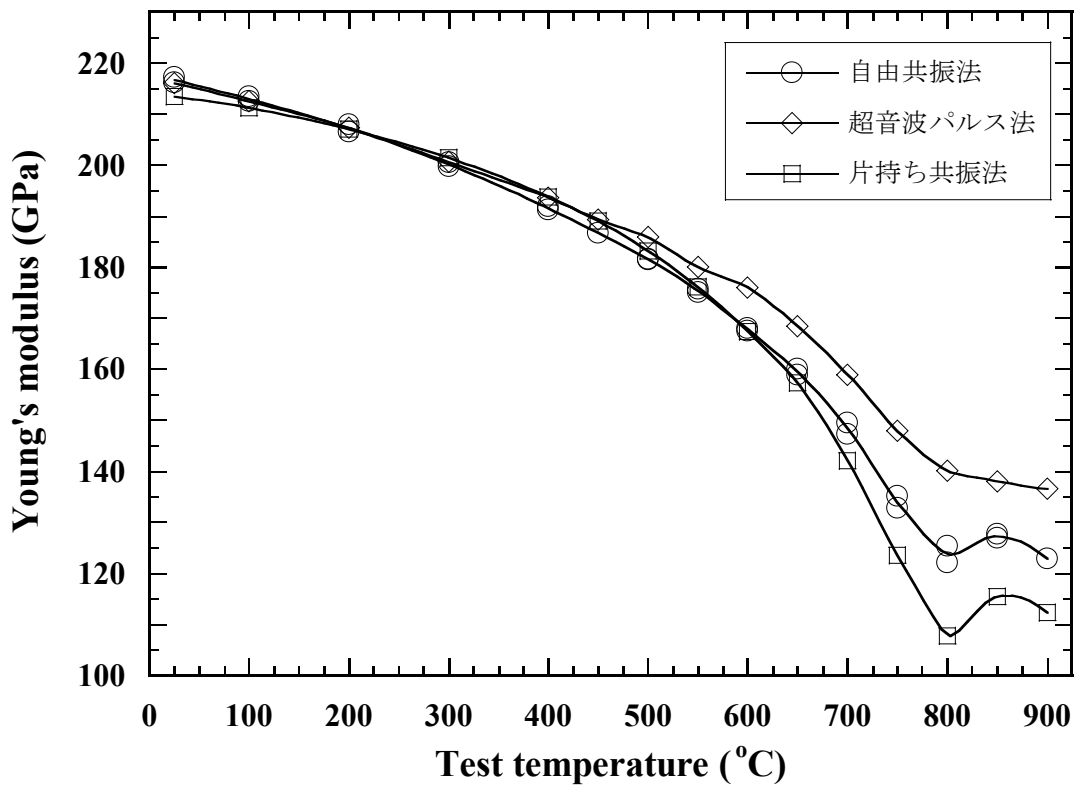


図 3.6-1 PNC-FMS ラップ管材(lot 22WFK)の各種試験方法による縦弾性係数の比較

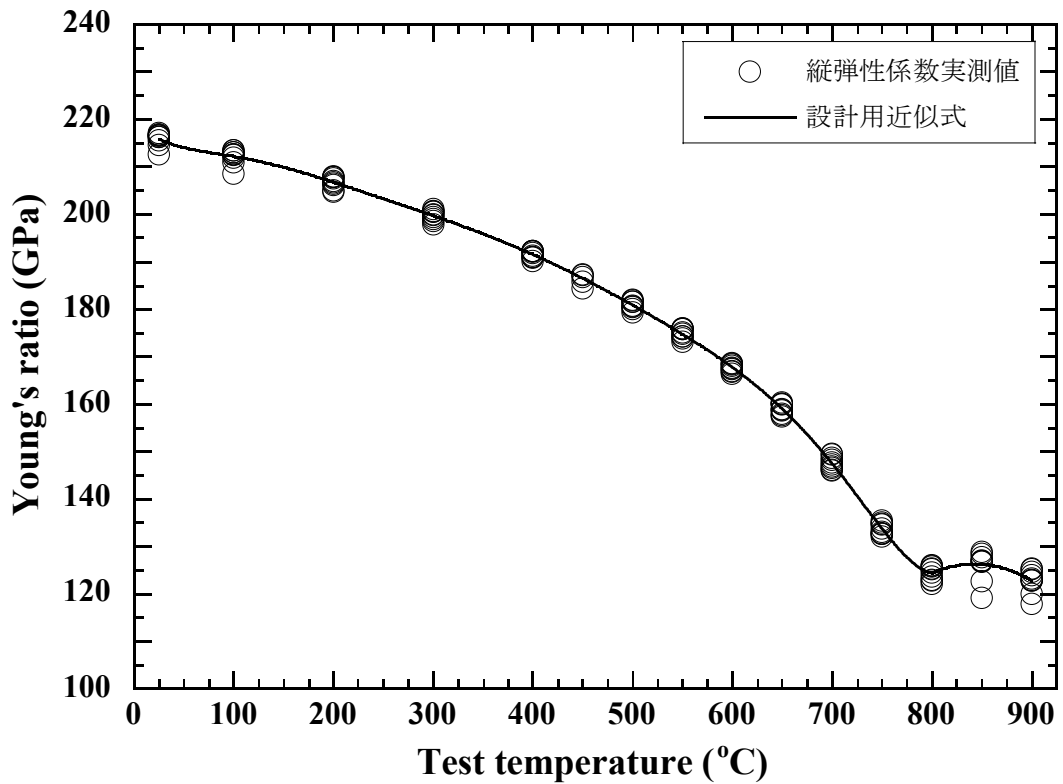


図 3.6-2 PNC-FMS ラップ管材の試験温度と縦弾性係数の関係

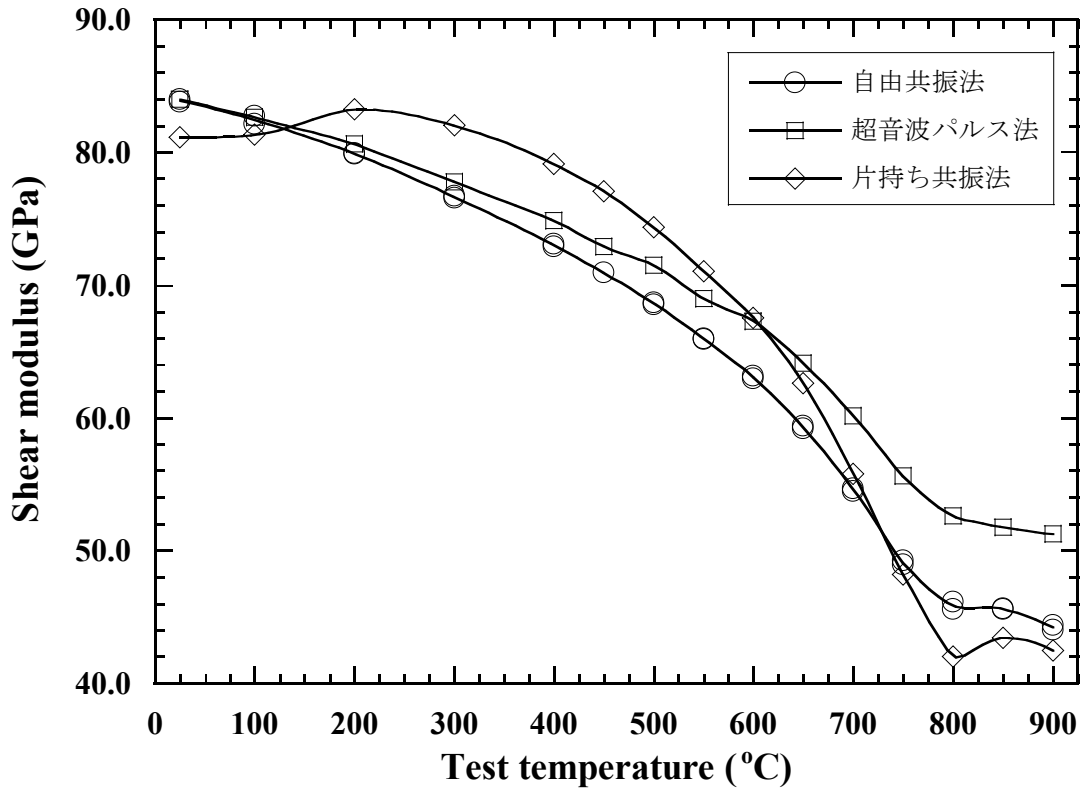


図 3.7-1 PNC-FMS ラップ管材(lot 22WFK)の各種試験方法による剛性率の比較

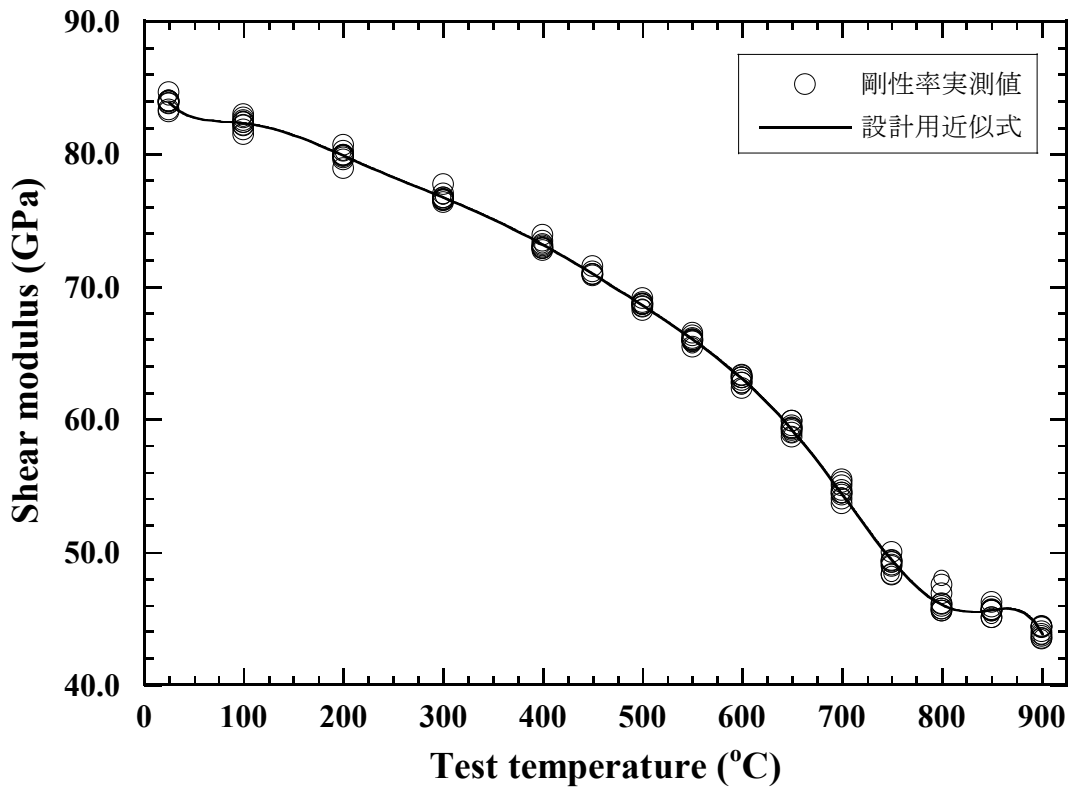


図 3.7-2 PNC-FMS ラップ管材の試験温度と剛性率の関係

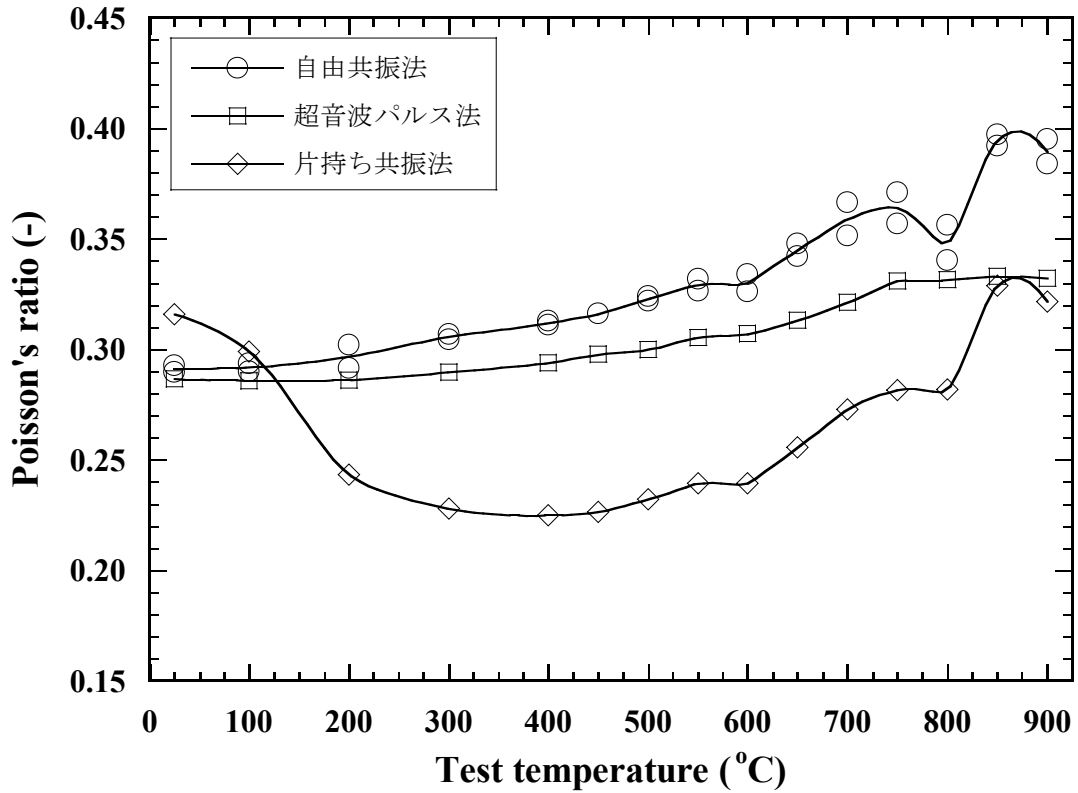


図 3.8-1 PNC-FMS ラップ管材(lot 22WFK)の各種試験方法によるポアソン比の比較

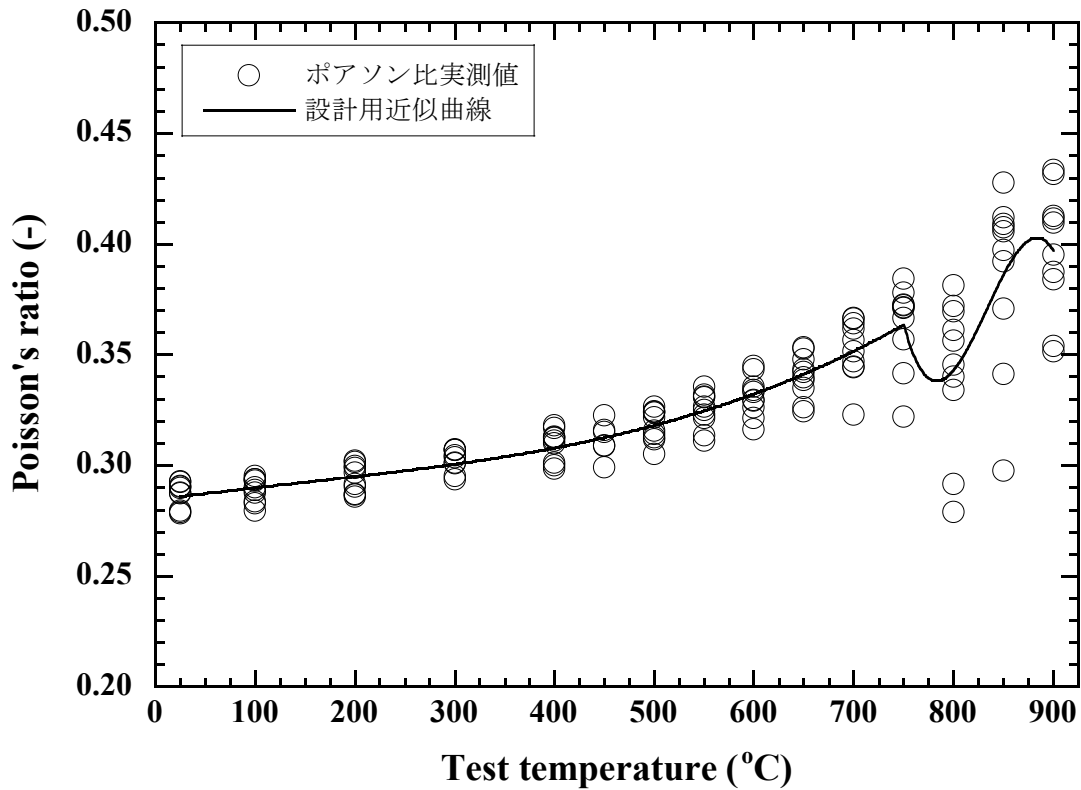


図 3.8-2 PNC-FMS ラップ管材の試験温度とポアソン比の関係

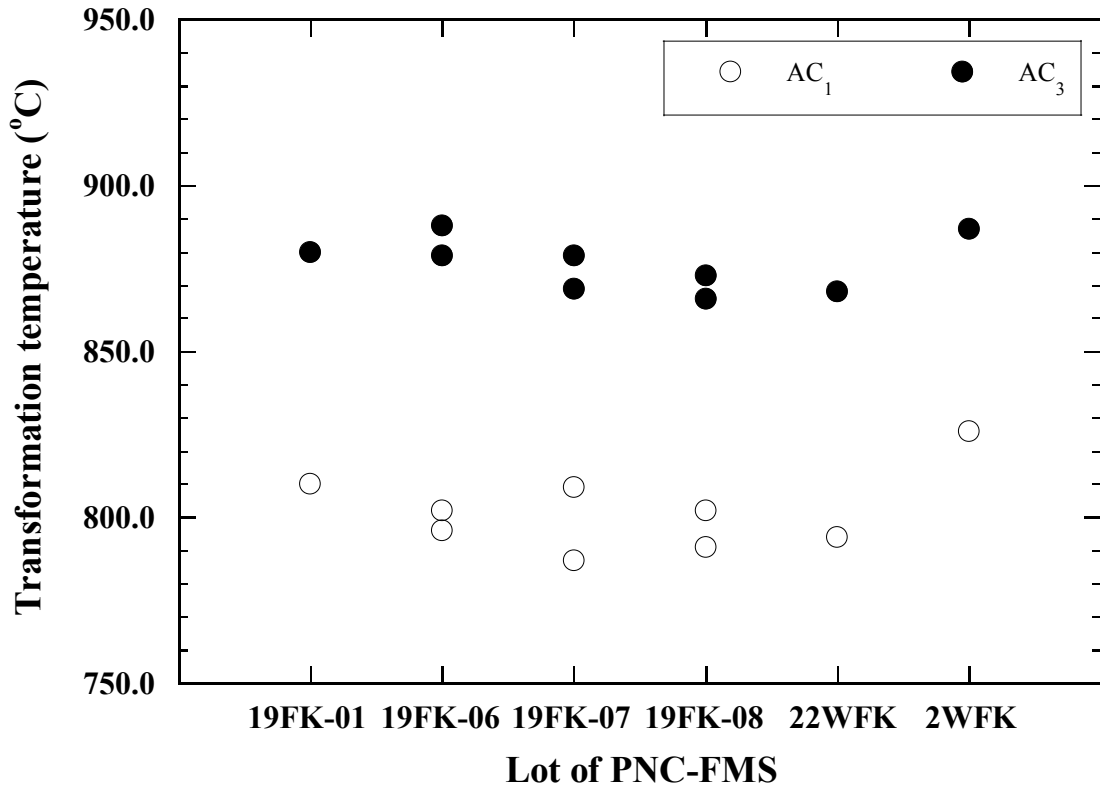


図 3.9-1 PNC-FMS ラップ管材の変態点実測値

付録 1. 設計評価用物性式一覧

(密度)

【RT ≤ T ≤ 900°C】

$$\rho_T = \frac{\rho_{RT}}{1+3\bar{\alpha}(T-25)}$$

(熱拡散率)

【RT ≤ T ≤ 700°C】

$$\alpha = 6.79435 \times 10^{-6} - 1.97682 \times 10^{-10}T - 1.43369 \times 10^{-11}T^2 + 3.00799 \times 10^{-14}T^3 \\ - 2.69502 \times 10^{-17}T^4$$

【700°C < T ≤ 900°C】

$$\alpha = 5.01317 \times 10^{-5} - 2.17233 \times 10^{-7}T + 3.14866 \times 10^{-10}T^2 - 1.42429 \times 10^{-13}T^3$$

(比熱容量)

【RT ≤ T ≤ 725°C】

$$Cp = 4.38081 \times 10^2 + 1.06249 \times 10^0T - 1.37440 \times 10^{-2}T^2 + 1.06900 \times 10^{-4}T^3 \\ - 4.22319 \times 10^{-7}T^4 + 8.92710 \times 10^{-10}T^5 - 9.53068 \times 10^{-13}T^6 + 4.05042 \times 10^{-16}T^7$$

【725°C < T ≤ 825°C】

$$Cp = 5.35417 \times 10^6 - 2.70848 \times 10^4T + 5.13923 \times 10^1T^2 - 4.33424 \times 10^{-2}T^3 \\ + 1.37076 \times 10^{-5}T^4$$

【825°C < T ≤ 900°C】

$$Cp = -4.24446 \times 10^6 + 1.46731 \times 10^4T - 1.68929 \times 10^1T^2 + 6.47822 \times 10^{-3}T^3$$

(熱伝導率)

【RT ≤ T ≤ 800°C】

$$\lambda = 2.40198 \times 10^1 + 2.09603 \times 10^{-2}T - 1.34876 \times 10^{-4}T^2 + 4.48044 \times 10^{-7}T^3 \\ - 6.41997 \times 10^{-10}T^4 + 3.25790 \times 10^{-13}T^5$$

【800°C < T ≤ 900°C】

$$\lambda = -3.72098 \times 10^3 + 8.82200T - 5.17070 \times 10^{-3}T^2$$

(瞬時熱膨張係数)

【RT ≤ T ≤ 825°C】

$$\bar{\alpha}_{in,T} = 9.77866 \times 10^{-6} + 9.32665 \times 10^{-9}T - 4.86745 \times 10^{-12}T^2$$

【825°C < T ≤ 900°C】

$$\bar{\alpha}_{in,T} = 1.32437 \times 10^{-2} - 3.15512 \times 10^{-5}T + 1.87516 \times 10^{-8}T^2$$

(平均熱膨張係数)

【RT ≤ T ≤ 825°C】

$$\bar{\alpha}_{sp} = 9.86131 \times 10^{-6} + 4.76006 \times 10^{-9}T - 1.75302 \times 10^{-12}T^2$$

【825°C < T ≤ 900°C】

$$\bar{\alpha}_{sp} = -3.97864 \times 10^{-3} + 1.43856 \times 10^{-5}T - 1.72267 \times 10^{-8}T^2 + 6.85290 \times 10^{-12}T^3$$

(縦弾性係数)

【RT ≤ T ≤ 800°C】

$$E = 2.19954 \times 10^2 - 2.31092 \times 10^{-1}T + 3.40984 \times 10^{-3}T^2 - 2.87338 \times 10^{-5}T^3 \\ + 1.28231 \times 10^{-7}T^4 - 3.27833 \times 10^{-10}T^5 + 4.79828 \times 10^{-13}T^6 - 3.73632 \times 10^{-16}T^7 \\ + 1.19759 \times 10^{-19}T^8$$

【800°C < T ≤ 900°C】

$$E = -6.34721 \times 10^2 + 1.80626T - 1.07171 \times 10^{-3}T^2$$

(剛性率)

【RT ≤ T ≤ 900°C】

$$G = 8.7526 \times 10^1 - 2.2725 \times 10^{-1}T + 4.1131 \times 10^{-3}T^2 - 3.8056 \times 10^{-5}T^3 \\ + 1.9319 \times 10^{-7}T^4 - 5.8346 \times 10^{-10}T^5 + 1.0730 \times 10^{-12}T^6 - 1.1768 \times 10^{-15}T^7 \\ + 7.0571 \times 10^{-19}T^8 - 1.7771 \times 10^{-22}T^9$$

(ポアソン比)

【RT ≤ T ≤ 750°C】

$$v = 2.84485 \times 10^{-1} + 6.11589 \times 10^{-5}T - 8.07574 \times 10^{-8}T^2 + 1.86486 \times 10^{-10}T^3$$

【750°C < T ≤ 900°C】

$$v = 7.34688 \times 10^1 - 2.65114 \times 10^{-1}T + 3.19329 \times 10^{-4}T^2 - 1.27744 \times 10^{-7}T^3$$

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光の度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の) 1	1
比透磁率 ^(b)	(数字の) 1	1

- (a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨ	Y	10 ¹	デ	d
10 ²¹	ゼ	Z	10 ²	センチ	c
10 ¹⁸	エク	E	10 ³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペ	P	10 ⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テ	T	10 ⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギ	G	10 ¹²	ピコ	p
10 ⁶	メ	M	10 ¹⁵	フェムト	f
10 ³	キ	k	10 ¹⁸	アト	a
10 ²	ヘ	h	10 ²¹	ゼプト	z
10 ¹	デ	da	10 ²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60min=3600s
日	d	1d=24h=86400s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1L=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベ	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エル	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フォトル	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1G cm ² =10 ⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≡ (10 ⁷ /4π)A m ⁻¹

- (c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「≡」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 f=1fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz	1	s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工事, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウエバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光強度	ルーメン	lm		cd sr ^(c)
放射線量の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酵素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

- (a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
(c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) についてはCIPM勧告2 (CF-2002)を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘り	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比熱容量, 比エンロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
比エンタールギ	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電表面積	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエンロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ³ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

