

海溝型巨大地震に伴う重力変化

- 2003年十勝沖地震に伴う絶対重力観測による重力変化理論の検証

背景

- Okubo(1991,1992)がディスロケーションによる重力変化理論を定式化
- 近年、精度 $1 \mu\text{gal} (= 10^{-8} m/s^2)$ を持つ高精度絶対重力計により地震前後の重力変化が観測されはじめる

絶対重力計を用いて重力変化を観測し、ディスロケーションに伴う重力変化理論を物理的に検証する必要性

絶対重力計を用いた重力変化理論の検証例

- 1998年 岩手県内陸北部の地震
内陸地震において成立
(Tanaka et al., 2001)
- 2000年 三宅島噴火前後
開口断層 火山でも成立
(Furuya et al., 2003)

海溝型巨大地震による重力変化はまだ検証されていない

目的および手段

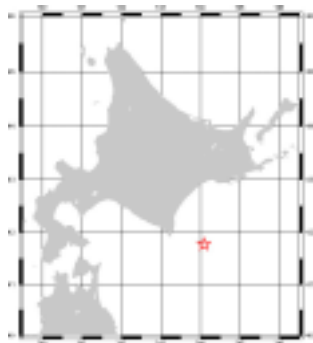
目的・・・海溝型巨大地震における重力変化理論の検証

手段

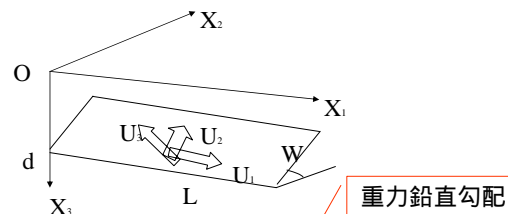
- 絶対重力計、相対重力計を用い、2003年十勝沖地震前後の重力変化を測定
- 断層モデルを求め、重力変化理論を検証

2003年十勝沖地震

- 日時
2003年9月26日
午前4時50分
- マグニチュード
M8.0
- 地震の深さ
約42km
海溝型巨大地震



ディスロケーションによる重力変化理論(Okubo1992)



$$\Delta g(x_1, x_2) = \{ \rho G [U_1 S_g(\xi, \eta) + U_2 D_g(\xi, \eta) + U_3 T_g(\xi, \eta)] + \Delta \rho U_3 C_g(\xi, \eta) \} \| - \beta \Delta h^{fault}(x_1, x_2)$$

$$f(\xi, \eta) \| = f(x_1, p) - f(x_1, p - W) - f(x_1 - L, p) + f(x_1 - L, p - W)$$

観測点(絶対重力)

- 襟裳 北海道大学えりも地殻変動観測センター (山中の坑道内)
- 帯広 帯広畜産大学
- 厚岸 厚岸町社会福祉センター



絶対重力点3点は初であり、非常に広域的な重力変化を観測

絶対重力観測期間

地震前

地震前5年

	測定期間	観測機器
襟裳	2004年9月20~21日	FG5L
帯広	1998年6月15~23日	FG5
厚岸	1998年6月5~14日	FG5

測定点、機種が異なる

地震後

	測定期間	観測機器
襟裳	2003年10月1~4日	FG5(#109)
帯広	2003年10月8~9日	FG5(#212)
厚岸	2003年10月11~12日	FG5(#109, 212)

コサイスミックな重力変化を見積もるためには地震直前までの重力変化を見積もる必要がある

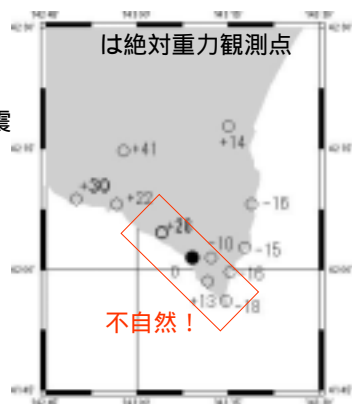
相対重力観測結果

地震前

2003年8月30日～9月1日

地震後 25日
9/26地震

5日
2003年10月1日～4日



を基準とした相対重力変化
(mgals)

不自然!

重力観測風景(1)



帯広畜産大学

重力観測風景(2)



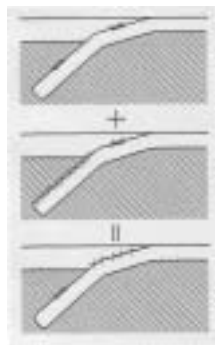
厚岸町社会福祉センター

1998年～2003年地震 直前までの補正

地震・火山活動以外に重力を時間変化させる要因として

- 地下水位変化 見積もりが困難 ×
- プレートの定常的な沈み込みに伴う地殻変動 Backslipモデルによって解析

Savage(1983)のBackslip モデル



定常的なスリップ
+
断層運動に反対向きの
食い違い変位
||
定常的なプレート運動

計算手法

Savage(1983)によると地殻変動、重力変化の経年変化は以下の式で表される

t : 直前の地震からの時間

T : 大地震の平均間隔

$$g(x,t) = -g_1(x,\infty) t/T + g_1(x,t) + \sum_{n=1}^{\infty} [g_1(x,t+nT) - g_1(x,nT)]$$

定常沈み込み 直前の地震 過去の履歴

Hirata et al.(2003)によると千島海溝の

平均地震間隔は77年

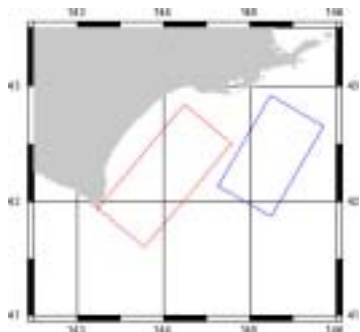
本研究では $T=80$ 年とした

この重力の経年変化をOkuno et al.(2003)で計算

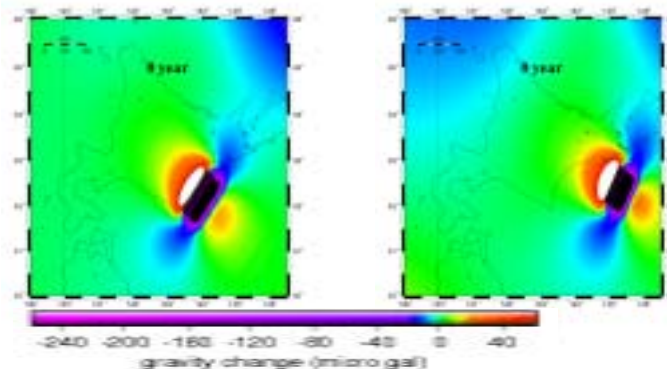
固着域の仮定

本研究ではIto et al.(2000)を参考にし、以下のよう
に固着域を指定

プレートの沈み込み
速度を7.8cm/year
(Seno et al., 1996)
プレート間固着率
0.85として計算



重力の経年変化の様子



地震直前までの重力変化

	地震前重力観測日	地震直前までの重力変化(μgal)
襟裳	2001年9月20～21日	-1.44
帯広	1998年6月15～23日	-2.53
厚岸	1998年6月5～14日	-3.83

襟裳における重力変化

襟裳における重力測定は測定機種、場所が異なるため、以下の2点において注意が必要

(1)地震前に用いたFG5Lと地震後に用いたFG5の機種
の差がもたらす系統誤差
問題なし!

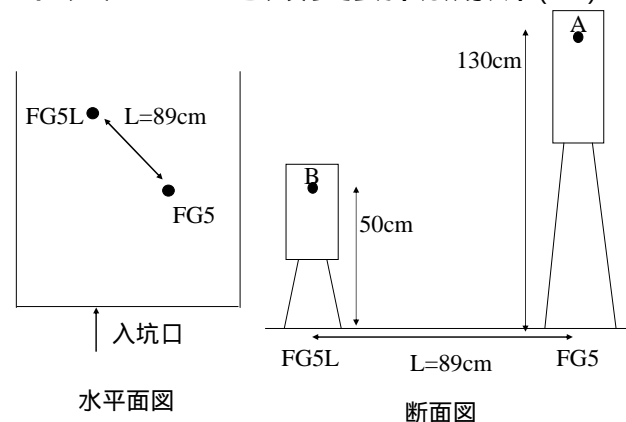
(2)重力測定点の高さがFG5Lでは50cm、FG5では130cmと異なるための**重力鉛直勾配**の影響、および測定点の位置が90cmほどずれていたために**重力水平勾配**の影響

2003年10月25日に相対重力計により再測定

北大えりも地殻変動観測所



北大えりも地殻変動観測所(2)



コサイスミックな重力変化

以上の全ての補正を施した結果、
コサイスミックな重力変化として以下の結果を得た

観測点	緯度	経度	観測値(μgal)
襟裳	42.017 °	143.153 °	+15.4
帯広	42.873 °	143.171 °	+14.3
厚岸	43.038 °	144.848 °	+8.4

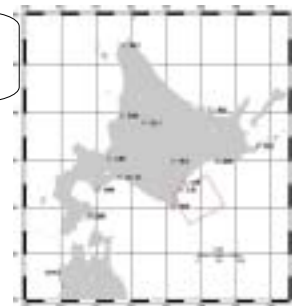
重力変化理論の検証

断層モデルにより説明できるかどうかを検証した

大きすぎる！
>>測定誤差 8 μgal

観測点	観測値	計算値	観測値 - 計算値
襟裳	15.4	57.5	-42.1
帯広	14.3	33.6	-19.3
厚岸	8.4	-0.6	9

理論の過誤もしくは見落としの可能性



緯度(°)	経度(°)	深さ(km)	走行(°)	傾斜角(°)
42.05	144.64	50.8	241	23
ずべり角(°)	長さ(km)	幅(km)	ずべり量(m)	
124	92	90	484	

理論の過誤、見落としの検討

理論式 を吟味する必要

$$\Delta g(x_1, x_2) = \{ \rho G [U_1 S_g(\xi, \eta) + U_2 D_g(\xi, \eta) + U_3 T_g(\xi, \eta) + \Delta \rho U_3 C_g(\xi, \eta)] \} - \beta \Delta h^{fault}(x_1, x_2)$$

数学的に問題なし

ところが、 の値を3.086(μgal/cm)で計算

実測値は2.19(μgal/cm)であったので、

襟裳における上下変動(-18cm)

を補正する必要性

補正した結果

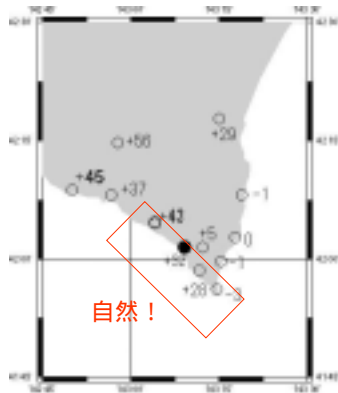
襟裳の「地上」で観測されるべき重力変化として、
15.4 + (3.086 - 2.19) × 18.0 = 31.6 μgal

16 μgalも差が縮まった

観測点	観測値	計算値	観測値 - 計算値
襟裳	+31.6	+57.5	-25.9
帯広	+17.5	+33.6	-16.1
厚岸	+8.5	-0.6	9.1

重力変化理論式には不用意に重力鉛直勾配を3.086(μgal/cm)と固定した値を用いず、**観測して得た重力鉛直勾配を用いるべき**である！

相対重力点の絶対重力変化



は絶対重力点(北大えりも地殻変動観測所)であるが、襟裳「地上」で観測されるべき重力値を示してある

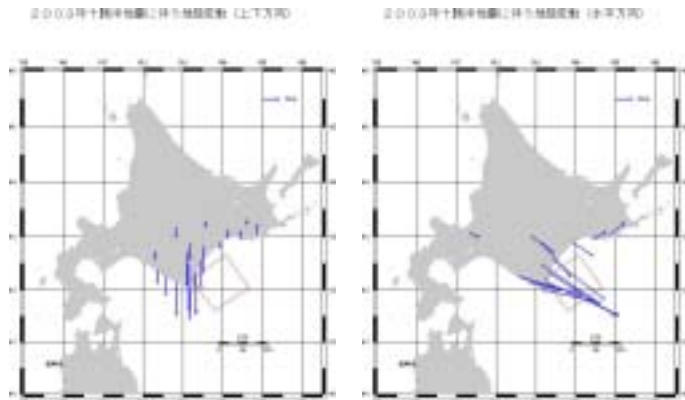
各測定点の絶対重力変化(μ gal)

断層すべりモデルの推定 (インバージョン)

使用したデータ

- 絶対重力点 3点
(襟裳、帯広、厚岸)
- 相対重力点 12点(襟裳周辺)
- GPS 上下変位 20点
- GPS 水平変位 13点 \times 2

GPSによる地殻変動



データ併用のメリット

- GPSの観測点は非常に数が多く、断層面全てを陸側からカバーする
- 絶対重力測定点における重力変化分解能(\sim 数mm)はGPS(上下成分、 \sim 数cm)の分解能より高い
- 襟裳地域においてGPS基準点よりも重力観測点が密に配置されている

インバージョン

$$V_1 = \sum \left(\frac{\Delta g_{obs} - \Delta g_{cal}}{\sigma_g} \right)^2 + \sum \left(\frac{\Delta h_{obs} - \Delta h_{cal}}{\sigma_h} \right)^2 + \sum \left(\frac{\Delta x_{obs} - \Delta x_{cal}}{\sigma_x} \right)^2$$

正規化された V_1 を最小とするようなパラメータを求める

データ数: 60、パラメータ数: 9

$\sigma_g = 15 \mu gal$ V_1 は自由度 $f=51$ である χ^2 分布に従う

$\sigma_h = 20 mm$ $V_1 < \chi_{51}^2(0.05) = 69$

$\sigma_x = 15 mm$ であれば適切なモデルであると言える

とした

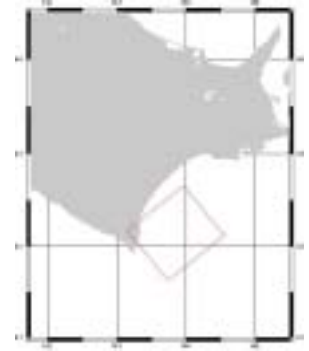
暫定断層モデル

最初の暫定モデルとして一様すべりの一枚断層を仮定して

緯度(°)	経度(°)	深さ(km)	走行(°)	傾斜角(°)
42.05	144.64	50.8	241	23
すべり角(°)	長さ(km)	幅(km)	すべり量(m)	
124	92	90	4.84	

9つのパラメータ

	グリッドサーチ範囲
断層東側下端の位置	42.30°N-43.00°N 143.70°E-144.40°E
走行	N120°W-N150°W
長さ	60km-110km
幅	60km-110km
断層下端までの深さ	40km - 60km
傾斜角	15°-35°
すべり量	2.0m - 5.5m
すべり角	90.0°-130.0°



結果

$$V_1^{(MIN)} = 210.3 > V_1^{(EXPECT)} \dots \text{改良の余地あり}$$

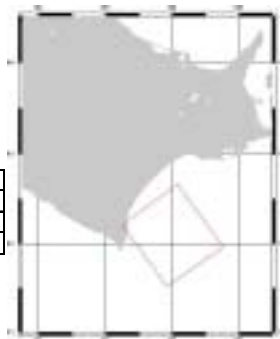
それぞれの残差の標準偏差は

重力(μgal)	上下(mm)	水平(mm)
17.3	28	37

現在の最適パラメータは

緯度	経度	走行	長さ	幅
42.66°N	144.08°E	N130°W	84.2km	106.8km
深さ	伏角	すべり量	すべり角	
53.7km	29°	4.88m	119.0°	

2枚目の断層を仮定する



結果2

2枚目の断層を加えたことにより、自由度が9減り $f=42$ となる。また、

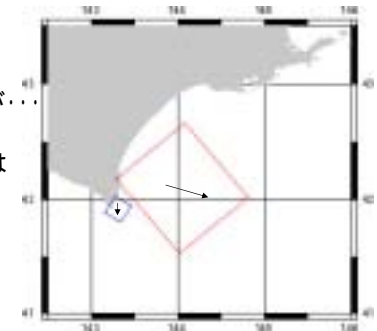
$$\chi_{42}^2(0.05) = 65 \text{ である}$$

$$V_1^{(MIN)} = 178.3 > V_1^{(EXPECT)}$$

まだモデルの適合度はよくないが...

それぞれの残差の標準偏差は

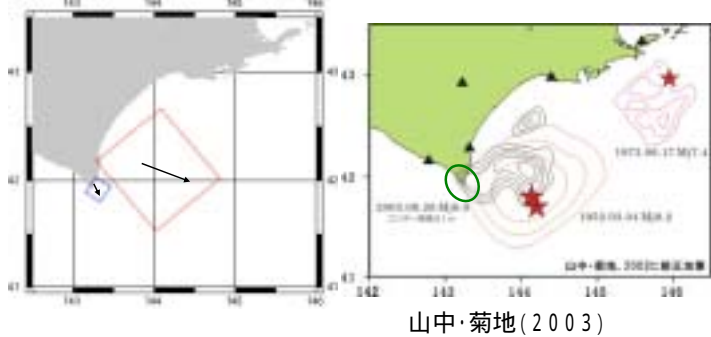
1枚目		
重力(μgal)	上下(mm)	水平(mm)
16.0	28	37
1枚目+2枚目		
重力(μgal)	上下(mm)	水平(mm)
10.9	26	35



他のモデルとの比較

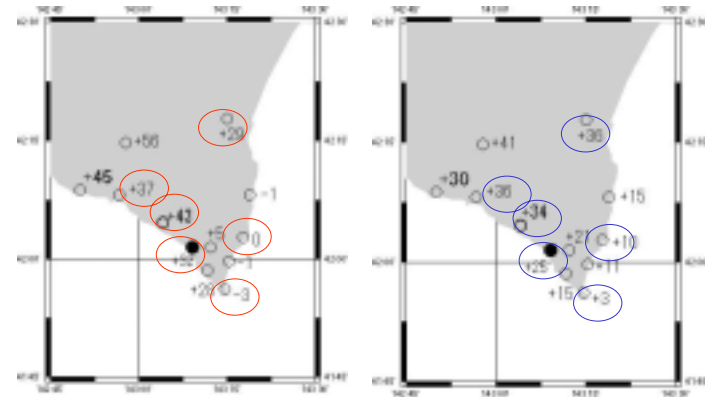
本研究で得られた断層モデル

地震波による解析モデル



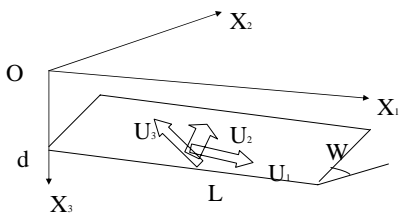
重力変化観測値

重力変化計算値



重力変化理論が成立

観測された重力変化と得られた断層モデルによる重力差が観測誤差内(15 μ gal)に収まった



$$\Delta g(x_1, x_2) = \{ \rho G [U_1 S_g(\xi, \eta) + U_2 D_g(\xi, \eta) + U_3 T_g(\xi, \eta)] + \Delta \rho U_3 C_g(\xi, \eta) \} - \beta \Delta h^{fault}(x_1, x_2)$$

よって海溝型巨大地震においても重力変化理論は成立する

結論

- 重力変化理論式では、不用意に重力鉛直勾配を 3.086 (μ gal/cm) と固定した値を用いると有意な誤差を生じることがある。そのため、その都度観測点における重力鉛直勾配を実測して用いる必要性がある
- プレートの定常運動を仮定して重力の経年変化を見積もることによってコサイスミックな重力変化が見積もれる
- 海溝型巨大地震においても重力変化理論は成立する