

# 伊勢湾北部の重力探査と海底重力計

中条 純 輔

## §1 海底重力の発展と伊勢湾の重力探査

物理探査がほとんどすべて陸上で探査技術を開発し海洋に適用されるようになったのと同様に 重力探査も陸上で開発された技術である。しかし重力探査ではそれを海洋にも使えるようにすることがひどくむづかしかった。その理由は海の上では動かない台を作ることが非常にむづかしいからである。重力は加速度である。従って船の揺れのような加速度と力学的には同じものである。ただ同じ加速度でも異なっている点は 重力の時間変化や空間変化が非常に小さく ほとんど一定値（直流分）なのに 船の動揺は5—10secの周期が卓越していることである。このような状況で海洋の重力を測れるようにした技術には2つの道があった。1つは船の上で船の揺れのような外部の雑音に打ち勝って測定する方法であり いま1つは重力計を海底に降ろし 静止させて測る方法である。

海洋において重力を測定し地質学上に大きな貢献をした人にベニング・マイネスがいる。彼はスダ列島の周辺の海で重力を測定し 島弧と海溝の構造やさらに成因を議論し ここで海の重力測定の意義を大きく打出している。彼の測定方法は振子をふってその周期から重力値を計算するものであり 海の波の影響をさけるために潜水艦で深くもぐっている。海面の波の振幅は深さと共に指数関数で減少するので外力はかなり減る。さらにここでジンバルで支えた器械の中で振子をふったのである。日本でも戦前に松山基範が同じ原理で潜水艦により重力を計ったことは有名である。戦後しばらくして1950年ごろからこの潜水艦による方法は急に衰え 船上重力計が発達してくる。

他の1つの方法である海底重力計は 米国で油田の調査などに用いられた。物理探査として用いられる重力計は振子を用いずスプリングののびによるものである。これは小形で簡単であるが 振子のように絶対値は分からず相対値のみが分かる。重力計を海底に静止できれば 陸上重力計はそのまま海底に使える。海底重力計は1941年に米国のガルフ社で作られた。その後海底重力の測定には缶を用いたこともある。これは大きな円錐状の鉄容器に重力計と測定手である人間を入れて海底

に降ろし重力を測定した。測定技術としては真に原始的な発想法であるが 海底の底質の視察や撮影ができる利点がある。この方法は缶が人間を入れるためにかなり大きくまた保安上の問題もあって現在では用いられない。現在用いられているものは水平をとったり測定したりすることをすべて船上から遠隔操作で行なっている。

日本で始めて海底重力計が用いられたのは 1956年に地質調査所が米国のノース・アメリカン社のUW-2Rを用いたことに始まる。続いて石油資源開発株式会社も同じ器械を購入して裏日本の油田地帯を調査している。こうして1950年代の末から60年代の始めにかけて 九州の有明海 大村湾 角力灘 日本海の秋田沖 新潟沖 陸奥湾南部などで重力探査が行なわれた。

一方船上重力計は海洋研究所の友田好文教授を中心として TSSGという重力計 (Tokyo Surface Ship Gravimeter) が発達し 日本近海でも大いに測定が進む。しかしこれは後述するような海底重力計の精度には遙かに及ばず 測地学的な目的で広い区域に用いられた。外国では米国の La Coste 社とBell社 ドイツの Askania 社が船上重力計を作製し使っている。

1968年に石油公団は La Coste 社のH型海底重力計を輸入し 東南アジアで石油の探鉱のために重力探査をしている。この装置の測定原理は古いUW-2Rと大筋は同じであるが 器材として優れているし 能率もよくなった。この La Coste 社の装置を用いて 1970年の夏に伊勢湾北部の海底重力の測定を行なった。これが数年の間途絶えていた日本の大陸棚の海底重力測定の復活のいとぐちになることを願っている。

伊勢湾は濃尾平野や伊勢平野とともに中新世以降の堆積盆であり 特に鮮新世から洪積世にかけてのいわゆる東海湖と呼ばれる淡水の地層は厚く分布している。この濃尾 伊勢湾の基盤の形態はこの地質を理解する上で重要である。重力探査は基盤の構造を理解するに有用な方法であり 濃尾平野 伊勢平野 岡崎平野を中心とする陸上では 既に10年以上前から行なわれてきている。その範囲は西は鈴鹿山脈から関が原のあたり 北は濃尾平野の北端まで 東は豊田から浜松を経て御前崎

に及び 南は遠州灘の海岸ぞいに渥美半島から伊勢湾口をへだてて鳥羽に到る広い区域である。この探査は地質調査所が行なったもののほかに名古屋大学や帝国石油株式会社が行なった区域もふくまれる。この10,000km<sup>2</sup>におよぶ区域の中で伊勢湾と三河湾は中心的な位置であるにもかかわらず従来探査されてはいなかった。それで伊勢湾の地質構造を明かにするとともにこの大きな堆積盆を中心とする区域の重力的な形態をまとめることを目的にして伊勢湾の重力探査を行なうことにした。

伊勢湾と三河湾は面積2,150km<sup>2</sup>の広い内湾である。これを予算のつごうもあって2回に分けて行ない初年度の1970年には伊勢湾北部の探査を行なった。その範囲は名古屋 四日市 津 松阪 知多 常滑の各港をふくみその南限は知多半島の内海町と対岸の三重県松阪港を結ぶところである。

現場の作業は70年の8月の暑い日々に行なわれた。33トンの船の後甲板にウインチと重力計の沈水部を取付けた。制御部は船室に備えた。測量はオーディスターという電波測量機で行なっている。作業日数による能率は13点/日ていどであった。

本文の前半では海底重力計の説明を行なう。そして後半では伊勢湾北部の重力探査の結果とその解釈をのべることにする。

## §2 海底重力計と船上重力計

本調査には海底重力計が用いられた。それは海底重力計が最も目的に適しているからなのであるが、この点を明かにしつつ海底重力計を理解するためために陸上重力計と海底重力計と船上重力計の3つの概要を比較していく。

海底重力計の測定原理は陸上重力計と同じであり重力計の受感部 sensor を防水した沈水部に入れて海底に降ろしすべて遠隔操作で測定する。陸上重力計より海底重力計の方がすべて容易で簡単なのであるがただ一つ海底重力計の方が便利な点は水深を測れることである。水深は水圧を測って求める。陸上では高さを測ることを重力測定とは別に行なわねばならないので不便であり費用もかかる。

船上重力計を海底重力計と比べて最も根本的な違いは海上では動かない場所を作ることができないということに起因している。水平を保つことを海底重力計は遠隔操作で行なうが船上重力計では動く水平面ではあるが水平面を作りこの水平安定台とよぶ水平面上で垂直

加速度を測定する。

陸上と海底重力計の測定原理にはバネ spring を用いている。バネの先に質量 $m$ を付すとバネには $mg$ の力が加わる。 $g$ は重力値である。この力はバネのひずみと釣合う。この釣合う点をゼロ点法で読取る。船上重力計にはバネと絨 string の2種類の方法がある。絨による方法は絨に質量を付して磁場の中に入れ発振回路を作って絨の個有振動の周波数を測る。周波数の自乗は垂直加速度に比例するのでこれから垂直加速度の瞬時値を求めたくさんの垂直加速度を平均して重力値を求めるのである。海底重力計の精度は陸上のそれと同じで0.03m-galであって船上重力計よりはるかによい。船上重力計の精度は10~1m-galであるから2ケタ悪い。ドリフト(バネの復元しないノビ)はラコスト社のものは非常に改良されて0.1m-gal/月にまでなったが船上重力計ではこれより悪い。

海底重力計は現在製作されている最も深いもので330mまで使える。これは大陸棚の外側をふくむ深さである。しかし海底重力計は実用上は浅海や内湾に適した方法であり原理的にはいかに深い所でも測れるが実用上は200mよりも浅い所がよいと思う。船は内湾では30tonぐらい外洋の大陸棚では100tonぐらいが適当である。船上重力計は1,000ton以上の船の最も振動の少ない部分に取付ける。船の大きさから極浅海は測れないが航行できる海上のどこでも測れるわけである。海底重力計の場合は重力探査を目的として行なうわけであるが船上重力計の場合には船が大きいので重力測定以外にも多目的に使われることが多くまた夜間をふくめて連続観測をすることが多いことや測定精度が悪いことから実際上の重力探査の適用方法としてはかなり違っている。

陸上と海底重力ではある点で重力値を測定するが船上重力計では数1000点の垂直方向の加速度の瞬時値の平均値として重力値を求める。1秒2回の瞬時値1000点で1つの重力値を出せば約8分ごとに1つの値を測定するわけでありこの時船が10ノットなら2.5kmの間の平均値として1つの重力値が分かるわけである。瞬時値を平均して船の動揺などの加速度(交流分)を取り除き重力値(直流分)だけを取り出す処理は電算機で行なう。この処理は海底重力計には全くない段階である。

重力値の補正は陸上と海底ではよく似ている。陸上では高度補正 緯度補正 地形補正を行なう。海底では水深補正 潮位補正 緯度補正 地形補正を行なう。

表1 重力測定法の比較

	陸上重力	海底重力	船上重力
受感部の測定原理	パネののび	パネののび	絛の振動 スプリングの2種がある。
測定精度	0.03m-gal	0.03m-gal	1m-gal
ドリフト	0.1m-gal/month	0.1m-gal/month	1m-gal/month
補正	高度補正 緯度補正 地形補正	水深補正 緯度補正 (ふつつ海底地形は補正しない) 潮位補正	エトベス補正 緯度補正 潮位補正
適用深度	—	200m以浅	海上(極浅海を除く)
レベリング	手動	遠隔操作	ジャイロスコープによるサーボ
船の大きさ	(ジープ)	内湾 30ton 外洋の大陸棚 100ton	1,000ton以上
測定状況	三脚の上でレベルをとって測る。	船を停止し 投錨し 海底に降ろして測る。	船は走りながら測定する。
測定点	点	点	数1000点の平均値
処	—	—	瞬時値数1000を電算機で処理する。
理	—	—	船の速さによる(夜間も連続測定)
率	30点/日	15点/日	—
能	—	—	—
量	10kg以下	1ton 水中部分150kg	2ton
概	—	—	—
略	数100万円	千数百万円	数千万円

表2 海底重力測定と船上重力測定の性質の違い

	海底重力	船上重力
1 適用範囲	内湾 大陸棚	外洋 深海
2 観測船と重力計	小さい(搬入型) 30-100ton	大きい(据置型) 1,000-5,000ton
3 作業範囲	日中	夜もふくめて連続測定
4 共同観測	ふつつ行なわない(採水 採泥の併用は容易)	磁気探査や音波探査と併用することが多い。
5 測定精度	よい 0.03m-gal	悪い 1m-gal
6 測定の精度	高精度を要す。	ある範囲の平均値で重力を求めるので測定の精度も悪くてよい。
7 処	船上では読取りままで 処理は行なわない。	電算機と on-line につなぐ 緯度 方位 水深などとともにフリーエアー異常 ブーグ異常まで求める。

ただし地形補正は陸上ほどには重要性がないので省略することもある。船上重力計では水深補正が要らず緯度補正とエトベス補正を行なう。エトベス補正は船の運動が地球の自転と重って遠心力を変えるために生ずる補正項であるから 止って測る場合にはゼロになる項である。従って船や飛行機などで測る場合だけ問題になる。陸上と海底と船上の3つの重力測定を比較してみると表1のごとくである。

作業能率は陸上重力計が30点/日ぐらいなのにくらべ海底重力計はその半分の15点/日ぐらいである。これは測定点の間隔や海の深さや船の機動性などでかなりちがうので大体の目安といえる。船上重力計の場合は点数としてより測線長として考える方が妥当であろう。10ノットで24時間走れば240マイル測定するわけであり10分に1回測れば144点/日測定するわけである。

装置の価格も方式によりかなり異なり 陸上重力計より海底重力計は数倍高価であるが 船上重力計はさらにその数倍高価であって1億円近くもする。

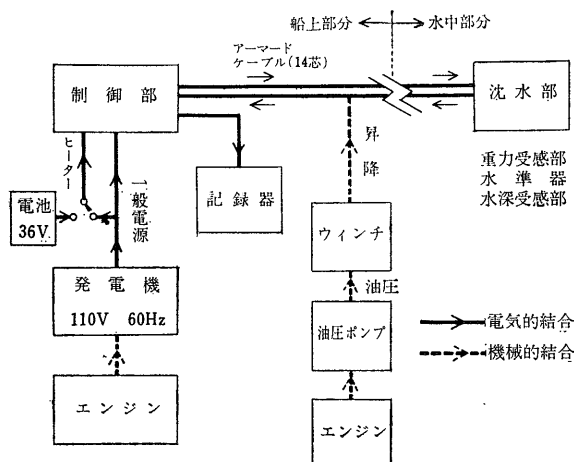
これらをまとめてみると同じ海洋の重力測定とはいっ

表3 陸上重力測定と海底重力測定の性質の違い

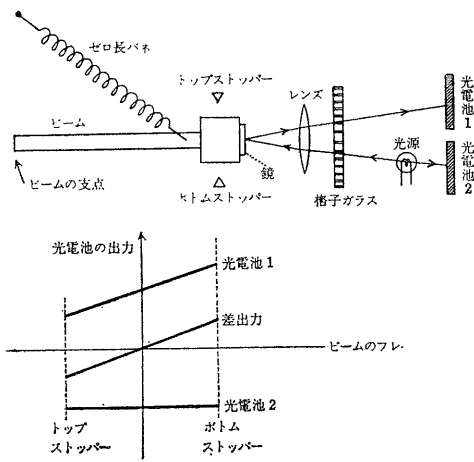
	陸上重力	海底重力
測定の能率	よい	悪い
位置の測量	容易	困難(電波測量等を用う)
高さ 深さの測量	むずかしく高価	容易(潮位の補正を要す)

ても海底重力計と船上重力計は非常に異なっている。その適用の違いをまとめれば表2のごとくである。海底重力測定の適用の基本的考え方は陸上の重力探査とほとんど同じであるといえよう。

次に陸上重力と海底重力をくらべると表3のごとくであって 高さの測量については陸では困難であるが 海底では潮位さえわかれば容易に求められる。海洋の重力を測定する場合は これらの機器や方式の違いを理解して 重力探査の目的がはっきりあらわれるような方法を用いるべきである。



第1図 海底重力計のブロック図  
海底重力計は水中部分の沈水部とケーブル 測定部分の制御部と記録器電源部分の発電機と電池および昇降部分のウインチと油圧ポンプの4つの部分に大別できる。



第2図 重力測定用のビームの平衡の検出  
重力測定にはビームの支点を動かし質量に働く重力とバネが釣り合う点をさがす。ビームの平衡の検出は格子ガラスを通る光をしらべる。光の検出には光電池を用い測定用と参照用の差出力を求める。

### §3 ラコスト海底重力計

#### 3.1 概要

この機器のメーカーは 正しくはラコスト アンド ロンバーグ社 (LaCoste and Romberg Co.) であり ここに述べるのは H型海底重力計 (Underwater Gravity Meter type H) である。そのブロックを第1図に示す。

沈水部 (submersible unit) には 重力計の中心部分である重力の受感部のほかにレベルをとったり 水深を測ったりする部分があって 直径 50cm の球の中に納められている。沈水部はケーブルで船上の制御部 (control unit) につながる。ケーブルは14心の導線で電気を伝えるとともにアーマード・ケーブルで張力もあり ウインチによって昇降を行なう。制御部は沈水部の遠隔操作を行なう部分である。電源には動作中は 110V 60Hz の交流を用い 夜間など休止中は 受感部の温度を一定 (約52°C) に保つためのヒーター回路を36Vの電池によって働かせる。沈水部を甲板から海底に昇降するにはウインチを用いる。ウインチの動力源には油圧モータを用い 油圧は油圧ポンプをエンジンで駆動し発生する。沈水部の重量は約 150kg(空中重量) コントロール部の大きさは 45cm×55cm×27cm ぐらいの小さいものであり エンジンなどすべてをふくむ重量は 1ton ぐらいである。

#### 3.2 機能と機構

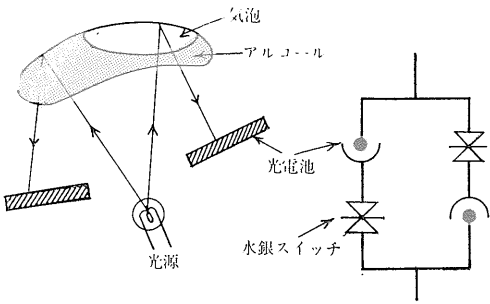
海底重力計の機能のおもなものは 次の3つである。

1. 重力値を測る。
2. 重力計を海底で水平に保つ。
3. 沈水部の深さを測る。

以下順にのべてゆこう。

ラコスト海底重力計の測定原理は 陸上のばあいと全く同じである。簡単にのべると ほぼ水平な棒 beam の先に質量を付しこれをバネで釣る。このバネは zero length spring という特殊なものである。このバネは長さ重量の関係をフックの法則であらわした時 重量がない時の見掛けの長さがゼロになるというものである。バネの材料には合金が用いられ バネの弾性定数の温度変化をなくすため一定温度に保っている。このバネは時間的にズルズル伸びてゆくいわゆるドリフトが非常に少なく 1カ月あたり 0.1m-gal/month という従来の機器にくらべて驚くほど小さいものである。ラ社はドリフトをここまで少なくするに30年を要したという。

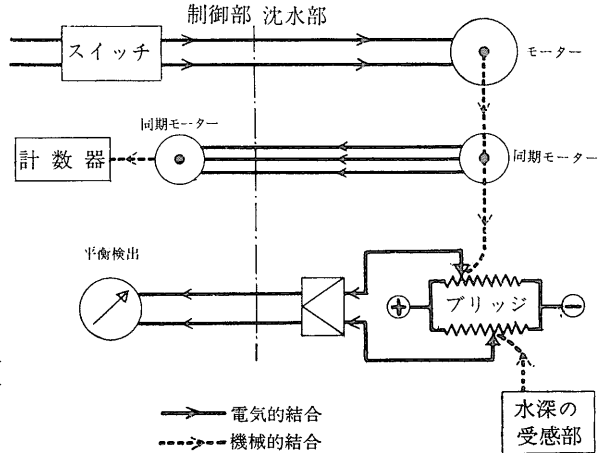
ここで重力が変わると 質量の重量が変わり バネのノビが変わる。このノビがなくなるようにビームの支点を調整して バネがある定位置にくるようにし 別に目盛校正 calibration をして いわゆるゼロ点法で測定する。バネが重量とバランスしているかどうかを見るには 第2図のような方法を用いる。質量の一端には鏡が付いている。光源から出た光はこの鏡で反射して光電池 sun battery に入る。このパスの間にはレンズなど光学系と格子ガラスが入っている。格子ガラスは入射角により通過する光量が変わる。光量は光電池 sun battery で電圧に変えられる。一方格子ガラスを通らない直接光も測定されてこの2つの差電圧を出す。そしてビームが平衡状態のとき電圧が0のようにしておく。この方法では光源の明るさが変わっても平衡点は変わらない。測定にあたっては制御部にあるスイッチを操作すると 沈水部内のバネの支点がモーターで動かされる。



第3図 水平検出器

水平の検出は水平の2方向を気泡で行なう。気泡に光をあてその反射を光電池で検出する。傾斜角が15°以上に大きくなると水銀スイッチが切れる。

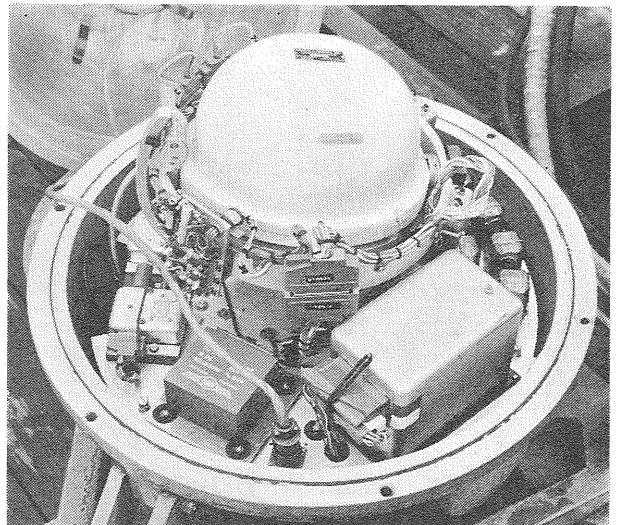
そしてモーターと同軸にセルシンモーターがあってこれが回転するとこのセルシンモーターによって制御部の同期モーターが回りこれに付された計数器が回る。従って計数器はバネの支点の位置すなわち重力値を表示するわけである。こうして支点の位置を動かしてビームのフレがゼロになる点をさがす。フレはメーターで読むとともにレコーダでも書かせる。またビームが上下どちらにふれているかを静電圧をかけてしらべる回路も付されている。レベルをとる機構も沈水部の重要な部分である。重力計の本体すなわちバネをふくむ受感部とレベルの検出機構は直径約25cmの白い球状の容器に入っている。この容器は耐水構造だから重力計の本体は外殻球とあわせて2重の耐水になっているわけである。この内殻球の中には気泡による水平検出器がビーム方向とそれに直交する方向についている。そして球全体が2方向のジンバルで吊られている。これにはそれぞれマイクロモーターが付いていて水平検出器の出力に従ってモーターが働く。モーターの動作は高速と低速の2段があり海底に降ろしてから大体の水平をとるまでは高速に働かせモーターの回転が逆向きに変わったら低速にし感度よく水平を保つようにする。水平を検出する方法は第3図のごとくである。気泡bubbleによる水準器は眼で見ても使えるものであるが遠隔操作のばあいは気泡に光をあてて右と左の端で光の量を光電池で検出している。そして右左の出力が平衡しないと平衡するようにジンバルのマイクロ・モーターが回る。水準機構が働く限界は±15°まででありこれをこえれば水銀スイッチが切れてジンバルは動かずメーターで表示される。



第4図 水深の測定

水深の測定には沈水部内のブルドン管に水圧を導いて変位に換え抵抗値の変化としこれをブリッジで測定する。制御部ではスイッチを入れ平衡検出が平衡するまでモーターを廻して計数値を読み取る。

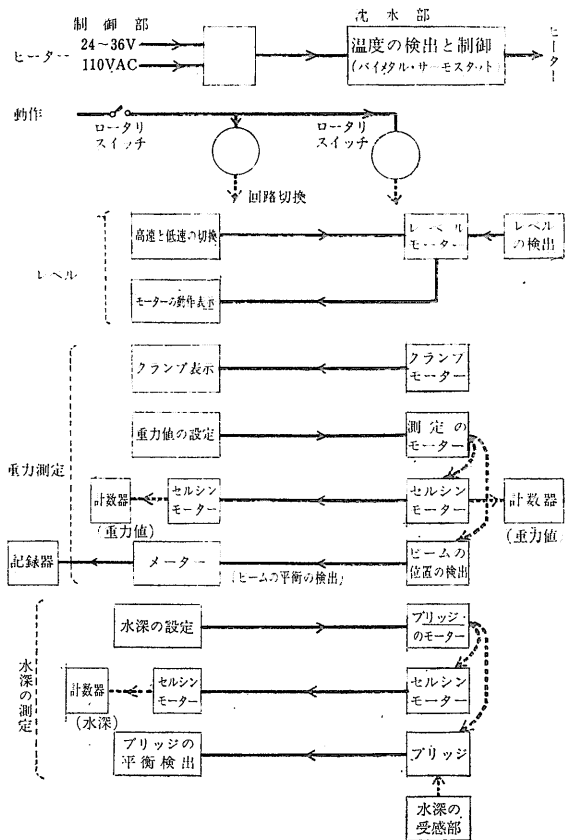
測定には制御部のスイッチで抵抗器のモーターを回してブリッジの平衡をとると共にモーターに同軸に付されたセルシンモーターを回して制御部の読取りの計数器を駆動する(第4図)。この方法は重力値の読取りと同じ方法である。沈水部のフタをあけた写真は第5図に示される。中の白いヘルメット状の内殻球は重力計の本体である。内には受感部と水準器が入り防水になっている。内殻球はジンバルで支えられていて水準器の出力によりマイクロモーター(左上)で水平を保つ。



第5図 沈水鐘の内部

球形の沈水鐘を開いたところで防水はO-リングで行なっている。中央の白いヘルメット状のものは重力計の本体と水準器が入り2重防水になっている。ヘルメットはジンバルで支えられ水準器の出力によって水平になるよう操作される。下右の四角い箱にはロータリ・リレーが入っていて電話の交換器のように制御部の信号に従って回路を切換える。沈水部は約150kgであり足には重りを付している。

水深を測るには受感部としてはブルドン管を用いこれで抵抗値を変える。すなわち水深→水圧→ブルドン管の変位→抵抗値の変化としている。ブリッジの値の



第6図 機能のブロック図  
制御部と沈水部との機能をブロックで表す。常時働いているヒーターと動作の命令によりレベル、重力測定、水深の測定になる。

右下の四角い箱はロータリーリレーの容器であり、制御部のロータリーリレーと同期して動く。上蓋と接する部分にはOリングを入れて防水している。

### 3.3 動作

沈水部と制御部の機能のブロック図を作ると第6図のごとくなる。これらの各部分は重力計を海底に降ろ

して測定するとき、次のような順序の操作によって制御される。

1. クランプ (Clamp)
2. 水深 (Depth)
3. 水平 (Level)
4. 読取 (Read)
5. 甲板 (Deck)

の5段であり、次に1クランプにもどる。この順序はロータリースイッチで回ってゆくので、跳越や逆回りはできない。重力計は常時1.クランプの状態にしている。このとき受感部はクランプされヒーター以外のすべての回路は止まっている。海底に降ろすとまず2.水深の状態にして水深を測る。次に3.水平にして水平モーター2台を働かせる。このときモーターを高速スイッチで働かせて概略の水平をとってからモーターの逆転を示す針のfluctuationが両方とも始まったら低速にする。これでレベルがよく保たれていれば4.読取にして重力値を読取る。この時だけ重力計のクランプははずされる。読取中はレベルモーターは低速で動作を続け水平を保っているがその動作は制御部のメーターでは示されない。これはメーター表示のケーブルをほかに切替えてしまうためである。読取りが終わると5.甲板にする。この時クランプモーターが働いて受感部がクランプされ、沈水部を海底から引上げてよい状態になる。クランプモーターが働く約0.5秒の間Arrestment点検のランプがつく。なおこのランプはクランプモーターをリリースする時にはつかない。それからウインチにより重力計を甲板上に引上げ、ここで深さを測る。甲板上の深さはゼロだからその読取値と水中の読取値の差に常数をかけて水深を求めるわけである。

これらの操作を表にすると第4表の如くである。これらの操作はロータリー・スイッチと記した押ボタンを押すごとに次から次にシフトされてゆく。これは電話の交換器のようにロータリー・リレーがコントロール

表4 海底重力計の操作の順

操作名	クランプ (Clamp)	水深 (Depth)	水平 (Level)	読取 (Read)	甲板 (Deck)
操作	停止 昇降 運搬移動	海底で水深を測る。	海底でレベルをとる。(高速と低速)	重力値を読取る。	甲板で水深のゼロ検査
動作	停止 → 沈降 (甲板)	(海底)			引揚げ ↓
クランプ		(クランプ)		リリース	(クランプ)
クランプ・モーター			リリース		クランプ(ランプで表示)
重力値読取			制御部で表示	表示なし	
レベル・モーター					甲板にて
水深測定		海底にて			

部と沈水部の両方において 押ボタンを押すたびに両方のリレーが1ステップずつ送られていって回路を切換える。そのためにケーブル内の導線の数は少なくすむ。このような切換を使わないNA社のUW-2型重力計は58心のケーブルを使っているが このラコスト社は14心で済んでいるのも この切換機構を用いているからである。ロータリー・スイッチの船上部と水中部の同期が何かの理由でズレてしまった時には ランプで表示され制御部のスイッチだけをシフトして合わせることができる。沈水部に浸水 flood した時はメーターで示す。重力計の受感部(この部分が最も高価である)は 2重に耐水になっているので 万一浸水してしかもすぐ引き上げることができなかつたとしても 本体にまで浸水することはまずないであろう。この浸水のメーターは浸水以外に海底の傾斜角が15°をこした場合にもふれるし また重力の読取装置の同期が正常の場合カウンターの10単位の一回転で1回メーター指示があり 同期がはずれるとその指示がなくなる。

表5 LR社とNA社の海底重力計の比較

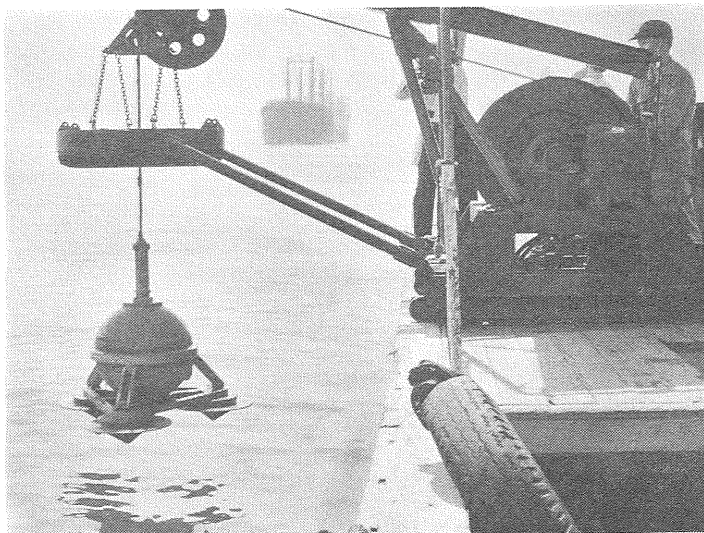
	NA社 UW-2R	LR社 H
精度	0.03m-gal	0.03m-gal
ドリフト	10m-gal/month	0.1m-gal/month
陸上の使用	可能	不可能(特別仕様なら可能)
ビームの平衡検出	差動トランス	格子ガラスと光量
レベルの検出	差動トランス	気泡と光量
レベルの動作	水中モータ	マイクロモータ(空中)
水深の検出	ブルドン管	ブルドン管
沈水部の連結	ワイヤとケーブルの2本 (機械的結合と電気的結合)	アーマード・ケーブル1本
ケーブルの心線	57芯	14芯
沈水部重量	(空中) 180kg	(空中) 150kg
総重量	1.5ton	1ton

水深などを記入しているところである。測定には2, 3分を要する。船の停船から測定の終了までは5-10分かかり 2kmの移動をふくめて1点あたり20-30分を要した。1日の平均の作業能率は 実働日数で15点/日ぐらいであり 最大は25点/日だった。測定中のトラブルとしては海底が軟泥の時重力計の沈水部が少しずつ沈んでゆくためレベルが追付かず設置し直したことがあった。また水深数メートルの極浅海で風波が強いつき測定出来ないことがあった。器械のトラブルとしてはケーブル関係の電気的と機械的のトラブルがあり 海洋観測においてケーブルの実用上の重要さをあらためて感じた。

海底重力計は その作業状況が停船し投錨し海底まで機器を降ろすことから採泥と採水を併用することがごく簡単である。そして少し工夫すれば 沈水部そのもの

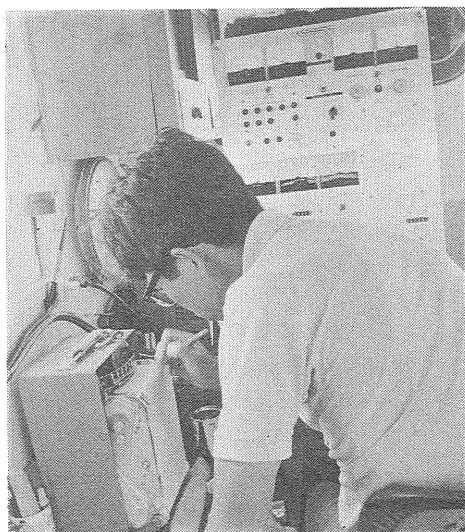
#### §4 伊勢湾の重力測定 of 能率

伊勢湾のような内湾の重力測定には 船上重力計より海底重力計の方が適していることはすでに述べた。ここは湾口を除き伊勢湾の最深部36m 師崎水道50mである。観測船を電波測量の誘導に従って予定点に進めここでアンカーを投碇して 1-2分放置して流れに従う。次に第7図の如く沈水部を海底に降ろす 着底するとケーブルをたるませて船の振動がケーブルから重力計に伝わらないようにして測定を始める。第8図は制御部の前で測定手が記録紙に測点番号 時刻 重力値



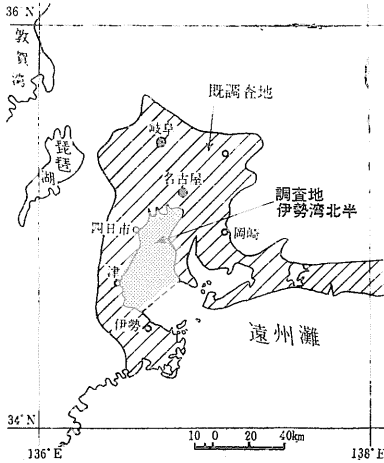
第7図 沈水部を海底に降ろす

沈水部の中には重力計が入っている。これを海底に降ろし遠隔操作で測定する。ケーブルにはワイヤとケーブルで14心の導線が入っている。1点の測定には水深や底



第8図 制御部

観測手の後方のメータ類のついたパネルが制御部である。出力の状態は記録紙に書かれる。



第9図  
位置図  
海底重力探査の行  
なわれた海底は伊  
勢湾北半で面積約  
1,000km<sup>2</sup>である。  
周辺の陸上はすべ  
て重力探査を終え  
ている。

によって採泥 採水もできるように思えるのである。

### §5 海底重力計の比較

1956年に日本に輸入されたノース・アメリカン社UW-2型海底重力計はいくつかの本に紹介されている。今回伊勢湾で用いられたLR社H型重力計を前者と比較してみると第5表の如くである。これらを概観すれば大体同じようなものではあるが細部にわたってみてゆくとLR社H型の方が優れていることが分かる。ドリフトが少ない点はLR社が優れている。重力計の本体がNA社の場合単独で陸上に使える点便利である。LR社の場合アーマードケーブル1本で昇降と電気的結合を兼ねている点は便利であるしまた心線が14本で約1/4の点も優れている。いずれの器械もケーブルと水中のコネクターに伴うトラブルが全トラブルの中ばをしめていることからしてもこの部分の原理的な簡素化は実用上大切である。制御部はLR社のものが大きさにして約1/5と非常に小さく扱いやすくなった。LR社のものは作業能率や要員の点でも優れている。それは重力計以外の要素も入るから単純な比較はむずかしいとしても実績としては今回の伊勢湾でLR社は2名の調査員(測量を除く)により13点/日の能率を上げているが有明海では5名の調査員により7点/日であった。このような違いは会社の違いよりむしろ15年間の材料や技術の信頼性の発展かもしれない。

### §6 伊勢湾北部の海底重力の測定

伊勢湾は湾口の伊良湖水道から湾の奥の名古屋港まで約60kmであり幅は湾央で約30km面積は約1,600km<sup>2</sup>の内湾である。本調査で測定された区域は知多半島の内海町と三重県の松阪港を結ぶ線から北で、面積は970km<sup>2</sup>である。この海域は既に述べた La Coste

and Romberg 社のH型海底重力計で約250点を測定した。また名古屋港付近の埋立地などを中心に陸域の重力も補充測定した。面積は約200km<sup>2</sup>で84点を測っている。これには Wordon 重力計を用いた。海の測点は東北東-西南西方向とそれに直交する方向で2km間隔の格子に配置されている。測点あたりの平均した面積は4.0km<sup>2</sup>/点であり原図の尺度は1/50,000で概査の部類に入る。概略の重力探査の範囲は第9図に示す。この図には陸上の重力探査がすでに行なわれた範囲も合わせて示している。この範囲図で伊勢湾は中心的な位置を占めている有様が分かる。伊勢湾・三河湾をふくむと濃尾 伊勢湾の区域は面積10,000km<sup>2</sup>にも及ぶ広い範囲になる。

調査海域の水深は湾央で最も深く36mであり測定点の大部分は30m以浅である。底質は大部分泥質であるが一部には砂層 砂礫層もある。白子の沖には礫層があり松阪の沖には砂泥層がある。泥層の中でも木曾川の河口のものは特に未固結で測定作業にも差支えるほどであった。観測船には33tonの汽帆船を用い測量にはオーディスターという電波測量機を用いている。作業は約30日を要した。

重力の測定値には 次の各種補正を加えた。

#### 1. 地殻潮汐補正

太陽や月の運行により海で起潮力が働き海洋潮汐が起こることはよく知られている。この起潮力は海水だけでなく地球自体にも働きかけて地殻潮汐を起こし重力値に影響する。この補正が地殻潮汐補正でありこれにはヨーロッパの物理探鉱協会E.A.E.Gで毎年出している補正表により行なった。

#### 2. 潮汐補正

潮位が変わると水深が見掛け上変わることと海水の層が存在することにより重力値に影響が表われる。厚さHで密度ρの水平な無限平板が作る重力値Sは平板と測定点の距離には関係なく

$$S=2\pi G\rho H$$

である。ここでGは万有引力常数である。

この式を用いて潮位を補正する。この海域には知多半島の常滑市鬼崎港に国土地理院の鬼崎検潮所があるのでその潮位の資料を用い四日市港や名古屋港の資料も参考に用いて補正した。基準海面には東京湾の中層潮位面を用いている。

#### 3. ドリフト補正

重力計の受感部はバネであるために使用中にズルズル伸びてゆくこれがドリフトであり測定の始めと終わりに同一地点で測って前記の2つの補正をしてもなお一致しない



分をドリフトとして誤差配分した。本調査に用いたラコスト社の重力計は 0.1m-gal/month という非常に小さいドリフトである。基点は岸壁上に作れば同一点に戻るのでもよい。しかし船の都合で岸壁上で重力を測れないときは海底に基点を作った。船は同一点に停っても重力計が海底で少しズレることがある。これは計算値で合わせている。

4. 高度補正

海底で測定された重力値を基準海水面に補正する。このとき深さだけを補正するフリーア補正と密度  $\rho_w$  の海水を密度  $\rho_B$  の地層に置換えるブーゲ補正の両方を行なう。補正值  $H_c$  は水深を  $H$  とすると

$$H_c = \left( \frac{2g}{R} - 2\pi G(\rho_w + \rho_B) \right) H$$

となる。ここで  $g$  は重力値  $R$  は地球の半径である。この式を数値的に示せば  $H_c$  を m-gal  $H$  を meter として

$$H_c(\text{mgal}) = (0.3086 - 0.0419(\rho_w + \rho_B)) H(\text{m})$$

である。海水の密度  $\rho_w$  には 1.025g/cm<sup>3</sup> を置換物質の密度  $\rho_B$  には 2.0g/cm<sup>3</sup> を用いた。

5. 緯度補正

重力は地球の引力と自転による遠心力の合力なので赤道で小さく極で大きい。地球の緯度  $\phi$  における重力  $g_\phi$  値は赤道の重力値を  $g_e$  として

$$g_\phi = g_e(1 + B_2 \sin^2 \phi + B_4 \sin^2 2\phi)$$

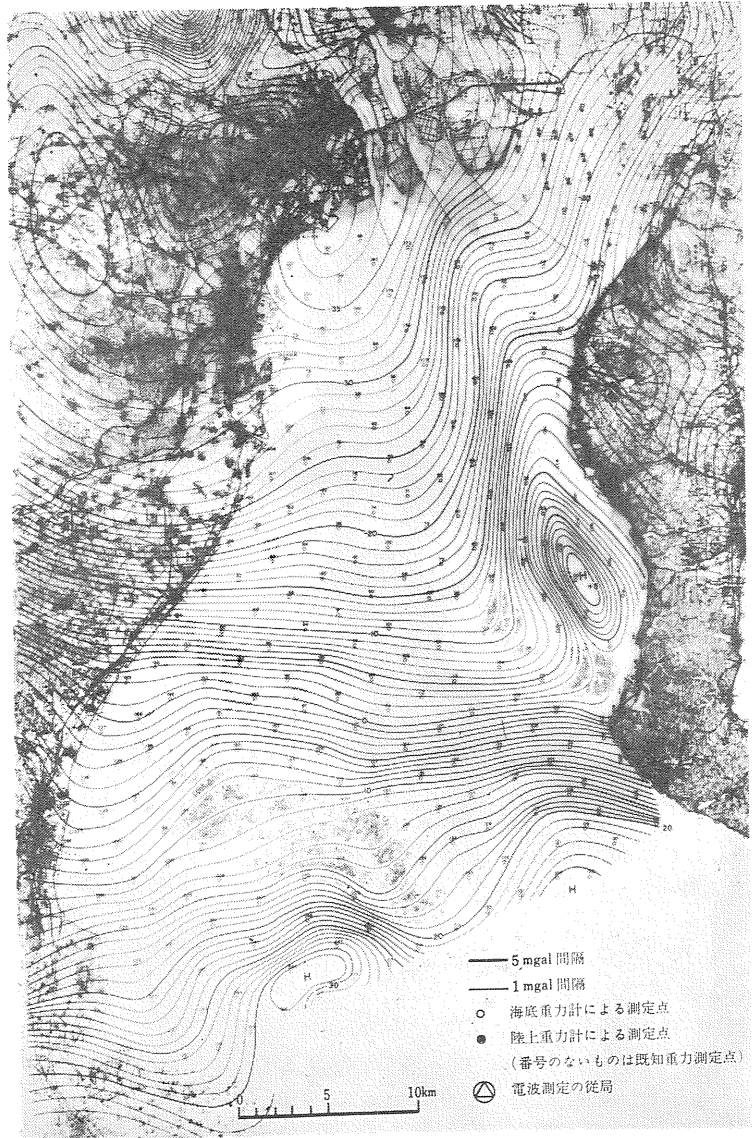
で与えられることは回転楕円体のポテンシャルの理論から分かっている。国際式として認められている式の常数は

$$g_e = 978.049$$

$$B_2 = 0.0052884 \quad B_4 = 0.0000059$$

である。

この式に従って緯度の増加による重力値の増加を補正した。



第10図 伊勢湾北部の等重力線図  
等重力線は 1m-gal 間隔で 5m-gal ごとに太線になっている。調査海域は内海と松阪を結ぶ線の北である。海底重力は白丸で示し 251 点測定し 陸上重力は黒丸に数字で示した。

6. 地形補正

測点周辺の地形を補正した。地形による重力値の影響は距離の 3 乗に反比例し 高度差の自乗に比例する。この海域周辺は平野部なので補正值は小さい 方法は放射線と同心円で分割された扇状区画の平均高度を読取る方法である。範囲は 45km まであり 密度仮定は 2.0g/cm<sup>3</sup> である。

以上の補正をして重力異常を求めた。重力異常を 4go'' 補正後の重力値  $g$  高度補正  $H_c$  地形補正  $A$  標準重力  $\gamma_0$  とすると

$$4go'' = g - Hc + A - 70$$

である。

知多港（名古屋港内の南部で知多市内）における測点 No. 1 と 常滑市の鬼崎港における測点 No. 19 と 鈴鹿市の白子港岸壁の測点 No. 108 の  $g$  と 重力異常  $4go''$  は次の如くである。

知多港 No. 1 (知多市)  
 $g = 979, 727.28\text{m-gal}$   
 $4go'' = -16.00\text{m-gal}$

鬼崎港 No. 19 (常滑市)  
 $g = 979, 728.97\text{m-gal}$   
 $4go'' = -7.25\text{m-gal}$

白子港 No. 108 (鈴鹿市)  
 $g = 979, 716.85\text{m-gal}$   
 $4go'' = -13.21\text{m-gal}$

本調査以外の調査区域とブーゲ異常値を接続するためにある常数だけ差が出てくる。この区域では  $4go''$  に対して  $-159.02\text{m-gal}$  をすでに差引いている。

上記のような補正と処理によって得たブーゲ異常値の等重力線図を作製したものが第10図である。コンターの間隔は  $1\text{m-gal}$  ごとであり  $5\text{m-gal}$  ごとに太線にしている。これで伊勢湾北半の重力の形態が明らかになりまた従来陸域だけでは決めかねた等重力線の形状や接続もはっきりした。

## §7 測定の結果

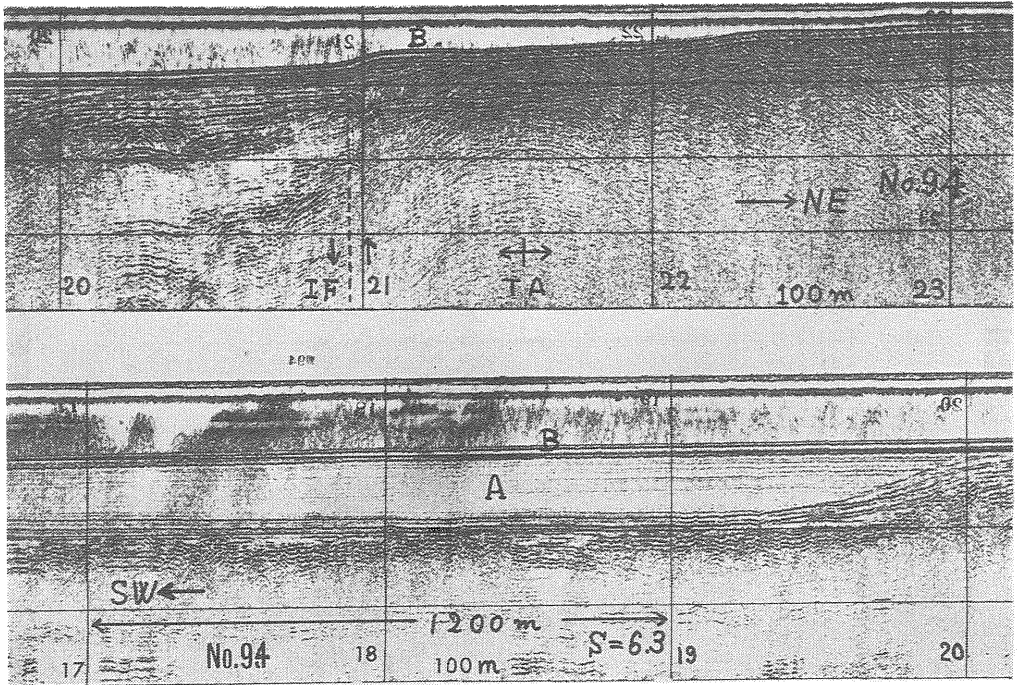
濃尾平野から伊勢湾にかけての平野と内湾のペアは中新世以降の堆積盆として形成されたものの現在の姿である。中新世には瀬戸内海 大阪湾 琵琶湖 伊勢湾と続く一連の沈降帯の東端にありその後それ等の沈降帯は分化が進んだ。厚い堆積が発達するのは第二瀬戸内期でありここで東海湖と名づけられる鮮新世中期から洪積世にかけての堆積物(非海成層)は濃尾平野では1500m以上に達し伊勢湾西岸の奄芸層群でも1000m前後に及んでいる。この地層の密度は岩相や深さによる圧密で異なっているが大體  $2.0\text{g/cm}^3$  ぐらいの値であろう。厚い鮮新洪積統の下には中新統があるが(知多半島の師崎層群や伊勢平野の一志層群)これは余り厚いものではない。濃尾平野には超深層地下水の利用を目的にした多くの掘さく孔(たとえば長良川河口の長島温泉)があり平野の地質は比較的分かっている。しかし中新統が海成層で塩分が多いため地下水の対象にならないために中新統を抜いて基盤にまで達するような掘さく孔

は少ない。

中新統である師崎層群や一志層群の密度は鮮新洪積統のそれよりは大きく  $2.2\text{g/cm}^3$  ぐらいと考えられるが基盤岩類の  $2.6-2.7\text{g/cm}^3$  よりはるかに小さい。基盤岩類は当海域が中央構造線より内帯側であるから古生層 領家変成岩類 貫入花崗岩等であろう。これらはいずれも  $2.6-2.7\text{g/cm}^3$  程度の値をもつもので重力異常を考える上での差はほとんどない。重力異常の大勢を支配しているものは鮮新洪積統と基盤岩の密度の差なのである。なお海水の密度  $1.025\text{g/cm}^3$  はブーゲ補正の段階で  $2.0\text{g/cm}^3$  に置換えているので考える必要はない。等重力線図は当海域の地質構造をよく示している。その形態の特長を分解して述べてみると次のようになる。

1. 三重県津市の東の沖から四日市の東の沖にかけての南北方向には重力値が南に高く北に低くなって南北25kmの間で約45m-galの差がある。従って重力傾度の平均値は北落ちで  $1.8\text{m-gal/km}$  である。
2. 名古屋港周辺では南東に高く北西に低い重力値を示しその平均重力傾度は  $2.5\text{m-gal/km}$  である。
3. 長良川の河口に負の重力異常がある。従来の陸上測定だけでは濃尾平野西縁の異常と四日市から菟野にかけての負異常の関連がよく分からなかった。今回の海底の測定と木曾川河口付近の補完調査でこの形状が明らかになった。すなわち長良川河口—四日市—菟野と半円形に続く低異常帯は養老山脈の高異常の南端に小さく孤立する桑名の高異常を取り巻いている。これによって濃尾平野西縁の養老山脈に平行する長く大きな低異常と鈴鹿山脈と養老山脈の間の長い小さな低異常がこの半円形の低異常を介してつながる。
4. 常滑港の南方で野間崎との間に北々西—南々東に長軸をもつ重力の高異常帯がありその西側との重力差は  $20\text{m-gal}$  程度である。高異常の東側は緩く西側は急傾斜であり傾斜の最大値は  $1.5\text{km}$  の間で  $10\text{m-gal}$  すなわち  $6.7\text{m-gal/km}$  で当海域最大の傾度である。
5. 津—四日市の沖にかけての1項の区域と名古屋港周辺の2項の区域との境は長良川の河口から4項でのべた高異常域の西縁を通り野間崎に続くあたりである。この境で重力傾度は西に落ちている。
6. 松阪港の北東約10kmには高異常がある。周辺との重力値の差は  $10\text{m-gal}$  程度である。
7. 知多半島北半の等重力線の形は海域の測定と陸域の補完測定と再測によってかなりその形が変わって来た。

このような堆積盆における密度の考察と等重力線の形態の分析は地質的な解釈へとつながってゆく。そし



第11図 伊勢湾断層の音探記録

音探は海底浅部を目的としたもので掃引100m エネルギー約100ジュール、発振間隔 3/8sec である 記録の垂直水平尺度比Sは6.3である。常滑背斜 TA は傾点20.9に軸をもつ この南西側の測点20.9に伊勢湾断層 IF があり南西落ちである。これらは重力異常の位置とよく一致するが重力異常の原因は基盤に及ぶ深いものである Bは海底面；Aは伊勢湾断層の西に広がる沖積層であり その下は鮮新洪積統上部である。この測線に近いすべての測線で背斜と断層がみられる

陸上における養老断層や猿投断層の重力異常における表われ方や堆積盆の形態は周辺の例として関連をもち参考になるのである。

(注：重力傾度にはエトベスという単位を用いることもあり次の関係がある。

$$1\text{m-gal/km} = 10\text{e}6\text{tvös} = 10^{-8}\text{c.g.s.}$$

上記の4項でのべた常滑港南方の重力高異常はここに基盤の高まりがあるためと考えられる。この基盤の高まりは上の層の背斜構造となる。これは音波探査で存在を確認している。これを常滑背斜とよぶことにしよう。次に5項でのべられた名古屋港周辺と津一四日市沖の海域の間の重力の傾向が急変する所は断層と考えられる。これを伊勢湾断層と呼ぼう。常滑背斜は20m-gal という大きな重力差からかなり大きな基盤の高まりであろう。濃尾平野の西縁の重力低異常と養老山脈の高異常はこの地域最大の重力差33m-gal であり地質的にも大きな落差の養老断層が推定されているが常滑背斜と伊勢湾断層をへだてた西側との差20m-gal もかなり大きなものでありしかも養老断層とちがって地形にはほとんど表われていない点も特長である。

等重力線の変化の最もはげしい所が断層の表われだと

考えると伊勢湾断層は長良川の河口から知多半島の野間崎(内海の北西)を結ぶ線のあたりになるであろう。また常滑背斜が高異常に沿っていると考えればそれは伊勢湾断層に平行したものである。常滑沖の高異常と常滑背斜は後述するように完全には一致しないのであるがこの高異常の影響がほとんどなくなる重力測点 No. 176 (大野町の西の沖合約 6km) で伊勢湾断層の落差を計算してみる。この No. 176 で伊勢湾断層に垂直方向(平面図上で)に線Sをひくとこの線の両端で重力差は約 12m-gal であり断層の位置で重力傾度は約 3.0m-gal/km である。これを幾つかの仮定のもとに垂直断層として計算してみると

- 1 密度差を  $0.6\text{g/cm}^3$  と仮定すれば断層の落差は480m 断層の東側の基盤の上面の深さ1,030m 断層の西の基盤の下面の深さ1,510m であり
- 2 密度差0.5なら落差570m 断層上面980m 下面1,560m となる(断層の落差は必ずしもただ一つの断層によるのではなく階段状断層の落差の和という可能性もある)。

常滑背斜と伊勢湾断層は音波探査においても観測されている。その記録例の一つとして No. 94 測線の一部を示す。これは常滑港から南西に向う測線で測点23から南西に17までの間約 3.5km を示している。放電エ



第12図 伊勢湾の説明図

No. 1 知多港 No. 19 亀崎港 No. 108 白子港は重力の基点 三角形△は電波測量の従局位置 IFGの実線は重力による伊勢湾断層で○は音探測線で確認されたところ。ただし?は疑問あり。TAは音探で調べた常滑背斜の位置。SL94は音探測線 No. 94 記録列を掲示したもの。Bは津の沖から四日市沖に到る基盤が北落ちの区域で傾斜角は密度差が $0.6g/cm^3$ なら $4^{\circ}2'$   $0.5g/cm^3$ なら $5^{\circ}$ 。名古屋港のCでは基盤が北西に落ちている。Gは松阪港の10km沖で花崗岩が海底下浅部にあると考えられる。

エネルギー約100ジュール 掃引100m 水中相当距離 発振時間間隔 3/8sec 記録の垂直水平尺度比 6.3という典型的な海底浅部用の音探である。この掃引100m というごく浅い音探にさえも常滑背斜は測点21.5に表われ伊勢湾断層は20.9に表われている。なおこの記録で伊勢湾断層は西落ちで東側は背斜をなす地層(常滑層群の下部かも知れない)の上面には沖積層はほとんどないが断層西側には沖積層Aが厚くほぼ水平に堆積している有

様が見える。沖積層Aの下は埋積物がありその下は 鮮新洪積統上部が水平に堆積している。このような背斜と断層は他の側線でも観測されている。このような浅部に表われた背斜と断層の位置を 第12図において 重力探査で考えられた断層と重ねてみる。

伊勢湾断層の北半は重力と音探の位置がかなりよく一致する。しかし常滑背斜の近傍では余り一致しない。また常滑背斜は重力異常の頂部と音探で見出された背斜軸がよく一致はするが背斜の軸方向は重力異常の軸とは一致しない。

重力は深い基盤の形状の反映であり重力から考えられる位置は誤差の大きいものである。音探は浅部だけを探索し断層の位置の誤差は少ないのであるが 基盤の形状の影響は浅部に比例的に表われるわけではない。重力と音探の成果の対比と不一致の原因は興味深い問題ではあるが 余りに専門的になるのでここでは避けることにしよう。重力異常でみる伊勢湾断層は長良川河口から野間崎の間にあるのだが北の長良川河口近くなると重力差は小さくなり音探記録でも分からなくなる。大野沖あたりでは 重力異常による位置と音探による位置がよく一致し 常滑背斜の南では複雑な形になりよく分からなくなる。

伊勢湾断層は養老断層と比べると興味深い。伊勢湾断層は海中にあって方向は $N20^{\circ}W$ (北から西へ $20^{\circ}$ 偏れる)であり西落ちである。養老断層は陸上にあって方位は $N29^{\circ}W$ で東落ちである。この2つは位置的につながり

そうだし方位も近い。しかし落ちのむきは逆になっている。横ズレの向きはいずれも分からない。この2つの断層は長良川の河口の重力の形態からも構造の規模からもヒンジ型(チョーツガイ)の断層の組と考えることはできないだろう。

畿近 三角地帯の東縁として敦賀湾から関ガ原に到る柳ガ瀬断層と関ガ原から長良川河口に到る養老断層が考えられていたが これに伊勢湾断層が加わったのである。

柳ガ瀬断層は左ズレ断層として第四紀にも動いたことが分かっている。そして西の琵琶湖側が落ち 東の伊吹山地が上ったと考えられる（ここは残念ながら重力探査が行なわれてはいない）養老断層は 柳ガ瀬断層と位置的によく続かないけれど巨視的には一連のものかもしれない。もっとも養老断層は 断層面をとらえていないから地質構造からの推定ともいえるが その存在の可能性は非常に大きい。伊勢湾断層と養老断層の形成時期の新旧や形成過程はまだよく分からない。しかし基盤の収縮によって落ちの向きが逆になる一連の断層の例は近畿地方に実例があると考えられるので 落ちが逆になることだけで原因が全く別だったり 形成の時代が違うことを結論づけることはできないだろう。

伊勢湾断層を解釈する別の可能性は 伊勢湾断層が北の方では東向きに偏れながら濃尾平野の下に入ってしまうことである。濃尾平野の基盤は養老断層に到るまでの間で西に落ちているのだがこれは単傾斜でなく幾つかの落差の小さな断層で緩く落ちていることが考えられる。伊勢湾断層はこれらの一つに続いて平野の下に入り落差は小さいが西落ちの傾向だけは保って続くことが考えられる。いずれももっと証拠が必要なのであるが 解釈を進めるための視点として述べたものである。

津の沖から四日市の沖にかけては南に高く北が低い重力値を示していて その平均の重力傾度は 1.8mgal/km であることはすでにのべた。これは南の湾口の方で基盤岩が浅いか露出し 湾の北の方で深くなって堆積盆を形成している一般的性質を反映している。

地質構造が2次元のモデルで表わされ 基盤が傾斜角  $\delta$  で傾いているときの重力傾度を  $\partial g/\partial x$  と表わすと

$$\partial g/\partial x = \rho G \sin 2\delta$$

という関係がある。ここで  $\rho$  は密度差  $G$  は万有引力常数である。この関係を用いて前記の重力から傾斜角を求めれば 密度差が  $0.5g/cm^3$  のとき  $5^\circ$   $0.6$  のとき  $4^\circ 2$  となる。この傾斜角は他の量に比べて少し大きすぎるような意味もあるが 密度差の推定や他の資料の基礎を検査し解釈をつめてゆきたい。

このような堆積盆の中には庵芸層群の褶曲が知られている。陸上の地質調査で知られているものもある。三重県鈴鹿市の沖には背斜が海中浅部の音波探査で知られていて海底地形にさえ現われている。しかし海底重力には背斜

の影響はほとんど表われてはいない。伊勢湾断層や常滑背斜の場合には 重力異常にも浅部の音波探査にもととと表われていたのであるが このような違いは背斜や断層の原因がどの程度基盤の形態に影響されているかによるものである。

### §8 おわりに

本文では海底重力計の概要と海底重力計で測った伊勢湾北半の重力探査の結果と解釈の概要をのべた。

海底重力計もそれによる測定も決して新しい技術ではないが 日本では 最近十年の間あまり活発には行なわれていなかった。しかし日本の広い大陸棚の海底重力はごく一部分しか調査されていない。調査されたのは秋田沖 新潟沖 陸奥湾南部 有明海 大村湾 角力灘などごく一部の海域に過ぎない。大陸棚の開発の重要性は 地学的な意味においてはもち論のこと 国土に連なるものとしての意義においても 資源や産業の基礎としての意義においても 国際的な海洋開発の先進性の点でも十分に考えるべきものがある。特に内湾の調査は内湾が産業や経済に密着していることからその重要性は大きい。日本の内湾の中で周辺の重力探査が終わっていて内湾の探査が終わっていないものには 当海域の伊勢湾のほかに東京湾 大阪湾 石狩湾 噴火湾 富山湾 博多湾 などをあげることができる。陸上の一部分だけなら鹿児島湾を始めとしてもっとふえるであろう。これらの内湾は陸上の地質との関連という点でも 重力探査のような基礎調査を長期的に地道に進められてゆく必要がある。伊勢湾の南半は今回の調査でなしえなかった課題の海域であるが この伊勢湾北半の海底重力探査を契機に南半のみならず広く日本の大陸棚の重力探査が進められてゆくことを期待している。

(筆者は物理探査部応用地球物理課長)



第13図 電波測量の受信機  
電波で船の位置を測定するオーデイスタの受信機。  
アンテナは船のマストに取付ける。陸上の従局から電波を発信し 船で受信して距離を測る。測定精度



第14図 電波測量の従局 自動車に積込んでいるのが発信機 車上の三角形のものがアンテナ