

小特集 社会との連携をめざしたプラズマ核融合アウトリーチ活動の展開

2. 理科教育の現場にプラズマ・核融合を

2. Including Plasma and Fusion Topics in the Science Education in School

門 信一郎

KADO Shinichiro

京都大学エネルギー理工学研究所

(原稿受付：2014年8月3日／改訂稿：2014年11月6日)

日本の教育はいわゆる「ゆとり」から「脱ゆとり」へと移行し、世界的にみた学力も回復傾向を示している。「ゆとり教育」期間もSSHやSPP等を通じ、中学・高校も理科離れ対策を講じ、筆者もそれに協力してきた。プラズマ現象は数多く中学高校の教科書に取り上げられているが、プラズマの名を使わないのは不自然に思える。プラズマ・核融合をあらわに現行の理科教育に組み込むには、高等学校で初めて「プラズマ」を目にするのでは遅い。全員が学ぶ中学理科で用語と基本性質に慣れ親しみ、高校では学術・研究志向の教育となるように内容や配置を工夫をすべきであろう。白熱灯と蛍光灯からLED照明へと移行しつつある今日、科学的リテラシーの充実には、光のスペクトル分類を再定義する必要がある。研究者にも現行の理科教科書の一読を奨励したい。

Keywords:

science literacy, yutori education, SSH, SPP, PISA, high-school textbook, continuum spectrum, line spectra, luminescence

2.1 背景

筆者が高校生にプラズマの紹介を始めたきっかけは、2002年、まさにスーパーサイエンスハイスクール(SSH)、サイエンスパートナーシッププログラム(SPP)の初年度であった。当時30代前半で、自身の研究の立ち上げにも奮闘している中、手探りで内容や教材を考案し、生徒への説明方法にもかなり苦心していた記憶がある[1]。当時プラズマテレビの人気が出てきたこともあり、生徒も「プラズマの用語は聞いたことはあるが、いったいどんなものなのか」と興味津々で参加していたような印象である。

実際、このプログラムは田舎の高校に育った筆者には大変魅力的に映り、自分の高校時代にもこんな体験ができたらよかった、と羨ましくも思った。その一方、限られた高校だけにこのような機会があることには、なにかしらの違和感を覚えていたのも事実である。「本来、教育とはどこにいても相応のものが受けられるべきものではないのか?」「そのためには、理科の教科書が導入になるべきではないのか?」との自問は長く続いた。

そのような経緯で、高校教科書を持参してもらい、それを参照しながらプラズマの授業を試みたりもするようになってきた[2]。

しかし近年、プラズマや核融合を広く人々に認知してもらう目的のためには、高等学校で初めてプラズマという用語を知るのでは効果が薄く、その意義もなくなりつつあるように感じている。もっと早期にプラズマを理科教育の中で扱えるのではないかと、それがプラズマ現象であることを

はっきりと記載すべきではないか、と思う内容も少なくない。特に蛍光灯やネオンランプの時代から発光ダイオード(Light Emitting Diode: LED)や有機EL(organic electroluminescence)の時代になり、それらとの比較においてプラズマからの発光を理解すべき段階になった、との思いが顕著になってきた。

さらに、2011年3月11日の東日本大震災に伴う原発事故を機に、核融合エネルギーの早期実現、その可能性、および考えられ得るリスクの評価[3]についても、より具体的に発信し、世の中に伝えていくべきではないのか、そのためには、科学者のサイエンスコミュニケーション能力と、社会における科学的リテラシー両者の充実が不可欠ではないか、との思いも強くなった。

そこで本章では、理科教育をめぐる昨今の状況を筆者の視点からまとめ、その中でプラズマ・核融合を教科書で学べる可能性について、筆者の考えを述べたい。

2.2 学習到達度調査(PISA)と学習指導要領

SSHやSPPが立ち上がってきた時期は、日本の教育史上、大転換ともいえる改訂に賛否が分かれていた。2002年度から小中学校、2003年度から高等学校で開始された、いわゆる「ゆとり教育」への学習指導要領の全部改訂である(本章ではこれを旧課程と称する)[4]。ある誕生年度の生徒がうけてきた教育課程の概要を図1にまとめる。賛否や個人個人の努力はもちろんあるが、この厳然たる事実を無視して日本の理科教育を語ることはできないだろう。したがって、本章でも「ゆとり教育」の呼称を容赦願いたい。

誕生年度	小1	小6	中1	中3	高1	大学	大学院	大学(現役)
1984	1991	1996	1997	1999	2000	2003	2007	旧旧課程
1985	1992	1997	1998	2000	2001	2004	2008	旧旧課程
1986	1993	1998	1999	2001	2002	2005	2009	旧旧課程
1987	1994	1999	2000	2002	2003	2006	2010	中学3以降ゆとり
1988	1995	2000	2001	2003	2004	2007	2011	中学2以降ゆとり
1989	1996	2001	2002	2004	2005	2008	2012	中学以降ゆとり
1990	1997	2002	2003	2005	2006	2009	2013	ゆとり(旧課程)
1991	1998	2003	2004	2006	2007	2010	2014	ゆとり(旧課程)
1992	1999	2004	2005	2007	2008	2011	2015	ゆとり(旧課程)
1993	2000	2005	2006	2008	2009	2012	2016	ゆとり(旧課程)
1994	2001	2006	2007	2009	2010	2013	2017	中3理数脱ゆとり
1995	2002	2007	2008	2010	2011	2014	2018	中23理数脱ゆとり
1996	2003	2008	2009	2011	2012	2015	2019	中学理数脱ゆとり
1997	2004	2009	2010	2012	2013	2016	2020	脱ゆとり(新課程)
1998	2005	2010	2011	2013	2014	2017	2021	脱ゆとり(新課程)
1999	2006	2011	2012	2014	2015	2018	2022	脱ゆとり(新課程)
2000	2007	2012	2013	2015	2016	2019	2023	脱ゆとり(新課程)
2001	2008	2013	2014	2016	2017	2020	2024	脱ゆとり(新課程)
2002	2009	2014	2015	2017	2018	2021	2025	完脱ゆとり
2003	2010	2015	2016	2018	2019	2022	2026	完脱ゆとり
2004	2011	2016	2017	2019	2020	2023	2027	完脱ゆとり

図1 誕生年と学習指導要領の対応図。課程の変更, 移行措置期間を太線で区切ってある。PISA実施は2000, 2003, 2006, 2009, 2012年。

ゆとり教育にいたる布石は、1989年の学習指導要領改訂[5]に基づいた、1995年に開始された月間2回の「学校週5日制」、1998年の学習内容3割削減と「生きる力」を育むため、とされた「総合的な学習」新設であったといえる。

ゆとり教育は直近の指導要領改訂で終焉を迎える。2009年度から小中学校で理数を中心に経過措置がとられ、2011年度に全面実施されることになった新課程、いわゆる「脱ゆとり」である（「詰め込み」回帰ではない）[6]。ここでは「生きる力」の概念を継承しつつ、基礎学力の充実、授業時間の増量がなされた。

「生きる力」という一見曖昧ともとれる用語が当初教育界を惑わしたのは事実であろう。最近では「レジリエンス」「逆境力」としても定着してきたように思うが、移りゆく社会情勢のなかでたくましく生きていくには何が必要なのか、という観点で、「ゆとり」を「基礎学力軽視」とはき違えてはいけない、という結論に達しているのだと筆者は解釈している。

「脱ゆとり」と言われる新課程の施行に拍車をかけたのが、経済協力開発機構（OECD）生徒の学習到達度調査（Programme for International Student Assessment: PISA）の結果である。PISAは15歳児を対象にReading（読解力）、数学的（Mathematics）リテラシー、科学的（Science）リテラシーの三分野について、2000年から3年ごとに実施されている[7]。特に各科目について、3回に一度、重点的な各論調査がなされている。科学の詳細調査は2006年度であった。得点の比較はこの詳細調査を経験した後が正確とされているため、数学的リテラシーは2003年以降[8]、科学的リテラシーは2006年以降[9]で比較することが好ましい。しかしながら、おおまかな傾向をみるために、本章では必要に応じてそれ以前の結果も参照したい。

まず、PISAの成績の推移について日本と、現在日本の教育のお手本としてよく参照されているフィンランドとの比較

を図2に示す（PISA2000, PISA2003はその後の経済成長などによる補正をしていないデータのままであるが両国はほとんど変化ない）。

PISA2003, PISA2006と日本の順位（および平均点）が低下してきたことに端を発し、脱ゆとりが声高に叫ばれるようになった。特にPISA2006[9]の科学についての詳細結果（図3）をみると、理科のことを知ってはいるが、楽しいと感じていない、というのが如実にわかり、理科の時間数削減によって、問題視されていた、いわゆる「理科離れ」と揶揄される社会現象の実態が数値化されたようであった。

そもそも「技術立国には理科が重要だ」との理念で、理科の時間数削減をカバーする政策が前述のSSHやSPPであったとも言える。しかし、他の項目も図2のようにグラフ化すると、理科の学力よりも、読解力、数学の低下がむしろ著しいことが見て取れる。すなわち、理科離れは「理科嫌い」もしくは「勉強嫌い」と認識するほうがよさそうである。

PISA2003ではまだ中2まではゆとり教育以前の旧旧課程であったため、ゆとり教育が学力低下の主因ではないとする解釈も見受けられる[10]。しかしながら、成績の低下に1年という時間は十分長い、ということは、体験ないし実感されておられるのではないだろうか。逆に成績の向

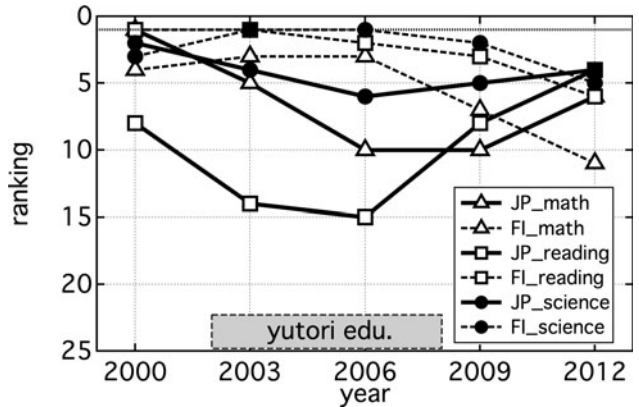


図2 PISA 国別順位の日本（JP実線）・フィンランド（FI破線）の比較。2002-2008年はいわゆる中学校のゆとり教育期。

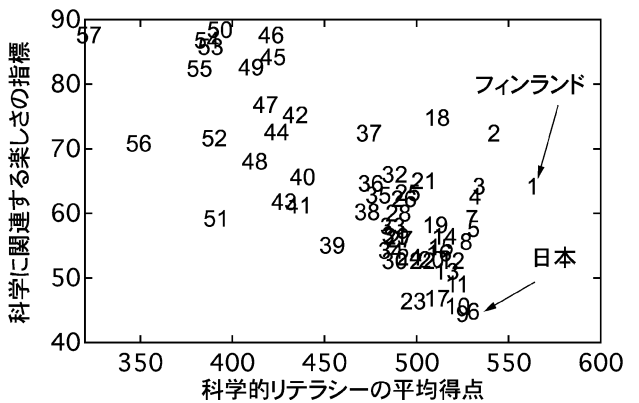


図3 PISA2006における科学の得点と関心との相関。数字は得点準位を示している。1位はフィンランド。日本は6位。

上、特に国語・算数に年月がかかるのは想像に難くない。論議はあるものの筆者は、この国際的な学力低下として、ゆとり教育との関連性を肯定するのが合理的だと思っている。実際、脱ゆとりの導入と期を同じくして、学力低下は盛り返しているように見える。

それを直接的に反映しているかの如く、2000-2002年を機に、首都圏の中学受験率および併願校数が増加を始めたという統計もでている(図4, 日能研調べ)。

OECD加盟国に着目すると、PISA2009[11], PISA2012[12]年と平均得点を伸ばしている上位国は日本のみ(やや順は下がるがドイツも伸びている)である。むしろ、日本がゆとり教育を導入する際のお手本といわれているフィンランドやカナダの得点が低下しており、現在それぞれの国で問題視されている。フィンランドの90年代の教育改革のお手本は、日本型の教育だったともいわれており、こと教育については長期にわたって最適な方策を示す合理的な成功例はみあたらない。

「脱ゆとり」の効果を明確に表現しているのは、図5に示す日本の習熟度別の得点分布である。

科学的リテラシーについてはPISA2006の詳細調査以降のデータに限られるため、PISA2003で詳細調査がなされた数学的リテラシーを示す。PISA2003からPISA2006で分布が左に寄っている、すなわち、習熟度の低い生徒が増えたことを反映している。その後PISA2009-PISA2012にかけて、右へシフトしており、年ごとに学力が回復しているのがわかる。科学的リテラシーもPISA2006以降、同様の回復傾向を示している。読解力についてはPISA2000からデータがある。PISA2003-PISA2006と学力低下がみられたが、他科目同様、PISA2009-PISA2012で向上しており、科学、数学の傾向とも整合している。

すなわち現在、学力はどの科目においても回復傾向にあると結論付けられる。図2に示したような科学的リテラシーはその中でも低下の度合いが小さく、日本の小中学校、学習塾、科学者、そして主役たる生徒たちは最大限、理科についての学力低下を食い止める働きをしてきたといえるのではないだろうか。

こういった社会のニーズ(理科離れへの危機感)を反映

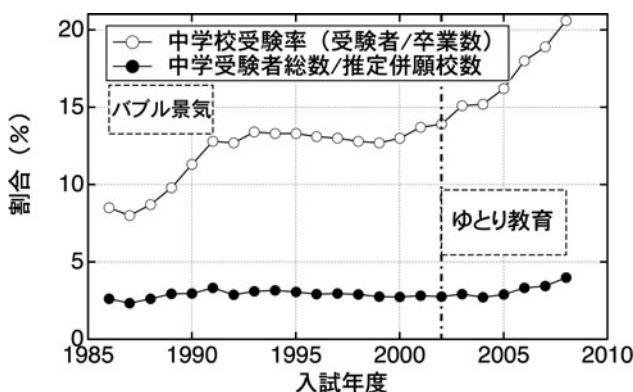


図4 首都圏の中学受験率の動向(日能研調べによるデータをグラフ化)。2002-2008年は小学校のいわゆるゆとり教育期。1986-1991年はバブル景気。

してか、テレビドラマなどでも科学者が主役となる、サイエンスショーが人気を博す、元素や深海などの展示がにぎわう、等、科学を目にする機会が増えたように思う。科学の分野内でのパイの奪い合いになっている感もあるが、受ける側は選択肢が広がり好機ともいえよう。子どもが興味を持つこと、打ち込んでいることであれば、親世代も自ずと関心をもつであろうから、その傾向が社会へ広がっていくことも起こり得よう。

毎年開催される国際物理オリンピック[13]でも、2011~2014年大会まで日本の高校生は参加者5名全員がメダル圏(全参加者400名弱の中から上位25%)に食い込んでいる[14]。国別順位も上位25%辺りであるので、最高レベルというより、中堅層が厚い、という解釈が適切であろう。

このような背景において、科学コミュニティが生徒達にかける期待、および提供できるべき学術的素養について考えるべきであろう。次回PISA2015では、再度科学の詳細調査がある。PISA2006においてほぼOECD加盟国中最下位となった科学への興味に関する部分の動向が一つの試金石になろう。

2.3 高校教科書の現状と問題点

中学では教科書に書かれていることをすべて学ぶことが前提であるが、高校理科の場合は採用科目に大きなウエイトがかかる。

表1に平成26年度の高校教科書採択状況を示す[15]。文科省から公表された統計資料をもとに分析・解釈をおこなった。表1(a)の新課程では基礎科目から3教科選択することが必要となっており、1年次に2科目、2年次に1科目と想定される。表1(a)をみると、生物基礎、化学基礎はほぼ確定で、残り1科目として物理基礎と地学基礎が2:1程度の採択、という数字にみえる。主に理科系において選択対象となる専門科目では、2年から3年次にかけて2科目を履修することが想定される。ここでは物理の選択率は旧課程(表1(b))よりも上がっているようである。

理科、特に高校物理に関するゆとり教育(旧課程)の内容で筆者が強く問題視していたことがあった。小中学校の理科内容が削減され、高校に押し上げられたにもかかわらず、物理I、IIの内容が過多となり、物理IIの「物質と原子(原子・分子の運動、原子と電子)」あるいは「原子と原

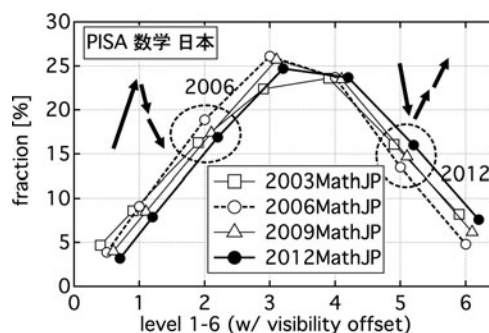


図5 日本のPISA数学的リテラシー得点分布の推移。視認性のため横軸を少しずらしてある。level 2, 5の占める割合の推移を矢印で示した。

表1(a) 平成26年度教科書発行部数(新課程).

種目等	需要数(冊)	全冊中	基礎内訳	専門/基礎
科学と人間生活	428,312	9.5%		
物理基礎	735,868	16.4%	23.2%	
化学基礎	1,030,895	22.9%	32.5%	
生物基礎	1,085,117	24.1%	34.2%	
地学基礎	316,600	7.0%	10.0%	
物理	235,510	5.2%		32.0%
化学	347,361	7.7%		33.7%
生物	303,137	6.7%		27.9%
地学	16,350	0.4%		5.2%
必修基礎	3,168,480		100.0%	
全冊数	4,499,150	100.0%		

表1(b) 平成26年度教科書発行部数(旧課程).

種目等	需要数(冊)	全冊中	**Ⅱ/**Ⅰ
理科基礎	961	3.6%	
理科総合A	3,876	14.4%	
理科総合B	3,964	14.8%	
物理Ⅰ	2,485	9.3%	
物理Ⅱ	636	2.4%	25.6%
化学Ⅰ	4,764	17.7%	
化学Ⅱ	1,072	4.0%	22.5%
生物Ⅰ	6,050	22.5%	
生物Ⅱ	1,137	4.2%	18.8%
地学Ⅰ	1,735	6.5%	
地学Ⅱ	175	0.7%	10.1%
全冊数	26,855	100.0%	

子核」の単元が選択履修可能となっていた[16]. しかし選ぶのは当然学校であり, 生徒が学びたい方を学べるわけではない. その一方, 大学入試では出題範囲を「物性(3)物質と原子, ア. 原子, 分子の運動」までとされることが多かった. 結果, 現実にはそれ以降の「原子と電子」, 「原子の構造」, 「原子核と素粒子」を全く学ばずに大学に進学してくる高校生が大部分であった.

この分野には, 水素原子のエネルギー準位とボーアの理論, X線回折, コンプトン散乱, 半導体, 光電効果, 放射線, 核エネルギー, 素粒子と宇宙等が含まれていた. これらは物理学史的に意義深い内容というだけでなく, 大学以降の物理, 化学, 工学を通じ, 理系の必須常識といつてよいであろう. 学習指導要領[16]にも「水素原子の構造を中心にスペクトルと関連させて扱うこと」など, 原子構造とスペクトルの重要性が再三再四強調されてきているにもかかわらず, 大学入学後にあらためてそれを学ぶか, という点, 現実には「否」といわざるをえなかった.

新課程の物理[17]では, 物理に配当される単位数は変わらないものの, ゆとり以前(旧課程)の学習指導要領の内容に近くなり, 選択性は排され, 内容も精査されている印象である. このカリキュラムで学んだ学生の意見・感想も時期がきたら聞いてみたいところである.

2.4 プラズマを教科書に記載するために

2.4.1 教科書におけるプラズマ現象の扱い

プラズマ現象がもっとも現れている高等学校の科目は「地学」分野である. オーロラ, 太陽風, 星の核融合, スペクトルなど, 関連分野も多い. しかし, 地学の履修率は極めて少ない. 前節の表1(b)で示したように, 旧課程地学Ⅱの教科書発行部数は全理科教科書の0.7%でしかない. 核融合反応については物理で簡単に触れてあるが, プラズマとの関連の記載がある教科書は少ない. しかも旧課程「物理Ⅱ」の履修率も「地学Ⅱ」について少なく, 前節に述べた選択単元の問題で履修されてこなかった.

すなわち, 高校理科はプラズマ・核融合分野の入門にはなっていない, という現実を直視しなければならないのである.

天文学の分野も地学の履修率が低いため, 同様の問題を抱えていると思うが, いわゆる天文ファン, 天体マニアなる少年少女達は, 小中学校ですでに高校地学入門程度の「知識」を獲得している. 実際, 筆者も小中学校の頃, テレビ講座の高校地学を夢中で見ていた. そのような生徒達は, 高校地学を学ばなくても, 大学で地学(地球科学や天文学)を専攻するのには, さほどの敷居の高さを感じないであろう.

異論はあるかもしれないが, こうしてみると日本物理学会の領域[18]で, 中学高校理科にほとんど関連性が触れていない, すなわち位置づけがはっきりしていないのは領域2(放電・プラズマ分野)のみなのではないだろうか. 他分野は広い意味では関連内容が明確に思える. 領域2が扱う内容も, 教科書の中に少しばかり明示するだけで, 関連させることもできるはずである. あるいは例題として扱うこともできるのではないだろうか.

新課程で理科の時間数が大きく増加されたとはいえ, いざプラズマを教科書に入れようとしても, あるいは「プラズマ」という項目を独立, 体系化して教育したい, という欲求に駆られても, プラズマの分野単独では扱う内容が狭すぎるといえよう.

自然現象は何度も繰り返し触れることにより, 徐々に身近になってくるものである. 一度に全部を教えようと思っても消化不良になる. 実際, 理科の教科はらせん階段を上がっていくように, 定められた分野について年次毎に高度化していく学習指導要領になっている.

特に, 新課程では, 「エネルギー」「粒子」「生命」「地球」に学習内容をカテゴライズし, この分類で高等学校「物理基礎」「化学基礎」「生物基礎」「地学基礎」まで縦糸として発展していけるように内容が精査されているようにみられる.

例えば, 「地球」項目の天体については, 小3で日陰の位置, 小4で月の形, 小6で月と太陽の形と位置, 中3で自転公転, 太陽系, 恒星, 高校地学基礎で宇宙の姿, 太陽と恒星, とらせん階段を上がっていく, 各項目について, より高度で深い理解へと進んでいく.

したがって, 「プラズマをどの段階で教えるか」ではなく, 「既存のカリキュラムの題材として, 既存のカリキュ

ラムをできるだけ圧迫せずにどう散りばめるか」が重要である。言い換えると、「プラズマをある学年で教えるのは難しいかどうか、行きすぎかどうか」の議論でなく、「その学年の理科で教えるには、何をどう教材に組み込むか」という視点で検討していく必要がある。

2.4.2 中学理科にプラズマをどう取り入れるか

筆者は、プラズマの学習は、全員が履修する中学理科からせん階段の登り口を位置づけるべきではないか、という考えに至っている。幸い中学理科は新課程で内容が増え、中2で真空放電（正しくは気体放電[2]）、イオン等が戻ってきた。教科書にもプラズマ現象が豊富にある。具体的には「化学変化とイオン」の内容について、以下のような変遷を経ている。

○1989(平成元)年3月(旧課程)：「イオン」については、帯電粒子であることを扱う程度とし、原子の構造には触れないこと。電解質水溶液の項目については、現象的に扱う程度とし、イオン化傾向は扱わないこと。

○1998(平成10)年12月(旧課程：ゆとり教育)：「エネルギーの出入り」については、定量的な扱いはしないこと。また、イオンについては扱わないこと。(→イオンの項目がなくなった)

○2008(平成20)年9月発行(新課程：脱ゆとり教育)：原子が電子と原子核からできていることを扱うこと。その際、原子核が陽子と中性子でできていることにも触れること。イオン式で表されることにも触れること。(→イオンの復活)

このように、新課程では、ゆとり教育以前の旧課程よりもむしろ拡充された内容になっており、プラズマについて認知してもらう下地は十分にあるように思える。

中学理科でプラズマをあつかえる部分には以下がある。

○エネルギー：真空放電(中2)、核融合発電(中3)

○粒子：物質の3態、物質の成り立ち(原子核と電子)、気体の電離

○地球：太陽の核融合、太陽風、黒点、オーロラ
これらの項目には、すでにプラズマ現象が取り上げられているので、「プラズマという用語を入れて」説明を加えるだけでもかなり認知されるのではないだろうか。

例えば3年理科では「太陽は非常に高温であるため、物質はすべて気体になっている。(東京書籍)」「太陽は高温の気体からできていて、多量の光を絶え間なく放出している(大日本図書)」のように記述され、その後、磁気嵐やオーロラの説明になるため、あたかも太陽からの光(エネルギー)がこれらの原因であるかのような印象を与えかねない。すなわち、プラズマ=気体、という位置づけであり、原因としての太陽風は出てこない。太陽から届くのが、光と粒子であることがほしい気がする。

現状あたかも、あえて「プラズマ」という用語を用いてはいけない合意があるかのようにになっている記述は、むしろ不自然に思えるが、それは我々プラズマ・核融合コミュニティーの広報不足と言わざるを得ない。ただし、物質第4の状態として再定義できるのかどうかは、学会として統一見解を出すべきではないかと思う(2006年8月にチェコ

のプラハで開かれた国際天文学連合(IAU)総会において冥王星が惑星から外された時のように)。プラズマをプラズマ状態としなければ、気体論を拡張して扱うのか、ということになり、それは仮に不可能ではないにしても、現実的ではないように思う(ハドロンガスからクォークグルオンプラズマへの転移もその統一的用語に関連してくるかもしれない)。

2.4.3 高校理科でプラズマをどう扱うか

中学でプラズマ現象が扱われていれば、高校では広報ではなく、物理学の中の位置づけとして題材を提案するのが適切であろう。

啓林館の新課程「科学と人間生活」では、コロナ・太陽風の説明で「コロナの中では水素やヘリウムの原子がイオンと電子に分かれており、電気を帯びたこれらの粒子が加速されて宇宙空間に流れ出している」、磁気嵐やオーロラについては「電気を帯びた粒子が大気中に入り」と説明されており、そこまで述べるならば**プラズマ**と書いたらいいのではないかとさえ思う。

電磁気では、荷電粒子の運動の題材で、サイクロトロン加速器と同列に、磁気モーメントと磁気ミラーをプラズマ現象として組み込めるであろう。核エネルギーでは、太陽の核融合と核融合発電のDT反応の区別を明示することで、より両者の特徴が理解しやすくなるであろう。X線や中性子などの放射線についても、種々の原子過程や核反応と関連づけて学ぶことで、内容を増やさなくても、より具体的な理解につながるであろう。素粒子の分野では、ゲージ粒子としてグラビトン(未発見)、ダークマター(未確認)等の記述もある。より身近で現実的なプラズマについて記述がほとんどないのは不自然といえるのではないだろうか。

新課程の「物理基礎」では多くの教科書で「エネルギーとその利用」の単元で、核融合反応や核融合エネルギーについての記載がある。履修率も高く試験範囲にもなるので、今後核融合エネルギーについての認知度が高まっていくであろうと予想される。

新課程の「物理」の教科書5社を調べたところ、「核融合反応」については、程度の差はあれどの教科書にも記載がある。しかしその中で「プラズマ」の用語が出てくるのは2社のみである。ただしそのうち啓林館では、発展的な内容を含む終章「物理学が築く未来」で、実に2ページ相当を割いて「核融合発電への取り組み」の解説があり、プラズマ、核融合三重積、ITERからプラズマテレビ等への波及についてまで触れてある。

プラズマ・核融合の内容がここまで本格的に採用されることはかつてないことであり、それだけ核融合エネルギーへの期待の高まりとも受け取れる。だからこそ、プラズマをより早期に身近な物質状態として認知してもらうことで、より多くの教科書に記述され、教育課程の中に浸透していきけるのではないかと感じている。

一方、新課程の地学教科書(啓林館)では太陽風の説明として、「地学基礎」で「コロナの中では、水素やヘリウムの原子が太陽中心部と同様にイオンと電子に電離してい

て、これらの粒子が加速され宇宙空間に流れ出している」と記載され、「地学」で「コロナから主に陽子と電子からなるプラズマを吹き出している」と、らせん階段の最後によくプラズマによる説明が登場する。

高校物理の教科書には光のスペクトルが度々でてくる。光の色、屈折、回折格子、電磁波の周波数と波長、熱放射、真空放電、ボーアのモデル等、新課程になってさらに重要視されているようにも思える（実際、SSH等で研究者らが工夫を凝らして行ってきたような演示実験や可視化された物理現象の様子がカラーで採用されているのを見るにつけ、理科離れを防ごうとした諸々の試みが、いくばくか実を結んできているのではないかと信じたい）。これらに共通して関与する物質状態として、プラズマがある。いわば横糸である。

物理だけではなく、地学ではオーロラなども荷電粒子（電磁気現象）として説明されており、スペクトルの赤方偏移や星の温度など、スペクトルに関連する項目も多い。プラズマの単元がなくとも、それがプラズマ現象であることが説明されているだけでも印象が違ふ。

とりわけ、線スペクトルの説明は気体放電によって行うのが、歴史的にも物理的にももっとも理解しやすいと考える。発光スペクトルのプラズマ分野への応用はごく一部であり、むしろ物・化・生・地を問わず、実験研究・原子分子素過程、発光現象の研究に共通する内容であるので理科全体の中で位置づけても教育効果は高いといえる。

2.5 スペクトル再定義の必要性

現行の高校物理の教科書におけるプラズマ現象の中で、積極的な改善が望まれる部分もある。それは前節に述べた光のスペクトルの系統的分類である。スペクトルは連続スペクトル（熱放射）と線スペクトル（原子スペクトル；輝線と暗線）に分類され、前者は温度に由来し、後者は物質固有のとびとびのエネルギー準位に起因するとして説明される。

高校物理 I（旧課程）の教科書では程度の差はあれ、どの出版社の教科書でも蛍光灯の原理が説明されている。筆者は、その部分と関連させて、プラズマの発光現象を説明する出前授業をしばしば行っていた。連続スペクトルと線スペクトルの説明にもそれは使えた。しかし、蛍光灯原理にある、保安器やグローランプ（バイメタル）は現代の蛍光灯ではほとんど採用されておらず、インバータ回路が主流である。これでは科学的リテラシーの拡充には片手落ちであろう。

1990年代後半に民生用として認知されはじめたプラズマディスプレイパネル（PDP）は、2000年代初頭にプラズマの名前を一躍家庭の話題にまで広げた。しかもプラズマテレビは蛍光灯原理の理解が役に立つ（立った）[19]。

しかしながら、プラズマディスプレイの動作原理も、プラズマを利用した発光・発色の原理も、今となってはその科学的リテラシーとしての意義が小さくなってきていると言わざるを得ない。現代馴染みのある電球は蛍光灯からLEDランプにとってかわられている。プラズマテレビは白

色LEDをバックライトとする液晶テレビにシェアを奪われ、さらに有機ELテレビも市場に参入しつつある。電球型LED、蛍光灯型LEDランプを観察しても、現在の高校物理でのスペクトルに関する内容は説明には使えない。

一方、高校物理の内容には半導体やPN接合も含まれているので、LEDの説明はむしろ行いやすい。さらに2014年ノーベル物理学賞が「高輝度・低消費電力白色光源を可能とした高効率青色LEDの発明」として赤崎勇氏、天野浩氏、中村修二氏に授与されたことで、ますますLEDへの関心は高まっている[20]。

科学技術や産業が発展し、LEDなど新たな光技術が身近になってきたことで、科学的リテラシーはそれらの正しい理解と運用力を要求してしかるべきである。それに伴い、これまで高校物理で扱ってきた光のスペクトルの種類を再定義する必要を強く感じている。実際、簡易分光器でスペクトルを観察する演習は多くの高校教科書（物理、地学）で導入されている。これまではスペクトルの違いを蛍光灯と太陽光または白熱灯を例に説明すればよかった。しかし

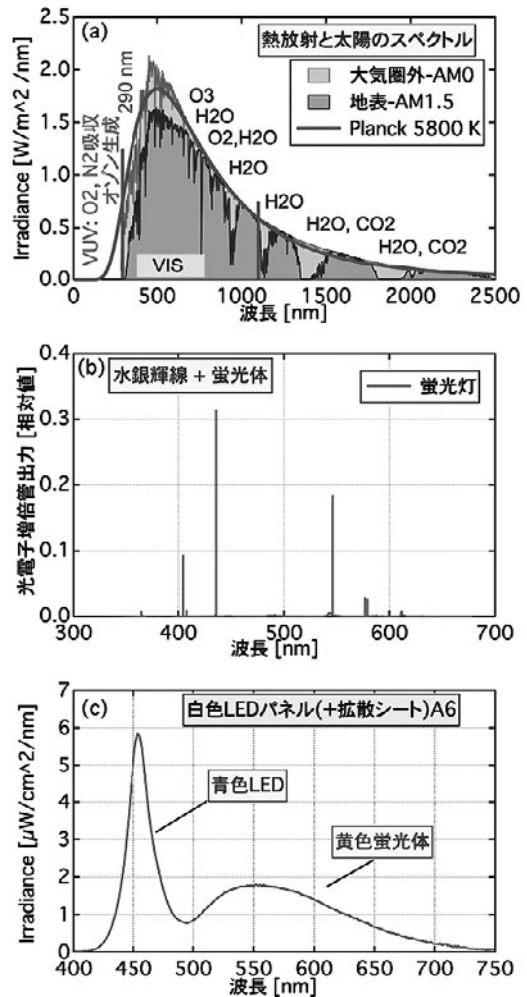


図6 3種類の光のスペクトル。(a)太陽の「べったり」した連続スペクトルと吸収線の測定データベース[23]、およびプランクの熱放射理論式。(b)蛍光灯の「とびとび」の輝線スペクトル（筆者ら計測）。白色蛍光体の「もあもあ」スペクトルは輝線のピークに比べ微弱。(c)白色LED。青色LEDと黄色の蛍光体の「もあもあ」としたスペクトル（筆者ら計測[21]）。

今日では、教室の照明も蛍光灯型のLED灯が採用されることが多くなってきている。白色LEDは青色LEDと黄色の蛍光体で構成される方式が現在の主流[21]である。簡易分光器で青とそれ以外の波長の「隙間」を観察するには少々コツが要るが、熱放射のような連続スペクトルでないことはすぐわかる。

そこで筆者は最近では、中高生への講演で試験的に以下の定義を導入している[22]。

○熱放射=連続スペクトル, べったりスペクトル(白熱灯, 太陽)

○線放射=線スペクトル(輝線・暗線), とびとびスペクトル

○ルミネッセンス=もあもあスペクトル(筆者案)

3タイプのスペクトルをデータベース[23]をもとにプロット, ないし実際に研究用の分光器で測定すると, 図6からわかるように, その違いは一目瞭然である。

ルミネッセンスは「冷光(蛍光や燐光を含む)」といわれることもあるが, 必ずしも定着していない。この分類だと, LEDは電子ルミネッセンス(エレクトロルミネッセンス), 蛍光体のスペクトルは光ルミネッセンス(フォトルミネッセンス)なので整合する[22]。

かつてCRTがCathode Ray Tube(陰極線管)のことであることが国内ではほとんど知られていなかったのと同様, 有機ELディスプレイのELがElectroluminescenceであることはほとんど知られていない(記載されている中学理科教科書も存在する)。日本語の場合は, 物理的用語と乖離した和訳が採用され流布されることが少なくないので, よく批判にもなっていたように思う。しかしながら, 電子レンジをmicrowaveと物理学の名称そのまま用いている欧米が科学的リテラシー教育に成功しているとは必ずしも言えないことは, PISAの結果からもみてとれる。

「気づき」体験は, 理科の動機付けとして有用という考え方もある。それをきっかけに, 学術的なリテラシーとして昇華できるか, というところが重要であるが, 現実はまだまだ最適解に到達してはいない。むしろ, プラズマ研究者は, 今後生徒の日常生活から現実味がなくなってくるであろう蛍光灯やプラズマテレビを引き合いに出し続け, かえって生徒に混乱を引き起こすことがないように, LED照明との比較において位置づける方針に転換しなければならないといえよう。

2.6 総括

世間一般にプラズマ・核融合を認知してもらうためには, 中学理科の教科書に記載されることが不可欠である。真空放電の分野で, プラズマという用語, 太陽風, オーロラ現象, エネルギーで核融合エネルギーについての簡単に触れることを提案したい。

一方, プラズマ研究を指向する大学生を増やすためには, 高校物理に積極的にプラズマ・核融合に関連する現象を組み込む(受験問題にできるレベルにかみ砕く)戦略的努力が必要であろう。高校物理では, プラズマの認知のために蛍光灯を扱うのではなく, 原子構造を学ぶために積極

的に気体放電(グロー放電)の発光スペクトルを取り入れるのが肝要に思える。そこでは電子衝突過程を組み込むことによって, 原子構造や発光過程の理解を一層深めることができる。これはプラズマの広報とは分けて考えても重要な素養である。ただし, LEDとの混乱を生じさせないように, 注意をはらってプラズマの発光現象や光のスペクトルを紹介する必要性を認識すべきであろう。

さらに中学高校の化学分野では物質の3態で, プラズマ状態のことを発展内容として半ページぐらいの記載で入れるのが妥当ではないだろうか。

MHD, 運動論, 波動, 輸送現象, 不安定性や乱流など非線形性等, 大学以降で学ぶ場合にも, 高等学校までにプラズマ現象と明示して履修されてくることは, その間口を大きく広げることでもある。我々専門家は, これらの詳細な理論背景をベースにして, 核融合のためのプラズマ閉じ込めや, 不安定性, 複雑性を語りがちであろうが, これらいわゆる「プラズマ物理学」は一時保留しておき, 高校物理までの範疇で核融合とプラズマ現象とをつなげるための方法論の確立が重要であろう。

どの分野でも, 自分達の研究を志してほしいと思うのは自然である。数学, 文学, 歴史なども同様であろう。パイの奪い合いになるのは当然なのかもしれないが, それが本来の学習に混乱をきたしては本末転倒である。研究者であっても現行の中学・高校の教科書を一読し, その内容との齟齬がないように, 用語を選んで, 最先端の科学を広くとらえ, その中でプラズマにかかわる諸現象を説明していく責任・義務を有すると考える。

参考文献

- [1] 井上徳之, 毛利 衛: スーパーサイエンススクール(数研出版, 2003) ISBN-10: 4410138081.
- [2] 門 信一郎: 「高校教科書を用いたプラズマ科学」教育キャリアパス研究会論文集(2008.8.8-9 京都大学基礎物理学研究所) 5.3節(pp.66-73) <http://k2.sci.u-toyama.ac.jp/career/event/080808/proceedings.pdf>
- [3] 核融合エネルギーの特徴と核融合炉の安全性・安心感 NIFS-MEMO-63 (2013-01-4)
- [4] 文部省: 中学校学習指導要領(平成10(1998)年12月)平成14(2002)年4月1日施
- [5] 文部省: 中学校学習指導要領(平成元年3月)平成5(1993)年4月施行. 移行期間平成2(1990)年4月1日から平成5(1993)年3月31日.
- [6] 文部科学省: 中学校学習指導要領(平成20(2008)年3月28日):平成24(2012)年4月施行. 移行期間:平成21(2009)年4月1日から平成23(2011)年3月31日
- [7] 国立教育政策研究所(編): 生きるための知識と技能-OECD生徒の学習到達度調査(PISA)2000年調査国際結果報告書, ぎょうせい(2002/2/1).
- [8] 国立教育政策研究所(編): 生きるための知識と技能2-OECD生徒の学習到達度調査(PISA)2003年調査国際結果報告書, ぎょうせい(2004/12/1)
- [9] 国立教育政策研究所(編): 生きるための知識と技能3-OECD生徒の学習到達度調査(PISA)2006年調査国際結果報告書, ぎょうせい(2007/12/5)
- [10] 池上 彰: 池上彰の「日本の教育」がよくわかる本

- (PHP 研究所, 2014) ISBN-10: 4569761747.
- [11] 国立教育政策研究所(編): 生きるための知識と技能 4 - OECD 生徒の学習到達度調査 (PISA) 2009年調査国際結果報告書-2010/12/ 8 出版社: 明石書店 (2010/12/ 8)
- [12] 国立教育政策研究所, 経済協力開発機構, OECD (著, 編), 渡辺 良 (監修, 翻訳): 生きるための知識と技能 5 - OECD 生徒の学習到達度調査 (PISA) 2012 年調査国際結果報告書 (明石書店, 2013).
- [13] 物理チャレンジホームページ <http://www.jpho.jp/iph.html>
- [14] 文科省報道発表 http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/26/07/1350115.htm
- [15] 文科省, 教科書制度の概要より http://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/kyoukasho/gaiyou/04060901/1235103.htm
- [16] 文部科学省: 高等学校学習指導要領 (平成11年 3 月) 平成24年度入学者まで適用. http://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/cs/1320174.htm
- [17] 文部科学省: 高等学校学習指導要領 (ポイント, 本文, 解説等) 平成25年度入学生から (数学及び理科は平成24年度入学生から) http://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/new-cs/you-ryou/1304427.htm
- [18] 日本物理学会, 領域ページ <http://div.jps.or.jp>
- [19] プラズマ・核融合学会編「カラー図解 プラズマエネルギーのすべて」 pp.14-16 (1章2, 3節: 門 信一郎) (日本実業出版社, 2007) ISBN-13: 978-4534041913
- [20] The Royal Swedish Academy of Sciences, PRESS RELEASE (2014-10-07) <http://www.kva.se/en/pressroom/Press-releases-2014/the-nobel-prize-in-physics-2014/>
- [21] S. Kado *et al.*, NIFS annual report for 2011.4-2012.3. p.216 (2012) <http://www.nifs.ac.jp/report/annrep12/pdf/216.pdf>
- [22] 門 信一郎: 「理科教科書における光スペクトル再定義の提案」日本物理学会第70回年次大会講演概要集 (2015. 3. 21-24, 早稲田大学) 24aCK-4 (2015).
- [23] 2000 ASTM Standard Extraterrestrial Spectrum Reference E-490-00 <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am0/ASTM2000.html>.