

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.49 No.1 2016-1



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。>

http://www.ss.cc.toho	ku. ac.	jp/
-----------------------	---------	-----

化比	低·索々 電話番号(内線)*		ナわサービフ内容	サービス時間
庐白	你"王泊	e-mail	土なりーレクバロ谷	平日
		022-795-6153 (6153)	計算機利用全般に関する相談	8:30~17:15
	利用相談室	sodan05@cc.tohoku.ac.jp 相談員不在時 022-795-3406(3406)	大判プリンタ、利用者端末等の 利用	8:30~21:00
一階	利用者談話室	(3444)	各センター広報の閲覧	8:30~21:00
	展 示 室 (分散 コンピュータ博物館)		歴代の大型計算機等の展示	9:00~17:00
	可視化機器室	(3428)	三次元可視化システムの利用	9:00~21:00
	総務係	022-795-3407(3407) som@cc.tohoku.ac.jp	総務に関すること	8:30~17:15
	会計係	022-795-3405(3405) kaikei@cc.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
三階	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
	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、アプリケーション に関すること	8:30~17:15
	ネットワーク係	022-795-6253(6253) net-sec@cc.tohoku.ac.jp	ネットワークに関すること	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)	

\*()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。

\_\_\_\_

本誌の名前「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ト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。

#### [巻頭言]

## 先端スーパーコンピュータが利用できる幸せ

#### HPCI コンソーシアム理事長 藤井 孝蔵

2016年の巻頭言をというお話しをいただきました. HPCI コンソーシアム理事長という立場 もこれがサイバーサイエンスセンターの巻頭言であるということも忘れて,計算科学分野の一 研究者として思うことを書かせて頂くことにします.

まず HPCI の現状です. 今年はいろんな意味で HPCI が変化を迎える年になります. アプリ 面では、京コンピュータを利用した5つの戦略プログラムが3月で終了し、すでに動きはじめ ている 9 つの重点課題プログラムが 4 月から本格化します. 終了にともなって戦略プログラム の成果が評価を受けますし、京コンピュータ利用も9年を経過することで、その運用や支援業 務が中間評価を受けると聞いています.つまり,京を中心とした HPCI の最初の3年ほどの成 果が問われる年になります.ハードウェア面では、現在、文科省の委員会等で議論が進んでい るポスト京コンピュータは基本設計フェーズを終了し、まもなく文科省の委員会から評価報告 書が出る予定です. 順調であれば, 試作・詳細設計フェーズへと移行します. ポスト京コンピ ュータの本格運用開始は 2020 年が予定されていますので、それまでの 5 年間は HPCI の第二 期として、京を凌駕する性能のマシンが大学の情報基盤センターに登場すると予想されていま す. 詳細は HPCI コンソーシアムホームページ 5 月 27 日づけのお知らせ「9 大学センター群の |今後の整備計画~要約版」をご覧ください.すなわち,ピラミッド型の HPCI がこの時期は八 ヶ岳型に移行することになり、大学情報基盤センターなど第二階層を構成する機関の計算機資 源の利用とそのサポートの考え方がとても重要になってきます。国内屈指のベクトル機を有す る東北大のサイバーサイエンスセンターにも、当然重要な一翼を担っていただくことになりま す.なお,これについては,現在理化学研究所に設置された WG と連携して意見交換会を開催 するなど,春の提言とりまとめに向けて HPCI コンソーシアムが議論を進めています.

ー計算科学研究者の立場でこれらの変化を見ると、気になる点があります.例えば、9 つの 重点課題に携わる研究者の多くが 5 つの戦略分野の関係者である点です.多くの公的研究費に おいて直近の成果が求められる状況が続いていますし、大きな予算を必要とするスパコンの場 合は、なおさら社会に見える成果が求められます.確実に見える成果を期待する結果、先端ス パコンの利用経験が豊富な研究者からの提案が選ばれるのも仕方ないといえます.しかし、す ぐに形になるような成果を革新に結びつけるのは難しいものです.これまでの努力で利用者が 広がりつつあるとはいえ、もっと爆発的な広がりがその利用に生まれることを期待したいとこ ろです.10 年ほど前に、ある航空関係の国際会議の基調講演で、Evolutionary Effort と Revolutionary Effort という話をしたことがあります.今求められるのは後者なのですが、なか なかよいアイデアは出てきません.「リスクを覚悟するものだけが成功する」という言葉にあるよ うに、そのような研究は高いリスクを伴うでしょう.みなさんも考えてみていただけると幸いです. 私自身は、10年ほど前からスパコン開発に携わる方々に「今の利用者の声を聞くな.使った ことのないが優れたアイデアを持った人の声に耳を傾けろ」と言ってきました.弾道計算のた めに使われたコンピュータが社会生活に溶け込んでいるように、たくさんの時間をかけて大規 模計算をするのではなく、例えばリアルタイムに答えを出すような、社会問題に関する利用が たくさんあるはずで、それを探すことがスパコン市場を一気に拡げる」と言い続けてきました. 一言で言えば、「スパコンの社会インフラ化」です.利用者でもある私の意見はエピメデスのパ ラドックスですが、それは問わないことにしてください.

よい提案があるかは不明ですが,短期的な明確な成果に結びつかないリスクを覚悟した文科 省の萌芽研究課題から何等かの革新が生まれる可能性を信じています.

少し昔話をしましょう.私が汎用スパコンと出会ったのは 1981 年,NASA Ames 研究所での CRAY-1S でした.ベクトル化されたプログラムがほぼ出来ていたにも関わらず,「慣れ」の問 題から研究者はみな CDC7600 を利用しており,ほとんど独占状態でマシンを使えたことを覚 えています.日本に戻り,すぐに某ベンダーの出荷前のマシンを利用する機会を得ました.社 員がみな帰宅する 18 時頃に工場に行き,朝まで 1GFLOPS,256MB メモリーという当時最高 速、最大のスパコンを廻して,テープで吸い上げたデータを当時の勤め先である航空宇宙技術 研究所(航技研,現JAXA 航空本部)に戻って処理しました.私のところに研修生として来て いた東大大学院生がこの作業に参加していました.彼は,今東北大流体科学研究所の所長の職 にあります.ご存じの方も多い大林茂教授です.後日談ですが,このプログラムを利用して遷 音速民間航空機の実用翼のシミュレーションを行い,通産省(現在の経産省)が進める YXX プ ロジェクト(ボーイング 7J7 プロジェクト)をサポートしました.その結果がたくさんの雑誌 の表紙や当時白黒だった朝日新聞の夕刊にぽつんとカラーで掲載されたのを嬉しく記憶してい ます.

当時,航技研にはスカラー機しかなく,メモリーは 32MB,性能は 8MFLOPS でした.大林 さんと私が開発したスパコン向けの圧縮性流体計算プログラムは,使い始めでいきなりスカラ ー機の 25 倍の性能を発揮しました.計算がどんどん進むので,間違ったのではないかと思った ほどです.航技研の同僚吉田正廣さんが少し手を入れてくれた結果,次には 55 倍の性能が出ま した.スパコン利用の醍醐味はこういった感動です.今,そういった感動を若い人にも感じて もらえたらもっともっと利用が広がるのではないかと思います.

優れた成果は優れた研究環境から生まれるものです.優れた研究環境とは設備だけでなく人 を含みます.優れた成果を出せたかはともかく,幸いなことに私は双方に恵まれてきました. 1989年に宇宙研(現JAXA宇宙科学研究所)に戻った後も、スパコンへのアクセスと同時に優 れた大学院学生やポスドクに恵まれてきました.職員であっても大学院生であっても、高い研 究動機を持った人と仕事ができたこと、優れた設備(ここでは世界トップクラスのスパコン) を利用できる機会に恵まれたことにはとても感謝です.スパコンが利用できる立場にあること を当たり前とおごることなく、強い動機をもって貴重な資源を有効利用することで、東北大学 サイバーサイエンスセンターからこれまでにない高い成果が生まれることを期待して、筆を置 くことにします.

#### [共同研究成果]

## 拍動流下における動脈瘤を有する血管壁挙動の 数値解析法とその臨床応用

西川優、横堀壽光、工藤和貴、大見敏仁、門間良平、 友野雄基、菅野崇史(東北大学大学院工学研究科)

#### 1. 緒言

拍動流によって誘起される血管壁の動的挙動の解明には流体解析と流体圧力により誘起 される血管壁の変形挙動の構造解析を行うことが必要である.

流体解析には、2次元あるいは軸対称流れにおいては渦度一流れ関数法、3次元流れに対しては MAC 法がある.前者は、連続の式を厳密に満足するが圧力を求める解析への適用が困難である.[1] 一方、MAC 法は連続の式が近似的にしか満足されていないことが指摘されている.[1]

ところで,著者の一人は以前より超音波ドップラー効果を利用して,拍動下での血管粘 弾性発現度と拍動の不規則度を定量化して動脈硬化と動脈瘤を非侵襲で診断する手法を提 案してきた. [2-5]

特に,動脈瘤の存在予測診断法の確立には,血管壁の不規則拍動挙動の測定実験結果を 数値流体力学(CFD)により検証することが重要である.そこで,著者らは,渦度一流れ関 数法と圧力のポアソン方程式を連成して解く方法により,動脈瘤を有する血管壁の拍動挙 動を数値解析により明らかにしてきた.[6-8]

本稿では、これらの解析手法について、さらに著者のグループで検討・発展させてきた手法とそれにより得られた結果について、2節で使用する動脈瘤モデルと解析の流れ、3節で基礎式と差分方法、4節で具体的な解析、5節で結言の順に述べる.

#### 2. 動脈瘤モデル

本研究で用いた解析モデルを Fig.1 に示す. 動脈瘤形状は(1) 式に示す Gauss の正規分布 曲線を用いて表した. [11]

 $R_0$ は初期管半径, b,cはそれぞれ動脈瘤高さ,幅を決定するパラメータである.

$$r = S(z) = R_0 + bR_0 \exp(-\frac{cz^2}{R_0^2})$$
(1)

また,流体は均質な非圧縮性 Newton 流体,流れは軸対称流とし,流れ方向および半径方向の二次元で解析を行う.

次に,解析領域を壁面形状関数で無次元化することにより,(R,Z)座標系から(η,Z)座標系 (長方形領域)への変換による写像を施す.(1)式で表される動脈瘤壁面形状関数における独 立変数を無次元化すると,(2)式で表される[11].

$$S(z) = 1 + b\exp(-cZ^2)$$
<sup>(2)</sup>

(2) 式による(R, Z)座標系から(η, Z)座標系への変換は式(3)で与える.

$$\eta = \frac{R}{S(Z)}, \quad Z = Z \tag{3}$$

これを図2に示す.



Fig.1 解析モデル



Fig.2 (η, Z)座標

#### 2.1 解析のながれ

本解析のフローチャートを図3に示す.

はじめに  $\Psi$ , Q の初期値を設定し  $\Psi$ について SOR 法で解く. それを用いて Qについて陽 解法で解く. この Qを用いてまた  $\Psi$ を求め以下それを繰り返す.

次に圧力 P については Navier-Stokes の方程式から圧力のポアソン方程式を求める.

 $Pの増分と現在の血管径 <math>r_n$ 及び有限変形の式[9]から計算される剛性を用いて $r_{n+1}$ を求める. また安定的に計算を行うため、一定ステップ数定常流を流し、十分落ち着いた時点で拍動流に切り替える.



## 3. 基礎式

二次元円筒座標系における連続の式と Navier-Stokes 方程式を (4),(5) 式に示す.

$$\frac{\partial u^+}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv^+) = 0 \tag{4}$$

$$\int \frac{\partial u^{+}}{\partial t^{+}} + v^{+} \frac{\partial u^{+}}{\partial r} + u^{+} \frac{\partial u^{+}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + v \left( \frac{\partial^{2} u^{+}}{\partial r^{2}} + \frac{1}{r} \frac{\partial u^{+}}{\partial r} + \frac{\partial^{2} u^{+}}{\partial z^{2}} \right)$$
(5a)

$$\left(\frac{\partial v^{+}}{\partial t^{+}} + v^{+}\frac{\partial v^{+}}{\partial r} + u^{+}\frac{\partial v^{+}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial r} + v\left(\frac{\partial^{2}v^{+}}{\partial r^{2}} + \frac{1}{r}\frac{\partial v^{+}}{\partial r} + \frac{\partial^{2}v^{+}}{\partial z^{2}} - \frac{v^{+}}{r^{2}}\right)$$
(5b)

u <sup>+</sup> :	軸方向速度	[m/s]
$\mathbf{v}^+$ :	半径方向速度	[m/s]
t <sup>+</sup> :	時間	[s]
p :	圧力	[Pa=N/m <sup>2</sup> ]
ρ:	密度	[kg/m <sup>3</sup> ]
ν:	動粘性係数	$[m^2/s]$

— 5 —

添え字の+は有次元量であることを表す. ここで(4)式より式(6)を満たすΨが存在する.

$$u^{+} = -\frac{1}{r}\frac{\partial\Psi}{\partial r} \quad v^{+} = -\frac{1}{r}\frac{\partial\Psi}{\partial z} \tag{6}$$

また、軸対称流において渦度ベクトルωは(7)式で定義される.

$$\omega = \frac{\partial v^+}{\partial z} - \frac{\partial u^+}{\partial r} \tag{7}$$

次に一様管部の半径を R<sub>0</sub>, 平均流速を U<sub>0</sub>で表し無次元数 R, Z, Ψ, Ω, u, v, t, P を導入する.

$$R = \frac{r}{R_0}, \quad Z = \frac{z}{R_0}, \quad \Psi = \frac{\psi}{2U_0 R_0^2}, \quad \Omega = \frac{\omega}{2U_0/R_0} u = \frac{u^+}{U_0}, \quad v = \frac{v^+}{U_0}, \quad t = \frac{U_0}{R_0} t^+, \quad P = \frac{p}{\rho v U_0/R_0}$$

ここで U<sub>0</sub>は(8)式のレイノルズ数の定義から, Re を定めることにより決定した.

$$Re = \frac{U_0 R_0}{v} \tag{8}$$

以上の無次元変数および無次元流れ関数 Ψ, 無次元渦度 Ωを導入することにより(4), (5) 式から以下の Poisson 方程式および渦度輸送方程式を導出される. (Poisson 方程式)

$$\Omega R = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial R^2} - \frac{1}{R} \frac{\partial \Psi}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Z^2}$$
<sup>(9)</sup>

(渦度輸送方程式)

$$\frac{\partial\Omega}{\partial t} + u \frac{\partial\Omega}{\partial Z} + v \frac{\partial\Omega}{\partial R} - \frac{v}{R} \Omega = \frac{1}{Re} \left\{ \frac{\partial^2\Omega}{\partial R^2} + \frac{\partial^2\Omega}{\partial Z^2} + \frac{\partial}{\partial R} \left( \frac{\Omega}{R} \right) \right\}$$
(10)

また、境界条件は以下のように定める.

管入口 : 
$$\frac{\partial \Psi}{\partial z} = 0, \frac{\partial \Omega}{\partial z} = 0, \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0$$
 (11a)

管出口 : 
$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial Z^2} = 0, \frac{\partial^2 \Omega}{\partial Z^2} = 0, P = 100[mmHg]$$
 (11b)

管中心軸: 
$$\frac{\partial u}{\partial R} = 0, v = 0, \Psi = 0, \Omega = 0, \frac{dP}{dR} = 0$$
 (11c)

壁面上の流れ関数に関する境界条件は定常時は-1の一定値とし, 拍動時には全域で cos 関数 に従って変動し振動を再現している.

なお,一階微分,二階微分は(12)-(15)式で表される.

$$\frac{\partial}{\partial R} = \frac{1}{S(Z)} \frac{\partial}{\partial \eta}$$
(12)

$$\frac{\partial^2}{\partial R^2} = \frac{1}{(S(Z))^2} \frac{\partial^2}{\partial \eta^2}$$
(13)

$$\frac{\partial}{\partial Z} = -\frac{\eta}{S(Z)} \frac{dS(Z)}{dZ} \frac{\partial}{\partial \eta} + \frac{\partial}{\partial Z}$$
(14)

$$\frac{\partial^2}{\partial Z^2} = \frac{\eta^2}{\left(S(Z)\right)^2} \left(\frac{dS(Z)}{dZ}\right)^2 \frac{\partial^2}{\partial \eta^2} + \left\{\frac{2\eta}{\left(S(Z)\right)^2} \left(\frac{dS(Z)}{dZ}\right)^2 - \frac{\eta}{S(Z)} \frac{d^2S(Z)}{dZ^2}\right\} \frac{\partial}{\partial \eta} - 2\frac{\eta}{S(Z)} \frac{dS(Z)}{dZ} \frac{\partial^2}{\partial \eta^2 \partial Z} + \frac{\partial^2}{\partial Z^2} \right\}$$
(15)

これらを基礎方程式(9)(10)に適用すると、無次元基礎方程式は以下のように表される. (Poisson 方程式)

$$C_1 \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \eta^2} + C_2 \frac{\partial \Psi}{\partial \eta} + C_3 \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \eta \, \partial Z} + C_4 \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Z^2} = C_5 \Omega \tag{16}$$

(渦度輸送方程式)

$$\frac{\partial\Omega}{\partial t} = \frac{1}{Re} \left( C_6 \frac{\partial^2\Omega}{\partial\eta^2} + C_7 \frac{\partial^2\Omega}{\partial Z^2} + C_8 \frac{\partial^2\Omega}{\partial\eta\partial Z} + C_9 \frac{\partial\Omega}{\partial\eta} + C_{10}\Omega \right) - C_{11} \frac{\partial\Omega}{\partial\eta} - C_{12} \frac{\partial\Omega}{\partial Z} - C_{13}\Omega$$
(17)

各係数を式(18)に示す.

$$C_{1} = \frac{1}{(S(Z))^{2}} \left\{ 1 + \eta^{2} \left( \frac{dS(Z)}{dZ} \right)^{2} \right\}$$
(18a)

$$C_{2} = \frac{1}{(S(Z))^{2}} \left\{ -\frac{1}{\eta} + 2\eta \left( \frac{dS(Z)}{dZ} \right)^{2} - \eta S(Z) \frac{d^{2}S(Z)}{dZ^{2}} \right\}$$
(18b)

$$C_3 = -\frac{2\eta}{S(Z)} \frac{dS(Z)}{dZ}$$
(18c)

 $C_4 = 1 \tag{18d}$ 

$$C_5 = \eta S(Z) \tag{18e}$$

$$C_6 = C_1 \tag{18f}$$

$$C_7 = 1 \tag{18g}$$

$$C_8 = C_3 \tag{18h}$$

— 7 —

$$C_{9} = \frac{1}{(S(Z))^{2}} \left\{ \frac{1}{\eta} + 2\eta \left( \frac{dS(Z)}{dZ} \right)^{2} - \eta S(Z) \frac{d^{2}S(Z)}{dZ^{2}} \right\}$$
(18i)

$$C_{10} = -\left\{\frac{1}{\eta S(Z)}\right\}^2$$
(18j)

$$C_{11} = \frac{2}{\eta(S(Z))^2} \frac{\partial \Psi}{\partial Z}$$
(18k)

$$C_{12} = -\frac{2}{\eta(S(Z))^2} \frac{\partial \Psi}{\partial \eta}$$
(181)

$$C_{13} = \frac{2}{\eta (S(Z))^2} \left( \frac{\eta}{S(Z)} \frac{dS(Z)}{dZ} \frac{\partial \Psi}{\partial \eta} - \frac{\partial \Psi}{\partial Z} \right)$$
(18m)

(16), (17)式を差分化して解き、 $\Psi \ge \Omega$ を計算することによって Navier-Stokes 方程式の解を 求める.

得られる Ψから、軸方向速度 u と半径方向速度 v は式(19)のように求めることができる.

$$u = -\frac{2}{\eta(S(Z))^2} \frac{\partial \Psi}{\partial \eta}, \qquad v = \frac{2}{\eta S(Z)} \left( -\eta \frac{1}{S(Z)} \frac{dS(Z)}{dZ} \frac{\partial \Psi}{\partial \eta} + \frac{\partial \Psi}{\partial Z} \right)$$
(19)

流れ関数-渦度法では圧力を求める事ができないため、ここまでの計算より得られる 𝒯、 𝑢,𝑔 を用いて圧力のポアソン方程式を解き 𝒫 を計算する.

(5a)式を Z で偏微分し, (5b)式に  $r^+$ をかけ  $r^+$ で偏微分し  $1/r^+$ をかける. それらを足しあわせる. ここで連続の式の項 D を式(20)のように定義する.

$$D \equiv \nabla \cdot V = \frac{\partial u^+}{\partial z} + \frac{v^+}{r^+} + \frac{\partial v^+}{\partial r^+}$$
(20)

連続の式を満たせば 0 となるはずであるが,差分化の際の離散化誤差が集積し大きな値と なる場合があるため式(21)の形で D 項を式に残す.[1]

$$\frac{1}{\rho}\nabla P^{+} = -\left(\frac{\partial D}{\partial t^{+}} + u^{+}\frac{\partial D}{\partial Z^{+}} + v^{+}\frac{\partial D}{\partial r^{+}}\right) + v\left(\frac{\partial^{2}D}{\partial z^{+2}} + \frac{1}{r^{+}}\frac{\partial D}{\partial r^{+}} + \frac{\partial^{2}D}{\partial r^{+2}}\right) - \left\{\left(\frac{\partial u^{+}}{\partial Z^{+}}\right)^{2} + 2\frac{\partial u^{+}}{\partial r^{+}}\frac{\partial v^{+}}{\partial z^{+}} + \left(\frac{\partial v^{+}}{\partial r^{+}}\right)^{2} + \frac{v^{+2}}{r^{+2}}\right\}$$
(21)

#### 3.1 差分化

Poisson 方程式に二次精度中心差分, 渦度輸送方程式に時間微分に一次精度上流差分, 空間微分に二次精度中心差分を用いて離散化する.

(Poisson 方程式)

$$\frac{c_3}{4\Delta\eta\Delta Z}\Psi_{i-1,j-1} - \frac{c_4}{(\Delta Z)^2}\Psi_{i-1,j} - \frac{c_3}{4\Delta\eta\Delta Z}\Psi_{i-1,j+1} + \left\{\frac{c_1}{(\Delta\eta)^2} - \frac{c_2}{2\Delta\eta}\right\}\Psi_{i,j-1} - 2\left\{\frac{c_1}{(\Delta\eta)^2} + \frac{c_4}{(\Delta Z)^2}\right\}\Psi_{i,j} + \left\{\frac{c_1}{(\Delta\eta)^2} + \frac{c_2}{2\Delta\eta}\right\}\Psi_{i,j+1} - \frac{c_3}{4\Delta\eta\Delta Z}\Psi_{i+1,j-1} + \frac{c_4}{(\Delta Z)^2}\Psi_{i+1,j} +$$
(22)

 $\frac{C_3}{4\Delta\eta\Delta Z}\Psi_{i+1,j+1}=C_5\Omega_{i,j}$ 

(渦度輸送方程式)

$$\frac{\Omega_{i,j}^{n+1} - \Omega_{i,j}^{n}}{\Delta t} = \frac{1}{Re} \left( \frac{C_{6}}{(\Delta \eta)^{2}} \left( \Omega_{i,j-1}^{n} - 2\Omega_{i,j}^{n} + \Omega_{i,j+1}^{n} \right) + \frac{C_{7}}{(\Delta Z)^{2}} \left( \Omega_{i-1,j}^{n} - 2\Omega_{i,j}^{n} + \Omega_{i+1,j}^{n} \right) + \frac{C_{8}}{(\Delta Z)^{2}} \left( \Omega_{i-1,j-1}^{n} - \Omega_{i+1,j-1}^{n} - \Omega_{i-1,j+1}^{n} + \Omega_{i+1,j+1}^{n} \right) + \frac{C_{9}}{4\Delta \eta \Delta Z} \left( \Omega_{i-1,j-1}^{n} - \Omega_{i+1,j-1}^{n} - \Omega_{i-1,j+1}^{n} + \Omega_{i+1,j+1}^{n} \right) + \frac{C_{9}}{2\Delta \eta} \left( \Omega_{i,j+1}^{n} - \Omega_{i,j-1}^{n} \right) + C_{10} \Omega_{i,j}^{n} \right) - \frac{C_{11}}{2\Delta \eta} \left( \Omega_{i,j+1}^{n} - \Omega_{i,j-1}^{n} \right) - \frac{C_{12}}{2\Delta Z} \left( \Omega_{i+1,j}^{n} - \Omega_{i-1,j}^{n} \right) - C_{13} \Omega_{i,j}^{n}$$
(23)

(22) 式に対して SOR 法を適用し流れ関数  $\Psi$ を導出する. そこで得られた  $\Psi$ の値を用いて (23)式により Euler 陽解法を用いて渦度  $\Omega$ を求める. なお (21) 式を SOR 法にて計算する際 の収束条件は以下のように定め,加速緩和係数  $\beta$  は 1.5 とした.

$$\left| \frac{\Psi_{i,j}^{(m+1)} - \Psi_{i,j}^{(m)}}{\Psi_{i,j}^{(m)}} \right| < 10^{-5} \quad (m: 計算ステップ数)$$
$$\Psi_{i,j}^{(m+1)} = \Psi_{i,j}^{(m)} + \beta \left( \tilde{\Psi}_{i,j}^{(m+1)} - \Psi_{i,j}^{(m)} \right)$$

流体解析と同様に圧力式についても写像と差分化を式(24)に示すように行う.

<sup>(</sup>Ψ: Gauss-Sidel 法による解, β:加速緩和係数)

$$\begin{split} P_{i,J} &= \frac{0.5S(Z)^{2}h^{2}}{1 + S(Z)^{2} + \eta^{2} \frac{dS(Z)^{2}}{dZ}} \left[ \frac{\eta^{2}}{S(Z)^{2}} S'^{2} \frac{P_{i,J+1} + P_{i,J-1}}{h^{2}} \\ &+ \left\{ \frac{2\eta}{S(Z)^{2}} S'^{2} - \frac{\eta}{S(Z)} S'' \right\} \frac{P_{i,J+1} - P_{i,J-1}}{2h} \\ &- \frac{2\eta}{S(Z)} S' \frac{P_{i+1,J+1} - P_{i+1,J-1} - P_{i-1,J+1} + P_{i-1,J-1}}{4h^{2}} \\ &+ \frac{P_{i+1,J} + P_{i-1,J}}{h^{2}} + \frac{1}{\eta S(Z)^{2}} \frac{P_{i,J+1} - P_{i,J-1}}{2h} \\ &+ \frac{1}{S(Z)^{2}} \frac{P_{i,J+1} + P_{i,J-1}}{h^{2}} \\ &+ Re \left\{ -\frac{D^{n}}{\Delta t} + u \left( -\frac{\eta}{S(Z)} S' \frac{\partial D}{\partial \eta} + \frac{\partial D}{\partial Z} \right) + \frac{v}{S(Z)} \frac{\partial D}{\partial \eta} \right\} \\ &- \left\{ \frac{\eta^{2}}{S(Z)^{2}} S' \frac{\partial^{2} D}{\partial \eta^{2}} + \left( \frac{2\eta}{S(Z)^{2}} S'^{2} - \frac{\eta}{S(Z)} S'' \right) \frac{\partial D}{\partial \eta} - \frac{2\eta}{S} S'^{2} \frac{\partial^{2} D}{\partial \eta \partial Z} \\ &+ \frac{\partial^{2} D}{\partial Z^{2}} + \frac{1}{\eta S(Z)^{2}} \frac{\partial D}{\partial \eta} + \frac{1}{S(Z)^{2}} \frac{\partial^{2} D}{\partial \eta^{2}} \right\} \\ &+ Re \left\{ \frac{1}{S(Z)^{2}} \left( \frac{\partial v}{\partial \eta} \right)^{2} - \frac{2\eta}{S(Z)^{2}} S' \frac{\partial u}{\partial \eta} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{2}{S(Z)} \frac{\partial u}{\partial \eta} \frac{\partial v}{\partial z} \\ &+ \left( -\frac{\eta}{S(Z)} S' \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\partial u}{\partial Z} \right)^{2} + \frac{v^{2}}{\eta^{2} S(Z)^{2}} \right\} \end{split}$$

ここで

$$S' = \frac{dS(Z)}{dZ} \qquad \qquad S'' = \frac{d^2S(Z)}{dZ^2}$$

である.

圧力についても SOR 法を用い, 収束条件は下の式とした.

$$\left| \frac{\mathbf{P}_{i,j}^{(m+1)} - \mathbf{P}_{i,j}^{(m)}}{\mathbf{P}_{i,j}^{(m)}} \right| < 10^{-5} \quad (m: 計算ステップ数)$$
$$P_{i,j}^{(m+1)} = P_{i,j}^{(m)} + \beta \left( \tilde{P}_{i,j}^{(m+1)} - P_{i,j}^{(m)} \right)$$

(P: Gauss-Sidel 法による解, β:加速緩和係数)

#### 3.2 圧力による血管の変形

血管壁が管内圧力に応じて変形する効果を考える.内圧 *p* における血管内径は薄肉円管 モデルにおける Laplace の式[11]を用いて, 漸化式とし(25) 式で表される.

$$r_{\rm n} = \frac{r_{\rm n-1}}{1 - \frac{\Delta p r_{\rm n-1}}{Eh}} \tag{25}$$

その様子を図4に示す.ここで各パラメータは以下のように定義した.



Fig.4 各ステップの圧力と半径の関係

ここで管内圧力の変動により得られた血管形状で次ステップの流れ場の計算を行い,そこから再び圧力の計算および血管形状の計算を行う.このように数値流体力学による流れ場の計算と材料力学による血管壁形状の計算の連成解析を行うことで血管内での現象を再現している.管内圧力に変動が生じることに伴い, (25)式よりrに変動が生じるが,このrに対して逐次式(3)で表される(R, Z)座標系から(η, Z)座標系(長方形領域)への変換による写像を施すことにより,拍動流条件下における血管の脈動を一様流条件下と同一の手法で解析することが可能となる.

ここで, (25) 式に示す管壁の剛性は, Fung による理論式(26)より[9]

$$\sigma = \frac{\sigma^*}{\lambda^* - \frac{1}{\lambda^{*2}}} (\lambda - \frac{1}{\lambda^2}) \exp(a(\lambda - \lambda^*))$$
(26)

σ: 血管壁に作用する応力 [g/mm<sup>2</sup>]
 λ: ひずみ

から式(27)を計算することにより算出した.

$$E = \frac{d\sigma}{d\lambda} = \frac{\sigma^*}{\lambda^* - \frac{1}{\lambda^*}^2} \left\{ 1 + \frac{2}{\lambda^3} a \left( \lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) \right\} \exp(a(\lambda - \lambda^*))$$
(27)

ここで a,  $\sigma$ <sup>\*</sup>,  $\lambda$ <sup>\*</sup>は定数であり, 体重 15~25kg のイヌの胸部大動脈を用いた引張強度試験に よる実験結果から[10], 以下の値を用いた.

$$a:$$
 1.9  
 $\sigma^*:$  25.83 [g/mm<sup>2</sup>]  
 $\lambda^*:$  1.6

#### 4. 解析

著者の一人による過去の研究により,動脈瘤を持つ人の血管壁速度波形には,図 5(b)のように頂点にピークが2回表れる二相性と呼ばれる特徴が表れることが知られている[4].測定により二相性の有無を判定することで動脈瘤を診断する手法を提案しており[4],CFDによりその検証が行われている.[6-8]

そこで本解析では二相性が動脈瘤由来であるかを原理的に確かめるため、上記の解析手法を用いて計算した血管壁速度波形に臨床と同様の二相性が表れるのかを検証した.また二相性の特徴を表す、図 6 のように波形の時間発展を一つの図で表すことのできる血管壁拍動波形の軌跡解析が行われている.1 ループが1 拍動であり、軌道は長周期的なずれを生じる.健常者は計測定例では周期的なループを描き、それに対して動脈瘤を有する場合は、図 7 に示すように2 相性に対応する小さな circuit loop が右上部に発生する[4].

本論文の CFD 解析により動脈瘤を有する血管壁の振動挙動に臨床波形測定例と同様の二 相性波形が発現するか検証する.









Fig.7 解析結果のアトラクター解析[4]

#### 4.1 CFD による解析結果

本解析では(1)式の動脈瘤形状を決定する係数 b=1.5, c=1 として解析を行った.速度波形 測定場所は図 8 に示すモデル上流部(a)と,中央部(b)である.図 9 に解析により得られた血 管壁速度波形を示す.上流部(a),中央部(b)共に動脈瘤を有する血管に臨床測定例と同様の 二相性波形を再現することができた.また波形軌道解析結果を図 10 に示す.右端に circuit loop が発現している.

以上のことから拍動による血管壁挙動の周期変化において,測定による二相性波形は動 脈瘤の存在により発現することが示された.また二相性は動脈瘤部から離れた上流部でも 発現した.



Fig.8 壁面速度測定位置



#### 5. 結言

本解析により非侵襲測定で得られた図 4,図 6 の二相性波形と Circuit loop は動脈瘤の存在 に寄るものであることが CFD により検証された. 今後実構造に近い血管壁への解析に本プ ログラムを発展させることにより, さらに詳細に動脈瘤の存在による血管壁挙動の乱れを 再現することができると考えられる.

#### 謝辞

本解析手法の開発にあたり、東北大学サイバーサイエンスセンターの SX-ACE を使用させて頂いたことを感謝する.

#### 参考文献

- [1] 河村哲也 流体解析1, 1996,朝倉書店
- [2] A.T.Yokobori, Jr., T.Ohkuma, S.Sasak, H.Yoshinari, T.Yokobori, H.Ohuchi and S.Mori, Bio-Medical Materials and Engineering, 4, (1994), pp.87–96.
- [3] A.T.Yokobori, Jr., M. Ichiki, H.Ohuchi, T.Kobayashi, T.Satoh and Y.Kinoshita, Bio-Medical Materials and Engineering, 14,3 (2006), pp.241–249.
- [4] A.T. Yokobori, Jr., M. Owa, M. Ichiki, T. Satoh, Y. Ohtomo, Y. Satoh, S. Ohogoshi, Y.

Kinoshita and S. Karino, Journal of Atherosclerosis and Thrombosis, 13,4, (2006),pp163-174.

- [5] A.T.Yokobori, Jr., T.Ohmi, R.Monma, Y.Tomono, K.Inoue, M.Owa, M.Ichiki, N.Mochiduki and H.Yamashita, Bio-Medical Materials and Engineering, 23, (2013), pp.75–91.
- [6] A.T.Yokobori.Jr., T.Ohmi, Y.Tomono, R.Monma, Y.Nishikawa, T.Kanno M.Ichiki The analysis of pulsatile behavior of blood vessel wall with aneurysm based on hybrid analysis of computer fluid dynamics (CFD) and solid mechanics, Proc of annual meeting of Atherosclerosis and Thrombosis, (2013)
- [7] A.T.Yokobori.Jr., T.Kanno, Y.Nishikawa, T.Ohmi, The analyses of mechanical behaviors of blood vessel wall with aneurysm at the progressive stage based on simulate experiment and computer fluid dynamics(CFD), Proc of annual meeting of Atherosclerosis and Thrombosis, (2014)
- [8] A.T.Yokobori.Jr., Y.Nishikawa, K.Kudo, T.Ohmi, Long Periodic Fluctuation of Blood Vessel Wall Caused by the Viscoelasticity Under Pulsatile pressure Flow, Proc of annual meeting of Atherosclerosis and Thrombosis, (2015)
- [9] Y.C.Fung, Appl. Mech. Rev., 1968,21(1),pp1-20.
- [10] 横堀壽光,大熊恒郎,前山俊秀,横堀武夫,大内博,奈良茂樹,佐々木久雄,葛西森 夫,生体材料, 1986,4,pp27-32.
- [11] 岡小天, レオロジー入門, 工業調査会, 1970.
- [12] D. Ruelle, and F. Takens, Communications in Mathematical Physics, 1971, 20, pp167-192.

#### [共同研究成果]

## 一様磁場下の熱プラズマジェットに輸送される

## ナノ粒子群の集団的形成過程の数値シミュレーション

#### 茂田 正哉 大阪大学 接合科学研究所

アルゴン熱プラズマジェットを用いた鉄ナノ粒子群の創製プロセスの数値シミュレーションを 行う.その際,簡潔でありながらナノ粒子群の集団的な形成および移流・拡散輸送過程を記述で きるモデルを導入し,動的なプラズマの温度場だけでなく,成長途中にあるナノ粒子群の数密度 と平均粒径の空間分布を明らかにする.さらに一様磁場が本プロセスに及ぼす影響も示す.

#### 1. 緒言

直径がナノメートルスケールの超微粒子(ナノ粒子)はバルクの材料とは大きく異なる物質機 能を示すことが知られており、磁気記録材料や環境浄化用触媒など様々な工業製品へ応用が期待 されている<sup>[1]</sup>.近年、ナノ粒子の大量創製を可能にするツールとして、高いエンタルピーと化学 的活性を有し、さらに外部電磁場によって制御可能<sup>[2]</sup>な流体である熱プラズマに注目が集まって おり、精力的に研究が進められている<sup>[3]</sup>.しかし 10,000 K を超える発光体である熱プラズマの流 動場について実験によって得られる情報には限りがあるため、プロセスの効率的な制御のために 必要な知見は今尚少ない.また流動場だけでなく、ナノ粒子の形成過程はマイクロ秒〜ミリ秒の 現象であるため、その集団的形成のメカニズムや輸送現象を直接計測することも困難である.そ のため、熱プラズマプロセッシングは依然として現場の技術者や研究者の経験に依っているとこ ろが多く、また莫大な時間とコストを要しているのが現状である.

そこで本研究では、熱プラズマ流によるナノ粒子の創製プロセスを対象として、アルゴン熱プ ラズマジェットおよび形成過程にある鉄ナノ粒子群の移流・拡散輸送の数値シミュレーションを 行う.その際に、簡潔でありながら均一核生成・不均一凝縮・粒子間凝集によるナノ粒子群の集

団的な形成過程を記述できるモデル<sup>[4]</sup> の移流・拡散方程式への拡張を行う. また熱プラズマジェットの軸と同じ方 向に印加した一様磁場がプラズマおよ びナノ粒子群の空間分布に与える影響 を明らかにする.

#### 2. 仮定および支配方程式

#### 2.1 熱プラズマ流

熱プラズマ流の通常の生成条件では, 圧力は大気圧と同程度で,プラズマを 含む流体全域にわたって局所熱平衡が 成り立ち,また光学的に薄いと仮定で きる.このとき支配方程式は以下のよ うな質量・運動量・エネルギーに関す る保存式となる.



Fig. 1 Computational domain

$$-18$$
  $-$ 

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho \boldsymbol{u}\right) = 0 \tag{1}$$

$$\rho \frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t} + \rho \boldsymbol{u} \cdot \nabla \boldsymbol{u} = -\nabla p + \nabla \cdot \left\{ \eta \left[ (\nabla \boldsymbol{u}) + (\nabla \boldsymbol{u})^{tr} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \boldsymbol{u}) \boldsymbol{I} \right] \right\} + \sigma \boldsymbol{E} \times \boldsymbol{B}$$
(2)

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} + \rho \boldsymbol{u} \cdot \nabla h = \nabla \cdot \left(\frac{\lambda}{C_p} \nabla h\right) + \frac{\partial p}{\partial t} + \rho \boldsymbol{u} \cdot \nabla p - q_{rad} + q_{con} + \boldsymbol{\Phi}$$
(3)

ここで、 $\rho$ は密度、tは時間、uは速度ベクトル、pは圧力、 $\eta$ は粘性係数、Iは単位行列、 $\sigma$ は導 電率、Eは電場ベクトル、Bは磁束密度ベクトル、hはエンタルピー、 $\lambda$ は熱伝導率、 $C_p$ は定圧 比熱、 $q_{rad}$ は放射損失、 $q_{con}$ はナノ粒子の凝縮熱、 $\sigma$ は粘性散逸である. また trは転置を意味する.

#### 2.2 ナノ粒子群の集団的形成

熱プラズマプロセスにおけるナノ粒子形成過程の概要は次の通りである.

- ① 熱プラズマの高温場において原料が蒸発する
- ② その原料蒸気は温度低下に伴い過飽和状態となる
- ③ 多数の臨界核が生成する(均一核生成)
- ④ その臨界核に原料蒸気が凝縮することでナノ粒子が成長する(不均一凝縮)
- ⑤ 同時にナノ粒子同士も衝突・合体してより大きなナノ粒子となる(粒子間凝集)

ナノ粒子は、時間スケールの異なる均一核生成や不均一凝縮を経るのみならず、2~3桁に及ぶ 直径差を持つ多数の粒子同士が衝突し凝集しながら集団として成長していく.これまで分子動力 学に基づいた数値計算も行われてはいるものの、現在のコンピュータ性能の限界から、数十個の 核の生成過程を数ナノ秒間分ほど追跡することしかできていないため<sup>[5]</sup>、ナノ粒子群全体の成長 を取り扱うことは実質的に不可能である.そこでエアロゾル学に基づく理論的および数値的なア プローチが有効とされている.

本稿では, 簡潔なモデルによりナノ粒子の集団的形成過程を表現するために, ナノ粒子は局所 的には同じ粒径を持つ球体であるとする.また帯電の効果は無視し, 粒子温度は周囲の流体の温 度と等しいとする.このとき支配方程式は以下のように記述できる.

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{n_p}{\rho} \right) + \rho \boldsymbol{u} \cdot \nabla \left( \frac{n_p}{\rho} \right) = \nabla \cdot \left[ \rho D_p \nabla \left( \frac{n_p}{\rho} \right) \right] + J - 2\sqrt{2}\beta_0 n_p^{11/6} f^{1/6} - \nabla \cdot \left( K_{ih} \eta \frac{n_p}{\rho} \nabla \ln T \right)$$
(4)

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{f}{\rho} \right) + \rho \boldsymbol{u} \cdot \nabla \left( \frac{f}{\rho} \right) = \nabla \cdot \left[ \rho D_p \nabla \left( \frac{f}{\rho} \right) \right] + J g_c + \beta_0 (n_v - n_s) n_p^{1/3} f^{2/3} - \nabla \cdot \left( K_{th} \eta \frac{f}{\rho} \nabla \ln T \right)$$
(5)

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{n_{\nu}}{\rho} \right) + \rho \boldsymbol{u} \cdot \nabla \left( \frac{n_{\nu}}{\rho} \right) = \nabla \cdot \left[ \rho D_{\nu} \nabla \left( \frac{n_{\nu}}{\rho} \right) \right] - J g_{c} - \beta_{0} (n_{\nu} - n_{s}) n_{p}^{1/3} f^{2/3}$$
(6)

ここで, *n* は数密度, *D* は拡散係数, *J* は均一核生成率<sup>[6]</sup>,  $K_{th}$  は熱泳動係数<sup>[7]</sup>, *T* は温度, *g* は 1つのナノ粒子に含まれるモノマー数の平均である. 添え字 *p*, *v*, *c* および *s* はそれぞれ粒子, 蒸気, 臨界状態および飽和状態を表している. また *f* は次のように定義される変数である.

$$f = n_p g \tag{7}$$

また  $\beta_0$  は衝突頻度に関するパラメーターであり、体積 v および質量 m を用いて以下のように表される.

$$\beta_0 = \left(\frac{3v_v}{4\pi}\right)^{1/6} \sqrt{\frac{6k_B T v_v}{m_v}} \tag{8}$$

*kB* はボルツマン定数である.式(4)および式(5)の右辺第4項は熱泳動を表している.式(4)~(6)の 右辺に含まれる粒子成長に関わる項の詳しい導出については文献[4]を参照されたい.

#### 3. 計算手法

本研究では、10,000 K を超える高温のプラズマと常温の非電離気体が相互作用しながら同時に 存在する熱流動場を取り扱わなければならない.両者の間には粘性係数・熱伝導率・定圧比熱・ 導電率といった物性値だけでなく密度にも大きな差がある<sup>[8]</sup>.その一方で、流れ場におけるマッ ハ数は 10<sup>-3</sup>~10<sup>-2</sup> のオーダーにあり、工学的に有意な時間スケールでの流体運動を捉えるために は熱プラズマ流を「大きな密度変化を伴う非圧縮性流れ」として取り扱うべきである.すなわち、 熱プラズマと周囲の低温気体との間に生じる速度、温度、密度、ナノ粒子濃度の急激な空間勾配 を捉えながら、さらに時間ステップ幅を大きく取っても数値計算を安定的に進められるような計 算手法が必要となる.そこで対流項を Hybrid K-K スキーム<sup>[9]</sup>により、時間微分項を3次精度 Adams-Moulton 法により差分化し、PISO 法<sup>[10]</sup>と組み合わせることによって、上述の数値計算を実 現することとする.なお、拡散項、圧力勾配項、熱泳動項には2次精度中心差分を用いる.

#### 4. 計算条件

図1に計算領域を示す. 流量 1.5 sl/min のアルゴンガスに 0.5 kW の電力が投入されることで半径 1.5 mm の噴出孔から約 12,000 K のプラズマジェットが噴出する. また幅 1.0 mm の同心円状の 冷却ガス供給スリットからは 300 K のアルゴンが 15.0 sl/min で供給される. さらにバルクガスも 300 K のアルゴンであるとする. ナノ粒子の原料である鉄は既にプラズマ生成部で蒸気になって いるものとしてプラズマジェットと共に 0.1 g/min で供給される. また計算領域全体にジェットと 同方向に 1.0 T の一様磁場を与える.

これらの条件の下, 2次元軸対称の計算領域を設けた. 座標系の原点をプラズマジェット噴出 孔の中心に取り, ジェットの軸方向および半径方向にそれぞれ z 軸および r 軸を取った. 両軸方 向にそれぞれ 0.05 mm の幅を持つスタガード格子を用いて,時間ステップ幅を 0.05 ms として計 算を進めた. 噴出孔におけるプラズマジェットの温度および速度には文献[11]の半径方向分布を 適用した. このとき本条件の下で算出される噴出孔におけるプラズマジェットの最大速度は約 385 m/s である.

#### 5. 計算結果

図2に磁場を印加しない場合の代表的な時刻におけるプラズマの温度分布およびナノ粒子群の 数密度分布と平均粒径分布の瞬間像を示す.高温のプラズマジェットの外縁で発生する大きな渦 運動により周囲の低温気体を巻き込む様子が計算されている.また大きな渦運動はプラズマの周 囲に二次的な渦運動を誘起し,下流域においてより複雑な流体混合が起きている.鉄ナノ粒子の 形成はおよそ 2,000 K以下で顕著となるため,このような流体混合はナノ粒子の形成および輸送 に大きな影響を及ぼす.プラズマジェットと共に輸送される鉄蒸気は温度低下に伴い過飽和状態



Fig. 2 Instantaneous fields without magnetic field

Fig. 3 Instantaneous fields with magnetic field

となりナノ粒子へと相変化するため、プラズマと低温ガスの界面近傍において特にナノ粒子の数 密度が高く、かつそれらの粒径は小さい.また巻き上がった領域も温度低下するため同様に多く の小さなナノ粒子が生成している.図2(b)と図2(c)を対比すると、大きな粒径を示している領域 のナノ粒子の数密度が低い傾向にあることがわかる.これはブラウン運動に起因する粒子間衝突 によってナノ粒子同士が凝集し、その数を減らしながら成長するためである.

図3に磁場を印加した場合のプラズマの温度分布およびナノ粒子群の数密度分布と平均粒径分 布の瞬間像を示す.磁場の印加によりプラズマの巻き上がりが抑制され,その結果として図2(a) と比較してプラズマの高温領域が下流方向へ伸長する様子が計算できている.これは文献[2]の実 験結果と同様の傾向を示している.周囲の低温気体との混合による温度低下が抑制されたことに よって,ナノ粒子の生成はプラズマの外縁でのみ顕著となる.またプラズマの流動場を介した間 接的な結果ではあるが,下流域でのナノ粒子群の空間的な広がりも抑えられることが示された.

#### 6. まとめ

アルゴン熱プラズマジェットを用いた鉄ナノ粒子群の創製プロセスの数値シミュレーションを 行った.その際,簡潔でありながらナノ粒子群の集団的な形成および移流・拡散輸送過程を記述 できるモデルを導入することで,動的なプラズマの温度だけでなく,成長途中にあるナノ粒子群 の数密度と平均粒径の空間分布を明らかにすることができた.さらに一様な印加磁場が本プロセ スに及ぼす影響も示すことができた.

#### 謝辞

本研究にあたり、東北大学サイバーサイエンスセンターの関係各位より有益なご指導とご 協力をいただいた。

- [1] 細川, 能城, "ナノパーティクルテクノロジー," 日刊工業新聞社, (2003).
- [2] Sato, T., Shigeta, M., Kato, D., Nishiyama, H., "Mixing and magnetic effects on a nonequilibrium argon plasma jet," Int. J. Thermal Sci., 40 (2001), pp. 273-278.
- [3] Shigeta, M. and Murphy, A.B., "Thermal plasmas for nanofabrication," J. Phys. D: Appl. Phys., 44 (2011), pp. 174025-(16 pages).
- [4] Nemchinsky, V.A. and Shigeta, M., "Simple equations to describe aerosol growth," Modelling Simul. Mater. Sci. Eng., 20 (2012), pp. 045017-(11 pages).
- [5] Lümmen, N. and Kraska, T., "Homogeneous nucleation and growth in iron-platinum vapour investigated by molecular dynamics simulation," Euro. Phys. J. D, 41 (2007), pp. 247-260.
- [6] Girshick, S.L., Chiu, C.P. and McMurry, P.H., "Time-dependent aerosol models and homogeneous nucleation rates," Aerosol Sci. Tech., 13 (1990), 465-477.
- [7] Talbot, L., Cheng, R.K., Schefer, R.W. and Willis, D.R., "Thermophoresis of particles in a heated boundary layer," J. Fluid Mech., 101 (1980), pp. 737-758.
- [8] Boulos, M.I., Fauchais, P. and Pfender, E., "Thermal plasmas," Springer, (1994).
- [9] Komurasaki, S., "A Hydrothermal Convective Flow at Extremely High Temperature," 7th Int. Conf. Comp. Fluid Dynamics, (2012), ICCFD7-3001.
- [10]Oliveira, P.J. and Issa, R.I., "An improved PISO algorithm for the computation of buoyancy-driven flows," Numer. Heat Transfer B 40 (2001), pp. 473-493.
- [11]Kanzawa, A. and Kimura, I., "Measurements of viscosity and thermal conductivity of partially ionized argon plasmas," AIAA Journal, 5 (1967), pp. 1315-1319.

[大学 ICT 推進協議会 2015 年度年次大会論文集より転載]

## スーパーコンピュータ SX-ACE の運用について

小野 敏1), 齋藤 敦子1), 森谷 友映1), 佐々木 大輔1), 山下 毅1),

大泉 健治1), 岡部 公起2), 江川 隆輔2), 小林 広明2)

1) 東北大学 情報部 情報基盤課

東北大学サイバーサイエンスセンター スーパーコンピューティング研究部 ono@cc.tohoku.ac.jp

概要:東北大学サイバーサイエンスセンターは、全国共同利用機関として学内外の研 究者に対して大規模科学計算システムを提供している。本稿では、2015年2月より運 用している新ベクトル型スーパーコンピュータ SX-ACE の運用状況等や、本システムを 用いた共同研究成果について報告する。

#### 1 はじめに

東北大学サイバーサイエンスセンター(以下、 本センターと略す)では、常に最高・最新鋭の 大型計算機を導入し、大規模科学技術計算の要 求に応えてきた。本センターの大規模科学計算 システムは二種類の計算機を運用し、主に研究 室のワークステーションでは行えないような大 規模シミュレーションに用いられている。この うちベクトル演算に適したものは、ベクトル型 スーパーコンピュータ SX-ACE[1]で、それ以外 のものはスカラ型並列コンピュータ LX 406Re-2 で実行されている。これまで本センターでは大 規模・長時間シミュレーションの実行を運用の 中心としており、2015年2月より運用している 新スーパーコンピュータシステム SX-ACE の運 用においても同様の方針で運用環境を構築した。 また大規模・長時間シミュレーションの実行に は、利用者アプリケーションの高度化・高速化、 MPI による並列化が必須であり、高速化支援活 動が重要であると考えている。

本稿では、新スーパーコンピュータシステム SX-ACE を含む大規模科学計算システムの概要、 付帯設備、運用環境、運用状況および高速化支 援活動について紹介する。

#### 2 大規模科学計算システムの概要

本センター大規模科学計算システムの構成を 図1に示す。本センターの大規模科学計算シス テムはベクトル型スーパーコンピュータ SX-ACE、スカラ型並列コンピュータLX 406Re-2、 ストレージシステム、および三次元可視化シス テムから構成される。

ベクトル型スーパーコンピュータ SX-ACE は 2,560のノードから構成される。1つのノードは 276GFLOPS のベクトルプロセッサ1 基と 64GB の 主記憶容量を有している。各ノードは、ノード 間接続装置(IXS)で高速に相互接続されており、 1 ジョブで最大 1,024 ノードを占有する並列処 理が可能である。なお OS は UNIX System V に準 拠した SUPER-UX である。スカラ型並列コンピ ュータ LX 406Re-2 は 68 のノードから構成され る。1 つのノードは 460GFLOPS の Intel Xeon プ ロセッサ2基と128GBの主記憶容量を有してい る。なお OS は Linux である。 ストレージシステ ムは lustre で構成される 1 次ストレージ 1PB と ScaTeFS(NEC Scalable Technology File System)で構成される2次ストレージ3PBの合計 4PBの容量を有している。1次ストレージは並列 コンピュータとの高速な I/0 を、2 次ストレー ジは利用者のホーム領域として並列コンピュー タおよびスーパーコンピュータとの高速な I/0



図1 大規模科学計算システム構成図

を実現している。

本センターの大規模科学計算システムは、ベ クトル型スーパーコンピュータを主力計算機と しつつ二種類の計算機から構成され、また三次 元可視化システム、ストレージシステムとも連 携することで、利用者の幅広いニーズに応える 計算環境を学内外の研究者へ提供している。

#### 3 付帯設備について

SX-ACE を設置している本センター2 号館の内 部構成を図 2 に示す。2 号館は SX-ACE の導入時 に必要とされる電源設備、空調機等を含めた計 算機の設置スペース、水冷方式に対応した冷却 システムを既存の計算機室に確保することが困 難であったため、2014 年 11 月に竣工した 2 階 建の計算機棟である。スーパーコンピュータ SX-ACE は 2 号館の 1 階に設置しており、2015 年 9 月からは 2 号館の 2 階へ並列コンピュータ LX 406Re-2、ストレージシステムを移設した。 計算機を集約することで、冷却設備の一元的な 運用が可能となり、省エネルギー運用を実現し ている。

SX-ACE は水冷・空冷の両冷却方式で運用され ている。水冷設備の冷却水と空調に必要な冷水 は密閉型フリークーリング方式の冷却塔(クー リングタワー)で生成される。2号館屋上に設置 した冷却塔一体型チリングユニットを図3に示 す。冷却の仕組みは、冷却塔が外気取り入れ送 風ファンまたは散布水により、冷媒の通るコイ ルを冷やし冷水を作り出している。夏場等の暑 い期間は、外気や散布水だけでは冷やしきれな いため、チラーを併用し電気を使って冷水を作 り出している。

SX-ACE ではさらに冷却の効率を高めるため



図2 2号館内部構成



図3 冷却塔一体型チリングユニット



図4 SX-ACE のコールドアイルキャッピング

の設備としてアイルキャッピングを導入してい る。その様子を図4に示す。SX-ACEおよび付帯 装置が収納されるラックは、冷気の吸入側であ る前面側を向かい合わせてレイアウトされてい る。フリーアクセスフロアの底面から供給され る冷気をラック前面から効率的に吸入するため に、向かい合うラックの側面と上面をビニール カーテンにより仕切るコールドアイルキャッピ ングを採用している。また、計算機ラック背面 からの排気は天井面の吸入口から天井裏を介し、 空調機へ戻す方式である。

#### 4 運用環境

#### 4.1 プログラミング言語とライブラリ

SX-ACE で利用可能なプログラミング言語お よび科学技術計算用ライブラリを表1に示す。 SX-ACE ではこれまで提供していたコンパイラ に加え、新たにFortran 2003 に対応したコンパ イラも提供している[2]。並列処理については、 MPI による並列処理を前提としているが、ノー ド内については自動並列処理、OpenMP による並 列処理が利用可能であり、MPI と組み合わせた ハイブリット並列、またはフラット MPI による 並列処理によりシミュレーションの大規模並列 実行が可能となっている。

科学技術計算用ライブラリは、SX-ACE 用に最 適化された ASL、ASLSTAT が利用可能であり、 SX-9を利用していたプログラムについては、再 コンパイルすることにより実行可能である。 BLAS、LAPACK、ScaLAPACK を利用しているプロ グラムについては、MathKeisan ライブラリを利 用することで、プログラムを変更することなく 実行可能である。

表1 SX-ACE で利用可能なプログラミング言語 と科学技術計算用ライブラリ

プログラミング言語・	規格・機能
ライブラリ	
Fortran 90/95	ISO/IEC 1539-1:1997
	自動並列、OpenMP
Fortran 2003	ISO/IEC 1539-1:2004
	自動並列、OpenMP
С, С++	ISO/IEC 9899-1999
	ISO/IEC 14882:2003
	自動並列、OpenMP
MPI/SX	MPI-3.0
ASL	数値計算ライブラリ
ASLSTAT	統計計算ライブラリ
MathKeisan	数学ライブラリ集
	(BLAS, LAPACK,
	ScaLAPACK を含む)

#### 4.2 ジョブ管理および利用形態

ジョブスケジューリング機能は NQS II を導入 し並列コンピュータとスーパーコンピュータの 一元管理が可能となっており、利便性の高いジ ョブ投入環境となっている。また、SX-ACE への バッチジョブ投入、コンパイルなどの作業は SX-ACE ではなくフロントエンドサーバである 並列コンピュータにて行う[3]。

SX-ACE の利用形態は占有利用と共有利用を 用意している。占有利用は一定数のノードを利 用者、あるいは研究グループが期間を定めて占 有し利用する方式である。契約されたノード数 内での並列処理が可能であり、ジョブの実行待 ちについては、研究グループ内のジョブにのみ 影響され、他の利用者のジョブによる実行待ち は発生しない。共有利用は他ユーザと利用する ノードを共有する利用方式であり、利用する時 期や利用ノード数によってジョブの実行待ちが 発生するが、最大で1,024ノードでの大規模並 列実行が可能である。

また共有利用には通常利用、無料利用、デバ ッグ利用の3つの利用形態があり、利用形態は ジョブ投入時のオプションによって指定するこ とができる。これまでの運用方針と同様に、大 規模・長時間ジョブをサポートするため、実行 時間制限の最大値は1ヶ月としている。各利用 形態の詳細を表2に示す。

通常利用はジョブ投入用コマンド qsub のオ プションとして、-q で sx を -b でノード数を指 定することで利用可能であり、利用ノード数に よって実行時間制限の規定値が異なっている。 デバッグ利用は、-q で debug を -b でノード数 を指定することによって利用可能であり、利用 ノード数によって実行時間制限が異なっている。

SX-ACE では研究室の PC、ワークステーション 等で実行されているプログラムの SX-ACE への 移行を支援する目的で、最大1ノード、1時間 の実行時間制限付きでジョブの実行を無料利用 できる利用形態を用意している。これは-q で sx を-b でfを指定することによって利用可能であ る。

利用形態	利用ノード数	実行時間制限
通常	$1 \sim 256$	規定値:2週間
		最大値:1ヶ月
	257~1,024	規定値:1ヶ月
		最大値:1ヶ月
デバッグ	1~16	2 時間
	17~32	24 時間
無料	1	1時間

表 2	共有利	用での	利用	形態
-----	-----	-----	----	----

#### 5 運用状況

SX-ACEの今年度4月から9月までのノード時

間とジョブ件数の推移を図 5 に示す。4 月、5 月と比較して6月から8月にかけてはジョブ件 数が大きく増加しているが、7月、8月について のノード時間は4月と同程度にとどまっている。 6月から8月にかけてジョブ件数が大きく増加 しているのは、システム更新後の新システムに 向けた最適化のための短時間ジョブが、多数投 入されたためと考えられる。9月に投入件数、 ノード時間が大きく減っているが、これは停 電・計算機保守作業、並列コンピュータシステ ムの移設作業により約3週間計算機サービスを 休止していた影響によるものである。また例年 4月から9月の期間については、利用者の入れ 替わりなどもあり、下半期に比べ利用時間が少 なくなる傾向があり、今後の利用に期待したい。



図5 ノード時間とジョブ件数の推移

SX-ACE の今年度4月から9月までの利用ノー ド数に対する経過時間の分布を図6に示す。利 用ノード数が32ノード以下のジョブ件数が一 番多くなっており約80%程度を占めている。こ れはデバッグ利用や無料利用についての利用ノ ード数は32ノード以下であり、短時間で実行が 終了するものが多いためこのような状況である と考えられる。実行時間制限の最大値である1 ヶ月間実行するジョブは存在しなかったが、規 定値である2週間に達するジョブについては10 件程度存在した。また、利用ノード数にかかわ らず、ジョブの実行が48時間以内で終了するジ ョブが大部分を占めていた。4月から8月は並



6 高速化支援活動

本センターでは 1999 年よりユーザアプリケ ーションの高精度化、大規模化の支援を目的と した共同研究制度を実施している。また社会貢 献の一環として、サイバーサイエンスセンター 共同研究制度の他に、産学連携共同研究に基づ く民間企業利用も実施しており、学術分野のみ ならず産業のイノベーション創出にも貢献して いる。さらには全国の情報基盤センター等と連 携して行う JHPCN(学際大規模情報基盤共同利 用・共同研究拠点)、HPCI(革新的ハイパフォー マンス・コンピューティング・インフラ)システ ム利用研究課題を通じて、計算科学分野の利用 者と共同研究を行い、様々な分野におけるアプ リケーションの最適化・高度化、並列化に取組 み高速化支援活動を行ってきた。

図7に1999年から取り組んでいる共同研究の 推移を示す。この図からわかるように、サイバ ーサイエンスセンター共同研究は恒常的に年 10 件程度実施されていることに加え近年、 JHPCN、HPCI を介した共同研究数が増加してい ることが確認できる。これは、サイバーサイエ ンスセンター共同研究を通してユーザアプリケ ーションが高度化、大規模化し JHPCN、HPCI 採 択課題へとステップアップしているためだと考 えられ、継続的な高速化支援活動が一定の成果 をあげていることがわかる。また表3にこれま で本センターが行ってきた高速化支援の成果を 示す。1997 年から 2014 年にかけて 200 件の共 同研究に基づくプログラムの最適化に取り組ん でおり、単体性能、並列性能ともに大幅な向上 を実現している。

本センターで導入したスーパーコンピュータ SX-ACE での大規模ジョブの実行にはMPI ライブ ラリによる並列化が必須である。これまでコン パイラによる自動並列処理、OpenMP による並列 処理のみ利用していた利用者の MPI 化支援も積 極的に行ってきた。この他各種利用者講習会の 開催、大阪大学との高速化に関するハンズオン セミナーの共同開催、高速化推進研究活動報告 書の発行、メール、電話での利用・高速化相談 に加え、窓口での対面による利用・高速化相談 などを行ってきた。この取り組みを今後も継続 し、新たに大規模科学計算システムを利用する 利用者、高速化・MPI 化が必要な利用者に支援 を行い、研究を進める上での強力なツールとし て役立てて頂きたいと考えている。



表 3 高速化支援活動実績

年度	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
件数	2	9	8	9	10	7	18	20	8	29	10
単体性能向上比	1.9	46.7	4.5	2.5	1.6	2.2	6.7	2.9	1.5	3.1	33.0
並列性能向上比	11.1	18.4	31.7	8.6	4.9	2.8	18.6	4.5	4.1	8.0	1.9
年度	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014				
件数	15	8	8	13	6	11	9				
単体性能向上比	9.3	47.0	47.2	16.2	19.7	16.7	10.3				
並列性能向上比	5.1	3.6	48.5	17.2	15.3	12.9	8.0	-			

#### 7 おわりに

本稿では、2015 年 2 月より運用を開始した新 スーパーコンピュータシステム SX-ACE を含む 大規模科学計算システムの概要、付帯設備、運 用環境、運用状況および高速化支援活動につい て紹介した。SX-ACE での大規模シミュレーショ ンの実行には MPI による並列化が必須であり、 今後も利用者アプリケーションの高速化・高度 化、並列化による高速化支援活動は必要である。 それとともに、高速化に対する認識を利用者に 高めてもらうよう努力していきたいと考えてい る。

#### 8 参考文献

[1] 日本電気株式会社、萩原 孝、浜口 博幸、 山信田 恒、スーパーコンピュータ SX-ACE のハードウェア、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. 48, No. 1, pp. 5-14, 2015.

- [2] 日本電気株式会社、工藤 淑裕、横谷 雄司、 SX-ACE でのプログラミング(ベクトル編)、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.48、No.1、 pp.15-32、2015.
- [3] 東北大学情報部情報基盤課共同利用支援係、
   共同研究支援係、東北大学サイバーサイエン
   スセンタースーパーコンピューティング研究
   部、スーパーコンピュータ SX-ACE の利用法、
   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. 48、No. 2、pp. 1-61、
   2015.

[大学 ICT 推進協議会 2015 年度年次大会論文集より転載]

## 暑熱環境下体温上昇解析コードの

スーパーコンピュータ SX-ACE での高速化と並列化

佐々木 大輔 1),山下 毅 1),西尾 涉 2),浅野 陽平 2),平田 晃正 2)

江川隆輔<sup>3)</sup>,小林広明<sup>3)</sup>

1) 東北大学 情報部 情報基盤課

2) 名古屋工業大学

 第北大学 サイバーサイエンスセンター スーパーコンピューティング研究部 d-sasaki@cc.tohoku.ac.jp

概要:東北大学サイバーサイエンスセンターでは、大規模科学計算システムを最大限活用 するために計算科学者と本センターの計算機科学者が連携しながら、プログラムの高速化 技法の研究・開発に取り組んでいる.本稿では、名古屋工業大学の研究グループが開発し てきた暑熱環境下体温上昇解析コードのベクトル型スーパーコンピュータ SX-ACE での高 速化について紹介する.現在ワークステーションで数時間程度かかっている解析時間を数 十秒程度に短縮できれば、様々な環境を模した解析を即時的に処理でき、熱中症の注意喚 起等への展開が期待できる.



図1 スーパーコンピュータ SX-ACE

#### 1 はじめに

東北大学サイバーサイエンスセンター(以下,本 センター)は、全国共同利用機関として大規模科 学計算システムの運用と、本システムを最大限に 活用可能なコードの高速化技法や新しいシミュレ ーション技術の研究・開発に取り組んでいる.本 センターでは 1997 年からさまざまな分野におけ る実アプリケーションの高速化の支援を計算科学 分野の利用者との共同研究を通じて行っている [1].また、センター独自の共同研究に加え、全国 の情報基盤センター等と連携して、学際大規模情 報基盤共同利用・共同研究拠点(JHPCN)や革新的 ハイパフォーマンス・コンピューティング・イン フラ(HPCI)を構成し,多様なニーズに応える計算 環境の提供も行っている.以上のように本センタ ーでは,利用者である計算科学者と本センターの 計算機科学の専門家が密に連携しながら,科学・ 工学の恒常的な進歩を支える共同研究,利用者コ ードの高速化支援活動を推進している.

本稿では、名古屋工業大学の研究グループが開 発している暑熱環境下体温上昇解析コード[2]の 高速化について紹介する.

### 2 スーパーコンピュータ SX-ACE

本センターに導入されているスーパーコンピュ ータ SX-ACE を図 1 に示す. SX-ACE の CPU はこれ までのベクトルプロセッサと同様に,高ベクトル 演算性能と高メモリバンド幅を継承している.ま た,SX シリーズ初のマルチコア化により,4 コア で構成され最大ベクトル演算性能は 256GFLOPS で ある.各コアには容量が 1,024KB に拡張された ADB

(Assignable Data Buffer)が搭載され, ADB と コア間のメモリバンド幅は 256GB/sec を有する. データが ADB 経由でアクセスされる場合は,メモ リバンド幅は 4Bytes/FLOP となり,メモリ負荷の 高いアプリケーションでも高い実行効率で実行可 能となっている.また,単一コアで演算を実行す る場合も 256GB/sec のメモリバンド幅が利用でき, 4Byte/FLOP での実行が可能となっている.SX-ACE は高ベクトル演算性能,高データ供給性能により, 高い実行性能を得ることができる.

本センターのSX-ACEは2,560ノードで構成され ている.各ノード間は最大 4GB/sec×2(双方向) で接続された2段ファットツリーネットワークで 構成され,システム全体の性能は 706.6TFLOPS と なっている.利用者には,最大1,024ノードの大 規模な実行環境を提供している.

#### 3 暑熱環境下体温上昇コードの概要

近年の地球温暖化に加え,2011年の東日本大 震災以降の節電要求と相まって,2011年以降, 熱中症による搬送者数は増加傾向にあり,2014 年にその数は全国で約58,000人に達したと言わ れている.熱中症に関する啓発活動は,温熱生理 (特に,スポーツ医学)あるいは救急医療に基づ く考察がほとんどであり対処療法的である.また, 啓発活動も展開される中,従来の「気温・湿度」 に加え,「暑さ指数」なども導入されているが, その認知度は高いとは言えない.

また,熱中症のリスクは性別・年齢のみならず, 身長・体重等の人体の個体差と置かれた環境に大 きく依存することが知られている.しかし,現状 では、年齢・性別の違いによるウェブ等による告 知に留まっており、これらを人体の個体差とその 変化を考慮した熱中症リスクの評価は行われてい ない.従って、体の個体差とその変化を考慮した 高い精度を有する熱中症リスクを評価できれば、 一般的な啓発活動のみならず、熱中症のリスク管 理という新しい領域を開拓できると考えられる.

名古屋工業大学の研究グループでは,部位ごと の血液温度差を考慮できる混成熱解析手法を開発, 精巧な数値人体モデルに適用し,測定値との比較 により,その有効性を確認してきた.解析には, 図 2(a)の国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT)の成人男性[3]に相当する日本人の解剖学 的数値人体モデル[4]を使用している.これらのモ デルは皮膚,筋肉,脂肪,骨,骨髄液,心臓,水 晶体,血管など 51 種類の組織から構成されてお り, 2mm の分解能を有している.図 2(b)のよう に血液温度を考慮するため,モデルの各部位ごと に分割して計算している.



図2 数値人体モデルの外観(a)と部位分割(b)の定義図



図3 解析のフローチャート

暑熱環境下体温上昇解析コードのフローを図 3 に示す.本コードは実行すると,暑熱環境下にお ける熱定常状態の初期温度分布,人体モデル,発 汗モデル,外気温などのデータを読み込む.読み 込みが完了すると,発汗率や血流量の変化,体温 調整機能を考慮して,人体の温度変化を計算す る.

暑熱環境下体温上昇コードの解析例を図4に示 す.図は、3時間暑熱ばく露(37℃)を行った際 の体表面温度を表している.



図4 暑熱ばく露における表面温度上昇の解析結果

## 4 暑熱環境下体温上昇コードの高速化 4.1 SX-ACE での初期性能解析

名古屋工業大学の研究グループが開発した暑熱

環境下体温上昇コードの初期性能解析結果を表1 に示す.解析には、SX-ACEの簡易性能解析ツール FTRACEを用いた.

初期性能解析の結果,温度上昇の計算ルーチン (サブルーチンA)とファイルの入出力処理ルーチ ン(サブルーチンB)の実行時間が全体の約98%を 占めていたため,この2つのサブルーチンを高速化 することを検討した.また,コア性能の向上を目 的とした高速化と,将来の大規模並列実行を見据 えた,コードの並列化にも取り組んだ.

表1 初期性能

PROC.NAME	FREQUENCY	EXCLUSIVE	MFLOPS	V.OP	AVER.
		TIME[sec](%)		RATIO	V.LEN
サブルーチンA	300	3371.986(89.9)	193.7	14.8	216.5
サブルーチンB	1	325.450( 8.7)	1.4	0.36	224.3
サブルーチンC	300	25.284(0.7)	7250	99.33	222
サブルーチンD	11	14.385( 0.4)	154.6	41.36	219.9
サブルーチンE	300	13.450(0.4)	14626	99.26	223.6
サブルーチンF	1	0.885( 0.0)	180.1	94.87	217.6
サブルーチンG	1	0.325( 0.0)	3271.3	98.99	229.1
サブルーチンH	1	0.184( 0.0)	0	99.1	218.6
total	915	3751 949(100 0)	276.4	45.62	221.5

以下では本コードに適用した高速化について述 べる.シングルコアでの高速化では,効率的に高 速化作業を行うため,反復回数を 300 回とし実行 時間を短縮した.並列化後は実際に研究で使用さ れている反復回数 5,400 回とした.

## 4.2 シングルコアでの高速化 4.2.1 ファイル入出力の高速化

サブルーチン B と入力データを解析すると,入 カデータがテキスト形式になっていることと,三 次元の人体モデルデータを読み込む際,2mm に分 割されているデータを,ループが実行される度に 読み込むようになっていたため,これが処理を遅 くする原因となっていることが判明した.ファイ ルの入出力を行う際,一般的にバイナリ形式で読 み込みを行う方がテキスト形式で読み込みを行う よりも高速となる.そのため,入力データをテキ スト形式からバイナリ形式に変換するコードを開 発し,本コードの入力データをバイナリ化した. バイナリ化することでファイルのサイズも半分程 度まで小さくなった.また,データを一括して読 み込むようにファイルの読み込み処理を変更した. 高速化前と後の実行時間を表2に示す.ファイ ル入出力の実行時間がテキスト形式では約325秒 かかっていたが,入力データをバイナリ形式にし, なおかつデータを一括して読み込むようにするこ とにより1秒以下にすることができた.

衣 ムーリ ノフレー ノ ノ DVフ 同 医 化 りろの木	表 2	サブル	ーチン	Bの福	新速化	の効果
-------------------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----

PROC.NAME	FREQUENCY	EXCLUSIVE	MFLOPS	V.OP	AVER.
		TIME[sec](%)		RATIO	V.LEN
before	1	325.450(8.7)	1.4	0.36	224.3
after	1	0 138( 0 0)	844 6	99.35	2179

#### 4.2.2 ベクトル化による高速化

次にサブルーチン A の高速化について検討した. 表1から,サブルーチン A はベクトル化率が約14% と非常に低い値となっている.SX-ACE のベクトル プロセッサは,複数のデータを一括して演算を行 うベクトル演算が可能であり,配列のそれぞれの 要素に同一の演算を行う計算に適している.ベク トルプロセッサの性能を引き出すためには,スカ ラ処理での実行時間とベクトル処理が可能な実行 時間の比であるベクトル化率を高めることが重要 である.ベクトル化率が 90%を超えると急速に性 能が向上するため,ベクトル化率を100%に限りな く近づけることが重要となる.

対象のサブルーチンを解析すると3重ループ構 造となっており,図5の前半では,後半の計算で 必要な変数の値を決めるための処理が行われてい る.この変数がスカラ型となっているためベクト ル化阻害の要因の1つとなっていた.また,図5 の後半では,別のサブルーチンを呼びだす処理が あり,これもベクトル化阻害の要因となっていた.

以上のベクトル化阻害要因を取り除くため,図 6 に示す通り,スカラ型の変数を配列変数に変更 し,サブルーチン呼び出しをインライン展開した.

高速化前と後の性能を表3に示す.サブルーチンAはベクトル化率が約99%になり,約22倍の性能向上を得ることができた.



図5 オリジナルコード



#### 図6 高速化後コード

#### 表3 サブルーチンAの高速化の効果

PROC.NAME	EXCLUSIVE	MFLOPS	V.OP	AVER.	VECTOR
	TIME[sec](%)		RATIO	V.LEN	TIME
before	3371.986(89.9)	193.7	14.8	216.5	12.55
after	147.017(73.1)	6448.5	99.16	196.4	138.76

#### 4.2.3 シングルコアでの高速化後の性能

高速化を行ったコードをシングルコアで実行し た際の性能を図7に示す.棒グラフはコードの実行 時間,折れ線グラフはベクトル化率を表している. サブルーチンAとサブルーチンBに前項までに示し た最適化を施す事で,コード全体のベクトル化率 が45%から99%に向上し,約18倍の性能向上を実現 している.





#### 4.3 コードの並列化

本コードはベクトル化等を行うことでシングル コアでの性能を高めてきた.更なる性能の向上の ためには、ネットワークに接続される複数のノー ドを利用し、多数のコアで計算をする並列化を検 討する必要がある.並列化にはノード内のコアレ ベルで MPI (Message Passing Interface)並列を 行う Flat MPI, ノード内はタスク並列,ノード間 は MPI 並列の Hybrid MPI がある.ノード内並列 にはコンパイラによる自動並列を利用した.

本節では先に述べたベクトル化を行ったコード の3重ループについて Flat MPI, Hybrid MPI によ る並列化を行い,性能の比較を行った.今回の入 カデータは,図8のループ1の反復回数は160回, ループ2の反復回数は320回となっている.

DO K=1,MODELZ	ループ1
DO J=1, MODELY	ループ2
DO I=1,MODELX	
!体温上昇計算	
END DO	
END DO	
END DO	

Flat MPIでは MPI 並列による分割を図8のルー プ1で行った. Hybrid MPIでは,ループ1を MPI 並列で分割し,分割後のループ1をさらに自動並 列した.また,利用するコア数を同一にすること で両並列化の効果を比較することとした.

並列化後の実行時間を図 9 に示す. 32 コアま での利用の場合は Flat MPI (194.9sec) が高速と なっている. 40 コアを超えたあたりで, Flat MPI と Hybrid MPI の差は徐々に縮まり, 160 コアの場 合は Hybrid MPI (59.5sec) の方が高速となった. この原因は, Flat MPI はプロセス数の増加に伴い プロセス間のデータ通信のオーバヘッドが増加し ためと考えられる.



#### 4.4 並列化後の全体の性能

並列化前後の性能向上比を並列数毎にまとめた 図 10 に示す. 図の点線はコア数を n 倍にしたとき に性能向上比が n 倍になる理想値を表している. Hybrid MPI で 40 ノード 160 コア利用した場合, 並列化前の反復回数 5,400 回のシングルコア実行 (3,552sec)に比較し,約 60 倍の性能向上が得ら 今回実装した Hybrid MPI では図 8 のループ1を 分割し1プロセス4タスク並列で実行しているた め,SX-ACE を最大40ノードまでしか利用できな い.そこで,将来の大規模化を見据え図8のルー プ2を自動並列し,160プロセス,4タスク並列の 計640 コアを利用することも検討した.640 コア で実行した場合,実行時間は約38秒となりもっと も高速となったが、性能向上比は理想値の約14% 程度となった.この原因として,今回のMPI 並列 による人体モデルの分割方法は,胴体付近は処理 量が大きく,腕などは比較的処理量が小さいため, プロセス間の処理量のインバランスが発生してい ると考えられる.更なる並列化とインバランスの 解消による高速化は今後の課題である.

#### 5 まとめ

本稿では暑熱ばく露における人体の表面温度上 昇の解析に、本センターが今までに取り組んでき た高速化支援で得られた高速化技法を適用し高速 化を行った事例について紹介した.本センターの 提供しているスーパーコンピュータ SX-ACE の性 能を最大限に引き出すためには、ベクトル化率を 100%に限りなく近づくよう高める必要である.ま た、SX-ACE は従前のベクトル型スーパーコンピュ ータより、さらにノードを多数接続することで性 能の向上を図る構成となっている.従って、今後 の高速化支援においては、シングルコアでの高速 化に加え、複数のノードのコアを利用する並列化 を行うことで性能を引き出していくことが重要と なる.

研究の最前線で開発が行われている暑熱環境下 体温上昇の解析コードの性能解析情報に基づき高 速化を行い,160 コア利用で約60倍の性能向上が 得られた.各プロセス間の処理量のインバランス の改善により,更なる並列化効率の向上が今後の 課題となっている.

本コードは,高速化により数時間程度を要する シミュレーションを数十秒程度で計算することが 可能となった.今後,熱中症リスクのリアルタイ ム評価・予測への応用が期待される.

#### 6 参考文献

東北大学サイバーサイエンスセンター,高速化推進研究活動報告,第6号,p8-12,(2015).
 西尾渉,浅野陽平,佐々木大輔,山下毅,平田晃正,江川隆輔,ベクトルスーパーコンピュータSX-ACEによる暑熱環境下体温上昇の高速解析,信学技法,Vol.115, No.213, p43-48, 2015.
 T. Nagaoka, S. Watanabe, K. Sakurai, E. Kunieda,

M. Taki and Y. Yamanaka, S. Momose, Y. Isobe, : "Development of realistic high-resolution whole-body voxel models of Japanese adults male and female of average high and weight, and application of models to radio-frequency electromagnetic-field dosimetry", Phys. Med. Biol., vol. 49, pp. 1-15, (2004).

[4] T. Nagaoka, E. Kunieda, and S. Watanabe : "Proportion-corrected scaled voxel models for Japanese children and their application to the numerical dosimetry of specific absorption rate for frequencies from 30 MHz to 3 GHz", Phys. Med. Biol., vol. 53, no. 23, pp. 6695-6712, (2008).

## [大学 ICT 推進協議会 2015 年度年次大会論文集より転載] キャンパス無線 eduroam の国内外の最新動向

後藤英昭<sup>1</sup>, 中村素典<sup>2</sup>, 曽根秀昭<sup>1</sup>

<sup>1</sup>東北大学サイバーサイエンスセンター
 <sup>2</sup>国立情報学研究所

#### hgot@cc.tohoku.ac.jp

概要: 学術系の無線 LAN ローミング基盤である eduroam は,世界 75 か国,国内 125 機関 (2015 年 10 月現在,前年比+47%) に成長し,大学キャンパス以外にも市街地や病院 など,様々な施設でサービスが展開されるようになってきている.本報告では,eduroam の国内の整備状況について解説するとともに,国内外の最新動向を紹介する.

#### 1 はじめに

国際的な学術無線 LAN ローミング基盤である eduroam (エデュローム)は、世界の大学や研究所 等において、キャンパス無線 LAN の相互利用を実 現する.日本は 2006 年に eduroam に加盟したが、 9 年目となる 2015 年現在で国内 125 機関が参加す るに至り [1]、学術認証フェデレーション (学認)[2] と並んで、重要な電子認証基盤に成長した.世界で はこの一年で5 か国が参加し、総数で 75 となった. eduroam は既にキャンパス無線 LAN の世界的なス タンダードになっているが、国内外ともに成長が続 いている.

本報告では,eduroamの国内の整備状況について 解説するとともに,国内外の最新動向を紹介する.

#### 2 eduroam JPの動向

eduroam JP の参加機関数は 2015 年 10 月時点 で 125 となり,昨年同時期の 86 から大幅な伸びと なった.国内には約 1,200 の高等教育機関があるこ とから,普及率ではやっと 10%を超えたところであ るが,欧州の多くの国々と比較すると大きな数であ る.図1に機関数の推移を,図2に参加機関のマッ プ(ピンは本部の位置)を示す.概ね全国に展開さ れているが,広域に空いている地域もあるので,特 に学会会場としてよく利用される機関への導入を期 待したい.

機関数の加速度的な伸びは,eduroam や学認の 知名度の高まりをはじめとして,各機関の電子認 証システムやキャンパス無線LANシステムが更新 時期になったことや,教育・研究の現場における携 帯端末利用の増加などが背景にあると考えられる. 一方で,教員から eduroam 導入の希望が多くある にも関わらず,運用面,予算面,あるいは両方にお いて,学内での承認が難しいという話も聞かれる. eduroam 導入の障壁として,以下のようなものが 考えられる.



図 1: eduroam JP 参加機関数の推移



図 2: eduroam JP 参加機関マップ

- (1) キャンパス無線 LAN の導入
- (2) 電子認証システムの更新や拡張
- (3) ゲスト用ネットワークの確保

(1) について,既にキャンパス無線LANを運用している機関では,それほど障壁は高くないと考えられる.しかしながら,学内情報インフラを訪問者に利用させることに対するセキュリティ上の不安の声が聞かれる.外国では,訪問者の端末も学内LANに直接収容するようなネットワーク構成で運用されている所もあるが,国内では eduroam 導入当初か

ら「ゲスト用ネットワーク」の必要性を訴えており, その結果,ゲスト用ネットワークの利用が一般的に なっている. 無線 LAN の通信を VLAN などで学 内 LAN から隔離することによって,学内サーバ等 への不正アクセスを阻止することができ,セキュリ ティ上の問題は解決できる.

(2) については、更新時期に併せて学認やeduroam に対応した電子認証システムを導入するのが望まし い.一方,国内機関ではシステム構築業者によって 構築されたシステムが運用されている例が多いが. eduroam に必要となる RADIUS IdP(ID Provider) を既存システムに接続するのは、技術上も契約上も 難しいことがある.この問題に対処するため,eduroam JP では既報のとおり、世界に先駆けて、集中型 eduroam アカウントサービスを充実させている [3]. 機関の電子認証システムが既に学認 (Shibboleth) に 対応している場合は, RADIUS のインタフェース を持たなくても、「仮名アカウント発行システム」を 利用して eduroam が利用できる. Shibboleth にも RADIUS にも対応していない場合であっても、「代 理認証システム」を利用して,構成員への eduroam アカウントの発行が可能である.実際に、これらの アカウントサービスをメインの IdP として利用し たり、電子認証システム更新までのつなぎとして利 用している機関は少なくない.執筆時点での利用 機関数は、仮名アカウント発行システムが88、代 理認証システムが35である.代理認証システムは eduroam 参加前の試用も可能である.

(3) について, SINET 接続機関に対して, IPv4 および IPv6 に対応した eduroam アクセスネット ワークが無償で提供されている.これ以外の機関 では,既存のアドレスブロックの一部をゲスト用に 切り出したり,プロバイダから回線を別途調達する 必要がある.導入から運用・管理もすべておまかせ の、いわゆる「マネージド Wi-Fi」のソリューショ ンも,一部企業から提供されている.

eduroam 導入を検討していた幾つかの大学から, 学内で承認が得られなかった理由として,

- 「訪問者に無線 LAN を利用させるのはセキュ リティ上の問題があり受入れられない」
- 「うちは訪問者のためのインフラに予算を割 く余裕はない」

などが聞かれた.前者については,先に述べたよう に,ネットワークの適切な分離によって解決可能で ある.後者について,「eduroam は訪問者用のシステ ム」と誤解されている可能性がある.これは,「訪問 者が利用できる」という点を強調していた eduroam JPの広報にも若干問題があったと考えられる.よ り正確に示すならば,「eduroam は,自機関の構成 員でも訪問者でも利用可能な、世界標準のセキュア なキャンパス無線 LAN システム」となるだろう. 言い換えれば、学内利用者向けの無線 LAN サービ スを別途用意する必要はなく、eduroam ひとつで 十分である.

ただし、キャンパス無線LANをeduroamに一本 化するには、認証VLANの導入が必要である.認 証VLANでは、利用者認証の結果に基づいてネッ トワークを自動的に切り替えることで、自機関の 利用者の端末は学内LANに直接収容し、訪問者の 端末はゲスト用ネットワークに収容することが可能 である.これにより、利用者が自機関のキャンパス 内で eduroam を利用する際は、学内の各種サービ スはもちろん、契約している電子ジャーナルへのア クセスも、学内端末同様に可能である.例えば、東 北大学の「TAINS 無線 LAN システム」では、外 部利用者用サブネットと内部利用者用サブネット を用意し、認証 VLAN によって切り替えることで、 eduroam の利便性を向上させている [4].

#### 3 世界の eduroam の動向

執筆時点で世界の参加国(地域)数は75であり, 前年同時期より+5である. 今後, アジアをはじ めとして、中東地域・アフリカ地域への展開が期 待されている、アジア地域では、過去に接続され たが長く動きの見られなかった中国やフィリピン で、再始動の動きが出てきた。APAN (Asia-Pacific Advanced Network) Communityの中に, IAM-TF (Identity and Access Management Task Force)  $\mathcal{D}^{\varsigma}$ 発足し, eduroam を含む認証連携 (Identity Federation) 全般について,情報交換や,新規参加国の サポートなどを行うコミュニティができた. また, Trans-Eurasia Information Network (TEIN)の支 援を受けて、オーストラリアの AARNet が中心と  $\ensuremath{\overleftarrow{x}}\ensuremath{\mathrel{>}}\ensuremath{\overleftarrow{x}}\ensuremath{\mathrel{>}}\ensuremath{\overleftarrow{x}}\ensuremath{\mathrel{>}}\ensuremath{\overleftarrow{x}}\ensuremath{\mathrel{>}}\ensuremath{\overleftarrow{x}}\ensuremath{\mathrel{>}}\ensuremath{\overleftarrow{x}}\ensuremath{\mathrel{>}}\ensuremath{\overleftarrow{x}}\ensuremath{\mathrel{>}}\ensuremath{\overleftarrow{x}}\ensuremath{\mathrel{>}}\ensuremath{\overleftarrow{x}}\ensuremath{\mathrel{>}}\ensuremath{\overleftarrow{x}}\ensuremath{\mathrel{>}}\ensuremath{\overleftarrow{x}}\ensuremath{\mathrel{>}}\ensuremath{\underbrace{x}}\ensuremath{\mathrel{>}}\ensuremath{\overset{\circ}}\ensuremath{\mathrel{>}}\ensuremath{\overset{\circ}}\ens$ cific, ジープと読む) プロジェクトが発足した. 当 プロジェクトでは、アジア太平洋地域から5か国を 選んで,eduroam 参加と,それぞれ国内3機関の 接続を支援する.日本からはアドバイザの立場で協 力している.

GÉANT Association (旧 TERENA)の GeGC (Global eduroam Governance Committee)や TF-MNM (Task Force - Mobility and Network Middleware)において, eduroam 認証ネットワークの 世界的なモニタリング (動作状況監視)システムの 構築や,会議用ゲストアカウントの発行・運用方法 などに関する議論が活発化している.日本では 2014 年から「会議向け期間限定 eduroam アカウントの 試行」を行っているが,そこで行われた議論や得ら れた知見などを情報提供しながら,世界の議論に貢 献している.

キャンパス外の eduroam サービスとしては, 昨 年度紹介したミュンヘンや北欧の例に加えて, さ らに多くの市街地で実施例が見られた. イギリス のヨークでは, 3月に市の中心部でサービスが開始 された [5]. 筆者らが 6 月に訪れたポルトガルのポ ルトでは, 飲食店の立ち並ぶウォーターフロントで eduroam を利用することができた. このようなサー ビスは, 地元の大学が地元の ISP や自治体 Wi-Fi と協力することで実現されている.

イギリスやオーストラリアなどの国々では,病院 へのeduroam 導入が進んでいる.イギリスでは,大 学関係の病院はもちろんのこと,独立した病院であっ ても,大学関係者との交流の多い所では eduroam が導入される例が見られる.

#### 4 むすび

eduroamの国内外の最新動向を紹介した.国内の 参加機関数は前年比で+47%と大幅な伸びを記録し, 今後も各機関の電子認証システムおよびキャンパス 無線 LAN の更新に合わせて,普及が期待される.

欧州やオーストラリアでは,市街地や病院,博物 館などに eduroam サービスが広がってきているが, これらは地元の大学の貢献が少なくない.市街地や 会議施設におけるサービス提供は,国際会議などの 誘致にも寄与するものと考えられる.

国内では、関東地域の公衆無線LANへのeduroam 重畳で世界に先行したが、今後の幅広い展開を求め て、様々な可能性の検討を継続していく.

#### 参考文献

- [1] eduroam JP: http://www.eduroam.jp/
- [2] 西村 健, 中村素典, 山地一禎, 大谷 誠, 岡部寿男, 曽根原 登, "日本における学術認証フェデレー ション"学認"の展開,"大学 ICT 推進協議会 2011 年度年次大会 論文集, 2011.
- [3] 後藤英昭, 新妻 共, 中村素典, 曽根秀昭, "キャンパス無線 eduroam の最新動向と国内機関向 け新サービス,"大学 ICT 推進協議会 2014 年度 年次大会 論文集 F3B-2, 2014.
- [4] 後藤英昭,水木敬明,曽根秀昭,七尾晶士,澤田勝 己,北澤秀倫,森 倫子,"東北大学におけるキャンパス無線LANサービスについて,"東北大学 情報シナジー機構 TAINS ニュース 2011.5.31, No.39, pp.10–14, 2011.5.31.
- [5] "(edu)roam even further: University and Council roll out free wifi network," University of York, 2015 news.

http://www.york.ac.uk/news-and-events/ news/2015/community/free-wifi/

## [大学 ICT 推進協議会 2015 年度年次大会論文集より転載] 東北大学全学ファイアウォールの運用に関する報告

野田 大輔<sup>1)</sup>,森 倫子<sup>1)</sup>,水木 敬明<sup>2)</sup>, 曽根 秀昭<sup>2)</sup>

1) 東北大学 情報部情報基盤課

2) 東北大学 サイバーサイエンスセンター

noda@cc.tohoku.ac.jp

概要:東北大学では、学内ネットワーク TAINS のセキュリティ向上を目的として、2014 年7月より TAINS と学外ネットワークとの対外接続点に全学ファイウォールを導入した。本稿では、全学ファイアウォールが TAINS のセキュリティにおいて担う役割と運用状況について報告する。

#### 1 はじめに

東北大学(以下、本学という。)では、学内ネッ トワーク TAINS (Tohoku Academic/All-around/ Advance/ Information Network System)のセキュ リティ向上を目的として、2014年7月より全学フ ァイアウォールを導入した。この全学ファイアウ ォールは TAINS と学外ネットワークとの対外接続 点に設置され、学外ネットワークから TAINS へ向 けた通信のうち、部局からの事前の申請に基づい た必要なものだけを許可し、不必要な情報が学外 ネットワークへ公開されることを防止している。

#### 2 全学ファイアウォールの導入背景

2013 年 12 月、本学のネットワークセキュリテ ィのさらなる強化を検討する目的で「全学ネット ワークのセキュリティ強化検討プロジェクト・チ ーム」(以下、「セキュリティ強化 PT」という。) が設置された。セキュリティ強化 PT での検討に おいて、本学が部局にグローバルアドレスを割り 当て、管理を移譲する分散管理となっていること により、十分なセキュリティ対策なしに情報機器 が学外ネットワークに公開されるケースの可能性 が指摘された。そこで TAINS と学外ネットワーク の接続点に透過型のファイアウォールを導入して グローバルアドレスの利用を申請登録制とする集 中管理を行う必要性が確認され、全学ファイアウ ォールを導入することが決定された。

#### 3 全学ファイアウォールについて

#### 3.1 概要

全学ファイアウォールは TAINS と学外ネットワ ークの対外接続点に設置されている透過型のファ イアウォールであり、TAINS と学外ネットワーク 間の通信を管理している(図1参照)。

全学ファイアウォールは学外ネットワークから TAINS へ向けた通信はデフォルトで不許可とし ており、学外ネットワークへサービスを提供する 場合は部局を通して情報シナジー機構へ通信許可 を申請し登録する必要がある。これによりグロー バルアドレスの集中管理を実現しセキュリティ対 策のなされていない情報機器が意図せず学外ネッ トワークへ公開されることを防止している。

一方で、TAINS から学外ネットワークへ向けた 通信はその応答を含めて全て許可している。従っ て、利用者端末からのウェブ閲覧等、学外ネット ワークへの通信は全学ファイアウォールの影響を 受けず一般利用者が全学ファイアウォールを意識 する必要はない。ただし 2015 年 6 月より著作権侵 害コンテンツの発信を防止する目的で、TAINS か ら学外ネットワークの通信であっても一部の P2P アプリケーションの通信を遮断している。



図 1:全学ファイアウォール概要図

#### 3.2 ポート設定

全学ファイアウォールのポート設定は以下の 通りである。

- 1. 全不許可
  - ▶ 全ての通信を遮断する
- 2. ウェブサーバのみ(80,443/tcp)許可
  - ウェブサービス用ポート(80,443/tcp)のみ
     許可する
- 3. 全許可
  - ▶ 全ての通信を許可する

デフォルトのポート設定は「1. 全不許可」となっており、学外ネットワークから開始される TAINS への通信は全て遮断される。学外ネットワークからの通信を許可するポート設定は、HTTP 通信と HTTPS 通信のみを許可する「2. ウェブサーバのみ (80,443/tcp)許可」と制限のない「3. 全許可」を 用意している。学外ネットワークへサービスを提 供する場合は、サービスを提供するグローバルア ドレス毎に、提供サービスに合わせてこれらいず れかのポート設定を選択して情報シナジー機構へ 申請し登録する必要がある。

ポート設定については導入初期に予想される 多数の申請と申請対応にあたる人的リソースを考 慮しシンプルな設定から開始することとした。今 まで通り制限なく使用できる「3.全許可」に加え、 情報発信のため多数の利用が予想されるウェブサ ーバを保護するため、ウェブサーバ用のポート (80,443/tcp)のみを許可するポート設定を提供す ることとした。

ポート設定のメニューについては今後拡張を 検討していく予定である。

#### 3.3 遮断アプリケーション

本学では 2011 年 4 月より民間事業者による「イ ンターネット上の著作権を侵害している疑いのあ る P2P 通信の検知・通知サービス」を利用し、著 作権侵害に関するインシデントの未然防止に努め てきた[1]。しかしながら、前記サービスは学外ネ ットワークへ発信されている P2P 通信を検知する ものであり、著作権侵害にあたるコンテンツが学 外ネットワークへ発信されること自体を防止する ものではなかった。

これに対し全学ファイアウォールはアプリケ ーション識別機能を有し、著作権侵害コンテンツ の発信に利用される可能性のあるアプリケーショ ンの通信を選択的に遮断可能であり、そのように 遮断することで、著作権に関するインシデントの 未然防止が期待されていた。

そして 2015 年 6 月より、全学ファイアウォー ルによる BitTorrent 等の著作権侵害コンテンツ の発信のおそれがある P2P アプリケーションの遮 断を開始した。

なお遮断アプリケーションについては TAINS の ウェブページ上で学内公開しており、研究等に必 要であれば申請により使用することが可能となっ ている。

### 4 全学ファイアウォールの運用

#### 4.1 事前申請について

全学ファイアウォールの導入にあたっては、導入前に約1ヵ月間の期間を設け、部局からの事前 申請を受け付けた。事前申請では申請漏れを極力 少なくするため、部局毎に当該部局が保有してい るグローバルアドレス一覧を記載した専用の事前 申請書を作成して使用した。事前申請書を各部局 に送付し記載された全てのグローバルアドレスに 対し全学ファイアウォールの導入時に希望するポ ート設定を記入した上で情報シナジー機構へ申請 いただいた。

#### 4.2 申請について

全学ファイアウォールの登録申請は、TAINS で 提供している他のサービスと同様に部局の技術担 当者を介してメールで申請書を情報シナジー機構 へ送付する形式としている。申請書にはグローバ ルアドレス、ポート設定、利用目的等を記載する。 申請書の受理後1両日中に全学ファイアウォール のポート設定を実施している。

全学ファイウォールの運用開始から現在まで の申請件数の推移を図2に示す。全学ファイアウ オールの運用開始直後は月10件以上の申請があ ったが、これらは事前申請の漏れや見落としの修 正のためと思われる。運用開始から1年経過した 現在では申請件数は落ち着いてきており月3,4件 程度となっている。



図 2:全学ファイアウォール申請件数推移

#### 4.3 運用費用について

全学ファイアウォールの導入費用及び初年度の 運用費用は、セキュリティ対策の緊急性から総長 裁量経費により措置された。2 年目以降の運用費 用についてはセキュリティ強化 PT の報告に従い、 保有するグローバルアドレスの数及び全学的基盤 経費の負担額に応じて各部局で按分することとなっている。

具体的にはグローバルアドレス1つあたりの負 担金額を定め、保有するグローバルアドレ数に応 じて各部局の負担金を算出する。これを保有グロ ーバルアドレス比例分とし、年間運用費用のうち 3分の2程度を賄う。不足額を全学的基盤経費比 例分として全学的基盤経費の負担額に応じて各部 局に按分する。各部局は保有グローバルアドレス 比例分と全学的基盤経費比例分の合計金額を全学 ファイアウォールの年間の負担金として負担いだ くこととしている。負担金は当該年度1月1日の 保有グローバルアドレス数と当該年度の全学的基 盤経費の負担額に基づいて算出し、当該年度の3 月31日支払としている。

#### 5 おわりに

本稿では、本学の全学ファイアウォールの概要 とこれまでの運用について述べた。 全学ファイウォールは当初の目的であるグロ ーバルアドレスの集中管理を達成し、著作権侵害 に関するインシデントの未然防止の役割を担うに いたった。今後もポート設定の拡充等さらなるセ キュリティ対策の強化が期待される。

一方で全学ファイアウォールの運用に投入で きる人的リソースには限りがあるため、強化する 機能の選択と効率的な運用方法を検討していく必 要がある。

#### 参考文献

 [1] 東北大学情報シナジー機構、著作権侵害の 疑いのある P2P 公衆送信の検知の運用、東 北大学情報シナジー機構 TAINS ニュース、 No. 39、pp. 4、2011, [報告]計算科学・計算機科学人材育成のためのスーパーコンピュータ無償提供利用報告

### 基礎ゼミ報告

## - 計算科学・計算機科学の楽しさに触れる -

江川 隆輔

東北大学サイバーサイエンスセンター スーパーコンピューティング研究部

2015 年 9 月 14 日から 18 日の 5 日間,東北大学サイバーサイエンスセンター・スーパーコンピ ューティング研究部では,全学教育「基礎ゼミ」の一環として,「ハイパフォーマンスコンピュー ティング入門~君もスパコンプログラマ:世界トップクラスのスパコンを使いこなす~」を開催 しました.本講義は、学部 1 年生を対象にしており,楽しみながら,計算科学,計算機科学の基 礎を学んでもらうことを目的にしております.今年度は,工学部(電気系・機械系),農学部の学 生計 11 名が参加しました.

講義では、まず、計算機・並列計算機の仕組みを、学生が自らクラスタ型の並列計算機環境の 構築を行うことで学びます.次に、構築した並列計算環境を用いて並列プログラミングの基礎を 学び、最後にスーパーコンピュータを用いてプログラムの実行速度を競うコンテストを行いまし た.5日間と短い期間ではありましたが、参加した学生らはスパコンの圧倒的な計算力に驚きな がらも、「単純に並列数を増やしただけでは計算時間が短縮しないことにおもしろさを感じた」と アンケートに答えるなど、高性能アプリケーション、システム開発分野における本質的な課題に 触れる良い機会になったようです.

本講義に開催にあたっては、サイバーサイエンスセンターが平成20年から行っている計算科学・ 計算機科学分野における人材育成を目的としたスーパーコンピュータ利用負担金免除プログラム を活用いたしました.このような場を提供してくださった関係各位に厚く感謝いたします.



参加した学生さんが構築した並列計算機



スーパーコンピュータ SX-ACE

#### [報告]

## SC15 報告

#### 東北大学サイバーサイエンスセンター 小松一彦

2015年11月15日~20日,スーパーコンピュータに関する最大の国際会議SC15 (International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis)が米国テキ サス州のオースティンコンベンションセンターにおいて開催されました。SC15は,78件の論文発 表をはじめとする研究成果・技術論文を発表する本会議(Conference)と、352もの企業・大学・ 研究所等がスーパーコンピュータに関連する製品や研究成果を発表する展示会(Exhibition)から 構成されています。総参加人数も非常に多く1万2000人を越え、会場の中だけでなく会場周辺の ホテルでも多数のワークショップや技術交流が行われています。

サイバーサイエンスセンターでは、流体科学研究所、金属材料研究所、東北メディカル・メガ バンク機構と合同で、展示会へ参加いたしました。展示ブースでは、新たに竣工したサイバーサ イエンスセンター2号館や新スーパーコンピューティングシステムSX-ACEの紹介をはじめ、SX-ACE を利用したシミュレーションの高速化やスーパーコンピュータを容易に使うためのシステムソフ トウェアなど、最新の研究成果の展示や発表を行いました。16~19日の4日間の展示会期間中の訪 問者は300名以上にものぼり、活発な議論・情報交換を行うことができました。

また、スパコン研究部の研究成果として、本会議のポスター発表やCREST「ポストペタスケール 高性能計算に資するシステムソフトウェア技術の創出」 ブースでの展示も行いました。本会議ポ スター発表では、実際のアプリケーションの振る舞いに近いベンチマークであるHPCGにおいて SX-ACEが世界最高の実効効率を達成したことや、SX-ACEを用いたリアルタイム津波浸水・被害予 測シミュレーションシステムの開発について発表し、多くの研究者と有用な議論を交わすことが できました。

次回の SC16 は 11 月 13 日~18 日に米国ユタ州ソルトレイクシティで行われる予定です。ソルトレイクシティでの開催は 2012 年 SC12 以来、4 年ぶりになります。



SC15 会場入り口

東北大学展示メンバー集合写真

展示ブースでの発表の様子

[報告]

## 小松助教らの研究グループが、レガシーコードの移植に関する国際 ワークショップ LHAM2015 において Best Workshop Paper Award を 受賞しました

サイバーサイエンスセンターの小松助教、江川准教授、滝沢准教授、小林教授の研究グループ が、レガシーコードの移植に関する国際ワークショップ(International Workshop on Legacy HPC Application Migration (LHAM) 2015)において、Best Workshop Paper Award を受賞しました。

(対象論文)

Migration of an Atmospheric Simulation Code to an OpenACC Platform Using the Xevolver Framework

(著者)

Kazuhiko Komatsu, Ryusuke Egawa, Shoichi Hirasawa, Hiroyuki Takizawa, Ken'ichi Itakura and Hiroaki Kobayashi

(受賞論文の概要)

HPC システムの多様化に伴い、既存のアプリケーションの性能可搬性が重要になりつつある。 本論文では、コード変換フレームを採用することで、既存のアプリケーションの保守性を維持し ながら、アプリケーションの性能可搬性を維持する手法について提案している。他の HPC システ ムに必要なコード変換を、既存のアプリケーションから切り離し、コード変換フレームワークに 任せることで、保守性と高い性能可搬性を両立している。



## [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/

## 利用負担金額の表示コマンドについて(No. 207)

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

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

(共同利用支援係)

## 地下鉄青葉山駅周辺案内

2015年12月6日仙台市地下鉄東西線が開業しました。サイバーサイエンスセンターは、青葉山駅北1出口より徒歩3分の距離にあります。



サイバーサイエンスセンターでは、スーパーコンピュータや分散コンピュータ博物館の公開も 行っております。見学を希望される方は、共同利用支援係までご連絡ください。

共同利用支援係 (022-795-3406, uketuke@cc. tohoku. ac. jp)

## — SENAC 執筆要項 —

#### 1. お寄せいただきたい投稿内容

次のような内容の投稿のうち、当センターで適当と判定したものを掲載します。その際に原稿の修 正をお願いすることもありますのであらかじめご了承ください。

- 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-

- ・<u>用紙サイズ:A4</u>
- ・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\*(10部以内の希望部数)と本誌 PDF 版を進呈します。 \*2014 年末で、別刷の進呈は終了しました。
- (2) 投稿予定の原稿が 15 ページを超す場合は共同利用支援係まで前もってご連絡ください。
- (3) 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。
- (4) 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

新年、明けましておめでとうございます。昨年は、新たに竣工したサイバーサイエンスセンター 2号館において新スーパーコンピュータシステム SX-ACE の運用が開始され、新システムを活用した リアルタイム津波浸水・被害予測シミュレーションシステムが開発されるなど、研究基盤だけでなく 社会基盤としても当センターの資源が活用されております。本年も、日本の科学技術・産業・社会を 支える重要な基盤として、皆様を支援できるよう取り組んでまいります。どうぞよろしくお願いいた します。

先月上旬に仙台市営地下鉄 東西線が開通し、「青葉山」駅から徒歩3分と、サイバーサイエンス センターへのアクセスが容易になりました。科学技術計算を支える新スーパーコンピュータや可視化 システム、東北の大学ネットワークを支えるネットワーク機器、 歴史的資料を展示しているコンピュ ータ博物館など、サイバーサイエンスセンターの見学が随時できますので、皆様のお越しをお待ちし ております。(K.K)

新年あけましておめでとうございます。

7月の異動から、早いもので半年がたちました。地下鉄東西線も遂に開業し、多くの方が利用していると思います。私が大学に勤務したての頃、「運輸交通専門委員会」を担当する部署にいました。委員会では青葉山キャンパスへの、道路だけではない新アクセス方法を検討されておりました。モノレール構想もあったと記憶しております。10年後、再びその部署に異動した時には「地下鉄」という結論になっており、委員会は仙台市の関係者とルートの協議を重ねていました。それが今、ようやく実現した、という想いです。

地下鉄開業で八木山も変りました。動物公園駅周辺は道路が広くなり、バスプールもできました。 八木山小学校付近と国道 286 号線を結ぶ新しい道路も開通しました。高校生だった頃、八木山に住む 友人宅をバイクで訪れる時、「ここだけ、なんでこんなに道路が広いんだ。」と思っていましたが、こ のようになる計画だったんですね。八木山から、今は高架となった JR 長町駅まで、広い道路1本でつ ながりました。当時から 30 数年たった今、車で通勤利用しています。

さて、センターからは、日々変っていく新キャンパスの建築工事ラッシュが一望できるため、貴重 な体験をさせていただいております。環境科学研究科の建物が完成し、農学研究科の建物が少しずつ 様相を表してきました。農学研究科が新キャンパスに移転完了すると益々の賑わいになるでしょう。 平成18年7月、私は新キャンパス用地取得の事務に携わっており、当時の吉本総長と村井知事が青葉 記念会館で県有地売買契約調印後、がっちりと握手した光景は鮮明に覚えております。文科省への移 転計画説明資料や、収支決算バランスシート作成、仙台市への環境アセスメント申請等々を思い出し ます。あれからもう10年になるんですね。

年頭にあたり、ちょっと過去を振り返ってみました。(T.K)



整備中の新青葉山キャンパス



地下鉄東西線 青葉山駅北1出入口

SENAC 編集部会

小林広明 江川隆輔 小野 敏	曽根秀昭 佐藤恵美子 斉藤くみ子	水木敬明 高杉佳奈	後藤英昭 大泉健治
編集・発行	平成 28 年 テ 東北大学 サイバー 仙台市書	1 月発行 : ·サイエンス : 茜 I 芸 美 空	、センター こ書葉 6-3
印刷	画 町 雨 町 町 雨 町 町 町 町 町 町 町 町 町 町 町 町 町 町	<sup>米区 元 径子</sup> ・ 980-8578 注生活協同組 コープ	H来 0 0 3 1合

## 索 引

## SENAC Vol. 48 (No. 1~No. 4)

2015. 1~2015. 10

項 日	No	n	項 目	No	n
	Iu	p.		IU	p.
****			却在		
					22
「普通の人々のためのスーパーコンピュータセン			SCI4 報告 小松一彦	1	66
ター」を目指して 小林広明	1	1	- 式 典報告 - 東北大学サイバーサイエンスセ		
			ンター新棟竣工および新スーパーコンピュー		
<u>共同研究成果</u>			タシステム導入披露式典を開催しました	2	136
東北地震に伴う固有地震活動の揺らぎから推定され			第13回シナジー研究会報告	2	148
た摩擦特性と余効すべり伝播過程			海洋研究開発機構地震津波・防災研究プロジ		
有吉慶介他	1	33	ェクトの有吉技術研究員が平成26年度地震学		
東北地方の農業における温暖化適応策と気象情報			会論文賞を受賞しました	2	149
の高度利用	2	108	第 116 回サイエンスカフェ「スーパーコンピ	-	1 10
V値及中加	2	100		2	54
			ム グの馬共和な力」 所催報日	5	04
多個カノカン COOQ の療光府施の動力子シミュレ	2	1	小仏の教が情報処理于云朱礼文的「第10回朱 北古如照口研究将時堂」な巫堂しました	0	
	3	1	北又部野口研先突励員」を文員しました	3	55
界面反応の第一原理シミュレーション		_	JHPCN 字除大規模情報基盤共同利用・共同研究		
柳澤将他	3	7	拠点第7回シンボジウム報告	4	48
結晶性分子ジャイロスコープの構造と回転動力学			東北大学サイバーサイエンスセンターオーブンキ		
の密度汎関数強束縛法によるシミュレーション			ャンパス報告	4	56
菅野学 他	4	1	<プレリリース報告> 準リアルタイムで熱		
グリーンランド氷床モデルを用いた地震波伝播シ			中症リスクを評価する技術の開発 ~個人に		
ミュレーション 豊国源知他	4	10	応じた熱中症対策を提案する、新たな情報~	4	57
CFD による血管糖拍動挙動における Vasomotion	_			_	
の 雨 羽 解 析	4	24	利田相談宮価り		
ッけの所切 工廠作員他 十田増マルチビートリフレクトアレーの記書注し	т	24		2	50
八祝候 マルノ レームリノレク トノレーの 設計 伝こ			平成21 平皮の利用相談について	ა ი	52
ベクトル型スーパーコンヒュータによる高速化の		0.5	新アクールルアンスタントの紹介	3	53
研究 今野住佑他	4	35			
アンテナの放射効率低トメカニズムに関する一検討			<u>展示室使り</u>		
有馬卓司他	4	43	(14)スーパーコンピュータ SX-9	3	57
<u>研究成果</u>			「Web版大規模科学計算システムニュース」より		
ベクトルスーパーコンピュータ SX-ACE による暑			利用負担金(1月~3月分)の請求について		
熱環境下体温上昇の高速解析 西尾渉他	4	48	(No. 181)	1	67
			利用負担金額の表示コマンドについて		
大相模科学計賞システム			$(N_0, 181)$	1	67
スーパーコンピュータシステム SY-ACE のハード			研究成果川スト提出のお願い (No 181)	2	68
D-R	9	1		2	150
リエノ CV ACE 本のプロガニミンガ(ベカール(小炉)	2	1	平成27 平及語自云計画について(NO.192) 正式 07 年度世日研究について(N-102)	2	150
SX-ALE $(0)$ ノロクフミンク (ヘクトル化編)	2	29	半成 27 年度共同研究につい( (No. 193)	2	151
SX-ACE でのプログラミング (亚列化編)	2	62	計算科字・計算機科字人材育成のためのスーパー		
アプリケーションサービスの紹介	2	85	コンピュータ無償提供制度について (No. 193)	2	151
SX-ベクトルコンピュータにおける高速化 ACE に			民間企業利用サービスについて (No. 193)	2	152
おける HPCG ベンチマークの性能評価	3	14	平成 27 年度利用負担金について(No. 194)	2	153
ベクトルコンピュータにおける高速化	3	20	利用負担金の表示コマンドについて (No. 197)	3	60
			SX-ACE 1,024 ノード実行の提供開始について		
大学 ICT 推進協議会 2014 年度 年次大会論文集よ			(No. 203)	4	59
<u></u>			非線形構造解析汎用プログラム MSC Marc/	_	
<u>- パーコンピュータシステム SV-ACF</u> の幻企			Montat $\mathcal{O}$ $\mathcal{N} \rightarrow \mathcal{V} = \mathcal{V} \mathcal{P} \oplus \mathcal{P} \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{O} \otimes \mathcalO \otimes $	Δ	60
ハ ハ コンビュ ゲンハアム SA AOL の相力 山下朝仙	1	20	Melitat ())、 ジョン ) シノに ) (C ) ((NO. 203) 粉ゴ加理プログラム Mathematica のバージョ	4	
山上叙旭	1	- 39	数式処理ノログノム Mathematica のパーショ	4	<i>c</i> 0
新亚列コンヒューダンステムと活用事例の紹介		15		4	60
齋滕敦子他	1	47	科字技術計算言語MATLABのバーションアップ		
リアルタイム津波浸水・被害予測シミュレーショ			について (No. 203)	4	61
ンシステム開発の取り組み 大泉健治他	1	54	反応経路自動探索プログラムGRRM14のサービ		
キャンパス無線 eduroam の最新動向と国内機関向			ス開始について(No.203)	4	62
け新サービス 後藤英昭他	1	58			
東北学術研究インターネットコミュニティの運用					
に関する報告 森倫子他	1	62			
お知らせ					
<u>パーコンピュータシステムの</u> 再新に伴う <b>A</b> 体					
のスケジュールについて	1	2			
SCHアカヤス認証鍵上出来」バの利用七法	1 9	105			
55日 / / ビノハロの山政王ルス リーノハロノイロ (万)	2	100			

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	1~256	規定値 : 2 週間 最大値 : 1 ヶ月	COCDY A 1844	ソード数 sx	利用ノード数
	257~1,024	規定値 : 1 ヶ月 最大値 : 1 ヶ月	00GB× / 一下级		
無料	1	1時間	60GB		f
デバッグ・	1~16	2 時間	60CB×1-ド粉	debug	利田ノード粉
	17~32	24 時間	0000~7 一下氨	uebug	

※ 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 ヶ月 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	IA	а
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

# 東北大学サイバーサイエンスセンター 人 大規模科学計算システム広報 Vol.49 No.1 2016–1

「巻頭言] [共同研究成果] 拍動流下における動脈瘤を有する血管壁挙動の数値解析法とその臨床応用 優・横堀 壽光 3 工藤 和貴・大見 敏仁 門間 良平・友野 雄基 菅野 崇史 一様磁場下の熱プラズマジェットに輸送される ナノ粒子群の集団的形成過程の数値シミュレーション …………………………… 茂田 正哉 17 [大学 ICT 推進協議会 2015 年度年次大会論文集より] スーパーコンピュータ SX-ACE の運用について 敏·齋藤 敦子·森谷 友映 22 佐々木大輔・山下 毅·大泉 健治 岡部 公起·江川 隆輔·小林 広明 暑熱環境下体温上昇解析コードのスーパーコンピュータ SX-ACE での高速化と並列化 ……………………… 佐々木大輔・山下 毅・西尾 涉 28 浅野 陽平・平田 晃正・江川 隆輔 小林 広明 キャンパス無線 eduroam の国内外の最新動向 東北大学全学ファイアウォールの運用に関する報告 ------野田 大輔・森 偷子 37 水木 敬明 · 曽根 秀昭 [報告] <計算科学・計算機科学人材育成のためのスーパーコンピュータ無償提供利用報告> 基礎ゼミ報告 ―計算科学・計算機科学の楽しさに触れる― 小松助教らの研究グループが、レガシーコードの移植に関する 国際ワークショップ LHAM2015 に おいて Best Workshop Paper Award を [Web 版大規模科学計算システムニュースより] 

