

宙線ミュオンを利用した高炉内部観察

Observation for the Inner Structure of Blast Furnace by Cosmic-Ray Muon Radiography

> 篠竹昭彦 新日本製鐵(株) Akihiko Shinotake

## 環境・プロセス研究開発センター 製銑研究開発部 主任研究員

### **~1)** はじめに

宇宙線ミュオンは、陽子や高エネルギー原子核などの1次 宇宙線が大気圏に到達する際に大気原子核と反応して生成し たπ中間子やk中間子が崩壊して生成する2次宇宙線である 素粒子の1つで、電荷を持つため、電気的に中性である ニュートリノに比べて検出がしやすい。宇宙線ミュオンは、 天頂角を決めると時間と場所によらずほぼ一定のエネルギー スペクトルを持つ特性があるため、未知の"密度長"(密度× 長さ)を持つ物体を透過する際の強度減衰を測ることで、"密 度長"を知ることができる。この際、ミュオンの質量が電子よ り約200倍重く強い相互作用を行わない粒子であるという特 徴の効果によって、高いエネルギーのミュオンは、鉄で数10 ~100mの厚みを通過することができ、ラジオグラフィーの対 象とすることができる (Fig.1)<sup>1)</sup>。その高エネルギーのミュオ ンは環境放射線である宇宙線として存在しているため発生器 を必要としない。一方で、高エネルギーの宇宙線ミュオンは 強度(飛来頻度)が小さく、測定精度を上げるためには、一

定の測定面積×測定期間をとる必要がある。

ミュオンは宇宙線として飛来するもののほか、加速器を用 いて生成させることができ、加速器ミュオンが化学反応のト レーサーとして用いられた研究例もある<sup>2)</sup>。宇宙線ミュオン と加速器ミュオンの強度とエネルギーのレベルをFig.2に模 式図として示す。Fig.2の縦軸・横軸は対数で示した。加速 器ミュオンは宇宙線ミュオンに比べて強度が大きい、すなわ ち単位時間あたり多量に生成させることができるが、エネル ギーレベルが小さく、高炉規模の巨大構造物を透過すること ができない。宇宙線ミュオンは高炉を透過できる GeV~TeV レベルのエネルギーを持つ。

宇宙線ミュオンを巨大構造物の内部探索に用いた例として は、Alvarezら<sup>3)</sup>が天頂方向から飛来する宇宙線ミュオンを 利用してピラミッド内部の空間を探索した例が挙げられる。 また、永嶺ら4)は、水平に近い方向から飛来する宇宙線ミュ オンを利用して火山の噴火活動の解明と噴火予知を目的とし て火山体の内部探索を行っている。本稿では、大型構造物と して高炉を対象とし、内部状態の探索を行った事例5)を紹介



Relationship between incident energy and the mean Fig.1 range of material penetration for iron



Fig.2 Relationship between Muon intensity and energy (log scale)

する。

高炉の炉下部は1500℃以上の高温であり、直接内部の状態を計測することが困難である。例えば高炉の寿命を支配する要因である炉床レンガの損耗量もしくは残存厚みは直接計測できる手段がなく、レンガ背面に埋設した熱電対の温度から伝熱計算を用いて推定しているのが現実である。紹介する研究事例は、宇宙線ミュオンを用いて炉床部の密度およびレンガの残厚を非接触で計測できる可能性を確認することを目的としたものである。

## (2) 測定原理および計測装置

宇宙線ミュオンによるラジオグラフィー (レントゲン写真撮 影)の測定原理を簡単にまとめると次の通りである。

宇宙線ミュオンには強度およびエネルギー分布に天頂角依 存性があり、天頂角が小さい(仰角が大きい)ほど平均的な 強度は大きいが、天頂角が大きい(仰角が小さく水平に近 い)宇宙線ミュオンは高エネルギー成分の相対比が多い。し たがって水平に近い方向から飛来するミュオンは火山体や高 炉など大型対象物に対する透過性がよく、観測装置の配置が 容易で対象物をそのままの状態にして測定することができ る。対象とする観測物の下にトンネルを掘る必要もない。構 造物を透過したミュオンの強度減衰測定を、2基以上の位置 敏感型検出器を用いて、物体を通るミュオンの経路を特定 し、物体内部の"厚さ"の空間分布のマッピングを得ることが できる。

永嶺らは、このような水平方向に近く(天頂角 60°~85°) 強度が弱い宇宙線ミュオンを用いたラジオグラフィーを実現 するために、上下左右に細分割されたプラスチックシンチ レーターを検出器として用いるとともに、次のような技術開 発を行った<sup>6,7)</sup>。

- 宇宙線ミュオンに対する有感面積が1m平方で空間分解 能が10cm平方の、上下左右に10本ずつに分割された プラスチックカウンター集合体を、1.5m離して設置す ることにより、宇宙線ミュオンの経路ごとの強度をとら えた。そのような測定系が2基用意された。
- 2) 測定物を透過した方向と、反対方向からの宇宙線ミュオンを同時にとらえ、規格化し、F/B比を求める方式を考案した。ここでF/B比とは、測定物側(F)と比較空間側(B)から一定期間に到達したミュオン強度(飛来カウント数)の比である。
- 3) ミュオンに比べ数10倍近い多量の軟成分(電子、ガン マ線など)バックグラウンドを除去するために、中間に 置いた鉄による軟成分がつくる多重発生信号を用いた。

高炉の測定は永嶺らが火山体観測に用いた測定系<sup>4)</sup>をその まま用いて行った。観測装置をFig.3に示す。対象とした高 炉は2004年に改修した新日本製鐵(株)大分第2高炉で、ま ず旧高炉吹止め後に取り出した外形形状が測定可能な炉底マ ンテル部を使って測定を行った。さらに、改修後稼働した新 高炉について炉底部の測定を行った。

## (3) 旧高炉の測定結果

高炉吹止め後に取り出された炉底マンテルの測定は、 Fig.4に示す配置で行った。炉底マンテルは、鋼材で組まれ た台上に乗っている。マンテルの底部には炉底カーボンレン ガが残っており、その上に凝固した銑鉄にスラグ、コークス が混在して固まった状態の残銑部が厚さ0.9m 程度残った状 態で乗っている。残銑層の一部が約30°ケーキ状にカットさ れ、その部分が残銑層の上におかれた構造になっている。

測定は、測定器系の中心が、平面位置でマンテルの中心か らマンテルの直径 17.6mの位置に、鉛直位置でマンテルの底 から 2.9mの位置に、Fig.4に示すように設置した。

仰角が小さいミュオンは前述の通り強度が弱いので、0.1m オーダーの測定精度を得るには1ヶ月程度の観測が必要であ ると推定され、30.5日間の測定を行った。永嶺らが火山の観 測で実施したのと同様の手法<sup>4)</sup>を用いて、得られたF/B比 から密度長(密度×物質通過距離)を求め、物質通過距離が 既知であることを利用して物質密度を求めた。観測値より計 算された密度をFig.5に示す。また、残銑部(密度 5.9g/cm<sup>3</sup> と仮定)とレンガ部(密度 2.2g/cm<sup>3</sup>と仮定)がきれいに分か れて存在していると仮定して計算した通過物質平均密度を Fig.5中に破線で示した。



Fig.3 Probing system used for Muon observation

残銑部は銑鉄、コークス、スラグが混在しているため正確 な密度は不明で、観測値をよく説明できる値を仮定した。マ ンテル周囲の鉄皮 (密度 7.85g/cm<sup>3</sup>)も考慮した。Fig.5 は仰 角 132mrad、198mrad、264mradの3方向について水平角 方向の密度分布を示している。この測定、解析から以下のこ とがわかった。

- (仰角が 132mrad → 198mrad → 264mrad と高くなるに つれて、平均密度は高くなる。相対的に残銑を通過する 距離が増え、レンガ部を通過する距離が減っていること に対応している。
- 2) 仰角 132mrad、水平角 100~400mrad の領域では、レンガのみを通過する部分と、残銑+レンガを通過する部



Fig.4 Location of furnace bottom remains of old Oita No.2 Blast Furnace before repair, and of its measurement



(solid line - observation, dotted line · · · calculation)

Fig.5 Mean density in every direction of the furnace bottom remains calculated from measurement values

分で明確に密度の差が検出されている。

- 3) 仰角264mradでは、水平角が一方向で密度が若干高く、十方向で密度が若干低くなっている。残銑層の内部で銑鉄/コークスの比率が均一でなく、領域により密度に差があったことが考えられる。
- 4) 仰角 132mrad、および仰角 198mradの領域では、水平 角-100mrad~-300mrad付近の密度が高くなってい る。炉底レンガの一部が損耗し銑鉄に置き換わってい て、破線の計算前提より残銑を通過する距離が長く、レ ンガ部を通過する距離が短かったことが推定される。

# 4 新高炉の測定結果

改修後稼働した高炉の測定は、Fig.6に示す配置で行っ た。測定器系の中心が、平面位置でマンテルの中心からマン テルの直径 17.9mの位置に、鉛直位置で測定装置下端が地 上から 2.66mの位置に設置した。まずこの位置で 24 日間測 定を行った。次に、炉底レンガの損耗量の推定精度を上げる ために、測定器を鉛直上方に 2m 上げて、その位置で 21 日間 測定を行った。

最初の測定位置で測定されたF(高炉側)/B(空側)比の 空間分布をFig.7に示す。横軸が水平角、縦軸が垂直角を表 す。図の中心部を縦に通る直線が炉の中心軸を通る位置を示 す。水平角方向で見ると、炉内の通過距離が長い炉の中心部 ほどF/B比が小さい。また、垂直角方向で見ると、レンガ部 を通過する仰角の小さい部分よりも、炉内鉄部を通過する仰 角の大きい部分の方がF/B比が小さい。

次いで、測定結果を定量的に評価するため、シミュレー ション計算を行った。高炉の炉床部分を円筒形に近似して、 炉内鉄部の密度、炉底部のレンガの厚さをパラメーターと し、高炉を透過してくるミュオンの飛来について火山体観測 に用いたのと同様の手法でモンテカルロシミュレーションを 行い<sup>4</sup>、宇宙線ミュオンの透過像のF/B比分布を算出した。

Fig.8に炉内鉄部の密度を変化させた場合のF/B比の分布



Fig.6 Relation between the furnace bottom portion and the measurement position in Oita No.2 Blast Furnace

図の例と、密度と炉床湯溜まり部分を横断する経路のF/B 比との関係を示す。このF/B比を実測値と比較した結果、 炉床湯溜まり部分の平均密度は6.347g/cm<sup>3</sup>と推定された。 この値は銑鉄の密度よりやや小さいが、湯溜まり部には密度 がより小さいコークスが混在しているため、平均密度は銑鉄 のみの場合より小さい。次いで、炉床湯溜まり部には推定さ れた上記の密度を用いて、炉底レンガの上面位置を変化させ た計算結果をFig.9に示す。今度は炉底レンガ上面を横切る ミュオン透過経路を選択し、実測値とF/B比を比較した。 炉底レンガが損耗してレンガ上面位置が低下すると、レンガ 部が鉄部に置き換わるため、レンガ部の通過長さが減少して 鉄部の通過長さが増加し、F/B比は小さくなる。比較の結 果、レンガの損耗量は20.7cm±10.8cmと推定された。

Fig.7に示された水平角、垂直角各方向について、F/B比の実測値とモンテカルロシミュレーションとの比較により推定した炉内の平均密度の分布をFig.10に示す。湯溜まり部の通過長さが大きい部位の密度が大きいのは共通であるが、

2m上方で測定した場合の方が、高密度部分がより低仰角側 に広がっている。また、両方の位置の測定結果を合成してレ ンガ損耗量を推定した図をFig.11に示す。左の図は初期の 測定位置 (0m) および測定器上昇後の測定位置 (+2m) にお いて観測されたF/B比と、レンガ損耗厚みを0cm、50cm、 100cmの3水準仮定してモンテカルロシミュレーションによっ て計算されたF/B比を仰角に対して示す。右の図は、左の 図の結果から、炉底レンガ上面を横切るミュオン透過経路に 対応する仰角 (0m に対し180mrad、+2m に対し150mrad) を選択し、シミュレーション結果をつないだ線上に測定値を プロットしたものである。両測定位置での結果を平均して、 損耗量は14.5cm ± 4.9cm と推定された。この誤差項はミュ オン飛来頻度のランダム性に起因する誤差で、観測期間が大 きくなれば縮小する。他方、推定において炉床湯溜まり部の 密度は湯溜まり部分を横断するミュオン透過経路上のF/B 比の測定値をシミュレーションと比較して求めた値を用いて いるが、実際は湯溜まり部の密度は均一ではなく、溶銑・



Fig.7 Muon penetrating intensity ratio measured in the blast furnace side and the opposite/skyward side



Fig.8 Estimation of the density in the hearth iron-rich portion



Fig.9 Comparison between measured data and Monte-Carlo simulation



Fig.10 Average density on the penetrating channel in each direction



Average subsidence level =  $14.5 \pm 4.9$  cm

Fig.11 The erosion loss thickness of the furnace bottom (subsidence) induced from the measurement results in the two arrangements of the different heights

コークス・スラグの存在割合によって局所分布があり、異な るミュオン透過経路上では平均密度は同じとはいえず、上記 レンガ損耗量推定値には別の誤差があると考えられる。さら に、測定器系の空間分解能による誤差および、高炉側および 比較空間側の測定空間における物質量を持つ障害物に起因す る誤差もある。これらの誤差を縮小してレンガ損耗量の推定 精度を向上することは今後の課題である。密度の局所分布を 推定するには、異なる方向からの測定を用いたトモグラ フィーが考えられ、これも今後の開発課題の1つである。

# **5** おわりに

宇宙線ミュオンが構造物を透過する際に、密度と厚みに対応して減衰する性質を利用して高炉内部の状態の可視化を探索した。新日本製鐵(株)大分第2高炉で、旧高炉を吹止めた後に取り出した炉底マンテルおよび、改修後に稼働を開始した新高炉の炉床部の測定を行い、(1)吹止め高炉の炉底マンテル部分の測定から、レンガと残銑部の形状および密度差に対応したミュオン強度分布が得られることを検証し、(2)新高炉の炉床湯溜まり部分を横断する経路を透過したミュオン強度から、選択した経路上の平均密度を推定し、(3)新高炉の炉底レンガと炉内を横切る経路のミュオン強度から、炉底レンガの損耗レベルを推定した。本測定方法により、高炉内の物質密度分布およびレンガの損耗量を推定できる可能性を初めて見出した。

一方、今後の課題としては、測定精度の向上と観測装置の ダウンサイジングが挙げられる。火山活動の解明や噴火予知 を目的として宇宙線ミュオンを用いた火山体観測を行う場合 は、噴火口内部が空洞であるかマグマが上昇してきているか を識別することが重要であり、位置特定精度はさほど要求さ れないため、遠方からの観測も可能であり、今回使用したよ うな大型の観測装置であっても、比較的設置場所の制約が少 ない。一方、高炉の内部の密度分布やレンガの残存量を観測 しようとする場合、高い位置特定精度が要求される。一定の 立体角に対する位置特定精度は観測対象から測定器までの距 離に比例するため、高炉観測の場合測定器をできるだけ高炉 の近くに置くことが望ましいが、大型の測定器は、高炉の近 傍では設置場所の制約が大きく、観測したい場所を見るのが 困難なことも考えられる。測定器を小型化できれば設置場所 の自由度が増す。

また、高炉炉内のように時間的に変化する対象を観測する 場合はできるだけ測定期間を短くできることが望ましいが、 宇宙線ミュオンは飛来頻度が高くなく、空間分解能と時間分 解能がトレードオフの関係にあり、高い空間精度を得るには 一定の観測期間を必要とする。測定面積を大きくすることで 時間あたりのミュオン蓄積量を増やし、観測期間を短縮する ことが可能であるが、装置はより高価となり、設置場所の制 約も大きくなる。今後宇宙線ミュオンを利用した高炉測定を 効果的に行うには、例えば時間変化が小さいレンガ損耗量に ついては観測期間を十分とって位置特定精度を上げる、時間 変化がより大きい炉内の観測には位置特定精度をやや緩和し ても観測時間を短縮する、など、観測対象に合わせて測定器 系を最適化する設計が重要になってくる。今後の進展を図り たい。それとともに、高炉測定にとどまらず火山観測も含め て宇宙線ミュオン測定の多方面へ活用が展開され、測定技 術・解析技術が進化することが期待される。

#### 参考文献

- K. Nagamine : Introductory Muon Science, Cambridge University Press (2003)
- 2) R. West: 化学と工業, 61 (2008), 1059.
- L. W. Alvarez, J. A. Anderson, F. E. Bedwei, J. Burkhard, A. Fakhry, A. Girgis, A. Goneid, F. Hassan, D. Iverson, G. Lynch, Z. Miligy, A. H. Moussa, M. Sharkawi and L. Yazolino : Science, 167 (1970), 832.
- 4) 田中宏幸, 永嶺謙忠: 火山, 48 (2003), 345.
- 5) 篠竹昭彦, 松崎眞六, 国友和也, 内藤誠章, 橋本操, 圃 中朝夫, 長根利弘, 永嶺謙忠, 田中宏幸: 鉄と鋼, 95 (2009), 665.
- 6) K. Nagamine, M. Iwasaki, K. Shimomura, and K. Ishida : Nucl. Instr. Methods Phys. Res., A356 (1995), 585.
- 7) H. Tanaka, K. Nagamine, N. Kawamura, S. Nakamura, K. Ishida, and K. Shimomura : Nuclear Instruments, A507 (2003) , 657.

(2009年8月10日受付)