

ニュージーランドのフィヨルドでの海面起伏計測記

杉原 光彦¹⁾・西 祐司¹⁾

1. はじめに

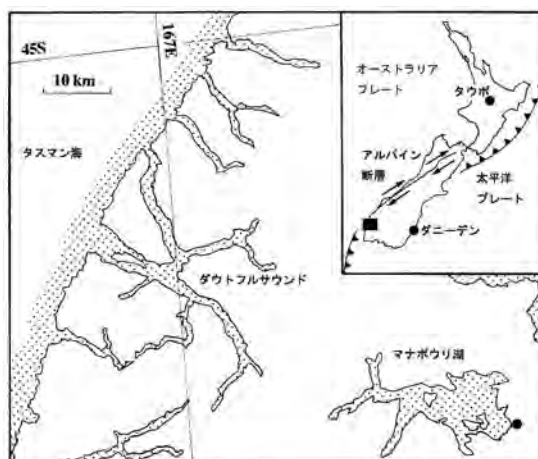
もう13年前のことになるが、我々はニュージーランドのフィヨルドでGPSによる海面起伏計測調査を行った。当時、1995年11月から1996年3月にかけて地質調査所はニュージーランドの地質・核科学研究所(IGNS)と共同でニュージーランドでの調査を実施していた(當舎, 1996)。この時、重力異常構造調査の一環としてタウポ火山帯内の3つのカルデラ湖でGPS調査を行った(杉原ほか, 1996)。タウポ火山帯の中でカルデラ湖は重力データの空白域となっているが、重力異常を反映する湖面の起伏をGPSにより精密測定することで、重力異常構造解析に役立てるのが目的だった。当初予定していた調査の目処が見ついた頃、ニュージーランド国内で地学的に重要な場所でありながら、地上重力データの過疎地域がもう1つあることに気づいた。それは南島南西部を占めるフィヨルド地域だった。そこはプレート沈み込み開始後間もないプレート境界に位置し、ニュージーランド国内最大の重力異常地域でもある注目すべき場所だった(Davey and Smith, 1983; Walcott, 1998)。そこで急遽、日程調整をしてフィヨルドでの予備調査を行うことにした。調査には我々の他に共同研究者のIGNSのステイヴン・シャーバーンさんも加わるようになった。彼とは1992年のニュージーランドホワイト島火山調査以来のつきあいがあり(西・杉原, 1992)、彼の参加は大変心強かった。

2. 調査の目的

ニュージーランドではフィヨルドはサウンドと呼ばれる。フィヨルド地域の地図を眺めるとフィヨルド地域の中心部を占めるダウトフルサウンドの形が目につく(第

1図)。フィヨルド地方の観光地としてはミルフォードサウンドが断然有名であるが、ダウトフルサウンドへのツアーもあり傭船も可能である。何よりも重要なのは重力異常図(第2図)から見て取れるように、ダウトフルサウンドはフィヨルド地域を特徴付ける高重力異常パターンの中心部に位置していることだ。しかも湾は枝分かれして空間的に広がりを持つので、そこでの調査は重力データの不足を補う目的にかなう。もっと南にあるダスキーサウンドも同様の魅力があるが、アクセスに難がある。こうした理由でダウトフルサウンドを調査地とすることに決めた。なお、ダウトフルサウンドの名称は18世紀にキャプテンクックが探検中に湾口を発見したものの「怪しげな入り江だ(Doubtful Sound)」と言って奥に船を進めることを躊躇したことに由来する。

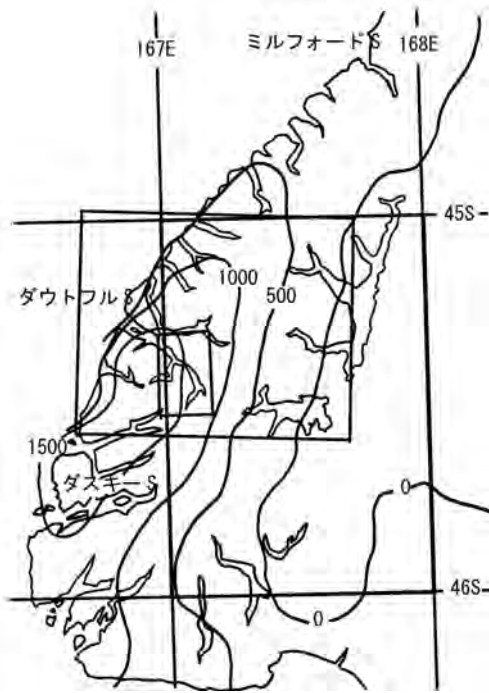
GPSによる水面起伏調査の手法と意味については杉原ほか(1996)でも説明してあるが、ここでも簡単に説明しておく。GPS測量が正規楕円体を基準に高さ



第1図 調査地ダウトフルサウンドの位置図。

1) 産総研 地圏資源環境研究部門

キーワード：ニュージーランド、フィヨルド、ジオイド起伏、重力異常、キネマテックGPS、ダウトフルサウンド

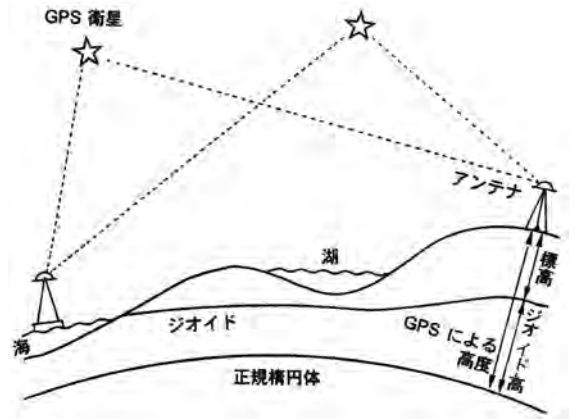


第2図 フィヨルド地方の重力異常図 (Woodward et al., 1978 を改変). 第1図の範囲と第4図の範囲を示した.

を評価するのに対して水準測量で標高の基準となるのがジオイドである(第3図). 球状の天体が自転していれば, 重力は万有引力と遠心力の和になるので, 安定な形状は自転軸に対称な回転楕円体となる. 実際に地球の形も回転楕円体で近似できるが, これが正規楕円体である. 一方, 静止した海水面を想定すれば, それがほぼジオイドに一致するが, ジオイドの形状は単純ではなく, 正規楕円体に対して起伏がある. ジオイド起伏の原因は地下の不均質構造である. 仮に地表下数10km以内の深度Dに過剰質量Mがあれば, その直上点から水平距離H離れた地点での重力異常が,

$$\frac{GM}{(H^2+D^2)} \frac{D}{\sqrt{H^2+D^2}} \quad (1)$$

で表されるのに対し, ジオイドの盛り上がりは



第3図 ジオイドとGPS測定の関係.

$$\frac{GM}{g\sqrt{H^2+D^2}} \quad (2)$$

で表される(萩原, 1982). ここでGは万有引力定数であり, gは地表の平均重力である. 2つの数式の比較から推定できるように, 重力異常の方がジオイド起伏よりも地下の不均質構造に敏感である. 重力異常データがあれば, それを使って地下構造を推定するのであるが, 重力異常データがなくてもジオイド起伏が分かれば, ある程度は地下構造を推定できる. 今回の調査の目的は, この点に注目して, 重力データが不足しているフィヨルド地域で重力データを補完できるようなジオイド起伏データが得られるかどうかを試してみることであった.

3. ダウトフルサウンドに着くまで

観測機材に関しては北島での湖上GPS調査で使用していたものをそのまま使用することとしたため, 準備は容易だった. 最大の問題は服装だった. 南半球のニュージーランドでは南に行くほど寒くなる. 南島南西部のフィヨルド地域は日本で言えば北海道北部に相当し, 夏でも寒い日がある. まして3月中旬ともなれば季節は秋になっており, 天候と海況によっては相当厳しい状況も想定しておく必要がある. タウポ市内の衣料品店で相談したところ, 昔, 羊飼いが寒い季節に着用していたという厚手のコートを勧められた. 内側がウール生地地で外側は油を浸み込ませた綿生地できていて, オリーブ色で重々しい外観はダウトフル

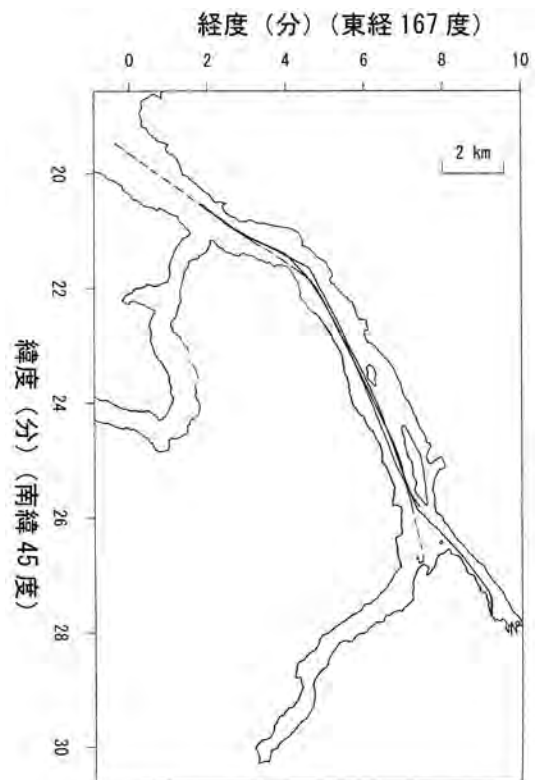
サウンドに相応しく思えたので勧めに応じて購入した。

各自、準備を終えて1996年3月12日の午後に南島南部の中心都市ダニーデンの空港で合流した。当時滞在していた北島のタウポから調査地へ向かうにはクイーンズタウン経由が最短経路であったが、クイーンズタウンは観光の中心地であることから航空賃は高く、機材の輸送にも不便であったため、ダニーデン経由で現場に向かうこととしたのだった。また急遽決まった調査であったため、タウポではすぐに入手できなかった資料もダニーデンならば入手を期待できた。西は前日の内に市内に入り朝から情報収集に動いた。DOSLI(国土地理院に相当する組織)の支所で詳細な地形図を入手し、GPS連続観測点の有無を尋ねた。市内の大聖堂前では大学関係者によるGPS測量の現場に立ち会えた。

調査用機材を積み込んでレンタカーで西に向かった。途中、クリントンという小さい町で休憩し、日没後しばらく走ってゴア市に到着した。この季節の南島の宿は予約せずとも空いているはずだから走れるところまで行って近くのモートルを探せば良い、とのシャーパーンさんの目論見は外れ、ゴア市街のモートルは軒並み「空室なし」表示だった。これから先は田舎道と諦めかけた時、シャーパーンさんは1軒の「空室なし」のモートルに入り、さらにしばらく走った先の町外れのモートルに空室があることを聞き出してきた。やっと見つけた宿に入り、遅い夕食をとりながら、これで次の米国大統領はゴアに決まったなどと軽口をたたいた。当時の米国大統領はクリントン氏でゴア氏は副大統領だった。大統領選で敗れた後、地球環境問題でスターとなってノーベル賞を受賞するというゴア氏の運命は思いもよらなかった。

翌朝、早々に出発し、9時半にマナポウリ湖畔にある旅行会社に到着した。諸手続きの後、指定された水上タクシーに機材を積み込み我々も乗船した。ボートはマナポウリ湖をものすごいスピードで横断した。水しぶきを避け動揺に身構えながら、フィヨルド調査への期待をふくらませていた。このスピードが出せればダウトフルサウンドを走破してタスマン海に出て、さらに南の奥深くに切れ込むダスキーサウンドまでも行けるのではないかと。

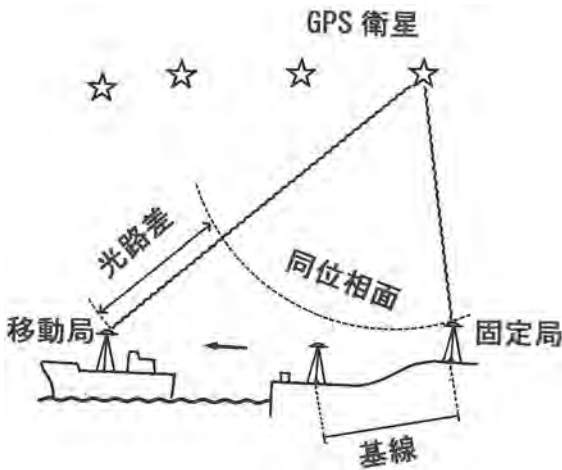
対岸に着いてしばらくすると、オフロード車で船長が迎えに来た。峠を越え、ついにダウトフルサウンド



第4図 航跡図。1回目の調査の航跡を破線で、2回目の調査の航跡を実線で示す。

に到着した。ダウトフルサウンドは別名「サウンドオブサイレンス」と呼ばれているとのことだったが確かに静寂さは神秘的ですらあった。調査船に1人残っていた助手のマオリの青年が我々を迎えてくれたが、他には誰もいなかった。シャーパーンさんに、もしも日本だったら「サウンドオブサイレンス」の曲がスピーカーから流れているかもしれないね、と言うと、日本の事情もよく知っている彼は微妙な表情を浮かべた。

サウンドオブサイレンスの魅力に浸っている間もなく、すぐに調査船に機材を積み込み出発した。最初の目的地は3kmほど先にある二股付近の岩礁だった(第4図)。ダニーデンで入手した詳細な地形図を眺めていて、三方に向かうことができ上空も開けており、基地とするのに相応しいと思って目星をつけた場所だった。そこは満潮時にも沈むことはないという船長のお墨付きも得て基地とすることに決定した。そこに直接調査船を係留することはできないので連絡ボートを下ろして機材とともに乗り込み、岩礁に向か



第5図 船上GPS調査の観測形態.

った。着いた先は適度な広さがあり、上空も十分に開けていて基地に適した場所だった。周囲をぐるりと眺めて、まさにサウンドオブサイレンスの真っ只中になると感じた。

4. 調査内容

調査は連続キネマテックGPS法を利用してひたすら海上を航行することだった。杉原ほか(1996)の説明を繰り返すことになるが、測定の原理と手順を簡単に述べておく。予め位置関係の分かっている基線の両端に2台のGPS受信機を受信状態にしておいた後、受信状態を保ったまま1台の受信機を移動することで、その受信機の時々刻々の位置を決定する(第5図)。ボートに設置したGPSアンテナが海面に対して一定の位置関係を保っていれば海面起伏を測定できることになる。GPSで高精度測量する場合はGPS信号の搬送波を比較する。GPS衛星から各観測点までの光路差に含まれる搬送波の波数の差で観測点毎の光路差を評価する。搬送波の波長は約20cmなので位相比較によって約1cmの精度も達成できるのである。測定開始時に既知地点での受信によって位相の対応付けがなされれば以後も受信が継続する限り位相の対応付けも維持される。4個以上のGPS衛星からの信号が途切れなければ3次元位置を連続的に決定できる。

岩礁に設置した2つの三脚に2台のGPS受信機を設置して基線と定めた。基線の位置関係を算出する



写真1 1回目の測定の基地局の様子。設定した基線の両端には三脚が立てられ、手前の三脚は固定点のGPSアンテナが載っている。標尺は潮位計測のために使用した。

ための30分間の静止測量を行った後、いよいよ1回目の調査開始となった。受信機はいずれも日本から持ち込んだトリンプル社製4000SSEである。サンプリング周期は2秒に設定した。潮位変化のモニターは測量用標尺を波打ち際に固定して、潮位を読み取ることにした(写真1)。潮位を読み取って記録するために一人は基地に残らなくてはならない。フィヨルドの岩礁にいる方が得がたい体験ができると期待した杉原が基地に残った。できるだけ湾口に近づいてみる、という声を残して西が移動用のGPSアンテナとともに連絡用ボートに乗り移った。GPSアンテナを捧げ持つような西をのせたボートを漕ぐのは、物静かだが精悍なマオリの青年。まるで映画の1シーンのような情景だった(写真2)。調査船にGPSアンテナを移してセットした後(写真3)、ボートを引き上げて調査船は出発し、やがて調査船は杉原の視界から消えた。杉原は時々、海面位置に対応する標尺の目盛をメモし、GPS受信機の表示を確認する以外は他にすることもなく、静謐なサウンドオブサイレンスの世界を堪能していた。2時間が経過した頃から潮位の上昇が気になってきた。岩礁が水没するのを感じるようになった。命の



写真2 1回目の計測で、基地局から調査船までボートでGPSアンテナを移動中の様子。



写真3 調査船上にセットしたGPSアンテナ。アンテナの奥に岩礁の基地が見える。

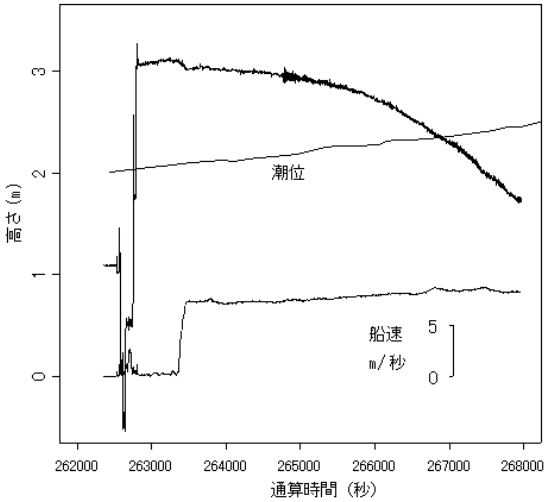
次に大切なのはGPSの受信記録である。基点のGPS記録を失えば船上のGPS記録も無駄になる。いよいよ危なくなったらGPS受信機をかかえて最寄の岸まで泳いでいこうと周囲の地形をあらためて真剣に見回した。幸いGPS受信機は防水仕様で水にも浮くようにできているから岸边に達するのは簡単そうだが、フィヨルド特有の立ち上がった地形が上陸を阻みそうだ。それでも何とか上陸できそうな地点の方角は見定めておいた。さらに潮位が上昇し、あと数十分後には避難行動開始かと思った時、視界に調査船が入った。調査船はダウトフルサウンドの十字路に出たところで揺れ始めたが、そのまま進み湾内の島の手前で引き返した。岩礁に近づいているはずなのになかなか岩礁が確認できず船速を上げた。ようやく、わずかに頭を出している岩礁上に人影を認めた(写真4)。本来であれば、調査船上のGPSアンテナを岩礁上に設定した基線の端点の三脚に戻して数分間受信してから測定終了となるのであるが、時間的余裕がないと判断してGPSアンテナは調査船に残したまま連絡ボートが出された。機材をすばやく片付け、杉原は岩礁を後にした。調査船に戻って一息つくと、フィヨルドの中に頼りなく浮かぶ岩礁に古風な外套に身を包ん



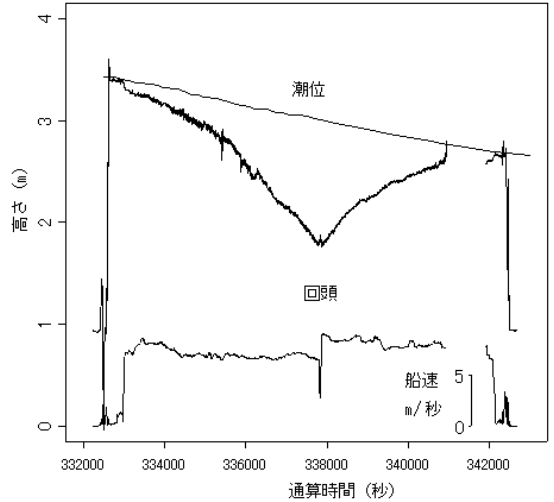
写真4 1回目の調査の基地局を置いた岩礁と周辺。1回目の調査を終了するために基地に戻ってきたら、岩礁は水没直前だった。

でたらずむ杉原の姿は絵のようだったと西が言った。残念ながら写真4以降の近影写真は無い。撮影する余裕がなかったのだった。

1回目の調査では湾口方面に向かったものの船速を期待したほど上げられず、湾口のはるか手前で引き返すこととなった。岩礁を基地とした動機の一つともなった別の湾奥への調査は断念せざるを得なかつ



第6図 1回目の調査の結果、計測された海面高度の時間変化、基地での潮位計測値も示した、船速の時間変化も示した。



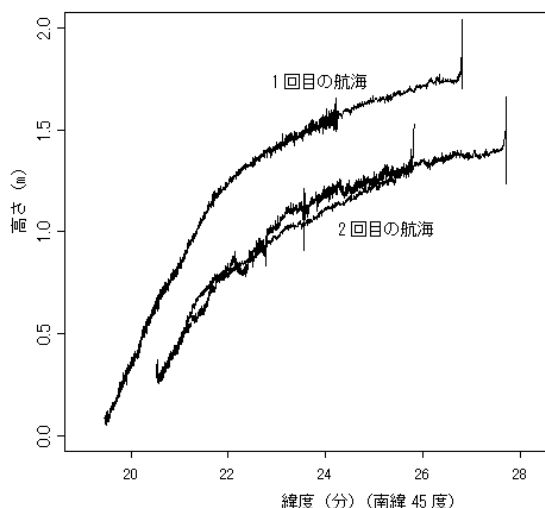
第7図 2回目の調査結果、計測された海面高度の時間変化、基地での潮位計測値も示した、船速の時間変化も示した。

た、残された時間を考慮すると2回目で調査は終わりになる、1回目の調査の航跡に沿って往復測定を行って、その測線の評価をできるようにすることにした。安全と撤収時の便を考慮して基地をダウトフルサウンドへの道路の終点近くの海岸に移すことにした。2つの三脚に2台のGPS受信機を設置して30分間の静止測定の後、2回目の調査を開始した。調査船が出て行った後、残った杉原が潮位をメモしていると、釣客と思われる一団がやってきた。その中の1人がGPSアンテナが外されて正準台がむき出しになった状態の移動局用三脚に近づき、正準台の接眼レンズを覗いて首をかしげた。正準台はアンテナを水平に保つためのものだが、地面の目印に合わせるための接眼レンズが望遠鏡の一部に見えたようだ。すぐに接眼レンズの延長上の対岸の風景ではなく、三脚直下が見えていることに気づいて爆笑した。彼らが去って静寂が戻った。調査船の方は出発後1時間20分が過ぎた時点で方向を転回した。フィヨルド内は穏やかで波はなく、ほとんど揺れは気にならなかった。船内ではシャーバーンと西が北島での調査結果を検討していた。途中、1回揺れた。別のボートとすれ違うため航路を岸に寄せたのだった。出発地に戻った後、移動アンテナを基線の一方の三脚に3分間静置して測定は終了した。機材を車に積み込んでダウトフルサウンドを後にした。

峠で振り返ると白く輝くダウトフルサウンドが見えた。

5. 調査結果

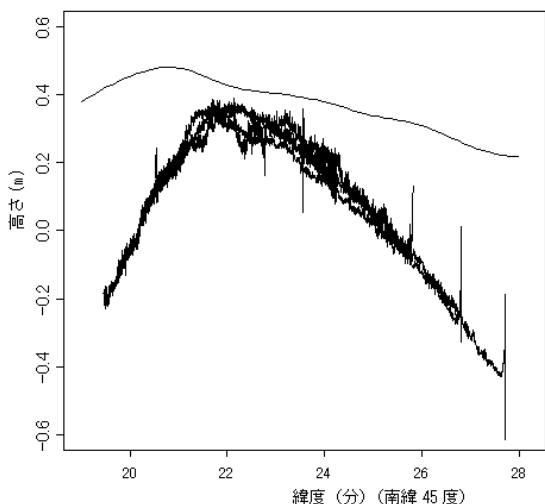
2回の測定によって得られたデータは受信機に付属のソフトウェアTRINVECで処理した。第6図に1回目の測定データの処理結果を示した。横軸に時間軸をとり、アンテナ高の変化と船速の変化を示してある。標尺を利用して計測した潮位の時間変化も一緒に示してある。最初に陸上に設けた基線の端点で約3分間静置後、調査船にアンテナを移し、北西に向かったのがあったが、回頭する前にダウトフルサウンドの十字路に出たところで受信が途切れている。到着後にアンテナを基点に戻していないので遡って処理をすることはできなかった。船速は約7m/sでほぼ一定だった。第7図は2回目の測定データの処理結果である。1回目と同様であるが、今度は回頭後も受信は継続していた。帰路の途中で受信が途切れてデータ処理ができなくなったが、到着後に再び基点で静置した時のデータから遡って処理した。しかし到着直前の船速を落とす際にも受信が切れており空白期間は残った。最初に受信が途切れたのは、すれ違うボートを回避した時に対応する。恐らくは例の釣客の一団が乗っていたと思われるが、彼らは沖合いでも一騒動起



第8図 1回目と2回目の調査結果から、水面起伏を航跡の緯度に対して示した。

こしていたことになる。処理できた区間の水平位置を第4図に航跡として示した。データから海面の時間変化成分と測定誤差を評価するために、通常は1回の測定では往復で同一経路を通ることを基本としたが、今回は1回目の復路のデータがないため2回目も同一航路をとった。実際に航跡はほぼ重なっている(第4図)。第8図では緯度を横軸にしてすべてのデータについて高さ変化を比較した。基地局で測定した潮位変化を差し引いて示してある。2回目の調査については往復で高さの差が見られる。基地局と湾内の他の地点での潮位変化の差と思われる。湾内の水位が振動するセイシュ現象も含まれていると考えられる。この区間は往復の航跡で水平方向に100-200mのずれがあるので、その影響も考えられる。1回目の調査結果とも比較すれば、2回目の差は潮位変化の差の可能性が大きく、その影響を差し引くことでジオイド起伏に相当すると思われる海面起伏成分を評価できる。既存重力データから推定されたジオイドと比較すると、第8図からグローバルなジオイド成分を差し引いた起伏は既存重力データから推定された広域成分の他に明白な残差成分がある。これが既存重力データでは認められなかったローカルな重力異常を反映していると思われる(第9図)。

今回の調査はフィヨルド地域の重力データを補足するための予備調査という位置づけであったので、調査結果に基づいて今後の調査方法について検討し



第9図 1回目と2回目の測定結果によって得られた海面高度起伏を航跡の緯度に対して重ねて示した。見やすくするためにグローバルなジオイド成分に相当する1次成分は除いた。既存の地上重力データから推定されるジオイド起伏も示した。

た。今回使用した調査船は安定性があるので外洋に近い領域も調査できるものと期待したが、外洋に出る前にフィヨルドが十字に分岐して広がっている部分で受信が途切れる程度に揺れた。また船速はタウポ湖調査時の半分より上げられず、予想以上に調査時間がかかった。一方、タウポ火山地帯のカルデラ湖と違って、フィヨルド特有の急峻な地形はGPS信号の連続受信の障害になりやすい。また、航路が限定されていて測線の交点を設けにくいのでデータ処理の際に潮位変化成分を評価する上でも不利である。フィヨルド地域の調査に関しては、海面を走り回ることに専念するのではなく、基地になりそうな場所では重力測定も行うこととし、基地間の移動の際に連続キネマテックGPSデータ取得を行うのが現実的である。GPSで位置決めをして重力測定することがまだ一般的になっていなかった当時のニュージーランドでは、その有効性が高いと思われた。1回目の調査で基地とした岩礁で重力測定できれば有意義だったのだが、携行した重力計が借用品であったため、ボートで移動する際のトラブルの可能性に躊躇して測定を控えた。自分達が管理する重力計であればそこで測定することは可能であった。調査航海中に基地に使用した岩礁の他にも複数の有望地点を目にした。中でも1回目

の調査で回頭地点の近くにあった島はフィヨルドの交差点付近に位置することもあって特に有望だった。

6. おわりに

今回示した調査結果の概要は、その年の秋に東京で開催された国際シンポジウムで予察結果として発表した。このデータだけでは十分な構造解析はできず、しばらくは再調査の機会を窺っていたが、その機会はないまま時は過ぎた。しかし調査自体の印象は強く、今も記憶に残るので、こうして調査記としてまとめた次第である。後日ダウトフルサウンドなどの年代測定データと重力異常を動力学モデル計算により関連付けてプレート沈み込みの初期段階を議論した House *et al.* (2002) の論文に目を通した時、引用された重力異常図を見て、あの時、もう少し時間をとってあれば、ここで比較対象となっていたかもしれないと残念に思った。しかし今、こうして当時を振り返ってみると、あの調査はむしろ僥倖だったと言える。ぎりぎりの調査日程の合間をぬって実行したものであって、やっと1本の測線データが得られたのだった。事実、ダウトフルサウンドからタウポに戻ってすぐに北島沖合いのホワイト島火山の地形図作成のための測量を実施し(安田ほか, 1996)、他にも地熱地帯での野外調査を行ってから荷造りをして3月21日に帰国というタイトなスケジュールだった。

水面起伏調査は1993年から各地で行っていたが、このフィヨルドでの調査が最後になった。この頃はGPSもまだ特別な装置でキネマテック測量も目新しかった。各地の調査結果を内外の学会で発表すると調査の面白さに共感してくれる人も多かった。ジオイド面に相当する水面を直視しながら走り回って、地下構造によるわずかな起伏をGPSで検出するという測定は重力“場”をまさに体感しているようだった(もともと鹿児島湾での調査(Sugihara and Komazawa, 1996)の時の船長は、そのような海面の起伏は昔から感じていたと言っていたが…)。その後、人工衛星か

らの測定による水面起伏データは質量ともに向上し、重力衛星も登場して、ここで述べたような調査の必要性は薄れたと思っていた。しかし、本稿をまとめながら、本調査の可能性について再検討してみるのも良いかもしれないと思い始めている。

なお、重力衛星の成果を含むニュージーランドのジオイド評価についてはAmos (2007) が言及している。

謝辞：一緒に調査に加わっていただいたシャーバーンさんに感謝します。

引用文献

- Amos, M. J. (2007) : Quasigeoid modeling in New Zealand to unify multiple local vertical datums, PhD thesis, Curtin University of Technology, 263pp.
- Davey, F. J. and Smith, E. G. C. (1983) : The tectonic setting of the Fiordland region, south-west New Zealand, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 72, 23-38.
- 萩原幸男 (1982) : 測地学入門, 東京大学出版会, 205pp, 東京.
- House, M. A., Gurnis, M., Kamp, P. J. J. and Sutherland, R. (2002) : Uplift in the Fiordland region, New Zealand: Implications for incipient subduction, *Science*, 297, 2038-2041.
- 西 祐司・杉原光彦 (1992) : ニュージーランドホワイト島火山微小地震観測記, *地質ニュース*, 457, 34-49.
- Sugihara, M. and Komazawa, M. (1996) : A kinematic GPS survey at the Northern part of Kagoshima Bay, Japan, *IAG Symposia*, 115, 217-221.
- 杉原光彦・宮崎純一・駒澤正夫 (1996) : 湖上GPS調査によるジオイド起伏計測, *ニュージーランド, タウポカレラへの適用*, *地質ニュース*, 507, 33-44.
- 當舎利行 (1996) : ニュージーランドでの地熱・火山の共同研究, *地熱*, 33, 33-49.
- Walcott, R. I. (1998) : Modes of oblique compression: late Cenozoic tectonics of the South Island of New Zealand, *Rev. Geophysics*, 36, 1-26.
- Woodward, D. J., Reilly, W. I. and Doone, A. (1978) : Sheet 27, Fiord, Gravity map of New Zealand, 1:250000, Bouguer anomalies, DSIR, Wellington.
- 安田 聡・西 祐司・杉原光彦 (1996) : ニュージーランド, ホワイト島火山の地形図作成, *地質ニュース*, 506, 35-41.

SUGIHARA Mituhiko and NISHI Yuji (2009) : A trial of GPS measurement in Doubtful Sound, New Zealand to evaluate geoid undulations.

<受付：2009年5月22日>