

地球の運動に関する教材の研究

——コマの運動と地球の運動——

柴山元彦*・小田幸弘**・横尾武夫*

大阪教育大学附属高等学校* 神戸市立丸山中学校** 大阪教育大学地学教室*

(昭和55年6月30日 受付)

高等学校の地学で歳差を教材とする新しい授業展開を開発した。その授業展開は3つの段階に分けておこなった。それは、(1)赤道座標変化としての歳差 (2)地球の回転軸の首振り運動 (3)地球のコマとしての性質と地球の構造 である。これらの各段階は実際の授業において実習を中心におこなった。すなわち、(1)古い星図と新しい星図を比較して、生徒は恒星に対して座標が変化していることを発見する。(2)天球座標と地球の自転の関係をあらわす模型をつくり、地球の自転軸の運動を考える。(3)卓上でコマを回しその運動の性質を観察する。そして地球の運動と比較する。この教材研究の目的は、地学における多様な分野を統合するカリキュラムを模索することと生徒の対自的な物の見方を育てることにある。

I はじめに

現代の地学教育においては、生徒に我々の住む地球を様々な観点と手法で探究させ、その総合的な把握をさせることをめざしている。その最終的な目的には、正しい自然観を確立し、環境保全を含めた応用等が含まれているが、地学教育の根底には物の考え方の陶冶、とりわけ「対自的な物の見方」を育てる使命があると考えられる。〔8〕その立場から私達は特に、地球の運動についての教材の再検討を進めている。今回、地球の歳差運動をテーマとした教材の開発をおこない、実験授業を展開した。

地球の運動の中で歳差と呼ばれる現象は重要であるにもかかわらず、空間的な運動であるための理解の困難さや、剛体力学を履習していないことから本質的な理解ができないと考えられることなどから、現在の高等学校地学では、「地学Ⅰ」では取り扱われず、「地学Ⅱ」に含まれているし、昭和57年度からの新カリキュラムにおける「理科Ⅰ」でも含まれていない。しかし古い星図と新しい星図の比較や、地球ゴマの観察を通してコマの運動の本質的な部分を抽象させるような方法による歳差教材は、卓上でのコマの運動と天界の地球の運動とを対比させることにより生徒の自然認識をさらに高い次元へ引き上げることが可能となる。ここでの実践が次のような理由で、ある一定の成果を得たものと考えられるので、ここに報告する。

その理由は、(1)今回の教材が他のあらゆる教材に共通する構造を持っていること。(2)対自的な物の見方の訓練を多く含んでいること。(3)歳差は他の教材と結びつく部分を多くもつため、教材相互の連結教材としての取り扱いが可能なことである。一などである。これらの理由から歳差は高等学校理科・地学においては重要な教材であると考えられる。

また今回の試みで、歳差をテーマとした教材の中に多くの困難な問題が浮きぼりにされたが、その困難さは地学の教材のほとんどのものに共通するものであることも判明した。その問題点とは、(1)地球の歳差現象は空間的にも時間的にも日常感覚とはかけはなれて大きいものであり、実験と観察を通しては、その存在すら認識させることは難しいこと。(2)歳差運動の理解は剛体力学の知識の上に成り立つものであるが、その基礎は高校物理Ⅱで初めて取り扱われているにすぎないことである。今回の実践では厳密な理論構成を指向せず、地球の総合的な把握ということ念頭におき、生徒に知的な興味を失なわせることなく、日常感覚からマクロ現象へ感覚を止場させることを目標として、授業が展開できるように心がけた。

昭和57年度新学習指導要領における「理科Ⅰ」に、地球の運動が重要なテーマとなっているが、ここでの試みが、基本的な考え方と実践の方法という点で、今後の新しい活動に資するものであると期待する。

Ⅱ 教材の構成

指導案の作成にあたって、その構成を三つの段階に分けることから出発した。

- (1) 恒星の天球座標の変化としての歳差現象の存在を知らせる。
- (2) 天球座標の変化は地球の首ふり運動にもとづくものであることを考えさせる。
- (3) 地球の首ふり運動は太陽や月の引力による地球のコマ運動であることを認識させる。

このような構成は人間の自然認識における普遍的な段階 (1)現象論的段階 (2)実体論的段階 (3)本質論的段階〔4〕に対比することも可能である。以下、各段階での教材の構成と問題点を取りあげていく。

1. 天球座標の歳差現象 太陽年と恒星年の差、もしくは春分点の移動といった観測事実としての歳差現象の発見は、古代ギリシャや古代中国の初期天文学に遡る。春分点の移動が1年間に50秒角という微小な変化は古代においては数世紀にもわたる観測を積み重ねによって始めて認識されるものであっただろう。生徒に歳差現象の存在のみを知らせるには、先人の歴史的な成果を講述することで目的は達せられる。しかし歳差を地球の自転軸の運動の実体に結びつけるためには、恒星に対し黄道の極は不変であるが、赤道の極が変化することを認識させたい。そこで、元期に数百年の違いがある現代の星図と古い星図を比較させる実習を作成した。元期が百年間の違いで、春分点の移動が1度角強であるから、かなり詳しい星図を用いて、春分点・秋分点・天の北南極付近の恒星の座標変化を読みとらせる必要がある。その目的のためには、我国で出版されている星図の中から、現代のものとして「全天恒星図」〔1〕古い星図として「フラムスチード天球図譜」〔2〕が最も適当であると考えた。後者は、1780年元期のフランス版の復刻であり、時代色を帯びながら、現代にも通ずる美しい星座図が画かれているので、まず生徒の興味をひきつけるためにも有効であることがわかった。これらの星図から黄道の極のまわりを黄道傾斜角を考えずに天の極が動くことが読みとれるように工夫した。この実習での一つの問題点は生徒に天球座標の知識が前提としてあるかどうかである。今回の実践授業では既習事項であったので、生徒の理解は早かったが、もしそうでない場合でも赤道・黄道等の大枠は中学校で学習しているので、星図からのそれらの読み取りは難しいものではないだろう。

2. 地球の首ふり運動 1の段階で、黄道面に対し赤道面・天の極の移動の様子を学習させた上で、この段階でその事実が地球の自転軸の首ふり運動に起因することを認識させ

る。またこの段階は天動説から地動説への転回に対比でき、生徒にコペルニクスの転回をさせることに意義があると考えられる。天球の内側から見た時と外側から見た時の違いをおさえつつ、星の座標の変化を地球の運動にむすびつけていく。黄道面を基準とし、黄道傾斜角を変化させずに、地球の自転軸が向きを変えていく実体を学習させる。歳差の角速度を量的におさえることは、1の実習から可能であろう。

3. 歳差運動の原因 地球の回転をコマ運動としてとらえ、地球に働く力と地球のコマとしての性質を理解させる。コマの運動は、それ自身、教材テーマとして魅力あるものだが、初・中等教育ではほとんど取りあげられていない。しかし生徒の日常の体験や遊びを通じて、その定性的な性質は感覚的にかなり把握していることが期待できる。そこで、卓上のコマと地球の運動を対比させ、生徒にとって新鮮な知的冒険となることを試みた。地球ゴマ（タイガー商会製）による実習を通じて、複雑なコマの運動から自転と首ふり運動の二つの主要なモードを抽出させることから出発する。次に、コマに働くトルクを変化させてトルクと首ふり運動の関係を考えさせる。この実習問題の要約には角運動量とトルクの関係を認識させる方法〔たとえば6〕と、首ふり運動の向きとトルクの向きの関係で認識させる方法〔たとえば5〕の二つがある。前者は本来の運動の法則の概念に則しており、後者はコマ運動の実体の記述である。我々はコマの運動と地球の運動の対応関係を重視する観点から後者の方法を選んだ。コマの運動の定性的性質を確認した後に、地球の歳差運動とコマの首ふり運動を比較させ、その原因を提示する。地球の構造と月・太陽による固体地球への潮汐力に関する説明の方法は、多くの教科書や解説書〔たとえば7〕に記述されているので、それらに準ずることにする。

この部分はここでのテーマとなる本質的な部分であるが、どのレベルまでを教材に取り入れるか、どのような方法を採用するかには、まだ種々の問題が残されている。今回の授業構成は地球の運動の実体の把握に重点をおき、そこに多くの時間をさいたことが特色である。

III 授業の方法と展開

1. 指導計画 歳差を授業でおこなう場合に年間指導計画の中でどのような位置づけをするかは幾つかの方法がある。(1)地学Ⅰにおける地球の運動の中で自転に関連しておこなう場合、(2)地学Ⅱにおける地球周辺の力として潮汐力などとあわせておこなう場合、(3)地学Ⅰの地球の内部構造が地震波によって調べられる以外に地球の回転をも利用して推定できることから歳差をあつかう場合、などが考えられる。57年度からの理科Ⅰでは地球の運動の項や地球の内部構造の項があるので(1)(2)のどちらでもおこなえるだろう。今回は普通におこなわれていない(3)の場合を高校1年生を対象におこなった。(表-1)

2. 授業展開 前述Ⅱのような教材構成にしたがって授業全体を大きく三段階に分けておこなった。授業は主に実習を中心に口述で天球儀・地球ゴマ・普通のコマを用いて授業し、生徒は配布された実習用プリント三種・地球ゴマ・普通のコマ・定規を使って実習をおこなった。三種の実習はそれぞれ前章の1～3に対応しており、授業時間は実習1・2に対応する部分を1時間、実習3に対応する部分を1時間で、合計2時

○地球の内部構造

1. 地球の平均密度
2. 地震波の伝わり方
3. 地殻とマントル
4. 地球内部の地震波速度
5. 地球の歳差と内部構造

間の授業をおこなった。

次に具体的な展開例をのべるが、前述のような実際の授業は大阪教育大学附属高等学校天王寺校舎の1年生4クラス(182名)を対象に、昭和55年2月6日・9日におこなった。

〔実習1〕 一春分点は移動する—

1950年分点の現在の星図(図-1)と1780年分点の星座図の入ったフラムスチード星図(図-2)の春分点付近のものを2種生徒に配布し、恒星は天球上の位置を変えないことを前提として図-1の中にある赤道と黄道を図-2の星図の中に記入させる。特に図-1の星図の赤道、黄道上にある鍵になる星を2つずつ知らせ(図中の○印)、それらを利用して作業をおこなう。その結果、黄道は恒星に対して変化しないが、赤道は少し平行移動したような位置に引くことができる。そのことから赤道と黄道の交点である春分点が黄道上を移動したことがわかる。また春分点の移動量を15度間隔の経線間の長さを利用して求める。

これらの星図は170年間をへだてたものであるから、1年で何秒角ずつずれているかを求める。さらに春分点が元の位置にもどるまでに何年かかるかを計算させる。

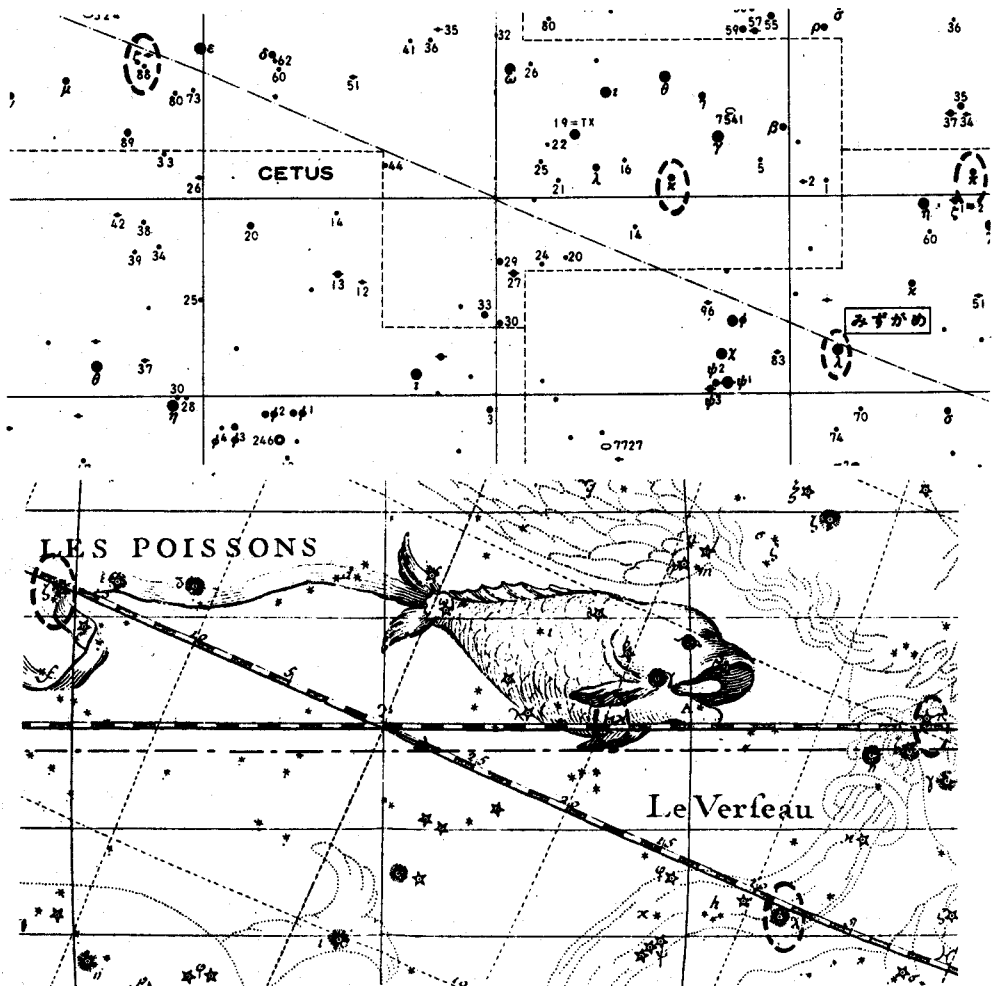


図-1(上) 現在(1950年分点)の春分点付近 [1]より引用加筆。楕円は鍵になる星を示す。
 図-2(下) 昔(1780年分点)の春分点付近 [2]より引用加筆。図-1と比較せよ。
 鎖線は現在の赤道に対応する。

前時は地震波を使つての地球の内部構造の授業であつた。そのためか突然星図ができて生徒達にとまどつた感じが見られたが作業は順調に進んだ。

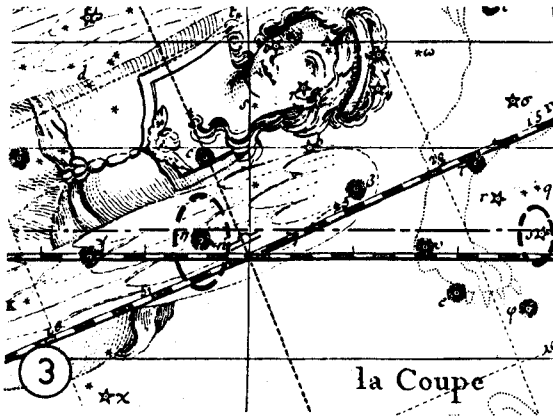


図3 昔(1780年分点)の秋分点付近。
〔2〕より引用加筆。鎖線は現在の赤道と対応する。鍵になる星を楕円で囲った。

図4 昔(1780年分点)の天の北極付近。
〔2〕より引用加筆。二本の鎖線の交点が現在の天の北極。鍵になる星を楕円で囲った。

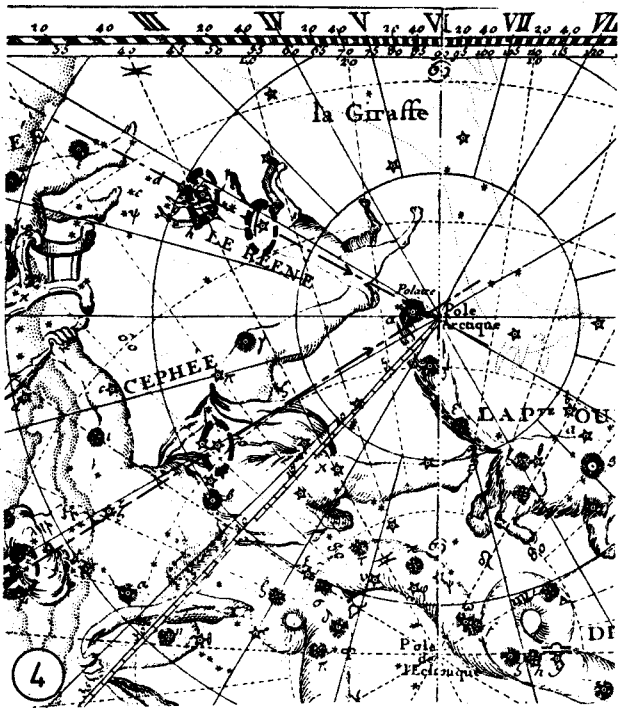
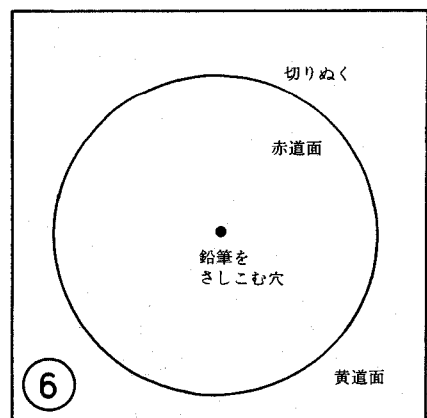
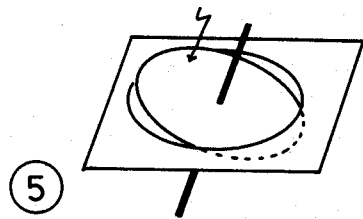


図5 天球座標における赤道・黄道と地球の自転軸の関係をあらわす模型

図6 図5の模型を作るための型紙



〔実習2〕 一地球の首ふり—

次に実習1でおこなつた方法と同じ方法で秋分点と天の北極がどのように変化するかを知らせるため、フラムスチード星図(1780年分点)上に現在の全天恒星図(1950年分点)から赤道を移して記入したものを生徒に配布した(図-3, 図-4)。そしてこれらの点も春

分点と同様に移動していることと、その移動量を調べさせ確認させる。さらに赤道が移動し、春分点・秋分点・天の北極がそれぞれこのような動きをすることから、地球がどのような運動をすることになるかを図-5のような模型を作らせて考えさせた。図-6はその模型を作成するための型紙である。また図-1~4の星図は天球の中から星々を見た時のものであるから、模型を作って考える場合は外から天球を見ることになり前記三点の移動方向も逆になることを注意する必要がある。このことはすでに述べたように地球上から宇宙を見るという考え方から、宇宙空間から地球を見るという視点の転換が必要であり、実習2の重要な点である。その結果自転軸が首ふり運動をしていることを見付けさせ、さらにその首ふりの方向は地球の自転方向と逆になっていることも確認させる。

【実習3】 ー地球ゴマー

この段階では歳差がどのような原因でおきるかを考える。まず普通のコマをまわさせ、コマの首ふりの回転方向がコマの回転方向と同じかどうか、また回転が速い時とおそい時とでは首ふり運動はどのようになるかを観察させる(図-7)。その結果、回転軸を鉛直軸から傾けると首ふり運動をはじめること、さらに首ふりの方向とコマの回転方向は同じであることを発見するだろう。次に生徒に地球ゴマを回させ、図-8のABCのような軸にかかるトルクの向きを変えた3つの場合を観察させる。その結果Cの場合普通のコマと違って回転方向と首ふりの方向は反対であることを生徒は見つけるであろう。地球の歳差と同じ現象がCの場合であったことを発見させ。そこでCの場合はAとどのような点で違うかを考えさせ、傾いた自転軸をおこそうとするとCのような現象がおきることに気づかせる。地球の場合、黄道の極に対して傾いた自転軸をおこそうとする力は何かを図-9を参考にして考えさせる。月の引力による影響は、太陽や惑星の影響よりも大きいので、月のみを考えてよいだろう。白道と黄道

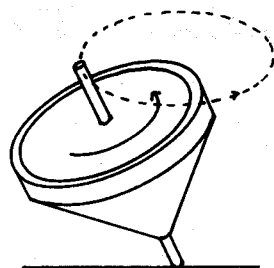


図7 普通のコマの首ふり運動

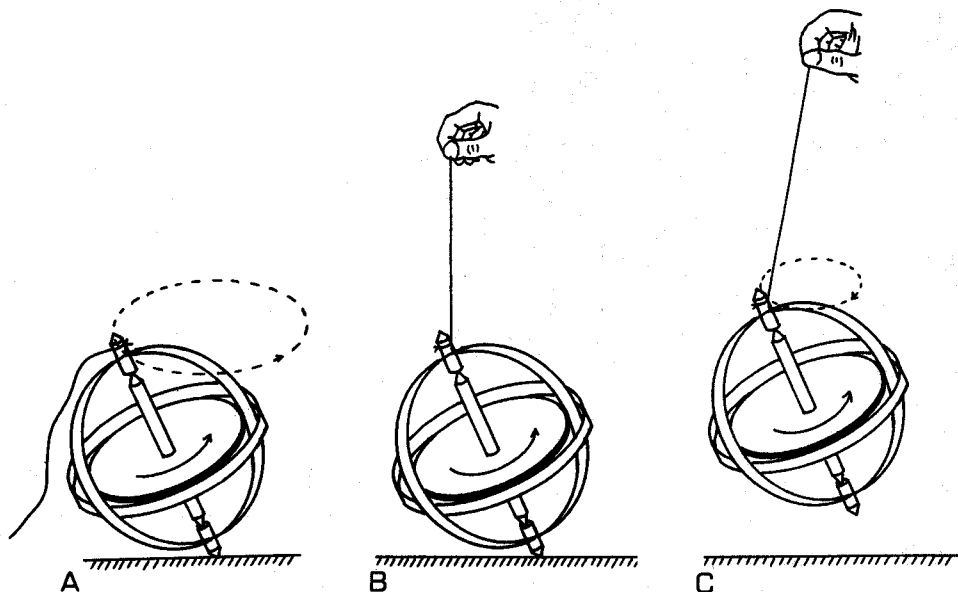


図8 地球ゴマの首ふり運動 A:普通に回した場合 B:ひもをぴんとはってまわした場合 C:つり下げて回転軸をかたむけて回した場合

はほとんど一致しているので白道面と黄道面を同一に考える。最後に地球のコマとしての性質を考えさせる。図-10は同じ大きさと質量のコマa、bである。aは周囲に鉛のわくをはめた木のコマと、中心に鉛を入れたbのようなコマとではまわり方がどのように違うかを考えさせる。そのことは、回転の仕方からその内部構造を推定できることに気づかせ、地球の内部構造の推定には地震波を使っておこなう方法とこのような回転の様子からの推定との両方を利用して内部構造を決めていることも知らせる。

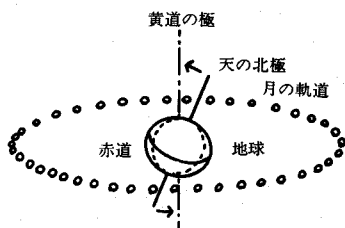


図9 地球の自転軸の向きを変えようとする力。軌道に月がばらまかれていていると考えると、春分点の方向を軸とした図のようなトルクが働く。

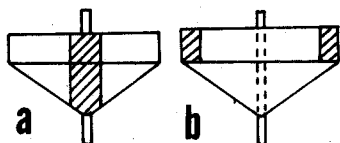


図10 大きさと重さが変らない二種のコマ。
aは鉛の太い芯が入っている。bは周囲が鉛でふちどられている。

3. 評価 今回高校1年生 180人を対象に授業をおこなったが、その一週間後にアンケートを取り、授業での重要な点が理解できたかどうか調べた。アンケートの設問は大きく、前述の3段階に分け作成しており、そのことが始めて聞いた事であるかどうか、始めて聞いた事がらであっても理解できたかどうかなどがわかるような形で答えるようになっている。歳差そのものについては初めて聞いたと答える生徒が6割近くおり、それらの生徒らも第一段階ではほとんどの生徒が理解できたようだ。第二段階に入って模型を使って立体的に考え始めると、授業時間の中では理解できなかった生徒ができていく。これらは何もこの教材に限ったことではなく空間的な概念がともなう教材の場合は理解が困難なようであるが、立体的な概念を養うにはよい。さらにコマそのものの運動と地球の歳差を考える第三段階に入るとコマそのものの力学的な問題がでてくるためかアンケートの結果でも理解できない生徒が第二段階よりもさらに増加していた。しかし地球コマと地球の歳差を対比して考えそれらに共通性があることや、回転の仕方によって地球の内部構造が推定できることなどは感覚的・定性的に理解できたことがアンケートや感想の文からわかった。アンケートの最後に授業に対する感想を書いてもらった。その内容は大きく分けて次の三つの型になる。

- (1)コマと地球が対比できることに感動したと書いているもの。一例、「地球の歳差などというものは、僕達が生きている間に感じとることができるようなものではない。それを身近なコマを使って理解できたのはよかった。」
- (2)地球の自転軸がこのような動きをしていることを知っておどろいたもの。一例、「北極星はずっと地軸の延長上にあると思っていたのに長い年月の間にかわってゆくのを知っておどろいた。」
- (3)力学的な説明が少ないことから納得がいかなかったと答えたもの。一例、「結果だけ解ったが原理的なことが良く解からなかった。」

アンケートの結果や感想から一応生徒は身近なものと宇宙のように大きなものとに共通した原理があることを理解できたのではないかと考えられる。

IV 考 察

授業は天球座標に関する話から始まり、地球の内部構造の話でしめくくられた。生徒にとってはこのような星図を使いコマを使った天文分野の学習が地球の内部構造という足下の話しにつながっていることに大きな驚きを感じたようだ。感想文にも「地球の歳差が内部構造と関係することを知って感動した」とあるように異質に近い二つの教材を歳差という教材によって結びつけることができた。地学は各学問分野が林立しており、その分野内における教材には系統性があるが、分野相互の結びつきはなく、それらを地学教育として体系化する必要性がさげばれている。この歳差は教材間を結びつける総合教材になりうるのではないだろうか。このような教材の開発を今後さらにつづけねばならないだろう。

感想文の中に「地球ゴマが地球の運動を知るのに役立つというのは知らないことであった」というのがあった。人間の精神史の中で、天界におこっている現象は地上でおこる事象とまったく関係のない法則にしたがっているという考え方をする段階があった。地学教育においても生徒のこのような考え方を打ちやぶることが重要な課題である。このような点からも今回の授業展開は宇宙の構造に対する対自的な見方を身につけさせる一つの方法である。

近年の宇宙科学技術の発展の場にあって、地球の空間運動は我々の常識となった。しかし、その認識の内容には単に概念として知ることと、探究的段階を通じ実感をともなって知ることとは大きな違いがある。今回歳差をテーマとした教材を作る過程で、その実体と原因を認識させることに種々の困難な問題が輩出した。歳差運動の運動形態は、自転や公転と同じく単純なものではあるが、それを理解するために実に広範な基礎知識が基底に必要となる。この問題は地学教材のいかなるテーマにおいても同じように内在し、それが地学教育の難しさの原因となっているように考えられる。地学教材の開発においては、一つのテーマの基礎となるべき知識を整理し、必要最少限の項目を抽出し、それを組み立てていくことが必要である。多くの人々が地学教育のそのような複雑な構造と格闘しているのが現状である。その結果、近年の地学教育の実践を通じて、物事を総合的に把握する訓練が徐々にではあるが国民の中に浸透し、その教育効果が上がっていくのが感じられる。

(追記) なお生徒に配布した実習用プリントの詳細はここでは省略したが、プリントそのものは大阪教育大学附属高等学校天王寺校舎地学研究室に残部が保管されている。

引 用 文 献

- 〔1〕 広瀬秀雄・中野繁 (1959) 全天恒星図 誠文堂新光社 東京
- 〔2〕 恒星社編 (1975) フラムステッド天球図譜 (復刻版) 恒星社 東京
- 〔3〕 関口直甫 (1977) 星の位置と運動 (新地学教育講座11) 東海大学出版会 東京
- 〔4〕 武谷三男 (1961) ニュートン力学の形成について (弁証法の諸問題 114～133頁) 理論社 東京
- 〔5〕 若生康二郎・石川利昭 (1977) 地球回転ゴマ 天文月報 70巻10号: 271～274
- 〔6〕 若生康二郎 (1979) 地球回転 (現代天文学講座1) 恒星社 東京
- 〔7〕 池辺展生編 (1974) 地球はここまである (地学II 42～45頁) 啓林館 大阪
- 〔8〕 横尾武夫 (1978) 高校地学における力学教材をめぐる 理数 139号4～9頁 啓林館 大阪

Development of Educational Materials on the Earth Rotation**Motohiko SHIBAYAMA, Yukihiro ODA and Takeo YOKOO**

*Tennoji High School attached to Osaka Kyoiku University, Osaka 543,
Maruyama Secondary School, Kobe, and Department of Earth Science,
Osaka Kyoiku University, Osaka 543, Japan*

A new method of teaching the rotation of the earth in term of precession is planed and practiced in the earth science in the high school. The course of teaching is devided into the three steps; (1) Precession as the secular change of the apparent places of stars, (2) Movement of the rotation axis of the earth, and (3) The top-like motion and the structure of the earth. Each step contains the practical exercises for students as follows: In the practice in step (1), students compare the star positions on recent star maps and ancient ones to find slow change of the coordinate frame refer to fixed stars. In step (2), they made a model with paper to clarify the relations between celestial coordinates and the earth rotation. In step (3), they play with spinning tops and find the homology between the motion of tops and that of the earth. Through this course of teaching, we intend to develope the "für sich" point of view of students. It is also emphasised that "the precession" can be one of the pertinent themes for synthetic instructions in the education of the earth science.