

## 総合報告

# 大地震、津波、火山大爆発などから発生した気圧波

三雲 健\*

## Atmospheric Pressure Waves Generated from Large Earthquakes, Tsunamis and Large Volcanic Eruptions

Takeshi MIKUMO

Kohata-Okurayama 39-809, Uji, Kyoto 611-0002, Japan

(Received November 24, 2010; Accepted March 16, 2011)

This report reviews various studies on atmospheric pressure waves that have been generated from large earthquakes, tsunamis, and large-scale volcanic eruptions. These waves described here include low-frequency acoustic and gravity waves ( $0.0008 \sim 0.0166$  Hz or its period  $1 \sim 20$  min) and high to medium frequency ( $> 0.0166$  Hz or its period  $< 1$  min) infrasonic air-waves. The low-frequency acoustic-gravity waves came from coseismic vertical ground deformation associated with two megathrust earthquakes, and sometimes from other large earthquakes and volcanic eruptions, which propagated to more than several thousand kilometers through the lower to part of the upper atmosphere. The waves that reached the upper atmosphere could cause traveling ionospheric disturbances and perturbations of total electron content. The higher frequency infrasounds also have often been observed after large earthquakes and volcanic eruptions, which traveled as air-waves propagating directly from the source, and also as air-waves coupled with traveling seismic Rayleigh waves. Small atmospheric perturbations have also been detected during propagation of tsunami waves caused secondarily by large submarine earthquakes. Theoretical waveform modeling has been made in some of the above cases, incorporating a realistic atmospheric temperature structure. It is expected that more detailed information about the source process of large earthquakes and volcanic eruptions could be extracted through the analysis of the waveforms recorded at a number of stations, including their maximum amplitudes, wave frequencies, duration times, directions of wave approach, and phase and group velocities.

Key words: Atmospheric pressure waves, Low-frequency acoustic-gravity waves, High-frequency infrasounds, Large earthquakes and volcanic eruptions

### §1. ま え が き

この報告は、標題のテーマに関する初期から2010年頃までの主要な研究をレビューしたものである。気圧波伝播の問題は本来、大気圏物理学の分野に属するが、筆者は1964年のAlaska地震の際に発生した気圧波を解析して以来、大地震に伴った気圧波の発生と伝播に関心を持って来たので、今回このような過去の研究を概観することとした。この報告がこのような問題に興味を持たれる方々の参考になれば幸いである。

気圧波伝播の問題は最近では、大気圏内だけに止まらず、固体地球、海洋、電離層を含む大気圏相互間のカプリングの問題として議論されることも多い。ここではsourceが固体地球側にあり、大地震や火山爆発などから地表面で発生した直接の気圧の擾乱が気圧波として大気圏や電離層へ伝播する場合と、副次的にこれらのsourceから生じて地表付近を伝播するRayleigh波や、海面に発生した津波の伝播がさらに気圧波を誘起させた場合について述べることにする。sourceがもともと大気圏にある場合はここでは述べないが、この報告の最後に挙げたいいくつかの論文を参照して頂きたい。

\* 〒611-0002 京都府宇治市木幡御蔵山 39-809

## §2. 気圧波の初期の観測と大気構造にもとづく理論

気圧波の伝播の最初の例としてよく知られているのは、1883年のインドネシアのKrakatoa火山の爆発によるもので、この波はオーストラリアや北米大陸の8個所で観測された[Symons (1888)]. 次いで1908年にシベリアのTunguskaに落下した巨大隕石の爆発によって生じた気圧波がロシアとヨーロッパの観測点7個所で観測されたが[Whipple (1930)], 実際の爆発高度は約8kmと推定されている[Ben-Menahem (1975)]. これらの現象に関連した気圧波伝播の初期の理論はPekeris (1948)やScorer (1950)によって提出された。この時の理論は一般的な等温大気や、一定の温度逓減を持つ下層大気とそれより上部に等温層を持つ2層構造にもとづくものであった。

1954年には、核爆発によって生じた気圧波が初めてYamamoto (1955, 1956)によって観測された。このような爆発による気圧波はその後引き続いて観測され、1952年からの5年間に18例あったことが報告されている[Yamamoto (1957)]. これらの波動は250~370 m/sの伝播速度を持ち、卓越周期が0.7~5 minのグループと、2 min以上の周期を持たないグループの2つに大別され、波長は5~100 kmと推定されている[Yamamoto (1957)]. このような気圧波伝播の理論に関しては、Yamamoto (1957)が提出した2つのモデルがある。1つはPekerisのモデルに近い2層モデルであるが、このモデルでは観測された1.5 minより短周期の波形を説明出来ないことが明らかになった。もう一つは高度10 kmまでは温度が逓減し、次の30 kmまでは温度一定、さらに50 kmまでは温度増加に転じ、これより上層は温度一定という4層構造モデルで、これに対する周波数方程式の数値解から2.5 minで極小値を持つような内部重力波の群速度の分散曲線が得られている[Yamamoto (1957)]. これによって、観測された1.5 minより短周期の波形と、さらに5 min程度の周期の両方の波形の説明が可能になった。これらの結果はこの後、一方では高層大気への重力波の伝播と、他方では下層大気中の高周波infrasoundの伝播と地球表面近くでの発生源の研究に端緒を開くものであった。この時期には、ほぼ一般的な等温大気モデルにもとづく理論[Hunt *et al.* (1960), Hines (1960)]も提出されているが、その後Weston (1961)は温度分布が垂直方向に連続的に変化するような、次に述べるARDCモデルに近い大気中を伝播する気圧波の理論を扱い、固有周波数と固有関数を導出している。

## §3. 標準的温度分布を持つ大気中の気圧波伝播

1960年代の初めには、ARDC Standard Atmosphere [Wares *et al.* (1960)]と呼ばれる大気中の温度の標準的な

高度分布が明らかにされた。この分布は地球上の緯度、季節、風速によって多少変化するが、地表から高度とともに温度が減少するtroposphere、温度が増加に転ずるstratosphere、再び温度が減少するmesosphereを経て、高度100 km以上で温度が急激に増加するthermosphereに分かれる。この温度分布はその後、高度約500 kmまでの電離層を含んだ高層大気に対するCIRAモデル[Yeh and Liu (1974)]やMSISE-90モデル[Hedin (1991)]などに拡張されたが、高度220 km以下の大気構造に関しては、最近のNRL-G2Sの半経験的モデル[Drob *et al.* (2003)]も含め、標準モデルとあまり大きい差はない。このような複雑な温度構造を持つ大気中を伝播する気圧波の理論的取り扱い、Press and Harkrider (1962), Pfeffer and Zarichny (1963), Harkrider (1964)らによって行われた。これらの研究では、このような温度構造を、厚さ数kmの等温層から成る水平多層構造（実際の計算では39層）に分割し、各層の境界面では上下方向の圧力と温度（したがって音波速度）が連続、高度220 kmで半無限の等温層または自由表面に接し、地表面では剛体に接するという境界条件を適用する。大気密度は地表からの高度とともに指数関数的に減少することを仮定している[Press and Harkrider (1962)]. これらの条件を満足するマトリクス連立方程式を解くことによって、この大気中を伝播する気圧波のacoustic mode  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$ やgravity mode  $GR_0$ ,  $GR_1$ など各モードの群速度と位相速度が周期の関数として得られた[Press and Harkrider (1962)].<sup>注1)</sup>

上の方法は多層構造からなる地殻・マントル中を伝播する地震表面波を計算するThomson-Haskellのマトリクス法[Haskell (1953)]と同様である。さらに地表のpoint sourceとある距離にある観測点に対するこの大気の動的なレスポンスをspectral amplitudeの形で求め、また地球表面の曲率を考慮することにより、任意の観測点に対するacoustic-gravity wavesの波形の計算が可能

注1) 以下の記述では、この結果と次のHarkrider (1964)の位相速度と群速度(Fig. 5)および振幅スペクトル(Fig. 7)に随い、周期約1 min~4.5 minの間にある基本モード $S_0$ と高次モード $S_1$ ,  $S_2$ をacoustic wave(音波)、周期4.5 min~14 minのモード $GR_0$ ,  $GR_1$ とそれ以上の周期の波をgravity wave(重力波)、両方をあわせてacoustic-gravity wavesと呼んでいる。周期約1 min以下の音波にはさらに高次のモード $S_3$ や $S_4$ が含まれるが[Pfeffer and Zarichny (1963)], ここではこれらを含めて“短周期infrasound”と表現した。これは20~0.001 Hzを総称してinfrasoundと呼ぶ普通の呼び方や、5 min以下0.05 secまでをinfrasoundとするBlanc *et al.* (2010)の定義とも異なる。

になった [Harkrider (1964)]. Harkrider はこの関係もちいて、空中爆発の際の理論波形を計算して実際の観測波形との比較を行なった。またこの大気中の acoustic mode と gravity mode の位相速度が海洋の長波の速度と同程度であることから、1883 年の Krakatoa 火山爆発で生じた気圧波は陸上のバリアを乗り越えて静水圧を超える振幅で海の波を励起したと考えられる [Press and Harkrider (1966)]. この大気波と海洋のカプリングの関係から、この Krakatoa 火山爆発の際に San Francisco で得られた潮位記録との比較を行い、ここで海面変動を生じさせたのが重力波の基本モード  $GR_0$  であることを確かめた [Harkrider and Press (1967)].

#### § 4. 巨大地震の際の地殻変動によって発生した長周期の気圧波

##### 4.1 1964 年 Alaska 地震によって生じた気圧波

1964 年 3 月 28 日には 20 世紀最大といわれた Alaska 地震 ( $M_w \sim 9.2$ ) が発生し、この時には震央距離 3,127~3,840 km にあるカリフォルニア州 Berkeley と San Diego 周辺の観測点で、群速度約 319 m/s、振幅~4 Pa、周期 14 min にも及ぶ異常な気圧波が観測された [Bolt (1964), Donn and Posmentier (1964), Mikumo (1968)]. このような長周期の気圧波が観測されたのは、当時これらの観測点に設置されていたアナログ記録型微気圧計が周期 2~5 min で 0.5~1.0 cm/Pa という高感度を持ち、20 min 程度の周期までなだらかに減少するような周波数レスポンスを持っていた [Mikumo (1968)] ためと考えられる。観測されたこの気圧波の群速度と位相速度は先に求められた acoustic mode と gravity mode の理論値 [Press and Harkrider (1962)] に合致した。この地震の震源域は震央から SW 方向に伸び、平均 1.5~5.0 m の隆起地域 800 km×100 km と、平均 -1.0~-1.5 m の沈降地域 800 km×150 km に及んだ [Plafker (1965)]. Mikumo (1968) は上の Harkrider の理論をこのように source が有限の拡がりを持つ場合に拡張し、この震源域を 4 地域に分け、平均隆起量と沈降量とライズ・タイムを種々に仮定して、これらの場合の acoustic-gravity waves の理論波形を計算し、観測波形を一応説明出来ることを確かめた。これによって、観測された異常な長周期気圧波がこの巨大地震に伴って 3 min 以内に起こった地殻上下変動によって発生したことが明らかになった。またこの地震後、周期 20~27 s 程度のやや短周期の気圧波 infrasound もアメリカ大陸中~東部の 3 観測点で記録された (§ 6).

またこのような短周期の気圧波の到着に先立ち、アラスカでは ionosonde [Leonard and Barnes (1965)] により、またコロラド州では Doppler sounder [Davies and Baker

(1965), Row (1967)] によって 400 m/s~2 km/s で進行する電離層の擾乱が観測されたが、これは地表からほぼ垂直に上昇した気圧波によって起こされた電離層の動きによるものと解釈されている [Cook and Baker (1965)]. このような現象は 1968 年十勝沖地震 ( $M_w 7.9$ ) の際にも観測され、震央から約 5,900 km にある Honolulu の観測点では、周期約 2 min の 10 MHz の Doppler 記録の波形が、伝播して来た地震 Rayleigh 波の波形に良く対応していることが見出された [Yuen *et al.* (1969)]. これは Rayleigh 波によって励起された acoustic-gravity waves が高度約 300 km に達して電離層の擾乱を発生させたためと考えられている。

##### 4.2 2004 年 Sumatra-Andaman 地震によって生じた気圧波

2004 年 12 月 24 日には、1964 年 Alaska 地震以来の最大といわれる Sumatra-Andaman 地震 ( $M_w 9.2$ ) が発生し、この地震による大規模な津波で沿岸各地に大きい被害を生じた。この地震の震源域はインド洋内で延長約 1,500 km に及んだ。この地震によって生じた気圧波は周辺の Diego Garcia (I52GB), Madagascar (I33MG), Kenya (I32KE), Palau (I39PW) の震央距離 2,720~6,310 km にある IMS 観測点 (§ 10) で観測された [Garces *et al.* (2005), Le Pichon *et al.* (2005a)]. これらのアレイ観測点に設置されている微気圧観測システムは 0.02~8 Hz の間でフラットで、それより低周波側では 20 dB/decade で減少するような周波数レスポンスを持っている。20 Hz サンプリングで得られたデータに 1.19~8.33 mHz の band-pass filter を適用して得られた音波-重力波の波形は、周期 6~7 min、最大振幅 0.8~2.0 Pa、群速度 307~314 m/s の範囲にあって、各アレイ間で良く対応している。またこの気圧波は震央距離約 5,600 km にある日本列島中部の松代、乗鞍岳、神岡など 4 観測点でも観測された。これらの観測点の微気圧計のレスポンスは 0.5 Hz~DC の間でフラットで、観測データは 1 Hz でサンプリングされている。これから日変化を除去したあとの波形は観測点間で良く対応し、振幅 7~12 Pa、12 min 程度の長周期の波形が見られた [Mikumo *et al.* (2008)]. さらに 1964 年 Alaska 地震の場合と同様、高度 220 km までの標準大気温度構造に対する Harkrider (1964) の速度分散曲線と先の source-receiver response を用い、長大な震源域の各部分での地殻上下変動量と立ち上がり時間に種々の値を与え、これらの観測点での acoustic wave と gravity wave の合成波形を計算して観測波形との比較が行われた。今の場合、震源域の大部分は海底にあるが、この逆断層地震によって生じる海底の地殻変動の波長が海の平均の深さより十分大きく、かつ、この変動が

2~3min 内に起こる場合には、海面の変動 (swelling と depression) は海底の変動にほぼ追従することが、過去の津波の理論的研究 [Kajiura (1963, 1970)] と最近の数値計算 [Saito and Furumura (2009)] によって確かめられている。この結果、各地で観測された気圧波の波形と振幅は、Sumatra-Andaman 地域のうち、南部の Nicobar 諸島付近の長さ約 800 km、幅約 200 km の地域で平均隆起量が 4 m を超え、これが 1.0~1.5 min の間に起こったと考えれば説明できることが明らかになった [Mikumo *et al.* (2008)]。この地殻変動の時定数は地震が起こってから津波が発生するまでに要した時間を示すものと考えられ、1964 年 Alaska 地震の場合と同程度であることも確かめられた。

一方この地震に際しても、電離層の擾乱が Global Positioning System (GPS) や Doppler sounding によって観測された。Heki *et al.* (2006) は、インドネシアとタイの 9 点の GPS 観測点で地震発生 10~15 分後に観測された、周期 4~5 min の約 1 km/s で伝播する TEC (total electron content) の擾乱を、acoustic-gravity waves の伝播によって起こされた変動によるものとして、震源域での破壊の伝播速度と、震源域内各地域の相対的地殻隆起変位を推定している。また PHKT 観測点では、この TEC の擾乱は地震発生 1 時間後に起り、4 min 周期で 4 時間継続した [Choosakul *et al.* (2009)]。ここでは 2 時間の間に 30 回の振動が観測され、p-p 振幅は 0.6 TECU ( $10^{16}$  electrons/m<sup>2</sup>) であった。この 4 min 周期の変化は、この大地震で発生した大気と固体地球の間の長時間の共鳴によって励起されたものと解釈されている [Choosakul *et al.* (2009)]。また TEC の擾乱はスマトラとタイ [Otsuka *et al.* (2006)] やインド東岸 [DasGupta *et al.* (2006)] でも観測され、前者では観測点間の変動を電離層内の directivity に帰している。また Iyemori *et al.* (2005) は地震直後にタイの観測点で長周期の地磁気の脈動を見出し、震源域に起因する地磁気変化と地球磁場の相互作用によるものと解釈している。一方、Taiwan の Doppler sounder の 3 観測点では、地震による Rayleigh 波で励起されたと思われる速度 70 m/s、振幅 200 m に及ぶ短周期の Doppler shift の変動と、次いで震源域で励起され、314 m/s の速度で伝播して来た acoustic-gravity waves による 30 min 間継続した変動が観測された [Liu *et al.* (2006a)]。

#### 4.3 2010 年 Chile 地震によって発生した気圧波

また最近の 2010 年 2 月 27 日には、南米チリの Bio-Bio 地方沿岸で巨大地震 ( $M_w$ 8.8) が発生し、震源域は海岸にほぼ平行に延長 500 km 以上に及んだ。この地震に伴った地殻変動によって発生したと思われる気圧波が、震央距離 17,230 km と 17,416 km に及ぶ日本の松代と神

岡両観測所で 15 時間 41 分後と 15 時間 56 分後に観測され、最大振幅は p-p で約 8~10 Pa であった [三上・大川 (私信, 2010), 森井 (私信, 2010)]。この波の群速度は 304~305 m/s と見積もられる。松代で観測された初動部分の波形の周期は 4~5 min、神岡の場合は周期約 10 min で若干異なるが、先の 2 つの巨大地震で観測されたものとはほぼ同程度であり、震源域の大きさや地殻変動のライズ・タイムをある程度反映したものと思われる。ただこの気圧波の伝播距離が長いので、高層大気中を伝播する波の周期にも関係するかも知れない。さらに松代では最初の波の到着後約 44 分には振幅約 10 Pa、周期 4~5 min 程度の明瞭な位相が記録されており、この波の群速度が約 392 m/s であることから、この波は地球の反対側を伝播して来た A2-波の可能性も考えられる。§9 に述べる火山大爆発の場合にはこのような波が観測された例はあるが、巨大地震の場合に 17,000 km を超える長距離を伝播して来た直達気圧波や、さらに A2 波と思われる後続波が観測されたことは極めて稀である。このような長距離を伝播して来た波の理論的取り扱いには §11 に述べるように normal-mode theory によらなければならないであろう。

#### §5. 長周期の音波・重力波の高層大気への伝播

大地震や §9 に述べる火山大爆発などから発生した音波と重力波が電離層を含む高層大気へまで伝播する現象を説明するために、多くの理論的研究も行われている [例えば、Francis (1973, 1975), Yeh and Liu (1974), Blanc (1985)]。Francis (1973) はエネルギーの散逸と熱伝導を含む realistic な上層大気構造中では、周期 2 時間にも及ぶ長周期の acoustic-gravity waves が 300~700 m/s の速度で F 層 (高度 150~800 km) 中を伝播して電離層の擾乱 traveling ionospheric disturbances (TIDs) を励起し得ることを示した。また Yeh and Liu (1974) は核爆発、化学爆発、大地震、隕石落下などによって生ずる acoustic-gravity waves が下層大気から高層大気へ伝播する際のカブリングのメカニズムについて検討を行っている。

また 1994 年南カリフォルニアの Northridge 地震 ( $M_w$ 6.7) の際には、GPS 観測網によって震央から 1,000 km 離れた地点に到るまで、5 min 程度の周期を持つ電離層内の TEC の変化が観測され、これが 300~600 m/s の速度で伝播したことが確かめられている [Calais and Minster (1995)]。Davies and Archambeau (1998) は、種々のタイプの浅い地震や地下爆発による短周期でかつ大振幅の表面波から発生した気圧波を、ARDC 標準大気と非線形の影響を考慮してモデル化し、TEC の変動

の原因がこの地震から生じた気圧波であることを理論的に証明した。また 1999 年 Turkey, 2000 年 southern Sumatra, 2001 年 Central America などの地震の際には、GPS 観測によって周期 180~390 s の電離層の擾乱が観測され、この位相速度は F 層内の音波速度 1.1~1.3 km/s に近いことが明らかになった [Afraimovich *et al.* (2001)]. また 2002 年 アラスカ Denali 地震 ( $M_w$ 7.9) の際、カリフォルニアの GPS 観測網で TEC の擾乱がこの地震によって生じた Rayleigh 波の伝播に伴って観測され [Ducic *et al.* (2003)], 3 次元トモグラフィーによるインバージョンから、ある領域では擾乱の上向きの伝播速度は約 1.2 km/s、水平方向には約 4 km/s と見積もられている [Garcia *et al.* (2005)]. 同様な研究は HF Doppler sounder によっても行われ、1999-2000 年の Turkey, Costa Rica, Chi-Chi, Oaxaca など  $M_s > 7$  の 12 個の大地震の際に、フランスの観測網で 3,849 と 4,624 mHz の反射点に相当する高度 (約 140~150 km) で電離層の擾乱 (TIDs) が観測された [Artru *et al.* (2004)]. これらの場合には何れも周期 20 s、変位振幅 0.4~5.5 mm の Rayleigh 波が付近の地震観測点を通過約 10 分後に、同程度の周期を持つ 0.3~0.7 Hz の Doppler 周波数の変動が認められた。さらに固体地球と大気を含む簡単な 1 次元モデルに normal-mode theory を適用して、1999 年 Chi-Chi 地震 ( $M_w$ 7.5) の際に生じた Rayleigh 波による高度 186 km での Doppler 周波数の時間的変化を計算し、観測結果を一応満足する結果が得られている [Artru *et al.* (2004)]. この Chi-Chi 地震の際には、Taiwan 地域の GPS によっても電離層の変動 coseismic ionospheric disturbance (CID) が観測され、ray-tracing などの方法によりその source を追跡した結果、この地震による急激な地面の上下変動によって発生した acoustic wave によることが明らかになった [Liu *et al.* (2010)].

また 2003 年十勝沖地震 ( $M_w$ 8.0) および 2004 年伊半島沖地震の前震 ( $M_w$ 6.9) の 2 つの逆断層型地震約 10 分後には、約 1 km/s の速度で水平方向に伝播する周期 4~5 min、振幅数 TECU の TEC の変化が日本列島内の GPS 観測網 GEONET ではじめて観測された [Heki and Ping (2005)]. これらの変動は、地震による海面の上下変位によって発生した気圧波が電離層の高度に達したために生じたものと考えられ、地磁気との相互作用で生じる指向性などについても議論している。また 1994 年北海道東方沖地震 ( $M_w$ 8.1) の際には、GEONET によって震央から 1,800 km 以上も伝播した CID が観測された。最初の 600~700 km まではこの速度は約 1 km/s で F 層の高度に相当する音波速度、その後は約 3 km/s の Rayleigh 波と、震央で励起された 600 m/s の音波による 2

つのモードに分離したことが確かめられている [Astafyeva *et al.* (2009)]. さらに 2008 年中国 Wenchuan 地震 ( $M_w$ 7.9) の際には、震源断層から約 1,000 km 以内にある 27 点の GPS 観測点で、半周期 180~210 s、振幅約 1 TECU に及ぶ TEC の変動が観測された。これらの変動は、逆断層成分をもつ断層運動に伴う地表面の隆起と沈降によって生じた音波 (衝撃波) が、震源から 1,000 km の距離まで 600 m/s の速度で南東方向に進行したために励起されたものと考えられる [Afraimovich *et al.* (2010)]. このことは、この変動の波面先端が地震断層の進行方向 (SW-NE) とほぼ平行であったことによっても裏付けられる。

一方、Shinagawa *et al.* (2007) の数値シミュレーションによれば、大気-電離層モデル (MSISE-90) の下に地震発生による 1 m/s の上向きの大気の変動が与えられた場合、音波は 10 分後に thermosphere に達して 100 m/s の振動を開始し、この擾乱が 30 分後には震央直上より水平方向に 1,500 km、60 分後には 2,500 km の距離に達することや、震源地域上では地表と上層大気下面の間にトラップされた 3~5 min 周期の大気振動 acoustic-gravity waves を生ずることなどが明らかになった。また火山爆発による大気の変動を表わすため、大気層下の点波源に、鉛直方向に 5 cm/s の速度振幅を持つ 5 min 周期の振動を与えた場合、ここから発生した音波が troposphere などのダクトに捕捉され、水平方向に 300 km 以上にわたって伝播した。source の真上では 3.7 mHz と 4.5 mHz、水平距離 300 km の地点では 3.9 mHz で共鳴する音波が形成され、また同時に stratosphere にトラップされた周波数 2~3 mHz の重力波が見られた [Matsumura *et al.* (2011)].

## § 6. 大地震によって発生した短周期気圧波 infrasound

Benioff and Gutenberg (1939) は、カリフォルニア州の 670 km の距離にある地震によって発生した周期 3 s の気圧波を、自作の拡声器を電磁式センサーとした気圧計で観測した。これがおそらく地震による気圧波を観測した最初の例と思われる。また先に述べたように、1964 年 Alaska 地震後、振幅 2~3 Pa、周期 20~27 s 程度、群速度 312~316 m/s のやや短周期の気圧波 infrasound もアメリカ大陸中~東部の 3 観測点 Boulder, Boston および Washington (震央距離 3,700~5,700 km) で記録された [Young and Greene (1982)]. さらに 1964 年新潟地震の際には、7,400 km の距離にあるオーストラリアの Brisbane で周期 60~70 s、群速度 260~270 m/s の気圧波が観測された [Bowman and Shrestha (1965)].

大地震によって発生した短周期の infrasound 気圧波は、その後多くの IMS 観測点で観測されている。2001 年ペルー Arequipa 地震 ( $M_w 8.4$ ) の際の IS08 観測点 (Bolivia; 震央距離 530 km) [Le Pichon *et al.* (2002)], 2001 年中国 Kunlun 山脈地震 ( $M_w 8.1$ ) の際の I34MN 観測点 (Mongolia; 距離 1,880 km) [Le Pichon *et al.* (2003)], 2002 年アラスカ Denali 断層地震 ( $M_w 7.9$ ) の際の I53US 観測点 (Fairbanks; 距離 150 km) [Olson *et al.* (2003)], 2002 年 Irian Java 地震 ( $M_w 7.5$ ) の際の IS07 観測点 (Waramunga; 距離 2,000 km) [Campus and Christie (2010)], 2004 年 Sumatra-Andaman 地震 ( $M_w 9.2$ ) (§ 4.2) および 2005 年 Aceh 地震 ( $M_w 8.7$ ) の際のインド洋周辺の数観測点、2005 年北部チリ地震 ( $M_w 7.8$ ) の際の IMS の 3 観測点 (Bolivia, Brazil, Peru; 距離 410~2,300 km) [Le Pichon *et al.* (2006)] など観測された。Sumatra 地震の場合を除き、震央距離 150~2,300 km で観測された infrasound 気圧波の周期は 2~10 s、振幅 0.5~2 Pa、群速度 340~360 m/s の範囲にある [Mikumo and Watada (2010)]。これらの多くの場合には、§ 7 に述べるように Rayleigh 波の進行に伴って励起された気圧波も観測されている。

一方、この IMS 観測網とは独立に、ニュー・メキシコ州の Los Alamos 国立研究所は独自の気圧波観測網を構築し、ユタ州やネヴァダ州の観測点とあわせて、1983-2002 年の間に起こった震央距離 165~4,000 km にある、31 個の大・中地震によって発生した気圧波の観測結果をまとめている [Mutschlecner and Whitaker (2005)]。観測されたこれらの気圧波の振幅は 2 個を除いて、どれも小さく 0.03~0.5 Pa、位相速度は 350~450 m/s の範囲にある。また  $M_w > 7.8$  の大地震 12 個の場合の IMS による気圧波の観測結果も Le Pichon *et al.* (2006) によってまとめられており、上の場合と同様、震央距離で正規化した気圧波の振幅と継続時間の地震のマグニチュードとの関係の経験則が論じられている。ただこれらの結果は IMS の観測計器の周波数特性のため、どれも周期 10 s 以内の短周期の infrasound 気圧波に対するものである。

### § 7. 地表を伝播する Rayleigh 波によって励起された気圧波 Infrasound

大地震の際に発生した Rayleigh 波の伝播に伴って気圧波が発生したことは、1951 年 Imperial Valley 地震 [Benioff *et al.* (1951)] や、1959 年 Montana 地震 [Cook (1971)] の際に報告され、このような気圧波は ground-coupled air waves と呼ばれることもある。また先に述べた 1964 年 Alaska 地震の際にはアメリカ大陸内の観測点 6 ヶ所でのこのような infrasound 気圧波が観測さ

れた [Donn and Posmentier (1964), Young and Greece (1982)]。観測された気圧波は数秒~20 s 程度の周期を持ち、振幅は最大で数 Pa 程度、伝播速度は 2~3 km/s であった。また 1968 年十勝沖地震の際、イギリスの Blacknest で周期 24 s、振幅 0.9 Pa の気圧波が観測された [Grover and Marshall (1968)]。これらの気圧波の伝播速度は地震の表面波速度に近いことから、地震によって発生した Rayleigh 波が観測点を通る際、あるいは付近の山脈などで反射した時に生じたものと考えられている。

日本国内での最初の顕著な観測としては、1995 年兵庫県南部地震 ( $M_w 7.2$ ) の際、愛知県刈谷 (震央距離約 185 km) の音波 3 点アレイ観測網で記録された infrasound が挙げられる (この観測網で観測されたデータについては、刈谷インフラサウンド・データベース (1984-2004) からアクセス出来る)。

上の地震の際に観測された波形は継続時間約 15 min、最大振幅約 2 Pa で 3 点間で良く対応し、これから得られる水平位相速度は 1.0 km/s を超えた [Tahira (1996)]。この infrasound の到着時刻は、比較的近い犬山地震観測所で観測された速度振幅約 1 cm/s の地震波の到来時刻にはほぼ対応することから、この振幅の大きい Rayleigh 波によって励起されたと考えられる。一方この地震動は 4~5 min 以内に収束しているのに対し、infrasound の波形にはさらに約 5 分後と 7.5 分後に振幅の大きい 2 つの later phase の波群の到着が認められ、全体として 10 min 程度継続している。これらの水平位相速度は音波速度に近く、また波群の到来方向は震央からの方向から北寄りに僅かにずれる。このことから、第 1 の波群は Rayleigh 波が進行中に途中の山脈などに衝突したために励起された infrasound と考えられるが、第 2 の波群は約 375 m/s の群速度を持つため、震央から直接音波として伝播して来た可能性が考えられる [Tahira (1996)]。なおこのような infrasound は 1993 年北海道南西沖地震 ( $M_w 7.8$ ) (震央距離約 871 km) と 1994 年北海道東方沖地震 ( $M_w 8.1$ ) (震央距離約 1,300 km) の際にも観測された [田平 (私信, 2010)]。

上のような地表を伝播する Rayleigh 波によって励起された infrasound は、§ 6 に挙げた 2001 年中国 Kunlun 地震、2001 年ペルー Arequipa 地震、2002 年アラスカ Denali 地震、2004、2005 年 Sumatra-Andaman 地震などの場合にも、震央付近で発生した気圧波の到着に先立って上記の IMS 観測点で観測され、位相速度は何れの場合も、3~5 km/s という地震波速度を示した。

また最近の顕著な例としては、2003 年十勝沖地震 ( $M_w 8.3$ ) の際、日本列島内の 9 観測点に併設した微気圧

計と広帯域地震計の両方で周期 15~50 s, 振幅 3 Pa 以下で, 速度 3.2 km/s で通過する波が約 20 s 間良く対応して記録された [Watada *et al.* (2006)]. この双方から, seismic — infrasonic pressure transfer function が周波数毎のスペクル比から計算され, 10~50 s の範囲では振幅比, 位相差スペクトルの両方がほとんど一定であることが明らかになった. この結果から観測された周波数と波長の範囲では, 気圧変化  $p_0$ , 空気密度  $\rho_0$ , 地表付近の音波速度  $c_0$ , 地表面の変位速度  $w_0$  の間に  $p_0 \approx \rho_0 c_0 w_0$  の近似的関係が成り立つことが確められた [Watada *et al.* (2006)]. ただこの関係は周波数が大気構造の cutoff 周波数に近くなり, また波長が大気の scale height に近づくとなり立たない. さらにこの地震の際に韓国の 2 観測点 CHNAR と TJI (震央距離約 1,500 km) で, 地震波に同期した infrasound が 0.01~16 Hz の範囲で見出された [Kim *et al.* (2004)].

### § 8. 津波によって生じた気圧波

水中を伝播する重力波と気圧波がカブリングすることについては早くから指摘されていた [Donn and McGuinness (1960)].

先に述べた 1964 年 Alaska 地震の際に Berkeley と East San Diego で観測された気圧記録に, 長周期波の始まりから約 16 分遅れて 1.0~1.5 min のやや短周期で振幅 0.3 Pa 程度の波が重畳して認められた. この 2 観測点での時間差は約 38 分あり, これから計算されるこの波の位相速度は 314 m/s となるため, この波は震源域付近で発生した津波,あるいはアラスカ湾内の seiche (海面の波の固有振動)によって励起された気圧波と考えられている [Bolt (1964), Mikumo (1968)]. 大地震によって起こされた津波が伝播する際に気圧波が励起される可能性があることは, 以前から指摘されていた [Peltier and Hines (1976)] が, 2001 年ペルー地震 ( $M_w$  8.1) に伴って生じた振幅 10~40 cm, 周期 20~30 min の津波が約 22 時間後に日本近海へ到着した際, 日本列島内の GPS 観測網 GEONET によって電離層の TEC の変化が観測された [Artru *et al.* (2005)]. また 2004 年 Sumatra-Andaman 地震の際, インド洋内の Diego Garcia (I52GB) 観測点では短周期 infrasound に続き, 津波によると思われる周期 0.5~2.0 s, 振幅 0.1 Pa 程度の気圧の擾乱が記録された [Garces *et al.* (2005), Le Pichon *et al.* (2005a)].

このような現象は, 大気密度が高度とともに指数関数的に減少し, 高度 150~600 km の電離層では運動エネルギーを保持するために気圧波の速度擾乱が地表に比べて  $10^4$  倍にも増幅される可能性があるためと考えられている [Blanc (1985)]. 長周期の津波が上層大気に重力波

を発生させることは最近の数値シミュレーション [Watada (2009), Lognonné (2010)] から確かめられている. また Liu *et al.* (2006b) は南インド洋の 5 観測点の GPS データを解析し, 10~20 min 周期の TIDs が津波と重力波のカブリングから期待される水平速度で伝播することを見出した. さらに Occhipinti *et al.* (2006) は 2004 年 Sumatra 地震の際に TOPEX/Poseidon と Jason 両衛星から得られた TEC のシグナルと海面の高さを同時観測した結果と, 津波から発生する重力波と電離層のカブリングを含む 3 次元モデリングの結果を比較し, これらの観測結果とシミュレーションの結果が一応満足できる範囲で一致することを確認した.

### § 9. 大規模火山爆発から生じた気圧波

大規模火山爆発から生じた気圧波は, § 2 の最初に述べた 1883 年のインドネシアの Krakatoa 火山の爆発以来, たびたび観測されている.

#### 9.1 インドネシア (1963), およびアラスカ (1967-1968) の火山

1963 年 5 月のインドネシア Bali 島の Mount Agung 火山爆発の際には, 14,700~16,300 km の距離にあるアメリカ大陸の Boulder, Boston, および Washington の 3 観測点で気圧波が観測され, 周期 70~140 s, 最大振幅 7~10 Pa, 伝播速度 268~288 m/s の acoustic wave の波群が最長 8 時間以上記録された [Goerke *et al.* (1965)]. なお Washington では逆方向に伝播した振幅 2.4 Pa, 速度 305 m/s の A2 波も観測された. 次いで 1967 年 12 月から 1968 年 5 月にかけてアラスカの Trident および Redoubt の火山大爆発があり, この時に生じた振幅 2~10 Pa の気圧波が College と Palmer の 2 観測点で観測された. 観測点までの距離は Trident からは 843 km および 510 km, Redoubt から 550 km および 236 km で, 気圧波の位相速度は 239~275 m/s であった. 観測された波には 2 つの波群があり, 最初の波群は高周波 (周期 10~30 s) の infrasound が卓越し, 水平速度 329 m/s で下層大気中の下部の音波チャンネル内を伝播し, 次の波群は水平速度 433 m/s でやや低周波 (周期 60~90 s) が卓越し, 上部の音波チャンネル内を伝播した acoustic wave と考えられている [Wilson and Forbes (1969)].

#### 9.2 日本の火山 (1990 年以降)

日本列島内の主要な 25 の活火山の大部分については, 1990 年代までに気象庁が微気圧変化観測を目的として, クレーターから 5 km 以内にマイクロフォンを設置して噴火の際に発生した infrasound を観測している. これまでの主要なものは, 1983 年以降の桜島, 1990 年代の雲仙岳, 2000 年の有珠山と三宅島, 2004 年の浅間山な

どの噴火である [Yamasato *et al.* (2007)]. このうち、三宅島の場合は2000年8月に大爆発に伴った振幅の大きい気圧波、また2004年9月1日の浅間山大噴火の際には、近距離で振幅200 Pa、周期3 s程度の気圧変化が1,000 km以上離れた九州と北海道の観測点で振幅0.3~0.7 Pa程度のinfrasoundとして観測された [Yamasato *et al.* (2007)]. また浅間山大噴火の12分後にはGPS観測網GEONETによって、電離層の擾乱が見出され、爆発によって生じた音波によって励起されたと思われる1.25 minの周期を持ち、約1.2 km/sの速度で伝播するTECの変化が観測された [Heki (2006)]. この観測から爆発のエネルギーは $2 \times 10^8$  MJと推定されている。

また九州霧島連峰の新燃岳では2011年1月27日から一連の噴火活動が始まり、2月1日には最大の爆発的噴火によって、3 kmの距離にある湯の野観測点で振幅458 Paの空振（衝撃波）を記録するとともに、104 km離れた延岡でも観測された。その後も振幅200 Paを超える空振を伴う噴火が2月14日までに3回発生している [福岡管区気象台 (2011)].

なお九州・桜島火山については特に以下に詳述する。

### 9.3 九州・桜島火山 (1979-1980; 1984-1985; 2000-)

九州の桜島火山は従来からたびたび噴火を繰り返して来たが、1955年以来活動が活発化して、1979年9月から1980年6月の期間には100回以上の活動があり、これらの噴火活動から生じた気圧波は、火口近傍の他、東北東約710 kmの距離にある刈谷を中心とする3観測点アレイで、26回観測された [Tahira (1982)]. 観測された高周波infrasoundの平均周期は約5.4 s、伝播速度303~338 m/s、最大振幅は3 Pa以内であった。観測された各イベントの1~2 min程度の継続時間と伝播速度を説明するため、高度50 km以下の温度構造と偏西風の風速を考慮してray tracingが行われた結果、この波はtropopauseと地表との間を重複反射しながら伝播したために生じたと考えられている [Tahira (1982)]. さらに1984年および1985年夏季に観測された91回の爆発から生じたinfrasoundには2つのタイプがあり、走時49 min弱、周期11~12 s、振幅0.2~0.3 Paの特徴的な2, 3の孤立的波形が含まれる場合と、走時50 min以上、周期15 s、振幅0.2 Paで波形が孤立的でない場合が記録されている。これらを説明するために、夏季に対する標準的温度構造に加え、大潮汐による風の成分を考慮して行われたray tracingの結果、前者はthermosphere内で2回反射し、後者は3回反射した後、観測点へ到達したことが明らかになった [Tahira (1988a)]. さらにthermosphere内のこれらのray pathについて、大気の実感的な温度構造と密度分布、音波の拡散の影響、平均的

風速や、さらに反射点付近での波線のcausticの影響を含め、伝播するinfrasoundの波形の変化を数値的に計算した。さらに観測計器の周波数特性を考慮して理論的に期待される波形を求め、刈谷観測点で観測された波形と比較した結果、thermosphere内で2回と3回重複反射した場合の波形を良く説明できることが示された [Tahira (1988b)].

その後2000年以後、桜島火山から4 km~1,100 kmの距離にある20個所以上（霧島44 km、室戸378 km、紀伊半島古座川530 km、伊豆半島870 km、千葉約945 kmを含む）の気圧計によって強い爆発型噴火による気圧変化が観測された。このうち28台のアレイから成る千葉の観測点では、2002年11月8日の噴火に際し、比較的短周期（周波数0.25 Hz）から長周期まで4つの波群を持つ分散性気圧波が観測され、到来方向は205°、位相速度357 m/sであった。次の2003年2月6日の比較的大きい噴火の際には、同様な特徴を持つ気圧波がこのアレイで観測され、到来方向は南東で、位相速度は360 m/sであった [西田 (2004)]. この時の気圧波は桜島付近のF-Net地震観測点で、地震表面波と、320 m/sの伝播速度をもつ音波が観測されたほか、室戸では分散性でないインパルスの気圧波が記録された。

また2009年10月3日の噴火では山頂から4 kmの観測点でp-p振幅1200 Paに及ぶ変化が4 s間継続し、東北東1,000 kmの距離にあるIMS観測点I30H（千葉県いすみ市、2004年設置）[Arai *et al.* (2010)]では最大振幅5 Pa、卓越周期5~10 s、継続時間1 minの分散型波群が記録された [Watada *et al.* (2010)]. この時の振幅の地域分布は方向性が顕著に見られたが、風の影響によるものと思われる。アレイによる解析によれば、これらの波の見かけ速度は0.345 km/sであった。火山から500 km以内の観測点での記録波形にはtroposphereとthermosphereと地表の間の5回の反射によるほぼ等間隔のlater phaseが見られたが、500 km以遠の観測点では4回の反射によるlater phaseが観測され、みかけ速度は0.4 km/sであった [Watada *et al.* (2010)].

### 9.4 アメリカ・ワシントン州 Mount St. Helens (1980)

1980年5月18日にはMount St. Helensが大爆発を起こし、この時に発生した気圧波は世界各地で観測され、最も近いワシントン州Toledo観測点では振幅370 Pa、また6,950~8,210 kmの遠距離にある日本の3観測点でも10 Pa程度の振幅を記録し、卓越周期は5~8 minであった [例えば、Donn and Balachandran (1981), Liu *et al.* (1982)]. 一方、距離927 kmにあるBerkeleyでは直達波A1のほか、地球を反対側に伝播した波A2と、同じ方向に地球を一周した波A3が記録されている [Bolt

and Tanimoto (1981)]. 記録された約 5~8 min の周期を持つ直達波は群速度 308 m/s, 振幅 35 Pa の大きい重力波であった. 上述の 1964 年 Alaska 地震の場合と同様, 計算による合成波形と, この気圧波の観測波形との比較が試みられた結果 [Mikumo and Bolt (1985)], 第 1 の爆発は約 30 s 継続してやや広い範囲にわたって音速の 2 倍程度の高速で水平方向に拡大し, 約 6 分後に第 2 の垂直方向の噴火が発生したと考えられることや, 地球を一周した波 A3 との振幅の比較から, 下層大気中の平均的減衰は  $Q=1,500$  程度の大きさであることなどが明らかになった [Mikumo and Bolt (1985)]. この爆発のエネルギーは  $4 \times 10^9$  MJ と見積もられている. またこの時には 67 km の距離にある地震観測点 LON で, 地表面付近を伝播した Lamb wave と思われる振幅約 30 Pa の気圧波が観測された [Kanamori *et al.* (1994)]. このような Lamb wave は一般的には火山爆発などの衝撃的な source から発生し, 遠距離まで伝播する性質を持っている [例えば, Gill (1982, pp.171-178)].

また Doppler 観測 [Liu *et al.* (1982)] と TEC (total electron content) の観測から, 気圧波の伝播によって大規模な電離層の擾乱が長時間継続したことも明らかになった [Roberts *et al.* (1982)]. この爆発後の電離層の擾乱は日本の関東地方の 3 観測点でも TEC の変動として HF (5~8 MHz) の Doppler sounder で観測され, 9~10 min の周期を持ち, 大円経路に沿い 302 m/s の水平群速度で伝播したことが明らかにされている [Ogawa *et al.* (1982)]. またこれと同時に, 気象庁の地表での 8 観測点では 4~5 min の周期で振幅 10 Pa 程度の重力波による気圧変化が観測された. この両方の観測から, 爆発によって生じた気圧波が上向きに上昇した後, 電離層内の音波チャネルの内部を Lamb wave として水平方向に伝播したために生じたものと考えられ, realistic な大気モデルと電離層の電子密度を考慮した理論計算からも確かめられている [Liu *et al.* (1982)].

### 9.5 メキシコ El Chichon 火山 (1982)

1982 年 3 月 29 日から 4 月 4 日にかけてメキシコ El Chichon 火山が爆発し, この時に生じた気圧波が 1,797 km 北方のアメリカ・テキサス州 McKinney に近い SRO 観測所のアレイで観測された. 5 回の爆発のエネルギーは最大  $2.0 \times 10^{10}$  MJ と推定されている. 記録された気圧波の継続時間は 3 回が約 80 min, このうち周期が 300 s 以上の長い重力波  $GR_0$  の最大振幅は 8~16 Pa, 音波  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  などが重複している場合のみかけ上の周期は 130~225 s, 最大振幅 4~9 Pa の大きさであった [Mauk (1983)].

### 9.6 フィリピン Pinatubo 火山 (1991)

1991 年 6 月 15-17 日にはフィリピンの Pinatubo 火山がさらに大規模な爆発 ( $\sim 10^{11}$  MJ) を起こし, 火山から 21 km の距離にある Clark 観測点で観測された気圧波の最大振幅は 350 Pa に達した [Kanamori and Mori (1992)].

この一連の火山活動によって生じた infrasonic wave の直達波 A1 は東北方約 2,270 km にある日本の刈谷観測点のアレイで 2 時間 45~54 分後に観測されて総計約 10 時間継続した. この波はそれぞれ 34~36 min 継続する振幅 0.25~0.48 Pa の 4 波群より成り, 約 8 時間後には大爆発によると思われる最大振幅 1 Pa を超える波群が 3 時間継続し, これらの波群の位相速度は 265~280 m/s であった [Tahira *et al.* (1996)]. さらに最初の活動から約 35 時間後には, 反対側の大円経路を伝播した速度 291 m/s の A2 波, およびさらに 2 時間後には地球を一周した伝播速度 314 m/s の A3 波も約 0.1 Pa の振幅で観測された. これに加え, 日本列島内の気象庁の 5 観測点では約 3 時間 50 分継続する最大振幅 10 Pa を超える acoustic-gravity waves の波群が記録され, 最長の周期は 13.9 min, 伝播速度は 300 m/s であった [Igarashi *et al.* (1994), Tahira *et al.* (1996)].

一方この火山爆発の際に 3.68 および 4.44 mHz (周期 272 s と 225 s) にスペクトルのピークを持つような bi-chromatic な表面波が励起され, 世界各地の地震観測点の超長周期地震計と重力計で少なくとも 2 時間以上にわたって記録された. これらの波群の群速度と位相速度および振動方向から, この波は Rayleigh 波の基本モードと考えられる [Widmer and Zürn (1992), Zürn and Widmer (1996)]. このような長周期の地震波を励起した 1 つのモデルとして, 火山大爆発によって熱エネルギーが連続的に空中に供給されて大気の振動を起こし, これが地球表面との間に acoustic coupling を起こしたものと考ええると, loading force の大きさは  $1.6 \times 10^{12}$  N, 気圧変化を生じたのは半径約 40 km の円形状の source と見積もられる [Kanamori and Mori (1992)]. さらにこれを説明するために, 等温大気構造に  $10^{11}$  MJ のエネルギーを持つ mass injection と energy injection の 2 つの異なるメカニズムの single force を与えると, 振幅 50~100 Pa, 周期 275 s と 304 s の acoustic mode と gravity mode の両方の気圧波が発生すると考えられた [Kanamori *et al.* (1994)].

これに対して最近 Watada and Kanamori (2010) は, 弾性体の固体地球と海洋および大気を含む realistic な地球モデルに対して normal-mode theory を適用し, 大気中に与えた等方性 point source から生ずる Rayleigh 波と気圧波のカプリングを理論的に計算した. この結

果、長波長の基本モードと高次モードの acoustic waves は thermosphere の底面と地球表面の間でトラップされるため、観測された Rayleigh 波とはほぼ同程度の波長の 230 s と 270 s の周期を持つこと、すなわち固体地球と大気が acoustic resonant oscillation を起こし、このカプリングが選択的にこの周期を持つ地球の spheroidal mode に相当する Rayleigh 波を励起した結果であることを明らかにした。この際、重力波と地球表面付近を伝播する Lamb wave は固体地球とはあまり効率的にカプリングしないため、火山爆発に伴って地震波を励起し難いことも明らかになった [Watada and Kanamori (2010)]。

さらにこの時の爆発では、日本の電離層観測網の HF Doppler 記録と TEC のデータの両方に約 20 min 周期の電離層の擾乱が観測され、約 290 m/s の水平速度で伝播した重力波によるものと解釈されている [Igarashi *et al.* (1994)]。同様な電離層の擾乱は Taiwan の 4 観測点でも 4 回に亘り、周期 16~30 min、伝播速度 131~259 m/s が観測された [Cheng and Huang (1992)]。

### 9.7 その他の火山 (2003-)

2003 年 7 月 Montserrat の Soufrière Hill 火山の爆発の際には、ボアホール体積歪計記録と GPS による高層大気での TEC の観測データの両方に共通する波形が見出され、スペクトル解析の結果、これらは、4 mHz にピークを持って継続的に振動する大気の擾乱によることが示された [Dautermann *et al.* (2009)]。さらにこれに対して normal-mode theory を適用した結果、この擾乱は大気中の単一の爆発によって生じた、4 mHz の基本モード周波数を持って振動する大気と固体地球の間のカプリングで説明できることが明らかになった。

また IMS 観測点が整備されて以後、比較的大きい火山爆発によって発生した気圧波が観測されたのは、2006 年 5 月の Kamchatka 半島にある Bezymianny 火山と Karymsky 火山爆発によるもので、半島の Petropavlovsk の IS44 とアラスカの Fairbanks にある IS53 両観測点で観測された。また 2005 年 1 月の Papua New Guinea の Manam 火山爆発の際には多数の観測点で気圧波が観測されている [Campus and Christie (2010)]。

この他、Vanuatu 諸島には Yasur 火山をはじめとする 13 の火山があり、殆ど連続的に噴火を繰り返し、これから発生した気圧波が IS22 観測点 (New Caledonia) をはじめとする多数の IMS 観測点で観測されている [Le Pichon *et al.* (2005b)]。

## § 10. International Monitoring System (IMS)

### 国際監視システム

1996 年に国連に提出された包括的核実験禁止条約

Comprehensive Test Ban Treaty (CTBT) にもとづく国際監視システム International Monitoring System (IMS) により、現在までに、地震、気圧波、水中音波、放射能などの 321 観測点が地球上に可能な限り一様に分布するように設置された。このうち infrasound 気圧波観測は最重点項目として、現在 60 観測点を有し、地球上での 1KT の爆発も検知できるよう配置されている。このような観測は本来の CTBT の目的のみならず、気象災害や地球物理学的研究にも役立つことが期待されているが、日本からのデータの利用は窓口である日本気象協会を通じることが求められている。この IMS については、最近 Springer から刊行された “Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies” [Le Pichon *et al.* (2010)] に詳しく述べられている。

このネットワークの各観測点は口径 1~3 km の 7~8 点のセンサー・アレイから成り、各センサーは 1 Hz で ~5 mPa 以内のノイズに抑えられ、0.02~4 Hz の帯域でフラットなレスポンスを持つよう設計されており、20 Hz でサンプリングされた観測データは中央の記録室からウィーンの国際データ・センター (IDC) へ送られる。アレイの形状の設計や各アレイからの観測データの空間的な相関、さらに風による微気圧変動、0.12~0.35 Hz 帯の microbarom などについては Chap.2 [Christie and Campus (2010)] に、また infrasound シグナルの波形相関による検出、PMCC と呼ばれる到着時刻、周波数、水平方向の伝播速度などによる波形のグルーピング、振幅の決定、顕著な位相の検出などのデータ処理などについては Chap.3 [Brachet *et al.* (2010)] に述べられている。また Drob *et al.* (2003) は、高度 170 km 以下の下層大気について、温度構造と風速を含む NRL-G2S と称するシステムを構築し、このシステムと ray tracing を用いて 0.02~10 Hz の infrasound の伝播様式を標準化している。

## § 11. まとめと今後の展望

これまで概観した大地震や、津波、大規模火山爆発などから発生した気圧波の観測によって、どのような情報が得られたのか、また今後どのような方向に発展するのかについて簡単に考察してみたい。これらの原因で地球表面に発生し、比較的近距离から数 1,000 km の距離まで伝播する、短周期の infrasound と、場合によっては地球を一周する長周期の acoustic-gravity waves は、ともに伝播経路である下層から高層大気までの温度構造の情報を含んでいる。しかし標準的構造とされている ARDC モデル、MSISE-90 モデル、NRL-G2S モデルなどには季節や風速による横方向の揺らぎが含まれる。最近これらのさらに詳細な構造を推定するため、連続的な

火山爆発から発生した気圧波 infrasound の 3 次元 ray tracing 解析を行うことによって、上層までの大気 of tomographic 構造を推定する試みも行われつつある [Le Pichon *et al.* (2005b)].

また最近では ionosonde, Doppler HF sounder や GPS などによる観測から、大地震発生後の電離層内の TEC の擾乱の研究が進展し、TEC の最大値が高度 200~400 km にあり、 $10^5 \sim 10^7 \text{ e}^- \text{ m}^{-3}$  程度 [Tanimoto and Artru-Lambin (2007)] であることや、さらに電離層内をこの高度の音波速度で水平方向に伝播する TIDs (traveling ionospheric disturbance) の存在が明らかになり、この方面の研究が進展して来た。このように、地球表面から発生した気圧波の伝播は、大気構造や気圧波自体の研究に止まらず、電離層内部の研究にも貢献しつつある。

一方、気圧波の観測から得られた、発生源である固体地球側についてはどのような情報が得られたのかを概観する。§4 に述べたように、長周期の気圧波 acoustic-gravity waves の観測から海溝型巨大地震に伴った地殻変動の上下変位やそのライズ・タイムに関して、ある程度の見積もりが可能になった。ただこのような巨大地震は稀であり、しかもその際に常に気圧波が発生するかどうかは、その時の地殻変動のパターンによる。また周期 10 数分にも及ぶ気圧波を観測し得るかは、微気圧計が長周期までカバーする十分な周波数レスポンスと高感度が必要である。また内陸部の大地震、例えば 1999 年 Chi-Chi 地震や 2008 年 Wenchuan 地震のような逆断層型地震の場合には、地表面の上下変動によって気圧波とさらには電離層での TEC の変動も励起される場合があり、これらのデータからも海溝型巨大地震の場合と同様、大地震の発生過程に関する情報が得られるかも知れない。さらに 2002 年アラスカ Denali 断層地震の場合には near-field で観測された短周期の気圧波 infrasound の振幅は 12 Pa に達しており、これから断層変位に関する 1 つの情報を得られる可能性も考えられる。このような短周期の直達気圧波 infrasound, また §7 の地表近くを進行する Rayleigh 波とのカプリングによって生ずるやや長周期の気圧波の継続時間も、断層破壊の進行あるいは震源域付近の地震動の発生に関してある程度の情報を与える可能性もある。ただこれらの波は途中の伝播経路あるいは観測点付近で山脈などに衝突して擾乱を受けた場合も考えられ、この解析は今後の課題であろう。また §9.6 に述べたような大規模火山爆発によって発生した気圧波とこれとのカプリングによって生じた長周期の Rayleigh 波から、この発生機構の解明に役立つことが考えられる。最近このような分野の研究は国際的には seismo-acoustics と呼ばれるようになり、関心を持つ研

究者も増加して来ている。

一方、これまで気圧波の理論的あるいは解析的研究には、大気、海洋、固体地球を個別に扱い、それぞれの間に線形のカプリングを想定することがしばしば行われて来た。しかし最近ではこれらの系を一体のものとして normal-mode theory によって取り扱う方法が採られるようになって来おり [例えば, Lognonné (1998), Artru *et al.* (2004), Kobayashi (2007), Tanimoto and Artru-Lambin (2007), Watada and Kanamori (2010), Kobayashi (2010), Lognonné (2010)], ここに述べたいろいろの問題に対する厳密な取り扱いによって、さらに発展が期待される。

最近ではこのような方法によって、source がもともと大気圏にあり、気温、気圧の変動や強風による波浪などの海面の擾乱が地球表面に脈動 microseism ( $\sim 0.1 \sim 0.4 \text{ Hz}$ ) と、これに同期する気圧の小さい擾乱 microbarom を生じさせる場合や、さらには大地震の発生とは関係なく、長期間にわたって常時地球自由振動 Hum ( $\sim 2 \sim 7 \text{ mHz}$ ) を生じさせる場合 [例えば Suda *et al.* (1998), Kobayashi and Nishida (1998), Nawa *et al.* (1998), Tanimoto *et al.* (1998), Tanimoto (1999), Tanimoto and Um (1999), Nishida *et al.* (2000), Fukao *et al.* (2002)] などの新しい分野の研究が進展して来ている。これらの場合については最後に挙げたいいくつかの重要論文を参照して頂きたい。

この報告では、地震や火山爆発から発生した気圧波の初期からの観測と研究が、その後どのように発展して来たかを概観した。Yamamoto (1956, 1957) に始まる観測と研究は、一方では大きい地震や大規模火山爆発によって発生した高層大気への acoustic-gravity waves の伝播とこれによる電離層の擾乱の研究へ、他方では下層大気内の低周波から高周波 infrasound の伝播の観測とその発生源などの研究へも道を拓いた重要なものであった。現在このような問題は多くの研究グループが組織的な研究を行っており、今後の発展と新しい成果を期待したい。

なおこの報告は、最近刊行された三雲 (2010) の原稿 (非売品) にさらに多くの新しいデータや知見を加えて、より広い範囲にわたる研究をまとめたものである。元の原稿からの転載を承諾して頂いた編集者の方々に感謝します。この報告が地震学および固体地球物理学分野の研究者の方々の些かの参考になれば大変幸いである。なお、この分野の読者には、気圧波伝播に関する次のような基礎的な教科書 [Gossard and Hooke (1975), Beer (1975)] が参考になるかも知れないので付記した。

## 謝 辞

この報告のものと原稿には、山元龍三郎博士、田平誠博士、東京大学地震研究所・綿田辰吾博士に目を通して頂き、貴重なコメントを頂きました。またこの報告について多くの重要なご意見を頂いた、査読者の北海道大学大学院理学院・日置幸介博士、東京大学地震研究所・西田 究博士、編集委員の産業技術総合研究所・今西和俊博士、さらに2010年Chile地震の際に松代で観測された気圧波の波形データを送付して頂いた気象庁精密地震観測室の大川隆志・主任研究官、三上直也・室長およびこのデータの予備的解析をして頂いた京都大学防災研究所の渋谷拓郎博士、神岡観測点の波形観測データを頂いた同研究所の森井 互博士に厚く御礼申し上げます。

## 文 献

- Afraimovich, E.L., N.P. Perevalova, A.V. Plotnikov, and A.M. Uralov, 2001, The shock-acoustic waves generated by earthquakes, *Ann. Geophys.*, **19**, 395–409.
- Afraimovich, E.L., D. Feng, V.V. Kiryushkin, and E.I. Astafeyeva, 2010, Near-field TEC response to the main shock of the 2008 Wenchuan earthquake, *Earth Planets Space*, **62**, 899–904.
- Arai, N., Y. Imanishi, S. Watada, T. Oi, T. Murayama, K. Murata, M. Iwakuni, and M. Nogami, 2010, Dispersion of infrasound signals excited by explosive eruptions of the Sakura-Jima volcano, S51D-02, presented at 2010 AGU Fall Meeting, San Francisco.
- Artru, J., T. Farges, and P. Lognonné, 2004, Acoustic waves generated from seismic surface waves: propagation properties determined from Doppler sounding observations and normal-mode modeling, *Geophys. J. Int.*, **158**, 1067–1077.
- Artru, J., V. Ducic, H. Kanamori, P. Lognonné, and M. Murakami, 2005, Ionospheric detection of gravity waves induced by tsunamis, *Geophys. J. Int.*, **160**, 840–848.
- Astafeyeva, E., K. Heki, V. Kiryushkin, E. Afraimovich, and S. Shalimov, 2009, Two-mode long-distance propagation of coseismic ionospheric disturbances, *J. Geophys. Res.*, **114**, A10307, doi:10.1029/2008JA013853.
- Beer, T., 1975, *Atmospheric Waves*, Adams-Hilger, London, 300pp.
- Benioff, H. and B. Gutenberg, 1939, Waves and currents recorded by electromagnetic barographs, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **20**, 421.
- Benioff, H., M. Ewing, and F. Press, 1951, Sound waves in the atmosphere generated by a small earthquake, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **37**, 600.
- Ben-Menahem, A., 1975, Source parameters of the Siberia explosion of June, 1908, from analysis and synthesis of seismic signals at four stations, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **11**, 1–35.
- Blanc, E., 1985, Observations in the upper atmosphere of infrasonic waves from natural and artificial sources: A summary, *Ann. Geophys.*, **3** (6), 673–688.
- Blanc, E., A. Le Pichon, L. Ceranna, T. Forges, J. Marty, and P. Herry, 2010, Global scale monitoring of acoustic and gravity waves for the study of the atmospheric dynamics, Chap.21 in “Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies”, eds. by A. Le Pichon, E. Blanc, and A. Hauchecorne, 647–664.
- Bolt, B.A., 1964, Seismic air waves from the great Alaskan earthquake, *Nature*, **202**, 1095–1096.
- Bolt, B.A. and T. Tanimoto, 1981, Atmospheric oscillations after the May 18, 1980 eruption of Mount St. Helens, *EOS*, **62** (23), 529–530.
- Bowman, G.G. and K.L. Shrestah, 1965, Atmospheric pressure waves from the Japanese earthquake of 16, June, 1964, *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.*, **91**, 223–224.
- Brachet, N., D. Brown, R. LeBras, Y. Cansi, P. Mialle, and J. Coyne, 2010, Monitoring the Earth's atmosphere with global IMS infrasound network, Chap.3 in “Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies”, eds. by A. Le Pichon, E. Blanc, and A. Hauchecorne, 77–118.
- Calais, E. and J.B. Minster, 1995, GPS detection of ionospheric perturbation following the January 17, 1994, Northridge earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **22** (9), 1045–1048.
- Campus, P. and D.R. Christie, 2010, Worldwide observations of infrasonic waves, Chap.6 in “Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies”, eds. by A. Le Pichon, E. Blanc, and A. Hauchecorne, 185–234.
- Cheng, K. and Y.-N. Huang, 1992, Ionospheric disturbances observed during the period of Mount Pinatubo explosions in June 1991, *J. Geophys. Res.*, **97** (A11), 16, 995–17, 004.
- Choosakul, N., A. Saito, T. Iyemori, and M. Hashizume, 2009, Excitation of 4-min periodic ionospheric variations following the great Sumatra-Andaman earthquake in 2004, *J. Geophys. Res.*, **114**, A10313, doi:10.1029/2008JA013915.
- Christie, D.R. and P. P. Campus, 2010, The IMS International network: Design and establishment of infrasound stations, Chap.2 in “Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies”, eds. by A. Le Pichon, E. Blanc, and A. Hauchecorne, 22–75.
- Cook, R., 1971, Infrasound radiated during the Montana earthquake of 1959 August 18, *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, **26**, 191–198.
- Cook, R. K. and D.M. Baker, 1965, Ionospheric motions caused by Rayleigh waves, *Trans. AGU*, **46**, 55.
- DasGupta, A., A. Das, D.D. Hui, K.K. Bandyopadhyay, and M.R. Sivaraman, 2006, Ionospheric perturbations observed by the GPS following the December 26th, 2004 Sumatra-Andaman earthquake, *Earth Planets Space*, **58**, 167–172.
- Dautermann, T., E. Calais, P. Lognonné, and G. Mattioli, 2009, Lithosphere-asthenosphere-ionosphere coupling after 2003 explosive eruption of the Soufrière Hills

- Volcano, Montserra, *Geophys. J. Int.* **179**, 1537–1546.
- Davies, J. B. and C.B. Archambeau, 1998, Modeling of atmospheric and ionospheric disturbances from shallow seismic sources, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **105**, 183–199.
- Davies, J.B. and D.M. Baker, 1965, Ionospheric effects observed around the time of the Alaskan earthquake of March 28, 1964, *J. Geophys. Res.*, **70**, 1251–1253.
- Donn, W.L. and N.K. Balachandran, 1981, Mount St. Helens eruption of 18 May 1980: Air waves and explosive yield, *Science*, **213**, 539–541.
- Donn, W.L. and W.T. McGuinness, 1960, Air-coupled long-waves in the ocean, *J. Atmos. Sci.*, **17**, 515–521.
- Donn, W.L. and E.S. Posmentier, 1964, Ground-coupled air waves from the great Alaskan earthquake, *J. Geophys. Res.*, **69**, 5357–5361.
- Drob, D.P., J.M. Picone, and M.A. Garces, 2003, The global morphology of infrasound propagation, *Geophys. Res. Lett.*, **108**; doi:10.1029/2002JD003307.
- Ducic, V.J., J. Artru, and P. Lonnnonné, 2003, Ionospheric remote sensing of the Denali earthquake Rayleigh surface waves, *Geophys. Res. Lett.*, **30** (18), :1952, doi:10.1019/2003GL017812.
- Francis, S.H., 1973, Acoustic-gravity waves and large-scale traveling ionospheric disturbances of a realistic, dissipative atmosphere, *J. Geophys. Res.*, **78**, 2278–2301.
- Francis, S.H., 1975, Global propagation of atmospheric gravity waves: A review, *J. Atmos. & Terr. Physics*, **37**, 1011–1054.
- Fukao, Y., K. Nishida, N. Suda, K. Nawa, and K. Kobayashi, 2002, A theory of the Earth's background free oscillations, *J. Geophys. Res.*, **107** (B9), 2206, doi:10.1029/2001JB000153.
- 福岡管区気象台・火山監視情報センター, 鹿児島地方気象台, 2011, 霧島山 (新燃岳) の火山活動資料, (2011. 3.2 発表), 表 1.
- Garces, M., P. Caron, and C. Hetzler, 2005, Deep infrasound radiated by the Sumatra earthquake and tsunami, *EOS*, **86** (35), 317–319.
- Garcia, R., F. Crespon, V. Ducic, and P. Lognonné, 2005, Three-dimensional ionospheric tomography of post-seismic perturbations produced by the Denali earthquake from GPS data, *Geophys. J. Int.*, **163**, 1049–1064.
- Gill, A.E., 1982, *Atmosphere-Ocean Dynamics*, Academic Press, N.Y.
- Goerke, V.H., J.M. Young, and R.K. Cook, 1965, Infrasonic observations of the May 16, 1963, volcanic explosion on the Island of Bali, *J. Geophys. Res.*, **70**, No.24, 6017–6022.
- Gossard, E.E. and W.H. Hooke, 1975, *Waves in the Atmosphere*, Elsevier, Amsterdam, 422pp.
- Grover, F.H. and P.D. Marshall, 1968, Ground to air couple waves from a distant earthquake, *Nature*, **220** (516), 686–687.
- Harkrider, D.G., 1964, Theoretical and observed acoustic-gravity waves from explosive sources in the atmosphere, *J. Geophys. Res.*, **69**, 5295–5321.
- Harkrider, D.G. and F. Press, 1967, The Krakatoa air-sea waves: an example of pulse propagation in coupled systems, *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, **13**, 149–159.
- Haskell, N.A., 1953, The dispersion of surface waves in multilayered medium, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **43**, 17–34.
- Hedin, A.E., 1991, Extension of the MSIS thermospheric model into the middle and lower atmosphere, *J. Geophys. Res.*, **69**, 1159–1172.
- Heki, K., 2006, Explosion energy of the 2004 eruption of the Asama Volcano, central Japan, inferred from ionospheric disturbances, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L14303, doi:10.1029/2006GL026249.
- Heki, K. and J. Ping, 2005, Directivity and apparent velocity of coseismic ionospheric disturbances observed with a dense GPS array, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **216**, 845–855.
- Heki, K., Y. Otsuka, N. Coosakul, N. Hemmakom, T. Komolmis, and T. Murayama, 2006, Detection of ruptures of Andaman fault segments in the 2004 great Sumatra earthquake with coseismic ionospheric disturbances, *J. Geophys. Res.*, **111**, B09313, doi:10.1029/2005JB004202.
- Hines, C.O., 1960, Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights, *Can. J. Phys.*, **38**, 1141–1481.
- Hunt, J.N., R. Palmer, and W. Penney, 1960, Atmospheric waves caused by large explosions, *Trans. Roy. Soc. London, A*, **252**, 275–315.
- Igarashi, K., S. Kaminuma, I. Nishimura, S. Okamoto, H. Kuroiwa, T. Tanaka, and T. Ogawa, 1994, Ionospheric and atmospheric disturbances around Japan caused by the eruption of Mount-Pinatubo on 15 June, 1991, *J. Atmos. & Terr. Physics*, **56**, 1227–1234.
- Iyemori, T., M. Nose, D. Han *et al.*, 2005, Geomagnetic pulsations caused by the Sumatra earthquake of December 26, 2004, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L20807, doi: 10.1029/2005GL0240083.
- Kajiura, K., 1963, The leading wave of a tsunami, *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, **41**, 535–571.
- Kajiura, K., 1970, Tsunami source, energy and directivity of wave radiation, *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, **48**, 835–869.
- 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.
- Kanamori, H., J. Mori, and D.G. Harkrider, 1994, Excitation of atmospheric oscillations by volcanic eruptions, *J. Geophys. Res.*, **99** (B11), 21, 947–21, 961.
- Kim, T.S., C. Hayward, and B. Stump, 2004, Local infrasound signals from the Tokachi-Oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **31**: L20605, doi: 10.1029/2004GL021178.
- 刈谷インフラサウンド・データベース (1984–2004), <<http://vdc-eps.org/hosting/pressure/tahira/>>.
- Kobayashi, N., 2007, A new method to calculate normal

- mode, *Geophys. J. Int.*, **168**, 315–331.
- Kobayashi, N., 2010, On excitation problems of an elastodynamic system with an open boundary condition, S11A-1928, presented at the 2010 AGU Fall Meeting, San Francisco.
- Kobayashi, N. and K. Nishida, 1998, Continuous excitation of planetary free oscillations by atmospheric disturbances, *Nature*, **395**, 357–360.
- Leonard, R.S. and R.A. Barnes, 1965, Observation of ionospheric disturbances following the Alaskan earthquake, *J. Geophys. Res.*, **70**, 1250–1253.
- Le Pichon, A., J. Guilbert, A. Vega, M. Garces, and N. Brachet, 2002, Ground-coupled air waves and diffracted infrasound from the Arequipa earthquake of June 23, 2001, *Geophys. Res. Lett.* **29** (18), :1886, doi:10.1029/2002GL015052.
- Le Pichon, A., J. Guilbert, M. Vallee, J.X. Dessa, and M. Ulzibat, 2003, Infrasonic imaging of the Kunlun Mountains for the 2001 China earthquake, *Geophys. Res. Lett.* **30** (15), 1184, doi:10.1029/2003GL017581.
- Le Pichon, A., P. Henry, P. Mialle, J. Vergos, N. Brachet, M. Garces, D. Drob, and L. Ceranna, 2005a, Infrasounds associated with the 2004–2005 large Sumatra earthquakes and tsunami, *Geophys. Res. Lett.*, **32**: L19802, doi: 10.1029/2005GL023893.
- Le Pichon, A., E. Blanc, D. Drob, S. Lambotte, J.X. Dessa, M. Lardy, P. Bani, and S. Vergnolle, 2005b, Infrasound monitoring of volcanoes to probe high-altitude winds, *J. Geophys. Res.*, **110**: D13106, doi: 10.1029/2004JD005587.
- Le Pichon, A., P. Mialle, J. Gilbert, and J. Vergoz, 2006, Multistation infrasonic observations of the Chilean earthquake of 2005, June 13, *Geophys. J. Int.*, **167**, 838–844.
- Le Pichon, A., E. Blanc, and A. Hauchecorne (Eds.), 2010, *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies*, Springer, 735pp.
- Liu, C., H. J. Kostermeier, K.C. Yeh, T.B. Jones, T. Robinson, O. Holt, R. Lettinger, T. Ogawa, K. Sinno, S. Kato, A.J. Bedard, and L. Kersley, 1982, Global dynamic responses of the atmosphere to the eruption of Mount St. Helens on May 18, 1980, *J. Geophys. Res.*, **87** (A8), 6281–6290.
- Liu, J.Y., Y.B. Tsai, S.W. Chen, C.P. Lee, Y.C. Chen, H.Y. Yen, W.Y. Chang, and C. Liu, 2006a, Giant ionospheric disturbances excited by the M9.3 Sumatra earthquake of 26 December 2004, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L02103, doi: 10.1029/2005GL023963.
- Liu, J.Y., Y.B. Tsai, K.F. Ma, Y. Chen, H. Tsai, C. Lin, M. Kamogawa, and C. Lee, 2006b, Ionospheric GPS total electron content (TEC) disturbances triggered by the 26 December 2004 Indian Ocean tsunami, *Geophys. Res. Lett.*, **111**: A05303, doi:10.1029/2005GJA011200.
- Liu, J.Y., H.F. Tsai, C.H. Lin, M. Kamogawa, Y.L. Chen, C.H. Lin, B.S. Huang, S.B. Yu, and Y.H. Yeh, 2010, Co-seismic ionospheric disturbances triggered by the Chi-Chi earthquake, *J. Geophys. Res.*, **115**, A08303, doi:10.10129/2009JA014943.
- Lognonné, P., 2010, Seismic waves from atmospheric sources and atmospheric-ionospheric signature of seismic waves, Chap. 10 in “*Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies*”, eds. by A. LePichon, E. Blanc, and A. Hauchecorne, 281–304.
- Lognonné, P., E. Clévéde, and H. Kanamori, 1998, Computation of seismograms and atmospheric oscillations by normal-mode simulation for a spherical earth model with realistic atmosphere, *Geophys. J. Int.*, **135**, 388–406.
- Matsumura, M., H. Shinagawa, and T. Iyemori, 2011, A numerical simulation of atmospheric acoustic and internal gravity waves generated by an earthquake or a volcanic eruption, presented at the annual meeting, DPRI, Kyoto University.
- Mauk, F.J., 1983, Utilization of seismically recorded infrasonic-acoustic signals to monitor volcanic explosions; The El Chichon sequence 1982–A case study, *J. Geophys. Res.*, **88** (B12), 10, 385–10. 401.
- Mikumo, T., 1968, Atmospheric pressure waves and tectonic deformation associated with the Alaskan earthquake of March 28, 1964, *J. Geophys. Res.* **73**, 2009–2025.
- 三雲 健, 2010, 「気圧微変動」のその後—大地震, 津波, 火山大爆発などから発生した気圧波—, 竹本修三・廣田勇・荒木 徹 (編)「京大地球物理学研究の百年 (II)」, 京大地球物理の歴史を記録する会, 45–54 (非売品).
- Mikumo, T. and B.A. Bolt, 1985, Excitation mechanism of atmospheric pressure waves from the 1980 Mount St. Helens eruption, *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, **81**, 445–461.
- Mikumo, T. and S. Watada, 2010, Acoustic-gravity waves from earthquake sources, Chap. 9 in “*Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies*”, eds. by A. Le Pichon, E. Blanc, and A. Hauchecorne, 263–279.
- Mikumo, T., T. Shibutani, A. Le Pichon, M. Garces, D. Fee, T. Tsuyuki, S. Watada, and W. Morii, 2008, Low-frequency acoustic-gravity waves from coseismic vertical deformation associated with the 2004 Sumatra-Andaman earthquake ( $M_w$ 9.2), *J. Geophys. Res.* **113**, B12402, doi:10.1029/2008JB005710.
- Mutschlecner, J.P. and R.W. Whittaker, 2005, Infrasound from earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **110**: 1108, doi:10.1029/2004JD005067.
- 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.
- 西田 究, 2004, 第7章, 桜島の噴火, 文部科学省科学研究費補助金 (基盤研究 (A)) 研究成果報告書「常時大気自由震動の検出と地球・大気系常時自由震動論の展開」(代表: 深尾良夫, 課題番号 13304034), 87–92, <<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/knishida/infrasound/Sakurajima.pdf>>, (参照 2011–3–12).
- Nishida, K., N. Kobayashi, and Y. Fukao, 2000, Resonant oscillations between the solid Earth and the atmosphere, *Science*, **282**, 2244–2246.

- Occhipinti, G., P. Lognonné, E.A. Kheran, and H. Hebert, 2006, Three-dimensional waveform modeling of ionospheric signature induced by the Sumatra tsunami, *Geophys. Res. Lett.*, **33** L20104, doi:10.1029/2006GL026865.
- Ogawa, T., H. Kumagai, and K. Sinno, 1982, Ionospheric disturbances over Japan due to the May 1980 eruption of Mount St. Helens, *J. Atmos. Terr. Phys.* **44**, 10, 863–868.
- Olson, J.V., C.R. Wilson, and R.A. Hansen, 2003, Infrasound associated with the 2002 Denali fault earthquake, Alaska, *Geophys. Res. Lett.*, **30** (23): 2195, doi:10.1029/2003GL018568.
- Otsuka, Y., N. Kotake, I. Tsugawa, K. Shiokawa, T. Ogawa, E.S. Saito, M. Kawamura, T. Maruyama, N. Hemmakorn, and T. Komolmis, 2006, GPS detection of total electron content variations over Indonesia and Thailand following the 26 December 2004 earthquake, *Earth Planets Space*, **58**, 159–165.
- Pekeris, C.L., 1948, The propagation of a pulse in the atmosphere, 2, *Phys. Rev.*, **73**, 145–154.
- Peltier, W.R. and C.O. Hines, 1976, On the possible detection of tsunamis by monitoring of the ionosphere, *J. Geophys. Res.*, **81**, 1995–2000.
- Pfeffer, R.I. and J. Zarichny, 1963, Acoustic-gravity wave propagation in an atmosphere with two sound channels, *Geofis. Pura Appl.*, **55**, 175–199.
- Plafker, G., 1965, Tectonic deformation associated with the 1964 Alaska earthquake, *Science*, **148**, 1675–1687.
- Press, F. and D.G. Harkrider, 1962, Propagation of acoustic-gravity waves in the atmosphere, *J. Geophys. Res.*, **67**, 3889–3908.
- Press, F. and D.G. Harkrider, 1966, Air-sea waves from the explosion of Krakatoa, *Science*, **151**, 1325–1327.
- Roberts, D.H., J.A. Klobuchar, P.F. Fougere, and D.H. Hendrickson, 1982, A large amplitude traveling ionospheric disturbances produced by the May 18, 1980, explosion of Mount St. Helens, *J. Geophys. Res.*, **87**, 6291–6301.
- Row, R.V., 1967, Acoustic-gravity waves in the upper atmosphere due to a nuclear detonation and an earthquake, *J. Geophys. Res.* **72**, 1599–1610.
- Saito, T. and T. Furumura, 2009, Three-dimensional simulation of tsunami generation and propagation: Application to intraplate events, *J. Geophys. Res.*, **114**, B02307, doi:10.1029/2007JB005523.
- Scorer, R.S., 1950, The dispersion of pressure pulse in the atmosphere, *Proc. Roy. Soc., London, A*, **201**, 137–157.
- Shinagawa, H., T. Iyemori, S. Saito, and T. Maruyama, 2007, A numerical simulation of ionospheric and atmospheric variations associated with the Sumatra earthquake on December 26, 2004, *Earth Planets Space*, **59**, 1015–1026.
- Suda, N., K. Nawa, and Y. Fukao, 1998, Earth's background free oscillations, *Science*, **279**, 2089–2091.
- Symons, G.J., 1888, The eruption of Krakatoa and subsequent phenomena, Trubner, London.
- Tahira, M., 1982, A study of the infrasonic waves in the atmosphere, (II) Infrasonic waves generated by the explosions of the Volcano Sakurajima, *J. Meteorol. Soc., Japan*, **60** (No.3), 896–907.
- Tahira, M., 1988a, A study of long range propagation of infrasonic waves in the atmosphere, (I) Observation of the volcanic infrasonic waves propagating through the thermospheric duct, *J. Meteorol. Soc., Japan*, **66** (No.1), 12–26.
- Tahira, M., 1988b, A study of long range propagation of infrasonic waves in the atmosphere, (II) Numerical study of the waveform deformation along the thermospheric ray paths, *J. Meteorol. Soc., Japan*, **66** (No. 1), 27–37.
- Tahira, M., 1996, A study of infrasonic waves of the atmosphere, presented at the Meteorological Society of Japan, Nagoya, Japan.
- Tahira, M., M. Nomura, Y. Sawada, and K. Kamo, 1996, Infrasonic and acoustic-gravity waves generated by the Mount Pinatubo Eruption of June 15, 1991, in "Fire and Mud: Eruption and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines", 601–613.
- Tanimoto, T., 1999, Excitation of normal modes by atmospheric turbulent source of long-period seismic noise, *Geophys. J. Int.*, **136**, 305–402.
- Tanimoto, T. and J. Artru-Lamin, 2007, Interaction of solid Earth, atmosphere, and ionosphere, in "Treatise on Geophysics", Vol.4, Elsevier, 421–444.
- Tanimoto, T. and J. Um, 1999, Cause of continuous oscillations of the Earth, *J. Geophys. Res.*, **104** (B12), 28, 273–28,739.
- Tanimoto, T., J. Um, K. Nishida, and N. Kobayashi, 1998, Earth's continuous oscillations observed on seismically quiet days, *Geophys. Res. Lett.*, **25** (10), 1553–1556.
- Wares, G.W., K.W. Champion, H.L. Pond, and A.E. Cole, 1960, Model Atmosphere, in "Handbook of Geophysics", 1-1-1-37, The McMillan Co.
- Watada, S., 2009, Radiation of acoustic and gravity waves and propagation of boundary waves in the stratified fluid from a time-varying bottom boundary, *J. Fluid Mech.*, **627**, 367–377.
- Watada, S. and H. Kanamori, 2010, Acoustic resonant oscillations between the atmosphere and the solid earth during the 1991 Mt. Pinatubo explosion, *J. Geophys. Res.*, **115**, B12319, doi:10.1029/2010JB007747.
- Watada, S., N. Arai, T. Murayama, M. Iwakuni, M. Nogami, T. Oi, Y. Imanishi, and Y. Kitagawa, 2010, Azimuthal traveltime and amplitude anomalies of tropospheric and thermospheric acoustic waves from the explosive eruption of the Sakurajima volcano in Japan, S11A-1931, presented at the 2010 AGU Fall Meeting, San Francisco.
- Watada, S., T. Kunugi, K. Hirata, H. Sugioka, K. Nishida, S. Sekiguchi, J. Oikawa, Y. Tsujii, and H. Kanamori, 2006, Atmospheric pressure change associated with the 2003 Tokachi-Oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*,

- 33**; L 24306doi:10: 1029 /2006 GL027967.
- Weston, V.H, 1961, The pressure pulse produced by a large explosion in the atmosphere, *Can. J. Phys.*, **39**, 993-1009.
- Whipple, F.J.W., 1930, The great Siberian meteor and the waves, seismic and aerial, which it produced, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **56**, 287-304.
- 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**, No.8, 765-768.
- Wilson, C.H. and R.B. Forbes, 1969, Infrasonic waves from Alaskan volcanic eruptions, *J. Geophys. Res.*, **74**, No. 18, 4511-4522.
- Yamamoto, R., 1955, The microbarographic oscillations produced by the explosions of hydrogen bombs in the Marshall Islands, *Weather*, **10**, 321-325.
- Yamamoto, R., 1956, The microbarographic oscillations produced by the explosions of hydrogen bombs in the Marshall Islands, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **57**, 106-109.
- Yamamoto, R., 1957, A dynamical theory of the microbarographic oscillations produced by explosion of hydrogen bombs, *J. Meteorol. Soc. Japan*, **35**, 32-40.
- Yamasato, H., T. Sakai, and Y. Fujiwara, 2007, Infrasonic observation near active volcanoes in Japan, 2007, *Infrasound Technology Workshop (ITW2007)*, Nov. 2007, Tokyo, Japan.
- Yeh, K.C. and C. Liu, 1974, Acoustic-gravity waves in the upper atmosphere, *Rev. Geophys. Space Phys.*, **12**, 193-216.
- Young, J.M. and G.F. Greene, 1982, Anomalous infrasound generated by the Alaskan earthquake of 28 March, 1964, *J. Acoust. Soc. Am.*, **71**, 334-339.
- Yuen, F.C., P.F. Weaver, R.K. Suzuki, and A.S. Furumoto, 1969, Continuous, traveling coupling between seismic waves and the ionosphere evident in May 1968 Japan earthquake data, *J. Geophys. Res., Space Physics*, **24** (9), 2256-2264.
- Zürn, W. and R. Widmer, 1996, Worldwide observation of bichromatic long-period Rayleigh waves excited during the June 15, 1991, Eruption of Mount Pinatubo, in "Fire and Mud: Eruption and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines", 615-624.