

論文

地学〔天文分野〕の教育内容についての分析

— 前提となる物理分野との関連において —

Analysis of Educational Contents on Astronomy in Earth Science

-Relation to Physical Learning-

浦田 健二

Kenji Urata

Key words: 天文教育、物理的素養の必要性、物理教科内容との関連性

Education of Astronomy, Necessity of Physics Education, Relation to Physical Basis

1. 問題意識

高等学校学習指導要領（平成30年告示）によれば（文部科学省、2018）、現在「理科」には基礎的な科目として、「科学と人間生活」、「物理基礎」、「化学基礎」、「生物基礎」、「地学基礎」の5科目があり、発展的な科目として、「物理」、「化学」、「生物」、「地学」の4科目がある。このうち、必修であるのは、「科学と人間生活」を含む場合には基礎的な科目から2科目、含まない場合には3科目の合計6単位である。発展的な科目は必修とはなっていない。このような履修条件における高校生の科目別履修状況を知るためには、教科書の採択数を比較すれば大体の傾向をつかむことができる（教科書レポート2018、2019）。基礎的な科目では、採択数の比率はおおよそ、「科学と人間生活」：「物理基礎」：「化学基礎」：「生物基礎」：「地学基礎」＝4：7：10：10：3であり、「地学基礎」は理科の科目の中で最も少ない。しかし、発展的な科目で比較したとき、もっと驚くべき結果となる。「物理」：「化学」：「生物」：「地学」＝2：3：2：0.1であり、「地学」履修者は他の科目に比べて20分の一、あるいは30分の一しかいない。これを反映して「地学」教科書採択数は例年一万冊程度しかない。発展的な科目は理系学部に進学しようとする学生が履修することを考え合わせると、「幅広い自然認識の養成」を主眼とする「地学」教育の役割

が特に理系学生に対してはたされていないことがわかる。

理科の分野で興味がある対象は何か、と一般に問えば、地球分野や宇宙分野と答える人がある程度いるはずで、そのことが基礎的な科目では「地学基礎」の履修者数（教科書採択数）に反映している、と基本的には考えることができよう。しかし、発展的な科目における「地学」履修者（教科書採択数）の少なさは、異常であるといえる。その原因については中井（2003）によって6項目にまとめられ議論されていて、地学を取り巻く状況に変化がないとするなら、地学が対象とする自然への関心と呼び覚まし、その関心に応え得る教科内容をもつことに尽きる、と結論付けている。そこで本稿では「地学基礎」、「地学」の個々の教科内容に焦点を当て、現時点の学習内容が興味を持てるようになっていくかどうかを議論する。興味を持てるかどうかは、これまでに獲得した知識や概念によって内容が理解できるかどうか依存している。

そもそも地学とは、地球科学の諸分野である地質、気象、海洋、古生物などと、宇宙科学諸分野をまとめたものであり、各分野それ自体が物理・化学に基づいた応用科学であるとともに、総合科学的な対象を扱う学問分野の集合体である。仮説を立て、実験を繰り返すことで定量的で精密な検証を行う物理・化学分野とは学問としての性格が大きく異なる。地学の諸分野は、人為的な条件

設定が可能な「実験」とは異なり、自然や宇宙の「観察」や「観測」から仮説を立てて検証することに重点が置かれる。これは物理・化学とは本質的に異なっており、またこの方法こそ自然認識の源流であって理科教育として極めて重要であると考えられる。地学諸分野の中で、徹底した「観測」に基づき自然認識を深めてきた分野として宇宙・天文分野を挙げることができる。本稿ではこの天文分野の教育内容について吟味することとする。20世紀の後半以降、地上の大望遠鏡や宇宙望遠鏡などの観測技術の進歩により、「観測」でも「実験」に匹敵するほどの精密なデータが収集され、物理・化学分野と同程度の定量的な議論ができるようになった。最新の知見が次々と得られ宇宙観は大きく変貌している。そのような流れを受けて、「地学」天文分野の教育内容として教材の選択が適切であるのかどうか、また、どのように興味が持てるように記述されているのか、などを検討する。

天文・宇宙分野の教育内容を理解するには、数学や物理的な素養がどうしても必要であり、その意味で他の地学の諸分野や化学・生物の科目とは大きく異なっている。「地学基礎」の天文分野であれば、中学の理科や数学の素養を踏まえて記述されているのか、「地学」の天文分野であれば、せめて高校までの「物理」あるいは「数学」の内容を踏まえて記述されているのかどうか。天文分野は数学、物理を基盤に組み立てられている以上、これらは教育上極めて重要であると思われる。ここでは、数学の素養については割愛し、物理的素養のみを検討することとした。

本稿では、中学理科程度の素養では天文現象を正確に理解することが困難であるような教育内容が「地学基礎」（基礎的な科目の一つ）に含まれていることを明らかにする。さらに「地学」（発展的な科目の一つ）では、高校の「物理」を習得していたとしても、かなり理解が困難な内容があることを示す。しかし、宇宙の全体像を描くためには、高校までの物理では理解することが不可能な事柄であっても、取り上げなければならないものもある。そのようなときには現象論的な説明をせざるを得ないし、その結果、事項羅列的な記述説明にならざるを得ない。それはやむを得ないことではあるが、その際に問題となるのは、きちんとした専門用語の定義・整理と、不必要に説明が細かくならないことである。物理的に説明できなくても、どのような現象を、あるいは現象を持つ天体を、なんと定義したのか、はっきりとさせてから説明する必要がある。天文分野の場合、ブラックホールやダークエネルギーなど、よく聞く言葉だけが独り歩きする傾

向が教科書にも散見される。また、天文マニアなら天文現象として興味を持つようなことであっても、一般の学生にとって事項羅列的に長々と何の物理的根拠もなく説明されると、むしろ興味を失ってしまうであろう。本稿では天文分野の教育内容について、物理との関連性を検討したうえで、いくつかの一般的な問題点を明らかにする。

2. 天文分野の教育内容の分析

（1）方法

中学校学習指導要領（平成29年告示）「理科」の「目標」と「内容」（文部科学省、2017）および高等学校学習指導要領（平成30年告示）「理科」の科目「物理基礎」、「物理」、「地学基礎」、「地学」（文部科学省、2018）のそれぞれの「目標」と「内容」を把握し、その後、実際に出版されている教科書の内容を熟読して比較検討を行った。「物理基礎」および「物理」については、「地学」の教科書を出版している2社を選んだ（啓林館と数研出版）。「地学基礎」の教科書を出版しているところは6社あったが、「地学」も出版しているのは啓林館と数研出版の2社しかなかったため、教科内容の連続性を考慮してこの2社とした（小川ほか、2011、2013）（磯崎ほか、2016、2017）。「地学基礎」の場合は、まず中学理科（第2分野）の宇宙分野の内容を踏まえて連続性があるように説明されているかどうか、また中学理科（第1分野）の物理分野の内容を踏まえて記述されているかどうか、また中学理科の内容を超える物理的素養を要求されるなら、その説明が十分になされているかどうか、などを念頭に置いて一行ずつ読み込んで検討した。「地学」の場合は、「地学基礎」とのつながりはどうなっているのか、高校「物理」（発展的な科目）の範囲内で記述されているかどうか、それ以上の大学物理で用いるような素養を用いているなら、それらを十分に説明しているかどうか、などを念頭に置いて詳細に読み込んだ。最新版の教科書を手に入れたにもかかわらず（2020年5月）、数研出版の「地学」教科書は平成25年検定済みのもので改訂されていない。啓林館の「地学」教科書は平成29年検定済みに改訂されていた。そのため、結局のところ、「地学」については啓林館の教科書を主にみることとなった。

（2）「地学基礎」天文分野について

（ア）総合的所見

「地学」（発展的な科目）のダイジェスト版になっていて、内容構成も「地学」とほとんど同じである。中学理

科第1分野に基づく物理的な説明はほとんどないため、知識の羅列になっている。本質的な説明はすべて「コラム」や「発展」などの別枠で扱っており、本文を読んでも納得できないことが非常に多い。また「コラム」や「発展」の記述内容は、「地学」の記述内容と重複しており、説明の工夫がみられない。

現在の教育内容のままでは、「地学基礎（天文分野）」は「理科」の1教科として存在する意味がないように思われる。「物理基礎」と「物理」の関係のように「地学基礎」の教科内容や対象を基礎的なことに絞るか、あるいは興味深い天文現象に絞って現象論的な説明に終始することにする、など抜本的に教育内容を改めて一新する必要があると考える。「地学基礎」は、大学受験対策用として文系志望学生が履修することが多いことを踏まえてこのような内容にしたのかもしれないが、全く逆効果であって、天文分野を身につまらないものにしてしまっている。

「地学基礎」の教科書に書かれている内容は、天文・宇宙科学を体系的に説明しようとするものであるが、平成30年度告示の高等学校学習指導要領の内容の趣旨とは大きくずれている（文部科学省、2018）。2冊の教科書の検定期が平成25年と29年であることを考えて、平成20年度告示の学習指導要領も調べてみたが（国立教育政策研究所）、やはり大幅に一致しない。学習指導要領によれば「地学基礎」における〔天文・宇宙分野〕の内容の位置づけは、平成20年度告示では、「宇宙と惑星としての地球の特徴を理解させる」ためであり、平成30年度告示では、「変動する地球について、宇宙や太陽系の誕生から今日までの一連の時間の中で捉えながら…」というものである。もちろん、非常に大きな視点からみれば天文・宇宙科学を体系的に説明してもかまわないかもしれないが、地球科学を中心とする「地学基礎」全体に流れる内容の趣旨からすると違和感が残る。それでいて、上述したように体系的な説明ですら成功していない。

（イ）具体的分析

①太陽系の諸天体および太陽系誕生史

観測技術の発展や惑星探査機の運用などにより、新しい知見が得られているが、わかった事実を羅列しても深みがなく、一部の天文マニアを除いて興味も引かないのではないだろうか。太陽系の天体、とくに惑星について説明するならば、得られた新しい知見を地球と関連付けて比較することにより、少なくとも地球に対しては深い理解が進む。「地学基礎」あるいは「地学」の天文以外の分

野、たとえば固体地球科学や大気科学の単元で話を統合化したほうがよい。そのほうが学習指導要領にも準拠する。

太陽系誕生史ではシナリオを紹介することが多いが、どうしてそのように考えられているのかわからないと、そもそも理科教育の題材として不適切であろう。中学理科（第1分野）では物質の3態について学んでいるのであるから、それらの知識に関連付けて説明したらどうだろうか。

「生命を生み出す環境」である地球の天文学的な条件については、天文・宇宙分野ではあつかわないほうがよい。火星や金星と比較して地球のみに液体の水が大量に存在するという事実は、大気科学の話と関連付けたほうが興味深い。ハビタブルゾーンを単なる「お話」として取り上げるぐらいなら、そのゾーンの範囲を中学数学で定量的に計算可能であることを示したほうが、天文分野の題材としては適切である。

②太陽

そもそも「可視光線は電磁波の一種であり、その波長によって色が異なる」という物理的な知識は、中学理科の範囲を超えている。その初歩的な説明もなく、太陽のスペクトルや吸収線などの話をしているため、現象論的な記述にとどめているのにもかかわらず、非常にわかりづらいものになっている。簡単な、軽い説明にしようとしているのはわかるが、それが逆に理解を全く伴わない説明になっており、これでは単に棒暗記するしか方法がない。これは理科教育の目指す方向とは全く逆であろう。

太陽エネルギーの単元で、H α 線、X線、紫外線、荷電粒子などの用語が登場するが、中学理科の素養を前提とする学生が、どの程度まで実感を持って理解できるのか、心もとない。

太陽スペクトルと吸収線の話から元素合成の話まで一気に持っていくことで、太陽のエネルギー源を説明しているが、これは無謀といえるだろう。核分裂や核融合は、高校「物理」（発展的な科目）の内容であり、高校1,2年次では何を言っているのか、わからなくて当然である。

③恒星

恒星の明るさとして「等級」のことを取り上げているのは初心者向きの内容として適切であると思われるが、そもそも「明るさ」とは一体何なのかを物理的に明確にしないと等級の説明をしても意味がない。中学理科（第1分野）でエネルギーの話は教えられおり、ジュールや

ワットという単位は基礎事項として習得している。恒星の明るさを「等級」で説明しておきながら、物理的な単位では説明されていないのである。中学理科の基礎事項を把握し、それにもとづいて説明を展開するべきである。

恒星の色については、いろいろな色を持つ恒星があることについて言及するのみで、それ以上の説明が本文中にはないにもかかわらず、「発展」などのコラムで色と表面温度、スペクトル型、HR 図などの話を一気に持ち出している。この内容は、「地学」（発展的な科目）の内容そのもので重複しており、欄外で説明するにはあまりにも豊富な内容が入りすぎている。「地学基礎」で取り上げるべき内容ではないだろうし、そもそも物理的な基礎が準備できていないために教えることが不可能な内容である。内容的に物足りないということであれば、電磁波の正体、物体と電磁波の基礎物理、黒体放射や吸収線（輝線）などの高校物理では詳しく取り上げない題材を、「地学基礎」の教育内容に入れるほうがよい。学習指導要領には準拠しなくなるが、「地学」（発展的な科目）との接続がうまくいくし、「地学基礎」と「地学」の内容的な棲み分けもできる。

恒星の質量光度関係や寿命、恒星の終末としての中性子星やブラックホールなどを「発展」や「コラム」として紹介することが多い。しかし、なぜそうなるのか、という物理的説明が中学理科の前提では不十分にしかできず、記述があまりにも表層的で混乱するだけである。原子の構造や陽子、中性子の初歩的知識がない学生に中性子星といっても意味がないし、ブラックホールといっても何の意味があるのだろうか。このような内容だと、「地学基礎」はいわゆる暗記科目になってしまう。天文・宇宙分野にとっての理科的基礎事項は、高校までの「物理」や「化学」では正面から取り扱わないことが多いことを踏まえるべきである。

④銀河系

中学理科（第2分野）では、銀河系についてわずか数行程度の説明があるだけであり、中学校を終えた段階で我々の太陽系が 2000 億個の恒星の集団である銀河系の一員であることを認識できている人は少ないように思われる。したがって、我々の太陽系が天の川として観測される銀河系に所属しており、いて座方向にある銀河中心の周りを約 2.5 億年かけて回転していることを、根拠を挙げて丁寧に説明する必要がある。「地学基礎」の説明では、中学理科（第2分野）の説明に比べれば多少詳しくなっているが、十分ではない。銀河系という題材につい

て「地学基礎」では何を取り上げ、「地学」で何を示すのか、段階的に理解が進むように教科内容を見直したほうがよい。その立場からすると、「地学基礎」ではまず、太陽系が天の川銀河に所属していることの根拠、を中心にすえるべきである。これは地球（太陽系）を取り巻く環境、という意味で学習指導要領の内容趣旨にも適合する。

⑤膨張する宇宙

宇宙全体が膨張していることは述べられていても、その証拠である「ハッブルの法則」と「宇宙背景放射」については本文中では何も説明せず、「発展」、「コラム」の欄外であつまっている。欄外での説明の仕方は、ほとんど「地学」と同じであり重複している。また、宇宙の「晴れ上がり」や銀河の「赤方偏移」が登場するが、「晴れ上がり」とはどういうことなのか十分な説明がなく、また啓林館の教科書では赤方偏移について宇宙（空間）膨張ではなくドップラー効果による解釈で説明しており、問題点が多い。「地学基礎」では「ほとんどすべての銀河が赤方偏移を起こしている」という事実とその解釈に集中し、「晴れ上がり」や「宇宙背景放射」あるいは「元素合成」については「地学」にまかせることにしたらどうか。そのほうが着実に段階的に理解が進む内容構成にすることができよう。

「地学基礎」の宇宙膨張については、ハッブルの法則のみを丁寧に扱えばよいと考える。銀河スペクトルの赤方偏移という観測的事実とその解釈について、また銀河までの距離の測定方法について、を取り扱うだけでも、中学理科の素養だけを前提とすると安易に理解することができることではないことがわかる。しかし、天文分野において観測的事実からいかに法則に到達するかを示す最も良い例となっているので、ハッブルの法則に焦点を当てることは教育上十分に意味があり、効果的であると思われる。さらに、ハッブルの法則を認めたとき、それがどうして宇宙膨張を意味するのかを考察させることは、理科教育の観点から興味深い。ハッブルの法則に絞ることで「地学基礎」の役割も明確になる。

ビッグバン理論では中性子、陽子、光子、電子などが登場するが、中学理科では電子以外は登場しない。まずは、原子の構造や素粒子についての基礎知識を整理してから、ビッグバンの話を展開するべきであろう。

物理的基礎知識の整理（紹介）を「地学基礎」の教科内容に含め、そのかわり天文・宇宙の内容については厳選された話題のみを取り上げる。天文・宇宙の詳細は「地学」にまかせる。たとえば、そのようにして「地学基礎」

と「地学」の役割分担を明確にすべきである。

(3) 「地学」天文分野について

(ア) 総合的所見

地球を取り巻く宇宙の構成がどうなっているのかを、観測に基づき物理的素養を基盤にして理解させ、現代的な宇宙像を構築していくやりかたは、自然認識の源流であり現代的なやり方でもある。その趣旨に従って随所に「実験」、「実習」が設けられており、工夫されていることがわかった。しかし、高校「物理」(発展的な科目)を履修済みと仮定したとしても、かなり理解が困難な題材が多く存在し、そもそも教科内容として無理があるものや、現行の教科書の記述では説明不足であるものなど、問題点も多い。「地学」の教科内容全体のうち、天文分野はその4分の1を占めるにすぎないので、教科書のページ数にはおそらく制限があり、詳しい説明はできない事情もあろう。それにもかかわらず天文・宇宙科学の全分野を統一的に、しかもコンパクトに説明しようとしたため、かえって地球を取り巻く宇宙の自然像をうまく描くことができている。教科内容自体と題材の取扱い方の抜本的な見直しが必要であると思われる。

(イ) 具体的分析

高校「物理基礎」および「物理」が履修済みであることを前提として、「地学」教科書の教科内容自体やその記述が、理解困難あるいは説明不足である根拠・原因を表1のようにAからEまでに分類し、それらに対する一般的な対策をまとめた。

表 1

	根拠・原因	対策
A	高校「物理」では全く扱っておらず、大学レベルの物理の素養が必要なために説明不足である。	中学理科の素養で説明できるものは記述する。できないものは「地学」の教科内容として削除する。
B	高校「物理」で概念的には登場するが、具体的な事象としては扱っていないため、説明不足である。	「地学」で用いる具体的な事象について、物理的な内容を「物理」と重複してもよいから十分に説明する。
C	中学理科では扱っておらず、高校「物理」で概念的にも具体的にも	対応する物理的基礎事項を明示する。高校物理で学習する内容を十分に踏

	初めて登場する内容だが、高校物理との関連付けを明確にしていないうえにわかりにくい。	まえて説明する。
D	中学理科の範囲内で十分理解できる内容だが、取り扱ったことがない事象	中学理科の素養をもとに具体性をもたせて十分に説明する。
E	中学理科の範囲内で十分理解できる内容だが、網羅的な説明になっている。	物理的(化学的)観点から整理して説明する。それができない場合は、簡略化するか削除する。

以下では「地学」で登場する具体的な題材について何が問題なのかを分析し、それぞれAからEまでの分類を行う。

(I) 太陽系の天体

① 地球の自転の証拠—フーコーの振り子— (B分類)

非慣性系を本格的に導入して説明しようとする、これは大学物理初年級の話になってしまうので、通常は宇宙から見たとき振り子面はどのような動きをするか、と考へ「振り子面は変化しない」ということで説明する。「地学」の教科書でもその方法で展開するのだが、本文中にはその原理的な説明はほとんどなく、図や図の説明だけで終わっており、またそれらを見て読んでも明快ではない。いくら何でももう少し説明してくれてもよいと思うのだが、これでわからないほうがおかしい、という感じの記述になっている。同じ「地学」の「大気」の章では、地球自転によるコリオリ力(転向力)の説明が丁寧にあるのとは対照的である。実はフーコーの振り子は同じコリオリ力による現象なのだが、それ以上に説明が困難な事柄である。その理由を分析する。

北極点(南極点)つまり地軸の真上にある場所では、宇宙から見たとき(慣性系でみたとき)、振り子面は不変である。振り子面を変える方向に(振り子面に垂直な方向に)力は働いていないからである。したがって、地軸の周りを地球が回転すれば、地面も鉛直方向上向きを軸とした回転をするので(地面が鉛直軸の周りにスピンする)、地面の上の観測者は振り子面が回転しているように見える。これが地球の自転の証明とされる。そしてこれは非常に理解しやすい。

では、赤道上ではどうだろうか。赤道上では、振り子の支点が地面とつながっているために（地面に束縛されているために）、地面が地軸の周りを回転運動するに伴って（これは地軸の周りのいわば公転運動）振り子面は地面とともに運動し1日に360度回転する。振り子は鉛直面内を振り子運動しながら地軸の周りを一日当たり360度回転（公転）することになるが、振り子が振れる方向ベクトル（＝最下点での振り子の速度ベクトル）は、振り子面と垂直な方向に働く力は存在しないので変化しない。したがって地面の上の観測者は振り子面の変化を観測することはない。つまり、振り子面は宇宙から見ると一日あたり360度も回転（地軸の周りの公転）をしているが、地面も全く同様に回転（公転）するにもかかわらず地面はその鉛直方向を軸としたスピンを全くしないので、地面にいる観測者は回転を観測することはない。

次に緯度 ϕ （ ϕ は0度、 ± 90 度ではない）ではどうだろうか（図1参照）。振り子を備え付けた場所（地面、緯度 ϕ ）における鉛直方向を表すベクトル \vec{g} （重力の働く方向）、振り子の支点を O とする。また振り子の振れる方向を表すベクトルを \vec{n} （＝最下点での振り子の速度ベクトル）とする。もちろん、すべて宇宙から観測した（慣性系）ときを考える。鉛直方向を表すベクトル \vec{g} は、地面が地軸の周りを回転（公転）するために方向が変化する（図1で \vec{g} から \vec{g}' へ）。この \vec{g} と支点 O を含む鉛直面（無数にある）の一つが振り子面になるが、地面が回転してどこへ移動しても振り子面に垂直に働く力は存在しないので、振り子面の振れる方向を表すベクトル \vec{n} は変化しない。支点 O と \vec{g} と \vec{n} から振り子面は決定されるが、支点 O と \vec{g} は地面とともに地軸の周りを回転（公転）するが（図1で \vec{g} から \vec{g}' へ）、 \vec{n} は不変である。地面（に固定された座標系）は、地球の自転により地軸の周りを回転（公転）するだけでなく、地面の鉛直方向 \vec{g} （あるいは \vec{g}' ）を軸とする回転（地面のスピン）もするので、振り子面の方向を表すベクトル \vec{n} が不変であることより、地面にいる観測者は振り子の振れる面が変化しているように見える。

以上からわかるように、地球の自転による効果は、地軸の周りの地面の回転（いわば公転）と地面のスピン（地面の鉛直方向の周りの回転）に分ける必要がある。前者は振り子の支点 O が地面に束縛されているため地面と共に動くので地面にいる観測者は検出できない。それに対し、後者は振り子の振れる方向 \vec{n} が不変であることにより、地面がスピンしていることが検出できる。地球の自転といっても、これら2つの効果があることを明確に

しないと正確な説明は不可能である。

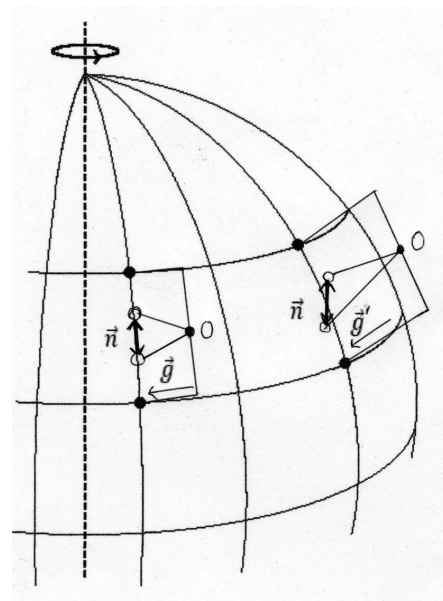


図1

②地球の公転の証拠 一年周光行差—（A分類）

地球が太陽の周りを公転速度 v で公転していると、太陽から見て公転軌道面に垂直な方向からやってくる恒星の光（速度 c ）は、地球から見ると斜めからやってくるように見える。このずれの角度 θ を測定することで公転運動の証拠とする、というものである。これは図2のようなガリレオの速度合成則を前提とした説明であり、これは高校「物理」で学習したものと合致する。しかし、図を見れば明らかのように、地球が観測する光の速度の大きさは、 c を超えてしまうことになり、特殊相対論に矛盾する。さすがに図2のような合成則を示す教科書は現在では存在しないが（昔は存在した）、説明自体がガリレオの合成則に基づくものである以上、問題があるといわざるをえない。特殊相対論は完全に高校物理の教科内容を逸脱しているし、相対論自体を中学理科の知識にもとづいて優しく説明するわけにもいかないであろう。本来、この現象は本質的に相対論的な現象なのである。時間の遅れや長さの収縮が関係する現象である。詳細は省くが、速度の合成をあえて描けば図3のようになり、恒星の光が θ だけずれて観測されることは依然として正しく、結果的にガリレオの合成則で考えたものと同じになる。しかし、そのようになる説明は、ガリレオの速度合成則があたかも成立するかのよう説明では不適切であろう。歴史的には、年周光行差が発見された後に年周視差がわかるわけで、年周光行差を取り上げたい理由はよくわかるが、相対論的な現象であることが分かってい

る現在において、教育上どう扱うべきか慎重に考える必要がある。

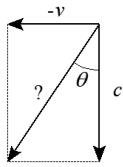


図 2.

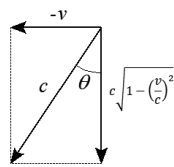


図 3.

③惑星の視運動 (D 分類)

惑星の逆行運動についてはごく簡単な説明がなされ、地球の公転運動を考えれば当然のように記述されている。しかし、中学理科でどこまで天文分野を学んでいるかを知れば (中学学習指導要領)、このような記述にはならないだろう。太陽の動き、月の動きと満ち欠け、金星の運動と満ち欠けについては、段階を踏んで小学校から中学校へと学んでいくのだが、高校になって「地学基礎」、「地学」になると、教育内容の継続性が途切れてしまう。惑星の視運動については、まともに説明されていないのである。逆行現象は、地球がほかの惑星を追い抜いたり、追い抜かれたりすることで起こることを、つまり地球の公転運動の結果であることを、現行のカリキュラムでは小学校から高校まで見渡しても、きちんと説明できていない。

④ケプラーの法則 (C 分類)

高校「物理」でもケプラーの法則が登場する。しかし、「地学」の記述はそれを全く無視しているようにも見える。ニュートンの運動法則との関係に全く触れず、運動法則とは関係なく惑星の軌道運動はケプラーの法則にしたがっているのだ、と主張しているかのようである。高校「物理」との関連性を考えて、ニュートンの運動法則と万有引力の法則からケプラーの法則が導き出せること、あるいは運動法則とケプラーの法則を用いると、万有引力の法則が発見できることなどを強調したほうが良いのではないか。あるいは、「物理」の発展学習として考えるなら、質量が同程度の 2 天体の運動について詳述するなど、ほかの内容にすべきであろう。いずれにしても、「物理」の内容を踏まえた内容に変更したほうがよい。

⑤太陽系誕生史 (D 分類)

太陽系を構成する惑星などの大きな天体は、ほぼ同一

平面を、ほぼ円軌道で同じ向きに公転している、という特徴を持っており、それを太陽系の誕生プロセスという観点から説明しようとしている点はよくわかる。しかし、シナリオなので話が唐突すぎるし、それまでに説明していない用語が突然出てくることや、直感的に考えても納得できない説明が多々ある、など問題点が多い。星間物質 (ガスとダスト)、微惑星、塵、固体微粒子、原始惑星などの用語や、太陽は球なのになぜディスク上の星雲ができるのか、外側になぜ大きな核ができるのか、内側のほうが星雲の密度は高いはずなのに、なぜ小さい核になるのか、星雲のガスは乱流状態になっているはずなのに、なぜ沈殿できるのか、ガス成分はなぜなくなったのか、など、教科書の記述を読んだだけでは疑問がありすぎる。

⑥惑星の特徴 (C 分類あるいは D 分類)

「惑星大気は重力が小さいと保持できない」のは、惑星の質量が小さいと大気の熱運動によって惑星の脱出速度をこえるものがあるため、宇宙空間に逃げていけるからである、というように物理的根拠をしっかりと上げて説明するべきである (C 分類)。ほかにも「地球内部に残っている熱」(そもそもなぜ熱があるのか)、「放射性同位体に伴う熱」(放射性同位体とは何でしょう)、「自己重力による収縮で発生した熱」(自己重力による収縮とは何でしょう)、など説明を要する記述が目立った (D 分類)。次々と物理的に説明不足の記述が目立つが、羅列的に多数のことを紹介しようとする、このようになってしまいうように思われる。内容を厳選すべきである。

⑦太陽系のいろいろな天体 (A 分類、B 分類)

彗星に関する記述で「太陽風」や「太陽の光圧」などが突然登場し、何のことかわからないまま説明され (A 分類)、また木星の衛星の話では、イオが木星の起潮力によって変形するとしているが、普通は海水に対する起潮力のことであって、惑星全体の固体成分が変形するなどということは (B 分類)、よほど想像力がなければ理解できないであろう。

⑧太陽 (B 分類、D 分類、E 分類)

太陽の表面現象として粒状斑、彩層、コロナ、プロミネンスなどが紹介されるが、すべて意味不明である (E 分類)。定義ですら明確ではないように思われる。太陽内部からのエネルギー輸送という観点から説明できれば、もう少し興味を持つことができよう。太陽スペクトルの話では、吸収線による元素同定があっさりと言われて

いるが、これは高校「物理」の最後の単元で短く扱っているものであり、十分な説明が必要である (B 分類)。また、「太陽活動とエネルギー」という題材では「プラズマ」という言葉が突然出てくる。第4の状態と呼ばれる「プラズマ」の概念を紹介する意義は認めるが (門信一郎、2015)、定義ですらしっかり述べずにいきなり言葉だけが登場するのは不適切である (D 分類)。確かに太陽や恒星はプラズマからできており、地場のリコネクションなどのプラズマ現象が太陽表面で起こっている。プラズマの紹介をするには太陽の表面現象で扱うのがよいであろう。しかし、やはり適切な説明というものが需要であることは、自明である。付け加えただけ、では混乱を招くだけである。

(II) 恒星

① 恒星までの距離と明るさ (D 分類)

恒星の年周視差と距離の関係式は弧度法を知らなくても導くことができるが、自明というわけでもない。宇宙を数理的にとらえるための良い例となっているので、もう少し丁寧な説明を心がけるべきである。

② 恒星の色とスペクトル (A 分類、B 分類)

黒体輻射は高校「物理」では扱わないが、地学 [天文分野] 特有の物理的基礎事項である (A 分類)。この物理的題材を避けることはできない。黒体輻射についてきちんと物理的に説明し、恒星の輻射が近似的に黒体輻射になることを明らかにする必要がある。また、スペクトル型では吸収線 (暗線) が元素特有の波長をもっていることを用いることになるが、線スペクトルと連続スペクトルの違いや吸収線の話は、高校「物理」の「原子の構造」で扱っている内容では説明不足である (B 分類)。

③ 恒星の性質 (A 分類、B 分類、C 分類)

分光視差で距離を決める時に、恒星のスペクトルの暗線を調べるだけで主系列星、巨星、白色矮星の区別ができる、と記述されているが、実は暗線の線幅を調べて初めて分かることであって、これは内容的には高校「物理」の範囲を超えている (A 分類)。また、ベテルギウスなどの大きな恒星は、離れた場所にある2つの望遠鏡を利用した「干渉計」を用いれば測定できるというのだが、「干渉計」とは何なのかの説明が一切ない。これでは、何をどのように観測しているのか、一向に理解できない (B 分類)。

分光連星では、光のドップラー効果を用いるが、高校

「物理」では音のドップラー効果はあつかうが、光のドップラー効果は扱っていない。同じ物理現象だといわれればそうであるが、そのこと自体が高校生にはわからないであろう (B 分類)。

連星の質量比は、主星と伴星の軌道半径の比から求まる。このことは高校「物理」の重心の定義から (重心運動と重心の周りの運動の分離から) わかるということを示すべきである (C 分類)。

④ 恒星の誕生と進化 (C 分類、E 分類)

「暗黒星雲や散光星雲の内部は可視光線で観測できず、赤外線や電波によって観測する」、と説明されてもなぜなのか全くわからない。温度が低い天体からは波長の長い電磁波が輻射される、という黒体輻射の物理を把握していないと、理解不能になってしまう (C 分類)。恒星の終末については、「惑星状星雲」、「超新星」、「中性子性」、「ブラックホール」などの名称が次々と登場するが、これらほとんどすべてが、どのような物理的性質をもった天体をさすのか、その定義ですら明確ではない (E 分類)。

⑤ 星団 (D 分類)

散開星団、球状星団、種族Ⅰの星、種族Ⅱの星などが若いあるいは古いというときに、基本的にどのように恒星の集団が作られていくと考えられているのかを説明しておかないと、「若い」、「古い」の意味が不明になる。宇宙全体が誕生してから、まず恒星ができて、その後、銀河や銀河団ができたとするのか、あるいはまったく逆なのか、このことを明確にしてから、話を展開すべきである。

(III) 銀河系と宇宙

① 銀河系 (B 分類、C 分類)

銀河系を構成する恒星の分布と距離を知ろうとすると、銀河面には星間物質が集中しているため、光では遠くなる恒星や星団を観測できない。しかし、電波や赤外線などでは透けて見えるため遠くまで観測できるとされる。もちろん、これは電磁波の波長による違いによって起こることは理解できるのだが、少し深く考えるとよくわからないことに気づく。なぜ、波長が長いと星間物質の影響を受けないのであろうか。物質による電磁波の吸収、回折、散乱などの物理的性質を理解していないと、到底納得できることではない (B 分類)。

銀河系全体の水素原子の分布図が題材として取り上げられるが、水素原子までの距離をどうやって測定したの

かの説明がないと受け入れることはできない。距離を測ることは天文分野では常に大きな問題になることは明白である（B分類）。

銀河系中心部における恒星や星間雲・分子雲の運動についての観測事実によってバルジ構造について解説を行うのであるが、高校「物理」の範囲では理解不能な記述が多々存在する。たとえば、「恒星が個々に乱雑な運動を行うことによって万有引力とつり合いを保つ」ことによって「バルジは球状を維持している」とされるが、これはいったい何を言いたいのだろうか。銀河系内の恒星や星間雲の運動を銀河回転とランダムな運動に分けて考えているらしいことはわかるが、これは重力多体問題の結果なのか、初期値に依存した一時的な運動を指しているのか、説明が不足している（B分類）。

銀河系中心天体である「いて座A^{*}」の周りをまわる赤外線源の運動の観測から、太陽質量の約400万倍の質量があることがわかる、という点は、高校「物理」の力学的観点からもう少し詳細な説明が欲しいと思われる（B分類）。また、太陽質量の約400万倍の天体であるからブラックホールであるといわれても、ブラックホールがどのようなものなのかわからなければ意味がない（C分類）。

銀河系内の回転と恒星の軌道については、さらに高校「物理」では理解できないことが多く存在する。銀河系内の恒星は回転運動しているだけでなく、恒星独自のランダムな運動をしている、と断定する。高校「物理」の範囲内で考えるならば、多数の恒星は万有引力の法則に従っているのであって、ランダムな原因は何もないのではないかと単純に考え疑問に思うであろう。また、銀河面から離れたところでは万有引力と遠心力の合力が銀河面方向にはたらくため、恒星は銀河面に引き寄せられる、として銀河系は全体として扁平なディスク状の形になっていく、というのはよくわかるが、ではなぜ、球状星団はディスクに落ちてこないのか、という素朴な疑問に対する解説が一言もない（C分類）。

銀河系の質量を求める方法として力学的方法と光学的方法が紹介され、前者のほうが後者より5倍ほど大きい、としてダークマターの存在が紹介される。後者の光や電波での直接的な観測によって推測される質量については、その具体的な方法について説明が欲しいところである（B分類）。

② 銀河と宇宙（D分類）

銀河の距離を求める方法については、かなり具体的に方法が説明されている。しかし、約一億光年以上遠くの銀河を求める方法で、「銀河の絶対等級」を推測し、見か

けの明るさとの比較で距離を決める方法があるが、このときの「銀河の絶対等級」の推測はどうやって行うのであろうか。また、銀河の中に「Ia型超新星」が出現すれば、その最大光度が決まっているので、見かけの明るさから距離を求めることができるというのだが、「Ia型超新星」がどういうものなのかの説明もなく、またどうして最大光度が決まっているのかもわからないわけで、説明不足である。（D分類）。

③ 膨張する宇宙（A分類）

20世紀後半から21世紀にかけて宇宙全体の誕生と進化を扱う宇宙論は最も進歩した分野であり、教科書でも最新の成果をもとにして話が展開されている。ビッグバン宇宙にもとづく元素合成の話や「晴れ上がり」による宇宙背景放射の存在と揺らぎの発見、誕生直後のインフレーションや加速膨張の話など、最新の成果が多く存在し、そのすべてを説明したい気持ちはよくわかるが、これらはすべて高校「物理」からみれば非常に高度な物理的基盤がなければ正確には理解できないものである。「お話」として教科書に記述するならば、観測事実やその物理的基盤、その結果わかったことを明確に整理すべきであり、現時点では、このような整理は宇宙論の専門家ですべてはできないように思われる（杉山，2019）。

ハッブルの法則、3K宇宙背景放射、初期宇宙のヘリウム合成、の3つの題材に焦点をあてて、丁寧に段階を踏んで正確に膨張宇宙の概念に到達するよう、教育目標を設定すべきである。理科教育の上で必要なことは、必ずしも最新の成果を盛り込むことではないであろう。

3. 天文分野の問題点

高等学校「地学」の天文分野について、学習指導要領の教科内容および教科書の内容を詳細に調べ、高校「物理」あるいは中学理科の素養がどの程度必要か、あるいはその範疇を超えているのか、を具体的に明らかにした。「地学」天文分野の教科内容および題材には、大きな問題が多数あることを明らかにできた。そもそも、多くの具体的題材について、高校「物理」以下の素養では根本的に理解不可能か、いちじるしく理解困難である。教科内容そのもの、教科書の題材、教科書の記述の仕方、などを全面的に改善しない限り、天文分野教育の将来はない。

「地学基礎」教科書については、天文分野に関する教科書の内容構成そのものが、学習指導要領の教育目標・内容に合致していない。教科書検定をよく通ったものだ、

と驚きを隠すことができない。学習指導要領においては、「地学基礎」は環境問題や防災の視点を含む教科として扱われており、その立場・視点から地球科学の教科内容が構成されている。天文・宇宙分野は、その地球を取り巻く環境として取り上げられているだけである。それゆえ天文分野が「地学基礎」の教科内容に占める割合は極めて低くならざるを得ない。それでも天文分野を興味深く意味のある内容にすることは可能であると思われるが、残念ながら現状の教科書は、天文分野だけで閉じた世界を作り独自に進める、というスタンスである。「地学基礎」が「地学」のダイジェスト版になっていることなども考慮すると、「地学基礎」における天分分野教育はあきらめ、「地学」(発展的科目のひとつ)の物理的基礎事項を「物理」に積極的に入れ、太陽系については「地学基礎」や「地学」の地球科学(地質や大気)分野に合体させる、というほうが合理的であるように思える。「地学基礎」天文分野は、そう判断せざるを得ないほど内容的に非常に貧弱である。

「地学」教科書については、「地学基礎」にくらべれば内容的に正確で論理的に書かれているが、いろいろな事柄をすべて盛り込むようにしたため、非常にわかりにくいものになっている。また、新しい用語の定義も、定義してから使用されるのではなく、本文中で使用後に後で正確に定義するなど、記述が整理されていないことがわかる。一部の天文ファンなら、そのような記述の仕方でもついていけるかもしれないが、そうでない学生には無理であろう。もっと内容を絞って整理し、基礎となる物理的基盤に基づいてわかりやすく記述すべきである。この立場からすれば、本来、高校では扱えない題材がかなりあることもわかる。「地学基礎」とは異なる意味で、内容の吟味が必要である。

4. 議論とまとめ

「地学基礎」、「地学」の教科内容と教科書の記述内容については、以上で分析したように前提となる物理的素養を十分に意識せずに天文分野全体をカバーしようとしたために、普通の学習者には非常に理解困難な内容になっていることがわかった。教科内容、題材の取り上げ方、記述の仕方に問題があると言わざるを得ないが、それでは「地学基礎」、「地学」は「物理」の中に組み込み、科目として廃止すればよいのであろうか。そのような主張も一理あり、天文分野の研究者でもその方向でこの問題を解決しようと考えている者もいる(須藤、2020)。しかし、本稿でもたびたび述べているように、天文分野で用

いられる物理は、通常の高校「物理」や大学初年級で扱う「物理」とは扱う題材が異なっており、たとえば高校「物理」に組み込むことは非常に難しいように思われる。また、扱うべき物理的題材は、光のドップラー効果のように、学生実験室で容易に扱えるようなものばかりではなく、やはり天体の宇宙を舞台として初めて理解できるものでもある。たとえば、フーコーの振り子は実験室でも確かめることはできるが、これは直径1万kmを超える地球が自転しているからこそ起こる現象であり、天文事象として理解されるべきであって、高校「物理」で行うような実験室で振り子の周期を測るものとは次元が異なる。一般に人為的に条件付けすることができない自然現象を観測し、そのデータから自然現象に潜む法則性を見出す、という営みは歴史的にみても自然科学の手法の一つだったはずである。高校「物理」に組み込んでしまうと、自然科学本来の大事な手法や考え方の一つを失うことになるように思われる。やはり、「地学基礎」、「地学」は、高校の理科教育の科目として残しておくべきである。

現行の「地学基礎」および「地学」の天文分野における教科内容、教科書の記述内容を大幅に変更する必要がある。まず中学理科(第2分野、天文分野)との継続性を持たせることである。中学までに月や金星の運動と満ち欠けまで段階を踏んで丁寧に学習していくのであるが、「高校地学」ではその流れが完全に途絶えてしまう。中学理科(第2分野)で学習者全員が「金星の満ち欠け」まで学んでいるのに、高校「地学基礎」では太陽系の他の惑星の運動という題材にはいかず、ただ太陽系についての最新の成果を一時的に記述することに終始してしまうのである。中学理科(第2分野)との継続性を大事にし、理解が段階的に進むように教科書の記述内容を工夫しなくてはならないだろう。また、内容を大幅に絞る必要がある。たとえば、「地学基礎」は太陽系天体のみを対象とし、詳細に、段階的に、題材のテーマを明らかにしつつ、積み上げるようにして理解を深めるようにし、「恒星」、「銀河」、「宇宙論」は「お話」にとどめておく、というのも一つの手である。「地学」の内容は太陽系を除く天文分野全体をカバーすることとするが、「恒星」、「銀河」、「宇宙論」での扱う題材をそれぞれ2~3に絞って取り上げ、天文分野特有の考え方や実習が可能な題材のみを残すものとする。「中学理科」、高校「物理」の内容を十分に踏まえて内容を精選し、最新の成果や詳細な全体像を描くことはあきらめるべきである。本稿で明らかにしたように、高校「物理」までを基盤として持っていたとしても、天文分野の内容理解には限界があるからである。

「地学基礎」および「地学」の天文分野における教科内容と教科書の記述内容を、中学理科および高校「物理」の前提知識をもとに分析し、現行の教科内容や教科書の記述内容には、理解困難な内容・記述が多いことを具体的に明らかにした。「地学基礎」および「地学」の天文分野は廃止あるいは他教科へ統合するのではなく、教科内容および教科書記述内容を大幅に見直すべきである。その際、①中学理科との継続性、②段階的な理解をもたらす構成内容、③題材の精選と全体像記述の放棄、が重要なポイントになる。

文献

- ・ 文部科学省 (2018) 高等学校学習指導要領 (平成 30 年告示)、「平成 29・30 年改訂 学習指導要領、解説等」、https://www.mext.go.jp/content/1384661_6_1_3.pdf
- ・ 教科書レポート (2018)、No. 61、『教科書レポート』編集委員会、日本出版労働組合連合会、2018 年 11 月 15 日、p72-73
- ・ 教科書レポート (2019)、No. 62、『教科書レポート』編集委員会、日本出版労働組合連合会、2019 年 10 月 15 日、p72-73
- ・ 中井仁 (2003)、高校「地学」の問題点と展望、地球惑星科学関連学会 2003 年合同大会、「地学教育の昨日 今日 明日」講座要旨
- ・ 文部科学省 (2017)、中学校学習指導要領 (平成 29 年度告示)、「平成 29・30 年改訂 学習指導要領、解説等」https://www.mext.go.jp/content/1413522_002.pdf
- ・ 国立教育政策研究所、学習指導要領データベース、高等学校学習指導要領 (平成 20 年告示)、文部科学省、<https://www.nier.go.jp/guideline/index.htm>
- ・ 小川雄二郎ほか 13 名 (2011)、文部科学省検定済教科書 高等学校理科用 地学基礎、数研出版株式会社、平成 23 年 3 月 30 日検定済、令和 2 年 1 月 31 日発行、104 数研 地礎 304
- ・ 小川雄二郎ほか 14 名 (2013)、文部科学省検定済教科書 高等学校理科用 地学、数研出版株式会社、平成 25 年 3 月 5 日検定済、令和 2 年 1 月 31 日発行、104 数研 地学 302
- ・ 磯崎行雄・川勝均・佐藤薫ほか 12 名 (2016)、文部科学省検定済教科書 高等学校理科用 地学基礎 改訂版、新興出版啓林館、平成 28 年 2 月 22 日検定済、令和元年 12 月 10 日発行、61 啓林館 地礎 308
- ・ 磯崎行雄・川勝均・佐藤薫ほか 12 名 (2017)、文部科学省検定済教科書 高等学校理科用 地学 改訂版、新興出版啓林館、平成 29 年 2 月 6 日検定済、令和元年 12 月 10 日発行、61 啓林館 地学 303
- ・ 門信一郎 (2015)、理科教育の現場にプラズマ・核融合を、J. Plasma Fusion Res. Vol. 91, No. 2 (2015) 99-106
- ・ 杉山直 (2019)、宇宙論の大展開、日本物理学会誌、Vol. 74, No. 6, 2019, p362-363
- ・ 須藤靖 (2020) 天文学と物理学、大学の物理教育、Vol. 26, No. 2, 2020, p55-58