

## はじめに

地球物理同窓会で話をするという貴重な機会を頂き、ありがとうございます。

これは私が大好きな斑鳩の法隆寺の写真です。写真とは直接関係ありませんが、現在は、自然科学も地球科学も混迷を極めている時代だと認識しています。地球科学以外の分野における一つの例として、ヒトゲノム解析の問題があるといえるでしょう。研究が始まる前は、ヒトゲノムの構造が分かると人間の生命の理解も大幅に進むという楽観的な空気が支配的でしたが、結果は、必ずしもそうはなりません。地球科学では、地震予知研究と社会の関係が混迷の典型です。それ以外の例を取って挙げると、現在は数値 **simulation** が全盛です。それは **thinking tool** としては大変役に立ち、現在は地震理解を深めていますが、もう何年か経つとその限界も改めて自覚するようになってくるのではないかという気がしています。問題は、「その先に何があるのか？」でしょう。ここでは、私の考えを述べさせていただきます。

## LOD

地球科学はここまで進歩したのに、単純で基本的だけれど理解されていないことが一杯残っているように見えます。例えば、1日の長さであるLOD (Length Of Day) が数ミリ秒 ( $10^{-3}$ 秒) 程度の振幅で変動しています。図1は、1976年から2009年までのLOD、閏秒、巨大地震の経年変化の比較です。見かけ上の相関はまったく見られません。

LOD変動のうち、年以下の短周期の変動は気象変動に起因するということが分かっていますが、年より長周期の変動の原因はさっぱり分っていません。地球の自転速度は2億年に1時間くらいの割合で永年的に長くなってきましたが、それは20年間に換算すると0.1ミリ秒のオーダーで、LODの変動より1桁小さく、億年の時間スケールの永年変化が最近数10年のLOD変動の原因ではありません。計算上では、スマトラ地震によるLOD変動はマイクロ秒 ( $10^{-6}$ 秒) のオーダーしかなく、スマトラ地震はLODにはほとんど影響を与えませんでした。また、全体的なトレンドとしては、最近30年間、億年の時間スケールの変動とは逆に、地球の自転速度は早くなっています。そのため、1999年に閏秒が入ってから7年間、閏秒が入りませんでした。

10年前、まだ富山大学にいた頃、LOD変動問題解決の一つの突破口として、超伝導重力計連続記録や伸縮計記録などから、CMB (Core-Mantle Boundary) 近傍の巨大なサイレント地震の可能性を追求する試みを行いました。2000年のある日、巨大地震は起こっていないのに、コアモードのピークがスペクトルの中に数多く見いだされ、統計的検定でも有意で、巨大CMBサイレント地震の存在を確信したのですが、2002年の京都大学への引っ越しに取り紛れ、論文も書き損ね、そのままになってしまいました。

LOD変動の原因はコア対流の変動とか海流の変動と考えている人もいます。しかし、地球の自転エネルギーが $10^{30}$ ジュール/年、1ミリ秒の揺らぎは $10^{21}$ ジュールです。一方、海流変動のエネルギーが $10^{18-20}$ ジュール/年、コアダイナモを維持するエネルギーが $10^{19}$ ジュール/年なので、海流の変動やコア対流の変動のエネルギーの1部を使ってLOD

の～1ミリ秒の揺らぎを作り出すというのは本質的に無理があるでしょう。

LODの長周期変動は未解決の課題の1つです。

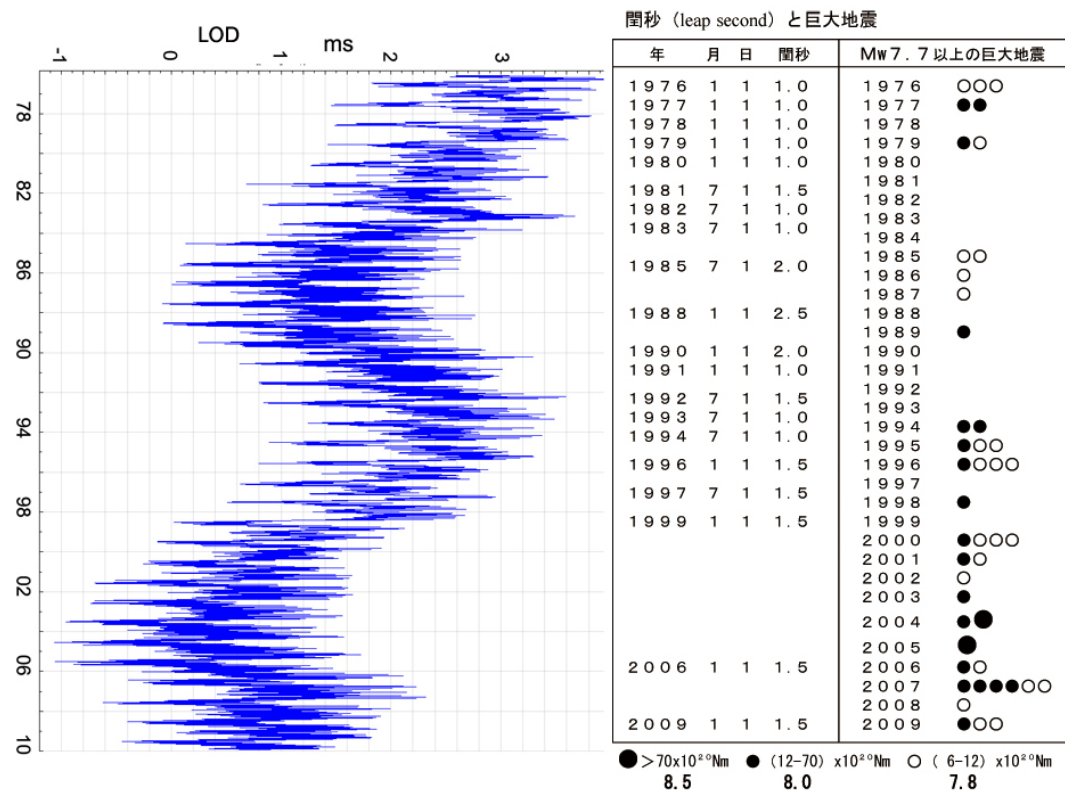


図1 左から LOD の経年変化 (IERS のHPによる)、閏秒 (情報通信研究機構のHPによる)、M7.8以上の巨大地震の発生回数 (Lamont -Doherty Earth Observatory の Global CMT Web Page による)。

### 構造とダイナミクス 異方性の問題

安芸敬一先生は「地球ダイナミクスは、平均的な構造からのズレとして現れる」と言っておられました。不均質構造や異方性構造は、地球ダイナミクスにとって本質的に重要です。私は、30年以上前から、地震波速度異方性の重要性を強調してきましたのですが、未だに異方性は看過されているように見えます。

1つの興味深い研究を紹介します。図2(上)は、isotropyを仮定したinversionによるS波速度の不均質の断面図です。「中央海嶺近辺では地震波速度が小さく、海嶺から離れてハワイや日本に近づき海洋底年代が古くなるほど地震波速度が大きくなる(プレートが厚くなる)」という、プレートテクトニクスのイメージによく合う海洋上部マントルの構造モデルが得られます。図2(下)は transverse isotropyを組み込んだインバージョンによる断面図です。数%のtransverse isotropyがあるだけで、まるで違った海洋上部マントルモデルになってしまい、プレートテクトニクスのイメージと合わなくなってしまいます。ほんの数%でまるで変わってしまうのです。なお、transverse isotropyは垂直軸に軸対称な異方性で、方位異方性に比べると、数学的に等方的な場合とほぼ同等に扱えます。

地震波走時のインバージョンでも、自由振動の固有周期のインバージョンでも、「水平方向の伝播速度はよく解けるが鉛直方向の伝播速度は解きにくい／解かれていない」、そこに問題があると

私は思っています。従って、異方性の問題を発展させるためには、一般的に異方的な媒質での表面波と自由振動の問題を解き、理論的見通しをよくする必要があります。

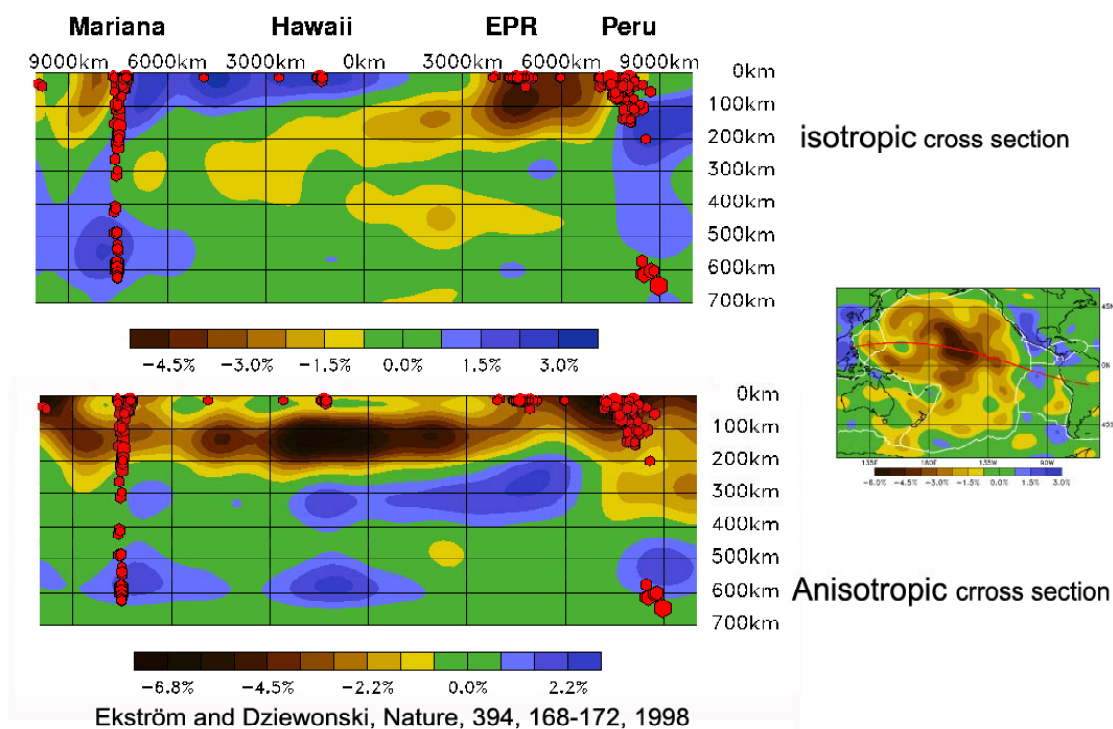


図2 長周期実体波走時と表面波の分散データを使った、isotropy (上) と transverse isotropy (下) を仮定したインバージョンによる太平洋の上部マントルのS波速度断面図。右は測線を示す。Ekström と Dziewonski (1998)による。

弾性論の歴史をたどると、1849年のStokesの論文において、等方的媒質における地震波の問題が解かれ、次に震源の問題としてsingle forceモデルからdouble coupleモデルに進歩してきましたが、出発点となった1849年の論文の頃には、まだ、grad, div, rot などベクトル微分のご概念は一般的ではありませんでした。Stokes は、grad, div, rotに等価な長い式の変形をやってのけ、grad, div, rotを使うのと等価なグリーン関数の表現式を導きました。地震学はその上に築かれており、Stokesは地震学に対して素晴らしい貢献をしたとすることができます。

しかし、Stokesの表現式に留まっていると、一般に異方的な媒質における表面波の問題は解けません。そこで、1990年、瀬瀬さんとともに、Stokesの枠組みを離れ、弾性体の運動方程式を一般的な曲線座標で書き、Hookeの法則も一般曲線座標で書き、図3のような異方的な媒質の表面波の固有方程式の表現式を導きました。紙と鉛筆の計算で半年を費やしました。

transverse isotropyの場合は、Rayleigh波(固有関数Y1~Y4)と Love波(Y5~Y6)は分離し、Takeuchi and Saito (1972)の表現式に帰着します。一般に異方的な媒質の場合は、Rayleigh wave-Love wave couplingのcross-termが存在します。

$$\frac{d}{dz} \begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \\ Y_5 \\ Y_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1/C & kF/C & 0 & 0 & 0 \\ -\rho\omega^2 & 0 & 0 & -k & 0 & 0 \\ -k & 0 & 0 & \gamma_2 & 0 & 0 \\ 0 & -kF/C & -\rho\omega^2 + k^2\gamma_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\rho\omega^2 + k^2N & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \\ Y_5 \\ Y_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & P_{M13} & 0 & P_{M15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_{M34} & 0 & P_{M36} \\ 0 & P_{M42} & P_{M43} & 0 & P_{M45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_{M54} & 0 & P_{M56} \\ 0 & P_{M62} & P_{M63} & 0 & P_{M65} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \\ Y_5 \\ Y_6 \end{pmatrix} \quad (\text{A.21})$$

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= A - F/C^2, & \gamma_2 &= L/(C_{44}C_{55}), \\ P_{M13} &= -P_{M42} = kA_2 \cos(2\phi), & P_{M15} &= -P_{M62} = -kA_2 \sin(2\phi), & A_1 &= (C_{11} - C_{22})/2, & A_2 &= (C_{13} - C_{23})/(2C), \\ P_{M34} &= -P_{M56} = A_3 \cos(2\phi), & P_{M36} &= P_{M54} = -A_3 \sin(2\phi), & A_3 &= (C_{44} - C_{55})/(2C_{44}C_{55}), & A_4 &= CA_2^2/2, \\ P_{M43}/k^2 &= -A_4 + [A_1 - 2FA_2] \cos(2\phi) + (P_z - A_4) \cos(4\phi), & & & A_5 &= (-A_1 + FA_1/C + P_z A_2)/2, \\ P_{M45}/k^2 &= P_{M63}/k^2 = A_5 \sin(2\phi) + A_6 \sin(4\phi) + P_z A_2 \sin(6\phi)/2, & & & A_6 &= (-P_z + FP_z/C + A_1 A_2/4). \\ P_{M65}/k^2 &= -A_4 - (P_z - A_4) \cos(4\phi) \end{aligned}$$

(A21) in Kawasaki and Koketsu (1990)

図3 一般的に異方的な平行成層構造の表面波の固有方程式。transverse isotropy の場合は Takeuchi and Saito (1972)の表現式に帰着する。Kawasaki and Koketsu (1990) による。

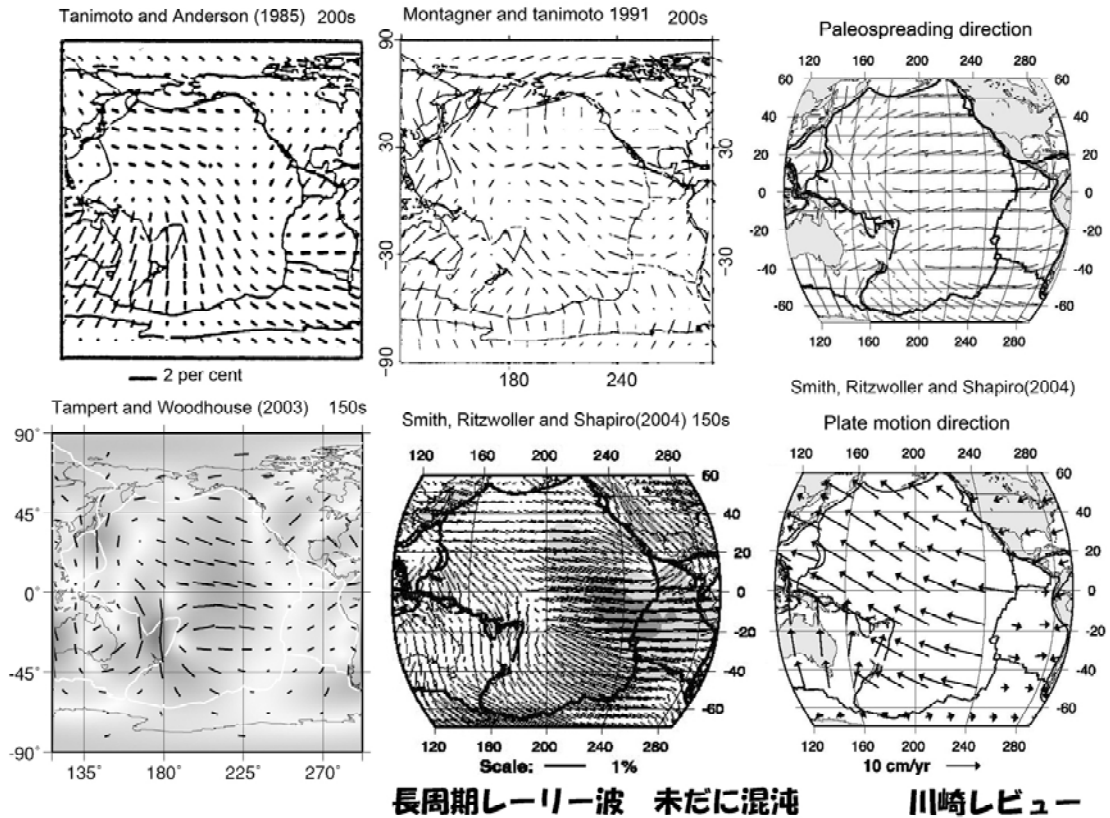


図4 Tanimoto and Anderson (1985), Montagner and Tanimoto (1991), Trampert and Woodhouse (2003), Smith, Ritzwoller and Shapiro (2004) による周期 200 秒のラーリー波の速度の早い方向のマッピング。Tanimoto and Anderson (1985), Montagner and Tanimoto (1991), Trampert and Woodhouse (2003) は、地球全体のマッピングであるが、焦点を絞るために、太平洋地域の部分のみを取り出した。右上は、地磁気縞模様から求めたプレート拡大方向の化石、右下は、現在のプレートの絶対運動の方向の分布 (Smith, Ritzwoller and Shapiro (2004) による)。

図4は、Tanimoto and Anderson (1985), Montagner and Tanimoto (1991), Trampert and Woodhouse (2003), Smith, Ritzwoller and Shapiro (2004) による200秒前後の表面波の伝搬速度の異方性のマッピングの比較です。しかし、ポイントともえいる中央海嶺と太平洋中央部における異方性のパターンが研究によって異なり、地球規模での異方性のマッピングも、いまだに混沌状態にあると言えそうです。

1980年代から1990年代、自分でも異方性を組み込んだ地球モデルの問題に本格的に取り組んで見ようと思ったこともあったのですが、富山大学の計算機能力の限界などもあって、力尽きました。

大規模異方性もまた未解決の課題と言えるでしょう。

### 内核の問題

次に地球規模の構造の議論に移りたいと思います。私として非常に気になるのが、内核と外核の密度差です。1066モデル (Gilbert and Dziewonski, 1975) の場合、ICB (Inner Core Boundary, 内核と外核の境界) での密度の不連続は $0.86\text{gr/cm}^3$ 、PREM (Dziewonski and Anderson, 1981) では $0.65\text{gr/cm}^3$ です。PREMの論文が出た頃には、この違いがそれなりに話題になりましたが、その後は看過されてきました。1つの理由は、この密度差を地震学的に厳密に決めることがほとんど不可能だったからでしょう。

最近になって、Stacy and Stacy (1999) は、内核成長の数値シミュレーションによって、 $0.86\text{gr/cm}^3$ か $0.65\text{gr/cm}^3$ のどちらかで、内核の形成が10億年前か、20億年以上前かに分かれることを示し、この問題に新たな光が当たりました。ICBの密度の跳びは、ヘリウムや酸素などの軽い元素がどれだけ内核に取り込まれたかを意味し、「地球史と地震波速度構造は整合的なのか？」という議論の試金石です。

しかし、今でも、 $0.86\text{gr/cm}^3$ か $0.65\text{gr/cm}^3$ かを解くのはきわめて困難です。一つアプローチとして、浮力を復元力とする内核の固有振動であるSlichter mode (Slichter, 1961) があります。Slichter modeの固有周期は5~6時間で、3つに分裂したsingletの固有周期を精密に決めることができれば、ICBにおける密度差を精密に決定することができるはずですが、密度差に起因する浮力はとても小さく、固有振動の振幅も極めて小さいので、M8クラスの地震では、Slichter modeの振幅は、超伝導重力計や伸縮計の検出限界より~3桁小さく、とうてい検出不可能です。

2004年、M9.3の超巨大スマトラ地震が起きました。この機会を逃せばSlichter modeの検出は不可能と思ひ、大学院生の

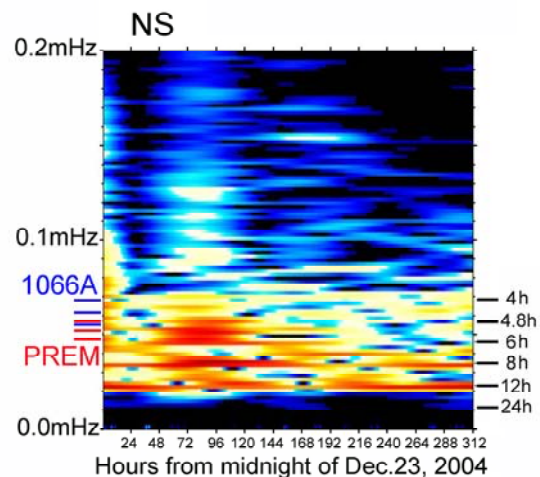


図5 2004年超巨大スマトラ地震の時の松代の伸縮計記録の3週間のランニングスペクトル。左軸の青棒は1066Aによる周期、赤棒はPREMによる周期。右軸の数字は、潮汐と高潮波の周期。2005年度の小巻あずみの修論による。

小巻さんと必死になって調べたのですが、うまくいきませんでした。

図5は、ほぼ20日間の記録のランニングスペクトルです。0.05mHz（周期20,000秒）あたりに3つに分裂したピークが見られたのですが、確証は得られませんでした。

これもまた未解決の課題です。

### 一般に異方的な地球の自由振動：内核のS波異方性

わたしは、もともと理論地震学を専門としてきました。その理論地震学に残された最後の課題が、「一般に異方的な地球の自由振動の定式化」ではないかと思っています。先に述べたように、1990年に一般に異方的な平行成層構造の媒質における表面波の問題を完全に解きました（図3）が、そのとき以来、一般に異方的な地球の自由振動の問題が気になっていました。最近、研究に割く時間ができて、自由振動の問題のレビューをしているうちに、こうすればうまくいくという方法に気がつきました。

一般的に異方的な地球の自由振動の問題もStokes（1849）の枠組みでは解けず、generalized spherical harmonicsの枠組に依るほかありません。generalized spherical harmonicsの枠組みで計算して気がついたことは、0S0(1228秒)、1S0(613秒)、2S0(399秒)などのangular orderが0のモードについては、固有方程式の表現式が非常に簡単になることです。

地震学分野ではよく知られていますが、内核には、北極方向に通る地震実体波は早く、赤道方向に遅いという2象限型の自転軸対称異方性があります。上記の固有方程式からは、自転軸対称異方的な地球の自由振動の場合、0S0、1S0、2S0などの固有周期の揺らぎに緯度依存性が生じます。おもしろいことに、実体波走時の揺らぎでは2象限形の異方性であっても、固有周期の揺らぎの緯度依存性は4象限形になることが読み取れます。逆に、0S0、1S0、2S0などの固有周期の緯度依存性が検出できれば、内核のS波の異方性が検出できるはずだということが分かりました。

内核のS波の異方性の未解決の課題です。

### 終わりに

地震学の混沌は、既存の知識を縦にしたり、横にしたり、重ねたりしても解けないのではないのでしょうか。私の話の意図は既にお分かりだと思いますが、混沌から抜け出す手がかりは、私は、次の2つだと思っています。

- (1) 未解決の課題に積極的に挑戦すること、
- (2) そのための方法論として、StokesやMaxwellの理論的枠組みから抜け出すこと。

1995年、突然、思いもしなかった系外惑星が発見され、太陽系形成論に予想外の視点が加わったように、地球科学でも、未解決の課題が解けたときには、今からは予想も出来ないような新しい視点が得られ、混沌を解きほぐす手がかりも得られるのではないかと確信しています。

Slichter modeの問題も未解決、内核と外核の密度差の問題も未解決です。逆に、神様は、構造とダイナミックスの関係という非常に魅力的で重要な問題を我々に残してくれたと考えることもできます。ほかにも、地震予知の問題、文化財を地震から守る問題など、本質的な問題はほとんど未解決で、やるべきことは一杯残っています。私は、これらの間

題に挑戦する若手が京都大学から出てくることを期待しています。

最初に法隆寺の写真をあえて持ち出したのは、「ヒントは目の前にころがっているかも知れない」という意味です。法隆寺が再建されたかどうかについては長い論争がありましたが、最終的に再建論が勝利し、見慣れた大きな石が法隆寺の初代の若草伽藍の礎石であったことが分かりました。目の前にあるのに気がつかなかったのです。系外惑星の発見も、ヒントが目の前にあったのに、長い間気がつかなかったのです。これらは素晴らしい教訓だったと思います。

京都大学地球物理学の今後の大いなる発展を期待して、これで終わらせていただきます。

参考文献（主要論文のみ）

- Dziewonski, A. M. and Anderson, D. L., Preliminary reference Earth model, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 25, 297-356 (1981).
- Gilbert, F. and Dziewonski, A. M., An application of normal mode theory to the retrieval of structural parameters and source mechanisms from seismic spectra, *Philosophical Transactions of Royal Astronomical Society of London, Ser.A*, 278, 675-693 (1975).
- Kanamori, H. and Anderson, D. L., Importance of physical dispersion in surface waves and free oscillation problems, *Review of Geophysics and Space Physics*, 15, 105-112 (1977).
- Kawasaki, I. and Koketsu, K., Rayleigh-Love wave coupling in an azimuthally anisotropic medium, *Journal of Physics of the Earth*, 38, 361-390.
- Slichter, L. B., The fundamental free mode of the Earth's inner core, *Proceeding of National Academy of Science, USA*, 47-186-190 (1961).
- Stacey, F. D. and Stacey, C. H. B., Gravitational energy of core evolution: implications for thermal history and geodynamo power, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 110, 83-93 (1999).
- Takeuchi, H. and Saito, M., Seismic surface waves, in *Methods in Computational Physics, Advances in research and Applications* 11, ed. by B. Bolt, Academic Press, NY, USA, 217-295 (1972).