

1 はじめに

中性子、光子の輸送を支配するボルツマン方程式を解く計算コードは、二つの方法で開発されてきた。一つは、決定論的方法であり、3次元形状が扱えるコードとして、TORT、BERMUDA 等が有名である。もう一つは、モンテカルロ法であり、3次元形状が扱えるコードとして、MORSE、MCNP¹が有名である。MCNPは、米国ロスアラモス国立研究所で開発された連続エネルギーモンテカルロ計算コードであり、多群断面積ライブラリの作成が必要ない。従って、多群ライブラリ作成に起因するエラーの入り込む余地がなく、TORT、BERMUDA、MORSE と比べ大きな利点がある。

MCNP で計算できる粒子は、中性子、光子、中性子/2次ガンマ線の他、version 4以降、電子の輸送計算用に、Integrated Tiger Series が組み込まれた。計算できるエネルギー範囲は、中性子 1.0E-11 - 20 (MeV)、光子、電子 1 (keV) - 1 (GeV)。中性子のエネルギー範囲に関しては、マニュアルの1章には、上の数値、RSICC Computer Code Abstract には、0-60 (MeV)、添付されている核データの中には一部 20 (MeV) 以上に対応しているものも含まれている。

中性子、光子に関するベンチマーク計算のレポート^{2,3}が発行されており、実験ともよく一致している。

2 計算コード、核データの入手

MCNP 4B コードは、財団法人 高度情報科学技術研究機構 (<http://www.rist.or.jp/>) 内の原子力コードセンターから入手できる。最新版 MCNP 4B2 は、インストールで使う `install.fix` ファイルをインターネット経由でダウンロードし、入れ代えなければならない

¹ Judith F. Briesmeister, Editor, "MCNP -- A General Monte Carlo N-Particle Transport Code," Los Alamos National Laboratory report LA-12625-M (March, 1997).

なお、マニュアルは、<http://www-xdiv.lanl.gov/XCI/PROJECTS/MCNP/manual.html> からダウンロードできます。

² D. J. Whalen, D. A. Cardon, J. L. Uhle and J. S. Hendricks, "MCNP: Neutron Benchmark Problems", LA-12212, 1991.

³ Daniel J. Whalen, David E. Hollowell, John S. Hendricks, "MCNP: Photon Benchmark Problems", LA-12196(September 1991).

い。(入手先: <http://www-xdiv.lanl.gov/XCI/PROJECTS/MCNP/dist.html>)

利用できる核データ (DLC-189/MCNPXS) が一緒に配布されている。この中には、連続エネルギー中性子ライブラリとして Evaluated Nuclear Data File (ENDF) System などの評価済み核データを MCNP 用に変換してものが多数、光子では MCPLIB と MCPLIB02 の2種、電子では EL ライブラリが含まれている。⁴また、JENDL-3 も MCNP 用にフォーマットが変換され、利用できる。

3 インストール

三つのファイルが配布されている。

`c660tar0.z` (プログラムなどを `tar` コマンドでまとめ `compress` したファイル)

`ccc660.lis` (`c660tar0.z` に含まれるファイルの説明)

`readme.cd` (`c660tar0.z` のファイルの開き方など)

一番上のファイルを `uncompress` し、`tar` で展開すると `mcnp4b` のディレクトリーができる。その中には、表1に示すファイル、ディレクトリーが作られている。

対応のプラットフォームは、Sun (OS and Solaris), IBM-RS6000 (AIX), DEC unix, SGI, HP9000, PC(dos/v, linux) などであり、linux を除いてロードモジュールがディレクトリー `exe` の下に保存されている。サブルーチンや `common` 文の変更を行わない場合は、これらを利用することができる。

インストールを行う場合は、ANSI standard C と FORTRAN 77 compilers が必要となる。インストール用のファイル一式はディレクトリー `install` の下にあり、インストール用のスクリプトが用意されている。このとき、最新版 4B2 にするには、`install.fix` ファイルを入れ替えておかなければならない。また、`install.fix` ファイルの中には、プラットフォームに依存した部分があり、自分の使う機種にあわせて、コメントをはずす必要がある。

インストールは、たとえば以下のように行う。

⁴ ライブラリに含まれる核種のリストなどの説明は、マニュアルの 2-16 頁、appendix G にまとめられている。

表1 解凍されたファイル、ディレクトリー

README.1ST	- Unix and PC installation instructions
README	- details on package contents and installation info
Directories	
doc	- directory of MCNP4B documentation in 'PDF' format (get the Adobe Acrobat Reader for free from http://www.adobe.com) to read and print these documents (LA-12625-M & VAX/VMS instructions)
dos	- DOS installation files
exe	- executable MCNP programs for different systems
install	- files used for installing
install-examples	- examples of installation for different systems
test	- subdirectory of sample input and output used for installing
tools	- miscellaneous files

mkdir mcnpdir (mcnp4b ディレク

トリーの下にインストール用のディレ
クトリーを作る)

cp install/* mcnpdir/.

cp test/* mcnpdir/.

cd mcnpdir

chmod u+x install

./install my-system

where 'my-system' is one of: aix, hp,
sun, dec, sgi, ucos.

このあと、スクリプト下でイ
ンストールが進み、機種等を
対話形式で打ち込む必要があ
る。最後に 29 題のテスト問
題を実行し、その結果を模範
解答と比較し終了する。この
とき dif* というファイルが
テスト問題ごとに作られ、イ
ンストールが正常に行えたか
どうかを確認できる。

インストール用のテスト問
題を用いて、色々なプラット
ホームでの計算時間の比較が、
インターネットなどで公開さ
れている。表2に、私が使っ
ている機種での計算時間を示
した。単位は分で、計算結果
の出力に含まれている "ctm"
の値を示している。5年前の

ワークステーションよりも今の PC の方が
速いことが分かる。なお、PC の場合、付属
の exe ファイルをDOS窓等で実行した場合、

表2 テスト問題を用いた計算機スピードの比較

No.	DEC ALPHA	HP 9000/755 P-II	K6-2/300	Celeron	Celeron
	STATION 500/500	HP-UX 9.03 TurboLinux	ver. 1.4	ver. 2.0	ver. 3.0
	DIGITAL UNIX 4.0B			433	492
1	0.02	0.07	0.04	0.04	0.03
2	0.04	0.16	0.08	0.09	0.06
3	0.04	0.18	0.08	0.08	0.05
4	0.07	0.29	0.16	0.16	0.09
5	0.01	0.06	0.03	0.03	0.02
6	0.03	0.10	0.06	0.06	0.04
7	0.07	0.27	0.15	0.16	0.10
8	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
9	0.03	0.12	0.07	0.07	0.04
10	0.02	0.12	0.06	0.07	0.04
11	0.09	0.35	0.20	0.20	0.13
12	0.12	0.65	0.33	0.37	0.19
13	0.02	0.09	0.05	0.04	0.03
14	0.03	0.10	0.05	0.05	0.03
15	0.01	0.04	0.02	0.02	0.01
16	0.01	0.04	0.02	0.02	0.01
17	0.04	0.17	0.09	0.09	0.05
18	0.08	0.35	0.20	0.22	0.12
19	0.04	0.25	0.12	0.13	0.07
20	0.07	0.57	0.26	0.29	0.17
21	0.11	0.40	0.23	0.23	0.14
22	0.01	0.06	0.03	0.03	0.02
23	0.06	0.45	0.21	0.23	0.13
24	0.03	0.14	0.09	0.09	0.05
25	0.05	0.20	0.12	0.13	0.07
26	0.03	0.13	0.08	0.08	0.05
27	0.02	0.09	0.05	0.05	0.03
28	0.01	0.06	0.03	0.03	0.02
29	0.10	0.57	0.24	0.27	0.15
total	1.27	6.10	3.16	3.34	1.95

linux の3割増程度の時間がかかる。

4 計算の実行

計算を行うには、カレントディレクトリーに、上で作成したロードモジュール、入力データ、核データのほか、核データの情報の一覧をまとめた xsdir ファイルが必要となる。xsdir の内部の一部を表 3 に示した。はじめに原子量などが納められ、そのあとに核種情報が続いている。一番左から、核種の識別番号、原子量、その核種を含むライブラリーのファイル名、存在する位置、などと続く。

入力データを inp とし、利用するライブラリー、ロードモジュール (たとえば, mcnp)、xsdir を同じディレクトリーにおいたとき、

./mcnp

にて、MCNP を実行できる。

結果は、outp にテキスト出力されるほか、バイナリーファイル runtpe も作られる。また、これら必要なファイルは、リンクを張ったり、パスを切ることで、ほかのディレクトリーに存在しても実行できるように設定できる。核データに関しては、xsdir の中で核データの存在位置を指定することもできる。

計算形状のエラーを確認するために、コマンドラインに実行時オプション ip をつけると、計算体系の 2 次元断面を表示することができる。

表 3 xsdir ファイル

atomic weight ratios							
1	1.000000						
1000	0.999317	1001	0.999167	1002	1.996800	1003	2.990140
2000	3.968217	2003	2.990120	2004	3.968219		
3000	6.881312	3006	5.963450	3007	6.955733		
...							
96000	244.947884	96242	239.979418	96243	240.973356	96244	241.966119
		96245	242.960245	96246	243.953373	96247	244.947884
		96248	245.941272				
97000	244.947835	97245	242.961106	97246	243.954859	97247	244.947835
		97248	245.941911	97249	246.935298		
98000	248.922674	98249	246.935164	98250	247.928114	98251	248.922674
		98252	249.916107				
directory							
1001.04C	.999170	BMCCS1	/users1/1/BMCCS1	1	1	2418	0 0 0.
1002.02C	1.996800	BMCCS1	/users1/1/BMCCS1	1	618	2966	0 0 0.
1003.03C	2.990140	BMCCS1	/users1/1/BMCCS1	1	1372	2073	0 0 2.53E-08
2000.01C	3.968220	BMCCS1	/users1/1/BMCCS1	1	1903	1664	0 0 0.
...							
92240.01C	238.068943	BMCCS1	/usr/1/BMCCS1	1	190601	2910	0 0 0.
94238.01C	236.004521	BMCCS1	/usr/1/BMCCS1	1	191341	2743	0 0 0.
94240.12C	237.992000	BMCCS1	/usr/1/BMCCS1	1	192039	41780	0 0 7.59E-08
94241.01C	239.060689	BMCCS1	/usr/1/BMCCS1	1	202496	3574	0 0 0.
94243.31C	240.922407	BMCCS1	/usr/1/BMCCS1	1	203402	7046	0 0 0.
95242.01C	239.921084	BMCCS1	/usr/1/BMCCS1	1	205176	5906	0 0 0.
1000.01P	.999317	MCPLIB1	/usr/1/MCPLIB1	1	1	389	0 0 .0000E+00
	1001	+					
	.999167	1002	1.996800	1003	2.990140		
2000.01P	3.968217	MCPLIB1	/usr/1/MCPLIB1	1	111	389	0 0 .0000E+00
	2003	+					
	2.990120	2004	3.968219				
3000.01P	6.881312	MCPLIB1	/usr/1/MCPLIB1	1	221	389	0 0 .0000E+00
	3006	+					
	5.963450	3007	6.955733				
4000.01P	8.934763	MCPLIB1	/usr/1/MCPLIB1	1	331	389	0 0 .0000E+00
	4009	+					
	8.934763						
5000.01P	10.717168	MCPLIB1	/usr/1/MCPLIB1	1	441	389	0 0 .0000E+00
	5010	+					
	9.926922	5011	10.914730				
...							

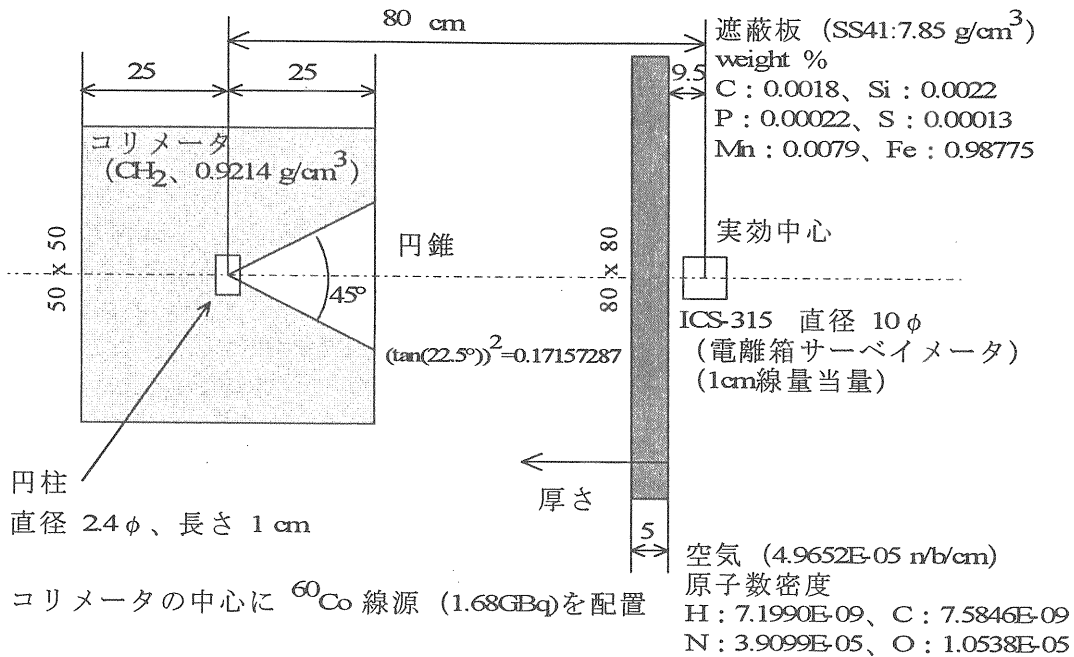


図1 ^{60}Co ガンマ線透過実験の体系

./mcnp ip⁵

以上で、MCNP を実行する環境が整った。
以下、入力データの作成方法に関して、SLAB
実験の解析を例に取り上げて解説する。

5 例題の解説

図1にここで取り上げる ^{60}Co 線源を用いた SS41 板の遮蔽実験と MCNP の入力データ作成に必要な数値を示した。コリメータは、外寸法が 50*50*50 cm、中心に線源を納める円柱領域、遮蔽板側は円錐形の開口部がある。SS41 板は、80*80 の面積を持ち 5 cm ごと厚さを変えることができる。測定は、1 cm 線量当量を表示する電離箱サーベイメータを用いた。コリメータの中心からサーベイメータの実効中心まで 80 cm あった。媒質の構成物質、密度も図中に示した。

図2には、測定結果と計算結果を示した。縦軸は LOG スケールをとっており、25 cm 厚を除いてほぼ直線で減衰している。

表4には、この体系を解析するための MCNP

⁵ 操作方法は、Appendix B に記述されている。

の入力データを示した。この入力データと MCNP の計算形状表示機能を用いて、計算体系の2次元断面を表示したものが図3である。

6 入力データの説明

入力データの説明はマニュアルの3章にまとめられている。以下で、表4に示した入力データの解説を行う。使用していない入力カード、オプション等は、できるだけ省略した。

入力データの各行は、80 カラムまで利用でき、\$を入れるとその後はコメントになる。また、1行目は表題行であり、自由な記入ができる。

6.1 セルの入力

2行目から空改行まで Cell カード。

入力形式: j m d geom

- j = セル番号 ; $1 \leq j \leq 99999$
- m = 0 ; セルがボイドの場合。
= 物質番号 ; Mm カードで与えられる。
- d = セルがボイドであれば不用。
= セルの物質密度。atoms/b/cm。
負の入力であれば g/cm³。

geom = Surface カードで設定した面で囲み、セルの形状とする。

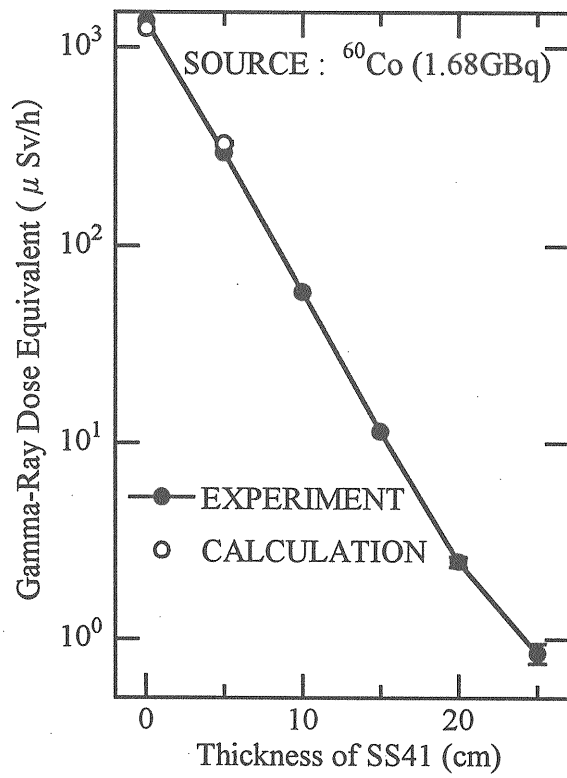


図2 測定結果、計算結果

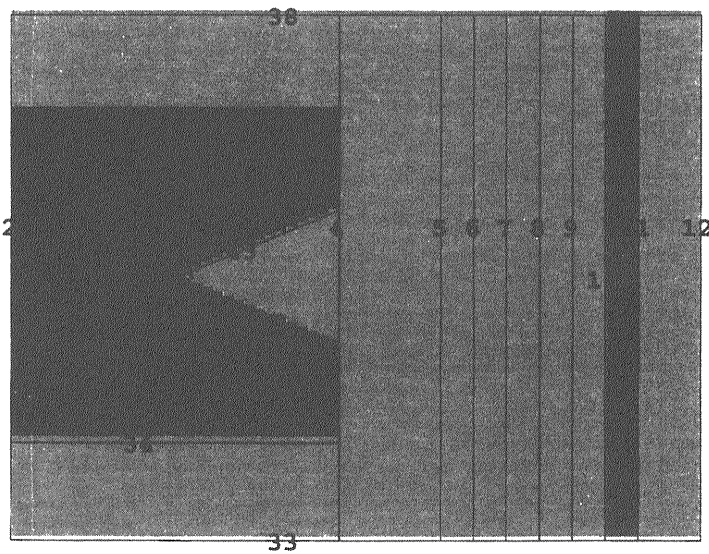


図3 計算形状

表4 入力データ

NEW SOURCE: 60-CO SLAB EXPERIMENTS

1 3 4.9652e-5 2-4 33 -34 22 -25
 2 3 4.9652e-5 -42 35 -36 \$ source area
 3 3 4.9652e-5 -43 -4 #2 \$ cone
 4 2 -0.9214 2-4 34 -37 23 -24 #2 #3 \$collimator
 5 3 4.9652e-5 2-4 34 -37 22 -25 #2 -4 34 -37 23 -24
 6 3 4.9652e-5 2-4 37 -38 22 -25
 7 3 4.9652e-5 4-5 33 -38 22 -25
 8 3 4.9652e-5 5-6 33 -38 22 -25
 9 3 4.9652e-5 6-7 33 -38 22 -25
 10 3 4.9652e-5 7-8 33 -38 22 -25
 11 3 4.9652e-5 8-9 33 -38 22 -25
 12 3 4.9652e-5 9-10 33 -38 22 -25
 13 1 -7.85 10-11 33 -38 22 -25
 14 3 4.9652e-5 11-12 33 -38 22 -25
 21 0 -2.12:-33.38:-22:25

2 PX -25.
 4 PX 25.
 5 PX 40.5
 6 PX 45.5
 7 PX 50.5
 8 PX 55.5
 9 PX 60.5
 10 PX 65.5
 11 PX 70.5
 12 PX 80.
 22 PY -40.
 23 PY -25.
 24 PY 25.
 25 PY 40.
 33 PZ -40.
 34 PZ -25.
 35 PZ -0.5
 36 PZ 0.5
 37 PZ 25.
 38 PZ 40.
 41 CX 5.
 42 CZ 1.2
 43 KX 0. 0.17157287 1

SDEF POS 0.0.0. PAR 2 ERG=D1

SH1 L 1.173 1.332

SP1 D 1. 1.

F2:P 12

FS2 41

SD2 6321.46025 78.53975

E2 0.015 0.02 0.03 0.04 0.05 0.06 0.08 0.1 0.15 0.2
 0.3 0.4 0.5 0.6 0.8 1.0 1.5

EM2 1.66E-06 3.34E-06 3.23E-06 2.52E-06 2.05E-06
 1.85E-06 1.86E-06 2.06E-06 2.70E-06 3.73E-06
 5.38E-06 7.54E-06 9.49E-06 1.13E-05 1.38E-05
 1.69E-05 2.17E-05 \$ * dps = mSv/h publ.51

M1 6000.01P -0.0018 14000.01P -0.0022 15000.01P -0.00022
 16000.01P -0.00013 25000.01P -0.0079 26000.01P² 0.98775 \$ss41(7.85g/cm³)

M2 1000.01P 2. 6000.01P 1. \$paraffin(0.9214g/cm³) CH2

M3 1000.01P 7.1990e-9 6000.01P 7.5846e-9 7000.01P 3.9099e-5
 8000.01P 1.0538e-5 gas=1 \$air (4.9652e-5 n/b/cm)

MODE P

PHYS:P 1.5 0 0

CUT:Pj 0.01

IMP:P 1.13R 0.

CTME 30

NPS 10000000

入力データでは、コリメータの中心を原点とし、検出器方向をx軸、線源を入れる円柱空間の軸方向をz軸としている。以下、一部のセルに関して解説する。

```
1 3 4.9652e-5 2 -4 33 -34 22 -25
```

セル番号が1、媒質はM3カードから引用し、密度は4.9652e-5 atoms/b/cmを示している。次の2-4は、Surfaceカードの2, 4番を利用し、x=-25 ~ 25の領域を示している。プラスの場合は、面より正の側を、マイナスの場合は負の側をしめす。同様に33-34は、z方向の領域を示し、22-25は、y方向の領域を示している。コロン(:)を入れた場合はorオペレータとなるが、なにも入れない場合はandの扱いとなり、全体で直方体のセルを形成している。

```
2 3 4.9652e-5 -42 35 -36 $ source area
```

ここでは、コリメータの中心部で、線源を納める円柱部分の空間を示している。-42は、Surfaceカード42番の円柱側面からの中側を示し、35-36で底面を示している。

```
3 3 4.9652e-5 -43 -4 #2 $ cone
```

ここでは、コリメータの開口部分を示している。#2の2は、セル番号を示し、-43-4が示す円錐部分のうち、2番のセルで設定した部分を除外する。#2の代わりに、#(-42 35 -36)としても同じである。

```
4 2 -0.9214 2 -4 34 -37 23 -24 #2 #3 $collimator
```

ここでは、コリメータのパラフィン部分を示している。密度が、g/cm³単位で指定するため、マイナスになっている。

```
21 0 -2:12:-33:38:-22:25
```

このセルは、ボイドで、それ以前の指定した14個のセル以外の領域を示している。

6.2 Surface の入力

Cellカードから空改行を一つおいてSurfaceカードの入力が始まる。ここでは、Cellカードでセルの形状を設定するための面の位置を記述する。Surfaceカードの終わりにも空改行必要。

入力形式: j a list

j = 面番号: 1 ≤ j ≤ 99999

a = 面の種類を選択 (表5参照)

list = a で選択した面に対応して、数値を入力する。

PX, PY, PZ は、平面を示し、たとえば、

```
2 PX -25.
```

は、面番号が2でx=-25.の平面を示す。

```
41 CX 5.
```

は、面番号が41で、軸がx軸上にあり、半径5.cmの円柱側面を示す。

```
43 KX 0. 0.17157287 1
```

は、面番号が43で、軸がx軸上にあり、頂点が(0,0,0)の円錐で、開き角の正接tはtan(22.5°) (2乗が入力される)そして正方向の広がりを使用するため、+1を入力している。

Surfaceカードが終わると空改行を入れ、そのほかのカードの入力を行う。

6.3 線源の入力

線源の設定は、次の3行で行っている。

```
SDEF POS 0. 0. 0. PAR 2 ERG=D1
```

```
SII L 1.173 1.332
```

```
SP1 D 1. 1.
```

SDEFカードで線源の設定や設定値の引用先を指定する。なお、引用先は、SI、SPカードで記述する。1行目のSDEFカードでは、順に、線源の位置が原点で、発生させる粒子が光子で、エネルギーは、SII、SP1から引用することを示している。2行目、3行目は対になっており、2行目は、発生させる光子のエネルギーが1.173 MeVと1.332 MeVであることを示し、その発生確率が1:1であることを3行目が示している。

一行目のPARオプションでは、発生させる粒子を指定し、1の時は中性子、2の時は光子、3の時は電子となる。

なお、defaultで等方線源を与えることとなっている。

表5 Surface カードで入力できる面 (MCNP のマニュアルより引用)

CHAPTER 3
Surface Cards

Table 3.1 MCNP Surface Cards

Mnemonic	Type	Description	Equation	Card Entries
P	Plane ↓	General	$Ax + By + Cz - D = 0$	$ABCD$
PX		Normal to X-axis	$x - D = 0$	D
PY		Normal to Y-axis	$y - D = 0$	D
PZ		Normal to Z-axis	$z - D = 0$	D
SO	Sphere ↓	Centered at Origin	$x^2 + y^2 + z^2 - R^2 = 0$	R
S		General	$(x - \bar{x})^2 + (y - \bar{y})^2 + (z - \bar{z})^2 - R^2 = 0$	$\bar{x} \bar{y} \bar{z} R$
SX		Centered on X-axis	$(x - \bar{x})^2 + y^2 + z^2 - R^2 = 0$	$\bar{x} R$
SY		Centered on Y-axis	$x^2 + (y - \bar{y})^2 + z^2 - R^2 = 0$	$\bar{y} R$
SZ		Centered on Z-axis	$x^2 + y^2 + (z - \bar{z})^2 - R^2 = 0$	$\bar{z} R$
C/X	Cylinder ↓	Parallel to X-axis	$(y - \bar{y})^2 + (z - \bar{z})^2 - R^2 = 0$	$\bar{y} \bar{z} R$
C/Y		Parallel to Y-axis	$(x - \bar{x})^2 + (z - \bar{z})^2 - R^2 = 0$	$\bar{x} \bar{z} R$
C/Z		Parallel to Z-axis	$(x - \bar{x})^2 + (y - \bar{y})^2 - R^2 = 0$	$\bar{x} \bar{y} R$
CX		On X-axis	$y^2 + z^2 - R^2 = 0$	R
CY		On Y-axis	$x^2 + z^2 - R^2 = 0$	R
CZ		On Z-axis	$x^2 + y^2 - R^2 = 0$	R
K/X	Cone ↓	Parallel to X-axis	$\sqrt{(y - \bar{y})^2 + (z - \bar{z})^2} - t(x - \bar{x}) = 0$	$\bar{x} \bar{y} \bar{z} t^2 \pm 1$
K/Y		Parallel to Y-axis	$\sqrt{(x - \bar{x})^2 + (z - \bar{z})^2} - t(y - \bar{y}) = 0$	$\bar{x} \bar{y} \bar{z} t^2 \pm 1$
K/Z		Parallel to Z-axis	$\sqrt{(x - \bar{x})^2 + (y - \bar{y})^2} - t(z - \bar{z}) = 0$	$\bar{x} \bar{y} \bar{z} t^2 \pm 1$
KX		On X-axis	$\sqrt{y^2 + z^2} - t(x - \bar{x}) = 0$	$\bar{x} t^2 \pm 1$
KY		On Y-axis	$\sqrt{x^2 + z^2} - t(y - \bar{y}) = 0$	$\bar{y} t^2 \pm 1$
KZ		On Z-axis	$\sqrt{x^2 + y^2} - t(z - \bar{z}) = 0$	$\bar{z} t^2 \pm 1$
				<small>±1 used only for 1 sheet cone</small>
SQ	Ellipsoid Hyperboloid Paraboloid	Axes parallel to X-, Y-, or Z-axis	$A(x - \bar{x})^2 + B(y - \bar{y})^2 + C(z - \bar{z})^2 + 2D(x - \bar{x}) + 2E(y - \bar{y}) + 2F(z - \bar{z}) + G = 0$	$ABCD E$ $F G x y z$
GQ	Cylinder Cone Ellipsoid Hyperboloid Paraboloid	Axes not parallel to X-, Y-, or Z-axis	$Ax^2 + By^2 + Cz^2 + Dxy + Eyz + Fzx + Gx + Hy + Jz + K = 0$	$ABCD E$ $F G H J K$
TX	Elliptical or circular torus. Axis is Parallel to X-, Y-, or Z-axis		$(x - \bar{x})^2/B^2 + (\sqrt{(y - \bar{y})^2 + (z - \bar{z})^2} - A)^2/C^2 - 1 = 0$	$\bar{x} \bar{y} \bar{z} A B C$
TY			$(y - \bar{y})^2/B^2 + (\sqrt{(x - \bar{x})^2 + (z - \bar{z})^2} - A)^2/C^2 - 1 = 0$	$\bar{x} \bar{y} \bar{z} A B C$
TZ			$(z - \bar{z})^2/B^2 + (\sqrt{(x - \bar{x})^2 + (y - \bar{y})^2} - A)^2/C^2 - 1 = 0$	$\bar{x} \bar{y} \bar{z} A B C$
X Y Z P	Surfaces defined by points		See pages 3-16 and 3-18	

6.4 検出器の入力

検出器の設定は、5種のカードを使用して
いる。

```
F2:P 12
FS2 41
SD2 6321.46025 78.53975
E2 0.015 0.02 0.03 0.04 0.05 0.06 0.08 0.1 0.15 0.2
    0.3 0.4 0.5 0.6 0.8 1.0 1.5
EM2 1.66E-06 3.34E-06 3.23E-06 2.52E-06 2.05E-06
    1.85E-06 1.86E-06 2.06E-06 2.70E-06 3.73E-06
    5.38E-06 7.54E-06 9.49E-06 1.13E-05 1.38E-05
    1.69E-05 2.17E-05 $ * dps = mSv/h publ.51
```

F カードには 7 種類あり番号で識別され
ている。

```
F1 : Surface Current
F2 : Surface Flux
F4 : Track length estimate of cell flux
F5 : Flux at a point ( Point Detector )
F6 : Track length estimate of energy deposition
F7 : Track length estimate of fission energy deposition
F8 : Energy distribution of pulses created in a detector
```

ここでは、面フラックスをもとめる F2 を
使用している。:P は、光子を示し、12 は、
Surface カードの 12 番（電離箱サーベイメ
ータの実効中心がある面）を示し、この面で
フラックスを求めることを示している。

FS2 カードは、F2 カードで指定した面を
さらに分割する場合に指定する。ここでは、
検出器のある 10φの部分を示す 41 番の
Surface カードで、検出器の中と外を区別し
ている。

SD2 では、FS2 カードで指定した分割面
の面積を指定する。12 番の面上で粒子を追っ
ている面積は 6400 cm² (80x80)、このうち
検出器しめる面積は 78.53975 cm²
(5*5*3.14159)、残りの面積が、6321.46025
cm² (6400-78.53975) となる。

E2 と EM2 は、検出器の応答関数を入力し
ている。E2 では、エネルギービンの上限を
示し、EM2 では、各ビンへの乗数を入力する。
なお、一番低いエネルギービンの下限値は、
エネルギーカットオフで指定された値（こ
こでは、0.01 MeV）となる。

F2 カードでは 1 発生粒子あたりの面フラ
ックスが計算される。応答関数は、計算結果

に線源条件（この場合、⁶⁰Co は 1 崩壊あたり
二つの光子を放出するので 1.68GBq*2）をか
けると、1 cm 線量当量が mSv/h の値が得ら
れるように、作成した。（具体的には、ICRP
Publ. 51 から計算。）

6.5 媒質の入力

M カードでは、媒質を定義する。表 4 では、
M1、M2、M3 の 3 種の媒質を定義している。

入力形式：

```
Mm ZAID1 frac1 ZAID2 frac2 . . . GAS=value
```

m = Cell カードの物質番号に対応

ZAIDi = xsdir ファイルの核種識別番号

fraci = i 核種の原子数比（負の値の場
合は、重量比）

GAS : 電子の stopping power に対する密
度効果の修正使う keyword

GAS=0 (default) 固体、液体

GAS=1 気体

6.6 その他

MODE P ; 光子の輸送計算を行う。

中性子、光子、電子のすべてを計算する場
合、“mode n p e”となる。

```
PHYS:P 1.5 0 0
```

入力形式：PHYS:P EMCPF IDES NOCOH

EMCPF = 詳細な光子物理として取り扱わ
れる上限エネルギー。(default : 100 MeV)

IDES = 0 (default) ; 電子輸送を行う場
合 (MODE カードで E を入れた場合) では光
子は電子を生成する。電子輸送を行わない場
合、TTB 近似に基づいて光子を生成する。

= 1 ; 光子は電子を発生しない

NOCOH = 0 (default) ;

コヒーレント散乱が起る。

= 1 ; コヒーレント散乱は起らない。

ここでは、EMCPF を 1.5 MeV とし、あとは
default 値を使っている。MODE P (電子輸
送をしない) 計算なので TTB 近似を使っ
ていることとなる。MCNP の TTB 近似では、入
射光子と同じ向きを発生光子に与えているた
め、後方散乱などを計算する場合は、注意が
必要です。

```
CUT:P j 0.01
```

このカードでは、光子のエネルギーカット

オフを 0.01 MeV に指定している。:P は、光子を示し、次の j は入力データを一つとばすとき (default 値を使う場合) に用いる。ここには、タイムカットオフが入るはずであるが、default 値を使うため、j を入れている。

IMP:P 1. 13R 0.

このカードでは、セルのインポートランスを設定するのでセル数と同じだけの数値が必要となる。:P は、光子を示し、それ以後、1. 13R 0. で、セル数分 (15 セル分) の指定をしている。13R は、直前の数値を 13 回繰り返すことを示している。

インポートランスは、たとえば、124... とセルごとに 2 倍ずつ大きくなっていく場合、一つ目のセルから二つ目のセルへ粒子が入るとき、粒子数を 2 倍にし、粒子の持つウエイトを半分にするを意味している。二つ目から三つ目のセルに移るときも同様。逆に三つ目のセルから二つ目のセルに戻るとき、50% の確率で粒子を終了させ、終了しなかった場合、粒子のウエイトを 2 倍にします。また、0 は、そのセルでは粒子の追跡を行わないことを意味する。

CTME 30 ;30 分間計算する。

NPS 10000000 ;10000000 ヒストリー計算する。

CTME と NPS の両方を指定した場合、先に条件に達したカードが計算をうち切る。

7 結果の解釈と対応

計算結果は、E カードで設定したエネルギービンごとでも得られるが、実験ではスペクトルデータを取っていないので、ここでは、合計値を利用する。このデータは、MCNP が出力する outp ファイルの最後に Tally Fluctuation Charts (TFC) としてまとめられる。表 4 で示した入力データを、linux (Celeron 433 を使用) で計算させた時の TFC を表 6 に示す。TFC では、ヒストリー、各エネルギービンの合計値、相対誤差⁷、Variance

of Variance⁷, Slope⁸, Figure of Merit⁹ が表示される。相対誤差の大きさと信頼性に関して、表 7 に示した。要するに相対誤差が十分小さい計算結果が得られればよいのであるが、それ以外に vov が 0.1 以下であること、slope が 3 より大きいことが推奨されている。また、fom は、計算効率を示しており、大きい値ほど効率がよいことを示している。

十分小さい相対誤差が得られなかった場合、モンテカルロ法において分散低減法といわれるいくつかを設定しなければならない。表 4 に示した入力データでは、IMP カードがそれに当たる。

たとえば、SS41 板が厚くなってきた場合、透過距離が長くなるにつれて、散乱で体系外にでる粒子や、エネルギーカットオフで追跡が終了する粒子が増え、検出器側の遮蔽板では、入射粒子数が減少する。このとき、IMP カードでこの媒質に大きな数値入れることで、入射粒子数を増やすことができ、検出器に届く粒子を増やすことができる。逆に、検出器と関係ない方向の媒質では、小さな数値を入力することで関係のない領域への粒子数を減らすことができ、計算効率を上げることができる。

また、今回のケースでは、コリメータの開口部側により多くの粒子を発生させることで、かなり計算効率が向上できると予想できます。(ソースバイアス¹⁰)

MCNP にはさらに強力な分散低減法が用意されています。しかし、これらはますます複雑なパラメータを使い、ノウハウ等もひつようです。もしお困りでしたら、目次のアドレスにご一報ください。

⁷ MCNP マニュアル 2-99 参照。

⁸ MCNP マニュアル 2-105 参照。

⁹ MCNP マニュアル 2-96 参照。

¹⁰ MCNP マニュアル 2-132 参照

⁶ MCNP マニュアル 2-93 参照。

表6 Tally Fluctuation Charts

nps	tally 2		vov	slope	fom
	mean	error			
512000	9.4754E-11	0.0703	0.0057	0.0	82
1024000	9.9652E-11	0.0486	0.0027	0.0	86
1536000	9.8704E-11	0.0398	0.0018	6.7	85
2048000	1.0024E-10	0.0343	0.0014	4.4	86
2560000	9.6269E-11	0.0313	0.0011	3.7	82
3072000	9.7895E-11	0.0283	0.0009	3.9	84
3584000	9.7127E-11	0.0263	0.0008	4.4	84
4096000	9.6726E-11	0.0246	0.0007	4.9	83
4608000	9.7074E-11	0.0231	0.0006	5.0	84
5120000	9.7207E-11	0.0219	0.0006	4.3	84
5632000	9.6801E-11	0.0209	0.0005	4.6	84
6144000	9.6802E-11	0.0200	0.0005	5.1	84
6213000	9.6653E-11	0.0199	0.0005	5.1	84

表7 相対誤差の大きさと信頼性 (マニュアル 2-95 頁より引用)

Guidelines for Interpreting the Relative Error

<u>Range of R</u>	<u>Quality of the Tally</u>
0.5 to 1	Garbage
0.2 to 0.5	Factor of a few
0.1 to 0.2	Questionable
<0.10	Generally reliable except for point detector
<0.05	Generally reliable for point detector