

# CPの破れとフレーバー混合\*

ノーベル賞受賞講演

2008年12月8日

小林 誠

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

高エネルギー加速器研究機構

翻訳：日笠健一 東北大学 高等大学院機構

## 1. 序

ご存じのように通常の物質は原子からできています。原子は原子核と電子からなっており、原子核は陽子と中性子によって構成されています。さらに、陽子や中性子は、2種類のクォーク、 $u$ と $d$ からできています。従って、通常の物質の基本的な構成要素は電子と2種類のクォーク  $u$ と $d$ です。

しかしながら、素粒子の標準理論と呼ばれる、既知の素粒子現象の包括的な記述を可能にした理論によれば、クォークの種類は6種類です。残りのクォークは  $s$ ,  $c$ ,  $b$ ,  $t$  という名前です。なぜこの4つが通常の物質中に存在しないかという、普通の環境では不安定であるためです。電子も同様に仲間がおり、6つのメンバーを持つレプトンという族に属します。3種類のニュートリノがこの6つのうちに入っています。

標準理論でもう一つ大事な部品は基本相互作用です。3種類の相互作用がクォークやレプトンに働きます。強い相互作用は量子色力学 (Quantum Chromodynamics, QCD) で記述され、電磁相互作用と弱い相互作用は Weinberg-Salam-Glashow の理論により統一的に記述されます。これらはいずれもゲージ理論と呼ばれる特別な種類の場の理論に属します。

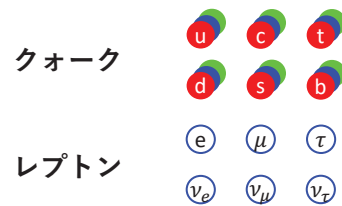
標準理論が確立したのは1970年代です。このきっかけはゲージ理論の研究の発展でした。特に、一般的なゲージ理論がくりこみ可能であることが証明 [1] されたのです。このことにより、素粒子の相互作用がすべて発散の困難のない量子場理論により記述できるという可能性が開かれました。それまでは、電磁相互作用しかその資格を持っていなかったのです。

1970年代の新しいフレーバーの発見は標準理論の確立に重要な役割を果たしました。特に、 $\tau$ レプトン、 $c$ ,  $b$ クォークは1970年代に発見されたものです。私が1973年に益川敏英氏と6クォークモデルを提案 [2] した頃には、クォークは3種類しかないと広く思われていました。4つめのクォークが存在するかもしれないという兆候はわずかにありましたが、誰も6つあるとは思っていませんでした。

以下では、CPの破れとクォーク・レプトンのフレーバーの研究の発展について、日本の寄与に重点を置きながら述べることにします。次節は坂田学派による先駆的業績に当てます。私はここ

\* 脚注および文献【】内は訳者による。

## 基本粒子



## 基本相互作用



図 1. 素粒子の標準理論。

から多くを学んだのでした。3節では CP 非保存についての仕事に触れ、当時我々がどのように考え何を見いだしたかを述べます。4節はその後の発展を述べます。我々の提案した理論は B ファクトリーという種類の加速器により実験的に検証されました。最後の 5 節では、レプトンセクターのフレーバー混合について少し見ることにします。これはクォークセクターのフレーバー混合と対をなす現象であり、この分野でも日本がユニークで重要な寄与をしているのです。

## 2. 坂田学派

益川博士と私は 2 人とも名古屋大学を修了し博士の学位を取得したのですが、私が大学院に入学した頃、名古屋大学の素粒子理論研究室は坂田昌一教授により率いられ、独特な研究スタイルで知られていました。さて、1947 年に宇宙線中に見つかったのを端緒として、1950 年代初頭に、何種類もの奇妙な粒子が発見されました。今の言い方では、奇妙な粒子は s クォークか反 s クォークのどちらかを構成要素に含んでいる粒子で、奇妙でない粒子はそうでないものです。ですが、これから述べるのはクォークモデルが生まれる以前の時代です。

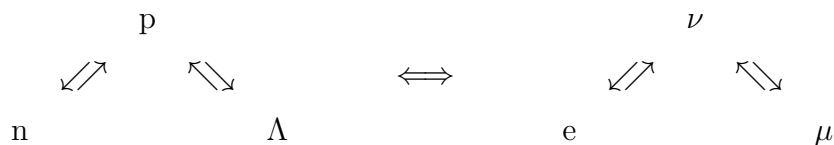
1956 年に、坂田は坂田モデルとして知られているモデルを提案しました [3]。このモデルは、あらゆるハドロンが陽子 (p)、中性子 (n)、ラムダ粒子 ( $\Lambda$ ) の 3 つ組の中から何個かを組み合わせてできた複合粒子であるというものです。そのハドロンが奇妙であってなくてもです。言い換えると、このモデルでは 3 種類のバリオン p, n,  $\Lambda$  がハドロンの基本的構成要素というわけです。その後坂田モデルはクォークモデルに席を譲り、クォークの 3 つ組 u, d, s が p, n,  $\Lambda$  に取って代わりました。しかし、基本的な 3 つ組の考え方の嚆矢は坂田モデルにあります。

以下、坂田モデルにおける弱い相互作用について話します。原子核の通常のベータ崩壊は中性子が陽子に転化することにより起こります。同様に、ラムダ粒子も陽子に変化できると考えられます。坂田モデルでは、ハドロンの弱い相互作用はすべて、基本の 3 つ組間のこの 2 種類の遷移によって説明されます。



図2. 坂田昌一 (1911–1970) (坂田記念資料室提供)。

この弱い相互作用のパターンは、レプトンの弱い相互作用とかなり似ています。



当時はニュートリノは1種類しかないと考えられていたことを注意しておきます。このようなバリオンとレプトンの弱い相互作用の類似性は Gamba, Marshak, 大久保 [4] によって指摘されました。

1960年に、牧, 中川, 大貫, 坂田 [5] はバリオン–レプトン対称性 (B-L 対称性) の考え方を押し進めて、いわゆる名古屋モデルを提案しました。このモデルでは、バリオンの3つ組  $p, n, \Lambda$  はそれぞれニュートリノ, 電子,  $\mu$  粒子に仮想的な「B物質」が結合したものであると考えました。

$$p = \langle B^+ \nu \rangle, \quad n = \langle B^+ e \rangle, \quad \Lambda = \langle B^+ \mu \rangle$$

ここではB物質を  $B^+$  と書いています。

複合モデルとしての名古屋モデルは特にそれ以上の進展を見せませんでした。その考え方の一端からおもしろい方向に発展がありました。1962年に、ニュートリノには電子型と $\mu$ 粒子型の2種類があることが発見されたからです。米国ブルックヘヴン国立研究所におけるこの結果 [6] が発表されると、牧, 中川, 坂田 [7] と片山, 松本, 田中, 山田 [8] はそれぞれ、名古屋モデルを拡張して2種類のニュートリノを含める興味深い試みを論文にしました。

牧らは、レプトンとバリオンを関連づける推論に基づいてニュートリノの質量を論じ、ニュートリノの状態の混合を記述する関係を導きました。

$$\begin{aligned}
 \nu_1 &= \cos \theta \nu_e + \sin \theta \nu_\mu \\
 \nu_2 &= -\sin \theta \nu_e + \cos \theta \nu_\mu
 \end{aligned}$$

ここで、 $\nu_1, \nu_2$  はニュートリノの質量固有状態で、牧らは陽子が B 物質と  $\nu_1$  の複合状態としました。この仮定は今の実験結果とは相容れませんが、レプトンフレーバー混合の正しい定式化を彼らが提示したのは強調に値します。この寄与を評価して、レプトンフレーバーの混合行列は現在 MNS 行列<sup>\*1</sup>と呼ばれています。

レプトンフレーバー混合はニュートリノ振動という現象を引き起こします。何年も後になって、ニュートリノ振動は思いがけない形で発見されました。このことについては後で触れることにします。

上の推論のもう一つの重要な帰結は、 $\nu_2$  に対応する 4 つめの基本粒子の存在です。これは片山らによって詳しく述べられています。当時はバリオンをまだ基本粒子とみなしていたわけですが、ここで述べられた弱い相互作用の構造は後の Glashow-Iliopoulos-Maiani (GIM) [9] によるものと同じです。

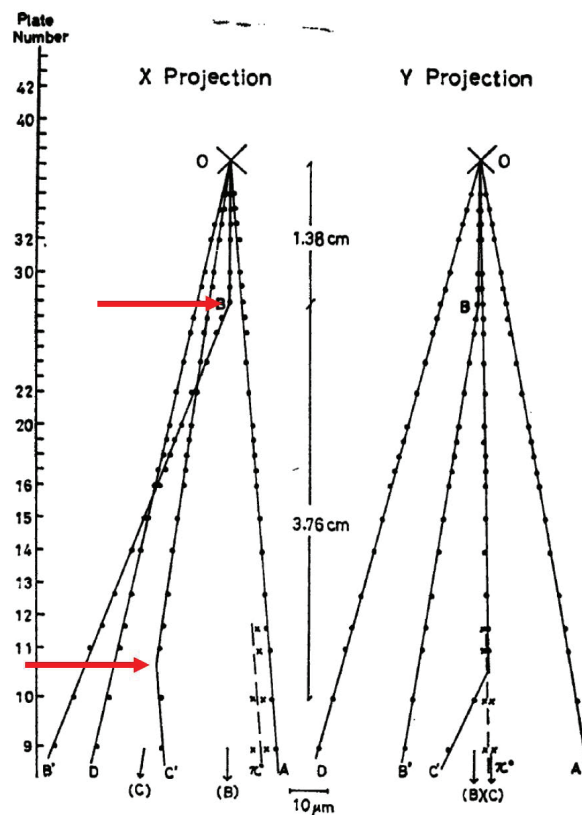


図 3. 宇宙線事象の 1 つ [10]。

これらの仕事は 1971 年に再び日の目を見ましたが、それは丹生たちが宇宙線にさらした原子核乾板検出器に新種の事象を発見した [10] からでした。そのうちの 1 つを図 3 に示します。飛跡のうち 2 本が途中でくの字状に曲がっており、対で生成された新粒子が崩壊したものと思われます。この新粒子の質量は 2 から 3 GeV、寿命は  $10^{-14}$  秒と推定されました。

坂田グループのひとりである小川修三は、この結果を知ってすぐ、この新粒子が拡張名古屋モデルに含まれる第 4 の実体に関係するのではないかと指摘しました [11]。この頃には坂田モデル

\*1 その後 PMNS (Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata) 行列と呼ばれることが多くなっている。

はクォークモデルに置き換わっていたので、この指摘の意味は、この新粒子が今で言うチャーム粒子ではないかということになります。これを受けて、日本のグループがいくつか、私も含め、4クォークモデルを調べ始めました [12]。当時私は名古屋大学の大学院生でした。

ここまで坂田学派のユニークな活動を紹介し、4クォークモデルについて詳しく述べました。我々が提案した6クォークモデルは、この4クォークモデルをそのまま単純に拡張したものというわけではありませんが、私にとってむしろ重要だったのは、名古屋大学の素粒子理論研究室の雰囲気でした。ここで述べた研究のほとんどは、私が大学院に入学する以前に行われたものではありますが、それを引き継いだ哲学は当時もまだ健在でした。全体像をつかむことはこの種の研究に必須であり、私はその重要性を学んだのでした。

### 3. 6クォークモデル

1971年に、非アーベルゲージ理論のくりこみ可能性が証明されました [1]。これにより、弱い相互作用を量子場理論により矛盾なく記述することができるようになり、Weinberg-Salam-Glashow理論 [13] が注目を浴び始めました。私は1972年に名古屋大学で博士号を取得し、京都大学に移りました。私がCPの破れの研究を始めたのはこの頃です。

CPの破れが最初に発見されたのは1964年、Cronin, Fitch たち [14] により、中性 K メソンの崩壊においてでした。CPの破れは、粒子と反粒子の間の対称性が破れていることになります。CPの破れの発見は、粒子と反粒子は本質的に差があることを意味します。

我々の考えは、もしゲージ理論が粒子の相互作用を矛盾なく記述するものであるならば、CPの破れもそれに含まれているはずということでした。この問題を解くには、それほど紆余曲折は必要ありませんでした。単に、くりこみ可能なゲージ理論がCPを破る条件を調べればよかったです。我々が見いだしたことは以下のようにまとめられます [2]。

当時はクォークは3つと広く思われていましたが、3クォークのモデルはゲージ理論として欠陥がありました。というわけで、理論的にはGIMタイプの4クォークモデルがすぐれていると考えられました。しかし、GIMタイプのモデルにCPの破れを含めることは不可能でした。GIMタイプの条件をゆるめて一般の4クォークモデルを考えたとしても、CPの破れを含む現実的なモデルは作れないということがわかりました。このことから、4番目のクォーク以上に未知の粒子が存在していなければならないことになります。私はこのことは重要でかなり強い結論であると考えました。

そこで、新しい粒子を導入してCPを破る機構をいくつか考案しました。そのうちの1つとして6クォークモデルを提案したのです。

以下では、CPを破るにはクォーク4つでは不十分で、6つが必要なことを理解してもらうため、クォークのフレーバー混合を少し詳しく解説します。

ゲージ理論の枠組では、フレーバー混合はゲージ対称性と粒子の状態のミスマッチから生じます。ゲージ対称性は、複数の粒子を多重項というグループにまとめて入れ込みます。しかし、多重項の各メンバーは必ずしも1種の粒子そのものではなく、いくつかの粒子の重ね合わせであることがあります。フレーバー混合とはこの重ね合わせに他ありません。今の場合、関係するゲージ群はWeinberg-Salam-GlashowのSU(2)で、多重項は二重項です。

4つのクォークが SU(2) 群の二重項2つを構成していると仮定すると、最も一般的な形として

$$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix},$$

のように書くことができます。ここで  $d', s'$  は実際のクォークの状態  $d, s$  の重ね合わせとなっており、行列を用いて

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} \\ V_{cd} & V_{cs} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix}$$

と書けます。この混合を表す行列は、数学でユニタリ行列と呼ばれる行列でないといけません。

次の問題は、CP の破れの条件がどうなるかです。量子場理論では、CP の破れは複素数の結合定数と関連しています。今の形式でもっと具体的に言うと、CP の破れが起こるのは、混合行列の要素の中に、除去できない複素数が現れるときです。ユニタリ行列の要素は一般的に複素数ですが、粒子状態の位相を調節することにより、実数に変えることができます場合があります。このとき物理的な結果は何も変わりません。このような場合の複素数は除去可能、そうでない場合除去できないと言います。このように、CP の破れの条件の一つは、粒子の状態の位相を調節しても取り除けない複素数が残ることです。

4クォークモデルでは、調節のための因子は、位相だけを対角要素にもつ行列2つで書けます。これらの位相をうまく選ぶことにより、どんな  $2 \times 2$  行列も実行列にすることができるのは容易に見て取れます。

$$\begin{pmatrix} e^{i\phi_u} & 0 \\ 0 & e^{i\phi_c} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} \\ V_{cd} & V_{cs} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-i\phi_d} & 0 \\ 0 & e^{-i\phi_s} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}.$$

この場合は CP の破れを導入するのは不可能であることがわかります。

6クォークモデルではこの論理展開のどこが変わるでしょうか。この場合、フレーバー混合は次のように表されます。

$$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix},$$

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}.$$

今回は混合行列が  $3 \times 3$  のユニタリ行列となります。この場合は前回と異なり、クォーク状態の位相を調節することで行列要素の全部の位相を取り除くことはできません。位相の調節によって最大可能なのは、行列要素を4つだけのパラメータを用いた標準形に直すことです。よく使われる形は

$$V = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix}$$

です。ここでは、 $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$ ,  $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) と書きました。 $\delta = 0$  ( $, \pi$ ) の場合を除き、行列要素には虚数部分が残る、CP 対称性が破れることがわかります。

パラメータの実測値の階層構造を考慮すると、次のような近似的な形が得られ、現象論的解析に広く用いられています。

$$V = \begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + O(\lambda^4).$$

この表式では、 $\eta$  が 0 でないとき CP 対称性が破れます。

さて、我々は当時この CP 非保存の機構はとてもおもしろいと思いましたが、6 クォークモデルだけを他の可能性の中から 1 つだけ選ぶ理由は持ち合わせていませんでした。系が十分多種類の粒子を含んでいれば CP 対称性を破ることは難しくないので、このモデルは特別とまでは言えません。しかし、その後の実験の発展によって、6 クォークモデルは別格の地位に押し上げられました。

1974 年に  $J/\psi$  粒子が発見され [15]、時を置かずして、4 つめのクォーク  $c$  とその反粒子の束縛状態であることがわかりました。この発見は素粒子物理に大きな衝撃をもたらしましたが、その一方で 6 クォークモデルにはほとんど影響がありませんでした。

1975 年には、 $\tau$  レプトンが発見されました [16]。この発見こそは我々のモデルにとって重大な意味がありました。 $\tau$  レプトンは 5 番目のレプトンです。レプトンではあれ、クォークにも第 3 の世代が存在するのではと思わせました。この頃から我々のモデルは注目を集めはじめました。6 クォークモデルの現象論を調べた初期の論文としては [17] と [18] があります。

1977 年にウプシロン粒子が発見され [19]、5 番目のクォーク  $b$  とその反粒子の束縛状態であることがわかりました。最後のクォーク  $t$  の発見 [20] はずっと後の 1995 年でしたが、すでにそれ以前に 6 クォークモデルは標準的なモデルとなっていました。

その間、B メソンの系においては大きな CP 非対称性が期待されるという指摘がされていました [21]。これにより、モデルを B ファクトリーで検証する可能性が開けました。B メソンは  $b$  クォークかその反粒子を構成要素に含むメソンで、B ファクトリーとは途方もない数の B メソンを工場のように生成できる加速器を言います。

#### 4. B ファクトリーにおける実験的証明

6 クォークモデルの実験的証明を目指して、2 つの B ファクトリーが建設されました。日本では KEK における KEKB、アメリカ合衆国では SLAC の PEP-II です。これらの加速器は通常のものとは異なり、互いに衝突する電子と陽電子は違うエネルギーに設定されています。このため、生成された B メソンはブーストを受けます。各 B ファクトリーには、実験グループである Belle (KEKB) と BaBar (PEP-II) が大規模の国際チームとして、多くの国の参加を得て組織されました。

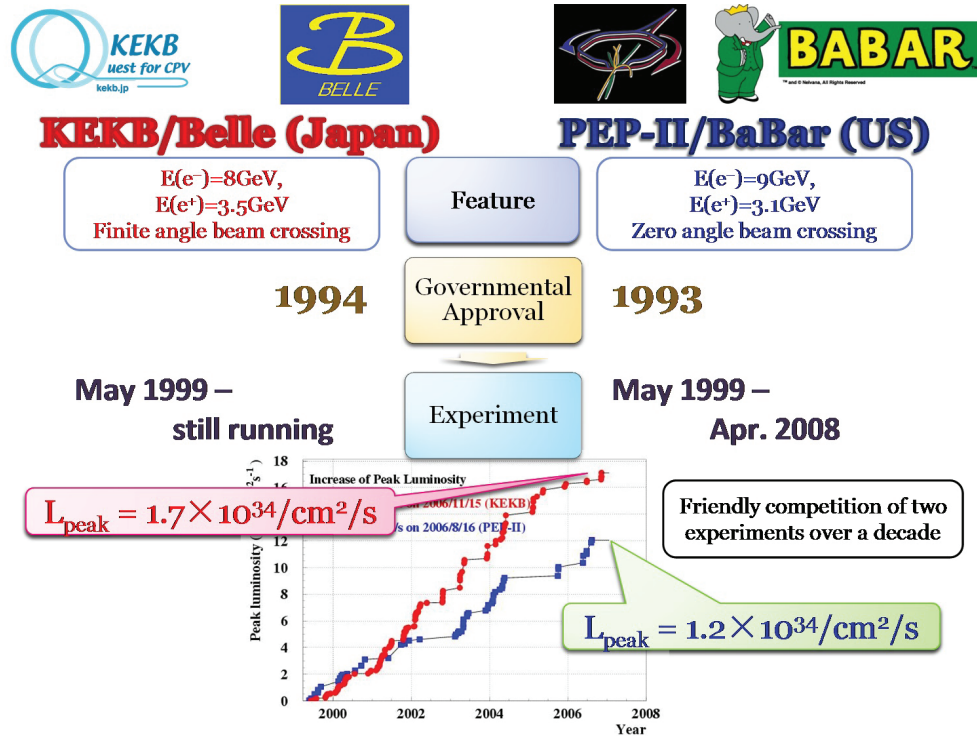


図 4. KEKB/Belle と PEP-II/BaBar。

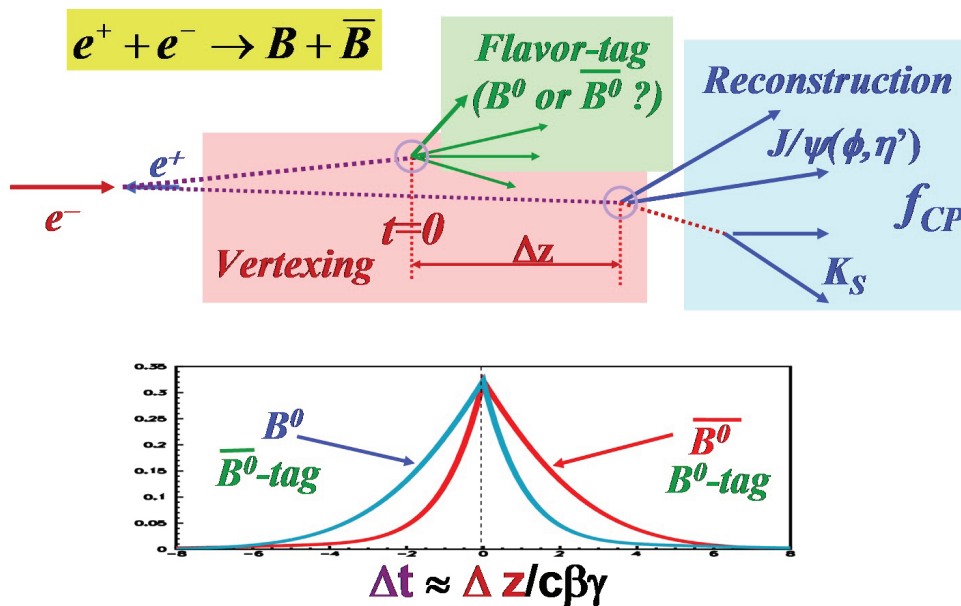


図 5. B メソン崩壊で CP の破れを測定する典型的な方法。

どちらもほぼ同時に採択され実験を開始しました。PEP-II/BaBar は今年運転を終了しましたが、KEKB/Belle はまだ続いています\*2。どちらも世界記録である  $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  以上のルミノシティを達成しました。ルミノシティは衝突型加速器の性能を表すのに鍵となるパラメータです。

\*2 KEKB は 2010 年 6 月に運転を終了、その後継である SuperKEKB は KEKB よりも 30 倍大きなルミノシティを目指す加速器であり、2019 年 3 月に物理実験を開始している。





最後の点ですが、これがクォークと並行するレプトンのフレーバー混合と関連しているのではないかという提案がされています。実はレプトンフレーバーの混合に関して、日本がとても重要な寄与をしてきています。これを次の節で述べます。

## 5. レプトンフレーバー混合

最も重要な成果はニュートリノ振動の発見です。これがなされた SuperKamiokande は、日本中部地方の神岡鉱山に建設された巨大な水のタンクです [24]。

この実験では、宇宙線が地球を取り巻く大気に衝突してつくったニュートリノを観測していました。ニュートリノは容易に地球を通り抜けるので、下からも検出器に入射してきます。ニュートリノ振動とは、ニュートリノの種類が飛行中に変化することです。もしニュートリノが地球の裏側からやってくる間にニュートリノ振動が起こったとすると、検出されるはずの種類のニュートリノの観測数が減ることになります。

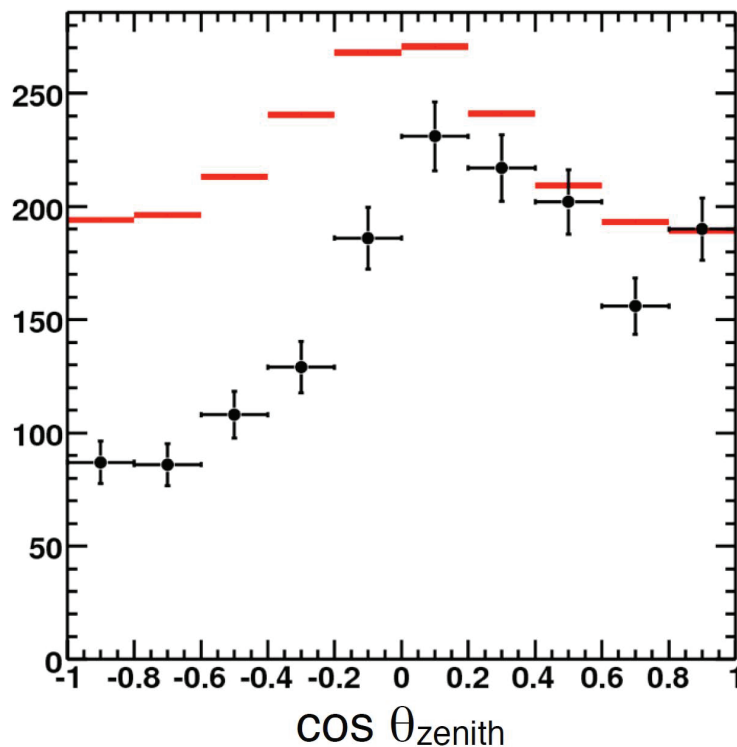


図 7. 大気ニュートリノの観測結果 [24]。

図 7 はこの実験の観測結果です。赤い横線は振動がない場合の予測値で、十字が実観測データです。この結果は明らかに（下方からの）ニュートリノの観測数が減っていることを示しており、ニュートリノ振動の予測と完全に一致しています。この大発見は戸塚洋二が率いたものですが、とても残念なことに、戸塚はこの 7 月に亡くなりました\*4。

\*4 この解析で中心的な役割を果たした梶田隆章氏は 2015 年にノーベル物理学賞を受賞した。



図8. 戸塚洋二 (1942-2008) (KEK 提供)。

ニュートリノ振動はさらに、人工のニュートリノを用いた実験二つによって確かめられました。一つは K2K 実験 [25] です。この実験では、ニュートリノを KEK 研究所の陽子シンクロトロンによって生成し、これを SuperKamiokande で観測します。図9は観測されたニュートリノのスペクトルです。データは振動パターンを明らかに示しています。もう一つの実験は、KamLAND 実験 [26] です。KamLAND 検出器は水の代わりに液体シンチレータを使っていますが、場所はやはり神岡鉱山にあります。この実験では、周囲に位置する原子力発電所の生成したニュートリノを観測しました。データはきれいに振動の予測と合っています (図10)。

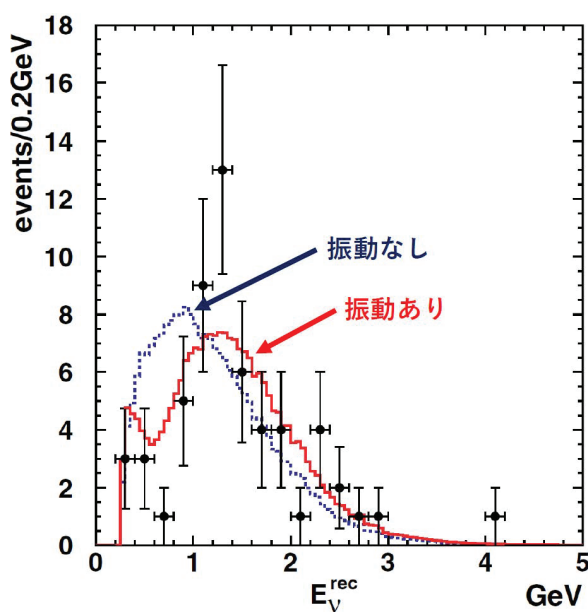


図9. K2K 実験の結果 [25]。

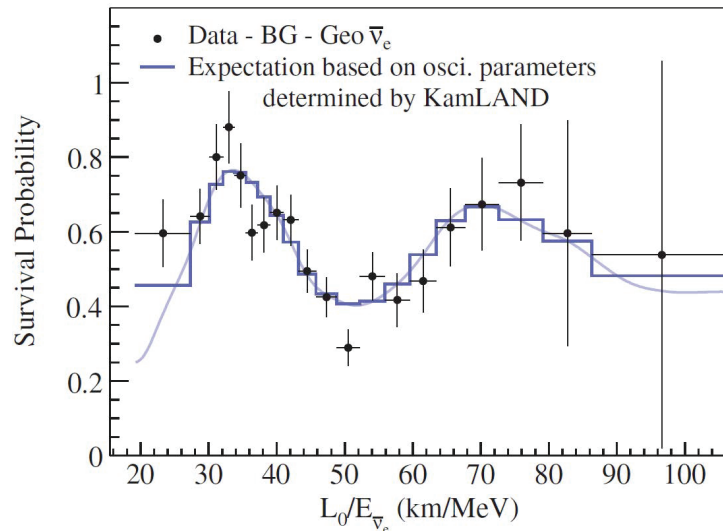


図 10. KamLAND 実験の結果 [26]。

これまで過去と現在の実験を見てきましたが、近い未来の実験として T2K 実験があります。KEK の北東 60 km ほどに位置する茨城県東海村に新しく建設された J-PARC 加速器によってニュートリノを生成し、SuperKamiokande に送るものです。検出器までの距離は K2K とさほど変わりませんが、強度ははるかに高いのです。T2K 実験は  $\nu_e$  出現の測定、つまり  $\nu_\mu$  が  $\nu_e$  に変化するのを直接観測することを目指しています\*5。この測定は、レプトンセクターでの CP の破れの大きさがどの程度可能かを予測するのに決定的に重要です\*6。そしてこの CP の破れは宇宙の物質優勢の起源に示唆を与えると期待されます。

まとめますと、日本はフレーバー物理に対し重要な貢献をいくつもなしてきたと思います。これには、坂田学派のハドロン・レプトン両方のフレーバーに関する先駆的な研究、KEK B ファクトリーによる B メソン系の実験的研究、そして SuperKamiokande と KamLAND によるニュートリノ振動の観測が含まれます。私はこの発展の多くを目撃することができたことをとてもうれしく感じます。特に、B ファクトリー実験の同僚と一緒に仕事できたことは忘れられません。そして、益川博士との共同研究を通して、私もこの分野の進展に寄与できたことをとりわけ幸せに思っております。

\*5 その後 2011 年に、T2K 実験は  $\nu_e$  の出現を実際に観測した。なお、T2K は Tokai-to-Kamioka, K2K は KEK-to-Kamioka から来ている。

\*6 ニュートリノと反ニュートリノの振動を比較することにより、CP 対称性の破れを探索することができる。T2K ではこの測定を行い、2020 年に CP の破れの兆候を見いだしている。

## 文献

1. G. 't Hooft, "Renormalizable Lagrangians for massive Yang-Mills fields," *Nucl. Phys. B* **35**, 167 (1971); G. 't Hooft and M.J.G. Veltman, "Regularization and renormalization of gauge fields," *Nucl. Phys. B* **44**, 189 (1972).
2. M. Kobayashi and T. Maskawa, "CP violation in the renormalizable theory of weak interactions," *Prog. Theor. Phys.* **49**, 652 (1973).
3. S. Sakata, "On a composite model for the new particles," *Prog. Theor. Phys.* **16**, 686 (1956).
4. A. Gamba, R. E. Marshak, and S. Okubo, in Proceedings of the Ninth Conference on High Energy Nuclear Physics, *Proc. Natl. Acad. Sci.* **45**, 881 (1959).
5. Z. Maki, M. Nakagawa, Y. Onuki, and S. Sakata, "A unified model for elementary particles," *Prog. Theor. Phys.* **23**, 1174 (1960).
6. G. Danby *et al.*, "Observation of high-energy neutrino reactions and the existence of two kinds of neutrinos," *Phys. Rev. Lett.* **9**, 36 (1962).
7. Z. Maki, M. Nakagawa, and S. Sakata, "Remarks on the unified model of elementary particles," *Prog. Theor. Phys.* **28**, 870 (1962).
8. Y. Katayama, K. Matumoto, S. Tanaka, and E. Yamada, "Possible unified models of elementary particles with two neutrinos," *Prog. Theor. Phys.* **28**, 675 (1962).
9. S. L. Glashow, J. Iliopoulos, and L. Maiani, "Weak interactions with lepton-hadron symmetry," *Phys. Rev. D* **2**, 1285 (1970).
10. K. Niu, E. Mikumo, and Y. Maeda, "A possible decay in flight of a new type particle," *Prog. Theor. Phys.* **46**, 1644 (1971).
11. S. Ogawa, 私信。
12. T. Hayashi, E. Kawai, M. Matsuda, S. Ogawa, and S. Shige-eda, "A possible interpretation of the new event in the cosmic ray experiment," *Prog. Theor. Phys.* **47**, 280 (1972); M. Kobayashi, M. Nakagawa, and H. Nitto, "Quartet models based on fundamental particles with fractional charge," *Prog. Theor. Phys.* **47**, 982 (1972); H. Kondo, Z. Maki, and T. Maskawa, "A note on the leptonic decays of charmed mesons," *Prog. Theor. Phys.* **47**, 1060(L) (1972); Z. Maki, T. Maskawa, and I. Umemura, "Quartet scheme of hadrons in chiral  $U(4) \otimes U(4)$ ," *Prog. Theor. Phys.* **47**, 1682 (1972).
13. S. Weinberg, "A model of leptons," *Phys. Rev. Lett.* **19**, 1264 (1967); A. Salam, "Weak and electromagnetic interactions," in Elementary Particle Theory, Proceedings of the 8th Nobel Symposium, Lerum, Sweden, 1968, edited by N. Svartholm (Almqvist and Wiksell, Stockholm, 1968), pp. 367–377; S. L. Glashow, "Partial symmetries of weak interactions," *Nucl. Phys.* **22**, 579 (1961).
14. J. H. Christensen, J. W. Cronin, V. L. Fitch, and R. Turlay, "Evidence for the  $2\pi$  decay of the  $K_2^0$  meson," *Phys. Rev. Lett.* **13**, 138 (1964).
15. J. J. Aubert *et al.*, "Experimental observation of a heavy particle  $J$ ," *Phys. Rev. Lett.* **33**, 1404 (1974); J. E. Augustin *et al.*, "Discovery of a narrow resonance in  $e^+e^-$  annihilation," *Phys. Rev. Lett.* **33**, 1406 (1974).
16. M. L. Perl *et al.*, "Evidence for anomalous lepton production in  $e^+e^-$  annihilation," *Phys. Rev. Lett.* **35**, 1489 (1975).
17. S. Pakvasa and H. Sugawara, "CP violation in six quark model," *Phys. Rev. D* **14**, 305 (1976).

18. J. Ellis, M. K. Gaillard, and D. V. Nanopoulos, “Left-handed currents and  $CP$  violation,” *Nucl. Phys. B* **109**, 213 (1976).
19. S. W. Herb *et al.*, “Observation of a dimuon resonance at 9.5 GeV in 400-GeV proton-nucleus collisions,” *Phys. Rev. Lett.* **39**, 252 (1977).
20. F. Abe *et al.* [CDF Collaboration], “Observation of top quark production in  $pp$  collisions,” *Phys. Rev. Lett.* **74**, 2626 (1995) [arXiv:hep-ex/9503002]; S. Abachi *et al.* [D0 Collaboration], “Observation of the top quark,” *Phys. Rev. Lett.* **74**, 2632 (1995) [arXiv:hep-ex/9503003].
21. A. B. Carter and A. I. Sanda, “ $CP$  violation in  $B$  meson decays,” *Phys. Rev. D* **23**, 1567 (1981); I.I.Y. Bigi and A. I. Sanda, “Notes on the observability of  $CP$  violations in  $B$  decays,” *Nucl. Phys. B* **193**, 85 (1981).
22. B. Aubert *et al.* [BaBar Collaboration], “Measurement of the  $CP$ -violating asymmetry amplitude  $\sin 2\beta$ ,” *Phys. Rev. Lett.* **89**, 201802 (2002) [arXiv:hep-ex/0207042]; K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], “Improved measurement of mixing-induced  $CP$  violation in the neutral  $B$  meson system,” *Phys. Rev. D* **66**, 071102(R) (2002) [arXiv:hep-ex/0208025]. 【有意な非対称性の最初の観測は, B. Aubert *et al.* [BaBar Collaboration], “Observation of  $CP$  violation in the  $B^0$  meson system,” *Phys. Rev. Lett.* **87**, 091801 (2001) [arXiv:hep-ex/0107013]; K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of large  $CP$  violation in the neutral  $B$  meson system,” *Phys. Rev. Lett.* **87**, 091802 (2001) [arXiv:hep-ex/0107061].】
23. J. Charles *et al.* [CKMfitter Group], “ $CP$  violation and the CKM matrix: assessing the impact of the asymmetric  $B$  factories,” *Eur. Phys. J. C* **41**, 1 (2005). より新しい結果は <http://ckmfitter.in2p3.fr> を参照。【図 6 は O. Deschamps [CKMfitter Group], talk at 34th ICHEP, Philadelphia, 2008, arXiv:0810.3139 [hep-ex] にある (ただし角度の名称が異なる)。】
24. Y. Fukuda *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], “Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos,” *Phys. Rev. Lett.* **81**, 1562 (1998) [arXiv:hep-ex/9807003]. 【図 7 は J. Raaf, talk at Neutrino 2008 (<https://www.slac.stanford.edu/econf/C0805263/Slides/Raaf.pdf>) より。】
25. M. H. Ahn *et al.* [K2K Collaboration], “Indications of neutrino oscillation in a 250 km long baseline experiment,” *Phys. Rev. Lett.* **90**, 041801 (2003) [arXiv:hep-ex/0212007]; M. H. Ahn *et al.* [K2K Collaboration], “Measurement of neutrino oscillation by the K2K experiment,” *Phys. Rev. D* **74**, 072003 (2006) [arXiv:hep-ex/0606032].
26. K. Eguchi *et al.* [KamLAND Collaboration], “First results from KamLAND: Evidence for reactor antineutrino disappearance,” *Phys. Rev. Lett.* **90**, 021802 (2003) [arXiv:hep-ex/0212021]; T. Araki *et al.* [KamLAND Collaboration], “Measurement of neutrino oscillation with KamLAND: Evidence of spectral distortion,” *Phys. Rev. Lett.* **94**, 081801 (2005) [arXiv:hep-ex/0406035]; 【図 10 は, S. Abe *et al.* [KamLAND Collaboration], “Precision measurement of neutrino oscillation parameters with KamLAND,” *Phys. Rev. Lett.* **100**, 221803 (2008) [arXiv:0801.4589 [hep-ex]] より。】

---

本記事は, “CP Violation and Flavor Mixing,” Nobel Lecture, December 8, 2008 by Makoto Kobayashi, in “Les Prix Nobel, The Nobel Prizes 2008,” published by Almqvist & Wiksell International, 2009, pp. 68–84 を, the Nobel Foundation と小林誠氏から許可をもらい, 日笠健一氏に翻訳していただいたものである。