K2K 実験の現状と今後について

加藤 一成
(高エネルギー物理学研究室)

1 Introduction

ニュートリノ振動は素粒子物理学において最も重要な研究テーマの一つであり、有限なニュートリノ質量とレプトン世代間混合の確かな証拠である。現在の素粒子標準理論ではニュートリノ質量はゼロであり、またレプトン数は保存する。したがって、ニュートリノ振動の発見は有限なニュートリノ質量とレプトン数非保存という、標準理論の枠組みを超えた新現象の発見でもある。

ニュートリノ振動は弱い相互作用の固有状態 $(\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau)$ が質量固有状態 (ν_1, ν_2, ν_3) と異なり、かつこれらのうち少なくとも 2 つが縮退していない場合に起こる。その振動確率は、関与するニュートリノ数が 2 つの場合、

$$P(\nu_l \to \nu_{l'}) = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(1.27 \times \Delta m^2[\mathrm{eV}^2] \frac{L[\mathrm{km}]}{E[\mathrm{GeV}]} \right) \tag{1}$$

と表される。ここで $\nu_l,\ \nu_{l'}$ は異なる弱相互作用固有状態であり、θ はその間の混合角、Δm^2 は質量の二乗差、L はニュートリノが生成された地点から観測された地点までの距離、E はニュートリノのエネルギーである。さらに、振動に関与するニュートリノ数が 3 つの場合には、クォーク世代での小林・益川行列と類似の MNS 行列により表記される。

現在のところ、大気ニュートリノ・太陽ニュートリノの観測においてニュートリノ振動の兆候を見つけており、特に大気ニュートリノの観測においては、ニュートリノ振動以外の解釈は難しい。

K2K 実験は加速器ニュートリノを用いた世界最初の長基線ニュートリノ振動実験であり、現在進行中である。本実験の主な目的は、大気ニュートリノで観測されているミューオンニュートリノ (ν_μ) の欠損を実験室で確認し、ニュートリノ振動のパラメータを精密に測定することである。そのため、つくば市にある高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の 12GeV-PS により平均エネルギー 1.4 GeV の純粋なミューオンニュートリノビームを生成し、250 km 離れた岐阜県神岡町のスーパーカミオカンデ検出器で検出する。そして、ニュートリノビーム生成直後のニュートリノのフラックス、エネルギースペクトルと 250 km 飛行後のそれらを比較することにより、ミューオンニュートリノの消滅および式 1 で表されるようなニュートリノ振動に特徴的な「エネルギースペクトルの歪み」を検証する。

2 2002 年 3 月現在の K2K 実験の結果

本実験は 1999 年 1 月より engineering run を開始、ビームの調整後、同年 6 月より physics run を開始し、現在までに 5.6×10^{19} POT (protons on target) のデータを蓄積した。これは我々の最終目標の約半分に相当する。このうち解析に用いたのはスーパーカミオカンデのデータ収集が安定であった 4.8×10^{19} POT 分のデータである。KEK 内に置いたビームモニターおよび前置検出器のデータの解析結果から、データ収集の全期間を通してニュートリノビームは 1 mrad 以内の精度でスーパーカミオカンデの方向を向いており (要求は 3 mrad 以内)、またそのフラックス、エネルギースペクトルも統計誤差の範囲内で安定であった。

前置水チェレンコフ検出器におけるニュートリノフラックスの測定結果から、ニュートリノ振動がない場合にスーパーカミオカンデにおいて期待されるニュートリノ事象数が $80.6^{7.3}_{-8.0}$ であるのに対し、実際に観測されたのは 56 事象であり、この結果、ニュートリノ振動がないという仮定は 97%以上の確率で排除される。また、振動があるとした場合、振動パラメータのひとつである $\sin^2 2\theta$ を 1 と仮

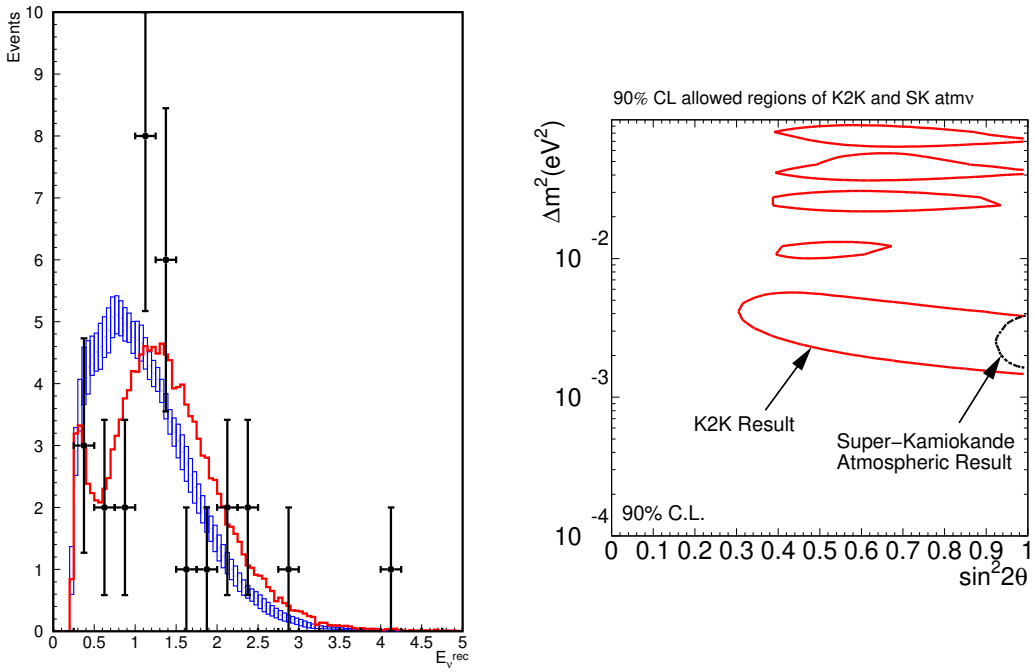

図 1: 左:スーパーカミオカンデにおけるニュートリノのエネルギースペクトルの形。点がデータ、ボックスが振動がない場合、ヒストグラムが振動がある場合のベストフィットである。右:振動解析の結果得られた振動パラメータの許容領域 (90% C.L.)。

定すると、質量 2 乗差は $\Delta m^2 = 3.0 \times 10^{-3}$ eV^2 付近でこの観測結果を最も良く再現し、これはスーパーカミオカンデでの大気ニュートリノの観測結果 $\Delta m^2 = 1.6$–4.0×10^{-3} eV^2 と良く一致するものである。また、スーパーカミオカンデで観測されたニュートリノのエネルギースペクトルは、上記の振動パラメータを仮定すると、ニュートリノ振動の効果により 0.5–1.0 GeV で歪みが現れることが期待され、我々はエネルギースペクトルにもニュートリノ振動の兆候を見始めている (図 1 左参照)。

3 K2K 実験の最新結果

2002 年 5 月、ニュートリノに関する国際会議 Neutrino 2002 において、我々はスーパーカミオカンデでのニュートリノ事象数とエネルギースペクトルの形の両方を用いた最初のニュートリノ振動解析の結果を発表した。ここでは付録的にその概要だけを簡単に述べておく。振動がない場合にスーパーカミオカンデにおいて期待される事象数が $80.1^{+6.2}_{-5.4}$ であるのに対し[1]観測は 56 事象、またエネルギースペクトル形は図 1 左のようになり、これらから振動がないとした場合にこのような観測結果を得る確率は 1%以下となり、振動がないことをほぼ排除した。また振動がある場合、振動パラメータのベストフィット値は $(\sin^2 2\theta,\ \Delta m^2) = (1.0,\ 2.7 \times 10^{-3}\ \text{eV}^2)$ であり、90% C.L. で許される振動パラメータの領域は図 1 右である。この結果は大気ニュートリノの観測結果と非常に良い一致を示している。

4 K2K 実験の今後

さて、ニュートリノ反応事象数とエネルギースペクトルを用いた振動解析はほぼ確立したが、さらにニュートリノ振動に対する感度を上げるため、いくつかの課題が残っている。

[1] 2002 年 3 月現在の結果とのわずかな違いは、今回 1kt 検出器の事象再構成精度を上げるために改良を加えた解析ツールを用いて、再度解析し直したことによる。

1. エネルギースペクトルを求めるために、荷電カレント準弾性散乱反応事象 ($\nu_\mu + n \to \mu + p$; QE) 候補を選んでいる。これに加え $\nu_\mu + N \to \mu + N' + m\pi$ のような非弾性散乱事象 (non-QE) の情報も使うことで、ニュートリノ振動に対する感度を上げることができる。しかしながら、このような non-QE 事象を用いるためには、ニュートリノと原子核との反応をより詳しく研究する必要がある。そのために、我々は前置検出器アップグレードを計画、準備している。

2. 現在の振動解析で大きな系統誤差を与える原因として、KEK からスーパーカミオカンデへのニュートリノスペクトルの外挿に用いる far/near 比が挙げられる。より精度の良い far/near 比を求めるため、現在の π 粒子モニターのデータに加え、CERN-PS で行われている HARP 実験において π 粒子生成の測定を行う。

4.1 前置検出器アップグレード

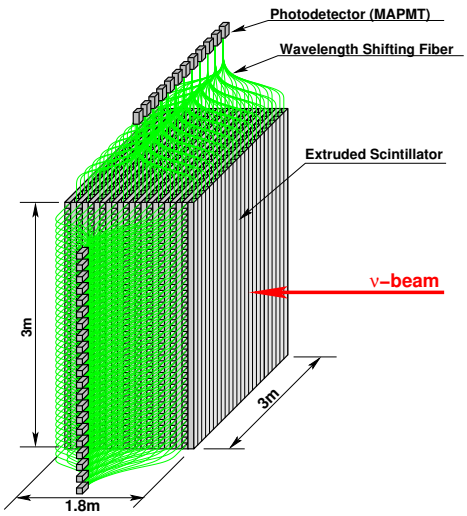

図 2: 新検出器となるシンチレータ飛跡検出器の概略図。

スーパーカミオカンデが示唆する $\Delta m^2 = 3 \times 10^{-3}$ eV^2 付近での振動に対して感度を上げるためには、ニュートリノエネルギー 0.7 GeV 付近でのスペクトルの精密測定が不可欠となる。さらに non-QE 事象を理解することは、スペクトル測定のバックグラウンドの除去が可能となり、さらに精度を上げることができる他、スーパーカミオカンデにおける non-QE 事象も振動解析に用いることができるようになり、振動に対する感度を大幅に上げることができる。0.7 GeV という低エネルギー領域で検出効率が高いのが、1kt 水チェレンコフ検出器 (1kt 検出器) であるが、バックグラウンドの測定、non-QE 事象の理解には不向きである。そこで前置検出器のアップグレード計画として、エネルギースペクトルの精密測定、ニュートリノ反応の詳細研究を目的に、京都グループが中心となって 2000 年度から新検出器 (SciBar 検出器) の開発を進めている。SciBar 検出器は図 2 に示すように、2×2 cm^2 程度の大きさのセグメント化されたシンチレータを縦横にならべ、そのシンチレーション光を波長変換ファイバーを用いて読み出すシステムで、このため 4 cm 程度の短い飛跡まで検出することができ、350 MeV/c 以上の陽子、300 MeV 以上のニュートリノ事象に対して高い検出効率を持つ。また p/π の識別能力を持ち、1.2 GeV/c 以下では誤識別率が 10%以下であるという結果を得ている。これらにより、QE/non-QE 反応の識別、QE 反応のバックグラウンドの評価、non-QE 反応の理解にその性能を発揮すると考えられる。

現在までに検出器基本性能の評価をほぼ終えており、実機建設のための量産システムの構築段階に入っている。同時に読み出し用エレクトロニクスの開発も進んでおり、そのノイズレベル、性能は我々の要求を十分に満たしていることを確認した。2002 年 9 月より実機のインストールを開始、2003 年のデータ収集では部分的に読み出しを行う予定である。さらに 2003 年の夏に全ての要素をインストールし、その後のビームで本格的にデータを収集する。

4.2 HARP 実験

前置検出器で測定したニュートリノエネルギースペクトルをスーパーカミオカンデに外挿するには、ニュートリノの親粒子である π 粒子の運動量分布、角度分布を知る必要がある。K2K 実験では π 粒子モニターを π 粒子生成標的直後に置き、それらを測定している。しかしながら、この検出器はガスチェレンコフ型であり、1 次陽子ビームというバックグラウンドを避けるため、2 GeV/c 以上の π 粒

子しか測定することができない。また、いくつかの要因から系統誤差も大きくなっている。CERN-PS で行われている HARP 実験は、まさに 1 次陽子ビームを標的に当てたときに生成される π 粒子の運動量角度分布を測定することを目的としている。我々はこの HARP 実験において、実際に K2K 実験の π 粒子生成標的と 12.9GeV/c の陽子ビームを用い、1 GeV/c 付近から上の π 粒子の運動量角度分布を測定する。2001 年夏に種々のテストを兼ね HARP 実験でデータ収集をしており、2002 年夏に本解析用のデータを収集する予定である。

5 Super-Kamiokande 再建

2001 年夏、スーパーカミオカンデは使えなくなった PMT の交換作業を行った。その後、実験再開に向け再注水中の同年 11 月、底面部の PMT のひとつが爆縮したことをきっかけに、連鎖的に PMT が割れるという事故が起こり、内水槽の PMT11146 本のうち 6779 本と外水槽の PMT1885 本のうち 1017 本が破損した。事故の詳細については東京大学宇宙線研究所神岡研究施設のホームページ (URL; http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/index-j.html) を参照していただくことにして、ここでは今後の復旧予定を述べる。

復旧は 2 段階のステップで行う。第一に早急な K2K 実験再開のため、PMT の数を半分に減らした検出器を 2002 年 12 月までをメドに再建する。そして K2K 実験終了後、残りの半分の PMT をインストールし、2007 年開始予定である JHF ニュートリノ実験に備える。

現在、実験再開のために、事故原因究明、事故防止策の検討がされ、2002 年 3 月までに PMT の爆縮防止用のケースのテストまで終わり、本格的に再建が開始された。その後、9 月中旬までに PMT のインストール終了、11 月中旬までかけて注水、10 月上旬からは部分的にスーパーカミオカンデ実験が再開できる予定である。また K2K としては、2003 年 12 月に実験再開予定である。

6 まとめと京都グループの貢献

K2K 実験は 1999 年の実験開始以来、2001 年 7 月までに収集したデータをもとに振動解析を行った。その結果、「振動なし」という仮定を 99%以上の信頼度で排除し、振動があるとした場合には、スーパーカミオカンデの大気ニュートリノ観測の結果とコンシステントな結果を得ており、ニュートリノ振動の存在はほぼ間違いないものであると言える。今後、事故により破損したスーパーカミオカンデを 2002 年内に再建し、2003 年 1 月より K2K のデータ収集を再開、統計を現在の 2 倍程度まで蓄積し、より精度の良い振動解析を目指す。

最後に京都グループの貢献をまとめておく。2001 年度初頭のグループ構成は西川、笹尾、中家、稲垣、加藤、横山、前坂、長谷川、山本と原子核・ハドロン研究室の PD である市川であったが、稲垣が年度半ばに博士号を取得したため、2002 年 3 月現在では計 9 名の体制となっている。本実験のスポークスマンである西川が実験全体をまとめ、中家がデータ収集・解析の中心的な役割を果たしている。検出器ごとに見ると、これまで稲垣が中心となって行っていたビームモニターを、2002 年度からは加藤・前坂をはじめとし、京都グループで責任を持つ。市川が 1kt 検出器の MC tuning、加藤が 1kt 検出器のキャリブレーション・解析と MRD のデータクォリティチェック、前坂が LG/VETO のデータチェックを行っている。また解析では、加藤・中家でスペクトル・振動解析を行っている。SciBar 検出器開発は京都グループ全体で取り組み、特に前坂が構造体設計と MC study、長谷川が検出器性能評価とインストール前の各構成要素チェックシステムの構築、山本が読み出し用エレクトロニクス開発、西川・中家・市川がそれら全体をまとめている。HARP 実験には加藤が中心的となって参加しデータ収集・解析を行う。将来計画である JHF ニュートリノ実験では中家・西川がワーキンググループ内で中心的な役割を果たし、市川がビームラインの設計を担当している。今後も K2K 実験、JHF ニュートリノ実験は京都グループが中心となって進めていく次第である。