

周辺プラズマ・固体境界における高熱負荷物理現象のシミュレーション
**Numerical simulation of physics phenomena under high heat load
 between peripheral plasma and solid surface**

星野一生
 Kazuo HOSHINO

原子力機構
 JAEA

コアプラズマから排出された高エネルギープラズマは、周辺領域において、リサイクリング中性ガスや周辺プラズマ冷却のため注入される不純物ガスとの相互作用によりエネルギーを低減させながら固体壁へと到達する。固体表面では、リサイクリング・損耗・再堆積といったプラズマとの相互作用を起こす。さらに、ELMやディスラプションのような瞬間的に除熱性能を超える熱負荷が到達した際には、固体表面での熔融が懸念される。また、液体ダイバータまで視野に入れば、液体金属とプラズマの相互作用も重要である。液体となれば、プラズマ照射下における蒸発やドロップレットの発生を考慮すべきであり、それらとプラズマが再び衝突するベーパーシールディングも重要となる。このように、周辺プラズマ・固体境界は、プラズマ・気体・液体・固体の4相が共存する非常に複雑な系であり（図1）、その理解は容易ではない。4相共存系の挙動を理解し予測するためには、それぞれの現象を扱っていた

数値計算手法のハイブリッド手法を開発し、4相のスケールギャップを超えた解析が必要となる。本講演では、このような周辺プラズマ・固体境界における国内の最近のシミュレーション研究として、周辺プラズマの熱・粒子輸送シミュレーションによる壁材料へ熱負荷予測、及び、その熱・粒子負荷を受ける材料側での熔融・損耗・物性変化を解明するためのハイブリッドシミュレーション例について報告する。

まず、周辺プラズマの熱・粒子輸送については、原子力機構において統合ダイバータコードSONIC[1]の開発が続けられている。前述のとおり、周辺プラズマは、プラズマ・中性燃料ガス・不純物ガスが混在するため、従来からそれぞれに適したモデリングを行い、統合シミュレーションが行われてきた。SONICでは、プラズマについては流体近似を用いて、2次元のポロイダル平面上に投影した輸送を解く。中性粒子については、原子分子過程、ダイバータの実形状を取り入れるため、モンテカルロ法を用いた粒子

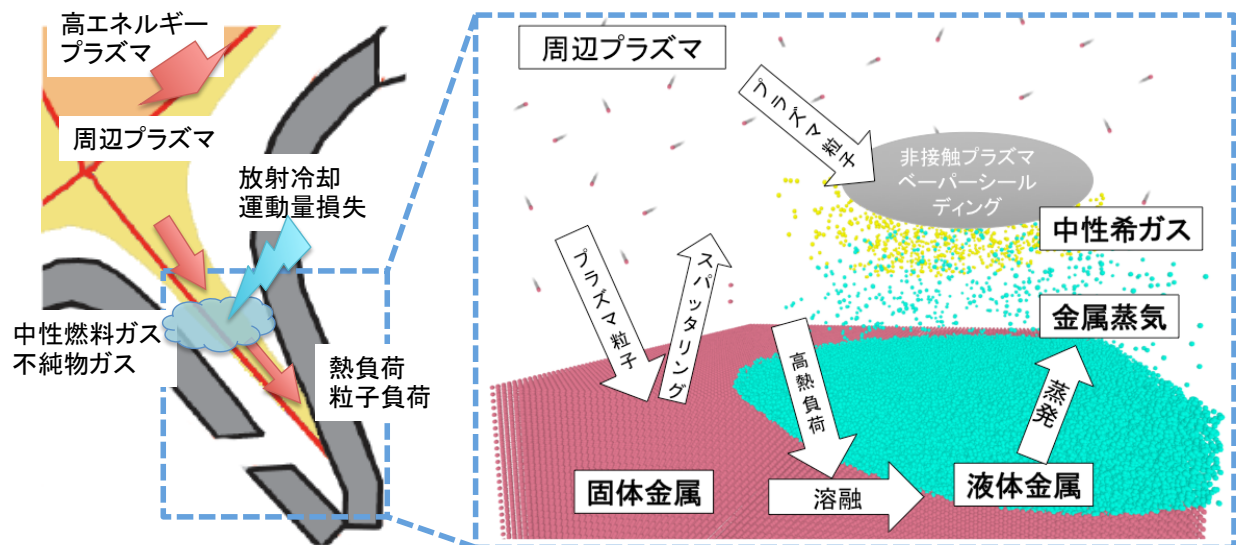


図1：周辺プラズマ・固体境界における4相共存系

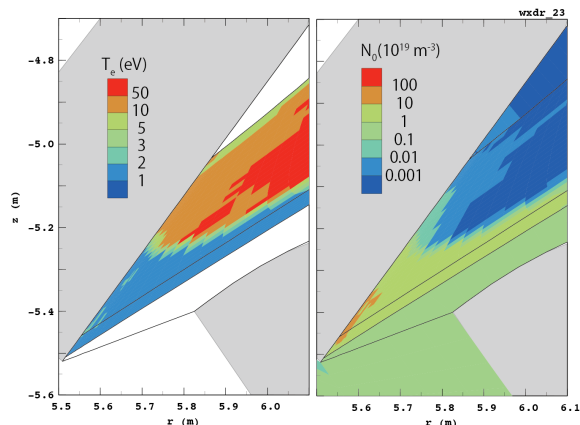


図2：SONICによる原型炉ダイバータシミュレーション。内側ダイバータ近傍の電子温度(左)、中性粒子密度(右)の空間分布。

モデルを用いている。不純物輸送の取り扱いについてはいくつか方法があるが、SONICでは、壁材料との相互作用や運動論的效果を取り入れやすいモンテカルロ粒子モデルを採用している。図2に、原型炉ダイバータのSONICシミュレーション例[2]を示す。Ar不純物ガスによる放射冷却により、ダイバータ板近傍の電子温度が低下し、部分非接触ダイバータが形成され、固体壁との間で密度が高くなった中性粒子との相互作用が起こっている。ダイバータ熱負荷は、内側ダイバータで 3MW/m^2 、外側ダイバータで 7MW/m^2 と予測される。このような熱・粒子負荷環境下における固体壁の損耗・再堆積のシミュレーションも進められている。

ダイバータ金属の溶融に関しては、現在、大阪大学上田らを中心にレーザー照射による熱負荷溶融実験が行われている。これに対応したシミュレーションとして、レーザーを電磁場解析で使われる時間領域差分(FDTD)法で扱い、タングステン材料を分子動力学法(MD)法で扱うFDTD-MDハイブリッド法による研究が核融合研伊藤らによって進められている[3]。FDTDで記述されたレーザーが分散性媒質である金属中に侵入すると、分極と分極電流 J が発生し、固体中の抵抗 γ に対応して γJ^2 に相当するエネルギー損失が起こる。この損失分のエネルギー γJ^2 をMDで記述される原子の運動エネルギーとして加算している。ミクロには金属中の電子の励起が絡む複雑な過程であるが、高熱負荷で金属格子が乱れる際には、まずはこの様なマクロな記述の方が少ないパラメータで現象を模擬しやすい。分極電流 J に関する数値的な扱いに関しては、Drude-Lorentzのモデルを採用している[4,5]。図3は実際にFDTD-MD法で解いたレー

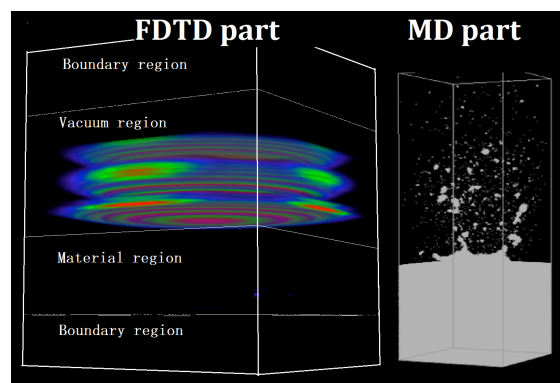


図3：FDTD-MD ハイブリッド法によるレーザー溶融シミュレーション。左図がFDTDにおいて上部から下部へレーザー伝わる様子。右図はMDにおいてタングステン(灰色)が溶融・飛散する様子。

ザーアブレーションの様子である。この計算条件は敢えてドロップレットが発生するような高強度レーザーが選ばれているが、より実験に即した計算も進められている。

実際の核融合炉環境を考えると、プラズマイオンが照射されており、タングステンも電離している可能性があり、プラズマ・気体・液体・固体の4相を同時に解く必要がでてくる。そこで、金属の原子分子過程を考慮に入れたParticle in Cell(PIC)法によるモデリングが大阪大学伊庭野らによって進められている。さらに、強磁場下のダイバータ領域では溶融金属と磁場の相互作用も無視できない。この点に関しても液体金属の流体計算(CIP)や電磁流体計算(MHD)までを考慮に入れた、マルチハイブリッド法の検討も行われている。これらの知見を再び周辺プラズマシミュレーションへと集約し、原型炉時代を想定した高精度なシミュレーション予測を実現することが目指されている。

謝辞

本稿執筆にあたりご協力いただいた核融合科学研究所 伊藤篤史先生、大阪大学 伊庭野健造先生に感謝いたします。

参考文献

- [1] K. Shimizu, et al., Nucl. Fusion 49 (2009) 065028.
- [2] 星野一生、他、本年会、25aB01
- [3] 伊藤篤史、他、日本物理学会 2014 年秋季大会、10aAK-8
- [4] A. Vial, et al., Rhys. Rev. B71 (2005) 085416.
- [5] K. Sawada, et al., Plasma and Fusion Res. 5 (2010) S2110.