

# ミランコビッチサイクルの理解を助ける 仮想地球ウェブアプリケーションの開発

澤口 隆\*

Development of a virtual Earth web-application for better  
understanding of the Milanković Cycle.

Takashi SAWAGUCHI\*

## Abstract

The Quaternary is one of the ice age in 4.6 billion years' Earth history and the cyclic climatic oscillation of glacier- and interglacier periods in the Quaternary is thought to be resulted from the solar insolation changes due to the Earth's orbital and precessional motions, i.e. Milanković Cycle. A new web application has been developed and released that simulates the Earth's orbital changes for 400 thousand years long for intuitive understanding for students.

**Keywords** : Geoscience Education, Milanković Cycle, Active Learning, Web Application

## 1. はじめに

地球史において大規模な氷床が発達した時代は“氷河時代”とよばれ、46億年の歴史の中では氷河時代が何度も繰り返し生じている。258.8万年前から始まる第四紀も氷河時代の1つであり、その気候は氷床が拡大する“氷期”と、縮小する“間氷期”が周期的に繰り返すことで特徴付けられる (Head et al., 2008)。アルプスを中心とした氷河の調査・研究により、19世紀には過去数十万年間の間の“氷期—間氷期”の繰り返しが認められており、こうした周期的な気候変動の原因が、地球の公転軌道の変化によるとの考えが、フランスの数学者アドマール (Joseph Adhémar : 1797-1862) や、スコットランドの科学者クロール (James Croll : 1821-1890) などによって既になされていた。ユーゴスラビア (現セルビア)

---

\*) 東洋大学自然科学研究室 〒112-8606 東京都文京区白山 5-28-20

Natural Science Laboratory, Toyo University, 5-28-20 Hakusan, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8606, Japan

の地球物理学者・ミランコビッチ（Milutin Milanković：1879–1958）は、こうした考え方を発展させ、地球軌道要素の周期的な変化がもたらす特に高緯度（北緯65°）地域の日照量変化が、周期的な気候変動の原因であることを示した。これは後にミランコビッチサイクルとよばれ、第四紀の周期的な気候変動を理解するためには欠かせない概念である。

本論では、ミランコビッチサイクルの理解を助けるための学習用インタラクティブ・ウェブアプリケーションの開発とその教育活用方法について報告する。

## 2. ミランコビッチサイクルと気候変動

### 2.1. 地球軌道要素

現在、太陽の回りの楕円軌道を365.24日かけて公転している地球は、その自転軸の回りを23時間56分4秒かけて回転（自転）しており、その自転軸は公転軸に対して23.44°傾斜している。こうした運動のパラメータは地球軌道要素と呼ばれ、時間とともに変化をしている。現在の地球軌道要素の値はTable 1の通りである。

**Table 1** 地球の軌道要素（国立天文台，2010）

Age (ka)	離心率 ( $e$ )	赤道傾角 (deg)	歳差( $e \cdot \sin \omega$ )	Insolation ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	歳差 ( $\omega$ )
-400	0.0164294	22.6729	0.0125991	436.667	129.9269757
-399	0.0161081	22.5679	0.0156898	432.182	103.0859041
-398	0.0159399	22.497	0.0139299	426.689	119.0847847
-397	0.0156876	22.4638	0.0117711	423.223	131.3797958
-396	0.0155451	22.4221	0.00613581	419.616	156.7520969
以下略	-	-	-	-	-

Age (ka)	離心率 ( $e$ )	赤道傾角 (deg)	歳差( $e \cdot \sin \omega$ )	Insolation ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	歳差 ( $\omega$ )
最大値	0.0494294	24.4715	-	495.487	-
最小値	0.0046269	22.0826	-	396.075	-

(\*天文単位： $\text{AU} = 1.49597870700 \times 10^{11} \text{m}$ )

ミランコビッチサイクルに関連する地球軌道要素は、(1) 公転軌道離心率 (eccentricity)、(2) 地軸の傾き (obliquity)、(3) 歳差 (precession) の3つである (Fig. 1)。これらはそれぞれ特徴的な周期性をもって変動しており、地球上の緯度毎の日射量が変化をすることになる。伊藤・阿部 (2007) では、Berger (1978) の定式化を用いて過去100万年間における北緯65度地点での日平均日射量を計算している (Fig. 2)。

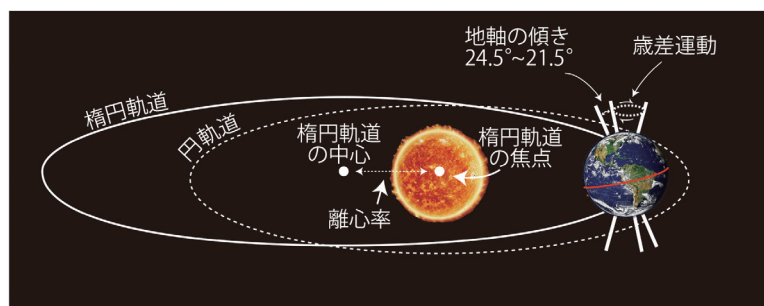


Fig. 1 地球軌道要素（歳差運動、地軸の傾き、離心率）

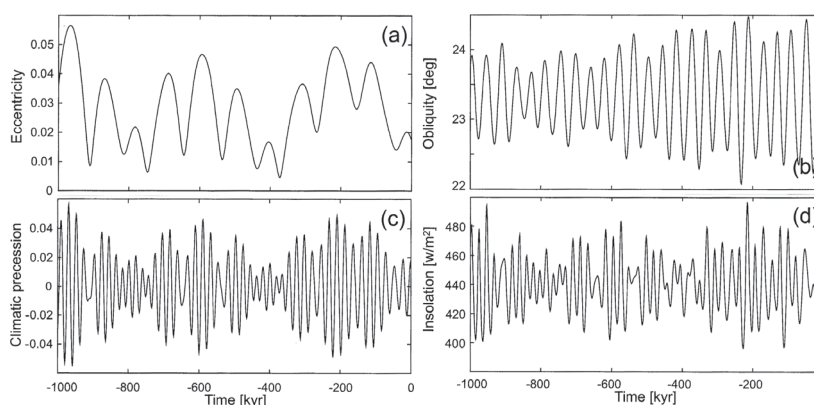


Fig. 2 過去100万年間における地球軌道要素の変化と、それらから計算された北緯65度地点での日平均日射量の変化（伊藤・阿部, 2007）。(a) 離心率、(b) 赤道傾角（度）、(c) 気候的歳差、(d) 計算された日平均日射量 ( $\text{W}/\text{m}^2$ )。

- (1) 公転軌道離心率 (eccentricity)・・・地球の公転軌道は楕円であるが、太陽や月、惑星などの引力の影響を受けて、楕円軌道の離心率が変化をする。離心率が小さく、円軌道に近い時は、太陽と地球の距離はあまり変化をしないが、離心率が大きくなると、近日点と遠日点の距離の差が大きくなり、季節による日照量の変化も大きくなる。Fig. 2 (a) のグラフを見ると、離心率は0から0.06の範囲で周期的に変動しており、フーリエ解析によって得られる特徴的な周期は、約10万年と41万年である。
- (2) 地軸の傾き (obliquity)・・・自転軸と公転軸との間の角度が地軸の傾きで、現在は23.44度である。この値も常に一定ではなく、22.2度～24.5度の範囲で周期的に変動し、その周期は4.1万年である (Fig. 2 (b))。地軸の傾きが大きいほど、高緯度の夏の日照量が大きくなる。
- (3) 歳差運動 (precession)・・・地軸が傾いている方向も周期的に変化をし、公転軸の北方向から見て、時計回りにゆっくりと回転をしている。この運動を歳差運動とよび、周期は、2.3万年と1.9万年である (Fig. 2 (c))。歳差運動の日照量への影響は、

離心率と関連して表れる。歳差運動によって、分点（春分点、秋分点）と至点（夏至、冬至）の位置は、軌道上を移動していくことになる。離心率が大きく楕円軌道の時は、歳差運動による地軸の傾斜方向がどちらを向いているかによって、緯度毎の日射量が変化をする。

ミランコビッチサイクルでは、現在の地球の大陸の配置を考慮し、氷床が発達して、その拡大・縮小が生じやすい北半球における緯度60度付近の日照量が、氷期・間氷期サイクルの原因となると考えられた。伊藤・阿部（2007）では、北緯65度における夏至の日平均日射量（ $W/m^2$ ）を計算している（Fig. 2（d））。離心率が大きく、地軸の傾きが大きく、北半球の夏に近日点に近づく歳差を持つ条件が重なると、この日平均日照量は大きくなる。

## 2.2. 第四紀の気候変動

ミランコビッチが過去60万年間における特定の緯度毎の夏の太陽放射量を求めた時代には、ヨーロッパにおける氷河の記録と対比することしかできなかった。その後、グリーンランドや南極氷床の氷床ボーリング試料、また、海洋底堆積物の分析などから、過去数十万年間における連続的な気候変動の記録が復元されており、ミランコビッチサイクルと第四紀の気候変動の関連性の研究が進んだ（川幡，2011）。

酸素には質量数が異なる3つの同位体、 $^{16}O$ 、 $^{17}O$ 、 $^{18}O$ が存在し、氷床コア中の気泡や海底堆積物に含まれる有孔虫の殻などから得られた $^{16}O$ と $^{18}O$ の割合比（ $\delta^{18}O$ ）は、氷床が発達するほど値が大きくなり、氷床が縮小すると値が小さくなる。海底から掘削されたコアから得られた連続的な $\delta^{18}O$ の変化は、気候変動による氷床の増減の指標となる。第四紀全般に渡って得られたこれらのデータは、時代によって特徴的な周期をもって増減することが分かっており、周期的に繰り返す山と谷に番号が振られ、これを海洋酸素同位体ステージ（Marine Isotope Stage: MIS）とよぶ。MISは、現在に近い方から順番に1番から番号がつけられ、間氷期に奇数番号、氷期に偶数番号が振られている（Fig. 3）。間氷期および氷期の中にも、細かい $\delta^{18}O$ の変動が見られる。これらをMISの番号にアルファベットの小文字（または小数点以下の番号）を使って固有の名前をつけて区別がされている（例えば、5eや5.5など）。現在の後氷期がMIS 1に対応する。最終氷期最盛期（Last Glacial Maximum: LGM）とも呼ばれる約2.1~2.0万年前がMIS 2に対応し、 $\delta^{18}O$ が極大に達して氷床が最も拡大した時期にあたる。最終間氷期にあたる約10万年前のMIS 5は温暖な時期で、その中で12.5万年前のMIS 5eで $\delta^{18}O$ が極小となる。

$\delta^{18}O$ 値は、第四紀更新世の始め（258.8万年前から90万年前頃）には、4.1万年の周期で変動をしているが、90万年前頃から振幅が大きくなり、それ以降は変動の周期が10万年に変化をする。また $\delta^{18}O$ の増減のパターンは対称的ではなく、氷期から間氷期へ移行する時は急激に $\delta^{18}O$ が減少するのに対して、間氷期から氷期への移行はなだらかに $\delta^{18}O$ が増加する。こうした鋸状の $\delta^{18}O$ の変化パターンは、氷床の消滅速度が早く、氷床が成長するのには時間がかかることを意味している。

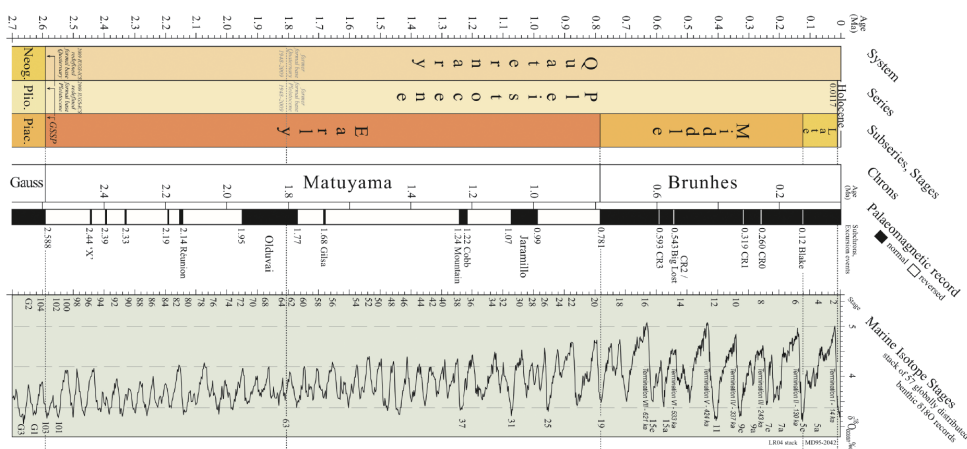


Fig. 3 第四紀の時代区分と古地磁気の逆転、および海洋酸素同位体ステージ  
(Marine Isotope Stages: MIS) (Subcommission on Quaternary Stratigraphy, online: index.php)

### 2.3. 教科書での記載

文部科学省は、高等学校の学習指導要領改訂告示を2018年に行ったが、2022年度までは周知徹底と移行期間とされている。現行の学習指導要領（理科）は2009年から実施されており、この課程における高等学校理科の地学は、2単位の「地学基礎」と4単位の「地学」に分けられる（文部科学省，2009）。教科書需要数から推定された高等学校における「地学基礎」と、「地学」の履修率は、それぞれ約27%、約1%である（川辺，2017）。

主要5社（啓林館、数研出版、実教出版、第一学習社、東京書籍）が発行している地学基礎の教科書を見ると、全ての教科書において第四紀の海水準変動と気候変動の説明はあるが、ミランコビッチサイクルの説明はなされていない。唯一、実教出版（2017）のみが、気候変動と地球温暖化の項目で、氷床コアから得られる過去の二酸化炭素量および気温変化のグラフを扱い、「氷期と間氷期は、過去数十年間に数回くり返されたが、この現象は地球の公転軌道や地軸の傾きの変化により、地球が受け取る太陽放射量の地域分布が変化し、それが気温変化をもたらしたためである。そのため、温度変化が先で、それを追うように二酸化炭素が変動したとされている。」と記述している。数研出版の教科書「地学」には、長期の気候変動として、ミランコビッチ周期が図入りで説明されている（植木，2017）。

## 3. インタラクティブ・ウェブアプリケーションの開発

本研究では、生徒や学生が自分の持っているスマートフォン・タブレット端末で、特別なソフトやプラグインをインストールする必要がなく、いつでもどこでも学習が可能な、インタラクティブ・ウェブアプリケーションを目指して開発を行った。開発には、

HTML5 + CANVAS + JavaScript + WebGLを用い、クロスブラウザ対応が可能なWebGLのラッパーとしてthree.jsライブラリ (three.js online: index.html) を用いた。URLは、<http://www.igeoscience.com/> で公開されている。

### 3.1. 日射量データ

地球軌道要素とそれらから計算される日平均日照量は、伊藤・阿部 (2007) の計算結果を利用した。数値データは、伊藤・阿部 (2007) のグラフ画像を、MacOSXで動作するPlotDigitizer X (online: index.html) を用いてデジタル化した上で利用した (Table 2)。

離心率は、(2つの焦点間の距離) / (楕円の長軸) で定義される。赤道傾角 (地軸の傾き) は公転軸からの角度、歳差は  $e \sin \omega$  (ここで、 $e$ は離心率、 $\omega$ は近日点経度、すなわち春分点からの反時計回りの角度) であるので、これらの値から  $\omega$  を求めて利用した。

Table 2 伊藤・阿部 (2007) のグラフから得た数値データ (一部)

Age	離心率	赤道傾角	歳差( $e \cdot \sin \omega$ )	日平均日照量 ( $W/m^2$ )	歳差 ( $\omega$ ) (度)	MIS
-330	0.0318736	24.0924	-0.0133166	477.897	294.6953939	9e
-318	0.0359102	22.7087	0.00115565	407.434	91.844192	9d
-238	0.0423796	22.4568	-0.0155366	465.024	291.5064294	7e
-229	0.0464851	22.2861	0.0326261	396.075	134.5765404	7d
-194	0.0445614	22.5205	-0.0176197	466.419	293.2910948	7a
-186	0.0412712	22.7405	0.0396235	408.047	163.7554108	6e
-123	0.0433618	23.4512	-0.00108037	479.101	271.4276863	5e
-112	0.0437063	22.364	0.00319746	396.674	94.1953855	5d

### 3.3. 操作方法と画面イメージ

MacOS版Safariブラウザでの表示例を、Fig. 4 に示す。

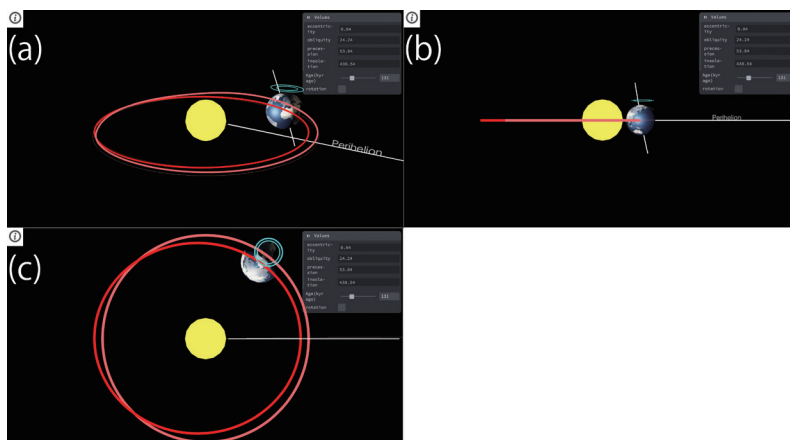


Fig. 4 アプリケーションの実行例 (軌道などの線は見やすさを考慮して誇張してある)



iPhoneやandroidなどのマルチタッチデバイス上では、スワイプ動作でモデルの回転、ピンチ動作で拡大・縮小ができる。右上の操作パネルには、離心率 (eccentricity)、地軸の傾き (obliquity)、歳差 (precession)、および、日平均日射量 (insolation) の値が表示されている。

表示される仮想地球は模擬的に自転運動をしているが、初期状態では公転はしていない。公転楕円軌道 (赤色) および比較のための真円軌道 (薄紅色) が線で表示されている。操作パネル最下部のトグルスイッチ (rotation) をオンにすると、模擬的に公転運動を見ることができる。トグルスイッチをオフにすると公転は止まる。また、地軸の傾きが最大 (22.2度) および最小 (24.5度) の時の位置が、水色の2つの同心円で示されている。近日点の方向が白線で示され、perihelionと表記してある。

操作パネルにはスライダー (age) があり、現在 (0 kyr ago) から40万年前 (400kyr ago) まで変化させることができる。スライダーを動かすと、その時代の地球軌道要素が再現される。その時、北半球の夏至点に仮想地球は配置される。学習者は、時代によって離心率が変化をして公転楕円軌道が変化をしていく様子や、地軸の傾く方向が歳差運動で回転していきながら、夏至の位置が変化していく様子などを、インタラクティブに確認することができる。

## 4. 教育活用例

### 4.1. 縄文海進とミランコビッチサイクル

縄文海進は、完新世初頭 (約1万年前) に始まり中期 (7,000年~5,500年前) に最盛期を迎えた海進である (地学団体研究会、1996)。海水準の最高頂期は約7000~6000年前で、海面は現在より約2~3 m高かったと考えられている。海底堆積物の  $\delta^{18}\text{O}$  は、氷床量の指標であるが、氷床が減少すれば海水量が増加することになり、海水面の上昇、すなわち海進が起きる。縄文海進の時期に  $\delta^{18}\text{O}$  が極大となっている (Fig. 5)。この時期のミランコビッチサイクルによる日照量は、約9000年前に最大となり、この時の離心率は0.02、赤道傾斜角は24.22度、気候歳差は329.36、日平均日射量は468.32 W/m<sup>2</sup>である。この時の地球の位置をFig. 6に示す。この図から、夏至の位置が必ずしも太陽に最も近づく近日点とは一致しないことが分かる。日照量の最大期 (約9000年前) と縄文海進の最盛期 (約7000年前) のずれは、氷床の融解などのフィードバック効果の応答に原因があると考えられる。

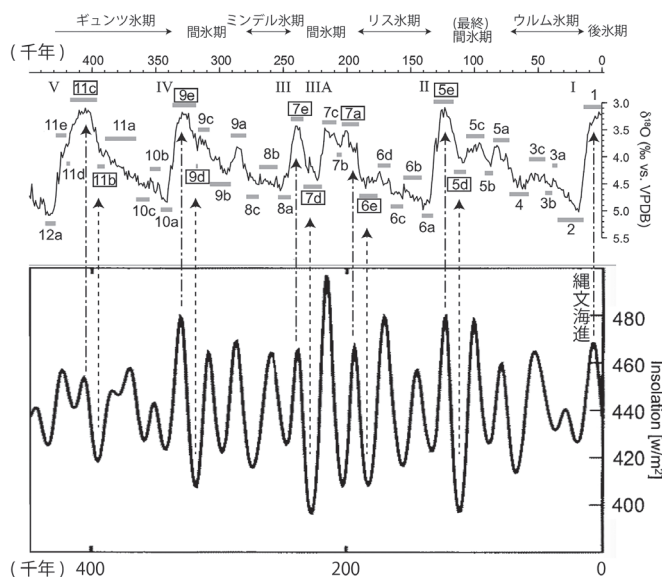


Fig. 5 40万年間の海洋酸素同位体ステージと北緯60度における日平均日照量との対応 (Bruce Railsback et al., 2015と、伊藤・阿部, 2007をもとに作図)

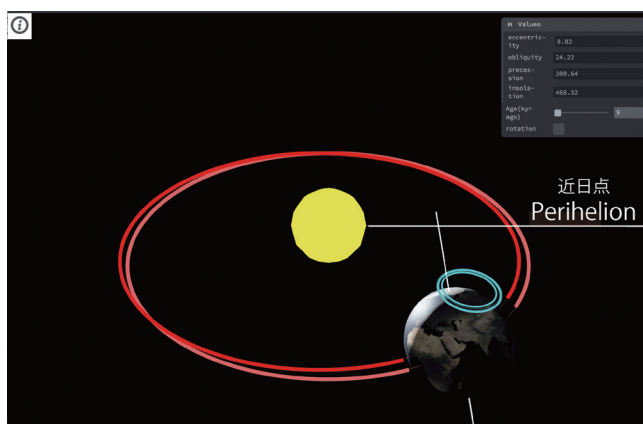


Fig. 6 9000年前の地球の位置

## 4.2. 海洋酸素同位体ステージとの関係

Fig. 5 に過去40万年間の海洋酸素同位体ステージと北緯60度における日平均日照量との対応を示す。秋山 (2009) は、過去50万年間におけるMIS 5 からMIS13に至る5つの温暖期において、各温暖期から氷期への $\delta^{18}\text{O}$ の値が増加する時期が、北緯60度における夏至の日照量の極小値と一致していることから、この極小値が寒冷化への引き金になったことを指摘している (Fig. 5 のMIS 5 d、7 d、9 d、11bに相当)。また、Petit et al. (1999) は、南極ボストーク氷床コアに記録された過去40万年間の記録の中で、氷床量の指標となる氷



に閉じ込められた空気の水素の  $\delta^{18}\text{O}$  値が、北緯65度の6月の半ばの日射量変化と非常に類似していることを指摘している（川幡，2011）。Table 3に、これらのMISに対応する時期の地球軌道要素を示す。

**Table. 3** MISに対応した地球軌道要素

Age	離心率	赤道傾角	歳差( $e \cdot \sin \omega$ )	日平均日照量 ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	歳差( $\omega$ ) (度)	MIS
-330	0.0318736	24.0924	-0.0133166	477.897	294.6953939	9e
-318	0.0359102	22.7087	0.00115565	407.434	91.844192	9d
-238	0.0423796	22.4568	-0.0155366	465.024	291.5064294	7e
-229	0.0464851	22.2861	0.0326261	396.075	134.5765404	7d
-194	0.0445614	22.5205	-0.0176197	466.419	293.2910948	7a
-186	0.0412712	22.7405	0.0396235	408.047	163.7554108	6e
-123	0.0433618	23.4512	-0.00108037	479.101	271.4276863	5e
-112	0.0437063	22.364	0.00319746	396.674	94.1953855	5d

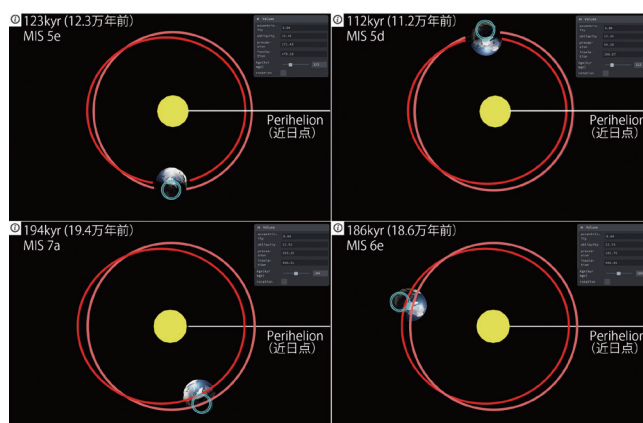


Fig. 7 MIS 5e、5d、および、MIS 7a、6eそれぞれの地球の位置

最終間氷期であるMIS 5の中で、最も  $\delta^{18}\text{O}$  の変化が大きいMIS 5eから5dの変化を見ると、日平均日照量は、479 [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] から397 [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] と、約17%も減少している。この時の地球の位置を確認すると、ともに近日点からは離れた位置にあり (Fig. 7)、日照量への影響には地軸の傾きが大きく影響していることが分かる (5eで最大の23.5度。5dで最小の22.3度)。これはMIS 9eから9dも同様である。一方で、MIS 7eから7dおよびMIS 7aから6eの変化は、地軸の傾きは大きく変化していないが、ともに氷床が増大するタイミングで、夏至点が遠日点に近く、歳差運動の影響が強い。

このようにして学習者は、地球軌道要素の複雑な周期性を、仮想地球を実際に見ながら、地球軌道要素の変化と海底酸素同位体ステージとの関係を考察していくことが可能となる。

## 5. まとめ

地質時代において、第四紀は現在を含む最も新しい時代であり、地球上に人類が進化・拡散した時代である。第四紀に見られる氷期・間氷期サイクルの特徴は、地球軌道要素の周期的な変動に起因しているが、地球に届く日照量だけで気候が変動するのではなく、地球システムの様々なフィードバック効果が重なり合って、周期的な気候変動が生み出されている。産業革命以降、人類は主として化石燃料を燃焼させることで高いエネルギーを利用し、世界の年平均二酸化炭素濃度は400ppmを突破している（WMO 温室効果ガス年報第12号, online : GHG\_Bulletin\_12\_press.pdf）。IPCC第5次報告書によると、人為起源の温室効果ガスの排出とその効果は気候システム全体にわたって検出されており、20世紀半ば以降に観測された温暖化の支配的な原因であった可能性が極めて高いとされている（IPCC気候変動2014総合報告書, online : ar5\_syr\_spmj.pdf）。ただし、人為的な気候変動を正しく理解するためには、自然界の変動の理解することが必要であり、地球軌道の周期的な変動にといった地球システムへの外力が大きく影響しているミランコビッチサイクルを理解することなしに、今後の地球の気候変動を理解することはできない。複雑な地球軌道要素に関わりあうミランコビッチサイクルをより深く理解するために、本論で開発したアプリケーションがその一助となることを願う。

## 引用文献

- Berger, A. L. (1978) Long-term variations of daily insolation and Quaternary climate changes. *Jour. Atmos. Sci.*, 35: 2362-2367.
- Bruce Railsback et al. (2015) An optimized scheme of lettered marine isotope substages for the last 1.0 million years, and the climatostratigraphic nature of isotope stages and substages. *Quaternary Science Reviews* 111: 94-106.
- Head, M. J. et al. (2008) The Quaternary: its character and definition. *Episodes*, 31: 234-238.
- Petit, J. R. et al. (1999) Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 399: 429-436.
- 秋山雅彦 (2009) 古気候から地球温暖化を読む. *地球科学*, 63 : 3-8.
- 伊藤孝士・阿部彩子 (2007) 第四紀の氷期サイクルと日射量変動. *地学雑誌*, 116 : 768-782.
- 植木岳雪 (2017) 高等学校における地学教育と第四紀学. *第四紀研究*, 56 : 195-206.
- 川幡穂高 (2011) 『地球表層環境の進化—先カンブリア時代から近未来まで』. 東京大学出版 : 1-292.
- 川辺文久 (2017) 地学教育への期待. *地質ニュース*, 6 : 25-29.
- 国立天文台 (2010) 理科年表 平成23年 机上版. 丸善 : 1-1064.
- 地学団体研究会 (1996) 『新版地学辞典』. 平凡社 : 1-1443.

実教出版（2017）『地学基礎 新訂版』，実教出版：1-207.

文部科学省（2009）高等学校学習指導要領，東山書房：1-296.

### オンライン文献（全て、2019年11月10日アクセス）

IPCC気候変動2014総合報告書，[http://www.env.go.jp/earth/ipcc/5th/pdf/ar5\\_syr\\_spmj.pdf](http://www.env.go.jp/earth/ipcc/5th/pdf/ar5_syr_spmj.pdf)

PlotDigitizerX，<http://www.surf.nuqe.nagoya-u.ac.jp/%7Enakahara/Software/PlotDigitizerX/index.html>

Subcommision on Quaternary Stratigraphy，<https://quaternary.stratigraphy.org/charts/index.php>

three.js，<http://threejs.org/index.html>

WMO 温室効果ガス年報第12号，[http://www.jma.go.jp/jma/press/1610/24a/GHG\\_Bulletin\\_12\\_press.pdf](http://www.jma.go.jp/jma/press/1610/24a/GHG_Bulletin_12_press.pdf)

