

大規模シミュレーションプロジェクト・成果報告書

土星リング-衛星系の力学進化と構造形成

研究分担者: 大槻圭史 (コロラド大学)

研究代表者: 井田茂 (東工大)

(2004 年 3 月)

1. はじめに

土星リングは無数の粒子及び小衛星からなり、これら構成粒子は互いに相互重力作用及び衝突を繰り返している。これらリングの構成粒子は氷からなると考えられているが、詳しい物性は良く分かっていない。リング・衛星等の衝突による力学進化に関する情報、例えば速度分散や構造形成、あるいは自転速度といったものから構成粒子の物性を推定できれば、リング・衛星系の起源に関して制約条件を与えることができる可能性がある。

従来、リングに関する多くの研究では、構成粒子はなめらかな球であると仮定されていた。しかしこれは現実的ではなく実際の粒子表面は粗さを持っていると考えられ、これら粗い（あるいは球からずれた形状の）粒子同士の斜め衝突により、粒子自転が引き起こされると考えられる。ある程度大きな衛星では潮汐力により自転が減速され、synchronous rotation の状態になる。しかし小衛星あるいはリング粒子の場合には、衝突が自転を決めると考えられる。

土星リング粒子の自転に関する情報は、地上観測及び探査機 Voyager による thermal radiation の観測結果から間接的に得られている。例えば Voyager に搭載された IRIS (infrared interferometer spectrometer) を用いた観測では、リングが太陽光に照らされているときと土星の陰になっているときの温度の違いを low phase angle 及び high phase angle（即ち、土星に対して太陽と同じ方向からリングを観測するか反対方向から観測するか）の二通りで調べた。その結果、陰になったリングを low phase angle から観測したときに、より顕著な温度の低下が得られ、これは粒子がゆっくりと（公転角速度と同程度かそれ以下で）自転していることを反映している、と解釈された。しかし thermal radiation のデータ解釈はモデルによるところもあり、明確な結論は得られていない。今年夏に土星に到着する探査機 Cassini

でも同様の観測がより高精度の機器 (CIRS; composite infrared spectrometer) を使って行われる予定である。従って、それに備えて理論的な研究も進めておく必要がある。

2. 多数の粒子衝突による小衛星の自転

本研究では上述の目的のための第一歩として、リング中にある一つの小衛星が、まわりの粒子との衝突によって獲得する自転角運動量について詳しく調べた (Ohtsuki 2004a, b)。

まず、小衛星と粒子の相対速度が小衛星表面からの脱出速度に比べてずっと大きく両者の相互重力が無視できる場合について、粒子衝突により小衛星が獲得する単位質量あたりの角運動量の平均値 $\langle l_z \rangle$ および二乗平均 $\langle l^2 \rangle$ を解析的に求めた。この結果より、小衛星に比べて質量のずっと小さな粒子が多数衝突してきた場合に小衛星が獲得する自転角速度はおよそ 0.4Ω (Ω は公転角速度) であることがわかった。

しかし、実際には小衛星と粒子の間の相互重力を無視することはできない。そこで、三体軌道計算により、相互重力を考慮した場合の $\langle l_z \rangle$ 、 $\langle l^2 \rangle$ 等を求めた。図 1 はその例であり、単位時間当たりに単位面密度の粒子集団の衝突により小衛星が獲得する自転角運動量の z 成分を無次元化したものの値を示している。 $\tilde{e}$ および $\tilde{i}$ は、粒子軌道の離心率及び軌道傾斜角を小衛星のヒル半径で規格化したものであり、実線は軌道計算結果、破線は相互重力を無視した場合に得られる解析解を示している。この図の場合、 $\tilde{e}$ (or $\tilde{i}$) $\simeq 2.4$ が、粒子のランダム速度が小衛星表面からの脱出速度とほぼ等しくなる場合に相当している。従ってこの図より、粒子のランダム速度が脱出速度に比べて十分大きくなれば、相互重力が無視できて解析解と軌道計算結果が一致することが確認できる。

図 2 は、小衛星が獲得する自転角運動量の平均値 $\langle l_z \rangle$ (無次元化してある) が、衝突前の小衛星の自転角速度 ω_z にどのように依存するかを軌道計算により調べたものである。この場合、粒子集団の e 及び i が Rayleigh 分布に従うことを考慮しており、速度分散が脱出速度に等しい場合と、その十分の一の場合の二通りについてプロットしてある。この図からわかるように、衝突前に ω_z が正の大きい値を持っている、即ち小衛星が速い順行自転をしているとき、 $\langle l_z \rangle$ は負となって、粒子衝突は自転を遅くする方向に働く。逆に ω_z が負の大きい値を持っている、即ち速い逆

行自転をしているときには $\langle l_z \rangle$ は正となる。この結果、小衛星の自転はゆっくりとした順行自転 ($0 < \omega_z/\Omega < 1$) に向かうようになる、同様の結果が Morishima and Salo (2004) により得られている (ただし彼らは粒子の速度分布は考慮していない)。

図 1.

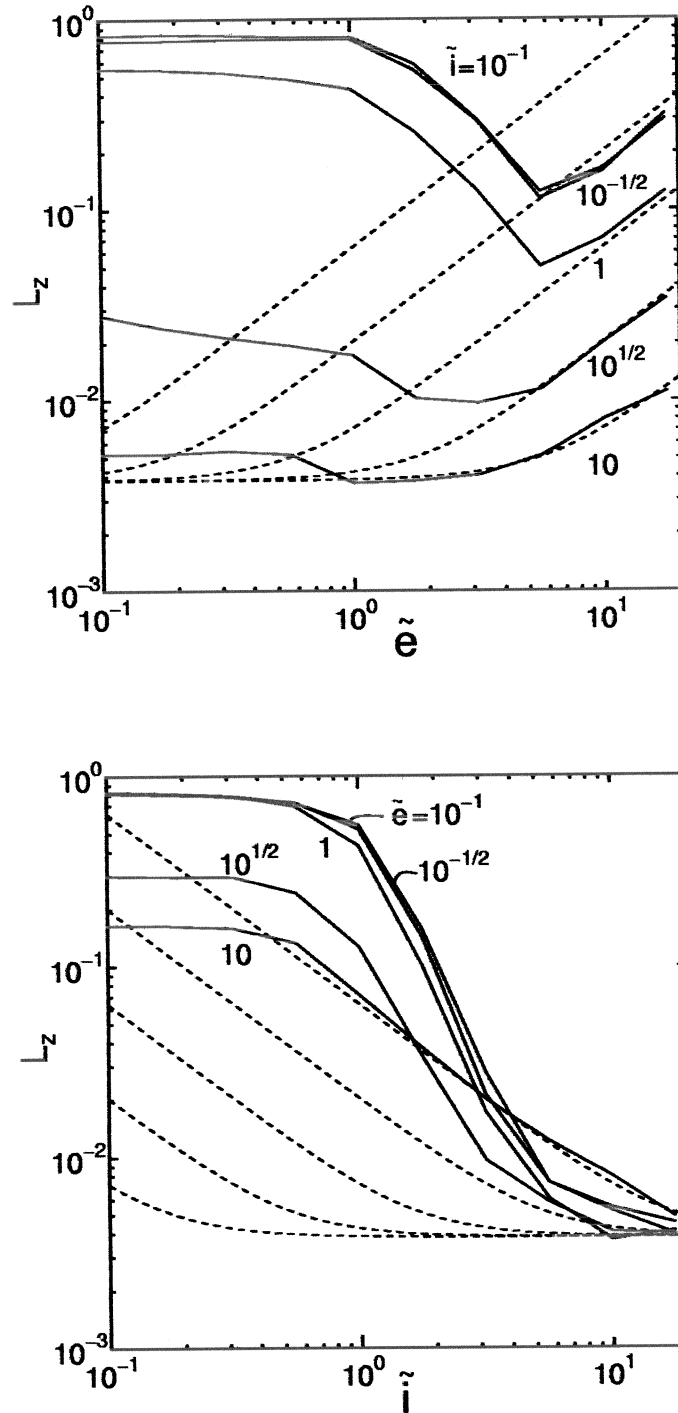
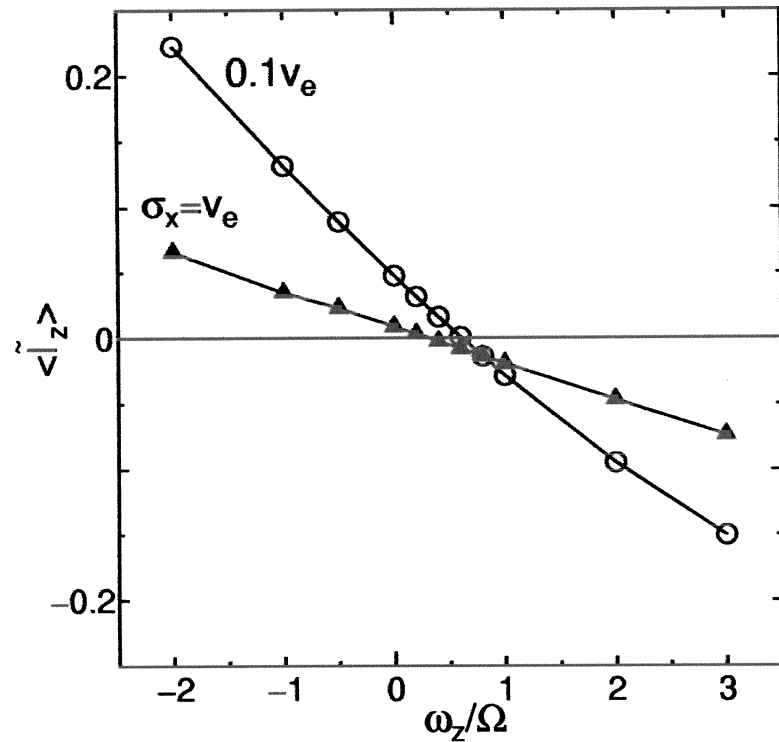


図 2.



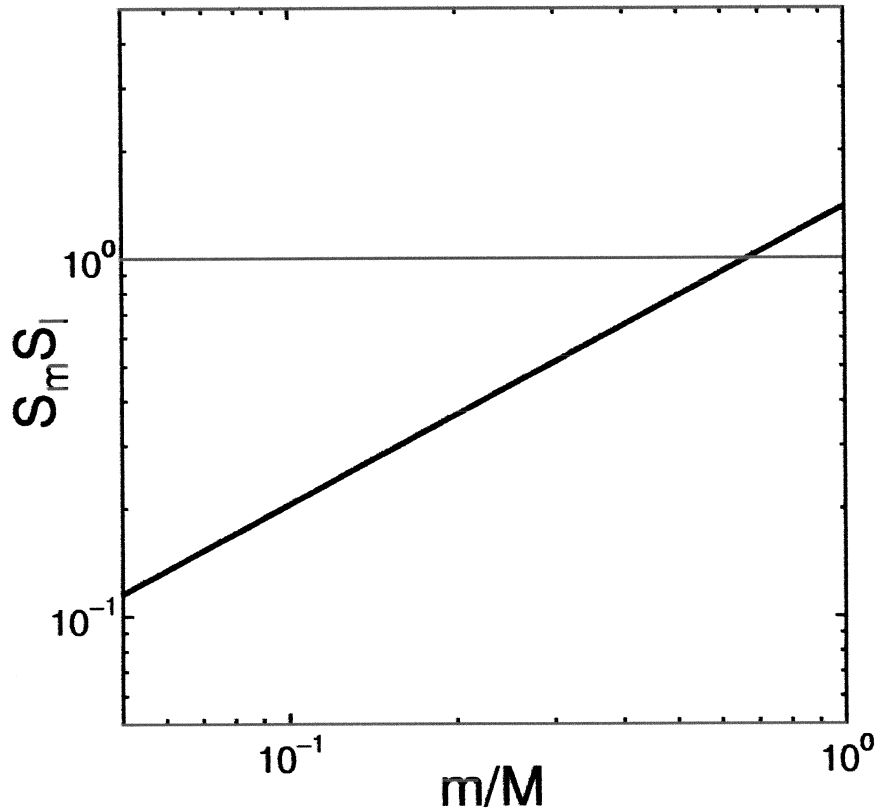
3. 大粒子衝突の効果

前節で述べたのは多数の粒子衝突によって小衛星が獲得する自転角運動量の平均値と、それによって決まる小衛星の平衡自転角速度であった。これは自転の“systematic component”あるいは“ordered component”と呼ばれる。それに対して、衝突頻度は低くてもサイズの大きな粒子が衝突してくると、一回の衝突で小衛星の自転が大きく変えられてしまう可能性がある。これは“random component”あるいは“stochastic component”と呼ばれる。Dones and Tremaine (1993) は惑星自転の研究においてこれら二成分を統一的に扱う formulation を導出し、random component が効く条件を求めた。その結果、微惑星集積によって得られる地球型惑星の自転については random component が重要な役割を果たしたと考えられる、という結論を得ている。しかし、彼らの formulation では惑星に衝突した微惑星は必ず合体し、それに伴って惑星の質量が増加することを前提としているため、本研究の粒子衝突による小衛星自転の問題には適用することができない。

そこで我々は、粒子が非弾性衝突の結果、合体せずに跳ね返ることを考慮し、小衛星自転に関する新たな formulation を導出した。そしてそれに基づいて、小衛星の自転において random component が効く条件を求めた。その条件は小衛星及び粒子の質量の関数である S_m と、小衛星と粒子の角運動量の関数である S_l という二つの量で書かれ、 $S_m S_l \geq 1$ のとき random component が効き、 $S_m S_l < 1$ なら効かない。ここに $S_m^2 = \langle m^2 \rangle / (M \langle m \rangle)$ (M 、 m は小衛星及び粒子の質量) であり、 S_l は $\langle l_z \rangle$ 、 $\langle l^2 \rangle$ 及び小衛星の自転角速度を用いて表される。

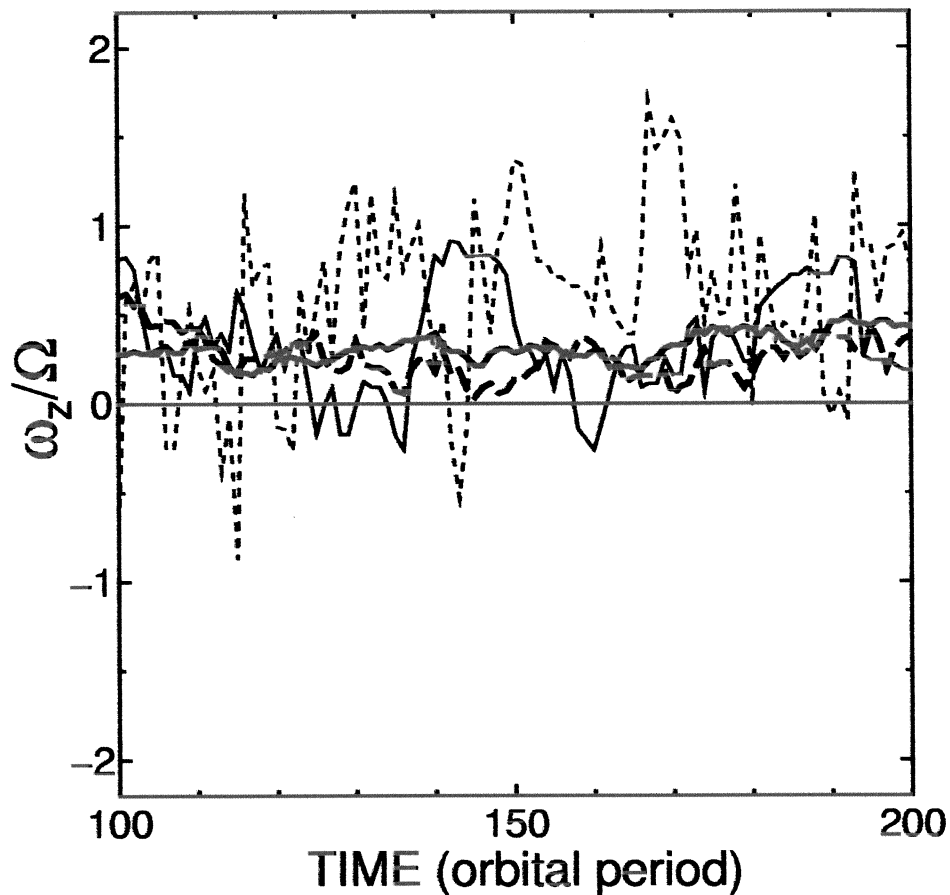
図3は、粒子が等質量 m であり、かつ相互重力を無視した場合について、条件 $S_m S_l = 1$ を m/M の関数として表したものである。この場合 $S_m = (m/M)^{1/2}$ であり、 S_l は解析的に求めることができる。この図より、 $m/M \sim 0.1$ のときには systematic component が効いて小衛星の自転角速度は $\omega_z \sim 0.4\Omega$ となるが、 $m/M \sim 1$ になってくると random component の効くことが予想される。

図3.



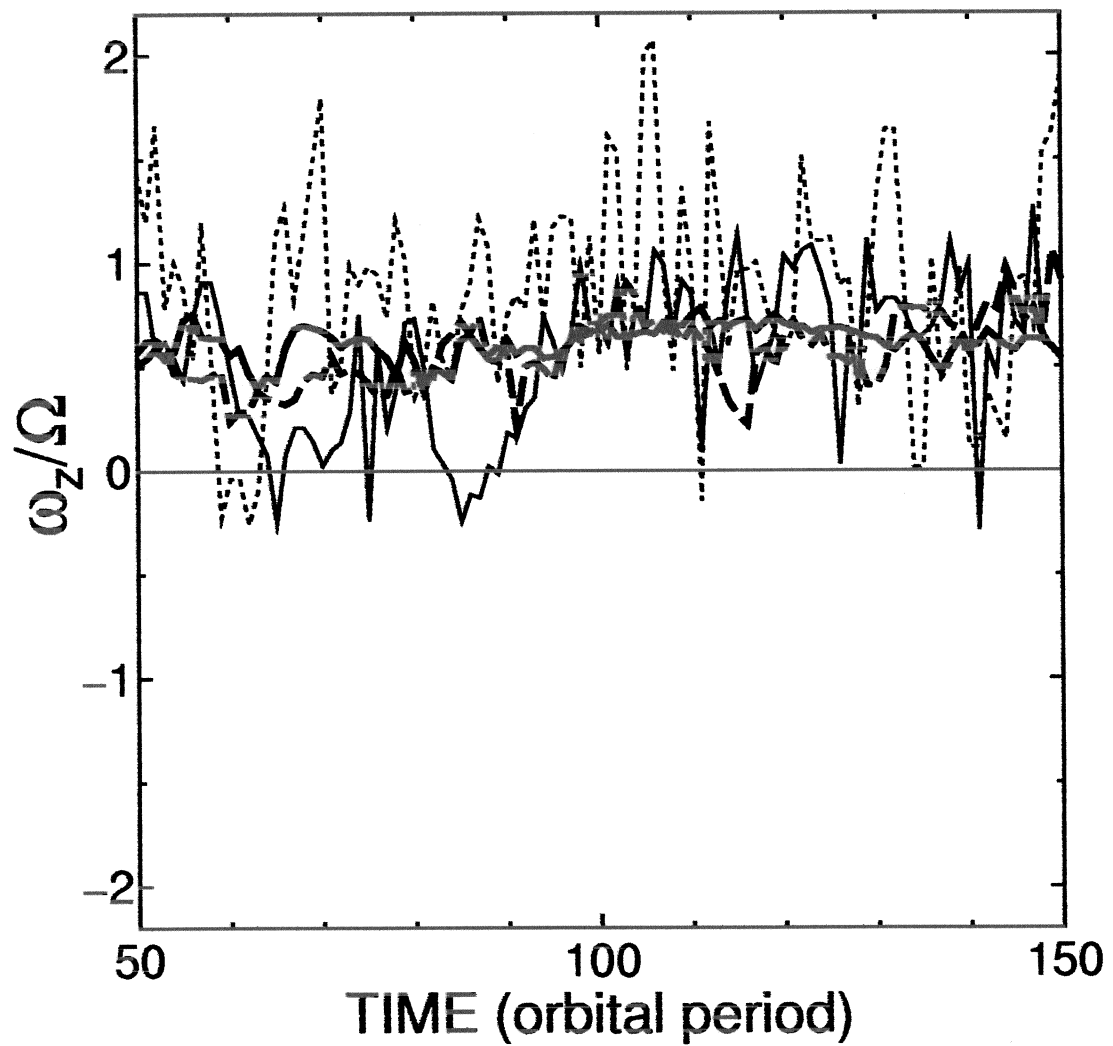
このことを実際にN体シミュレーションで確認したのが図4である。これは小衛星の自転角速度の z 成分 (Ω を単位としたもの) の時間進化を示している。この計算では等質量の粒子集団 ($N = 10^3$) の中に一つの小衛星を置いており、相互重力は考慮されていない。四つの線は異なる m/M の値に対応しており、 $m/M = 1$ (細破線)、0.5 (細実線)、0.2 (太破線)、0.1 (太実線) を表している。 m/M が小さいときには systematic component が効いて $\omega_z \simeq 0.4\Omega$ となるのに対し、 $m/M \sim 1$ になると random component が効いて、小衛星の自転は順行、逆行、ともにありうる。これらの結果は解析的計算に基づく図3の結果と一致する。

図4.



同様のことは相互重力を考慮した場合にも確認できる。図5は相互重力を考慮してN体シミュレーションを実行したものであり。同様の結果を得ている。ただし重力の効果により、systematic component が効く場合の平衡自転角速度の値が図4の場合に比べてやや大きく ($\sim 0.6\Omega$) になっている。

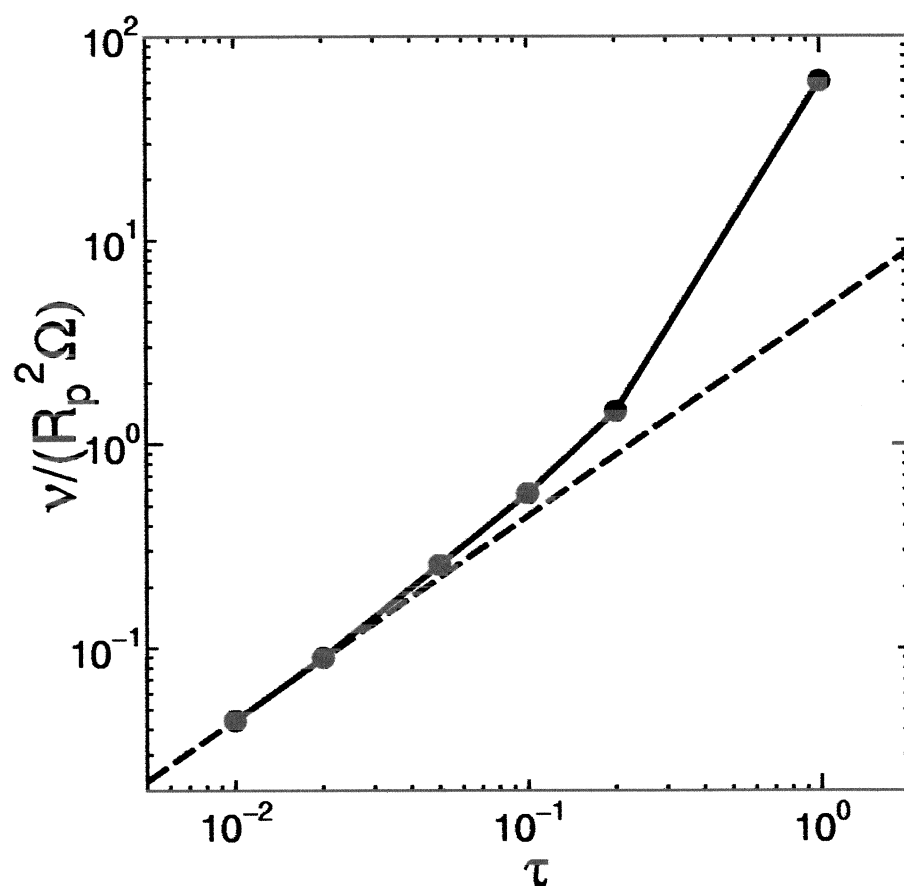
図5.



4. Discussion

以上の計算ではリングの粒子密度が低い場合を考えた。しかし粒子密度が高くなってくると、二粒子間の相互重力作用だけでなく、リング全体の自己重力が重要になってきて、構造形成にも大きな影響を及ぼすことが知られている。例えば図6は、最近我々が導出した formulation (Tanaka et al. 2003) に基づいて、リングの粘性をリングの光学的厚さ τ の関数として求めたものである。実線はN体シミュレーションで求めたもの、そして破線は三体軌道計算結果より求めたものである。これより、 τ が1より十分小さい場合には両者は一致するが、 $\tau \sim 0.1$ 程度ですでに違いが見られ、 $\tau \sim 1$ になるとその差は顕著になることがわかる。従って粒子自転についても τ が大きい場合には上述の結果と異なる振舞いを示す可能性があり、探査機による観測と直接比較するためには、そのような場合についても明らかにする必要がある。

図6.



REFERENCES

- Dones and Tremaine 1993. On the origin of planetary spins. *Icarus* 103, 67–92.
- Morishima and Salo 2004. Spin rates of small moonlets embedded in planetary rings: I. Three body calculations. *Icarus* 167, 330–346.
- Ohtsuki 2004a. Formulation and analytic calculation for the spin angular momentum of a moonlet due to inelastic collisions of ring particles. Submitted to *Earth, Planet. Space*.
- Ohtsuki 2004b. On the rotation of a moonlet embedded in planetary rings. Submitted to *Icarus*.
- Tanaka, Ohtsuki, and Daisaka 2003. A new formulation of the viscosity in planetary rings. *Icarus* 161, 144–156.