

JAERI-Data/Code  
96-019



## 粒子輸送モンテカルロ・コードMCNPの並列処理

1996年6月

樋口健二・川崎琢治\*

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1996

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 株原子力資料サービス

粒子輸送モンテカルロ・コードMCNPの並列処理

日本原子力研究所計算科学技術推進センター

樋口 健二・川崎 琢治\*

(1996年5月20日受理)

光子・中性子輸送問題を解くモンテカルロ・コードは、各粒子に対する計算の独立性を利用したベクトル処理あるいは並列処理が可能である。本報告では、既存の汎用粒子輸送モンテカルロ・コードの並列計算への適応性について述べる。並列計算機については、ベクトル型並列計算機とスカラ並列計算機を対象とした。即ち、粒子輸送モンテカルロ・コードMCNPを対象に、①4台のベクトル・プロセッサを持つモンテカルロ装置 Monte-4 上でベクトル並列処理、②256台のスカラ・プロセッサを持つ Paragon XP/S 上で並列処理を行った。これら2種類の並列処理に関する手法及び結果について述べるとともに、粒子輸送モンテカルロ・コードの並列計算への適応性について述べる。また、STA 基本ソフトの概念設計のための既存ツール調査として、今回利用した並列コンピュータの並列プログラミング開発環境に対する評価について述べる。

Parallel Processing of Monte Carlo Code MCNP  
for Particle Transport Problem

Kenji HIGUCHI and Takuji KAWASAKI\*

Center for Promotion of Computational Science and Engineering  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Nakameguro, Meguro-ku, Tokyo

(Received May 20, 1996)

It is possible to vectorize or parallelize Monte Carlo codes (MC code) for photon and neutron transport problem, making use of independency of the calculation for each particle. Applicability of existing MC code to parallel processing is mentioned. As for parallel computer, we have used both vector-parallel processor and scalar-parallel processor in performance evaluation.

We have made i) vector-parallel processing of MCNP code on Monte Carlo machine Monte-4 with four vector processors, ii) parallel processing on Paragon XP/S with 256 processors. In this report we describe the methodology and results for parallel processing on two types of parallel or distributed memory computers. In addition, we mention the evaluation of parallel programming environments for parallel computers used in the present work as a part of the work developing STA (Seamless Thinking Aid) Basic Software.

**Keywords:** Monte Carlo, MCNP, Vectorization, Parallelization, Vector Processing, Parallel Processing, Particle Transport Problem, Programming Environment

---

\* On Loan to Fuji Research Institute Corporation, Inc.

## 目 次

|  |    |
|--|----|
| 1. はじめに .....                                  | 1  |
| 2. コード及び入力データの概要 .....                         | 3  |
| 2.1 MCNP コード .....                             | 3  |
| 2.2 入力データ .....                                | 4  |
| 2.3 コードの挙動解析 .....                             | 8  |
| 3. 計算機アーキテクチャ .....                            | 10 |
| 3.1 高速モンテカルロ装置 Monte-4 .....                   | 10 |
| 3.2 スカラ並列計算機システム Paragon XP/S .....            | 12 |
| 4. 高速化手法 .....                                 | 15 |
| 4.1 Monte-4 上におけるベクトル並列化手法 .....               | 15 |
| 4.2 Paragon XP/S 上における並列化手法 .....              | 21 |
| 5. 性能評価結果 .....                                | 26 |
| 5.1 Monte-4 上におけるベクトル並列処理 .....                | 26 |
| 5.2 Paragon XP/S 上における並列処理 .....               | 31 |
| 5.3 Monte-4 及び Paragon XP/S 上における並列処理の比較 ..... | 43 |
| 6. プログラミング環境に対する評価 .....                       | 45 |
| 6.1 Monte-4 上の並列プログラミング環境 .....                | 46 |
| 6.2 Paragon XP/S 上の並列プログラミング環境 .....           | 47 |
| 7. おわりに .....                                  | 50 |
| 謝 辞 .....                                      | 50 |
| 参考文献 .....                                     | 51 |
| 付録1 MCNP オプションの説明 .....                        | 53 |
| 付録2 MCNP コード入力データ .....                        | 59 |

## Contents

|  |    |
|--|----|
| 1. Introduction .....  | 1  |
| 2. Outline of the Code and Input Data .....                                  | 3  |
| 2.1 MCNP Code .....  | 3  |
| 2.2 Input Data .....   | 4  |
| 2.3 Code Analysis .....  | 8  |
| 3. Machine Architecture .....  | 10 |
| 3.1 Monte Carlo Machine Monte-4 .....  | 10 |
| 3.2 Distributed Memory Scalar Parallel Computer Paragon XP/S .....           | 12 |
| 4. Method Used in the High Performance Computing .....                       | 15 |
| 4.1 Vectorization and Parallelization Method on Monte-4 .....                | 15 |
| 4.2 Parallelization Method on Paragon XP/S .....                             | 21 |
| 5. Performance Evaluation .....  | 26 |
| 5.1 Vector-Parallel Processing on Monte-4 .....                              | 26 |
| 5.2 Parallel Processing on Paragon XP/S .....                                | 31 |
| 5.3 Comparison between Parallel Processing on Monte-4 and Paragon XP/S ..... | 43 |
| 6. Evaluation of Programming Environments .....                              | 45 |
| 6.1 Programming Environment on Monte-4 .....                                 | 46 |
| 6.2 Programming Environment on Paragon XP/S .....                            | 47 |
| 7. Concluding Remarks .....  | 50 |
| Acknowledgments .....  | 50 |
| References .....   | 51 |
| Appendix 1 Explanation of MCNP Option .....                                  | 53 |
| Appendix 2 Input Data for MCNP Code .....                                    | 59 |

## 1. はじめに

粒子輸送モンテカルロ・コード(以下本稿においては、MC コードと呼ぶ)は、十分に精度の良い解を得るために多大の計算時間を必要とすることが良く知られている。一方、各粒子に対する計算の独立性を使ったベクトル処理あるいは高並列処理が可能であることから、高速処理に対するさまざまなアプローチが行われてきた。これらのアプローチは大きく、高並列計算機によるアプローチとベクトル計算機によるアプローチの二つに分類される。

高並列計算機によるアプローチは、Kalos、Yazid、Martin らによる研究がある。Kalos らは、64 台のプロセッサを持つ Illiac-IV 上で中性子輸送計算(浸透問題)の高速処理を試みた<sup>[1]</sup>。Kalos らは、各プロセッサに粒子の 1 世代(発生から消滅まで)を割り当てる history-based な並列処理ではなく、各プロセッサに複数粒子の同じ計算処理を割り当てる event-based な並列処理を行った。history-based なアプローチでは、各プロセッサは、粒子の発生から消滅までのシミュレーションを逐次的に行う(粒子を一つずつ処理する)。一方、event-based なアプローチでは、衝突のシミュレーションや、衝突点を求めるための追跡計算など同じ計算処理(event)を受ける粒子群がプロセッサに割り当てられ、各 event に対する計算が並列に処理される。Kalos らの研究は、event-based なアプローチの概念を提案したという意味で注目された。また、Yazid らは、ワークステーション・クラスタ上での MCNP コードの並列処理を試み、MCNP 4 コード・パッケージのサンプル問題 17 題(簡単な幾何形状で構成される問題でコードの正常動作確認に用いる)を含む 23 の入力データに対し、58 ~ 99 % の並列化効率を得た<sup>[2]</sup>。Martin らは、BBN-ACI TC2000 及び KSR-1 上での並列処理を試み、128 台のプロセッサで構成される BBN-ACI TC2000 上で理想的な並列化効率を得た<sup>[3]</sup>。しかし、使用経験の無い KSR-1 上では、10 台以上のプロセッサ構成において低い並列化効率を得たに留まっている。Martin らは、複数プロセッサ間の負荷の不均衡を避けるため、マスター プロセスがスレーブ プロセスに動的にタスクを分配する pool of tasks と名付けた手法を用い、さらに、乱数を用いたモンテカルロ計算の再現性を保持するため、Frederickson の提案した乱数木に基づく並列計算用乱数列を用いてモンテカルロ・シミュレーションを行った。

ベクトル計算機による高速化の研究については、1980 年代にいくつかの試みが始まられた。主な研究として、Brown、Nakagawa、Asai らによる研究がある。Brown らは、Kalos が提案した event-based なアプローチによる粒子輸送モンテカルロ・コードを開発し、CYBER205 上において性能評価を行った<sup>[4]</sup>。Brown らは、同じ event を引き起こした粒子群に対し、ベクトル処理を行うとともに、粒子を領域ごとに分類しベクトル処理する手法によって高い速度向上率を得た。Nakagawa らは、同じく event-based なアプローチによる粒子輸送モンテカルロ・コードを開発し、VPP-100 及び VP2600 上において新たなコードを開発し十分な結果を得た<sup>[5]</sup>。Asai らは、コードの新規開発は高コストを要し、また信頼性を得るために長期間を要するという理由から、既存のコードを高速化するための特殊なハードウェアを搭載したモンテカルロ装置を提案し<sup>[6]</sup>、開発した<sup>[7]</sup>。

本報告では粒子輸送汎用モンテカルロ・コード MCNP コード<sup>[8]</sup>のベクトル型並列計算処理とスカラ型並列計算処理の手法、結果及び問題点を述べるとともに、両者の比較を行う。即ち、2 章では、MCNP コード(Version 4A)の特徴及び性能評価に用いたモデルについて述べる。3 章にお

いて、それぞれの計算機アーキテクチャを簡単に説明した後、4章では、Monte-4 及び Paragon XP/S 上における高速化手法について述べる。5章では、それぞれの計算機上における高速処理結果について述べる。また、本研究は、並列プログラミング環境の機能調査の一環として行われたことから、Monte-4 及び Paragon XP/S のデバッグ及び性能解析ツールに対する評価結果を6章において述べる。

## 2. コード及び入力データの概要

### 2.1 MCNP コード

#### 2.1.1 概要及び特徴

計算に用いた MCNP コードは、①エネルギーの取り扱いが連続である、②種々の放射線輸送問題を解くための機能が組み込まれている、③種々の断面積データが用意されている等の特長を持つ。また、本コードは、米国のロスアラモス国立研究所で開発され、長期にわたって改良を重ねられたコード(本研究では Version 4A を用いた)で、放射線輸送問題に対する完成度が高いことから、原子力分野で広く用いられている。

性能評価においては、人体に対する被曝線量計算問題を用いた。この計算は、計算体系の形状が非常に複雑なために、一般の工学問題を想定して開発された MCNP コードの機能を次のように拡張して使用する必要があった。

MCNP コードにおいては、自由二次曲面の論理演算で三次元領域を表現するが、計算モデルを表現する際に使用される三次元領域や二次曲面の数及び一つの三次元領域を表現する際に使用される二次曲面の数に対する制限、つまり、形状表現における制限がある。体系を表現するために使用できる領域(セルと呼ばれる)は、150 セル以内であり、また、各セルは 100 ワード以内のデータで表現されなければならない。一方、さまざまな臓器や骨によって構成される人体の形状は複雑であり、今回計算に使用した人体模型を、この MCNP コードにおける制限下で記述することが不可能であった。そこで、形状表現用配列を拡張し、計算に使用した。この拡張作業では、サブルーチン CHEKCS 及び動的割付による配列格納用コモン EPHCOM 及びコモン IMXDCS を書き換えた。その結果、今回使用した MCNP コード (Version 4A 及び Version 4)においては、使用可能なセル数及び各セルを記述する際のワード数に関する制限はない。

#### 2.1.2 一様乱数の生成法

MCNP コードは、モンテカルロ・シミュレーションに使用する一様乱数の生成法として、乗算合同法を用いている。乗算合同法においては、生成される乱数列を  $\{X_n\}$ 、 $(0, 1)$  区間に正規化される前の整数列を  $\{IX_n\}$  とすると、それぞれの数列を次の式で生成する。

$$IX_n \equiv M \times IX_{n-1} \pmod{2^{48}}$$

$$X_n = IX_n / 2^{48}$$

ここで、 $M = 5^{19} = 19073486328125$  である。 $M$  は上記漸化式によって生成される数列が最長周期( $= 2^{46}$ )を持つよう選ばれた乗数である。MCNP コードの一様乱数生成法の特徴は次のとおり。

- ① 上記の整数演算は、 $2^{48}$  の剰余計算を必要とする。通常の計算機上で演算可能な整数の値は $-2^{31} \sim 2^{31} - 1$  であるが、本コードは乱数発生に関わる整数演算を上位及び下位 24 ビットずつに分割して行うために、32 ビット計算機上でも桁溢れによって計算結果が異なることはない。

- ②修正 Leapfrog 法<sup>[9]</sup>を用いているため、計算機及び粒子の処理順序が異なった場合でも、同じ結果を得ることができる。修正 Leapfrog 法においては、各粒子のシード(種)を予め与えられた Stride(幅)を使って次のように与える。

$$IX_N \equiv M^S \times IX_{N-1} \pmod{2^{48}}$$

ここで、 $IX_N$  は N 番目の粒子が使い始める乱数のシードを表し、S は通常 (MCNP コードにおいては) 152917 という値が使われる。各粒子は、数列  $\{IX_n\}$  の S とびの値を始点として  $\{IX_n\}$  の部分列を使用することになる。この S の値は、文献<sup>[10]</sup>において、Hendrics が粒子計算において各粒子に与えるシードの間隔として望ましいとしている値で、2 進数表現における下位ビットが 01010101、上位ビットが 1001 で始まる数である。即ち、152917 の 2 進数表現は、1001010101010101 であり、この条件を満たしている。しかしながら、Hendrics は粒子輸送モンテカルロ計算は使用する乱数列の性質については、さほど敏感ではないとしている。

### 2.1.3 コードの構造及び各サブルーチンの機能

粒子輸送モンテカルロ・シミュレーションの一般的な計算フローを図 2.1 に、MCNP コード (Version 4A) の主なルーチン間の呼び出し関係を図 2.2 に示す。

図 2.1 に示す粒子のマイグレーション・ループにおいて、ソース源から取り出した中性子あるいは光子のヒストリ、即ち、粒子の誕生から消滅までを追跡する。粒子のマイグレーション・ループは、サブルーチン HSTORY に記述されている。また、図 2.2 に示したルーチンの各機能は次のとおり。

|                |   |
|----------------|---|
| <b>MCNP</b>    | 断面積データや入力データの読み込み及び内部変換を行う。                             |
| <b>HSTORY</b>  | 粒子のランダム・ウォークを行う。  |
| <b>STARTP</b>  | ランダム・ウォークを開始する際、粒子の線源からの取り出しや属性(粒子位置、飛方向、エネルギー等)の決定を行う。 |
| <b>TRACK</b>   | 粒子の飛程を追跡し、衝突点を決定する。                                     |
| <b>CHKCEL</b>  | 二次曲面の論理演算によって表現された 3 次元領域の整合性を検査する。                     |
| <b>LGEVAL</b>  | 境界を越えた粒子の次に侵入するセルを決定するため、あるセルと点との包含関係を調べる。              |
| <b>MCRUN</b>   | 粒子のランダム・ウォーク・シミュレーション及び出力を制御する。                         |
| <b>TRANSPT</b> | 粒子のランダム・ウォーク・シミュレーションを制御する。                             |

### 2.2 入力データ

今回性能評価に用いた計算モデルは、人体に対する線量当量計算である<sup>[11]</sup>。入力データ (MCNP コード用) を付録 2 に、計算に用いた MCNP コードの機能及びそれらを使用するための入力データの説明を付録 1 に示す。また、人体模型と線量当量の計算手法に関する説明を以下に示す。

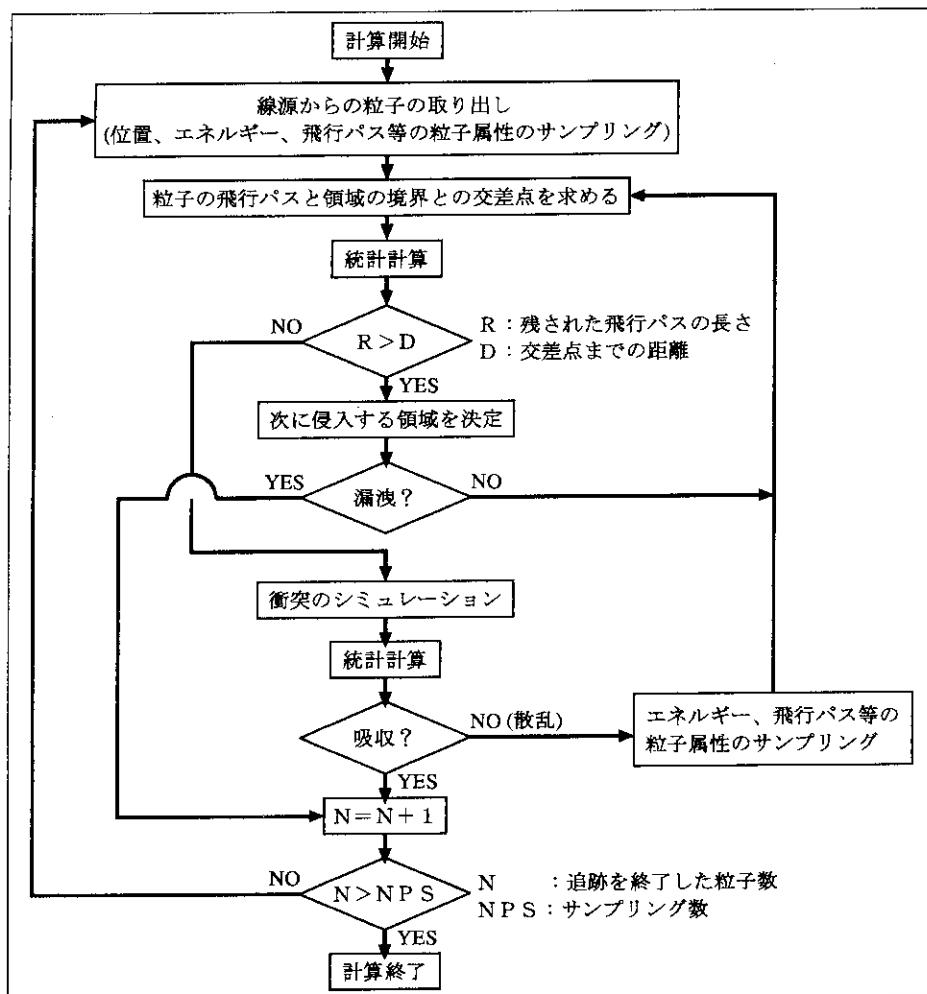


図 2.1 粒子輸送モンテカルロ・コードの計算フロー

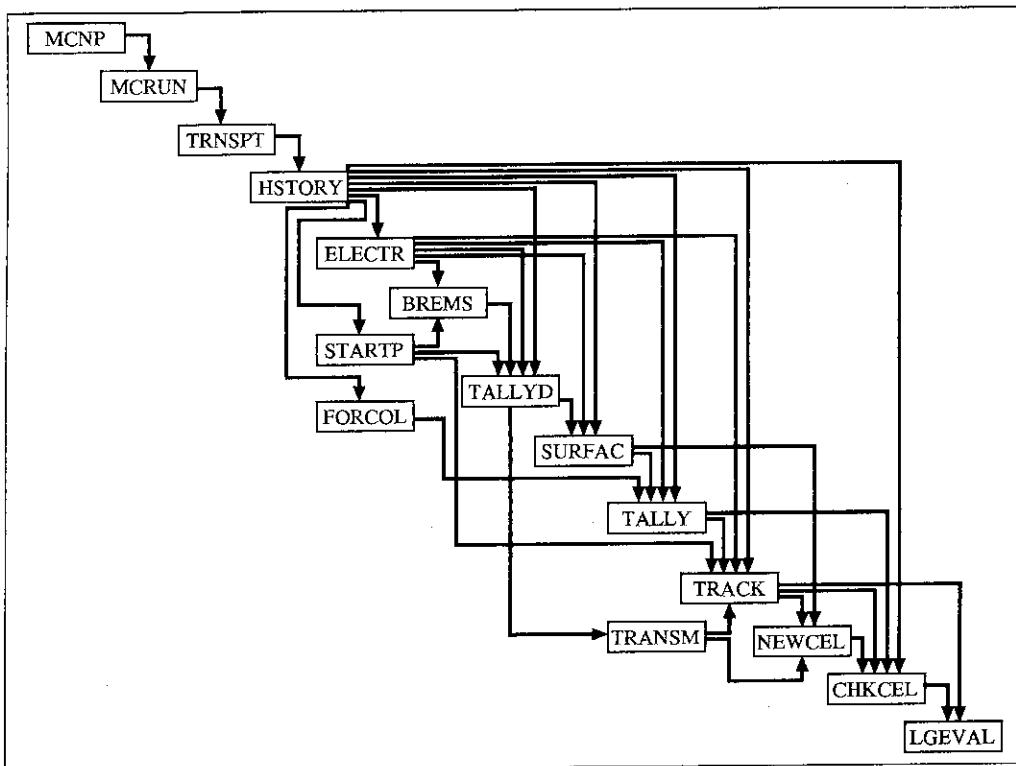


図 2.2 MCNP コード (Version 4A) 主要ルーティング木構造

### 2.2.1 人体模型

人体模型は、米国のオークリッジ国立研究所で開発された Cristy Phantom<sup>[12]</sup> を用いた。Cristy Phantom は、二次曲面の論理演算で各臓器が表現されている。骨髓は、骨と一緒に混じり合っていると仮定されている。今回用いた人体模型は、肺、心臓、肝臓等の 10 種類の臓器と背骨、肋骨等 4 種類の骨及び軟組織によって構成されている。1977 年の ICRP 勧告<sup>[13]</sup>において、対象臓器としての指定があり、その後いくつかの提案があった目及び食道は、定義されていない。

### 2.2.2 実効線量当量算出に用いた係数及び条件

単一の入射エネルギー  $E_0$  の線源を用いた場合の人体に対する実効線量当量  $H_E(E_0)$  は次の式で算出される。

$$H_E(E_0) = \sum_T w_T \times \left\{ \sum_i k_T^\gamma(E_i) \times \Phi_T^\gamma(E_i) \times Q_T^\gamma(E_i) + \sum_j k_T^n(E_j) \times \Phi_T^n(E_j) \times Q_T^n(E_j) \right\} / \Phi_0$$

ここで、 $E_0$  は線源のエネルギー、 $w_T$  は  $T$  番目の臓器または骨に対する組織荷重係数、 $E_i$  は  $i$  番目の粒子 ( $\gamma$  線) の衝突時のエネルギー、 $E_j$  は  $j$  番目の粒子 (中性子) の衝突時のエネルギー、 $Q_T^\gamma$  及び  $Q_T^n$  はそれぞれ  $T$  番目の組織に対する  $\gamma$  線及び中性子の線質係数、 $\Phi_T^\gamma$  及び  $\Phi_T^n$  はそれぞれ  $T$  番目の組織に対する  $\gamma$  線及び中性子の粒子フルエンス、 $\Phi_0$  は入射粒子束、 $k_T^\gamma$  及び  $k_T^n$  はそれぞれ  $\gamma$  線及び中性子の組織  $T$  に対するカーマ係数である。

**組織荷重係数** 組織荷重係数は、人体全体に対する実効線量当量を計算する際に用いられる係数である。この組織荷重係数について、ICRP勧告では、「違った臓器に対する放射線被曝による死亡危険性を画一的に評価するための量」と定義している。組織荷重係数は、全身が均等に放射線被曝した時、その被曝によるある組織の全身に及ぼす確率的影響の比を表現している。表 2.1 に計算に使用した組織荷重係数を示す。

表 2.1 ICRP 勧告による組織荷重係数

| 組織   | 荷重係数 |
|------|------|
| 生殖腺  | 0.25 |
| 乳房   | 0.15 |
| 赤色骨髓 | 0.12 |
| 肺    | 0.12 |
| 甲状腺  | 0.03 |
| 骨表面  | 0.03 |
| その他  | 0.30 |

**カーマ係数**  $\gamma$  線や中性子などの間接電離放射線と物質との相互作用によって生じた荷電粒子の初期運動エネルギーの合計をカーマ (kerma) と言い、線量計算においては、吸収線量 (absorbed dose) の良い近似を与える。カーマ係数は、物質中における放射線のフルエンスをカーマに換算するための換算係数で、単位は  $Gy \text{ cm}^2$  である。中性子に対するカーマ係数は、人体の軟組織に対して定義されたカーマ係数を文献<sup>[14]</sup> より参照した。 $\gamma$  線に対するカーマ値は、カーマ係数等によるカーマ当量への変換を行わずに、単に吸収エネルギーを用いた。

**線質係数** 線質係数は、放射線の線質(種類やエネルギー)によって異なる生物に対する影響を考慮する係数である。荷電粒子が水中を通過する際に失う単位距離あたりのエネルギー、つまり線エネルギー付与 (LET) の関数として決められる。カーマ係数と同様、粒子のエネルギーの関数である。しかし、 $\gamma$  線の線質係数は、エネルギーの値にかかわらず 1 とした。中性子に対する線質係数は、カーマ因子と同様、文献<sup>[14]</sup> より参照した。この値は、文献<sup>[14]</sup> における勧告において 2 倍に引き上げられたが、ここでは、それ以前の値を使用している。

**実効線量当量算出において選択した臓器** モンテカルロ計算により各臓器に対する線量当量を評価した後、実効線量当量を算出するために「生殖系臓器」及び「その他の臓器」を次の基準にしたがって選択した。

- 生殖系の組織として定義された卵巣及び睾丸の中から、最も線量当量の高い組織を 1 つ選び、これを生殖系の組織の線量当量とした。

- 「他の臓器」として、線量当量の高い順に 5 つの臓器を選び、これらの線量当量を「他の臓器」の線量当量とした。

**放射線場に関する条件** 線源は、単一エネルギーの平行ビームである。粒子束  $\Psi$  で割ることにより、線源の強度に依存しない量、つまり、粒子束あたりの線量当量を計算した。なお、人体を取り囲む空気の濃度は、標準状態(摂氏零度、1 気圧)の乾燥空気の  $10^{-5}$  倍とした。

### 2.2.3 計算に用いた MCNP コードの機能

MCNP コードには、放射線輸送問題において使用されるさまざまなタリーが用意されている。指定された面における中性子束を算出するもの、指定された領域における吸収エネルギーを算出するもの等である。今回の計算においては、F6 タリーを使用した。F6 タリーは、指定された領域における単位質量あたりの吸収エネルギーを求めるための中性子 /  $\gamma$  線用のタリーであり、ヒストリーあたりの値を出力する。既に述べたように、 $\gamma$  線の場合、線質係数は、エネルギーの値にかかわらず 1 であるから、MCNP コードによって出力される rad 単位の吸収線量を rem 単位の線量当量にそのまま単位変換し、さらに Sv に変換した。

### 2.3 コードの挙動解析

上記計算を行った時の、オリジナル・コード(スカラ版)の各サブルーチンに対する計算時間の分布を表 2.2 に示す。

表 2.2 オリジナル MCNP コードのサブルーチンの実行時間コスト

|   | サブルーチン名 | 実行時間の比率 |    | サブルーチン名          | 実行時間の比率 |
|---|---------|---------|----|------------------|---------|
| 1 | TRACK   | 34.6 %  | 10 | SOURCB           | 0.9 %   |
| 2 | LGEVAL  | 27.4 %  | 11 | ROTASZ           | 0.4 %   |
| 3 | CHKCEL  | 17.6 %  | 12 | TALLY            | 0.4 %   |
| 4 | ACETOT  | 8.5 %   | 13 | SURFAC           | 0.4 %   |
| 5 | STARTP  | 1.7 %   | 14 | QPOL             | 0.4 %   |
| 6 | COLIDN  | 1.6 %   | 15 | ACEGAM           | 0.3 %   |
| 7 | HSTORY  | 1.4 %   | 16 | NEWCEL           | 0.3 %   |
| 8 | RANG    | 1.2 %   | 17 | BREM             | 0.3 %   |
| 9 | XSEC    | 0.9 %   |    | 合計 <sup>*1</sup> | 98.3 %  |

<sup>\*1</sup> 主要ルーチンのみを対象としたため、合計 100 % とならない。

- 粒子輸送モンテカルロ・コードの計算処理は、入出力処理を除けば、
- ①粒子の追跡計算
  - ②衝突のシミュレーション

### ③統計処理

の3つに大別される。このうち、最も計算コストの高い処理は、①であり、入力データによって異なるが、全体の50～80%の計算時間が費やされる。①に相当するTRACK、CHKCEL、LGEVAL等のサブルーチンは、粒子のランダム・ウォークを行う際、粒子の飛程と領域との交差計算を行いながら、粒子を追跡する。また、衝突のシミュレーションや断面積データの内部変換<sup>\*1</sup>を行うサブルーチン群は、COLIDN、ROTASZ、ACEGAM、ACETOTであり、約11%の計算時間が費やされている。その他、一様乱数の生成に約1.2%の計算時間が費やされている。

---

<sup>\*1</sup> MCNPコードにおいて、エネルギーの取り扱いは連続である。このため、離散的に与えられた断面積データの内部変換が必要である。

### 3. 計算機アーキテクチャ

#### 3.1 高速モンテカルロ装置 Monte-4

平成4年度に製作を完了した高速モンテカルロ装置は、粒子輸送モンテカルロ・コード高速化のために開発された専用計算機である。既存のスーパーコンピュータ(NEC SX-3/11)をベース・プロセッサとして、新規開発されたハードウェアが付加され、また、既存のハードウェアの一部が改良されている。図3.1に本装置の構造を示す。

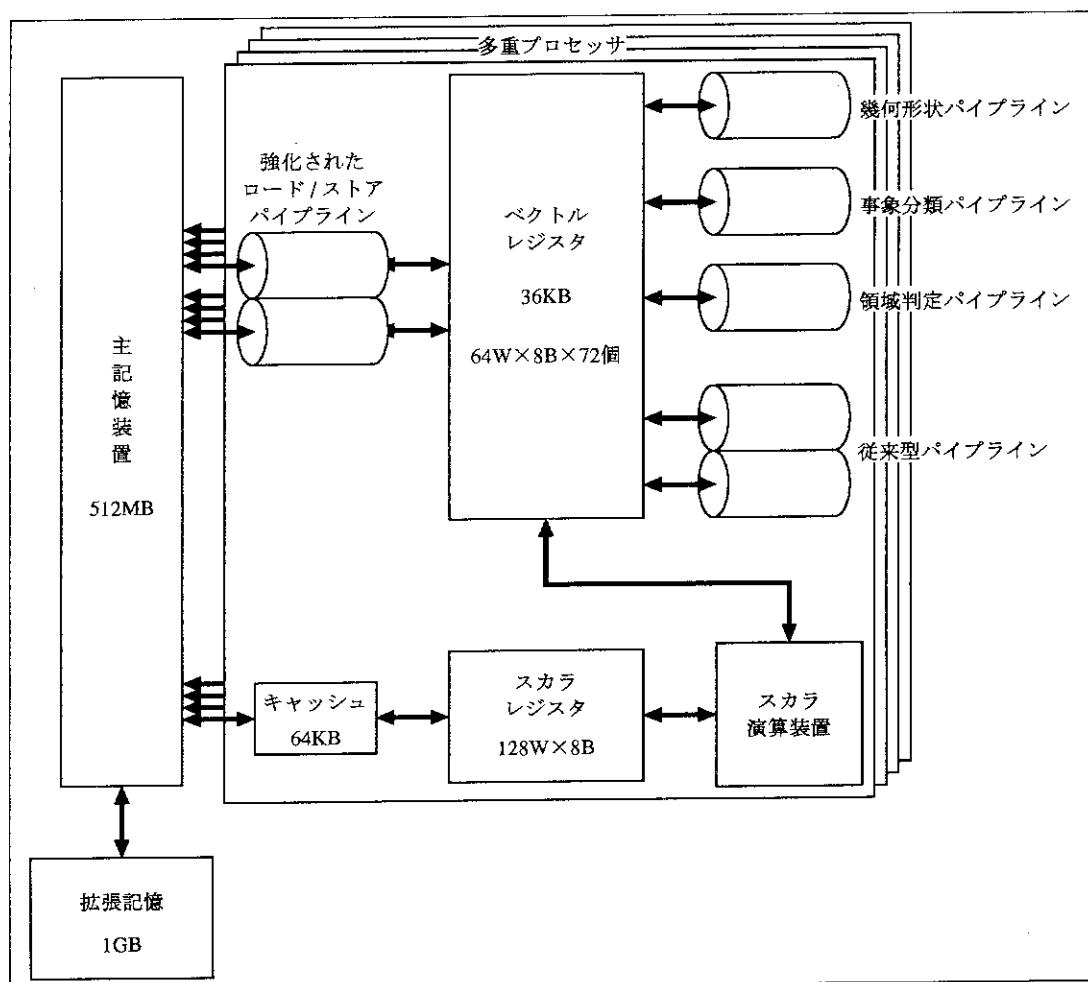


図3.1 Monte-4 ハードウェア構成

4台のベクトル・プロセッサは、ローカル・メモリ(局所記憶)を持たず、512 MBの主記憶を共有する。各ベクトル・プロセッサは、ベース・プロセッサと同様の演算パイプラインに加えて、3つのモンテカルロ・パイプライン(3.1.1節参照)を搭載している。ベクトル演算における最大要素数(ベクトル処理する際の最大ベクトル長)は、64である。ベクトル処理におけるデータの流れは、

主記憶 → ベクトル・レジスター → 主記憶

である。また、スカラ処理におけるデータの流れは、

主記憶またはキャッシュ  $\leftrightarrow$  スカラレジスタ  $\leftrightarrow$  スカラ演算装置

である。以下、本節では、主に、粒子輸送モンテカルロ・コード高速化のために新規開発あるいは改良された本装置のハードウェア上の特長について述べる。

### 3.1.1 モンテカルロ・パイプライン

本装置は、粒子輸送モンテカルロ計算において多用され、かつ、従来のベクトル計算機においてベクトル処理が困難な処理を高速化するため、モンテカルロ・パイプラインと呼ばれる3種類の特殊パイプラインを搭載している。各モンテカルロ・パイプラインの概念を以下に示す。

**幾何形状パイプライン** 粒子輸送モンテカルロ・コードにおいては、2次あるいは4次曲面の論理演算によって表現された3次元領域中の粒子を追跡する。この追跡計算において、粒子の現在位置から領域の境界までの距離を計算する際、各粒子が属する領域を構成する曲面の種類によって粒子を分類する必要があるが、この処理は、従来のベクトル計算機においてベクトル化が困難な多分岐の条件分岐文によって行われる。本パイプラインは、従来スカラ処理によって行われていたこの種のDOループを高速処理する。

**事象分類パイプライン** 粒子輸送モンテカルロ・コードのベクトル処理においては、散乱や吸収といった事象ごとに粒子を集め、ベクトル処理を行う。本パイプラインは、粒子を事象によって高速に分類し、粒子バンクを作成する。

**領域判定パイプライン** 2次あるいは4次曲面の論理演算によって表現された3次元領域において、粒子を追跡する際、ある点がどの領域に含まれるかを判定する処理が必要である。本パイプラインは、この処理を行うための二値論理式の評価を高速に行う。

### 3.1.2 強化されたロード / ストア・パイプライン

粒子輸送モンテカルロ・コードのベクトル処理においては、複数の粒子を同時に追跡する。計算において、各粒子の属性データは間接番地によって参照される。ところが、間接番地参照は、連続番地参照と異なり、主記憶からベクトル・レジスタへのデータ転送が遅く、このため、演算パイプラインに遊びが生じ、ベクトル・プロセッサの性能が低下する。本装置においては、間接番地参照データの転送能力が改造前のベース・プロセッサと比較し、8倍に強化されている。

### 3.1.3 並列処理機能

粒子輸送問題においては、各粒子に関する処理は独立であり、この独立性を利用した並列処理による高速化が可能である。本装置においては、4台のプロセッサを用いた並列処理が可能である。並列処理には、サブルーチン単位で並列処理を行うマクロ・タスク機能とDOループや文の集まりを並

列処理するマイクロ・タスク機能の 2 種類がある。本研究においては、マクロ・タスク機能を用いて並列処理を行った。その手法については 4 章で後述する。

### 3.2 スカラ並列計算機システム Paragon XP/S

平成 7 年度に原研が導入した並列計算機システム Paragon XP/S のアーキテクチャを図 3.2 に示す。

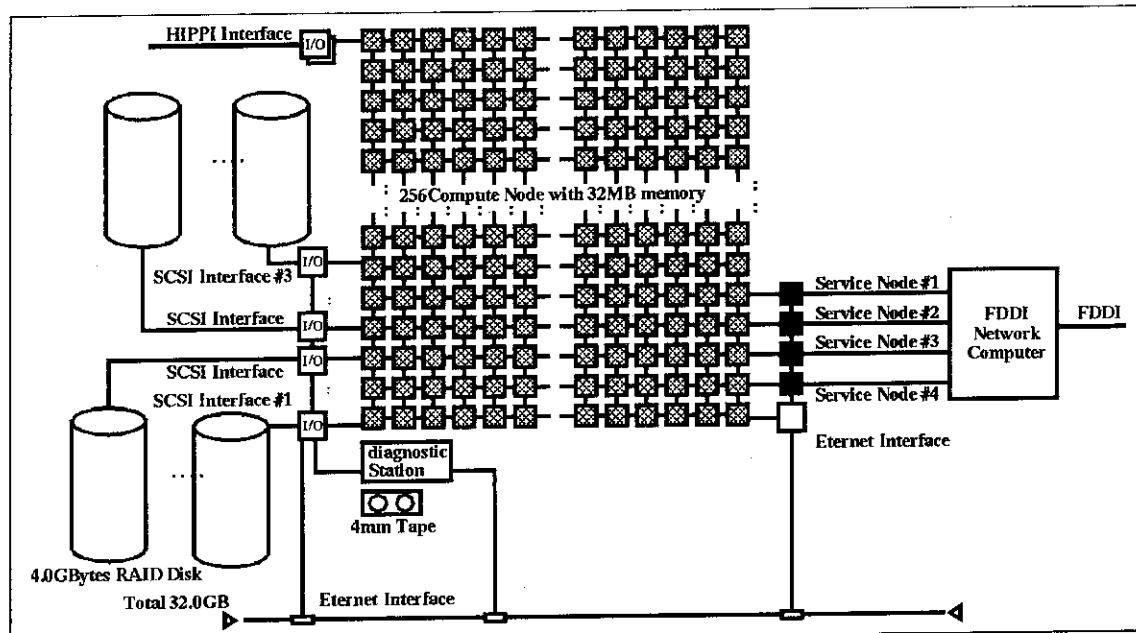


図 3.2 Paragon XP/S ハードウェア構成

本システムは、256 台のノードで構成され、各ノードは、32 MB の分散メモリを有する。各ノードの演算処理性能は、75 MFLOPS であり、したがって、システム全体の最大処理性能は、19.2 GFLOPS である。ノード間の最大通信速度は、200 MB/秒である。システムには、FDDI インターフェースによりアクセスすることができる。利用者は、本システムの有効利用のために用意された次節に示す 3 種類のモードで、本システムを使用する。

#### 3.2.1 システムの利用形態

**プログラムの作成、編集及び翻訳** Paragon XP/S そのものではなく、Paragon XP/S にイーサネット接続したサービス・ノード (SUN SPARC) 上でプログラムの作成、編集及び翻訳を行う。

**プログラムの対話的実行及びデバッグ** 32 台のノードで構成された小規模システム上で、プログラムの対話的実行及びデバッグを行う。

**プログラムのプロダクション・ラン** 既にデバッグが終了し、完成したプログラムを用いて、大規模計算を行う。

### 3.2.2 並列プログラミング・ライブラリ

**PVM ライブラリ** ネットワークに接続された異機種 UNIX コンピュータ群を、単一の並列コンピュータ（パラレルバーチャルマシン）として利用することを目的として、米国のオークリッジ国立研究所にて開発された並列ライブラリである。

PVM のライブラリ関数として提供されている機能には、プロセス制御、ステータス情報の取得と設定、実行時設定、メッセージパッシングがある。表 3.1 に MCNP 4A コードで使用している PVM ライブラリ関数を示す。

表 3.1 主要な PVM ライブラリ関数

| 種別            | 関数名          | 機能                              |
|---------------|--------------|---------------------------------|
| プロセス制御        | pvmfkill     | PVM プロセスを終了させる。                 |
|               | pvmfspawn    | 新規の PVM プロセスを起動する。              |
| ステータス情報の取得と設定 | pvmfconfig   | 現在のバーチャルマシンに関する情報を返す。           |
|               | pvmfexit     | PVM から離脱することを宣言する。              |
|               | pvmfmytid    | PVM プロセスの識別番号を返す。               |
|               | pvmfparent   | 呼び出しプロセスを生成した PVM プロセスの識別番号を返す。 |
|               | pvmfpstat    | 指定した PVM プロセスの状態を返す。            |
| メッセージパッシング    | pvmfinitsend | デフォルト送信バッファをクリアする。              |
|               | pvmfbuinfo   | メッセージバッファに関する情報を返す。             |
|               | pvmfmcast    | 指定された PVM プロセス群にマルチキャストする。      |
|               | pvmfpack     | データをメッセージバッファにパックする。            |
|               | pvmfrecv     | メッセージを受信する。                     |
|               | pvmfsend     | メッセージバッファの内容を送信する。              |
|               | pvmfunpack   | データをメッセージバッファからアンパックする。         |

**NX ライブラリ** Paragon OSF/1 システムコール群に含まれた、並列ライブラリである。

NX のライブラリ関数として提供されている機能は、プロセス制御、ステータス情報の取得と設定、実行時設定、メッセージパッシング、グローバルオペレーションがある。表 3.2 に 4.2.2 節で述べる PVM から NX への書換えで使用した NX ライブラリ関数を示す。

表 3.2 主要な NX ライブライリ関数

| 種別                | 関数名       | 機能                    |
|-------------------|-----------|-----------------------|
| ステータス情報の<br>取得と設定 | mynode    | 呼び出しプロセスのノード番号を返す。    |
|                   | numnodes  | アロケートされたノード数を返す。      |
| メッセージ<br>パッシング    | cprobe    | 指定されたタイプのメッセージの到着を待つ。 |
|                   | crecv     | メッセージを受信する。           |
|                   | csend     | メッセージを送信する。           |
|                   | gsendx    | 指定されたノード群にマルチキャストする。  |
|                   | infocount | 受信メッセージのバイト数を返す。      |
|                   | infonode  | 受信メッセージを送信したノード番号を返す。 |
|                   | infotype  | 受信メッセージのタイプを返す。       |

## 4. 高速化手法

本章では、Monte-4 及び Paragon XP/S 上での高速化手法について述べる。4.1 節において前者の、4.2 節において後者の説明を行う。

### 4.1 Monte-4 上におけるベクトル並列化手法

Monte-4 は、4 台のベクトル・プロセッサを持つ、メモリ共有型の並列計算機である。したがって、同計算機上で高い性能を獲得するためには、コードのベクトル並列化(4 台のベクトル・プロセッサを用いた並列処理による高速化)が必要である。その手法について述べる。

#### 4.1.1 MCNP コードの計算フロー

扱う粒子の種類や統計値として求める物理量によって計算フローは若干異なるが、大要は、5 ページの図 2.1 に示したように、粒子を一つづつ取り出し、以下の処理を行う。

- ① 乱数と分布関数等線源に対する条件を用いて、粒子の初期値(位置、飛方向、飛程の長さ、エネルギー等)を決定する。
- ② 粒子の現在位置から飛方向に沿った領域の境界までの距離を計算する。
- ③ 境界までの距離と粒子の飛程の長さを比較し、粒子が領域の境界を越えたか否かを決定する。
- ④ 粒子束や Energy deposition 等興味ある物理量について、粒子のその領域への寄与分を計算する。
- ⑤ 粒子が領域の境界を越えた場合、粒子が次に進入する領域を探し、②へ戻る。ただし、体系外へ出た場合、漏洩したものと判断し、追跡を終了する。その領域にとどまった場合、次の⑥において衝突のシミュレーションを行う。
- ⑥ 求めた衝突点において、乱数と断面積データを用いて、衝突のシミュレーションを行う。この結果、粒子が散乱したか、二次粒子を生成した場合、さらに追跡を続けるために②へ戻る。粒子が吸収された場合、追跡を終了する。

#### 4.1.2 ベクトル化手法

オリジナル版における、粒子を一つづつ追跡しているループは、サブルーチン呼び出しや再帰的処理を含むため、ベクトル処理には適さない。一般に、既存の粒子輸送モンテカルロ・コードにおいては、ベクトル処理により高速処理可能な DO ループが皆無に等しい。そこで、ベクトル化においてはこの計算フローを変更し、複数(数百~数千)の粒子を同時に追跡するようコードを書き換える。さらに上記 4.1.1 に示した各処理ごとに粒子を分類し、各粒子群をベクトル処理可能な DO ループによって処理するよう書き換える。ベクトル化手法に関して、より詳細に説明すれば、次のとおりである。中性子や光子の粒子輸送問題を解くモンテカルロ・コードでは、中性子及び  $\gamma$  線が衝突する原子核と比較し、粒子相互の反応断面積と粒子密度が小さいことから、粒子間の相互作用を考慮せず、シ

ミュレーションを行う。すなわち、個々の粒子の挙動は互いに独立である。モンテカルロ法により粒子輸送問題を解く場合、ある一つの粒子が誕生してから消滅するまでを 1 世代または 1 ヒストリと呼んでいるが、5 ページの図 2.1 からわかるように、オリジナル・スカラ版では、ある 1 世代の計算が終了した後、次世代の計算を開始するというように、ランダムウォーク・シミュレーションを 1 粒子ずつ逐次的に処理する計算フローとなっている。ベクトル版はイベント・バンク方式と呼ばれる手法を用いて、複数粒子を同時に処理するようアルゴリズムが変更されている。イベント(事象)とは粒子のランダムウォークに必要な様々な処理、すなわち、上記 4.1.1 に示す ① ~ ⑥ 等である。各粒子は事象ごとに分類されており、同一の粒子バンク中の粒子に関してベクトル処理を行っている。ここで、粒子バンクとは、粒子(実際には粒子番号)を事象ごとに格納する配列である。

#### 4.1.3 モンテカルロ・パイプラインの適用

粒子輸送モンテカルロ・コードを上記手法により、ベクトル化し、さらに本装置に装備されたモンテカルロ・パイプラインによって高速化する手法を述べる。

**幾何形状パイプラインの適用** 図 4.1 (a) は、ベクトル化された MCNP コードの一部である。

この DO ループは、上記 4.1.1 中の ② 及び ③ の処理の一部であり、粒子が現在属する領域にとどまるか、境界を越えるかを判定するため、幾何形状ごとに粒子を分類している。この DO ループは、多分岐の条件分岐文を含むため、従来のベクトル計算機上では高速化できない。この部分に本パイプラインを適用した例を図 4.1 (b) に示す。本パイプラインは、ライブラリ・コールの形式で使用する。呼び出し名は、VGSORT であり、4 番目の引き数である 22 は、分岐の数、VA は分類キー、N30BK、N40BK、... は分類された粒子番号の格納用配列である。この例では、本パイプラインの適用により、処理が約 5 倍高速化されている。

**事象分類パイプラインの適用** 図 4.2 (a) は、同じくベクトル化された MCNP コードの一部である。

この DO ループは、粒子を二分岐の条件分岐文によって事象(処理)ごとに分類し、粒子バンクを作成している。この処理は、ベクトル化された粒子輸送モンテカルロ・コードにおいて頻繁に行われる。二分岐の条件分岐文を含む DO ループは、ベクトル処理可能であるが、条件分岐命令に対して、制御変数(マスク)を用いてベクトル・データの圧縮(Compress)または伸長(Expand)等の処理を行うため、高い速度向上率は望めない。本パイプラインをこの DO ループに適用し、さらに高速化を図る。この部分に本パイプラインを適用した例を図 4.2 (b) に示す。幾何形状パイプラインと同様、本パイプラインは、ライブラリ・コールの形式で使用する。呼び出し名は、VESORT であり、図における WGT\_V は分類キー、NBK\_EXPIRX 及び NBK\_TRACK は分類された粒子番号の格納用配列である。この例では、本パイプラインの適用により、処理が約 2 倍高速化されている。

**領域判定パイプラインの適用** 図 4.3 (a) は、同じくベクトル化された MCNP コードの一部である。

```

*vdir novector
  DO 4000 II_=1,I_10
  JJ_=NBK_10(II_)
  GO TO(1030,1040,1040,1040,1050,1060,1070,1080,1090
  1      ,1100,1110,1120,1130,1140,1150,1160,1170,1180
  2      ,1190,1200,1210,1220,1230,1240,1240) K_V(JJ_)
1030 CONTINUE
  I30=I30+1
  N30BK(I30)=JJ_
  GO TO 4000
1040 CONTINUE
  I40=I40+1
  N40BK(I40)=JJ_
  •
  •
  •
1240 CONTINUE
  I240=I240+JJ_
  N240BK(I240)=JJ_
4000 CONTINUE

```

(a)

```

*vdir nodep
  DO 4000 II_=1,I_10
  JJ_=NBK_10(II_)
  VA(II_)=K_V(JJ_)
4000 CONTINUE
CALL VGSORT22(VA,NBK_10,I_10,22,N30BK,I30,N40BK,I40, ...

```

(b)

図 4.1 幾何形状パイプラインを適用したコード例

```
*vdir novecter
DO 4000 II_=1,I_10
JJ_=NBK_10(II_)
IF(WGT_V(JJ_).LE.0.) THEN
  I_EXPIRX=I_EXPIRX+1
  NBK_EXPIRX(I_EXPIRX)=JJ_
ELSE
  I_TRACK=I_TRACK+1
  NBK_TRACK(I_TRACK)=JJ_
4000 CONTINUE
```

(a)

CALL VESORT(WGT\_V,NBK\_EXPIRX,I\_EXPIRX,NBK\_TRACK,I\_TRACK)

(b)

図 4.2 事象分類パイプラインを適用したコード例

このサブルーチン、LGEVAL は、ある点が複数の曲面によって構成された三次元領域に含まれるか否かを判定する処理を行うが、計算コストが高いにもかかわらず、再帰的処理を含むため、ベクトル化が困難である。この部分に本パイプラインを適用した例を図 4.3 (b) に示す。その他のモンテカルロ・パイプラインと同様、本パイプラインは、ライブラリ・コールの形式で使用する。呼び出し名は、LGEVAL であり、図 4.3 (b) における LG は評価される論理式の要素が格納された配列である。この例では、本パイプラインの適用により、処理が約 13 倍高速化されている。

**並列化手法** 上記手法によってベクトル化したコードを、さらに、マクロ・タスク機能によって並列処理し、高速化した。その手法について次に述べる。Monte-4 は、共有メモリ方式の並列計算機であり、局所メモリを持つ計算機（後述）と比較し、並列化は容易である。Monte-4 上での並列処理にはマクロタスク機能またはマイクロタスク機能を用いる 2 つの方法がある。前者がサブルーチンのような大きな計算単位の並列性に着目して並列化するのに対し、後者は DO ループや文の集まりのような比較的小さな並列性に着目して並列化する。粒子輸送モンテカルロ・コードは、計算コストの集中した大きな DO ループが存在しないため、マイクロタスク機能を用いて並列化しても大きな効果を得ることは難しく、マクロタスク機能を用いて並列化する。即ち、今回の作業では、各プロセッサに均等数の粒子を割り当て、これら粒子に対するベクトル処理をマクロタスク機能を用いて並列処理を行った。ここで用いた基本的な技法については次のとおり。

**タスクの生成と消去** タスクを生成（並列処理を開始）するための関数 *ptfork*、タスクを消去（並列処理を終了）するための関数 *ptjoin* 等を粒子シミュレーションを制御しているサブルーチンに挿入し、マクロ・タスク機能による並列処理を実行する。

**グローバル・コモンとローカル・コモン** スカラー処理及びベクトル処理と比較し、並列処理では、プログラムにおけるデータの割り付け方法に大きな違いがある。スカラー処理及びベクトル処理

```

FUNCTION LGEVAL(LG,N)
C   EVALUATE LOGICAL EXPRESSION LG OF LENGTH N.
C   REPRESENTATION OF LOGICAL ELEMENTS:
C   (    1000001    TRUE    1
C   )    1000002    FALSE    0
C   UNION 1000003    INTERSECTION IMPLLICIT
C   DIMENSION LG(*)
C
      LG(N+1)=1000002
      I=0
      L=0
10   LGEVAL=1
20   I=I+1
      IF (LG(I).GT.1) GO TO 40
      LGEVAL=MIN(LGEVAL,LG(I))
      IF (LGEVAL.NE.0) GO TO 20
30   I=I+1
      IF (LG(I).LT.2) GO TO 30
40   IF (LG(I).NE.1000003) GO TO 50
      IF (LGEVAL.EQ0) GO TO 10
      IF (L.EQ.0) RETURN
      GO TO 60
50   IF (LG(I).NE.1000001) GO TO 80
      L=L+1
      IF (LGEVAL.NE.0) GO TO 20
60   M=1
70   I=I+1
      IF (LG(I).EQ.1000001) M=M+1
      IF (LG(I).EQ.1000002) M=M-1
      IF (M.NE.0) GO TO 70
80   L=L-1
      IF (I.NE.N+1) GO TO 20
      RETURN
      END

```

(a)

 $J_{\_}(II\_)=1-LGEVAL(LG_{\_}(II\_),N)$ 

(b)

図 4.3 領域判定パイプラインを適用したコード例

では、全てのデータが静的領域に割り付けられるが、並列処理は静的領域または動的領域に割り付けられる。並列処理で使用されるコモンは、グローバル・コモンとローカル・コモンである。すべてのプロセッサにおいて共通に使用されるデータが割り付けられるグローバル・コモンと各プロセッサにおいて個別に使用されるデータが割り付けられるローカル・コモンの混同は、エラーを引き起こす原因となる。例えば、次の例を考える。ここでは、手続き AAA で変数 A の値を定義し、その値を手続き BBB で参照している。この場合、変数 A はローカルデータとして割り当てられているため、手続き AAA が終了した時点で解放されてしまう。従って、手続き BBB で変数 A を参照するとき、その値は手続き AAA で定義した値であるかどうかは保証されない。

```

SUBROUTINE BBB
B = A
RETURN
ENTRY AAA
A = 12345
RETURN
END

```

上記手続きを正常動作させるためには、SAVE 文を使用する(共通データとする)か、変数 A をグローバル・コモンに割り付ける必要がある。並列化のためのプログラミングでは、プロセッサ間で共有すべき変数をローカル・コモンに割り付ける、あるいは各プロセッサにおいて独自に定義・参照する変数をグローバル・コモンに割り付ける、といったグローバル / ローカル・コモンの誤用がエラーを引き起こすことが多い。従って、データの割り付けられている場所及び値が保証される時間を十分理解してプログラミングする必要がある。

**排他制御** 複数のプロセスが同時に共有変数の値を変えようすると、正しい結果を得ることができない場合が発生する。このような場合は排他制御を使用して、1 つのプロセスのみが共有変数を変更するようにする必要がある。例えば、次のように排他的に処理したい部分をロック関数(PLLOCK と PLUNLOCK)で囲むことによって正しい結果を得ることができる。ロック変数は関数 PLASGN で割り当てられる。

```

GLOBAL COMMON /SUM/A
CALL PLASGN(LTVar)
CALL PLLOCK(LTVar)
A = A + 1
CALL PLUNLOCK(LTVar)

```

以上、MCNP コードをマクロ・タスク機能によって並列化した手法の概要を述べた。

## 4.2 Paragon XP/S における並列化手法

前述したように、並列化には MCNP 4A コード・パッケージ中の PVM 版を用いた。この MCNP コード (Version 4A) PVM 版 (以下、PVM 版) は、主にワークステーション・クラスタによる並列処理用に開発されたもので、PVM 関数によりタスク間通信機能を実現している。4.2.1 節で、MCNP 4A PVM 版の構造を説明する。PVM 版をベースに性能向上のための書き換えを進めたが、その詳細を 4.2.2 節に示す。

### 4.2.1 MCNP 4A PVM 版の構造

MCNP コード PVM 版の主なルーチン及び PVM 関数に対する木構造を図 4.4 に示す。MCNP コード逐次版 (オリジナル版) の主なルーチンに対する木構造は、2.2 ページ図 2.2 に示した。

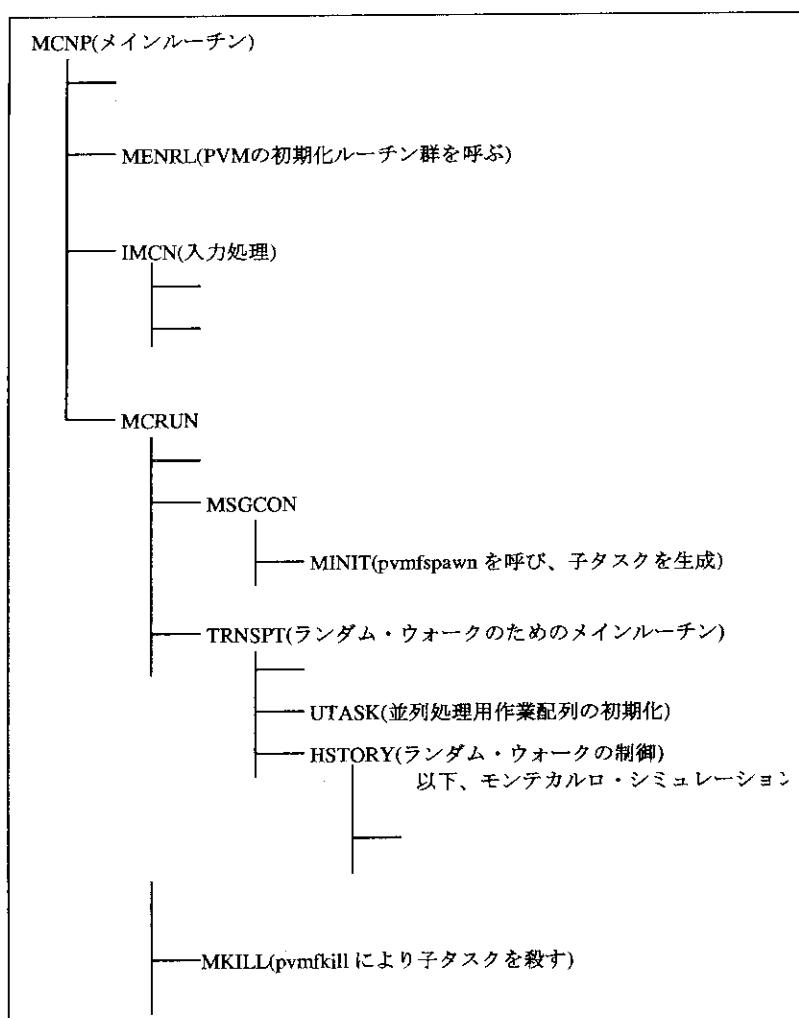


図 4.4 PVM 版主要ルーチン木構造

各ルーチンの機能については 2.1 節に前述した。また、使用されている PVM 関数の機能を表 4.1 に示す。

表 4.1 MCNP コードで使用した PVM 関数

| 種別                        | 関数名          | 機能                              |
|---------------------------|--------------|---------------------------------|
| プロセス<br>制御                | pvmfkill     | PVM プロセスを終了させる。                 |
|                           | pvmfspawn    | 新規の PVM プロセスを起動する。              |
| ステータス<br>情報の<br>取得と<br>設定 | pvmfconfig   | 現在のバーチャルマシンに関する情報を返す。           |
|                           | pvmfexit     | PVM から離脱することを宣言する。              |
| メッセージ<br>パッシング            | pvmfmytid    | PVM プロセスの識別番号を返す。               |
|                           | pvmfparent   | 呼び出しプロセスを生成した PVM プロセスの識別番号を返す。 |
| メッセージ<br>パッシング            | pvmfpstat    | 指定した PVM プロセスの状態を返す。            |
|                           | pvmfinitSend | デフォルト送信バッファをクリアする。              |
|                           | pvmfbuinfo   | メッセージバッファに関する情報を返す。             |
|                           | pvmfmcast    | 指定された PVM プロセス群にマルチキャストする。      |
|                           | pvmfpack     | データをメッセージバッファにパックする。            |
|                           | pvmfreccv    | メッセージを受信する。                     |
|                           | pvmfsend     | メッセージバッファの内容を送信する。              |
|                           | pvmfunpack   | データをメッセージバッファからアンパックする。         |

逐次版との比較 6 ページの図 2.2 と図 4.4 の比較及び使用されている PVM 関数の機能を考慮することで、並列処理に関して次のことがわかる。

- ① PVM 版は逐次版に PVM ライブライリ関数が挿入されたものであり、両者の間に構造の違いはない。
- ② 各粒子に対するランダム・ウォーク・シミュレーションが並列実行されている。
- ③ 挿入された主な PVM 関数は、PVMFSPAWN、PVMFSEND、PVMFRECV 等である。PVMFSPAWN は各粒子に対するランダム・ウォーク制御ループの先頭で呼ばれ、並列タスクの生成を行う。PVMFSEND によって、各粒子に関するシミュレーション終了後、統計処理に必要なデータ（今回使用した入力モデルでは、各領域で粒子が失うエネルギーの総和）がスレーブプロセスからマスター プロセスへのメッセージとして送信され、マスター プロセスは PVMFRECV を使ってこれらのメッセージを受信する。

各粒子に対するランダム・ウォーク・シミュレーションの並列処理制御 PVM 版の（時間的）計算フローを図 4.5 に示す。

並列処理はマスター・スレーブ方式を用いて、次の手順で行われている。

- ① 入力データや断面積データの読み込み・内部変換等の前処理（マスター プロセス）
- ② 体系を構成する領域の幾何形状データ等計算に必要なデータの送信（マスター プロセス）

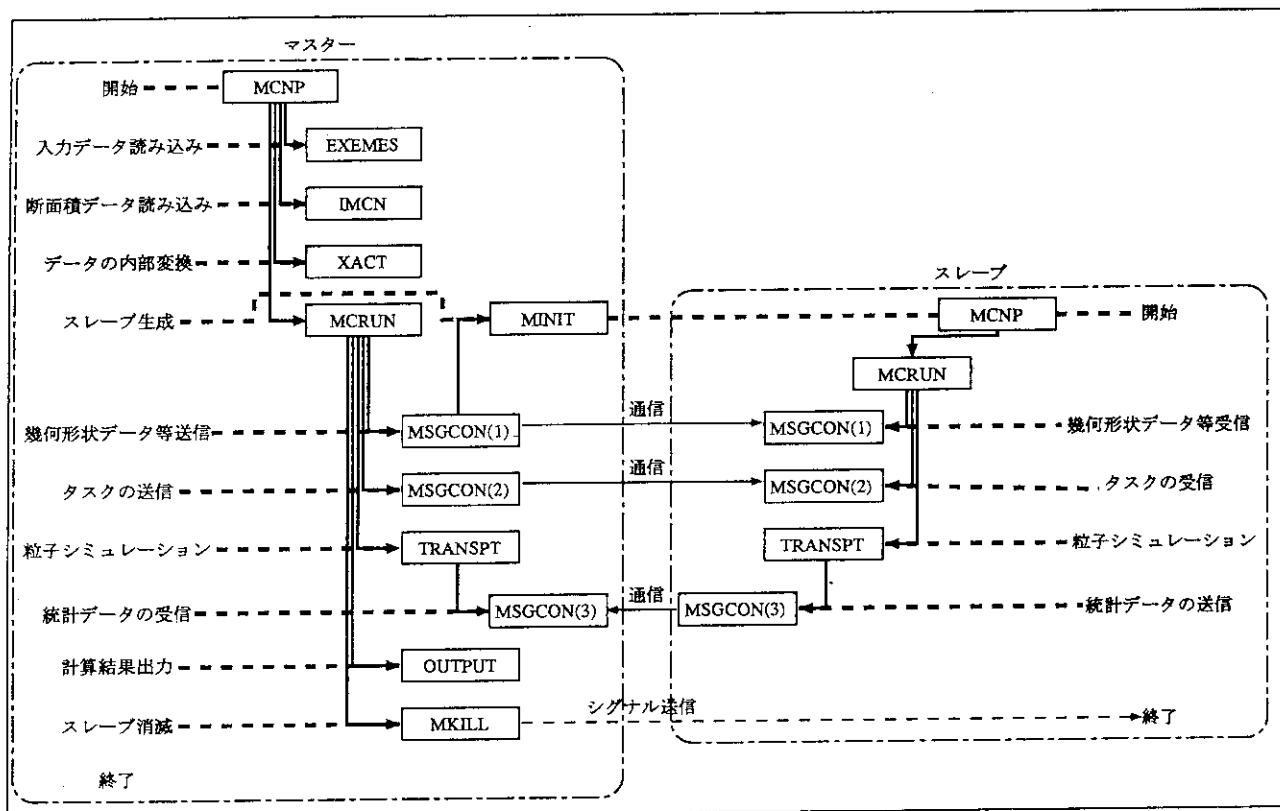


図 4.5 PVM 版計算フロー

- ③ ②で送られたデータ類の受信(スレーブプロセス)
- ④ 与えられた数の粒子シミュレーション(マスター及びスレーブプロセス)
- ⑤ 統計データの送信(スレーブプロセス)
- ⑥ 統計データの受信・集計及び計算結果の出力(マスタープロセス)

#### 4.2.2 性能向上のためのチューニング

PVM ライブライリから NX ライブライリへの変換 PVM はネットワークに接続された異機種 UNIX コンピュータ群を、単一の並列コンピュータ(バーチャルマシン)として利用することを目的として開発された。MCNP の PVM 版もネットワークに接続された異機種 UNIX コンピュータ群を実行環境として想定しているため、Paragon のような homogeneous(Paragon XP/S のような各プロセッサが同じ性能をもつ並列マシン)な並列コンピュータシステムでは不要な以下のようないくつかの機能を使用している。

- 異なるコンピュータ間の整数あるいは浮動小数点の表現の違いを吸収するための送受信時のデータ変換機能。
- バーチャルマシンにホストを追加・削除する機能。
- PVM タスクの起動・終了機能。
- PVM タスクへのシグナル送信機能。
- バーチャルマシンの設定とアクティブな PVM タスクに関する情報取得機能。

PVM 通信ライブライリは上記の機能をサポートするため、冗長な処理が存在し Paragon XP/S 独自の並列プログラミング・ライブライリである NX ライブライリと比較して性能がよくない。そこで、PVM 版の上記の(異機種 UNIX コンピュータ群を使用するための)不要な処理を除くと共に、プロセス間通信を NX ライブライリ関数に置き換え、性能向上を図った。書き換え以前の PVM 版の性能及び書き換え後の MCNP コード(Version 4A)の性能については、5 章で後述する。本節では、NX ライブライリへの変換について述べる。変換の対象とした PVM 関数及び変換後の NX ライブライリ関数については表 4.2 のとおりである。表 4.1 に示した 14 個の PVM 関数を NX ライブライリを用いて記述した。変換の内容も表 4.2 に示す。

表 4.2 PVM から NX 関数への変換

| PVM 関数名      | 使用した<br>NX 関数名                      | 説明  |
|--------------|-------------------------------------|---|
| pvmfexit     | なし                                  | スタブ関数とした。   |
| pvmfkill     | なし                                  | kill システムコールを用いて記述した。   |
| pvmfspawn    | なし                                  | nx_load 等の動的プロセス生成関数を用いず、起動時に全プロセスを生成する NX の機能で代替した。  |
| pvmfconfig   | numnodes                            | ホスト数は全ノード数、アーキテクチャ数は 1、PVM デーモンの識別番号は全ノード数、ホスト名は gethostname 関数の戻り値、スピードは一律に 1000 とした。            |
| pvmfmytid    | mynode                              | 呼び出しプロセスのノード番号を指定した。  |
| pvmfparent   | mynode                              | ノード番号 0 には PvmNoParent(-23)、他のノード番号には 0 を返すようにした。   |
| pvmfpstat    | なし                                  | 常に PvmOk(0) を返すようにした。   |
| pvmfbuinfo   | infocount、<br>infotype、<br>infonode | バッファ識別番号は常に 0、メッセージバイト長は infocount の戻り値、メッセージのタイプは infotype の戻り値、メッセージ送信元の識別番号は infonode の戻り値とした。 |
| pvmfinitsend | なし                                  | 受信バッファとして確保した領域をクリアのみを行うようにした。  |
| pvmfmcast    | gsendx                              | gsendx でマルチキャストを行うようにした。  |
| pvmfpack     | なし                                  | 送信バッファとして確保した領域にコピーを行うようにした。  |
| pvmfrecv     | cprobe、<br>infocount、<br>crecv      | cprobe でメッセージを待ち、infocount でバッファに必要なバイト数を取得し領域を動的に確保した後、crecv でバッファに受信を行うようにした。                   |
| pvmfsend     | csend                               | 送信バッファの内容を csend で送信するようにした。  |
| pvmfunpack   | なし                                  | 受信バッファとして確保した領域からコピーを行うようにした。   |

## 5. 性能評価結果

### 5.1 Monte-4 上におけるベクトル並列処理

本節では、Monte-4 上での高速化結果について述べる。前述したように、Monte-4 は、4 台のベクトル・プロセッサを持つ、メモリ共有型の並列計算機である。同計算機上で高い性能を獲得するために行なった高速処理に関する結果及び考察について述べる。

なお、本研究においては、計算結果の妥当性に関する考察は行っていない。その理由は、MCNP コードの乱数生成法にある。2 章で述べたように MCNP コードは修正 Leapfrog 法により乱数を生成しており、各粒子のランダム・ウォークに使用する乱数のシード(種)を決定論的に与える。このため、ベクトル処理 / 並列処理において各粒子に対する計算順序が変化した場合でも、乱数列の使用される順番が変化することなく、逐次処理による計算結果とベクトル処理 / 並列処理による計算結果は一致する場合が多いためである。データ・フォーマットの異なる計算機間、あるいは、同じ計算機上でも数値計算の丸め誤差により計算結果が異なる可能性もあるが、本研究で用いた入力データの例では、ワークステーション(SUN)、モンテカルロ装置及び Paragon XP/S 上での結果はすべて一致した。

#### 5.1.1 ベクトル処理による速度向上

表 5.1 に Monte-4 上における処理時間及び速度向上率を示す。

ベクトル化によるオーバーヘッド ベクトル版のスカラ処理時間は、オリジナル・コードのスカラ処理と比較し 28 % 増大している。これはベクトル化によるオーバーヘッドであり、その内容は、DO ループの初期化、スカラ変数の配列化によって生じた番地計算である。これらのオーバーヘッドは、4.1 節で述べたように、逐次的に行っていった粒子のモンテカルロ・シミュレーションをベクトル化するようアルゴリズム変更したことによる。したがって、本コードに限らず、既存の粒子輸送モンテカルロ・コードのベクトル化にはこの種のオーバーヘッドが伴う。

**モンテカルロ・パイプラインの効果** 3.1 節で述べたように、モンテカルロ・パイプラインは、粒子輸送モンテカルロ計算において多用され、かつ、従来のベクトル計算機においてベクトル処理が極めて困難な処理を高速化する特殊なハードウェアである。ベクトル版の実行時間 A と実行時間 B の比較により、モンテカルロ・パイプラインを使用時、約 1.6 倍の性能向上があったことがわかる。

なお、「1.6 倍の性能向上」には、モンテカルロ・パイプライン同様 Monte-4 開発において強化されたロード / ストア・パイプラインの効果は含まれない(共に強化されたロード / ストア・パイプラインを使用した結果だからである)。強化されたロード / ストア・パイプラインの性能測定には、Monte-4 のベース・プロセッサである NEC SX-3/11 との実行時間の比較が必要となるが、今回の作業ではその測定は行わなかった。Monte-4 の詳細な性能評価結果については、文献<sup>[7]</sup>に詳しい。

表 5.1 Monte-4 上での MCNP コードの高速化率

| プロセッサ台数               | 1         |          |          | 2         |            | 3         |            | 4         |            |
|-----------------------|-----------|----------|----------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|
|                       | バージョン     | オリジナル    | ベクトル     | スカラ<br>並列 | ベクトル<br>並列 | スカラ<br>並列 | ベクトル<br>並列 | スカラ<br>並列 | ベクトル<br>並列 |
| 実行モード                 | スカラ       | スカラ      | ベクトル     | スカラ<br>並列 | ベクトル<br>並列 | スカラ       | ベクトル<br>並列 | スカラ       | ベクトル<br>並列 |
| 実行時間 A <sup>*1</sup>  | 2,696.6 秒 | 3,448.8秒 | 925.3秒   | 1,401.5秒  | 541.7秒     | 959.6秒    | 381.4秒     | 740.1秒    | 313.8秒     |
| 実行時間 B <sup>*2</sup>  | —         | —        | 1,726.1秒 | —         | 919.5秒     | —         | 644.0秒     | —         | 505.5秒     |
| 速度向上率 A <sup>*3</sup> | 1.0       | —        | 2.9      | —         | 5.0        | —         | 7.1        | —         | 8.6        |
| 速度向上率 B <sup>*4</sup> | —         | —        | 1.0      | —         | 1.7        | —         | 2.4        | —         | 2.9        |
| 速度向上率 C <sup>*5</sup> | 1.0       | —        | —        | 1.9       | —          | 2.8       | —          | 3.6       | —          |

<sup>\*1</sup> モンテカルロ・パイプラインを使用した場合の実行時間<sup>\*2</sup> モンテカルロ・パイプラインを使用しなかった場合の実行時間<sup>\*3</sup> ベクトル / ベクトル並列処理(モンテカルロ・パイプライン使用)のオリジナル・コードのスカラ処理に対する速度向上率<sup>\*4</sup> ベクトル版ベクトル処理(1 プロセッサ)に対する速度向上率、即ち、ベクトル処理を行った場合の並列処理による速度向上率<sup>\*5</sup> オリジナル・コードに対するスカラ並列版の速度向上率、即ち、並列処理による速度向上率

各サブルーチンの速度向上率 各サブルーチンに対する実行時間、速度向上率、平均ベクトル長を表 5.2 に示す。

粒子輸送問題用モンテカルロ・コードの計算内容は、大きく次の 4 つに大別される。即ち、

- ① 入力データや断面積データの読み込み及び内部変換等の前処理
- ② 3 次元空間における粒子追跡
- ③ 衝突のシミュレーション
- ④ 統計処理

である。①～④のうち、最も計算コストの高い部分は、②であり、コード全体の計算時間に対する比率は、入力データに依存するが、おおむね 50 % ~ 90 % である。

用いた入力データに対する粒子追跡計算のためのサブルーチンは、TRACK、CHKCEL、LGEVAL 等である。これらのサブルーチン群はコード全体の約 85 % の計算時間を費やす。

サブルーチン TRACK、CHKCEL については、ベクトル処理によって 3 倍以上の速度向上率があった。これらサブルーチンにおける平均ベクトル長は 50 ~ 60、ベクトル化率は 90 % 以上である。前述したように、条件分岐文と間接番地データによる性能低下を考慮すると、この速度向上率は妥当であるといえる。また、サブルーチン LGEVAL については、約 13 倍という高い速度向上率を得た。これは、主にモンテカルロ・パイプラインの効果である。

表 5.2 MCNP コードのサブルーチンの速度向上率

|                   | サブルーチン名              | スカラ実行                 | ベクトル実行 <sup>*1</sup> | ベクトル化率               | 平均ベクトル長 <sup>*2</sup> | 速度向上率                |
|-------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| 1                 | TRACK-V              | 1218.4 秒              | 35.3 %               | 381.1秒 <sup>V</sup>  | 40.5 %                | 93.2 %               |
| 2                 | CHKCEL-V             | 934.9 秒               | 27.1 %               | 275.9秒 <sup>V</sup>  | 29.3 %                | 97.4 %               |
| 3                 | LGEVAL <sup>*3</sup> | 756.2 秒               | 21.9 %               | 58.6秒 <sup>M</sup>   | 2.3 %                 | —                    |
| 4                 | ACETOT-V             | 268.3 秒               | 7.8 %                | 118.2秒 <sup>V</sup>  | 12.6 %                | 98.7 %               |
| 5                 | COLIDN-V             | 63.8 秒                | 1.8 %                | 25.7秒 <sup>V</sup>   | 2.7 %                 | 91.2 %               |
| 6                 | HSTORY-V             | 48.9 秒                | 1.4 %                | 19.5秒 <sup>V</sup>   | 2.1 %                 | 74.4 %               |
| 7                 | CHKCEL-S             | 43.9 秒                | 1.3 %                | 47.0秒 <sup>S</sup>   | 5.0 %                 | —                    |
| 8                 | STARTP-V             | 32.3 秒                | 0.9 %                | 8.3秒 <sup>V</sup>    | 0.9 %                 | 91.6 %               |
| 9                 | XSEC                 | 18.7 秒                | 0.5 %                | 18.5秒 <sup>S</sup>   | 2.0 %                 | —                    |
| 10                | BREM                 | 4.0 秒                 | 0.1 %                | 8.4秒 <sup>S</sup>    | 0.9 %                 | —                    |
| 11                | QPOL-F               | 5.0 秒                 | 0.1 %                | 6.1秒 <sup>S</sup>    | 0.6 %                 | —                    |
| 合 計 <sup>*4</sup> |                      | 3394.4秒 <sup>*5</sup> | 98.4% <sup>*6</sup>  | 908.7秒 <sup>*7</sup> | 96.5% <sup>*8</sup>   | 76.0 % <sup>*9</sup> |
|                   |                      |                       |                      |                      |                       | 57.1                 |
|                   |                      |                       |                      |                      |                       | 3.66                 |

\*1 ベクトル処理時間のうち、<sup>V</sup> は主にベクトル処理した、<sup>M</sup> は主にモンテカルロ・パイプラインを適用した、<sup>S</sup> はスカラ処理したサブルーチンをそれぞれ示す。

\*2 Monte-4 上で計測した値。Monte-4 のベクトルレジスタの最大処理要素数は 64 であるため、64 以上のベクトルは 64 ずつに分割されてパイプライン処理される。分割後のベクトル長(64 以下)を示した。

\*3 本文で述べたように、ベクトル化は極めて困難。モンテカルロ・パイプラインを適用した場合の処理時間をベクトル処理時間として示した。

\*4 コード全体の合計ではなく、表 5.2 に示した主要なサブルーチンの合計。

\*5 Monte-4 上の解析用ツールによる計測のため、誤差を含む。コード(ベクトル版)全体のスカラ処理時間は、3448.8 秒。

\*6 コード全体の合計ではないため、100.0 % とならない。

\*7 コード全体のベクトル処理時間は、941.2 秒。

\*8 コード全体の合計ではないため、100 % とならない。

\*9 モンテカルロ・パイプラインによる高速化部分はベクトル化率の計算対象から除外した。

### 5.1.2 並列処理による速度向上

並列計算における速度向上率は、並列化率（後述）及び負荷分散（後述）によって決定される。これに加え、Monte-4 はメモリ共有型の並列計算機であることから、メモリ競合による性能低下も影響する。

本節では、これらの因子を定量的に示すとともに、性能向上のための考察を行う。

並列処理による速度向上率  $S$  は、次の式で評価することができる。

$$\begin{aligned} S &= T_s / T_p \\ T_s &= T_{ss} + T_{sp} \\ F_p &= T_{sp} / T_s \\ T_p &= T_{ss} + \max\{T_{pp}^i + T_o^i, i = 1, N\} \\ T_{sp} &= \sum_i T_{pp}^i \\ F_{im} &= \min\{T_{pp}^i + T_o^i, i = 1, N\} / \max\{T_{pp}^i + T_o^i, i = 1, N\} \end{aligned}$$

ここで、

- $N$  : プロセッサ台数
- $T_s$  : スカラ処理時間
- $T_p$  : 並列実行時間
- $T_{ss}$  : 逐次計算部分の（スカラ）処理時間
- $T_{sp}$  : 並列化部分のスカラ処理時間
- $T_{pp}^i$  :  $i$  番目のプロセッサにおける並列処理部分のみに関する実行時間
- $F_p$  : 並列化率
- $T_o^i$  :  $i$  番目のプロセッサにおける並列処理によるオーバーヘッド
- $F_{im}$  : 負荷分散の不均衡によって生じたオーバーヘッドの比率

である（図 5.1）。

以下、性能評価に用いた入力データを使用した場合の  $F_p$ 、 $F_{im}$ 、及び  $T_o^i$  に関する定量的説明を行う。なお、 $T_o^i$  は計算機アーキテクチャ等に大きく依存するが、本装置及び本コードの場合、並列処理時のプロセッサ間のメモリ競合が該当する。

並列化率 4 章で述べたように、粒子輸送モンテカルロ・コードの計算内容は、

- ① 入力データの処理（断面積データの読み込み及び内部変換を含む）
- ② 粒子シミュレーション
- ③ 出力処理

の 3 つに大別される。また、ベクトル / 並列計算が可能な部分は、粒子シミュレーション（粒子追跡及び衝突のシミュレーション）である。いま、①～③の処理時間をそれぞれ、 $a$ 、 $b$ 、 $c$  とする。並列化率  $F_p$  は、図 5.1 に示すように、1 台のプロセッサを用いてベクトル処理を行った際のコード全体の処理時間に対する並列化部分の処理時間であるから、

$$F_p = b / (a + b + c)$$

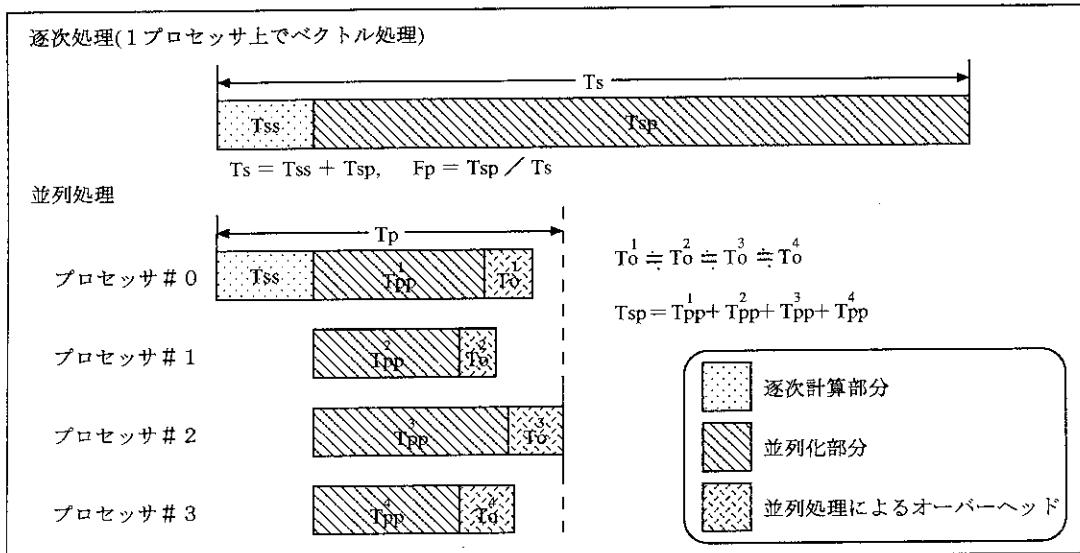


図 5.1 並列処理時間の評価

となる。性能評価に用いた入力データによる計算を行った場合の本コードの並列化率(計測された  $b$  に基づき、算出した  $F_p$ )は、約 93 %である。

アムダールの法則により、 $N$  台のプロセッサを用いた並列処理における理想的な速度向上率は、

$$\frac{1}{1 - F_p + \frac{F_p}{N}}$$

である。原子力コードの場合、断面積データの読み込み、内部変換等の処理が必要であり、これらの処理の大部分は逐次処理となるため、高い並列化率は期待できない場合が多い。特に、性能評価に用いた問題については、制動幅射による  $\gamma$  線の生成率の計算等の前処理もあり、低い並列化率となつた。いま、 $N = 4$ 、 $F_p = 0.93$  であるから、性能評価に用いた入力データに対する本コードの並列処理による速度向上率の上限は、3.3 となる。

**負荷分散** 本コードの並列処理では、均等数の粒子を各プロセッサに割り当てる静的な負荷分散を行つた。即ち、処理粒子数を  $M$ 、プロセッサ台数を  $N$  とすると、各プロセッサでは  $M/N$  個の粒子が処理される。この場合、各プロセッサに動的に粒子を割り当てる手法<sup>\*2</sup>と比較し、 $F_{im}$  は大きくなる。一方、動的に粒子を割り当てるためには、各プロセッサに割り当てる粒子数を小さくする必要があり、この場合粒度の減少(ベクトル長の減少)及び割り当て処理のオーバーヘッドに伴う性能低下がある。本コードの並列処理ではベクトル処理を併用していることから、ベクトル長が大幅に減少し、その結果性能が大幅に減少する後者(動的な負荷分散手法)ではなく、前者(静的な負荷分散手法)を用いた。この結果、各プロセッサにおける並列化部分に関する実際の計算時間の分布は、

\*2動的に粒子を割り当てる手法: いま、 $M$  と比較し十分小さい数(プロセッサの台数にも依存するが、4 プロセッサの場合、 $M/1,000 \sim M/10,000$  程度)を  $M'$  とする。まず、各プロセッサに  $M'$  個の粒子を割り当て、計算を行う。その後、各プロセッサにおける計算が終了次第、 $M'$  個ずつ粒子を割り当てていく。これにより、 $F_{im}$  は最大  $M'$  個の粒子の処理時間に抑えられる。最適な  $M'$  の選択法、割り当て処理のオーバーヘッド等については、文献<sup>[15]</sup>に詳しい。

プロセッサ #0 : 263.0 秒  
 プロセッサ #1 : 272.0 秒  
 プロセッサ #2 : 264.3 秒  
 プロセッサ #3 : 241.6 秒

であり、これにより、 $\frac{272.0 - 241.6}{272.0} \times 100 = 11.2\%$  の効率低下があった。

メモリ競合による性能低下 表 5.1 には、ベクトル並列版だけでなく、スカラ並列版の実行時間も示した。スカラ並列版とは、MCNP コード・パッケージに含まれる CRAY 用のソースを書き換えたもので、粒子を各プロセッサに均等に分配し、スカラ処理するバージョンであり、ベクトル処理は行なっていない。このスカラ並列版の並列処理による速度向上率（表 5.1 中速度向上率 C）は、ベクトル版の並列処理による速度向上率（同じく速度向上率 B）よりも大きい。即ち、4 プロセッサを用いた場合、

速度向上率 C = 3.6 > 速度向上率 B = 2.9

である。スカラ処理を行った場合とベクトル処理を行った場合の並列の並列化率及び負荷分散は同等であると考えられる。したがって、この理由は共有メモリ特有のメモリ競合<sup>\*3</sup>にある。

即ち、ベクトル化されたコードにおいて粒子の属性は配列となっており、メモリより読みだす経路に関してプロセッサ間の競合が生じ、これにより性能が落ちる。この性能低下は、スカラ処理よりも高速な（単位時間あたりのデータアクセス頻度の高い）ベクトル処理の方が大きい。

例えば 4 台のプロセッサを用いた場合のメモリ競合は、次の二つの実行時間を計測・比較することで算出できる。

$TS(i)$ : ベクトル並列化されたコードを 1 台のプロセッサで処理した時の、各タスク  $i$  に対する実行時間

$TP(i)$ : ベクトル並列化されたコードを 4 台のプロセッサで処理した時の、各タスク  $i$  に対する実行時間

ここで、 $TS(i)$  はメモリ競合が無い場合の各プロセッサにおける処理時間である。 $\sum_i TS(i)$  と  $\sum_i TP(i)$  の比較により、算出されたメモリ競合による性能低下は、約 7 % である。

## 5.2 Paragon XP/S 上における並列処理

前述したように、並列化には MCNP 4A コード・パッケージ中の PVM 版（汎用）を NX 版（Paragon XP/S 専用）に書き換え、性能向上を図った。

### 5.2.1 PVM 版の並列処理

書き換え以前の PVM 版に対する速度向上率を表 5.3 に示す。

<sup>\*3</sup>メモリ競合: 各プロセッサから共有メモリ（主記憶）へのアクセスが競合すること。当然ながら性能は低下する。主記憶は複数のバンクと呼ばれる領域に分割されており、メモリ競合は同一バンクへの複数プロセッサからのアクセスが同時に発生した場合に起こる。

表 5.3 PVM 版の速度向上率(粒子数 100,000)

| PE 数    | 逐次    | 2      | 4     | 8     | 16    | 32      | 128      | 256      |
|---------|-------|--------|-------|-------|-------|---------|----------|----------|
| 実行時間(秒) | 808.6 | 1052.3 | 562.7 | 695.2 | 895.8 | 3,235.6 | 10,329.0 | 26,251.2 |
| 速度向上率   | 1.00  | 0.77   | 1.44  | 1.16  | 0.90  | 0.25    | 0.08     | 0.03     |

PVM 版が次に述べる NX 版と比較して遅く、特にプロセッサ台数が増加した場合に著しい速度低下を招く原因には、以下の 2 点がある。

- ① PVM 版では pvmfspawn 関数により動的にプロセスを生成している。
- ② PVM 関数での送受信が NX 関数での送受信より遅い。

自プロセスの PVM プロセス番号や親プロセスの PVM プロセス番号等のステータス情報の取得と設定を行う関数は、数回しか実行されずコストも非常に小さいので無視できる。

MCNP 4A の実行ファイルの大きさは 11.9 MB であるが、このサイズのプロセスを生成するために要した pvmfspawn 関数の処理時間を表 5.4 に示す。

表 5.4 pvmfspawn の処理時間

| PE 数    | 2    | 4    | 8     | 16    | 32    | 64    | 128    |
|---------|------|------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 処理時間(秒) | 13.8 | 43.2 | 175.9 | 216.1 | 256.2 | 469.8 | 1100.5 |

プロセスの生成時間は、PE 数 8 の場合だけ突出しているが、平均して 1 プロセスあたり 7 ~ 13 秒である。プロセスの生成には実行ファイルのファイル I/O、OS カーネル内の実行イメージ生成も含まれており、他のジョブの影響を受けやすく処理時間にぶれを生じる。

PVM と NX の通信関数の処理時間の比較を表 5.5 に示す。

表 5.5 PVM と NX の通信関数の処理時間

| 通信関数名                 | pvmfsend<br>↓<br>pvmfrecv | csend<br>↓<br>crecv | pvmfmcast<br>↓<br>pvmfrecv | gsendx<br>↓<br>crecv |
|-----------------------|---------------------------|---------------------|----------------------------|----------------------|
| 処理時間(秒) <sup>*1</sup> | 47.036                    | 0.117               | 191.162                    | 5.227                |

\*1 128 プロセッサで実行し、1024 バイトのデータを 1,000 回送受信した。

処理時間に 2 桁もの開きがあり、PVM 版ではプロセッサ台数が多くなると、処理時間のほとんどを通信に費すことになる。プロセス生成のコストも 128 台では全体の処理時間の約 10 % を占めるが、通信のコストは全体の処理時間の約 86 % を占めている。

### 5.2.2 NX 版の並列処理

PVM 版を書き換えた NX 版の速度向上率を表 5.6 に示す。

表 5.6 NX 版の速度向上率

| PE 数 | 粒子数 100,000 |       | 粒子数 1,000,000 |       |
|------|-------------|-------|---------------|-------|
|      | 実行時間(秒)     | 速度向上率 | 実行時間(秒)       | 速度向上率 |
| 逐次   | 808.6       | 1.00  | 5,725.5       | 1.00  |
| 2    | 577.3       | 1.40  | 3,005.9       | 1.91  |
| 4    | 444.7       | 1.82  | 1,640.7       | 3.49  |
| 8    | 390.9       | 2.07  | 970.0         | 5.90  |
| 16   | 357.3       | 2.26  | 627.2         | 9.12  |
| 32   | 385.4       | 2.10  | 464.6         | 12.32 |
| 64   | 472.0       | 1.71  | 393.9         | 14.54 |
| 128  | 657.1       | 1.23  | 375.2         | 15.23 |
| 256  | —           | —     | 432.6         | 13.24 |

PVM ライブライリ関数の NX ライブライリ関数を使用した書き換えについては、3.2 節で述べたが、この書き換えによって 1.3 倍 (2 プロセッサ) から 15.7 倍 (128 プロセッサ) の性能向上を得た。

図 5.2 と図 5.3 に粒子数 1,000,000 の場合について、プロセッサ 2 台～ 256 台までの NX 版の処理内容別の処理時間を示す。

- ① 前処理部分は逐次処理 (約 260 秒) であり、マスター プロセス (ノード 0 番のプロセス) のみ処理を行い、他のすべてのスレーブ プロセスはアイドル状態である。
- ② プロセッサ台数を増やすにつれ、通信時間が増大する。これは、分配処理において NX ライブライリ関数 gsendx を用いてマスター プロセスから他のすべてのスレーブ プロセスにマルチキャストしていることと、収集処理においてマスター プロセスがその他のすべてのプロセスから処理結果を受け取るため、通信の衝突が起こることによる。
- ③ シミュレーションは全粒子数を静的にプロセッサ台数で割った粒子数をマスター及びスレーブ プロセスに割り付けることにより並列実行を行っている。プロセス数の増加に伴って、各プロセスのシミュレーション処理時間は減少するが、表 5.7 からわかるように各プロセッサ間の処理時間の不均衡の減少が緩慢である。

PE 数が 2 ～ 256 の場合の分配処理時間、負荷不均衡時間 (最大処理時間と最小処理時間の差)、収集処理時間を表 5.7 に示す。

分配処理では、マスター プロセスから全スレーブ プロセスに送信 (マルチキャスト) を 3 回行っている。スレーブ プロセスへの送信のために NX ライブライリのマルチキャスト関数 gsendx を使用して

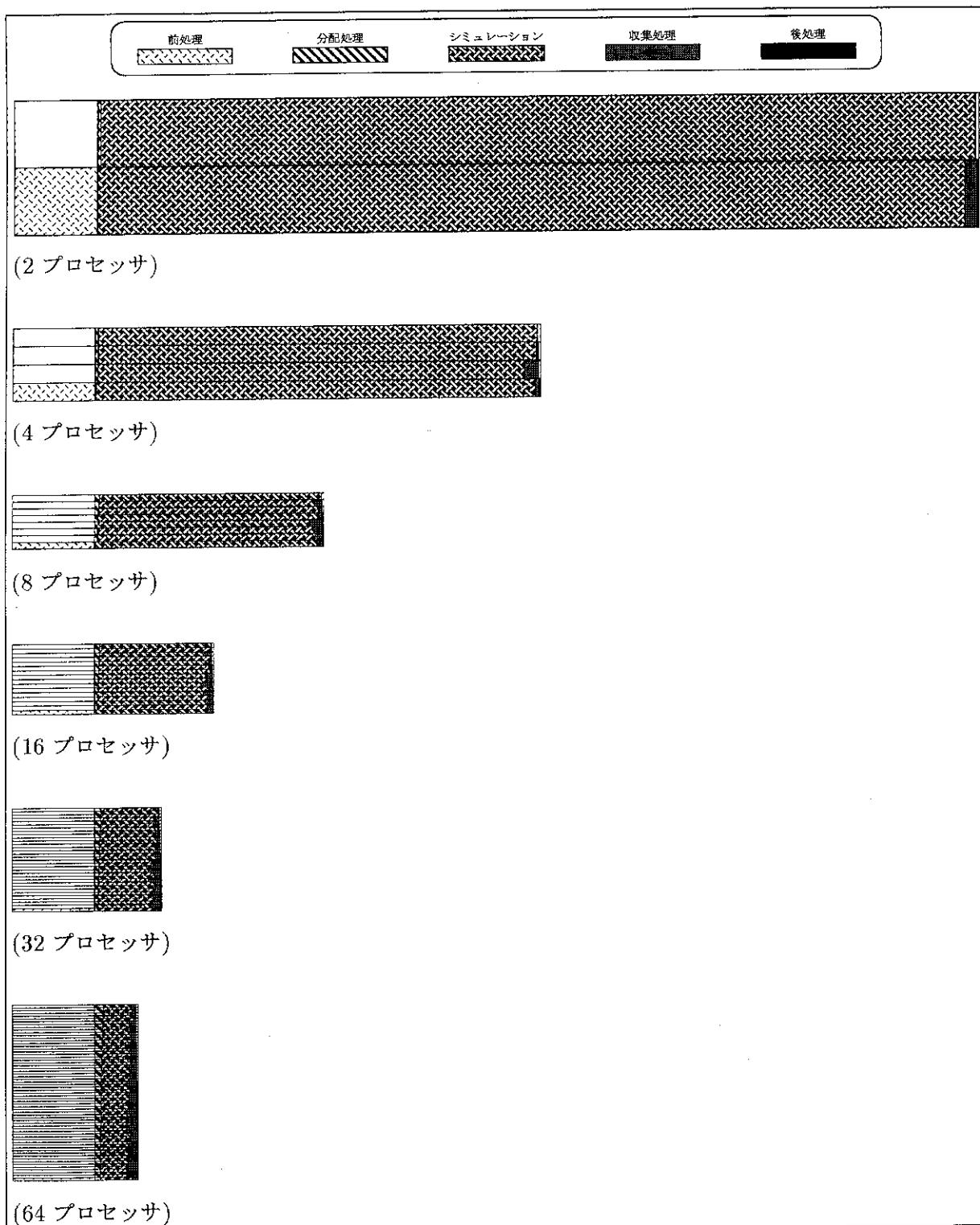


図 5.2 MCNP コードの計算時間分布 (その 1/2)：粒子数 1,000,000

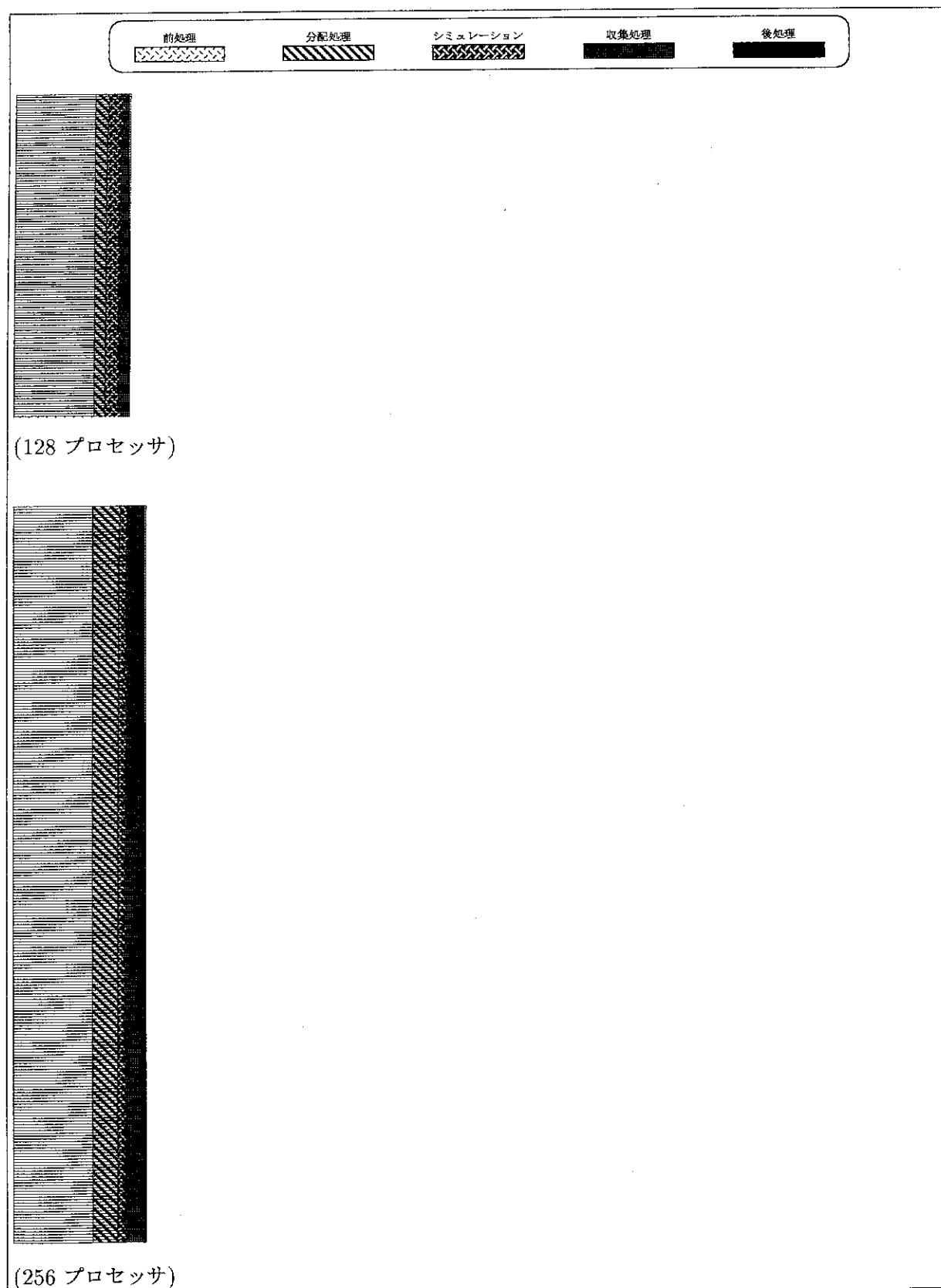


図 5.3 MCNP コードの計算時間分布 (その 2/2) : 粒子数 1,000,000

表 5.7 並列タスクに関する分配、負荷不均衡、収集処理時間

| PE 数       | 2    | 4    | 8    | 16   | 32   | 64   | 128  | 256  |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 分配処理時間(秒)  | 8.7  | 10.9 | 13.6 | 15.8 | 19.4 | 27.8 | 45.5 | 91.8 |
| 負荷不均衡時間(秒) | 28.4 | 38.7 | 36.4 | 25.8 | 27.5 | 26.9 | 23.4 | 21.9 |
| 収集処理時間(秒)  | 7.1  | 5.9  | 5.4  | 5.8  | 6.0  | 12.1 | 15.9 | 53.3 |

いる。gsendx は、ほとんど送信プロセスの個数に比例した処理時間がかかる。PE 数の増加に伴う分配処理時間の増加は gsendx の影響である。

PE 数增加に伴うシミュレーション処理の負荷不均衡時間の減少は、緩慢である。これは、全粒子数が 1,000,0000 個あり、256 PE で実行した場合でも各プロセスに割り当てる粒子数 3,900 個程度になり各粒子の処理時間の差異が平均化されることによる。

収集処理では、一つのスレーブプロセスにつきマスター プロセスに 3 回の送信を行っている。収集処理時間は、全プロセス中のシミュレーション処理の終了時刻のもっとも遅い時刻からマスター プロセスが最後の計算結果を受け取った時点までの時間を示した。シミュレーションの処理時間の不均衡の影響で収集処理の通信時間が一部隠蔽され、PE 数が 2 の場合より PE 数が 8 の場合の方が処理時間が短いが、PE 数が少ない場合は処理時間はほとんど変わらない。PE 数が多くなるとマスター プロセスのノードに通信が集中することによって衝突を生じ処理時間が増加する。

逐次計算部分 ( $T_{pre} + T_{out}$ ) は約 260 秒である。コード全体が 5,726 秒だから全体の 4.5 % を占める。即ち、並列化率は、0.955 (95.5 %) である。したがって、22 倍以上の速度向上率は達成不可能である。

### 5.2.3 並列化における今後の課題

分散メモリ並列計算システムにおいて、高い速度向上を得るためにには、並列化率の向上、負荷の均等化、通信時間の短縮あるいは隠蔽が必要である。これらを実現するために、Paragon XP/S のハードウェア構成も考慮し、今後次に述べるような最適化方法をさらに試みる必要がある。

**並列化率の向上** 上述したように「入力データや断面積データの読み込み・内部変換処理」は逐次実行であり、約 260 秒<sup>\*4</sup>であり全処理時間の 4.5 % を占める。したがってこのままでは 22 倍の速度向上が限界である。逐次計算部分の削減には、入力ファイル読み込み処理の並列化が効果的と思われるが、Paragon XP/S では、ディスク装置は各ノードに個別には備えられていない。しかし、実際に測定すると非常に大きなファイル<sup>\*5</sup>を单一のプロセッサが入出力するよりも、いくつか小さなファイルに分けて複数プロセッサを用いて入出力した方が高速であった。よって、断面積データファイルを核種別に細かく別々のファイルに分割し、各ノードにデータ読み込みを分担させれば、より高速になり並列化率も向上する。

<sup>\*4</sup> ファイル I/O が含まれているので、他のジョブの影響で処理時間に多少のばらつきがある。

<sup>\*5</sup> 現在の MCNP コードは、数百 KB ~ 十数 MB の 13 個のファイルをマスター プロセスのみが読み込んでいる。

したがって入力部分は、断面積データ指定ファイルをマスター・プロセスが読み込み、核種別に分けられた断面積データファイル名を各スレーブ・プロセスに送信し、各スレーブ・プロセスはマスタースレーブによって与えられた断面積データを読み込むように並列化を行う。各スレーブ・プロセスは読み込んだ断面積データをプロセス間通信によって全プロセスにブロードキャストすることになる。

**負荷の均等化** 表 5.7 に示したように全プロセス間の負荷の不均衡は、各プロセスが処理する粒子数が十分あれば各プロセスが担当の全粒子を処理する時間に比較して小さい。また、1 粒子あたりの処理の時間分布に依存するが、表 5.7 と表 5.8 から分かるように、人体モデルでは負荷の不均衡時間はプロセス数の増加とともに減少する。

表 5.8 静的タスク割り当時の負荷不均衡時間の推移

| PE 数                      | 512  | 1024 | 2048 | 4096 | 8192 | 16384 | 32768 | 65536 |
|---------------------------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| 負荷不均衡時間 <sup>*1</sup> (秒) | 13.7 | 11.3 | 8.80 | 6.85 | 5.39 | 4.43  | 4.47  | 4.39  |

\*1 1,000,000 粒子一つの処理時間の計測結果をもとに推定した。粒子一つの最大処理時間は 4.39 秒、最小処理時間は 0.87 ミリ秒、平均処理時間は 5.39 ミリ秒、標準偏差は 0.049 である。

しかし、プロセス数の増加に伴う負荷の不均衡時間の減少率は、各プロセスのシミュレーション時間の減少率と比較して小さい。したがって、負荷の不均衡の全体の処理時間に対する比率は増大する。

各プロセスが処理する粒子数が十分多く、かつ、homogeneous な並列システム (Paragon XP/S のような各プロセッサが同じ性能をもつ並列マシン)においては、PE 数によって粒子数を均等割りして各プロセスに与える静的タスク割り当ては非常に有効なタスク割り当て手法である。しかし、1 粒子あたりの処理時間は均等ではないので、静的なタスク割り当てはスケーラブル<sup>\*6</sup>なタスク割当手法ではない。したがって、プロセス数が多い場合でも各プロセスが担当する全粒子を処理する時間に比較して小さな負荷不均衡で押えるためには、動的なタスク割当手法 (5.1.2 節 30 ページ脚注参照) を用いなくてはならない。

動的なタスク割当手法として、マスタースレーブ方式のプログラムで通常採用する以下のような方式がある:

- マスター・プロセスはプログラム全体のタスクを管理し、マスター・プロセスはスレーブ・プロセスからのタスク割り当て要求に対し、タスクをスレーブ・プロセスに割り当てる。
- スレーブ・プロセスはマスター・プロセスから割り当てられたタスクを処理し、処理が終れば新たにマスター・プロセスにタスク割当を要求する。

この動的なマスタースレーブタスク割り当て方式では、一つのマスター・プロセスが全スレーブ・プロセスのタスクを管理しタスク割当要求を処理するため、PE 数 (スレーブ・プロセス数) の増加に比例してマスター・プロセスのノードへの通信が増加する。このため、マスター・プロセスのノードが通信のボトル

<sup>\*6</sup> この場合、プロセッサ台数に比例して、線形に処理能力が増大すること。

ルネットとなり、通信効率の低下を招く可能性が大きい。そこで、以下のような Paragon XP/S の PE 配置のメッシュ構造(全 2 重通信)を考慮した、局所タスク割り当て方式の採用を検討した。

**局所タスク割り当て方式** この方式では最初(シミュレーション開始時)は、各プロセスに静的に PE 数で均等割りした粒子数を与える。その後、以下の処理を繰り返す。

- ①一定時間粒子を処理する。
- ②各プロセスは上下左右<sup>\*7</sup>から送信された処理速度と残処理粒子数のメッセージが、到着していれば受信する(図 5.4 (a))。
- ③上下左右すべてのプロセスから終了メッセージを受信し、自身の残処理粒子数が 0 であれば処理を終了する。
- ④上下左右と自身のプロセスの処理速度<sup>\*8</sup>と残処理粒子数をもとに、上下左右に担当してもらう粒子数を終了時間が同一になるという条件で計算する。ただし、メッセージが到着していないプロセスについては、スピードは自身のスピードと同じ、残処理粒子数は初期値とする。
- ⑤上下左右のプロセスに担当してもらう粒子数が正であれば、それを各担当プロセスに送信する。
- ⑥自身の処理速度と調整後の残処理粒子数を上下左右のプロセスに送信する。もし、自身の残処理粒子数が 0 であれば、終了メッセージを送信する(図 5.4 (b))。
- ⑦終了メッセージを送信したプロセスには以降メッセージは送信しない。

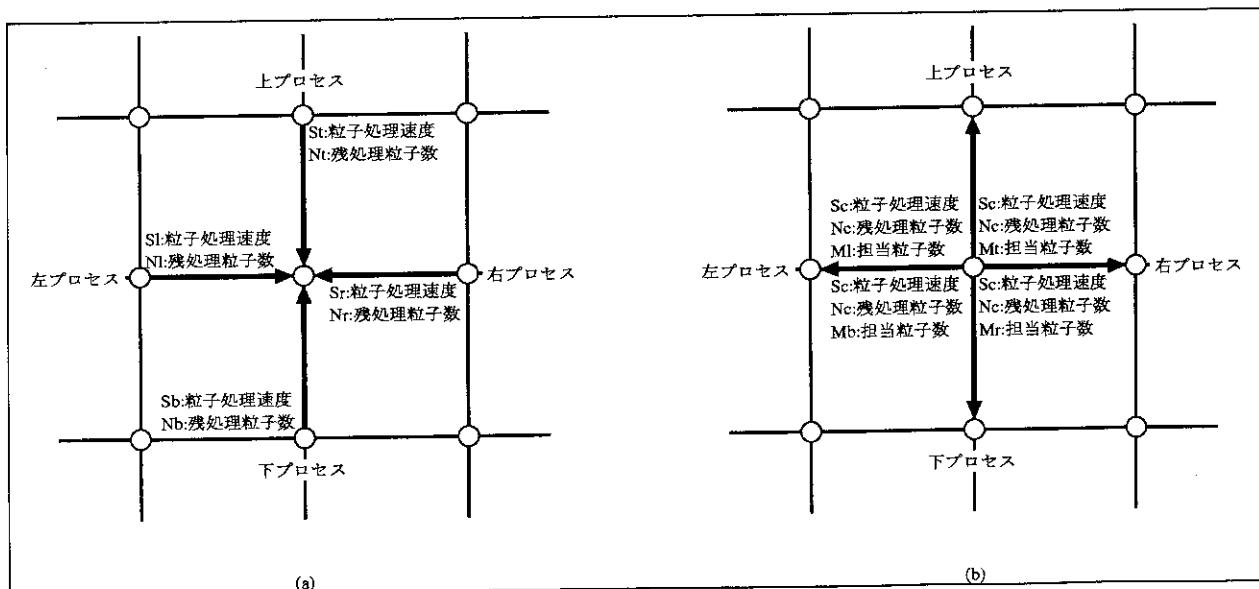


図 5.4 局所タスク割り当て方式

\*7 上下左右の四方でなく 2 次元メッシュ上のノードを 1 次元に並べて二方からとしてもよい。

\*8 自身が既に処理した粒子数でその処理経過時間を割ったものとする。

$N_t$  上プロセスの残処理粒子数  
 $S_t$  上プロセスの粒子処理速度  
 $M_t$  上プロセスに処理を担当してもらう粒子数

$N_b$  下プロセスの残処理粒子数  
 $S_b$  下プロセスの粒子処理速度  
 $M_b$  下プロセスに処理を担当してもらう粒子数

$N_l$  左プロセスの残処理粒子数  
 $S_l$  左プロセスの粒子処理速度  
 $M_l$  左プロセスに処理を担当してもらう粒子数

$N_r$  右プロセスの残処理粒子数  
 $S_r$  右プロセスの粒子処理速度  
 $M_r$  右プロセスに処理を担当してもらう粒子数

$N_c$  自身の残処理粒子数  
 $S_c$  自身の粒子処理速度

とすると、終了処理時間を等しくするためには、

$$\begin{aligned} S_c(N_c - M_t - M_b - M_l - M_r) &= S_t(N_t + M_t) \\ S_c(N_c - M_t - M_b - M_l - M_r) &= S_b(N_b + M_b) \\ S_c(N_c - M_t - M_b - M_l - M_r) &= S_l(N_l + M_l) \\ S_c(N_c - M_t - M_b - M_l - M_r) &= S_r(N_r + M_r) \end{aligned}$$

となる。これを解くと

$$\begin{aligned} M_t &= \frac{S_c S_b S_l S_r (N_c + N_b + N_l + N_r) - \Gamma N_t}{\Delta} \\ M_b &= \frac{S_c S_t S_l S_r (N_c + N_t + N_l + N_r) - \Gamma N_b}{\Delta} \\ M_l &= \frac{S_c S_t S_b S_r (N_c + N_t + N_b + N_r) - \Gamma N_l}{\Delta} \\ M_r &= \frac{S_c S_t S_b S_l (N_c + N_t + N_b + N_l) - \Gamma N_r}{\Delta} \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned} \Gamma &= S_c S_t S_b S_l + S_c S_t S_b S_r + S_c S_t S_l S_r + S_c S_b S_l S_r \\ \Delta &= S_c S_t S_b S_l + S_c S_t S_b S_r + S_c S_t S_l S_r + S_c S_b S_l S_r \end{aligned}$$

である。

ここで示した方式は、シミュレーションに続く処理である収集処理を考慮したものではない。各々のプロセスに、収集処理の送受信方式に見合った適当な負荷不均衡を与えることにより、一部の通信時間を隠蔽することが可能になる。さらなる速度向上のためには、このような負荷均衡化方法を考慮する必要がある。

**通信時間の削減** 通信時間を削減するためには、通信回数を削減し効率的な方式で通信を行うことである。

分配処理は NX ライブラリのマルチキャスト関数 gsendx を用いているが、 gsendx は PE 数に比例して処理時間がかかるため、表 5.7 に示したように分配処理は、 PE 数に比例した処理時間がかかる。現在の分配方式は、マスタープロセスは gsendx を用いて全スレーブプロセスに個別にデータを送信し、各スレーブプロセスはそのデータを受信するだけである。この個別に全スレーブプロセスにデータを送るという方式により、 PE 数に比例した処理時間がかかる。しかしながら、スレーブプロセスがデータを受信するだけでなく、受信したデータを他のスレーブプロセスに送信するという処理も行うように、分配処理をグローバルなオペレーションとすることでもっと効率的に送受信を行えるようになる。また、マスタープロセスとスレーブプロセスは分配処理でちょうど同期が取られることになるので、この分配処理をグローバルなオペレーションとして実現しても何らオーバーヘッドの増大にはならない。

表 5.7 に示したように収集処理は PE 数が大きい場合、 PE 数の増分以上に処理時間の増分が大きくなる。これは、上述したようにマスタープロセスのノードに通信が集中し、衝突が起こり通信が滞ってしまうためである。これを回避するにはマスタープロセスにデータが集中しない様に、中継プロセスで送信データをまとめて送信回数を減少させて、マスタープロセスにデータを送るようにすればよい。この収集処理も、上述の分配処理と同じくマスタープロセスとスレーブプロセス間でちょうど同期が取られることになるので、グローバルなオペレーションとして実現しても何らオーバーヘッドの増大にはならない。

現在 MCNP コードで採用している送受信方法と以下の 4 種類の送受信方法の通信時間の比較を行った。

**対角送受信** 図 5.5 のように対角線に沿って、送受信を行う方式である。図 5.5 (a) に分配時、図 5.5 (b) に収集時の送受信の様子を示した。

**マップ一列 2 分法送受信** 通信の衝突を避けるため、図 5.6 (a) のようにノード番号をマップし、2 次元のノードを一列化し 2 分法で送受信を行う方式である。図 5.6 (b) に 2 分法での分配時、図 5.6 (c) に 2 分法での収集時の様子を示した。

**行列 2 分法送受信** 通信の衝突を避けるため、2 分法の送受信を行、列ごとに行う方式<sup>[16]</sup> である。

**単純一列 2 分法送受信** 単純にノード番号で 2 次元のノードを一列化し、2 分法の送受信を行う方式である。

簡単のため、図 5.5 では分配の始点を、また図 5.6 では収集の終点をひだり上すみにしているが、アルゴリズム的には始点、終点はどの位置でも良く、矩形の中心を始点、終点に定めた方が効率は良い。表 5.9 に測定結果を示す。

分配処理はデータを送受信するだけであり、送受信方式を変更した場合の分配処理時間の変化は表 5.9 の処理時間の比較から直接得られる。しかし、収集処理では、中継プロセスは受信したデータと自身のデータをもとに処理を行い、その処理した結果をデータとして送信する。この中継プロセス

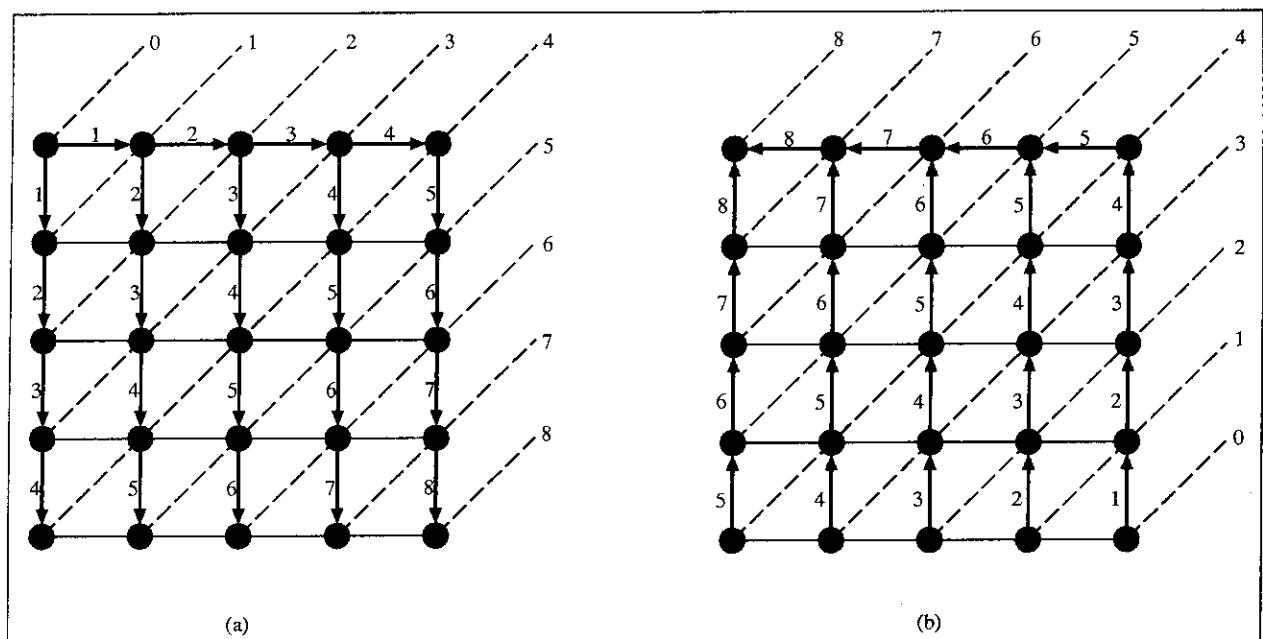


図 5.5 対角送受信方式

表 5.9 送受信方式別処理時間(秒)の比較

| PE 数   |         | 2     | 4     | 8     | 16    | 32     | 64    | 128    |
|--------|---------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|
| PE の配置 |         | 2 × 1 | 2 × 2 | 4 × 2 | 4 × 4 | 1 × 32 | 8 × 8 | 8 × 16 |
| 分配     | 従来方式    | 0.015 | 0.029 | 0.067 | 0.145 | 0.315  | 0.815 | 2.142  |
|        | 対角方式    | 0.015 | 0.023 | 0.024 | 0.034 | 0.027  | 0.042 | 0.053  |
|        | マップ一列方式 | 0.015 | 0.023 | 0.033 | 0.043 | 0.055  | 0.078 | 0.115  |
|        | 行列方式    | 0.016 | 0.023 | 0.033 | 0.043 | 0.051  | 0.078 | 0.113  |
|        | 単純一列方式  | 0.016 | 0.023 | 0.033 | 0.042 | 0.051  | 0.078 | 0.114  |
| 収集     | 従来方式    | 0.016 | 0.048 | 0.123 | 0.324 | 0.697  | 1.657 | 4.146  |
|        | 対角方式    | 0.016 | 0.034 | 0.058 | 0.063 | 0.131  | 0.126 | 0.219  |
|        | マップ一列方式 | 0.016 | 0.034 | 0.057 | 0.079 | 0.124  | 0.181 | 0.289  |
|        | 行列方式    | 0.016 | 0.034 | 0.058 | 0.084 | 0.119  | 0.183 | 0.290  |
|        | 単純一列方式  | 0.016 | 0.034 | 0.057 | 0.083 | 0.115  | 0.180 | 0.292  |

\*8 バイトオブジェクトの長さ 65,536 の配列の送受信処理時間である。

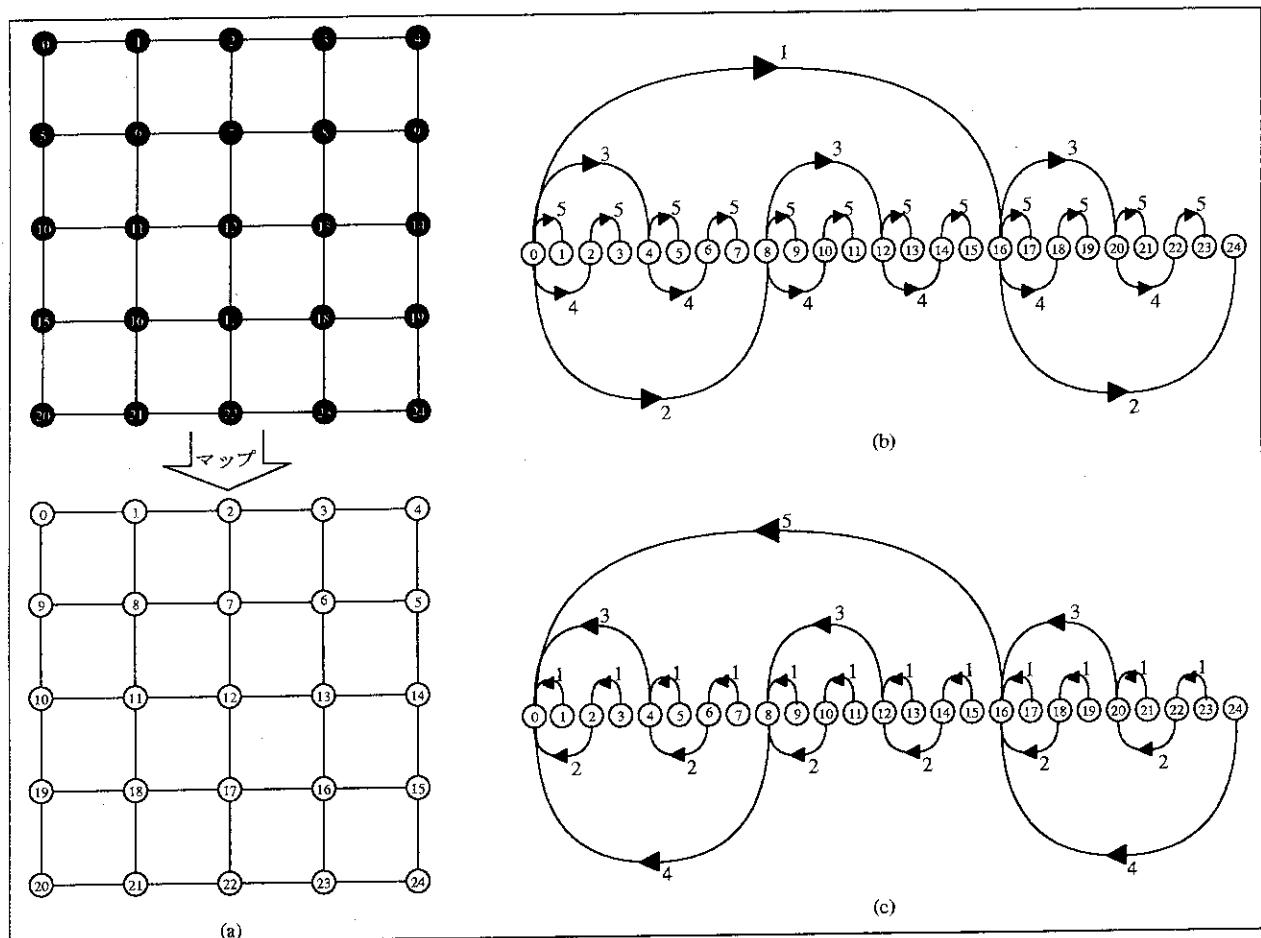


図 5.6 2 分法送受信方式

での処理コストが無視できない場合、送受信方式の並列度と処理コストによる通信時間の隠蔽が収集処理時間に関与してくれる。したがって、中継プロセスの処理コストも考慮しなければならない。現在の MCNP コードでは、各スレーブプロセスはマスタープロセスに約 286,000 バイトのデータ(統計データと粒子属性データ)を送信し、マスタープロセスはスレーブプロセス一つにつき約 0.038 秒の処理(統計データの保存と履歴保存のための粒子属性データの保存)を行っている。中継プロセスでの処理コストを 0.038 秒とし、送受信データを 286,000 バイトとした場合の収集処理時間を表 5.10 に示す。

表 5.10 中継コストを考慮した収集処理時間(秒)の比較

| PE 数    | 2     | 4     | 8     | 16    | 32     | 64    | 128    |
|---------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|
| PE の配置  | 2 × 1 | 2 × 2 | 4 × 2 | 4 × 4 | 1 × 32 | 8 × 8 | 8 × 16 |
| 従来方式    | 0.044 | 0.135 | 0.324 | 0.710 | 1.498  | 3.178 | 6.858  |
| 対角方式    | 0.044 | 0.065 | 0.088 | 0.119 | 0.161  | 0.186 | 0.358  |
| マップ一列方式 | 0.044 | 0.089 | 0.152 | 0.208 | 0.298  | 0.410 | 0.500  |
| 行列方式    | 0.044 | 0.089 | 0.155 | 0.213 | 0.299  | 0.406 | 0.527  |
| 単純一列方式  | 0.044 | 0.089 | 0.151 | 0.212 | 0.296  | 0.386 | 0.538  |

\* 送受信するデータは 286,000 バイト、中継プロセスの処理時間を 0.038 秒とした通信時間である。現在の MCNP コードでは、各スレーブプロセスはマスタープロセスに 3 回に分けて送信を行っているが、この計測では送信は 1 回にまとめた。

以上の計測結果から PE 数と処理時間の関係をみると、従来方式は PE 数の増加に伴い分配・収集とともに PE 数に比例、またはそれ以上に処理時間が増加している。他の 4 方式では PE 数の増加に伴う処理時間の増加が緩やかである<sup>9</sup> が、PE 数が多くなった場合(64 ~ 128)に、対角方式が他の 3 方式に比べて分配・収集ともに処理時間が短くなっている。したがって、スケーラブルな速度向上を得るために、分配処理、収集処理に対角送受信方式を採用するのが適当だと考えられる。

### 5.3 Monte-4 及び Paragon XP/S 上における並列処理の比較

Monte-4 及び Paragon XP/S 上における MCNP コードの処理時間を表 5.11 に示す。

処理時間には粒子シミュレーションの他、断面積データの読み込み及び内部変換等の前処理や出力処理のための時間も含まれる。計算機の性能比較を行う場合、ベクトルあるいは並列処理による数値演算速度のみならず、ファイルのアクセス速度、プロセッサ間のデータ転送速度も含めて評価を行う必要がある。このような観点から上記の値を評価に用いた。

Paragon XP/S 上での処理時間は、375.2 秒が最小となる。前述したように、Paragon XP/S 上での並列処理においては、断面積データの読み込み及び内部変換等の逐次実行の前処理のため、

<sup>9</sup> PE 数を N とした時、理論的な処理時間のオーダーは対角方式は  $O(\sqrt{N})$  であり、マップ一列方式、行列方式、単純一列方式は  $O(\log_2 N)$  である。

表 5.11 処理時間の比較 (粒子数 1,000,000)

| 計算機     | Monte-4 <sup>*1</sup> |       |       |       | Paragon XP/S <sup>*2</sup> |         |       |       |       |       |       |       |
|---------|-----------------------|-------|-------|-------|----------------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|         | 1                     | 2     | 3     | 4     | 2                          | 4       | 8     | 16    | 32    | 64    | 128   | 256   |
| プロセッサ数  | 925.3                 | 541.7 | 381.4 | 313.8 | 3,005.9                    | 1,647.7 | 970.0 | 627.2 | 464.6 | 393.9 | 375.2 | 432.6 |
| 処理時間(秒) |                       |       |       |       |                            |         |       |       |       |       |       |       |

\*1 バージョンはベクトル(並列)、実行モードはベクトル、モンテカルロ・パイプラインを使用したもの。

\*2 PVM 版を書き換えた NX 版を使用したスカラ並列版。

倍の速度向上率が上限となる。また、計算結果の送信及び受信が必要なため、使用するプロセッサが 200 台程度以上になると処理時間はかえって増大する。

4 プロセッサを用いた時の Monte-4 上における処理時間は、313.8 秒である。Monte-4 のスカラ演算速度及び I/O が Paragon XP/S よりも速い。膨大な量の断面積データの読み込み及び内部変換を必要とする放射線輸送問題には数値演算能力だけでなく、ファイルのアクセス等についても高い性能が要求される。

## 6. プログラミング環境に対する評価

並列プログラミングを支援するツールについて述べる。

Monte-4 及び Paragon XP/S 上におけるこの種のツールには以下の 3 種類ある。

- ① コンパイラ
- ② 挙動解析ツール
- ③ デバッガ

①については、高度なツールは人工知能的な手法を用いて、処理の意味論的解釈及びアルゴリズム変換、並列処理のためのデータ分割等を行うが、多くのものは、明示的に記述されたループに対し、(並列化のための)注釈文を付加するツールである。Monte-4 及び Paragon XP/S 上のものは後者に分類される。高度なツール(前者)としては、例えば次のようなシステムがある。

Saarlandes 大学(独)の Kessler は、分散システムのための自動並列化ツールへのアプローチとして、PARAMAT を開発した<sup>[17]</sup>。Kessler は、

「殆どの科学計算プログラムは、有限個のアルゴリズム・パターンに分割できる。」

という観察結果に基づき、PARAMAT を開発した。PARAMAT は、プログラムの意味構造を高速に解析することが可能なパターン認識アルゴリズムを用いており、このアルゴリズムは、ループの分割や入替え等の一般的なプログラム修正に対してもロバスト性を示す。また、PARAMAT は、解析されたプログラムの意味構造を用いて、データ分割、実行時間予測、アルゴリズムの変更を含めたプログラムの最適化を行う。論文において、Kessler は、データフロー解析のための PARAMAT のパターン認識手法を示した。この手法の特徴は、データの自動マッピングを行うため考案した記述子を用いて配列の定義 / 参照領域及びデータ分割を行っている点である。Kessler らは、2 次元の畳込み関数の計算プログラムを例にとり、PARAMAT の有用性を示した。

②の挙動解析ツールとは、サブルーチンの呼び出し関係(木構造)等のプログラムの構造、サブルーチンの実行回数及び計算コスト等を出力・表示する機能であり、各社(各コンピュータ・メーカー)同様の機能を持つツール類を整備している。この種のツールの評価基準は使い易さ及び精度である。

③のデバッガとは、主に、プログラムをデバッグ時特定の変数の値を興味のある時間ステップで出力する機能である。この種のツールは、その機能はしばしば必要とされるにもかかわらず、通常使用されない。理由は、応答時間が遅い、興味ある情報を対話的に出力するためのパラメータの指定が煩雑、使用メモリのサイズやプログラムのステップ数等様々な制限がある等である。実際、本コードのベクトル並列化あるいは並列化においても使用しなかった。

以下に Monte-4 及び Paragon XP/S 上の各種ツールの使用経験に基づく主観的評価を述べる。この種のツールの評価基準についてはまだ確立されていないため、本稿では、客観的事実を踏まえた主観的評価を述べる。

## 6.1 Monte-4 上の並列プログラミング環境

Monte-4 上のプログラミング支援環境について述べる。ベクトル化あるいは並列化を支援する Monte-4 上のツールは大きく計算時間の分布やサブルーチンの実行回数等を出力・表示する ANALYZER とベクトル化 / 並列化されたプログラムを自動生成するための FOPP(FORTRAN Optimize PreProcessor) に分かれる。

### 6.1.1 ANALYZER

ANALYZER-P/SX は、FORTRAN プログラムのベクトル化及び並列化に関するチューニングのための静的 / 動的特性を解析する性能評価支援向上ツールである。静的特性とは、サブルーチンの呼び出し関係、変数の参照定義関係等のプログラムの構造に関する情報(プログラムを実行しなくとも解析可能な情報)であり、動的特性とは、ある入力データを用いてプログラムを実行した際のサブルーチンやサブルーチンを構成するステートメントの実行回数やコストである。この種のツールについては各社同様の機能を持つツール類を整備しており、また、ほとんどのユーザに使用経験がある、と思われるため機能の詳細な説明は省略し、以下に使用経験に基づく主観的評価を述べる。

- この種のツールの評価基準の一つとして精度の問題が挙げられる。本ツールは、標準以上の精度(同じ機能を持つ他社ツールと同等以上の精度)を持っていると考える(これ以上の精度は技術的に困難と思われる)。このツール以外を用いた、上記に示した情報の収集は(Monte-4 上では)不可能なので正しい値は所詮把握できないが、このツールによって出力された各サブルーチンの計算コストの合計は実際に計測したコード全体の実行時間と数パーセントの誤差で一致する。この程度の誤差なら精度は良い、と考える。
- Monte-4 開発当時は、ツールの完成度が低く、解析対象プログラムにエラーが存在しないにもかかわらず、動的解析を行うための試行計算中にしばしば異常終了した。異常終了した場合、ユーザは先ずプログラムにバグがあることを考え、調査する。しかし、この調査は徒労に終わり、結局システムのバグであることが判明した時、ユーザは、i) このムダな(ユーザが最も嫌悪する作業である)調査を強要したシステムを憎悪する、あるいは、ii) システムに不信感を抱く。客観的事実を述べるならば、いずれにせよ作業効率が著しく低下する。しかしながら、上記に示した類のシステムのバグについては、現在ほぼ修正が終了し、使い易い状態のように思える。

### 6.1.2 FOPP(FORTRAN Optimaze PreProcessor)

このツールは並列化あるいはベクトル化されたプログラムを自動生成する(より正確には、並列処理あるいはベクトル処理に最適なプログラムを自動生成する)機能を持ち、FORTRAN コンパイラに組み込まれている。ユーザはコンパイラ・オプションを指定する形式で最適化機能を使用する。最適化に関する主な機能は次のとおり。

ベクトル化に関連した最適化 単純ループや多重ループをベクトル化に適した形式に変換する。即ち、変数・配列の定義参照関係を解析し、再起性の無い繰り返し計算を発見し、そこにベクトル化

指示行を付加する。

**インライン展開** 下位ルーチンを上位ルーチンに展開し、サブルーチン呼び出しのオーバーヘッドを削減するとともに、計算粒度を高める（ベクトル / 並列処理される部分の計算量をより大きなものにする）。

**並列化に関連した最適化** ベクトル化に関連した最適化同様、変数・配列の定義参照関係を解析し、単純ループや多重ループを並列化するための指示文（\*PDIR PARD、\*PDIR CRITICAL 等）を挿入する。多重ループについては、基本的に内側ループをベクトル処理、外側ループを並列処理するような指示文を挿入する。

以上が FOPP による主な最適化の概要である。以下に主観的評価を述べる。

- 上記に「再起性の無いことを確認し、ベクトル / 並列化指示行を挿入する」と記述したが、この機能は変数 / 配列名あるいは明示的に記述されたインデックスから変数 / 配列の定義 / 参照関係を検出する（統語的解析による最適化）というもので、論理的に再起性の無いことの確認是不可能である。言い換れば、FOPP による最適化はごく簡単なレベルである（プログラマであれば容易な作業である）。即ち、ユーザにとって自動の意味は、単純作業の削減ということになる。非常に大きなコードを FOPP を用いて最適化し、ベクトル / 並列処理への適応性を概観する場合などには有効と思われる。
- FOPP はしばしば、不必要的ベクトル / 並列化指示行を挿入し、性能を低下させる場合がある。ループの入替え等はある「戦略」の下に行われるが、「戦略」が失敗し、コストの大きな内側ループを外側ループに入れ換え（一般に、多重ループはコストの高いループが最内側に位置したほうがベクトル / 並列処理によって性能は向上する）、性能を阻害する例もあった。ループの繰り返し回数が明示的に表示されていない場合（科学技術計算においては明示的に表示されている場合のほうが少ないと思われるが）にこの種の失敗が見られる。前段で述べた「統語的解析による最適化」の欠点である。本ツールはこの種の欠点を補うために、多重ループの並列化等では粒度の実行時テスト等を行っている。

## 6.2 Paragon XP/S 上の並列プログラミング環境

Paragon XP/S 上のプログラミング支援環境について述べる。並列化を支援する Paragon XP/S 上のツールは大きく計算時間の分布やサブルーチンの実行回数等をプロファイルする prof、gprof と通信についての情報をグラフィカルに表示する Paragraph に分かれる。

### 6.2.1 prof と gprof

prof と gprof はプログラム実行時のプロファイル情報を収集・表示するツールである。これらのツールは、UNIX 環境では標準に備わっているものであるが、Paragon XP/S では並列プロセス対応に拡張されている。prof は、以下のようなプロファイル情報を収集・表示する。

- 各サブルーチン実行時間の全実行時間に占める割合

- 各サブルーチン実行時間の合計
- 各サブルーチン呼び出し回数
- 各サブルーチンの 1 回実行時間の平均実行時間を収集・表示

gprof では、 prof が収集・表示する情報に加えて、以下のプロファイル情報を収集・表示する。

- サブルーチン間の呼び出し関係及び実行時間

以上が Paragon XP/S のプロファイラの概要である。以下に使用経験に基づく主観的評価を述べる。

- prof、 gprof は、ソースの各実行行に対する実行回数及びコストの収集・表示機能を持たない。プログラムのチューニングをより精密に行う場合や、プログラムの動的な制御の流れを把握する場合には、ソースの各実行行に対する実行回数及びコストの情報の必要性を感じた。
- prof、 gprof のプロファイル情報には、ユーザ・プログラムだけではなく、 prof、 gprof の使用したシステム・コールの情報まで含まれている。プログラムを最適化するためプロファイル情報を利用する際、重点的に最適化するユーザ・プログラムの部分を定量的に同定することを複雑にするばかりでなく、プロファイル情報の精度にも影響すると思われ、ユーザ・プログラムのみのプロファイル情報を収集・表示することが望ましい。

### 6.2.2 Paragraph

Paragraph は並列実行プロセスの計算負荷や通信量をモニタリングした結果を X-Window を利用してグラフィカルに表示する対話型の性能解析ツールである。Paragraph は、通信及び負荷に関するモニタリング結果を

- ガントチャート<sup>\*10</sup>
- 棒グラフ
- 折れ線グラフ
- 円グラフ

等で表示する。プロセス間の通信のタイミング、通信量、通信時間及び負荷の状態が視覚的に把握できる。

以上が Paragon XP/S の性能解析ツールの概要である。以下に使用経験に基づく主観的評価を述べる。

- MCNP PVM 版の並列化はマスター・スレーブ方式で行っているが、スレーブプロセスの終了をマスタープロセスがスレーブプロセスにシグナルを送信することによって実現している。Paragraph はモニタリング中にシグナルが生成されると、情報収集に支障をきたし異常な結果

---

<sup>\*10</sup>時間を横軸に、プロセッサを縦軸にとり、各プロセッサの状態 (Busy, Overhead, Idle, I/O) の時間的変化がわかる棒グラフの一種。

となり、PVM 版の通信及び負荷の解析を Paragraph では行えなかった。Paragraph がシグナルを正常に取り扱えるように修正され、シグナルを用いているユーザ・プログラムの解析ができるようになることが必要である。

- Paragraph は、ユーザプログラムの実行をモニタリングし、ユーザプログラムの計算終了後にモニタリング結果を表示する静的解析ツールである。並列化のコード修正による通信のデッドロック等のバグの発見を容易にするために、プログラムを実行すると同時に動的に通信情報を提供するような動的な解析ツールの必要性を感じた。
- Paragraph では、情報表示速度を向上させるため、並列実行プロセスの計算負荷や通信量をモニタリングした結果データを収集後にデータ変換を行っているが、ソース・ファイルが大きく、履歴データが数 MB を超えるような場合に、Paragraph の情報表示が実用に適さない程に遅い場合がある。既存の原子力コードは概してソース・ファイルも大きく、実行時間も長いため履歴データも膨大な量になることが多い。Paragraph の情報表示が履歴データのサイズにあまり依存せずに、速やかに表示されるような処理方式に変更されることが望ましい。

## 7. おわりに

MCNP コードの Monte-4 上でのベクトル並列処理と Paragon XP/S 上でのスカラ並列処理について述べた。前者については、モンテカルロ・パイプライン等により従来のベクトル計算機と比較し、大きな速度向上率を得た (VP-100 上で 1.5 倍程度に対し、Monte-4 上で 8.6 倍)。後者については、32 ~ 256 台のプロセッサを用いて 12.3 ~ 15.2 倍の速度向上率を得るにとどまった。処理時間は 128 プロセッサ使用時が最も短く、256 プロセッサ使用時にはかえって増大する。これは、プロセッサ使用台数に比例して、通信処理時間が増大するためである。即ち、通信処理時間が  $O(N)$  となる送受信アルゴリズム (システム・ライブラリ) を用いたためであり、ユーザ・プログラムでトーナメント方式による通信を行えば、同処理時間は、 $O(N)$  ではなく、 $O(\log_2 N)$  に改善される。このためには、粒子シミュレーションが終了した時点で、グローバルなオペレーションによりマスター・プロセスへ統計データを転送するような制御構造が必要である。ただし、上記評価は、今回性能評価に用いた入力データ ( $\gamma$  線の平行ビームを線源とした人体に対する線量当量計算) に限定される。今後、その他の問題についても適応性を検討する必要がある。即ち、問題依存な逐次処理部分を除外し、粒子あたりの平均処理時間と分散から最適なプロセッサ台数を教示するような解析や、スケーラビリティ解析も必要である。スケーラビリティ解析とは、文献<sup>[18]</sup> に記述されているように、逐次処理に対する速度向上率及び並列化効率 (速度向上率をプロセッサ使用台数で割った値) の、i) プロセッサ台数を変化させた場合の線形性及びii) 計算の規模を変化させた場合の線形性についての評価である。これらの解析により、本コードの効率的な並列計算機利用が促進されると考える。

## 謝 辞

計算科学技術推進センター並列処理基本システム開発グループの武宮氏には、並列処理の専門家の立場から有用な助言を頂いた。ここに深謝いたします。

(株) カナザワ・コンピュータ・サービスの山崎氏には、Monte-4 上でのベクトル並列作業に関して、貴重なデータを提供して頂いた。ここに深謝いたします。

(財) 高度情報科学技術研究機構の長谷川氏には、Monte-4 上でのモンテカルロ・コードのベクトル化に関して貴重な助言を頂いた。ここに深謝いたします。

## 7. おわりに

MCNP コードの Monte-4 上でのベクトル並列処理と Paragon XP/S 上でのスカラ並列処理について述べた。前者については、モンテカルロ・バイオライン等により従来のベクトル計算機と比較し、大きな速度向上率を得た (VP-100 上で 1.5 倍程度に対し、Monte-4 上で 8.6 倍)。後者については、32 ~ 256 台のプロセッサを用いて 12.3 ~ 15.2 倍の速度向上率を得るにとどまった。処理時間は 128 プロセッサ使用時が最も短く、256 プロセッサ使用時にはかえって増大する。これは、プロセッサ使用台数に比例して、通信処理時間が増大するためである。即ち、通信処理時間が  $O(N)$  となる送受信アルゴリズム (システム・ライブラリ) を用いたためであり、ユーザ・プログラムでトーナメント方式による通信を行えば、同処理時間は、 $O(N)$  ではなく、 $O(\log_2 N)$  に改善される。このためには、粒子シミュレーションが終了した時点で、グローバルなオペレーションによりマスター・プロセスへ統計データを転送するような制御構造が必要である。ただし、上記評価は、今回性能評価に用いた入力データ ( $\gamma$  線の平行ビームを線源とした人体に対する線量当量計算) に限定される。今後、その他の問題についても適応性を検討する必要がある。即ち、問題依存な逐次処理部分を除外し、粒子あたりの平均処理時間と分散から最適なプロセッサ台数を教示するような解析や、スケーラビリティ解析も必要である。スケーラビリティ解析とは、文献<sup>[18]</sup> に記述されているように、逐次処理に対する速度向上率及び並列化効率 (速度向上率をプロセッサ使用台数で割った値) の、i) プロセッサ台数を変化させた場合の線形性及び ii) 計算の規模を変化させた場合の線形性についての評価である。これらの解析により、本コードの効率的な並列計算機利用が促進されると考える。

## 謝 辞

計算科学技術推進センター並列処理基本システム開発グループの武宮氏には、並列処理の専門家の立場から有用な助言を頂いた。ここに深謝いたします。

(株) カナザワ・コンピュータ・サービスの山崎氏には、Monte-4 上でのベクトル並列作業に関して、貴重なデータを提供して頂いた。ここに深謝いたします。

(財) 高度情報科学技術研究機構の長谷川氏には、Monte-4 上でのモンテカルロ・コードのベクトル化に関して貴重な助言を頂いた。ここに深謝いたします。

## 参考文献

- [1] Troubetzkoy, E., Steinberg, H., and Kalos, M. H., *Monte Carlo radiation penetration calculations on a parallel computer*, Trans. Amer. Nucl. Soc., 17, 260, 1973
- [2] Yazid, P. I., et al., *Parallelization of MCNP4 Code by Using Simple Fortran Algorithms*, JAERI-M 93-230, 1993
- [3] Martin, W., et al., *Experiences with Different Parallel Programmings for Monte Carlo Particle Transport Leads to a Portable Toolkit for Parallel Monte Carlo*, Proc. Joint Internat. Conf. on Mathematical Methods and Supercomputing in Nucl. Applications, 1993
- [4] Brown, F. B., Martin, W.R., *Monte Carlo Methods for Radiation Transport Analysis on Vector Computers*, Prog. Nucl. Energy, 14, 269, 1984
- [5] Nakagawa, M., et al., *Monte Carlo Calculations on Vector Super Computers Using GMVP*, ibid., 24, 183, 1990
- [6] Asai, K., et al., *Vectorization of the KENO IV Code*, Nucl. Sci. & Eng., 92, 298, 1986
- [7] Higuchi, K., et al., *Development of Monte Carlo Machine for Particle Transport Problem*, J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 32, No. 10, 1995
- [8] Judith, F. *MCNP-A General Monte Carlo Code for Neutron and Photon Transport Version 3A*, LA-7396-M, Rev.2 Manual, 1986
- [9] Foster, I., *Designing and Building Parallel Programs*, Addison Wesley, 1994
- [10] Hendricks, J., *Effects of Changing the Random Number Stride in Monte Carlo Calculations*, Nuclear Sciences and Engineering, Vol. 109, pp.86-91, 1991
- [11] Higuchi, K., et al., *Investigation of the Applicability of MCNP Code to Complicated Geometries*, JAERI-M 94-057, 1994 (in Japanese)
- [12] Cristy, M. *Specific Absorbed Fractions of Energy at Various Ages from Internal Photon Sources*, ORNL-TM-8381, 1987
- [13] *Recommendation of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 26
- [14] Burger, G., et al., *Effective Dose Equivalent and it's Relationship to Operational Quantities for neutrons*, European Seminar on Radiation Protection Quantities for External Exposures, PTB Braunschweig, Oct. 13-15, 1980
- [15] Takemiya, H., et al., *Highly Parallel Processing of Monte Carlo Codes for Particle Transport*, Proc. 1st Conference of the Japan Society for Computational Engineering and Science, 1996 (in Japanese)

- [16] Ohta, T., *A Fast Global Sum on the Coarse-grained Scalar Parallel Computer*, JAERI-Data/Code 96-009, 1996 (in Japanese)
- [17] Kessler, C. *Symbolic Array Data Flow Analysis and Pattern Recognition in Numerical Codes*, Proc. Programming Environments for Massively Parallel Distributed Systems, Monte Verta, 57-68, 1994
- [18] Hwang, K. *Advanced Computer Architecture: Parallelism, Scalability, Programmability*, McGraw-Hill, New York, 1993

## 付録 1 MCNP オプションの説明

人体に対する外部被曝計算を行った際使用した MCNP コードの機能及びそれらを使用するための入力データの説明を以下に示す。

### (1) MODE カード

MCNP コードでは、中性子輸送問題、中性子・光子輸送問題及び光子輸送問題を取り扱うことができる。このカードを使用して、取り扱う粒子の種類を指定する。以下に MODE カードの使用方法を示す。

MODE  $N$

$N = 0$  の時、中性子輸送問題

$N = 1$  の時、中性子・光子輸送問題

$N = 2$  の時、光子輸送問題

中性子被曝問題においては、中性子及び中性子と物質の相互作用によって生じた光子を追跡する。この場合次のようになる。

MODE 1

### (2) IP(IN) カード

このカードを使用して、各セルに対するインポータンスを与える。中性子輸送問題に対しては IN カードを、光子輸送問題に対しては IP カードを使用する。インポータンスとは、領域分割 (Geometry splitting) とルシアン・ルーレットを行う際に使用される値で、その領域の重要度を示す。領域分割とは、より詳細なサンプリングを行う際に粒子を分割して追跡を行う手法であり、ルシアン・ルーレットとは、計算時間短縮のためにウェイトの小さい粒子をそのウェイトに応じて殺す手法である。以下に、W というウェイトを持つ粒子が、インポータンスが I1 である領域 1 から、インポータンスが I2 である領域 2 へ進入した時の処理を示す。

粒子のウェイト : W

領域 1 のインポータンス : I1

領域 2 のインポータンス : I2

IF  $I2/I1 > 1$  領域分割を行う。

IF  $I2/I1$  is integer

粒子を  $I2/I1$  倍にする。

ELSE

$I1:I2$  の割合で粒子を増やす。

ENDIF

ELSE

ルシアン・ルーレットを行い、 $1 - I2/I1$  の確率で粒子をそのウェイトに応じて殺す。

```

ENDIF
W = W*I1/I2

```

以下に、使用した入力データの例を示す。

```
IN    1  115R  0  1
```

この例では、セル 1 ~ セル 116 及びセル 118 のインポータンスを 1 に、セル 117 のインポータンスを 0 にセットしている。セル 1 ~ セル 115 は、人体を表現する領域、セル 116 は、人体を包含する希薄な空気を表現する球状のセルであり、セル 118 は、線源を表現するセルである。セル 117 は、人体を包含する球（セル 116）のさらに外側に位置する球であり、インポータンスを 0 にセットすることにより、人体から遠ざかりつつある粒子に対する追跡を終了することで、計算時間の短縮を行っている。

### (3) SRCn カード

このカードを使用して、問題における線源を決める。線源の種類とカードの使用方法は以下の通り。

- SRC1 等方性の点線源
- SRC2 球面上外方向の cosine 分布線源
- SRC3 球面上内方向の cosine 分布線源
- SRC4 ある三次元領域での一様分布線源
- SRC5 平面

その他、SRC カードによってユーザーが任意の分布をサブルーチン SOURCE 内で定義できる。また、SRC1 ~ SRC5 で定義された線源に対し、SDIR カードをもちいてある方向に bias をかけることが可能である。以下に、SRC1 カードを使用した例を示す。

```
SRC1    -8.5   -2.36   20.   21   1
```

この例では、線源として、等方性の点線源を使用している。線源位置は (-8.5,-2.36,20.) であり、所属するセルの番号は 21 (大腸) である。また、ソース粒子のウェイトはすべて 1 としている。

今回行った人体に対する外部被曝計算においては、SRC5 カードを使用して、円盤からの平行線源を定義している。以下にその例を示す。

```
SRC5    100.  0.  0.  200  J  100.  -1.  0.  0.  0  J
```

この入力カードで定義される宣言は、

- 位置 : (100.,0.,0.)
- 線源を表現するセルの番号 : 200
- 円盤の半径 : 100.
- 照射方向を示すベクトル : (-1.,0.,0.)

である。

## (4) SI カード、SP カード

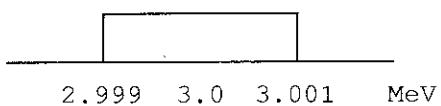
これらのカードを使用して、ソース粒子のエネルギー及びその確率密度関数を与える。例えば、

```
SI    a    b    c
SP    0    M    N
```

の時、区間  $[a,b]$ 、 $[b,c]$  から一様に  $M:N$  の割合でソース粒子のエネルギーをサンプリングする。以下に、使用した入力データの例を示す。

```
SI    0    2.999  3.001
SP    0        0        1
```

この例では、ソース粒子のエネルギーを一様に  $3.0 \pm 0.001$  MeV としているが、これは単一エネルギーの線源を使用しているためである。



## (5) Mm カード

このカードを使用して、各媒質の構成物質及びその分布を与える。例えば、

```
Mm    ZAID1  fraction1  ...
```

の時、

|            |                                   |
|------------|-----------------------------------|
| ZAID :     | ZZZAAA.n                          |
| ZZZ :      | 原子番号                              |
| AAA :      | 原子量 (自然元素なら 000)                  |
| <i>n</i> : | 断面積データ識別番号                        |
| fraction : | > 0 なら、原子数による比率<br>< 0 なら、重量による比率 |

である。以下に、使用した入力データの例を示す。ここでは、文献<sup>[8]</sup>に基づいて、軟組織(M1)、骨(M2)、肺(M3)の構成要素を定義した。この時、骨髄は骨と一緒に混じりあっていると想定した。

|    |          |         |          |         |          |         |          |         |
|----|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|
| M1 | 1001.04  | -.10454 | 6012.10  | -.22663 | 7014.04  | -.02490 | 8016.04  | -.63525 |
|    | 11023.01 | -.00112 | 12000.02 | -.00013 | 14000.02 | -.00030 | 15131.01 | -.00134 |
|    | 16032.01 | -.00204 | 17000.02 | -.00133 | 19000.01 | -.00208 | 20000.10 | -.00024 |
|    | 26000.11 | -.00005 | 40000.02 | -.00001 |          |         |          |         |

(6)  $F_n$  カード

このカードを使用して、タリーを定義する。 $F_n$  カードを使って指定された評価法により、面 S 上あるいはセル C 内での統計量をタリーする。MCNP コードにおいて使用できる評価法は以下の通りである。括弧内は光子用のタリーである。

- F1(F11) 指定された面をよぎった粒子カレントがタリーされる。
- F2(F12) 指定された面をよぎった粒子束がタリーされる。
- F4(F14) 指定されたセルにおける単位体積あたりの飛程の長さがタリーされる。
- F5(F15) 指定された点における粒子束がタリーされる。
- F6(F16) 指定されたセルにおける Track length estimator によって評価されたエネルギー蓄積量がタリーされる。
- F7 指定されたセルにおける Track length estimator によって評価されたエネルギー蓄積量がタリーされる。この時、核分裂によって生じた  $\gamma$  線のエネルギーも含める。

以下に、使用した入力データの例を示す。

F16 (7 8) (45 46)

この例では、セル 7 及び 8(腎孟)、セル 45 及び 46(卵巣)における  $\gamma$  線のエネルギー蓄積量を Track length estimator によって評価している。MCNP コードのタリーによって、出力された値の処理については、本文を参照されたい。

## (7) ERGP カード

このカードによって指定された EMCWF 以上のエネルギーを持った  $\gamma$  線に対しては MCG の簡単な物理的取り扱いが適用される。EMCWF 以下のエネルギーを持った  $\gamma$  線に対しては MCP の詳細な物理的取り扱いが適用される。MCG と MCP については、以下の通り。

## ・ MCG の簡単な物理的取り扱い

光電子効果 (photoelectric effect)、電子対創生 (pair production)、コンプトン散乱 (compton scattering) 等の物理現象のみを取り扱う。したがって、全断面積は、

$$\sigma_t = \sigma_{pe} + \sigma_{pp} + \sigma_s$$

となる。

## ・ MCP の詳細な物理的取り扱い

低いエネルギーを持った  $\gamma$  線と物質との複雑な相互作用を考える。

計算においては、EMCWF=0.1(Mev) とした。

(8) DE<sub>n</sub>, DF<sub>n</sub>

このカードの特徴は、例えば粒子束 - 線量間の修正係数のような点列で表現された関数を、エネルギーの関数として DF<sub>n</sub> カードを使って入力できる点である。MCNP コードは、EM<sub>n</sub> カードを使った内挿ではなく、点列間の log-log 内挿を標準的に行う。DE<sub>n</sub> カードで定義されるエネルギー点は、F<sub>n</sub> タリーに対する E<sub>n</sub> カードによって定義されるタリー用のエネルギー点である必要はない。粒子のエネルギーがこれらのカードによって定義された範囲を超えた場合は、最も高いエネルギーまたは低いエネルギーが使用される。EM<sub>n</sub> カードと違い、DE<sub>n</sub>、DF<sub>n</sub> カードにおいては、多くの点が使用可能である。しかし、そのレスポンスは合計値のような数少ないエネルギー bin (energy bin) にのみタリーされ得る。この 2 つのカードにおいて、n = 0 の時、DE<sub>n</sub>、DF<sub>n</sub> を持たないが、しかし、それらに関わるすべてのタリーに関数は適用される。通常使用される粒子束 - dose 間の収束係数、空気、水、軟組織に対するカーマやエネルギー吸収係数に対しては log - log 内挿が適当である。これらの 2 つのどちらに対しても最初のエントリが 5 カラム以降におかれた時、LIN または LOG が要求される特別なタイプの内挿法に対して定義される。したがって、log - log、log-linear 等のどんな組合せでも可能である。以下に使用した入力データを示す。

(9) E<sub>n</sub>

このカードを使用して、F<sub>n</sub> で指定されたタリーに関するエネルギーの bin を指定する。n = 0 の時、デフォルト値の変更を行う。以下に、使用した入力データの例を示す。

E0 .001 .01 .1 1 10

|             |   |           |
|-------------|---|-----------|
| エネルギー・カットオフ | ～ | .001(MeV) |
| .001        | ～ | .01       |
| .01         | ～ | .1        |
| .1          | ～ | 1         |
| 1           | ～ | 10        |

TOTAL

(10) T<sub>n</sub>

F<sub>n</sub> で指定されたタリーに関する時間の bin を指定する。n = 0 の時、デフォルト値の変更を行う。単位は 10<sup>-8</sup> SEC. (シェイク (shake) と呼ばれる)。

<入力データの例>

T16 1.0 10.0 100.0 1000.0 1000000.0

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 0.0       | ~ | 1.0       |
| 1.0       | ~ | 10.0      |
| 10.0      | ~ | 100.0     |
| 100.0     | ~ | 1000.0    |
| 1000.0    | ~ | 1000000.0 |
| 1000000.0 | ~ | 時間カットオフ   |
|           |   | TOTAL     |

(11) CUTP T<sub>cop</sub> E<sub>cop</sub> WC1 WC2 SWTM

カットオフを行うための時間、エネルギー、ウエイトを指定する。  
ウエイト・カットオフを行う際の処理は、以下の通り。

粒子のウエイト : W  
 ソースセルのインポータンス : I<sub>S</sub>  
 当該セルのインポータンス : I<sub>X</sub>  
 $W < WC2 * RX$  の時、(RX : R × I<sub>S</sub> / I<sub>X</sub>、R は一様乱数)  
 粒子は確率  $W/(WC1 * RX)$  で生き残る。  
 この時、W=WC1\*RX とする。

## &lt; 入力データの例 &gt;

CUTP 1.0E6 1.0E-2 3J  
 時間カットオフを 1.0E6 シェイクで行う。  
 エネルギー・カットオフを 1.0E-2 MeV で行う。  
 WC1、WC2、SWTM は、デフォルト値 -0.5、-0.25、.01 を使用している。

## 付録 2 MCNP コード入力データ

C 1000000EV, NEUTRON, HUMAN PHANTOM, SOURCE(PARALLEL,PA)  
C 27.0 - 70.0  
C COMPLEMENT OF SM.INT IS (17:-47:48:-49:50)  
C COMPLEMENT OF U.L.INT. IS (51:-53:54) (55:-57:58)  
C COMPLEMENT OF L.L.INT. IS (59:-61:54) (62:-66:61) (64:66:-2)  
C CHANGED DATA (24 25 26 27 28 29) INTO 24  
C CELL, IP, VOL AND TALLY  
C IMPORTANCE OF HEAD AND THYROID IS 2, NUMBER OF HISTORY IS 200K.

111 4 -1.04 -1 50 -3 (10:-2:12) (11:-2:12) (-15:20:21)  
(-22:23) #13 #14 #15 #16 #17 #18 #30 #37 #40 #41 #42 #44  
#158 #159 #160 #161 #162 #163 #164 #165 #166 #167 #168 #169  
#47 #48 #49 #52 (55:-57:58)

C 0.0 - 27.0  
112 4 -1.04 -1 2 -50 (10:-2:12) (11:-2:12) #7 (-15:20:21)  
(17:-47:48:-49:50) (51:-53:54) (55:-57:58) (59:-61:54)  
(62:-66:61) (64:66:-2) #45 #46 #93 #104 #105

C SKIN  
118 4 -1.04 1 2 -3 -183 #121 #122 #181 #182

C HEAD  
C 130 4 -1.04 (-5 6):(-4 3 -6) #9 (-22:23) (24:-25:-26:27:13:-5)  
C #31  
130 4 -1.04 (-5 6) (-15:20:21) (-22:23) (24:-25:-26:27:13:-5) 68  
131 4 -1.04 (-4 3 -6) (-15:20:21) (-22:23)  
(24:-25:-26:27:13:-5) 68  
#53 #54 #55 #56 #57 #58 #59 #60 #61 #62 #63 #64 #65 #66 #67  
#68 #69 #70 #71 #72 #73 #74 #75 #76 #77 #78 #79 #80 #81 #82  
#83 #84 #85 #86 #87 #88 #89 #90 #91 #92

C THYROID  
C 53 4 -1.04 -101 102 -103 3 -161  
53 4 -1.04 -101 102 33 -103 3 -104 -105  
54 4 -1.04 -101 102 -33 -103 3 -104 -106  
55 4 -1.04 -101 102 33 -103 104 -107 -108  
56 4 -1.04 -101 102 -33 -103 104 -107 -109  
57 4 -1.04 -101 102 33 -103 107 -110 -111  
58 4 -1.04 -101 102 -33 -103 107 -110 -112  
59 4 -1.04 -101 102 33 -103 110 -113 -114  
60 4 -1.04 -101 102 -33 -103 110 -113 -115  
61 4 -1.04 -101 102 33 -103 113 -116 -117  
62 4 -1.04 -101 102 -33 -103 113 -116 -118

|    |         |                                 |
|----|---------|---------------------------------|
| 63 | 4 -1.04 | -101 102 33 -103 116 -119 -120  |
| 64 | 4 -1.04 | -101 102 -33 -103 116 -119 -121 |
| 65 | 4 -1.04 | -101 102 33 -103 119 -122 -123  |
| 66 | 4 -1.04 | -101 102 -33 -103 119 -122 -124 |
| 67 | 4 -1.04 | -101 102 33 -103 122 -125 -126  |
| 68 | 4 -1.04 | -101 102 -33 -103 122 -125 -127 |
| 69 | 4 -1.04 | -101 102 33 -103 125 -128 -117  |
| 70 | 4 -1.04 | -101 102 -33 -103 125 -128 -118 |
| 71 | 4 -1.04 | -101 102 33 -103 128 -131 -132  |
| 72 | 4 -1.04 | -101 102 -33 -103 128 -131 -133 |
| 73 | 4 -1.04 | -101 102 33 -103 131 -134 -135  |
| 74 | 4 -1.04 | -101 102 -33 -103 131 -134 -136 |
| 75 | 4 -1.04 | -101 102 33 -103 134 -137 -114  |
| 76 | 4 -1.04 | -101 102 -33 -103 134 -137 -115 |
| 77 | 4 -1.04 | -101 102 33 -103 137 -140 -141  |
| 78 | 4 -1.04 | -101 102 -33 -103 137 -140 -142 |
| 79 | 4 -1.04 | -101 102 33 -103 140 -143 -144  |
| 80 | 4 -1.04 | -101 102 -33 -103 140 -143 -145 |
| 81 | 4 -1.04 | -101 102 33 -103 143 -146 -111  |
| 82 | 4 -1.04 | -101 102 -33 -103 143 -146 -112 |
| 83 | 4 -1.04 | -101 102 33 -103 146 -26 -149   |
| 84 | 4 -1.04 | -101 102 -33 -103 146 -26 -150  |
| 85 | 4 -1.04 | -101 102 33 -103 26 -151 -152   |
| 86 | 4 -1.04 | -101 102 -33 -103 26 -151 -153  |
| 87 | 4 -1.04 | -101 102 33 -103 151 -154 -108  |
| 88 | 4 -1.04 | -101 102 -33 -103 151 -154 -109 |
| 89 | 4 -1.04 | -101 102 33 -103 154 -157 -158  |
| 90 | 4 -1.04 | -101 102 -33 -103 154 -157 -159 |
| 91 | 4 -1.04 | -101 102 33 -103 157 -160 -161  |
| 92 | 4 -1.04 | -101 102 -33 -103 157 -160 -162 |

## C SKIN OF HEAD

152 4 -1.04 (5 6 -185):(4 3 -6 -184) (-15:20:21)

## C SKIN OF LEGS

154 4 -1.04 (7 -2 9 -186) #50 #51 (8:2:-9) (194:2:-9)

155 4 -1.04 (8 -2 9 -187) #50 #51 (7:2:-9) (193:2:-9)

#154

## C LEGS

3 4 -1.04 (-7 -2 9) (194:2:-9) #50 #51  
(64:66:-2)4 4 -1.04 (-8 -2 9) (193:2:-9) #50 #51  
(64:66:-2)

## C LEG BONES

156 5 -1.4 -194 -2 230

(64:66:-2)

|     |        |      |      |     |
|-----|--------|------|------|-----|
| 173 | 5 -1.4 | -194 | -230 | 231 |
| 174 | 5 -1.4 | -194 | -231 | 9   |
| 157 | 5 -1.4 | -193 | -2   | 230 |

(64:66:-2)

|     |        |      |      |     |
|-----|--------|------|------|-----|
| 175 | 5 -1.4 | -193 | -230 | 231 |
| 176 | 5 -1.4 | -193 | -231 | 9   |

C ARM CHANGED SUR. 10,11 AND REMOVED SUR. 13.

|     |        |     |     |      |
|-----|--------|-----|-----|------|
| 5   | 5 -1.4 | -10 | 232 | -12  |
| 177 | 5 -1.4 | -10 | 233 | -232 |
| 178 | 5 -1.4 | -10 | 2   | -233 |
| 6   | 5 -1.4 | -11 | 232 | -12  |
| 179 | 5 -1.4 | -11 | 233 | -232 |
| 180 | 5 -1.4 | -11 | 2   | -233 |

C PELVIS

|   |   |     |    |     |    |     |     |
|---|---|-----|----|-----|----|-----|-----|
| 7 | 5 -1.4 (-14 17 2 16 -18 -19):(-14 17 -15 16 18) | -14 | 17 | 2   | 16 | -18 | -19 |
| C | 8 5 -1.4  | -14 | 17 | -15 | 16 | 18  |     |

C SPINE

|     |        |     |    |     |  |  |  |
|-----|--------|-----|----|-----|--|--|--|
| 9   | 5 -1.4 | -20 | 15 | -30 |  |  |  |
| 171 | 5 -1.4 | -20 | 30 | -3  |  |  |  |
| 172 | 5 -1.4 | -20 | 3  | -21 |  |  |  |

C SKULL

|    |        |    |     |    |  |  |  |
|----|--------|----|-----|----|--|--|--|
| 10 | 5 -1.4 | 22 | -23 | 68 |  |  |  |
|----|--------|----|-----|----|--|--|--|

C FACIAL SKELTON

|    |        |     |    |    |     |     |      |
|----|--------|-----|----|----|-----|-----|------|
| 11 | 5 -1.4 | -24 | 25 | 26 | -27 | -13 | 5 68 |
|----|--------|-----|----|----|-----|-----|------|

C RIB CAGE

|     |        |     |    |     |      |  |  |
|-----|--------|-----|----|-----|------|--|--|
| 158 | 5 -1.4 | -28 | 29 | 30  | -201 |  |  |
| 159 | 5 -1.4 | -28 | 29 | 202 | -203 |  |  |
| 160 | 5 -1.4 | -28 | 29 | 204 | -205 |  |  |
| 161 | 5 -1.4 | -28 | 29 | 88  | -207 |  |  |
| 162 | 5 -1.4 | -28 | 29 | 208 | -209 |  |  |
| 163 | 5 -1.4 | -28 | 29 | 210 | -211 |  |  |
| 164 | 5 -1.4 | -28 | 29 | 212 | -213 |  |  |
| 165 | 5 -1.4 | -28 | 29 | 214 | -215 |  |  |
| 166 | 5 -1.4 | -28 | 29 | 216 | -217 |  |  |
| 167 | 5 -1.4 | -28 | 29 | 218 | -219 |  |  |
| 168 | 5 -1.4 | -28 | 29 | 220 | -221 |  |  |
| 169 | 5 -1.4 | -28 | 29 | 222 | -31  |  |  |

C CLAVICLES

|    |        |     |     |     |    |     |  |
|----|--------|-----|-----|-----|----|-----|--|
| 13 | 5 -1.4 | -32 | -13 | 33  | 34 | -35 |  |
| 14 | 5 -1.4 | -32 | -13 | -33 | 36 | -37 |  |

C SCAPLAE CHANGED FROM 39 TO 28

C COMPLIMENT IS (38:-39:-40:31:-13:41:-42:-43:44)

|    |        |                 |    |    |     |    |     |    |     |
|----|--------|-----------------|----|----|-----|----|-----|----|-----|
| 15 | 5 -1.4 | -38             | 28 | 40 | -31 | 13 | -33 | 41 | -42 |
|    |        | (28 :-29 :-30 ) |    |    |     |    |     |    |     |
| 16 | 5 -1.4 | -38             | 28 | 40 | -31 | 13 | 33  | 43 | -44 |
|    |        | (28 :-29 :-30 ) |    |    |     |    |     |    |     |

C BREASTS

|     |         |      |   |
|-----|---------|------|---|
| 121 | 4 -1.04 | -234 | 1 |
| 122 | 4 -1.04 | -235 | 1 |

C SKIN OF BREASTS

|     |         |     |   |     |
|-----|---------|-----|---|-----|
| 181 | 4 -1.04 | -69 | 1 | 234 |
| 182 | 4 -1.04 | -70 | 1 | 235 |

C STOMACH

|    |         |     |    |
|----|---------|-----|----|
| 17 | 4 -1.04 | -45 | 46 |
| 18 | 4 -1.04 | -46 |    |

C SMALL INTETINE

C COMPLEMENT IS (17:-47:48:-49:50)

|    |         |                                     |    |     |    |     |    |
|----|---------|-------------------------------------|----|-----|----|-----|----|
| 19 | 4 -1.04 | -17                                 | 47 | -48 | 49 | -50 | 45 |
|    |         | (51:-53:54) (55:-57:58) (59:-61:54) |    |     |    |     |    |

C UPPER LARGE INTESTINE

C COMPLEMENT IS (51:-53:54) (55:-57:58)

|    |         |     |    |     |     |             |  |  |
|----|---------|-----|----|-----|-----|-------------|--|--|
| 20 | 4 -1.04 | -51 | 52 | 53  | -54 | (55:-57:58) |  |  |
| 21 | 4 -1.04 | -52 | 53 | -54 |     | (55:-57:58) |  |  |
| 22 | 4 -1.04 | -55 | 56 | 57  | -58 | (59:-61:54) |  |  |
| 23 | 4 -1.04 | -56 | 57 | -58 |     | (59:-61:54) |  |  |

C LOWER LARGE INTESTINE

C COMPLEMENT IS (59:-61:54) (62:-66:61) (64:66:-2)

C WALL

|    |         |                   |                   |                |
|----|---------|-------------------|-------------------|----------------|
| 24 | 4 -1.04 | (-59 60 61 -54) : | (-62 63 66 -61) : | (-64 65 -66 2) |
|----|---------|-------------------|-------------------|----------------|

C CONTENTS

|    |         |                |                |             |
|----|---------|----------------|----------------|-------------|
| 25 | 4 -1.04 | (-60 61 -54) : | (-63 66 -61) : | (-65 -66 2) |
|----|---------|----------------|----------------|-------------|

C ADRENAL GRANDS

|    |         |     |     |
|----|---------|-----|-----|
| 30 | 4 -1.04 | -67 | 180 |
|----|---------|-----|-----|

C BRAIN

|    |         |     |
|----|---------|-----|
| 31 | 4 -1.04 | -68 |
|----|---------|-----|

C KIDNEYS

|    |         |     |     |
|----|---------|-----|-----|
| 37 | 4 -1.04 | -76 | 66  |
| 40 | 4 -1.04 | -77 | -78 |

C LIVER

|    |         |     |     |    |     |
|----|---------|-----|-----|----|-----|
| 41 | 4 -1.04 | -79 | -80 | 50 | -81 |
|----|---------|-----|-----|----|-----|

C LUNGS

|    |          |                       |                  |                  |
|----|----------|-----------------------|------------------|------------------|
| 42 | 6 -0.296 | (-82 -84 -86 89 -90): | (-82 88 -89):    | (-82 86 89 -90): |
|    |          | (-82 90)              |                  |                  |
| 44 | 6 -0.296 | (-83 85 -87 88 -91):  | (-83 87 88 -91): | (-83 91)         |

## C OVARIES

|    |         |     |
|----|---------|-----|
| 45 | 4 -1.04 | -92 |
| 46 | 4 -1.04 | -93 |

## C PANCREAS

|    |         |     |    |     |
|----|---------|-----|----|-----|
| 47 | 4 -1.04 | -94 | 95 | -66 |
| 48 | 4 -1.04 | -94 | 66 | 96  |

## C SPLEEN

|    |         |     |
|----|---------|-----|
| 49 | 4 -1.04 | -97 |
|----|---------|-----|

## C TESTES

|    |         |     |
|----|---------|-----|
| 50 | 4 -1.04 | -98 |
| 51 | 4 -1.04 | -99 |

## C THYMUS

|    |         |      |
|----|---------|------|
| 52 | 4 -1.04 | -100 |
|----|---------|------|

## C UTERUS

|    |         |      |     |
|----|---------|------|-----|
| 93 | 4 -1.04 | -164 | 165 |
|----|---------|------|-----|

(59:-61:54) (62:-66:61) (64:66:-61)

## C URINARY BLADDER AND CONTENT

|     |         |      |     |
|-----|---------|------|-----|
| 104 | 4 -1.04 | -177 | 178 |
| 105 | 4 -1.04 | -178 |     |

## C \*\*\* ENVIRONMENT \*\*\*

|     |             |            |            |            |            |
|-----|-------------|------------|------------|------------|------------|
| 106 | 7 -1.293E-8 | -188       | (183:-2:3) | (185:-6)   | (184:-3:6) |
|     | (186:2:-9)  | (187:2:-9) | (193:2:-9) | (194:2:-9) | 98 99      |
|     | (-15:20:21) | (69:-183)  | (70:-183)  | (10:-2:12) | (11:-2:12) |

107 0 -199 188

## C TRUNK

|   |    |         |        |     |     |     |     |
|---|----|---------|--------|-----|-----|-----|-----|
| 1 | SQ | 0.0025  | 0.0100 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
|   |    | -1.0000 | 0.0    | 0.0 | 0.0 |     |     |
| 2 | PZ | 0.0     |        |     |     |     |     |
| 3 | PZ | 70.0000 |        |     |     |     |     |

## C HEAD

|   |    |         |        |        |         |     |     |
|---|----|---------|--------|--------|---------|-----|-----|
| 4 | SQ | 0.0156  | 0.0100 | 0.0    | 0.0     | 0.0 | 0.0 |
|   |    | -1.0000 | 0.0    | 0.0    | 0.0     |     |     |
| 5 | SQ | 0.0156  | 0.0100 | 0.0196 | 0.0     | 0.0 | 0.0 |
|   |    | -1.0000 | 0.0    | 0.0    | 86.8500 |     |     |
| 6 | PZ | 86.8500 |        |        |         |     |     |

## C LEGS

|   |    |          |        |     |     |     |         |
|---|----|----------|--------|-----|-----|-----|---------|
| 7 | GQ | 1.0000   | 1.0000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | -0.2000 |
|   |    | -20.0000 | 0.0    | 0.0 | 0.0 |     |         |
| 8 | GQ | 1.0000   | 1.0000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.2000  |
|   |    | 20.0000  | 0.0    | 0.0 | 0.0 |     |         |
| 9 | PZ | -80.0000 |        |     |     |     |         |

## C ARM

## JAERI-Data/Code 96-019

|     |                |          |         |         |          |        |        |
|-----|----------------|----------|---------|---------|----------|--------|--------|
| 10  | GQ             | 0.5102   | 0.1372  | 0.0     | 0.0      | 0.0    | 0.0104 |
|     |                | -19.4898 | 0.0     | -0.2050 | 185.8775 |        |        |
| 11  | GQ             | 0.5102   | 0.1372  | 0.0     | 0.0      | 0.0    | 0.0104 |
|     |                | 18.0612  | 0.0     | 0.1760  | 159.5918 |        |        |
| 12  | PZ             | 69.0000  |         |         |          |        |        |
| 232 | PZ             | 51.7500  |         |         |          |        |        |
| 233 | PZ             | 34.5000  |         |         |          |        |        |
| 13  | PY             | 0.0      |         |         |          |        |        |
| C   | PELVIS         |          |         |         |          |        |        |
| 14  | SQ             | 0.0069   | 0.0069  | 0.0     | 0.0      | 0.0    | 0.0    |
|     |                | -1.0000  | 0.0     | -3.0000 | 0.0      |        |        |
| 15  | PZ             | 22.0000  |         |         |          |        |        |
| 16  | PY             | -3.0000  |         |         |          |        |        |
| 17  | SQ             | 0.0078   | 0.0078  | 0.0     | 0.0      | 0.0    | 0.0    |
|     |                | -1.0000  | 0.0     | -3.8000 | 0.0      |        |        |
| 18  | PZ             | 14.0000  |         |         |          |        |        |
| 19  | PY             | 5.0000   |         |         |          |        |        |
| C   | SPINE          |          |         |         |          |        |        |
| 20  | SQ             | 0.2500   | 0.1600  | 0.0     | 0.0      | 0.0    | 0.0    |
|     |                | -1.0000  | 0.0     | 5.5000  | 0.0      |        |        |
| 21  | PZ             | 80.5400  |         |         |          |        |        |
| C   | SKULL          |          |         |         |          |        |        |
| 22  | SQ             | 0.0230   | 0.0135  | 0.0302  | 0.0      | 0.0    | 0.0    |
|     |                | -1.0000  | 0.0     | 0.0     | 86.8500  |        |        |
| 23  | SQ             | 0.0178   | 0.0111  | 0.0226  | 0.0      | 0.0    | 0.0    |
|     |                | -1.0000  | 0.0     | 0.0     | 86.8500  |        |        |
| C   | FACIAL SKELTON |          |         |         |          |        |        |
| 24  | SQ             | 0.0204   | 0.0123  | 0.0     | 0.0      | 0.0    | 0.0    |
|     |                | -1.0000  | 0.0     | 0.0     | 0.0      |        |        |
| 25  | SQ             | 0.0319   | 0.0173  | 0.0     | 0.0      | 0.0    | 0.0    |
|     |                | -1.0000  | 0.0     | 0.0     | 0.0      |        |        |
| 26  | PZ             | 74.0000  |         |         |          |        |        |
| 27  | PZ             | 84.7300  |         |         |          |        |        |
| C   | RIB CAGE       |          |         |         |          |        |        |
| 28  | SQ             | 0.0035   | 0.0104  | 0.0     | 0.0      | 0.0    | 0.0    |
|     |                | -1.0000  | 0.0     | 0.0     | 0.0      |        |        |
| 29  | SQ             | 0.0037   | 0.0116  | 0.0     | 0.0      | 0.0    | 0.0    |
|     |                | -1.0000  | 0.0     | 0.0     | 0.0      |        |        |
| 30  | PZ             | 35.1000  |         |         |          |        |        |
| 31  | PZ             | 67.3000  |         |         |          |        |        |
| C   | CLAVICLES      |          |         |         |          |        |        |
| 32  | TZ             | 0.0      | 11.1000 | 68.2500 | 20.0000  | 0.7883 | 0.7883 |
| 33  | PX             | 0.0      |         |         |          |        |        |

|                                    |    |          |         |         |         |        |         |
|------------------------------------|----|----------|---------|---------|---------|--------|---------|
| 34                                 | P  | 7.0342   | 1.0000  | 0.0     | 11.1000 |        |         |
| 35                                 | P  | 0.8941   | 1.0000  | 0.0     | 11.1000 |        |         |
| 36                                 | P  | -7.0342  | 1.0000  | 0.0     | 11.1000 |        |         |
| 37                                 | P  | -0.8941  | 1.0000  | 0.0     | 11.1000 |        |         |
| <b>C SCAPLAE</b>                   |    |          |         |         |         |        |         |
| 38                                 | SQ | 0.0028   | 0.0104  | 0.0     | 0.0     | 0.0    | 0.0     |
|                                    |    | -1.0000  | 0.0     | 0.0     | 0.0     |        |         |
| 39                                 | SQ | 0.0204   | 0.0104  | 0.0     | 0.0     | 0.0    | 0.0     |
|                                    |    | -1.0000  | 0.0     | 0.0     | 0.0     |        |         |
| 40                                 | PZ | 50.9000  |         |         |         |        |         |
| 41                                 | P  | 0.2500   | 1.0000  | 0.0     | 0.0     |        |         |
| 42                                 | P  | 0.8000   | 1.0000  | 0.0     | 0.0     |        |         |
| 43                                 | P  | -0.2500  | 1.0000  | 0.0     | 0.0     |        |         |
| 44                                 | P  | -0.8000  | 1.0000  | 0.0     | 0.0     |        |         |
| <b>C STOMACH</b>                   |    |          |         |         |         |        |         |
| 45                                 | SQ | 0.0625   | 0.1111  | 0.0156  | 0.0     | 0.0    | 0.0     |
|                                    |    | -1.0000  | 8.0000  | -4.0000 | 35.0000 |        |         |
| 46                                 | SQ | 0.0872   | 0.1755  | 0.0183  | 0.0     | 0.0    | 0.0     |
|                                    |    | -1.0000  | 8.0000  | -4.0000 | 35.0000 |        |         |
| <b>C SMALL INTESTINE</b>           |    |          |         |         |         |        |         |
| 47                                 | PY | -4.8600  |         |         |         |        |         |
| 48                                 | PY | 2.2000   |         |         |         |        |         |
| 49                                 | PZ | 17.0000  |         |         |         |        |         |
| 50                                 | PZ | 27.0000  |         |         |         |        |         |
| <b>C UPPER LARGE INTESTINE</b>     |    |          |         |         |         |        |         |
| 51                                 | SQ | 0.1600   | 0.1600  | 0.0     | 0.0     | 0.0    | 0.0     |
|                                    |    | -1.0000  | -8.5000 | -2.3600 | 0.0     |        |         |
| 52                                 | SQ | 0.3116   | 0.3116  | 0.0     | 0.0     | 0.0    | 0.0     |
|                                    |    | -1.0000  | -8.5000 | -2.3600 | 0.0     |        |         |
| 53                                 | PZ | 14.4500  |         |         |         |        |         |
| 54                                 | PZ | 24.0000  |         |         |         |        |         |
| 55                                 | SQ | 0.0      | 0.1600  | 0.4444  | 0.0     | 0.0    | 0.0     |
|                                    |    | -1.0000  | 0.0     | -2.3600 | 25.5000 |        |         |
| 56                                 | SQ | 0.0      | 0.2569  | 1.0563  | 0.0     | 0.0    | 0.0     |
|                                    |    | -1.0000  | 0.0     | -2.3600 | 25.5000 |        |         |
| 57                                 | PX | -10.5000 |         |         |         |        |         |
| 58                                 | PX | 10.5000  |         |         |         |        |         |
| <b>C LOWER LARGE INTESTINE</b>     |    |          |         |         |         |        |         |
| <b>C SUBTRACT 1.0 FROM 18.6691</b> |    |          |         |         |         |        |         |
| 59                                 | GQ | 0.2829   | 0.2204  | 0.0066  | 0.0     | 0.0721 | -0.0289 |
|                                    |    | -4.5410  | -0.6289 | 0.1289  | 17.6691 |        |         |
| <b>C SUBTRACT 1.0 FROM 36.6698</b> |    |          |         |         |         |        |         |
| 60                                 | GQ | 0.5569   | 0.3956  | 0.0113  | 0.0     | 0.1294 | -0.0569 |

|     |                          |                   |          |          |          |        |         |
|-----|--------------------------|-------------------|----------|----------|----------|--------|---------|
|     |                          | -8.9384           | -1.1287  | 0.2716   | 35.6698  |        |         |
| 61  | PZ                       | 8.7200            |          |          |          |        |         |
| 62  | TY                       | 3.0000            | 0.0      | 8.7200   | 5.7200   | 1.5700 | 1.5700  |
| 63  | TY                       | 3.0000            | 0.0      | 8.7200   | 5.7200   | 0.9100 | 0.9100  |
| 64  | TY                       | 3.0000            | 0.0      | 0.0      | 3.0000   | 1.5700 | 1.5700  |
| 65  | TY                       | 3.0000            | 0.0      | 0.0      | 3.0000   | 0.9100 | 0.9100  |
| 66  | PX                       | 3.0000            |          |          |          |        |         |
| C   | ADRENAL GRANDS           |                   |          |          |          |        |         |
| 67  | GQ                       | 2.6524            | 1.7920   | 0.0400   | 3.4499   | 0.0    | 0.0     |
|     |                          | -35.8163          | -29.9950 | -3.0400  | 194.4260 |        |         |
| C   | BRAIN                    | CHANGED ON 1990.5 |          |          |          |        |         |
| 68  | SQ                       | 0.0229            | 0.0135   | 0.0302   | 0.0      | 0.0    | 0.0     |
|     |                          | -1.0000           | 0.0      | 0.0      | 86.8500  |        |         |
| C   | BREASTS                  |                   |          |          |          |        |         |
| 69  | SQ                       | 0.0429            | 0.0551   | 0.0607   | 0.0      | 0.0    | 0.0     |
|     |                          | -1.0000           | 10.0000  | -9.9499  | 52.0000  |        |         |
| 70  | SQ                       | 0.0429            | 0.0551   | 0.0607   | 0.0      | 0.0    | 0.0     |
|     |                          | -1.0000           | -10.0000 | -9.9499  | 52.0000  |        |         |
| 234 | SQ                       | 0.0466            | 0.0607   | 0.0671   | 0.0      | 0.0    | 0.0     |
|     |                          | -1.0000           | 10.0000  | -9.9499  | 52.0000  |        |         |
| 235 | SQ                       | 0.0466            | 0.0607   | 0.0671   | 0.0      | 0.0    | 0.0     |
|     |                          | -1.0000           | -10.0000 | -9.9499  | 52.0000  |        |         |
| C   | GAL. BLADDER AND CONTENT |                   |          |          |          |        |         |
| 71  | GQ                       | 1.0000            | 1.0000   | 1.0000   | 0.0001   | 0.0003 | -0.0001 |
|     |                          | 9.0021            | 6.3904   | -59.9992 | 925.9734 |        |         |
| 72  | GQ                       | 1.0000            | 1.0000   | 1.0000   | 0.0001   | 0.0003 | -0.0001 |
|     |                          | 9.0021            | 6.3904   | -59.9992 | 926.4678 |        |         |
| 73  | GQ                       | 1.0000            | 1.0000   | 1.0000   | 0.0      | 0.0003 | -0.0001 |
|     |                          | 9.0021            | 6.3904   | -59.9992 | 930.4492 |        |         |
| 74  | GQ                       | 1.0000            | 1.0000   | 1.0000   | 0.0      | 0.0003 | -0.0001 |
|     |                          | 9.0021            | 6.3904   | -59.9992 | 918.4961 |        |         |
| 75  | PZ                       | 8.0000            |          |          |          |        |         |
| C   | KIDNEYS                  |                   |          |          |          |        |         |
| 76  | SQ                       | 0.0494            | 0.4444   | 0.0331   | 0.0      | 0.0    | 0.0     |
|     |                          | -1.0000           | 6.0000   | 6.0000   | 32.5000  |        |         |
| 77  | SQ                       | 0.0494            | 0.4444   | 0.0331   | 0.0      | 0.0    | 0.0     |
|     |                          | -1.0000           | -6.0000  | 6.0000   | 32.5000  |        |         |
| 78  | PX                       | -3.0000           |          |          |          |        |         |
| C   | LIVER                    |                   |          |          |          |        |         |
| 79  | SQ                       | 0.0037            | 0.0156   | 0.0      | 0.0      | 0.0    | 0.0     |
|     |                          | -1.0000           | 0.0      | 0.0      | 0.0      |        |         |
| 80  | P                        | 0.0286            | 0.0222   | -0.0233  | -1.0000  |        |         |
| 81  | PZ                       | 43.0000           |          |          |          |        |         |

|     |          |         |         |         |          |     |     |
|-----|----------|---------|---------|---------|----------|-----|-----|
| C   | LUNGS    |         |         |         |          |     |     |
| 82  | SQ       | 0.0400  | 0.0178  | 0.0017  | 0.0      | 0.0 | 0.0 |
|     |          | -1.0000 | -8.5000 | 0.0     | 43.5000  |     |     |
| 83  | SQ       | 0.0400  | 0.0178  | 0.0017  | 0.0      | 0.0 | 0.0 |
|     |          | -1.0000 | 8.5000  | 0.0     | 43.5000  |     |     |
| 84  | PX       | -5.4000 |         |         |          |     |     |
| 85  | PX       | 8.0000  |         |         |          |     |     |
| 86  | PY       | 1.5000  |         |         |          |     |     |
| 87  | PY       | 1.0000  |         |         |          |     |     |
| 88  | PZ       | 43.5000 |         |         |          |     |     |
| 89  | PZ       | 46.0000 |         |         |          |     |     |
| 90  | PZ       | 54.0000 |         |         |          |     |     |
| 91  | PZ       | 55.0000 |         |         |          |     |     |
| C   | OVARIES  |         |         |         |          |     |     |
| 92  | SQ       | 1.0000  | 4.0000  | 0.2500  | 0.0      | 0.0 | 0.0 |
|     |          | -1.0000 | -6.0000 | 0.0     | 15.0000  |     |     |
| 93  | SQ       | 1.0000  | 4.0000  | 0.2500  | 0.0      | 0.0 | 0.0 |
|     |          | -1.0000 | 6.0000  | 0.0     | 15.0000  |     |     |
| C   | PANCREAS |         |         |         |          |     |     |
| 94  | SQ       | 0.0039  | 0.6944  | 0.0918  | 0.0      | 0.0 | 0.0 |
|     |          | -1.0000 | -1.0000 | 0.0     | 37.0000  |     |     |
| 95  | PX       | -1.0000 |         |         |          |     |     |
| 96  | PZ       | 37.0000 |         |         |          |     |     |
| C   | SKIN     |         |         |         |          |     |     |
| C   | SPLEEN   |         |         |         |          |     |     |
| 97  | SQ       | 0.0816  | 0.2500  | 0.0278  | 0.0      | 0.0 | 0.0 |
|     |          | -1.0000 | 11.0000 | 3.0000  | 37.0000  |     |     |
| C   | TESTES   |         |         |         |          |     |     |
| 98  | SQ       | 0.5917  | 0.4444  | 0.1890  | 0.0      | 0.0 | 0.0 |
|     |          | -1.0000 | 1.3000  | -8.0000 | -2.3000  |     |     |
| 99  | SQ       | 0.5917  | 0.4444  | 0.1890  | 0.0      | 0.0 | 0.0 |
|     |          | -1.0000 | -1.3000 | -8.0000 | -2.3000  |     |     |
| C   | THYMUS   |         |         |         |          |     |     |
| 100 | SQ       | 0.4444  | 1.5625  | 0.0625  | 0.0      | 0.0 | 0.0 |
|     |          | -1.0000 | 0.0     | -7.3000 | 57.0000  |     |     |
| C   | THYROID  |         |         |         |          |     |     |
| 101 | C/Z      | 0.0     | -4.0000 | 2.2000  |          |     |     |
| 102 | C/Z      | 0.0     | -4.0000 | 1.0000  |          |     |     |
| 103 | PY       | -4.0000 |         |         |          |     |     |
| 104 | PZ       | 70.2500 |         |         |          |     |     |
| 105 | GQ       | -1.0000 | -1.0000 | 0.0     | -2.0000  | 0.0 | 0.0 |
|     |          | -8.0000 | -8.0000 | 0.0     | -16.0000 |     |     |
| 106 | GQ       | -1.0000 | -1.0000 | 0.0     | 2.0000   | 0.0 | 0.0 |

## JAERI-Data/Code 96-019

|     |    |         |         |     |          |     |     |
|-----|----|---------|---------|-----|----------|-----|-----|
|     |    | 8.0000  | -8.0000 | 0.0 | -16.0000 |     |     |
| 107 | PZ | 70.5000 |         |     |          |     |     |
| 108 | GQ | -0.7725 | -0.7725 | 0.0 | -2.0000  | 0.0 | 0.0 |
|     |    | -8.0000 | -6.1804 | 0.0 | -12.3607 |     |     |
| 109 | GQ | -0.7725 | -0.7725 | 0.0 | 2.0000   | 0.0 | 0.0 |
|     |    | 8.0000  | -6.1804 | 0.0 | -12.3607 |     |     |
| 110 | PZ | 70.7500 |         |     |          |     |     |
| 111 | GQ | -0.5588 | -0.5588 | 0.0 | -2.0000  | 0.0 | 0.0 |
|     |    | -8.0000 | -4.4706 | 0.0 | -8.9411  |     |     |
| 112 | GQ | -0.5588 | -0.5588 | 0.0 | 2.0000   | 0.0 | 0.0 |
|     |    | 8.0000  | -4.4706 | 0.0 | -8.9411  |     |     |
| 113 | PZ | 71.0000 |         |     |          |     |     |
| 114 | GQ | -0.3588 | -0.3588 | 0.0 | -2.0000  | 0.0 | 0.0 |
|     |    | -8.0000 | -2.8706 | 0.0 | -5.7411  |     |     |
| 115 | GQ | -0.3588 | -0.3588 | 0.0 | 2.0000   | 0.0 | 0.0 |
|     |    | 8.0000  | -2.8706 | 0.0 | -5.7411  |     |     |
| 116 | PZ | 71.2500 |         |     |          |     |     |
| 117 | GQ | -0.1725 | -0.1725 | 0.0 | -2.0000  | 0.0 | 0.0 |
|     |    | -8.0000 | -1.3804 | 0.0 | -2.7608  |     |     |
| 118 | GQ | -0.1725 | -0.1725 | 0.0 | 2.0000   | 0.0 | 0.0 |
|     |    | 8.0000  | -1.3804 | 0.0 | -2.7608  |     |     |
| 119 | PZ | 71.5000 |         |     |          |     |     |
| 120 | GQ | 0.0000  | 0.0000  | 0.0 | -2.0000  | 0.0 | 0.0 |
|     |    | -8.0000 | 0.0000  | 0.0 | 0.0000   |     |     |
| 121 | GQ | 0.0000  | 0.0000  | 0.0 | 2.0000   | 0.0 | 0.0 |
|     |    | 8.0000  | 0.0000  | 0.0 | 0.0000   |     |     |
| 122 | PZ | 71.7500 |         |     |          |     |     |
| 123 | GQ | -0.0560 | -0.0560 | 0.0 | -2.0000  | 0.0 | 0.0 |
|     |    | -8.0000 | -0.4479 | 0.0 | -0.8958  |     |     |
| 124 | GQ | -0.0560 | -0.0560 | 0.0 | 2.0000   | 0.0 | 0.0 |
|     |    | 8.0000  | -0.4479 | 0.0 | -0.8958  |     |     |
| 125 | PZ | 72.0000 |         |     |          |     |     |
| 126 | GQ | -0.1135 | -0.1135 | 0.0 | -2.0000  | 0.0 | 0.0 |
|     |    | -8.0000 | -0.9080 | 0.0 | -1.8161  |     |     |
| 127 | GQ | -0.1135 | -0.1135 | 0.0 | 2.0000   | 0.0 | 0.0 |
|     |    | 8.0000  | -0.9080 | 0.0 | -1.8161  |     |     |
| 128 | PZ | 72.2500 |         |     |          |     |     |
| 129 | GQ | -0.1725 | -0.1725 | 0.0 | -2.0000  | 0.0 | 0.0 |
|     |    | -8.0000 | -1.3804 | 0.0 | -2.7608  |     |     |
| 130 | GQ | -0.1725 | -0.1725 | 0.0 | 2.0000   | 0.0 | 0.0 |
|     |    | 8.0000  | -1.3804 | 0.0 | -2.7608  |     |     |
| 131 | PZ | 72.5000 |         |     |          |     |     |
| 132 | GQ | -0.2331 | -0.2331 | 0.0 | -2.0000  | 0.0 | 0.0 |

## JAERI-Data/Code 96-019

|     |    |         |         |     |          |     |     |
|-----|----|---------|---------|-----|----------|-----|-----|
|     |    | -8.0000 | -1.8649 | 0.0 | -3.7298  |     |     |
| 133 | GQ | -0.2331 | -0.2331 | 0.0 | 2.0000   | 0.0 | 0.0 |
|     |    | 8.0000  | -1.8649 | 0.0 | -3.7298  |     |     |
| 134 | PZ | 72.7500 |         |     |          |     |     |
| 135 | GQ | -0.2952 | -0.2952 | 0.0 | -2.0000  | 0.0 | 0.0 |
|     |    | -8.0000 | -2.3616 | 0.0 | -4.7233  |     |     |
| 136 | GQ | -0.2952 | -0.2952 | 0.0 | 2.0000   | 0.0 | 0.0 |
|     |    | 8.0000  | -2.3616 | 0.0 | -4.7233  |     |     |
| 137 | PZ | 73.0000 |         |     |          |     |     |
| 138 | GQ | -0.3588 | -0.3588 | 0.0 | -2.0000  | 0.0 | 0.0 |
|     |    | -8.0000 | -2.8706 | 0.0 | -5.7411  |     |     |
| 139 | GQ | -0.3588 | -0.3588 | 0.0 | 2.0000   | 0.0 | 0.0 |
|     |    | 8.0000  | -2.8706 | 0.0 | -5.7411  |     |     |
| 140 | PZ | 73.2500 |         |     |          |     |     |
| 141 | GQ | -0.4240 | -0.4240 | 0.0 | -2.0000  | 0.0 | 0.0 |
|     |    | -8.0000 | -3.3917 | 0.0 | -6.7834  |     |     |
| 142 | GQ | -0.4240 | -0.4240 | 0.0 | 2.0000   | 0.0 | 0.0 |
|     |    | 8.0000  | -3.3917 | 0.0 | -6.7834  |     |     |
| 143 | PZ | 73.5000 |         |     |          |     |     |
| 144 | GQ | -0.4906 | -0.4906 | 0.0 | -2.0000  | 0.0 | 0.0 |
|     |    | -8.0000 | -3.9250 | 0.0 | -7.8501  |     |     |
| 145 | GQ | -0.4906 | -0.4906 | 0.0 | 2.0000   | 0.0 | 0.0 |
|     |    | 8.0000  | -3.9250 | 0.0 | -7.8501  |     |     |
| 146 | PZ | 73.7500 |         |     |          |     |     |
| 147 | GQ | -0.5588 | -0.5588 | 0.0 | -2.0000  | 0.0 | 0.0 |
|     |    | -8.0000 | -4.4706 | 0.0 | -8.9411  |     |     |
| 148 | GQ | -0.5588 | -0.5588 | 0.0 | 2.0000   | 0.0 | 0.0 |
|     |    | 8.0000  | -4.4706 | 0.0 | -8.9411  |     |     |
| 149 | GQ | -0.6285 | -0.6285 | 0.0 | -2.0000  | 0.0 | 0.0 |
|     |    | -8.0000 | -5.0283 | 0.0 | -10.0566 |     |     |
| 150 | GQ | -0.6285 | -0.6285 | 0.0 | 2.0000   | 0.0 | 0.0 |
|     |    | 8.0000  | -5.0283 | 0.0 | -10.0566 |     |     |
| 151 | PZ | 74.2500 |         |     |          |     |     |
| 152 | GQ | -0.6998 | -0.6998 | 0.0 | -2.0000  | 0.0 | 0.0 |
|     |    | -8.0000 | -5.5982 | 0.0 | -11.1965 |     |     |
| 153 | GQ | -0.6998 | -0.6998 | 0.0 | 2.0000   | 0.0 | 0.0 |
|     |    | 8.0000  | -5.5982 | 0.0 | -11.1965 |     |     |
| 154 | PZ | 74.5000 |         |     |          |     |     |
| 155 | GQ | -0.7725 | -0.7725 | 0.0 | -2.0000  | 0.0 | 0.0 |
|     |    | -8.0000 | -6.1804 | 0.0 | -12.3607 |     |     |
| 156 | GQ | -0.7725 | -0.7725 | 0.0 | 2.0000   | 0.0 | 0.0 |
|     |    | 8.0000  | -6.1804 | 0.0 | -12.3607 |     |     |
| 157 | PZ | 74.7500 |         |     |          |     |     |

## JAERI-Data/Code 96-019

|     |                             |           |         |         |          |     |         |
|-----|-----------------------------|-----------|---------|---------|----------|-----|---------|
| 158 | GQ                          | -0.8468   | -0.8468 | 0.0     | -2.0000  | 0.0 | 0.0     |
|     |                             | -8.0000   | -6.7747 | 0.0     | -13.5494 |     |         |
| 159 | GQ                          | -0.8468   | -0.8468 | 0.0     | 2.0000   | 0.0 | 0.0     |
|     |                             | 8.0000    | -6.7747 | 0.0     | -13.5494 |     |         |
| 160 | PZ                          | 75.0000   |         |         |          |     |         |
| 161 | GQ                          | -0.9227   | -0.9227 | 0.0     | -2.0000  | 0.0 | 0.0     |
|     |                             | -8.0000   | -7.3812 | 0.0     | -14.7625 |     |         |
| 162 | GQ                          | -0.9227   | -0.9227 | 0.0     | 2.0000   | 0.0 | 0.0     |
|     |                             | 8.0000    | -7.3812 | 0.0     | -14.7625 |     |         |
| C   | UTERUS                      |           |         |         |          |     |         |
| 164 | SQ                          | 0.1600    | 0.0400  | 0.4444  | 0.0      | 0.0 | 0.0     |
|     |                             | -1.0000   | 0.0     | -2.0000 | 14.0000  |     |         |
| 165 | PY                          | -4.5000   |         |         |          |     |         |
| C   | URINARY BLADDER AND CONTENT |           |         |         |          |     |         |
| 177 | SQ                          | 0.0407    | 0.0836  | 0.0836  | 0.0      | 0.0 | 0.0     |
|     |                             | -1.0000   | 0.0     | -4.5000 | 8.0000   |     |         |
| 178 | SQ                          | 0.0452    | 0.0973  | 0.0973  | 0.0      | 0.0 | 0.0     |
|     |                             | -1.0000   | 0.0     | -4.5000 | 8.0000   |     |         |
| C   | SKIN                        |           |         |         |          |     |         |
| 183 | SQ                          | 0.0025    | 0.0096  | 0.0     | 0.0      | 0.0 | 0.0     |
|     |                             | -1.0000   | 0.0     | 0.0     | 0.0      |     |         |
| 184 | SQ                          | 0.0149    | 0.0096  | 0.0     | 0.0      | 0.0 | 0.0     |
|     |                             | -1.0000   | 0.0     | 0.0     | 0.0      |     |         |
| 185 | SQ                          | 0.0149    | 0.0096  | 0.0185  | 0.0      | 0.0 | 0.0     |
|     |                             | -1.0000   | 0.0     | 0.0     | 86.8500  |     |         |
| 186 | GQ                          | 1.0000    | 1.0000  | 0.0     | 0.0      | 0.0 | -0.2000 |
|     |                             | -20.0000  | 0.0     | -0.0400 | -4.0400  |     |         |
| 187 | GQ                          | 1.0000    | 1.0000  | 0.0     | 0.0      | 0.0 | 0.2000  |
|     |                             | 20.0000   | 0.0     | -0.0400 | -4.0400  |     |         |
| C   | *** ENVIRONMENT ***         |           |         |         |          |     |         |
| 179 | SO                          | 200.0000  |         |         |          |     |         |
| 180 | PZ                          | 38.0000   |         |         |          |     |         |
| 181 | P                           | 0.2687    | 0.2090  | 0.9403  | 26.3310  |     |         |
| 182 | P                           | 0.2687    | 0.2090  | 0.9403  | 34.3310  |     |         |
| 188 | SO                          | 1000.0000 |         |         |          |     |         |
| C   | LEG BONES                   |           |         |         |          |     |         |
| 193 | GQ                          | 1.0000    | 1.0000  | 0.0047  | 0.0      | 0.0 | 0.1504  |
|     |                             | 20.0000   | 0.0     | 1.2845  | 87.7500  |     |         |
| 194 | GQ                          | 1.0000    | 1.0000  | 0.0047  | 0.0      | 0.0 | -0.1504 |
|     |                             | -20.0000  | 0.0     | 1.2845  | 87.7500  |     |         |
| 230 | PZ                          | -11.2     |         |         |          |     |         |
| 231 | PZ                          | -34.4     |         |         |          |     |         |
| C   | RIB CAGE                    |           |         |         |          |     |         |

C SURF. 206 IS SURF. 88.

201 PZ 36.5  
 202 PZ 37.9  
 203 PZ 39.3  
 204 PZ 40.7  
 205 PZ 42.1  
 207 PZ 44.9  
 208 PZ 46.3  
 209 PZ 47.7  
 210 PZ 49.1  
 211 PZ 50.5  
 212 PZ 51.9  
 213 PZ 53.3  
 214 PZ 54.7  
 215 PZ 56.1  
 216 PZ 57.5  
 217 PZ 58.9  
 218 PZ 60.3  
 219 PZ 61.7  
 220 PZ 63.1  
 221 PZ 64.5  
 222 PZ 65.9

C

199 SO 1001.0000

C \*\*\* SOURCE \*\*\*

243 PX 100.0

C MODE 1

MODE N P

IMP:N 1 115R 0

C CHANGED DATA 4\*1.0

C TRUNK TRUNK S.TRUNK HEAD HEAD THYROID THYROID THYROID  
 C THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID  
 C THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID  
 C THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID  
 C THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID  
 C THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID

C S.HEAD S.LEGS S.LEGS LEG LEG U.B.LEG M.B.LEG L.B.LEG  
 C U.B.LEG M.B.LEG L.B.LEG U.ARM M.ARM L.ARM U.ARM M.ARM  
 C L.ARM PELVIS L.SPINE M.SPINE U.SPINE

C SKULL F.S RIB RIB  
 C RIB RIB RIB RIB RIB RIB RIB RIB  
 C RIB RIB CLAV. CLAV. SCAPLAE SCAPLAE BREAST BREAST

C BRE. S. BRE. S. STOMACH STOMACH  
C S.M.INT U.L.INT U.L.INT U.L.INT U.L.INT L.L.INT L.L.INT  
C ADRENAL BRAIN KIDNEY KIDNEY LIVER  
C LUNG LUNG OVARY  
C OVARY PANCREA PANCREA SPLEEN TESTE TEST THYMUS UTERUS  
C BLADDER BLADDER ENV. ENV. SOURCE  
VOL 1.0 1.0 1410.0 5430.0 5430.0 0.5 0.5 0.5  
0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5  
0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5  
0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5  
0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5  
0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5  
274.0 595.0 595.0 10400.0 10400.0 196.0 406.0 798.0  
196.0 406.0 798.0 119.5 119.5 239.0 119.5 119.5  
239.0 606.0 206.1 548.3 165.6  
618.0 305.0 56.0 56.0  
56.0 56.0 56.0 56.0 56.0 56.0 56.0 56.0  
56.0 56.0 27.4 27.4 101.0 101.0 168.5 168.5  
25.5 25.5 152.0 250.0  
1060.0 91.2 96.3 121.0 127.0 160.3 137.6  
15.7 1370.0 144.0 144.0 1830.0  
1560.0 1810.0 4.19  
4.19 45.35 45.35 176.0 18.8 18.8 20.1 76.0  
45.7 203.0 4190000000. 1.0

C << SOURCE ( ) >>

SDEF SUR=243 POS=100. 0. 0. RAD=100.0 VEC=-1. 0. 0. ERG=0.1

C

C << MATERIAL >>

C

C SOFT TISSUE

M4 1001.04 -.10454 6012.10 -.22663 7014.04 -.02490 8016.04 -.63525  
11023.01 -.00112 12000.02 -.00013 14000.02 -.00030  
15031.01 -.00134 16032.01 -.00204 17000.02 -.00133 19000.01 -.00208  
20000.10 -.00024 26000.11 -.00005 40000.02 -.00001

C SKELTON

M5 1001.04 -.07337 6012.10 -.25475 7014.04 -.03057 8016.04 -.47893  
9019.03 -.00025 11023.01 -.00326 12000.02 -.00112 14000.02 -.00002  
15031.01 -.05095 16032.01 -.00173 17000.02 -.00143 19000.01 -.00153  
20000.10 -.10190 26000.11 -.00008 82000.10 -.00001

C LUNG

M6 1001.04 -.10134 6012.10 -.10238 7014.04 -.02866 8016.04 -.75752  
11023.01 -.00184 12000.02 -.00007 14000.02 -.00006  
15031.01 -.00080 16032.01 -.00225 17000.02 -.00266 19000.01 -.00194

20000.10 -.00009 26000.11 -.00037 40000.02 -.00002

C AIR

M7 8016.04 -.25000 7014.04 -.75000

F6:P (118 152 154 155) (130 131) (104 105) 17 19 (20 22)  
 24 30 31 (37 40) 41 (42 44) (45 46) (47 48) (50 51) 52 93  
 (121 122) (53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70  
 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 90 91 92)  
 (156 157 173 174 175 176 5 6 7 9 10 11 158 159 160 161 162 163  
 164 165 166 167 168 169 13 14 15 16 177 178 179 180) 10 (15 16)  
 (13 14) (158 159 160 161 162 163 164 165 166 167 168 169) 9 171  
 172 7 (156 157) (173 175) (174 176) (5 6) (177 179) (178 180) 11

F4:N (118 152 154 155) (130 131) (104 105) 17 19 (20 22)  
 24 30 31 (37 40) 41 (42 44) (45 46) (47 48) (50 51) 52 93  
 (121 122) (53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70  
 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 90 91 92)  
 (156 157 173 174 175 176 5 6 7 9 10 11 158 159 160 161 162 163  
 164 165 166 167 168 169 13 14 15 16 177 178 179 180) 10 (15 16)  
 (13 14) (158 159 160 161 162 163 164 165 166 167 168 169) 9 171  
 172 7 (156 157) (173 175) (174 176) (5 6) (177 179) (178 180) 11

DE4 1.000E-08 1.000E-07 1.000E-06 1.000E-05 1.000E-04 3.000E-04  
 1.000E-03 1.000E-02 1.000E-01 1.000E+00

DF4 4.000E-10 1.300E-10 4.000E-11 1.300E-11 6.000E-12 1.000E-11  
 3.500E-11 7.000E-10 8.000E-09 3.000E-08

NPS 1000000

CTME 200.0

PRDMP 2J -1

C PRINT