双ロール形薄板連続鑄造過程のシミュレーション*

(第1報, 凝固と温度の解析と実験による検証)

佐 成 弘 毅^{*1}, 井 上 達 雄^{*2}

Simulation of Strip Casting Process by Twin Roll Method (1st Report, Analysis of Solidification and Temperature, and the Experimental Verification)

Hiroki SANARI and Tatsuo INOUE

A model plant of strip casting system of two roll type was developed to obtain the fundamental data on optimum operating condition for production of strip or thin slab. In this first report, mode of solidification and temperature distribution in the strip of Pb-Bi alloy with low melting temperature during steady process was simulated by solving the heat conduction equation incorporated with latent heat due to solidification when considering material flow. And, the results of analysis on the shape of the solidified shell and the temperature distribution in molten metal was compared with measured temperature data by thermocouples, and the validity of the simulation method are also discussed.

Key Words: Finite Element Method, Heat Conduction, Twin Roll Strip Casting, Steady State, Phase Transformation, Solidification

1. 緒 言

金属材料の薄板, とくに需要が多い薄板鋼板は, 連続鑄造で得られたスラブを, 熱間および冷間で圧延して生産されるのが普通である。これに対して, 圧延工程の省略あるいは大幅な簡略化を目指して, 溶融金属から直接薄板鑄片を連続的に鑄造する方法, いわゆる薄板連続鑄造法(strip casting method)^{(1)~(4)}が注目されている。薄板連続鑄造法は, 最終形状に近い鑄片(near net shape)を連続鑄造する方法の一つで, 高速で回転するロールやベルトを鑄型(モールド)とし, その表面で溶融金属を急冷凝固させ, 鑄片とモールドを同期させて送り出し, 薄板鑄片を連続的に得る鑄造法である。鑄造する薄板の目的とする材質, 板厚あるいは板幅に応じて, 双ロール法, 単ロール法, 双ベルト法などの鑄造方法が考案されているが, 一部の特殊金属の生産を除いて実用化には至っていない。

本研究でとりあげる双ロール法(twin roll process)^{(5)~(12)}は, 互いに逆方向に回転する二つのロールをモールドとし, その間に溶融金属を保持し, ロール表面で冷却,

凝固した鑄片をロールの間から送り出し, 薄板を鑄造する方法で, 1~10 mm 程度の板厚の薄板の生産に適していると言われている。

この方法によって良好な鑄片を得るためには, 適切な鑄造条件の設定が必要であり, そのためには鑄片および溶融金属内の温度分布や組織, 凝固の状態, さらに応力分布などを有限要素法などの数値解析法によって予測することが有効であると考えられる。

本研究の第1報では, 試作した小形のモデルプラントによって低融点合金の鑄造実験を行い, 測定した凝固の様相と温度分布を, スラブの連続鑄造過程の解析について著者らが提案した方法⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾でシミュレートすることを試みる。また, 第2報では, 鋼を対象として, 鑄造条件の変化が凝固と温度に及ぼす影響について検討を行い, さらに凝固シェルに生じる応力を弾塑性および弾粘塑性構成式を用いて有限要素解析を行い, 両者を比較検討する。

2. 実験と解析方法

2・1 試作した双ロール形薄板連続鑄造装置 双ロール形薄板連続鑄造実験装置の概略図を図1に示す。また, 図2は主要部の概要であり, 図3はその部分の写真である。

* 平成元年11月10日, 材料力学講演会において講演, 原稿受付 平成元年4月24日。

*¹ 学生員, 京都大学大学院(〒606 京都市左京区吉田本町)。

*² 正員, 京都大学工学部。

モールドロール①は直径 300 mm, 幅 100 mm で, S 45 C の芯軸に厚さ 10 mm の Cu-Cr 合金製のスリーブがはめ込んである。スリーブと芯軸の間には, らせん状の 4 本の溝を設け, 軸端のロータリージョイントを介して冷却水を流し, 内部冷却を行っている。モールドロールの注湯部側面には, アルミナ, またはアクリル製のサイドプレート②がエアシリンダ③によって圧着され, ロール軸方向の溶湯の保持を行っている。モールドロールには, 正弦波 PMW インバータによって回転数を制御された AC モータの動力をギアボックスによって分岐, 減速して二つのロール各々に同回転数で逆方向の回転が与えられる。モールドロールの下には, モールドロールと同径の S 45 C 製のピンチロール④が備えられ, モールドロールと同期して鋳片を支持かつ引き抜く役目を持つ。モールドロールの片方の軸受は, 二つのモールドロール間の距離を調節できるように, スライドレールを介して台座に取付けられており, 軸受け間にはさむシムの厚みを変えることによってロールギャップを調整することができる。また, ロールの圧下力は, このスライドレール上の軸受けを押すエアシリンダの圧力を変化させることによって調節する。鋳造材料の溶解には, サイリスタインバータ式高周波誘導加熱装置⑤を用いた大気溶解炉⑥を用いる。注湯は, 溶解炉を傾動して給湯樋⑦を通してモールドロール間の湯だめに注湯する。以下に, 実験機的主要諸元を示す。

モールドロール: 直径 300 mm × 幅 100 mm
 ロール周速度: 0 ~ 530 mm/s
 ロールギャップ: 0 ~ 50 mm
 ロール圧下力: 最大 550 kg
 AC モータ出力: 5.5 kW
 溶解炉: 出力 30 kVA, 溶解量(鉄換算) 20 kg

図 1 試作した双ロール形薄板連続鋳造実験装置の概要図

2・2 実験材料, 条件および温度測定方法 鋳造のモデル材料としては低融点合金(U-Alloy 80)を用いた。その化学成分は, 40 % Pb, 40 % Bi, 12 % Sn, 8 % Cd であり, 材料定数は次のとおりである。

密度 ρ : $9.98 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$

比熱 c_L : $c_S = 40.0 \text{ cal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$

熱伝導率 $k_L = k_S$: $3.7 \times 10^{-3} \text{ cal/mm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$

凝固潜熱 L_S : $5.56 \times 10^8 \text{ cal/kg}$

液相温度 T_L : 90°C

固相温度 T_S : 70°C

また, 鋳造は次の条件で行った。

鋳造速度 v : 65.4 mm/s

ロールギャップ d : 3 mm

溶湯深さ l : 75 mm

溶湯初期温度 T_0 : 110°C

ロール表面および周囲温度 T_w : 17°C

で行った。溶解量は約 5 kg で, 鋳造時間は約 20 秒である。

連続鋳造中に, サイドプレートに取付けた 16 対のアルメル-クロメル熱電対によって凝固シェルおよび

図 2 実験装置主要部の概念図

図 3 実験装置の上部からの写真

溶湯内の温度を測定サイクルタイム1秒で測定した。測定データの制御には、パーソナルコンピュータを用い、熱電対に発生した電位差を増幅器で増幅し、A-D変換した後、いったんパーソナルコンピュータ内のメモリーに記憶し、それをディスクに記録してデータの保存、再生が自由に行えるようになっている。

3. 凝固と温度の解析

3・1 凝固と物質移動を考慮した定常熱伝導方程式
詳しくは、既報⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾に記したが、相変態として液相-固相変態のみを考える場合、熱伝導方程式は、

$$\rho c \dot{T} - \rho l_s \dot{\xi}_s - \text{div}(k \text{grad } T) = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

となる。ここで、 l_s は液相から固相へと変態する場合に発生する単位質量当たりの潜熱であり、 ξ_s は固相の体積分率(固相率)であって、材料の状態図などからこの法則を用いて決めるべきであるが、ここで用いた材料の平衡状態図のデータが不明なため、固相の体積分率は、液相温度と固相温度の間で比例的に与えられるとした。また、 ρ, c, k はそれぞれ密度、比熱、熱伝導率であり、これらを一般に θ と表すとき、固相と液相における値 θ_s と θ_L によって

$$\theta = \theta_s \xi_s + \theta_L (1 - \xi_s) \quad \dots\dots\dots (2)$$

の形の複合則で決められるとする。

解析に用いる座標系として、

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}(X, t) \quad \dots\dots\dots (3)$$

で表される時間 t に依存する空間座標 $\mathbf{x}$ を用いる。 X は物質に固定された座標、すなわち物質座標を表す。空間座標を用いる場合、任意のスカラ、ベクトル、テンソル関数 ψ の物質導関数は次のようになる。

$$\dot{\psi} = \frac{\partial \psi}{\partial t} + \frac{\partial \psi}{\partial x} \cdot \mathbf{v} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $\mathbf{v} = \mathbf{v}(x, t)$ は速度ベクトルである。

式(4)を式(1)に代入し、さらに定常問題の条件 $\partial(\quad)/\partial t = 0$ を用いると

$$\rho c \mathbf{v} \cdot \text{grad } T - \rho l_s \mathbf{v} \cdot \text{grad } \xi_s - \text{div}(k \text{grad } T) = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

という空間座標系における定常熱伝導方程式を得る。

また、境界条件は、

$$\text{温度固定境界 } S_T \text{ 上で } T = \bar{T} \quad \dots\dots\dots (6)$$

自然境界 S_h 上で

$$k \text{grad } T \cdot \mathbf{n} = -h(T - T_w) \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。ここに、 T は S_T 上での固定温度、 $\mathbf{n}$ は S_h の外向き単位法線ベクトル、 h は熱伝達係数、 T_w は周囲温度である。断熱境界では、 $h=0$ として自然境界として扱う。物体の内部で温度こう配が存在するとこ

ろに解析領域の境界を設けなければならないとき、その境界は、自然境界でも断熱境界でもない。そこで、そのような境界の境界条件を次のように定める。すなわち、ある境界で温度こう配が $\text{grad } T$ であるとき、その境界から流出する熱量は $k \text{grad } T \cdot \mathbf{n}$ であるとするものである。この場合温度こう配 $\text{grad } T$ も求める量であるので、この条件を陰的境界条件⁽¹³⁾といい、その境界を S_i で表すことにする。したがって、物体の全表面を S とすると、

$$S = S_T + S_h + S_i \quad \dots\dots\dots (8)$$

の関係が成り立つことになる。

3・2 解析条件 図1および2で示される装置を用いた鑄造過程を、空間座標系によって図4のようにモデル化する。安定な鑄造過程では、空間点での温度は時間によらず一定であるので、定常問題として取扱うことができる。溶湯および鑄片は板厚方向の長さ比べて、板幅方向の長さが十分長く、さらに両端の断熱効果が大きいので、板幅方向の熱伝導を無視した二次元問題と見なすことにする。また、流れ方向に対しての対称性から、斜線部のように片側半分についての解析を行う。

熱伝導方程式(5)の境界条件としては、図5に示すものを用いた。すなわち、上表面は、温度 $\bar{T}$ が一定の溶湯が常に供給されているとして温度固定境界 S_T とし、ロールまたは雰囲気と接する側面は熱伝達のある自然境界 S_h とみなす。中心は断熱境界 S_h で、下端は温度こう配のある陰的境界 S_i とし、ロール出口の下30 mmにとった。

鑄造過程の速度場を正確に規定するためには、複雑な流れ解析が必要であり、これについては、今後の課題であるとし、ここでは、図6に示すような簡単な近

図4 解析のモデル

似を用いた。すなわち、鋳造速度はロール表面の周速度に等しく、凝固した固相領域はロールに密着して回転するとし、未凝固の液相領域および固液共存領域では、速度の垂直方向成分は一樣で流量の連続性を満たすように設定する。したがって、凝固シェルを求めた後、任意の水平方向断面において流量が一定になるように未凝固領域の垂直成分を決める。また、未凝固領域の水平成分は固相境界線上で速度が接線方向を向くようにとり、中心線上で零とし、その間を比例的に内挿して与える。また、ロール出口の下流では、一樣な鋳造速度を規定する。ある点が凝固しているか否かは温度に依存するので、速度場も温度に依存することになる。

解析は、有限要素法を用いることとし、3節点三角形要素によって、ロール半径、ロールギャップ、溶湯深さなどの形状・寸法から自動的に要素分割を行うプログラムを作成して、図7のような離散化を行った。

ここで、節点数は3445、要素数は6592とした(図には離散化の概要のみを示している)。

4. 実験結果と解析結果の比較

図8(a)に示す鋳片内の代表的測定点での温度の時間推移の記録例を図8(b)に示す。鋳造開始直後の非定常な部分を過ぎて約10秒すると、鋳造が終了するまでにほぼ定常状態とみなせる領域が15秒程度存在するので、これを定常温度の測定値とみなすことにする。これらの各測定点での測定温度から内挿して推定した温度分布が図9である。図中の70°Cならびに90°Cの等温線が、材料の固相線および液相線に対応する。すなわち、70°Cの等温線から左下は凝固が完了

図5 熱伝導解析の境界条件

したシェル、90°Cの線から右側は液相であり、その間は固液混合相である。

次に、実験で用いた鋳造材料および前述の鋳造条件のデータを用いて解析した温度分布を図10の実線で示す。また、図には、図9の実験結果の一部を破線で重書きしてある。解析におけるロールと溶湯との間の熱

図6 速度分布の近似

図7 有限要素解析の要素分割法(実際の解析では、節点数3445、要素数6592としてある)

伝達係数は、各実験点における測定温度と解析結果とが、できるだけ一致するように試行錯誤によって決定し、鋳片とモールドロール間で $h=0.18 \times 10^{-2} \text{ cal/mm}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$ 、鋳片と大気間で $h=0.288 \times 10^{-4} \text{ cal/mm}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$ とした。凝固シェルの形状および凝固シェル内の温度分布は比較的良好に一致していることがわかる。液相領域の温度分布は、あまり良く一致していないが、これは、実験においては、注湯時に起こる攪はんによって溶湯内で流れの乱れが生じるため、溶湯表面で温度分布が生じるのに対して、解析では溶湯表面の温度を一定とし、また溶湯内の流れも一様であるとしていることに起因すると考えられる。このように、

液相における流れの速度場についてのより正確な把握を行うことができれば、良好な結果を得た固相内のみでなく全領域でのシミュレーションが可能になることがわかる。

(a) 熱電対取付位置

(b) 代表点での温度測定結果

図8 温度分布の測定法とその結果

図9 測定結果から求めた温度分布

図10 解析(実線)と実験(破線)による温度分布の比較

5. 結 言

双ロール形薄板連続鋳造法を確立する第一段階として、小形のモデルプラントを試作し、低融点合金を用いた実験を行った。溶湯の定常凝固状態と温度分布をシミュレートするために、物質移動と潜熱の発生を考慮した解析を試みたところ、凝固シェルの形状およびその内部と近傍の温度分布について、良好な結果が得られた。

本研究を遂行するにあたり、実験装置の試作に協力いただいた川崎重工業(株)の薦紀夫、金子英夫、井上英二の各氏、温度計測システムの製作に参加された京都大学工学部の今谷勝次氏、実験の実施に協力された同小林広佳君に謝意を表す。また、研究費の一部は、文部省科学研究費補助金〔試験研究(2), No. 62850022〕によるものである。

文 献

- (1) 草川, 鉄と鋼, 71(1985), A 200.
- (2) 田中, 鉄と鋼, 71(1985), A 197.
- (3) 伊藤, 機誌, 91(1988), 1025.
- (4) 大橋, 金属学会会報, 25(1986), 505.
- (5) 小菊・小沢・渋谷・宋戸・菅, 鉄と鋼, 71(1985), A 229.
- (6) 吉田・谷口・須藤・野崎, 鉄と鋼, 71(1985), A 237.
- (7) 西岡・土田・北川・藤田・佐藤・大槻, 鉄と鋼, 71(1985), A 241.
- (8) 大橋, 金属学会会報, 25(1986), 505.
- (9) 北條・姜・加藤・玉川・矢口, 機論, 53 (1987), 2452.
- (10) 姜・北條・斎藤・矢口, 機論, 機論, 53 A(1987), 2459.
- (11) Miyazawa, K. and Szekely, J. *Metall., Trans., A*, 12 (1981), 1047.
- (12) 齊藤・有馬・佐藤・加藤, 第 38 回塑性加工連合講演会講演論文集, No. 132(1987-10), 125.
- (13) 王・井上, 機論, 53 A(1987), 1735.
- (14) Inoue, T. and Wang, Z. G., *Ing.-Arch.*, 58(1988), 265.

討 論

〔質問〕 加藤 康司〔東北大学工学部〕

図 10 における実験値と計算値の比較は満足のゆくものか。討論者には両値の間の差が大きすぎると思われる。計算手法および境界条件の有効さを検討するために、参考文献(11)の計算結果と比較の討論をされれば有意義かと思われるがいかがか。

〔回答〕 計算による温度分布が、とくに液相部で実験結果とかなり差があるのはご指摘のとおりである。これは、文献(10)と同様、実験では注湯口から溶湯がある速度をもって注がれるためメニスカスの温度が中央で高いのに対して、計算では一定と仮定したこと、また解析を二次元的に行ったのであるが、実際にはやや温度低下がみられるサイドプレート部の測温をしたことがその理由である。さらに、本文中でも述べたように、液相内の速度場を図 6 のように簡単な形で近似したことも大きな原因と考えている。

これらの点を改良するため、現在注湯口と温度測定

法の改良および流れを含めた解析とプログラムの開発を行っているので、次報では計算結果の改善が期待できている。

〔質問〕 清水 翼

〔(株)日立製作所機械研究所〕

ロールと溶湯、ロールと固相間あるいは溶湯と固相間の熱伝達係数はどのようにして決定されたのか。

〔回答〕 本研究では、論文で述べた実験条件のみでなく、種々の条件下での実験を行っているが、ロールと溶湯間およびロールと固相間の熱伝達係数は、これら一連の実験と温度解析の結果がほぼ合致するように、逆問題的に試行錯誤によって決定した。また、溶湯と固相は、その境界で潜熱の発生を伴う相変態が起こるものの、連続した物体として取扱っており、熱伝導率、比熱などの違いによって両相を区別しているの、熱伝達係数は不用である。