

溶鋼連続测温技術の開発

Development of a New Technique for Continuous Molten Steel Temperature Measurement

杉浦雅人 ^{*(1)} Masato SUGIURA	山崎強 ^{*(2)} Tsuyoshi YAMAZAKI	中尾隆二 ^{*(3)} Ryuji NAKAO	田中智昭 ^{*(4)} Tomoaki TANAKA
永田清二 ^{*(5)} Seiji NAGATA	熊澤宏之 ^{*(6)} Hiroyuki KUMAZAWA	坪田英司 ^{*(7)} Eiji TSUBOTA	永井涉 ^{*(8)} Wataru NAGAI

抄 録

転炉等の溶鋼精錬炉では、処理中の溶鋼温度を正確に把握することがプロセス制御と成分造り込みの両面で極めて重要である。現在唯一の一般的测温法は、サブランスに取り付けた消耗型熱電対を間欠的に溶鋼に浸漬する方法である。新日本製鐵は、連続測定が可能な新しい溶鋼测温技術を開発した。炉底ノズルを通して放射测温を行う。2次元観察に画像処理技術を組み合わせ、細径ノズル内での光軸調整・維持を容易にした。研究室試験炉、実機ステンレス鋼精錬炉AOD及び実機スクラップ溶解炉で測定を実施し、消耗型熱電対と同等精度で連続的な温度推移が計測できることを確認した。

Abstract

In the production of steel in a smelting furnace such as a converter, to measure molten steel temperature is extremely important to both process control and metallurgical quality. Generally, sub-lance method is only utilized for direct measurement of the steel temperature. A disposable thermocouple probe attached at the tip of the sub-lance is intermittently inserted the steel. Nippon Steel developed a new continuous temperature measurement technique using 2-dimensional radiation thermometry. The molten steel is observed through a tuyere nozzle at the bottom of the furnace. Experiments were carried out on a laboratory steel bath, a stainless steel converter AOD and a scrap melting furnace. Efficiency of this continuous thermometry was clarified.

1. はじめに

製鋼プロセスの精錬工程では、耐火物炉に収容された高温の溶鋼が所定の温度、化学成分に精製される。精錬は化学反応であり、その反応速度は温度に依存することから、処理中の溶鋼温度を常に正確に把握する必要がある。また、溶鋼温度が時々刻々変動するなかで処理終了タイミングを判断するといったプロセス制御の観点からも、温度は極めて重要である。例えば転炉では、溶鋼に酸素ガスを吹き込み、炭素等の不純物成分を除去し、同時に酸化発熱反応により昇温する。大型転炉では一度に100 t以上の溶鋼が処理されるが、要する時間はわずか数十分であり、この間に、溶鋼温度は200程度上昇する。

現在は、サブランスと呼ばれる熱電対プローブ昇降装置を用いて間欠的な测温を行い、途中の温度推移はモデル計算で補完する方法が広く普及している。サブランスは1960年代に開発された技術であり、消耗型熱電対を溶鋼に浸漬させ、熱電対が溶断するまでのわず

かな時間に温度を読み取る方法である。サブランスの熱電対は精度、信頼性の高い测温が可能であるものの、着脱時間やプローブコスト等の制約があり、処理中にせいぜい数回の測定に限られる。このため、精錬不良や終点温度外れが発生し問題となることもある。

以上の背景から、溶鋼温度を連続的に測定する技術に対する期待は以前から高い。その実現には、熱電対のように感温素子を溶鋼に直接浸漬させる方法では熱的・材料的限界があるので、非接触で熱放射を測定する放射测温法の適用が有力である。精錬炉下部に設けた貫通観察ノズルから放射测温を行う方法について、既にいくつかの報告例がある^{1,2)}。

本稿では、まず炉内の溶鋼からの熱放射を測定する上での技術課題を整理する。次に、それを解決することに成功した新しい溶鋼放射测温技術^{3,4)}について述べる。この技術は、2次元放射测温に溶鋼自動検出画像処理を組み合わせたもので、熱電対と同等の精度で連続测温が可能であり、かつ視野変化の影響を受けにくい実用上の利点がある。

^{*(1)} 環境・プロセス研究開発センター 計測・制御研究開発部 主任研究員
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL:(0439)80-2102

^{*(2)} 広畑技術研究部(製鋼) 主任研究員

^{*(3)} 光技術研究部(製鋼) 主幹研究員

^{*(4)} 光製鐵所 製鋼工場 マネジャー

^{*(5)} 環境・プロセス研究開発センター システム制御技術部 マネジャー

^{*(6)} 広畑製鐵所 製鋼工場 課長

^{*(7)} 広畑製鐵所 設備部

^{*(8)} 広畑製鐵所 製鋼工場 マネジャー

2. 炉内溶鋼からの熱放射を観測する難しさ

放射测温法は、対象物体から発散される熱放射の放射輝度を測定することにより、その物体の温度を測定する方法である。非接触、高速、遠隔測定等の特徴を有することから、鉄鋼業に限らず多くの産業分野で広く利用されている。

対象物体が理想的な放射体すなわち黒体と仮定できる場合には、分光放射輝度はPlanckの黒体放射測に従い、次の式で表される。

$$L_b(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} \frac{1}{\exp(C_2 / \lambda T) - 1} \quad (1)$$

ここで、 λ ：波長

T ：対象物体温度(絶対温度)

C_1, C_2 ：それぞれ黒体放射の第1及び第2定数

観測波長 λ を固定すると、(1)式は温度 T のみの関数になり、温度 T が高くなると分光放射輝度 $L_b(\lambda, T)$ が単調増加する。従って、放射温度計で観測される分光放射輝度から正確な温度を求めることができる。

ところが、一般的な物体は黒体ではない。このとき、物体からの熱放射を測定したときに得られる分光放射輝度 L は、

$$L = \epsilon L_b(\lambda, T) + (1 - \epsilon) L_b(\lambda, T_s) \quad (2)$$

ここで、 ϵ ：対象物体表面の分光放射率

ϵ ：周囲からの外乱放射光が物体表面で

反射されて検出される割合を表す係数

T_s ：周囲物体の温度(絶対温度)

で与えられる。予め分光放射率の値を知っておく必要があり、さらに、周囲に存在する物体の温度 T_s が測定対象より高温であると、そこからの外乱放射が同時に観測される迷光雑音誤差が発生する。係数 ϵ は外乱放射源の位置、サイズあるいは対象物体の表面反射特性に依存し、正確な値を求めることは極めて困難な場合が多い。

放射测温法を炉内溶鋼に適用することを考える。図1に転炉等の溶鋼精錬炉の模式図を示す。炉体上部開口部から放射温度計で観測する方法は、(2)式で表現される状況に相当する。すなわち、溶鋼の放射率は、放射测温に適した赤色から近赤外の波長帯域で0.4程度であり⁵⁾、放射率変動や迷光雑音の影響を受ける。特に、上吹き酸

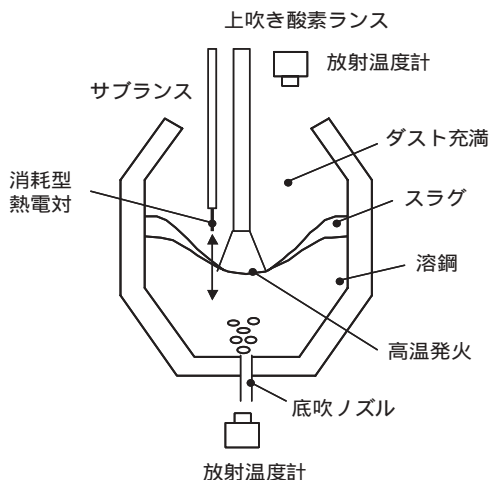


図1 転炉等の精錬炉の模式図

素ガスにより形成される高温火点は、激しい迷光雑音源になると考えられる。また、溶鋼表面にはスラグと呼ばれる溶融酸化物が浮遊していることが多く、この放射率の値は溶鋼とは異なることが知られている。さらに、炉内では多量のダストが発生するので、溶鋼からの放射光は途中の光路で減衰する。これらの原理的な問題から、精度の高い放射测温は事実上不可能であろう。

そこで、炉底部の炉体貫通ノズルに不活性ガスを流しながら溶鋼を観測する。不活性ガスは炉外側からノズルに圧入して、溶鋼側に吹き捨てる。炉底のノズルからガスを吹き込むこと自体は、既に操業のガス吹錬で行われている。溶鋼がノズル内に進入しない十分な流量のガスを流すので、噴出するガスが溶鋼中に常に一定高さ以上になる気柱を形成する。すると都合の良いことに、気柱内での放射光の多重反射により、溶鋼観察部は空洞黒体と呼ばれる擬似的な黒体になる。よって放射率が高位安定し、なおかつ迷光雑音も存在しない原理的には理想状態での放射测温となる。

しかしながら、この観察方法には実用上の難しさがある。観察ノズルを介して溶鋼を観察する状況を図2に示す。炉体耐火物の厚みは小型炉であっても500mm以上あるが、常時吹き捨てる不活性ガスのコスト、あるいはガス供給設備を考えると、ノズルは管内径20mm以下にすべきであり、非常に細長いパイプ内を通した観察となる。精錬炉は高温溶鋼の装入、排出が繰り返されるので、熱的・機械的原因でノズルが次第に変形することもある。さらに、常温のパーシガスが高温溶鋼に最初に当たるノズル先端には、マッシュルームとよばれる凝固鋼が付着し、視野が狭まることもある。点計測を行う一般的な放射温度計を導入したとすると、遠方のノズル先端の微小測定スポットを正確に捕捉する必要があり、光軸調整は容易ではない。具体的には、放射温度計の観測方向を微調整しながら、信号出力が最大となること、すなわち溶鋼を直視しているであろう方向を探し出す作業を行う。操業中に炉体に近づけない状況下では、何らかの原因で放射温度計の観察方向が少し変化しただけで、ノズル内面で反射され減衰した間接光を見たり、マッシュルームによる視野欠けが起こる。このとき観測される放射輝度は溶鋼自体のそれより小さく、放射温度計は真の溶鋼温度より低い温度を出力するが、溶鋼温度が低下したのか視野外れが発生したのかは判断できない。

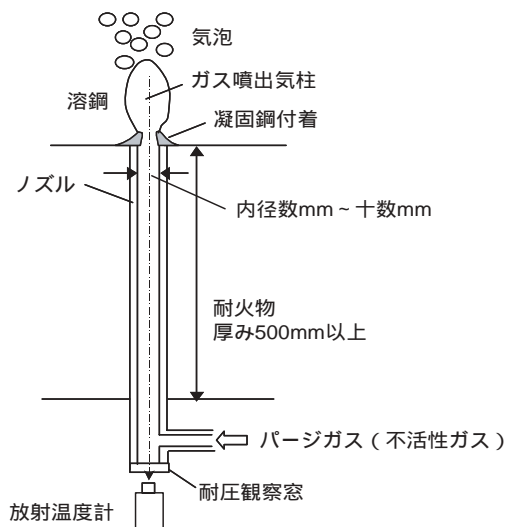


図2 溶鋼観察ノズルの概略図

3. 開発した溶鋼放射测温技術

3.1 ノズル内を2次元観察する測定原理

前述の細径長尺ノズル観察における課題に対して、2次元の光検出器を有する放射温度計でノズル内を画像観察することを考案した。2次元放射温度計の受光視野角は、ノズル先端部でノズル内径より広くなるようにする。すると図3にあるように、ノズル先端にある溶鋼を画像として捉えることができる。高温の溶鋼像(溶鋼を直視している領域)が明るく、低温のノズル内壁が暗く観察される。

このように測定対象である溶鋼を画像としてモニタリングできると、設置時の光軸調整が容易である。溶鋼像が中心から多少ずれていても、画像の視野に収まっていればよいので、点計測型放射温度計のように高精度の光軸調整が不要である。測定中に光軸ずれ(図3(b))やマッシュルームによる視野狭さくが起った場合(図3(c))、画像上の溶鋼像位置あるいはサイズが変化するものの、溶鋼像の輝度値は変わらない。そこでさらに、溶鋼像を自動検出する画像処理を組み合わせ、信頼性の高い安定した放射测温を可能とした。

3.2 放射测温システムの構成

図4は開発した2次元放射测温システムの概略構成図である。千数百の溶鋼の温度領域では可視光の赤色成分を放射しているので、2次元光検出器にはCCDカメラを利用できる。実機精錬炉では炉体外周鉄皮とその周辺温度が溶鋼からの伝熱により400以上の高温になることもある。常温付近での使用を前提とした電子機器であるCCDカメラをノズルに直接設置しようとすると、冷却機構が大掛かりになることが懸念された。そこで、耐熱イメージファイバ(画像伝送ファイバ)をノズルに取り付けて受光し、熱負荷の少ない離れた場所に設置したCCDカメラに画像を導いた。イメージファイ

バは保護チューブに収納して内部を空冷した。

イメージファイバはノズルを通した観察に適した受光レンズを取り付けた専用部品を製作した。CCDカメラはモノクロで、中心透過波長 $0.6\mu\text{m}$ の光学バンドパスフィルタを通して撮像する。カメラコントローラでCCDの露光時間を正確に制御して、放射輝度と画像輝度とを対応付ける。CCDカメラが出力する画像信号は画像入力ボードを介してパーソナルコンピュータ(PC)に取り込まれる。画像処理ボード及びPCは、近年、低価格化と高性能化が著しく進んでいるので、汎用市販品を使用することができる。

画像処理ソフトウェアは、熱画像から溶鋼像を抽出して温度を算出するリアルタイム画像処理演算を実行する。溶鋼像は画像上で最も輝度の高い部位なので、単純な2値化処理で比較的容易に抽出できる。2値化しきい値は画像の最高輝度値に基づき決定する。次に、溶鋼像の位置(重心位置の座標)およびサイズ(画素数)を求める。位置からはCCDの観測方向とノズル中心軸との一致状況、またサイズからは視野閉そく状況が判断できるので、例えば、溶鋼像が画像から外れるほどの大幅な光軸ずれや極端な視野閉そく進行が起っている場合は、処理を中断して警報を発する。次に、溶鋼像を切り出して平均輝度を計算し、予め測定しておいた校正データを参照して温度を算出する。以上の一連の画像処理フローを、終了入力がないまで毎秒5画面程度の処理スピードで繰り返し、連続的に測定する。测温値はモニタ画面に表示するとともに、溶鋼像位置、サイズなどの画像処理情報と合わせて記録する。

3.3 温度キャリブレーション

温度キャリブレーションとは、対象物体温度と放射温度計出力との検量線を予め実験的に求めておく作業である。ここでは、一般的な放射温度計と同じように、オフラインで黒体炉を用いて実施した。黒体炉とは放射率が1と見なせる空洞形発熱部を一定温度に保持して熱放射基準を供給する装置である。黒体炉が高温になるほど熱放射輝度が大きくなり、放射温度計の出力に相当する画像輝度は高くなる。PC内部では画像輝度が256階調のデジタル信号で扱われるが、画像処理を安定し行うためには、有効な画像輝度範囲は限られる。経験的には、画像輝度が40以下まで暗くなると溶鋼抽出処理が不安定になり、逆に220以上に明るくなるとCCD受光素子の飽和がはじまり感度が低下する。この間の180階調を温度に換算すると約200に相当し、実際の溶鋼温度変動範囲を全てカバーできない。

そこで、画像輝度が40から220の領域になるように、CCDの電子露光時間を段階的に切り替えることで、広い温度範囲に対応できるようにした。電子露光時間は $1/125\text{s}$ 、 $1/250\text{s}$ 、 $1/500\text{s}$ 、 $1/1000\text{s}$ 、 $1/2000\text{s}$ の5段階とした。所有する黒体炉の上限温度が 1700 であったので、溶鋼温度が 1700 を上回る場合は、露光時間 $1/2000\text{s}$ の検量線を外挿することとした。この結果、测温システムは 1200 から 1750 の温度範囲に対応することができる。

4. 小型試験炉における検証試験

測定精度や操作性といった基本的な性能を評価するため、はじめは溶鋼収容量 1.5t の試験炉にて基礎実験を行った。溶鋼は炭素濃度 1.5% のステンレス鋼とした。試験炉には誘導加熱装置があり、自然放冷と誘導加熱で溶鋼温度を変化させることができる。観察ノズルとしては、内径 4mm の単管パイプを炉底部に垂直に設けた。ノズル先端溶鋼界面からイメージファイバ受光部までの距離は 800mm で

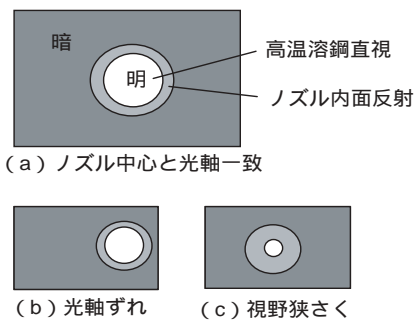


図3 熱画像の見え方

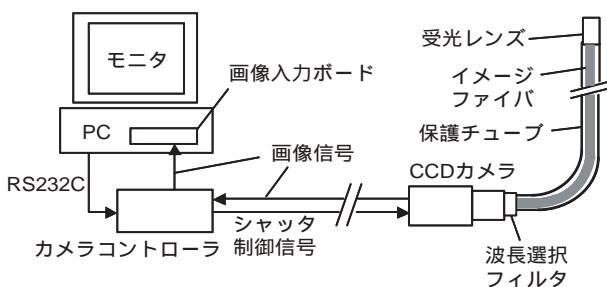


図4 2次元放射测温システム

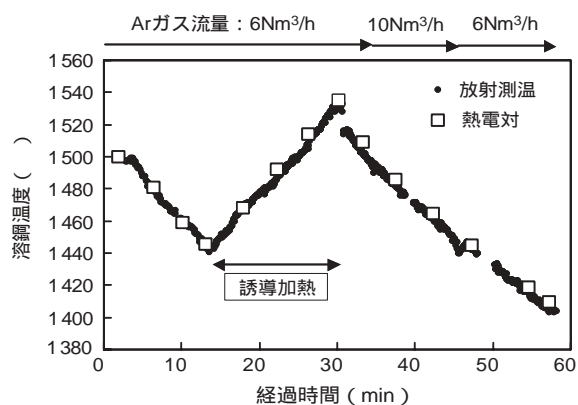


図5 1.5 t 試験炉での測定結果例

ある。この観察条件では、600×480画素のCCD画像上で、溶鋼が1000画素程度の大きさで撮像される。不活性ガスの種類はArとした。

測定結果の一例を図5に示す。ここでは、溶鋼を注入してから13分間自然放冷し、その後経過時間30分まで誘導加熱で昇温し、30分以降再度放冷させる温度変化を与えた。消耗型熱電対(人手による間欠測定)による比較測定を約3分間隔で行った。途中パージガス流量を6Nm³/hから10Nm³/hに変更する操作も行った。本放射測温は熱電対測定と良く一致し、また、時系列データのばらつきも安定していることも明らかになった。ノズル内径とガス流量から見積られる気柱長さが80mm程度であること⁶⁾、気柱先端では微細気泡が次々と生成する光学的拡散面になっていると推察されることを考慮すると、ガス気柱は安定して空洞黒体になっていると結論付けられる。ここでガス流量領域では、流量が変更しても空洞黒体への影響はなかった。操作性に関しては、内径4mmのノズルに対してイメージファイバの光軸調整を行う取り付け作業も比較的容易であり、画像観察方式であることの利点が確かめられた。

5. 生産現場への適用

5.1 ステンレス鋼精錬炉(AOD炉)

画像観察式放射測温の有用性が確認されたことを受けて、次に我々は、光製鐵所にある操業中の実機60tステンレス鋼精錬炉(AOD炉)での測温実験に取り組んだ。既設の底吹き精錬ノズル(内径13mm)の1本を流用してイメージファイバ観測光学系を設置した。溶鋼界面からイメージファイバ受光部までは約1.5mの距離がある。ガス種類・流量は操業条件のままとし、精錬前半はO₂とN₂の混合ガス、後半はN₂あるいはAr単独ガスを吹き込む。

図6に測定結果例を示す。精錬処理前半では酸素混合ガスにより、溶鋼界面が発火して測定できない。そこで、サブランス熱電対測定前後で酸素ガスのみを一時的に停止して放射測温を行った。経過時間15分以降は、ガスがN₂またはAr単独になるので連続的な温度推移が測定されている。本方式放射測温はサブランス熱電対測定と非常に良く対応していた。ただし、放射測温は熱電対に対して常に140℃低い値を示していたので、一定値を加算する補正を行っている。これはガスによる気柱内溶鋼界面の冷却の影響等が考えられる。連続的な測温が可能になると、従来のサブランス測定とモデル計算に基づく操業と比較して、精錬制御精度を大きく改善することが期待され、現在実機導入を進めている。

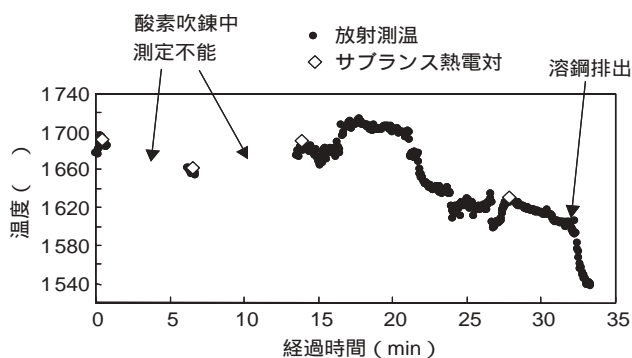


図6 実機AOD炉での測定結果例

5.2 スクラップ溶解炉

広畑製鐵所では、O₂ガス上底吹きと微粉炭吹き込みにより加熱、加炭を行うスクラップ溶解炉を対象として、本方式放射測温を試みた。この溶解炉には主原料のスクラップ材の他に多種多量の副原料が投入されるが、処理の途中までは未溶解スクラップが障害となりサブランスが挿入できず、今までは温度推移を正確に把握することが難しかった。複数ある底吹きノズルの1本を連続測温に使用し、不活性ガスとしてN₂ガスを一定流量吹き込んだ。種湯にスクラップ冷片を装入した時点から測定を開始し、溶解の進行に伴い溶銑温度が上昇する様子を観察した。サブランス測定時に両者の測温指示値を比較するとほぼ±10℃以内で一致していた。このスクラップ溶解炉で温度推移を実測することができたのは初めてであり、様々の操業条件で測定を実施した結果、各種原料の投入量、投入速度等と溶銑温度変化との関係が解明され、溶解処理の安定化、炉体耐火物損傷の低減が図られた。

6. おわりに

新日本製鐵は製鋼プロセスを対象とした新しい溶鋼放射測温技術を開発した。精錬炉の下部ノズルから溶鋼の熱放射を2次元観測し、画像処理と組み合わせて放射測温を行う。この技術は、従来の消耗型熱電対による間欠測定に替わり、処理中の連続測温を可能にする。また、光軸ずれや視野サイズ変化の影響を受けにくい等の実用上の大きな利点がある。測定システムを開発し、1.5t試験炉、実機60tステンレス鋼精錬炉(AOD)及び実機スクラップ溶解炉で実湯試験を実施した。この結果、浸漬消耗型熱電対の測定値とよく対応した良好な結果が得られ、本方式放射測温の有用性が確認された。今後、AOD炉、転炉などの精錬プロセスで本技術の実用化を進める予定である。

参考文献

- 1) 犬井正彦ほか:材料とプロセス 2, 216(1989)
- 2) Ramaseder, N. et al.: Metallurgical Plant and Technology International 2, 48(2001)
- 3) 杉浦雅人ほか:材料とプロセス .14, 1005(2001)
- 4) 杉浦雅人ほか:計測自動制御学会第19回センシングフォーラム資料 2002 p.351
- 5) Shvarev, J.K.: Teplofizika vycokih temperatur .17(2) 66(1979)
- 6) 加藤嘉英ほか:鉄と鋼 .70(3) 380(1984)