

小型たたら炉の温度分布解析

田辺 潤*

Analysis of Temperature Distribution in Modified Tatara Furnace

Jun TANABE

Synopsis : From influence of temperature being big in an iron manufacture principle during the operation in modified tatra steelmaking furnace method, the temperature of inside of whole in modified tatra steelmaking furnace was measured, and the non-equilibrium reaction temperature was examined. I did condition setting of simulation afterwards and made temperature distribution by ANSYS by analysis of temperature distribution in a furnace. The carbon content of "Kera" was around 1.5 mass%. I could grasp temperature distribution in modified tatra steelmaking furnace as a result of having done a temperature distribution simulation in a furnace and was able to confirm a generation part of "Kera", shape again.

Key words: steelmaking, iron sand, charcoal, bloom, tatara, temperature distribution

1. 緒言

たたら製鉄は我が国古代から人々の生活の中から生まれ、改良が加わりながら継承されてきた技術である¹⁾。たたら製鉄で作られた 鋳 (ケラ) は、近代製鉄法で生産される鋼に比べて劣るどころか、加工性および鍛接性に優れているといわれている。また、現在刀剣等の素材として使用される。鋳の生成はオーステナイト固溶体と液相の共存領域で起きている²⁾。この製鉄原理は明らかに高炉による現代製鉄法と異なっている。永田³⁾が行った研究では、“たたら炉”は小型で内部に土を塗ってなく、送風方法も掃除機を利用した連続送風であり、古来から行われてきた“たたら炉”とはいくつかの点で異なっている。しかし生成した 鋳の成分および状態はよく似ており、木炭を用いて砂鉄を還元していること、および炉の高さが1.3m程度であることが重要であるとしている。永田の研究による製錬反応機構²⁾は非平衡状態で、反応が進行しており、古来からのたたら炉でも同じ現象が生じているとしている。また、田辺ら⁴⁾が行った研究では小型たたら炉製鉄法で一部液体を生成した鉄は表面張力で球状になり転がり落ちて、熔融状態のノロに落ちる。そして、ノロの中を沈降し互いに付着しながら炉底で成長し 鋳となる。このとき、表面張力のために鉄とぬれ性の悪いノロは排除されるので緻密な 鋳ができる。このようにノロは生成した粒鉄の再酸化を防止すると共に 鋳の成長を助ける。したがって、オーステナイトと液相の固液共存領域で反応が起きていると考えられる。また、ブーダア反応 $C+Q=CO$ の親和力 A は0

より大きくなり、非平衡反応であることであるとしている。しかし、これらの研究は炉内全体の温度測定をしていない。

以上のことより、本研究では小型たたら炉法における操業中では温度の影響が大きいことから、たたら炉内全体の温度を測定し、非平衡反応温度を検討した。その後シミュレーションの条件設定をし、炉内の温度分布の解析を行った。

2. 小型たたら炉製鉄法

2.1 原料

実験では砂鉄(Table 1)は磁選されているニュージーランドのものを使用した。比較として太田砂鉄を示す。TiとSiのmassバランスによりノロの生成が決まる。このノロの生成が多すぎても少なすぎても、鋳の生成に影響するため適度にノロを生成するようにニュージーランドの砂鉄にはケイ砂を1%添加した。

2.2 たたら炉の構造

始めに、炉を築くために地面を整地し、そこに地面からの湿気を防ぐために鉄板を敷いた。その上に、炉底用の耐

Table 1. Chemical composition of iron sands (mass%)

	T-Fe	Ti	Si	Al	Mg	Ca	S
New Zealand	55.8	4.60	1.96	1.93	1.78	1.47	0.02
Ohta	51.0	5.50	25.0	8.60	2.60	3.20	0.00

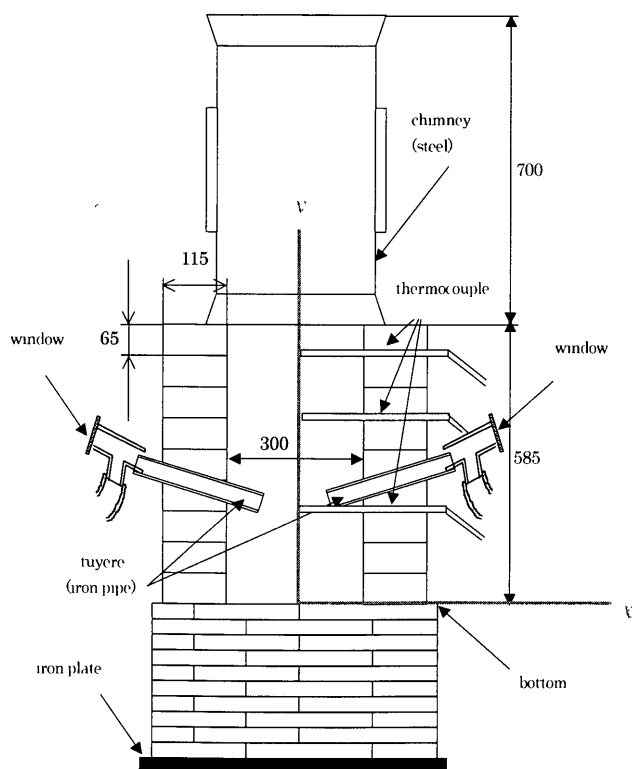


Fig. 1. Construction of small Tataru furnace.

火レンガを数段敷き詰めた。さらにその上に、炉壁用の耐火レンガを用いて炉壁を作製した。炉壁は耐火レンガを9段積み上げた。レンガとレンガの接合には、モルタルを水で溶いたものを用いた。この時炉は、上から見て「コ」の字型になるように炉の前面だけを残して設置した。炉の前面は、操業終了時に前面をはずして鉚をスコップで取り出すので炉の横幅はスコップの幅300 mmを基準として合わせた。炉の組み立ての際、2段目にはノロ出しの穴を、4・5段目には送風管を差し込むための隙間を、熱電対はそのときの測定箇所に合わせて隙間を開けた。

Fig. 1のように炉を造り、羽口（送風管）、熱電対を設置した。そして、炉の前面を少しずつ積み上げながら、耐火レンガの1段目まで粉炭(2.5 kg)を投入した。さらに炉の前面を積み上げて、小型炉を完成させた。木炭を投入し、火付けを行い、炉内を乾燥させた。その後送風を開始し、炉頂部まで木炭を投入した。煙突を立てて、さらに木炭を煙突の頭頂部まで投入した。煙突は通気性の向上が目的である。木炭をよく燃焼させ、煙突から出る炎が酸化炎から還元炎へ変化したら、温度（電圧）の測定（1分毎）をレコーダーにより開始し、砂鉄を投入してから木炭を投入した。砂鉄と木炭の投入は10分毎に行った。10分というのは砂鉄の還元率を考えて決定したものである。また、送風量は木炭の燃焼速度で調整し、木炭が10分間に約10 cm降下するようにした。砂鉄の投入量は一定としたが、木炭の投入量は燃焼状態を見て判断しながら適量を投入した。操業途中、ノロ出し作業を砂鉄投入開始から7回目・10回

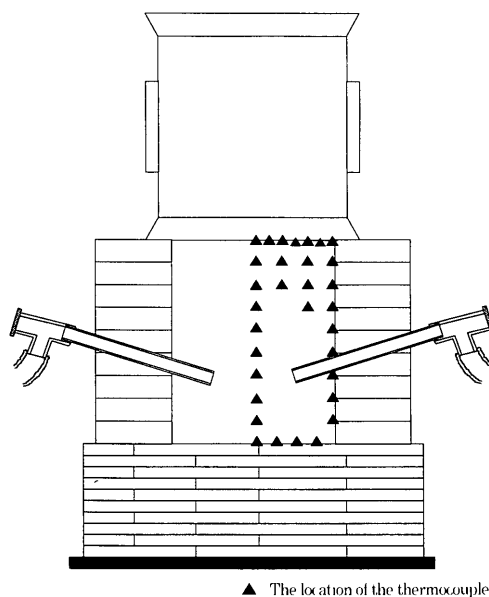


Fig. 2 The measurement place of the temperature of inside of modified Tataru steelmaking furnace.

目・13回目に行った。その後砂鉄の総投入量に達したら投入を止め、同時に木炭投入も止めた。

煙突内の木炭が燃焼しながら炉頂部まで降下したら、煙突をはずし草で蒸した。草はイネ科のものを用いた。イネ科は燃焼しても形を崩さず断熱し、酸化を防ぐ役割をしている。さらに炉頂部よりも木炭が降下したら、炉の前面を1段ずつ外していき、ある程度の高さまで降下したら送風を止め、同時に温度測定も停止した。前面のレンガをすべて外し、炉より鉚を取り出し水冷した。小型たたら炉内の温度を測定した箇所をFig. 2に示す。

3. 温度分布

所定の位置について温度の測定を行った。測定点において縦方向は耐火レンガのひとつ分の高さ65 mm、横方向は50または25 mm間隔について行った。得られた測定温度から温度分布を作成した。

次に炉内測定温度の一例(Fig. 3)を示す。

炉中心羽口先端($(x,y)=(0 \text{ mm}, 195 \text{ mm})$)の温度は1600K前後の温度を示している。煙突から投入された砂鉄は炉内を降下していく間に半熔融状態になり還元されていき鉚となって成長をしていく。この半熔融状態になった粒が木炭の上を流れていく間に吸炭を行っていく。また、砂鉄に含まれていた不純物はぬれ性の違いから別れて流れていく。炉底に到達しても再び結合することはない。この測定温度から砂鉄と木炭の投入終了時から温度の安定が見られるこの時間でゆっくりと鉚が成長をしていく。なお、操業途中に数度ノロだしを行った。

たたら製鉄では製錬反応機構は非平衡状態で、反応が進行しているが、どの操業でも同じように温度の安定が見ら

れる砂鉄投入砂鉄投入終了30分後を反応終了後と仮定して前後5分間（11点）の測定データを用い、その11点から移動平均法⁵⁾を用いて温度の平均を求めた。

$$T = \frac{1}{429} \sum_{j=-5}^5 W_j \times t_i \dots\dots\dots(1)$$

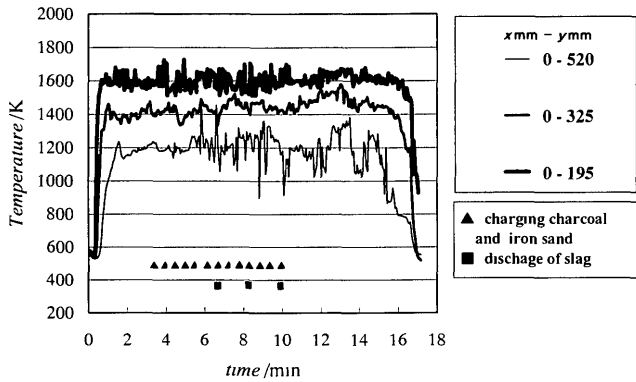


Fig. 3 Temperature changes in small Tataru furnace during operation.

T : 温度の平均値[K]
 W_j : 重み関数(-36, 9, 44, 69, 84, 89, 84, 69, 44, 9, -36)
 t_i : 温度 [K] ($i=1, 2, 3 \dots 11$)

この W_j の係数はサービッキ・ゴーリの表の値からとっている。この温度を基に温度分布を作成した。

温度分布(Fig. 4)の温度は格子接点が測定点である。ここでは羽口における断面部を左右対称とし、右半分を示した。

Fig. 4の測定温度をまとめた結果からも1600K前後を熱源として温度が広がっている。炉底において温度が低くなっているのは生成される鋤が炉底の蓋の役目をし、温度が上がらなかったためと考えられる。

Fig. 5に示すように得られた鋤は二層状態に分かれていた。上部では金属光沢がある玉鋼と呼ばれる部分で、表面も均一であった。下部は銑と呼ばれる部分で、表面は凹凸が見られた。EDS結果では上部ではFe以外はほとんど見られなかった。下部ではTiやSiが多く見られた。これらが含まれていたのはノロが混入をしていたためと考えられる。

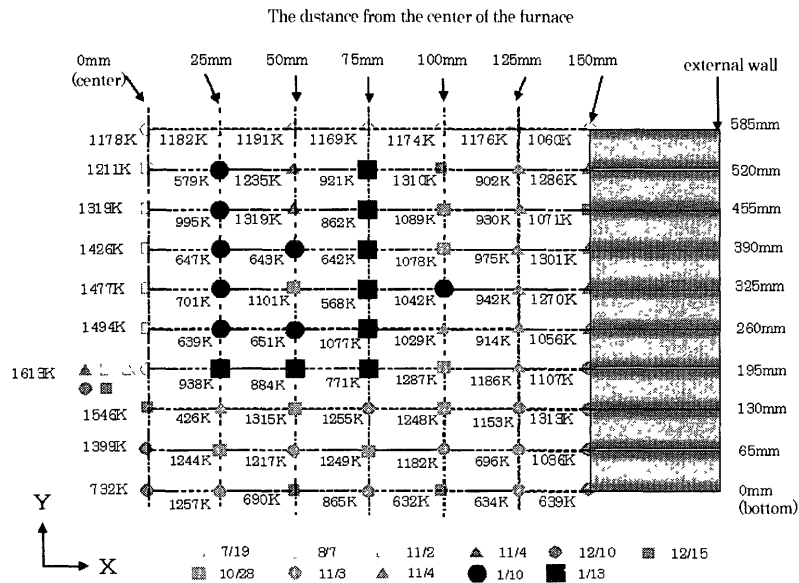


Fig. 4 Temperature measurement point in small Tataru furnace of 30±5 min after iron sand injection end

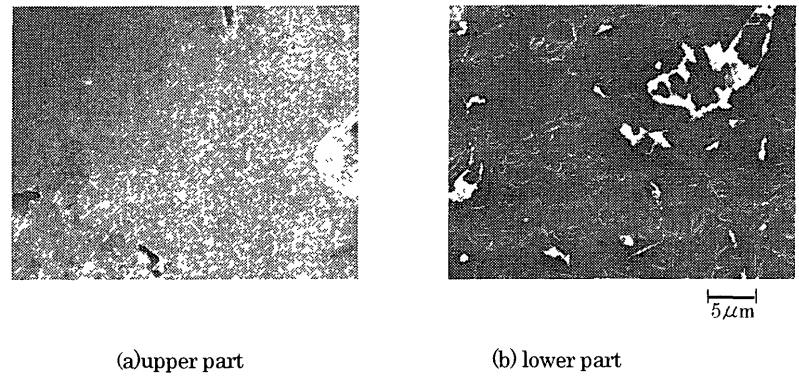


Fig. 5. Cross section of Kera.

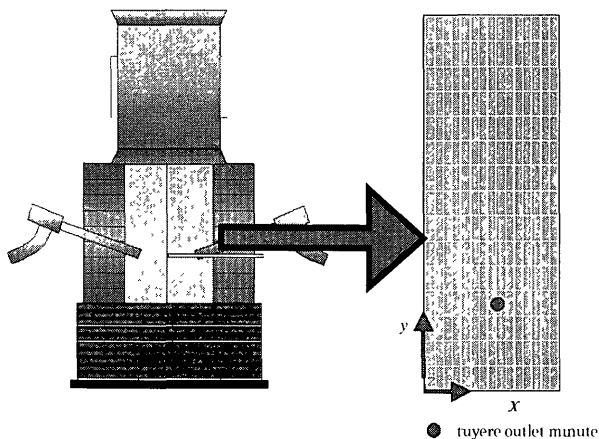


Fig. 6 Division figure of inside of modified Tatra

4. 温度解析

小型たたら炉の温度解析を行うにあたり、たたら炉は高炉と大きさが異なるが還元反応により鉄を生成する反応器であることから高炉と同様に考えた。高炉の解析⁶⁻¹⁰⁾は様々な反応の基礎式を組み合わせることによってシミュレーションを行っている。高炉でシミュレーションを行う場合、条件の決定が重要な要因となる。本研究では小型たたら炉の製鉄法における温度分布のシミュレーションを行う準備として条件の決定を行い、検討した。

ここでは二次元モデルの検討を行った。

本研究の温度分布シミュレーションを行うにあたり、ANSYS/ED 5.7を使用した。ANSYSは、多種の解析（構造、伝熱、磁場、流体、圧電、音響など）が可能だけでなく、ほとんどすべての解析の間で連成解析が可能である。

さらに、各場の解析環境（材料特性、境界条件、要素の選択-非選択など）を特殊なファイルに納めておくことが可能で、このファイルを読み込むだけで、各解析に必要な条件を簡単に入れ替えることができるソフトである。

また、ANSYS/EDでは、最大節点数は、1000、最大要素数は、500に制限されている。このことを考慮し以下の初期条件を決定した。

4.1 炉の分割

ANSYSを使用するにあたり、小型たたら炉の内部を分割しなければならない。そのために、最大節点数、最大要素数を考慮して、小型たたら炉内の右半分の断面を15×15分割（節点数=256、要素数=450）した。Fig 6に小型たたら炉内の右半分の分割図を示す。

4.2. 境界条件

Fig 4で求めた炉頂・炉中心・炉壁および炉底の全砂鉄投入終了30分後の前後5分間（11点）の測定データを用い、その11点から移動平均法により平均を求めた炉内温度分布グラフをFig 7~10に示す。さらにそれぞれのグラフに最小二乗法を用いて、一次関数の近似値をあてて移動

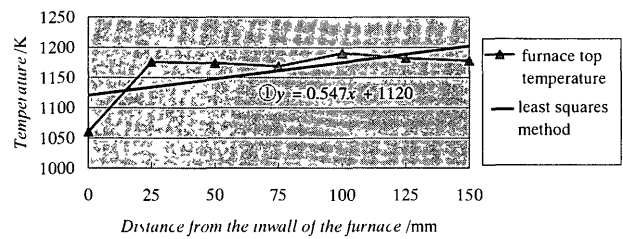


Fig. 7 Temperature distribution graph of the furnace top.

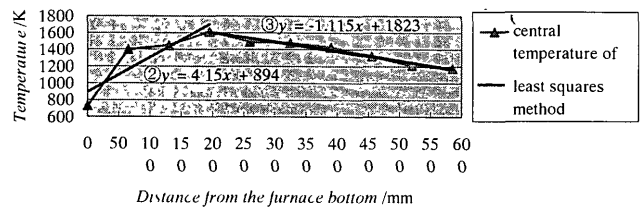


Fig. 8. Division figure of inside of modified Tatra steel-making furnace. (15×15)

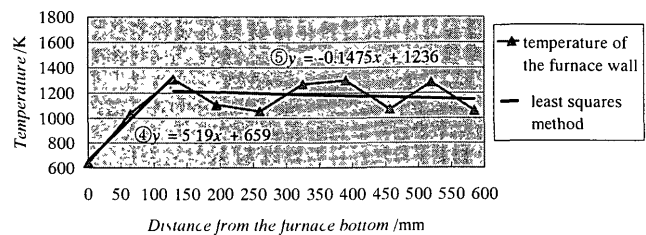


Fig. 9 Temperature distribution graph of the furnace wall.

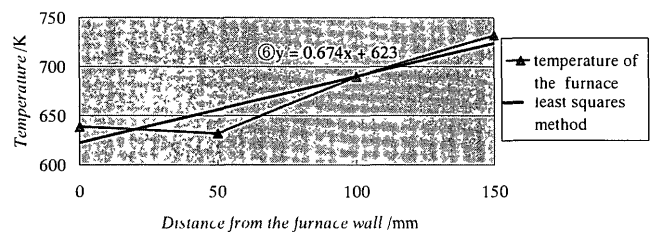


Fig. 10. Temperature distribution graph of the furnace bottom.

関数に近いグラフになるようにした。小型たたら炉内の温度の境界条件を以下のように示す。

- ① $y = 0.547x + 1120$ (炉頂)
- ② $y = 4.15x + 894$ (炉中心：炉底から0~195 mm)
- ③ $y = -1.115x + 1823$ (炉中心：炉底から195~585 mm)
- ④ $y = 5.19x + 659$ (炉壁：炉底から0~130 mm)
- ⑤ $y = -0.1475x + 1236$ (炉壁：炉底から130~585 mm)
- ⑥ $y = 0.674x + 623$ (炉底)

炉中心部と炉壁部において1つの関数を求めることができなかったのは、1つの関数を使用すると炉底から0~130[mm]の間において誤差が大きく出てしまうためである。また、炉内の温度は一様に上昇・下降していると考えられるため、本実験の境界条件は1次関数を使用して求めた。

4・3 初期温度

前節で述べた境界条件を使用し、分割した小型たたら炉内の周囲の温度を設定した。Fig.11に入力温度を示す。

4・4 解析式

ピトー管を用いた羽口部分の実験より羽口部分の圧力は101.35 [kPa]であって、大気圧とほぼ一致することがわかっている。このことより小型たたら炉内の圧力は P_i を羽口の出口部分の圧力、 P_0 を煙突出口部分の圧力とすれば、

$$P_i = P_0 = 101.35 \text{ [kPa]}$$

$$\therefore \Delta P = P_i - P_0 = 0 \dots\dots\dots (2)$$

このことにより、小型たたら炉内の圧力は大気圧とほぼ同じで一定であるといえる。

したがって、Ergunの実験式¹¹⁾は $(10.5\rho r)u^2 + (150.0\mu)u = 0$ となつて、この2次方程式より、 $u=0$ となる。これは小型たたら炉の1次元的理解である。すなわち、小型たたら炉内のガスは自然対流であると仮定して、ガスの流速は小さいと考えるのが妥当である。さらに、炉内の圧力はほぼ大気圧に等しく、一定と考えられるから、小型たたら炉を2次元的に理解する時、 $\text{grad } P = \vec{0}$ となつて、

$$(f_1 + f_2|G|)G = \vec{0}$$

となる。したがって、ガスの質量速度 G は零ベクトルとなる。

$$G = \rho(u, v) = \vec{0}$$

であるから、2次元的理解ができ、ガスの速度成分 u, v は

$$u=0, v=0 \dots\dots\dots (3)$$

となる。

連続の方程式¹²⁾の最終的な理論式は

$$\text{div } \vec{v} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

である。 $u=v=0$ であるから、連続の方程式は小型たたら炉内の温度分布シミュレーションを行うにあたり、必要ないことがわかる。

Navier-Stokes¹³⁾の方程式の最終的な理論式は

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \lambda \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \mu \left(2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = -\rho g - \frac{\partial P}{\partial y} + \lambda \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \mu \left(2 \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right)$$

である。 $u=v=0$ と $\text{grad } P = \vec{0}$ より、この式も小型たたら炉内の温度分布シミュレーションには必要ないことがわかる。

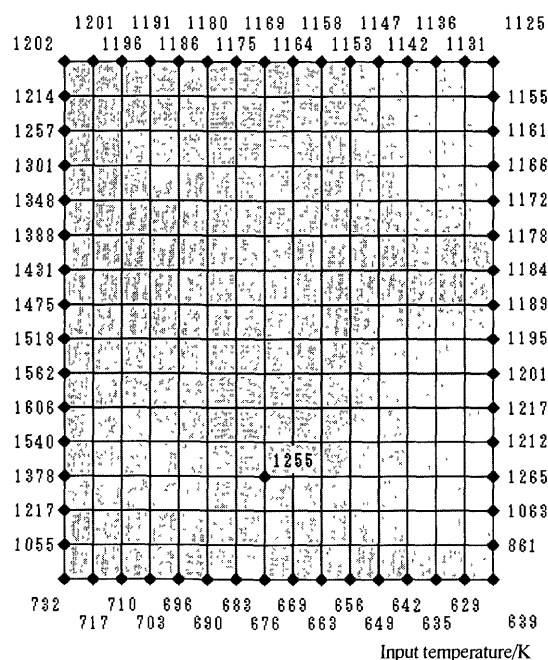


Fig 11 Input temperature which set the temperature of the circumference in divided inside of modified Tatra steelmaking furnace.

熱伝導方程式¹³⁾の最終的な理論式は

$$\rho \frac{De}{Dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \kappa \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - P \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \Phi$$

ただし

$$\Phi = 2\mu \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right\} + \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2$$

である。まず拡散項 Φ については

$$\Phi = 2\mu \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right\} + \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2$$

この式で $u=0, v=0$ とすれば $\Phi=0$ となる。したがって、熱伝導方程式は

$$\rho c_v \frac{DT}{Dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \kappa \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \dots\dots\dots (4)$$

となる。このとき、 $u=v=0$ であることに注意すると、

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial t}$$

したがって、(4)式は

$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \kappa \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \dots\dots\dots (5)$$

ここで、小型たたら炉内の発熱量 $\partial Q/\partial t$ を無視できるものとし、定常状態を考えれば、 $\partial T/\partial t=0$ としてよい。したがって、熱伝導方程式(5)式は次のラプラスの方程式になる。

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \dots\dots\dots (6)$$

本実験の温度解析には上の(6)式を使用して解析を行った。

4.5 シミュレーション結果および考察

ANSYSにより解析した小型たたら炉内の温度分布図をFig.12に示す。

Fig. 4と先ほどANSYSで求めたFig.12を比較してみると、全体的に一致していることがわかる。このことより、本実験の解析結果は妥当な数値を得ていることがわかった。

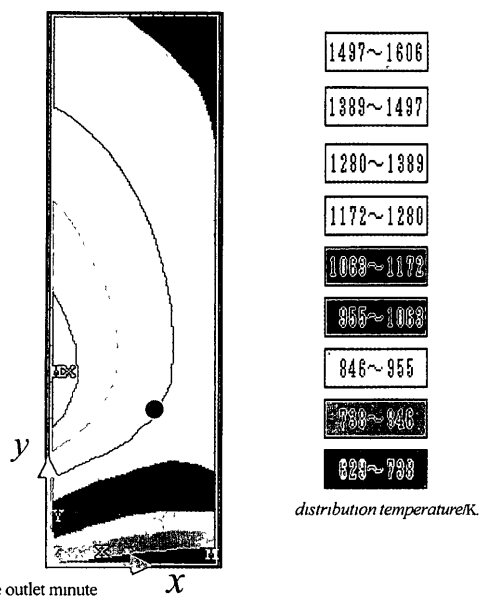


Fig 12 Temperature distribution analysis result of inside of modified Tatra steelmaking furnace.

5. 結言

小型たたら炉内の温度分布を作成した。また温度は1600K付近を中心に広がっていた。得られた鋳の炭素分析において下部のほうが上部に比べ炭素量が多く含有していた。鋳の炭素含有量は1.5%前後であった。測定温度から境界条件の関数を算出した。小型たたら炉内に羽口から流れる気体の流速 $v=4.0871$ [m/s]、圧力 $P=101.35$ [kPa]ということがわかった。このことより、小型たたら炉内の圧力は101.35[kPa]で一定ということがわかった。そのことより、熱伝導方程式と境界条件を用いてANSYSを使用し、小型たたら炉内の温度分布シミュレーションを行った結果、炉内の温度分布を把握でき、鋳の生成部分、形状などが再確認できた。

本研究におけるシミュレーション解析において日本工業大学共通系教授船橋昭一先生に御指導、御鞭撻を賜り深くここに感謝いたします。

文 献

- 1) 岡田廣吉：たたらから近代製鉄へ，平凡社，東京，(1990)。
- 2) 俵 国一：古来の砂鉄精錬法，丸善，東京，(1993)。
- 3) K Nagata *Tetsu-to-Hagané*, **86** (2000), 633
- 4) J Tanabe and K Nagata *Tetsu-to-Hagané*, **87** (2001), 515
- 5) 竹本宣弘，荒 実：Cによる数値計算，朝倉書店，東京，(1993)
- 6) J Kudo and J Yagi *Tetsu-to-Hagané*, **72** (1986), 2032
- 7) J Yagi, K Takeda and Y Ohmori *Tetsu-to-Hagané*, **66** (1980), 1888
- 8) M Hatano and K Kurita *Tetsu-to-Hagané*, **62** (1976), 953
- 9) M Hatano, K Kurita and K Okane *Tetsu-to-Hagané*, **63** (1977), 217
- 10) 羽田野道春：第一巻 高炉製鉄法，地人書館，東京，(1999)。
- 11) S Ergun *Chem Eng Prog*, **45** (1952), 89
- 12) 斉藤彬夫，岡田昌志，一宮浩市：例題演習伝熱工学，産業図書，東京，(1990)。
- 13) 矢川元基：流れと熱伝導の有限要素法入門，培風館，東京，(1994)。