



TOHOKU
UNIVERSITY

ISSN 0286-7419

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.44 No.3 2011-7



Supercomputing System
Cyberscience Center
Tohoku University
www.ss.isc.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.isc.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
				月～金
一階	共同利用支援係 (受付)	022-795-3406 (3406) FAX:022-795-6099 uketuke@isc.tohoku.ac.jp	各種申請書、講習会、利用相談、広報、センターへの質問や要望の受付等	8:30～17:15
	利用相談室	022-795-6153 (6153) sodan05@isc.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	10:00～16:00 8:30～21:00
	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
三階	庶務係	022-795-3407 (3407) syomu@isc.tohoku.ac.jp	庶務に関すること	8:30～17:15
	会計係	022-795-3405 (3405) kaikai@isc.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
	共同研究支援係	022-795-6252 (6252) rs-sec@isc.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	022-795-6251 (6251) uketuke@isc.tohoku.ac.jp	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@isc.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)	8:30～21:00

() 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。

[共同研究成果]

次世代タービン複雑流動の大規模シミュレーション技術の開発

笹尾 泰洋[†], 山本 悟[†]

[†]東北大学大学院情報科学研究科 山本・笹尾研究室

我々の研究グループにおいて開発された CFD コードである, 凝縮を考慮できる蒸気タービン内部流動解析プログラム「数値タービン」および前処理法と PROPATH に基づく「超臨界流体シミュレータ(SFS)」を用い, 蒸気タービン試験機を通過する湿り蒸気流れ(常圧・相変化有り), 蒸気タービン部分流入段(亜臨界圧), 翼列を通過する超臨界二酸化炭素流れ(超臨圧を跨ぐ)の3つの特徴的な流れ場を対象に数値解析を行った.

1. 緒言

地球温暖化問題に対する世論の高まりや, 新興国における燃料需要の増大および政情不安に伴う燃料費の高騰によって, 電力プラントの高効率化に対する要求はかつて無いほどの高まりを見せている. 蒸気タービンは, 一般に作動流体である蒸気が高温高压であるほど高効率であり, 石炭火力発電用の 1000MW 級蒸気タービンに供給される蒸気は定格時で 566°C, 24.1MPa に達する^[1]. この様な高温高压条件下で運用される蒸気タービンは超臨界圧蒸気タービンと呼ばれ, 蒸気は初め超臨界状態で流入し, 出口へと近づくに従い沸騰することなく気相へと変化する. 次世代型超々臨界圧タービンにおいては, タービンロータ材ならびに冷却手法の発展に伴い, さらなる高温高压化が達成されている.

一方, 化石燃料や核燃料を用いない将来の発電プラントとして, 集光型太陽熱発電の実現に向けた研究・開発が進められている. 集光型太陽熱発電では, 集光ミラーによって集められた太陽光を利用し, オイルや融解塩等に蓄積された熱エネルギーから昼夜を問わず蒸気を生成して蒸気タービンを駆動する. 現在, 研究が盛んな集光型太陽熱発電にはタワー式太陽熱発電とトラフ式太陽熱発電がある. 前者は作動流体の高温高压化が容易である反面, 集光ミラーの大規模化や制御に課題があり, 後者は集光ミラーの大規模化が容易である反面, 集熱パイプが長大となり熱損失が増大して高温化に適さない, といった課題がある. そこで, トラフ式太陽熱発電においては, 熱効率の向上を図るために超臨界二酸化炭素を作動流体とした超臨界 CO₂ ガスタービンの利用が検討されている. この様に, 発電用タービンにおける超臨界流体の利用は, 発電形態によらず拡大していくものと思われる.

電力プラントにおいて運用される大出力の蒸気タービンは, 高压タービン, 中圧タービン, 低压タービンの組み合わせから構成されている. 低压タービンを通過した蒸気はディフューザで減速され, 排気室を経て復水器内部において水へと戻る. 復水器内部の圧力は海水温における蒸気圧よりやや高い 5kPa(0.05 気圧)程度であり, 低压タービンの出口側における静圧はさらに低压である. 蒸気はタービン内部で断熱膨張しながら過冷却状態に達し, 低压タービン最終段近傍において非平衡凝縮による急激な相変化を伴う気液二相流を形成する. その際に放出される潜熱は作動流体の熱力学的損失となり, 低压タービンにおける損失の中で大きな割合を占める. また, 低压タービンの排気損失も全損失の中で大きな割合を占めており, 低压タービンの高性能化を実現する上で, 最終段近傍からディフューザにかけての流れ場の解明は, 特に重要な課題である.

このように, 発電に用いられる大出力蒸気タービン内部において, 蒸気は超臨界圧からほぼ真空まで大きな圧力変化を経験し, さらに, 相変化を伴う複雑な遷音速流れ場を形成する. 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-9 を用いて, 蒸気タービン内部においても特に特徴的な流れ場が形成されている最終段近傍の湿り蒸気流れを想定したタービン試験および部分流入段に数値タービンを適用し, その流れ場を三次元的に再現した. また, 集光型太陽熱発電において利用が検討されている CO₂ タービン内部の仮想的な流れ場として, 翼列を通過する超臨界 CO₂ 流れを設定し, SFS を用いて流れ場の予測を行った.

2. 基礎方程式

2.1 凝縮を考慮できる三次元圧縮性流れの基礎方程式

本研究では、三次元圧縮性 N-S 式に蒸気の相変化を考慮した蒸気の質量保存則、運動量保存則、エネルギー保存則、液滴の質量保存則、液滴の数密度保存則、乱流運動エネルギーおよびその比散逸率からなる次式を解く。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F_i}{\partial \xi_i} + S + H = 0 \quad (1)$$

ここで、 Q は未知変数ベクトル、 F は流束ベクトル、 S は粘性項、そして H は生成項であり、次のように表される。

$$Q = J \begin{bmatrix} \rho \\ \rho w_1 \\ \rho w_2 \\ \rho w_3 \\ e \\ \rho\beta \\ \rho n \\ \rho k \\ \rho\omega \end{bmatrix}, F_i = J \begin{bmatrix} \rho W_i \\ \rho w_1 W_i + \partial \xi_i / \partial x_1 p \\ \rho w_2 W_i + \partial \xi_i / \partial x_2 p \\ \rho w_3 W_i + \partial \xi_i / \partial x_3 p \\ (e + p)W_i \\ \rho\beta W_i \\ \rho n W_i \\ \rho k W_i \\ \rho\omega W_i \end{bmatrix}, S = -J \frac{\partial \xi_i}{\partial x_j} \frac{\partial}{\partial \xi_i} \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{1j} \\ \tau_{2j} \\ \tau_{3j} \\ \tau_{kj} u_k + (\kappa + \kappa') \partial T / \partial x_j \\ 0 \\ 0 \\ \sigma_{kj} \\ \sigma_{oj} \end{bmatrix}, H = -J \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \rho(\Omega^2 x_2 + 2\Omega w_3) \\ \rho(\Omega^2 x_3 - 2\Omega w_2) \\ 0 \\ \Gamma \\ I \\ S_k \\ S_\omega \end{bmatrix} \quad (2)$$

本研究で取り扱う気液二相流は液滴の質量分率が十分に小さい均質流を仮定する($\beta < 0.1$)。湿り蒸気の状態方程式および音速の式は石坂ら^[2]により定式化された下式より算出する。

$$p = \rho RT(1 - \beta) \quad (3)$$

$$c^2 = \frac{C_{pm}}{C_{pm} - (1 - \beta)R} \frac{p}{\rho} \quad (4)$$

ただし、 $C_{pm} = \beta C_{pl} + (1 - \beta)C_{pv}$

C_{pl} 、 C_{pv} は水および蒸気の定圧比熱であり、それぞれ4.184、1.882kJ/(kg·K)とした。凝縮による液滴の質量生成率 Γ は古典凝縮論に基づき、凝縮核生成と液滴の成長による質量増加の和で表される。本研究ではさらに、液滴の成長を液滴の数密度を関数にした式で近似した次式を用いる^[2]。

$$\Gamma = \frac{4}{3} \pi \rho_l \left(I r_*^3 + 3 \rho n r^2 \frac{dr}{dt} \right) \quad (5)$$

凝縮核生成率 I はFrenkel^[3]の式より、液滴の成長率 dr/dt は、Gyarmathy^[4]のモデルより算出した。

数値解法として、空間差分にはRoeの流束差分法^[5]および4次精度コンパクトMUSCL TVDスキーム^[6]を用いた。粘性項には2次精度中心差分を用い、乱流モデルにはSSTモデル^[7]を用いた。時間積分にはLU-SGS法^[8]を用いた。

2.2 前処理を施した二次元圧縮性流れの基礎方程式およびPROPATHの適用

山本らによって定式化された、前処理を施した二次元圧縮性ナビエ・ストークス方程式は、一般曲線座標系で次のように定義される^[9]。

$$\Gamma \frac{\partial \hat{Q}}{\partial t} + \frac{\partial F_i}{\partial \xi_i} + \frac{\partial F_{wi}}{\partial \xi_i} = 0 \quad (i = 1, 2) \quad (6)$$

ただし、

$$\hat{Q} = J \begin{bmatrix} p \\ u_1 \\ u_2 \\ T \end{bmatrix}, \quad F_i = J \begin{bmatrix} \rho U_i \\ \rho u_1 U_i + \frac{\partial \xi_i}{\partial x_1} p \\ \rho u_2 U_i + \frac{\partial \xi_i}{\partial x_2} p \\ (e+p)U_i \end{bmatrix}, \quad F_{vi} = -J \frac{\partial \xi_i}{\partial x_j} \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{j1} \\ \tau_{j2} \\ \tau_{jk} u_k + \kappa \frac{\partial T}{\partial x_i} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$p, u_i, T, U_i, \rho, e, \tau_{ij}, \kappa$ ならびに J は、それぞれ、圧力、物理速度成分、温度、反変速度成分、密度、全内部エネルギー、粘性応力テンソル、熱伝導率、ならびにヤコビアンである。また、前処理行列 Γ は次のように定義される。

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \theta & 0 & 0 & \rho_T \\ \theta u_1 & \rho & 0 & \rho_T u_1 \\ \theta u_2 & 0 & \rho & \rho_T u_2 \\ \theta h - (1 - \rho h_p) & \rho u_1 & \rho u_2 & \rho_T h + \rho h_T \end{bmatrix} \quad (8)$$

ただし、 $h = (e+p)/\rho$ であり、 ρ_T, h_T ならびに h_p はそれぞれ密度の温度偏微分、 h の温度偏微分、 h の圧力偏微分である。また、 θ は次式のように定義される。

$$\theta = \frac{1}{U_r^2} \frac{\rho_T (1 - \rho h_p)}{\rho h_T} \quad (9)$$

U_r は Weiss らの定義より次のように選択される^[10]。

$$U_r = \begin{cases} \varepsilon c & (u < \varepsilon c) \\ u & (\varepsilon c < u < c) \\ c & (c < u) \end{cases} \quad (10)$$

ここで、 c は音速であり、 ε は極めて小さな値 $u = \sqrt{u_i u_i}$ である。

PROPATH^[11]では、密度、熱伝導率、定圧比熱などの熱物性値は温度と圧力を引数とする関数として定義されている。これらの熱物性値の関数は信頼ある文献を元にプログラムされており、例えば水の場合には、IAPWS IF97^[12]で定義された値が使用される。別の物質に関する熱物性データを利用したい場合には、物質毎に用意されている熱物性ライブラリをコンパイル時に読み込むだけでよく、数値計算コード自体には手を加える必要がないため極めて有用である。

3. 蒸気タービン試験機を通過する湿り蒸気流れの数値解析

3.1 実験条件および計算条件

現在、大規模電力プラントにおいて運用されている蒸気タービンは、その殆どが復水タービンである。低圧タービンに供給される蒸気の状態は熱源や中圧タービンの有無、再熱器の種類により様々であるが、翼列に対して仕事をしながら断熱膨張し、35°C、5kPa (0.05 気圧)前後の低圧蒸気となって排出される。この過程で蒸気は一時的に過冷却状態に達し、均一核生成による急激な液滴生成を経て気液二相流を形成する。その際放出される潜熱は、局所的な圧力の上昇を引き起こし翼性能を低下させるだけでなく、蒸気の熱力学的な損失をもたらす。液滴の生成や成長、挙動に伴う損失は湿り損失と呼ばれ、低圧タービンにおける損失の大きな部分を占めることが知られている。そこで我々の研究グループでは、凝縮を考慮できる蒸気タービン内部流動解析プログラム「数値タービン」を開発し、これまで蒸気タービンを対象とした三次元非定常流動解析を行ってきた。本研究においては、三菱重工によって行われた湿り蒸気を用いた大規模タービン試験に数値タービンを適用し、その信頼性を検証する。

図 3.1 は三菱重工によって開発された試験翼列とピトー管の配置図である。作動流体である水蒸気は、スプレーノズルより液滴を加え飽和状態とした後、重力トラップによって粒径の大きな液滴を除去してから

試験翼列へ供給する。初段動翼列と2段目静動翼列の下流には5孔ピトー管 P1, P2, P3 が挿入されており、トラバース計測による性能評価が行われた。翼枚数は全て96枚である。

表 3.1 に計算条件を示す。入口全圧、入口全温および出口静圧を固定値とし、壁面には断熱滑り無し境界を適用する。Case 1 は三菱重工による翼列試験を模した計算条件である。実際の蒸気タービン最終段近傍においては均一核生成が支配的であるが、大規模なタービン試験機に連続的に過冷却蒸気を供給することは困難であるため、実験では液滴を付加した飽和蒸気を供給している。そこで、解析において流入蒸気を過冷却状態とした Case 2 を新たに設定し、平衡凝縮と非平衡凝縮の違いがトラバース計測結果に及ぼす影響についても調査した。

表 3.1 計算条件

	入口全圧 [MPa]	圧力比 [-]	入口全温 [K]	過冷却度 [K]	入口湿り度 [-]	回転速度 [rpm]	凝縮モデル
Case 1	0.1747	1.349	388.8	0	6.9	4452	有り
Case 2	0.1747	1.349	363.8	-25.0	0	4452	有り

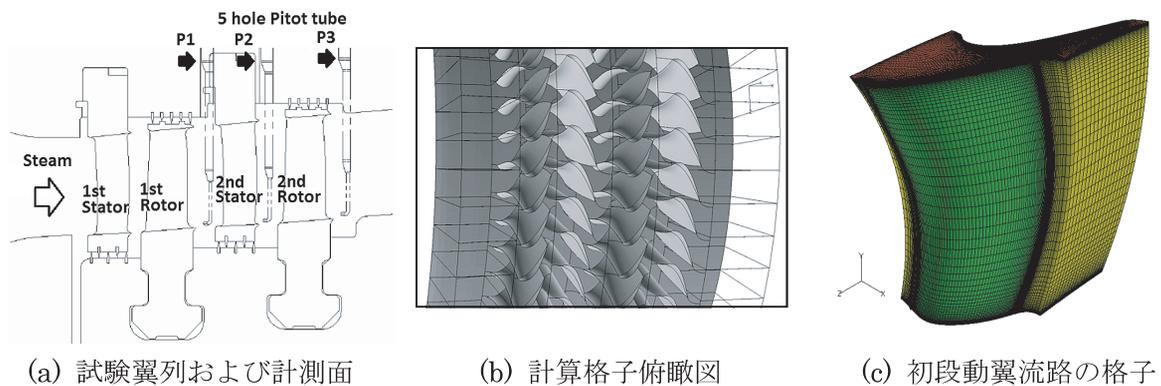


図 3.1 実験装置および計算格子

3.2 計算結果

図 3.2 および図 3.3 はミッドスパン断面における瞬間の液滴質量生成率分布および液滴質量分率分布である。実験条件を模擬した Case 1 においては、各翼列のど部の翼背面近傍において液滴の成長が促進されており、翼列間の緩衝領域においては殆ど成長していないことが分かった。一方、Case 2 においては、初段静翼列の翼背面側の後流から初段動翼列のど部にかけて、液滴の成長速度が大きいことが分かった(図 3.2(b))。また、Case 2 の同時刻における液滴の凝縮核生成率分布を調べたところ、初段静翼列のど部の翼背面において、最も核生成率が高いことが分かった。これは、のど部付近において蒸気は最も速度が大きく低温低圧となるため、結果として過冷却度が高くなるためである。一方、初段動翼の下流以降においては核生成が殆ど起こっていないことから、2 段目以降では平衡凝縮が支配的であることが分かった。

表 3.2 は5孔ピトー管によって計測されたミッドスパン断面における圧力と気体流出角の比較である。なお、全圧と気体流出角は相対速度を用いて算出した。P1, P2 においては、Case 1, 2 ともに全圧、静圧、気体流出角のいずれも計測値と良く一致した。一方、P3 における全圧および静圧は計測値との誤差が大きい。これは、解析では出口境界条件に一樣な静圧を与えているためであり、Case 1 と Case 2 の全圧、静圧および気体流出角はほぼ一致した。

以上の結果より、数値タービンは凝縮を伴う条件下においても十分な流れ場の予測精度を有することが確認できた。また、湿り蒸気を用いた翼列性能試験においては、圧力比が比較的小さく、非平衡凝縮による凝縮量が比較的小さな条件下では、凝縮が圧力及び流速に対して与える影響は限定的であるこ

とが分かった. よって, 非平衡凝縮が支配的な蒸気タービン内部の流れ場を平衡凝縮によって実験的に近似した場合でも, 性能評価の観点からは十分に有用であるといえる.

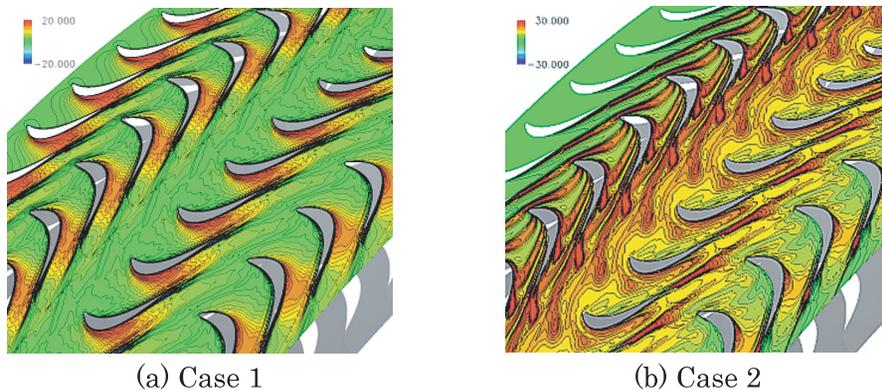


図 3.2 瞬間の液滴質量生成率分布

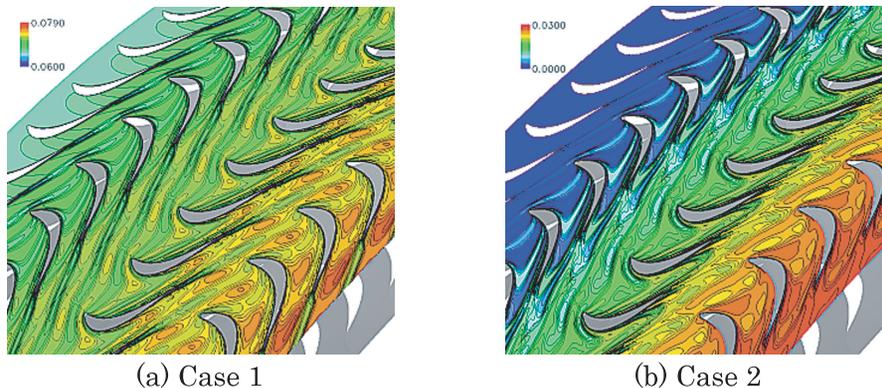


図 3.3 瞬間の液滴質量分率分布

表 3.2 ミッドスパン断面における後流の計測値

	P1			P2			P3		
	全圧 [MPa]	静圧 [MPa]	Yaw 角 [deg]	全圧 [MPa]	静圧 [MPa]	Yaw 角 [deg]	全圧 [MPa]	静圧 [MPa]	Yaw 角 [deg]
実測値	0.1470	0.1452	66.8	0.1366	0.1348	67.4	0.1260	0.1245	66.0
Case 1	0.1470	0.1454	67.1	0.1363	0.1346	67.6	0.1270	0.1253	66.1
Case 2	0.1469	0.1448	67.4	0.1362	0.1342	67.6	0.1270	0.1253	66.1

4. 部分流入段半周を通過する亜臨界圧蒸気の非定常流動解析

4.1 部分流入段の研究背景

現在, 電力プラントに用いられている蒸気タービンの多くは, 組立てやメンテナンスの容易さから水平2つ割り構造の高圧車室および中圧車室を採用している. 車室は内外の大きな圧力差に耐え, なおかつ車室やフランジの部材を薄肉化するために, 二重構造にするなどの工夫が施されているが, ノズルボックスの間には, なお十分な厚みを有したフランジを設置する必要がある. 部分流入方式の蒸気タービンにおいては, 蒸気は複流形ノズルボックスに供給され, 静翼列を模したノズルを通過して下流の翼列へと流入する. しかし, ノズルはフランジによって水平面がふさがれている為に, ノズル下流とフランジ下流とでは蒸気の供給量が大きく変化することになる. このため, 動翼の旋回方向に対して極めて不均一な流れ場が形成されることになり, 部分流入段を構成する動翼には極めて強い非定常流体力が働くことになる.

部分流入段を対象とした解析的研究としては, He^[13]や Sakai ら^[14] による非定常流動解析例が報告さ

れており、動翼に働く非定常流体力や損失のメカニズムに関する議論が行われている。近年では計算機の高性能化に伴い、Gaoら^[15]やHushmandiら^[16]によって部分流入段全周を対象とした三次元非定常流動解析が行われており、より詳細な非定常流体力の予測や各段出口における全圧分布予測が行われている。一方、我々の研究グループでは、東北大学サイバーサイエンスセンターのSX-9を用いて、部分流入段全周ないし半周を対象とした二次元非定常流動解析を行い、フランジが部分流入段の全体性能の低下に占める割合を予測し、さらに、非定常流体力を低減することで部分流入段の効率を向上できるフランジ構造の改良案を提案した^[17]。

本研究の最終的な目標は、我々の開発した数値タービンによって部分流入段を通過する非定常蒸気流れ場を解析し、部分流入段の性能向上に繋がるフランジの改良案を提案することである。ここでは、その過程として得られたフランジ近傍の三次元非定常解析結果について考察する。

4.2 計算対象および計算条件

図 4.1(a)は部分流入段に適用した計算格子の俯瞰図であり、図 4.1(b)はフランジ近傍の拡大図である。計算格子はいずれも拡張H型格子であり、格子点数はノズル部が64×64×33点、フランジ部が24×64×33点、動翼部が128×64×33点である。これらの計算格子を組み合わせることで、ノズル54流路、動翼列30流路、総格子点数約1580万点からなる部分流入段半周分の計算格子を作成した。計算にはSX-9, P8クラスを用いた。メモリ使用量は24.7~48.6GByteであり、1ジョブ当たり約1100 CPU-hourを要した。

流入蒸気条件は亜臨界圧(150気圧前後)を想定して決定した。境界条件として入口全圧、入口全温および出口静圧を固定し、圧力比は1.17とした。動翼の回転数は3000rpmである。本条件下において流れ場が準定常状態に達した際の平均流入マッハ数は0.13、平均流出マッハ数は0.19となった。

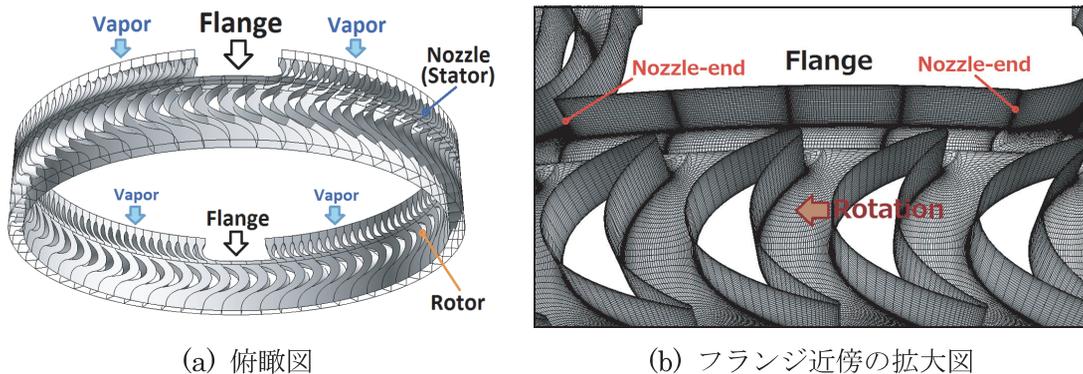


図 4.1 計算格子

4.3 動翼に働く非定常流体力

図 4.2 は動翼がフランジ近傍を通過する際に経験する非定常流体力の解析結果である。縦軸は動翼1枚に働く揚力を、入口全圧と旋回方向に投影された翼表面積で割って無次元化した値であり、横軸は動翼1ピッチ長さで無次元化された標準位置からの動翼の変移である。図 4.2 中の等値線図は瞬間の静圧分布であり、"Flange"と記載された水色の領域と図中のフランジの位置は一致する。

動翼はフランジ下流(y/Pitch=10~11)に差し掛かると、小さな揚力のピークを経験する。これは、フランジ下流へ殆ど蒸気が供給されないために動翼背面側の静圧が低下し、一時的に揚力が増加するためである。動翼がフランジ下流側の蒸気が淀む領域(y/Pitch=11~15)に進入すると、揚力は急激に低下する。図 4.3(c)はフランジ右側のノズル A1, A2 背面の限界流線である。フランジ下流側は低圧となるためノズル B 側では気体流出角が(背面に流れが付着する方向に)大きくなり剥離は観察できなかった。図 4.3(a)はフランジ左側のノズル B1, B2 背面の限界流線である。ノズル A とは逆に気体流出角が(背面から流れが剥がれる方向に)小さくなり、ノズル後縁近傍では剥離が生じていることが分かる。図 4.3(b)はフランジの下流側壁面全体における限界流線である。フランジ下流側では殆どの領域において流れが剥離しているこ

とが分かった. 図 4.4 はフランジ近傍の渦粘性係数分布であり, フランジから発生した後流の影響が下流を通過する複数の動翼に及んでいる様子を確認することができる. この領域ではフランジ下流より発生した渦が断続的に動翼間へと流れ込むため, 動翼に働く揚力は大きく変動する. また, 渦によって境界層と主流との間で運動量の交換が促進されるため, 通風損失が増大する可能性がある. 図 4.5 はノズルと動翼の干渉領域における速度ベクトルである. フランジの下流側において流れは Hub 側から Tip 側へと大きく蛇行している様子を確認することができる. また, Hub 近傍では動翼の旋回方向とは逆向きの流れが生じており, 動翼の出力に悪影響を及ぼしている可能性がある.

動翼が次のノズル下流($y/\text{Pitch}=15\sim 16$)へ移動すると, 動翼間の淀んだ蒸気はノズルから供給される高速の蒸気によって圧縮され, 運動エネルギーの一部は熱へと変換される. これが噴射端部損失に相当する^[13]. この時, 動翼背側の圧力が腹側より高くなることで, 動翼には負の揚力(Negative lift)が働く事になる(図中 B). フランジを完全に通過した動翼は, その後, 徐々に揚力を回復していく.

以上より, 動翼が経験する非定常流体力は, フランジの下流側に形成される特徴的な流れ場に起因することが分かった. 今後は, 計算領域を部分流入段全周および下流段側へと拡張し, 性能向上に繋がるフランジ形状を提案していきたい. また, 沸騰水型原子炉によって生成された飽和蒸気は蒸気乾燥機を経て高圧タービンへと供給されるが, なお 0.1%程度の湿度を有している. 高圧タービン初段を通過する高温高圧の湿り蒸気流れに関する解析例は殆ど例が無いため, 折をみて計算を行ってきたい.

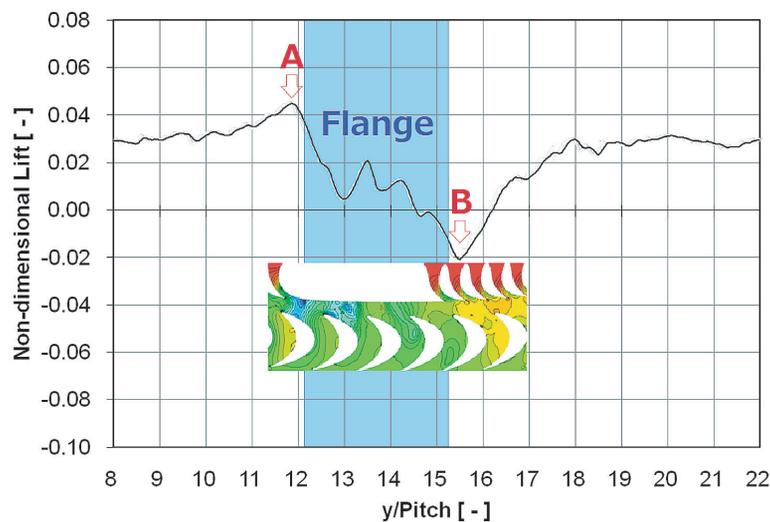


図 4.2 フランジ近傍で動翼に働く非定常流体力

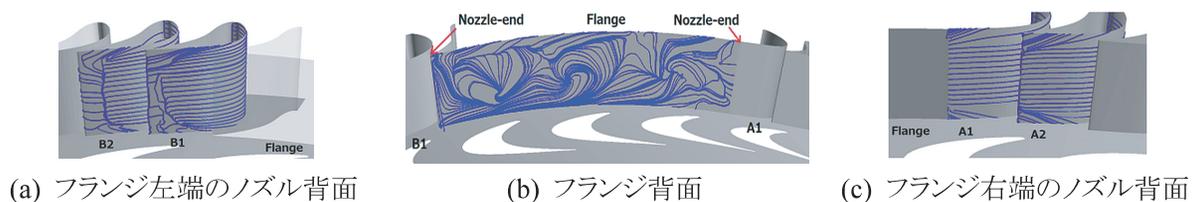


図 4.3 フランジとノズル背面の限界流線

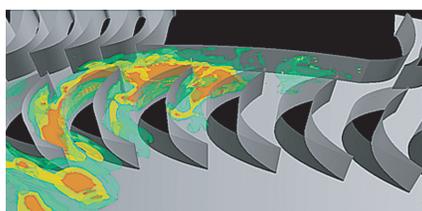


図 4.4 瞬間の渦粘性係数分布

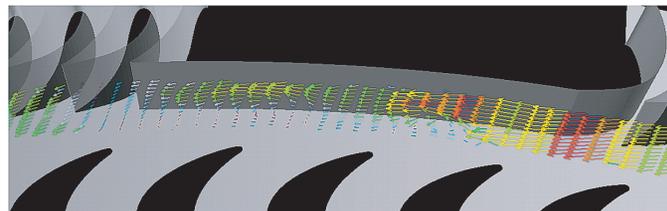


図 4.5 フランジ近傍の速度ベクトル分布

5. 二次元翼列を通過する超臨界二酸化炭素流れの数値解析

5.1 超臨界 CO₂ ランキンサイクルの研究背景と計算条件

トラフ式太陽熱発電は構造上、熱媒体の高温化が困難であり、水蒸気を作動流体として用いた場合、蒸気タービン低圧段において湿り損失が大きくなってしまい、高効率化には問題があると考えられている。さらに、季節や天候、時間帯による日照量の変化にも柔軟に対応する必要があるため、化石燃料を熱源としたボイラーの併設が不可欠である。そこで、低温低圧下において比較的高い熱効率を發揮できる、超臨界二酸化炭素を作動流体とした超臨界 CO₂ ランキンサイクルが注目を集めている。

超臨界 CO₂ ランキンサイクルにおいても化石燃料を熱源とした発電方式が提案されているが、本研究では太陽熱を熱源とした低温低圧条件を想定し、仮想的な計算を行った。表 5.1 は集熱パイプの耐圧性能は 10MPa 強程度、集熱器の出口温度は 400~600K 程度になるであろう、との仮定から設定した計算条件である。超臨界流体の熱物性は、臨界点から高温側に離れるに従い温度依存性が小さくなることから、Case 1 は比較の対象として入口側を 600K とした。一方、Case 2, 3 は臨界点近傍における CO₂ の特異な熱物性の変化を捉えるために、入口温度を 340K とした。超臨界 CO₂ タービンの翼形状が入手できなかったため、本研究では Bakhtar ら^[18]の遷音速翼列を仮想的な計算対象とした。図 5.1 は格子点数は 256x128 点からなる H 型計算格子であり、翼表面近傍には十分に格子を寄せてある。

表 5.1 計算条件

	P_{in} [MPa]	P_{in}/P_{out} [-]	T_{in} [K]
Bakhtar, et al. ^[18]	0.1004	1.24	408.5
Case 1	8.0	1.24	600.0
Case 2	8.0	1.24	340.0
Case 3	10.0	1.24	340.0

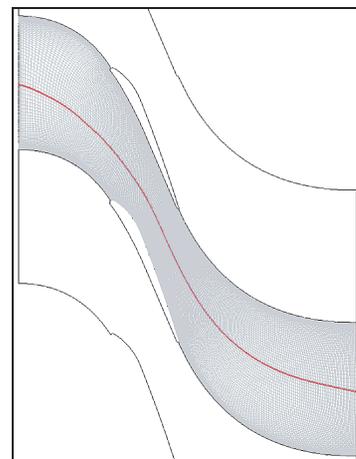


図 5.1 計算格子

5.2 臨界圧を跨ぐ超臨界二酸化炭素流れの計算結果

図 5.2 は各場合の瞬間の定圧比熱分布である。Case 1 においては常温常圧の場合と同様、下流へ向かって二酸化炭素が膨張するに従い比熱は低下する。一方、Case 2 においては、流れ場全域で一様な定圧比熱となっている。図 5.3 は定圧比熱の P-T 図であるが、臨界点近傍では定圧比熱が急激に大きくなるのが分かる。図 5.3 中の白線は、Case 2, 3 の計算結果から得られた静温静圧の分布を図 5.1 の赤線の位置から抜き取り、書き込んだものである。白線の右上が入口側、左下が出口側に相当する。図 5.3 からも、Case 2 の場合、出口側で二酸化炭素は約 6.8MPa, 323K に達しているが、定圧比熱には殆ど変化が無いことが確認できる。Case 3 では下流側において定圧比熱が高く、特に圧力と温度が最も低下する翼列のど部の翼背面近傍において定圧比熱は最大値となった。これは、Case 1 の場合とは対照的な分布であり、臨界点近傍における特徴的な傾向である。図 5.4 は密度の P-T 図である。図 5.4 より Case 2, 3 の入口温度がさらに 20 度程低下すると、翼背面の低圧領域において二酸化炭素は凝縮することが予想できるため、この条件を計算対象とするためには二酸化炭素に適した液滴生成モデルの導入が不可欠である。図 5.5 は各場合における翼面上静圧分布である。縦軸は翼前縁の淀み点における全圧 P_0 で無次元化された静圧であり、横軸は x 方向の翼弦長で無次元化された翼面上の位置である。いずれの場合も水蒸気を用いた Bakhtar らの実験結果と良く一致しており、物質の違いや、臨界点近傍における

急激な熱物性値の変化に起因した特徴的な分布は確認できなかった。

本研究は計算コードの安定性の評価や超臨界二酸化炭素流れに対する知見を得るための準備的な研究である。よって、遷音速翼列のような薄翼の表裏で 2MPa(20 気圧)もの圧力差が生じるような、非現実的な流れ場を計算対象とした。今後は、超臨界 CO₂ ランキンサイクルにおいて実際に利用が検討されている翼形状を対象に、より現実的な境界条件を適用した計算を行う予定である。

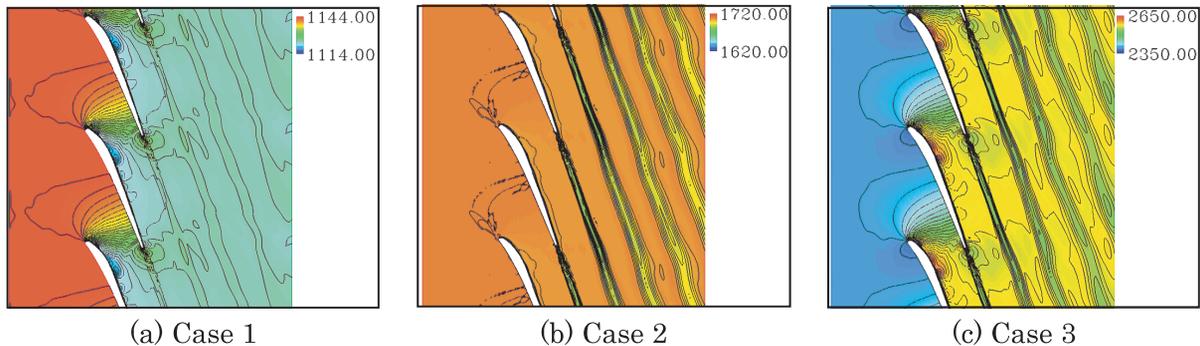


図 5.2 瞬間の定圧比熱分布

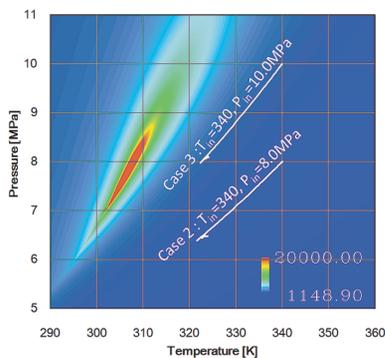


図 5.3 定圧比熱の P-T 図

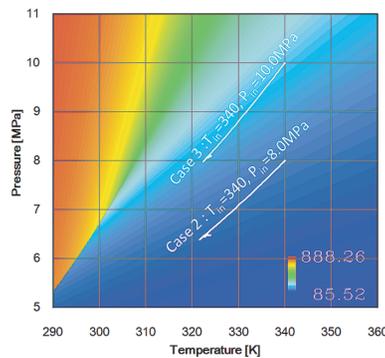


図 5.4 密度の P-T 図

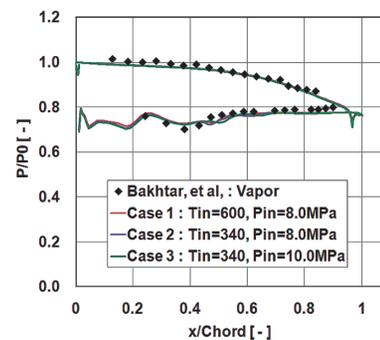


図 5.5 翼面上静圧分布

6. 結言

まず、蒸気タービン試験機を通過する湿り蒸気流れに数値タービンを適用し、タービンメーカーによる計測結果と比較を行うことでその信頼性を検証した。また、実験が困難な過冷却蒸気流れについても解析を行い、凝縮メカニズムの違いが流れ場に及ぼす影響について考察した。次に、蒸気タービン部分流入段を通過する亜臨界圧蒸気流れに数値タービンを適用し、フランジ近傍において動翼が経験する非定常流体力について議論した。最後に、遷音速翼列を通過する超臨界二酸化炭素流れに SFS を適用し、その特徴的な流れ場について考察を行った。

謝辞

ターボ機械を対象とした数値解析は全段全周解析を目指して大規模化の一途を辿っており、本研究においても部分流入段半周を対象とする大規模計算の一例を紹介した。このような計算は東北大学サイバーサイエンスセンターが運用するスーパーコンピュータの利用なくしては実現が困難である。同センター関係各位のご尽力に感謝の意を表するとともに、今後益々のご活躍を期待したい。

参考文献

[1] 黒木慶一, 秋山智, 坂口光, 世界初タンデムコンパウンド型 3,600rpm, 1,000MW 蒸気タービン, ターボ機械, 第 32 巻, 第 8 号, 461-465, 2001.

- [2] Ishizaka, K., Ikohagi, T. and Daiguji, H., A High-Resolution Numerical Method for Transonic Non-Equilibrium Condensation Flow through a Steam Turbine Cascade, Proc. of the 6th ISCFD, 1, 479-484, 1995.
- [3] Frenkel, J., Kinetic Theory of Liquids, Dover, 1955.
- [4] Gyarmathy, G., Zur Wachstumsgeschwindigkeit kleiner Flüssigkeitstropfen in einer übersättigten Atmosphäre, Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik, 14-3, 280-293, 1963.
- [5] Roe, P.L., Approximate Riemann Solvers, Parameter Vectors, and Difference Schemes, Journal of Computational Physics, 43, 357-372, 1981.
- [6] Yamamoto, S. and Daiguji H., Higher-Order-Accurate Upwind Schemes for Solving the Compressible Euler and Navier-Stokes Equations, Computers and Fluids, 22-2/3, 259-270, 1993.
- [7] Menter, F.R., Two-equation Eddy-viscosity Turbulence Models for Engineering Applications, AIAA Journal, 32-8, 1598-1605, 1994.
- [8] Yoon, S. and Jameson, A. Lower-upper Symmetric-Gauss-Seidel method for the Euler and Navier-Stokes equations, AIAA Journal, 26, 1025-1026, 1988.
- [9] Yamamoto, S., Preconditioning Method for Condensate Fluid and Solid Coupling Problems in General Curvilinear Coordinates, Journal of Computational Physics, 207, 240-260, 2005.
- [10] Weiss, J.M. and Smith, W.A., Preconditioning Applied to Variable and Constant Density Flows, AIAA Journal., 33, 2050-2057, 1995.
- [11] A Program Package for Thermophysical Properties of Fluids, Ver.12.1. PROPATH group, <http://www.cc.kyushu-u.ac.jp/scp/system/library/PROPATH/PROPATH.html>.
- [12] Angus, S. et al., International Thermodynamic Table of the Fluid State-3 Carbon Dioxide, IUPAC, Vol.3, 1976.
- [13] He, L., Computation of unsteady flow through steam turbine blade rows at partial admission, 1997 Proceedings of Institution of Mechanical Engineers, 211, Part A, 197-205, 1997.
- [14] Sakai, N., Harada, T. and Imai, Y., Numerical Study of Partial Admission Stages in Steam Turbine, 2006 JSME International Journal, Series B, 49, 2, 212-217, 2006.
- [15] Gao, L., Dai, Y., Rotor dynamic analysis on partial admission control stage in a large power steam turbine, Proceedings of ASME Turbo Expo 2010, GT2010-22608, CD-ROM, 2010.
- [16] Hushmandi, N., B., Fridh, Jens E., Fransson, T., H., Unsteady Forces of Rotor Blades in Full and Partial Admission Turbines, Journal of Turbomachinery, 133, 041017-1-041017-12, 2011.
- [17] Sasao, Y., Monma, K., Tanuma, T. and Yamamoto, S., Numerical Prediction of Unsteady Flows through Whole-Nozzle-Rotor Cascade Channels with Partial Admission, International Journal of Fluid Machinery and Systems, 2-3, 248-253, 2009.
- [18] Bakhtar, F., Ebrahim, M., Webb, R. A., On the performance of a cascade of turbine rotor tip section blading in nucleating steam Part 1 : surface pressure distributions, Proc Instn Mcch Engrs, 209, 115-124, 1995.

[共同研究成果]

チャンネル内遷移流に発現する乱流縞の計算領域依存性に関する DNS 解析

塚原 隆裕* 金子 士津真** 川口 靖夫*

* 東京理科大学 理工学部 機械工学科

** 東京理科大学大学院 理工学研究科 機械工学専攻

本研究では遷移レイノルズ数域の平行平板間流で観測される縞状の間欠的乱流場に注目し、直接数値シミュレーションによる系統的な調査から、その特性を明らかにした。主流方向に対するスパン方向の計算領域サイズ（アスペクト比）を 0.3~1.0 まで変化させ、乱流縞の計算領域依存性について報告する。また、乱流エネルギーの輸送方程式より、乱流域と準層流域の各領域にてエネルギーフローを調べた。結果、乱流縞はある程度定まった角度で安定化することと、乱流エネルギーは乱流域と準層流域の両領域で生成され、領域間ではエネルギーの授受がないことを見出した。

1. 序論

水資源豊かなこの地球環境では、様々な形態や状態でありなす「流体の流れ」が数多く発生している。水圏では海洋の循環流れとしての潮流や河川の流れなど、気圏では大気の循環流れとして貿易風や偏西風、または身近に感じる空気の流れとして季節風や単なる風も「流れ」の例として挙げられる。産業分野では、熱や物質の輸送を目的とした流れの利用は多岐にわたり、例えば、石油輸送のためのパイプライン、地域冷暖房設備や上下水道の配管設備などである。これらの我々の身の回りで起きている「流れ」は乱流状態にあることが多い。乱流化すると流れは大小様々な渦を含むようになり、それら渦運動が大規模な混合を助けるようになる。効率的な熱除去や物質混合を要する場面においては、乱流の強い拡散性・混合性が有効であり、熱交換器の伝熱促進やエンジン内の燃焼加速を促すために乱流は積極的に利用されてきた。一方、流体摩擦の点では、乱流は摩擦を増加させる側に働く阻害要因となる。さらに乱流は強非線形現象であるため、予測をすることが困難である。これに対して、予測が比較的容易で秩序だった流れを層流というが、上記の乱流と相反する特徴を有する（つまり、層流では効率的な物質拡散や混合、または熱伝達が見込めない。しかしながら、壁面摩擦が乱流に比べて顕著に小さいため、ポンプ駆動力の低減や省エネルギーに繋がる）。近年では、マイクロ熱交換器や高密度電子機器の冷却装置などの小型化が進む中、流れの低レイノルズ数化に伴う熱伝達特性の低下が問題となっている。または、流体の高い出口温度を得ることを意図した場合に、流路内の平均流速が遅く設定されるために再層流化が懸念される。層流への逆遷移が起きると熱伝達率が顕著に悪くなるため、目標の出口温度が得られず、機器の安全性も損なってしまう。このような工学的背景に鑑み、乱流と層流間の中間的状态（遷移域）の流れ場を解析し、流動特性や特徴的な乱流構造の解明を本研究の目的としている。解析対象となる流れ場は、図 1 に示すように、圧力勾配によって平行平板間（チャンネル）を流れる平面ポアズイユ流である。これは規範的な流れ場の一つであり、壁乱流についての一般的な知見を得る際に、しばしば研究対象とされている。

乱流は古くから数多くの研究が行われており、乱雑な流れの中にも統計的普遍性や準秩序的構造を有することが明かされてきた。しかし、未だに解明されていない極めて重要な問題も残されており、上記の乱流から層流への逆遷移過程もその一つである。乱流現象の解明には多方面からのアプローチがあり、理論的・実験的研究がこれまで大きな成果を上げてきた。大型コンピュータの飛躍的な進歩により、数値流体力学（CFD: Computational Fluid Dynamics）も現象予測のみならず、乱流の基礎研究において大きく貢献している。最近では計算手法も確立されてきており、乱流の直接数値シミュレーション（DNS: Direct Numerical Simulation）が数多く行われるようにな

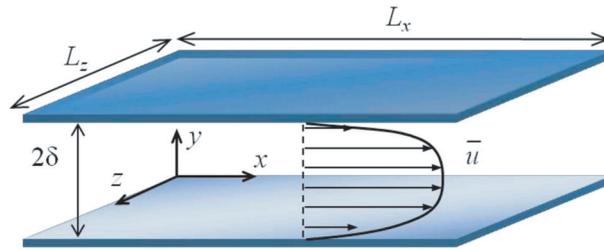


図1 解析対象の平行平板間流路の模式図.

った. DNS は, 支配方程式をモデル化せずに直接解く手法である. DNS から得られる信頼性の高い解析結果やデータベースは実験と比較され, また乱流モデルなどに広く応用されている.

層流への逆遷移付近の比較的低いレイノルズ数におけるチャンネル内遷移流の DNS としては, Iida & Nagano [1] が 1998 年にスペクトル法を用いて行っている. 通常, チャンネル乱流の DNS では, 無限平板を模擬するために有限の計算体積の主流方向 (x) とスパン方向 (z) に周期境界条件を用いるが, その計算領域サイズとして彼らは $(L_x \times L_y \times L_z) = (5\pi\delta \times 2\delta \times 2.5\pi\delta)$ で解析している. これにより比較的小さいスケールの乱流構造は十分に捉えられ, 低レイノルズ数効果について詳しく調査をしている. この時のレイノルズ数は壁面摩擦速度 u_τ , チャンネル半幅 δ , および動粘性係数 ν で無次元化された摩擦レイノルズ数に基づいて $Re_\tau = 60$ であるが, 後述の乱流縞について観測された報告はされていない. その後, Tsukahara ら [2-5] により $Re_\tau = 56 \sim 150$ において大規模な計算領域を用いた DNS が実施され, 新たな乱流の準秩序的構造を発見した. レイノルズ数を遷移域 ($Re_\tau = 56 \sim 80$) まで下げると, 図 2 で見るように乱流域が縞状の空間的間欠性を呈し, 主流方向に対して一定角度で傾斜した構造をとることを見出した. これは水平方向の計算領域を従来のものより 10~100 倍の面積に拡大したことにより, $Re_\tau < 80$ において, 過去の研究では捉えることの出来なかった大規模スケールの構造を捉えたものである. この構造を「乱流縞 (turbulent stripe)」と呼んでいる. 乱流縞は乱流域が主流方向に対して規則的な角度 ($20^\circ \sim 30^\circ$) を保ち, 平面ポアズイユ流では構造が平均流の影響で下流へと伝播する. 平面クエット流においても遷移レイノルズ数域で乱流縞が発生することが知られている [6-9]. しかしながら, 乱流縞の形成メカニズムは依然として未解明である.

DNS を含めて数値シミュレーションでは, 必ず「計算領域サイズ」と「捉える乱流構造のスケール」の双方に注意をして実行しなくてはならない. 本研究でも周期境界条件を適用しているため, 擬似的に無限に広い平行平板間流れを想定しているが, 理論上は計算領域より大きいスケールの構造を捉えることは不可能である. つまり, 計算領域より大きいスケールの構造は減衰してしまうため, 前述のように, 計算領域が不十分なサイズであると, 流体現象の本来生じるべき構造 (乱流縞など) を捉えられず, 非物理的 (非現実的) な流れが数値解となってしまいう可能性がある. しかし, 乱流縞においては図 2 に示されるように, 元来, 主流方向とスパン方向に周期性を有するため, この波長に基づいた計算領域を設定することで, 任意の本数の乱流縞のパターンを再現することができる.

本研究では, 計算領域を変化させることにより乱流縞の計算領域依存性について調査する. また, 乱流エネルギーの輸送方程式により, 乱流域と準層流域の各領域におけるエネルギーフローを調べ, 乱流縞の形成メカニズムについて検討した.

2. 解析手法

2.1 解析対象

解析対象となる流れ場は, 非圧縮性ニュートン流体における平行平板間ポアズイユ流である (図 1 参照). 境界条件として, 壁面上では滑り無しとし, 主流方向及びスパン方向に周期境界条件を

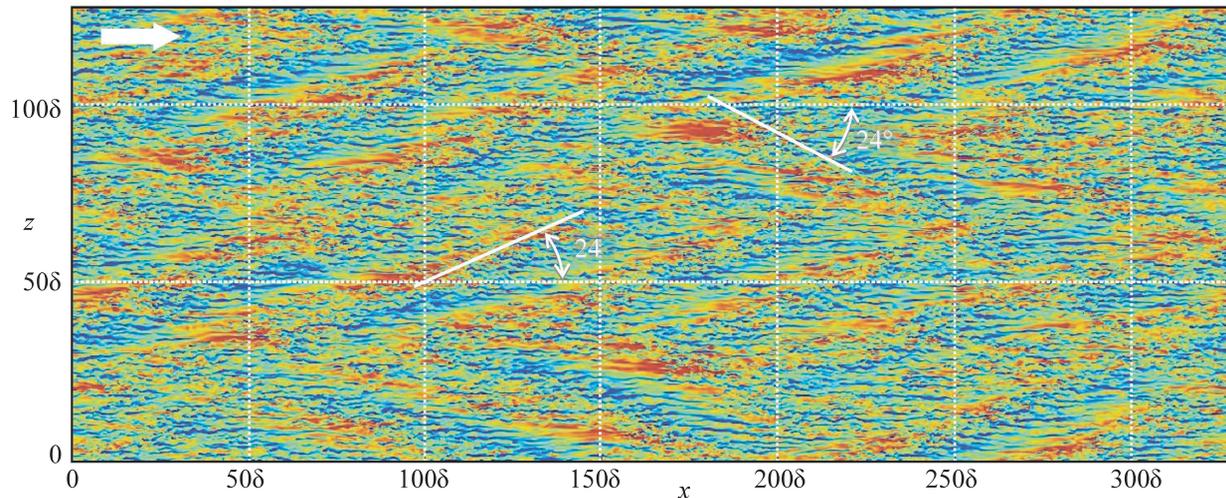


図2 大規模計算領域で捉えられた $Re_\tau = 80$ における縞状の空間的間欠性をもつ乱流場（乱流縞）の可視化. 高さ $y = \delta/2$ での水平面内における瞬時主流方向速度変動のコンター（赤, $u^+ > 3$; 青, $u^+ < -3$ ）を示す. 平均流は右向き.

適用している. 主流方向に圧力勾配一定条件を課しているため, 平均流量の時間変動を生ずるが, 統計的定常な状態に達してから各種平均量や瞬時場の抽出を行った.

2.2 支配方程式

流体の運動を記述する支配方程式として, 連続の式と運動量方程式を用いる. モデル化せず, 数値的に直接解くことで流れを忠実に再現する.

- 連続の式

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

- 運動量方程式 (Navier-Stokes 方程式)

$$\frac{\partial u_i^+}{\partial t^*} + u_j^+ \frac{\partial u_i^+}{\partial x_j^*} = -\frac{\partial p^+}{\partial x_i^*} + \frac{1}{Re_\tau} \frac{\partial^2 u_i^+}{\partial x_j^{*2}} \quad (2)$$

ここで, 三次元直交座標系とし ($i = 1 \sim 3$; $x_1 = x$, $x_2 = y$, $x_3 = z$), u_i は速度, p は圧力, t は時間を表す. 上添え字の (+) は u_τ 及び v で無次元化された物理量であり, (*) については δ を用いて無次元化されていることを示す.

2.3 計算手法

式(1), (2)のカップリングには Fractional-step 法を用いた. 時間積分には, 対流項, 粘性項 (x 及び z 方向) に二次精度 Adams-Bashforth 法, 粘性項 (y 方向) に二次精度 Crank-Nicolson 法を適用した. 空間的離散化には x 方向と z 方向に四次精度中心差分を, y 方向には二次精度中心差分を適用した.

2.4 計算条件

レイノルズ数は $Re_\tau = 80$ とした. 本研究では計算領域のスパン方向の長さを変化させることにより乱流縞の発生限界角度を調査する. ただし, 主流方向の領域サイズは変化させず, $L_x = 51.2\delta$

表1 スパン方向の計算領域サイズ (L_z), 1本または2本の乱流縞を形成する場合の発生予測角度 (θ_1, θ_2), 及び乱流縞の観測結果 (P, 平行型の乱流縞が発生; N, 非平行な乱流縞).

	Case 1	Case 2	Case 3	Base	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7	Case 8
L_z	10.24 δ	15.36 δ	20.48 δ	25.6 δ	30.72 δ	35.84 δ	40.96 δ	46.08 δ	51.2 δ
θ_1	11.3°	16.7°	21.8°	26.6°	31.0°	35.0°	38.7°	42.0°	45.0°
θ_2	—	—	—	—	16.7°	19.3°	21.8°	24.2°	26.6°
Stripe	N	P	P	P	P	N	N	P	N

表2 プログラム性能 (SX-9, p16 利用時). 総格子点数は約 8 億点 (4096 × 96 × 2048).

CPU 時間 [h:m:s]	743:35:03	プロセッサ同時実行時間	
MOPS 値	54,502	Conc. Time (≥ 1) [sec]	167652.38
MOPS 値 (実行時間換算)	870,239	Conc. Time (≥ 2) [sec]	167644.03
MFLOPS 値	27,793	Conc. Time (≥ 4) [sec]	167643.90
MFLOPS 値 (実行時間換算)	443,773	Conc. Time (≥ 6) [sec]	167643.86
平均ベクトル長	255.96	Conc. Time (≥ 8) [sec]	167643.82
ベクトル換算率 [%]	99.77	Conc. Time (≥ 12) [sec]	167643.64
メモリサイズ [GB]	187.19	Conc. Time (≥ 16) [sec]	162787.69

で一定とする. スパン方向サイズ $L_z = 25.6\delta$ を標準 (Base) として, 計算領域を縮小させた場合 3 ケース (Case 1~3) と拡大した場合 5 ケース (Case 4~8) の計 8 ケースを調べた. スパン方向長さの変化量は等間隔に 5.12 δ 毎に変化させ, 一番大きいケースで Base の計算領域の二倍となっている. 表 1 に解析を行った 8 ケースについて示す. 表中の θ_1, θ_2 はそれぞれ計算領域内に乱流縞が一本もしくは二本発生した場合の角度を表している. 例えば, θ_1 は $\tan^{-1}(L_z/L_x)$ に相当する.

2.5 プログラム性能

本計算はノード内並列計算のため OpenMP が実装されている. 計算コードは既報[5]のものと同様であり, 計算性能も同程度である. 一例として, 図 2 の大規模な計算領域について解析した際のプログラム性能を, Proginf の結果から抜粋して表 2 に示す. ここでは 10 万ステップ分の性能を示すが, 実際には初期条件から十分に発達した流れ場を得るまでに約 100 万ステップ分の計算を要している. 表 2 より, ベクトル長及びベクトル換算率ともに各理論上限値に近く, ベクトル処理が効率的に行われていることが分かる. プロセッサ同時実行時間から判断して, 全プロセッサ (16CPU) による並列計算に対して大半の計算時間を費やしており, 高効率な並列処理も実現されている. また, 1 CPU 当たり約 27 GFLOPS の高い実効性能を得ている.

3. 結果及び考察

3.1 計算領域変化に伴う構造の変化

図 3 に計算領域をスパン方向に縮小させた場合 (Case 2~3) の結果を示す. 比較のため, 基準となる計算領域 (Base) の結果も合わせて示す. ここでは, 赤い領域が高速ストリーク, 青い領

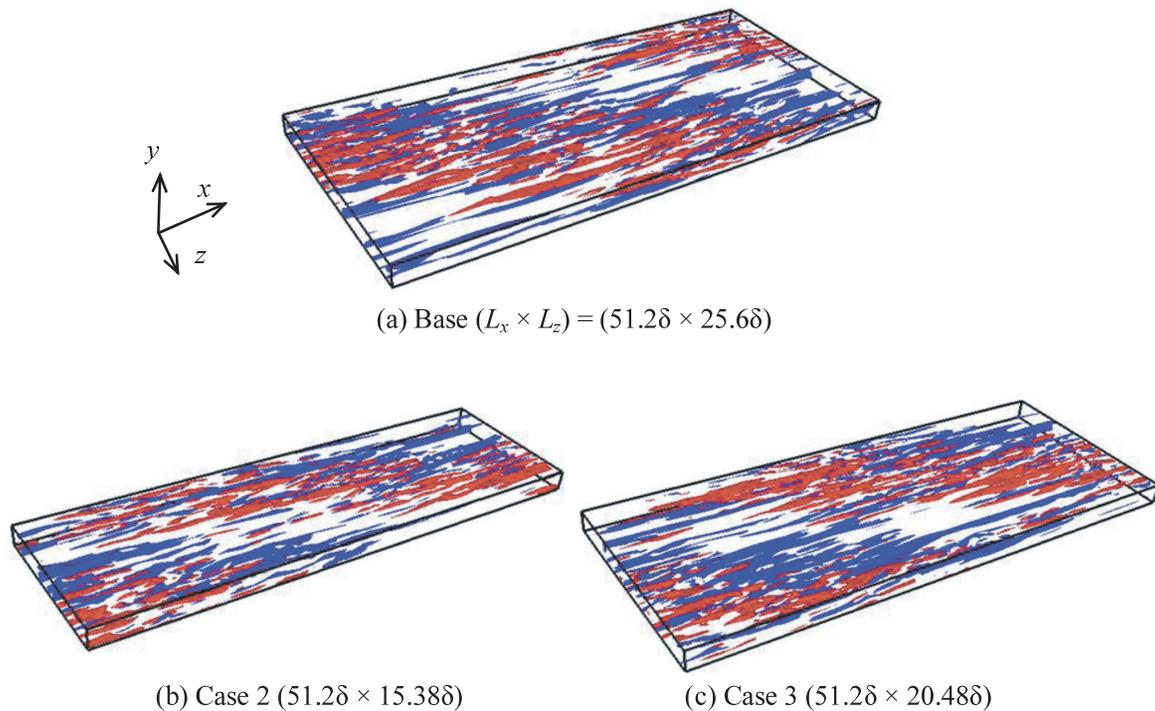


図3 乱流縞の計算領域依存性 ($L_x : L_z = 1:0.3 \sim 0.5$). 遷移レイノルズ数域 ($Re_\tau = 80$) にあるチャンネル乱流の流れ場の三次元可視化. 赤と青の等値面はそれぞれ高速領域 ($u^+ > 4$) と低速領域 ($u^+ < -4$) を示す. 平均流は左下から右上に向かって流れている. 見易さのため, 下壁側半分 ($y < \delta$) のみを可視化.

域が低速ストリークを表している. 可視化図から分かるように, 高速ストリークと低速ストリークの群れが計算領域に対して縞状に分布し, つまり速度乱れが間欠的に発生していることが確認できる. Case 2 においても乱流縞を維持することから, 過去の DNS や実験[4]で確認されていた乱流縞の角度 ($20^\circ \sim 30^\circ$) より小さい角度でも発生し得ることを示唆している. このことから, 乱流縞を発生させるための最小スケールはおよそ $\lambda_z = 15\delta$ ($\lambda_z^+ = 1200$) であると言える. Case 1 では, 縞構造が崩れて斑点状の構造が発生する (図は非掲載). これは, 流れが層流から乱流へ遷移する初期段階によく見られる乱流斑点に酷似している. つまり, Case 1 では乱流縞が発生しなくなることから, 乱流縞の角度が主流方向に対して 15° 以下では構造を維持できなくなることが示された.

計算領域を拡大した場合 (Case 4~8) の結果を図4に示す. 図4(b)のCase 4では, Case 2及びCase 3と同様に計算領域の対角方向に一本の乱流縞が発生していることが確認できる. これを, 便宜上ここでは“平行型の乱流縞”と言う. 図4(c), (d)に示すCase 5とCase 6の場合は, 共に高速ストリーク群が低速ストリークによって分断され平行型の乱流縞を維持できなくなっている. ここで明らかに計算領域の対角方向に発生していた乱流縞の構造が崩れた. これは高速ストリーク群が低速ストリークによって分断されていることから, 低速ストリークの影響で乱流縞が平行型から主流方向に尖ったV字型になったと考えられる. 図4(e)を見ると, 再び明確な平行型の乱流縞がCase 7において発生することが確認できる. しかし, Case 4と異なり, 計算領域の対角方向に対して一本ではなく, 計算領域内に二本の乱流縞が発生している. つまり, Case 7のスパン方向の長さが乱流縞のスパン方向スケールの分岐点といえる. これより角度を算出すると, 乱流縞の傾斜角度は 24.23° であり, 一般的な乱流縞の傾斜角度の範囲内に収まる. スパン方向の乱流縞の間隔を見てみると $\lambda_z = 23\delta$ ($\lambda_z^+ = 1840$) である. 図4(f)のCase 8では, 再び平行型が一部で

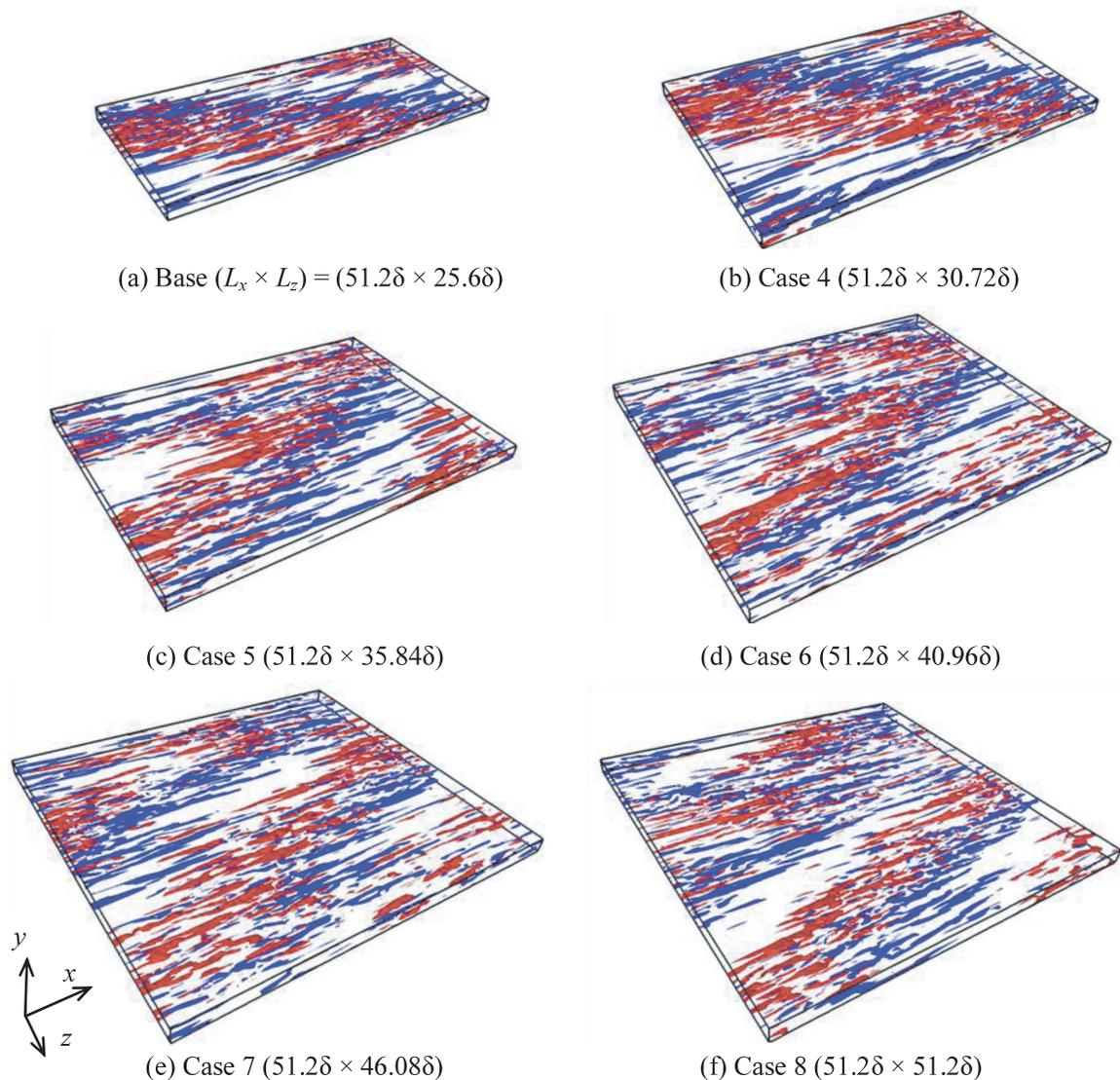


図4 乱流縞の計算領域依存性 ($L_x : L_z = 1:0.5 \sim 1$)。可視化の詳細は図3と同様。

崩れたような分布となる。つまり，計算領域内に複数本の乱流縞を捉え得る場合，その乱流縞はレイノルズ数が一定ならばある程度定まった角度で発生し，安定することが分かる。

上記のスパン方向計算領域を変化させたときの乱流縞の形状変化について，表1に結果をまとめた。Case 5, 6, 8では平行型の乱流縞が崩れ主流方向へ尖ったV字型の乱流縞を形成する。V字型の乱流縞が形成される際，対角方向に一直線状に並んでいた高速ストリーク群が低速ストリークによって分断され，平行型の乱流縞ではなくなる。次に，Case 3とCase 6や，BaseとCase 8を比較する。これらの関係はちょうど前者の計算領域を二倍すると後者の領域と一致する。その結果，計算領域が小さい場合には平行型の乱流縞を形成していたが，二倍の計算領域では自由度が増したためか，二本の平行型の乱流縞が発生するのではなく崩れた形状の乱流縞を呈する。このことから，BaseやCase 3は本質的な乱流縞ではなく，計算領域の制約を受けて直線状に発生してしまっていると考えられる。しかし，Case 6とCase 8の間のCase 7では二本の平行型の乱流縞を捉えられていることから乱流縞の本質的な発生角度を求めることが出来る。つまり，乱流縞は $21.8^\circ < \theta < 26.6^\circ$ の範囲で発生し安定化すると考えられる。今回の結果より， $Re_\tau = 80$ における乱流縞の発生角度は約 24° であると言える。

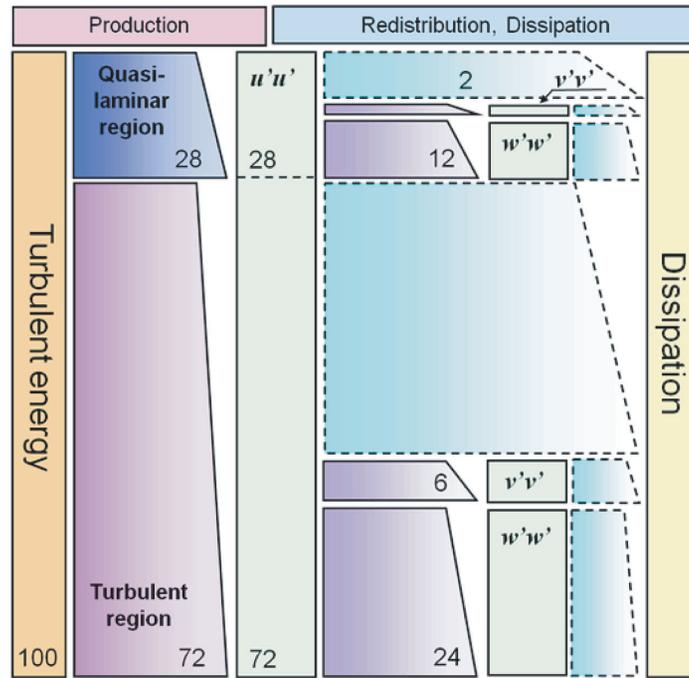


図5 乱流縞における乱流エネルギー輸送プロセスの概略図. 流れ場全域で生成される乱流エネルギー量を100%とし, 生成(図中, 青または赤で表記)~再配分(紫色)~散逸(水色)までの過程を示す.

3.2 乱流エネルギーの輸送機構

乱流エネルギーは次式のように定義される.

$$k = \frac{1}{2}(\overline{u'u'} + \overline{v'v'} + \overline{w'w'}) \quad (3)$$

このように, 主流方向, 壁面垂直方向, スパン方向の各方向速度変動の二乗平均の総和で表すことができる. また, 乱流エネルギーの $\overline{u'u'}$ 成分についての輸送方程式は,

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{u'u'}}{\partial t} &= -2\overline{u'u'_j} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x_j} - 2\overline{\left(\frac{\partial u}{\partial x_j}\right)^2} + 2\overline{p' \frac{\partial u'}{\partial x}} - \frac{\partial \overline{u'p'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{u'u'u'_j}}{\partial x_j} + \frac{\partial^2 \overline{u'u'}}{\partial x_j^2} \\ &= P_{11} - \varepsilon_{11} + \Phi_{11} + \Pi_{11} + T_{11} + D_{11} \end{aligned} \quad (4)$$

と導かれ, 右辺第一項から生成項, 散逸項, 圧力歪相関項(再配分項), 圧力拡散項, 乱流拡散項, そして分子拡散項である. 但し, 式(4)の各項は νu_τ^4 で無次元化されている.

前述の Base における解析結果に基づいて, 図5に乱流エネルギーのフローを示す. この図は, 生成した乱流エネルギーがどのような経路を辿って散逸していくかを示している. 生成した乱流エネルギー量の空間的総和($\iiint P_{11} dV$)を100%とする. まず, 主流方向成分 $\overline{u'u'}$ の生成項によって平均流から乱れ成分へと運動エネルギーが変換されるが, 乱流域で72%, 準層流域では28%程度の乱れ生成が行われている. 各領域で生成されたエネルギーは, お互いの領域で交換することなくそれぞれの領域内で輸送される. 乱流域に注目すると, 圧力歪相関項 Φ_{11} の働きによりスパン方向 $\overline{w'w'}$ に

24%, 壁垂直方向成分 $\overline{v'v'}$ に 6% だけ再配分され、それ以外のエネルギーは直接に（各種拡散項による壁垂直方向への輸送を伴いつつ）散逸する．準層流域では、スパン方向成分に 12%, 壁垂直方向成分に 2% ほど再配分されている．主流方向成分からスパン方向成分や壁垂直方向へエネルギーが再配分される割合は、それぞれの領域における $\overline{u'u'}$ の生成エネルギー量に対して、スパン方向成分には約 30%, 壁面垂直方向成分には約 8% である．このことから、各成分で生成されるエネルギーは乱流域のほうが大きい、発生後に他成分へ再配分されるエネルギー割合はどちらの領域も同じくらいであると言える．さらに、乱流域では生成されるエネルギー量が多いことから、他成分へ多くのエネルギーが再配分されるので乱流状態を維持するが、準層流域では生成されるエネルギー量が少ないために乱れが抑えられていると考えられる．

4. 結論

本研究では、平行平板間ポアズイユ流で発現する乱流縞の計算領域依存性について、DNS を行った．レイノルズ数は、乱流縞が観測される遷移レイノルズ数域内の $Re_\tau = 80$ に設定した．計算領域を変化（主流方向サイズは $L_x = 51.2\delta$ で一定）させることにより乱流縞の形状が変化し、構造が最も安定して発生するスケール及び角度を調べ、以下の知見を得た．

- 計算領域に対して乱流縞が一本捉えられている場合は、スパン方向計算領域サイズに従い乱流縞の波長も比較的柔軟に変化する．
- スパン方向計算領域が $L_z = 10\delta$ 程度まで小さすぎると乱流縞を維持できず、構造が崩壊し斑点状の構造が現れる．
- スパン方向計算領域を拡大して $L_z = 35\delta$ を超えると、高速ストリーク群や低速ストリーク群が一直線状に並ぶことができなくなる．このとき、低速ストリーク群によって高速ストリーク群が分断されるため一直線状に並ばなくなる．
- スパン方向計算領域を $L_z = 46\delta$ まで拡大すると、領域内に二本の平行な乱流縞を捉えることができ、そのときの乱流縞の傾斜角度は $\theta = 24^\circ$ である．
- 乱流エネルギーは乱流域と準層流域の両領域で生成されており、総量の 7 割が乱流域、3 割が準層流域で発生している．また、それぞれの領域間ではエネルギー授受は行われず、各々の領域内でエネルギーが生成され、最終的には散逸する．
- 圧力歪相関項の働きによって壁面垂直方向成分やスパン方向成分に再配分されるときに割合は両領域において同じ比率である．

以上より、計算領域を変化させた事により安定して乱流縞が発生するスケールを求めることができ、その角度はレイノルズ数が一定の場合にある程度定まった角度（本研究のレイノルズ数では約 24° ）であることが分かった．この傾向は、過去の実験 [4,6] や DNS [3,8] による観測結果とも良く一致している．

謝辞

本研究における DNS は東北大学サイバーサイエンスセンターの大規模科学計算システムを利用して実行されたものであり、同センターのご協力を頂いたことに謝意を表す．また、本研究の遂行にあたり科学研究費補助金（#20860070, #22760136）の助成を受けた．

参考文献

[1] Iida, O. and Nagano, Y., “The relaminarization mechanisms of turbulent channel flow at low Reynolds

- numbers,” *Flow, Turbulence and Combustion*, Vol. 60, 193–213, 1998.
- [2] Tsukahara, T., Seki, Y., Kawamura, H., and Tochio, D., “DNS of turbulent channel flow at very low Reynolds numbers,” In: *Proceedings Fourth International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena*, Williamsburg, VA, USA, Jun. 27–29, pp. 935–940, 2005.
- [3] Tsukahara, T. and Kawamura, H., “Turbulent heat transfer in a channel flow at transitional Reynolds numbers,” In: *Proceedings of the First Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow*, Xi’an, China, Oct. 18–21, (CD-ROM) ASCHT2007-055, 8 pp., 2007.
- [4] Tsukahara, T., Kawaguchi, Y., Kawamura, H., Tillmark, N., and Alfredsson, P. H., “Turbulence stripe in transitional channel flow with/without system rotation,” In: *Proceedings of the Seventh IUTAM Symposium on Laminar-Turbulent Transition*, Stockholm, Sweden, Jun. 23–26, IUTAM Bookseries, Vol. 18, Springer, pp. 421–426, 2009.
- [5] 塚原隆裕, 會田紘史, 川口靖夫, “平行平板間流れにおける乱流斑点の発達に関する DNS 解析”, *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. 43, No. 3, pp. 9–17, 2010.
- [6] Prigent, A., Grégoire, G., Chaté, H., Dauchot, O., and van Saarloos, W., “Large-scale finite-wavelength modulation within turbulent shear flows,” *Physical Review Letter*, Vol. 89, 014501, 2002.
- [7] Barkley, D. and Tuckerman, L.S., “Mean flow of turbulent-laminar patterns in plane Couette flow,” *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 576, 109–137, 2007.
- [8] Duguet, Y., Schlatter, P., and Henningson, D. S., “Formation of turbulent patterns near the onset of transition in plane Couette flow,” *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 650, 119–129, 2009.
- [9] Tsukahara, T., Tillmark, N., and Alfredsson, P. H., “Flow regimes in a plane Couette flow with system rotation,” *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 648, 5–33, 2010.

白

[研究開発公募の成果]

“多段 2 体衝突法” による流体粘性の制御効果

— 「超 SIMD ビット演算法による低消費電力流体シミュレーションコードの開発」における中間成果の定性的解説—

松岡 浩^{*1,*2}、菊池 範子^{*1,*3}

*1 東北大学電気通信研究所(情報社会構造研究分野)

*2 理化学研究所計算科学研究機構

*3 カストマシステム株式会社システム事業部

東北大学サイバーサイエンスセンターの研究開発公募制度を利用して、格子ガス法による流体シミュレーションコードの開発を行ってきた。とくに、平成 22 年度は、格子点数を増やさずに流体粘性を小さくして、より高いレイノルズ数領域の流体现象をシミュレーションできる、新しい流体粘性制御法の研究を行った。その結果、各格子点において、次の並進移動に進む前に、仮想粒子の 2 体衝突を何段階も行わせる“多段 2 体衝突法”によって、それなりの効果を発現できることを確認した。今回は、この事実を確認するために用いた 3 次元格子ガス法計算モデルの概要と、実際に SX-9、2 ノード(32CPU)を利用して行ったシミュレーション事例の結果について定性的な解説を述べる。

1. はじめに

筆者らは、平成 15 年度から格子ガス法シミュレーションコードの独自開発を進めてきたが、東北大学サイバーサイエンスセンターの研究開発公募制度を利用して、平成 20・21 年度に「揺動散逸モデル付き微小整数型格子流体法シミュレーションコードの開発」、平成 22・23 年度に「超 SIMD ビット演算法による低消費電力流体シミュレーションコードの開発」という課題を実施した。前者の課題では、2 次元流体シミュレーションコードを完成させ、現在実施中の後者の課題では、新しい粘性制御法の考案とそれを組み込んだ 3 次元流体シミュレーションコードの開発を目指している。今回は、我々が検討している新しい粘性制御法のひとつである“多段 2 体衝突法”について、これまでに得られた中間成果を定性的にご紹介したい。定量的な考察は現在推進中である。

2. 格子ガス法の魅力

一般に「流体シミュレーション」と言えば、ナビエ・ストークス方程式を差分法で解く方法^[1]が王道である。しかし、筆者らが、あえて“格子ガス法”にとどまって研究を続けている理由は、格子ガス法がもつ以下の魅力を捨てがたいからである。

① しっかりした理論的根拠と秘めた将来性

格子ガス法は、空間中に仮想的な格子を張り、その格子上で多数の仮想粒子が並進と衝突を繰り返しながら移動していく様子を平均化して流体運動を模擬する手法である。格子の目と同じ大きさのサブマクロのスケールでは、仮想粒子の移動が格子の張られた方向に限定されるなど、このモデルは、現実世界を忠実に模擬できていないことは明らかである。しかし、適切な格子形状と適切な粒子速度をモデルとして選択すれば、多数の仮想粒子の動きを平均化して得られるマクロのスケールにおいて、ナビエ・ストークス方程式など流体に関する現象論的な基

礎方程式を近似的に満足することが証明されている^[2] (証明例: チャップマン・エンソグ展開)。すなわち、格子ガス法は、近似的には、しっかりした理論的根拠をもつ流体シミュレーション手法である。このような手法は、マクロな物理現象の法則が解明されていない場合にも、ミクロな仮想粒子の衝突規則などに基づく自己組織化の結果として、マクロな現象を再現できる潜在的な可能性がある。これは、ある意味で、マクロな物理法則よりも深遠な物理の本質にせまるもので、不規則性の再現も含めた非平衡系統計力学のシミュレーションツールとして将来性が期待できると思われる。

②誤差のない数値計算と計算安定性

格子ガス法では、各格子点において仮想粒子が持ちうる速度の種類が限定(3次元シミュレーションの場合でも、例えば15~30個程度)されている。このため、各格子点の状態記述に当たっては、それぞれの速度ごとに、その速度をもつ仮想粒子が存在する(1)か、否(0)か?の2値情報を2値整数で表現すればよい。また、各格子点における仮想粒子の衝突による移動向き等の変更についても、2値整数に対するビット演算 (and, or, not, shift 等) を適用でき、時間発展計算に実数を使用しなくて済む。従って、実数演算の場合に生じる打ち切り誤差の蓄積がないので、格子ガス法の計算モデル自体は、誤差なく計算することができる。また、数値計算的にも安定である。

③極めて高い並列度の格子点計算の実現容易性

各格子点の状態を小さなメモリ容量で記述できるので、同一のメモリサイズでは、より多数の格子点状態をまとめて並列計算できる。従って、実時間を目指した高速計算に有利である。特に、筆者らが自主開発してきた格子ガス法シミュレーションコードでは、個々の格子点に関する一連のデータ処理を1ビット幅で実行できる。このため、SX-9のようなベクトル処理プロセッサでは、1回のベクトル命令発行で、64ビット/ワード×256ワード/命令=16384ビット/命令のデータがSIMD処理(Single Instruction Multi Data-stream)されることから、16384個の格子点に係る計算を1CPUで並列的に実行できることになる。我々の研究では、サイバーサイエンスセンターのSX-9、2ノード(32CPU)を頻繁に用いているが、この場合、16384×32=524288格子点についての超並列計算が可能になっている。このように非常に多数の格子点に関する並列的な計算を比較的小数のプロセッサさらには少数のノードで実行できることは、プロセッサ間通信またはノード間通信の相対的頻度を減らせる点でも有利である。

④トランジスタ数の少ない論理演算回路による低消費電力の達成

格子ガス法では、上述のとおり、ビット演算を主体にした計算処理を行えるので、VLSI上では、and, or, not, shiftなどの論理演算回路が継続的に動作すればよい。(cf. この特徴を活かしたハードウェア研究には、FPGAによる格子ガス法専用計算機の構成例^[3]や、過去に製品化された専用計算機CAM-8などの事例がある。)従って、これらの回路に比べて桁違いに多数のトランジスタから構成される浮動小数乗算演算回路などの動作を回避することができる。このため、VLSI内部の部分回路ごとに電源のオン/オフを制御できる将来のプロセッサでは、低消費電力のシミュレーションが可能になる。また、今後、大規模な流体問題を扱っていくためには、ますます大きな並列度の格子点並列計算を実現していく必要がある。このときの並列計算実行時には、個々の格子点に関する演算を行う電子回路は同時に動作しているはずであるから、ひとつひとつの格子点に係る演算回路は極めて低消費電力なものにしなければならない。この点、格子ガス法では、動作すべき演算回路を極めて単純なものにできるのでトランジスタ数を減らすという低消費電力化のための最も基本的で効果的なアプローチを採用できる。

⑤複雑形状の取扱い容易性とマルチフィジクス展開への将来性

格子ガス法では、例えば、各格子点が固体であるか液体であるかを指定するだけで、任意の

形状の境界条件を容易に与えることができる。これは、現実の複雑な体系の解析に適用しやすいことを意味しており、実用上大変有利である。さらに、格子ガス法は、仮想粒子のもつ質量や速度を、いろいろな意味でのエネルギーや運動量と解釈することにより、電磁場^[4]、音場^[5]、応力場など、流体解析以外にも幅広く利用できる可能性を秘めている。実際、いろいろな研究がなされている。これらの成果が出てくれば、いろいろなマルチフィジクスな問題を“仮想粒子の並進・衝突”というシングルフィジクスな問題として統一的に扱い、その結果、通常の連成計算よりもはるかに高速なシミュレーションを実現できる可能性がある。また、最近では、燃焼場^[6]、蒸気膜崩壊^[7]、多孔質固体内流動^[8]、シュレーディンガー方程式の電子波解析^[9]などにまで格子ガス法を応用した研究が発表されており、格子ガス法が適用できる物理現象はますます拡大される一方である。

以上、格子ガス法の利点ばかりを述べてきたが、重要な欠点もいくつか知られている。ここでは、大規模並列計算を実現していく観点からの考察として、計算すべき格子点数に関する欠点だけを以下に述べておく。

粗視化操作にともなう多数の格子点計算の不可避性

格子ガス法においては、ひとつの格子点に集まった仮想粒子の質量と運動量だけを合計して、その格子点位置にある流体の質量や運動量だということにしても、隣の格子点における同様に求めた値との間にランダムな変動が大きすぎてベクトルの向きがバラバラになり全体の流れ構造を把握できない。そこで、ある程度の広がりをもつ時空間領域内でその中にある全ての格子点に存在する仮想粒子の質量と運動量を合計して、その領域における質量や運動量を求める。この操作は、“粗視化(疎視化)”と呼ばれており、この操作を行うことによって、格子点ごとのランダムな変動が領域内で打ち消しあって、隣の領域における同様に求めた値との間に連続性が現れ、全体の流れ構造を知ることができる。ナビエ・ストークス方程式を差分法で解く通常の王道的流体解析と比較する場合は、格子ガス法の領域ひとつひとつがナビエ・ストークス法の格子点に対応しているので、格子ガス法では、通常の方法と比べて、何倍もの数の格子点について計算を行わなければいけないことがわかる。すなわち、ある解像度で流体の運動を求めようとする場合、格子ガス法では、求めたい流体運動の解像度よりもさらに一段細かい解像度で配置される格子点について計算を行う必要がある。従って、格子ガス法が非常に多数の格子点について効率的な並列計算が可能であるからと言っても、同じ解像度の流体解析を行う場合に、どちらの方が速く計算できるかは即断できない状況にある。

最後に、レイノルズ数との関係について触れておきたい。格子ガス法では、粗視化領域の時空間の大きさが大きいほどレイノルズ数が高い流体现象のシミュレーションが可能になる。これは、直感的に言えば、粗視化領域の大きさが大きくなるほど、隣どうしの粗視化領域の中心間距離が離れ、その間により多数の格子点が存在していろいろな衝突を経て運動量が伝わっていくことになるので、両者間の運動量の相関が低くなり、統計的には似た流体挙動をしなくなる、すなわち、流体としては、粘性が低下したことになる。その結果、流体挙動のレイノルズ数が高くなると解釈できる。流体解析の実用的な応用を考える場合、模擬できる流体现象のレイノルズ数は少しでも高くできることが望ましい。そのためには、上述のことから、できるだけ大きい領域での粗視化を行うため、格子ガス法シミュレーションによる格子点数を相当大きくする必要がある。従来からいろいろなところで研究課題にされていることではあるが、「格子点数を増やさずにレイノルズ数を高くする」という点が、筆者らのグループでも本質的な研究課題になっている。

そこで、今回は、平成22年度の研究開発公募による研究成果の中間報告を兼ねて、“多段2体衝突法”による粘性制御の効果について、定性的な範囲ではあるが、ひとつの事例をご紹介します。

3. 本研究で用いた3次元格子ガス法計算モデル

ここでは、例題として、静止している流体がある向きに流れはじめたとき、流れ方向に垂直に置かれた無限長円柱の後流にどのような3次元渦が過渡的に生じるのか？を計算してみる。一般に3次元の流体现象をシミュレーションするための格子ガス法については、いくつかの計算モデルが提案されているが、本研究では、1986年に d’Humières, Lallemand, and Frisch が提案した“面心超立方体格子モデル(Face-Centered Hyper Cubic モデル、FCHC モデル)”と呼ばれる計算モデル^[10]を利用した。

図1に、計算体系を示す。流体の流れの向きに+X軸を、無限長円柱の軸に平行に+Z軸を設定した。+Y軸は、3つの座標軸+X, +Y, +Zが右手系の直行座標系を成すように決めた。Y方向とZ方向には、周期的境界条件を適用し、無限にこの体系が繰り返されている状況を仮定している。3次元位置(X, Y, Z)のそれぞれには、図1の右上に示したような超立方体セルがひとつ存在する。このセルは4次元空間中の立方体で、4次元空間を利用するのが、FCHCモデルの特徴である。格子ガス法のモデルを粗視化して得られた結果が、ナビエ・ストークス方程式を解いて得られる結果と近似的に一致するためには、仮想粒子の衝突散乱にある程度の等方性が確保される必要がある。通常の3次元格子では、この条件を満足できないので、FCHCモデルでは、4次元空間中の格子を使うことにより、仮想粒子がいろいろな向きに移動できる状況を作り出して等方性を確保している。

また、ここでは、第4番目の次元をRで表し、具体的には、Rは、R=0, 1, 2, 3の4値のみしかとらないものと仮定した。Rが取り得る値は、現実の3次元空間に存在する体系からは制約を受けないので任意に決めることができる。また、R方向は、Rが3から1だけ増加すればR=0になり、Rが0から1だけ減少すればR=3になるという設定の“循環座標”とした。図1では、このR座標を3次元位置(X, Y, Z)の各位置にある球殻の半径で表現している。こうして、ひとつの3次元位置には、ひとつのセルがあり、その8つの頂点に位置する球は、それぞれ4つの球殻からなり、各球殻にたかだか1個の仮想粒子が存在するという4次元描写が可能になる。各球殻は、4次元位置(X, Y, Z, R)で表現できるので、これを“4次元格子点”と呼んでもよいであろう。

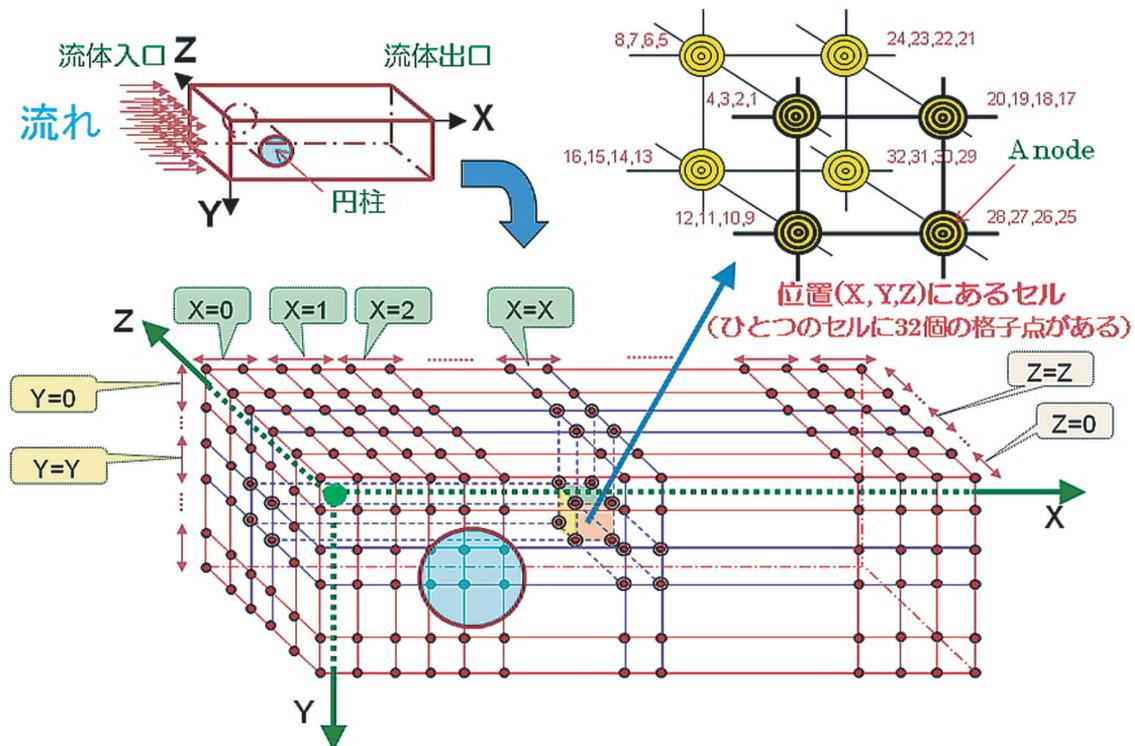
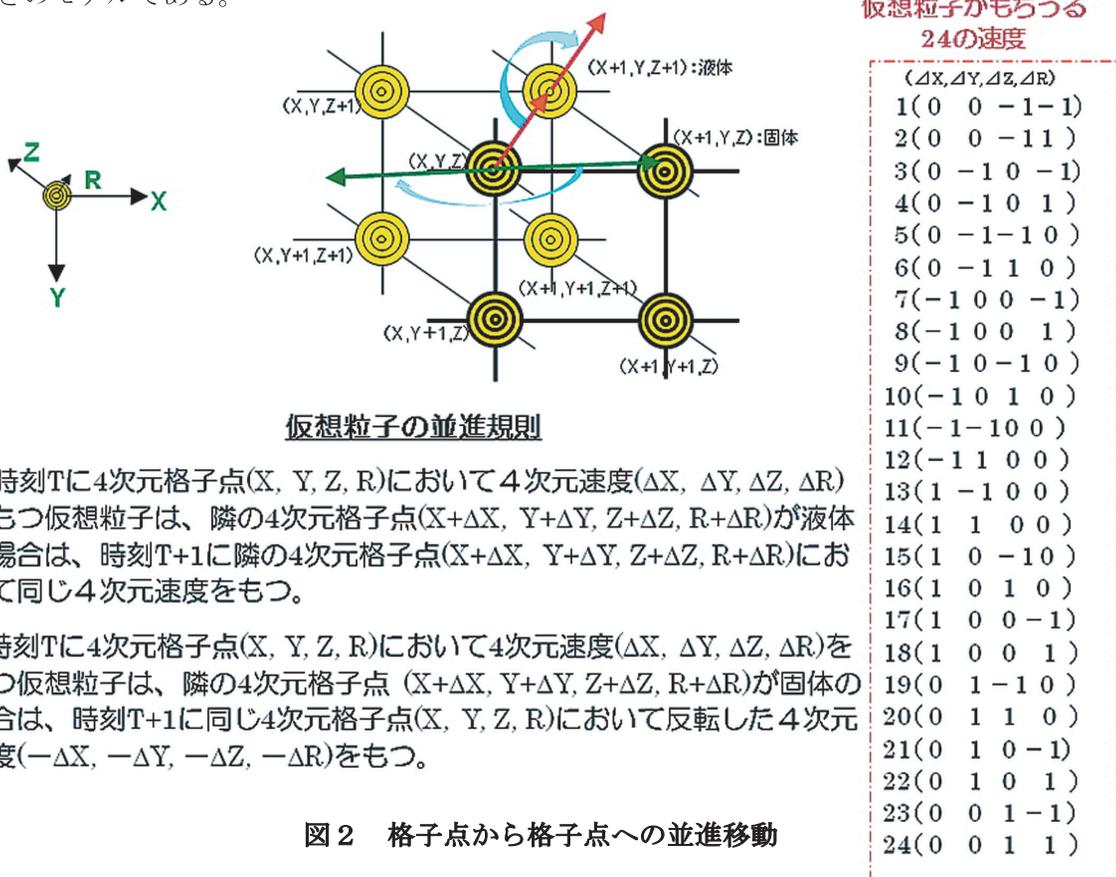


図1 円柱後流渦を計算するためのセルと格子点

図2には、4次元格子点間を仮想粒子が移動していく様子と、筆者らが用いた並進規則を示した。FCHCモデルでは、4次元格子点間を仮想粒子が移動していくので、仮想粒子の速度ベクトルも4つの成分(ΔX, ΔY, ΔZ, ΔR)から成り、4次元である。また、4成分のうち2つは必ず「0」で、残りの2つの成分は「+1」and/or「-1」とするのがFCHCモデルである。この結果、図2の右に示すように、仮想粒子は24種類の速度を持ち得ることがわかる。また、その4次元空間における大きさは、 $\{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2 + (\Delta Z)^2 + (\Delta R)^2\}^{1/2} = \sqrt{2}$ となりすべて等しい、すなわち、単一速度のモデルである。



また、図3には、各4次元格子点における仮想粒子の衝突規則を示した。要点は、「仮想粒子の粒子数と、4つの各成分ごとの運動量の和が衝突の前後で変化しない」という“保存則”が成立すること、及び「同じ向きに移動する仮想粒子は、ひとつの4次元格子点にたかだかひとつしか存在できない」という“排他律”を仮定することである。

図3に示した例では、移動向きの識別番号が「5」「16」「17」「21」の速度をもつ4つの仮想粒子がある4次元格子点にやってきたとき、移動向きの識別番号が「1」「13」「14」「23」の仮想粒子に変化して、その4次元格子点から出ていく様子を示している。この衝突前後の変化では、“保存則”と“排他律”が満たされているが、これ以外の変化でも、“保存則”と“排他律”を満たすことが可能である。このような場合、その可能性があるすべての衝突パターンを等確率で生じさせる。しかし、このような衝突パターンは、全体として非常に多数存在するため、通常は、衝突して向きを変える仮想粒子が2つのみの場合を扱う“2体衝突法”が採用されている。詳細は省略するが、詳しく調べてみると、仮想粒子の識別番号が「a」と「b」の2粒子が衝突して、識別番号が「c」と「d」の2粒子になる衝突パターンを、「 $a + b \Rightarrow c + d$ 」という式で記載したとすると、282本の2体衝突式が書ける。通常は、各4次元格子点でたかだか1回の2体衝突、すなわち、282本の式のうち適用可能な2体衝突式がたかだか1本だけ適用される。(実際の計算では、体系の対称性などを利用して、できるだけ小さくしたルックアップテーブルが高速計算のために使用される。)

筆者らが試みた“多段2体衝突法”では、各4次元格子点において、たかだか1本の2体衝突式を適用したあと、次の並進移動の過程には進まず、衝突後の速度をもつ仮想粒子に対して、再び、そして何回も2体衝突式を適用する。適用する2体衝突式を選択をランダムに相当数繰り返して、はじめて、次の並進移動の過程に進ませる。これにより、各格子点に入射する前の仮想粒子の速度分布と、そこから出ていくときの仮想粒子の速度分布の間の相関が小さくなり、粘性が小さい流体挙動が発現してくると思えられる。

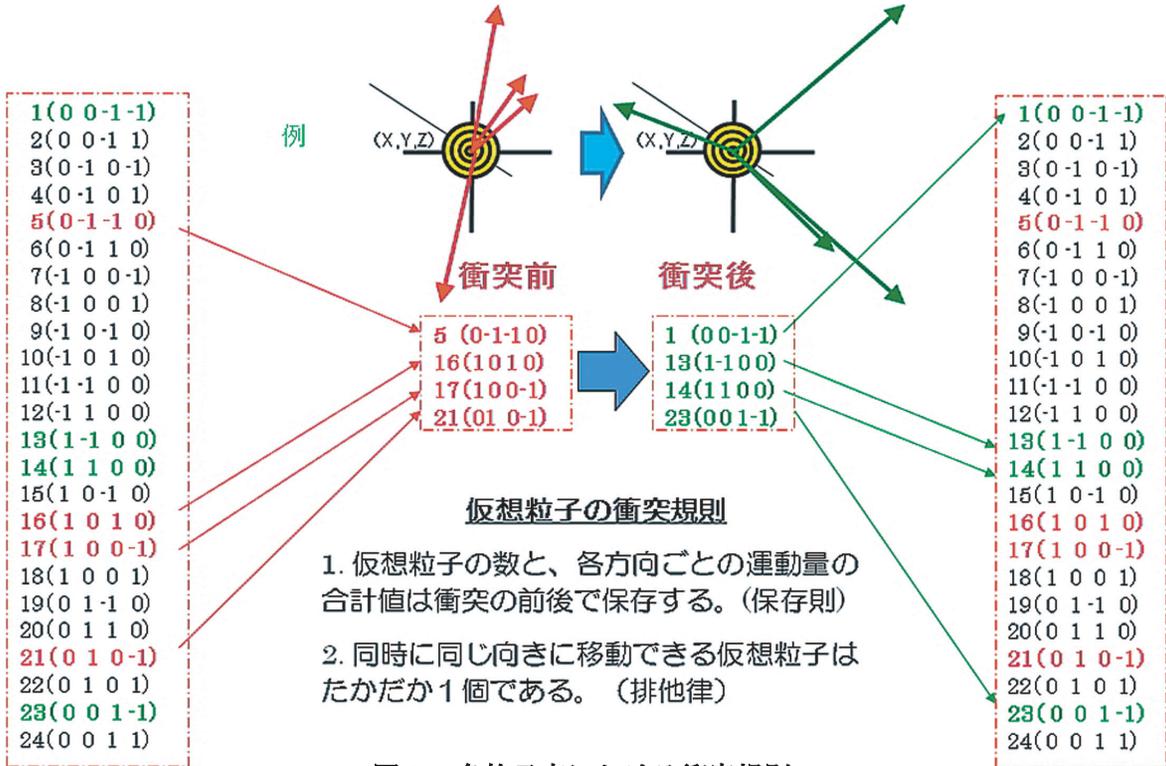


図3 各格子点における衝突規則

4. 急発進した流れ中の円柱後流渦の過渡変化解析と衝突式数依存性

東北大学サイバーサイエンスセンターのSX-9、2ノード(32CPU)を用いて行った実際のシミュレーション結果の1例を図4に示す。4次元格子点数は、 $3072 \times 768 \times 768 \times 4 \approx 72$ 億点である。

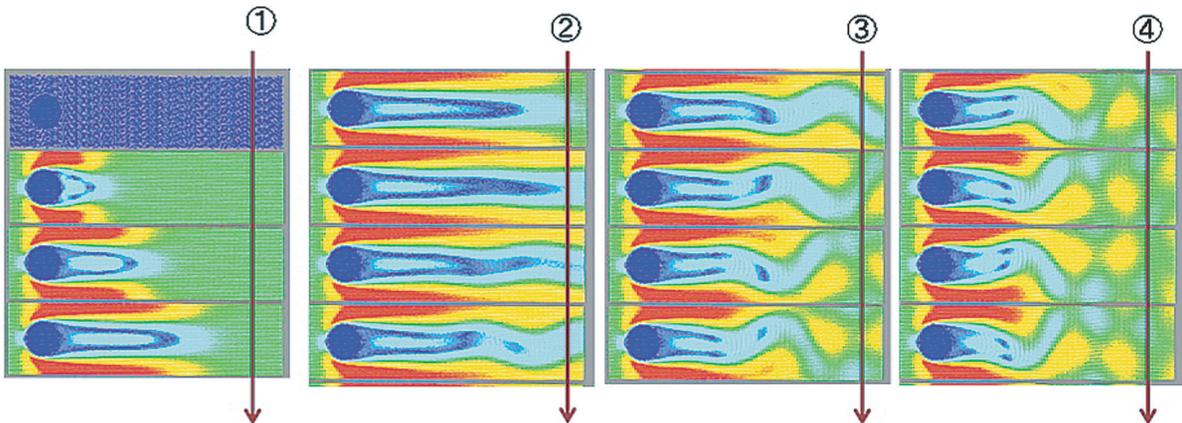


図4 無限長円柱の後流の過渡変化

図4は、図1に示した計算体系を、Z軸に垂直なある平面で切ったときのXY平面内における流体の運動量の時間変化を示している。図の色は、運動量ベクトルの大きさを示しており、小さい順に、青色→空色→黄緑色→黄色→赤色と変化する色で大きさを表現している。左上の全体が青い図が、時刻ゼロにおいて円柱まわりの流体が静止している状態である。①に示すとおり、双子渦が発生してその長さが伸びる。②に示すとおり、伸びた尾の先が揺れだす。③に示すとおり、揺れた部分が引きちぎられて、残った部分が揺れて、いわゆる“カルマン渦”に移行し、④に示すとおり、定常的な変化となる。このようなシミュレーション結果は、実験で観察されている過渡変化^[11]と比較してみると、定性的にはよく一致している。

図5は、上記の過渡変化シミュレーションを、“多段2体衝突法”において、適用する2体衝突式の本数を変えて行った結果を比較したものである。上から下へ時間が推移し、左から右に進むにつれて、適用する2体衝突式数が増加するものとする。

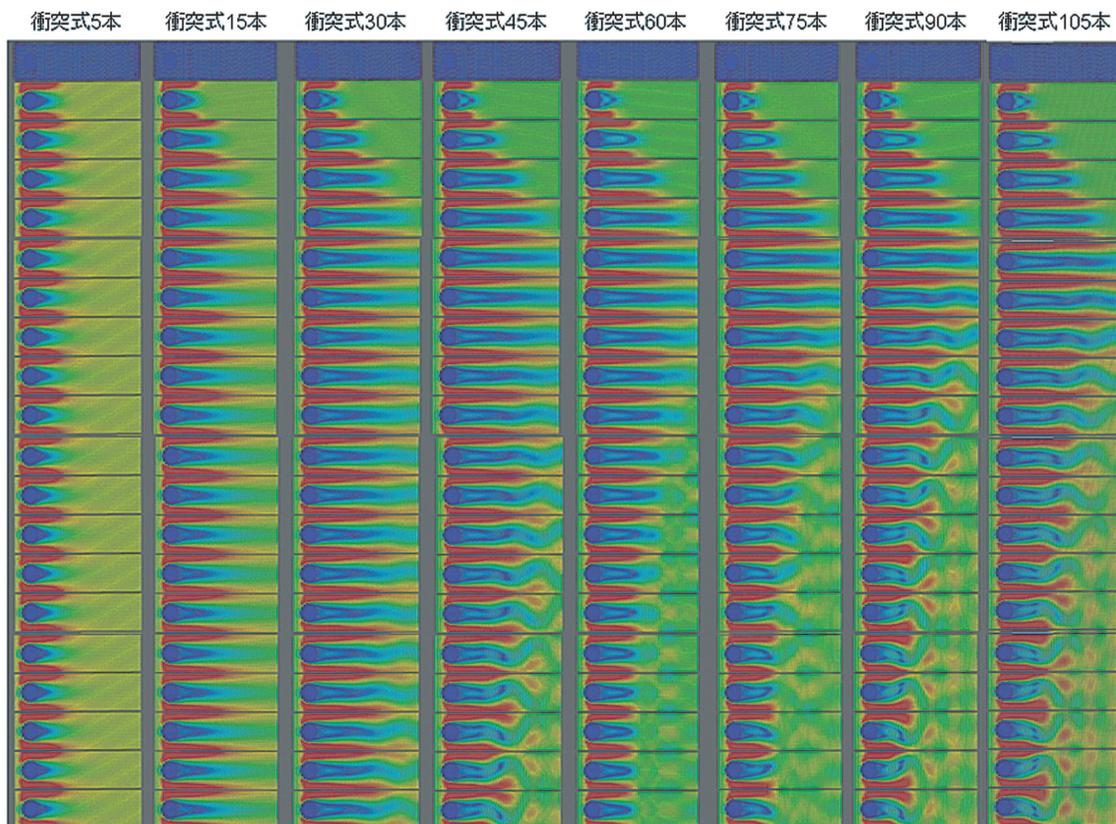


図5 無限長円柱の後流過渡変化に対する粘性制御の効果

適用する2体衝突式の本数が増すに従って、過渡変化の特徴は、以下のように変化している。

衝突式数	計算時間	過渡変化の特徴
5本	446472.216 秒	少し伸びた混沌渦。
15本	449223.944 秒	少し伸びた双子渦。
30本	447000.724 秒	15本の場合より伸びた双子渦で、尾がかすかに揺れる。
45本	448771.655 秒	30本の場合より伸びた双子渦の尾に第3の渦ができて揺れはじめ、カルマン渦へ。
60本	447954.562 秒	45本の場合よりも双子渦が伸び、尾が切れて、短い太い双子渦。
75本	450588.949 秒	60本の場合よりも双子渦が伸び、尾が切れて、短い太い双子渦ができ、その尾が揺れる。
90本	445957.043 秒	上記+カルマン渦の開始。
105本	444964.259 秒	上記+カルマン渦。

5. まとめ

以上の特徴変化から、適用する2体衝突式の本数を増やすことによって生じる効果は、流体の粘性が小さくなっていく場合の効果として現れることが定性的に観察できる。この結果、シミュレーションに“多段2体衝突法”を適用することで、格子点数を増やすことなく、つまり、計算時間を増加させることなしに、双子渦が発生するレイノルズ数領域から、カルマン渦が発生するレイノルズ数領域まで、その振る舞いを評価することが可能であることを明らかにした。

なお、今後より定量的な考察や理論的な裏付け説明が望まれるが、筆者らは、これらに関する今後の研究活動を通じて、何か新しい発想の超並列シミュレーション手法にたどり着くことを夢見ている。

謝辞

本研究の実施は、東北大学サイバーサイエンスセンターの研究開発公募制度によってはじめて可能になった。また、計算機の利用、プログラムの最適化等について、同センターのスタッフの方々はもとより、同センター担当のNECの方々から多くのご支援を頂いた。筆者らは、ここに深く感謝申し上げる次第である。

参考文献

- [1] Osamu Inoue and Akira Sakuragi, “Vortex shedding from a circular cylinder of finite length at low Reynolds numbers”, *PHYSICS OF FLUIDS* 20, 033601 (2008).
- [2] U. Frisch, D. d’Humières, B. Hasslacher, P. Lallemand, Y. Pomeau, and J-P. Rivet, “Lattice Gas Hydrodynamics in Two and Three Dimensions”, *Complex Systems*, 1, pp. 649-707, (1987).
- [3] T. Kobori and T. Maruyama, “A high speed computation system for 3D FCHC lattice gas model with FPGA”, *Proceedings of the 13th International Conference on Field-Programmable Logic and Applications*, pp. 755-765 (2003).
- [4] “格子ガスオートマトンによる3次元電磁場のモデリング方法”, 特開平 11-250120, 特願平 10-350532.
- [5] M. Otani, T. Takeuchi, Y. Iwaya, H. Matsuoka, and Y. Suzuki, “Sound-Field Lattice Gas Cellular Automaton for Real-Time Acoustic Rendering,” *Int. Universal Commun. Sympo. (IUCS2010)*, pp. 288-231 (2010).
- [6] 山本和弘, 小沼義昭, “格子ガスオートマトン法による燃焼場の数値計算”, *日本機械学会論文集(B編)* 67 巻 663 号(2001年11月).
- [7] 栴尾大輔, 阿部豊, 松隈洋介, “3次元格子ガスオートマトン法を用いた高温粒子表面上の蒸気膜崩壊挙動に関する数値シミュレーション”, *日本原子力学会和文論文誌*, Vol. 7, No. 4, pp. 321-327(2008).
- [8] 栴尾ら, “3次元格子ガスオートマトン法を用いた高空孔率多孔性固体の流動特性解析”, *日本機械学会論文集B編*, 68 [666], 35-40 (2002).
- [9] 酒井敦, 鎌倉良成, 谷口研二, “量子格子気体法によるデバイス内部の電子波伝搬解析”, *信学技報, TECHNICAL REPORT OF IEICE*. VLD2002-72, SDM2002-178 (2002年9月).
- [10] D. d’Humières, P. Lallemand, and U. Frisch, *Europhys. Lett.*, 2 (1986) p. 291.
- [11] 種子田定俊, “画像から学ぶ流体力学”, 朝倉書店, p. 45 及び p. 47.

[研究成果]

チップマルチベクトルプロセッサのためのプログラム最適化技術

佐藤義永*1 撫佐昭裕*2 江川隆輔*3

滝沢寛之*1 岡部公起*3 小林広明*3

*1 東北大学大学院情報科学研究科

*2 日本電気株式会社

*3 東北大学サイバーサイエンスセンター

ベクトルプロセッサのさらなる高性能化、高効率化を実現するために、チップマルチベクトルプロセッサ(CMVP)が提案されている。1チップに複数の演算コアを搭載することにより、高い演算性能が実現できる一方で、ピーク演算性能に対するメモリバンド幅(Bytes/Flop、以下、B/F)は減少すると考えられる。このためCMVPは、低下するB/Fを補うためにキャッシュメモリを搭載している。したがって、CMVPの性能ポテンシャルを引き出すには、従来のベクトルプロセッサ向けのプログラム最適化に加えて、キャッシュメモリを活用する最適化も考慮する必要がある。これまで本研究では、キャッシュメモリを有するベクトルプロセッサを対象として、ループアンローリングとキャッシュブロッキングの二つの最適化手法を効果的に組み合わせるプログラム最適化戦略を提案してきた。本稿では、この最適化戦略をCMVPに適用し、その有効性を実アプリケーションによる性能評価に基づき考察する。

1. 緒言

過去30年間、ベクトル型計算機は先端科学技術計算分野の発展に多大な貢献をしており、今後の更なる性能向上が期待されている。計算機の性能は、搭載されるプロセッサの性能に大きく依存する。科学技術計算におけるプロセッサの性能とは、実効性能(単位時間当たり処理可能な浮動小数点演算数、Flop/s)の高さで議論することができる。半導体加工技術の進歩により、プロセッサ1チップ辺りに搭載されるトランジスタ数は年々増加し、より多くの演算器が搭載可能となる。しかし、単に演算器の数を増やただけでは性能向上は得られない。なぜならば、大量の演算器を同時に稼働させるよう命令を発行する必要があるが、並列実行可能な命令数には限界があるためである。そこで、近年では1チップに複数のプロセッサコアを搭載するチップマルチコアプロセッサ(CMPs)が一般的になってきている。CMPsとは、従来のプロセッサを演算コアとみなし、1チップに複数の演算コアを搭載するプロセッサである。CMPsでは、命令単位よりも粗い並列性を持つスレッド単位で並列処理を行うことで、高性能化を実現している[1]。ベクトルプロセッサにおいても、科学技術計算の主要カーネル部のマルチスレッドが容易であることから、CMPsの適用が検討されてきている。本研究では、次世代のベクトルプロセッサとして、チップマルチベクトルプロセッサ(CMVP)を提案しており、本研究の目的はCMVPの実効性能を高めるプログラム最適化手法の検討である。

CMVPでは、1チップに従来のベクトルプロセッサを複数搭載することから、演算性能の飛躍的な向上が期待できる。しかし、演算性能と比べて、チップとメインメモリ間のメモリバンド幅の向上は緩やかである。これは、メインメモリと通信するためにチップに搭載されるI/Oピンの数は物理的制約により、これ以上増やせないためである。したがって、チップに搭載するコア数が増えれば増えるほど、演算性能とメモリバンド幅の性能差が拡大する。演算性能とメモリバンド幅のバランスであるBytes/Flop(B/F)に着目すると、B/Fが半減することで理論最大性能に対する実効性能が半減するという報告がなされている[2]。不足するメモリバンド幅を補うために、CMVPには共有ベクトルキャッシュと呼ばれるキャッシュ機構が搭載されており、共有ベクトルキ

キャッシュの利用方法が性能向上の鍵となる。

従来のベクトルプロセッサと CMVP 向けの最適化の大きな違いは、最内ループ長の扱い方である。従来のベクトルプロセッサでは、最内ループ長を伸ばして、一度のベクトル命令で処理可能なベクトル長を長くすることにより、データ転送の遅延時間を隠ぺいしている。しかし、CMVP ではキャッシュが存在することから、ただループ長を伸ばしただけでは性能が低下する恐れがある。ループ長が長くなればなるほど、メモリアクセスするデータ範囲が大きくなるため、データ参照における時間的局所性が小さくなる可能性があり、その結果キャッシュヒット率が低下する。したがって、CMVP ではキャッシュブロッキングと呼ばれるループ長を変化させる最適化手法を用いて、適切なループ長を設定する必要がある。また、ループアンローリングもベクトルプロセッサで頻繁に利用される最適化であるが、ループを展開することにより参照の局所性が変化するため、キャッシュヒット率に影響する。したがって、CMVP において最適化を行う場合には、ループアンローリングとキャッシュブロッキングを適切に組み合わせる必要がある。このように、CMVP では、複数の最適化のパラメータとその組み合わせ方を検討しなければならず、容易に最適化を適用することは困難である。

そこで本稿では、CMVP においてループアンローリングとキャッシュブロッキングを効果的に組み合わせる最適化戦略を提案する。本戦略では、プログラムにおける性能のボトルネックに着目し、ボトルネックの解消に有効な最適化を優先的に適用することにより、最適化の効果を最大限に引き出す。また本稿では、この最適化戦略を適用した実アプリケーションによる性能評価もを行い、その有効性を検証する。

2. チップマルチベクトルプロセッサ

CMVP のブロック図を図 1 に示す。CMVP は従来のベクトルプロセッサをベクトルコアとして複数備え、加えて共有ベクトルキャッシュを有している。ベクトルコアは 5 種類のベクトル演算パイプラインセットを備えると共に、連続する演算命令を処理する際に、一方の演算パイプラインの結果を次の演算パイプラインの入力として並列処理を行うベクトルチェイニングが可能である。共有ベクトルキャッシュは、32 個のサブキャッシュから構成されている。これは、メインメモリとプロセッサ間のインターリーブ転送をキャッシュ機構にも適用するためである。メインメモリの各メモリバンクから、共有ベクトルキャッシュのサブキャッシュに独立して転送可能とすることにより、各サブキャッシュから各演算コア内のベクトルレジスタへデータを並列に転送できる。これにより、高い実行メモリバンド幅を実現している。

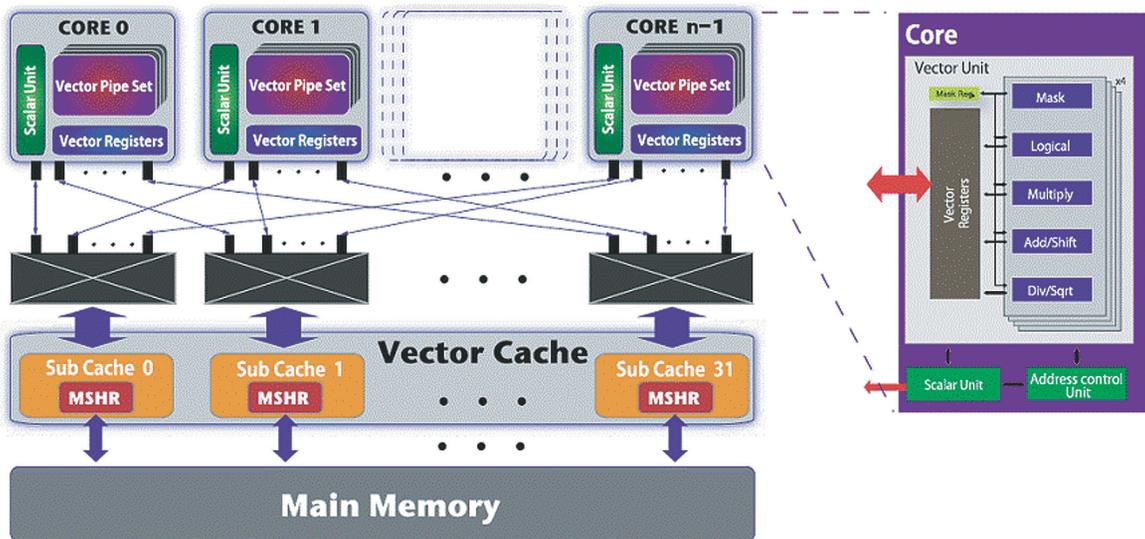


図 1 CMVP のブロック図

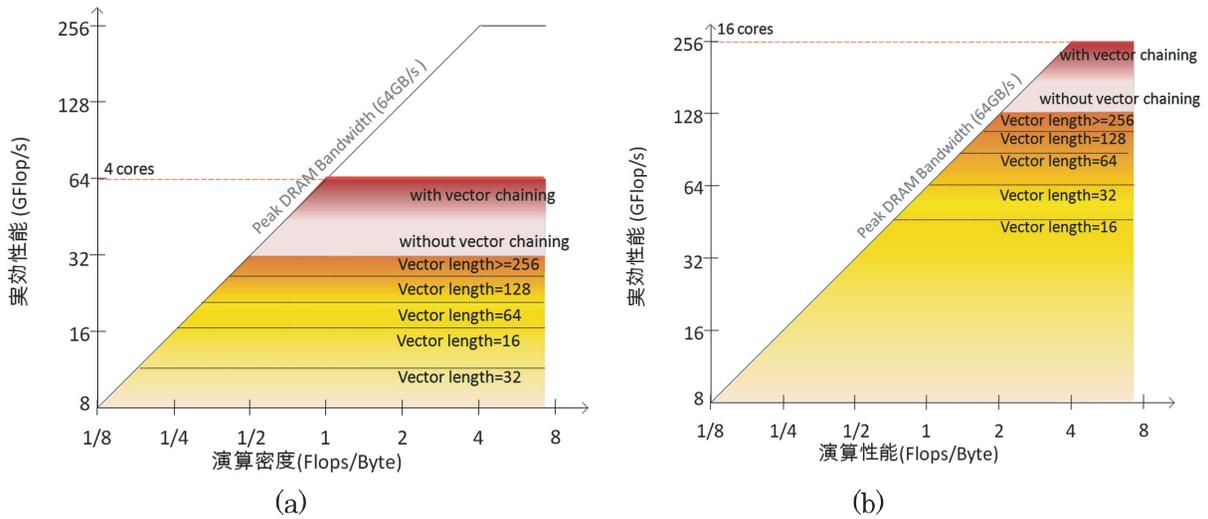


図 2 (a) 4 コア CMVP のルーフラインモデル、(b) 16 コア CMVP のルーフラインモデル

3. CMVP のためのプログラム最適化手法

3.1. ルーフラインモデルを用いた性能解析

CMVP の性能を活かすには、従来のベクトルプロセッサ向けの最適化に加えて、ベクトルキャッシュ向けの最適化が必要となり、複数の最適化手法を検討する必要がある。本稿ではループアンローリングとキャッシュブロッキングの最適化手法の組み合わせを検討するが、双方の最適化が影響しあうため、最善の最適化パラメータを探索するのは困難である。そこで、プログラムのボトルネック解析に基づき、プログラム最適化手法を組み合わせる方法を提案する。ボトルネック解析ではルーフラインモデル[3]と呼ばれる性能モデルを用いる。

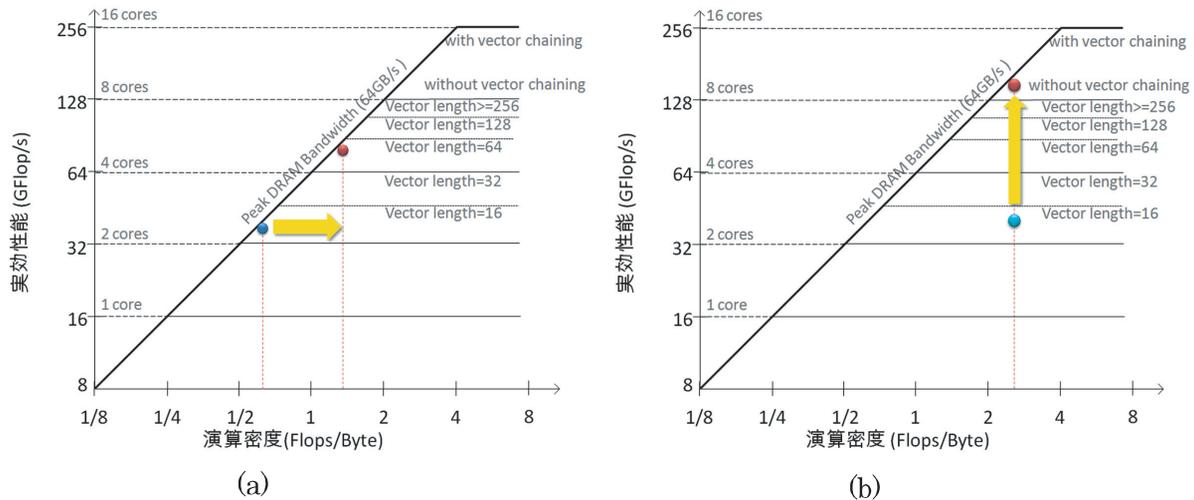
ベクトルプロセッサで利用される科学技術アプリケーションでは、プロセッサとメインメモリ間におけるデータ転送時間が実行時間の大部分を占める。そのため、システムの実効性能はプロセッサとメインメモリ間のデータ転送性能に大きく左右される。このことから、CMVP の性能モデルは CMVP の演算性能だけではなくデータ転送性能も考慮する必要がある。そこで、ルーフラインモデルを CMVP の性能モデルとして採用する。ルーフラインモデルは演算密度を性能指標として用いている。演算密度とは、アプリケーションに含まれる演算量と、演算に必要なデータ転送量(プロセッサ-メインメモリ間)の比であり、これを利用することによりシステムとアプリケーションの双方の特徴から性能を考慮することができる。なお、演算密度の単位として、Flops per Byte が一般的に用いられる。これにより、アプリケーション毎に性能のボトルネックの解析が可能となり、アプリケーションとシステムの特徴を踏まえたプログラム最適化の指針を導くことができる。

図 2 に CMVP のルーフラインモデルを示す。なお、ピーク演算性能は、コア当たりの性能(16 GFlop/s)とコア数の積である。4 コアと 16 コアの CMVP におけるルーフラインを比較すると、ピーク演算性能は 16 コアの方が高い。しかし、ピーク演算性能が得られる演算密度をみると、低い演算密度では、4 コアよりも 16 コアの方が、メモリバンド幅がボトルネックになりやすいことがわかる。したがって、このように CMVP で利用するコア数を考慮したルーフラインモデルを構築することにより、コア数に応じて性能のボトルネックを解析することが可能となる。

図3にCMVPのルーフラインモデルを用いたボトルネック解析を示す。図3 (a)は実効性能がメモリバンド幅により律速される場合である。特に、積層コア数が多い場合には、メモリバンド幅がボトルネックになりやすいと考えられる。このようなメモリのボトルネックを解消するためには、キャッシュヒット率を高めて演算密度を向上するプログラム最適化手法が有効であると考えられる。一方、実効性能がメモリバンド幅に律速されていないにもかかわらず、十分な性能が得られない場合の例を図3 (b) に示す。演算密度が高くとも、ベクトル長が短い、並列演算パイプラインを十分に利用できない場合は実効性能が低くなる。そこで、ベクトル長や最内ループの演算命令

数を増やす等により、性能のボトルネックを解消する必要がある。

ルーフラインモデルを用いて性能のボトルネックを解析することにより、性能改善に効果的なプログラム最適化手法を選択することが可能となる。本研究では、これを最適化の組み合わせに応用する。次節において、組み合わせる最適化手法、および性能解析に基づく最適化戦略について詳説する。



(a) メモリバンド幅ネックの場合のルーフラインモデル、
(b) 演算ネックの場合のルーフラインモデル

3.2. ルーフラインモデルに基づくプログラム最適化戦略

演算のボトルネックを解消するプログラム最適化手法としてループアンローリングに着目し、メモリバンド幅のボトルネックを解消するプログラム最適化手法としてキャッシュブロッキングに着目する。これらループ変換によるプログラム最適化は、性能に対し一長一短の性質を有している。そのため、各最適化を組み合わせることで最大の性能を得るには、効果的な組み合わせで最適化を施す必要がある。例えば、ループアンローリングを適用した後にキャッシュブロッキングを適用する場合、ベクトル長とキャッシュヒット率の最適なトレードオフを実現できない恐れがある。これは、キャッシュヒット率を考慮せずにループアンローリングを施すこととなり、その後キャッシュブロッキングを適用しても十分なキャッシュヒット率を得られないためである。したがって、本研究では最適化を適用する順序を考慮した最適化の組み合わせを検討する。そこで本節では、ループアンローリングとキャッシュブロッキングの性質について述べる。

3.2.1. ループアンローリング

ループアンローリングは、ループを展開することで複数の繰り返し演算を一回の繰り返しで処理する手法である。ループアンローリングにより、ループの繰り返しに要する分岐命令が削減される。さらに、複数の繰り返しに含まれるメモリアクセスのうち共通するメモリアドレスが、一回のアクセスで済むためメモリアクセス数を削減できる。したがって、最内ループにおける演算数が増加し、演算パイプラインを効率的に利用することが可能となり実効性能が向上する。一方で、複数の繰り返しにおいて共通するメモリアクセスがなく、ループアンローリングによってメモリアクセス数が削減できないアプリケーションでは、アンローリングにより内側ループに含まれるメモリアクセス数が増加する。その結果、外側ループにおける時間的局所性が減少し、キャッシュヒット率が低下する。したがって、ループアンローリングは、最内ループにおける演算量向上とキャッシュヒット率減少のトレードオフを有するプログラム最適化手法である。

3.2.2. キャッシュブロッキング

キャッシュブロッキングは、キャッシュサイズに合わせてループを分割することで、参照の局所性を高める最適化手法である。ループを分割することで、再利用性のあるデータをより多くキャッシュに格納することができ、キャッシュヒット率の向上が期待できる。一方、ブロッキングを行うためのループ分割によりベクトル長が短くなり、一度のベクトル命令で処理するデータ数が減少する。また、ループ分割によりループ分岐回数が増加するため、ループのオーバーヘッドも増加する。このため、ブロッキングするループ長に応じてキャッシュヒット率が向上する一方、ベクトル長の短縮やループのオーバーヘッドによる性能低下というトレードオフが存在する。

3.2.3. プログラム最適化戦略

アンローリングやブロッキングを適用することにより、それぞれの最適化に応じて参照の局所性が変化するため、両最適化を同時に適用する際には互いに影響を及ぼす。したがって、最適化パラメータにはトレードオフの関係があると言える。そこで、本最適化戦略ではループアンローリングとキャッシュブロッキングの適用順序をループラインモデルにより検討する。例えば、ループラインモデルによる解析によりメモリバンド幅がボトルネックである場合には、キャッシュブロッキングを先に適用し、その後ループアンローリングを適用する。性能のボトルネックを解消するプログラム最適化の効果を最大限に引き出し、その後もう一方のプログラム最適化を適用することで二種類の最適化における最良のトレードオフを導く。

次に、最適化パラメータの決定方法について述べる。アンローリング段数やブロッキングサイズを変化させた際の実効性能の傾向は、最大値を頂点として単調増加から単調減少となることが報告されている。そこで本手法では、グリーディサーチアルゴリズムを用いて最適化パラメータの探索を行う。このアルゴリズムは、最適化前のパラメータを初期条件として徐々に最適化パラメータを変えていき、実効性能が最も高くなる最適化パラメータを探索する。これにより、各最適化における性能の傾向から、最適化パラメータの全探索を行う必要がなく最適解を得ることができる。しかし二種類の最適化を組み合わせる場合、独立に探索して得られた最適解は、他方の最適化の影響で最適解でなくなる恐れがある。したがって、先行する最適化を適用した後に、後続の最適化における最適化パラメータを探索する必要がある。本最適化戦略では、初めにループラインモデルを用いたボトルネック解析により適用するプログラム最適化の順序を決定する。そして先に適用する最適化のパラメータをグリーディサーチにより探索して適用する。その後、他方の最適化について再度グリーディサーチによるパラメータ探索を行い、最適化を適用する。

4. 性能評価

本章では、実アプリケーションに提案戦略を適用し、CMVPにおける実効性能を評価することにより、提案戦略の有効性を検証する。

4.1. 評価環境

本評価では、新たに開発したソフトウェア制御の可能なオンチップキャッシュを導入したSXベクトルプロセッサのトレースドリブンシミュレータを用いる。本評価で用いるシミュレータは、実行される各命令の実行タイミングや、実行時のサイクル数、メモリアクセスサイクル数等を計測することで、全実行時間やキャッシュヒット率を算出する。さらに、シミュレータに与えるパラメータを変更することで、ベクトルキャッシュの有無やプロセッサの構成、メモリバンド幅の変更も可能である。また、CMVPの構成は、ベクトルキャッシュの容量を1 MBとし、メモリバンド幅はコア数によらずメインメモリ-キャッシュ間を64GB/sとし、一方でキャッシュから各コアへは常に64GB/s/coreで提供できるものとする。したがって、ベクトルコアのピーク性能を16 GFlop/sと仮定すると、メインメモリのB/Fはコア数が増加するに従い、1コア時 4 B/Fから16コア時 0.25 B/Fまで減少する。

4.2. 評価アプリケーション

評価には、行列積(Matrix Multiply) と7点および27点のステンシル計算(7-pt Stencil、27-pt Stencil) を行うカーネルに加え、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で利用されている4種類の実アプリケーションを用いる。表1に実アプリケーションの詳細について述べる。なお、アプリケーションの並列化は、最外D0ループを均一なスレッドに分割するようマイクロタスキングを用いて行い、各スレッドを一つのコアで実行する。

表 1 評価アプリケーション

評価アプリケーション	計算手法	問題サイズ	ベクトル化率	ベクトル長
Matrix Multiply	-	1024×1024×1024	99.5%	256
7-pt Stencil	-	256×256×256	99.7%	256
27-pt Stencil	-	256×256×256	99.7%	256
Earthquake [4]	Friction Law	2047×2047×257	99.5%	256
Land Mine [5]	FDTD	1500×1500×50	99.7%	250
Turbulent Flow [6]	DNS	512×512×256	99.9%	256
Antenna [7]	FDTD	252756×9×138	99.5%	256

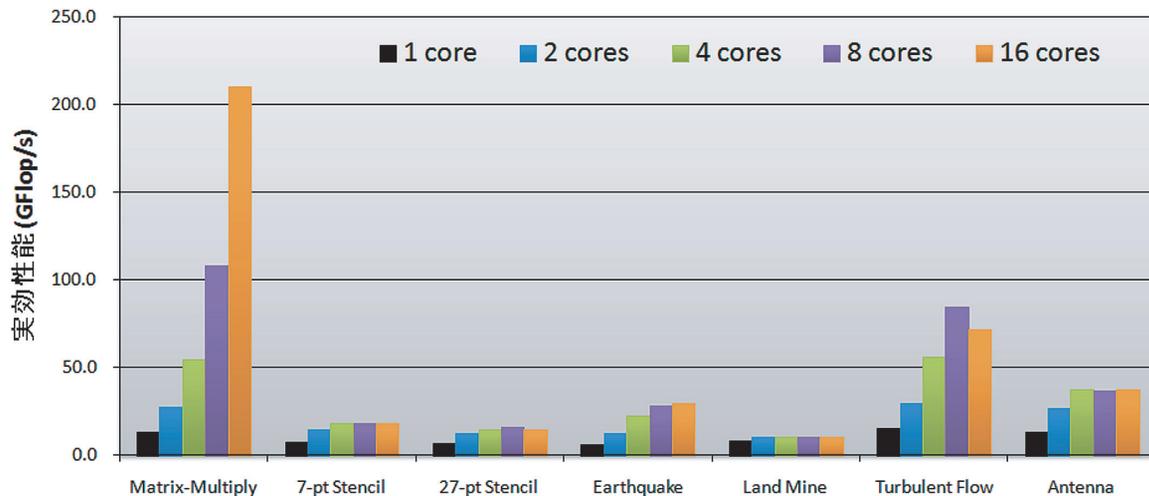


図 4 評価結果 (最適化戦略適用前)

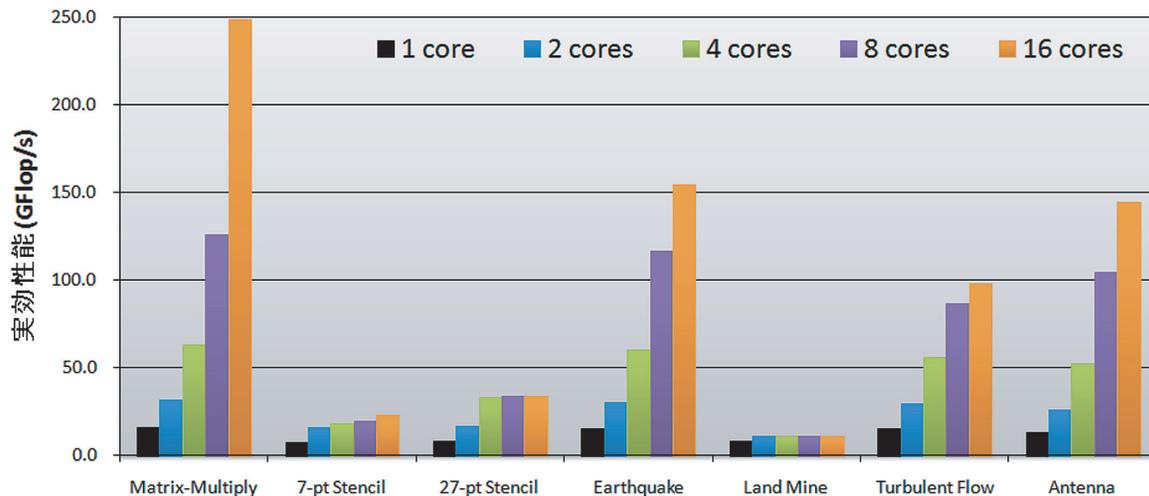


図 5 評価結果 (最適化戦略適用後)

4.3. 評価結果

図 4 に最適化戦略適用前の評価結果を示す。全体としてみると、1 コアから 8 コアまでコア数が増加する間では、ほとんどのベンチマークにおいて性能が向上する。しかし 16 コア時では Matrix-Multiply を除くすべてのベンチマークは性能が向上しなくなる。これは、コア数の増加に伴いコア当たりには供給できるメモリバンド幅が低下するためである。

Matrix-Multiply、Earthquake そして Turbulent Flow ではコア数が増加するに従い、他のベンチマークと比較して高い性能向上が得られることが分かる。これは、各コアでデータをベクトルキャッシュで共有することにより、メインメモリアクセス数を削減できるためである。そのため、コア数増加に伴う B/F 低下の影響を受けにくい。しかし、16 コア時までコア数を増やすと、B/F 低下の影響が表れ、性能向上は得にくくなる。さらに Turbulent Flow では、16 コアでスレッドを並列処理すると、各スレッドが利用するキャッシュ容量が、ベクトルキャッシュ容量を超えてしまうためキャッシュヒット率が減少し、結果として演算性能が低下する。同様に、Antenna においてもキャッシュ容量が不足するため、性能の向上幅が低下する。したがって、これらのアプリケーションではキャッシュブロッキングを適用する必要がある。

一方で、Stencil と Land Mine では、ほとんど実効性能は向上していない。これは、これらのベンチマークはメモリアクセスが他のアプリケーションと比較して多いためである。特に、コア数が増加するに伴いコア当たりのメモリバンド幅は低下するため、コア数増加に伴うスケラビリティを得ることは困難である。したがって、CMVP では実効メモリバンド幅を向上させるキャッシュブロッキングによる最適化は不可欠であると言える。

図 5 に最適化戦略適用後の評価結果を、図 6 にルーフラインモデルにおける最適化戦略適用前後の演算性能と演算密度の関係を示す。図 5 より、最適化戦略を適用することにより、全てのベンチマークにおいて実効性能が向上していることがわかる。なお、図 6 のルーフラインモデルによる解析より、16 コア時においては Matrix-Multiply と Earthquake が演算ネック、それ以外がメモリネックであると判断できる。これに基づき最適化戦略を適用することにより、最大で 5 倍の性能向上が得られた。

最適化戦略により実効性能の飛躍的な向上を達成したが、Earthquake や Turbulent Flow、Antenna では、さらなる性能向上の余地がある。また、メモリネックのアプリケーションでは 16 コア時には最適化の効果は得難い。そこで今後は、アンローリングやブロッキング以外の最適化の適用も検討し、最適化が与える効果や最適化間の影響について評価、および解析に取り組む予定である。

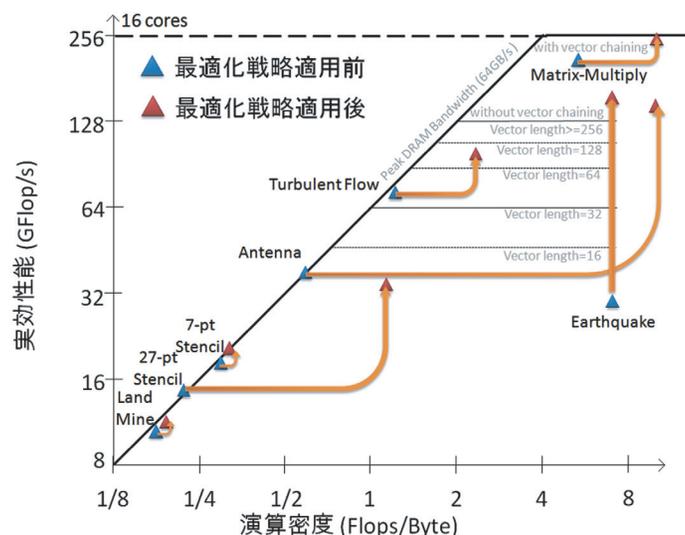


図 6 最適化適用前後のルーフラインモデル(16 コア CMVP)

5. 結言

本研究の目的は、次世代ベクトルプロセッサとして本研究室で提案している CMVP において、その性能を最大限に活用するためのプログラム最適化戦略の確立である。そこで本稿では、ループラインモデルを用いたボトルネック解析に基づいてプログラム最適化を行う戦略を提案した。提案する最適化戦略では、複数の最適化の適用順序を決定するために、ループラインモデルを用いて性能のボトルネックの解析を行う。そして、解析結果からボトルネックの解消に有利な最適化を選択し、効果的にプログラム最適化手法を組み合わせることができる。

実アプリケーションを用いて、実効性能を評価した結果、実効性能では最適化適用前と比較して最大で約 5 倍の性能向上を達成した。本提案戦略を用いることで、CMVP において最適化の順序付け及びパラメータ探索を行うことにより効果的に最適化が組み合わせ可能であることが明らかになった。

今後は、CMVP 向けのループラインモデルの改善、および新たなプログラム最適化手法の検討を行う予定である。最適化後においても性能向上の余地がまだ残っており、現在の性能を決定づける要因についてループラインモデルで解析可能となるよう、アプリケーションの詳細な解析を行う。また、アンローリングやブロッキング以外の最適化手法も最適化戦略に取り込み、さらなる性能向上が可能な最適化戦略へと発展させる予定である。

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出来た。また、本研究の一部は文部科学省基盤研究(S)課題番号 21226018 の研究プロジェクト「ペタフロップス級計算機に向けた次世代 CFD の研究開発」による。

参考文献

- [1] Lance Hammond, Basem A. Nayfeh, and Kunle Olukotun., "A Single-Chip Multiprocessor," Computer, pp. 79-85, September, 1997.
- [2] Hiroaki Kobayashi., "Implication of Memory Performance in Vector-Parallel and Scalar-Parallel HEC Systems", High Performance Computing on Vector Systems 2006, Springer-Verlag, pp. 22-50, 2006.
- [3] Samuel Williams, Andrew Waterman, and David Patterson., "Roofline: an Insightful Visual Performance Model for Multicore Architecture", Communications of the ACM, Vol. 52, No. 4, pp. 65-76, 2009.
- [4] Keisuke Ariyoshi, Toru Matsuzawa, and Akira Hasegawa., "The key frictional parameters controlling spatial variations in the speed of postseismic-slip propagation on a subductionplate boundary", In: Earth and Planetary Science Letters, Vol. 256, pp. 136-146, 2007.
- [5] Takeo Kobayashi, Motoyuki Sato., "FDTD simulation on array antenna SAR-GPR for landmine detection", In: Proceedings of SSR2003, pp. 279-283, 2003.
- [6] Takahiro Tsukahara, Kaoru Iwamoto, and Hiroshi Kawamura., Evolution of Material Line in Turbulent Channel Flow. Proceedings of the Fifth International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, pp. 549-554, 2007.
- [7] Yukiko Takagi, Hiroyasu Sato, Yoshihiko Wagatsuma, and Kunio Sawamura., Study of High Gain and Broadband Antipodal Fermi Antenna with Corrugation. Proceedings of 2004 International Symposium on Antennas and Propagation, Vol. 1, pp. 69-72, 2004.

[報 告]

佐藤義永氏が IEEE Computer Society Japan Chapter 優秀若手研究賞を受賞しました

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小林研究室博士課程後期3年で、センターのテクニカルアシスタントでもある佐藤義永氏が IEEE Computer Society Japan Chapter 優秀若手研究賞を受賞しました。

佐藤氏の受賞は、2011年ハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム(HPCS2011)における

「ループラインモデルに基づくベクトルプロセッサ向けプログラム最適化戦略」
(佐藤義永, 永岡龍一, 撫佐昭裕, 江川隆輔, 滝沢寛之, 岡部公起, 小林広明)

の発表の論文が高く評価されたものです。

(本賞は電気技術および電子技術に関する学問、技術の奨励のために有為と認められる新進の若手研究者に贈呈するもので、2011年ハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウムにおいて優秀な論文を発表した者から選定されるものです。)

[報 告]

**学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点第3回シンポジウム
平成22年度先端的大規模計算利用サービス成果報告会 報告**

江川隆輔

スーパーコンピューティング研究部

平成23年7月14日、15日の両日、学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点第3回シンポジウム、および平成22年度先端的大規模計算利用サービス成果報告会が、東京品川The Grand Hallにおいて開催されました。

学際大規模情報基盤共同利用・共同研究は、東北大学、北海道大学、東京大学、東京工業大学、名古屋大学、京都大学、大阪大学、九州大学にそれぞれ附置するスーパーコンピュータを持つ8つの共同利用の施設を構成拠点とする「学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点」が、超大規模数値計算系応用分野、超大規模データ処理系応用分野、超大容量ネットワーク技術分野、およびこれらの技術分野を統合した大規模情報システム関連研究分野、更には分野間に亘る複合分野の研究者らと取り組む学際的な共同利用・共同研究です。この取り組みにより我が国の学術・研究基盤の更なる高度化と恒常的な発展が大いに期待されております。平成22年度は37件、平成23年度には39件の課題が学際大規模情報基盤共同利用・共同研究として採択されており、そのうち当センターとの共同研究課題は、平成22年度4件、平成23年度は6件ありました。

また、先端的大規模計算利用サービスは、平成19年度から文部科学省の委託事業として開始され、各大学が開発した応用ソフトウェア(シミュレーションソフトウェア等)と各大学が有する国内有数のスーパーコンピュータをそれらの利用支援サービスと一体化して民間企業に提供するものです。当センターでも、本サービスを通して多数の企業と共同研究に取り組んできました。今回の成果報告会では、当センターのスーパーコンピュータを用いた、三菱航空機株式会社による国内初の小型ジェット旅客機設計に関する成果発表が行われました。本サービスは、平成23年度をもって文部科学省の先端的研究施設共用促進事業から、各大学の自主事業に移行しました。当センターでも自主事業として、民間企業の方々が当センターの計算資源を利用できる制度を整えております。興味のある方はセンターのホームページをご覧ください。

本シンポジウム、成果報告会では、各研究課題の成果発表、ポスター発表を通して積極的な議論が交わされたばかりでなく、拠点および拠点を構成する各センターにおけるそれぞれの共同研究への取り組みを確認することができました。本報告では、今年度の東北大学との共同研究として採択された課題のうち以下に示す課題と、現在民間利用制度を通して当センターを利用している課題のポスターを転載致します。来年度も引き続き、学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点の研究公募行う予定であります。ご興味のあるかたは奮ってご応募ください。

【平成23年度学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠における当センターとの共同研究課題】

- ・ 炭化水素系燃料の超音速乱流燃焼の数値シミュレーション
研究代表者 滝田謙一 (東北大学)
- ・ 次世代ペタスケールCFD のアルゴリズム研究
研究代表者 中橋和博 (東北大学)
- ・ マルチパラメータサーベイ型シミュレーションを支えるシステム化技術に関する研究
研究代表者 奥田洋司 (東京大学)
- ・ 計測融合オペレーション実現のための大規模計算機空気冷却風速場の実時間解析
研究代表者 松岡浩(理化学研究所)
- ・ 学術グリッド基盤の構築・運用技術に関する研究
研究代表者 合田憲人(国立情報学研究所)

【先端的大規模計算利用サービス 東北大学利用課題】

- ・ 民間航空機空力弾性設計へのCFD解析技術の適用 三菱航空機株式会社



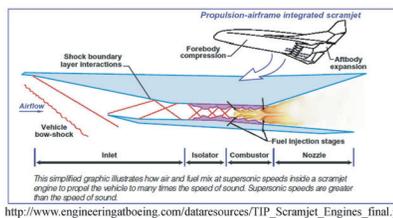
炭化水素系燃料の超音速乱流燃焼の数値シミュレーション



● 研究の背景と目的

スクラムジェットエンジン(超音速燃焼ラムジェットエンジン)

極超音速飛行時に大気を吸い込み、超音速のまま燃焼室内で噴射した燃料と混合・燃焼させることで推力を発生する。大気を酸化剤として用いるため、従来のロケットエンジンに比べてはるかに高い輸送効率で大量のペイロードを運ぶことができる。スクラムジェットエンジンの最大の技術課題は超音速流中での迅速な燃料の混合、着火・燃焼技術の確立であるが、このためには超音速乱流燃焼メカニズムを把握することが重要となる。しかしながら、超音速燃焼実験設備は大規模にならざるを得ず、実験回数や取得データ数が限られるため、実験データのみから超音速燃焼メカニズムの把握は困難である。



各燃料の詳細反応機構

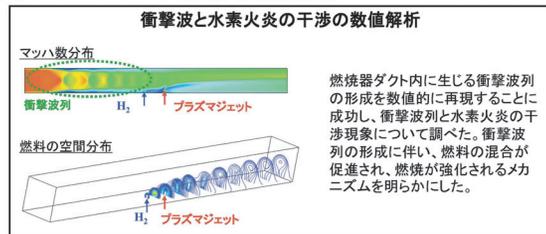
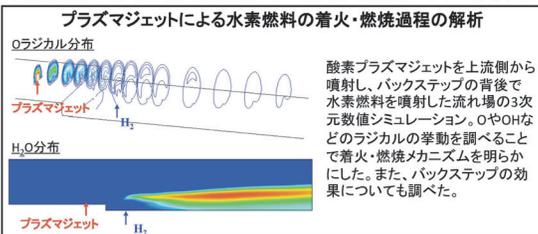
- 水素 (H₂):
化学種数10程度、素反応数30程度
- メタン (CH₄):
化学種数20以上、素反応数100以上
- エチレン (C₂H₄):
化学種数30以上、素反応数200以上

以上の理由で、スクラムジェットエンジン開発には数値シミュレーションが不可欠である。スクラムジェット燃焼器の数値シミュレーションは乱流や衝撃波を精度良く捉えることに加えて、着火・燃焼を解析するために多数の化学種の素反応機構や輸送過程を考慮する必要がある。特に、実用的な燃料である炭化水素系燃料の超音速燃焼を解析できるコードの開発が強く望まれる。しかしながら、炭化水素系燃料の詳細反応機構の解析には膨大な化学種および素反応数を考慮しなければならないため、未だ実現していない。

本研究の目的は、計算コードの並列化や化学反応計算の最適化により、膨大な計算量を必要とする炭化水素系燃料の超音速乱流燃焼の数値シミュレーションを実現し、その詳細な着火・燃焼メカニズムを解明することである。

● これまでの研究例

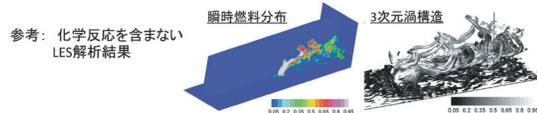
水素燃料の詳細反応機構および2方程式乱流モデルを導入した3次元RANSコードによる超音速燃焼解析

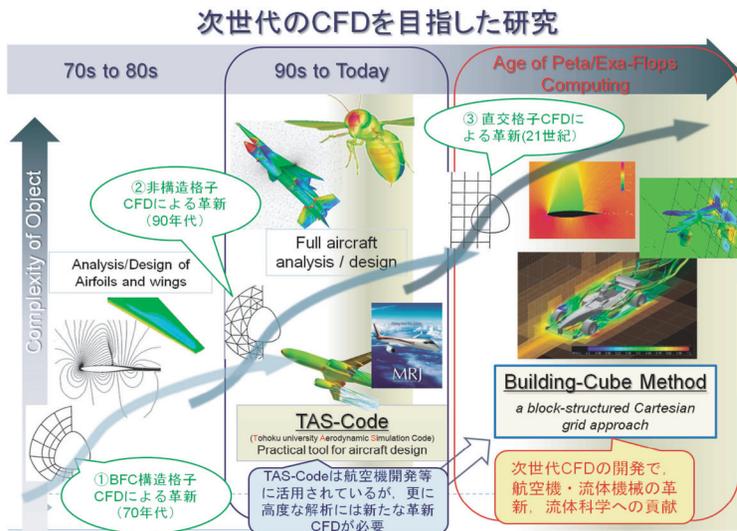


● 研究計画

- ① 水素燃焼反応コードのチューニングによる最適化
既存の水素燃焼反応(9化学種33素反応)を含むコードを並列化することで高速化し、また、反応計算アルゴリズムを最適化する。
- ② 炭化水素系燃料へのコードの拡張
まずは、炭化水素系燃料の中で最も分子量の小さいメタンの詳細反応機構(18化学種101素反応)をコードに組み込む。続いて、スクラムジェットエンジンの燃料として実用的なエチレンの反応機構の導入を試みる。

- ③ 窒素の反応の導入
窒素の反応も導入することで、窒素の解離やNOxの影響まで考慮したより正確な現象の再現を可能にする。
- ④ LES法の導入
LES法の導入により乱流の大規模構造等の非定常解析を可能にし、より深い現象の解明を行う。



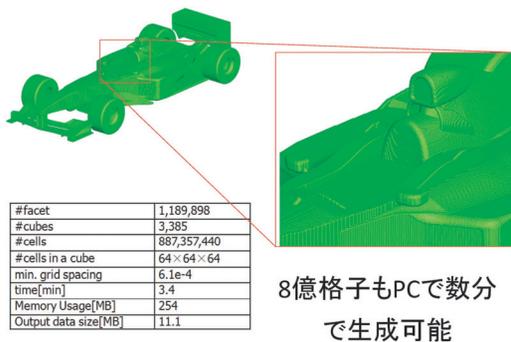


Building-Cube Method
(直交格子積み上げ法)

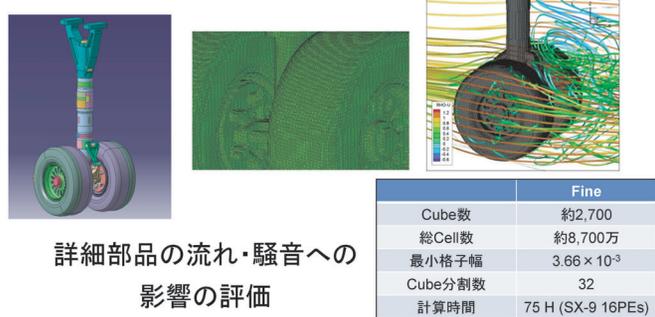
特長

- ◆ 等間隔直交格子法を基礎とした手法
- ◆ 高速・ロバストなメッシュ作成
- ◆ 多数の小領域“Cube”による領域分割
- ◆ 全てのCubeで等価な計算負荷
- ◆ 高解像度解法を容易に構築可能
- ◆ 簡易なデータ構造とアルゴリズム
- ◆ 大規模データの圧縮

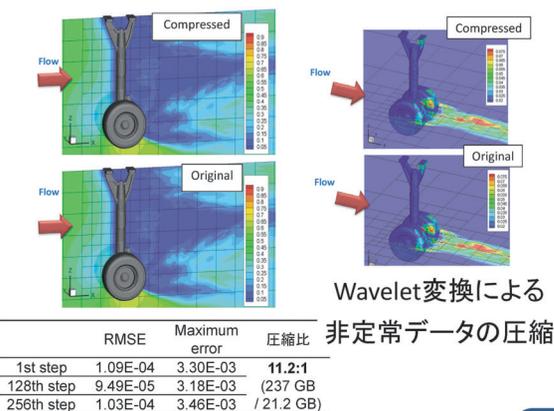
大規模格子生成



大規模流体・音響解析



大規模データ圧縮



平成23年度開発目標

- 流体ソルバーの高速化・実用化に関する研究開発を引き続き行うと共に、大規模スカラー並列計算機を用いて流体ソルバーのペタスケール化を図る
- ペタフロップス級流体計算を可能とする流体ソルバーのアルゴリズム(東北・工, 農工)
 - データ圧縮法を用いた転送時間の短縮に関する研究と大規模データのリモート可視化(東北・工, 農工)
 - 大容量のオンチップキャッシュを考慮したベクトル化技術(東北・サイバー)
 - ペタスケール向けの超並列化技術(東北・サイバー, 名古屋・情基)
 - 広域ベクトル連携計算基盤用ソフトウェア, データ共有技術(東北・サイバー, 大阪・メディア)

学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点公募型共同研究 平成23年度採択課題

3rd Symposium

11-MD04

Joint Usage / Research Center for Interdisciplinary Large-scale Information Infrastructures

研究代表者氏名(所属) 奥田洋司(東京大学 人工物工学研究センター)

研究課題名: マルチパラメータサーベイ型シミュレーションを支えるシステム化技術に関する研究



マルチパラメータサーベイ型シミュレーションの特徴

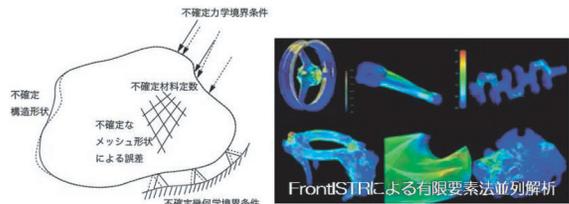
- 不確実性の考慮、多目的設計、計算結果の特性分類等の大規模分散シミュレーション
- メッシュ生成、計算の実行計画、統計処理、可視化処理等の多段階かつ試行錯誤的な手続き
- 多様なソフトウェアや計算機環境の混在

本研究の目的

マルチパラメータサーベイ型のシミュレーションにおける数値計算、データ処理、情報システム関連処理を支援する統合クラウドシステムを開発し、研究者の負担を軽減すると共に、ヒューマンエラー低減化と研究開発の品質、継承性の向上に資する。

内容

- 大学等で開発、公開されているアプリおよび計算センターで導入されている市販アプリを中心に、プリ・ポスト処理を含めた統合的なWebポータル化、SaaS化を行う。
- 複数拠点にまたがるネットワーク上においてシステムを構築する。
- これらアプリの環境設定や利用方法、利用手順を効率的に支援できる『マルチパラメータサーベイ型シミュレーション用統合クラウドシステム』を構築する。



摂動確率有限要素法の並列分散環境への適用
 - 物性値、形状等の不確実性を確率変数として扱う
 - 確率変数 (N個) を期待値まわりでテイラー展開
 - N個の方程式系を解く

図1 マルチパラメータサーベイ型シミュレーションの例：不確実性を考慮した構造設計、使用アプリケーション FrontSTR

拠点・運用アプリケーションの種別(2011年度)

- 北大 : NASTRAN, ANSYS, FLUENT
- 東北大 : 航空、伝熱沸騰
- 東大 : FrontSTR(構造)、FaSTAR(流体)
- 東工大 : 他大学の各種ソフトウェア
- 名大 : FaSTAR(流体)、LS-DYNA, StarCCM
- 京都 : KVS(可視化)、伝熱沸騰
- 阪大 : FrontFlowBlue (流体)
- 九大 : 回転系流体

具体的な計算実施内は、「不確実性を考慮した構造設計」、「実風洞装置と同レベルのデータ生産性、品質を有する数値風洞」、「沸騰などの発生型気液混合流の動態予測」、「実生体の複雑な形状をそのまま取り入れた構造、流体等の物理計算」など

研究計画

- 2011年度
- 1) 東北大、東工大、九大を加え、8拠点に共同研究者の各種アプリケーションを拡大・整備する。
 - 2) RCMシステムソフトウェア(*)を用いて、8大学のアプリケーションを統合的にSaaS化する。
 - 3) 実利用を進めつつ、学際領域=異分野領域間においてアプリケーションの相互利用および活発な意見交換を行う場を設け、学際研究の促進を図る。
 - 4) テスト利用者による課題の抽出、客観的な評価を行う。
- (*)RCM: R&D Chain Management System Software

- 2012年度以降
- システム連携機能の強化**
 最適化エンジンやデータマイニング処理の連携実績およびそれら機能のインテリジェント化を進める。
- 個別研究の推進**
 各アプリに基づく研究テーマの推進に必要な機能追加、支援を実施し、実用段階でのハードルを技術面でクリアする。

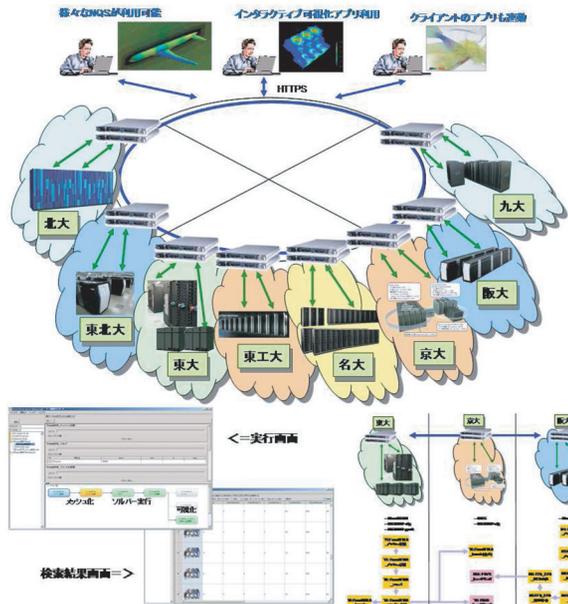


図2 『マルチパラメータサーベイ型シミュレーション用統合クラウドシステム』概念図

期待される効果

- 大学や研究機関で開発、公開されているアプリの普及が飛躍的に向上する。また、実験研究、広くは民間における研究開発全般にも大きく貢献する。
- 解析結果が自動的にデータベース化される機構を開発することで、結果の再参照を通じた研究開発の信頼性と継承性の向上が期待される。

学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 公募型共同研究 平成23年度採択課題

3rd Symposium

11-MD05

Joint Usage / Research Center for Interdisciplinary Large-scale Information Infrastructures

松岡 浩(理化学研究所計算科学研究機構)

計測融合オペレーション実現のための 大規模計算機空気冷却風速場の実時間解析



——計測融合オペレーションによる「計算機と冷却空調電源系にやさしい過渡変化の創出」をめざして——

メンバー:

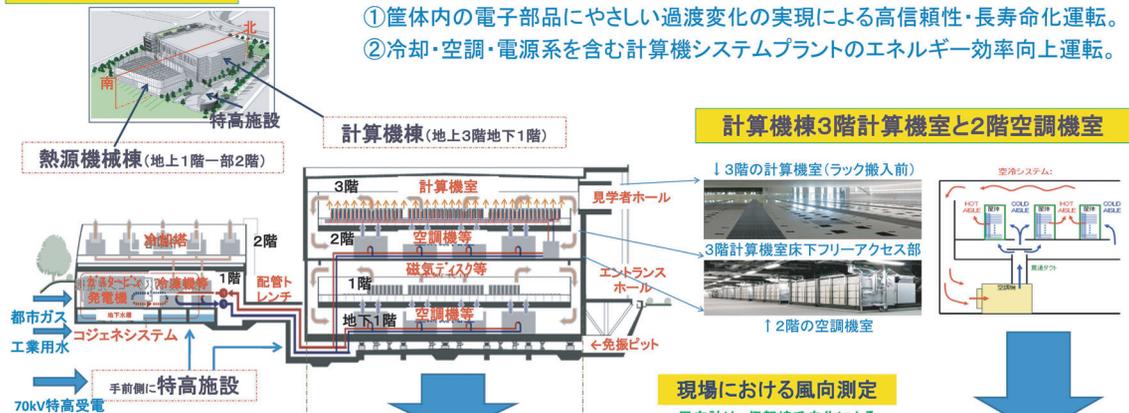
松岡 浩(理研)、横川 三津夫(理研)、峯尾 真一(理研)、瀧塚 博之(理研)、伊賀崎 誠(理研)、渡辺 正(原子力機構)、板倉 憲一(海洋機構)、
福田 正大(計算科学振興財団)、菊池 範子(カストシステム/東北大)、
小林 広明(東北大)、江川 隆輔(東北大)、竹村 治雄(阪大)、菊池 誠(阪大)、東田 学(阪大)、青柳 睦(九大)、高見 利也(九大)、小林 泰三(九大)

研究目的及び具体的な達成目標

格子ガス法超並列計算手法により、大規模計算機空気冷却風速場の実時間シミュレーションの実現性を示す。

- ①“京コンピュータ”施設を対象にNS方程式手法との比較計算を行い、定常状態シミュレーションの妥当性を確認。
- ②異なる定常状態間の過渡変化を実時間計算できる計算機能力が容易に確保可能な規模であることを試算。
- ③計算機センターの異常時対応オペレーションのため上記計算機能力の広域連携環境による確保法を検討。

施設の南北断面図



☆“計測融合オペレーションシステム”が目指すもの

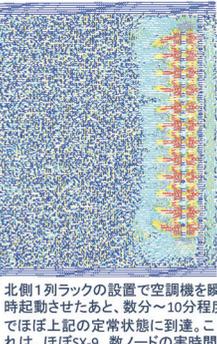
- ①筐体内の電子部品にやさしい過渡変化の実現による高信頼性・長寿命化運転。
- ②冷却・空調・電源系を含む計算機システムプラントのエネルギー効率向上運転。

現場における風速・温度測定



格子ガス法3次元計算

(3階床上1.2mの平面図)



現場における風向測定

風向計は、伊賀崎氏自作による



格子ガス法過渡変化シミュレーション

スパコンの広域連携環境によるシミュレーション実験(拠点との協力)

格子ガス法3次元計算

(ラック位置での2,3階立面図)



北側1列ラックの設置で空調機を瞬時起動させたあと、数分~10分程度でほぼ上記の定常状態に到達。これは、ほぼSX-9、数ノードの実時間。

“計測融合オペレーション”の必要性

ベタフロップスを超える超並列高速計算機システムでは、通常数10メガワット以上の巨大な発熱を伴うばかりでなく、その発熱分布は広範囲に広がり、計算機システムのジョブスケジューラによる計算ノードの割当て・解除、各種プログラムのエラー発生、計算機ハードウェアの故障のほか、これらに伴う筐体ファン自動オンオフや、故障の修理保守後の起動、さらには、計算機システムの冷却・空調・電源系におけるトラブル発生で予測できない急速な形状変化をする。他方、従来型の冷却制御は、液冷システム、空冷システムともに、計算機冷却場の入口温度と入口流量を確保し、各筐体では、温度や湿度がある制限値を超えた場合に電源オフにすることで計算ボード等の電子装置の保護を行っている。今後の大規模計算機システムにおいては、上述のとおり、異常な急速過渡変化の過程が多様化するため、従来の制御方式では、定格温度や定格湿度から大きなオーバーシュートやアンダーシュートが生じる可能性が高い。これらは、制限値に達すれば、稼働率の低下、達しない場合でも、電子部品の信頼性や寿命の低下を招く。このため、各種センサー情報とシミュレーションから過渡変化の全体像を的確に把握し、冷却システムの制御を適応的に実行する“計測融合オペレーション”を可能にする技術の構築がきわめて重要!

JHPCN

学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 第3回シンポジウム

Japan High Performance Computing and Networking plus Large-scale Data Analyzing and Information Systems

2011年7月14日, 15日

THE GRAND HALL (品川)

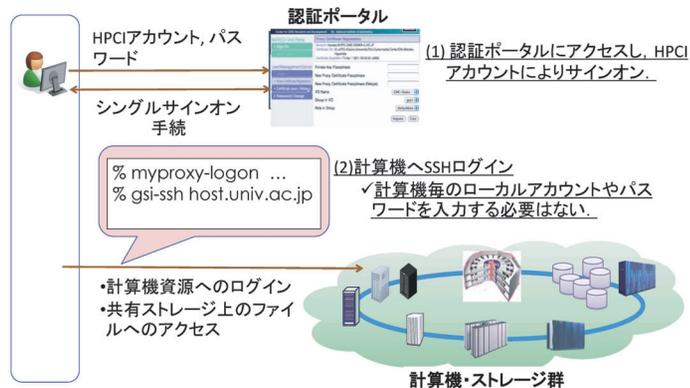


■目的

ネットワーク上に分散した様々な研究データを融合して処理することにより、未知の問題解決や科学的発見を行う新たな研究手法(e-サイエンス)が注目されている。e-サイエンスを実現するためには、ネットワーク上に分散した様々なデータを連携し、かつ高性能計算機群を用いてこれらのデータを高速に処理するためのグリッド基盤が必要となる。本研究では、我が国におけるe-サイエンスを活用した研究を促進することを旨とし、学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点に設置された計算機、およびこれらを接続する学術情報ネットワークであるSINET4から構成される実用的なグリッド基盤を構築・運用するための技術に関する研究を行う。平成23年度は特に認証基盤に焦点をあて、平成22年度までに行った研究の成果を活用し、本格的なグリッド認証基盤運用に向けた実証実験を行う。また、本研究の成果を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)の詳細仕様策定に活用する。

■目標とする認証基盤

- ✓ Grid Security Infrastructure (GSI)による計算機群へのシングルサインオンの実現。(ユーザは、認証ポータルにアクセスしてサインオンするだけで、計算機群へSSHログインできる。)
- ✓ Shibboleth認証連携技術による情報基盤センター認証連携の実現。(ユーザは、どこか一つの情報基盤センターにアカウントを持てばよい。)

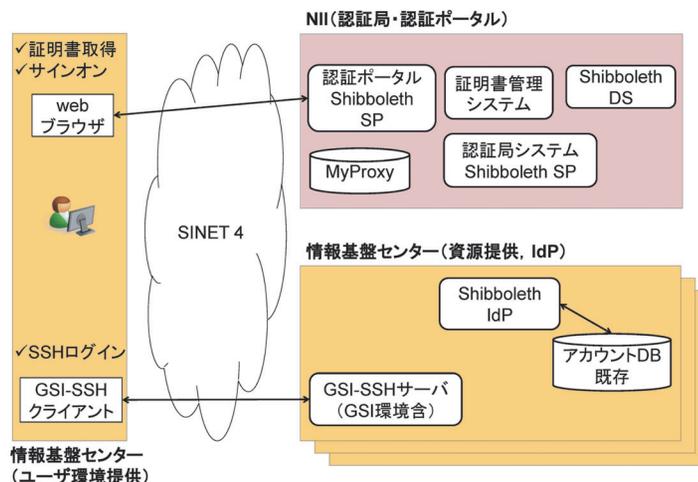


■計画

- ✓ NIIおよび9大学情報基盤センターからなる認証基盤テストベッド構築。
- ✓ テストベッドの運用性およびスケラビリティに関する検証(HPCIを想定した実証実験)

■参加機関

北海道大学, 東北大学, 筑波大学, 東京大学, 東京工業大学, 名古屋大学, 京都大学, 大阪大学, 九州大学, 国立情報学研究所



三菱航空機株式会社

先端的大規模計算利用サービス

民間航空機空力弾性設計へのCFD解析技術の適用

成果

- 三菱リージョナルジェット(MRJ)の設計に高精度CFDソルバーを利用した航空機全機形態の大規模フラッタ解析を適用。(東北大学SX-9を利用)
- 飛行安全上重要となる遷音速フラッタ特性を高い精度で解析予測することが可能となり、より踏み込んだ軽量化設計を実現。

□ フラッタとは？

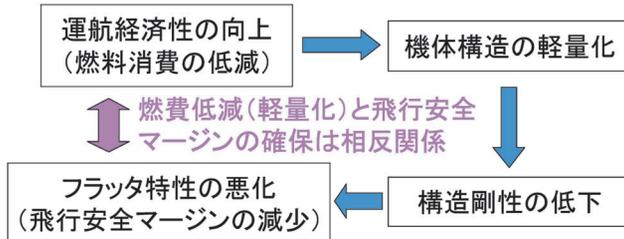
- 飛行中の柔軟構造体に作用する3つの力(空気力、慣性力、弾性復元力)が連成して起こる自励振動現象。
- フラッタ発生による航空機事故は過去多数報告されており、15%マージンを含めた運用領域内でフラッタ振動が起きないことを解析・風洞試験・飛行試験で証明する必要あり。



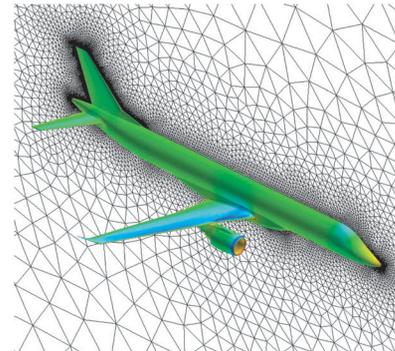
三菱リージョナルジェット(MRJ)

<http://www.mrj-japan.com/j/>

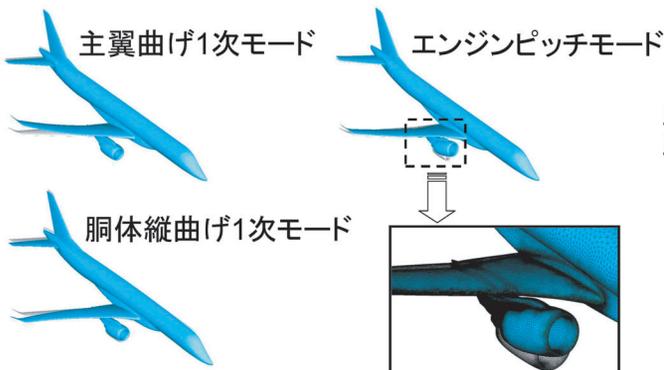
□ 高精度フラッタ解析の重要性



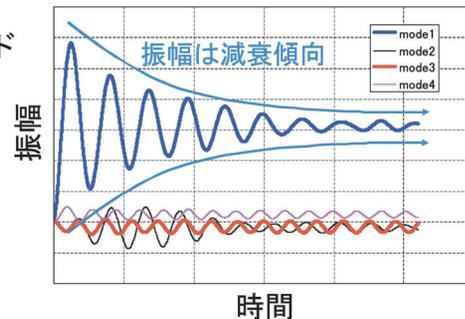
「飛行安全の確保」と「軽量化設計」の両立には、精度の高いフラッタ解析技術が求められる。



解析格子と定常圧力分布



全機形態 主要振動モード形状



飛行中の振動変位履歴

全機形態 CFDフラッタ解析結果

白

[解 説]

大判カラープリンタの利用方法

共同研究支援係

1. はじめに

本センターでは、大判カラープリンタ（ヒューレットパッカード社、DesignJetT1200ps）を設置しており、A0サイズまでのポスターなどを2400×1200dpiの高品質で出力することができます。この大判カラープリンタは、プリントサーバに接続されており、プリントサーバに印刷ファイルを転送することで、お手持ちのPowerPointスライドなどの文書や図表をA0サイズまで拡大して出力することが可能になります。

この大判カラープリンタは、サイバーサイエンスセンター本館1階の利用相談室にあります。ご利用には、プリントサーバにログインするための利用者番号と、印刷ファイルを転送するためのUSBメモリをご準備ください。利用時間は平日9時～21時です。

本稿では、作成した文章や図表を大判カラープリンタに出力するための「印刷ファイルの作成方法」と、「大判カラープリンタに印刷する方法」についてWindows7での使用を例にご紹介します。

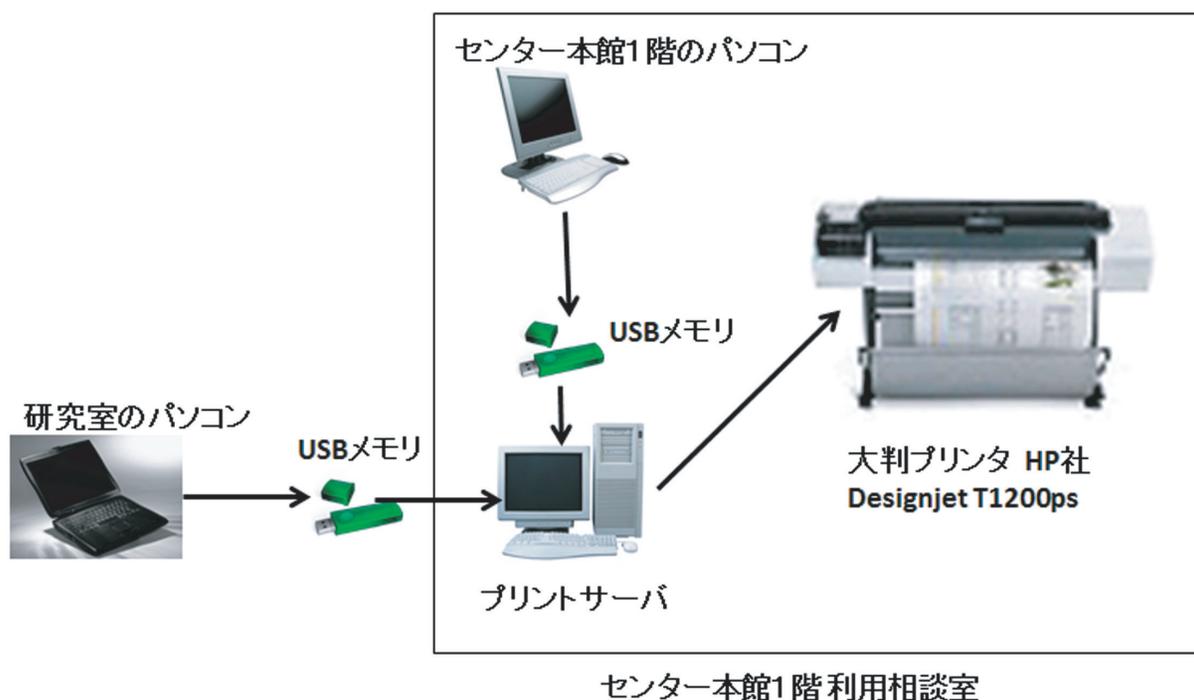


図 1 大判カラープリンタシステムの構成

2. 印刷ファイルを作成する方法

(1) 本センターの利用相談室のパソコンで作成する場合

本センターのパソコンでは、Microsoft Office や Adobe Reader を利用することができます。パソコンには、大判カラープリンタ用の印刷ドライバが導入済みですので、ドライバを利用者が準備しなくても、(3)の説明に従って印刷ファイルを作成できます。

(2) 研究室のパソコンで印刷ファイルを作成する場合

研究室のパソコンで印刷ファイルを作成するには、下記のようにしてプリンタドライバを導入します。

- ① 次の URL
<http://h20566.www2.hp.com/portal/site/hpsc/public/psi/swdHome/?sp4ts.oid=3942001>
に接続します。
- ② 「オペレーティングシステム」から「Microsoft windows 7(32bit)」を選択し、「ダウンロード」の中の「ドライバー」から「HP Designjet T1200ps/T770(PostScript アップグレード)シリーズ PostScript ドライバー (32bit)」の項目のダウンロードボタンをクリックしファイルをダウンロードします
- ③ ダウンロードしたファイルを適切なディレクトリで実行します。
(自動的に解凍されてファイルが出来ます。)
- ④ Windows のスタート→コントロールパネル→ハードウェアとサウンドから「プリンタの追加」を選びます。
- ⑤ プリンタの追加ウィザード(図 2)が表示されます。「ローカルプリンタを追加します」の項目をクリックします。

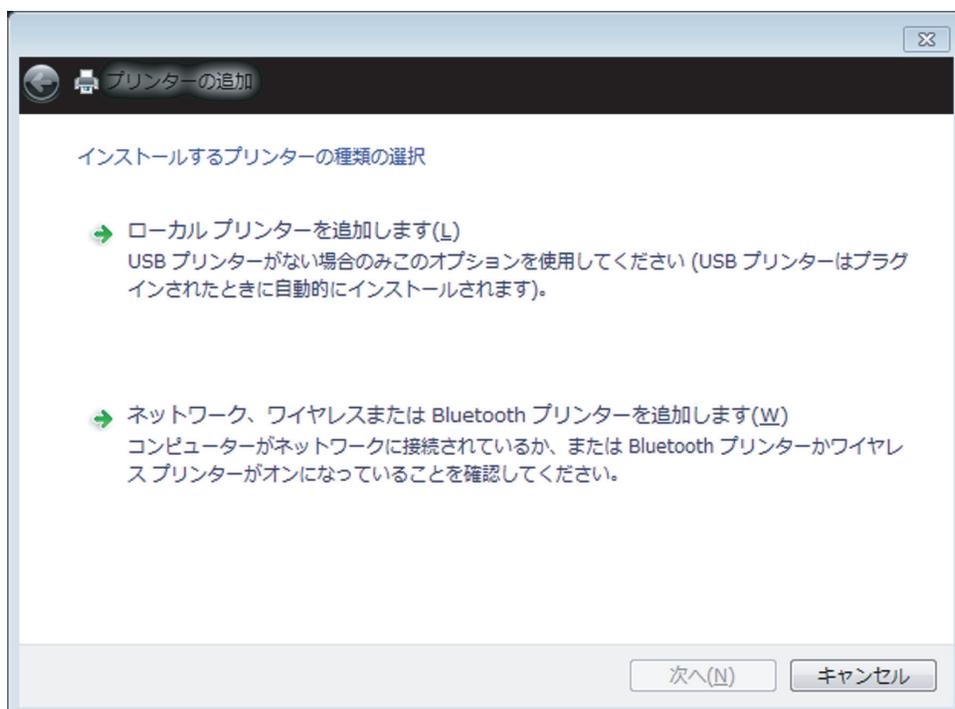


図 2 プリンタの追加ウィザード画面

「プリンターポートの選択」で、「既存のポートを使用」を「FILE:ファイルへ出力」を選択し、「次へ」をクリックします（図 3）。

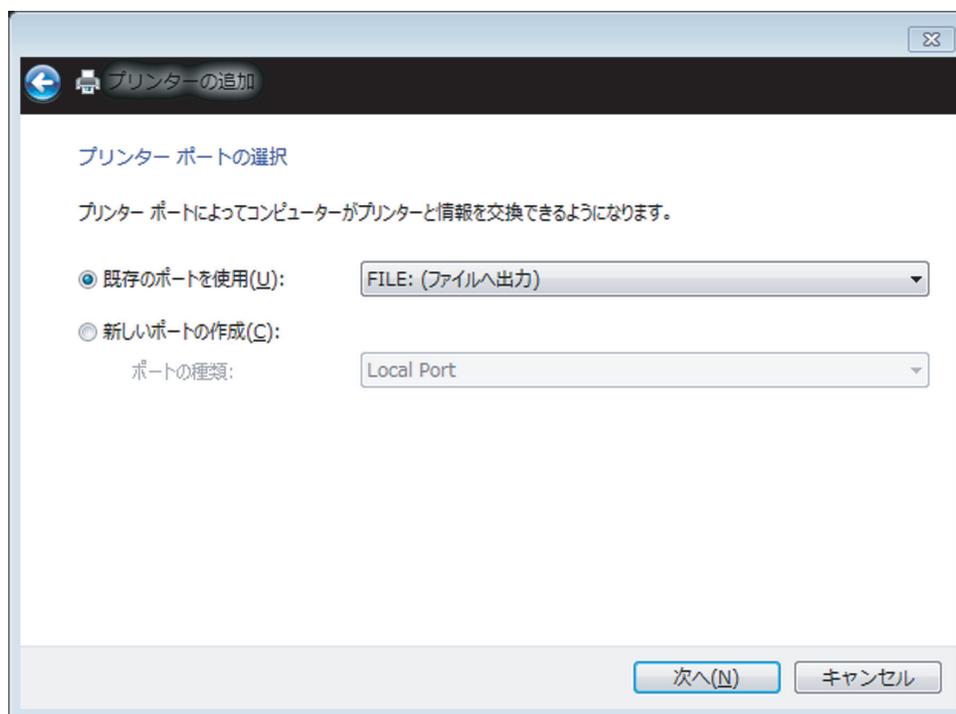


図 3 プリンターポートの選択画面

「プリンタードライバのインストール」で「ディスク使用」をクリックします（図 4）。

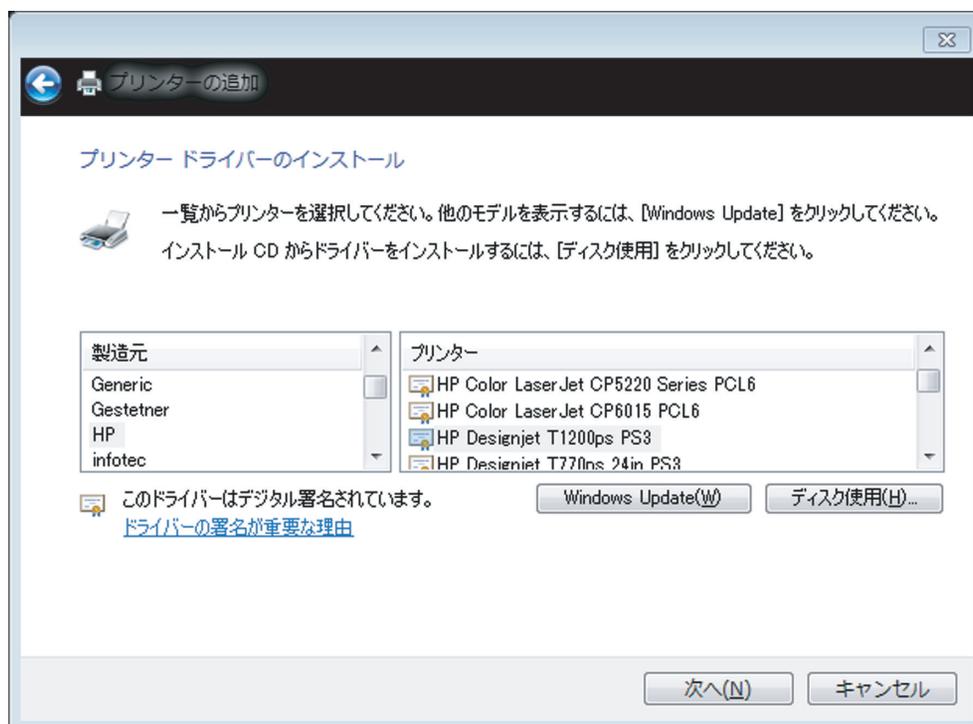


図 4 プリンタードライバのインストール画面

「フロッピーディスクからインストール」から「参照」をクリックします（図 5）。



図 5 フロッピーディスクからインストール画面

「ファイルの場所」が表示されますので、先程解凍したファイルがあるディレクトリを選び、表示されたファイルを選んで、「開く」をクリックします（図 6）。

「フロッピーディスクからインストール」画面に戻るので、「OK」をクリックします。

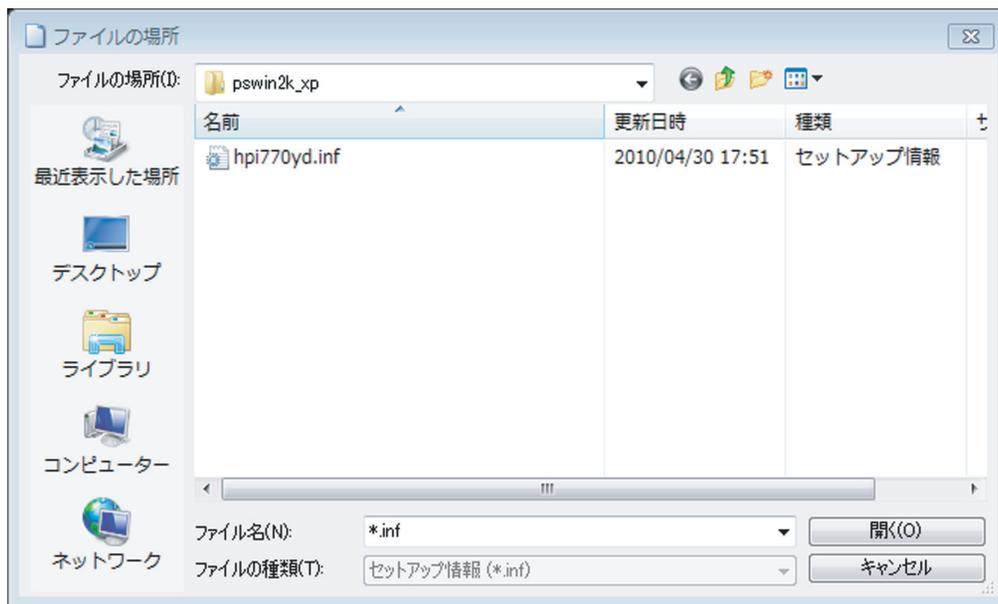


図 6 ダウンロードしたファイルの選択画面

プリンタの一覧が表示されますので、「HP Designjet T1200ps PS3」を選び、「次へ」をクリックします（図 7）。

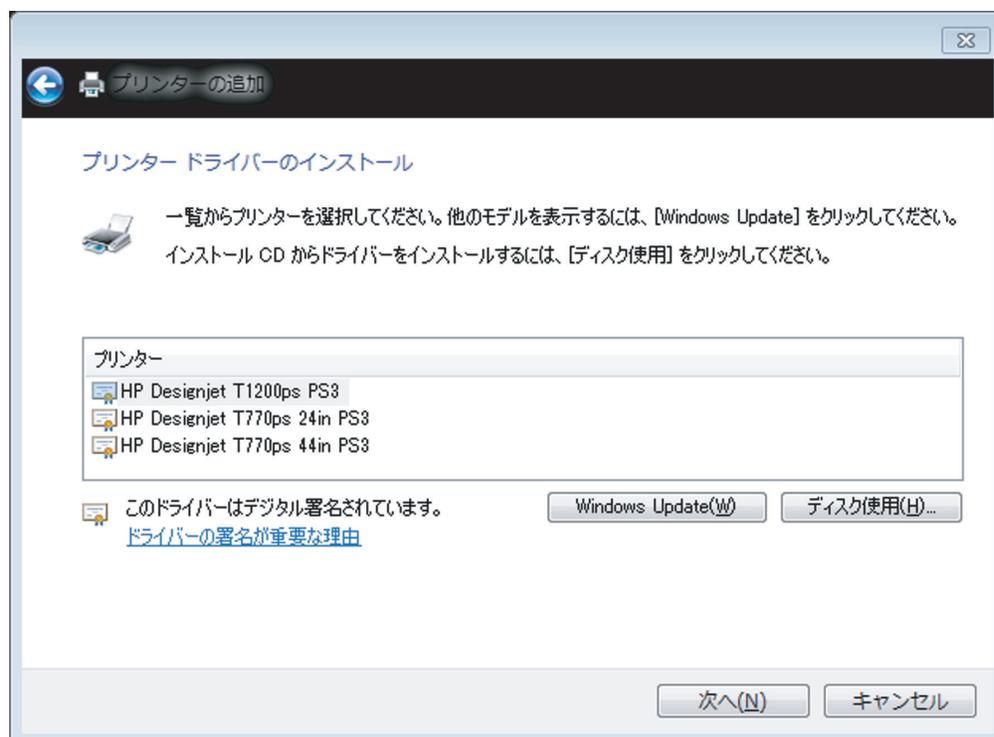


図 7 インストールするプリンタの選択画面

登録する「プリンター名」の指定は、表示されている名前を変更したいときは指定したい「プリンター名」を入力してください。「次へ」をクリックするとインストールが開始します（図 8）。

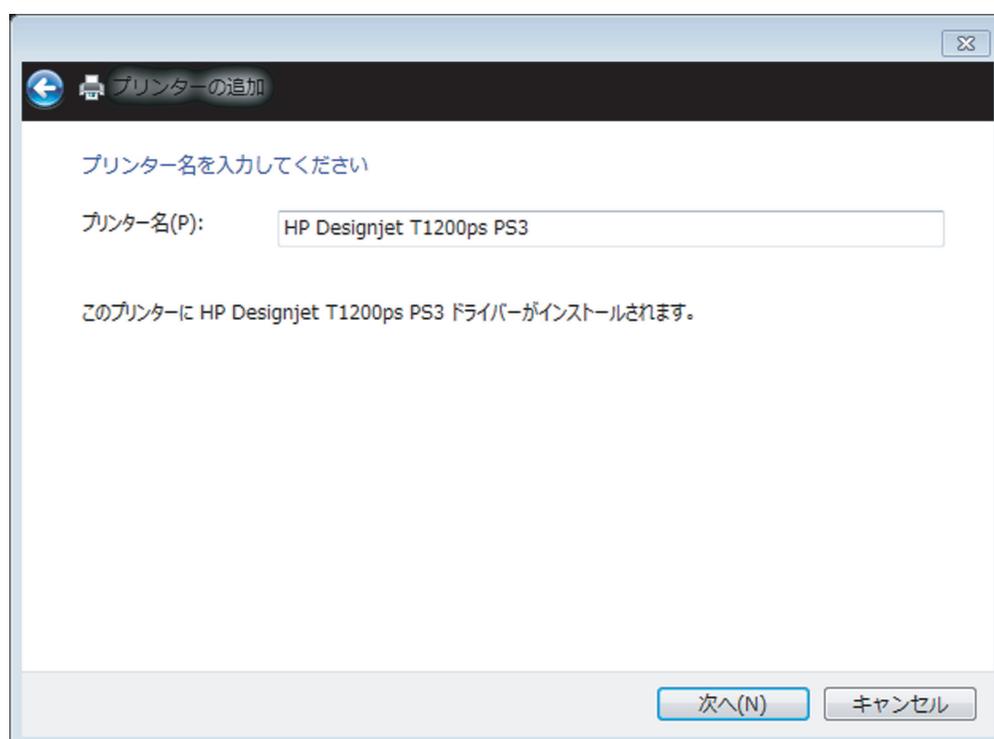


図 8 プリンター名入力画面

「通常使うプリンターに設定する」のチェックがされていないことを確認し、「完了」をクリックします（図 9）。

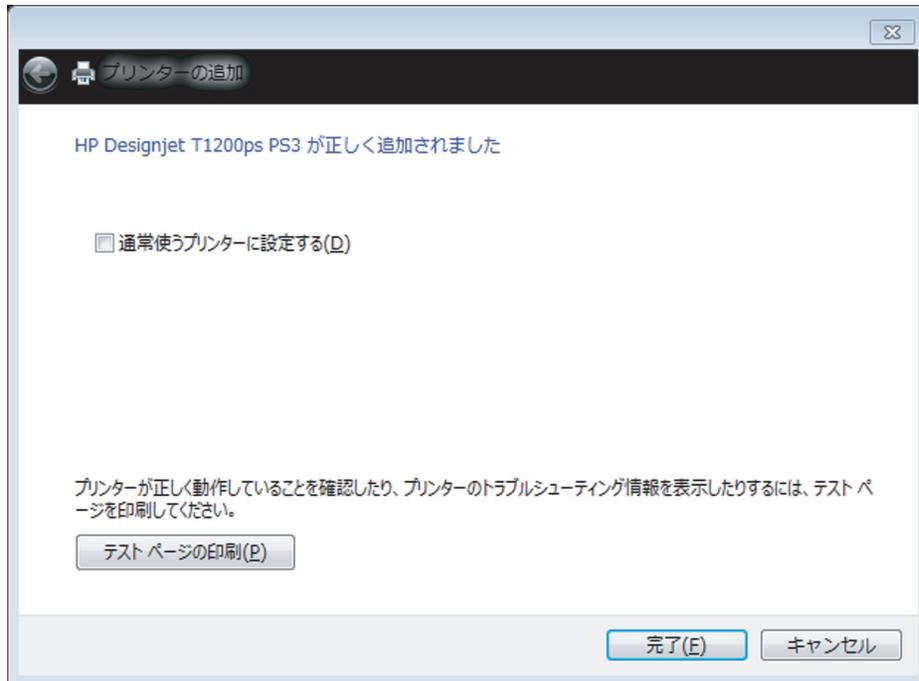


図 9 インストール終了後の画面

以上で設定は終了です。「デバイスとプリンター」ウィンドウにアイコンが追加されていれば、インストールの完了です。正しく追加されていれば解凍したファイルを削除しても構いません（図 10）。



図 10 プリンタが追加されていることの確認画面

(3) 印刷ファイルを作成する

Microsoft Word や Microsoft PowerPoint などの原稿を開き、上部のメニューバーの「ファイル」から「印刷」を選びます。

印刷ウィンドウにある「プリンターの選択」の中から、「HP Designjet T1200ps PS3」を選択します。設定確認のため、あるいは、印刷する大きさを変更するために「詳細設定」をクリックします（図 11）。

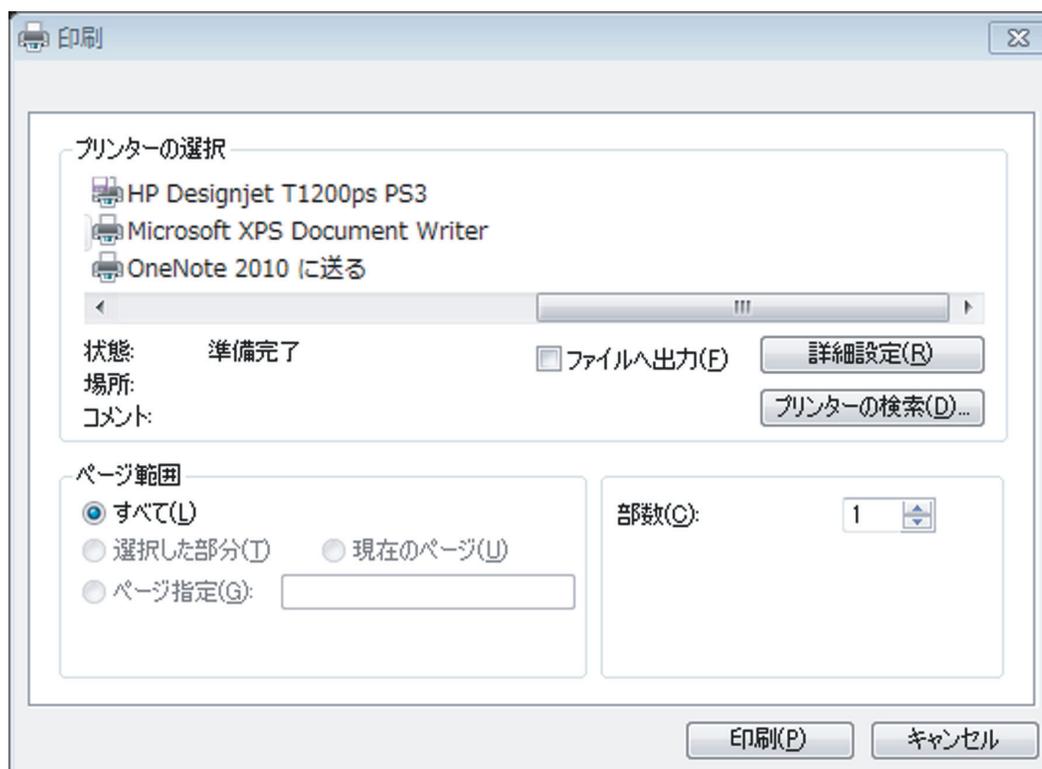


図 11 プリンター選択画面

「用紙/品質」の「文章サイズ」ではアプリケーションで作成した原稿サイズを選択します（図12）。

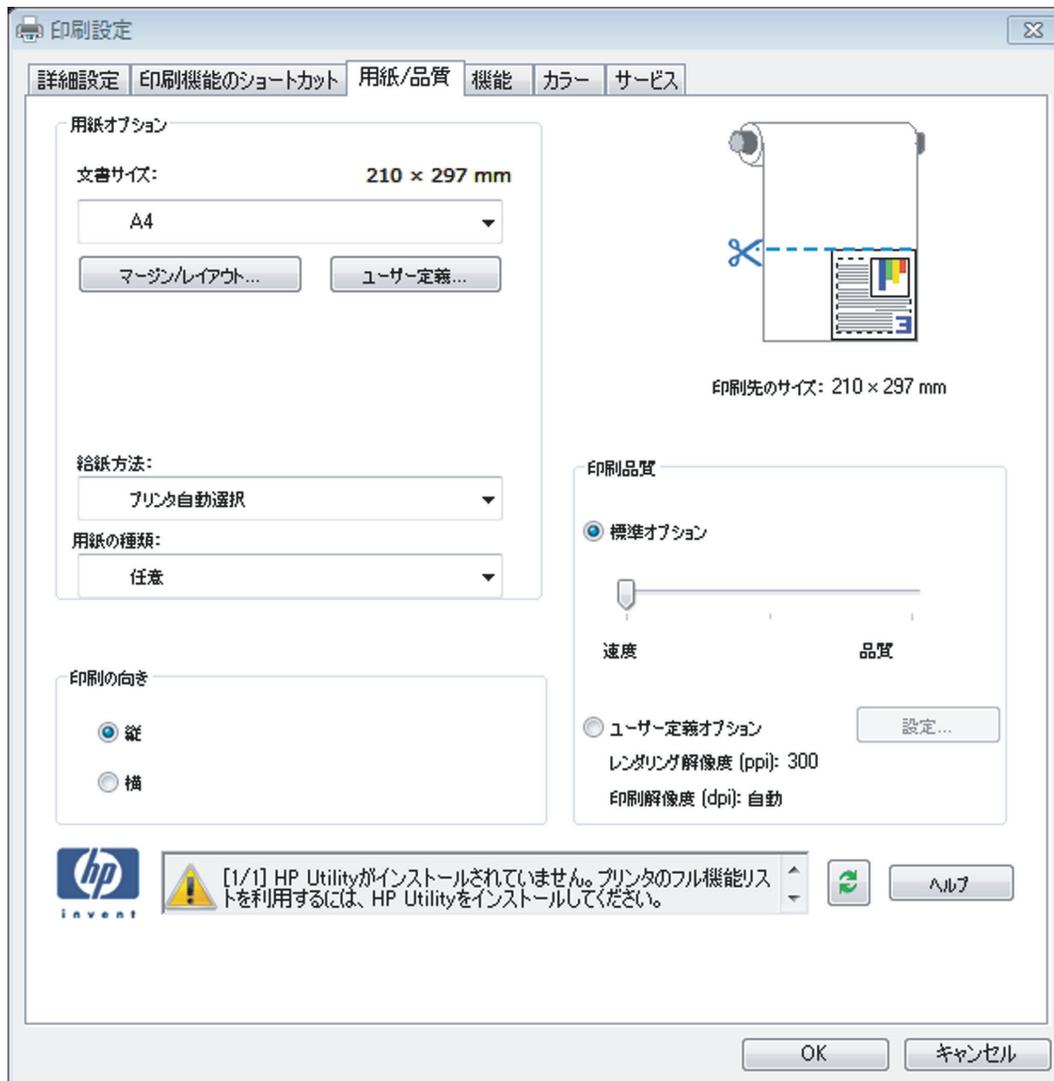


図 12 原稿サイズ設定画面

原稿のサイズと印刷する用紙サイズが違う場合は、「機能」ウィンドウの「サイズ変更オプション」の「文章を印刷する用紙」に、出力したいサイズを選択します。右側の図の「印刷先のサイズ」が指定したサイズになります。最大 A0 サイズまで指定が可能です（図 13）。

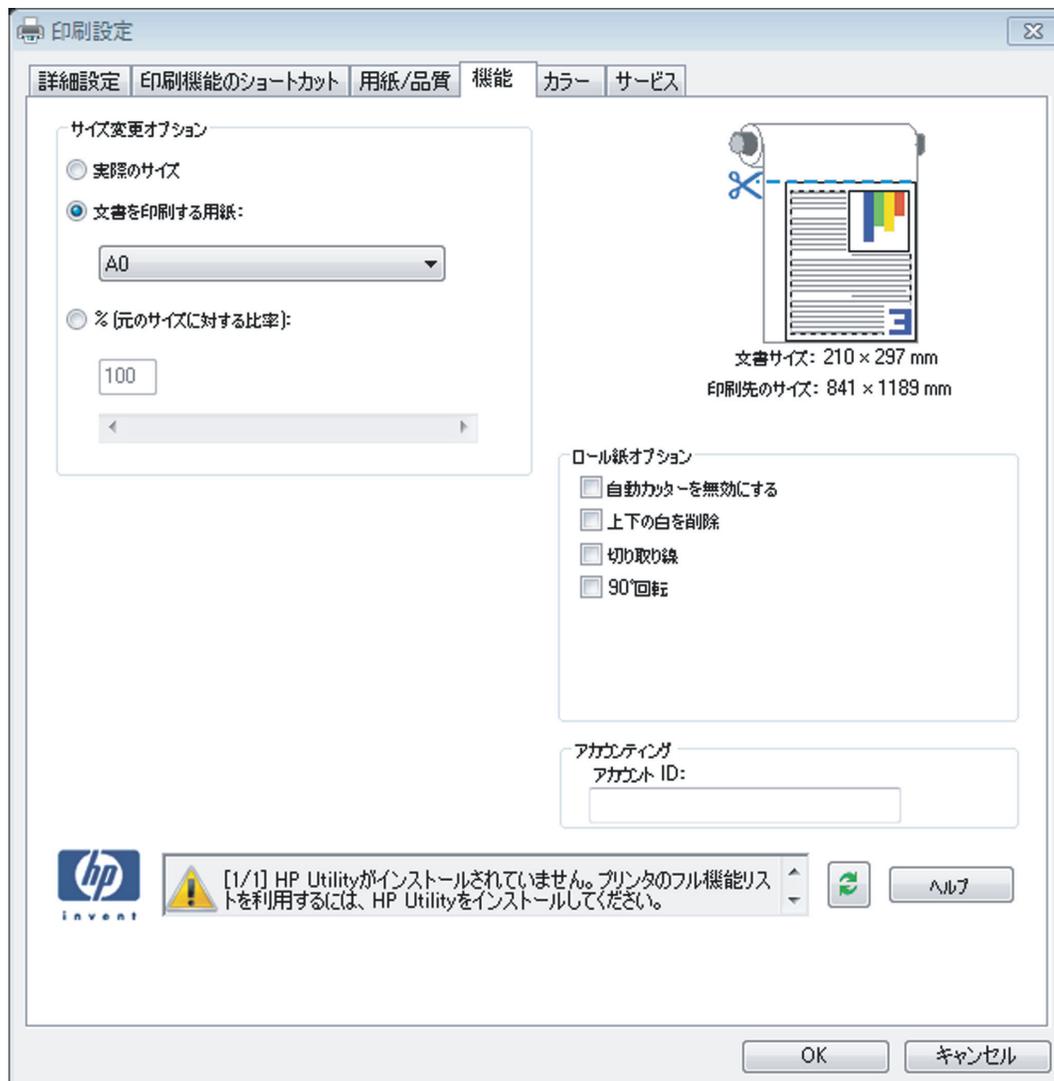


図 13 印刷サイズの変更画面

すべての設定が終わったら「OK」をクリックします。印刷ウィンドウ（図 11）に戻るので、「印刷」をクリックします。

「ファイルへ出力」ウィンドウが表示されますので、USB メモリを選択しファイル名を入力して、「OK」をクリックすると印刷ファイルが作成されます。

3. 印刷ファイルの大判カラープリンタでの印刷方法

印刷ファイルの印刷は、利用相談室にあるプリントサーバで行います。

印刷方法

プリントサーバに利用者番号とパスワードを入力し、プリントサーバにログインします。プリントサーバ本体の前面にあるカバーの中にある USB ポートに、USB メモリを入れます。デスクトップ上に USB メモリのアイコンが表示されたことを確認します (図 14)。

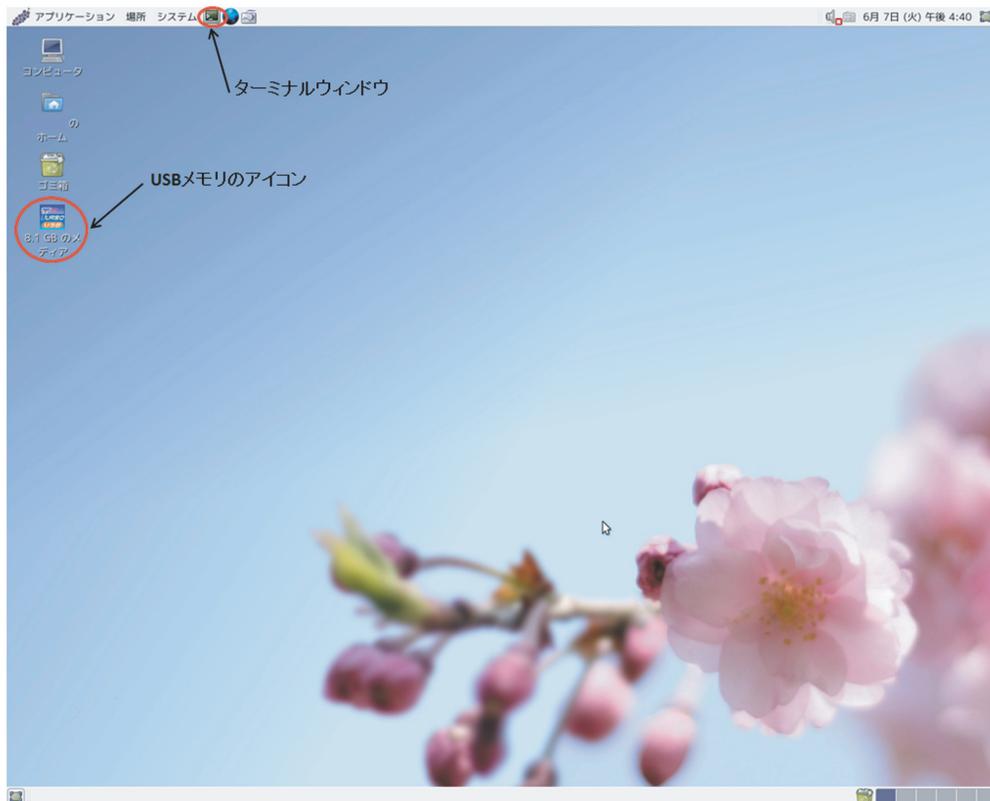


図 14 プリントサーバのデスクトップ

画面上部にあるターミナルウィンドウ (画面マーク) をクリックして開き、ターミナルウィンドウから印刷コマンドを入力します。コマンドの形式は

`lpr` 印刷ファイル名

です。「lpr」と「印刷ファイル名」の間には半角スペースが入ります。

はじめに、「lpr」までを入力します。

次にデスクトップの USB メモリのアイコンをクリックして USB メモリウィンドウを開き、印刷ファイルを USB メモリウィンドウから、コマンドを入力したターミナルウィンドウにドラッグすると、「lpr」の後にファイル名が入力されます (図 15)。入力した内容を確認し、キーボードの **Enter** を押すと印刷が始まります。

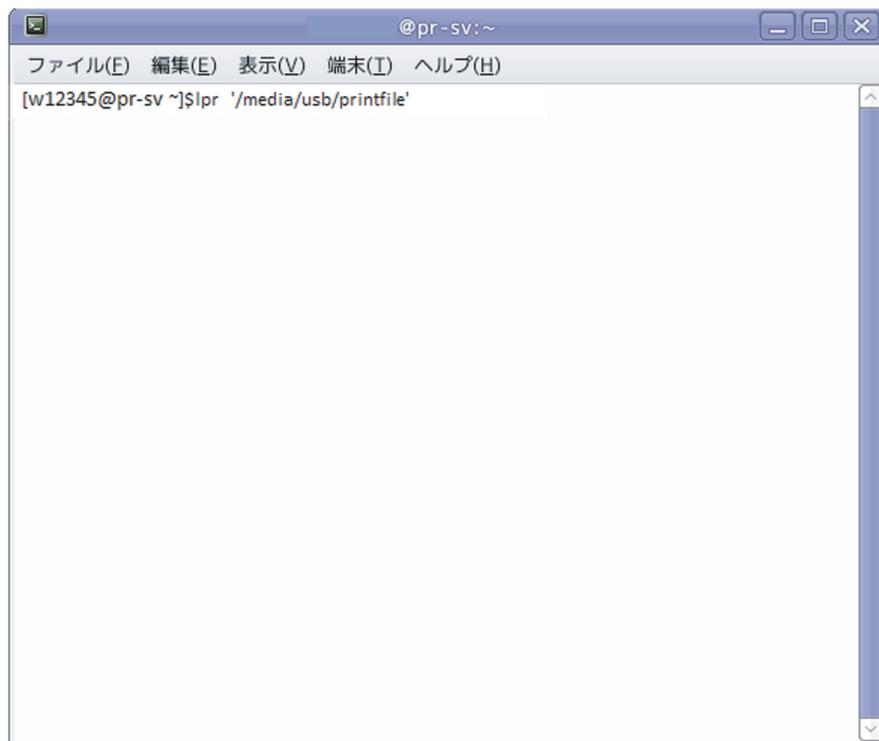


図 15 印刷ファイル名入力後のターミナルウィンドウ

プリンタは、印刷が終わると自動的にカッターで紙を切り取り、用紙受けに紙を排出します。印刷を途中で取り消したいときは、プリンタの操作部にあるキャンセルボタンで取り消せます。

大判カラープリンタの出力負担経費は 1 枚につき 600 円としています。また、プリントサーバの利用者ディレクトリの下に印刷ファイルを保存しておく、ファイル負担経費の対象となります。不要な印刷ファイルがある場合は削除するようにしましょう。

4. おわりに

本稿では、文書、図表を拡大して印刷する方法を説明しました。さらに詳しい説明をご覧になりたい方は、利用相談室のプリントサーバのそばに置いてあるマニュアル「大判カラープリンタ出力操作説明書」をご覧ください。

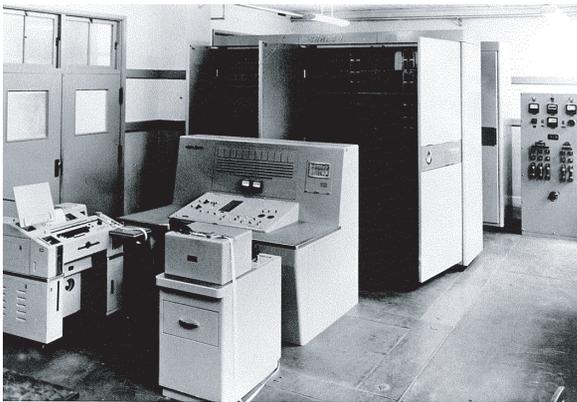
現在センターにある大判カラープリンタは以前提供していたプリンタよりも高画質で印刷することができますので、ぜひご利用ください。

[展示室便り①]

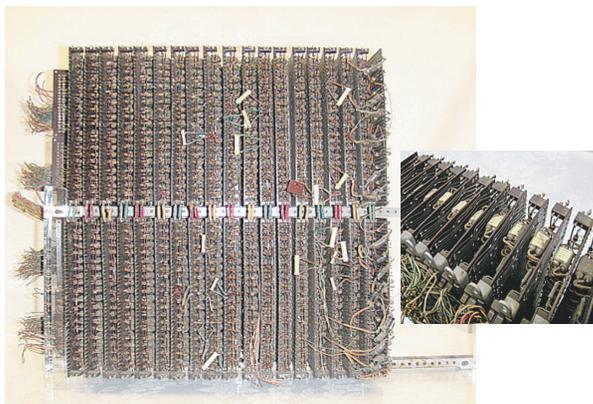
サイバーサイエンスセンターの1階にある展示室は、2010年に情報処理学会分散コンピュータ博物館として認定されました。SENAC vol.43 No.3 (2010-7)では、展示室を紹介しました。これから何回かにわたり主な展示品についての紹介をしていきます。

SENAC-1

1回目は、国産計算機の黎明期、1958年（昭和33年）に東北大学電気通信研究所・大泉充朗教授（初代大型計算機センター長）と日本電気株式会社との間で共同開発されたパラメトロン式計算機 SENAC-1 です。SENAC-1 は SENDai Automatic Computer ・1 から命名されました。ちなみに本誌名の SENAC は、この名に由来しております。



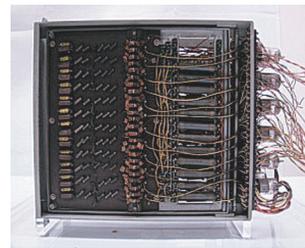
展示品 1 SENAC-1 全景の写真



展示品 2 パラメトロン演算ユニット

展示室には SENAC-1 の当時の写真、計算機の部品、利用者に向けて作られた印刷物などが展示されています。その中で展示品 1 は、当時電気通信研究所内の研究室に設置されたときの写真です。展示品 2 は、その中に組み込まれていたパラメトロン演算ユニット、展示品 3 は電源ユニットです。

展示品「SENAC-1 の概説」には、SENAC-1 の開発目的、設計の基本方針、諸元について記載されていまして一部を紹介いたします。ちなみにこの冊子は、全学の利用希望者向けの講演会で使われたようです。



展示品 3 電源ユニット

(1) 開発の目的

「*SENAC-1* は本学の学部、研究所の多くの研究において最も大きな隘路となっている膨大な数値計算を急速に遂行して、それら諸研究の円滑な発展を目的として計画されたものである。」とあり、研究としての計算機の開発だけではなく、当初から学内利用を想定していたことが伺えます。

(2) 設計の基本方針

SENAC-1 を設計するに当たっての基本方針と特徴が記載されています。ここでは基本方針のみ紹介いたします。その内容は、現在の方針にも通じています。

- (i) 本機は多種多様の計算に使用されるのでできるだけ何人にも使い易いようにする。
- (ii) パラメトロンは真空管、トランジスターその他の電子部品に比して信頼度は高いが演算速度が若干おそいので、回路設計によってこれを補うようにする。
- (iii) 計算機が安定して動作するように信頼度の高いものをつくる。
- (iv) 将来計算機の機能と増設が必要となる時が必ずおきると想定されるもので、これが容易であるようにする。

(3) 諸元

文中に「比較のため国産リレー計算機として代表的な *FACOM128* 及び真空管式電子計算機である大型 *UNIVAC* 計算機の性能を併記する。」とあり、読みにくいところもありますが原紙で紹介します(次頁)。当時としても *SENAC-1* のレベルの高さが伺えます。

公開は、昭和33年11月に東京大学等学外のコンピュータ関係者、文部省そしてパラメトロン発明者の後藤英一氏を招待して行われたようです。

開発は、やはり黎明期であり機器の調整にはかなり難航したようです。最後に、開発メンバーの体調について大泉充朗先生が書かれたものを紹介いたします。

・・・更に困った事にはこのコンピュータグループに疲労の色が濃くなって来たのである。野口正一氏*がお弁当に水をかけて流し込んで食べている。・・・日本電気 *KK* の有力な一人が失言語になり、話が出来なくなった。・・・

*文中の野口正一氏は、当時大学院生で、六代目の東北大学大型計算機センター長(現サイバーサイエンスセンター前身の長)です。

	SENAC-1	FACOM	UNIVAC
1. 数	2進法	10進法	10進法
2. 数の範囲	浮動固定小数点の切替指数2進法8桁(10 ^{±39}) 有効数字2進法39桁(10進法13桁) (但し倍長計算により10進法26桁も可能)	浮動小数点 10 ^{±19} 有効数字8桁 (倍長計算可能)	固定小数点 有効数字11桁
3. 演算方法	並列式	並列式	並列式
4. 符号系	単一番地方式	3番地方式	
5. 演算素子	パラメトロン 9600 真空管 500	継電器 4500	真空管 5400
6. 消費電力	7 KW	15 KW	90 KVA
7. 記憶容量	256 (1024迄増設容易)	一般 180 常数 50 特殊 30	1.000
8. 制御方式	プログラム内蔵方式	テープ制御方式	プログラム内蔵方式
9. プログラム	自動プログラム可能		
10. 演算速度 (単位 10 ⁻³ 秒)			
加減算	0.7 ~ 1	150	0.525
乗算	1.5 ~ 3	150 ~ 400	2.15
11. 入出力装置	6単位テープ読取機 (速度600字/分) 頁式プリンタ (速度400字/分)	72単位テープ読取機 60字同時式パンク	磁気テープ (12800字/秒) 100字同時プリンタ (速度600字/分)
12. 価格	3638.2万円	4500万円	75.000万円

SENAC-1の諸元

[利用相談室便り]

利用相談について

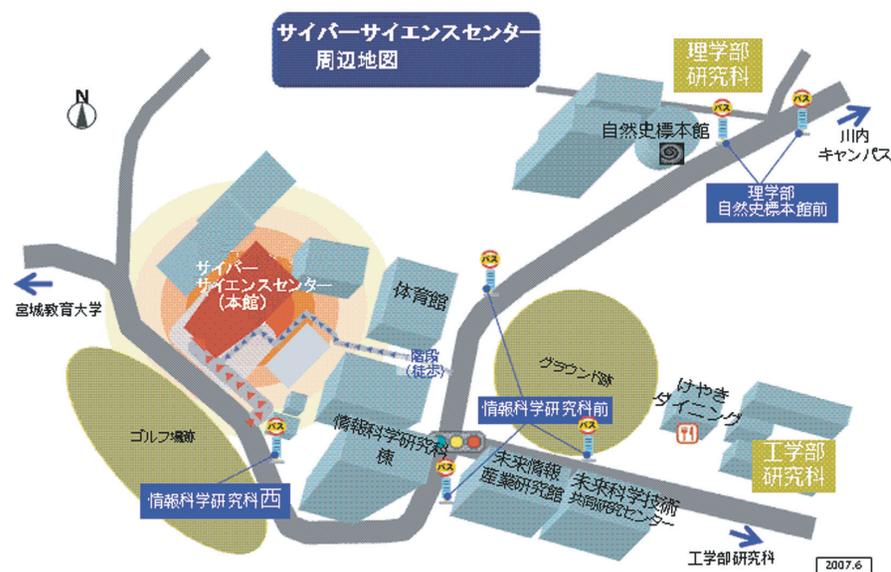
今年度も5月よりサイバーサイエンスセンター本館利用相談室、弘前大学、秋田大学、山形大学で利用相談を行っています。詳細は本誌p. 67～p. 68をご覧ください。相談内容によってはメール等に問い合わせる場合や、時間を要する場合がありますが、利用者の問題解決にむけて努めております。直接面談のほかに、メールや電話の相談も受けておりますのでお気軽にご相談ください。

- ・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、一度相談してみてもいいのではないでしょうか。

また、サイバーサイエンスセンター本館相談室には、各種マニュアル、書籍も多数揃えています。相談室での閲覧、貸し出し（一部の書籍、マニュアルを除く）も可能ですので是非ご活用ください。

次頁に、本年度のテクニカルアシスタント(利用相談員)メンバーの自己紹介を掲載いたします。各相談室に足を運ぶきっかけになればうれしく思います。



サイバーサイエンスセンター本館



本館利用相談室

テクニカルアシスタント自己紹介

《サイバーサイエンスセンター本館相談室》

沢田 雅洋 (さわだ まさひろ)

東北大学 大学院理学研究科地球物理学専攻 特任助教

今年で利用相談員 3 年目となります沢田と申します。火曜日を担当しています。私の研究テーマは数値モデルを用いて台風の発生・発達過程について調べることで、今年でスーパーコンピュータを利用し始めて 10 年目となります。数値モデルは気象庁・気象研究所で開発された局地気象モデルでして、力学だけではなく、凝結や放射、地表面過程などの様々な物理過程を扱うため、大規模な計算を行うにはスーパーコンピュータの利用が欠かせません。この経験から、私は **fortran** のプログラミングや **MPI** の基本的な利用方法、スーパーコンピュータでの高速化、バイナリデータの読み書きなどについて相談に対応させて頂けると思います。その他、**Linux** の基本的な使い方、並列コンピュータやスーパーコンピュータの利用法についてもお手伝いできることがあるかと思っておりますので、お気軽にお尋ね下さい。

山崎 馨 (やまざき かおる)

東北大学 大学院理学研究科化学専攻 博士課程前期

理学研究科化学専攻博士課程前期 2 年の山崎 馨と申します。金曜日の 15 時から 17 時を担当しています。昨年度に引き続き、利用相談員として **Gaussian** 等の量子化学計算パッケージを使った理論計算を中心に皆様の研究のお手伝いをさせていただきます。

物理的・化学的に意味のある量子化学計算を実行するためには、計算手法の選択を正しく行わなければなりません。この為には、十分な文献探索と予備計算が必要になることに注意して下さい。私は、技術相談員として、この様な計算の準備と計算手法の選択からインプットファイルの作成、そして計算結果の解釈のこつにいたるまで、量子化学計算において突き当たる問題のトータルサポートを **one-stop** で実現していきたいと考えております。

1 年間よろしく願いいたします。

坂本 修一 (さかもと しゅういち)

東北大学 電気通信研究所 准教授

木曜日を担当している電気通信研究所准教授の坂本です。長いものでサイバーサイエンスセンターの利用相談員は今年度で10年目になりました。

私は、人間の聴覚情報処理過程の解明及び工学応用を念頭に、様々な環境での音・音声の聞こえを調べ、その知見に根ざした音響通信システムの開発を進めています。そのためには多くの知覚心理実験を行って結果の統計解析が必要となるため、サイバーサイエンスセンターで提供して

いるSASを初めとする統計解析パッケージを利用しています。また、刺激作成などでMATLABもよく利用しています。

ネットワークやスーパーコンピュータに関する知識はほとんどありませんが、Windows端末の使い方や、SAS、MATLABなどのアプリケーションの使い方、みなさんのお役に立てることがあるかと思っています。お気軽に声をかけていただけたら幸いです。

佐藤 義永 (さとう よしえい)

東北大学 大学院情報科学研究科情報基礎科学専攻 博士後期課程

昨年度よりサイバーサイエンスセンター利用者相談室で水曜日の利用相談員を担当させていただいております。専攻分野は計算機アーキテクチャで、次世代のベクトル計算機に向けた要素技術の研究を行っており、センター内の端末や入出力装置等の操作に加えて、ベクトル計算機の利用法に関するご相談も対応いたします。本書をご覧のみなさまには既に当たり前のことと思いますが、計算機を用いた科学技術シミュレーションは先端科学分野において非常に重要です。より高精度に、より高速にシミュレーションを行うことにより、新たな発見が生まれ、科学技術の発展に繋がります。したがって、サイバーサイエンスセンターで稼動しているスーパーコンピュータを効率よく利用することで、みなさまの研究を加速させるだけでなく、世界に貢献できると考えています。利用相談員として、微力ながらみなさまのお力になればと思います。よろしくお願いいたします。

山下 毅 (やました たけし)

東北大学 情報部情報基盤課共同利用支援係 技術一般職員

平成 22 年 5 月からサイバーサイエンスセンターの職員として勤務し、同年度から利用相談員をしております。今年度は火曜日 14-16 時の担当で、担当分野はスーパーコンピュータ (SX-9)、並列コンピュータ (Express 5800) の利用方法全般、およびアプリケーションの利用に関することです。MATLAB、MSC. Marc/Mentat、Patran については操作方法のご相談もお受けできます。また、Fortran コードの高速化 (ベクトル化、並列化、MPI 化) のご相談も随時受け付けていますので、お気軽に利用相談室までお越し下さい。

最近では研究室のワークステーションクラスのマシンでも、高速 CPU と大規模メモリを使用して数値計算を行えるようになってきました。6 コア×2CPU、最大 192GB という製品もあるようです。当センターでサービスを行っている SX-9 は、MPI を使用すれば最大 64CPU と 4TB (4,096GB) というメモリを使用することが出来ます。しかしながら、ベクトルマシンである SX-9 の性能を最大限に引き出すためには、プログラムコードのチューニングが必須となります。研究室のマシンで動かしているプログラムコードをそのまま SX-9 でコンパイル&実行しても、SX-9 の性能が発揮されることはまれです。「スパコンって言っても、案外遅いなあ。」という経験がある方は、ぜひプログラムコードの高速化についてご相談下さい。

佐々木 大輔 (ささき だいすけ)

東北大学 情報部情報基盤課共同研究支援係 技術一般職員

平成 23 年度に東北大学の技術職員として採用され、本年度 5 月からサイバーサイエンスセンターで利用相談員をさせていただくこととなりました、佐々木と申します。担当は毎週月曜日 14～16 時となっております。学生時代には Fortran で数値計算を行い、そのほか C 言語等でもプログラムを書いておりました。

大規模なシミュレーションを行う際、PC で実行すると数時間～数日かかってしまう場合があります。しかしスーパーコンピュータを利用すればシミュレーションの内容にもよりますが、大幅に計算時間を短縮することができます。本センターのスーパーコンピュータを利用し、高速な計算を体感していただきたいです。

採用されたばかりということもあり、知識不足なところも多々あるかと思えます。そのため、質問に対して十分にお答えすることができない場合もあると思えます。皆様の質問、相談内容にお答えできるよう努めていきます。今後とも、よろしく願いいたします。

《弘前大学・秋田大学・山形大学》

佐藤 裕之 (さとう ひろゆき)

弘前大学 大学院理工学研究科 准教授

センターには大変長くお世話になっています。ソフトウェアを含めた計算資源は、より高性能になるとともに机上にすべてを揃えるには高価になりすぎてきてもおり、共同利用施設の存在をありがたく感じています。相談の内容や件数は、計算機の力の変化とともに変わってきていると感じていますが、広い意味での計算機への接続とデータのやりとりに関する内容は、さまざまな分野や立場の方々から、常に質問される事柄の一つであるようです。ネットワークの資源が普及するにつれて、接続の方法が多様にもなり、またセキュリティとの兼ね合いで複雑にもなってゆくのを身近に感じるのは、面白くもありまた面倒なものでもあります。遠隔地からの利用に、物理的な距離は感じなくなってきたものの、ネットワークの安全という質の異なる壁を越えるには、まだまだ距離を感じる場合があります。正しい情報を手に入れること、相談相手を見つけることが、楽をするための秘訣です。微力ですがお役にたきたいと思っています。どうぞご利用下さい。

宮本 量 (みやもと りょう)

弘前大学 大学院理工学研究科 助教

専門は量子化学であって、コンピュータとはもっぱらユーザーとしての付き合いです。大学院生の時にスペクトルのシミュレーションをするのに自作のプログラムを作製したのが、大型計算機との付き合いはじめてでした。現在ではセンターの計算機は Unix 環境になっており、操作性やプログラム作成環境は汎用化されて充実していると感じます。さらに最近の計算機は並列化も著しいのですが、とてもその能力を生かすに至っていません。また、分子科学の分野では超有名な

Gaussian というプログラムパッケージで、分子の電子状態の計算をも行っています。東北大には最新のバージョンが導入されており、大規模な計算も可能です。所属の関係で利用相談を受けることはほとんど無いのですが、少しでも利用者のお役に立てればと思います。

田中 元志(たなか もとし)

秋田大学 大学院工学資源学研究科 准教授

平成 14 年度から相談員をさせて頂いております。学生時代から UNIX 環境には触れており、C 言語、TeX は使用しておりました。現在は、この他に MATLAB を使用しております。FDTD (Finite Difference Time Domain : 有限差分時間領域) 法による計算機シミュレーションを行ってございました頃は、Fortran90 も使用しました。解析モデルにもよりますが、パソコンで実行すると丸 1 日かかるような計算が 1 時間程度で済んでしまいました。すごいですね。このような計算には、本センターのスーパーコンピュータの利用は欠かせません。皆さんも本センターを大いに利用して下さい。質問に対して十分にお答えすることができない場合がありますが、
よろしくお願い致します。

板垣 幸由(いたがき ゆきよし)

山形大学 理学部 技術専門職員

私は、理学部の所属ですが、通常は学術基盤センターで学内LANと各種サーバ群の管理を行っています。以前はサイバーサイエンスセンターの前身である大型計算機センター・システム管理係に所属しスーパーコンピュータ等大規模計算機システムの管理を行っていた時期もありましたが、山形大学に赴任してきた平成9年度以降はネットワークの管理・運用業務が多くなりました。昔はセキュリティといった言葉もあるにはありましたが、今ほど意識する必要はありませんでした。しかし近年コンピュータ・ネットワークが一般家庭に普及するにつれ、これらを取り巻く環境は劇的に変化してきました。SPAMメールの嵐、ウィルスメールによる被害、ファイル交換ソフトを使った著作権侵害等、問題が山積された世の中となり、それらを監視している私達の仕事も増え、日々頭を悩ませているというのが現状です。

サイバーサイエンスセンターを利用されているみなさんも、計算機の利用や、ネットワークに関する悩みを抱えている方は少なくないと思います、そのような場合は、迷わずテクニカルアシスタントにご相談ください。きっと、良い解決法やヒントが見つかるはずです。

高野 勝美 (たかの かつみ)

山形大学 大学院理工学研究科 准教授

光ファイバ通信の研究を行っております。通信システムという多数のパラメータからなる非線形システムの設計に数値計算を使っています。また、大学院生の頃から現在も電磁波・光波の電磁界解析も行っており、境界要素法、ビーム伝搬法、FD-TD法などを使った数値計算にも携わってきました。Fortranを使った計算が主ですが、MATLABなども使います。東北大学の計算機や山形大学のベクトル計算機を使った経験があります。数値計算によって、予測しにくいものや目に見えないものを可視化することができます。つまり、解析的に一般論を論じにくい問題の全体像をイメージすることができます。PCソフトウェア開発のプログラム作りとはまた違った、数値計算の楽しさを相談者と分かち合えたらと思っています。

鈴木 勝人 (すずき かつひと)

山形大学 工学部学術情報基盤センター 技術専門職員

私は米沢市にある工学部でネットワークや各種サーバ類の面倒をみています。計算機と係わって30年以上。最近は学生さんなどの質問で、意味不明というか本来の意味と違う表現に思わず笑いながら答えることもしばしばです。

サイバーサイエンスセンターの素晴らしい計算資源を活用していただき、時間的余裕を楽しんでみてはいかがでしょうか。時間距離を考える事なく、本当に速い計算機を自分のPCを使う感覚で利用できる現在は、非常に恵まれた環境にあるといえます。費用も発生しますが、青葉山の速い計算機を皆さんでフルに使ってみましょう。どうぞ宜しくお願いします。

[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.isc.tohoku.ac.jp/tayori/>

平成23年度の利用相談について (No.119)

今年度も利用相談室での利用相談を5月9日(月)より開始いたしました。相談室では面談、電話、メール等で相談を受け付けます。各相談員の担当時間、担当分野は表1をご覧ください。本センターの利用に関する相談は、曜日に関わらず対応いたしますのでお気軽にご相談ください。また、本館利用相談室には各種マニュアル、書籍も揃えておりますのでご利用ください。

弘前大学、秋田大学、山形大学でも利用相談を受け付けます。表2を参考にしてご利用ください。

《 サイバーサイエンスセンター本館 利用相談室 》

仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3 (もよりのバス停は「情報科学研究科西」)

Tel : 022-795-6153 学内内線 92-6153 (不在の場合は、022-795-3406)

e-mail*: sodan05@isc.tohoku.ac.jp

*e-mailによる相談は常時受け付けておりますが、曜日、時間帯、相談内容によっては、回答まで時間がかかる場合があります。あらかじめご了承ください。

表1 平成23年度利用相談日程と主な担当分野(本館)

曜日・時間		テクニカルアシスタント	主な担当分野
月	2-4時	佐々木大輔 (情報基盤課共同研究支援係)	<ul style="list-style-type: none"> ・FORTRAN, C/C++ ・並列化 (自動並列)
火	2-4時	沢田 雅洋 (理学研究科) 山下 毅 (情報基盤課共同利用支援係)	<ul style="list-style-type: none"> ・並列コンピュータ ・スーパーコンピュータ ・アプリケーション全般
水	2-4時	佐藤 義永 (情報科学研究科)	<ul style="list-style-type: none"> ・スーパーコンピュータ ・大判プリンタ
木	2-4時	坂本 修一 (電気通信研究所)	<ul style="list-style-type: none"> ・アプリケーション (MATLAB, SAS) ・C/C++
金	3-5時	山崎 馨 (理学研究科)	<ul style="list-style-type: none"> ・アプリケーション (Gaussian) ・並列コンピュータ
*上記以外の時間帯に面談・電話での相談を希望の方は、共同利用支援係(1階窓口)まで相談内容をお申し出ください。センター内担当者に取り次ぎます。			

表 2 平成 23 年度利用相談日程と担当分野（他機関）

大学名	相談場所・日時	テクニカルアシスタント	担当分野
弘前大学	理工学部 1 号館 322 室 在室中随時	佐藤 裕之	スーパーコンピュータ, 端末ログイン, ファイル, Fortran, ベクトル化, ASL
弘前大学	理工学部 2 号館 0405 室 在室中随時	宮本 量	端末ログイン, Fortran, C/C++, Gaussian
秋田大学	工学資源学部 1 号館 337 室 在室中随時	田中 元志	スーパーコンピュータ, 端末・ログイン, ファイル, ジョブ操作, Fortran, C/C++, MATLAB, ハードウェア, 課金, 利用申請, メール
山形大学	学術情報基盤センター (小白川キャンパス) 金曜 10:00-12:00	板垣 幸由	端末・ログイン, ファイル, メール, ウイルス対策ソフト, サーバ証明書
	工学部 7 号館 245 号室 火曜 14:30-16:30	高野 勝美	端末・ログイン, ファイル, Fortran, MATLAB
	工学部学術情報基盤セ ンター 在室中随時	鈴木 勝人	端末・ログイン, Fortran, TOPIC/インターネット(組織間接続), メール, ウイルス対策ソフト

(共同利用支援係)

コンパイラアップデートのお知らせ (No.120)

スーパーコンピュータ用のコンパイラを Fortran90 Ver 2.0 Rev430、C++ Ver1.0 Rev091 に、また並列コンピュータ用の f95 コンパイラ、C++コンパイラをそれぞれ Version 11.1 Rev069 にアップデートしましたのでお知らせします。(2011 年 5 月 23 日から)

スーパーコンピュータ

Fortran コマンド名 : sxf90

C/C++コマンド名 : sxcc

オプションの説明は、man コマンドでも参照できます。

並列コンピュータ

f95 コマンド名 : f95

C/C++コマンド名 : cc

オプションの説明は、-help オプションでも参照できます。

■スーパーコンピュータのFortran90 コンパイラについて**【主な追加機能・強化機能】**

- (1)関数結果を格納する作業配列を、可能ならばスタックに割付けることを指定するオプション `-O wkary_opt` を追加しました。
- (2)関数結果を格納する作業配列を、ヒープに割付けることを指定するオプション `nowkary_opt` を追加しました。
- (3) 隣接アクセス最適化を行うことを指定するオプション `-pvctl neighbors` を追加しました。
- (4)直後の文中に現われる配列式または DO ループに対して、隣接アクセス最適化を行う (NEIGHBORS)か行わない (NONEIGHBORS)かを指定するコンパイラ指示オプション `NEIGHBORS`、 `NONEIGHBORS` を追加しました。
- (5)組込み手続 `COUNT`、 `MAXLOC`、 `MINLOC` に `KIND` 引数をサポートしました。
- (6)TYPE(C_PTR) で宣言されているデータを、宣言通りに翻訳する(構造型とする)ことを指定する f90 のコマンドオプション `-f2003` のサブオプション `cptr_derive` を追加しました。
- (7) TYPE(C_PTR) で宣言されているデータを、INTEGER(KIND=8) として翻訳することを指定する f90 のコマンドオプション `-f2003` のサブオプション `cptr_i8` を追加しました。
- (8)組込み手続 `TANH(X)` の呼出しを、 $(\text{EXP}(2*X)-1)/(\text{EXP}(2*X)+1)$ に置き換えることを指定する f90 のオプション `-pvctl chgtanh` を追加しました。
- (9)以下の Fortran2003 規格が追加サポートされました。
 - ・ POINTER 引数に対する INTENT 属性指定
 - ・ 組込み手続
 - `COMMAND_ARGUMENT_COUNT`
 - `GET_COMMAND`
 - `GET_COMMAND_ARGUMENT`
 - `GET_ENVIRONMENT_VARIABLE`
 - ・ 関数結果への ALLOCATABLE 属性指定

Fortran2003 につきましては紹介資料もご覧ください。

<http://www.ss.isc.tohoku.ac.jp/PDF/Fortran2003/機能.pdf>

■スーパーコンピュータのC++コンパイラについて

新バージョンの新機能等については紹介資料をご覧ください。

<http://www.ss.isc.tohoku.ac.jp/PDF/c++sx-rev090新機能のご紹介.pdf>

<http://www.ss.isc.tohoku.ac.jp/PDF/c++sx-rev091新機能のご紹介.pdf>

■並列コンピュータのf95 コンパイラ、C++コンパイラについて

変更点および機能強化については各紹介資料の第3章をご覧ください。

f95 http://www.ss.isc.tohoku.ac.jp/PDF/Release_NotesF.pdf

C++ http://www.ss.isc.tohoku.ac.jp/PDF/Release_NotesC.pdf

(共同研究支援係)

非線形構造解析汎用プログラム MSC.Marc2010/Mentat2010のサービス開始について (No.120)

Marc/Mentat のバージョンを MSC.Marc2010/Mentat2010 として運用を始めましたのでお知らせ致します。旧バージョンのものは暫定的に run_marc2008r1、mentat2008r1 というコマンドでご利用できます。

2011年5月26日(木)よりサービスを開始しておりますのでご利用下さい。

サービス開始日 : 2011年5月26日(木)

ホスト名 : gen (並列コンピュータ)

▼ MSC.Marc2010/Mentat2010

バージョン名 : ver2010r2

起動コマンド : run_marc, mentat

新機能の概要、機能の詳細についてはマニュアル[1-3]リリースガイドをご覧ください。

マニュアル : PDF形式マニュアルを gen 上で提供しています。
並列コンピュータ gen.isc.tohoku.ac.jp にログインし、
acroread コマンドをご覧ください。各マニュアルは、
gen.isc.tohoku.ac.jp の以下のディレクトリにあります。

gen: /usr/ap/MSC2010/mentat2010.2/doc/

- [1] release_guide2010r2.pdf : リリースガイド(2010r2 英語)
- [2] release_guide2010r1.pdf : リリースガイド(2010r1 英語)
- [3] release_guide2010r1_jpn.pdf : リリースガイド(2010r1 日本語)

英文マニュアル

- [4] vola.pdf : Volume A: Theory and User Information
- [5] volb.pdf : Volume B: Element Library
- [6] volc.pdf : Volume C: Program Input
- [7] vold.pdf : Volume D: User Subroutines and Special Routines
- [8] vole.pdf : Volume E: Demonstration Problems
- [9] mt_help_ref.pdf : Mentat 2005 Help Reference

和文マニュアル(2003版)

gen: /usr/ap/MSC2010/mentat2010.2/doc/japanese/

- [1] vola.pdf : A編 理論およびユーザー情報
- [2] volb.pdf : B編 要素ライブラリ
- [3] volc.pdf : C編 プログラム入力
- [4] vold.pdf : D編 ユーザーサブルーチンおよび特別ルーチン
- [5] vole.pdf : E編 例題集
- [6] marc_ug.pdf : ユーザーガイド
- [7] mt_help_ref.pdf : Mentat 2003 ヘルプリファレンス
- [8] xsec_adden.pdf : ドキュメント補足資料

(共同利用支援係)

大阪大学サイバーメディアセンター講習会受信のご案内 (No.120)

東北大学サイバーサイエンスセンターでは、大阪大学サイバーメディアセンターで実施されるスーパーコンピュータに関する講習会をインターネットでライブ受信いたします。講習会の内容は、以下のとおりとなっております。

参加希望者は、共同利用支援係まで事前にご連絡ください。事前に受講希望のお申し出がなかった場合は、受信を中止することがありますので予めご承知おきください。

共同利用支援係 Tel: 022-795-3406 E-mail: uketuke@isc.tohoku.ac.jp

■受信予定講習会

初心者のためのスーパーコンピュータ入門

日時：9月13日（火）10:00～16:00

（ベクトル化並列化の基礎からチューニングまでとMPIの説明）

詳細につきましては、以下のウェブページでご確認ください。

<http://www.hpc.cmc.osaka-u.ac.jp/j/news/news20110426.html>

■受信場所

サイバーサイエンスセンター5階 講義室

（講演時間になりましたら、講義室までお越しください。）

（共同利用支援係）

平成23年度講習会（8月，9月開催）案内

No.	名 称	開催日時	講 師	内 容 概 略
5	ネットワークとセキュリティ入門	8月2日(火) 13:30~16:00	水木 敬明	・ネットワークの基本的な仕組み ・ネットワークの危険性と安全対策
6	Gaussian入門	8月9日(火) 13:00~17:00	岸本 直樹 (理学研究科)	・Gaussian の基本的な使い方
7	スーパーコンピュータの高速化技法	9月1日(木) 10:00~16:00	NEC	・ベクトル化による高速化技法 ・並列化による高速化技法
8	MPIプログラミング入門	9月2日(金) 10:00~16:00	NEC 花岡勝太郎	・MPIによる並列プログラミングの基礎 ・利用法
9	UNIX入門	9月5日(月)* 13:00~16:10	後藤 英昭	・UNIXシステムの基本的な使い方 ・エディタの使い方 ・プログラムの実行方法
10	スーパーコンピュータと並列コンピュータの基本的な利用法	9月7日(水) 13:30~16:00	大泉 健治	・自動ベクトル化・自動並列化 ・利用法
11	MARC入門	9月15日(木)* 13:00~17:00	内藤 英樹 (工学研究科)	・MARCの基本的な使い方
12	Mathematica入門	9月27日(火)* 13:00~17:00	横井 渉央 (情報科学研究科)	・Mathematicaの基本的な使い方

* 年度当初の予定から、日程が変更になっています。

<各講習会共通事項>

会 場：サイバーサイエンスセンター本館5階 講義室又は端末機室
(青葉山キャンパス情報科学研究科西隣)

当日受付：サイバーサイエンスセンター本館1階 受付窓口
(受付は開始5分前までをお願いします。)

申込方法：「大規模科学計算システム」ウェブサイトよりお申込みください。
<http://www.ss.isc.tohoku.ac.jp/> → 「利用案内」 → 「講習会」
講習会詳細についても上記ウェブサイトをご参照ください。

受講対象：センター利用有資格者（教員、大学院生、学部4年生、技術職員等）

問合せ先：共同利用支援係 Tel:022-795-3406 E-mail:uketuke@isc.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、希望があれば別刷50部を進呈します。50部を超える分については、著者の実費負担とします。別刷の希望部数等は投稿の際に申し出てください。
- (2)投稿予定の原稿が15ページを超える場合は以下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@isc.tohoku.ac.jp
TEL 022-795-3406

編集後記

「神戸に構築中の次世代スパコン「京」が TOP500 のランキングで一位!」、久しぶりにスパコン関係者にとって明るい話題がありました。ご存じのように、「京」の開発を巡っては、事業仕分けで予算が一時凍結されるなど、その開発の意義が問われ様々な議論がなされましたが、様々な困難を乗り越え、2位の中国、3位の米国のシステムに対して 3~4.5 倍の圧倒的な性能を示した「京」の開発は、日本のスパコン開発技術の高さを世界に示しました。

もちろん、TOP500 での一位は、単に「世界一の規模の道具」で有ることを示したにすぎず、これから求められることは、その「世界一の規模の道具」の能力を極限まで引き出し、様々な先端科学技術分野や安全・安心な社会構築において **only one/top one** の成果を生み出すことです。

現在、「京」と国内のスパコン資源を連携して最大の成果の創出に結びつける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)の構築と利用を主導する場として「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)コンソーシアム」の発足に向けた検討が行われています。この中で、全国の基盤センター群は、神戸の理化学研究所と連携して、ワンストップでこれらのセンターが運用するスパコンサービスが受けられる HPCI のテスト環境の構築を、本年 10 月を目標に進めています。HPCI により研究室レベルの計算環境から基盤センターレベルの計算環境へ、さらには「京」のレベルの計算規模へとシームレスに利用環境の拡大が行えると共に、全国の様々なスパコン資源を有機的に連携させて活用することができ、スパコン同機種・異機種連携シミュレーション、大規模データの広域共有活用、資源の有効活用、障害・災害時の信頼性向上などがなされ、新しいシミュレーション技術・スパコン利活用技術の研究開発などが進むものと思われま

我が国の計算科学者と計算機科学者のコミュニティが一同に集まる HPCI コンソーシアムの形成によりこの分野がより一層活性化され、多くの学生・若手研究者が集い、発展していくことをスパコン関係者の一人として大いに期待しています。(H.K)

東日本大震災から 4 カ月が経過しました。マグニチュード 8 クラスの余震が 100%に近い確率で発生するとの話もあり、余震のたびに思わず身構えてしまいます。また、現在センターでは震災後の節電協力のため、室内の照明は従前の約半分とし、エアコンを使用する際の室温設定は 28 度にしてあります。今号の記事で紹介されている利用相談室は 1 階にありますが、スパコンの一部が近くに設置されているためか、相談室前の廊下の温度は 24 度程度に保たれています。相談室はドアを開けておくとエアコンなしで充分快適に過ごすことができます。書籍も若干ですが今年度も補充いたしました。高速化や並列化の利用相談はもちろんのこと、計算機関係のマニュアル、計算機・ネットワーク関係の書籍などの閲覧も可能です。運がよければ飲み物のサービスもありますので、どうぞお気軽にお越しください。(K.S)



サイバーサイエンスセンター前
整備中の青葉山新キャンパス

SENAC 編集部会

小林広明 曾根秀昭 水木敬明 後藤英昭
江川隆輔 早坂哲夫 大泉健治 小野 敏
高橋洋一 斉藤くみ子

平成 23 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 大成印刷株式会社

システム一覧

計算機システム	ホスト名	機種
スーパーコンピュータ	super.isc.tohoku.ac.jp	SX-9
並列コンピュータ	gen.isc.tohoku.ac.jp	Express5800

サービス時間

利用システム名	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
館内利用	月曜日～金曜日は8:30～21:00、 土・日・祝日は閉館

ジョブクラスと制限値

計算機システム	処理	ジョブクラス	CPU時間	メモリ容量
スーパー コンピュータ	会話型	(4cpu)	1時間	8GB
	バッチ 処理	ss (4cpu)	1時間	256GB
		s (4cpu)	無制限	32GB
		p8 (8cpu)	〃	512GB
		p16 (16cpu)	〃	1024GB
		p32 (32cpu)	〃	1024GB×2
		p64 (64cpu)	〃	1024GB×4
並列 コンピュータ	会話型	(4並列)	1時間	8GB
	バッチ 処理	as (非並列)	無制限	16GB
		am (Marc専用)	〃	16GB
		am2 (Marc専用)	〃	128GB
		a8 (8並列)	〃	128GB
		a16 (16並列)	〃	256GB
		a32 (32並列)	〃	512GB

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.44 No.3 2011-7

[共同研究成果]

- 次世代タービン複雑流動の大規模シミュレーション技術の開発…………… 笹尾 泰洋 1
山本 悟
- チャンネル内遷移流に発現する乱流縞の計算領域依存性に関する DNS 解析…………… 塚原 隆裕 11
金子士津真
川口 靖夫

[研究開発公募の成果]

- “多段 2 体衝突法”による流体粘性の制御効果…………… 松岡 浩 21
— 「超 SIMD ビット演算法による低消費電力流体
シミュレーションコードの開発」における中間成果の定性的解説—
菊池 範子

[研究成果]

- チップマルチベクトルプロセッサのためのプログラム最適化技術…………… 佐藤 義永 29
撫佐 昭裕
江川 隆輔
滝沢 寛之
岡部 公起
小林 広明

[報告]

- 佐藤義永氏が IEEE Computer Society Japan Chapter 優秀若手研究賞を受賞しました …… 37
- 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点第 3 回シンポジウム
平成22年度先端の大規模計算利用サービス成果報告会 報告…………… 江川 隆輔 38

[解説]

- 大判カラープリンタの利用方法…………… 47

[展示室便り①]

- SENAC-1…………… 58

[利用相談室便り]

- 利用相談について…………… 61
テクニカルアシスタント自己紹介…………… 62

[Web 版大規模科学計算システムニュース] より…………… 67

- 平成23年度の利用相談について (No.119)
コンパイラアップデートのお知らせ (No.120)
非線形構造解析汎用プログラム MSC . Marc2010/Mentat2010 のサービス開始について (No.120)
大阪大学サイバーメディアセンター講習会受信のご案内 (No.120)

平成23年度講習会（8月，9月開催）案内…………… 72

執筆要項…………… 73

編集後記…………… 74

