2.9 超音波集束シミュレータ ZZ-HIFU の測定評価

(独)理化学研究所　野田　茂穂

2.9.1 はじめに

ZZ-HIFU は Zouki Zenshin-High Intensity Focused Ultrasound の略称であり、「次世代生命体統合シミュレーションソフトウェアの研究開発」プロジェクトで開発された高密度焦点式超音波法シミュレーションソフトウェアである。このプロジェクトでは、ライフサイエンス分野でのシミュレーションソフトウェアを京に向け開発チューニングを行い、高性能計算機を用いた大規模詳細なシミュレーションを実現し、その有効性を示す事を目標の一つに置いている。

体内に出来た腫瘍に対する治療として、体内を切り開き切除する方法、針を使った穿刺治療といった腫瘍以外の部位にダメージを与える治療が行われている。近年、体へのダメージの少ない治療法として、集束超音波により腫瘍のみを焼灼する治療法が開発された。この手法は、高密度焦点式超音波法と呼ばれており、一般的には HIFU(High Intensity Focused Ultrasound)治療として知られている。HIFU 治療は、体外部から超音波を体内の腫瘍部に集束させ、その焦点で発生する熱エネルギにより腫瘍を焼灼させるものである。HIFU 治療の精度や効率を上げる為さらには HIFU 治療機器の開発には、超音波が体内をどのように伝播するかを精密に知る必要があり、新しいシミュレーションソフトウェアを開発してきた。本報告ではその性能について報告する。

2.9.2 プログラム概要

ZZ-HIFU では超音波が体内を伝播する過程を再現し、さらに集束超音波により引き起こされる温度分布の時間変化をシミュレーションする。特に治療部位での現象を時間発展的にシミュレーションするが、超音波は体内を伝播するため、治療部位周辺で起こっている現象も取り扱う必要がある。例えば、頭部を対象としたシミュレーションの場合、頭蓋骨により反射した超音波が本来目的とした集束点以外の所に二次的な集束点を作る場合があり、目的腫瘍以外の正常な組織に損傷を及ぼす事があり、これらを予測するには腫瘍部近傍の局所的領域だけでなく、広範囲な領域を計算対象とする必要がある。

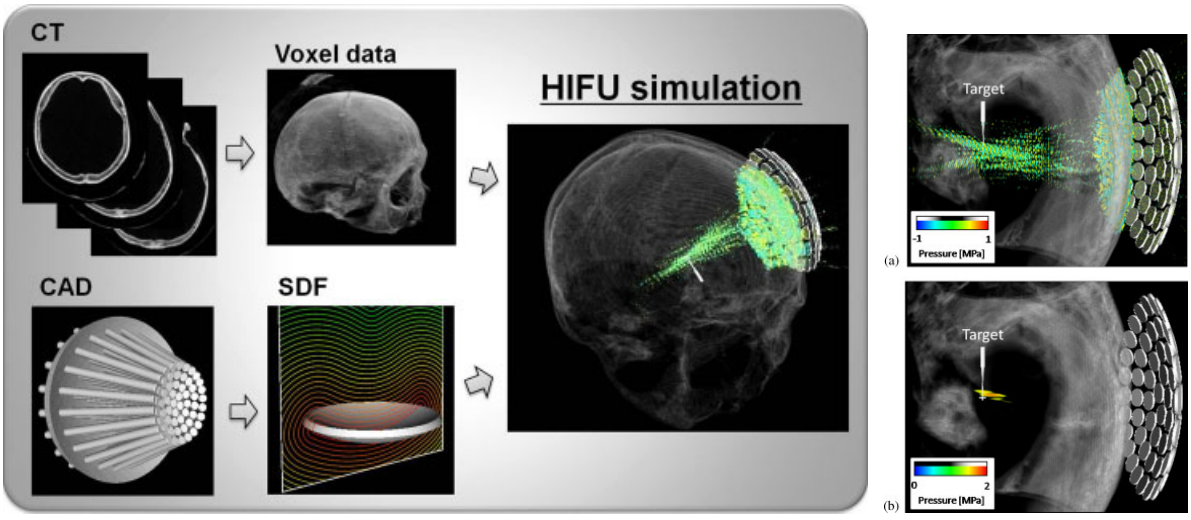


図 1、HIFU シミュレーション概念図

患者個々の状態をシミュレーション対象とするため、計算対象のモデル形状や腫瘍位置や形状といった物をどのようにシミュレーションに取り込んで行くかが問題である。ZZ-HIFU では、3DCT で取

得された三次元医療画像をボクセル空間に配置したボクセル人体モデルを使用する事でこの問題を解決している。計算で使用するボクセルは 1mm 以下の微細な物を空間に均一に使用する必要があり、その演算規模は非常に大きくなる。そのため、HPC 向けにチューニングを行い、効率よく結果が得られる様にする必要がある。

超音波発信装置としてアレイ型のトランスデューサーを使用しており、一つ一つのトランスデューサーの位相を適切に制御する事により、超音波の焦点の位置や大きさを制御できる装置を対象としている。

人体は複数の成分からなり、多媒質中の音波の伝播に対する基礎式を空間 n 次、時間二次精度の有限差分法によって離散化し、FDTD 法に準じて時間発展を計算する。並列化は計算領域をノード単位で領域分割し、ノード内はループ分割するハイブリッド並列を採用している。その並列化には SPHERE を使用しており、領域分割の配列メモリ管理、入出力制御、通信テーブル作成などの開発作業を効率化している。プログラム本体は Fortan90 で作成されており、SPHERE の制御に関わる所は C++を使用している。ホットスポット部分は Foratran90 でコーディングされている。

基礎式として、質量保存式と運動量保存式を用いる。(添付資料参照) 基礎式を空間6次精度中心差分で離散化し、時間方向は二次精度の中心差分を用いる。

質量保存式:

$$\frac{1}{\rho_m c_{sm}^2}\left(\frac{\partial p_x}{\partial t}+\sigma_x p_x\right)+\frac{\partial u}{\partial x}=0,$$
$$\frac{1}{\rho_m c_{sm}^2}\left(\frac{\partial p_y}{\partial t}+\sigma_y p_y\right)+\frac{\partial v}{\partial y}=0,$$
$$\frac{1}{\rho_m c_{sm}^2}\left(\frac{\partial p_z}{\partial t}+\sigma_z p_z\right)+\frac{\partial w}{\partial z}=0$$

運動量保存式:

$$\rho_m\left(\frac{\partial u_i}{\partial t}+\sigma_i u_i\right)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left\{\zeta_m e_{kk}\delta_{ij}+2\mu_m\left(e_{ij}-\frac{1}{3}e_{kk}\delta_{ij}\right)\right\}$$

2.9.3 測定環境

性能測定には、理化学研究所の RICC および FX1 を用いた。

2.9.4 測定結果

元々のプログラムの実行時間は 200.1027 秒であり、これのいくつかのチューニングを施す事により、167.8631 秒迄高速化する事に成功した。これは、プログラムのチューニングにより、キャッシュミスの低減や演算量の削減を行い、その結果、演算時間に占める処理時間の割合が多い、cal_t，cal_v，cal_w，cal_u の高速化を実現した。詳細は添付資料中 TUNE15 と TUNE6 を参照の事。

2.9.5 まとめ

FX1 で利用できる富士通プロファイラを元に SPARC64ⅧIfx での性能を予測した。約4倍の性能向上が見込まれる事が分かり、主として、浮動小数点演算待ちが削減され、性能が向上する事が期待される事が分かった。

ZZ-HIFU評価報告

野田　茂穂、沖田　浩平、青山　幸也

11/10/2011 @ SS研マルチコアクラスタ性能WG

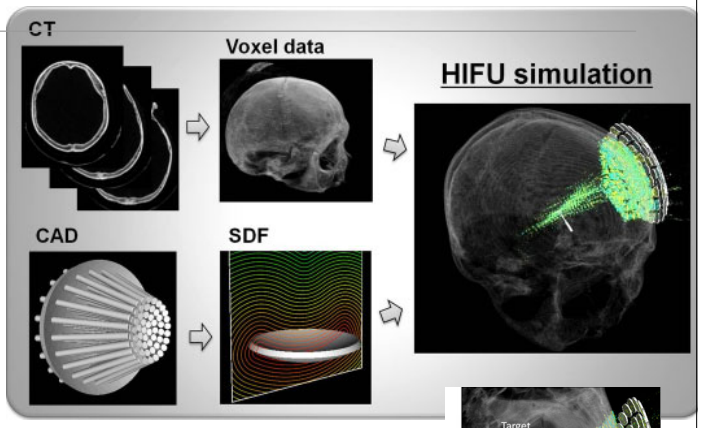
All Rights Reserved, Copyright © ISLiM, RIKEN 2011~

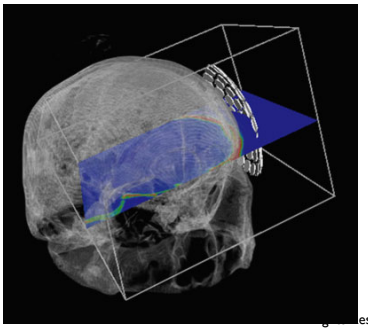
アプリケーション紹介

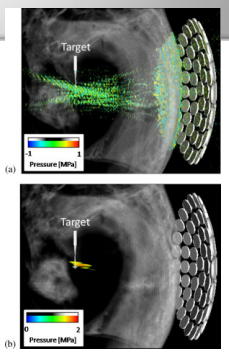
All Rights Reserved, Copyright © ISLiM, RIKEN 2011~

高密度焦点式超音波法ソルバ

- 超音波を集束させ，焦点で加熱によって腫瘍を焼灼する治療法（High Intensity Focused Ultrasound : HIFU）
  - 超音波が体内を伝播する過程や，温度分布および治療部位の時間発展をシミュレーション
  - 医療画像から作成されたボクセル人体モデルを利用
  - 治療機器による焦点制御が困難な体深部の腫瘍治療におけるシミュレーションによる焦点制御支援
  - 各個人の体型に対応したシミュレーションによる術前の治療計画の検討
  - 治療機器の設計および認可に向けた臨床試験における安全性の検討
- 多成分からなる媒質中の音波の伝播に対する基礎式を空間n次，時間2次精度の有限差分法によって離散化し，FDTD法に準じて時間発展を行う．領域分割とループ分割によるハイブリッド並列化によって大規模並列計算が可能となっている．
- Fortran90, C++
- MPI, OpenMP, SPHERE







eserved, Copyright © ISLiM, RIKEN 2011~

基礎式と計算手法

- 式１、式２をFDTDにて計算
- 時間積分は2次精度の陽解法ですが、拡散項がある場合は1次精度の陽解法
- 空間は６次精度中心差分

式１：質量保存式（PML:Perfectly matched layer）

$$\frac{1}{\rho_m c_{sm}^2}\left(\frac{\partial p_x}{\partial t}+\sigma_x p_x\right)+\frac{\partial u}{\partial x}=0,$$
$$\frac{1}{\rho_m c_{sm}^2}\left(\frac{\partial p_y}{\partial t}+\sigma_y p_y\right)+\frac{\partial v}{\partial y}=0,$$
$$\frac{1}{\rho_m c_{sm}^2}\left(\frac{\partial p_z}{\partial t}+\sigma_z p_z\right)+\frac{\partial w}{\partial z}=0$$

式２：運動量保存式

$$\rho_m\left(\frac{\partial u_i}{\partial t}+\sigma_i u_i\right)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left\{\zeta_m e_{kk}\delta_{ij}+2\mu_m\left(e_{ij}-\frac{1}{3}e_{kk}\delta_{ij}\right)\right\}$$

All Rights Reserved, Copyright © ISLiM, RIKEN 2011~

性能測定

All Rights Reserved, Copyright © ISLiM, RIKEN 2011~

プロファイル取得方法

- コンパイル

```
FXFFLAGS= -Cfpp -Kfast,OMP -Am -X9 -Ktl_trt
fx    : $(FILE)
        $(FC) $(FXFFLAGS) $(NSTEPMAX) $(DSIZE) $(SPLIT) $(CALOPT) $(FILE)
```

- 計測実行方法
  - 通常

```
fpcoll -lhwm -Hevent=Statistics ./a.out
```

  - PA tool

```
# performance measurement Vol1
fpcoll -tcsv -o output_prof_1.csv -i3600000 -
Ulocal_event="cycle_counts,op_stv_wait,op_stv_wait_nc_pend,op_stv_wait_sxmiss_ex,branch_instructions,op_stv_wait_ex
,op_stv_wait_sxmiss,instruction_counts",section=range ./a.out
# performance measurement Vol2
fpcoll -tcsv -o output_prof_2.csv -i3600000 -
Ulocal_event="eu_comp_wait,cse_window_empty,load_store_instructions,branch_comp_wait,fl_comp_wait,cse_window_e
mpty_sp_full,trap_DMMU_miss,cycle_counts",section=range ./a.out
# performance measurement Vol3
fpcoll -tcsv -o output_prof_3.csv -i3600000 -Ulocal_event="cycle_counts,inh_cmit_gpr_2write,
0endop,floating_instructions,impdep2_instructions,3endop,2endop,1endop",section=range ./a.out
# performance measurement Vol4
fpcoll -tcsv -o output_prof_4.csv -i3600000 -
Ulocal_event="cycle_counts,prefetch_instructions,sx_miss_count_pf,sx_miss_count_dm,op_r_iu_req_mi_go,instruction_flo
w_counts,dvp_count_pf,dvp_count_dm",section=range ./a.out
```

All Rights Reserved, Copyright © ISLiM, RIKEN 2011~

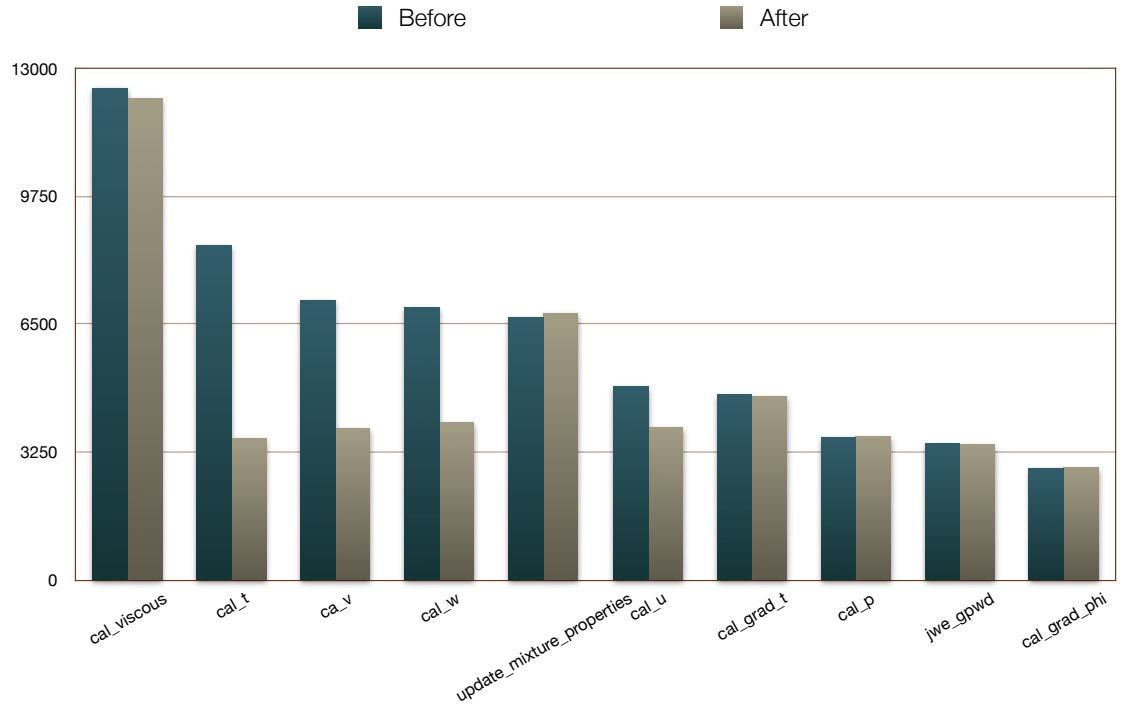
Before

```
Fujitsu Performance Profiler Version 3.0
  Measured time              : Thu Sep 15 11:58:44 2011
  CPU frequency              : Process     0  2520 (MHz)
  Type of program            : Thread (OpenMP)
  Average at sampling interval  : 10.0 (ms)
  Measured range             : All ranges

Time statistics

    Elapsed(s)     User(s)    System(s)    Barrier(s)
  ------------------------------------------------------
     200.1027     676.9999      0.0120       0.0100   Application
  ------------------------------------------------------
     200.1027     676.9999      0.0120       0.0100   Process     0

    Elapsed(s)     User(s)    System(s)    Barrier(s)
  ------------------------------------------------------
     200.1027     676.9999      0.0120       0.0100   Process     0
  ------------------------------------------------------
     200.1027     171.5852      0.0021       0.0000   Thread      0
     199.9842     168.8950      0.0031       0.0000   Thread      1
     199.9827     168.7949      0.0032       0.0100   Thread      3
     199.9841     167.7248      0.0036       0.0000   Thread      2

Procedures profile

  ************************************************************************
    Application - procedures
  ************************************************************************

       Cost       %      Barrier       %   Start    End
  ------------------------------------------------------------
      67694  100.0000          1    0.0015      --      --  Application
  ------------------------------------------------------------
      12509   18.4787          0    0.0000    1377    1849  hifu3d.hifu3d_cal_viscous_
       8501   12.5580          0    0.0000    2920    3020  hifu3d.hifu3d_cal_t_
       7108   10.5002          0    0.0000    2057    2157  hifu3d.hifu3d_cal_v_
       6933   10.2417          0    0.0000    2263    2363  hifu3d.hifu3d_cal_w_
       6674    9.8591          0    0.0000    1158    1265  hifu3d.hifu3d_update_mixture_properties_
       4915    7.2606          0    0.0000    1856    1956  hifu3d.hifu3d_cal_u_
       4709    6.9563          0    0.0000    2766    2913  hifu3d.hifu3d_cal_grad_t_
       3624    5.3535          0    0.0000    2476    2547  hifu3d.hifu3d_cal_p_
       3466    5.1201          0    0.0000      --      --  jwe_gpwd
       2838    4.1924          0    0.0000    3158    3244  hifu3d.hifu3d_cal_grad_phi_
```

After

```
Fujitsu Performance Profiler Version 3.0
  Measured time              : Thu Sep 15 12:01:26 2011
  CPU frequency              : Process     0  2520 (MHz)
  Type of program            : Thread (OpenMP)
  Average at sampling interval  : 10.0 (ms)
  Measured range             : All ranges

Time statistics

    Elapsed(s)     User(s)    System(s)    Barrier(s)
  ------------------------------------------------------
     167.8631     551.9431      0.0111       0.0000   Application
  ------------------------------------------------------
     167.8631     551.9432      0.0111       0.0000   Process     0

    Elapsed(s)     User(s)    System(s)    Barrier(s)
  ------------------------------------------------------
     167.8631     551.9432      0.0111       0.0000   Process     0
  ------------------------------------------------------
     167.8631     139.6659      0.0020       0.0000   Thread      0
     167.6828     138.1258      0.0030       0.0000   Thread      2
     167.6810     137.1857      0.0033       0.0000   Thread      3
     167.6829     136.9657      0.0028       0.0000   Thread      1

Procedures profile

  ************************************************************************
    Application - procedures
  ************************************************************************

       Cost       %      Barrier       %   Start    End
  ------------------------------------------------------------
      55192  100.0000          0    0.0000      --      --  Application
  ------------------------------------------------------------
      12233   22.1644          0    0.0000    1407    1927  hifu3d.hifu3d_cal_viscous_
       6776   12.2771          0    0.0000    1183    1295  hifu3d.hifu3d_update_mixture_properties_
       4661    8.4451          0    0.0000    2866    3013  hifu3d.hifu3d_cal_grad_t_
       3994    7.2366          0    0.0000    2356    2463  hifu3d.hifu3d_cal_w_
       3879    7.0282          0    0.0000    1934    2041  hifu3d.hifu3d_cal_u_
       3844    6.9648          0    0.0000    2143    2250  hifu3d.hifu3d_cal_v_
       3638    6.5915          0    0.0000    2576    2647  hifu3d.hifu3d_cal_p_
       3604    6.5299          0    0.0000    3020    3166  hifu3d.hifu3d_cal_t_
       3428    6.2110          0    0.0000      --      --  jwe_gpwd
       2851    5.1656          0    0.0000    3304    3390  hifu3d.hifu3d_cal_grad_phi_
```

All Rights Reserved, Copyright © ISLiM, RIKEN 2011~



All Rights Reserved, Copyright © ISLiM, RIKEN 2011~

チューニング内容

- ループ分割によるキャッシュミスの低減：

  cal_v, cal_w
- 演算量の削減：cal_u,cal_v,cal_w

■ TUNE15

【対象ループ】Update_Mixtureの③　【修正個所】P9

```
fc = 1.0d0 - phi(i,j,k)*phi(i,j,k)*(3.0d0-2.0d0*phi(i,j,k))
```

の右辺を、下記のように展開したところ、多少速くなりました。

```
fc = 1.0d0 - 3.0d0*phi(i,j,k)*phi(i,j,k)
           + 2.0d0*phi(i,j,k)*phi(i,j,k)*phi(i,j,k)
```

All Rights Reserved, Copyright © ISLiM, RIKEN 2011~

■ TUNE9

●【対象ループ】Cal_Tの①　【修正個所】P1,P2,P6,P30,P31

図3-5(1)のIF文(実際には全部で3個所)の真偽により、変数s1は以下のようになります。
●IF文が真の場合：[1]で「s1 = 処理1」
●IF文が偽の場合：[2]で「s1 = 処理2」
IF文の条件式で使用される配列maskは、タイムステップループの間、値が変わりません。図3-5(1)では、タイムステップごとに毎回同じIF文の判定を行っているため、オーバーヘッドになります。そこで図3-5(2)のように作業配列mask1を使用してIF文を除去しました。
まずタイムステップループの前に一度だけIF文を実行します。[1],[2]により、IF文が真の場合、配列mask1に1.0が設定され、IF文が偽の場合、mask1に0.0が設定されます。
これにより、[3]の「s1 = 処理1*mask1 + 処理2*(1.0-mask1)」は、以下のように図3-5(1)の[1],[2]と同じ結果になります。
● [1],[2]のIF文が真の場合(mask1=1.0):「s1 = 処理1*1.0 + 処理2*(1.0-1.0) = 処理1」
● [1],[2]のIF文が偽の場合(mask1=0.0):「s1 = 処理1*0.0 + 処理2*(1.0-0.0) = 処理2」
図3-5(1)のループ内の他の2つのIF文についても同様に修正しました。従って作業配列mask1は4次元配列mask1(3,*,*,*) となります。

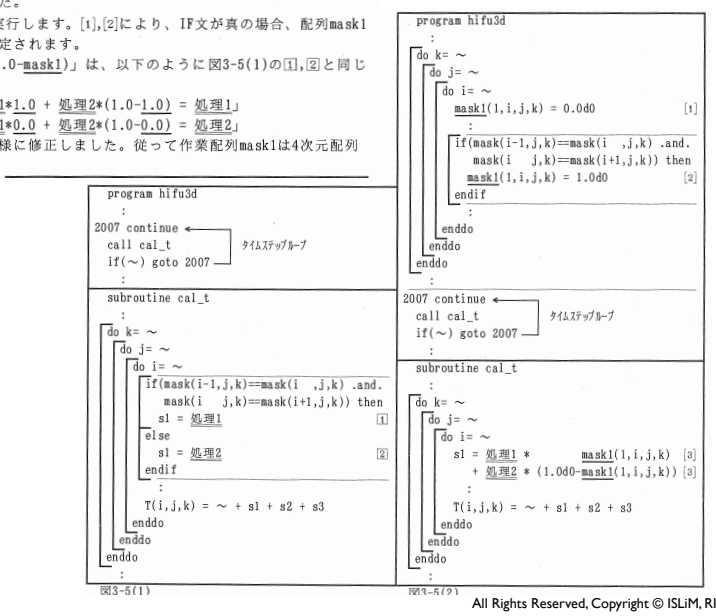


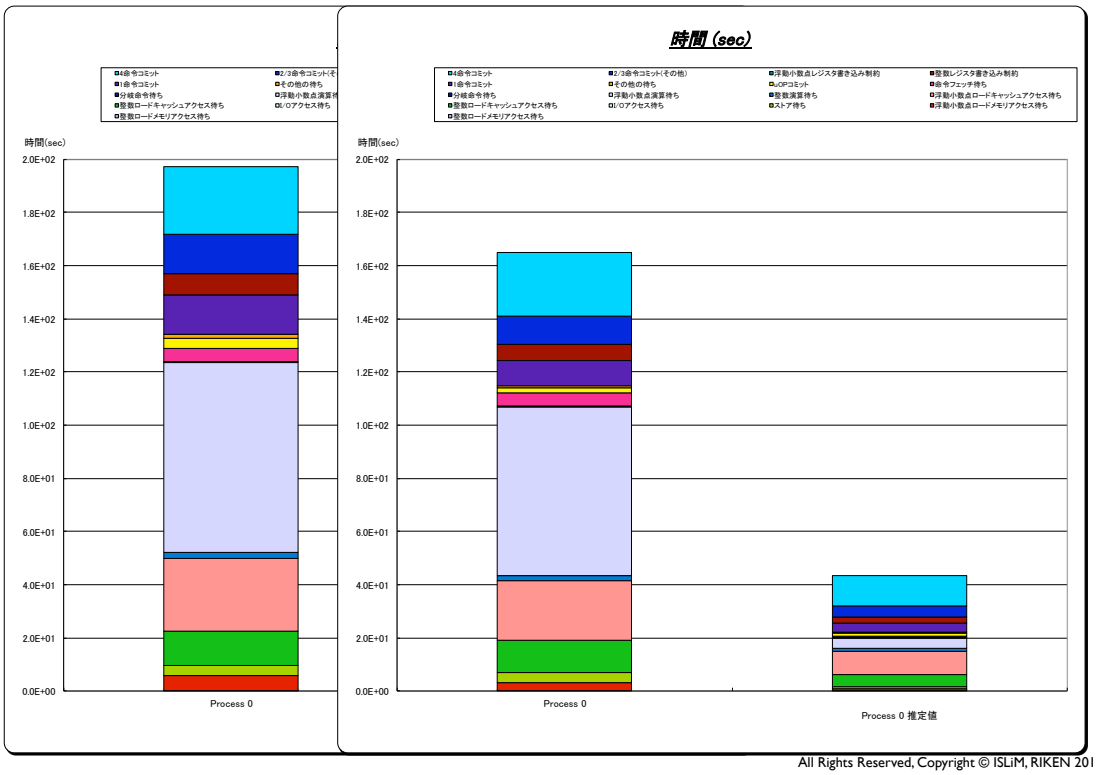
図3-5(1)　図3-5(2)

All Rights Reserved, Copyright © ISLiM, RIKEN 2011~

チューニング効果

- オリジナル版とチューニング版を8スレッド並列で実行したところ、チューニング版があまり速くない
  - 並列に実行して効果があるチューニングとほとんど変らないか、却って遅くなるチューニングがある。
- オリジナル版とチューニング版で、速度が変らないか却って遅くなる理由は、
  - オリジナル版では、ループ内で配列を多く使用しているのでキャッシュミスが発生
  - チューニング版では、ループを4つに分割し、1つのループで使用する配列の数を減らしてキャッシュミスを減少
  - 一方、オリジナル版を8スレッドで並列に実行すると、キャッシュの大きさが8倍になるため、(本プログラムの場合)、何も修正しなくてもキャッシュミスが減少
  - 従ってチューニング版を8スレッドで実行したのと同様の速度
  - また、チューニング版はループを４分割し、作業配列を導入しており、これがオリジナル版と比較してオーバーヘッドになる場合は、並列に実行すると却って遅くなる
- 並列性能（８スレッド）
  - オリジナル：5.3倍
  - チューニング：4.9倍

All Rights Reserved, Copyright © ISLiM, RIKEN 2011~



All Rights Reserved, Copyright © ISLiM, RIKEN 2011~

PAデータ情報	実行 Time1	実行 Time2	実行 Time3	実行 Time4	L1ミス数	L1ミス率 (instruction)	L1ミス率 (ld/st)	L2ミス数	L2ミス率 (instruction)	L2ミス率 (ld/st)	L1$-L2$間スループット (GB/s)	メモリスループット(GB/s)	MFLOPS	MIPS	TLBミス数	TLBミス率 (instruction)	TLBミス率 (ld/st)
Process 0	1.97E+02	1.97E+02	1.97E+02	1.97E+02	5.69E+09	1.322%	4.115%	1.24E+09	0.287%	0.894%	1.85E+00	1.93E+00	8.32E+02	2.19E+03	2.12E+03	0.000%	0.000%

Graph (sec)

時間グラフ内訳	整数ロード'メモリアクセス待ち	浮動小数点ロード'メモリアクセス待ち	ストア待ち	I/Oアクセス待ち	整数ロード'キャッシュアクセス待ち	浮動小数点ロード'キャッシュアクセス待ち	整数演算待ち	浮動小数点演算待ち	分岐命令待ち	命令フェッチ待ち	uOPコミット	その他の待ち	1命令コミット	整数レジスタ書き込み制約	浮動小数点レジスタ書き込み制約	2/3命令コミット(その他)	4命令コミット	合計
Process 0	1.23E-01	5.79E+00	3.77E+00	0.00E+00	1.30E+01	2.70E+01	2.49E+00	7.13E+01	5.81E-01	4.98E+00	3.59E+00	1.40E+00	1.49E+01	7.99E+00	0.00E+00	1.50E+01	2.55E+01	1.97E+02

時間グラフ内訳 割合 (%)	整数ロード'メモリアクセス待ち	浮動小数点ロード'メモリアクセス待ち	ストア待ち	I/Oアクセス待ち	整数ロード'キャッシュアクセス待ち	浮動小数点ロード'キャッシュアクセス待ち	整数演算待ち	浮動小数点演算待ち	分岐命令待ち	命令フェッチ待ち	uOPコミット	その他の待ち	1命令コミット	整数レジスタ書き込み制約	浮動小数点レジスタ書き込み制約	2/3命令コミット(その他)	4命令コミット	合計
Process 0	0.06%	2.93%	1.91%	0.00%	6.57%	13.70%	1.26%	36.10%	0.29%	2.52%	1.82%	0.71%	7.54%	4.05%	0.00%	7.59%	12.93%	100.00%

PA DATA (1・2)	cycle_counts	op_stv_wait	op_stv_wait_nc_pend	op_stv_wait_sxmiss_ex	branch_instructions	op_stv_wait_ex	op_stv_wait_sxmiss	instruction_counts	eu_comp_wait	cse_window_empty	load_store_instructions	branch_comp_wait	fl_comp_wait	cse_window_empty_sp_full	trap_DMMU_miss	cycle_counts
Process 0	4.96E+11	1.16E+11	0.00E+00	3.09E+08	1.24E+10	3.30E+10	1.49E+10	4.30E+11	1.86E+11	2.20E+10	1.38E+11	1.46E+09	1.80E+11	9.51E+09	2.12E+03	4.95E+11

PA DATA (3・4)	cycle_counts	inh_cmit_gpr_2write	0endop	floating_instructions	impdep2_instructions	3endop	2endop	1endop	cycle_counts	prefetch_instructions	sx_miss_count_pf	sx_miss_count_dm	op_r_iu_req_mi_go	instruction_flow_counts	dvp_count_pf	dvp_count_dm
Process 0	4.97E+11	2.01E+10	3.38E+11	9.12E+10	3.62E+10	2.01E+10	3.79E+10	3.75E+10	4.96E+11	4.12E+10	1.22E+09	1.41E+07	5.69E+09	4.39E+11	9.71E+08	9.47E+06

SPARC64VIIIfx推定値Graph (sec)

時間グラフ内訳	整数ロード'メモリアクセス待ち	浮動小数点ロード'メモリアクセス待ち	ストア待ち	I/Oアクセス待ち	整数ロード'キャッシュアクセス待ち	浮動小数点ロード'キャッシュアクセス待ち	整数演算待ち	浮動小数点演算待ち	分岐命令待ち	命令フェッチ待ち	uOPコミット	その他の待ち	1命令コミット	整数レジスタ書き込み制約	浮動小数点レジスタ書き込み制約	2/3命令コミット(その他)	4命令コミット	合計
Process 0 推定値	3.07E-02	1.45E+00	9.43E-01	0.00E+00	4.90E+00	1.02E+01	1.57E+00	4.49E+00	3.66E-01	3.13E-01	2.26E+00	8.85E-01	5.50E+00	2.89E+00	0.00E+00	6.39E+00	1.23E+01	5.45E+01

時間グラフ内訳 割合 (%)	整数ロード'メモリアクセス待ち	浮動小数点ロード'メモリアクセス待ち	ストア待ち	I/Oアクセス待ち	整数ロード'キャッシュアクセス待ち	浮動小数点ロード'キャッシュアクセス待ち	整数演算待ち	浮動小数点演算待ち	分岐命令待ち	命令フェッチ待ち	uOPコミット	その他の待ち	1命令コミット	整数レジスタ書き込み制約	浮動小数点レジスタ書き込み制約	2/3命令コミット(その他)	4命令コミット	合計
Process 0 推定値	0.06%	2.66%	1.73%	0.00%	8.99%	18.75%	2.87%	8.23%	0.67%	0.57%	4.15%	1.62%	10.09%	5.31%	0.00%	11.71%	22.59%	100.00%

All Rights Reserved, Copyright © ISLiM, RIKEN 2011~

PAデータ情報	実行 Time1	実行 Time2	実行 Time3	実行 Time4	L1ミス数	L1ミス率 (instruction)	L1ミス率 (ld/st)	L2ミス数	L2ミス率 (instruction)	L2ミス率 (ld/st)	L1$-L2$間スループット (GB/s)	メモリスループット(GB/s)	MFLOPS	MIPS	TLBミス数	TLBミス率 (instruction)	TLBミス率 (ld/st)
Process 0	1.65E+02	1.65E+02	1.65E+02	1.65E+02	5.02E+09	1.389%	4.801%	1.14E+09	0.316%	1.091%	1.95E+00	2.13E+00	9.33E+02	2.20E+03	2.36E+03	0.000%	0.000%

Graph (sec)

時間グラフ内訳	整数ロード'メモリアクセス待ち	浮動小数点ロード'メモリアクセス待ち	ストア待ち	I/Oアクセス待ち	整数ロード'キャッシュアクセス待ち	浮動小数点ロード'キャッシュアクセス待ち	整数演算待ち	浮動小数点演算待ち	分岐命令待ち	命令フェッチ待ち	uOPコミット	その他の待ち	1命令コミット	整数レジスタ書き込み制約	浮動小数点レジスタ書き込み制約	2/3命令コミット(その他)	4命令コミット	合計
Process 0	9.84E-02	3.23E+00	3.71E+00	0.00E+00	1.21E+01	2.25E+01	1.68E+00	6.35E+01	5.61E-01	4.84E+00	1.63E+00	7.68E-01	9.75E+00	5.93E+00	0.00E+00	1.08E+01	2.37E+01	1.65E+02

時間グラフ内訳 割合 (%)	整数ロード'メモリアクセス待ち	浮動小数点ロード'メモリアクセス待ち	ストア待ち	I/Oアクセス待ち	整数ロード'キャッシュアクセス待ち	浮動小数点ロード'キャッシュアクセス待ち	整数演算待ち	浮動小数点演算待ち	分岐命令待ち	命令フェッチ待ち	uOPコミット	その他の待ち	1命令コミット	整数レジスタ書き込み制約	浮動小数点レジスタ書き込み制約	2/3命令コミット(その他)	4命令コミット	合計
Process 0	0.06%	1.96%	2.25%	0.00%	7.36%	13.66%	1.02%	38.53%	0.34%	2.94%	0.99%	0.47%	5.92%	3.60%	0.00%	6.53%	14.39%	100.00%

PA DATA (1・2)	cycle_counts	op_stv_wait	op_stv_wait_nc_pend	op_stv_wait_sxmiss_ex	branch_instructions	op_stv_wait_ex	op_stv_wait_sxmiss	instruction_counts	eu_comp_wait	cse_window_empty	load_store_instructions	branch_comp_wait	fl_comp_wait	cse_window_empty_sp_full	trap_DMMU_miss	cycle_counts
Process 0	4.15E+11	9.57E+10	0.00E+00	2.48E+08	1.11E+10	3.08E+10	8.40E+09	3.62E+11	1.64E+11	2.16E+10	1.05E+11	1.41E+09	1.60E+11	9.34E+09	2.36E+03	4.16E+11

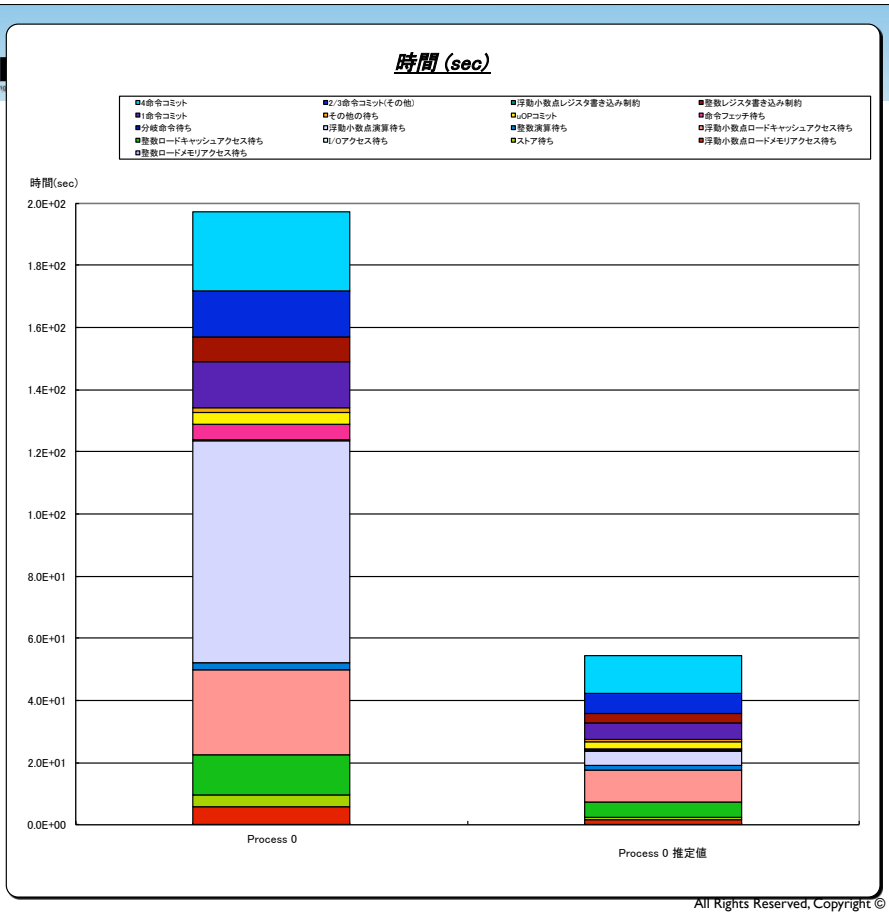
PA DATA (3・4)	cycle_counts	inh_cmit_gpr_2write	0endop	floating_instructions	impdep2_instructions	3endop	2endop	1endop	cycle_counts	prefetch_instructions	sx_miss_count_pf	sx_miss_count_dm	op_r_iu_req_mi_go	instruction_flow_counts	dvp_count_pf	dvp_count_dm
Process 0	4.15E+11	1.49E+10	2.89E+11	8.49E+10	3.44E+10	1.43E+10	2.77E+10	2.46E+10	4.16E+11	3.90E+10	1.13E+09	8.86E+06	5.02E+09	3.66E+11	8.97E+08	7.33E+06

SPARC64VIIIfx推定値Graph (sec)

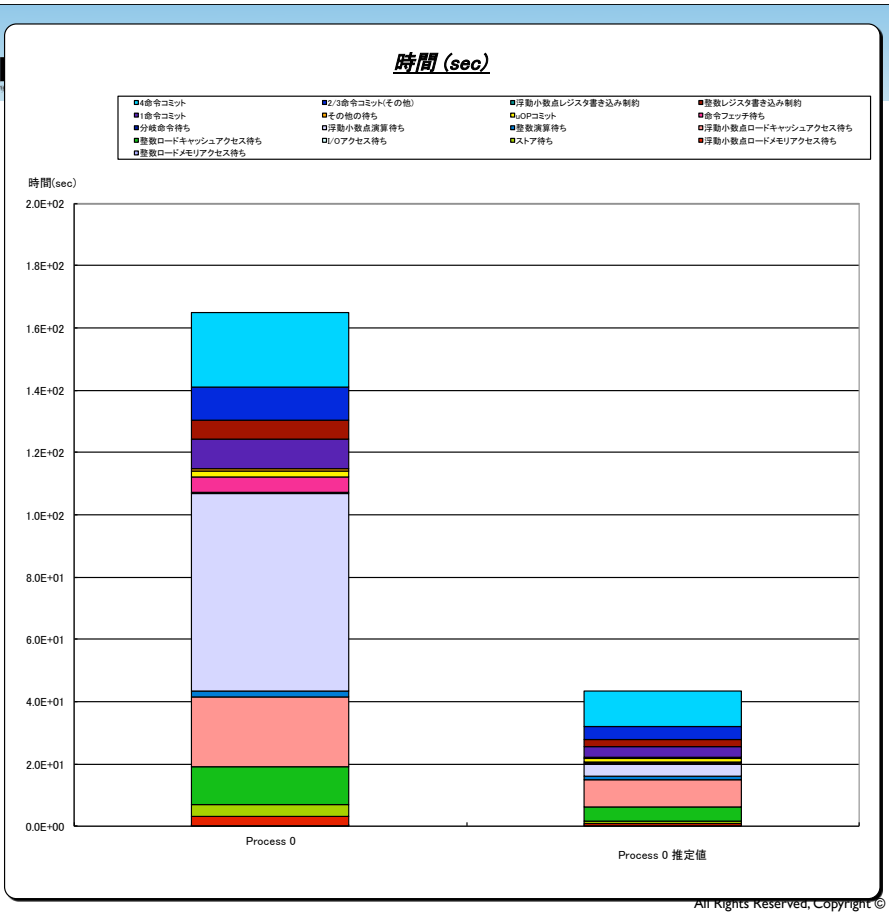
時間グラフ内訳	整数ロード'メモリアクセス待ち	浮動小数点ロード'メモリアクセス待ち	ストア待ち	I/Oアクセス待ち	整数ロード'キャッシュアクセス待ち	浮動小数点ロード'キャッシュアクセス待ち	整数演算待ち	浮動小数点演算待ち	分岐命令待ち	命令フェッチ待ち	uOPコミット	その他の待ち	1命令コミット	整数レジスタ書き込み制約	浮動小数点レジスタ書き込み制約	2/3命令コミット(その他)	4命令コミット	合計
Process 0 推定値	2.46E-02	8.09E-01	9.27E-01	0.00E+00	4.58E+00	8.51E+00	1.06E+00	4.00E+00	3.53E-01	3.05E-01	1.03E+00	4.84E-01	3.47E+00	2.11E+00	0.00E+00	4.46E+00	1.12E+01	4.33E+01

時間グラフ内訳 割合 (%)	整数ロード'メモリアクセス待ち	浮動小数点ロード'メモリアクセス待ち	ストア待ち	I/Oアクセス待ち	整数ロード'キャッシュアクセス待ち	浮動小数点ロード'キャッシュアクセス待ち	整数演算待ち	浮動小数点演算待ち	分岐命令待ち	命令フェッチ待ち	uOPコミット	その他の待ち	1命令コミット	整数レジスタ書き込み制約	浮動小数点レジスタ書き込み制約	2/3命令コミット(その他)	4命令コミット	合計
Process 0 推定値	0.06%	1.87%	2.14%	0.00%	10.58%	19.63%	2.44%	9.23%	0.82%	0.70%	2.37%	1.12%	8.01%	4.86%	0.00%	10.29%	25.90%	100.00%

All Rights Reserved, Copyright © ISLiM, RIKEN 2011~



All Rights Reserved, Copyright © ISLiM, RIKEN 2011~



All Rights Reserved, Copyright © ISLiM, RIKEN 2011~

Befor

```
*******************************************************************************
  Application - performance monitors
*******************************************************************************

             Time(s)  Instructions        MIPS       MFLOPS      Cover(%)  Start    End
-------------------------------------------------------------------------------------
  Elapsed    200.1027  1.554858e+12   7770.3003   3038.8860     87.1965     --     --  Application
-------------------------------------------------------------------------------------
  Elapsed     33.9091  309480667484    9126.7686   4700.0615     96.2603   1377   1849  hifu3d.hifu3d_cal_viscous_
  Elapsed     21.9806  185927060668    8458.6934   1721.6554     99.2490   2920   3020  hifu3d.hifu3d_cal_t_
  Elapsed     18.5975  189785811427   10204.9199   3616.7947     98.4694   2057   2157  hifu3d.hifu3d_cal_v_
  Elapsed     18.3742  186768878699   10164.7500   3586.7241     98.3019   2263   2363  hifu3d.hifu3d_cal_w_
  Elapsed     28.4768   96586898288    3391.7786    747.4074     60.7027   1158   1265  hifu3d.hifu3d_update_mixture_properties_
  Elapsed     12.8303  139624795714   10882.4238   5393.4106     99.1439   1856   1956  hifu3d.hifu3d_cal_u_
  Elapsed     12.7157  104721324854    8235.5811   3514.5505     97.0267   2766   2913  hifu3d.hifu3d_cal_grad_t_
  Elapsed      9.3909   92206173601    9818.6475   5363.4482     99.0825   2476   2547  hifu3d.hifu3d_cal_p_
  Elapsed     16.6106   54691619543    3292.5637    810.1867     55.2351     --     --  jwe_gpwd
  Elapsed      7.5414   46972190323    6228.5947   3524.1199     97.5748   3158   3244  hifu3d.hifu3d_cal_grad_phi_

             Time(s)  L2 miss(%)  mTLB-is(%)  mTLB-op(%)     Cover(%)  Start    End
-------------------------------------------------------------------------------------
  Elapsed    200.1027      0.3072      0.0000      0.0000     87.1965     --     --  Application
-------------------------------------------------------------------------------------
  Elapsed     33.9091      0.4090      0.0000      0.0000     96.2603   1377   1849  hifu3d.hifu3d_cal_viscous_
  Elapsed     21.9806      0.1960      0.0000      0.0000     99.2490   2920   3020  hifu3d.hifu3d_cal_t_
  Elapsed     18.5975      0.1811      0.0000      0.0000     98.4694   2057   2157  hifu3d.hifu3d_cal_v_
  Elapsed     18.3742      0.3953      0.0000      0.0000     98.3019   2263   2363  hifu3d.hifu3d_cal_w_
  Elapsed     28.4768      0.1413      0.0000      0.0000     60.7027   1158   1265  hifu3d.hifu3d_update_mixture_properties_
  Elapsed     12.8303      0.2457      0.0000      0.0000     99.1439   1856   1956  hifu3d.hifu3d_cal_u_
  Elapsed     12.7157      0.4320      0.0000      0.0000     97.0267   2766   2913  hifu3d.hifu3d_cal_grad_t_
  Elapsed      9.3909      0.3884      0.0000      0.0000     99.0825   2476   2547  hifu3d.hifu3d_cal_p_
  Elapsed     16.6106      0.0567      0.0000      0.0000     55.2351     --     --  jwe_gpwd
  Elapsed      7.5414      0.5914      0.0000      0.0000     97.5748   3158   3244  hifu3d.hifu3d_cal_grad_phi_
```

After

```
             Time(s)  Instructions        MIPS       MFLOPS      Cover(%)  Start    End
-------------------------------------------------------------------------------------
  Elapsed    167.8631  1.279574e+12   7622.7266   3379.7988     84.7377     --     --  Application
-------------------------------------------------------------------------------------
  Elapsed     32.9582  303491811692    9208.3789   5005.4312     96.4877   1407   1927  hifu3d.hifu3d_cal_viscous_
  Elapsed     28.9257   98329499601    3399.3813    760.7977     60.1695   1183   1295  hifu3d.hifu3d_update_mixture_properties_
  Elapsed     12.4409  103532620467    8321.9326   3587.9478     96.9842   2866   3013  hifu3d.hifu3d_cal_grad_t_
  Elapsed     10.5489  106238752306   10071.0410   4376.0215     98.6138   2356   2463  hifu3d.hifu3d_cal_w_
  Elapsed     10.0296  104768611662   10445.9932   4825.9990     99.2187   1934   2041  hifu3d.hifu3d_cal_u_
  Elapsed     10.1546  106700586942   10507.6123   4580.7646     98.0174   2143   2250  hifu3d.hifu3d_cal_v_
  Elapsed      9.4881   92693027995    9769.4053   5309.7554     98.7432   2576   2647  hifu3d.hifu3d_cal_p_
  Elapsed      9.5217  114825479098   12059.3682   5313.0464     98.2709   3020   3166  hifu3d.hifu3d_cal_t_
  Elapsed     16.1134   54403140381    3376.2605    844.6558     55.1470     --     --  jwe_gpwd
  Elapsed      7.5706   49470042876    6534.5195   3790.9597     97.8672   3304   3390  hifu3d.hifu3d_cal_grad_phi_

             Time(s)  L2 miss(%)  mTLB-is(%)  mTLB-op(%)     Cover(%)  Start    End
-------------------------------------------------------------------------------------
  Elapsed    167.8631      0.3442      0.0000      0.0000     84.7377     --     --  Application
-------------------------------------------------------------------------------------
  Elapsed     32.9582      0.4167      0.0000      0.0000     96.4877   1407   1927  hifu3d.hifu3d_cal_viscous_
  Elapsed     28.9257      0.1420      0.0000      0.0000     60.1695   1183   1295  hifu3d.hifu3d_update_mixture_properties_
  Elapsed     12.4409      0.4322      0.0000      0.0000     96.9842   2866   3013  hifu3d.hifu3d_cal_grad_t_
  Elapsed     10.5489      0.4072      0.0000      0.0000     98.6138   2356   2463  hifu3d.hifu3d_cal_w_
  Elapsed     10.0296      0.2802      0.0000      0.0000     99.2187   1934   2041  hifu3d.hifu3d_cal_u_
  Elapsed     10.1546      0.2690      0.0000      0.0000     98.0174   2143   2250  hifu3d.hifu3d_cal_v_
  Elapsed      9.4881      0.3889      0.0000      0.0000     98.7432   2576   2647  hifu3d.hifu3d_cal_p_
  Elapsed      9.5217      0.3461      0.0000      0.0000     98.2709   3020   3166  hifu3d.hifu3d_cal_t_
  Elapsed     16.1134      0.0549      0.0000      0.0000     55.1470     --     --  jwe_gpwd
  Elapsed      7.5706      0.5915      0.0000      0.0000     97.8672   3304   3390  hifu3d.hifu3d_cal_grad_phi_
```

opyright © ISLiM, RIKEN 2011~