

© 1985 ISIJ

## 砂型鋳物用凝固シミュレーションの実用化技術 技術報告

安齋浩一\*・新山英輔\*<sup>2</sup>・内田敏夫\*・細金晶子\*<sup>3</sup>

## Some Practical Technology for Implementation of Solidification Simulation as Applied to Sand Mold Castings

Kouichi ANZAI, Eisuke NIYAMA, Toshio UCHIDA and Akiko HOSOGANE

## Synopsis:

Although it has become clear that a computer simulation is an efficient method to predict a generation of defects in castings, there has not been sufficiently economical hardware and software which can be applied to 3-dimensional model in a practical sense.

In order to cope with this difficulty, we have developed solidification simulation systems; a large computer system and a personal computer system.

The large computer system can deal with 2- and 3-dimensional models and it only takes about half an hour to one hour to input the data for a 3-dimensional model by special data processing.

The personal computer system is applicable to 2-dimensional models.

It has a pre-processor enabling easy data input and a post-processor with which one can evaluate the results by color graphics.

In this paper, some details of these systems and results of their applications are described.

## 1. 緒 言

鋳造品の主な欠陥である引け巣、偏析などの発生は、凝固時の伝熱現象に大きく支配されていることが良く知られている<sup>1)</sup>。特に砂型鋳物における熱の流れは、鋳物及び鋳型の形状や材質、鋳込み時の温度分布といった製品ごとに異なる多くの因子に依存しており、その制御は信頼性の高い製品を製造する上で重要で、しかもむずかしい問題である。

最近では、鋳物の凝固現象をコンピュータシミュレーションすることによつて欠陥の発生を定量的に評価し、鋳造方案作成の補助的手段としている<sup>2)~4)</sup>。凝固のシミュレーションモデルや欠陥の予測方法などについては、すでに多くの報告がなされており<sup>5)~10)</sup>、引け巣欠陥に対してはかなりの精度で発生予測ができることがわかっている。これらの手法は、種々の鋳造法に適用可能でありそれぞれの場合に応じた初期条件、境界条件を与えて数値解析すれば良い。

しかし、凝固解析の実用化を実際に進めてみると、計算コストや計算作業時間が予測精度とからめた問題として浮び上がってくる。一般の機械部品や冶金プロセスの設計のためのシミュレーションに比べると、鋳物のシミュレーションは許される費用や時間が著しく少なく、同時に要求される予測精度はどちらかというところ粗くてよい、という特徴がある。

こうした特殊な状況に対処するために、解析モデルの決め方、入出力データの処理法、引け巣予測パラメータの評価法、等々の周辺技術の整備が必要になる。従来、この種の具体的な利用技術の議論が少ないので、著者が用いている凝固解析の原理とその周辺技術について、実用上の経験を含めて報告する。

こうした特殊な状況に対処するために、解析モデルの決め方、入出力データの処理法、引け巣予測パラメータの評価法、等々の周辺技術の整備が必要になる。従来、この種の具体的な利用技術の議論が少ないので、著者が用いている凝固解析の原理とその周辺技術について、実用上の経験を含めて報告する。

## 2. 計算の基礎式

凝固現象の数値解析モデルは、凝固潜熱の取扱方法、解析原理、欠陥の発生予測方法等の違いによつていろいろな組み合わせが考えられるが、ここでは、等価比熱法により凝固潜熱の発生を考慮した内節点差分法による熱伝導解析によつて、凝固時の温度こう配などを評価して引け巣欠陥を予測するモデルを採用する<sup>12)</sup>。このモデルは、入力データの作成が容易で演算速度が短いことを特徴とする。

内節点差分法は、離散化した要素間において微小時間の間の熱の収支を考えて、離散化された時刻における各要素の温度を算出する方法である。直交要素に対する基

昭和 59 年 5 月日本鋳物協会第 105 回全国講演大会にて発表

昭和 59 年 10 月 22 日受付 (Received Oct. 22, 1984)

\* (株)日立製作所日立研究所 (Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd., 832-2 Horiguchi Katsuta Ibaraki pref. 312)

\*<sup>2</sup> (株)日立製作所日立研究所 工博 (Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd.)

\*<sup>3</sup> (株)勝田産業 (Katsuta Sangyo Co, Ltd.)

礎式は、次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} &\rho_i C_i V_i \frac{T(t+\Delta t, i) - T(t, i)}{\Delta t} \\ &= \sum_{j=1}^N W_{ij} [T(t, j) - T(t, i)] \\ &W_{ij} = \frac{S_{ji}}{\frac{1}{h_{ij}} + \frac{l_{ij}}{k_i} + \frac{l_{ji}}{k_j}} \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

ここに、 $T(t, i)$  : 時刻  $t$  の要素  $i$  の温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\Delta t$  : 微少時間増分 (s)

$N$  : 隣接要素数

$\rho_i$  : 要素  $i$  の密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$C_i$  : 要素  $i$  の比熱 ( $\text{cal}/(\text{g}\cdot\text{deg})$ )

$k_i$  : 要素  $i$  の熱伝導度 ( $\text{cal}/(\text{s}\cdot\text{cm}\cdot\text{deg})$ )

$V_i$  : 要素  $i$  の体積 ( $\text{cm}^3$ )

$S_{ij}$  : 要素  $i$  と要素  $j$  の接触面積 ( $\text{cm}^2$ )

$l_{ij}$  : 要素  $i$  の節点から接触面までの垂直距離 (cm)

$h_{ij}$  : 接触面における熱伝達係数 ( $\text{cal}/(\text{s}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{deg})$ )

この式は、二次元、三次元に共通であるが実際のプログラムは二次元用と三次元用において作成し使用している。

等価比熱法は、(1)式の比熱を凝固潜熱の発生分を考慮した次式のような等価な比熱  $C_{mi}$  でおきかえて解析する方法である。

$$C_{mi} = C_i - L \frac{dm}{dT} \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 $m$  : 固相率

$L$  : 単位質量あたりの潜熱 ( $\text{cal}/\text{g}$ )

$m$  として線形分布を仮定すれば、 $C_{mi}$  は次式のように簡単に表せる。

$$C_{mi} = \begin{cases} C_i & (T > T_{liq}, T < T_{sol}) \\ C_i + \frac{L}{T_{liq} - T_{sol}} & (T_{liq} \geq T \geq T_{sol}) \end{cases} \dots \dots (3)$$

ここに、 $T_{liq}$  は液相線温度、 $T_{sol}$  は固相線温度である。

(1)式を鑄込みから凝固終了まですべての要素に対し適用することによって凝固過程をシミュレーションする。

引け巣欠陥予測パラメータである温度こう配  $G$  は、各要素が臨界温度  $T_c$  に達した時に周囲の要素との温度差を節点間の距離で除し、その最大値をとることによって求める。 $G/\sqrt{R}$  は、さらにそれらをその時の冷却速度  $R(\text{deg}/\text{min})$  の  $1/2$  乗で割つたものである。 $G$  または

$G/\sqrt{R}$  がある臨界値  $G_c(G/\sqrt{R})_c$  以下である要素に引け巣欠陥が発生するとするのが、温度こう配法、あるいは  $G/\sqrt{R}$  法である。

これらの臨界値は、実験的に求めなければならないが砂型鑄鋼品に対しては次の値を用いることによつて精度良く引け巣欠陥の発生予測ができることが新山ら<sup>10)</sup>により明らかにされている。

$$\left. \begin{aligned} &T_c = \text{固相線温度} \\ &(G/\sqrt{R})_c \approx 1.0 \end{aligned} \right\} \dots (4)$$

また、 $G_c$  は鑄物の大きさによつて異なり、大物ほど  $G_c$  が小さい値となることが知られている<sup>10)</sup>。

### 3. モデル形状

一般に、鑄物の形状は複雑なものが多いが、三次元形状のモデルによる全体解析は計算コストが高くなる。しかし、凝固シミュレーションの目的を考えると砂型鑄物の場合、特定の押湯や冷し金の効果を評価したい場合が大部分であり、この時は部分モデルを考えて解析することが可能で、これにより計算が簡略化できる。

部分モデルは、押湯、冷し金の条件などから鑄物内部に断熱面を仮定し作成する。断熱面の設定には任意性があるが、主に熱的な対称面を推定して決める。重要な解析対象部から十分遠い位置であれば、必ずしも実際に断熱状況にならない部分でも断熱面を設定してさしつかえない。この場合「十分遠い」とは、鑄鋼では肉厚の3倍程度と考えれば良い。

さらに、Fig. 1 のような大部分が二次元的形状(板)を有するモデルの場合は、熱量補正法による二次元解析(擬三次元解析)が適用できる。この方法は、次式で示される鑄物の凝固時間に関するいわゆる CHVORINOV 則を基礎としている。

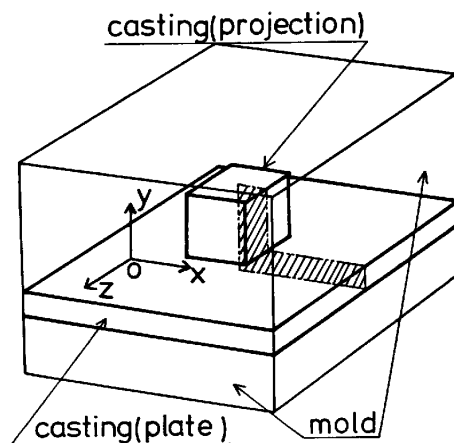


Fig. 1. Schematic illustration of simulation model.

$$t_f = K \left( H \cdot \frac{V}{A} \right)^2 \dots\dots\dots (5)$$

- ここで、 $t_f$  : 鋳物の凝固時間  
 $K$  : 定数  
 $H$  : 鋳物が凝固完了までに放出する単位体積当たりの熱量  
 $V$  : 鋳物の体積  
 $A$  : 鋳型に接する鋳物の表面積

Fig. 1 のハッチングで示した断面に対し(5)式を適用すると、三次元的形状を有している突起部に対する(5)式中の  $(V/A)$  は、二次元近似を行うことで過大に評価される。これは、突起部の  $A$  の内、Fig. 1 中の  $z$  軸に垂直な面が二次元近似によつて省略されてしまうことによる。これと同じようなことが、Fig. 1 のハッチング部に対し二次元凝固解析を行うと起こる。そこで、

$$H_m \left( \frac{V}{A} \right)_2 = H \left( \frac{V}{A} \right)_3 \dots\dots\dots (6)$$

- ここに、 $H_m$  : 補正した熱量  
 $\left( \frac{V}{A} \right)_2$  : 二次元モデルの  $(V/A)$   
 $\left( \frac{V}{A} \right)_3$  : 三次元モデルの  $(V/A)$

となるような  $H_m$  を用いると(5)式による凝固時間の評価が二次元モデルでも等しくなることから、この例では突起部の熱的物性値を補正してやり(6)式が成立するように凝固解析を行うと二次元モデルでも実際に近い凝固時間となることが期待できる。この方法を擬三次元解析と呼んでいる。

Fig. 2 に三次元モデル、擬三次元モデル、二次元モデルによる解析結果を示す。二次元モデルと三次元モデルによる結果には大きな差異がみられるが、擬三次元モデルでは熱量を補正した突起部ののぞき、三次元モデル

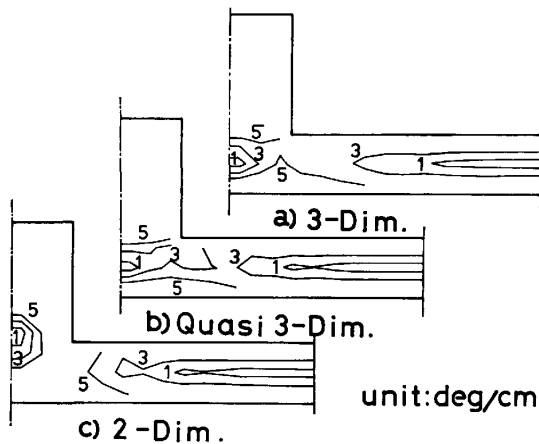


Fig. 2. Results of temperature gradient distribution in three types of simulation models.

と結果が良く一致しているのがわかる。このことは、熱量補正法を解析の目的とする対象そのものでなくその付属部に適用する限り、かなり精度が良いことを示唆している。

この方法は、製品部がほぼ二次元的形状(板、軸対称)を有し押湯が部分的につくような場合に有効であり、押湯が製品に及ぼす効果を正當に評価できる。実際、当社において日常的に行つている凝固シミュレーションの約7割は、部分モデルにこの擬三次元モデルを適用したものであり、製品検査の結果との比較からその有効性が実証されている。

#### 4. 凝固シミュレーションシステム

##### 4.1 システム化

実用規模の凝固シミュレーションを実行しようとする時、計算に必要なデータの量や計算の結果出力されるデータの量は膨大なものとなるため、データの処理には特別な工夫が必要である。特に、鋳物や鋳型の形状に関するデータは、入出力データの多くの部分を占めるため、その処理方法によつて凝固解析の実用化の成否が大きく左右される。

そこで、現在利用できるハードウェアを用いて効率良く凝固解析ができるようなデータ処理方法を検討し、大型計算機システム及びパーソナルコンピュータシステムとしてまとめた。

##### 4.2 大型計算機を用いた凝固シミュレーションシステム

大型計算機は、計算速度が速くメモリーも多く取れるため、大規模な凝固計算を実行できる。また、多数の汎用ソフトや大型の周辺機器(大容量ディスク、プロッタ、グラフィック端末機など)が使えるという利点がある。

そこで、既存のハードや汎用ソフトが有効に利用できるようなデータ処理方法を採用した二次元凝固シミュレーションプログラム「CAST 2」及び三次元凝固シミュレーションプログラム「CAST 3」を中核とした、大型計算機用凝固シミュレーションシステムを開発した。ハード構成を Fig. 3 に示す。図中 MODEM は、データ転送制御装置を示す。

内節点法によつて凝固解析を実行するための入力データは、(1)式からわかるように各分割要素の体積、表面積といった幾何学的データと要素間の熱抵抗や要素の密度、比熱、熱伝導度といった物性データより成つている。これらのデータをいかに速く、正確に入力できるかが実用化上の大きなポイントとなる。

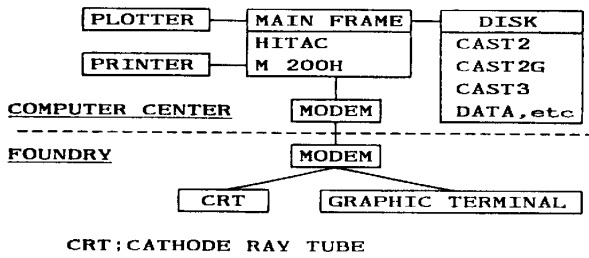


Fig. 3. Large computer system for solidification simulation.

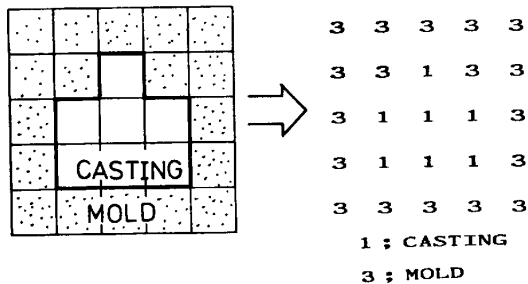


Fig. 4. Distribution of material number.

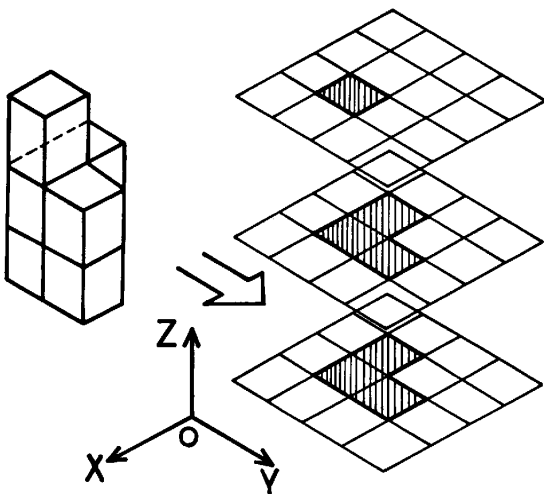


Fig. 5. Layer by layer data input for 3-dim. solidification simulation.

そこで、CAST 2, CAST 3 では直交分割要素を採用することによつて、各分割線の座標位置だけの入力でも幾何学的データを作成できるようにした。また、各要素の物性データに対しては、Fig. 4 のように各直交要素に材料番号をマトリクス状に入力する方法を採用した。すなわち、別にこれらの材料番号に対応した物性値を入力しておき、計算実行時には常にこれらの番号を調べて必要な物性値を(1)式に代入するようにした。

このようなマトリクスデータの輸入は、表示画面上でデータをまとめてコピーしたり移動したりできる汎用ソフト (DESP (日立) など) を利用することによつて著しく容易となる。特に三次元モデルでは、Fig. 5 のよ

Table 1. Characteristics of solidification simulation program "CAST2" and "CAST3".

|                    | CAST 2   | CAST 3   |
|--------------------|--|----------|
| Dimension of model | 2, 2.5 (Quesi-2Dim.)   | 3        |
| Max. mesh size     | 45×45  | 33×33×33 |
| Program size       | 600 KB   | 2 MB     |
| Simulation method  | 1) Innor nodal point method<br>2) Equivalent heat capacity method<br>3) Temp. gradient and $G/\sqrt{R}$ method |          |

KB=1 000 Byte, MB=1 000 KB

うに三次元データを二次元データの積み重なりとみて、マトリクスデータを繰り返し入力しデータを作成するようにしたので効果が大きい。

各要素間の熱抵抗は、空気-鋳型、鋳物-冷し金といった異なる材料間の境界面に対し与えれば十分であることから、入力データとしては熱抵抗値(熱伝達係数の逆数)とそれが働く要素の材料番号を与えれば良いようにした。

以上のようなデータ処理方法の採用により、当社鋳造工場の製品に対して二次元モデルで数 10 分、三次元モデルで 30 min から 1 h でデータの入力が可能であることがわかった。

入力データのチェックをチェック専用プログラムで行った後、バッチ処理にて解析を実行する。計算に必要な時間は、通常二次元モデルで数分、三次元モデルで数 10 分である。CAST 2, CAST 3 の特徴を Table 1 に示す。

計算結果は、リスト及びプロッタで出力するようにした。プロッタは、凝固開始及び終了の等時線と各欠陥予測パラメータの等高線を出力させ、欠陥発生の有無を視覚的に判定できるようにした。三次元モデルでは、任意の直交断面を指定することによつて二次元データに変換してプロッタ出力する。

二次元モデル用としては、さらに画像処理用マイコン内蔵のグラフィック端末機を用いた対話形凝固シミュレーションシステム「CAST 2G」を開発した。CAST 2, CAST 3 では前もつて要素分割を行つておき、それらに基づいて CRT によつて文字及び数字で図形データなどを入力したが、CAST 2G ではタブレットを用いて点の位置として図形を定義できるため、図形を用いてのデータ処理が可能となり要素分割から結果の出力までをディスプレイ上に表示される入力ガイダンスを通じて対話的に実行できる。また物性データは、データベース化することによつて表を通じ材質名を指定するだけで入力

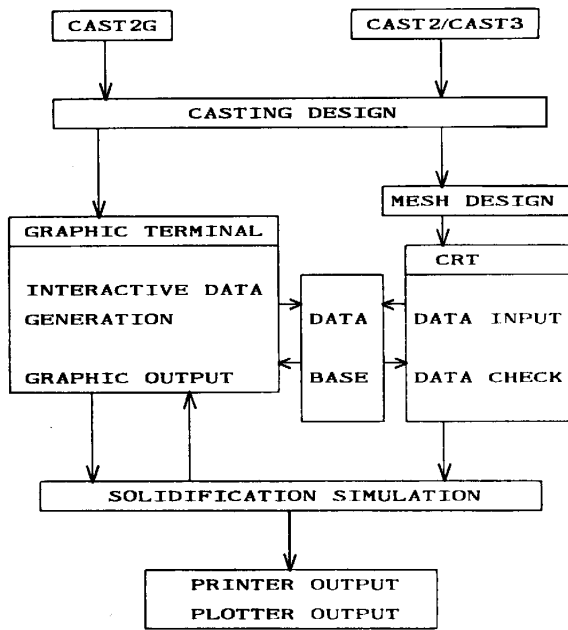


Fig. 6. Flow diagram of solidification simulation by large computer system.

できるようにした。

CAST 2, CAST 3 及び CAST 2 G のデータ入出力の流れを Fig. 6 に示す。

#### 4.3 パーソナルコンピュータを用いた凝固シミュレーションシステム

パーソナルコンピュータと呼ばれる小型のコンピュータは、計算速度やメモリー量の点では大型計算機にまだ遠く及ばないが、操作が簡単なことや価格的にも専用機として利用できるなどの利点がある。中でも 16 ビットタイプのパーソナルコンピュータは、二次元凝固シミュレーションを実用的に行えるだけの計算速度、メモリー量を持つまで性能が向上してきている。そこで、鋳造設計者が現場で手軽に扱えるようなパーソナルコンピュータを用いた二次元凝固シミュレーションシステムを開発しその性能を評価した。

計算機本体は、カラー CRT、ミニフロッピドライブ 2 台を内蔵している。特に操作性を考え、漢字が扱えるタイプを選んだ。ミニフロッピドライブは、1 台をプログラム読み込み専用とし他方をデータ入出力専用とした。ソフトウェアは、プリプロセッサ「CASTIN」、メインプログラム「CASTRUN」、ポストプロセッサ「CASTOUT」の三つの部分より成りそれぞれ独立に実行されるが、それらはデータベースを通して Fig. 7 のようにつながっている。

CASTIN は、データの入力を容易にするためのプログラムで BASIC インタプリタで動作する。CASTIN におけるデータの流れを Fig. 8 に示す。新規にデータ

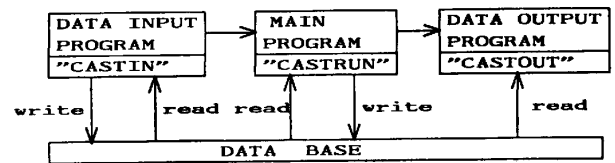


Fig. 7. Flow diagram of personal computer solidification simulation system.

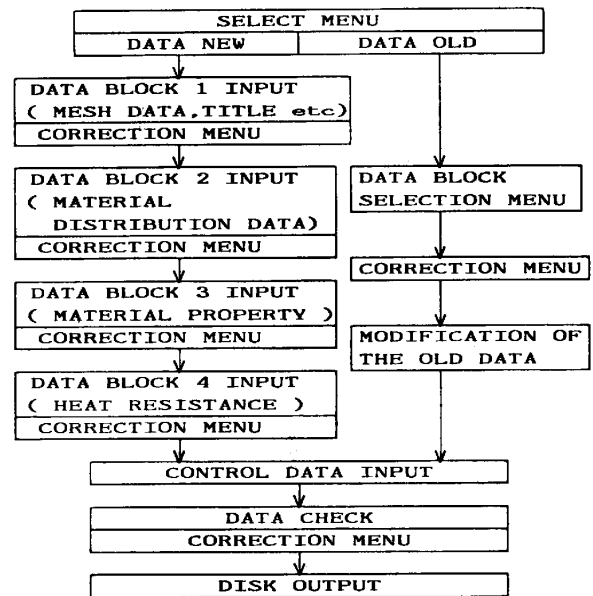


Fig. 8. Flow diagram of "CASTIN".

を作成する場合と、データベースに登録されているデータを一部訂正してデータを作成する場合とでデータ処理は異なるが、基本的にはたえず画面に表示される入力ガイダンスにより指示されたデータを入力してゆくことによつて、自然に入力データが作成できるよう工夫した。また入力データの修正は、訂正メニューを通じて容易に行えるようにした。入力データの作成は、要素分割数にもよるが通常数 10 分で完了する。

CASTRUN は、基本的には大型計算機システムにおける CAST 2 と同じであり、BASIC コンパイラで動作する。最大要素数は、 $37 \times 37$  (256 KB) である。鋳鋼品を  $20 \times 30$  メッシュで要素分割し凝固計算した時の計算時間を大型計算機の場合と比較して Table 2 に示す。これからわかるように、BASIC コンパイラの利用によつて実用レベルでの凝固解析が可能になった。

CASTIN 及び CASTRUN では、データの入力や計算の実行を途中で中断し、また任意の時に再開できる機能を持たせて、大規模計算の場合でも時間を有効に使つて凝固解析ができるようにした。

CASTOUT は、解析結果をプリンタ出力したり CRT にカラーグラフィック出力するためのプログラムで BASIC インタプリタで動作する。CASTOUT を実

Table 2. Comparison of typical calculation time between solidification simulation systems.

| Hardware      | Software          | CPU time    |
|---------------|-------------------|-------------|
| Hitachi B-16  | Basic interpreter | 27 h 25 min |
| Hitachi B-16  | Basic compiler    | 1 h 35 min  |
| HITAC M 200 H | Fortran compiler  | 20.4 s      |

- 1 ----- 計算結果の印刷 (プリンタ)
- 番 2 ----- 分割の図
- \* 号 3 ----- 凝固開始時間の図
- 出 4 ----- \* (任意の時間)
- 力 5 ----- 凝固終了時間の図
- の 6 ----- \* (任意の時間)
- 種 7 ----- 温度勾配の図
- 類 8 ----- \* (任意の値)
- \* 下 9 ----- G / ROOT · R の図
- さ 10 ----- \* (任意の値)
- い 11 ----- 凝固アニメーション
- 12 ----- 終了

Fig. 9. Selection menu of "CASTOUT".

行すると、まず Fig. 9 のようなメニューを表示するようにした。1 番がプリンタ出力、2 番から 11 番までがグラフィック出力である。グラフィック出力では、3, 5, 7, 9 番のように全体の最大、最小の間を自動的に 6 等分し要素ごとに色分け出力するものと、4, 6, 8, 10 番のように任意の値を指定することによって必要な要素のみを選んで出力するものを用意した。こうすることによって、鋳物全体の状態と局所的な状態とを両方評価することができる。

以上の表示機能は、大型計算機システムにおけるリスト及びプロッタ出力に対応するものであるが、パーソナルコンピュータシステムではさらにその特徴を活かして、11 番を指定することにより凝固過程をアニメーション出力できるようにした。これは、一定時間間隔でその時刻までに凝固を開始あるいは終了している要素を色分けして CRT にダイナミックに表示するものである。この機能を用いれば、固液共存域の広がりや凝固の加速状況などを視覚化し実感的に評価することができる。

### 5. 引け巣欠陥発生予測パラメータの利用法

#### 5-1 鋳鋼ガイドベーンの三次元凝固解析

CAST 3 の適用例として、Fig. 10 に示すような鋳鋼ガイドベーンを考え A-A' 断面での対称性を考慮して、13×27×38 の要素分割により凝固解析を行った。

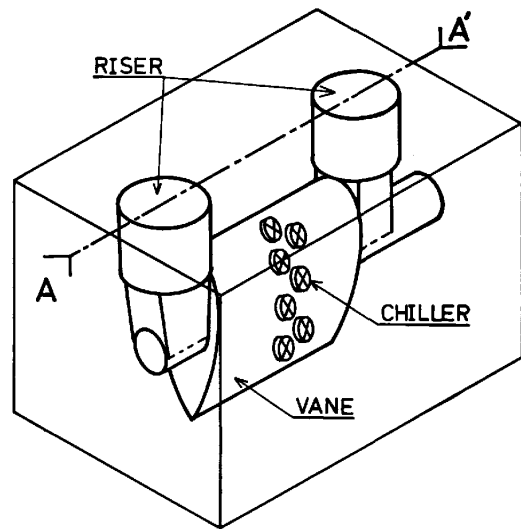


Fig. 10. Outline of guide vane for solidification simulation by "CAST 3".

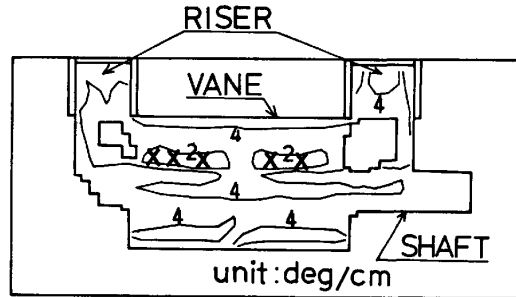


Fig. 11. Temperature gradient distribution on a longitudinal section of guide vane. (× indicates a shrinkage point)

Fig. 10 の A-A' 断面に対する解析結果のプロッタ出力例を Fig. 11 に示す。Fig. 11 は等温度こう配線であり、引け巣発生臨界温度こう配を 2°C/cm とすると羽根上部の左右に引け巣欠陥の発生が予想される領域があることがわかった。しかしこの領域は、強度上重要な軸部をはずれており軽微な引け巣は存在しても問題はない部分である。

従来、凝固解析によつて欠陥の程度を予測する技術は確立されていないが、経験的には次のようなことがわかっている。

(1) 等温度こう配線において臨界温度こう配値は閉ループを描き、その内部の状態によつて大まかな欠陥の程度を予測できる。すなわち、閉ループ内の温度こう配の最小値が比較的臨界値に近い大きい値である時は軽微であり、零に近い小さい値であると大きな欠陥である場合が多い。

(2) 臨界温度こう配値の閉ループが占める領域が狭い時は軽微な場合が多く、広い時は大きな場合が多い。

そこで、Fig. 11 の隣接断面を調べてみると 2°C/cm

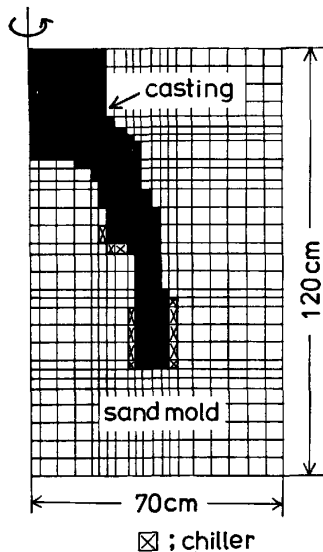


Fig. 12. Calculation model of steel casting for personal computer system.

以下の領域は A-A' 断面の垂直方向には広がっておらず、中心断面のごく近傍に限られることがわかった。また閉ループ内の最小値は計算結果をリストで調べてみると約  $1^{\circ}\text{C}/\text{cm}$  であり、総合的にみて引け巣欠陥が発生してもそれは軽微なものであると判断された。

実際にこの案に基づき鋳造を行って、X線検査により引け巣欠陥の発生を調べた。その結果、Fig. 11 中の X部に引け巣が発生しているのが観察されたが、JIS 2 級程度の大きさでありシミュレーションで予想したように実用上差し支えない程度の引け巣であることがわかった。

凝固シミュレーションによつて引け巣欠陥の程度を正確に予測する技術はまだ開発されていないが、経験的にはこの例のように等温度こう配線からある程度推定ができる。一方、 $G/\sqrt{R}$  法はその臨界値が鋳物の大きさによらないため欠陥の有無の判定には便利であるが、等温度こう配線ほどきれいな閉ループを描かない場合が多く、欠陥の程度を推定するには温度こう配の方が適している。

### 5.2 パーソナルコンピュータによる二次元凝固解析

パーソナルコンピュータによる二次元凝固解析の例として、表 2 で計算時間の評価に用いたモデルに適用した場合について述べる。この鋳鋼品は、鋳物先端の肉厚部に引け巣の発生が心配されたため、Fig. 12 のように冷し金を用いて引け巣の発生をふせいだ。冷し金の位置、大きさなどは、凝固解析により検討し適切なものとした。

計算は、Fig. 12 に示す要素分割で軸対称モデルによ

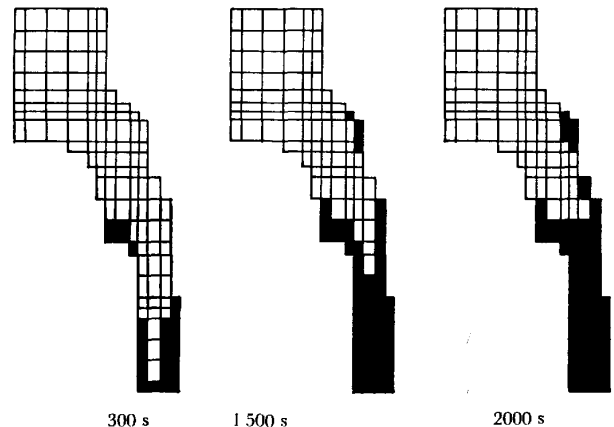


Fig. 13. Solidification pattern of steel casting by personal computer system. (Blackened elements have already solidified at specified time after pouring.)

り解析した。解析結果は CRT にカラーグラフィック出力できるが、パーソナルコンピュータシステム特有のアニメーション出力を用いれば凝固の進行状況を視覚的に評価できる。これは、Fig. 13 に示すような凝固界面の時間的な変化を、鋳物各部の凝固時間に比例したある一定時間で連続的に CRT 上にカラーグラフィック出力することによつて行われる。表示の速さは、ユーザが自由に選べるため鋳物の大きさに応じて見やすい状態を指定できる。

## 6. 結 言

鋳物に発生する引け巣欠陥が、コンピュータによる凝固解析によつて設計段階で予測できることが示されて久しい。しかし、鋳物全体を日常的に三次元解析できるだけの経済的なハードウェア、ソフトウェアはまだまだ開発されておらず、実際の利用にはさまざまな工夫を必要とする。

当社では、現在利用できるハードウェアを用いていかに実用的に凝固解析技術を利用できるかを検討してきた。そして、温度こう配法、 $G/\sqrt{R}$  法、擬三次元モデルなどを開発することによつて大型計算機用システムとパーソナルコンピュータ用システムとしてまとめることができた。これらは、いずれも実用経験からその特徴なりの実用性を有していることが実証された。これらのシステムは、ハードウェア、ソフトウェアの今後の発達によつてさらに使いやすいものへと改良してゆくべきものであり、最終的には三次元データの入出力方法をさらに簡単なものとして、三次元解析の利用をさらに広めてゆく予定である。

本研究の遂行に当たり、日立勝田工場関係各位、勝田

産業長田斌氏, 日立研究所相澤達志博士, ほかの御援助, 御討論を得た.

文 献

- 1) 梅村晃由: 鋳物, 46 (1974), p. 1068
- 2) W. C. ELICKSON: AFS Int. Cast Met. J., 5 (1980), p. 30
- 3) 新山英輔: 鋳物, 53 (1981), p. 576
- 4) 大中逸雄: 日本金属学会会報, 22 (1983), p. 802
- 5) 新山英輔: 鋳物, 49 (1977), p. 608
- 6) 大中逸雄, 西川 清, 福迫達一: 鉄と鋼, 67 (1981), p. 547
- 7) 大中逸雄, 森 康尋, 福迫達一: 鋳物, 53 (1981), p. 673
- 8) 今福一英: 日本機械学会論文集(C), 47 (1981), p. 918
- 9) C. P. HONG, T. UMEDA and Y. KIMURA: Metall. Trans., 15B (1984), p. 91
- 10) E. NIYAMA, T. UCHIDA, M. MORIKAWA and S. SAITO: AFS. Int. Cast. Met. J., 6 (1981), p. 16
- 11) E. NIYAMA, T. UCHIDA, K. ANZAI and S. SAITO: US-Japan Cooperative Science Program Seminar on "Solidification Processing" (1983), p. 215
- 12) 新山英輔: 綜合鋳物 (1982 - 3月), p. 10