

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400459

研究課題名(和文) 火星常時自由振動と内部構造探査

研究課題名(英文) Background free oscillations and internal structure of Mars

## 研究代表者

柴田 直樹(小林)(SHIBATA (KOBAYASHI), Naoki)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号：30272660

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：2016年3月打ち上げ予定だったNASAの火星内部構造探査InSightに向けて、火星の常時励起自由振動・脈動を用いた火星内部構造探査の可能性について検討を行った。パスファインダー探査機の気圧データを基に大気の地面に与える力を計算し、それによって励起される定常的な地動を見積もった。地殻境界や火星マンツルの構造を推定するのに必要な長周期の常時振動は搭載地震計の検出感度を下回るが、地殻の表層構造に関しては条件によって常時励起された脈動を検出できる可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：We evaluated amplitudes of seismic tremors of Mars excited by atmospheric disturbance and study the possibility for them to be used for revealing the internal structure of Mars. Using observation data of the atmospheric pressure obtained by the Pathfinder lander, we estimated strength of the atmospheric disturbance and calculated amplitudes of incessant ground motions, i.e. seismic tremors excited by the disturbance. The results are that amplitudes of tremors sensitive to the depth of the crust-mantle interface and mantle structure are difficult to be detected by the seismometer installed into the InSight lander. However, the short period tremors sensitive to the shallow part of the crust may be detected by the seismometer depending conditions of the atmospheric disturbance which are weakly constrained and may be different from that of the observation by Pathfinder.

研究分野：地球惑星科学

キーワード：InSight 火星 内部構造 探査 地震波 自由振動 脈動 励起

## 1. 研究開始当初の背景

InSight は火星内部構造に迫る人類初の地球物理学的観測ミッションである。そこでは広帯域地震観測が大きな役割を担う。火星の成り立ちや内部構造進化を理解するにはまず火星の基本的な層構造を決めることが重要である。しかし、InSight は1点観測であるためそこから引き出す成果をより確実なものとするためには事前の検討を十分行っておく必要がある。また、研究代表者は大気擾乱による惑星の自由振動の励起を予測しており、火星は常時自由振動という地球では既知の現象となった振動の励起について理解を深める良きプラットフォームである。常時自由振動、常時微動から内部構造に迫る手法を確立することが本研究課題の目的である。InSight の成果はその後の惑星内部構造探査の道に与える影響は大きく、極めて重要な研究課題である。

InSight (Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport) は2012年8月にNASA (アメリカ航空宇宙局) の Discovery Program の12番目のミッションとして採択された火星内部構造探査計画である。この計画では広帯域地震計、電波測位、熱流量計を搭載した小型着陸機を火星表面に投入し、本格的な火星内部構造探査を目指している。地震計を用いた本格的な内部構造探査はアポロ月探査計画以降では初めてのことであり、世界中の固体惑星の成り立ちを研究している研究者から高い期待を集めている。現在、InSight には世界19機関の研究者が参画し、日本からも研究代表者が Co-I として参加している。InSight では火星の内部構造とそこで生起するプロセスを調べることで固体惑星の進化の過程を理解することと現在の火星内部のテクトニックな活動度と隕石衝突のフラックスを決定することを目指している[1]。そして、火星の地殻と中心核の分化と内部構造の進化について、次の6つの点を決めることで迫ろうとしている。それは地殻の厚さと構造、火星の組成と構造、中心核の大きさ・組成・状態、内部の熱的な状態、火星内部の地震活動度とその分布、火星表面への隕石のフラックスである。

火星では現在のところプレートテクトニクスが働いている形跡はなく、その内部構造と分化のプロセスを探ることはプレートテクトニクスが成り立つ以前の地球の内部構造進化を理解する上でも重要な情報を与えてくれるものと期待されている。プレート運動を持たない固体惑星の分化と構造進化を理解するには中心核の大きさ、状態、組成、マンツルの組成と層構造、地殻の厚さと構造それに火星内部からの熱流量といった基礎的な惑星を特徴付けるパラメータを決めることが先決である。これらの基礎パラメータを決定するために広帯域地震計、火星の回転変動計測、熱流量観測を高い精度で実施することが必要となる。しかし、地球物理学的な計測においてはネットワーク観測が本道であり、InSight のような

1点観測では引き出せる情報に限りがある。そのため火星初となる内部構造探査をより実りあるものとするためには十二分な事前検討が必要である。本研究課題では1点の広帯域地震計測から火星の内部構造についての情報を何処まで引き出すことが可能であるかを検討し、その目的のために必要な解析ツール群の開発を目指した。

プレート運動を持つ地球ではプレート間の運動の相互作用によってプレート境界付近では活発な地震活動が繰り返されている。火星においてはそのような強い地震活動が生じていることは恐らくないであろう。研究代表者は地震活動が活発でない惑星でも地震(断層活動)以外の励起源として大気の擾乱による自由振動の励起の可能性を示した[2]。その予測によれば火星でも地球常時自由振動(非地震性の地球自由振動)と同レベルの振動が示唆されている。回転計測や火星隕石の情報に基づいて構成された火星内部構造モデル[3]に基づき、火星の自由振動モードを計算したところ、2 mHz 以下の長周期基本伸び縮みモードはコアサイズに敏感であることがこれまでの解析で分っていた。また、7 mHz~25 mHz の基本伸び縮みモード(表面波に対応)は地殻厚に敏感である。こうしたモードが大気擾乱で励起されていれば非地震性地震による内部構造探査が可能となる。研究代表者は自由振動モードの計算法を改良し、大気を含む固体惑星に拡張した[4]。この手法では減衰する固有振動の固有解を複素数固有値、固有関数として表現し、それらを非常に効率よく計算することができる。図1に示した固有周波数(実部)はこの手法で計算したものである。

## 2. 研究の目的

以上のような背景と準備状況のもと、本課題では火星常時自由振動あるいはそれらの重ね合わせである常時微動から火星内部構造を求める逆問題を解くツール群を開発する。しかし、火星常時自由振動の励起量の見積もりは太陽放射と釣り合う熱輸送する大気運動から推定される大雑把な大気擾乱モデルを仮定していた。そこで、まず、火星探査機 Pathfinder の気圧データに基づき、実際の観測大気圧データを用いた火星常時自由振動の励起について検討する。また、その準備としてこれまで提唱されている火星構造モデルをサーベイし、系統的なモデル群を作成し、それらによって予測される自由振動解の傾向を掴んでおく。こうしたサーベイは地道ではあるが、観測量が得られた際にそれによって許容される内部構造モデルに対する直観が養われ、逆問題の初期値解の与え方において有用になると考えた。

本研究課題は研究代表者が提唱した大気励起常時自由振動という現象を海洋の無い火星において実証的に示す研究に結びつく点、また常時自由振動、常時微動という地動ノイズ

から火星内部構造に迫る点, InSight という人類初の本格的火星内部構造探査をより確実に実りあるものに高めるという点において極めて独創的であり, 価値のある課題である. InSight は1点観測であるがその成果はその後のネットワーク観測へと発展するか否かの試金石となり, 将来の惑星内部構造探査の道りに於いて果たすべき役割は極めて大きい.

### 3. 研究の方法

提唱されている火星内部構造モデルに対し, 周期 30 秒以上のモードで約 2000 個, 周期 10 秒以上では各モデル当り 2 万個近いモードの固有振動数と固有関数のデータベースを作成する. こうして得られた固有振動モードを用いて, 地球常時自由振動の計算手法[5]を応用し, 火星常時自由振動, 常時微動のモデルスペクトルを計算する. 常時自由振動, 常時微動のスペクトルは内部構造を反映する応答と励起源である大気擾乱のスペクトルの積であり, 逆問題は内部構造と励起スペクトルの両方を解くことになる. そこで, 低周波数のモードのようにピークが分離されて観測される周波数帯域とモードが分離して観測されない高周波数領域では異なる解析法が必要になる. 特に固有モードが分離されない高周波数側では応答項と励起項の分離は励起項の特性が明らかでなければ困難であるので, 上下動のスペクトルと水平動のスペクトルの比を取ることによって励起項の寄与を打ち消す手法をコード化する.

以上は有意なイベントが検出されない場合に対して常時微動を利用する手法の開発であるが, 火星よりサイズも小さく熱的な冷却進化が進んでいる月ですらアポロ計画で月震計を設置したことで小さいながらも地震活動が生じていることが分ってきた. 火星でも何らかの地震活動が生じていても不思議はないであろう. 火星周回衛星の画像解析から同定された火星表面の断層系の分布から, 地球の地震活動におけるスケール則を仮定した解析ではマグニチュード4クラスの地震は2年という観測期間の間に観測される可能性が指摘されている[6]. 隕石衝突を含めそうした地震イベントにも対応できるようにモードの重ね合わせ法による波形インバージョンによる解析コードも併せて準備する.

### 4. 研究成果

#### (1)火星自由振動の計算

現在までに提唱されている火星内部構造モデルについてサーベイを行った. その結果, Sohl and Spohn (1997) [3]の提唱している model A, B が地殻厚, コア半径においての不定幅を代表する端成分モデルとして適当であると判断した. 図1に model A, B に対して計算した伸び縮み自由振動 (スフェロイダル) モードの分散関係を示す. 横軸は各モードの次数, 縦軸は各モードの周波数を mHz で表示している. 赤いマークは慣性モーメントの制約を

強くした model A, 青いマークは SNC 隕石から推定されている火星マンツルの Fe/Si 比を強い制約としたモデルの結果である. Model A は B に比較してマンツルが厚い (コ

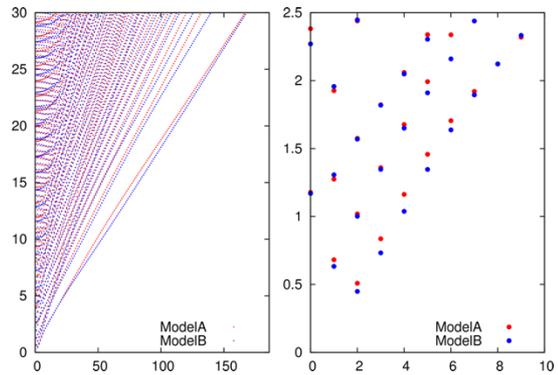


図1 火星自由振動の分散関係

ア半径が小さく, 地殻厚が薄い) 特徴を持つ. モデル間の分散関係の大きな特徴は 10 から 20 mHz の基本ブランチの周波数の差と 2 mHz 以下のコアを感じる長周期モードの周波数の差異である. これらの違いはそれぞれ地殻厚とコア半径の違いに起因している.

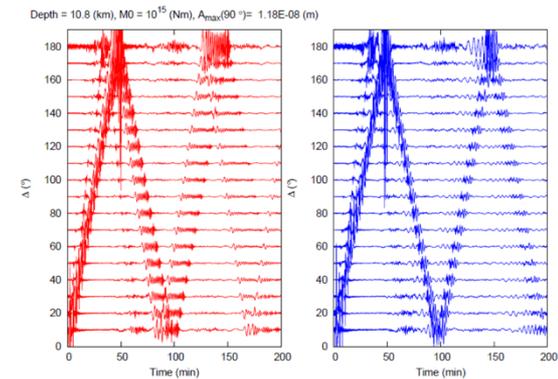


図2 地殻内の地震による火星の長周期波形

図2に計算したモードを用いて重ね法によって計算した深さ 10km における逆断層地震によって励起される周期 30 秒以上の長周期振動の波形を model A と B について比較した. 両モデルの地殻厚の違いを反映して表面波の分散の様子が異なることが分かる.

#### (2)常時微動の計算

常時自由振動の計算法は Fukao et al. (2002) [5]に詳しくまとめられている. 物理の本質部分を挙げると各モードの加速度振幅は以下の式となる.

$$a_l \sim \frac{\Delta p L^2}{M_l} \times \sqrt{\frac{4\pi R^2}{L^2}} \times \sqrt{Q_l} \times \sqrt{2l+1}$$

ここで,  $l$ はモードの次数 (angular degree),  $\Delta p$ は圧力変動の大きさ,  $L$ は圧力擾乱の相関距離,  $R$ は火星半径,  $Q$ は quality factor,  $M$ はモードの振動に寄与する実効的な質量である.  $M$ は長周期になるほど大きくなる. 右辺第一因子は一つの擾乱の力の1周期における寄与, 第二因子は地表面を覆うそうした擾乱の総数,

第三因子は減衰による過去の記憶を失うまでに加わる加振数，最後の因子は縮退したモードの個数である．第二因子以降が平方根になるのは，ランダム加振のため位相効果が無いためである．この関係式から分かるように圧力変動の大きさ $\Delta p$ だけでなく，相関距離 $L$ も正確な振幅見積りに必要となるが，現在のところそれは仮定せざるを得ない．こうした不定性を考え，大気擾乱として二つのモデルを検討した．一つは Kobayashi and Nishida (1998) で用いた火星大気次元解析モデルであり，仮に楽観モデルと名付ける．これは以下のスペクトルで与えられる．

$$\psi(f) = p_0^2 \tau_0 (\tau_0 f)^{-2} = 2.5^2 \times 874 \times (874 f)^{-2}$$

[Pa<sup>2</sup>/Hz]．相関距離には圧力スケールハイト  $L = H = 12,100$  m を用いた．二つ目の大気擾乱モデルは火星探査機 Pathfinder の気圧計のデータに基づくものである．NASA PDS からデータをダウンロードし，火星地表面の大気擾乱の程度を探った．もちろん，この気圧変動はグローバルな典型的な変動値とは異なる可能性はあるが，火星大気擾乱の一つの目安となる．10 mHz 以上は量子化誤差が効いてくるので 0.2 から 10 mHz までの範囲で大気圧変動を見ると

$$\psi(f) \approx 10 \times (f/1 \text{ mHz})^{-2} \text{ Pa}^2/\text{Hz}$$

というスペクトルとなった．擾乱の相関距離には地球自由振動の振幅を説明する接地境界層厚程度の値  $L = 1000 \times (f/1 \text{ mHz})^{-1}$  m を用いた．これを悲観モデルと名付ける．図 3 に Fukao et al. (2001) [5] の方法を用いて計算した両モデルによる常時自由振動のスペクトルを示した．また，InSight に搭載される広帯域地震計 (VBB) のノイズレベル (黒線) も示してある．この比較から分かるように，太陽放射と釣り合う熱対流モデルによる擾乱モデル (楽観モデル: 赤線) では常時励起振動が優位に観測できるが，より現実的な Pathfinder の観測気圧変動を用いた大気擾乱モデル (悲観モデル: 青線) では観測装置の検出限界以下のレベルとなった．

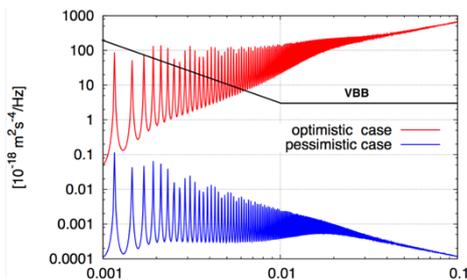


図 3 常時自由振動のスペクトル

(3) 浅部構造に敏感な短周期常時微動  
前節で述べたようにマントルにも敏感なグローバルな長周期自由振動の常時励起振幅は悲

観モデルにおいては搭載地震計の検出レベルを下回る結果となった．火星の大気擾乱の大きさについては不定な部分も多いが，長周期モードの観測はかなり厳しい結果といえよう．そこで，当初の研究課題からやや逸脱するが地殻やもっと浅い表層レゴリスの構造に関して敏感である短周期表面波の常時励起についても考察した．まず，表層構造を単純な二層モデルとして，第一層の厚みを  $H$ ，密度，P 波速度，S 波速度をそれぞれ， $\rho_1$ ， $\alpha_1$ ， $\beta_1$  とし，第二層の密度，P 波速度，S 波速度をそれぞれ， $\rho_2$ ， $\alpha_2$ ， $\beta_2$  とする場合について励起量を見積もった．表 1 に用いた浅部構造モデルの  $H$  (km)， $\rho_1$  (g/cm<sup>3</sup>)， $\beta_1$  (km/s)， $\rho_2$  (g/cm<sup>3</sup>)， $\beta_2$  (km/s) を示す．一つ目のモデルは隕石衝突によって形成される表層のメガ・レゴリスを想定したモデルである．速度構造は月のメガ・レゴリス層の観測値を参考に与えた．二つ目のモデルは地殻を想定したモデルである．

表 1 浅部構造モデル

	$H$	$\rho_1$	$\beta_1$	$\rho_2$	$\beta_2$
regolith	0.1	2	0.3	3	3
crust	50	3	3	4	4

大気擾乱で励起される脈動の平均自乗振幅は次式で与えられる．

$$u^2 \sim \int_0^{Q\lambda} \left[ \frac{\Delta p L^2}{8cU\sigma} \sqrt{\frac{2}{\pi kr}} \right] \frac{2\pi r dr}{L^2} \sim Q \left( \frac{\Delta p}{\rho c U} \right)^2 L^2$$

ここで  $k$  は波数， $c$ ， $U$  は表面波の位相速度と群速度， $\sigma$  は規格化因子でもある振動質量 (面密度) である．

$$\Delta p^2 \sim \int_f^\infty \psi(f) df \approx \frac{10^{-5}}{f} \text{ Pa}^2/\text{Hz}$$

は Pathfinder の記録に基づいた値を用いた．結果を平均自乗振幅の平方根で表すと，メガ・レゴリスの場合で

$$u \sim 5 \times 10^{-7} \times \left[ \sqrt{\frac{0.3}{f}} \sqrt{\frac{Q}{1000}} \sqrt{\frac{L}{0.5 \text{ km}}} \right] \text{ [m]},$$

地殻の場合で，

$$u \sim 8 \times 10^{-9} \times \left[ \sqrt{\frac{0.06}{f}} \sqrt{\frac{Q}{1000}} \sqrt{\frac{L}{0.5 \text{ km}}} \right] \text{ [m]},$$

である．それぞれの帯域で地震計の検出限界は  $3.7 \times 10^{-6}$  m 及び  $4.2 \times 10^{-5}$  m 程度である．どちらのケースでも検出限界を下回るが，メガ・レゴリスのケースでは factor の違いであるので，観測点周辺の大気擾乱状況によっては観測の見込みがある結果となった．地殻厚の検出に関してはグローバルモードの場合と同じくかなり厳しい結果となった．

#### (4) まとめ

NASA の惑星探査ミッションであるディスカバリープログラムに選ばれた火星内部構造探査 InSight [1] はこれまでの火星着陸探査とは異なり，広帯域地震計などの地球物理学観測

装置を搭載した本格的な内部構造探査である。火星は比較的小型の地球型惑星であり、その内部構造は地球では忘れ去られてしまった火星形成期の記憶をとどめている天体と期待されている。InSightはその内部構造を広帯域地震計、熱流量計、回転計測によって制約することを目指した野心的なプロジェクトである。InSightは2016年3月に打ち上げ予定で開発が進められていたが、広帯域地震計の性能を左右する真空容器のガスリークの問題のため2年間の打ち上げ延長が決まった。しかし、開発課題をクリアし火星表面で観測を始めることができれば、火星の初期進化にもインパクトを与える内部構造の知見をもたらすと期待されている。本研究課題ではそのInSightの科学成果を強化するため、研究代表者が提唱した常時自由振動の観測可能性と常時自由振動を用いた内部構造探査のための解析準備を行うことを目的としたものである。火星内部構造モデルは未だ不確定なものであるが、Sohl and Spohn (1997) [3] の内部構造モデルは現在でも種々提唱されている火星モデルを代表するモデルであり、そのmodel A, Bを用いた火星常時自由振動の検出可能性について検討した。検討の結果、Kobayashi and Nishida (1998) [2] が用いた次元解析による大気擾乱モデルでは検出の可能性が示唆されるが、より現実的な火星探査機Pathfinderの圧力観測に基づいた大気擾乱ではグローバルな構造の情報を引き出すことの可能な長周期自由振動の常時励起レベルは搭載される広帯域地震計の検出レベルを大きく下回る結果となった。そこで、地殻及び地殻浅部の構造に敏感なもっとも短周期の表面波について着目し、その常時励起振動についての検討も行った。短周期表面波を用いた常時励起振動をPathfinderの観測大気圧変動を外挿して見積もった。結果、地殻厚を決めるのに有利な数10秒の表面波の励起はグローバルモードの励起と同様検出レベルを下回ったが、表層1kmほどに分布しているメガ・レゴリス層については常時微動からその層厚について議論できる可能性を見出した。しかし、実際の大気擾乱の程度については不確定な部分が多いので、実際に地震計を設置して脈動のレベルを観測するまで本当のところは分からないであろう。本報告書では述べなかった隕石の衝突地震もInSightのプログラムではメインの観測テーマであり、常時脈動も含め、InSightの観測結果が将来のネットワーク観測のデザインを決める上で大変重要なものとなる。最後に、このような魅力的な惑星探査ミッションであるInSightにCo-Iとして誘ってくださったパリ地球物理学研究所のP. Lognonné教授、開発課題の多いInSightミッションを見事にまとめ数々の困難を乗り越えてチームをまとめているPIであるW. B. Banerdt博士に感謝の意を表したい。

<引用文献>

- ① <http://insight.jpl.nasa.gov>
- ② N. Kobayashi and K. Nishida, *nature*, 395, 1998, 357-360
- ③ F. Sohl and T. Spohn, *JGR*, 102, 1997, 1613-1635
- ④ N. Kobayashi, *GJI*, 168, 2007, 315-331
- ⑤ Y. Fukao et al., *JGR*, 107, 2002, 2206, DOI: 10.1029/2001JB000153
- ⑥ Knapmeyer et al., *JGR*, 111, 2006, E11006

#### 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4件)

- ① T. Kawamura, Naoki Kobayashi, S. Tanaka and P. Lognonné, *Lunar Surface Gravimeter as a lunar seismometer: Investigation of a new source of seismic information on the moon*, *JGR Planets*, 査読有, Vol. 120, 2015, 343-358 DOI:10.1002/2014JE004724
- ② R. Yamada, T. Nebut, H. Shiraishi, P. Lognonné, Naoki Kobayashi and S. Tanaka, *Frequency band enlargement of the penetrator seismometer and its application to moonquake observation*, *Advances in Space Research*, 査読有, Vol. 56, 2015, 341-354 DOI:10.1016/j.asr.2015.04.024
- ③ Y. Nishikawa, A. Araya, K. Kurita, Naoki Kobayashi, T. Kawamura, *Designing a torque-less wind shield for broadband observation of mars quakes*, *Planetary and Space Science*, 査読有, Vol. 104, B, 2014, 288-294, DOI:10.1016/j.pss.2014.10.011
- ④ K. Nishida, Naoki Kobayashi and Y. Fukao, *Background Lamb waves in the Earth's atmosphere*, *Geophys. J. Int.* Vol. 196, 312-316, 査読有, DOI: 10.1093/gji/ggt413, 2014

[学会発表] (計15件)

- ① 柴田直樹, 内部構造四方山話, 月地殻研究会, 2016年3月2日~2016年3月4日, 金沢大学サテライト・プラザ
- ② W. B. Banerdt, S. Asmar, D. J. Banfield, U. R. Christensen, J. F. Clinton, V. M. A. Dehant, W. M. Folkner, R. Garcia, D. Giardini, M. P. Golombek, M. Grott, T. Hudson, C. L. Johnson, G. Kargl, B. Knapmeyer-Endrun, Naoki Kobayashi, P. Lognonne, J. Maki, D. Mimoun, A. Mocquet, P. Morgan, M. P. Panning, W. T. Pike, T. Spohn, J. Tromp, R. C. Weber, M. A. Wieczorek, C. T. Russell, *Getting Under Mars' Skin: The*

- InSight Mission to the Deep Interior of Mars (Invited), AGU Fall meeting, 14-18 Dec. 2015, San Francisco
- ③ 小林直樹, 火星内部構造探査 InSight: 脈動で見る内部構造, 日本惑星科学会, 2015年10月14日~2013年10月16日, 東京工業大学
- ④ V. Dehant, S. Asmar, W. Folkner, P. Lognonné, B. Banerdt, S. Smrekar, A. Rivoldini, U. Christensen, D. Giardini, T. Pike, J. Clinton, R. Garcia, C. Johnson, Naoki Kobayashi, B. Knapmeyer-Endrun, D. Mimoun, A. Mocquet, M. Panning, J. Tromp, and R. Weber, Radioscience and seismic measurements for the INSIGHT mission about interior of Mars, 12-17 Apr. 2015, Vienna, Austria
- ⑤ P. Lognonné, W. B. Banerdt, R. C. Weber, D. Giardini, W. T. Pike, U. Christensen, D. Mimoun, J. Clinton, V. Dehant, R. Garcia, C. L. Johnson, Naoki Kobayashi, B. Knapmeyer-Endrun, A. Mocquet, M. Panning, S. Smrekar, J. Tromp, M. Wiczorek, E. Beucler, M. Drilleau, T. Kawamura, S. Kedar, N. Murdoch, P. Laudet and the InSight/SEIS Team, SCIENCE GOALS OF SEIS, THE INSIGHT SEISMOMETER PACKAGE, 46th LPSC, 16-20 Mar. 2015, The Woodlands, Texas
- ⑥ P. Lognonne, W. Banerdt, D. Mimoun, Naoki Kobayashi, M. Panning, W. Pike, D. Giardini, U. Christensen, Y. Nishikawa, N. Murdoch, T. Kawamura, S. Kedar and A. Spiga, Martian Ambient Seismic Noise: from the first modeling to the future data of the InSight Seismic experiment, 15-19 Dec. 2014, San Francisco
- ⑦ 西田究, 小林直樹, 深尾良夫, Lamb波と熱圏にトラップされた重力波のカップリング, 日本地球惑星科学連合大会2014年大会, 2014年4月28日~2014年5月2日, パシフィコ横浜
- ⑧ T. Kawamura Naoki Kobayashi, S. Tanaka and P. Lognonné, Evaluation of Observation bias of Apollo Seismic Observation Network, 45th LPSC, 17-21 Mar. 2014, The Woodlands, Texas
- ⑨ K. Nishida, Naoki Kobayashi and Y. Fukao, Background Lamb waves in the Earth's atmosphere, AGU Fallmeeting, 9-13 Dec. 2013, San Francisco
- ⑩ 小林直樹, InSightで観測される大気励起火星常時微動, 日本惑星科学会, 2013年11月20日~2013年11月22日, 石垣島
- ⑪ 小林直樹, 西田究, 須田直樹, 辻健, 脈動で探る火星内部構造, 日本地震学会2013年秋季大会, 2013年10月7日~2013年10月9日, 横浜
- ⑫ 西田究, 小林直樹, 深尾良夫, Lamb波の常時励起, 日本地震学会2013年秋季大会2013年10月7日~2013年10月9日, 横浜
- ⑬ W. Banerdt, S. Smrekar, P. Lognonné and Naoki Kobayashi, An Introduction to the Exploration for the interior of Mars: InSight, 日本地球惑星科学連合大会2013年大会(招待講演), 2013年5月19日~2013年5月24日, 幕張メッセ
- ⑭ 白石浩章, 山田竜平, 石原吉明, 小林直樹, 早川雅彦, 田中智, 鈴木宏二郎, 火星ペネトレータによるネットワーク観測案, 日本地球惑星科学連合大会2013年大会, 2013年5月19日~2013年5月24日, 幕張メッセ
- ⑮ W. B. Banerdt, S. Smrekar, K. Hurst, P. Lognonné, T. Spohn, S. Asmar, D. Banfield, L. Boschi, U. Christensen, V. Dehant, W. Folkner, D. Giardini, W. Goetz, M. Golombek, M. Grott, T. Hudson, C. Johnson, G. Kargl10, Naoki Kobayashi, J. Maki, D. Mimoun, A. Mocquet, P. Morgan, M. Panning, W. T. Pike, J. Tromp, T. van Zoest, R. Weber, M. Wiczorek and the InSight Team, INSIGHT: A DISCOVERY MISSION TO EXPLORE THE INTERIOR OF MARS, 44th LPSC, 18-22 Mar. 2013, The Woodlands, Texas
- [図書] (計0件)
- [産業財産権]
- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)
- [その他]
- ホームページ等  
<https://planetb.sci.isas.jaxa.jp/lb7/naoki/>
6. 研究組織  
 (1)研究代表者  
 柴田(小林)直樹(SHIBATA (KOBAYASHI), Naoki)  
 JAXA・宇宙科学研究所・助教  
 研究者番号: 30272660