

# インフラサウンド・音波帯域による大気リモートセンシング

山本真行（高知工科大学）

## 1. はじめに

大気中では長大スケールの地球物理現象が様々に発生しており、日々の気象現象から年スケールの頻度で発生する大地震・津波といった大規模自然災害をもたらす現象まで、間接的あるいは直接的に我々の生活に直結する存在である。本稿では地球大気モニタリング手法として近年注目されつつあるインフラサウンドならびに音波モードによるリモートセンシングの背景と関連した著者らの取組みについて簡潔に紹介したい。

インフラサウンドとは、人間の可聴周波数下限の 20 Hz 以下の圧力波であり、物理学的には音波モードの波動である。電磁波で、可視光線の下限周波数以下を赤外線(infrared)と呼び区別するように、可聴音以下の低周波音波をインフラサウンド(infrasound)と呼ぶ。この波動は波長がキロメートルサイズの圧力波であり、上述の長大スケール地球物理現象が波源となりうる。音波は大気を伝達媒体とする粗密波(縦波)であるが、その伝搬は大気分子の微視的な動き即ち粘性に支配され、大気粘性には周波数依存性があるため高周波ほど減衰し低周波あるいは長波長ほど長距離伝搬できる（田平, 2007; Sutherland et al., 2004）。

インフラサウンドの低周波側では波動伝搬は分散性を有し音波遮断周波数にてカットオフを生じる。それ以下の周波数の波は、外因により一旦上昇した空気塊が重力に支配され再降下する大気重力波モードの波となる。大気重力波は、近年その研究が飛躍的に進んだ熱圏における波動現象（大気光発光層における波状構造や電離圏全電子数 TEC における伝搬性の波状構造）等の一因として着目されており、鉛直方向の伝搬成分を有する波を介した大気各層の上下結合の解明は、地球大気研究におけるフロンティアの1つである。

## 2. インフラサウンド・音波による観測例

以下ではインフラサウンド・音波領域の波動の伝搬による地球物理現象の近年の観測例をいくつか紹介する。詳細は各引用文献を参照されたい。

- 1) 低気圧・前線・・・大規模な積乱雲の雲頂や寒冷前線の直上では顕著な上昇流が発生し、音波ならびに大気重力波の波源となる。一部は地上で観測され（新井, 2009）、一部は上層大気に伝搬し熱圏で観測される波動現象の種となると考えられる。
- 2) 火山噴火・・・火山噴火は火口付近にて水蒸気爆発等による圧力開放によって衝撃波を生み、大規模噴火では 1000 km 程度まで伝搬し観測される（新井他, 2010）。2010 年の霧島山新燃岳の大規模噴火では空振による建物被害等が多く報告された。
- 3) 波浪・津波・・・海洋の波浪は海水面－大気カップリングにより大気に波動を伝える。長大スケールの波動は海洋の水深に依存し生み出される。海洋のうち大面積を占める大陸棚の平均水深に依存した波長の波 Microbaroms(周期 4~10 秒)が内陸の観測点でも連続的に検出される。海底地震でキロメートルスケールの津波が発生した場合、

津波による海面変動が大気に伝わり遠距離伝搬する。2004年のスマトラ沖大地震では磁力計観測から地震後に電離圏が揺れた事例 (Iyemori et al., 2005) が報告され、東日本大震災の大津波では津波到達前に顕著な大気波動が観測された (Arai et al., 2011)。

- 4) 火球・隕石・・・流星体は 11.2 km/s 以上の対地速度で上層大気に突入し、火球クラス(約 10 cm)以上では衝撃波を生む。大気中を音波モードで地上まで伝搬した衝撃波は発光から数分後に低周波音として観測される。さらに大気-地表面カップリングにより表層の地震波を生み地震計観測網により計測される (Ishihara et al., 2004)。
- 5) 雷・スプライト・・・雷鳴は対流圏を長距離伝搬し見通し距離外の遠雷として観測される。スプライト等、成層圏～中間圏で発生する高高度発光放電現象 TLE がインフラサウンドを生むかは議論の中であるが、静電破壊が大気中に粗密波を生む可能性がある。
- 6) オーロラ・・・磁力線に沿って擾乱するオーロラ嵐の発生時には、電磁気力に支配されたプラズマ粒子の動きが周辺大気を超えることがあり、電離大気と中性大気の衝突によって大気中に衝撃波が生まれ、一部が地上まで伝搬する可能性がある。古くから報告があるが議論の中である。

### 3. 著者らの取組み

インフラサウンドの波源となりうる現象には、比較的高頻度での発生が予期できる現象と、予期困難な稀なものがあり、観測手法等の検証を短期間に実施したい場合は例えば桜島の火山噴火のように頻発する現象の波源周辺で臨時観測を展開することが早道である。一方、大規模現象を波源とする場合は、大振幅の低周波が数 1000 km を伝搬し広範囲で検出可能な強度の波を生む場合が多く、定常的モニタリング観測にもメリットがある。一方、人為的現象を波源とする場合には、時期や場所を特定した能動実験が可能である。

インフラサウンドのセンシングには、マイクロホン、圧電素子、水晶振動子などを用いた差圧計または絶対圧計が使われる。これらの素子で検出された微気圧変動 ( $\sim 0.001$  Pa) を音波遮断周波数 ( $\sim 0.003$  Hz) まで解析し、アレイ観測等により各センサの出力を相関解析し長周期の波動成分を抽出する。我々は、圧電素子式や非接触光学式センサのプロトタイプ開発 (山本・石原, 2009) を進めるとともに、マイクロホン型センサ (Chaparral physics 製) を用いた臨時アレイ観測による観測を進めてきた。

2007年9月のS-520-23号ロケットでは、JAXA内之浦宇宙空間観測所にセンサを設置しロケット打上げ時の轟音を波源とする音波計測により、図1のようにロケット燃焼終了までに発生する音波の上空からの伝搬を計測した (鈴木, 2009)。

2010年6月13日の「はやぶさ」地球帰還の際は、

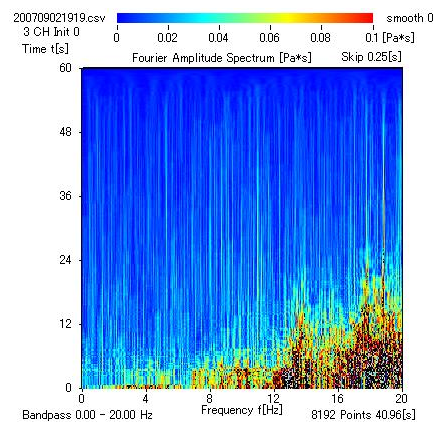


図1 S-520-23号ロケット打上げ後60秒間のインフラサウンド(0~20 Hz)

オーストラリア・ウーメラ砂漠の3地点にインフラサウンドセンサを、6地点に地震計をアレイ設置し、同帰還カプセル及び探査機本体の大気圏再突入時に生じた衝撃波が成層圏上部(40 km 付近)から地表までインフラサウンドとして伝搬し、さらに大気-地表面カップリングにより励起された地震波の同時観測に成功した。1地点で可聴音の録音にも成功し、帰還カプセルのみでなく探査機本体の破碎で生じた部品群が励起した小規模な衝撃波群の同定にも成功した(Yamamoto et al., 2011)。また、大気-地表面カップリング過程の比較的フラットな周波数特性を確認した (Ishihara et al., 2012)。

極域でのインフラサウンド帯域の波動調査としては、国立極地研究所などと共に IPY 期間中に昭和基地にインフラサウンドセンサ1台を設置、2008年春以降の試験観測を継続している。現在はセンサ1台のため方向探知が不可能であるが、海洋波浪起源と思われる波動を継続的に観測している他、周波数 20 Hz 以上の領域に特徴的な波動を観測している (Kanao et al., 2012)。Microbaroms は長周期地震計による観測から得られる海洋起源の波動 DFM(Double-Frequency Microseism, 周期 4~10 秒)と相関する変動が見られ、さらに深海底の平均水深に依存する周波数の SFM(Single-Frequency Microseism, 周期 12~30 秒)(Grob et al., 2011)と関連する波動も微弱ながら確認できる。

近年インフラサウンド帯域が着目されつつある理由に、CTBTO(Comprehensive Nuclear Test-Ban Treaty Organization)による国際核実験検知網の整備が挙げられる。同観測網では全球上に計 60 地点のアレイ観測点を設置することで、人為的な大規模爆発現象の波源特定を目的としているが、人為現象の特定には自然現象による波動の把握が必須であり、研究が進んできた背景がある。国内では、千葉県いすみ市の夷隅観測点が唯一の CTBT インフラサウンド観測点(IS30)であり日本気象協会により運営されている。同観測点は、2011年3月11日の東日本大震災の大津波が励起した波動を明瞭に検出しており (Arai et al., 2011)、音波伝搬速度は津波進行速度より速いため、現在の津波警報とは異なる新たな警報構築による津波予報への応用や高精度化への貢献も期待される。

飛翔体を用いた音波伝搬の観測としては、1960年代に実施されたグレネード法(ロケット搭載火薬を上空で爆発させ地上マイク群で観測する手法)による温度場構造観測の例がある (Stroud et al., 1960) が、近年では行われていない。

#### 4. 最近の展開

著者らは 2012 年度打上げ予定の S-310-41 号観測ロケットを用いた音波伝搬のその場計測を計画している。同実験ではロケット頭胴部にスピーカーと複数のマイクを搭載し、特定周波数の音波を断続的に発生させ、ロケット上昇につれ指数関数的に変化する周辺大気条件に応じた音波伝搬状況を計測する予定である。搭載機器 PDI については開発を終えている。詳細は、森永他(2012, 本収録)を参照されたい。同実験にあわせ、地上に人工音波源を設置するとともに、打上げ地点周辺の複数点における臨時観測も予定している。

同実験に先立ち、2011年12月の S-310-40 号ならびに 2012年1月の S-520-26 号観測ロ

ケット打上げにあわせ、我々は鹿児島・宮崎両県の 3 地点にインフラサウンドセンサをアレイ設置し、打上げ音の伝搬ならびに桜島噴火の多地点観測を実施した。結果として、同山麓の観測点で 50 Pa 以上の微気圧波が観測された噴火では 70 km 程度の伝搬による波動が観測され、アレイ観測からの波源推定が検証された(小松, 2012)。打上げの轟音は 50 km を超える遠方では検出できなかった。S-310-41 号ロケット実験では 10 数 km の範囲に観測点を設置して再挑戦したい。

極地観測としては、現在、国立極地研究所等と共同で複数センサによるアレイ観測と昭和基地周辺の地震観測点への整備を計画している。これらの観測は、氷河起因の地震（氷震）など極地特有の現象発見と温暖化モニタリングに寄与する可能性を有す。

#### 参考文献：

- 新井伸夫, 微気圧振動観測施設で観測される様々な自然界の現象:インフラサウンドの世界, *日本音響学会誌* **65**, 318-323, 2009.
- 新井伸夫, 今西祐一, 綿田辰吾, 大井拓磨, 村山貴彦, 岩國真紀子, 野上麻美, インフラサウンドの観測-桜島の爆発的噴火に起因するシグナルの伝播特性-, *日本音響学会研究発表会講演論文集*, 1-3-7, 2010.
- 小松孝康, インフラサウンド多地点アレイ観測システムの構築と音波源位置の推定, *平成 23 年度高知工科大学大学院工学研究科特別研究報告*, 2012.
- 鈴木敏史, ロケット打上げにより励起されたインフラサウンドの計測とデータ解析用ソフトウェアの開発, *平成 20 年度高知工科大学大学院工学研究科特別研究報告*, 2009.
- 田平 誠, インフラサウンドの計測と伝搬, *日本音響学会誌* **63**, 428-433, 2007.
- 森永隆稔, 山本真行, 阿部琢美, S-310-41 号搭載音波伝搬計測装置 PDI の開発, *平成 23 年度スペースプラズマ研究会*, 本収録, 2012.
- 山本真行, 石原吉明, インフラサウンド測定装置, 特許出願 2009-119504, 2009.
- Arai, N., M. Iwakuni, S. Watada, Y. Imanishi, T. Murayama, M. Nogami, Atmospheric boundary waves excited by the tsunami generation related to the 2011 great Tohoku-Oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L00G18, doi:10.1029/2011GL049146, 2011.
- Grob, M., A. Maggi, E. Stutzmann. Observations of the seasonality of the Antarctic microseismic signal, and its association to sea ice variability, *Geophys. Res. Lett.* **38**, L11302, doi:10.1029/2011GL047525, 2011.
- Ishihara, Y., M. Furumoto, S. Sakai, S. Tsukuda, The 2003 Kanto large bolide's trajectory determined from shockwaves recorded by a seismic network and images taken by a video camera, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L14702, 2004.
- Ishihara, Y., Hiramatsu, Y., Yamamoto, M.-Y., Furumoto, M., Fujita, K., Infrasound/Seismic Observation of the Hayabusa Reentry: Observations and Preliminary Results, *Earth Planets Space*, **63**, in press, 2012.
- Iyemori et al., Geomagnetic pulsations caused by the Sumatra earthquake on December 26, 2004, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L20807, doi:10.1029/2005GL024083, 2005.
- Kanao, M. et al., Interaction on Seismic Waves between Atmosphere - Ocean - Cryosphere and Geosphere in Polar Region, *In: Seismic Waves - Research and Analysis* ; InTech. Publisher, ISBN 978-953-307-944-8, 2012.
- Stroud, W., W. Nordberg, W. Bandeen, F. Bartman, P. Titus, Rocket - Grenade Measurements of Temperatures and Winds in the Mesosphere over Churchill, Canada, *J. Geophys. Res.*, **65**, 2307-2323, 1960.
- Sutherland, Louis C. and Henry E. Bass, Atmospheric absorption in the atmosphere up to 160 km, *J. Acoust. Soc. Am* **115**, 1012-1032, 2004.
- Yamamoto, M.-Y., Y. Ishihara, Y. Hiramatsu, K. Kitamura, M. Ueda, Y. Shiba, M. Furumoto, and K. Fujita, Detection of Acoustic/Infrasound/Seismic Waves Generated by Hypersonic Reentry of HAYABUSA Capsule and Fragmented Parts of Spacecraft, *Publ. Astro. Soc. Japan*, **63**, 971-978, 2011.