

平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「自動車用インバータのモジュール等の温度特性評価用
小型熱衝撃試験機の開発」

研究開発成果等報告書

平成22年 3月

委託者 関東経済産業局

委託先 財団法人神奈川科学技術アカデミー

目次

第1章 研究開発の概要	p.3
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	p.3
1-2 研究体制	p.3
1-3 成果概要	p.7
1-4 当該研究開発の連絡窓口	p.7
第2章 小型熱衝撃試験機の構造	p.8
2-1 全体説明	p.8
2-2 台車	p.9
2-3 銅プレート	p.10
2-4 レール	p.10
2-5 壁	p.12
2-6 支持棒	p.13
2-7 循環水装置	p.15
2-8 ドライエヤー発生装置	p.15
2-9 ヒーター	p.15
2-10 ペルチェ素子	p.16
2-11 センサー	p.18
第3章 小型熱衝撃試験機の動作および操作	p.19
3-1 試験機動作	p.19
3-2 入力方法	p.21
3-3 シーケンス動作シーケンス	p.22
3-4 ハードウェア	p.26
第4章 計算による信頼性評価	p.29
4-1 台車の反り(計算)	p.30
4-2 台車の反り(実験)	p.36
4-3 高温側の壁	p.38
4-4 支持棒	p.41

第 5 章 従来の熱衝撃試験機での実験	p.45
5-1 目的	p.45
5-2 気相式温度槽	p.45
5-3 予備試験	p.48
5-4 本試験	p.50
第 6 章 小型熱衝撃試験機での実験	p.55
第 7 章 全体総括	p.58

第 1 章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

小型省エネ熱衝撃試験機の試作機完成に向けて、小体積部品用の超低温技術、超高温技術、及び、低高温度槽間を移動する技術の開発について、以下の研究より解決を図る。

- ・ 従来の熱衝撃試験機は、低温の空気と高温の空気を大量に作成し、30 c m～50 c m四方の試験空間に交互に空気を入れ換えより熱衝撃試験機を大型装置として構成した。これから開発する小型省エネ高速熱衝撃試験機は、熱伝導で検査対象部品の温度をコントロールし、机上で試験する機能を、従来に比して簡単・低価格・超省エネ・高速に実現できる革新的技術である。

- ・ 熱伝導で超低温の小スペースを創り出し、また超高温の小スペースを創り出す。
- ・ 従来技術であるペルチェ素子応用技術とその特性を更に引出せる付加技術より、熱伝導方式で超低温を実現する。また、小スペースを高温にする技術を更に高度化して、超高温を実現する。この両スペースを移動する機能を付加することより、小型省エネ高速熱衝撃試験機を実現することが可能になる。

本事業では、まず実現を図るための試作機を製作し、試験モジュールを使って実機の製作に向けた検証を行う。

1-2 研究体制

1-2-1 研究組織

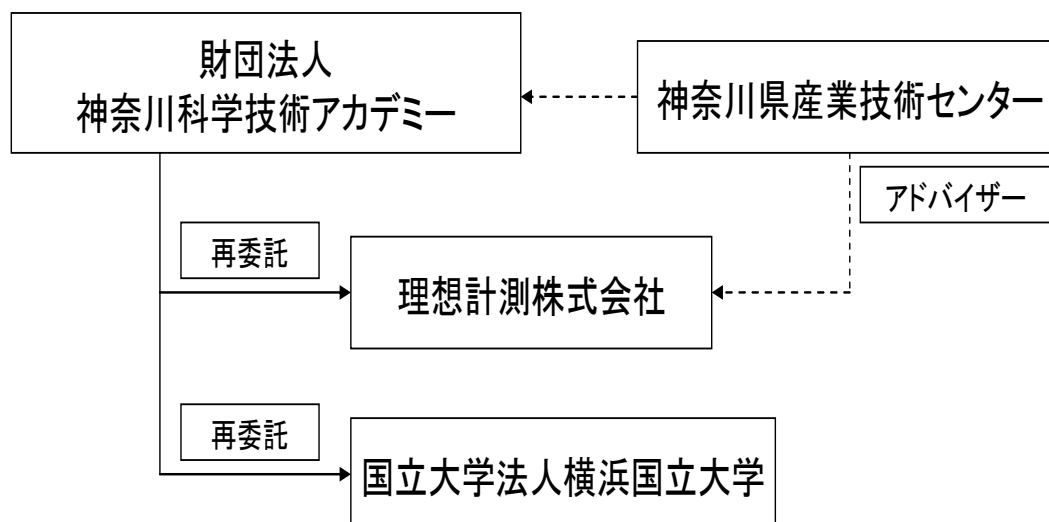


図 1-1 研究組織

1-2-2 管理体制

① 管理事業者

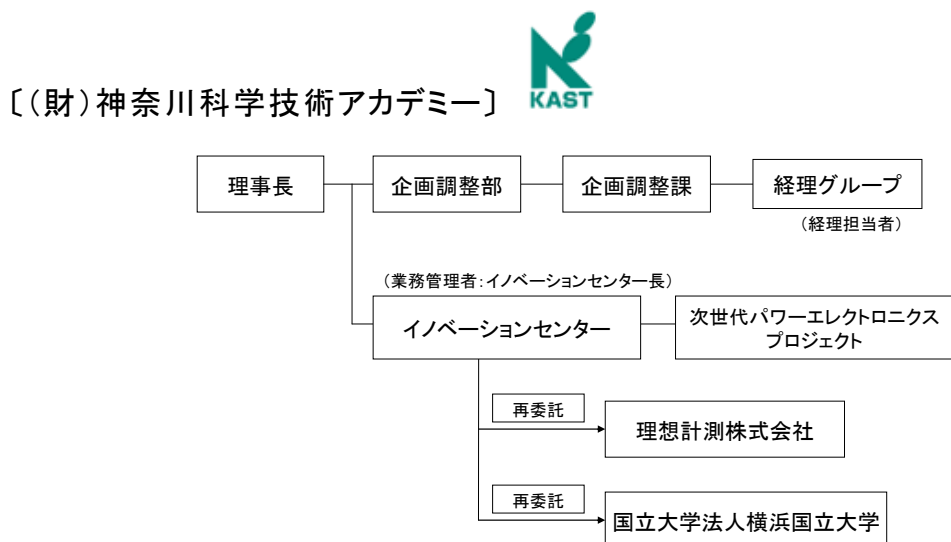


図 1-2 (財) 神奈川科学技術アカデミー管理体制

②再委託先

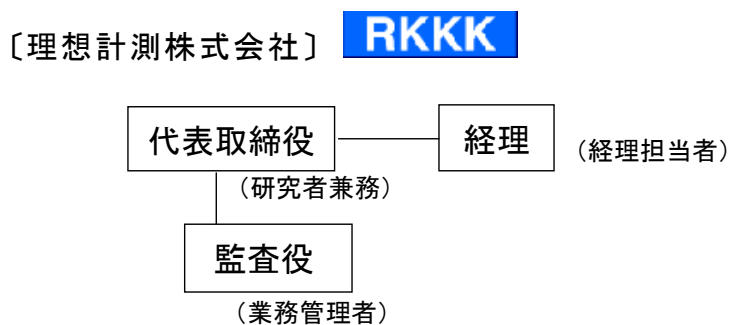


図 1-3 (株) 理想計測株式会社管理体制

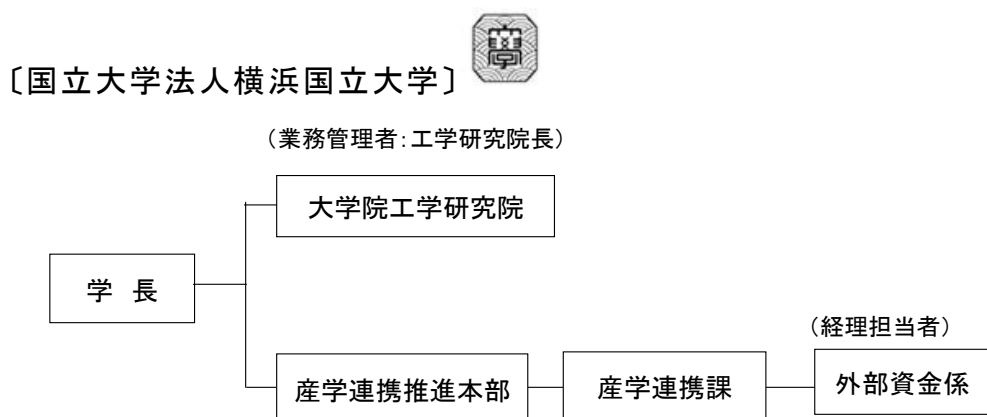


図 1-4 横浜国立大学管理体制

1-2-3 管理員及び研究員（氏名，所属・役職）

(1) 管理員及び研究員（氏名，所属・役職）

【事業管理者】 財団法人神奈川科学技術アカデミー

①管理員

氏名	所属・役職
唐澤志郎	イノベーションセンター長
小林文子	イノベーションセンター産学協働グループ主幹
篠原主勲	次世代パワーエレクトロニクスプロジェクト常勤研究員

②研究員

氏名	所属・役職
篠原主勲	次世代パワーエレクトロニクスプロジェクト常勤研究員

【再委託先】

(研究員)

理想計測株式会社

氏名	所属・役職
臼井重徳	代表取締役

国立大学法人横浜国立大学

氏名	所属・役職
于強	大学院工学研究院准教授

(2) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理者)

財団法人神奈川科学技術アカデミー

(経理担当者) 企画調整部企画調整課経理グループ主査 山岡 修

(業務管理者) イノベーションセンター長 唐澤志郎

(再委託先)

理想計測株式会社

(経理担当者) 経理 大平利恵

(業務管理者) 監査役 臼井壽吉

国立大学法人横浜国立大学

(経理担当者) 産学連携推進本部産学連携課外部資金係長 高橋賢次

(業務管理者) 大学院工学研究院長 石原修

(3) 他からの指導・協力者

神奈川県産業技術センター

氏名	所属・役職
篠原俊朗	電子技術部 副部長
八坂慎一	電子技術部 主任研究員

1-3 成果概要

小型熱衝撃試験機を開発した。この試験機は、科学実験で用いられる器具の一種で、長時間一定温度に保つ事が出来るような制御を施した容器である。従来の熱衝撃試験機は、低温の空気と高温の空気を大量に作成し、30 cm～50 cm四方の試験空間に交互に空気を入れ換えるため、熱衝撃試験機を大型装置を必要とした（第5章参照）。大量の高温空気と低温空気を毎回入れ換えるため、大量のエネルギーを放出する必要があった。また、試験機の槽内を低温側から高温側へ、もしくは低温側から高温側へ、槽の温度状態を変化するためには、長時間を必要とした。

従来機と比較して、本試験機の優位性は主に3点である。①小型である。（従来機の体積で1/4程度。） ②省エネである。（本機は、エネルギー2.5(KW)程度を想定。従来機は、25(kw)程度であり、消費エネルギー1/10を達成） ③高速である。試験機の一部である銅板（プレート）に、試験片をのせて、その試験片の温度を計測したところ、5分程度で台と台車の温度がほぼ一致した。（従来機では、15分程度は必要） ④高精度である。従来機では、時間経過後に設定温度まで上昇しないのが通例であった。本試験機では、設定温度を温度自動制御システムより、高精度に設定温度を維持することができた。

以上より、本試験機を用いれば、高耐熱、熱衝撃試験が要求される自動車用インバータのモジュールの信頼性評価が可能である。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

財団法人神奈川科学技術アカデミー イノベーションセンター

産学協働グループ 主幹 小林 文子

〒213-0012 川崎市高津区坂戸三丁目2番1号

かながわサイエンスパーク西棟614室

Tel : 044-819-2031, FAX : 044-819-2026

E-mail : kobayashi@newkast.or.jp

URL : <http://www.newkast.or.jp>

理想計測株式会社 代表取締役 臼井 重徳

〒221-0061 横浜市神奈川区七島町138番地

Tel:045-402-6111, FAX:045-402-5777

E-mail : info@risohkeisoku.com

URL : <http://www.risohkeisoku.com/>

第2章 小型熱衝撃試験機の構造

2-1 全体説明

小型熱衝撃試験機は、電気で温める高温槽、空気で冷却する常温槽と、ペルチェ素子で冷やす低温槽の3つの温度槽からなる。台車と呼ばれる台の上に試験片を設置する。その台車が常温槽から高温槽へ移動し、その後、高温槽から常温層へ移動し、低温槽から常温槽へ移動する。この動作より、台車に配置した試験片の温度上昇、低下を実現する。また上記の動作のすべてを1温度サイクルと定義する。

本機は、インバーターモジュールの試験片に対応した信頼性評価に関する試験機である。小型熱衝撃試験機のサイズを確定する上で、インバーターモジュールに使用されるIGBTの大きさを確認して設計する必要がある。また、クライアントのニーズより、台車に複数のIGBT試験片を同時に設置し、短時間で実験を終了させたい場合がある。本機は複数の試験片を同時に設置できる台車サイズを想定した。

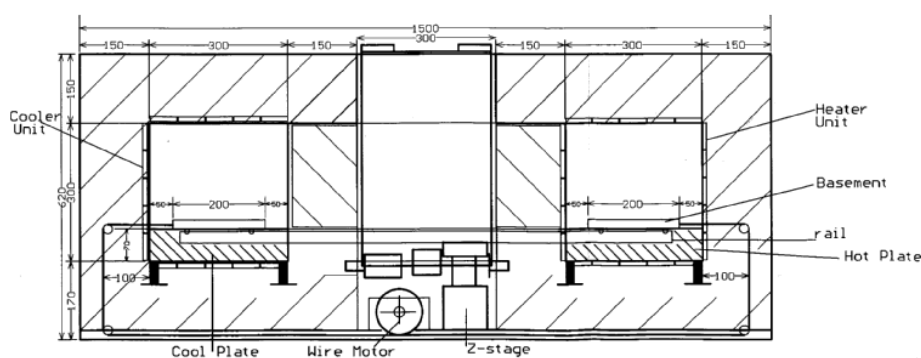


図 2-1 小型熱衝撃試験機全体図

表 2-1 小型熱衝撃試験機基本性能

仕様項目	目標値
最高温度	350℃
最低温度	-50℃
1温度サイクル	15分
消費エネルギー	2.5(KW)
温度設定に対する誤差	±0.5
試験機サイズ	620(mm)×620(mm)×1500(mm)

2-2 台車

図 2-2 と図 2-3 に台車とレールを示す。試験片を高温槽、常温槽、低温槽へ、移動するため、台車とレールからなる機構を槽内に配置する。台車の底面に、レールを設置する。この台車の移動について、試験機に取り付けたモーターが台車の動力源である。この動力より、台車に取り付けられたワイヤーを上下左右に引っ張り、レール上を台車が摺動する。

この台車は、槽の中心位置に停車する。各槽に、銅プレートと呼ばれる板を設置する。この銅プレートに台車を置くことで、銅プレートから台車に熱を伝える。台車全体を設定温度まで温め、台車と試験片の接触を通して、試験片全体の温度を設定値まで温める。台車は -50°C および 350°C の槽内を移動するため、台車の温度変化は、瞬時に槽内の温度変化に追従させる必要がある。そのため、台車に熱エネルギーを蓄積しないような、熱容量が小さい材質が求められる。本開発においては、コスト面も考慮して、アルミで台車を作成した。台車の上に搭載する試験片について、 5kg 程度を想定した。

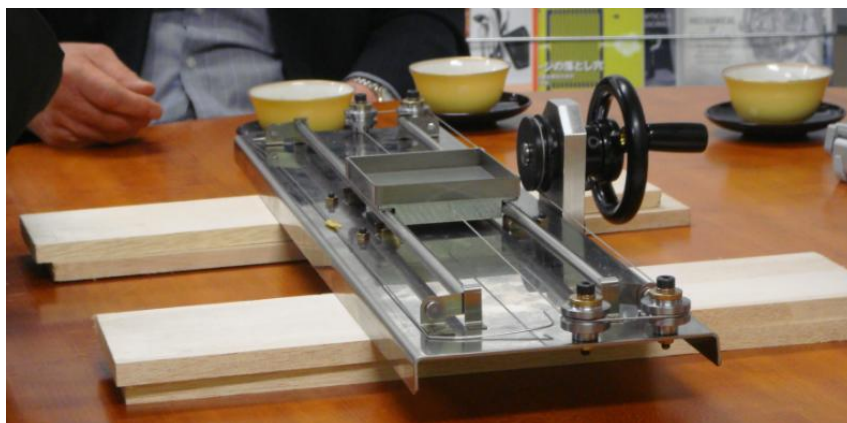


図 2-2 移動部の試作機（台車およびレール）



図 2-3 移動部の試作機（台車およびレール）

2-3 銅プレート

従来の熱衝撃試験機は、低温の空気と高温の空気を予め準備し、試験槽内に交互にその高温空気と低温空気の入れ換えができる大型装置である。周囲の空気より、熱を伝える方式を気相式と呼ぶ。この方式は、熱容量が極めて低い空気を用い、試験片を温めるため、極めて短時間に、目標温度に到達することが困難であった。

本機は、高温槽、常温槽および低温槽に、予め設定した温度に温められた（もしくは冷やされた）銅プレートを配置する。銅プレートと台車を接触より、銅プレートの予熱を試験片へ伝える接触式を採用した。台車について、5分間以内で設定温度への温度上昇（低下）を本機的设计仕様の一つとした。すなわち、銅プレート内の熱エネルギーを、接触より、台車全体へ伝え、台車自体を温める（冷やす）。

上記的设计仕様を満たすように銅プレートの厚さは、概算の式で割り出した。1秒あたりの消費エネルギーは次式である。

$$(\text{銅プレート質量}) = 300(\text{mm})(\text{縦}) \times 300(\text{mm})(\text{横}) \times 70(\text{mm})(\text{高さ}) \times 8.93 \times 10^{-6}(\text{kg/mm}^3) = 56.3(\text{kg})$$

$$(\text{1秒あたりの消費エネルギー}) = 56.3(\text{kg}) \times 380(\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})) \times 20(\text{K}) \div 300(\text{s}) = 1418.7(\text{J/s}) \\ \approx 1.4(\text{KW})$$

(注) 銅の比熱：380(J/(kg・K))

実機開発において、計算が示すとおりにいかないこともあるので、設計裕度をとって、2.5(KW)程度をひとつ的设计仕様とし、本機を開発した。(検討の詳細は、第4章、1節、2節参照)

2-4 レール

台車が高温槽、常温槽、低温槽へ、移動するため、図2-2と図2-3に示すように槽内にレールを配置する。台車の下に、レールを設置する。この台車の移動について、試験機に取り付けられたモーターが動力源である。この動力より、ワイヤーを引っ張り、レール上を台車が摺動する。本試験機は、銅プレートと台車の接触より、あらかじめ温められた（もしくは冷やした）銅プレートの熱を、台車に伝えることで、試験片の温度を調整する形態（接触式）を採用している。台車が移動するときは、台車が移動できるように、レール自身を持ち上げることで、銅プレートから台車を引き離す。槽内に台車が停車すれば、熱を効率よく伝えることができるように、レール自身を下げることで、

銅プレートと台車が接触する構造を持つ。

本開発において、高温槽、常温槽、低温槽の3部屋を台車が移動し、自動的に試験を実施するような試験機を想定した。この移動部の設計に関して、疲労設計が重要な課題である。15分間で1温度サイクルを想定した。すなわち、1時間の試験機の稼働したサイクル数は、4温度サイクル、1日稼働では約100温度サイクル、1年間の稼働では、約3万温度サイクルである。試験機の稼働率は、98%以上を想定し、試験機を設計した。精密な機械加工などを必要とする機構を移動部に用いれば、トラブルが発生しやすい。試作機を作成した後に、試験片が槽内でつまったり、扉がロックされたり、ガタが発生するなどの問題が生じると、その後の対処方法が困難である。

本開発機では、高疲労寿命と思われるレールを台車の移動部として、採用した。このレールを採用するにあたって、大きな問題が2つあった。

一つ目の問題点は、高温槽と低温槽を一本のレールでつなぐため、レールから伝導する熱を、高温槽、低温槽内で、遮断することが重要な課題であった。熱伝導が低い材料であるセラミックスは脆性破壊を起こし、割れやすい。そのため、細長い棒状の形状で、台車を支えることが困難である。高温槽と低温槽の中に配置されているレールのジョイント部のみを、セラミックスで作成し、他の部分を鉄で作成するようなことも検討した。このケースでは、レールが平行に作成できない問題がある。また、パイプの加工は高精度に実施できない。鉄とセラミックを結合した場合に、セラミックと鉄の熱膨張が異なるので、長時間、試験機を使用すれば、レールのジョイント部が緩み、疲労破壊する可能性がある。

以上の考察より、高温槽と低温槽に極端な温度差があるため、線膨張係数を緩和できるように、すべて同質材料でレールを作成した。

二つ目の問題点は、実験機を使用した直後では、低温槽が凍結する可能性がある。低温槽内に水蒸気が発生すれば、移動部(図2-2,図2-3)の隙間に、水が流れ込み、水が蓄積する。その状態で、再度、実験機を実施すれば、移動部などが凍結する可能性がある。一定の期間実験機を停止し、実験機全体が常温になれば問題はない。しかし、常温になる前に、再び試験機を使用すれば、低温槽内に霜が発生する。台車の移動に必要なレールからなる移動部を、高温槽と低温槽の外へ配置するような構造を検討したが、保守、メンテナンス等を考慮すれば、非常に難しいことが想定された。高温槽、常温槽、低温槽の外側に移動部を配置するため、グラスウール(2.5節参照)の断熱材の中に移動部を配置することになる。この移動部に、熱を遮断するためのグラスウールをつめこむことになるため、レールに問題が生じると、取替え作業が困難である。

本開発において、水蒸気を槽外に排出できるように、槽内にドライエアーを配置した。(2-8 ドライヤー参照)。また槽内に窒素を流入することで結露を防ぐことを検討した。

2-5 壁

高温槽、低温槽内では、設定温度を保持する必要がある。そのためには、壁面を伝って、熱を放熱もしくは吸熱しない構造が必要である。本開発にあたって、冷蔵庫などに使われる真空断熱材とグラスウールを、本試験機の壁の材料に使用することを検討した。本試験機の高温槽について、 400°C 程度まで温度上昇を想定した。グラスウールの耐熱性は $550^{\circ}\text{C}\sim 600^{\circ}\text{C}$ であり、グラスウールで試験機の壁を作成することは可能である。グラスウールの熱伝導率は $0.05(\text{W}/\text{m}\cdot\text{K})$ である。この熱伝導率は、他の材料の物性値と比較すると十分に低いが、熱を十分に遮断できない。一方で、真空断熱材の熱伝導率は $0.002(\text{W}/\text{m}\cdot\text{K})$ である。グラスウールの熱伝導率 $0.05(\text{W}/\text{m}\cdot\text{K})$ よりも、断熱効果が高い。そのため、真空断熱材を使用するとほぼ熱が伝わらない。一方で、真空断熱材の使用範囲は -50°C から 100°C である。また、真空断熱材のサイズを自由に変更することができない。最小サイズは $35(\text{mm})\times 35(\text{mm})$ であり、真空断熱材を切断することでサイズを調整することができない。そのため、ヒーター周辺には、グラスウールを配置して、試験機の外面の壁に、真空断熱材を配置する二重壁面構造を設計した。図 2-4 にその概念図を示す。

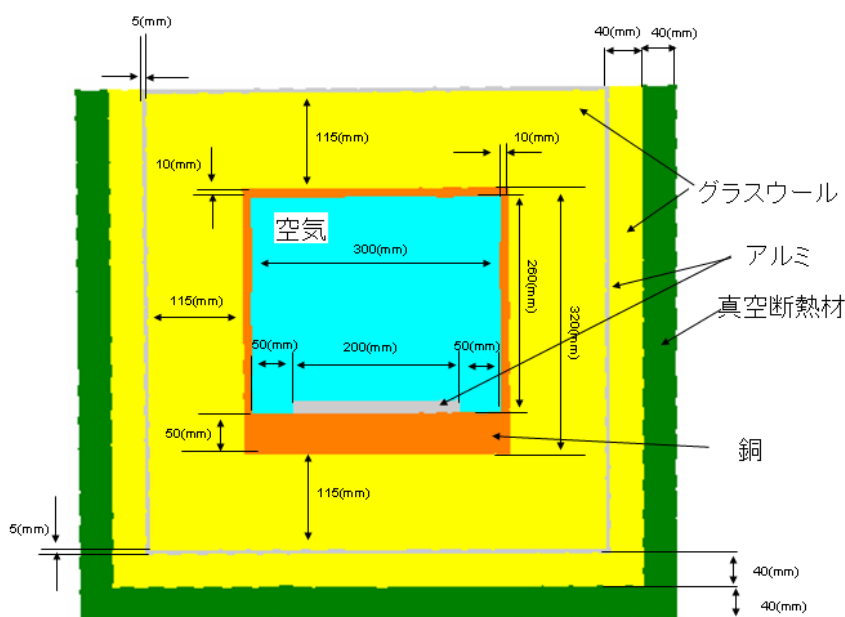


図 2-4 高温槽の概念図

図 2-4 の中心に、加熱室を設ける。この室内は 350°C である。加熱室の壁厚は約 $10(\text{mm})$ である。材質は銅である。その加熱室の外側にヒーターを取り付けた。ヒーターの厚さは、約 $2(\text{mm})$ 程度である。

壁の厚み全体の3分の2をグラスウールで作成し、3分の1を真空断熱材に置き換える。真空断熱材は100℃を超えて使用できないため、グラスウール壁と真空断熱材壁との間に、アルミニウムで作成した放熱室を配置した。放熱室がない場合は、ヒーターからグラスウールを伝って高温槽の壁面から熱を放熱する。放熱室を設けることで、熱を試験機の上方向へ放熱する。この放熱室の板厚を約3(mm)程度に作成した。試験機を軽量化するため、この板厚は薄いものを使用する必要がある。また試験機の外壁の温度について、ユーザーがこの試験機に触れることもあるため、低温やけどが生じないように外壁の温度が40℃以下となるようにした。

以上より、まとめると、試験機壁面温度の設計仕様は、加熱室 350℃、真空断熱材 100℃以下、試験機外壁面 40℃以下である。この設計仕様を満たすように、壁の厚さを熱・構造連成解析による計算で決定した。(第4章を参照)

銅を高温槽に入れると、酸化銅が発生し、内壁の表面が変色する。銅で作成した内壁がさびる。そのため、槽内の温度を正確に調整できない場合がある。変色や、酸化物の発生を抑えるため、高温用・低温用共に銅プレートには鍍金を施した。この表面処理より、5日間350℃の放置実験を行ったところ、内壁に黒色系の錆が発生しないことを確認した。低温側の壁について、結露等の問題はあがるが、グラスウールなどを均質に敷き詰め、密閉することで、低温側の壁面を作成した。

2-6 支持棒

図2-5に示すように灰色の部分が台を支える柱である。加熱室の底面に柱を4本設置する。

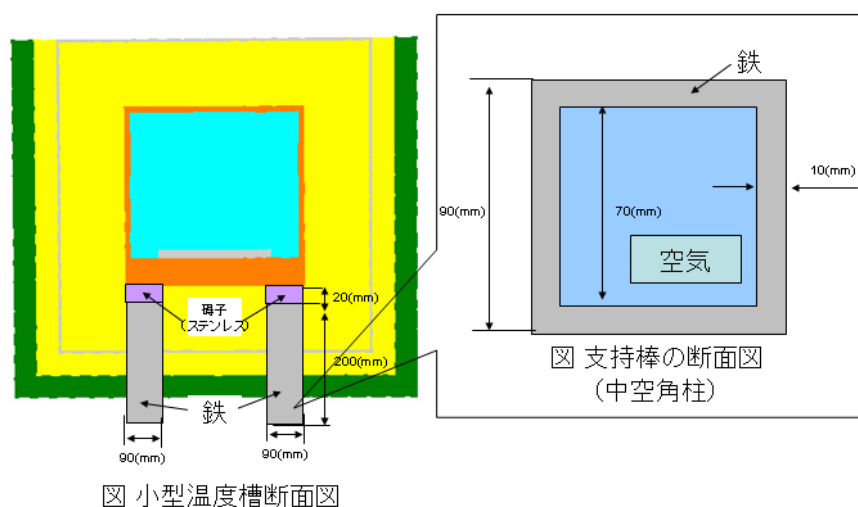


図 2-5 支持棒

試験機を支持するため、柱を設置する必要がある。試験機内の重量は、主にガラスウール、銅プレートやアルミニウムからなる。特に銅プレートの重量は数十キロの重さがある。試験機の重量を支えるため、支柱の強度的な検討が必要である。一方で柱をつたって床や地面に熱が逃げるため、柱の強度を増すために柱を太くすると、エネルギー効率が低下する。また銅は自重により、たわみやすい金属であるため、高精度に試験機の並行状態を維持できず、台車の移動に問題が生じる。

本研究では、支柱の強度を維持し、なおかつ熱伝導を低下するように、アルミで作成した中空パイプで支柱を作成した。中空パイプの断面積を決定するため、下記の計算式を採用した。支柱の両端の温度が、室温 25℃と温度 350℃であることを仮定する。支柱の断面積を $100(\text{mm}^2)$ 、支柱の長さを $500(\text{mm})$ とする。支柱をステンレスで作成した場合、熱がどの程度、床面に伝わるかを、下記で計算した。

$$Q = \frac{\alpha S}{l} \Delta T = \frac{0.0167(\text{W} / \text{mm} \cdot \text{K}) \cdot 100(\text{mm}^2)}{500(\text{mm})} (350(\text{C}) - 25(\text{C})) = 1.0855(\text{W})$$

柱を 5 本とすると、 $1(\text{W}) \times 5 = 5(\text{W})$ 程度、エネルギーが損失する。設定温度を維持するためには、そのエネルギー損失を、加熱室で熱エネルギーを補う必要がある。

たわみの問題点として、精度よく支持棒(柱)の長さを設定できない可能性が高い。支持棒と台を、溶接したとすれば、5 本とも同じ長さに設定できない可能性が高い。試験機を設置する床や地面について、数 mm 程度差が生じる。設置する場所によって、実験の精度などに不具合が生じる可能性がある。床が傾いていると支柱に負荷される力も変化するため、高精度に平坦度を保持できない可能性が高い。板の加工精度などを考えると、5 本の支柱の高さに数十マイクロン程度の差が生じる。そこで本機を開発するにあたって、従来の熱衝撃試験機などに取り付けられているネジ(椅子や机などに取り付けられている高さを調整する機構などのようなもの。)を採用した。このネジより、支柱の高さを調節する。水平・勾配測定器のような機器で計測しながら、高さや平坦さなどを調整する。試験機の高さ自体も調整できるため、作業し易いように調整可能である。また支柱を、試験機から分離し、納品場所に運搬することが可能である。ボルトなどで組み立てる方式を取っているため試験機の移動運搬がしやすい。

銅プレートのたわみについても検討した。図 2-6 のもとの、理論的に求められた支柱間のたわみは下記である。

$$\delta = \frac{PL^3}{48EI}$$

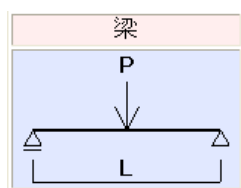


図 2-6 両端支持梁

たわみは、長さ(L)の 3 乗に比例して増大する。加熱室下面の真中を支持すると、たわみが 1/8 程度減少する。銅はたわみやすいので、銅の重さをなるべく分散できる支柱を検討した。

たわみの改善案として、自重を分散する構造、例えば中空パイプや、テーパー設置などで対応した。支柱と加熱室下の間に、厚みがあるステンレス板を一枚挿入することで剛性を上げて対応した。

2-7 循環水装置

図 2-7 に循環水装置の概観を示す。高温槽が準備できたならば、循環水の電源をONにし、低温槽の冷却の準備をする。循環水装置について、電源を切って、再び入れるまで5分待つ必要がある。



図 2-7 循環水装置



図 2-8 ドライエアー発生装置

2-8 ドライエアー発生装置

図 2-8 にドライエアー発生装置の概観を示す。結露などの問題があるのでドライエアーを入れる。

2-9 ヒーター

図 2-9 にヒーター・モジュールの概観を示す。高温槽の温度維持のため、多数のヒーター・モジュールで構成されるヒーター装置を使用する。



図 2-9 ヒーター・モジュール単体

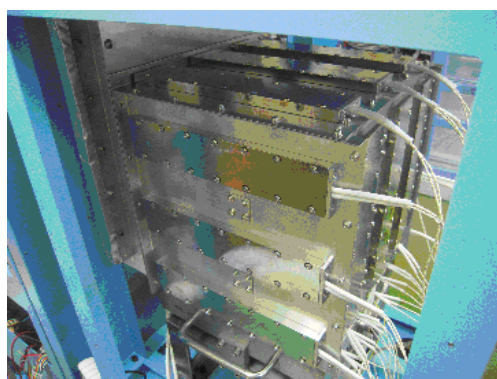


図 2-10 ヒーター・モジュールを取付け

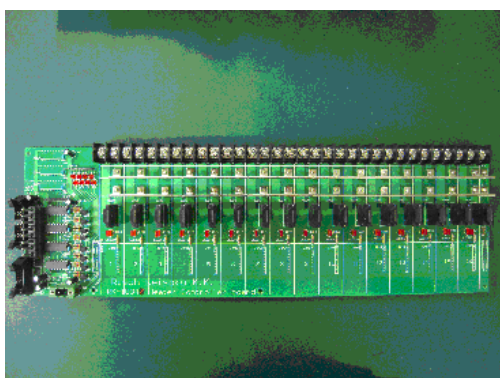


図 2-11 ヒーター・モジュールに電力供給の制御を行うヒーター制御基板

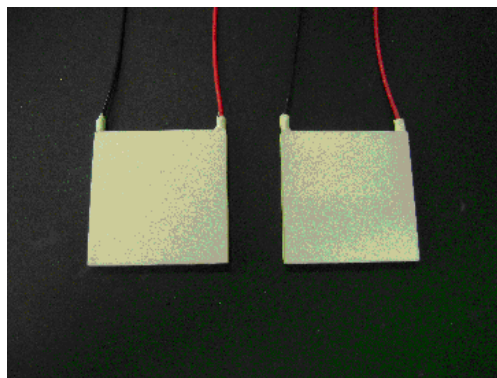


図 2-12 ペルチェ素子
(サイズ:40(mm)×40(mm)×4(mm)(正方形))

2-10 ペルチェ素子

小型熱衝撃試験装置では、低温槽で低温を発生・維持するため、ペルチェ素子、水冷式ヒートシンク及び冷却水循環装置(図 2-7)を組み合わせで使用する。ペルチェ素子を図 2-12 に示す。

ペルチェ素子の機能は、DC 通電することにより、一方の面から、他方の面に、熱を移動させるものである。ペルチェ素子を、冷却にも加熱にも使用できるが、この装置では冷却に使用する。

数個程度で無く、100 個程度やそれ以上の非常に多数のペルチェ素子を使用する際に、並列接続運転と、直列接続運転が考えられる。実験では、次の 2 通りを行って、直列接続したモジュールと基板型電源の組合せを 1 単位として、1 個の水冷ヒートシンクに繋がる 6 個ペルチェ = 1 群を駆動することとした。

第一の方法：3.6V、4.5A の電源を 2 個直列にして 7.2V を得て、直列接続した 6 個のペルチェ群を駆動する。これを 16 セット用意する。

第二の方法：6V1.60A の電源 2 個を直列接続して 12V を得て、多数のペルチェ

素子を駆動する。これで16 x 6個のペルチェ群を駆動する。

ペルチェ素子群に接続する線材の本数は第一方法では16対であるが、第二方法では96対で、それぞれ3-4Aの電流を流せる太さで実際に接続してみると、第二方法では、電線の敷設が非常に多大の労力を必要とし難しかった。また、メンテナンス時にも困難が予想された。

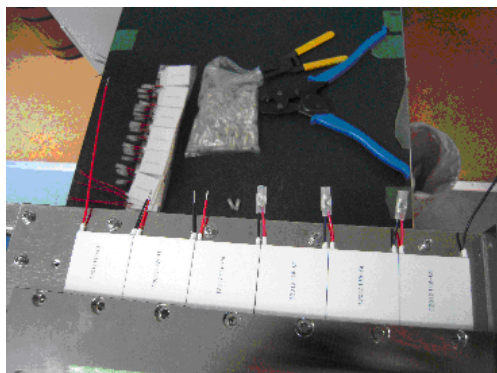


図 2-13 ペルチェ素子の直列接続

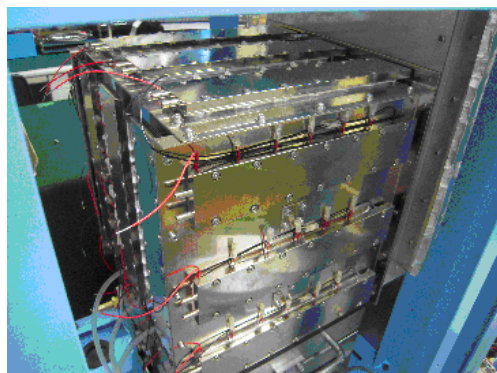


図 2-14 低温槽内部

左図のペルチェ素子6個を直列接続したものを、低温槽壁面に取り付け、その上から水冷ヒートシンクを取付けた低温槽が、右図である。

これを駆動するための電源が、下左図である。

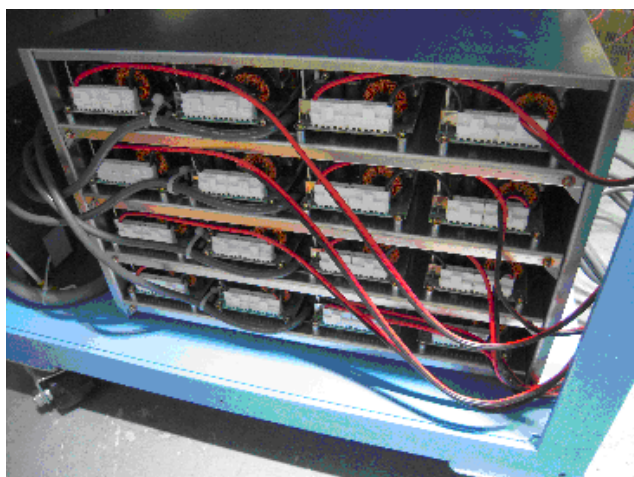


図 2-15 駆動電源

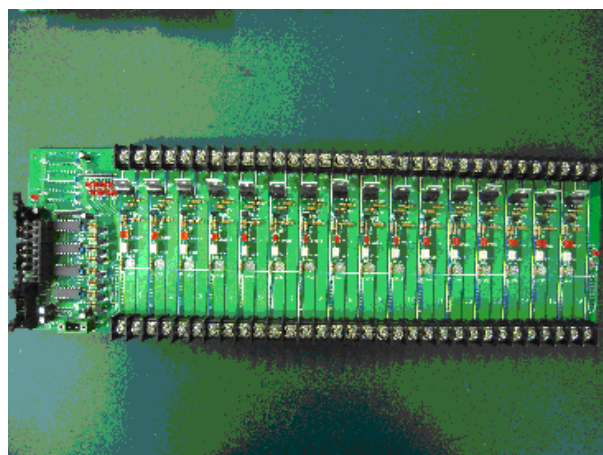


図 2-16 ペルチェ素子群

この電源から来る電力を、上右図のクーラー制御基板に接続して、温度維持するための制御された電力が、ペルチェ素子群に供給される。

2-11 センサー

センサーは温度を計測するための温度センサーおよび台車および扉（高温扉、低温扉）の位置を確認するための位置センサーの 2 種類がある。

台車の位置を確認するためのセンサーの設置箇所を、図 2-17 に示す。位置の誤差は、目標の位置に対して ± 1.5 mm 程度ある。

温度の計測点（熱電対設置位置）は、高温槽内に 3 つ、中間槽内に 2 つ、低温槽内に 3 つある。高温槽について、計測点は銅プレートに 2 つ、内壁に 1 つある。低温槽について銅プレートに 2 つ、内壁に 1 つある。中間槽について、銅プレートに 1 つ、内壁に 1 つある。銅プレートと内壁は同じ温度になることを想定している。温度のセンサーの配置場所について、表 2-2 にまとめる。全部で 7 箇所の温度を計測する。

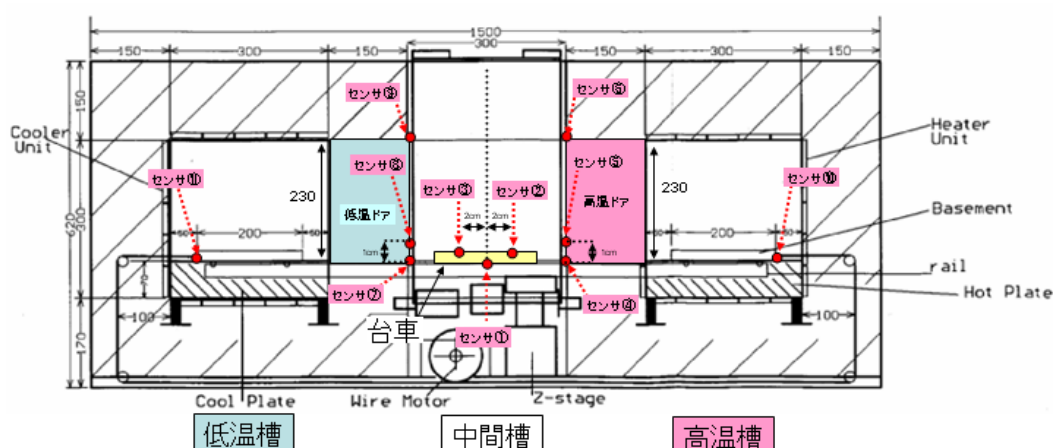


図 2-17 試験機内の位置センサー

表 2-2 チャンネル(RK-10220C PCB H8/3048F の I/O 表 参照)
(温度測定点のチャンネルと測定場所の関係)

チャンネル	温度測定場所
0	高温槽の気温
1	高温槽内の銅プレート温度 1
2	高温槽内の銅プレート温度 2
3	中間槽の気温
4	中間槽内の銅プレート温度
5	低温槽の気温
6	低温槽内の銅プレート温度 1
7	低温槽内の銅プレート温度 2

第3章 小型熱衝撃試験機の動作および操作

3-1 試験機動作

図 3-1～図 3-12 に小型熱衝撃試験機の動作の概略を示す。図 3-1 に示すように、台車および開閉ドアの位置情報を取得するためのセンサーは 11 箇所である。赤扉、青扉は高温側および低温側の開閉扉を示す。センサーの感知の有無を 0 (無)、1 (有) の信号で定義する。台車の速度を $5.0 \times 10^{-2}(m/s)$ 、ドア開閉速度を $5.0 \times 10^{-2}(m/s)$ とした。

0(s)時の試験機では、両扉を閉じる。そのため、センサー④、センサー⑦が 1 となる。台車は常温槽中央位置に停車中である。そのためセンサー①が 1 となる。

次に図 3-2 の動作では、高温ドアおよび低温ドアを、それぞれ、1(cm)上へ持ち上げる。レールおよび台車を持ち上げるために必要な動作である。このとき、センサー⑤ (高温ドア側センサー) が 1、およびセンサー⑧が 1 となる。図 3-3 の動作では、高温ドアを全開する。低温ドアを 1(cm)上の地点で停止する。図 3-4 の動作では、台車を中間槽から高温槽へ移動する。高温ドアの移動を停止する。図 3-5 の動作では、低温槽のドアを閉じる。このとき高温槽のドアを閉じている途中である。図 3-6 の動作では、低温槽および高温槽のドアを閉じる。図 3-7 の動作では、試験片が熱せられ、試験片温度が設定温度に到達する。その後、設定時間まで待機する。図 3-8 の動作では、レールを持ち上げるため、低温槽および高温槽のドアを、1(cm)上まで開く。図 3-9 の動作では、低温ドアを移動を停止し、高温ドアを全開する。図 3-10 の動作では、台車を高温槽から中間槽へ移動する。図 3-11 の動作では、低温ドアを下に移動する。高温ドアも移動中である。図 3-12 の動作では、高温ドアを下げる。

以上の全動作が 1 温度サイクルの半分に対する試験機の動作を示す。台車を中間槽から高温槽へ移動する場合について、全ステップ数は 10 段階で、全時間数は、約 18.2(s) 程度になる。低温側の扉の開閉および台車の移動も同様である。

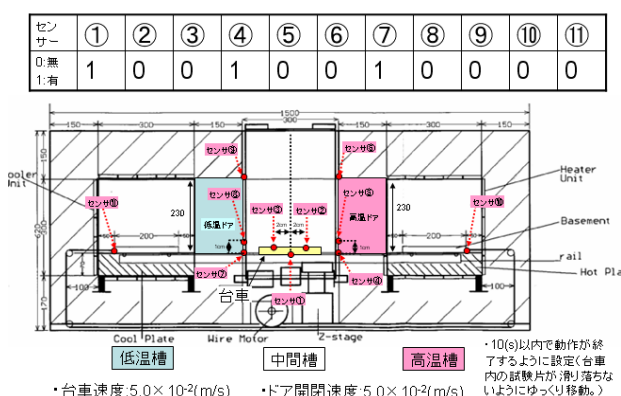


図 3-1 試験機 (初期状態)

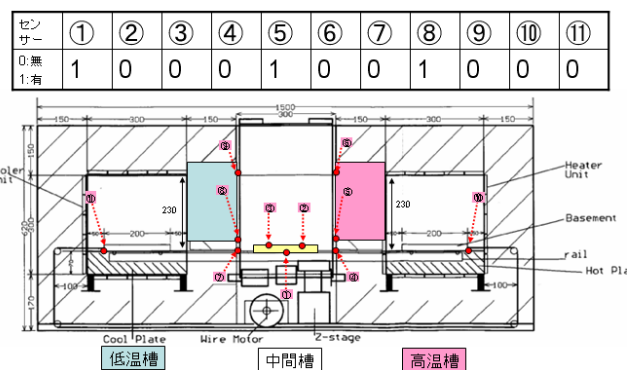


図 3-2 試験機(目標時間間隔: 0.2(s))

センサー	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪
0:無	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
1:有											

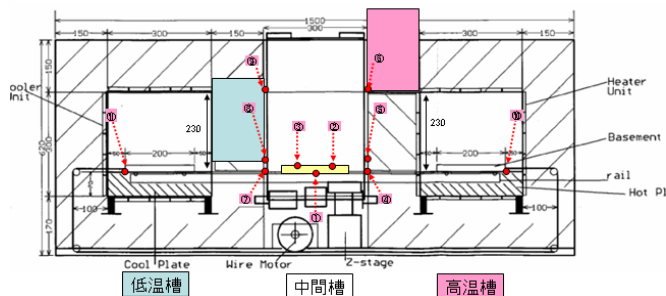


図 3-3 試験機(目標時間間隔: 4.4(s))

センサー	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪
0:無	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0
1:有											

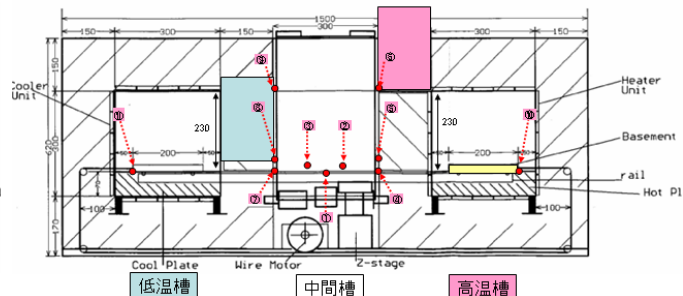


図 3-4 試験機(目標時間間隔: 9.0(s))

センサー	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪
0:無	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
1:有											

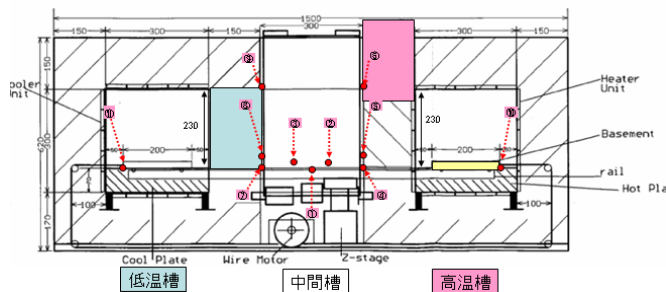


図 3-5 試験機の動作(目標時間間隔: 0.2(s))

センサー	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪
0:無	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
1:有											

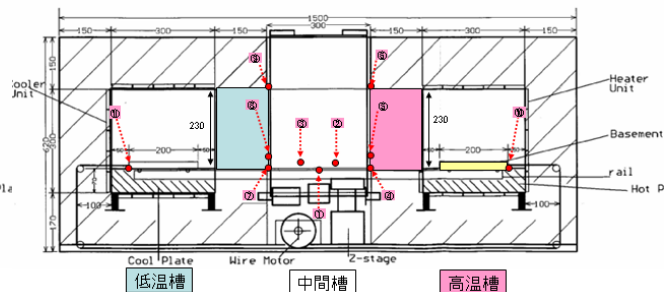


図 3-6 試験機の動作(目標時間間隔: 4.4(s))

センサー	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪
0:無	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
1:有											

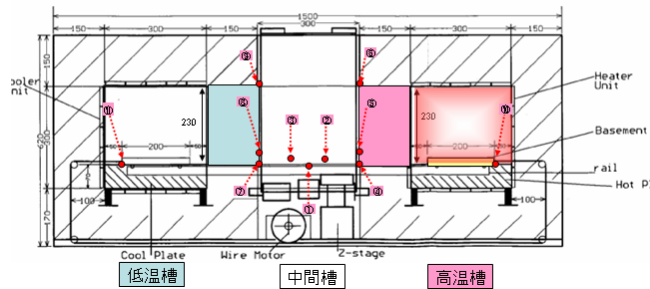


図 3-7 試験機の動作(待機中)

センサー	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪
0:無	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0
1:有											

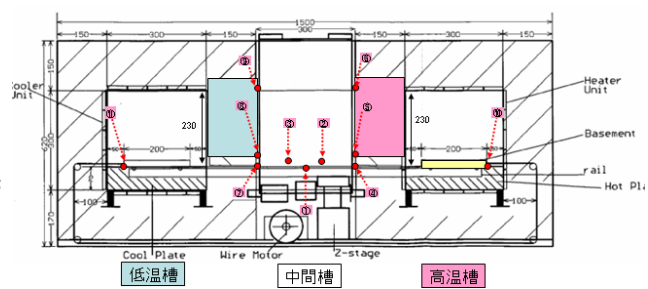


図 3-8 試験機の動作(目標時間間隔: 0.2(s))

センサー	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪
0:無	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0
1:有	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0

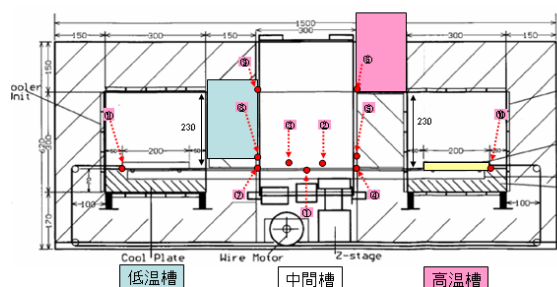


図 3-9 試験機の動作(目標時間間隔: 4.4(s))

センサー	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪
0:無	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
1:有	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0

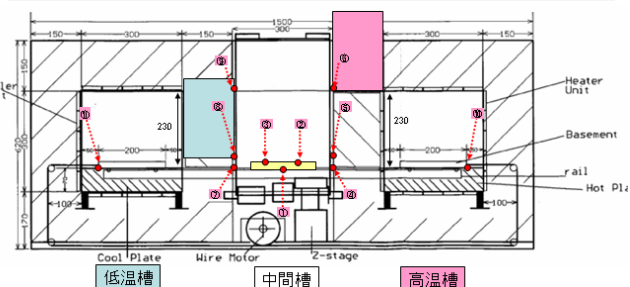


図 3-10 試験機の動作(目標時間間隔: 9.0(s))

センサー	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪
0:無	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
1:有	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0

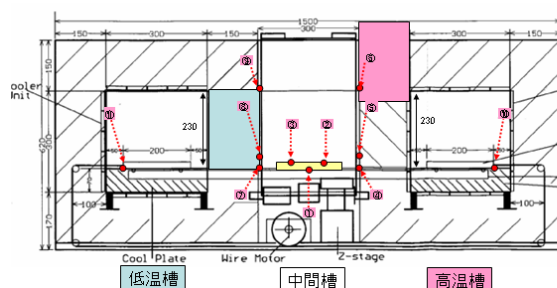


図 3-11 試験機の動作(目標時間間隔: 0.2(s))

センサー	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪
0:無	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
1:有	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0

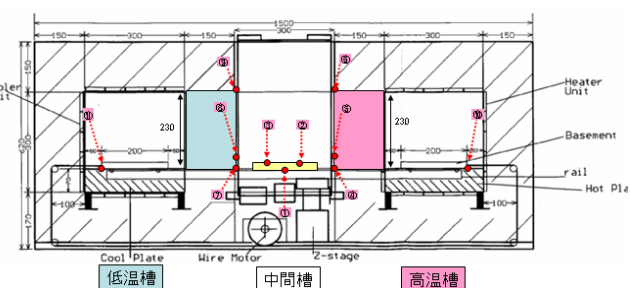


図 3-12 試験機の動作(目標時間間隔: 4.4(s))

3-2 入力方法

設定項目を決めるため、小型試験機の up, down のボタンで項目を選択する。数字の入力方法について、1桁ずつ、数字を入力していく。最後列の桁を入力後、設定を確認する。YES もしくは NO を聞いて、もし違っているならば再入力を行う。問題ないならば、そのまま設定画面を”enter”で抜ける。すなわち”enter”キーは確定ボタンを示す。”esc”キーを押したら、設定項目内で、初期の画面(1桁目の入力位置)に戻る。



図 3-13 操作パネル

3-3 システム動作シーケンス

ブレーカーを入れ、本体電源をONにし、準備スタートを押した後に、高温槽を加熱する。その間は、低温槽を冷やし始めない。高温槽が準備できたならば、次に低温槽を冷やし始める。(全ONであれば、効率的に試験機を稼動できるが、全部 ON にすると推定 40A~50A 程度になるため、電源が維持できず、ブレーカーが落ちてしまう可能性が高い。)

高温槽には、3種類のヒーターを設置している。そのヒーターをヒーター1とヒーター2、補助と定義する。また低温槽には、3種類のクーラーを設置している。そのクーラーをクーラー1とクーラー2、補助と定義する。目標温度に到達したならば、ヒーターやクーラーなどの温度調整機器のスイッチを OFF にし、温度が変化したならば、温度を調整するため、温度調整機器をまた ON にする。すなわち、ON-OFF の制御である。

全体において実行すること又は方針:

A: 「待つ」とは、その前の命令実行後に、所定状態になることを待つ。しかし、所定時間を経過してもその状態にならない場合は、再度実行し、待つて再度エラーの場合はそれを表示して停止する。

B: フェイルセーフの方針でプログラムする。又規定していない場合は、そのままにしないで、打合せを行う。

C: 所定 XXX とある場合は、隠し設定画面で、その値を設定できるようにプログラムする。

D: 各シーケンスの実行と不実行(省略)を隠し画面で、指定可能とする。

E: 保持モードとは、所定温度に達する前に4ビット全てを ON にしていたが、達した後に2ビット(b1とb3)を、常時 OFF にして、残り2ビット(b0とb3)のみで ON と OFF を繰り返しながら、所定温度を保持すること。実際には、温度をモニターし所定温度と比較しながら、0.1秒毎に、指定ビットの ON/OFF を行い所定温度と等しいかオーバーかすればビットを OFF にし、以内になれば ON するコントロールを行って、所定温度になるように操作し続ける。その際、上昇時は(所定温度 + α)を所定温度とし、下降時は(所定温度 + β)を所定温度とし、上記保持モードでのコントロールが行えるように、 α と β を $\pm 5^{\circ}\text{C}$ の範囲で指定できるようにする。

1、本体電源が ON になった後は、システムの電気部分の機能チェックをし、エラーの場合はそれを表示し、停止する。

1-1) メモライト・リード・比較チェックを行う。また RTC チェックも行う。LCD に、テストパターンを2秒間表示し外部から確認できるようにする。温度測定モジュールの機能チェック、温度チェックを行う。更に、上記と下記の準備中の状態遷移が確認できるように、LCD 表示する。

- 1-2) LED をビット0から順番に最終ビットまで、1秒毎に点灯させて、外部からチェックしていることを確認できるようにする。
- 1-3) ドライエア発生装置の電源をONして、スタンバイ状態にする。スタンバイモードにならない場合は、その表示をして、停止する。
- 1-4) 循環水装置の電源をONして、スタンバイ状態にする。スタンバイモードにならない場合は、その表示をして、停止する。READY 信号が出ていること。
循環水装置の再電源オンは、5分時間を置いてから行う。
- 1-5) 温度を測定し、所定温度か、室温かをチェックする。
- 1-6) 各リミット SW の状態をモニターし、異常状態かどうかをチェックする。
- 1-7) 電氣的に、全てOKならば、全LEDを1秒毎に点灯・消灯を2回して消灯して、スタンバイモードに入る。
- 1-8) 「準備スタート」入力待ちに入る。

2. パラメータ入力をプロンプトする。

パラメータ入力が正しく行われた後にスタートされた後に、次のようなシーケンスで動作する。

3. ドライエア発生装置

- 3-1) 温度を所定温度に設定する。
- 3-2) 発生装置が所定の指定温度になるまで待つ。 所定時間で指定温度にならない場合は、表示して停止する。
この2項:手動設定
- 3-3) バルブを全開にし、高温槽、中間槽、低温槽の気温が所定温度になるまで待つ。

所定温度: ドライエア温度 = -20°C ($-50\sim+50^{\circ}\text{C}$)。 TO=60M とし、エラー時全ビットオフにする。

CPU の通信ポート0で4117からリードできる温度8チャンネルの詳細

チャンネル番号 温度測定場所

- | | |
|---|-----------|
| 0 | 高温槽の気温 |
| 1 | 高温プレート1温度 |
| 2 | 高温プレート2温度 |
| 3 | 中間槽の気温 |
| 4 | 中間槽の温度 |
| 5 | 低温槽の気温 |
| 6 | 低温プレート1温度 |

7 低温プレート2温度

3-4) 各槽のプレートが、パラメータ指定温度 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 以外の場合は、上記3-3)待ち時間の間に、
次項のチェックを行う。

4. 中槽で、台車を少しだけ移動させ、正常に動作するかをチェックする。

4-1) 中槽で、台車を20mm移動し、リミット SW が ON になるかを確認する。

4-2) 上記がエラーの場合、両ドアを上方に2秒間上昇させる。

4-3) 台車を20mm移動させてみて、リミット SW が ON になるかを確認する。

5. 高温槽の温度起動:

5-1) 高温槽のパワーを全開にし(全ビットを ON にする)、所定温度に達するのを待つ。

ヒーターの系統を 2 系統とし、1 系統毎に別々に制御を行う。

ヒーター1 高温プレート1の温度を、モニタしながら5-2)の制御を行う。

ヒーター1補助

ヒーター2 高温プレート2の温度を、モニタしながら5-2)の制御を行う。

ヒーター2補助

全開とは、この 4 ビットを1にする。

5-2) 所定温度に達した後は、保持モードに入る。各温度槽の温度保持モードとは、温度をモニターしながら、0.1秒毎に、指定ビットの ON/OFF を繰り返し(所定温度に等しいかをオーバーすればビットを OFF にし、以内になれば ON する)、所定温度になるように操作し続ける。

6. 低温槽の温度起動:

6-1) 循環水装置の温度を指定し、所定温度に達するのを待つ。(循環水装置の温度を指定とはどのように行えばよろしいでしょうか)

6-2) 低温槽のパワーを全開にし(全ビットを ON にする)、所定温度に達するのを待つ。

クーラーの系統を 2 系統とし、1 系統毎に別々に制御を行う。

クーラー1 低温プレート1の温度を、モニタしながら6-3)の制御を行う。

クーラー1補助

クーラー2 低温プレート2の温度を、モニタしながら6-3)の制御を行う。

クーラー2補助

全開とは、この4ビットを1にする。

6-3) 所定温度に達した後は、高温槽と同じく、保持モードに入る。

7. 高温槽と低温槽の温度が指定温度に達した後は、それを表示し、試験スタートの入力を待つ。

試験スタート状態になったら、次に進む。

8. 高温晒し:

8-1) 高温ドアを開け、高温槽に移動させ、高温ドアを閉じて、台車の温度の上昇を待つ。

8-2) はじめの高温晒しでは、温度設定を、所定温度+10°C(設定可能とする)に設定し、所定時間後に、所定温度に設定し直す。 所定時間: ドア閉から時間カウント開始し、2分後(0-5分)後に、 α を0にする。

8-3) 所定温度に達して、保持状態になった後は、指定時間経過まで待つ。

8-4) この指定時間待ちの間に、低温槽の温度を所定温度-10°C(指定可能とする)に設定して、その温度(次ステップ待ち温度)に設定し直す。

8-5) 指定時間経過後は、高温ドアを開けて、中槽に移動し、高温ドアを閉める。

9. 中間槽で、台車温度が下がるのを待つ。

9-2) ドライエアの中間槽バルブを全開にして、そのドライエア温度又は+20°C(どちらか指定可能とする)に達するのを待つ。ドライエア温度をパラメータとして記憶できるようにして、その温度設定値を用いる。

9-3) 所定時間内にその温度 $\pm 10^\circ\text{C}$ にならない場合は、エラーとする。

9-4) ドライエア中間槽バルブを閉じて、次に進む。

10. 低温晒し:

10-1) 低温ドアを開け、低温槽に移動させ、低温ドアを閉じて、台車の温度の下降を待つ。

10-2) はじめの低温晒しでは、温度設定を、所定温度-10°C(設定可能とする)に設定し、

所定時間後に、所定温度に設定し直す。

10-3) 所定温度に達して、保持状態になった後は、指定時間経過まで待つ。

10-4) この指定時間待ちの間に、高温槽の温度を所定温度+10°C(指定可能とする)に設定して、その温度(次ステップ待ち温度)に設定し直す。

10-5) 指定時間経過後は、低温ドアを開けて、中槽に移動し、低温ドアを閉める。

11. 中槽で台車温度が上がるのを待つ。

11-2) ドライエアの中槽バルブを全開にして、そのドライエア温度又は+20°C(どちらか指定可能とする)に達するのを待つ。

11-3) 所定時間内にその温度±10°Cにならない場合は、エラーとする。

11-4) ドライエア・バルブを閉じて、次に進む。

12. 高温晒し8項に戻り、指定回数、熱衝撃サイクルを繰り返す。

上記は常温槽がある場合のシーケンスである。常温槽がある場合は、緩やかな温度変化を実施する熱試験機を想定している。そのため、急激な温度変化を実験できる熱衝撃試験機ではない。熱試験機と熱衝撃試験機の2つの選択肢を用意した。熱試験機として使用する場合は、高温槽に配置された試験片を常温槽に台車を挿入し、室温で冷却する。常温槽が、エネルギーの損失を緩和する働きがある。熱衝撃試験として使用したい場合は、高温槽から低温槽に台車を、そのまま槽内に入れる。

熱試験機では消費エネルギーを2.5(KW)以下にすることが可能である。熱衝撃試験機として使用したい場合は、消費エネルギーが2.5(kw)程度まで必要となる。

3-4 ハードウェア

小型熱衝撃試験機は、主要な高温槽部、低温槽部、機構部分を機能させる為の電気回路部分と電力部分がある。

ハードウェア部分は、本装置の下方部分に配置されている。日本製マイコンを搭載したCPU基板と、多く手足となる制御・検出部分をまとめる為のレジスタ基板、操作パネルの為の操作パネル基板、温度台車移動と高温ドア・低温ドアを制御するためのモーター制御基板、ヒーターを制御し電力を供給する為のヒーター制御基板、ペルチェ素子を駆動し電力を供給する為のクーラー制御基板から構成される。

ブロック図は次の通りである。

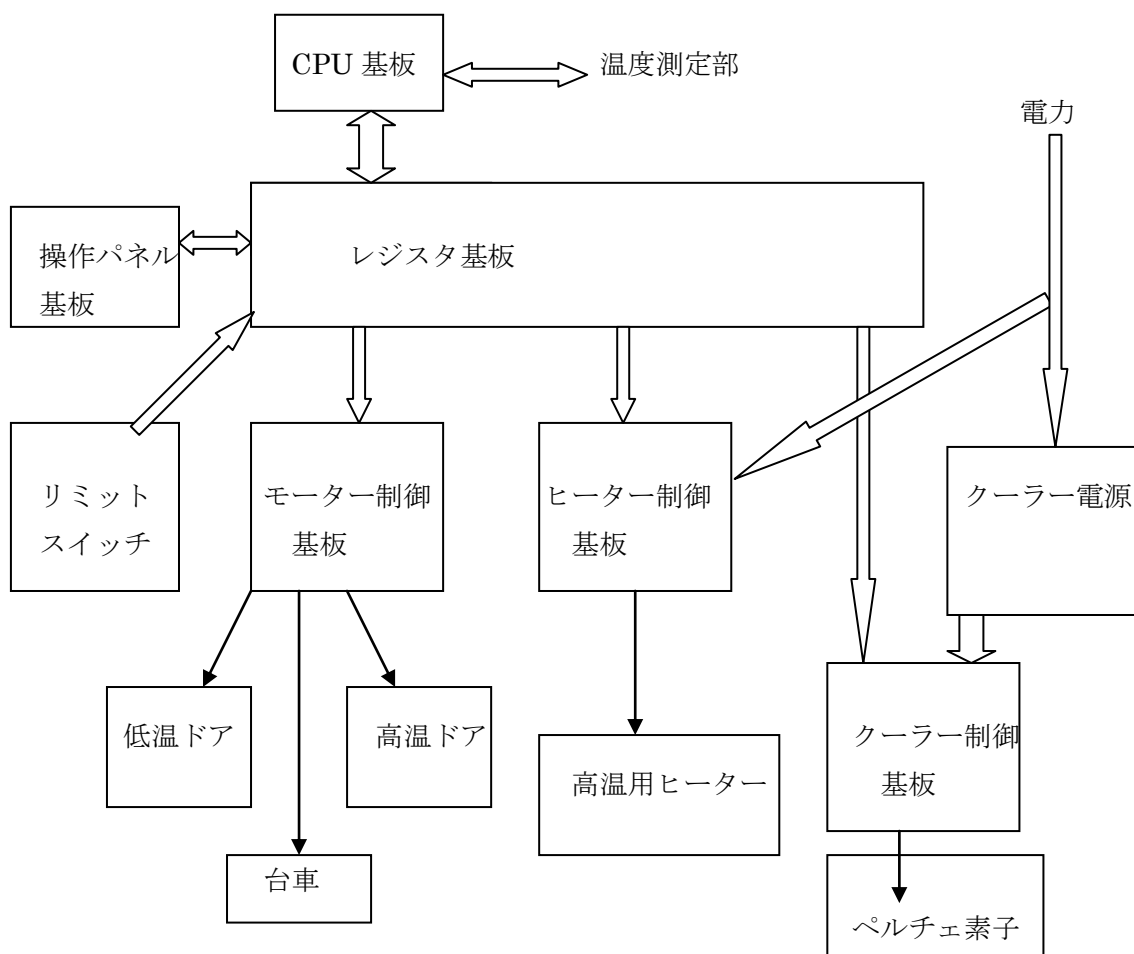


図 3-14 ブロック図

各基板の写真は次の通りである。

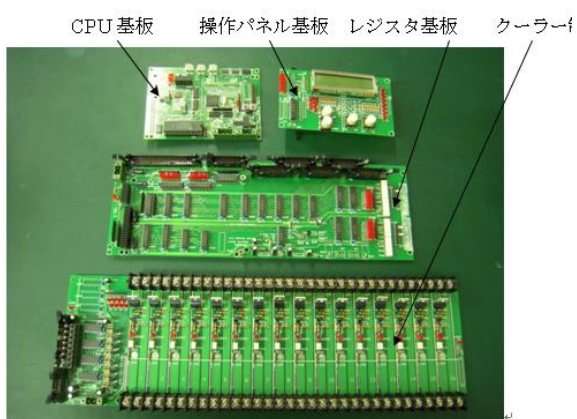


図 3-15 基板

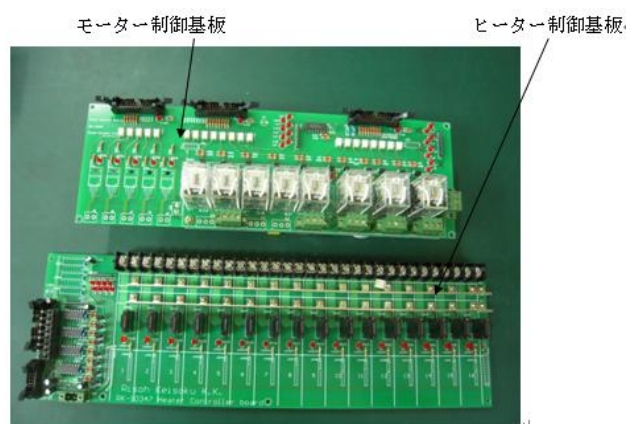


図 3-16 基板

組立設計図は次の通り。

中央の両方の取手を中心方向に90度ひねると蓋がロックされる。

中央上部は、高温ドアと低温ドアの収納部である。

寸法は、横160(cm)×高さ175(cm)×奥行き60(cm)である。

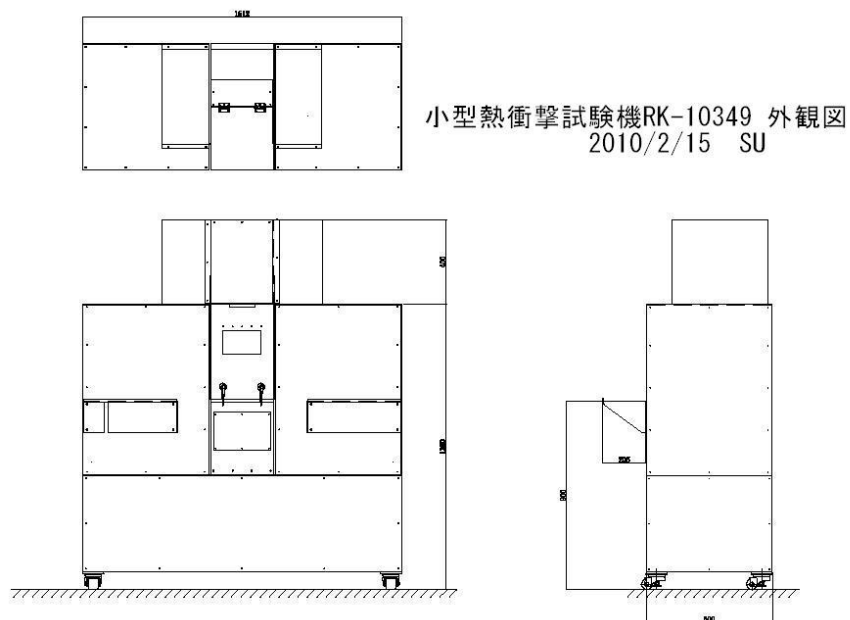


図 3-17 組立設計図

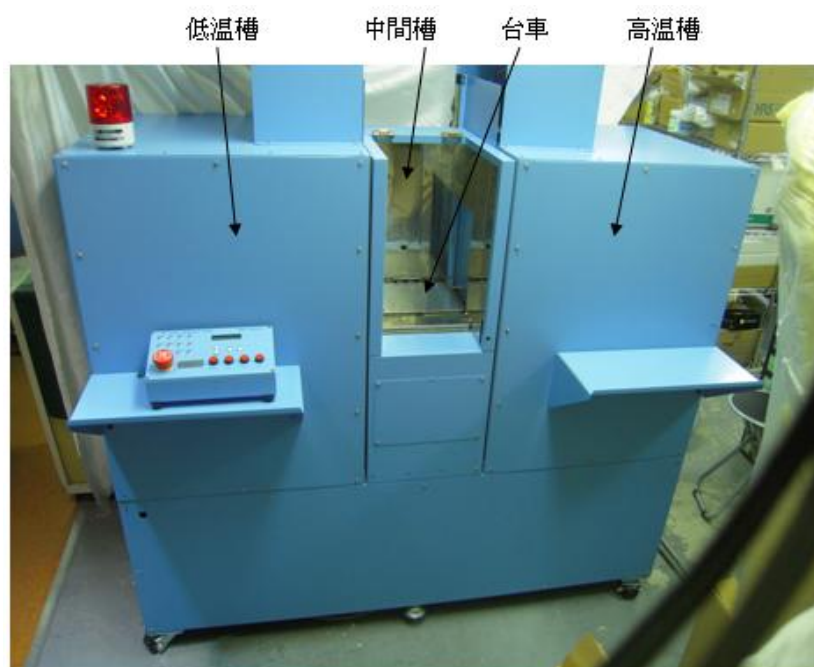


図 3-18 試験機概観

第4章 計算による信頼性評価

試験機の基本設計を構築する上で予備試験が必要である。この予備試験を、シミュレーションによる計算結果に基づいて、機器の仕様の検討を行った。温度範囲（ -50°C ～ 350°C ）、温度サイクルの温度保持時間などの基本性能を満足する試験機を開発するため、設計最適化技術を駆使したシミュレーション評価により、試験機のプロトタイプを構築した。

熱や構造のシミュレーションを実施するため、有限要素法を使用する。この有限要素法は、連続体の方程式を離散化する手法である。様々な過程を経て、連立一次方程式まで連続体の式を変形する。この連立一次方程式を解くための機能を"ソルバー"（代表的なものに、ICCG法、ガウス=ザイデル法、SOR法などがある）と呼ぶ。現状では、どのような連立一次方程式でも解を求める汎用ソルバーは存在しない。

汎用ソフト（熱解析、構造解析、流体解析、磁場解析を含む）には、様々な商用ソフトがある。この中で、ABAQUS[®]のソルバーは、他の汎用ソフトと比較して、ソルバーに優位性があると考えられている。すなわちどのような計算条件でもロバストに解が収束し、計算結果を求める可能性を有する。本開発において、高効率に熱を伝達する必要があるため、台と台車の接触状態が重要な課題の一つである。試験片をのせる台車（アルミ板）と銅プレートの接触状態およびアルミ板の反りを解析する際に、計算モデルのメッシュがゆがみやすく、連立一次方程式の解を求めることが困難な状態になりやすい。

以上より、ソルバーの優位性や計算のノウハウの観点から、ABAQUS[®]を選択した。このABAQUS[®]を用いて、主に下記の4点について検討を行った。

・台車の反り：小型熱衝撃試験器台車部の温度変化による反りの計算を実施した。急激な温度変化より、台車に反りが発生する。この反りが原因で、台と台車の間に、隙間が生じるため、熱伝達率が低下する。急激な温度変化に対応できない可能性がある。そのため、シミュレーション技術より、適切な台の板厚を決定した。（4.1節, 4.2節参照）

・台の容積：本試験機は、あらかじめ台に熱を蓄熱する方式をとる。台に蓄熱したエネルギーを、試験片に供給することで、試験片を温める。この台の最適な容積をシミュレーションより、検討した。（4.1節, 4.2節参照）

・温度槽の壁：試験機内の熱を、外気から遮断するため、熱の伝導を制御する壁構造を開発した（外壁の接触で、やけどなどが生じないように、試験機上部から熱が放熱する構造を検討した。）（4.3節参照）

・試験機を支える支柱：自重による試験機支持棒の強度を検討した。熱は支持棒を伝って、床面に熱を放熱する。そのため、熱を伝えないように、銅板と支持棒の接触面積を極力減少させる必要がある。計算による事前検討より、構造的に十分な性能をもつ支持台を製作した。(4.4 節参照)

次節から、順番に詳細な検討内容を述べる。

4-1 台車の反り (計算)

台車部は低温部と高温部との温度変化より、台車に反りが発生する。この反りは、銅プレートと台車間に、隙間が生じるため、熱伝達率が低下する。そのため急激な温度変化に対応できない。反りが発生しない台車の形状を決めるため、計算による解析を実施した。

図 4-1 に計算モデルを示す。計算モデルは、台車をモデル化したアルミ板、銅プレートをモデル化した銅板、そして、アルミ板と銅板の接触状態をモデル化した薄い接触部からなる。

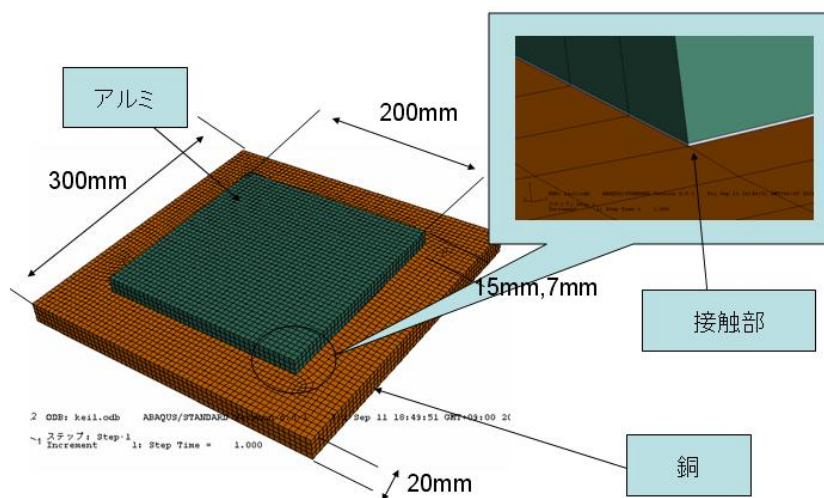


図 4-1 計算モデル

常温槽から高温槽へ台車が移動したときを想定し、台と台車の温度の変化を調べた。計算条件を、図 4-2 に示す。銅プレートの初期温度を 350°C に設定し、アルミ板の初期温度を 20°C とした。銅プレートの四隅を変位拘束した。計算で用いた物性値を表 4-1 にまとめた。接触部の剛性を $0.0 (\text{N}/\text{mm})$ 、接触部の熱伝導率を $0.0001 (\text{W}/(\text{mm} \cdot \text{K}))$ とする(空気の熱伝導率とほぼ同じ値である)。本開発機の基本性能を満たすように 5 分でアルミ板の温度が 20°C から 350°C になることを目標とした。

図 4-4 に横軸を時間、縦軸を温度としたときのグラフを示す。2つの曲線は、台車（アルミ板）の温度と台（銅板）の温度を示す。5分以内で、ほぼ2つの温度が平衡状態となる。図 4-5 にアルミ板と銅板の変位のコンター図を、図 4-6 に台車の反り量をを示す。薄いアルミ板(7mm)を使用した。温度が上昇することで大きな反りが発生した。

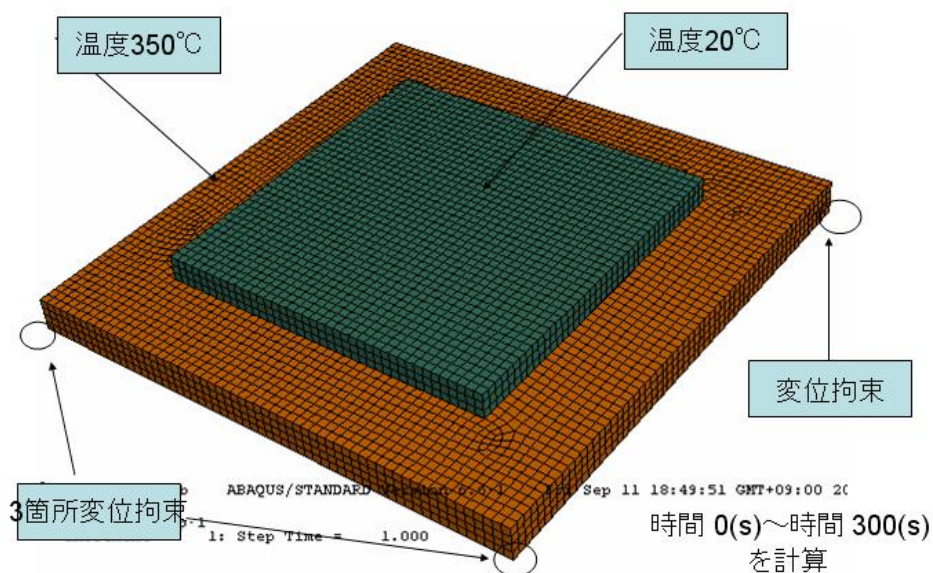


図 4-2 計算条件（初期条件 $t=0(s)$ ）

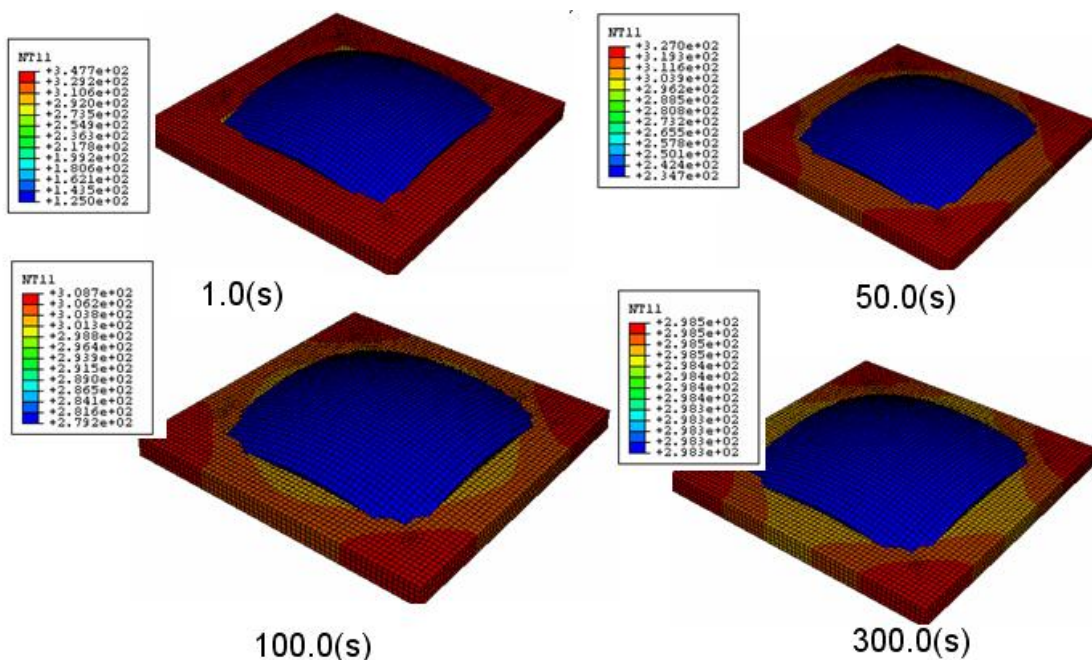


図 4-3 温度分布

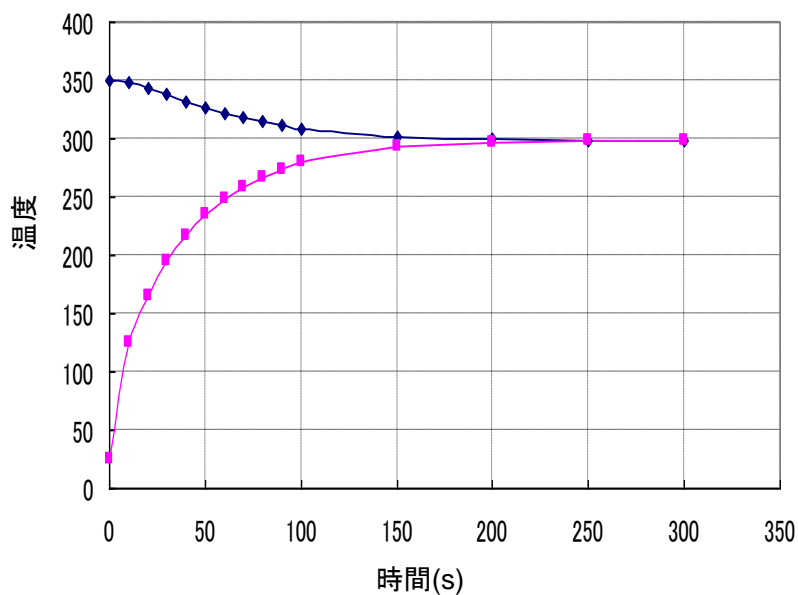


図 4-4 台(青線)と台車 (赤線) の温度変化

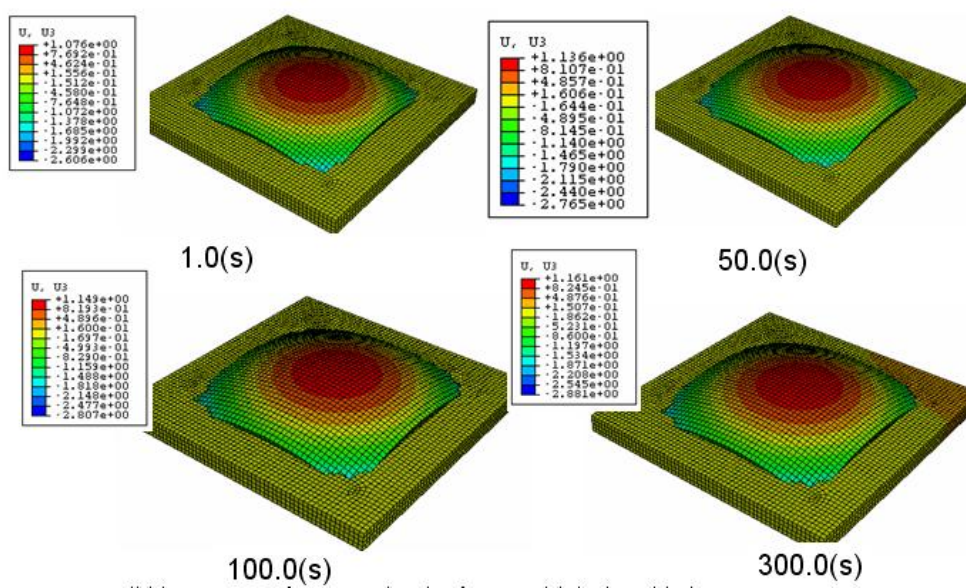


図 4-5 変位コンター図

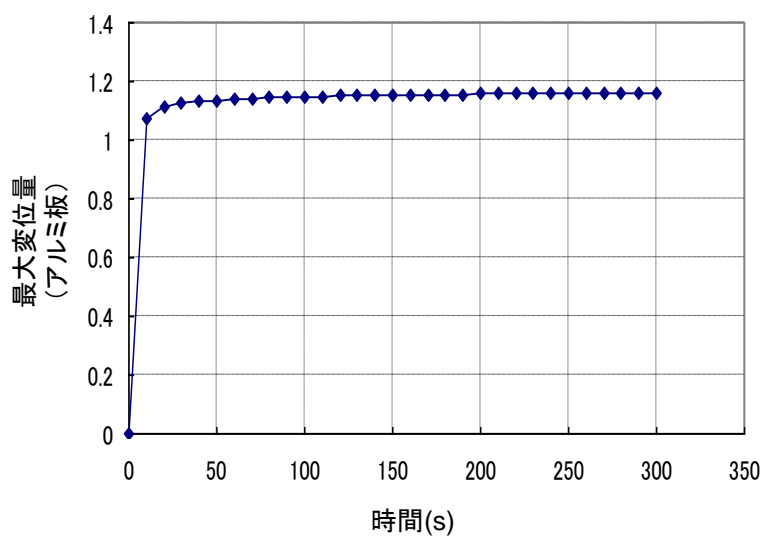


図 4-6 台車部反り量

台車部の形状を平板にすれば、反りが発生する。図 4-7 に示すように、反りを抑えるため、台車部を三角柱にする。また、三角柱にすることで台車 (アルミ板) と台 (銅板) との接触面積が増加するため、良好な伝熱が得られることが期待できる。解析モデルの傾斜部は 45° である。材料特性として銅板 $70(\text{mm})$ 、熱伝導率 $0.0001(\text{W}/(\text{mmK}))$ とした。台車部を三角柱にすることでそり量が十分に抑えられることがわかった。

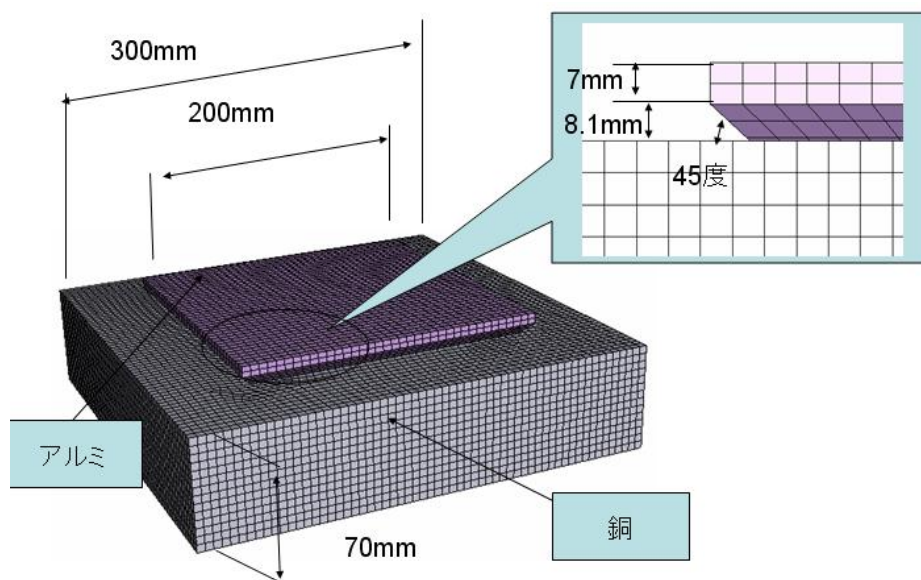


図 4-7 台車部三角柱解析モデル(傾斜 45°)

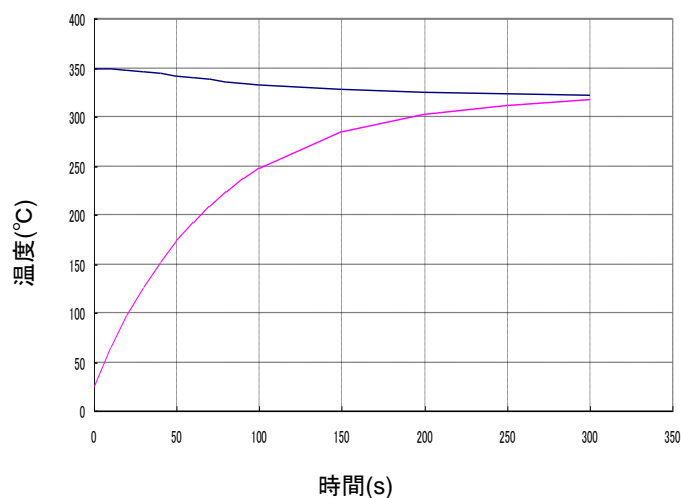


図 4-8 台車部三角柱解析モデルの温度変化(傾斜 45°)

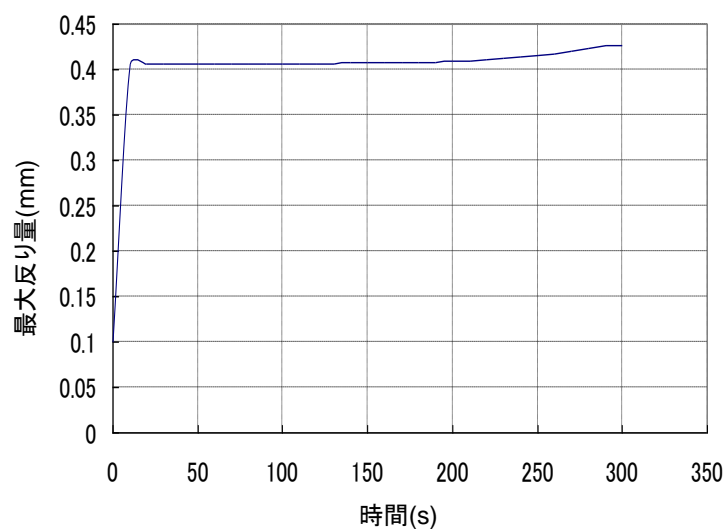


図 4-9 台車部三角柱解析モデルの反り量(傾斜 45°)

台車部を三角柱にすることで、反りの発生を抑えることができる。三角柱傾斜部の角度を変えることで、反り量と熱の伝達量が変化する。そこで、傾斜部の角度を 60°) とし、解析をおこなう。材料特性として銅板 70(mm)、熱伝導率 0.0001(W/mmK) とした。傾斜部 45°)と 60°)の反り量を比較すると、ほぼ同様の反り量を得た。また、伝熱特性についても、両者ともにほぼ同様の結果を得た。

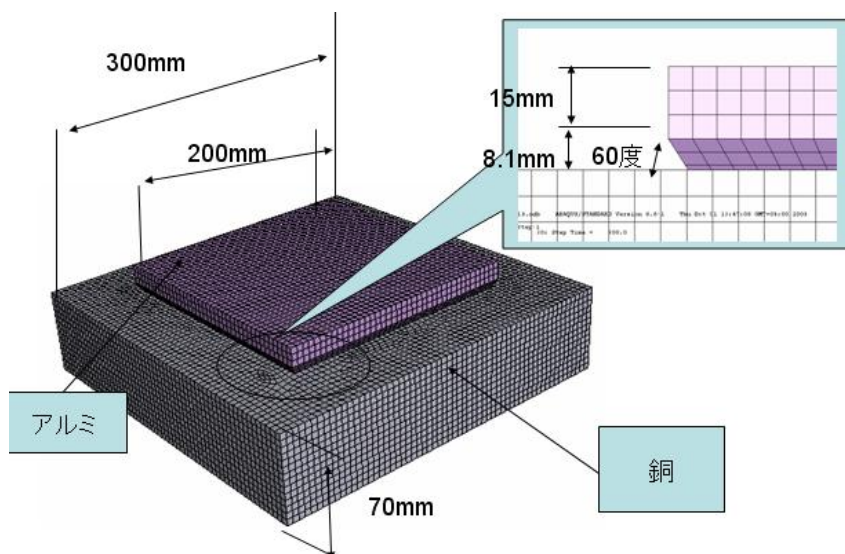


図 4-10 台車部三角柱解析モデル(傾斜 60°)

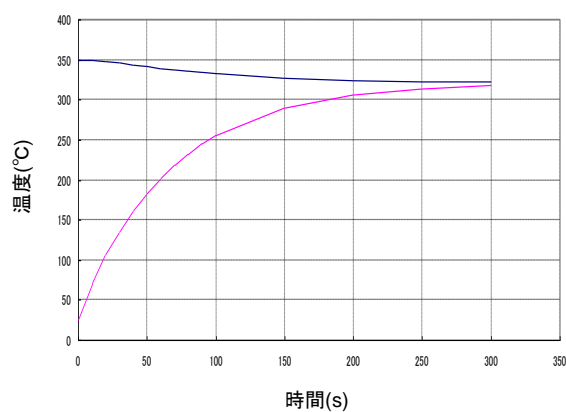


図 4-11 台車部三角柱解析モデルの温度変化(傾斜 60°)

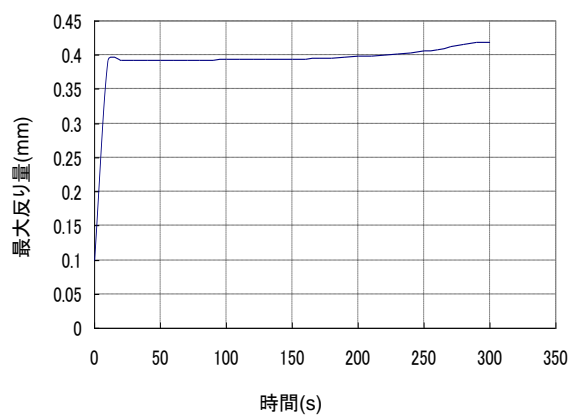


図 4-12 台車部三角柱解析モデルの反り量(傾斜 60°)

表 4-1 本研究で使用した材料物性値

物性値	熱伝導率 ($W/mm \cdot K$)	密度 (kg/mm^3)	比熱容量 ($J/(kg \cdot K)$)	ヤング率 (N/mm^2)	ポアソン比	線膨張係数
真空断熱材	0.000002	1.0×10^{-20}	1.0×10^{-20}	1.0	0.3	1.0×10^{-20}
ガラスウール	0.00005	10.0×10^{-9}	840	1.0	0.3	1.0×10^{-20}
空気	0.0000241	1.29×10^{-9}	1.0×10^3	1.0×10^{20}	0.3	1.0×10^{-20}
銅(25°C)	0.401	8.96×10^{-6}	380	1.28×10^5	0.34	1.70×10^{-5}
銅(400°C)	0.401	8.96×10^{-6}	380	1.10×10^5	0.34	1.70×10^{-5}
アルミ(25°C)	0.237	2.69×10^{-6}	880	7.046×10^4	0.345	2.3×10^{-5}
アルミ(400°C)	0.237	2.69×10^{-6}	930	4.900×10^4	0.345	2.3×10^{-5}
鉄(25°C)	0.0804	7.87×10^{-6}	450	2.11×10^5	0.29	1.10×10^{-5}
鉄(400°C)	0.0804	7.87×10^{-6}	450	1.84×10^5	0.29	1.10×10^{-5}
セラミック	0.016	7.9×10^{-6}	395	2.11×10^5	0.29	2.3×10^{-5}

4-2 台車の反り (実験)

4.1 節で台車の反りと温度変化を計算で確認した。本節では、その計算結果をもとに、実験を実施した。図 4-13, 図 4-14, 図 4-15 に試験片の外略図を示す。また実験の様子を図 4-16, 図 4-17, 図 4-18 に示す。アルミ板 (台車) の温度を室温にし、その板を 100°C に熱した台 (銅板) に配置する。アルミ板の温度上昇速度を測定した。実験から下記の 4 点がわかった。

- ・ 安定して温度が上昇する。
- ・ 室温は 23.7 度である。0(s) から 50(s) の間で、温度が急激に上昇する。
- ・ 50(s) 程度で 100°C 程度、台車の温度が上昇した。そのため、300(s) で 350°C 程度の温度上昇を達成することが十分に期待できる。
- ・ 台車の反りは発生しない。

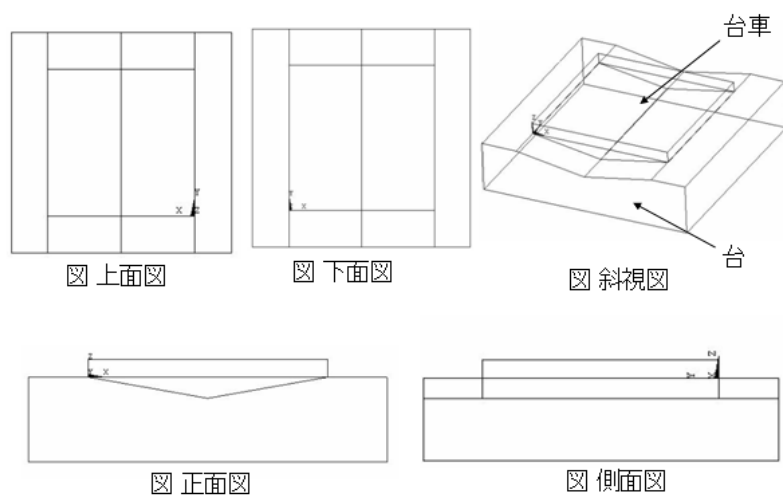


図 4-13 試験片外略図

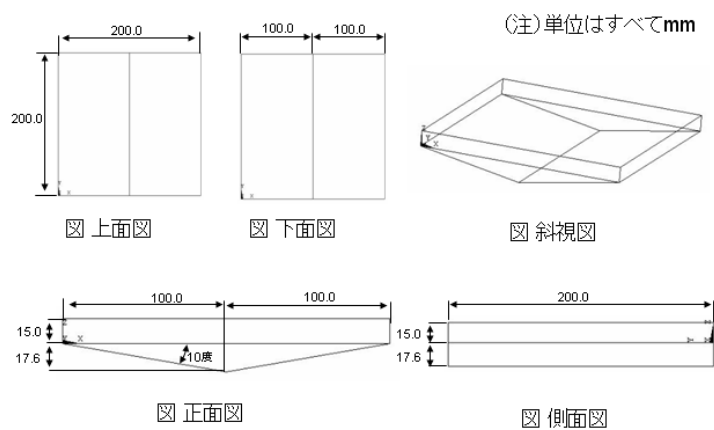


図 4-14 台車 (アルミ板)

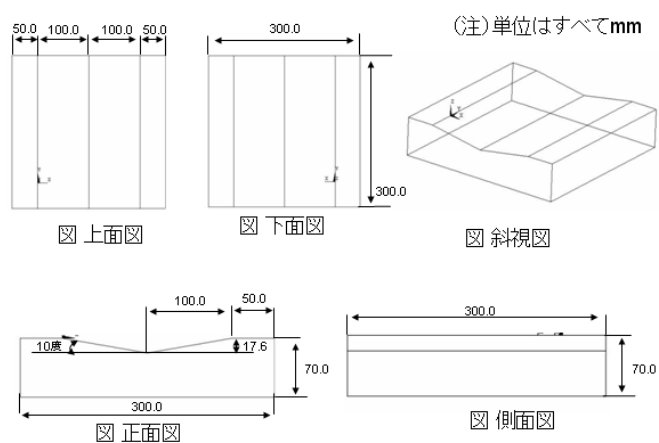


図 4-15 台 (銅板)



図 4-16 台の計測の様子

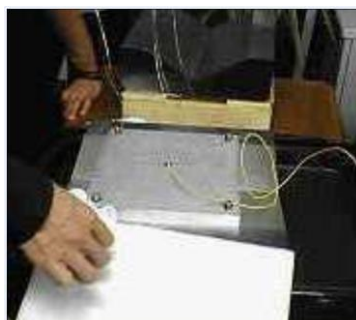


図 4-17 台車を台に配置した
場合の計測の様子



図 4-18 小試験片の計測
の様子

4-3 高温槽の壁

熱衝撃試験機の高温槽側の壁厚みを検討した。高温槽側は内部が最高 350°C の高温になる。試験機高温槽の表面から放熱を防ぐため、高温槽の壁面に、グラスウール等の断熱材が必要である。グラスウールの熱伝導率は (0.05W/mK) である。断熱材の厚みを決めるため、熱伝導解析を実施した。図 4-19 に解析モデルを示す。材料の物性値を表 4-1 に示す。 $200(\text{mm})$ の壁厚さのグラスウールを使用しても、なお試験機外表面の温度が 100°C 以上という結果が得られた。外壁面は高温であるため、ユーザーが試験機に接触すれば、やけどを生じるため、極めて問題である。

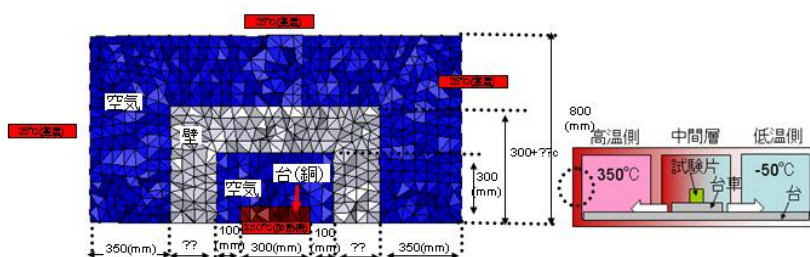


図 4-19 計算モデルおよび試験機外略図

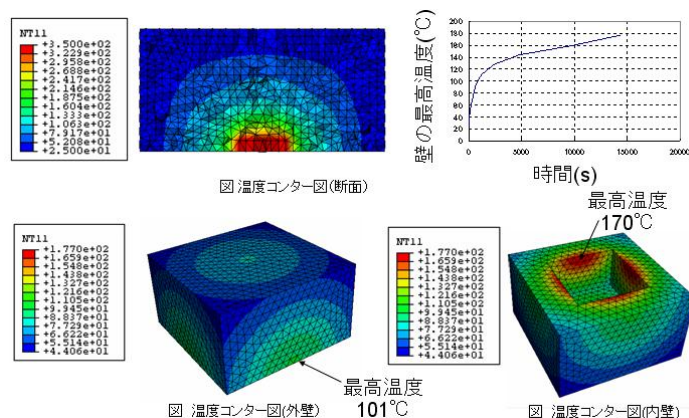


図 4-20 計算モデル温度分布

冷蔵庫などに使われる真空断熱材とグラスウールを、温度槽の壁の材料に使用することを検討する。計算モデルに使用した材料物性値を表 4-1 に示す。真空断熱材の熱伝導率はグラスウールの熱伝導率よりも、断熱効果が高い。(真空断熱材を使用するとほぼ熱が伝わらない。)しかし、真空断熱材の使用範囲は -50°C から 100°C である。そのため、加熱室周辺にはグラスウール壁を配置し、その壁の厚みを全体の $\frac{2}{3}$ 程度に抑える。高温槽の壁の厚みの $\frac{1}{3}$ を真空断熱材に置き換え、グラスウール壁の外側を真空断熱材でつつむことを検討した。真空断熱材表面の温度を 100°C 以下に抑えるため、グラスウール材とアルミ材の間にアルミで作成した放熱室を配置する。この放熱室を配置することで、高温側の箱の側面と底面の熱を上方へ、放熱していく構造を構築した。高温側の構造を図 4-21 に示す。この構造の伝熱解析を実施することで、壁面の最高温度を検討した。

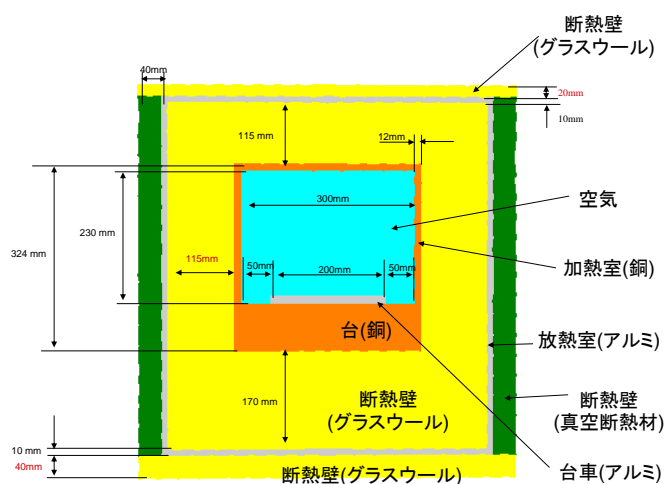


図 4-21 解析モデル (高温槽)

温度槽の側面、底面及び上面にも断熱材を使用し、温度上昇を防ぐ必要がある。図 4-21 の構造は、上・底面の断熱材のため、上下面からの放熱を妨げる。そのため、温度が上昇しやすい。加熱室と放熱室間の断熱壁の厚さを 115mm に設定したモデルを作成し、解析を行った。図 4-22 に示すように、上面・底面の温度が 25 度程度まで低下するが、真空断熱材の内壁部の温度が 94°C 程度となる。真空断熱材の使用条件である 100°C 以下に対してやや厳しい状態である。

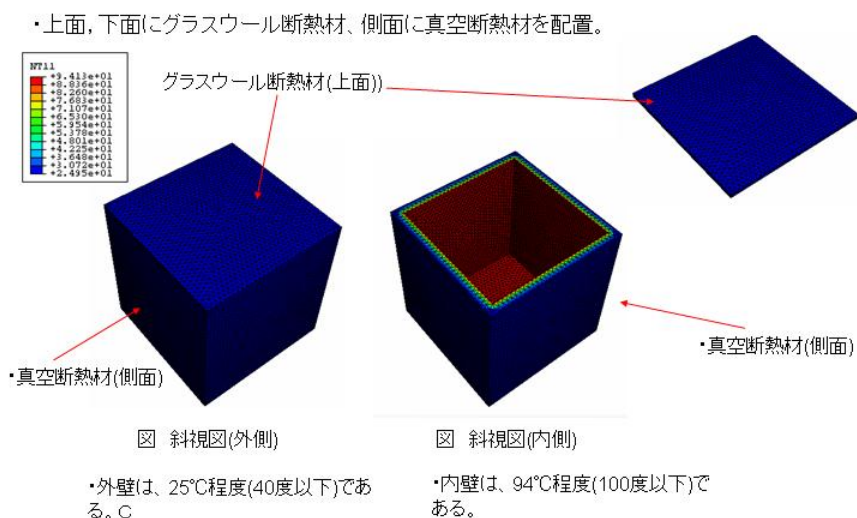


図 4-22 温度コンター図 (図 4-21 の解析モデルによる計算結果)

放熱室は高温になるため(100°C)、真空断熱材の使用上限温度を超える。そこで、真空断熱材と放熱室の間にグラスウール壁を配置した。この構造より、試験機の側面の温度を低温に保つ。上面には真空断熱材を設置しない。上面に真空断熱材を設置しないことで、上面から、熱を放熱する。その放熱で、試験機の側面の温度を低温に保持する。そのような構造を検討した。図 4-22 の解析結果を踏まえて、図 4-23 に示すように、真空断熱材と放熱室の間に新たに断熱壁を設けたモデルを作成し、解析を行った。図 4-24 に示すように、真空断熱材の内壁の温度を 89°C程度にし、真空断熱材の使用条件を満たす。試験機表面の温度は 25°Cである。十分に低温であるために、やけどなどの心配はない。試験機内部の熱を排出しなければならないため、上面の温度は、外壁の温度と比較し、多少高い。高温槽の上面に安全網などを設置することで対応する。

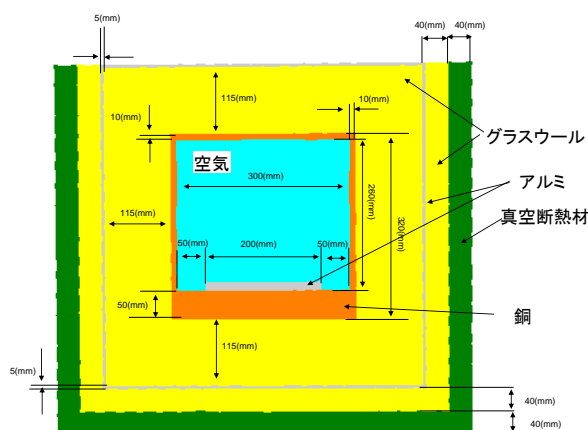


図 4-23 解析モデル (高温側) (改良)

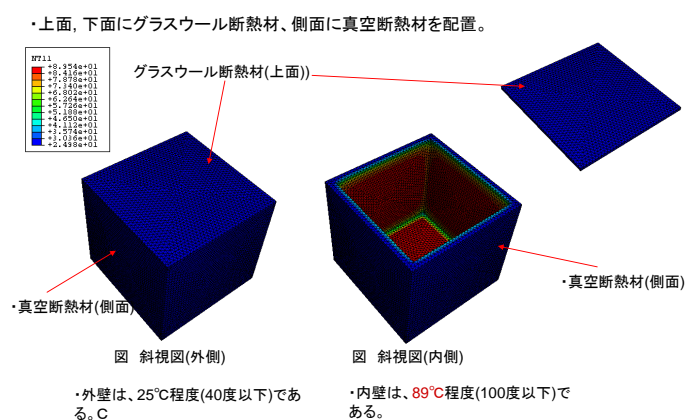


図 4-24 温度コンター図 (改良) (図 4-23 の解析モデルによる計算結果)

4-4 支持棒

自重による試験機支持棒の強度を検討した。熱は支持棒を伝って、床面に熱を放熱する。熱を遮断するため、銅板と支持棒の接触面積を極力減少させる必要がある。図 4-25 に計算モデルを示す。高温となる加熱室との接触部について、断熱を目的にステンレスを使用する。また、接触面積を低減するため、支持棒の断面は中空角柱とした。

加熱時 (350℃) に、加熱室の底面が加熱室の自重よりどの程度たわむのかを算出するために解析を行った。台 (銅板) 底面の四隅を支持棒で支えるため、たわみ最大値は底面の中心部である。図 4-26 に示すように、中心点でのたわみは 0.1(mm)程度である。台端部に対し、台中心部の変形が小さいため、自重によるたわみの影響はない。

ステンレス硝子部の応力分布を検討した。熱を遮断するため、熱伝導率が低い硝子を設置した。硝子は加熱室と接触し、加熱室の自重による影響を受ける。硝子は割れやすい特徴を持つため、硝子の応力状態を検討した。硝子の応力コンター図を図 4-27 に示す。硝子に生じる最大応力は使用条件を満たしていることを確認した。次に、図 4-28 に示すように、支持棒の変位を変位コンター図に示した。変位は 0.3(mm)程度に抑えられており、こちらも使用に問題ないことを示した。

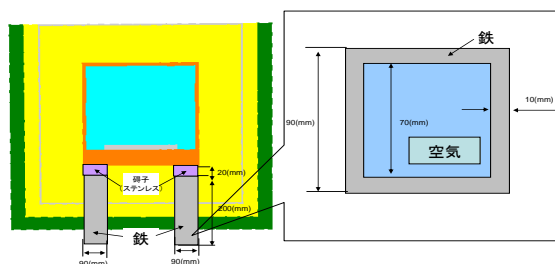


図 4-25 小型温度槽断面図と支持棒の断面図（中空角柱）

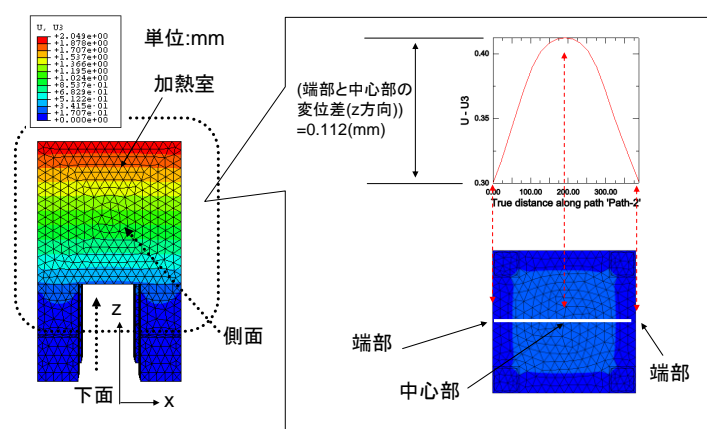


図 4-26 加熱室下面の変位コンター図

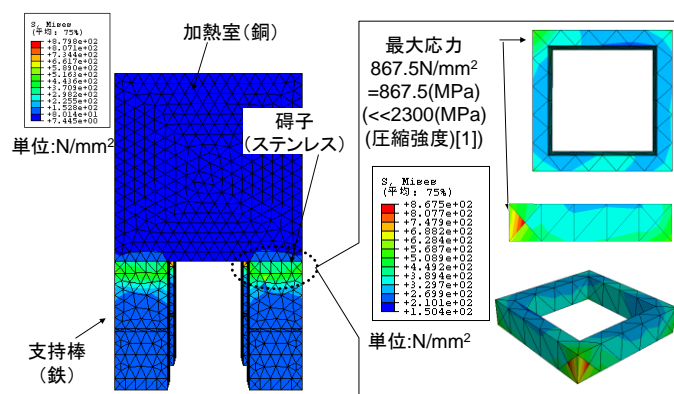


図 4-27 応力コンター図（加熱室、碍子、支持棒）

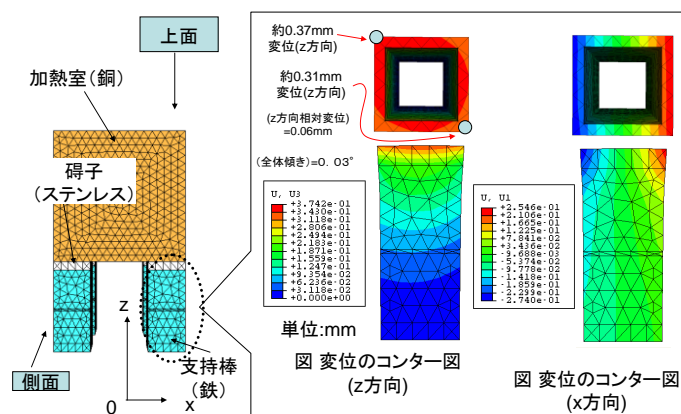


図 4-28 変位のコンター図 (加熱室、碍子、支持棒)

支持棒を4隅に配置する構造では強度上の不安があるため、図 4-29 に示すように加熱室の支持構造をトラス状の支持台構造に変更する。支持台の材質に鉄を使用する。この構造に関して伝熱解析・構造解析を行う。支持台の計算モデルについて、 $30(\text{mm}) \times 30(\text{mm})$ の角柱(ケース1)と $10(\text{mm}) \times 10(\text{mm})$ の角柱(ケース2)の太さが異なるモデルを用意した。その他の解析条件に関しては前回までの解析と同様である。加熱室支持台の形状について考察をおこなった。図 4-30 に加熱室および支持棒の変位コンター図を示す。トラス構造の支持台について、通常的支持棒に比べ、加熱室自身の変形を抑えることができた。具体的には通常的支持棒では加熱室中央が自重により、たわむ。トラス構造ならば加熱室底面中央部を支持することができるため、自重によるたわみを抑制することができる。支持台底部で応力集中が発生する。このため、トラスの構造を強固にする必要がある。

伝熱解析の結果から、ケース2の方について、伝熱性能が低いという結果を得ることができた。これは、加熱室内部の熱を逃がさないため、低エネルギーで、試験機の稼動が可能である。構造的に応力が集中する箇所があるが、支持台下部だけ、強固な構造にすることで、伝熱性能を維持しつつ、構造的にも十分な性能をもつ支持台を製作することができる。

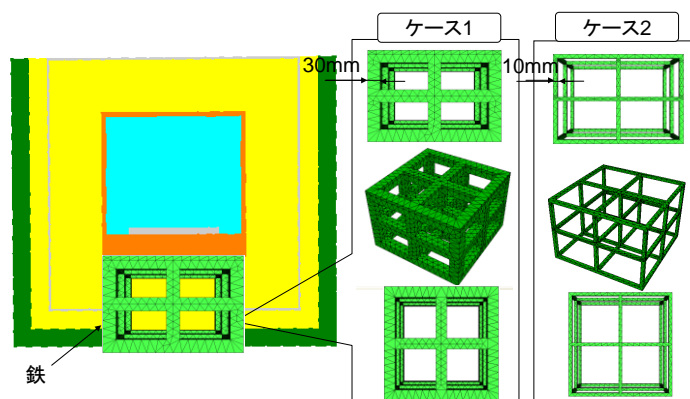


図 4-29 小型温度槽断面図

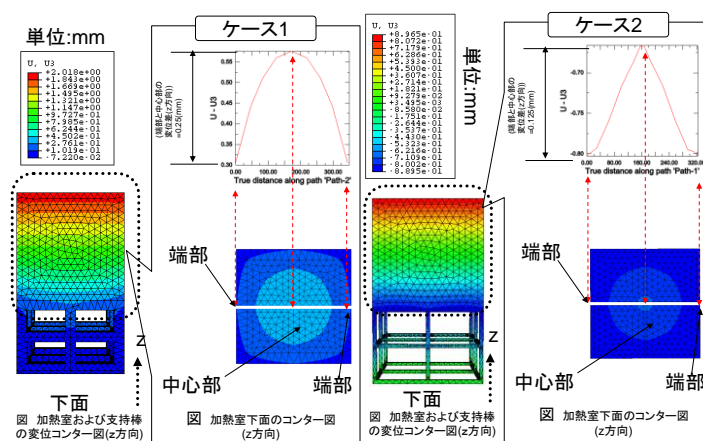


図 4-30 加熱室および支持棒の変位コンター図(z方向)

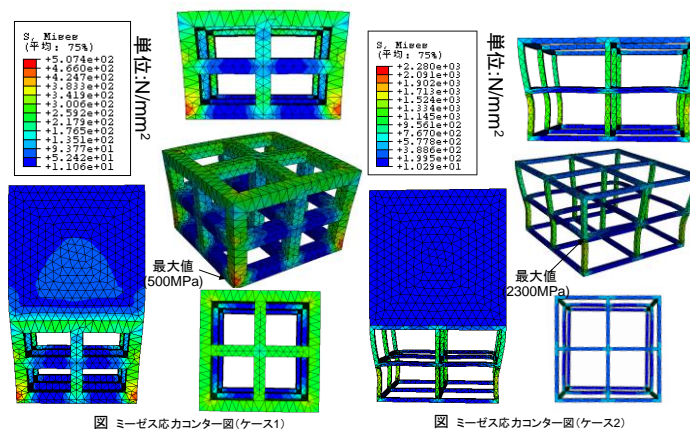


図 4-31 応力コンター図

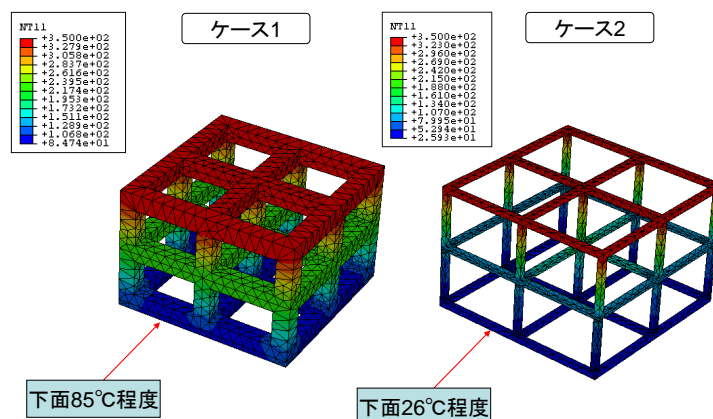


図 4-32 支持台の温度分布

第 5 章 従来の熱衝撃試験機での実験

5-1 目的

新開発の熱衝撃試験装置における温度制御の仕様を決めるため、従来型気相式熱衝撃試験装置における温度を実測した。本報告では、予備試験と本試験の2回にわけて、実験を行った。予備試験では、気相式による試験片の温度の時間変化を確認するため、試験片を気相式の台の真中に配置して、熱電対により温度を計測した。本試験では、予備試験の結果をもとに再度実験を行った。

5-2 気相式温度槽

図 5-1 に示すように、最初に、低温槽が、試験片を配置した台を覆いかぶさるように移動する。次に、低温槽が移動して、もとの位置に戻る。その後、高温槽自身が台を覆いかぶさるように移動する。試験片を設置した台の位置は常に固定される。高温槽、低温槽の箱自身が移動するような構造である。気相式の試験片を配置するためのスペースは 50cm×50cm 程度である。隙間を設けるため、試験片を配置するためのスペースは 40cm×40cm 程度を想定している。

低温槽の設定温度は-50°Cであるが、実際は-70°Cに槽が冷やす。高熱の台や試験片を冷たい低温槽に挿入するため、低温槽に負担がかかる。あらかじめ、設定値よりも、低い温度で

台を冷やしておく方がよい。設定温度を -50°C に、実際の温度も、 -50°C に設定した場合、試験片の温度を設定温度に低下するためには、長時間を必要とする。(高温側は、発熱が大きいため、設定温度を上げすぎると、危険な場合がある。)外壁の温度は 40°C 程度であり、高温ではない。気相式の温度制御に関して、壁下にある熱電対を使用した。(試験片の温度は、モニターしているのみ。試験機の制御には、この熱電対を使用していない。)図5-2に示すように熱電対を、蓋を通して設置する。

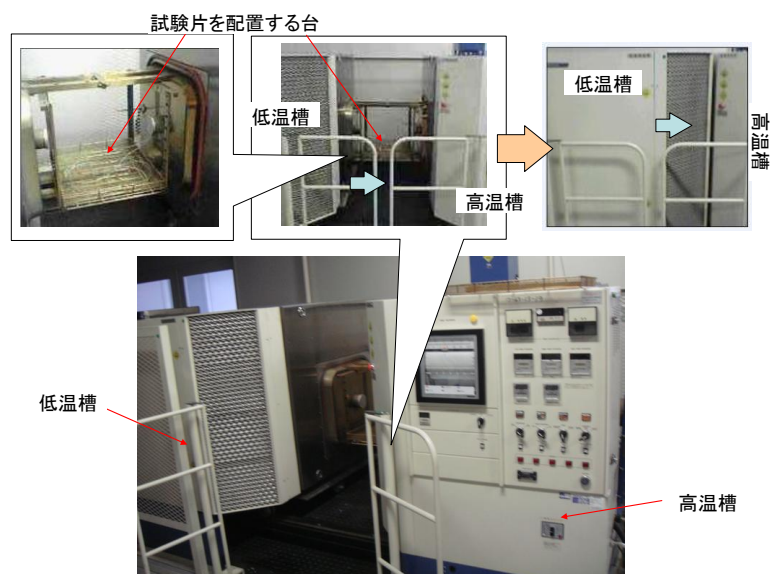


図 5-1 気相式温度槽



図 5-2 気相式温度槽

・熱電対

熱電対を用意した。配線は脆弱であるため、負荷がかからないようにした。

・絶縁

電気信号で温度を測定するため、絶縁が必要である。ノイズを計測する可能性がある(電気信号の電圧が低いいため影響を受けやすい)。グランド(台)に電流が流れてしまうと、測定が

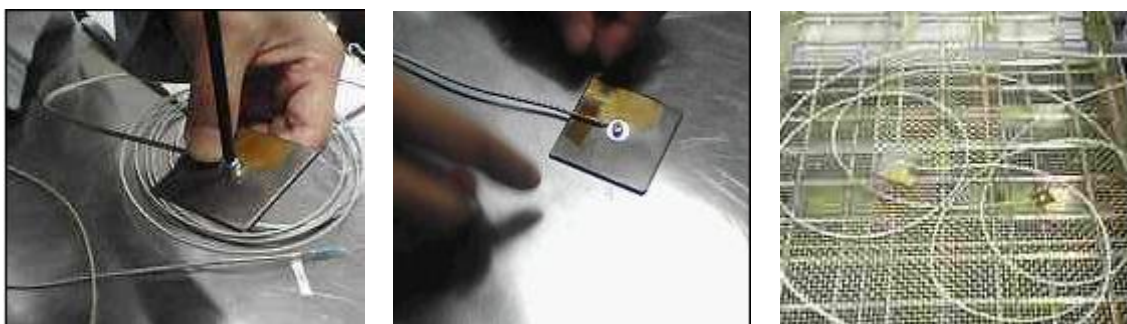


図 5-3 熱電対および試験片

困難になる。薄い絶縁板を敷いてやると、ノイズの遮断に効果的ではある。一方で非常に厚い絶縁板を挿入すると、絶縁板の熱容量が増加するため、高精度に温度測定が実施できない問題がある。

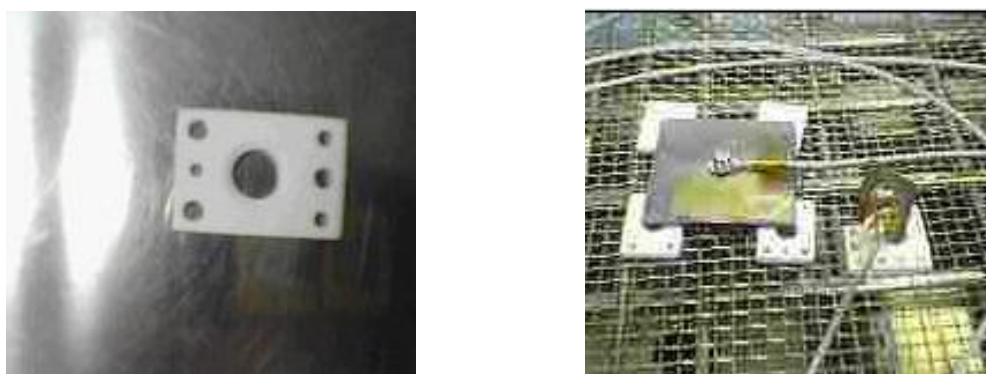


図 5-4 絶縁

・温度測定器

熱電対の電気信号を温度測定器で計測する。温度保障回路があり、周辺の気温を計測し、それを基準に、槽内の温度を測定する。温度について、±数度の計測誤差はある。熱衝撃試験であるため、急激な温度変化時には、サンプリング間隔を $1(s)$ に設定した。それ以外については、データ量を圧縮するため、サンプリング間隔を長めに取った。



図 5-5 温度測定器

・試験片

図 5-6 の試験片を用意した。この試験片に熱電対を取り付け、温度計測を開始した。

①2cm(横)×2mm(縦)×2mm(厚)

②50mm(横)×50mm(縦)×3mm(厚)



図 5-6 試験片(銅板)

5-3 予備試験

表 5-1 に実験条件をまとめる。①～⑥の条件で実験を実施した。自動車のパワーモジュールが対象であるため、高温側と低温側の温度差が広範囲であることを想定した。高温側の温度条件は 200℃、250℃、300℃、350℃の4条件である。低温側の温度条件は、-50℃、-40℃の2条件である。高温側、低温側の保持時間を90分とした。(低温槽、高温槽に試料を挿入してから90分である。温度が設定温度に到達してからの90分ではない。) 槽の温度の計測装置の設置場所は、内壁の下方である。

気相式は、試験片の熱容量に対して、試験片の周辺は、空気であるため、熱容量が小さい。そのため予冷温度を設定する必要がある。-70℃の予冷温度について、低温槽を-70℃にあらかじめ、冷却していることを示す。高温槽で温めた試験片を、調整することで、最終的に、-50℃になるように温度を制御する。予冷温度を低く設定すると、オーバーシュートを起こすため、最適な予冷温度を設定する必要がある。低温側の設定温度が-50℃である場合は、設定温度以下の-70℃に予冷温度を設定した。低温側の設定温度が-40℃である場合は、設定温度以下の-50℃に予冷温度を設定した。

表 5-1 実験条件

	高温側設定	低温側設定	予冷温度	サイクル数
①	+250℃ 90分	-50℃ 90分	-70℃	2回
②	+300℃ 90分	-50℃ 90分	-70℃	2回
③	+350℃ 90分	-50℃ 90分	-70℃	2回
④	+200℃ 90分	-40℃ 90分	-50℃	2回
⑤	+200℃ 90分	-40℃ 90分	-60℃	2回
⑥	+200℃ 90分	-40℃ 90分	-70℃	2回

温度測定
CH1: □50mm銅板
CH2: □20mm銅板

図 5-7 に表 5-1 の①-③の温度の時間変化を示す。壁際の温度は350℃であるが、室の中心は、350℃に達していない可能性がある。設定温度より、数度程度低下してしまうことをグラフは示している。すなわち、設定温度に到達しない。気相式では、数時間経過後、必ず、設定温度になるというわけではないことがわかった。

本試験機は、試験片と銅プレートとを接触することで、試験片に熱を伝える接触式であるため、試験片に対して、銅プレートが十倍程度の熱容量を有する。そのため、気相式と比較して、高精度に温度を保持できる。

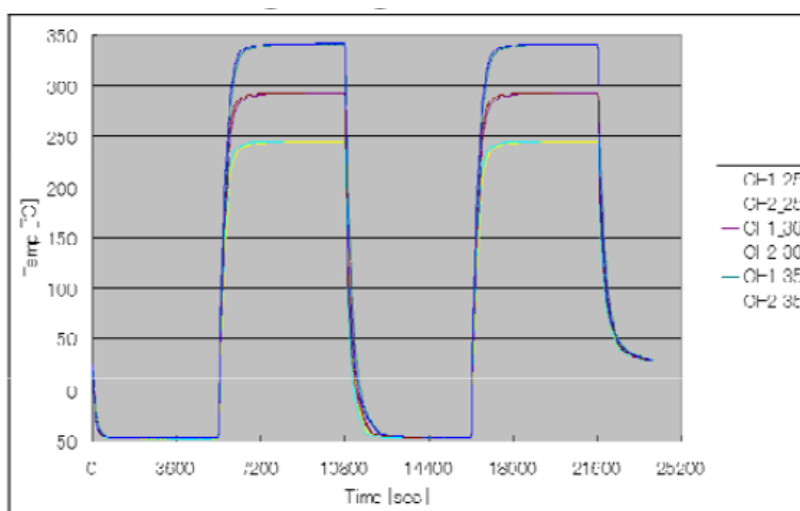


図 5-7 ①-③の温度変化

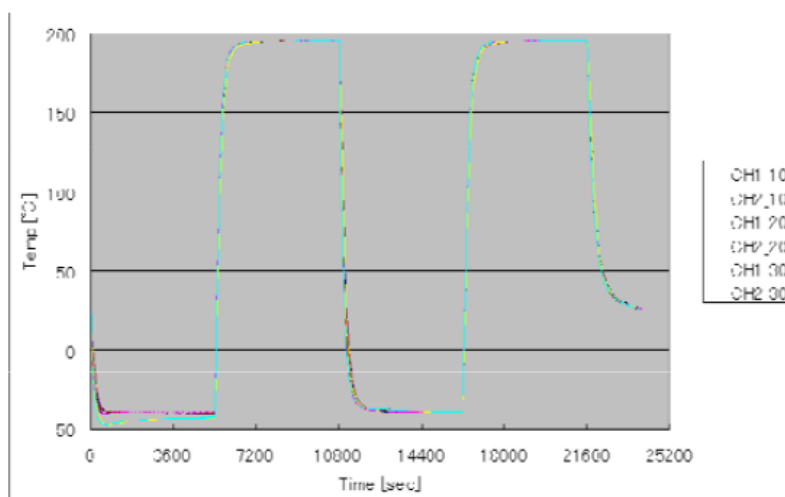


図 5-8 ④-⑥の温度変化

本小型槽の特徴の一つとして、温度測定の高精度化が挙げられる。従来の気相式温度槽は、温度を目標とする条件に設定しても、実際にその目的とする温度に到達することがない。

そのことを実験で確かめるためには、実験条件や環境の適切な設定が大変重要である。温度を測定するときには試験片に熱電対をとりつけ、その試験片の温度を確認するが、その試験片の熱電対の取り付け方で温度が、微小に変化する可能性がある。その取り付け方とは、試験片のどの位置に熱電対を設定するか？もしくは、試験片と熱電対をどのように固定するのか？熱電対から送られる電気信号をどのように処理するのか？このようなことをすべて適切に実施した後に、温度を高精度に計測することが可能である。比較的低温である150℃(パワーデバイス半導体の信頼性などを確認する時の温度)程度ならば上記のことを意識した上で適切に行うことができる。ところが、本章は極めて高温状態(約350℃)での、温度測定である。そのため、特に、試験片と熱電対の固定方法に問題があった。耐熱テープや接着剤の固定で行ったところ、焼き切れてしまうなどの問題があり、温度サイクル試験を実施したが、高精度な温度測定ができなかったことも考えられる。試験片から熱電対がはずれるなど測定が難しいこと、また、試験片を高温槽に入れると、酸化銅が発生し、表面がまっくろになり、さびる。温度を正確に計測できないこともわかった。

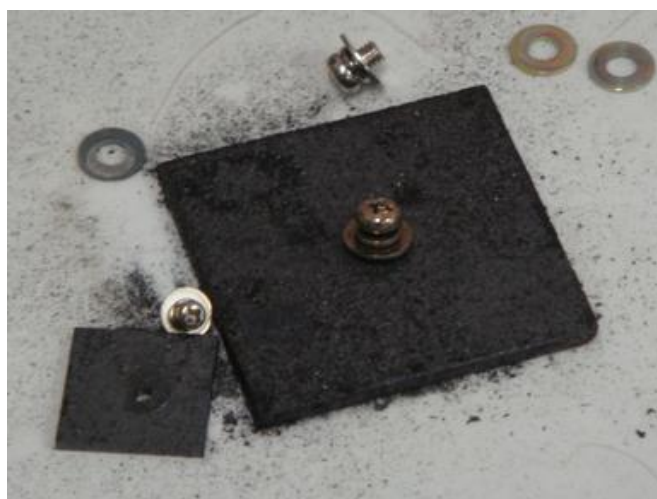


図 5-9 試験後の試験片(図 5-6 の試験片(銅板))

5-4 本試験

予備試験で用意した試験片(図 5-6)の代わりに、アルミナの板で実験を行った。アルミナ板 2 種類を表 5-2 に示す。予備試験の代替試験片として、アルミ板を用意した。サイズ大は、42.4(mm)×42.6(mm)×6.0(mm)である。サイズ小は 24.9(mm)×25.0(mm)×10.0(mm)である。アルミ板に熱電対を取り付け、アルミブロック周囲の温度を測定するため、熱電対を設置した。温度の計測点は、試験片(正方形)の中心位置である。また、試験片の周囲の温度も計測した。電流ノイズを防ぐため、150(mm)×150(mm)×1(mm)の絶縁板を用意した。この板にサンプルを置いて、温度を計測した。

表 5-2 試験片の形状

	W [mm]	D [mm]	H [mm]
アルミ大	42.4	42.6	6.0
アルミ小	24.9	25.0	10.0

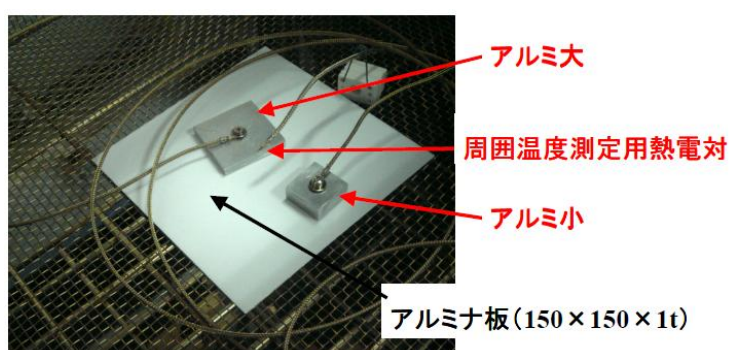


図 5-10 試験片設置状態



図 5-11 試験片設置状態

表 5-3 に実験条件を示す。5 温度サイクル 30 分、3 温度サイクル 60 分、2 温度サイクル 12 時間の 3 条件で実験を実施した。最高温度は+350℃、最低温度は-50℃である。

図 5-12～図 5-20 に温度の時間変化を示す。図 5-11 に示すように、アルミ大、アルミ小および周囲温度の 3 点を計測した。すべての実験条件について、周囲の温度は、設定温度へ急上昇する。温度サイクルが短時間になるに従って、周囲の温度に対して、試験片温度の追従性が低下する。温度サイクルが長時間になるに従って、試験片温度の追従性が向上する。温度サイクルが短い熱衝撃試験は行えないことがわかる。また設定温度まで周囲の温度が上昇しない。(約 346℃程度でサチル。) また試験片の温度は、設定温度まで上昇しない。(約 342℃程度でサチル。)

表 5-3 本試験の実験条件

	低温側	高温側	保持時間	サイクル数
試験①	-40℃	+200℃	30分	5
試験②	-50℃	+250℃	30分	5
試験③	-50℃	+300℃	30分	5
試験④	-50℃	+350℃	30分	5
試験⑤	-40℃	+200℃	60分	3
試験⑥	-50℃	+250℃	60分	3
試験⑦	-50℃	+300℃	60分	3
試験⑧	-50℃	+350℃	60分	3
試験⑨	-50℃	+350℃	12時間	2

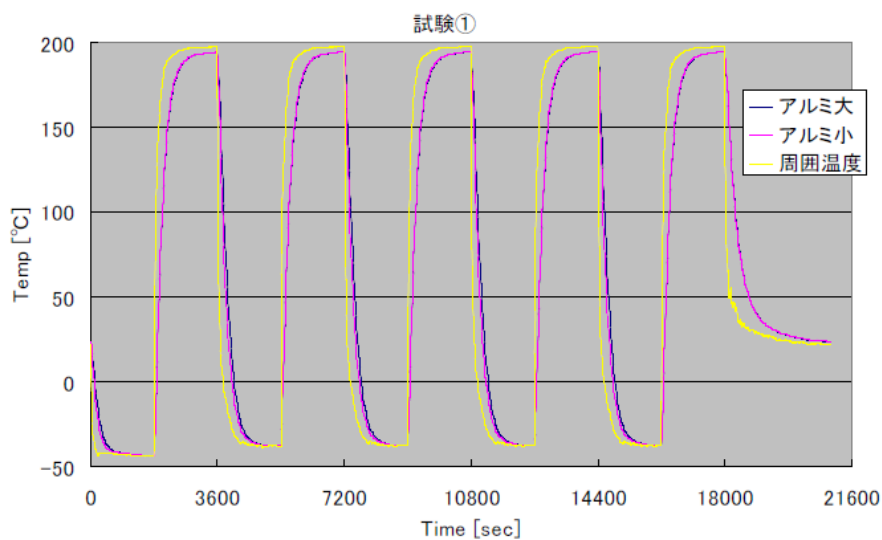


図 5-12 試験①の温度プロフィール

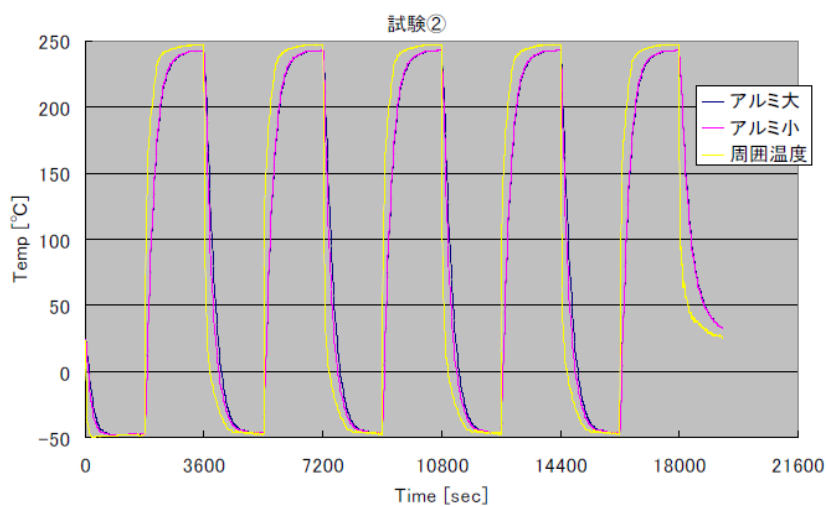


図 5-13 試験②の温度プロフィール

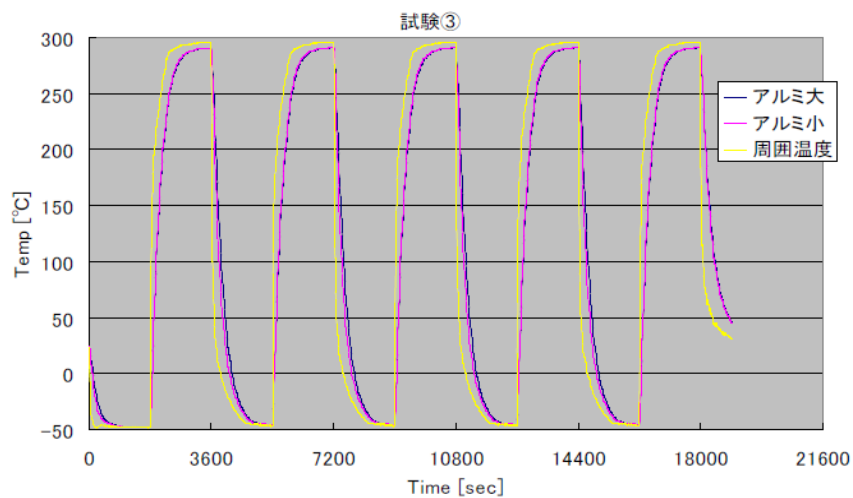


図 5-14 試験③の温度プロファイル

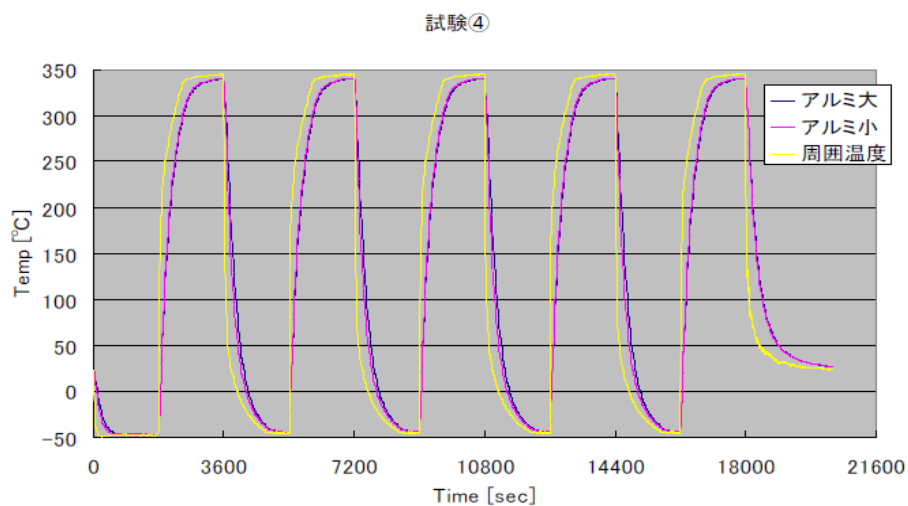


図 5-15 試験④の温度プロファイル

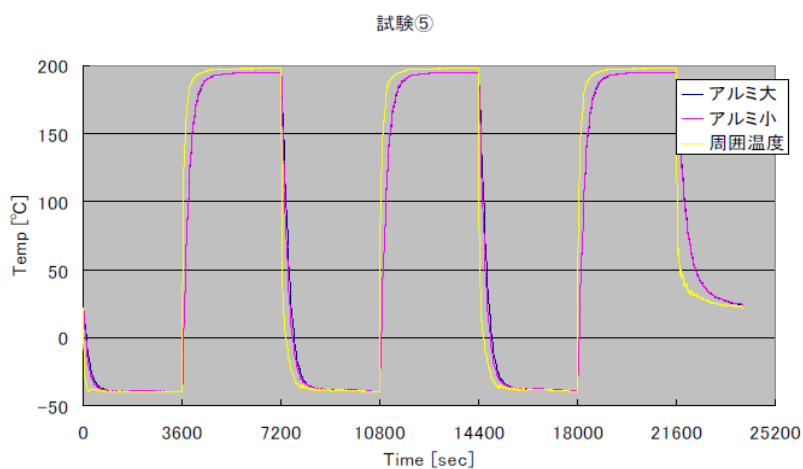


図 5-16 試験⑤の温度プロファイル

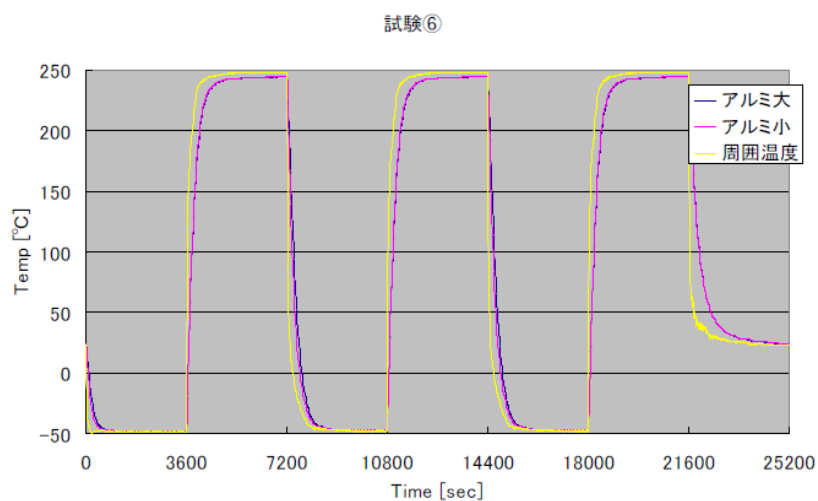


図 5-17 試験⑥の温度プロファイル

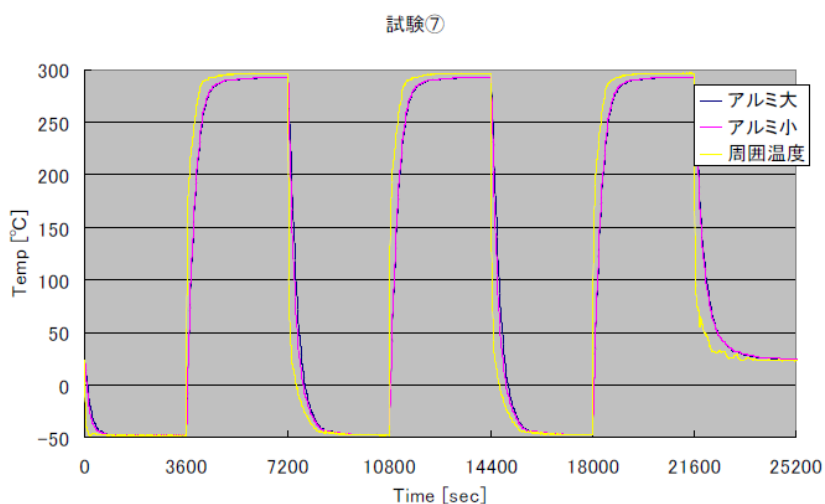


図 5-18 試験⑦の温度プロファイル

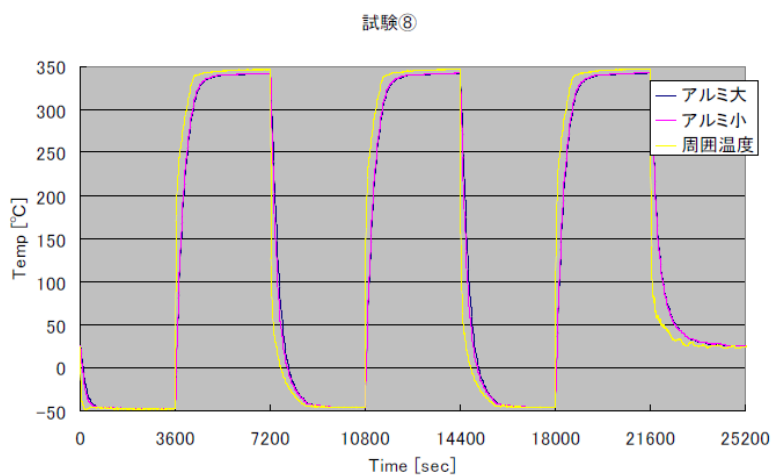


図 5-19 試験⑧の温度プロファイル

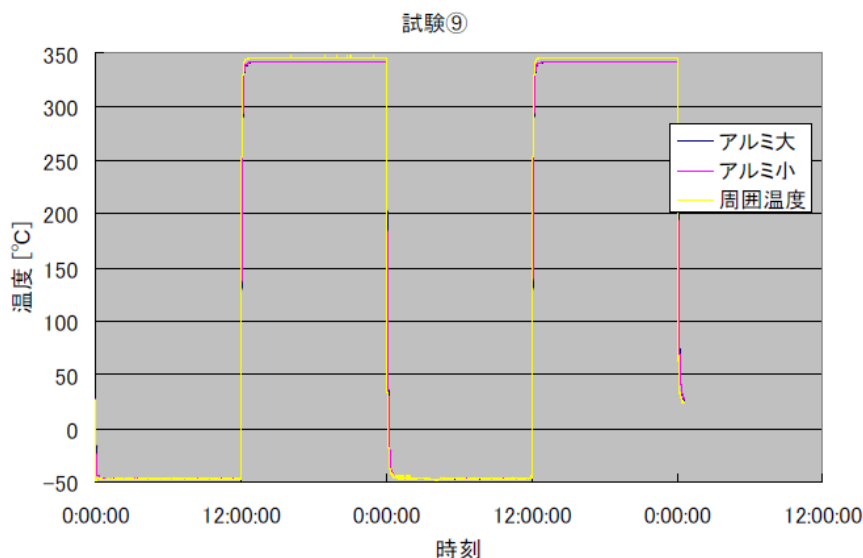


図 5-20 試験⑨の温度プロファイル

第 6 章 小型熱衝撃試験機での実験

小型熱衝撃試験機の試作機の外観は先に示した。図 6-1 に小型熱衝撃試験機による試験片の温度変化を示す。

高温槽の温度プレートは、室温から 300°C まで約 1600 秒 = 27 分で上昇した。その温度グラフデータは下図の通り。下図では 70°C からスタートしたが、室温から 70°C までを加えて見て頂きたい。

また、300°C に達してからも、温度安定性は非常に優れていることがわかる。また、時間に対する温度勾配がほぼ直線であることから、加えた熱量が、温度上昇に従って逃げやすくなっていないことがわかる。これは、外部との断熱性が顕著であることを示し、省エネ設計が生かされているともいえる。



図 6-1 小型熱衝撃試験による温度プロファイル

次に、この300℃の温度プレートの上に、台車を移動して接触させた際の温度データを次ページに示す。下図は台車の温度測定点を示す図である。

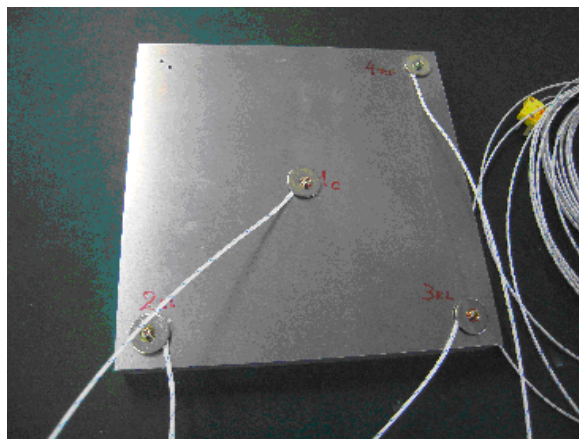


図 6-2 台車および測定点

台車中央部と四隅の温度は、温度上昇時は中央部が高く約4℃の差があったが、設定値に達した後は、ほぼ同じ温度になった。下図の台車温度は中央部のものである。

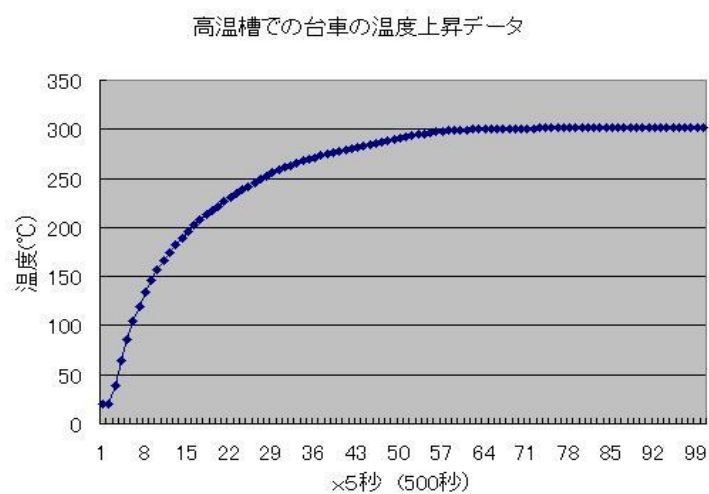


図 6-3 台車温度 (中央部)

グラフ全体で500秒なので、300℃までの到達時間は、300秒で約5分である。ほぼ目標時間になっている。次に、-40℃に設定・維持された低温槽の温度プレート上に移動した台車の温度降下データを示す。

低温槽での台車温度降下データ

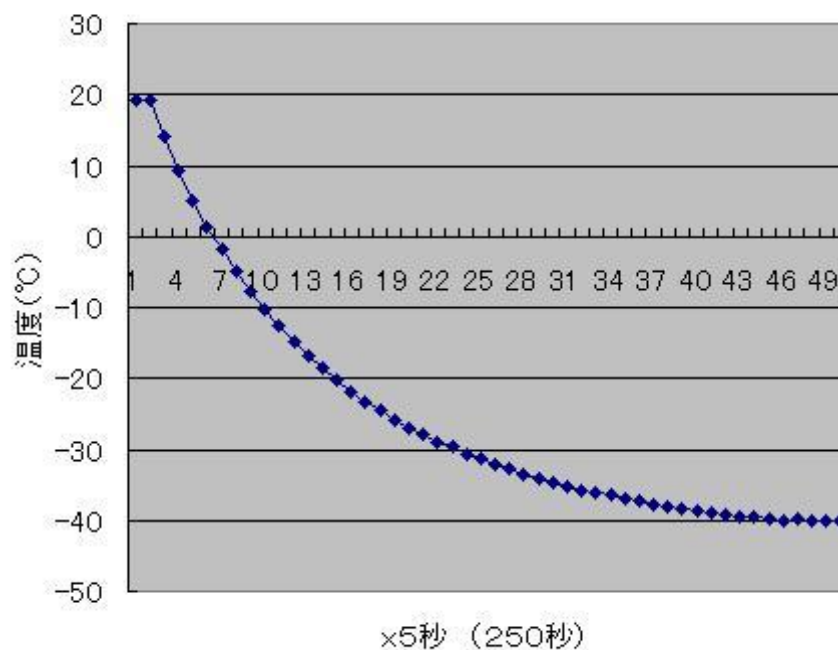


図 6-4 台車温度 (降下データ)

250秒=4分で室温+20℃から-40℃に達している。高温ドアを開閉しての台車の中間槽から高温槽への移動と、低温ドアを開閉しての台車の中間槽から低温槽への移動とは、約3秒であるので、1サイクルに占める時間は3秒×4=12秒である。これにより、5分+α+4分+β+12秒=10分が合計時間となり、15分で1サイクルの熱衝撃試験が十分可能となる。

第7章 全体総括

自動車のハイブリッド化や電気自動車の更なる省エネルギー化のため、今後見込まれる高耐熱・小型軽量の SiC 素子等の新材料を使用したパワーモジュール製作を対象とした熱衝撃試験機を開発した。電子用品における超低温環境と超高温環境を短時間で切り換え、小スペースの机上でも熱衝撃試験が可能となる小型温度環境の試作機を完成した。熱衝撃試験を開発するための項目を高温部、低温部、機械部（移動部）に分け、シミュレーションの予備検討をもとにおおよその仕様を決定し、試作機を作成した。高温槽および低温槽を個別に検討した後、熱衝撃試験機、全自動制御によるテストランを行ったところ、十分な仕様を満たすことがわかった。

従来の気相式の場合、温度槽に試験片を設置し、2つの空気槽に高温空気と低温空気を作成し、それぞれの槽から、高温、低温空気を交互に流入させ、温度サイクル試験を行う。温度槽が大型であり、温度槽に大量の高温空気と低温空気を毎回入れ換えるため、準備に時間を必要とし、また、空気の入れ換えのたびに、空気中に高温空気（もしくは低温空気）を放出するため、大量のエネルギーを消費する。この開発品は、ペルチェ素子等より低温室内で低温を作り、ヒーター等の高温化装置より高温室内で高温を作り、台車に試験対象を設置する。台車が各温度槽に移動することで、熱衝撃試験サイクルを繰り返す。空気の排出がないため、大量のエネルギーを節約し、また短時間で所定温度となる。以下に熱衝撃試験の特長をまとめる。

1. 省エネ機開発を達成した。（本機は、エネルギー2.5(kw)程度を想定。従来機は、25(kw)程度であり、消費エネルギー 1/10 を達成）
2. 試験機の一部である銅板（プレート）に、試験片を設置し、その試験片の温度を計測した。2分程度で台と台車の温度がほぼ一致した。（従来機では、15分程度は必要）。急速に試験片の温度を温めることが可能である。温度槽内に対する試験片内の温度の追従性が極めて良好である。
3. 従来の熱衝撃試験機は、時間経過後、設定温度まで上昇しない。本試験機は、設定温度を温度自動制御システムより、高精度に設定温度を維持できる。

今後は、試作機の品質を確かめながら、小型熱衝撃試験機の事業化を推進していく計画である。①研究開発の成果をもとに、事業化への第一段階として、単品の受託生産が1年以内に行えるよう準備を進める。②第二段階として、多品種生産に対応できるように、部品のモジュール化の研究を横浜国立大学、神奈川科学技術アカデミー、神奈川県

産業技術センターの協力体制で進める。③また、川下ユーザーの多様な試験要求に対応できるように、部品生産のパートナーづくりを進め、生産体制を確保する。

以上より、デスクトップサイズへの軽量・小型化、広範囲の温度領域を網羅する高性能化、省エネ技術による低コスト化より、多様な実験条件に対して幅広く対応できるため、小型熱衝撃試験機（本試験機）を用いれば、今後予想される他社の追従に先んじた研究開発を進めることが可能である。

この研究へのお問い合わせについて

理想計測株式会社

◎担当者：白井 重徳 ◎所在地：〒221-0061 神奈川県横浜市神奈川区七島町 138 番地

◎TEL：045-402-6111 ◎ FAX：045-402-5777 ◎ E-mail：info@risohkeisoku.com

財団法人神奈川科学技術アカデミー

◎所在地：〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP 西棟 614

◎TEL：044-819-2031 ◎ FAX：044-819-2026 ◎ E-mail：pro@newkast.or.jp

◎プロジェクト参画研究機関（大学、公設試等）：（財）神奈川科学技術アカデミー、横浜国立大学

◎プロジェクト参画研究機関（企業）：理想計測（株）

◎主たる研究実施場所：理想計測（株）