



TOHOKU
UNIVERSITY

ISSN 2436-0066

東北大学
サイバーサイエンスセンター

大規模科学計算システム広報

SENAC

Vol.53 No.3 2020-7



Cyberscience
Center

Supercomputing System
Tohoku University

www.ss.cc.tohoku.ac.jp

大規模科学計算システム関連案内

<大規模科学計算システム関連業務は、サイバーサイエンスセンター本館内の情報部情報基盤課が担当しています。>

<https://www.ss.cc.tohoku.ac.jp/>

階	係・室名	電話番号(内線)* e-mail	主なサービス内容	サービス時間
				平日
一階	利用相談室	022-795-6153 (6153) sodan@cc.tohoku.ac.jp 相談員不在時 022-795-3406 (3406)	計算機利用全般に関する相談 大判プリンタ、利用者端末等の利用	8:30～17:15 8:30～21:00
	利用者談話室	(3444)	各センター広報の閲覧 自販機	8:30～21:00
	展示室* (分散 コンピュータ博物館)*	*現在、見学は受け付けておりません。再開は今秋を予定しています。	歴代の大型計算機等の展示	9:00～17:00
三階	総務係	022-795-3407 (3407) cc-som@grp.tohoku.ac.jp	総務に関すること	8:30～17:15
	会計係	022-795-3405 (3405) cc-kaikei@grp.tohoku.ac.jp	会計に関すること、負担金の請求に関すること	8:30～17:15
	共同利用支援係 (受付)	022-795-3406 (3406) 022-795-6251 (6251) uketuke@cc.tohoku.ac.jp	利用手続き、利用相談、講習会、ライブラリ、見学、アプリケーションに関すること	8:30～17:15
	共同研究支援係	022-795-6252 (6252) rs-sec@cc.tohoku.ac.jp	共同研究、計算機システムに関すること	8:30～17:15
	ネットワーク係	022-795-6253 (6253) i-network@grp.tohoku.ac.jp	ネットワークに関すること	8:30～17:15
	情報セキュリティ係	022-795-3410 (3410) i-security@grp.tohoku.ac.jp	情報セキュリティに関すること	8:30～17:15
四階	研究開発部	022-795-6095 (6095)		
五階	端末機室	(3445)	PC 端末機(X 端末)	8:30～17:15

* () 内は東北大学内のみの内線電話番号です。青葉山・川内地区以外からは頭に 92 を加えます。

本誌の名称「SENAC」の由来

昭和 33 年に東北地区の最初の電子計算機として、東北大学電気通信研究所において完成されたパラメロン式計算機の名前で SENAC-1 (SENdai Automatic Computer-1) からとって命名された。

[お知らせ]

大規模科学計算システムの更新について

東北大学サイバーサイエンスセンターは、大規模化するシミュレーション解析に対応することを目的として、スーパーコンピュータ「SX-Aurora TSUBASA」及び並列コンピュータ「LX 406Rz-2」（総合演算性能 1.76PFLOPS）の導入を決定しました。現システムは 令和2年7月末日をもって運用を停止し、新システムは令和2年10月の運用開始を予定しています。詳細は以下の通りです。

1. 現システムのサービス停止

1-1. サービス停止日時

令和2年7月31日（金） 15:00

1-2. 停止するサービス

現在運用しているすべてのサービス

（フロントエンドサーバ、スーパーコンピュータ SX-ACE、並列コンピュータ LX 406Re-2 等）

1-3. バッチリクエストについて

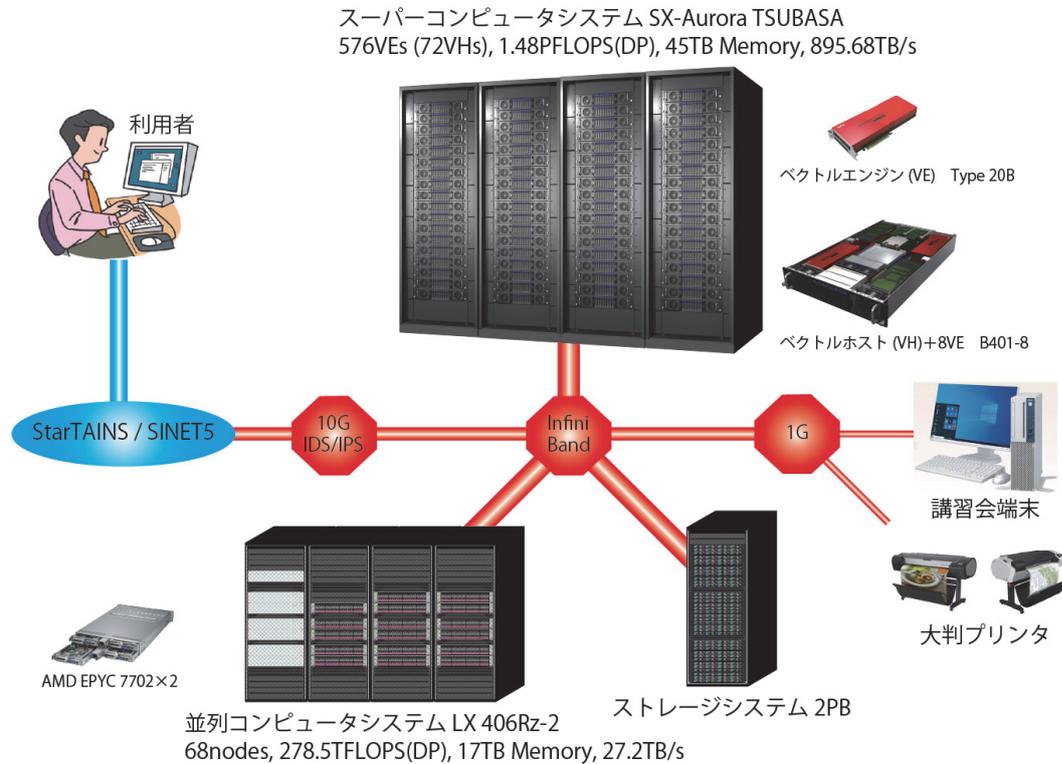
サービス停止時に以下の扱いとなります。

- ・ 実行中のリクエストは、演算の途中でも終了となり、実行した部分まで課金対象となります。
- ・ 実行待ちのリクエストは、削除となります。

1-4. ファイルについて

利用者ホーム領域（/uhome/利用者番号）、課題領域および共有ファイル領域（/super/short/プロジェクトコード）のデータはすべて、センターにて、新ストレージシステムに移行します。新システムでも引き続きご利用いただけます。

2. 新システムの構成



○スーパーコンピュータ

・SX-Aurora TSUBASA (日本電気株式会社)

システム構成	: 72 ベクトルホスト(VH) + 576 ベクトルエンジン(VE)
総合演算性能	: 1.48 PFLOPS (DP)
総主記憶容量	: 45 TB
総メモリバンド幅	: 895.68 TB/s

・ノード性能

モデル名称	: B401-8 (1VH + 8VE)
演算性能	: 1.075 TFLOPS + 19.6 TFLOPS (DP)
主記憶容量	: 256 GB + 384 GB
ノード間接続	: InfiniBand(HDR 200Gbps×2)

・プログラム開発環境

: NEC Software Development Kit for Vector Engine
(Fortran, C/C++, Numeric Library Collection, PROGINF/FTRACE)
NEC MPI

○並列コンピュータ

•LX 406Rz-2 (日本電気株式会社)

総ノード数	: 68 ノード
総合演算性能	: 278.5 TFLOPS (DP)
総主記憶容量	: 17 TB
総メモリバンド幅	: 27.2 TB/s

•ノード性能

CPU 名	: AMD EPYC 7702 ×2
演算性能	: 2.048 TFLOPS ×2(DP)
主記憶容量	: 256 GB
ノード間接続	: InfiniBand(HDR 200Gbps×1)

•プログラム開発環境 : AOCC (AMD Optimizing C/C++ Compiler),
AMD uProf, AMD Optimizing CPU Libraries,
GNU Compiler Collection(Fortran,C/C++), Open MPI
Intel Parallel Studio XE Cluster Edition

•アプリケーション : Gaussian, Mathematica, MATLAB

○ストレージシステム

•SFA7990XE (DDN)

実効容量 : 2 PB

•ファイルシステム : 並列分散ファイルシステム ScaTeFS

○その他

•利用者講習会システム

デスクトップ PC, 大判カラープリンタ等

(スーパーコンピューティング研究部, 共同利用支援係, 共同研究支援係)

[共同研究成果]

不均一反応により変化する固体燃料の大規模シミュレーション

沼澤 結：東北大学工学研究科
松川 嘉也：東北大学工学研究科
松下 洋介：東北大学工学研究科
青木 秀之：東北大学工学研究科

本研究では、X線CTを用いてコークスの構造を直接反映させたおおよそ2億ボクセルのコークスモデルを作成し、反応温度を1373 Kおよび1573 Kとしてそのコークスモデル内部においてガスの物質移動をともなうガス化反応速度解析を行った。さらに、コークスの不均質な構造を直接反映させた有意性を検討するため、比較対象として均質なモデルに対しても同様の解析を行った。その結果として、X線CTを用いて不均質な構造を直接反映させた場合はコークスが不均一に脆化し、反応後期では均質なモデルを用いた場合には表現できない炭素基質ボクセルが集中する領域のみが残存した。さらに、全体の反応率および見かけの反応速度は均質なモデルを用いた場合ではほとんど単調に変化したものの、不均質な構造を直接反映させた場合では非線形な変化を示した。

1. 緒言

多孔質炭素材料であるコークスは高炉内において還元材やスパーサーなど様々な役割を担う。特に、高炉内の通気・通液性は銑鉄の生産性に大きな影響を及ぼすため、スパーサーとしての役割は重要である。そのため、コークスは高強度であることが求められ、これまでコークスの強度に関して多くの研究が行われてきた[1-7]。これらの研究により、気孔構造がコークスの強度に大きく影響を及ぼすことが明らかとなった。また、高炉内においてコークスはガス化反応によって脆化し、粉化しやすくなる。粉化したコークスは、高炉内の通気性を障害し、高炉操業に悪影響を及ぼす。そのため、コークスのガス化反応に関して多くの実験がなされてきた[8-10]。

近年では、コークスを含む多孔質炭素材料を対象としたガス化反応の数値シミュレーションも行われている[11-14]。Richter et al.は複数の粒子で構成された多孔質モデルを対象に、気相反応および固相反応を考慮した対流拡散問題を解き、その多孔質体モデル内部および周辺部におけるガスの濃度分布について検討した[12]。Xue et al.は、複数の円錐状の気孔を持つ単一の石炭チャーモデルに対してRichter et al.と同様の解析を行い、気孔であるモデル粒子の粒径が内部の反応速度の分布に及ぼす影響を評価した。さらに、X線CTを用いて作成した石炭チャーの多孔質構造を計算に直接反映した研究もある。Fong et al.は、X線CT像から作成した石炭チャーモデルに対して物質移動を考慮したガス化反応の数値シミュレーション手法を提案し、石炭チャーの構造を均質とするモデルと比較した[14]。我々の研究では、コークスのX線CT像から多孔質モデルを作成し、そのモデルの一部を対象として有限要素法に基づいた物質移動を伴うCO₂ガス化反応解析を行った[15]。しかしながら、この手法では計算負荷の観点からより大規模の計算は現実的ではないため、コークス全体の構造変化を詳細に捉えることは困難である。

そこで、本研究では離散化手法を有限要素法から有限体積法に変更し、さらにMPIによる並列計算を可能とした計算コードを用いて、X線CT像から作成したおおよそ2億ボクセルのコークスモデルを対象に反応温度1373 Kおよび1573 Kにおいて物質移動を伴うガス化反応速度解析を行った。比較対象として均質なコークスモデルを対象とした解析も行い、実コークスの構造を考慮することの有意性について検討した。

2.手法

2.1 解析対象

2.1.1 X線CTから作成したコークスモデル(Case N)

X線CTを用いることでコークスの構造を直接反映させた解析対象を作成した。具体的には電気加熱式コークス炉を用いて Goonyella 炭を乾留し、コークスを作製した。コークスを中心部から円柱状に切り出し、コークス試料とした。そのコークス試料の大きさは $\phi 20 \times 14$ mmである。マイクロX線CTスキャナー(TOSCANER-32250 μ hd, Toshiba IT & Control Systems Corporation, Japan)を用いて、その円柱状のコークスのマイクロX線CT像を撮像した。なお、画面分解能は $20.6 \mu\text{m}/\text{pixel}$ であり、スライス厚は $32 \mu\text{m}$ である。本研究では、コークスが気孔および炭素基質から構成されると仮定したうえで、Otsuの手法[16]に基づいて2値化し、コークスのX線CT像におけるボクセルを気孔と炭素基質に分類した。2値化した画像を積層させることで、図1に示すコークスモデルを作成した。このコークスモデルの要素数は約4億ボクセルである。本研究では、高さ方向の中心の面を対称面とし、コークスモデルの半分の領域を解析対象とした。この解析対象の分割数は $950 \times 950 \times 224$ (approx. 0.2 billion)である。また、炭素基質ボクセルの密度は $1400 \text{ kg}/\text{m}^3$ とした。

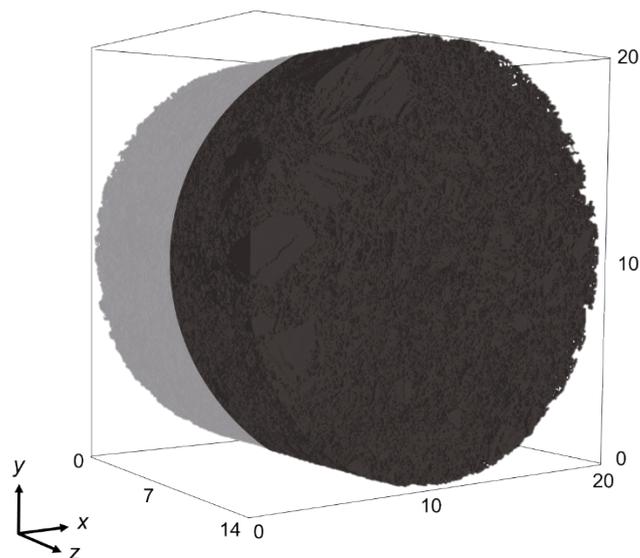


図1 およそ4億ボクセルのコークスモデル。解析対象はコークスモデルの半分の領域(黒色の領域)である。This figure is reprinted with permission from Elsevier [21].

2.1.2 均質なコークスモデル(Case U)

比較対象として均質な解析対象を作成した。この解析対象の大きさはCase Nと同様に $\phi 20 \times 14$ mmとした。また、炭素基質ボクセルの密度はCase Nと同じである。解析対象内のすべてのボクセルに空隙率 ε を与えることで、解析対象内部に均質な気孔構造を形成させた。なお、Case Nの解析対象全体における平均の気孔率が0.49であるため、初期のタイムステップにおけるボクセルの空隙率 ε を0.49とした。また、Case Uの各炭素基質ボクセルの表面積は、コークスモデル全体の表面積がCase Nと等しくなるように設定した。

2.2 コークスのガス化反応の大規模シミュレーション

2.2.1 支配方程式

コークスの X 線 CT から作成した解析対象において、拡散による CO, CO₂ および N₂ ガスの物質移動を解析した。Case N では、X 線 CT 像により解像された気孔ボクセルおよび気相ボクセル内においてガスの拡散を考慮し、その拡散方程式は次式のように表せる：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_m) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho D_{m,\text{mix}} \frac{\partial Y_m}{\partial x_i} \right) + \dot{S}_m, \quad (1)$$

ここで、 $D_{m,\text{mix}}$ は多成分系における化学種 m の拡散係数を、 S_m は化学種 m の生成項を、 Y_m は化学種 m の質量分率を、 ρ はガス密度を表す。生成項には、気孔と炭素基質との界面において CO₂ ガス化反応を考慮した。また、ガスが炭素基質ボクセル内部に拡散しないと仮定した。

Case U では、解析対象内のすべてのボクセルに空隙率 ε を与えたため、そのボクセル内においてガスの拡散方程式は次式のように表せる：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon \rho Y_m) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\varepsilon \rho D_{m,\text{mix}} \frac{\partial Y_m}{\partial x_j} \right) + \dot{S}_m \quad (2)$$

なお、気相では、空隙率 ε を 1 とした。

2.2.2 ガスの拡散

解析対象のメッシュサイズは数十 μm オーダーであり、解析対象内では分子拡散が支配的であるとした。そこで、ガスの拡散は分子拡散とし仮定し、次式により化学種 m の拡散係数 $D_{m,\text{mix}}$ を算出した：

$$D_{m,\text{mix}} = \frac{1 - X_m}{\sum_{i=1, i \neq m}^m (X_i / D_{im})}, \quad (3)$$

ここで、 D_{im} は二成分系の拡散係数であり、 X_m は化学種 m の体積分率を表す。この式は二成分系の拡散係数を多成分系に拡張した式である。2 成分系分子拡散係数は次式に示す Chapman-Enskog 理論により算出した：

$$D_{im} = 1.858 \times 10^{-7} \frac{\sqrt{T^3 \{ (1/M_m) + (1/M_i) \}}}{\left(\frac{P}{101325} \right) \sigma_{\text{ave}}^2 \Omega_{D-\text{ave}}}, \quad (4)$$

ここで、 M はガスの分子量、 T はガス温度、 P は全圧、 σ_{ave} は衝突する分子の衝突直径、 $\Omega_{D-\text{ave}}$ は Lennard-Jones ポテンシャルによる衝突積分をそれぞれ表す。

2.2.3 不均一反応

炭素基質と気相および気孔の界面における不均一反応として、以下に示す総括反応を考慮した：



炭素基質ボクセルでは、CO₂ ガス化反応によって炭素の質量を減少させた。一方で、気孔ボクセルおよび気相ボクセルでは、ガス化反応によって CO₂ を消費し、CO を生成させた。なお、反応の進行によらず炭素基質ボクセルの表面積は一定とした。また、CO₂ ガス化反応の反応速度定数 k は、Kashiwaya et al. が提案した反応速度式[17]に基づいて次式より算出した：

$$k = N_c k_c + N_a k_a, \quad (5)$$

ここで、 k_c および k_a は結晶性炭素および非結晶性炭素の反応速度定数を、 N_c, N_a は全質量に対して結晶および非結晶性炭素が占める質量の割合を表す。炭素の反応速度定数 k_c, k_a は、Langmuir-Hinshelwood 機構に基づき、式(6,7)のように定義されている:

$$k_c = \frac{k_{1,c} P_{CO_2}}{1 + k_2 P_{CO} + k_3 P_{CO_2}}, \quad (6)$$

$$k_a = \frac{k_{1,a} P_{CO_2}}{1 + k_2 P_{CO} + k_3 P_{CO_2}}, \quad (7)$$

ここで、 $k_{1,c}, k_{1,a}, k_2, k_3$ は素反応の反応速度定数、 P は圧力である。なお、Kashiwaya et al. の研究を参考に N_c を 0.25、 N_a を 0.75 とした。また、炭素基質ボクセルの反応率 X は次式のように定義した:

$$X = 1 - \frac{m_t}{m_0}, \quad (8)$$

ここで、 m_0 は初期の炭素基質ボクセルの質量、 m_t は経過時間 t の炭素基質ボクセルの質量を示す。コークス全体の反応率 X_{overall} は、次式で表せる:

$$X_{\text{overall}} = 1 - \frac{\sum m_t}{\sum m_0} \quad (9)$$

2.2.4 解析条件

有限体積法に基づいて支配方程式を離散化し、拡散項には中心差分法を適用した。反応による構造変化を観察するため、時間積分法には完全陰解法を用いて解析時間 18000 s まで解析した。なお、時間刻みを 30 s とした。行列ソルバーに AGMG (AGgregation-based algebraic MultiGrid)[18–20]を用いることで、離散化方程式の相対残差が 10^{-6} になるまで反復計算を行った。さらに、生成項が質量分率に依存するため、一タイムステップ中にそれらの項を少なくとも 4 回更新した。また、境界条件に関しては、図 2 に示すように高さ方向の中心の境界面において濃度勾配をゼロとし、この境界面を対称面とした。その他の境界は、 $N_2 : CO_2 : CO = 0.5 : 0.5 : 0$ とし、ガスの質量分率を固定した。また、反応温度が反応によるコークスの構造変化に及ぼす影響を検討するため、反応温度を 1373 K あるいは 1573 K とした。この計算は in-house コードを使用しており、計算時間は東北大学サイバーサイエンスセンター所有の並列コンピュータ LX406Re-2 において 6 ノード 72 コアを用いておおよそ 2 日であった。

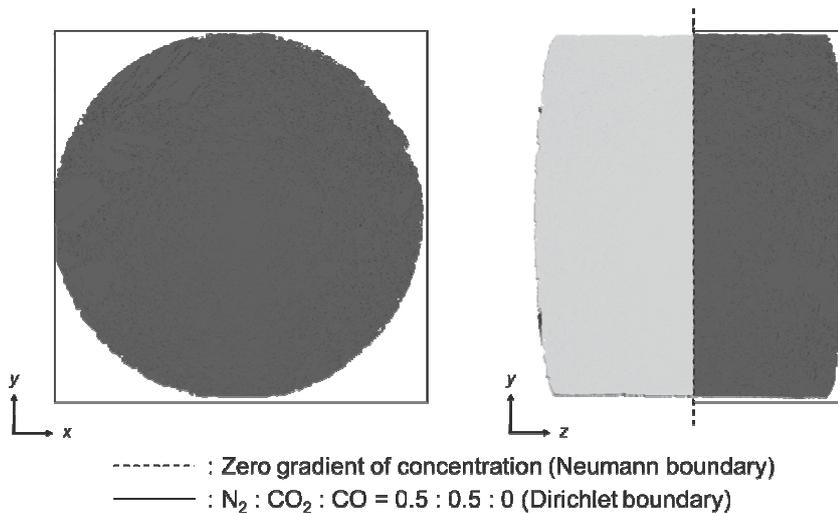


図 2. 境界条件. 点線で示す対称面において質量分率の勾配をゼロとし、実線で示すその他の面では質量分率を固定した. This figure is reprinted with permission from Elsevier [21].

3. 結果と考察

3.1 構造変化の比較

X線CTを用いてコークスの構造を直接反映することの有意性を示すため、2つのCaseで計算結果を比較した。図3に、炭素基質ボクセルの局所の反応率の空間分布の経時変化を示す。図3(a)および(b)に着目すると、Case Nではコークスが不均一に脆化したことがわかる。1373 Kではコークスの構造はほとんど変化しなかったものの、1573 Kでは反応の進行に伴いコークスの構造が大きく変化し、炭素基質ボクセルが集中する領域のみが残存した。特に、経過時間18000 sではイナーチニット(IMDC)のような特徴的な領域のみが残存した。この理由として、これらの領域では比表面積が小さく、見かけの反応性が低いことが考えられる。一方で、Case Uでは、炭素基質ボクセルはコークス内に一様に存在し、反応進行にともないコークスが縮小した。いずれの反応温度においても、局所の反応率は径方向の中心に近づくにつれ減少した。これらより、図3(b)に示す炭素基質ボクセルが集中した領域はX線CT像に由来し、Case Nではこのような特徴的な構造を考慮可能であることが示された。

3.2 コークス全体の反応率および見かけの反応速度の比較

2つのCaseを定量的に比較するため、図4にコークス全体の反応率および見かけの反応速度の経時変化を示す。いずれのCaseにおいてもみかけの反応率は、全体の傾向として時間の経過とともに単調に増加し、Case Nの1573 Kでは反応時間200 min以降において傾きが減少する非線形な挙動が見られた。これは図4(b)に示す見かけの反応速度からもわかり、反応後期において反応表面積が減少したためである。また、いずれの温度においてもCase Nの全体の反応率および見かけの反応速度はCase Uよりも大きい値を示した。反応温度1373 Kでは、Case Nの見かけの反応速度がCase Uよりもおよそ2倍大きかった。一方、反応温度1573 Kでは、Case Nの見かけの反応速度は全体の反応率が0から0.5の範囲ではCase Uの2倍程度大きかった。この差は2つのCaseで表面積とCO₂の拡散性が異なるためである。また、全体の反応率が0.5以上の範囲では両者の差が小さくなる傾向が見られた。これは両者の全体の表面積が同程度となったためである。図5に反応によるコークス全体の表面積の変化を示す。ここで、コークス全体の表面積は炭素基質ボクセルと気孔ボクセルあるいは気相ボクセルの界面の表面積の総和である。1573 Kの全体の反応率0.5以上の範囲に着目すると、Case NとCase Uの全体の表面積の差が減少したことがわかる。したがって、全体の反応率0.8付近において見かけの反応速度が概ね良好に一致した。以上より、Case NとCase Uの反応率および反応速度の差は反応による表面積の変化挙動が大きく異なることに起因することが示された。

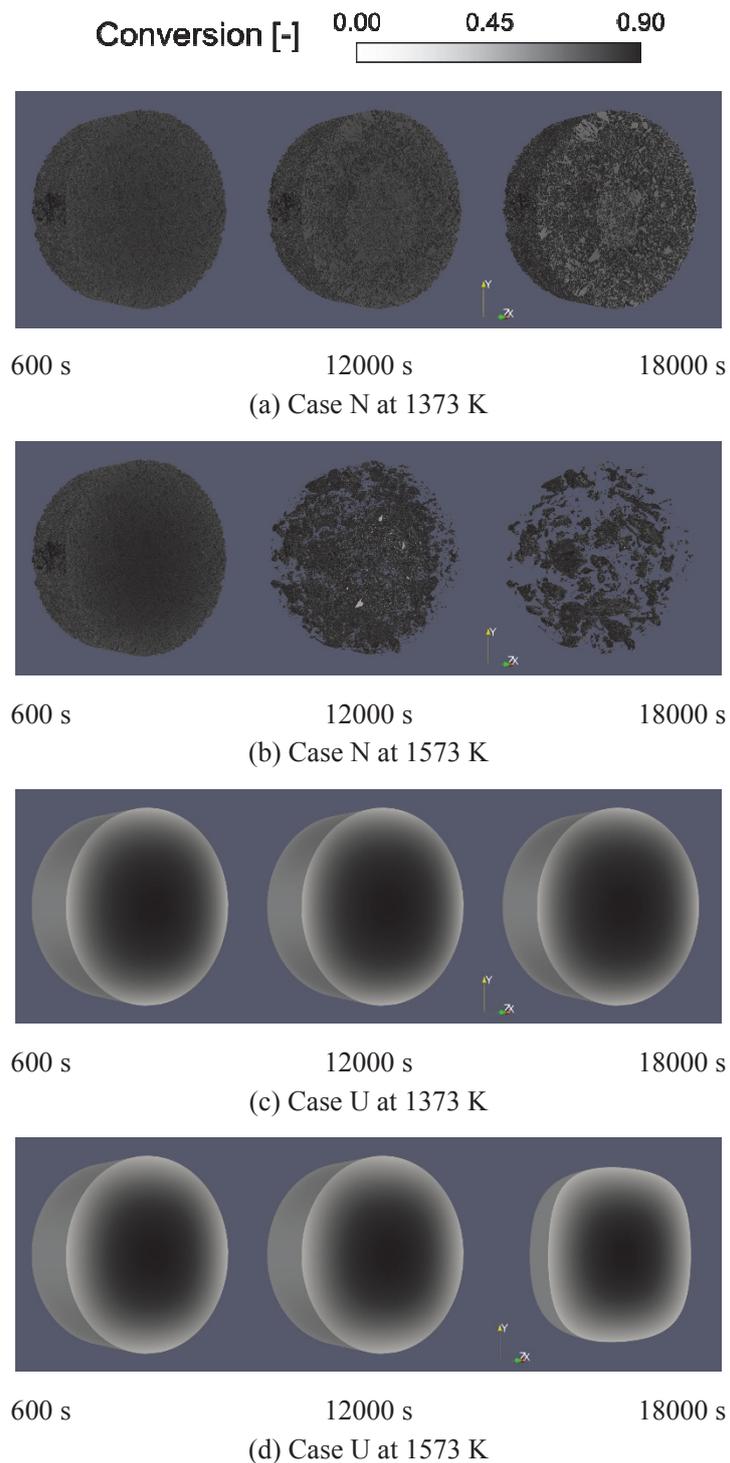


図 3 1373 K および 1573 K における Case U および Case N の反応率の空間分布の時間変化.

This figure is reprinted with permission from Elsevier [21].

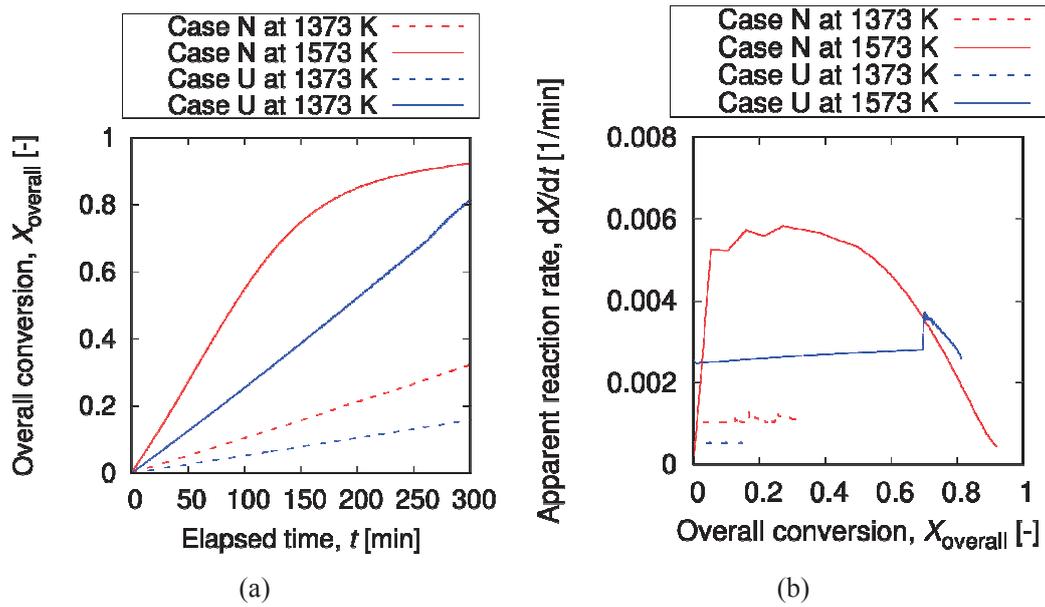


図4 ガス化反応によるコークスモデル全体の反応率および見かけの反応速度の変化.
This figure is reprinted with permission from Elsevier [21].

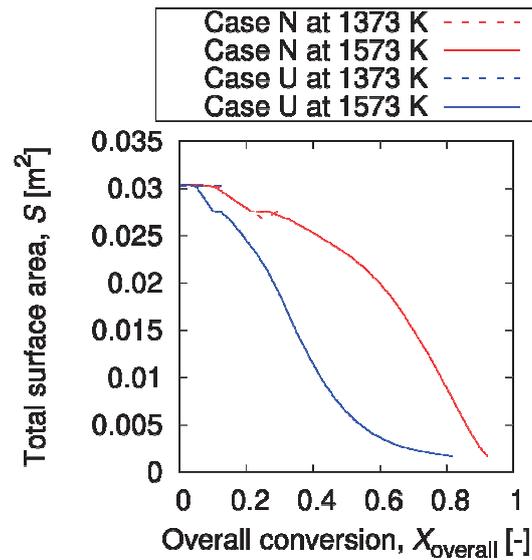


図5 ガス化反応によるコークスモデル全体の表面積の変化.
This figure is reprinted with permission from Elsevier [21].

4. 結言

本研究では、実コークスの構造の複雑さを考慮するため、反応温度 1373 K および 1573 K において X 線 CT 像から作成したおおよそ 2 億ボクセルのコークスモデルを対象に物質移動を伴うガス化反応速度解析を実施した。また、コークスの複雑な構造を考慮することの有意性を示すため、比較対象として均質なモデルに対しても同様の解析を行った。X 線 CT 像を反映させた場合ではコークスが反応の進行にともない不均一に脆化し、炭素基質ボクセルが集中する領域のみが残存した。一方で、均質なモデルを用いた場合では炭素基質ボクセルはコークス内に一様に存在し、反応進行にともないコークスが縮小した。全体の反応率は、全体の傾向として時間の経過とともに単調に増加し、X 線 CT 像を反映させた場合の 1573 K ではその傾きが反応の進行にともない減少する非線形な挙動が見られた。これは反応後期において全体の表面積が減少したためである。また、X 線 CT 像を反映させた場合の見かけの反応速度は、1373 K および 1573 K の反応初期において均質なモデルを用いた場合よりも大きい値を示した。これは両者の場合で表面積と CO_2 の拡散性が異なるためである。1573 K の反応後期では、2 つ場合における見かけの反応速度の差が小さくなった。これは両者の全体の表面積が同程度となったためである。これらより、X 線 CT 像を反映させた場合は、均質なモデルを用いた場合では見られない不均一な脆化を表現可能であり、さらに反応中における全体の表面積の違いによって全体の反応率および見かけの反応速度が均質なモデルを用いた場合と大きく異なることが示された。

謝辞

本研究は、東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータを利用することで実現することができた。また、研究にあたっては同センター関係各位に有益なご指導とご協力をいただいた。本研究は科研費 19J20961 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Grant MGK, Chaklader ACD, Price JT. Factors affecting the strength of blast furnace coke. vol. 70. 1991. doi:10.1016/0016-2361(91)90150-9.
- [2] Patrick JW, Stacey AE. The strength of industrial cokes: Part 1. Variability of tensile strength in relation to fissure formation. vol. 51. 1972. doi:10.1016/0016-2361(72)90044-0.
- [3] Patrick JW, Stacey AE. The strength of industrial cokes. 7. Further studies of the influence of additives in a coke-oven charge on the tensile strength of coke. *Fuel* 1978;57:258–64. doi:10.1016/0016-2361(78)90001-7.
- [4] Patrick JW, Stacey. The strength of industrial cokes Part 6 Further studies of the influence of coke breeze in a coal charge on tensile strength of coke. *Fuel* 1975;54 Oct.:256–64.
- [5] Jenkins DR, Lomas H, Mahoney M. Uniaxial compression of metallurgical coke samples with progressive loading. *Fuel* 2018;226:163–71. doi:10.1016/j.fuel.2018.03.173.
- [6] Kubota Y, Nomura S, Arima T, Kato K. Quantitative Evaluation of Relationship between Coke Strength and Pore Structure. *ISIJ Int* 2011;51:328–36.
- [7] Saito Y, Kanai T, Yamazaki Y, Matsushita Y, Aoki H, Nomura S. Effect of Meso-scale Pore Structure on Coke Strength. *J Japan Inst Energy* 2017;96:93–101.
- [8] Xing X, Rogers H, Zhang G, Hockings K, Zulli P, Ostrovski O. Coke degradation under simulated blast furnace conditions. *ISIJ Int* 2016;56:786–93. doi:10.2355/isijinternational.ISIJINT-2015-704.
- [9] Xing X, Rogers H, Zulli P, Hockings K, Ostrovski O. Effect of coal properties on the strength of coke under simulated blast furnace conditions. *Fuel* 2019;237:775–85. doi:10.1016/j.fuel.2018.10.069.
- [10] Pusz S, Krzesinska M, Smedowski, Majewska J, Pilawa B, Kwiecinska B. Changes in a coke structure due to reaction with carbon dioxide. *Int J Coal Geol* 2010;81:287–92. doi:10.1016/j.coal.2009.07.013.
- [11] Richter A, Nikrityuk PA, Kestel M. Numerical investigation of a chemically reacting carbon particle moving in a hot O₂/CO₂ atmosphere. *Ind Eng Chem Res* 2013;52:5815–24. doi:10.1021/ie302770j.
- [12] Richter A, Nikrityuk PA, Meyer B. Three-dimensional calculation of a chemically reacting porous particle moving in a hot O₂/CO₂ atmosphere. *Int J Heat Mass Transf* 2015;83:244–58. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.11.090.
- [13] Xue Z, Guo Q, Gong Y, Xu J, Yu G. Numerical study of a reacting single coal char particle with different pore structures moving in a hot O₂/CO₂ atmosphere. *Fuel* 2017;206:381–9. doi:10.1016/j.fuel.2017.06.035.
- [14] Fong GH, Jorgensen S, Singer SL. Pore-resolving simulation of char particle gasification using micro-CT. *Fuel* 2018;224:752–63. doi:10.1016/j.fuel.2018.03.117.
- [15] Numazawa Y, Igawa D, Matsuo S, Saito Y, Matsushita Y, Aoki H, et al. Numerical analysis of reaction degradation for threedimensional coke pore structure. *ISIJ Int* 2018;58:1420–6. doi:10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-144.
- [16] Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Trans Syst Man Cybern* 1979;9:62–6. doi:10.1109/TSMC.1979.4310076.
- [17] Kashiwaya Y, Ishii K. Kinetic analysis of coke gasification based on non-crystal/crystal ratio of carbon. *Tetsu-to-Hagané* 1990;31:440–8. doi:10.2355/isijinternational.31.440.
- [18] Notay Y. An aggregation-based algebraic multigrid method. *Electron Trans Numer Anal* 2010;37:123–46.
- [19] Notay Y. Aggregation-Based Algebraic Multigrid for Convection-Diffusion Equations. *SIAM J Sci Comput* 2012;34:A2288–A2316.
- [20] Notay Y, Napov A. An Algebraic Multigrid Method with Guaranteed Convergence Rate. *SIAM J Sci Comput* 2012;34:A1079–A1109. doi:10.1137/090750688.
- [21] Numazawa Y, Saito Y, Matsushita Y, Aoki H. Large-scale simulation of gasification reaction with mass transfer for metallurgical coke: Model development. *Fuel* 2020;266:117080. doi:10.1016/J.FUEL.2020.117080.

[共同研究成果]

プラズマアクチュエータによる低迎角時の翼流れ制御と翼空力特性の改善

藤井 孝藏：東京理科大学 工学部 情報工学科

小川 拓人：東京理科大学大学院 工学研究科 経営工学専攻

浅田 健吾：東京理科大学 工学部 情報工学科

関本 諭志：東京理科大学 工学部 情報工学科

1. はじめに

流体力学の難しさは、その強い非線形性と硬直性にある。非線形性の典型は、音速近い流れ（遷音速）での局所衝撃波と高い気流角における失速現象として現れる。そして、そのどちらもが航空機の空力的な設計点（巡航迎角と巡航マッハ数）を決定する際に重要なバフエットバウンダリー（図1）の決定要因となる現象である。後者の失速を防ぐデバイスはこれまでも多数提案され、フラップや前縁スロットといった離着陸時に利用される高揚力装置は実際に利用されているデバイスの典型である。これらの高揚力装置は離着陸という決められた手順においては非常に有効な手段であるが、マニューバ（航空機の運動）時に生ずる失速に対応するといった即応性には乏しい。また大規模で重いこともこれら装置の特徴である。

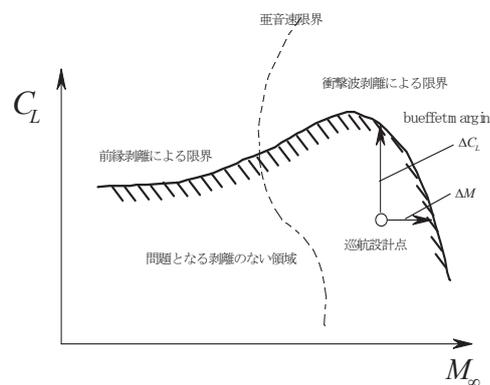


図1 バフエットバウンダリー（模式図）

近年、UAV (Unmanned Aerial Vehicle) や MAV (Micro Aerial Vehicle) が注目されている。より具体的には、荷物配達や農薬散布などに利用されるドローンや急速な進展を遂げている空飛ぶ自動車など、いわゆる輸送機とは比較にならない小型の飛行機体が話題となっている。流れを特徴づける流体力学的な無次元パラメータは速度スケールと形状サイズスケールで決まるレイノルズ数であるが、このような飛行機器周りの流れは、民間輸送機などに比して2桁、小型の航空機からは1桁低い $Re=10^3$ から 10^5 に届く程度の値となっている。高いレイノルズ数の流れには境界層の薄さや乱流といった流体力学的困難さがあるが、低いレイノルズ数にも乱流遷移による強いレイノルズ数依存性などの困難さがあり、近年その研究が広がりを見せている[1-3]。また、上述の例からもわかるように、これらの小型の飛行機は輸送機にはない多様な運動（マニューバ）を行うため、失速の制御や機体の安定性向上のための工夫が重要となる。

そんな中、15年ほど前から DBD (Dielectric Barrier Discharge: 誘電バリア放電) プラズマアクチュエータ（以下、DBD-PA）と呼ばれる流体制御デバイス[4-8] が注目され、世界的に研究が進められてきた。国内でも、日本機械学会にプラズマアクチュエータ研究会が設けられ、アカデミックな研究者のみならず、その産業利用に期待する多くの産業界の方々が参加し、実用化に向けた議論を進めている[9]。DBD-PA は、常温プラズマの生成によって流れ場に局所的な変動を与え、これにより大きな流れの制御を行う極薄の流体制御デバイスで、図2に示すように2枚の電極とそれに挟まれた薄い誘電体からなる[10]。厚さ数百マイクロメートルと非常に薄く、かつ軽量であるため、既存の流体機器にも簡単に取り付けて利用することも可能である。バリア放電を利用するため、流れる電流量は小さく、消費電力が極めて小さいこともその特徴である。プラズ

マ

マを発生させるために高電圧を生み出す電源（昇圧装置）が必要となるが、多くの実験的研究で利用される大型電源に対して、市販の数ボルト程度のリポバッテリー数本と 300g を切る小型電源によって代替できることが、最近の著者らの研究で明らかになっている [11].

航空機を対象とした DBD-PA に関する研究の多くが失速制御や揚力の増加に着目してきたのに対して、境界層の制御や抵抗低減への利用も進んできた。著者らは、低レイノルズ数域において、巡航に近い低迎角条件下では、所謂層流剥離泡の制御によって DBD-PA に翼の抵抗低減効果があることを明らかにした [10, 12 など]。ただ、これらの研究は迎角一点での結果のみに基づいたものであり、かつ最適な DBD-PA のパラメータの議論には至っていない。

本研究は、より幅広い低迎角状態においても DBD-PA による翼の抵抗低減効果が存在するのか、存在するとすればその効果はどの程度かなどを明らかにするもので、東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータなどを利用して進められた。本報告は、著者らが文献 13 などでも公開した成果に基づき、そこで得られた重要事項を整理すると同時に一部加筆したものである。DBD-PA は、流れの非線形性を上手に利用して、時空間における局時流動を制御することで大きな流れをコントロールするデバイスである。そのため、数値シミュレーションにも局所的な高い空間解像度、長時間のシミュレーションによる時間平均と時間変動場の創出などが不可欠となり、結果として 1 つのケースのシミュレーションが多大な計算規模となる。また、複数迎角など幅広い条件下での評価が必要となることから全体計算量は大きなものであることを付記しておく。

2. アプローチ

2.1 翼型、プラズマアクチュエータ、流れ条件、計算条件

翼型は私たちの研究グループも含め、多くの DBD-PA 研究で採用されている NACA0015 翼を採用する。スパン方向一様な 2 次元翼形状とするが、計算対象は乱れ成分の 3 次元性効果が評価できる長さとして 20% スパン長の翼としている。主流速度 $U_\infty \approx 10$ [m/s]、翼弦長 $c \approx 0.1$ [m] を意識し、レイノルズ数は $Re = 6.3 \times 10^4$ とする。参考として図 3 に風洞試験の様子を示すが、DBD-PA は前縁と並行に設置した。一般に失速制御に利用する DBD-PA は剥離点位置近傍に設置するのが効果的と言われていることから、本研究でも失速が始まる迎角における翼面上流れの剥離位置に近い場所として、前縁から 5% コード長位置に露出電極端が来るように設置した。シミュレーションにおいて一様流マッハ数は $M_\infty = 0.2$ と設定しているが、効率的に低速の流れを模擬するための設定であり、主流と DBD-PA による誘起流れの速度などをあわせることで、上述の通りに 10 [m/s] の主流速度における DBD-PA の効果を模擬している。迎角は、2 度から 2 度おきに失速に至る迎角までを対象とする。

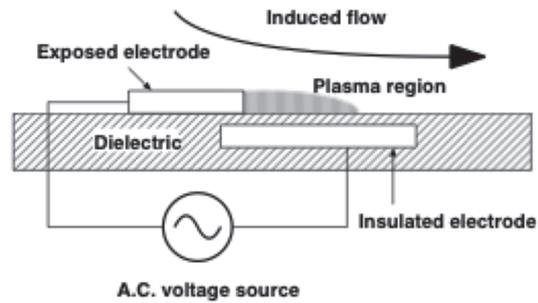


図 2 プラズマアクチュエータ模式図¹⁰⁾

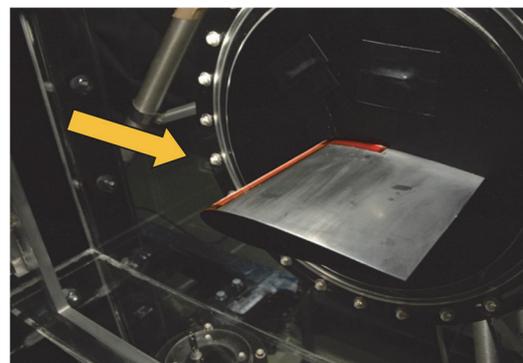


図 3 (参考) 風洞内の翼模型に設置されたプラズマアクチュエータ³⁾

2.2 プラズマ誘起流のモデル化

交流 (AC) 電源を利用した周期的な電圧変化 (AC-DBD) によるプラズマアクチュエータ (DBD-PA) においては、生成プラズマが供給する小さな運動量が流れ制御の主要因であるこの流れ場への運動量供給を、支配方程式に体積力項を導入することで模擬する。体積力のモデル化によるプラズマ効果と流体支配方程式とのカップリングには幾つかの種類が存在するが、本研究では比較的単純な Suzen & Huang の定常体積モデル (以下 Suzen モデル) [14] を非定常流れに拡張した体積モデル [15] を利用する。この修正モデルの導入方法、その信頼性、そしてこれを利用した数値計算の妥当性については、著者らの既出論文を参照されたい [16, 17 など]。アクチュエータの出力を決めるパラメータ D_c を 0.04 とした。 D_c はいわば電圧高さに相当するパラメータであり、この値は一様流 U_∞ とアクチュエータの最大誘起流速 U_{DBD} の比 U_{DBD}/U_∞ が 0.3 程度となる実験事実に整合する値である。DBD-PA では Duty Cycle を利用して電圧印加を間欠的に行うバースト波利用の有効性が確認されていることから、ここでも DBD-PA はバースト波を利用する。これまでの研究から効果が確認されている無次元バースト周波数 6.0 を基本として利用、一部のケースで他のバースト周波数も利用する。バースト比 (バースト波 1 周期時間内で DBD-PA をオンにする時間) は 0.1 とした。

2.3 数値計算手法

数値計算手法は基本的に一昨年の SENAC への寄稿 [18] と同じである。流れ場の支配方程式には、3次元圧縮性ナビエ・ストークス方程式を用い、implicit LES (Large Eddy Simulation) によるモデル化を利用した数値シミュレーションを実施する。基礎方程式を有限体積的な評価を利用した差分法により離散化して数値計算を行う。対流項および粘性項の離散化には、従来の圧縮性スキームに比べて高い空間解像度を有する 6 次精度コンパクト差分を利用している [19]。形状メトリックス、形状ジャコビアンについても同様の評価法を採用する。時間積分は、2 次精度 ADI-SGS 陰解法を用いているが、内部反復を導入することで大きな時間ステップにおいても時間精度が維持されるような工夫を施している。コンパクト差分が生み出す数値振動を抑えるフィルターには 10 次精度のものを用いている。これら計算法については文献 [20-22] などの参考文献を参照されたい。

2.4 計算格子

図 4 に計算格子を示す。ベースの格子として、翼型周りに $759 \times 134 \times 179$ 点を、DBD-PA 付近の格子空間解像度を向上させる目的で、それに重合して DBD-PA 付近に $149 \times 134 \times 111$ 点の格子を配置している。全体で、2 千万点程度となっている。格子間のデータのやりとりは文献 [23] などを参照されたい。

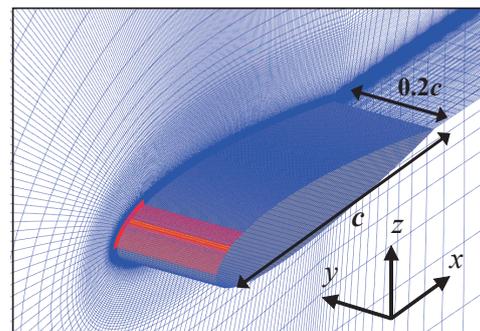


図 4 計算格子¹³⁾

2.5 利用計算機

本計算では、主に東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータ SX-ACE を利用した。実際の計算では、計算領域を分割して各ノードに割り当てて計算を行う。利用ノード数は 20 ノードである。ノード内はスレッド並列 (自動並列、一部 Open MP を利用)、ノード間は MPI によるハイブリッド並列を用いた。1 ケースの計算時間はおよそ 40 時間である。

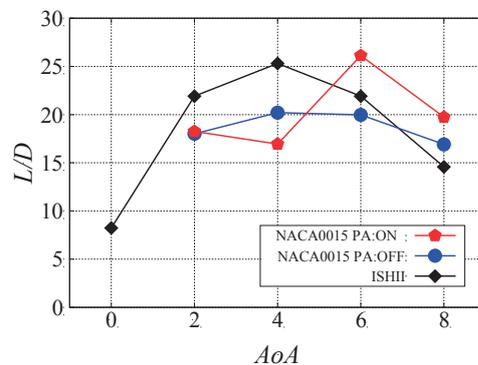
ノード内とはいえ自動並列機能（もしくは openMP）が利用できることは旧来からのプログラムの活用，また新規プログラム作成の観点でユーザの負担を軽減し，結果として本来の目的であるシミュレーションと結果の分析に研究の主体を置くことを可能にしている。

3. 計算結果

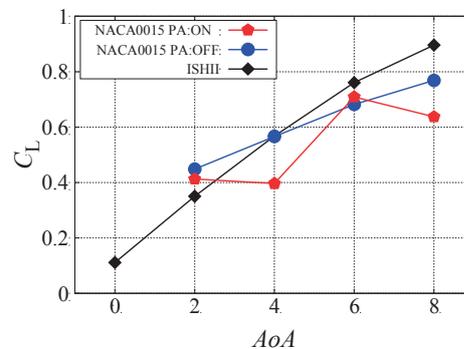
3.1 空力特性の向上（マクロ面でのプラズマアクチュエータの効果）

最初に，各迎角条件下における計算結果からマクロなデータとして航空機の空気力学特性のグラフを図 5(a)– 図 5(c)に示す．スパン方向に空間平均をとった上で一定時間内の時間平均をとった結果で，図 5(a)に航空機の巡航性能となる揚抗比 ($L/D=C_L/C_D$) を，図 5(b)と図 5(c)にはその成分でもある揚力係数 (C_L) と抗力係数 (C_D) を，横軸を迎角としてプロットしている．青色のマークが PA/OFF すなわち DBD-PA を利用しなかった場合，赤色のマークが PA/ON すなわち DBD-PA を利用した場合である．黒色のデータは，当該レイノルズ数域で高い空力性能を示すと言われ，模型飛行機などでも広く利用されている石井翼に対する計算結果である．総ての迎角において石井翼の性能（値）を越えることができれば，最大揚抗比を利用する巡航状態での DBD-PA の有効性を示すだけでなく，機体のマニューバにおいても優位性があることを示すことになる．仮に同程度の値であったとしても，石井翼が約 7%の厚み，DBD-PA をつけた翼が NACA0015 で 15%の対象翼であることから，構造的にも製造上の優位性を保てることになる。

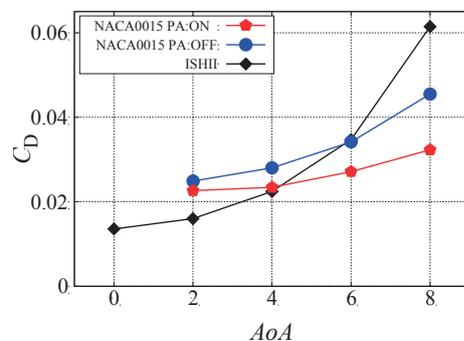
図 5(a)を見ると，PA/OFF と PA/ON の比較から，迎角 6 度以上で DBD-PA の効果が確認できる．また，石井翼の揚抗比を上回った結果ともなっている．さらに最大揚抗比は迎角 6 度において実現され，その値は迎角 4 度で実現される石井翼の最大揚抗比を越えている．揚抗比の向上はせいぜい 2 割から 3 割程度であり，失速後迎角において得られたような PA/ON によって PA/OFF の 4 倍とか 5 倍の揚抗比といった格段の向上は見られない．とはいえ，これら低い迎角でも揚抗比の向上が実現できることの意義は十分にある．なお，DBD-PA の動作パラメータ，特にバースト周波数とバースト比は失速後迎角で有効だったパラメータをそのま



(a) 揚抗比 (L/D)



(b) 揚力係数 (C_L)



(c) 抗力係数 (C_D)

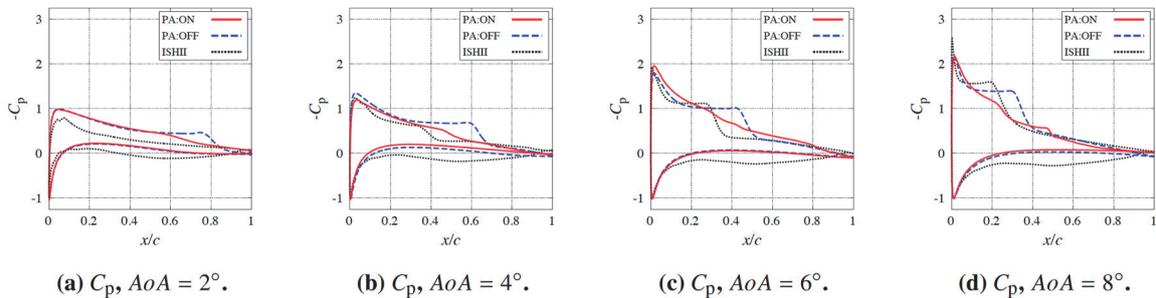
図 5 翼の空力特性¹³⁾

ま利用しており，特段の工夫をしていない点に注意いただきたい．6度以上の迎角においては，そのような条件下でも石井翼を越える揚抗比が実現されている．一方で，残念ながら迎角4度以下ではDBD-PAの効果はほとんど確認できず，石井翼の性能に及ばない．特に迎角4度では，PA/ONによって揚抗比の低下を招いてしまっている．

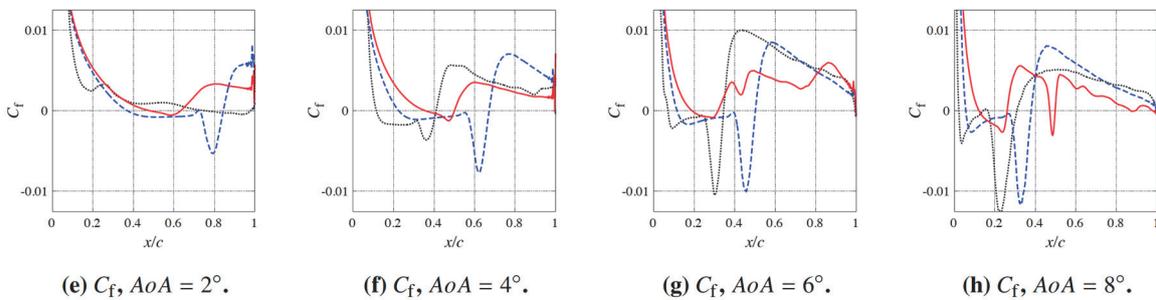
以下にこの要因と改善方法について述べるが，そのヒントになるデータとして図5(b)の揚力係数と図5(c)の抗力係数を確認する．PA/ONの揚力はPA/OFFや石井翼と異なる奇妙な変化を示している．2度，6度においてはDBD-PAの効果はあまり見られないが，4度，8度では揚力の低下を招いている．図5(c)の抗力係数はどの迎角でもDBD-PAの利用が一定の抗力係数低下を示している．すなわち，失速後の迎角のようにDBD-PAによる揚力の増加ではなく，抗力の低下によって揚抗比の向上を実現していることがわかる．この点は迎角1点だけのシミュレーションから以前に得られた結果[11]と同様で，その主張が他の迎角でも共通であることがわかる．石井翼は迎角の増加とともに急激な抗力増加を招くがNACA0015翼では増加が穏やかで，DBD-PAの利用はその増加をさらに妨げるように機能している．

3.2 翼面上圧力分布からの考察

図6(a)と(b)に翼面上の圧力(係数)と翼上面の表面摩擦係数のコード方向分布を示す．PA/OFF, PA/ONそして石井翼に対する時間とスパン方向空間平均の結果をプロットしている．この条件下では，流れ場は小さな擾乱に敏感でかなり長くとっても時間平均には一定の変動が伴う．そのため，摩擦係数分布などはある程度定性的な結果であることを予め記しておく．最初にPA/OFFの条件下でのNACA0015翼の空力特性について述べておく．一般に，レイノルズ数が 10^4 から 10^5 の条件下では，このような翼の空力特性に強い非線形性が現れる．迎角を0度から次第に上げていくと，最初は後縁剥離を起こすが，ある迎角で剥離剪断



(a) 翼面上圧力係数 C_p



(b) 表面摩擦係数 C_f

図6 時間平均した翼面上の圧力分布と剪断応力分布¹³⁾

層の再付着が起き、翼面上に層流剥離泡と呼ばれる再循環流れが形成される。層流剥離泡は、流れが層流状態で剥離し、そこで形成される剥離剪断層の流れ不安定(K-H instability)によって乱流遷移が促進されることで生ずる。さらに迎角を上げていくと、層流剥離泡は次第に前方に移動し、最後は前縁から剥離して再付着せず失速状態となる。図 6(a)の圧力係数分布においてすべての迎角における PA/OFF の結果に見られる圧力のプラトー（一定値）は主としてこの層流剥離泡が作る再循環領域によるものである。図 6(b)の翼面摩擦係数で剥離領域（係数が負の領域）からもこの事実が確認できる。一方で、石井翼は前縁の負圧ピークから滑らかな圧力上昇を示しており、圧力のプラトー領域はほとんど見られない。文献 11, 12 でも述べたように、翼面付近の流れに内在する乱れの成長を確認すると、石井翼は層流状態を長く保つ特性があり、剥離しても層流のまま再付着し、乱流遷移をほとんど起こさない点に特徴がある。結果として低い抵抗を維持し、巡航状態での高い揚抗比を実現する。図 5(a)からもわかるように、高い迎角ではこの優位性は失われていく。図 6(a), (b)ともにこのような事実をサポートしている。

図 6 における PA/ON の結果を見ると、アクチュエータの誘起流れによって、全体に巡航状態での石井翼と同様な圧力分布、すなわち層流状態を保とうとするように流れ場が変化していると考えられる。PA/ON の条件下では、どの迎角においても翼面上の剥離域はほとんど見られない。この結果は図 5(c)にあるように、PA/OFF 条件下からの抗力の減少と整合する。一方で、負圧の維持が揚力に貢献していた前縁剥離泡を失うことで、翼面上圧力分布は揚力の減少が生じている。

では、図 5(a)において迎角 4 度で起きている PA/ON による揚抗比の低下の原因は何であろうか。図 5(c)からは抗力の増加に特別の様相はなく、図 5(b)からこの原因が迎角変化に対する揚力増加の減少（むしろ若干の減少）に起因していることが確認できる。図 6(a)を改めて見てみると、まず前縁付近のサクシオンピークが迎角 4 度と 6 度の間で大きく変化していることに気づく。PA/OFF では 2 度、4 度、6 度と迎角の増加に応じてサクシオンピークは線形的に上昇しているようであるが、PA/ON では、2 度、4 度での変化は小さく、6 度になってはじめて急激な上昇がある。前縁付近のサクシオンピークは翼面全体の負圧につながるため、これが揚力減少の一因となっていると考えられる。次に、PA/OFF の場合の高い揚力の要因であった層流剥離泡を失うことで翼面上の負圧プラトー域が消滅したことが挙げられる。この揚力低下を改善する方法を見いだすため、以上の 2 つの特徴を生み出している DBD-PA の誘起流れについて次の節で述べる。

3.2 流れ場からの考察

図 7 は PA/ON（バースト波）条件下での翼面上の圧力係数分布の時間変化を色で表示したものである。横軸はコード位置(左端が前縁, 右端が後縁), 縦軸は無次元時間となっている。前縁付近では高い負圧（青色）、後縁側では相対的に高い圧力（赤）となっている。翼面上、赤色の中に

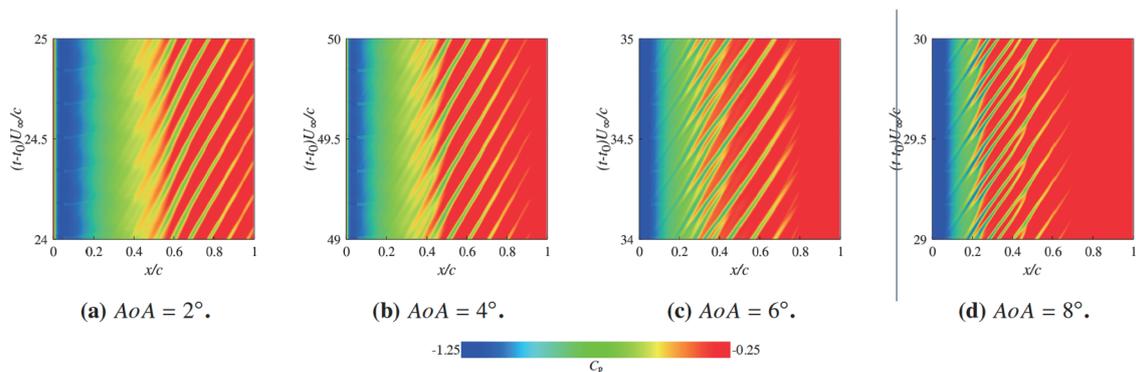


図 7 PA/ON（バースト波）条件下での翼面上の圧力係数分布の時間変化¹³⁾

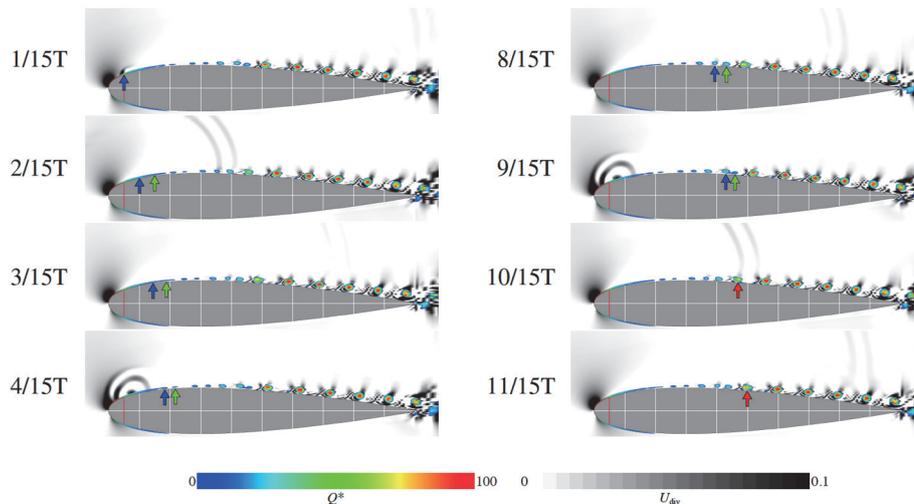


図8 翼周り流れのバースト波1周期の位相平均
(スパン平均)速度勾配テンソルの第2不変量と速度ベクトルの発散)¹³⁾

斜めの筋として見えるところは相対的に負圧が生じていることを意味している. 関連して, PA/ON の場合の迎角 4 度における翼周り流れのバースト波 1 周期の位相平均した速度勾配テンソルの第 2 不変量 (いわゆる Q 値) と速度ベクトルの発散を図 8 に示す. 位相平均はスパン方向の平均をとった上での時系列データを処理している. この図では, バースト波一周期の間の翼面上スパン方向に延びる 2 次元的渦流れの時間変化を見ることができる. 図 8 からわかるように, 図 7 に見える筋状の相対負圧域はちょうどスパン方向に延びる 2 次元渦の軌跡に対応している. これまでの研究[3, 7, 15 など]でも明らかにされているように, バースト波が駆動される度にスパン方向に設置した電極から 2 次元的な渦構造(actuation vortex)が誘起される. Actuation vortex は強い乱れを伴っている. これらの渦が翼面上を輸送される過程で別の渦(natural vortex)が翼面上に誘起される. 図 7(c)や図 7(d)に明確に見えるように, 双方の渦はコード上で合体して 1 つの渦が形成される. これらの迎角では, 形成された渦は小さな乱れ構造へと変化するため, 図 7(c)や図 7(d)には翼後方では明確な渦構造が見られない. 一方で, 図 7(b)では 50%コード位置あたりで渦の合体が実現し, 生成される渦構造は後縁近くまで維持される. 図 5(a)に見られる圧力係数の小さなバンプと図 6(b)に見られる小さな負の剪断応力はこの渦合体の伴うものと想像される. 以上, 流れ構造と結果として起きる翼の空力特性との関係は明らかになったが, これらの流れ構造が何故維持されるのか, PA/ON の条件下で前縁のサクシオンピークが迎角 4 度と 6 度の間で何故急激に高くなるかは現時点で明らかになっていない. 4 度, 6 度の迎角における結果のさらなる分析は現在進行中であるが, 次節では, この問題を解決し, 迎角 4 度での空力特性値を向上させるための 1 つの試みを示す.

3.3 揚抗比改善への一提案

前節で述べたように, 迎角 4 度での揚抗比の落ち込みを生み出す DBD-PA の誘起流れの作用要因は明確化できていないが, 結果として現れているのが, (1) 前縁サクシオンピークが低いままに留まっていること, (2) そのことと関係して,

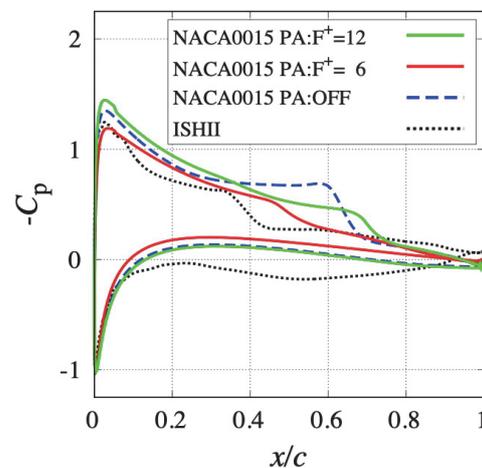


図9 時間平均した翼面上の圧力分布

前縁からの圧力回復が比較的緩くなり、結果として翼面摩擦係数の減少が緩やかになっていること、の2点である。一点だけの巡航迎角を対象とした著者らの先行研究[12]では、利用するバースト周波数が高いほどサクシオンピークは高くなっている。また、高いバースト周波数で誘起される渦構造が持つ乱流成分は小さく、これが遷移を遅らせることに有効に機能しているという推測がある。これらの事実を考え、試行的なケースとして無次元バースト周波数 F^+ を倍の 12 に、バースト比も倍の 0.2 に変更したケースを選び、対象とする迎角 4 度の条件下でシミュレーションを実施した。得られた翼面上圧力係数分布を図 9 に示す。図 6(a) の結果もあわせてプロットしている。見てわかるように、サクシオンピークはかなり高くなり、負圧領域が翼面上に広がっている。得られた空力特性値を図 10 に示す。図 5 より高い迎角の結果も加えた結果である。緑に塗られたマークが今回の結果であり、DBD-PA のパラメータを変更することで迎角 4 度における揚抗比 (L/D) が大きく向上している。

今回は議論しなかったが、迎角 8 度においても揚抗比の低下が見られる。PA/OFF のプロットからも想像できるように、失速迎角は 12 度付近にある。12 度もしくはそれ以上の迎角においては、DBD-PA は乱流遷移を促進することで（主に揚力を増加させ）揚抗比を向上させ、失速制御を実現している。一方で、巡航から失速迎角に至る低い迎角では DBD-PA が誘起する 2 次元渦が逆に乱流遷移を遅らせ、それにより（主に抗力を減少させ）揚抗比を向上させている。迎角 8 度はその境界にあり、そこでの制御には迎角 4 度や 6 度と異なる戦略が必要となると予想される。

現在、筆者らは翼面上に数点の圧力センサーを配置し、そこで得られるデータをバースト周波数に反映させるという簡単なフィードバック制御の利用によって、幅広い迎角における制御効果の向上を図っている。風洞試験においては、機械学習による判断を、数値シミュレーションでは位相平均を用いた判断をすることで研究が進みつつある。これらの技術を組み合わせることで、ほとんどの迎角において自動的に最適なバースト波のパラメータが選択され、残された課題が解決できる可能性が十分にあることを付記しておく。

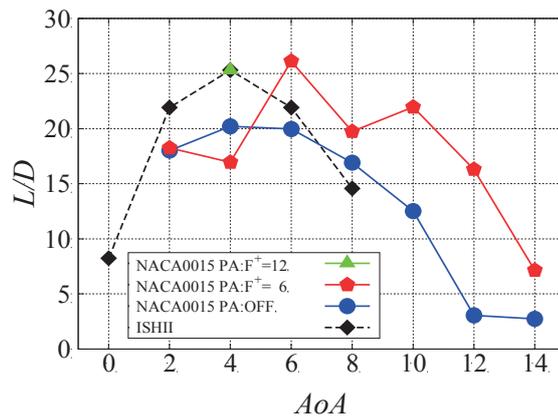


図 10 時間平均した翼面上の圧力分布

4. まとめ

高い迎角において優れた制御特性を示し、失速を制御できると言われる小型の電気的デバイス、プラズマアクチュエータ (DBD-PA) を低迎角の条件下の NACA0015 対称翼まわりの流れに適用した。DBD-PA はバーストモードを利用し、剥離剪断層の再付着効果が高いと言われる無次元バースト周波数 $F^+=6$ 、バースト比 $BR=0.1$ (10%) を利用した。著者らの既存研究において巡航迎角一点でのみ示されていた抗力低減効果は幅広い迎角で実現できることが確認され、巡航よりも高い迎角においては揚抗比の改善が見られた。一方で、迎角 2 度では改善が小さく、また迎角 4 度では揚力の低下を生ずることで揚抗比の低下が見られた。DBD-PA による誘起流れがどのように作用したかの詳細は更なる研究を待つ必要があるが、事実として前縁付近のサクシオンピークとその後の圧力回復が起きていることが確認された。これまでのシミュレーション結果を元に、サクシオンピークを高めることが期待できるより高いバースト周波数 $F^+=12$ 、バースト比 0.2 を利用した結果、迎角 4 度における揚抗比を大きく改善する結果が得られた。低迎角における DBD-PA の作用は、大迎角の場合と異なり、むしろ乱流遷移を遅らせることで抗力低減を実現している。そこでは翼面上を移動するスパン方向 2 次元渦と渦の合体が強く影響していると考えら

れるが、誘起流れの作用に関しては、今後の研究として位相平均に対する詳細な解析が必要と考えられる。

謝辞

本研究では、東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータ SX-ACE を利用させていただいた。研究にあたってご協力頂いたセンターの皆様がこの場を借りて謝意を示したい。また、本研究の一部は科学研究費補助金基盤研究 A (JSPS 18H03816) のサポートにより実施したものである。

参考文献

- [1] Winslow J. Otsuka H. Govindarajan B. and Chopra I., “Basic Understanding of Airfoil Characteristics at Low Reynolds Numbers (10^4 – 10^5)”, AIAA J., Vol. 55, No. 3, pp. 1050–1061, 2018.
- [2] Kojima R. Nonomura T. Oyama A. and Fujii K., “Large-eddy simulation of low-Reynolds-number flow over thick and thin NACA airfoils”, J. Aircraft, Vol. 50 No. 1, pp. 187-196. 2013.
- [3] 藤井孝藏, 浅田健吾, “低レイノルズ数流れに対する CFD 研究の現状と将来”, 日本航空宇宙学会誌, Vol. 67, No. 5, pp. 174-180, May 2019.
- [4] Corke T. C. Enloe C. L. and Wilkinson S. P., “Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Flow Control,” Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 42, pp. 505–529, 2010.
- [5] Post M. L. and T. C. Corke, “Separation Control on High Angle of Attack Airfoil Using Plasma Actuators,” AIAA Journal, Vol. 42 No.11,2004.
- [6] Benard N. Jolibois J. and Moreau E., “Lift and Drag Performances of an Axisymmetric Airfoil Controlled by Plasma Actuator,” Journal of Electrostatics, Vol. 67, No. 2-3, pp. 133–139, 2009.
- [7] Sato M. Nonomura T. Okada Asada K., K. Aono H. Yakeno A. Abe Y. and Fujii K., “Mechanisms for laminar separated-flow control using dielectric-barrier-discharge plasma actuator at low Reynolds number,” Physics of Fluids Vol. 27 (117101) 2015.
- [8] Fujii K., “High-performance Computing Based Exploration of Flow Control with Micro Devices,” Philosophical Transactions A, The Royal Society, Vol. 372, Article ID 20130326, pp. 1471-2962, 2014.
- [9] 日本機械学会, プラズマアクチュエータ研究会, <http://plasma-actuators.jp/>
- [10] Fujii, K., “Three Flow Features behind the Flow Control Authority of DBD Plasma Actuator”, Applied Science, 8 (4), 546, 2018.
- [11] Sekimoto S. Fujii K. Hosokawa S. Akamatsu H., “Flow-control Capability of Electronic-substrate-sized Power Supply for a Plasma Actuator”, Sensors & Actuators: A Physical, Elsevier, Vol. 306, Article 111951, May 2020.
- [12] Asano K. Sato M. Nonomura T. Oyama A. and Fujii K., “Control of Airfoil Flow at Cruise Condition by DBD Plasma Actuator - Sophisticated Airfoil vs. Simple Airfoil with Flow Control -,” AIAA Paper 2016-3624, June 2016.
- [13] Ogawa T. Asada K. Tatsukawa T. and Fujii K., “Computational Analysis of the Control Authority of Plasma Actuators for Airfoil Flows at Low Angle of Attack”, AIAA Scitech2020, Orland, Florida, USA, Jan. 2019.
- [14] Suzen Y. B. and Huang P. G., “Simulations of Flow Separation Control using Plasma Actuators,” 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, January 2006.
- [15] Asada K. Nonomura T. Aono H. Sato M. Okada K. Fujii K., “LES of Transient Flows Controlled by DBD Plasma Actuator over a Stalled Airfoil,” International Journal of Computational Fluid Dynamics, Vol. 29, 2015.
- [16] Aono, H. Sekimoto, S. Sato, M., Yakeno, A. Nonomura, T. and Fujii, K., “Computational and experimental analysis of flow structures induced by a plasma actuator with burst modulations in quiescent air,” Bulletin of the JSME Mechanical Engineering Journal Vol. 2, No. 4 pp. 1-16 2015.
- [17] Sato M. Aono H. Yakeno A. Nonomura T. Fujii K. Okada K. and Asada K., “Multifactorial effects of operating conditions of dielectric-barrier-discharge plasma actuator on laminar-separated-flow control,” AIAA Journal, Vol.53, No.9, pp. 2544-2559, 2015.

[18] 藤井孝藏, 小川拓人, 浅田健吾, “DBD プラズマアクチュエータを用いたフィードバック翼
周り流れ剥離制御モデルの検討”, SENAC, Vol. 51, No. 4, Oct. 2018.

[19] Lele S. K., “Compact finite difference schemes with spectral-like resolution,” J. Comp. Phys., Vol. 103,
pp. 16–42, 1992.

[20] Kawai S. and Fujii K., “Compact scheme with filtering for large-eddy simulation of transitional
boundary layer” AIAA J. Vol. 46, No. 3, pp. 690-700, 2008.

[21] D. Lee S. Kawai T. Nonomura M. Anyoji, H. Aono, A. Oyama, K. Asai, and K. Fujii, “Mechanisms of
surface pressure distribution within a laminar separation bubble at different Reynolds numbers,” Physics of
Fluids Vol. 27 (023602) 2015.

[22] Aono H. Kawai S. Nonomura T. Sato M. Fujii K. and Okada K., “Plasma-Actuator Burst-Mode
Frequency Effects on Leading-Edge Flow-Separation Control at Reynolds Number $2.6 \cdot 10^5$,” AIAA Journal
Vol. 55, pp. 3789-3806, 2017, DOI:10.2514/1.J055727

[23] Fujii K., “Unified Zonal Method Based on the Fortified Solution Algorithm,” Journal of Computational
Physics, Vol. 118, pp. 92-108, 1995.

[解説]

セキュア公衆無線 LAN ローミング基盤 Cityroam と
WBA OpenRoaming への参加について

後藤英昭

東北大学サイバーサイエンスセンター クラウドサービス基盤研究室

1 はじめに

公衆無線 LAN のなかでも、観光地やカフェ、公共施設などで提供されている、いわゆる「フリー Wi-Fi」では、暗号化のないオープン Wi-Fi が現在広く利用されている。しかし、オープン Wi-Fi には、無線区間の盗聴をはじめ、偽基地局に誘導しての盗聴、中間者攻撃、端末に対しての能動攻撃などの危険性があることや、ネットワークの不正利用に関する責任所在が曖昧なこと、攻撃者を追跡できないことなど、様々な問題がある。利用者登録・認証の仕組みを導入したフリー Wi-Fi も少なくないが、行く先々で登録・認証の作業が必要となり、利便性が低い。これらの問題を解決し、安全で利便性の高い公衆無線 LAN を実現しようとする、「次世代ホットスポット (NGH, Next Generation Hotspot)」と呼ばれるシステムがある。著者らは、国内の複数の通信事業者と協働して、この NGH をベースとしたフリー Wi-Fi のローミング基盤として、セキュア公衆無線 LAN ローミング基盤「Cityroam™」を開発、運用している。2020 年 5 月、WBA より、国際的なローミング基盤である「WBA OpenRoaming」のサービス開始の発表があった [1]。Cityroam は、初期サポートメンバーの一つとして、OpenRoaming に参加した。

本稿では、Cityroam の開発背景と現状、及び、WBA OpenRoaming を中心とした国際無線 LAN ローミング基盤の動向について概説する。

2 セキュア公衆無線 LAN ローミング基盤
Cityroam

国内のセキュア公衆無線 LAN ローミング基盤である Cityroam と、そのベースになった NGH テストベッド、及び、これらの開発背景・状況についての詳細は、文献 [2, 3] などで説明した。本稿では、概要を述べるに留める。

まえがきに示したように、現在主流のオープン Wi-Fi に基づくフリー Wi-Fi には、セキュリティ及び利便性の上で多くの問題があり、これらに対処するために Wireless Broadband Alliance (WBA) と Wi-Fi Al-

liance が共同で次世代ホットスポット (NGH) と呼ばれるコンセプトを提唱している。NGH は、無線 LAN ローミング環境において SSID (Service Set Identifier) の自動選択と自動接続を実現する Passpoint (Hotspot 2.0) 仕様 [4] に基づいており、Passpoint はまた、IEEE 802.1X [5] による安全な利用者認証に基づいている。Cityroam は、NGH/Passpoint をベースとして、複数の通信事業者に横断的な利用者認証の仕組みを提供する無線 LAN ローミング基盤で、安全で利便性の高い公衆無線 LAN の普及を目指している。ローミング基盤に参加する複数の通信事業者の団体は、ローミングフェデレーションと呼ばれることがあり、この観点で Cityroam はフェデレーションと呼べる。

著者は、2016 年より、学術系無線 LAN ローミング基盤 eduroam [6] を Passpoint に適応させるための技術開発や、世界規模で複数のローミングフェデレーションを結ぶためのローミングアーキテクチャの開発などを手掛けてきた。2017 年には、国内の公衆無線 LAN のセキュア化と NGH 導入を推進する目的で、著者が発起人・幹事となって「セキュア公衆無線 LAN ローミング研究会 (NGHSIG) [7]」を発足させた。以来、複数の事業者と協働で、国内の NGH 基盤及び次世代フリー Wi-Fi の整備を推進してきた。2018 年 6 月より、国内の認証連携基盤に Cityroam の名称を与え、通信事業者及び一般利用者に利用開放し、開発と実証実験を進めている。

図 1 に、Cityroam のウェブサイトの様子を示す。Cityroam では、参加事業者が設置する無線 LAN 基地局で共通の SSID="cityroam" が吹かれているのに加えて、Passpoint 用のビーコンも吹かれている。Cityroam の特徴の一つとして、eduroam との連携・統合が挙げられるが、eduroam 利用者のために SSID="eduroam" も併設されている。現在、主な参加事業者の拠点である京都市と長野市を中心として、国内各地の飲食店や宿泊施設、公園、公共施設などに基地局が設置されている。

Cityroam に参加する無線 LAN サービスの事業者は、他の事業者の利用者を自社の基地局で受け入れ、



図1 Cityroom ウェブサイト (2020年6月)

ローミングサービスを展開できる。Internet Service Provider (ISP) や各種ウェブサービスなど、無線 LAN サービスを自社では提供しないが、利用者アカウントを認証連携で提供できる事業者も、Cityroom に参加することで、利用者へ無線 LAN サービスを提供できるようになる。

本稿の執筆時点で、Cityroom には以下のようなアイデンティティプロバイダ (IdP) が接続されている [3]。

- 世界の携帯電話会社や ISP (実証実験中)
- eduroam
- ANYROAM
- Cityroom/NGHSIG クラウド認証システム
- GlobalReach Odysseys Hotspot 2.0 Signup & Provisioning Service
(一部の基地局のみで、デモ用に利用可能)
- WBA OpenRoaming (後述)

利用者は、いずれかのアカウントを持っていれば、国内各地の基地局で、Passpoint または 802.1X 認証により、安全かつ自動接続で無線 LAN が利用できる。

WBA では、NGH の技術開発と普及促進のために、NGH live と呼ばれるトライアルプログラムが走って

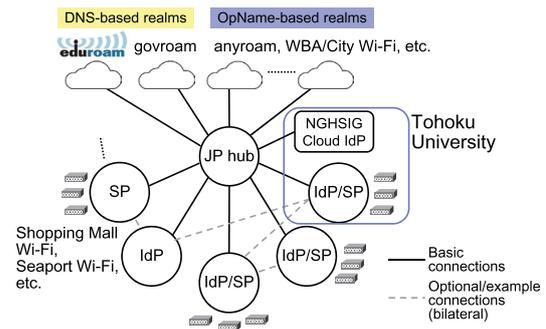


図2 JP hub と NGH テストベッド [3]

いる。また、NGH live の一部として、2016 年から 2018 年の間、各年 1~2 か月の期間で、City Wi-Fi Roaming trial と呼ばれるトライアルも開催された。このトライアルでは、世界各地の事業者や都市 Wi-Fi を結んでの実証実験が行われた。研究会では、図 2 のような NGH テストベッドを構築し、第二回となる 2017 年のトライアルに初参加、国際的な NGH 基盤との認証連携を実現した。また、翌 2018 年にもトライアルに参加し、認証連携システムの構築に技術的な支援を行い、共同実証実験を行うことで、世界の NGH の開発に貢献した。City Wi-Fi Roaming trial の期間中は、世界の携帯電話会社や ISP とも認証連携を試すことができたが、トライアル終了後は一部の事業者のみ試験的に利用できる状態である。

3 WBA OpenRoaming

OpenRoaming [1] は、世界中の市民が利用できる、セキュアな公衆無線 LAN のためのローミング基盤である。まだ開発途中のため、流動的な仕様も多い。初めに、OpenRoaming の登場した背景を簡単に説明する。

WBA では、NGH のための仕様策定に留まらず、無線 LAN サービス事業者や携帯電話会社、ISP、City Wi-Fi、その他の様々なフリー Wi-Fiなどを接続した、国際的なローミング基盤を実現しようとする構想があった。前述の City Wi-Fi Roaming trial は、このようなローミング基盤の実現に向けた、準備的な位置付けにあったと考えられる。

公衆無線 LAN の国際的なローミングとしては、以前より、幾つかの事業者がブローカーとなって認証連携を実現する仕組みが存在している。幾つかの老舗はダイヤルアップ接続の時代からのローミング事業者である。国内の無線 LAN 事業者でも、国内他社や海外の事業者とローミングを実現している例があるが、現

在の方式では、訪問先ごとに異なる SSID を利用者が手作業で選択したり、あまり安全ではないウェブ認証の画面に ID・パスワードを入力する必要があるなど、利便性でもセキュリティの観点でも、問題があった。NGH/Passpoint では、一つのアカウントを、場所や事業者によらずにシームレスに利用できる環境を目指している。

WBA などの広報によると、利用者は契約する事業者から発行された無線 LAN プロファイルを端末にインストールしておくだけで、安全かつ自動的に無線 LAN 接続が完了し、携帯電話並みの利便性が得られるとされる。また、携帯電話の SIM カードを用いた EAP-AKA (Extensible Authentication Protocol Method for 3rd Generation Authentication and Key Agreement, RFC 4187) やその改良版の EAP-AKA' (RFC 5448) にも対応しており、スマートフォンなどでは、プロファイルを別途導入することなく端末の初期状態のまま、もしくは、簡単な設定変更のみで、NGH/Passpoint 対応の公衆無線 LAN に接続できる。例えば、観光地がローミングに対応した公衆無線 LAN を提供していれば、そこを訪れた旅行者は、現地で情報をかき集めて無線 LAN 利用の登録をするといった煩わしさから開放され、すぐに無線 LAN を利用できるようになる。

国際的なローミング基盤を構築しようというプロジェクトは、WBA 以外でもあり、2019 年春に Cisco から OpenRoaming が発表された。WBA が構想するローミング基盤と目的がよく似ており、両者の関係がしばらく不明であったが、2020 年 3 月、Cisco から WBA に移管する形で両者が合流することになった。

2020 年春、WBA は通信事業者等に対して OpenRoaming への参加の呼びかけを行った。セキュア公衆無線 LAN ローミング研究会では、国内外の通信事業者とのローミングを実現しつつ、大規模ローミング基盤の実現・応用の研究のために、Cityroam を主体として OpenRoaming に参加することにした。2020 年 5 月 28 日に、WBA OpenRoaming のお披露目となるプレスリリースが出されたが、その中には初期サポートメンバーとして Cityroam 及び eduroam の名前も含まれている。

Cityroam は、NGH/Passpoint ベースのフリー Wi-Fi 向けとしては、おそらく世界初のローミングフェデレーションである。OpenRoaming は通信事業者を対象とした技術開発が続けられてきており、フェデレーションを接続するための仕組みの開発が必要である。

eduroam もフェデレーションであるが、市民一般向けの公衆無線 LAN の機能はまだ検討されていない。すなわち、サービスプロバイダ (SP) と IdP の両方の機能を有するフェデレーションとしては、Cityroam が若干先行している。OpenRoaming において、基本機能は既に開発がある程度進んでいるが、大規模フェデレーションを相互接続するという観点での技術開発はまだこれからである。また、フリー Wi-Fi 向けの世界規模のローミングサービスを実現する上で、その効率的な運用方法や、運用ルールの開発も必要である。我々は、単に Cityroam フェデレーションを運用するのみならず、運用で得られた知見を蓄積・提供し、技術開発を進めることで、世界規模の無線 LAN ローミング基盤の構築に貢献することを目指している。

4 むすび

国内のセキュア公衆無線 LAN ローミング基盤である Cityroam の開発背景と現状、及び、WBA で立ち上がった国際的なローミング基盤である OpenRoaming について概説した。

世界には、市民のネットワーク接続は政府が最低限保証すべきものという見方があり、実際に社会インフラの一つとして公衆無線 LAN を展開している例が散見されるようになった。一方、まだ一部の国に限られており、応用開拓はこれからといった状況ではあるが、高等教育機関を中心に普及してきた eduroam が、初等・中等教育機関や会議施設等にも導入されるようになってきた [8]。学校側でも、eduroam に限らず、市民一般向けの公衆無線 LAN をキャンパス内に併設し、市民サービスや避難所としてのインフラに役立てようとする動きがある [9]。OpenRoaming 参加を通じて、通信事業者と協働することで、ICT 活用社会のインフラとなるような公衆無線 LAN ローミング基盤の技術開発と展開を推進していく予定である。

参考文献

- [1] WBA OpenRoaming, <https://wballiance.com/openroaming/>
- [2] 後藤英昭, “次世代ホットスポット (NGH) の世界動向と NGH 対応 eduroam システムの開発,” 信学技報 IA2017-61/IN2017-60, pp.49-54, 2017.
- [3] 後藤英昭, “安全で利便性の高い公衆無線 LAN を提供する次世代ホットスポット基盤 Cityroam” 東北大学サイバーサイエンスセンター 大規模科学計算システム広報 SENAC Vol.51, No.3, pp.16-

- 19, 2018.
- [4] Wi-Fi Alliance, “Passpoint – Wi-Fi ホットスポットネットワークへのシームレスでセキュアな接続を実現,” <https://www.wi-fi.org/ja/discover-wi-fi/passpoint/>
 - [5] IEEE Std 802.1X-2010, “Port-Based Network Access Control.”
 - [6] eduroam JP, <https://www.eduroam.jp/>
 - [7] セキュア公衆無線 LAN ローミング研究会 (NGH-SIG), <https://nghsig.jp/>
 - [8] Sabrina McCollum, “Connectivity in the School Sector: NREN Survey Results for Access and Connectivity of Schools in Europe,” GN4-2-17-241b113, GÉANT, 2017.
 - [9] 原田寛之, 後藤英昭, “学術無線 LAN ローミング基盤 eduroam と次世代ホットスポット基盤 Cityroam のキャンパスへの展開,” 大学 ICT 推進協議会 2018 年度年次大会 論文集 MA1-5, 2018.

[利用相談室便り]

令和2年度の利用相談について

サイバーサイエンスセンターの利用相談についてご案内いたします。今年度は、新型コロナウイルス感染防止のため安全確保を最優先に考え、相談は主にメールと電話で受け付けます。面談をご希望の方は、事前に以下相談窓口にてメールでご連絡ください。相談内容、時間帯によっては、時間を要する場合がありますが、利用者の問題解決にむけて努めております。センター本館相談室には、各種マニュアル、書籍も揃えています。相談室での閲覧、貸し出し（要事前予約）も可能ですのでご活用ください。

センター利用に関してご質問、ご不明な点があればお気軽にご利用ください。

- ・プログラムを高速化するにはどうしたらいいの？
- ・プログラムを並列化してもっと速く計算したい！
- ・スパコンでプログラムを動かしても速さがPCと変わらないんだけど、どうして？
- ・研究室のコンピュータではメモリが足りない！
- ・研究室の電気代高騰で困っている。
- ・コンピュータの管理は面倒。研究に専念したい。
- ・サービスしているアプリケーションを研究室から利用するにはどうすればいいの？

このような、スーパーコンピュータ利用に関する疑問や問題をお持ちの方、これから利用してみたいとお考えの方、一度相談してみたいはいかがでしょうか。

相談窓口メールアドレス：sodan@cc.tohoku.ac.jp

電話：022-795-6153(利用相談室)

022-795-3406(共同利用支援係)相談員不在の場合



サイバーサイエンスセンター本館（右）、
2号館（左）

令和2年度利用相談日程と主な担当分野

曜日・時間		テクニカルアシスタント	主な担当分野
月	14時～16時	佐々木大輔 (情報基盤課共同研究支援係)	<ul style="list-style-type: none"> ・スーパーコンピュータ ・並列コンピュータ ・Fortran ・大判プリンタ
火	14時～16時	齋藤 敦子 (情報基盤課共同研究支援係)	<ul style="list-style-type: none"> ・スーパーコンピュータ ・並列コンピュータ ・大判プリンタ
木	14時～16時	森谷 友映 (情報基盤課共同研究支援係)	<ul style="list-style-type: none"> ・スーパーコンピュータ ・並列コンピュータ ・Fortran ・大判プリンタ
金	14時～16時 (事前予約*)	小松 一彦 (サイバーサイエンスセンター)	<ul style="list-style-type: none"> ・スーパーコンピュータ ・並列コンピュータ ・高速化 (ベクトル化、並列化) ・Fortran ・C/C++
事前予約*		菅野 学 (理学研究科)	<ul style="list-style-type: none"> ・Gaussian
事前予約*		山下 毅 (情報基盤課共同利用支援係)	<ul style="list-style-type: none"> ・アプリケーション全般 ・高速化 (ベクトル化、並列化) ・Fortran ・負担金
事前予約は、共同利用支援係 (uketuke@cc. tohoku. ac. jp) あてメールでご連絡ください。上記以外の時間帯 (平日 9 時～17 時) は共同利用支援係で対応いたします。			

[新テクニカルアシスタントの自己紹介]

菅野 学 (かんの まなぶ)

東北大学 大学院理学研究科化学専攻 助教

新しくテクニカルアシスタントを務めさせて頂くことになりました理学研究科化学専攻助教の菅野 学と申します。量子化学計算ソフトウェア Gaussian の利用相談を担当致します。

昨今の計算機の発達および多種多様な有償・無償の計算プログラムのリリースにより、計算化学は実験研究者にとっても身近かつ重要なツールになりました。著名な国際誌に目を通すと、実験データと上手く合致するシミュレーション結果をセットにした論文が増えています。Gaussian は化学の分野で最も広く使われているソフトウェアです。長い歴史を有し、多くの機能を備えています。それが故に使いこなすのは計算化学者であっても簡単ではありません。Gaussian の入力ファイルの書き方や出力結果の解析の仕方、あるいは計算条件の選択など、利用者の方々が遭遇する諸問題の解決を支援します。1年間どうぞよろしくお願い致します。

[報告]

令和2年度科学技術分野の文部科学大臣表彰において、曾根秀昭教授らが科学技術賞（理解増進部門）を受賞

令和2年度 科学技術分野の文部科学大臣表彰において、本センター・曾根秀昭教授らのグループが「科学技術賞（理解増進部門）」を受賞しました。

曾根教授らは、高等教育機関の情報セキュリティ対策のためのサンプル規程集と教材を作成・公開することにより、情報セキュリティポリシーの普及啓発と支援を進めてきました。また、最新の状況に対応した改訂（図1）と普及促進も行ってきました。このサンプル規程集は条文サンプルと解説から構成されており、大学等の各機関が情報セキュリティ対策を理解したうえで必要な編集を行うことを通じ、自らの機関に適した規定を策定できます。また、多くの大学が共通して活用できるのも特長です。さらに、情報セキュリティ教材のe-learningシステムによる提供（図2）も特徴であり、多くの大学等で教育に組込んで利用されてきました。情報セキュリティ規定は法律、制度、組織運営、関連技術等の最新の知識が求められる課題ですが、各機関で具体的な参考として役立つよう、標準的かつ活用可能な規定群を策定して各機関の取組みを支援してきました。また、多くの大学等で利用されてきた教材と併せて、わが国の高等教育機関の情報セキュリティ水準の維持、向上にも貢献してきたことが高く評価されたものです。

なお、業績名、受賞者は以下のとおりです。

○科学技術分野の文部科学大臣表彰 科学技術賞（理解増進部門）

業績名：高等教育機関のための情報セキュリティ規定と教材の普及啓発

受賞者：曾根秀昭（東北大学教授／国立情報学研究所（NII）客員教授）（筆頭者）

金谷吉成（東北大学特任准教授／国立情報学研究所客員准教授）

上田浩（法政大学教授／国立情報学研究所客員教授）

長谷川明生（中京大学教授／国立情報学研究所客員教授）

小川賢（神戸学院大学教授／国立情報学研究所客員教授）

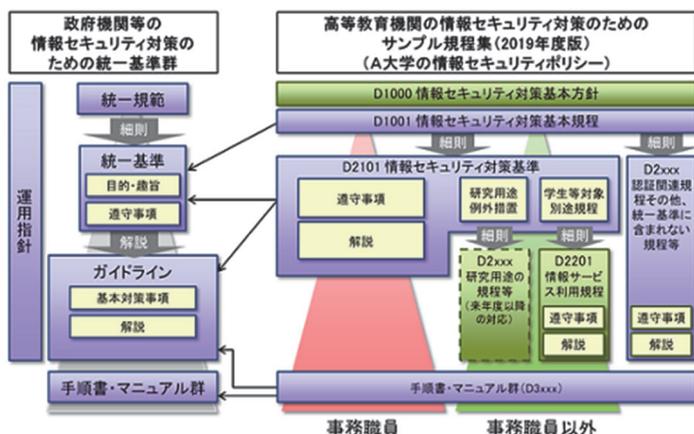


図1 「政府機関等の情報セキュリティ対策のための統一基準群」平成30年度版に準拠したサンプル規程集の改訂（2020年2月）



図2 高等教育機関における情報セキュリティ教育のための教材「倫倫姫の情報セキュリティ教室」(2020年3月)

[Web 版大規模科学計算システムニュースより]

大規模科学計算システムニュースに掲載された記事の一部を転載しています。 <http://www.ss.cc.tohoku.ac.jp/tayori/>

令和 2 年度からの利用負担金の請求について (No. 297)

令和 2 年度から利用負担金の請求は年 2 回となります。上期（4 月 1 日から 9 月 30 日まで）の利用負担金を 10 月上旬に、下期（10 月 1 日から 3 月 31 日まで）の利用負担金を 4 月上旬に請求します。請求月以外に請求書が必要な場合は、請求書発行を希望する日の 1 ヶ月前までに共同利用支援係（uketuke@cc.tohoku.ac.jp）までご連絡をお願いします。

なお、本年度は大規模科学計算システムの更新に伴い現システムは 7 月末日をもって運用を停止します。上期の利用負担金の請求は 8 月上旬に行います。

（共同利用支援係，会計係）

利用負担金額の表示コマンドについて (No. 297)

本センター大規模科学計算システムでは、利用者の利用額とプロジェクトごとに集計した負担額、請求情報を表示するためのコマンドとして `ukakin`, `pkakin` があります。また、利用者のジャーナル情報とプロジェクトごとに集計したジャーナル情報を CSV 形式で出力するコマンド `ulist`, `plist` があります。これらのコマンドは、並列コンピュータ (front.cc.tohoku.ac.jp) にログインして使用します。

コマンド名	機 能
<code>ukakin</code>	利用者ごとの利用額を各システム、月ごとに表示
<code>pkakin</code>	プロジェクトごとに集計した負担額、請求情報を表示
<code>ulist</code>	利用者ごとのジャーナルを CSV 形式で出力
<code>plist</code>	プロジェクトごとに集計したジャーナルを CSV 形式で出力

いずれも、前日までご利用いただいた金額を表示します。コマンド使用例は大規模科学計算システムウェブページをご覧ください。

負担金の確認

<https://www.ss.cc.tohoku.ac.jp/utilize/academic.html#負担金の確認>

（共同利用支援係）

— SENAC 執筆要項 —

1. お寄せいただきたい投稿内容

サイバーサイエンスセンターでは、研究者・技術者・学生等の方々からの原稿を募集しております。以下の内容で募集しておりますので、皆さまのご投稿をお待ちしております。なお、一般投稿いただいた方には、謝礼として負担金の一部を免除いたします。

- ・一般利用者の方々が関心をもたれる事項に関する論説
- ・センターの計算機を利用して行った研究論文の概要
- ・プログラミングの実例と解説
- ・センターに対する意見、要望
- ・利用者相互の情報交換

2. 執筆にあたってご注意いただく事項

- (1)原稿は横書きです。
- (2)術語以外は、「常用漢字」を用い、かなは「現代かなづかい」を用いるものとします。
- (3)学術あるいは技術に関する原稿の場合、200字～400字程度のアブストラクトをつけてください。
- (4)参考文献は通し番号を付し末尾に一括記載し、本文中の該当箇所に引用番号を記入ください。
 - ・雑誌：著者, タイトル, 雑誌名, 巻, 号, ページ, 発行年
 - ・書籍：著者, 書名, ページ, 発行所, 発行年

3. 原稿の提出方法

原稿のファイル形式はWordを標準としますが、PDFでの提出も可能です。サイズ*は以下を参照してください。ファイルは電子メールで提出してください。

—Wordの場合—

- ・用紙サイズ：A4
- ・余白：上=30mm 下=25mm 左右=25mm 綴じ代=0
- ・標準の文字数（45文字47行）

<文字サイズ等の目安>

- ・表題=ゴシック体 14pt 中央
- ・副題=明朝体 12pt 中央
- ・氏名=明朝体 10.5pt 中央
- ・所属=明朝体 10.5pt 中央
- ・本文=明朝体 10.5pt
- ・章・見出し番号=ゴシック体 11pt～12pt

*余白サイズ、文字数、文字サイズは目安とお考えください。

4. その他

- (1)執筆者には希望により本誌PDF版を進呈します。
- (2)一般投稿を頂いた方には謝礼として、負担金の一部を免除いたします。免除額は概ね1ページ1万円を目安とします。詳細は共同利用支援係までお問い合わせください。
- (3)投稿予定の原稿が15ページを超える場合は共同利用支援係まで前もってご連絡ください。
- (4)初回の校正は、執筆者が行って、誤植の防止をはかるものとします。
- (5)原稿の提出先は次のとおりです。

東北大学サイバーサイエンスセンター内 情報部情報基盤課共同利用支援係

e-mail uketuke@cc.tohoku.ac.jp

TEL 022-795-3406

スタッフ便り

スタッフ便りを書く順番が回ってきました。←二年前にスタッフ便りを書いたときの書き出しがこれでした。そのときの内容を復習がてら読むと、その日の出来事を（日記のように）記述するという、我ながら姑息な手法でスペースを埋めていたようです。ついでにその二年前の付近のカレンダーを振り返ってみると、隔週ぐらいで国内や国外に出張していたようです。今日時点からみて最後の出張は今年1月の高知でのシンポジウムでした。改めて、ここ最近の数か月の生活は、当時とは一変したなあと思わずにはられません。広報誌 SENAC の今号の編集部会の会議も Google Meet によりオンラインによって行われました。考えてみると、対面での会議は2月以降一度も経験していないですね。個人的には会議に関しては、オンラインの方が便利で捗る気がします。各種 Web 会議アプリにも随分と慣れてきた気がします。この先、オンライン会議が主流になり続けるのでしょうか。ところで、今号の記事にありますように、大規模科学計算システムが更新されます。ちょうど今、センターの2号館で搬入作業等が行われています。今回もまたオチもなく近況を書くだけになってしまいました。(T.M)

4月1日付け着任後、新型コロナウイルス感染拡大防止への大学としての対応は、目まぐるしく変化し、あっという間に3ヶ月が経過している。本号が発行されている頃は、まだ本学がレベル1であることを心より祈っております。政府の緊急事態宣言解除後の経済活動は、それ以前より当たり前のように活発となり「ウィズコロナ」との付き合い方に苦慮している。私自身、建物の中に入った際には手指用アルコール消毒をまず探し、エレベーターには乗らず案内板を横目で見ながら階段を目指して目的の場所へ向かい、さっさと選んだあとはレジで当然のようにソーシャルディスタンスを保ちキャッシュレス決済となんと今時に順応しているではないか。

しかし、梅雨時の休日は兼業農家の宿命である田んぼ周辺の草刈りと畑の草取りで大量の汗を流したあと、毎週楽しみにしている「こんな所にポツンと一軒家」を今度は胃内アルコール消毒をしながら手づかみで漬物などつまみを頬張り、こんな生活もありかな？ 早く梅雨が明けないかな？ 早くスーパーコンピュータでワクチン開発できないかな？ 早く遠隔医療で血糖値と血圧下がらないかな？ などと妄想にふけている。(S.U)



開発中の青葉山キャンパス

SENAC 編集部会

滝沢寛之 水木敬明 後藤英昭 伊藤昭彦
早坂和勝 大泉健治 小野 敏 斉藤くみ子

令和2年7月発行
編集・発行 東北大学
サイバーサイエンスセンター
仙台市青葉区荒巻字青葉6-3
郵便番号 980-8578
印刷 株式会社 東誠社

システム一覧

計算機システム	機種
スーパーコンピュータ	SX-ACE
並列コンピュータ	LX 406Re-2

サーバとホスト名

フロントエンドサーバ	front. cc. tohoku. ac. jp
SSH アクセス認証鍵生成サーバ	key. cc. tohoku. ac. jp

サービス時間

利用システム名等	利用時間帯
スーパーコンピュータ	連続運転
並列コンピュータ	連続運転
サーバ	連続運転
可視化機器室	平日 9:00～21:00
館内利用	平日 8:30～21:00

スーパーコンピュータ (SX-ACE) の利用形態と制限値

利用形態	利用ノード数 ※	実行時間制限 (経過時間)	メモリサイズ制限	-q オプション	-b オプション
通常	1～1,024	規定値：1週間 最大値：1ヶ月	60GB×ノード数	sx	利用ノード数
無料	1	1時間	60GB		f
デバッグ	1～16	2時間	60GB×ノード数	debug	利用ノード数
	17～32	24時間			

※ 2ノード以上を利用した並列実行にはMPIの利用が必用

並列コンピュータ (LX 406Re-2) の利用形態と制限値

利用形態	利用ノード数 ※	実行時間制限 (経過時間)	メモリサイズ制限	-q オプション	-b オプション
通常	1～24	規定値：1週間 最大値：1ヶ月	128GB×ノード数	lx	利用ノード数
アプリケーション	1	なし	128GB		a
会話型	1 (6コアまで)	1時間 (CPU時間合計)	8GB	-	-

※ 2ノード以上を利用した並列実行にはMPIの利用が必用

目次

東北大学サイバーサイエンスセンター

大規模科学計算システム広報 Vol.53 No.3 2020-7

[お知らせ]

大規模科学計算システムの更新について	1
--------------------------	---

[共同研究成果]

不均一反応により変化する固体燃料の大規模シミュレーション	沼澤 結 4
	松川 嘉也
	松下 洋介
	青木 秀之

プラズマアクチュエータによる低迎角時の翼流れ制御と翼空力特性の改善	藤井 孝藏 13
	小川 拓人
	浅田 健吾
	関本 諭志

[解説]

セキュア公衆無線 LAN ローミング基盤 Cityroam と WBA OpenRoaming への参加について	後藤 英昭 23
----------------------------------------------------------------	----------

[利用相談室便り]

令和 2 年度の利用相談について	27
------------------------	----

[報告]

令和 2 年度 科学技術分野の文部科学大臣表彰において、曾根秀昭教授らが科学技術賞（理解増進部門）を受賞	29
------------------------------------------------------------	----

[Web 版大規模科学計算システムニュースより]

令和 2 年度からの利用負担金の請求について (No.297)	30
---------------------------------------	----

利用負担金額の表示コマンドについて (No.297)	30
----------------------------------	----

執筆要項	31
------------	----

スタッフ便り	32
--------------	----