

高炉数学モデルの開発

Development of Mathematical Model for Blast Furnace

西岡 浩樹*
Koki NISHIOKA

宇治澤 優
Yutaka UJISAWA

高谷 幸司
Kouji TAKATANI

抄 録

高炉内には様々な物質が存在し、かつ相変化を伴うなど、内部で生じる現象は非常に複雑である。実高炉の挙動を表現可能な、3次元非定常数学モデル、高炉炉底・側壁煉瓦侵食予測モデルを開発した。開発した数学モデルは、定常状態における高炉炉内の状況、火入れ時の非定常的な炉内状況の推移、炉底・側壁煉瓦の侵食状況の予測等、炉内で生じる多くの現象を表現することが可能であり、実際に、高炉の操業解析等に活用している。

Abstract

Various phenomena in blast furnaces that are affected by gas flow, chemical reactions, descent of burden materials and so on are very complicated. Three-dimensional mathematical blast furnace model is developed based on the mass, momentum and energy conservation in the furnace. Another mathematical model that can estimate the transient erosion process of the blast furnace hearth is also developed. Developed mathematical models can predict in-furnace state such as gas flow, temperature, brick/refractory erosion of blast furnaces at steady state and unsteady state. These mathematical models are applied to analyses of actual blast furnace's operations.

1. 緒 言

高炉内では図1に示すように様々な物質(気体, 固体, 液体, 粉体)が存在し、その主要成分数、炉内で進行する主要反応数も非常に多い。高炉内で生じる様々な現象は、ガス流れ、化学反応、装入原料の降下挙動、炉内の通気・

通液抵抗、融着帯の形状等の影響を受ける。このように高炉内現象は非常に複雑であるが、解体調査、基礎実験、多くの検出端情報、および、数学モデルを活用することにより、徐々に理解が進んできた。なかでも高炉数学モデルは、物質の移動、熱の移動、運動量の移動等を数学的に記述することにより、高炉内の移動現象を定量化することができるため、高炉内で生じる複雑な現象を理解する上で非常に有用である。

本報では、これまで著者らが開発に携わってきた高炉の数学モデルの概要および実高炉への適用例について説明する。

2. 高炉数学モデルの概要および計算例

2.1 高炉炉内の流動・伝熱・反応解析¹⁾

これまでに高炉を対象として様々なモデルが開発されてきた。当初は、1次元定常モデルであったが、コンピューターの処理速度の向上に伴い、1次元非定常モデル、2次元定常モデル、3次元非定常モデルへと発展してきた。本報では、3次元非定常モデルについて概説する。

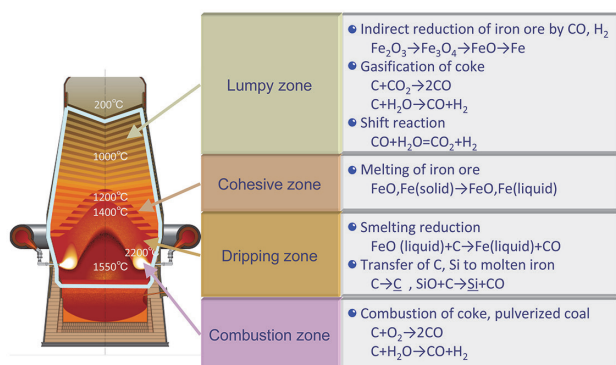


図1 高炉内の移動現象
Transport phenomena in blast furnace

* プロセス研究所 製鉄研究部/先端技術研究所 数理科学研究部 上席主幹研究員 博士(工学) 千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511

2.1.1 基礎方程式

3次元非定常モデルの概要を図2に示すが、炉底の溶銑・スラグ溜まりを除く領域を解析の対象としている。基礎式として、気体・固体・液体各相に関する物質収支式、エネルギー収支式、運動量収支式を考慮している(式(1)~(6))。

$$\frac{\partial(\epsilon_k \rho_k \omega_{kn})}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon_k \rho_k \omega_{kn} \mathbf{u}_k) = \epsilon_k \nabla \cdot (\rho_k D_k \nabla \omega_{kn}) + RW_{kn} \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\epsilon_k \rho_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon_k \rho_k \mathbf{u}_k) = \sum_n RW_{kn} \quad (2)$$

$$RW_{kn} = M_n \sum_n Rate_N \cdot a_{knN}$$

$$\frac{\partial(\epsilon_g \rho_g \mathbf{u}_g)}{\partial t} = -\epsilon_g \nabla P - \epsilon_g (f_1 + f_2 | \epsilon_g \rho_g \mathbf{u}_g |) (\epsilon_g \rho_g \mathbf{u}_g) \quad (3)$$

$$f_1 = 150 \left(\frac{1-\epsilon_g}{\epsilon_g d_p} \right) \frac{\mu_g}{\epsilon_g \rho_g}, \quad f_2 = 1.75 \left(\frac{1-\epsilon_g}{\epsilon_g d_p} \right) \frac{1}{\epsilon_g^2 \rho_g}$$

$$u_{xs} = B \frac{\partial u_{ys}}{\partial x}, \quad u_{zs} = B \frac{\partial u_{ys}}{\partial z} \quad (4)$$

$$u_{yj} = const., \quad u_{xl} = u_{zl} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\epsilon_k \rho_k C_{p_k} T_n)}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon_k \rho_k C_{p_k} T_n \mathbf{u}_k) \quad (6)$$

$$= \epsilon_k \nabla \cdot (k_k \nabla T_k) - \sum_m \{ \alpha_{k-m} U_{k-m} (T_m - T_k) \} + RH$$

$$RH = \sum Rate_N (-\Delta H_N) \eta_{kn}$$

ここで、 ϵ ：体積占有率、 ρ ：密度、 ω ：重量分率、 \mathbf{u} ：流速、 D ：拡散係数、 M ：分子量、 $Rate$ ：反応速度、 a ：化学量論係数、 P ：圧力、 d_p ：粒径、 μ ：粘度、 C_p ：比熱、 T ：温度、 B ：定数、 U ：熱伝達係数、 ΔH ：反応に伴うエンタルピー変化、 η ：熱分配率、 α ：有効接触面積、 $k=g$ (気体)、 s (固体)、 l (液体)、 $n=CO, CO_2, \dots$ (気体)、 Fe_2O_3, Fe_3O_4, \dots (固体)、 Fe_2O_3, Fe_3O_4, \dots (液体)、 $N=1, 2, 3, \dots$ (化学反応式の番号)である。

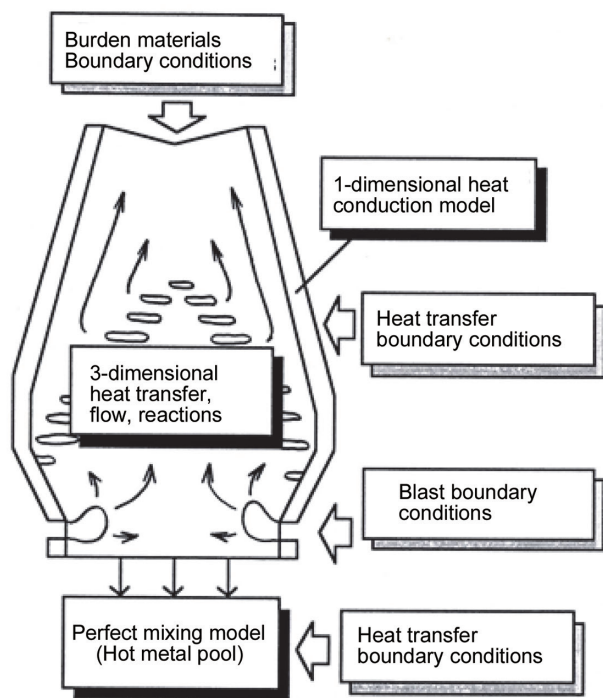


図2 3次元非定常高炉数学モデルの概要¹⁾
Schematic diagrams of 3-dimensional mathematical model for blast furnace

表1 高炉数学モデルで考慮している主な反応
Reactions considered in mathematical blast furnace model

No.	Reactions
1	$3Fe_2O_3(s) + CO(g) \rightarrow 2Fe_3O_4(s) + CO_2(g)$
2	$Fe_3O_4(s) + CO(g) \rightarrow 3FeO(s) + CO_2(g)$
3	$FeO(s) + CO(g) \rightarrow Fe(s) + CO_2(g)$
4	$3Fe_2O_3(s) + H_2(g) \rightarrow 2Fe_3O_4(s) + H_2O(g)$
5	$Fe_3O_4(s) + H_2(g) \rightarrow 3FeO(s) + H_2O(g)$
6	$FeO(s) + H_2(g) \rightarrow Fe(s) + H_2O(g)$
7	$C(s) + CO_2(g) \rightarrow 2CO(g)$
8	$C(s) + H_2O(g) \rightarrow CO(g) + H_2(g)$
9	$FeO(l) + C(s) \rightarrow Fe(l) + CO(g)$
10	$C(s) \rightarrow \underline{C}$
11	$H_2O(g) + CO(g) = H_2(g) + CO_2(g)$
12	$SiO_2(l) + C(s) \rightarrow SiO(g) + CO(g)$
13	$SiO_2(s) + C(s) \rightarrow SiO(g) + CO(g)$
14	$SiO_2(s) + 3C(s) \rightarrow SiC(s) + 2CO(g)$
15	$SiO(g) + \underline{C} \rightarrow \underline{Si} + CO(g)$
16	$Fe(s) \rightarrow Fe(l)$
17	$FeO(s) \rightarrow FeO(l)$

2.1.2 高炉炉内現象の取り扱い

このモデルでは、非常に複雑な高炉内の現象を表現するにあたり、以下の仮定を設定した。

高炉内のガス成分としては、 CO, CO_2, H_2, H_2O, N_2 等の主要な成分を考慮した。鉱石およびコークスについても $Fe_2O_3, Fe_3O_4, FeO, Fe, C, SiO_2$ 等の主要な成分を考慮した。反応に関しては、表1に示す高炉内で進行する主要な反応を考慮した。

高炉炉内で生じる気体の圧力損失はエルガン式により求めた。炉頂から装入された装入物(焼結鉱、ペレット、塊鉱石、...)の降下速度分布はKinematic model²⁾により表現できるものとした。分散相に対する滴下挙動が十分に解明されていないため、融着帯にて生成した融液は一定速度で降下するものとした。コークスと鉱石の温度は等しいものとした。溶銑とスラグの温度は等しいものとした。

鉱石の還元反応モデルには、3界面未反応核モデル³⁾を使用した。コークスのガス化反応モデルは、粒子内の反応率分布を考慮するため、触媒有効係数(Thiele-modulus)の考え方を採用するとともに、境界膜内の物質移動を考慮した。レースウェイ内の燃焼については、本モデルでは直接取り扱わず、羽口から吹き込まれるガスおよび微粉炭の組成と温度、レースウェイに流入するコークスの組成と温度から、理論燃焼温度およびボッシュガス組成、ボッシュガス流量を求めた。

炉内における装入原料の粒径に関しては、還元粉化による鉱石の粒径変化、ガス化によるコークスの粒径変化を考慮した。

2.1.3 境界条件

実炉と同様に、境界条件として、炉頂から装入する原料

の組成, 半径方向の粒径分布, O/C 分布 (鉱石とコークスの重量比) を設定する。あわせて送風量, 送風温度, 送風湿度, 微粉炭吹き込み量等の操作条件を指定する。以上の境界条件を設定することにより, 炉内のガス流速分布, ガス濃度分布, 温度分布, 鉱石の還元率分布, コークスの粒径分布等を計算することができる。

2.1.4 計算方法

高炉の形状を表現するため, 計算格子には境界適合格子を採用した (図 3)。基礎方程式をスタッガード格子上で差分化し, ガス流れの解法には SOLA 法⁴⁾を採用した。エネルギー方程式, 気体, 固体, 液体の質量保存式の解法にはポイント SOR 法を採用した。時間変化項の差分化には, 完全陰解法を用いた。計算の全体の流れを図 4 に示す。

2.1.5 計算結果と実測結果との比較

高炉数学モデルにより計算された高炉炉内状態の一例を

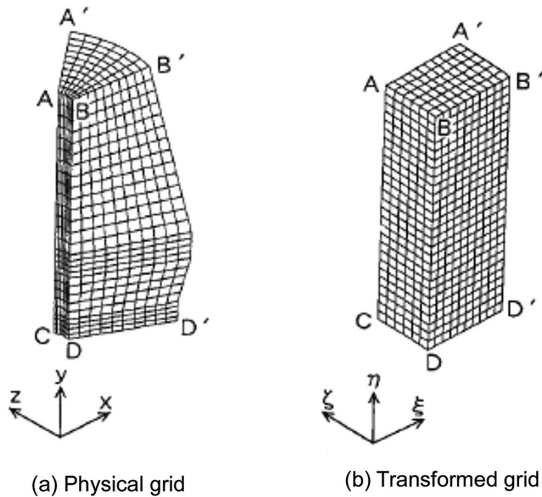


図 3 計算格子¹⁾
Grid system

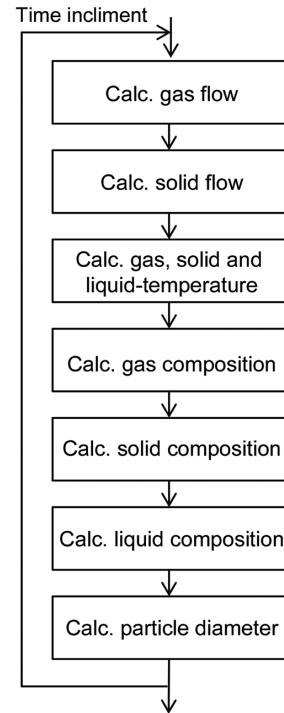


図 4 計算の流れ¹⁾
Solution procedure diagram

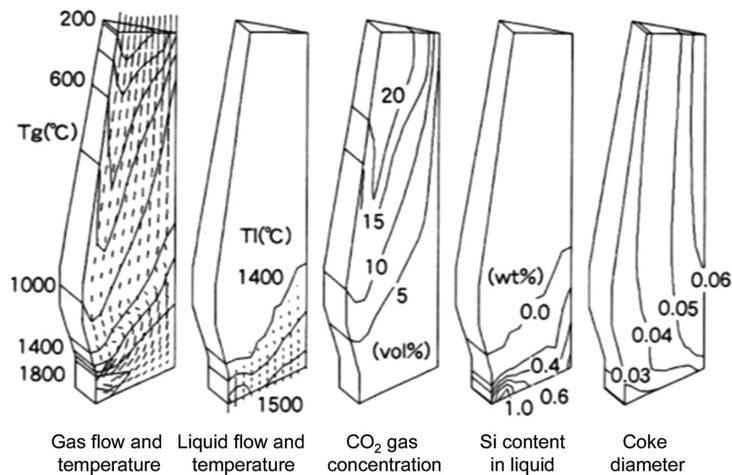


図 5 高炉数学モデルの計算結果 (一例)¹⁾
Computational results of blast furnace by the mathematical model

図 5 に, 計算結果と実測結果との対比を図 6 に示す。このように複雑な高炉内の現象も数学的に適切に記述することにより定量的に表現することが可能になった。

高炉を安定的に操業するには, 非定常操業時の挙動を明らかにすることが極めて重要である。和歌山 5 高炉の火入れ操業を再現した結果と実績との比較を図 7 に示す。炉頂ガス組成, 炉頂ガス温度, 溶銑温度, 炉体煉瓦温度の計算結果は実測値と良く対応しており, 本モデルが, 高炉の非定常な挙動を十分な精度で予測できることが確認できる。

2.2 高炉炉内の層構造を考慮した反応解析⁵⁾

原料価格の高騰, 資源対応力強化, CO₂ 排出量削減等を

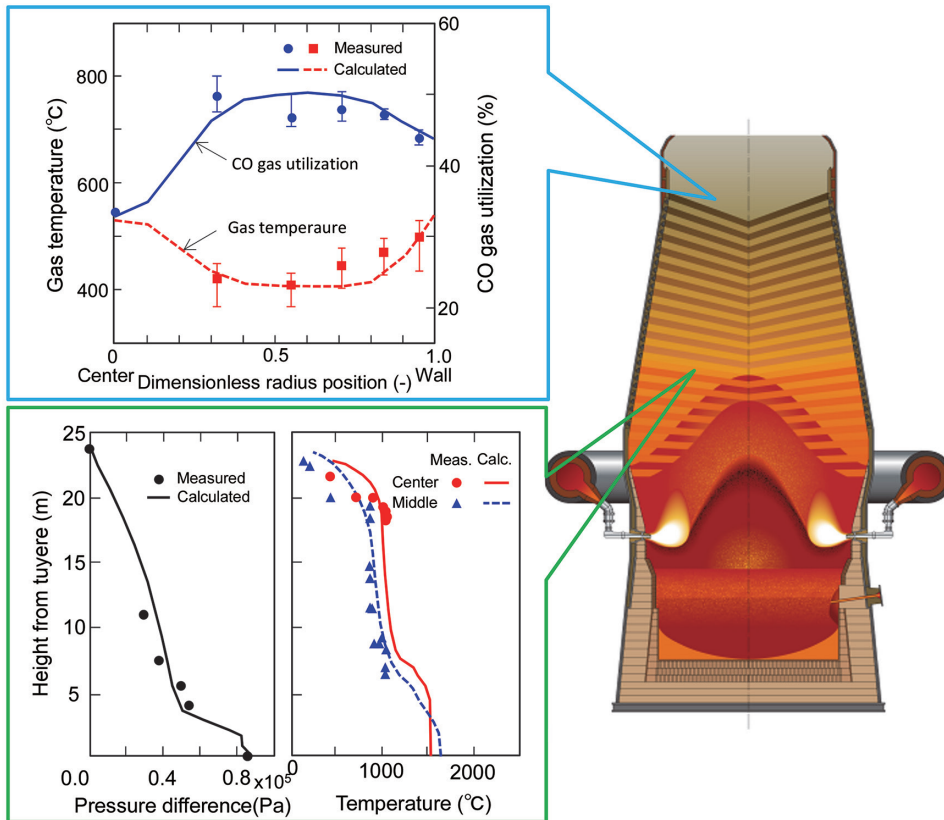


図6 和歌山5高炉における測定値と高炉数学モデルによる計算値との比較¹⁾
 Example of comparison with measured and calculated results of Wakayama No.5 blast furnace

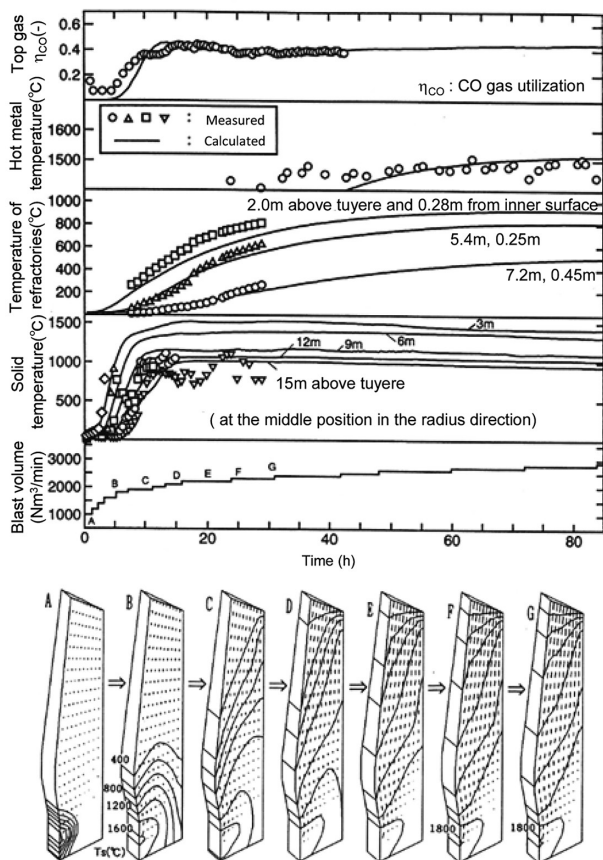


図7 和歌山5高炉の火入れ操作の計算結果¹⁾
 Computational results of Wakayama No.5 blast furnace
 blow-in operation

目的として、高炉の低還元材比・低コークス比操作が指向されている。低コークス比操作では、コークス層厚の減少による炉内圧力損失の上昇が懸念されるが、適切なコークス層厚に関する理論的検討は十分に為されていない。最適な装入物分布設計を行うには、高炉炉内における鉍石層とコークス層の堆積状況、すなわち層構造を把握する必要がある。そこで、高炉炉内の層構造を表現可能なモデルを開発した。

2.2.1 層構造の追跡方法

高炉内における各層の堆積形状を表現するには、鉍石層とコークス層の界面を区別するとともに各層の降下挙動を追跡する必要がある。界面の移動を追跡する手法は種々存在するが、計算精度および計算負荷を考慮しVOF法⁶⁾を採用した。VOFの移流方程式の差分化にはCrank-Nicolson法を採用し、移流項の差分化にはCICSAM法⁷⁾を採用した。

2.2.2 高炉炉内現象の取り扱い

高炉内で生じる流動、伝熱、反応等の取り扱いに関しては、基本的に2.1.2に示した通りである。

2.2.3 計算結果

計算結果の一例を図8に示すが、炉頂より装入された鉍石層、コークス層が、明瞭な層構造を保ったまま炉下部ま

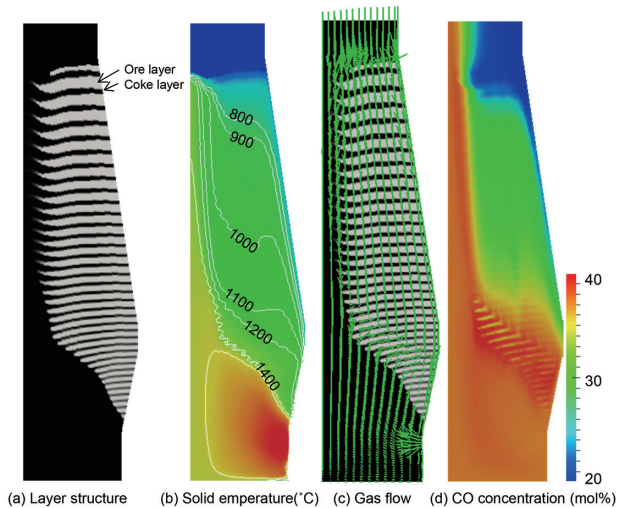


図8 炉内層構造，温度分布等の計算結果⁵⁾

In-furnace states calculated by mathematical blast furnace model

で降下していることが確認できる。ガス流れに関しては、鉍石融着層を避けコークススリットを優先的に通過する流れが確認される。CO濃度に関しても、鉍石層では鉍石の還元に伴うCO濃度の低下が、コークス層ではコークスのガス化に伴うCO濃度の上昇が見られる等、炉内層構造に対応したCO濃度分布が得られていることが確認できる。

2.3 新規開発原料への対応⁸⁾

高炉の抜本的な低還元材比操業を達成するため、還元平衡温度の低下を目的として種々の取り組みがなされている。新日鐵住金(株)では、高炉内の反応高速化、高効率化を狙い、高炉操業緒元を改善しうる非焼成含炭塊成鉍を開発してきた⁹⁾。そこで、含炭塊成鉍の各種ガス雰囲気下における反応挙動の調査およびモデル化を行った。

2.3.1 実験方法

含炭塊成鉍の反応モデルの構築に必要なデータを得るため、種々のN₂-CO-CO₂組成下において反応実験を実施した。実験装置内に試料を設置し、所定のガス雰囲気下にて、室温から1100℃まで10℃/minで昇温した。1100℃に到達後1時間保持した後、N₂に切り替え試料を冷却した。実験中は質量分析計によるCO、CO₂、N₂組成、赤外分光計によるCO、CO₂組成、歪ゲージによる重量変化、ガス流量の測定を連続的に行った。排ガス組成、排ガス流量の測定結果に基づき、各温度における還元率、ガス化率を求めた。

2.3.2 含炭塊成鉍の反応モデル

試料断面を観察した結果、いずれのN₂-CO-CO₂組成で反応させた試料においても、明確な反応界面が確認できなかったため、含炭塊成鉍の反応モデルとして、均一反応モデルを採用した。各段階の還元速度定数およびガス化速度

定数はアレニウス型の温度依存性を示すものとし、実験で得られた還元率・ガス化率曲線と計算値との差が最も小さくなる、還元速度パラメータおよびガス化速度パラメータを求めた。

2.3.3 結果

一例として、100%N₂雰囲気下における、含炭塊成鉍からのガスの発生挙動を図9に示すが、630℃程度と比較的低い温度からガス化反応が進行していること、ガス化反応開始時点の発生ガスは、ほとんどがCO₂であることが確認できる。また還元率の計算結果と実験結果を図10に示すが、両者が良く一致していることが確認できる。

本反応モデルを高炉3次元非定常数学モデルに組み込み、含炭塊成鉍50kg/t-hot metal使用時の還元材比低減効果を計算した結果、大分での実炉使用試験の結果¹⁰⁾と同じ炭素原単位低減効果(0.36kg-C/t-hot metal)が得られた。

2.4 高炉炉底・側壁煉瓦侵食予測モデル¹¹⁾

2.4.1 基礎方程式

本モデルは、高炉炉下部のコークス充填領域、コークスフリー層、炉床煉瓦を解析の対象としている(図11)。基礎方程式として、固体・液体各相に関する物質収支式、エ

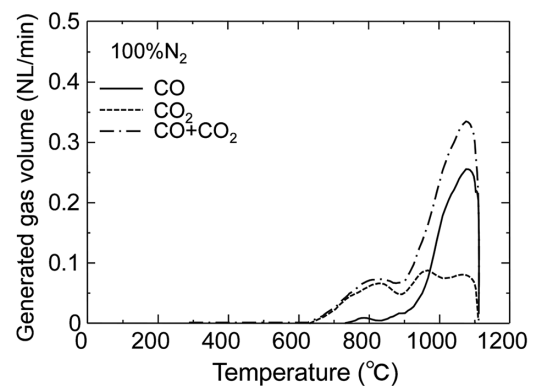


図9 含炭塊成鉍の反応挙動⁸⁾

Gas generation behavior of iron oxide agglomerates

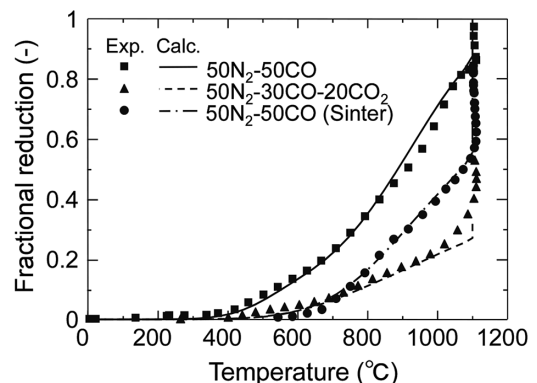


図10 実験結果と計算結果の比較(反応率)⁸⁾

Comparison of measured fractional reduction curves of samples with calculated ones

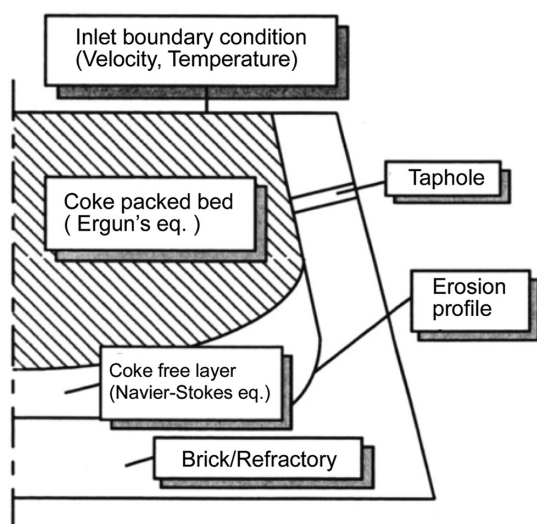


図 11 高炉炉底・側壁煉瓦侵食予測モデルの構成¹¹⁾
System of hearth erosion model

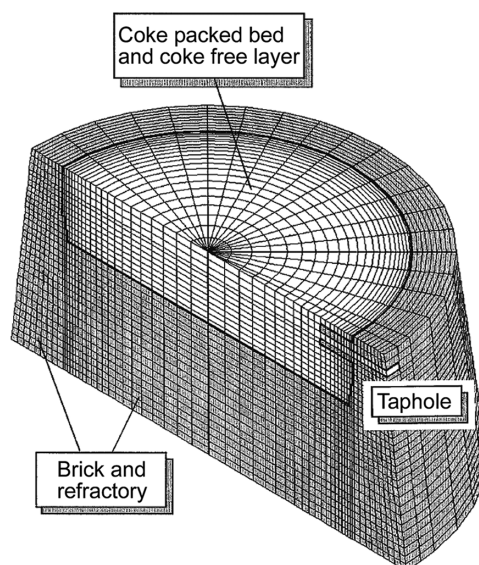


図 12 計算に使用した境界適合格子¹¹⁾
Boundary fitted coordinate system of computational grid

エネルギー収支式，運動量収支式を考慮している。

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon\rho\mathbf{u}) = 0 \quad (7)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = -\nabla p - \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{F} = 0 \quad (8)$$

$$\rho \frac{\partial(C_p T)}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)C_p T = \nabla(k\nabla T) \quad (9)$$

2.4.2 境界条件

流入境界条件として，上面から供給される溶銑の流量，温度を設定する(図 11)。煉瓦の上面は断熱であるとした。流出境界条件として，出銑口からの溶銑の排出速度を設定する。炉底煉瓦の底面および外表面の境界条件として，総括熱伝達係数を設定する。コークス充填領域については，通常，応力解析の結果に基づき領域を設定するが，任意の領域をコークス充填領域とすることも可能である。すなわち，炉底に形成されるコークフリースペースの影響等についても，本モデルにより解析が可能である。煉瓦の溶損温度に関しては，解体調査結果に基づき，カーボン煉瓦の場合は 1150℃，シャモット煉瓦の場合は 1350℃で溶損するとした。

2.4.3 計算方法

高炉炉床部の形状を表現するため，境界適合格子を採用した(図 12)。なお計算格子にはスタックードグリッドを採用した。基礎式をスタックードグリッド上で離散化し，ナビエーストークス方程式の解を SOLA 法⁴⁾により求めた。移流項の差分化には 3 次風上差分法を適用し，拡散項の差分化には 2 次の中心差分法を適用した。

計算は，以下の手順で行った。まず流動解析を行い，溶銑の速度分布を求める。次に伝熱解析を行い，炉底煉瓦を含めた全領域の温度分布を求める。煉瓦の温度が所定の温度(カーボン煉瓦：1150℃，シャモット煉瓦：1350℃)を上

回った場合，煉瓦が溶損したものとして該当する計算セルの煉瓦を取り除くとともに，溶銑が存在する領域として，再び流動解析を行う。この手順を，煉瓦の溶損が進行しなくなるまで繰り返すことにより，熱平衡状態における炉床煉瓦の形状，すなわち，炉床煉瓦の侵食状況を予測することができる。

2.4.4 結果

モデルによる炉床煉瓦侵食状況の予測精度を検証するため，予測された最終侵食形状と，解体調査により実測された実炉の煉瓦侵食形状との比較を行った結果を図 13 に示す。この計算では，溶銑は計算領域の上方より，均一な温度，流量で供給されるものとした。またコークス充填層の形状は，応力解析を行った結果に基づき設定した。推定された煉瓦侵食形状と実炉の解体調査結果は良く一致しており，モデルが実炉の煉瓦侵食形状の予測に活用できることを確認した。

3. 結 言

実高炉の挙動を表現可能な，3次元非定常数学モデル，高炉炉底・側壁煉瓦侵食予測モデルを開発した。開発した数学モデルは，定常状態における高炉炉内の状況，火入れ時の非定常的な炉内状況の推移，炉底・側壁煉瓦の侵食状況の予測等，炉内で生じる多くの現象を表現することが可能であり，実際に，高炉の操業解析等に活用されている。

参照文献

- 1) Takatani, K., Inada, T., Ujisawa, Y.: ISIJ Int. 39 (10), 15 (1999)
- 2) Nedderman, R. M., Tuzun, T.: Power Technolo. 22, 243 (1979)
- 3) Spitzer, R.H., Manning, F.S., Phillbrook, W.O.: Trans. Metall. Soc. AIME. 236, 1715 (1966)

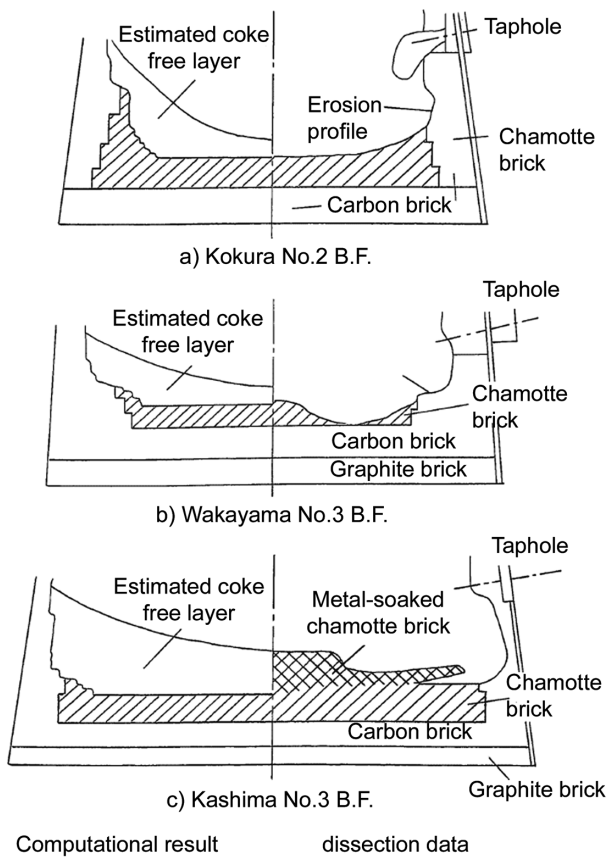


図 13 最終侵食形状の計算結果と解体調査結果の比較¹¹⁾
 Comparisons of computational final erosion profiles with dissection data

- 4) Hirt, C. W., Nichols, B. D., Romero, N. C.: Los Alamos. LA-5852, 1975
- 5) Nishioka, K., Ujisawa, Y., Takatani, K.: CAMP-ISIJ. 25, 957 (2012)
- 6) Hirt, C. W., Nichols, B. D.: J. Comp. Phys. 39, 201 (1981)
- 7) Ubbink, O., Issa, R.: J. Comp. Phys. 100, 25 (1992)
- 8) Nishioka, K., Sakai, H., Higuchi, K.: CAMP-ISIJ. 27, 682 (2014)
- 9) Naito, M. et al.: Tetsu-to-Hagané. 87, 357 (2001)
- 10) Yokoyama, H. et al.: ISIJ Int. 52, 2000 (2012)
- 11) Takatani, K., Inada, T., Takata, K.: ISIJ Int. 41 (10), 1139 (2001)



西岡浩樹 Koki NISHIOKA
 プロセス研究所 製鉄研究部
 先端技術研究所 数理科学研究部
 上席主幹研究員 博士(工学)
 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



高谷幸司 Kouji TAKATANI
 元 技術開発本部 顧問 博士(工学)



宇治澤優 Yutaka UJISAWA
 プロセス研究所 試験高炉PJ推進部長
 博士(環境工学)