

学位論文題名

Experimental study on the impact vaporization of ice

(水の衝突蒸発に関する実験的研究)

学位論文内容の要旨

惑星および衛星は、微惑星が衝突合体して集積することにより形成されたと考えられている。木星以遠の外惑星領域では、岩石に加え氷を多量に含んだ氷微惑星の衝突集積が行われた。氷微惑星の衝突の際、衝突エネルギーによって氷は容易に蒸発（衝突蒸発）する。氷の衝突蒸発は大気の形成に直接関わるほか、構成物質のうち氷のみが選択的に蒸発、消失することにより天体のバルク化学組成にも影響を及ぼしたと考えられ、惑星や衛星の進化に重要な役割を果たした。したがって、この現象を詳しく調べる必要がある。しかし、これまでに氷の衝突蒸発に関する実験はほとんど行われておらず、蒸発量が衝突速度や氷の温度に対しどのように変化するのかや、衝突エネルギーのうちどれだけが蒸発に用いられるのか（分配率）については全く分かっていない。本研究は氷の衝突蒸発に関して、以上のような性質を実験的に明らかにする目的で行われた。

本研究では、外惑星形成環境をシミュレートした低温、高真空の条件下で衝突を行い、衝突蒸発を観測するために、i) 高真空中で作動する電磁推進式加速装置、ii) 広い圧力範囲で質量分析計を動作させる多段の真空排気系、iii) 非常に短い時間内に種々の装置を制御、データを収集するシステムなどを新たに開発した。これにより氷の衝突蒸発実験を系統的に行うことがはじめて可能となった。実験は閉鎖系の真空チェンバー中で、液体窒素を用いたクライオスタットにより低温に冷却された氷に銅の飛翔体を衝突させて行った。衝突を行う真空チェンバーは、質量分析計を設置した超高真空のガス分析用チェンバーに可変リークバルブを介してつながっている。これにより衝突で発生したガスは in-situ でガス分析用チェンバーに取り込まれ、衝突時の各種ガスの分圧が測定可能となった。衝突による氷蒸発量は発生した水蒸気分圧の値から、気体の状態方程式を用いて求められた。また発生するガスと真空チェンバー中に残留する水蒸気とを区別するため、試料氷には重水から作製した氷を

用いた。この結果、蒸発ガスの測定感度を二桁以上高めることができた。

以上の実験装置を用いて、真空（衝突前 $\sim 10^{-3}$ Torr）中で130–185 Kの氷に、銅の飛翔体（250 mg）を54–329 m/s（0.36–13.5 J）の速度で衝突させて、氷の衝突蒸発量を調べた。その結果、実験範囲内で速度の増加とともに4桁以上も増大する氷の蒸発を観測した。そして蒸発量は衝突速度に応じて次のような3つの領域に区別できることが分かった。

- (I) 氷の蒸発はほとんど起こらず、蒸発への分配率は衝突エネルギーの0.03 % 以下となる(<100m/s)
- (II) 蒸発量は速度とともに非常に急激に増大していき、分配率は3桁以上も増加する(100–180m/s)、
- (III) 蒸発量の増加は衝突エネルギーに比例するようになり、分配率は18–26 % でほぼ一定になる(>180 m/s)

急激に分配率が増大しはじめる (I) , (II) の境界の速度は100 m/s であり、この速度における衝撃圧を求めると280 MPa となる。この圧力はこれまでに知られている氷のユゴニオ弾性限界 (HEL) の圧力にほぼ一致している。HEL は衝撃圧縮によるずれ応力によって氷の圧縮破壊がはじまる圧力であるから、氷の衝突蒸発は衝撃圧下で氷が圧縮破壊されることによって引き起こされると考えられる。また温度に関しては氷試料が高温になるに従って、

(I) と (II) の領域で蒸発量がわずかに増え、領域 (III) ではほとんど変化しない。また領域 (II) , (III) の境界が低速側に30 m/s 程度シフトする。これは、氷の温度が高いと氷の強度が低下し、破壊がより低速で行われるためと考えられる。さらに領域 (II) , (III) で発生した水蒸気の圧力から破片の温度を見積もると、理論的に求められる温度に比べて数十K も高い値を示した。これは衝突エネルギーの散逸が不均質であり、一部が高温に加熱されたためと解釈される。以上より、氷の衝突蒸発は衝撃圧縮による破壊にともなって起こり、破断面での局所的なエネルギー散逸によって破片が高温に加熱されることにより領域 (II) , (III) でみられるような高い分配率を示したと結論された。また、得られた結果をもとに氷衛星の進化過程を議論し、氷衛星が半径200 km 以上に成長すると衝突蒸発による化学組成の変化が重要となることがはじめて明らかにされた。

学位論文審査の要旨

主査 教授 前野 紀一
副査 教授 本堂 武夫
副査 教授 香内 晃
副査 教授 山本 哲生 (大学院理学研究科)

学位論文題名

Experimental study on the impact vaporization of ice

(氷の衝突蒸発に関する実験的研究)

惑星および衛星は、微惑星が衝突合体して集積することにより形成されたと考えられている。木星以遠の外惑星領域では、岩石に加え氷を多量に含んだ氷微惑星の衝突集積が行われた。氷微惑星の衝突の際、衝突エネルギーによって氷は容易に蒸発（衝突蒸発）する。氷の衝突蒸発は大気の形成に直接関わるほか、構成物質のうち氷のみが選択的に蒸発、消失することにより天体のバルク化学組成にも影響を及ぼしたと考えられ、この現象を詳しく調べる必要がある。しかし、これまでに氷の衝突蒸発に関する実験はほとんど行われておらず、蒸発量が衝突速度や氷の温度に対しどのように変化するのか、衝突エネルギーのうちどれだけが蒸発に用いられるのか（分配率）、等については全く分かっていない。本研究は氷の衝突蒸発に関して、以上のような性質を実験的に明らかにする目的で行われた。

本研究では、外惑星形成環境をシミュレートした低温、高真空の条件下で衝突を行い、衝突蒸発を観測するために、i) 高真空中で作動する電磁推進式加速装置、ii) 広い圧力範囲で質量分析計を動作させる多段の真空排気系、iii) 非常に短い時間内に種々の装置を制御、データを収集するシステムなどを新たに開発した。これにより氷の衝突蒸発実験を系統的に行うことがはじめて可能となった。実験は閉鎖系の真空チェンバー中で、液体窒素を用いたクライオスタットにより低温に冷却された氷に銅の飛翔体を衝突させて行われた。衝突を行う真空チェンバーは、質量分析計を設置した超高真空のガス分析用チェンバーに可変リークバルブを介してつながっている。これにより衝突で発生したガスはin-situでガス分析用チェンバーに取り込まれ、衝突時の各種ガスの分圧が測定可能となった。衝突による氷蒸発量

は発生した水蒸気の分圧の値から、気体の状態方程式を用いて求められた。また発生するガスと真空チャンバー中に残留する水蒸気とを区別するため、試料氷には重水から作成した氷を用いた。この結果、蒸発ガスの測定感度は二桁以上高められた。以上の実験装置を用いて、真空（衝突前 $\sim 10^{-3}$ Torr）中で130-185 Kの氷に、銅の飛翔体（250 mg）を54-329 m/s（0.36-13.5 J）の速度で衝突させて氷の衝突蒸発量を調べることにより、速度の増加とともに4桁以上も増大する氷の蒸発を観測し、蒸発量は衝突速度に応じて3つの領域（I、II、III）に区別できることが明らかにされた。

急激に分配率が増大しはじめる（I）、（II）の境界の速度は100 m/sであり、この速度における衝撃圧を求めると280 MPaとなる。この圧力はこれまでに知られている氷のユゴニオ弾性限界（HEL）の圧力にほぼ一致している。HELは衝撃圧縮によるずれ応力によって氷の圧縮破壊がはじまる圧力であるから、氷の衝突蒸発は衝撃圧下で氷が圧縮破壊されることによって引き起こされると考えられる。また温度に関しては氷試料が高温になるに従って、（I）と（II）の領域で蒸発量がわずかに増え、領域（III）ではほとんど変化しない。また領域（II）、（III）の境界が低速側に30 m/s程度シフトする。これは、氷の温度が高いと氷の強度が低下し、破壊がより低速で行われるためと考えられる。さらに領域（II）、（III）で発生した水蒸気の圧力から破片の温度を見積もると、理論的に求められる温度に比べて数十Kも高い値を示した。これは衝突エネルギーの散逸が不均質であり、一部が高温に加熱されたためと解釈された。以上より、氷の衝突蒸発は衝撃圧縮による破壊にともなって起こり、破断面での局所的なエネルギー散逸によって破片が高温に加熱されることにより領域（II）、（III）でみられるような高い分配率を示したと結論された。また、得られた結果をもとに氷衛星の進化過程を議論し、氷衛星が半径200 km以上に成長すると衝突蒸発による化学組成の変化が重要となることが明らかにされた。

審査員一同は、これらの成果が氷物性および惑星科学の研究分野の発展に極めて大きな寄与をしたものと評価し、また研究の企画、実施に関する能力、大学院課程における研鑽や取得単位等も併せ、申請者が博士（地球環境科学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。