

模擬地震動の作成 WGEN

プログラムWGEN (Simulated Wave Generation) は、地震のマグニチュードと震央距離が与えられたとき、減衰定数 5% の大崎スペクトルを目標とし、これに適合する模擬地震動の加速度時刻歴を作成するサブルーチン副プログラムである。

WGEN (模擬地震動の作成)

【目的】

地震のマグニチュードと震央距離が与えられたとき、減衰定数5%の大崎スペクトルに適合するように、解放基盤面上における模擬地震動の加速度時刻歴を作成する。

【使用法】

(1) 接続方法

```
CALL WGEN ( EM , R , NN , IR , ACC , ND , DT , AMAX , VMAX , MXCYCL ,
           ERR , VW1 , VW2 )
```

引数	型	プログラムを呼ぶときの内容	プログラムから戻ったときの内容
EM	R	地震のマグニチュード	不変
R	R	震央距離 (単位 km)	不変
NN	I	加速度時刻歴のデータ数	不変
IR	I	乱数を発生する関数副プログラムに初期値として与える整数	変化している
ACC	R 1次元配列 (ND)	何も入れなくてよい	模擬地震動の加速度時刻歴 (単位 gal)
ND	I	配列 ACC , VW1 , VW2 の整合寸法 ND NN	不変
DT	R	何も入れなくてよい	加速度時刻歴の時間間隔 (単位 sec)
AMAX	R	何も入れなくてよい	同上 最大加速度 (単位 gal)
VMAX	R	何も入れなくてよい	同上 最大速度 (単位 kine)
MXCYCL	I	逐次計算の最大繰り返し回数	実際の繰り返し回数
ERR	R	許容誤差 (無次元小数)	実際の誤差 (無次元小数)

VW1	R 1次元配列 (ND)	何も入れなくてよい	(作業領域)
VW2	R 1次元配列 (ND)	何も入れなくてよい	(作業領域)

(2) 必要なサブルーチンおよび関数副プログラム

ENVL OHSP VELK FAST CRAC IACC ERES RAND

(3) 注意事項

NNは、4096を越えない2の累乗数でなければならない。

【計算法】

プログラムの構成は、およそ次のようになっている。

a) 引数 引数のうち、NNは作成する模擬地震動時刻歴におけるデ - タ数であって、4096を越えない2の累乗数とする。目的にもよるが、地震のマグニチュードに応じて、およそそのようなNNが適当であろう。2の累乗数でないデ - タ個数NNを希望する場合は、後続のゼロを付け加えた個数を、2の累乗数とすればよい。

マグニチュード M	6	7	8
NN	512	1024	2048
継続時間 T_d (sec)	12.2	24.9	50.8
時間間隔 Δt (sec)	0.024	0.024	0.025

引数IRは、使用者が自分のライブラリから選び、プログラム中で引用する0~1間の一様分布乱数発生用関数副プログラム(ここでは、仮にその名前をRANDとしている)を起動するため、RAND(IR)の形で与える初期値である。IRは単なる整数ではなく奇数、非負の整数あるいは負の整数など、プログラムによって、制限の設けられている場合が多い。初期値IRの値によって、同じ条件に対して、異なった地震動が作成できる。

引数ERRは、繰り返し計算を打ち切るための許容誤差であり、実用的な見地からいって、5%より小さくする必要はない。ERR=0.05の場合、計算は大体4~6回の繰り返しで収束するので、通常の場合、繰り返し計算の最大回数を与える引数MXCYCLは、10程度にしておけば十分であろう。

b) 位相差分 サブルーチンENVLを呼び、継続時間 T_d を求めて、時刻歴の時間間隔 Δt を計算し、包絡曲線 $E(x)$ を、その両端つまり時刻0および T_d に対応する点($x=0$ および $x=1$)を含む33点、いい換えれば0~1間のx軸を32等分する点で定める。次に、包絡曲線の値 $E(x)$ を、0から順次加算した上、累積確率密度分布 $EE(x)$ を求め、0~1間に一様に分布する任意の乱数を p としたとき、 $EE(x)=p$ となる x の値を求める。

このことを、 $(NN/2-2)$ 個の乱数について繰り返せば、0~1間に分布する $(NN/2-2)$ 個の x の値の標本が得られるので、これらを0~ (-2π) 間の分布に換算すれば、1と組の位相差分PDIFすなわち $\Delta\phi_k$ ($k=1, 2, \dots, NN/2-2$)が定まる。このような位相差分の分布形は、包絡曲線の形と似たものになり、したがって、作成される模擬地震動は、近似的にサブルーチンENVLによって与えられた包絡形を有するものになると期待してよい。

c) 位相角 位相差分が決まれば、位相角PHIは、PHI(1)は無視してもよく、PHI(2)を

$\phi_2 = 0$ と仮定すれば，以下順次に

$$\phi_{k+1} = \phi_k + \Delta\phi_k \quad k = 2, 3, \dots, NN/2 - 2$$

で計算される．

d) 目標スペクトルとフ - リエ第1次近似 $NFOLD$ は，折曲げ点の番号である．ここではまず，各成分の振動周期

$$T_k = T_d / k \quad k = 2, 3, \dots, NFOLD$$

を計算する． T_1 は実際は T_d であるが，プログラム上は一応 $T_1 = 2T_2$ と仮定している．

目標スペクトルである大崎スペクトルは，外挿できないこともないが，本来は周期 0.02 ~ 2 sec の間で定義されたものであるから，周期がこの範囲に入る最小の次数 $KMIN$ と最大の次数 $KMAX$ ，範囲内に入る周期の個数 NE を求める．

次に，サブルーチンOHSPを呼んで，各周期点 T_k における減衰定数 0 % の速度応答スペクトル $(S_v)_k^{h=0}$ を求め（上記の範囲外は 0 とする），これとフ - リエ振幅スペクトルが，近似的に等しいことを利用して，振幅 F_k の第1次近似値とする．ついで，OHSPを再び呼んで，以後の目標スペクトルとなる減衰定数 5 % の速度応答スペクトル $(S_v)_k^{\text{target}}$ を求めておく．

e) 繰り返し計算 まず 1 回目の繰り返し計算 ($NCYCL = 1$) に入り， F_k の第1次近似値と位相角 ϕ_k から，複素フ - リエ係数 C_k を求め，これをフ - リエ逆変換して，加速度時刻歴 ACC の第1次近似とする．

f) 基線補正 ここで，サブルーチンCRACを呼んで，加速度時刻歴の基線補正をしておくのが望ましい．補正後の時刻歴をフ - リエ変換し，改めて振幅 F_k の第1次近似値を求める．

g) フ - リエ振幅の修正 基線補正した第1次近似の加速度時刻歴について，サブルーチンERESを呼び，減衰定数 5 % の速度応答スペクトル $(S_v)_k$ を求めてみると，目標スペクトル $(S_v)_k^{\text{target}}$ とは一致しない．そこで，両者の比

$$r(k) = (S_k)_k^{\text{target}} / (S_v)_k$$

を計算して，振幅 F_k を $F_k \rightarrow r(k) \cdot F_k$ と修正し，これを F_k の第2次近似値として，2 回目の繰り返し計算 ($NCYCL = 2$) に入る．

h) 収束誤差 以下，同様な計算を繰り返し，繰り返し回数が所定の値 ($MXCYCL$) に達した場合，あるいは誤差を表わす比率 $r(k)$ の 2 乗平均が，許容誤差 ERR より小さくなったところで，計算を打ち切る．この時点で，配列 ACC に格納されているデータが，求める模擬地震動の加速度時刻歴である．

プログラムの算法は，以上のとおりであるが，ここで，このプログラムに関連して，なお若干の事項を付け加えておく．

i) 引数 IR に与える数値により，地震の同一のマグニチュード，同一の震央距離に対して，異なった地震動が作成できる．このプログラムによれば，作成された地震動の最大加速度・最大速度は， IR の値にかかわらず，それぞれ別掲のプログラムOHACによって計算される最大加速度，VELKによって計算される最大速度と，それほどかけ離れたものとはならない筈であるが，できればごく近い値になることが望ましい．また，客観的な評価は難しいが，できれば，作成された地震動の形が，自然の地震動らしさをもっていることも，模擬地震動に要求される1つの条件であろう．

実際には，引数 IR に適宜の値を与えながら，何回かの試行を繰り返し，これらの条件に合ったものを，目指していく訳である．よほど運が悪くないかぎり，おそらく10回以内の試行で，一応満足のいく結果に，到達できるだろう．

ii) 前に d) 項で述べたとおり，このプログラムの算法では，まず各周期点 T_k における減衰定

数0%の速度応答スペクトル $(S_v)_k^{h=0}$ を求め、これとフ-リエ振幅スペクトルとの近似性に着目して、振幅 F_k の第1次近似値を定める。ついで、以後の繰り返し計算では、減衰定数5%の速度応答スペクトル $(S_v)_k^{\text{target}}$ を目標スペクトルとして、 F の逐次近似値を求めていく。

しかし、 F_k の第1次近似値を定めるだけの目的で、まず $(S_v)_k^{h=0}$ を求める段階を省略して、代わりに、最初から減衰定数5%の $(S_v)_K^{\text{target}}$ を、 F_k の第1次近似値としても、結果的には、ほとんど差異を生じない。

【プログラム】

```

C * * * * * WGEN 1
C   SUBROUTINE FOR SIMULATED WAVE GENERATION WGEN 2
C * * * * * WGEN 3
C WGEN 4
C                               CODED BY Y.OHSAKI WGEN 5
C WGEN 6
C   SUBROUTINE WGEN(EM,R,NN,IR,ACC,ND,DT,AMAX,VMAX,MXCYCL,ERR,VW1, WGEN 7
*                               VW2) WGEN 8
C WGEN 9
C   COMPLEX C(4096) WGEN 10
C   DIMENSION ACC(ND),VW1(ND),VW2(ND) WGEN 11
C   DIMENSION E(33),X(33),EE(33) WGEN 12
C   DIMENSION PDIF(2046),PHI(2049),F(2049),T(2049),SV(2049),H(1), WGEN 13
*   RES(2049,1),RR(2049) WGEN 14
C   PARAMETER (PI2=6.283185) WGEN 15
C   DATA DX/0.03125/,H0/0./,H/0.05/ WGEN 16
C WGEN 17
C   PHASE DIFFERENCES WGEN 18
C WGEN 19
C   CALL ENVL(EM,TB,TC,TD,33,E,33) WGEN 20
C   DT=TD/REAL(NN) WGEN 21
C   NN2=NN/2 WGEN 22
C   NFOLD=NN2+1 WGEN 23
C   X(1)=0. WGEN 24
C   EE(1)=0. WGEN 25
C   DO 110 M=2,33 WGEN 26
C   X(M)=REAL(M-1)*DX WGEN 27
C   EE(M)=EE(M-1)+E(M) WGEN 28
110 CONTINUE WGEN 29
C   DO 120 M=2,33 WGEN 30
C   EE(M)=EE(M)/EE(33) WGEN 31
120 CONTINUE WGEN 32
C   DO 150 K=1,NN2-2 WGEN 33
C   P=RAND(IR) WGEN 34
C   DO 130 J=2,33 WGEN 35
C   IF(P.LE.EE(J)) GO TO 140 WGEN 36
130 CONTINUE WGEN 37
140 PDIF(K)=- (X(J-1)+(P-EE(J-1)))/(EE(J)-EE(J-1))*DX*PI2 WGEN 38
150 CONTINUE WGEN 39
C WGEN 40
C   PHASE ANGLES WGEN 41
C WGEN 42
C   PHI(2)=0. WGEN 43
C   DO 160 K=1,NN2-2 WGEN 44
C   PHI(K+2)=AMOD(PHI(K+1)+PDIF(K),PI2) WGEN 45
160 CONTINUE WGEN 46
C WGEN 47
C   TARGET SPECTRUM AND FIRST FOURIER APPROXIMATION WGEN 48
C WGEN 49
C   T(1)=TD*2. WGEN 50
C   DO 170 K=2,NFOLD WGEN 51
C   T(K)=TD/REAL(K-1) WGEN 52

```

170	CONTINUE	WGEN	53
	DO 180 K=2,NFOLD	WGEN	54
	IF(T(K).LE.2.) GO TO 190	WGEN	55
180	CONTINUE	WGEN	56
190	KMIN=K	WGEN	57
	DO 200 K=KMIN,NFOLD	WGEN	58
	IF(T(K).LT.0.02) GO TO 210	WGEN	59
200	CONTINUE	WGEN	60
	KMAX=NFOLD	WGEN	61
	GO TO 220	WGEN	62
210	KMAX=K-1	WGEN	63
220	NE=KMAX-KMIN+1	WGEN	64
	DO 230 K=2,NFOLD	WGEN	65
	CALL OHSP(EM,R,H0,T(K),SV0,K-2)	WGEN	66
	IF(K.LT.KMIN.OR.K.GT.KMAX) SV0=0.	WGEN	67
	F(K)=SV0/TD	WGEN	68
230	CONTINUE	WGEN	69
	DO 240 K=2,NFOLD	WGEN	70
	CALL OHSP(EM,R,H(1),T(K),SV(K),K-2)	WGEN	71
	IF(K.LT.KMIN.OR.K.GT.KMAX) SV(K)=0.	WGEN	72
240	CONTINUE	WGEN	73
C		WGEN	74
C	ITERATIVE COMPUTATION	WGEN	75
C		WGEN	76
	ENN=1./REAL(NN)	WGEN	77
	NCYCL=0	WGEN	78
250	NCYCL=NCYCL+1	WGEN	79
	C(1)=(0.,0.)	WGEN	80
	DO 260 K=2,NN2	WGEN	81
	C(K)=F(K)*CPLX(COS(PHI(K)),SIN(PHI(K)))	WGEN	82
	C(NN+2-K)=CONJG(C(K))	WGEN	83
260	CONTINUE	WGEN	84
	C(NFOLD)=F(NFOLD)*(1.,0.)	WGEN	85
	CALL FAST(NN,C,4096,+1)	WGEN	86
	AMAX=0.	WGEN	87
	DO 270 M=1,NN	WGEN	88
	ACC(M)=REAL(C(M))	WGEN	89
	AMAX=AMAX1(AMAX,ABS(ACC(M)))	WGEN	90
270	CONTINUE	WGEN	91
C		WGEN	92
C	BASE LINE CORRECTION	WGEN	93
C		WGEN	94
	CALL CRAC(DT,NN,AMAX,ACC,ND,VW1,VW2)	WGEN	95
	DO 280 M=1,NN	WGEN	96
	C(M)=CPLX(ACC(M),0.)	WGEN	97
280	CONTINUE	WGEN	98
	CALL FAST(NN,C,4096,-1)	WGEN	99
	DO 290 K=2,NFOLD	WGEN	100
	F(K)=CABS(C(K))*ENN	WGEN	101
290	CONTINUE	WGEN	102
C		WGEN	103
C	MODIFICATION OF FOURIER AMPLITUDES	WGEN	104
C		WGEN	105
	CALL ERES(1,H,1,NFOLD,T,2049,DT,NN,ACC,ND,2,VMAX,RES)	WGEN	106
	DO 300 K=2,NFOLD	WGEN	107
	RR(K)=SV(K)/RES(K,1)	WGEN	108
	F(K)=F(K)*RR(K)	WGEN	109
300	CONTINUE	WGEN	110
C		WGEN	111
C	ERROR FOR CONVERGENCE	WGEN	112
C		WGEN	113
	EPS=0.	WGEN	114
	DO 310 K=KMIN,KMAX	WGEN	115

```

      EPS=EPS+(1.-RR(K))**2                                WGEN 116
310 CONTINUE                                             WGEN 117
      EPS=SQRT(EPS/REAL(NE))                              WGEN 118
C
      IF(EPS.LE.ERR) GO TO 320                            WGEN 119
      IF(NCYCL.EQ.MXCYCL) GO TO 330                      WGEN 120
      GO TO 250                                           WGEN 121
320 MXCYCL=NCYCL                                        WGEN 122
330 ERR=EPS                                             WGEN 123
      RETURN                                             WGEN 124
      END                                               WGEN 126

```

【使用例】 マグニチュード 7.3，震央距離 25.0 km の地震を想定し，解放基盤面上における模擬地震動（加速度時刻歴）を策定せよ．

[解]

プログラム：

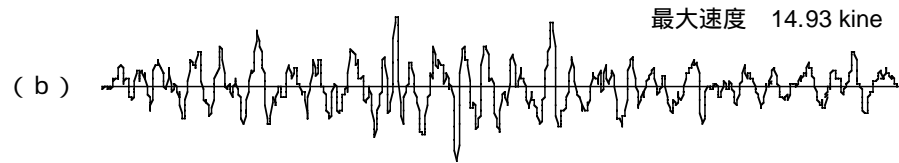
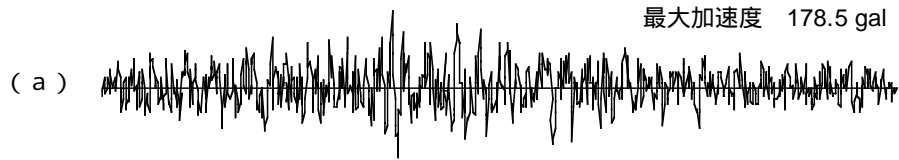
```

      DIMENSION ACC(1024),VEL(1024),VW1(1024),VW2(1024),T(513),H(1),      1
*      RES(513,1),VRES(513)                                             2
      DATA      EM/7.3/,R/25.0/,NN/1024/,H/0.05/                       3
      DATA      IR/101/,MCYCL/10/,ERR/0.05/                             4
C
      CALL WGEN(EM,R,NN,IR,ACC,1024,DT,AMAX,VMAX,MCYCL,ERR,VW1,VW2)      5
      CALL IACC(DT,NN,ACC,VEL,VW1,1024,VMAX,DMAX)                        6
      TD=10.** (0.31*EM-0.774)                                           7
      NFOLD=NN/2+1                                                       8
      DO 110 K=1,NFOLD                                                    9
      T(K)=TD/REAL(K)                                                    10
110 CONTINUE                                                            11
      DO 120 K=1,NFOLD                                                    12
      IF(T(K).LE.2.) GO TO 130                                           13
120 CONTINUE                                                            14
130 KMIN=K                                                               15
      DO 140 K=KMIN,NFOLD                                                16
      IF(T(K).LE.0.02) GO TO 150                                         17
140 CONTINUE                                                            18
      KMAX=NFOLD                                                         19
      GO TO 160                                                           20
150 KMAX=K-1                                                             21
160 NE=KMAX-KMIN+1                                                       22
      DO 170 K=1,NE                                                       23
      T(K)=T(K+KMIN-1)                                                    24
170 CONTINUE                                                            25
      CALL ERES(1,H,1,NE,T,513,DT,NN,ACC,1024,2,VMAX,RES)              26
      DO 180 K=1,NE                                                       27
      VRES(K)=RES(K,1)                                                    28
180 CONTINUE                                                            29
      STOP                                                                30
      END                                                                31

```

アウトプット：結果は，模擬地震動の加速度時刻歴が，配列 ACC に格納されており，これを積分した速度時刻歴が配列 VEL に，また減衰定数 5% の速度応答スペクトルは，配列 VRES に格納されていて，プロットすれば，それぞれ下図 (a) ， (b) ， (c) のようになる．
図 (c) に記入してある細線は，目標とした大崎スペクトルである．

マグニチュード $M = 7.3$ 震央距離 $R = 25.0$ km



(c) 速度応答スペクトル

