# 粒子・熱制御とプラズマ対向材料研究の進展
# 5．磁場構造と輸送


| メタデータ | 言語: jpn |
| --- | --- |
| | 出版者: |
| | 公開日: 2010-12-13 |
| | キーワード (Ja): |
| | キーワード (En): |
| | 作成者: 伊藤，公孝 |
| | メールアドレス: |
| | 所属: |
| URL | http://hdl.handle.net/10655/3918 |

小特集
粒子・熱制御とプラズマ対向材料研究の進展

# 5. 磁場構造と輸送

伊 藤 公 孝
(核融合科学研究所)

# Magnetic Structure and Transport

ITOH Kimitaka
*National Institute for Fusion Science, Toki 509-5292, Japan*
(Received 14 November 2000)

**Abstract**

Investigations of magnetic field structure and transport have progressed via TEXTOR collaborations. This research covers the change in magnetic topology due to island formation on occasion of a sawtooth crash, impact of global current profile on turbulent transport and the bifurcation nature of confinement. This area of research requires, on one hand, the precise measurement of the magnetic field, which is a unique capability of TEXTOR experiments. At the same time, an advanced theory of turbulent transport and transitions is required and is supplied by Japanese contributions. A general description of the collaboration is provided. Then a typical outcome is explained, taking the case of the formation of a thin current layer at the onset of sawtooth crash as an example.

**Keywords:**

magnetic structure, anomalous transport, transport barrier, bifurcation, sawtooth crash, trigger phenomena, current sheet, radial electric field

## 5.1 始めに

「粒子・熱制御」を対象とする研究計画では，プラズマの粒子・熱の輸送の理解が根本的な要素である．

プラズマの粒子・熱の輸送現象を考えると，準定常的な現象に加えて，LH遷移に代表されるような改善閉じ込め現象への遷移，さらにはディスラプションを始めとする崩壊現象など，様々な時定数や空間構造をもったプラズマの流れが観測されている．粒子・熱制御の研究では，そうしたプラズマの輸送現象を理解し，それらが外部から制御できるパラメータといかに関連しているか解明する努力が不可欠である．

ここで解説する「磁場構造と輸送」に関するTEXTOR共同研究は1994年より開始されたが，それは当時の理論的な展開[1]に解説されているように，磁場構造と改善閉じ込めが関連するとの理論的指摘に基づき始められたものである．磁場構造と輸送の問題は，その後内部輸送障壁と関連することが実験的にも検証され，[2]に最近の展開を紹介したように現在広く研究が展開している．

本共同研究の課題は，準定常的な場合を始めとし崩壊現象など急激な変化まで含め，磁場構造と輸送との相互関係を幅広く研究することである．TEXTOR側が実験研究を担当し，日本側が主として理論モデルや理論からの予言等，実験解析への指針を提供し，相互に啓発しあって研究をまとめようというものである．TEXTOR実験の

*author's e-mail: itoh@nifs.ac.jp*

特徴，すなわち，

(1)高精度の電流分布計測に実積がある

(2)ペレット実験やI-modeなど改善閉じ込めモードがみつかっている

ことを考え，一方，日本で

(1)自己維持乱流の描像にたつ輸送理論やカタストロフィ理論

をすすめていることから，この共同研究は両者に相補うものである．当初は，ペレット共同研究の一貫としてスタートを切り，共同研究に着手した．

主たる研究参加者は　伊藤公孝（核融合研），伊藤早苗，矢木雅敏（九大），福山　淳（共同研究開始当時岡山大），佐藤浩之助（共同研究開始当時核融合研），野田信明（核融合研），H. Soltwisch，K.H. Finken，H.R. Koslowski，R.R. Weynants（Julich側）他である．

## 5.2　研究概要

### 5.2.1　鋸歯状崩壊の物理

TEXTORの高時間分解マイクロ波干渉計がデータを得，水平方向のチャンネルを用いたファラディ回転角計測により，崩壊直前の磁気軸の螺旋変形の変位がプラズマ研究史上初めて測られた．その結果，次のことがわかった．

(1)OHプラズマの鋸歯状崩壊では，磁気軸の螺旋変形振幅は1 cm程度に止まり，$q=1$の有理面の小半径が$r=15-17$ cmであるのに比べて十分小さく，崩壊中に磁気軸は$q=1$有理面に達していないことがはっきりした．

(2)NBIやICRFの追加熱を行うと，数cm程度の変形が突発することが認められた（現在のところ，磁気軸が有理面に達しているか否か，まだはっきり結論できない）．これらの発見は，重要な意義を持ち，様々な理論モデルの当否を決めるものである．

鋸歯状崩壊が突然発生することをmagnetic triggerの問題と呼ぶが，それに解決を与えるモデルとして[3]が提案されている．このモデルでは磁気軸が$q=1$有理面に達しなくとも崩壊が生じることを説明している．

この観測にあわせて，崩壊時に，局所的なトロイダル電流層が形成されることも観測された．その理論モデルを構成した[4]のでその詳細を次の節に述べる．

### 5.2.2　輸送の物理

輸送に関する物理の研究も着実に進歩した．一つの課題として，従来提唱している電流拡散型バルーニングモード乱流による輸送モデル[1]が，OHプラズマを説明しうるか否か興味深い問題がある．このモデルでは熱拡散係数が

$$\chi = F(s,\alpha)\,q^2(-R\beta')^{3/2}\left(\frac{c}{\omega_{\rm p}}\right)^2\frac{v_{\rm A}}{R} \qquad (1)$$

という式で与えられる．ここで$q^2(-R\beta')^{3/2}$という依存性がL-modeに見られる閉じ込め時間のpower degradationと電流依存性の源である．最初の係数$F(s,\alpha)$は磁気シアやShafranov-shiftの効果を示し，弱・負磁気シアでは輸送係数が低下する．この機構によって高ポロイダルベータプラズマや逆磁気シアでの内部輸送障壁形成が理論的に提示された[1]．高ポロイダルベータプラズマでは，磁気シアの変化はブートストラップ電流に起因するので，輸送と磁場構造の結合する自律的な状態が実現することになる．

OH加熱の場合，加熱分布はプラズマ電流の分布で定まり，また，加熱入力自体がプラズマ温度に依存することから，同じようにプラズマの自律性が顕著になる．自律的閉じ込め構造の解析として興味深い．輸送理論では，OH加熱の閉じ込めと電流分布変化による改善閉じ込めとの双方を説明できる必要がある．

解析を進めた結果，(1)電流拡散型バルーニングモードによるエネルギー輸送，(2)MHD活動による中心$q$値を拘束する機構，(3)プラズマ・壁相互作用を通じて不純物濃度とプラズマ密度が相関を持つこと，の3つの機構が組み合わさり，エネルギー閉じ込め時間が密度にほぼ比例するという“アルカトール則”が現れることが示された[5]．このような理論的進展を説明しつつ，TEXTOR実験の結果との比較を論じた．

TEXTORでは，不純物入射を行った場合の改善閉じ込め（RI-modeと呼ばれる）を研究している．ネオンやシリコンを添加し，周辺での放射損失が増えた場合，密度分布が中心集中し，閉じ込め時間が長くなることを見出している．そのモードに対し，実験結果を詳細に検討した．輸送解析コードにより時間発展を観察した．輸送係数（実効的熱伝導係数）は，プラズマ分布の各点で低下するが，時間分解（約10 ms）からすると，空間的にどの位置で改善状態が発生するか決定は困難である．それに関連し，中心付近でも，密度の集中（ピンチ）が見られ，その始まりの時刻は，ネオンの添加の時刻に近いことを確認した．今後とも研究の進展を見守りたい．

日本側研究グループでは，理論的描像を総合的に展開しているが，TEXTORにおける様々な観測とあわせ，研究を深めることが可能になっている．

また，TEXTORでWeynantsが中心になって行ってい

るバイアスプローブの実験で，表面近傍の電場構造が測られている．我々の理論結果との比較分析を行っている．実験データについて議論を行い，実験的に因果関係を確定する方法を教授した．その結果は先方が発表した論文に盛り込まれた．TEXTORのバイアスプローブを用いた実験では，表面に局所的に集中した電場が形成されることが示された．そのモデル理論を作り，径電場にソリトン型の構造ができること，そしてそれが分岐することを示した[6]．磁場構造と輸送の問題からさらに展開し，電磁場構造を包括的に捕らえる共同研究を行った．

## 5.3 内部崩壊時のシート状電流の発生機構について

TEXTORでは，詳細なsawtooth振動の崩壊直後に，inversion radius近傍に局所的な電流層が生まれることが観測された[7-9]．文献[9]に基づき，その電流の構造をFig. 1に示す（ポロイダル方向および小半径方向に局在したリボン状のトロイダル電流が，崩壊直後の短時間観測されている）．TEXTOR共同研究によって，そのモデルが考案された[4]のでここで紹介する．

### 5.3.1 モデル

Sawtooth振動においては，中心部の圧力崩壊現象が起きた直後も磁気面の破壊はプラズマ中央部に止まり，ある磁気面より外では磁気面は閉じた構造を保っていると考えられる．その境目となる磁気面の小半径を$r_{\mathrm{KAM}}$とする．その磁気面より内側では，磁気面破壊により輸送係数が大きくなっているので，$r_{\mathrm{KAM}}$の外側近傍にある厚み$\Delta$をもって温度や圧力の急勾配が形成される（Fig. 2参照）．崩壊が発生し中心で圧力が平坦化するまでの短い時間$\tau_{\mathrm{cr}}$と輸送係数$\chi_{\mathrm{L}}$を用い，急勾配層の厚み$\Delta$は

$$\Delta \simeq \sqrt{\chi_{\mathrm{L}}\tau_{\mathrm{cr}}} \tag{2}$$

と与えられる．理論[10]にあるように，M-mode transitionによって輸送係数が$\chi_{\mathrm{M}}$まで急上昇するために崩壊が誘起されるとすると，厚みは

$$\frac{\Delta}{r_{\mathrm{inv}}} \simeq \sqrt{\frac{\chi_{\mathrm{L}}}{\chi_{\mathrm{M}}}} \tag{3}$$

と評価される．ここで$r_{\mathrm{inv}}$はinversion radius（普通$r_{\mathrm{KAM}} \simeq \sqrt{2}r_{\mathrm{inv}}$と考えられる）であり，$\tau_{\mathrm{cr}} = r_{\mathrm{inv}}^2/\chi_{\mathrm{M}}$を満たす．

急勾配層での圧力勾配は近似的に

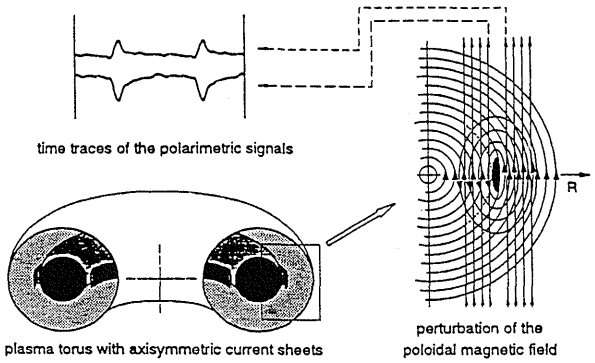


Fig. 1　Plasma torus with axisymmetric toroidal current sheets (quoted from [9]). The outer sheet carries the current in the same direction as the main plasma current. The inner sheet current directs to the opposite.

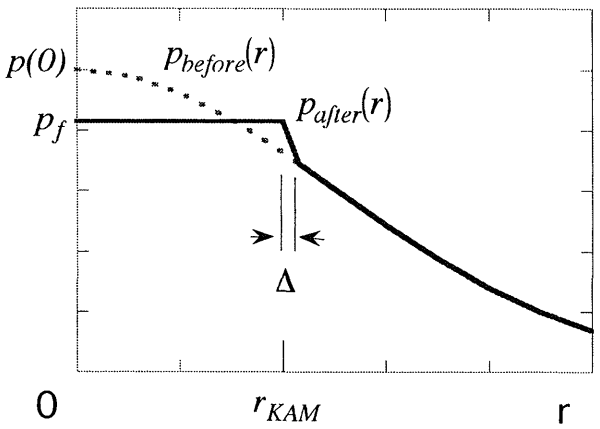


Fig. 2　Pressure profile after the crash (solid line) and before the crash (dashed line).

$$\left|\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}r}\right| = \frac{P_{\mathrm{after}}(r_{\mathrm{KAM}}) - P_{\mathrm{after}}(r_{\mathrm{KAM}}+\Delta)}{\Delta} \tag{4}$$

で評価される．崩壊発生前の圧力分布が中心付近でパラボラ分布に近ければ，

$$\left|\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}r}\right| = \frac{p(0)-p_{\mathrm{f}}}{\Delta} \text{ または } \left|\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}r}\right| \simeq \frac{p(0)-p_{\mathrm{f}}}{r_{\mathrm{inv}}}\sqrt{\frac{\chi_{\mathrm{M}}}{\chi_{\mathrm{L}}}} \tag{5}$$

となる．

圧力勾配によって二次電流（Pfirsch-Schlüter current）

$$J_{\parallel} = -(1+2q)\frac{\nabla p}{B}\cos\theta \tag{6}$$

が流れる．崩壊後生まれた局所的な急な圧力勾配(5)に

よる電流は

$$J_{\parallel}=(1+2q)\sqrt{\frac{\chi_{\mathrm{M}}}{\chi_{\mathrm{L}}}}\frac{p(0)-p_{\mathrm{f}}}{Br_1}\cos\theta \qquad (7)$$

で与えられる．

この電流は，トーラスの内側外側で流れる向きが逆である．トーラス外側での電流は，$-\pi/2<\theta<\pi/2$ と $r_{\mathrm{KAM}}<r<r_{\mathrm{KAM}}+\Delta$ を満たす狭いリボン状の範囲に流れるので，その領域で電流 $I_{\mathrm{s}}=\iint J_{\parallel}\mathrm{d}\theta r\mathrm{d}r$ を求めると

$$I_{\mathrm{s}}=2(1+2q)r_{\mathrm{KAM}}\frac{p(0)-p_{\mathrm{f}}}{B} \qquad (8)$$

という結果を得る．この領域では $q\sim1$ なので，

$$I_{\mathrm{s}}\simeq 6r_{\mathrm{KAM}}\frac{p(0)-p_{\mathrm{f}}}{B} \qquad (9)$$

となる．全体の電流 $I_{\mathrm{p}}\simeq 2\pi a^2B/q(a)\mu_0R$ と比較すると

$$\frac{I_{\mathrm{s}}}{I_{\mathrm{p}}}\simeq\frac{3Rr_{\mathrm{KAM}}}{2\pi a^2}q(a)\frac{p(0)-p_{\mathrm{f}}}{p(0)}\beta(0) \qquad (10)$$

となる．この値は観測可能なレベルである．この(8)－(10)の結果は，崩壊時のM-mode状態の輸送係数や，L－modeでの輸送係数のモデル，さらには電流層の厚みによらないことを注意しておく．

以上の結果から，[7-9]のような状況では，局所的な電流が観測されることが予言できる．

#### 5.3.2 比較

このモデルによって予言される局所的な電流層と実験との比較を行った．

極性：ここで述べられた電流は，トーラス外側ではトロイダルプラズマ電流と同じ向きを向いている（それは実験の観測に一致）．

電流層の厚み：$\tau_{\mathrm{cr}}\simeq100\,\mu\mathrm{s}$：，$\chi_{\mathrm{L}}\simeq2\,\mathrm{m^2/s}$ という値を使うと $\Delta\simeq1.4\,\mathrm{cm}$ となる（実験での空間分解能では，数cm以下という評価であり，その精度以上の測定はできていない．矛盾はしていない）．

電流の大きさ：$n_{\mathrm{e}}(0)=5\times10^{19}\,\mathrm{m^{-3}}$，$T_{\mathrm{e}}=1\,\mathrm{keV}$，$B=2\,\mathrm{T}$，$R/a=3$，$a/r_{\mathrm{inv}}=3$，$q(a)=3$，$\beta(0)\simeq0.8\%$ という代表的な値に対し，$(p(0)-p_{\mathrm{f}})/p(0)=0.1$ という大きさの崩壊を考えてみよう．その場合，$I_{\mathrm{s}}/I_{\mathrm{p}}\sim0.2\%$ であり，1 kAのオーダの電流値が予言される（実験では粗い評価として $I_{\mathrm{s}}\simeq3\,\mathrm{kA}$ 程度である）．

時間変動：$\chi_{\mathrm{L}}\simeq2\,\mathrm{m^2/s}$ 程度の輸送係数のもとでは，電流層は1 ms程度で消滅する（Fig. 3を参照）．

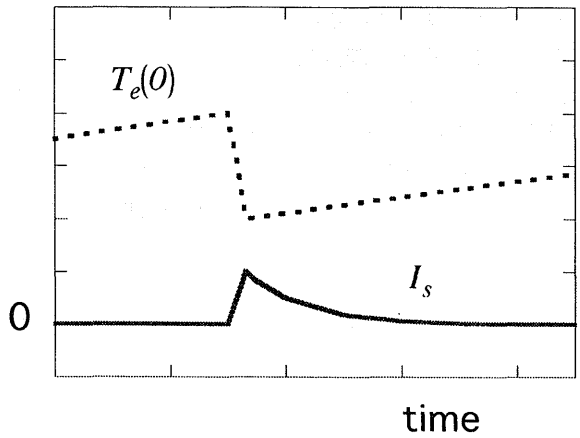


Fig. 3　Schematic drawing for time evolution of the sheet current.

この理論モデルは実験の観測精度の範囲では棄却されない．sawtooth崩壊時の電流層形成の機構として有効なモデルであると考えられる．

### 5.4 終わりに

「磁場構造と輸送」に関する課題についてTEXTORとの共同研究を進めることができたが，計画時の予想以上に研究のインパクトを得ることができたと言ってよかろう．特に，TEXTORグループが長期間準備してきた水平方向ファラディ回転角計測がまさに結果を出す時点にあったことは幸運であった．磁場構造と輸送という広い研究課題について，時機に応じて焦点を絞った共同作業を行いつつ，広範な展開が得られたことは，この共同研究に参加した研究者の創意の賜物である．さらに，この共同研究を通じて，日本・TEXTOR双方の共同研究者に理解と敬意が生まれたことも，この共同研究の価値ある成果であることを強調したい．

これらの共同研究の実施にあたっては，日本－TEXTOR協力の事業の一環であるとともに，展開や論文の取りまとめにおいて，科学研究費や核融合科学研究所共同研究等の援助を受けた．黒田教授（当時）とWolf教授他，ご支援いただいた各位に感謝します．また，本報告作成にあたっては，伊藤早苗，矢木雅敏（九大），福山　淳（京大）各氏との議論に負うところが多いことを感謝いたします．

## 参考文献

[1] 伊藤公孝，伊藤早苗，矢木雅敏，福山　淳，安積正史：プラズマ・核融合学会誌 **69**, 1524 (1993).
[2] 伊藤公孝：プラズマ核融合学会誌 **73**, 647 (1997).

[3] A.J. Lichtenberg, K. Itoh, S.-I. Itoh and A. Fukuyama, Nucl. Fusion **32**, 495 (1992); A. Fukuyama, K. Itoh, S.-I. Itoh and M. Yagi, Nucl. Fusion **40**, 685 (2000).
[4] K. Itoh, S.-I. Itoh, H. Soltwisch and H.R. Koslowski, Plasma Phys. Control. Fusion **39**, 1033 (1997).
[5] M. Yagi, A. Fukuyama, S.-I. Itoh and K. Itoh, J. Phys. Soc. Jpn. **65**, 11 (1996).
[6] K. Itoh, S.-I. Itoh, M. Yagi and A. Fukuyama, Phys. Plasmas **5**, 4121 (1998).
[7] H. Soltwisch, G. Fuchs, H.R. Koslowski, J. Schlueter and G. Waidmann, *Proc. 18th Eur. Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics,* Berlin, Europhys. Conf. Abstr., (Eur. Phys. Soc. Geneva 1991) Vol.15C, Part-II, 17.
[8] H. Soltwisch, H.R. Koslowski, Plasma Phys. Control. Fusion **37**, 667 (1995).
[9] H. Soltwisch *Contributions to High Temperature Plasma Physics* ed. K. H. Spatschek and J. Uhlenbusch (Akademie Verlag, Berlin 1994) p.471.
[10] K. Itoh, S.-I. Itoh and A. Fukuyama, Plasma Phys. Control. Fusion **37**, 1287 (1995).