

氏名・(本籍)	なか じま きょう 中 嶋 享
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	理博第2169号
学位授与年月日	平成17年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科, 専攻	東北大学大学院理学研究科(博士課程)物理学専攻
学位論文題目	Measurement of Neutrino Oscillation Parameters with Precise Calculation of Reactor Neutrino Spectrum at KamLAND (KamLANDにおける原子炉ニュートリノスペクトルの精密計算に基づく ニュートリノ振動パラメータの測定)
論文審査委員	(主査) 教授 鈴木 厚 人 教授 山 本 均 助教授 末 包 文 彦, 綿 村 哲, 中 村 哲

## 論 文 目 次

1	Introduction	1
1.1	The neutrino	2
1.2	Neutrino oscillation	3
1.3	Neutrino oscillation experiments	6
1.4	KamLAND experiment	16
2	KamLAND experiment	19
2.1	Anti-neutrino detection method	19
2.2	Location of KamLAND	23
2.3	Detector design	25
3	Event reconstruction and detector calibration	39
3.1	Waveform analysis	39
3.2	Gain calibration	41
3.3	Bad channel selection	43
3.4	Timing calibration	43
3.5	Vertex reconstruction and fiducial volume	45
3.6	Energy reconstruction	50
3.7	Muon track reconstruction	58
3.8	Noise event selection (Noise cut)	62
3.9	Flasher event selection (Flasher cut)	63

4	Background estimation	64
4.1	Single event distribution	64
4.2	Background for reactor $\bar{\nu}_e$ selection	67
5	Event selection	77
5.1	Data collection	77
5.2	Livetime calculation	77
5.3	Detection efficiency	82
5.4	Reactor $\bar{\nu}_e$ event selection	84
6	Fission rate calculation	90
6.1	Reactor neutrino	91
6.2	Time evolution of the fission rate	96
6.3	Fission rate calculation using the reactor core analysis method	99
6.4	Fission rate calculation using simplified method	100
6.5	Systematic error of the simple method	110
7	Expected reactor anti-neutrino event estimation	112
7.1	Japanese commercial reactors	112
7.2	Korean commercial reactors	124
7.3	World reactors	128
7.4	Contribution from long lived nuclides	130
7.5	Anti neutrino flux at KamLAND	133
7.6	Reactor $\bar{\nu}_e$ events at KamLAND assuming no anti-neutrino oscillation	133
8	Analysis	140
8.1	Event ratio and significance of reactor $\bar{\nu}_e$ disappearance	141
8.2	Correlation between observed event rate and reactor $\bar{\nu}_e$ flux	141
8.3	Oscillation Analysis	146
9	Conclusion	151
A	Japanese research reactors and world reactors	152
B	Operation data of Japanese reactors	154
C	Operation data of Korean reactors	157
	Bibliography	159

# 論文内容要旨

KamLAND (Kamioka Liquid Scintillator Anti-Neutrino Detector) は岐阜県飛騨市に立地する1000tonの液体シンチレータを用いた反ニュートリノ検出器である。周囲約180kmの柏崎や若狭湾岸には合計熱出力80GWの原子力発電所が運転している。KamLANDではこれらの原子炉内で核分裂生成物の $\beta$ 崩壊により発生し飛来する電子型反ニュートリノを観測している。2成分のニュートリノ振動の確率は振動パラメータ( $\Delta m^2, \sin^2 2\theta$ )を用いて

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2(\Delta m^2 L / 4E \nu_e)$$

で表される。KamLANDでは、原子炉反ニュートリノのエネルギー( $\sim 4\text{MeV}$ )と基線長( $\sim 180\text{km}$ )により $\Delta m^2 \sim 10^3(\text{eV}^2)$ の領域に検出感度をもつ。これは太陽ニュートリノ(電子型ニュートリノ)の観測によりニュートリノ振動の解とされる大混合角解(LMA)の領域を含んでいる。したがって30年来の太陽ニュートリノ欠損問題を人工的反ニュートリノを用いて解明することが可能である。KamLAND実験は2002年1月より実験を開始し、2002年12月に原子炉反ニュートリノ消失現象を発見した。しかし、ニュートリノ振動現象を確認するには、さらにデータを蓄積して検出事象のエネルギー分布の変化を識別する必要があった。

今回、KamLANDにおける2002年3月9日から2004年1月11日までのデータを解析した。実験動作時間は $(515.1 \pm 0.3)$ 日、有効体積は543.7tonであり、前回の4.7倍の766ton-yearに対する測定データを用いた。電子型反ニュートリノの検出は陽子との逆 $\beta$ 崩壊反応にともなって発生する2つの信号の遅延同時計測で行う。宇宙線 $\mu$ 粒子が引き起こすバックグラウンドを取り除くために、 $\mu$ 粒子事象後の2秒間、検出器の全体積もしくは $\mu$ 粒子の軌跡から3m以内の事象に影響の程度に応じて除外した。得られた検出事象数は $2.6\text{MeV} < E_{\text{prompt}} < 8.5\text{MeV}$ に対して258であった。最も影響のあるバックグラウンド事象として、Rnの崩壊核である $^{210}\text{Po}$ からの $\alpha$ 粒子と液体シンチレータ中の $^{12}\text{C}$ との $^{12}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反応によるバックグラウンド( $10.3 \pm 7.1$ )がある。これに、宇宙線 $\mu$ 粒子による破砕反応原子核である $^6\text{Li}$ と $^8\text{He}$ からの $\beta$ 線と中性子によるバックグラウンド( $4.9 \pm 0.9$ )、検出器外での $\mu$ 粒子反応に伴う高速中性子によるバックグラウンド( $0 \pm 0.89$ )、検出器内部の放射性物質に起因するバックグラウンド( $2.69 \pm 0.02$ )を加えることにより、全てのバックグラウンド事象数は $17.8 \pm 7.3$ と見積もられる。

原子炉反ニュートリノの検出に関する系統誤差は5.5%であり、有効体積の決定精度(4.7%)が支配的である。ニュートリノ振動の解析に必要な原子炉反ニュートリノ事象の予測数の系統誤差はこれより小さくすることが必須となる。そのため、日本の全原子力発電所の運転出力データの提供を各電力会社からうけ、各原子炉における核種別核分裂反応率を追跡し、ニュートリノフラックスを計算した。核燃料中で核分裂する主要な核種は、核燃料として最初から存在する $^{235}\text{U}$ 、 $^{238}\text{U}$ と、 $^{238}\text{U}$ が中性子吸収反応とベータ崩壊を繰り返して生成される $^{239}\text{Pu}$ 、 $^{241}\text{Pu}$ である。核分裂あたりのニュートリノエネルギースペクトルは熱中性子核分裂実験で得られた $\beta$ 線のエネルギー分布からの逆算値( $^{235}\text{U}$ 、 $^{239}\text{Pu}$ 、 $^{241}\text{Pu}$ )、または計算( $^{238}\text{U}$ )による値が知られている。これに依存する系統誤差は2.5%である。一方、原子炉の運転熱出力は炉心を出入りする冷却材のエンタルピーバランスに基づいて計算され、依存する量は主に給水流量、炉心圧力および給水温度である。通常の炉心条件下では給水流量が熱出力の系統誤差に対して最も支配的な要素であり、測定誤差は2%である。

一方、核分裂あたりに発生するニュートリノのエネルギースペクトルは核種によって異なるため、核分裂核種の組成比の時間変化を計算する必要がある。核分裂反応に伴う核燃料の組成比の変化の割合は、単位燃料質量あたりにそれまで発生したエネルギーで定義される燃焼度を用いて表わされる。これ

らの核種の組成比の燃焼度変化を追跡する手法として、原子炉内部の3次元的中性子フラックスを考慮して計算する原子炉解析手法が知られている。この手法は中性子フラックスの分布の他、核燃料の構成、制御棒の状態など多数のパラメータを必要とするため、日本の全ての商業用原子炉に対して適用するのは現実的ではない。そこで、KamLAND実験のために、より少数のパラメータを用いて核種別核分裂反応率を簡易的に計算する方法が東京電力(株)によって開発された。これは、日本の商業用原子炉において、核燃料として $^{235}\text{U}$ が3%程度の濃縮ウランを用いており、一回あたりに交換する燃料の割合およびサイクルがそれぞれ30%程度および約1年と同じ運転パターンが採用されていることを利用している。一定割合の燃料交換を数回繰り返した後の核種別核分裂反応率の時間変化は炉心の個性によらず燃料の特性のみに依存するパターンとなり、このような炉心は平衡炉心と呼ばれている。一方、原子炉の最初の運転サイクルでは、炉心内全ての核燃料が $^{235}\text{U}$ と $^{238}\text{U}$ によって構成された状態から反応が開始するため、平衡炉心よりPuの核分裂反応率が少ない状態で推移する。この状態の炉心は初装荷炉心と呼ばれている。簡易的な計算方法では、任意の炉心を参照用として選定した初装荷炉心と平衡炉心を組み合わせてモデル化する。具体的には、新燃料部分を初装荷炉心とし、それ以外の部分を平衡炉心として体積比を用いて相似して表現する。それぞれの部分の核分裂反応率は、参照用炉心に対して原子炉解析手法で計算された燃焼度変化を適用する。さらに、参照用炉心として選定した炉心との燃料の特性の違いに対する補正を加えることにより、原子炉ニュートリノのエネルギースペクトルの計算精度は1%以内である。

KamLANDに飛来する原子炉ニュートリノにおいて日本以外の原子炉からの寄与は運転熱出力の定格値を用いて3-5%と見積もられる。このうち最も寄与の大きい韓国の原子炉に対しては運転状況を反映させるために毎日の電気出力を用いて原子炉ニュートリノの発生量を計算している。

これらをあわせると、原子炉反ニュートリノ予測事象数の計算の系統誤差は3.4%であり、検出の誤差とあわせて系統誤差を6.5%で見積もることができた。原子炉反ニュートリノ事象の予測数はニュートリノ振動の効果を考えない場合、 $365.2 \pm 23.7(\text{syst})$ である。また、各原子炉の運転状況に起因する原子炉ニュートリノフラックスの変動と検出事象数との相関はバックグラウンド事象の計算値と矛盾がないことを示している。予測事象数に対する、バックグラウンドの数 $17.8 \pm 7.3$ を引いた検出事象数の比は、

$$\frac{N_{\text{obs}} - N_{\text{BG}}}{N_{\text{expected}}} = 0.658 \pm 0.044(\text{stat}) \pm 0.047(\text{syst})$$

であり、原子炉反ニュートリノの消失現象を99.998% ( $3.99\sigma$ )の信頼度で再確認した。これは前回の解析期間に対する事象数の比 $0.589 \pm 0.085(\text{stat}) \pm 0.042(\text{syst})$  (99.95% C.L.)と矛盾しない。また、検出事象のエネルギー分布から、ニュートリノ振動から期待される歪みを99.6% ( $2.88\sigma$ )の信頼度で検出した。KamLANDのデータを用いた2成分ニュートリノ振動の解析によるニュートリノ振動パラメータの最適値は

$$\Delta m^2 = 7.9_{-0.3}^{+0.3} \times 10^5 \text{eV}^2, \tan^2 \theta = 0.46$$

である。また、太陽ニュートリノ実験の結果と組み合わせた解析による最適値は

$$\Delta m^2 = 7.9_{-0.3}^{+0.3} \times 10^5 \text{eV}^2, \tan^2 \theta = 0.40_{-0.10}^{+0.10}$$

であり、現在、最も高精度の測定値である。

## 論文審査の結果の要旨

中嶋享氏が提出した博士論文のタイトルは、「Measurement of Neutrino Oscillation Parameters with Precise Calculation of Reactor Neutrino Spectrum at KamLAND」である。内容は、原子炉ニュートリノ実験カムランドに於いて、精密な原子炉ニュートリノの量を計算し、その結果を用いて反電子ニュートリノの振動パラメータを測定したことである。この論文の中で、中嶋氏は、日本にある53基の原子炉から提供される運転データをまとめ上げ、又韓国その他の世界中の原子炉の影響も考慮に入れ、カムランド検出器に飛来する原子炉ニュートリノの量を3.4%の高精度で計算した。その値と実際にカムランド検出器で測定された原子炉ニュートリノの量を比べることで、検出される原子炉ニュートリノの量が大きく欠損していることを発見し、そのエネルギースペクトルの歪みから、原子炉ニュートリノの振動パラメータを測定した。この結果は、素粒子物理に大きな影響を与えている。中嶋氏はまた検出器の建設に於いても、直径13mのプラスチックバルーンの製作、バックグラウンドコントロール、装置較正など重要な貢献を行った。

論文は、中嶋享氏の研究内容を過不足なく説明しており、発表も問題なかった。質疑応答では、一般質問につまる面もあったが、全般的に合格ラインに達していると判断される。

以上により、中嶋享氏が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することが示された。したがって中嶋享氏提出の博士論文は、博士（理学）の学位論文として合格と認める。