

# 3年目を迎えたニュートリノ振動実験

横山広美  
サイエンスライター

1999年4月に始まった「つくば-神岡間 長基線ニュートリノ振動実験」は、素粒子ニュートリノに質量があることを証明する世界に先駆けた実験である。つくばから発射された $\mu$ ニュートリノの数は250km先の神岡で減少しており、質量があることの確証となる振動現象を示しているようだ。ニュートリノ研究の最前線をレポートする。

## ファーストイベント

“I hope the candidates run 7436 sub 259 ev 14054126 seems to be a real candidate.”

岐阜県神岡町に設置された検出器、スーパーカミオカンデ (SK) グループからの第1報はeメールだった。

1999年6月19日午後8時すぎ、メールを受けた茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構 (KEK) ニュートリノグループの部屋では、ただちにcandidates (イベント候補) が画面に表示された。そのまわりをスタッフ、各大学から参加している常駐の学生たちが取り囲む。

ファーストイベント。KEKから発射された $\mu$ ニュートリノが神岡まで250kmを飛び、SKで初めて観測されたのだ。「やれやれよかった、と思いました」

このメールを書いた東京大学宇宙線研究所の伊藤好孝助教授 (当時助手) は、ファーストイベントを得たときの心境をこう語った。実験開始から約3か月が

たっていた。ビームを収束する電磁ホーンに不調があり、その回復後もなかなかイベントが出ず心配が募っていたので、感激よりも安堵感のほうが大きかったようである。

この実験は、ニュートリノに質量をもつことを確認するために開始された「つくば-神岡間 長基線ニュートリノ振動実験」、略してK2K (KEK to Kamioka) 実験である。日米韓3か国の15を越す大学・研究機関が参加する国際素粒子実験として99年4月にスタートしていた。

## 大気ニュートリノ振動の観測

これより1年前の98年6月、SKグループは大気ニュートリノ (陽子などの一次宇宙線が大気と反応して生成されるeニュートリノ、 $\mu$ ニュートリノ) の観測からニュートリノに質量がある証拠を得たと報告した。 $\mu$ ニュートリノについて、SKに上空から到来するものと、地球の裏側で生成され地球を貫通してくるものを比べると、

裏側から来る数は有意に減少していた。これは長距離を飛行している間に、 $\mu$ ニュートリノが別種のニュートリノ ( $\tau$ ニュートリノ) に変化したためと考えられる。

この現象は「ニュートリノ振動」といって、変化する前後のニュートリノに質量差があるときにのみ起こる。ニュートリノにはe型、 $\mu$ 型、 $\tau$ 型の3種類があり、それぞれ $\nu_e$ 、 $\nu_\mu$ 、 $\nu_\tau$ と表示される。このうち2つのニュートリノ、例えば $\mu$ ニュートリノと $\tau$ ニュートリノが2つの異なる質量の固有状態の重ね合わせであれば、 $\mu$ ニュートリノは飛行している間に $\tau$ ニュートリノへ、さらに $\mu$ ニュートリノに変化 (振動) する。これはニュートリノに質量をもつことを示している。

太陽から到来するeニュートリノの数が、予想値の3分の1しか観測されないことは1960年代から知られていた。ニュートリノ振動と太陽中を通過するときの効果によって、eニュートリノが他の種類に変化したことが予想されたが、太陽が放出しているeニュートリノの数はモデル計算によってしかわからないため、本当に減少しているのか決定的な証拠にはなっていなかった。それに対して大気ニュートリノ観測の結果は飛行距離の長短によるもので、ニュートリノのフラックス (流量) 推定値によらない初めての観測結果であった。

この大気ニュートリノによるニュートリノ振動の報告は、素粒子物理学界

神岡から共同研究者に送られたファーストイベントについてのメール (1999年6月19日)。

```
Dear all,
I hope the candidates run 7436 sub 259 ev 14054126 seems
to be a real candidate.
It has T diff = 2 micro, and seems to be
invisible muon + proton ring + decay electron.
The fitted direction is wrong since it's for decay electron.
The result of manual fitting is;
```

	Evis	Direction vector	Cerenkov angle
muon ring	12 MeV	(0.459, -0.819, 0.344)	36 deg
proton ring	36 MeV	(-0.503, -0.852, 0.149)	28 deg

```
My personal feeling is that this is the candidate.
However, again please do not post it to any newspapers or TV directors until
the second event come.
```



を非常に興奮させた。現在の素粒子物理学の根幹をなす理論は「標準理論」と呼ばれていて、目指す究極の理論には達していない。しかし今までの「すべて」の素粒子実験の結果は、これから予測できるものだった。標準理論ではニュートリノの質量は0とされている。これは標準理論の外から与えられた値で、理論から質量が0と理由づけられている光子とは異なる。標準理論ではニュートリノの質量が0でなければならない理由はなかった。そしてニュートリノに質量があった事実は、われわれ人類が手にする標準理論から予測できなかった初めての結果なのである。

「ニュートリノ振動は自然の示す科学的事実として受け入れざるをえないが、不思議に感じることに変わらない」と、KEKの早戸良成助手は述べる。そのニュートリノ振動は式(1)で表すことができる。あるニュートリノから他のニュートリノに変化する確率は4つの値によって決まり、その1つが $\Delta m^2$ 、ニュートリノが変化する前後での質量の2乗差となる。K2K実験では飛行距離Lを約250km、エネルギーEを平均1.3GeVに固定して実験を行う。

式(1)

SKで測定された $\mu$ ニュートリノの数  
 $\Delta m^2$ がないときにSKで測定が予測される数

$$= 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left( \frac{1.27 \times \Delta m^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}]}{E [\text{GeV}]} \right)$$

$\theta$  : 混合角

$\Delta m^2$ : 変化する前後の

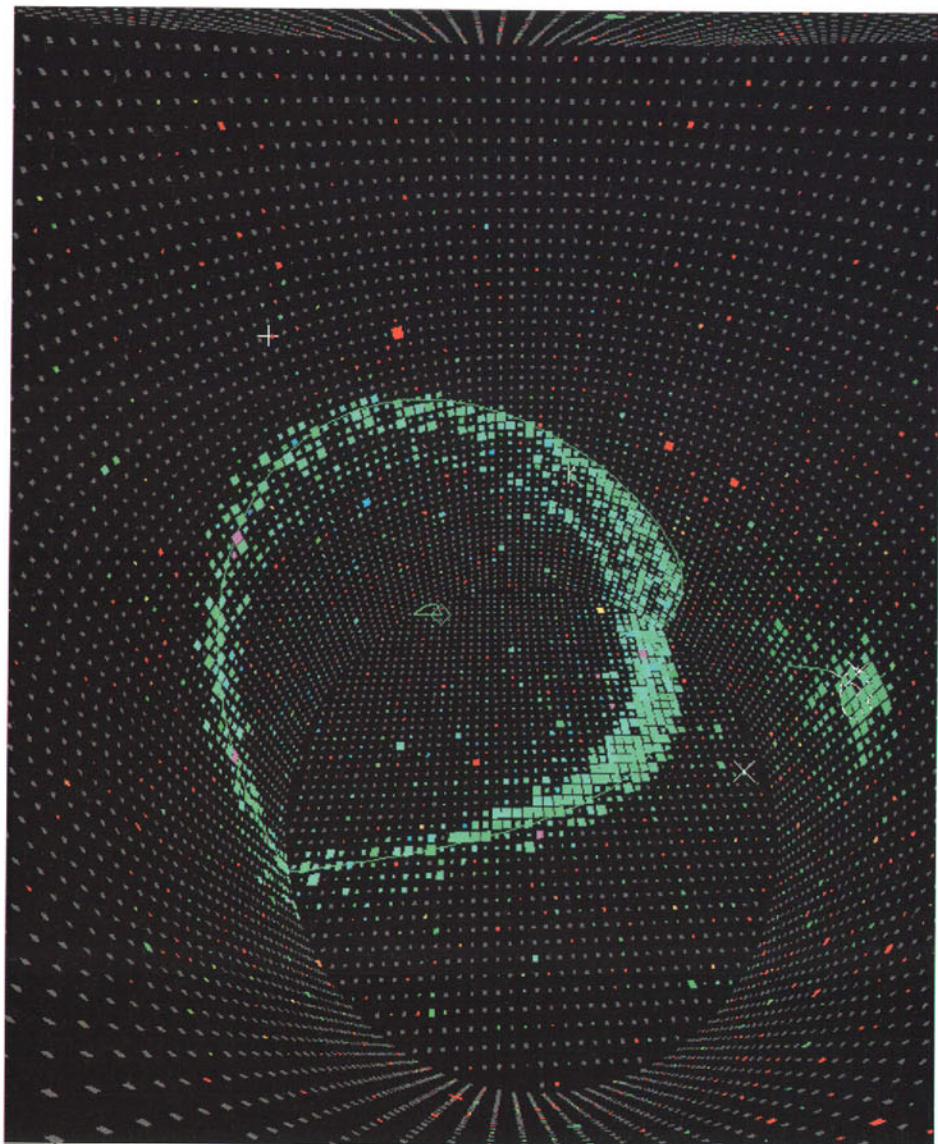
ニュートリノ質量の2乗差

L : 飛行距離 (K2K実験では250km)

E :  $\mu$ ニュートリノのエネルギー

(K2K実験では平均1.3GeV)

注) [eV]は素粒子物理学で用いられるエネルギーの単位。質量は[eV/c<sup>2</sup>]で表されるが、エネルギーを示すmc<sup>2</sup> (c:光速) [eV]に換算して表すのが慣例である。実際は3種類の間での振動だが、ここでは単純化して2種類間の振動で表す。



スーパーカミオカンデで捕らえられた $\mu$ ニュートリノによるチェレンコフ光リング。  
 KEKから来た $\mu$ ニュートリノが水の中の核子と反応すると、 $\mu$ 粒子をつくる。  
 $\mu$ 粒子の速度が水中での光速よりも速い場合、進行方向を軸に円錐形の弱い光を発する。  
 (http://neutrino.kek.jp/figures.htmlによる)

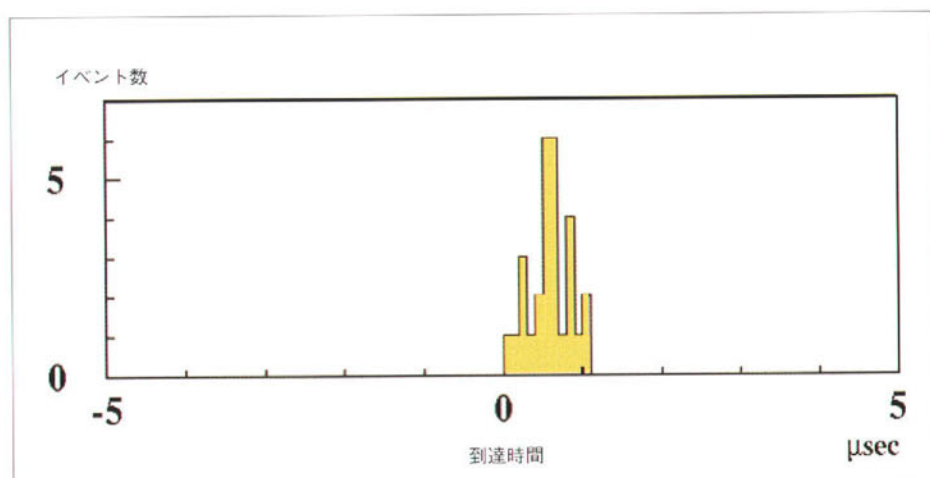
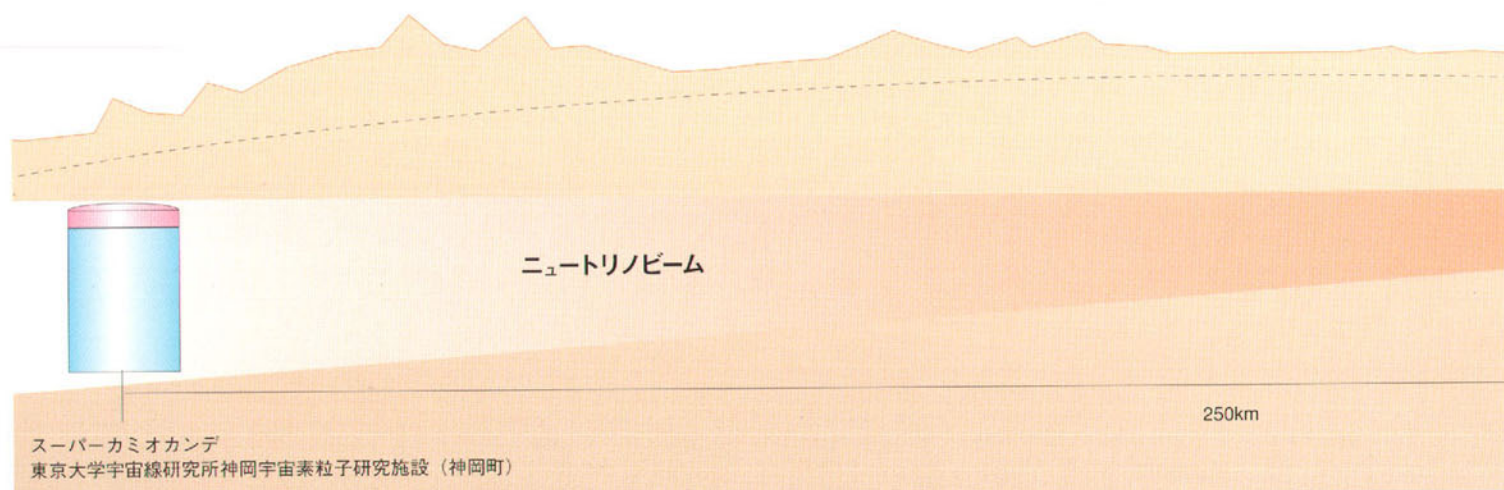
### 世界初の長基線実験

人工ニュートリノを使った振動実験はK2K実験が初めてではない。これまでの実験でニュートリノ振動が確認されなかったのは、ニュートリノの飛行距離が1km程度の「短基線」であったためである。飛行距離が短いとき、つまり式(1)中でL/Eが小さい実験は、 $\Delta m^2$ が比較的大きな場合に有効である。これまでの実験ではニュートリノが宇宙の質量を担うダークマターの1つであることを期待し、その $\Delta m^2$ 領域を探索していた。ところが、大気ニュートリノ振動によって示された $\Delta m^2$ は、0.0005

~0.006 [eV<sup>2</sup>]と予想外に小さかった。

K2K実験はこの小さな $\Delta m^2$ 領域の探索が可能な、世界初の長基線実験である。大気ニュートリノ観測によってニュートリノに質量があることが報告された今、加速器で大量に人工ニュートリノを生成し実験を行うのは、まずニュートリノ振動を確実にするため、そしてさらに踏み込んで $\Delta m^2$ を明らかにし、ニュートリノ反応を解明するためだ。大気ニュートリノにはeニュートリノと $\mu$ ニュートリノが混ざっているが、人工的に生成した $\mu$ ニュートリノビームに混ざっているeニュートリノは1%以下に抑えられる。また、大気ニュー





イベントの到達時間情報

KEKから発射されたニュートリノの到達予想時間を0としている。  
ニュートリノビーム長が0.8マイクロ秒のため、0~1マイクロ秒の前後を含め1.5マイクロ秒の間に得られたイベントをKEKからのニュートリノイベントと識別する。

トリノの到来方向はまちまちであり、生成されてからの飛行距離の不確かさが大きい。エネルギーに関しても同様である。K2K実験では飛行距離が250kmと決まっており、生成したビームのエネルギーを測定できることから、質量差 $\Delta m^2$ を精度良く決定できる。

この実験を日本が世界に先駆けて開始することができた背景には、2つの幸運があった。まず、陽子崩壊を検出するために建設された水チェレンコフ検出器カミオカンデが、超新星爆発で放出され1987年2月23日に地球に到来したニュートリノを幸運にも11イベント観測し、ニュートリノ検出器として知られるようになった。その後、企業を

含めた多くの人々の努力によってさらに高感度、大容量のSKが誕生し、世界中から多くの研究者が集まってきた。もう1つの幸運は、神岡-つば間振動が最大になる、ちょうど良いエネルギー領域の $\mu$ ニュートリノを生成することができる、KEKの12GeV陽子加速器が存続していたことである。今から約15年も前に、エネルギーが低く、フロンティアを担う高エネルギー物理の装置としては価値がなくなりつつあったこの加速器の運転停止が議論された。しかし、まだまだ面白い実験の可能性があるとて運転が継続され、それから10年余りを経て大活躍することになったのである。

### ニュートリノの発射と選別

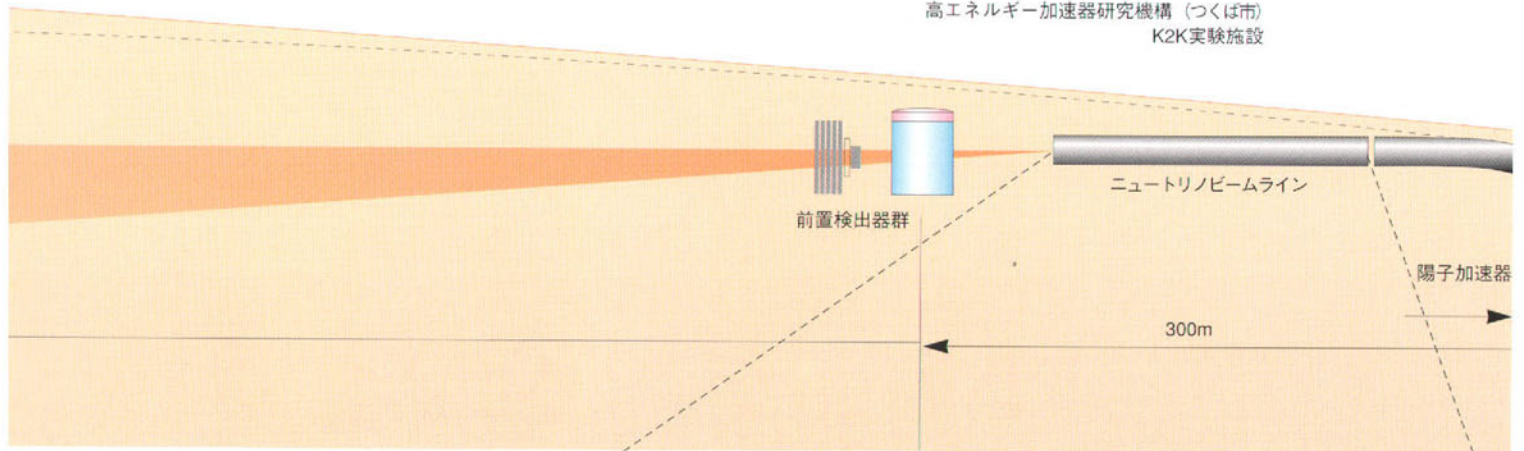
自然界にはニュートリノが大量に存在する。ビッグバンの名残である宇宙背景ニュートリノ、超新星爆発や太陽からのニュートリノ、地球の内部に含まれている放射性物質からのニュートリノなどである。太陽から来るニュートリノだけでも、地球を1秒間に1平方cm当たり660億個が通過する。これほどの数があるにもかかわらず、われわれがそのことに気づかないのは、ニュートリノの反応確率が非常に低いためである。

反応確率が低いということは、検出器とも反応せず、イベントが捕らえにくいことを示している。つばから発射された $\mu$ ニュートリノのほとんどは、反応せずに地中を通りぬけてSKを通過し、宇宙空間へ飛び去っていく。このため統計精度を上げるには、大量の $\mu$ ニュートリノを生成し、長期間にわたって測定する必要がある。つばでは、2.2秒ごとに6兆個の陽子を用いて $\mu$ ニュートリノビームを生成し、発射している。

この $\mu$ ニュートリノビームの生成から発射までの過程については37ページの図をご覧ください。生成した $\mu$ ニュートリノの数とエネルギーは、陽子加速器から300m下流に位置する前置検出器群で測定する。

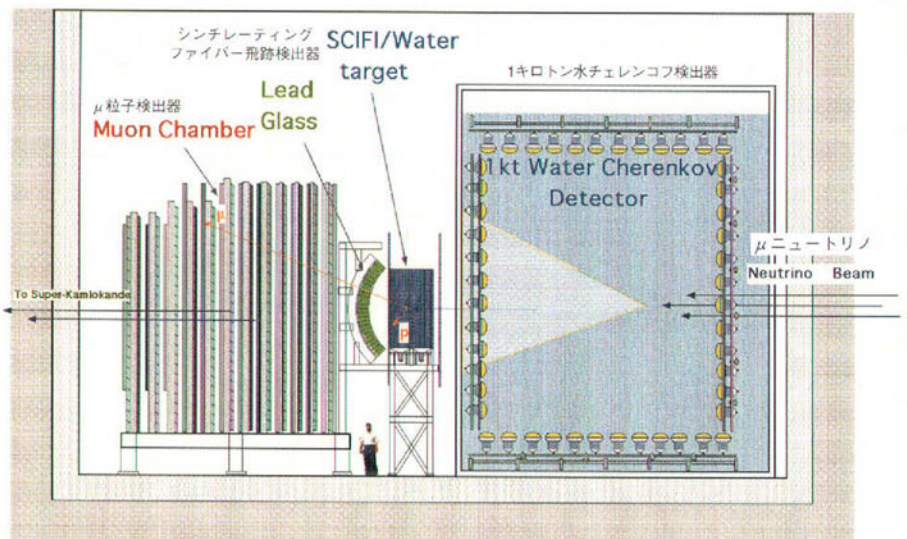
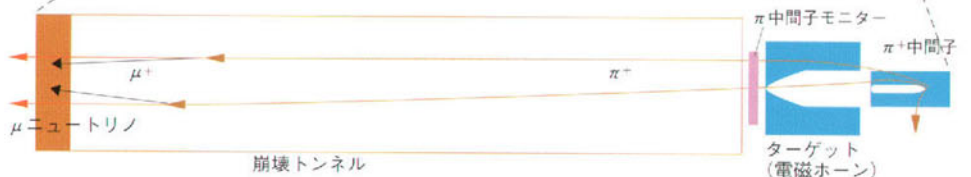
ニュートリノは電荷をもたず磁場に





人工ニュートリノの生成

まず加速器から出た陽子ビームをターゲットに当て、 $\pi$ 中間子をつくる。ビーム収束用電磁ホーンは、強力なパルス電磁石でプラスの電荷をもつ $\pi$ 中間子だけを収束する。 $\pi^+$ 中間子は崩壊トンネルの中を飛行している間に崩壊し、 $\mu$ 粒子と $\mu$ ニュートリノが生成される。



前置検出器群

前置検出器群では生成した $\mu$ ニュートリノのフラックスとエネルギーを測定する。スーパーカミオカンデと同じ構造をもつ1キロトン水チェレンコフ検出器が $\mu$ ニュートリノのフラックスを測定する。さらにその後に続くシンチレーティングファイバー飛跡検出器、 $\mu$ 粒子検出器で、 $\mu$ ニュートリノが反応して生成される $\mu$ 粒子を測定し $\mu$ ニュートリノのエネルギーを再構成する。

よって収束することができないので、その親粒子である $\pi^+$ 中間子を収束する。しかし、収束された $\pi$ 中間子の進行方向にはばらつきがある。つまり250km先の $\mu$ ニュートリノのエネルギーとフラックスは、 $\pi^+$ 中間子のエネルギーと進行方向によって予測しなければならない。そこで、収束された直後の $\pi^+$ 中間子の進行方向と運動量を測定する $\pi$ 中間子モニターが開発された。

この検出器の開発を担当したのはKEK、COE (中核的研究機関) 研究員の丸

山和純博士。「世界で初めての検出器に、自分のちょっとした工夫が盛り込まれるのがうれしかった」と、当時を振り返る。

これらの前置検出器群によって、250km先のSK側では直径1 km以上に広がっている $\mu$ ニュートリノビームのエネルギー分布を観測し、正確な振動情報を得ることができるのである。

では、自然界のニュートリノとK2K実験によるイベントを、SKでどのように選別するのか？ これには正確な時

間を測定できるため、GPS衛星が活用されている。つくばで発射された $\mu$ ニュートリノビームは、約0.8ミリ秒後にSKに到達する。そのビーム長は約1マイクロ秒。そこでSKでは、この $\mu$ ニュートリノの到達予想時刻から1マイクロ秒の前後を含め、1.5マイクロ秒の間にデータがあるかを調べている。このときに、エネルギー領域が近くノイズイベントになる可能性が高いのは大気ニュートリノであるが、その確率は1000分の1にすぎない。



## K2K実験への期待

「大事なのは、実験に対する熱意と責任感」。京都大学博士課程の稲垣隆宏氏は研究に望む姿勢についてこう述べた。K2K実験は素粒子実験としては中規模なため、設計から解析まで一貫して取り組め、物理結果につなげることができるのが大きな喜びだという。K2K実験には100人ほどの研究者が参加しているが、なによりも現場の研究者1人1人の高いモラル（士気）が実験を支えていることがわかる。

K2K実験の開始から2年がたった。ニュートリノ振動がないときにSKで予測される $\mu$ ニュートリノの数は38イベント。それに対して実際に捕らえられた数は28イベントである。これは90%の確率でニュートリノに質量があることを示している。今年の6月までに2倍の



KEK側のニュートリノホール脇のモニタールーム。ビームが出ている間、前置検出器群を1日3交代でつねに見守っている。

撮影：細川隆平

イベント数が予想され、確かにニュートリノ振動を捕らえているなら、上の確率はさらに大きくなるはずである。パウリによってニュートリノの存在が

予測されてから70年。大気ニュートリノの観測によって大きく前進したニュートリノ物理は今、新しい局面を迎えている。

（編集担当 福島佐紀子）

## ニュートリノ研究は「質量」から「混合」へ進む

総合研究大学院大学素粒子原子核専攻／高エネルギー加速器研究機構

中村健蔵

——中村先生はK2K実験のKEK代表者を務めておられます。ニュートリノ研究の今後についてお尋ねしたいと思います。まずK2K実験ではニュートリノ振動がほぼ確証されると言っているのでしょうか？

中村——実験はまだ初期の段階、4分の1が終わったところですから、まだ確実なことは言えません。今のところ、ニュートリノ振動が起きていないとしたら神岡で反応したニュートリノが「38個捕まるはずだ」という予測値に対し、実際は28個しか捕捉されていないので、ニュートリノ振動を観測している可能性はかなり高いのです。しかし、実験データには統計的なばらつきがつきものですから、もっと多くのニュートリ

ノを捕捉して統計精度を高くする必要があります。

スーパーカミオカンデ（SK）による大気ニュートリノでの観測結果からは、ニュートリノ振動そのものは確実に起こっている。しかし、パラメータがどの値かということについては、広い領域が示されているだけです。K2K実験ではその領域全体をカバーすることはできません（39ページの図を参照）。SKで観測される大気ニュートリノの飛距離は地球の裏側から来るニュートリノだと1万2000km以上になりますし、エネルギー分布は非常に広い。これに対して加速器でつくる人工ニュートリノはエネルギーが特定の値に集中し、距離もつ

です。

——ということは、運がよければK2Kの調べられる領域でニュートリノ振動が確認でき、運が悪ければできないということですか？

中村——その通りですが、SKのデータともしっかりと良く合うパラメータの値はK2Kで調べられる領域にありますし、今までのK2Kの結果もこのパラメータの値で矛盾なく説明できます。確認できる可能性が高いと思っています。

ニュートリノ振動が起こりうる全領域をカバーしようとする、ニュートリノの飛距離やエネルギーを変えないといけないのですが、アメリカが2004年の実施予定で進めているMINOS実験は、全領域をカバーすることができま



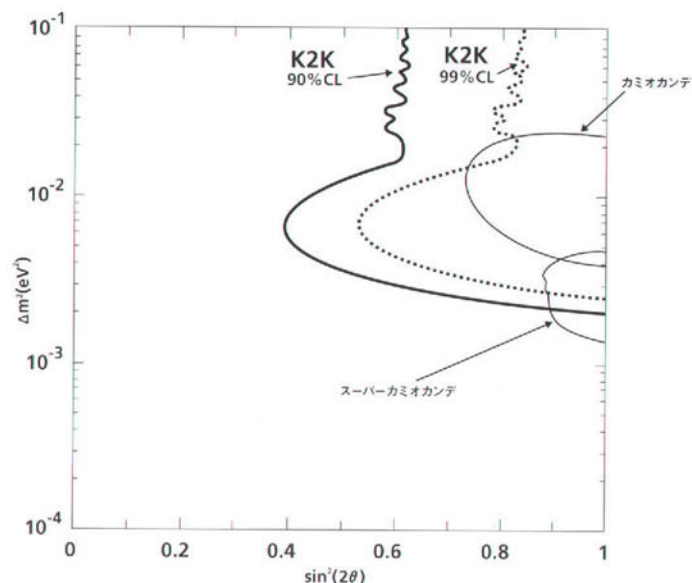
撮影：細川隆平



#### K2K実験の探索可能なパラメータ領域

K2K実験では、大気ニュートリノ観測によって示唆された全パラメータ領域をカバーしない。実際のパラメータがK2K実験の領域にあれば、ニュートリノ振動が観測される。

90%CLと示された曲線の右側の領域に振動パラメータがあれば、90%以上の信頼度でニュートリノ振動を観測できる。99%CLと示される曲線の右側は、99%以上の信頼度でニュートリノ振動を観測できる領域である。



す。MINOS実験がスタートする前にK2Kがニュートリノ振動を確認した場合、MINOS実験の目的は $\mu$ ニュートリノから $\tau$ ニュートリノへの振動を観測することになるでしょう。K2Kでは $\mu$ ニュートリノのエネルギーが低いため、変身先まで見ることはできないのです。

といっても、MINOS実験では、 $\tau$ ニュートリノが反応してできる寿命の短い $\tau$ 粒子を、個別にこれが $\tau$ 粒子だと同定することはできません。全体として $\tau$ 粒子ができていることを統計的に示すだけです。これに対して、ヨーロッパ合同原子核研究所が2005年の実施予定で計画しているOPERA実験は、検出器の質量が小さいかわりに詳細を調べて個々の $\tau$ 粒子を同定できるものです。

——では、ニュートリノ振動の存在が確認されたあとのニュートリノ物理学の目標は何になるのでしょうか。

中村——ニュートリノ振動があるということは、ニュートリノが世代間で混合することを意味しています。クォークの場合の混合と似ていますね。クォークの場合、その混合のようすは「小林・益川行列」で記述することができ、小林・益川行列をきちんと決めることが非常に重要な研究になっています。

ニュートリノの場合も、その混合行列である「牧・中川・坂田 (MNS) 行列」をきちんと決めていく必要があります。

スーパーカムイオカンデが観測したニュートリノ振動は、ほとんどが $\mu$ ニュートリノから $\tau$ ニュートリノへの振動ですが、本来のニュートリノ振動は2種のニュートリノ間の振動ではなく、3種のニュートリノ間での振動、つまり混合なのです。ということは、 $\mu$ ニュートリノから $\tau$ ニュートリノへの振動だけでなく、 $e$ ニュートリノへの振動もわずかにあるはずで、それを正確に測る必要があります。これらの測定と太陽ニュートリノの測定から、MNS行列の3つの角度を決めることになります。さらに、ニュートリノ反応でもCP対称性を保存しないフェーズ (位相角) があり、それを測定しないと混合行列は完璧なものになりません。

——CP非保存を調べる計画というのがあるのですか。

中村——CP非保存というのは粒子と反粒子の対称性の破れなので、反 $\mu$ ニュートリノを放射して、その振動のようすを $\mu$ ニュートリノと比べる。違いがあれば、それがCP非保存になります。しかし、その実験を地中にニュートリノ

を放射して行くと、CP非保存の効果を覆い隠すような現象が起こってしまうので、観測するのが難しい。現在、ニュートリノでのCP非保存を測定する2つの方法が考えられています。1つは低いエネルギーのニュートリノを使い、短い距離 (100~数百km) で観測しようというもので、イベント数の統計をかせぐのは大変ですが、CP非保存を覆い隠す効果は小さいと考えられます。もう1つは、ニュートリノのエネルギーを20~50 GeVに高めて、フラックスも強めるニュートリノファクトリー計画で、距離は数千kmと長くする必要があります。CP非保存の効果は小さくても、統計精度が上がるので測定できると考えられています。

したがってニュートリノ実験としては、CP非保存まで測定できれば現在クォークで研究しているレベルのことができる。その結果、クォークとレプトンの混合の違いがはっきりすると予想されます。クォークとレプトンはいずれ大統一理論によって同じ素粒子の一族に統一されると予想されますが、統一するときの鍵になるのが混合行列というわけです。

(取材構成 福島佐紀子)

#### [文献]

- ・中村健蔵「筑波・神岡間 長基線ニュートリノ振動実験」『学術月報』日本学術振興会 (1999年)
- ・K.Nishikawa, "Status of K2K(KEK to Kamioka Long Baseline Neutrino Oscillation Experiment)," *Nuclear Physics B(Proc.Suppl.)*, 77,198-23(1999).
- ・Takaaki Kajita, "Atmospheric Neutrino Results from Super-Kamiokande and Kamiokande," *Nuclear Physics B(Proc.Suppl.)*, 77,123-32(1999).