

Particle Data Book

東北大学 大学院理学研究科 高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所

日笠 健一

hikasa@phys.tohoku.ac.jp

中村 健蔵

kenzo.nakamura@kek.jp

2005年9月5日

素粒子データグループと RPP

素粒子データグループ (Particle Data Group, PDG) は、50人規模の国際共同グループで、“Review of Particle Physics” (RPP, 俗に Particle Data Book) の編集をその最重要の目的としている。中核となっているのはローレンス・バークレー国立研究所 (LBNL) であるが、グループのメンバーの所属はアメリカ, CERN を中心とする西欧, ロシア, アジアと広範囲にわたっており, 日本からは現在4名が参加している。RPP の編集以外にも, 一般向けの高エネルギー物理教育用の素材作成, 高エネルギー研究者のアンケート調査など, 広範囲の活動を行っている。

RPP は, 高エネルギー物理学において, 現在まで半世紀にわたる実験結果のエッセンスをまとめたものであり, 信頼できるデータ集として広く研究者に用いられている。SPIRES によって引用件数を調べてみると, RPP は群を抜いて1位であり, 偶数年に出版されている各版の引用数は, ここ10年にわたり軒並み3000前後を保持している。

50年の歴史

PDG の歴史¹は, 1957年にさかのぼる。ストレンジネスの量子数の存在が発見され, ハドロンの分類が課題となっていた頃である。総合報告年鑑である Annual Review of Nuclear Science の7巻に, M. Gell-Mann と A. H. Rosenfeld がストレンジ粒子に関するレビューを執筆したが, その中に当時知られていた素粒子の質量と寿命など性質をまとめた表が含まれていた。Rosenfeld と W. H. Barkas は, この表の改訂版を同年バークレーのプレプリントとして発表した。このわずか数ページのレポートが RPP の最初の版とすることができる。数回の改訂の後, 学術雑誌に初めて出版されたのは1964年の Review of

¹1975年以前については当事者である Rosenfeld の寄稿 [1] が詳しい。

Modern Physics 誌上である。このときの表題は “Data on Elementary Particles and Resonant States” で全27ページ, 著者は6名で, バークレー以外からは当時ストックホルムにいた M. Roos が参加していた。これ以後, ほぼ毎年新版が出版され, 1968年には手帳版が加わり Particle Data Group の名が登場, 69年には表題がシニアな方面にはおなじみの “Review of Particle Properties” となった。1970年には Physics Letters B 誌に出版された。74年以後には偶数年の出版となり, その後 Physical Review D 誌, European Physical Journal C 誌上でも出版されている。どの雑誌に掲載されるかは, 最近は入札で決定されている。

また, 1995年にはウェブサイト [2] が開設され, オンラインで全データを参照することが可能になった。出版物は1年おきの更新であるが, ウェブサイトの更新は毎年行われており, より新しいデータを得ることができる。

1996年より表題が現在の “Review of Particle Physics” に変更されたが, これはレビューの充実を反映している。著者数, ページ数ともに年々増加の一途をたどり, 現時点で最新の2004年版 [3] では, 総ページ数1109ページにのぼり, Physics Letters B の一巻分となっている。これに記載されている原論文は6415 (この版で新しく加わったもの512), 測定値データの数は21926 (そのうち1726が新しい) とされている。また, 手帳版は320ページとなっている。この版の著者としては53人がPDGとして記載されているほか, レビュー部分の著者として, 96人が名を連ねている。レビューの著者には4名の日本人が含まれている。

PDG に対する日本の寄与は, すでに1970年代より内山富美代氏, 島田徳三氏が著者として参加, 小柳義夫氏が加速器・測定器等のデータ提供で協力していたが, 本格的には1986年にKEKとLBNLの間で協議がなされ, 高橋嘉右氏 (のち小柳氏) をヘッドに日米協力事業の一環として進められることになり, 萩原薫, 川端節彌氏がLBNLに滞在して作業を行った。以後現在に至るまで引

き続いて日本グループが編集の一翼を担っている。現在の顔触れおよび担当項目は、KEK より萩原（トップクォーク、新クォーク探索）、中村健蔵（天体起源ニュートリノ）、東北大より棚橋誠治（ゲージボソン探索、compositeness、テクニカラー）、日笠健一（ヒッグス、WIMP、その他の探索）となっている。

RPP の構成

RPP が主に3つの部分、粒子の性質の「まとめの表」(Summary Tables)、レビュー、データ集成 (Data Listings) からなっていることは、多くの方がご存じであろう。まず、最初に位置するまとめの表は、PDG の作業の結晶とも言えるべき部分であり、各粒子の質量、寿命、崩壊分岐比などの物理量の測定値の世界平均をまとめたものである。信頼できる値をいかにして導くかは重要なので、これについては後で詳しく述べることにする。ここに掲載されている粒子は、存在が確実であるものに限られているが、主要な仮説的粒子に対する制限や、種々の保存則の破れに対する上限値もまとめられている。

レビューは2004年版では40項目からなり、物理基礎定数、単位、周期表などから始まり、標準模型 (QCD、電弱理論、フレーバー、CP 非保存)、パートン描像、ニュートリノ質量、大統一理論など基本的な理論の事項、宇宙論・天体物理、世界の実験施設・装置、放射能等、確率統計、運動学・断面積、重要な過程の断面積のデータのグラフなど、高エネルギー物理の教科書的内容がまとめられている。また、これ以外にもデータ集成の中にミニレビューと称される各事項のまとめが数多くちりばめられている。レビューのうちかなりの部分は、その道の専門家に執筆が依頼されており、数名の(記名)査読者とのやりとりを経て、正確で読みやすいものにし、またできる限りアップトゥデートなものとするよう努力がなされている。作業が集中するのを避けるため、レビューの更新はデータの更新より早い時期に行われている。

これらレビューの著者や、下で述べる各セクションの担当者は必要に応じて変更されるが、その際には5名からなるパネル(日本からは日笠が参加)によって最適な著者が選ばれるよう審議が行われる。

手帳版には、これらまとめの表とレビューの部分から特に重要な項目を抜き出したものが掲載されているが、手帳版に何を含めるかは毎年頭痛の種となっているようである。

データベースの更新

全体の3分の2ほどをなすのはデータ集成の部分であり、ここにはまとめの表の根拠となる基礎データがすべて網羅されているだけでなく、まとめの表からもれたデータも多く含まれている。毎年これをアップデートしていくのは根気のいる作業であり、最大の延べ時間が費やされる部分でもある。これがどのような手順で行われるかを紹介しよう。

まず、データベースに入力すべき原データを含んでいる(可能性のある)論文の洗い出しが行われる。原データは、査読のある学術誌に掲載されたものに限られる(まれに例外はあるが)。1年ごとに、高エネルギー分野の論文が掲載されている主要な雑誌20誌ほどに全部目を通し、論文を拾い出して各セクション(例えば τ , B , Z , ヒッグス、超対称粒子など)に割り付けていく。この作業は2人が独立に行って漏れのないようにしている。

このようにしてリストアップされた論文は、各セクションの担当者(encoder)に送られる。各担当者は、送られてきた論文を読み、データベースに加えるべき情報が含まれているかどうかを判断し、必要な場合はその妥当性について検討を行い、データを抽出して、データ集成に追加できるようなフォーマットにまとめる。既存の項目に追加するのが適当でない場合は、新しい項目を作成したり、既存の項目の再構成を行うこともある。

日本のメンバーが担当しているのはこの部分の作業の一部である。担当しているセクションは大部分が探索にかかわる項目であり、実験・理論の両方を十分把握していることが必要になる。90年代にLEPをはじめとして多彩な探索の結果が数多く発表されていた頃には、セクションの新設・分割・再編成を頻繁に行って、新しい種類の結果を含めるとともに、既存のリストを見やすくしていくことが必須であった。最近はその当時よりは落ち着きをみせており、論文数も以前ほどではなくなっている。そのかわり、 B メソンの項目は爆発的に増加しており、BELLE のメンバー(日本人ではないが)も encoder として活躍している。日本グループの寄与は人数の割に大きく、1992年版と2002年版では日本のメンバーが筆頭著者に選ばれている。

こうしてまとめられたデータは、そのセクションを担当する overseer に送られる。Overseer はこのデータが正確かどうかを論文と照合して確認し、必要な場合は変更を加えて、データベースの管理者に送り、全体のデータベースの更新が行われる。Encoder と overseer の仕事の分担の切り分けはセクションによって必ずしも一定ではなく、また変則的な形態(2名で両方の役目を分担して

担当など)で行われている場合もある。

次に、各論文から抽出されたデータは、論文の著者の一人に送られ、正しいかどうかの確認を受ける。この段階で訂正が行われることはめったにないが、これを経てはじめて平均値の算出等に使用できるデータとなる。まれに著者より本質的な変更の要求をされるケースがあり(特に controversial なデータの場合)、これらクレームの対応は overseer が行っている。

各年のアップデートでは、ある期日までに出版された論文をすべて対象としているが、それ以後に出版されたものでも重要なものはできるだけ加えるようにしている。著者の方から、受理されているとのアピールがある場合もある。そのような論文がある場合には、積極的に該当セクションの担当者に連絡すれば、早くにデータベースに追加されることも十分ありうる。

歴史的な事情があり、不安定なく強い相互作用で崩壊する)メソンに関するデータは今までに述べた流れとは別に処理されている。この部分を担当しているのはヨーロッパの参加者の一部からなる“Meson Team”と呼ばれるグループで、独自のやり方で作業を進めている。

こうして作られたデータベースは膨大なものであるが、RPP のデータ集成として印刷されているデータはその全部ではない。まとめの表の平均値を求めるのに用いられるデータはリストされているが、古くて歴史的な意味しか持たないデータは順次印刷物からははずされている。これはもちろんページ数の増大を抑えるためである。

統計的手法

さて、このデータベースからまとめの表に掲載される値を求めるためには、種々の統計操作が必要となる。高エネルギー物理の分野では、周辺他分野と比較して確率・統計的手法のかなり高度なものが用いられてきているが、PDG は古くからデータ処理についての指導的役割の一翼を担ってきたと言える。例えば、信頼区間を得る場合の非物理的なパラメータ領域 ($m^2 < 0$ となる領域など)の取り扱いのように一般に「PDG の方法」と称されるような指針を提示したり、少数統計の場合の Feldman-Cousins の方法をいち早く推奨するなどの役割を果たしている。

PDG のデータ処理方法の一般的な考え方は、RPP の各版の最初に必ず置かれている総説の部分で触れられている。2004 年版 [3] では、p. 13 からの“Procedures”の節である。(以下、ページ数は 2004 年版のもの。)これは Rosenfeld の 1975 年のレビュー [1] の当時から基本的には変わっていない。ここにはそのような方針と手法を

採用した背景的なことも書かれているので、興味のある方には一読を勧めたい。

まとめの表の推定値を求めるには、単純な場合にはその量の測定値のデータを平均すればよい。しかし、データ集成に含まれるデータの全部が推定値を求めるのに用いられるわけでは必ずしもない。用いられない場合の主な理由には次のようなものがある。

- 後から出版された結果が以前の結果の再解析であったり、以前のデータを含んでいた場合、新しいものだけが使用される。
- 誤差が与えられていない場合。
- 疑念のある仮定に基づいている場合。
- データの S/N 比が悪かったり、統計的な有意度が低いなど、他のデータに比べて質が劣る場合。
- 他の、より信頼できると考えられる結果と明らかに矛盾する場合。どの結果が信頼できるかの基準をはっきり示せる場合には、そうでないものを対象からはずすが、そうでない場合は、後で述べるようにスケールファクターを用いて誤差の調整が行われる。
- プレプリントや会議報告から採取された場合。

上限・下限値については、現状ではデータを統合することは行わず、最もよい値を採用している。従ってそれ以外のデータは用いられない。

一つの量だけで話が閉じる場合は比較的単純であるが、さまざまな物理量の間に関連が問題となる場合や、独立な物理量の数よりも測定できる量の数が多い場合は、constrained fit が行われる。分岐比の総和が 1 であるという条件、共鳴状態を含む終状態など、inclusive と exclusive な量の間関係、寿命、幅、断面積の間関係など、いろいろな場合がある。例えば、 τ の分岐比の決定 (p. 418)、 K 中間子の CP 非保存パラメータの決定 (p. 637) では複雑な fit が行われている。このような場合には、各測定量の平均値と fit の結果の推定値の両方が記載されている。 Z の精密測定のパラメータの fit も高次輻射補正を含んだきわめて複雑なものであるが、これは LEP Electroweak Working Group によって、RPP 用に出版データのみを用いた fit が特別に行われている。

矛盾を含むデータとスケールファクター

一般にある量の測定値は真の値のまわりにばらつくが、そのばらつきが大きくて統計的にまず起こりえないと思

われる場合が実際に多く存在する。1つ以上の測定が誤りを含んでいる可能性が高いが、どのデータが誤っているのかがはっきりしないのが普通である。そのような場合に機械的に平均操作をすると、その誤差の値はかならずしも信用できない。こういった事態に対応する方法として PDG が用いているのが、スケールファクターにより誤差の値を調整することである。

束縛条件が無く、かつ測定値の間に相関がない場合にデータを平均するには、 x_i と δx_i をそれぞれ i 番目の実験から報告された測定値とその誤差とすると、 $w_i = 1/\delta x_i^2$ を重みとする標準的な加重平均 $\langle x \rangle$ とその誤差 δx を求める。次に、 $\chi^2 = \sum w_i (x_i - \langle x \rangle)^2$ を計算する。測定値がガウス分布をする場合、 χ^2 の期待値は $N-1$ である。そこで、 $\chi^2/(N-1) \leq 1$ であれば δx_i をそのまま誤差として採用する。もし $\chi^2/(N-1) \gg 1$ なら、平均値を全く用いないか、問題のありかが分かっていればそれを考慮して conservative に推定した誤差をつけて平均値を示す。 $\chi^2/(N-1) > 1$ であるがそれほど大きくない場合は、少なくとも一つの実験結果の誤差が過小評価されている可能性が高いと考えるが、しかしどの実験結果かは特定できないので、平均値を計算するのに用いられた実験結果が全て同じファクター $S = (\chi^2/(N-1))^{1/2}$ だけ過小評価されていると仮定し、 $S\delta x$ を平均値 $\langle x \rangle$ の誤差とする。この S をスケールファクターと呼んでいる。崩壊分岐比のように束縛条件のある場合はフィットを行うが、やはり統計的に期待されるより誤差が大きい場合はスケールファクターを定義して誤差を $S (> 1)$ 倍する。(詳しくは [3] を参照されたい。)

比較的大きなスケールファクターのある量については、「解決できない食い違いのため、現在の実験からはこの物理量を正確に決めることはできない。今後の測定を待つべし。」ということが言えよう。

測定値の変遷

このようにして決定される測定値であるが、新しい実験が行われると一般に誤差が小さく正確な値になっていくと期待するのが普通である。RPP の p. 18 には、いくつかの量の測定値が年とともにどう変わっていったかを示すグラフが掲載されている。これをご覧になると、中心値が誤差の何倍も変化しているケースがあることがわかるであろう。

典型的には誤差の小さい新しいデータが支配的な場合や、質の劣る古いデータを捨てた場合などに起きる。例えば τ の質量については一つの実験結果で値がほぼ決まっており、1992 年以前は DELCO の結果が支配的であった

が、1994 年以降は BES の結果が支配的になっている。DELCO のデータに比べて、その誤差範囲を越えたところに BES の新しい測定結果があるために τ の質量の平均値の不連続的なジャンプが起きている。

もう一つの例として B^+ の平均寿命を見ると、1992 年版の値から 1994 年版の値へ誤差範囲を超えた変化が見られる。ここで B^+ の平均寿命としてプロットされているのは、1992 年版(初めて LEP の 4 実験のデータが現れた)の値までは電荷状態を分離しない B ハドロンの寿命の平均値であり、1994 年版の値からは LEP の実験及び CDF 実験でバーテックス測定器を用いて B^+ を分離した測定結果である。1992 年版のまとめの表では既に LEP の結果が支配的で、 B ハドロンの寿命の平均値は 1.29 ± 0.05 ps である。1994 年のまとめの表には B^+ だけでなく B ハドロンの寿命の平均値も掲載されており、LEP 実験からの値は共に $\sim 1.5 \pm 0.03$ ps となっている。従って、1992 年版と 1994 年版のまとめの表に取り上げられた LEP 実験の結果が不連続的なジャンプを示しているのである。この原因について、1994 年版 RPP の B 中間子についてのミニレビューでは、「多分、バーテックス測定器の理解が進んだためであろう。」と断定的でない書き方をしている。

このことから得られる教訓として、PDG がまとめの表に取り上げる実験データの組み合わせと、平均を計算する手続きは、通常十分信頼できるが、示された誤差を超える変動も起こり得るし、また実際に起きるということを認識しておくことが重要である。

存在の不確定な粒子

データ集成には、報告された状態のうち、PDG の見解として統計的に有意性が見られ、かつ、より信頼できるデータにより否定されていないものは全て含めている。しかし、まとめの表に取り上げるのは十分確立したと考えられる状態だけに限る。この判断は主観による部分を完全に排除することは難しく、明確な基準を示すことはできない。そこで高エネルギーニュースの編集者からの次の質問に記されているようなことも起こる。

RPP から無くなったり復活したりする項目、レビュー(たとえば、ペンタクォークがらみの「エキゾチックバリオン」)があるが、どういう判断で決めているのか?

新たにまとめの表に登場した状態については、「十分確立したと考えられる」とはいえ、無条件ではなく何らかの注釈付きの場合がある。ペンタクォーク $\Theta(1540)^+$ は 2004 年版 RPP [3] でエキゾチックバリオンとして華々しく登場したが、次のような添え書きがある。「6 つの実験

が観測を主張している状態をまとめの表に掲載しないわけにはいかない。しかしながら現在までの証拠に基づけば、この状態の存在については多少留保が必要であると我々は信ずる。」そして、データ集成的エキゾチックバリオンの項に添えられたミニレビューにおいて、過去の実験でピークが見出されないこと（幅が狭いからであると説明されるが、納得できない点もある）、特に、アクセプタンスが一般的な泡箱実験でダリッツプロットに現れるべき $\Theta(1540)^+$ 共鳴のバンドが見られないこと、等の不審点が指摘されている。まとめの表に取り上げられた状態が本当に確立すれば、このような注釈は不要となる。（バリオンについては、存在の確実度は星1つから4つまでに分類されており、 $\Theta(1540)^+$ は星3つとなっている。）このようにまとめの表に取り上げるか否かの判断はやや主観的であり、経験に頼るところがあるので、一度は掲載された状態が消えたことは過去に何度もあった。かつて4クォーク状態 ($qq\bar{q}\bar{q}$) のバリオン候補とされた $S(1930)$ 共鳴はまとめの表に現れて消えることを2度繰り返した。

おわりに

PDG のメンバーの作業は上で述べたように担当セッションごとに行われているが、グループミーティングの機会には、普段顔を合わさないメンバーが意見交換することができる。大きな課題がある場合にはワークショップが開催され、その問題について徹底的な議論が行われる。近年ではニュートリノ質量、 B メソン、余剰次元模型の取り扱いなどについてワークショップが行われた。また、1年おきに Advisory Committee の会合が開かれ、PDG の活動報告に基づき積極的な評価と同時に具体的な建設的批判を頂いている。（Committee には日本からの委員として以前には近藤敬比古氏、現在は相原博昭氏が加わっている。）なにぶん膨大なページ数であるから、改善すべき点も見受けられると思われるが、ユーザーからの意見は RPP をよりよいものとしていく上で貴重であり、遠慮なくコメントをいただくとありがたい。

日本の高エネルギー業界の規模は、RPP の配布数から推測すると米国の5分の1程度であるが、PDG に対する寄与は人的にも財政的にもそれを下回っている。現在も KEK より好意的なサポートをいただいているが、今後日本からより一層の貢献をしていくことが望まれる。

今年（2005年）のデータ集成的新版はウェブサイトですでに掲載されており、レビューの新版もそのうち更新される予定である。今年中に出版された論文のデータは

来年の夏から秋にかけて2006年版として出版されることになっている。これは50年記念の版となるはずである。

現在のウェブサイトはPDFおよびPostscriptファイルへのリンクを並べた構成になっているが、これをもっと有機的に検索可能なものとしていく計画もあり、データをCD-ROMなどの媒体で配布することも検討されている。このようになればさらに利便性が向上すると期待されるが、具体的な日程はまだ未定である。

参考文献

- [1] A. H. Rosenfeld, *Ann. Rev. Nucl. Sci.* **25**, 555 (1975).
- [2] <http://pdg.lbl.gov/>. KEK のミラーサイトは <http://ccwww.kek.jp/pdg/>.
- [3] Particle Data Group, S. Eidelman *et al.*, *Phys. Lett. B* **592**, 1 (2004).