

討 4

数式モデルによる高炉内諸現象の解明

住友金属工業株式会社 羽田野道春 ○栗田興一 山岡秀行
中央技術研究所 下田輝久 梶原義雅

1. 緒言

高炉内では、ガス、固体、液体が互いに、反応、熱交換、相変化を行いながら移動しているが、これらの現象を適当に組み合わせて、シミュレーションモデルを作成することにより、炉内現象の解明、ひいては、高炉の安定操業に寄与することが可能と考えられる。

数式モデルによる解析は、現状では、1次元解析から、2次元解析へ、さらには、定常解析から、非定常解析へと進展しつつあるが、本報告では、高炉内における、ガス、液体、固体の運動、および、熱反応の順に、当社で開発されているモデルの概要と、その適用状況について概説する。

2. 物質移動

2. 1. ガス流れ

充填層に関する圧力損失式として、層流、乱流両域を通じて成り立つ実験式（Ergunの式）が一般によく知られている。2次元解析の場合は、その式をベクトルの次数を考慮しながら、2次元に拡張した式を用いている。計算の手法は、流れの函数を用いる手法と、圧力を用いる手法があり、各々、次の特徴を持っている。すなわち、前者は、計算時間が短い、2次元解析および断面均一湧き出しの場合しか使用出来ない。一方、後者は、計算時間が長い、3次元解析および、任意湧き出しの場合にも使用出来る。本報告では、3次元湯流れ以外は、前者の手法を用いている。

i) レースウェイまわりの流れ

レースウェイから高炉内へのガスの吹き出しについて冷間実験結果を用いて検討した。すなわち、図1はレースウェイ境界面での静圧分布の実測値を示し、この静圧分布に合致するように求めた流線分布が、図2である。¹⁾この結果、レースウェイから炉内へのガスの吹き出しは、羽口からの衝風の突き当たり部で最大となることがわかる。コークスの消費量が、レースウェイ境界面を通過するガス量に比例して変化すると仮定すると、衝風の突き当たり部でのコークス消費量が最も多くなることを示唆している。同時に、この部分はレースウェイ内でのよどみ点となっており、微粉コークスの蓄積を招くことから、通気性の悪化を起し易い。従って、この部分での通気性は、微粉の発生速度と、消費速度とのバランスによって決まることになり、もし、この部分で通気性が悪化した場合、ガスはレースウェイ上方へ吹き抜けると考えられる。

ii) 炉内ガス流れ

炉内解体調査から融着帯の炉内における役割が注目されるが、この融着帯の通気性に関する検討は、まだ始まったばかりである。すなわち、高炉ガス流れを解析する場合、融着層を、通気性のまったくない岩盤とみな

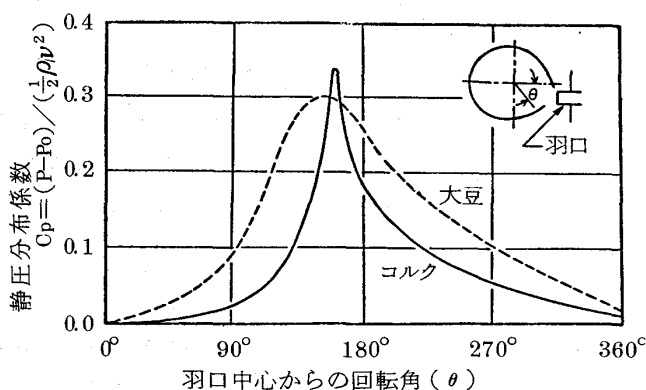


図1. レースウェイ境界面での静圧分布
 P_0 ; 羽口先端での静圧
 v ; 衝風速度, ρ ; ガス密度

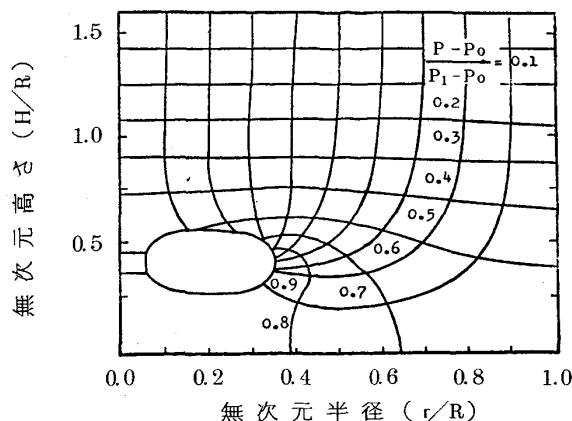


図2. レースウェイから吹き出されるガスの流線および等圧線分布

した、スリットモデル、融着層の部分、通気性の低い領域とみなした連続モデル等がある。本節では、実用上の見地から、メッシュ数を少なくし、融着帯を鉍石、コークスが層状につらなる、異方性のある通気性を持った帯と考えた。これらの異方通気性は、鉍石、コークス各々の通気度実験から推定されるものである。その結果、図3に示すごとく、鉍石通気性状によって、炉内ガス流れ、および、炉内圧力損失の変化する様子がシミュレート出来た。²⁾

iii) 層頂でのガス流れ³⁾

高炉装入物の装入方法が、ガス流れに与える影響は装入物の半径方向粒度、空隙率分布を与えることによって、シミュレート出来る。さらには層頂形状がV型の場合、ガスの流線は層頂に近づくに従って、炉芯に向かう傾向が見られるが、この傾向は、層頂平均高さから、炉半径分だけ下方に降りれば、無視し得ることがわかった。また、装入物の垂直方向の荷重の単純積算と、圧損とのバランスを比較すると、通常操作の時に、最も吹き抜け易いのは、層頂炉芯であることが明らかとなった。

iv) 湯面形状³⁾

羽口からのガスの吹き込みの影響により、羽口下から炉芯にかけて、静圧分布が発生する。この結果、炉床上部に蓄えられているスラグ湯面形状は、図4のごとく湯面高さに応じて変化する。また、平均湯面レベルが極端に上昇した場合、炉内圧力損失も上昇することがシミュレート出来る。

2. 2. 滴下液流れ

高炉炉下部の挙動のうち、とりわけ、液体の挙動については未知であり、液体滴下式自体が確立されていない。しかし、高炉操業上、炉内圧力損失の増加とフラッシング限界の予測等、液挙動について検討すべき要因が多い。

ここでは、液体、ガス向流冷間充填層での実験結果から液体滴下式と、ガス圧力損失式を作り、これらを連立させることによって、充填層の液滞留率が、コークス粒度に応じて変化する様子を、図5に示した。⁴⁾ この結果、液、ガスが流れていない場合は、溶銑の液滞留率の方が、スラグのそれを上まわるが、ガス、液の流れがある場合、スラグの液滞留率の方が、溶銑のそれより増加する。さらに、コークス粒度がある程度以下になると、急激に液滞留率の増加することが明らかとなった。

炉内における液体滴下経路についての検討は、冷間での水実験または、水に対応しての計算例が与えられている。(図6⁵⁾

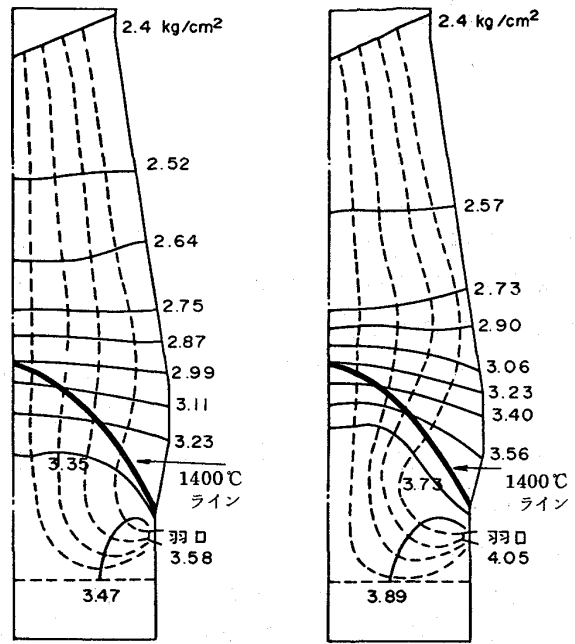


図3. 装入物高温部通気抵抗が炉内ガス流れに与える影響 (融着帯通気抵抗、右図が大の場合、左図が小の場合)

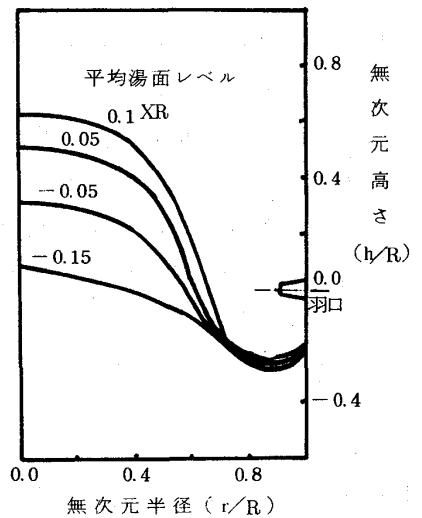


図4. 平均湯面レベルが湯面形状に及ぼす影響

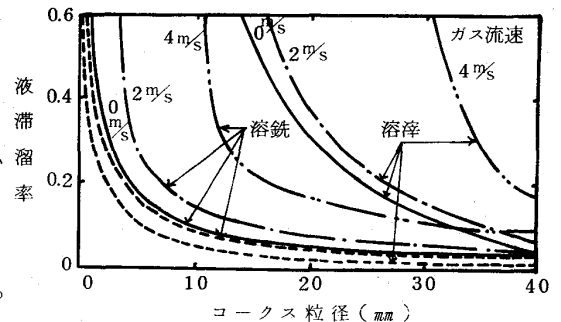


図5. 炉内液滞留率推定結果

————— } 溶銑滓滴下流速 $10^{-4} m/s$
 - - - - - " 滴下流速 $0 m/s$

その結果、側壁からガスを吹き込んだ場合のフラッキング限界送風量は、充填塔実験によって得られる限界送風量より高くなることが示された。これは、側壁からガス吹き込んだ場合、気体、液体の滴下経路の分離を起こし易くなることが原因となっている。

2. 3. 固体流れ

高炉の解体調査により、固体流れについても、次第に明らかとなっている。すなわち、シャフト上部では、ほぼ、ピストン流れと考えられるが、炉下部では、レースウェイへの荷の流れ込みのためのスリパチ状の領域と、炉芯側での荷の停滞領域（炉芯コークスに相当）の存在することが確かめられている。⁶⁾ 図7に熱間実験炉で確認した荷の流れ込み領域を示す。⁷⁾ しかし、この2つの領域の境界、荷下り速度分布、並びに経路は未知であり、モデル化の試みすら行なわれていない。

固体の流れを解析するには、まず高炉内静止充填層の応力分布を求める技術を確認する必要があるが、2次元では未開発であり応力を求めるに必要なデータの蓄積が待たれている。

2. 4. 溶銑の流れ

炉床部における溶銑の流れについても、充填層内流れの式を用いて、解析可能である。湯流れが炉底への熱負荷にどのように影響するかは、この湯流れと、伝熱を同時解析することによって得られる。解析手法は、湯流れモデルによって求めた、流線に沿って伝熱計算を行う手法で、この手法により求めた、出銑口を含む炉床断面内の温度分布の計算結果を図8に示す。この結果、出銑口、炉底間の距離をある程度以上とることによって、湯流れによる、熱負荷を軽減出来、侵食が進まなくなること、減産操業により、出銑量が減少すると、炉底の隆起が起こり得ることが、シミュレート出来た。

3. 熱、反応

高炉内の、熱、反応についての、1次元的な取り扱いは、鞭らの研究⁸⁾によってほぼ完成されたと云える。これら高炉の定常解析は精密モデルを簡略化した槽列モデルを用いて、実用化されており、融着帯位置の異常な低下が炉況の悪化を招くことが知られている。最近、上記のモデルをさらに進め、非定常的な解析を可能にしたモデルが開発され、休風時の解析も、図9のように可能となっている。⁹⁾ 解析手法は、装入物の荷下り挙動に注目して、荷下り流線に沿って、熱、反応解析を行う方法である。

4. 統一モデル

物質移動、熱、反応の同時解析を行った高炉半径方向モデルである。ガス側の流線は、ガス流れモデルより求め、固体荷下りのうち、羽口前燃焼コークスは、レースウェイ直上へスリパチ状に

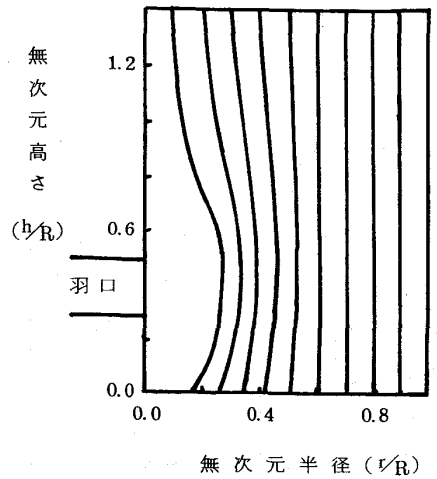


図6. 液体滴下流線分布

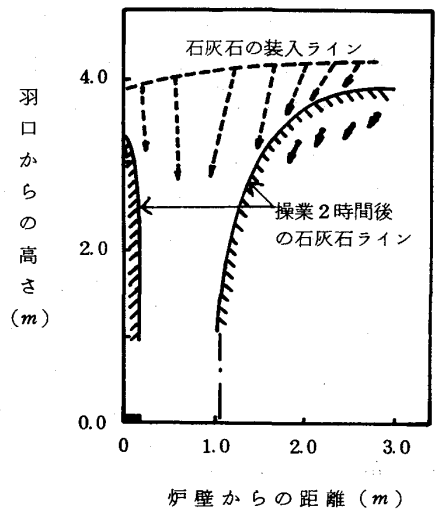


図7 装入コークスの半径方向荷下り分布

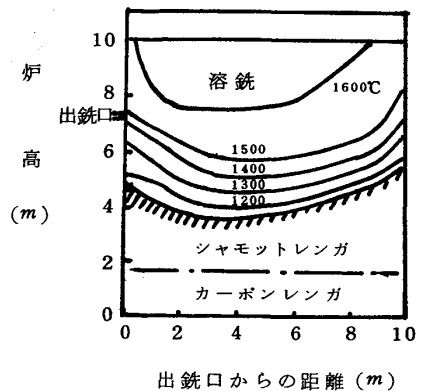


図8 湯溜り内温度分布

流れ込むこと、液および反応固体は、炉内をピストン流れで流下することを仮定し、これらの流線に沿って、熱反応を解析する。熱伝導による伝熱は

物質移動による伝熱に比し、微小であるとして無視した。この結果、ガス固体について炉内温度分布が得られ(図10)¹⁰⁾ 炉芯コークス部分が1種の保温帯として働くことにより、融着帯の逆V型が形成されることが明らかとなった。

5. 結 言

以上のように、数式モデルの活用が増加しつつある反面さらに開発を要する、次のような課題をかかえている。

- i) 原料の性状評価モデルの充実
- ii) 装入物の荷下り、分布挙動の解析。

文 献

- 1) 羽田野, 栗田; 鉄と鋼, 62(1976)8, P. 956
- 2) 羽田野他; 鉄と鋼, 64(1978)4, P. 107
- 3) 羽田野, 栗田, 岡根; 鉄と鋼, 63(1977)2, P. 219
- 4) 羽田野, 栗田; 鉄と鋼, 62(1976)11, P. 439
- 5) 羽田野, 梶原; 学振第54委, 1412, (1977)
- 6) 富田他; 鉄と鋼, 64(1978)4, P. 108
- 7) M. Hatano et. al.; Trans. ISIJ, 17(1977), P. 105
- 8) J. Yagi, I. Muchi; Trans. ISIJ, 10(1970), P. 392
- 9) 羽田野, 山岡; 鉄と鋼, 64(1978) 11, P. 504
- 10) 羽田野, 栗田; 学振第54委, 1428, (1977)

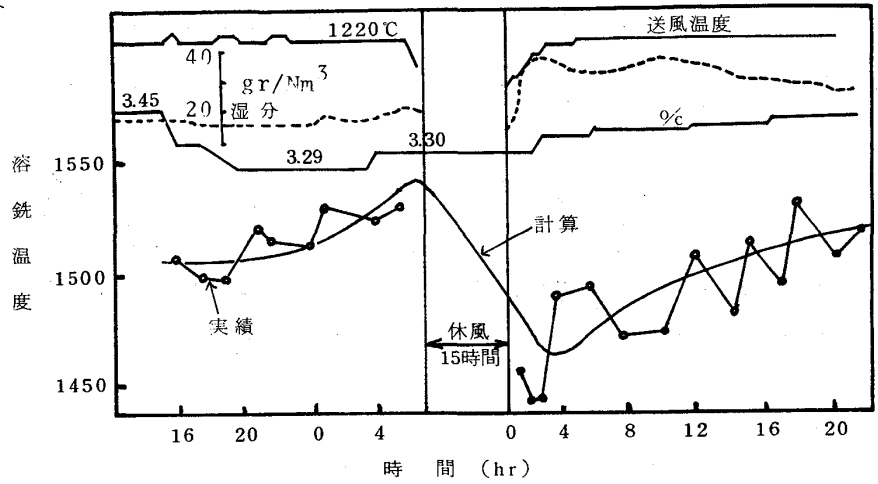


図9. 非定常モデルによる休風解析

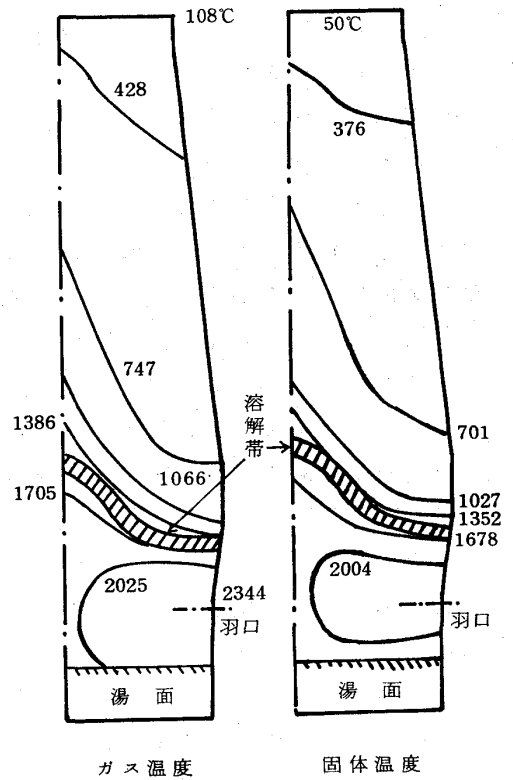


図10. 高炉半径方向モデルによるガス、固体温度分布