

世紀の難問「経度問題」とのアナロジーから地震予知の将来について考える

深畑幸俊

要 旨

地震予知は、19世紀末の地震学の成立以来その実現が模索されてきたが、いまだ展望は開けない。解決にはおそらく数百年の年月を要する世紀の難問と呼ぶことができる。経度問題は、大航海時代の幕開け以降数百年にわたってヨーロッパ人を悩ませた世紀の難問であり、人間の生命・財産と直結するなど地震予知の問題と共通する点を持つ。本稿では、経度問題とはどのようなもので、如何にして解決に至ったかを紹介することにより、今後の地震予知への取り組みを考える際の一助としたい。

キーワード：経度問題，地震予知，世紀の難問，グリニッジ

1. はじめに

地震予知は、地震学の黎明期より研究者の念頭にある問題だった。地震学会の設立に主導的役割を果たしたジョン・ミルンや、東京大学に設けられた世界最初の地震学講座教授（大森房吉の前任者）である関谷清景もその頃既に地震予知に関する論文等を残している（泊，2008）。1960年代には地震予知研究計画がスタートし、1995年兵庫県南部地震（阪神大震災）後には地震予知のための新たな観測研究計画等に衣替えをした。この100年以上の間に、地震学は間違いなく大いに進歩・発展したと言える。しかし、地震予知は未だに実現への展望が見出せない大問題として残っている。

学問的課題として認識されて以降、解決に非常に長い時間を要した問題としては、高次方程式の解の公式やフェルマーの定理の証明、永久機関の発明などが知られている。これらは否定的に証明されたものも含め、いずれもその解決に数百年以上を要した「世紀の難問」と呼ぶことができる。地震予知は、現代における世紀の難問であり、フェルマーの定理などと肩を並べる超難問として認識する必要がある。そのような超難問へのアプローチを考える際に、過去の歴史に学ぶことは意味があることだろう。

地震予知の特徴として、人間の生命・財産に直結する社会的な問題でもあるという点がある。そこで、本稿では、地震予知と同じく人間の生命・財産と直結する世紀の難問であった経度問題について紹介し、

地震予知を考える上での一助としたい。なお、本稿で述べる経度問題についての私の知識は、その多くないしはほとんどをデーヴァ・ソベル（1997）「経度への挑戦 - 一秒にかけた四百年」（原題：Longitude）に依っていることをあらかじめお断りしておきたい。

2. 経度問題

2.1 経度と緯度

経度問題とは、当該地点の経度をどのようにして知るかという問題である。現代では、小型のGPS受信機が一台あれば誰でも簡単に自分がいる場所の経度を知ることができるが、大航海時代が始まって以降数百年にわたって、経度問題は船乗りのみならず、為政者や科学者、技術者を悩ます世紀の難問だった。

地球儀や世界地図には緯線と経線が描かれる。このうち緯線の基準は昔から赤道と決まっている。古代のプトレマイオスの地図でも緯度0度は赤道となっていた。緯度の基準が赤道に定まっているのは、単純に天文学的な要請によるものである。その一方、経度には絶対的な基準が存在しない。もちろん現在では、ほとんど全ての地図で英国ロンドン郊外のグリニッジ天文台を通るように経度0度の線が引かれている。しかし、経度の基準が現在の位置に国際的に定まったのは1884年のことに過ぎない。それまでは、アゾレス諸島やローマ、パリ、エルサレムなどを転々としたという。

ここに経度と緯度との絶対的な違いがある。つま

り、緯度は基準があらかじめ定まっているので、その地点で観測を行えば知ることができる。例えば、北極星の仰角を測ったりするように。一方、経度はある人為的に定めた基準に対する相対的な位置関係を把握することにより初めて決まる量である。島影一つない大洋で基準となる地点からの経度差を知るのは、大航海時代が到来した15 - 17世紀の科学・技術・知識では不可能なことだった。

船上で経度が分からなくなるといのは、自分の現在位置が分からなくなることであり、それがために、船が暗礁に乗り上げてしまったり目的の島に辿り着けなかったりという遭難が多発した。また、経度が分からなくても安全に航行できる大洋航路というのは限られてくるので、そこは海賊の狙うところとなった。かくして、海上で正確な経度を知る方法というのはヨーロッパ各国において重大な社会問題となり懸賞金までかけられる事態となった。例えば英国では、1707年シリー諸島で軍艦4隻が座礁、死者2000名の大惨事が発生し、これをきっかけに、経度測定法を発見した者に莫大な賞金を与えるとした経度法が1714年制定された。

経度問題は、日本ではなじみが薄いがヨーロッパでは未だにその残滓を見ることができる。例えば、Photo 1は、英国スコットランド・エディンバラ城での1コマである。午後1時きっかりに海に向けて号砲を鳴らす。これは今では観光客向けのセレモニーに過ぎないが、元々は天文台が観測して求めた正確な時刻を港に停泊中の船舶に伝えるという実用的な目的から始まったものである。Photo 2は経度の基準となっているグリニッジ天文台だが、そこではオレンジ色の球がやはり午後1時ちょうどに風見マストの上からするすると落とされる。後述するように、経度問題では正確な時間や時計が鍵を握る。天文台では最も精度良く観測のできる正午に時計合わせをして、その1時間後に正確な時刻を伝えていたのである。

2.2 天の時計とハリソンの時計

経度問題は、問題としては簡単に理解できる一方、長い間解かれなかったため、いくつもの怪しげな解決法が提案された。例えば、1 kmおきに船を停泊させておき定時になるとリレー式に大砲を鳴らして周囲に正確な時刻を知らせる、あるいは共感の粉と呼ばれるある種魔術的なものを用いる方法などである。特に経度法制定以降は、賞金に目がくらんだ連中から、様々なアイデアが持ち込まれたらしい。このように専門家から見て怪しげな解決法が多数提案されるのは、「世紀の難問」の重要な特徴と考えられる（深畑，2012）。この点は、現代の地震予知も全く



Photo 1 Gun fire exactly at 1 pm at the Edinburgh castle. Now, the gun fire is just a ceremony for tourists. But it had originally a practical purpose: to convey accurate time to people on the ships at the Edinburgh port.



Photo 2 Greenwich Observatory. The orange ball falls down from the wind indicator exactly at 1 pm.

同様である。

経度測定の解決法の本命と考えられていたのは、天文学的方法によるものである。天体の運行を極めて精密に予測することができれば、経度を割り出せる。例えば、ロンドンの午前零時における天体の状況が完璧に予測できれば、その状況が現在いる場所の時刻（現地時刻）でいつ起きたかを観測することにより経度が分かる。

この分野で最初に顕著な業績を挙げたのは、ガリレオ・ガリレイである。彼は、1610年ガリレオ衛星と呼ばれる木星の衛星を発見してひたすら観測し、年1000回も衛星の食が起こることを見出した。この衛星の食の起こるタイミングを天の時計として利用することにより、経度が分かるという寸法である。経度測定に道を拓いたとしてガリレオはオランダ政府から金鎖を送られている。このガリレオの提案した方法は、海上での経度測定には利用できなかった

が（船は揺れるため、衛星を望遠鏡の視野に収め続けることができなかった）、陸上の経度を正しく求める上で非常に役立ち、地図作成の分野で大きな成果を収めた。当時の地図は、経度が正確に求められなかったため、それなりにゆがんでいたのである。

船上からも昼夜を問わず観測できる天の時計として月は早くから注目されていた。月の出は毎日50分ほどずつ遅くなるので、経度差1度に対しては約8秒、角距離にしておよそ2分のずれとなる。しかし、月の軌道は18.6年周期で変化するなど、月の運行の正確な予測は難題であり、フランスは1667年パリに、イギリスは1675年グリニッジにそれぞれ天文台を建設し、国家事業として天体観測を推進した。グリニッジの二代目の天文台長（1720~1742）が、彗星で有名なエドモンド・ハレーである。こうして、経度測定のための天文学的データの蓄積が、より組織的かつ継続的に進むようになった。当時、天文学は極めて実用的な意義を有する学問だったのである。

この間、4分儀や6分儀などに代表される観測機器の進歩も見逃してはならない。16世紀末まで天体の高度測定にはもっぱら直角器という道具が使われ、太陽の観測をする際には、視界にまともに太陽が入らざるを得なかった。そのために片眼を失明する船乗りも多かったという。海賊というと片目に眼帯をしているのが定番だが、海賊達にとっても天体観測は必須だったはずなので、おそらくはそういった事情を反映していると推測される。しかし、6分儀等の発明により、目を痛めることもなく、簡便に天体間の角度が測れるようになった。

17世紀後半にはアイザック・ニュートンが万有引力の法則を確立する。太陽-地球-月系の運動は3体問題のため解くのは決して容易でないが、レオンハルト・オイラーが高い精度を持つ簡潔な公式として表すことに成功し、彼の協力を得た地図制作者トビアス・マイヤーが1750年代に角距離1.5分以内の精度を持つ月の運行表を作成するに至った。マイヤー、オイラー共にイギリスの経度評議会から賞金を一部贈られている。マイヤーの成果を受け、1766年に「航海暦と天体暦」第一版が当時のグリニッジ天文台長ネビル・マスケリンの監修で出版され、月の運行予測は基本的に決着した。その後、月の天体暦は1907年まで、航海暦は現在でも出版が続いているという。「航海暦」は当然のことながらグリニッジを経度の基準としており、世界中の船乗りがその「航海暦」を用いることにより、グリニッジを通る経線が本初子午線として採用されることとなった。

一方、天の時計ではなく本物の時計を用いて経度を知ることも可能である。例えば、ロンドン時刻に合わせた正確な時計があれば、南中高度などから知

られる現地の時刻と付き合わせるにより、その場所の経度が分かる。正確な時計があれば経度問題が解決できることは初期の頃より知られていたが、これも実用化が難題だった。何しろ、数ヶ月に及ぶ航海の後に、時計が2分ずれたら経度1/2度の誤差（経度法の一等賞に必要な精度）になってしまうのである。当時の時計は一日に何分もずれるのが普通であり、船上という極めて悪い条件下で2桁以上精度を上げるという途方もない技術革新が要求された。

この問題にも先鞭をつけたのはガリレオである。彼は振り子の等時性の原理を発見し、それを時計に応用することを考えた。しかし、実際に時計を製作するには、動力や脱進機などいくつかの機構が要る。振り時計を実現したのはクリスティアン・ホイヘンスで、1658年に論文「時計」を著し、海上での経度測定に適していると主張した。彼の作った時計は、試験航海で有用性を証明したが、天候が良い場合に限られた。振り時計の宿命として、船が激しく揺れると全くタイミングが取れなくなってしまうのである。振り子の欠点を解決するために、ロバート・フックとホイヘンスはそれぞれひげぜんまいを考案したが、結局実用的な海上時計の完成には至らなかった。18世紀初め、経度法の制定にあたり意見を求められたニュートンは以下のように答えている。「正確な時計を使うという方法がある。しかし船の揺れ、暑さ寒さや湿度の変化、経度が異なる場所での重力差といった理由から、そのような時計はいままで作られたことがないし、これからも出現する可能性は低い」。

そのように否定的見通しが支配的であった中、実用的な海上時計を世界で初めて完成させたのが、英国ヨークシャー出身の大工、ジョン・ハリソンである。ハリソンがH-1と呼ばれる最初の精巧な海上時計を作ったのが1735年、その後改良を加え彼が決定版として世に送り出したH-4が作られたのが1759年である。彼は、様々な革新的な工夫をすることにより、当時では想像も付かない精巧な時計を作り上げた。例えば、種類の違う金属片を組み合わせることで温度変化の影響を少なくした。自然に油がしみ出る特殊な木を用いることにより、注油を不要にした。これにより、温度変化によって潤滑油の粘度が変わり時計のペースに影響を与えることを防いだ。摩擦を少なくするために、ケージに入れたボールベアリングを初めて実用化したのもハリソンである。その後、ハリソンの時計がコピー、改良、簡素化され、時計製作はイギリスの重要産業に急成長した。19世紀前半には大量の海上時計が出回るようになり、経度問題は完全に解決された。

3. 地震予知への教訓

経度問題は、長年にわたる天文学的データの蓄積、ニュートンやオイラー、ガリレオやホイヘンスらによる天体運行および振子時計の理論の進歩、天体観測や時計製作の技術的革新によって解決された。世紀の難問の解決には、このように幅広い領域の総合的な進歩が必要となるのが普通である。

経度問題は一気に解決された訳ではなく、陸上の経度がガリレオ衛星の食の予測値から正確に求められるようになるなど、部分的成功と呼べる成果がまずあった。地震予知を進める上でもたいへん心強いことである。極めて限定的な条件下ではあるが、釜石沖の繰り返し地震 (Matsuzawa, et al., 2002) や伊豆東方沖の群発地震 (Morita, et al., 2006) のように、現在既に地震予知実現の萌芽を見ることができる。

また、経度問題に促されて、世界初の光速の測定や地球自転速度の増加の発見など第一級の科学的成果が生み出された。光速の測定は、木星の食の予測値のずれから、地球自転速度の増加は古文書の調査により明らかになったものである。地磁気永年変化の豊富なデータが現代に残されているのも、ハレーらが経度問題の解決を目指して精力的に測定を行ってくれたことに起因している。高次方程式の解の公式のように否定的に解決される場合も含め、世紀の難問への取り組みは、このように実りある科学的成果をもたらしてくれる。

経度問題でもそうであったように、地震予知でも技術的進展は重要な役割を果たすであろう。それは、現在の地震学における、GPSやSARといった宇宙測地技術、あるいは大規模数値計算の重要性を見れば明らかである。これらの革新的技術は一朝一夕にもたらされたものではない。米ソによって開発された宇宙技術や西側諸国によるエレクトロニクス技術の長足の進歩が波及してきたものである。現在発展著しい科学技術分野としては、生命科学、ナノテクノロジー、ロボット、人工知能といったものが挙げられる。そういった科学技術の革新を地震学の分野に積極的に取り入れていく取り組みが今後重要となるだろう。例えば私は、極微少の断層モニタリングロ

ボットなどというものを夢想する。1日に10 m動くことができれば、3年で10 kmの深さに到達できる。もちろん、動力や通信を初めとして課題は多い。しかし、わずか半世紀前にはGPSやラップトップ・コンピュータは夢物語だった。逆に、このようにSFじみたことが実現しないならば、地震予知実現は依然として遠いだろう。

経度問題の解決には歴史に名を残す一流の科学者達が参加し、国家も観測所の設置や奨励金の支給などで後押しをした。各国の利害や駆け引きにより決まることの多かった本初子午線が、現在グリニッジを通るように引かれていることは、経度問題の解決に中心的役割を果たしたグリニッジ天文台及び英国への深い敬意の表れと読める。地震予知をすぐに実現することはできないが、観測データを着実に積み上げ、理論の進歩を図るとともに、技術的進展も積極的に行っていくことが現代の地震学者の責務であり、比類なき国際貢献でもある。

参考文献

- デーヴァ・ソベル (藤井留美訳) (1997) : 経度への挑戦 - 一秒にかけた四百年, 翔泳社, 205pp.
- 泊次郎 (2008) : 明治初期の地震予知研究 - ミルンと関谷清景, 日本地震学会2008年度秋季大会講演要旨, p. 44.
- 深畑幸俊 (2012) : 世紀の難問「地震予知」に挑む, 地震学の今を問う, pp. 76-80.
- Matsuzawa, T., Igarashi, T. and Hasegawa, A. (2002): Characteristic small-earthquake sequence off Sanriku, northeastern Honshu, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 29, doi:10.1029/2001GL014632.
- Morita, Y., Nakao, S. and Hayashi, Y. (2006): A quantitative approach to the dike intrusion process inferred from a joint analysis of geodetic and seismological data for the 1998 earthquake swarm off the east coast of Izu Peninsula, central Japan, *J. Geophys. Res.*, Vol. 111, doi:10.1029/2005JB003860.

(論文受理日: 2012年6月8日)

Future of Earthquake Prediction Analogously Considered from the Longitudinal Problem

Yukitoshi FUKAHATA

Synopsis

Seismologists has challenged the problem of earthquake prediction since the late nineteenth century, but this problem is remained to be unsolved yet. The longitudinal problem, which had annoyed European people more than a few hundred years since the beginning of the Exploration Age, has some similarities with the earthquake prediction problem. Here, I introduce the longitudinal problem: what was the problem, how people and nations made efforts, and how the problem was finally solved? By studying the longitudinal problem, we can learn useful lessons for earthquake prediction.

Keywords: longitudinal problem, earthquake prediction, problems for centuries, Greenwich