

(論文)

# 製鋼溶鋼温度ばらつき分布予測技術の開発

## Development of prediction technique for temperature distribution of molten steel in steelmaking



友近信行<sup>\*1</sup> (博士(情報学)) 中岡威博<sup>\*2</sup> (博士(工学)) 佃 岳洋<sup>\*3</sup> 長瀬佳之<sup>\*3</sup> 桂 寛<sup>\*4</sup> 隅田一毅<sup>\*5</sup>  
 Dr. Nobuyuki TOMOCHIKA Dr. Takehiro NAKAOKA Takehiro TSUKUDA Yoshiyuki NAGASE Hiroshi KATSURA Kazuki SUMIDA

To promote the transfer to younger workers through operation support, a technique has been developed to present, in a probability distribution, the deviation risk for molten steel temperature in the converter furnace, molten steel treatment, and continuous casting steps involved in processing. This technique constructs a probability distribution by converting and transferring massive amounts of recorded data concerning past performance into information corresponding to the current operational state. It is based on a physical model, weighing the information in accordance with the degree of similarity. Its advantages are that calculable factors in a deterministic manner are separated from uncertain factors, the time change of the uncertain factors is taken into account on the basis of thermal influence, and Just-In-Time modeling is applied, which enables the systematic calculation of the probability distribution even for different conditions of such factors as steel types and facilities. This technique has been applied to an actual steelmaking process, which has reduced the deviation of casting temperature from the target value to less than half of the conventional one.

まえがき = 製鉄所などの製造現場において熟練操業者の減少が進む中、若年操業者への技能継承が急務となっている。作業標準の整備や形式知の明文化だけでなく、暗黙知の形式知化と継承に有効な操業支援システムのニーズが高まっている。

いっぽう、ICTの普及と進展により、従来では考えられなかった大量のデータ収集とその活用が可能になってきており、JIT (Just-In-Time) モデリングなど過去の大量操業データに基づくシステム<sup>1), 2)</sup>が開発されてきた。

そのようななか、当社ではJITモデリング技術を応用した操業支援システムの開発に注力してきた<sup>3), 4)</sup>。これらのシステムは、実績データの単なる羅列やトレンドの可視化ではなく、①過去データの中から類似性の高い事例を重視し、②物理モデルに基づいて現操業状態に対応

した仮想経験情報に変換し、③熟練者の頭の中のイメージを視覚情報として提示することによって若年者の経験値を補い、④適切な判断やアクションを支援することを特徴としている。

本稿では、当社加古川製鉄所における転炉～連続間の複雑な取鍋溶鋼物流を対象に、溶鋼温度の確率分布を予測する方法、および、それらを操業者に提示して的確な温度管理を支援するシステムについて述べる。

### 1. 本技術開発の背景と目的

転炉での吹錬が終了した溶鋼は、取鍋に移されて溶鋼処理設備 (RH 炉など) に搬送される。溶鋼処理が終了した後、取鍋は連続铸造設備まで搬送され、取鍋の底部から溶鋼がタンディッシュに注がれる (図1)。このとき、溶鋼温度が高いと、铸造時のブレイクアウトや割

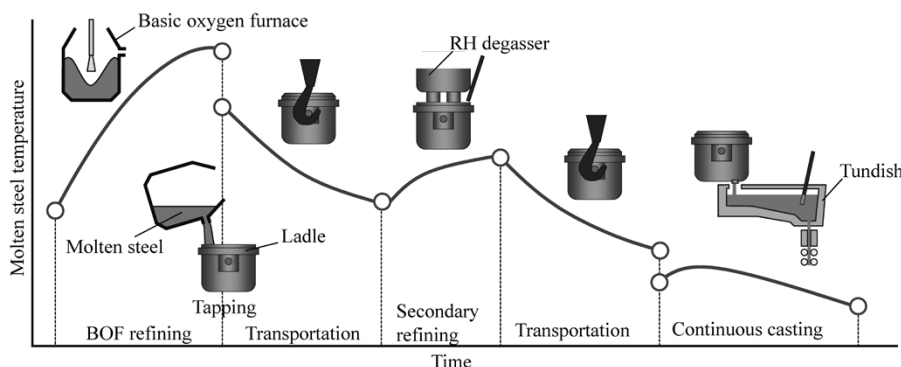


図1 製鋼工程と溶鋼温度変化の概要  
 Fig. 1 Outline of steelmaking process and change of molten steel temperature

<sup>\*1</sup> 技術開発本部 生産システム研究所 (現 技術開発本部 AI推進プロジェクト部) <sup>\*2</sup> 技術開発本部 機械研究所 <sup>\*3</sup> 鉄鋼事業部門 技術開発センター  
<sup>\*4</sup> 鉄鋼事業部門 加古川製鉄所 制御部 <sup>\*5</sup> 鉄鋼事業部門 加古川製鉄所 製鋼部

れ・偏析などのリスクが増加する。また、溶鋼温度が低いと、浸漬ノズルの詰まりや取鍋開口不良のリスクが増加する。それらのリスクを回避する目的で、溶鋼温度を目標値より高めに保ちつつ、高すぎる場合は铸造速度を落として対応している。しかしながらこのような対応は、加熱コストや生産性に悪影響を及ぼすことになる。したがって、タンディッシュ内の溶鋼温度をより適切な範囲に保つことは、安定な操業を実現する上で必要不可欠となっている。

いっぽう、加古川製鉄所では多品種の鋼材を作り分けるため、複数の製鋼工場に複数の溶鋼処理と連続铸造設備が配置され、それらが絡み合う複雑な溶鋼物流となっている。そのため、時々刻々と変化する操業スケジュールに応じて、タンディッシュ内の溶鋼を途切れさせることなく、さらに所定の温度範囲内に管理することは非常に難しい。

そのようななか、例えば連铸操業者は、次に搬入される予定の溶鋼がまだ溶鋼処理を開始する前のタイミングにおいて、溶鋼処理工程での搬出目標温度の補正值を入力している。このとき、铸造温度管理範囲や操業スケジュール情報を踏まえた上で、搬入後の溶鋼温度（ひいては铸造温度）が所定の範囲に入るように調整を図っている。

そこで、取鍋搬送中やタンディッシュ内の溶鋼温度を種々のデータから理論に基づいて予測する取り組みがなされてきた<sup>5),6)</sup>。しかし、取鍋やタンディッシュの耐火物温度も測定できないため、溶鋼温度を正確に予測することは困難である。温度が予測できないのであれば、実際の温度が予測値より高温側に外れるリスクが高いのか、低温側に外れるリスクが高いのか、操業者にとってはその情報が有効なものとなる。実際、熟練者へのヒアリングの結果、溶鋼温度の確率分布のようなものを頭に浮かべて予測温度の外れリスクを認識していることが分かった。

そこで、溶鋼温度を1点で予測するのではなく、操業条件に応じた溶鋼温度のばらつきを確率分布で提示することによって操業者の的確な意思決定を支援することにした。なお、ほかにも温度分布に関する研究<sup>7)</sup>はあるが、本開発ではJITモデリングにより鋼種や工程の違いを柔軟に扱える点や、熱的な影響因子の違いを考慮している点の特徴である。

## 2. 熟練操業者の考え方

熟練操業者が溶鋼温度の外れリスクを予測する場合、すべての過去事例を均等に思い出して検討している訳ではない。今回の操業条件に近い（類似性の高い）事例を記憶の中から引き出し、それぞれの事例と今回の操業条件との異なる部分を補正し、今回の条件に置き換えて（転移させて）認識している。すなわち、過去の各事例を今の操業状態に対応した仮想経験情報に変換した上で認識している。熟練者はその際、物理的に因果関係が明確な要因（決定論的にモデル化可能な基準となる挙動）と不確定な要因（確率論的に考察可能なばらつき）とを

分離して温度変化を解釈している。

例えば、当該チャージと操業条件が類似した過去事例において、溶鋼処理後の搬送時間が20分の際に溶鋼温度が想定値より10℃下回ったとする。もし、当該チャージの搬送時間が30分であれば、「搬送時間が10分増えた分だけ溶鋼温度も低下するはず」という解釈と、「搬送時間が20分で想定値より10℃下回ったのだから、搬送時間が30分ならば想定値よりもっとずれるはず」という解釈の二とおりが存在する。前者は物理的に因果関係が明確な要因、後者は不確定な要因に相当する。

熟練者は、前者の観点で溶鋼温度の時系列変化（基準線）を予測し、後者の観点で類似過去事例のばらつき（基準線との誤差）を当該条件に置換している。そして、各過去事例に対し、当該操業状態との類似性に応じた重み付けをすることによって温度外れリスクを確率的に把握している。

## 3. 溶鋼温度ばらつきの確率分布予測手順の概要

### 3.1 基本コンセプト

前章の熟練者の考え方に従い、以下の①～⑤の手順で溶鋼温度ばらつきの確率分布を計算する。なお、説明を簡便にするため、本節以降では転炉～溶鋼処理間の取鍋搬送における溶鋼温度分布計算を例に述べる。

- ①過去チャージにおける溶鋼温度のばらつき（基準線からの誤差）を計算する。このとき、理論モデルに基づく温度上限線からの誤差をばらつきと定義する。
- ②熱的影響因子を考慮した上で、各過去チャージの温度ばらつきを当該チャージの予測時刻に写像する。
- ③当該チャージの上限線を基準に写像後のばらつきを転写させる。
- ④転写後の個々の温度ばらつきの値に対して、各過去チャージと当該チャージとの類似度に従ってそれぞれ重み付けをする。
- ⑤重み付きのヒストグラムを構成し、面積が1となるように正規化したものを確率分布とみなして温度ばらつきリスクを把握する。

上記のうち、①～③は物理現象論に基づく考え方であり、④と⑤は確率・統計的な考え方である。確定的な部分を物理現象論に基づく考え方で構成し、確率的な部分を統計的なモデルで構築する。

### 3.2 具体的な計算手順

溶鋼温度ばらつきの確率分布を計算する具体的な手順を図2に従って説明する。

【ステップ①】まず、 $i$ 番目の過去チャージ ( $i=1\sim N$ ) において、時刻 $t$ の溶鋼温度 $T_i(t)$ を、基準線（物理モデル<sup>5)</sup>から算出される温度降下の上限線 $f_i(t)$ と誤差要因 $\Delta_i(t)$ との和で表現する（式(1)）。

$$T_i(t) = f_i(t) + \Delta_i(t) \dots\dots\dots (1)$$

すると、測温時刻 $t_i$ における誤差 $\Delta_i(t_i)$ は式(2)となる。

$$\Delta_i(t_i) = T_i(t_i) - f_i(t_i) \dots\dots\dots (2)$$

【ステップ②】誤差 $\Delta_i(t_i)$ を時間写像し、当該チャージの

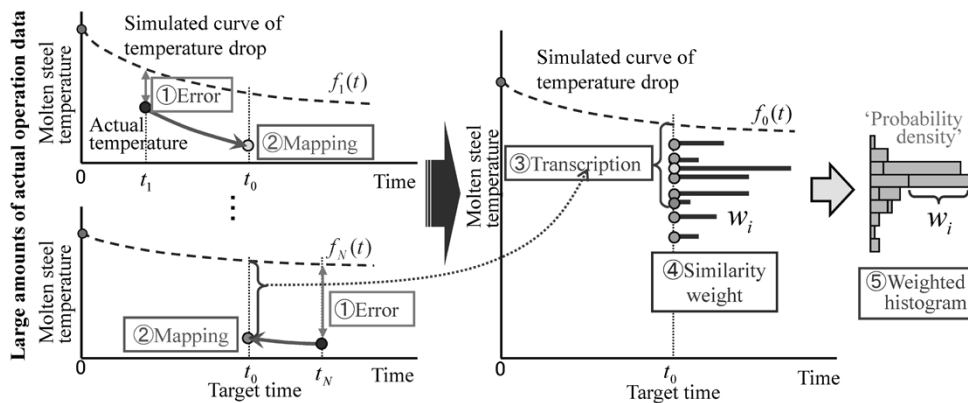


図2 溶鋼温度ばらつき分布の計算方法概要  
 Fig. 2 Outline of calculation method for probability distribution of molten steel temperature

予測時刻  $t_0$  に相当する値  $\Delta_i(t_0)$  に変換する。

【ステップ③】物理モデルで計算される当該チャージの溶鋼温度基準線  $f_0(t)$  に対し、誤差  $\Delta_i(t_0)$  を加算することによって予測時刻  $t_0$  における当該チャージの温度ばらつきを構成する1点  $T_{0i}(t_0)$  を求める。

$$T_{0i}(t_0) = f_0(t_0) + \Delta_i(t_0) \dots\dots\dots (3)$$

【ステップ④】各過去チャージに対して  $T_{0i}(t_0)$  を算出する。「操業条件が類似ならば基準線からのずれ方も類似する」との経験則に基づき、当該チャージと各過去チャージの類似度を各温度  $T_{0i}(t_0)$  に対応させる。

【ステップ⑤】類似度で重み付けしたヒストグラムを構成し、面積 = 1 に正規化したものを操業者に提示する。

#### 4. 溶鋼温度ばらつき要因を考慮した確率分布の構成方法

前章で述べた一連の手順における主な課題は、ステップ②において、誤差  $\Delta_i(t_i)$  の値をどのように写像して  $\Delta_i(t_0)$  の値を算出するかである。すなわち、誤差  $\Delta_i(t_i)$  の値が時間軸方向でどのように変化するかをどう定めるかが課題である。取鍋搬送中の温度ばらつき計算を例に説明する。

##### 4.1 取鍋搬送中のばらつき要因

転炉出鋼後～溶鋼処理設備への取鍋搬送において、温度がばらつく要因は以下の三つに集約される(図3)。

- (a) 初期溶鋼温度のばらつき
- (b) 初期耐火物温度のばらつき
- (c) 熱伝達率のばらつき

(a) は、転炉出鋼時 ( $t=0$ ) における温度測定誤差に起因するものである。「 $i$  番目の過去チャージにおける溶鋼温度初期値は  $T_{Mi}(0)$  と測定されたが、測定誤差の影響により真の値は  $T_{Mi}(0) + \Delta_{Mi}$  とずれている。それが原因で時刻  $t_i$  においても基準線から  $\Delta_i(t_i)$  だけ乖離(かいり)した」とする考え方である。

(b) は、転炉出鋼時における耐火物温度(取鍋耐火物の蓄熱量)の誤差に起因するものである。「 $i$  番目の過去チャージにおける取鍋耐火物温度の初期値が  $T_{Ri}(0)$  であると認識していた。しかし、実際は誤差  $\Delta_{Ri}$  が存在し、それが原因で時刻  $t_i$  において基準線から  $\Delta_i(t_i)$  だけ乖離した」とする考え方である。

(c) は、取鍋搬送中における溶鋼から取鍋耐火物への

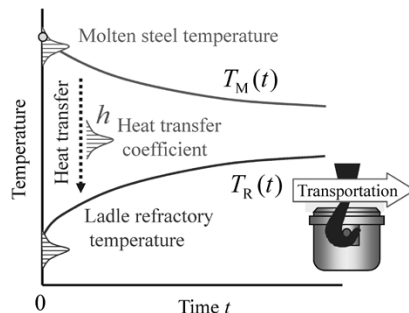


図3 取鍋搬送中における溶鋼温度ばらつき要因  
 Fig. 3 Factors of temperature variability in ladle transportation

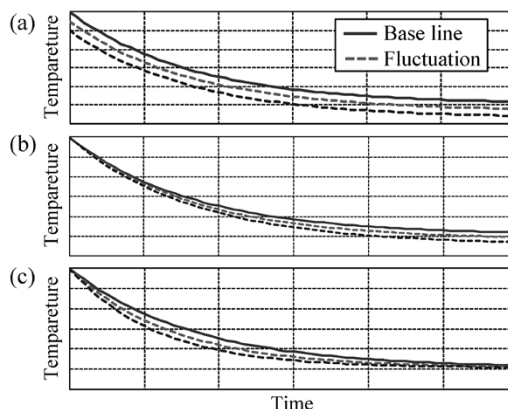


図4 各ばらつき要因における温度時間変化  
 Fig. 4 Variation with time of temperature in each variability factor

熱移動の誤差に起因するものである。「 $i$  番目の過去チャージにおける熱伝達率  $h_i$  に対して、実際には誤差  $\Delta_{Hi}$  が存在し、それが原因で時刻  $t_i$  において基準線から  $\Delta_i(t_i)$  だけ乖離した」とする考え方である。

##### 4.2 各ばらつき要因による誤差時間変化

前節で述べた (a), (b), (c) の各ばらつき要因による誤差が変化する影響を把握するため、理論に基づく高精度な計算モデル<sup>5)</sup> でシミュレーションを行った。図4に示すように、初期溶鋼温度ばらつき((a)によるものであれば、 $\Delta_i(t_i)$  の値は時間によらずほぼ一定となる。また、初期耐火物温度のばらつき((b)によるものであれば、 $\Delta_i(t_i)$  の値は時間とともに拡大する。さらに、熱伝達率のばらつき((c)によるものであれば、 $\Delta_i(t_i)$  は時間とともに拡大した後、0 に収束する。

以上のように、シミュレーションによって  $\Delta_i(t_i)$  を任意時刻に写像することができるが、二つの問題が存在す

る。

問題の一つは計算コストである。ICTの進展が著しいとはいえ、数万点以上の過去データに対して高精度な計算をリアルタイムで実行することは困難である。耐火物温度の実測値がない中で、どう計算するかも課題である。

もう一つの問題は、どのばらつき要因が支配的であるか不明であることである。ばらつき要因によって写像方向が異なり、実際の誤差が何に起因するものか分からない。したがって、どの方向に写像すればよいかも判断できない。

#### 4.3 簡易物理モデルに基づく定式化

二体伝熱の支配方程式を使ってばらつきがない状態を計算する。溶鋼温度  $T_M(t)$ 、熱移動量  $Q(t)$ 、耐火物温度  $T_R(t)$  の支配方程式はそれぞれ以下となる。

$$\rho_M c_M v_M \frac{dT_M(t)}{dt} = -Q(t) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$Q(t) = A \cdot h \cdot (T_M(t) - T_R(t)) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\rho_R c_R v_R \frac{dT_R(t)}{dt} = Q(t) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $\rho_M, c_M, v_M$ ：溶鋼の密度、比熱、体積

$\rho_R, c_R, v_R$ ：取鍋耐火物の密度、比熱、体積

$A$ ：溶鋼と耐火物の接する面積

$h$ ：熱伝達率

である。さらに、

$$\alpha = \rho_R c_R v_R / (\rho_R c_R v_R + \rho_M c_M v_M),$$

$$\beta = (\rho_R c_R v_R + \rho_M c_M v_M) / (\rho_R c_R v_R \cdot \rho_M c_M v_M)$$

とおくと、よく知られた基本式として

$$T_M(t) = -\alpha \cdot (T_M(0) - T_R(0)) \cdot (1 - e^{-\beta h t}) + T_M(0) \quad \dots (7)$$

が得られる。式(7)はばらつき要因のない式であり、これが温度基準線に相当する。初期溶鋼温度ばらつき  $\Delta_M$ 、初期耐火物温度ばらつき  $\Delta_R$ 、熱伝達率ばらつき  $\Delta_H$  による溶鋼温度変化を表す式はそれぞれ以下となる。

$$T_M(t, \Delta_M) = -\alpha \cdot (T_M(0) + \Delta_M - T_R(0)) \cdot (1 - e^{-\beta h t}) + T_M(0) + \Delta_M \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$T_M(t, \Delta_R) = -\alpha \cdot (T_M(0) - T_R(0) - \Delta_R) \cdot (1 - e^{-\beta h t}) + T_M(0) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$T_M(t, \Delta_H) = -\alpha \cdot (T_M(0) - T_R(0)) \cdot (1 - e^{-\beta(h+\Delta_H)t}) + T_M(0) \quad \dots\dots\dots (10)$$

##### 4.3.1 初期溶鋼温度のばらつきの影響

式(7)の基準線と式(8)の差をとることによって、初期溶鋼温度のばらつきの時間変化  $\Delta(t, \Delta_M)$  を定式化する。

$$\Delta(t, \Delta_M) = T_M(t, \Delta_M) - T_M(t) = \Delta_M \cdot \{-\alpha(1 - e^{-\beta h t}) + 1\} \quad \dots (11)$$

式(7)より

$$\alpha \cdot (1 - e^{-\beta h t}) = (T_M(0) - T_M(t)) / (T_M(0) - T_R(0)) \quad \dots\dots (12)$$

であることから、式(12)を式(11)に代入して整理すると

$$\Delta(t, \Delta_M) = \Delta_M \cdot (T_M(t) - T_R(0)) / (T_M(0) - T_R(0)) \quad \dots\dots (13)$$

を得る。溶鋼温度に比べて耐火物の初期温度は非常に小さいため、

$$(T_M(t) - T_R(0)) / (T_M(0) - T_R(0)) \approx 1$$

と近似できる。したがって、

$$\Delta(t, \Delta_M) \approx \Delta_M = const. \quad \dots\dots\dots (14)$$

と、初期溶鋼温度ばらつきの影響は一定と近似できる。

##### 4.3.2 初期耐火物温度のばらつきの影響

同様に、式(7)と式(9)の差をとって式(12)を代入して整理すると、初期耐火物温度のばらつきの時間変化  $\Delta(t, \Delta_R)$  は式(15)となる。

$$\Delta(t, \Delta_R) = T_M(t, \Delta_R) - T_M(t) = \Delta_R \cdot (T_M(0) - T_M(t)) / (T_M(0) - T_R(0)) \quad \dots\dots\dots (15)$$

$i$  番目の過去チャージにおける测温時刻  $t_i$  での基準線からのばらつき  $\Delta(t_i, \Delta_R)$  と、任意時刻  $t$  におけるばらつき  $\Delta(t, \Delta_R)$  の比率は

$$\Delta(t, \Delta_R) / \Delta(t_i, \Delta_R) = (T_M(0) - T_M(t)) / (T_M(0) - T_M(t_i)) \quad \dots (16)$$

となることから、

$$\Delta(t, \Delta_R) = \Delta(t_i, \Delta_R) \cdot (T_M(0) - T_M(t)) / (T_M(0) - T_M(t_i)) \quad \dots (17)$$

となる。したがって、初期耐火物温度のばらつきが溶鋼温度のばらつきに及ぼす影響は、温度軸方向に相似となる。

##### 4.3.3 熱伝達率のばらつきの影響

式(10)は、式(7)の  $t$  を  $((h + \Delta_H)/h) \cdot t$  に置き換えたものと同じである。つまり、時刻  $t_i$  における测温値  $T_M(t_i, \Delta_H)$  と、式(7)の温度基準線  $T_M(t)$  が同じ値となる時刻を  $\tau_i$  とすると、 $((h + \Delta_H)/h) \cdot t_i = \tau_i$  であるから  $(h + \Delta_H)/h = \tau_i/t_i$  が成り立つ。したがって、任意時刻  $t$  における基準線からの温度のばらつきは

$$\Delta(t, \Delta_H) = T_M(t_i, \Delta_H) - T_M(t) = T_M((\tau_i/t_i) \cdot t) - T_M(t) \quad \dots (18)$$

となる。式(18)から分かるように、熱伝達率のばらつきが溶鋼温度に及ぼす影響は、時間軸方向に相似となる。

以上、いずれのばらつき要因においても、過去チャージの温度基準線(物理モデル<sup>5)</sup>で計算した  $f_i(t)$  と実测温値があれば、比較的単純な計算式で任意の時刻に写像可能であることが分かる。

#### 4.4 ばらつき要因比率の考え方

実際のデータを搬送時刻  $t_0$  に写像する場合、ばらつき要因の比率、すなわち、写像方法が式(14)か(17)か(18)かの比率によって、温度の分布形状が変化する(図5)。搬送時間と温度降下量の関係と考えた場合、搬送時間とばらつき要因は無関係と考えられる。このため、過去実績データにおいて、搬送時間が短いデータ群をある時刻  $t_0$  に写像したものと、搬送時間が長いデータ群を

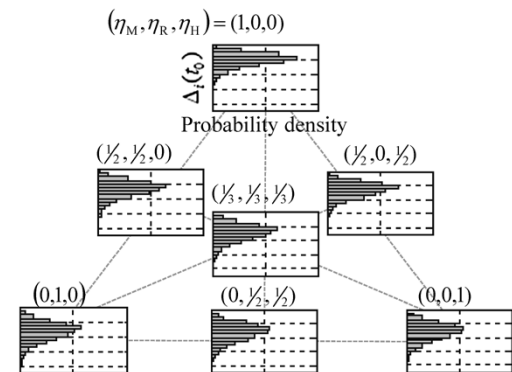


図5 ばらつき要因の比率による写像後の温度分布の違い  
Fig. 5 Difference in temperature distribution after mapping by ratio of variability factors

時刻  $t_0$  に写像したもので、写像方法が適切ならば両者の分布形状は一致すると考えられる。そこで、式 (3) において

$$\Delta_i(t_0) = \eta_M \cdot \Delta_i(t_0, \Delta_M) + \eta_R \cdot \Delta_i(t_0, \Delta_R) + \eta_H \cdot \Delta_i(t_0, \Delta_H) \dots (19)$$

としたときの要因比率  $\eta_M$ 、 $\eta_R$ 、 $\eta_H$  のうち、 $\eta_M$  の値を 0.0 ~ 1.0 の範囲で変化させ、二つのデータ群の写像後の分布形状が最も一致する最適点を求めた。ここで、実作業時間の範囲では分布形状が似ていることから  $\eta_R = \eta_H = (1 - \eta_M) / 2$  とした。

データ群を変えて評価した結果、 $\eta_M$  が 0.30 ~ 0.36 の範囲で最適となったため、 $\eta_M = \eta_R = \eta_H = 1/3$  に決定した。

#### 4.5 類似度による重み付け

$i$  番目の過去チャージと当該チャージのデータ項目をそれぞれ  $X_i = [x_{i1} \ x_{i2} \ \dots \ x_{iL}]$ 、 $X_0 = [x_{01} \ x_{02} \ \dots \ x_{0L}]$  とし、その近さを評価するため重み付きユークリッド距離  $d_i$  を求める。

$$d_i = \sqrt{\sum_{j=1}^L q_j (x_{ij} - x_{0j})^2} \dots (20)$$

ここに、 $q_j > 0$  : 重み係数

距離  $d_i$  から算出される類似度  $w_i = \exp(-\lambda d_i)$  を重みとして式 (3) の温度  $T_{0i}(t_0)$  に対応させて重み付きヒストグラムを構成し ( $\lambda$  は調整パラメータ)、面積が 1 となるように正規化したものを確率分布として操業者に提示する。

#### 5. 実機適用結果

加古川製鉄所の製鋼工程において 2011 年 6 月に本手法を実機化した。タンディッシュ内の溶鋼温度分布の計算結果と実測温度を図 6 に示す。ここで、温度分布形状やその時間変化が特徴的な例を選んだ。(a) ~ (d) に示すように各作業条件に応じた温度ばらつきの違いを適切に予測可能であることが確認できる。

また、タンディッシュ内溶鋼温度の目標値と実績温度との差異で評価した場合、本システムの導入により目標値からの偏差を従来の半分以下 (約 41%) に低減できた。

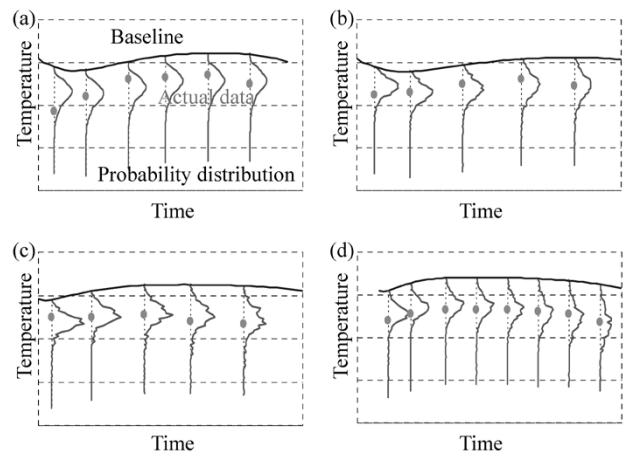


図 6 タンディッシュ内溶鋼温度の予測分布形状と実績温度との比較  
Fig. 6 Comparison between shapes of predicted distribution of molten steel temperature and measurement data in tundish

むすび = 熱的影響因子を考慮した物理モデルに基づいて温度基準線からのばらつきを写像し、類似度に応じた重み付きヒストグラムを構成することによって多工程の確率分布を統一的に予測可能な方法を開発した。

ICT の活用により蓄積された大量データに対して、実作業中の当該チャージとの類似度に応じた重み付けを行い、仮想経験情報に変換して提示することによって操業者の経験を補い、適切な判断・アクションを支援することができた。

#### 参考文献

- 1) 茂森弘靖. JFE 技報. 2015, No.35, p.8-13.
- 2) 角谷泰則ほか. 計測自動制御学会論文集. 2014, Vol.50, No.7, p.528-535.
- 3) ㈱神戸製鋼所. 出力値予測方法, 該装置および該方法のプログラム. 特許第 5363238, 2013-9-13.
- 4) 友近信行ほか. 材料とプロセス. 2017, Vol.30, No.2, p.782.
- 5) 中岡威博ほか. 材料とプロセス. 2009, Vol.22, No.1, p.83.
- 6) 大倉才昇ほか. 材料とプロセス. 2011, Vol.24, No.1, p.29.
- 7) 園田 翔ほか. 材料とプロセス. 2011, Vol.24, No.1, p.33.