



特集記事・2

ここまで来た鉄鋼の計測・制御・システム技術

画像計測を用いた熔融金属の放射测温技術

Radiation Thermometry Techniques using Image Processing
for Molten Metals

杉浦雅人
Masato Sugiura

新日本製鐵(株)
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

1 はじめに

温度計測は多くの産業で一般的に行われている。製造工程で鋼材の加熱と冷却を繰り返す鉄鋼業では、プロセス制御と品質作り込みの両面で温度管理が重要である。物体からの熱放射を観測してその温度を知る放射测温法は、高温物体の温度を非接触で測定できることから、鉄鋼業は古くからその利用技術に関する研究開発に積極的であった。国内では、1980年代から90年代にかけて鉄鋼各社が放射测温技術の開発競争を繰り広げ、数多くのアプリケーションが考案された。この背景としては、焼鈍工程の連続化などによって高速で走行する鋼板の温度を測定するニーズが高まったことと、デバイスの進歩で放射温度計の性能が向上したことが挙げられる。当時は、連続ラインの処理過程で表面の放射率が変化する鋼板の温度をいかに正確に求めるかが課題であった。一方、この時代、製鉄・製鋼工程の熔融金属の温度計測では、“浸漬消耗型熱電対”と呼ばれる接触式の测温方法がすでに普及していたため、放射测温のニーズは潜在化していた。浸漬消耗型熱電対は精度の高い测温が行えるが、あくまで間欠的な測定である。熔融金属の温度変化を連続的に知りたい場合には、放射测温法の適用が期待される。筆者は10年ほど前からこの熔融金属を対象とした放射测温技術に興味を持ち、研究開発に取り組んできた¹⁻⁴⁾。本稿では、その具体例として、精錬炉の炉底ノズルを通して炉内を覗く溶鋼連続测温と、高炉の出鉄口近傍での溶鉄連続测温について紹介する。これらは放射测温法の応用技術であるが、従来の点計測型の測定とは異なり、測定対象からの熱放射を画像計測することが特徴である。

2 熔融金属の温度測定の歴史

はじめに、鉄鋼業における溶鉄・溶鋼を対象とした温度計

測について、この分野の技術史を概説したい。産業革命で英国に遅れをとったドイツは19世紀の終わりから国を挙げて鉄鋼業を発展させた。この過程で温度計測にかかわる理論が大いに進歩した。1900年にドイツの物理学者Planckによって導出された黒体放射理論は、量子力学の始まりとして有名であるが、溶鉄炉の放射测温が産業上のニーズであったと言われている。しかし放射温度計がすぐに実用化したわけではない。実際の生産現場の熔融金属の测温は、熟練工が専用のカラーガラスを通して目視する方法に頼っていた。高温物体が発光する赤色光の強度や色合いが温度に依存しているので、経験を積んだ人の目は、“温度がいつもと同じであるか”を知ることができた。2つの物体の輝度を比較する時の肉眼の鋭敏性を利用した光高温計も使われた。光高温計は、人がファインダを覗いて、内蔵しているフィラメントの輝度を対象の輝度に一致させて温度を推定する。当時、光学的な測定装置はあったものの、熔融金属表面に放射率が異なるスラグが浮遊している問題や、ダスト、煙といった光学計測上の障害、そして計測装置には過酷な高温雰囲気を実用化を妨げていた。

このような時代に、平炉の溶鋼を対象としたユニークな放射测温技術が開発されている⁵⁾。blow-tube高温計と呼ばれるこの测温は、溶鋼湯面に中空パイプを挿入し、先端からガスを噴き出しながら溶鋼内の熱放射を観測する。重量のある装置を手でハンドリングすることや、パイプに付着する凝固物の除去といったメンテナンスの負担から普及に至らず、後に開発された浸漬消耗型熱電対に取って代わられた。

浸漬消耗型熱電対は英国のSchofieldによって考案され、1960年頃には世界の鉄鋼業で広く使われていた⁶⁾。使い捨ての熱電対プローブを熔融金属に挿入するこの测温方法は、開発当初“quick-immersion熱電対”と呼ばれた。その名の通り、熱電対素線が熔融金属にコンタクトして溶断する数秒間で熔融金属の温度を測定する。浸漬消耗型熱電対は間欠的な測

定ではあるが、信頼できる測定値が得られる测温手段として、今日でも一般的に使われている。

長らく実用化に至る新技術が出現しなかったが、1990年代に我が国で石英光ファイバを使った溶融金属の测温技術が開発された^{1,7,8)}。山田らによって開発されたこの技術は、石英光ファイバの素線を溶融金属に直接浸漬させ、溶融金属内部で放射光を捉える特殊な放射测温法である。離れて観測する一般的な放射温度計は湯面の放射率の影響を受けるが、ファイバ先端を溶融金属に浸漬させることで等温場で囲まれた空洞黒体が形成されるので、見かけの放射率が1になる。光ファイバ先端部は徐々に損耗するが、検出器の応答が速いので溶損する前に测温が行える。測定終了後は光ファイバを引き上げ、先端部を切断して再度測定に使用する。浸漬消耗型熱電対と比較して、自動化が容易で、測定コストが小さく、より頻度の高い測定が可能になる。連続铸造機に溶鋼を供給するタンディッシュの温度管理や、高炉出銑口直近での溶銑温度測定で実用化されている。

一方、blow-tube 高温計の発想に近い方法として、精錬炉の炉底部に設けたノズルから溶鋼を観測する取り組みが国内外で報告されている^{9,10)}。しかし、これらは放射温度計の光軸調整とその維持に実用上の課題を残した。2000年頃、筆者らは、この課題を解決することができる画像計測型の放射测温技術を提案した。その後、この画像計測型の放射测温技術を高炉出銑温度測定にも応用した。これらの测温技術をそれぞれ3章と4章で詳しく述べる。

3 精錬炉の溶鋼の放射测温

3.1 開発の狙いと測定対象

転炉等の精錬炉では、溶鋼に酸素ガスを吹き込み、炭素等の成分を調整するとともに、酸化発熱反応により所定の温度まで昇温する処理が行われる。処理中の溶鋼温度推移の把握は重要であり、浸漬消耗型熱電対を取り付けたサブランスを昇降させる测温方法が一般化している。しかし前述の通り、浸漬消耗型熱電対は間欠測定であるので、测温は精錬中に数回に限られる。炉体下部の観察ノズルから放射测温を行う方法は連続測定を可能にするため、精錬精度とプロセス制御性の向上が期待される。

精錬炉上部の開口部から炉内の溶鋼を観測することは以下の理由でできない。すなわち、1) 炉内はダストが多量に発生している、2) 上吹きランスの酸素ガスによる高温火点が外乱となる、3) 溶鋼表面にはスラグが浮遊していて放射率が不明である。そこで、精錬炉の底部に貫通ノズルを設け、ノズルに不活性ガスを圧入して溶鋼の進入を防止して溶鋼を観測する。ノズル先端では噴出するガスの気柱によって実効放射

率が1とみなせる疑似的な黒体が形成されるので都合がよい。

3.2 溶鋼観察の課題

ノズル内径はパージガス流量の制約から10mm程度かそれ以下にする必要がある。すると、図1に示すように、細長いノズル内部を通した溶鋼観察が求められるので、放射温度計の光軸調整と維持が難しい。高温の溶鋼の装入と排出を繰り返すとノズルがわずかに変形することもある。さらに、パージガスによる冷却でノズル先端に溶鋼が凝固して付着し、視野が狭まることもある。一般的な点計測型の放射温度計を使うことを考えると、測定中に観察方向がずれてノズル内面反射光を見たり、凝固鋼による視野欠けが起り得る。このとき観察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。しかしながら、真に溶鋼温度が低下したのか、視野はずれが発生したのかを温度測定値から判断することはできない。

3.3 画像計測方式の放射测温

溶鋼を安定して直視する課題に対して、CCDカメラを2次元の放射温度計として使用して、視野を常時モニタリングしつつ测温を行う方法を考案した。CCDカメラの視野は、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、極端な光軸ずれや、凝固鋼による視野の完全閉そくが起らな

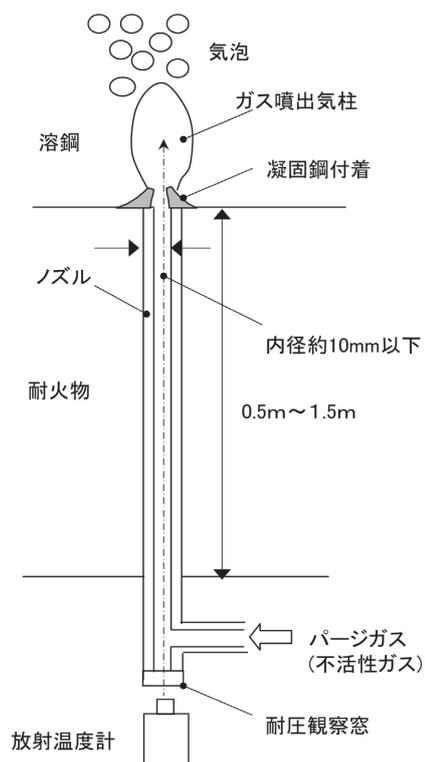


図1 炉内溶鋼観察ノズルの概略図²⁾

い限り、図2にあるように、画像上で溶鋼像（溶鋼を直接観測している領域）の位置あるいはサイズが変化するだけで、温度に対応している溶鋼像の輝度は変化しない。したがって、溶鋼像の輝度を自動的に検出する画像処理を組み合わせれば安定した測温が可能になる。

このような画像処理は、今日では、PCの画像処理システムで比較的簡単に実現できる。CCDカメラが捉える熱画像はPCに取り込まれデジタル化される。画像処理は、はじめに2値化処理で溶鋼像を抽出する。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（中心位置の座標）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、画像から溶鋼像が外れるほどの大幅な光軸ずれや著しい視野閉そくの進行がある場合は、処理を中断して警報を発する。次に、抽出した溶鋼像の輝度を計算し、予めPCに記憶しておいた温度校正データを参照して溶鋼温度を算出する。以上の画像処理を繰り返して連続的に温度測定値を得る。CCDカメラの温度校正は実験室で黒体炉（放射率が1と見なせる発熱体の温度を高精度に制御する基準放射源）を用いて実施した。カメラのゲインやレンズ絞りなどの光量調整機能をすべて固定した上で黒体炉を観測して、温度と256階調の画像輝度とを対応付ける。図3に温度校正データの一部を示す。一つのシャッタースピードでカバーできる温度範囲は約200℃であった。測定対象の温度範囲はこれより広がったので、複数のシャッタースピードの校正データを用意しておき、適切な画像輝度で観察するようにPCからの制御でシャッタースピードを切り替えるようにした。

3.4 試験結果と考察

まず筆者らは、試験炉に内径4mmの貫通ノズルを設置して検証実験を実施した。溶鋼の観察距離は800mmである。パージガスにはArを使用した。試験炉に1.5tonの溶鋼を装入し、誘導加熱と自然放冷で温度を変化させた。ノズル観察放射測温を実行すると同時に、約3分間隔で浸漬消耗型熱電対による比較測定（人手による間欠測定）を行った。図4に

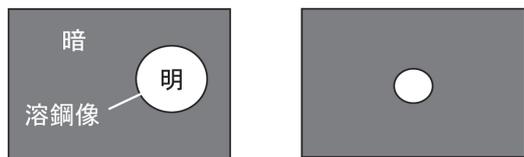


図2 熱画像の見え方²⁾

測定結果を示す。放射測温と熱電対の測定値は良く一致していた。ガス気柱は安定した擬似黒体になっていたと考えられる。途中パージガス流量を6Nm³/hから10Nm³/hに変化させたが、この影響は指示値に表れなかった。

次に、実機ステンレス精錬炉（AOD炉）で実験を行った。複数ある既設の底吹ガス精錬ノズル（内径13mm）のうち1本を改造して溶鋼観測光学系を設置した。溶鋼までの観察距離は約1.5mであった。精錬処理前半では酸素と不活性ガスの混合ガスを吹くので、溶鋼界面が発火して測定できない。そこで、サブランス測温前後で酸素ガスを一時的に停止して画像計測放射測温を実施した。精錬処理後半は不活性ガスのみを吹く作業になるので、連続的な温度推移が測定できた。画像計測放射測温はサブランス熱電対に対して常に約140℃低い値を示していたが、良い相関を示していた。両者のずれの原因は、画像信号ケーブルが温度校正時より延長されたこと、ガス流量が300Nm³/hと多いので気柱内溶鋼界面

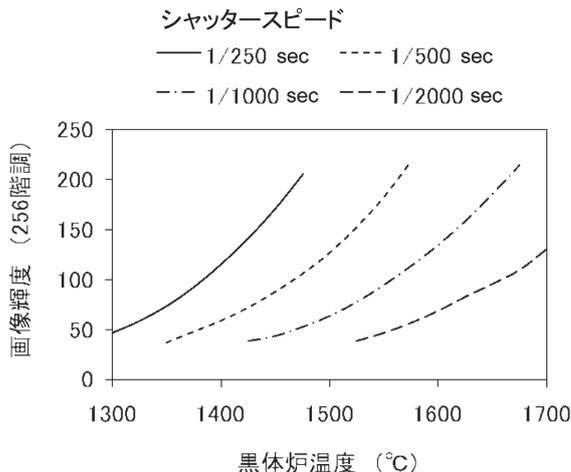


図3 CCDカメラの温度校正結果²⁾

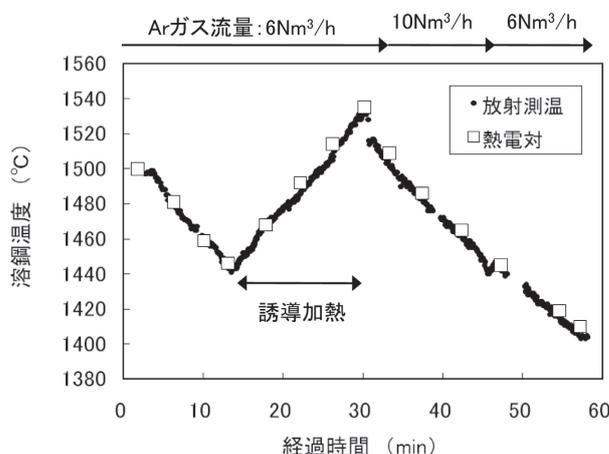


図4 1.5ton試験炉での溶鋼測温結果²⁾

の冷却が起こっていたものと考えられる。

4 高炉出鉄流の放射测温

4.1 開発の背景と測定対象

高炉の出鉄口から流出する溶鉄の温度は、直接観察することができない炉下部の熱レベルを推定する上で重要な情報の一つである。図5に示すように、高炉の炉底には溶鉄と溶融スラグが滴下して湯溜まりを形成している。出鉄口に貫通孔を開けると溶鉄と溶融スラグの混合液体（以下出鉄流と呼ぶ）が流出する。出鉄流は出鉄樋を進み、スキムで溶鉄とスラグに分けられ、それぞれトーチカーとスラグ取鍋に注がれる。今日一般的に行われている浸漬消耗型熱電対による测温は、作業性や安全性の観点から溶鉄が出鉄樋を進んだ先で行われる。1回の出鉄作業は3時間程度続くが、熱電対プローブの着脱を含めた人手測定の時間・労力あるいは貴金属熱電対のコストの制約から、通常测温は数回しか行わない。また、出鉄初期の熱電対測定値は、出鉄樋の抜熱の影響を受けて流出時点の温度すなわち炉内温度より低下していることが懸念される。本来測るべきものは出鉄口から流出した直後の連続的な温度推移であり、非接触の放射测温が望まれる。

4.2 放射测温適用の課題

高炉の出鉄流の测温に放射测温法が使われていなかった理由を黒体放射理論に立ち返って説明する。放射温度計が観測する高温物体からの熱放射輝度LはPlanckの黒体放射式を使って次のように表される。

$$L = \epsilon \times \frac{c_1}{\lambda^5} \times \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad [\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}] \dots (1)$$

ここで、 ϵ ; 放射率

T ; 温度 [K]

λ ; 観測波長 [m]

c_1 ; 定数 $1.19 \times 10^{-16} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$

c_2 ; 定数 $1.44 \times 10^{-2} [\text{m} \cdot \text{K}]$

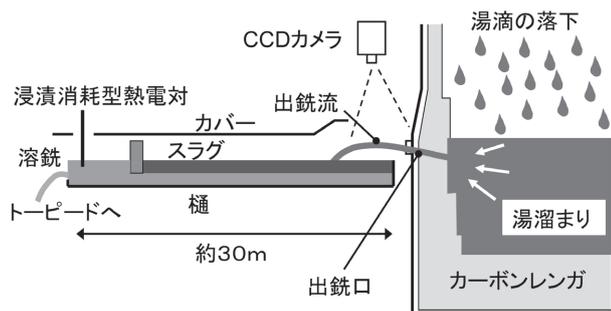


図5 高炉出鉄口付近の構造⁴⁾

実際の測定では観測波長 λ が固定されるので、(1)式の未知数は温度Tと放射率 ϵ である。したがって温度Tを求めるには放射率の情報が必須である。出鉄流を測定対象とする場合、放射率が異なる溶鉄とスラグが未知の比率で混合している。赤色から近赤外の波長帯域における溶鉄の放射率は約0.4とされている¹¹⁾。スラグの放射率はそれより高い。溶鉄とスラグの混合比率は出鉄中に時々刻々と変化して把握できない。そもそも放射率の異なる高温液体が混じり合った場合にその放射率がどのような値になるかは明らかでない。検出波長 $0.65 \mu\text{m}$ の放射温度計で温度 1500°C の出鉄流を観測する場合、放射率が0.4からわずかに0.1上昇しただけで 30°C 以上の測定誤差を生じる。このように放射率の不安定性は致命的な测温誤差になる。温度計測の専門家は、この原理的な技術課題は克服し難いと考えていたため、高炉出鉄流は放射测温が利用できない対象と言われていた。

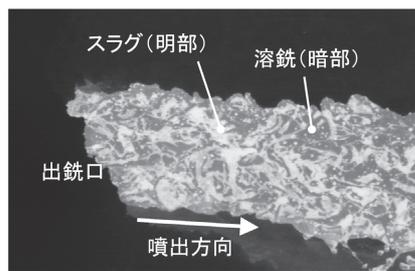
4.3 出鉄流の熱画像

筆者らは、溶鉄とスラグの混合状態や見かけの放射率を調査するため、出鉄流を撮像してみた。図5に示すように、出鉄口から樋のカバーに隠れるまでの出鉄流の熱画像をCCDカメラで観察した。出鉄口付近は雰囲気温度が高く、時に炉内ガスが噴出して溶鉄・スラグのスプラッシュが飛散する劣悪な環境であるため、カメラは空冷ジャケットに収納して保護している。前章の溶鋼放射测温と同様に、カメラには予め温度目盛りを付けた。ただし、出鉄流は放射率が1ではないので、画像輝度から得られる温度はあくまで見かけの温度（輝度温度ともいう）である。

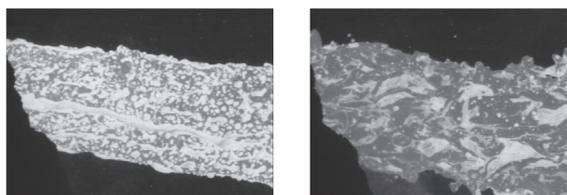
出鉄流は $10\text{m}/\text{sec}$ 程度の高速で噴出しているので、像流れが生じない短い露光時間 ($1/10000\text{sec}$) で撮像した。すると、図6 (a) に示すような“斑模様”の熱画像が得られた。出鉄流にはやや暗い領域（暗部）とそれに比べて明るい領域（明部）が存在した。炉内湯溜りの一箇所から流出する液体に2値的な温度分布があるとは考えにくい。この輝度差の原因を調べたところ、暗部は溶鉄であり、明部はスラグであることが分かった。すなわち、溶鉄とスラグは渾然一体となっているのではなく、水と油のように分離した状態で流出していることが明らかになった。通常の点計測型の放射温度計を使うことを考えると、光検出器の応答時間が 100msec 程度であることから斑模様が平均化されて、実効放射率が溶鉄とスラグの混合比率に影響されることになり十分な測定精度が得られない。ところが、今回筆者らが得た知見は、出鉄流の斑模様を時間的・空間的に分解できる高速・高精細な観測を行えば、放射率が既知の溶鉄をスラグと分離して捉えられるということである。

4.4 画像計測方式の放射测温

斑模様の熱画像から溶銑部分の輝度を判定して温度を演算する画像処理手法を説明する。熱画像の溶銑部の輝度の代表値を求めることがポイントである。ここではヒストグラム処理を使った。熱画像の輝度ヒストグラムを求めると図7のような形状になる。ヒストグラムの低輝度側には熱放射源がなく暗い背景の輝度分布がある。高輝度側には出銑流の輝度分布があり、そこでは溶銑とスラグの分布が一部重なって存在する。溶銑分布の形状は出銑流径やスラグ混合比率で変化するが、ピークを示す輝度レベル(図中のP)は温度のみに依存する。そこで、溶銑分布のピークPを溶銑領域の代表輝度とすることとし、次に述べる処理でPを自動検出する。背景輝度の分布は出銑中に変化しないので、背景輝度分布が終わる位置に始点Kを設定しておく。始点Kから高輝度側の隣り合う輝度レベル間で画素数の大小を比較する処理を順に進めると、画素数が減少に転じる輝度レベルが



(a) 代表的な出銑流の熱画像



(b) スラグ比率が高い場合 (c) スラグ比率が低い場合

図6 出銑流の熱画像⁴⁾

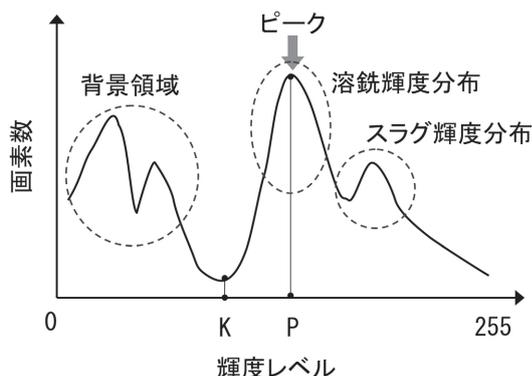


図7 輝度ヒストグラムと溶銑ピーク輝度検出処理⁴⁾

ピークPである。このような処理を行えば出銑流の温度が低くてもスラグピークを溶銑ピークとして誤検出することがない。次に、カメラの温度校正データを参照して画像輝度から溶銑の見かけの温度を演算する。予め実測した校正曲線は関数にフィッティングしてソフトウェアに与えておく。引き続き、溶銑の放射率で見かけの温度を補正して溶銑温度を求める。PCシステムは上記の一連の処理をリアルタイムで実行し、連続测温が実現される。

4.5 測定結果と考察

オンライン試験装置を構築し、操業中の高炉で試験を実施した。画像計測放射测温(試験装置)の温度と、出銑樋下流にて浸漬消耗型熱電対で測定した溶銑温度(通常の操業测温)を比較した結果を図8に示す。出銑①と出銑②は異なる出銑の溶銑温度推移である。出銑中に溶銑とスラグの混合状態は、図6の(a)、(b)および(c)のように変動している。凡そ1500~1550℃の範囲で変動する溶銑温度に対して、画像計測放射测温の測定値は熱電対とほぼ一致していた。両者の測定値の僅かな差については、熱電対の測定精度や測定位置の不一致などの要因もあることから、画像計測放射测温は実用上十分な精度があると評価している。出銑中の温度は基本的に出銑後半に向かって徐々に上昇する。これは、出銑時間の経過とともに炉内湯溜まりの溶銑・スラグ液面が低下し、上部から滴下して間もない温度の高い溶銑・スラグが出銑口に流れ込むためと考えられる。ただし、出銑②のように出銑初期に短時間だけ温度が高く、その後は温度変化がほと

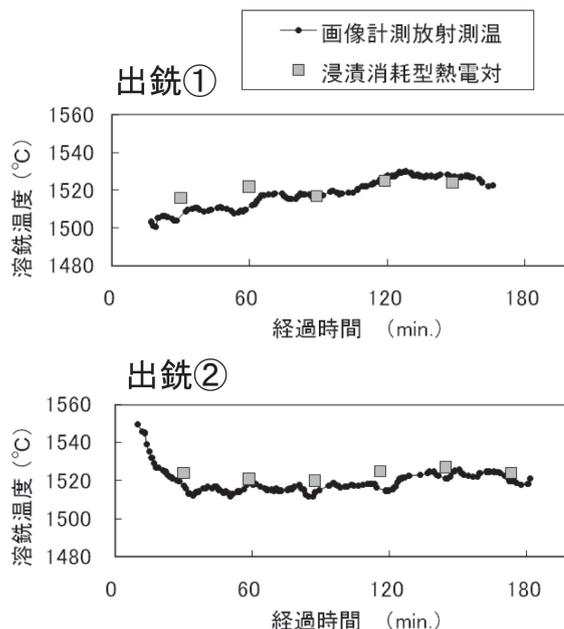


図8 出銑中の連続测温結果⁴⁾

んどないケースもあった。出銑温度推移には他にも様々なパターンが見られるので、高炉の炉内には何らかの非定常性があるものと考えられる。

5 おわりに

1500℃付近の高温溶融金属の温度計測の話題として、精錬炉の溶鋼測温と、高炉の出銑流測温の2つの開発事例を解説した。前者は、小径で長尺の炉体貫通ノズルを通して溶鋼を観測するもので、光軸ずれや視野狭さくに対してロバストな画像計測方式の温度計測を提案した。後者では、出銑流の熱画像を高速シャッターで撮像すると溶銑とスラグが分離して斑模様に見える現象を利用して、スラグ比率の影響を受けない溶銑温度測定を実現した。これらの画像計測方式の放射測温は、単なる熱電対測定の代替でなく、急峻な温度変化を捉えることができる連続測定を可能にしている。

鉄鋼業の放射温度測定には一世紀を超える長い歴史があり、熱放射理論や基礎的な計測手法はすでに体系化されている。しかし製鉄所の生産現場を見渡すと、いまでも放射測温の適用が難しい、あるいは十分な測温精度が得られない対象が少なくない。市販の放射温度計の導入では対処できない測定対象については、鉄鋼業の計測技術者が自ら新しい着想の測定手法を研究開発することが必要であろう。本稿で紹介した開発事例は、最近の光学デバイスの進歩や安価化した計算機をうまく利用すれば、放射測温法にさらなる可能性があることを示唆している。今後は、測定の不完全さをモデル計算に基づく推定で補うといった知的な温度計測の研究領域にも期待したい。

参考文献

- 1) Z.M.Zhang, B.K.Tsai and G.Marchin : Radiometric Temperature Measurement II .Applications, Academic Press, (2010)
- 2) 杉浦雅人, 中尾隆二, 山崎強, 田中智昭, 内藤修治 : SICE 第19回センシングフォーラム資料, (2002), 351.
- 3) 杉浦雅人, 山崎強, 中尾隆二, 田中智昭, 永田清二, 熊澤宏之, 坪田英司, 永井渉 : 新日鐵技報, 379 (2003), 21.
- 4) 杉浦雅人, 大谷洋平, 山本大寛, 松崎眞六 : SICE 第24回センシングフォーラム資料, (2007), 192.
- 5) D.P.DeWitt and Gene D.Nutter : Theory and practice of Radiation Thermometry, A Wiley-Interscience Publication, (1988)
- 6) J.A.Stevenson : Platinum Metals Rev.,7 (1963) 1, 2.
- 7) 山田善郎, 大角明, 旗手嵩文, 前田浩史, 板倉孝, 若井造 : NKK技報, 152 (1996), 22.
- 8) 若井造, 下村昭夫, 早坂祥和 : 第38回SICE 学術講演会予稿集, (1999), 113.
- 9) 犬井正彦, 森明義, 岡田剛, 山本俊行, 小山朝良 : 材料とプロセス, 2 (1989), 216.
- 10) N.Ramaseder and J.Heiss : Metallurgical Plant and Technology International ,2 (2001), 48.
- 11) K.M.Shvarev, V.S.Gushchin, B.A.Baum and V.P.Gel'd : High Temperature, 17 (1979), 57.

(2010年11月16日受付)