

薄板製造プロセスにおける 鋳型界面での非定常伝熱特性の検討

松井 邦雄*

Kunio Matsui

1. まえがき

鉄鋼業の生産品目は大きく分けて構造用型鋼（H型鋼など）、厚板（造船、圧力容器用など）、薄板（自動車、家電用など）に分けられるが、生産量の8割以上が薄板（業界ではストリップと呼んでいる）であり、大型製鉄所の設備はほとんどがストリップを生産するために存在するといっても過言ではない。現在でも板厚1 mm以下のストリップを生産するために数多くの圧延機を必要としており、熱間圧延ラインは数百メートルの長さに達している。

ストリップキャスターは溶鋼から直接板厚数mmのストリップを生産できる連続鋳造機であり革新的な省設備、省エネが期待できるが、技術的には鋳造現象が短時間のためその完成は遅れていた。最近になってやっとストリップキャスター実用化の計画が本格化してきた。以下ストリップの生産手法の変遷を交えてストリップキャスター開発に必要な鋳型界面での伝熱特性把握の意義について紹介する。

砂型鋳造で成型される対象物（大型鋳物部品）は大型のため鋳造が完了する（完全凝固）時間は数時間に及ぶものもあり、押し湯など引け巣防止が主な課題であるため定常の伝熱特性の把握で十

分である。一方、製鉄関係の鋳造プロセスでは薄板を大量生産するためのスラブ（厚み数百mmの薄板製造のための半製品）を連続鋳造することが求められている。現在のスラブ連続鋳造機が出現する昭和30年代以前は金型鋳造（インゴットケースと呼んでいた）でインゴットを造塊し、加熱炉での昇温後分塊圧延機でスラブを製造していた。

現在のスラブ連続鋳造機はスラブ表面の凝固殻を約10 mmまで凝固させて連続鋳造機から出た直後から水冷により完全凝固させて鋳造を完了している。鋳造現象に水を用いることは非常に危険であり、水冷するタイミングを誤ればごく薄い凝固殻は内部の高温状態の溶鋼により復熱溶融し（もなかの皮が破けて中のあんこが飛び出す現象）、水がかかることから水蒸気爆発を発生する。これをブレイクアウトと呼んでいるがスラブ連続鋳造機導入当初では各地の製鉄所では頻繁に発生し、鉄鋼協会の講演会ではブレイクアウトの回数が少ないことの学会発表競争をしていた時期もあった。スラブ連続鋳造では砂型、金型鋳造とは違い凝固時間が数十秒から長くとも数分で安定的に凝固殻10 mmを連続して凝固させる必要があり、信頼性ある技術の完成に20年近く費やしていた。解決に導いた技術の一つとして、鋳型と溶鋼との界面にフラックスと呼ばれる無機物（Ca、Siなどの

* 計測事業部 材料試験部 部長

酸化物、塩化物：いまだに各社企業秘密となっているものもある）をはさむことで緩冷却凝固特性にし、凝固殻の不均一を防止できたことが成功の原因と言われている。

最近では鉄スクラップ量も増加しており生産量は高炉ほど大量生産を要求されず、また膨大な設備投資額を必要としない薄板製造プロセスが望まれてきており、溶鋼から直接薄板を製造できるストリップキャスターが注目された。

スラブ連続 casting プロセスでは緩冷却特性により凝固殻厚みを安定化する技術で現在主流の製造プロセスとなっているが、ストリップキャスターの凝固時間は 100 ms 程度とスラブ連続 casting とは 2 桁以上凝固時間が短い。この短時間で凝固殻を 1 mm 程度凝固させるためには緩冷却法は目的に逆行する技術であり、 casting 開始から 100 ms 程度の短時間での casting 型と溶鋼の界面伝熱特性が casting 材質の選択、操業条件の基本設計にとって非常に重要となる。研究分野ではアモルファステープ作製に利用される単ロール法において casting 型／溶湯界面のヒートフラックスが知られていたが、その凝固時間は 1 μ s と極端に短いため参考にはできない。著者はストリップキャスター開発前に上記 100 ms 程度の casting 時間における casting 型／溶鋼の伝熱特性を求める基礎実験、解析を実施し、現在実用化目前となっているストリップキャスターの基本設計資料を提案できたのでその内容を紹介する。

2. 浸漬実験

casting 型と溶鋼界面の伝熱特性は界面での casting 型表面温度、溶鋼表面温度が任意の時刻で測定できれば界面の熱伝達率は理論的には得ることができる。しかし casting 型表面からの距離が 0 の位置に熱電対を埋め込むことは製作上不可能であり、また 100 ms 以下の短時間での熱伝達率が必要なので casting 型内部の温度測定から外挿して表面温度を推定する方法

も内部温度が昇温せず推定できない。そのため表面から製作上可能な浅い深さ（2.5 mm）に CA 熱電対をセットして要素実験装置とした。また casting 型表面近傍の外部温度測定（R 熱電対）も応答性をあげるためにセラミックス保護管は使用できず、かつ寸法的に保護管を使えば casting 型表面近傍を測定することもできないので、やむ終えを得ず保護管なしで直径数ミクロンの裸 R 熱電対をセットした。

図 1 に示す実験装置を用い、駆動シリンダをタイマーで制御し模擬 casting 型を溶鋼プールに約 1 秒間浸漬して温度変化を測定した。必要とされる時間帯は 0.1 秒以下であるので当時サンプリング間隔最速の LA コンピュータ、アナログのオシロチャートを紙送り速度最大で使用した。

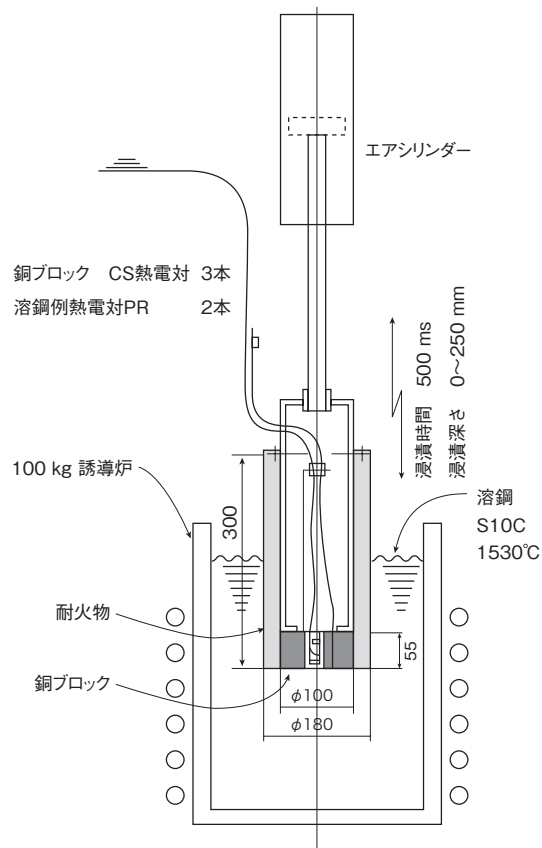


図 1 浸漬実験装置

実験結果は鋳型外部のR熱電対は溶鋼への浸漬時の熱衝撃で断線してたために測定できず、界面での熱特性を把握することは温度計測結果からはできなかった。

しかし、鋳型に付着した時間に対する凝固殻の発達と比較的ばらつきが少なく、信頼性あるデータが得られた。図2に時間に対する鋳型に付着した凝固殻厚みを示す。溶鋼静圧により凝固殻発達に違いがあることが予想されたのでそれをパラメータとして実験した結果から違いも明確に現れた。

$$\delta = 21.2\sqrt{t} \quad (\text{溶鋼静圧：250 mm}) \quad (1)$$

$$\delta = 15.3\sqrt{t} \quad (\text{溶鋼静圧：25 mm}) \quad (2)$$

δ : 凝固厚さ (mm)

t : 凝固時間 (分)

スラブ連続鋳造においても経験則として鋳型内凝固殻の推定は時間の平方根に比例することは知られていたが、その比例乗数は10前後と小さい値であった。ストリップキャスターの場合はフラックスを使用しないため凝固特性の大幅な向上が期待できるとわかり、ストリップキャスター実現が夢でないことがわかった瞬間である。またスラブ連続鋳造では上記ルート則から凝固時間内の熱伝達率は一定値と考えられていたが、アモルファス

テープ製造の例でもわかるように極短時間では桁違いに大きな熱流束が実現している。比較的長時間鋳造の場合はほとんどが定常となった時間領域での操業のため伝熱特性の非定常を考えなくとも推定できたと考えられる。ストリップキャスターの場合は(1)(2)式からもわかるように通常のスラブ連続鋳造とは異なる伝熱特性を示したので次章にこの特性から界面の熱伝達特性を求める手法を示す。

3. 界面の熱伝達率 (α_B) 推定方法

界面の熱伝達率 α_B は前述から時間とともに変換することが予想されるため以下のように仮定する。

$$\alpha_B = kt^{-n} \quad (3)$$

ただし k, n : 乗数

t : 溶鋼接触からの時間(秒)

α_B は時間とともに変化していくが非定常伝熱解析を実施するうえで微小時間間隔では見かけ上一定値(平均値)を採用するので時間 t_0 で実験で得られた凝固厚さ(1)、(2)式になるときの時刻0から t_0 まで α_B が一定値であったとする値を α_B^* とする。

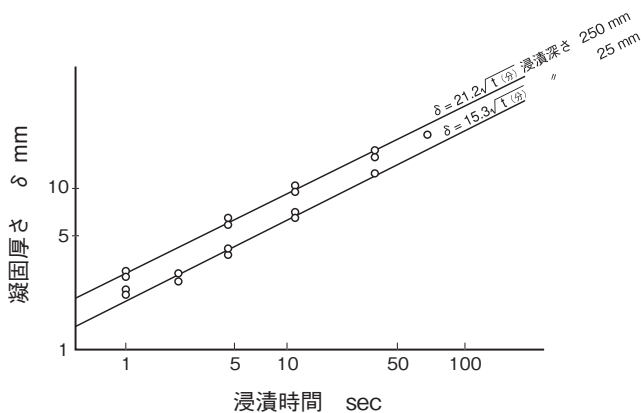


図2 浸漬時間と凝固厚さ

これを任意の時刻 t_0 での見かけの熱伝達率と呼ぶ。

ここで実験で求められた凝固厚さは凝固後引き上げられて測定されるため、凝固層の内部に合金であるため生成される固液共存層（Mussy層）をどの程度含んでいるか不明である。固液共存層の割合を示す指標を固相率 f_s と呼び、0～1.0の値で示される。（0：完全液相、1：完全固相）図3、4に(1)(2)式の実験データに相当する α_B の時間に対する変化について固相率をパラメータにして示す。

両対数グラフで直線のため

$$\alpha_{B*} = k^* t_0^{-n^*} \quad (4)$$

ただし k^* 、 n^* ：比例乗数（実験で付着した凝固殻の固相率に依存する）とあらわせる。

見かけの熱伝達率 α_{B*} は時間 $[0, t_0]$ での真の熱伝達率 α_B の時間平均と考えられるので

$$\alpha_{B*} = 1 / t_0 \int_0^{t_0} \alpha_B dt \quad (5)$$

(3) 式を代入し積分すると

$$\alpha_{B*} = k t_0^{-n} / (1-n) \quad (6)$$

(4)、(6) 式から

$$n = n^* \quad (7)$$

$$k = (1-n) k^* \quad (8)$$

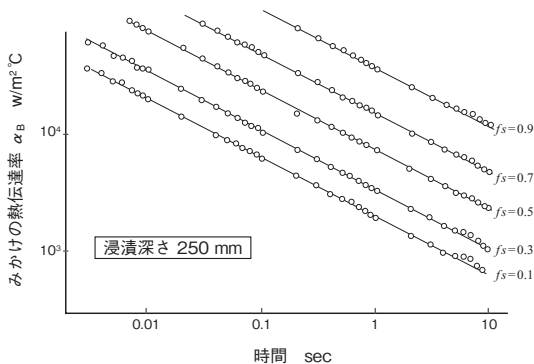


図3 みかけの熱伝達率

$$\text{よって、真の熱伝達率 } \alpha_B = (1-n^*) k^* t^{-n^*} \quad (9)$$

これにより浸漬実験で模擬鋳型に付着した固液共存層の割合がわかれば真の熱伝達係数は判明することになる。

4. 真の熱伝達率 α_B の決定

鋳型からの抜熱だけの場合は凝固組織分析たとえばデンドライド二次アーム間隔の観察などから固相率推定の推定も可能性はあったかもしれないが、浸漬ブロックを引き上げた瞬間から大気雰囲気中で冷却され、ブロック引き上げ時の凝固殻最表面部の固相率測定は不可能であった。

そこで鋳型の非定常温度結果と比較することとした。図5、6に溶鋼静圧ごとの鋳型の表面から2.5、7.5 mm深さに設置した熱電対による測定結果を示し、前章で求められた固相率に相当する非定常熱伝達率を用いた温度解析結果をフィッティングした。

図からわかるようにブロックに付着した凝固殻は固相率約0.4の非定常熱伝達特性を用いた解析結果が深さ0.25、0.75 mmの測温結果と一致し、以下の結論が得られた。

$$\alpha_B = 3000 t^{-0.5} \quad (\text{溶鋼静圧 250 mm}) \quad (10)$$

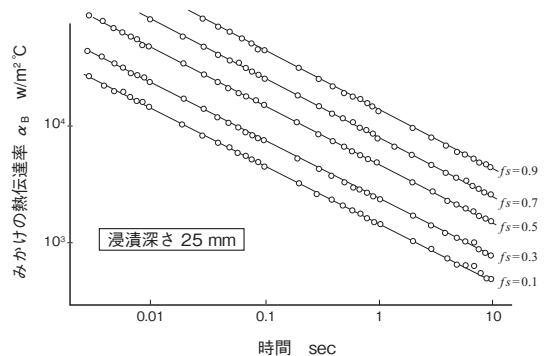


図4 みかけの熱伝達率

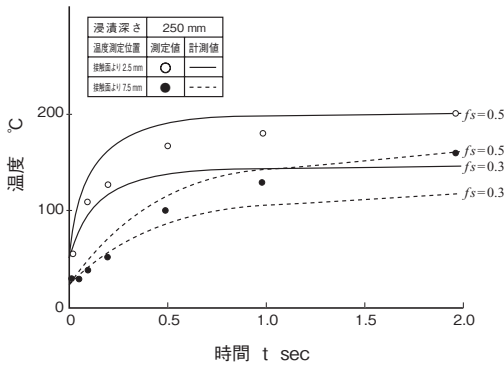


図5 温度測定結果

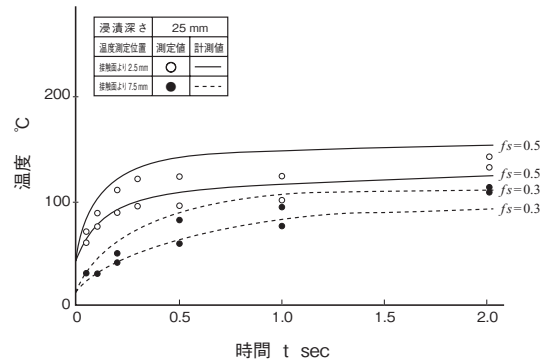


図6 温度測定結果

$$\alpha_B = 1800 t^{-0.5} \text{ (溶鋼静圧 25 mm)} \quad (11)$$

これ以外にも表面に添加物を塗布した実験も実施して興味ある結果も判明したが、それについては省略する。

5. あとがき

開発当初スラブ連続铸造機での凝固特性では双ロール式ストリップキャストは成立せず、圧延機のようにキャストで完全固相になった後、塑性加工して薄板とすべきという説もあった。これは熱を奪う熱交換の機能をもつ铸造用モールドと力を伝え塑性加工するための圧延ロールを同時に満たすことを要求されるので材質的にも強度的にも不可能である。今回鑄型界面での伝熱特性が把

握できたので自信を持ってストリップキャストの開発に自信がもて開発を促進していくことができた。

最後に当初は温度測定から伝熱特性を把握する予定であったが、最終的には理論解析との組み合わせでこれを把握することになった。本来は現象を直接観察して科学的根拠を明確にして技術とすることが王道である。研究をしているころ1600℃の環境下で耐えられるマイクロマシンとなってロール鑄型上で溶鋼がどのように凝固殻となっていくかをみてみたいという夢があったことを思い出します。現在でも鑄造中の鑄片表面性状を計測する手法はなく、上記夢が将来、この夢がかなうことを期待したい。



計測事業部
材料試験部
部長

松井 邦男

TEL. 045-784-6833
FAX. 045-784-6826