**Grflt-v20.fにおけるすべり速度関数（またはmoment rate関数）の選択**

フーリエ変換・逆変換は，地震学分野で使われている次式を用いる．

 フーリエ変換：

 フーリエ逆変換：

変位最大値を１で基準化したすべり速度関数をf(t)、そのフーリエ変換をF(ω)とする。以下のすべり速度関数において、ISVFuncはプログラム内の識別番号である。

**０．矩形関数（ISVFunc=0；Time Window数とTime Interval(s)を指定し、重ね合わせ可能）**

　τを矩形関数の継続時間とする。

 、　 

ここで。プログラム内でτは、三角形関数のτ1+τ2 (=τ)として入力する。

・入力例ex0-in.csv（ISVFunc=0；τ=τ1+τ2=2.0 s）



⇒Grflt-v20.fではすべり関数や振幅スペクトルは出力しない

**１．三角形関数（ISVFunc=1；Time Window数とTime Interval(s)を指定し、重ね合わせ可能）**

　τ1、τ2、τを、それぞれ不等辺三角形関数の前半、後半、全継続時間（τ=τ1+τ2）とする。

 、　

ここで、、、、

・入力例ex1-in.csv（ISVFunc=1；τ1=1.0 s、τ2=1.0 s）

⇒Grflt-v20.fではすべり関数や振幅スペクトルは出力しない

**２．指数関数（ISVFunc=2；Time Windowによる重ね合わせは使用しない）**

　τはf(t)の最大振幅時の時間でありプログラム内では、三角形関数のτ1+τ2 (=τ)として入力する。

 、 

**・計算例（τ=1.0 s）**

　Exp-SlipV.fを使用したすべり関数（Exp\_slip：最終すべり変位を１で基準化）とフーリエ振幅スペクトル（Exp\_amp）を図１に示す。振幅スペクトルには波形からFFTで数値的に求めたものと、上式による理論スペクトルの比較も示しているが、倍精度・dt=0.01秒で20 Hz程度まで両者は良く一致している。



図1　指数関数によるすべり速度・変位・加速度関数とフーリエ速度振幅スペクトル（τ=1.0 s）

**・Grflt-v20.fの入力例ex2-in.csv（ISVFunc=2；τ=2.0 s）**

⇒Grflt-v20.fでは指数関数のすべり関数や振幅スペクトルは出力しない

**３．正規分布（ガウス）関数（ISVFunc=3；Time Windowによる重ね合わせは使用しない）**

　正規分布すべり速度関数と、そのフーリエ変換は次式で表せる。次項に説明するように、入力パラメータμ（中央値）とσ（標準偏差、σ2は分散）は、smoothed ramp関数とほぼ等価になるように、μ=τ、σ=τ/5とする（τは三角形関数のτ1+τ2 ）。

、

　上式は時刻μでピーク値を持ち、開始時間がほぼμ/2秒、継続時間が約μ(=τ)秒の関数となる。ここではぼμ/2秒の時間遅れを導入する次式を使用する。





**・計算例（μ=τ=2 s、σ=τ/5=0.4 s）**

Gauss-SlipV.fを使用したすべり関数（Gauss\_slip：最終すべり変位を１で基準化）とフーリエ振幅スペクトル（Gauss\_amp）を図２に示す。μ/2秒の時間遅れによるすべり変位はほぼ０から開始し、継続時間が2秒で収束しているが、速度と加速度波形が０から開始していない。また波形をFFTで計算したスペクトルは、振幅は小さいものの理論スペクトルと比較すると1 Hz以上の高振動数で精度を落としている。



図2　ガウス分布(正規分布)関数によるすべり関数（左：速度・変位・加速度）とすべり関数速度のフーリエ振幅スペクトル（右：波形からのFFT出力と理論スペクトルの比較）（μ=2 s、σ=μ/5=0.4 s）

**・Grflt-v20.ｆの入力例（ex3-in.csv、ISVFunc=3；μ=τ=2 s、σ=τ/5=0.4 s）**

⇒Grflt-v20.fではガウス関数のすべり関数や振幅スペクトルは出力しない

**４．Smoothed Ramp関数（ISVFunc=4；Time Windowによる重ね合わせは使用しない）**

　smoothed ramp関数（すべり速度関数）とその時間積分（変位関数）次式で与えられる。

、　すべり関数：

ここで、τが継続時間である。上式は時刻0でピーク値とした継続時間が約τ秒の対称形となるため、τ/2秒の時間遅れを導入する次式を使用する。

、　すべり関数：

上式のフーリエスペクトルはFFTで数値変換して使用する。

**・計算例（τ=2 s）**

　Ramp-SlipV.fを使用したすべり関数（Ramp\_slip：最終すべり変位を１で基準化）とフーリエ振幅スペクトル（Ramp\_amp）を計算し、図２のGauss分布との比較を図３に示す。Gauss分布とほぼ同じすべり速度とフーリエ振幅スペクトルを示すことが確認できる。



図3　ガウス分布関数とSmoothed Ramp関数のすべり関数とフーリエ振幅スペクトルの比較

（ガウス分布関数:μ=2 s、σ=μ/5=0.4 s、Smoothed Ramp関数:τ=2 s）

**・Grflt-v20の入力例ex4-in.csv（ISVFunc=4；τ=2 s, 細分化dt=0.01 s）**

⇒Grflt-v20.fではSmoothed Ramp関数のすべり関数や振幅スペクトルは出力する

　 Ramp\_slip.csv（すべり速度・変位関数・加速度関数）

　 Ramp\_amp.csv（すべり速度・加速度関数のフーリエ振幅スペクトル）

**５．中村・宮武関数（ISVFunc=5；Time Windowによる重ね合わせは使用しない）**

　すべり速度関数は図４に示す中村・宮武(2000)より波形を計算し、フーリエ振幅スペクトルはその波形をフーリエ変換して求める。入力データは(4-3)式のfmax (Hz)、すべり変位を１で基準化したすべり速度最大値Vm、および、tr=W/Vr (s)とする。さらに、例題に示すように一般にすべり速度関数の立ち上がり時間は非常に短いため、時間刻みΔtを細かく刻まないと振幅スペクトルを過小に評価するため、細かな時間刻みdtN (s)も入力する。

図4　中村-宮武(2000)によるすべり速度・加速度関数

（http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/miyatake/SlipFunc-Prog.html）

 　　　 　　　　 　　　…(4-1)

ここで、

、　 　　　　 　　…(4-2)

、　、　、　 　…(4-3)

である。tbはすべり速度が立ち上がりの２次関数からKostrov型関数に移行する時間であり、(4-1)式にすべり変位を与えることで自動的に決定される。さらに、cとarはKostrov型関数から振幅0に移行するまでを１次関数で補間するための係数である。

fmax、Vm（最終変位で基準化）、trを指定すると、上式より全てのパラメータが決まる。

**・計算例（fmax=6 Hz、基準化Vm=20.837/5.092=4.092 m/s、tr= 2.114 s、dt=0.005 s）**

NM-SlipV.fを使用したすべり関数（N&M\_slip：最終すべり変位を１で基準化）とフーリエ振幅スペクトル（N&M\_amp）を内閣府(2013)の首都直下地震モデルを基にしたベンチマークテストのデータを用いて計算する。

内閣府(2013)の検討では、初期モデルとして経験式よりSMGAの震源パラメータとしてS=900km2、地震モーメントMo= 5.1×1019 Nm(SMGA : Mo= 1.7×1019 Nm)、⊿σ=30 MPa、1855年安政江戸地震の震度分布を説明するモデルとして、応力パラメータを⊿σ=52 MPaに設定している。一方、被害想定では安全側となるばらつきを考慮したモデルとして、⊿σ=62 MPaを用い、この値を最終報告書では用いている。地震モーメントは $∆σ=(7/16)∙Mo/R^{3}$（Eshelby, 1957)より、断層面全体でMo= 1.05×1020 Nm (Mw=7.3)、SMGA のみでは Mo= 3.51×1019 Nm (Mw=7.0)となる。SMGAの面震源モデルの断層すべり量は$Mo=μDA$よりD=5.092mとなる。(SMGA:S=150km2,μ=4.6×1010 N/m2)。対象断層をSMGA(面積S=150.3km2)、fc = fmax =6 Hz , Vr=2900 m/s μ=4.6×1010 N/m2を用いて

　　w = $\sqrt{S}$ = 12.26 km、td ≒ 0.053 s、tr ≒ 2.114 s、ts = 1.5×tr = 3.171 s

を得る。また、SMGAの応力降下量は断層面積から等価半径Rを求めて、円形クラックの静的応力降下量(Eshelby 1957)より算出する。

　　R ≒ 6.917 km 、⊿σ = 4.641×107（Pa）＝ 46.406（MPa）

※内閣府(2013)では初期モデルを⊿σ＝30 MPaモデルとし、安政江戸地震の震度分布を再現するため⊿σ=52 MPaに設定している。また今回の被害想定ではバラツキや安全側を考慮して⊿σ=62 MPaで計算をしている。ベンチマークテストの計算にはレシピに従って求めた⊿σ=46.406 MPaを用いる。以上のパラメータを用いて、その他のパラメータを得る。

Vm ≒ 20.837 m/s、tb ≒ 0.0828 s、c ≒ 1.271 m/s

ar ≒ 1.203 m/s2 、b≒ 1.819、ε ≒ 0.067

従って、プログラムでは以下のパラメータを使用する。

fmax=6 Hz、基準化Vm=20.837/5.092=4.092 m/s、tr= 2.114 s

　図５にすべり速度・変位・加速度関数、および、すべり速度・加速度関数のフーリエ振幅スペクトルを示す。細分化時間刻みdtN=0.005 sを用いた。



図5 すべり速度・変位関数（左）、加速度関数（中）、および、

すべり速度・加速度関数のフーリエ振幅スペクトル（右）

**・Grflt-v20.fの入力例ex5-in.csv（ISVFunc=5；****細分化dtN=0.005s、fmax=6 Hz、**

**基準化Vm=4.092 m/s、tr= 2.114 s） ⇒　図5**

⇒Grflt-v20.fでは中村・宮武関数のすべり関数や振幅スペクトルは出力する

　 N&M\_slip.csv（すべり速度・変位関数・加速度関数）

　 N&M\_amp.csv（すべり速度・加速度関数のフーリエ振幅スペクトル）

**６．規格化Yoffe関数（ISVFunc=6；Time Windowによる重ね合わせは使用しない）**

図６に示すTinti et al.（BSSA, 2005）および、田中（博士論文、2019）による規格化Yoffe関数に基づくすべり速度時間関数f(t)は次式でもとめ、それをフーリエ変換して使用する。入力パラメータはτS、τRであり、ここでは$τ\_{R}>2τ\_{s}$τR>2τSとする。

≒1.3τs

2τs+τR

図6 規格化Yoffe関数に基づくすべり速度時間関数

 (5-1)

ここで，Dmaxは最終的なすべり量である．また，K及びC1～C6は以下の式で表現される．

 (5-2)

 (5-3)

 (5-4)

 (5-5)

 (5-6)

 (5-7)

 (5-8)

したがって， Dmax（=1と基準化）、τs及びτRを設定することにより，すべり速度時間関数f(t)が得られる．

**・計算例（熊本地震の地表地震断層：τS = 1.2 s、τR = 2.8 s）**

Yoffe-SlipV.fを使用したすべり関数（Yoffe\_slip：最終すべり変位を１で基準化）とフーリエ振幅スペクトル（Yoffe\_amp）を計算する。例として，図7に2016年熊本地震の布田川断層浅部の震源モデル（田中ほか、2018）によるτs=1.2秒，τR=2.8秒を用いたすべり速度・変位・加速度時間関数と速度関数のフーリエ振幅スペクトルを示す（すべり量Dmax=1m）。振幅スペクトルには約0.83 Hz(=1/τs)の整数倍に相当する振動数で振幅の谷が現れている。



　図7　すべり速度・変位・加速度関数と速度関数のフーリエ振幅スペクトル（τs=1.2 s、τR=2.8 s）

**・入力例ex6-in1.csv（ISVFunc=6；細分化dt=0.01s、τs=1.2s，τR=2.8s）⇒図7**

⇒ Yoffe\_slip.csv（すべり速度・変位関数・加速度関数）

　 Yoffe\_amp.csv（すべり速度・加速度関数のフーリエ振幅スペクトル）、が出力

**・計算例（都心南部直下地震のSMGA：τS = 0.02 s、τR = 3.1 s）**

次に図5の中村・宮武関数を模擬した例の比較図を図8に示す。



図8 図5による中村・宮武関数（青線）と対応させた規格化Yoffe関数（赤線）

上図：すべり速度関数（左）、変位関数（中）、加速度関数（右）

下図：すべり速度・加速度関数のフーリエ振幅スペクトル（右）

**・入力例ex6-in2.csv（ISVFunc=6；細分化dt=0.005s、τs=0.02s，τR=3.1s）⇒図8**

