特集「将来木星圏・土星圏探査計画へのサイエンス:その1」 ニュートリノ起因の電波を用いた氷衛星探査

庄司 大悟¹, 栗田 敬¹, 田中 宏幸²

2011年9月14日受領, 2011年10月26日受理.

(要旨) 木星衛星エウロパ表層の氷の厚さを求めることは氷衛星研究において重要な課題である.しかし, 多くの研究にも関わらず氷の厚さは精度よく決まってはいない.我々は将来のミッションを見据えて,氷の 厚さを求めるための新しい手法として,ニュートリノ由来の電波観測を紹介する.その有効性を検証するた めにモデル計算を行った.その結果,エウロパの氷が対流していないならば,氷の厚さを見積もることが可 能であるという結果を得た.氷が対流している場合では,氷全体の厚さの決定は不可能であるが,対流層の 上層にあるリソスフェアの厚さを見積もれることが分かった.この観測方法は解決すべき課題も多いが,将 来の氷衛星探査に新たな手掛かりを与えることができると思われる.

1. はじめに

木星や土星を周回している衛星の中には、表面が氷 (主にH₂Oの固体)で覆われた氷衛星が多数存在して いる.巨大惑星系は惑星を太陽、衛星を太陽系の惑星 とすると、小型の太陽系と見なすことができる.その ため木星や土星系の氷衛星を研究することは太陽系の 研究においても重要である.

木星系では3つの巨大な氷衛星(エウロパ, ガニメデ, カリスト)が周回している.その中で,エウロパが持 つ他の氷衛星とは異なる特徴としてとりわけ注目され ている点は,表面付近に液体の水からなる層(内部海) の存在が示唆されていることである.内部海は未だ直 接検知されるには至っていない.しかし,エウロパが 内部海を保持している可能性は,表面地形の分析[例 えば1]や熱輸送シミュレーション[例えば2]などの研 究によって指摘されている.特に誘導磁場が観測され たことによってその存在がより有力視されるようにな った[例えば3,4].この誘導磁場は,衛星が受ける木 星の磁場の向きが変化することで,衛星内部に電流が 流れた結果発生したと考えるのが最も適当である. そ のような電流が流れる層として,数種類の塩やイオン を含んだ全球的な液体層が考えられている. エウロパ 内部に液体水が存在しているとすれば,内部海の熱源 を解明することで,地球とは異なる活動メカニズムを 知ることができるかもしれない. また,エウロパ内部 では生命が発生している可能性がある. そのため,エ ウロパは惑星科学だけでなく宇宙生物学(アストロバ イオロジー)においても重要な研究対象となっている.

エウロパの研究に関して重要な未解決問題の一つは 表面を覆う氷層の厚さである.氷の厚さを精度よく決 定することはエウロパ内部で発生している熱量の推定 に関係するため、内部の活動度を探る手掛かりとなる. さらに、内部海に届く日光の量は氷の厚さに依存して 変化するため、アストロバイオロジーにおいてもエウ ロパの氷層の厚さを決定することは非常に重要な意味 を持つ.氷の厚さに関しては多くの研究があるが、そ の結果は数キロメートル[例えば1]から数十キロメー トル[例えば2]まで大きな幅がある.この幅を小さく するためには更なる観測と分析が必要になる.そこで 我々は、将来の木星土星系探査における新しい観測手 法として、宇宙空間を飛び交う高エネルギーの素粒子 を利用した電波観測を提案する.この論文では原理の

^{1.} 東京大学地震研究所

^{2.} 東京大学地震研究所高エネルギー素粒子地球物理学研究センター daigo@eri.u-tokyo.ac.jp

概略を述べ,氷の温度と表層に含まれる不純物濃度を 考慮したシミュレーションの結果を報告する.

2. 基本原理

2.1 高エネルギーニュートリノについて

宇宙空間には一般に宇宙線と呼ばれている陽子や原 子核,素粒子が数多く飛び交っている.そのような 宇宙線のなかには、非常に高いエネルギーをもつニ ユートリノが含まれている. 高エネルギーニュートリ ノはガンマ線バースト[5]や銀河の中心にあると言わ れるブラックホール[6]のような非常に大きなエネル ギー源で粒子が加速されて発生したと考えられている が、詳しいメカニズムは明らかになっていない、ニュ ートリノは電荷を持っていないため、物質の中に入り 込んでもほとんど反応を起こすことなく通過して行く. しかし, 時々弱い相互作用で反応を起こし, パイオン などの荷電粒子を発生させる. このような現象は中性 または荷電カレント反応とよばれ、ニュートリノがエ ウロパの氷に入射した際にもこのような反応が起こる. 発生した荷電粒子は更なる荷電粒子を発生させ、カレ ント反応の結果無数の荷電粒子が局所的に発生するこ とになる.この次々に荷電粒子が発生する現象をハド ロンシャワーという.

2.2 アスカリアン効果と電波観測

ニュートリノとエウロパの原子核との反応によって 発生した荷電粒子は、光速に近い早さで発生するため、 エウロパの中を通過する際にチェレンコフ光が生じる. このとき発生したチェレンコフ光の波長がハドロンシ ャワーの幅よりも大きい場合、各々のチェレンコフ光 は互いに干渉を起こすことが知られている。氷の場合、 発生するハドロンシャワーの幅は数センチになるので、 波長が10センチ以上のチェレンコフ光が干渉を起こ すことになる.この波長域の光は周波数で数ギガヘル ツ以下の領域であり、電波領域となる。つまり、ニュ ートリノがエウロパの氷に入射すると干渉した電波が 内部で発生する.このような、電波領域で干渉を起こ したチェレンコフ光が発生する現象はアスカリアン効 果と呼ばれており[7]、加速器を使った実験で確認さ れている[8]、干渉を起こしたチェレンコフ光の強度 は(1)式の形で表される.

$$I = 1.17 \times 10^{21} Ah\nu \left(\frac{\Delta\nu L}{cr}\right)^2 \left(\frac{E_{\nu}}{1 \text{GeV}}\right)^2 \text{Jy (1)}$$

ここでh, v, cはそれぞれプランク定数, 平均周波数, 光速度である[9]. また, 1 Jy は10⁻³⁶ Wm⁻² Hz⁻¹ である. *L* は荷電粒子がチェレンコフ光を発する間に物質を進 む距離である. 南極の氷を仮定した場合,約*L*= 6 m となる[9]. $\Delta v, E_v$ は観測する周波数の幅,ニュート リノのエネルギー (単位はeV)である. また, rは電 波が発生した場所からの距離, *A* は電波が影響を受け た減衰の大きさを示す値である. 無限小*1*での減衰を α dB とすると*A* は(2)式のようにかける.

$$A = 10^{-\frac{1}{10}} \int_{0}^{r} \alpha dl \tag{2}$$

またaを1mあたりの減衰レベルとすると以下のよう に表される[10].

$$\alpha = 0.0009\sigma \text{ dBm}^{-1} \tag{3}$$

σは電気伝導度で単位はμSである.

エウロパの内部で発生した電波領域のチェレンコフ 光は円錐状に放射される、このとき、電波の減衰の大 きさは電波が通過する物質の電気伝導度に強く依存す る. 電波は電気伝導度の大きな物質ではすぐに減衰し てしまうが、小さな物質では比較的長い距離を伝搬す ることができる. 電気伝導度は氷の温度に依存し、温 度が低いほど小さくなる. エウロパの氷の温度勾配は エウロパの氷の厚さに依存するので、結果として電波 の減衰レベルはエウロパの氷の厚さに依存する。電波 の減衰が小さいとき、その電波はエウロパの外部に出 て来れるので、減衰の小さな(低い温度の)氷の体積が 大きくなれば、より多くの電波がエウロパの外に放た れることになる.液体の水の電気伝導度は氷の電気伝 導度よりも遥かに大きいので、水の層で発生した電波 は当然外には出てこない、よって将来、電波の観測ア ンテナを周回衛星に搭載し、エウロパを観測すれば、 電波の観測数から氷の厚さを見積もることができる. これがニュートリノによる電波観測の基本原理である.

3. 電波観測のモデル計算

3.1 エウロパの内部構造モデル

この原理の有効性を検証するためにエウロパの内部 構造モデルを構築し、氷の厚さを変化させた場合の電 波の観測数量変化を調べるためのモデル計算を行った. エウロパのモデルとして半径1560 kmの岩石コア,水, 氷でできた3層の球を仮定した。重力探査の結果と熱 量の大きさから、エウロパは鉄のコアと岩石のマント ルに分化している可能性も考えられるが[11]、岩石の 層からの電波は表面に出てこないため鉄のコアは考慮 せず.マントルと一体となった岩石質のコアを仮定し た. Shojiらによる先行研究では電波の減衰レベルは 氷の深さに依存せず一定であると仮定しているが[12] 実際の減衰は深さによって変化する、そこで我々は今 回、氷層の温度構造と氷層に含まれている不純物の分 布を考慮してモデルを構築した. エウロパの氷層の温 度構造と不純物の種類や濃度は明らかになっていない が、我々はMooreが提案した3種類のモデル(Marine. Tidal, Convection)を採用した[10](図1). Marineモデ ルでは不純物(H⁺及びCl⁻)の濃度を表面で0. 氷の底 で[H⁺]=30 µM, [Cl⁻]=500 µMであると仮定し, 深さ に比例して濃度が増加する.この濃度は南極の氷の値 を参考にして決定した[13]. Tidalモデルは温度が250 K以下の氷は1%の岩石を含み、それ以外は南極の氷 の減衰と等しいと仮定されている. Convectionモデ ルは氷の下層(250 K以上の領域)が対流しているとす るモデルで、対流層の上に対流していないリソスフ ェアの存在を仮定している.いずれのモデルも内部 海の温度は270 K, 表面の温度は100 Kであるとした (図1). Marine 及びTidal モデルの氷の温度構造は氷 の深さに従って指数関数的に増加している(図1a, b). Convection モデルにおいては、リソスフェアの領域 で指数関数的に温度が増加し、その下にある氷の温度 は250 Kで一定とした。氷の底面1 kmの領域では250 Kから270 Kまで線形に増加している(図1c).

まず,このモデルに10¹⁹ eVのニュートリノを1000 万個打ち込みハドロンシャワーが発生する場所を記録 した.ニュートリノの反応位置の計算にはシミュレー ションソフトウェアであるJULIeTを用いた.1000万



図1: エウロパ氷層の (a): Marine (b): Tidal (c): Convection モデル. Marineモデル及びTidalモデルでは対流はおこら ず, 温度は指数関数的に増加していると仮定している. Convectionモデルでは温度が250 K以上の領域で対流が 発生し、対流している領域の温度は250 Kであるとした. Marineモデルでは氷の不純物としてH*とCI⁻の二つを仮定 し、氷の深さに比例して濃度が増加している. Tidalモデ ル及びConvectionモデルの不純物は、氷の温度が250 K以 下の領域では1パーセントの岩石、温度が250 K以上の領域 では1パーセントの塩分を仮定した. 図は Moore(2000)を 改変[10].

というニュートリノの数は, エウロパに入射するニュ ートリノの約一週間分の量に相当する[14]. シャワー の位置と方向から電波の方向と距離を計算し, 電波の 放射角内にアンテナがあり, かつエネルギーがアンテ ナの熱ノイズより大きな強度を持つ場合に, その電波 をシグナルと見なした[12]. アンテナ高度はエウロパ 表面から200 km上空にあると仮定した. Convection モデルでは, リソスフェアの厚さを5 kmと10 kmに あたえてシミュレーションを行った. 電波の観測周波 数領域は1.5ギガヘルツから2.5ギガヘルツと仮定した. この周波数領域は電波が干渉を起こす上限値である [9].

3.2 結果と考察

氷の厚さと電波の観測数は図2の様になった.氷の

厚さは10 kmから40 kmまで10 kmずつ変化させて いる. Marineモデルの氷では氷が厚くなるにつれて 電波の観測数が上がり続けている。一方 Tidal モデル では氷の厚さが20 kmを超えると観測数の増加が止 まり、氷が厚くなっても変化がなかった.このため、 Marineモデルでは氷の厚さが40 kmであっても10 kmの分解能で氷の厚さが決定できるのに対し、Tidal モデルでは厚さが20 km以上では厚さが決定できない ことが分かった. Marine モデルの不純物濃度は表面 と氷の底を一定値で固定し、深さに比例して増加する と仮定している、そのため、氷の厚みが増加するほど 不純物の増加率が低下し、不純物の少ない(減衰の小 さな)氷の体積が増える。一方Tidalモデルの不純物 濃度は、温度が250 K以下の領域では一定としている ため、氷がある厚さ以上になるとそれ以上厚さが増加 しても増えた部分の氷で発生した電波は減衰し外に出 てこない。Tidalモデルにおける氷層厚さの増加に伴 う観測数が20 km付近で止まったのはこのためである と考えられる. Convection モデルでは、リソスフェ アの厚さを5 km および10 km とした場合のいずれも、 電波の観測数は氷層全体の厚さにほとんど依存しない. そのため、この氷層モデルでは我々の観測手法で厚み を決定できないことが分かった。これは対流層の温度



図2: 氷層厚みに対して観測できる電波の数. Moore(2000)で提 案されたMarine, Tidal, Convectionの3つの氷層モデルで 電波の観測数を計算した. Convectionモデルは対流層の上 にあるリソスフェア(Lid)の厚さを5kmと10kmの2通り でシミュレーションを行った.

を深さに関係なく250 K以上と仮定したため,発生し た電波は温かい対流層で減衰してアンテナに届かない からである.しかし,リソスフェアの厚さが5 kmと 10 kmとで観測数が大きく変化した(図2).リソスフ ェアの温度はエウロパ表面である上部で100 K,対流 層との境界である下部で250 Kとしている.そのため リソスフェアが厚さが増加すると,電波の減衰が小さ な氷の体積も増加する.リソスフェアの厚さが5 km における場合と10 kmにおける場合とで電波の観測数 が大きく変化したのはこのためである.

氷の厚さを10 kmから40 kmであると仮定した我々 のモデル計算では、Marineモデルの場合、10 kmか ら40 kmの範囲において10 kmの分解能で厚さを決 定できることが分かった.また,Tidalモデルでは20 kmまで厚みの決定が可能であるという結果を得た. 電波の減衰を深さに依存せず一定であるとした際.厚 みを決定できる限界値は8 kmであった[12]. よって、 現実的な電波の減衰を考慮した場合、氷が数十キロに 渡る厚い場合でも厚みを決定できることが分かった. Convectionモデルでは氷層全体の厚さを決定するこ とはできないが、リソスフェアの厚みを決定すること はできるという結論を得た. エウロパ表面の地形の分 析から、エウロパの氷層では対流が起きていることが 示唆されている[15]. 実際に対流が起きているならば、 この観測方法は対流していない層の厚さを解明する手 法となる.

4.課題

シミュレーションを行った結果,いくつかの氷層モ デルにおいては,氷層厚さの変化とともにニュートリ ノによる電波の観測可能数が有意に変化することが分 かった.しかしこの研究はまだ始まったばかりであり, 解決すべき問題が多く残っている.例えば今回のモデ ル計算では表面の地形による電波の散乱などの影響は 考慮されていない.さらに,アンテナの検出効率や熱 ノイズ以外のノイズの影響も考えていく必要がある.

ノイズの原因として考えられるのは、木星からの電 波やニュートリノ以外の宇宙線によって発生した電波 である.陽子や原子核などの宇宙線もエウロパと反応 し、電波を発生させる.しかし、電波は氷と真空の屈 折率の変化によって表面で屈折を起こす.エウロパ氷 の屈折率を南極の氷と同じ約1.8とすると[9],地面に 対して水平に走ったニュートリノから発生した電波し か外部に出てくることはできない[16].今回のモデル 計算ではこの屈折の影響は考慮している.さらにアス カリアン効果を引き起こすには、粒子は比較的長い 距離を走らなければならないことが分かっている[16]. 陽子や原子核の宇宙線は電荷を持っているため、すぐ に反応を起こしてしまう.そのため、地面と水平に長 い距離を通過することはできない.よって、これらの 宇宙線からの影響は少なくなると考えられる.木星や 他の惑星からの電波の影響に関しては更なる考察が必 要である.

エウロパに入射するニュートリノの量についても考 察が必要となる.高エネルギーの宇宙線については, 発生場所やメカニズムが詳しく分かっていないため, ニュートリノのフラックス自体にも大きな不定性が残 っている.ニュートリノの数が変化すると電波の観測 数も変化するため,エウロパにやってくるニュートリ ノの数の不定性は重大な問題となる.これを解決する 一つの手段として,観測した電波の強度分布の形から 氷の厚さを求める方法が提案されている[12].

5. 研究の意義と今後の展望

以上のように、ニュートリノによる氷の厚さ決定は 多くの問題を抱えているが、我々は観測手法が氷衛星 の研究に新しい手掛かりを与えるものと期待してい る、これまでの研究によれば、現在のエウロパの氷層 厚さのモデルは、数キロメートルであるとする Thin crustモデル[例えば1]と数十キロメートルであるとす る Thick crust モデル [例えば2, 15]の二つにわかれて いる. 表面地形の成因から氷層厚さを推定する方法で は、地形年代が明らかでないために厚さの現在値とみ なすことができない. また, エウロパ内部の熱輸送量 計算による見積もりではエウロパ内部の熱量及び熱の 発生場所に不定性が残っている[17]. 誘導磁場の解析 でも厚さの不定性が大きくThin crustとThick crust の判別には至っていない[例えば4]. このように、エ ウロパの氷の厚さは現在まで精度よく求まっていない だけでなく、薄いか厚いかの決着もついていないのが 現状である.

将来的に期待されている内部構造探査の手法として

レーダー探査が挙げられている.レーダー探査は南極 の氷層内部における氷のねじれを明らかにしており [18],氷衛星の探査においても内部海を探知できる可 能性がある.しかしレーダーの出力を考慮すると深さ 10 kmがレーダー探査の限界とされている[19].仮に エウロパの氷の厚さが数十キロに及ぶならば、レーダ ーでの厚さ決定は難しくなってくる.今回のモデル計 算によるとニュートリノ起因の電波観測では、氷のモ デルにもよるが、厚さが10 km以上の場合でも氷の厚 さが決定できる可能性がある.この電波観測をレーダ ーや重力、磁場観測と組み合わせて、氷の厚さをより 精度よく決定できるか少なくとも Thin crust と Thick crustの論争に決着をつけることができる.

また我々は、この観測手法を土星の氷衛星へ応用す ることも考えている.現在注目しているのはエンセラ ダスである.エンセラダスにもエウロパ同様内部海が 存在しているとされている[20].しかも興味深いこと に、エンセラダスの内部海は衛星全体に広がっている のではなく、局所的に存在している可能性が示唆さ れている[20].我々はこの電波観測を用いて、深さ50 km以上の領域にある局所的な内部海の検出可能性に ついて評価することを目指している.エンセラダスは 小型の氷衛星であるにも関わらず、大きな熱放射が観 測されており、さらにその熱放射は南極付近に偏って いることが分かっている[21].エンセラダスの氷の厚 さを局所的にも決定できれば、熱発生の問題解決に大 きく貢献することができる.そのためにもエンセラダ スへの応用は重要である.

6. おわりに

エウロパの内部構造を解明するために既に行われて いる手法をより洗練させるとともに,新しい情報をも たらす観測手法を開発して行くことが将来の惑星科学 において重要となる.素粒子を使った電波観測は衛星 の内部から発生した電波を観測するので,電波の発生 装置を搭載する必要がない.そのため観測装置の消費 電力を低く抑えることが可能となり,他の機器の観測 を妨げる可能性が低い.また衛星の表面を掘り起こす などの必要がないため,環境破壊の心配がない.この ような省エネルギーで環境に優しい観測方法が将来の 惑星探査につながっていくことを期待している.

7. 謝辞

我々はこの研究を始めるにあたり,保科琴代氏から 高エネルギー素粒子計算ソフトJULIeTを紹介してい ただいた.この計算プログラムは千葉大学IceCubeグ ループが開発し,ホームページ(http://www.ppl.phys. chiba-u.jp/JULIeT/)にて提供されている.また,我々 は高エネルギー粒子観測実験「ANITA」の原理を参考 にした.

参考文献

- [1] Carr, M. H. et al., 1998, Nature 391, 363.
- [2] Tobie, G. et al., 2003, J. Geophys. Res. 108(E11), 5124.
- [3] Kivelson, M. G. et al., 2000, Science 289, 1340.
- [4] Zimmer, C. et al., 2000, Icarus 147, 329.
- [5] Vietri, M., 1998, Phys. Rev. Lett. 80, 3690.
- [6] Nellen, L. et al., 1993, Phys. Rev. D 47, 5270.
- [7] Askar'yan, G. A., 1962, Sov. Phys. JETP 14, 441.
- [8] Gorham, P. W. et al., 2007, Phys. Rev. Lett. 99, 171101.
- [9] Gorham, P. W. et al., 2009, Astroparticle Physics 32, 10.
- [10] Moore, J. C., 2000, Icarus 147, 292.
- [11] Anderson, J. D. et al., 1998, Science 281, 2019.
- [12] Shoji, D. et al., 2011, Geophys. Res. Lett. 38, L08202.
- [13] Moore, J. C. et al., 1994, J. Geophys. Res. 99, 5171.
- [14] Engel, R. et al., 2001, Phys. Rev. D 64, 093010.
- [15] Pappalardo, R. T. et al., 1998, Nature 391, 365.
- [16] Gorham, P. W. et al., 2001, AIP Conf. Proc 579, 177.
- [17] Lowell, R. B. and DuBose, M., 2005, Geophys. Res. Lett. 32, L05202.
- [18] Siegert, M. J. et al., 2004, Science 305, 1948.
- [19] Chyba, C. F. et al., 1998, Icarus 134, 292.
- [20] Tobie, G. et al., 2008, Icarus 196, 642.
- [21] Spencer, J. R. et al., 2006, Science 311, 1401.