



2. 低温プラズマシミュレーションの基礎

2. Fundamentals of Low-Temperature Plasma Simulation

池田 圭¹⁾, 中舘 博²⁾, 松永史彦²⁾IKEDA Kei¹⁾, NAKADATE Hiroshi²⁾ and MATSUNAGA Fumihiko²⁾¹⁾株式会社アテナシス, ²⁾ペガサスソフトウェア株式会社

(原稿受付: 2017年5月11日)

低温プラズマは弱電離でかつ熱的に非平衡であり, それゆえに利用価値が高く, 様々な産業に幅広く応用されている. しかしながら, 実用化されている技術が数多くある一方で現象の理解は必ずしも進んでいない. 本章では, はじめに温度に着目した上で低温プラズマの特徴を説明する. 次に, 低温プラズマがどのような産業で応用されているかを鳥瞰し, その理解のためにはシミュレーションが不可欠な理由を述べる. 更に, 低温プラズマシミュレーションの手法としての粒子モデルおよび流体モデルに関して, その特徴と基礎的事項を説明する.

Keywords:

low-temperature plasma, non-equilibrium plasma, particle model, PIC/MC, DSMC, fluid model

2.1 低温プラズマとは

我々の身近にあるプラズマの多くは, 電離している粒子の数が相対的に少ない弱電離プラズマである. 中性粒子が室温であると仮定して, 弱電離プラズマ中のイオンや電子の温度はどうなっているであろうか. 電子は質量が小さく電界からの加速を受けやすい一方で, 一回の衝突で失うエネルギーは重粒子同士の衝突の場合よりも非常に小さい. 半導体製造プロセスで多く利用されるような低圧下では, 粒子同士の衝突周波数も低いために, プラズマ中で加速された電子の温度の方が重粒子の温度よりも高い状態[1]となり, 熱的に非平衡なプラズマ, すなわち低温プラズマが容易に生成される.

衝突周波数は圧力に比例して高くなることから, 図1に示すように, 大気圧近傍もしくはそれ以上の圧力では, 電子の温度も重粒子の温度に近づくことと期待される[2]. しかしながら, 実際には大気圧でも電子温度と周囲の重粒子の

温度は一桁以上異なっていることが多く, 非平衡性は維持されていることが本学会誌の過去の小特集でも取り上げられている[3]. 低温プラズマと高温プラズマについては, 何度以上は高温プラズマといった厳密な区別はないが, 身近な低温プラズマは熱的に非平衡であり, その多くは重粒子の温度が気体と同程度の温度から熱電離が大きく影響を及ぼさない5,000 K程度までである(アークの条件を除くと, 多くの低温プラズマの電離度は0.1%にも満たない). 大気圧程度の高圧力で重粒子の温度がおおよそ10,000 Kまで高くなると熱プラズマと呼ばれるようになり, より熱平衡に近づくが, 依然として非平衡性が議論されている[4]. 更に温度が上昇して電離度も高くなると高温プラズマと呼ばれ, 核融合プラズマはその典型である. 2.2節では身近な低温プラズマに焦点を絞り, どのような分野で応用されているのか, また2.3節では, なぜシミュレーションが必要とされるのかを順に述べる.

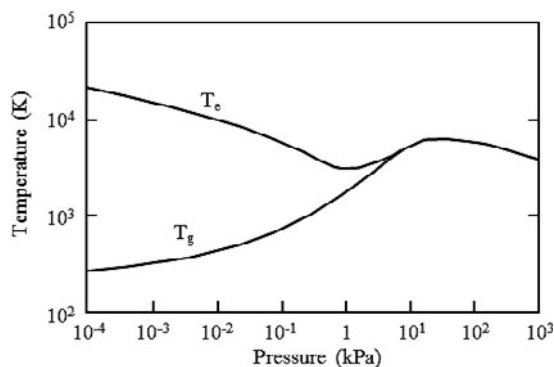


図1 電子温度および重粒子の温度の圧力依存性 (文献[2]より引用).

2.2 プラズマと固体・液体表面(界面)における反応

プラズマを扱う装置のシミュレーションを検討する際には, プラズマ領域のモデル化は勿論であるが, 周囲の壁との相互作用の考慮も重要である. 反応場をごく一部の限られた領域で制御できる場合でも, ガスや電力などを供給するシステムが直接的・間接的に影響を与える. プラズマを応用する目的は, 大きく分けて以下の2つに分けられる. 一つは, プラズマを利用した燃焼[5]のように, 主にプラズマ生成部を利用する場合であり, もう一つはプラズマを固体や液体[6]と接触させて, その界面との相互作用を利用する場合である. 後者の代表的な例の一つである半導体の

¹⁾ATHENASYS Co.,Ltd., ²⁾PEGASUS Software Inc.

authors' e-mail: dk@athenasys.co.jp, h-nakadate@psinc.co.jp, matsunaga@psinc.co.jp

製造過程には、薄膜を堆積するプラズマCVD(化学気相成長)や微細加工を行うエッチングの工程が多数あり、LSI(大規模集積回路)やLCD(液晶ディスプレイ)などのデバイス作製に必須の技術となっている[7]。デバイス応用以外でも幅広い応用が進んでおり、例えばDLC(ダイヤモンドライクカーボン)[8]等のコーティング技術は、耐摩耗性を必要とする研磨剤や切削工具、自動車部品の他、PETボトルのバリア膜[9]などに应用されている。また、親水性向上を目的とした表面改質の例として、大気圧プラズマによるチタンインプラントの表面処理も知られている[10]。異種材料の接着性を向上させる例として、有機膜とステンレスの密着性向上の目的にも応用が期待されている[11]。更に、自立式鉄塔としては世界最高となった東京スカイツリーの完成には溶接技術が不可欠であった[12]。その他にも、生成物を直接利用する代わりに、プラズマアクチュエータ[13]を利用した気流制御技術の研究も進められており、再生可能なエネルギーの一つとして風車のブレードへの応用も期待されている[14]。このように、小さなスケールから大きなスケールまで、実に幅広い分野で利用・研究・応用がなされている。

また、近年では医療応用に対する研究も進められており、2009年にはISPM(International Society for Plasma Medicine)[15]も設立され、外傷や手術の際にプラズマを照射して止血を始めとする創傷医療やがん治療[16,17]、心筋梗塞の緩和[18]治療などへの研究も進められている。この他にも、種子の発芽制御や成長促進、滅菌・殺菌や鮮度維持など、農業への応用[19]や、低温プラズマを利用した大気・水環境保全技術への応用[20,21]も期待されている。

2.3 低温プラズマシミュレーションの重要性

低温プラズマは非常に幅広い分野で実用化されている一方で、理解が及んでいない点も非常に多い。計測手段としては、比較的低压のプラズマの場合、ある程度大きな空間のプラズマが対象であれば、静電プローブや質量分析、LIF(レーザー誘起蛍光法)などが有効な場合もある。しかしながら、近年応用を広げている大気圧プラズマの多くは、その体積が非常に小さく、静電プローブのようにプラズマに影響を与える測定方法は適さない。また、比較的に実用的な測定手段の一つである発光分光測定についても、十分な空間分解能を得ることは困難となる。更に、大気圧近傍の高圧力下では、プラズマによって様々な励起種やラジカルが生成される上に、それらと他の原子・分子、イオンとの反応によって二次的に生成される化学種の数が増大となる。例えば、 N_2 や O_2 の振動励起状態を細かく分けて考えないとしても、準安定な励起種が複数ある上に、 O_3^- 、 O_4^+ 、 N_3^+ 、 N_4^+ といったイオンも生成され、全ての化学種を定量的に測定することは事実上不可能である。反応については、 $N^+ + O_2 \rightarrow NO^+ + O$ のような異種のイオンと中性粒子の反応の他、 $O + O_2 + M \rightarrow O_3 + M$ (Mは第三体粒子)のような3体反応も無視できなくなる。粒子の平均自由行程は圧力の上昇に反比例して短くなることから、反応はごく限られ

た領域で進展し、光電離が重要なプロセスの場合には、その反応を測定する手段もない。更に、表面反応に関しては汎用のモデル構築も容易ではない。例えば、文献等で見つけられる金属表面の二次電子放出係数は、一般に研磨された状態で測定された値であるが、多くの低温プラズマにおいて、その表面状態は履歴に依存しやすく、表面の堆積物もしくはエッチングされた状態を考慮する必要がある。

以上のように、低温プラズマの反応は極めて複雑であるため、現象の理解にはシミュレーションによる可視化が不可欠である。以降、具体的な低温プラズマシミュレーションの方法を粒子モデル、流体モデルの順に説明する。

2.4 粒子モデルによるシミュレーション手法

低温プラズマシミュレーションでは、荷電粒子(電子およびイオン)だけでなく、中性粒子(原料ガス、励起原子・分子、ラジカル分子)を取り扱う必要がある。荷電粒子についてはParticle-in-Cell/Monte Carlo Collision method(PIC/MC法)[22,23]、中性粒子についてはDirect Simulation Monte Carlo method(DSMC法)[24,25]という粒子モデルのシミュレーション手法がある。どちらも短い時間ステップ t で粒子の運動を追跡していく手法である。

両者の粒子の移動や境界条件の扱いはよく類似している。計算コードのソースレベルの話ですれば、PIC/MC法とDSMC法の粒子境界条件、粒子の移動、統計処理などのルーチンは共通化して完全に同一のルーチンを用いることができる。

超粒子(super particle や simulated particle などともいう)の概念も共通である。真空装置内に存在する、例えば 10^{20} 個の粒子(電子、イオン、中性の気体分子)のすべてを計算機内で取り扱うのは不可能であるので、例えば 10^6 個の超粒子で代表させて計算を実行する。この $10^{20}/10^6 = 10^{14}$ 、つまり一個の超粒子は 10^{14} 個の実在粒子を代表していることを表しており、これを超粒子の重みという。低温プラズマを取り扱う場合は、荷電粒子を取り扱うPIC/MCC法の方が、中性粒子を扱うDSMC法に比べて超粒子の重みが小さくなるのが普通である。

1ステップの時間 Δt は対象粒子種で大きく異なる。質量が軽く、加速によりエネルギーを得やすい電子の速度は高いためPIC/MC法の Δt は 10^{-10} 秒程度に短くとる必要がある。一方、DSMC法の Δt は 10^{-6} 秒程度である。

移動と衝突を分離して取り扱う点は両者同様である。実際には、分子は Δt の間のどこかで衝突をするのだが、計算では Δt の時間、超粒子は衝突なしで移動し、 Δt 後に(衝突すると判定された超粒子は)一斉に衝突するという取扱いをする。 Δt が平均衝突時間程度より小さければ、この取扱いは妥当である。

両者の衝突の取扱いは幾分異なる。PIC/MC法ではバックグラウンドに存在する原料ガス(これは超粒子として取り扱わない)との衝突を考えるのに対し、DSMC法では超粒子同士の衝突を取り扱う。また、PIC/MC法では電離、励起、解離などの反応を考慮する必要がある。最大の衝突周波数を見積もって仮衝突と実衝突の判定を行うな

ど、計算効率をあげるための工夫には共通点がある。

PIC/MC 法では電界を計算する必要があるという点も DSMC 法との大きな違いである。中性粒子の運動は電界の影響を受けないが、荷電粒子の運動は電界の影響を考慮に入れて運動方程式を計算することになる。

一般的には粒子モデルに比べると流体モデルの計算負荷ははるかに小さいと言われているが[26]、実はそうでもない場合も多い。例えば、流体モデルには粒子種や反応式の数に比例して計算量が増える計算量の大きいルーチンがいくつかあるが、粒子モデルにはそれがない。粒子種や反応式が非常に多い計算では、粒子モデルでの計算が速いケースもある。また、流体モデルで計算する際の Δt やメッシュ幅も、粒子モデルに比べて常に大きくとれるというわけでもない。

PIC/MC 法と DSMC 法の詳細に関しては、紙面の都合上、いくつか文献を紹介するにとどめたい。

PIC/MC 法は1990年代初めには既に低温プラズマシミュレーションに用いられている[28]。まずは Birdsall の教科書[22]を読むのがよいだろう。また、南部の著書[27]に衝突の取扱いについての記述がある。粒子モデルだけでなく流体モデルにも当てはまるが、荷電粒子のシミュレーションは非線形性が非常に強いため、空間メッシュ幅、時間ステップ Δt などの計算条件が適切に設定されていない場合には直後に計算が発散してしまうなどといった扱いづらい面もある。

DSMC 法は1960年代前半に Bird により最初に開発された手法である。Bird は1976年、1994年に DSMC 法の著書[24, 25]を出版している。また、2013年にも自費出版のサイトで新しい著書[29]を発表している。南部の著書[27]も取りかかりやすいであろう。DSMC 法は、原理的に計算が発散することがないという流体シミュレーションにはない強力な利点を持っている。ただし、妥当な計算結果を得るためにはやはり、空間メッシュ幅や時間ステップ Δt に注意が必要である。

2.5 流体モデルによるシミュレーション手法

流体モデルでは、プラズマを連続体(流体)とみなし、質量保存則を表す「連続の式」、運動量保存則を表す「運動方程式」、そしてエネルギー保存則を表す「エネルギー方程式」に基づいてシミュレーションを行う。未知変数は粒子数密度 n_α 、流速ベクトル \mathbf{u}_α 、温度 T_α または圧力 p_α であり、これらは粒子種ごとに空間座標 x と時間 t の連続関数として定義される巨視的な量である。ここで添え字の α は粒子の種類を区別する指標である。また状態方程式 $p_\alpha = n_\alpha k_B T_\alpha$ が成り立つと仮定する。 k_B はボルツマン定数である。基礎方程式系は、これら未知変数の x および t に関する偏微分を含んだ非線形の偏微分方程式である。方程式の具体的な形は例えば文献[35]を参照されたい。このような連続体としての扱いが妥当であるのは、プラズマを構成している粒子の平均自由行程 λ とプラズマ容器サイズや電極間距離など系の代表的な長さ L の比 λ/L (これをクヌッセン数といい K_n と記す) が1に比べて充分小さい場

合である。ガスの圧力が p [Pa] で温度が 400 K のプラズマの場合、電子の平均自由行程は $0.04/p$ [m] と見積もられるので[7]、系の代表長さを L [m] として $K_n \leq 0.1$ という条件に代入すると、 $pL \geq 0.4$ となる。したがって、例えば $L=0.1$ m の場合にはガス圧が 4 Pa 以上であれば電子に対して流体モデルを適用できそうである。逆に圧力がそれ以下の場合は粒子モデルを用いたほうがよいであろう。ただし L の取り方には任意性があるので、これはあくまでも目安と考えてほしい。なおイオンの平均自由行程は電子より小さいので、同じ条件であれば流体モデルが適用できる。

ところで、熱プラズマの場合には、電子とイオンと中性粒子をまとめて一つの流体として取り扱えるので、運動方程式は一つだけ解けばよいが[30]、非平衡低温プラズマの場合は粒子種ごとに異なった流体が粒子の衝突を介して相互に質量、運動量、およびエネルギーを交換しながら運動する混合流体と考えなければならない。したがって、粒子種の数だけ方程式のセットを解かなければならない。しかも現象が本質的に非定常であるため、定常解を一回求めて終わりという訳にはいかない。しかし、すべての方程式を忠実に解く場合には膨大な計算時間を要するため、実際には以下に示す近似を用いる場合が多い。

- ・電子とイオンについては、運動方程式を解くかわりにドリフト-拡散モデルを用いて粒子フラックスを計算する。
- ・イオン温度の空間-時間変化は小さいとしてイオンに関するエネルギー方程式は解かない。(イオンの温度は室温などの既知であるとする。)
- ・中性粒子は全部まとめて一つの多成分気体とみなす。

なお、荷電粒子の密度分布により電界が形成され、また電界は外力の形で荷電粒子の運動に影響を与えるので、これらの方程式のほかに静電ポテンシャル(電位)に関するポアソン方程式を同時に解く必要がある。電界は静電ポテンシャルの空間勾配から求められる。このような近似のもとで荷電粒子に関しては、電子および各イオン種についての連続の式と、電子に関するエネルギー方程式のみをポアソン方程式とともに解けばよいことになる。

ここで、ドリフト-拡散モデルについて説明しよう。例として電子を考える。外部磁界が無い(もしくは無視できる)場合、電子に関する運動方程式は以下のように書ける(電子を表す下付の添え字は省略する)。

$$mn \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla(nk_B T) - en\mathbf{E} - nm\nu\mathbf{u} \quad (1)$$

ここで、 m は電子の質量、 n は電子の数密度、 \mathbf{u} は電子の速度、 \mathbf{E} は電界、 e は素電荷、そして ν は1個の電子が1秒間に分子と弾性衝突をする平均回数(平均衝突周波数)である。上式の左辺は電子流体の加速度を表し、右辺第1項は圧力勾配による力、第2項は電気力、そして第3項は分子との衝突に起因する電子集団としての減速率をそれぞれ表している。イオンとの衝突による影響や粘性応力は無視している。いま、 \mathbf{u} が変化する時間的な尺度を τ としたとき、もし $\tau\nu \gg 1$ であれば、左辺括弧内の第1項は右辺第3

項に比べて無視できる。また、 u の大きさが熱運動の平均的な大きさ ($\sqrt{k_B T/m}$ 程度) よりも小さければ、上式の右辺第3項に比べて左辺括弧内第2項も併せて無視できる[31]。これらの場合には、式(1)から直ちに \mathbf{u} が求められる。

$$\mathbf{u} = -\frac{e}{mv} \mathbf{E} - \frac{1}{mvn} \nabla(nk_B T) \quad (2)$$

この式は、電子集団としての平均速度が局所的な電界に比例する速度 (電界ドリフト速度) と、密度勾配に比例する速度 (拡散速度) の和で表されることを示している。式(2)に密度を乗じてフラックス $\Gamma (=n\mathbf{u})$ で表せば、

$$\Gamma_\alpha = \pm n_\alpha \mu_\alpha \mathbf{E} - D_\alpha \nabla n_\alpha \quad (3)$$

と表すことができる。ここで、 $\mu \equiv e/mv$ を移動度、 $D \equiv k_B T/mv$ を拡散係数という。ここでは、電子のみならずイオンに対しても同様の近似を適用できるとして、粒子種の区別を示す添え字 α を付けた。また、右辺第2項では温度を空間微分の外に出した形で近似している。右辺第1項の複号は、正イオンに対してはプラス(+), 電子および負イオンに対してはマイナス(-)をとる。 τ に関しては、例えば電極への印加電圧の周波数が f [Hz] であるならば $1/f$ [秒] と設定すればよい。式(3)において、 \mathbf{E} は瞬時の電界であるが、 $v \leq 1$ の場合においても、緩やかに変化する実効電界 \mathbf{E}^{eff} を \mathbf{E} の代わりに用いることで、式(3)と同じ形式で粒子フラックスを計算する手法が提案されている[31]。このとき、移動度や拡散係数および各種の衝突周波数などを輸送パラメータや輸送係数、スオームパラメータなどという。これらは、原料ガスの種類と換算電界 (電界強度をガス分子の数密度で除した値) に応じて異なるため、式(3)において一般に定数ではない。電子はイオンに比べて軽いため、スオームパラメータを理論的に求める方法は両者で異なる。これに関する詳細は、電子に関しては文献[32]を、またイオンに関しては文献[33]をそれぞれ参照されたい。いずれにしても、スオームパラメータを求めるためには、低温プラズマシミュレーションで考慮する荷電粒子と中性分子 (原子) との各種衝突断面積 (一般に衝突する2粒子の相対速度に依存する) のデータをあらかじめ準備しておく必要がある。またスオームパラメータが実験的に求められている場合には、その値を利用することもある。

実際に低温プラズマシミュレーションを行うには、微分方程式を離散化しなければならない。空間に関してはメッシュ分割を行って、計算対象となる領域を多数の (小さい) 空間領域 (セル) に分割する。未知変数は各セルにおいて一つの値を持つことになる。差分法や有限体積法を用いて方程式の離散化を行う場合、密度や温度などのスカラー量をセルの中心で定義し、粒子フラックスなどのベクトル量は、隣あうセルとの境界面においてその面に垂直な成分で定義する場合が多い[34]。このように諸量を設定すると、セル内のスカラー変数の時間変化が、セル表面を通過する粒子フラックスで表現できるため都合が良い。セル表面で

の粒子フラックスを求める際に、それを挟む両隣のセルでの密度の値を補間して用いる必要があるが、それには空間1次元移流-拡散方程式の厳密解を利用する Scharfetter-Gummel 法がよく用いられる[34]。時間積分に関して陽解法を用いる場合には、時間の経過とともに解が発散しないように「電子が Δt 秒間にドリフト速度で進む距離がセルの幅を超えない」という条件が必要である。通常は、プログラム内部で Δt を自動的に決めるが、荷電粒子については、おおよそ $\Delta t = 10^{-12} \sim 10^{-10}$ 秒程度である。中性粒子に関しては、流れ場の変化する時間尺度が荷電粒子のそれと比してオーダーが大きく異なるため、荷電粒子の時間積分とは分離して、中性粒子計算のための別の Δt を用いて計算を行う。これは、おおよそ $\Delta t = 10^{-8} \sim 10^{-6}$ 秒程度である。荷電粒子を解く際には、中性粒子の密度分布を現在求められている最新の値に固定しておき、数周期分計算を進める。その際、電子と分子の衝突によって生成される中性ラジカル種などの生成率の空間分布 (印加電圧1周期の平均値) を求めておく。続いて、中性粒子の計算を別の Δt を用いて1 [ms] 程度の時間で計算を進める。その際には、今度は荷電粒子種の密度の空間分布を固定しておき、また荷電粒子の計算で求められた中性粒子の生成率の空間分布も併せて用いる。上記の通り、異なる時間スケールで行われる荷電粒子の計算および中性粒子の計算のやり取りを反復することによって (周期的) 定常状態時の低温プラズマの諸特性を求める。

参考文献

- [1] K. Ikeda *et al.*, J. Vac. Soc. Jpn. **50**, 423 (2007).
- [2] E. Pfender, *Gaseous Electronic*, Vol. 1, M.N. Hirsh and H. J. Oskam, Eds. (New York: Academic Press, 1978) p.302.
- [3] F. Tochikubo *et al.*, J. Plasma Fusion Res. **92**, 680 (2016).
- [4] Y. Tanaka *et al.*, J. Plasma Fusion Res. **82**, 479 (2006).
- [5] Y. Uesugi, J. Plasma Fusion Res. **89**, 207 (2013).
- [6] F. Tochikubo *et al.*, J. Plasma Fusion Res. **91**, 307 (2015).
- [7] 菅井秀郎: プラズマエレクトロニクス (オーム社, 2000).
- [8] 大竹尚登: DLC の応用技術 - 進化するダイヤモンドライクカーボンの産業応用と未来技術 - (シーエムシー, 2016).
- [9] http://www.spstj.jp/publication/archive/vol19/Vol19_sub_size_6_down_10_No6_sub_size_6_down_10_1.pdf.
- [10] 松崎絃一 他: 日口腔インプラント誌 **27**, 30 (2014).
- [11] 是津信行 他: 表面技術 **65**, 227 (2014).
- [12] 津山青史: 鉄と鋼 **100**, 71 (2014).
- [13] T. Segawa *et al.*, J. Plasma Fusion Res. **91**, 665 (2015).
- [14] H. Nishida *et al.*, J. Plasma Fusion Res. **91**, 661 (2015).
- [15] <http://plasmamedizin.com/>
- [16] S. Ikehara *et al.*, Plasma Process Polym. **12**, 1348 (2015).
- [17] K. Miyamoto *et al.*, J. Clin. Biochem. Nutr. **60**, 25 (2017).
- [18] T. Hirata *et al.*, J. Plasma Fusion Res. **91**, 771 (2015).
- [19] K. Takagi *et al.*, J. Plasma Fusion Res. **90**, 531 (2014).
- [20] M. Okubo *et al.*, J. Plasma Fusion Res. **84**, 121 (2008).
- [21] A. Yamatake *et al.*, IEEE Trans. Plasma Sci. **34**, 1375 (2006).
- [22] C.K. Birdsall and A.B. Langdon, *Plasma Physics via Com-*

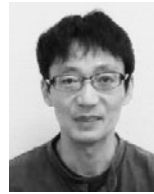
puter Simulation (McGraw-Hill, 1985).

- [23] K. Nanbu, IEEE Trans. Plasma Sci. **28**, 971 (2000).
- [24] G.A. Bird, *Molecular Gas Dynamics* (Clarendon Press, 1976).
- [25] G.A. Bird, *Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flow* (Clarendon Press, 1994).
- [26] 南部健一：プラズマ・核融合学会誌 **77**, 1137 (2001).
- [27] 南部健一：原子・分子モデルを用いる数値シミュレーション 第3章モンテカルロ法の基礎 (コロナ社, 1996).
- [28] C.K. Birdsall, IEEE Trans. Plasma Sci. **19**, 65 (1991)
- [29] G.A. Bird, The DSMC Method, createspac, <https://www.createspace.com/3689652> (2013).
- [30] Watanabe *et al.*, Plasma Fusion Res. **87**, 514 (2011).
- [31] Gogolides *et al.*, J. Appl. Phys. **72**, 3971 (1992).
- [32] G.J.M. Hagelarr *et al.*, Plasma Sources Sci. Technol. **14**, 722 (2005).
- [33] Mason *et al.*, *Transport Properties of Ions in Gases* (Wiley, 1992).
- [34] 真壁利明：プラズマエレクトロニクス (培風館, 1999).
- [35] Lieberman *et al.*, *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing* (Second edition, Wiley, 2005).



いけだ けい
池田 圭

1989年東京理科大学卒業，同年日電アネルパ(株) (現, キヤノンアネルパ(株)) 入社。2001年ウェブフロント入社。2008年10月(株)アテナシス設立。化学反応を含んだマルチフィジックス解析に従事。今回、小田先生より貴重な機会をいただきました。これから低温プラズマシミュレーションを始めようとしている方々に少しでも参考にしていただければ幸いです。



なか だて ひろし
中 館 博

1998年 東北大学大学院工学研究科 原子核工学専攻 後期課程 修了。博士(工学)。株式会社CRCを経てペガサスソフトウェア株式会社を設立。40代後半にして社内最年少。粒子モデルのシミュレーションが専門。GUIやインストーラ回りだけでなく、会社のウェブ更新、ゴミ出し、電気ポットにお湯の補給などの雑用も専門。



まつ なが ふみ ひこ
松 永 史 彦

1982年京都大学理学部卒 (おもに数学を専攻)。同年センチュリリサーチセンタ(株) (現伊藤忠テクノソリューションズ(株)) に入社し、おもに流体に関するシミュレーションを担当する。2002年にペガサスソフトウェア(株)に移り、流体モデルを用いた非平衡プラズマシミュレーション用のソフトウェア開発に従事し現在に至る。