常時地球自由振動

東京大学地震研究所*

西田 究

Earth's Background Free Oscillations

Kiwamu NISHIDA

Earthquake Research Institute, University of Tokyo,
1-1-1, Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan

(Received April 5, 2008; Accepted August 8, 2008)

It has long been believed that only large earthquakes excite free oscillations of the solid Earth. In 1998 a few Japanese groups reported existence of Earth's background free oscillations even on seismically quiet days. The excited modes are almost exclusively fundamental spheroidal modes with amplitudes of about 0.5 nGal (10^{-11} m/s²), and they fluctuate persistently in little correlation with their neighboring modes. Cumulative effects of many small earthquakes are too small to explain the amplitudes. These features suggest that the background free oscillations are excited persistently by random disturbances globally distributed near the Earth's surface. The intensities of these modes clearly show annual and semiannual variations with the largest peak in July and a secondary peak in January. The observed amplitudes of some modes are anomalously large relative to the adjacent modes. These are the modes that are theoretically expected to be coupled with the acoustic modes of the atmospheric free oscillations. All of these features suggest that atmospheric disturbance is one of the most likely excitation sources of this phenomenon. Assuming that atmospheric pressure disturbance acting on the Earth's surface is a primary excitation source, some quantitative comparison has been made between the atmospheric pressure disturbance and Earth's background free oscillations. Shortly after the discovery, some groups proposed oceanic excitation mechanism. This mechanism is based on two observations; (1) The typical frequency of Earth's background free oscillations of about 0.01 Hz coincides with that of ocean bottom pressure sensors. (2) The excitation sources are dominated in the northern Pacific in winter of the northern hemisphere and in the circum-Antarctic in winter of the southern hemisphere. The source distribution is consistent with oceanic wave height data. Based on these observations oceanic excitation mechanism by ocean infragravity waves through their nonlinear interaction was proposed. However, the proposed mechanisms work efficiently only in shore regions, and hence may not be consistent with the observed spatial extent of the excitation sources, and they cannot explain observed acoustic resonance. At present there is little

consensus about the excitation mechanism that can explain all of the observed features. These observations suggest that excitation sources are superposition of oceanic and atmospheric phenomena. The phenomena of background free oscillations should be understood as those in a single system of the atmosphere, ocean and solid Earth.

Key words: Earth's background free oscillations, Surface waves, Acoustic coupling

§ 1. 常時地球自由振動現象の発見

周期 200 秒より長周期側では、地震が起ると地震波が地球を何周も伝播する。この周期帯で地動のフーリエスペクトルを計算すると、地球自由振動の固有周波数に対応する多くのピークを同定することができる。固有周波数はそれぞれに地球の内部構造を反映している。そのため地球自由振動の観測が地球物理学的に重要である事は、Lord Kelvin [Thomson (1863)] が一様な球の固有周波数を見積もって以来共通の認識であり、さかんに検出が試みられてきた [Dahlen and Tromp (1998)]。観測記録から初めて地球自由振動の存在を検出したのは、1960 年にチリ地震時の歪み計記録からであった [Benioff *et al.* (1961)]。それ以降地球自由振動の観測例は蓄積され、測定された固有周波数から地球内部構造を推定する研究 [例えば Masters *et al.* (1982)] がさかに行われるようになった。

チリ地震での検出以前には、大気擾乱など非地震性の現象が地球自由振動を励起する可能性も検討されていた。Benioff *et al.* (1959) は、地震活動が静穏な期間の観測記録を周波数解析し、地球自由振動の検出を試みた。しかし当時の観測精度では、励起振幅に対して観測ノイズが大きすぎたために検出は失敗に終わった [Kanamori (1998)]。チリ地震での検出以降は、巨大な地震のみが観測可能な地球自由振動を励起しようと考えられるようになり、地震活動が静穏な期間のデータは顧みられなくなってしまった。この Benioff らの試みは約 40 年後に再び日の目を見ることになる。

太陽では、表層付近の乱流が周期 5 分程の音波を励起し続けている事が知られている [Goldreich and Kumar (1988)]。地表から、太陽表面の速度場は精度良く観測されており、観測された音波の固有周期から太陽内部の音速構造や、角運動量分布が詳細に調べられている [日震学と呼ばれる。例えば Gough and Toomre (1991)]。小林 (1996) は太陽の 5 分振動の励起メカニズムと同様なメカニズムが、地球・火星・金星に対しても有効ではないかと考えた。次元解析から大気擾乱の大きさを見積り、大気擾乱が nGal 程度の振幅の振動を励起し得ると

*〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1

見積もった。それを受け1998年に名和らは、南極・昭和基地の超伝導重力計のデータを調べ、地震活動が静穏な期間においても、周期数百秒の帯域で固体地球が振動し続けている現象を発見した [Nawa *et al.* (1998)]。常時地球自由振動の発見である。この南極の超伝導記録には潮位変動に伴う固有のノイズ [Nawa *et al.* (2003)] が混在していたことから、検出はまだ確定的とはいえなかった。しかし、南極のデータによる検出に続き、IDAの観測点に設置されたLacoste重力計 [Suda *et al.* (1998)] や、IRIS, GEOSCOPEの観測点に設置されたSTS1-Z地震計 [Kobayashi and Nishida (1998), Tanimoto *et al.* (1998)] など、世界中の観測点で相次いで検出され、その存在は確定的となった。現在ではSTS2地震計 [Widmer-Schmidrig (2003)] を含め50以上の観測点で検出されている。

観測の一例として、地震活動が静穏な期間の加速度スペクトルをFig. 1に示す。この図は17観測点の記録を平均化したスペクトル [Nishida *et al.* (2000)] である。この図からは数多くのピークが見て取れる。それぞれのピーク周波数は地球自由振動の固有周波数に対応しており、地震活動が静穏な期間でも、地球は常に振動し続けている事を示している。

本論文では、1998年の常時地球自由振動の発見以来、10年の間に蓄積されてきた観測事実を2章でまとめ、その励起メカニズムについて3章で議論していく。

Fig. 1. Stacked power spectrum on the seismically quiet days from 1989 to 1997, which consists of the successive monthly spectra each of which is an average of the 1 day spectra over 17 IRIS stations and 8 GEOSCOPE stations. This figure shows spectral peaks of fundamental spheroidal modes. The modes denoted as ${}_0S_{29}$ and ${}_0S_{37}$ are theoretically expected to be coupled with acoustic free oscillations in the atmosphere.

§ 2. 励起の特徴

1998年の発見以降、常時自由振動の励起の特徴は詳しく調べられている。励起の特徴から、励起源は地表付近に分布する持続的な擾乱だという事が分かってきた。以下に具体的な特徴を述べる。

2.1 励起振幅の統計的特徴

2 mHz から 20 mHz にかけて、伸び縮み基本モードが卓越しており、モード当たりの励起振幅は 0.5 nGal 程度である [Fig. 2 上図参照; Nishida *et al.* (2002)]。振幅

Fig. 2. Upper figure: Root mean square amplitudes of the fundamental spheroidal modes (fundamental Rayleigh waves). Open circles show the modal amplitudes. Closed squares in the lower frequency range indicate the modal amplitudes obtained through the normal mode approach [Nishida *et al.* (2000)]. The modes denoted as ${}_0S_{29}$ and ${}_0S_{37}$ are theoretically expected to be coupled with acoustic free oscillations in the atmosphere. Taken from Nishida *et al.* (2002). Lower figure: Comparison of the PSDs of the background fundamental Rayleigh waves (solid line) to those of the ground noise (broken line) in the New Low Noise Model (NLNM) [Peterson (1993)]. They coincide with each other in the almost entire seismic passband from 2 to 20 mHz. The model PSD increases rapidly with decreasing frequency below 3 mHz because of the gravitational effect of air mass fluctuation and with increasing frequency above 20 mHz because of the microseisms effect. Taken from Nishida *et al.* (2002).

は観測点の位置によらず、ほぼ同程度の大きさである [Nishida and Kobayashi (1999)]. 高次モードの励起も確認されているが基本モードと比べると振幅は一桁以上小さい [Fukao *et al.* (2002), Nishida *et al.* (2002)]. 基本モードが卓越している観測事実は、励起源が地表付近に分布している事を示唆している。また、常時地球自由振動のパワースペクトルと広帯域観測点のバックグラウンドノイズモデル [New Low Noise Model (NLNM); Peterson (1993)] を比較すると、2 mHz から 20 mHz の帯域で振幅が調和的である事が分かってきた [Fig. 2 下図: Nishida *et al.* (2002)]. 常時地球自由振動は、今までは単に地震観測に対するノイズとして取り扱われてきたのである。

また、励起振幅が 10% 程度季節変動していることも報告されている [Tanimoto and Um (1999), Nishida *et al.* (2000), Roult and Crawford (2000), Ekström (2001), Kurrle and Widmer-Schmidrig (2006)]. 7 月に最大値となる年変動が一番大きく、次に大きな変動は 2 月に極大をとる周期半年の変動である。この変動は、観測点の位置によらず共通している。Fig. 3 に Nishida *et al.* (2000) による 1989 年から 1997 年の期間のスペクトログラムを示す。この図から、励起振幅が実際に年変動している様を見て取れる。励起振幅の季節変動は、励起源が固体地球内部ではなく大気海洋中に存在する事を示唆している。

Fig. 3. Spectrogram of the seismically quiet days from 1989 to 1998, which consists of the successive monthly spectra, each of which is an average of the 1-day spectra over 90 days and over all the available stations. This figure blows up the result in a relatively narrow frequency range from 3 to 5 mHz. The vertically intense lines with approximately regular intervals correspond to the spectral peaks of fundamental spheroidal modes, whose theoretical frequencies are indicated by tick marks on the upper edge. The apparent annual variation is observed. Taken from Nishida *et al.* (2000).

2.2 大気音波との共鳴振動

火山噴火など大気中に存在する現象が固体地球の振動を励起する場合、長周期 Rayleigh 波と長周期大気音波 [例えば, Beer (1974), Gossard and Hooke (1975)] が音響共鳴振動する事が知られている [Watada (1995), Lognonné *et al.* (1998), Kobayashi (2007)]. Pinatubo 火山の噴火時には、実際に広帯域地震計が音響共鳴振動をとらえられている [Widmer and Zürn (1992), Kanamori and Mori (1992), Zürn and Widmer (1996)]. 音響共鳴振動の観測スペクトルは、周期 255 秒と 270 秒の卓越周期をもつ鋭いピークでは説明する事ができる。周期 270 秒の卓越周期をもつ共鳴振動は、固体地球の伸び縮み基本モード (${}_0S_{29}$) と、大気音波の基本モードとの共鳴振動に対応し、周期 255 秒の卓越周期をもつ共鳴振動は、伸び縮み基本モード (${}_0S_{37}$) と音波の 1 次モードとの共鳴振動に対応している [Watada (1995), Lognonné *et al.* (1998), Kobayashi (2007)]. ここで ${}_0S_l$ は l 次の伸び縮み基本モードを表している。Fig. 1, Fig. 2 上図と Fig. 3 はこの二つの音響共鳴モードの励起振幅が周りのモードの励起振幅より 10% 程度大きい事を示している。観測された音響共鳴振動は、常時地球自由振動の励起源が大気中にエネルギーをもっている事を示唆している。

共鳴振動の観測は、励起源が固体地球の振動だけではなく大気音波も定常的に励起している事を示唆している。常時励起長周期大気音波の直接観測は、その励起メカニズムを理解する上で非常に重要である。しかし、現在のところ対応する音波モードを直接観測によってとらえた例は報告されていない。関連する観測としては、radio sounding による積乱雲起源の長周期大気音波の観測例がある [Jones and Georges (1976)]. 気圧計のアレー観測によって直接検出しようという試みもあるが、周期 100 秒程度の長周期音波の検出に留まっており、共鳴振動の検出には至っていない [Nishida *et al.* (2005)].

共鳴モード ${}_0S_{29}$ (周期 270 秒) の年変動は 40% と他のモードの変動に比べ著しく大きい [Nishida *et al.* (2000)]. しかしもう一方の共鳴モード ${}_0S_{37}$ (周期 225 秒) の季節変動は、他のモードの変動と大きな違いはみられなかった (Fig. 3 参照)。 ${}_0S_{29}$ の励起振幅の年変動が特異的に大きな原因として、大気の固有周波数の変動による共鳴効率の変化が考えられる [チューニング・メカニズム; Nishida *et al.* (2000)]. 大気の音速構造は年変動しているために、その固有周波数も年変動する。大気音波モードと固体モードが波数-周波数領域で近いほどに共鳴の効率は良くなるために、励起振幅の年変動が特異的に大きくなるのである。しかしチューニング・メカニズムは大気音波が十分にトラップされている時のみ有効な

ため、 ${}_0S_{37}$ に対してチューニング・メカニズムは有効でない。そのためチューニング・メカニズムが有効な ${}_0S_{29}$ の年変動のみが大きくなる。大気構造を仮定してチューニング・メカニズムの有効性を検討すると、十分観測値の変動の違いを説明しうる事も明らかになってきた [Kobayashi (2007)]. しかし、大気の音速構造は固体地球に比べて3次元性が強いことや、風速分布の影響も強い事もあり、定量的に観測と比較することは未だ難しい。

2.3 ねじれモードの観測

大気海洋現象が励起源ならば、それらは基本的には圧力ソースなので、伸び縮み基本モード (Rayleigh 波に対応) が卓越していると予想される。水平動記録から、基本振れモード (Love 波に対応) の励起振幅を押さえる事は、励起メカニズムを押さえる上で重要である事は明らかである。しかし、水平動記録は上下動記録よりもノイズレベルが高いため実際に検出する事は非常に難しかった。しかし、Kurrel and Widmer-Schmidrig (2008) は日本を含む静穏な観測点の水平度記録を注意深く解析し、200秒から500秒にかけて基本振れモードを検出した。また Nishida *et al.* (2008) らは Hi-net 傾斜計の記録をアレー解析する事により、周期 100 秒より短周期の常時励起 Love 波を検出した。驚くべき事に、これらの解析結果は、周期 10 秒から 500 秒にかけて、Love 波の平均自乗振幅が Rayleigh 波の 3 倍程度である事を示している。

また観測された波の到来方向と振幅の時間変動は、海洋波浪が励起に関わっている事を示唆している。この観測事実は、oceanic infragravity wave と固体モードの地形カップリングを示唆している。

2.4 励起源の空間分布

前節までで述べた解析結果は、基本的に励起振幅が観測点によって変わらない事を暗に仮定していた。励起メカニズムを探るためには、励起源分布の時空間変化が重要である事は明らかである。しかし、当初のデータ解析では単点のデータ解析が主であったため、観測点による振幅の違いを議論できずにいた。Rhie and Romanowicz (2004) は、日本の F-net とカリフォルニアの広帯域地震計データをアレー解析する事によって、励起源の空間分布を推定した。南半球の冬には、南半球特に南極付近に強い励起源が存在し、北半球の冬には北太平洋に強い励起源が存在する事を示した (Fig. 4)。励起源の空間分布と波高分布により対応が見られる事から、海洋波浪が励起源であると結論づけている [Rhie and Romanowicz (2004, 2006)].

Rhie and Romanowicz の解析法では、アレーレスポンスの影響を見積もっていない事もあり、励起源の空間パターンの定性的な議論に留まっていた。そこで、より定量的な議論をするために、Nishida and Fukao (2007) はこれとは独立な手法を用いて励起源の空間分布を推定し

Fig. 4. Comparison of seasonal variations in the distribution of hum-related noise (degree one only) and significant wave height in the year 2000. a, b, The directions corresponding to mean amplitudes that are larger than 85% of the maximum are combined for the two arrays in winter (a) and in summer (b) to obtain the region of predominant sources in each season. Arrows indicate the direction of maxima. Both arrays are pointing to the North Pacific Ocean in the winter and to the southern oceans in the summer. c, d, Global distribution of significant wave height, in the winter (c) and in the summer (d), averaged from TOPEX/Poseidon images for the months of January and July 2000, respectively. Black colour in c and d indicates locations with no data. Taken from Rhie and Romanowicz (2004).

た。まず、ランダムな圧力擾乱が地表付近に分布し、擾乱の強さが長波長構造をもつと仮定して（球面調和関数の7次まで）、任意の二点間の加速度記録の相互相関関数を定式化した。グローバルに分布する54観測点の地震活動が静穏な期間の記録を用い、すべての組み合わせに対して相互相関関数を計算した。この観測データに対して合成波形をフィッティングすることによって、励起源の空間分布を推定した。空間パターンの時間変化は、定性的には Rhie and Romanowicz (2004) の結果と調和的である。しかし、Nishida and Fukao (2007) の結果は、大陸地域での励起が弱い事、海岸線付近の浅い領域だけではなく面的に励起源が分布している事も示している。

§ 3. 励起メカニズム

現在、テクトニックな現象が常時地球自由振動を励起している可能性はほぼ否定され、大気現象もしくは海洋現象が励起源であるという共通認識が確立されている。しかし周期100秒から1000秒の周波数帯域では、大気、海洋擾乱の時空間構造はよく理解されていない点が多く、すべての観測を説明できるような統一的な描像は未だ得られていない。

3.1 地震による励起

発見当初、励起源の候補として、Harvard の CMT カタログ [Dziewonski and Woodhouse (1983)] には載っていないような小さな地震が積算として効いている可能性が議論された [Suda *et al.* (1998), Kobayashi and Nishida (1998), Tanimoto and Um (1999)]。多くの常時自由振動の解析では、 M_w 5.5 以上の地震が起こっている期間のデータを使用していない。にもかかわらず、観測値を説明するためには M_w 6.5/day ものモーメントリリースレートを必要とする [Nishida and Kobayashi (1999)]。地震の頻度分布が Gutenberg-Richter 則に従うとすると、微小な地震の集まりではとても励起振幅の大きさを説明する事ができない。

3.2 大気励起仮説

小林 (1996) は次元解析から大気圧擾乱の大きさを見積り、圧力擾乱が地球をランダムに地表を叩いていると仮定して、モードあたりの励起振幅が $n\text{Gal}$ 程度であると見積もった。この理論的な予想は、地球自由振動現象の検出の大きなきっかけとなった。圧力擾乱の実体としては、コロモゴロフの等方性乱流 [Landau and Lifshitz (1987)] を仮定したモデル [Tanimoto (1999)] や、境界層乱流 [Stul (1988)]、や積雲対流 [中島・野津原 (2001)] などが考えられている。Fukao *et al.* (2002) は、大気圧擾乱の統計的特徴（相関距離と、周波数領域でのパワースペクトル）と、地動の観測スペクトルを結びつける定

式化を行った。観測から見積もられた大気圧のパワースペクトルと相関距離 [Nishida *et al.* (2005)] から地動の加速度スペクトルを見積もると、大気圧擾乱が常時地球自由振動を十分に励起し得ることが分かってきた [Fukao *et al.* (2002), Nishida *et al.* (2005)]。しかし、まだこの周波数帯域での大気乱流の時空間構造は未解明な部分も多く、特に海洋上での大気乱流の構造は良く分かっていないため、不確定な部分も多い。

また大気音波との共鳴振動の観測は、大気励起仮説の大きな根拠となっている。海洋の infragravity wave が大気音波との共鳴振動を引き起こすことは考えづらい [Webb (2007)]、大気中に励起源がないと観測事実を説明できないからである。共鳴モードの励起の問題は、大気擾乱の鉛直方向の情報も含んでいるため、非常に重要である。しかし励起源の分布を定量的に求めるためには、大気構造の3次元性や風速分布を理論に組み入れる必要があるが、現状では難しい。これらの効果を取り込んだ理論的な手法を構築する事となれば、それと比較しうる大気音波の直接観測は今後の重要な課題である。

3.3 海洋励起仮説

常時地球自由振動の発見からしばらくたつと、長周期帯域でも同様に海洋波浪が表面波を励起しているという主張がされ始めた。Watada and Masters (2001) は海底圧力計のスペクトルと、常時自由振動の加速度スペクトルのピークがともに 0.01 Hz 付近にある事から、海洋波浪が励起源である可能性を指摘した。Rhie and Romanowicz (2004) は、波高データの時空間変化と、常時地球自由振動の励起振幅の変化を比較し、ocean infragravity waves が励起源だと結論づけている [Rhie and Romanowicz (2006)]。

短周期側の帯域（周期20秒から5秒）に目を移すと、この帯域では海洋波浪が表面波を定常的に励起していることが良く知られている。脈動 (microseisms) と呼ばれ、卓越周期14秒の primary microseisms と卓越周期7秒の secondary microseisms に分類される [Haubruch *et al.* (1963)]。海洋波浪自体の卓越周期は14秒程度である事が知られており、primary microseisms は海岸線付近の浅い地域での波浪による励起だと考えられている [Darbyshire and Okeke (1969), Okeke and Asor (2000)]。Secondary microseisms は、海洋波浪の非線形効果によって励起されたと理解されている [Longuet-Higgins メカニズム; Longuet-Higgins (1950), Hasselemann (1963), Kedar *et al.* (2008)]。励起振幅自体は secondary microseisms の方が primary microseism よりも桁で大きく、地表の観測点であれば大陸にある観測点であっても、はっきりと記録される。

常時地球自由振動の励起の問題に、Longuet-Higgins メカニズムを拡張したメカニズムが提唱されている [Webb (2007), Tanimoto (2005, 2007)]. もし、このメカニズムが有効だとすると、地動のピーク周波数が海底圧力のピーク周波数の倍になるはずである。しかし実際は周波数がほぼ同じである事が知られている [Webb (1998)]. また、非線形メカニズムが有効だとすると、水深の浅い海岸沿いの領域でのみ地球自由振動が励起されていると期待される。しかし実際の観測 [Nishida and Fukao (2007)] では、励起源の空間構造は degree 0 の構造が卓越しており、非線形メカニズムではこの観測を説明できない。

観測された Love 波の振幅の大きさ [Kurrle and Widmer-Schmidrig (2008), Nishida *et al.* (2008)] は、大気擾乱による励起では説明しづらく、海洋擾乱が励起に寄与している事を示唆している。しかし、前に述べた非線形メカニズムでは励起源を圧力ソースとして取り扱うために、Love 波の観測された振幅を説明する事ができない。Love 波の励起振幅を説明するためには、oceanic infragravity wave と Love 波 Rayleigh 波との地形カップリングが本質的に重要だと考えられる [Nishida *et al.* (2008)]. しかし地形カップリングの定量的な議論は未だなされていない。今後の重要な課題である。

§ 4. ま と め

1998 年に常時地球自由振動現象が発見されて以降、多くの研究から、その存在は確固たるものになった。現在、励起源の時空間変動や、大気音波との音響共鳴振動等、数多くの観測事実が蓄積されつつある。しかし、現在提唱されている大気励起メカニズムと海洋励起メカニズムは、どちらも全ての現象を説明できるには至っていない。今後この現象を理解するためには、大気・海洋・固体地球の既存の枠組みにとらわれる事なく、観測・理論の両面から一つ一つ現象を理解して行く事が重要であろう。また大気・海洋・固体地球の大きな枠組みで地震学をとらえる事は、今後他の惑星で地震探索を行う上でも重要な手がかりとなるだろう。

謝 辞

査読者の名和一成氏、須田直樹氏、および編集担当の綿田辰吾氏のご意見とご指摘は本稿を改訂する上で大いに役立ちました。記して感謝いたします。

文 献

Beer, T., 1974, *Atmospheric Waves*, Adam Hilger, London.
Benioff, H., J. Harrison, L. LaCoste, W. Munk, and L. Slichter,

- 1959, Searching for the earth's free oscillations, *J. Geophys. Res.*, **64**, 1334-1337.
Benioff, H., F. Press, and S. Smith, 1961, Excitation of the free oscillations of the earth by earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **66**, 605-619.
Dahlen, F. and J. Tromp, 1998, *Theoretical Global Seismology*, Princeton University Press, Princeton.
Darbyshire, J. and E. Okeke, 1969, A study of primary and secondary microseisms recorded in Anglesey, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **17**, 63-92.
Dziewonski, A. M. and J. H. Woodhouse, 1983, An experiment in systematic study of global seismicity: Centroid-moment tensor solutions for 201 moderate and large earthquakes of 1981, *J. Geophys. Res.*, **88**, 3247-3271.
Ekström, G., 2001, Time domain analysis of Earth's long-period background seismic radiation, *J. Geophys. Res.*, **106**, 26483-26493.
Fukao, Y., K. Nishida, N. Suda, K. Nawa, and N. Kobayashi, 2002, A theory of the earth's background free oscillations, *J. Geophys. Res.*, **107**(B9), 2206.
Goldreich, P. and P. Kumar, 1988, The interaction of acoustic radiation with turbulence, *Astrophys. J.*, **326**, 462-468.
Gossard, E. E. and W. Hooke, 1975, *Waves in the Atmosphere*, Elsevier, Amsterdam.
Gough, D. and J. Toomre, 1991, Seismic observations of the solar interior, *Annual Rev. Astron. Astrophys.*, **29**, 627-685.
Hasselmann, K., 1963, A statistical analysis of the generation of microseisms, *Rev. Geophys.*, **1**, 177-210.
Haubrich, R., W. Munk, and F. Snodgrass, 1963, Comparative spectra of microseisms and swell, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **53**, 27-37.
Jones, R. M. and T. M. Georges, 1976, Infrasound from convective storms. iii. Propagation to the ionosphere, *J. Acoust. Soc. Am.*, **59**(4), 765-779.
Kanamori, H., 1998, Shaking without quaking, *Science*, **279**, 2063-2064.
Kanamori, H. and J. Mori, 1992, Harmonic excitation of mantle Rayleigh waves by the 1991 eruption of Mount Pinatubo Philippines, *Geophys. Res. Lett.*, **19**, 721-724.
Kedar, S., M. Longuet-Higgins, F. Webb, N. Graham, R. Clayton, and C. Jones, 2008, The origin of deep ocean microseisms in the northern Atlantic ocean, *Proc. R. Soc. A*, **464**, 777-793.
小林直樹, 1996, 大気擾乱による固体惑星の振動, 日本惑星科学会秋期講演予稿集, 85.
Kobayashi, N., 2007, A new method to calculate normal modes, *Geophys. J. Int.*, **168**, 315-331.
Kobayashi, N. and K. Nishida, 1998, Continuous excitation of planetary free oscillations by atmospheric disturbances, *Nature*, **395**, 357-360.
Kurrle, D. and R. Widmer-Schmidrig, 2006, Spatiotemporal features of the earth's background oscillations observed in central Europe, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L24304.
Kurrle, D. and R. Widmer-Schmidrig, 2008, Horizontal hum of the earth: A global background of spheroidal and toroidal modes, *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L06304.
Landau, L. and E. Lifshitz, 1987, *Fluid Mechanics*, Course

- Theor. phys., **6**, 2nd ed., Pergamon Press, New York.
- Lognonnè, P., E. Clèvèdè, and H. Kanamori, 1998, Computation of seismograms and atmospheric oscillations by normal-mode summation for a spherical earth model with realistic atmosphere, *Geophys. J. Int.*, **135**, 388-406.
- Longuet-Higgins, M., 1950, A theory of the origin of microseisms, *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.*, **243**, 1-35.
- Masters, G., T. Jordan, P. G. Silver, and F. Gilbert, 1982, Aspherical earth structure from fundamental spheroidal-mode data, *Nature*, **298**, 609-613.
- 中島健介, 野津原昭二, 2001, 雲は地球を揺らすか? - 積雲による固体地球自由振動の励起, 日本気象学会.
- Nawa, K., N. Suda, Y. Fukao, T. Sato, Y. Aoyama, and K. Shibuya, 1998, Incessant excitation of the Earth's free oscillations, *Earth Planets. Space*, **50**, 3-8.
- Nawa, K., N. Suda, S. Aoki, K. Shibuya, T. Sato, and Y. Fukao, 2003, Sea level variation in seismic normal mode band observed with on-ice GPS and on-land SG at Syowa Station, Antarctica, *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1402.
- Nishida, K. and Y. Fukao, 2007, Source distribution of Earth's background free oscillations, *J. Geophys. Res.*, **112**, B06306-2007.
- Nishida, K. and N. Kobayashi, 1999, Statistical features of earth's continuous free oscillations, *J. Geophys. Res.*, **104**, 28741-28750.
- Nishida, K., N. Kobayashi, and Y. Fukao, 2000, Resonant oscillations between the solid earth and the atmosphere, *Science*, **87**, 2244-2246.
- Nishida, K., N. Kobayashi, and Y. Fukao, 2002, Origin of earth's ground noise from 2 to 20 mHz, *Geophys. Res. Lett.*, **29**, doi, 10.1029/2001GL013862.
- Nishida, K., Y. Fukao, S. Watada, N. Kobayashi, M. Tahira, N. Suda, K. Nawa, T. Oi, and T. Kitajima, 2005, Array observation of background atmospheric waves in the seismic band from 1 mHz to 0.5 Hz, *Geophys. J. Int.*, **162**, 824-840.
- Nishida, K., H. Kawakatsu, Y. Fukao, and K. Obara, 2008, Background Love and Rayleigh waves simultaneously generated at the Pacific ocean floors, *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L16307, 10.1029/2008GL034753.
- Okeke, E. and V. Asor, 2000, On the microseisms associated with coastal sea waves, *Geophys. J. Int.*, **141**, 672-678.
- Peterson, J., 1993, Observations and modeling of seismic background noise, *U.S. Geol. Surv. Open File Rep.*, 93-322.
- Rhie, J. and B. Romanowicz, 2004, Excitation of earth's continuous free oscillations by atmosphere-ocean-seafloor coupling, *Nature*, **431**, 552-556.
- Rhie, J. and B. Romanowicz, 2006, A study of the relation between ocean storms and the earth's hum, *Geochem. Geophys. Geosys.*, **7**, Q10004.
- Roult, G. and W. Crawford, 2000, Analysis of 'background' free oscillations and how to improve resolution by subtracting the atmospheric pressure signal, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **121**, 325-338.
- Stull, R. B., 1988, *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, Kluwer Academic Publisher.
- Suda, N., K. Nawa, and Y. Fukao, 1998, Earth's background free oscillations, *Science*, **279**, 2089-2091.
- Tanimoto, T., 1999, Excitation of normal modes by atmospheric turbulence: Source of long period seismic noise, *Geophys. J. Int.*, **136**, 395-402.
- Tanimoto, T., 2005, The oceanic excitation hypothesis for the continuous oscillations of the earth, *Geophys. J. Int.*, **160**, 276-288.
- Tanimoto, T., 2007, Excitation of normal modes by non-linear interaction of ocean waves, *Geophys. J. Int.*, **168**, 571-582.
- Tanimoto, T. and J. Um, 1999, Cause of continuous oscillations, *J. Geophys. Res.*, **104**, 28723-28739.
- Tanimoto, T., J. Um, K. Nishida, and N. Kobayashi, 1998, Earth's continuous oscillations observed on seismically quiet days, *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 1553-1556.
- Thomson, 1863, On the rigidity of the Earth, *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.*, **153**, 574-582.
- Watada, S., 1995, Part I: Near-source acoustic coupling between the atmosphere and the solid earth during volcanic eruptions, PhD thesis, California Institute of Technology.
- Watada, S. and G. Masters, 2001, Oceanic excitation of the continuous oscillations of the Earth, *AGU Fall Meeting Abstracts*, AGU:A620+.
- Webb, S., 1998, Broad band seismology and noise under the ocean, *Rev. Geophys.*, **36**, 105-142.
- Webb, S., 2007, The earth's 'hum' is driven by ocean waves over the continental shelves, *Nature*, **445**, 754-756.
- Widmer, R. and W. Zürn, 1992, Bichromatic excitation of long-period Rayleigh and air waves by the Mount Pinatubo and El Chichon volcanic eruptions, *Geophys. Res. Lett.*, **19**, 765-768.
- Widmer-Schmidrig, R., 2003, What can superconducting gravimeters contribute to normal-mode seismology?, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **93**, 1370-1380.
- Zürn, W. and R. Widmer, 1996, Worldwide observation of bichromatic long-period Rayleigh waves excited during the June 15, 1991, eruption and lahars of Mount Pinatubo, page 615. University of Washington Press.