

## 1960年代以降の音波、インフラサウンド、重力波の研究 Studies on the acoustic, infrasonic and gravity waves since the 1960s

加藤 進<sup>1\*</sup>  
Susumu Kato<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 京都大学  
<sup>1</sup>Kyoto University

Since the basic theory of acoustic gravity wave was established in the 1960s, many small dynamic disturbances in the upper atmosphere, taking place either naturally or artificially, have been well understood in terms of these waves. Particularly, travelling ionospheric disturbances (TID) were found to be a manifestation of gravity waves. Later, nuclear explosions have been considered to be detected as the acoustic gravity wave sources. Also aurora particles has been found to be the wave sources. Recently, tsunami produced by earth quakes has been interested as acoustic gravity wave sources though the precise detection system has been far from complete. In understanding gravity waves whose propagating velocity, is as slow as local winds, we have to consider the frequencies to be often seriously Doppler-shifted by local winds. In the 1980s gravity waves, propagating from the lower to upper atmosphere, are considered to be saturated dynamically and thermodynamically, resulting to release the angular momentum to the ambient atmosphere, contributing to the peculiar mesosphere general circulation.

As to atmospheric tides which are gravity waves with global scales and with periods of one solar-day or its submultiples, the classical tidal theory was established in the 1960s clarifying tides and other planetary-scale wave structures as consisting of both positive and negative modes, each of which depends on either positive and negative sign of the eigen value of the fundamental equation i.e. the Laplace tidal equation, respectively. The classical tidal theory has solved an outstanding problem on the geomagnetic Sq variation which is the geomagnetic variation originating in the ionosphere being observed on the earth's surface. Thus, we have realized that various atmospheric waves contribute to coupling between the lower and upper atmosphere.

We saw since the 1980s remarkable steps forwards in observation of the atmospheric waves particularly by radars and lidars. The Mesosphere, Stratosphere and Troposphere (MST) radars have been constructed in many places in the world providing observational supports of the theories. Particularly, the MU radar Kyoto University, constructed in 1984, has played an important role in showing the saturation spectrum and momentum release of gravity waves for contributing to the mesosphere general circulation. It should be remarked that while a lot of observation data about atmospheric waves is available now, very often the data analysts may be lacking in clear understanding the basic theories. Hopefully, the present paper may help them improve the lacking.

キーワード: 音波, 重力波, 大気, 潮汐, MST レーダー, 伝搬  
Keywords: acoustic waves, gravity waves, atmosphere, tide, MST radar, propagation

## チェリャビンスク隕石火球：広帯域地震計および微気圧計に記録された衝撃波シグナルの解析

### Chelyabinsk meteorite fall: analysis of shockwave signals recorded by broadband seismometers and infrasound sensors

石原 吉明<sup>1\*</sup>, 平松 良浩<sup>2</sup>, 西田 究<sup>3</sup>, 新井 伸夫<sup>4</sup>, 岩國 真紀子<sup>4</sup>, 柿並 義宏<sup>5</sup>, 古本 宗充<sup>6</sup>, 山本 真行<sup>5</sup>  
Yoshiaki Ishihara<sup>1\*</sup>, Yoshihiro Hiramatsu<sup>2</sup>, Kiwamu Nishida<sup>3</sup>, Nobuo Arai<sup>4</sup>, Makiko Iwakuni<sup>4</sup>, Yoshihiro Kakinami<sup>5</sup>, Muneyoshi Furumoto<sup>6</sup>, Masa-yuki Yamamoto<sup>5</sup>

<sup>1</sup>産業技術総合研究所, <sup>2</sup>金沢大学, <sup>3</sup>東京大学地震研究所, <sup>4</sup>日本気象協会, <sup>5</sup>高知工科大学, <sup>6</sup>名古屋大学  
<sup>1</sup>National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, <sup>2</sup>Kanazawa Univ., <sup>3</sup>ERI, Univ. of Tokyo, <sup>4</sup>Japan Weather Association, <sup>5</sup>Kochi Univ. of Tech, <sup>6</sup>Nagoya Univ.

A huge bolide was appeared in the skies over the Ural district, Russia around 03:20 UTC, and a few minutes after, strong shockwave struck at Chelyabinsk city. The shockwave destroyed lots of window glasses of buildings and injured more than 1,000 residents. The shockwave signals were clearly recorded by global broadband seismic network and CTBT-IMS infrasound monitoring array stations. At the small meteorite fall (e.g., Jan. 20th, 2013 fireball event, Iwakuni et al., this JpGU meeting), the shockwave related signal detection range is limited as wide as 150 km from terminal burst point or atmospheric trajectory. However, the case of Chelyabinsk bolide, we could identify shockwave related wave phenomena at least beyond 1,000s km in range. It is no doubt that this is the largest bolide event since 1908, when the Tunguska event occurred.

In this presentation, we will present the results of analysis of shockwave related phenomena based on seismic, infrasound, and GPS TEC records.

キーワード: 隕石落下, 衝撃波, インフラサウンド

Keywords: meteorite fall, shockwave, infrasound

## 多地点アレイセンサで検出されたロケット打上時インフラサウンド信号の減衰曲線 Attenuation curve of infrasound signal from a sounding rocket launch detected by multiple-sites arrayed sensors

山本 真行<sup>1\*</sup>, 畠山 彩乃<sup>1</sup>, 木原 大城<sup>1</sup>

Masa-yuki Yamamoto<sup>1\*</sup>, Aiyo Hatakeyama<sup>1</sup>, Daiki Kihara<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 高知工科大学

<sup>1</sup> Kochi University of Technology

Infrasound and audible sound propagation in atmosphere is one of the open fields of the atmospheric science. Infrasound and atmospheric gravity waves propagating vertically up to the thermosphere is important in energy transportation way from the ground/ocean to the thermosphere. These waves can possibly be a seed of observable waves in upper atmosphere as many kinds of horizontal waves observed by optically or electromagnetically at each fixed altitude, suggesting they might be a key of atmospheric studies in vertical interactions. Many kinds of sources in naturally and artificially on ground, ocean, or troposphere like volcanic eruptions, earthquakes, tsunamis, artificial explosions, traffic of vehicles and planes can emit acoustic/infrasonic waves, however, experiments of direction finding by multiple-sites arrayed infrasound sensors in mesoscale region have been limited.

Determination of wave source coordinates of infrasonic waves was studied by using multiple eruptions of Sakurajima volcano and 3 sounding rocket launches from Uchinoura Space Center (USC), JAXA. In August 2012, we deployed 8 infrasound sensors at 4 sites as 2 triangles of 3-sensor arrays (Chaparral Model-2.5) and 2 independent sensors (Model-2) at 4 independent azimuths in separations within 14 km from the launch pad. During the experiment, JAXA's S-310-41 sounding rocket was launched at USC at 16:30 JST on Aug. 7, 2012. A clear infrasound pulse was detected at each 3 of 4 sites, however, not at 1 site. Based on the wind measurement on ground and by radiosondes, wind vector was ENE to WSW at the launch time. The observation site in negative result was located in SW azimuth and a high mountain was located between the launch pad and the site, implying the site was in the shadow region of the infrasound propagation at that time. According to the pulse signal at the other 3 sites and previous two rocket launches, attenuation curve by atmospheric viscosity was clearly observed between 1 km and 63 km, suggesting maximum propagation distance of about 40 km from the launch pad for S-310 and S-520 type sounding rockets.

The data were recorded as win-format files by Hakusan LS-8000WD and LS-8800 data loggers as well as SAYA 16 bit A/D boards with a PC at each site. Data viewer software directly from the win-format binary files was developed for the direction finding of wave source azimuth by each 3-sensor array. Using the software, infrasonic wave source coordinates by the Sakurajima eruptions and the rocket launches were successfully confirmed within a few km radius. In this paper, we will present a summary of direction finding experiments and introduce planned multiple-sites arrayed observation of infrasound in Kochi seacoast.

キーワード: インフラサウンド, 方向探知, センサアレイ, 観測ロケット, 減衰, 大気粘性

Keywords: infrasound, direction-finding, sensor array, sounding rocket, attenuation, atmospheric viscosity

## 昭和基地周辺の多地点センサレイによる極域インフラサウンド観測 Infrasound observation in polar region by multiple-sites sensor arrays at around Syowa station

村山 貴彦<sup>1\*</sup>, 金尾 政紀<sup>2</sup>, 山本 真行<sup>3</sup>, 松島 健<sup>4</sup>, 石原 吉明<sup>5</sup>

Takahiko Murayama<sup>1\*</sup>, Masaki Kanao<sup>2</sup>, Masa-yuki Yamamoto<sup>3</sup>, Takeshi Matsushima<sup>4</sup>, Yoshiaki Ishihara<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 日本気象協会, <sup>2</sup> 国立極地研究所, <sup>3</sup> 高知工科大学, <sup>4</sup> 九州大学, <sup>5</sup> 産業総合技術研究所

<sup>1</sup>Japan Weather Association, <sup>2</sup>National Institute of Polar Research, <sup>3</sup>Kochi University of Technology, <sup>4</sup>Kyushu University,

<sup>5</sup>Advanced Industrial Science and Technology

Not only seismic observation but also infrasound monitoring in Antarctica is important for investigating polar region phenomena like icequakes. At Syowa station (SYO; 39E, 69S), we built a pilot infrasound site with single Chaparral Model-2 sensor in 2008 as a chance of IPY (international Polar Year) campaign. Since then, infrasonic signals have been recorded continuously at Syowa, revealing the existence of continuous low-frequency pressure waves corresponding to the Double-Frequency Microbaroms (DFM) with peaks between 4 and 10 s in whole season. Signals with same period are recorded in broadband seismograph at SYO (microseisms). The peak amplitudes of DFM reflect the influence of winter cyclonic storms in Southern Ocean, indicating relatively lower amplitudes during winters, possibly caused by sea-ice extent around the coast with decreasing oceanic loading effects. In contrast, Single-Frequency Microseism-baroms (SFM, between 12 and 30 s) are observable under storm conditions particularly in winter. Several characteristic waves detected by seismographs in Antarctica are originated from physical interaction between solid earth and atmosphere-ocean-cryosphere, involving environmental changes.

On infrasound data, stationary signals are identified with harmonic over tones at a few Hz to lower most human audible band, which appear to be local effects, such as sea-ice cracking vibration. Microseism-baroms are useful proxy for characterizing ocean wave climate, and continuous monitoring by multiple-sites seismographs and infrasound sensors contribute to FDSN and CTBT in southern high latitude. In JARE-54 program, we expanded infrasound sensors to the suburbs of SYO and multiple-sites infrasound observation was realized in February 2013. In order to detect the realistic wave source locations near SYO, array observation and multiple-sites monitoring of infrasonic and seismic waves are extremely important. The current observation project at around SYO is expected to show the existing phenomena in Antarctica with their underlying physical processes. In this paper, infrasound observation at SYO and surroundings will be discussed.

キーワード: インフラサウンド, 地震波, 南極, マイクロバロムス, 氷震, センサレイ

Keywords: infrasound, seismic waves, Antarctica, microbaroms, icequake, sensor array

## 固体地球起源の大気変動現象を解明するためのデータ同化システムの開発 Data assimilation system to comprehend atmospheric variations associated with the solid Earth

長尾 大道<sup>1\*</sup>, 富澤 一郎<sup>2</sup>, 家森 俊彦<sup>3</sup>, 金尾 政紀<sup>4</sup>, 樋口 知之<sup>1</sup>

Hiomichi Nagao<sup>1\*</sup>, Ichiro Tomizawa<sup>2</sup>, Toshihiko Iyemori<sup>3</sup>, Masaki Kanao<sup>4</sup>, Tomoyuki Higuchi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 統計数理研究所, <sup>2</sup> 電気通信大学 宇宙・電磁環境研究センター, <sup>3</sup> 京都大学理学研究科 附属地磁気世界資料解析センター, <sup>4</sup> 国立極地研究所

<sup>1</sup>The Institute of Statistical Mathematics, <sup>2</sup>The University of Electro-Communications, <sup>3</sup>Graduate School of Science, Kyoto University, <sup>4</sup>National Institute of Polar Research

地震や火山等の固体地球起源のイベントが発生した際に、大気中に波動が励起され、ついには高度数十～数百 km の電離層にまで達するという現象が知られている。特に、2011 年東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）の際には、東アジアの微気圧観測点において、津波起源と思われる微気圧変動が捉えられたことが報告されている（Arai et al., 2011）。我々は、このような地震音波現象を含む固体地球と大気間の物理的相互作用メカニズムを解明することを目的に、HF ドップラーによる電離層観測を実施している電気通信大学 菅平宇宙電波観測所に微気圧観測点を新たに設置し、2011 年 12 月から微気圧の連続観測を開始した。新観測点では、2012 年 3 月 14 日に発生した 2 つの比較的大きな東北地方太平洋沖地震の余震（三陸沖、千葉県沖）によって励起された微気圧変動および電離層変動を捉えることに成功した。この地震音波を地震波と同時に解析すれば、震源についてより詳細な情報が得られることが指摘されている（Nagao et al., 2012）。

菅平観測点では、東北地方太平洋沖地震の余震に伴う大気変動を狙い通り捉え、それを理論計算によって再現することに成功した。本研究では、微気圧観測の強化とデータ同化計算の高速化を図ることを主な目的に、地震をはじめとする固体地球起源の大気変動現象を解明するためのデータ同化システムを構築した。地震発生直後の音波伝搬について、地震波解析から得られた震源に関するモデルパラメータを少しずつ変えて複数のシナリオを同時計算しておき、地震音波が微気圧観測点に到達した直後から、予め計算したシナリオと観測データを同化させることにより、モデルパラメータを決定することが可能となっている。

キーワード: データ同化, 微気圧, 地震音波

Keywords: data assimilation, microbarometer, seismoacoustic wave



## 光ファイバ変位計を用いた高精度微気圧計の開発 R&D of a highly sensitive barometer using an optical fiber transducer

高森 昭光<sup>1\*</sup>, 綿田 辰吾<sup>1</sup>, 今西 祐一<sup>1</sup>, 北島俊明<sup>2</sup>, 大井 拓磨<sup>3</sup>  
Akiteru Takamori<sup>1\*</sup>, Shingo Watada<sup>1</sup>, Yuichi Imanishi<sup>1</sup>, Toshiaki Kitajima<sup>2</sup>, Takuma Oi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> ミトミ技研, <sup>3</sup> 東邦マーカンタイル

<sup>1</sup>ERI, University of Tokyo, <sup>2</sup>Mitomi Giken Co.,Ltd, <sup>3</sup>TOHO MERCANTILE CO., LTD.

地球表面を覆う大気と固体地球とは、様々に相互作用していることが、近年の重力・ひずみ・地震や地球回転の精密観測を通じて明らかとなっている。

たとえば、地震や火山の噴火に伴う地表の運動によって大気中に低周波（約 20 Hz 以下）の音波であるインフラソニック波が放出されることが知られており、微気圧計を用いて実際に観測されている（Watada, et al., GRL, 2006）。これまでの地動観測に基づく地震や火山爆発現象の定量化に加え、従来困難であった地表付近の急激な地殻変動や爆発現象の定量化へ道が開けつつある（Watada, JFM, 2009）。特に、気圧の観測点を多数・稠密に展開してインフラソニック波を捉えることができれば、データを相互補完して精度の高い情報を得られるだけでなく、伝達経路にある大気に関する物理量（密度や気温など）の面的分布を取り出せる可能性もあり、将来的には気象学への応用も考えられる。

このように、音波、すなわち局所的な気圧変動はそれ自体が固体地球物理学、気象学的に意義深い観測量である一方、他の観測において深刻な「雑音」となることもある。たとえば、地球の固有自由振動による重力加速度変動を観測することによって地球内部構造を解明する研究が行われている。このような重力変化はきわめて小さいが、超伝導重力計を用いて非常に高い精度の観測が実現されている（Courtier, Phys. Earth Planet. Inter, 2000 など）。この観測において、重力計周辺の大気分布が変化すると、大気による上方への重力（万有引力）の分布が変化し、地球変形による重力変化に対する雑音となる。現状では重力観測点での気圧変化を気圧計で観測し、大気密度変化に伴う重力変動を推定して、超伝導重力計のデータから取り除くという補正が行われている。しかし、補正の精度は不十分であり、観測にとって最大の制限要因となっている。この問題を克服するためには、重力の観測点だけではなくその周辺で稠密に精度の高い気圧観測網を展開してより詳細な気圧データを得ることが必要だと考えられている。他にも、申請者らはレーザー干渉計を用いた精密ひずみ観測によって地球自由振動を直接捉えているが、この観測においても大気の荷重変化の影響を補正する必要がある。これもひずみ計周辺の複数の点での局地的な大気圧変動を観測することによってより有効な補正を行うことが可能であると考えられる。

本研究の目的は上記のような応用に適した微気圧計を開発することである。必要な感度（分解能）を達成しつつ、多点展開に適した高い信頼性と低コストを両立する手法として、具体的には、大気圧変動によるペローズなどのリファレンスの変形を光ファイバ変位計で読み取る方式が適していると考え、これらを組み合わせた気圧計の開発を行なっている。

本講演では開発中の気圧計の概要やこれまでに行なった実験結果について紹介する予定である。

キーワード: 微気圧計, 光ファイバ変位計

Keywords: sensitive barometer, optical fiber transducer

## CTBTの検証制度を担うインフラサウンド観測網への期待 The Infrasound Observation Network for the CTBT's verification regime and its expectations for scientific studies

新井 伸夫<sup>1\*</sup>  
Nobuo Arai<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 日本気象協会  
<sup>1</sup>Japan Weather Association

The purpose of the verification regime of the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty (CTBT) is to monitor countries' compliance with the CTBT which bans all nuclear explosions on the planet. The CTBT's global alarm system is designed to detect any nuclear explosion conducted on Earth ? in the underground, underwater or in the atmosphere. The CTBT Organization is establishing and operating the International Monitoring System (IMS) which consists of 337 facilities located all over the world. The IMS uses four different technologies, which are seismic, hydroacoustic, infrasound and radionuclide, to monitor the planet for nuclear explosions. Atmospheric waves with very low frequencies are called infrasound and the CTBTO is establishing its observation network which has 60 stations in 35 countries around the world. Each station is composed of an array of infrasound sensors with an aperture of about 2 km. Infrasound sensors measure micropressure changes in the atmosphere which are produced by a variety of natural and man-made sources, for example, exploding volcanoes, earthquakes, meteors and storms in the natural world and nuclear, mining and large chemical explosions in the man-made arena. Nowadays, 45 stations have been installed and are sending data to the International Data Centre in Vienna in real time basis. And observed data are available for CTBT member states. The Infrasound Observation Network is unique by its global and homogeneous coverage and its data quality and has considerable potential for civil and scientific applications.

キーワード: インフラサウンド, 観測網, 大気圧変動  
Keywords: infrasound, observation network, atmospheric pressure

## HF ドップラによって観測された 2012 年 5 月 6 日の竜巻起源の音波による電離圏擾乱

### Ionospheric disturbance caused by acoustic wave due to the tornado on 6 May 2012 observed by the HF Doppler network

富澤 一郎<sup>1\*</sup>, 西村仁志<sup>1</sup>

Ichiro Tomizawa<sup>1\*</sup>, Hitoshi Nishimura<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 電気通信大学宇宙・電磁環境研究センター

<sup>1</sup>SSRE, Univ. of Electro-Comm.

2012 年 5 月 6 日 12 時 35 ~ 55 分 JST に茨城県つくば市付近で強い竜巻が発生した。この竜巻発生域の上空に反射点を持つ電通大 HF ドップラ (HFD) 観測ネットワークにおいて、ドップラの短時間変動が観測された。この変動のスペクトルを解析したところ、20 ~ 300 秒の大気音波成分に起因した変動であることを確認できた。

竜巻による大気波動については、Davies and Jones(1977) など多数の報告があるが、竜巻直上での観測は今回が初めてである。反射点が竜巻に最も近かった大洗の HFD5006 kHz 観測では、ドップラ変動から求めた大気波動周期として 120、170、240 秒が全期間安定して得られた。これらの周期は Davies and Jones(1977) の報告と合っている。100 秒以下の短周期成分が、竜巻が HFD 反射点に近づいたときに観測された。また、300 秒以上の長周期側で明確な減衰が見られた。同じ HFD 反射点でも反射高度の高い 8006kHz の方が短周期変動が減衰していることから、F 層高度では短周期成分の減衰が大きいことも分かった。以上のことから、下層大気からの音波モードでの伝搬であることが確認できた。

つぎに、観測された 3 つのドップラ変動周期について、Chimonas and Peltier(1973) の熱圏下部と地表との間の反射伝搬モデルで解析を行った。茨城県内の 3 つの HFD 観測点間の位相差解析を行い、水平位相速度 132、66、56 m/s を得た。これらの水平速度、反射高度に適合したモードから波源までの距離を推定したところ、おおよそ竜巻位置と合致した。また、反射点間位相から求めた波面方向も矛盾しない結果を得た。

さらに詳しい解析結果については、講演時に報告する予定である。

#### 参考文献

[1]K.Davies and J.E.Jones : Acoustic waves in the ionospheric F2-region produced by severe thunderstorms, J. Atmos. Terr. Phys., Vol.85, pp.1787-1744, 1973.

[2]G.Chimonas and W.R.Peltier : On severe storm acoustic signals observed at ionospheric heights, J. Atmos. Terr. Phys., Vol.36, pp.821-828, 1973.

キーワード: 電離圏擾乱, 大気音波, 2012 年 5 月 6 日竜巻, HF ドップラ観測

Keywords: ionospheric disturbance, acoustic wave, tornado on 6 May 2012, HF Doppler observation



## 地震・津波により励起された音波による電離圏擾乱 Ionospheric disturbances induced by acoustic waves excited by earthquakes and tsunamis

柿並 義宏<sup>1\*</sup>, 山本 真行<sup>1</sup>

Yoshihiro Kakinami<sup>1\*</sup>, Masa-yuki Yamamoto<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 高知工科大学

<sup>1</sup>Kochi University of Technology

Since the first report of atmospheric perturbation associated with earthquakes in 1960's, many evidences of ionospheric perturbation have been reported using ionosondes. A dense GPS array is a good 2-D monitoring tool for studying ionosphere because total electron content (TEC) can be estimated using the phase difference of two L-band ( $f_1=1575.42$  MHz and  $f_2=1227.60$  MHz) carriers emitted from GPS satellites. Recently, using the GPS-TEC, ionospheric disturbances induced by infrasound excited by earthquakes and tsunamis have been well investigated.

After the M 9.0 Tohoku earthquake (Tohoku EQ) occurred on March 11 of 2011, many types of ionospheric disturbance such as acoustic resonance and gravity wave were observed. The initial TEC variation was observed 9 min after the main shock. Distribution of the intensities of the initial TEC variation showed clear inclination and declination effect of magnetic field. After the initial TEC variation, deep plasma density depletion named "tsunamigenic ionospheric hole" was observed over the tsunami source area. Similar depletion was also found in the 2010 M8.8 Chile, the 2004 M9.1 Sumatra earthquakes and others.

Asymmetry of propagation of the initial TEC variation was found. A faster coseismic ionospheric disturbance (CID) propagated at 3.0 km/s only in the west-southwest, while a slower CID propagated concentrically at 1.2 km/s or slower from the tsunami source area in the Tohoku EQ. Taking the propagation speed and oscillation cycle into account, the faster CID was possibly induced by acoustic waves excited by a Rayleigh wave but the slower CID was associated with an acoustic or gravity wave. If the acoustic wave excited by the Rayleigh wave induced the faster CID at each point, the faster CID must be observed even at north of the epicenter because the Rayleigh wave propagated all directions from the epicenter. Therefore, the acoustic wave excited by the Rayleigh wave formed superimposed wave front and then it disturbed the ionosphere.

A CID associated with acoustic resonance also showed asymmetry of the distribution. North edge of the CID associated with acoustic resonance corresponded to north edge of the tsunamigenic ionospheric hole. Further, the propagation velocity of the CID is similar to that of acoustic waves. The results imply the source of acoustic resonance was located over the tsunami source area and acts as a point source.

キーワード: 電離圏擾乱, GPS-TEC, 地震, レイリー波, 音波共鳴, 津波電離圏ホール

Keywords: ionospheric disturbance, GPS-TEC, earthquake, Rayleigh wave, acoustic resonance, tsunamigenic ionospheric hole

## 津波と津波源によって引き起こされる電離圏擾乱の数値シミュレーション Numerical simulations of ionospheric disturbances induced by tsunami and tsunami source

松村 充<sup>1\*</sup>, 津川 卓也<sup>2</sup>, 品川 裕之<sup>2</sup>, 齊藤 昭則<sup>3</sup>, 大塚 雄一<sup>4</sup>, 家森 俊彦<sup>5</sup>

Mitsuru Matsumura<sup>1\*</sup>, Takuya Tsugawa<sup>2</sup>, Hiroyuki Shinagawa<sup>2</sup>, Akinori Saito<sup>3</sup>, Yuichi Otsuka<sup>4</sup>, Toshihiko Iyemori<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 電気通信大学 宇宙・電磁環境研究センター, <sup>2</sup> 情報通信研究機構, <sup>3</sup> 京都大学大学院理学研究科地球物理学教室, <sup>4</sup> 名古屋大学太陽地球環境研究所, <sup>5</sup> 京都大学大学院理学研究科附属地磁気世界資料解析センター

<sup>1</sup>Center for Space Science and Radio Engineering, University of Electro-Communications, <sup>2</sup>National Institute of Information and Communications Technology, <sup>3</sup>Department of Geophysics, Graduate School of Science, Kyoto University, <sup>4</sup>Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, <sup>5</sup>Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism, Graduate School of Science, Kyoto University

過去の観測、理論および数値計算から、津波は大気重力波を励起し電離圏擾乱を引き起こすことが知られている。大津波やその波源の海面変動に対する電離圏の応答を調べることは、大気圏と電離圏の上下結合過程を理解する上で、また、電離圏観測を津波の早期警報に応用する上で有用である。2011年の東北沖地震後に日本の地上GPS受信機網により観測された電離圏のTEC(全電子数)には、津波とほぼ同じ位相速度(220-290m/s)を持った伝播性の変動が見られた。この事例については、津波とその波源が近接していたため、その両者が大気重力波およびTEC変動の生成源となっていた可能性がある。両者の寄与は切り分けてそれぞれに対する電離圏の応答を理解する必要がある。本研究では、2次元の津波、3次元の非静力学圧縮性大気、3次元の電離圏を結合させたモデルを開発し、津波および「津波源」のそれぞれに対するTEC変動の応答を調べた。シミュレーションの結果、「津波源」が作り出した220-290m/sのTEC変動の振幅は、津波そのものが作り出した変動の振幅と同程度であることが明らかになった。TECにはこの他に、位相速度420-780m/sの伝播性の変動および震央付近に局在する4分周期の変動も観測、シミュレーションともに見られた。これらの変動はほぼ「津波源」のみによって生成されたものであった。TEC変動の振幅と津波の振幅の関係は、TEC変動の振幅と「津波源」と振幅の関係から間接的に導出できる可能性がある。

キーワード: 大気重力波, 音波, 地震, 津波, TEC

Keywords: gravity wave, acoustic wave, earthquake, tsunami, TEC

## 音波・重力波現象解析用高精度大気圏電離圏モデルの開発

### Development of a high-resolution atmosphere-ionosphere model for analyzing acoustic-gravity wave phenomena

品川 裕之<sup>1\*</sup>, 松村 充<sup>2</sup>, 陣 英克<sup>1</sup>, 三好 勉信<sup>3</sup>, 藤原 均<sup>4</sup>, 津川 卓也<sup>1</sup>, 齊藤 昭則<sup>5</sup>, 家森 俊彦<sup>5</sup>, 丸山 隆<sup>1</sup>

Hiroyuki Shinagawa<sup>1\*</sup>, Mitsuru Matsumura<sup>2</sup>, Hidekatsu Jin<sup>1</sup>, Yasunobu Miyoshi<sup>3</sup>, Hitoshi Fujiwara<sup>4</sup>, Takuya Tsugawa<sup>1</sup>, Akinori Saito<sup>5</sup>, Toshihiko Iyemori<sup>5</sup>, Takashi Maruyama<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 情報通信研究機構, <sup>2</sup> 電気通信大学, <sup>3</sup> 九州大学, <sup>4</sup> 成蹊大学, <sup>5</sup> 京都大学

<sup>1</sup>NICT, <sup>2</sup>University of Electro-Communications, <sup>3</sup>Kyushu University, <sup>4</sup>Seikei University, <sup>5</sup>Kyoto University

地震、津波、火山、隕石落下、積雲活動、台風、日食、大規模爆発、ロケット発射などの突発性大気現象に伴うインフラソニック波や高周波の重力波などによって電離圏の変動が起きることは古くから示唆されてきた。しかし、超高層現象は極めて複雑であり、さまざまな要因で変動するため、これらの大気波動現象が具体的にどのようなメカニズムで電離圏変動を引き起こすのかは依然良く分かっていない。我々はこれまでに非静力学大気圏・電離圏結合モデルを開発し、それを用いて2004年のスマトラ沖地震や2011年の東北沖地震の際に観測された電離圏変動の再現を試みた。その結果、観測された電離圏変動が地震で励起された音波モードの波が上方に伝搬することによって起きたものであることを示した。このシミュレーション方法は音波・重力波に伴う現象を解析する上で、非常に有効なものと考えられる。我々は、今後このモデルをさらに高精度化し、様々な現象に対する電離圏への影響を計算し、大気圏・電離圏観測データ等と比較する予定である。これによって、自然現象・人工的な突発性現象に伴う大気音波の発生・伝搬過程と電離圏変動メカニズムをより詳細に明らかにできると期待される。本講演では、大気圏・電離圏モデルの現状と今後の計画について報告する。

キーワード: 音波, 重力波, 大気圏, 電離圏, 結合, モデル

Keywords: acoustic wave, gravity wave, atmosphere, ionosphere, coupling, model

## 重力音波共鳴起源の Pc5 型脈動と内部磁気圏起源の Pc5 型脈動の比較

### A comparison of Pc5 micro-pulsations associated with vertical acoustic resonance and those with substorm onset

家森 俊彦<sup>1\*</sup>, 服部 浩二<sup>2</sup>

Toshihiko Iyemori<sup>1\*</sup>, Koji Hattori<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 京都大学理学部

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Kyoto University, <sup>2</sup>Faculty of Science, Kyoto University

大きな地震や火山噴火、あるいは激しい大気擾乱に伴う重力音波共鳴の基本モードにより励起される Pc5 型地磁気脈動の周期と、磁気擾乱時、特に、サブストーム発生時などに見られる storm-time Pc5 型地磁気脈動の周期とは比較的近接しているため、両者の区別は注意を要する。2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震では、重力音波共鳴により生成されたと考えられる磁場振動が日本各地で Pc5 型地磁気脈動として観測されたが、場所により位相や成分に明瞭な違いが見られた。一方、2012 年 12 月 7 日に発生した東北沖アウターライズ地震では、約 90 分後に重力音波共鳴の基本モードにほぼ等しい周期 270 秒の Pc5 脈動が観測されたが、日本近辺では位相がほぼ一致しているため、磁気圏起源である可能性が高い。この発表では、両者を含め、いくつかの例について、脈動としての特性を比較した結果を示す。

キーワード: 地磁気脈動, サブストーム, 重力音波共鳴

Keywords: geomagnetic micro-pulsation, substorm, vertical acoustic resonance

## 火球に起因する微気圧振動波形 The Infrasound signals produced by a bolide on 20th January, 2013

岩國 真紀子<sup>1\*</sup>, 新井 伸夫<sup>1</sup>, 平松 良浩<sup>2</sup>, 石原 吉明<sup>3</sup>, 山本 真行<sup>4</sup>, 柿並 義宏<sup>4</sup>, 村山 貴彦<sup>1</sup>, 野上麻美<sup>1</sup>  
Makiko Iwakuni<sup>1\*</sup>, Nobuo Arai<sup>1</sup>, Yoshihiro Hiramatsu<sup>2</sup>, Yoshiaki Ishihara<sup>3</sup>, Masa-yuki Yamamoto<sup>4</sup>, Yoshihiro Kakinami<sup>4</sup>,  
Takahiko Murayama<sup>1</sup>, Mami Nogami<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 日本気象協会, <sup>2</sup> 金沢大学理工研究域自然システム学系, <sup>3</sup> 産業技術総合研究所情報技術研究部門ジオインフォマティクス研究グループ, <sup>4</sup> 高知工科大学 システム工学群

<sup>1</sup>Japan Weather Association, <sup>2</sup>School of Natural System, College of Science and Engineering, Kanazawa University, <sup>3</sup>Geoinformatics Research Group, Information Technology Research Institute, AIST, <sup>4</sup>Department of systems engineering, Kochi University of Technology

The infrasound observation system has been installed in Isumi, Chiba-prefecture (approximately 60 km SE of Tokyo) as a component of the International Monitoring System for the CTBT's verification regime. It is an array observation site and is comprised of six elements with an aperture of about 2km. It had been deployed on November 2004. Some interesting infrasound signals are observed, which was generated by the volcanic explosions, large earthquakes, artificial explosions and so on.

A bolide was flying over Kanto region around 02:42 on 20th of January 2013 (JST). Optical observation data gave the information that the explosion area of this bolide was over Mt. Tsukuba. Distance between Mt. Tsukuba and Isumi is about 100km, back azimuth of Mt. Tsukuba is 350 degrees. The infrasound sensors detected some pulsed waves around 02:48. A back azimuth of signals was estimated 356 degrees from north. It is consistent with the area of its explosion. From observed apparent velocity of signals, the elevation angle of these signals was estimated 20 degrees. According to both this elevation angle and the distance, the altitude which the bolide explosion happened is estimated approximately 30km and travel time of atmospheric wave is calculated about 5 minutes. Arrival time of signals at Isumi is around 02:48, it is also consistent with evaluation results.

In this presentaion, some remarkable optical observation, seismic records and TEC are introduced and discussed.

キーワード: インフラサウンド, 火球, 爆発, 圧力波, 微気圧計

Keywords: infrasound, bolide, explosion, perssure wave, microbarometer



## 桜島における空振比較観測

### Intercomparison Observation of the Infrasonic at Sakurajima Volcano

新堀 敏基<sup>1\*</sup>, 小久保 一哉<sup>1</sup>, 高木 朗充<sup>1</sup>, 鬼澤 真也<sup>1</sup>, 山本 哲也<sup>1</sup>, 福井 敬一<sup>2</sup>, 安藤 忍<sup>3</sup>, 藤原 善明<sup>4</sup>, 坂井 孝行<sup>4</sup>, 山里 平<sup>4</sup>, 上田 義浩<sup>5</sup>, 加藤 幸司<sup>6</sup>, 中橋 正樹<sup>7</sup>, 松末 伸一<sup>7</sup>

Toshiki Shimbori<sup>1\*</sup>, Kazuya Kokubo<sup>1</sup>, Akimichi Takagi<sup>1</sup>, Shin'ya Onizawa<sup>1</sup>, Tetsuya Yamamoto<sup>1</sup>, Keiichi Fukui<sup>2</sup>, Shinobu Ando<sup>3</sup>, Yoshiaki Fujiwara<sup>4</sup>, Takayuki Sakai<sup>4</sup>, Hitoshi Yamasato<sup>4</sup>, Yoshihiro Ueda<sup>5</sup>, Koji Kato<sup>6</sup>, Masaki Nakahashi<sup>7</sup>, Shinichi Matsusue<sup>7</sup>

<sup>1</sup> 気象研究所, <sup>2</sup> 地磁気観測所, <sup>3</sup> 文部科学省, <sup>4</sup> 気象庁, <sup>5</sup> 大阪管区気象台, <sup>6</sup> 福岡管区気象台, <sup>7</sup> 鹿児島地方気象台

<sup>1</sup>Meteorological Research Institute, <sup>2</sup>Kakioka Magnetic Observatory, <sup>3</sup>MEXT, <sup>4</sup>Japan Meteorological Agency, <sup>5</sup>Osaka DMO,

<sup>6</sup>Fukuoka DMO, <sup>7</sup>Kagoshima LMO

気象庁は、火山噴火を捉える目的で、噴火に伴う空気振動を記録する空振計を火山近傍に設置して監視観測を行っている。気象研究所では、2009年度から5年計画の重点研究「気象観測技術等を活用した火山監視・解析手法の高度化に関する研究」の一部として、各種のインフラサウンドセンサーの特性を調査する目的で、桜島噴火に伴う空振の比較観測を鹿児島地方気象台の協力の下、南岳山頂火口から東南東約4.7 km 地点に位置する黒神町瀬戸において行っている。火山観測現業に使用している空振計（圧電型の超低周波マイクロホン）とコンデンサ型の超低周波マイクロホンによる同時観測の結果、位相特性の相違によって波形に差異があることがわかった。しかしながら、観測期間中に桜島で発生した規模の噴火に対して見られる空振波形の差異はピークピーク値あるいは実効値で比較すれば、異なる位相特性に起因する見かけ上の差に過ぎないことがわかった。さらに水晶振動型の圧力計を使用した空振観測なども含め、これまでの比較観測で明らかになった振幅特性や位相特性、風によるノイズレベルなどをまとめて報告する。

#### 謝 辞

比較観測では、京都大学の横尾亮彦氏の超低周波マイクロホンによる空振データも参考にさせていただいた。記して感謝の意を表します。

キーワード: 空振, 超低周波音, 超低周波マイクロホン, 気圧波, 圧力計, 火山観測

Keywords: air shock, infrasound, infrasound microphone, pressure wave, barometer, volcano monitoring

## S-310-41号観測ロケットを用いた中層・高層大気における音波伝搬特性の直接計測 In-situ measurement of acoustic wave propagation characteristics in middle and upper atmosphere by PDI on-board S-310-41

木原 大城<sup>1\*</sup>, 山本 真行<sup>1</sup>, 森永 隆稔<sup>2</sup>, 古本 淳一<sup>3</sup>

Daiki Kihara<sup>1\*</sup>, Masa-yuki Yamamoto<sup>1</sup>, Takatoshi Morinaga<sup>2</sup>, Jun-ichi Furumoto<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 高知工科大学, <sup>2</sup> 北海道大学, <sup>3</sup> 京都大学

<sup>1</sup>Kochi University of Technology, <sup>2</sup>Hokkaido University, <sup>3</sup>Kyoto University

高層大気中における音波伝搬路は基本的に温度場と風速場に依存しており、主な大気モデル(MSIS)により導出可能であるが、詳細な音波伝搬の解明には至っていない(Sutherland et al., 2004)。この領域での実測は比較的難しく過去の実験例も極めて限られている。1960年代には、観測ロケットに搭載した火薬を爆発させ地上の複数地点での音波伝搬特性から温度と風速の計測を行ったグレナード法(Stroud et al., 1960)が実施され、1990年代には低周波音発生装置により地上から100 Hz帯の低周波音を高層大気に向けて送り大気疎密を発生させMUレーダ(Middle and Upper Atmosphere Rader; 中層・高層大気観測レーダ)で観測を行うRASS(Radio Acoustic Sounding System)による結果が報告されている(Tsuda et al., 1994)が、飛翔体を用いた直接的な高層大気音波計測は実施されていない。

S-310-41号観測ロケットは、2012年8月7日にJAXA内之浦宇宙空間観測所より打ち上げられた。中層・高層大気における音波伝搬特性の直接計測を目的とした音波伝搬特性計測装置PDI(Propagation Diagnostics in upper atmosphere by Infrasonic/Acoustic waves)がサブペイロードの1つとして搭載され音波データの取得に成功したので詳細を報告する。PDIは、音波源となるスピーカー、検出器である3台のマイク、音波制御など行うエレキ部、および圧力計により構成される。スピーカーから出力電力1W、周波数10 Hzから1 kHzまでの7固定周波数の正弦波および無音を0.2秒刻みの1.6秒周期で繰り返し送出し、スピーカーと各マイク間のわずかな空間を経て伝搬する音をマイクにより計測した。搭載マイクは、ロケット燃焼時の燃焼音、ノーズコーン開頭およびメインペイロード分離時の封入火薬爆発音も軌道上で計測した。さらに、低周波音発生装置を用いて地上より50 Hz、100 Hzの音波を一定間隔で送出し、ロケット搭載マイクでの観測を試みた。

打上げから約34秒(高度約35 km)まで激しいロケット燃焼音が計測されてから、静穏となった後、搭載スピーカー出力音の計測が予定通り開始され、最高高度150 km到達までスピーカー出力音による伝搬強度プロファイルを確認することができた。計測音の解析から、気圧の低下(高度の上昇)に伴って信号強度が減衰することを確認できSutherland et al. (2004)による理論値と同等の傾向を示す結果が得られた。飛翔中に実施された火薬点火時の爆発音の計測にも成功し、音速、大気温度の算出を行ったが、サブペイロード用のテレメトリ容量の関係からサンプリングが十分でなく理論値との間に差異が生じた。また、地上から送出した音波は、搭載マイクでは確認できなかった。本発表では、打上げ前に真空チャンバを用いて実施した模擬実験結果および、大気モデルMSISとの比較研究結果について議論する。

キーワード: 観測ロケット, S-310-41, 音波伝搬, 中層・高層大気

Keywords: Sounding rocket, S-310-41, Acoustic wave propagation, Middle and Upper atmosphere

## PSD 式インフラサウンドセンサ開発および小型化 Development and downsizing of a PSD type infrasound sensor

真鍋 雄大<sup>1</sup>, 山本 真行<sup>1\*</sup>  
Yudai Manabe<sup>1</sup>, Masa-yuki Yamamoto<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 高知工科大学

<sup>1</sup> Kochi University of Technology

Infrasound is one of the open fields for remote-sensing methods of geophysical phenomena in the atmosphere. There have been developed and used many types of infrasound sensors, however, typically used infrasound sensors are almost manufactured by foreign countries, resulting high cost situation in Japan. If we can develop low cost infrasound sensors, multiple-site arrayed observation will be realized in near future. Recently, infrasound signal generated by tsunami was clearly detected by many CTBTO infrasound stations (Arai et al., 2011), suggesting a new era for establishing a dense infrasound sensor network in every part of Japan for preventing or reducing catastrophic disasters. Because the nature of pressure waves with large wavelength, amplitude of infrasound generated by tsunami might be proportional to the size of the disasters. Combination with sensor networks of seismometers on ground and ocean floor, GPS-buoy type wave recorders, and water manometers on ocean floor, establishing a dense network of infrasound sensors with arrayed configuration is desired.

Since 2006, we have been developing new sensing method of infrasound by using piezo film and PSD (Position Sensitive Detectors), achieving frequency range between 0.001 Hz and 10 Hz as well as minimum pressure level of 0.01 Pa (Yamamoto and Ishihara, 2009). Here, we tried downsizing the PSD type infrasound sensor developed in 2008 into a size of 0.15 m x 0.15 m x 0.25 m height with calibrating it by using space chamber (0.8 m length x 0.58 m diameter) as an accurate volume pressure reservoir. By pushing and pulling a small amount of air by a small syringe, calibrating pressure waves with extremely weak amplitude (10 Pa to 0.01 Pa) can be generated in the chamber, precise measurement of artificially generated infrasonic signals could be realized. The waves were measured not only by the developed PSD sensor, but also by Chaparral Model-2.5 infrasound sensor at the same time. Comparison with output signals by two types of sensors, the downsized PSD type infrasound sensor was carefully studied. In this poster, we will show the new design and obtained calibrating datasets.

キーワード: インフラサウンド, センサ開発, PSD, 小型化, 低コスト, 較正

Keywords: infrasound, sensor development, PSD, downsizing, low-cost, calibration

## IUGONETにおけるインフラサウンド関連メタデータの整備 Preparation of the metadata for infra-sound in IUGONET project

小山 幸伸<sup>1\*</sup>, 家森 俊彦<sup>1</sup>, 堀 智昭<sup>2</sup>, 田中 良昌<sup>3</sup>, 阿部 修司<sup>4</sup>, 新堀 淳樹<sup>5</sup>, 梅村 宜生<sup>2</sup>, 上野 悟<sup>6</sup>, 佐藤 由佳<sup>3</sup>, 谷田貝 亜紀代<sup>5</sup>, 八木 学<sup>7</sup>

Yukinobu Koyama<sup>1\*</sup>, Toshihiko Iyemori<sup>1</sup>, Tomoaki Hori<sup>2</sup>, Yoshimasa Tanaka<sup>3</sup>, Shuji Abe<sup>4</sup>, Atsuki Shinbori<sup>5</sup>, Norio UMEMURA<sup>2</sup>, Satoru UeNo<sup>6</sup>, Yuka Sato<sup>3</sup>, Akiyo Yatagai<sup>5</sup>, Manabu Yagi<sup>7</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科附属地磁気世界資料解析センター, <sup>2</sup> 名古屋大学太陽地球環境研究所, <sup>3</sup> 国立極地研究所, <sup>4</sup> 九州大学 国際宇宙天気科学・教育センター, <sup>5</sup> 京都大学生存圏研究所, <sup>6</sup> 京都大学大学院理学研究科附属天文台, <sup>7</sup> 東北大学理学研究科 惑星プラズマ・大気研究センター

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Kyoto University, <sup>2</sup>Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, <sup>3</sup>National Institute of Polar Research, <sup>4</sup>International Center for Space Weather Science and Education, Japan, <sup>5</sup>Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH), Kyoto University, <sup>6</sup>Kwasan & Hida Observatories, School of Science, Kyoto University, <sup>7</sup>Planetary Plasma and Atmospheric Research Center, Graduate School of Science, Tohoku University

京大地磁気センターにおいては、愛知教育大学の田平誠名誉教授によって観測された、1984-2004年に渡る刈谷インフラサウンドデータが整備・公開されている。また、IUGONETプロジェクトにおいては、超高層大気を主な対象としたメタデータ・データベースとデータ解析ソフトウェアを整備している。この一環として、上述の刈谷インフラサウンドデータに関するメタデータ、ならびにデータ解析ソフトウェアを整備しつつある。本発表では、上記に関する現状報告を行う。さらに、超高層大気分野以外の他分野との協力について提案する。

キーワード: 超高層大気, メタデータ, データベース, データ解析ソフトウェア, インフラサウンド

Keywords: upper atmosphere, metadata, database, data analysis software, infra-sound