

## 論文の内容の要旨

### 論文題目

閉凸空間によるデータ処理法を用いた中性子線量の評価法とその応用に関する研究

氏名 橋本 周

放射線防護のための中性子線量測定では固定的な線量応答特性を持つ線量計の適用が主であるが、中性子のエネルギーによって線量換算が大きく変動するにもかかわらず、測定において真値との整合が保証されないという課題を抱えている。例えば、広く使われている「レムカウンタ」と呼ばれる中性子線量率計は、一般に速中性子場で校正されているが、低速中性子場では過大評価を与えることが知られており、その割合は2倍から数倍に及ぶ。これは、線量寄与の大きい数 MeV 近傍の中性子に高い感度の応答特性を単一の検出器に与えているからである。中性子線量計の応答特性は近年も盛んに改善が進められているが、変動幅の大きい中性子線量換算を的確に反映できる単一検出器の線量計はまだない。この対策として、複数の検出器を組み合わせた中性子線量測定も行われてきた。例えば、電子式中性子個人線量計では、複数の検出器を備え、それぞれの出力の線形結合によって線量評価を行っている。しかしながら、線形結合法による線量評価はある程度経験的に決められている部分もあり、複数検出器の出力が十分に活用されているとは言い難い。

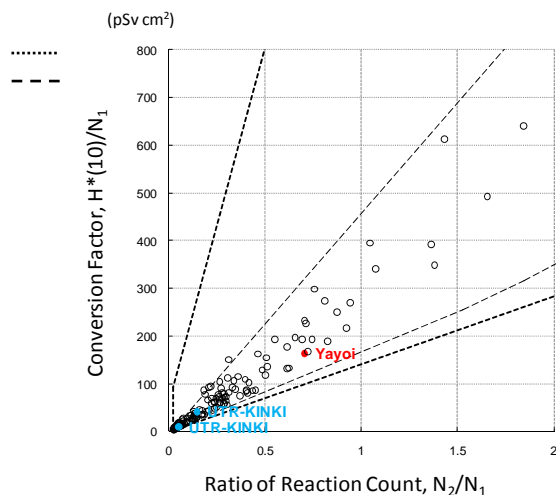
そこで本研究では、複数検出器の出力相関を活用した線量評価法に着目した。複数の検出器で同じ対象を測定し、それらの出力の相関関係から目的量を評価しようとするものである。複数検出器の出力の相関、及び各検出器出力と目的量の相関をベクトル化して、位相ベクトル空間を形成すると、一連の測定値はこの空間中で閉凸空間を形成する。この閉凸空間を用いて目的量の最適値の評価を行う。この方法は多変量解析の手法の一種で、閉凸空間データ処理法と言われる。これを放射線量測定に適用した。この方法では、複数検出器の出力の相関に応じて連続的に変動する換算係数を追うことができるため、中性子エネルギースペクトルの変動に追従する柔軟な換算係数を与えることができる。これは、複数検出器の出力相関を体系立てて整理することを可能にし、複数の検出器から得られる情報量を十分に活用して的確な線量測定につなげることになる。この方法は、中性子線量測定のみならず、放射線防護におけるさまざまな測定を発展させるものである。特に放射線防護では、物理的に直接計測するのは困難な防護量を評価する要求があり、そこに大きな発展をもたらすことが期待される。

放射線測定における閉凸空間データ処理法の概要は以下のとおりである。ある放射線場  $\phi(\mathbf{E})$  における目的量  $Q$  を測定する独立した複数の検出器の出力  $N_i$  について、 $Q/N_j$ 、 $N_i/N_j$ 、 $\dots$ 、 $N_i/N_j$  を導入する。これらの値はお互いに独立であるから、これらを軸とする直交空間が定義できる。この直交空間は目的量を測定する各検出器の応答特性に基づいている。この

直交空間においては、放射線場  $\phi(E)$  に対応する特定の点が指定できる。このとき、あらゆる  $\phi(E)$  に対応する点は、直交空間中に閉凸空間を形成する。ここで、目的量を除く全ての測定値が得られているならば、 $Q/N_j$  軸に平行して閉凸空間の交わる弦を決めることができる。この弦の範囲が、 $Q/N_j$  値の取り得る範囲である。ここで、検出器  $j$  の出力  $N_j$  値がすでに得られているので、目的量  $Q$  の取り得る範囲を決めることができる。閉凸空間を作り出す複数検出器の応答特性とその相互の関係によって、この目的量の取り得る範囲の広がりの変動する。この手法の利点は、それぞれの測定で与えられた目的量の広がりの中に、必ず真値が存在することである。閉凸空間が与える目的量の取り得る幅は、目的量評価における精度を与えているとみなせる。

本研究では、複数の中性子検出器の応答特性による閉凸空間で中性子線量の計測を試みた。放射線防護のための中性子線量の測定は、空間線量測定と個人線量測定に大きく分類できる。最初に空間線量測定について研究した。そのために、単一の検出器で複数の応答特性を兼ね備える、混合ガス比例計数管を開発した。この応答評価に必要な計算コードを整備し、主に計算により設計要素を検討した。その結果、低速中性子を  $^3\text{He}$  で検出し、速中性子を  $\text{CH}_4$  で検出する、混合ガス円筒型比例計数管を完成させた。2種類の反応による出力はエネルギースペクトル形状が異なり、その相違で弁別できる。この計数管の能力は加速器中性子で検証した。次に、計算により、この計数管の単色中性子に対する応答特性、核分裂中性子を線源とする様々な状況における応答特性、多数の核分裂起源中性子の実測事例に対する応答特性を、それぞれ詳細に求めた。この計算結果で得られる2種類の反応

の出力に基づき、それぞれ閉凸空間を形成し、線量評価の適性を確認した。単色中性子に対する計数管の応答からは、閉凸空間が実際に形成されることを確認した。さらに、核分裂中性子を線源とする様々な状況における計数管の応答によって閉凸区間を形成したところ、それは線量測定に適しており、過去の多くの実測事例は余さずこれに適合することを確認した。さらに、実験用原子炉の中性子場において、混合ガス比例計数管の応答実験を行った。実験結果から得られた核反応の出力と線量測定値の相関は、図1に示すように、先に作成した閉凸空間中に配置された。以上より、閉凸空間データ処理法による中性子線量評価が機



- ..... : 単色中性子による閉凸空間の境界
- : 核分裂中性子による閉凸空間の境界
- : 中性子スペクトル実測事例に対する応答
- (red) : 弥生における実験結果
- (blue) : 近大炉における実験結果

図1 混合ガス比例計数管の閉凸空間と線量評価

能していることが検証された。さらに、反応毎の出力ではなく、各反応を主要な出力とする出力エネルギー帯 (ROI) を設定し、その ROI における計数から閉凸空間を形成する試みも行った。その結果、反応毎出力の評価の時と同様に、閉凸空間が形成され、計算値、実験値ともその閉凸空間中に配置され、的確に中性子線量評価を行えることが示された。さらに、その閉凸空間の広がりから中性子線量の測定精度を評価したところ、現行のレムカウンタなどの中性子線量計と遜色ないことが確認された。したがって、新たに開発した混合ガス比例計数管に閉凸空間データ処理法を適用することで、中性子線量測定器として十分に適用できるという成果が得られた。また、この計数管はレムカウンタよりも重量を大幅に低減でき、その点でも優れている。

個人線量については、既存の中性子個人線量計の組み合わせに閉凸空間データ処理法を適用することで、その効果を検証した。複数種類の個人線量計の同時使用を想定し、それぞれの検出器出力を用いて閉凸空間を形成した。個人線量計には、現行の主要 11 種類を選び、110 通りの個人線量計の組み合わせによる線量測定の比較評価を行った。この比較評価のために、閉凸空間の良否の数値化を試みた。それぞれの検出器の応答特性を関数化し、それらの直交性を関数の相対内積を求めて評価した。相対内積は、関数間の内積をそのノルムで規格化したものである。相対内積が大きいものは、閉凸空間の形状が好ましくなく、線量評価が難しい傾向にあることがわかった。また、相対内積の小さいものは閉凸空間の形状が良く、線量評価に優れている傾向にあることが示された。ただし、必ずしも相対内積の小さい組み合わせの全てが線量測定の目的において十分なものばかりではなく、さらに最適値の選定方法やそれぞれの検出器の測定精度などの条件に基づいて評価を行う必要があることもわかった。個人線量計の組み合わせのうち、きわめて優れたエネルギー応答特性を示す組合せがあった。図 2 はその一例である。閉凸空間の広がり狭く、線量換算係数を少ない変動幅で選定することができる。このときの線量換算係数の幅の評価結果を図 3 に示す。全ての入射中性子条件において線量換算係数は係数 2 の範囲に収まっている。これは、それぞれの検出器単体では得られなかった精度であり、閉凸空間データ処理法を適用することで線量応答特性が向上したことを表す。その一方で、組み合わせによっては、線量計単体での中性子線量測定よりも劣る特性を示す

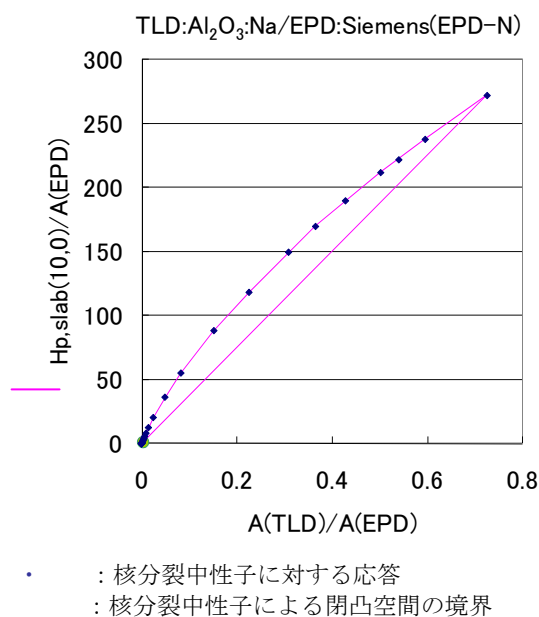


図 2 EPD と TLD の組み合わせの閉凸空間

ものもあった。個人線量計の組み合わせによって閉凸空間データ処理法の適性に違いがあることが確認され、相対内積評価は、見込みの低い組み合わせを排除するためのスクリーニングに適用できるとの新たな知見を得た。

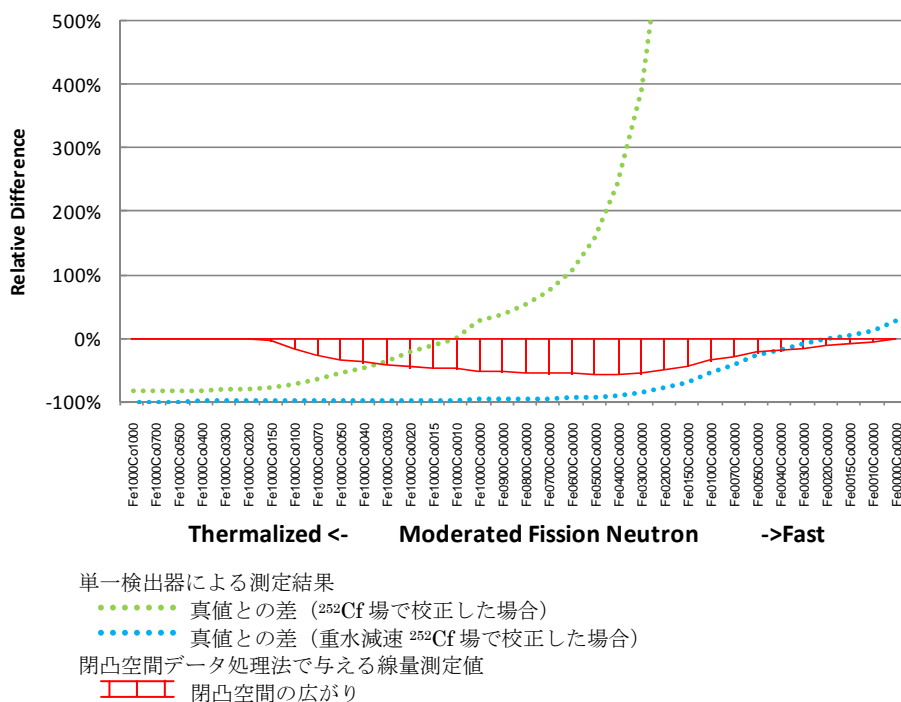


図3 EPD 単体の場合と、TLD と組み合わせた場合の線量測定値の真値との相違

さらに、閉凸空間データ処理法の、その他の放射線測定への応用にも取り組んだ。ここでは、積層型電流モード X 線検出器による X 線エネルギー分布測定への応用を取り上げた。積層型 X 線検出器のエネルギー応答特性の異なる各層の検出器の電流出力を使い、2 種類のエネルギー領域における X 線積分フラックスを求めた。結果は良好で、十分に X 線のエネルギー分布を決めることができた。また、エネルギー分布測定では、閉凸空間の境界部分だけが関与することも示された。つまり、X 線フラックスについて、広がりを持つ値を与えるのではなく、単一の値を決める一種の検量線として閉凸空間が作用するため、精度の高い測定ができることが新たに判明した。

以上より、複数検出器出力を用いた閉凸空間データ処理法を実場での中性子線量測定と、X 線エネルギー分布測定を適用して、この方法が十分に機能するとの知見を得た。これらはいずれも、従来は困難であった放射線に関連する量の測定を、複数の検出器の単純な出力を的確に処理することで達成できることを示している。これは、放射線防護全般におけるさまざまな測定に適用することができる方法であり、複数検出器の出力とその相関が有する情報量を十分に活用し、的確に防護量などの目的量を測定するための一般的な方法論として確立した。