

小中学校理科での活用を念頭においた地学教材 「太陽系の旅 - 銀河系の回転と地質年代 -」の開発

清水 今日子*¹・土橋 一仁*¹・下井倉 ともみ*¹
佐藤 たまき*¹・生田 巳裕*²・鉄矢 悦朗*²

宇宙地球科学分野

(2017年5月29日受理)

SHIMIZU, K., DOBASHI, K., SHIMOIKURA, T., SATO, T., IKUTA, M. and TETSUYA, E.: Development of Teaching Material for Elementary and Junior High School Students “Journey of the Solar System -Galaxy Rotation and Geological Age-”. Bull. Tokyo Gakugei Univ. Div. Nat. Sci., **69**: 137-142. (2017) ISSN 1880-4330

Abstract

We have developed a new teaching material to learn the relation between the geological ages and the Galaxy rotation. The teaching material indicates several important fossil organisms and events in the history of life along the path of the Solar system orbiting the Galaxy with a period of 200 million years, and is summarized as an A1-sized poster that can be posted at classrooms. We have designed the teaching material to be useful for education of high school students as well as elementary and junior high school students. In this paper, we introduce the teaching material itself and show some examples how to utilize it at elementary and junior high schools.

Keywords: astronomy, paleontology, elementary school, junior high school

Department of Astronomy and Earth Sciences, Tokyo Gakugei University, 4-1-1 Nukuikita-machi, Koganei-shi, Tokyo 184-8501, Japan

要旨: 本研究では、銀河系の回転と地質年代を関連づけて学習することができる新しい地学教材の開発を行った。「太陽系の旅」と名付けたこの教材は、銀河系を約2億年の周期で公転する太陽系の軌道上に各地質年代を代表する古生物や生物史上の出来事をプロットし、教室に掲示できるA1サイズのポスターとして表現したものである。高校地学の授業ではもちろんのこと、小学校理科や中学校理科の授業でも積極的に活用できるよう、教材の表現方法等を工夫した。本論文では、開発した教材の概要と、学習指導要領と関連づけた小学校・中学校での活用例について紹介する。

*1 東京学芸大学 広域自然科学講座 宇宙地球科学分野 (184-8501 小金井市貫井北町 4-1-1)

*2 東京学芸大学 美術・書道講座 美術分野

1. はじめに

地学分野の学習には、数億光年に及ぶ遠方銀河の距離や、138億年前のビッグバンに代表される宇宙の歴史など、広大な空間的・時間的スケールを把握するためのセンスがしばしば必要となる。科学に強い興味をもつ児童・生徒であれば、関連する図鑑や資料を独学で読み解き、そのような素養を自力で身に付けることができる。しかし、科学に特別な関心を抱いていない多くの児童・生徒がこのようなスケール感を習得するためには、適切な教材を用いた学校での授業を通して、徐々に理解を深めていく必要があるであろう。

46億年の地球の歴史を1年に圧縮して表現した「地球カレンダー」(例えば、清水 2004)は、このような時間的スケール感を身に付けるのに適した教材であるといえる。地球の誕生を1月1日の午前0時とし、現在を12月31日の午後12時とすると、真核生物の登場(約20億年前)は7月上旬で、白亜紀末の恐竜の絶滅(6600万年前)は12月26日となる。宇宙や地球の年齢のように大きな数値を学術的に取り扱う際には、物事を対数スケールで考える方が便利な場合が多いが、まだ若い児童・生徒や一般市民にとっては、地球カレンダーのように単純なりニアスケールで考える方が、直感的に理解しやすいであろう。

地球カレンダーは時間的なスケール感を養うには適した教材であるが、もう一つの地学的な素養である空間的なスケール感を養うには必ずしも十分な教材ではない。空間的・時間的スケール感の両方をカバーできる地学教材があれば、学校教育の現場で大いに役立つであろう。そこで我々は、そのような教材の実現を目標に、地質年代上の代表的な古生物や出来事を銀河系の回転に対応させた新しい地学教材の開発に取り組んだ。

銀河系は、太陽を含む約2000億個の恒星からなる星の集団である。太陽系は銀河系の中心から27000光年の距離に位置し、秒速240kmの速度で銀河系の周りを公転している(例えば、Honma et al. 2012; Reid et al. 2014)。単純な等速円運動を仮定すれば、太陽系の公転周期は約2億年であり、地球誕生から現在までに銀河系の周りを20回以上回転した計算になる。この2億年という数字は、カンブリア爆発(5億4千万年前)やペルム紀の大量絶滅(2億5千万年前)といった地質年代上の重要な出来事と同じオーダーの時間スケールである。「6600万年前の恐竜の絶滅は、1/3回転前の出来事である」というように、銀河系の回転を時計代わりに使った教材を作成すれば、時間的スケ-

ール感のみならず空間的スケール感も同時に養うことが可能になる。本論文で紹介する「太陽系の旅」と名付けたこの教材は、このようなコンセプトで開発した「教室に掲示できるポスター型の地学教材」である。

高等学校学習指導要領(文部科学省2009)によると、銀河系の回転は高校地学で扱うことになっているので、開発した教材は高校地学の授業にそのまま活用できる。しかし、文部科学省が2016年に発表した履修状況調査では、高校で地学を履修する生徒は全体の0.8%に過ぎない(http://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/new-cs/_icsFiles/afieldfile/2016/03/11/1368209_02.pdf)。つまり、大部分の生徒は、銀河系が回転しているという事実すら知らないまま高校を卒業している可能性が高い。

銀河系と太陽系の関係といった基本的な宇宙観は、高校地学の履修率に関わらず、科学的リテラシーとして全国民が共有すべき重要な科学知識であると思われる。高校ではなく、むしろ義務教育である小・中学校の授業で触れる機会を作るべきであろう。そこで我々は、高校就学以前の小・中学校の理科の授業でも「太陽系の旅」を手軽に活用できるよう、平易な解説を付ける等、教材の表現方法を工夫した。

本論文の第2章では、教材の概要について紹介する。また、銀河系の回転周期の計算や、教材として選定した地質年代上の代表的な古生物や出来事についても述べる。第3章では、関連する小・中学校の学習指導要領の内容について述べ、開発した教材を効果的に利用するための活用例について紹介する。本論文のまとめを、第4章に示す。

2. 教材の開発

2.1 教材の概要

開発した教材を、図1に示す。この教材は、アメリカ航空宇宙局(NASA)が最近作成した銀河系の精密なイラスト(https://www.nasa.gov/pdf/752206main_Exploring_MilkyWay.pdf)に、太陽系の公転軌道を時計代わりにして地質年代上の重要な古生物や出来事をプロットしたものである。図の中央よりやや下側の太陽マークが現在の太陽系の位置で、これを公転軌道に沿って(図では)反時計回りに進むことで、時間を遡る。次節で述べるように、太陽系は約2億年で銀河系を一周する。白亜紀末の恐竜の絶滅は0.33回転前の出来事であり、イクチオステガが出現したのは1.8回転前のことである。教材には、3回転(6億年)前の事項まで軌道に沿って示したが、それよりも過去の事項について



図1 開発した教材「太陽系の旅 - 銀河系の回転と地質年代 -」

は、左下にまとめて示した。

この教材は、A1サイズでカラー印刷してポスターとして小学校～高等学校の教室に掲示して活用することを想定している。教材には、先カンブリア時代・古生代・中生代・新生代の古生物や出来事をプロットしてあるが、これらを地質年代別に紫・緑・青・黄の4つの異なる色で表現した。我が国では先天色覚異常の児童・生徒が40人クラスに約1人の割合でいると考えられるが(例えば、文部科学省 2003)、個性的な色判別の特性をもつこれらの児童・生徒も認識しやすい4色を選定した。

2. 2 銀河系の回転と太陽系の公転周期

図1の教材の右上には、銀河系の回転と構造について、それぞれ簡単な解説を付けた。銀河系の回転速度は、銀河中心からの距離 R によって異なる。銀河系は、巨大なブラックホールのある中心付近では複雑な運動をしているが、 $1 < R < 4$ kpc ではやや遅く回転し、 $R > 4$ kpc では概ね一定の速度で回転している。 $R > 15$ kpc の遠方での正確な運動は、まだよくわかっていない。

最近の超長基線干渉計 (VLBI) を用いた観測によ

ると、太陽系は銀河系の中心から $R = 8.34 \pm 0.16$ kpc (約27000光年) の距離にあり、銀河系の中心の周りを $V = 240 \pm 8$ km/s の速度で回転している (Reid et al. 2014)。太陽系が銀河系の周りを等速円運動しているとすると、これらの測定値より太陽系の公転周期 T は、

$$T = \frac{2\pi R}{V} = 2.13 \pm 0.08 \text{ 億年} \quad (1)$$

と推定することができる。ただし、より精度の高いデータが将来もたらされれば、この値はその都度少しずつ更新されるであろう。また、実際の太陽系の軌道は単純な円軌道ではなく、よりダイナミックで複雑なものになっていると考えられる。本研究では、簡単のために、太陽系の公転周期を2億年として教材を作成した。

興味深いことに、銀河系内のガスの分布は、太陽系の軌道付近 (約8 kpc) を境に内側では分子ガスが多く、外側では原子ガスが多い (Nakanishi & Sofue 2003, 2006)。また、星間ダストの性質も、内側と外側で大きく異なる可能性が指摘されている (Dobashi 2013)。太陽系は、このように物理的に特異な境界面

をかすめながら銀河系内を旅しているのである。このことは、恐竜の絶滅のような天体起源の大災害を引き起こす原因の一つになっているのかもしれない。

なお、図1のNASAのイラストに見られるように、銀河系にはきれいに巻いた何本かの渦状腕がある。渦状腕は、公転している恒星の密度が周囲より高くなっている部分である。渦状腕の形も時間とともにある速度（パターン・スピードという）で変化するが、それは上で述べた銀河系の回転速度とは異なるものであることに注意されたい。上で述べた回転速度は、個々の恒星の速度である。銀河系を公転する恒星を高速道路上の自動車に例えるなら、渦状腕は交通渋滞が起きている場所に相当する。交通渋滞がおきている場所も遠くから見れば移動して見えるが、それは個々の自動車の速度とは異なるものである。銀河系の渦状腕がどのように変化していくのかについては、現時点ではよくわかっていない。

2. 3 地質年代の代表的な古生物と出来事

本研究では、地質年代上の8種類の古生物と4つの出来事を取り上げ、それぞれイラストを作成して解説文とともに図1の教材に掲載した。それぞれの古生物・出来事を、表1にまとめる。

これらの古生物や出来事は、できるだけ高校までの理科の教科書に記述のあるものを選んだ。残念ながら

ら、小学校理科の教科書には、古生物学的な記述としては堆積環境を示す「貝の化石」が、地質年代とは無関係に記述されているだけである。表1の8種類の古生物のうち、「ユーステノプテロン」・「イクチオステガ」・「始祖鳥」・「フクイサウルス」の4つについては、東京書籍（岡村ほか 2016a, 2016b）・教育出版（細矢ほか 2016）・学校図書（霜田ほか 2016）などの中学校理科の教科書に記述がある。その他の古生物である「最初の生命」・「グリパニア」・「エディアカラ生物群」・「サヘラントロプス」と、4種類の出来事である「カンブリア爆発」・「植物の上陸」・「ペルム紀の大量絶滅」・「恐竜の絶滅」は、高校の地学基礎の教科書や関連する図鑑（例えば、小川ほか 2013；木村ほか 2012；千代延 2011；鈴木 2011）に記載されているもののうち、地質年代上特に重要と思われるものである。

教材に使用する8種類の古生物と4つの出来事のイラストについては、美術を専攻する著者の一人（生田）が、古生物学の専門家であるもう一人の著者（佐藤）の監修を受けつつ色鉛筆で描いたものをスキャナーで取り込み、加工して作成した。

3. 小学校・中学校の学習指導要領との関連と活用例

本研究で開発した教材が高校地学の授業で活用でき

表1 教材に用いた古生物・出来事

| 年代 (億年前) | 銀河回転 (回転前) | 古生物・出来事 | 説明・概要等 |
|-------------|---------------|-----------|--|
| 40 | 20 | 最初の生命 | ・最初の生物。 |
| 20 | 10 | グリパニア | ・最古の真核生物。 |
| 6 | 3 | エディアカラ生物群 | ・カイメン（原始的な多細胞動物）やクラゲのような生物の繁栄。 |
| 5.4 | 2.7 | カンブリア爆発 | ・硬い殻や目を持つ多種多様な生物が登場。 ・三葉虫、アノマロカリスなどの繁栄。 |
| 4.2 | 2.1 | 植物の上陸 | ・クックソニア（最古の陸上植物）。 ・オゾン層の形成。 |
| 3.85 | 1.93 | ユーステノプテロン | ・魚の形をしているが、ヒレの付け根の部分には手足の骨の一部がある。 |
| 3.6 | 1.8 | イクチオステガ | ・初期の両生類。 |
| 2.5 | 1.25 | ペルム紀の大量絶滅 | ・化石記録で確認できる最大の絶滅。気温の低下や海水準の低下などの環境変動が原因であるとする説が有力。 |
| 1.5 | 0.75 | 始祖鳥 | ・現在の鳥と爬虫類に見られる特徴を両方持つ。ダーウィンの進化論を裏付けたことで有名な動物。 |
| 1.2 | 0.6 | フクイサウルス | ・福井県・石川県・岐阜県に広がる約1億年前の白亜紀の地層「手取層群」より産出。 |
| 0.66 | 0.33 | 恐竜の絶滅 | ・直径10kmほどの隕石の衝突による大絶滅。 |
| 0.07 | 0.035 | サヘラントロプス | ・現在知られている中で最も古い人類の化石。 |

ることは言うまでもないが、天文学や古生物学に興味のある児童・生徒であれば、小・中学生でもこの教材を使って学習することは十分可能である。しかし、銀河系の回転や生物の大絶滅などは、小・中学校理科の学習指導要領の範囲外であるため、この教材を日常的な授業で利用するためには、多少の工夫が必要であろう。学習指導要領の内容に関連付けて本教材を効果的に使用するための活用例を、以下に述べる。小学校と中学校の学習指導要領の天文学分野と古生物学分野の内容を、表2に示す。

表2 教材に関連する小学校・中学校理科学習指導要領の内容

| 校種 | 学年 | 内容 |
|-----|------|---------------------------|
| 小学校 | 第3学年 | (3) 太陽と地面の様子 |
| | 第4学年 | (4) 月と星 |
| | 第6学年 | (4) 土地のつくりと変化 (5) 月と太陽 |
| 中学校 | 第1学年 | (2) 大地の成り立ちと変化 |
| | 第2学年 | (3) 動物の生活と生物の変遷 |
| | 第3学年 | (6) 地球と宇宙 |

3. 1 小学校の学習指導要領との関連と教材の活用例

小学校理科で天文学分野について学習するのは、「(3) 太陽と地面の様子」(第3学年)、「(4) 月と星」(第4学年)、および「(5) 月と太陽」(第6学年)である(文部科学省 2008a)。小学校理科の段階では、日常的な授業では銀河系はおろか太陽系についてすら取り扱う機会がない。古生物学分野については、「(4) 土地のつくりと変化」(第6学年)で、流れる水の働きによって地層が作られたことの証拠として「貝の化石」の存在に触れる程度にとどまる。

しかし、意識して授業を計画すれば、本教材を「(4) 土地のつくりと変化」や「(5) 月と太陽」の発展的な学習材料として利用することができるであろう。児童が化石を含む地層がどのような環境で形成されたのかを学ぶ際、その地層が形成された年代に言及する。さらに、月は地球の周りを公転する衛星であり、地球は太陽の周りを公転する惑星であること、また太陽は地球とともに銀河系の中を旅していることを紹介した上で本教材を提示し、「この貝が生きていたとき、太陽と地球はどこを旅していたのでしょうか」と問いかける。授業後も本教材を教室に掲示することで、児童の休み時間中の話題となることも考えられる。美しい銀河系のイラストや親しみやすい古生物のイラストは、児童が天文学や古生物学に興味を抱くきっかけにもなるであろう。

このような教授法には小学校の学習指導要領の範囲をやや超える内容も含まれるが、著者ら自身の経験によれば、科学に興味をもつ子どもにとってのハードルは低い。全国の教員養成系大学に対する最近の調査によると(下井倉・土橋 2017)、教員志望の大学生のうち小学校理科で教える「月の満ち欠け」の仕組みを正しく理解している者は全体の僅か2割のみであり、月の満ち欠けを月食と混同する等、その原理を全く理解できていない者が全体の4割を占めることが明らかになっている。これは、中学校理科で学ぶ自転・公転の概念が身につけていないことを意味している。小学校理科で「(5) 月と太陽」の項目を教える際、本教材を活用して公転・自転に触れておく機会を設けることは、中学校での学習時の導入や知識の定着にも大きな効果があると期待される。

なお、本教材の文章は学術的な用語を多用したやや難易度の高いものとなっているが、漢字には全てふりがなをふってあり、小学校低学年の児童でも読むことができるようになっている。本教材を見て天文学や古生物学に興味を感じた児童が、自らその用語を辞書や図鑑で調べ、能動的に学習することも期待される。

3. 2 中学校の学習指導要領との関連と教材の活用例

中学校理科(文部科学省 2008b)では、天文学分野は2分野の「(6) 地球と宇宙」で扱われる。「ア 天体の動きと地球の自転・公転」では地球が太陽の周りを公転していることを学習し、「イ 太陽系と恒星」では銀河系の構造についてふれることとなっている。古生物学分野は、2分野の「(2) 大地の成り立ちと変化」と「(3) 動物の生活と生物の変遷」で学習する。「(2) 大地の成り立ちと変化」の「イ地層の重なりと過去の様子」で、示相化石及び示準化石を学習する。地質年代の区分は古生代、中生代、新生代の第三紀及び第四紀を取り上げることになっている。「(3) 動物の生活と生物の変遷」の「エ 生物の変遷と進化」では、進化の具体例として、魚類から両生類への進化を学習する。

本教材は、天文学分野の「(6) 地球と宇宙」の学習の発展学習として、利用することができる。授業で太陽系のイメージが構築された生徒に対して、太陽系も銀河系の中で公転しているというイメージを与えることは容易である。初歩的ではあっても銀河系の構造について学んだ直後なら、なおさらである。本教材を配布して生徒の頭の中に銀河系の回転のイメージを構築し、すでに学習した古生物学分野を太陽系の軌道に沿って復習すれば、地学的な空間スケールや時間ス

ケールを、より深く実感できるものと思われる。

4. まとめ

本研究では、銀河の回転と地質年代を関連づけて理解するための新しい教材の開発に取り組んだ。教室に掲示することができるA1サイズのポスターとして開発したこの教材はまだ試作段階にあるが、今後、授業実践などを通して教材の改良を行い、完成度を高めた。最終的には、生徒が日常的に使用できるA4版の下敷き型教材の作成も目指す。また、教師用の解説教材も作成し、教師が教材として利用しやすいよう工夫を行う予定である。

謝 辞

本研究の一部は、科学研究費補助金 (Nos.17K00963, 17H02863, 16K12749, 26287030, 26350186, 2661004) の援助を受けて行いました。ここに感謝致します。

引用文献

- Dobashi, K., Marshall, D. J., Shimoikura, T., & Bernard, J.-Ph. (2013), Atlas and Catalog of Dark Clouds Based on the 2 Micron All Sky Survey. II. Correction of the Background Using the Besançon Galaxy Model, Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.65, id.31, 16pp.
- Honma, M., Nagayama, T., Ando, K., Bushimata, T., Choi, Y. K., Handa, T., Hirota, T., Imai, H., Jike, T., Kim, M. K., Kameya, O., Kawaguchi, N., Kobayashi, H., Kurayama, T., Kuji, S., Matsumoto, N., Manabe, S., Miyaji, T., Motogi, K., Nakagawa, A., Nakanishi, H., Niinuma, K., Oh, C. S., Omodaka, T., Oyama, T., Sakai, N., Sato, K., Sato, M., Shibata, K. M., Shiozaki, S., Sunada, K., Tamura, Y., Ueno, Y., & Yamauchi, A.(2012), Fundamental Parameters of the Milky Way Galaxy Based on VLBI Astrometry, Astronomical Society of the Pacific, Vol.64, id.136, 13pp.
- Nakanishi, H., & Sofue, Y.(2003), Three-Dimensional Distribution of the ISM in the Milky Way Galaxy: II. The HI Disk, Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.55, pp.191-202
- Nakanishi, H., & Sofue, Y.(2006), Three-Dimensional Distribution of the ISM in the Milky Way Galaxy: II. The Molecular Gas Disk, Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.58, pp.847-860
- Reid, M. J., Menten, K. M., Brunthaler, A., Zheng, X. W., Dame, T. M., Xu, Y., Wu, Y., Zhang, B., Sanna, A., Sato, M., Hachisuka, K., Choi, Y. K., Immer, K., Moscadelli, L., Rygl, K. L. J. & Bartkiewicz A.(2014), Trigonometric Parallaxes of High Mass Star Forming Regions: The Structure and Kinematics of the Milky Way, Astrophysical Journal, Vol. 783, id.130, 14pp.
- 岡村定矩ほか (2016a), 「新編 新しい科学1」, 東京書籍株式会社, pp.239-240.
- 岡村定矩ほか (2016b), 「新編 新しい科学2」, 東京書籍株式会社, pp.134-137.
- 小川勇二郎ほか (2013), 「地学基礎」, 数研出版株式会社, pp.126-130.
- 木村龍治ほか (2012), 「地学基礎」, 東京書籍株式会社, pp.47-54.
- 清水伴雄 (2004), 「人間なしで始まった地球カレンダー」, ごま書房, 40pp.
- 下井倉ともみ・土橋一仁 (2017), 「理科を専攻としない教員志望学生の『月の満ち欠け』の教育の必要性」, 地学教育, 第69巻, pp.211-227.
- 霜田光一ほか (2016), 「中学校 科学1」, 学校図書株式会社, p.254.
- 鈴木哲 (2011), 「講談社の動く図鑑 MOVE 恐竜」, 株式会社講談社, pp.74-75.
- 千代延勝利 (2011), 「新ポケット版学研の図鑑⑩ 恐竜・大昔の生き物」, 学研教育出版, pp.20-160.
- 細矢治夫ほか (2016), 「自然の探求 中学校理科1」, 教育出版株式会社, pp.240-241.
- 文部科学省 (2003), 「色覚に関する指導の資料」, 文部科学省, p.2.
- 文部科学省 (2008a), 「小学校学習指導要領 理科編 (平成20年9月)」, 大日本図書, pp.20-67.
- 文部科学省 (2008b), 「中学校学習指導要領 理科編 (平成20年9月)」, 大日本図書, pp.58-90.
- 文部科学省 (2009), 「高等学校学習指導要領解説 理科編 (平成21年7月)」, 大日本図書, pp.114-115.