

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 4月18日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22403005

研究課題名（和文） はやぶさ地球帰還時の大気圏再突入衝撃波による可聴下音波

及び励起地震動の精密観測

研究課題名（英文） Precise observations of infrasound and seismic motions excited by shockwaves at the Hayabusa reentry

研究代表者

平松 良浩（HIRAMATSU YOSHIHIRO）

金沢大学・自然システム学系・准教授

研究者番号：80283092

研究成果の概要（和文）：豪州ウーメラ砂漠にてアレイ観測を行い、「はやぶさ」地球帰還時のインフラサウンド及び地震記録、光学観測記録を取得し、それらの解析により衝撃波の励起位置を推定した。観測結果に基づく励起位置での推定大気圧は、従来の理論値と2倍程度のずれがあり、理論の仮定に問題があることが明らかとなった。大気圧変動と地動との伝達関数を定義し、大気-地表面カップリング過程の定量化を行った。

研究成果の概要（英文）：We carried out array observations with infrasound/seismic and optical sensors and obtained those records at the Hayabusa reentry in Woomera, Australia. We estimated the source location of shockwaves generated by the reentry from the analyses of those records. The estimated overpressure values of the shockwaves are twice larger than those from a traditional theory, indicating that there are some problems on the assumptions of the traditional theory. We define a transfer function between the pressure perturbations and ground motions, and quantify a coupling process between atmosphere and ground surface.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	6,400,000	1,920,000	8,320,000

研究分野：地震学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：はやぶさ，インフラサウンド，地震動，大気-地表面カップリング，エネルギー伝搬係数

## 1. 研究開始当初の背景

日本の小惑星探査機「はやぶさ」は、2005年に小惑星「イトカワ」にて探査成果を得た後、着陸時にサンプリングした表層岩石サンプルを携え惑星間空間を飛翔し、2010年に地球に帰還する。帰還の際には直接惑星間空間より地球大気に突入する計画であり、人類が

作ることのできる最高速度の約12 km/sでの大気圏突入の機会を得る。これは日本が作り出す最速の物体であり衝撃波観測のまたとない実験機会となる。世界的にも、これまでの米国の探査機 Genesis 及び Stardust の大気圏突入カプセルの例があるだけであり、惑星間空間からの直接帰還は稀有な機会である

インfrasoundは周波数 20 Hz 以下の可聴下音波で、波長が大きいため大気分子の粘性による減衰の影響を受けにくい。大気中を長距離伝搬可能なため、遠距離の人工的爆発や地球物理現象のリモートセンシング手法として開拓されつつある。近年、インfrasoundの圧力波が、大気-地表面カップリング過程を経て地表面を揺らし、地震計精密観測において地震動として検出されることが明らかになっており (Ishihara et al., 2003, 2004; J. Pujol et al., 2006)、地震計観測網データに基づく大気圏突入流星体の軌道決定手法開発に関しては、我々の研究チームが世界的にも中心的な役割を果たしている。

本研究は、日本初となる惑星間空間からの地球帰還を人工的な流星による衝撃波源と捉え、大気波動と地震波の同時観測を最適な観測条件下で達成し、衝撃波の波源決定並びにエネルギー推定を行い、その結果を応用した地震動波形のみからの隕石のサイズ推定法を新たに提案することを目指したものである。

## 2. 研究の目的

本研究では、「はやぶさ」大気圏再突入の予測軌道に対して最適な待ち受け観測を実施し、以下の点を明らかにする。

- (1) アレイ配置したセンサ群によるインfrasound及び地震動計測データの相関処理による方向探知に基づく衝撃波源の決定。
- (2) 光学観測等の同時観測結果との比較による温度場を考慮した音波伝搬経路の解明
- (3) 高層大気中の伝搬経路を仮定した上でのインfrasound計測の絶対値からの衝撃波源のエネルギー推定。
- (4) インfrasoundと地震動の同一地点における同時観測による大気-地表面カップリング過程におけるエネルギー伝搬効率の解明。

## 3. 研究の方法

インfrasoundセンサと地震計は、3つのインfrasoundセンサ/地震計アレイ観測点 (GOS2、GOS2A、GOS2B) および3つの単独地震計観測点 (GOS2B-sub1、GOS2B-sub2、GOS2B-sub3) として展開された (図1)。GOS2、GOS2A、GOS2Bはそれぞれ「はやぶさ」のカプセルの予定軌道に対するスラントレンジが 67.8 km、54.9 km、36.9 km であり、GOS2B-sub1、GOS2B-sub2、GOS2B-sub3はカプセルの予定軌道に対してほぼ平行に配列している (図1)。

観測点の位置はハンディGPS (Garmin, Oregon 450)、アレイ観測点内の各センサの相対位置はトータルステーション (SOKKIA、

SET530R) により測定した。また、GOS2観測点では可聴域における衝撃波を記録するためにICレコーダー (OLYMPUS、Voice-Trek V-40)

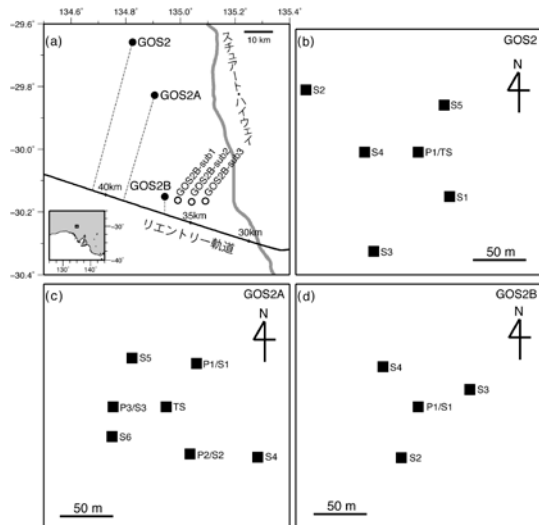


図 1. インfrasoundセンサ/地震計の観測点分布。黒丸はアレイ観測点、白丸は地震計の単独観測点を表す。リエントリー軌道に沿って「はやぶさ」カプセルの飛行高度が記されている。(b) GOS2、(c) GOS2A、(d) GOS2Bのアレイ配置。Pはインfrasoundセンサ、TSは三成分地震計、Sは鉛直成分地震計を表す。

を用いた。

観測に用いた機材は、インfrasoundセンサ6台・データロガー6台及び地震計 (三成分地震計および鉛直成分地震計)・データロガーセット20台である。インfrasoundセンサには、半径3 mの多孔質のポーラスパイプ8本を接続し、構造的ローパスフィルターとして風等によるノイズを軽減した。インfrasound記録のサンプリング周波数は100 Hzである。3成分地震計記録のサンプリング周波数は100 Hz、鉛直成分地震計記録のサンプリング周波数は125 Hzである。時刻校正はGPSを用いて行った。

これら観測波形に対して、波形解析、アレイ解析、周波数解析を行い、衝撃波の到来方向及び波源位置の推定、前駆波の同定、波源における過剰圧の推定、大気-地表面カップリング過程の定量化を行った。

## 4. 研究成果

2010年6月13日に地球に帰還し、火球となったカプセルや「はやぶさ」本体およびその破片は目視ならびに光学機器により観測された (図2)。等温大気の仮定の下、予定軌道情報から予測される衝撃波の到達時はリエントリー時より301秒後であり、観測記録と良く一致している。その時記録されたイ

インフラサウンド波形は明瞭なN字型を示しており、同時に観測された地震計記録にも、逆



図2. 「はやぶさ」リエントリーに伴う火球。

N字型の波形を見ることができる(図3)。なお、図3の地震計記録は速度記録を積分し、変位記録に直したものであり、0.1 Hzのハイパスフィルターが適用されている。

超音速で飛行する物体は押し波に引き続く疎密波の衝撃波を発生し、急激な下向きに続く上向きの地動を生じる。時刻情報および波形の特徴から、インフラサウンドセンサおよび地震計で観測された波形記録は「はやぶさ」の大気圏再突入により生じた衝撃波であると結論できる。それぞれの観測点で記録された衝撃波が生じた高度は、予定軌道情報と等温大気における衝撃波の伝播に基づくとGOS2で40.6 km、GOS2Aで38.9 km、GOS2Bで36.5 kmである。

このような衝撃波はGenesisやStardustの場合でも観測されている。カプセルのサイズ(直径)とN字型の衝撃波の周期に着目すると、Genesisでは直径1.52m、周期0.4秒であり(ReVelle *et al.*, 2005)、Stardustでは直径0.811m、周期0.2秒であった(Edwards *et al.*, 2007)。それに対して、「はやぶさ」では直径0.4m、周期0.12秒であり、カプセルの直径と周期は比例関係にあることが明らかとなった。

図4はメインパルス部分のMUSIC(Ueno *et al.*, 2010)を用いたF-Kスペクトル解析の結果とGOS2A観測点の三成分地震計記録によるパーティクルモーションである。F-Kスペクトル解析には、1-3 Hzのバンドパスフィルターを適用した全ての地震計の鉛直成分変位波形を用いている。NS方向とEW方向のスローネスはそれぞれ-2.13 s/kmと-0.32 s/kmであり、見かけ速度は464.3 m/s、到来方向は磁北から-171.5°、仰角は42.9°である。「はやぶさ」のカプセルの予定軌道情報から予測される値は、磁北から-169.5°、仰角は45.1°であり、解析結果と良く一致している。さらに、GOS2A観測点の三成分地震計記録に

よるパーティクルモーションを見ると、水平面の波の伝播方向に直線的であり、鉛直面で

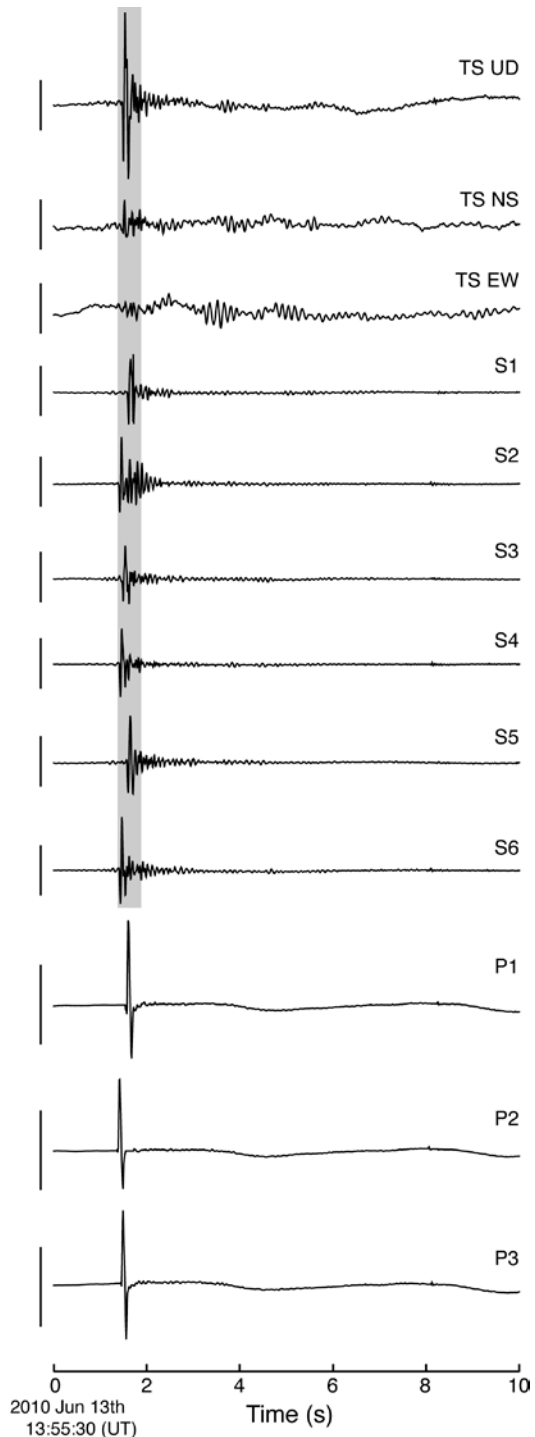


図3. GOS2A観測点において記録された衝撃波波形。地震計記録は0.1 Hzのハイパスフィルターが適用されている。縦棒は振幅のスケールを表しており、地震計記録については100 nm、インフラサウンドセンサ記録については1 Paである。灰色部分は図4におけるF-Kスペクトル解析ならびにパーティクルモーションの表示に用いた時間窓である。

楕円になっていることが分かる。また、

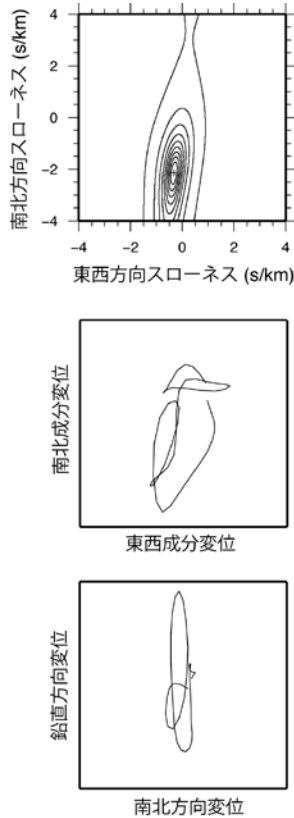


図 4. GOS2A 観測点における (左) F-K スペクトル解析結果および (中、右) 三成分地震計記録によるパーティクルモーション。なお、これらの解析の際には 1-3 Hz のバンドパスフィルターが適用されている。

retrograde な振動をしていることも見て取れる。これらの特徴は、地震計で記録されたメインパルスがレーリー波であることを示す。

GOS2 と GOS2A では、衝撃波のメインパルスの前に弱い波群が認められる (図 3)。平らな境界で接する流体と弾性体の系では、境界に入射する平面波の音波は境界面で変換し、弾性体に表面波 (レーリー波) が励起される (Ben-Menahem and Singh, 1981)。入射音波の見かけ速度が弾性体での表面波の位相速度に近ければ、その励起は効率的に起こる。したがって、メインパルスの前に見られる波群は観測点近傍の地表面でインフラサウンド波から変換した表面波であると考えられる。一方、GOS2B と GOS2B-sub1 から GOS2B-sub3 ではそのような波群は認められなかった。これらの観測点では、インフラサウンド波の見かけ速度が表面波の位相速度より速く、表面波が励起されなかったと考えられる (Ishihara *et al.*, 2011)。

メインパルスの後続波の中にもパルス状の波が複数認められる (図 3)。これらは GOS2 観測点で可聴音としても認識されている。複数地点でのビデオカメラによる光学観測との比較から、これらのパルス状の波は「はやぶさ」の破片から生じたことが明らかとなった。

GOS2、GOS2A および GOS2B にて観測されたインフラサウンド波形の振幅 (過剰圧の+側の値) はそれぞれ、0.7、1.0、1.3 Pa であった。これらの値は ReVelle (1976) の理論式による推定値の 1/2 から 1/3 程度である。推定にあたっては衝撃波源の位置情報や衝撃波伝播距離の誤差が推定値に影響を及ぼすが、それらによる誤差はたかだか 1 km 程度であり、観測値と推定値の違いを説明するにはあまりにも小さすぎる。ReVelle (1976) では、衝撃波の緩和半径 ( $R_0$ ) を飛行物体の半径 ( $d$ ) とマッハ数 ( $M$ ) を用いて、 $R_0 = d \times M$  の式で表している。この関係式は次元解析を用いて経験的に導出されたものであり、数倍程度の差がでてくる原因である可能性が高い。上記の理論式に対して係数の修正を行い、過去に日本で衝撃波励起の地震動が観測された 3 つの火球 (宮古、関東、神戸) に適用すると、大気圏突入前の火球サイズとして、宮古火球では ~1 m、関東火球では ~5 m、神戸火球では ~0.5 m との推定結果が得られた。

大気圧変動と地動との変換過程を理解するためにそれぞれのスペクトル記録を用いて伝達関数を定義した。また、大気中の衝撃波から固体地球の振動へのエネルギー伝搬係数は、過剰圧やその他の観測値から、約 0.5% と見積もることができる。この値は Stardust の再突入時データから得られる値 (約 2%) よりはやや小さい。これらの結果から火球現象における大気から固体地球へのエネルギー伝搬係数はせいぜい数% のオーダーであることが予想される。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 9 件)

- ① Shoemaker, M., Van der Ha, J., Abe, S., and Fujita, K., Trajectory estimation of the Hayabusa spacecraft during atmospheric disintegration, *Journal of Spacecraft and Rockets*, 50, 326-336, doi: 10.2514/1.A32338, 2013, 査読有。
- ② 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, 64, 655-660,  
doi:10.5047/eps.2012.01.003, 2012, 査読有
- ③ Yamamoto, M.-Y., Ishihara, Y., Hiramatsu, Y., Kitamura, K., Ueda, M., Shiba, Y., Furumoto, M., Fujita, K., Detection of acoustic/infrasonic/seismic waves generated by hypersonic re-entry of the HAYABUSA capsule and fragmented parts of the spacecraft, PASJ, 63, 971-978, 2011, 査読有, <  
<http://pasj.asj.or.jp/v63/n5/630535/630535a.html> >.
- ④ Fujita, K., Yamamoto, M.-Y., Abe, S., Ishihara, Y., Iiyama, O., Kakinami, Y., Hiramatsu, Y., Furumoto, M., Shoemaker, M., Ueda, M., Shiba, Y., Suzuki, M., An overview of JAXA's ground-observation activities for HAYABUSA reentry, PASJ, 63, 961-969, 2011, 査読有, <  
<http://pasj.asj.or.jp/v63/n5/630534/630534a.html> >.
- ⑤ Ueda, M., Shiba, Y., Yamamoto, M.-Y., Fujita, K., Watanabe, J., Sato, M., Abe, S., Kakinami, Y., Uehara, S., Okamoto, S., Fujiwara, Y., Tanabe, Y., Trajectory of HAYABUSA reentry determined from multisite TV observations, PASJ, 63, 947-953, 2011, 査読有, <  
<http://pasj.asj.or.jp/v63/n5/630532/630532a.html> >.  
[学会発表] (計 26 件)
- ① Ishihara, Y., Hiramatsu, Y., Yamamoto, M.-Y., Furumoto, M., Fujita, K., Infrasonic and Seismic Observation of the Hayabusa reentry: Burst signals and air-to-ground coupling process, AGU 2012 Fall Meeting, 2012. 12. 3., Moscone Center (USA)
- ② Yamamoto, M.-Y., Ishihara, Y., Hiramatsu, Y., Furumoto, M., Fujita, K., Acoustic/infrasonic/seismic waves induced by hypersonic reentry of HAYABUSA capsule and mother spacecraft, Asia Oceania Geosciences Society 2012, 2012. 8. 13., Resort World Convention Centre (Singapore)
- ③ 石原吉明, 平松良浩, 山本真行, 古本宗充, 藤田和央, はやぶさリエントリーのインフラサウンド・地震観測, 2012年日本地球惑星科学連合大会, 2012年5月22日, 幕張メッセ (千葉)
- ④ Yamamoto, M.-Y., Ishihara, Y., Hiramatsu, Y., Furumoto, M., Fujita, K., Observation of Infrasonic/Acoustic/Seismic Waves Induced by Hypersonic Reentry of Hayabusa, Asteroids, Comets, Meteors 2012, 2012. 5. 18., TOKI Messe (Niigata)
- ⑤ Ishihara, Y., Hiramatsu, Y., Yamamoto, M.-Y., Furumoto, M., Fujita, K., Infrasonic and seismic observation of Hayabusa reentry as an artificial meteorite fall, AGU 2011 Fall Meeting, 2011. 12. 7., Moscone Center (USA)
- ⑥ 石原吉明, 平松良浩, 山本真行, 古本宗充, 藤田和央, 人工隕石落下としての「はやぶさ」リエントリー: リエントリーに伴う衝撃波のインフラサウンド・地震波観測と解析結果, 日本惑星科学会 2011 年秋季講演会, 2011 年 10 月 24 日, 相模女子大学 (神奈川)
- ⑦ Ishihara, Y., Hiramatsu, Y., Yamamoto, M.-Y., Furumoto, M., Fujita, K., Ground Observation of the Hayabusa Reentry: The Third Opportunity of Man-made Fireball from Interplanetary Orbit, AGU 2010 Fall Meeting, 2010. 12. 13., Moscone Center (USA)
- ⑧ 石原吉明, 山本真行, 平松良浩, 古本宗充, 藤田和久, 「はやぶさ」リエントリー起源衝撃波の地上観測, 日本地震学会 2010 年秋季大会, 2010 年 10 月 27 日, 広島国際会議場 (広島)
- ⑨ 石原吉明, 山本真行, 平松良浩, 古本宗充, 藤田和久, 阿部新助, カプセルリエントリー=人工隕石落下の観測-カプセルリエントリーに伴う衝撃波観測と将来への展望-, 日本惑星科学会 2010 年秋季講演会, 2010 年 10 月 8 日名古屋大学 (名古屋)
- ⑩ Yamamoto, M.-Y., Abe, S., Ishihara, Y., Hiramatsu, Y., Fujita, K., Observation plan of HAYABUSA SRC reentry: for the third opportunity of manmade fireball from interplanetary orbit, Meteoroids 2010, 2010. 5. 25., Breckenridge (USA)
- [その他]  
ホームページ等  
<http://earth.s.kanazawa-u.ac.jp/hayabus a.html>
6. 研究組織  
(1) 研究代表者  
平松 良浩 (HIRAMATSU YOSHIHIRO)  
金沢大学・自然システム学系・准教授  
研究者番号: 80283092
- (2) 研究分担者  
山本 真行 (YAMAMOTO MASAYUKI)  
高知工科大学・環境学研究科・准教授  
研究者番号: 30368857

古本 宗充 (FURUMOTO MUNEYOSHI)  
名古屋大学・環境学研究科・教授  
研究者番号：80109264

(3)連携研究者

石原 吉明 (ISHIHARA YOSHIAKI)  
独立行政法人産業技術総合研究所・情報技術研究部門・研究員  
研究者番号：80400232

藤田 和央 (FUJITA KAZUO)  
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・研究開発本部未踏技術研究センター・主幹研究員  
研究者番号：90281584