

「月惑星探査の来たる 10 年」第一段階パネルへの意見書

■ 意見提出先パネル（希望するパネルに○をつけて下さい。複数回答可）

（○）木星型惑星・氷衛星・系外惑星探査パネル

■ 提案タイトル

（高エネルギーニュートリノによるエウロパ表層氷層の構造決定）

■ 代表者の氏名・所属・連絡先（E-mail アドレス、または電話番号と Fax 番号）

（栗田敬・東京大学地震研究所・kurikuri@eri.u-tokyo.ac.jp）

■ 共同提案者の氏名・所属（適宜追加して下さい）

（庄司大悟・東京大学地震研究所）

（田中宏幸・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）

（木村淳・惑星科学研究センター／北海道大学）

■ 要約（400 字程度）

（Europa の内部海は生命の存在の可能性や地球の形成初期のマグマオーシャンとの関連性から注目を集めているが、未だその存在の確証は得られていない。重力のデータからは表層の 100km 程度の H₂O 層の存在が明らかになっているが、その相（液相・固相）に関しては分解能がなく、現時点では表層の氷層厚さに関する理論的予測として 40km 程度を想定する Thick Ice-Layer モデルと数 km 程度を想定する Thin Ice-Layer モデルが存在するのみである。表層の氷層の厚さは Europa の熱進化の段階や熱収支を理解する上できわめて重要な基本的な情報だが、観測的な制約は得られていないのが現状である。これに対して国際協同計画 Europa Jupiter System Mission (Jupiter Europa Orbiter) では内部海の誘導電流による磁場観測とレーザー高度計による潮汐振幅の観測が提案されている。本意見書は、これらとは本質的に異なる、高エネルギーニュートリノを用いた表層氷層の厚さ決定法を提案するものであり、次ページ以降では手法の原理説明とシミュレーションによる観測可能性の検討結果を示す。

注：本意見書では、本来求められている科学的な背景よりも観測手法の説明に字数を費やしている。これは本提案のような観測が従来の日本の惑星科学コミュニティでは話題に上ったことがないこと、しかも実現可能性も高く国際的にも検討されはじめているために迅速に「頭出し」をしたいという意向からである。科学的な意義は別項：「氷衛星の多様な内部進化と地球との比較」とオーバーラップする点が多い。

■ 本意見書の内容（テキストおよび図表）をパネルリーダー並びに事務局がパネル討論と各種報告書へ引用することについて承諾しますか？（いずれかに○）

（○）承諾する （ ） 承諾しない

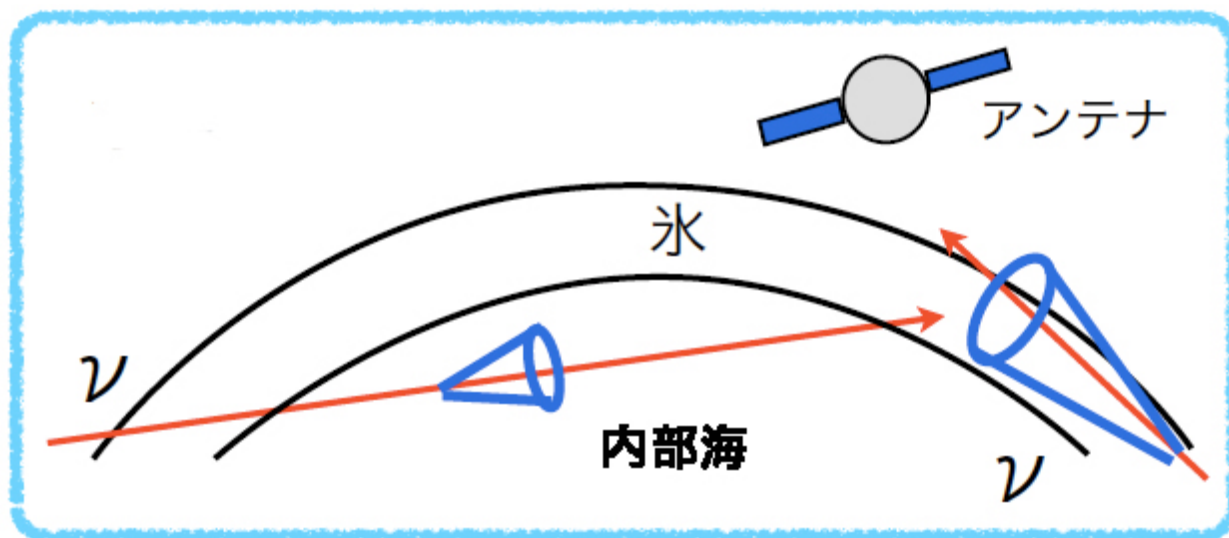
■ （上で「承諾する」に○をされた方のみ）引用時には協力者リストを付加する場合があります。協力者リストに氏名を公表することを希望しますか？（いずれかに○）

（○）希望する （ ） 希望しない

- ・自由記述（3 ページ以内，図表の貼り付け可）

■原理：

10^{18} eV 以上のエネルギーを持つ超高エネルギーニュートリノが物質と弱い相互作用をおこしたとき、ハドロン・電磁シャワーが形成される。この時に生成された過剰な電子によりチェレンコフ光が発生するが、シャワーの広がり（氷の場合は数 cm 程度）よりも大きな波長の電磁波はコヒーレントな特性を持ち、大きな振幅を持つことになる（Askaryan Effect、Askaryan JETP 14,441,1962）。氷の場合、シャワーの広がりからの制約により GHz 帯にエネルギーの卓越した電磁放射が期待される。氷媒質中の電磁波の減衰長は 1km 程度であるのに対し、海水中のそれは数 10cm であるために、内部海で生成された電磁シャワーによる電磁放射は減衰を受け外部に漏れ出すことはないが、表層の氷層内での電磁放射は条件を満たせば外部に伝搬していく。すなわち Europa 外部で観測する GHz 帯での電磁放射の数は表層氷層での超高エネルギーニュートリノの相互作用の数に比例することが期待される。厚い氷層では多数の相互作用が期待され、薄い氷層では小数の相互作用しか起きず、電磁放射の数が氷層の厚さに対応することが予想される。これが Europa の表層氷層の厚さを決める原理である。

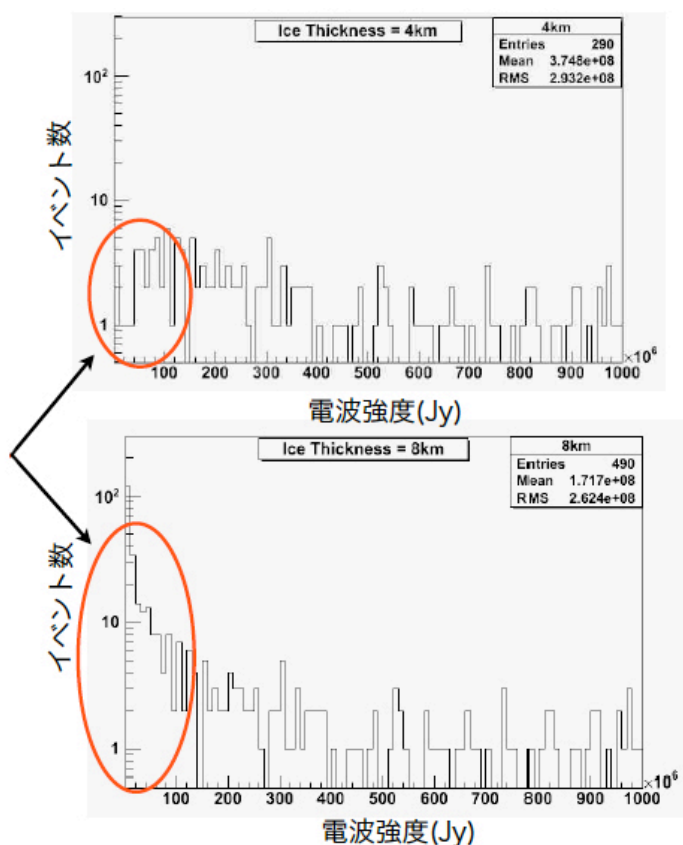


■シミュレーション：

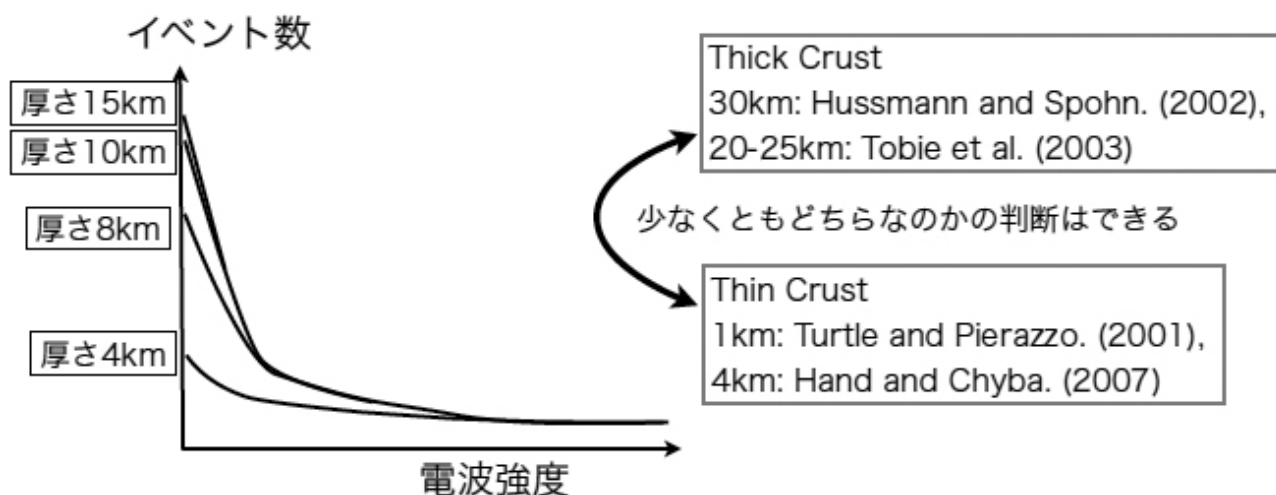
原理的には十分に可能な観測事項ではあるが、Europa の条件設定での可観測性の検討をおこなった。超高エネルギーニュートリノの相互作用・カスケード・電磁放射のシミュレーションは千葉大学グループが開発した JULiE シミュレーションソフトを用いた。Europa は 4km から 20km までの厚さの表層氷層とその下に海水相当の内部海を持つと仮定し、100 万個の 10^{18} eV のニュートリノが均等に Europa に入射した時に Askaryan Effect で生成されるコヒーレントな電磁波が高度 200km、 1 m^2 のアンテナに検知されうるのか、を検討した。電磁波の外部への伝搬には氷相での減衰長 1500m、水相（下部のシリケートとの相互作用を考慮して海水程度のイオン濃度・電気伝導度を持つことを想定）での減衰長は 25cm 程度を仮定した。また Europa 領域でのアンテナの熱雑音を考慮し、 10^5 Jy 以上の放射強度をもつ電磁波をカウントした。

下図は氷層の厚さが 4km の場合と 8km の場合に、アンテナに補足された放射イベントの数を放射強度の関数として表示したものである。低いエネルギー強度（ $< 2 \times 10^7 \text{ Jy}$ ）のところでイベント数の顕著な違いが認められる。これは浅い内部海（薄い氷層）では海水中でのニュートリノの相互作用による電磁放射が減衰してしまいイベントを捕捉できないのに対し、深い内部海（厚い氷層）では対応する深さの氷層内の電磁放射は減衰を受けながらも（従って相対的に低エネルギー側に偏在するが）アンテナで捕捉できるのでイベント数の増加として認識されることによる。

一方、表層氷層の厚さを 15km 以上に増加させたときにはイベント数に変化は見られなかった。これは氷の減衰長が効いて 15km 以上の深さの氷層内での電磁放射は地表面に到達できないことを反映している。



すなわち本手法は氷の電磁波の減衰長に制限され、15km 以上の厚さに関しては飽和してしまい分解能がない。このような制約はあるものの、現在提案されている「厚い地殻モデル vs. 薄い地殻モデル」の論争には決着を付けることができる。



■今後の検討課題：

今回示したシミュレーションでは、ニュートリノのエネルギーに関して宇宙空間に見られるような現実的なエネルギー分布を考えてはいない。また Askaryan Effect で高いエネルギー放射が期待される GHz 帯域の木星領域での電波環境などが考慮されていない、など具体的な可観測性の検討が今後の課題である。

■背景：Europa の表層氷層の厚さに関する議論

現在 Europa の表層氷層の厚さに関する直接的な観測結果は得られていないが、表層地形や熱史などから推定されているものには、厚い地殻モデル：Hussmann and Spohn 2002 (30km 厚), Tobie et al 2003 (20-25km 厚)と薄い地殻モデル：Turtle and Pierazzo 2001 (1km 厚), Hand and Chyba 2007 (4km 厚) という対立する 2 つのモデルが提唱されている。氷層は内部熱構造の変化に伴って成長したものであるために、氷層の厚さは Europa の熱史や現在の熱的な進化の段階を示す直接的な観測量として重要である。また Europa の熱収支を考える上で木星による潮汐加熱の見積もりがきわめて重要であるが、厚い地殻モデル・薄い地殻モデルでは潮汐加熱の効き方や発生熱量が大きく異なるために、氷層の厚さを観測的に制約することを通して潮汐加熱の役割を明らかにすることができる。また現在も Europa 表層の縞模様・クラッキングは形成されていると考えられているが、この形成速度は氷層の熱輸送量によって変化する (Kimura et al. 2008) ために、氷層の厚さは現在の Europa のテクトニクスを考える上でも重要である。

このように Europa の表層氷層の厚さはこの天体の内部進化の状態を判定できる直接的な観測量であることを強調しておきたい。

■ 諸外国の探査計画との関連：

この提案の基となっている原理は新しいものではない。Askaryan Effect に関しては 2001 年に加速器を用いて実証されている (Saltzberg et al PRL 86,2802,2001)。また最近氷相での Askaryan Effect の観測もおこなわれた (Gorham et al PRL 99,171101,2007)。また南極の氷層中での観測 (ニュートリノ望遠鏡プロジェクト) が進行中である (Halzen, Science 315,66,2007)。本提案はこのような確立された物理学の手法を惑星探査に応用するものである。NASA の Jupiter Europa Orbiter ではこのようなタイプの機器は検討されていないが、Schaefer et al は Europa Jupiter System Mission Instrument Workshop (2009) にて本提案と類似のプランを提案している。

表層氷層の厚さを決めるという観測の提案は従来の JEO プランの中でも中心的な課題として取り上げられてきており、1) 木星の磁場擾乱に起因する内部海内の誘導電流による磁場変動の観測、2) レーザー高度計による潮汐変形の振幅の観測、が提案・検討されている。

■ 参考文献

Kimura,J., Y. Yamagishi, and K.Kurita, *Earth Planets and Space*, 59, 113-125, 2007.

Shouji,D.,H.Tanaka and K.Kurita, To determine thickness of surface ice layer of Europa, AGU Fall Meeting 2009 and submitted to GRL 2009