

重力データ解析（3回目）

潮汐計算

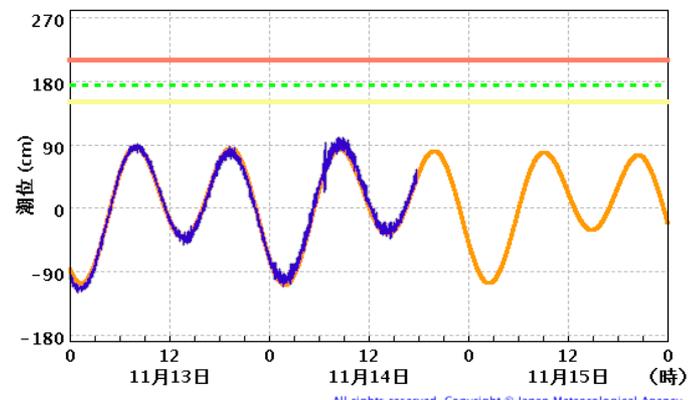
測地学研究室 風間卓仁

今日の流れ

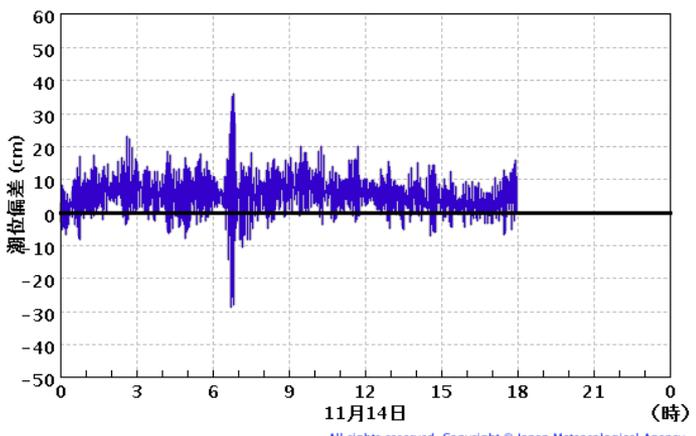
- 導入：潮汐について
 - 潮汐が生じる原因
 - 潮汐に伴う重力変化とその補正法
- 演習：潮汐変化の予測計算
 - WindowsのUnix系ソフト Cygwin
 - Unix系コマンド (gfortran, gnuplot, etc)
- レポート課題に関する説明

トカラ列島・中之島の潮位変化

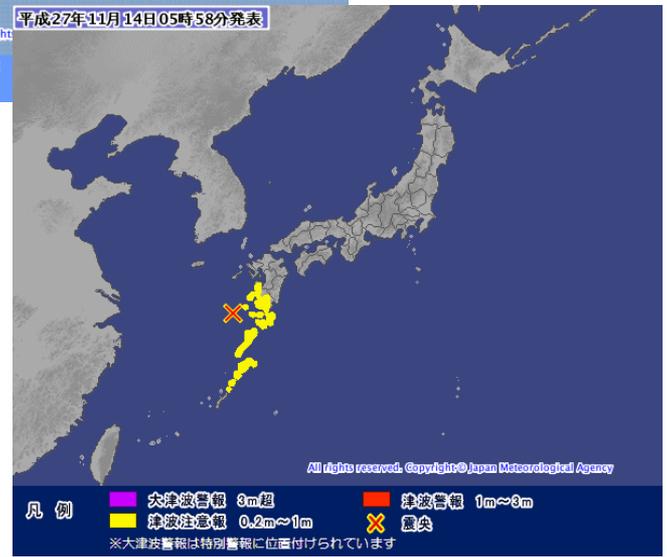
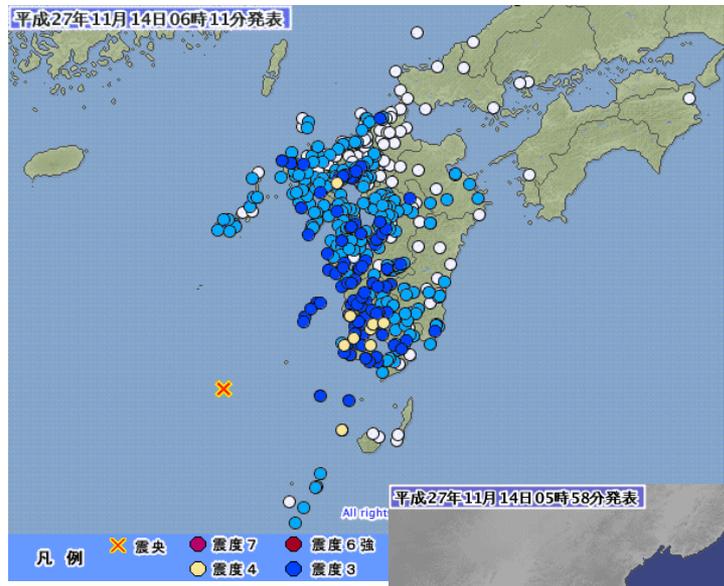
■ 気象庁 > 防災情報 > 潮位観測情報



実際の潮位 ———— 高潮注意報基準 ————
 天文潮位 ———— 高潮警報基準 ————
 過去最高潮位(174cm:2004年08月29日19時32分:台風第16号) - - - - -

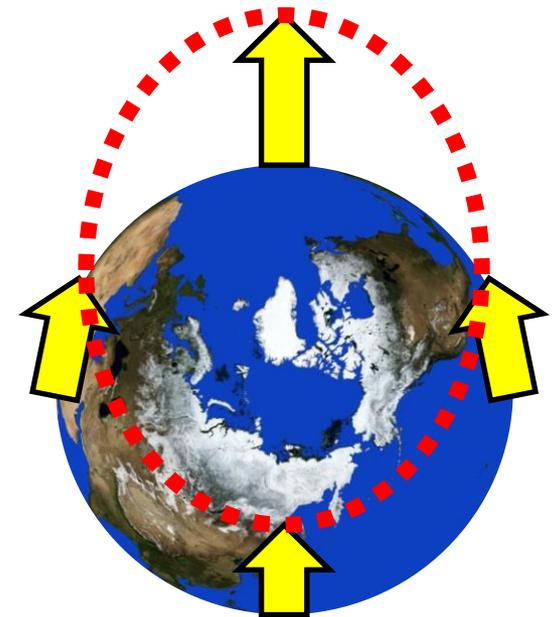
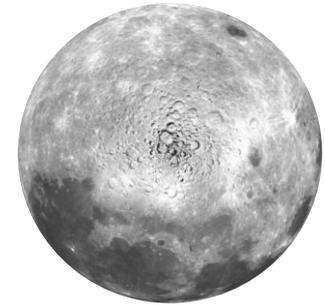


潮位偏差 ————



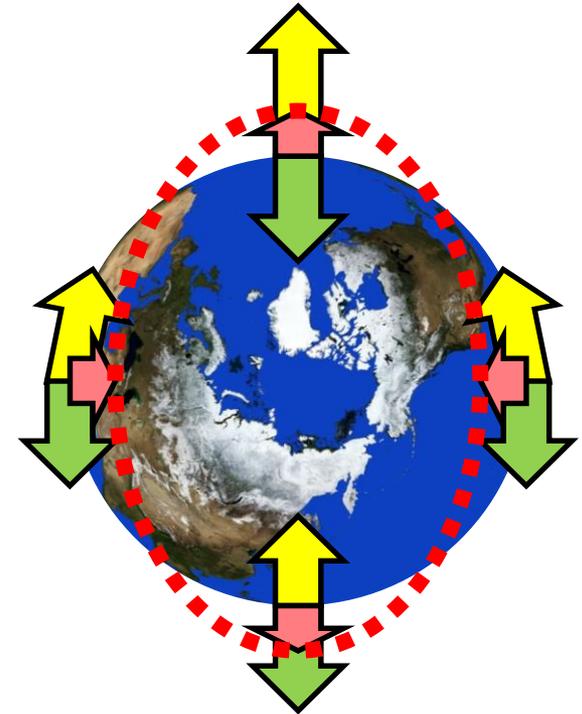
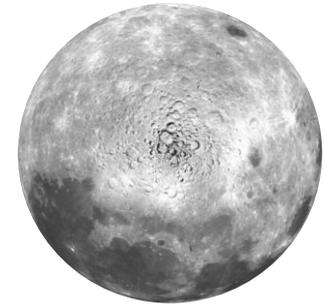
潮汐（固体地球潮汐）とは？

- 知恵蔵2015: 地球と他の天体が接近・離反する時、相互の引力の働きで、引き起こされる固体地球の変形。地球内部は、近似的には弾性体なので外力で変形し、それがジオイド面の変化(地面の傾斜や鉛直線方向の変化)となって表れる。
- 右図は波数1の潮汐変形。



半日周の分潮が生じる理由

- 潮汐は異なる周期の波の重ね合わせ → 1個1個を分潮という
- (月による起潮力) = (月の引力) + (月との公転に伴う遠心力) を考えると、波数が2に
- しかも地球は1日に約1回自転しているため、ある地点では起潮力の極大 (→満潮) と極小 (→干潮) を2回経験する



潮汐に伴う重力変化

- 潮汐の効果ポテンシャルを使って議論すると、潮汐変動に伴う重力変化は以下のように書ける

$$\Delta g_{Earth} \propto \left[1 - \frac{n+1}{n} k_n + \frac{2}{n} h_n \right] \cdot \frac{nV_n}{a} \equiv \delta_n \cdot \Delta g_{rigid,n}$$

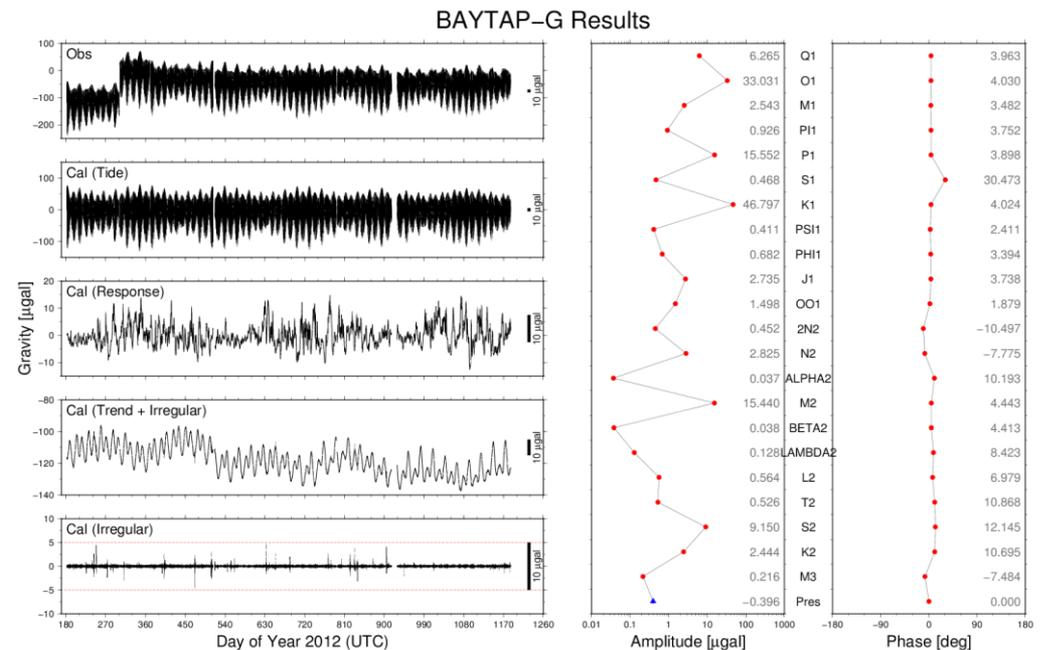
- n は潮汐ポテンシャル V の展開次数 (※分潮の次数とは別物)、 $\Delta g_{rigid,n}$ は地球が剛体の場合の重力変化、 δ_n は地球が弾性体の場合の重力増大率 (= δ ファクター)
- 潮汐ポテンシャル V の主要項 $n=2$ を考えると、
 $\delta_2 \sim 1.16$ となる

実際に地球で起きる潮汐変形

- 天体由来の起潮力に伴う地球の変形 (**固体地球潮汐変形**) は非常に正確に計算できる
- しかし、地球は弾性的かつ粘弾性的で、構造の不均質も存在する → δ ファクターは場所によってわずかに異なり、天体公転との時間差 (位相ずれ) も生じる
- 特に、海の潮位変化に伴う固体地球の副次的な荷重変形を **海洋潮汐荷重変形** という

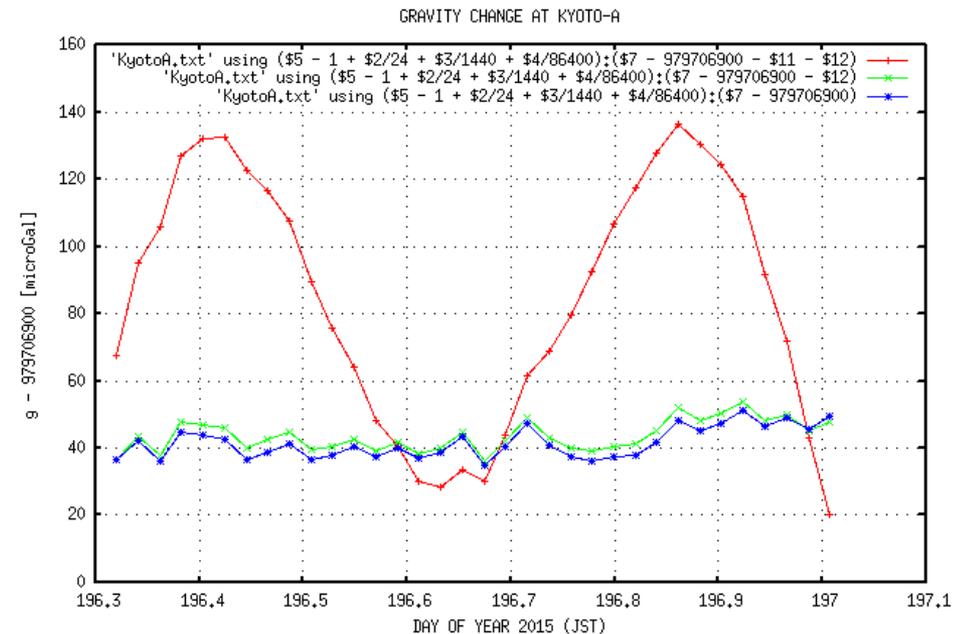
潮汐補正：超伝導重力計の場合

- 重力変化（つまり潮汐変動）を連続的に観測可
- 各分潮の周期は既知なので、各分潮の振幅と位相ずれをfitting等により求めればよい
- 有名なソフトウェアが BAYTAP (天文台水沢)



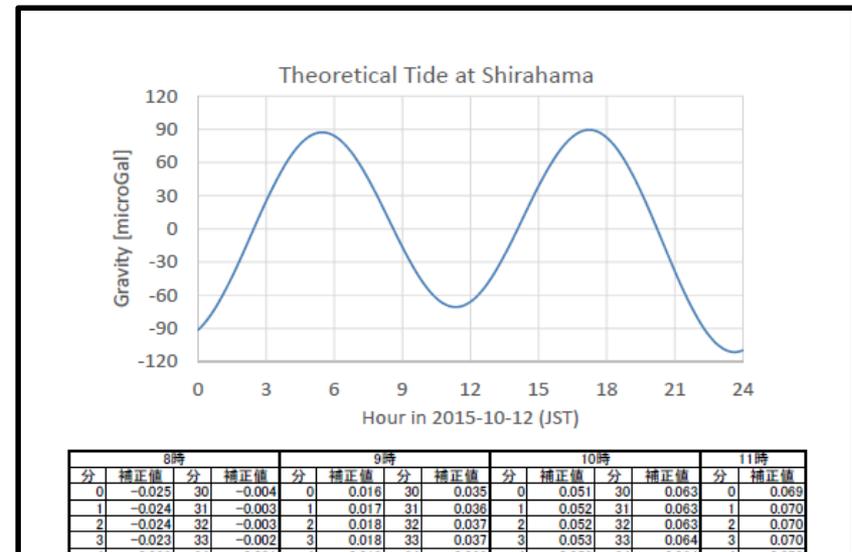
潮汐補正：絶対重力計の場合

- 器械上の制約から連続観測しづらい
- 固体潮汐 (\sim 百 μGal) は理論計算によって補正
- 海洋潮汐 (\sim 数 μGal) は海洋潮汐モデルを用いて補正：有名なものがNAO.99b (天文台水沢)



潮汐補正：相対重力計の場合

- 主に移動観測に用いるため、連続観測や海洋潮汐モデル計算もしづらい
- 固体潮汐+海洋潮汐の重力変化の経験値から、 $\delta \sim 1.2$, 位相ずれ0を仮定して固体潮汐予測ソフトで計算：有名なのが tide4n (天文台水沢)



今日やること

- 潮汐予測プログラム tide4n (国立天文台水沢・田村氏) で潮汐重力変化を計算する
- WindowsのUnix系ソフト Cygwin を使ってコンパイル (gfortranコマンド)
- 白浜の潮汐重力変化を計算 → 風間の計算結果と合うことを確認 (gnuplotコマンド)
- 設定ファイルを変更して京大の潮汐重力変化を計算 → dg/dz 測定データに潮汐補正を施すと結果がどうなるかを確認

Cygwinの使い方 (1)

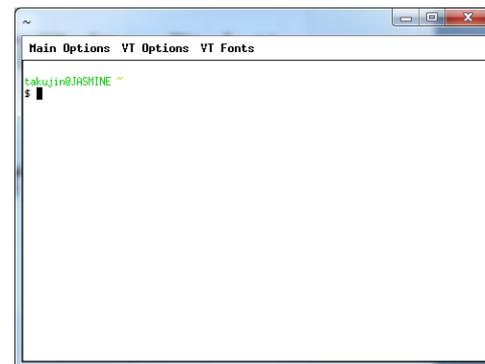
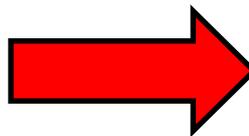
- Cygwinアイコンをダブルクリック → 黒いターミナル画面が出てくる
- `pwd` を入力 → `/home/geodesy` がホームディレクトリであることを確認
- ただしこのディレクトリは、Windows上では `C:¥cygwin¥home¥geodesy` になる (※デスクトップにショートカットがあります)
- Cygwinからデスクトップを見たいときは、`cd /cygdrive/c/Users/geodesy/Desktop`

Cygwinの使い方 (2)

- Cygwin上のホームディレクトリに DC2015 というフォルダを作る
 - cd
 - mkdir DC2015
 - ls
- Windows上でもこのフォルダを確認する
- DC2015の下に gravity というフォルダを作る
 - cd DC2015
 - mkdir gravity

Cygwinの使い方 (3)

- いま使っている黒いターミナル画面だと、Emacs (エディタ) や gnuplot (グラフ表示) の別ウィンドウが開かない
- なので、別ウィンドウを開けられるターミナルを startxwin & で呼び出す
- 白いターミナル画面が現れるはず



tide4n のダウンロード

- ブラウザ上で以下にアクセス
 - <http://goo.gl/M0xpD8>
- 3つのファイルをダウンロードし、先ほど作った gravity フォルダに入れる
- 3つのファイルの中身を確認
 - Windows: メモ帳、ワードパッド、TeraPad
 - Cygwin: emacs, vi, cat, more, less

tide4n.f

- Fortran 77で書かれた潮汐予測プログラム
- サブルーチン TIDE4N は田村さん、メイン部分とサブルーチン cal2doy は風間によって作成されたもの
- 標準入力から設定パラメータを読み込む
- サブルーチンの中で SORTED.DAT を読み込む
- 設定されたパラメータから出力ファイル名 (YYYY DOY .txt) を自動生成し、そのファイルに予測潮汐を出力する

Shirahama.dat

- 南紀白浜の潮汐変化を計算するために、必要なパラメータを並べたファイル
 - 2~26行目: 各分潮のファクター(=1.2)と位相(=0)
 - 29~46行目: 潮汐計算のためのパラメータ
 - サブルーチン TIDE4N の冒頭部分に各パラメータの意味が書いてある
- 異なる場所や時刻における潮汐変化を予測したければ、AEAST~NUM の項目を書き換えた上で、新しいファイル (例: kyoto.dat) を作る

SORTED.DAT

- サブルーチン TIDE4N で読み込まれる分潮表
- この分潮表では1200個の分潮を網羅している
- Shirahama.dat では1200個の分潮を25の周波数帯域に分けてパラメータを設定している（長周期潮汐はファクター値 0 を仮定）

ファイル(E)	編集(E)	書式(O)	表示(V)	ヘルプ(H)										
1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00000000	0.738300	0.000241		
2	4	0	0	0	0	0	0	0	0.00000000	0.000043	0.0			
3	2	0	0	0	0	1	0	0	0.00220641	-0.065547	0.000027			
4	4	0	0	0	0	1	0	0	0.00220641	-0.000033	0.0			
5	3	0	0	0	1	-1	0	0	0.00243541	-0.000013	0.0			
6	2	0	0	0	0	2	0	0	0.00441281	0.000642	-0.000001			
7	3	0	0	0	1	0	0	0	0.00464181	0.000254	0.0			
8	3	0	0	0	1	1	0	0	0.00684822	0.000041	0.0			
9	2	0	0	0	2	1	0	0	0.01149003	-0.000089	0.0			
10	2	0	0	0	2	2	0	0	0.01369644	-0.000034	0.0			
11	2	0	0	1	-1	0	0	0	0.03642683	-0.000020	0.0			
12	2	0	0	0	0	0	0	1	0.03760492	0.000011	0.0			
13	2	0	0	1	0	-1	-1	0	0.03886027	0.000098	0.0			
14	2	0	0	1	0	0	-1	0	0.04106668	0.011549	-0.000024			
15	3	0	0	1	0	0	0	0	0.04106864	0.000004	0.0			
16	2	0	0	1	0	0	1	0	0.04107060	-0.000609	0.0			
17	2	0	0	1	0	1	-1	0	0.04327309	-0.000073	0.0			
18	2	0	0	1	0	1	1	0	0.04327701	0.000036	0.0			
19	2	0	0	0	0	0	0	2	0.05137677	-0.000011	0.0			
20	2	0	0	2	-2	-1	0	0	0.07064725	-0.000048	0.0			
21	2	0	0	2	-2	0	0	0	0.07285365	-0.000732	0.000001			
22	2	0	0	2	-2	1	0	0	0.07506006	-0.000073	0.0			
23	3	0	0	2	-1	0	0	0	0.07749547	0.000047	0.0			
24	3	0	0	2	-1	1	0	0	0.07970187	0.000007	0.0			
25	2	0	0	2	0	0	-2	0	0.08213336	0.000288	0.0			
26	2	0	0	2	0	0	0	0	0.08213728	-0.072732	-0.000081			
27	2	0	0	2	0	1	0	0	0.08434369	-0.001799	-0.000003			
28	2	0	0	2	0	2	0	0	0.08655009	-0.000400	0.0			
29	2	0	0	2	0	3	0	0	0.08875650	0.000012	0.0			
30	2	0	0	3	-2	0	-1	0	0.11392033	0.000025	0.0			
31	2	0	0	3	0	0	-1	0	0.12320396	0.004246	-0.000014			
32	2	0	0	3	0	1	-1	0	0.12541037	-0.000074	0.0			
33	2	0	0	3	0	2	-1	0	0.12761677	-0.000018	0.0			
34	2	0	0	4	0	0	-2	0	0.16427064	0.000173	0.0			
35	2	0	1	-4	1	-1	0	0	0.38717737	-0.000028	0.0			
36	2	0	1	-4	1	0	2	0	0.38938770	0.000021	0.0			
37	2	0	1	-4	3	0	0	0	0.39866740	0.000014	0.0			
38	2	0	1	-3	1	-1	1	0	0.42824797	-0.000051	0.0			
39	2	0	1	-3	1	0	1	0	0.43045438	0.000675	-0.000001			
40	2	0	1	-3	1	1	1	0	0.43266078	-0.000042	0.0			
41	2	0	1	-2	-1	-2	0	0	0.45782461	-0.000056	0.0			
42	2	0	1	-2	-1	-1	0	0	0.46003102	-0.000153	0.0			
43	3	0	1	-2	0	-1	0	0	0.46467283	0.000013	0.0			
44	3	0	1	-2	0	0	0	0	0.46687924	-0.000053	0.0			
45	2	0	1	-2	1	-1	0	0	0.46931465	-0.001133	0.000001			
46	2	0	1	-2	1	0	0	0	0.47152105	0.015791	0.000005			
47	2	0	1	-2	1	1	0	0	0.47372746	-0.001025	0.000001			
48	2	0	1	-2	1	2	0	0	0.47593387	0.000010	0.0			
49	3	0	1	-2	2	0	0	0	0.47616287	0.000007	0.0			
50	2	0	1	-1	-1	-1	1	0	0.50110162	-0.000046	0.0			
51	2	0	1	-1	-1	0	1	0	0.50330803	0.000507	0.0			
52	2	0	1	-1	-1	1	1	0	0.50551443	-0.000027	0.0			
53	2	0	1	-1	0	-1	0	0	0.50574147	0.000033	0.0			
54	2	0	1	-1	0	0	0	0	0.50794788	-0.000458	-0.000001			
55	3	0	1	-1	0	0	1	0	0.50794984	0.000006	0.0			

とりあえず動かしてみる

- コンパイル: gfortran tide4n.f -o tide4n.exe
 - 普通のUnixでは tide4n.out だが、Windowsでは実行形式ファイルは *.exe なのでこれに合わせる
- 実行: ./tide4n.exe < Shirahama.dat
- 2015285.txt が作られるので見てみる
- 「メモ帳」ソフトで見ると改行がおかしくなる
 - WindowsとUnixで改行形式が異なるため
 - unix2dos 2015285.txt とすると改行形式を替えることができる (逆コマンド: dos2unix)

グラフを描いてみる

- gnuplot
- plot '2015285.txt' using 4:5 with line
- set grid; set xtics 3
- set xlabel 'Hour in 2015/10/12 (JST)'
- set ylabel 'Gravity [microGal]'
- set title 'Tidal Gravity at Shirahama'
- replot
- 以前渡したグラフと同じになるか確認する

グラフを保存する

- 方法1: キャプチャ画像 (*.png) として保存
 - グラフの画面で Alt + PrintScreen
 - 「ペイント」ソフトで貼り付け
 - 適当なファイル名 + .png で保存
- 方法2: ベクトルデータ (*.eps) で保存
 - set terminal postscript enhanced eps color
 - set output 'Shirahama.eps'
 - replot
 - exit

課題(1)

- 2015年11月9日の京都大学における潮汐重力変化を計算するために、新たな設定ファイル (例: Kyoto.dat) を作成する
- tide4n.exe で上記のファイルを読み込み、2015年11月9日の潮汐重力変化を求めた上でこの計算結果を描画する
- この潮汐データを用いて、前回演習時に取得した相対重力データに対して潮汐補正を施し、各階間の dg/dz 値を再計算する

注意点

- 京都大学理学部1号館の座標は地図情報などから取得すべし
- tide4n で得られる潮汐変化は物理量であり、単位は μGal である。単位 mGal の重力観測データを潮汐補正するには、tide4n の結果を $1/1000$ にして差し引けばよい。
- 潮汐重力変化のグラフが描けた時点で周りの人と比べましょう。座標値がわずかに違っていても結果には大差がないはず。

課題(2)

- tide4n.f のメインプログラムあるいは設定ファイルのパラメータを書き換えて、任意の場所・年月日における各分潮 (Q1からM4までの短周期23分潮) の潮汐変動を出力させる
- 各分潮の振幅値 (peak to peak) を計算し、振幅値が大きい分潮ベスト4を探す
- 上記4つの分潮の角周波数 (deg/hour) および周期 (hour) を示した上で、これらの分潮が発生する要因を調べる

ヒント

- 例えば Q1 分潮の重力変化だけを求めたい場合、他の分潮のファクター値を 0.0 にすればよい
- 東京湾の潮位変化に潮汐解析を適用し、各分潮の振幅値を求めた結果は以下にある（各分潮の角周波数も書いてある！）
 - <http://goo.gl/WYc6Gn>
- 長周期潮汐のうち、例えばMm分潮(周期27.32日)は月の公転によって、Sa分潮(周期365.24日)は地球の公転によって生じる分潮である

提出等について

- 課題(1): 潮汐重力変化の描画結果、 dg/dz の再計算結果、およびこれに付随する文章（1つのワードファイルとして作成してもOK）
- 課題(2): 自分のやったことや計算結果について、不足のないように自由にレポート
- 提出先: 風間のメールアドレスに添付
- 提出期限: 2016年1月17日（DC最終日の前日）
- 参考文献も忘れずに書きましょう！

スライド作成時に参考にした情報

- T. Herring (2009), Treatise on Geophysics (Volume 3): Geodesy. <http://goo.gl/inaNca>
- 測地学テキスト <http://goo.gl/YPgflX>
 - 2-3-3 潮汐
 - 2-3-3-1 分潮
 - 2-3-3-2 ラブ数, 志田数
 - 4-7 起潮力ポテンシャル
 - 海洋潮汐 (1~4)
- 遠心力に関する記事 <http://goo.gl/UEbew6>