

Oxidizing proto-atmosphere on Titan: Constraint from the impact origin of its N₂ atmosphere

石丸 亮¹、関根康人²、松井孝典¹、Olivier Mousis³

¹千葉工業大学惑星探査研究センター、²東京大学大学院新領域創成科学研究科、³CNRS/INSU

タイタンは土星系最大の衛星であり、厚い窒素分子大気を持つことが知られている。このタイタン大気がどのように形成されたのかについては諸説あるが未だに大きな謎になっている。この謎を解決することは、タイタンの窒素大気の起源を理解することだけでなく、土星衛星系の形成シナリオに制約を与える可能性がある。一般的に、タイタンや他の規則衛星は、土星サブネビュラ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いる (Lunine et al., 1989; Prinn & Fegley, 1989; Alibert & Mousis, 2007)。タイタンの集積エネルギーを考慮すると、タイタンの集積時にはタイタン外層が融解・蒸発し、原始大気が形成すると考えられている (Stevenson et al., 1986; Kuramoto & Matsui, 1994)。原始大気の化学組成は、(1)微衛星の化学組成と、(2)原始大気形成後に大気中で起こる化学反応により決まるため、これらを調べることは、タイタンの窒素大気の起源を理解する上で非常に重要である。

微衛星の化学組成は、サブネビュラの物理化学条件に強く依存する。先行研究は2つの衛星形成モデルを提案している。一つがガス惑星形成の初期ステージでの衛星形成であり、高温高圧サブネビュラ中で衛星が形成する (Lunine et al., 1989; Prinn & Fegley, 1989)。他方は、ガス惑星形成の後期ステージでの衛星形成であり、低温低圧サブネビュラ中で衛星が形成する (Alibert & Mousis, 2007)。前者では、ガス反応や触媒反応が活発に起こることでメタンとアンモニアが生成されるため、微衛星組成並びにタイタン原始大気組成はメタンやアンモニアに富む還元的な組成になると考えられる (Lunine et al., 1989; Prinn & Fegley, 1989)。一方、後者の低温低圧サブネビュラの場合には、原始太陽系星雲からサブネビュラへ太陽組成を持つ氷微惑星が活発に流入すると示唆されていることから、形成される微衛星の組成は太陽組成を反映する、二酸化炭素とアンモニアに富む組成になると示唆される (Alibert & Mousis, 2007)。つまり、この場合には、原始大気は二酸化炭素とアンモニアに富む大気であることがわかる。

原始大気中のアンモニアから窒素分子が生成される有望なモデルの1つ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飛翔体前面に形成される衝撃波 (バウショック) によって大気中のアンモニアを分解して窒素分子を生成するモデルである。このメカニズムが有効に働くかどうかは原始大気組成とアンモニア分解反応のキネティクスに強く依存するはずであるが、大気組成の効果が系統的に調べられているわけではないし、分解反応のキネティクスについてもこれまで十分に論じられていなかった。

そこで本研究では、キネティクスを考慮できる数値モデルを新たに構築し、タイタンの原始大気として考えられる様々な大気組成での衝撃波加熱による窒素生成効率を求めることを目的とする。本研究のモデルは1次元の衝撃波後面の流体モデルと化学反応モデルをカップリングして構築した (Gibson & Marrone, 1962; Hall et al., 1962)。

本研究の結果からはメタンが衝撃波加熱を抑制する効果を持つことがわかった。というのも、メタンは多くの振動準位を持っているため（9個）に比熱が大きい性質があり、衝撃波によって加熱されにくいのである。そのため、メタンに富む還元的な原始大気への衝突では、衝撃波温度が低いためにアンモニアの分解反応が十分に起こらず（平衡に到達せず）、窒素生成効率が著しく小さいことがわかった。高温高压サブネビュラ条件（Lunine et al., 1989; Prinn & Fegley, 1989）で推定されるメタンに富む原始大気への微衛星の衝突を考えると、現在のタイタン大気のような窒素大気が形成されないことがわかった。

一方、二酸化炭素に富む酸化的な大気では衝撃波温度が高くなることが本研究の結果からわかった。これは、二酸化炭素の振動準位が少ないため（4個）、メタンと比較して比熱が小さいためである。衝撃波温度が高くなる結果として、アンモニア分解反応が効率よく起こり、化学平衡に相当する窒素分子が生成されることが示された。結果として、低温低压サブネビュラ（Alibert & Mousis, 2007）により推定される二酸化炭素に富む原始大気への微衛星の衝突を考えると、タイタンの集積期に分厚い窒素大気が形成することが示唆される。そのため本研究の結果は、もしタイタンの窒素大気が集積期に形成したのならば、原始大気が二酸化炭素に富む酸化型の大気であったことを示唆している。

本研究の結果は低温低压サブネビュラ（Alibert & Mousis, 2007）モデルにより推測される二酸化炭素に富む微衛星の存在を支持する結果である。タイタンとエンセラダスに集積した微衛星の化学組成は似ていたことが予想されることから、もし低温低压サブネビュラ（Alibert & Mousis, 2007）モデルが正しいのならば、タイタンと同様にエンセラダスの微衛星の化学組成も二酸化炭素に富むことが予想される。実際に、エンセラダスから噴出しているプルームの主成分として二酸化炭素とアンモニアが観測されており（Waite et al., 2009）、この観測は本研究の推定と調和的である。

参考文献

- Alibert, Y., & Mousis, O. 2007, *A&A*, 465, 1051
- Gibson, W. E., & Marrone, P. V. 1962, *Phys. Fluids*, 5, 1649
- Hall, J. G., Eschenroeder, A. Q., & Marrone, P. V. 1962, *J. Aerospace Sci.*, 29, 1038
- Jones, T. D., & Lewis, J. S. 1987, *Icarus*, 72, 381
- Kuramoto, K., & Matsui, T. 1994, *J. Geophys. Res.*, 99, 21183
- Lunine, J. I., Atreya, S. K., & Pollack, J. B. 1989, in *Origin and Evolution of Planetary and Satellite Atmospheres*, ed. S. K. Atreya, J. B. Pollack, & M. S. Matthews (Tucson, AZ: Univ. Arizona Press), 605
- McKay, C. P., Scattergood, T. W., Pollack, J. B., Borucki, W. J., & Ghyseghem, H. T. V. 1988, *Nature*, 332, 520
- Prinn, R. G., & Fegley, B., Jr. 1989, in *Origin and Evolution of Planetary and Satellite Atmospheres*, ed. S. K. Atreya, J. B. Pollack, & M. S. Matthews (Tucson, AZ: Univ. Arizona Press), 78
- Stevenson, D. J., Harris, A. W., & Lunine, J. L. 1986, in *Satellites*, ed. J. A. Burns & M. S. Matthews (Tucson, AZ: Univ. Arizona Press), 39
- Waite, J. H., Jr., et al. 2009, *Nature*, 460, 487