

鉄ブロックを用いたオフライン測定によるミュオンラジオグラフィーの密度 決定精度と位置決定精度の測定

Measurement of the accuracy of muon radiography in positioning and determining density by
utilizing steel blocks

田 中 宏 幸**
TANAKA Hiroyuki

新日本製鐵株式会社**
NIPPON STEEL CORPORATION.

Abstract A model experiment was performed in order to evaluate the spatial resolution and accuracy of determining density in a blast furnace by utilizing steel blocks whose density and geometrical structure were both well known. By comparing the experimental result with simulations, a density and a width of the steel block were measured as $7.3 \pm 1.0 \text{ g/cm}^3$ and $37 \pm 15 \text{ cm}$, respectively.

Keywords: muon, radiography, blast furnace, calibration, resolution

1. 緒 言

溶鉱炉炉壁の損耗状態を知るためには密度の異なる物体が接している、いわゆるインターフェース部分の形状を知ることが重要である。そのため、本研究では密度と形状の良く分かっている鉄ブロックを用いてモデル実験を行うことで、ミュオンラジオグラフィー測定装置の密度決定精度と位置決定精度を見積もることを目的とした。具体的には、以下の手順で進めることとした。(1) 鉄ブロックの形状を既知として密度のみを未知量として解析することにより密度決定精度を見積もる。(2) 鉄ブロックの密度を既知としてブロックの端の位置のみを未知量として解析することで位置決定精度を見積もる。以下、実験装置、解析手順、解析結果について順に述べていくこととする。

2. 実験装置

本実験のセットアップは図 1 に示されている。用いた鉄ブロック (図 1b) は長さ 5 m、幅 40 cm であり、鉄ブロックの中心から検出器の中心までの距離は約 5 m となっている。用いた検出器は 30 cm(L) × 2.5 cm(W) × 1.5 cm(H) のプラスチックシンチレータを縦と横に 48 本組み合わせたもので、総面積は 0.09 m² である。また、検出器の 2 枚の面を 75 cm 離して設置することで、33 mrad の角度分解能を達成している。この実験セットアップで約 1 カ月間ミュオンラジオグラフィー観測を行った。

*東京大学地震研究所 〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1

TEL: (03)5841-5789 E-mail: ht@eri.u-tokyo.ac.jp

** 新日本製鐵株式会社

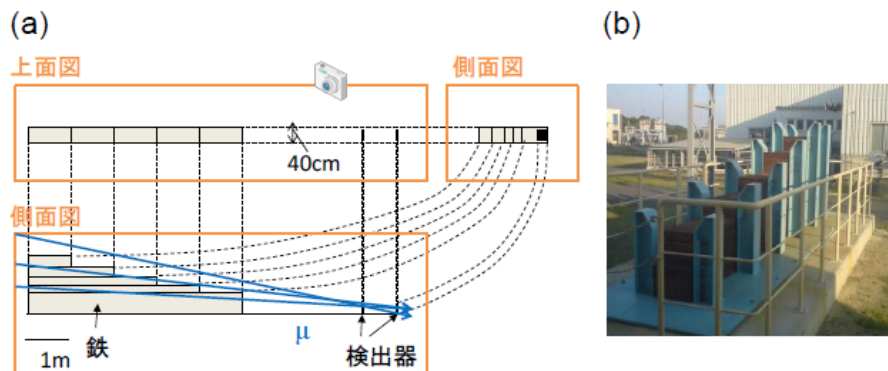


図 1 (a)鉄ブロックを用いたテスト実験のジオメトリー (b)実験に用いた鉄ブロックの写真

3. 結果

約 1 カ月間のミュオン観測結果が図 2 に表されている。仰角 95 mrad～158 mrad から到来したミュオン数（鉄を通過してきたもの）が青四角で、仰角 190 mrad～285 mrad から到来したミュオン数（鉄を通過していないもの）が赤丸でプロットされている。仰角が異なると検出器の有効面積やミュオン強度が異なるため、両者はグラフが重なるように規格化されている。この図では、点線で囲まれた部分に鉄によるミュオンの吸収が見えている。

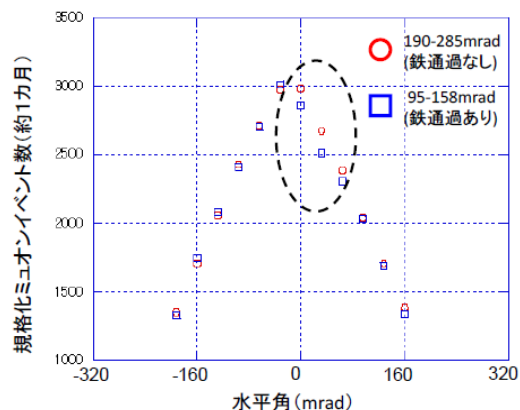


図 2 約 1 カ月間で測定されたミュオンイベント数。赤丸は仰角 190 mrad～285 mrad から到来したミュオンイベント数（鉄を通過していない）、青四角は仰角 95 mrad～158 mrad から到来したミュオンイベント数（鉄を通過している）。仰角が異なると検出器の有効面積やミュオン強度が異なるため、赤丸と青四角が重なるように規格化されている。

3. 考察

この実験結果を解析するためにシミュレーションとの比較を行った。後方から物質を通らずに飛来するミュオンの天頂角分布と、上式を積分するエネルギーの下限値を 1 GeV～7 GeV と変えて計算した結果の比較から、シミュレーションで発生させるミュオンのエネルギー下限値（カットオフエネルギー）は 4 GeV とした。また、図 2 の結果から検出器は鉄ブロックの中心から約 2 度ずれていることが分かったので、シミュレーションも同様にして行った。鉄ブロックの形状を正しく与えて、鉄の密度を 0

g/cm³ から 13 g/cm³ 変えて行ったシミュレーション結果と、観測データを比較したものが図 4 に示されている。この結果から、ミュオンが鉄を最も厚く通る最も精度の良いところで、 1σ の精度で鉄の密度を 7.3 ± 1.0 g/cm³ と決定できた。

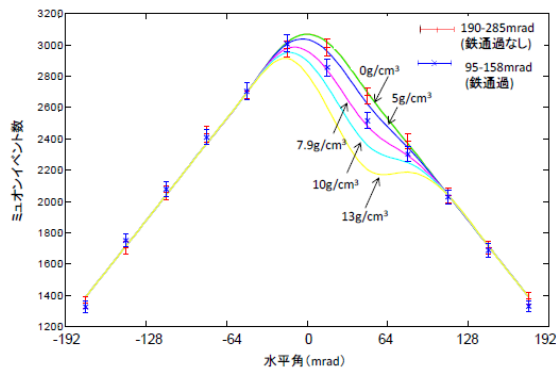


図 4 鉄ブロックの密度を 0 g/cm³, 5 g/cm³, 7.9 g/cm³, 10 g/cm³, 13 g/cm³ と変えてシミュレーションと実験結果との比較

次に、鉄ブロックの密度を正しく与えて、鉄ブロックの幅 d のみを未知量とすることで鉄ブロックの幅の決定精度を求めた。図 5 に実験結果と鉄ブロックの幅 d を 10cm から 60cm に変えてシミュレーションを行った結果との比較が示されている。この解析結果から、 1σ の精度で鉄ブロックの幅を約 37 ± 15 cm と決定できた。

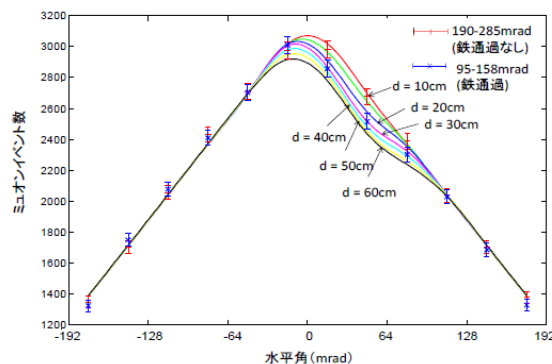


図 5 鉄ブロックの幅 d を 10cm, 20cm, 30cm, 40cm, 50cm, 60cm と変えて行ったシミュレーション結果と実験結果との比較

4. 結論

本実験では鉄の密度を 7.3 ± 1.0 g/cm³ と決定できたので、密度決定精度は $\pm 13\%$ であった。実際の溶鉱炉の場合、いわゆる鉄の厚みが 3 倍以上になるため、溶鉱炉に対して同様の実験を行えば、ミュオンが良く吸収され、観測されるミュオンイベント数が溶鉱炉の密度に敏感になる。また、本実験で用いた検出器の角度分解能は ± 33 mrad であるから、5 m 離れた位置での鉄ブロックの位置決定精度の計算値は ± 16.5 cm となるが、この値は本実験で求めた鉄の端の位置決定精度 ± 15 cm と近い。このことから、角度分解能 $\pm \Delta \theta$ の検出器を用いて L m 離れた溶鉱炉を観測したとき、溶鉱炉の中心での位置決定精度 ΔX は $\Delta X = \pm \Delta \theta \times L$ になるという結論が得られた。