

# 音波CT法による高炉炉芯内温度分布測定

岡田 務\*・一田 守政\*・山地 宏尚\*・国友 和也\*・  
井上 衛\*<sup>2</sup>・山田 育野\*<sup>2</sup>・山根 健司\*<sup>3</sup>

Dead-man Temperature Distribution Measurement in a Blast Furnace by Acoustic CT Method

Tsutomu OKADA, Morimasa ICHIDA, Hironao YAMAJI, Kazuya KUNITOMO,  
Mamoru INOUE, Ikuya YAMADA and Kenji YAMANE

**Synopsis** : A new sensor measuring two dimensional temperature distribution of the dead-man in a blast furnace has developed by using an acoustic wave CT method based on the theory that acoustic velocity in gas depends on a temperature.

The features of a new measurement apparatus transmitting and receiving the acoustic wave which decreased to a great extent in packed bed is as follows.

Shock wave is used in transmitter to generate acoustic wave with large acoustic pressure. Receiver has the good sensitivity for low frequency. Then, the least square method is adopted for computed tomography since the number of acoustic velocity data is limited.

Relationship between temperature and acoustic velocity in a packed bed was obtained in off-line experiment.

The measurement in an actual blast furnace was carried out during the scheduled shutdown. The acoustic wave was transmitted from a tuyere and the wave propagated through the furnace were received at some tuyeres. The temperature calculated by this method showed the decreasing tendency from side wall to the center of the blast furnace. An isothermal line of the temperature distribution had the possibility to show the shape of the dead-man. The temperature measured by this method was about 100°C lower than that measured by thermocouple.

**Key words** : blast furnace; dead-man; temperature distribution; acoustic wave; computed tomography; shock wave.

## 1. 緒言

現在、ほとんどの高炉で溶銑コスト低減のために、微粉炭多量吹き込みが指向されている。微粉炭多量吹き込みにより、装入コークス量に対する鉱石量が増大する操業下(以降、高O/Cと呼ぶ)では、高O/Cによる炉下部の通気、通液性の悪化や、コークス劣化による粉率の上昇が懸念される<sup>1)</sup>。このため、微粉炭多量吹き込みを安定的に継続するためには、炉芯状態を適正に活性化し、維持することが重要である。

このような状況にも拘わらず、現在の炉芯状態を知る手段は、十分であるとは言い難い。例えば、操業情報として、炉底底盤温度<sup>2)</sup>や炉下部の圧損、送風圧力変動<sup>3)</sup>などが利用されている。また、非水冷式ゾンデを炉内に挿入し直接測定した炉内温度<sup>4)</sup>や、コークスサンプリングによるコークス履歴温度測定<sup>5)</sup>や粉率などからも定量化が図られている。しかし、炉内の2次元的な温度分布を測定する手段は知られていない。

一方、炉の断面積が4 m<sup>2</sup>を越える大型ボイラ内等での2次元的な温度分布測定が、音波CT (Computed Tomography) 法を活用して試みられている<sup>6,7)</sup>。気体中の音速は、その

伝搬する雰囲気温度に依存するため、音速から音波が伝搬した経路の平均温度が算出できる。音波CT法とは、同一平面上の音速データをCT法により2次元分布とし、音速と温度の関係を利用して温度分布図を得るものである。伊藤ら<sup>8)</sup>は、ボイラ内の温度分布測定を試み、検出端として適用できることを示している。

本研究は、音波CT法を用いて、高炉の羽口レベルの水平断面の2次元的な温度分布を求めることを試みたものである。ただし、ここで対象とする高炉の内部は高温充填層であり、低濃度粉体と気体からなるボイラ内の状態とは大きく異なるため、ボイラ内での測定法をそのまま適用することはできない。また、高温充填層内での音波の伝搬理論が確立されていないこと、伝搬する音波の減衰が非常に大きいと予想できることなどの様々な課題が考えられる。

先ず高炉を想定した高温充填層内を伝搬する音波の測定装置を構築すると同時に、充填層内における音波の伝搬特性をオフライン試験で定量化した。これらの知見に基づき、高炉の休風中に羽口レベルの水平断面の2次元的な温度分布を測定し、音波CT法による高炉内の温度分布測定の可能性を検討した。

平成10年6月10日受付 平成10年9月22日受理 (Received on June 10, 1998; Accepted on Sep. 22, 1998)

\* 新日本製鐵(株) プロセス技術研究所 (Process Technology Research Laboratories, Nippon Steel Corp., 20-1 Shintomi Futtsu 293-8511)

\*2 新日本製鐵(株) 名古屋製鉄所 (Nagoya Works, Nippon Steel Corp.)

\*3 北海製鉄(株) (Hokkai Iron & Coke Corp.)

## 2. 測定原理

一般に理想気体中の音速は、(1)式のように示される<sup>9)</sup>。

$$v = (\gamma RT/M)^{1/2} \dots \dots \dots (1)$$

$v$  : 音速  $T$  : 絶対温度  $\gamma$  : 比熱比

$R$  : ガス定数  $M$  : 分子量

(1)式の比熱比 $\gamma$ の温度変化は小さいので、理想気体中の音速は温度のみの関数として考えられる。従って、直進する音波の速度を測定することで、その伝搬経路上の平均温度を求めることができる。2次元的な温度分布を求めるには、例えばFig. 1の高炉における測定方法に示すように、1ヶ所の音源から発せられた音波を測定対象とする平面上の数ヶ所で受信する。これを炉の円周方向に繰返すことで、同一平面上で伝搬経路が交差する音速データを得ることができ、CT法を適用して再構成計算する。次に、これらの音速データを温度に変換し、画像処理することにより、2次元的な温度分布図を求めることができる。ただし、(1)式は理想気体中での理論式であるので、高炉内の高温充填層内を伝搬する音波がこの関係式に従うとは限らず、高温充填層内での音速と温度の関係を定量化する必要がある。

本測定方法は、伝搬する音波が充填層内を直進することを前提としている。受信波の波形において、初めの立ち上がり時間が直進波の伝搬時間を与えると仮定した。炉内を伝搬する音波が屈折や反射を起こしながら伝搬し、これらの屈折波や反射波を同時に捕らえていると考えられる。しかしながら、これらの伝搬波は、屈折や反射により伝搬距離が長くなるために伝搬時間が大きくなるので、受信波の波形の初めの立ち上がり以降に表れると考えた。

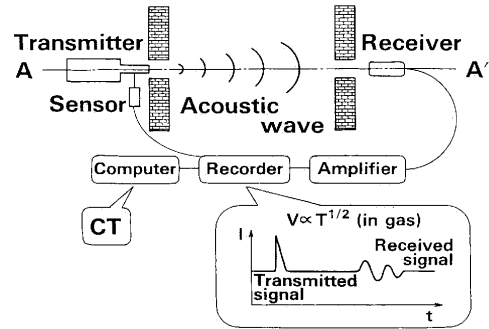
## 3. 測定装置の開発

### 3.1 衝撃波を利用した音源

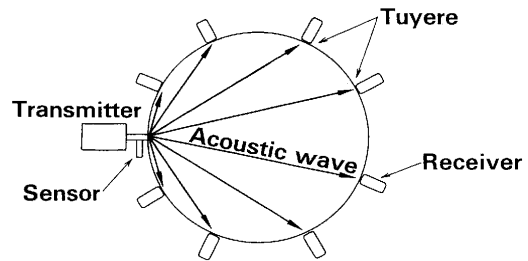
充填層内では音波の減衰が激しくなることに加え、音波の周波数が高くなれば、さらに減衰が大きくなることが予想できる。さらに、媒体となるガス種によってもその減衰が大きくなることが知られている<sup>10)</sup>。例えば、空気中にCO<sub>2</sub>ガスが混合している場合、その濃度の上昇に伴い音波は減衰する。このために、直径が10mを越える充填層である高炉内を伝搬する音波を得るためには、かなり強力な音源が必要である<sup>11)</sup>。

本測定装置は、音源からパルス的な音波を発生させて、炉内を伝搬した音波を受信し、その波形をデータ処理する構成とした。音圧の大きい音波を発生する方法は種々あるが、可燃性ガスの瞬間的な爆発で発生する衝撃波を利用した。この方法は簡単に繰返すことが可能であり、強力なパルス波を得ることができる。

Fig. 2に今回開発した衝撃波を利用する音源の発生原理



(a) Vertical section in blast furnace.



(b) Horizontal section in blast furnace (A-A').

Fig. 1. Measuring method in blast furnace.

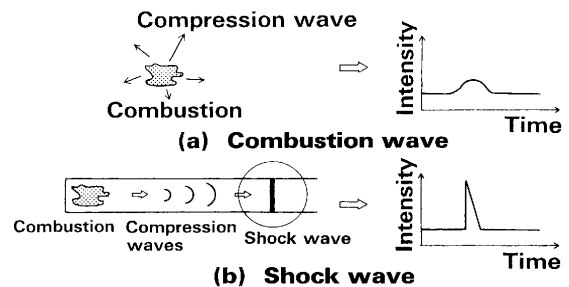


Fig. 2. Principle of combustion wave and shock wave generation.

を示す。Fig. 2(a)に示すように、通常の爆発的な燃焼では、発生した圧縮波はあらゆる方向へ散乱するために、各々の圧縮波の強度は低いものとなる。一方、本法はFig. 2(b)に示すように、無数の圧縮波をショックチューブにより一方へ伝搬させることができる。第1波の圧縮波が通過した後の微小空間は、通過前よりも僅かに高温・高圧となる。このために、第2波の圧縮波は第1波よりも速度が大きくなり、第1波に追いつく。これらが繰返されると、最終的に全ての圧縮波が一つに重なり、強力な圧縮波つまり衝撃波となる。この衝撃波がショックチューブから外に開放されると、局所的な高圧部が発生するので、それを音源として利用することができる。

効率良く強度の大きい衝撃波を発生させるために、プロパンガスと純酸素を当量混合比となるように調整した予混合ガスを燃焼ガスとして使用した。アセチレンガスと純酸素の予混合ガスの方がより発生強度は大きい、燃焼速度が大きくなり過ぎるため、2重、3重の逆火防止対策を必要とするなどの構造が難しくなる<sup>12)</sup>。

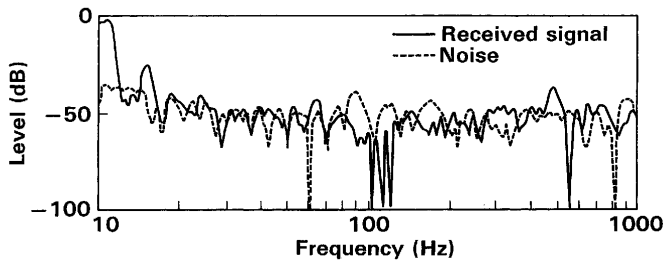


Fig. 3. Example of frequency analysis.

衝撃波の発生は非定常現象として現れるため、十分な強度を持ち、再現性のある衝撃波を安定的に得ることが困難である。これらの問題を解決するためには、点火初期の燃焼速度を大きくして、衝撃波の形成を早めることが有効と考えられる。このために、点火部へらせん状のバネを設置することで火炎の乱流場を形成し、燃焼初期の燃焼速度の増加を図った。その結果、ショックチューブの形状を $\phi 53 \times 500$  mmと小さくしても、安定的な衝撃波を得ることができ、その発生音圧としてC-J特性値である $3.7 \text{ MPa}^{12)}$ に近いものを得ることができた。

### 3.2 受信センサー

気体中であっても音波は距離に対して指数関数的に減衰し、高周波数の場合には減衰係数が増して強度が低下する<sup>13)</sup>。充填層内での気体の粘性係数の増加などがあると、さらに音波は減衰し、伝搬可能な音波は減衰能の小さい低周波数帯になることが考えられる。

前述した衝撃波発生装置を用い、高炉の休風中に音波を入射して、実炉内の伝搬波の受信を試みた。周波数特性が1 Hz~20 kHzの受信センサーを用い、受信波をFFTアナライザーを使って周波数解析した。その結果をFig. 3に示す。実線は炉内を伝搬した音波であり、破線はノイズレベルである。このように、炉内の伝搬波として検出される音波は、ノイズレベルを除いた20 Hz以下の非可聴音域となる低周波数の音波であった。

### 3.3 伝搬波のCT解析

今回の測定方法は羽口を利用するので、測定口の数や場所に制約がある。さらに、測定に時間がかかると炉内状況の変化の影響を避けることができなくなるので、短時間で測定を完了する必要がある。従って、高炉で測定できる音速データは、非常に限られた数になる。

代表的なCT法<sup>14,15)</sup>である総和法やコンボリューション法では、100以上のデータ数が必要である。これに対して、本法は一般にデータ数が少なくても計算が可能とされている最小二乗法<sup>8)</sup>を適用した。そのブロック図をFig. 4に示す。一般に、CT法でのデータは線形一次方程式で表され、平面全体はそれらの多元連立方程式で表されるので、これを解けば分割領域の平均音速が求められる。

本法では、炉端部におけるデータ数が少なくなるために、端部の精度の低下は避けられない。そこで、一点のみでは

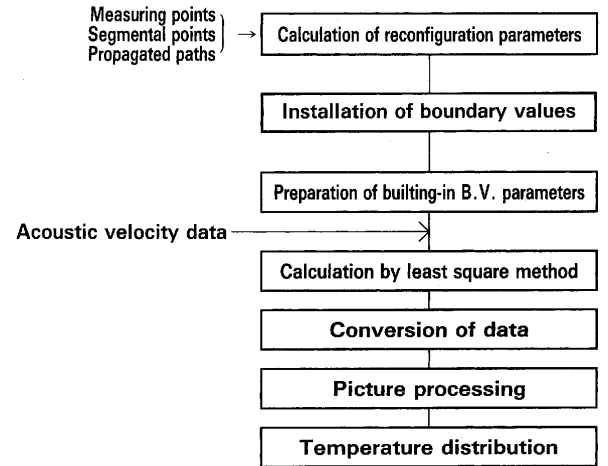


Fig. 4. Block diagram of CT program.

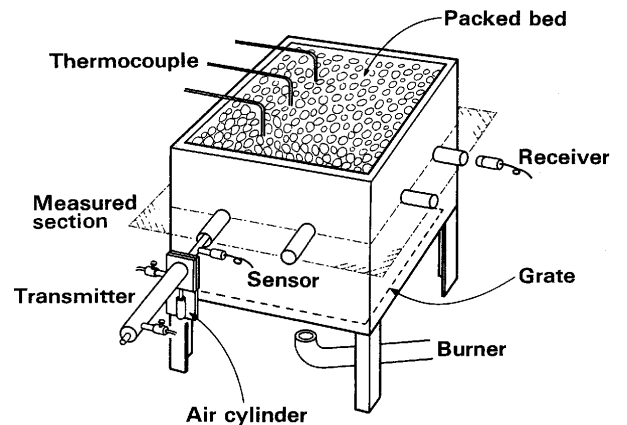


Fig. 5. Experimental apparatus in test furnace.

あるが、炉内温度を測定して、その実測値を用いて炉端部の温度を補正することもできる。

## 4. 高温充填層内における音波伝搬特性

高温充填層内における音波の伝搬特性を調べるために、オフライン試験を行った<sup>16)</sup>。今回は、音速とその伝搬経路上の平均温度の関係を与える実験式を求めた。

高温充填層内における音速の支配要因としては、雰囲気温度の他に空隙率が考えられる。低空隙率の場合には、気体と充填物との摩擦により気体の粘性力が増加し、音波の強度が減衰するとともに、伝搬速度も減衰することが考えられる。

まず初めに音速に及ぼす空隙率の影響を検討した。Fig. 5にオフライン試験装置の概要を示す。炉の充填層部は一辺が1 mの立方体であり、室温で径の異なる球を充填して空隙率を変化させた条件の下、伝搬速度を測定する試験を行った。測定は、火格子から500 mm上の水平断面で行った。

音波の送受信孔は炉の周方向に8ヶ所あり、1ヶ所の音源から発信した音波を、同一側面の受信孔を除く他の6ヶ

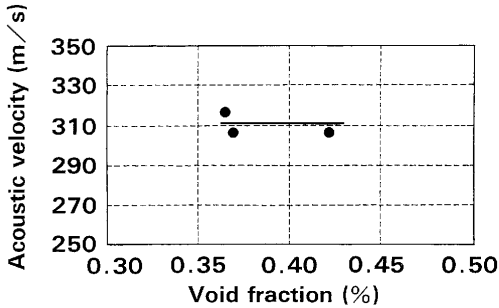


Fig. 6. Relation between void fraction and acoustic velocity in a packed bed.

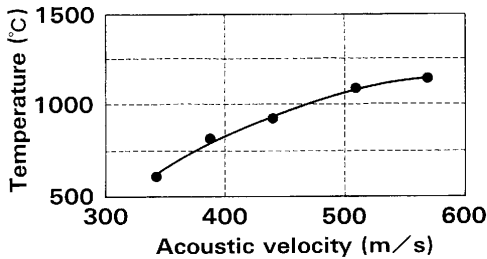


Fig. 7. Relation between acoustic velocity and temperature in a packed bed.

所の受信孔で同時に受信した。これを炉の周方向に8回繰返して、同一伝搬経路で送受信方向が逆転する場合は平均化し、合計24の音速データを得た。

炉内の空隙率と平均音速との対比を Fig. 6 に示す。気体中の音速よりも充填層内では音速は小さい値となるが、0.35~0.45の空隙率の範囲内では、音速に及ぼす空隙率の影響は小さいことが判明した。そこで、今回は空隙率の変化で音速は変わらないと仮定した。本測定法の精度向上のためには、広範囲（例えば0.20~0.60）に空隙率を変化させる条件下で空隙率と音速の関係を求める必要があり、今後の課題である。

次に、音速に及ぼす温度の影響を検討した。高炉の炉芯部を模擬するために、Fig. 5 に示したオフライン試験装置を用いて、φ50 mm 程度の粒径のコークスを火格子上に充填してある。そして、バーナーにより下方から点火し、下方から上方へ送風することで、炉内全域の雰囲気温度が所定の温度に一定となるようにコークスを燃焼させた。その後送風を停止して、空隙率の測定と同じように本法による測定を開始した。その断面の空隙率は、コークス粒径から推定して0.45であった。測定開始から終了までの時間内では、炉内温度の変化がほとんど認められなかった。大気を自然吸引することにより、炉内のコークス燃焼が継続していたためと考えられる。熱電対を予め炉内に25本設置し、炉内の温度分布を測定した。

このような試験を繰返し行い、炉内の平均音速と熱電対によって測定した炉内の平均温度との対比を Fig. 7 に示す。この図をもとに高温充填層内における音速と温度の関係を表す(2)式を求めた。

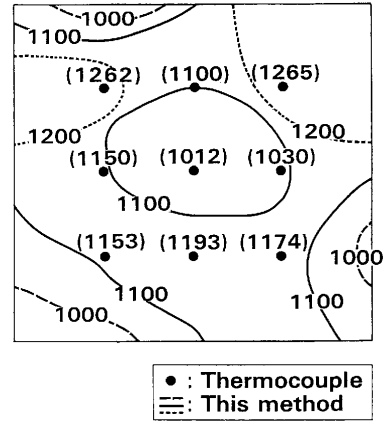


Fig. 8. Temperature distribution in experimental apparatus (unit: °C).

$$T = 931 \times \ln(v/123) - 273 (\text{°C}) \quad (2)$$

$T$ : 温度(°C)  $v$ : 音速(m/s)

ただし、(2)式は理想気体中の理論式である(1)式と無関係であり、500~1300°Cの範囲で求めたものであるが、これ以外の範囲での音速と温度の関係にも用いた。この式を使って求めた2次元温度分布図を Fig. 8 に示す。図中のカッコ内の数字は熱電対による測定値を示し、等温線は本法によって得られた温度分布を示す。両者を比較すると、30~40°Cの範囲内で良い一致を示している。

以上のように、高炉内を想定したオフライン試験により音速と温度の関係を求めたが、本関係式は一般的に成立するものではなく、温度範囲、空隙率範囲ともに限られた式である。また、粉や銑滓などが介在すると音波の伝搬強度を変化させることも考えられる。しかし、その体積の占める割合は小さいので、気体中を伝搬する音速に与える影響は無視できると考えた。気体中の音速はガス種や比熱比によっても変化するが、高炉とオフライン試験炉の炉内の気体状態が同じで、音速は温度にのみ依存すると仮定した。

## 5. 高炉における測定結果と考察

### 5.1 高炉における測定結果

高炉における測定は、高炉の休風中に一つの羽口から音波を炉内に入射し、他の複数の羽口で炉内を伝搬した音波を受信した。このような一連の作業を炉の円周方向に何度か繰返すことで、羽口レベルの断面全域を網羅する音速データを得た。さらに、CT法と前述した音速と温度の実験式を用いて2次元温度分布を求めた。

高炉測定時の送受信装置の概要を Fig. 9 に示す。音源となる衝撃波発生装置は、ブローパイプの蓋から炉内へ向けに置いた。さらに、音波を捕える受信センサーは、微粉炭吹き込みバーナーの接続ホースを外して置いた。Fig.10に、送受信波の測定例を示す。Fig.10(a)は炉内への入射波の波

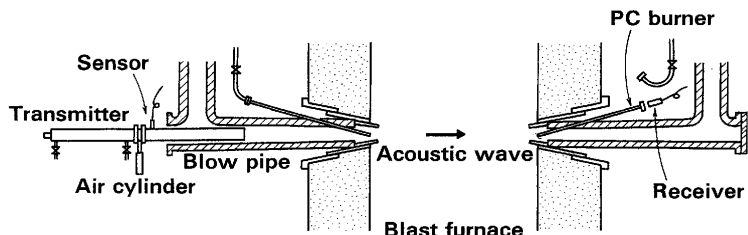


Fig. 9. Measurement apparatus in actual blast furnace.

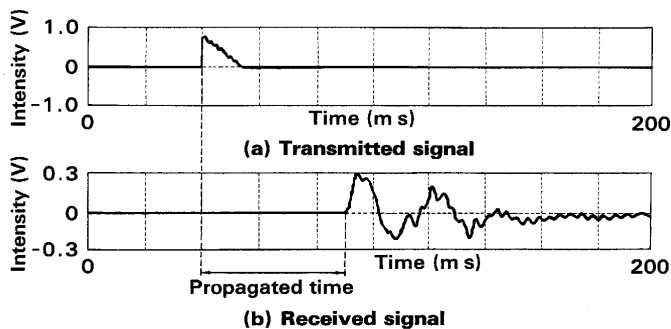


Fig. 10. Example of measured signal.

形を示し、Fig.10(b)は炉内を伝搬した音波の受信波形を示している。炉内を伝搬した音波の受信波形の立ち上がり時間と入射波形の立ち上がり時間の差から、音波の伝搬時間を求めた。さらに、ブローパイプ内での音波の伝搬時間を予めオフライン試験にて測定し、音波の炉内での伝搬時間を補正した。

実炉測定の一例として、Fig.11(a)に、休風中に行った北海製鉄2高炉の羽口断面の2次元温度分布の測定結果を示す。この高炉の羽口断面の炉内径は10.7m、羽口数は28本である。

休風に入ってから10時間後に測定を開始し、音波を羽口1つおきの14ヶ所から入射し、1つの入射波を7ヶ所の羽口で同時に受信した。受信センサーは炉の円周方向に均等になるように配置した。このようにして、炉内の音速データを得て、CT法による再構成計算を行った。炉芯内の温度分布は、炉壁近傍で1400°C、炉中心部で800°Cとなり、炉壁から炉中心部にかけて温度が低下する傾向を示した。この傾向は、炉内に光ファイバーを搭載したゾンデを挿入して測定した結果<sup>17)</sup>と同様である。

Fig.11(b)に、測定前10日間の平均値で、羽口毎の風量分布図を示す。本測定前の操業時には、#1、#28羽口では送風を停止し、#4~#6および#12~#15羽口では他の羽口よりも約20%低風量となっていた。これらの丸で囲んである羽口近傍の炉壁温度は、本法による2次元温度分布では#15羽口近傍を除いて1000°C前後の低温度を示した。なお、この期間では#18羽口の風量計が故障していた。

以上のように、本法によって得られた2次元温度分布は、炉の半径方向ではゾンデの測定結果、炉の円周方向では風量分布から推定される炉壁近傍の温度分布と定性的に同じ

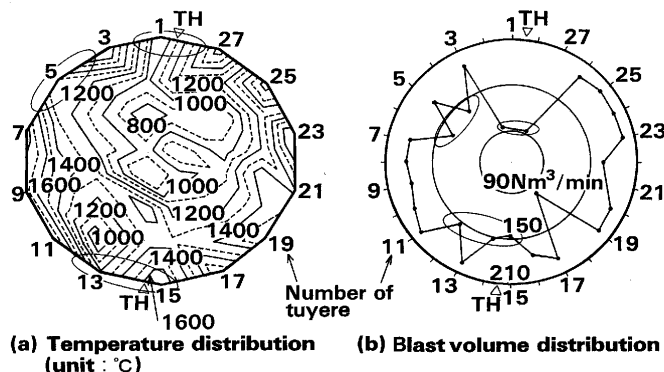


Fig. 11. Temperature and blast volume distribution on tuyere level at Hokkai No. 2 BF.

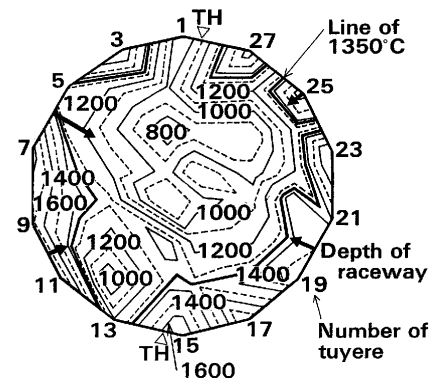


Fig. 12. Depth of raceway and temperature distribution on tuyere level at Hokkai No. 2 BF (unit: °C).

傾向を示したので、羽口断面上の2次元温度分布を反映していると考えられる。

### 5.2 炉芯形状の推定

羽口断面上の2次元温度分布から、羽口断面上での炉芯領域の推定を試みた。Fig.12に、北海製鉄2高炉で休風前日の操業中に測定したレースウェイ深度と、本法による2次元温度分布図を合わせて示した。レースウェイ深度測定結果は、図中の太い矢印の長さで表している。レースウェイ深度は、操業中に羽口から金棒を炉内に挿入し、その抵抗力的変化から推定した。この時、太線で示した1350°CラインとNo. 6羽口を除く3ヶ所ではほぼその深度が一致した。この2次元温度分布の絶対値には検討の余地を残すが、1350°Cラインを結ぶことで炉芯形状を推定できる可能性を示唆している。

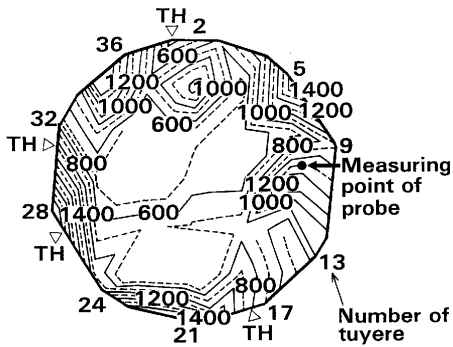


Fig. 13. Temperature distribution on tuyere level at Nagoya No. 1 BF (unit: °C).

### 5.3 適用範囲と測定精度

大型高炉における実炉測定の例として、Fig.13に名古屋1高炉の休風中の測定結果を示す。この高炉の羽口断面の炉内径は13.8m、羽口数は38本である。

休風に入ってから20時間後に測定を開始し、音波を10ヶ所から入射して、それぞれ6ヶ所で同時に受信した。これらの音速データからCT法による再構成計算を行った。Fig.11(a)に示した北海製鉄2高炉の測定結果と同様に、炉壁近傍から炉中心部にかけて、温度が低くなる傾向を示した。このように、音速データ数が北海製鉄での測定時よりも少なく、炉内径が拡大し音波の伝搬距離が大きくなっている条件でも、2次元温度分布を得ることができた。

名古屋1高炉においては、熱電対を断熱材で保護した非水冷プローブ<sup>4)</sup>を、高炉の休風中に炉内へ挿入し、炉内温度を直接測定している。この測定を行った直後に本法にて炉内温度を測定した結果、#10羽口先端から2mの位置でCT法では1100°C、プローブでは1211°Cとなり、CT法ではプローブに比べて、約100°C低い値を示した。この差異は、(1)音速データの数を減らしたことによって再構成計算時のデータ数が減少したこと、(2)伝搬距離が長くなったために受信波がより減衰し、音波の到達時間の測定誤差が増大したことなどに起因すると考えられる。

## 6. 結言

音波CT法を活用した高炉の炉芯内温度分布の測定を試みて、以下の結論を得た。

(1) 高温充填層内の同一平面上において、音波を入射して得られる音速データをCT処理して2次元温度分布を得る測定装置を開発した。

(2) 高温充填層内において、音速の温度依存性に関する実験式を求めた。

(3) 上記測定装置により、高炉の休風中に炉芯部の2次元温度分布の測定を行った。測定精度には多くの課題を残しているが、本法により相対的な2次元温度分布を測定できることが判明した。

## 文 献

- 1) 稲葉晋一, 八木順一郎: 鉄と鋼, **78** (1992), 1187.
- 2) 熊岡 尚, 織田博史, 一田守政, 国友和也, 財部 毅: 材料とプロセス, **10** (1997), 231.
- 3) 上條綱雄, 高橋 昇, 星野剛一, 吉田康夫, 伊藤良二, 柴田耕一郎, 宮川 裕: 材料とプロセス, **6** (1993), 848.
- 4) 岡田 務, 神山久朗, 井上 衛, 山根健司, 藤原保彦: 材料とプロセス, **6** (1993), 116.
- 5) 原口 博, 西 徹: 製鉄研究, **315** (1984), 65.
- 6) S.P.Nuspl, E.P.Szmania, J.A.Kleppe and P.R.Norton: ASME Paper (No. 86-JPGC-PTC-2), (1986).
- 7) 中居裕貴, 神山久朗, 井上 衛, 岡田 務, 山地宏尚: 材料とプロセス, **9** (1996), 912.
- 8) 伊藤文夫, 坂井正康: 日本機械学会論文集B, **53** (1987), 1610.
- 9) 超音波技術便覧, 実吉純一編, 日刊工業新聞社, 東京, (1966), 1165.
- 10) F.D.Shields: J.Acoust. Soc. Amer, **31** (1959), 248.
- 11) 岡田 務, 神山久朗, 井上 衛, 山地宏尚, 林 一雄, 一田守政: 材料とプロセス, **8** (1995), 377.
- 12) ガス爆発予防技術, 平野敏右編, 海文堂, 東京, (1983), 50.
- 13) 音と音波, 小橋 豊編, 裳華房, 東京, (1969), 133.
- 14) 波動信号処理, 青木由直編, 森北出版, 東京, (1986), 108.
- 15) 科学計測のための画像データ処理, 河田聡編, CQ出版, 東京, (1994), 221.
- 16) 岡田 務, 神山久朗, 藤原保彦, 井上 衛, 山地宏尚, 一田守政: 材料とプロセス, **8** (1995), 1152.
- 17) 馬場昌喜, 和栗真次郎, 井上義弘, 芦村敏克, 内藤誠章: 鉄と鋼, **80** (1994), 1.