

磁気セイルの推進力の見積もりと性能向上のためのオプション

秋田 大輔*・鈴木 宏二郎**

Estimation of Magnetic Sail Thrust and Options for Performance Improvement

Daisuke AKITA* and Kojiro SUZUKI**

Abstract : In the present study, a small magnetic sail consisting of a 4m-diameter coil, which seems to be reasonable size as a test vehicle realizable within the present technology level, is considered. Interaction of the solar wind with the magnetic sail is numerically simulated by the full particle (PIC) method. Fundamental features of the flow field and the induced electromagnetic field around the small magnetic sail are clarified. Force acting upon the magnetic sail, which is estimated by considering the Lorentz force generated by the induced electromagnetic field and the momentum change of the solar wind around the magnetic sail, is in the order of 10^{-3} mN. Additionally, optional concepts of sailing propulsion, which use applied electric field or artificial charged particles, are also considered. The new concepts may improve the acceleration performance and/or payload capacity of the sailing propulsions.

Keywords : Magnetic Sail, Plasma Flow, PIC Method

概 要

コイル直径 4 m の磁気セイルについて、Full PIC法を用いて太陽風と電磁場の干渉解析を行い、太陽風流れ場や誘導電磁場の基本的な特性について調べるとともに、太陽風粒子の総運動量変化や $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ 力から磁気セイルの推力を見積もった。その結果、ここで想定したような磁気セイルでは 10^{-3} mN 程度の推力が得られることが分かった。また、セイリング推進の性能を向上させるオプションとして、磁場ではなく電場を印加した場合の効果や、電荷を帯びた微粒子で構成される光圧を利用した新しい推進システムの可能性について検討した。

1. はじめに

Pioneer 10 や Voyager 1 によるプロジェクトに代表される太陽系外縁などの深宇宙探査に対する要求は非常に高い。このような探査の機会を増やすためには、ミッション期間を短縮し、運用コストを削減することが望まれる。しかし、Isp や推力電力比の点で、既存の推進システムの能力向上によるミッション期間の大幅な短縮は難しく、

* Graduate Student, Dept. of Advanced Energy, University of Tokyo

** Dept. of Advanced Energy, University of Tokyo

推進システムにおける何らかの質的变化を模索する必要がある。

ソーラーセイルや磁気セイル [1], [2] などのセーリング推進は、太陽からのエネルギーフラックスを推進力に変換する Isp 無限大の推進システムであり、上のような深宇宙探査等での利用が期待されるコンセプトのひとつである。しかし、ソーラーセイルと磁気セイルは、それぞれをドライブする太陽光と太陽風のエネルギー密度が低いため、衛星が十分な加速を得るためには、ともに大規模でかつ軽量の構造の製造・展開が必要となる。図1は、太陽光圧と太陽風動圧をそれぞれ太陽からの距離に対して示したものである。ソーラーセイルについては、太陽光圧が地球公転軌道付近で 10^{-6} Pa 程度であり、数十mから数百mの薄膜を展開できれば、数mN から数十mN 程度の推力を得ることができる。一方、磁気セイルは、光圧に比べ3桁小さい太陽風動圧を駆動源とするため、ソーラーセイルに比べ数十倍大きいセイル(磁場)を展開できれば、ソーラーセイルと同程度の推力が得られることになる。磁気セイルの場合は、磁場がセイルとなるため、磁場を印加するためのコイルは、必ずしも巨大である必要はない。

また、ソーラーセイルや磁気セイルにおいて、性能の向上が期待される方法として、磁場だけでなく電場の印加も利用する方法や、Winglee^[3]らが提案したプラズマを噴射し、その凍結膨張によって有効な磁場領域を拡大する方法(燃料必要)、Sheidon^[4]らが提案した電荷を帯びた微粒子をソーラーセイルの薄膜の代わりに利用して太陽光を反射し推進する方法などが考えられている。Sheldonらが提案した方法は、電磁気的な作用で荷電粒子を衛星まわりに捕捉するため、ソーラーセイルと磁気セイルを融合したようなコンセプトと言える。しかし、これらの方法はコンセプトが提案されただけで、まだ具体的には検討されていない。

本稿では、磁気セイルの推進力の見積もりと電場を印加した場合の効果、また、Sheldonらの方法における荷電粒子の捕捉方法に関する簡単な検討について報告する。

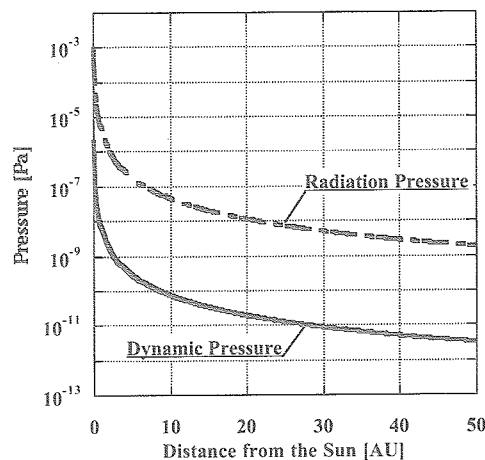


図1 太陽からの距離に対する太陽光圧と太陽風動圧の変化。

2. 磁気セイルの推進力の見積もり

2.1. 解析アプローチ

PIC法^[5]を用いて高速希薄プラズマ流と印加磁場との干渉解析を行い、誘導電流と印加磁場との $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ 力および太陽風粒子の総運動量変化から、磁気セイルの推進力の見積もりを行う。

磁場を印加するための磁気セイルのコイルには、高温超伝導材の使用を想定する。表1に示すように、実際の打ち上げを考えコイル直径4m、印加磁場はコイル中心で0.06T(電流 ~ 190 A \cdot Turn)とする。これは、現在の高温超伝導に関する技術レベルを若干上回る程度の値である^[6]。

この磁気セイルについて、Zubrinの方法^{[1],[2]}を用い推力を簡易的に推算する。磁気セイルの印加磁場はコイル中心から距離の3乗で低下するダイポールを仮定する。その結果、図2に示すような太陽風の動圧と印加磁気圧がつり合う面が決定する。この面を剛体と仮定し、Newton流近似で面上の圧力分布(図2参照、 C_p :圧力係数)から、この剛体にはたらく太陽風の抗力を計算し、それがすなわち磁気セイルの推力とすると、この場合の推力は0.1 mNのオーダーとなる。

図3に、ここで想定する磁気セイルと地球公転軌道付近での太陽風との電磁氣的な干渉スケールを示す。地球公転軌道付近での太陽風条件^[7]は、表2に示す値を用いた。 r_{mp} は、磁気セイル中心から太陽風動圧と印加磁気圧のつり合い点までの距離(~ 230 m)、 v_∞ は一樣流速であり、磁気セイルと太陽風のマクロな干渉スケールを示している。 ω_p 、 ω_{ce} 、 ω_{ci} はそれぞれプラズマ周波数、電子サイクロトロン周波数、イオンサイクロトロン周波数であり、 λ_D 、 λ_{ce} 、 λ_{ci} はそれぞれデバイ長、電子サイクロトロン半径、イオンサイクロトロン半径である。図には、各スケールにおいて適当な計算モデルも付せて示している。粒子(イオン、電子)の運動スケールを解像する必要がない場合は、計算コスト上MHD近似が有用であり、逆に、電子の運動スケールまで解像する必要がある場合は、粒子コード(Full PIC法)が適切である。ここで想定する磁気セイルまわりの太陽風流れのシミュレーションでは、電子の運動スケールを解像するため、Full PIC法を採用する(Ref. [8],[9],[10]参照)。

図4に計算格子を示す。計算領域は $500\text{ m} \times 500\text{ m} \times 500\text{ m}$ 、格子幅は10 mの等間隔であり、デバイ長 λ_D (11.6 m)以下である。磁気セイルはコイル直径4 m、中心磁場0.06 Tであり、ダイポールのベクトルが主流に対向するように計算領域中心に配置する。

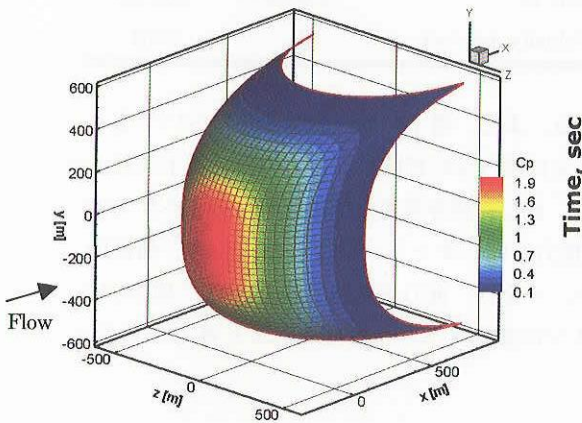


図2 太陽風動圧と印加磁気圧のつり合い面。

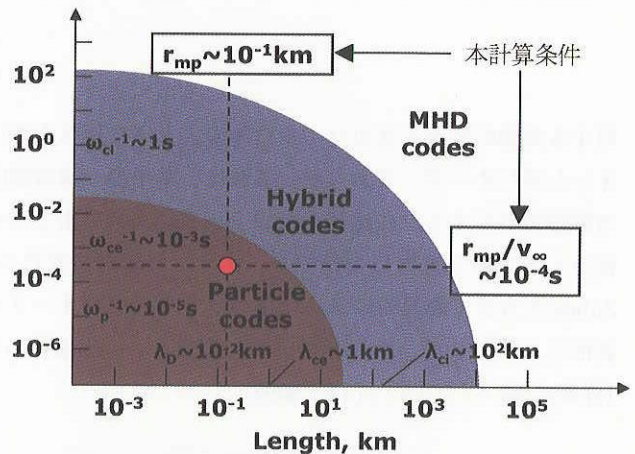


図3 電磁氣的干渉スケールと計算モデル。

2.2. 解析結果

図5、6に磁気セイルまわりのダイポールベクトルを含む断面における太陽風電子、陽子の数密度分布および流線を示す。電子とイオンでは、質量と熱速度の違いから、印加磁場の影響領域に一桁程度の差がある。結果、電子に比べ、イオンはより磁気セイル近傍まで到達し、電荷分離が生じる。電荷分離によって、図7に示すように、磁気セイル付近で最大50 V程度の静電ポテンシャルが誘導される。電子はそれを打ち消すように、磁気セイル中心へ引き寄せられるが、イオンは流れの運動エネルギーが1 keV程度であるため、比較的その影響は小さい。また、誘導磁場は、印加磁場に比べ十分小さく、流れ場に対する影響はほとんど無視できる程度であった。この場合、イオン粒子の総運動量変化から見積もった磁気セイルの推力は 10^{-3} mNのオーダー、一樣流動圧とコイル面積で無次元化した抗力係数は90程度となった。抗力係数が比較的大きな値をとるのは、磁気セイルの太陽風に

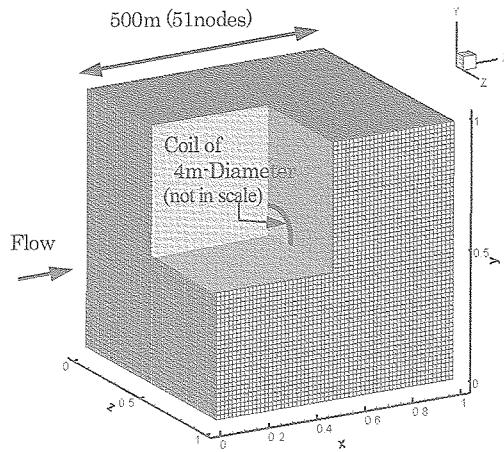


図4 計算格子.

表1 磁気セイル条件.

Diameter of Coil, m	4
Applied Current, kA / Turn	190
Magnetic Flux Density at Coil Center, T	0.06

表2 太陽風条件.

	Proton	Electron
Velocity, km/sec	400	
Number Density, $1/\text{cm}^3$	5	
Temperature, K	120,000	140,000
Thermal Velocity, km/sec	45	2061

対する実効的な大きさがコイル自体の大きさに比べ大きいためである。また、電子の総運動量変化についてもイオンと同じオーダーであった。これは、電子の一樣流動圧は、イオンに比べ3桁程度小さいものの、電子に対する影響領域がイオンに比べ1桁以上大きいためであると考えられる。また、誘導電流と印加磁場との $J \times B$ 力の積分から求めた推力についても、イオンの運動量変化から求めた推力と同じオーダーとなった。一方、前節の Zubrin の方法で簡易的に求めた推力は 0.1 mN のオーダーであった。つまり、推力を見積もる上での、実際の代表的なスケールは、Zubrin の方法で仮定した rmp より小さく、イオンの運動スケール程度であると考えられる。(詳細は Ref. [8], [9], [10] 参照)

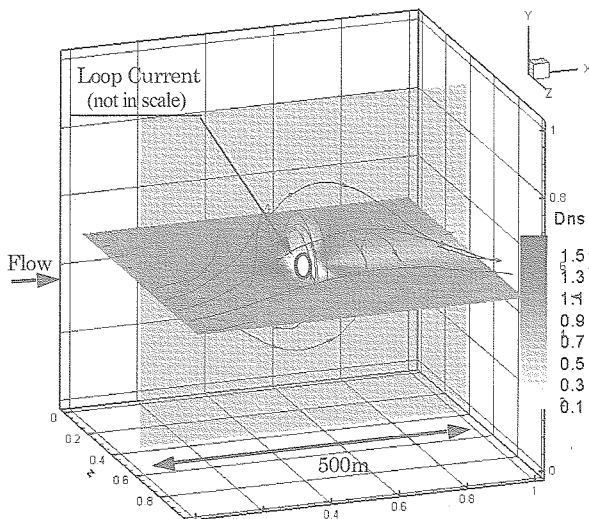


図5 電子数密度分布と流線(磁場印加).

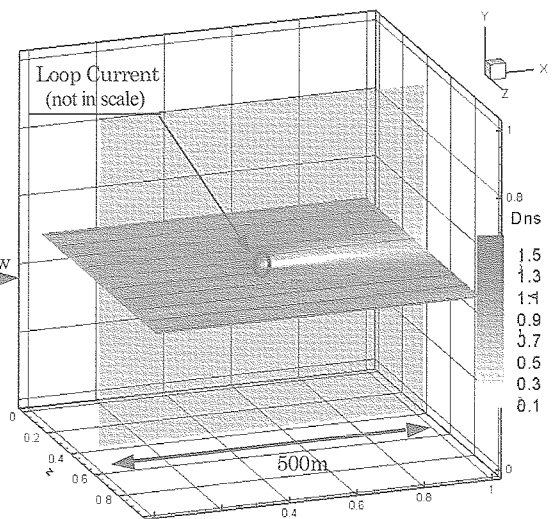


図6 陽子数密度分布と流線(磁場印加).

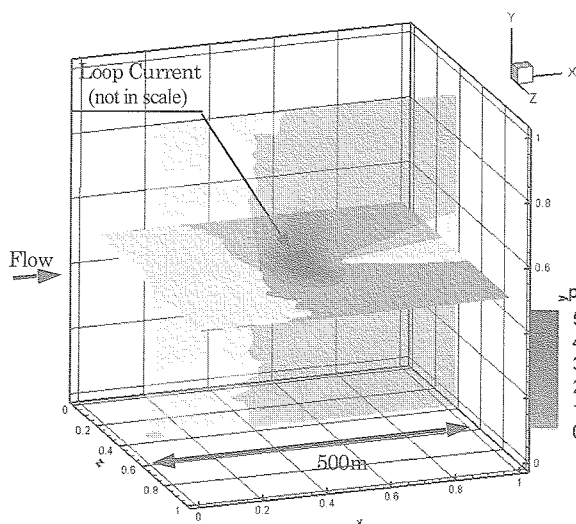


図7 静電ポテンシャル分布 (磁場印加).

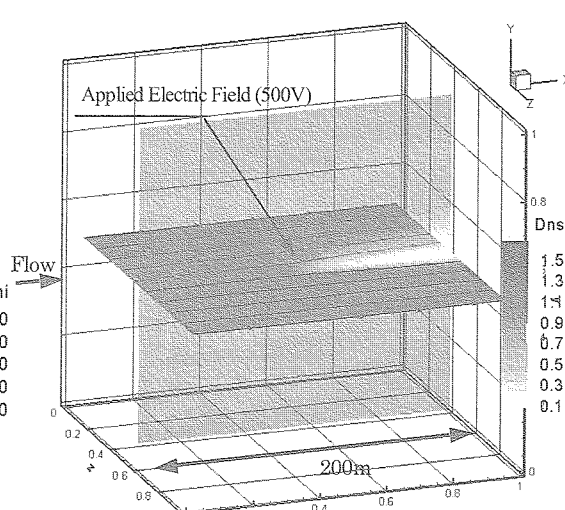


図8 陽子数密度分布と流線 (電場印加).

2.3. 電場印加の効果

磁気セイルの性能を向上させる方法のひとつとして、電場を印加した場合の効果調べた。図8に電場を印加した場合のイオンの数密度および流線を示す。ここでは簡単のため、計算領域は $200\text{ m} \times 200\text{ m} \times 200\text{ m}$ 、太陽風数密度は地球公転軌道付近の $1/10$ とし、磁場は印加せず常に計算領域中心に 500 V の電圧がかかっているとす。電子は熱速度が一樣流速に比べ速いため、印加電圧を打ち消すよう中心に引き寄せられる分布となる。一方、イオンは図8に示すように磁気セイル背後で図6に似た後流を形成している様子がわかる。イオンは電圧を印加した計算領域中心より上流では減速され、下流では加速されるが、磁場を印加した場合と同様にその軌道が曲げられることで流れ方向の運動量変化から推力が発生するものと考えられる。この条件下でのイオンの総運動量変化から求めた推力は、一樣流動圧とコイル面積で無次元化して 0.4 程度であった。これから、磁気セイルにおいて磁場だけでなく電場も印加することで、得られる推力が増加する可能性があることがわかる。

3. 光圧利用の可能性^[11]

ここでは、Sheldonらが提案した、帯電した微粒子を電磁気的作用によって衛星のまわりに捕捉し、光の運動量フラックスを受けて推進するセイリング推進について、荷電粒子の捕捉方法を簡単に検討する。

いま、理想的な状態として、衛星まわりの太陽光を受ける粒子の数密度は十分小さく、すべての粒子に一樣に光が当たる状態を考える。太陽光を反射する粒子として、半径 $0.1\ \mu\text{m}$ のシリカ粒子 (投影面積 $3 \times 10^{-14}\ \text{m}^2$ 、密度 $2\ \text{ton/m}^3$ 、反射率 50%) を仮定すると、粒子1個の質量は $8.4 \times 10^{-18}\ \text{kg}$ となり、地球公転軌道付近 (光圧 $\sim 4.5 \times 10^{-6}\ \text{Pa}$) で $1\ \text{N}$ の推力を得るためには、総粒子数 1.4×10^{19} 個、総質量 $116\ \text{kg}$ 程度が必要となる。粒子を探査機まわりに捕捉するための装置を $100\ \text{kg}$ とすると、推進システム重量は $216\ \text{kg}$ 、面密度で評価すると $1\ \text{g/m}^2$ 程度となる。現在のソーラーセイルでは、薄膜を支持するための構造重量を含め $10\ \text{g/m}^2$ 以上であるから、このコンセプトはソーラーセイルと比べ構造的に困難な膜面の展開が不要となるだけでなく、加速性能の向上やペイロードの増加も期待できることがわかる。これは、薄膜を微粒子に分解することで、すべての粒子に太陽光が当たり、効率が向上するためである。よって、簡単には粒子径は小さいほど性能は向上する。磁気セイルやプラズマセイルと比べると、太陽風に比べ3桁程度大きい太陽光の運動量フラックスを利用できるため、要求される有効磁場サイズの縮小が期待でき、必要な大きさの磁場を生成しやすくなる。

ここでは荷電粒子として特定のダストや分子を想定するのではなく、仮想的な質量と電荷を持った粒子を考える。荷電粒子の捕捉方法としては、円電流のミラー磁場を用いた最も簡単な方法を考え、まず単一荷電粒子の捕捉条件を検討して、粒子軌道解析による確認を行う。

円電流のつくる磁場を中心からの距離 r に対して $B = B_0 (r_0/r)^3$ と表す(B_0 :中心磁束密度, r_0 :円電流半径)。円電流中心からの距離 r における荷電粒子の磁場への捕捉条件は、粒子のサイクロトロン半径 r_c が系の代表長 r に比べ十分小さい場合($r_c \ll r$)と考えられる。仮に、代表長を円電流半径とし $r = r_0 = 10$ m, 円電流中心磁束密度 $B_0 = 10^{-4}$ T, 円電流中心からの距離 $r \sim 100 r_c$, 粒子速度 $v = 1$ m/secとすると、荷電粒子が捕捉されるための条件は、単位質量あたりの電荷が 10^5 C/kg程度以上となる。ここでは仮に、半径 $r_p = 10$ nm, (密度 ~ 2000 kg/m³), 質量 $m = 10^{-21}$ kg, 電荷 $q = 1000 e$ の荷電粒子を考える。この場合、荷電の粒子軌道は、地球まわりのVan Allen帯のそれと同じように磁力線に巻き付き、緯度方向に反復しながら経度方向にドリフトする。このような粒子軌道は、当然粒子の初期位置・速度によって大きく異なるものの、上の条件で荷電粒子が印加磁場まわりに捕捉されることが確認できた。この条件下で単位質量あたりの電荷量が 10^5 C/kgより小さい場合には、荷電粒子は磁場に捕捉されることなく円電流から離れていく軌道をとる。

粒子に一定方向の外力(光圧)が加わる場合は、捕捉条件として上の条件に加えLorentz力がその外力に比べ十分大きいことが必要となる。外力は簡単に、地球公転軌道付近での光圧と粒子断面積(粒子半径 ~ 10 nm)の積と仮定する。 $q/m = 10^5$ C/kgの場合の粒子軌道を図9に示す。図中の円は円電流サイズを示している。荷電粒子は円電流周囲に捕捉され、粒子軌道は外力を加えた方向に変形していることが確認できる。また、これより強い外力を加えた場合は、荷電粒子は磁場に捕捉されることはなく円電流から離れていく軌道をとる。

多数の荷電粒子を扱う場合も上と同様の捕捉条件が必要となるが、粒子速度に対応する粒子温度が導入される。粒子温度は熱速度が上の条件と同程度となるように設定し、電気的中性を保つため、極性のみが異なる2種類の荷電粒子を投入する。初期条件は、計算領域中心に一辺30 mの立方体を考え、その中に荷電粒子が一様に分布した状態とし、粒子法[9]により解析を行った。初期条件下におけるセルひとつあたりのサンプル粒子数は30程度である。図10は、初期条件から数サイクロトロン運動周期(0.1秒オーダー)経過後の円電流まわりの中心断面における粒子数密度分布を示したものである。円電流まわりに数密度の高い領域ができ、粒子が捕捉されている様子がわかる。

荷電粒子の捕捉条件についてまとめると、一種類の荷電粒子を磁場の印加によって捕捉する場合は、粒子にかかる磁場によるLorentz力が粒子慣性力や外力(光圧)、静電力に比べ十分大きいことが条件として必要となる。慣性力に対する条件により粒子電荷、質量、温度が制限され、外力に対する条件で粒子サイズが制限される。

粒子の捕捉を向上させる方法としては、ダストプラズマを用いプラズマを印加磁場で捕捉し太陽光を受けるダスト粒子はその静電力で閉じ込めることや、印加電磁場の配位などに対する改良等が考えられる。しかし、ある程度の粒子拡散も免れないと考えられる。この場合、荷電粒子は推力を得るための燃料と考えられ、その性能向上にはより十分長い捕捉時間を得るための何らかの工夫が必要であろう。また、今回の計算では仮想的な荷電粒子を想定して解析を行ったが、今後、分子からダストまでを含む様々な荷電粒子を扱うためには、今回の数値計算による解析を拡張することも重要である。

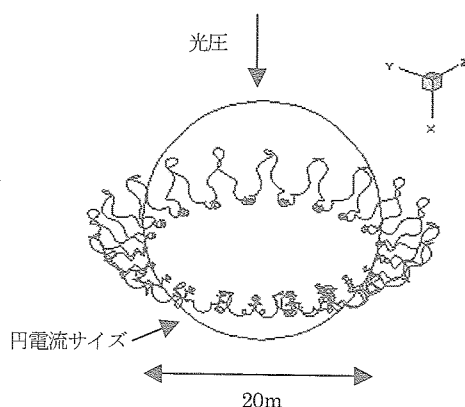


図9 光圧を受けた場合の捕捉された荷電粒子の軌道。

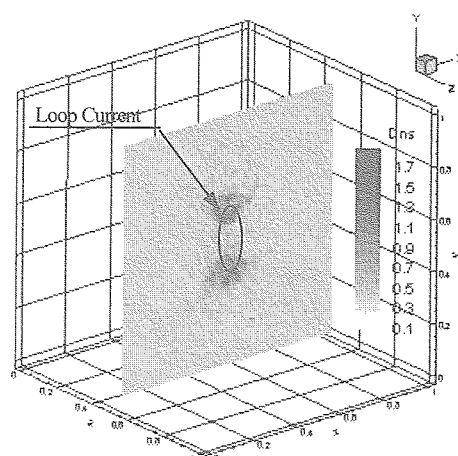


図10 円電流まわりの粒子数密度分布。

4. まとめ

4 mサイズの磁気セイルについて、Full PIC法で太陽風と電磁場の干渉解析を行い、推力の見積もりを行った。その結果、現象スケールとして粒子の運動スケール（影響領域サイズ）が支配的であることがわかった。電場を印加した場合についても解析を行い、磁気セイルの推力が増加する可能性があることを示した。

また、電荷を帯びた微粒子で構成される、光圧を利用した推進システムの可能性について検討した。システム重量的に大きなメリットをもつ推進コンセプトであるが、円電流のつくる磁場に対する荷電粒子捕捉の基本特性を調べた結果、その成否のカギは粒子の捕捉効率の向上にあり、十分な捕捉時間を得るためには何らかの新技術の導入が必要であることがわかった。

今後の課題は、現在の技術レベルで実現できる磁気セイルの技術実証機の検討と、そのスペックに即した推力評価解析である。

参考文献

- [1] Robert M. Zubrin and Dana G. Andrews, "Magnetic Sail and Interplanetary Travel", *Journal of Spacecraft and Rocket*, Vol.28, No.2, March-April, pp.197-203, 1991.
- [2] D. Andrews and R. Zubrin, "Progress in Magnetic Sails", AIAA Paper 90-2367, 1990.
- [3] R. M. Winglee, J. Slough, T. Ziemba and A. Goodson, "Mini-Magnetospheric Plasma Propulsion: Tapping the energy of the solar wind for spacecraft propulsion", *Journal of Geophysical Research*, Vol.105, No.A9, September, pp.21067-21077, 2000.
- [4] R. Sheldon, E. Thomas Jr., M. Abbas, D. Gallagher, M. Adrin and P. Craven, "Dynamic and Optical Characterization of Dusty Plasmas for Use as Solar Sails", *Space Technology and Applications International Forum-STAIF*, American Institute of Physics, 425, 2002.
- [5] Birdsall, C. K. and Langdon, A. B., *Plasma Physics via Computer Simulation*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1985.
- [6] ISTEJジャーナル編集委員会, "超伝導技術とその応用", 丸善, 1996.
- [7] Newbury, J. A., C.T. Russell, and J. L. Phillips, "Electron Temperature in the Solar Wind at 1AU", *EOS*

Transactions, Vol.77, No.47, Nov. 19, 1996, pp.471.

- [8] 秋田大輔, 鈴木宏二郎, “磁気セイルまわりの太陽風プラズマ流れに関する数値解析”, 第48回宇宙科学技術
連合講演会講演集, 2H08, 2004.
- [9] Daisuke AKITA and Kojiro SUZUKI, "Kinetic Analysis on Plasma Flow of Solar Wind Around Magnetic Sail",
AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, AIAA 2004-4788, Toronto, Canada, June, 2005.
- [10] Daisuke AKITA and Kojiro SUZUKI, "Numerical Analysis on Characteristic Features of Solar Wind Flow around
Magnetic Sail", *Journal of Space Technology and Science*, Vol.20, No.2, pp43-53, 2005.
- [11] 秋田大輔, 鈴木宏二郎, “磁気セイルにおける光圧利用の可能性について”, 平成16年度宇宙航行の力学シン
ポジウム講演集, pp. 1-4, 2004.
- [12] G. Khazanov, P. Delemere, K. Kabin, T. J. Linde and E. Krivorutsky, "Fundamentals of the Plasma Sail Concept:
MHD and Kinetic Studies", AIAA 2003-5225.
- [13] K. Fujita, I. Funaki, H. Ogawa, H. Yamakawa, "Numerical Investigation of Acceleration Processes in
MgnetoPlasmaSail", ISTS 2004-o-3-07v, *24th International Symposium of Space Technology and Science*,
Miyazaki, Japan, 2004.
- [14] D. Akita, K. Suzuki, "Preliminary Study on Magnetic Sail for Escape Mission from the Solar System", ISTS 2004-
b-47, *24th International Symposium of Space Technology and Science*, Miyazaki, Japan, 2004.
- [15] N. Omid and H. Karimabadi, "Kinetic Simulation and Modeling of Plasma Sail," AIAA Paper 2003-5226, 2003.