

Title	ホウ素中性子捕捉療法のための液体減速型中性子スペ クトロメータの開発	
Author(s)	玉置, 真悟	
Citation	大阪大学, 2018, 博士論文	
Version Type	VoR	
URL	https://doi.org/10.18910/69590	
rights		
Note		

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

博士学位論文

ホウ素中性子捕捉療法のための 液体減速型中性子スペクトロメータの開発

玉置 真悟

2018年1月

大阪大学大学院工学研究科環境・エネルギー工学専攻

要旨

近年, 頭頚部腫瘍に対する放射線治療として, ホウ素中性子捕捉療法 (Boron Neutron Capture Therapy, BNCT) が大きな注目を集めている.現在は原子炉を用いた BNCT の臨床例のみが報告 されているが,近年では BNCT 用の加速器中性子源 (Accelerator Based Neutron Source, ABNS)の 開発が盛んに行われており,大阪大学においても産学で連携して BNCT 用加速器中性子源装置 の開発を行うプロジェクトが進められている.しかし ABNS は照射中性子場の特性が装置設計 に依存して大きく変動するため,その特性を測定・評価することが BNCT 用加速器中性子源装置 の開発において極めて重要である.特に照射場の中性子が持つエネルギーは BNCT 患者への実 効線量に与える影響が大きく,人体への影響を評価するうえで極めて重要であるため,BNCT 用 中性子場のエネルギースペクトルを正確に評価する装置開発が強く求められている.本論文は,中性子場のエネルギースペクトルを正確に評価する装置開発が強く求められている.本論文は,中性子場のエネルギースペクトルを,BNCT で使用される熱外領域も含め,幅広いエネルギー範 囲で測定するための装置の開発について取りまとめたものである.具体的には,液体減速型中性 子スペクトロメータの開発及び実用化のための研究を実施し,その特性や実用化のための条件 について検証した結果を報告する.

第1章では日本国におけるがん治療の背景やその中でのBNCTの占める位置,BNCTの 歴史,BNCT 用加速器中性子源装置開発の現状と課題について議論し,それを基に本研究の目的 について述べた.

第2章では液体減速型中性子スペクトロメータの基本原理の実現可能性を数値的に検証し、液体減速型中性子スペクトロメータの実現可能性を確認した.その結果、液体減速材が¹⁰B等の高い中性子吸収能を持つ原子を多く含むことで応答関数の特性が変化し、中性子スペクトルの測定性能が上昇することを明らかにした.

第3章では、液体減速型中性子スペクトロメータのプロトタイプの設計・製作を行い、 それを用いた実験的研究を実施した.その結果、検出器の応答関数を適切な条件下で評価するこ とで、少なくとも1 MeV 以下のエネルギー領域において中性子スペクトルを正確に測定可能で あることを確認した.また、検出器の応答関数を適切に評価するためには実験で照射される中性 子場の空間分布や角度分布などの特性が極めて重要であり、あらゆる中性子場で使用可能な中 性子スペクトロメータを開発するためには中性子場特性に対する依存性の低い設計とする必要 があると結論した.

第4章では、第3章で得られた知見を基に改良型中性子スペクトロメータの設計を行い、測定シミュレーションを通してその性能を確認した.結果は、照射中性子場の中性子入射角を考慮すれば、コリメータ孔内に入射する、cosθ > 0.9995を満たす前方中性子束のエネルギースペクトルを測定可能であり、1 MeV 以下の中性子に対して特に優れた測定能力を持っていることを確認した.

第5章では結言として以上までの成果を総括し、本装置の特性と有用性、そして実用化 までの課題について述べた.最終的には、本研究で設計・開発を進めた装置は、前方中性子フラ ックスを測定可能な装置であり、その特性を応用して測定対象となる中性子場の角度・エネルギ ー微分中性子エネルギースペクトル、すなわち二重微分中性子束強度を測定するための手法を 検討・実用化することであらゆる特性の中性子場に対する適用可能性があると結論した.

今後は本装置を用いた前方中性子束スペクトルの測定可能性を実験的に確認した後, 二重微分中性子束強度の測定可能性について検証を進める方針である.

Development of liquid moderator based neutron spectrometer for BNCT Abstract

Boron neutron capture therapy (BNCT) based on ${}^{10}B(n,\alpha)^7Li$ reactions is known to be an effective radiation therapy for cancers. Because of its superior treatment results, it attracts the attention of many doctors and researchers all over the world. In the past, cases have been reported only with nuclear reactors used as neutron sources. However, owing to social and political factors, it is very difficult to implement a new nuclear reactor in hospital. Therefore, accelerator-based neutron sources (ABNS) for BNCT are being developed all over the world. Generally, the neutron energy spectrum in the irradiation field formed by an ABNS is strongly dependent on the design of the ABNS, e.g., the type of target nuclide and bombarded particle, and the structure of the beam shaping assembly. Meanwhile, the absorbed or equivalent dose to normal tissues of the human body is largely dependent on the irradiated neutron energy. Therefore, it is necessary to evaluate the neutron spectrum accurately in a treatment field to realize an accelerator-based BNCT. In this study, a new neutron spectrometer, called a "liquid-moderator-based neutron spectrometer" has been developed to measure the neutron spectrum more accurately and precisely. In this paper, the details and the results of this research, usefulness of the method and problems were reported to realize the present spectrometer.

In chapter 1, a literature work was done to explain the background and the history of BNCT, the current status and problems of development of ABNS. Finally, the objectives of this study was shown.

In chapter 2, the principles and the result of a feasibility study of the employed method for the liquid-moderator-based neutron spectrometer were reported. The feasibility study was performed numerically, and validity of the liquid-moderator-based neutron spectrometer was examined. Finally, the feasibility was confirmed and essential elements for the spectrometer was revealed.

In chapter 3, a prototype of the liquid-moderator-based neutron spectrometer was developed to examine the validity of the method experimentally. As a result, it was found that prototype spectrometer enabled to measure the neutron spectrum from 1×10^{-9} MeV to 1 MeV. However, it also revealed that it is fundamentally important to consider the source condition used in the response function calculation due to its large dependence of the experimental condition; hence, it is necessary to design the spectrometer with a response function that has a low dependency on the incident neutron source characteristics

In chapter 4, a design study was performed to improve the previously developed prototype of the liquid-moderator-based neutron spectrometer. By carrying out a numerical simulation of the designed new spectrometer, the validity of this spectrometer was finally assessed and confirmed numerically.

In chapter 5, the characteristics, validity, usefulness and problems of the liquid moderator-based neutron spectrometer were discussed from the results of chapters 2 – 4. In conclusion, the developing spectrometer was confirmed to be possible to measure the energy spectrum of angular neutron flux which satisfies $\cos\theta > 0.9995$, where θ is an angle between the detector axis and incident neutron direction, by considering the measurement conditions carefully.

In future, the improved neutron spectrometer designed in chapter 4 will be developed, and an experimental test of the spectrometer will be performed to confirm the capability to measure the angular neutron flux spectrum. Finally, the possibility of the double differential neutron spectrum measurement will be explored after the experimental test.

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 BNCT の原理と歴史	6
1.3 BNCT 用加速器中性子源の概要	10
1.4 BNCT 用加速器中性子源開発の課題	12
1.5 本研究の目的	14
1.6 本論文の構成	15
参考文献	15
第2章 測定原理と実現可能性の検討	19
2.1 緒言	19
2.2 減速型中性子スペクトロメータのスペクトル測定原理	20
2.2.1 放射線検出器の概論	
2.2.2 中性子検出用比例計数管の動作原理	22
2.2.3 減速型中性子スペクトロメータの測定原理	
2.2.4 液体減速型中性子スペクトロメータ	
2.3 Bayes 推定法による spectrum unfolding	
2.3.1 Bayes の定理	
2.3.2 Bayes の定理による unfolding 問題の解釈	
2.3.3 Bayes 推定の放射線計測問題への適用	30
2.3.4 Bayes 推定による unfolding の手続き	
2.3.5 スペクトル型 Bayes 推定における繰り返し回数の決定	
2.4 実現可能性の検討	35
2.4.1 応答関数の評価	
2.4.2 数值実験	
2.4.3 結果と考察	
2.5 結論	
参考文献	49
第3章 プロトタイプの設計と原理の実験的検証	53
3.1 緒言	53
3.2 プロトタイプスペクトロメータの設計	53

3.3 実験	57
3.3.1 実験体系	57
3.3.2 実験手順	59
3.3.3 実験結果と考察	61
3.4 結論	64
参考文献	65
第4章 改良型中性子スペクトロメータの設計	67
4.1 緒言	67
4.2 改良型中性子スペクトロメータの設計	67
4.3 数値実験 1: プロトタイプスペクトロメータとの比較	75
4.3.1 シミュレーション体系	75
4.3.2 結果と考察	76
4.4 数値実験 2: 種々の中性子場での検討	78
4.4.1 シミュレーション体系	78
4.4.2 結果と考察	79
4.5 結論	86
参考文献	87
第5章 総括	89
謝辞	93
研究業績	94
付録 モンテカルロ型 Bayes 推定 ソースコード	98

第1章 序論

1.1 研究の背景

わが国では 1981 年以来, 悪性新生物, すなわちがんが脳血管疾患を抜いて死亡 原因の第1位である (Fig. 1-1). また, がんによる死亡者の多くは高齢者が占め るため, 近年の少子高齢化に伴いその割合は増加傾向にある (Fig. 1-2, 1-3) [1-2]. そのため, 日本国民の寿命の延長や生活の質 (quality of life: QOL)の維持・向上 のためには, がんの有効な治療法の確立が急務である.

我が国の国民病であるがんへの対応は,2006年に「がん対策基本法」が制定 され,2007年より施行,放射線治療並びに化学療法の専門医の育成,緩和医療の 充実,がん登録の推進,がん相談支援や情報提供体制の構築が謳われている.特 に参議院の付帯決議においては,放射線治療の重要性について述べられている. がん治療において放射線治療は,外科治療,化学療法と並んできわめて重要な 位置を占めている.放射線治療は外科治療と同様に局所療法であるが,多くの がんで罹患器官の形態と機能を温存し,QOL を良好に保ちつつがんを治療せし める点で優れており,適応が正しければ腫瘍の局所制御率は手術に匹敵する. また,その低侵襲性の故,高齢のがん患者に対しても優しい治療である.[3].



Fig. 1-1. 死因年次推移分類別にみた死亡率.

1



Fig. 1-2. 年齢別にみた死因分類別死亡数.

平成27年(2015)10月1日現在



Fig. 1-3. 日本の人口ピラミッド(出典:総務省統計局 平成 27 年国勢調査「人口 等基本集計結果」 [2])

高齢化社会を迎えた日本において, がん患者の QOL の向上が大いに期待できる 放射線治療は, 今後特に重要な役割を果たすと考えられる.

放射線治療を行うに当たって重要なことは、がん細胞に多くの放射線を照 射し、正常細胞に対する照射は最小限にとどめることである.理想としてはが ん細胞にのみ放射線を照射することであり、そのために様々な手法・技術が開発 されてきた.現在の治療で使用されている主な放射線としては、X線、γ線、電子 線、β線、中性子線、陽子線、重粒子線(炭素イオン線)などがある.これらの放 射線は生体内物質を電離・励起する能力を持つ電離放射線であり、身体深部まで 到達する高エネルギーを有している.



Fig. 1-4. 放射線の種類による線量分布(出典:臨床放射線腫瘍学 [3])



Fig. 1-5. 従来の X 線治療 (3D-CRT) と強度変調放射線治療 (IMRT) の概念図 (出典: 臨床放射線腫瘍学 [3])

X 線は放射線治療で最も多く利用されている放射線である. その大半はリ ニアックなどの直線加速器から発生する高エネルギーX線の外部照射によるも のである.X線は真空の加速管内で高速に加速した電子を銅や白金などの重金属 ターゲットに衝突させ、制動放射を利用して発生させる. 高エネルギーの X 線 の体内線量は、入射直後に増加に向かい、ピーク後は指数関数的に減弱する. γ線の物質に対する相互反応はX線と違いはなく,体内線量も同じような分布形 状となる. この入射直後から線量ピークまでをビルドアップ領域といい、光子 と物質の相互作用で生じた二次電子の飛程付近が最大値となる (Fig. 1-4). γ線は 原子核の励起状態からのエネルギー遷移により発生し、長年 ⁶⁰Co 線源を用いた 遠隔治療装置が使用されてきた.しかしながら,高エネルギーX線発生装置で発 生するX線のエネルギーが⁶⁰Coから発生するガンマ線のエネルギーよりも高く、 ビルドアップまでの距離が深くなり急性期放射線皮膚炎を低減できることから、 ガンマ線よりもX線を用いた治療がより主流となっている.X線やγ線を利用す る放射線治療では、様々な角度から放射線の外部照射を行い、無駄な部位への 照射を極力避けつつできるだけ病巣の形状に線量分布を一致させる,3次元原 体照射 (3D-CRT) と呼ばれる手法が一般的である. また, 標的となる腫瘍と複 数のリスク臓器が空間的に近接して存在する場合に, 均一な強度の放射線を照 射する 3D-CRT では適切な線量分布を得ることが原則的に困難であることから、 照射する放射線強度を変調してより適切な線量分布を作り出す強度変調放射線

治療 (IMRT) と呼ばれる手法も近年では一般的となってきている (Fig. 1-5).

しかしながら、X線では腫瘍に対する線量集中性に限界がある.そのため、 さらに腫瘍への線量集中を可能とする陽子や重粒子線 (一般的には炭素イオン 線)といった高エネルギー荷電粒子線治療法が提案された. 陽子線とは正の 1荷の電荷量を持つ陽子 (水素原子核) を,炭素イオン線とは¹²C 原子の原子核 を加速したイオンビームであり、どちらも物質中を通過する際にクーロン力に よる電離作用によって運動エネルギーを損失する その運動エネルギーの損失 は阻止能と呼ばれ、運動エネルギーの大きさに反比例する関係を持つ.物質へ 入射したイオンビームは深部へ進むにつれて運動エネルギーを損失し、物質中 で停止する寸前の場所で非常に大きなエネルギーを損失する. その結果, 停止 寸前の場所に Bragg peak とよばれる高い線量領域が形成される (Fig. 1-4). 粒 子線治療とは、イオンビームの照射位置及び入射運動エネルギーを調整して腫 瘍部分に Bragg peak を集中させることで腫瘍に線量を集中させ、腫瘍部以外の 線量を極力抑えることが可能である. 粒子線でがんを治療するためには, Bragg peak をがんの大きさに合わせて拡大する必要がある. これを拡大 Bragg peak (SOBP) という (Fig. 1-6). 粒子線治療の利点は, Bragg peak を利用することで皮 膚表面から腫瘍までの組織に与える線量を原理的に小さくできることである. 一方で、大きな腫瘍に対して粒子線治療を行う際には SOBP も同様に拡大する



a: 炭素イオン線の生物線量と物理線量.b: 炭素イオン線と陽子線線量分布の比較 RBE: 生物学的効果比

(a: Kanai T et al: Int J Radiat Oncol Biol Phys 44: 201-210, 1999)

Fig. 1-6. SOBP の形成(出典:臨床放射線腫瘍学 [3])



Fig. 1-7. BNCT の原理図

必要があり,結果として皮膚から腫瘍までの間にある組織への積算線量が大き くなってしまう,という問題もある.

中性子線はそのエネルギーによって,熱中性子,熱外中性子,中速中性子, 速中性子,超高速中性子に分類される.非荷電粒子である中性子線の体内にお ける深部線量分布形状はX線やγ線と同様な減衰曲線を描く.本研究では,その 優れた治療実績から世界的に注目を集めている,ホウ素と中性子の原子核反応 により放出される線エネルギー付与 (LET)の高い荷電粒子を利用した,ホウ素 中性子捕捉療法 (Boron Neutron Capture Therapy: BNCT)のための研究を行って いる.

1.2 BNCT の原理と歴史

BNCT とは、非放射性核種である ¹⁰B が低エネルギー中性子を捕獲し ¹⁰B(n, α)⁷Li で示される核反応を引き起こす性質を利用した、放射線がん治療法の一種である [4] (Fig. 1-7). 上記の核反応で発生する粒子は LET (linear energy transfer、線エネルギー付与) が高く、水中や組織中における飛程が 4 μ m から 10 μ m の範囲 内になる. これはすなわち、¹⁰B(n, α)⁷Li 反応で発生した α 粒子と反跳リチウム原 子核が 1 つの細胞内でその運動エネルギーをすべて放出することを意味している. また、¹⁰B(n, α)⁷Li 反応は、熱中性子と人体を構成するほかの元素 (水素、炭素、 窒素、酸素等) の相互作用によって引き起こされる反応と比較してその断面積

が極めて大きい [5] (Table 1). したがって, 十分な量のホウ素を腫瘍組織に蓄積 することができれば, 正常細胞に対する線量付与を低く保ったまま¹⁰Bを十分に 含んだ腫瘍組織にのみ線量を付与することが理論上可能である.

BNCT の歴史の始まりは、今から 70 年以上前までさかのぼる. 1932 年に Chadwick によって中性子の存在が報告され [6], その4年後の 1935 年に Taylor と Goldhaber によって ${}^{10}B(n,\alpha)^7Li$ 反応に関する発表が行われた [7], そのわずか 1年後の1936年に Locher によって NCT (neutron capture therapy)の基本的なアイ デアは公表された [8]. 1940 年には Kruger の論文に最初の BNCT の実験に関す る報告が発表されている [9]. 彼は, 腫瘍組織片に対してホウ酸を混合したうえ で中性子照射を行う非生体内実験を行ったのち、その組織片をマウスに移植し たところ、ホウ酸あるいは中性子照射のみを行った組織片を移植した結果と比 較して低い移植性を示すことが明らかとなったと報告している. また, 同年に Zahl らによって生体に対する NCT の効果が調査された [10]. 彼らはマウスの 肉腫に対して油性懸濁剤を注射して治療を行う実験を行った.その後まもなく, 脳腫瘍に対する NCT が提案された [11]. 腫瘍細胞の脳関門機能消失によりホウ 素の取り込みが行われる[12] という性質を利用し,正常な脳組織を保護しなが らの治療が可能であると述べられている.また、同著者の別の論文で、脳の腫瘍 細胞は正常な脳細胞に比べてホウ素の集積性が高くなるという結果が報告され ている [13]. 初期の生物学的研究から 10 年後, 人間に対する最初の医療応用が 行われた. 以降の BNCT の歴史は, 1951 年から 1961 年にアメリカで実施された 初期の医療応用, 1968 年から 1980 年代に行われた日本の畠中らによる先駆的研 究, 1990 年代中期から始まり現在まで続いている原子炉熱外中性子施設を利用 した初期臨床試験、そして近年盛んになっている加速器熱外中性子源施設を用 いた BNCT への取り組みの4つに分類することができる.

核種	反応	反応断面積(barn)	放出エネルギー(MeV)
${}^{1}\mathrm{H}$	$^{1}\mathrm{H}(\mathrm{n,\gamma})^{1}\mathrm{H}$	0.332	2.22
¹² C	$^{12}C(n,\gamma)^{13}C$	0.0034	4.95
¹⁴ N	$^{14}N(n,p)^{14}C$	1.81	0.63
¹⁶ O	$^{16}O(n,\gamma)^{17}O$	0.00018	4.14
¹⁰ B	$^{10}\mathrm{B}(\mathrm{n},\alpha)^{7}\mathrm{Li}$	3837	2.79

Table 1-1. 生体内元素及びホウ素と熱中性子との主要な反応



Fig. 1-8. (a) BSH と (b) BPA (出典: Neutron capture therapy: principles and applications [4]).

最初期のアメリカで実施された初期の医療応用では, 原子炉を用いた熱中 性子ビームによる BNCT が実施された. これは, 原子炉で照射される熱中性子 ビームには高速中性子やガンマ線等の不純物が少ない高品質なビームが製作可 能だったからである. しかしながら, 熱中性子は組織内への浸透性が低く, ビー ムそれ自体による線量は皮膚表面で最大になるので、腫瘍組織のホウ素取り込 み量による個人差があったものの、皮膚表面からおおよそ4 cm 程度までにある 浅部がんにしか適用できなかった. 1951 年から 1961 年まで Brookhaven にて、そ して 1959 年から 1961 年まで Massachusetts Institute of Technology (MIT) にて、 W Sweet らによって脳腫瘍に対する BNCT の臨床試験が実施された [14, 15]. こ れらの研究では熱中性子ビームを腫瘍まで届かせるため、手術により腫瘍を露 出させたのちに中性子を照射する、術中照射と呼ばれる手法が採用された.し かしながら、これらの研究の結果は惨憺たるものであった.これは、腫瘍組織に 選択的に十分蓄積するようなほう素薬剤がなかったことや、高速中性子によっ て患者の体それ自体から発生する反跳陽子やガンマ線による付加線量が過小評 価されていたことが主な原因であったと考えられている.この結果,1961年には BNCT の研究が中止され、以降 30 年もの間、アメリカでは BNCT の研究がほと んど行われなかった.

この状況の大きな転換点は, 1968 年の畠中らの研究によってもたらされた. 彼らは Soloway らによって合成された BSH [16] (Fig. 1-8(a)) を使用して BNCT の術中照射を実施した [17]. この研究の結果として畠中らは grade 3 および grade 4 の malignant glioma 患者の 5 年生存率が 58 %になったという驚異的な成 果を報告している [18] (Fig. 1-9).



Fig. 1.2 Copy of H.Hatanaka's printed results shown 1989 at the 17th International Congress of Radiology in Paris

Fig. 1-9 畠中らが 1989 年当時発表した BNCT の成果 (出典: Neutron capture therapy: principles and applications [4]).

また, 1987 年に三嶋らによって BPA(Fig. 1-8(b)) を用いた malignant melanoma に対する臨床試験が実施された [19]. 現在は治療するがんの種類に応じて BSH または BPA, あるいはその両方を使用する BNCT が主流となっている.

1990 年代初期からは、アメリカとヨーロッパで深部がん治療のため、原子 炉中性子源を用いた熱外中性子源 (Fig. 1-10)の開発が行われ始めた.これは、 放射線治療による深部がんの治療を、手術を行うことなく実施することを目標 に、従来よりも高いエネルギーの中性子ビームを使用する BNCT の研究が進ん だためである.照射した熱外中性子は患者の組織それ自体によって減速され、 従来よりも照射中の体内の熱中性子束分布が改善された.これにより、皮膚表 面からおおよそ8 cm までのより深部のがんを治療することができるようになり、 熱外中性子場を BNCT 治療場とする手法が現在の主流となっている.

しかしながら,現在の BNCT 研究には重大な問題がある. それは原子炉施 設を用いた運用は政治的な要素に大きく左右されることである. 実際,1900 年代 に建設された BNCT 施設は, それぞれ理由は異なるものの, そのほとんどがシ ャットダウンし,2012年段階で利用可能な BNCT 施設は台湾の National Tsing Hua University にある Tsing Hua Open-pool Reactor (THOR), そしてアルゼンチンの



Fig. 2.2 Isometric drawing of the MITR-II depicting components of the vertical thermal neutron beam and (horizontal) fission converter-based epithermal neutron beam

Fig. 1-10 BNCT 用熱外中性子照射装置 MITR-II の等角図. (出典: Neutron capture therapy: principles and applications [4]).

Bariloche Atomic Center にある RA-6 reactor のみとなった. この状況を打開する ため,加速器中性子源を用いた BNCT 治療施設の開発に向けた研究が世界中で 進められている.

1.3 BNCT 用加速器中性子源の概要

BNCT 用加速器中性子源とは,加速した粒子をターゲット物質に照射し,核反応 によって中性子を発生させ,適切な減速材により熱/熱外エネルギーまで減速 した中性子を,制御された状態で照射できる装置である.加速器中性子源を実 用化するための研究は,粒子を加速するための加速器の研究,中性子を発生さ せるためのターゲットに関する研究,発生した中性子を適切に減速する減速材 体系についての研究などに分けられる.これらのうち,加速器中性子源用ター ゲットに関する研究と減速材体系に関する研究は,患者に照射する治療場の特 性に極めて密接にかかわっており,特に注目されている.

BNCT 用加速器中性子源のターゲットとしては, ⁹Be や ⁷Li などが検討され ることが多い [20]. これは, 比較的低エネルギーのイオンビーム (主に陽子線) によって高い収量の中性子を得ることができるためである.

例えば、京都大学原子炉実験所では、サイクロトロン加速器による 30 MeV 陽子線と⁹Be ターゲットを利用した BNCT 用加速器中性子源 Cyclotron-based neutron source (C-BENS)の開発が進められている [21]. C-BENS ではターゲット に入射する陽子のエネルギーが⁹Be(p,n)⁹B 反応の閾値 (2.057 MeV) よりも極め て高く、発生する中性子は最大で 30 MeV のエネルギーを持つ. しかしこれでは、 BNCT に直接利用するには中性子のエネルギーが高すぎるので、減速材体系 (Fig. 1-11)を使用して熱外中性子領域まで中性子エネルギーを低下させている. 結果として、C-BENS の治療場では、中性子エネルギーは、熱中性子領域から数 + MeV 領域まで広がり、40 keV 程度にピークを持つ中性子スペクトルとなる (Fig. 1-12). 筑波大学ではライナック加速器による 8 MeV 陽子線と⁹Be ターゲッ トを利用した加速器中性子源の開発が行われている [22]. また、多くの BNCT 研究グループでは 2.3—2.8 MeV 陽子ビームによる ⁷Li(p,n)⁷Be 反応を利用する BNCT 用加速器中性子源の可能性が検討されている [23-25]. これは、⁹Be ターゲ ットを使用する場合よりも低エネルギーの中性子を高い収量で得られる点が評



Fig. 3. Schematic layout of a beam-shaping assembly for epithermal neutron generator using 30-MeV proton cyclotron and Be target.



Fig. 1-11 C-BENS の減速材体系 (beam shaping assembly) (出典: *Tanaka, H., et al. Nucl. Inst. Meth. B 267.11 (2009): 1970-1977.* [21]).

Fig. 1-12 C-BENS 治療場の中性子スペ クトル (出典: Tanaka, H., et al. Nucl. Inst. Meth. B 267.11 (2009): 1970-1977. [21])

価されてのことであり、その最大エネルギーはおよそ 1 MeV 程度になる. また、 低エネルギー陽子を入射した場合でも比較的中性子収量が高い特徴を利用して、 ⁷Li(p,n)⁷Be 反応の閾値近傍のエネルギー(およそ 1.9 MeV)の陽子を入射するこ とで数十 keV の中性子を発生させ、これを減速材によってエネルギーを減衰さ せることなく直接治療に利用する手法の研究も進められている [26, 27].

ここで注目すべき点は,加速器中性子源はターゲットに用いる核種,入射 する粒子の種類やエネルギー,減速材体系等に依存して照射する中性子のエネ ルギースペクトルが変化し,そのエネルギー範囲は原子核反応により中性子が 発生するエネルギーを持つ高速領域から,室温近辺のエネルギーである熱領域 まで幅広く分布することである.

1.4 BNCT 用加速器中性子源開発の課題

放射線医療においては, 放射線の正常組織に対する影響を可能な限り小さくす るため, 精密に放射線量を制御する必要がある. 特に中性子による人体への実 効線量はそのエネルギー分布によって大きく変化する [28] (Fig. 1-13). また, 前 節で述べた通り, 加速器中性子源によって得られる中性子場は, ビームの加速 エネルギーやターゲットの種類, 減速材の構造等に依存して大きく変化するの で, 患者に対する線量を正確に評価するためには治療用中性子場の中性子強度 やそのエネルギーを正確に評価しておくことが必要である.

従来は、治療場の特性評価のためには多重箔放射化法が一般的に用いられ てきた.これは、放射化サンプルは一般にその体積が小さく、検出器それ自体に よる中性子の場の乱れが小さいことや、極めて強度の強い中性子場においても 検出器の故障を考慮する必要がないといった利点があることが理由である.例 えば、京都大学原子炉実験所の原子炉 BNCT 施設である Heavy Water Thermal Neutron Irradiation Facility (KUR-HWNIF) では、16 種類の放射化反応を用いて治 療場の中性子スペクトル測定が行われた [29]. また、Auterinen らは全世界にあ る原子炉 BNCT の内の 8 つについて、12 種類の放射化反応とカドミウムカプセ ルの組み合わせを用いて中性子場のスペクトル測定を行った [30].

多重箔放射化法とは測定を行う中性子場に複数種類の金属サンプルを設置 し、その放射化量から"unfolding"と呼ばれる逆行列解法処理を通して中性子ス ペクトルの評価を行うスペクトル測定法である.前述のとおり、測定場を乱さ ないことや高強度中性子場に対する適用性が高いといった利点のある極めて有 力な手法であるが、一方で測定に利用できる核反応の種類が限られているため



Fig. 16.3 Contributions to energy dependent neutron kerma factors for ICRU brain from different elements. For comparison, the kerma factor for ¹⁰B is included, shown for a concentration of 15 μ g/g. The *dashed vertical line* at 0.5 eV indicates the boundary between fast and thermal neutrons (Adapted from data in Ref. [8])

Fig. 1-13 ICRU ファントムに対して中性子場の付与する線量の分布. 人体の脳に 対する線量分布と等価である. (出典: *Neutron capture therapy: principles and applications* [4]).

有感エネルギー領域やエネルギー分解能が制限されるという欠点がある.従来で は、この問題は"initial guess"と呼ばれるスペクトル初期値を導入することにより 解決が試みられてきた.これは、unfolding を行う際に実験データ群数が求める中 性子スペクトルのエネルギー群数より小さい場合、解の一意性が失われてしま うことを避けるために用いられてきた手法であり、初期スペクトルにシミュレ ーション計算などによって求めた理論スペクトルを代入することで,得られる 解の正確性を向上させる効果が見込まれている.しかしながら,この手法はい わば計算値を実験値によって補正して解を得る手法であり,得られる解は initial guess の値に強く依存し, initial guess の値と真の解の差が大きくなるほど得られ る解の正確性が悪くなる.これは多くの中性子スペクトル測定法に共通の問題 でもある.例えば,空間中性子束評価のために用いられることが多い Bonner sphere spectrometer (BSS) [31] であるが,これは減速材殻を多数製作して検出器 応答の種類を増やすということが一般的に容易でないことから,多重箔放射化 法と同様に実験データ群数が制限され, unfolding の結果に不安定性が現れると いう問題を持つ [32].この問題を解決するため,BSSの減速材殻の材質を変化さ せる [33-34],多重箔放射化法と BSS を組み合わせる [35] などの多くの工夫を 凝らした研究がなされているが,まだ十分な解決がなされていないのが現状で ある.

1.5 本研究の目的

前節までの内容をまとめると, BNCT 治療を安全に行うためには照射される中性 子のエネルギー分布に関する情報が極めて重要であるにも関わらず, それを実 験的に評価するための測定方法の整備が未だ不十分であるため, シミュレーシ ョン計算結果を用いた実験補正値がそれに代用されている, ということができ る.しかしながら, シミュレーション計算によって得られる結果は実際の設備 で考慮されるべき条件がすべて反映されているとは限らないため, 実験的に中 性子スペクトルを正確に測定・評価することは依然として極めて難しい状況で あると言える.

以上の問題を踏まえ,本研究では信頼性の高い中性子スペクトルを実験的 に測定するスペクトロメータの設計・開発を行うこと目的とした.具体的には, ボナー球と同様の原理であるが,減速材に液体を用いることでスペクトルの推 定に必要な実験データ数を増やす工夫が施された新しい中性子スペクトロメー タの設計・開発を行い,得られる中性子スペクトルの精度や正確性を大幅に向上 させることを目標とした.また,本装置のプロトタイプ検出器を製作して実際 に中性子場のスペクトル測定を行い,その性能を実験的に評価することも目指 した.

1.6 本論文の構成

本論文は全5章で構成されている.

第2章では本研究で開発した中性子スペクトロメータの基礎的な原理と, その実現可能性検討研究の結果について説明する.

第3章では中性子スペクトロメータのプロトタイプの開発並びに本手法の 実験的研究の結果について説明する

第4章ではプロトタイプスペクトロメータを用いた実験的研究の結果から 得られた知見を基に、スペクトロメータ実機の最適化設計の結果を説明する. 最後に、第5章で本研究の結論を記す.

参考文献

- 1. 厚生労働省, 平成 27 年(2015)人口動態統計(確定数)の概況. http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/jinkou/kakutei15/index.html
- 総務省,平成27年国勢調査「人口等基本集計結果」 <u>http://www.stat.go.jp/data/kokusei/2015/kekka.htm</u>
- 日本放射線腫瘍学会,日本放射線腫瘍学研究機構(編)(2012)臨床放射線腫 瘍学 最新知見に基づいた放射線治療の実戦.南江堂
- 4. Sauerwein, Wolfgang AG, et al., eds. Neutron capture therapy: principles and applications. Springer Science & Business Media, 2012.
- 5. Shibata, Keiichi, et al. "JENDL-4.0: a new library for nuclear science and engineering." Journal of Nuclear Science and Technology 48.1 (2011): 1-30.
- Chadwick, James. "The existence of a neutron." Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. Vol. 136. No. 830. The Royal Society, 1932.
- 7. Taylor, H. J., and M. Goldhaber. "Detection of nuclear disintegration in a photographic emulsion." Nature 135.341 (1935).
- 8. Locher, Gordon L. "Biological effects and the therapeutic possibilities of neutrons." American Journal of Roentgenology and Radium Therapy. 36 (1936): 1-13.
- Kruger, P. Gerald. "Some biological effects of nuclear disintegration products on neoplastic tissue." Proceedings of the National Academy of Sciences 26.3 (1940): 181-192.
- 10. Zahl, Paul A., Franklin S. Cooper, and John R. Dunning. "Some in vivo effects of

localized nuclear disintegration products on a transplantable mouse sarcoma." Proceedings of the National Academy of Sciences 26.10 (1940): 589-598.

- 11. Zahl, Paul A., and Franklin S. Cooper. "Physical and biological considerations in the use of slow neutrons for cancer therapy." Radiology 37.6 (1941): 673-682.
- 12. Sweet, William H. "The uses of nuclear disintegration in the diagnosis and treatment of brain tumor." New England Journal of Medicine 245.23 (1951): 875-878.
- Sweet, W. H., and M. Javid. "The possible use of slow neutrons plus boron10 in therapy of intracranial tumors." Transactions of the American Neurological Association 56 (1950): 60-63.
- 14. Slatkin, Daniel N. "A history of boron neutron capture therapy of brain tumours: postulation of a brain radiation dose tolerance limit." Brain 114.4 (1991): 1609-1629.
- 15. Farr, L. E.; W. H. Sweet, J. S. Robertson, C. G. Foster, H. B. Locksley, D. L. Sutherland, M. L. Mendelsohn, E. E. Stickley, "Neutron capture therapy with boron in the treatment of glioblastoma multiforme." American Journal of Roentgenology Radium Therapy and Nuclear Medicine. 71 (1954):279-293.
- Soloway, A. H., H. Hatanaka, and M. A. Davis. "Penetration of brain and brain tumor. VII. Tumor-binding sulfhydryl boron compounds." Journal of medicinal chemistry 10.4 (1967): 714-717.
- 17. Hatanaka, Hiroshi. "A revised boron-neutron capture therapy for malignant brain tumors." Journal of neurology 209.2 (1975): 81-94.
- Hatanaka, Hiroshi. "Clinical results of boron neutron capture therapy." Basic Life Science 54.15 (1990): 15-21.
- Mishima, Yutaka, et al. "Treatment of malignant melanoma by single thermal neutron capture therapy with melanoma-seeking 10B-compound." The Lancet 334.8659 (1989): 388-389.
- Kreiner, Andres Juan, et al. "Present status of accelerator-based BNCT." Reports of Practical Oncology & Radiotherapy 21.2 (2016): 95-101.
- 21. Tanaka, H., et al. "Characteristics comparison between a cyclotron-based neutron source and KUR-HWNIF for boron neutron capture therapy." Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 267.11 (2009): 1970-1977.
- 22. Kumada, H., et al. "Project for the development of the linac based NCT facility in University of Tsukuba." Applied Radiation and Isotopes 88 (2014): 211-215.

- 23. Horiike, H., et al. "Liquid Li based neutron source for BNCT and science application." Applied Radiation and Isotopes 106 (2015): 92-94.
- Kononov, O. E., et al. "Optimization of an accelerator-based epithermal neutron source for neutron capture therapy." Applied radiation and isotopes 61.5 (2004): 1009-1013.
- Minsky, D. M., and A. J. Kreiner. "Beam shaping assembly optimization for ⁷Li(p,n)⁷Be accelerator based BNCT." Applied Radiation and Isotopes 88 (2014): 233-237.
- 26. Kobayashi, Tooru, et al. "Near-threshold ⁷Li(p,n)⁷Be neutrons on the practical conditions using thick Li-target and Gaussian proton energies for BNCT." Applied Radiation and Isotopes 88 (2014): 221-224.
- Halfon, S., et al. "High-power liquid-lithium target prototype for accelerator-based boron neutron capture therapy." Applied Radiation and Isotopes 69.12 (2011): 1654-1656.
- Goorley, J. T., W. S. Kiger, and R. G. Zamenhof. "Reference dosimetry calculations for neutron capture therapy with comparison of analytical and voxel models." Medical Physics 29.2 (2002): 145-156.
- 29. Sakurai, Yoshinori, and Tooru Kobayashi. "Spectrum evaluation at the filter-modified neutron irradiation field for neutron capture therapy in Kyoto University Research Reactor." Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 531.3 (2004): 585-595.
- 30. Auterinen, Iiro, et al. "Measurement of free beam neutron spectra at eight BNCT facilities worldwide." Applied radiation and isotopes 61.5 (2004): 1021-1026.
- 31. Bramblett, Richard L., Ronald I. Ewing, and T. W. Bonner. "A new type of neutron spectrometer." Nuclear Instruments and Methods 9.1 (1960): 1-12.
- Thomas, D. J. "Neutron spectrometry." Radiation Measurements 45.10 (2010): 1178-1185.
- 33. Yonap, Shimsuke, et al. "Development of a new multi-moderator spectrometer for epithermal neutrons." Journal of Nuclear Science and Technology 41.sup4 (2004): 415-417.
- 34. Ueda, H., H. Tanaka, and Y. Sakurai. "Reprint of The improvement of the energy resolution in epi-thermal neutron region of Bonner sphere using boric acid water

solution moderator." Applied Radiation and Isotopes 106 (2015): 107-110.

35. Lin, Heng-Xiao, et al. "Characteristics and application of spherical-type activation detectors in neutron spectrum measurements at a boron neutron capture therapy (BNCT) facility." Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 811 (2016): 94-99.

第2章 測定原理と実現可能性の検討

2.1 緒言

本章では,筆者の開発した液体減速型中性子スペクトロメータの原理とその実 現可能性の検討結果について述べる [1-2].

第1章で述べた通り,放射線医療においては放射線の正常組織に対する影響を可能な限り小さくするため,精密に放射線量を制御する必要がある.特に中性子による人体への実効線量は照射場の中性子エネルギー分布によって大きく変化する [3]. したがって,患者に対する線量を正確に評価するためには治療用中性子場の中性子強度やそのエネルギーを正確に評価しておくことが必要である.

従来は,治療場の特性評価のために多重箔放射化法が一般的に用いられて きた [4-5]. しかしながら,前章で述べた通り多重箔放射化法は測定に利用でき る核反応の種類が限られているため有感エネルギー領域やエネルギー分解能が 制限されるという欠点がある.また,空間中性子束評価のために用いられるこ とが多いボナー球 (Bonner sphere spectrometer, BSS) [6] (Fig. 2-1) についても同様 の問題がある.ボナー球は減速材殻を多数製作して検出器応答の種類を増やす ということが一般的に容易でないことがその理由であり,その結果,応答関数 の種類数が解析するエネルギー領域の範囲を十分細かく分割するには少なくな るからである (Fig. 2-2) [7-8].



Fig. 2-1 ボナー球の模式図 (Bramblett 他による [6])



Fig. 2-2. ボナー球の応答関数の一例 (Thomas による [7]).

そこで本研究では、液体を減速材として用いるスペクトロメータを開発す ることで、減速材の厚さを連続的に変化させ、より高精度な中性子スペクトル 測定を可能とする装置の開発を行っている.本章では、この新しい装置である 液体減速型中性子スペクトロメータの概念設計と、スペクトル評価手法、そし てシミュレーションによる実現可能性検討の結果を述べる.

2.2 減速型中性子スペクトロメータのスペクトル測定原理

減速型中性子スペクトロメータは, (1) 検出器形状から検出器の応答関数 (入射 中性子に対する検出器応答のエネルギー依存性を示す関数)を決定し, (2) 検出 器を中性子場に設置して検出器信号を計数し, (3) 応答関数と検出器信号の計数 から逆算して中性子場のエネルギースペクトルを評価する, という 3 ステップ で中性子スペクトルの測定を行う.本節では,まず中性子の測定に関連する放 射線検出器全般について述べた後,本研究全般で使用した³He 充填比例計数管 (Fig. 2-3) の動作原理について述べる.その後,減速型中性子スペクトロメータ を用いた中性子エネルギースペクトル測定の原理について説明する.



Fig. 2-3 本研究で使用した³He充填比例計数管. 直径 50 mm (2 inch), 内圧 1 MPa, 動作電圧 1250 V である.

2.2.1 放射線検出器の概論

まず,中性子検出器の概要と動作原理について述べる [19]. 一般的に放射線検 出器は,入射した放射線が検出器内部で何らかの相互作用を経由し,最終的に 何らかの定量的に評価可能な物理現象を引き起こすことで放射線を検出する装 置である.

放射線検出器を大きく分類すると、検出器内部に入射した放射線の相互作 用により、最終的に何らかの形で即発的な出力パルスの電気信号が発生し、そ れを放射線検出信号とするリアルタイム式の放射線検出器と、一次的には放射 線との相互作用によって何らかの半ば恒常的な変化を引き起こし、それにより ストレージされた情報を二次操作によって取り出す方式の検出器の 2 種類に分 けられる. 前者の例としては、電離箱、比例計数管、ガイガーミュラー計数管等 の、検出器内部で放射線との相互作用による電離によって発生した自由電子に 対して高電圧を印加することにより電荷を収集し電気信号とするガス検出器や、 放射線と相互作用してシンチレーション光を発する物質 (シンチレータ)を利 用し、発生した光を光電子増倍管によって電気信号に変換し検出信号とするシ ンチレーション検出器、半導体結晶の内部で放射線が相互作用を引き起こした 時に発生する電子正孔対に電圧を印加して電流信号を得る半導体検出器などが ある. 後者の例としては, 前世紀の X 線の発見まで遡る古い歴史を持つ写真乳 剤を利用したラジオグラフィ用フィルムや原子核乾板, 放射線によって生じる 電子正孔対が即座に再結合しない材料を使用し,二次的に熱励起による蛍光 (thermally stimulated luminescence, TSL) を発生させることで積分的で受動的な放 射線検出器 (線量計)として利用することができる TLD 線量計 (thermoluminescent dosimeter), TLD 検出器と同様の原理であるが熱励起ではなく 光励起による蛍光 (optically stimulated luminescence, OSL) によって動作する OSL 線量計, OSL を応用した位置敏感型放射線検出器のイメージングプレート (Imaging plate, IP), 中性子による原子核の放射化を利用し, 中性子照射によって 放射化したサンプルの放射能を測定することで中性子束の強度を評価する放射 化検出器 (activation detector) 等があげられる.

これらの内,中性子検出器として主に使用されるものは比例計数管,シン チレーション検出器,放射化検出器である.中性子は電荷を持たず電気的に中 性であるため,直接電離を発生させることはない.そのため,比例計数管やシン チレーション検出器を中性子検出器として用いる場合には,中性子を何らかの 相互作用により電離放射線に変換する必要がある.一般的には中性子と原子核 との荷電粒子放出反応を発生させ、それによる即発パルス信号を使用する.本 論文では、本研究で使用した³He 充填比例計数管についてのみ次節にて詳細を 述べる.その他の検出器については教科書やそれに引用されている参考文献を ご参照いただきたい [19].

2.2.2 中性子検出用比例計数管の動作原理

本研究では³He(n,p)³H 反応によって荷電粒子が発生する性質を利用し中性子を 検出する³He 充填比例計数管を利用した.本節では中性子検出用比例計数管の 動作原理について説明する.

比例計数管 (proportional counter) とはガス入り検出器の一形式であり,常 にパルスモードで作動させ,電離放射線と内部ガスの相互作用によって発生し たイオン対の電荷をガス増幅 (gas multiplication)の現象に基づいて増幅し,収 集することでパルス信号を得る装置である (Fig. 2-4).比例計数管を中性子検出 に用いるための手法としては,検出器内部で中性子と内部ガスを相互作用させ, 陽子やアルファ粒子等の,エネルギーを持った荷電粒子に即時に変換する核反 応を引き起こし,これらの荷電粒子を検出することで中性子を検出したものと する方法が一般的である.中性子と相互作用する内部ガスとしては,¹⁰B を含有 する BF₃ ガスや,本研究でも使用した³He ガスなどが広く用いられる.これは



Fig. 2-4 比例計数管の基本要素と動作原理.



Fig. 2-5¹⁰Bの中性子反応断面積 [18].¹⁰B(n,α)⁷Li反応の断面積が極めて高い.



Fig. 2-6 ³He の中性子反応断面積 [18]. ³He(n,p)³H 反応の断面積が極めて高い.

¹⁰B(n,a)⁷Li 反応や ³He(n,p)³H 反応の反応断面積が大きいため (Fig. 2-5, Fig. 2-6) である [18]. 中性子の検出は荷電粒子放出反応を通して引き起こされるため, この反応率が高いということはすなわち中性子の検出効率が高いということと 等価であり,中性子の測定を効率的に行うことができることを意味する. これ らの反応は低エネルギー中性子に対して特に高い反応断面積を持つが,一方で 主として反応する中性子のエネルギーよりも核反応の *Q* 値 (核反応によって発 生するエネルギー)が大きな正の値 (¹⁰B(n,a)⁷Li 反応では 2.792 MeV, ³He(n,p)³H 反応では 0.764 MeV) となる. そして核反応で発生したエネルギーは主として発 生する荷電粒子に運動エネルギーとして与えられるため,検出器信号それ自体 には入射中性子のエネルギーに関する情報が含まれず,中性子が比例計数管内 で内部ガス中の原子核と核反応したという事実しか示さない. ゆえに中性子検 出用の比例計数管単体で中性子のエネルギースペクトルを評価することは不可 能である. 比例計数管を用いて中性子スペクトル測定を行うためには,例えば、 減速材等を組み合わせて中性子に対する応答関数を変化させることが必要とな る. 次節にてその詳細を記す.

2.2.3 減速型中性子スペクトロメータの測定原理

本節では、本研究でも採用した減速型中性子スペクトロメータを用いた中性子のエネルギースペクトル測定の原理についての概要を述べる.

今, エネルギーEの中性子に対して感度 $R_i(E)$ を持つ検出器について考える. この時, この検出器を用いて中性子フルエンスが $\Phi(E)$ と表される中性子場で測 定実験を行うと, その時の実験値 M_i (エネルギー区間 $[E_{min}, E_{max}]$ の積分値) は 式 (2.1) で表される.

$$\mathbf{M}_{i} = \int_{E_{min}}^{E_{max}} \mathbf{R}_{i}(E) \cdot \Phi(E) \mathrm{d}E$$
(2.1)

この式は中性子フルエンス Φ(E)に関する第1種 Fredholm 型積分方程式と呼ば れる,中性子検出器によって得られる実験データを導出するための式である.

式 (2.1) の積分方程式の逆問題を解いて $\Phi(E)$ を求めることを一般に spectrum unfolding と呼ぶ. 式 (2.1) では検出器の応答関数 $R_i(E)$ と中性子のフル エンス $\Phi(E)$ は中性子のエネルギーE に対して連続であるが, ヒストグラム型の 離散スペクトルとして扱うほうが数値処理を施すに際して有利であるため, 実 際の評価を行う際には式 (2.1) の離散化を行う. まず検出器に入射する中性子 のもつエネルギーE のエネルギー区間 $[E_{min}, E_{max}](E_{min} \cong 0)$ を n+1 個のエネル ギービン $E_0 (= E_{min}) < E_1 < \cdots < E_j < \cdots < E_n (= E_{max})$ で分割する. このビン区間で $\Phi(E)$ を積分し,式 (2.2) の通りエネルギー群 $\Delta E_j (E_{j-1} < E < E_j)$ に対するヒスト グラム $p_j (j = 1, n)$ を作成する.

$$p_j = \int_{\Delta E_j} \Phi(E) dE$$
(2.2)

ここで ΔE_i はビンの区間幅であり任意に定義できる. エネルギースペクトル $p_j(j=1,n)$ と実験で得られた測定値 $M_i(i=1,m)$ の関係は,行列方程式を用いて 式 (2.3) および式 (2.4) で表される. ここで検出器の応答関数 $R_i(E)$ も離散化さ れるので,その要素を $r_{ij} = R_i (E \in \Delta E_j)$ と表した. これは i 番目の減速材配置条件 下 (典型的には i 番目の減速材厚さ)において検出器に入射した中性子がエネル ギー群 ΔE_j に属するエネルギーを持つ場合における検出効率に相当する.

$$\begin{bmatrix} M_1 \\ \vdots \\ M_i \\ \vdots \\ M_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{1j} & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{i1} & \cdots & r_{ij} & \cdots & r_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mj} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_j \\ \vdots \\ p_n \end{bmatrix}$$
(2.3)

 $\vec{\mathbf{M}} = \mathbf{R} \cdot \vec{\mathbf{p}}$

(2.4)

この行列 R を本研究では応答関数行列と呼ぶ. 最終的に式 (2.3) で表される行列式の逆問題を spectrum unfolding によって解くことにより入射中性子のエネルギースペクトル $\mathbf{\tilde{p}}$ を求めることができる.

2.2.4 液体減速型中性子スペクトロメータ

従来のボナー球等の減速型中性子スペクトロメータでは,球形を作るため に減速材はポリエチレンなどの固体材料で製作されていた.これは減速材殻の 取り扱いが容易であることや,球状の減速材を製作することが可能となるため 検出器の角度依存性を無視できる,等の利点によるものであるが,一方で同心 球状の減速材殻を多数製作することは一般的に困難であるため,応答関数行列 の種類数が解析したいエネルギー範囲と比べて少なすぎる という欠点がある.

筆者が開発を行っている液体減速型中性子スペクトロメータとは,中性子 入射方向に液体の減速材を配置することで,入射中性子のエネルギーに対する 検出器感度を準連続的に変化させ,その変化量と実験で得られる中性子検出信 号の数からエネルギースペクトルの推定を行う装置である (Fig. 2-7).本装置で は減速材として液体を使用するので減速材厚を変更することが容易であり,検



Fig. 2-7 液体減速型中性子スペクトロメータの概念図.

出器感度の変化 (応答関数) をより細やかに変更する (種類数を増やす) ことが 可能となるため, エネルギースペクトル測定において測定値の確度や精度の向 上が見込まれる.

2.3 Bayes 推定法による spectrum unfolding

一般的に spectrum unfolding は式 (2.3) で表される行列方程式の逆問題を数値計 算によって解くことにより行われる. Spectrum unfolding の過程で最も問題とな るのは,実験データに含まれる統計誤差等の影響により,得られたスペクトル に激しい振動や物理的に意味のない負の値が出てくること,そして解が正確に 収束しないことである. これらの問題を解決するため,これまで様々な手法が 提案されてきたが,この過程での不確かさは未だかなり大きいことがあり,そ こで導出されるスペクトルの精度を向上するための計算法に関する研究が続け られている [9-12].

本研究では、東北大学の岩崎らによって開発された、確率統計学の Bayes の 定理を拡張した新しい Bayes 推定法を導入した [13]. この手法の特徴としては、 原理が非常に単純であり適用が容易であること、応答関数以外の束縛条件を必 要としないこと、応答関数を 1 つの放射線に対して発生する特定の事象が発生 する確率から求められるためその評価が容易であること、測定値が正値の場合 は必ず推定結果の正値が保証されること、逆行列を求める必要がなく数値的な 不安定さを生じないことなどがある.

2.3.1 Bayes の定理

Bayes の定理とは条件付き確率に関する基本的な定理である.まず,S を標本空間,A を S に属する部分集合(事象)とする.これに対して実数 P(A)を与える関数があり,かつ関数 P(A)が式 (2.5)から式 (2.7)までを満たす時,P を標本空間 S の集合に対して定義された確率測度といい,P(A)を事象 A の確率という.ただし, A_1, A_2, \dots, A_n は S 内の互いに排反な事象である.

$$P(A) \ge 0 \tag{2.5}$$

$$P(S) = 1 \tag{2.6}$$

$$P(A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n) = P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_n)$$
(2.7)

次に, 事象 B が起こったという条件のもとで A が起こる確率を考える. これは条件付き確率と呼ばれるものであり, 式 (2.8) で P(A|B)として定義される.

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)}$$
(2.8)

ここで,2つの事象 A, B がともに生起する確率は式 (2.9) で与えられる. これを 確率の乗法定理という.

$$P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B|A) = P(B) \cdot P(A|B)$$
(2.9)

また,式 (2.9) より条件付き確率 P(A|B)は式 (2.10) のように整理される.

$$P(A|B) = \frac{P(A) \cdot P(B|A)}{P(B)}$$
(2.10)

事象 A₁, A₂, …, A_n が互いに排反でかつ S に属する全事象の分割である時,任意の 事象 B に対して式 (2.11) が成り立つ. これを全確率の公式という.

$$P(B) = P(A_1) \cdot P(B|A_1) + P(A_2) \cdot P(B|A_2) + \dots + P(A_n) \cdot P(B|A_n)$$
(2.11)

以上の式から, 事象 A_jの条件付き確率に対する関係式として式 (2.12) が導き出される. これを Bayes の定理という.

$$P(A_j|B) = \frac{P(A_j) \cdot P(B|A_j)}{\sum_{j=1}^{n} P(A_j) \cdot P(B|A_j)}$$
(2.12)

Bayes の定理は P(A_j)及び P(B|A_j)が与えられたときに P(A_j|B)を求める方法を示す もので, P(A_j)を事前確率, P(A_j|B)を事後確率という.一般的にベイズ推定とは,
事前確率 $P(A_j)$ に確率の3公理を満たす適当な任意の数値を代入し,あらかじめ 与えられている P(B)や $P(B|A_j)$ とともにその値を式 (2.12) に代入して事後確 率 $P(A_j|B)$ を求め,より客観的に確からしい確率を得る手法である.この一連の 手続きを Bayes 改訂という.通常この手法では Bayes 改訂によって得られた事後 確率 $P(A_j|B)$ を新たな事前確率 $P(A_j)$ として更新し,繰り返し Bayes 改訂を行うこ とで可能な限り確からしい値を推定することが可能であると考えられている.

2.3.2 Bayes の定理による unfolding 問題の解釈

本節では,前節で述べた各々の式を実験で得られる値に対応させ, Bayes の定理 を unfolding 問題に適用する方法を考える.

まず,標本空間Sを「放射線が検出器に入射し,検出器信号が出る」という 事象とし,これが全事象を示しているものとする.次に,事象A_iを「エネルギー 分割*ΔE_i*に属するエネルギーを持つ放射線が検出器に入射し,検出器信号が出る」 という事象とする.そして,B_iを「*i*番目の検出器条件下 (本研究においては*i*番 目の減速材厚さ)において放射線が検出器に入射し,検出器信号が出る」という



Fig. 2-8 統計学的観点から見た各々の事象の意味と関係の解説図

事象とする (図説: Fig. 2-8). 任意の事象 X が発生する確率を P(X) とすると, P(S) は放射線が検出器に入射し,検出器信号が出る確率であり, $P(A_i)$ はエネル ギー分割 ΔE_i に属するエネルギーを持つ放射線が検出器に入射して検出器信号 が出る確率, $P(B_i)$ は i 番目の検出器条件下 (= i 番目の減速材厚さ) において放 射線が検出器に入射し,検出器信号が出る確率として表されることになる.

今, 事象 A_i は実際の物理現象に対する「仮説」, 事象 B_i は実際の物理現象 「観測結果」という意味合いを持つものとして考える. これは Bayes 統計学的に は岩崎らによって導入された「並立仮説」という解釈と強く結びついている [14]. これは, 事象群 {A_i} を「観測結果を生成する複数の並立した仮説が存在し, そ のどれもが正しい仮説の可能性がある」と解釈する考え方である. この場合, Bayes 推定によって最終的に求められるのは並立したそれぞれの仮説の混合割 合であり, 仮説の事後確率 P(A_i|B_i) として与えられることになる. 本研究におい て考えられる物理現象として考えると, 事後確率 P(A_i|B_i) は「i 番目の減速材配 置条件下にある検出器が信号を出したとき, それがエネルギー分割 ΔE_iに属する エネルギーを持つ放射線に起因するものである」という事象が発生する確率を 表し, 実験値が得られた場合に, その結果が妥当となる放射線のエネルギース



Fig. 2-9 Bayes 推定によりエネルギースペクトルの推定値を求める手続き.

ペクトルの推定値を与える指標となる (Fig. 2-9). また,事後確率 P(B_i|A_j) は「エ ネルギー分割 ΔE_j に属するエネルギーを持つ放射線が検出器に入射したとき, *i* 番目の減速材配置条件下にある検出器が信号を出す」という事象が起こる確率 を示し,これは前節で述べた応答関数 r_{ij}と同じ意味合いを持つ量である.

2.3.3 Bayes 推定の放射線計測問題への適用

本節では,前節で述べた Bayes の定理による unfolding 問題の解釈を基に, Bayes 推定を実際の放射線計測問題へ適用するための手法について検討する.

まず,式 (2.12) を式 (2.4) に対応させて考えてみる. このとき,事象 A_j が 発生する確率 $P(A_j)$ (j = 1, n) は真のエネルギースペクトル**p**に,事象 B_i が発生す る確率 $P(B_i)$ (i = 1, m) は実験によって得られる測定値群**M**に相当する. 先ほど述 べたとおり $P(B_i|A_j)$ は応答関数 r_{ij} と対応する. しかしながら,これらの値が確率 の3 公理を満たすとは限らない. なぜならば,2.3.2 節内の解説では放射線が検出 器に入射した時に必ず検出器が信号を発するものとして unfolding 問題を解釈し ているが,一般的に応答関数 r_{ij} は「放射線が検出器に入射し,かつ検出器が信号 を発さない」という事象を含む量として得られるためである. したがって,まず これらの値を変形し,誤差の3 公理を満たす変数に置き換えることにする.

今,応答関数要素{r_{ij}}の*i*に対する総和 f_iを式 (2.13), {r_{ij}}を f_iで規格化した 応答関数要素{r'_{ij}}を式 (2.14) のように表す. 定義より,規格化応答関数要素 r'_{ij} は式 (2.15) を満たす.

$\mathbf{f}_j = \sum_{i=1}^m \mathbf{r}_{ij}$	(2.13)
$\mathbf{r}_{ij}' = \frac{\mathbf{r}_{ij}}{\mathbf{f}_i}$	(2.14)

$$\sum_{i=1}^{m} r'_{ij} = 1$$
(2.15)

このとき式 (2.14) にて \mathbf{r}_{ij} に積算されている \mathbf{f}_i の逆数は, 検出器の検出効率を補 正する因子, すなわち検出器に放射線が入射したが検出器が信号を発さなかっ た事象を補正するための係数となっている. 式 (2.4) は規格化応答関数行列 R' と検出効率行列 F をそれぞれ式 (2.16) 及び式 (2.17) のように導入し, 式 (2.18) のように変形される.

$$\mathbf{R}' = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{11}' & \cdots & \mathbf{r}_{1j}' & \cdots & \mathbf{r}_{1n}' \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{r}_{i1}' & \cdots & \mathbf{r}_{ij}' & \cdots & \mathbf{r}_{in}' \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{r}_{m1}' & \cdots & \mathbf{r}_{mj}' & \cdots & \mathbf{r}_{mn}' \end{bmatrix}$$
(2.16)

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_1 & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{f}_n \end{bmatrix}$$
(2.17)

 $\overrightarrow{\mathbf{M}} = \mathbf{R}' \cdot \mathbf{F} \cdot \overrightarrow{\mathbf{p}}$

(2.18)

ここで $\mathbf{F} \cdot \vec{\mathbf{p}}$ の各要素の総和 $|\mathbf{P}_{\mathbf{F}}|$ (式 (2.19))を用いて $\mathbf{F} \cdot \vec{\mathbf{p}}$ を規格化した補正スペ クトル $\vec{\mathbf{p}'}$ (式 (2.20))を導入する.

$$|\mathbf{P}_{\rm F}| = \sum_{j=1}^{n} f_j \mathbf{p}_j \tag{2.19}$$

$$\vec{\mathbf{p}'} = \frac{1}{|\mathbf{P}_{\mathrm{F}}|} \cdot \mathbf{F} \cdot \vec{\mathbf{p}} = \frac{1}{|\mathbf{P}_{\mathrm{F}}|} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{1} \cdot \mathbf{p}_{1} \\ \vdots \\ \mathbf{f}_{j} \cdot \mathbf{p}_{j} \\ \vdots \\ \mathbf{f}_{n} \cdot \mathbf{p}_{n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_{1}' \\ \vdots \\ \mathbf{p}_{j}' \\ \vdots \\ \mathbf{p}_{n}' \end{bmatrix}$$
(2.20)

定義より,補正スペクトル**p**'の要素{p'_j}は式 (2.21) を満たす.

$$\sum_{j=1}^{n} \mathbf{p}'_{j} = 1 \tag{2.21}$$

この時,式 (2.18) は式 (2.22) のように変換される.

$$\vec{\mathbf{M}} = |\mathbf{P}_{\mathrm{F}}| \cdot \mathbf{R}' \cdot \vec{\mathbf{p}'}$$
(2.22)

今,式 (2.22)の両辺の各要素は式 (2.23)のように表される.

$$M_{i} = |P_{F}| \sum_{j=1}^{n} r'_{ij} p'_{j}$$
(2.23)

*i*に対して M_iの総和|M|をとると式 (2.24) のように整理される.

$$|\mathbf{M}| = \sum_{i=1}^{m} \mathbf{M}_{i} = \sum_{i=1}^{m} \left(|\mathbf{P}_{\mathbf{F}}| \sum_{j=1}^{n} \mathbf{r}_{ij}' \mathbf{p}_{j}' \right) = |\mathbf{P}_{\mathbf{F}}| \sum_{j=1}^{n} \left\{ \mathbf{p}_{j}' \cdot \left(\sum_{i=1}^{m} \mathbf{r}_{ij}' \right) \right\} = |\mathbf{P}_{\mathbf{F}}|$$
(2.24)

|M|をもって式 (2.22) を規格化すると,式 (2.4) は最終的に式 (2.25) のように 整理できることになる.

$$\begin{bmatrix} M_1' \\ \vdots \\ M_i' \\ \vdots \\ M_m' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11}' & \cdots & r_{1j}' & \cdots & r_{1n}' \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{i1}' & \cdots & r_{ij}' & \cdots & r_{in}' \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1}' & \cdots & r_{mj}' & \cdots & r_{mn}' \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_1' \\ \vdots \\ p_j' \\ \vdots \\ p_n' \end{bmatrix} \begin{pmatrix} = \frac{1}{|\mathsf{M}|} \begin{bmatrix} \mathsf{M}_1 \\ \vdots \\ \mathsf{M}_i \\ \vdots \\ \mathsf{M}_m \end{bmatrix} \end{pmatrix}$$
(2.25)

このとき, {M'_i}, {r'_{ij}}, {p_j} はすべてその定義より確率の3公理を満たすので, こ れらを用いてベイズ推定を実際の放射線計測問題に適用することが可能となる. 実際の実験値に対する絶対値の補正は|M|を乗じることにより可能である.

2.3.4 Bayes 推定による unfolding の手続き

本節では,前節までの議論を踏まえ,実際の Bayes 推定による unfolding 処理の 手続きについて議論する.

まず, 事前確率 P(A_j)を Bayes 改訂の繰り返し適用を念頭に置いた表式に書 き換えるため, 評価スペクトル e_j^(k)を導入する. 添え字(k)は k 回目の Bayes 改訂 によって得られた評価スペクトルであることを表す. 導入された評価スペクト ル $\overrightarrow{\mathbf{e}^{(k)}} = \{e_j^{(k)}\} (j = 1, n)$ は式 (2.20) で定義された補正スペクトル $\overrightarrow{\mathbf{p}'}$ の推定値で あり, 真のスペクトル $\overrightarrow{\mathbf{p}}$ を評価するためのファクターである. したがって, $\overrightarrow{\mathbf{e}^{(k)}}$ は $\overrightarrow{\mathbf{p}'}$ の満たす条件, すなわち式 (2.26) を満足する必要がある.

$$\sum_{j=1}^{n} e_j^{(k)} = 1$$
(2.26)

このとき, 改訂後の評価スペクトル e_j^(k+1)(i) は式 (2.12) との対応から式 (2.27) のように表される.

$$\mathbf{e}_{j}^{(k+1)(i)} = \mathbf{M}_{i}' \cdot \frac{\mathbf{r}_{ij}' \mathbf{e}_{j}^{(k)}}{\sum_{j=1}^{n} \mathbf{r}_{ij}' \mathbf{e}_{j}^{(k)}}$$
(2.27)

ここで, 添え字(i)は測定スペクトルの i 群の値によって改訂された旨を表す. ス ペクトル全体については加算演算を行う.

$$\mathbf{e}_{j}^{(k+1)} = \sum_{i=1}^{m} \mathbf{e}_{j}^{(k+1)(i)} = \sum_{i=1}^{m} \left(\mathbf{M}_{i}' \cdot \frac{\mathbf{r}_{ij}' \mathbf{e}_{j}^{(k)}}{\sum_{j=1}^{n} \mathbf{r}_{ij}' \mathbf{e}_{j}^{(k)}} \right)$$
(2.28)



Fig. 2-9 スペクトル型 Bayes 推定法の解説図.

これによって Bayes 改訂された評価スペクトル e^{j(k+1)}が得られる.式 (2.27)では 式 (2.12)にはないファクターM'iを乗じている点に注意が必要である.これは Bayes の定理から導き出される式 (2.12)の意味を拡大解釈した操作であるが, 最終的に式で加算演算を行っており,複数の先行知識である e^{j(k)}に M'iで重みづ けを行う平均化の操作に相当する (Fig. 2-9).この操作は完全集積されたヒスト グラム型のデータから Bayes 推定を行う際に必要となる.東北大学の名内はこ の方法を「スペクトル型 Bayes 推定法」と呼んでいる [15].

e^{*j*^(*k*+1)の積分値について考えてみると, 変数 *i* と *j* は独立で積分順序が交換可能であることから,式 (2.29) が得られ,式 (2.27) によって分配される M'*i* の積分値は常に保存されることになる.}

$$\sum_{j=1}^{n} e_{j}^{(k+1)} = \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{m} \left(M_{i}' \cdot \frac{r_{ij}' e_{j}^{(k)}}{\sum_{j=1}^{n} r_{ij}' e_{j}^{(k)}} \right) = \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} \left(M_{i}' \cdot \frac{r_{ij}' e_{j}^{(k)}}{\sum_{j=1}^{n} r_{ij}' e_{j}^{(k)}} \right)$$
$$= \sum_{i=1}^{m} M_{i}' \times \sum_{j=1}^{n} \left(\frac{r_{ij}' e_{j}^{(k)}}{\sum_{j=1}^{n} r_{ij}' e_{j}^{(k)}} \right) = \sum_{i=1}^{m} M_{i}' \times \left(\frac{\sum_{j=1}^{n} r_{ij}' e_{j}^{(k)}}{\sum_{j=1}^{n} r_{ij}' e_{j}^{(k)}} \right) = \sum_{i=1}^{m} M_{i}'$$
$$\therefore \sum_{j=1}^{n} e_{j}^{(k+1)} = \sum_{i=1}^{m} M_{i}' = 1$$
(2.29)

2.3.5 スペクトル型 Bayes 推定における繰り返し回数の決定

Bayes 推定において重要な要素の 1 つに, Bayes 改訂の繰り返し回数を何回に決 定するべきか, ということがある.本研究では大阪大学の近藤によって開発さ れた,モンテカルロ法による Bayes 改訂数決定法を参考に,繰り返し回数を決定 した [16].

まず, 真の測定値 M からサンプル測定値列 Y^(h) = {Y_i^(h)}を作成した. Y_i^(h)は 正規分布 N(M_i, σ_i^2) に従うように乱数を用いて作成した. ここで, σ_i^2 は測定値の 分散, h は作成した Y_i^(h)のサンプル番号である. 本研究では h = 1000 とした. 次 に,全てのサンプル測定値数列 Y^(h)に対して k 回目の推定における推定値 $e^{(k)(h)} = \{e_j^{(k)(h)}\}$ (j = 1, n)を求めた. その後,式 (2.30) および (2.31) に従って $e^{(k)(h)}$ の平均値 $\overline{e^{(k)}} = \{\overline{e_i^{(k)}}\}$ と標準偏差 $\sigma_e^{(k)} = \{\sigma_{e_j}^{(k)}\}$ を求めた.

$$\overline{\mathbf{e}_{j}^{(k)}} = \frac{1}{h} \sum_{h} \mathbf{e}_{j}^{(k)(h)}$$
(2.30)

$$\left(\sigma_{e,j}^{(k)}\right)^{2} = \frac{1}{h} \sum_{h} \left(e_{j}^{(k)(h)} - \overline{e_{j}^{(k)}}\right)^{2}$$
(2.31)

 $\overline{\mathbf{e}^{(k)}}$ を式 (2.22) の $\overline{\mathbf{p}'}$ に代入すると, k 回目の推定における測定の推定値 $Z^{(k)} = \{Z_i^{(k)}\} (i=1,n)$ は式 (2.32) で与えられる. また, このとき $Z^{(k)}$ の標準偏差 $\sigma_Z^{(k)}$ = $\{\sigma_{Z_j}^{(k)}\}$ は式 (2.33) で与えられる.

$$Z_{i}^{(k)} = \sum_{j=1}^{n} r_{ij} \cdot \overline{e_{j}^{(k)}}$$
(2.32)

$$\left(\sigma_{\mathbf{Z},i}^{(k)}\right)^{2} = \sum_{j=1}^{n} r_{ij}^{2} \cdot \left(\sigma_{e,j}^{(k)}\right)^{2}$$
(2.33)

 $(\sigma_{Z,j}^{(k)})^2$ は Bayes 改訂の繰り返し回数 k に対して単調増加であることが近藤の研究によって明らかとなっている [16]. したがって,本研究では式 (2.34) を満たす最大の kを Bayes 改訂の繰り返し回数として決定した

$$\sum_{i=0}^{m} \sigma_i^2 \ge \sum_{i=0}^{m} \left(\sigma_{Z,i}^{(k)}\right)^2$$
(2.34)

この式は、測定の推定値 Z^(k)の分散の総和が実験値の分散の総和の値より大きくならない範囲でベイズ推定の繰り返しを続行するということを意味している.

最終的に k 回の Bayes 改訂によって得られた推定スペクトルの平均値 $e^{(k)}$ を補正 スペクトル $\vec{p'}$ の推定値として求める.式 (2.20) より,真のエネルギースペクト ル \vec{p} の推定値 \vec{e} は,式 (2.35) で求められる.

 $\vec{\mathbf{e}} = |\mathbf{P}_{\mathbf{F}}| \cdot \mathbf{F}^{-1} \cdot \overrightarrow{\mathbf{e}^{(k)}}$

(2.35)

巻末の付録に掲載したリスト 1 からリスト 3 に本研究で作成したモンテカ ルロ型 Bayes 推定 unfolding プログラムのソースコードを掲載したので, 具体的 なプログラムについてはそちらを参照していただきたい.

2.4 実現可能性の検討

液体減速型中性子スペクトロメータの実現により,初期スペクトルを必要とせ ず,正確な中性子スペクトルの測定することが原理的に可能であることを確認 するため,理想的な検出器モデルを用いた数値実験による実現可能性の検証を 行った.また,使用する液体減速材の候補として複数の液体材料について検討 することで,液体減速型中性子スペクトロメータを製作する上で液体減速材に 求められる条件についても検討した.本節ではその詳細について報告する.



Fig. 2-10 応答関数の計算モデル.

2.4.1 応答関数の評価

理想的な液体減速型中性子スペクトロメータの検出器モデルとは,(1) ある特定 の方向から中性子が照射されること,(2) 中性子が液体減速材を通って中性子検 出素子に入射すること,(3) 液体減速材以外の何かと相互作用した中性子(例:実 験室内の散乱中性子等)による検出器信号が一切無視できること,の以上3点を 満たすモデルである.Fig. 2-10 に本研究で使用した計算モデルを示す.これは前 述した3条件を満たす,最も基本的な液体減速型中性子スペクトロメータの検 出器モデルである.

本研究では、応答関数の評価計算と実験のシミュレーションによる解析を 行うため、汎用中性子輸送計算用モンテカルロコード MCNP-5 (A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5)を使用した[17]. これは中性子、光子、 電子の3次元輸送計算をモンテカルロ法によって行う計算コードである. MCNP-5 では連続エネルギー核データを利用でき、現在モンテカルロ計算コー ドの標準的なものとして広く利用されている. MCNP-5 は実験体系の形状を正確 にモデル化することができる.その体系内に、線源となる領域を設定し、粒子の 輸送を、モデルに含まれる物質の個々の反応断面積を考慮し、確率的にサンプ リング計算を行う.この計算を多数回行うことで、任意の体系全体に平均的に 発生する輸送現象のシミュレーション計算を行うことができる. MCNP-5 は各種 放射線と物質との相互作用計算のために核データライブラリーを必要とする. 本研究では日本原子力研究開発機構の評価済み核データライブラリー (Japanese Evaluated Nuclear Data Library)の中で最も新しい JENDL-4.0 に基づく ACE フォ ーマットファイルを使用した[18].

物質	軽水	重水	ホウ酸水	ホウ酸トリメチル
	H ₂ O	D ₂ O	H ₃ BO ₃ -aq	B(OCH ₃) ₃
融点 [°C (K)]	0 (273)	3.81 (277)	_	-34 (239)
沸点 [°C (K)]	100 (373)	101.4 (375)	_	68 (341)
¹⁰ B 密度 (mol/L)	_	_	0.174	1.784

表 2-1 可能性検討の段階で検討された材料.

応答関数を求めた手順を以下に示す.まず, MCNP-5 を用いて Fig. 2-10 に示 された体系をモデル化した.次に,エネルギー区間 *ΔE* で一様な分布を持つ準単 色平行中性子ビームを減速材側から中性子検出器に向けて照射した.この手順 を,入射する中性子のエネルギーを 0.01 eV から 20 MeV までの範囲で 10^{0.1}倍ず つ変化させながら繰り返し,検出器モデルの応答関数を計算した.検出器感度 は ³He(n,p)³H反応の反応率 (reactions / incident neutron flux intensity) と一致する ものとした.以上の手順に従って,減速材の厚さを 0 mm から 200 mm まで 1 mm ずつ変化させながら減速材厚さと入射中性子エネルギーに依存する検出器応答 関数を評価した.液体減速材としては,軽水,重水,ホウ酸水,ホウ酸トリメチ ルの4 種類を検討した.これらの材料を候補とした理由は,(1) 常温で液体であ る,(2) 入手が容易である,(3) 中性子に対する相互作用確率 (反応断面積) が異 なっており,それぞれの応答関数に差異を設けることが可能である,という条 件を満たしたためである.これらの材料の特性を表 2-1 に,それぞれを液体減速 材として用いた場合の応答関数の計算結果を Fig. 2-11 に示す.



Fig. 2-11 応答関数の計算結果. 液体減速材として (a) 軽水, (b) 重水, (c) ホウ酸 水, (d) ホウ酸トリメチルを用いた場合の計算結果をそれぞれ示す.

Fig. 2-11 より, 軽水の応答関数は, 減速材を厚くするほど熱, 熱外中性子に 対する感度が小さくなっていくが, 50 mm 程度からの変化は感度曲線の形状は変 わらずに絶対値のみが低下して行っていることや. その時 1 MeV 近傍の傾きが 変化を続けておりそれ以上のエネルギー領域の感度はほとんど変化していない ことが分かる.重水の応答関数は、熱中性子や高速中性子に対する感度変化が 軽水より小さく、減速材を厚くするほど全エネルギー領域における応答が一定 の値に近づいていくことが分かる.これは、重水素の断面積が軽水素より小さ く、重水素との散乱によるエネルギー変化量がより小さいためと思われる.ホ ウ酸水の応答関数は、熱・熱外中性子の感度変化量が軽水より大きく、また軽水 と異なり熱・熱外中性子の感度曲線の変化量がエネルギーごとに異なっており、 傾きが徐々に大きくなっていることが分かる.これは、ホウ素の(n,α)反応断面 積が大きいためである. ホウ酸トリメチルの応答関数は. ホウ酸水よりもさら に熱・熱外中性子の感度変化が大きく、低エネルギー側に大きく感度が低下する 領域が発生し、減速材を厚くするほどその領域の境目が高エネルギー側にシフ トしていったことが読み取れる. これは、ホウ酸トリメチルの方がホウ素の原 子数密度が大きいためである. 結論すると、応答関数の計算結果は用いる減速 材によってそれぞれ特性が異なったものが得られたことが分かる.

2.4.2 数值実験

最後に,液体減速型中性子スペクトロメータにより原理的に中性子スペクトル が測定可能であることを確認するため,数値実験を行った.手順は以下の通り である.

まず, スペクトルの推定を行う「真のスペクトル」を設定した (Fig. 2-12). 中 性子エネルギー領域の違いによる中性子スペクトル測定の実現可能性をそれぞ れ検証するため, 真のスペクトルとしては (A) 熱中性子領域, (B) 熱外中性子領 域, (C) 高速中性子領域にそれぞれピークを持つ3種類のエネルギースペクトル を用意した. 次に, Fig. 2-11 の応答関数と Fig. 2-12 の中性子スペクトルを用いて, 式 (2.3) より検出器応答の期待値**M**を計算した. これは, Fig. 2-10 に示した応答 関数計算モデルと同様の計算モデルで Fig. 2-12 に示したエネルギースペクトル を持つ中性子ビームを照射した場合に得られる検出器応答の期待値を計算する 操作に相当する. その後, 実験値を模擬するために, 計算した検出器応答に統計 誤差を加えた. 統計誤差は, 検出器信号の計数が十分に大きく, 正規分布に 従 うものとした. 統計誤差の大きさは誤差比が 0, 1, 2, 5%の場合について検討した.



Fig. 2-12 数値実験で用いた真のスペクトル.A: 熱中性子領域, B: 熱外中性子領域, C: 高速中性子領域にそれぞれピークを持つ3種類のスペクトルを設定した.

例として、各減速材材料を用いた検出器モデルでA, B, C のスペクトル測定を行った場合の検出器信号計数率の期待値と、それに対して5%の統計誤差を加えた場合のランダムサンプリング値を Fig. 2-13、Fig. 2-14、Fig 2-15 にそれぞれ示す. 各図の (a) のグラフが各シミュレーションにおける測定結果の期待値を、(b) の グラフがランダムサンプリングの結果を示している.本研究では全ての測定値 に一定の比率で誤差を加えたため、計数率がたかいほど誤差の絶対値は大きく なっている.最後に、Fig. 2-11 の応答関数と Fig. 2-13(b)、Fig. 2-14(b)、Fig. 2-15(b) の結果を用いてそれぞれ Bayes 推定法による unfolding を行うことで中性子スペ クトルを推定し、真のスペクトルと比較を行った.



Fig. 2-13 A: 熱中性子領域にピークを持つ中性子スペクトルに対する, 各減速材 ごとの検出器応答. それぞれ, (a) 検出器応答の期待値, (b) 5 %の統計誤差を加え た場合のランダムサンプリング値を示している.



Fig. 2-14 B: 熱外中性子領域にピークを持つ中性子スペクトルに対する, 各減速 材ごとの検出器応答. それぞれ, (a) 検出器応答の期待値, (b) 5 %の統計誤差を加 えた場合のランダムサンプリング値を示している.



Fig. 2-15 C: 高速中性子領域にピークを持つ中性子スペクトルに対する, 各減速 材ごとの検出器応答. それぞれ, (a) 検出器応答の期待値, (b) 5 %の統計誤差を加 えた場合のランダムサンプリング値を示している.

2.4.3 結果と考察

中性子スペクトル A に対する数値実験の結果を Fig. 2-16 から Fig. 2-19 に,中 性子スペクトル B に対する結果を Fig. 2-20 から Fig. 2-23 に,中性子スペクトル C に対する結果を Fig. 2-24 から Fig. 2-27 に示す.それぞれ, (a) 軽水, (b) 重水, (c) ホウ酸水, (d) ホウ酸トリメチルを用いた場合の結果を示している.この結 果より,各材料に対する考察を行った.

まず軽水を減速材として用いた場合の解析結果について記す.熱中性子ス ペクトルの解析では,加えた統計誤差が0%の時は比較的良い一致が見られたが, 1%以上の統計誤差を加えた場合熱中性子の分布が広がってしまい,元のスペク トルをよく再現しなかった.熱外中性子に対しても同様に加えた統計誤差が0% であったときは元のスペクトルをよく再現したが,加えた誤差が大きくなるに つれてスペクトルに振動が現れた.この傾向は高速中性子スペクトルの解析を 行った場合にも見られた.

重水を減速材に用いた場合は,いずれのスペクトルの解析を行った場合も, 統計誤差が0%の場合は比較的よく一致しているが,わずかでも誤差が加わると 元のスペクトルとは大きく異なる値を示す傾向が見られた.また,比較的一致 していた誤差0%の場合の結果も,他の材料と比べるとスペクトルの振動が目立 ち,あまり良い結果が得られなかった.これは主として応答関数の減速材厚さ



Fig. 2-16 A-(a): 熱中性子領域にピークを持つ中性子スペクトルに対する, 軽水 を減速材として使用した場合の数値実験の結果.



Fig. 2-17 A-(b): 熱中性子領域にピークを持つ中性子スペクトルに対する, 重水 を減速材として用いた場合の数値実験の結果.



Fig. 2-18 A-(c): 熱中性子領域にピークを持つ中性子スペクトルに対する, ホウ酸水を減速材として用いた場合の数値実験の結果.



Fig. 2-19 A-(d): 熱中性子領域にピークを持つ中性子スペクトルに対する, ホウ酸トリメチルを減速材として用いた場合の数値実験の結果.



Fig. 2-20 B-(a): 熱外中性子領域にピークを持つ中性子スペクトルに対する, 軽水 を減速材として用いた場合の数値実験の結果.



Fig. 2-21 B-(b): 熱外中性子領域にピークを持つ中性子スペクトルに対する, 重水を減速材として用いた場合の数値実験の結果.



Fig. 2-22 B-(c): 熱外中性子領域にピークを持つ中性子スペクトルに対する, ホウ酸水を減速材として用いた場合の数値実験の結果.



Fig. 2-23 B-(d): 熱外中性子領域にピークを持つ中性子スペクトルに対する, ホウ酸トリメチルを減速材として用いた場合の数値実験の結果.



Fig. 2-24 C-(a): 高速中性子領域にピークを持つ中性子スペクトルに対する, 軽水 を減速材として用いた場合の数値実験の結果.



Fig. 2-25 C-(b): 高速中性子領域にピークを持つ中性子スペクトルに対する, 重水を減速材として用いた場合の数値実験の結果.



Fig. 2-26 C-(c): 高速中性子領域にピークを持つ中性子スペクトルに対する, ホウ酸水を減速材として用いた場合の数値実験の結果.



Fig. 2-27 C-(d): 高速中性子領域にピークを持つ中性子スペクトルに対する, ホウ酸トリメチルを減速材として用いた場合の数値実験の結果.

に対する変化が他の減速材に比べて小さいためと考えられる.

ホウ酸水については,軽水と同様に加えた誤差が0%の場合はいずれのスペ クトルに対してもよい一致を示したが,1%以上の誤差を加えると,熱中性子の 場合はピークの分布が広がり,熱外・高速領域のスペクトルに対しては誤差が大 きくなるにつれて激しい振動が現れるようになった.軽水を用いた結果と比 較すると,高速中性子スペクトルに対しては軽水を用いた結果と比べても優劣

はつかなかったが,熱・熱外スペクトルについては軽水の結果に比べて誤差 を加えたときに現れる振動が緩やかであるように思われた.

ホウ酸トリメチルについては,熱中性子スペクトルの解析に対しては素晴 らしい一致を示した.特に、5%までの誤差を加えた場合であっても、ピークの 幅がわずかに広がっただけでスペクトルの振動がほとんど現れなかった点は特 筆できる.これはホウ酸トリメチルが含有する¹⁰B原子の量が多く,熱中性子に 対する反応断面積が大きいため,減速材厚さに対する応答関数の変分が大きく なり、わずかな減速材量の変化からでも入射中性子の持つエネルギーの違いに よる検出器応答の差異を評価することができたためと考えられる.熱外・高速ス ペクトルに対しては、傾向としては軽水・ホウ酸水と同様に、誤差が0%の時は 元のスペクトルとよく一致し、誤差を大きくするにつれて激しい振動が見られ るようになった.振動の度合いとしてはホウ酸水を用いた場合の結果と同程度 であった.

2.5 結論

2.4 節の結果より、液体減速型中性子スペクトロメータにより熱、熱外、高速領域の中性子スペクトルが測定可能であることが確認された.また、今回評価した材料の中ではホウ酸トリメチルが本手法で用いる減速材として最も適していると考えた.このような結果が現れた理由としては、用いた減速材の中性子吸収断面積が強く関係している可能性が考えられる.すなわち、ホウ酸トリメチルは本章で検討した他の材料に比べて¹⁰Bの含有量が多く、中性子吸収断面積が大きいため、減速材厚さ変化に対する応答関数の変化量が大きくなり、わずかな減速材厚さの変化からでも中性子エネルギーの差異に起因する検出器感度の違いを十分に評価することが可能であったため、正確な中性子スペクトルが評価できたのではないか、ということである.

測定に含まれる誤差による影響として,次のような傾向が見られた.まず, 測定値に誤差が含まれていない場合,いずれの減速材を用いた場合であっても, 再現性の精度に差があるもののおおむね真のスペクトルと解析スペクトルがよ く一致した.しかし,測定値に誤差を加えて解析を行った場合,解析スペクトル に振動が現れ,各材料を用いた場合に対する元のスペクトルの再現性の差は明 らかに顕著になった.最も振動の表れ方が緩やかであったホウ酸トリメチルを 減速材として用いた場合,熱中性子場に対しては測定誤差が5%まで,熱外・高 速中性子の比率が大きい場では2%までは解析スペクトルに現れる振動の幅が 比較的小さく,測定を行うことが可能である見込みを得た.

以上の結果より,十分大きな中性子反応断面積を持つ液体減速材を使用して,適切な形状の検出器を設計し,十分な精度で測定を行うことにより,液体減 速型中性子スペクトロメータの原理に基づいて中性子場のエネルギースペクト ル測定が可能であると結論した.

参考文献

- S. Tamaki, I. Murata, "Feasibility study on high-dynamic-range neutron spectrometer with continuously thick-adjustable moderator/absorber." in: *Proceedings of the 2013 Symposium on Nuclear Data, Tsuruga, Fukui, Japan, 2013, JAEA-Conf. 2014-002 INDC(JPN)-199*, 2015: 145-150.
- Tamaki, S., F. Sato, and I. Murata. "A feasibility design study on a neutron spectrometer for BNCT with liquid moderator." *Applied Radiation and Isotopes* 106 (2015): 41-44.
- Goorley, J. T., W. S. Kiger, and R. G. Zamenhof. "Reference dosimetry calculations for neutron capture therapy with comparison of analytical and voxel models." *Medical Physics* 29.2 (2002): 145-156.
- 4. Sakurai, Yoshinori, and Tooru Kobayashi. "Spectrum evaluation at the filter-modified neutron irradiation field for neutron capture therapy in Kyoto University Research Reactor." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 531.3 (2004): 585-595.
- 5. Auterinen, Iiro, et al. "Measurement of free beam neutron spectra at eight BNCT facilities worldwide." *Applied radiation and isotopes* 61.5 (2004): 1021-1026.
- 6. Bramblett, Richard L., Ronald I. Ewing, and T. W. Bonner. "A new type of neutron spectrometer." *Nuclear Instruments and Methods* 9.1 (1960): 1-12.
- 7. Thomas, D. J. "Neutron spectrometry." Radiation Measurements 45.10 (2010): 1178-

1185.

- Johnson, T. L., et al. "Recent advances in Bonner sphere neutron spectrometry." Proceedings of the topical conference on theory and practices in radiation protection and shielding. Volumes 1-2. 1987.
- Mukherjee, Bhaskar. "A high-resolution neutron spectra unfolding method using the genetic algorithm technique." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 476.1 (2002): 247-251.
- 10. Braga, Cláudia C., and Mauro S. Dias. "Application of neural networks for unfolding neutron spectra measured by means of Bonner spheres." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 476.1 (2002): 252-255.
- 11. Sweezy, Jeremy, Nolan Hertel, and Ken Veinot. "BUMS—Bonner sphere Unfolding Made Simple: an HTML based multisphere neutron spectrometer unfolding package." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 476.1 (2002): 263-269.
- 12. Bedogni, Roberto, et al. "FRUIT: an operational tool for multisphere neutron spectrometry in workplaces." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 580.3 (2007): 1301-1309.
- Iwasaki, S. "A new approach for unfolding problems based only on the Bayes' theorem." 9th International Symposium on Reactor Dosimetry, Prague, Chezk, Sep. 2-6, 1996.
- 14. 岩崎信, "ベイズ統計的手法による放射線逆問題の解法" Technical report, 平成 8~10 年度 科学研究費補助金萌芽的研究 研究成果報告書, 1999.
- 15. 名内泰志, "数十MeV中性子に対する荷電粒子生成反応に関する実験的研究" PhD thesis, 東北大学大学院工学研究科 (1998).
- 16. 近藤恵太郎, "軽元素の核融合中性子誘起荷電粒子放出反応に関する実験的 研究" PhD thesis, 大阪大学大学院工学研究科 (2008).
- 17. Brown, Forrest B. "MCNP–A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5." Los Alamos National Laboratory, Oak Ridge, TN (2003).
- 18. Shibata, Keiichi, et al. "JENDL-4.0: a new library for nuclear science and

engineering." Journal of Nuclear Science and Technology 48.1 (2011): 1-30.

Knoll, Glenn F. Radiation detection and measurement, 4th Edition. John Wiley & Sons, 2010.

第3章 プロトタイプの設計と原理の実験的検証

3.1 緒言

前章では、液体減速型中性子スペクトロメータの実現可能性を、理想条件にお ける検出器モデルを用いて数値計算的に検討した.しかしながら、本装置を実 際に用いる場合には、スペクトロメータの構造や、実験室壁からの中性子の散 乱、そして評価済み核データの評価精度等により、スペクトルの測定精度の悪 化が予想される.したがって、液体減速型中性子スペクトロメータの開発にお いて、その実現可能性を実験的に明らかにすることは極めて重要である.

本章では、液体減速型中性子スペクトロメータのプロトタイプ検出器の設計・製作を行い、それを用いた実験を通して液体減速型中性子スペクトロメータの測定原理の実現可能性を検証した結果について述べる [1].

3.2 プロトタイプスペクトロメータの設計

本節では液体減速型中性子スペクトロメータのプロトタイプ検出器の設計とそ の応答関数の評価結果について述べる.本研究で開発しているスペクトロメー タは,特定の方向から入射する中性子に対して,液体減速材を通過させたのち 中性子検出器で計数する測定実験を実施し,その実験データを基に検出器の応 答関数から入射中性子スペクトルを導出する装置である.以下にその詳細を示 す.

プロトタイプスペクトロメータの設計を Fig. 3-1(a)に示す.本装置は中性子 検出器として直径 5 cm,内圧 1 MPa の ³He 充填球形比例計数管を使用した.液 体減速材としてはテトラフルオロホウ酸ナトリウム (NaBF4) 水溶液を使用した. これは, NaBF4 は水への溶解度が大きく (109 g / 100 ml),溶液内の ¹⁰B 原子の密 度を高めることができ,かつ前章で検討したホウ酸トリメチルと比べると可燃 性などがないため取り扱いが容易であったためである.液体減速材の厚さは容 器に注入する液量によって容易に調整することができる.本研究では水 600 g に 対して純度 98%の NaBF4 試薬を 500 g 混合して液体減速材を製作した.このと きの溶液の比重は 1.35 g/cc であった.液体減速材および比例計数管はカドミウ ム,ホウ酸,そしてポリエチレンを周辺に設置することによって散乱中性子等



Fig. 3-1. プロトタイプスペクトロメータの設計. (a) Spectrum data measurement detector (SDM 検出器) と (b) Background compensation detector (BGC 検出器) を それぞれ示す.

から遮蔽し, バックグラウンド信号の低減に努めた.本章ではこれをスペクト ル測定検出器 (spectrum data measurement detector, SDM 検出器) と呼称する.ま た, Fig. 3-1(b) に SDM 検出器と同時に設計したバックグラウンド補正検出器 (Background compensation detector, BGC 検出器) の設計を示す. BGC 検出器は文 字通り, 散乱中性子や漏れ中性子による検出器信号を補正するための検出器で あり, SDM 検出器 (Fig. 3-1(a)) と比較すると, 減速材及びカドミウム板, そして その周辺の隙間を埋めているホウ酸粉末を, 鉄, ポリエチレン, カドミウム及び ホウ酸粉末で構成される遮蔽体に置き換えたものであることが分かる.

具体的なバックグラウンド信号の補正は以下の手順で行われる.まず,SDM 検出器を用いて,減速材の厚さを *Li* ($1 \le i \le m$, m=56) とした場合の実験をそれ ぞれ実施し,実験値 *M_{S,i}* を求める.次に,BGC 検出器を用いて測定実験を行い, バックグラウンド信号値 *M_{BG}* を求める.最後に,*M_{S,i}* から *M_{BG}* を減算し,正味の 測定値 *M_i* を求める.検出器入口以外の場所から入射する中性子に対する SDM 検出器と BGC 検出器の感度は,その構造が同じであることから等価であるため, この手順によりバックグラウンド信号による計数を補正することができる.こ れは後述する応答関数の計算についても同様に適用される.

スペクトロメータを設計した後, MCNP-5 [2] を使用してスペクトロメータ をモデル化し,その検出器応答を求めることで応答関数の計算を行った.検出 器応答は比例計数管内の ³He(n,p)³H 反応の反応率が検出器信号の計数に一致す るものとして求めた. SDM 検出器の計算モデルについては, NaBF4 水溶液の厚み を 0 mm から 260 mm まで, 0 mm から 26 mm までは 1.04 mm ごとに, 26 mm か ら 104 mm までは 20 mm ごとに,そして 104 mm から 260 mm までは 10.4 mm ご とに変化させたものをそれぞれモデル化した. 260 mm という厚さは減速材容器 に 500 ml の溶液が注入された場合の液体減速材の厚さを示している.入射中性 子のエネルギーは,あるエネルギー区間 ΔE_j ($E_{j1} \le E \le E_j$, $1 \le j \le n$, n = 56)内で一 様関数である分布を持つものとした.これにより, ΔE_j に含まれるエネルギーEを 持つ中性子に対する検出器応答の平均値を,それぞれの区間 ΔE_j について求めた. 各エネルギー区間のエネルギービン E_j ($0 \le j \le n$) は, j = 0 について求 んた. 各エネルギー区間のエネルギービン E_j ($0 \le j \le n$) は, j = 0 についてよ $E_0 = 0$ eV とし, $E_l = 1$ meV から $E_{36} = 1$ MeV までは各桁に 3 個ずつエネルギー区間を持つ 等比数列 (j = 1-36), $E_{36} = 1$ MeV から $E_{56} = 20$ MeV までは 1 MeV ごとに区間を 持つ等差数列 (j = 36-56) となるように定義した.

本研究で開発しているスペクトロメータは円筒形の検出器であり,ボナー 球のように球形ではないため,検出器に入射する中性子の特性,すなわち中性 子の入射位置や入射角度に検出器感度が依存する可能性が考えられた.そこで 本研究では(a) 直径 2 cmΦ, 平行中性子ビーム, (b) 直径 2 cmΦ, 2π 方向等方中性 子源,(c) 直径 20 cmΦ, 平行中性子ビーム,(d) 直径 20 cmΦ, 2π 方向等方中性子 源の4種類の線源条件を, 応答関数を評価する条件として検討した.入射中性子 のフラックスは1/cm²/s として規格化した.BGC 検出器についても同様の線源 条件で検出器応答を計算した.

SDM 検出器の検出器応答を $R_S = \{R_{S,ij}\}$ ($1 \le i \le m, 1 \le j \le n, m = n = 56$), BGC 検出器の検出器応答を $R_{BG} = \{R_{BG,j}\}$ と表すと、このスペクトメータの応答関数 は式 (3.1) のように、すべての i, j について SDM 検出器の応答から BGC 検出器 の応答を減算することで求められる.

$$\mathbf{R} = \{R_{ij}\} = \{R_{S,ij} - R_{BG,j}\}$$
(3.1)



Fig. 3-2. 液体減速型中性子スペクトロメータのプロトタイプ検出器の応答関数. 線源条件として, (a) 直径 2 cm Φ , 平行中性子ビーム, (b) 直径 2 cm Φ , 2 π 方向等 方中性子源, (c) 直径 20 cm Φ , 平行中性子ビーム, (d) 直径 20 cm Φ , 2 π 方向等方 中性子源の 4 種類の条件を検討した.

本研究では最終的に, 56 個のエネルギー分割に区切られた 56 種類の検出器 応答が応答関数として得られた.これを線源条件 (a), (b), (c), (d)についてそれぞ れ求めた結果を Fig. 3-2 に示す.

3.3 実験

液体減速型中性子スペクトロメータのプロトタイプ設計とその応答関数計算を 行った後,その製作精度や性能を評価し,本装置の原理についての検証を行う ための中性子測定実験を実施した.本節ではその詳細を述べる.

3.3.1 実験体系

実験体系の外観と実験の様子を Fig. 3-3 に,実験体系のモデル図を Fig. 3-4 に示 す. この実験では,黒鉛ブロックの上にポリエチレン,鉛,カドミウムで製作し たコリメーターを設置し,さらにその上にスペクトロメータを設置して測定実 験を行った.中性子源としては,1 個あたり 4.0×10⁶ 個 の 中性子を放出する



Fig. 3-3 実験体系の外観と実験の様子.



Fig. 3-4 実験体系のモデル図.

AmBe 中性子源を 4 個, Fig. 3-4 に示した位置に並べて設置して使用した. この実 験体系は, AmBe 線源から放出された中性子を黒鉛により減速させ, その後コリ メーターを通すことでスペクトロメータ中心部に下部から入射する中性子以外 を遮蔽し, 中心部に, 収束された前方性の高い低エネルギー中性子を入射させ ることを目指した設計である. AmBe 線源はコリメーター孔の中心からずらして 配置することにより, 線源から放出された高速中性子が直接検出器に入射しな いよう工夫されている.この実験体系によって得られる入射中性子場の特性の MCNP-5 による計算結果を Fig. 3-5, Fig. 3-6, Fig. 3-7 に示す.

Fig. 3-5 は入射中性子場の中性子束強度径方向空間分布を, Fig. 3-6 は入射中 性子場中心部 (Fig. 3-4 の点 T) の中性子束強度の角度分布を, Fig. 3-7 は入射中 性子場中心部の中性子エネルギースペクトルをそれぞれ示している. これらの 図より,本実験体系により,コリメーター孔径である直径 20 mm 以内に収束さ れた,極めて前方性が強く熱中性子領域に大きなピークを持つ中性子ビームが 設置したスペクトロメータに入射したことが読み取れる.



Fig. 3-5. 照射中性子場の径方向強度分布.

3.3.2 実験手順

本節では実際の実験手順について説明する.まず始めに, Fig. 3-3 に示した通り の実験体系において,スペクトロメータの減速材容器に注入する NaBF4 水溶液 の量を 0 ml から 500 ml まで,すなわち減速材の厚さを 0 mm から 260 mm まで 変化させながら中性子測定実験を実施し,SDM 検出器の計数率 $M_S = \{M_{S,i}\}$ を求 めた.減速材体積の変化量,すなわち測定を実施した時の減速材の厚さは 3.2 節 の応答関数計算で示した減速材厚さの変化量と同じとした.各測定では計数値 として 10000 カウントを目途に測定を行った.その後,BCG 検出器を使用して同 様の手順でバックグラウンド信号の計数率 M_{BG} を測定し,これを M_S の各要素か ら減算し,正味の計数率 $M = \{M_i\}$ を求めた.最後に,求めた正味の計数率Mと Fig. 3-2 に示した応答関数を用いて 2.3 節に示した手順に従ってモンテカルロ型 Bayes 推定法による unfolding を行い,中性子のエネルギースペクトルを評価し た.



Fig. 3-6. 照射中性子場中心部の中性子束角度分布.



Fig. 3-7 検出器に入射する中性子場のエネルギースペクトル.



Fig. 3-8 検出器応答の実験値とシミュレーション計算値.

3.3.3 実験結果と考察

正味の計数率Mの測定結果と MCNP-5 によるシミュレーション結果を Fig. 3-8 に示す.この結果より、シミュレーション計算の結果は、特に減速材の量が 30 ml 以下 (減速材厚さが 15.6 mm 以下)の時に実験値とよく一致することが読 み取れる.この測定結果と Fig. 3-2 に示した応答関数を用いて、第2章第3節で 示した手順に従って unfolding を行い、中性子スペクトルの評価値 Φ_a 、 Φ_b 、 Φ_c 、 Φ_d を求めた. Unfolding の結果を Fig. 3-9 に示す.

Unfolding によって得られた結果は, MCNP-5 を用いて計算した, Fig. 3-4 に 示した点Tの中性子スペクトル Φ_{T} と比較し,使用する応答関数に適した条件を 検討した.ここで,中性子スペクトル間の違いについて定量的に考察を行うた め,式 (3.2) によりスペクトル評価関数*A*を求めた.



Fig. 3-9. 中性子スペクトルのアンフォールディング結果. Φ_{T} はMCNP-5 による シミュレーションで得られた照射場の中性子スペクトル設計値を, Φ_{a} , Φ_{b} , Φ_{c} , Φ_{d} はそれぞれ Fig. 3-2 に示した応答関数(a), (b), (c), (d)を用いて unfolding した 結果を示す.

$$A = \sqrt{\frac{1}{\log\left(\frac{E_n}{E_0}\right)} \sum_{j=1}^n \left[\cdot \int_{E_{j-1}}^{E_j} \left\{ \ln\left(\frac{\mathbf{\Phi}_m(E)}{\mathbf{\Phi}_{\mathbf{T}}(E)}\right) \right\}^2 \cdot d(\log E) \right]}$$
(3.2)

Φr は中性子スペクトルの真値であり、本研究においては MCNP-5 による計算 値とした. また, Φ_m には Φ_a , Φ_b , Φ_c , Φ_d をそれぞれ代入した. この関数は, 統 計学における分散の求め方を基にしており, 中性子のエネルギーとその強度の 違いを対数スケールで比較するためのものである. **Φ**_mに代入したスペクトルが **Φ**_Tとよく一致しているほどその値が小さくなる.中性子エネルギーの対数値を 用いた理由は、測定している中性子のエネルギー範囲が 1 × 10⁻⁹ から 20 MeV までと大変広範囲にわたっていることから、各桁のエネルギーについて等価に 評価することがより実際的な評価関数を作成することにつながると考えたため である. また, 中性子強度比の評価にも対数値を用いている理由は, Fig. 3-9 から 読み取れるように unfolding の条件によって中性子スペクトルの強度が大きく異 なっているが、線形的な取り扱いによってこの違いを評価すると、 Φ_m が Φ_T と比 べて過小評価された時に評価に不具合が生じるためである.具体的には、 Φ_m の 値が**Φ_Tに比べて十分に小さく無視できる場合**,**Φ_Tの値それ自体が評価関数の値** として出力されてしまい, unfolding 結果の精度を評価することが困難であった ためである.対数を取ることにより、 Φ_m と Φ_T の違いの比率を評価量として用い ることができるようになり、この問題を解決することができる. 例えば、**Φ**_mが Φ_{T} と比べてちょうど 10 倍または 10 分の 1 になるとき,評価関数 A の値は 1 にな る. すなわち, 10 倍または 10 分の 1 であるということを等価に表現することが できる. また, 100 分の1 になった時は A の値は2 に, 1000 分の1 になった時に は3になる. すなわち, Φ_m が Φ_T と比べて過小評価されている場合でもその違い を評価することができる.この評価関数Aを用いることにより, unfolding により 得られた結果**Ф**а, Фь, Фс, Фдの精度を定量的に比較し, このプロトタイプスペ クトロメータの応答関数を評価するにあたって適した条件を検討した.

 $E \leq 0.5 \text{ eV}, 0.5 \text{ eV} < E \leq 10 \text{ keV}, 10 \text{ keV} < E \leq 100 \text{ keV}, 100 \text{ kev} < E \leq 1 \text{ MeV},$ E > 1 MeV の領域における各中性子スペクトルの評価関数 A の値を Fig. 3-10 に 示す. この結果より, 1 MeV 以下の領域においては Φ_a の結果が最も Φ_T とよく一 致していることが評価関数 A の値から明らかとなった. これは Fig. 3-5 及び Fig. 3-6 に示した通り,本実験ではスペクトロメータに直径 20 mm 以内にコリ メートされた強前方性の中性子場を入射させており,この条件は 応答関数計算



Fig. 3-10 各エネルギー領域におけるスペクトル評価関数 A の値.

における線源条件 (a) とよく一致する条件であるため,実験結果が計算値と良い一致を示したものと考えられる.

一方で、1 MeV 以上の領域では Φ_a の結果は芳しくなく、むしろ Φ_c または Φ_d の方が良い結果であることが示されている. これは、Fig. 3-5 に示される通り、高速中性子領域については中心部に比べてコリメート半径外の中性子束強度が2分の1程度の強度を保っていることが原因ではないかと推察される. すなわち、高速中性子は透過力が大きいために、減速材部以外の面からスペクトロメータに入射した後に側面部で散乱されて検出器ないし減速材に入射することにより信号が発生したため、この成分が検討されていない(a)よりも線源面積が大きく減速材面以外から多くの中性子が入射する(c)や(d)の条件で unfolding を行った方が正確に評価できた可能性を示唆している.

また, Fig. 3-8 に示した結果の通り, 減速材の厚さが 30 mm よりも厚い時の 実験結果と計算結果の一致が悪いことも1 MeV 以上の中性子スペクトルの測定 精度が悪いという結果に関連している可能性がある. Fig. 3-8 の結果は, 減速材 の厚さが 30 mm を超えるとき, 実験結果に比べて計算結果が 10 分の1 程度に 過小評価されており, 透過力が強く減速材量が多い条件下での応答関数の値が 高い高速中性子による信号が計算値では過小評価されている, ということを示 している. この理由としては, 計算によって求めた検出器応答が, 実験で使用 した検出器の実際の感度に比べて高速中性子に対する応答が過小評価されてい
る可能性が考えられる. この具体的な原因としては, 比較的中性子断面積の小 さいガラス製の減速材容器や検出器を製作するときに使用したポリエチレンブ ロックの隙間を通過して検出器に入射した, ストリーミング中性子の影響があ ると思われる. 差異は, 計算にはそこまで詳細にモデル化されていないことに より発生したと考えている. 以上の原因から, 実験の測定値の高速中性子によ る寄与が過大評価された結果, 1 MeV 以上の中性子束強度の過大評価につながっ た可能性がある.

以上の結果より、本装置は適切な応答関数を評価することにより、1 MeV 以 下の広範な中性子スペクトルを非常に高い確度と精度で測定可能であることが 示唆された. 一方で, 本装置の応答関数を評価するにあたっては, 応答関数を計 算するためのシミュレーション計算における線源条件が極めて重要であり.不 適切なものを選ぶと場合によっては数10倍から100倍以上の違いが表れてしま うことも分かった.しかしながら、応答関数を評価する際の適切な線源条件は、 本研究の結果からもわかる通り,実際の実験でスペクトロメータに入射する中 性子場の特性に強く依存している. この事実は非常に重要である. なぜならば、 筆者が本装置の測定対象として想定している BNCT 用加速器中性子源装置の照 射中性子場は、その設計に依存した極めて複雑な特性、 すなわち複雑な空間強 度分布や角度分布を持った中性子場であり、これを事前に、しかも測定装置ご とに評価したうえで中性子スペクトルの測定を行うということは現実的ではな く.かつ個々に異なる手法でスペクトルを評価することになるため得られる結 果の一般性についても問題が現れうるためである. したがって. スペクトロメ ータの実機設計においては、この装置を使用するための一般性を持たせるため、 入射中性子場の特性を無視できるか、あるいはその影響を低減する何らかの工 夫がなされていることが望ましい. 以上までの検討結果を踏まえたスペクトロ メータ実機の設計とその具体的な工夫については第4章で述べる.

3.4 結論

本章では液体減速型中性子スペクトロメータの実現可能性とそのために必要な 条件を検討するため、スペクトロメータのプロトタイプの設計・製作を行い、本 装置の原理の実験的検証を行った.その結果、本装置では適切な応答関数を評 価することにより1 MeV 以下の領域の中性子スペクトルを高い精度で測定可能 であることを実験的に確認した.一方で、本装置の応答関数は入射する中性子 場の強度分布や角度分布に極めて強く依存しており、装置の完成のためには検 出器応答関数の入射中性子場特性に対する依存性を除去ないしは低減すること が可能な検出器設計が必要であることも明らかとなった.

次章では、本章の結果を踏まえ、液体減速型中性子スペクトロメータの実 機設計の結果について述べる.

参考文献

- S. Tamaki, F. Sato, I. Murata, "Study on a liquid-moderator-based neutron spectrometer for BNCT —Development and experimental test of the prototype spectrometer", *Nucl. Instr. and Meth. A*, 870, pp. 90 – 96 (2017).
- 2. Brown, Forrest B. "MCNP–A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5." *Los Alamos National Laboratory, Oak Ridge, TN* (2003).

第4章 改良型中性子スペクトロメータの設計

4.1 緒言

本章では,第3章の液体減速型中性子スペクトロメータのプロトタイプを用いた実験的研究によって得られた知見を基に行った,本装置の改良設計及び数値実験による性能評価の結果について述べる[1].

第3章で、液体減速型中性子スペクトロメータには応答関数に入射する中 性子場の特性に対する強い依存性があること、そのため、本装置の完成のため にはスペクトロメータの設計それ自体に入射中性子場の特性による影響を除去 ないし低減する工夫を盛り込む必要があることが明らかとなった. そのことを 踏まえ、中性子スペクトロメータ前方にプリコリメータを設置し、検出器へ入 射して信号を発生させる入射中性子の成分を制限することで、入射中性子場の 特性、すなわち入射中性子場の空間強度分布や角度分布に依存しないスペクト ロメータの設計を目指した. 設計したスペクトロメータは、2 段階の数値実験に よりその性能を検証した.まず、第3章のプロトタイプスペクトロメータとの性 能の比較を行うため, 第 3 章の実験体系と同様の体系でスペクトル測定をシミ ュレーションし、改良型スペクトロメータによるスペクトル測定のシミュレー ション結果を第3章に示したプロトタイプスペクトロメータによる中性子スペ クトルの測定結果と比較することで、プリコリメータの有効性を検証するとと もに改良型スペクトロメータの性能及び特性を評価した.その後、改良型スペ クトロメータが中性子場特性に依存することなく性能を発揮することを確認す るため、複数種類の実験体系で同様にシミュレーションによる検証を行い、そ の性能を評価した、本章ではその結果について述べる、

4.2 改良型中性子スペクトロメータの設計

本節では,前章で得られた知見を基に,入射中性子に対する有感位置や有感角 度を制限するためのプリコリメータを取り付けた,改良型の液体減速型中性子 スペクトロメータの設計と,その応答関数の評価結果について述べる.

液体減速型中性子スペクトロメータの設計改良案を Fig. 4-1 に示す.本装置 と第3章で使用したプロトタイプスペクトロメータの違いは3点ある.すなわ ち,(1)液体減速材部分の前方に,高密度ポリエチレンとホウ素添加ポリエチ



Fig. 4-1 液体減速型中性子スペクトロメータの設計改良案

レン,そしてカドミウム板を用いて製作した中性子用プリコリメータを設置し たこと,(2) BG 信号の補正法を,バックグラウンド補正検出器を使用する方式か らプリコリメータに長さ 30 cm の鉄製のシャドーバーを挿入する方式に変更し たこと,(3) 減速材容器周辺のホウ酸粉末の層をポリエチレンに変更したことで ある.1 点目は,前節で述べた入射中性子に対する検出器応答依存性を低減する ための変更である.(n,2n) 反応による入射中性子場の乱れを避けるため,鉄や鉛 などの重原子核を含む材料の使用を避け,水素やホウ素等の軽核を主として遮 蔽材の材料としている.2 点目は,検出器の内部構造に空間的な余裕ができたこ とを受けて,検出器構造に大きな変更を加えない,より簡便なバックグラウン ド信号の補正方法を検討した結果,入射中性子が通るコリメータ孔部分を遮蔽 し,その差分を取る手法が実験的にも簡便で効率的であると考えたためである. 3 点目の変更は,2 点目の変更を受けて減速材部分周辺の製作性や交換性を考慮 する必要がなくなり,より高速中性子に対する遮蔽能力の高い材質に交換した ものである.

次に, MCNP-5 [2]を用いたモンテカルロ計算により検出器の応答関数の計 算を行った. 検出器応答は前章と同様に ³He(n,p)³H 反応率を用いて計算し, 減速 材の厚さを 0 mm から 250 mm まで, 0 mm から 25 mm までは 1 mm ごとに, 25 mm から 100 mm までは 5 mm ごとに, 100 mm から 250 mm までは 10 mm ご とに変化させた場合の応答関数を計算した.本章では,改良型スペクトロメー タの応答関数の入射中性子特性に対する依存性について検証を行うため,次の (a) から (i) に列挙した,線源条件の線源面積や中性子入射角度がそれぞれ異な る9条件についてそれぞれ応答関数の計算を行った.

- (a) 直径 50 mmΦ, 2π 方向等方線源
- (b) 直径 50 mmΦ, 強前方性線源 (cosθ > 0.9995)
- (c) 直径 50 mmΦ, 平行中性子ビーム
- (d) 直径 100 mmΦ, 2π 方向等方線源
- (e) 直径 100 mmΦ, 強前方性線源 (cosθ > 0.9995)
- (f) 直径 100 mmΦ, 平行中性子ビーム
- (g) 直径 200 mmΦ, 2π 方向等方線源
- (h) 直径 200 mmΦ, 強前方性線源 (cosθ > 0.9995)
- (i) 直径 200 mmΦ, 平行中性子ビーム

(b), (e), (h)の強前方性線源について cos *θ* > 0.9995 に中性子を照射した場合を検討 した理由は、コリメータ孔の入口部から比例計数管を見る立体角のなす角が cos *θ* = 0.9995 となるためである.

入射中性子束の強度 *I* [neutrons]は,線源面積 *S* と Fig. 4-2 に示した中性子放 出角度に対する角度成分規格化係数 *W(θ)*の積 *I* (式(4.1))を用いて規格化した.

 $I = S \cdot W(\theta)$

(4.1)



Fig. 4-2 中性子放出角度 θ と角度成分 規格化係数 *W*(θ)の関係.



Fig. 4-3 コリメータ孔から比例計数管 を見るの正味の立体角Ωmの概念図.

角度成分規格化係数 $W(\theta)$ は、コリメータ孔内部に、入射角 θ のなす立体角に対 して均一な立体角密度の中性子が入射した場合に、中性子が比例計数管を通過 する確率の逆数として定義した.中性子の放出角が大きく、比例計数管が全て その立体角内に入る場合には、中性子放出角の立体角 Ω とコリメータ孔から比 例計数管を見る正味の立体角 Ω_m (Fig. 4-3) の比率の逆数 (Ω / Ω_m) として与 えられ、中性子の放出角度が0度、すなわち、平行ビーム線源を使用する場合は、 本装置のコリメート孔径が比例計数管径と一致することから、全ての照射中性 子が比例計数管に入射するようになり、 $W(\theta)$ の値は 1 となる.角度成分規格化 係数とはすなわち、中性子放出角の広がりによって生じる中性子照射密度の減 少を、コリメータ孔の内側に平行ビームを入射したときに比例計数管に入射す る中性子数で補正し、比例計数管位置における空間中性子束強度を (1/S)[cm⁻²] に規格化するための係数である.このことから、式 (4.1) とはすなわち、比例計 数管一の空間中性子束強度を 1 / cm²に規格化する操作であることが分かる.角 度成分規格化係数を解析的に求めることは極めて困難であるため、本研究では モンテカルロ計算によりその値を求めた.

以上までの条件による応答関数の計算結果を Fig. 4-4 の(a)~(i)に示す.



Fig. 4-4(a) 応答関数 (a), 線源条件が直径 50 mmΦ, 2π 方向等方線源の計算結果.



Fig. 4-4(b) 応答関数 (b), 線源条件が直径 50 mmΦ, cosθ>0.9995 の強前方性線源 の計算結果.



Fig. 4-4(c) 応答関数 (c), 線源条件が直径 50 mmΦ, 平行ビーム線源の場合の計 算結果.



Fig. 4-4(d) 応答関数 (d), 線源条件が直径 100 mm Φ , 2 π 方向等方線源の計算結果.



Fig. 4-4(e) 応答関数 (e), 線源条件が直径 100 mm Φ , cos θ > 0.9995 の強前方性線 源の計算結果.



Fig. 4-4(f) 応答関数 (f), 線源条件が直径 100 mm Φ, 平行ビーム線源の計算結果.



Fig. 4-4(g) 応答関数 (g), 線源条件が直径 200 mm Φ , 2 π 方向等方線源の計算結果.



Fig. 4-4(h) 応答関数 (h), 線源条件が直径 200 mm Φ , $\cos\theta > 0.9995$ の強前方性線 源の計算結果.



Fig. 4-4(i) 応答関数 (i), 線源条件が直径 200 mm Φ, 平行ビーム線源の計算結果.

4.3 数値実験 1: プロトタイプスペクトロメータとの比較

前節で設計した改良型スペクトロメータの性能を検証するため,まず前章の実験で使用した実験体系で測定を行った場合のシミュレーションを行い,そのスペクトル評価結果とプロトタイプスペクトロメータを使用した場合のスペクトル測定結果と比較することにより,測定結果の入射中性子場の特性に対する依存性について評価を行った.本節ではその結果を述べる.

4.3.1 シミュレーション体系

Fig. 4-5 に本節で使用した実験体系を示す. これは第3章で使用した実験体系の スペクトロメータ部分を本章で設計した改良型スペクトロメータに置き換えた 体系である.本節では図中の点 T における中性子場のエネルギースペクトルを 測定することを目標とし,以下の手順で数値実験を行った.

まず MCNP-5 を用いてモデル化した Fig. 4-5 の体系にて、スペクトロメータ の減速材の厚さを 0 mm から 250 mm まで変化させて、照射測定のシミュレーシ ョンとバックグラウンド信号の補正計算を行い、改良型スペクトロメータの計 数率計算値を求めた (Fig. 4-6). その後, Fig. 4-4 に示した各応答関数と Fig. 4-6 に 示した計数率を用いて第 2 章に示した手順に従ってモンテカルロ型 Bayes 推定 法による unfolding を行い、中性子スペクトルの評価を行った.



Fig. 4-5 数値実験1のシミュレーション体系. 図中に示した点Tの位置のスペクトル測定を行う.



Fig. 4-6 数値実験1の検出器信号の計数率の計算値.

4.3.2 結果と考察

数値実験 1 の unfolding 結果を Fig. 4-7 に示す. T_w は点 T における中性子束の全 角度成分積分値を, T_f は同位置における中性子束の前方成分 ($\cos\theta > 0.9995$)を, (a) から (i) は Fig. 4-4 に示した各応答関数を用いた場合の unfolding の結果を示 している. $\Phi_a(3)$ は第 3 章で得られた unfolding 結果を再掲したものである. また, Fig. 4-8 に各 unfolding 結果を T_f と比較した場合の各エネルギー領域における評 価関数 *A* の値を示す.

Fig. 4-7, Fig. 4-8 の結果より, まず (a) から (i) までの 9 個の線源条件を用いた場合について, 応答関数の計算結果やそれを用いた unfolding の結果のばら つきが少ないことが読み取れる. これは第 3 章の unfolding 結果と比較すると明 らかである. この事実はすなわち, プリコリメータを用いたスペクトロメータ 設計の改良により, 検出器感度の入射中性子特性依存性を大幅に低減できたこ



Fig. 4-7 数値実験 1 の unfolding 結果. T_w は点 T における中性子束の全角度成分 を, T_f は同位置における中性子束の前方成分 ($\cos\theta > 0.9995$)を, (a)から(i)は Fig. 4-4 に示した各応答関数を用いた場合の unfolding の結果を示している. $\Phi_a(3)$ は 第 3 章で得られた unfolding 結果を再掲したものである.



Fig. 4-8 数値実験1の unfolding 結果に対する, 各エネルギー領域における評価 関数 *A*.

とを示している.一方で,改良型スペクトロメータを用いたスペクトル測定の 結果は第3章の結果と異なり,点Tの全フラックスとはその絶対値に大幅な違 いが表れた.これはプリコリメータを設置したことにより検出器に入射する中 性子束の前方成分以外が遮蔽されており,測定結果からその成分を再現するこ とができなかったためと考えられる.ただし,入射中性子束の前方成分 (cos*θ* > 0.9995)とunfolding結果を比較すると,これらは1 MeV 以下の領域で良 く一致している.この事実はすなわち,本装置は複雑な角度分布を持つ中性子 場においても,中性子束の前方成分のみを抽出して中性子スペクトルの測定が 可能となる特性を持っていることを示唆しているものと考えられる.

一方で,1 MeV 以上の領域については未だ十分な一致が見られない理由としては, プリコリメータにより高速中性子の透過成分や内部散乱成分が十分に除去しきれていない可能性が考えられる.しかしながら, Fig. 4-8 からわかる通り, 評価関数 *A* の値は第 3 章の結果に比べて大きく改善しており, プリコリメータの設置の中性子スペクトル測定性能向上に対する有効性が確認できたといえる.

4.4 数値実験 2: 種々の中性子場での検討

プロトタイプスペクトロメータと改良型スペクトロメータの比較によりプリコ リメータの有効性が確認できたため、次に、照射中性子場の特性に対する改良 型スペクトロメータの応答特性と適用性について検討するため、4 種類の異なる 特性を持った中性子場に対する照射測定シミュレーションを行った.本節では その詳細と結果について述べる.

4.4.1 シミュレーション体系

Fig. 4-9 に本節で検証したシミュレーション体系を示す. これら 4 つのシミュレ ーション体系は,中性子スペクトロメータに [1] 炭素ブロックによって減速さ れた熱中性子を主な成分とし,かつコリメータを使用しない「非集束低エネルギ ー中性子場」, [2] エネルギーをほとんど失っていない高速中性子を主な成分と し,かつコリメータを使用しない「非集束高エネルギー中性子場」, [3] 熱中性子 を主な成分とし,コリメータを使用する「集束低エネルギー中性子場」, [4] 高速 中性子を主な成分とし,コリメータを使用する「集束高エネルギー中性子場」を それぞれ照射する体系である. Fig 4-9 に示した4体系は,各図中に示した点Tに おける前方中性子フラックス (cosθ>0.9995) を測定することを目的に設計した.



Fig. 4-9 数値実験2で使用したシミュレーション体系. それぞれ, [1] 非集束低 エネルギー中性子場, [2] 非集束高エネルギー中性子場, [3] 集束低エネルギー中 性子場, [4] 集束高エネルギー中性子場の照射を目的とした体系である.

この4体系における点Tの前方中性子フラックスのエネルギースペクトルをFig. 4-10 に,各体系で照射測定のシミュレーションを行った結果をFig. 4-11 に示す.

4.4.2 結果と考察

Fig. 4-11 に示した 4 つのシミュレーション体系における検出器信号計数率を, Fig. 4-4 に示したそれぞれの応答関数を用いて Unfolding した結果を Fig. 4-12, Fig. 4-14, Fig. 4-16, Fig. 4-18 に示す. また, これらの結果と Fig. 4-10 に示した中 性子スペクトルとの一致を定量的に評価するための評価関数 *A* の値をそれぞれ Fig. 4-13, Fig. 4-15, Fig. 4-17, Fig. 4-19 に示す. これらの結果より, 改良型の液体 減速型中性子スペクトロメータの特性について考察する.

Fig. 4-12 と Fig. 4-13, そして Fig. 4-14 と Fig. 4-15 の示す結果は, コリメート されていない中性子場の測定において, (a), (d), (g) の 2π 方向等方線源を使用し た応答関数による unfolding 結果が測定中性子場のエネルギースペクトルによく 一致しており.かつ線源面積が広いほどその一致は良くなることが明らかとな った.その他の強前方性,あるいは平行ビーム中性子源によって計算した応答



Fig. 4-10 シミュレーション体系 [1], [2], [3], [4] の入射前方中性子束スペクトル.



Fig. 4-11 シミュレーション体系 [1], [2], [3], [4] における検出器信号の計数率計 算値.

関数による結果は,特に 1 MeV 以上の領域で一致が良くなかったものの,線源 面積による感度の差がほとんど見られなかった.これは,中性子場がコリメー トされておらず,かつ中性子源が検出器表面に近いことから,コリメータ孔側 面の遮蔽材で散乱された中性子が側面からコリメータ孔内に浸透した後,液体 減速材まで入射した可能性があり,これによる信号が無視できないほど大きい ため,この成分が十分に考慮されうる応答関数を使用した場合の方がよりスペ クトル解析の結果が良くなったものと考えられる.

一方, Fig. 4-16 と Fig. 4-17 の結果,および Fig. 4-18 と Fig. 4-19 の結果より, コリメートされている中性子場においては (b), (c), (e), (f), (h), (i) の応答関数を 用いた結果が良い一致を示した.また,これらの結果は全て互いによく一致し ていた.線源面積にかかわらずよく似た結果が得られたことから,検出器軸方 向に対する角度がほとんどない入射中性子はプリコリメータによって非常によ く遮蔽されており,コリメート孔を通る成分のみが測定されているものと考え られる.またコリメートされていない中性子場の測定シミュレーションによる 結果と合わせて考察すると,本章で設計した改良型中性子スペクトロメータの 検出器応答を乱す要因は,検出器の軸に対して大きな角度を持つ入射中性子が, 何らかの形でコリメート孔とその側面の遮蔽体に最低でも1回ずつ入射したの ち,比例計数管に到達して信号を発生させることであると考えられる.

以上の結果より本章で設計したスペクトロメータの一般的な適用性について検証する.本装置の特性をまとめると以下の通りとなる.

- 検出器軸と入射中性子のなす角度を θ とすると, cos θ > 0.9995 を満たす前方
 中性子束のエネルギースペクトルを測定する能力を持つ.
- θ = 0 の平行ビーム,あるいは小さな角度 θ しか持たない入射中性子場に対しては中性子の入射面積に対する検出器応答の依存性はほとんどなく,コリメータ孔に入射した中性子のみを対象に測定を行うことが可能である.
- θ が大きい中性子が入射する場合,一度コリメート孔に入射した後に側面遮 蔽体に入射し,その後またコリメータ孔に入射した中性子や,コリメート径 外に入射した後に遮蔽体を透過してコリメータ孔に浸透した中性子による 信号を考慮する必要がある.



Fig. 4-12 シミュレーション体系 [1] の中性子スペクトル測定結果.



Fig. 4-13 シミュレーション体系 [1] の中性子スペクトル測定結果の評価関数 A の値.



Fig. 4-14 シミュレーション体系 [2] の中性子スペクトル測定結果.



Fig. 4-15 シミュレーション体系 [2] の中性子スペクトル測定結果の評価関数 A の値.



Fig. 4-16 シミュレーション体系 [3] の中性子スペクトル測定結果.



Fig. 4-17 シミュレーション体系 [3] の中性子スペクトル測定結果の評価関数 A の値.



Fig. 4-18 シミュレーション体系 [4] の中性子スペクトル測定結果.



Fig. 4-19 シミュレーション体系 [4] の中性子スペクトル測定結果の評価関数 A の値.

すなわち,本装置は入射中性子場の入射角を考慮し,角度成分が十分小さ い中性子が主として入射する中性子場に対して,平行ビームまたは強前方性中 性子場によって計算した応答関数を用いることで,プリコリメータ孔の軸上の 中性子場の前方中性子束スペクトルを測定することが可能な装置であると言え る.入射角が大きな中性子が多く存在する中性子場に対しては,等方線源を使 用した応答関数を用いることによりスペクトルを評価することが可能であるも のの,線源面積,すなわち中性子の入射位置に対する依存性も完全には除去で きておらず,このような中性子場に対する測定法に関してはさらなる検討を要 する.

しかしながら、この問題は中性子場の測定方法を工夫することにより解決 可能であると考えられる.例えばγ線検出器であるゲルマニウム半導体検出器 やシンチレーション検出器 [3] のように、測定したい線源から一定の距離を離 して測定することで応答関数を使い分けることなくあらゆる中性子場のエネル ギースペクトルを測定できる可能性がある.測定中性子場から距離を取ること により、検出器軸に対して大きな角度を持つ中性子の強度は取った距離の二乗 に反比例して減衰し、検出器軸に平行な成分が主として入射するようになる. そして改良型の液体減速型中性子スペクトロメータの特性上、中性子場が検出 器軸に対して平行、すなわち平面波であるとみなすことができるようになれば、 コリメータ孔径外に入射した中性子を無視することが可能となり、かつ応答関 数による測定結果への影響も考慮する必要がなくなる可能性がある.

4.5 結論

本章では,第3章のプロトタイプ検出器を用いた液体減速型中性子スペクトロ メータの実験的研究によって得られた知見を基に装置設計の改良を行い,その 性能を数値実験によって評価した.

検出器設計では、入射中性子特性による検出器感度への影響を低減するた め、Fig. 4-1 に示した、プロトタイプ検出器前方にプリコリメータを設置する装 置を設計した.この装置でプロトタイプ検出器を用いた実験と同様の体系でシ ミュレーションを行い、中性子スペクトル測定実験を模擬した結果、入射中性 子場のうち cos > 0.9995 を満たす前方中性子束のエネルギースペクトルを測定 する装置としてスペクトロメータとして本装置が設計されており、かつ検出器 感度の入射中性子場特性に対する依存性が大きく低減されていることを確認し た.また、1 MeV 以下のエネルギーを持つ中性子に対して特に優れた測定能力を 持っていることを確認した.

その後,設計した装置の一般的な適用性を確認するため,照射中性子場の 特性が異なる 4 種類の実験体系を用いた場合の測定実験のシミュレーションを それぞれ実施した.その結果,測定中性子場の角度成分を考慮した応答関数,す なわち,検出器軸に対して平行に入射する中性子を主とする中性子場に対して は平行ビームまたは強前方性の中性子場を使用した応答関数を,大きな角度を 持つ中性子が多く入射する中性子場に対しては等方中性子場を使用して求めた 応答関数を使用することにより,プリコリメータ軸上の前方中性子束のエネル ギースペクトル測定が可能であることを確認した.一方で,入射中性子場の特 性に対する依存性を少なくするという本章の目的を考慮すると,本装置は検出 器軸に対して平行に入射する中性子を主とする中性子場の測定を行うための装 置であるとみなすべきであると結論できる.

しかしながら、この特性はあらゆる中性子場に対して適用可能な、汎用性 を持つ測定装置を開発するという目的に矛盾しないと考えられる.なぜならば、 一例としては測定対象となる中性子場と検出器の間に距離を取ることにより、 大きな入射角を持つ中性子が多く含まれる中性子場であっても平行中性子以外 の入射中性子成分を減衰させ、検出器に入射する中性子場を検出器軸に対して 平行に入射する中性子を主とする中性子場とみなすことができるからである. すなわち、本装置の特性は、本装置の使用方法について検証することにより、応 答関数を使い分けることなくあらゆる中性子場のエネルギースペクトルを測定 できる可能性を示唆している.

今後は設計したスペクトロメータを製作し,その特性を実験的に確認した 後,汎用的にスペクトル測定を行う手法について検討を進める予定である.

参考文献

- S. Tamaki, S. Kusaka, F. Sato, I. Murata, "DESIGN IMPROVEMENT OF A LIQUID-MODERATOR-BASED NEUTRON SPECTROMETER FOR BNCT." *Radiation Protection Dosimetry* (2017): 1 – 4.
- Brown, Forrest B. "MCNP–A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5." Los Alamos National Laboratory, Oak Ridge, TN (2003).
- Knoll, Glenn F. Radiation detection and measurement. *John Wiley & Sons*, 2010, pp. 321–364, 415–465.

第5章 総括

本章では,本研究 (第2章,第3章及び第4章)の研究成果をそれぞれ要約し, 導き出される知見と課題について議論する.

第2章では、液体減速型中性子スペクトロメータによる中性子スペクトル 測定の基本原理について説明するとともに、スペクトロメータの基本モデルを 用いた数値実験を実施し、本装置による中性子スペクトル測定原理の実現可能 性を検証した.また、複数種類の液体減速材を用いて数値実験を実施すること によって本装置のエッセンスとなる液体減速材の持つべき特性について議論を 行った.液体減速材として軽水、重水、ホウ酸水、ホウ酸トリメチルの4種類を 使用した数値実験の結果、得られる実験データから中性子のエネルギースペク トルを推定できる見込みを得た.また、その結果はホウ酸トリメチル、ホウ酸水、 軽水、重水の順に良い結果を示した.これはそれぞれの液体減速材の中性子吸 収断面積の大きさの順番と一致しており、液体減速材が高い中性子吸収能を持 つ原子、例えば¹⁰B等を多く含むことにより中性子スペクトルの測定性能が上昇 する可能性を示唆している.この結果より、十分大きな中性子反応断面積を持 つ液体減速材を使用して、適切な形状の検出器を設計し、十分な精度で測定を 行うことにより、液体減速型中性子スペクトロメータの原理に基づいて中性子 場のエネルギースペクトル測定が可能であると結論した.

第3章では,第2章で数値的に確認した液体減速型中性子スペクトロメー タの基本原理の妥当性を,今度は実験的に確認するため,液体減速型中性子ス ペクトロメータのプロトタイプの設計・開発を行い,それを用いた実験による本 装置の中性子スペクトル測定原理の検証を実施した.また,その結果を基に液 体減速型中性子スペクトロメータの実機設計・開発を行う上で重要となる条件・ 課題について議論した.結果としては,検出器の応答関数を適切な条件下で評 価することにより,少なくとも1 MeV 以下のエネルギー領域において中性子ス ペクトルを正確に測定可能であることを確認した.また,検出器の応答関数を 適切に評価するためには照射される中性子場の空間分布や角度分布などの特性 が極めて重要であり,あらゆる中性子場で使用可能な中性子スペクトロメータ を開発するためには中性子場特性に対する依存性の低い応答関数を持つスペク トロメータの基礎設計を検討する必要があることを確認した.

第4章では,第3章で得られた知見を基に液体減速型中性子スペクトロメ

ータの改良設計を行い、照射測定のシミュレーションを通してその性能を確認 した.結果としては、中性子入射方向にプリコリメータを設置する検出器設計 を採用することにより、入射中性子特性による検出器感度への影響が低減し、 入射中性子場のうち cos θ > 0.9995 を満たす前方中性子束のエネルギースペク トルを測定するスペクトロメータが設計された.またこの設計では、1 MeV 以下 のエネルギーを持つ中性子に対して特に優れた測定能力を持っていることを確 認した. 第 3 章の実験体系による照射測定のシミュレーション結果により得ら れた中性子スペクトルと比較すると、プリコリメータの採用により、1 MeV 以上 の中性子に対する測定精度が向上していることが明らかとなった. また, 照射 中性子場の特性が異なる 4 種類の実験体系を用いた場合の測定実験のシミュレ ーションの結果、測定中性子場の角度成分を考慮した応答関数、すなわち、検出 器軸に対して平行に入射する中性子を主とする中性子場に対しては平行ビーム または強前方性の中性子場を使用した応答関数を,大きな角度を持つ中性子が 多く入射する中性子場に対しては等方中性子場を使用して求めた応答関数を使 用することにより、 プリコリメータ軸上の前方中性子束のエネルギースペクト ル測定が可能であることを確認した.一方で、入射中性子場の特性に対する依 存性を少なくするという本章の目的を考慮すると, 適切な応答関数を中性子場 ごとに代えてスペクトルを評価することは適切でないこと、そして等方線源を 用いた応答関数による結果よりも平行中性子場を用いた応答関数による結果の 方がシミュレーション全体としての測定結果が良好であったことから.本装置 は、コリメータ孔内に入射する、検出器軸に対して平行な中性子を主とする中 性子場の測定を行うことが可能な装置であるとみなすべきであると結論した. また、改良型スペクトロメータの特性をこのように評価することにより、 測定 対象となる中性子場と検出器との間に距離を取るなど、検出器軸となす角が小 さい中性子が主として入射するように測定実験の手法を工夫することで、本装 置を用いたスペクトル測定における中性子場特性による測定結果への影響を低 減し、より正確な前方中性子束エネルギースペクトルが測定可能になる可能性 がある.

本研究全体の結論としては、本研究の成果として 1 MeV 以下のエネルギー 領域の前方中性子束に対して高い感度を持つ中性子エネルギースペクトロメー タを設計することができたと言える. BNCT 用中性子場の持つエネルギースペク トルを考慮すると、本装置によって有効に測定可能なエネルギー領域は、今後 さらなる改良を加えることで拡張する必要があると考えられるが、⁷Li(p,n)⁷Be 反 応を基礎とする BNCT 用加速器中性子源に関していえばその最大エネルギーが 1 MeV 以下になるため、本装置を用いて中性子場のエネルギースペクトルを評 価することが可能であると言える.

また、本装置は特定方向の中性子束にのみ感度を持つスペクトロメータで あると結論したが、このことはある一つの可能性を示唆している、それは、液体 減速型中性子スペクトロメータを用いた角度・エネルギー微分中性子束強度分 布、すなわち二重微分中性子束強度の測定可能性である. 従来、BNCT 用中性子 場のエネルギースペクトル測定と言えば空間測定、すなわち、ある特定の地点 における全中性子束のみを対象とした測定のみが実施されてきた. しかしなが ら, IAEA の示す BNCT 用中性子場の設計要件にカレント・フラックス比, すな わち照射中性子場の前方性に関する項目が設けられていることからもわかるよ うに. 照射場の中性子束角度分布は人体への影響を考慮するうえで非常に重要 な項目である. にもかかわらず, これまで照射中性子場の角度分布については ほとんど実験的に評価されてこなかった. その理由は, 中性子場の角度分布は 一般的にそのエネルギーに依存して異なる値を持っており, 実験的な評価を行 うことがこれまでは事実上不可能なほどに困難であったためである.しかしな がら、本研究で開発した装置は中性子束の前方中性子束スペクトルを測定する 装置である. また, 第4章の考察より本装置は測定中性子場から距離を離して使 用することにより、より正確なスペクトル測定を行うことが可能であると考え られる.このアイデアを応用すると、本装置は中性子スペクトルを測定したい 点を定め、その点から距離を取り、測定点が検出器軸上に入るようにしつつ検 出器の角度を変えながら測定実験を実施することにより, 照射中性子場の角度 ごとのエネルギースペクトル, すなわち二重微分中性子束強度を測定し, これ までより詳細な中性子場特性評価を行うことが可能となる可能性がある. 二重 微分中性子束強度が測定可能になれば、中性子場の特性にかかわらずあらゆる 中性子場を評価することが可能となる. すなわち, 本装置による中性子スペク トル測定の汎用性を担保することが可能になる.また、より詳細な中性子場の 情報を評価することにより、より安全かつ効果的な加速器中性子源装置の開発 に貢献することが期待される. したがって, 二重微分中性子束強度の測定可能 性は従来の中性子スペクトル測定とは一線を画する極めて画期的な結果をもた らすことが期待され、極めて重要であると言える.

今後は、まず本装置を用いた前方中性子束スペクトルの測定可能性を実験 的に確認することが必要である.この実験は大阪大学 OKTAVIAN 施設にて使用 可能である AmBe 小線源や強力 14 MeV 中性子工学実験装置 (OKTAVIAN), そ して日本原子力研究開発機構の放射線標準施設 (FRS) で使用可能である単色 中性子照射用の加速器中性子源を用いて実施する予定である. これらの実験を 通して液体減速型中性子スペクトロメータにより前方中性子束スペクトルが測 定可能であることを実験的に確認した後, 改めて本装置を用いた二重微分中性 子束強度の測定可能性について検証していく予定である.

謝辞

本研究の遂行にあたり直接の御指導を頂き,終始あたたかな御指導,御協 カそして激励を頂きました大阪大学大学院工学研究科の村田 勲教授に深く感 謝を申し上げます.

本論文作成にあたり、細部にわたって貴重な御助言、御指導を賜りました 大阪大学レーザー科学研究所の乗松 孝好教授、大阪大学大学院工学研究科の 北田 孝典教授に深く感謝申し上げます.

本研究の遂行,そして本論文作成に関する貴重な御助言,御指導を賜りました,大阪大学大学院工学研究科の佐藤 文信准教授に深く感謝申し上げます.

大阪大学 OKTAVIAN 施設での学生生活, そして実験において多大なご助力 を賜りました, 大阪大学大学院工学研究科技術部 伊達道 淳技術主幹, 杉本 久司技術専門職員, 吉岡 潤子技術専門職員, 日下 祐江技術専門職員, 髙田 梨菜技術専門職員に深く感謝申し上げます.

本研究の遂行に必須であった³He 充填比例計数管を貸与していただきまし た東北大学の馬場 護名誉教授,中村 尚司名誉教授,そして渡部 浩司教授に深 く感謝申し上げます.

本研究の遂行にあたりこれまで数多くの実験指導を頂きました,名古屋大 学の吉橋 幸子准教授,群馬大学の酒井 真理助教,そして国立研究開発法人量 子科学技術研究開発機構の近藤 恵太郎研究員に深く感謝申し上げます.

本研究遂行及び研究室での学生生活において多くの御助力,御協力を頂き ました大阪大学大学院工学研究科村田研究室所属・出身の学生の皆様に深く感 謝申し上げます.

博士課程在学中に経済的なご支援を頂きました独立行政法人日本学術振興 会 人材育成事業部 研究者養成科の皆様に深く感謝申し上げます.

本研究は日本学術振興会 科学研究費助成事業 特別研究員奨励費 課題番号 16J00093 による経済的援助を受けて遂行されました. 深く感謝申し上げます.

最後になりましたが、これまで私を支え、見守ってくださった家族への深 い感謝の意を持ちまして、謝辞の結びとしたいと思います.

平成 29 年 12 月 玉置 真悟

研究業績

- I. 主要論文(査読あり)
- <u>S. Tamaki</u>, S. Kusaka, F. Sato, I. Murata, "DESIGN IMPROVEMENT OF A LIQUID-MODERATOR-BASED NEUTRON SPECTROMETER FOR BNCT." *Radiation Protection Dosimetry* (2017) in press.
- (2) <u>S. Tamaki</u>, F. Sato, I. Murata, "Study on a liquid-moderator-based neutron spectrometer for BNCT —Development and experimental test of the prototype spectrometer", *Nucl. Instr. and Meth. A*, **870**, pp. 90 – 96 (2017).
- (3) <u>S. Tamaki</u>, F. Sato, I. Murata, "A feasibility design study on a neutron spectrometer for BNCT with liquid moderator", *Applied Radiation and Isotopes*, 106, pp. 41 44 (2015).
- II. 関連論文(査読あり)
- <u>S. Tamaki</u>, I. Murata, "Feasibility study on high-dynamic-range neutron spectrometer with continuously thick-adjustable moderator/absorber", Proceedings of the 2013 Symposium on Nuclear Data, November 14 – 15, 2013, Research Institute of Nuclear Engineering University of Fukui, Tsuruga, Fukui, Japan, *JAEA-Conf. 2014-002 INDC(JPN)-199*, pp. 145-150 (2015).
- III. その他論文(査読あり)
- X. Guan, M. Manabe, <u>S. Tamaki</u>, F. Sato, I. Murata, T. Wang, "Performance testing of the neutron flux monitors from 10 keV to 1 MeV developed for BNCT: A preliminary study", *Applied Radiation and Isotopes*, 125, pp.119-123 (2017).
- (2) 田中 憲一, 櫻井 良憲, 梶本 剛, 田中 浩基, 高田 卓志, 村田 勲, <u>玉置 真</u>
 (<u>悟</u>, 遠藤 暁, "イメージングプレートを用いた中性子捕捉療法ビーム成分 分布の品質保証 (特集 放射線医療現場における受動型検出器による計測
 手法の最近の進展)." 放射線= Ionizing radiation 43.1 (2017): 3-7.
- (3) S. Ohnishi, <u>S. Tamaki</u>, I. Murata, "Validation of large-angle scattering data via shadow-bar experiment", *Fusion Engineering and Design*, **112**, pp. 360 366 (2016).
- (4) X. Guan, M. Manabe, <u>S. Tamaki</u>, S. Liu, F. Sato, I. Murata, T. Wang, "Experimental study on the performance of an epithermal neutron flux monitor for BNCT",

Applied Radiation and Isotopes, 113, pp.28-32 (2016).

- (5) <u>S. Tamaki</u>, F. Sato, I. Murata, "Simple phase-space-population control method for Monte-Carlo particle transport calculation", Proceedings of the 2014 Symposium on Nuclear Data, November 27 – 28, 2014, Conference Hall, Hokkaido University, Sapporo, Japan, *JAEA-Conf. 2015-003 INDC(JPN)-2015*, pp. 219-224 (2016).
- (6) <u>S. Tamaki</u>, M. Sakai, S. Yoshihashi, M. Manabe, N. Zushi, I. Murata, E. Hoashi, I. Kato, S. Kuri, S. Oshiro, M. Nagasaki, H. Horiike, "Mock-up experiment at Birmingham University for BNCT project of Osaka University Neutron flux measurement with gold foil", *Applied Radiation and Isotopes*, **106**, pp. 72 74 (2015).
- M. Sakai, <u>S. Tamaki</u>, I. Murata, "Simplified neutron detector for angular distribution measurement of p-Li neutron source", *Plasma and Fusion Research*, 9:4405111 (2014).

IV. 国際会議 (Oral)

 <u>S. Tamaki</u>, F. Sato, I. Murata, "Study of a New Neutron Spectrometer based on Liquid Moderator for BNCT - Experiment in a neutron field produced with an AmBe source and graphite moderator -", 8th Young Researchers BNCT Meeting, September 13 – 17, Pavia, Italy (2015).

V. 国際会議 (Poster)

- <u>S. Tamaki</u>, S. Kusaka, F. Sato, I. Murata, "Improvement of a liquid moderator based neutron spectrometer for BNCT", 9th Young Researchers BNCT Meeting, November 13 – 15, Kyoto, Japan (2017).
- (2) <u>S. Tamaki</u>, F. Sato, I. Murata, "Development of neutron collimator for the new wide dynamic range neutron spectrometer for BNCT", 17th International Congress on Neutron Capture Therapy, October 2 – 7, Columbia, Missouri, USA (2016).
- VI. 国内会議
- (1) <u>玉置 真悟</u>, "液体減速型中性子スペクトロメータの設計改良研究", 平成 29 年度京都大学原子炉実験所専門研究会「放射線治療と放射線防護のための 放射線計測に関する研究会」, 2017 年 9 月 1 日, 京都大学.
- (2) 玉置 真悟, "ホウ素中性子捕捉療法のための液体式減速型中性子スペクト

ロメーターのプロトタイプ検出器の開発",第 12 回日本原子力学会関西支 部「若手研究者による研究発表会」,2016 年 12 月 14 日,大阪科学技術セン ター,大阪府.

- (3) <u>玉置 真悟</u>, 佐藤 文信, 村田 勲, "BNCT 用新型中性子スペクトロメーターのための中性子コリメーターの開発", 第 13 回日本中性子捕捉療法学術大会, P-06, 2016 年 8 月 6 7 日, 東京大学.
- (4) <u>玉置 真悟</u>, 佐藤 文信, 村田 勲, "ホウ素中性子捕捉療法のための新型中性 子スペクトロメータの実験的研究", 日本原子力学会 2015 年秋の大会, P34, 2015 年 12 月 9 – 11 日, 静岡大学.
- (5) <u>玉置 真悟</u>, 佐藤 文信, 村田 勲, "ホウ素中性子捕捉療法のための液体減速 材を用いた新型中性子スペクトロメーターに関する実験的研究", 第 41 回 非破壊検査に関する研究発表会, 8, 2015 年 8 月 21 日, 電子科学研究所, 大 阪府.
- (6) <u>玉置 真悟</u>, 佐藤 文信, 村田 勲, "熱領域から数 10MeV 領域を対象とする 液体減速・吸収材を用いた中性子スペクトロメータの設計研究", 第 11 回 日本中性子捕捉療法学術大会, 39, 2014 年 7 月 4 – 5 日, 大阪大学.
- (7) 玉置 真悟, 酒井 真理, 吉橋 幸子, 真鍋 正伸, 図子 直城, 村田 勲, 帆足 英二, 加藤 逸郎, 久利 修平, 河瀬 眞也, 大代 修司, 長崎 将雄, 堀池 寛, "大阪大学 BNCT プロジェクトのためのバーミンガム大学におけるモック アップ実験 -金箔による中性子強度分布測定---", 第11回日本中性子捕捉療 法学術大会, 39, 2014 年 7 月 4 5 日, 大阪大学.
- (8) 酒井 真理, <u>玉置 真悟</u>,村田 勲,宮丸 広幸,飯田 敏行,"p-Li 中性子源の 角度分布測定用簡易 He-3 検出器の開発",日本放射線安全管理学会 第 11 回学術大会,1B1-4,2012 年 12 月 4 – 6 日,大阪大学.

受賞歴等

- S. Tamaki, "Travel Grant Award", 8th Young Researchers BNCT Meeting, Pavia, Italy, September 2015.
- (2) 玉置真悟「2014 年度菅田-Cohen 賞」,大阪大学大学院工学研究科電気電子 情報工学専攻 成績優秀賞.
- (3) S. Tamaki "Ralph Fairchild Award at the 16th ICNCT", 16th International Congress on Neutron Capture Therapy (ICNCT-16), Helsinki, Finland (Pörssitalo), June, 2014.

(4) 玉置真悟「2013 年度核データ研究会 ポスター発表最優秀賞」, 2013 年度核 データ研究会,福井大学, 2013 年 11 月.

外部資金

(特別研究員奨励費) ホウ素中性子捕捉療法のための熱・熱外・高速中性子用新型スペクトロメーターの開発, <u>玉置</u> 真悟 2016~2017 年度, 1,300 千円.

付録 モンテカルロ型 Bayes 推定 ソースコード

リスト 1: main.cpp

```
/*
1
    * Unfolding Test code based on Bayes' Theorem
2
3
      Revised on: 2016/06/18 -> ver 0.4 released
4
           Author: S. TAMAKI, Osaka University
    */
5
6
7
    #include <stdio.h>
8
    #include <stdlib.h>
9
    #include <ctype.h>
10
    #include <signal.h>
11
    #include <string>
12
13
    /*_DEBUG はコンパイラオプションで定義する (開発環境によっては定義済みかもしれない. 要確認)*/
    #ifdef DEBUG
14
    /* 開発モード (色々試す用)*/
15
    #include "bayes_develop.h"
16
17
    #else
18
    /* 正式モード (安定動作版)*/
    #include "bayes.h"
19
20
    #endif
21
22
    int main(int argc, char* argv[])
23
    {
24
        const int INPUT_LENGTH = 256;
25
        char c;
26
        char tmp[INPUT LENGTH + 1];
27
        char fname1[INPUT LENGTH + 1] = "response4bayes.csv";
                                                               /*応答関数*/
28
        char fname2[INPUT LENGTH + 1] = "EXP data.csv";
                                                                   /*実験データ*/
29
        char fname3[INPUT_LENGTH + 1] = "Init_dat_X1.csv";
                                                                /*初期値横軸エネルギービンの設定*/
        char option[INPUT_LENGTH + 1] = "default";
30
31
        char *out_spc = "Spectrum_output.csv";
32
        char *out_fld = "Fold_data.csv";
33
        int j;
34
        int I, m, n;
35
        char s[32], *p;
36
        Bayesian_Estimation *bayes = NULL;
37
38
        FILE *fp;
39
        double *E = NULL, *est = NULL, *di = NULL, *dr = NULL, *est var = NULL;
40
        int fin = 0:
41
42
        /* mode */
43
        fputs("mode->", stderr);
        fgets(tmp, INPUT_LENGTH, stdin);
44
45
        c = *tmp;
46
        fputc(c, stdout);
47
        /* Response Function */
48
        fputs("¥n 応答関数の入っている csv ファイル名¥n->", stderr);
49
```

```
50
         fgets(tmp, INPUT_LENGTH, stdin);
51
         sprintf(fname1, strtok(tmp, "¥n"));
52
         fputs(fname1, stdout);
53
54
         /* Input Data */
55
         fputs("¥n 測定データの入っている csv ファイル名¥n->", stderr);
56
         fgets(tmp, INPUT_LENGTH, stdin);
57
         sprintf(fname2, strtok(tmp, "¥n"));
58
         fputs(fname2, stdout);
59
60
         /* Energy Bin */
         fputs("¥n 初期値横軸エネルギービンの入っている csv ファイル名¥n->", stderr);
61
         fgets(tmp, INPUT LENGTH, stdin);
62
63
         sprintf(fname3, strtok(tmp, "¥n"));
         fputs(fname3, stdout);
64
65
66
         /* Number of Data */
67
         fputs("¥n 測定データ di の次数¥n->m=", stderr);
68
         fgets(tmp, INPUT_LENGTH, stdin);
69
         m = atoi(tmp);
70
         printf("%d", m);
71
         if (!(m > 0)) {
72
             fputs("¥n m には 0 より大きい整数を入力してください. ¥n 終了します ¥n", stderr);
73
             return 0;
74
         }
75
76
         /* Number of Energy Bin */
77
         fputs("¥n 評価スペクトル est の次数¥n->n=", stderr);
78
         fgets(tmp, INPUT_LENGTH, stdin);
79
         n = atoi(tmp);
80
         printf("%d", n);
81
         if (!(n > 0)) {
82
             fputs("¥n n には 0 より大きい整数を入力してください. ¥n 終了します ¥n", stderr);
83
             return 0;
84
         }
85
         /* Number to Repeat */
86
87
         fputs("¥n 繰り返し上限¥n->", stderr);
88
         fgets(tmp, INPUT_LENGTH, stdin);
89
         I = atoi(tmp);
90
         printf("%d", I);
91
         if (!(l > 0)) {
             fputs("¥n l には 0 より大きい整数を入力してください. ¥n 終了します ¥n", stderr);
92
93
             return 0;
94
         }
95
96
         /* Standard Deviation */
97
         if (toupper(c) == 'D')
98
             *s = 'J';
         else {
99
100
             switch (toupper(c)) {
101
             case 'A':
                 /* Analysis Mode */
102
                 fputs("¥n エネルギースペクトル真値の入っている csv ファイル名¥n->", stderr);
103
```
104	break;
105	case 'C':
106	/* Chi_Square Mode */
107	fputs("¥n カイニ桒バイアス¥n->bias=", stderr);
108	break;
109	case 'M':
110	fputs("¥n サンフリンク数¥n->k = ", stderr);
111	break;
112	}
113	
114	fgets(tmp, INPU1_LENGTH, stdin);
115	sprintt(option, strtok(tmp, "¥n")); */
116	
117	#IT definedINTEL_COMPILER
118	sprintt(option, "1000");
119	#ellidellined_WISC_VER
120	spiniu_s(opiion, inPOT_LENGTH, 1000),
121	#else
122	spinia(option, rood),
120	foute(ontion stdout):
125	
126	fouts/"¥n 標準偏差(角の入力で偏差比) ファイル読み込みの場合は F を入力¥n->s=" stderr):
127	foets(tmp_sizeof(s) - 1_stdin):
128	sprintf(s_strtok/tmp_"¥n"));
129	print(s, substant), fin)),
130	}
131	foutc('¥n', stdout):
132	
133	try {
134	switch (toupper(c)) {
135	case 'D':
136	if ((bayes = new Bayesian_Estimation(l, m, n)) == NULL)
137	throw bayes;
138	break;
139	case 'A':
140	if ((bayes = new Bayesian_Estimation(I, m, n, option)) == NULL)
141	throw bayes;
142	break;
143	case 'C':
144	if ((bayes = new Bayesian_Estimation(I, m, n, strtod(option, &p))) == NULL)
145	throw bayes;
146	break;
147	case 'M':
148	if ((bayes = new Bayesian_Estimation(I, m, n, strtol(option, &p, 10))) == NULL)
149	throw bayes;
150	break;
151	default:

printf("不正なモード入力です.¥n D:繰り返し回数指定モード¥n M:MC 繰り返し回数決定モ ード¥n のいずれかを選んでください."); return 0;

}

catch (const Bayesian_Estimation *const err_bayes) {

}

157	printf("Program Construction failed!¥n");
158	return 0;
159	}
160	
161	bayes->Set Bayes(s, fname1, fname2, fname3);
162	
163	/* 終了処理 */
164	if ((fin = bayes->Bayesian()) > 0) {
165	/* Output */
166	trv {
167	/* Output Estimate spectrum est[n] into file */
168	i = 0.
169	y us, while ((fn = fonen(out_snc_"w")) == NI II (
170	if (1/i++ < 100))
170	throw fo:
170	
172	if(tourpor(o) = - M)
173	ii (topper(c) - iii)
174	II (Dayes->Gei_RESULT(ac, aest, aut, aut, aest_var))
175	throw IP;
176	fprintr(tp, "energy¥talstribution¥terror¥trepeat=¥t%d¥n", fin);
1//	for $(j = 0; j < n; j++)$ {
178	If (est[j] < 1e-99) {
179	est[j] = 0;
180	est_var[j] = 0;
181	}
182	fprintf(tp, "%.4IE¥t%.4IE¥t%.4IE¥n", E[j], est[j], est_var[j]);
183	}
184	}
185	else {
186	if (bayes->Get_RESULT(&E, &est, &di, &dr))
187	throw fp;
188	fprintf(fp, "energy¥tdistribution¥trepeat=¥t%d¥n", fin);
189	for (j = 0; j < n; j++) {
190	if (est[j] < 1e-99)
191	est[j] = 0;
192	fprintf(fp, "%.4lE¥t.4lE¥n", E[j], est[j]);
193	}
194	}
195	fclose(fp);
196	/* End Output Estimate spectrum */
197	
198	/* Output Refolded data into file */
199	j = 0;
200	while ((fp = fopen(out_fld, "w")) == NULL)
201	if (!(j++ < 100))
202	throw fp;
203	fprintf(fp, "data_num¥torigin¥trefold¥trepeat=¥t%d¥n", fin);
204	for (j = 0; j < m; j++)
205	fprintf(fp, "%04d¥t%lf¥t%lf¥n", j + 1, di[j], dr[j]);
206	fclose(fp);
207	/* End Output Refolded data */
208	
209	fputs("¥n 推定スペクトルのファイル書き込みが正常に終わりました.¥n", stderr);
210	printf(" 繰り返し回数は %07d 回 です¥n", fin);

```
211
            }
212
            catch (const FILE *const err fp) {
213
               if (err_fp != NULL) {
                   printf("出力データのメモリ確保に失敗しました.¥n");
214
215
                   fclose(fp);
216
               }
217
               else
218
                   printf("出力ファイルの作成に失敗しました.¥n");
219
            }
            /* End Outputs */
220
221
222
            if (E != NULL)
223
                delete[] E;
224
            if (est != NULL)
225
                delete[] est;
226
            if (di != NULL)
                delete[] di;
227
228
            if (dr != NULL)
229
                delete[] dr;
230
            if (est var != NULL)
231
                delete[] est_var;
232
        }
233
        else {
234
            switch (bayes->Get STATE()) {
235
            case Bayesian_Estimation::PREPARE:
                fputs("¥n 入力ファイルが指定されていません. source code を確認してください. ¥n プログラ
236
     ムを終了します. ¥n", stderr);
237
               break;
238
            case Bayesian_Estimation::READY:
                fputs("¥n 計算が実行されていません. source code を確認してください. ¥n プログラムを終了
239
     します. ¥n", stderr);
240
               break;
241
            case Bayesian Estimation::FIN:
                fputs("¥n 異常な状態. 通常は STATE=FIN で I <= 0 にはならない. ¥n source code を確認し
242
     て下さい. ¥n", stderr);
243
               break:
244
            case Bayesian_Estimation::ERR_MEM:
                fputs("¥n メモリ確保に失敗しました.ファイルサイズが大きすぎる可能性があります.¥n プ
245
     ログラムを終了します. ¥n", stderr);
246
               break;
247
            case Bayesian Estimation::ERR RFILE:
                fputs("¥n ファイルが存在しないか不正な入力が行われました.¥n "", stderr);
248
249
                fputs(bayes->Get_Error_File(), stderr);
250
                fputs("'を確認してください ¥n プログラムを終了します. ¥n", stderr);
251
               break;
252
            case Bayesian Estimation::ERR WFILE:
                fputs("¥n ログファイル作成に失敗しました. プログラムを再実行してください.¥n プログラ
253
     ムを終了します. ¥n", stderr);
254
               break;
255
            case Bayesian_Estimation::ERR_DZERO:
                fputs("¥n 入力した実験誤差の一部または全部が 0.0 であり,0 除算または無限ループ発生の
256
     可能性があります.¥n", stderr);
257
                fputs(bayes->Get Error File(), stderr);
258
                fputs("'を確認してください. ¥n プログラムを終了します. ¥n", stderr);
```

259	break;
260	default:
261	fputs("¥n STATE への代入値が異常. source code を確認して下さい. ¥n プログラムを終了し
201	ます. ¥n", stderr);
262	break;
263	}
264	}
265	delete bayes;
266	
267	getchar();
268	return 0;
269	}
270	/**************************************

/ / 2.00000.1	リン	スト	> 2:	bay	ves.h
---------------	----	----	------	-----	-------

	リスト 2:	bayes.h		
1	/*			
2	* bayes.h			
3	* ver. 0.4.0			
4	* Revised on: 2016/06/18 -> * Major Update: ver.	0.4.0		
5	* Author: S. TAMAKI, Osaka University			
6	*/			
7	#ifndef _DEBUG			
8	// CHECKING _DEBUG			
9				
10	#ifndef S_TAMAKI_BAYESIAN_ESTIMATION_			
11	#define S_TAMAKI_BAYESIAN_ESTIMATION_			
12	// CHECKING S_TAMAKI_BAYESIAN_ESTIMATIO	N		
13				
14	typedef class Bayesian_Estimation {			
15	public:			
16	enum Bayes_State { PREPARE = 0, READY = 1, FIN = 2, ERR_MEM = -1, ERR_RFILE = -2,			
10	ERR_WFILE = -3, ERR_DZERO = -4, STOP = -10 };			
17	enum Bayes_Mode { DEFAULT = 0, ANALYSIS	s = 1, CHI_SQUARE = 2, MONTE_CARLO = 3 };		
18				
19	Bayesian_Estimation();	// constructor default		
20	Bayesian_Estimation(// constructor MODE DEFAULT		
21	const int repeat, const int m, const int n);			
22	Bayesian_Estimation(// constructor MODE ANALYSIS		
23	const int repeat, const int m, const int n, cha	ar *const true_name);		
24	Bayesian_Estimation(// constructor MODE CHI_SQUARE		
25	const int repeat, const int m, const int n, co	nst double b);		
26	Bayesian_Estimation(// constructor MODE MONTE_CARLO		
27	const int repeat, const int m, const int n, co	nst int k);		
28	Bayesian_Estimation(// constructor MODE ANALYSIS : change log file		
	name			
29	const int repeat, const int m, const int n, co	nst double b, const char *const log);		
30	Bayesian_Estimation(// constructor MODE CHI_SQUARE : change log file		
	name			
31	const int repeat, const int m, const int n, ch	ar *const true_name, const char *const log);		
32	Bayesian_Estimation(// constructor MODE MONTE_CARLO : change log		
00	file name			
33	const int repeat, const int m, const int n, con	nst int K, const char *const log);		
34	virtual ~Bayesian_Estimation();	// destructor		

35		
36	void Set_Bayes(∥ ファイル設定
37	char *s, char *fname1, char *fname2, ch	nar *fname3);
38	int Bayesian(void);	∥ ベイズ推定計算シーケンス
39	int Get_RESULT(∥ 評価スペクトル取得
40	double **xenergy, double **xest, double	e **xdi, double **xdr);
41	int Get_RESULT(// 評価スペクトル取得 : MONTE_CARLO MODE
42	double **xenergy, double **xest, double	e **xdi, double **xdr, double **xest_var);
43		
44	char* Get_Error_File(void) {	∥ エラーファイル名取得
45	return error_file;	
46	}	
47	void Stop Bayes(void) {	// 強制停止
48	STATE = STOP;	
49	}	
50	Bayes State Get STATE(void) {	// 状態取得
51	return STATE;	
52	}	
53	5	
54	private:	
55	const Baves Mode MODE:	// 計算モード
56	const int MMAX [.]	// 測定スペクトル di の次数
57	const int NMAX	// 評価スペクトル初期値 est の次数
58	const int KMAX:	ルサンプリング数ト限
59	const int REPEAT	// ベイズ推定繰り返し回数上限
60	const char *const out_log:	// 出力ログファイル名
61	const int MC_RANDOM_SEED	// MC モード田初期シード
62	char *spc_true:	
63	double bias:	// カイニ 垂モードの評価値バイアス
64		
65	double **R:	// 広な関数
66	double *di *dev:	// 測定データ di と標準偏差 dev
67	double *dr:	
68	double *F *F:	// energy:F における initial spectrum:F
60	double *L DSUM:	
70	double *est:	
70	double est,	
71	double est_val,	
72		// エノー山力用文子列
73	Bowee State STATE:	11
74	Bayes_State STATE,	11
75	Device State Device Construct(visid)	
76	Bayes_State Bayes_Construct(void);	
77	void Bayes_EXE(
78	double "xe_sample, double "xd_sample	
79	Int Bayes_ANALYSIS(FILE TP, Int I);	
80	void Bayes_Chi_SQUARE(FILE "TP, Int I);	
81	Int Bayes_MONTE_CARLO(void);	// ペイス推定:モンテカルロ
82	double Randmize_G(double ave, double sig	ma);
83	} payes_t;	
84		
85	// END CHECKING S_TAMAKI_BAYESIAN_ES	
86	#endif	
87		
88	// END CHECKING _DEBUG	

89 #endif

IJ	ス	F	3.	have	s cor
/	<u> </u>				3.0171

```
1
    14
2
    * bayes.cpp
3
      ver. 0.4.0
4
       Revised on: 2016/06/18 -> Major Update: ver. 0.4.0
5
           Author: S. TAMAKI, Osaka University
    */
6
7
    #ifndef _DEBUG
8
    // CHECKING _DEBUG
9
    #include <stdio.h>
10
11
    #include <stdlib.h>
12
    #include <ctype.h>
    #include <math.h>
13
14
    #include <string>
15
    #include <random>
16
17
    #include "bayes.h"
18
19
    /*
                                                                                          */
20
    using namespace std;
21
    22
23
    /* constructor default */
24
    Bayesian_Estimation::Bayesian_Estimation()
        : MODE(DEFAULT), MMAX(100), NMAX(100), REPEAT(100000), KMAX(1),
25
    MC_RANDOM_SEED(12345679), out_log("log_bayes.txt")
26
    {
27
        STATE = Bayes_Construct();
                                                  // Preparation
28
    }
29
    /* constructor MODE default */
30
    Bayesian_Estimation::Bayesian_Estimation(const int repeat, const int m, const int n)
31
        :MODE(DEFAULT), MMAX(m), NMAX(n), REPEAT(repeat), KMAX(1),
32
    MC_RANDOM_SEED(12345679), out_log("log_bayes.txt")
33
    {
34
        STATE = Bayes_Construct();
                                                  // Preparation
35
    }
36
37
    // constructor MODE ANALYSIS
38
    Bayesian_Estimation::Bayesian_Estimation(const int repeat, const int m, const int n, char *const true_name)
        :MODE(ANALYSIS), MMAX(m), NMAX(n), REPEAT(repeat), KMAX(1),
39
    MC_RANDOM_SEED(12345679), out_log("log_bayes.txt"), spc_true(true_name)
40
    {
41
        STATE = Bayes Construct();
                                                  // Preparation
42
    }
43
44
    // constructor MODE ANALYSIS : change log file name
    Bayesian_Estimation::Bayesian_Estimation(const int repeat, const int m, const int n, char *const true_name,
45
    const char *const log)
```

```
:MODE(ANALYSIS), MMAX(m), NMAX(n), REPEAT(repeat), KMAX(1),
46
    MC RANDOM SEED(12345679), out log(log), spc true(true name)
47
    {
48
        STATE = Bayes_Construct();
                                                    // Preparation
49
    }
50
    // constructor MODE CHI SQUARE
51
    Bayesian_Estimation::Bayesian_Estimation(const int repeat, const int m, const int n, const double b)
52
         :MODE(CHI SQUARE), MMAX(m), NMAX(n), REPEAT(repeat), KMAX(1),
53
    MC RANDOM SEED(12345679), out log("log bayes.txt"), bias(b)
54
    {
55
        STATE = Bayes Construct();
                                                    // Preparation
56
    }
57
    // constructor MODE CHI SQUARE : change log file name
58
    Bayesian Estimation::Bayesian Estimation(const int repeat, const int m, const int n, const double b, const
59
    char *const log)
        :MODE(CHI_SQUARE), MMAX(m), NMAX(n), REPEAT(repeat), KMAX(1),
60
    MC_RANDOM_SEED(12345679), out_log(log), bias(b)
61
    {
        STATE = Bayes Construct();
62
                                                    // Preparation
    }
63
64
65
    /* constructor MODE MONTE CARLO */
    Bayesian_Estimation::Bayesian_Estimation(const int repeat, const int m, const int n, const int k)
66
        :MODE(MONTE_CARLO), MMAX(m), NMAX(n), REPEAT(repeat), KMAX(k),
67
    MC RANDOM SEED(12345679), out log("log bayes.txt")
68
    {
69
        STATE = Bayes_Construct();
                                                    // Preparation
70
    }
71
    /* constructor MODE MONTE_CARLO : change log file name */
72
    Bayesian Estimation::Bayesian Estimation(const int repeat, const int m, const int n, const int k, const char
73
     *const log)
        :MODE(MONTE CARLO), MMAX(m), NMAX(n), REPEAT(repeat), KMAX(k),
74
    MC_RANDOM_SEED(12345679), out_log(log)
75
    {
76
        STATE = Bayes Construct();
                                                    // Preparation
77
    }
78
79
    /* common subroutine for constructor */
80
    Bayesian Estimation::Bayes State Bayesian Estimation::Bayes Construct(void)
81
    {
82
        int i;
83
84
        R = NULL;
                                                   // Response Function
                                                                           : R[MMAX][NMAX]
        di = NULL;
85
                                                    // Experimental data
                                                                          : di[MMAX]
86
        dev = NULL;
                                                     // Err of EXP data
                                                                           : dev[MMAX]
87
        dr = NULL;
                                                    // Refolded data
                                                                           : dr[MMAX]
        E = NULL;
                                                                           : E[NMAX]
88
                                                   // Energy bin
89
        F = NULL;
                                                   // Initial spectrum
                                                                        : F[NMAX]
90
        LLDSUM = NULL;
                                                      // SUM of R Column
                                                                               : LLDSUM[NMAX]
91
        est = NULL;
                                                     // Estimated result
                                                                           : est[NMAX]
92
```

93	/* Memory allocation */
94	
95	// R[MMAX][NMAX]
96	if ((R = new double*[MMAX]) == NULL) {
97	return ERR_MEM;
98	}
99	for (i = 0; i < MMAX; i++) {
100	if ((R[i] = new double[NMAX]) == NULL) {
101	return ERR_MEM;
102	}
103	}
104	// di[MMAX]
105	if ((di = new double[MMAX]) == NULL) {
106	return ERR_MEM;
107	}
108	// dev[MMAX]
109	if ((dev = new double[MMAX]) == NULL) {
110	return ERR_MEM;
111	}
112	// dr[MMAX]
113	if ((dr = new double[MMAX]) == NULL) {
114	return ERR_MEM;
115	}
116	// E[NMAX]
117	if ((E = new double[NMAX]) == NULL) {
118	return ERR_MEM;
119	}
120	// F[NMAX]
121	if ((F = new double[NMAX]) == NULL) {
122	return ERR_MEM;
123	}
124	// est[NMAX]
125	if ((est = new double[NMAX]) == NULL) {
126	return ERR_MEM;
127	}
128	// est_var[NMAX]
129	if ((est_var = new double[NMAX]) == NULL) {
130	return ERR_MEM;
131	}
132	// LLDSUM[NMAX]
133	if ((LLDSUM = new double[NMAX]) == NULL) {
134	return ERR_MEM;
135	}
136	
137	return PREPARE;
138	/* End Memory allocation */
139	}
140	
141	/**************************************
142	/* destructor */
143	Bayesian_Estimation::~Bayesian_Estimation()
144	{
145	int i;
146	

```
if (R != NULL) {
147
148
             for (i = 0; i < MMAX; i++) {
                  if (R[i] != NULL) {
149
150
                      delete[] R[i];
151
                  }
152
             }
153
             delete[] R;
154
         }
155
         if (di != NULL) {
             delete[] di;
156
157
         }
158
         if (dev != NULL) {
159
              delete[] dev;
160
          if (dr != NULL) {
161
162
              delete[] dr;
163
         }
         if (E != NULL) {
164
165
              delete[] E;
166
         }
         if (F != NULL) {
167
168
              delete[] F;
169
         }
170
         if (est != NULL) {
              delete[] est;
171
172
         }
173
         if (est_var != NULL) {
174
              delete[] est_var;
175
         }
          if (LLDSUM != NULL) {
176
177
              delete[] LLDSUM;
178
         }
179
     }
180
     181
     /*
           入力設定 */
182
183
     void Bayesian_Estimation::Set_Bayes(char *s, char *fname1, char *fname2, char *fname3) {
184
         int i, j;
185
         const int STR_LENGTH = 4096;
         FILE *fp;
186
187
         char str[STR_LENGTH + 1], *tp1 = NULL, *tp2 = NULL, tok[] = ",¥t¥n";
188
         if (STATE != PREPARE) {
189
190
              return;
191
         }
192
         /*
               Input Response function into R[MMAX][NMAX] */
193
194
         try {
195
             if ((fp = fopen(fname1, "r")) == NULL) {
                  throw ERR_RFILE;
196
197
             }
              for (i = 0; i < MMAX; i++) {
198
                  if (fgets(str, STR_LENGTH, fp) == NULL) {
199
200
                      throw ERR_RFILE;
```

201	}
202	if ((tp1 = strtok(str, tok)) == NULL) {
203	throw ERR_RFILE;
204	}
205	R[i][0] = strtod(tp1, &tp2);
206	for (j = 1; j < NMAX; j++) {
207	if ((tp1 = strtok(NULL, tok)) == NULL) {
208	throw ERR RFILE:
209	}
210	R[i][i] = strtod(tn1.8tn2)
211	}
212	
212	fcloce(fn):
210	1003e(ip),
214	}
210	
210	$II(IP := NOLL) \{$
217	tciose(tp);
218	}
219	error_file = fname1;
220	STATE = err;
221	return;
222	}
223	/* End Input Response function */
224	
225	/* Input Experimental data into di[MMAX] and Standard deviation into dev[MMAX] */
226	try {
227	if ((fp = fopen(fname2, "r")) == NULL) {
228	throw ERR_RFILE;
229	}
230	if (fgets(str, STR_LENGTH, fp) == NULL) { // Skip first line as a comment
231	throw ERR_RFILE;
232	}
233	for (i = 0; i < MMAX; i++) {
234	if (fgets(str, STR_LENGTH, fp) == NULL) {
235	throw ERR_RFILE;
236	}
237	if ((tp1 = strtok(str, tok)) == NULL) {
238	throw ERR_RFILE;
239	}
240	if ((tp1 = strtok(NULL, tok)) == NULL) {
241	throw ERR RFILE;
242	}
243	difi] = strtod(tp1, &tp2):
244	switch (toupper(*s)) {
245	case 'J':
246	dev[i] = 0.0
247	break.
248	case 'F'
240	if ((tn1 = strtok(NUUL tok)) == NUUL)
250	
251	
201 252	i doviii = ottod/tn1 i tn2):
202	$uev[i] = sittou(tp1, \alpha tp2),$
203	Dieak,
∠54	derault

	255	dev[i] = strtod(s, &tp2);
<pre>257</pre>	256	break;
<pre>258</pre>	257	}
<pre>259</pre>	258	if (dev[i] < 0) {
<pre>200</pre>	259	dev[i] = -dev[i] * di[i];
<pre>261</pre>	260	}
262 throw ERR_DZERO; 263 } 264 } 265 fclose(fp); 266 ; 267 catch (const Bayes_State err) { 268 if (fp 1= NULL) { 269 fclose(fp); 270 } 271 error_file = fname2; 272 STATE = err; 273 return; 274 ; 275 /* End Input Experimental data and Standard deviation */ 276 ; 277 /* Input Energy bin into E[NMAX] and Initial spectrum into F[NMAX] */ 278 try { 279 if ((fgets(str, STR_LENGTH, fp) == NULL) { 280 throw ERR_RFILE; 281 ; 282 if ((fgets(str, STR_LENGTH, fp) == NULL) { 283 for (j = 0; j < NMAX; j*+) {	261	if ((MODE == ANALYSIS MODE == CHI_SQUARE) && dev[i] == 0.) {
<pre>263 } 264 } 265 fclose(fp); 266 } 267 catch (const Bayes_State err) { 268 if (fp 1= NULL) { 269 fclose(fp); 270 } 271 error_file = fname2; 272 STATE = err; 273 return; 274 } 275 /* End Input Experimental data and Standard deviation */ 276 ' 277 /* Input Energy bin into E[NMAX] and Initial spectrum into F[NMAX] */ 278 try { 279 if ((fp = fopen(fname3, "r")) == NULL) { 280 throw ERR_RFILE; 281 } 281 if ((fgets(str, STR_LENGTH, fp) == NULL) { 282 if (fgets(str, STR_LENGTH, fp) == NULL) { 283 throw ERR_RFILE; 284 } 285 for (j = 0; j < NMAX; j++) { 286 if (fgets(str, STR_LENGTH, fp) == NULL) { 287 throw ERR_RFILE; 288 } 289 if ((tp1 = strtok(str, tok)) == NULL) { 288 throw ERR_RFILE; 288 } 289 if ((tp1 = strtok(str, tok)) == NULL) { 290 throw ERR_RFILE; 291 } 292 E[]] = strtod(tp1, &tp2); 293 if ((tp1 = strtok(tuL, tok)) == NULL) { 294 throw ERR_RFILE; 295 } 295 F[]] = strtod(tp1, &tp2); 296 F[]] = strtod(tp1, &tp2); 297 } 298 fclose(fp); 299 } 200 catch (const Bayes_State err) { 301 if (fp 1= NULL) 302 fclose(fp); 303 error_file = fname3; 304 STATE = err; 305 return; 306 } </pre>	262	throw ERR_DZERO;
264 } 265 fclose(fp); 266 } 267 catch (const Bayes_State err) { if (fp 1= NULL) { fclose(fp); ? 270 > 271 error_file = fname2; 272 STATE = err; 273 return; 274 } 275 /* End Input Experimental data and Standard deviation */ 276 if ((fp = fopen(fname3, *r')) == NULL) { throw ERR_RFILE; if ((fgets(str, STR_LENGTH, fp) == NULL) { // Ksip first line as a comment	263	}
265 fclose(fp); 276 catch (const Bayes_State err) { 277 if (fp 1= NULL) { 288 if (fp 1= nume2; 271 error_file = fname2; 272 STATE = err; 273 return; 274 } 275 /* End Input Experimental data and Standard deviation */ 276	264	}
266 } 267 catch (const Bayes_State err) { 268 if (fp != NULL) { 269 fclose(fp); 270 } 271 error_file = fname2; 272 STATE = err; 273 returr; 274 } 275 /* End Input Experimental data and Standard deviation */ 276 /* 277 /* Input Energy bin into E[NMAX] and Initial spectrum into F[NMAX] */ 278 try { 279 if (fge fopen(fname3, "r")) == NULL) { 270 try { 271 if (fgets(str, STR_LENGTH, fp) == NULL) { 282 if (fgets(str, STR_LENGTH, fp) == NULL) { 283 for (j = 0;] < NMAX; j++) {	265	fclose(fp);
267 catch (const Bayes_State err) { 268 if (fp 1= NULL) { 270 } 271 error_file = fname2; 272 STATE = err; 273 return; 274 } 275 /* End Input Experimental data and Standard deviation */ 276 /* Input Energy bin into E[NMAX] and Initial spectrum into F[NMAX] */ 277 if ((fp = fopen(fname3, "r")) == NULL) { 278 try { 279 if ((fp = fopen(fname3, "r")) == NULL) { 270 throw ERR_RFILE; 281 } 282 if ((fgets(str, STR_LENGTH, fp) == NULL) { 283 for (j = 0; j < NMAX; j++) {	266	}
268 if (fp != NULL) { 269 folose(fp); 270 } 271 error_file = fname2; 272 STATE = err; 273 return; 274 } 275 /* End Input Experimental data and Standard deviation */ 276 /* 277 /* Input Energy bin into E[NMAX] and Initial spectrum into F[NMAX] */ 278 try { 279 if (fg = fopen(fname3, "r")) == NULL) { 270 throw ERR_FILE; 281 } 282 if (fgets(str, STR_LENGTH, fp) == NULL) { 283 throw ERR_RFILE; 284 } 285 for (j = 0; j < NMAX; j++) {	267	catch (const Bayes_State err) {
269fclose(fp);270}271error_file = fname2;272STATE = err;273return;274}275/* End Input Experimental data and Standard deviation */276/* Input Energy bin into E[NMAX] and Initial spectrum into F[NMAX] */277/* Input Energy bin into E[NMAX] and Initial spectrum into F[NMAX] */278try {279if (f(p = fopen(fname3, "r")) == NULL) {280throw ERR_RFILE;281}282if (fgets(str, STR_LENGTH, fp) == NULL) {283for (j = 0; j < NMAX; j++) {	268	if (fp != NULL) {
270 } 271 error_file = fname2; 272 STATE = err; 273 return; 274 } 275 /* End Input Experimental data and Standard deviation */ 276 /* Input Energy bin into E[NMAX] and Initial spectrum into F[NMAX] */ 276 /* Input Energy bin into E[NMAX] and Initial spectrum into F[NMAX] */ 277 /* Input Energy bin into E[NMAX] and Initial spectrum into F[NMAX] */ 278 try { 279 if ((fp = fopen(fname3, "r")) == NULL) { 280 throw ERR_RFILE; 281 } 282 if (fgets(str, STR_LENGTH, fp) == NULL) { 283 for (j = 0; j < NMAX; j++) {	269	fclose(fp);
271 error_file = fname2; 272 STATE = err; 273 return; 274 } 275 /* End Input Experimental data and Standard deviation */ 276 /* Input Energy bin into E[NMAX] and Initial spectrum into F[NMAX] */ 276 /* Input Energy bin into E[NMAX] and Initial spectrum into F[NMAX] */ 276 /* Input Energy bin into E[NMAX] and Initial spectrum into F[NMAX] */ 277 /* Input Energy bin into E[NMAX] and Initial spectrum into F[NMAX] */ 276 if (fgets(str, STR_LENGTH, fp) == NULL) { 281 } 282 if (fgets(str, STR_LENGTH, fp) == NULL) { 283 for (j = 0; j < NMAX; j++) {	270	}
272 STATE = err; 273 return; 274 } 275 /* End Input Experimental data and Standard deviation */ 276 /* Input Energy bin into E[NMAX] and Initial spectrum into F[NMAX] */ 277 /* Input Energy bin into E[NMAX] and Initial spectrum into F[NMAX] */ 278 try { 279 if (fgets(str, STR_LENGTH, fp) == NULL) { 280 if (fgets(str, STR_LENGTH, fp) == NULL) { 281 } 282 if (fgets(str, STR_LENGTH, fp) == NULL) { 283 if ((fgets(str, STR_LENGTH, fp) == NULL) { 284 } 285 for (j = 0; j < NMAX; j++) {	271	error_file = fname2;
273 return; 274 } 275 /* End Input Experimental data and Standard deviation */ 276 /* Input Energy bin into E[NMAX] and Initial spectrum into F[NMAX] */ 277 /* Input Energy bin into E[NMAX] and Initial spectrum into F[NMAX] */ 278 try { 279 if ((fp = fopen(fname3, "r")) == NULL) { 280 throw ERR_RFILE; 281 } 282 if (fgets(str, STR_LENGTH, fp) == NULL) { 283 throw ERR_RFILE; 284 } 285 for (j = 0; j < NMAX; j++) {	272	STATE = err;
<pre>274</pre>	273	return;
275/*End Input Experimental data and Standard deviation */276/*Input Energy bin into E[NMAX] and Initial spectrum into F[NMAX] */277try {278try {279if (ftp = fopen(fname3, "r")) == NULL) {280throw ERR_RFILE;281}282if (fgets(str, STR_LENGTH, fp) == NULL) {283throw ERR_RFILE;284}285for (j = 0; j < NMAX; j++) {	274	}
<pre>276 277 /* Input Energy bin into E[NMAX] and Initial spectrum into F[NMAX] */ 279 if ((fp = fopen(fname3, "r")) == NULL) { 280 throw ERR_RFILE; 281 } 282 if (fgets(str, STR_LENGTH, fp) == NULL) { // Skip first line as a comment 283 throw ERR_RFILE; 284 } 285 for (j = 0; j < NMAX; j++) { 286 if (fgets(str, STR_LENGTH, fp) == NULL) { 287 throw ERR_RFILE; 288 } 289 if ((tp1 = strtok(str, tok)) == NULL) { 290 throw ERR_RFILE; 291 } 292 E[j] = strtod(tp1, &tp2); 293 if ((tp1 = strtok(NULL, tok)) == NULL) { 294 throw ERR_RFILE; 295 } 296 F[j] = strtod(tp1, &tp2); 297 } 296 folose(fp); 299 } 200 catch (const Bayes_State err) { 301 if (fp != NULL) 302 folose(fp); 303 error_file = fname3; 304 STATE = err; 306 } 307 /* End Input Energy bin and Initial spectrum */ 308 </pre>	275	/* End Input Experimental data and Standard deviation */
$ \begin{array}{llllllllllllllllllllllllllllllllllll$	276	
278 try { 279 if ((fp = fopen(fname3, "r")) == NULL) { 280 throw ERR_RFILE; 281 } 282 if (fgets(str, STR_LENGTH, fp) == NULL) { 283 throw ERR_RFILE; 284 } 285 for (j = 0; j < NMAX; j++) {	277	/* Input Energy bin into E[NMAX] and Initial spectrum into F[NMAX] */
279 if ((fp = fopen(fname3, "r")) == NULL) { 280 throw ERR_RFILE; 281 } 282 if (fgets(str, STR_LENGTH, fp) == NULL) { 283 throw ERR_RFILE; 284 } 285 for (j = 0; j < NMAX; j++) {	278	try {
280 throw ERR_RFILE; 281 } 282 if (fgets(str, STR_LENGTH, fp) == NULL) { // Skip first line as a comment 283 throw ERR_RFILE; 284 } 285 for (j = 0; j < NMAX; j++) {	279	if ((fp = fopen(fname3, "r")) == NULL) {
281 } 282 if (fgets(str, STR_LENGTH, fp) == NULL) { // Skip first line as a comment 283 throw ERR_RFILE; 284 } 285 for (j = 0; j < NMAX; j++) {	280	throw ERR_RFILE;
282if (fgets(str, STR_LENGTH, fp) == NULL) { // Skip first line as a comment283throw ERR_RFILE;284}285for (j = 0; j < NMAX; j++) {	281	}
283throw ERR_RFILE;284}285for (j = 0; j < NMAX; j++) {	282	if (fgets(str, STR_LENGTH, fp) == NULL) { // Skip first line as a comment
	283	throw ERR_RFILE;
285for (j = 0; j < NMAX; j++) {	284	}
286 if (fgets(str, STR_LENGTH, fp) == NULL) { 287 throw ERR_RFILE; 288 } 289 if ((tp1 = strtok(str, tok)) == NULL) { 290 throw ERR_RFILE; 291 } 292 E[j] = strtod(tp1, &tp2); 293 if ((tp1 = strtok(NULL, tok)) == NULL) { 294 throw ERR_RFILE; 295 } 296 F[j] = strtod(tp1, &tp2); 297 } 298 fclose(fp); 299 } 300 catch (const Bayes_State err) { 301 if (fp != NULL) 302 fclose(fp); 303 error_file = fname3; 304 STATE = err; 305 return; 306 } 307 /* 4 End Input Energy bin and Initial spectrum */	285	for (j = 0; j < NMAX; j++) {
$\begin{array}{c cccc} 287 & throw ERR_RFILE; \\ 288 & & \\ \\ 289 & if ((tp1 = strtok(str, tok)) == NULL) { \\ 290 & throw ERR_RFILE; \\ 291 & & \\ \\ 292 & E[j] = strtod(tp1, & tp2); \\ 293 & if ((tp1 = strtok(NULL, tok)) == NULL) { \\ 294 & throw ERR_RFILE; \\ 295 & & \\ \\ 296 & F[j] = strtod(tp1, & tp2); \\ 297 & & \\ \\ 298 & fclose(fp); \\ 299 & \\ \\ 300 & catch (const Bayes_State err) { \\ 301 & if (fp != NULL) \\ 302 & fclose(fp); \\ 303 & error_file = fname3; \\ 304 & STATE = err; \\ 305 & return; \\ 306 & \\ \\ 307 & /^{*} & End Input Energy bin and Initial spectrum */ \\ 308 & \\ \end{array}$	286	if (fgets(str, STR_LENGTH, fp) == NULL) {
288 } 289 if ((tp1 = strtok(str, tok)) == NULL) { 290 throw ERR_RFILE; 291 } 292 E[j] = strtod(tp1, &tp2); 293 if ((tp1 = strtok(NULL, tok)) == NULL) { 294 throw ERR_RFILE; 295 } 296 F[j] = strtod(tp1, &tp2); 297 } 298 fclose(fp); 299 } 300 catch (const Bayes_State err) { 301 if (tp != NULL) 302 fclose(fp); 303 error_file = fname3; 304 STATE = err; 305 return; 306 } 307 /* 8 End Input Energy bin and Initial spectrum */	287	throw ERR_RFILE;
289 if ((tp1 = strtok(str, tok)) == NULL) { 290 throw ERR_RFILE; 291 } 292 E[j] = strtod(tp1, &tp2); 293 if ((tp1 = strtok(NULL, tok)) == NULL) { 294 throw ERR_RFILE; 295 } 296 F[j] = strtod(tp1, &tp2); 297 } 298 fclose(fp); 299 } 300 catch (const Bayes_State err) { 301 if (fp != NULL) 302 fclose(fp); 303 error_file = fname3; 304 STATE = err; 305 return; 306 } 307 /* End Input Energy bin and Initial spectrum */	288	}
290 throw ERR_RFILE; 291 } 292 E[j] = strtod(tp1, &tp2); 293 if ((tp1 = strtok(NULL, tok)) == NULL) { 294 throw ERR_RFILE; 295 } 296 F[j] = strtod(tp1, &tp2); 297 } 298 fclose(fp); 299 } 300 catch (const Bayes_State err) { 301 if (fp != NULL) 302 fclose(fp); 303 error_file = fname3; 304 STATE = err; 305 return; 306 } 307 /* 208 End Input Energy bin and Initial spectrum */	289	if ((tp1 = strtok(str, tok)) == NULL) {
291 } 292 E[j] = strtod(tp1, &tp2); 293 if ((tp1 = strtok(NULL, tok)) == NULL) { 294 throw ERR_RFILE; 295 } 296 F[j] = strtod(tp1, &tp2); 297 } 298 fclose(fp); 299 } 300 catch (const Bayes_State err) { 301 if (fp != NULL) 302 fclose(fp); 303 error_file = fname3; 304 STATE = err; 305 return; 306 } 307 /* 4 End Input Energy bin and Initial spectrum */	290	throw ERR_RFILE;
292 E[j] = strtod(tp1, &tp2); 293 if ((tp1 = strtok(NULL, tok)) == NULL) { 294 throw ERR_RFILE; 295 } 296 F[j] = strtod(tp1, &tp2); 297 } 298 fclose(fp); 299 } 300 catch (const Bayes_State err) { 301 if (fp != NULL) 302 fclose(fp); 303 error_file = fname3; 304 STATE = err; 305 return; 306 } 307 /* 4 Input Energy bin and Initial spectrum */	291	}
293 if ((tp1 = strtok(NULL, tok)) == NULL) { 294 throw ERR_RFILE; 295 } 296 F[j] = strtod(tp1, &tp2); 297 } 298 fclose(fp); 299 } 300 catch (const Bayes_State err) { 301 if (fp != NULL) 302 fclose(fp); 303 error_file = fname3; 304 STATE = err; 305 return; 306 } 307 /* 4 End Input Energy bin and Initial spectrum */	292	E[j] = strtod(tp1, &tp2);
294 throw ERR_RFILE; 295 } 296 F[j] = strtod(tp1, &tp2); 297 } 298 fclose(fp); 299 } 300 catch (const Bayes_State err) { 301 if (fp != NULL) 302 fclose(fp); 303 error_file = fname3; 304 STATE = err; 305 return; 306 } 307 /* 4 Input Energy bin and Initial spectrum */	293	if ((tp1 = strtok(NULL, tok)) == NULL) {
295 } 296 F[j] = strtod(tp1, &tp2); 297 } 298 fclose(fp); 299 } 300 catch (const Bayes_State err) { 301 if (fp != NULL) 302 fclose(fp); 303 error_file = fname3; 304 STATE = err; 305 return; 306 } 307 /* 4 Input Energy bin and Initial spectrum */	294	throw ERR_RFILE;
296 F[j] = strtod(tp1, &tp2); 297 } 298 fclose(fp); 299 } 300 catch (const Bayes_State err) { 301 if (fp != NULL) 302 fclose(fp); 303 error_file = fname3; 304 STATE = err; 305 return; 306 } 307 /* 4 Input Energy bin and Initial spectrum */	295	}
297 } 298 fclose(fp); 299 } 300 catch (const Bayes_State err) { 301 if (fp != NULL) 302 fclose(fp); 303 error_file = fname3; 304 STATE = err; 305 return; 306 } 307 /* End Input Energy bin and Initial spectrum */	296	F[j] = strtod(tp1, &tp2);
298 fclose(fp); 299 } 300 catch (const Bayes_State err) { 301 if (fp != NULL) 302 fclose(fp); 303 error_file = fname3; 304 STATE = err; 305 return; 306 } 307 /* End Input Energy bin and Initial spectrum */	297	}
299 } 300 catch (const Bayes_State err) { 301 if (fp != NULL) 302 fclose(fp); 303 error_file = fname3; 304 STATE = err; 305 return; 306 } 307 /* End Input Energy bin and Initial spectrum */	298	fclose(fp);
300 catch (const Bayes_State err) { 301 if (fp != NULL) 302 fclose(fp); 303 error_file = fname3; 304 STATE = err; 305 return; 306 } 307 /* End Input Energy bin and Initial spectrum */	299	}
301 if (fp != NULL) 302 fclose(fp); 303 error_file = fname3; 304 STATE = err; 305 return; 306 } 307 /* End Input Energy bin and Initial spectrum */	300	catch (const Bayes_State err) {
302 fclose(fp); 303 error_file = fname3; 304 STATE = err; 305 return; 306 } 307 /* End Input Energy bin and Initial spectrum */ 308	301	if (fp != NULL)
303 error_file = fname3; 304 STATE = err; 305 return; 306 } 307 /* End Input Energy bin and Initial spectrum */ 308	302	fclose(fp);
304 STATE = err; 305 return; 306 } 307 /* End Input Energy bin and Initial spectrum */ 308	303	error_file = fname3;
305return;306}307/* End Input Energy bin and Initial spectrum */308	304	STATE = err;
306 } 307 /* End Input Energy bin and Initial spectrum */ 308	305	return;
307 /* End Input Energy bin and Initial spectrum */ 308	306	}
308	307	/* End Input Energy bin and Initial spectrum */
	308	

```
309
                Set est[NMAX] and compensate with detection efficiency for each energy */
          /*
          for (j = 0; j < NMAX; j++) {
310
311
               LLDSUM[j] = 0;
312
               for (i = 0; i < MMAX; i++) {
313
                   LLDSUM[j] += R[i][j];
314
               }
315
          }
316
          for (j = 0; j < NMAX; j++) {
317
               for (i = 0; i < MMAX; i++) {
                   R[i][j] /= LLDSUM[j];
318
                                           // Compensate Response function with detection efficiency
319
               }
320
               est[j] = F[j] * LLDSUM[j];
                                           // Compensate Initial spectrum with detection efficiency
321
               est_var[j] = 0.0;
322
          }
          /*
                End Set est and Compensate */
323
324
325
                In Analysis mode : Input True spectrum into F[NMAX] */
          /*
          if (MODE == ANALYSIS) {
326
327
               try {
328
                   if ((fp = fopen(spc_true, "r")) == NULL) {
329
                        throw ERR_RFILE;
330
                   }
                   if (fgets(str, STR LENGTH, fp) == NULL) {
331
                                                                  // Skip first line as a comment
332
                        throw ERR RFILE;
333
                   }
                   for (j = 0; j < NMAX; j++) {
334
335
                        if (fgets(str, STR LENGTH, fp) == NULL) {
336
                            throw ERR_RFILE;
337
                        }
338
                        if ((tp1 = strtok(str, tok)) == NULL) {
339
                            throw ERR RFILE;
340
                        }
341
                        E[j] = strtod(tp1, &tp2);
342
                        if ((tp1 = strtok(NULL, tok)) == NULL) {
                            throw ERR_RFILE;
343
344
                        }
345
                        F[j] = strtod(tp1, &tp2) * LLDSUM[j];
346
                   }
347
                   fclose(fp);
348
               }
349
               catch (const Bayes State err) {
                   if (fp != NULL)
350
351
                        fclose(fp);
                   error_file = spc_true;
352
353
                   STATE = err;
354
                   return;
355
               }
356
          }
357
          /*
                End Input True spectrum */
358
          STATE = READY;
359
360
          return;
361
      }
362
```

363	/**************************************
364	/* Bayes 推定シーケンス */
365	int Bayesian_Estimation::Bayesian(void) {
366	int i, j, k, l;
367	FILE *fp = NULL;
368	double *a = NULL, **b = NULL, **c = NULL; // temporary variables
369	double **d_sample = NULL; // d_sample
370	double **e_sample = NULL; // e_samplele
074	double var_i = 0, var_e = 0, var_r = 0; // Sum of variance of input, e_sample and
371	refolded e_sample
372	
373	if (STATE != READY) { return -1; }
374	
375	/* Memory allocation for temporary variables */
376	try {
377	/* Set log file */
378	if (MODE != DEFAULT) {
379	i = 0:
380	while ((fp = fopen(out_log, "w")) == NULL) {
381	if (!(i++ < 100)) throw ERR WFILE:
382	}
383	switch (MODE) {
384	case ANALYSIS:
385	forintf(fp "Repeat ¥t Chi di ¥t Chi est ¥t D di ¥t D est ¥n") [.]
386	break:
387	case CHL SQUARE:
388	forintf(fn " repeat ¥t X2 ¥t sign ¥n")
389	hreak
390	case MONTE CARLO
391	forintf(fn " repeat¥t var of t ¥t var of e ¥t var of r ¥n")
302	hreak.
393	default
394	hreak.
395	}
396	
397	/* End Set log file */
308	
000	/* Memory allocation for temporary variables */ // NULL 初期化にもっといい方法が
399	
400	if ((a = new double[MMAX]) == NI II I) {
401	throw ERR MEM
402	
402	f if (/h = new double*IMMAYI) == NI II L) {
400	throw ERR_MEM:
404	
405	$\int f_{\text{or}} (i - 0) \cdot i < \text{MMAX} \cdot i + 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < \text{MMAX} \cdot i + 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < \text{MMAX} \cdot i + 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < \text{MMAX} \cdot i + 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < \text{MMAX} \cdot i + 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < \text{MMAX} \cdot i + 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < \text{MMAX} \cdot i + 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < \text{MMAX} \cdot i + 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < \text{MMAX} \cdot i + 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < \text{MMAX} \cdot i + 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < \text{MMAX} \cdot i + 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < \text{MMAX} \cdot i + 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < \text{MMAX} \cdot i + 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < \text{MMAX} \cdot i + 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < \text{MMAX} \cdot i + 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < \text{MMAX} \cdot i + 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < \text{MMAX} \cdot i + 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < \text{MMAX} \cdot i + 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < \text{MMAX} \cdot i + 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < \text{MMAX} \cdot i + 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < \text{MMAX} \cdot i + 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < \text{MMAX} \cdot i + 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < \text{MMAX} \cdot i + 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < \text{MMAX} \cdot i + 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < \text{MMAX} \cdot i + 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < \text{MMAX} \cdot i + 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < \text{MMAX} \cdot i + 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < \text{MMAX} \cdot i + 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < \text{MMAX} \cdot i + 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < 1 \int f_{\text{or}} (i - 1) \cdot i < 1 \int f_{\text{or}} (i$
400	h(1 - 0, 1 < M(0, -1))
402	
400	$\int for (i = 0; i < MM\Delta X; i++) J$
110	if (/h[i] = new double[NIMA X]) == N[)
410 /11	
+11 /12	
112	
413	$\int \frac{1}{1000} \frac{1}{1000} \int \frac{1}{1000} \frac{1}{1000} \int \frac{1}{1000} \frac{1}{10000} \int \frac{1}{10000000000000000000000000000000000$
414	

415	throw ERR_MEM;
416	}
417	for (i = 0; i < MMAX; i++) {
418	c[i] = NULL;
419	}
420	for (i = 0; i < MMAX; i++) {
421	if ((c[i] = new double[NMAX]) == NULL) {
422	throw ERR_MEM;
423	}
424	}
425	if ((d_sample = new double*[KMAX]) == NULL) {
426	throw ERR_MEM;
427	}
428	for (k = 0; k < KMAX; k++) {
429	d sample[k] = NULL;
430	}
431	for (k = 0; k < KMAX; k++) {
432	if ((d_sample[k] = new double[MMAX]) == NULL) {
433	throw ERR MEM;
434	}
435	}
436	; if ((e_sample = new double*[KMAX]) == NULL) {
437	throw ERR_MEM:
438	}
439	for $(k = 0; k < KMAX; k++)$
440	e sample[k] = N[1]
441	
442	for $(k = 0; k \le KMAX; k++)$
443	if ((e. sample[k] = new double[NMAX]) == NULL) {
444	throw ERR_MEM
445	}
446	}
447	/* End Memory allocation for temporary variables */
448	
449	/* Initialize d_sample[KMAX][MMAX]*/
450	if (MODE == MONTE_CABLO) {
451	var i = 0
452	for (i = 0: i < MMAX: i++) {
453	var i += (dev[i] * dev[i])
454	
455	for $(k = 0; k < KMAX; k++)$
456	for $(i = 0; i < MMAX; i++)$
457	d sample[k][i] = Randmize G(di[i] dev[i])
458	u_sampie[k][i] = Kandinize_O(u[i], dev[i]),
450	
459	}
400	
401	$for (k = 0; k \in KMAY; k + +)$
402	$101 (K - U, K > KIVIMA, K^{++}) \{$ for (i = 0; i < MMAA V; i++) (
403	$ U (1 - 0, 1 \times V V AA, 1^+) $
404 465	u_sampie[kj[i] – ul[i];
400))
400	}
407	/* FND Initialize di seconda */
400	

469	
470	/* Initialize e_sample[KMAX][NMAX] */
471	for (k = 0; k < KMAX; k++) {
472	for (j = 0; j < NMAX; j++) {
473	e_sample[k][j] = est[j];
474	}
475	}
476	/* END Initialize e_sample */
477	}
478	catch (const Bayes State err) {
479	STATE = err;
480	}
481	/* End Memory allocation for temporary variables */
482	
483	/* Unfolding */
484	l = 0;
485	while (STATE == READY) {
486	for (k = 0; k < KMAX; k++) {
487	/* Initialize a,b,c */
488	for (i = 0; i < MMAX; i++) {
489	a[i] = 0;
490	for (j = 0; j < NMAX: j++) {
491	b[i][i] = 0;
492	c[i][i] = 0;
493	}
494	}
495	/* End Initialize */
496	
497	/* Calculate a : b : c */
498	for (i = 0; i < MMAX; i++) {
499	for (j = 0; j < NMAX: j++) {
500	b[i][i] = R[i][i] * e sample[k][i];
501	a[i] += b[i][i];
502	}
503	}
504	for (j = 0; j < NMAX; j++) {
505	for (i = 0; i < MMAX; i++) {
506	if (a[i] != 0) {
507	c[i][i] = d sample[k][i] * b[i][i] / a[i];
508	}
509	else {
510	c[i][j] = 0;
511	}
512	}
513	}
514	/* End Calculate */
515	
516	/* Renew Estimation est */
517	for (j = 0; j < NMAX; j++) {
518	e_sample[k][j] = 0;
519	for (i = 0; i < MMAX; i++) {
520	e_sample[k][j] += c[i][j];
521	}
522	}

523	/* End Renew Estimation */
523 524	
525	1
526	for $(i = 0; i < NMAY; i++)$
520	eetfil = 0.
528	for (k = 0; k < KMAY; k++)
520	est[i] += e somple[k][i]
529	est[j] +- e_sampie[k][j],
530	} potfil /= double/KMAX);
527	esijj /- double(KiMAX),
522	}
535	/* Judge Centinue and Analyze */
535	f Subge Continue and Analyze f
535	$ (!(TT) \times REFERT)) $
530	STATE - STOP,
538	}
530	awitch (MORE) (
539	
540 541	Case ANALTSIS.
541 540	$\{ (I = Pouse ANALYSIS(for I)) < 0 \}$
54Z	$ (- Bayes_ANALYSIS(p , 1)) < 0) $
543 544	} brook
544 545	Dieak,
545 546	
540 547	Case CHI_SQUARE.
547 540	{ Bayon Chi SOLIARE(fr. I);
548	Bayes_Cni_SQUARE(IP, I);
549	Dreak;
550	
551	case MONTE_CARLO.
552 552	$\{$
555 554	static const int MCtype – 1,
554 555	$val_e = 0,$
555	$\int \frac{1}{2} \int $
550	$ O(i) - O_i \le O(i) A_i A_i = 0;$
557	$est_val[j] = 0,$ for $(k = 0; k \in KMAY; k++)$
550	$ O (K - 0, K - K MAA, K^++) \{$
560	est_variji += (e_sanipie[kjiji - estiji) - (e_sanipie[kjiji - estiji),
561) ost variii /= daubla/KMAY_1);
562	$est_val[] = double(nivirx - 1),$
563	
564	\int yer $\mathbf{r} = 0$.
565	$vai_i = 0$, for (i = 0; i < MMAX; i++) /
566	for $(i = 0, i < NMAY$, $i + 1)$
567	var r += R[i][i] * R[i][i] * eet var[i];
568	
560	۲ ۱
570	
570	j else j
572	forintf/fn "%07d¥t% 3IE¥t% 3IE¥t% 3IE¥n" var i var e var r):
573	if $(1/var r < var i))$
574	
575	
576	ر hreak:
010	biour,

577 } 578 default: 579 break; 580 } 581 /* End Judge and Analyze */ 582 } 583 /* End Unfolding */ 584 585 if (MODE != DEFAULT && fp != NULL) { 586 fclose(fp); 587 } 588 if (STATE == STOP) { 589 590 /* Refolding */ for (i = 0; i < MMAX; i++) { 591 592 dr[i] = 0; for (j = 0; j < NMAX; j++) { 593 594 dr[i] += R[i][j] * est[j]; 595 } 596 } /* 597 End Refolding */ 598 for (j = 0; j < NMAX; j++) { 599 600 if (LLDSUM[j] > 0) { est[j] /= LLDSUM[j]; 601 est_var[j] = sqrt(est_var[j]); 602 603 est_var[j] /= LLDSUM[j]; 604 } 605 else { 606 est[j] = 0; est_var[j] = 0; 607 608 } 609 } 610 STATE = FIN; 611 } 612 getchar(); Free Memory for temporary variables */ 613 /* 614 if (a != NULL) { 615 delete[] a; 616 } if (b != NULL) { 617 618 for (i = 0; i < MMAX; i++) { if (b[i] != NULL) { 619 620 delete[] b[i]; 621 } 622 } 623 delete[] b; 624 } 625 if (c != NULL) { 626 for (i = 0; i < MMAX; i++) { 627 if (c[i] != NULL) { 628 delete[] c[i]; 629 } 630

}

```
631
               delete[] c;
632
          }
633
          if (d_sample != NULL) {
634
               for (k = 0; k < KMAX; k++) {
635
                   if (d_sample[k] != NULL) {
636
                        delete[] d_sample[k];
637
                   }
638
               }
639
               delete[] d_sample;
640
          }
          if (e_sample != NULL) {
641
642
               for (k = 0; k < KMAX; k++) {
                   if (e_sample[k] != NULL) {
643
                        delete[] e_sample[k];
644
645
                   }
646
               }
647
               delete[] e_sample;
648
          }
649
          /*
                 End Free Memory for temporary variables */
650
          if (STATE == FIN) {
651
652
               return I;
653
          }
654
          else {
655
               return -1;
656
          }
657
      }
658
659
      /*
            Bayes 推定計算本体 */
      void Bayesian_Estimation::Bayes_EXE(double *xe_sample, double *xd_sample, double *xa, double *xb,
660
      double **xc)
661
      {
662
          int i, j;
663
          /* Initialize a,b,c */
664
          for (i = 0; i < MMAX; i++) {
665
666
               xa[i] = 0;
667
               for (j = 0; j < NMAX; j++) {
668
                   xb[i][j] = 0;
669
                   xc[i][j] = 0;
670
               }
671
          }
          /* End Initialize */
672
673
674
          /* Calculate a : b : c */
675
          for (i = 0; i < MMAX; i++) {
676
               for (j = 0; j < NMAX; j++) {
677
                   xb[i][j] = R[i][j] * xe_sample[j];
678
                   xa[i] += xb[i][j];
679
               }
680
          }
          for (j = 0; j < NMAX; j++) {
681
682
               for (i = 0; i < MMAX; i++) {
683
                   if (xa[i] != 0) {
```

684 xc[i][j] = xd_sample[i] * xb[i][j] / xa[i]; 685 } else { 686 687 xc[i][j] = 0; 688 } 689 } 690 } 691 /* End Calculate */ 692 /* Renew Estimation est */ 693 for (j = 0; j < NMAX; j++) { 694 695 xe_sample[j] = 0; for (i = 0; i < MMAX; i++) { 696 697 xe_sample[j] += xc[i][j]; 698 } 699 } 700 /* End Renew Estimation */ 701 } 702 703 704 /* 評価スペクトル取得 */ 705 int Bayesian_Estimation::Get_RESULT(double **xenergy, double **xest, double **xdi, double **xdr) { 706 int i; 707 708 if (*xenergy != NULL) { 709 return -1; 710 } 711 if ((*xenergy = new double[NMAX]) == NULL) { 712 return -1; 713 } 714 if (*xest != NULL) { 715 return -1; 716 } 717 if ((*xest = new double[NMAX]) == NULL) { 718 return -1; 719 } if (*xdi != NULL) { 720 721 return -1; 722 } if ((*xdi = new double[MMAX]) == NULL) { 723 724 return -1; 725 } if (*xdr != NULL) { 726 727 return -1; 728 } if ((*xdr = new double[MMAX]) == NULL) { 729 730 return -1; 731 } 732 for (i = 0; i < NMAX; i++) { 733 (*xenergy)[i] = E[i]; 734 (*xest)[i] = est[i]; 735 } 736 for (i = 0; i < MMAX; i++) { 737 (*xdi)[i] = di[i];

738	(*xdr)[i] = dr[i];
739	}
740	
741	return 0;
742	}
743	
744	/* 評価スペクトル取得:MONTE_CARLO MODE */
745	int Bayesian_Estimation::Get_RESULT(double **xenergy, double **xest, double **xdi, double **xdr, double
745	**xest_var) {
746	int i;
747	
748	i = Get_RESULT(xenergy, xest, xdi, xdr);
749	if (i) {
750	return i;
751	}
752	if (*xest_var != NULL) {
753	return -1;
754	}
755	if ((*xest_var = new double[NMAX]) == NULL) {
756	return -1;
757	}
758	
759	for (i = 0; i < NMAX; i++) {
760	(*xest_var)[i] = est_var[i];
761	}
762	
763	return 0;
764	}
765	
766	/**************************************
767	/* ベイズ推定 ANALYSIS MODE */
768	int Bayesian_Estimation::Bayes_ANALYSIS(FILE *fp, int I) {
769	int i, j;
770	double chi_di = 0, chi_est = 0, D_di = 0, D_est = 0; //分析用変数
771	
772	static int I_best;
773	static double *est_best = new double[NMAX];
774	static double sign = 1e+300;
775	
776	
777	STATE = ERR_WFILE;
778	return -1;
779	
700	II (esi_desi NOLL) {
701	STATE - ERR_IVIEW,
702	1etuili - 1,
781	ſ
785	/* Refolding */
786	for (i = 0: i < MMAX: i++) {
787	drfil = 0.
788	for (i = 0: i < NMAX: i++) {
789	dr(i) += R(i)(i) * est(i)
790	}

```
791
          }
792
          /*
                End Refolding */
793
794
          /*
                Data Analysis */
795
          for (i = 0; i < MMAX; i++) {
796
               chi_di += ((di[i] - dr[i])*(di[i] - dr[i])) / (dev[i] * dev[i]);
               D_di += di[i] * log(di[i] / dr[i]);
797
798
          }
799
          /*
                End Data Analysis */
800
          /*
                Spectrum Analysis */
801
802
          for (j = 0; j < NMAX; j++) {
              chi_est += ((est[j] - F[j])*(est[j] - F[j]));
803
               if (F[j] > 1E-300) {
804
                   D_est += F[j] * log(F[j]);
805
806
                   if (est[j] > 1E-300) {
807
                        D_est -= F[j] * log(est[j]);
808
                   }
809
                   else {
810
                        D_est -= F[j] * (-300);
811
                   }
812
              }
               else {
813
814
                   if (est[j] > 1E-300) {
                       D_est -= F[j] * (300 - log(est[j]));
815
816
                   }
817
                   else {
818
                       D_est -= 0;
819
                   }
820
              }
821
          }
          /*
822
                End Spectrum Analysis */
823
824
          fprintf(fp, " %07d ¥t %.2IE ¥t %.2IE ¥t %.2IE ¥t %.2IE ¥n", I, chi_di, chi_est, D_di, D_est);
825
          if (D_est < sign) {
826
827
               sign = D_est;
828
              I_best = I;
829
              for (j = 0; j < NMAX; j++) {
830
                   est_best[j] = est[j];
831
              }
832
          }
          if (!(I < REPEAT)) {
833
               for (j = 0; j < NMAX; j++) {
834
835
                   est[j] = est_best[j];
836
              }
837
          }
838
          return I_best;
839
     }
840
          /***
841
     /*
842
            ベイズ推定 繰り返し終了判定
                                              Chi SQUARE */
843
      void Bayesian_Estimation::Bayes_Chi_SQUARE(FILE *fp, int I) {
844
          int i, j;
```

```
845
         double log10_rep = 0, log10_chi = 0, chi = 0;
846
         double alpha = 0, beta = 0, sign = 0;
847
         static double sx_1 = 0, sy_1 = 0, sx_2 = 0, sxy = 0;
848
849
         if (fp == NULL) {
850
             STATE = ERR WFILE;
851
             return;
852
         }
853
         /* Refolding */
854
         for (i = 0; i < MMAX; i++) {
855
856
             dr[i] = 0;
857
             for (j = 0; j < NMAX; j++) {
858
                 dr[i] += R[i][j] * est[j];
859
             }
860
             chi += ((di[i] - dr[i])*(di[i] - dr[i])) / (dev[i] * dev[i]);
861
         }
862
         /* End Refolding */
863
         /* Calculate least square line */
864
         if(1){ // もっといい方法ないかな
865
             log10_rep = log10((double)l);
866
867
             log10 chi = log10(chi);
868
             sx_1 += log10_rep;
869
             sy_1 += log10_chi;
870
             sx_2 += log10_rep * log10_rep;
871
             sxy += log10_rep * log10_chi;
872
             alpha = (l * sxy - sx_1 * sy_1) / (l * sx_2 - sx_1 * sx_1);
             beta = (sx_2 * sy_1 - sxy * sx_1) / (I * sx_2 - sx_1 * sx_1);
873
874
             sign = (log10((double)MMAX * bias) - beta) / alpha;
875
         }
         /* End Calculate */
876
877
878
         fprintf(fp, " %07d ¥t %.5IE ¥t %.5IE ¥n", I, chi, sign);
879
         if (log10 rep > sign) {
             STATE = STOP;
880
881
         }
882
         return;
883
     }
884
     885
           ベイズ推定
                         MONTE CARLO */
886
     /*
887
     int Bayesian_Estimation::Bayes_MONTE_CARLO(void) {
888
         return 0;
889
     }
890
     891
     /*
892
           正規分布型乱数 -- ボックス・ミューラー法 */
893
     double Bayesian Estimation::Randmize G(double ave, double sigma) {
894
         static std::mt19937_64 engine(MC_RANDOM_SEED);
895
         static std::uniform real distribution<double> rand d(0.0, 1.0);
896
         const double PI = 3.1415926535898;
897
         double x1, x2;
898
         double z1, z2;
```

899	
900	x1 = rand_d(engine);
901	x2 = rand_d(engine);
902	z1 = sqrt(-1 * log(x1)) * sin(2 * PI * x2);
903	z1 = z1 * sigma + ave;
904	// z2 = sqrt(-1 * log(x1)) * cos(2 * PI * x2);
905	// z2 = z2 * sigma + ave;
906	return z1 > 0 ? z1 : 0.0; // 負の値が得られたときは 0 を返す
907	}
908	/**************************************
909	#endif // endif _DEBUG