

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	タイタン上の有機物の表面エネルギーと弾性に関する実験的研究
Title(English)	Experimental study on surface energy and elasticity of organic materials on Titan
著者(和文)	平井英人
Author(English)	Eito Hirai
出典(和文)	学位:博士(理学), 学位授与機関:東京科学大学, 報告番号:甲第221号, 授与年月日:2025年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:玄田 英典,中嶋 健,太田 健二,癸生川 陽子,関根 康人,筒井 智嗣
Citation(English)	Degree:Doctor (Science), Conferring organization: Institute of Science Tokyo, Report number:甲第221号, Conferred date:2025/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第		号	学位申請者氏名		平井 英人	
論文審査 審査員		氏 名		職 名		氏 名	職 名
	主査	玄田 英典		教授	審査員	関根 康人	教授
	審査員	中嶋 健		教授		筒井 智嗣 (高輝度光 科学研究センター)	主幹研究員
		太田 健二		准教授			
		癸生川 陽子		准教授			

論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は、「Experimental study on surface energy and elasticity of organic materials on Titan」というタイトルであり、6章から成っている。

第1章「General introduction」では、土星最大の衛星タイタンの地形的特徴と気候、及びタイタン表層における風による有機物砂粒子の輸送について概説し、これまでの研究の問題点、および本論文の目的について述べている。大気中で生成された有機物エアロゾルはタイタン表層に全球的に沈降するはずであるが、低緯度域にのみ厚い有機物の堆積層が存在しており、中緯度域にはあまり存在していない。乾燥した気候を示すタイタンの中低緯度域では、風が地表面の有機物を舞い上げらせ移動させる（跳動）可能性があるが、これまでに実験室で測定されたタイタンの有機物模擬物質の固着力（表面エネルギー）は大きく、跳動が効果的に起こらないことがわかっている。しかし、これらの実験は室温下でのみなされたものであり、タイタン表層の低温条件（約 93 K）では調べられていない。本論文では、低温条件下でのタイタン模擬有機物の固着力及び表面エネルギーと弾性特性の測定を行い、タイタン表層における有機物の輸送過程の再評価と、将来探査における有機堆積物層の検出可能性を検討することを目的としている。

第2章「Characterization of laboratory analogs of Titan’s organic materials used in the present study」では、タイタンの大気-表層で生じうる多様な化学プロセスを考慮して、有機物の模擬試料を3種類（タイタンソリン、変性ソリン、熱水有機物）作成している。それぞれの試料に対し、種々の化学分析及び表面構造分析を行い、解析したデータを統合することで、それらの形態と化学構造に関する特徴づけを行っている。その結果、それぞれの試料が異なる化学構造を持ち、物理特性（表面エネルギー・弾性特性）に影響を与える可能性を示した。

第3章「Cohesion force and surface energy of Titan’s organic analog materials」では、原子間力顕微鏡を用いて有機物模擬物質の固着力を測定し、表面エネルギーを推定した。その結果、温度低下とともに、固着力および表面エネルギーがアレニウスの式に従って低下することが示された。また、表面エネルギーは化学組成の違いよりも測定温度の違いに強く依存することも明らかにした。このことは、低温のタイタン表層において、従来考えられてきたよりも、有機物粒子の跳動が起きやすいことを意味している。また、固着力がアレニウスの式に従うメカニズムとして、弾性率の温度依存性による接触面積の変化や、物質界面における摩擦によるエネルギーの散逸を挙げ、議論している。特に前者は有機物の粘弾性に関わるメカニズムであり、今後の研究が期待される。

第4章「Elastic wave velocities of Titan’s organic analog materials」では、X線非弾性散乱および超音波実験を用いて、有機物模擬物質の弾性特性を制約した。特に、X線非弾性散乱は比較的新しい手法であり、惑星科学分野において低温における測定を行ったのは本研究が初めてである。従来の研究では、有機物模擬物質について限られた弾性率に関する情報しか得られていなかった一方で、本研究では、X線非弾性散乱によって有機物のフォノン分散を決定し、超音波法の結果と組み合わせることで、異なる周波数領域における有機物の弾性特性の振る舞いを明らかにしている。また、温度低下によって弾性特性の変化が生じることが示された。これらの結果は、タイタンの表層における有機物の焼結プロセスなどにおける変形特性や有機物砂粒子の輸送プロセスにおける衝突時の挙動を理解する上で重要な示唆を与えるものである。

第5章「Applications to Titan’s surface processes」では、得られた固着力及び表面エネルギーの温度依存性を考慮し、タイタンの表面における有機物の跳動による輸送過程について検討している。これまでは、中緯度地域での有機物の跳動は困難とされていたが、本研究の結果に基づく新たなモデルでは、中緯度帯における強めの季節風によって有機物粒子の跳動が起き、低緯度帯へと輸送されることが示された。この結果は、タイタンの気候モデルの予想と矛盾せずに有機物堆積物の分布の緯度依存性を説明できる唯一のモデルである。また、中緯度から低緯度へと有機物が掃き集められ得るという示唆は、今後の探査計画の重要な指標となる。本論文では、地震波探査に基づく浅部地下構造の制約可能性についても検討し、有機物の層の厚さが 30 m 以下であれば、人工的に発生させた地震波の反射波を十分に検出可能であることを示した。

第6章「General conclusions」では、本研究の結果についてまとめている。本研究で得られた固着力及び表面エネルギーの温度依存性は、太陽系外惑星の大気中の有機エアロゾルの成長プロセスや、地球初期の大気環境に関する理解を深める上でも重要であることも述べられている。また、原始惑星系円盤中のダストの合体成長プロセスへの示唆についても述べられている。

以上の通り、本論文はタイタン表層で形成された有機物の固着力及び表面エネルギーと弾性特性に関する低温下における実験的研究であり、表層物質輸送プロセスを通してタイタンの表層進化を解明するための新たな知見を提供している。本論文の成果は、今後計画されているタイタン探査計画（ドラゴンフライ）に新たな指針を与えるものである。よって、博士（理学）の学位を与えるにふさわしいものと認める。

注意：「論文審査の要旨及び審査員」は、東京科学大学リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。