

[共同研究成果]

小惑星内部構造レーダ探査模擬 FDTD シミュレーションコードの開発

— 小惑星 Dimorphos の VHF レーダ探査 —

小林 敬生

韓国地質資源研究院

2重小惑星系 Didymos-Dimorphos を調査する ESA の小惑星探査機 HeRa に搭載された VHF レーダ Juventas Radar (JuRa) による Dimorphos 内部構造探査模擬を目的とするシミュレーションコードの開発について紹介する。JuRa は Dimorphos 到着後、まず周回軌道から 10^3 m ほどの距離において全体観測をしたのち距離を縮めて近接観測を行ない最終的に表面着陸までの観測を計画している。開発中のシミュレーションコードは遠距離観測モードと近距離観測モードの 2 つのシミュレーションモードから構成される。本稿は、そのうち近距離観測モードについて報告をするものである。

1. はじめに

前世紀の終盤、大型光学望遠鏡の新設と光学センサーの高感度化が相まって、暗く小さな微小天体の発見数が急激に増加した。1990 年代に入り地球とこれら小天体との衝突が引き起こす災害の最小化を目的とするスペースガード活動がはじまり、今世紀に入りそれが planetary defense つまり、惑星防衛という概念/活動に昇華した。2021 年にはそれを具体化した行動として人工物を小惑星に衝突させることによりその軌道運動に人為的に変化を引き起こす実証実験 Dart (Double Asteroid Redirection Test) が母小惑星 Didymos を公転する衛星 Dimorphos を対象に行われ、その公転軌道に変化を引き起こすことに成功した。Didymos はサイズが 700m であり Dimorphos は 170m ほどである。

この Dart による衝突実験が Dimorphos に与えた影響の評価を行なうことを主目的とする探査プロジェクト Hera が一昨年 (2024 年) 10 月に打ち上げられた。Didymos-Dimorphos 系への到着は今年 (2026 年) 12 月である。Hera は種々の光学観測機器とともに 2 機の 6U キューブサット、Juventas と Milani を搭載している。これらは Didymos-Dimorphos 系到着後に HeRa から分離されそれぞれのミッションを遂行する。JuRa は Juventas に搭載されているレーダである。

JuRa は観測中心周波数 60 MHz (波長 5 m) の VHF レーダであり、フルポラリメトリック観測ができるよう直交 1 対のダイポールアンテナを送受信アンテナとしている。アンテナエレメントの長さは 1.5m で、Dimorphos 到着後に展開する。JuRa のバンド幅は 20 MHz であり、計算上の真空中のレンジ分解能は 7.5m である。小電力による劣悪な S/N 条件をカバーするため、レーダ方式は疑似ランダムパルス変調方式をとっている。JuRa の探査目標は Dimorphos の内部構造を明らかにすることである。内部構造の解明をするためには、JuRa のデータをもとにトモグラフィ逆問題を解く方法とフルポラリメトリック観測データの偏波解析により内部構造の偏波特性を決定する方法がある。前者はマクロな構造を決定する方法であり、後者は波長スケール程度の相対マイクロな構造を決定する方法である。解を得たのちそれを惑星科学の文脈で解釈するのだが、その前に解の正しさを確認する必要がある。しかし、そのための追試の手段が地球上にはない。波長 5 m のレーダに対応できる実験施設がないからである。そこで登場するのがシミュレーションである。シミュレーションが要求される実験を代替するのである。

本稿著者は、電磁波の伝搬・散乱問題を扱うのに広く使われている FD-TD (Finite Difference - Time Domain) 法 [1] を使って、JuRa の送受信アンテナを含めたフルスケールモデルのシミュレーションコードの開発を進めている。

2. 近接レンジ観測モデル

2.1 FD-TD モデル

FD-TD 法では、数値分散の影響を実用程度まで無視できるようにするため、格子点間隔の大きさを代表波長の 20 分の 1 以下とすることが推奨されている[1]。本研究でもこの目安に従い格子点間隔を定めるが、本研究では観測中心周波数 60MHz のレーダによる小惑星の内部構造の探査が主題なので、小惑星内部媒質を伝搬するときの波長を基準として考えなければいけない。Dimorphos のように大きさが 10^2 m 程度の小さな小惑星は、本体が稠密なひとつの岩塊ではなく、さまざまな大きさの小さな岩層が集まって出来ており、従って全体として空隙率も高いと考えられている。現在のところ、JuRa の波長スケールで見た時の Dimorphos 内部の比誘電率は 3 程度であると考えられている。その場合、Dimorphos 内部を伝搬する JuRa パルスの平均波長 λ は

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon}} \sim 2.9 \text{ m}$$

と見積もられる。ここで λ_0 は真空中の JuRa 中心周波数での波長で ϵ は Dimorphos 内部の平均比誘電率である。本研究では格子点間隔 Δs を 15 cm とした。

本稿で紹介するのは、プロトタイプコードの結果である。このプロトタイプのシミュレーション空間の大きさはグリッド数にして $700 \times 700 \times 700$ であり、実空間の大きさにすると約 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ となる。このシミュレーション空間全体は厚さ 10 格子点の吸収境界で包まれている[2]。

アンテナはいわゆる細線モデル (thin wire model) [3, 4] によってモデル化したダイポールアンテナで同一直線上に並ぶ格子点を使ってアンテナエレメントを模擬する。JuRa のアンテナエレメント長は 1.5 m なので、10 個の格子点を使ってアンテナエレメントを模擬した。2 本のアンテナエレメントは給電点を挟んで両側に位置する。モデルの安定性を確保するためにアンテナエレメントの直径は 9 cm とした。これは、実物のアンテナエレメントの直径 1.2 cm と比較すると現実離れた値である。これについては章を改めて後述する。

給電点にアンテナ励起信号を送り、且つ、アンテナが受信するレーダエコー信号を本体側に送る給電線は 3 次元のシミュレーション空間とは別個に 1 次元の給電線モデル[5]として並行して

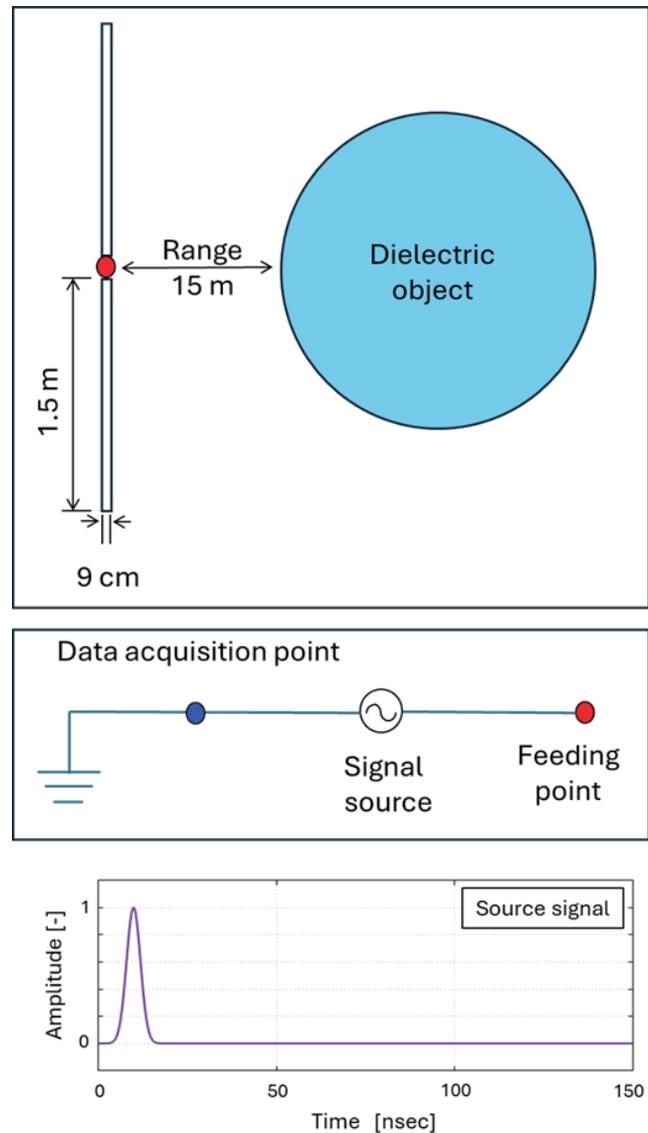


図 1. FD-TD シミュレーションモデル概念図 (上) 及び、アンテナ給電線モデル概念図 (中)、アンテナ励起信号 (下)。

シミュレーションを行なう。1次元給電線モデルは一方の端が3次元FDTDモデル内の給電点と共有され、もう一方の端は吸収境界となっている。給電線モデルの適当なところに給電信号源を設け、そこからみて吸収境界側の適当なところにデータ取得点を設けてその電圧値を観測データと定義する。アンテナ励振信号はガウシアンパルスである。

今回はテストとして、2種類の誘電体球（モデル1とモデル2）を探索目標小惑星とみなしてシミュレーションを行なった。モデル1は、内部が均一な直径60mの誘電体球で、内部媒質の比誘電率は2である。モデル2はモデル1と同じ大きさであるが、内部の直径48mの同心球部分を比誘電率4の媒質が占めている。それ以外の部分（マントル部分）はモデル1と同じ比誘電率2の媒質からなる。両モデルとも、今回のテストシミュレーションでは導電率を考慮しなかった。

JuRaアンテナの位置は給電点位置で代表させる。本稿では、給電点位置を誘電体球表面から15mとし、アンテナの軸方向は誘電体球の接線方向に合わせた。

2.2 モデル1：均一媒質誘電体球（直径60m）

モデル1によるシミュレーションは図1に示すアンテナ/ターゲット配置で行なった。アンテナ給電点からターゲット誘電体球の表面までのレンジは15mである。

近接レンジ観測で注意すべきことはアンテナの内部反射である。アンテナに給電する励振パルスのエネルギーはそのすべてがアンテナから電磁波として放射されるわけではない。相当程度がアンテナエレメントの端で反射されて給電線にまで戻ってくる。一部はアンテナと共振してアンテナエレメントに残留し、放射を続けながらも引き続き給電線へ還流し続ける。この還流成分は近接レンジ観測の障害となりうる。

図2（上）はターゲットのない自由空間における“受信”信号のプロットである。自由空間なので反射体は存在しない。ここで“受信”された信号の正体はアンテナの内部反射波である。図2（中）は探索目標の誘電体球の表面から15mの地点で観測した結果である。一見図2（上）と見分けがつかないのは、内部反射と比してターゲットからの反射信号が弱すぎるためである。図を十分に拡大すると、内部反射のすぐ後に非常に小さい振幅のターゲット反射波が認められる。この図2（中）のデータから図2（上）のデータを差し引いたものが図2（下）である。この図では、ターゲットの表面反射がはっきりと認められる。この表面反射はアンテナ内部反射の記録から約100nsec遅れて記録されているが、これは真空中で15mの距離を往復する電波の伝搬時間100nsecと整合的である。その後、800nsecを過ぎてから現れる信号はアンテナから見てターゲット裏面からの反射波である。裏面からの反射波は球体の中心を通る最短経路で伝搬してくるだけでなく、球体の表面に沿って伝搬する成分も混在しており表面反射

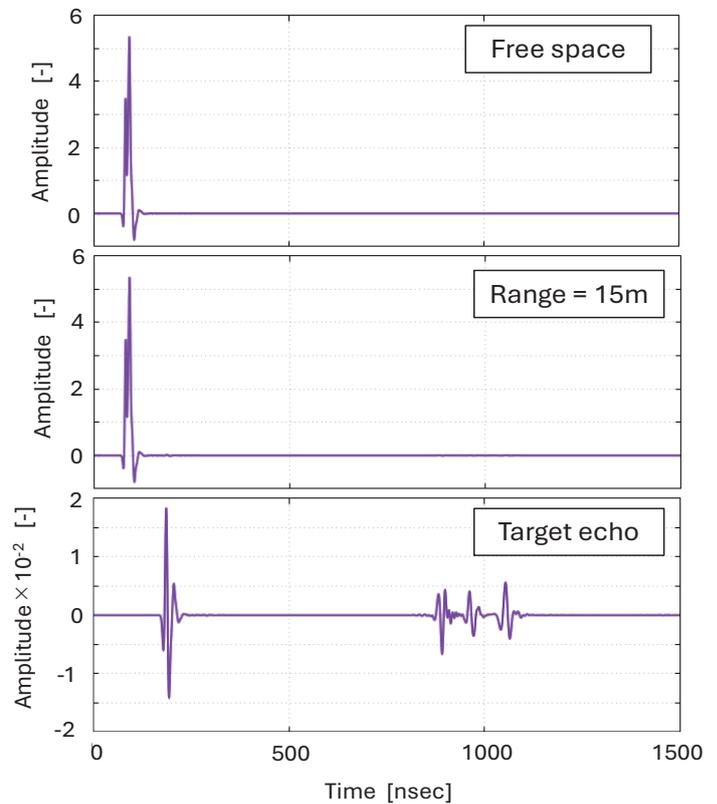


図2 アンテナ内部反射成分（上）および、誘電体球観測データ（中）、誘電体球反射信号（下）。

波の波形に比べると複雑な様相を呈している。今回のシミュレーションでは媒質の導電率を無視しているために裏面反射波の振幅は伝搬減衰を受けることなくその大きさが維持されている。この先、媒質の導電率を考慮したシミュレーションでは、裏面反射は伝搬中の減衰のため見えなくなることが予想される。

2.3 モデル2：同心2媒質誘電体球（外直径60m、内直径48m）

モデル2はモデル1と同じく外直径60mの大きさを持つが内部は均質ではなく構造を持つ。直径48mの誘電体球（比誘電率4）を厚さ6mの誘電体層（比誘電率2）が覆っているのである。モデルの断面図を図3に示す。誘電体中のレンジ分解能は媒質の比誘電率の平方根の逆数に比例するので、モデル2の誘電体層中で JuRa のレンジ分解能は5.3mとなる。

図4はこのモデル2の観測のシミュレーションの結果である。モデル1の場合と同じく、受信データからアンテナ内部反射成分を差し引いた結果である。観測点位置はモデル1と同じくターゲット表面から15mの地点なので、モデル1のシミュレーションと同じタイミングで表面反射波が観測されている。その直後に内部境界面からの反射波が受信されている。厚さ $d=6\text{m}$ で比誘電率 $\epsilon=2$ の誘電体層をレーダパルスが往復する時間 τ は光速を c として

$$\tau = 2 \frac{\sqrt{\epsilon} d}{c}$$

と計算されるが、それは56.6nsecである。図4では表面反射波と内部境界面反射波この計算通りの振る舞いをしていることが確認される。

3. アンテナモデルの適合性

上述したように本稿のシミュレーションではアンテナエレメントの形状（断面直径9cm、稠密）が実際のアンテナエレメントの形状（断面直径1.2cm、中空）からかけ離れたものとなっている。これがどのような影響をシミュレーションに及ぼすのか検討する。

そのためにまず実際のアンテナエレメントと同じ長さ・断面直径のモデルでアンテナのシミュレーションを行なう。計算の不安定化を避けるためにグリッドサイズは20mmとして、アンテナ長さ150cm、断面直径1.2cmとした。

アンテナを扱う研究では、着目する周波数の電波の波長を基準としてアンテナからの距離が1

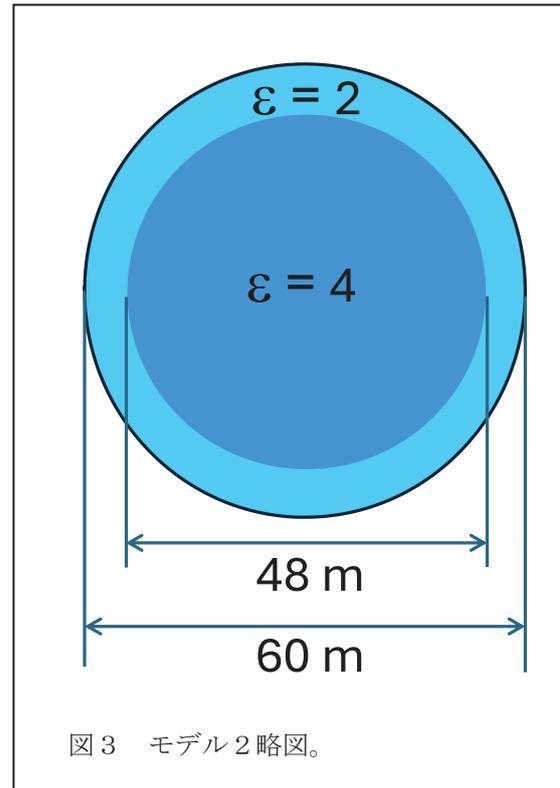


図3 モデル2略図。

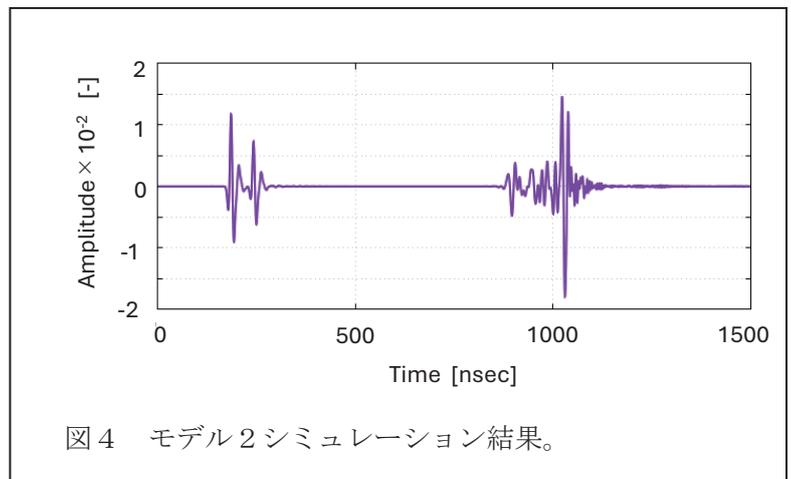


図4 モデル2シミュレーション結果。

波長程度以下のアンテナ近傍における電磁場を近接場と呼ぶ。アンテナから 10 波長も離れれば一般には遠方場とみなす。JuRa の中心周波数 60MHz の電磁波の波長は 5m なので、アンテナから 50m 離れた地点で観測される JuRa のレーダパルスは遠方場とみなせる。図 5 は格子点間隔 15 cm のシミュレーションにおけるアンテナモデルと格子点間隔 20 mm の実サイズアンテナモデルのアンテナ給電点から 50m の地点における送信パルス波形を比較したものである。波形に多少の差異はあるが、深刻な問題を引き起こすほどの違いではないと判断できる。

次に、アンテナのインピーダンスを調べた。FDTD シミュレーションでは、アンテナ給電線モデルの最後端グリッドの電圧値と電流値のデータからアンテナインピーダンスを計算することができる。図 6 はそうして得られたふたつのモデルのアンテナインピーダンスを比較したものである。一見して明らかに両者のインピーダンスの周波数の関数としての振る舞い方に大きな違いがあることがわかる。ただし、JuRa の公式バンド幅 $60 \pm 10\text{MHz}$ 近傍では当たらずとも遠からず程度の差異とみなすこともできそうである。これが、遠方場でパルス波形が大きく違わなかった理由である。近接レンジとは言え、ターゲットから数波長も離ればそこはほぼ遠方場なので、現在のアンテナモデルでシミュレーションを続けても問題はなさそうだ、と判断した。

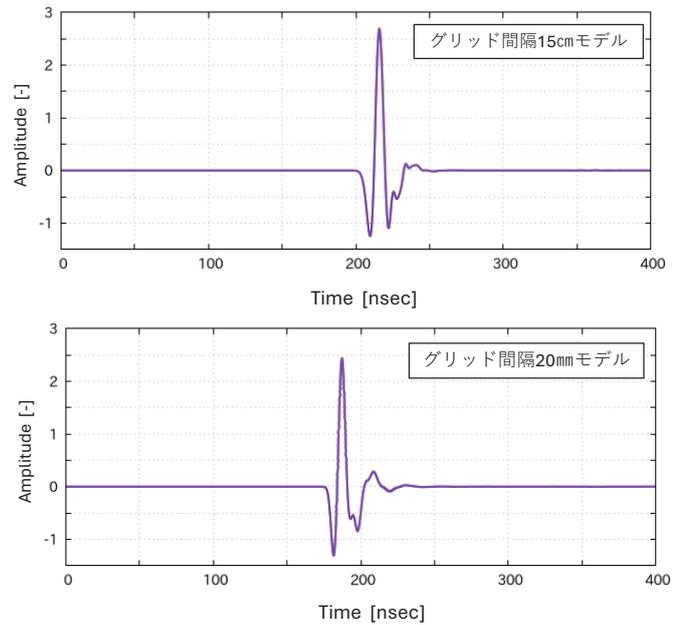


図 5 グリッド間隔の違いによる遠方場レーダパルス波形の比較。(上)グリッド間隔 15 cm (下)同 20 mm。

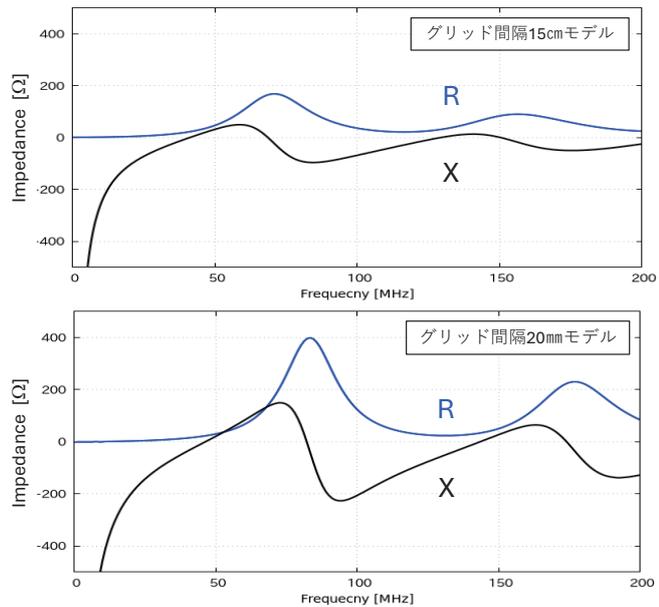


図 6 グリッド間隔の違いによるアンテナインピーダンスの比較。(上)グリッド間隔 15 cm (下)同 20 mm。

4. シミュレーションコードの MPI 化と計算時間

今回のプロトタイプコードによるシミュレーションでは探査対象天体モデルのサイズが実際の探査対象天体のその約 3 分の 1 であった。JuRa 観測シミュレーションの本計算では、シミュレーション空間の大きさが $1400 \times 1400 \times 1400$ 以上の大きさが必要となり、コードの MPI 化が必須となる。MPI 化に際してシミュレーション空間の分割数、すなわちプロセス数と実計算時間

(より卑近な言葉では計算が始まってから終わるまでの実際の待ち時間) との間にはどのような関係があるのかを、本稿のシミュレーションコードを元に作ったテストコードを使って調べてみた。

4.1 テストモデル

テストシミュレーションは真空を想定した空間の中心に点電流源を置いた FDTD シミュレーションである。この点電流源を JuRa のアンテナ同様ガウシアンパルスで励振し、放射された電磁波が吸収境界で吸収されて消えるまでを計算する。本項は MPI 化の効果による計算時間の変化が主題なので、電磁波の伝搬の様子等シミュレーション結果の詳細は省略する。

シミュレーション空間は大きさが $N \times N \times N$ ($N=1280$) の 3 次元 (i, j, k) 空間であり、これが厚さ 10 の吸収境界層に包まれている。本テストでは、 k 方向に垂直な平面でシミュレーション空間と吸収境界層を等間隔でスライスするように分割して MPI 並列プロセスの計算領域を定義した (図 7)。

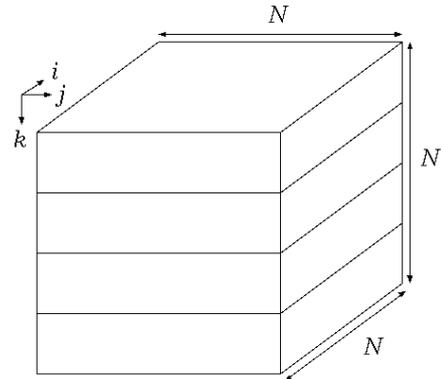


図 7 シミュレーション空間分割の概念図 (プロセス数 4 の場合)。

4.2 プロセス数と実計算時間

このテストではプロセス数が 8、16、24、36、48、64 の場合について同じシミュレーションを実行して、シミュレーションの実計算時間を調べた。図 8 はその結果をまとめたものである。プロセス数を増やせば単純に計算時間を短縮できるものと期待して行なったテストであったが、期待とは裏腹に計算時間の極小はプロセス数 16 で実現され、それ以上のプロセス数ではプロセス数に比例するように計算時間が伸びていった。

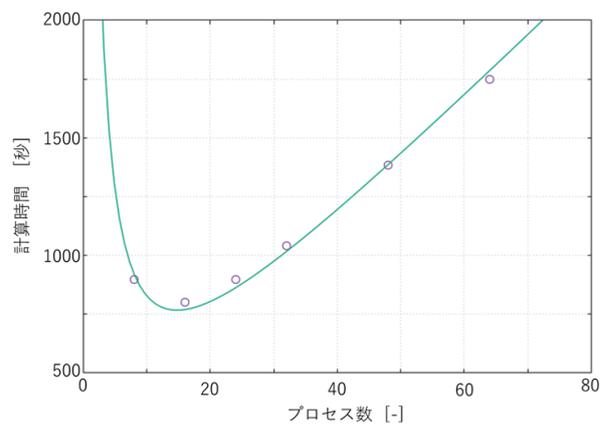


図 8 プロセス数と計算時間。
(丸：実計算時間、実線：本文式 (1) の曲線)

計算時間をプロセス数 n の関数と見なして、試しに

$$t(n) = \frac{T_0}{n} + T_{\text{com}}(n-1) \quad (1)$$

なる式を適用し、 $T_0=5850$, $T_{\text{com}}=26.9$ とすると図 8 に示すように大変よくあてはまる。式 (1) の右辺第 1 項はシミュレーション空間を n 個の領域に分割して MPI 並列化コードによって計算すると計算時間が $1/n$ 倍になることを示している。ひとつの計算領域を構成するグリッド数は N^3/n 個である。 T_0 は MPI 化していないコードによる計算時間である。右辺第 2 項は MPI 領域分割したシミュレーション空間の各計算領域間の境界越しのデータの通信に要する時間を表す。 T_{com} はひとつの境界越しのデータ通信にかかる時間である。境界を構成するグリッド数は N^2 個である。この右辺第 2 項が意味するところは、領域間の境界越しデータ通信が多数の領域境界で同時並列的に行われるのではなく、境界単位で逐次的に行われ、そのためデータ通信時間が境界数 $(n-1)$ に比例して増大するということである。第 1 項は n に反比例して小さくなる。そのため、 n が大き

くなるとあるところから第1項の寄与が第2項の寄与に比べて相対的に無視できるほど小さくなる。そして第2項の寄与が支配的となり実計算時間が n に比例して増大するようになるのである。実計算時間の立場からMPI並列化を考えると、プロセス数 n (領域分割数) には最適値があると結論できる。式

(1) が示す最適値は $n=15$ で、その場合の実計算時間は 766.6 秒である。

4.3 多方向領域分割

次に領域分割の仕方を工夫して実計算時間をどの程度短縮できるかを見積もってみる。実計算時間の見積もりで考慮すべき制約条件は以下の3条件である。

1. 各領域の計算時間は領域を構成するグリッド総数に比例する。
2. 各境界でのデータ通信にかかる時間は境界を構成するグリッド総数に比例する。
3. 境界越しのデータ通信は境界単位で逐次的に行われる。

上のテストではMPI領域分割をする際、図7に示すように、 $i-j$ 面に平行な面での分割 (k 方向の分割) だけを試みた。ここでは、領域分割を $i-k$ 面に平行な境界によっても行なうこと (j 方向の分割) を考える (図9)。 k 方向の分割数を n 個、 j 方向の分割数を m 個とする。領域分割は各方向それぞれ m 等分割、 n 等分割なので、分割後の計算領域の大きさはすべて同じで、各計算領域に含まれるグリッド数は N^3/mn である。したがって、各領域の計算時間は T_0/mn となることが予想される。

一方、領域境界の数は、 $i-j$ 面に平行な境界の数は全部で $m(n-1)$ 、また、 $i-k$ 面に平行な境界の数は全部で $n(m-1)$ となる。領域境界の大きさは方向によって異なる。境界の大きさを、境界を構成するグリッドの数で表すと k 方向の分割境界の大きさは N^2/m であり、 j 方向の分割境界の大きさは N^2/n となる。先の T_{com} が N^2 個のグリッドデータの通信時間であったことを思い出すと、今の k 方向の分割境界越しデータ通信の時間は T_{com}/m となることがわかる。 k 方向の分割境界数が $m(n-1)$ であることと境界越しデータ通信は境界単位で逐次的に行われることを勘案すると k 方向の境界越しデータ通信にかかる時間は結局 $T_{com}(n-1)$ となることがわかる。同様に j 方向の分割境界越しデータ通信の時間は $T_{com}(m-1)$ となる。

以上から、実計算時間は

$$t(m, n) = \frac{T_0}{mn} + T_{com}(m + n - 2) \tag{2}$$

となることが予想される。上の T_0 、 T_{com} の値をそのまま用いると、 $m = n = 6$ で計算時間が 431.5 秒となることが簡単な数値計算で示される。さらに同様な考察から、 i 方向の分割も取り入れてシミュレーション空間を賽の目に切るように分割すると期待される計算時間は

$$t(l, m, n) = \frac{T_0}{lmn} + T_{com}(l + m + n - 3) \tag{3}$$

となる。ここで l は i 方向の分割数である。そして、この場合 $l = m = n = 4$ で計算時間が 333.5 秒となることが数値計算で示される。

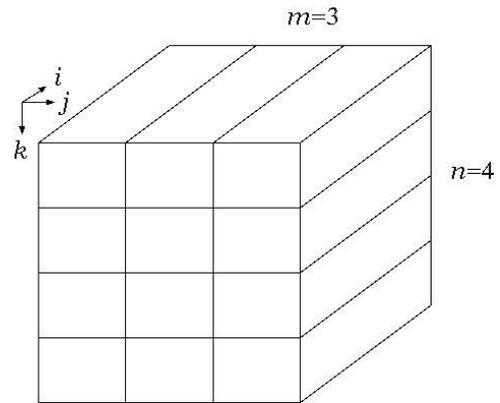


図9 シミュレーション空間分割の概念図 (領域分割 $m=2$ 、 $n=4$ の場合)。

5. おわりに

JuRa の観測計画の最後では可能な限り Dimorphos の着陸観測を目指すことになっている。首尾よく着陸観測が成功すれば、データの解析・解釈では本稿の FDTD シミュレーションが活用されることになる。近接場の中に物体があればアンテナはその物体と電氣的に強く結合（カップリング）し、単独のアンテナではなく物体と電氣的に結合してできた新たなアンテナとしてふるまうようになる。この場合も現行のアンテナモデルでよいのかは、確認する必要があると考えられる。

今後は、本稿の $700 \times 700 \times 700$ グリッドモデル（ $100 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ モデル）をそれぞれの方向に 2 倍以上拡張して差し渡し 170m の大きさの Dimorphos が余裕をもって入れるようにしたのち、JuRa サイエンスグループと連携しながら内部構造モデルを導入し、さらにコードの MPI 化を進めて本格的なシミュレーションを進める計画である。MPI 化されたコードでは上で見積ったように実計算時間の短縮を目指して多方向領域分割を導入したい。

以上、本稿では、近距離観測モードの JuRa シミュレーションについて報告した。遠距離観測モードのシミュレーションについては場を改めて報告したい。

謝辞

本研究は、東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータを利用することで実現することができた。また、コード作成にあたっては度々同センタープログラム相談室から迅速で的確な助言を頂き研究を順調に進めることができた。

参考文献

- [1] Taflove, A., and Susan C. Hagness, *Computational Electrodynamics Third Edition*, Artech House, 2005
- [2] Berenger, J. P., Three-dimensional perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves, *J. Computational Physics*, Vol. 127 363 – 379, 1996
- [2] Umshankar, K. R., A. Taflove, and B. Beker, Calculation and experimental validation of induced currents on coupled wires in an arbitrary shaped cavity *Ieee Trans. Antennas Propagat.*, Vol. 35, 1248 – 1257, 1987
- [3] Mäkinen, R. M., J. S. Juntunen and M. A. Kivikoski, An improved thin-wire model for FDTD, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 50, 1245 – 1255, 2002
- [4] Maloney, J.G., K. L. Shlager, and G.S. Smith, A simple FDTD model for transient excitation of antennas by transmission lines, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. 42, 289 - 292, 1994