

## 論文の内容の要旨

論文題目            Chemical effects of satellitesimal impacts on Titan's atmosphere  
                         - On impact origin of Titan's N<sub>2</sub> atmosphere -  
( 微衛星衝突がタイタン大気に及ぼす化学的影響  
                         - タイタン窒素大気の衝突起源 - )

氏名                 石丸 亮

タイタンは厚い N<sub>2</sub> 大気を持つことが知られているが、この大気がどのように形成されたのかについては未だに大きな謎になっている。一般的に、タイタンは土星星雲中のガスが凝縮して形成された微衛星の衝突・合体・集積によって形成されたと考えられており、タイタンの原始大気は微衛星に含まれていた揮発性分子が蒸発して形成されたことが提案されている。最近行われたホイヘンス探査によってタイタン大気中の始原的な希ガスの量が非常に少ないことが初めてわかった (Niemann *et al.*, 2005)。この観測事実はタイタンを形成した微衛星に希ガスがほとんど含まれていなかったことを示唆している。N<sub>2</sub> と希ガスは同程度の低温環境で凝縮して微衛星を形成するので、希ガスが凝縮しない環境ならば N<sub>2</sub> も凝縮しなかったことが予想される。そのためタイタン大気に含まれている窒素は N<sub>2</sub> ではなく別の窒素化合物が微衛星を形成して集積したと考えられる。そのような物質として現在最も有力であると考えられているのが NH<sub>3</sub> である。以上のことからタイタンの原始大気は NH<sub>3</sub> に富む大気であったことが支持されている。それでは原始 NH<sub>3</sub> 大気から現在の N<sub>2</sub> 大気へとどのように進化したのであろうか？

NH<sub>3</sub> 大気から N<sub>2</sub> 大気形成される有望なモデルとして衝突衝撃波加熱モデルが提唱されている (Jones and Lewis, 1987; McKay *et al.*, 1988)。これは高速飛翔体が大気を通過する際にその前面に形成されるバウショックによって大気中の NH<sub>3</sub> を分解して N<sub>2</sub> を生成するモデルである。先行研究では衝撃波によって加熱された大気ガスがただちに高温の平衡組成に変化することを仮定している。地球大気で形成されるバウショックではこの仮定が成立することが知られている。先行研究では CH<sub>4</sub>-rich な微衛星の集積を想定し、そのとき形成される CH<sub>4</sub>-NH<sub>3</sub> 大気を原始大気として考えている。そのような CH<sub>4</sub>-NH<sub>3</sub> 大気の高温の平衡組

成では  $\text{NH}_3$  よりも  $\text{N}_2$  の方が安定なので大量の  $\text{N}_2$  が生成する結果が先行研究によって報告されている。

しかしながら、これらの先行研究が現実の原始大気で起こる衝突衝撃波を再現しているとは必ずしも言えないことが問題点として挙げられる。なぜなら彼らが考えている原始大気は還元大気であり、そのような還元大気は地球大気に比べて比熱が大きくなるために衝撃波加熱が効かないことが予想されるからである。還元大気に含まれる  $\text{CH}_4$ 、 $\text{NH}_3$  の振動モードが多いことが還元大気の比熱を大きくする原因である。もし還元大気で衝撃波加熱が効かない場合には、先行研究がしている平衡の仮定が成立しないことが十分に考えられ、先行研究の提唱していた  $\text{N}_2$  大気形成モデルが破綻してしまう。還元ガスを含む原始大気からの  $\text{N}_2$  生成を適切に扱うためには化学反応のキネティクスを考慮する必要がある。

一方で、原始大気として  $\text{CH}_4$ - $\text{NH}_3$  大気しか扱われていないこともまた問題である。集積時間が短い場合には原始大気の毛布効果によって水氷が大量に蒸発し水蒸気大気が形成されることが提唱されている (Kuramoto and Matsui, 1994)。また、 $\text{CO}_2$ -rich な微衛星がタイタンに集積する場合には  $\text{CO}_2$  が大気の主成分になるかもしれない。タイタンの  $\text{N}_2$  大気の起源を解明するためには水蒸気大気や  $\text{CO}_2$  を含む原始大気についても当然議論されるべきである。

そこで本研究では独自に反応キネティクスモデルと流体モデルをカップリングさせることで、原始大気で形成されるバウショックの数値モデルを開発した。そして、そのモデルを使って原始大気として考えられる 4 種類の大気組成に対して  $\text{N}_2$  生成を見積もった。その結果から大気組成毎に  $\text{N}_2$  大気形成可能性を論じた。4 種類の大気組成は  $\text{CH}_4$ - $\text{NH}_3$  大気、 $\text{CO}_2$ - $\text{NH}_3$  大気、 $\text{CH}_4$ -rich 微衛星の集積によって形成された水蒸気大気、 $\text{CO}_2$ -rich 微衛星の集積によって形成された水蒸気大気である。

$\text{CH}_4$ - $\text{NH}_3$  大気の結果からは  $\text{CH}_4$  が衝撃波加熱を抑制する 2 つの冷却効果を持つことがわかった。1 つ目は、 $\text{CH}_4$  の振動モードが多いために衝撃波によって加熱されにくいことが挙げられる。この振動モードの励起を考慮した場合には、振動励起しない場合に比べて衝撃波温度が 40 % 程度も減少することがわかった。2 つ目は  $\text{CH}_4$  の解離反応が大きな吸熱を伴うために  $\text{CH}_4$  の分解とともにガス温度が低下する効果である。これらの冷却効果を考慮した場合には、還元大気では衝撃波による加熱が効かないために、 $\text{NH}_3$  の分解が阻害され  $\text{N}_2$  が生成されにくくなる。結果として先行研究の結果とは違って、広いパラメタ範囲の衝突 (低速衝突、 $\text{CH}_4$  に富む大気への衝突) において  $\text{N}_2$  大気が形成されないことがわかった。また、本研究の結果から、先行研究 (Jones and Lewis, 1987) が置いていた平衡の仮定が必ずしも妥当ではないことがわかった。低速衝突または  $\text{CH}_4$  に富む大気への衝突においては先行研究の仮定が成立しないため、先行研究のモデルは著しく  $\text{N}_2$  収率を過大評価してしまう。

$\text{CO}_2$ - $\text{NH}_3$  大気は  $\text{N}_2$  生成に対して有利であるかもしれない。 $\text{CO}_2$  は振動モードが少ないので  $\text{CO}_2$  を含む大気は比熱が小さくなる。また  $\text{CO}_2$  は分子量が大きいことから、 $\text{CO}_2$  を含む大気ではマッハ数が大きくなることが考えられる。これらは衝撃波温度を増加させる効果を

持つ。本研究の結果から、 $\text{CO}_2\text{-NH}_3$  大気の衝突ではほとんどの衝突パラメタに対して  $\text{N}_2$  大気を形成するのに十分な収率が得られるため  $\text{N}_2$  大気形成に対して非常に有利に働くことが示唆される。しかしながら衝撃波による  $\text{CO}_2$  の熱分解で  $\text{CO}$  が生成されてしまうことは問題になるかもしれない。なぜなら現在のタイタン大気に  $\text{CO}$  がほとんど存在しないことと矛盾するかもしれないからである。現在のタイタン大気を説明するためには  $\text{CO}$  を消費する機構が働く必要があると考えられる。

集積時間が短い場合には水蒸気大気が集積期に形成されることが提唱されている (Kuramoto and Matsui, 1994)。この水蒸気大気もまた衝撃波加熱による  $\text{N}_2$  大気形成には有利であるかもしれない。水蒸気大気が形成されれば、振動モードが少ない  $\text{H}_2\text{O}$  が比熱を小さくするので衝撃波温度が高くなることがその理由である。そのため、水蒸気を含む原始大気を考えることによって  $\text{N}_2$  大気が形成される衝突パラメタ範囲が  $\text{H}_2\text{O}$  を含まない大気組成に比べて著しく広がることが本研究の結果からわかった。実際、本研究の結果からは  $\text{CH}_4$  分圧が  $\sim 4 \times 10^4$  Pa より低い水蒸気大気であれば、タイタン質量の 5% に相当する質量の微衛星の衝突によって衝突速度に関係なく現在の  $\text{N}_2$  量が生成することがわかった。そのような  $\text{CH}_4$ -poor な原始大気は集積期の水蒸気大気で起こる大規模な大気散逸によって作られるかもしれない (Kuramoto and Matsui, 1994)。大気が散逸する過程で  $\text{CH}_4$  は散逸し続けるのに対して、 $\text{NH}_3$  ( $\text{NH}_3$  は海に大量に溶解) と  $\text{H}_2\text{O}$  は海からの蒸発によって補充されるので大気中に維持される。つまり、大規模な大気散逸が起こるならば、 $\text{N}_2$  大気の生成に有利な  $\text{CH}_4$ -poor な水蒸気大気が自然に形成されることが示唆される。以上のように、水蒸気大気は衝撃波加熱を強めるだけでなく、冷却効果を持つ  $\text{CH}_4$  を散逸させることによって  $\text{N}_2$  生成を促進することが期待される。さらに  $\text{CO}_2$ -rich 微衛星の集積によって  $\text{CO}_2$  が水蒸気大気に含まれる場合には、 $\text{CO}_2$  を含まない大気に比べてさらに  $\text{CH}_4$ -rich な大気組成であっても十分な  $\text{N}_2$  収率が得られることがわかった。従って、 $\text{CO}_2$ -rich 微衛星の集積は水蒸気大気からの  $\text{N}_2$  生成をさらに容易にすることが期待される。作られた  $\text{N}_2$  の一部も散逸するかもしれないが、散逸によって  $\text{CH}_4$  分圧が  $10^4$  Pa 以下になるならば  $\text{N}_2$  の総生成量が現在の  $\text{N}_2$  量の 30-100 倍程度になるので  $\text{N}_2$  大気形成の問題にはならないかもしれない。水蒸気大気モデルの有効性を確認するためには詳細な大気散逸モデルを用いて  $\text{N}_2$  の散逸量を定量的に見積もることが重要になるだろう。

水蒸気大気においても  $\text{CO}$  が生成されることは問題になるかもしれない。 $\text{CO}$  は  $\text{CH}_4$  と  $\text{H}_2\text{O}$  の反応、もしくは  $\text{CO}_2$  の熱分解によって主に作られる。しかしながら  $\text{CO}$  量を抑制する 2 つの機構が水蒸気大気では働くかもしれない。1 つ目が水蒸気大気で起こる大規模な大気散逸である。 $\text{CH}_4$  と  $\text{CO}_2$  が散逸することによって  $\text{CO}$  の生成が抑えられる可能性がある。2 つ目は微衛星によって持ち込まれるマグネタイトの表面での触媒反応である。従って、水蒸気大気での  $\text{N}_2$  大気形成は  $\text{CO}$  に不足した現在のタイタン大気と調和的であるかもしれない。

$\text{N}_2$  大気の衝突起源が妥当であるかについての答えは本研究の結果だけでは得ることはできない。なぜなら水蒸気大気で生成された  $\text{N}_2$  の散逸の問題や、 $\text{CO}_2\text{-NH}_3$  大気への衝

突によって生成される CO の余剰の問題がまだ解決されていないからである。しかしながら N<sub>2</sub> 大気が集積期の微衛星衝突によって形成されたのならば、先行研究が仮定した還元大気ではなくてむしろ酸化型大気 (CO<sub>2</sub>-rich or 水蒸気大気) への衝突でなくてはならないことを本研究の結果は示している。従って、現在の N<sub>2</sub> 大気存在は原始タイタンに水蒸気大気が形成されていた、もしくは土星系サブネビュラで CO<sub>2</sub>-rich 微衛星が作られていたことの間接的な証拠になっているのかもしれない。もしそうならば、タイタンの集積時間や土星系星雲の化学進化に対して重要な制約になるであろう。