地殻変動
P-17

日本測地学会
第１１４回講演会

地球表層流体の荷重変動データベースの構築と荷重変動補正を伴なうGPS 解析

[1] 情報通信研究機構, [2] 一橋大学

瀧口博士[1] (htaki@nict.go.jp)，後藤忠広[1]，大坪俊通[2]

地球表層流体の荷重変動データベース

測地学において，GPS やVLBI などの宇宙測地技術の発展により，地球規模の地殻変動が水平成分でmm，垂直成分でcm のオーダーで捉えられるようになった．しかし，精度向上に伴いプレート運動や地震･火山活動とは異なる周期的な地殻変動も捉えられるようになった．この変動は，地球表層流体が移動することに伴う，質量再分配（**荷重変動**）による地球の弾性変形と考えられ，大陸内陸部の観測点での上下変動の振幅は最大30mm程度にもなる．この事は，**精密測位解析には荷重変動の補正が必要**であることを意味する．しかしながら，荷重変動の補正は，地球潮汐や海洋潮汐の補正の様に確立した方法やモデル化がなされている訳ではない．

そこで，本研究は，精密測位解析における荷重変動の補正方法を確立する足掛りとして，**補正用のデータを計算･提供**しようとするものである．具体的には，精密測位を行う解析者が必要とする任意の地点での荷重変動の影響を，"**いつでも，どこでも**"計算でき，"**だれでも**"使用できるように，計算結果を提供するシステムを構築する．

荷重変動の計算方法

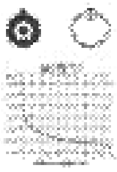
Convolution Method （Farrell, 1972）

地球を弾性体とした場合の地表荷重による変形は，質量分布とグリーン関数による畳み込み積分で計算することが出来る．

鉛直方向の弾性変形Lは次式で表せる．

$$L(\theta',\lambda')=\rho\iint H(\theta,\lambda)G_L(\phi)T(\alpha)dS$$

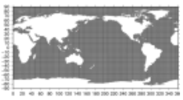
ρ ： 平均密度(e.g. 大気や海水)
H ： 入力データ (e.g. 大気圧変動)
GL： Green関数
T ： 方位角αにおける三角関数



現代測地学 p272 図6.1.5
(a) 点荷重に対する弾性体地球の変形．
(b) Farrell (1972)

海陸データ

グリッド 5'×5'

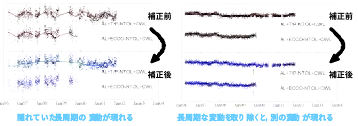


荷重変動の補正例

GPS座標時系列

GPS座標時系列の荷重変動補正は，以下の式の様に単純に，水平･垂直成分毎にGPS座標時系列から求めた荷重変動時系列を差し引く事で行った．

$$Corrected\,GPS = GPS-(Load_1+Load_2+\cdots+Load_n)$$



周期性
20%軽減 (AL+T/P-NTOL+CWL)
IGS ： 水平成分 2〜7%，垂直成分 20%
GEONET： 水平，垂直成分 20%

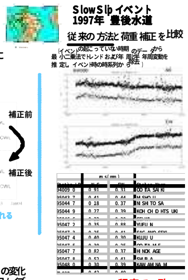
時系列
隠れていたシグナルを抽出
ローカルな変動
長周期の変動 ← 一時的な変動，変動の変化，別の荷重の変動，環境変化，人口ノイズ

Takiguchi, H., and Y. Fukuda, J. Geod. Soc. Japan, 52, 2, 141-154, 2006

Slow Slip イベント
1997年 豊後水道

従来の方法と荷重補正を比較

（イベントの起こっていない時期のデータから最小二乗法でトレンドおよび年周･半年周変動を推定し，イベント時の時系列から除去）



rms 0.4mm程度で一致
荷重補正が有効

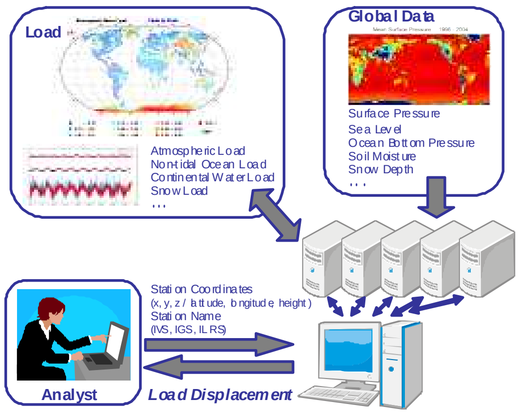
荷重変動データベース

コンセプト
精密測位において荷重変動の影響は無視できない
非定常･非周期変動を議論する為には，
周期変化（荷重変動）は取り除かなければならない
観測される地球物理学現象に伴う荷重変動は計算可能

ルーチン化
グローバルデータ
時空間分解能
今後も更新されるもの

計算可能な荷重変動は計算して取り除く！

ネットワーク経由で，ユーザーの要求する，任意の地点，任意の時間における各種荷重変動を計算し，提供する．



入力情報
地点情報 (x, y, z / lat, lon, height)
時間情報 (yyyy, mm, dd [hh])

オプション
荷重
- **大気荷重**
  大気圧: NCEP, ECMWF, JRA …
  (IB仮定 on/off …)
- **非潮汐海洋荷重**
  海面高度 ：Topex/Poseidon，Jason-1 …
  (ステリックハイト補正 on /off，係数変更 …)
  同化モデル: ECCO …
- **陸水荷重**
  土壌水分: NASA GLDAS …
- **積雪荷重**
  積雪: NCEP, ECMWF, JRA …

Landseaグリッド

出力
荷重変動 (x, y, z / lat, lon, height)
時系列 or グローバルグリッド

✓**平成22年度末:サービス開始．** 予定

荷重変動補正を伴なうGPS 解析

精密衛星軌道決定ソフトウェア

concerto

concerto v4 for time transfer (c4改, c4のC++版でGPS解析に特化した)を用い，荷重変動補正を伴なうGPS解析を実行

改良･調整中

	c4改仕様
観測量	GPS code & carrier phase, PPP/single difference
地球回転	IERS conventions 2003
局変位	IERS conventions 2003
	固体地球潮汐，海洋荷重，極潮汐
	荷重変動(大気荷重，非潮汐海洋荷重，陸水荷重，等)
伝搬補正	離心率相対論補正，Phase wind-up，電離層遅延
	大気遅延補正 (Saastamoinen，NMF，GMF，KARAT)
	アンテナ位相中心補正(absolute/elevation by ANTEX)
パラメータ推定	線形最小二乗法によるバッチ推定

SLR解析時にモデルとして補正

SLRの観測は，光波を用いている為晴天時にしか観測データが得られない．晴天時は一般的に高気圧であるので，SLR観測で得られる観測点位置はVLBIやGPSなどから求められたものより低くなる事が知られている．通常の解析では，ローカルな気圧変動と垂直変動から求められたアドミッタンス(-0.35mm/hPa)を考慮して解析が行われる．最近では，グローバルな大気圧データを解析に組み込んだり大気荷重を計算して，時系列として解析に取り込む研究が行われている．

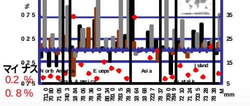
大気荷重だけではなく，**非潮汐海洋荷重**と**陸水荷重**など他の荷重を組み込んで解析を行い，どの程度解析精度が向上するか調べた

解析: concertover.4
測距値残差のrms で評価

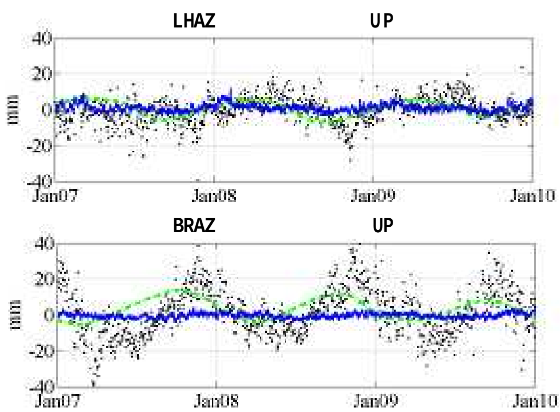
rms減少率(366日間)
T/P-NTOL マイナス
ECCO-NTOL 0.2 %
CWL 0.8 %

Results rms減少率

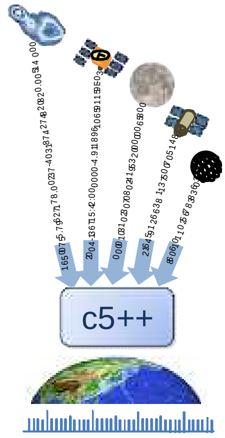
	(1) none rms (mm)	(2) NTOL(T/P) rms (mm)	(%)	(3) NTOL(ECCO) rms (mm)	(%)	(4) CWL rms (mm)	(%)
1997 01	9.535	9.534	0.010	9.519	0.168	9.470	0.682
1998 01	9.473	9.477	-0.042	9.445	0.296	9.323	1.583
1999 01	9.205	9.209	-0.043	9.206	-0.011	9.136	0.750
2000 01	9.738	9.737	0.010			9.679	0.606
2001 01	9.249	9.279	-0.324			9.214	0.378
mean	9.440	9.447	-0.07	9.390	0.2	9.364	0.8



Takiguchi, H., T. Otsubo and Y. Fukuda Earth, Planets and Space, 58, 2, e13-e16, 2006.



・ c4改で求めた座標解(荷重補正なし)の上下成分
破線 荷重変動DBで求めた陸水荷重変動
直線 荷重変動DBで求めた大気荷重変動



c4改からC5++へ

concerto version4は，現在C5++としてバージョンアップが図られている(詳しくは，本講演会のHobiger 他，大坪 他を参照)．C5++では，VLBI，GPS，SLRという複数の宇宙測地技術の解析が可能で，荷重変動補正もオプションとして選択可能となる予定である．将来的には，C5++へ移行すると共に，IGS，IVS，ILRSなどの**主要観測局の荷重変動補正を行った座標時系列を提供**する事も考えている．

References
Takiguchi H., Y. Fukuda, J. Geod. Soc. Japan, 52, 2, 141-154, 2006 a.
Takiguchi H., T. Otsubo, Y. Fukuda, Earth, Planets and Space, 58, e13-e16, 2006 b.

本研究は科研費(21740333)の助成を受けたものである．

2010年11月8日@京都大学宇治キャンパス 宇治おうばくプラザ