

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第6996440号
(P6996440)

(45)発行日 令和4年1月17日(2022.1.17)

(24)登録日 令和3年12月20日(2021.12.20)

(51)国際特許分類

G 0 1 K	3/00 (2006.01)	F I	G 0 1 K	3/00
B 2 1 C	31/00 (2006.01)		B 2 1 C	31/00
G 0 1 N	25/18 (2006.01)		G 0 1 N	25/18
G 0 1 K	1/14 (2021.01)		G 0 1 K	1/14

L

Z

請求項の数 4 (全27頁)

(21)出願番号 特願2018-133202(P2018-133202)
 (22)出願日 平成30年7月13日(2018.7.13)
 (65)公開番号 特開2020-12654(P2020-12654A)
 (43)公開日 令和2年1月23日(2020.1.23)
 審査請求日 令和3年1月5日(2021.1.5)

(73)特許権者 000004743
 日本軽金属株式会社
 東京都港区新橋一丁目1番13号
 (74)代理人 110002147
 特許業務法人酒井国際特許事務所
 林 沛征
 静岡県静岡市清水区蒲原一丁目34番1
 号 日本軽金属株式会社 グループ技術セ
 ンター内
 審査官 平野 真樹

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 ダイスの温度計算方法及びダイスの温度計算システム

(57)【特許請求の範囲】**【請求項1】**

金属又は合金である押出対象の押出加工に用いられるダイスの温度分布をシミュレートするダイスの温度計算方法であって、

前記ダイスにおける前記押出対象の押出方向を列方向とし、前記押出方向に直交する方向を行方向として、前記押出対象の押出口が配置される前記ダイスの中央部に対する行方向断面の仮想モデルを設定する工程と、

前記仮想モデルにおいて、前記行方向及び前記列方向に複数の部分領域を含む2次元マトリクス状の分割モデルを設定する工程と、

前記ダイスに対して前記押出方向に押し当てられる前記押出対象が存する第1箇所と、前記ダイスから押し出される前記押出対象が存する第2箇所と、前記第2箇所に対して前記押出方向側であって前記ダイスの内側の空間である第3箇所と、前記ダイスの前記押出方向側の端部側の空間である第4箇所と、前記第2箇所及び前記第3箇所の反対側に位置する前記ダイスの外周側の空間である第5箇所との温度を取得する工程と、

前記第1箇所及び前記第2箇所における前記ダイスに対する入熱量と、前記第3箇所、前記第4箇所及び前記第5箇所における前記ダイスからの放熱量と、を算出する工程と、

前記分割モデルに含まれる各部分領域の温度を算出する温度分布算出工程と、を含み、前記温度分布算出工程は、

前記ダイスの内周側における前記第2箇所からの入熱量及び前記ダイスの内周側における前記第3箇所への放熱量と、前記ダイスの外周側から前記第5箇所への放熱量と、予め定

められた各部分領域の初期温度とに基づいて、1行分に含まれる各部分領域の温度を算出する第1算出工程と、

前記ダイスの一端側における前記第1箇所からの入熱量と、前記ダイスの他端側から前記第4箇所への放熱量と、予め定められた各部分領域の初期温度とに基づいて、1列分に含まれる各部分領域の温度を算出する第2算出工程と、
を含み、

前記第1算出工程と前記第2算出工程はそれぞれ複数回行われ、

前記第1算出工程と前記第2算出工程は交互に行われ、

2回目以降の前記第1算出工程では、温度を算出する1行分の各部分領域の温度のうち、それ以前の前記第2算出工程で算出された部分領域の温度を当該部分領域の前記初期温度とし、

2回目以降の前記第2算出工程では、温度を算出する1列分の各部分領域の温度のうち、それ以前の前記第1算出工程で算出された部分領域の温度を当該部分領域の前記初期温度とすることを特徴とする、

ダイスの温度計算方法。

【請求項2】

1回目の前記第1算出工程と1回目の前記第2算出工程のうち、後に行われる工程では、先に行われる工程で算出された部分領域の温度を当該部分領域の前記初期温度とすることを特徴とする、

請求項1に記載のダイスの温度計算方法。

【請求項3】

所定時間が経過することが想定された前記所定時間前後の異なる2タイミングの各々における前記温度分布算出工程において、後のタイミングにおける各部分領域の前記初期温度は、前のタイミングの前記温度分布算出工程で算出された各部分領域の温度であることを特徴とする、

請求項1又は2に記載のダイスの温度計算方法。

【請求項4】

金属又は合金である押出対象の押出加工に用いられるダイスの温度情報を取得する温度情報取得装置と、金属又は合金である押出対象の押出加工に用いられるダイスの温度分布をシミュレートする情報処理装置とを備えるダイスの温度計算システムであって、

前記温度情報取得装置は、

前記ダイスに対して前記押出対象の押出方向に押し当てられる前記押出対象が存する第1箇所の温度情報を取得する第1温度情報取得部と、前記ダイスから押し出される前記押出対象が存する第2箇所の温度情報を取得する第2温度情報取得部と、前記第2箇所に対して前記押出方向側であって前記ダイスの内側の空間である第3箇所の温度情報を取得する第3温度情報取得部と、前記ダイスの前記押出方向側の端部側の空間である第4箇所の温度情報を取得する第4温度情報取得部と、前記第2箇所及び前記第3箇所の反対側に位置する前記ダイスの外周側の空間である第5箇所の温度情報を取得する第5温度情報取得部とを有し、

前記情報処理装置は、

前記ダイスにおける前記押出対象の押出方向を列方向とし、前記押出方向に直交する方向を行方向として、前記押出対象の押出口が配置される前記ダイスの中央部に対する行方向断面の仮想モデルを設定し、

前記仮想モデルにおいて、前記行方向及び前記列方向に複数の部分領域を含む2次元マトリクス状の分割モデルを設定し、

前記ダイスの内周側における前記第2箇所からの入熱量及び前記ダイスの内周側における前記第3箇所への放熱量と、前記ダイスの外周側から前記第5箇所への放熱量とを算出し、前記分割モデルに含まれる各部分領域の温度を算出する演算部を有し、

前記演算部は、

前記第2箇所及び前記第3箇所を含む前記ダイスの内周側からの入熱量及び放熱量と、前

10

20

30

40

50

記第5箇所を含む前記ダイスの外周側からの放熱量と、予め定められた各部分領域の初期温度とに基づいて、1行分に含まれる各部分領域の温度を算出する第1算出工程と、前記第1箇所を含む前記ダイスの一端側からの入熱量と、前記第4箇所を含む前記ダイスの他端側からの放熱量と、予め定められた各部分領域の初期温度とに基づいて、1列分に含まれる各部分領域の温度を算出する第2算出工程と、をそれぞれ複数回行い、

前記第1算出工程と前記第2算出工程を交互に行い、

2回目以降の前記第1算出工程では、温度を算出する1行分の各部分領域の温度のうち、それ以前の前記第2算出工程で算出された部分領域の温度を当該部分領域の前記初期温度とし、

2回目以降の前記第2算出工程では、温度を算出する1列分の各部分領域の温度のうち、それ以前の前記第1算出工程で算出された部分領域の温度を当該部分領域の前記初期温度とすることを特徴とすることを特徴とする、

ダイスの温度計算システム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、金属又は合金の押出技術、特に押出加工に用いられるダイスの温度分布の把握に関するものである。

【背景技術】

【0002】

金属又は合金の押出加工において高精度と高品質の押出を実現するには、押出の金型（ダイス）が押出形材におよぼす影響の特定が不可欠である。

【0003】

ダイスの温度分布は、押出形材の精度、特に肉厚に影響を与えることが知られている。よって、ダイスの温度分布の把握が重要となる。従来より、有限要素法（FEM：Finite Element Method）解析を行ってダイスの温度分布をシミュレートする方法が知られている（例えば、非特許文献1）。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0004】

【文献】林沛征著「アルミニウム合金押出形材の肉厚変動に関する検討」、アルトピア、日本国、カロス出版、2017年7月15日発行、第47巻、2017年7月号、p.9-16

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

しかしながら、FEM解析は、高度な技術と専用の設備（ソフトウェア含む）を必要とするため、実施可能な環境が極めて限定されていた。このため、より容易にダイスの温度分布をシミュレート可能な方法等が求められていた。

【0006】

本発明はかかる問題にかんがみてなされたものであり、より容易にダイスの温度分布をシミュレート可能なダイスの温度計算方法及びダイスの温度計算システムを提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0007】

本発明の態様に係るダイスの温度計算方法は、金属又は合金である押出対象の押出加工に用いられるダイスの温度分布をシミュレートするダイスの温度計算方法であって、前記ダイスにおける前記押出対象の押出方向を列方向とし、前記押出方向に直交する方向を行方向として、前記押出対象の押出口が配置される前記ダイスの中央部に対する行方向断面の仮想モデルを設定する工程と、前記仮想モデルにおいて、前記行方向及び前記列方向に複

10

20

30

40

50

数の部分領域を含む 2 次元マトリクス状の分割モデルを設定する工程と、前記ダイスに対して前記押出方向に押し当てられる前記押出対象が存する第 1 箇所と、前記ダイスから押し出される前記押出対象が存する第 2 箇所と、前記第 2 箇所に対して前記押出方向側であって前記ダイスの内側の空間である第 3 箇所と、前記ダイスの前記押出方向側の端部側の空間である第 4 箇所と、前記第 2 箇所及び前記第 3 箇所の反対側に位置する前記ダイスの外周側の空間である第 5 箇所と、の温度を取得する工程と、前記第 1 箇所及び前記第 2 箇所における前記ダイスに対する入熱量と、前記第 3 箇所、前記第 4 箇所及び前記第 5 箇所における前記ダイスからの放熱量と、を算出する工程と、前記分割モデルに含まれる各部分領域の温度を算出する温度分布算出工程と、を含み、前記温度分布算出工程は、前記ダイスの内周側における前記第 2 箇所からの入熱量及び前記ダイスの内周側における前記第 3 箇所への放熱量と、前記ダイスの外周側から前記第 5 箇所への放熱量と、予め定められた各部分領域の初期温度とに基づいて、1 行分に含まれる各部分領域の温度を算出する第 1 算出工程と、前記ダイスの一端側における前記第 1 箇所からの入熱量と、前記ダイスの他端側から前記第 4 箇所への放熱量と、予め定められた各部分領域の初期温度とに基づいて、1 列分に含まれる各部分領域の温度を算出する第 2 算出工程と、を含み、前記第 1 算出工程と前記第 2 算出工程はそれぞれ複数回行われ、前記第 1 算出工程と前記第 2 算出工程は交互に行われ、2 回目以降の前記第 1 算出工程では、温度を算出する 1 行分の各部分領域の温度のうち、それ以前の前記第 2 算出工程で算出された部分領域の温度を当該部分領域の前記初期温度とし、2 回目以降の前記第 2 算出工程では、温度を算出する 1 列分の各部分領域の温度のうち、それ以前の前記第 1 算出工程で算出された部分領域の温度を当該部分領域の前記初期温度とすることを特徴とする。
10

【 0 0 0 8 】

本発明の一態様として、1 回目の前記第 1 算出工程と 1 回目の前記第 2 算出工程のうち、後に行われる工程では、先に行われる工程で算出された部分領域の温度を当該部分領域の前記初期温度とすることが好ましい。

【 0 0 0 9 】

本発明の一態様として、所定時間が経過することが想定された前記所定時間前後の異なる 2 タイミングの各々における前記温度分布算出工程において、後のタイミングにおける各部分領域の前記初期温度は、前のタイミングの前記温度分布算出工程で算出された各部分領域の温度であることが好ましい。
20

【 0 0 1 0 】

本発明の態様に係るダイスの温度計算システムは、金属又は合金である押出対象の押出加工に用いられるダイスの温度情報を取得する温度情報取得装置と、金属又は合金である押出対象の押出加工に用いられるダイスの温度分布をシミュレートする情報処理装置とを備えるダイスの温度計算システムであって、前記温度情報取得装置は、前記ダイスに対して前記押出対象の押出方向に押し当てられる前記押出対象が存する第 1 箇所の温度情報を取得する第 1 温度情報取得部と、前記ダイスから押し出される前記押出対象が存する第 2 箇所の温度情報を取得する第 2 温度情報取得部と、前記第 2 箇所に対して前記押出方向側であって前記ダイスの内側の空間である第 3 箇所の温度情報を取得する第 3 温度情報取得部と、前記ダイスの前記押出方向側の端部側の空間である第 4 箇所の温度情報を取得する第 4 温度情報取得部と、前記第 2 箇所及び前記第 3 箇所の反対側に位置する前記ダイスの外周側の空間である第 5 箇所の温度情報を取得する第 5 温度情報取得部とを有し、前記情報処理装置は、前記ダイスにおける前記押出対象の押出方向を列方向とし、前記押出方向に直交する方向を行方向として、前記押出対象の押出口が配置される前記ダイスの中央部に対する行方向断面の仮想モデルを設定し、前記仮想モデルにおいて、前記行方向及び前記列方向に複数の部分領域を含む 2 次元マトリクス状の分割モデルを設定し、前記ダイスの内周側における前記第 2 箇所からの入熱量及び前記ダイスの内周側における前記第 3 箇所への放熱量と、前記ダイスの外周側から前記第 5 箇所への放熱量とを算出し、前記分割モデルに含まれる各部分領域の温度を算出する演算部を有し、前記演算部は、前記第 2 箇所及び前記第 3 箇所を含む前記ダイスの内周側からの入熱量及び放熱量と、前記第 5 箇所を
40

含む前記ダイスの外周側からの放熱量と、予め定められた各部分領域の初期温度に基づいて、1行分に含まれる各部分領域の温度を算出する第1算出工程と、前記第1箇所を含む前記ダイスの一端側からの入熱量と、前記第4箇所を含む前記ダイスの他端側からの放熱量と、予め定められた各部分領域の初期温度に基づいて、1列分に含まれる各部分領域の温度を算出する第2算出工程と、をそれぞれ複数回行い、前記第1算出工程と前記第2算出工程を交互に行い、2回目以降の前記第1算出工程では、温度を算出する1行分の各部分領域の温度のうち、それ以前の前記第2算出工程で算出された部分領域の温度を当該部分領域の前記初期温度とし、2回目以降の前記第2算出工程では、温度を算出する1列分の各部分領域の温度のうち、それ以前の前記第1算出工程で算出された部分領域の温度を当該部分領域の前記初期温度とすることを特徴とすることを特徴とする。

10

【発明の効果】

【0011】

本発明に係る態様によれば、より容易にダイスの温度分布をシミュレートすることができる。

【図面の簡単な説明】

【0012】

【図1】図1は、実施形態に係る温度計算システムの主要構成を示すブロック図である。

【図2】図2は、押出装置による金属又は合金の直接押出加工のイメージ図を示す。

【図3】図3は、広幅チャンネル形状形材のダイスとその温度測定点(P1～P4)を示す図である。

20

【図4】図4は、図3に示す温度測定点に対する温度センサの進入方法を説明するためのダイスの概略断面図である。

【図5】図5は、ビレット3本連続押出の各測定点の温度履歴の測定結果とFEM解析結果を示す図である。

【図6】図6は、ビレット10本連続押出における押出先端材と後端材のA,B,C部の肉厚測定値を示す図である。

【図7】図7は、2次元の熱伝導の模式図を示す図である。

【図8】図8は、1次元の外部熱と固体の非定常熱伝導の図式解法を示す図である。

【図9】図9は、フーリエ理論式と差分法によるダイスの熱伝導計算のモデルを示す図である。

30

【図10】図10は、1次元の場合における入熱と放熱に基づいた差分法の計算モデルを示す図である。

【図11】図11は、F1とF4の境界条件である熱伝達係数と雰囲気温度および熱伝達を熱伝導に直した場合の相当距離を示す表図である。

【図12】図12は、FEM解析モデルを示す図である。

【図13】図13は、300秒経過後のFEM解析結果の温度分布図を示す図である。

【図14】図14は、に300秒経過後の差分法計算結果とFEM解析結果の比較を示す図である。

【図15】図15は、図9の5つの境界条件である熱伝達係数と雰囲気温度、熱伝達を熱伝導に直した場合の相当距離を示す表図である。

40

【図16】図16は、300秒経過後のFEM解析結果の温度分布図を示す図である。

【図17】図17は、FEM解析結果の各行要素のX方向の温度分布を示す。

【図18】図18は、300秒経過後の差分法による各行要素のX方向の温度分布の結果を示す図である。

【図19】図19は、1行要素と5行要素の差分法計算結果とFEM解析結果の比較を示す図である。

【図20】図20は、考案した左右、上下の伝熱の計算方法を示す図である。

【図21】図21は、考案した左右、上下の伝熱の計算方法を示す図である。

【図22】図22は、考案した左右、上下の伝熱の計算方法を示す図である。

【図23】図23は、考案した左右、上下の伝熱の計算方法を示す図である。

50

【図24】図24は、考案した差分法計算方法による各行要素のX方向の温度分布を示す図である。

【図25】図25は、考案した差分法の1行要素と5行要素の計算結果とFEM解析結果の比較を示す図である。

【図26】図26は、差分法計算による押出加工中のダイスのベアリング付近要素E11と外周側要素E15の経過時間と温度履歴の関係を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0013】

以下、本発明に係る実施形態について図面を参照しながら説明するが、本発明はこれに限定されない。以下で説明する実施形態の構成要素は、適宜組み合わせができる。また、一部の構成要素を用いない場合もある。また、以下で説明する実施形態における構成要素には、当業者が容易に想定できるもの、実質的に同一のもの、いわゆる均等の範囲のものが含まれる。

10

【0014】

図1は、実施形態に係る温度計算システム1の主要構成を示すブロック図である。温度計算システム1は、温度情報取得装置60と、情報処理装置70と、を含む。温度情報取得装置60は、押出装置100の各所の温度情報を取得する。温度情報取得装置60は、第1温度情報取得部61、第2温度情報取得部62、第3温度情報取得部63、第4温度情報取得部64及び第5温度情報取得部65を含む。

20

【0015】

図2に押出装置100による金属又は合金の直接押出加工のイメージを示す。なお、図2に示すイメージは、外周形状が円筒状のダイス2を、当該円筒の中心軸に沿って切断した場合の断面のイメージである。図2では、ビレット3を押出加工中の押出装置100を図示している。ダイス2は、金属又は合金の押出加工に用いられる金型である。ビレット3は、ダイス2を用いて加工される押出形材3aのもとになる金属又は合金であり、例えばアルミニウム又はアルミニウムを含む合金である。ステム4は、ビレット3をダイス2に押し付ける。ダミブロック5は、ビレット3とステム4との間に設けられる。コンテナ6は、ダイス2に押し付けられるビレット3を、ビレット3の外周側から支持する。コンテナ6の内側の空間の形状及び大きさは、ビレット3、ステム4及びダミブロックの形状及び大きさに対応する。

30

【0016】

第1温度情報取得部61は、第1ポイントFP1の温度を検知する。第2温度情報取得部62は、第2ポイントFP2の温度を検知する。第3温度情報取得部63は、第3ポイントFP3の温度を検知する。第4温度情報取得部64は、第4ポイントFP4の温度を検知する。第5温度情報取得部65は、第5ポイントFP5の温度を検知する。

【0017】

第1温度情報取得部61、第2温度情報取得部62、第3温度情報取得部63、第4温度情報取得部64及び第5温度情報取得部65は、少なくとも1000[]~550[]の範囲内の温度を検知可能な温度センサである。第1温度情報取得部61、第2温度情報取得部62、第3温度情報取得部63、第4温度情報取得部64及び第5温度情報取得部65の具体的構成例として、熱電対を用いた温度センサが挙げられるが、これに限られるものでなく、機能的に上述の要件を満たす温度センサであればよい。

40

【0018】

第1ポイントFP1は、ダイス2に対して押出方向に押し当てられる押出対象が存する第1箇所に相当する。第2ポイントFP2は、ダイス2から押し出される押出対象が存する第2箇所に相当する。第3ポイントFP3は、第2箇所に対して押出方向側であってダイス2の内側の空間である第3箇所に相当する。第4ポイントFP4は、ダイス2の押出方向側の端部側の空間である第4箇所に相当する。第5ポイントFP5は、第2部分及び第3部分の反対側に位置するダイス2の外周側の空間である第5箇所に相当する。言い換えれば、第2ポイントFP2及び第3ポイントFP3は、押出対象である押出形材3aと対

50

向するダイス 2 の内周側に位置する。

【 0 0 1 9 】

第 1 ポイント F P 1 の温度は、ダイスチャンバー内のメタル加工熱からの入熱 F 0 の算出に用いられる。第 2 ポイント F P 2 の温度は、ダイス 2 のペアリングのメタル摩擦熱からの入熱 F 1 の算出に用いられる。第 3 ポイント F P 3 の温度は、ダイス逃げ部の空気との界面からの放熱 F 2 の算出に用いられる。第 4 ポイント F P 4 の温度は、ダイス後部の工具系との接触からの放熱 F 3 の算出に用いられる。第 5 ポイント F P 5 の温度は、ダイステックとの接触からの放熱 F 4 の算出に用いられる。入熱 F 0 、入熱 F 1 、放熱 F 2 、放熱 F 3 及び放熱 F 4 については後述する。

【 0 0 2 0 】

情報処理装置 7 0 は、演算部 7 1 、記憶部 7 2 、入力部 7 3 、出力部 7 4 、インターフェース 7 5 等を備える。演算部 7 1 は、 C P U (Central Processing Unit) 等の演算装置を有し、記憶部 7 2 から処理内容に応じたソフトウェア・プログラム及びデータを読み出して実行処理することで、情報処理装置 7 0 が実現する各種の機能に対応する演算処理を行う。記憶部 7 2 は、主記憶装置及び補助記憶装置を有し、演算部 7 1 により読み出されるソフトウェア・プログラム及びデータを記憶する。主記憶装置の具体的構成例として、 R A M (Random Access Memory) として機能する半導体メモリが挙げられる。補助記憶装置の具体的構成例として、 H D D (Hard Disk Drive) 、 S S D (Solid State Drive) 、フラッシュメモリー、 R O M (Read Only Memory) 等が挙げられる。

10

【 0 0 2 1 】

入力部 7 3 は、キーボード、マウス、マイクその他の入力装置を 1 つ以上含み、情報処理装置 7 0 を操作するユーザからの入力を受け付ける。出力部 7 4 は、液晶ディスプレイ等の表示装置、スピーカ等の音声出力装置のうち少なくとも 1 つを含み、情報処理装置 7 0 の処理内容に応じた出力をを行う。インターフェース 7 5 は、情報処理装置 7 0 に対して温度情報取得装置 6 0 を接続可能にするインターフェースである。インターフェース 7 5 は、例えば、 U S B (Universal Serial Bus) 等のバスインターフェースであるが、温度情報取得装置 6 0 の出力インターフェースに対応したインターフェースであればよい。言い換えれば、温度情報取得装置 6 0 の出力インターフェースとインターフェース 7 5 との関係は、相互接続及びデータ伝送可能なインターフェースの関係になるよう設けられる。

20

【 0 0 2 2 】

なお、実施形態で温度情報取得装置 6 0 からインターフェース 7 5 に入力されるデータは、デジタルデータである。第 1 温度情報取得部 6 1 、第 2 温度情報取得部 6 2 、第 3 温度情報取得部 6 3 、第 4 温度情報取得部 6 4 及び第 5 温度情報取得部 6 5 がデジタルデータを出力可能なセンサであってもよいし、第 1 温度情報取得部 6 1 、第 2 温度情報取得部 6 2 、第 3 温度情報取得部 6 3 、第 4 温度情報取得部 6 4 及び第 5 温度情報取得部 6 5 から出力されるアナログの温度情報を温度情報取得装置 6 0 に設けられたアナログ / デジタル変換回路でデジタルデータ化して出力する構成であってもよい。

30

【 0 0 2 3 】

実施形態の記憶部 7 2 は、シミュレート用プログラム 7 2 P を記憶する。シミュレート用プログラム 7 2 P は、例えば表計算ソフトウェア・プログラムと、当該ソフトウェア・プログラムで利用可能な表計算データとを含む。当該表計算データは、当該表計算ソフトウェア・プログラムを実行中の演算部 7 1 が後述するダイス 2 の温度計算方法を実行処理するためのアルゴリズムに則った計算式及びデータを含む。

40

【 0 0 2 4 】

以下、ダイス 2 の温度計算方法及び当該温度計算方法に関連する事項について、図 2 から図 2 6 を参照して説明する。

【 0 0 2 5 】

押出加工プロセスにおいては、ダイス 2 の温度分布の変化が直にダイス開口部寸法、形材の肉厚に影響を及ぼすため、検討が重要となる。本稿では、フーリエの理論式と差分法計算によるダイス 2 の非定常熱伝導解析、ダイス温度分布の計算方法を紹介する。2 次元の

50

熱伝導解析には、2方向からの熱伝導の影響が考慮されることによって、計算精度が高い差分法計算方法が開発された。

【0026】

(1.はじめに)

近年、車両軽量化による燃費向上のため、アルミニウム押出形材は、自動車、車両などの分野への適用が広がりつつある。これにともない、押出形材3aに求められる要求性能、精度、品質も年々高度化している。高精度と高品質の押出を実現するには、形材形状寸法と肉厚におよぼす影響因子の究明・対策が不可欠である。

【0027】

押出形材3aの精度、特に肉厚の変動は、押出加工中の力の変化、ダイス2と工具系の温度変化によるものが多い。押出加工プロセスにおいて、ダイス2の温度分布の変化は、直にダイス開口部（形材の肉厚）に影響を及ぼす。よって、ダイス2の温度分布の検討が重要となる。

10

【0028】

本稿では、フーリエの理論式と差分法計算による押出加工プロセスのダイス2の非定常熱伝導解析およびダイス温度分布の計算方法を紹介する。

【0029】

(2.押出加工の肉厚変動問題)

押出中、力の因子であるコンテナシールカ7（図2参照）、ダイス2内のメタル圧力8（図2参照）、および熱的因子であるダイス2内の温度分布は時間とともに変化する。

20

【0030】

例として、広幅チャンネル形状形材のダイス2の温度変化と肉厚変動結果を説明する。

【0031】

図3及び図4に広幅チャンネル形状形材のダイス2とその温度測定点（P1～P4）を示す。図5にビレット3本連続押出の各測定点の温度履歴の測定結果とFEM解析結果を示す。図5に示すように、押出中、塑性加工の発熱により、ダイス2のベアリング付近部のP3とP4の温度は高くなる。一方、ダイスタックへの伝熱などにより、ダイス2の外周のP1とP2の温度は低くなる。押出先端から押出後端にかけて、ベアリング付近部と外周部の温度差が広がっている。さらに、押出ビレット本数が増えるにつれて、その温度差が大きくなる。

30

【0032】

なお、図4は、図3に示す温度測定点P1, P3に対する温度センサの進入方法を説明するためのダイス2の概略断面図である。また、図4におけるi1は、8[mm]である。また、図4におけるi2は、10[mm]である。図4では、温度測定点P1, P3の温度を測定するため、ダイス2に穴H1, H2を設けて温度センサを進入させている。図示しないが、温度測定点P2, P4の温度測定の仕組みも温度測定点P1, P3と同様である。また、第1温度情報取得部61を用いた第1ポイントFP1の温度測定及び第2温度情報取得部62を用いた第2ポイントFP2の温度測定においても、温度測定点P1, P3の温度測定のためにダイス2に穴をあけているのと同様、ダイス2及びビレット3の少なくとも一方に穴をあけて温度センサを進入させる。

40

【0033】

図6にビレット10本連続押出における押出先端材と後端材のA, B, C部の肉厚測定値を示す。各押出ビレットの先端材から後端材にかけて、肉厚が薄くなる傾向にある。ビレット間にあっても、押出本数が増えるにつれて、肉厚が薄くなっていく。このように、押出先端、ビレット間の肉厚変動は、負荷とダイス2内の温度変化によるものと考えられる。

【0034】

(3.フーリエ理論式と差分法の計算)

前述のように、押出加工中に、時間とともに変化するダイス2の温度は、ダイス2の開口に影響を及ぼし、形材肉厚変動の原因となる。定量的にダイス2内部の温度分布と温度変

50

化を検討するため、ここでは、フーリエ理論式と差分法による計算を試みた。

【0035】

図7に2次元の熱伝導の模式図を示す。時間 $d t$ の間に、X方向の左から右への熱伝導とY方向の上から下への熱伝導による直方体内部に蓄えられた熱量 $d Q_1$ の方程式を式(1)のように書ける。

【数1】

$$dQ_1 = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) dx dy dt \quad \dots (1)$$

10

【0036】

ここで、Tは温度、λは熱伝導率である。

【0037】

なお、温度(T)は、測定又は設定により定められる。熱伝導率(λ)は、例えばダイス2の組成により決定される定数である。また、∂は、偏微分を表す符号である。また、X方向は、行方向に相当する。また、Y方向は、列方向に相当する。

【0038】

一方、時間 $d t$ の間に、内部温度変化に必要な熱量 $d Q_2$ は式(2)となる。ここで、Cは比熱、ρは密度である。

【数2】

$$dQ_2 = \left(\frac{\partial T}{\partial t} dt \right) C \rho dx dy \quad \dots (2)$$

20

【0039】

なお、比熱(C)及び密度(ρ)は、例えばダイス2の組成により決定される定数である。

【0040】

式(1)と式(2)から、熱伝導による内部温度変化は式(3)となる。

【数3】

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{C \rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad \dots (3)$$

30

【0041】

ここで、 $a = \lambda / (C \rho)$ とすると、式(3)は式(4)となる。

【数4】

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad \dots (4)$$

40

【0042】

式(4)はフーリエの微分式である。この2重偏微分方程式を解くには、差分法が有効な手法である。

【0043】

図8に1次元の外部熱と固体の非定常熱伝導の図式解法を示す。ここで、非定常熱伝導の図式解法と差分法計算を説明する。

【0044】

まず、固体内部の熱伝導計算については、内部のある時間 t の温度計算点(T_1, T_2, T_3, \dots)を等間隔 Δx で分割する。図8に示すように、時間 t の温度 T_2 が時間 Δx を経過した後、 T_1, T_3 との熱伝導により、 T_{2A} となる。その温度変化の差分法の計

50

算は式(5)となる。

【数5】

$$\frac{T_{2A} - T_2}{\Delta t} = \frac{a \left(\frac{T_1 - T_2}{\Delta x} - \frac{T_2 - T_3}{\Delta x} \right)}{\Delta x} \quad \dots (5)$$

【0045】

従って、時間 $t + \Delta t$ の温度 T_{2A} と時間 t の温度 T_1, T_2, T_3 の関係は式(6)となる。ここで、 $M = (\Delta x)^2 / a \Delta t$ とする。

10

【数6】

$$T_{2A} = \frac{1}{M} [T_1 + (M - 2)T_2 + T_3] \quad \dots (6)$$

【0046】

次に、外部熱から固体への熱伝達計算を説明する。外部熱から固体への熱伝達計算を熱伝導計算に直して検討する。この時、熱伝導計算は熱伝達係数と熱伝導率から算出される相当距離を用いて、計算する。

20

【0047】

図8に示すように外部熱の温度を T_f 、外部熱と固体表面の熱伝達係数を α 、固体表面の初期温度を T_0 、固体の熱伝導率を λ とする。

【0048】

熱伝達により、外部熱から固体表面への熱流束 q の計算式は式(7)となる。

【数7】

$$q = \alpha dT = \alpha(T_f - T_0) \quad \dots (7)$$

【0049】

一方、熱伝導と考えた場合、外部熱から固体表面への熱流束 q の計算式は式(8)となる。

30

【数8】

$$q = \lambda \frac{dT}{dx} = \lambda \frac{T_f - T_0}{dx} \quad \dots (8)$$

【0050】

式(7)と式(8)から、式(9)の等式を書ける。

【数9】

$$\alpha(T_f - T_0) = \lambda \frac{T_f - T_0}{dx} \quad \dots (9)$$

40

【0051】

式(9)により、外部熱から固体表面への熱伝達を熱伝導に直した場合、外部熱と固体表面の相当距離 d_x は、熱伝達係数と熱伝導率から、式(10)で求められる。

【数10】

$$dx = \frac{\lambda}{\alpha} \quad \dots (10)$$

50

【 0 0 5 2 】

差分法を利用して外部からの熱伝達を計算するときに、図 8 に示すように、外部に固体表面から相当距離 $x / 2$ の位置に外部雰囲気温度点 T_f 、固体表面から $x / 2$ 位置に T_{-1} 点を設ける必要がある。 T_{-1} の値は、固体表面点 T_0 と外部点 T_f の x 座標の線形関係から計算できる。 T_{-1} の値が求めれば、 $t + t$ 時間の T_{1A} は式(6)のように、 t 時間の T_{-1} , T_1 , T_2 から計算できる。 T_{1A} が決まれば、 T_{1A} と T_{-1} の線形関係から、表面 T_{0A} (T_0 の $t + t$ 時間の温度) が計算できる。

【 0 0 5 3 】

このように、設定された時間ステップで、固体内部の各計算点の温度が計算される。また、各計算点の温度結果を次の時間ステップの伝熱計算の初期温度として定義し、温度変化を計算する。時間ステップの繰り返し計算により、外部熱と固体、固体内部の非定常伝熱解析を行う。繰り返し計算は表計算ソフトウェア・プログラムを利用した演算部 7 1 による演算等で実施可能である。

10

【 0 0 5 4 】

なお、ダイス 2 の外部の雰囲気温度 (T_f) は、第 1 温度情報取得部 6 1、第 2 温度情報取得部 6 2、第 3 温度情報取得部 6 3、第 4 温度情報取得部 6 4 又は第 5 温度情報取得部 6 5 によって取得される。初期のダイス 2 の表面の温度 (T_0) は、予め定められたダイス 2 の初期温度 (例えば、450 [K]) である。ダイス 2 は、押出加工の開始前に初期温度になるよう加熱される。

【 0 0 5 5 】

20

(4. 押出加工中のダイスの熱伝導計算)

(4.1 ダイスの熱伝導計算)

図 9 にフーリエ理論式と差分法によるダイス 2 の熱伝導計算のモデルを示す。押出加工中のダイス 2 の入熱と放熱は、ダイスチャンバー内のメタル加工熱からの入熱 F_0 、ダイス 2 のペアリングのメタル摩擦熱からの入熱 F_1 、ダイス逃げ部の空気との界面からの放熱 F_2 、ダイス後部の工具系との接触からの放熱 F_3 、ダイスタックとの接触からの放熱 F_4 と定義する。

【 0 0 5 6 】

以下、単に F_0 と記載した場合、入熱 F_0 をさす。また、単に F_1 と記載した場合、入熱 F_1 をさす。また、単に F_2 と記載した場合、放熱 F_2 をさす。また、単に F_3 と記載した場合、放熱 F_3 をさす。また、単に F_4 と記載した場合、放熱 F_4 をさす。

30

【 0 0 5 7 】

図 9 では、ダイスの仮想モデルとして、行列方向 (X 方向 \times Y 方向) に 5×5 の部分領域が設定された分割モデルを例示している。図 9 及び後述する図 2 0、図 2 1、図 2 2 及び図 2 3 等に示すダイスの仮想モデルは、例えば図 2 に示すダイス 2 の断面 2 V の仮想モデルである。また、各部分領域を区別する目的で、それぞれ異なる番号 (11 ~ 15, 21 ~ 25, 31 ~ 35, 41 ~ 45, 51 ~ 55) を付している。この番号の 1 0 の位が X 方向の位置を示し、1 の位が Y 方向の位置を示す。

【 0 0 5 8 】

図 9 及び後述する図 2 0、図 2 1、図 2 2 及び図 2 3 等に示す入熱 F_0 は、 Y 方向の一端に配置された部分領域に「11」、「12」、「13」、「14」、「15」が付されている 5 列分の部分領域に対する入熱として機能する。図 9 に示す放熱 F_3 は、 Y 方向の一端に配置された部分領域に「51」、「52」、「53」、「54」、「55」が付されている 5 列分の部分領域からの放熱として機能する。図 9 に示す入熱 F_1 は、 X 方向の一端に配置された部分領域に「11」が付されている 1 行分の部分領域に対する入熱として機能する。図 9 に示す放熱 F_2 は、 X 方向の一端に配置された部分領域に「21」、「31」、「41」、「51」が付された 1 行分の部分領域からの放熱として機能する。図 9 に示す放熱 F_4 は、 X 方向の他端に配置された部分領域に「15」、「25」、「35」、「45」、「55」が付されている 1 行分の部分領域からの放熱として機能する。

40

【 0 0 5 9 】

50

また、入熱 F 0 は、第 1 箇所におけるダイス 2 への入熱に相当する。また、入熱 F 1 は、第 2 箇所におけるダイス 2 への入熱に相当する。また、放熱 F 2 は、第 3 箇所におけるダイス 2 からの放熱に相当する。また、放熱 F 3 は、第 4 箇所におけるダイス 2 からの放熱に相当する。また、放熱 F 4 は、第 5 箇所におけるダイス 2 からの放熱に相当する。

【 0 0 6 0 】

例示する解析モデルは 5 行 × 5 列に分けられて、計 25 要素である。

【 0 0 6 1 】

(4 . 2 1 次元の左右方向の熱伝導計算)

まず、図 10 に示す 1 次元の場合、左からの F 1 の入熱と右への F 4 の放熱の計算を検討する。モデルの形状は正方形の 100 × 100 mm である。

10

【 0 0 6 2 】

ダイス 2 の初期温度は 450 、熱伝導率は 30 W / (m · °C) 、比熱は 460 J / (kg · °C) 、密度は 7800 kg / m³ である。モデルは平面モデルである。

【 0 0 6 3 】

F 1 と F 4 の境界条件である熱伝達係数と雰囲気温度および熱伝達を熱伝導に直した場合の相当距離を図 11 に示す。計算時間は 300 s である。差分法の計算時間間隔を 6 s とし、計算ステップは 50 である。

【 0 0 6 4 】

なお、300 s は、300 秒 (s : second) をさす。6 s は、6 秒 (s) をさす。

【 0 0 6 5 】

差分法の計算精度を検討するため、非定常伝熱の FEM 解析を行った。非定常伝熱の FEM 解析は汎用 FEM 解析ソフト Ansys 18.0 (登録商標) を用いた。図 12 に FEM 解析モデルを示す。要素は分割サイズが 5 mm で、計 400 個である。

20

【 0 0 6 6 】

図 13 に 300 s 経過後の FEM 解析結果の温度分布図を示す。左から右に向かって、温度が低くなる。図 14 に 300 s 経過後の差分法計算結果と FEM 解析結果の比較を示す。両者は一致していることが分かる。従って、1 次元の場合、左右からの 2 つの熱境界条件の伝熱解析において、差分法の計算精度が高いことが分かる。

【 0 0 6 7 】

[4 . 3 2 次元の左右、上下方向の熱伝導解析]

30

図 9 に示すようにダイス 2 の熱伝導は左右、上下方向である。ここで、同様に正方形の 100 × 100 mm のモデルを用いて、図 9 の 5 つの境界条件の伝熱解析を検討する。ペアリング部の長さは 20 mm とする。

【 0 0 6 8 】

図 9 の 5 つの境界条件である熱伝達係数と雰囲気温度、熱伝達を熱伝導に直した場合の相当距離を図 15 に示す。計算時間は 300 s である。差分法の計算時間間隔を 6 s とし、計算ステップは 50 である。同様に、差分法の計算精度を検討するため、非定常伝熱の FEM 解析を行った。

【 0 0 6 9 】

図 15 に示す雰囲気温度 (T_f) は、温度情報取得装置 60 により取得される温度である。境界 No. 「 F 0 」の雰囲気温度 (T_f = 520 []) は、第 1 温度情報取得部 61 により取得される。境界 No. 「 F 1 」の雰囲気温度 (T_f = 550 []) は、第 2 温度情報取得部 62 により取得される。境界 No. 「 F 2 」の雰囲気温度 (T_f = 200 []) は、第 3 温度情報取得部 63 により取得される。境界 No. 「 F 3 」の雰囲気温度 (T_f = 200 []) は、第 4 温度情報取得部 64 により取得される。境界 No. 「 F 4 」の雰囲気温度 (T_f = 100 []) は、第 5 温度情報取得部 65 により取得される。すなわち、実施形態における入熱 F 0 は、第 1 箇所で検知された温度により生じるダイス 2 に対する熱伝導である。また、入熱 F 1 は、第 2 箇所で検知された温度により生じるダイス 2 に対する熱伝導である。また、放熱 F 2 は、第 3 箇所で検知された温度により生じるダイス 2 に対する熱伝導である。また、放熱 F 3 は、第 4 箇所で検知された温度によ

40

50

り生じるダイス 2 に対する熱伝導である。また、放熱 F 4 は、第 5 箇所で検知された温度により生じるダイス 2 に対する熱伝導である。

【 0 0 7 0 】

図 16 に 300 s 経過後の FEM 解析結果の温度分布図を示す。図 17 に FEM 解析結果の各行要素の X 方向の温度分布を示す。チャンバー内のメタルの F 0 とベアリング部の F 1 からの入熱により、ベアリング付近の温度が高くなる。一方、ダイス 2 外周の F 4 、逃げ部の F 2 とバックダイ部の F 3 の放熱により、ダイス 2 の内部から外部へ向かって、ダイス 2 の上面から下面に向かって、温度が低下する。

【 0 0 7 1 】

図 18 に 300 s 経過後の差分法による各行要素の X 方向の温度分布の結果を示す。2 次元の差分法による各時間ステップの温度計算値は、X 方向と Y 方向の温度計算結果の重ね合わせの値である。

10

【 0 0 7 2 】

図 18 の差分法による各行要素の温度計算結果と図 17 の FEM 解析結果を比較すると、両者に差があることが分かる。図 19 に 1 行要素と 5 行要素の差分法計算結果と FEM 解析結果の比較を示す。図 19 から、1 行の右側要素の差分法計算結果は FEM 解析結果より約 36% 低い。一方、5 行の右側要素の差分法計算結果は FEM 解析結果より全体的に約 25% 高い。このように、2 次元の場合、単純に X, Y 方向の温度計算結果を重ね合わせただけでは、精度が良くないことが分かる。

【 0 0 7 3 】

前述の差分法計算結果と FEM 解析結果の不一致の原因は、計算の初期温度の設定によるものと考えられ、ここで、差分法の計算方法を再考案した。本実施形態の方法は、この再考案された差分法の計算方法による。

20

【 0 0 7 4 】

図 20 から図 23 に考案した左右、上下の伝熱の計算方法を示す。時間ステップのダイス温度を計算する際、まず、第 1 ステップは、図 20 に示すように 1 行目の要素 11 と要素 15 の間に境界条件 F 1 と F 4 による熱伝導を計算する。次に、第 2 ステップは、図 21 の 1 列目の要素 11 と要素 51 の間に境界条件 F 0 と F 3 による熱伝導を計算する。その際、要素 11 の初期温度値を第 1 ステップでの計算後の温度値とする。その後、図 22 の第 3 ステップの 2 行目要素の熱伝導を計算する際、要素 21 の初期温度値を第 2 ステップでの 1 列目計算後の温度値とする。その後、図 23 の第 4 ステップの 2 列目要素の熱伝導を計算する際、要素 12 と 22 の初期温度値をそれぞれ第 1 ステップと第 3 ステップでの計算後の温度値とする。同じように、3 行 ~ 5 行要素、3 列 ~ 5 列要素の熱伝導を計算する際は、上記の方法で、前の行と列で計算した値を初期温度と定義し、計算する。この計算方法とすれば、X, Y 方向の熱伝導の温度変化の影響が考慮され、計算精度の向上につながると考えられる。

30

【 0 0 7 5 】

なお、「1 行目の要素 11 と要素 15 の間に境界条件 F 1 と F 4 による熱伝導」とは、「ダイスのベアリングのメタル摩擦熱からの入熱 F 1 と、ダイススタックとの接触からの放熱 F 4 との影響によって、ダイスの仮想モデルに設定された 1 行目の部分領域（要素 11、要素 12、要素 13、要素 14、要素 15）に生じる熱伝導」をさす。また、「1 列目の要素 11 と要素 51 の間に境界条件 F 0 と F 3 による熱伝導」とは、「ダイスチャンバー内のメタル加工熱からの入熱 F 0 と、ダイス後部の工具系との接触からの放熱 F 3 との影響によって、ダイスの仮想モデルに設定された 1 列目の部分領域（要素 11、要素 21、要素 31、要素 41、要素 51）に生じる熱伝導」をさす。

40

【 0 0 7 6 】

例えば、図 15 に示す相当距離（ / [mm] ）を図 8 に示す「 / 」にあてはめる。図 15 に示す雰囲気温度（ T_f [] ）を図 8 に示す「 T_f 」にあてはめる。なお、熱伝達係数 [(W/m² ·)] は、相当距離（ / [mm] ）を導出するために用いられている。熱伝達係数 [(W/m² ·)] 及び相当距離（ / [mm] ）の少な

50

くとも一方は、押出装置 100 の具体的構成、押出装置 100 が置かれる環境等の条件に応じて導出される既定の値として与えられる。

【0077】

なお、ダイスの仮想モデルが正方形の $100 \times 100 \text{ mm}$ のモデルである場合、図 8 に示す \times は、 20 mm である。 $\times / 2$ は、 10 mm である。すなわち、 \times は、仮想モデルの X 方向（又は Y 方向）の寸法の $1 / 5$ である。

【0078】

具体例として、図 20において「11」、「12」、「13」、「14」、「15」が付されている部分領域が X 方向に並ぶ 1 行分の部分領域における初期温度及び算出される温度について説明する。境界 No. 「F1」の雰囲気温度 T_f が「550」であるため、図 8 の T_f に「550」が代入される。また、図 8 の T_0 の初期値は、上述の通り、ダイス 2 の初期温度（例えば、450 [] ）である。従って、ここでは T_0 に「450」が代入される。また、図 8 の「 / 」に境界 No. 「F1」の相当距離「 / 」の「15」が代入される。また、ダイスの仮想モデルが正方形の $100 \times 100 \text{ mm}$ のモデルであるので、「 $\times / 2$ 」に、「10」が代入される。これらの値が代入された T_f 、 T_0 、 $/$ 、 $\times / 2$ によって、演算部 71 は、図 15 の「F1」に対応する T_{-1} を算出する。この T_{-1} が、「11」、「12」、「13」、「14」、「15」が付されている部分領域が X 方向に並ぶ 1 行分の部分領域における、「11」側からの入熱 F_1 に相当する。

10

【0079】

図 8 の T_1 、 T_2 、 T_3 はそれぞれ、図 20において「11」、「12」、「13」が付されている部分領域の初期温度である。この初期温度は、ダイス 2 の初期温度である。この具体例では、 T_1 、 T_2 、 T_3 にはそれぞれ「450」が代入される。図示しないが、実際には、「14」、「15」が付されている部分領域の初期温度として、 T_4 、 T_5 が設定されている。この具体例では、 T_4 、 T_5 にも「450」が代入される。

20

【0080】

さらに、図 8 では図示しないが、「15」側からの放熱 F_4 に相当する T_7 が設定される。 T_7 は、上述の入熱 F_1 に相当する T_{-1} の算出と同様の仕組みで算出される。すなわち、境界 No. 「F4」の雰囲気温度 T_f が「100」であるため、図 8 の T_f に「100」が代入される。また、図 8 の T_0 の初期値は、上述の通り、ダイス 2 の初期温度（例えば、450 [] ）である。従って、ここでは T_0 に「450」が代入される。また、図 8 の「 / 」に境界 No. 「F4」の相当距離「 / 」の「120」が代入される。また、ダイスの仮想モデルが正方形の $100 \times 100 \text{ mm}$ のモデルであるので、「 $\times / 2$ 」に、「10」が代入される。これらの値が代入された T_f 、 T_0 、 $/$ 、 $\times / 2$ によって、演算部 71 は、図 15 の「F4」に対応する T_{-1} を算出する。この「F4」に対応する T_{-1} が、 T_7 として扱われる。また、 T_5 と T_7 との間の T_6 の初期値は、 T_0 の初期値と同一である。

30

【0081】

このようにして定められた T_{-1} 、 T_0 、 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 、 T_6 、 T_7 と、上述の式(6)に基づいて、 T_{-1A} 、 T_0A 、 T_1A 、 T_2A 、 T_3A 、 T_4A 、 T_5A 、 T_6A 及び T_7A が算出される。なお、実施形態では、図 15 の T_f は一定であるものとする。なお、式(6)で T_2A の算出に用いられる 3 つの値を (T_1 、 T_2 、 T_3) と表すことができるとする。この場合、 T_1A の算出に用いられる 3 つの値は、(T_{-1} 、 T_1 、 T_2) であり、 T_0 を含まない。 T_0A は、 T_1A と T_{-1} の線性関係に基づいて求められる。また、 T_{-1A} は、 T_{-1} の算出に用いられる T_f と T_0A とを結ぶ線分の傾き (T_f と T_0A との差) と、 $/$ と $\times / 2$ との比に基づいて求められる。 T_f は、「F1」の雰囲気温度 T_f である。

40

【0082】

以上、説明した最初の演算（最初の第 1 算出工程）で、演算部 71 は、図 20において「11」、「12」、「13」、「14」、「15」が付されている部分領域が X 方向に並ぶ 1 行分の部分領域に対応する T_{-1A} 、 T_0A 、 T_1A 、 T_2A 、 T_3A 、 T_4A 、 T

50

5 A, T 6 A 及び T 7 A を算出する。ここで、T 1 A が「11」の部分領域の t [s] 経過後の温度である。T 2 A が「12」の部分領域の t [s] 経過後の温度である。T 3 A が「13」の部分領域の t [s] 経過後の温度である。T 4 A が「14」の部分領域の t [s] 経過後の温度である。T 5 A が「15」の部分領域の t [s] 経過後の温度である。

【0083】

次に、演算部 7 1 は、図 2 1において「11」、「21」、「31」、「41」、「51」が付されている部分領域が Y 方向に並ぶ 1 列分の部分領域に対応する T - 1 A, T 0 A, T 1 A, T 2 A, T 3 A, T 4 A, T 5 A, T 6 A 及び T 7 A を算出するための処理を行う。ここで、「11」側からの入熱は、入熱 F 0 である。従って、上述の説明で代入された境界 No. 「F 1」の雰囲気温度 T f 及び境界 No. 「F 1」の相当距離 / を境界 No. 「F 0」の雰囲気温度 T f 及び境界 No. 「F 0」の相当距離 / に置換して値を代入し、これらの値が代入された T f, T 0, /, × / 2 によって、演算部 7 1 は、図 1 5 の「F 0」に対応する T - 1 を算出する。この T - 1 が、「11」、「21」、「31」、「41」、「51」が付されている部分領域が Y 方向に並ぶ 1 列分の部分領域における、「11」側からの入熱 F 0 に相当する。

【0084】

同様の仕組みで、「51」側からの放熱 F 3 に相当する T 6 は、上述の説明で代入された境界 No. 「F 4」の雰囲気温度 T f 及び境界 No. 「F 4」の相当距離 / を境界 No. 「F 3」の雰囲気温度 T f 及び境界 No. 「F 3」の相当距離 / に置換して値を代入し、これらの値が代入された T f, T 0, /, × / 2 によって、演算部 7 1 は、図 1 5 の「F 0」に対応する T - 1 を算出する。この「F 3」に対応する T - 1 が、「51」側からの放熱 F 3 に相当する T 7 として扱われる。

【0085】

このようにして定まった T - 1, T 7 と、図 2 1において「21」、「31」、「41」、「51」が付されている部分領域が Y 方向に並ぶ 1 列分の部分領域の初期値 T 2, T 3, T 4, T 5 と、「最初の第 1 算出工程」で算出された「11」の温度 T 1 A とに基づいて、演算部 7 1 は、「最初の第 1 算出工程」の後に行われる「最初の第 2 算出工程」を行う。具体的には、演算部 7 1 は、「最初の第 2 算出工程」において、T 1 を「最初の第 1 算出工程」で算出された「11」の温度 T 1 A で置換する。すなわち、演算部 7 1 は、図 8 に示す T - 1, T 7 に、入熱 F 0 に相当する T - 1、放熱 F 3 に相当する T 7 を代入する。また、演算部 7 1 は、T 0, T 2, T 3, T 4, T 5 に、ダイス 2 の初期温度を代入する。また、演算部 7 1 は、T 1 に、「最初の第 1 算出工程」で算出された「11」の温度 T 1 A を代入する。このようにして定められた T - 1, T 1, T 2, T 3, T 4, T 5, T 6 と、上述の式(6)に基づいて、T - 1 A, T 0 A, T 1 A, T 2 A, T 3 A, T 4 A, T 5 A, T 6 A 及び T 7 A が算出される。ここで、「11」の温度 T 1 A が再計算される。すなわち、第 1 算出工程と第 2 算出工程で同じ部分領域の値が算出される場合、後に行われた工程の値が採用される。

【0086】

次に、演算部 7 1 は、図 2 2において「21」、「22」、「23」、「24」、「25」が付されている部分領域が X 方向に並ぶ 1 行分の部分領域に対応する T - 1 A, T 0 A, T 1 A, T 2 A, T 3 A, T 4 A, T 5 A, T 6 A 及び T 7 A を算出するための処理を行う。ここで、「12」側からの放熱は、放熱 F 2 である。従って、上述の説明で代入された境界 No. 「F 1」の雰囲気温度 T f 及び境界 No. 「F 1」の相当距離 / を境界 No. 「F 2」の雰囲気温度 T f 及び境界 No. 「F 2」の相当距離 / に置換して値を代入し、これらの値が代入された T f, T 0, /, × / 2 によって、演算部 7 1 は、図 1 5 の「F 2」に対応する T - 1 を算出する。この T - 1 が、「21」、「22」、「23」、「24」、「25」が付されている部分領域が X 方向に並ぶ 1 行分の部分領域における、「21」側からの放熱 F 2 に相当する。なお、放熱 F 4 に相当する T 7 は、既に算出済みである最初の演算（最初の第 1 算出処理）における T 7 と同一である。

【0087】

10

20

30

40

50

このようにして定まった T_{-1} , T_7 と、図22において「22」、「23」、「24」、「25」が付されている部分領域がX方向に並ぶ1行分の部分領域の初期値 T_2 , T_3 , T_4 , T_5 と、「最初の第2算出工程」で算出された「21」の温度 T_{2A} に基づいて、演算部71は、「最初の第2算出工程」の後に行われる「2回目の第1算出工程」を行う。具体的には、演算部71は、「2回目の第1算出工程」において、 T_1 を「最初の第2算出工程」で算出された「21」の温度 T_{2A} で置換する。すなわち、演算部71は、図8に示す T_{-1} , T_7 に、放熱 F_2 に相当する T_{-1} 、放熱 F_4 に相当する T_7 を代入する。また、演算部71は、 T_0 , T_2 , T_3 , T_4 , T_5 に、ダイス2の初期温度を代入する。また、演算部71は、 T_1 に、「最初の第2算出工程」で算出された「21」の温度 T_{2A} を代入する。このようにして定められた T_{-1} , T_0 , T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_5 , T_6 , T_7 と、上述の式(6)に基づいて、 T_{-1A} , T_{0A} , T_{2A} , T_{3A} , T_{4A} , T_{5A} , T_{6A} 及び T_{7A} が算出される。
10

【0088】

次に、演算部71は、図23において「12」、「22」、「32」、「42」、「52」が付されている部分領域がY方向に並ぶ1列分の部分領域に対応する T_{-1A} , T_{1A} , T_{2A} , T_{3A} , T_{4A} , T_{5A} , T_{6A} 及び T_{0A} を算出するための処理を行う。ここで、「12」側からの入熱は、既に算出済みの入熱 F_0 である。また、「52」側からの放熱は、既に算出済みの放熱 F_3 である。

【0089】

このようにして定まった T_{-1} , T_6 と、図23において「32」、「42」、「52」が付されている部分領域がY方向に並ぶ1列分の部分領域の初期値 T_3 , T_4 , T_5 と、「最初の第1算出工程」で算出された「12」の温度 T_{2A} 及び「2回目の第1算出工程」で算出された「22」の温度 T_{2A} に基づいて、演算部71は、「2回目の第2算出工程」を行う。すなわち、演算部71は、図8に示す T_{-1} , T_7 に、入熱 F_3 に相当する T_{-1} 、放熱 F_3 に相当する T_6 を代入する。また、演算部71は、 T_3 , T_4 , T_5 に、ダイス2の初期温度を代入する。また、演算部71は、 T_0 , T_1 に、「最初の第1算出工程」で算出された「12」の温度 T_{2A} を代入する。また、演算部71は、 T_2 に、「2回目の第1算出工程」で算出された「22」の温度 T_{2A} を代入する。このようにして定められた T_{-1} , T_0 , T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_5 , T_6 , T_7 と、上述の式(6)に基づいて、 T_{-1A} , T_{0A} , T_{2A} , T_{3A} , T_{4A} , T_{5A} , T_{6A} 及び T_{7A} が算出される。
20
30

【0090】

以後、図示しないが、5番目の演算（3回目の第1算出工程）では、それ以前の第2算出工程で算出済みの「31」、「32」が付されている部分領域の温度 T_{3A} , T_{3A} を初期値 T_1 , T_2 に代入する。6番目の演算（3回目の第2算出工程）では、それ以前の第1算出工程で算出済みの「13」、「23」、「33」が付されている部分領域の温度 T_{3A} , T_{3A} , T_{3A} を初期値 T_1 , T_2 , T_3 に代入する。7番目の演算（4回目の第1算出工程）では、それ以前の第2算出工程で算出済みの「41」、「42」、「43」が付されている部分領域の温度 T_{4A} , T_{4A} , T_{4A} を初期値 T_1 , T_2 , T_3 に代入する。8番目の演算（4回目の第2算出工程）では、それ以前の第1算出工程で算出済みの「14」、「24」、「34」、「44」が付されている部分領域の温度 T_{4A} , T_{4A} , T_{4A} を初期値 T_1 , T_2 , T_3 , T_4 に代入する。9番目の演算（5回目の第1算出工程）では、それ以前の第2算出工程で算出済みの「51」、「52」、「53」、「54」が付されている部分領域の温度 T_{5A} , T_{5A} , T_{5A} , T_{5A} を初期値 T_1 , T_2 , T_3 , T_4 に代入する。10番目の演算（5回目の第2算出工程）では、それ以前の第1算出工程で算出済みの「15」、「25」、「35」、「45」、「55」が付されている部分領域の温度 T_{5A} , T_{5A} , T_{5A} , T_{5A} , T_{5A} を初期値 T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_5 に代入する。
40

【0091】

以上、特筆した「それ以前の算出工程の値を参照した置換」を除いた各部分領域の初期値

は、ダイス2の初期温度である。また、2回目以降の第1算出工程における一端側からの放熱(T_{-1})と他端側からの放熱(T_7)は、既に算出済みの放熱 F_2 と放熱 F_4 である。また、第2算出工程における一端側からの入熱(T_{-1})と他端側からの放熱(T_7)は、既に算出済みの入熱 F_1 と放熱 F_3 である。

【0092】

このように、演算部71は、ダイス2の内周側における第2箇所からの入熱量 F_1 及びダイス2の内周側における第3箇所への放熱量 F_2 と、ダイス2の外周側から第5箇所への放熱量 F_4 と、予め定められた各部分領域の初期温度に基づいて、1行分に含まれる各部分領域の温度を算出する第1算出工程と、ダイス2の一端側における第1箇所からの入熱量 F_0 と、ダイス2の他端側から第4箇所への放熱量 F_3 と、予め定められた各部分領域の初期温度に基づいて、1列分に含まれる各部分領域の温度を算出する第2算出工程と、を行う。また、第1算出工程と第2算出工程は、 t を同一の値として、それぞれ複数回行われる。また、第1算出工程と第2算出工程は交互に行われる。また、2回目以降の第1算出工程では、温度を算出する1行分の各部分領域の温度のうち、それ以前の第2算出工程で算出された部分領域の温度を当該部分領域の初期温度とする。また、2回目以降の第2算出工程では、温度を算出する1列分の各部分領域の温度のうち、それ以前の第1算出工程で算出された部分領域の温度を当該部分領域の初期温度とする。

10

【0093】

また、1回目の第1算出工程と1回目の第2算出工程のうち、後に行われる工程では、先に行われる工程で算出された部分領域の温度を当該部分領域の初期温度とする。なお、上述の説明では、第1算出工程が先に行われているが、第2算出工程を先に行ってもよい、その場合、最初(1回目の第2算出工程)で算出された「11」の部分領域の温度 T_{1A} を、2番目(1回目の第1算出工程)の「11」の部分領域の初期値 T_1 に代入する。

20

【0094】

実施形態では、上述のように、計算時間は300sである。また、差分法の計算時間間隔を6sとし、計算ステップは50である。具体的には、初期温度450[]であるタイミングを開始時点(0s)とする。このタイミングにおける全ての部分領域のダイス2の温度は、初期温度(450[])である。演算部71は、 $t=6$ を設定し、上述の式(6)に基づいて、上述のように第1算出工程と第2算出工程を繰り返して開始時点から6s経過後の各部分領域の温度を算出する。

30

【0095】

次に、演算部71は、 $t=6$ を設定して開始時点(0s)の初期温度に基づいて算出された各部分領域の温度を初期温度(T_1, T_2, \dots)とし、改めて $t=6$ を設定し、上述の式(6)に基づいて、上述のように第1算出工程と第2算出工程を繰り返す。これによって、開始時点から12s経過後の各部分領域の温度が算出される。以下、算出された温度を初期温度とした処理を計算ステップの回数だけ繰り返すことで、計算時間(300s)後の各部分領域の温度及びそれまでの6秒間隔での各部分領域の温度が算出される。

【0096】

このように、所定時間が経過することが想定された所定時間前後の異なる2タイミングの各々における温度分布算出工程において、後のタイミングにおける各部分領域の初期温度は、前のタイミングの温度分布算出工程で算出された各部分領域の温度である。

40

【0097】

図24に考案した差分法計算方法による各行要素のX方向の温度分布を示す。図24の差分法の温度計算結果と図17のFEM解析結果を比較すると、全体的に一致していることが分かる。

【0098】

図25に考案した差分法の1行要素と5行要素の計算結果とFEM解析結果の比較を示す。両者は一致する。このように、2次元の熱伝導解析においても、2方向からの熱伝導の影響が考慮されることによって、計算精度が高い差分法計算方法が得られた。

【0099】

50

なお、図24及び図25では、実施形態によるダイス2の温度計算方法によって導出された300s後のダイス2の温度分布と、FEM解析によって導出された300s後のダイス2の温度分布とを比較している。図24及び図25では、300s後の各部分領域の温度を、上述の第1算出工程及び第2算出工程で算出されるT0A, T1A, T2A, T3A, T4A, T5A, T6Aで表している。

【0100】

また、図24における「1行Y=90」は、図9等において「11」、「12」、「13」、「14」、「15」が付されている部分領域がX方向に並ぶ1行分の部分領域に対応する。また、図24における「2行Y=70」は、図9等において「21」、「22」、「23」、「24」、「25」が付されている部分領域がX方向に並ぶ1行分の部分領域に対応する。また、図24における「3行Y=50」は、図9等において「31」、「32」、「33」、「34」、「35」が付されている部分領域がX方向に並ぶ1行分の部分領域に対応する。また、図24における「4行Y=30」は、図9等において「41」、「42」、「43」、「44」、「45」が付されている部分領域がX方向に並ぶ1行分の部分領域に対応する。また、図24における「5行Y=10」は、図9等において「51」、「52」、「53」、「54」、「55」が付されている部分領域がX方向に並ぶ1行分の部分領域に対応する。

【0101】

また、図25における「1行要素」は、図9等において「11」、「12」、「13」、「14」、「15」が付されている部分領域がX方向に並ぶ1行分の部分領域に対応する。また、図25における「5行要素」は、図9等において「51」、「52」、「53」、「54」、「55」が付されている部分領域がX方向に並ぶ1行分の部分領域に対応する。また、図25における「差分法改」は、実施形態によるダイス2の温度計算方法であることを示す。また、図25における「FEM」は、FEM解析による演算結果であることを示す。

【0102】

図26に差分法計算による押出加工中のダイス2のベアリング付近要素E11と外周側要素E15の経過時間と温度履歴の関係を示す。今回考案した計算方法を用いることにより、押出先端におけるダイス2の内部と外部の温度差を定量的に検討できる。

【0103】

なお、図26におけるE11は、図9等において「11」が付されている部分領域に対応する。また、図26におけるE15は、図9等において「15」が付されている部分領域に対応する。図26は、差分法の計算時間間隔を6sとし、計算ステップを50とした0s～300sまでの各タイミングの部分領域の温度を結ぶ線を描くグラフである。

【0104】

[作用効果]

以上、本実施形態によれば、FEM解析により近似する各部分領域の温度を算出することができる。すなわち、FEM解析と同等の高精度な演算を、FEM解析を実施可能な環境によらず得ることができる。このように、実施形態によれば、より容易にダイス2の温度分布をシミュレートすることができ、しかも、FEM解析と同等の高精度な演算結果を得られる。

【0105】

[その他]

なお、金属はアルミニウムに限られない。また、合金はアルミニウムを含む合金に限られない。金属又は合金は、ダイス2を用いた押出加工を適用可能な金属又は合金であればよい。

【0106】

上述した「モデルの形状(正方形、100mm×100mm)」、「ベアリング部の長さ(20mm)」、「計算時間(300s)」、「差分法の計算時間間隔(6s)」、「計算ステップ(50)」はあくまで一例であり、これに限られるものではなく、適宜変更可能

10

20

30

40

50

である。また、解析モデルは 25 要素に限られない。解析モデルは、行列方向に $h \times v$ であればよい。 h 及び v は、2 以上の自然数である。

【0107】

上述の実施形態における仮想モデルは、ダイス 2 の断面の平面モデルであるが、ダイス 2 の軸対称モデルであってもよい。

【0108】

以上、本願発明の種々の有用な実施例を示し、かつ、説明を施した。本願発明は、上述した種々の実施例や変形例に限定されること無く、この発明の要旨や添付する特許請求の範囲に記載された内容を逸脱しない範囲で種々変形可能であることは言うまでも無い。

【符号の説明】

10

【0109】

- 1 温度計算システム
- 2 ダイス
- 2 V 断面
- 3 ビレット
- 6 0 温度情報取得装置
- 6 1 第 1 温度情報取得部
- 6 2 第 2 温度情報取得部
- 6 3 第 3 温度情報取得部
- 6 4 第 4 温度情報取得部
- 6 5 第 5 温度情報取得部
- 7 0 情報処理装置
- 7 1 演算部

20

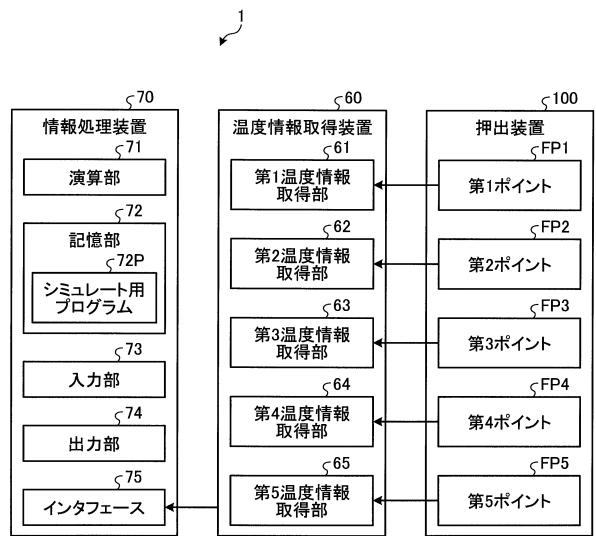
30

40

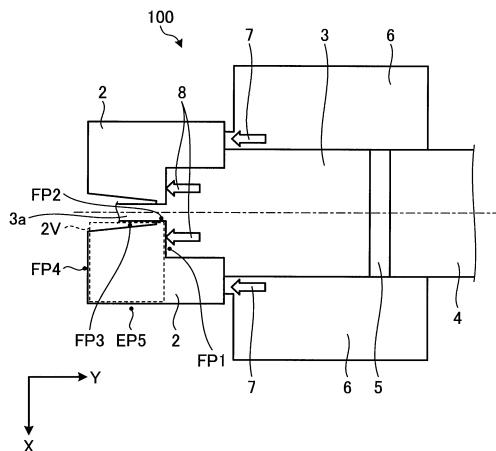
50

【図面】

【図 1】



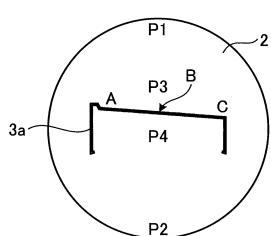
【図 2】



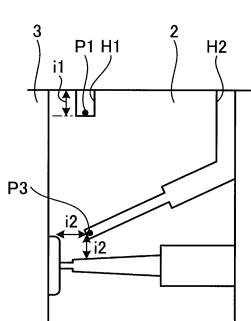
10

20

【図 3】



【図 4】

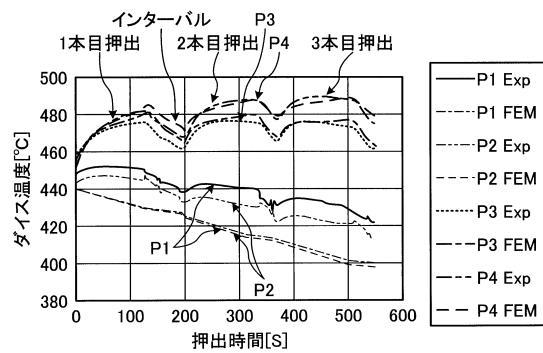


30

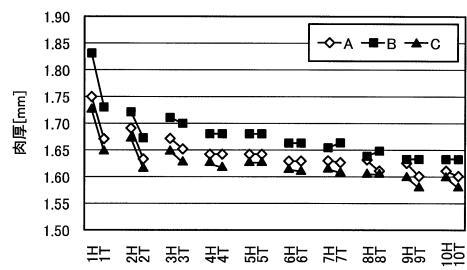
40

50

【図 5】

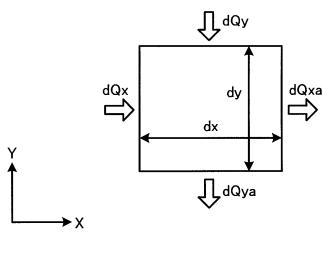


【図 6】

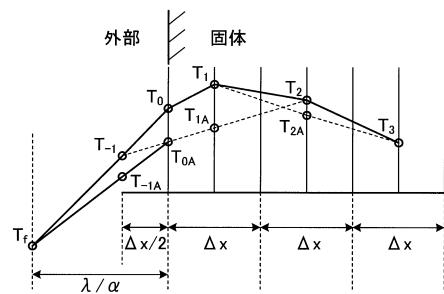


10

【図 7】



【図 8】



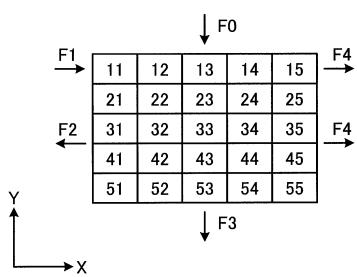
20

30

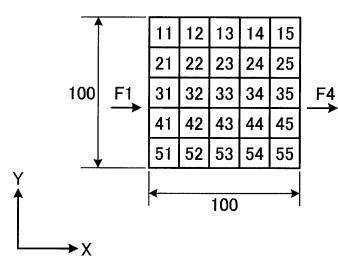
40

50

【図 9】



【図 10】

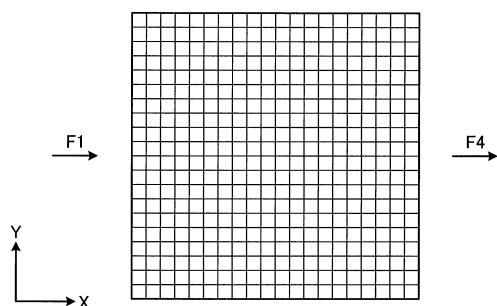


10

【図 11】

境界No.	熱伝達係数 α [W/(m ² ·°C)]	雰囲気温度 T_i [°C]	相当距離 λ / α [mm]
F1	2000	550	15
F4	250	100	120

【図 12】



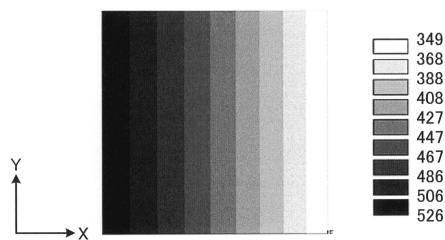
20

30

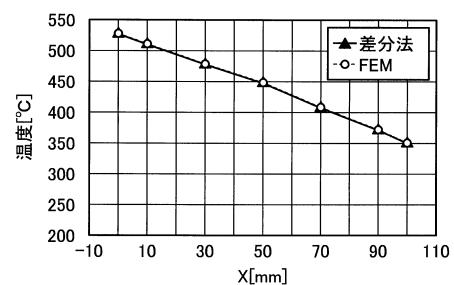
40

50

【図 1 3】



【図 1 4】

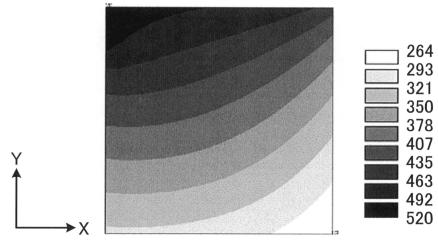


10

【図 1 5】

境界No.	熱伝達係数 α [W/(m ² ·°C)]	雰囲気温度 T_i [°C]	相当距離 λ / α [mm]
F0	2000	520	15
F1	2000	550	15
F2	35	200	857
F3	500	200	60
F4	250	100	120

【図 1 6】



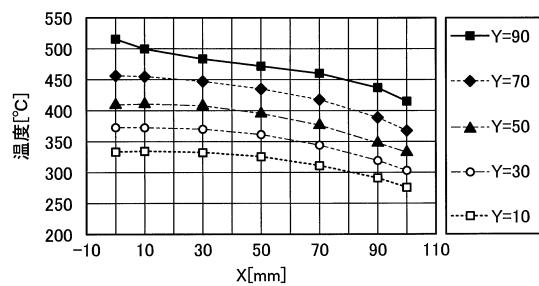
20

30

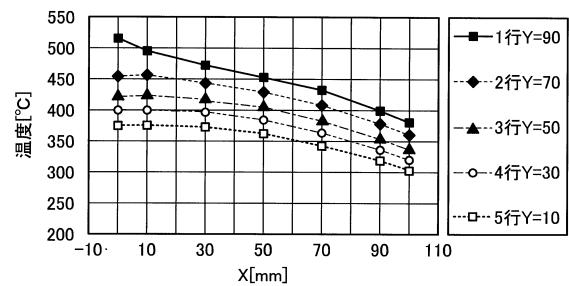
40

50

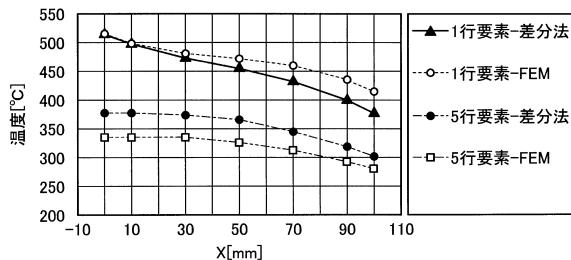
【図 1 7】



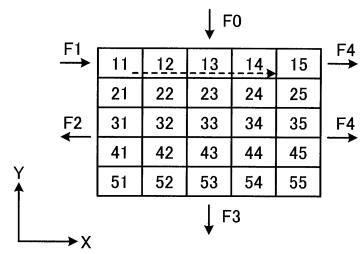
【図 1 8】



【図 1 9】



【図 2 0】



10

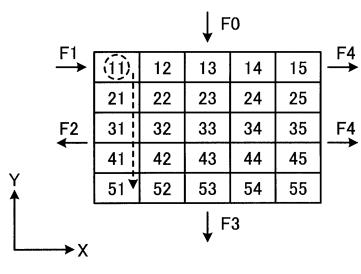
20

30

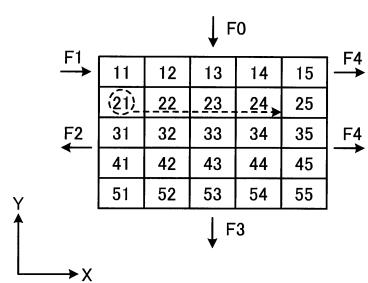
40

50

【図 2 1】

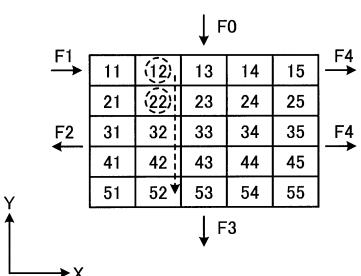


【図 2 2】

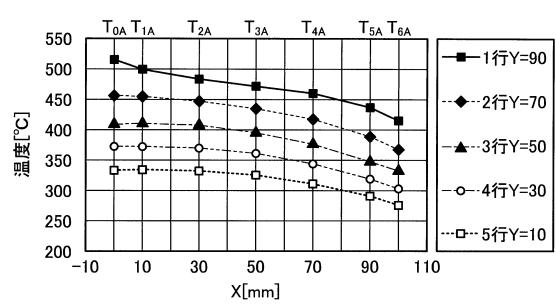


10

【図 2 3】



【図 2 4】



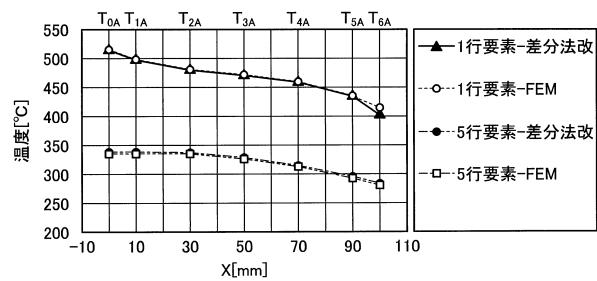
20

30

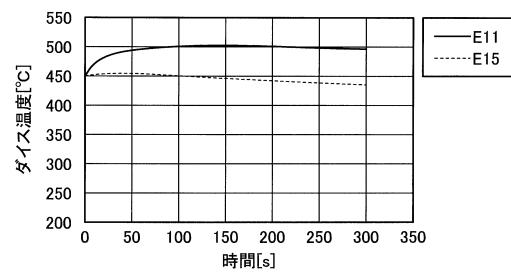
40

50

【図 2 5】



【図 2 6】



10

20

30

40

50

フロントページの続き

- (56)参考文献 特開平4 - 102179 (JP, A)
 特開2008 - 260044 (JP, A)
 特開2003 - 130829 (JP, A)
 特開2002 - 18515 (JP, A)
- (58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)
 G01K 1 / 00 - 19 / 00
 B21C 23 / 00 - 35 / 06
 G01N 25 / 00 - 25 / 72