

## 素粒子データブック

東北大学 高等大学院機構

日笠 健一

hikasa@tohoku.ac.jp

東京大学 素粒子物理国際研究センター

田中 純一

jtanaka@icepp.s.u-tokyo.ac.jp

2022 年 (令和 4 年) 8 月 18 日

Particle Data Book は、高エネルギー物理の研究者なら誰でも使ったことがあるといっても言い過ぎではない文献であろう。INSPIRE-HEP データベースによれば、2010 年版から 2018 年版の 10 年分<sup>1</sup>の合計引用回数は 43300 回 (2022/8/8 現在) であり、圧倒的な数を誇っている。読者の中には自らの結果が掲載されて一人前の研究者になったと感じた方もいらっしゃるはずである。研究者の間で “PDG” や “Particle Data Book” の愛称で呼ばれている分厚い本、手帳版、あるいは最近ではウェブ版もあるが、その文献の正式名称は “Review of Particle Physics” という。ただ、おそらく通じないので、以下「素粒子データブック」と呼ぶ。

高エネルギーニュースでは、2005 年に中村健蔵氏と筆者の一人が紹介記事 [1] を書いているが、かなりの日時が経過しているので、今回は前回十分書けなかった点を含め、それ以後に重点をおいて改めて紹介する。

### 1 素粒子データグループ

素粒子データブックの編集を行っているのは素粒子データグループ (PDG) である。その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<sup>2</sup>、メンバーは世界中にわたっている。いわゆる素粒子データの集成の部分に関わっているのは LBNL に 10 名程度、世界では 60 名以上おり、それぞれに担当部分が決まっている<sup>3</sup>。日本のメンバーがそのうち 6 名となっている。

素粒子データブックの以前の名称は “Review of Particle Properties” であったが、1996 年から現在の名称になった。これはレビューの部分が年々充実してきたことを反映している。現行版では 100 以上のレビューが含まれている。各レビューの著者も素粒子データブックの

著者の中にリストアップされており、著者の合計は 250 名を超える。日本からは現在 10 名がレビューの著者となっている。

新たに著者を加える際には Representative Board (日本から日笠) で議論が行われる。また、外部評価として International Advisory Committee が 2 年に 1 回程度開催され、活動に対する評価とともに詳細な要望を含むレポートが毎回提出されている。この委員には日本から 1 名加わるようになっており、現在の委員は横山将志氏<sup>4</sup>である。また、中田達也氏<sup>5</sup>が委員長を務めている。

### 2 素粒子データブックの変遷

素粒子データブックの歴史はすでに 65 年を超える<sup>6</sup>。今までの各版は PDG のウェブページにて見ることができ、その端緒は 1957 年に A. H. Rosenfeld により作成された表で、M. Gell-Mann と彼によって書かれたストレンジ粒子の総合報告 [3] に含まれていた。翌年バークレーからプレプリントとして発表された 20 ページのレポートでは、当時知られていた「素粒子」の表 (質量、寿命を含む) は 1 ページに収まっており、それ以外に崩壊モードの表が 2 ページという分量に過ぎなかった。強い相互作用で崩壊するハドロン、いわゆる共鳴状態が多数発見される前の時期である。最初に学術雑誌に掲載されたのは 1964 年 (Review of Modern Physics) [4] で<sup>7</sup>、それ以降さまざまな雑誌 (今までに計 7 誌) に新版が掲載されている。言うまでもなく毎回の改訂でページ数は増加し、最新版では 2000 ページを大きく超えている。また著者も最初の数名から 2 桁増加している。ページ数は単調増加であるが、物理的な重量は必ずしもそうなっ

<sup>4</sup>日本からは過去に近藤敬比古氏、相原博昭氏、田中が委員を務めている。

<sup>5</sup>ヨーロッパの機関からの委員という立場になる。

<sup>6</sup>最初 20 年弱の経緯は文献 [2] が詳しい。

<sup>7</sup>バークレーと並行して、ヨーロッパでは当時コペンハーゲンにいた M. Roos が単独で同様の表を出版していた [5]。この 2 者が協力することになり、1964 年から Roos が著者に加わった。ヨーロッパのグループはこれから発展してメソンチームとなった経緯がある。

<sup>1</sup>第 2 章で説明するように 2 年おきの刊行のため 5 冊分になる。

<sup>2</sup>2017 年より中核メンバーに INFN から 1 名参加している。

<sup>3</sup>ヨーロッパのメンバーのうち一定部分はメソンチームというサブグループを構成していて、「不安定な」(強い相互作用か電磁相互作用で崩壊する) メソンの部分を担当している。

ていない。これは出版社が同じでなく、使われている紙の紙質による。

携帯可能な手帳版（ブックレット）は1968年に始まり、内容量と携帯性とのバランスを取りつつ今に至っている。以前はダイアリーなども毎年配布されていたが、これは財政難もあり中止となっている。一方で1995年よりウェブサイトが開設され、それまで基本2年ごとであった改訂が毎年行われるようになった（ただし雑誌の出版は2年に一度）。当初は各セクションのPDFファイルが置かれているだけであったが、近年はinteractiveになり（図1左）、使い勝手がよくなっている。また最近ではAndroid用のアプリ（図1右）も登場している<sup>8</sup>。

紙の出版物の必要性は以前から議論されており、何度かアンケートも実施されている。全体としてはウェブの利用にシフトしてきているが、紙媒体に対する要望も根強く、今のところ学術雑誌による出版が継続されている。図2は2000年以降に出版された12冊の表紙のスナップショットである。

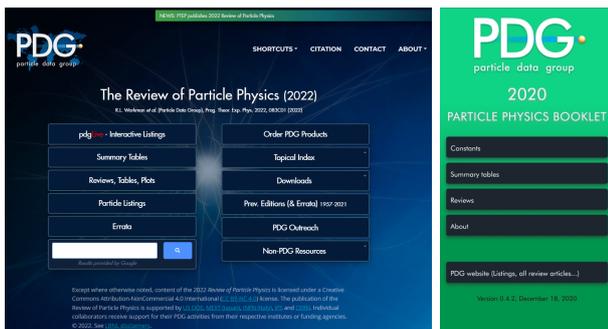


図1: PDGのウェブサイトのトップページ(左) [6]。デザインが一新された。PDGのアプリ(右)。

2020年版では、初めて日本の雑誌である Progress of Theoretical and Experimental Physics (PTEP) により出版され、2022年版も引き続き PTEP に掲載された。これは関係者の努力と日本物理学会の援助によるところが大きく、PTEP 誌の国際的認知度が増すことが期待されている。PTEP 誌はオンラインジャーナルのため、印刷版は本来存在しないが、素粒子データブックは特別に印刷されている。

### 3 素粒子データブックの構成と編集

素粒子データブックは大きく3つの部分からなっている。Summary Table（まとめの表）、レビュー部分、Particle Data Listing（データ集成）である。まとめの表は、最もよく参照される部分で、各素粒子の質量、寿命、崩壊分岐比などの測定値の世界平均を列挙してい

<sup>8</sup> iPhone/iOS 版も作成されたが、アプリの要件をみたまないとされ掲載不可となった。



図2: 2000年以降に出版されたPDG雑誌。中央上の2冊がPTEPからの2020年版と2022年版。

る。これらの値は基本的に最も信頼できる測定値とされる。レビューは年々充実しており、物理定数からはじまり、標準模型、天体物理・宇宙論、実験手法、確率統計、運動学、断面積データ、各素粒子の性質、仮想的粒子探索など、2022年度版では全95項目のレビューがある。これ以外にもデータ集成の中に、個別のテーマに関するレビューが埋め込まれており、全部で120になる。データ集成は、平均値を導くのに使用された各実験のデータをすべて表にしている。粒子探索については、まとめの表にはなく、こちらだけに含まれている項目も多い。2022年度版では、まとめの表が100ページほど、レビューが約1000ページとなり、これに加えてデータ集成も1100ページを超えている。

2016年度版から大きな変更があり、データ集成の部分は印刷版に含まれないこととなった。これにより印刷版は半分の厚さとなり扱いやすくなった。ウェブではデータ集成も継続して参照可能となっている。

さて、PDGが蓄積するデータベースの更新は毎年2回行われている。2005年の頃 [1] と変わったこととして、当時は各担当者が原著論文からデータを抽出し、データブックの書式にしてLBNLに送っていたが、現在はデータベースへの入力まで行っている。提供するデータの質を保つため、この作業は4段階に分かれており、その手順をごく簡単に紹介する。

第1段階から第3段階には、それぞれ独立した作業グループがある。

**作業1** 論文を探すグループ (literature searcher)

**作業2** 作業1の論文からデータを抜き出すグループ (encoder)

**作業3** 作業2が適切に行われたかどうか検証するグループ (overseer)

作業1では、毎年新しく出版される論文の中から、データベースに登録すべきデータを含んでいる論文を探す。査読付きの学術誌に掲載されることが条件で（稀に例外あり）、主要な20誌ほどに目を通し、論文を各粒子等のセクションに割り当てていく。この作業は2人が独立して行い、漏れができるだけないようにしている。これには長年、故 S. Eidelman がその一人として従事していた。

作業2では、各セクションの担当者 (encoder) が、割り当てられた論文を読み、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判断し、必要があればその妥当性について検討し、データを抽出する。追加すべき項目がデータベースに無い場合は、新しい項目を作成する。また、既存の項目を再構成することもある。

作業3では、各セクションの担当者 (overseer) が、作業2で登録されたデータが適切かどうか、あるいはさらに追加すべきデータがあるかどうか検証する。必要な場合は担当の encoder と議論する。Encoder と overseer の仕事の分担は統一されたものではなく、セクションによっては変則的な形態（2名で両方の役目を分担など）で行われている場合もある。

作業3の終了後、各論文から抽出されたデータは、論文の著者・グループの一名・代表者 (verifier) に送られ、正しいかどうかの確認を受ける。これが第4段階である。この段階で訂正が行われることは少ないが、このチェックを受けてデータベースへの登録が確定する。

これらの作業の終了後、平均値の算出、全体的な編集作業を経て、毎年のアップデート版が公開される。

一方、レビューの更新は、データの更新作業と重ならないような日程でなされている。各レビューには必ず複数名のレフェリーが付き、正確さが期されている。

## 4 日本グループの活動

日本人としては、1970年代前半に内山富美代氏、島田徳三氏が個人的にPDGの活動に参加していたが、1974年からKEKがPDGと連携することとなった(KEK-PDG)。これは、KEK-PSの開始が近づき、国内の高エネルギーグループから個別にLBNLへのデータのリクエストが増えた背景があるようで、当時はデータの配布は磁気テープの形であったが、これをKEKでライブラリとして一元化することとなった。高橋嘉右氏、小柳義夫氏らにより、KEK-PSの最初の実験の一つとして計画されていた $\pi N$ 散乱の過去のデータや、光子生成反応のデータなどが収集されLBNLに提供された[8]。

1986年には、日米科学技術協力事業の枠組みにより、PDGへの財政的寄与が開始され、同時に素粒子データブック編集への組織的な参加が決定した。秋には萩原薫、

川端節彌両氏がLBNLに数週間滞在して作業を行った。当時の素粒子データブックには、粒子探索のセクションは最小限に留まっていたが、日本グループはその大部分を担当し、次第に充実させていった。担当分野はレプトン関連と単独クォーク、モノポール以外のすべてで、担当後最初の1988年度版では、トップ・第4世代クォーク、アクシオン等の軽いボソン、超対称粒子、「その他の探索」のセクションに加えて、新しくヒッグスボソン、重いボソン ( $W'$  など)、下部構造 (compositeness) の探索セクションが新しく作られた。探索データの評価は理論的な視点が必要なことから、理論家が主に作業を担った。時を置かずLEPから大量の探索実験の結果が発表され、担当する論文数は急激に増加した。その後もTevatron、LHCと波状的ではあるが増加傾向にある。1986年から現在までの日本グループが担当しているencoderセクションとその担当者、および、日米協力の日本側の代表者を表1にまとめた。図3は日本グループでencodeのためにチェックした論文の数の推移を示している。PDG全体では近年2年間あたり800本前後の論文から新しくデータを抽出している。最終的にはデータを抽出しなかった論文もあるため、図の数字と800という数字を直接は比較できないが、日本グループの高い貢献度がうかがえるかと思う。

このように、日本グループの担当は当初実在しない粒子のみであったが、1995年からは中村健蔵氏が太陽・大気ニュートリノのデータの担当を開始した。同年にはトップクォークが発見され、2012年にヒッグスボソンが発見されて実在粒子の仲間入りを果たした。

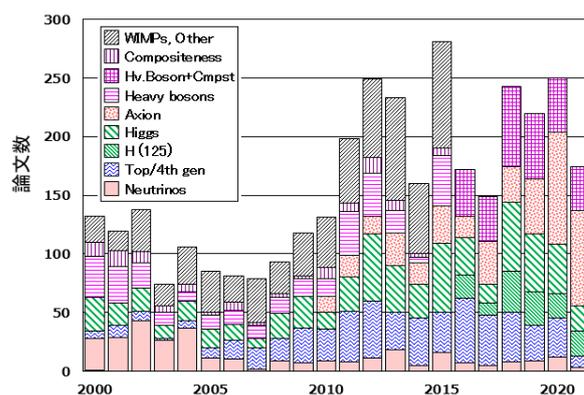


図3: 2000年以降日本グループが担当した論文数。2016年以降はHeavy BosonsとCompositeness/Technicolorを合わせてHv.Boson+Compstとして集計している。

レビューに関しても、日本の研究者の寄与が増加している。今まで、三田一郎 (BメソンCP非保存)、福来正孝 (宇宙論パラメータ)、中村健蔵 ( $\nu$ 質量・混合)、山本明 (超伝導磁石)、住吉孝行 (光子検出器) 各氏が執筆しているが、2022年現在では表2のように国内研究者による9編のレビューが掲載されている。

表 1: 1986 年から 2022 年までの国内の encoder 担当者と日米協力の日本側代表者。括弧書きは海外所属。

セクション \ 西暦年	86-88	89/90	91	92/93	94	95	96	97-03	04-09	10-13	14/15	16-22				
Neutrinos (solar, atmospheric)								中村健蔵								
Top, 4 <sup>th</sup> gen. quarks					萩原薫				隅野行成							
$H^0$ (125 GeV)					日笠				田中							
Higgs searches					日笠											
Axions/Light bosons	萩原薫 川端節彌				村山齊				(村山)		高橋史宜					
Heavy bosons ( $W'$ , leptoquark, ...)									棚橋誠治							
Compositeness and Technicolor																
SUSY									村山齊				(村山)			
WIMPs/Other searches													日笠			
日米協力の日本側代表者					高橋嘉右				小柳義夫				日笠			

表 2: 2022 年現在のレビュー記事執筆者

担当レビュー	(共同) 執筆者
CKM Quark-Mixing Matrix	堺井義秀
Neutrino Masses, Mixing, and Oscillations	横山将志
Lattice QCD	橋本省二
Superconducting magnets for collider detectors	牧田陽
MC Neutrino Generators	早戸良成
Pole Structure of the $\Lambda(1405)$ Region	兵頭哲雄
Searches for Quark and Lepton Compositeness	日笠・棚橋誠治・寺師弘二
Grand Unified Theories	久野純治
Leptoquarks	棚橋誠治

## 5 ヒッグスセクションの変遷

ヒッグスボソンのセクションは日本で一貫して担当している中の一つである。筆者が担当していることもあり、一例としてこのセクションの変遷をたどってみたい。

ヒッグスボソンの探索結果が素粒子データブックに初めて掲載されたのは 1982 年版であり、 $\eta'$  崩壊中の  $H^0$  放出の上限であった。この時は「その他の探索」セクションの 1 項目であった。1986 年版までは、データは 5 個まで増えたが同様の状態であった。日本グループの担当となった 1988 年版では、独立したヒッグスボソンのセクションが設けられ、データ数は 13 となり、より過去のデータや宇宙論の制限も追加された。1990 年版では、LEP からの最初の制限 3 つを含んで、38 のデータが掲載された。1992 年版では、データ数は 58 に増えたが、関与する結合の種類により ( $Z/W$ ,  $B$ ,  $K$ , 核子など) 6 つのサブセクションに分けられ見やすくなった。1994 年版では、電弱精密測定からの間接的な制限 (標準模型を仮定) が加わった。データ数が非常に増加したこ

とから、ページ数の無闇な増大を抑えるため、1996 年版からは LEP 以外からの制限は不掲載となった。以後、LEP の結果でも古くなったデータは不掲載とするようになった<sup>9</sup>。

2000 年版では初めて Tevatron からの結果 (断面積に対する上限) が掲載され、2004 年版で LEP 各実験からの最終的な質量の下限が掲載された。2010 年に Tevatron により質量 160 GeV 付近が棄却された (2011 年 Web 版で反映) のに続き、2012 年版では LHC により質量領域の大半が棄却された。2012 年 7 月のヒッグスボソン発見により、2013 年の Web 版では遂に実在粒子として 125 GeV の  $H^0$  のセクションが創設された。2016 年には  $H^0$  の担当を日笠から田中に交代した。

$H^0$  の性質は標準模型のヒッグスボソンとして矛盾がないが、一方で、標準模型以外のモデルでは、類縁のスカラーボソンの存在は頻りに予想される。標準模型以外のヒッグスボソンの制限については、1988 年版で初めてサブセクションが設けられ、1990 年版では超対称模型のヒッグスのサブセクション等が追加された。湯川結合を持たないヒッグス、検出不可能な終状態に崩壊するヒッグス、一般の複数ヒッグス場模型のヒッグスなど、さまざまな性質のヒッグスボソンに対する制限が  $H^0$  とは別のセクションとしてまとめられている。電荷を持つヒッグスについても、1984 年版に PETRA の各実験からの  $H^\pm$  の制限が掲載されたのを最初に、コライダー、フレーバー物理等からの制限が掲載されている。 $H^{\pm\pm}$  も 1992 年版より加わっている。

さて、粒子の質量や寿命などの平均値を求める統計的手法の詳細は素粒子データブックの序章<sup>10</sup> や前回の記事 [1] にまとめられている。PDG では平均値とその誤差を算出するとき、誤差をウェイトとして用いて平均を

<sup>9</sup>実験屋としては not used になり、それが印刷物から消えていくのは寂しいものであるが...

<sup>10</sup>2022 年度版では 15-18 ページ

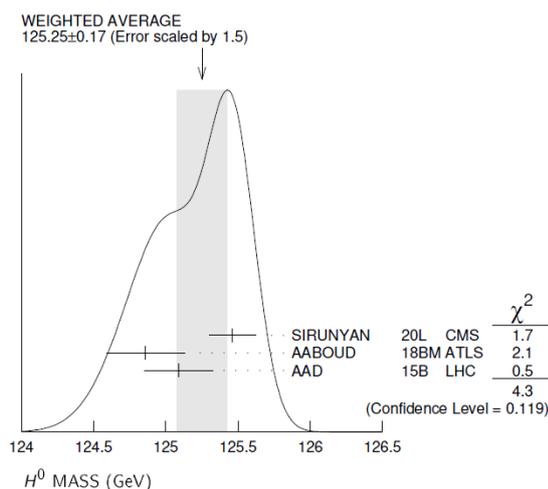


図 4: ヒッグスボソンの質量の3つの測定値とその平均値 [7]

取る一般的な方法を用いる。ただし、平均値を算出するために用いたデータに誤差から見積もられるよりも大きな不一致が見られる ( $\chi^2$  が1より大きい) 場合、データにある種の矛盾があると考え、「スケールファクター」を算出しそれを使って誤差を大きく評価する。Summary Tables に「S = 数字」を見かけたら、スケールファクターが導入されていることを示している。ここでは、ヒッグスボソンの質量を例にとり、その手法を簡単に紹介する。まとめの表では、2022年度版のヒッグスボソンの質量は  $125.25 \pm 0.17$  GeV (S = 1.5) と報告されている。対応するデータ集の部分を見ると、この平均値は3つの論文に掲載された数字から算出されている:

- $125.46 \pm 0.16$  GeV (CMS 13 TeV [9]),
- $124.86 \pm 0.27$  GeV (ATLAS 13 TeV [10]),
- $125.09 \pm 0.21 \pm 0.11$  GeV (LHC Run1 [11]).

図4がその分布で、 $\chi^2$  値がそれぞれ1.72, 2.09, 0.46でATLAS 13 TeVがずれているように見える。この場合、自由度あたりの $\chi^2$  値が  $(1.72+2.09+0.46)/2 = 2.14$  と1を大きく超えるため、スケールファクター ( $\sqrt{2.14} \approx 1.5$ ) を導入して誤差を機械的な値よりも大きくしている。

## 6 おわりに

発見から10年、ヒッグスボソンのデータは増加とともに精密化してきた。ヒッグスボソンのデータは標準模型と矛盾がないとは言え、New Physicsの「窓」としてこれからも精密測定が進んでいく。こういった成果をデータとして残す方法は試行錯誤中である。 $H^0$  については、いわゆる $\kappa$ フレームワーク、SMEFT等の枠組みで測定はなされるものの、ATLASとCMSの測定量の

定義が微妙に異なることもある。そのため文字としては残せるが、データとしては残せていないもどかしさがある。その中でもsimplified template cross sectionフレームワークは期待できる枠組みであるが、データの統計が不足しているため、実験独自にカテゴリー削減が行われることもあり悩むところである。

さらに、ヒッグスボソンに限らず、さまざまな粒子の探索結果もデータの蓄積とともに更新されている。近年の実験結果は、質量と生成断面積であったり、2つの質量であったりと2次元データとして提示されているものが多い。PDGのフォーマットは基本的に1次元なので、2次元の情報を提供することは容易でない。例えば、WIMPの核子との散乱断面積の上限値は、いくつかの典型的な質量値に対する上限を与えるにとどまっている。これらは将来への課題であろう。

## 参考文献

- [1] 日笠健一, 中村健蔵, 高エネルギーニュース **24-2**, 1 (2005).
- [2] A. H. Rosenfeld, Ann. Rev. Nucl. Sci. **25**, 555–598 (1975).
- [3] M. Gell-Mann and A. H. Rosenfeld, Ann. Rev. Nucl. Sci. **7**, 407–478 (1957). 表は p. 411.
- [4] A. H. Rosenfeld *et al.*, Rev. Mod. Phys. **36**, 977–1004 (1964).
- [5] M. Roos, Rev. Mod. Phys. **35**, 314–323 (1963).
- [6] <https://pdg.lbl.gov>. KEKのミラーサイトは <https://ccwww.kek.jp/pdg/>.
- [7] R. L. Workman *et al.* (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. **2022**, 083C01 (2022).
- [8] 小柳義夫, 情報管理 **24**, 899–905 (1981); 学術月報 **49**, 670–674 (1996); 素粒子論研究・電子版 **21**, 13–23 (2016).
- [9] CMS Collab., Phys. Lett. B **805**, 135425 (2020).
- [10] ATLAS Collab., Phys. Lett. B **784**, 345–366 (2018).
- [11] ATLAS and CMS Collabs., Phys. Rev. Lett. **114**, 191803 (2015).