

# 中性子の後方散乱を利用した非破壊計測 (第3報, 計測診断プログラムの開発)

田中 秀樹

## Non-Destructive Measurement Using Back Scatter of Neutron (3rd report, Development of the Application of Measuring Diagnosis)

Hideki TANAKA

We present the method for non-destructive measuring the inside scale of sealed container. We have constructed the devices by the use of proposed method, and we have inspected the most suitable location with object of measurement, when scale is measured. And we showed that this devices was capable of measuring water level. The result of the evaluation experiment, devices was capable of measuring thickness of clay, and difference of measuring location had a significant effect on measuring result. We developed the application of analysis and diagnosis, and water level was measured by using devices, the fine data within 88.9% correct answer rate was obtained.

Keywords: Non-Destructive Measurement, Radioisotope, Neutron, Sealed Container, Scale

本研究では、密封容器内のスケール量を非破壊で計測する手法として、軽元素に対する中性子の減速効果を利用する方法を提案する。これまで提案手法を用いた機器を構築し、スケール計測における計測対象との最適な位置関係について検証した。また、水位に対する計測が可能であることを示した。本報では粘土の厚み変化ならびに計測位置のずれが後方散乱におよぼす影響について評価した。その結果、本システムが粘土の厚み計測に適用可能であること、ならびに計測位置ずれが計測結果に大きく影響を与えることを示した。また、人の客観的評価機能を有し、スケール量のオンライン計測を可能とする解析診断プログラムを開発した。このプログラムを用いた水位解析診断実験で、正解率が88.9%という良好な結果を得た。

キーワード: 非破壊計測、放射性同位元素、中性子、密封容器、スケール

### 1 まえがき

タンクや配管などに代表される密封容器においてスケールが発生することがある。スケールは容器の内容物が内部に付着したものである。スケールの発生した状態において、タンクの場合は許容量が減り、配管の場合は流量が少なくなるなど、設備能力を発揮できないことがある。そのため、容器内部のスケール量を定期的に検査し、その量が既定値を越える場合にはそれを取り除く必要がある。

この定期検査では、スケール量を把握するために破壊、非破壊それぞれの手法で検査を行っている。破壊検査では容器の一部を破壊し目視にて検査を行っ

ているが、破壊箇所が複数に渡る、検査後に修繕が必要であるという課題がある。一方、非破壊検査では計測対象物の大きさをカバーできる計測装置が必要である、計測装置を扱うためには特殊な資格が必要であるという課題がある。

非破壊検査手法として、 $\gamma$ 線を用いた透過法によるスケール量の計測法が提案されている<sup>(1),(2)</sup>。この手法は、大型の計測対象物に対しては強力な線源を必要とするため、特殊な資格が必要となる、放射線管理区域をもうけなければならないなどの課題がある。資格を必要としない微量な線源を用いた手法として、中性子を利用した計測法も提案されている<sup>(3)</sup>

が、この計測法はシリカのみを計測対象物としており、内容物の硬化したスケールに対する計測手法は未解決である。

これまで挙げた課題を解決する手法として、中性子の後方散乱を利用した容器内部のスケール計測法を提案する。提案する手法は後方散乱に特徴があり、大型の計測対象物に対しても強力な線源や大型の治具を必要としないため簡便な計測が可能である。

データ解析、診断に目を向けると、計測後のデータにはばらつきがある。このような計測結果をもとに、容器の修繕を決定するには判定作業者の主観が含まれることが考えられる。よって、作業者の主観を排除する判断機能が必要となる。

前報<sup>(4),(5)</sup>では、提案手法を実現したシステムを構築し、その特性を明らかにした。また、計測における線源・検出器および計測対象物との最適計測位置を設定した。

本報では、水以外の計測対象物に対するシステムの適用性を検討するため、計測対象物を粘土としてこの計測実験を行った。実験では、粘土の厚み、および線源・検出器に面する粘土面の面積変化と後方散乱との関係を調べることで、測定可能なスケールの大きさを明らかにした。また、スケール量のインプロセス計測を目的としたデータ解析システム、ならびに人の客観的評価機能を有する診断プログラムを開発し、水位計測実験によって評価した。

## 2 システムの概要

### 2.1 原理

本システムでは、放射線源（以下、線源）と放射線検出器（以下、検出器）とを密封容器の外側に配置する。線源から放出される中性子とスケールとの間に生じる相互作用により減速した中性子を検出器で計数する。計数した中性子数とスケール量との間には相関関係があり、これを明らかにすることでスケール量の計測が可能となる。

本システムで用いる線源は微量であるため、誰でも使用することができる。また、線源側に戻ってくる中性子（以下、後方散乱）を利用するため、計測対象物が大型であってもスケール量を計測できる。

前述したように、本手法では中性子の減速効果を

利用するが、中性子は衝突する相手が軽元素ほど減速されやすい。中性子の散乱現象は弾性散乱と非弾性散乱とに分類できるが、弾性散乱では、実験室座標系において衝突前の中性子の速度、入射角をそれぞれ  $v_1$ 、 $\theta$ 、また衝突後についてそれぞれ  $v_2$ 、 $\psi$  とすると、速度は次式で与えられる。

$$\frac{v_2^2}{v_1^2} = \frac{A^2 + 2A \cos \theta + 1}{A + 1} \quad (1)$$

衝突前と衝突後のエネルギーをそれぞれ  $E_1$ 、 $E_2$  とし、 $E = (1/2)mv^2$  より式 (1) は次式に変形できる。

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{A^2 + 2A \cos \theta + 1}{(A + 1)^2} \quad (2)$$

ここで  $\cos \theta$  は

$$\cos \theta = \frac{1 + A \cos \psi}{(A^2 + 2A \cos \psi + 1)^{1/2}}$$

であり、 $A$  は原子の質量数を示す。

式 (2) で中性子が軽元素により減速されやすいことが示せる。

### 2.2 システム構成

本システムは図 1 に示すとおり、放射線を発生する線源、放射線を検出する比例計数管、シンチレーション検出器、検出器の出力を分析するマルチ・チャンネル・アナライザ（以下、MCA）<sup>(6)</sup> で構成した。

線源には、主に中性子を放出する放射能 3.7MBq の放射性同位元素  $^{252}\text{Cf}$  を利用した。この線源は外形寸法  $\phi 26 \times 28\text{mm}$  のコリメータで覆い、放射線の放出方向を制限した。検出器は放射線の入射のたび、そのエネルギーに比例した電圧パルス信号を発生する。本研究で用いる検出器には、中性子の後方散乱が計測でき、取扱いが容易で、機械的強度が大きいなどの理由から、比例計数管およびシンチレーション検出器<sup>(7)-(9)</sup> を用いた。各検出器とも高圧電圧の印加

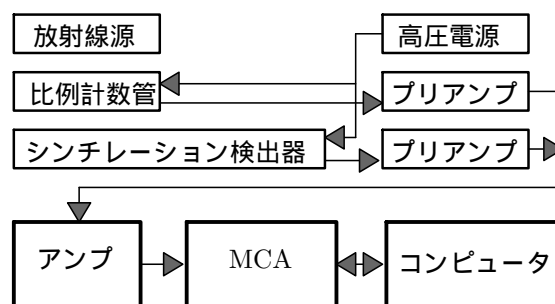


図 1 システムブロック図

を必要とするため、高圧電源ユニットから電力を供給した。検出器からの出力はミリボルト程度の電圧値であり、プリアンプで計数可能な大きさ ( $10^3$  倍) まで増幅させた。プリアンプは、ケーブルによる信号の減衰やアンプとのマッチングも行う。次段のアンプは、プリアンプで増幅した信号をさらに十数ボルトまで増幅する。

検出器の出力は電圧パルス波形であり、このままではコンピュータ解析は難しいため、アンプの後段に MCA を置いた。MCA では、入力した電圧パルス波高値に対応したチャンネルと呼ばれる記憶ユニットに電圧パルスの出現回数を蓄積する。コンピュータでは MCA と RS-232C を介して通信し、データ送受信ならびに MCA の制御を行った。また、コンピュータではチャンネルデータから導出した特徴量よりスケール量を推定させた。

ここで、本研究において線源と検出器のセットを計測ヘッドと呼ぶことにする。

### 3 粘土計測実験

#### 3.1 粘土の厚み計測

計測対象物を市販の油粘土とし、その形状は円柱と四角柱とする。本実験では、この厚さを 10mm から 70mm まで、10mm おきに变化させた。ここで、円柱の直径は 150mm、四角柱の底面は一辺を 100mm の正方形とし、それぞれの形状の粘土は、直径 360mm、深さ 360mm、厚さ 3mm のステンレスポット内に配置した。計測ヘッドとステンレスポットの間には、材質 SUS304、厚さ 3mm の遮蔽板を挿入した。また、計測ヘッドと遮蔽板との間隔は 10mm、線源と検出器との軸間隔は 35mm とし、検出器には比例計数管を用いた。この条件の下でステンレスポットの底面から計測を行い、粘土の厚みの変化が中性子の後方散乱に及ぼす影響を調べた。図 2 は四角柱の粘土をステンレスポットに入れた様子を示す。

円柱、四角柱の粘土の厚みを变化させ計測した結果は図 3 となった。結果から計測される中性子数と粘土厚みの比は、円柱で約 19.5 放射線数/mm、四角柱で 10.0 放射線数/mm であり、円柱は四角柱の 1.95 倍の变化量であることが分かる。それぞれの断面積を求めると円柱  $1.77 \times 10^4 \text{mm}^2$ 、四角柱  $1.0 \times 10^4 \text{mm}^2$



図 2 四角柱計測実験の様子

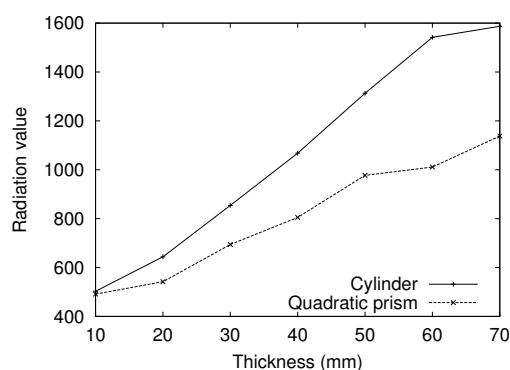


図 3 後方散乱におよぼす粘土厚みの影響

で、円柱の面積は四角柱の 1.77 倍である。これは、円柱と四角柱の变化量と断面積の比がほぼ等しいことを示しており、同じ厚さにおける後方散乱は計測対象物の断面積に等しいと考えられる。

#### 3.2 計測領域調査

本システムの計測領域の把握を目的に、形状を円柱とする粘土の直径を变化させ後方散乱の变化を調べた。円柱の直径は 0mm から 150mm まで 10mm おきに变化させた。このとき、円柱の厚さは 70mm で一定とした。容器、遮蔽板、計測ヘッドと遮蔽板の間隔、線源と検出器との間隔は前実験と同条件である。図 4 は円柱形状の粘土をステンレスポットに入れた様子を示す。

計測結果は図 5 であり、円柱直径が 30mm までは放射線数に変化はみられなかった。これは線源から放出される中性子数と粘土からの後方散乱数が一様でなく、ばらつきがあるためと考えられる。よって、直径が 30mm 未満の粘土は、計測不能であると言える。また、直径が 40mm 以上 130mm 未満までは、

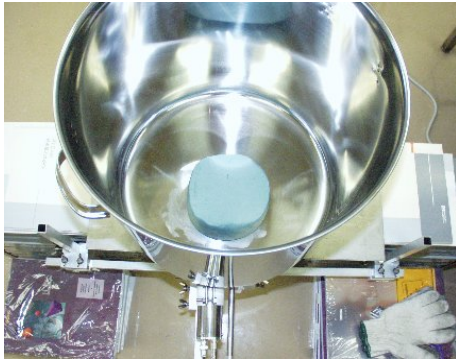


図 4 円柱直径変化計測実験の様子

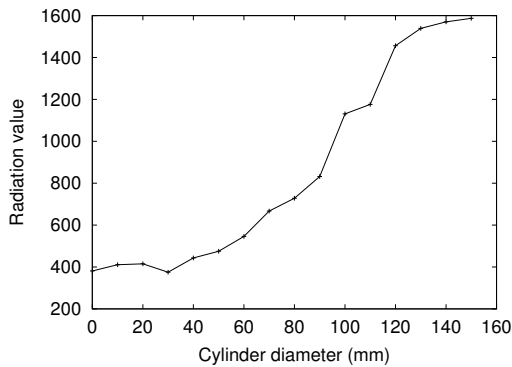


図 5 後方散乱におよぼす円柱直径の影響

直径の増加に伴いカウント数も増加するが、130mm を越えるとカウント数の増加量がゆるやかになっている。これは、150mm を越えるあたりに計測領域の限界があることを示している。

### 3.3 計測ヘッドの位置ずれの影響

前項までの実験で、計測ヘッドに面した計測対象物の表面積が後方散乱に大きく影響することが明らかとなった。しかし、これまでの実験では計測ヘッドの中心とこれに面する計測対象物面の中心がずれた場合について検討していない。そこで、計測ヘッドの中心が計測対象物の中心からずれた場合における後方散乱への影響を計測した。実験で使用する粘土の形状は円柱で、その直径 130mm、高さ 70mm とした。計測ヘッドの中心軸を円柱の軸上から外へ、10mm おきに 120mm まで移動させた。

図 6 は計測結果であり、中心からずれるほどカウント数も低くなるのが分かる。円柱の端に計測ヘッドが位置する地点が図の 75mm であり、この地点を境に後方散乱の変化量が減少している。この結果から、計測ヘッドは計測対象物面の中心に配する必要

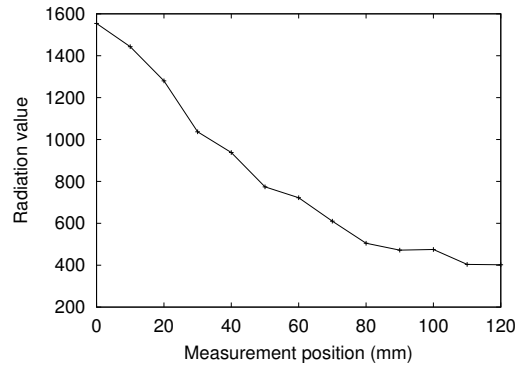


図 6 後方散乱におよぼす計測ヘッド位置ずれの影響

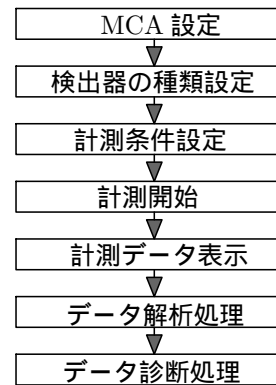


図 7 解析処理フロー

があることが分かった。

## 4 解析診断システムの開発

本研究では、このデータを処理し計測対象物の量を推定するシステム構築までを目的とする。前述までの研究で、複数の計測対象物に対する本システムの検出器出力とその特徴を調べた。ここでは、計測対象物の量を推定する解析診断システムを開発する。解析診断システムへの要求事項には、(1) 診断結果の正確性、(2) 処理の高速性、(3) インプロセス計測、(4) 高度なユーザインターフェース、(5) プログラム修正の容易さなどがある。これら 5 つの要求を満足するシステムの開発を目指す。具体的な内容は、平成 12 年度に開発した解析システム<sup>(5)</sup> にオンライン処理部分を追加し、さらに診断結果の正確性およびユーザインターフェースを向上させた。

図 7 は解析診断処理の流れを示したものである。MCA とコンピュータとの通信において、接続ポート番号、通信速度の設定が必要となる。本研究では 2 種類の放射線検出器を用いており、その計測結果

はそれぞれ異なり、データ解析処理を使用する検出器に合わせて変更しなければならない。設定が必要な計測条件は、可変できる放射線エネルギーに対する分解能と放射線とを計測する時間であるサンプリング長である。

一連の計測は、上記を設定した後に開始し、放射線の検出結果がリアルタイムで表示され、サンプリング終了後にデータ解析処理、データ診断処理が実行される。

本システムは LabVIEW で開発し、MCA との通信は Microsoft Visual C++ で作成した DLL を LabVIEW から呼び出すことで実現した。

#### 4.1 解析手法

検出器は、入射した放射線エネルギーに比例した電圧値を出力するというものである。MCA では、入力する電圧値に対応するチャンネルと呼ばれるメモリに、電圧値の出現回数を蓄積する。チャンネル数  $m$  の MCA に電圧  $E$  が入力されるとき、チャンネル  $C$  は次式で表わされる。

$$C_i = C_i + 1 \quad (3)$$

ここで、 $i = E/m$  である。

検出器で放射線を検出すると、全てのチャンネル ( $C_0$  から  $C_m$  まで) にデータが蓄積される。しかし、決まった計測対象物の計測においては、特定のチャンネルに計測特徴が現われる。そこでこの範囲内のチャンネルデータを加算し、それを基に認識を行う。この範囲を  $a, b$  としたとき、解析データ  $R$  は次式で表せる。

$$R = \sum_{i=a}^b C_i \quad (0 \leq a \leq m, 0 \leq b \leq m) \quad (4)$$

#### 4.2 診断手法

ファジー、遺伝的アルゴリズムなど様々な診断手法が存在するが、本研究ではニューラルネットワーク (以下、NN) を用いた。用いた NN 手法は、図 8 に示すような入力、中間、出力層の 3 層からなるパーセプトロンである。NN の学習にはバックプロパゲーション法を用いた。

図 8 中の丸はユニットと呼ばれ、図 9 に示すような、各入力  $x$  に対し重み  $w_i$  をかけた荷重和としきい値  $\theta$  との差をとり、その値を関数に代入した答え

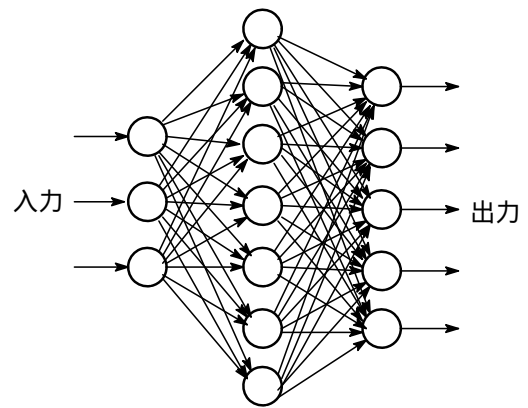


図 8 3層パーセプトロン

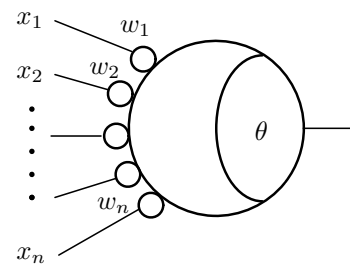


図 9 ニューロンモデル

が出力となる。これを式で表わすと、次式となる。

$$u = \sum_{i=1}^n w_i x_i - \theta \quad (5)$$

$$z = f(u) \quad (6)$$

ここで、本システムで用いる関数  $f(u)$  は、NN によく使われるシグモイド関数とする。シグモイド関数を次に示す。

$$f(u) = \frac{1}{1 + \exp(-u)} \quad (7)$$

#### 4.3 実験および結果

開発した解析診断システムを使い、水位計測を実施した。実験水位は 0mm から 40mm まで 5mm おきの 9 水位とし、1 つの水位に対し 5 回の計測を実施した。各水位に対し MCA のチャンネルに蓄積したデータを式 (4) で加算し、これをまとめた結果を図 10 に示す。

この加算したデータと水位との関係を学習させた NN で水位診断を行った。その結果を表 1 にまとめる。表 1 中の数値は NN 出力層ユニットの発火より求まる水位を示しており、水位 5mm の計測診断結果以外はどの水位も正しく計測診断できることが示された。一方、水位 5mm の結果については、どの

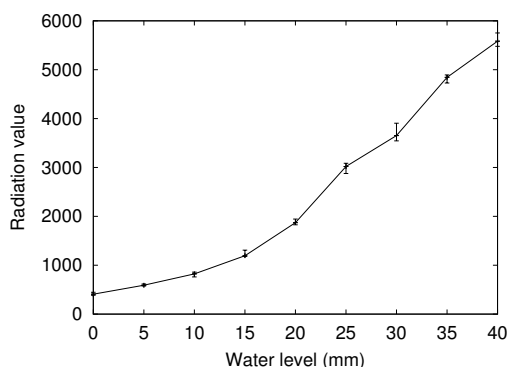


図 10 後方散乱におよぼす水位の影響

表 1 水位計測診断結果

水位 (mm)	サンプル				
	1	2	3	4	5
0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0
10	10	10	10	10	10
15	15	15	15	15	15
20	20	20	20	20	20
25	25	25	25	25	25
30	30	30	30	30	30
35	35	35	35	35	35
40	40	40	40	40	40

実験サンプルにおいても水位を 0mm と誤診断した。この理由は、水位 0mm と 5mm との入射放射線数には大きな変化がないこと、ならびに入射放射線数のばらつきが影響しているものと考えられる。

本実験における診断正解率は 88.9% と良好な結果を得た。

## 5 むすび

本報では水位以外の計測対象物に対するシステムの適用性を調べるため、粘土の厚さ、粘土の面積がおよぼす後方散乱の変化を調べた。その結果、計測ヘッドに面する計測対象物の面積が十分広い場合には本システムで粘土厚さの計測が可能となることが明らかとなった。しかし、面積の狭い場合には厚さの計測が難しいことも判明した。

さらに、スケール量のインプロセス計測を可能とし、人の客観的評価機能を有する解析診断プログラ

ムを開発した。本プログラムでは MCA と RS-232C を介してデータ通信を行うことで、リアルタイムで解析可能となった。診断処理手法には NN を使い、ばらつきのあるデータにおいても正しくスケール厚さを計測できることを確認した。

今後の課題としては、任意形状の計測対象物に対するシステムの適用性の調査、ならびに遮蔽物の厚さに対する補正係数の導出が必要と思われる。さらに、診断正解率の向上を目的とした、本システムに最適な特徴抽出法の検討が必要と思われる。

謝 辞 本研究は、中小企業技術開発産学官連携促進事業(中小企業庁補助金)の一環として実施した。記して関係各位に感謝の意を表す。

## 参考文献

- (1) 児玉潔, 小林修, 脇部康彦, 林憲秋, “ $\gamma$ 線透過法による地熱発電所熱水配管のシリカスケール測定,” 非破壊検査, vol.38, no.9A, pp.797-798, 1989.
- (2) 清水健一, 粟森義彦, “石油精製装置等の内部診断技術の開発,” 石油学会誌, vol.41, no.2, pp.138-144, 1998.
- (3) 諸富稔章, 犬山文孝, 安賀弘一, 久保勝彦, 内田和久, 米田幸憲, 林憲秋, “中性子を用いた熱水配管のスケール厚み計測,” 地熱, vol.23, no.3, pp.224-229, 1986.
- (4) 田中秀樹, “中性子の後方散乱を利用した非破壊計測(第1報),” 広島市工業技術センター年報, vol.13, pp.67-73, 1999.
- (5) 田中秀樹, “中性子の後方散乱を利用した非破壊計測(第2報),” 広島市工業技術センター年報, vol.14, pp.57-63, 2000.
- (6) ニコラスツルファニディス, 放射線計測の理論と演習 応用編, 現代工学社, 1986.
- (7) ニコラスツルファニディス, 放射線計測の理論と演習 基礎編, 現代工学社, 1986.
- (8) 日本アイソトープ協会, 放射線・アイソトープ講義と実習, 丸善, 1992.
- (9) 加藤貞幸, 放射線計測, 培風館, 1994.