

**卒業論文**

**極板アルミ箔のIH加熱に関する**

**磁場 - 伝熱連成解析**

**1P ~ 52P 完**

**平成 19 年 2 月 2 日提出**

**指導教員 泉 聡志 助教授**

**産業機械工学科 50223 中村 育弘**

# 目次

第1章 序論	5
1.1 研究の背景	5
1.2 研究の目的	7
1.3 本論文の構成	7
第2章 解析手法	8
2.1 一方向シーケンシャル連成解析	8
2.2 双方向シーケンシャル連成解析	9
2.3 磁場解析	10
2.4 熱伝導解析	13
2.5 熱伝達率	16
2.5.1 熱伝達率について	16
2.5.2 熱伝達率の計算	16
2.5.3 熱伝達率の計算結果	18
2.6 解析時間	19
第3章 解析結果の評価	20
3.1 緒言	20
3.2 解析結果	21
3.2.1 熱伝達率 $m$ を用いた解析結果と実験結果の比較	21
3.2.2 実験結果から求めた熱伝達率	24
3.3 考察	27
3.4 結言	29
第4章 双方向連成解析と一方向連成解析の比較・評価	30
4.1 緒言	30
4.2 二つの連成解析の比較方法	31
4.3 二つの連成解析の比較結果	33
4.4 二つの連成解析の比較についての考察	35
4.5 各物性値の温度依存による効果	37
4.5.1 各物性値の温度依存の効果の評価方法	37
4.5.2 各物性値の解析の結果	39
4.5.3 考察	43
4.6 結言	46
付章 実験について	47
実験方法	47
実験結果	49

# 目次

Fig 1-1	Figure of battery plate.....	5
Fig 1-2	Figure of IH heating device.....	6
Fig 2-1	Directional analysis.....	8
Fig 2-2	Bi-directional analysis.....	9
Fig 2-3	Model of electromagnetic field analysis.....	10
Fig 2-4	Enlarged view of model of electromagnetic field analysis .....	10
Fig 2-5	Aluminum specific resistance .....	11
Fig 2-6	Core B-H curve .....	11
Fig 2-7	Initial condition of electric current direction .....	12
Fig 2-8	Relationship between frequency and current.....	12
Fig 2-9	Model of heat transfer analysis.....	13
Fig 2-10	Enlarged view of model of heat transfer analysis.....	13
Fig 2-11	Aluminum heat conducting .....	14
Fig 2-12	Aluminum specific heat.....	14
Fig 2-13	Aluminum density .....	14
Fig 2-14	Specific heat of active material .....	15
Fig 2-15	Model of calculation of heat transfer coefficient .....	16
Fig 2-16	Heat transfer distribution.....	17
Fig 2-17	Distribution of heat transfer and $\alpha_m$ .....	17
Fig 3-1	Comparison of experimental with analytic value @ test1.....	21
Fig 3-2	Comparison of experimental with analytic value @ test2.....	21
Fig 3-3	Comparison of experimental with analytic value @ test3.....	21
Fig 3-4	Comparison of experimental with analytic value @ test4.....	22
Fig 3-5	Comparison of experimental with analytic value @ test5.....	22
Fig 3-6	Comparison of experimental with analytic value @ test6.....	22
Fig 3-7	Comparison of experimental with analytic value @ test7.....	23
Fig 3-8	Comparison of experimental with analytic value @ test8.....	23
Fig 3-9	Comparison of experimental with analytic value @ test9.....	23
Fig 3-10	Comparison of experimental with analytic optimized value 1 .....	24
Fig 3-11	Comparison of experimental with analytic optimized value 2 .....	25
Fig 3-12	Comparison of experimental with analytic optimized value 3 .....	25
Fig 3-13	Comparison of experimental with analytic optimized value 4 .....	25

Fig 3-14	Comparison of experimental with analytic optimized value 5 .....	26
Fig 4-1	Comparison of bi-directional with directional analysis @ 7.2[sec] .....	33
Fig 4-2	Comparison of bi-directional with directional analysis @ .....	33
Fig 4-3	Comparison of bi-directional with directional analysis @ .....	34
Fig 4-4	Comparison of bi-directional with directional analysis @ .....	34
Fig 4-5	Comparison of bi-directional with directional analysis @ .....	34
Fig 4-6	Comparison of four analyses at (electric resistance) .....	39
Fig 4-7	Comparison of four analyses at (electric resistance) .....	39
Fig 4-8	Comparison of four analyses at (electric resistance) .....	39
Fig 4-9	Comparison of four analyses at (electric resistance) .....	40
Fig 4-10	Comparison of four analyses at (heat conducting).....	40
Fig 4-11	Comparison of four analyses at (heat conducting).....	40
Fig 4-12	Comparison of four analyses at (heat conducting).....	41
Fig 4-13	Comparison of four analyses at (heat conducting).....	41
Fig 4-14	Comparison of four analyses at ( $C \times \rho$ ).....	41
Fig 4-15	Comparison of four analyses at ( $C \times \rho$ ).....	42
Fig 4-16	Comparison of four analyses at ( $C \times \rho$ ).....	42
Fig 4-17	Comparison of four analyses at ( $C \times \rho$ ).....	42
Fig 4-18	Aluminum specific heat $\times$ density.....	44
Fig appendix- 1	Photograph of experiment .....	47
Fig appendix- 2	Photograph of observation points.....	47
Table 1	Calculated result of heat transfer coefficient.....	18
Table 2	Heat time and heat loss time .....	19
Table 3	Experimental result of heat transfer coefficient.....	24
Table 4	Experimental parameters .....	48
Table 5	Experimental result .....	49

# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

2次電池は、近年急速に普及したノートパソコンや携帯電話などのモバイル情報通信機器の電池や、電気自動車など広く世の中に用いられている。

中でも、原油高騰や環境への配慮からハイブリッド車が注目を集め、日本国内をはじめ世界各国で売り上げを伸ばしている。

ハイブリッド車とは、ガソリンエンジンと電気モーターを利用しエネルギー消費を最適化できるとともに、減速時に運動エネルギーを電気エネルギーに変換して回収できるため、燃料消費をガソリン車より減らすことが可能である。また、エネルギー供給は給油のみであるため、電気自動車に比べ新たにインフラ整備を行う必要もないため、次世代自動車として評価が高い。

そのため、世界中で高容量高出力可能な2次電池の開発が盛んに行われている。

本研究では2次電池製造工程において、誘導加熱で電極を加熱するという現象に関して出てくる磁場 伝熱連成解析を行った。

正極板の製造工程についてまず説明をする。

2次電池で用いられる正極版はアルミ箔上に活物質が塗装されている。塗装パターンには複数のパターンが考案されているが、例えばアルミ箔中央部に塗工され、塗工部と未塗工部を持つようなパターンが考えられる。

モデルを以下に示す。

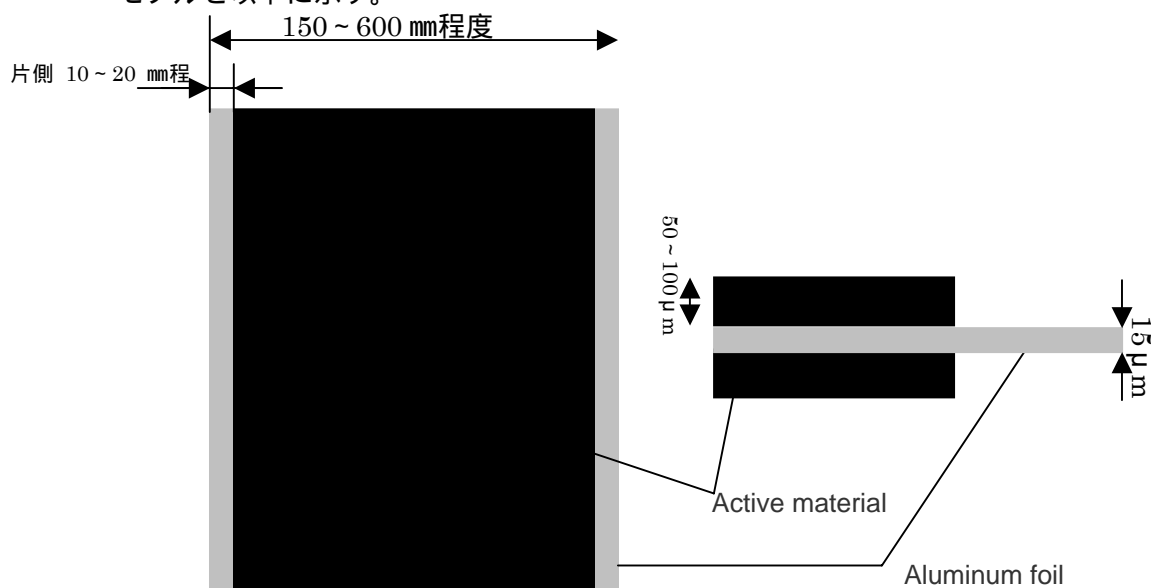


Fig 1-1 Figure of battery plate

次に2次電池製造工程において懸念される問題点について説明する。

2次電池製造工程では、塗工後に活物質を圧縮し、膜密度を上げる手法が広く一般的に用いられている。上記モデルに挙げたような正極を塗工部と未塗工部同時に圧縮した場合、塗工部は圧縮されるが、未塗工部は圧縮されないため、内部ひずみが発生し、正極のひずみやしわ等不具合が発生することがわかっている。

この問題を解消するために、正極の未塗工部をアニール処理することによって未塗工部のアルミ箔を軟化させ、ひずみを解消させる手法が提案されている。

アニール処理の際に留意しなければいけない点は、活物質が 200 ~ 300 を超えると分解してしまうため、出来るだけ未塗工部だけを加熱しなければならない点である。

本研究ではアニール処理の中でも、IH加熱について着目している。

IH加熱の手段について説明する。塗装後の運搬時に極板の両端をCの字型のコアに通過させる。以下に写真と図を示す。

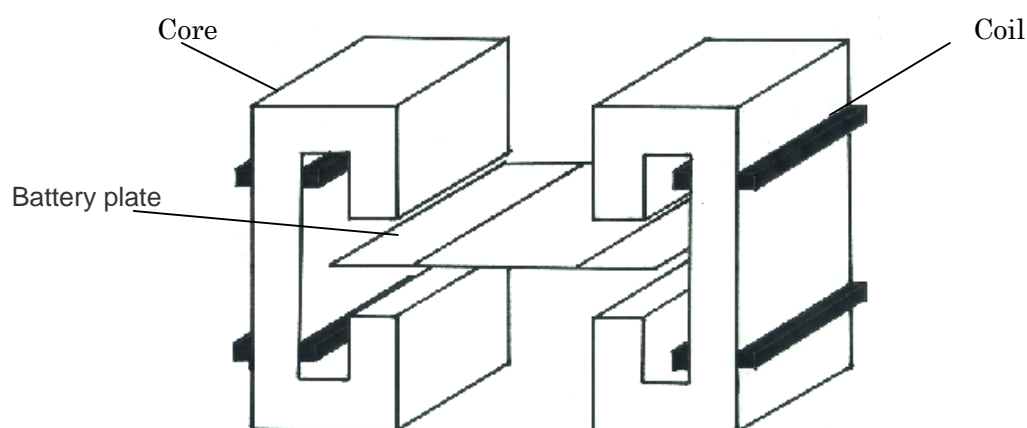


Fig 1-2 Figure of IH heating device

コイルに交流電流を流すことで、コアには磁場が周期的な変化をしながら作られ、アルミ箔で渦電流を発生させる。渦電流のアルミ箔での電気抵抗によるジュール発熱によって、アルミ箔は加熱される。

一方、近年では製造工程の最適化のために FEM を代表とする CAE ツールが期待されている。その中で、IH加熱の解析の為に専用ツールが数多く利用されている。しかし磁場解析と熱伝導解析とを双方向に連成して行うことができないため、物性値を温度依存にして解析は出来なかった。

しかし、汎用有限要素法ソフトANSYS[10.0]<sup>1</sup>ではIH加熱の解析において磁場解析と熱伝導解析が双方向に連成して取り扱うことが出来るので、物性値の温度依存性にして解析することが可能である。その反面、電磁場解析において非線形の場合二次元解析に限られるという欠点がある。

## 1.2 研究の目的

本研究では、ANSYSの『双方向シーケンシャル連成解析』を用いてIH加熱の磁場解析と熱伝導解析の双方向連成シミュレーションを行うことを目的とする。

まず、『双方向シーケンシャル連成解析』の結果と、実験結果(付章参照)とを比較することで解析の評価を行う。

また、物性値の温度依存性を考慮した解析である『双方向シーケンシャル連成解析』と、温度依存性を考慮しない『一方向シーケンシャル連成解析』とを比較することで、物性値の温度依存性を考慮することによる効果、双方向連成による効果について論ずる。

## 1.3 本論文の構成

第一章では本研究の背景と目的について述べた。

第二章として、IH加熱の解析の手法について述べた。

第三章として、実験のデータと比べて、解析の評価を行った。

第四章として、一方向シーケンシャル連成解析と双方向シーケンシャル連成解析とを比較することで、物性値の温度依存性の効果や双方向連成解析の効果について論じた。

付章では、IH加熱の実験についての詳細を記載した。

---

<sup>1</sup> ANSYS, Inc.

## 第2章 解析手法

### 2.1 一方向シーケンシャル連成解析

一方向シーケンシャル解析とは、電磁場解析と伝熱解析を一方向でのみ連成する解析であり、温度変化に関わらず物性値を常に一定しなければならない。ANSYS 以外のソフトでも行える解析である。

解析の概略図を以下に示す。

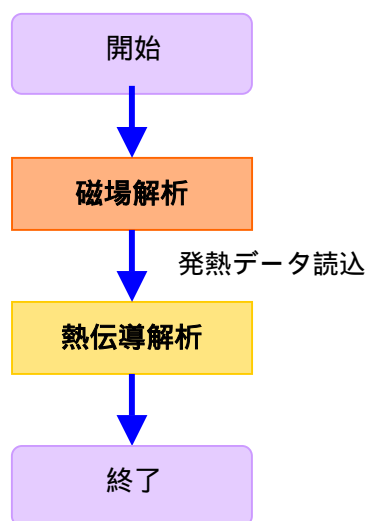


Fig 2-1 Directional analysis

一方向解析は、まず磁場解析を行い、アルミ箔に発生する渦電流からジュール発熱の分布データを得る。

次に、ジュール発熱データを発熱荷重として極板の非定常熱伝導解析を行い、温度分布の時刻暦データを求める。



## 2.2 双方向シーケンシャル連成解析

双方向シーケンシャル解析とは、磁場解析と熱伝導解析を双方向に連成することで物性値を温度に依存して変化しながら行える解析である。

解析の概略図を以下に示す。

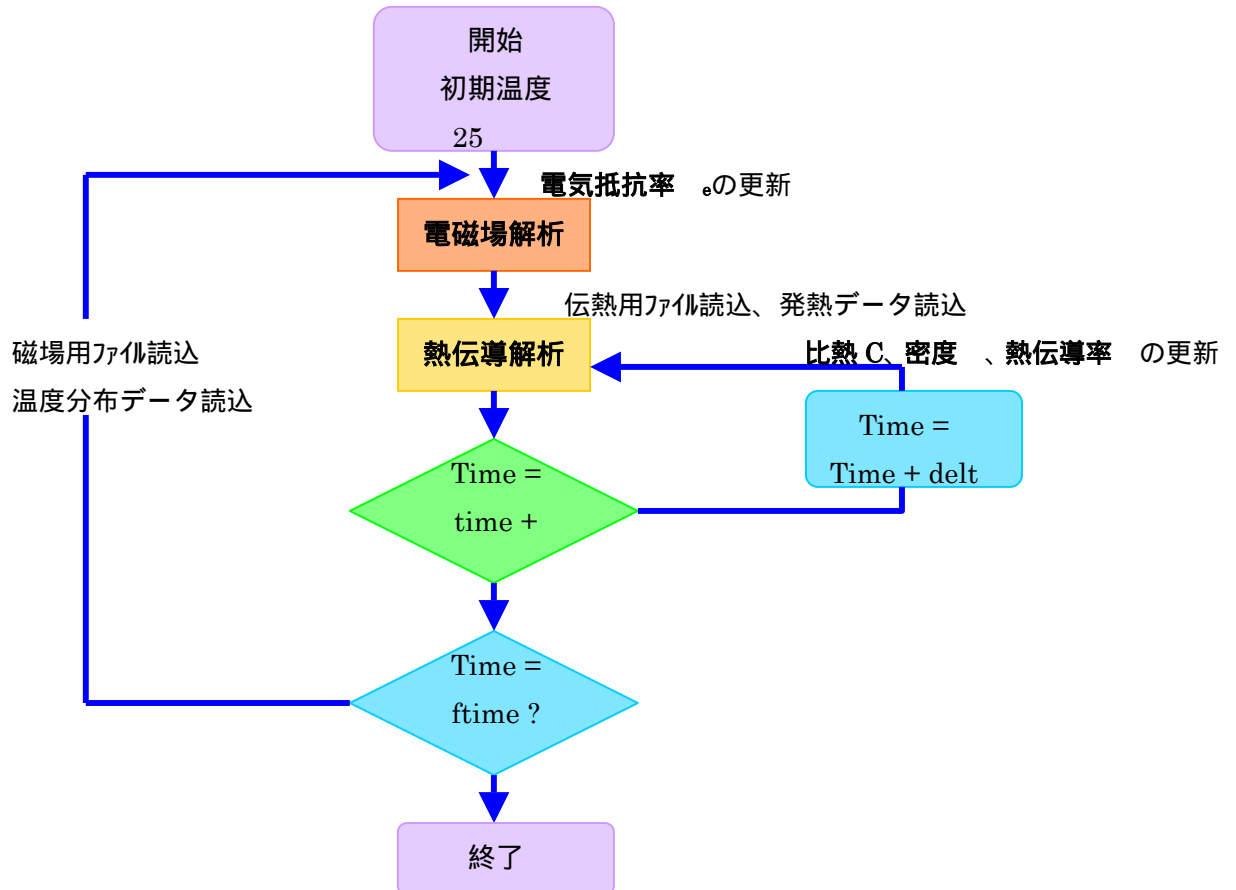


Fig 2-2 Bi-directional analysis

双方向解析は、まず初期温度 25 により物性値を決定し磁場解析を行ってジュール発熱分布を得る。その後ジュール発熱分布を発熱荷重として非定常熱伝導解析を行って温度分布を得るのだが、 $\text{delt}[\text{秒}]$ ごとにその温度結果をフィードバックして物性値評価温度とすることで物性値を更新する。

$\text{delt}[\text{秒}] \times 5[\text{回}] = \text{tinc}[\text{秒}]$  伝熱解析を行ったら、温度結果をフィードバックして物性値評価温度として物性値を決定し、再度磁場解析を行う。

これを解析時間( $\text{ftime}$ )  $\div$   $\text{tinc} = 10$  回行うことで、物性値を温度によって変化しながら解析を行うのである。

## 2.3 磁場解析

磁場解析のモデルを以下に示す。

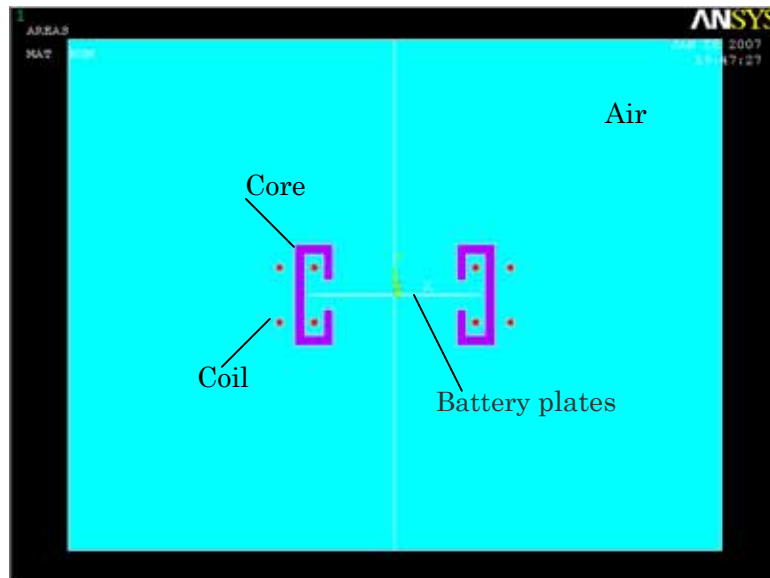


Fig 2-3 Model of electromagnetic field analysis

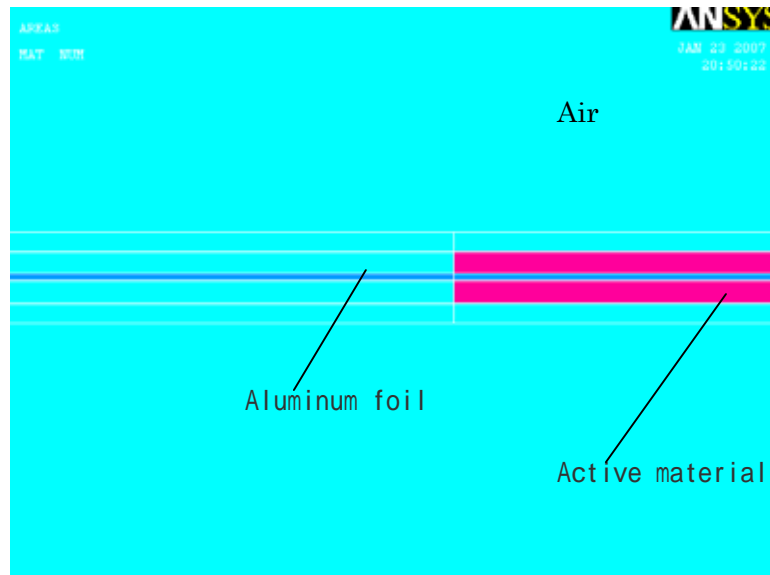


Fig 2-4 Enlarged view of model of electromagnetic field analysis

モデルは搬送方向に対して垂直な面での、二次元モデルとしている。

磁場解析に関係のない台や冷却板、耐熱カバー等は空気層とし、『コア』『コイル』『アルミ箔』『活物質』『空気』のみモデル化した。

個々の物性値は以下に示す。



コイル電流値については個々の解析においてそれぞれ定義をする。コイル電流の向きについては、以下に図で初期電流方向を示す。

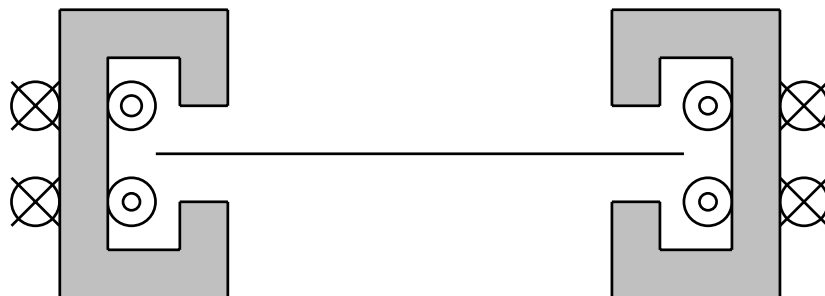


Fig 2-7 Initial condition of electric current direction

また、コイル周波数についてだが、IH 加熱装置ですでにコイル電流値との関係が決まっている。以下にその対応の図を記載する。

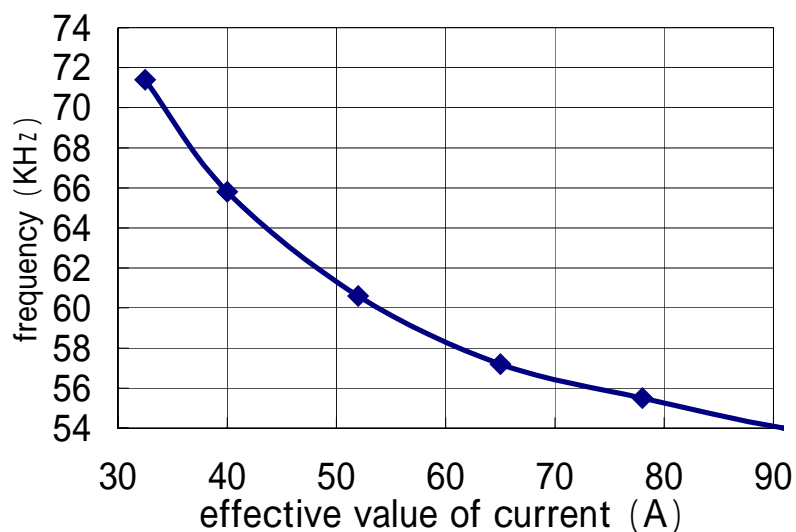


Fig 2-8 Relationship between frequency and current

また、磁場解析では渦電流密度は位相差を表現するために実数解と虚数解に分けて計算される。だが IH 加熱の場合周波数が高く、熱伝導解析ではそのような短い時間変動は無視できるので、ジュール発熱量を計算する際に時間平均値で計算して一定発熱量とした。

## 2.4 熱伝導解析

熱伝導解析のモデルを以下に示す。

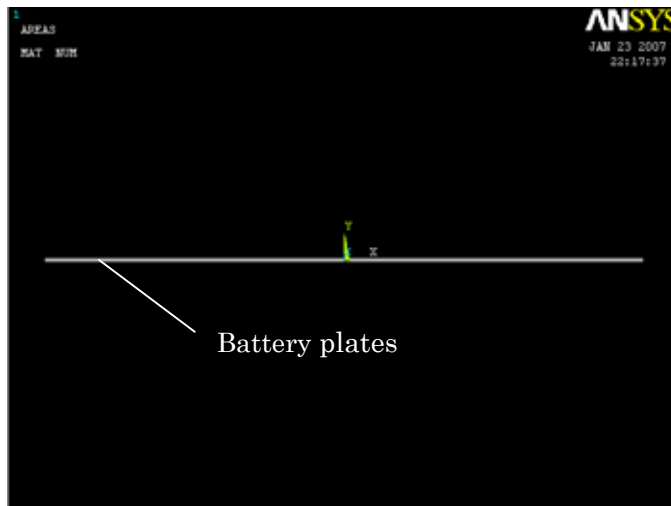


Fig 2-9 Model of heat transfer analysis

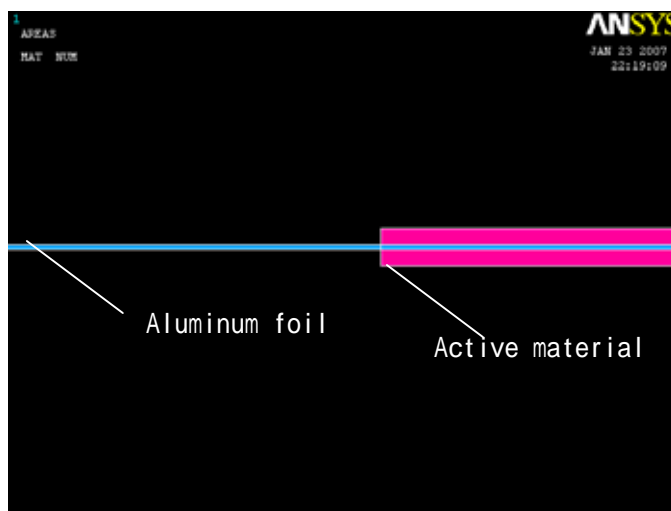


Fig 2-10 Enlarged view of model of heat transfer analysis

モデルは磁場解析の『アルミ箔』『活物質』のモデルをそのまま利用する。よって、磁場解析と同様に、搬送方向にたいして垂直な面での二次元モデルとなる。

その他『空気』『コア』『コイル』は解析対象とはせず、極板(アルミ箔、活物質)の内部での熱伝導と外部との熱伝達のみで解析を行う。

個々の物性値は以下に示す。

アルミ箔

熱伝導率

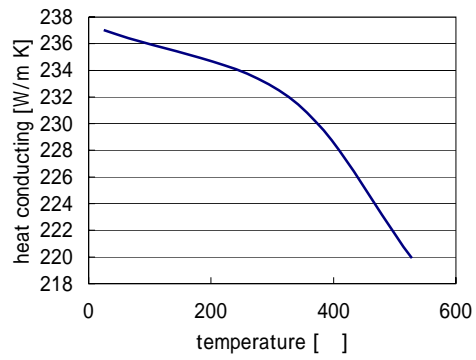


Fig 2 -11 Aluminum heat conducting

比熱

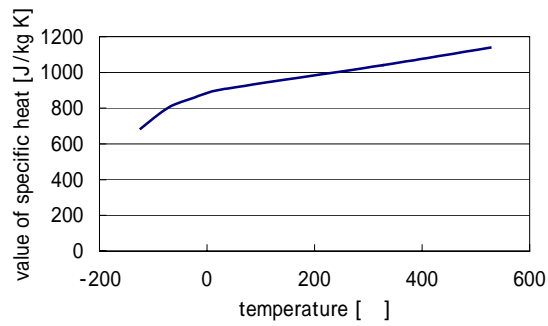


Fig 2 -12 Aluminum specific heat

密度

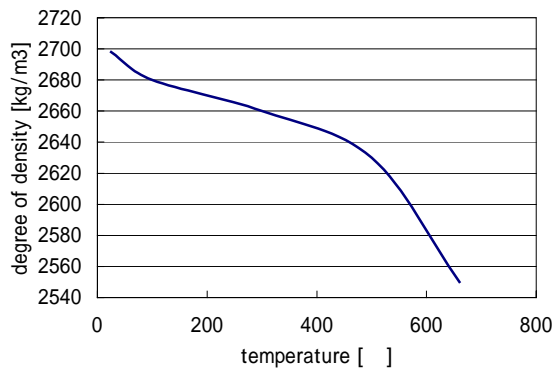


Fig 2 -13 Aluminum density

活物質

熱伝導率 1.35 [W/K・m]  
比熱

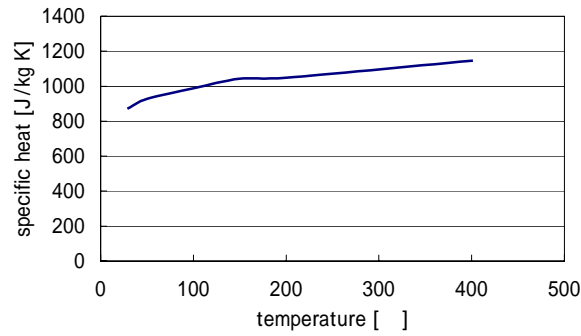


Fig 2 -14 Specific heat of active material

密度 2370 [kg/m<sup>3</sup>]

荷重条件は、磁場解析の結果であるアルミ箔のジュール発熱データを内部発熱として用いる。

境界条件は、極板の熱伝達率がある。熱伝達率については説明が長くなるので次項で述べることとする。

解析タイプは、非定常熱伝導解析を行う。解析時間については長くなるので次々項で述べることとする。

## 2.5 熱伝達率

### 2.5.1 熱伝達率について

本研究でのIH加熱の解析では、コアの内部の空気がどのような状態であるのか分からないため、正確な熱伝達率を計算で求めることはできず、さらに熱伝達率は物性値のように便覧に載っているものでもない。

よって本研究では、まず簡単なモデルに近似して計算により  $h_m$  を求め、 $h_m$  を使って解析を行い、実験結果と比較する。

次に、熱伝達率を変化させ実験値に合わせこむことで、実験結果と解析結果が近くなる熱伝達率  $h_m$  を求め、熱伝達率の評価を行う。

### 2.5.2 熱伝達率の計算

熱伝達率の計算では、以下のようなモデルとして求める。

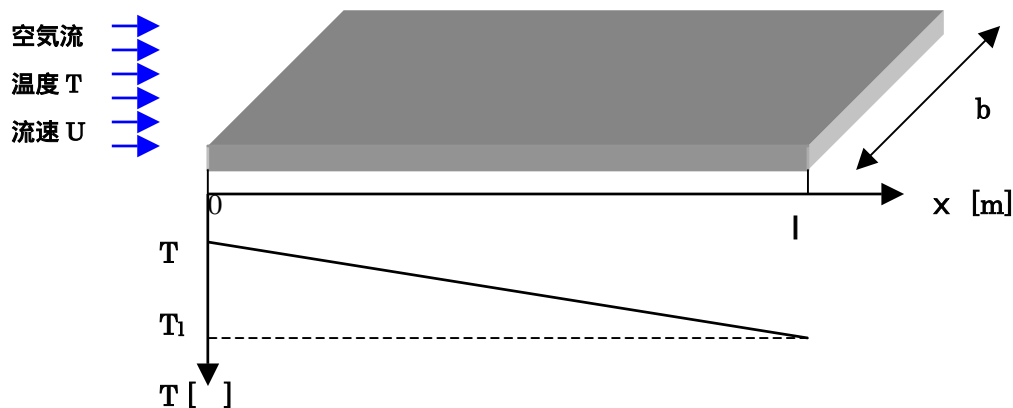


Fig 2-15 Model of calculation of heat transfer coefficient

熱伝達率は、強制対流熱伝達として、幅 $b$ [m]、長さ $l$ [m]、の平板が温度 $T = 300$ [K]、流速 $U$ [m/s]の空気流に平行に置かれているとする。ただし、平板温度は $x=0$ では $T$ に等しく下流に向かって直線的に増大して $x=l$ では $T_1$ とする。このときの局所熱伝達率を求める式は以下の通りである。<sup>2</sup>

$$\begin{aligned} Nu &= 0.547Pr^{1/3}Re_x^{1/2} \\ &= Nu \quad /x \end{aligned}$$

例えば、 $x=l$ で $T=600$ [K]とし、流速 $U=20$ [m/min]とすると(参照【実験1】)、局所熱伝

<sup>2</sup> 日本機械学会 伝熱工学資料 改訂第四版 p42



達率は下のグラフのような分布を示す。

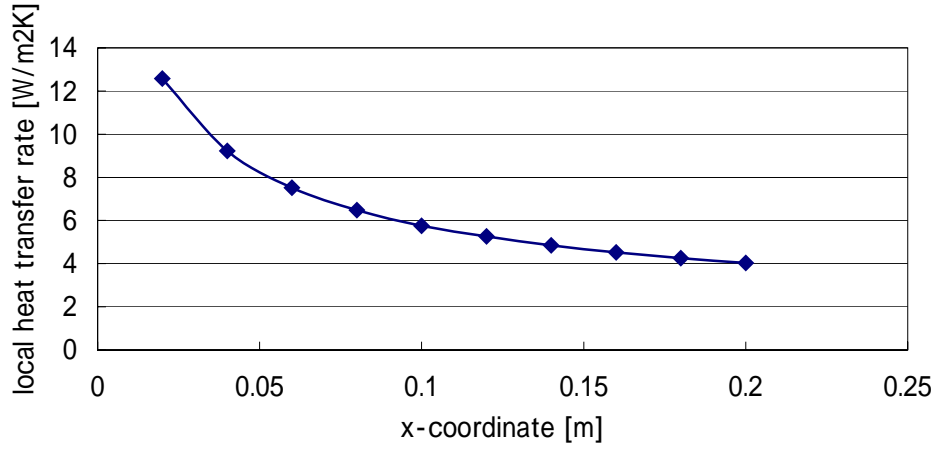


Fig 2-16 Heat transfer distribution

熱伝達率はx座標によって変化するので、平均熱伝達率  $m$  を以下の式で定義した。

$$m = (x_{=0} + x_{=0.2} \times 2) / 3$$

今回の例では、 $m = 6.876$  となった。下にその値を熱伝達率のグラフ上に示した。

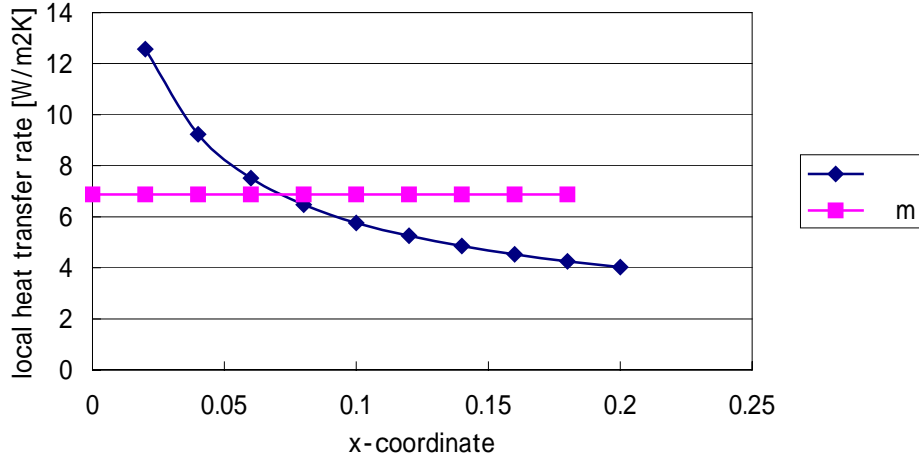


Fig 2-17 Distribution of heat transfer and  $m$

よって、簡単なモデルにより求める熱伝達率は、この平均熱伝達率  $m$  とする。

### 2.5.3 熱伝達率の計算結果

実験のパラメータを元に熱伝達率  $m$  を求めた。実験はパラメータを変えて9回行われたので、それぞれ求めた。

ここで、計算に入れる値は

空気の流速 = 極板の搬送速度

$$T_{x=l} = \text{実験結果の} T \times 1.06$$

とした。

各実験の熱伝達率の計算結果は下に表で示す。

実験	搬送速度 [m/min]	$T_{x=l}$ [ ]	$m$ [W/m <sup>2</sup> K]
1	20	330	6.8762
2	20	480	7.0204
3	30	257	8.6755
4	30	384	8.8899
5	18.7	424	6.7929
6	31.3	309	8.8256
7	25	271	7.9270
8	25	458	7.8372
9	25	365	7.8733

Table 1 Calculated result of heat transfer coefficient

## 2.6 解析時間

解析時間についてだが、実験(付録参照)では温度測定はコアの下流約 40mm で行っている。すなわち、コア通過後に熱を放出し温度が下がっていると考えられる。

そこで本解析では解析時間を大きく二つに分け、それを連続して行うこととする。その二つを以下に示す。

**加熱時間** 極板がコアを通過している時間。磁場解析では電流による荷重がありジュール発熱が発生し、熱伝導解析では発熱荷重がある。  
 $[加熱時間] = [コア長さ] \div [搬送速度]$

**放熱時間** 極板がコアを通過後、下流約 40mm の観測地点に行くまでの時間。磁場解析では電流による荷重が無くジュール発熱が発生せず、電熱解析では発熱荷重が無い。  
 $[放熱時間] = [40mm] \div [搬送速度]$

9 つの実験において、それぞれのパラメータを元に『加熱時間』『放熱時間』を求め、以下に示す。

実験	搬送速度 [m/min]	加熱時間 [sec]	放熱時間 [sec]	合計時間 [sec]
1	20	0.6	0.12	0.72
2	20	0.6	0.12	0.72
3	30	0.4	0.08	0.48
4	30	0.4	0.08	0.48
5	18.7	0.64	0.13	0.77
6	31.3	0.38	0.08	0.46
7	25	0.48	0.1	0.58
8	25	0.48	0.1	0.58
9	25	0.48	0.1	0.58

Table 2 Heat time and heat loss time

## 第3章 解析結果の評価

### 3.1 緒言

極板の IH 加熱の解析を評価するために、IH 加熱の実験の結果と比較を行う。実験データの提供を受けたので、その詳細は付章に記述した。

前章に述べた『双方向シーケンシャル連成解析』によって物性値の温度依存性を考慮した解析を行う。

また、実験はパラメータを変えて9回行われているので(付章参照)、すべての実験について解析を行う。

本章では、以下の点について解析を行い、実験データとの比較検討を行う。

- 計算により求めた熱伝達率  $h_m$  を使った解析と、実験で得た温度データとの比較検討。
- 熱伝達率を変数として解析を行い、実験の温度データと適合する熱伝達率  $h_m$  を求め、計算で得た熱伝達率  $h_m$  と比較検討を行う。

## 3.2 解析結果

### 3.2.1 熱伝達率 $m$ を用いた解析結果と実験結果の比較

計算して求めた熱伝達率  $m$  を使った解析結果と実験結果との比較したグラフを実験ごとにグラフにして下に示した。

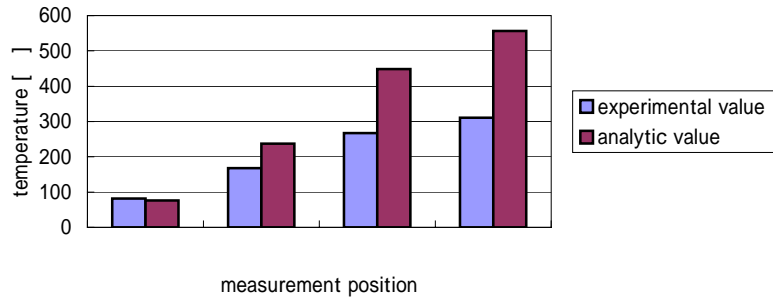


Fig 3-1 Comparison of experimental with analytic value @ test1

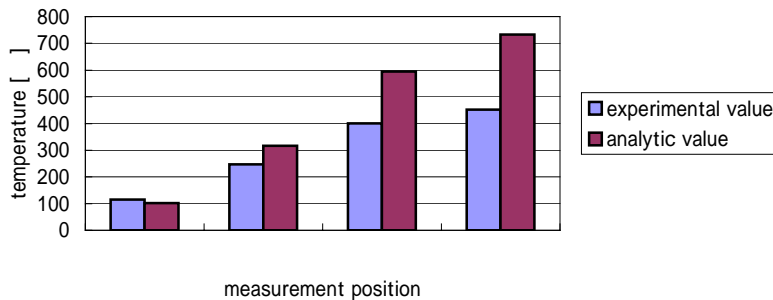


Fig 3-2 Comparison of experimental with analytic value @ test2

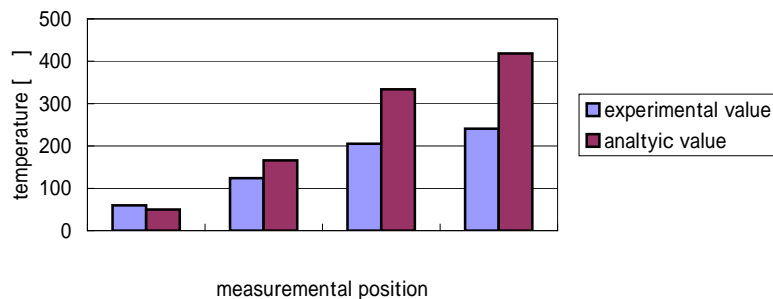
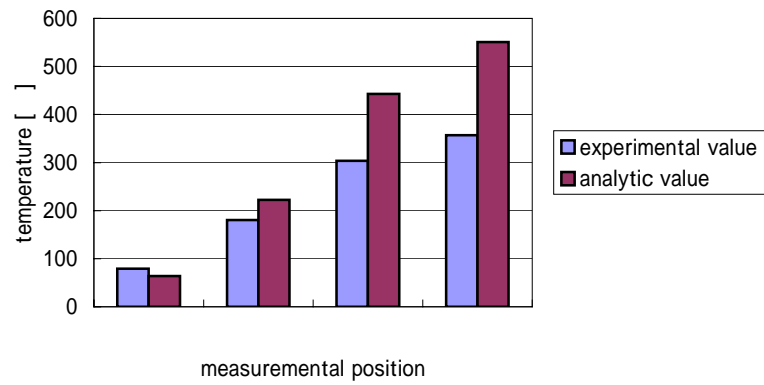
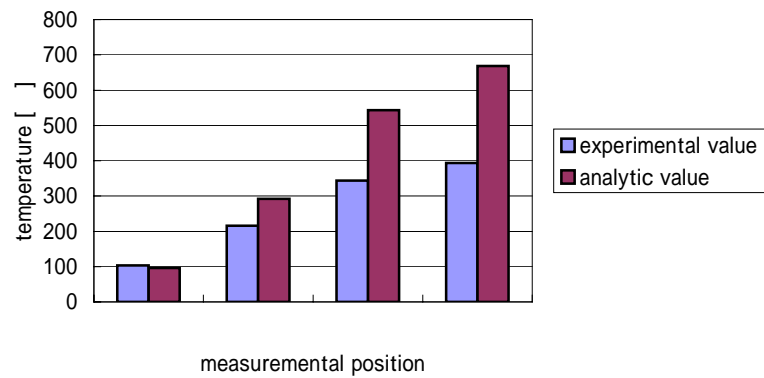


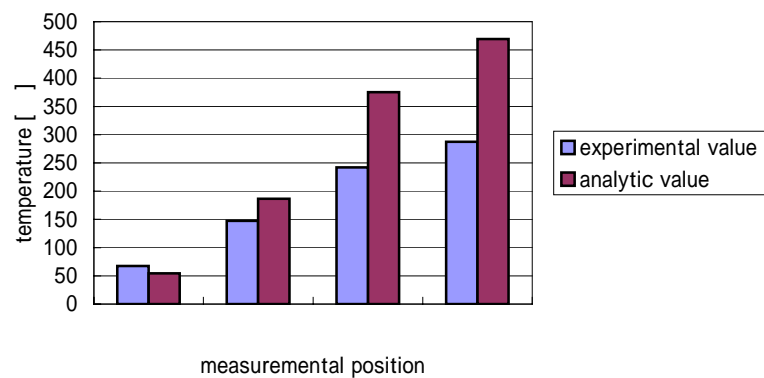
Fig 3-3 Comparison of experimental with analytic value @ test3



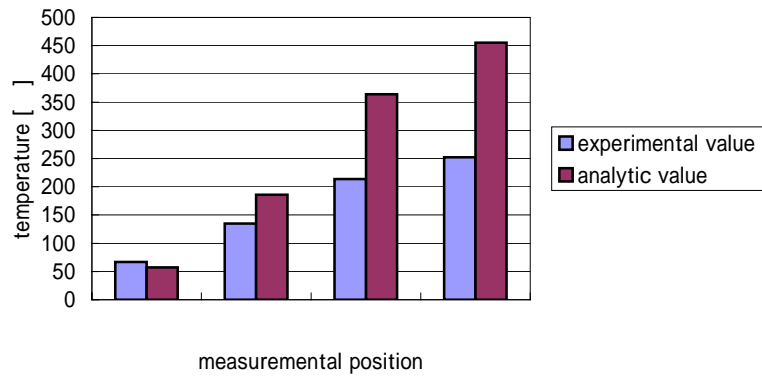
**Fig 3 -4 Comparison of experimental with analytic value @ test4**



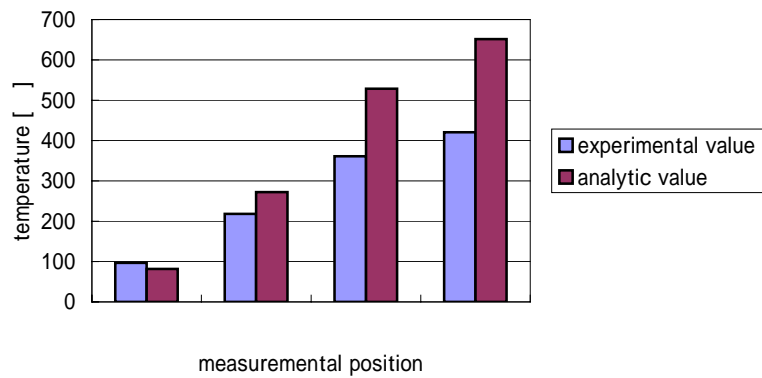
**Fig 3 -5 Comparison of experimental with analytic value @ test5**



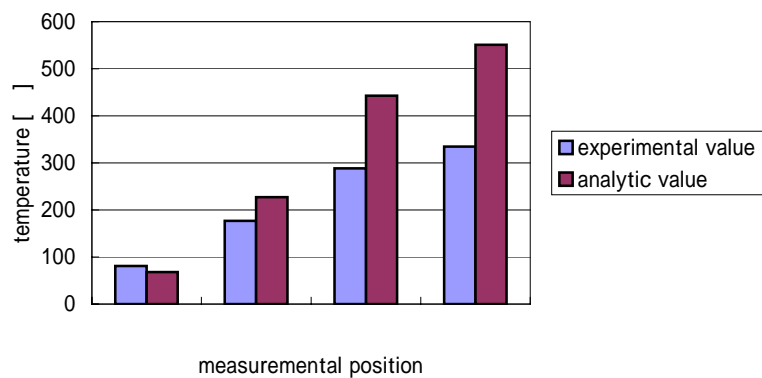
**Fig 3 -6 Comparison of experimental with analytic value @ test6**



**Fig 3 -7 Comparison of experimental with analytic value @ test7**



**Fig 3 -8 Comparison of experimental with analytic value @ test8**



**Fig 3 -9 Comparison of experimental with analytic value @ test9**

### 3.2.2 実験結果から求めた熱伝達率

実験値と適合するように熱伝達率を変化させ求めた値を下の表にしめす。

実験	搬送速度 [m/min]	コイル電流値 [A]	熱伝達率(計算) [W/m <sup>2</sup> K]	熱伝達率(実験) [W/m <sup>2</sup> K]
1	20	55	6.8762	40
2	20	65	7.0204	35
3	30	55	8.6755	50
4	30	65	8.8899	45
5	18.7	60	6.7929	35
6	31.3	60	8.8256	50
7	25	53.5	7.9270	50
8	25	66.5	7.8372	40
9	25	60	7.8733	45

Table 3 Experimental result of heat transfer coefficient

熱伝達率による合わせ込みでは、～すべて適合はしないので、と が大体合うようにした。合わせこみ後の実験値と解析値との温度の比較を下に示す。

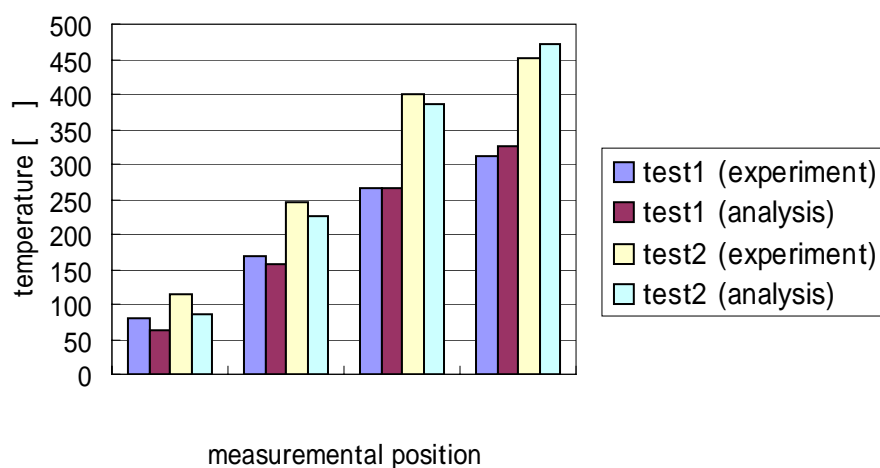
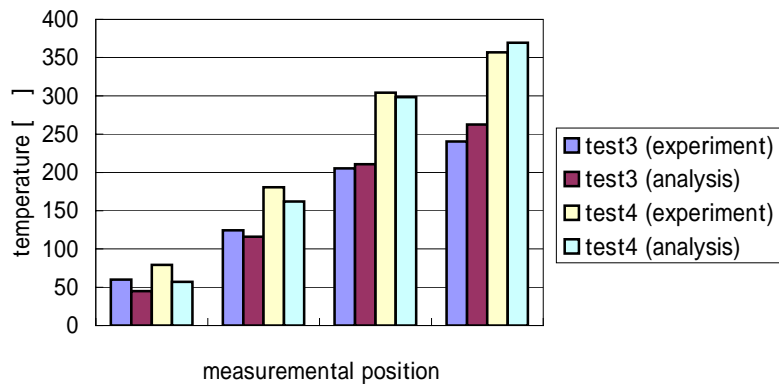
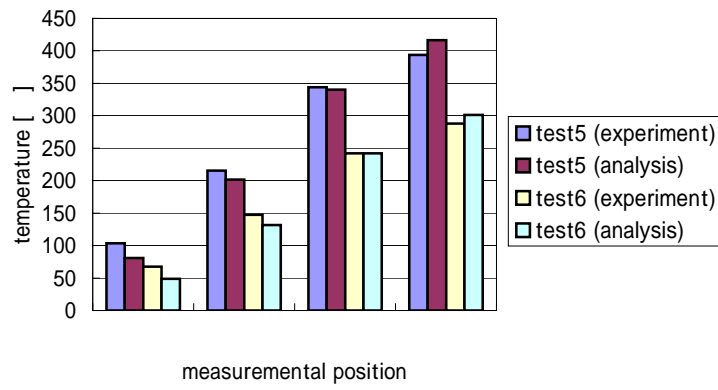


Fig 3-10 Comparison of experimental with analytic optimized value 1

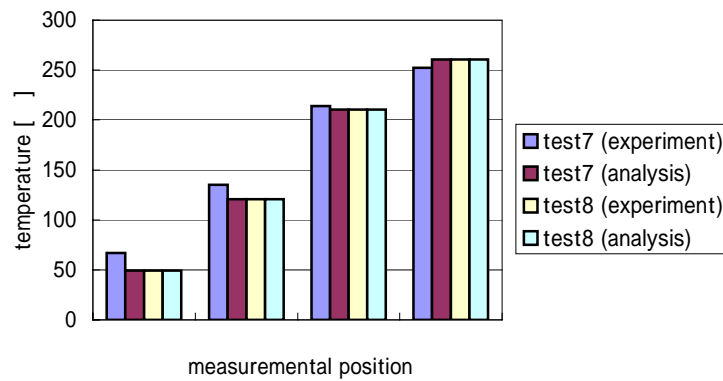




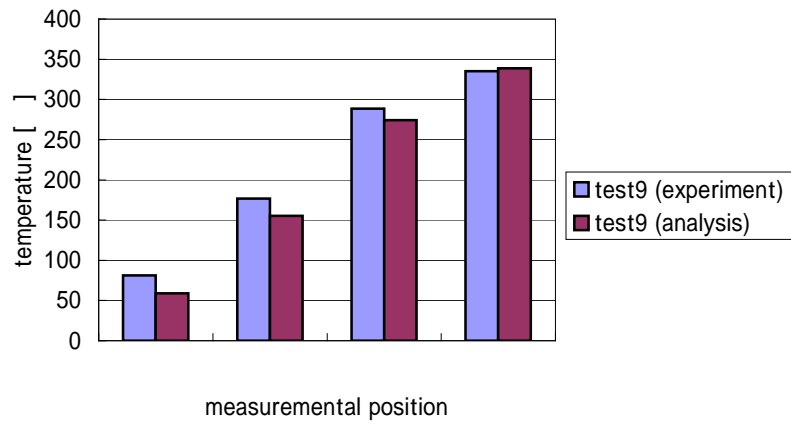
**Fig 3-11 Comparison of experimental with analytic optimized value 2**



**Fig 3-12 Comparison of experimental with analytic optimized value 3**



**Fig 3-13 Comparison of experimental with analytic optimized value 4**



**Fig 3 -14 Comparison of experimental with analytic optimized value 5**

### 3.3 考察

まず、計算で求めた熱伝達率を用いた解析と実験値との比較について。

実験 1~9 で共通して言えるのだが、内側で温度の低い観測地点 ではほぼ一致しているものの、端で温度が高いほど解析値が実験結果にくらべはるかに高い温度をしめしている。

しかし、解析値では実験 2、5 の端でアルミニウムの融点 660 を超えてしまっている。実験の際ではアルミが融解しているという事は無かったため、明らかに解析が高すぎてしまっていると言える。

それでは、解析値がなぜ高くなってしまったか、考えうる理由を以下に挙げる。

- 二次元解析にしたことにより、搬送方向での熱の移動を無視してしまっているため。
- 熱伝達率の計算でのモデルによって熱伝達率を低く見積もりすぎている。
- 熱電対のシースによって熱電対の熱容量が大きくなってしまったため
- 熱電対の極板との接触不良
- 輻射を考慮していないため

特に大きな原因は最初の二つであると考えられる。

二次元モデルにした理由というのは、B-H 特性が非線形であり、解析ソフト ANSYS では三次元での非線形電磁場解析ができないからである。だが、極板は搬送方向で大きく温度勾配があり熱の移動は大きいと考えられる。現在では三次元にできないので、搬送方向の熱の移動を熱伝達率に加算して近似するしかないと考えられる。

熱伝達率のモデルだが、実際は搬送されている箔であるため、周囲の空気流の様子は分からない。又、IH 加熱をすることでアルミ箔の端部にしわができてしまうため、これによって熱伝達率も実際はかなり高くなるのではないかと推測できる。

結果、熱伝達率を実験の実験結果に適合させるように変化させて求めることで、解析と実験を合わせる事で解析として完成すること考えられる。

次に、実験結果に適合するようにして求めた熱伝達率について

計算で求めた熱伝達率が 6~9 あたりであったのに対して、実験から求めた熱伝達率は 35~50 とかなり大きい値となった。先ほどの、搬送方向の熱の移動などを含めた熱伝達率だといえる。

熱伝達率と搬送速度、コイル電流値との関係を見てみる。

搬送速度だが、搬送速度が大きくなると熱伝達率も高くなることが分かる。大体搬送速度が 10m/min 大きくなると、熱伝達率も 10[W/m<sup>2</sup>K] 高くなることが分かる。

コイル電流値だが、コイル電流値が大きくなると熱伝達率が低くなることが分かる。大体コイル電流値が 10 [A]大きくなると、熱伝達率は 5[W/m<sup>2</sup>K]低くなることが分かる。

搬送速度が大きくなると熱伝達率が高くなるのは、当初考えたモデルでも同様に空気流が持っていき熱量が大きくなるためであるが、コイル電流が大きくなると熱伝達率が低くなるのは、温度が高くなると熱伝達率は通常高くなると考えられているので、違和感がある。さまざまな要因が重なって熱伝達率が下がる結果になったのだと思われる。

### 3.4 結言

本章では、物性値を一定値とした一方向連成解析ではなく、物性値の温度依存性を考慮した双方向連成解析を行って、実際に行った実験の結果との比較を行った。以下に本章の結論を示す。

- 簡単なモデルにより求めた熱伝達率を利用して解析を行ったが、実験結果よりはるかに高い温度となる結果が出てきてしまった。原因として考えられるのは、二次解析にしたことで搬送方向の熱移動を無視したことと、モデルと実際とで熱伝達の様子が異なっていたことが挙げられる。
- 実験結果と解析結果が合うような熱伝達率を求めた。簡単なモデルでの熱伝達率よりはるかに大きかった。熱伝達率は搬送速度が大きくなると高くなるが、コイル電流が大きくなると低くなった。

# 第4章 双方向連成解析と一方向連成解析の比較・評価

## 4.1 緒言

本研究ではIH加熱の解析において、物性値の温度依存性を考慮した解析『双方向シーケンシャル連成解析』を行った。

本章では、『一方向シーケンシャル連成解析』も実行し、『双方向シーケンシャル連成解析』と比較し、物性値の温度依存性を考慮したことによる効果、双方向連成による効果について論ずる。また、各物性値の温度依存性の考慮による効果を一つずつ調べることで、物性値の温度依存性を考慮したことによる効果と、双方向連成による効果の理由について論ずる。

本章の構成を以下に示す。

- 『双方向シーケンシャル連成解析』と『一方向シーケンシャル連成解析』の温度分布を比較・評価し、物性値の温度依存性の考慮による効果と双方向連成による効果について論ずる。
- 物性値を一つずつ双方向、一方向の解析を行い比較・評価することで、各物性値の温度依存性による効果を述べる。

## 4.2 二つの連成解析の比較方法

今回の『双方向シーケンシャル連成解析』と『一方向シーケンシャル連成解析』の比較では、【実験1】の条件で行った。すなわち、

搬送速度 20 [m/min]

コイル電流 55 [A]

である。また、熱伝達率は計算によって求めた値  $h$  を利用することとする。

熱伝達率 6.8762 [W/m<sup>2</sup>K]

『一方向シーケンシャル連成解析』では、物性値の参照温度を何に設定するかによって物性値を定義しなくてはならないため、本章では物性値の参照温度を 27、177、327 の三つとして三種類の『一方向シーケンシャル連成解析』を行った。

双方向連成と一方向連成との物性値の定義を以下に示す。

『双方向連成』

アルミ箔	電気抵抗率	温度依存
	熱伝導率	温度依存
	比熱	温度依存
	密度	温度依存
活物質	熱伝導率	1.35 [W/m K]
	比熱	温度依存
	密度	2370 [kg/m <sup>3</sup> ]

『一方向連成』(物性値の参照温度 27 )

アルミ箔	電気抵抗率	2.7354 [ $\mu$ · cm]	(参照温度 27 )
	熱伝導率	237.00 [W/m K]	(参照温度 27 )
	比熱	903.21 [J/kg K]	(参照温度 27 )
	密度	2697.3 [kg/m <sup>3</sup> ]	(参照温度 27 )
活物質	熱伝導率	1.35 [W/m K]	
	比熱	1059.3 [J/kg K]	(参照温度 27 )
	密度	2370 [kg/m <sup>3</sup> ]	

『一方向連成』(物性値の参照温度 177 )

アルミ箔	電気抵抗率	4.4517 [ $\mu$ · cm]	(参照温度 177 )
	熱伝導率	236.35 [W/m K]	(参照温度 177 )
	比熱	973.06 [J/kg K]	(参照温度 177 )
	密度	2669.5 [kg/m <sup>3</sup> ]	(参照温度 177 )
活物質	熱伝導率	1.35 [W/m K]	
	比熱	1059.3 [J/kg K]	(参照温度 177 )
	密度	2370 [kg/m <sup>3</sup> ]	

『一方方向連成』(物性値の参照温度 327 )

アルミ箔	電気抵抗率	6.1552 [ $\mu$ · cm]	(参照温度 327 )
	熱伝導率	231.64 [W/m K]	(参照温度 327 )
	比熱	1128.9 [J/kg K]	(参照温度 327 )
	密度	2659.9 [kg/m <sup>3</sup> ]	(参照温度 327 )
活物質	熱伝導率	1.35 [W/m K]	
	比熱	1158.3 [J/kg K]	(参照温度 327 )
	密度	2370 [kg/m <sup>3</sup> ]	

この四つを解析し、比較検討を行う。

また、解析結果は、実験での観測地点 ~ と同じ場所の温度結果を用いる。



### 4.3 二つの連成解析の比較結果

まず、実験の測定と同じコア通過後 40mm 下流の地点での観測地点 ~ の解析による温度の比較を下にグラフで示す。

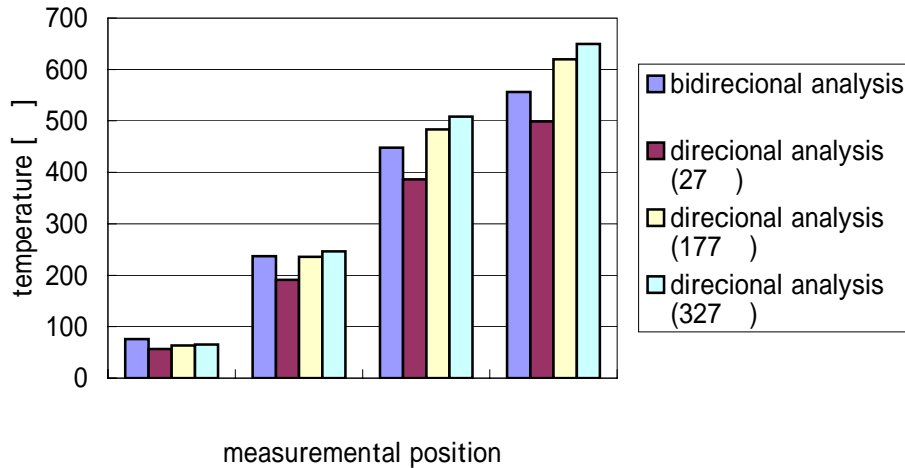


Fig 4-1 Comparison of bi-directional with directional analysis @ 7.2[sec]

又、観測地点 ~ で、加熱開始から測定位置までの時刻暦温度変化の様子を双方向連成解析と一方向連成解析とを比較して下にグラフで示す。

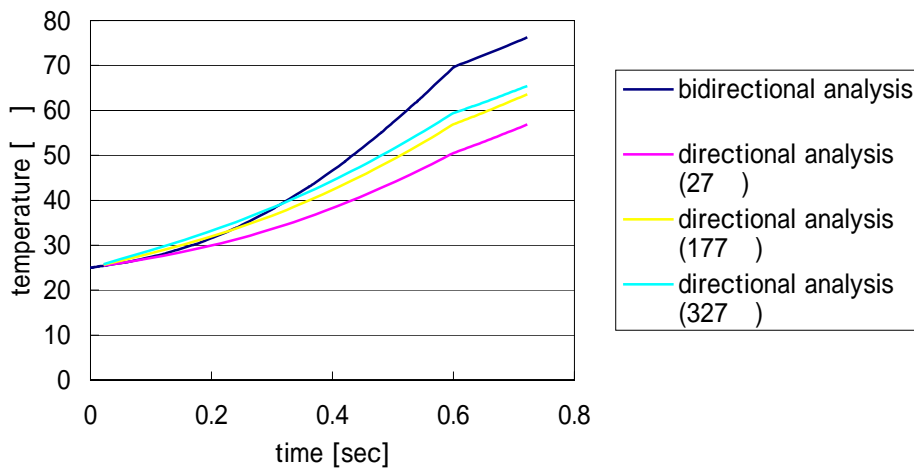
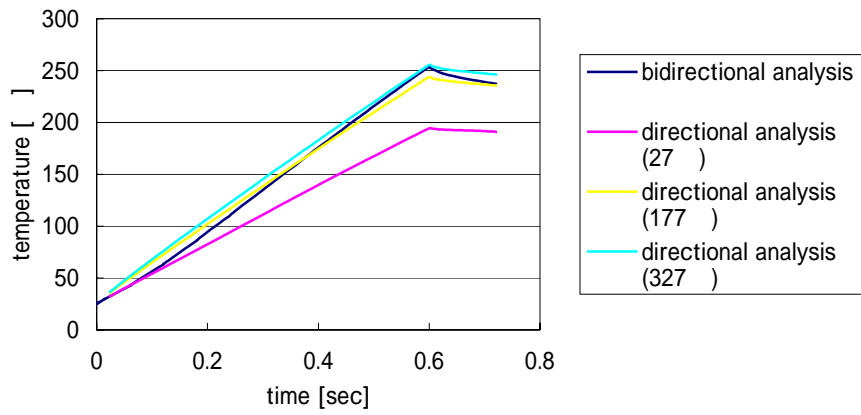
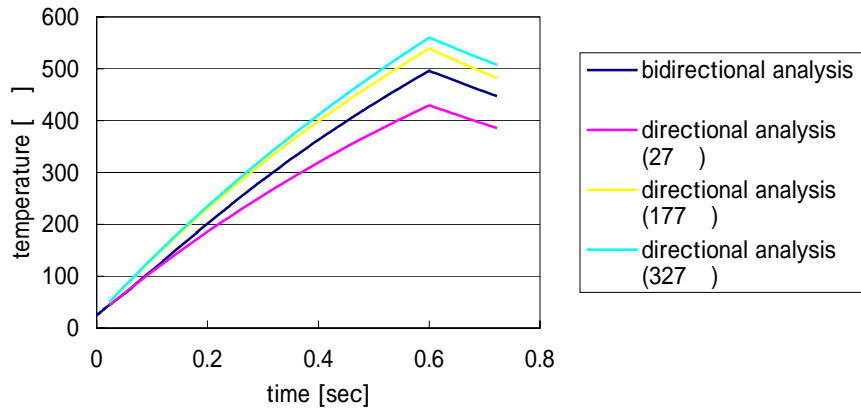


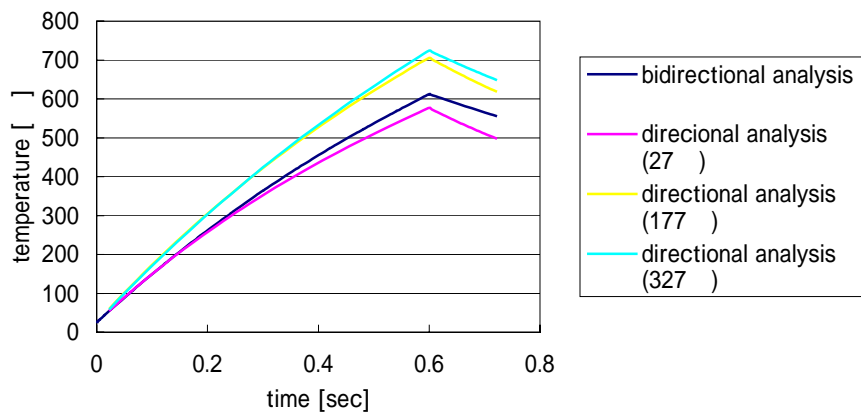
Fig 4-2 Comparison of bi-directional with directional analysis @



**Fig 4-3 Comparison of bi-directional with directional analysis @**



**Fig 4-4 Comparison of bi-directional with directional analysis @**



**Fig 4-5 Comparison of bi-directional with directional analysis @**

## 4.4 二つの連成解析の比較についての考察

Fig 4-1 を見ると、双方向連成は大体参照温度 27 と 177 の一方向連成解析の間に温度分布を示していると思われる。

ということは、『ちょうどよい参照温度で物性値を決めて一方向連成をすれば、わざわざ物性値を温度依存性にして双方向連成を行わなくてもいいのでは』という考えが出てくる。

しかし、個々の観測地点での時刻暦温度変化のグラフを見ると、先ほどの提案がうまくいくとは簡単には結論が出なくなる。その結論への推移を以下に述べる。

まず、個々の観測地点での時刻暦温度変化を見てみる。

観測地点 (Fig 4-2)では、一番内側に位置しているため、温度上昇が少ない観測地点である。一方向連成では参照温度に近い順に、観測温度も高い温度を示している。だが、双方向連成は 0.4 [sec] 辺りから急激に温度が上がり、一方向連成よりかなり高い温度を示している。この地点では双方向連成が一方向連成とは全く違う結果を示していることがわかる。

観測地点 (fig 4-3)では、一方向連成は参照温度が高い順に温度が高くなっているが、参照温度 177 と 327 の温度はとても近い値を示している。双方向連成は一方向解析の参照温度 177 と 327 の温度変化とほとんど同じ値をとっている。一方向連成の温度変化と比べると比較的高い温度であると分かる。

観測地点 (Fig 4-4)では、一方向連成は参照温度高い順に温度が高くなっている。双方向連成は、ちょうど参照温度 177 と 27 の真中辺りの温度をしめしている。一方向連成の温度変化と比べると地点よりは低くなっていると分かる。

観測他店 (Fig 4-5)では、一方向連成は参照温度が高い順に温度が高くなっている。双方向連成は、参照温度 177 と 27 の一方向解析の間をとっているが、どちらかという参照温度 27 に近い値をしめしている。一方向連成と比べると低めであることが分かる。

以上をまとめると、双方向連成解析は一方向連成解析と比べて内側ほど高く端側ほど低くなる傾向があり、すべての観測地点において特定の物性値参照温度による一方向連成解析で近似できないことがわかった。

この IH 加熱の解析では、決して一つの観測地点が分かればいいわけではなく、未塗装部

全体が加熱されているか、端はアルミの融解点を越えていないか、塗装部は活物質の融解点を越えていないか、以上を知る必要があるため、塗装部から端部までの四つの点すべてがきちんと解析できていなければならない。すべての観測地点を特定の物性値参照温度による一方向連成解析で近似できないため、『双方向シーケンシャル連成解析』による物性値の温度依存性解析が IH 加熱の必要な解析であることが分かる。

## 4.5 各物性値の温度依存による効果

### 4.5.1 各物性値の温度依存の効果の評価方法

前項では、各測定地点での時刻暦温度変化について、双方向連成は一方向連成と比べ、内側ほど高めで端ほど低めの温度変化を示し、特定の物性値参照温度による一方向連成解析には近似できないことが分かった。

それでは、なぜ観測地点によって双方向連成は一方向連成と異なる時刻暦温度変化を示したのか、各物性値の温度依存性を考慮することによる効果の一つずつ調べていくことによって、前項で述べた特徴や効果について論じていく。

温度変化のアプローチ方法として、下に挙げる物性値について調べる。

- ・電気抵抗率
- ・熱伝導率
- ・比熱×密度

最後の比熱×密度にしたのは、伝熱方程式によりこの二つの物性値は積とすることで意味を持つので、積にした。

また、解析方法は以下の通りにした。

#### 1 電気抵抗率についての解析

電気抵抗率	温度依存(双方向)、参照温度 27、177、327 の値(一方向)の四つを行う。
熱伝導率	参照温度 177 の値
比熱×密度	参照温度 177 の値

#### 2 熱伝導率についての解析

電気抵抗率	参照温度 177 の値
熱伝導率	温度依存(双方向)、参照温度 27、177、327 の値(一方向)の四つを行う。
比熱×密度	参照温度 177 の値

#### 3 比熱×密度についての解析

電気抵抗率	参照温度 177 の値
熱伝導率	参照温度 177 の値
比熱×密度	温度依存(双方向)、参照温度 27、177、327 の値(一方向)の四つを行う。

以上それぞれ四つの解析を行い、温度分布の違いを調べる。

また、解析条件等は先ほどと同じ【実験 1】で熱伝達率  $6.8762 \text{ [W/m K]}$  を用いる。

## 4.5.2 各物性値の解析の結果

それぞれ物性値の結果を下に示す。

### 1 電気抵抗率

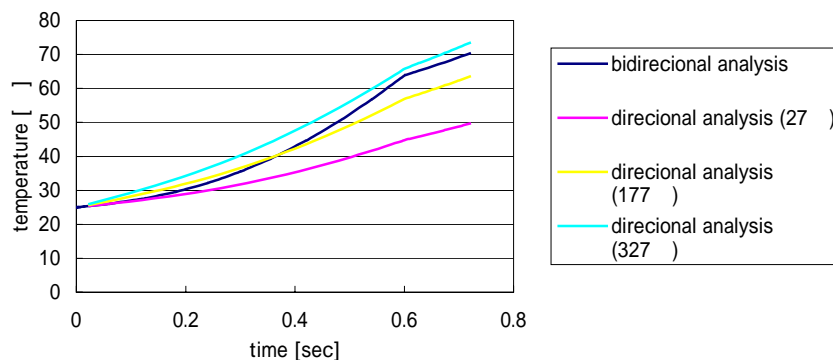


Fig 4-6 Comparison of four analyses at (electric resistance)

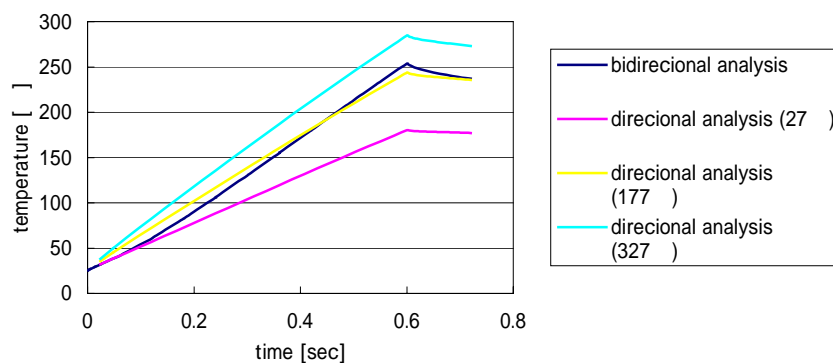


Fig 4-7 Comparison of four analyses at (electric resistance)

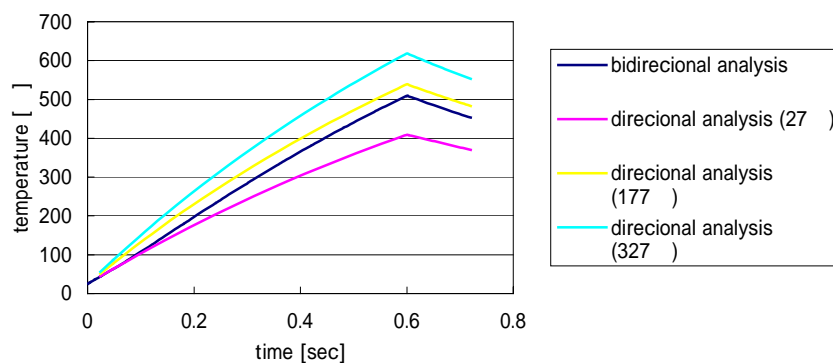


Fig 4-8 Comparison of four analyses at (electric resistance)

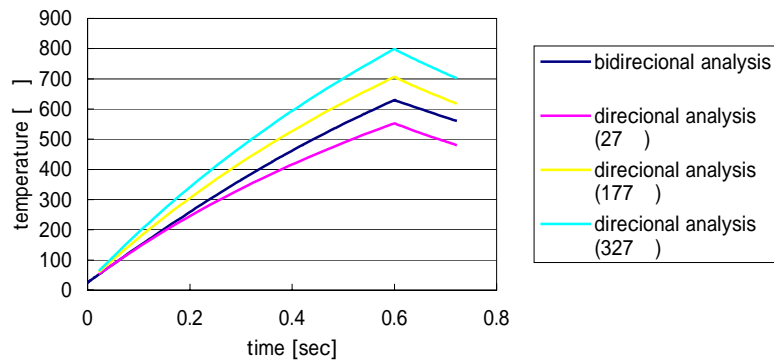


Fig 4-9 Comparison of four analyses at (electric resistance)

## 2 熱伝導率

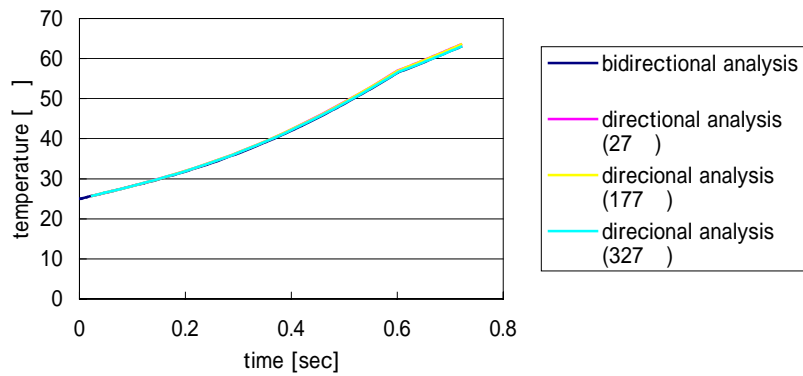


Fig 4-10 Comparison of four analyses at (heat conducting)

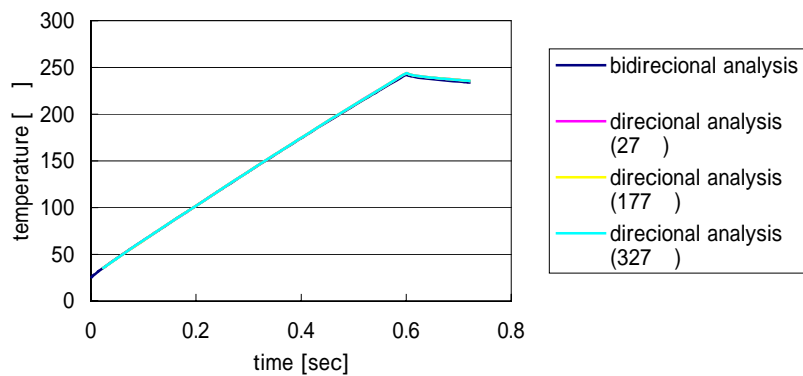


Fig 4-11 Comparison of four analyses at (heat conducting)



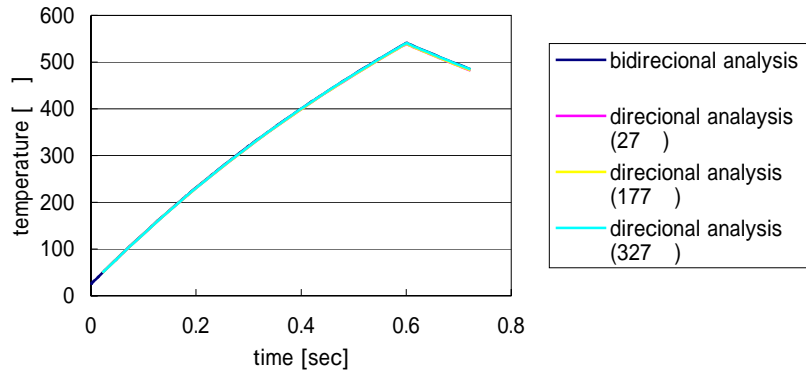


Fig 4-12 Comparison of four analyses at (heat conducting)

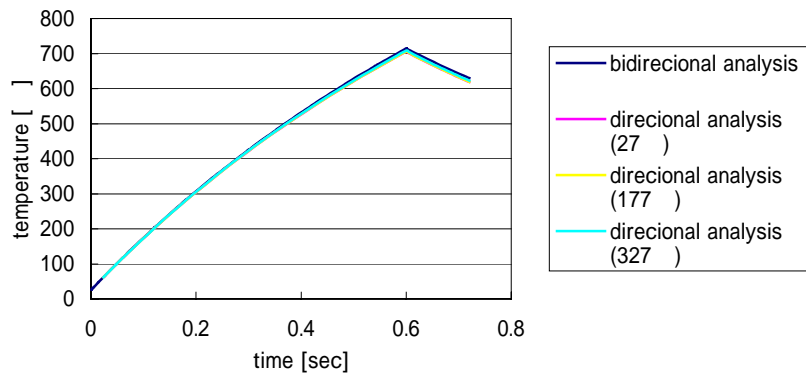


Fig 4-13 Comparison of four analyses at (heat conducting)

**3 比熱 × 密度**

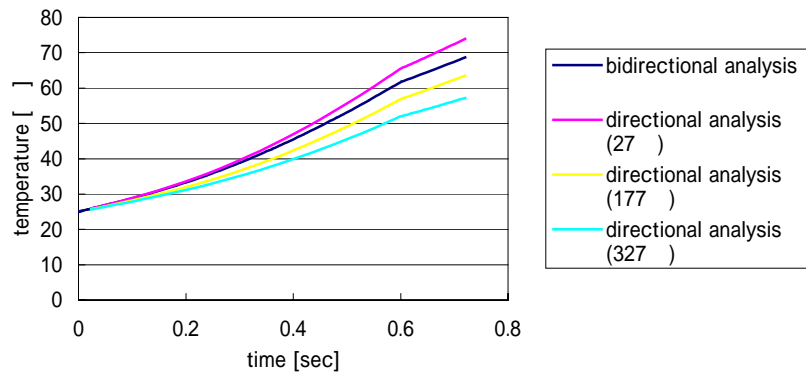


Fig 4-14 Comparison of four analyses at (C × )

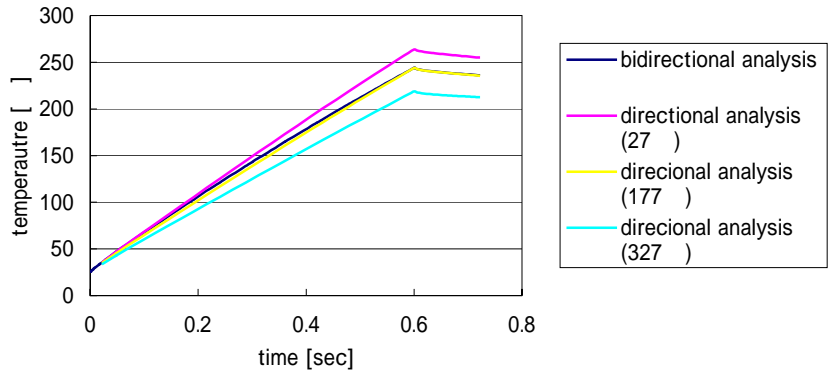


Fig 4-15 Comparison of four analyses at (C x )

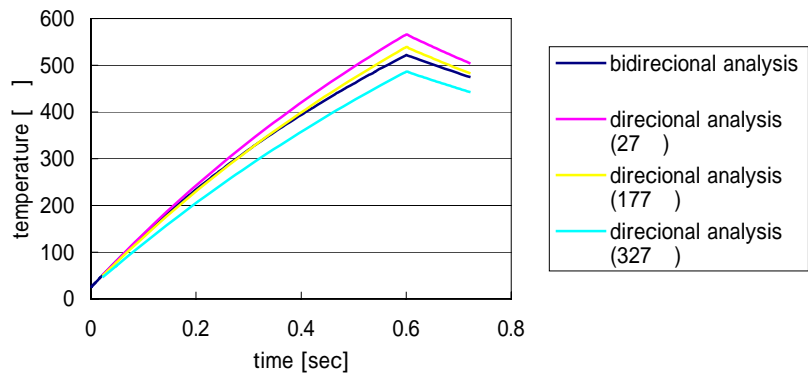


Fig 4-16 Comparison of four analyses at (C x )

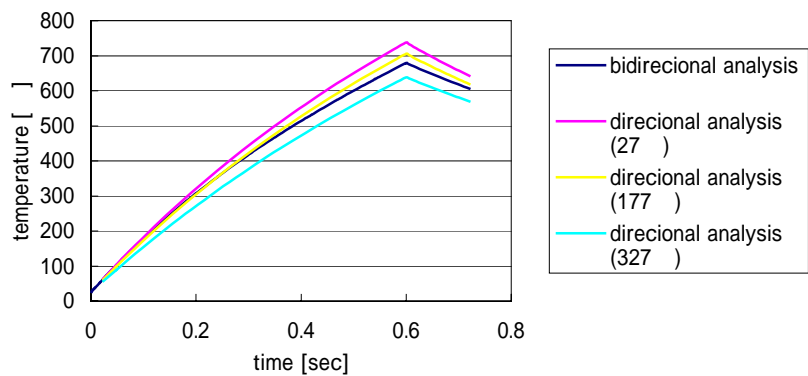


Fig 4-17 Comparison of four analyses at (C x )

### 4.5.3 考察

まず物性ごとに温度依存性による効果の評価を行う。

#### 1 電気抵抗率

まず一方向連成解析についてだが、参照温度が高いほど時刻暦温度変化の温度も高いことが分かる。これはFig2-5により電気抵抗率が温度に対して直線的単調増加であることと、単位時間あたりのジュール損失の式

$$P = R(\text{抵抗値}) \times I(\text{電流値})^2$$

で示せるように、ジュール発熱は抵抗値に比例することがその理由である。

次に双方向連成解析だが、観測地点によって時刻暦温度変化の様子も異なることが分かる。

極板の内側で一番低い ほど参照温度 327 の一方向連成の温度変化に近づき、極板の端で一番温度の近い では参照温度 27 と 177 の中間辺りを示している。

原因として考えられるのは、実際発熱の大部分を行う端では温度上昇にしたがって電気抵抗率も高くなり次第に温度上昇も大きくなることで参照温度 27 と 177 の中間を示す一方、 のような内側では前半では発熱は微小だが温度が上がることで電気抵抗率も上がり温度上昇に貢献するくらいの発熱ができるようになったからだと推測できる。

重要な結果は、一方向連成解析は参照温度が高いほど高く、双方向は観測地点 ほど参照 327 の一方向連成に近く、 ほど参照温度 27 の一方向連成に近くなるということだ。

#### 2 熱伝導率

観測地点 ~ に共通して、どの一方向連成解析も双方向連成解析もほとんど時刻暦温度変化は同じ値をしめしている。

この解析結果の比較により、熱伝導率の影響はほとんど無いということが言える。

又、一方向連成解析と双方向連成解析で全く時刻暦温度変化のグラフが変わらないことから、連成解析の手段を変えても影響は無いことが分かる。すなわち、他の物性値の温度依存性の比較において、一方向連成解析と双方向連成解析との連成解析の手段の違い(ループ等)による影響はほとんど無いということがこれから言えるのだ。

#### 3 比熱×密度

まず一方向連成解析についてだが、電気抵抗率とは逆で、参照温度が低い順に時刻暦温度変化の温度も高くなっていることが分かる。これは以下に示した比熱×密度と温度との関係を示したグラフ

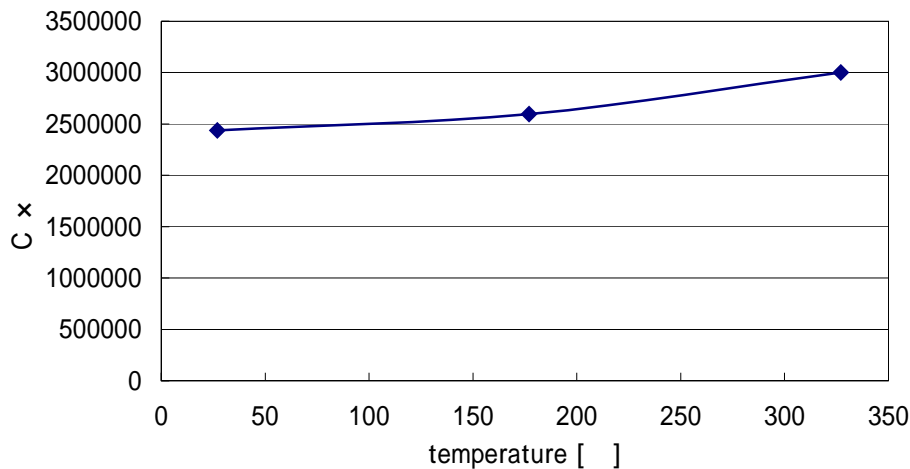


Fig 4-18 Aluminum specific heat × density

と、熱伝導方程式

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_s \nabla^2 T + w$$

により、比熱×密度が温度によって単調増加する事と、比熱×密度が大きいほど温度が高くなりにくい事から、参照温度が低いほど時刻暦温度変化の温度が高いことが分かる。

双方向解析についてだが、内側で温度の低い観測地点 では参照温度 27 と 177 の温度変化の間で高い値をしめしているが、端で温度の高い観測地点 に行くほど参照温度 177 と 327 の間で低い値となっている。

これは、端ほど温度が高いため、先ほどの比熱×密度のグラフと熱伝導方程式から温度が上がりやすく、内側ほど温度が低いため温度が上がりやすい、ということが理由と挙げられる。

以上をまとめると、一方向連成解析では以下ようになった。

- |       |                   |
|-------|-------------------|
| 電気抵抗率 | 参照温度が高いほど高い温度     |
| 熱伝導率  | 参照温度が変わってもほぼ一致する。 |
| 比熱×密度 | 参照温度が低いほど高い温度     |

すべての物性値を温度依存にした一方向連成において参照温度が高いほど高い温度を示したのは、電気抵抗率での各参照温度分布の差が比熱×密度より大きかったためだと分かる。

双方向連成解析について、一方向連成と比較した結果をまとめると以下になる。

電気抵抗率            内側で高め、端ほど低め

熱伝導率            関係なし

比熱×密度           内側で高め、端ほど低め

このことをふまえると、すべての物性値の温度依存性を考慮した解析を行ったとき、端ほど時刻暦温度変化が一方向連成と比べて低めの温度をしめし、内側ほど高めの温度を示したことがわかる。

このことより、温度依存性を考慮すると考慮しない場合と比べて極板の内側では高い値、極板の端では低い値を示したことの理由を各物性値の温度依存性の効果により理解することが出来た。

## 4.6 結言

本章では『一方向連成解析』と『双方向連成解析』とを比較することで、双方向連成解析は各観測地点で温度変化の挙動が一方向連成には近似できないという事が分かった。又その原因を求めるために個々の物性値の温度依存性の考慮による効果を一つずつ調べた。以下に本章の結論を示す。

- 双方向連成解析は、すべての観測地点でにおいて、特定の物性値参照温度による一方向連成解析に近似できない。物性値の温度依存性を考慮すると、極板の観測地点ごとで温度変化の様子が変わることが分かった。
- 各物性値一つずつ温度依存性を考慮した効果について調べた。それにより、双方向連成解析が各観測地点で異なる温度変化を示した理由について理解することが出来た。

# 付章 実験について

## 実験方法

本研究では実験のデータの提供を受けた。その実験の様子を以下に載せる。

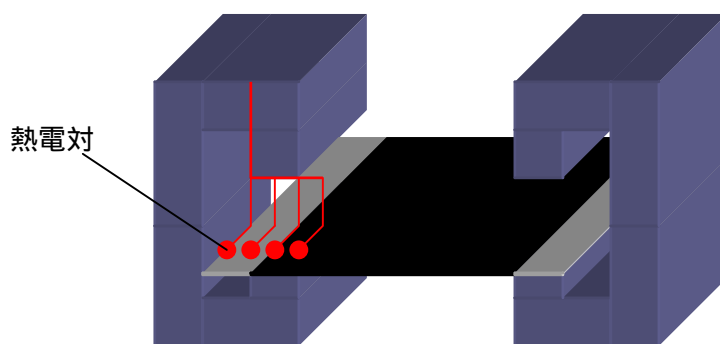


Fig appendix- 1 Photograph of experiment

実験では実際の IH 加熱と同様に極板を搬送しながら過熱を行う。

温度測定位置はコアから約 40mm 下流である。

温度測定は線径 0.1mm、スポット径 0.5mm の 0.5mm シースタイプ K 熱電対を、極板の加熱付近に四本接触して行っている。

極板の温度測定位置は、極板の端から 19.5mm、14mm、8mm、2.5mm であり、熱電対の位置精度は  $\pm 0.5\text{mm}$  程度である。極板位置は下図の通り。

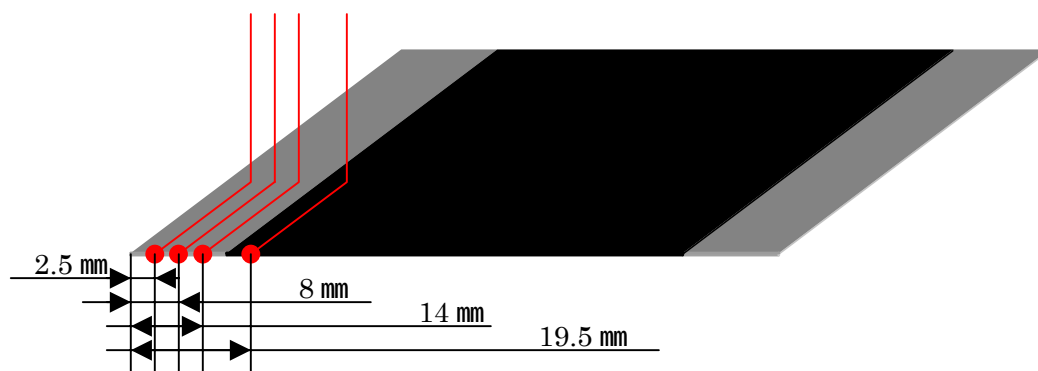


Fig appendix- 2 Photograph of observation points

また、実験では『搬送速度』、『コイルの電流値』をパラメータとして実験を行った。その詳細を下に表で記載する。

実験	搬送速度 [m/min]	コイル電流値 [Arms]
1	20	11
2	20	13
3	30	11
4	30	13
5	18.7	12
6	31.3	12
7	25	10.7
8	25	13.3
9	25	12

Table 4 Experimental parameters



## 実験結果

実験の結果は以下の通りとなった。

実験	搬送速度	コイル電流値	表面温度 [ ]			
	[m/min]	[A]				
1	20	11	81.3	167.3	267.0	311.3
2	20	13	115.1	247.1	400.2	452.5
3	30	11	59.7	124.2	205.4	240.6
4	30	13	79.5	180.7	303.9	356.7
5	18.7	12	103.3	215.5	343.8	393.9
6	31.3	12	67.7	147.2	242.1	287.6
7	25	10.7	66.9	135.2	214.0	252.4
8	25	13.3	97.1	217.9	361.4	420.3
9	25	12	81.2	176.7	288.6	335.0

Table 5 Experimental result

# 参考文献

- [1] 日本機械学会 “伝熱工学資料 改訂第四版” p42,p314,p328 (1986)
  
- [2] サイバネットシステム株式会社 “ANSYS Product News 2004 WINTER ”  
p11 (2004)
  
- [3] サイバネットシステム株式会社 “2006 Japan ANSYS Conference ”  
p42-1 (2006)

# 謝辞

本研究では、学外アドバイザー柴田一郎さん、石田裕貴さんには大変お世話になりました。IH 加熱の工程について詳しく教えていただいたり、実験を行って詳しく結果を教えていただいたり、物性値を調べていただいたりと、お忙しい中親身になって協力していただき、心から感謝をしております。誠にありがとうございました。

また、指導教員の泉先生には様々なアドバイスを頂き、初めての論文でしたが無事完成までいたる事が出来ました。誠にありがとうございました。

以上簡単ではありますが、私からの謝辞とさせていただきます。ありがとうございました。

以上

1P ~ 52P 完

卒業論文

平成 19 年 2 月 2 日提出

産業機械工学科 50223 中村 育弘