



多孔体に相変化物質を含浸させた複合蓄熱体の
温度特性に関する研究
－セラミックス及び金属多孔体を用いた場合－
(協力研究)

2001年11月

椎名 保顕・小牧 克哉*・田中 学*・菱田 誠*

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 津城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 津城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 2001

編集兼発行 日本原子力研究所

多孔体に相変化物質を含浸させた複合蓄熱体の温度特性に関する研究
— セラミックス及び金属多孔体を用いた場合 —
(協力研究)

日本原子力研究所大洗研究所核熱利用研究部
椎名 保顕・小牧 克哉*・田中 学*・菱田 誠*

(2001年10月12日受理)

高熱伝導率の多孔体に相変化物質を含浸させ、実効熱伝導率を向上させた潜熱蓄熱体により、熱伝達流体の温度変動を効果的に吸収することができる。これを用いると、高温ガス炉に接続された熱利用系の安全性を高めることができるのみならず、一般産業においても、一定温度の安定した熱源を作ることができると等、多方面に利用することができる。

多孔体にはセラミックスとしてジルコニア (ZrO_2 , 気孔率 45.3%)、金属としてニッケル・クロム (92.6%) 及びニッケル(95.3%)を用い、それらにパルミチン酸を含浸させた複合蓄熱体を作製し、温度変動実験及び数値解析を行うことにより、複合蓄熱体の空間的・時間的温度変動を調べた。その結果、セラミックスを用いた複合蓄熱体に対して、金属多孔体を用いた複合蓄熱体は、内部温度の均一性が高いこと、長時間相変化温度に保持されることが示された。この理由は、金属多孔体を用いた複合蓄熱体は、気孔率が非常に高いにもかかわらず実効熱伝導率が高くなること、高い気孔率のために多量の相変化物質を含浸できるためであると結論できる。数値解析結果は実験結果と比較的良好く一致した。さらに精度を上げるために、気孔率の高い複合蓄熱体の物理性評価の精度向上、相変化物質の融解・凝固特性の正確な把握が必要であり、高気孔率の場合には、自然対流も考慮する必要があることが示された。

これらから、セラミックス多孔体よりも、金属多孔体を用いた方が温度吸収に用いる潜熱蓄熱体として有効であることが明らかになった。

本報告書は千葉大学との協力研究の成果である。

大洗研究所 〒311-1394 茨城県東茨城郡大洗町成田町新堀 3607

*千葉大学工学部

Study on Thermal Characteristics of Composite Heat Storage Units Made by Impregnation of Phase Change Material into Porous Materials—For Cases of Porous Ceramics and Porous Metals—
(Cooperative Research)

Yasuaki SHIINA, Katsuya KOMAKI*, Gaku TANAKA* and Makoto HISHIDA*

Department of Advanced Nuclear Heat Technology
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received October 12, 2001)

Temperature changes in heat transfer fluid can be effectively reduced by a heat storage unit of phase change material(PCM) when effective thermal conductivity of the unit is improved by impregnating PCM into porous materials with high thermal conductivity. This technique can be applied to heat utilization system connected to High Temperature Gas Cooled Reactors to improve safety and also it can be applied to many industries such for supplying constant temperature heat source.

Composite heat storage units were made by impregnating palmitic acid into porous ceramics of ZrO₂ (porosity 45.3%) and porous metals of nickel-chrome(92.6%) and nickel(95.3%). Time-dependent and spatial temperature characteristics of the composite heat storage units were studied by performing temperature varying experiment and numerical simulation.

Results show that temperatures in the composite units are more uniform and temperature is kept at melting temperature for longer time during cooling for the composite heat storage units of porous metals than that of porous ceramics. These come from the reasons that effective thermal conductivity is higher for metal composite than for ZrO₂ composite and more amount of PCM is impregnated in the metal composite than in ZrO₂ composite

Results of numerical simulation agree relatively well with experiments. In order to improve the accuracy, precise effective thermal properties of the composites, precise phase change characteristics during melting and solidification and natural convection analysis for high porosity heat storage unit would be required.

It can be concluded that metal composite is more effective than ceramic composite for the temperature reducing heat storage unit.

Keywords: Heat Storage, Phase Change Material, HTGR, Heat Utilization System, Temperature Change, Porous Material, Ceramics, Porous Metal

This report is the result of cooperative research with Chiba university

*Chiba University

目次

1.はじめに.....	1
2.実験.....	4
2. 1 相変化物質及び多孔体材料の選定	4
2. 2 複合蓄熱体の製作	6
2. 3 相変化物質の含浸率の測定	6
2. 4 実験装置	8
2. 5 実験方法	8
3.数値解析.....	11
3. 1 基礎方程式	11
3. 2 初期条件及び境界条件	12
4.結果及び考察.....	14
4. 1 昇温による定常実験	14
4. 2 温度を周期的に変動させた温度変動実験	15
4. 3 考察.....	18
5.結論.....	20
参考文献	21

Contents

1. Introduction	1
2. Experiment	4
2.1 Selection of Phase Change Material and Porous Materials	4
2.2 Production of Composite Heat Storage Unit	6
2.3 Measurement of PCM Absorbed in Porous Material	6
2.4 Experimental Apparatus	8
2.5 Experimental Method	8
3. Numerical Analysis	11
3.1 Basic Equation	11
3.2 Initial and Boundary Conditions	12
4. Results and Discussion	14
4.1 Heating Experiment at Constant Temperature	14
4.2 Temperature Varying Experiment	15
4.3 Discussion	18
5. Conclusions	20
References	21

1. はじめに

現在のほとんどの工業プロセス、化学プロセスは、熱源からの熱の供給を必要とする。このような工業プロセス、化学プロセスでは、熱源の燃料供給量の変動等により温度、圧力、熱量の変動が生じる。これらの変動はプロセス側には、化学反応速度の変動や温度、圧力、流等の変動等を引き起こし、製品の不均一や、性能不良等を引き起こす原因となる可能性がある。また、プロセス側に生じるこれらの変動は、プロセスを安全に運転するには有害で、極力小さく抑える必要がある。そこで、熱源からプロセスに直接熱を供給するのではなく、固液相変化蓄熱を利用して一旦潜熱蓄熱器に熱を貯めた後、その熱をプロセスに供給すると、温度変動の小さい、ほぼ一定温度の熱を供給することができる。

この技術の重要な応用例として高温ガス炉の熱を利用する熱利用系がある。高温ガス炉は約900°Cの熱を、ガスタービン発電や化学プロセスに供給して、発電や水素製造等に利用しようとするものである。熱を熱利用系の化学プロセスに利用する場合、原料供給の不均一等により、熱利用系には温度、圧力、流量等の変動が生じることが考えられる。これらの変動は、結局熱的変動として熱交換器を経て原子炉1次系に伝えられて、変動が大きい場合には異常変動として検知され、原子炉停止を引き起こすことも考えられるので、原子炉を含めた熱利用系の安全性を高め、長期の安定な運転を行うにはこれらの熱負荷等の変動を低減化することが不可欠となる。

このために潜熱蓄熱技術を用いると、受動的に負荷変動を吸収することができるのみならず、原子炉の緊急停止時等の緊急時には、蓄熱器（実際は熱交換器である）が貯蔵した熱を一定時間補助熱源として使用することが可能になり、熱利用系機器の熱衝撃を防止することが可能となる。

また、この高温蓄熱技術は、夜間電力を貯蔵し、それを昼間の発電に回すために用いることが可能になるなど、エネルギーの有効利用にも役立てることができる。

本研究で用いるのは潜熱蓄熱方式であるが、蓄熱方式には大別して、顯熱蓄熱、潜熱蓄熱、化学蓄熱の3種類がある⁽¹⁾

顯熱蓄熱は、蓄熱材料の熱容量を利用して蓄熱する方式である。蓄熱量 Q は、蓄熱材料の質量 M 、比熱 C_p 、熱貯蔵前後の蓄熱材の温度差 ΔT によって次式で表わされる。

$$Q = M \int_{\Delta T} C_p dT \quad (1.1)$$

この式からわかるように、小さい温度差で大量の熱を貯蔵するためには、蓄熱材としては、比熱及び質量が大きく、広い温度条件で安定なものが望ましい。

潜熱蓄熱は、蓄熱材料の相変化潜熱を利用して蓄熱する方式である。気液相変化も考えられるが、体積変化が大きすぎるため、通常は固液相変化が用いられる。温度変化の小さい系では、顯熱蓄熱に比べ、潜熱蓄熱のほうがはるかにコンパクトで、膨大な熱量を貯蔵することが可能である。また、蓄熱・放熱時過程は一定温度で行われることも特徴である。このことは逆に、蓄熱及び放熱をほぼ同じ温度で行うことができることを意味する。相変化温度は物性値であるため、材料を選択すれば定まってしまい、蓄熱温度を完全に自由に選択することはできない。しかし、2成分または3成分の蓄熱材を混合することにより、ほぼ任意の相変化温度を持つ蓄熱材を選択することが可能となってきている。

化学蓄熱は、 $A + B \leftrightarrow C$ という化学反応の際の吸熱・発熱反応を利用して蓄熱する方式で、蓄熱密度を非常に大きくすることができます。熱の貯蔵は化学反応で生じた物質を貯蔵することで行われるため、顯熱方式、潜熱方式の場合と異なり、熱漏れ等の心配はない。また、熱の輸送もパイプライン等で物質を輸送することにより容易に行われる。しかし、熱の貯蔵、放出には化学反応装置を必要とすること、化学蓄熱では固体と気体という組み合わせが多いため、化学反応装置の伝熱特性が悪いこと等の問題点がある。また、蓄熱時と放熱時の特性の違いが生じ易く、蓄熱・放熱の繰り返しによる蓄熱材の劣化も生じることがある。

本研究では、上記 3 つの蓄熱方式のうち、一定温度で熱の貯蔵、放熱が可能な潜熱蓄熱方式に着目した。

従来のシェルアンドチューブ方式の熱交換器を用いた潜熱蓄熱システムを Fig.1.1 に示す。この場合、蓄熱過程では、伝熱面近傍の蓄熱媒体は融解して液相となるため、流れが生じ、自然対流により熱移動が行われる。一方、放熱過程においては、図に示すように伝熱面に固相が析出し、伝熱面からの熱の移動が固体の熱伝導のみになって、自然対流を期待できる融解過程（熱貯蔵過程）の数分の 1 の熱伝達率になる。また、蓄熱媒体は通常、熱伝導率が非常に低く、特に、高温の蓄熱媒体である溶融塩は水の数分の 1 の熱伝導率となるため、伝熱面に固相が析出する放熱過程では、熱伝達率は非常に小さくなる。潜熱蓄熱の実用化のためには、伝熱性能の向上…特に放熱過程の伝熱性能の向上…が必要である。この問題を解決する方法としては、伝熱面面積を増やすために伝熱フィンをつける方法や、伝熱面をひっかいて固相を強制的に除去する方法等が提案されているが、決定的な手法とはいえない。

この問題を解決する新しい方法として、熱伝導率の高い多孔性セラミックスや多孔体金属に相変化物質（蓄熱材）を含浸させた蓄熱体（以後複合蓄熱体と呼ぶ）が有効であると考えられる。これは、相変化物質を熱伝導率の高いセラミックスや金属の空隙部に含浸させることにより、セラミックスまたは金属を通しての熱移動を期待することが可能となり、その結果、実効熱伝導率が高くなつて伝熱性能が向上するためである。この複合蓄熱体を用いた潜熱蓄熱システムの概念を Fig.1.2 に示す。

本研究では、上記複合蓄熱体を温度変動吸収用蓄熱体として用いる場合に必要な基礎的データを得ることを目的とし、熱源の供給熱量変動を模擬した実験装置を製作して、伝熱面の温度を変化させたときに、セラミックス及び金属多孔体に相変化物質を含浸させた複合蓄熱体の内部での温度分布・温度変動を調べた。また、数値計算を行い実験結果との比較検討を行った。これにより、これら蓄熱体の温度変動特性を調べ、温度変動吸収体として用いる場合の有効性を評価した。

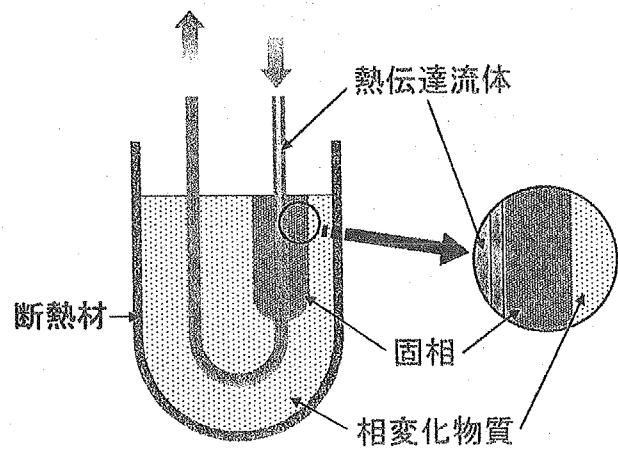


Fig.1.1 従来の潜熱蓄熱

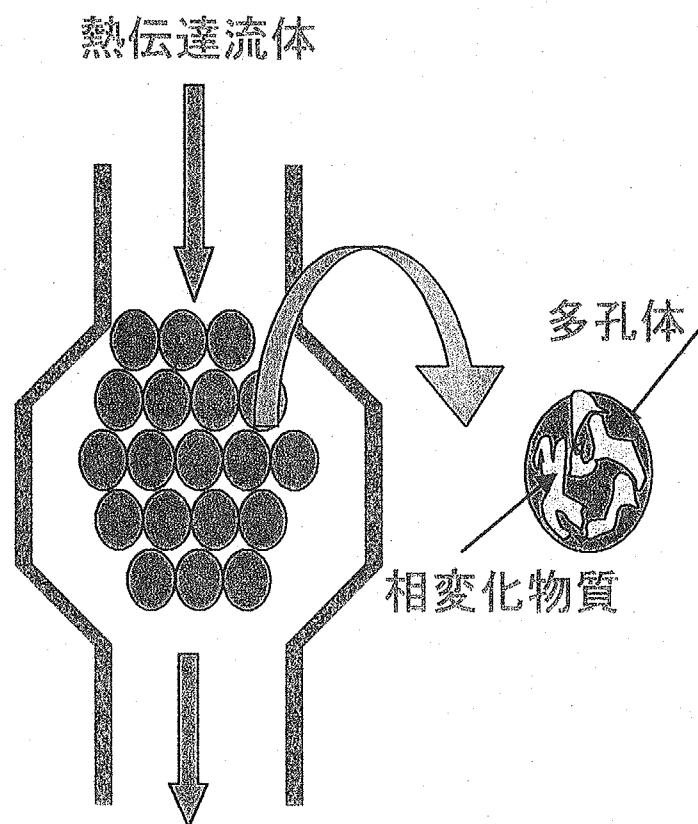


Fig.1.2 相変化物質/多孔体による潜熱蓄熱

2. 実験

2.1 相変化物質及び多孔体材料の選定

相変化物質は実験装置の性能を考慮し、パルミチン酸 ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$) を選んだ。パルミチン酸の物性値を Table 2.1 に示す。

パルミチン酸を含浸させる多孔体セラミックス及び多孔体金属は入手のしやすさ、気孔率の大きさを考慮し、セラミックスはジルコニア (ZrO_2) を、多孔体金属は発泡金属のニッケルとニッケル・クロムの 3 種類を選定した。それぞれの物性値及び気孔率を Table 2.1 に示す。ここで、ニッケル・クロム多孔体はニッケルとクロムの骨材を用いて製作され、合金化されたものではないが、発泡化の過程で高温に保持されるため、一部が合金化した可能性を考慮してニクロムの物性値も併せて載せてある。但し、表中のニクロムの成分比と、本ニッケル・クロムの成分比は異なるため、ニッケル・クロムが合金化した場合の実際の熱伝導率は不明である。また、多孔体形状を Fig.2.1 に示す。多孔体は図に示すように中空円筒形状である。多孔体多孔体セラミックス及び多孔体金属の気孔及び骨材の寸法は以下のとおりである。

ジルコニア：計測できず。気孔径約数ミクロンと思われる。

ニッケル・クロム：気孔直径約 1~2mm、骨材太さ径約 0.8mm,

ニッケル：気孔直径約 0.2~0.5mm、骨材太さ径約 0.2mm.

Table 2.1 実験試料の物性値⁽²⁾

	熱伝導率 (W/mK)	密度 (kg/m ³)	比熱 (J/gK)	気孔率 (%)	融点 (°C)	潜熱 (J/g)
パルミチン酸	0.165 (70°C)	852.7	1.80 (20°C) 2.73 (65°C)	—	58~62	187
ジルコニア	2	6000	0.5	45.3	—	—
ニッケル	121	8945	0.329	95.3	—	—
ニッケル・クロム (70%Ni-30%Cr)	123	8424	0.324	92.6	—	—
ニクロム(90%Ni-10%Cr)	17.4	8670	0.444			

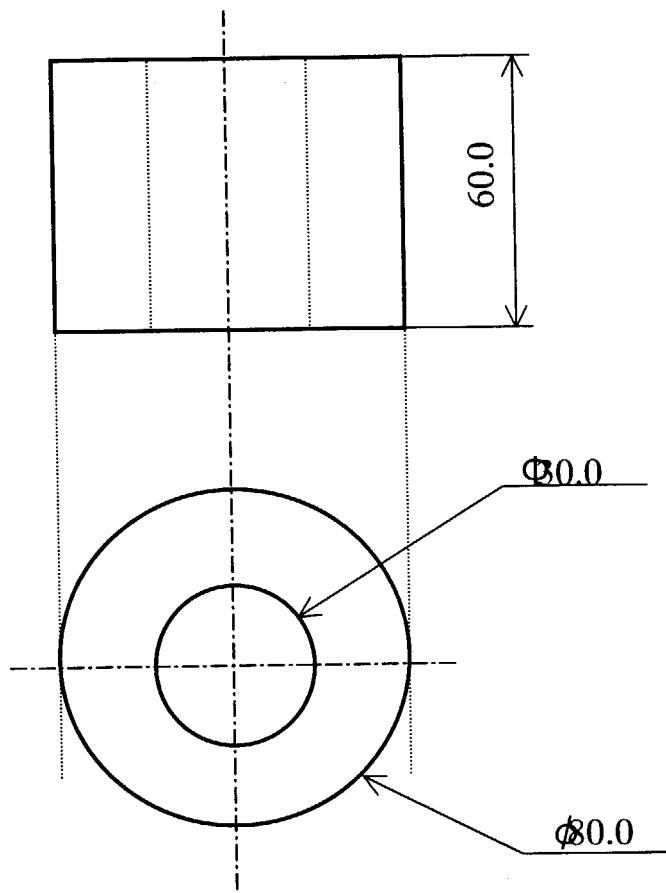


Fig.2.1 多孔質体の形状

2.2 複合蓄熱体の製作

パルミチン酸を多孔質体に含浸させることにより複合蓄熱体を製作した。複合蓄熱体の製作には、電気炉（デンケン、KDF-S 90、使用可能温度 100°C～1050°C）と、大型のるつぼを用いた。製作における概略の手順は以下の通りである。

- 1) パルミチン酸を入れたるつぼを電気炉に入れ、高温雰囲気中でパルミチン酸を溶融させる。
- 2) 溶融したパルミチン酸の中に多孔質体を浸す。
- 3) パルミチン酸が多孔体の気孔中に浸透させるため、所定時間浸漬させた後、多孔質体をパルミチン酸より取り出す。

2.3 相変化物質の含浸率の測定

パルミチン酸がジルコニア気孔中にどの程度浸透するかを調べるために、パルミチン酸が気孔中に浸透している割合を表す充填率の測定をするとともに、ジルコニア気孔中に十分に浸透させるための製作方法の検討を行った。充填率 F は、ジルコニアに浸透したパルミチン酸の体積 V_p とジルコニアの気孔体積 V_z より次式であらわされる。

$$F(\%) = \frac{V_p}{V_z} \times 100 \quad (2-1)$$

予備実験で用いたジルコニアの寸法及び形状を Fig.2.2 に示す。このジルコニアの気孔率は Fig.2.1 に示すものより低く、約 29% である。これに溶融したパルミチン酸を含浸させる。そのときの放置時間と雰囲気温度を変え、どの程度充填率が変化するかを調べた。結果を Fig.2.3 に示す。この結果より予備実験で用いたジルコニアと本実験で用いるジルコニアの大きさを考慮し、本実験で用いるジルコニアはパルミチン酸内に 100°C で 4 時間以上漬け込ませれば十分な充填率が得られると判断した。実際、90% 近い充填率を得る事ができた。

金属多孔体については、気孔の平均寸法がジルコニアよりも大きいので十分含浸するものと考えられる。

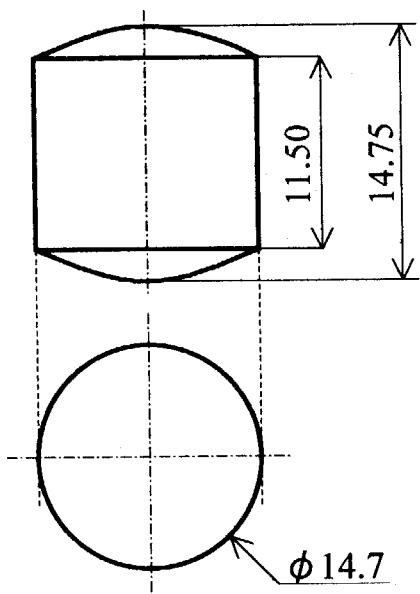


Fig.2.2 予備実験用のジルコニアの形状

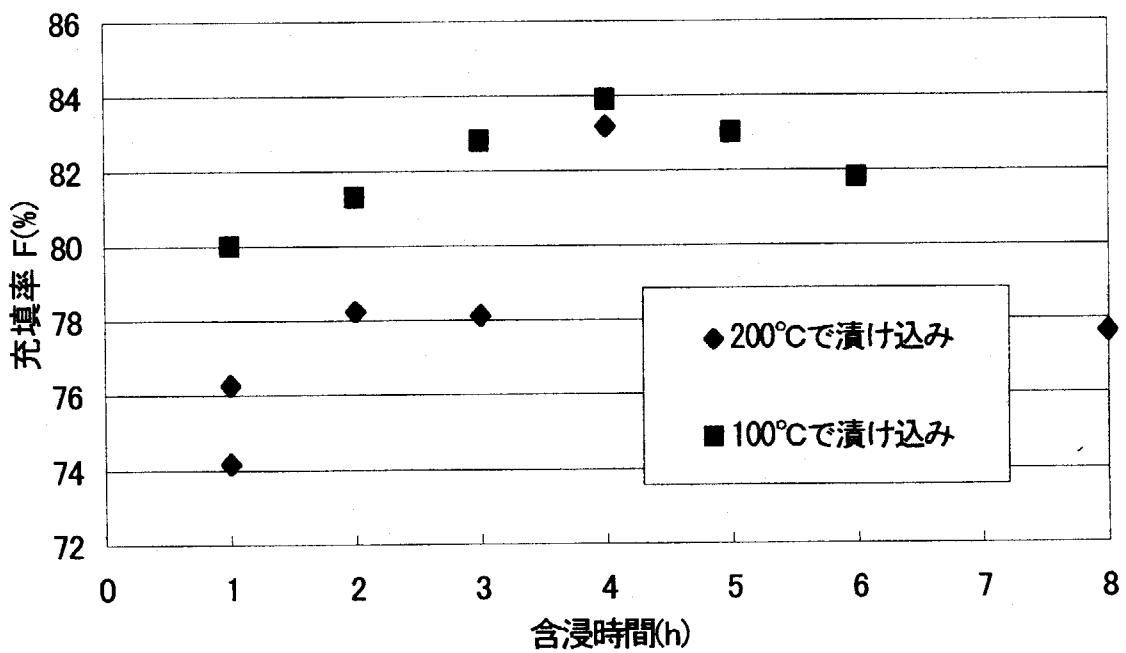


Fig.2.3 含浸時間と充填率の関係

2.4 実験装置

Fig.2.4 に実験装置の概略図を示す。実験装置は(1)容器部、(2)熱源部、(3)熱電対、(4)測定部からなる。以下に各部の概要を記述する。

(1) 容器部

容器部は内径 81mm ϕ 、深さ 60mm のインコネル 600 製容器で、中央に外径 29.5mm ϕ の同心状円筒凸部がある構造となっている。中央の凸部は、内側が空洞となっており、容器外下部からヒータが設置されている。また、中央凸部の上部にはインコネル管が垂直に溶接され、真空ポンプにより凸部の外側下部から空気を吸い込むことができる構造となっている。これは、ヒータを切ったときに中央凸部に空気を流して速やかに冷却するためのものである。容器の外側周囲は厚さ 30mm の断熱材で囲まれている。

(2) 热源部

(1)に記したように、中央凸部内側に下からヒータが挿入されている。取り付けられているヒータは、セラミックヒータ(電気入力 300W、最高使用温度 1100°C)である。ヒータへの入力電圧は PID 型デジタル指示調節計を介して入力される。また(1)で記述したように、ヒータの上部にパイプを付け、その先にポンプ(吐出空気量 60l/min)を接続し、空気を流すことでヒータの冷却を行えるようにした。ポンプもヒータ同様、制御装置を介して電圧が入力される。

(3) 热電対

熱電対にはシース径 1.0mm の K 型熱電対を用いた。熱電対は円筒容器外壁(2本)、凸部壁内壁(2本)、フランジ部(1本)、ヒーター部(1本)、蓄熱体内部(4本)に取り付け温度測定を行った。Fig.2.4 に熱電対取り付け位置を示す。

(4) データ集録

データ集録部は温度補償機能付きデータロガー及びパソコンより構成され、熱電対出力は、GP - IB インターフェース及びデータロガーを介して、パソコンに取り込んだ。取り込んだデータはエクセルを用いて解析した。

2.5 実験方法

実験に際してはインコネル製容器の中に多孔体又は相変化物質を多孔体中に含浸させた複合蓄熱体を入れ、中央凸部内のヒータを用いて内壁温度を変動させて、容器内温度(多孔体温度又は複合蓄熱体温度)を測定した。多孔体のみの場合と複合蓄熱体の場合では、空間的及び時間的温度特性が異なると考えられるので、この測定により温度特性を把握する。

多孔体と複合蓄熱体には、 $r=2.1\text{cm}$, 2.7cm , 3.3cm の位置に測定穴を開け、容器上蓋に溶接し挿入された熱電対用ウェルを穴の中に入れる。容器を密封した後、ヒータに通電し昇温した後、温度変動を与える。温度を下げるときには、容器中央凸部に接続されたポンプを作動して、ヒータ部に直接空気を流して冷却した。実験では約 110°C から 40°C にさげるのに、冷却時間は約 80 分程度要した。そのため、温度変動周期は約 120 分程度以下にすることはできなかった。パルミチン酸の融点は約 60°C であることを考慮して、選定した容器中央凸部表面の最高温度は 110°C である。

最低温度 40°C としたが、達成した温度は冷却条件及び複合蓄熱体種類により変化した。温度変動実験は以下の条件で行った。

- (1) 常温から 110°C に 1 時間かけて昇温し、定常状態至るまでの過渡変化を調べる。
- (2) 110°C 間での昇温と降温を繰り返す。110°C に達したとき、110°C に保持する時間を 4 種類変えた
 - (i) 保持時間 0 分
 - (ii) 保持時間 40 分
 - (iii) 保持時間 60 分
 - (iv) 保持時間 80 分

冷却設定温度は 40°C としたが、達成温度は条件により変化した。降温時間はジルコニア多孔体、ジルコニア複合蓄熱体は同じとしたが、ニッケル・クロム及びニッケルの場合には、多孔体と複合蓄熱体の場合で降温速度が大きく異なったため、複合蓄熱体の降温時間を長くした。

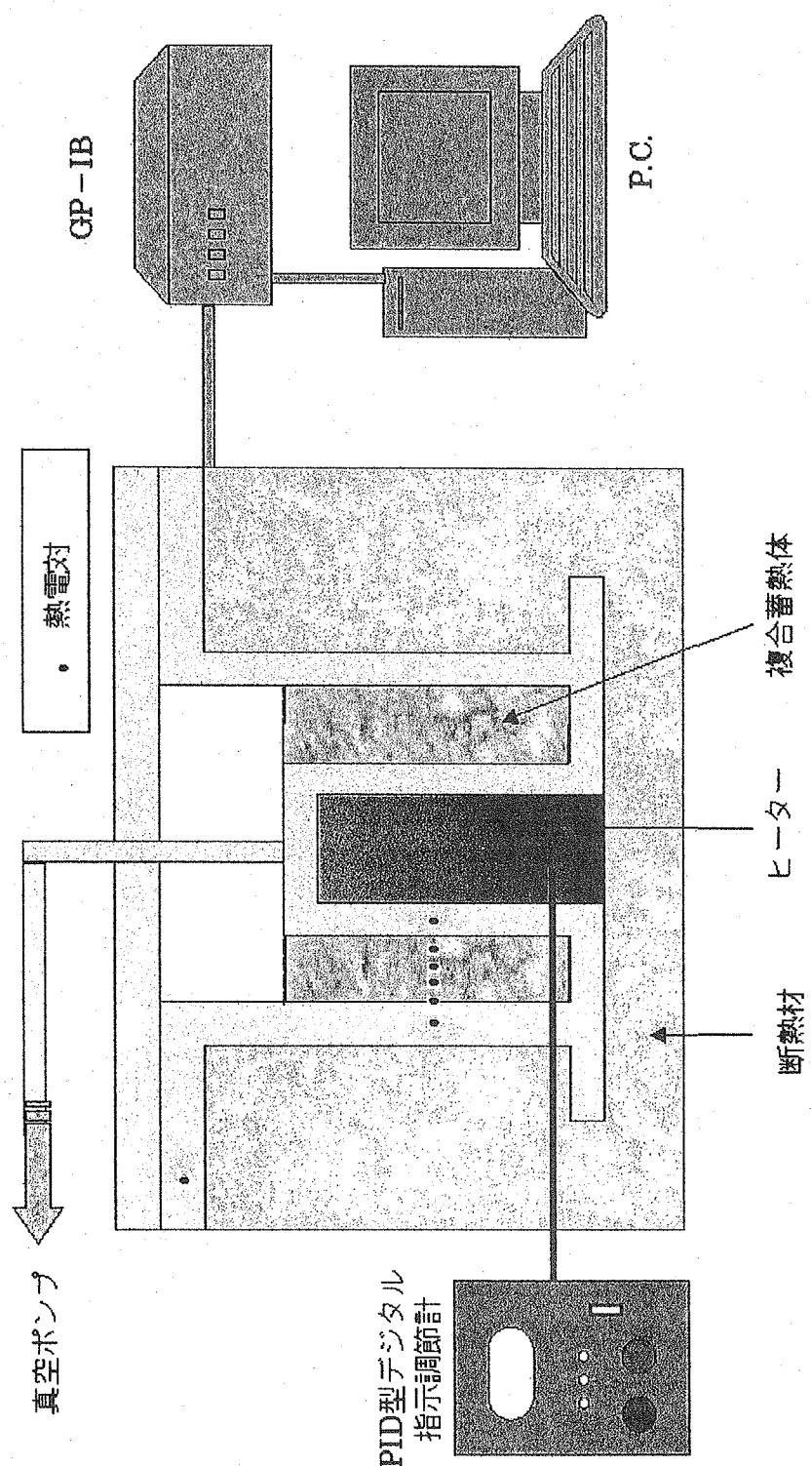


Fig. 2.4 実験装置概略図

3. 数値解析

3.1 基礎方程式

多孔体セラミックス及び金属多孔体は同心二重円筒形状であるので、円筒座標により解析を行った。数値計算は以下の仮定の下に行った。

- (1) 热の流れは一次元 (r 方向) とし、上下方向の放熱は無視する。
- (2) パルミチン酸、多孔質体の体積は温度によらず一定とする。すなわち、相変化物質の密度は、液相・固相に係わらず一定とする。
- (3) 热の移動は热伝導のみによって行われ、対流等は生じていないとする。
- (4) パルミチン酸の热伝導率は液相、固相で等しいとした。

数値計算に用いた基礎方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (3.1)$$

(3.1)式は相変化の潜熱を考慮する関係から、エンタルピ h を用いた式となっている。式中の ρ, λ は実効値を表す。(3.1)式に関係する量は以下のように与えられる。

密度

$$\rho = f_t \rho_t + f_s \rho_s \quad (3.2)$$

エンタルピ

$$h = C_p T + g_s \varepsilon L \quad (3.3)$$

比熱

$$C_p = g_t C_{pt} + g_s [(1-\varepsilon) C_{psk} + C_{psl}] \quad (3.4)$$

热伝導率

$$\lambda = f_t \lambda_t + f_s [(1-\varepsilon) \lambda_{sk} + \varepsilon \lambda_{sl}] \quad (3.5)$$

相変化潜熱

$$L = f_s L_s \rho_s / \rho \quad (3.6)$$

上式で ε : 相変化物質のうち液相の割合 (液相率), C_p : 比熱, g : 相変化物質の重量割合, f : 相変化物質の体積割合, L_s : 相変化物質の潜熱を表す。また、添え字は t : 多孔質体, s : 相変化物質, k : 相変化物質のうち固体領域, l : 液体領域, を表す。したがって、液相領域では $\varepsilon = 1$, 固相領域では $\varepsilon = 0$ である。また、複合蓄熱体全体積を V , 多孔体体積及び相変化物質体積をそれぞれ V_t, V_s とすると,

$$\begin{aligned} V_s + V_t &= V, \quad f_t = V_t/V, \quad f_s = V_s/V \\ W &= \rho_s V_s + \rho_t V_t, \quad g_s = \rho_s V_s/W, \quad g_t = \rho_t V_t/W \\ V_s &= V_k + V_l, \quad \varepsilon = V_l/V_s \end{aligned} \quad (3.7)$$

となる。ここで W は複合蓄熱体の重量である。

計算に用いた物性値で、热伝導率に関してはさまざまな評価法が提案されている⁽³⁾⁻⁽⁶⁾。本研究では热伝導率の評価法を求めるために主眼をおいてはいないので、それらのうち体積平均値を取つ

た(3.5)式を用いた。それぞれの評価法における実効熱伝導率の値を Table 3.1 に、また、(3.2)-(3.6) 式を用いて求めたその他の物性値を Table 3.2 に示す。Table 3.1 にはニッケル・クロムの物性値として Table 2.1 のニクロムの物性値を用い、参考値として（）の中に示した。また、Table 3.2 中の（）にパルミチン酸の固体の物性値を用いた値を示した。(3.5)式で求めた熱伝導率はこれらの中でかなり大きい値を示す。

数値解析における基礎式の離散化にはコントロールボリューム法を用いた⁽⁷⁾。また、相変化の解析には、固相率を導入し、相変化潜熱をエンタルピー変化に組み込んだいわゆるエンタルピー法を用いて解析を行った⁽⁸⁾。

3.2 初期条件及び境界条件

初期条件及び境界条件は以下の通りである。

初期条件

$$t = 0: \quad T = T_r, \quad \epsilon = 0 \quad (3.8)$$

境界条件

$$\begin{aligned} r = r_h: \quad T &= T_r(t) \\ r = r_E: \quad T &= T_E(t) \end{aligned} \quad (3.9)$$

また、定義から液相部（完全に融解を完了した領域）で $\epsilon = 1$ 、固相部（すべて固相である領域）で $\epsilon = 0$ である。

解析手法は以下のとおりである。融解はある温度幅で生じるとし（ここでは 58°C～60°C とした）、融解開始時、融解終了時に単位質量の相変化物質が保有するエンタルピ値をあらかじめ求めておく。解析はまず、 $t=0$ において固相率=1 とする。(3.1)式をエンタルピーについて解く。エンタルピーの値が融点に達したとき融解が開始するものとして、固相率を求める。求めた固相率の値を用いて蓄熱媒体の物性値を計算し、次の計算ステップで新しい物性値を用いる。エンタルピがあらかじめ求めておいた融解終了の値になったとき、液相のみになったものとして固相率=0 とする。解析では、実験装置の容器中央凸部の表面温度および容器外側表面温度を境界条件として与えて数値計算を行った。

Table 3.1 各種評価式から求めた実効熱伝導率（単位 W/mK）

	(3.5)式	Beckermann ⁽³⁾	Calmidi ⁽⁴⁾
ジルコニア多孔体	1.11	0.203	0.257
ジルコニア複合蓄熱体	1.17	0.672	0.321
ニッケル・クロム多孔体	9.13 (ニクロム 1.31)	0.031	3.313 (ニクロム 0.488)
ニッケル・クロム複合蓄熱体	9.26 (ニクロム 1.44)	0.191	3.443 (ニクロム 0.618)
ニッケル多孔体	5.71	0.032	2.31
ニッケル複合蓄熱体	5.84	0.208	2.44

Table 3.2 (3.5)式から求めた各種実効物性値

	$\rho(g/cm^3)$	$C_p(J/gK)$ (solid)	$L(J/g)$	$\kappa_l(cm^2/s)$ (solid)	$\kappa_s(cm^2/s)$ (solid)
ジルコニア多孔体	3.282	0.5	0	0.00676	0.00676
ジルコニア複合蓄熱体	3.668	0.735 (0.637)	19.7	0.00434	0.00501
ニッケル・クロム多孔体	0.610	0.324	0	0.462	0.462
ニッケル・クロム複合蓄熱体	1.382	1.668 (1.149)	104.5	0.0402(0.00625)	0.0583(0.0091)
ニッケル多孔体	0.420	0.329	0	0.413	0.413
ニッケル複合蓄熱体	1.233	1.912 (1.299)	123.3	0.0248	0.0365

4. 結果及び考察

4.1 昇温による定常実験

Figs.4.1.1~4.1.6 はヒータの加熱面温度を約1時間で 110°C に昇温し、その後、温度をそのまま保持したときの実験結果で、試験体の内部が定常状態に達するまでの温度変化を表している。Fig4.1.1 はジルコニア単体の結果を Fig4.1.2 はジルコニアを用いた複合蓄熱体の結果を示す。加熱面温度が上昇するにつれて徐々に試験体内部の温度も上昇し、加熱面温度が一定値に保持されると、内部の温度変化が緩やかになり、定常値に向かう。昇温速度は複合蓄熱体の方が遅い。Table 3.1 よりわかるように、多孔体にパルミチン酸が含浸した場合の実効熱伝導率の増加率より、密度の増加率の方が高い。そのため複合蓄熱体の熱容量が大きく増加して温度伝導率が小さくなるためである。Fig.4.1.2 に示されるように温度上昇の過程で温度勾配の変化が現れる。 $r=3.3\text{cm}$, 4.0cm では、約 60°C に変曲点が現れている。これは相変化による変曲点である。 $r=2.1\text{cm}$, 2.7cm の場合には 60°C 付近における温度変曲点は明瞭ではない。そのかわり、 $r=2.1\text{cm}$ の場合には約 70°C に、 $r=2.7\text{cm}$ の場合には約 65°C に変曲点が現れる。これは、その点において相変化が生じたことによる変曲点ではなく、外側表面において相変化が終了し、温度が急激に上昇したことにより生じたと考えられる。2つの図を比べると、容器内部の温度差 ($r=2.1\text{cm}$ と $r=4.0\text{cm}$ における温度差) は、パルミチン酸を含浸させた方が小さくなる。これは、ジルコニアのみの場合には空隙に空気が充満するため実効熱伝導率が小さいが、パルミチン酸が含浸すると実効熱伝導率が大きくなるためである。

Figs.4.1.3~4.1.6 はニッケル・クロム多孔体とニッケル・クロム多孔体にパルミチン酸を含浸させた複合蓄熱体及びニッケル多孔体とニッケル多孔体にパルミチン酸を含浸させた複合蓄熱体を用いた場合の定常までの温度変化を示す。多孔体のみの場合にはジルコニア多孔体を用いた場合と同様の傾向を示している。パルミチン酸を含浸させない場合の温度変化を見ると、金属多孔体の方がジルコニアのみの場合よりも温度上昇速度が速い。これは、ジルコニアに比べ金属は気孔率が高いが、Table 3.1 に示すように熱伝導率が大きく、熱容量が小さいため、複合蓄熱体の実効温度伝導率が高くなるためであると考えられる。ニッケル・クロムの複合蓄熱体の温度変化を Fig.4.1.4 に示す。図から分かるように $r=2.7\text{cm}$ では明瞭ではないが、他の点では 60°C 付近において温度の変曲が観察される。これは相変化によるものである。その後、 $r=2.1\text{cm}$ では約 80°C, $r=2.7\text{cm}$ では約 73°C において温度上昇が鈍くなり、ほぼ一定となった後、再び急に上昇し、定常に達する。この温度上昇は、 $r=4.0\text{cm}$ で 60°C を超えると温度の急上昇が生じた後に生じていることから、この効果により生じたと考えられる。Fig.4.1.6 に示されるように、ニッケルの複合蓄熱体の場合には、内部の温度差はジルコニアやニッケル・クロムの場合より小さくなることが示された。これは、ニッケルの場合には気孔率は大きいにもかかわらず、実効熱伝導率がジルコニア及びニッケル・クロムよりも高くなるためであると考えられる。Table 3.1 に示すニッケル・クロム複合蓄熱体の実効熱伝導率はニッケル複合蓄熱体よりも高くなっているが、実際にはニッケル・クロムの一部が合金化して熱伝導率が低下するため、実効熱伝導率はニッケル複合蓄熱体の方が高くなっているものと考えられる。

Figs. 4.1.7~4.1.9 に複合蓄熱体を用いた場合の定常状態までの実験結果と数値計算結果の比較

を示す。

Fig.4.1.7 はジルコニア多孔体にパルミチン酸を含浸させた複合蓄熱体の結果を示す。この場合、100分から200分の間で $r=2.1\text{cm}$, $r=2.7\text{cm}$ の位置において実験値と計算値にずれが生じているが、それ以外の時間では実験値と計算値は比較的良く一致している。この場合には、数値解析結果の方が温度の変曲度は大きい。Fig.4.1.8 はニッケル・クロムの複合蓄熱体の結果である。 $R=2.1\text{cm}$ 及び $r=2.7\text{cm}$ における 60°C から 80°C の間の一致は余り良くない。この場合には、両方の位置とも融点を超えてからずれが大きくなっているのが観察される。この原因としては、相変化がある温度幅で生じることや、実効熱伝導率の誤差等の理由も考えられる。そこで、ニッケル・クロムの熱伝導率として Table 2.1 に示した値を用いて行った数値解析結果を Fig.4.2.44 に示す。しかし、熱伝導率が低くなってしまっても温度は若干低下するが、Fig.4.1.8 の解析結果と大きな違いは見られない。これから、Fig.4.1.8 に示される不一致として、複合蓄熱体内部の自然対流の存在を考慮する必要がある。ニッケル・クロムの場合には、2.1 節に記述したように多孔体の空隙の寸法が約 $1\sim 2\text{mm}$ であるため、流動抵抗は小さいと考えられ、加熱面側に沿って上昇し、固液界面近傍で下降する自然対流が存在すると考えられる。これにより、加熱面より近傍の $r=2.1, 2.7\text{mm}$ の位置においては自然対流の影響が大きく現れ、実験値の温度が高くなっているものと考えられる。Fig.4.1.9 はニッケルの複合蓄熱体の結果である。この場合、相変化を示す変曲点は非常に緩やかに現れる。内側円筒面（加熱面）温度が上昇している領域で計算結果の方が実験結果よりも全体的に低い値を示す。これは、前述のように実効熱伝導率が実際と異なること、また、多孔体骨部とパルミチン酸部で温度が異なること等が考えられる。ニッケルの場合には空隙の寸法はニッケル・クロムよりもかなり小さいこと及び実効熱伝導率が大きく、また、複合蓄熱体内部の温度差が小さいため、自然対流の影響は小さいものと考えられる。

4.2 温度を周期的に変動させた温度変動実験

Figs.4.2.1~4.2.27 にヒータの加熱面温度を約 1 時間で 110°C に昇温し、一定時間 110°C に保温した後冷却し、その後、昇温・一定時間保温・冷却を繰り返した場合の各部温度の時間変化を示す。実験結果は全て 3 回目以降のサイクルの温度変化を表したものである。保温時間はいずれの試験体についても 0 分、40 分、60 分、80 分と 4 通り変えた。

Figs.4.2.1~4.2.4 はジルコニアのみの結果を、Figs.4.2.5~4.2.8 はジルコニアの複合蓄熱体の結果を示す。これら 2 種類の結果を比較すると、保温時間が長い方が内部の温度変動幅が大きくなること、複合蓄熱体を用いた場合の方が内部の温度振幅が抑えられ、昇温・冷却時に温度勾配が緩やかになっていることがわかる。特に温度下降時に約 58°C のところで温度勾配が急に緩やかになることがわかる。これは、相変化潜熱により、温度効果速度が低下したために生じたものと考えられる。温度上昇時には、 60°C 付近において相変化潜熱により温度勾配が緩やかになる現象は明瞭ではない。この理由は、温度上昇時は昇温速度を設定した温度制御を行っているため、熱入力が大きくなっているためである。一方、降温時には空気流による強制冷却を行っているため、熱伝達率が一定に保たれていると考えられる。Fig.4.2.6 を見ると加熱面が 110°C で保持された後に、 $r=2.1\text{cm}$ の温度に小さな変曲点が現れているのが見られる。これは、外表面や $r=4.0\text{cm}$ において温度が急に上昇するために誘起されたものであると考えられる。Fig.4.2.9 にジルコニアとその

複合蓄熱体を用いたときの保温時間と温度振幅の関係を示す。図から、ジルコニアのみの場合より複合蓄熱体の方が温度振幅が小さくなることが示される。保温時間が長いと温度振幅は増加する。温度振幅の減少は、①単位体積あたりの熱容量の増加及び②潜熱の効果、の2つの理由によると考えられる。そこで、潜熱の効果を調べるために、潜熱のみ0とした時の解析結果と潜熱を考慮したときの解析結果の比較をFig.4.2.40に示す。図より潜熱=0とした場合には振幅が大きくなることが示される。前述したように、昇温時は、温度をプログラムどおりに上げるので潜熱の効果は顕著には現れない。しかし、降温時は空冷で行うため、潜熱の効果は大きく、 $r=2.1\text{cm}$ においては潜熱=0とすると約18°C温度が低くなる。

Figs.4.2.10~4.2.17は試験体にニッケル・クロム多孔体とその複合蓄熱体を用いたときの実験結果を示す。Figs.4.2.10~4.2.13はニッケル・クロム多孔体の結果で、Figs.4.2.14~4.2.17はニッケル・クロム複合蓄熱体の結果である。ニッケル・クロム多孔体のみの場合と複合蓄熱体の場合の加熱面の温度変動波形及び周期は異なっている。これは、複合蓄熱体を多孔体のみと同じ温度変動波形を与えたとき、温度降下後の温度がパルミチン酸融点以下に下がらなかったため、複合蓄熱体のみ冷却時間を長くしたためである。これらの結果を見ると、保温時間が小さい場合には、多孔体のみの場合と比べて複合蓄熱体の内部温度がかなり低いことが分かる。Fig.4.2.11とFig.4.2.15を比較すると、温度上昇時にも潜熱の存在により温度上昇が抑えられていることがわかる。この場合、 $r=2.1\text{cm}$ 及び $r=2.7\text{cm}$ の温度はニッケル・クロムだけの場合にはそれぞれ約94°C及び約82°Cであるが、ニッケル・クロム+パルミチン酸の場合には、それぞれ約80°C及び75°Cでしばらく一定値を保った後、80°Cを超えている。この温度の振る舞いは、4.1節にも記したが、外表面からの放熱により生じる外側温度の影響によるものである。また、金属多孔体のみの場合には、温度降下は早く、温度降下時には約30分で60°C以下に低下するが、複合蓄熱体の場合は、温度降下時には約120分経過しても60°C程度に保たれる。これは相変化潜熱により温度低下が抑えられているためである。一方、保温時間が大きくなると、昇温時に相変化を生じている間は温度が低く抑えられるが、相変化終了後、温度上昇を生じる。前述のように、本実験では昇温時には潜熱による温度上昇の遅れをなくすように熱入力が非常に大きくなる。したがって、温度変動吸収の効果を評価するには降温時の温度振る舞いに特に着目する必要がある。

複合蓄熱体は、多孔体金属の場合よりも実効熱伝導率が高くなるため、蓄熱体の内側と外側の温度差は多孔体の場合と比べて複合蓄熱体の場合には小さくなる。

Fig.4.2.18にニッケル・クロム及びその複合体を用いた場合の保温時間と温度振幅の関係を示す。降温時間が多孔体の場合と複合蓄熱体の場合とでは異なるため、単純な比較はできないが、複合蓄熱体の方が降温時間を長くとっているため温度差が大きく現れるはずである。しかし、図からは、複合蓄熱体は多孔体の場合の約1/2となっており、温度変動幅が小さく抑えられていることがわかる。

Figs.4.2.19~4.2.26にニッケル多孔体及びその複合蓄熱体を用いた場合の温度変動の結果を示す。Figs.4.2.19~4.2.22はニッケル多孔体のみの場合の結果、Figs.4.2.23~4.2.26は複合蓄熱体の場合の結果である。この場合もニッケル・クロムの場合と同様に複合蓄熱体の降温時間を長くしてある。ニッケル・クロムの場合と同様に、複合蓄熱体の温度振動幅は小さくなることがわかる。昇温時にニッケル・クロムの複合蓄熱体で見られた75°Cや80°Cで温度一定を示す現象ははっきりとは見られなかった。しかし、Fig.4.2.24を見ると、 $r=2.1\text{cm}$ の温度が、約470分のところで急上昇

する現象が見られる。上昇前は温度勾配が小さいことから、この現象はニッケル・クロムの $r=2.1\text{cm}$ の温度が約 80°C で一定値をとった後、急上昇する現象 (Fig.4.2.15 参照) と同じものと考えられる。ニッケルの場合に、ニッケル・クロムのような温度の振る舞いが顕著に現れないのは、実効熱伝導率が大きいために、加熱面温度が一定に保持されて $r=2.1\text{cm}$ の温度上昇が緩やかになる前に、外側表面温度の上昇が生じてしまうためであると考えられる。

Fig.4.2.27 にニッケルと複合蓄熱体の保温時間と温度振幅の関係を示す。この場合も、ニッケル・クロムの場合と同様に、ニッケル多孔体のみの場合と複合蓄熱体の場合で降温時間が異なるため、単純な比較はできないが、複合蓄熱体の方が温度振幅が小さくなっている。保温時間が長いと複合蓄熱体の場合の温度振幅低減率は小さくなる。実験において保温時間が長い場合には、ほとんどが液相のみの状態であると考えられるため、温度変動の減少幅が比較的小さくなるものと考えられる。温度変動域を低くして、相変化温度を挟めば、減少幅はもっと大きくなるものと考えられる。

Figs.4.2.28～4.2.39 に複合蓄熱体の温度変動実験結果と数値計算結果の比較を示す。

Figs.4.2.28～4.2.31 はジルコニアとパルミチン酸の複合蓄熱体の場合の結果である。実験結果は黒抜き記号、数値解析結果は白抜き記号で示す。実験と数値解析の結果を比較すると、保温時間が長くなると数値解析の方がいくらか低い値を示す。特に、保温時間が 40～80 分の場合には、数値解析結果に約 70°C 付近における変曲点が明瞭に現れるが、実験結果には温度変曲点はあまり明瞭には現れていない。この原因は、パルミチン酸の相変化温度に幅があること、ジルコニア多孔体の気孔率が比較的低く (45.3%)、気孔の寸法が小さいために含浸したパルミチン酸が少ないと、実効熱伝導率の評価が正しくないこと等に起因すると思われる。

Figs.4.2.32～4.2.35 にニッケル・クロムの複合蓄熱体の温度変動実験結果と数値計算結果の比較を示す。Fig.4.2.32 は保温時間 0 の場合の結果である。解析結果は加熱面で近い位置で低い温度を示す。ニッケル・クロム発泡金属の骨材はニッケルとクロムであり、2つの金属は入り組んで配置されている。金属を発泡させるために骨材を高温に保持することから、3.1 に記述したようにニッケルとクロムが合金化され、ニクロムが生成されている可能性がある。ニッケル及びクロムの熱伝導率に比べてニクロムの熱伝導率はかなり低いため、ニクロムの物性値を用いた解析を行った。結果を Fig.4.2.45 に示す。その結果、ニッケルとクロムの熱伝導率を用いた解析結果より、若干低い温度を示すことがわかる。Figs.4.2.33～4.2.35 に保温時間が 40 分、60 分及び 80 分の場合の結果を示す。Fig.4.1.8 と同様に、 $r=2.1\text{cm}$, 2.7cm の位置の 60°C から 80°C の間の誤差が特に大きい。これは、複合蓄熱体内部における自然対流の影響であると考えられる。また、 80°C 付近で実験では大きな変曲点が見られた。数値解析結果でも変曲点は見られるが実験と比べるとかなり小さい。この原因としては、外側境界における温度急上昇の影響が複合蓄熱体内部に及んでいるものと考えられる。Fig.4.2.46 に、ニクロムの物性値を用いて、保温時間 60 分の温度変化を数値解析で求めた結果を示す。Fig.4.2.45 の場合と同様に温度は若干低くなるが大きな差は現れない。

Figs.4.2.36～4.2.39 にニッケルの複合蓄熱体の温度変動実験結果と数値計算結果との比較を示す。いずれも、実験と解析の結果は 60°C から 80°C の間を除いて良く一致している。特に保温時間が 40 分以上の場合には一致がよい。この理由は、ニッケルは熱伝導率が高いために、複合蓄熱体の実効熱伝導率が高く、温度変動の間、全体が融点以上に保たれて相変化が生じないこと、および、複合蓄熱体内部の温度差が小さいために、自然対流の効果が小さいことによるものと考えら

れる。このことからも、ニッケルの熱伝導率は、ニッケル・クロムより高いと考えられる。

数値解析と実験の不一致の原因として、気孔率の高い複合蓄熱体を均質モデルを用いて解析していること及び蓄熱体内部の流れを解いていないことが考えられる。熱の伝導は多孔質体骨材部と蓄熱媒体では異なるため、両者の温度が異なる可能性がある。したがって、精度を上げるためにには非均質系を対象とした解析モデル、解析手法を開発する必要があると思われる。また、自然対流流れをきちんと評価する必要がある。

4.1 節にも記述したが、Figs.4.2.40～4.2.43 にジルコニア及び発泡金属中に含浸させたパルミチン酸の物性値のうち、潜熱のみ 0 とした場合とそうでない場合の数値解析結果の比較を示す。Fig.4.2.40 はジルコニアの複合蓄熱体を用い、保温時間を 60 分とした場合の結果で、Fig.4.2.30 (Fig.4.2.9) の場合の温度を用いて計算を行った。この場合、複合蓄熱体は温度 50°C から 80°C まで変化する。潜熱を考慮した場合と潜熱 = 0 とした場合では最高及び最低温度が異なっており、潜熱 = 0 とした場合の方が温度変動幅は約 8°C 大きい。Fig.4.2.9 の所でも記述したが、潜熱 = 0 とすると降温時の温度低下が著しく、潜熱がある場合と比べて約 18°C 低下する。Fig.4.2.41～Fig.4.2.43 にニッケル及びニッケル・クロムの場合の結果を示す。Fig.4.2.41 はニッケル・クロム複合蓄熱体で保温時間 60 分の場合の結果である。保温時間が 60 分以上の場合には温度が融点以上となるため、相変化が生じないと考えられ、潜熱 = 0 と潜熱を考慮した場合の 2 つの結果に差はない。保温時間が 0 の場合 (Figs.4.2.42, 4.2.43) には相変化が生じていると考えられるが、2 つの差は小さい。これは、境界条件として複合蓄熱体の外側表面温度を与えていたが、外側表面温度自身があまり低下していないためである。実際に潜熱 = 0 のものを用いれば外側表面温度が大きく低下するため、もっと大きな温度差がつくものと考えられる。

4. 3 考察

定常実験ではニッケル・クロム複合蓄熱体の結果から (Fig.4.1.4)、 $r=2.1\text{cm}$, 2.7cm の位置でそれぞれ約 80°C, 73°C 付近に温度の平坦部が現れた。これは、加熱面温度が一定に保持されたために現れたもので、その後の温度の急上昇は外側表面温度の上昇により生じたものである。半無限体物質の相変化ではこのような現象は生じない。この現象はニッケル複合体の場合には顕著には現れないことから、実効熱伝導率、温度上昇速度、外表面からの放熱速度、試験体の寸法などに依存するものと考えられる。数値解析ではこの現象を完全には再現できなかったが、実際の温度変動吸収体を設計する場合には、このような現象が生じることを考慮しなければならないと考えられる。

また、気孔率が高い場合には、融点を超えた領域で蓄熱体内部における自然対流を考慮する必要が生じる。ただし、実効熱伝導率が大きい場合には、蓄熱体内部の温度差が小さくなることから自然対流が生じにくくなるため。これらの効果を精度良く評価できる解析手法の開発が必要である。

実験において、昇温時には昇温速度を与える制御プログラムを組んだため、熱入力はそれぞれの実験で異なっていると考えられる。すなわち、多孔体のみの場合には熱入力は小さく、複合蓄熱体の場合には熱入力は大きい。特に、金属多孔体を用いた複合蓄熱体の場合にはパルミチン酸の量が多いため熱入力は非常に大きいと考えられる。一方、温度降下時には一定流量の空気流で

冷却しているため、熱伝達率がほぼ一定の条件での冷却になっていると考えられる。潜熱蓄熱体を用いて温度変動を吸収する場合には、温度変動流体の変動を吸収するため、熱伝達率一定の条件に近いと考えられる。実際の温度変動を低減化する場合には、この温度降下時の条件に近いと考えられ、本実験の温度降下時の温度変動特性がより重要となる。温度変動実験において、たとえば、Figs.4.2.14～4.2.18において温度降下時には複合蓄熱体がほぼ融点温度に保持されていることから、温度変動吸収効果は大きいと考えられる。一方、ジルコニアの複合蓄熱体はFig.4.2.8からも分かるように、保温時間が80分でも温度降下時には融点以下に低下することが分かる。これから、実効熱伝導率を高くすることができる金属多孔体の方が、蓄熱媒体を含浸させて温度変動吸収体として用いる場合には、より効果が大きいことが分かる。

5. 結論

パルミチン酸(相変化物質)をセラミックス多孔体(ジルコニア)及び金属多孔体(ニッケル・クロム及びニッケル)に含浸させた複合蓄熱体を3種類製作し、昇温による定常実験、温度変動実験及び数値解析を行い以下の結果を得た。

1. 温度変動実験の結果、温度降下時には多孔体のみの場合と比べて複合蓄熱体温度は融点付近に長時間とどまる。この場合、ジルコニアの複合蓄熱体よりもニッケル・クロム及びニッケル複合蓄熱体の方が融点にとどまる時間が長い。また、ニッケル・クロム複合蓄熱体よりもニッケル複合蓄熱体の方が、蓄熱体温度の均一性が高い。これらから、金属多孔体を用いた方が、また、金属多孔体でも熱伝導率の高い方が温度変動吸収により有効であることが示唆される。
2. 相変化物質を含浸させて伝熱特性を向上させるにはジルコニア多孔体よりも金属多孔体の方が2つの点で有利である。1つは金属多孔体の方が気孔率を高くすることができ、単位体積あたりの蓄熱量を大きくすることができます。2つは、気孔率が大きいにも係わらず、実効熱伝導率をジルコニア複合蓄熱体よりも高くすることができます。
3. 数値計算により比較的良く実験結果を再現することができた。ニッケル・クロム複合蓄熱体の場合に観察された温度変化などの不一致点も見られた。これは、気孔率が高い場合には複合蓄熱体内部の自然対流を考慮する必要があること。また、気孔率が高い場合には物性値評価が難しいこと及び相変化温度に幅があること等に起因すると思われる。したがって、数値解析の精度を上げるには、気孔率の高い場合の自然対流流れを評価すること、相変化物質の相変化特性、複合蓄熱体の実効熱伝導率等の熱物性値をきちんと評価することが極めて重要である。また、気孔率の高い場合に均質モデルを用いることの是非を検討する必要がある。今後、非均質モデル等の開発の検討が必要であろう。

参考文献

- (1) 蓄熱増熱技術, 神沢淳編, アイピーシー
- (2) 热物性ハンドブック、日本热物性学会編、養賢堂(1990)
- (3) Beckermann,C & Viskanta,R., Int. J. Heat Mas Transfer, *31*, 35-46(1988)
- (4) Calmidi,V.V. & Mahajan,R.L., ASME. Ser.C, *121*, 466-471(1999)
- (5) Kunii,D. & Smith,J.M., AIChE J., *6*, 71(1960)
- (6) Song,M. et al., Int.J.Heat Mass Transfer, *36*, 3687-3695(1993)
- (7) Patankar,S.V., “热移動と流れの数値解析”, 森北出版(1997)
- (8) 大中逸雄, ”コンピュータ伝熱・凝固解析入門”, 丸善(1990)

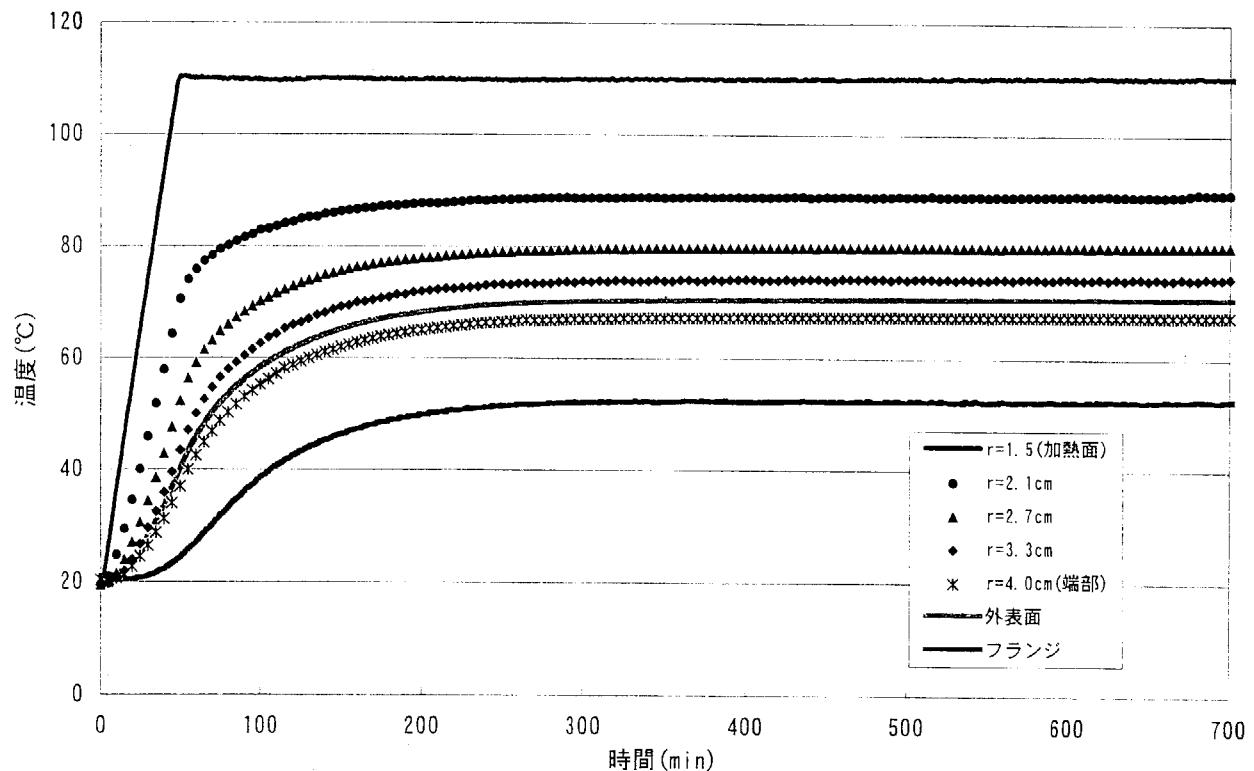


Fig. 4.1.1 ジルコンの定常までの温度変化

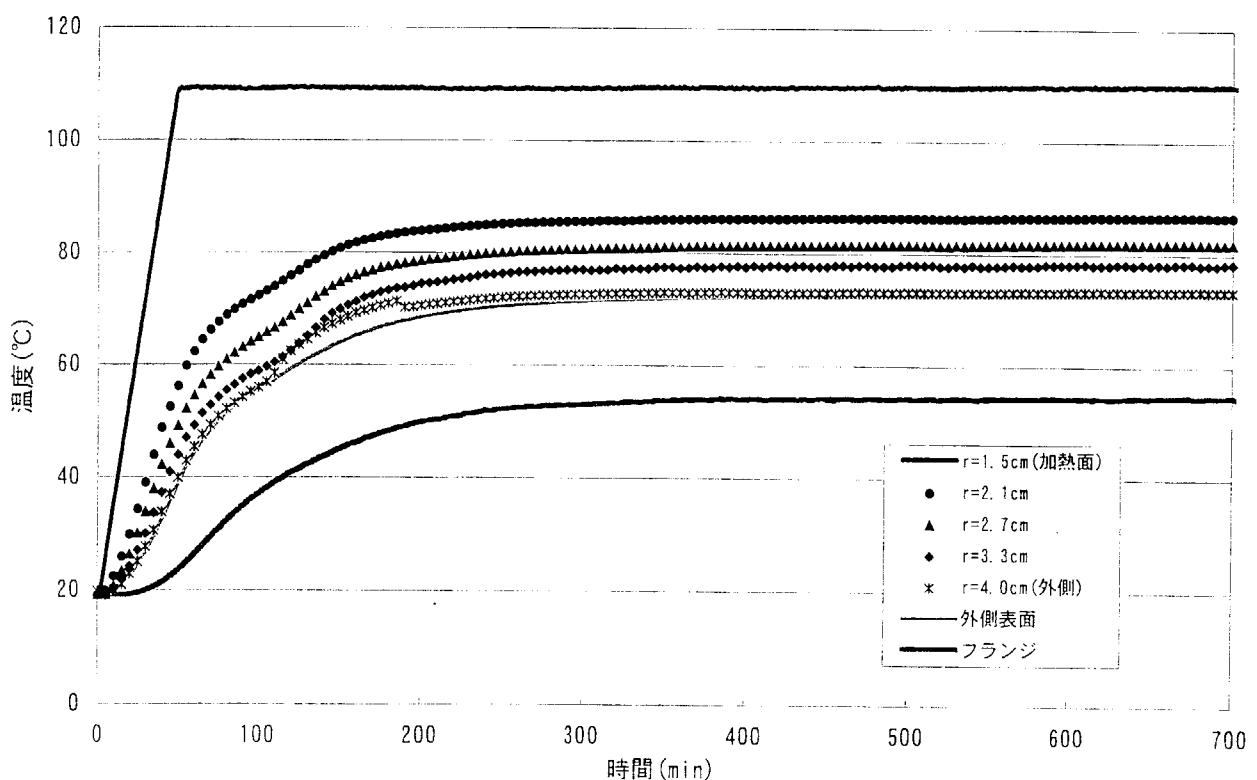


Fig. 4.1.2 ジルコン・パルミチン酸の定常までの温度変化

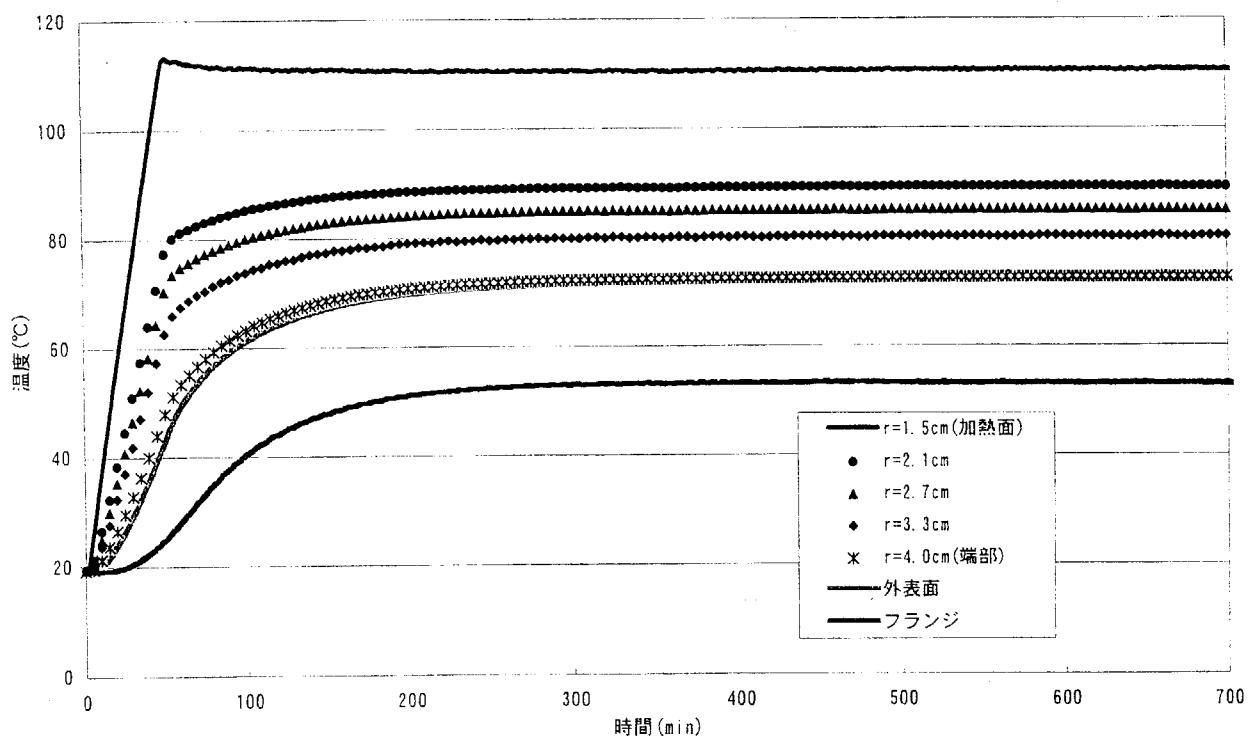


Fig. 4.1.3 ニッケル-クロムの定常までの温度変化

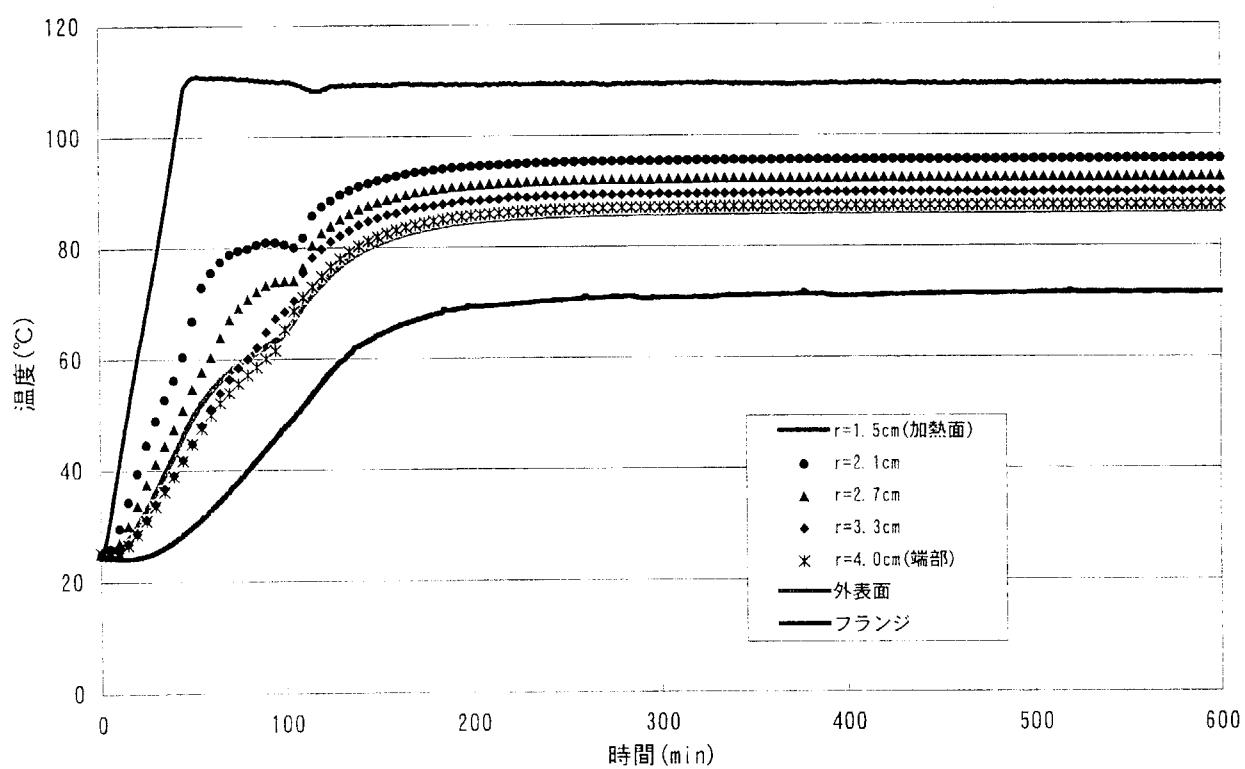


Fig. 4.1.4 ニッケル-クロム・パルミチン酸の定常までの温度変化

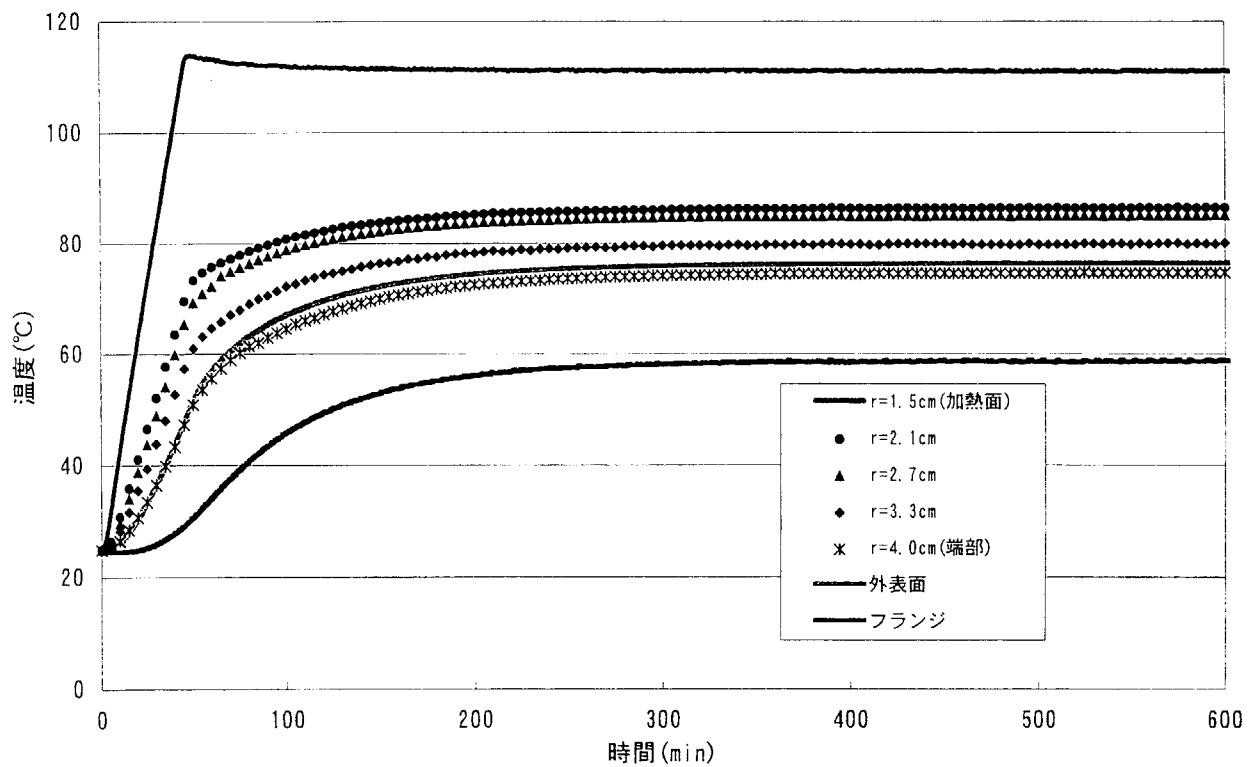


Fig. 4.1.5 ニッケルの定常までの温度編変化

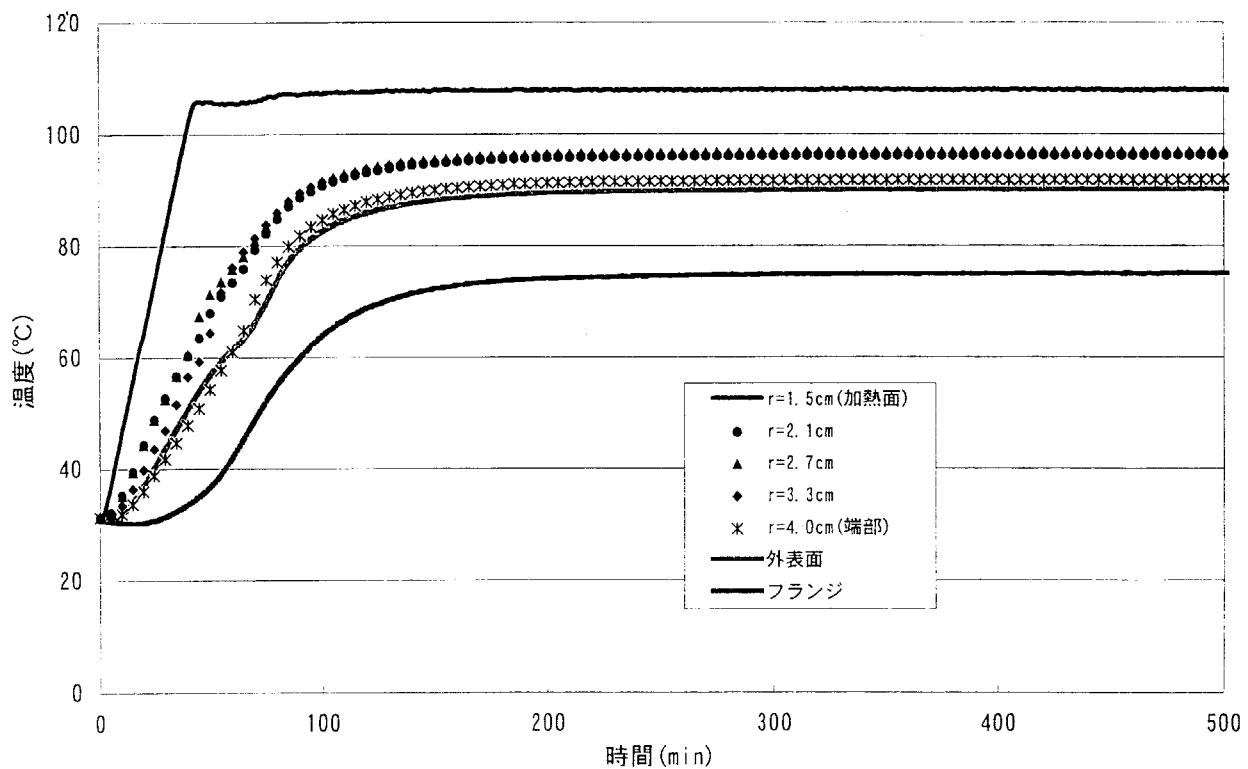


Fig. 4.1.6 ニッケル・パルミチン酸の定常までの温度変化

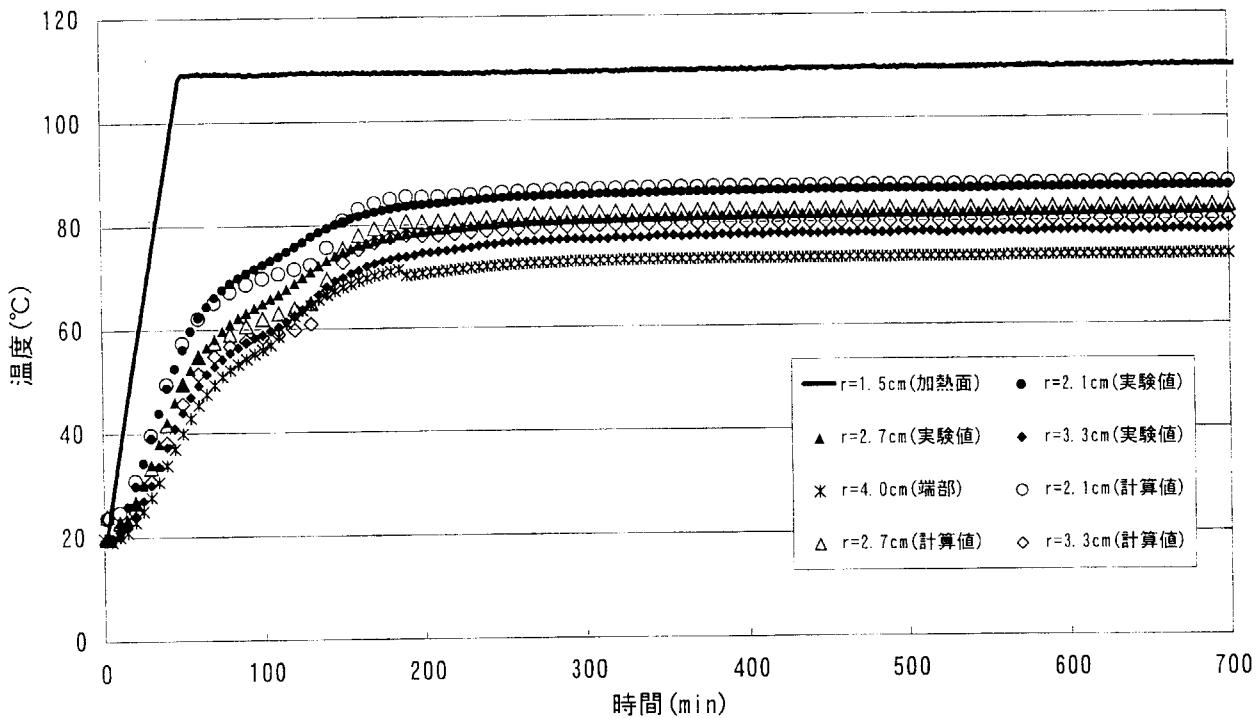


Fig. 4.1.7 ジルコン・パルミチン酸の定常までの温度変化

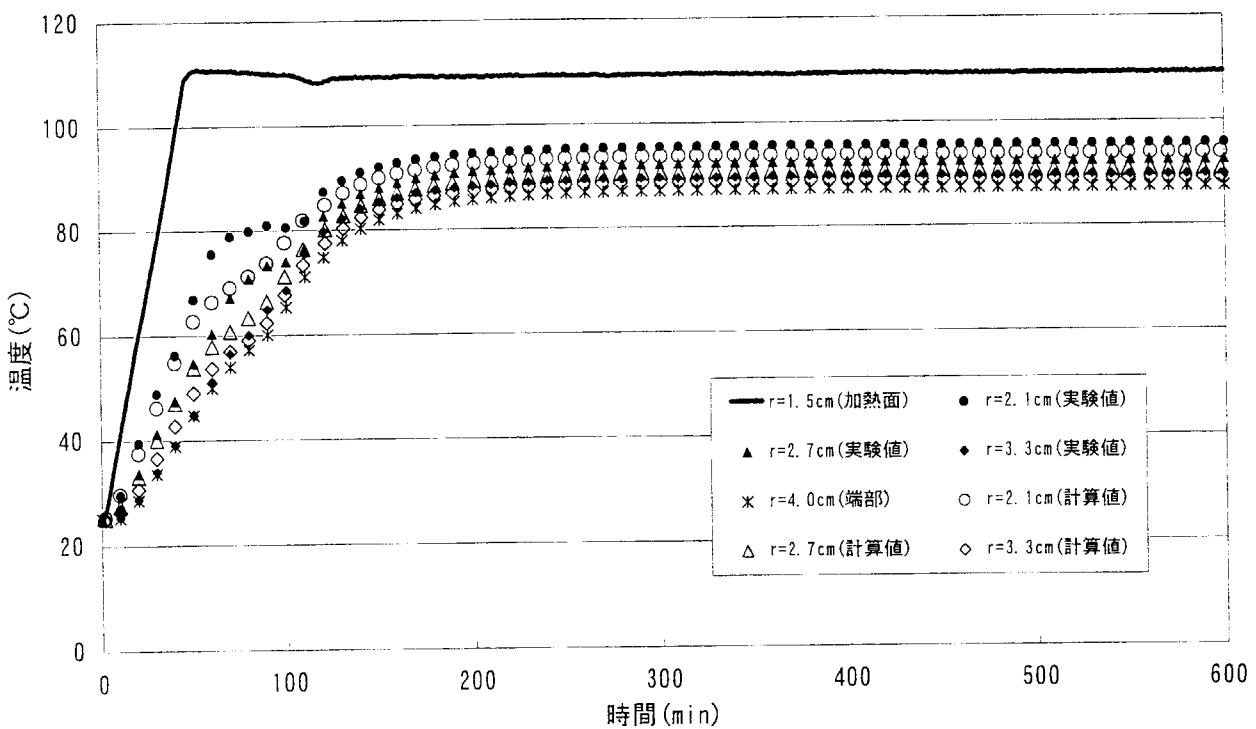


Fig. 4.1.8 Ni-Cr・パルミチン酸の定常までの温度変化

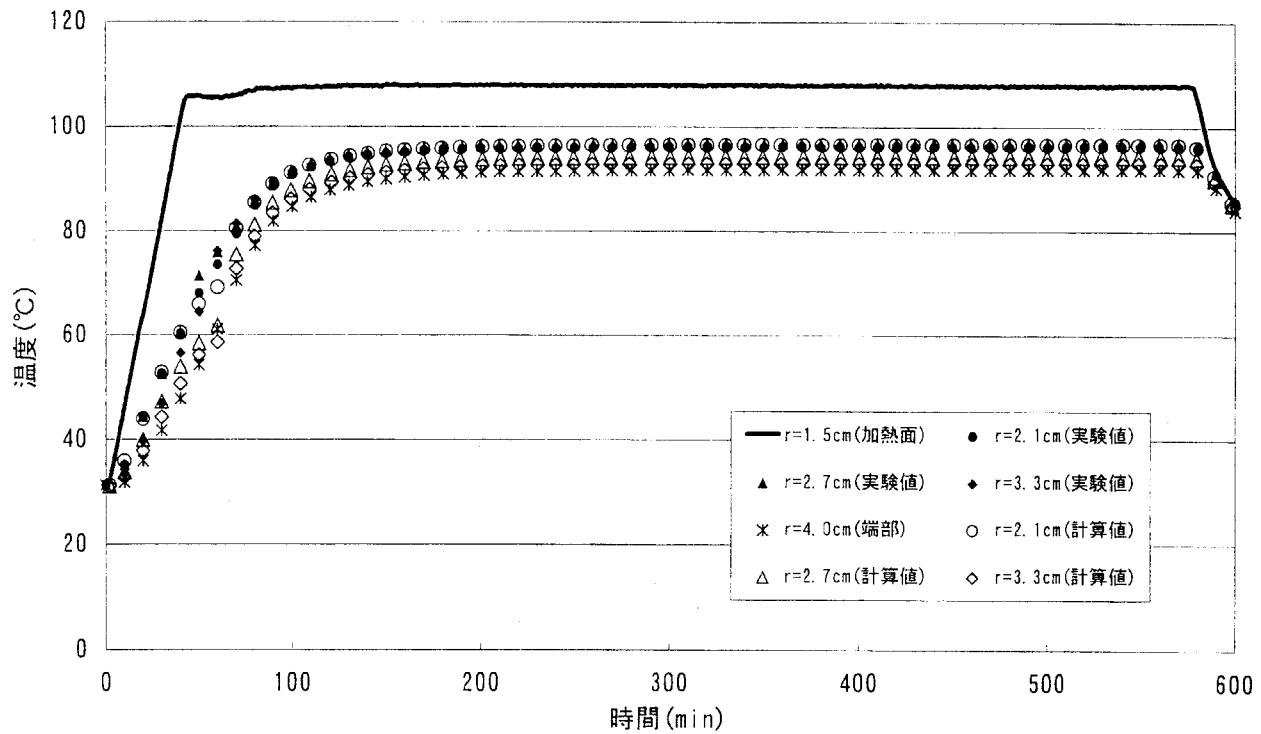


Fig. 4.1.9 ニッケル・パルミチン酸の定常までの温度変化

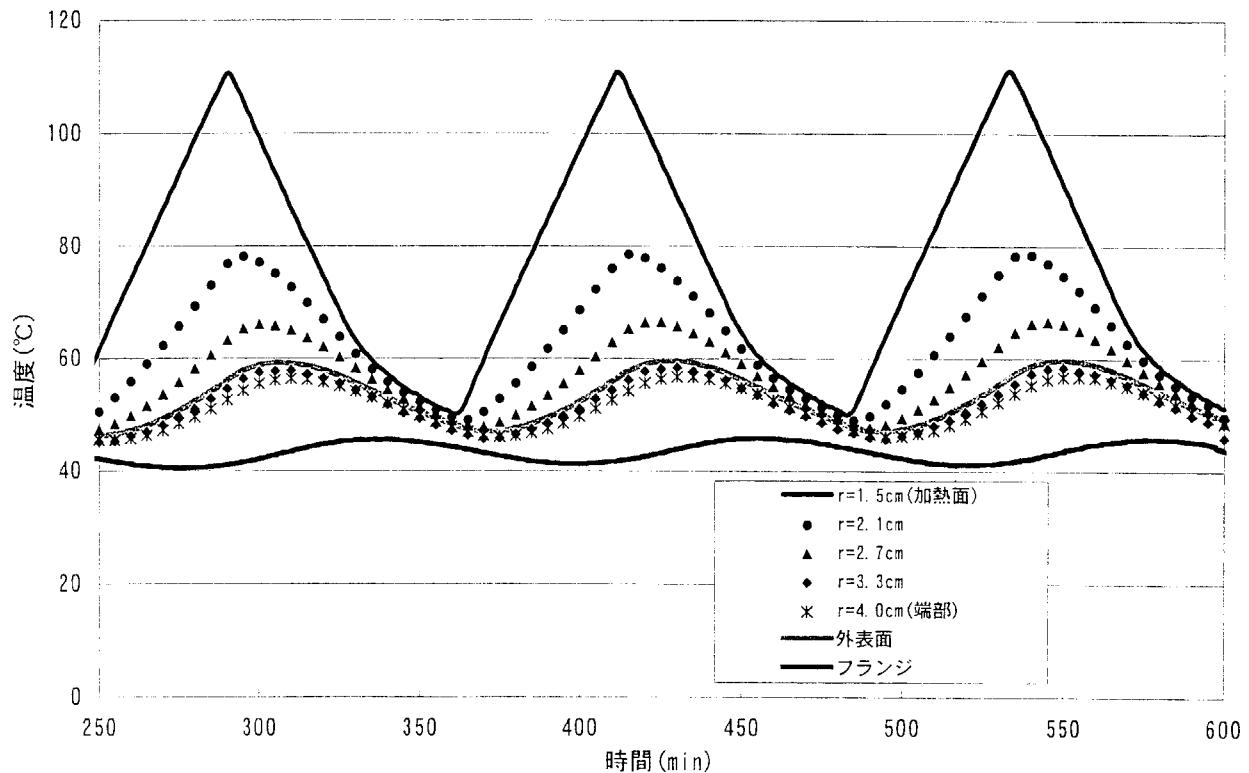


Fig. 4.2.1 ジルコンの保温時間0分の温度変化

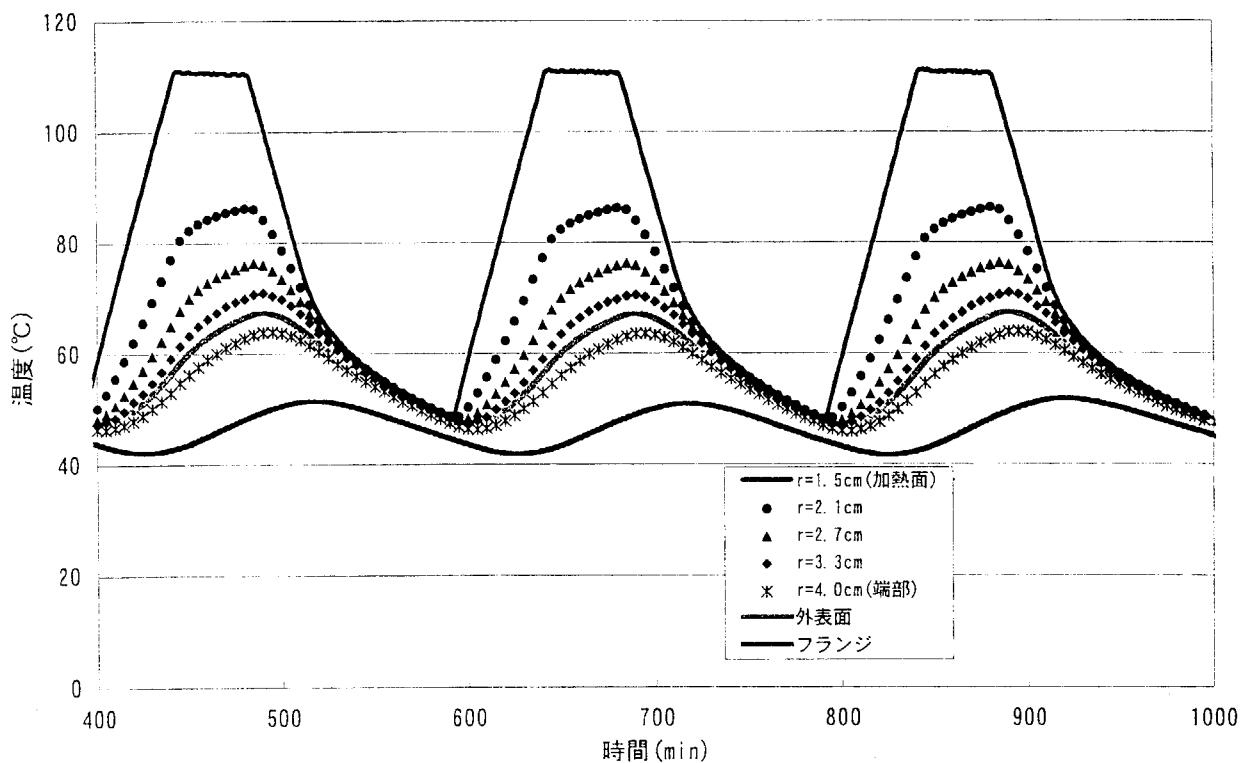


Fig. 4.2.2 ジルコンの保溫時間40分の温度変化

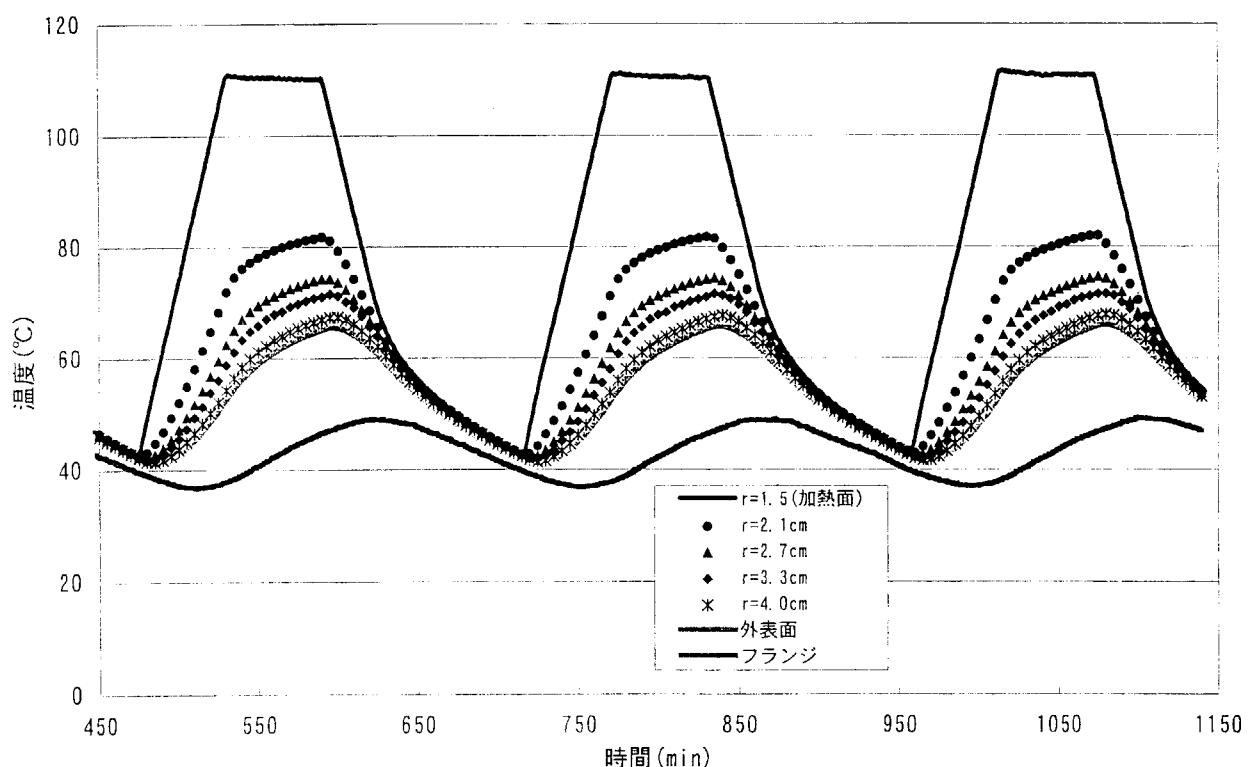


Fig. 4.2.3 ジルコンの保溫時間60分の温度変化

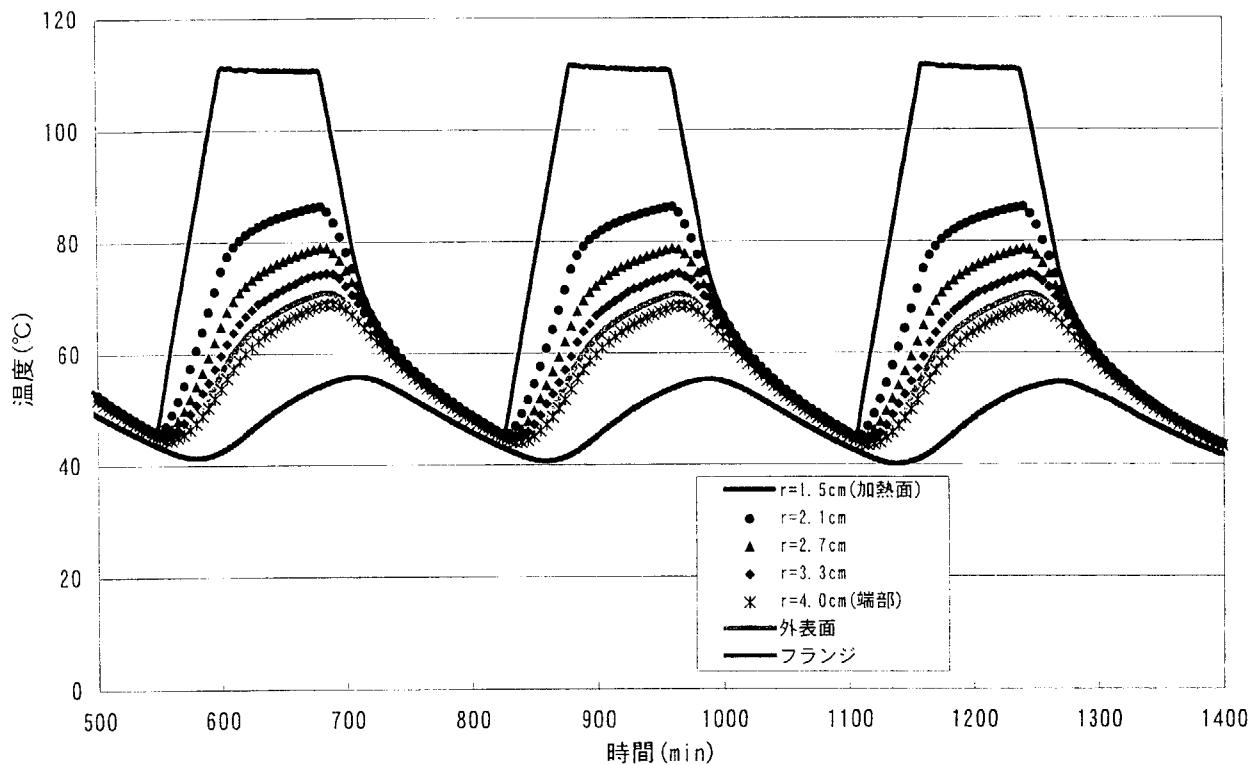


Fig. 4.2.4 ジルコンの保温時間80分の温度変化

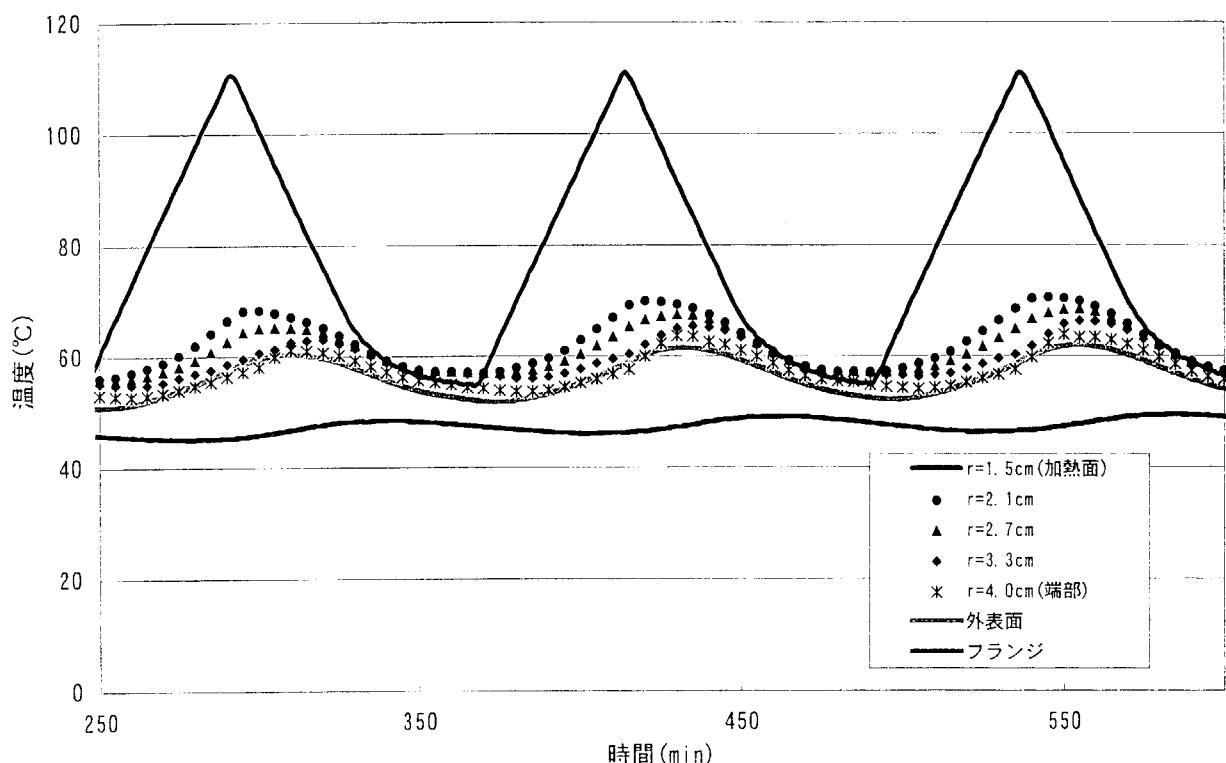


Fig. 4.2.5 ジルコン・パルミチン酸の保温時間0分の温度変化

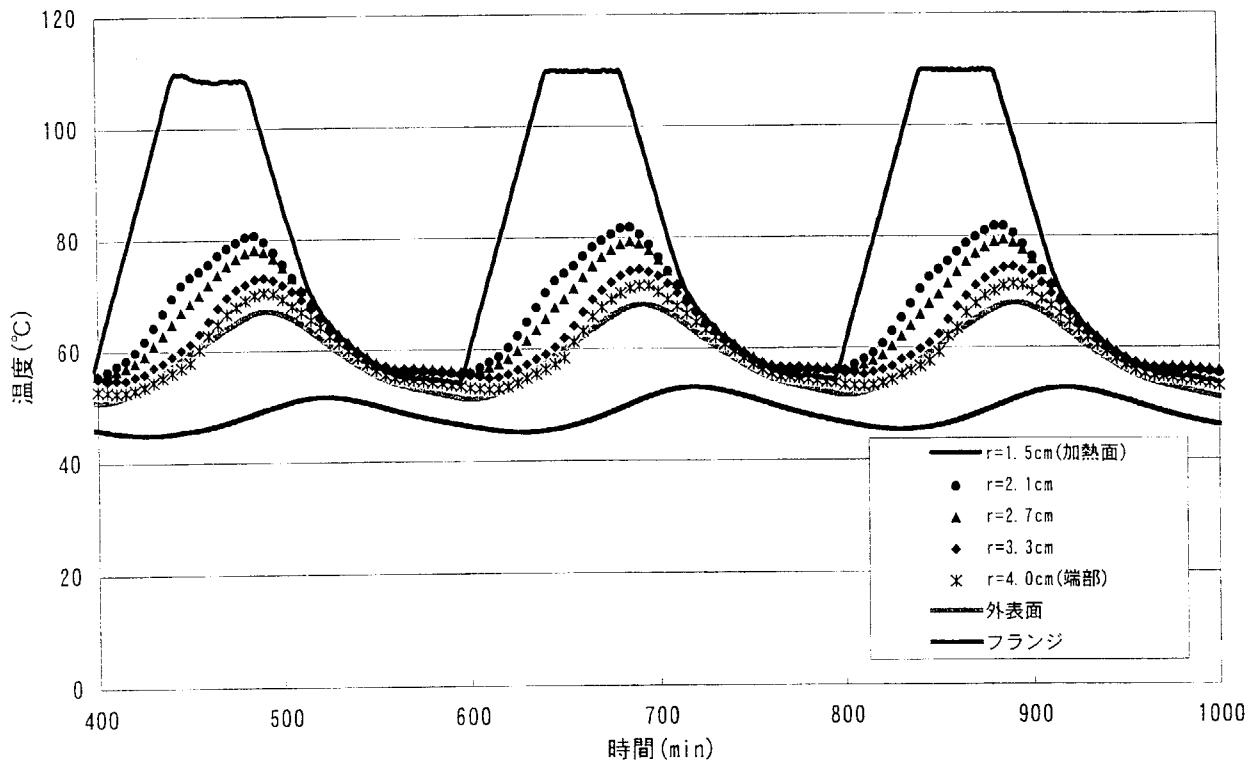


Fig. 4.2.6 ジルコン・パルミチン酸の
保温時間40分の温度変化

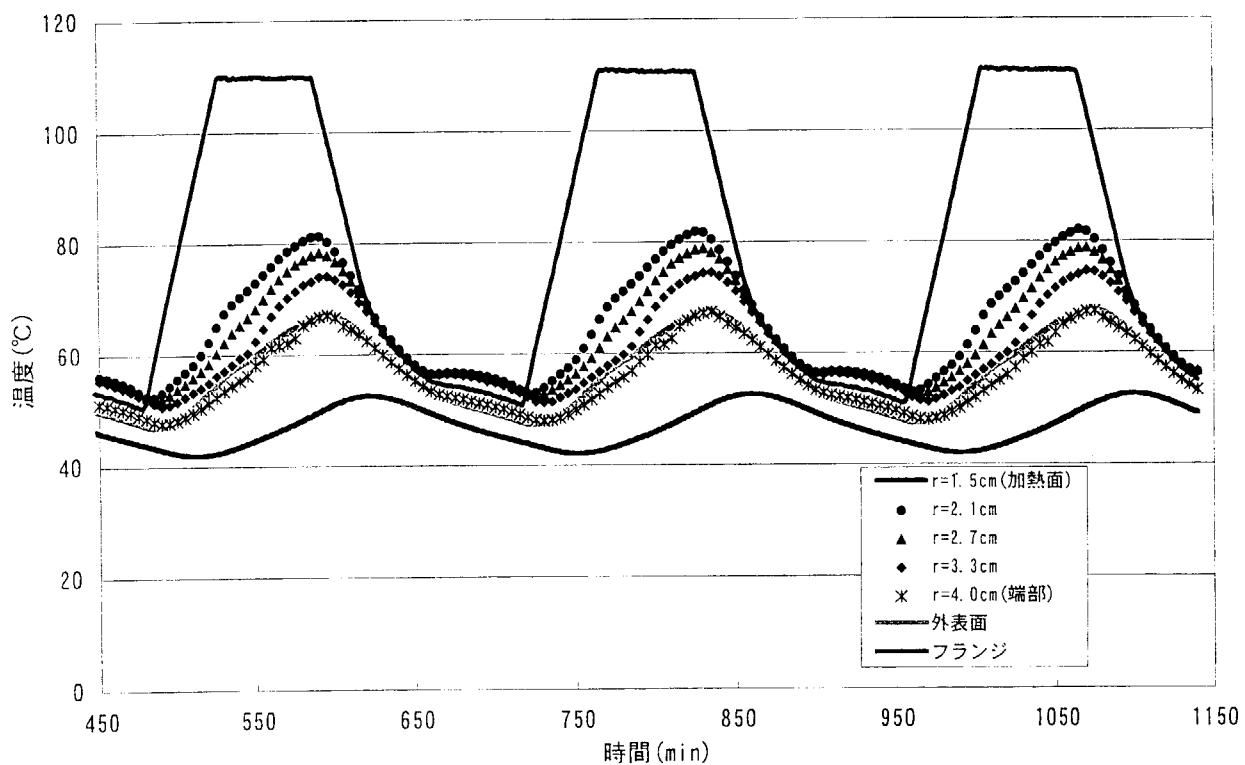


Fig. 4.2.7 ジルコン・パルミチン酸の
保温時間60分の温度変化

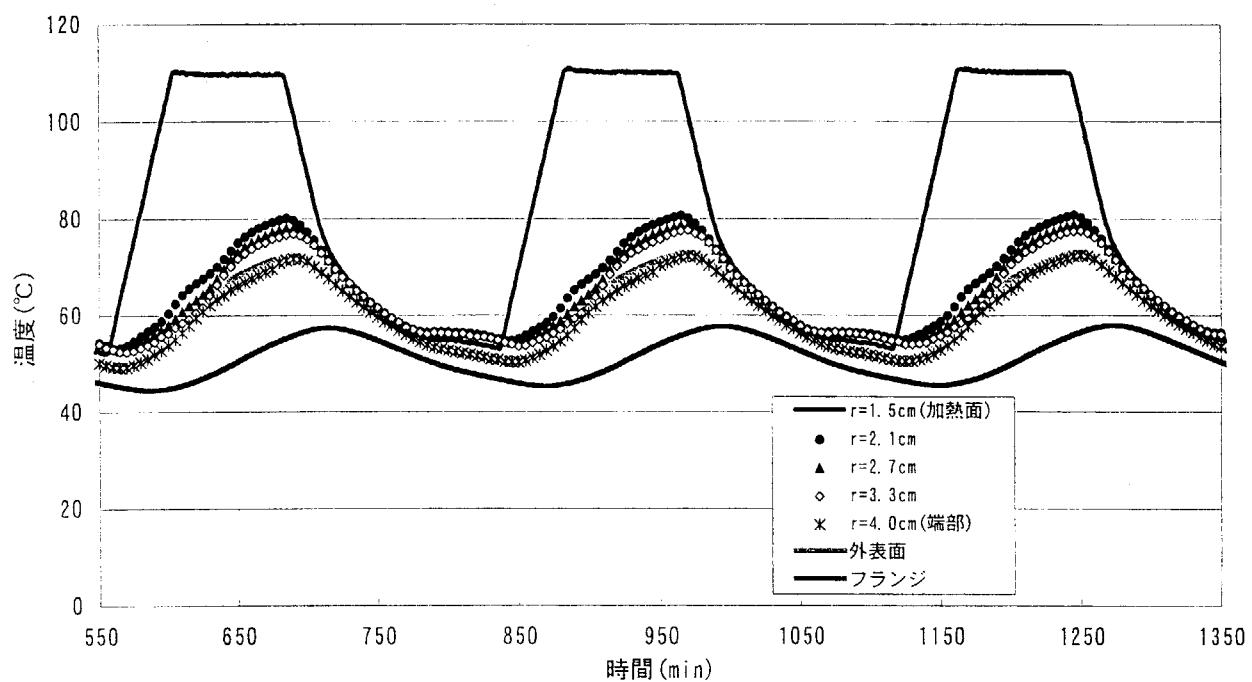


Fig. 4.2.8 ジルコン・パルミチン酸の
保温時間80分の温度変化

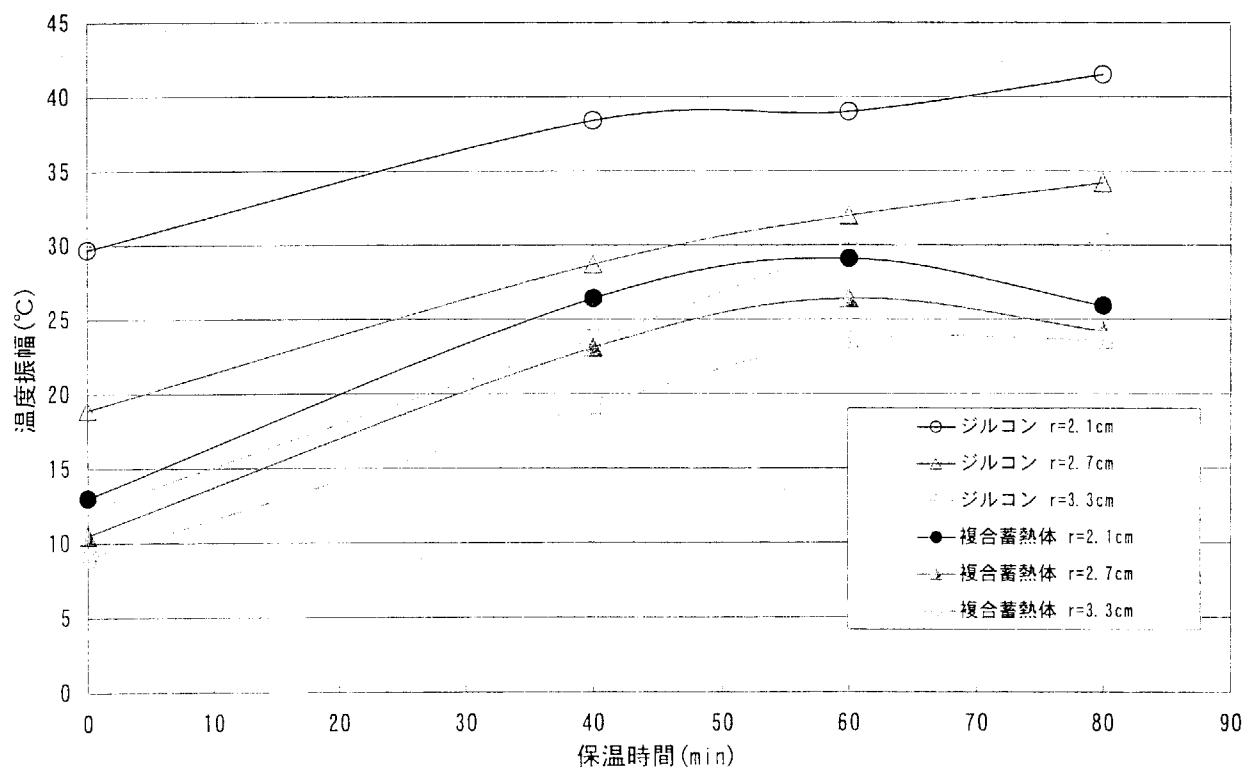


Fig. 4.2.9 ジルコンと複合蓄熱体の保温時間と
温度振幅の関係

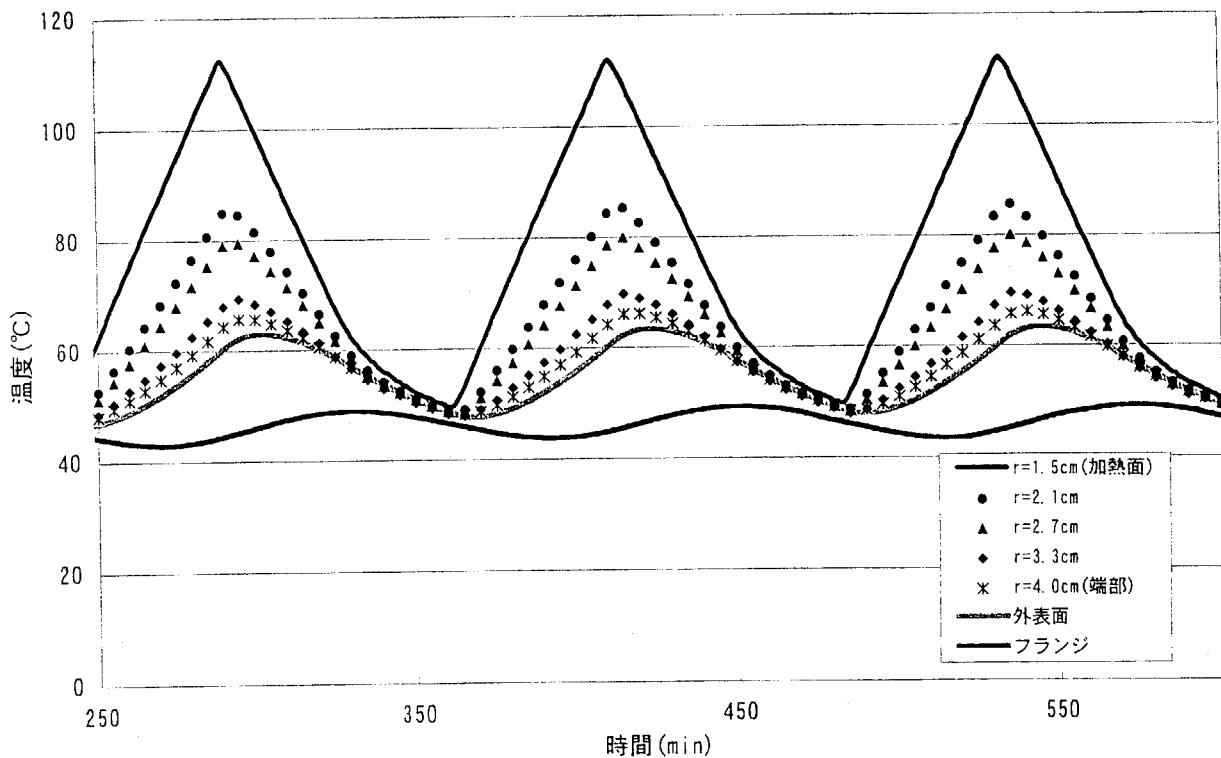


Fig. 4.2.10 ニッケル-クロムの保溫時間0分の温度変化

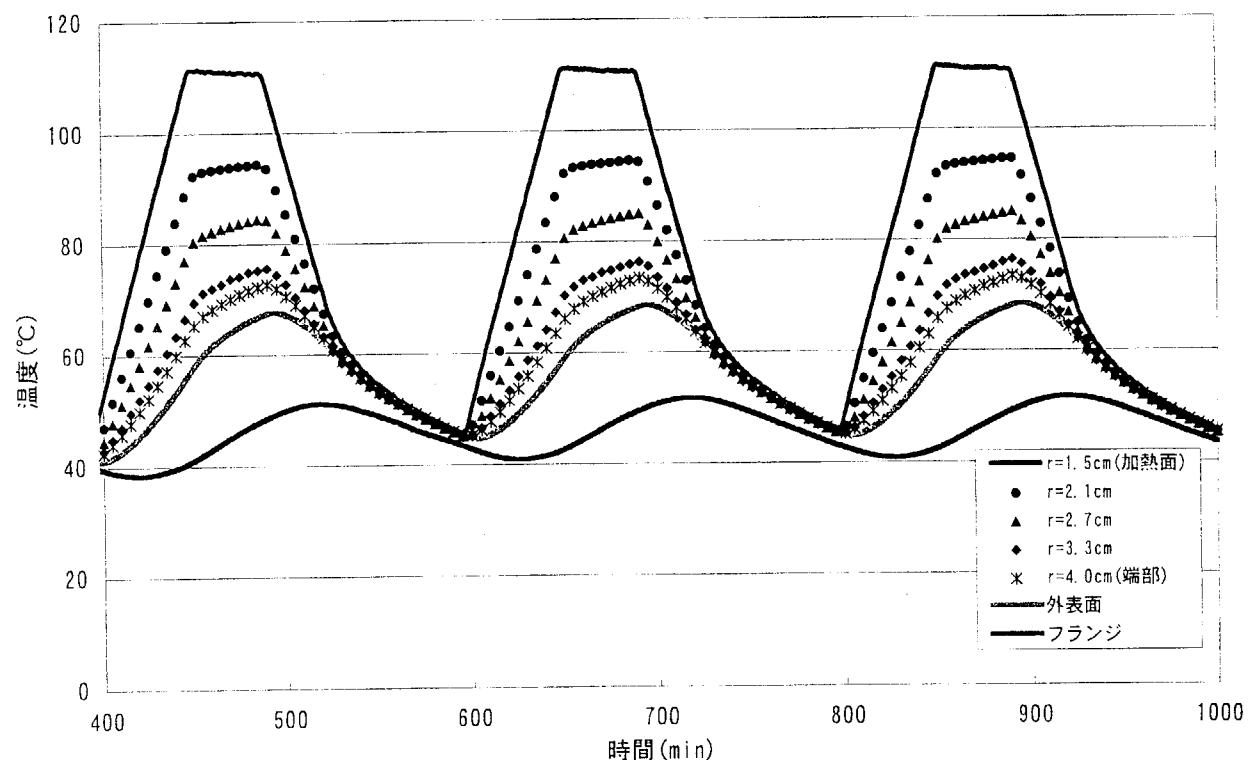


Fig. 4.2.11 ニッケル-クロムの保溫時間40分の温度変化

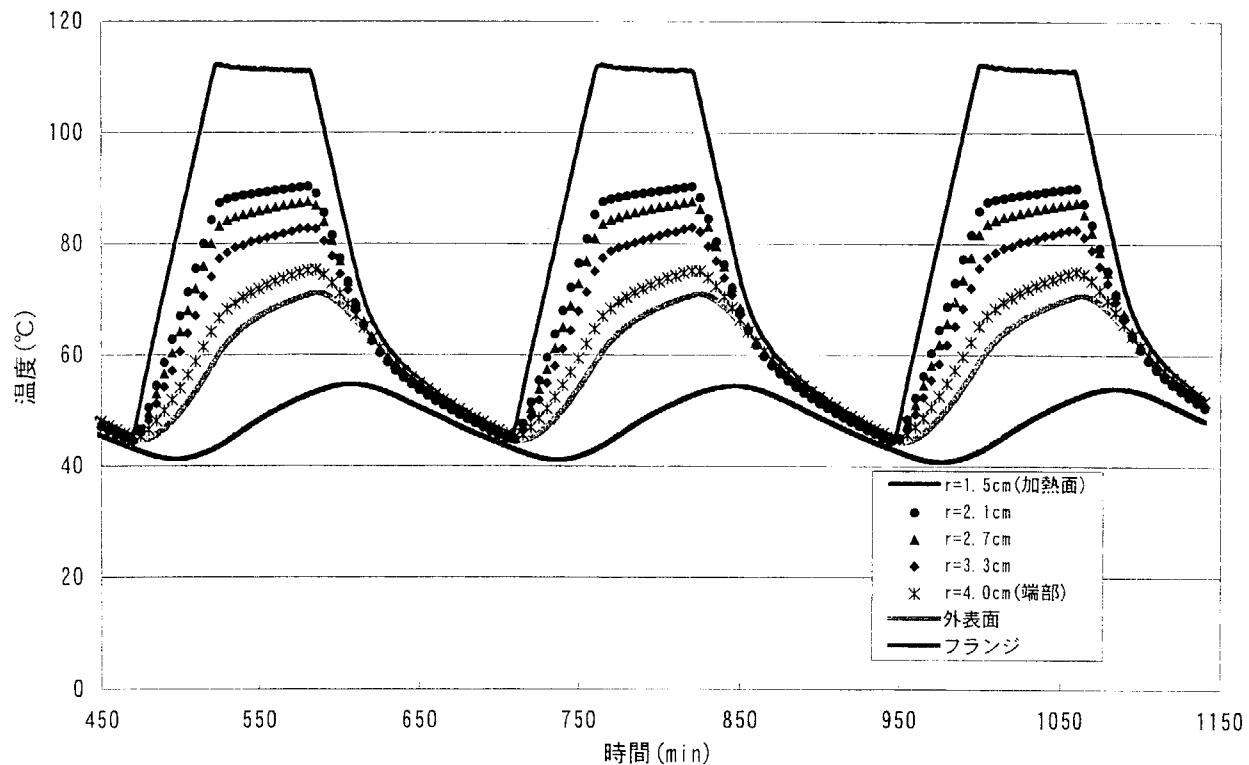


Fig. 4.2.12 ニッケル-クロムの保温時間60分の温度変化

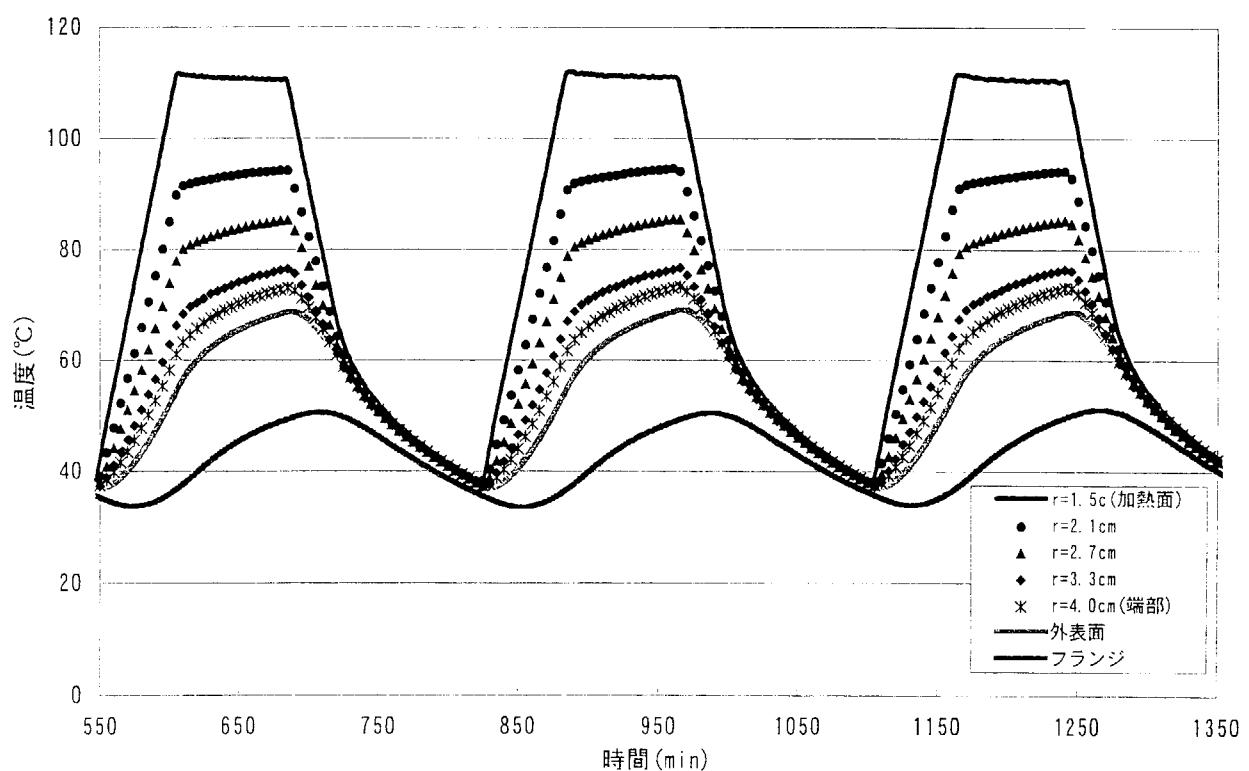


Fig. 4.2.13 ニッケル-クロムの保温時間80分の温度変化

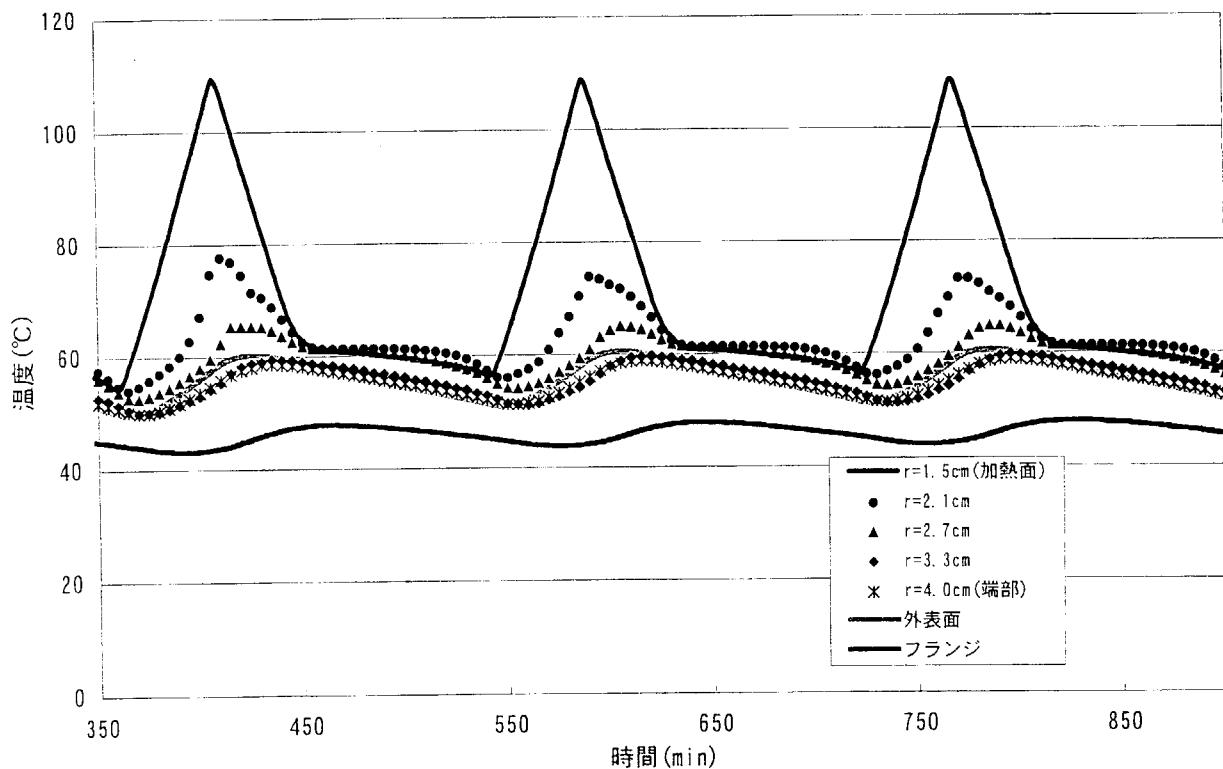


Fig. 4.2.14 ニッケル-クロム・パルミチン酸の
保温時間0分の温度変化

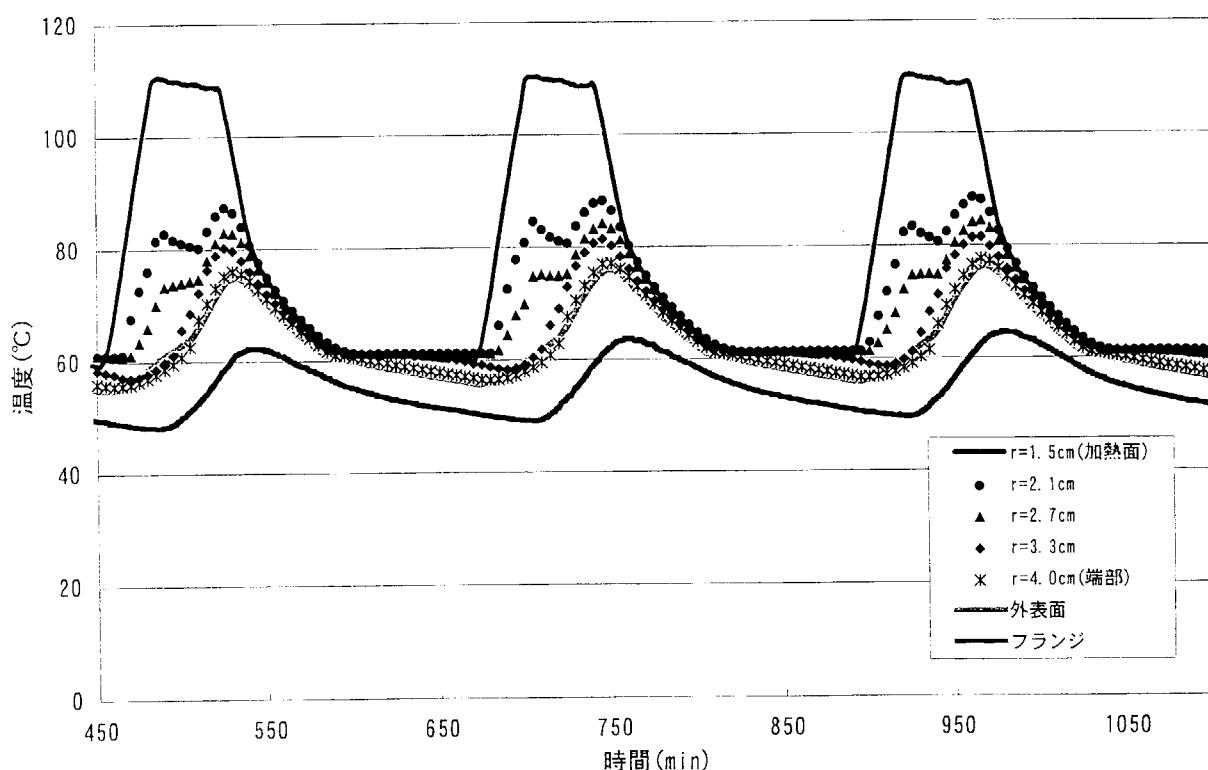


Fig. 4.2.15 ニッケル-クロム・パルミチン酸の
保温時間40分の温度変化

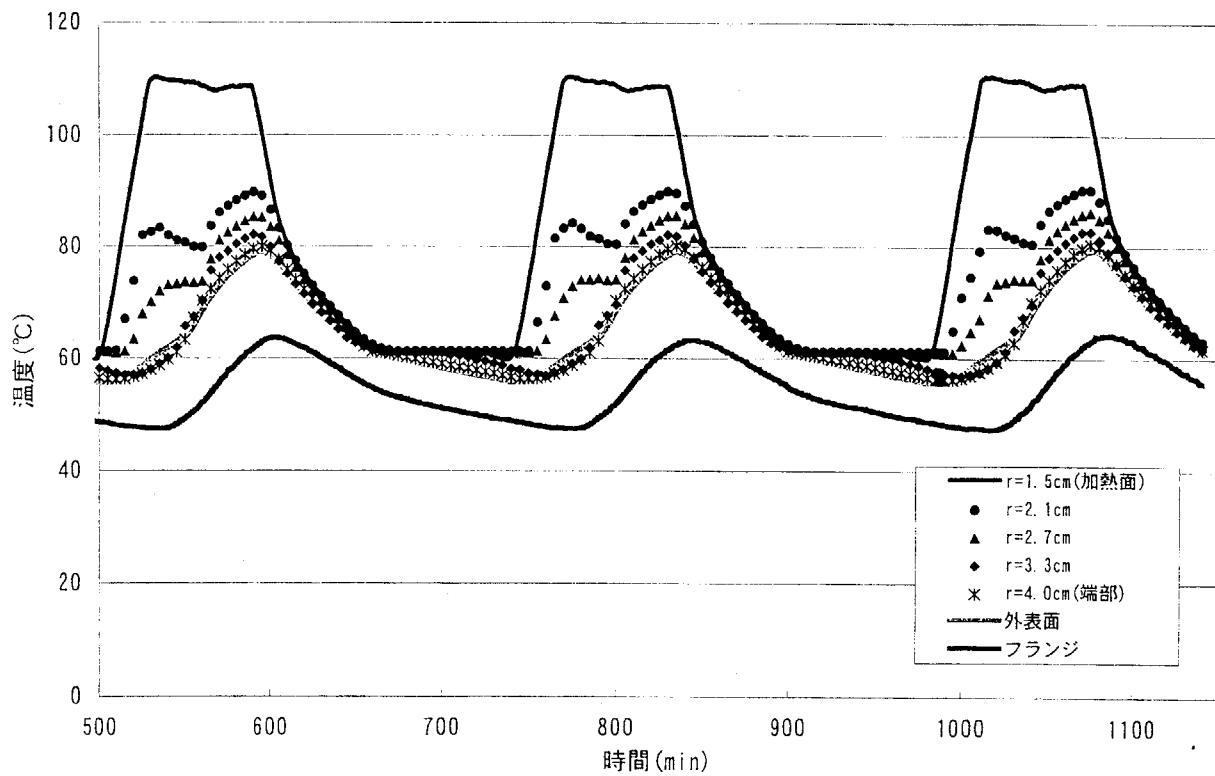


Fig. 4.2.16 ニッケル-クロム・パルミチン酸の
保温時間60分の温度変化

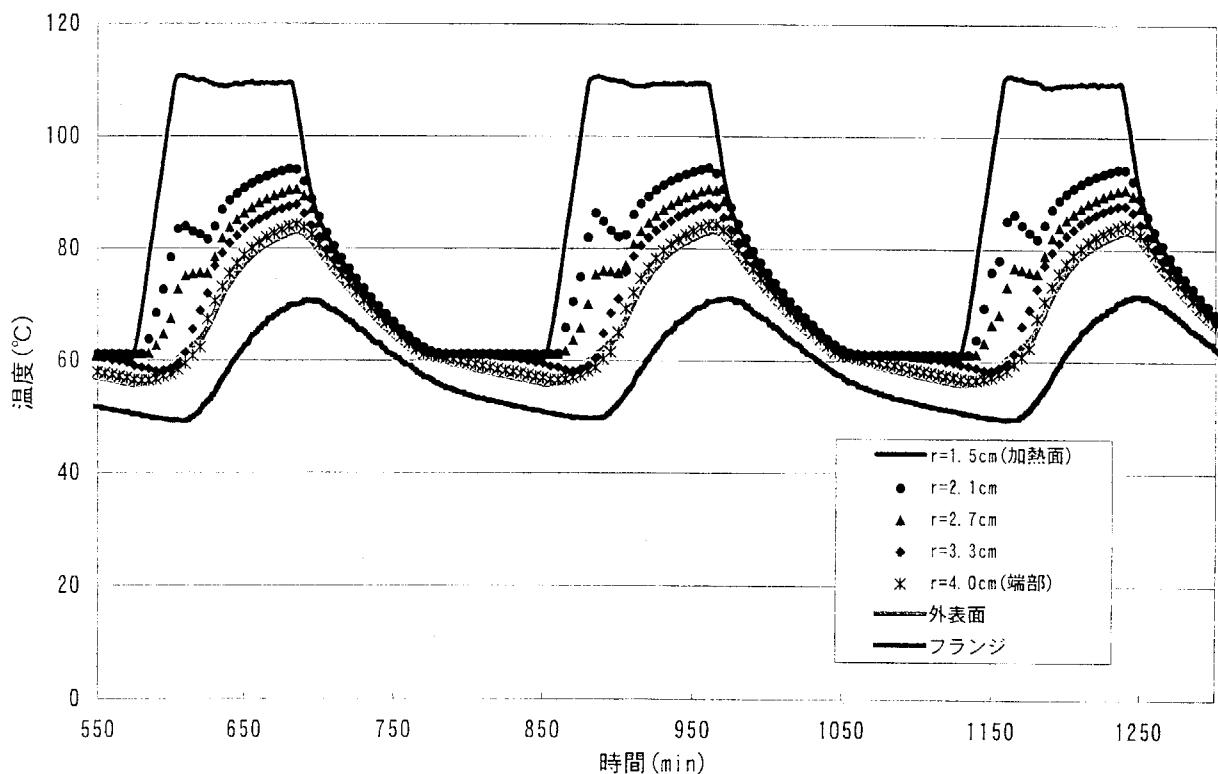


Fig. 4.2.17 ニッケル-クロム・パルミチン酸の
保温時間80分の温度変化

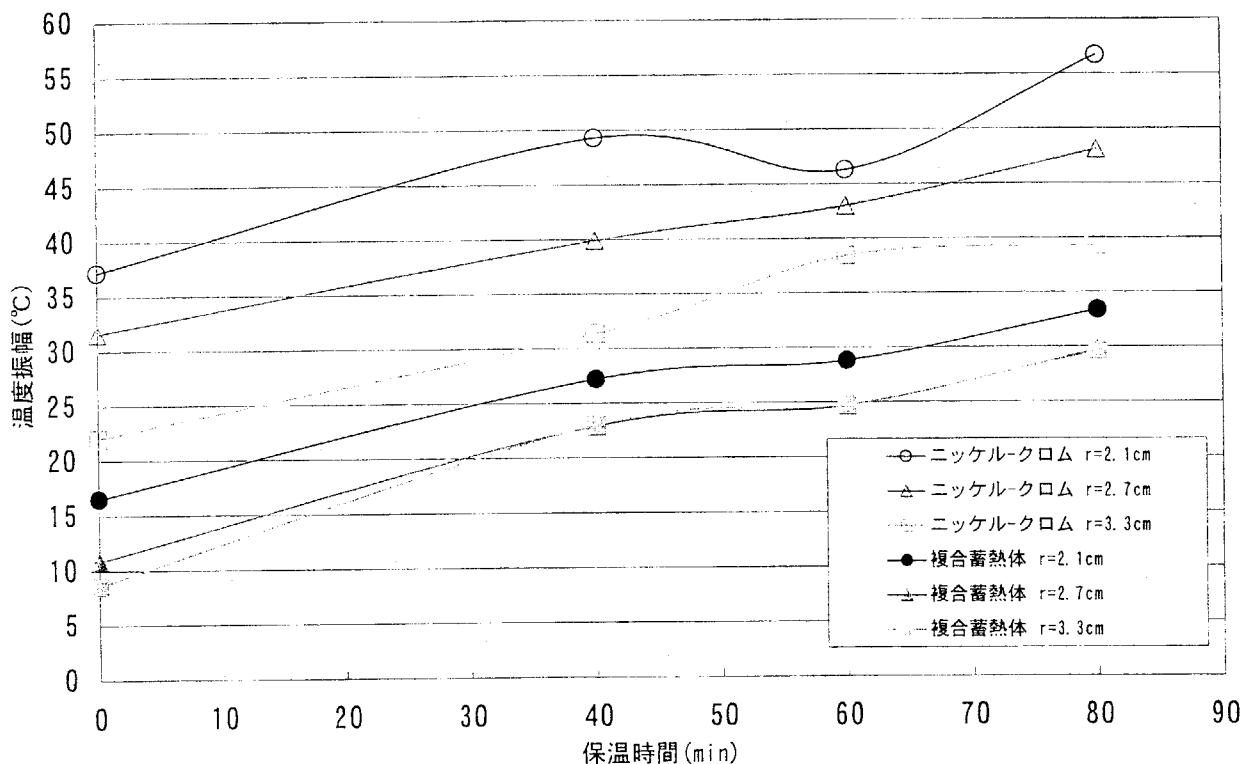


Fig. 4.2.18 ニッケル-クロムと複合蓄熱体の
保温時間と温度振幅の関係

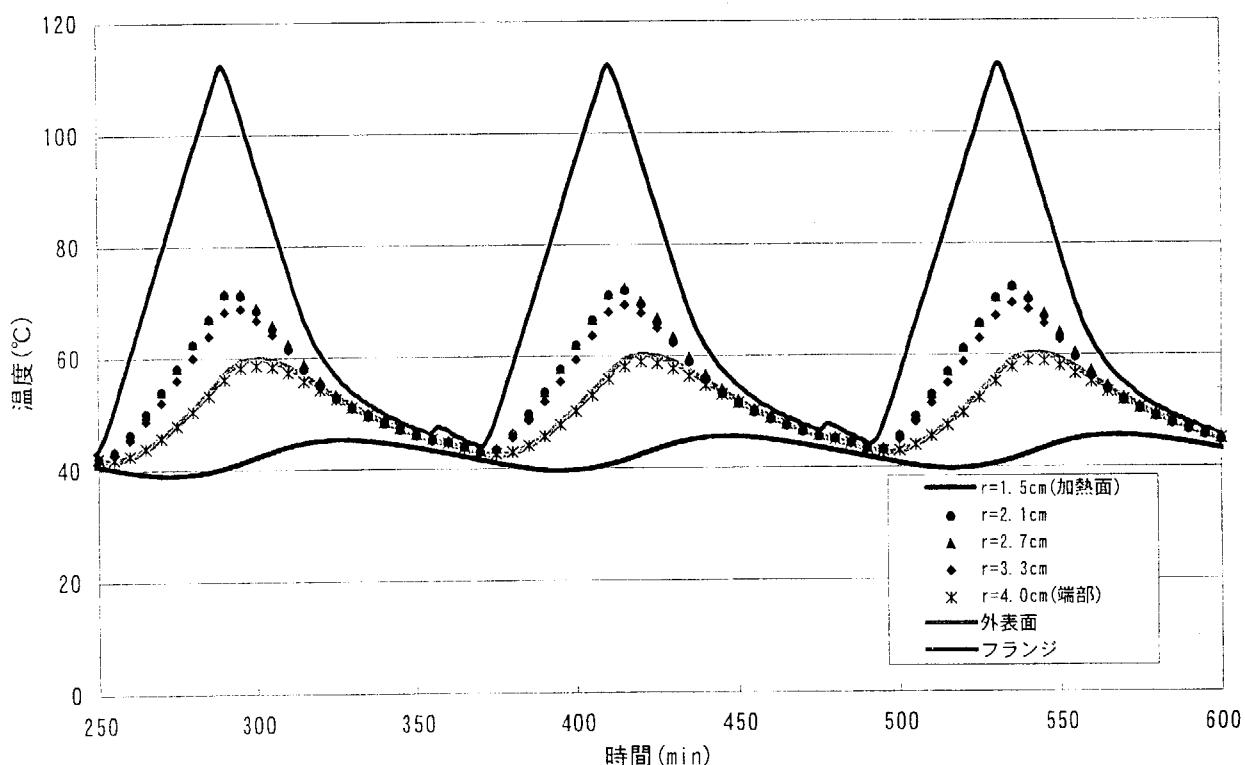


Fig. 4.2.19 ニッケルの保温時間0分の温度変化

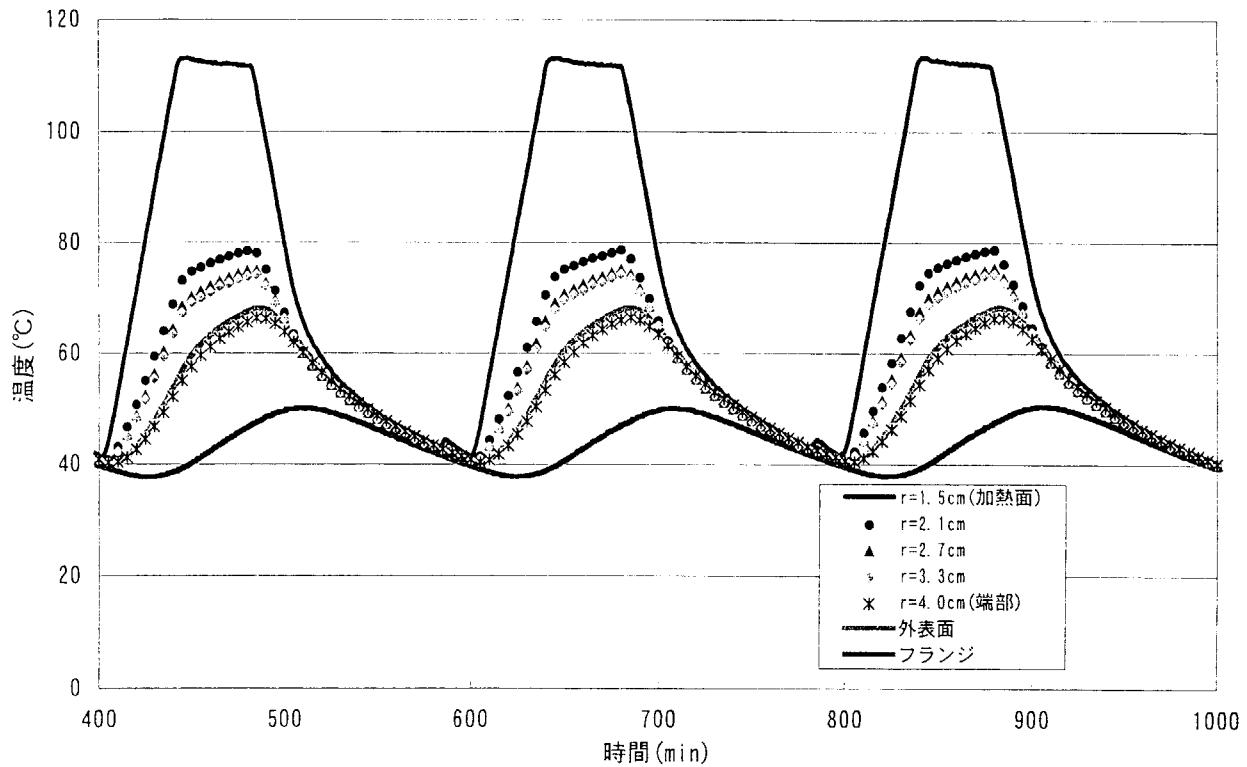


Fig. 4.2.20 ニッケルの保溫時間40分の温度変化

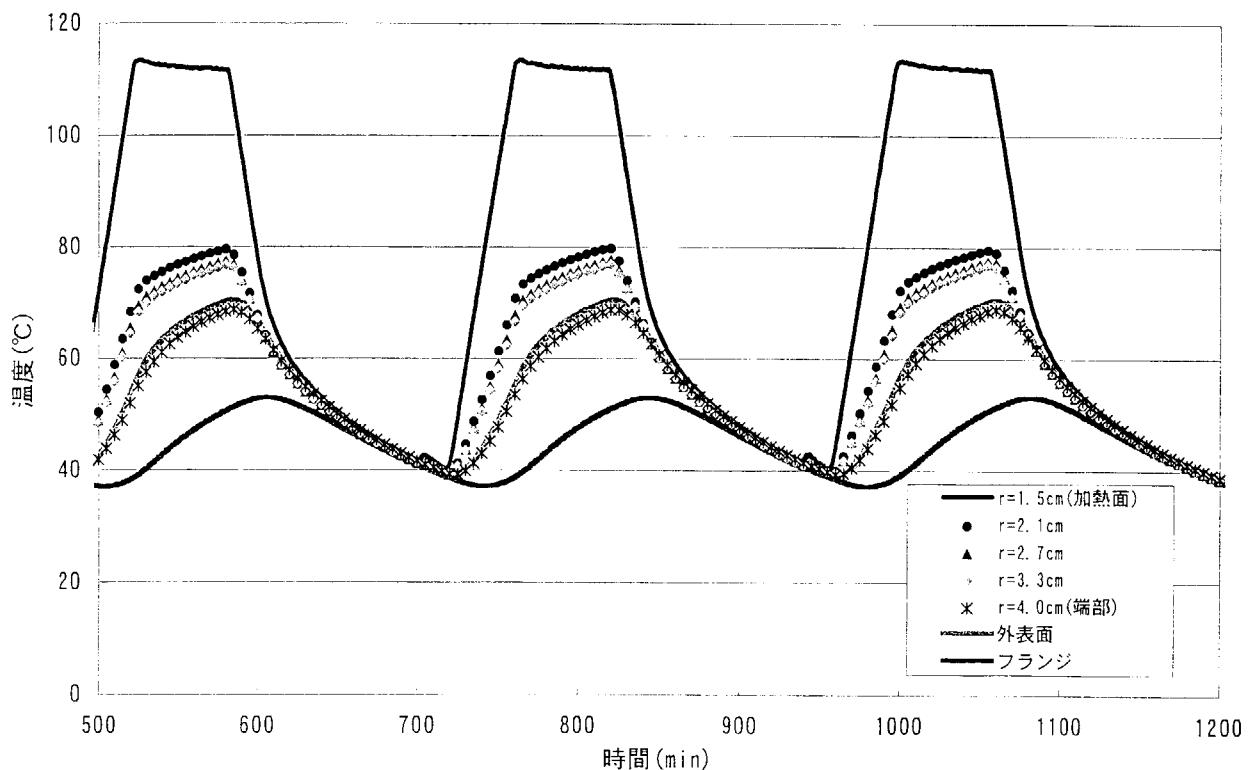


Fig. 4.2.21 ニッケルの保溫時間60分の温度変化

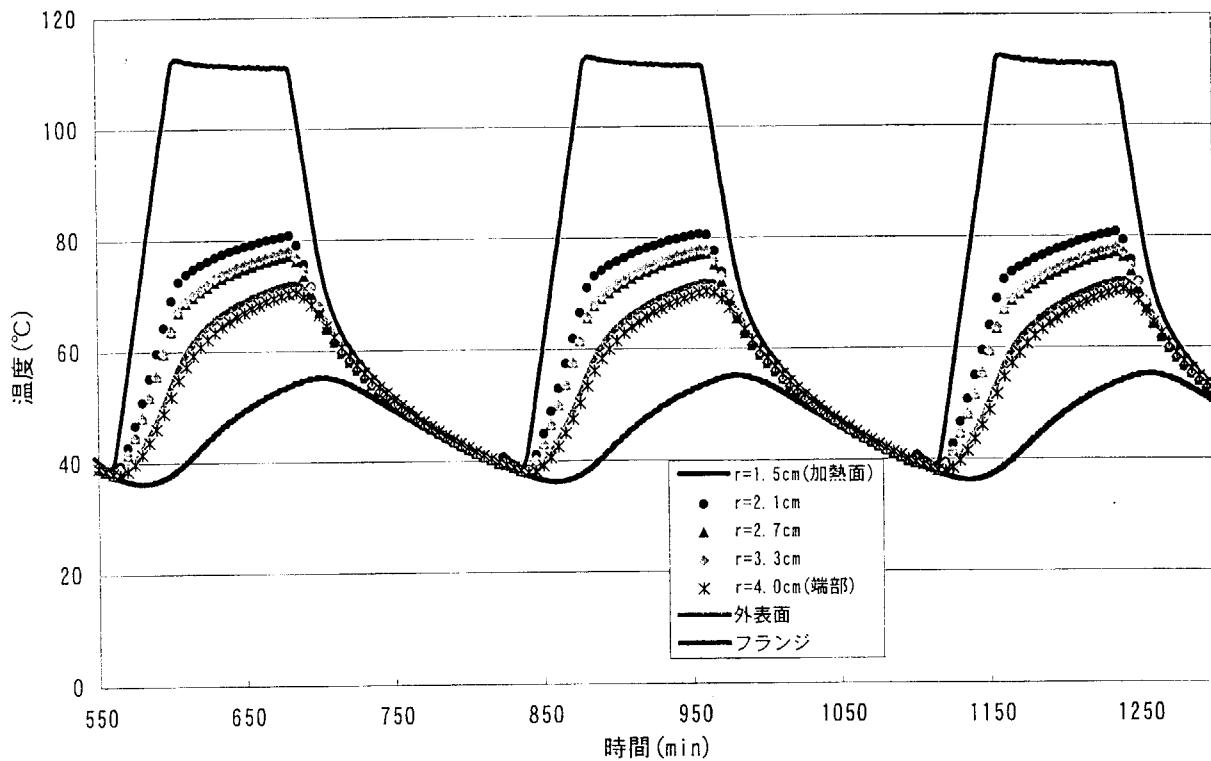


Fig. 4.2.22 ニッケルの保温時間80分の温度変化

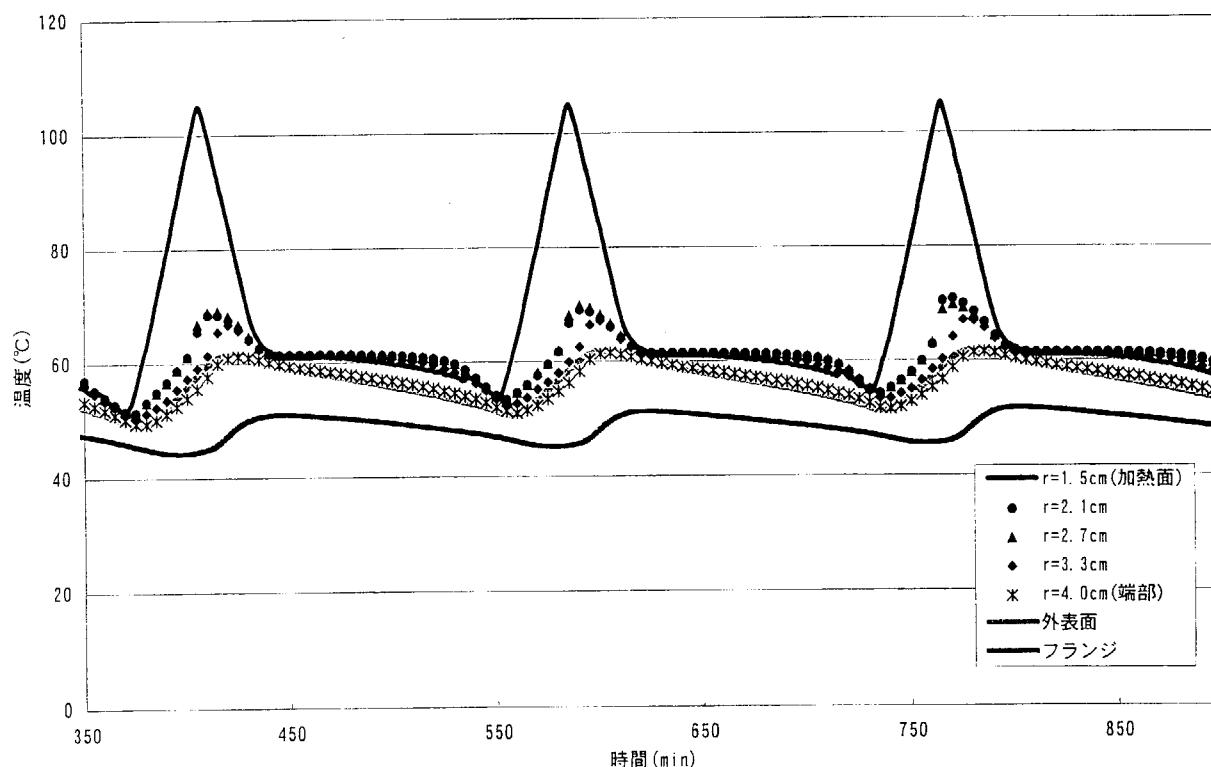


Fig. 4.2.23 ニッケル・パルミチン酸の保温時間0分の温度変化

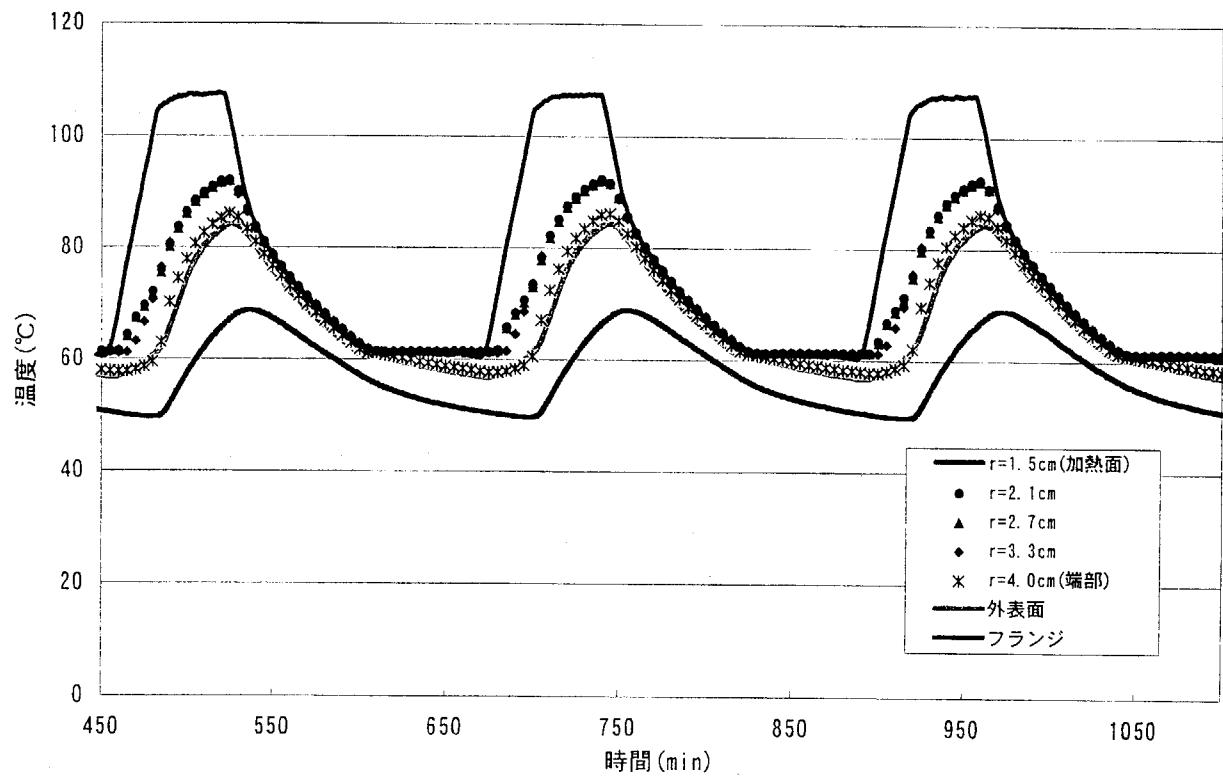


Fig. 4.2.24 ニッケル・パルミチン酸の
保温時間40分の温度変化

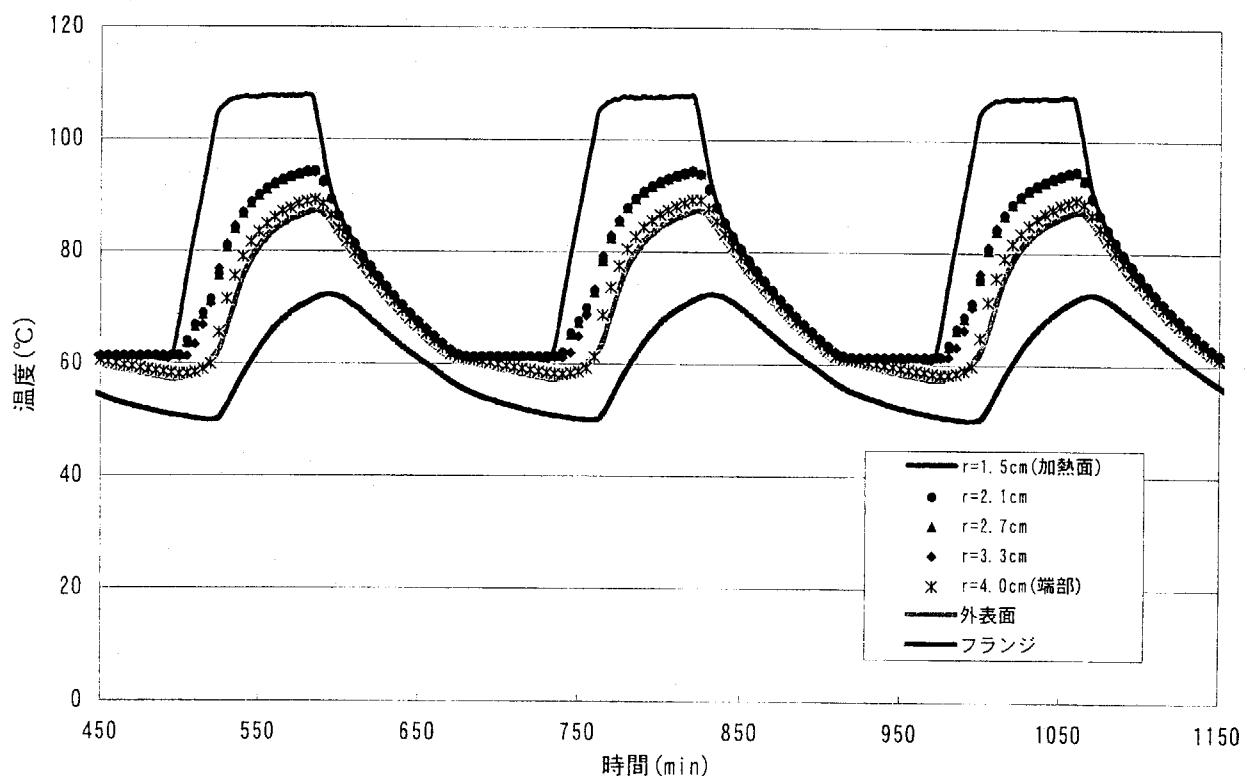


Fig. 4.2.25 ニッケル・パルミチン酸の
保温時間60分の温度変化

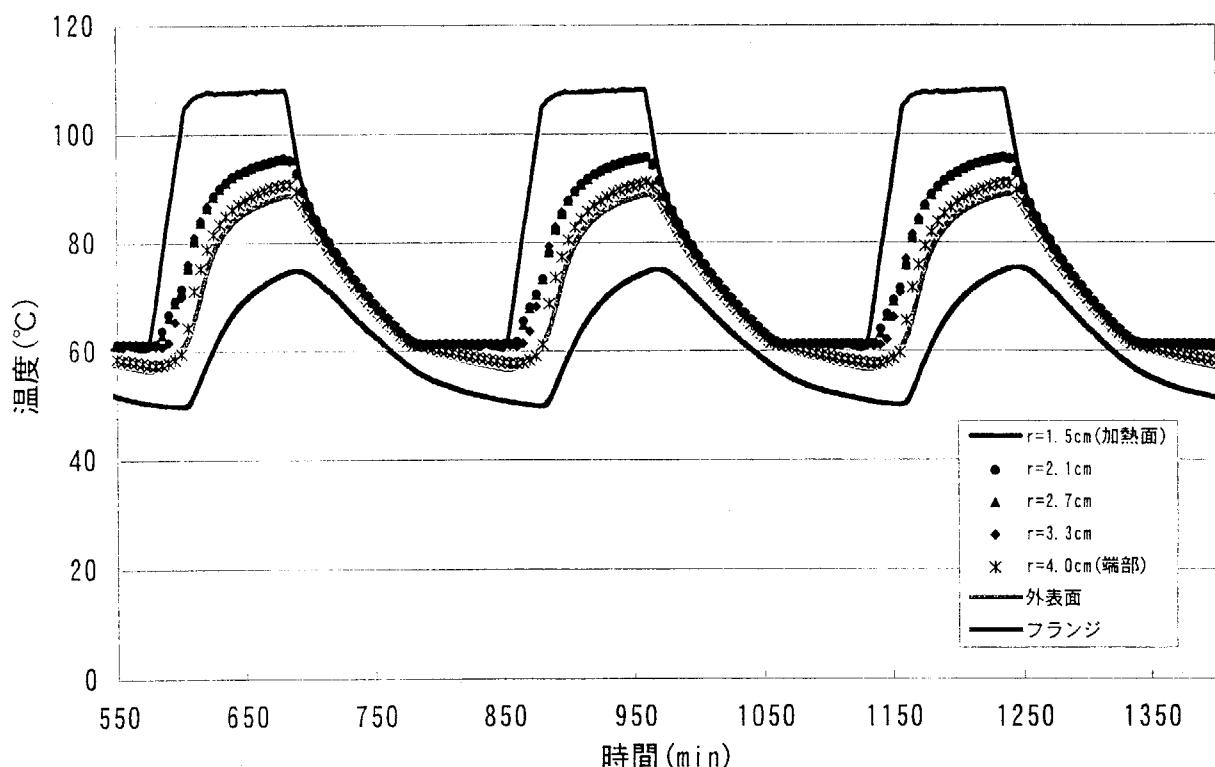


Fig. 4.2.26 ニッケル・パルミチン酸の
保温時間80分の温度変化

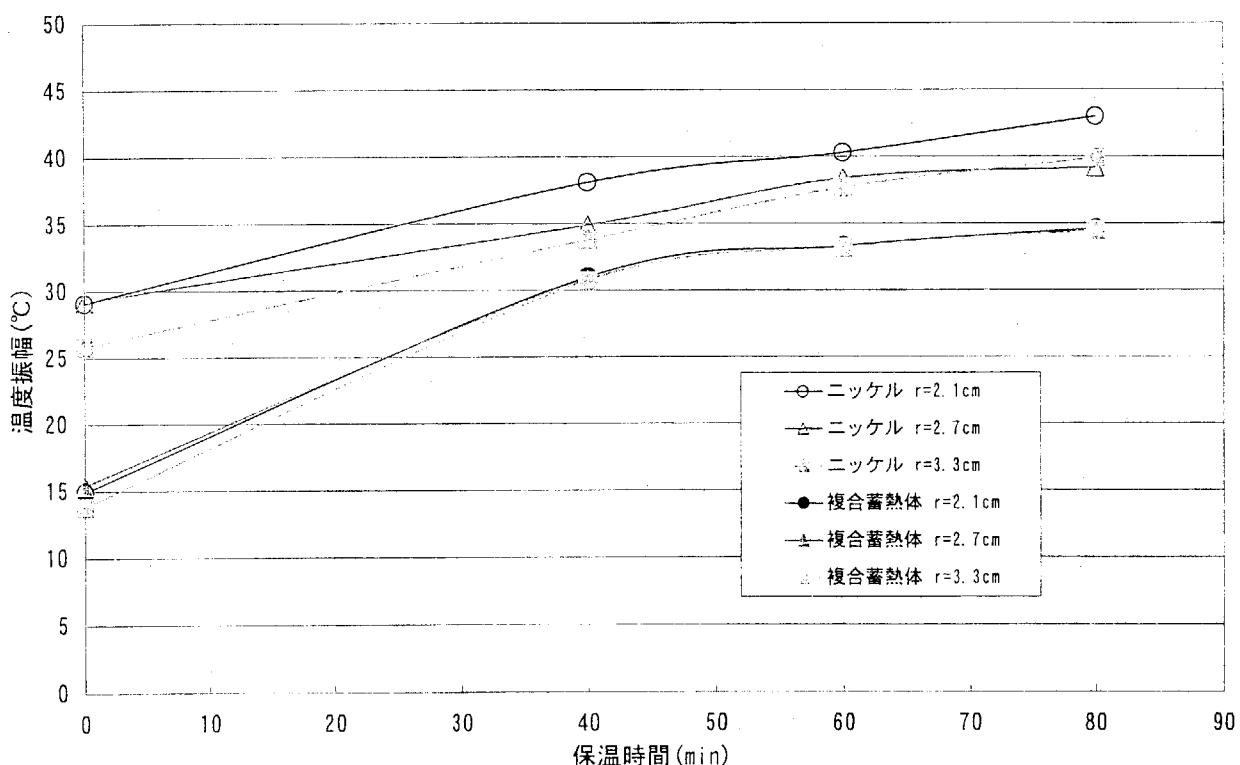


Fig. 4.2.27 ニッケルと複合蓄熱体の保温時間と
温度振幅の関係

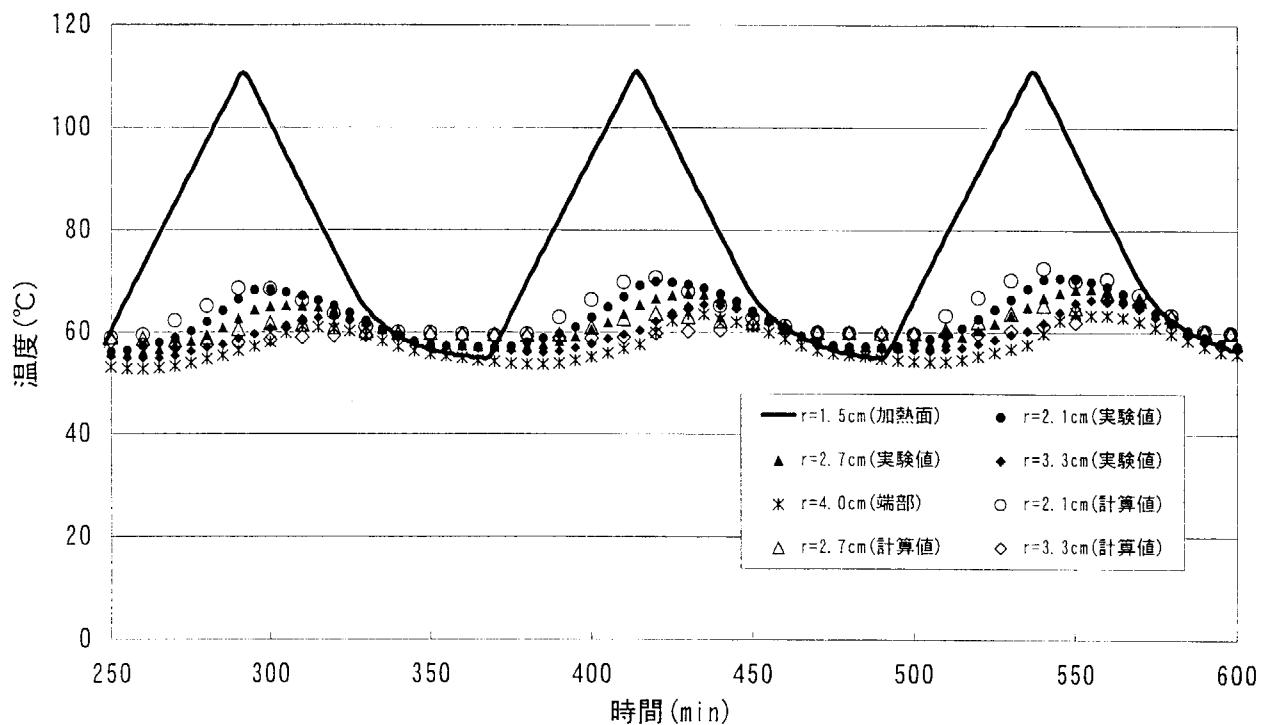


Fig. 4.2.28 ジルコン・パルミチン酸の保温0分の温度変化

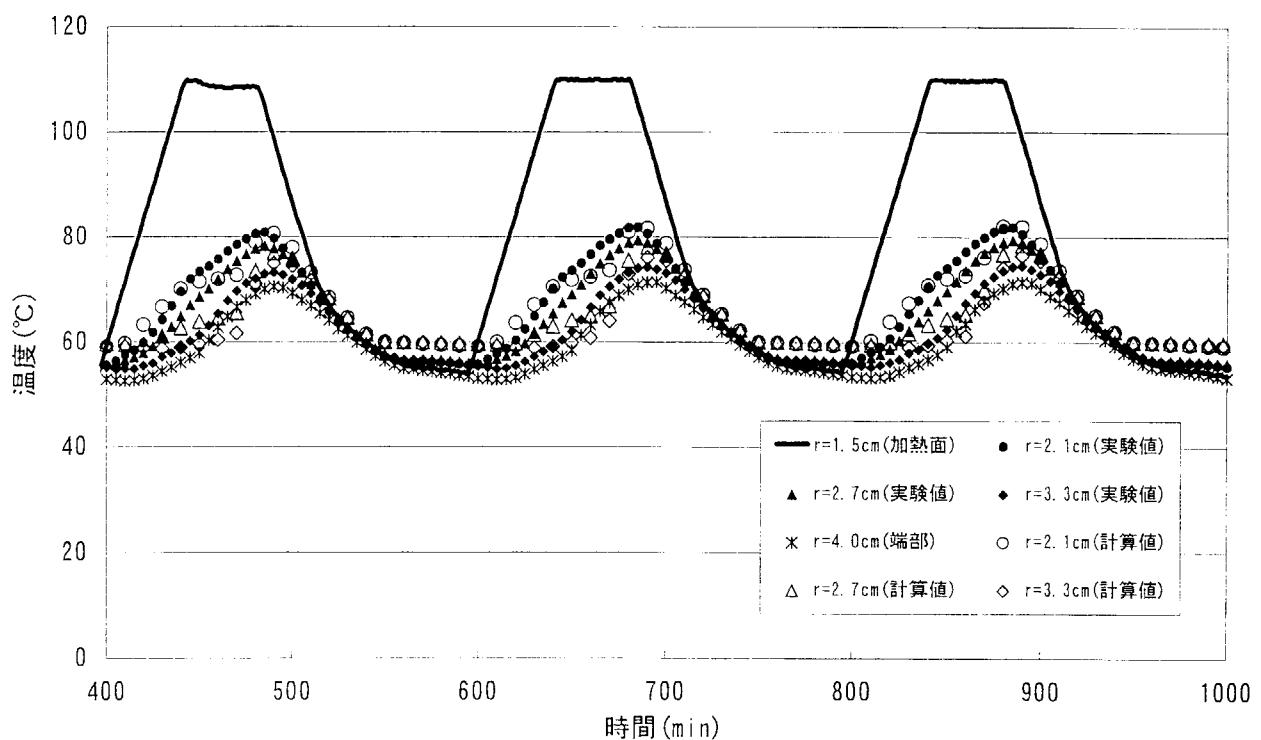


Fig. 4.2.29 ジルコン・パルミチン酸の保温時間40分の温度変化

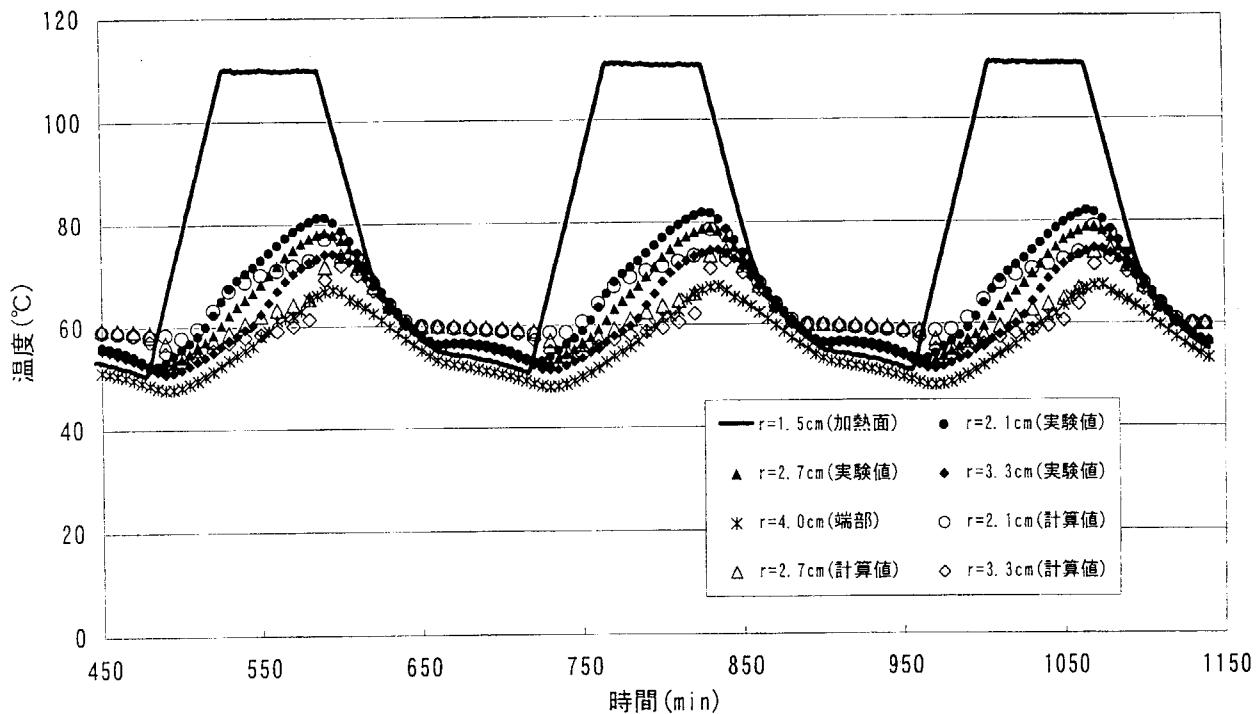


Fig. 4.2.30 ジルコン・パルミチン酸の保温時間60分の温度変化

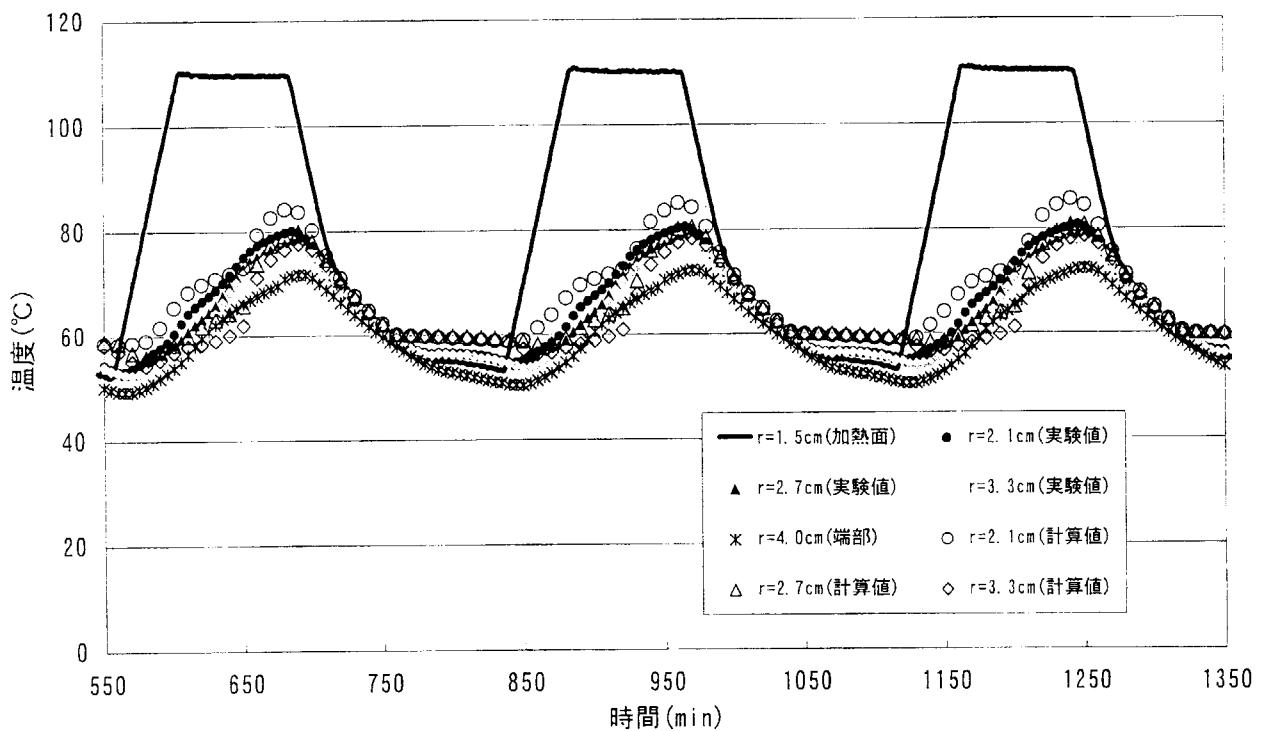


Fig. 4.2.31 ジルコン・パルミチン酸の保温時間80分の温度変化

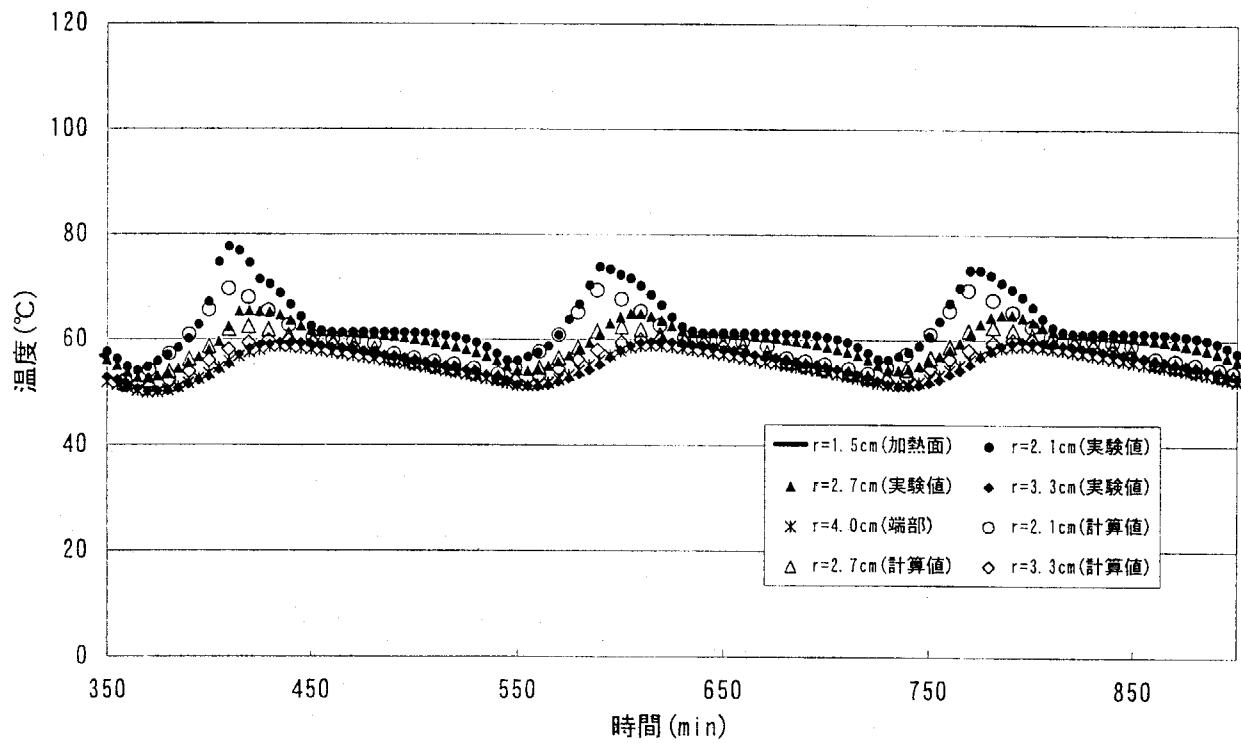


Fig. 4.2.32 Ni-Cr · パルミチン酸の保温時間0分の温度変化

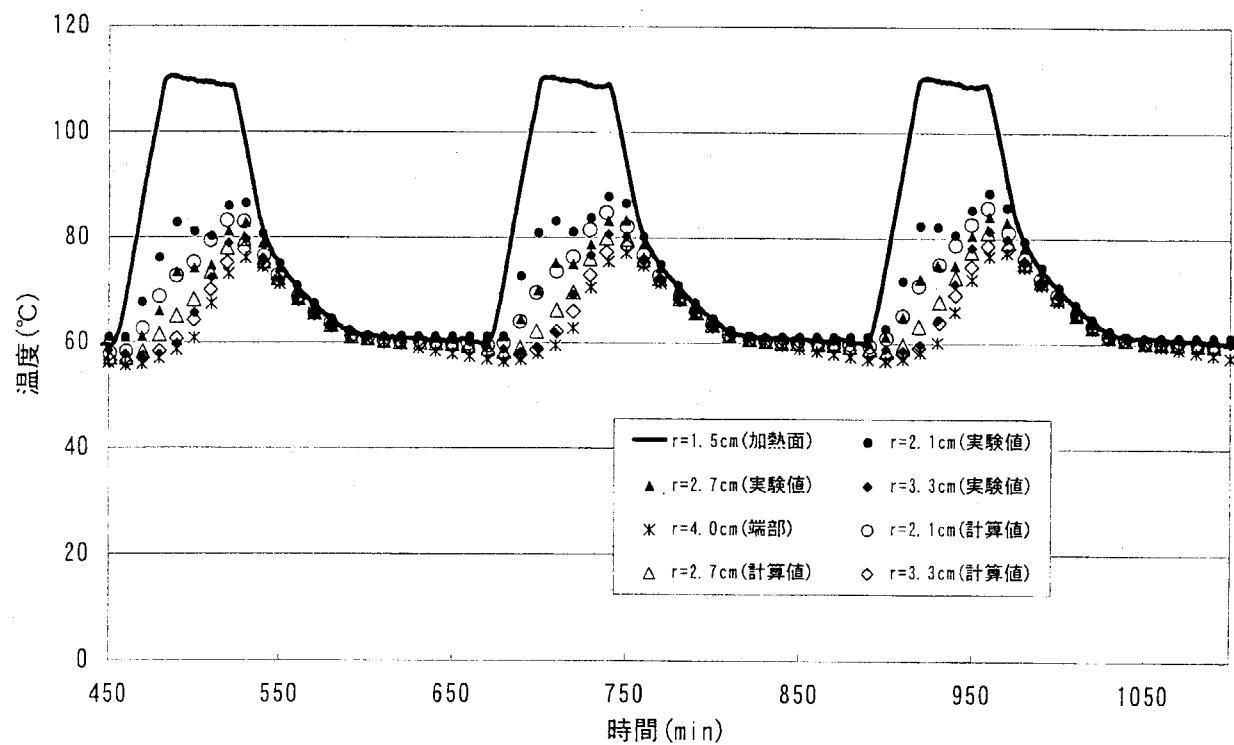


Fig. 4.2.33 Ni-Cr · パルミチン酸の保温時間40分の温度変化

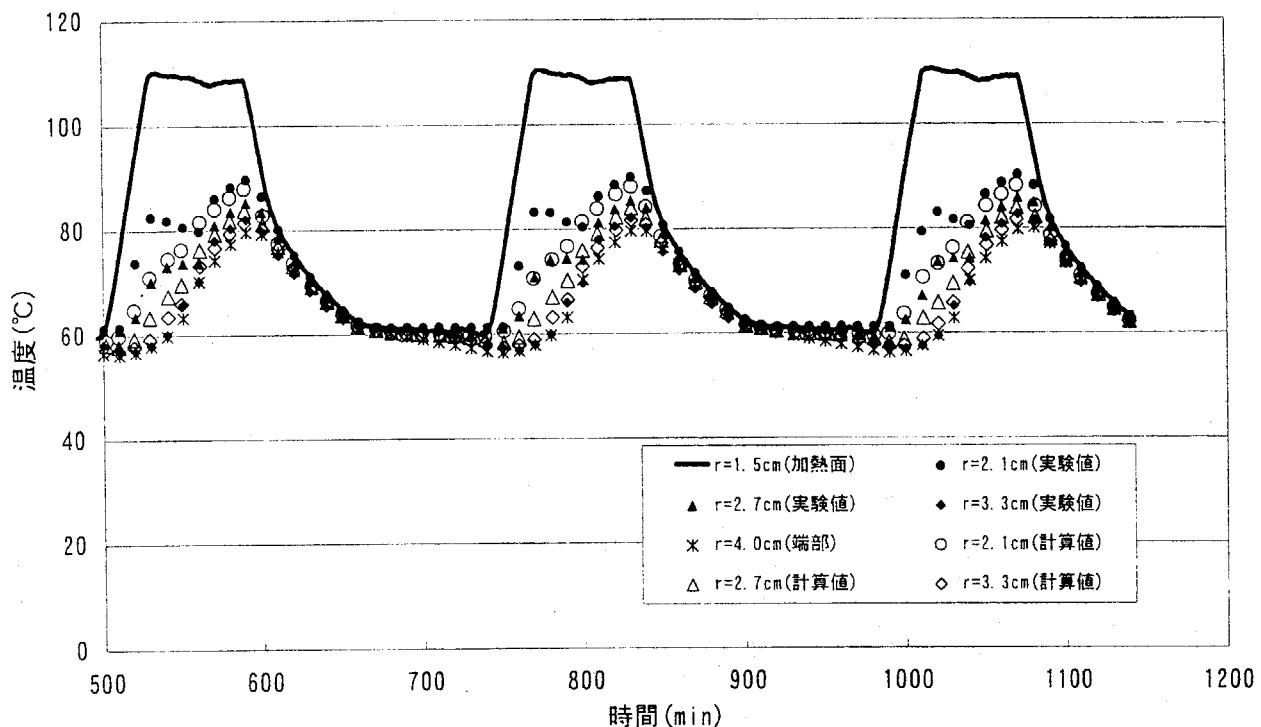


Fig. 4.2.34 Ni-Cr · パルミチン酸の保温時間60分の温度変化

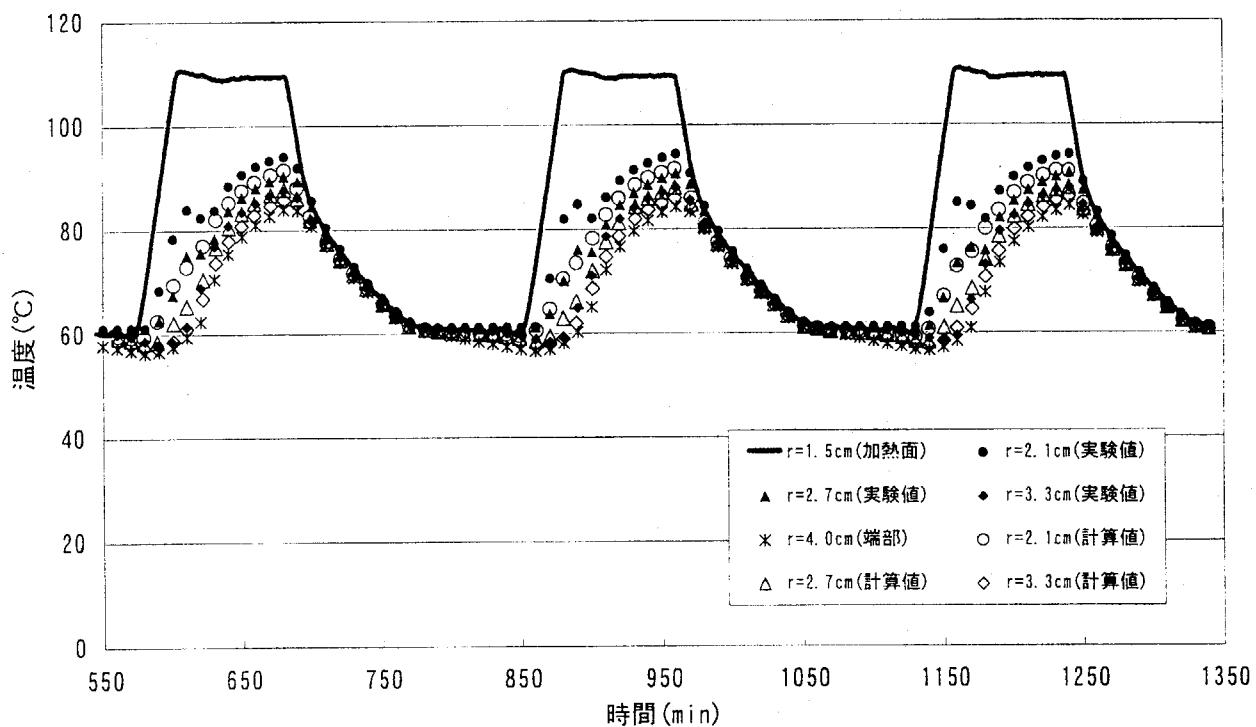


Fig. 4.2.35 Ni-Cr · パルミチン酸の保温時間80分の温度変化

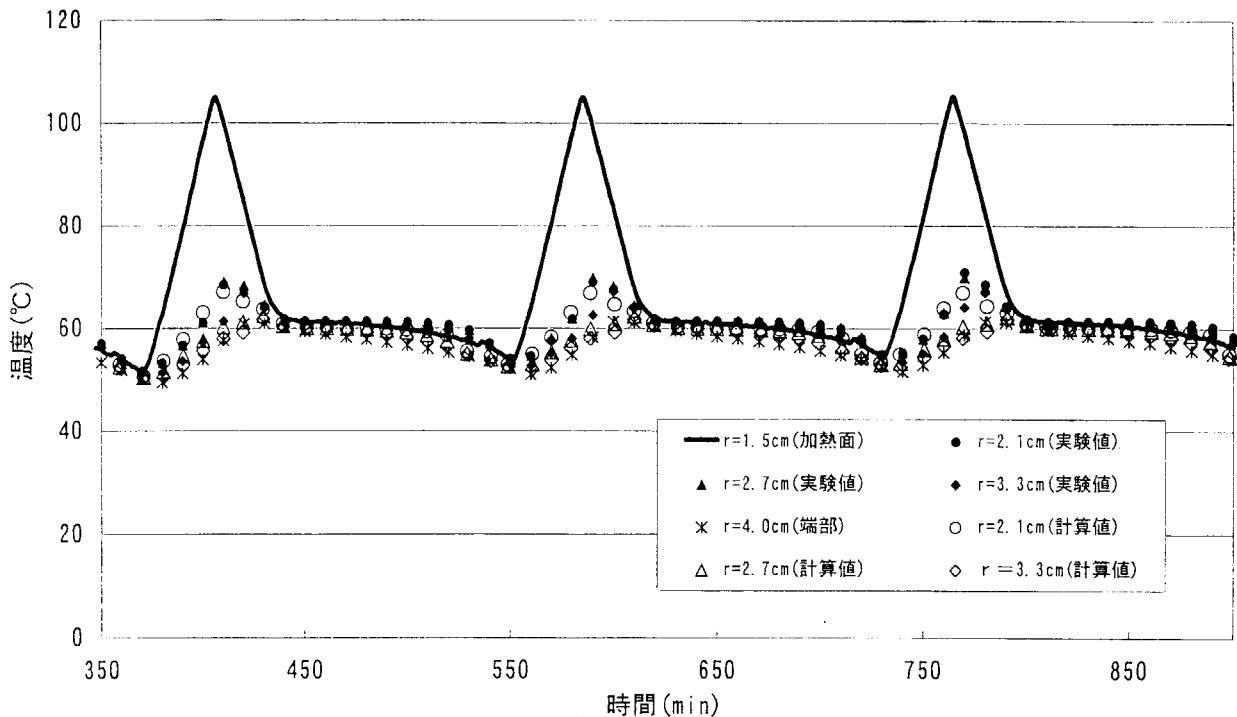


Fig. 4.2.36 ニッケル・パルミチン酸の保温時間0分の温度変化

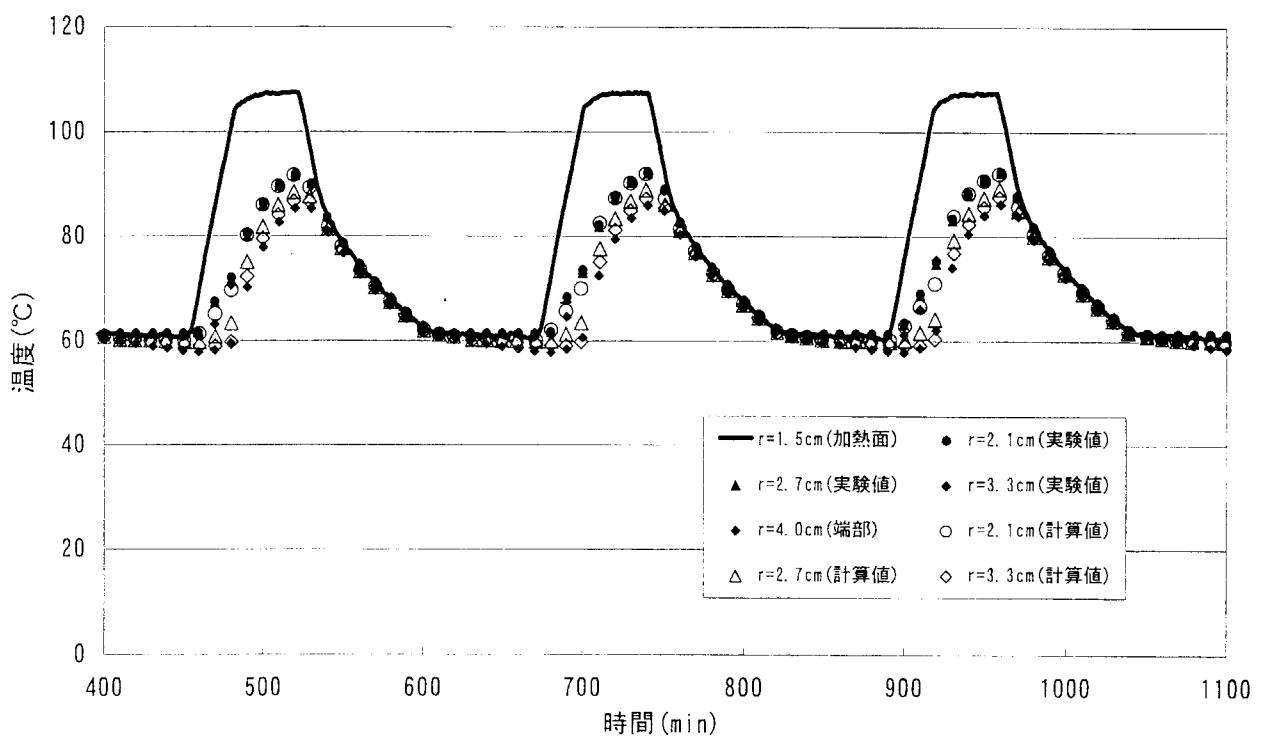


Fig. 4.2.37 ニッケル・パルミチン酸の保温時間40分の温度変化

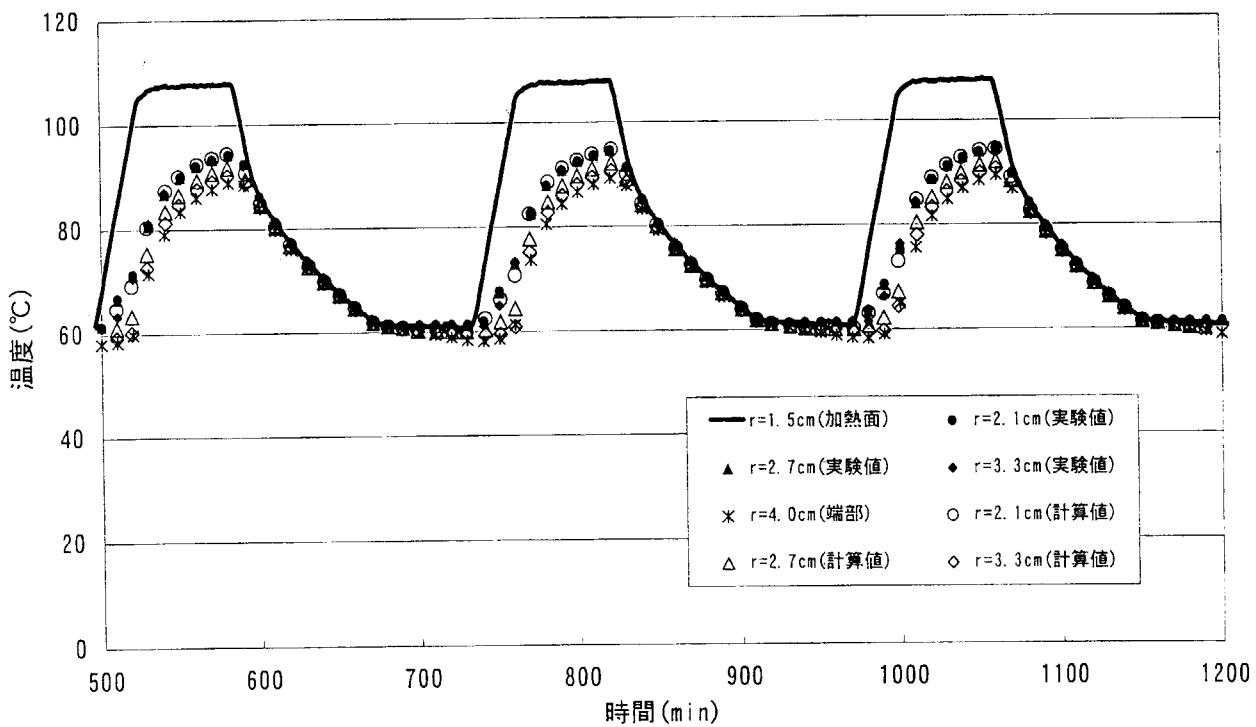


Fig. 4.2.38 ニッケル・パルミチン酸の保温時間60分の温度変化

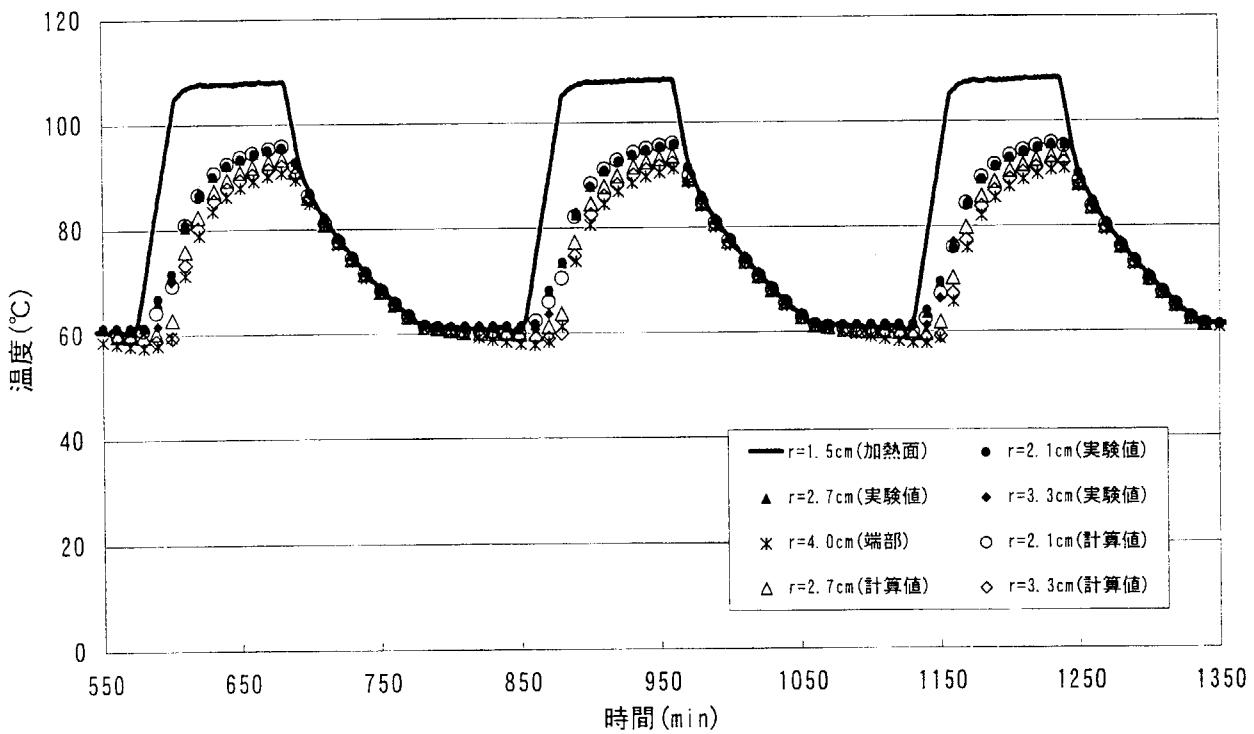


Fig. 4.2.39 ニッケル・パルミチン酸の保温時間80分の温度変化

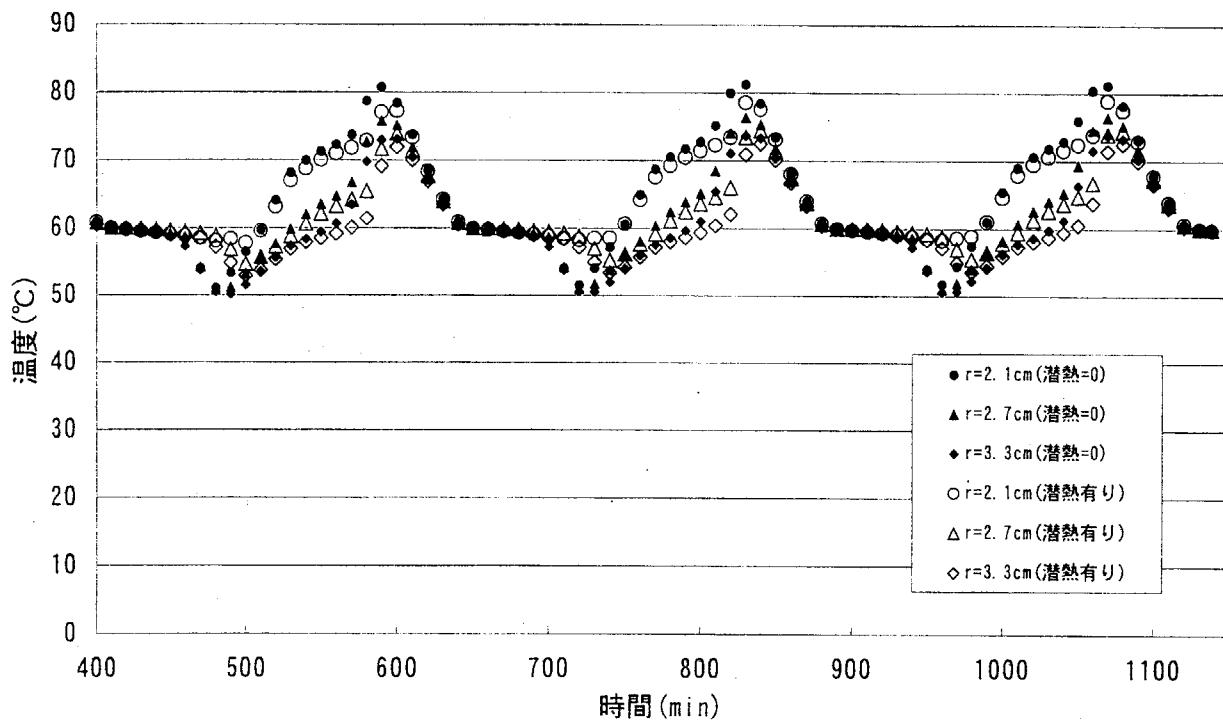


Fig. 4.2.40 パルミチン酸の潜熱=0としたときのジルコン・パルミチン酸の保温時間60分の比較

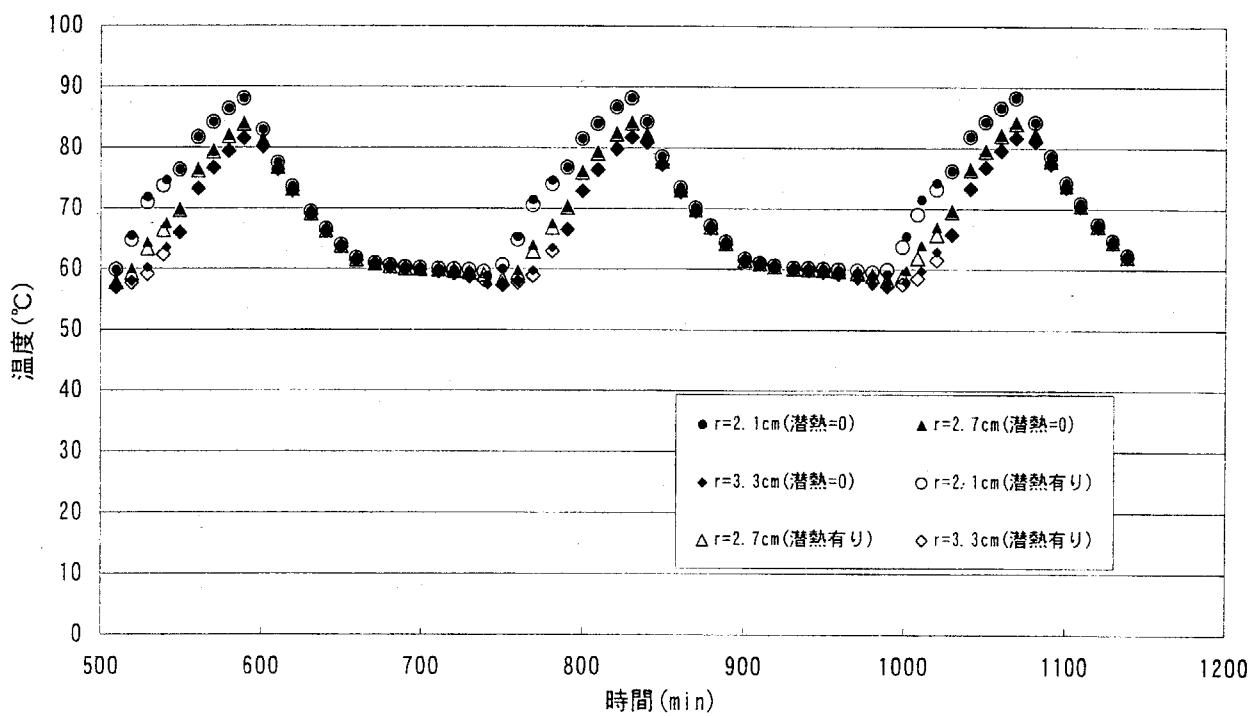


Fig. 4.2.41 パルミチン酸の潜熱=0としたときのNi-Cr・パルミチン酸との保温時間60分の比較

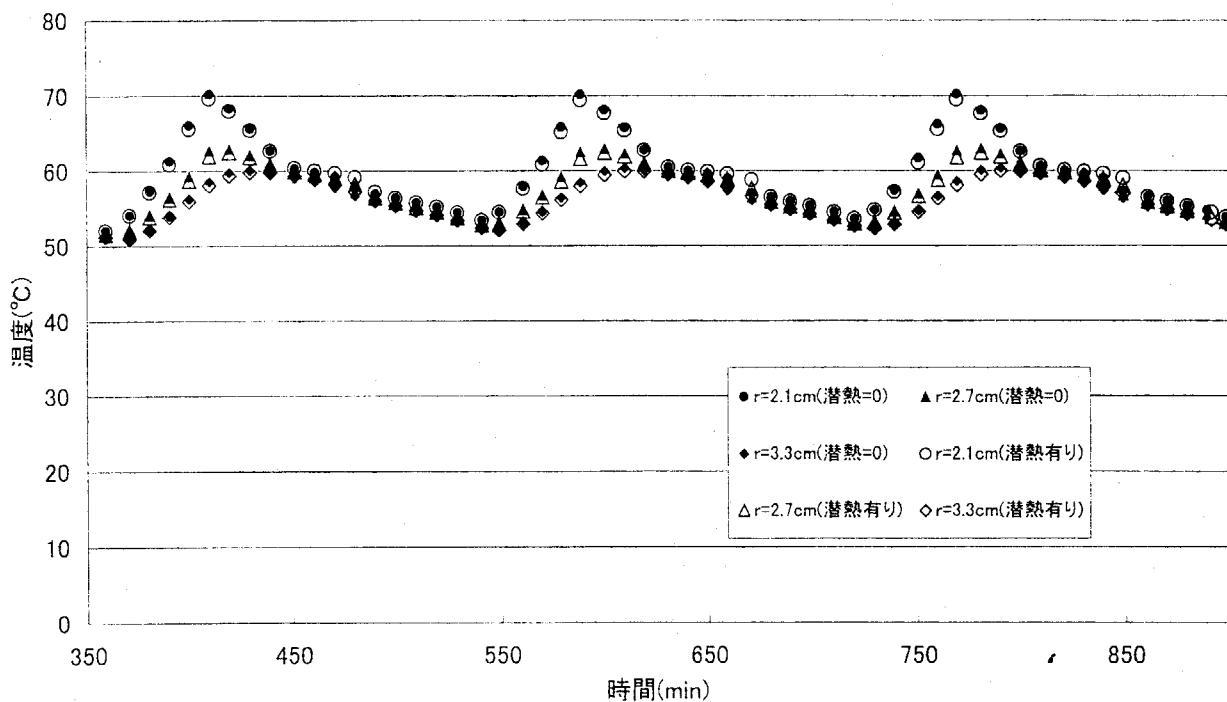


Fig. 4.2.42 パルミチン酸の潜熱=0としたときのNi-Cr・パルミチン酸との
保温時間0分の比較

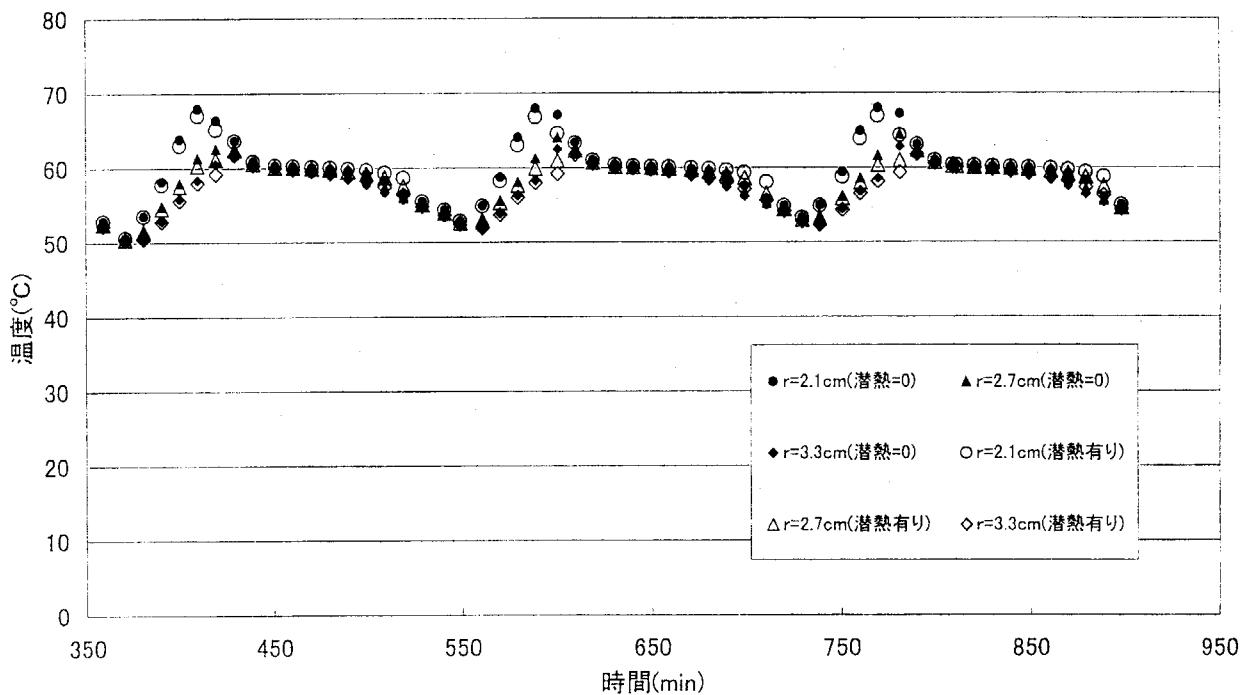


Fig. 4.2.43 パルミチン酸の潜熱=0としたときのニッケル・パルミチン酸の
保温時間0分の比較

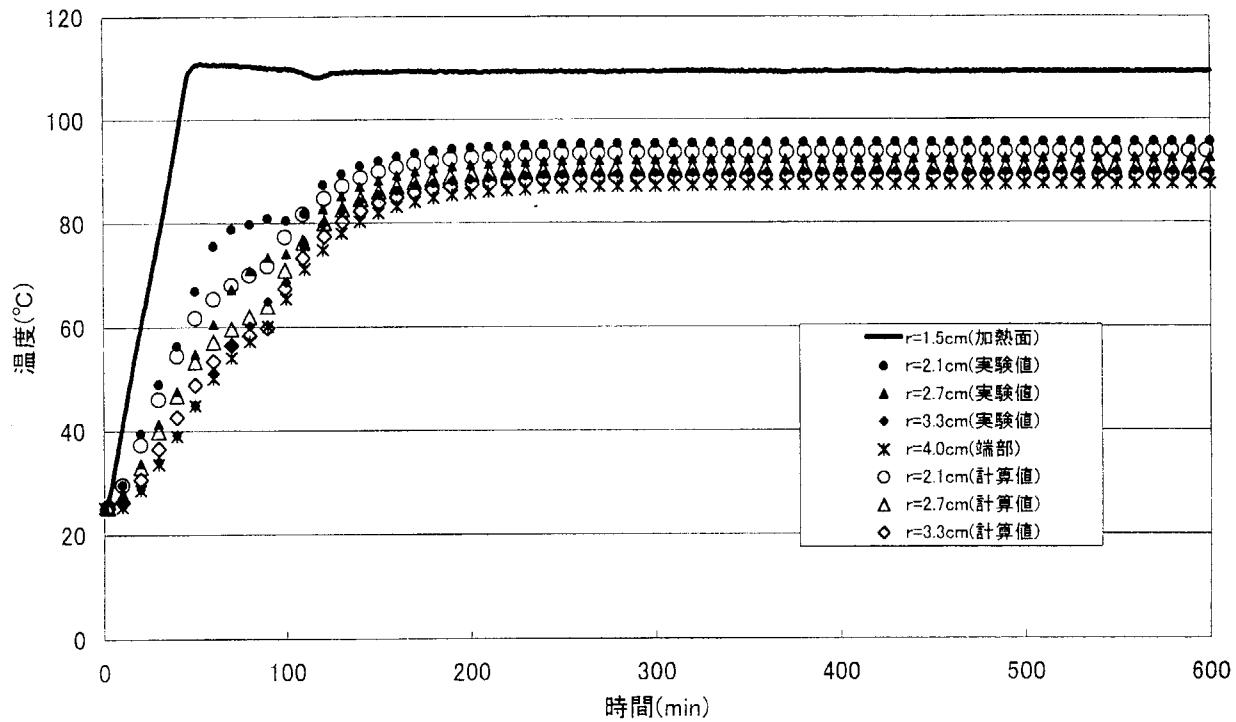


Fig. 4.2.44 ニクロム・パルミチン酸の定常までの温度変化

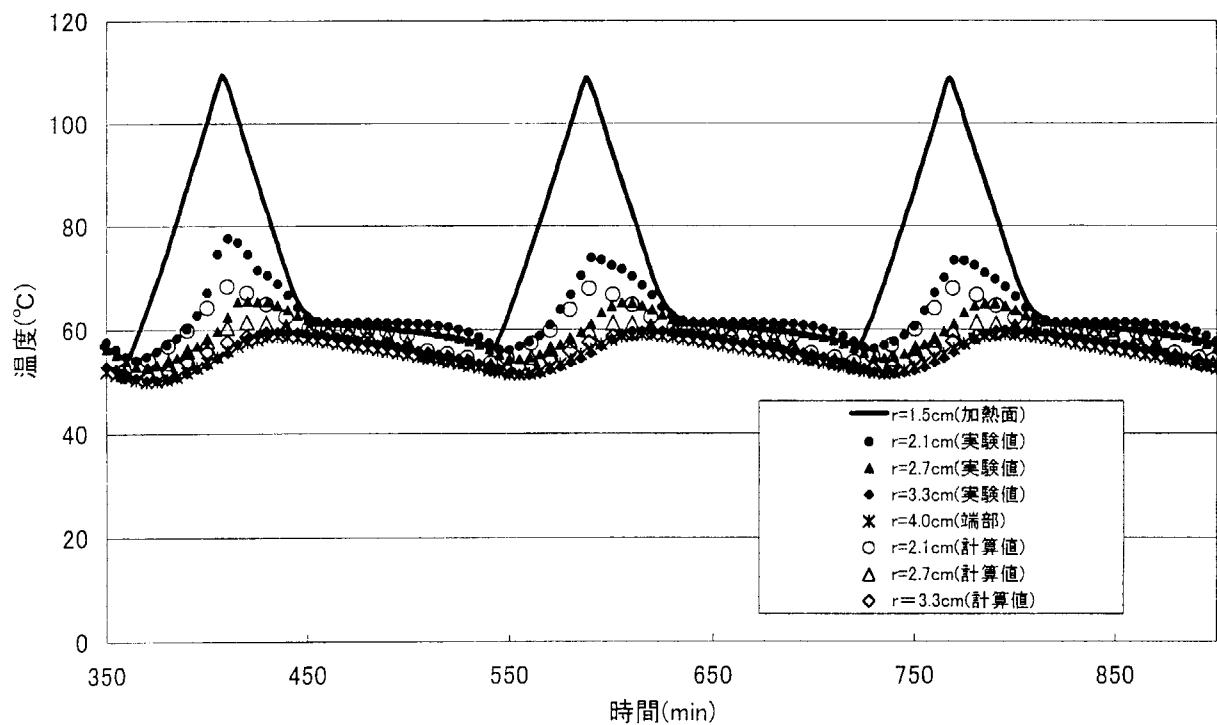


Fig. 4.2.45 ニクロム・パルミチン酸の保温時間0分の温度変化

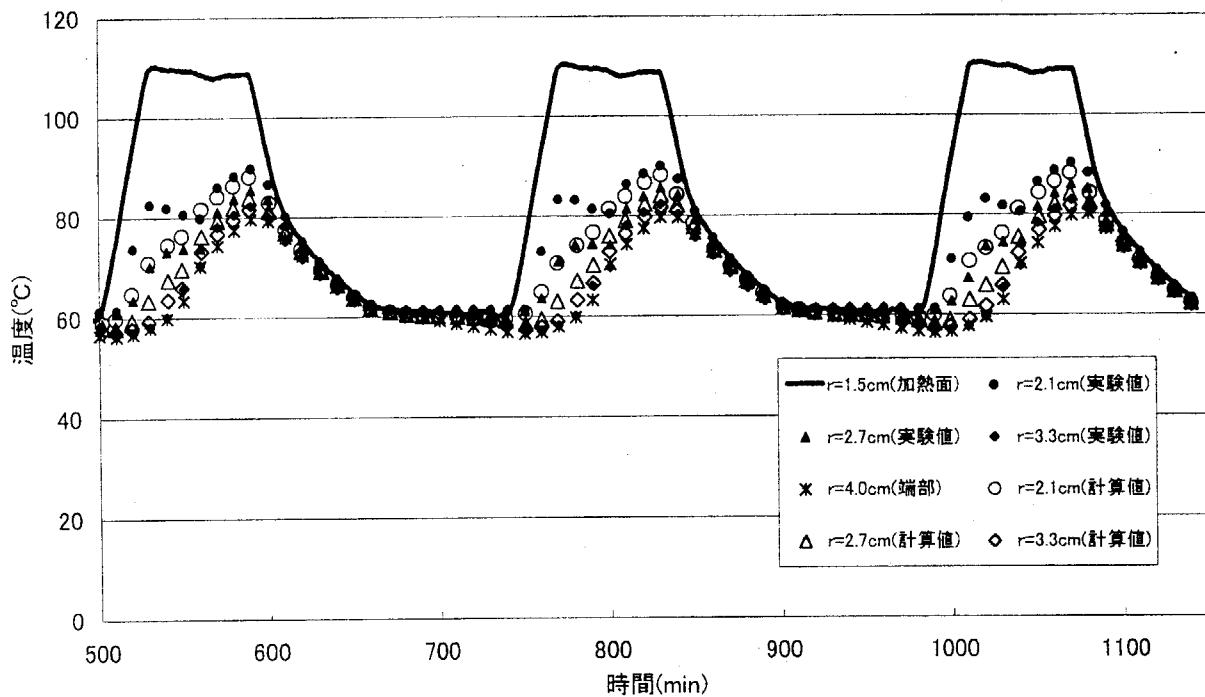


Fig. 4.2.46 ニクロム・パルミチン酸の保温時間60分の温度変化

This is a blank page.

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	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
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	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
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC開発理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(N\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ボアズ)}(\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)}(\text{cm}^2/\text{s})$$

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
0.0980665	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
0.101325	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
1.33322 × 10 ⁻⁴	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
6.89476 × 10 ⁻³	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m		kW·h		cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J (計量法)	
		1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889					= 4.184 J (熱化学)	
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹			= 4.1855 J (15 °C)	
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵			= 4.1868 J (国際蒸気表)	
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹			仕事率 1 PS (仮馬力)	
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹			= 75 kgf·m/s	
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸			= 735.499 W	
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1				

放射能	Bq	Ci		吸収線量	Gy	rad	照射線量	C/kg	R	線量当量	Sv	rem	
		1	2.70270 × 10 ⁻¹¹										
	3.7 × 10 ¹⁰	1	1	0.01	1		1	2.58 × 10 ⁻⁴	1	0.01	1	100	

多孔体に相変化物質を含浸させた複合蓄熱体の温度特性に関する研究—セラミックス及び金属多孔体を用いた場合—(協力研究)

R100

古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています。