失われた"レーマーの光の遅れの方程式"

齋　藤　嘉　夫
(京都工芸繊維大学工芸学部)

レーマーは，光速度が無限であると考えられていた1676年，それが有限であることを，木星の第1衛星イオの食の周期の観測から証明した[1,2]．このことはよく知られているが，発見された「光の遅れの方程式」は失われ，その内容も誤って伝わっている．その責任は執筆者の怠慢であると厳しく指摘されている[3]．ここでは，レーマーの真実を紐解き，何が起こったのかをつまびらかにし，レーマーの研究に対する新たな謎を提示したい．

図1はロッシの光学で，レーマーの証明の説明に用いられたのとほぼ同じ図である[4]．地球がE_1の位置にある場合を，すなわち，木星-地球-太陽がこの順序で一直線になる状態を衝とよぶ．衝は，その惑星がもっとも地球に近づくときで，先ごろ火星大接近があったが，それもひとつの衝であった．その衝で，木星の第1衛星イオの食が観察された．半年後，木星-太陽-地球の順序に並ぶ位置E_2で，同じ食が観察された．しかし，その食は予測された時間より22分遅れた．遅れの原因は光速度が有限のためであって，地球の軌道の直径を進むのに光は22分を要すると説明される．したがって，光速度は地球の軌道の直径を22分で割れば得られる．なんとも，スマートな結果である．しかし，これが間違った説明の核心である．

講義ノート作成時に，この説明には間違いがあると直感した[5]．レーマーが時間基準にした衝の食の観察は間違いない．しかし，木星-太陽-地球が一直線に配置する場合を合とよぶが，合，もしくはその近辺で，木星を観測することはできない．ぎらぎら輝く太陽の脇を通して，その向こうにある惑星，すなわち，太陽の光を反射して輝く星を見ることはできない．横で，パソコンのマウスを操作していた家内にそれを説明して「おかしいと思わない？」と声を掛けると，「論文にすれば」と軽く返答が返ってきた．背中を押される形で，調査を開始した．

E-mail: vipsaito@kit.ac.jp

座右の「新稿物理学概説」でも間違った説明であった[6]．これらの説明の観察の期間は，半年もしくはそれに20日を加えた日数がかかる．その期間が3か月との記述も見つかった[7]．観測が3か月で，軌道の直径に22分とくれば，観測された遅れの時間は10分ではなく11分ではなかったのかという疑問もわく．それに加え，多くの物理の教科書や光学の参考書には，レーマーの記述がないことにも気が付いた．著名な辞書にもレーマーの見出し語がないものも見つかった．およそ，光の科学史を語るとき，レーマーを等閑にはできないであろうと思うが，なぜ，そのようなことになったのであろうか．レーマーの評価が低すぎる．何かがおかしい．途中で止めるわけにはいかなくなってきた．詳細は論文に譲ることとして[8,9]，レーマーの光速度有限の証明の経過はおおよそ次のようであった．

当時，イオの食の周期が乱れること，すなわち，不等が知られていた．さまざまな原因が考えられたが，確実なものはなかった．レーマーはその周期の乱れが系統的であることに気が付いた．地球が木星に接近している場合には，食の周期が徐々に短くなる．一方，遠のく場合には，その周期が次第に長くなる．レーマーはこれらの周期の差の原因を光速度が有限であれば説明できると考えた．

1676年9月，パリ科学ロイヤルアカデミーで，11月9日の食が予定より10分遅れることをレーマーが予言した．問題の食がパリ天文台で11月9日5時35分45秒に観測され，これにより，レーマーが示したとされる「光の遅れの方程式」の必要性が支持された．観測された遅れの時間は10分であって，22分ではない．予言が確認されたことを受け，レーマーは地球軌道を進むのに光は22分を要すると同じアカデミーで述べた[10]．このことは，翌月の12月に*Journal des Scavans*に掲載され[1]，そのわずか半年後に*Philosophical Transactions of the Royal Society*にその翻訳が発表された[2]．当時の情報の伝播速度を考えると，レーマーの発見がいかにセンセーショナルであったか

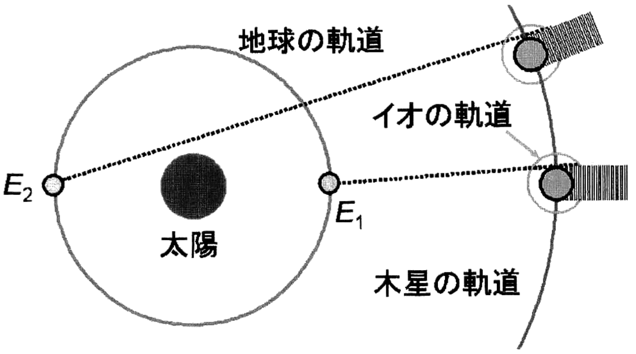

図1　ロッシのレーマーの観測の説明図．

が，この時間の経過から伝わってくる．

論文では「その遅れは地球軌道の直径に対して 22 に比例することを発見した」と述べられている．しかし，この方程式は現在では不明である．レーマーが先に語った 22 分と比例定数 22 は同じ数である．この両者が関係していることは想像に難くないが，これらから直ちに幻の方程式が出せるわけではない．

レーマーの時代の数値を用い，この幻の方程式を求めることとした．イオの公転周期はレーマーによると 42.5 時間であった．レーマーの遺産は火事で焼失したが，その一部が 1913 年に発見され，レーマー自筆のイオの食の観測記録が含まれていたことは幸運であった[10]．レーマーが予言した食は地球が木星から遠のく場合であったが，問題の年には，遠のく場合の食の記録は 4 回あり，そのうちの 1 回は問題の食で，残り 3 回は 8 月の食である．8 月の最初の食は問題の衝の食の可能性が高く，レーマーの予言した食とともに時間の基準として計算に用いた．計算の結果，当然のことながら，時間基準の食は秒まで一致したが，残りの 2 つの食も 5 分以内で一致した．計算で得られたイオの食の公転時間は 152944.44 秒，約 42.48 時間であり，レーマーの約 42.5 時間と一致する．

衝での木星-地球間の距離と，問題の食が観測されたときのそれらの距離との差は 1.384×10^{11} m で，これより得られる光速度は 2.306×10^{8} m/s である．地球軌道を 22 分で縦断する場合に得られる光速度は，2.121×10^{8} m/s で上の値と同程度である．これらは，現在知られている光速度の 3 割程度小さい値である．

予言の食が 10 分遅れで観測されたときの木星-太陽-地球の角度は 84.6° であった．これらと地球軌道の直径に 180° を対応させせると，21.3 分が出てくる．これは問題の 22 分に対して，3%の精度で一致する．数字 22 が出てきたのはここからと推察される．これより，幻の光の遅れの方程式を $\Delta t=22\times x^{\circ}/180^{\circ}$[分]と書ける[8,9]．$\Delta t$ は光の遅れを，x° は惑星-太陽-地球でなす角を表す．$x^{\circ}=180^{\circ}$ のとき，すなわち地球の軌道に対応する距離で，光は 22 分遅れることとなる．この式は，イオの場合だけではなく，すべての食に適応される．すなわち，レーマーが述べたように，光の遅れ（retardment：古語）を表す式となっている．

レーマーの結果が間違って伝わったシナリオは次のように考えられる．レーマーがイオの食の観測から光速度の有限性を証明した．光は地球軌道の直径を横切るのに 22 分かかる．この 2 つが結合して，「レーマーが，イオの食が衝でより合で 22 分遅れることを観測し，光速度の有限性を証明した」というように変わった．地球軌道の直径をこの 22 分で割れば光速度が得られる．いつごろからか，このスマートな説明の魅力に誘惑されてしまってそれが伝わったと考えられる．間違いはエスカレートし，多くの書籍には，遅れの時間も 8 分から 22 分までさまざまであり，レーマーが示さなかった光速度が，レーマーが求めたとして，こちらもさまざまな値が紹介されている．

しかし，新たな疑問が出てきた．不正確な光速度しか得られないのに，10 分という正確な時間がどこから出てきたのかという疑問である．不正確の原因は当時知られていた天文単位距離が不正確であったからという説明があるが，それは数パーセントの精度で知られていたから，これも全くの間違いである．レーマー自筆の記録から，系統的な周期の変動は証明されたが[10]，どのように計算しても 10 分は得られない．レーマーの発見が同僚たちに受け入られなかったのは，このあたりが原因なのかと考えさせられる．いずれにしてもこの謎は歴史の彼方に消え去さっていくのであろう．

文　　献

1) M. Roemer: Journal des Scavans, du Lundy 7 Decembre, M. DC.LXXVI (1676) 233-236.
2) O. Roemer: Philos. Trans. Royal Soc., VXII, June 25 (1677) 893-894.
3) A. Wrôblewski: Am. J. Phys., **53** (1985) 620-631.
4) B. Rossi: *Optics* (Addison-Wesley Publishing, Reading, Massachusetts, 1957) pp. 246-247.
5) 大槻義彦：改訂新版物理学 I（学術図書出版，1990）p. 253.
6) 多田政忠編：新稿物理学概説 上巻（学術図書出版，1982）pp. 272-273.
7) R. A. Serway: *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*, 4th ed. Vol. 2 (Saunders College Publishing, Philadelphia, 1995) pp. 1025-1026.
8) 齋藤嘉夫：大学の物理教育，2003-2（2003）9-13.
9) Y. Saito: Association of Asia Pacific Physical Societies Bulletin, **14**, No. 1 (2004).
10) I. B. Cohen: *Roemer and the First Determination of the Velocity of Light* (Burndy Library, New York, 1942).