

jh130017-NA11

球座標系 2.5 次元差分法による地球・火星・月の全球地震波伝播モデリング

豊国 源知 (東北大学)

概要 本課題では、既存の地球・火星・月の内部構造モデルと震源に関する情報を用いて、これらの天体の内部を伝播する地震波を高周波数まで再現し、3 天体の地震波伝播の比較を行う。火星や月では 60~70 年代に地震計による観測が行われたが、データの質や観測点分布の偏りのために地震波伝播には不明な点が多い。現在はこれらの天体で再度地震探査を行う計画が各国で進められている。本課題は従来の観測の欠点を補完し、将来の地球外地震探査へ向けた機器開発、観測計画への指針を与えられると期待される。中間報告の時点では自動並列/Open MP 演算のみを用い、地球、火星、月について、それぞれ卓越周期 30 秒、30 秒、15 秒という長周期の波までしか計算できなかったが、その後プログラムの MPI 化を行い、1 次元内部構造モデルについて地球、火星、月それぞれで、卓越周期 15 秒、8 秒、2 秒という高周波数までの現実的な計算に成功した。

1. 研究の目的と意義

本課題では、既存の地球・火星・月の内部構造モデルと震源に関する情報を用いて、これらの天体の内部を伝播する地震波を、高周波数まで精度よくシミュレーションすることを第一の目的とする。また 3 天体におけるシミュレーション結果を比較検討することで、それぞれの天体の地震波伝播の特徴を抽出することを第二の目的とする。

火星や月では 1960~70 年代に地震計による観測が行われたが、データの質や観測点分布の偏りのために地震波伝播には不明な点が多い。現在はこれらの天体で再度地震探査を行う計画が各国で進められている。本研究では現在までに得られている天体内部構造や震源の知識を活用し、現実的な全球波動場のシミュレーションで各天体の地震波動場の特徴を予測する。この研究の意義は、従来の観測の欠点を補完し、将来の地球外地震探査へ向けた機器開発、観測計画への指針を与えられる点にある。

本課題で利用する計算手法は、申請者がこれまで開発を行ってきた、全球地震波伝播を精度と効率よく計算する手法「球座標系 2.5 次元差分法」である。2.5 次元計算とは、媒質の 2 次元構造断面上で 3 次元の波動場を計算する方法であり、通常の 3 次元計算の 1 万~10 万分の 1 の計算資源で現実的な波動場を計算できる。本研究の特色は、

手法の効率の良さを活かし、3 天体の様々な構造・震源モデルに適用し多数の計算を実行することで、各天体の波動場の特徴を統計的に捉えられる点にある。

2. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

(1) 共同研究を実施した拠点名および役割分担

東北大学サイバーサイエンスセンター

研究代表者：豊国源知 (東北大・助教) :

コードの開発と演算の実行、結果の解釈

共同研究者：竹中博士 (岡山大・教授) :

コードの開発

共同研究者：小林広明 (東北大・教授) :

高速化・最適化支援

共同研究者：江川隆輔 (東北大・准教授) :

高速化・最適化支援

共同研究者：小松一彦 (東北大・助教) :

高速化・最適化支援

(2) 共同研究分野

超大規模数値計算系応用分野

(3) 当公募型共同研究ならではの事項など

研究代表者の在籍研究機関の計算機を利用できるため、公募課題採択以前から作成していたプロ

グラムをそのまま利用でき、移植等へかける労力を必要としない点が挙げられる。

3. 研究成果の詳細と当初計画の達成状況

(1) 研究成果の詳細について

(1-1) 手法：球座標系 2.5 次元差分法

本課題で計算に用いているシミュレーション手法は、「2.5 次元モデリング」と呼ばれる手法である。これは 3 次元モデリングと 2 次元モデリングの長所を組み合わせた手法である。

様々なシミュレーション手法の中で、3 次元の地球モデル中を伝播する 3 次元の波をフルに計算する方法は「3 次元モデリング」と呼ばれる。これは最も現実に近い理論波形が得られるが、莫大な計算機資源(メモリと計算時間)を必要とする。これに対して、地下の 2 次元断面のみに着目して、その面内を伝わる 2 次元の波だけを計算する手法は「2 次元モデリング」である。この手法は計算資源が少なくすむ一方、3 次元の波面の幾何学的な広がりやを正しく考慮できないせいで、観測波形と直接比較ができないデメリットが生じる[竹中, 地震, 1993]。

以上のような両者のデメリットを克服すべく提案されたのが、本課題で用いる「(軸対称) 2.5 次元モデリング」である。これは震源を通る鉛直軸の周りに軸対称な構造を仮定することで、3 次元的な空間の広がりやの効果を 2 次元断面に落とし込んだのち、その断面内において、面内運動 2 成分と、面外運動 1 成分の、3 次元の波動伝播を計算する方法で、「波動場 3 次元, 構造 2 次元」という意味で「2.5 次元」と呼称される。この手法は構造断面のみについて計算を行うことで計算資源は 2 次元モデリング並みに節約でき、同時に 3 次元の地震波伝播を正しく取り扱える。現在は計算機性能の進歩により、10 年ほど前までは不可能だった大規模計算がどんどん実現しているが、それでも 3 次元モデリングでは 1 回の計算がやっとなり、その 1 万~10 万分の 1 で計算が行える 2.5 次元モデリングは、依然として魅力的な手法である。

数値計算手法の分類上の重要な点に、離散化手

法の違いがある。複雑な不均質媒質を入力した計算では、計算の対象とする全空間・時間領域を離散化して解く場合がほとんどであるが、離散化手法の違いによって差分法、有限要素法、擬スペクトル法、など様々に分類される。このうち差分法は、支配方程式に現れる偏微分を差分で近似する解法であり、コーディングが容易で地震波のシミュレーションで普遍的に使われているので、我々のプログラムでも差分法による離散化を採用している。

我々はこれまで、全地球をターゲットとした地震波シミュレーションのために、軸対称 2.5 次元モデリングを用いた波形計算プログラムの開発を行ってきた。このプログラムでは、震源と地球中心を結ぶ軸を z 軸とした球座標系 (r, θ, ϕ) を定義して、 ϕ 方向に構造モデルの軸対称性を導入したうえで、その 2 次元断面 (r - θ 断面) について弾性波の支配方程式を解く。差分法と 2.5 次元モデリングを組み合わせた全地球地震波シミュレーションは、90 年代半ばから最近まで間断なく利用されているものの[e.g., Igel & Wever, *GRL*, 1995], 軸対称の仮定のせいで、軸を挟んで非対称な現実的な構造を扱えない問題が存在した。震源についても、先行研究では核爆発のような軸対称なメカニズムを持つ震源だけが用いられ、断層運動のような非対称な震源は取り扱われていなかった。加えて、球座標系を用いた解法では、球の中心 ($r=0$) が方程式の特異点となるため、これを回避する方法が必要になる。先行研究の中には地震波動場を音響場で近似して、地球中心を含めて計算を行ったものがあるが[Thomas et al., *GJI*, 2000], P 波と S 波をまともに計算した例はない。このように計算の効率性とは引き換えに、従来の軸対称 2.5 次元モデリングには改良すべき点も多く存在した。我々は通常の球座標領域と座標軸の取り方を変えた新しい座標領域「準球座標領域」を定義することで、従来の手法の枠組みで任意の非対称構造を取り扱うことに成功した[Toyokuni et al., *GRL*, 2005]. 通常の球座標領域 ($0 < r < \infty, 0 \leq \theta \leq \pi, -\pi \leq \phi \leq \pi$) を用いると、球の大円に沿った構造断面

は $\phi = 0$ と $\phi = \pi$ にある 2 枚の半円板で表される。このため任意の構造モデルを $\phi = 0$ の面に入力すると、軸対称性によって $\phi = \pi$ の面における構造は $\phi = 0$ のものと対称にならざるを得なかった (図 1a)。これに対して準球座標領域 ($0 < r < \infty, -\pi \leq \theta \leq \pi, -\pi/2 \leq \phi \leq \pi/2$) では、球の大円に沿った構造断面は $\phi = 0$ における円板 1 枚のみで表され、この面には任意の不均質構造モデルが入力できる (図 1b)。座標軸の取り方を変えるだけなので、従来の軸対称モデリングの効率の良さはそのまま、非対称な構造モデルが取り扱える。このように現在のプログラムは軸対称性の仮定によるデメリットからは解放されているので、以降では「軸対称」という単語を用いることを避け、本手法を「球座標系 2.5 次元差分法」と呼ぶことにする。

また任意の非対称震源を 5 種類の震源要素に分解して解く手法により、断層から励起される地震波のシミュレーションも可能になった [Toyokuni & Takenaka, *EPS*, 2006]。さらに、計算精度を高める媒質パラメータの導入 [Toyokuni & Takenaka, *CAGEO*, 2009]、震源メカニズムを考慮した線形補完による球中心の特異点問題の回避、および媒質の物性が完全な弾性体からずれていることにより生じる地震波の減衰現象 (=非弾性減衰) の導入 [Toyokuni & Takenaka, *PEPI*, 2012] も行い、現在のプログラムでは極めて現実に近い地震波伝播をシミュレーションできる。

(1-2) 本課題におけるプログラム開発の概要

本課題におけるシミュレーションは、東北大学サイバーサイエンスセンターのベクトル型スーパーコンピュータ NEC SX-9 を用いて実行した。計算機の利用にあたっては、サイバーサイエンスセンターと日本電気株式会社との共同研究でプログラムの性能分析を行い、その結果に基づいてチューニングを施した。ソースコードは Fortran90 で記述しており、行数は約 18000 である。日本電気株式会社において手動によるループ展開やベクトル化指示行の挿入、演算やファイル出力の細かな最適化等のチューニングを施した結果、1CPU 実

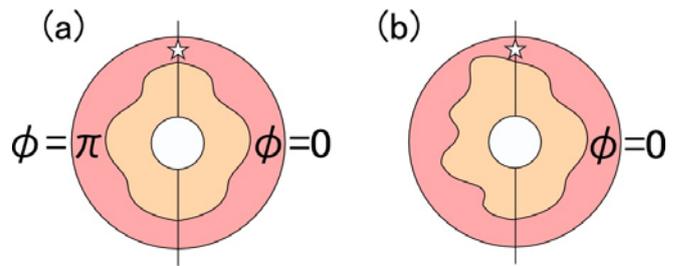


図 1: 通常の球座標領域 (a) と準球座標領域 (b)。

行で約 60 倍の計算速度向上に成功した。また自動並列化による性能測定 (コンパイルオプション “-R2 -f3 -Ep -pi -Pauto -Wf,-pvctl fullmsg”) の結果、8CPU で 4.4 倍、16CPU で 5.8 倍の速度向上を見た。

また上記共同研究によって、中間報告の時点で既にプログラムの MPI 化も行っていたが、その後何例かのテスト計算を実行したところ、高周波数までの計算では天体の中心付近で解が不安定となるケースがあることが判明したため、中心付近にスムージングを施すよう独自にプログラムを改良し、最適化とデバッグを繰り返した。これにより当初の研究計画よりも数ヶ月程度の遅れが生じたが、以下で示すように課題年度終了までに地球、火星、月全てについて、高周波までの地震波伝播を安定に計算することに成功した。

(1-3) 地球の地震波伝播計算 (全課題期間)

中間報告では地球の地震波伝播シミュレーションについて記載しなかったため、ここで本課題における成果をやや詳しく紹介する。

最初に中間報告の際に割愛した、地球・火星・月の長周期地震波伝播の比較結果を示す。三天体の大きささと地震波速度構造の違いによる地震波伝播の相違がわかりやすいよう、三天体の同じ深さに、同じメカニズムの震源を入れてシミュレーションを行った。地球の内部構造は Dziewonski & Anderson [PEPI, 1981] による 1 次元速度構造モデル (図 2c) を用いた。月と火星の 1 次元構造モデルは、中間報告で述べたとおりである。震源は三天体とも深さ 30 km に置き、メカニズムはピュアな横ずれ型とした。また震源から励起される波

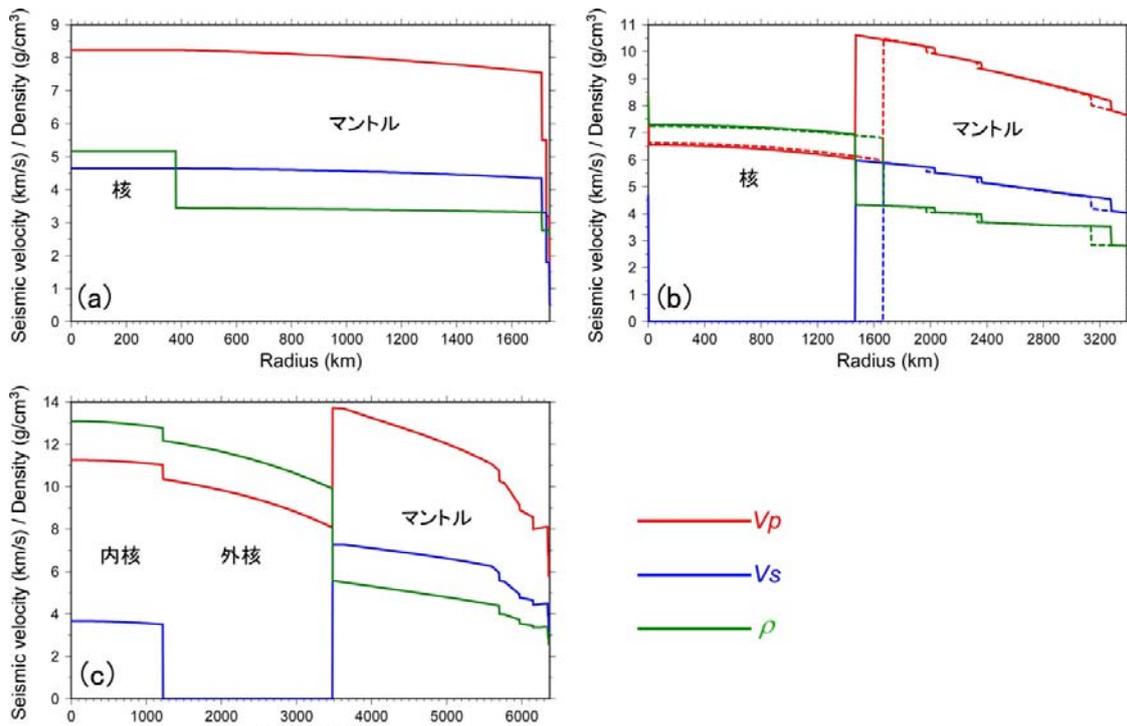


図 2：本課題の計算で用いた (a) 月・(b) 火星・(c) 地球の 1 次元構造モデル．赤，青，緑線はそれぞれ P 波速度， S 波速度，密度を表す．火星のモデルは，モデル A（実線）と B（点線）の 2 種類がある．

のパルス幅も 30 秒で統一した．この計算の格子数やメモリ等は表 1 に示した．

図 3 は三天体の断面における，励起後 600 秒と 1800 秒の地震波伝播のスナップショットである．天体の大きさによる地震波伝播の違いを見やすくするため，三天体は同じ縮尺で描いている．火星は地球の約 1/2，月は 1/4 の大きさしかないため，月では励起後 600 秒で既に震源の反対側まで波が到着している．また月の地殻における多重反射によって，波がいつまでも震源付近に留まっている様子がわかる．1800 秒では，火星でも大振幅の波が震源の反対に到着しているのに対し，地球では振幅の小さい P 波が到着したばかりである．また月では中心付近まで大振幅の波が伝播している．地震波は伝播距離が長くなるほど減衰していくので，地球に比べて小さい月や火星では，地震波が大振幅を保って天体の裏側まで伝播する．したがって地震の規模が同じ場合は，月や火星の方が観測可能な地域が広いうえ，天体深部を通過してきた波を観測しやすいと言えることが理論的に示された．

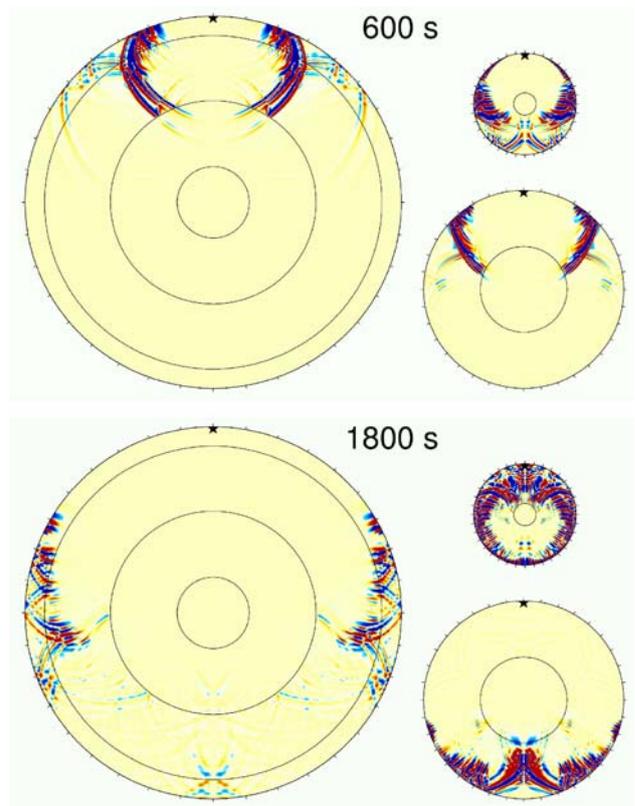


図 3：月・火星・地球の地震波伝播の比較．励起後 600 秒と 1800 秒での粒子速度の r 成分のスナップショットを示した．赤色は正，青色は負の振幅を表す．震源は星印．

表 1：図 3 の計算諸元

	パルス幅 (秒)	空間格子数	時間格子数	メモリ (GB)	実行時間 (s)	MFLOPS 値
月	30	3201546	400000	2.304	18785	7780
火星	30	5442720	200000	3.520	22290	5642
地球	30	10835200	200000	10.176	12632	20446

また中間報告時点では，地球の地震波伝播は卓越周期 30 秒までしか計算を行えなかったが，プログラムの MPI 化によって周期 15 秒までの波動場の計算に成功した．周期 15 秒の場合，空間格子数約 4271 万点，時間格子数 40 万点が必要となるが，SX-9 の 2 ノード 16CPU (ジョブクラス p32) を用いた演算で，5 時間程度の実行時間で終了した．図 4 は図 2c に示した 1 次元速度構造モデルを使って計算した，励起後 500 秒，1000 秒，1500 秒での地震波伝播のスナップショットである．波動場は深さ 635 km に置いた，ピュアな横ずれ型震源から励起させたものである．

(1-4) 火星の地震波伝播計算 (中間報告後)

火星の地震波伝播計算については，詳細を中間報告で述べているので，ここでは中間報告以降の成果についてのみ記述する．現在までに得られている火星の内部構造モデル (図 2b) では，火星の核は中心付近まで液体となっている．このため波動場を計算する際に中心付近で計算の不安定が発生しやすく，特に高周波までの計算でその傾向が顕著であった．中間報告以降，中心付近の波動場を計算する際に，震源のメカニズムを考慮したスムージングを施すことで，計算の不安定を解消することに成功した．

図 5 は図 2b に実線で示した 1 次元速度構造モデルを使って計算した，励起後 120 秒から 720 秒までの 120 秒おきの火星の地震波伝播のスナップショットである．SX-9 の 2 ノード 16CPU (ジョブクラス p32) を用いた演算で，卓越周期 8 秒という現実的な実体波の周期付近までの計算が可能となった．図 5 では励起後 360 秒あたりで波が火星の中心を通過しているが，その後も解は発散せずに安定に計算できていることがわかる．

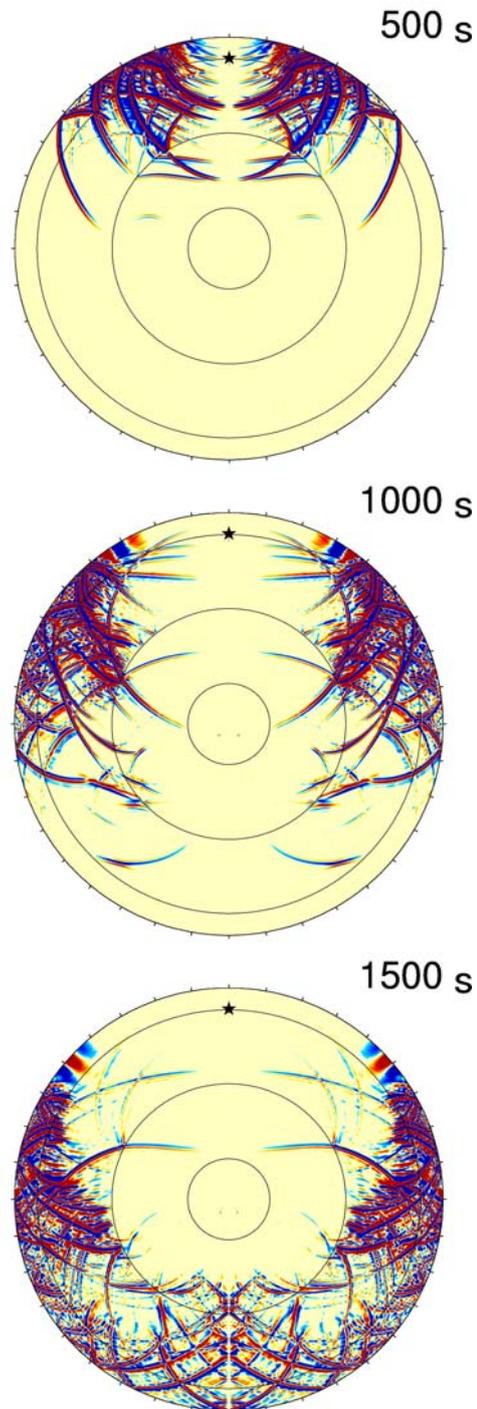


図 4：卓越周期 15 秒での地球の地震波伝播．励起後 500 秒，1000 秒，1500 秒での粒子速度の r 成分のスナップショットを示した．赤色は正，青色は負の振幅を表す．震源は星印．

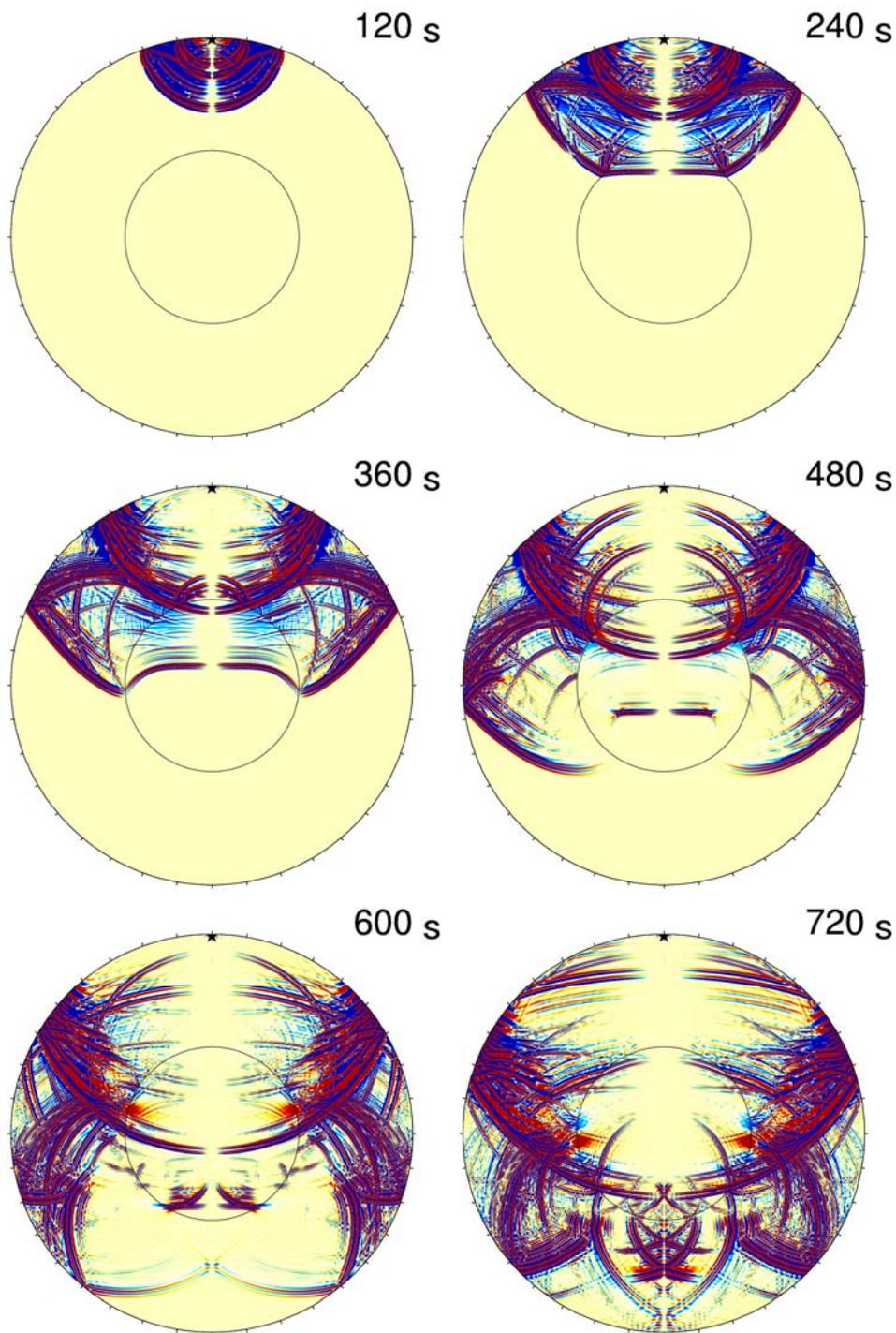


図 5：卓越周期 8 秒での火星の地震波伝播．励起後 120 秒から 720 秒までの 120 秒おきの粒子速度の r 成分のスナップショットを示した．赤色は正，青色は負の振幅を表す．震源は星印．

(1-5) 月の地震波伝播計算（中間報告後）

月の地震波伝播計算についても，詳細を中間報告で述べているので，ここでは中間報告以降の成果についてのみ記す．火星の場合と同様，MPI を用いた演算で，高周波までの理論地震波形計算を

行った．月の場合，半径が地球の約 $1/4$ ，火星の約 $1/2$ であることから，地球や火星における計算と同等の計算資源を用いて，さらに高周波の波まで計算することができる．本課題では，卓越周期 2 秒までの計算に成功した．地球の自然地震の実体波（ P 波， S 波）の卓越周期は数秒であるので，予

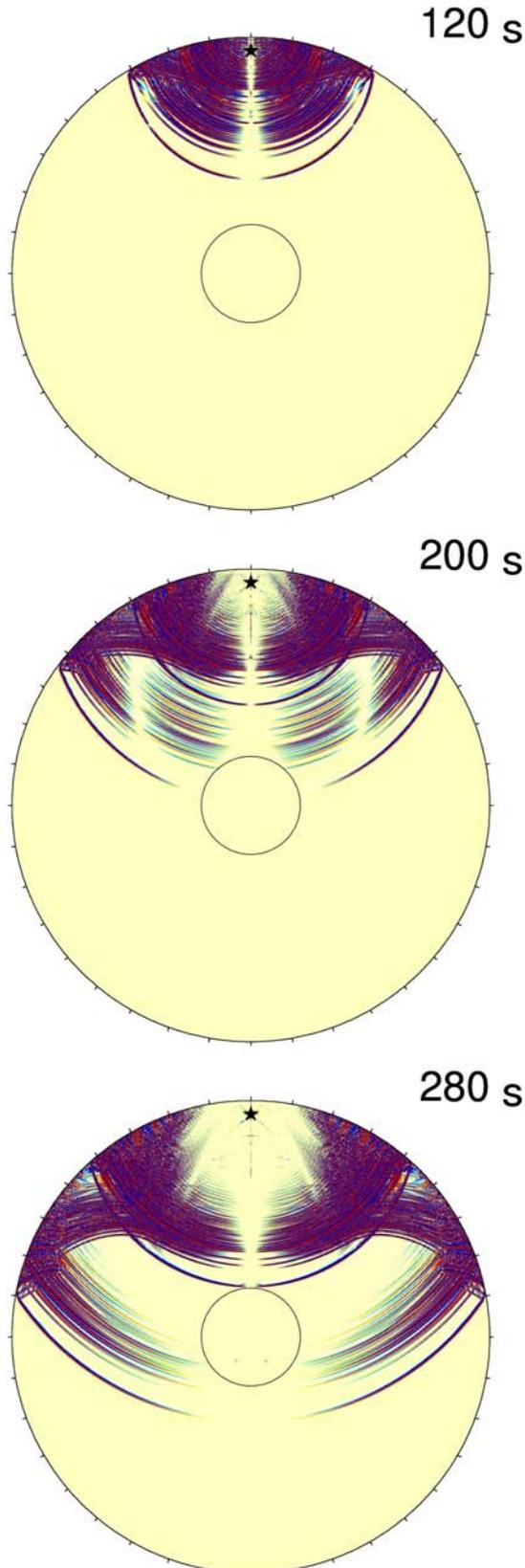


図 6：卓越周期 2 秒での月の地震波伝播。励起後 120 秒，200 秒，280 秒での粒子速度の r 成分のスナップショットを示した。赤色は正，青色は負の振幅を表す。震源は星印。

想されうる周波数範囲は本課題の計算で網羅できたことになる。

図 6 は図 2a に示した 1 次元速度構造モデルを使って計算した，励起後 120 秒，200 秒，280 秒での月の地震波伝播のスナップショットである。本例の計算でも SX-9 のジョブクラス p32 を利用した。震源は深さ 100 km の比較的浅部に置いたため，薄く低速度の地殻内における地震波の多重反射が顕著になり，地球や火星の計算では見られない特徴的な後続波が現れていることがわかる。この特徴は観測波形の特徴と非常に調和的であることから，今後観測波形との比較を進めていきたい。

(2) 当初計画の達成状況について

本課題後半は，(1-2)でも述べた通り，天体中心における計算の不安定に関する問題への対処とプログラムのデバッグに多くの時間を費やした。また課題後半は年度末にあたり，SX-9 のジョブクラス p32 や p16 は 2 ヶ月程度の待ち時間が必要で，デバッグは自前の計算機で進めるしかなく，思うような進捗が得られなかった。

一方，プログラムの MPI 化と，天体中心付近での波動場のスムージングの導入によって，1 次元構造モデルを用いた高周波までの地球・火星・月の全球地震波伝播計算は成功した。今後は構造モデルを変えるだけで，さらに複雑な計算も可能な状態であるので，当初計画は 8 割方達成できると言える。

4. 今後の展望

今後は本課題で作成したプログラムを，横方向の不均質を含むモデルに適用し，さらに現実的な波動場のシミュレーションを行い，惑星探査で計画されている観測機器の開発にフィードバックする予定である。また横方向不均質を含むモデルで高周波までの計算を行ったのち，本課題に関連する成果を論文として国際誌へ投稿する予定である。

5. 研究成果リスト

(1) 学術論文（投稿中のものは「投稿中」と明記）

豊国源知, 竹中博士, 趙大鵬, 石原吉明:

月と火星の全球地震波伝播シミュレーション, 東北大学サイバーサイエンスセンター大規模科学計算システム広報 SENAC,46(3), 1-12, 2013.

(2) 国際会議プロシーディングス

(3) 国際会議発表

Toyokuni, G. H. Takenaka, and D. Zhao:

Accurate and efficient modeling of seismic wave propagation -axisymmetric 2.5-D approach and its applications-, 19th Workshop on Sustained Simulation Performance, Sendai, Japan, 2014.3.

(4) 国内会議発表

(5) その他（特許, プレス発表, 著書等）