



小特集 マルチスケールでのプラズマ・壁相互作用の理解の現状

3. メソスケールのプラズマ・壁相互作用—ダストの振る舞い—

芦川 直子

核融合科学研究所

(原稿受付：2008年8月28日)

現在、核融合炉におけるダスト研究が盛んになりつつあるのは、ITERにおいて炉内のトリチウム蓄積許容量が設定されており、ダストへの蓄積量評価が重要であるためである。しかし、プラズマ・壁相互作用の分野ではダストという名称が国際学会でトピックスとして挙げられるようになる前から堆積物の一部としての分析は行われており、また損耗した物質がどのように移動するのかという古くて新しい疑問に対しても、今日のダスト研究は大きく寄与しようとしている。これらトリチウム蓄積と炉内物質輸送双方において、プラズマ対向壁でのマクロ的なバルク材としての表面変質変化の結果として発生し、かつナノスケール以下の原子レベルでの損傷や化学的・物理的反応の結果として生み出されるメソスケールとしてのダストについて取り上げる。

Keywords:

dust, deposition, erosion, tritium inventory, ITER, plasma-facing material

3.1 はじめに

プラズマ中のダストに関する研究は、主に宇宙プラズマやプロセスプラズマで古くから行われており、微粒子プラズマとも呼ばれている[1]。宇宙空間そのものがプラズマで構成されていることから、宇宙創造のストーリーと微粒子メカニズムの解明は無関係ではない。

プラズマプロセス分野では、1980年代後半から半導体製造の分野でミクロン以下の不純物微粒子除去を目的とした研究が進められていた。1986年には、プラズマ中の微粒子はクーロン格子を作ることが予想され、1994年になり条件がそろえばプラズマ中で微粒子が規則的な構造をとるといふ小クーロン結晶が発見された。これにより、帯電した微粒子とプラズマの相互作用に関するモデルが構築された。

物性物理の分野では、固体から気体状態へとスパッタリングによって転移する変化、もしくは気体から固体へと凝縮する変化過程の一段階として1980年代頃からクラスタ状態が着目されている[2]。まさにこれはプラズマ・壁相互作用のキーワードでの損耗・堆積過程であり、このマイクロクラスタとして着目されているサイズは1 nm程度(原子数として 10^2 程度)で、後に述べるこれまでに検出されたダストの下限値近くに位置する。マイクロクラスタの着目すべき点は、構造が構成原子数もしくは分子数に依存して多様な形をとることで、この変化に対応した内部エネルギーの振動は同じ物質でも10 nm前後のサイズ(原子数として 10^3 から 10^4 オーダー)である微粒子状態の単位構成原子数あたりの平均値に比べて著しく大きい。このような中間領域での興味深い物性が、これまでに様々なダストが検出されている理由であると考えられる。

磁場閉じ込めプラズマ装置では、表面分析法を用いた組成および粒径分布に関する研究が進められた。I. Ali Khanによる金属ダストの報告(1978)[3]、K. NariharaによるJIPPT-IIUにおけるトムソン散乱計測装置による観測結果(1997)[4]、J. WinterによるTEXTORでの収集ダストおよびレーザ散乱による分布計測(1999)[5]と報告が行われてきた。2001年にはM. RubelによってExtrap T2 RPF装置とTEXTOR Tokamak装置での採取ダスト分析およびカメラ計測の結果が報告された[6]。その後、P. Sharpeらアイダホ国立研究所のグループが真空容器内へ大気開放後に入り、メンブレンフィルタ上にダストを付着させるために背面を真空ポンプで排気する手法によるダスト採取を複数の装置で実施し、統計的な報告を行った[7]。ITERにおいて炉内トリチウム蓄積量の増加が許容プラズマ放電回数に与える影響を無視できない[8]ことからダストの議論は活発になり、P. Sharpeらは単位面積あたりのダスト堆積量を装置間で比較するとともに、ITERでのプラズマ運転上の問題として、放射化物としてのダストに対する蓄積過程のモニターと除去方法の必要性を明記した。

ITERでは炉内構造物へのトリチウム蓄積許容量の最大値が2008年の時点で700 gと設定されており、それ以下での運転が求められている。モデリングにより蓄積速度の試算が行われているが、例えば2 g/pulseの場合、180ショット程度で350 g(注；この当時の蓄積許容値は350 gであった)に到達する[9]。そのため、炭化水素の発生量の軽減を目的とし、ダイバータ部の材料をすべてタンゲステン被覆材に変更する案もある。また最もダストが蓄積しやすいリモートエリアの領域を減らすため、ダイバータ部のドーム

構造の変更に関する議論も行われた。あわせて、プラズマ運転期間中のダスト除去方法の開発も検討課題であり、炉内ダストの振る舞いがITERの設計に大きく影響を及ぼしている。

そもそも、ダストとは何かというところにも話題を触れたい。磁場閉じ込めプラズマ装置の真空容器に設置された構造材、対向壁材、その他装置から発生した微細な物質で、かつ先の固体表面から完全に剥離したものを指す。古くからダイバータ板上の堆積物の分析は様々な装置で行われており[10-11]、ダストはこれらの分析対象内にも含まれていた[8]。つまり堆積層とダストの双方が堆積物であると考えられ、例えば昇温脱離ガス分析(TDS)による結果は堆積物全体のガス吸蔵量を評価していることになる。しかし、炉内トリチウム蓄積量の評価を考えると、ダスト粒子と堆積層それぞれの構造と表面積の違いにより単位質量あたりのガス吸蔵量に差が生じると考えられ、また再移動が容易であるという観点から、近年ITER等では堆積層とダストを区別する傾向にある。サイズとしてはnmオーダーからミクロンオーダーが一般的で、現在のところ表面分析による下限値は透過型電子顕微鏡(TEM)の分解能に依存している。核融合プラズマの分野ではダスト、デブリ(人工衛星から発生したゴミを指すスペースデブリと同じ発想か)、装置によってはUFOという表現さえあるが同じものを示していた。近年ITERでのトリチウム蓄積の問題が深刻になってからは、Dustという言葉が立派なキーワードの一つとして広く認知されるようになったが、議論される目的によって何をダストとして扱うかという点においての曖昧さはまだ残っている。

ダストと呼ばれているものにはどのようなものがあるだろうか。発生源として考えられているのは一般的なダイバータ部や第一壁におけるプラズマとの相互作用による損耗、熱負荷による溶融、その他特定の機器トラブルによる破片やコーティング膜の剥離まで含まれる。これらは、次章以降に示すように炉内で捕集されることで、結果的に発生し移動した後の帰着状態の場所・形状を確認することができる。多くの場合、発生箇所とは異なる所に堆積したと考えているが、まれに発生箇所と帰着箇所が同じ領域(同じ構造物内)であることもある。

ただし、近年ダストの議論で着目されているのはトリチウム蓄積の問題から炭素、タングステン、ベリリウムなどのITERで用いられる限られた対向壁材料であり、その堆積箇所、化学結合を含む構造状態と堆積量である。

3.2 表面分析法によるダスト解析

大気解放後に実施される真空容器内ダスト採取について述べる。これはメンブレンフィルタを設置したホルダーを容器内に持ち込み、フィルタの背面を真空ポンプで排気しながらメンブレンフィルタ上へのダスト吸着を促す方法である。日本でも核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)[12]、日本原子力研究機構のJT-60U[13]、九州大学のTRIAM-1M[14]においてこの手法による採取が実施された。その一例を図1, 2に示す。TRIAM-1Mでのダス

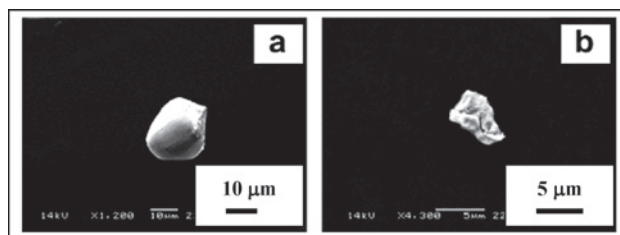


図1 TRIAM-1Mで大気解放後に採取されたダストのSEM像。(a)球形状、(b)フレーク形状[14]。

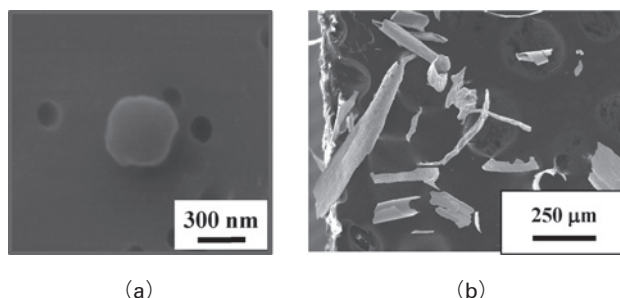


図2 LHDで大気開放後に採取されたダストのSEM像。(a)球形状の炭素ダスト、(b)フレーク形状の金属ダスト。

ト組成は多くの場合リミターまたはダイバータに起因したモリブデンであり、一部のダストは真空容器に起因したステンレス材であった。走査型電子顕微鏡(SEM)による表面分析の結果から、採取された90%のダストは1-5ミクロンで、10ミクロン以上は図1(a)に示すような球形状、10ミクロン以下は図1(b)に示すフレーク形状であった。一方、LHDのプラズマ対向壁は第一壁にステンレス材、ダイバータ板に黒鉛が用いられているため、これら2種類の組成によるダストが図2のように検出される。(a)は炭素ダストで球形であり、(b)は金属ダスト(主な元素は鉄)でフレーク形状である。2005年以降に実施した最近の採取ダストの結果からは、炭素ダストは単体の球形、もしくは球が複数重合している形態をしており、金属系ダストでは異形状をしていることが報告された。また粒径が1 μm以下では炭素が支配的であり、1 μm以上では金属が支配的であった。これらダストの表面分析はこれまで主にSEMが用いられていたが、TEMを併用することによってナノオーダーのダスト分析を可能とした。その結果、これまで実機で採取され分析されたダスト径として、例えばJT-60Uで100 nm - 40 μm、NSTXで200 nm - 50 μmと報告されているが、LHDでは8 nm - 10 μmと微小なダストが観測されており、その個数も多いことが測定されている。将来の炉内トリチウム蓄積量の評価を考えた際、このような微小ダスト量の評価も重要になる可能性もある。それぞれ位置依存性を比較するために複数箇所での採取し、それらの採取面積を一定として行われた。たとえば、LHDの平均ダスト数密度は40.5 mg/m²であり、JT-60Uでは37.4 mg/m²と報告されている。また、これらに対向壁表面積上に平均してダストが存在した場合、トラス全体で推測されるダスト量はそれぞれLHDの表面積を400 m²とした場合16.2 g、JT-60Uで200 m²とした場合7.5 gと見積もられている。ただし、

実際には位置依存性があることがよく知られている。図3はJT-60Uで採取された単位面積あたりに採取されたダスト質量を示しており、それぞれプラズマ対向部、リモートエリア部、およびポート部とに分け、さらにポロイダル依存性を明らかにするため上部、赤道面部、下部とに分けている。閉ダイバータ構造を持つトカマク装置では、直接プラズマが曝露しないリモートエリア部へのダスト堆積が顕著であり、これがITERで議論されているように従来の壁コンディショニングによるトリチウム除去をより難しくしている一因である。これに対して、開ダイバータ構造であるLHDではポロイダル依存性、位置依存性ともに少ないことが図4よりわかる。2005年以降の採取でもこの傾向は変わらず、JT-60Uのバッフル板下で採取されたような、ダストが蓄積しやすい場所はこれまで見つかっていない。

ダストの発生メカニズムの可能性としては、主放電、グローなどのコンディショニング放電等による物理的・化学的スパッタリング、ブリストアの破裂片、ディスラプション現象、ELM現象、アーキングなどの溶融片などが考えられている。これらの研究はさまざまな模擬試験装置で行われており[15など]、気相反応を経て生成されたと考えられる数十nm—1 μ m球状ダストやそれらが重合したタイプの

ダストの生成は炭素材等を用いて実施され再現性も良い。

しかし、対向材に堆積したダストがどのようなものであったかを分析することは容易であるが、実は発生そのものをきちんと計測できた例は時間スケールが限られていることもあり大変少ない。ここで注意したいのは、比較的観測例の多い、近い将来ダストになりそうだと想像される堆積層の一部にある（剥がれてはいないが）剥離しそうな片の観測と、剥離していくダスト現象とは異なる時刻の分析・計測であるということである。

3.3 ダストの実時間計測

ITERでは、プラズマ実験期間中にいかに正確な蓄積量を実時間で測定するかが課題となっている。ダスト関連の実時間計測法としては、YAGレーザーによるミー／レイリー散乱測定法と高速カメラによる2次元像計測が挙げられる。DIII-Dにおける散乱光によるダスト計測は、トムソン散乱計測用のYAGレーザーを利用しており、ある時刻に一つの空間チャンネルのみでレイリー散乱信号のカウンタ値が上昇した場合、ダストによる信号変化とみなされる。この計測の特徴はカメラ計測に比べるとダスト粒子径に対する感度がよく直径50nm以上のダストが検出可能であり、かつ場所の特定が実時間でできることである。

高速カメラによる移動ダストの計測では、時間分解能がmsオーダーの可視もしくは赤外領域の高速カメラが使用されるようになったことから、ダスト粒子の移動を比較的容易に観測できるようになった。これまで可視カメラによる計測ではTEXTOR, NSTX, LHD, JT-60U, Tore Spura, TRIAM-1M等で行われている。LHDでは3–5 μ m領域の赤外線カメラによる計測も行われており、その観測例を図5に示す。それぞれ円内にある点がダストであり、紙面上(a)から(b)へ移動している。Extrap T2 RPF装置では1.04ミクロン領域のフィルターを用いての計測が行われた[6]。

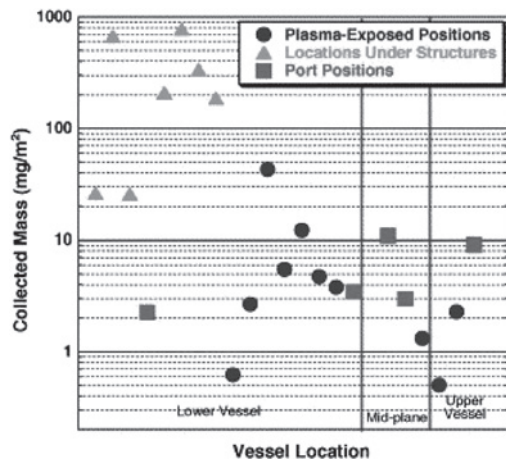


図3 JT-60Uにおいて単位面積あたりに採取されたダスト[13]。

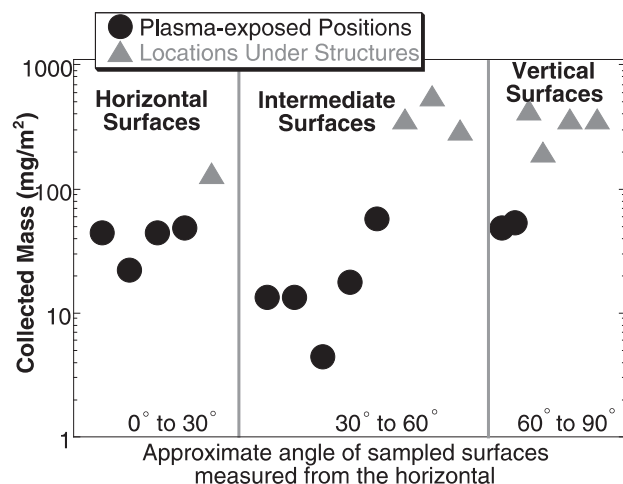


図4 LHDにおいて単位面積あたりに採取されたダスト質量[12]。

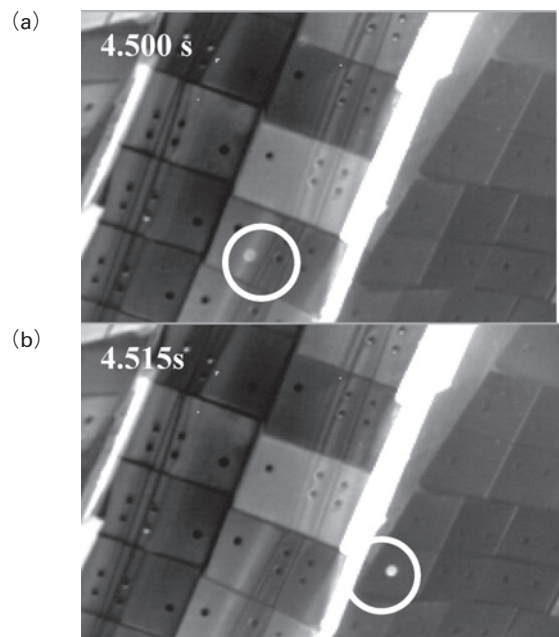


図5 LHDで高速赤外線カメラを用いて観測されたダスト。

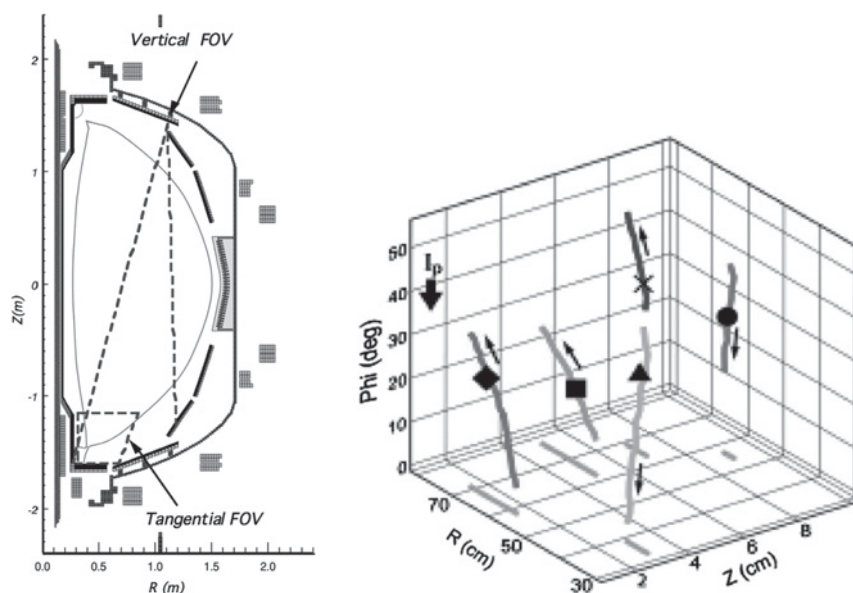


図6 (a)NSTXにおけるカメラ2台による観測視野、および(b)解析されたダストの3次元軌跡。線はダストの軌跡、 \blacklozenge 、 \blacksquare 、 \times は外側ストライクポイントより外にあるダスト粒子、 \blacktriangle 、 \bullet は外側ストライクポイントより内側にあるダスト粒子を示しており、矢印は動きの方向を示す[16]。

特に、NSTXでは2台のカメラによる同時計測が行われ、移動方向の3次元計測情報を得ることに成功しており、その一例を図6に示す[16]。ダストの速度はNSTXで10–200 m/s、JT-60Uで最大500 m/s、LHDでは数十 m/sと報告している。これらを大別するとダイバータ部と周辺プラズマ領域での観測結果となる。一般的に1台のカメラ計測であった場合、ダイバータ部ではダストの発生源の一つと考えられるターゲット板の位置やXポイントなど基準となる位置の確認が比較的容易であるのに対し、周辺プラズマ領域では視線が長くなる傾向にあり、速度の誤差が大きくなる。

ダストが存在する位置の同定手段の一つとして、筆者らはLHDの赤外線カメラ計測においてトラス内側に存在するダスト粒子の一部でステンレス第一壁への反射光が観測可能であることが明らかとなったことから、ダスト自身と反射光の位置関係から位置情報を得る手法を確立した。この方法では一台のカメラで3次元情報を得ることが可能である[17]。

カメラにより観測される1空間チャンネルは一般的にミクロンオーダーのダスト径よりも十分大きいいため、カメラによってダストの粒径を求めることは大変難しく、元素も判別できない。しかし2次元像として観測していることから、比較的速度の遅いダストに関しては複数の観測時間フレームにわたり移動方向および加速される状況が観測でき、特定のダストのダイナミクス解析に適している。

損耗等により自然発生した組成の区別が難しいダストの観測だけでなく、既知の元素および直径のダストを準備し挿入する実験を行うことで自然発生したダストとの比較検討を行う実験も進められている。DIII-Dでは炭素ホルダーへ炭素粉末を入れ、それをDivertor Materials Evaluation System (DiMES) [18]と呼ばれている駆動装置を用いてダイバータ位置まで挿入し、カメラによるダストの軌跡

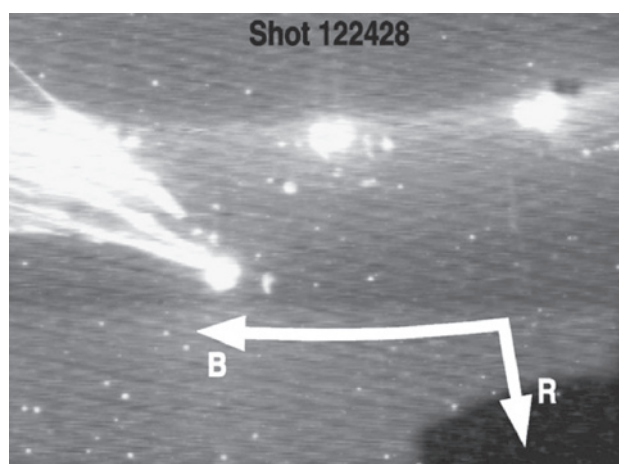


図7 DIII-Dで行われた、DiMESによる炭素ダストの導入実験。Bは磁力線方向を示す[19]。

解析および炭素不純物計測によるCIII発光強度の変化を計測しており、その結果を図7に示す[19]。ここでは、図の中心部より左上方向へ導入ダストに伴う発光が観測され、これが磁力線方向へ移動していることがわかる。LHDでもステンレスホルダーを用いて既知の粒径10 μm の炭素粉末をダイバータ位置から挿入する実験に成功し、一様ではなく限られた一方向へのみ導入される様子が観測されており、詳細について解析を行っている。これら既知のパラメータによるダスト導入実験は、理論モデルとの比較を行う際にも大変重要となるため、引き続きTEXTORでのリミッターによる導入を含む複数の装置での実施が予定されている。

ダストが存在する領域は、プラズマ周辺部の閉じた磁気面から開いた磁力線のSOL領域もしくはエルゴディック層を超えて対向壁に至るまでの広い範囲が考えられる。これらダストの加速メカニズムに関して、磁場の影響、ラー

モア運動, ELM・ディスラプション現象による熱・粒子束変化による影響やアブレーションによる昇華など様々な要因が可能性として考えられている。実機では、特定のダストがどのような力を受けたかを解析しているところで、一般論として述べる状況ではない。例えば、LHD では反射光を用いた3次元解析により、実空間におけるダストの速度ベクトルとその場所での磁場の向きとを比較検討することができるようになり、現在周辺プラズマ部で移動するダストの解析を進めている状況である。今後ダイナミクスの解析のためには、それぞれの計測法がカバー可能な移動メカニズムに関して、より詳細な議論が必要であると考えている。

これらの実験は、プラズマ模擬試験装置において様々なパラメータで行われており、特にプロセスプラズマでは特定のダストに対する制御も既に行われている。

3.4 モデリング

ダストの帯電は、主にプラズマ粒子束による効果の方が強いとされ、またイオン束と電子束は等しくないため、通常、負に帯電すると考えられている。ダストに寄与する力として次の6つのものが考えられている[20]；1)静電力、2)磁場、3)重力、4)ロケット推進力、5)ローレンツ力、6)プラズマとの摩擦力。

これらの力に対し、ダイバータ板近傍で幅 $l=1\text{ cm}$ のプラズマによって加速されたダストを考えると式(1)で示す静電力と、式(2)で示すプラズマとの粘性力とに絞ることができる。

$$F = qE \quad (1)$$

$$F_{\text{fric}} = \zeta_F \pi r_d^2 m_i n v_i (v_p - v_d) \quad (2)$$

ここで、 m_i はイオン質量、 n は電子密度、 $v_i = (T/m_i)^{1/2}$ 、 v_p は流体速度で、 ζ_F は任意の係数であり経験的に10を用いる。電子温度とイオン温度がほぼ等しい $T=10\text{ eV}$ のプラズマに対し、直径 $r_d = 1\text{ }\mu\text{m}$ の炭素ダスト(密度 $\rho_d = 2\text{ g/cm}^3$)を仮定すると、 n_{sh} をシース端での電子密度としたとき、ダストの速度 v_d は式(3)から与えられ、

$$v_d = v_i \left(\frac{\zeta_F m_i n_{\text{sh}} l}{\rho_d r_d} \right)^{1/2} \quad (3)$$

v_d は $10\text{--}100\text{ m/s}$ のオーダーとなる。実機で観測されたダストに対して、このモデリングによる値は比較としてよく用いられており、実験結果もこのオーダーで観測されていることが多い。

DIII-D などトカマク装置では、ダストが対向材の表面から放出された後、その運動、対向材との反射・吸着に関するモデルしてDUSTTと呼ばれるコードが既に開発されており、周辺プラズマのモデリングと合わせた議論が進められている[21]。また、モデリングの分野で先行している議論としてダスト温度評価がある。例えば、M. Rosenbergらはダストの昇華による粒子径変化をダストの寿命のパラ

メータとして用いており、プラズマからの輻射による加熱機構が考慮されている[22]。実験データからはこれに対して十分議論できるデータをまだ提示できておらず、相対強度による評価も含めて議論が続けられている。

3.5 まとめ

プラズマ・壁相互作用の柱の一つである損耗・堆積過程に大きく寄与するダストの生成、移動、堆積メカニズムに関する研究は、ITERという目先の大きな課題を前に大きく進展しつつある。工学的観点からは、将来の核融合炉に向けてさらなる発生量、ガス蓄積量等の定量化と、堆積した場所、ダストの構造に合わせた除去方法の最適化が求められている。

謝辞

この記事を書くにあたり有益なデータ、コメントを提供いただきました九州大学の白谷正治教授、切通聡さん、岩下伸也さん、核融合科学研究所の相良明男教授、富田幸博准教授、日本原子力研究機構の朝倉伸幸博士に感謝いたします。また、ここで紹介した研究の一部は科学研究費補助金(特定領域研究)「核融合炉のトリチウム蓄積・排出評価のための理論およびシミュレーションコードの開発」19055005の支援により遂行いたしました。

参考文献

- [1] O. Ishikara *et al.*, J. Phys. D: Appl. Phys. **40**, R121 (2007).
- [2] 菅野暁, 仁科雄一郎他: 日本物理学会誌 **44**, 225 (1989).
- [3] I. Ali Lhan *et al.*, J. Nucl. Mater. **74**, 132 (1978).
- [4] K. Narihara *et al.*, Nucl. Fusion **37**, 1177 (1997).
- [5] J. Winter *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion. **46**, B583 (2004).
- [6] M. Rubel *et al.*, Nucl. Fusion **41**, 1087 (2001).
- [7] P.J. Sharpe *et al.*, Fusion Eng. Des. **63**, 153 (2002).
- [8] G. Federici *et al.*, Nucl. Fusion **41**, 1967 (2001).
- [9] C.H. Skinner *et al.*, Phys. Scr. T **124**, 18 (2006).
- [10] A. Sagara *et al.*, J. Nucl. Mater. **313-316**, 1 (2003).
- [11] Y. Goto *et al.*, J. Nucl. Mater. **329-333**, 840 (2004).
- [12] J.P. Sharpe, A. Sagara *et al.*, J. Nucl. Mater. **313-316**, 455 (2003).
- [13] J.P. Sharpe, K. Masaki *et al.*, J. Nucl. Mater. **337-339**, 1000 (2005).
- [14] K. Sasaki *et al.*, J. Nucl. Mater. **363-365**, 238 (2007).
- [15] C. Arnas *et al.*, J. Nucl. Mater. **337-339**, 69 (2005).
- [16] A.L. Roquemore *et al.*, J. Nucl. Mater. **363-365**, 222 (2007).
- [17] N. Ashikawa *et al.*, submitted to J. Nucl. Mater.
- [18] C.P.C. Wong *et al.*, J. Nucl. Mater. **258-263**, 433 (1998).
- [19] D. Rudakov *et al.*, J. Nucl. Mater. **363-365**, 227 (2007).
- [20] S.I. Krasheninnikov, Y. Tomita *et al.*, Phys. Plasmas **11**, 3141 (2004).
- [21] R. Smirnov *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **49**, 347 (2007).
- [22] M. Rosenberg *et al.*, J. Phys. D: Appl. Phys. **41**, 015202 (2008).