

技術論文

連続铸造铸型直下での鋼の磁気変態を活用した電磁センサーの開発

Electromagnetic Sensor Just below Continuous Casting Mold by Using Magnetic Transformation of Steel

原田 寛* Hiroshi HARADA
 山名 正哲 Masanori YAMANA
 長嶋 政樹 Masaki NAGASHIMA
 藤 健彦 Takehiko TOH
 今野 智弘 Tomohiro KONNO

抄 録

铸型短辺直下において铸片表面が磁気変態することに着目し、铸片表面温度を電磁的に測定するセンサーを検討した。提案した電磁センサーは铸片表面に印加した磁力線が、铸片表面の磁性、すなわち、表面温度によって変化することを利用したもので、磁力線の変化を誘導起電力として検出し、誘導起電力と表面温度との関係式を用いて表面温度を推定する。実験室にてセンサーの原理を検証した後に、铸型短辺ロール直下にセンサーを設置しプラントテストを行った。その結果、高温水蒸気雰囲気下においても測定可能で、铸型内流動、凝固状況を総合的に診断できることがわかった。

Abstract

Electromagnetic sensor to measure the slab surface temperature of narrow face by using the magnetic transformation just below CC mold has been proposed, noticing that the narrow face of slab has been cooled below Curie temperature at the beneath of mold. The principle of the proposed sensor is that the imposed magnetic field on the slab surface is governed by the electromagnetism of slab surface, in other words, slab surface temperature and the induced electric voltage due to the change of imposed magnetic field is measured to estimate the slab surface temperature by using the relationship between electric voltage and surface temperature. As preliminary experiments, laboratory experiments have been performed to clarify the relationship between the temperature and induced electric voltage, when AC magnetic field has been imposed on the slab surface. Moreover, plant tests have been conducted by installing the sensor just below the narrow face of mold to show that the proposed sensor could measure surface temperature under severe conditions and comprehensively evaluate the fluid flow and solidification behavior in CC mold.

1. 緒 言

铸型内流動は铸造安定性や铸片品質に大きく影響を及ぼす。図1に示すように铸型内に注入された溶鋼流に偏りが生じ、溶鋼流が凝固シェルに衝突する際、凝固シェルの再溶解が顕著となると局所的な凝固シェル厚が不足し、シェル成長不足による短辺ロール直下のバルジングやブレイクアウトと呼ばれる操業トラブルを招くことがある。加えて、偏流はストランド内下降流速の増長による気泡系内部欠陥やメニスカス反転流速の増長によるパウダー巻込み等の原因となる。そのため、ノズル吐出流を適切に制御することや浸漬ノズル内の非金属介在物付着抑制に加えて、偏流発生後の検知技術および操業対応による铸片欠陥や操業トラ

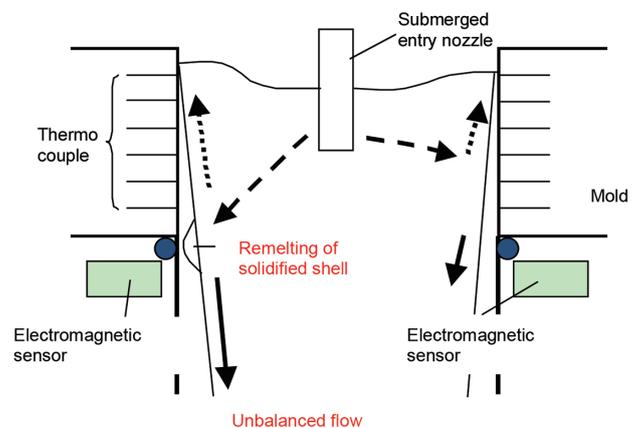


図1 ストランド内偏流の発生状況の模式図
 Schematic view of unbalanced flow in continuous casting strand

* プロセス研究所 鋼圧一貫研究部 上席主幹研究員 博士(工学) 千葉県富津市新富 20-1 〒 293-8511

ブルの抑制が必要となる。一般的な偏流検知技術としては、銅板短辺に配置した熱電対のピーク温度から一定割合の部分をメナスカス位置として両短辺の差異を偏流指数として検知する手法や、銅板短辺の給排水温度と給水流量から求めた熱流束の差異を偏流指数とする手法などがあるが^{1,2)}、ストランド内に侵入する偏流の検知はいずれの手法も困難である。

そこで、ストランドでの偏流を検知する手法として、偏流が発生した場合にシェルの再溶解またはシェル成長速度に差異が生じ両短辺の鋳片温度が変化すること、併せて、鋳型短辺直下の強冷却により鋳片表面が磁気変態することに着目し、鋳型直下の高温水蒸気雰囲気下においても安定的に鋳片表面温度の測定が可能な電磁センサーについて検討した³⁻⁵⁾。

2. 電磁センサーの原理と実験室実験による原理の検証

スラブの連続鋳造の場合、ストランドにおいて長辺側は鋳型直下から最終凝固位置近傍まで多数のロールで支えられているが、短辺側は鋳型直下に設けられた数本のロールで支えられているに過ぎない。そのため、鋳片短辺部の冷却は長辺側からの冷却に頼らざるを得ないため、鋳型直下で強冷却を行うのが一般的である。そのため、図2に模式的に示すような温度パターンとなる。ここで注目すべきは鋳片表面温度(T_s)が一旦Curie点(T_c)下まで温度が低下した後、復熱により上昇する点である。Curie点は磁気変態点であり、Curie点を境に強磁性から常磁性へ、さらに高温では非磁性へと変化する。

そこで図3に示すように鋳片表面に交流磁場を印加すると、Curie点よりも十分高温では、真空中と同様に印加された磁場は広がりながら対象物の内部まで侵入する(図3中破線)。一方、表面が磁性を帯びるとその部位に磁場が集中することになり(図3中実線)、磁力線の大幅な変化をもたらすことになる。この磁力線の変化は鋳片表面温度、すなわち、鋳片表面の磁性によって決まる。そのため、磁力線の変化を別に設けたコイルで検出し、別途定めた誘導起電力と鋳片表面温度との関係式を用いて鋳片表面温度を測定する。

図4に電磁センサーのシステム構成を示した。電磁センサーはソレノイド状の励磁コイルと検出コイルから構成され、励磁コイルの前面に検出コイルが設置されている。コイル一式はステンレス鋼製円筒ケースに収納してセンサーとし、円筒ケース内は乾燥空気で強制冷却した。励磁コイルには定電流アンプを用いて低周波の交流電流を通電し、交流磁場を鋳片表面に対し垂直に印加した。なお、検出コイルの電圧信号はローパスフィルターを介してノイズを除去するとともに、ロックインアンプを用いて励磁電流と同じ周波数成分のみを検出した。

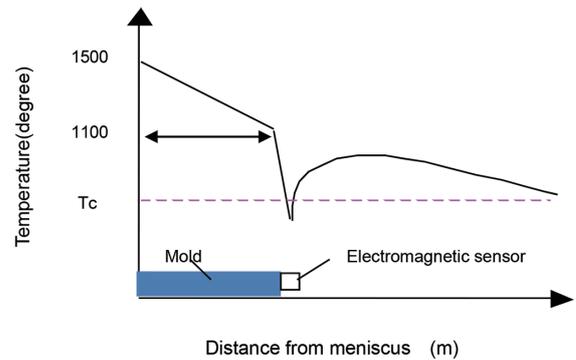


図2 鋳片短辺表面温度変化の模式図
Schematic view of slab surface temperature profile at narrow face during casting

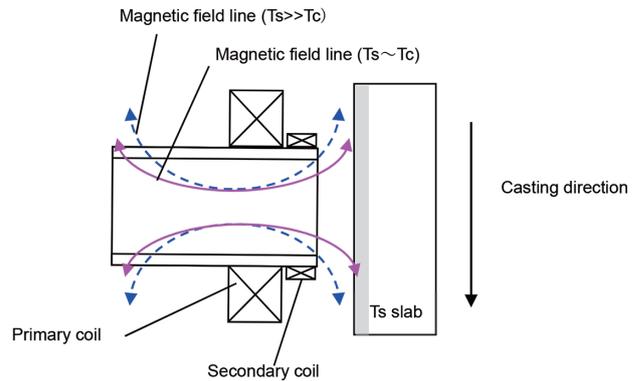


図3 電磁センサーの構成と表面温度による磁力線の変化の模式図
Schematic view of the proposed electromagnetic sensor and the change of magnetic field line due to slab surface temperature

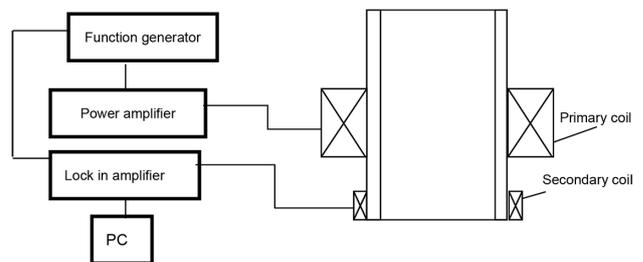


図4 電磁センサーの測定システム
Measurement system of electromagnetic sensor

製作した電磁センサーの原理を検証するため実験室で実験を行った。具体的には、鋳片サンプルを加熱炉に装入し1300℃まで加熱後にとりだし、加熱した鋳片サンプルの上方に前述した電磁センサーを配置した。また、鋳片サンプル表面下約1mmの位置に熱電対をセットし、鋳片サンプルの温度と検出コイルの電圧変化を測定した。測定結果の一例として、センサーと鋳片間の距離が30mmの結果を図5に示した。高温側とCurie点よりも低温側においては、検出コイルによって測定された電圧がほぼ一定であるが、図5中矢印で示した範囲において電圧が変化していることがわかる。そこで、その矢印で示した範囲について、多項

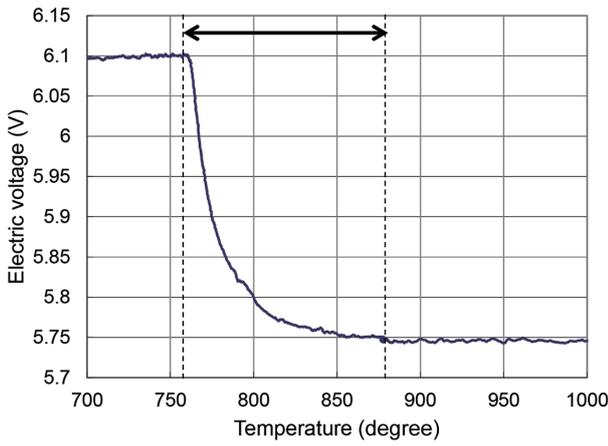


図5 スラブ表面温度と検出コイルによって測定された誘導起電力との関係
Relationship between slab surface temperature and induced electric voltage of secondary coil

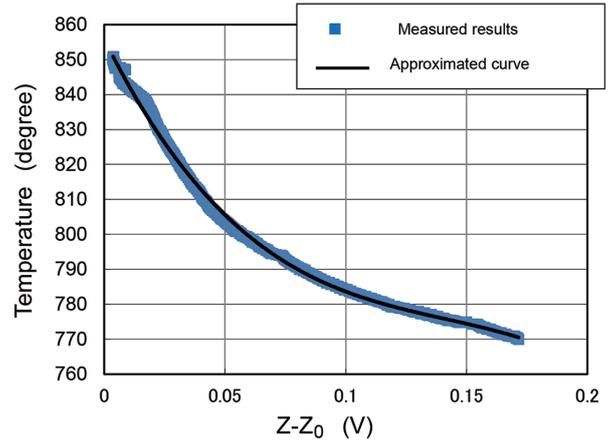


図6 スラブ表面温度と検出コイルの誘導起電力との関係に関する近似式
Approximated curve about the relationship between induced electric potential of secondary coil and surface temperature

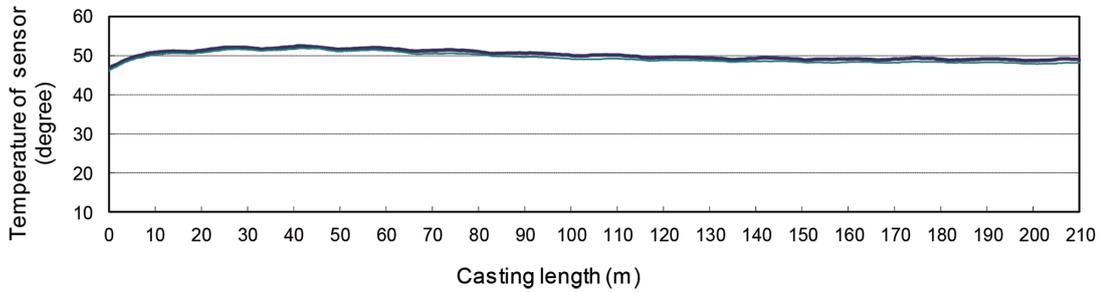


図7 铸造中の電磁センサー本体温度の時間変化
Successive change of sensor temperature during casting

式近似を行い電圧と铸片表面温度の関係式を求めた(図6)。(1)、(2)式に示す三次式で実験結果を再現することができる。次章で述べるプラントテストにおいては、(1)、(2)式を用いて電圧測定結果から铸片表面温度を推定する。

$$V = Z - Z_0 \quad (1)$$

$$T = -20065V^3 + 8752.8V^2 - 1390.8V + 858.8 \quad (2)$$

$$R^2 = 0.9967 \quad (3)$$

ここで、T: 温度 (degree), Z: 電圧 (V), Z_0 : 非磁性域での検出コイル電圧 (V)。

3. プラントテストによる電磁センサー測定結果と考察

前述した電磁センサーを铸型短辺ロール直下に設置した。電磁センサーはステンレス鋼製円筒容器内に格納し、かつ内部はエア冷却を行う構造とした。铸型短辺下に直接設置するため、铸造中、幅可変を行ってもセンサーと铸片間の距離はおよそ一定値に保持することができる。ただし、铸型短辺直下にセンサーを設置するため、铸片からの輻射熱による温度ドリフトが懸念される。そこで、電磁センサー内に熱電対を設置し铸造中の電磁センサー本体の温度変化を調査した。測定結果の一例を図7に示すが、铸造中のセ

表1 プラントテストの铸造条件
Casting conditions of plant test

| | |
|-----------------|--|
| Slab width | 1000-1800 mm |
| Casting speed | 0.75-1.2 m/min |
| Steel grade | Middle carbon Al-killed steel, low carbon Al-killed steel |
| Sensor position | (i) Vertical position: just below the narrow face of mold (ii) Distance between sensor and narrow face of slab: 30 mm |

ンサーの温度上昇はわずかであることがわかる。これは、電磁センサーには二次冷却水の一部が絶えず噴射されるためである。その結果、本センサーを搭載した铸型を連続铸造機に上架中、安定した測定を行うことができた。

表1に示す条件で铸造を行い、得られた電磁センサーの信号について解析した。まず、短辺側の二次冷却注水量を変更する試験を行った。結果を図8に示す。ここで、高い電圧は铸片表面温度が低いこと、逆に低い電圧は铸片表面温度が高いことに対応する。二次冷却水量密度の増減に呼応し、電磁センサーの電圧が速やかに変化していることがわかる。これはスプレー流量により铸片表面温度が迅速に変化することになるが、電磁センサーは铸片表面温度、す

なわち、表面の磁気特性によって検出コイルの電圧が変化することによる。

また、図8において14500sと16000sは同じ二次冷却流量となるが、センサー電圧はほぼ同じ値を示しており、電磁センサーの再現性も高いことが確認される。さらに铸造中、冷却水量を変更する実験を行い、二次冷却水量密度と铸片表面温度との関係を調査した。なお、図9の縦軸に示す铸片表面温度は電磁センサーの測定結果を図6に示した関係式を用いて表面温度に換算したものである。図9からも短辺冷却水量と铸片表面温度の間には良好な対応関係がみられることが確認される。

次に、铸型両短辺直下にセンサーをそれぞれ設置し連続して測定を行った。両短辺の铸片表面温度をそれぞれ縦軸、横軸にプロットすることで、キャスト内での铸片表面温度の変化を両短辺の偏差を含め評価することができる。代表的な測定例として、図10にはキャストを通じて铸造が安定していた例を示した。キャスト内で铸造速度や铸造幅が変化することで、平均的な铸片表面温度が増減するため、電磁センサーにて推定された両短辺の铸片表面温度は左下コーナーから右上コーナーにわたって分布している。また、

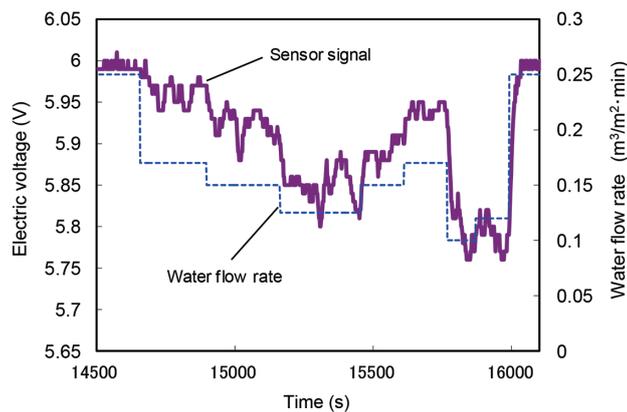


図8 短辺二次冷却水量変更時の電磁センサーの電圧変化
Successive change of sensor signals in the condition which water flow rate of spray at narrow face changes

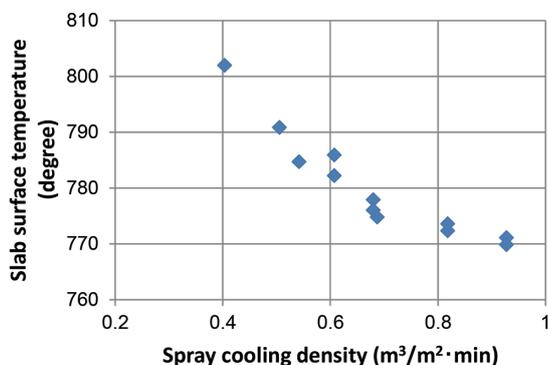


図9 短辺スプレー冷却水量密度が電磁センサーによる推定铸片表面温度に及ぼす影響
Effect of water flow rate of spray at narrow face on the estimated slab surface temperature

データのばらつきは铸片表面温度が高い条件で大きいことがわかる。ただ、本キャストについては、ばらつきはあるものの両センサーの信号は $y=x$ の線を中心にプロットされており、どちらか一方への偏りは見られない。

一方、図11には铸造の進行とともにノズル詰まりが進行した例を示した。加えて、図11においては、(a)ノズル詰まりがみられなかったキャスト前半と(b)ノズル詰まりが顕著となったキャスト後半で分けてプロットした。ノズル詰まりが見られなかったキャスト前半は左下コーナーに集中しているのに対し、ノズル詰まりが顕著となったキャスト後半は温度のばらつきも大きく、また、両短辺の温度差も増大していることがわかる。その上、図11のキャスト前半と図10を比較すると、図11の条件ではキャストの前半で短辺Bの表面温度が短辺Aと比較して低くなっていることがわかる。図10,図11から、ノズル吐出流が凝固シェル成長に大きく影響するだけでなく、ノズル吐出流の偏流

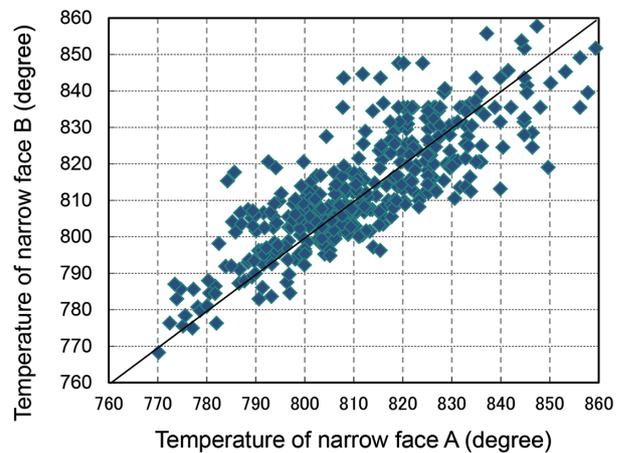


図10 両短辺の铸片表面温度のキャスト内変化
Successive change of surface temperature at both narrow faces in the sequential casting

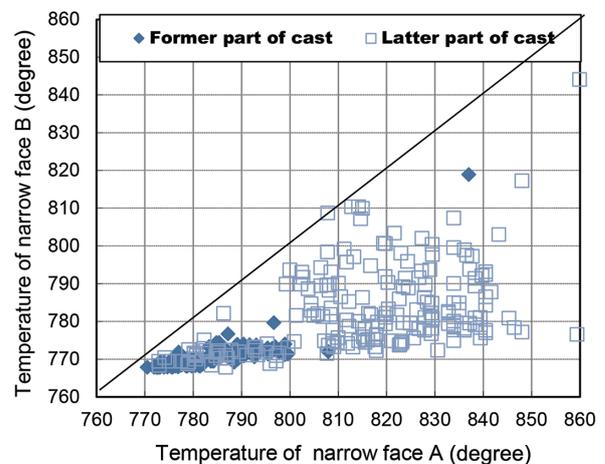


図11 両短辺の铸片表面温度のキャスト内変化(ノズル詰まりが生じた条件)
Successive change of surface temperature at both narrow faces in the sequential casting (Cast data with occurrence of nozzle clogging are plotted.)

は凝固シェル成長の差を生じさせ、結果として鋳片表面温度の差を生み出していることが明らかである。

以上、鋳型短辺直下での磁気変態を利用した電磁センサーを用いることで鋼種や鋳造条件による鋳片表面温度の変化を検出できることに加え、鋳型両短辺に設置し両センサーの偏差を評価することで、鋳型内流動、凝固状況を総合的に診断できる可能性を示唆しているといえる。

4. 結 言

鋳型短辺直下での鋳片の熱履歴に伴い磁気変態が生じることに着目し、鋳片表面温度を電磁的に測定する電磁センサーについて検討した。得られた結果は以下のように要約される。

- (1) 鋳片表面に印加した磁力線が、鋳片表面の磁性、すなわち、表面温度によって変化することを利用して、磁力線の変化を誘導起電力として検出し、誘導起電力と表面温度との関係式を用いて表面温度を推定することを可能にした。
- (2) 本センサーを用いることで、二次冷却水量による鋳片

表面温度の変化を測定できること、さらに、ノズル詰まりの進行とともに鋳片表面温度の変動が増大することがわかった。

- (3) 鋳型両短辺直下に本センサーを設置し、両短辺間の鋳片表面温度差を評価することで、鋳型内流動、凝固状態を総合的に診断できることがわかった。

参考文献

- 1) 王寺陸満：第153回，第154回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会，1994，p.1
- 2) Ishii, T., Tanaka, M., Uehara, A., Kimura, H., Tsutsumi, N.: Proc. Int. Symposium on Electromagnetic Processing of Materials, Nagoya, 1994, ISIJ, p.396
- 3) Harada, H., Toh, T., Nagashima, M., Yamana, M.: CAMP-ISIJ. 28, 586 (2015)
- 4) Harada, H., Toh, T., Nagashima, M., Yamana, M.: CAMP-ISIJ. 29, 650 (2016)
- 5) Harada, H., Nagashima, M., Toh, T.: Proc. of 8th Int. Symposium on Electromagnetic Processing of Materials, Canne, 2015



原田 寛 Hiroshi HARADA
プロセス研究所 鋼圧一貫研究部
上席主幹研究員 博士(工学)
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



長嶋政樹 Masaki NAGASHIMA
技術総括部 一貫最適化推進室 主幹



今野智弘 Tomohiro KONNO
広畑製鉄所 製鋼部 製鋼技術室長



山名正哲 Masanori YAMANA
日鉄テクノロジー(株)
広畑事業所 総務部



藤 健彦 Takehiko TOH
日鉄テクノロジー(株)
富津事業所 資源・プロセスソリューション部長
博士(環境科学)