

## ミランコビッチサイクル：復活から 40 周年

1976 年に、ヘイズ、インブリー、シャックルトンの 3 人の地質学者が、ミランコビッチ・サイクルの復活のきっかけとなった衝撃的な論文を米国の科学雑誌サイエンスに発表した。セルビアの地球物理学者ミルティン・ミランコビッチが 1912 年から 1941 年にかけて行った気候変動の天文学的理論の正しさを裏付ける新たな証拠を提示したのである。それからちょうど 40 年が経過したが、ミランコビッチ・サイクルは第四紀の気候変動の研究において今日でもその輝きを失っていない。40 周年を記念して、最新のサイエンスとネイチャーに、ミランコビッチ・サイクルに関する記事が発表された[1], [2]。

ルイ・アガシーが氷河時代を発見して以来、寒冷な氷期と温暖な間氷期の繰り返しがなぜ起こるか、自然科学における大きな問題になっていた。ミランコビッチは、その原因を数学的な理論で明確にしようとした。地球の軌道運動や地軸の傾き角は、木星や土星の引力の影響を受けて、周期的に変化している。地球の軌道の円からずれば、離心率というパラメータで表されるが、その値は惑星の引力によって 10 万年の周期で変化している。現在の地球の地軸の傾き角は 23.4 度であるが、この値も 4.1 万年周期で変化している。こうした変化によって、地球が太陽から受け取る日射量に変化し、それが氷床の発達や縮小をもたらして、気候が変動するというわけである。

ヘイズらは、南極に近いインド洋で掘削された海底堆積物コアの解析を行っていた。ヘイズは、クリマップ計画というプロジェクトを立ち上げ、海底堆積物コアに含まれる有孔虫化石を用いて海水面温度の変動を復元しようとしていた。シャックルトンはその酸素同位体比を分析して、大陸氷床の消長を復元し、インブリーは、そのスペクトル解析を行って、気候変動の周期性を解析したのである。気候変動を示す時間変化曲線をスペクトル解析した結果、4.1 万年、2.3 万年、1.9 万年のところにピーク、すなわち、その周期で変化する変動の成分があることが見つかった。これらの周期は、ミランコビッチが天文学的に計算した軌道要素や地軸の傾き角の変動にみられる周期性と一致したのである。

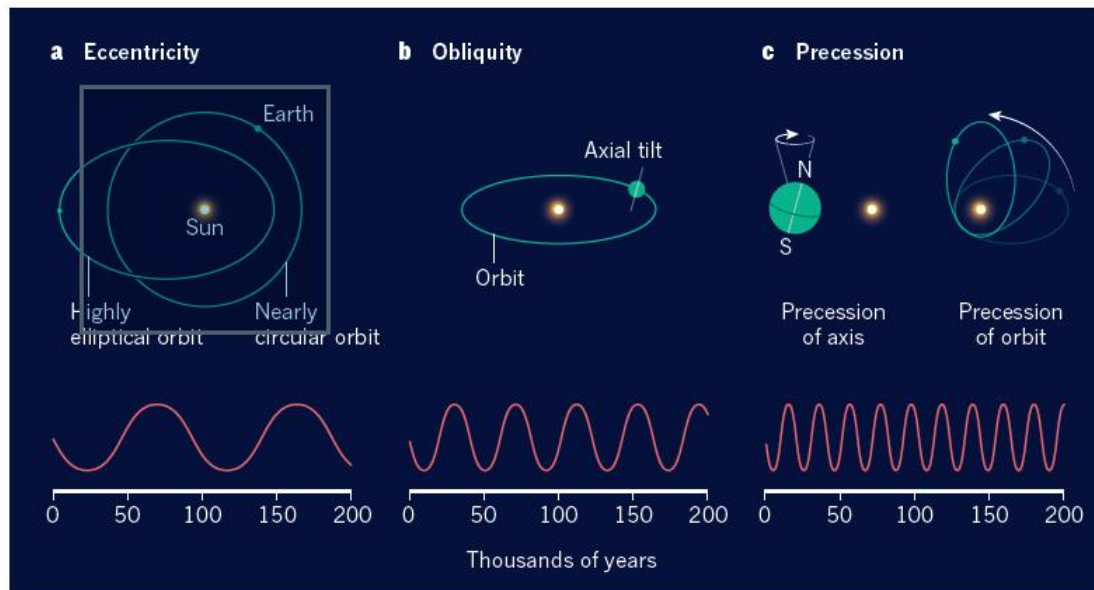


図1. ミランコビッチ・サイクル[2]

この研究論文の発表がきっかけとなって、多くの研究課題が生まれた。地球の軌道要素の変動によって、太陽からの日射量がどのように変化し、ひいては氷期と間氷期の繰り返しのような大規模な気候変動に影響を与えるのか。ミランコビッチは、北極線に近い北緯65度の地点における夏季（6-8月）の日射量が気候変化を促すと考え、そこでの日射量の変動を過去60万年間にわたって計算し、第四紀の氷期-間氷期サイクルと比較した。ミランコビッチはこのように考えたが、研究者によっては、冬季の日射量が気候に影響するとなったり、夏季のもっと短い期間における日射量の影響が大きいという見解もあった。また、軌道要素の変動成分ごとに、緯度による日射量の変動への影響を調べるべきだという見解もあらわれた。

ミランコビッチは、北緯65度における夏季の日射量が気候に影響すると考えた。この緯度では、冬季に積もった雪が夏季に融けずに残っていれば、万年雪となり、雪氷となって次第に地表を広く覆うようになる。気候の寒冷化は、夏季に融雪が起こらないことが鍵であるというわけであるが、研究者によっては、冬季に降る雪の量が氷床の拡大を促すという意見もあった。実際の地球では、全球的に気候変化が起こっているので、気候の再編成を引き起こす気候システムのしくみを解明することも重要な課題となる。また、実際の地球の氷期-間氷期サイクルでは、10万年周期の変化が顕著であるが、ミランコビッチ・サイクルでは、10万年周期の離心率の変動成分の振幅は小さい。気候システムにおける外力（フォーシング）とその非線形的応答特性の解明も重要な課題である。

一方、地質学者は、ミランコビッチ・サイクルによる環境変化を海底堆積物、鍾乳石などに記録された変動を解析している。ミランコビッチ・サイクルと環境変動を対比するためには、堆積物に精度の高い年代目盛を入れ、原因と結果すなわち因果関係を明らかにする必要がある。

このように、ミランコビッチ・サイクルは、40 年前に発表されたヘイズらの研究で復活し、その後の気候科学の研究における中心的な役割を果たしてきた。こうした状況は、今後も続くものと期待される。

[1] Hodell, D. A. (2016) The smoking gun of the ice ages. *Science*, 354, 1235-1236.

[2] Maslin, M. (2016) Forty years of linking orbits to ice ages. *Nature*, 540, 208-210.