REPORT

OF

HYDROGRAPHIC RESEARCHES

No. 12, March, 1977

遠州灘の海底地質

永野真男*・安城龍彦*・登崎隆志*

SUBMARINE GEOLOGY OF ENSYU-NADA SEA, SOUTH OF HONSYU

Manao Nagano, Tatsuhiko Ajiro and Takashi Tozaki

Received 15 October 1976

Abstract

The Hydrographic Department of Japan caried out the survey of submarine topography by P.D.R., and of geological structure by continuous seismic profiler (air-gun system) from off the Shima Peninsula to off the Izu Peninsula in July to October, 1974. The survey is based on the project "Basic Map of the Sea on Continental Shelf". The survey ship "Mei-yo" conducted survey of 7600 nautical miles, and position fixes were made by Loran C system.

Results from the analyses on the data obtained are as follows;

1. Submarine Topography

The physiography of the sea area extending from the Shima Peninsula to Cape Omae-zaki is classified as continental shelf, continental slope, deep-sea terraces and knoll chains, and each of them distributes in parallel with the direction of NE-SW. There exist many submarine valleys from on the shelf break to the continental slope. They disappear on the deep-sea terrace at the base of the continental slope.

The deep-sea terrace off the Shima Peninsula develops remarkably in the depth from 1600 to 2000m. One which develops from off Cape Irago to off the mouth of Tenryu River becomes narrow depression in the depth from 700 to 1500m. The depression off the mouth of Tenryu River correspond to the upper reaches of the Tenryu Submarine Valley.

The knoll chains exist between the outer edge of the deep-sea terraces and the Nankai

* 測量課

Trough, and the width of which varies from 40 to 60km. Two chains and small troughs between them run along the Nankai Trough and they form en echelon structure. The Tenryu Submarine Valley reaches from offing of Tenryu River to the Nankai Trough, descending through the knoll chains area.

Both east and west slopes of the Suruga Trough are considerably steep. On the east slope the configuration is simple, but on the west slope there destributes a submarine basin and bank.

2. Geological Structure

The strata in the area were classified acoustically as Ae, Be, Ce and De formations in the descending order. The main trends of the geological structure are NE-SW or ENE-WSW, which are represented by the Nankai Trough, the knoll chains area and the deep-sea terraces, and N-S by the Suruga Trough.

The author estimates the history of the development of geological structure as follows;

After the deposition of De formation, uplift and subsidence with NE-SW trend faults occured from off the Shima Peninsula to off Cape Omaezaki. The subsided area became the prototype of the Nankai Trough. After the deposition of Ce formation, landside part of the knoll chains lifted up with the NNE-SSW trend faults which cut upheaval axis. By this movement, the base of the continental slope off the Shima Peninsula became subsidence area which was the prototype of the Kumano Trough, and the lower reaches of the Tenryu Submarine Valley was formed. The Nankai Trough continued subsiding, but the elevation of the knoll chain and ridge around the Trough, which is consisted of De and Ce formations, kept Be formation from depositing there.

During and after the deposition of Be formation, the upper stream of the Tenryu Submarine Valley was formed by the graben-like faults showing NE-SW trend at the base of the continental slope off the mouth of Tenryu River, and other submarine valleys on the continental slope were also formed in this time.

Later, sediment of Ae formation was supplied through the submarine valleys from the landside and deposited in the Kumano Trough, the upper of the Tenryu Submarine Valley and the Nankai Trough.

In the Suruga Bay after the deposition of Ce formation, this area became subsidence area with the N-S direction because of the down warping. This movement continued after the deposition of Be formation, and the prototype of the Suruga Trough was formed. Consequently, the Suruga Trough connected to the Nankai Trough. After that event, the sediment which was mainly supplied along the main trend of the Suruga Trough formed Ae formation in the Suruga Trough and the Nankai Trough.

1. はじめに

水路部では昭和49年7～8月・9～10月の2回に分けて，遠州灘から駿河湾に至る海域の地形・音波探査（エアガン）・地磁気・重力の調査を測量船明洋（船長上田三郎）で実施した．

この調査は大陸棚の海の基本図整備のために行われたものであるが，遠州灘では地震予知計画に基づく調査も含まれている．

この報告では，海底地形および地質構造について概報し，地質構造発達史について若干の推察を行う．

2. 調査海域および方法

調査海域は志摩半島から伊豆半島までの沖合で，南端は北緯33°の線で限られ，南海舟状海盆の東縁部を包含している（Fig 1）．陸岸付近の調査限界は距岸約3海浬，水深100～300mである．

調査測線は海域の主要な地形をほぼ直角に切る2海浬間隔の主測線と，これにクロスする測線で，全測線距離は約7600海浬に達する（Fig 3）．

測位はロランCにより10分間隔（2海浬弱）で行った．ロランCによる位置は陸測（主に三点両角法）との比較から，系統的誤差を検出し補正した．

測深には深海型（NS16）・浅海型（NS39）音響測深機を使用した．水深の読み取りは1000m以浅は1m，以深は10m単位で行ない，音速度補正および潮高補正（水深200m以浅のみ）を行った．音速度補正に用いた資料は1000m以浅はC.S.K.資料（拓洋 1968.8.9），1000m以深は同資料（U.S.S.R., G. NEVELSKOY, 1966.4.29）を用い，補正値は桑原方式で算出した．潮高補正は海域西部で尾鷲港平均水面下1.04m，東部で御前埼港平均水面下1.01mを基本水準面として行った．

音波探査はエアガン方式の深海用連続音波探査装置によった．記録周波数帯域はおおよそ60～300Hzである．

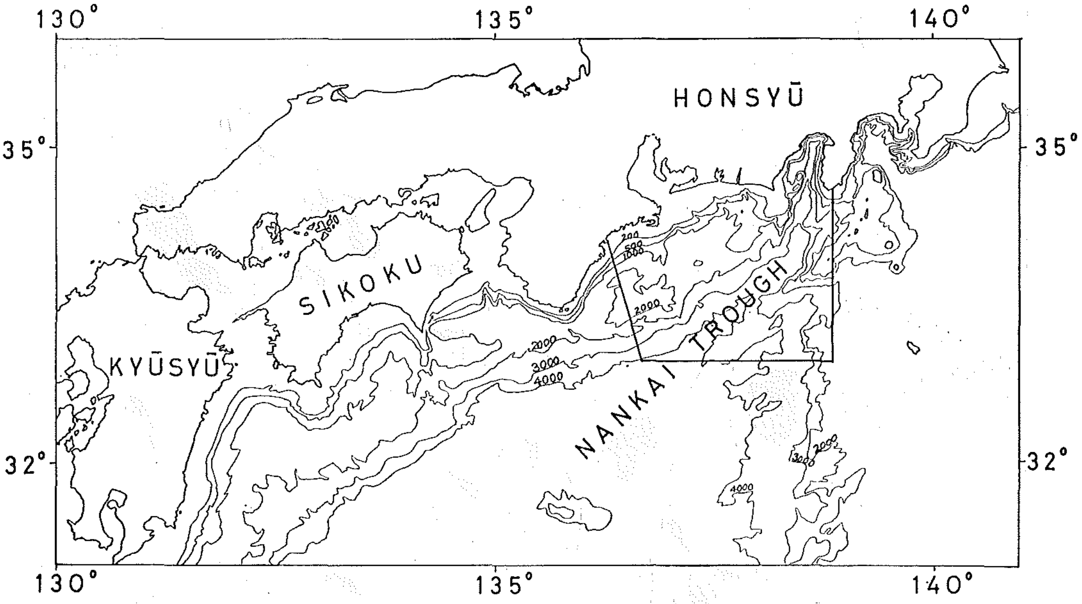


Fig. 1 Map of Surveyed Area of Ensyu-Nada

3. 海底地形（Fig 4 参照）

Fig 2 はこの海域の地形分類図である．主な地形には名称が付与されている*．

海域の地形を概観すると，西南日本の太平洋側大陸斜面基部に広く分布している南海舟状海盆は，この海域内の御前埼南東方70kmに達し，さらに北方延長上の駿河舟状海盆に連続している．南海舟状海盆から陸側には幅の広い大陸斜面がみられるが，駿河舟状海盆から陸側では大陸斜面の幅が狭い．ここでは御前埼から駿河舟状海盆と南海舟状海盆の交点を結んだ線を境として南西側を遠州灘地域，北東側を駿河湾地域と呼ぶことにする．

* 水路通報（昭和51年）第33号994項

3.1 遠州灘地域

この地域の地形は陸岸から沖に向って大陸棚・大陸棚斜面・深海平坦面・堆および海丘列が配列し，南海舟状海盆に至る．南海舟状海盆の南東縁に沿う銭州海嶺は銭州から南西方向に張り出し，南海舟状海盆と四国海盆を隔てている．このうち大陸棚斜面には多くの海底谷が分布し深海平坦面に開口している．天竜海底谷は大陸棚斜面下から海丘列を横断して南海舟状海盆に達する（Fig 2）．

3.1.1 大陸棚

志摩半島沖では外縁が海岸線に平行に分布し，幅10～13km・外縁水深140～150mである．伊良湖岬から天竜川沖では外縁の方向は海岸線に斜交する形をとり，幅は30kmから7～9kmとほぼ直線的に減じ，外縁水深は170mから250～290mと増大する**．天竜川沖から御前埼沖では御前埼海脚部を除いて発達が悪く，海脚部で幅25km,

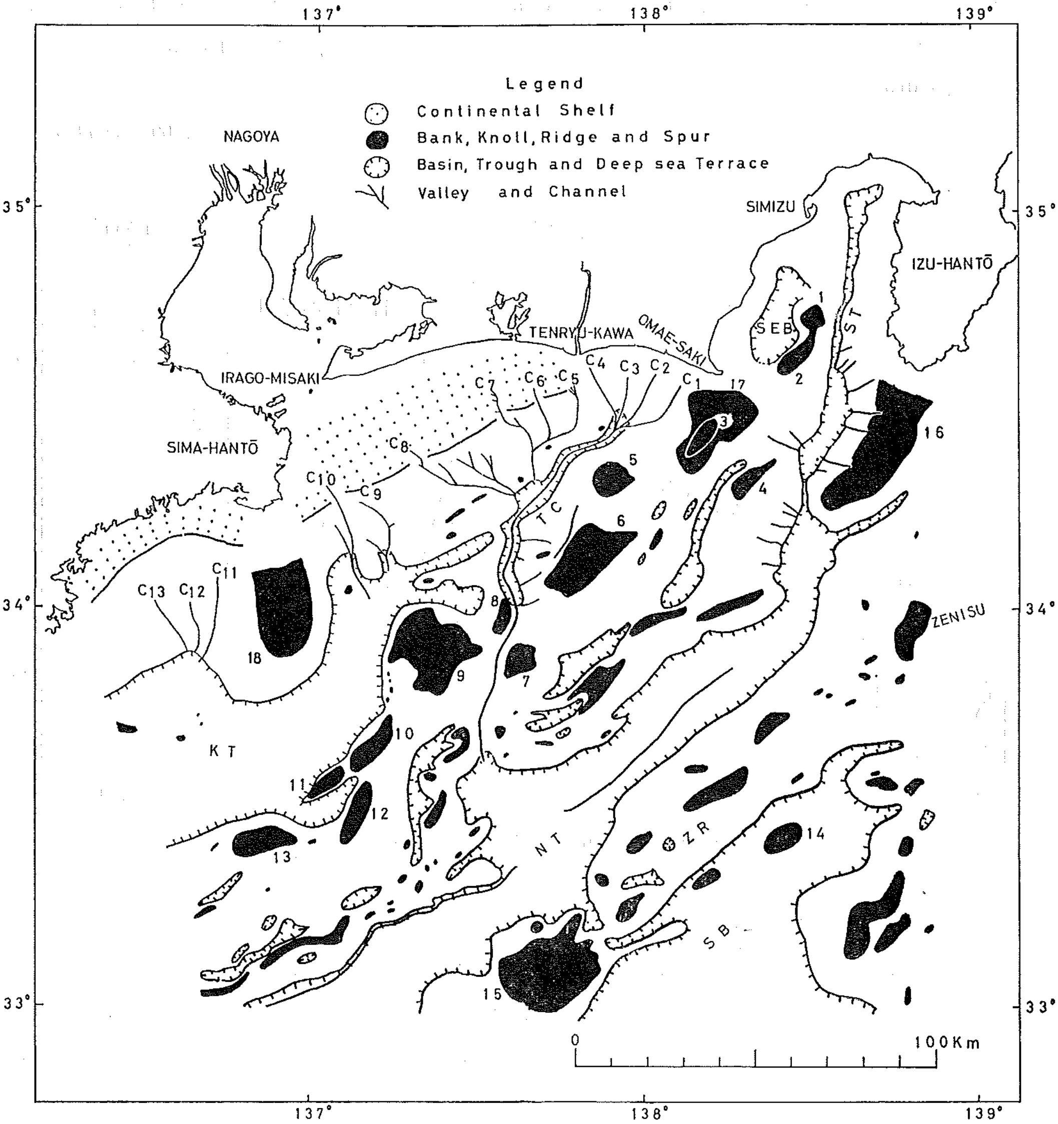


Fig. 2 Classification Chart of Bottom Topography.

** 一般的に水深 130～140m といわれている大陸棚外縁とするには若干問題を残している．

記号	地　形　名	位　置　（概　位）	水深(m)	記　号	地　形　名
1	石花海北堆〔石花海〕	34° 44′ N, 138° 31′ E	51	C 1	浜岡海底谷
2	石花海南堆〔合ノ瀬〕	34° 39′ N, 138° 28′ E	71	C 2	大東海底谷
3	御前埼堆　〔小鯛場〕	34° 27′ N, 138° 11′ E	56	C 3	浅羽海底谷
4	金州の瀬	34° 21′ N, 138° 21′ E	50	C 4	川口海底谷
5	第1天竜海丘〔沖ノ瀬〕	34° 20′ N, 137° 55′ E	468	C 5	浜松海底谷
6	第2天竜海丘〔小台場〕	34° 10′ N, 137° 50′ E	328	C 6	舞阪口海底谷
7	第3天竜海丘	33° 53′ N, 137° 38′ E	1580	C 7	本宮山海底谷
8	第1渥美海丘	33° 59′ N, 137° 35′ E	1600	C 8	高松海底谷
9	第2渥美海丘	33° 55′ N, 137° 29′ E	837	C 9	大山沖海底谷
10	第1志摩海丘	33° 40′ N, 137° 10′ E	1310	C10	安乗口海底谷
11	第2志摩海丘	33° 35′ N, 137° 03′ E	1730	C11	五ケ所海底谷
12	第3志摩海丘	33° 30′ N, 137° 09′ E	1380	C12	神前海底谷
13	第4志摩海丘	33° 25′ N, 136° 52′ E	1700	C13	長島海底谷
14	銭州沖海山	33° 25′ N, 138° 25′ E	2200	SEB	石花海海盆
15	遠州灘沖海山	33° 02′ N, 137° 43′ E	2680	TD	天竜海底谷
16	伊豆海脚			KT	熊野舟状海盆
17	御前埼海脚			NT	南海舟状海盆
18	志摩海脚			ZR	銭州海嶺
				SB	四国海盆

水深120m前後である．

外縁の形態は志摩半島沖で比較的明瞭な傾斜変換点を示すが，伊良湖沖ではやや丸みを帯び，不明瞭となる．大陸棚斜面の一部は天竜川沖から伊良湖岬沖で崖状を示し，その上端が大陸棚外縁となっている．大陸棚外縁を刻む海底谷は御前埼南西沖から伊勢湾沖に分布する．

この海域の大陸棚の外縁深度・幅・あるいは外縁を刻む海底谷の分布域は天竜川沖，伊勢湾沖を境にして地域的な違いが認められる．

3.1.2 大陸棚斜面

斜面の平均傾斜は2〜3°であるが部分的にみれば4〜6°のところがある．志摩半島沖では大陸棚外縁から水深300〜500mまでは緩斜面で，水深500から1700m間では比較的急傾斜となるとともに海底崖あるいは地すべり状の地形がみられ，この部分に五ケ所・神前・長島海底谷が分布する．伊勢湾沖から御前埼沖では，斜面の基部に地形的凸所があり，その陸側に平坦面がみられる．この平坦面は浜松，舞坂口海底谷（Fig. 2）下流部で700〜800m，高松海底谷下流部で1000〜1100mの面である．この地域の海底崖および地すべり状の地形は高松海底谷と浜松海底谷の間にみられ，特に高松海底谷の支谷が分布する水深500mから1000mの部分は顕著な海底崖となっている．

3.1.3 深海平坦面

熊野舟状海盆（Fig. 2）は伊勢湾沖から区域外の熊野灘にかけて分布する水深1600〜2000mの平坦面である．

伊勢湾沖の水深1600～1900mの海盆底は北から南に向って傾斜し，水深1900～2000mの部分は東西方向で見るかぎり極めて平坦な面である．しかし，志摩半島沖の海盆底には東西方向に点在する地形の高まりがあり，この高まりから陸側は水深が30～50m浅い面となっている．この面は五ケ所・神前・長島海底谷（Fig. 2）の開口部にあたる．

熊野舟状海盆東縁と天竜海底谷にはさまれる地域には2段の狭小な凹地が形成されている．北側の凹地は水深1200～1400mで，軸が西に傾き，東端は天竜海底谷に下る海底崖となる．南部の凹地は水深1500～1600mで，軸部は中央で浅く，熊野舟状海盆および天竜海底谷に向って傾く鞍部である．これらの凹地には海底谷の流入はみられない．

天竜海底谷上流域の谷軸方向は全体にＮＥ－ＳＷ方向であるが，天竜川沖で屈曲してＥＮＥ－ＷＳＷ方向を示す．谷頭は水深700m付近にあり，ここに浜岡・大東・浅羽・川口海底谷が，また谷幅のやや広くなる水深1400～1500m付近には，浜松・舞坂口・本宮山・高松海底谷が開口している．天竜海底谷上流域の谷壁は海底崖を示し，谷底は平坦である．

3.1.4 堆・海丘列

深海平坦面の外縁から南海舟状海盆に至る幅40～60㎞の地域で，分断された地形が配列し，いわゆる ridge and trough zone（岩渕，1970）と考えられる．この配列は大きくとらえると，御前埼沖から2列の堆・海丘列と，それにはさまれる小規模海盆が雁行しながら南海舟状海盆に沿っている．このうち陸側の堆および海丘は深海平坦面からの比高が500～800mで，御前埼堆を含む御前埼海脚，第1・第2・第3天竜海丘，第1・第2渥美海丘・第1・第2・第3・第4志摩海丘などがこれにあたる（御前埼海丘列と仮称する）．沖側の堆および海丘は金州の瀬から南海舟状海盆の北西縁に沿っており（金州の瀬海丘列と仮称する），南海舟状海盆からの比高は金州の瀬で3500m，それより西側で1200～1800mである．南海舟状海盆に下る斜面の傾斜は約15～19°である．

天竜海底谷は前述の上流域から谷軸を南北方向にとり，第3天竜海丘と第2渥美海丘の間でＮＮＥ－ＳＳＷ方向となり南海舟状海盆に達する．

この地域の海丘のうち，第2渥美海丘は隣接する西側の第1志摩海丘および東側の第3天竜海丘と比較して，頂軸方向が急変し，北に偏移すること，頂部水深が500～700m浅くなっていることなどから一つの地塊と推定される．また海丘列の海丘と海丘の間は鞍部になっていて，海丘列間の小規模海盆などを考慮すると，さらに多くの小規模な地塊に分けられる可能性がある．

3.1.5 南海舟状海盆

御前埼南東方70㎞が南海舟状海盆の頭部であり，水深3500～3700mの平坦面である．この平坦面の北縁は傾斜約5°の幅の狭い凹地で駿河舟状海盆と接続し，東縁は伊豆海脚（Fig. 2）の南東斜面下の凹部に連続する．南海舟状海盆の軸は水深3700m付近から南西方に折れ曲るとともに幅が広くなり，海盆底は南西方向に深くなる．この南西方向の海盆底には部分的に小起伏がみられ，Channel が発達している．Channel は水深3700～4000mの部分で海盆の中央に位置し，天竜海底谷との接合部付近で不明瞭となる．しかし水深4100mから以西で再び明瞭となり，海盆北西縁の大陸斜面下に位置する（Fig. 2）．Channel の横断面は平底形で，幅約2～3㎞，比深40～60m程度であるが，部分的には100mに達するところがある．縦断面は順傾斜を示す．

3.1.6 銭州海嶺

銭州から南西方向に延びる，幅約30㎞，南海舟状海盆および四国海盆からの比高約2000mの海嶺である．頂部は南西方向に深くなる．南海舟状海盆および四国海盆に下る斜面の傾斜は水深2500～3500mがとくに急であり約12°である．この海嶺の先端（区域内）には頂部水深2680mの遠州灘沖海山（Fig. 2）があり，海山の北東側は

海嶺を胴切るように幅の狭い凹地が認められる.

3.2 駿河湾地域

この地域は陸岸から駿河舟状海盆に至る斜面部の幅が狭いこと，地形の走向が大概北を向くことなどから遠州灘地域と異質である．しかし駿河舟状海盆の西側斜面には深海平坦面および堆が分布し，遠州灘地域との類似点もみられるが，ここでは大陸斜面として一括する．

3.2.1 大陸斜面

駿河舟状海盆の西側斜面は石花海海盆および石花海堆（Fig. 2）の北縁を境にして北部と南部に分けられる．北部は水深900m以浅に海脚状の高まりおよび谷状の小地形が分布し，水深1000～1500mで単調な急斜面となる．南部は陸岸から駿河舟状海盆に向って石花海海盆・石花海堆（北堆と南堆に分れている）が分布し，その南端は御前埼海脚北東縁の凹地で境される．石花海海盆は南から北に傾きながら延びる凹地で，水深400～800m，幅約10km，長径約20kmである．この海盆の北縁は東西方向の狭小な凹地となり駿河舟状海盆底に続く．

石花海堆は堆軸がＮＮＥ－ＳＳＷ向でやや駿河舟状海盆の軸方向に斜交する．石花海北堆と南堆は水深 171m の鞍部によって分けられ，堆の斜面は西側が急で，堆頂面は駿河舟状海盆に向って傾いている．石花海南堆から駿河舟状海盆に至る斜面には水深1400～1500m・1700～1900m・2200～2400mに幅の狭い平坦面が分布する．

一方，駿河舟状海盆の東側斜面には水深400～500m・900～1000mに傾斜変換点があり，水深1000mから駿河舟状海盆に至る斜面の傾斜はとくに急で20～26°に達する．

伊豆海脚は先端部が南西方向に曲り，全体的にみると駿河舟状海盆に向って傾いている．海脚の南西縁と金州の瀬の間が駿河舟状海盆と南海舟状海盆を境する幅の狭い凹地であり，南東縁は南海舟状海盆頭部から北東方向に延びる凹地である．海脚上の400～600m等深線の東縁は南北方向の海底崖を形成している．海脚の西側斜面は水深1000～1500mに傾斜変換点があり，ここから駿河舟状海盆に下る斜面の傾斜は15°前後である．この斜面上には海底谷が分布し，駿河舟状海盆の2400～2800m面に開口する．

3.2.2 駿河舟状海盆

海盆の中心部は全体的にＮ－Ｓ方向を示すが，湾奥部の水深1000m付近で北東方向に折れ曲っている．海盆底には二つの平坦面がみられる．一つは水深1400～1600m，幅2.5～7kmの面，他は水深2400～2800m・幅７～８kmの面である．この二つの面を接続する水深1800～2300mの部分は幅の狭いＶ字形の横断面を示す．縦断面の傾斜はＶ字形の部分で2°30′，両平坦面では約0°55′であり順傾斜を示す．この面のうち2400～2800mの面は東に緩く傾き，最深部が東縁に沿ってみられ，この部分に海底谷が開口している．

4. 地　質

4.1 地層区分

音波探査記録にみられる地層は上位から Ae・Be・Ce・De 層に区分される．Fig. 5 はこの海域の地質図である．

Ae 層：熊野舟状海盆の中心部では平行層理がみられ，約0.4 sec の厚さで Be 層の凹所を埋積し，縁辺部で Be 層あるいは下位層にアバットする．駿河舟状海盆底の水深1500m付近では厚さ 0.2 sec 程度で，層理が不明瞭で黒くて密な反射面で縁辺部の Ce あるいは De 層にアバットする．南海舟状海盆底ではやや透明で，層理がみられ両側斜面で Ce または De 層にアバットする．大陸棚から大陸棚斜面では地形に平行し，下位層を傾斜不整合に覆う．

Be 層：熊野舟状海盆，大陸棚斜面で白黒の縞目のパターンを示し，層理の連続性がよい．熊野舟状海盆の中

心部で厚さは 0.4 sec 以上とみられ，縁辺部では Ce 層にアバットあるいは尖滅している．大陸棚斜面の一部では Ae 層と傾斜不整合を示す．御前埼海脚・第1・第2天竜海丘では Ce 層をオーバーラップしている．

Ce 層：いわゆる透明層で，層理のみられるところもあるが層理が密で層理の連続性が悪い．志摩半島沖の大陸棚斜面で De 層にアバットする．

De 層：この海域の最下位層で音響的基盤としたものであり，層理は不明瞭である．南海舟状海盆から陸側では表面が強い反射面として表わされ，反射面の下は白く抜ける．銭州海嶺側では強い反射面がかなり厚く現れる．

4.2 地層の分布と構造

この海域の主な地質構造の方向は南海舟状海盆，海丘列および深海平坦面に代表されるＮＥ－ＳＷないしＥＮＥ－ＷＳＷ方向，駿河舟状海盆のＮ－Ｓ方向，天竜海底谷のＮＮＥ－ＳＳＷないしＮＥ－ＳＷ方向，および伊勢湾沖から天竜川沖に分布する海底谷の軸方向をとるＮＷ－ＳＥないしＮＮＷ－ＳＳＥ方向である．

地層の分布域はこれらの構造軸によって規制されている．すなわち Ae 層は大陸棚から大陸棚斜面および海盆底の表層を形成し，Be 層は主に御前埼海丘列付近から陸側および石花海海盆に分布する．Ce 層は広範囲に分布するが，金州の瀬海丘列・銭州海嶺の頂部および駿河舟状海盆をとりまく斜面には分布せず，De 層の露頭となっている．

4.2.1 遠州灘地域

（i） 大陸棚

志摩半島沖では Be・Ce 層が分布せず，Ae 層が De 層を不整合に覆っている．De 層の表面は音波散乱状を呈する．伊良湖岬～天竜川沖では Ae 層が外縁部に向って厚くなり，沖側に傾いている．高松海底谷から天竜川沖では外縁部の一部が Ae 層を切る断層崖の肩になっている．また高松海底谷と本宮山海底谷間の水深 150～250m 付近には Ae 層を切る二条の断層がみられる．この断層はＥ－Ｗ方向，北落ち断層で落差は２～５m程度である．

（ii） 大陸棚斜面

志摩半島沖では Ae 層を除いて新しい地層ほど沖側に分布している．Ce 層は水深 700m 付近から志摩海脚の水深200～300mで De 層にアバットし，Be 層は熊野舟状海盆底の水深2000m付近から志摩海脚の水深 500m 付近で Ce 層にアバットあるいは尖滅する．Ae 層は De 層を覆い，大陸棚外縁から斜面上部に垂れ下がるように分布している．

伊良湖岬～天竜川沖では Ae 層が撓曲し，斜面の一部は Ae 層を切る断層崖となっている．安乗口海底谷と高松海底谷間は水深1000mまでは，Ae 層の撓曲面が斜面を形成している．高松海底谷と本宮山海底谷間は断層崖が大陸棚斜面そのものであり，水深 500m 以深に Be 層が露出する．この斜面に分布する海底谷は大陸棚外縁付近で Ae 層を，水深500～800m付近から下流部で Be 層を刻んでいる．斜面基部にはＮＥ－ＳＷ 方向の Be・Ce 層の褶曲がみられ，天竜海底谷上流域に下る斜面は Ce あるいは Be 層の露出する断層崖である．

（iii） 深海平坦面

熊野舟状海盆には Be・Ce 層の褶曲がみられ，海丘列の縁で微小な断層がみられる．とくに海盆の中心部は Be 層の向斜部となっている．海盆底にみられる地形的凸所（前述）は Be 層の露頭で，陸側から供給されたとみられる堆積物を堰止めている．

伊勢湾沖から天竜海底谷上流域では Ce・Be 層の褶曲，断層が顕著である．伊勢湾沖で Be 層は熊野舟状海盆に向って厚く，志摩海脚に向って薄く堆積している．天竜海底谷上流域は大陸棚斜面基部にみられる背斜構造

と堆•海丘列側の背斜構造の間にみられ，Be 層を切る地溝状の凹地である．この凹地に Ae 層が堆積している．

これらの褶曲，断層軸はＮＥ—ＳＷあるいはＥＮＥ—ＷＳＷ方向である．

(iv) 海丘列

御前埼海丘列の Ce 層には Ae あるいは Be 層が深海平坦面側からアバットまたは尖滅している．御前埼海脚，第１・第２天竜海丘では Be 層が Ce 層にオーバーラップないしは頂部付近で尖滅している．とくに御前埼海脚頂部では Be 層が浸蝕をうけ Ce 層が露出している．

天竜海底谷以西の第２渥美海丘では Be層が，第１•第２志摩海丘斜面には Ae 層が Ce 層にアバットしている．また，第４志摩海丘では Be 層が頂部まで堆積した後，浸蝕されたことが明らかである (Fig. 5，断面F—F′)．

金州の瀬海丘列はほとんどDe層の露頭であり，Ce・Be・Ae 層の堆積はみられない．この海丘には御前埼海丘列から沖側斜面に露出する Ce 層がアバットしている．

構造軸の方向はほぼ南海舟状海盆に沿うＥＮＥ—ＷＳＷ方向，ＮＥ—ＳＷ方向であるが，海丘の軸には雁行配列がみられる．特に伊勢湾沖の第２渥美海丘・第１・第２・第３志摩海丘で顕著である．

(ｖ) 南海舟状海盆

海盆底に分布する Ce 層は銭州海嶺側の斜面に尖滅し，大陸斜面基部に向って深くなり明らかでない．Ce 層を覆っている地層は全体に Ae 層とみられ，Ae 層は銭州海嶺側に向って薄くなり，Ce 層にアバットまたは収れんしている．Ae 層の層理面には天竜海底谷との接合部以西で軽微な褶曲および断層がみられる．channel は Ae 層を刻んでいる．

(vi) 銭州海嶺

海嶺の中心部は De 層の露頭であり，De 層の斜面に Ce 層が尖滅している．尖滅している点の水深は四国海盆側で2000m前後，南海舟状海盆側で3000～3500m付近である．

遠州灘沖海山では頂部付近まで比較的厚い Ce 層がみられ，Ce 層は褶曲している．

4.2.2 駿河湾地域

(ｉ) 大陸斜面

駿河舟状海盆の西側斜面の上部には De 層の上に Ce 層が薄く平行するようにのり，斜面の基部に De 層が露出する．東側斜面では Be 層が海盆に向って傾き，分布する下方先端部は地形傾斜変換点とほぼ一致する．ここより海盆側で Ce・De 層の露頭となる．伊豆海脚上には Ce および Be 層を切る南北方向，東落ち断層がみられる．

石花海海盆では Ae 層の堆積はみられず，Be 層が海盆底を形成している．この Be 層は陸側および石英海堆側の斜面で Ce 層に尖滅またはアバットしている．石花海堆頂部は Ce 層の露頭であり，Ce 層は駿河舟海盆側へ向って緩く傾く．

(ii) 駿河舟状海盆

海盆底の水深1000～1500m，および水深2400～2800mには Ae 層の堆積がみられる．1000～1500mの部分で Ae 層は緩やかに向斜を示し，2400～2800mの部分は東に向って緩く傾き，それぞれ Ce または De 層にアバットする．この２つの Ae 層堆積盆の間は幅が狭く De 層の露頭である．

4.3 対　比

今回の調査では金州の瀬付近で２点の採泥が行われたが，現在資料の解析がなされていない．しかし奥田ほか (1976) を参考にすれば，Ae 層は第四紀洪積世中期以降，Be 層は中新世末から洪積世中期，Ce・De 層は中新世前～中新世末期と考えられる．

5. 地質構造発達史

以上のことから，この地域の地質構造発達史はおおむね次のように推察される．

① De 層堆積後：伊豆半島沖から遠州灘の海域にＮＥ－ＳＷ方向，ＥＮＥ－ＷＳＷ方向の断層を伴う構造運動がおこった．この運動で金州の瀬海丘列・銭州海嶺および南海舟状海盆の原形が形成され，金州の瀬海丘列，銭州海嶺は相対的に隆起し，南海舟状海盆は沈降した．志摩半島沖は隆起して，現在の大陸棚付近は陸域となり侵蝕された．Ce 層はこれらの隆起部を除き，広範囲に堆積した．

② Ce 層堆積後：御前埼海丘列を中心に隆起運動がおこり，同時にこの隆起帯を切るＮＮＥ－ＳＳＷ方向あるいはＮＮＷ－ＳＳＥ方向の断層が生じた．この結果，天竜海底谷下流域を形成するとともに，第３天竜海丘・第１・第２渥美海丘・第１・第２志摩海丘などを形成した．志摩半島沖ではこれらの海丘の隆起に伴ない，大陸棚斜面基部が沈降域となり熊野舟状海盆の原形となった．

南海舟状海盆は金州の瀬海丘列の全体的な沈降とともに深化した．駿河湾ではＮ－Ｓ方向を軸とする中心部が撓曲運動によって沈降しはじめ，駿河舟状海盆の原形が形成された．

Be 層の堆積盆はこれらの運動によって全体的に陸側に移動した．南海舟状海盆は De・Ce 層の高まりに囲まれて Be 層の堆積盆から外れた．

③ Be 層堆積中～堆積後：Ce 層堆積後の運動は Be 層堆積中にも継続された．志摩半島沖の大陸棚地域は隆起が，熊野舟状海盆では沈降が続いた．伊勢湾沖から御前埼沖では御前埼海脚・第１・第２天竜海丘が隆起し大陸棚斜面基部に褶曲帯が形成された．天竜海底谷上流域はこの褶曲帯の形成と同時に地溝状の断層によって形成された．

また，志摩海脚側の隆起は伊良湖岬沖に較べて相対的に大きく，伊勢湾沖の凹部はこのような運動の差によって形成された．高松海底谷などの形成も同様に考えられる．

駿河湾の陸側から中央部に向う斜面の撓曲運動は Be 層堆積後まで継続され，駿河舟状海盆がほぼ完成し，南海舟状海盆と連続した．

Ae 層は主に陸側から供給され，伊良湖岬沖から天竜川沖の大陸棚から大陸棚斜面に，また天竜海底谷上流域，熊野舟状海盆には大陸棚斜面に分布する海底谷を径路として，堆積物が供給され，それらの表層として形成された．

一方，駿河舟状海盆では主に軸方向から供給された堆積物が，Ae 層を形成し，さらに南海舟状海盆へ堆積物を供給した．南海舟状海盆は駿河舟状海盆あるいは天竜海底谷から供給される堆積物によって厚い Ae 層を形成した．

Ae 層堆積後，氷期の海水準低下によって大陸棚が形成された．とくに御前埼海脚では Be・Ce 層が侵蝕された．氷期以後の地殻変動は大陸棚の外縁深度の違いなどからみて，現在でも地域ごとに差異のある運動をしていると思われ，天竜川沖の沈降が目立っている．

謝辞

稿を終るにあたり，原稿を読んでいただき多くのご教示，助言をいただいた水路部測量課長杉浦邦朗氏，水路部測量課補佐官岩渕義郎氏，同主任水路測量官桜井操氏に深く感謝します．また困難な船上作業に多大の協力をいただいた測量船「明洋」船長上田三郎氏ほか乗組員各位，測量に参加された測量課および第一・第三・第五・第八・第九管区海上保安本部水路部の皆様に厚くお礼申し上げます．

参 考 文 献

岩渕義郎 1970 "紀伊半島沖の地形・地質" 島弧と海洋 p.149

奥田義久・井上英二・石原丈実・木下泰正・玉木賢策・上嶋正人・石橋嘉一 1976 "南海舟状海盆およびその北側斜面の海底地質" 海洋科学 Vol. 8, No. 3, p. 48

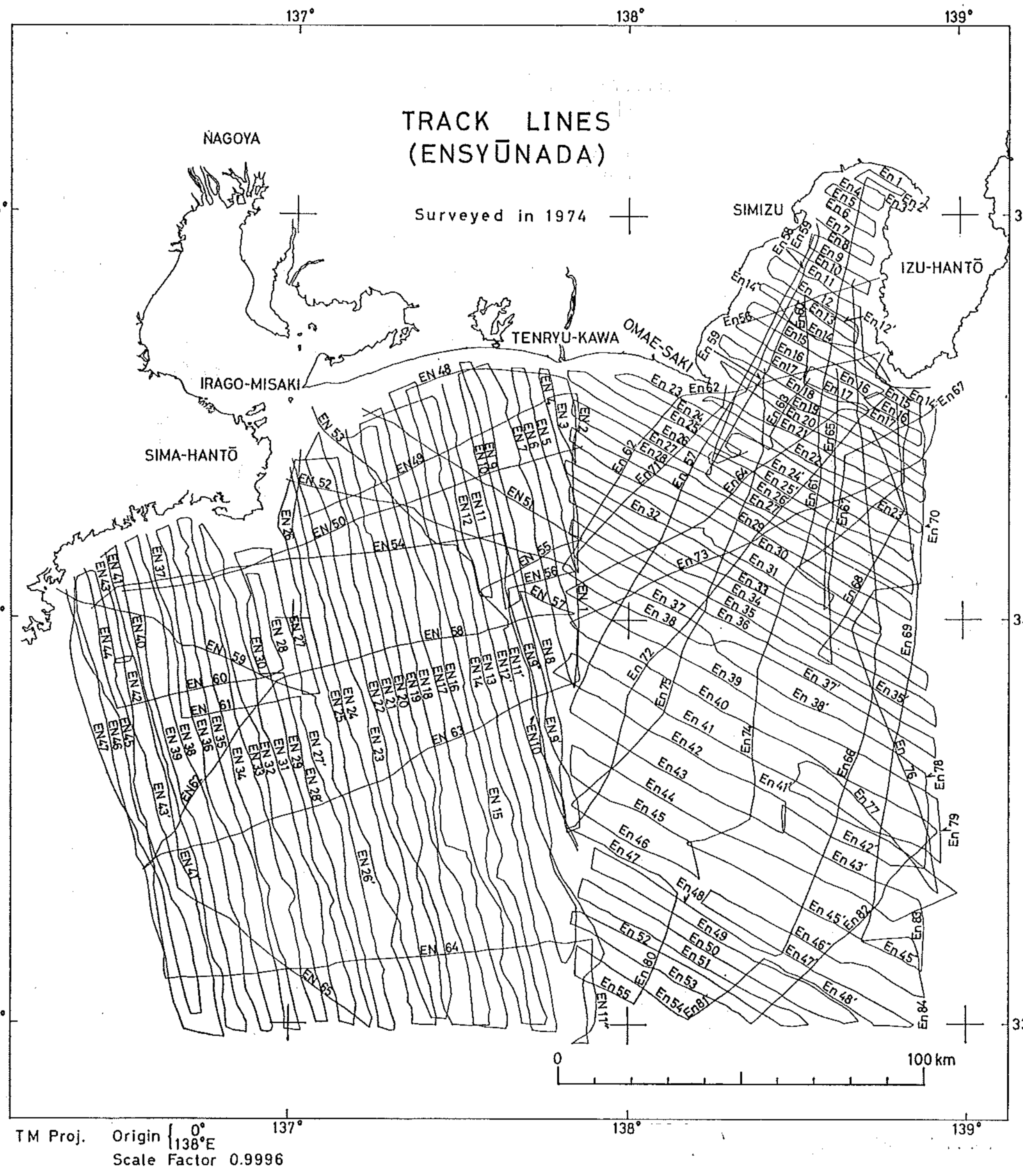


Fig. 3 Tracks of Survey of Ensyu-Nada

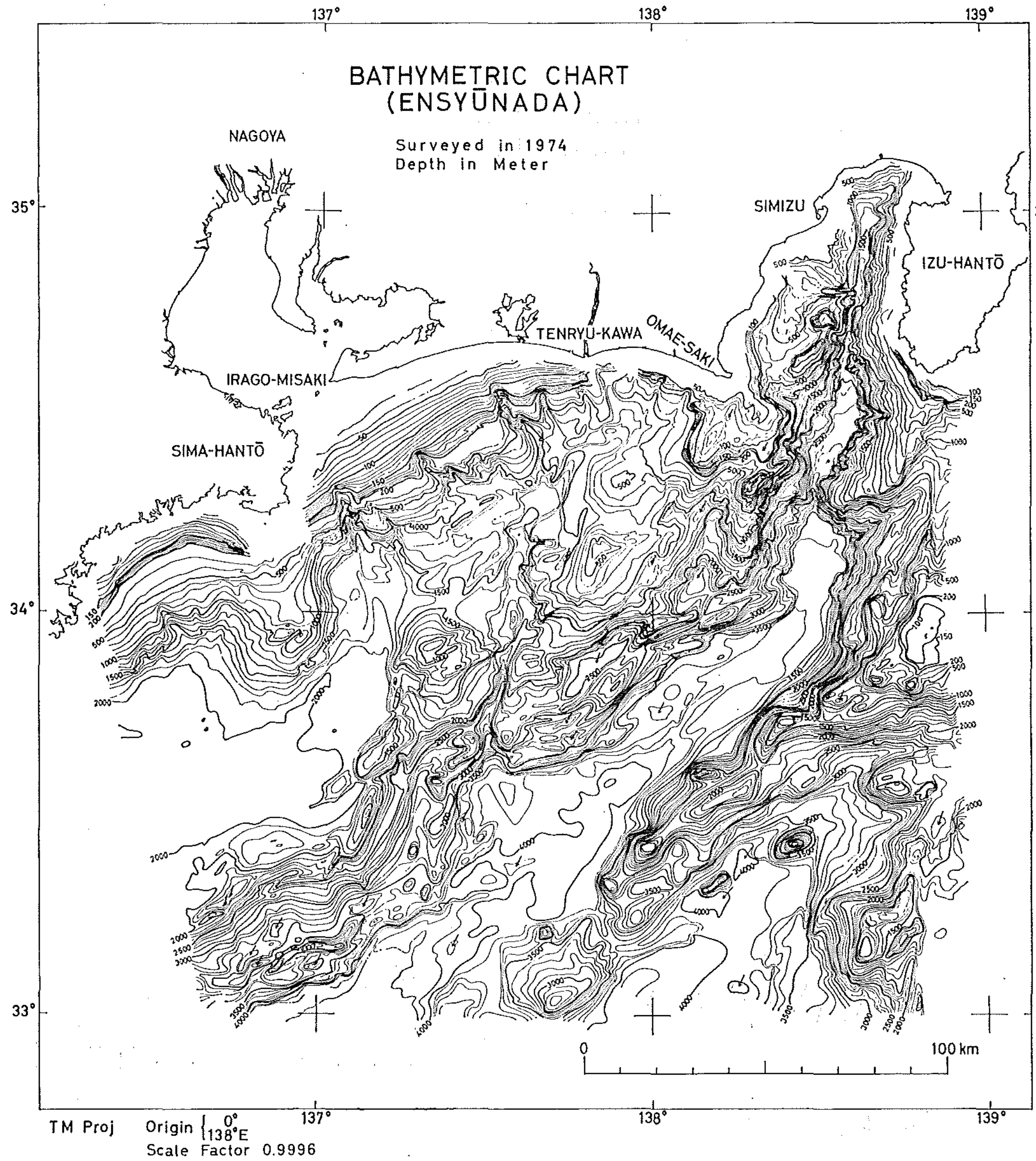


Fig. 4 Bathymetric Chart of Ensyu-Nada unit : m

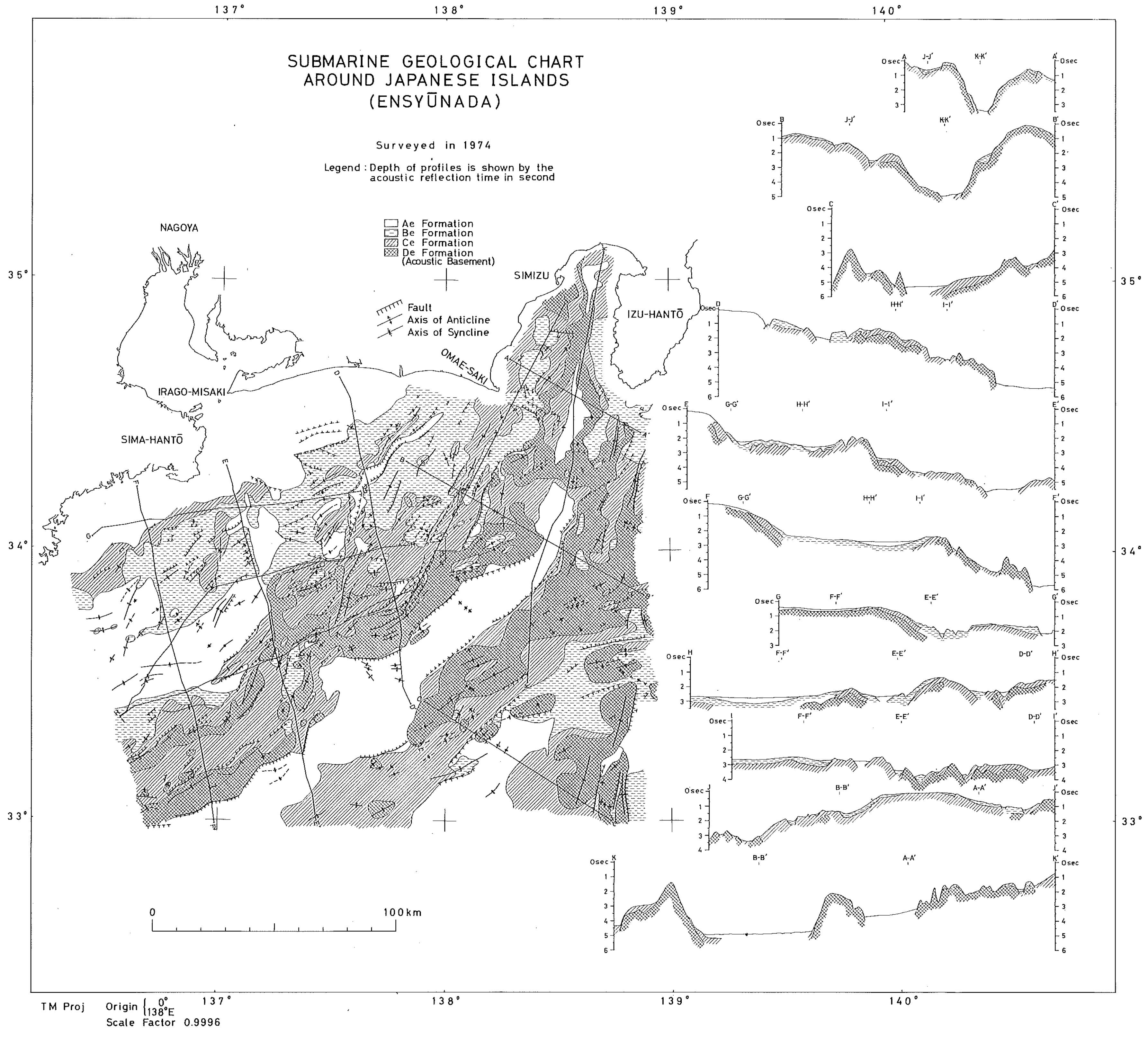
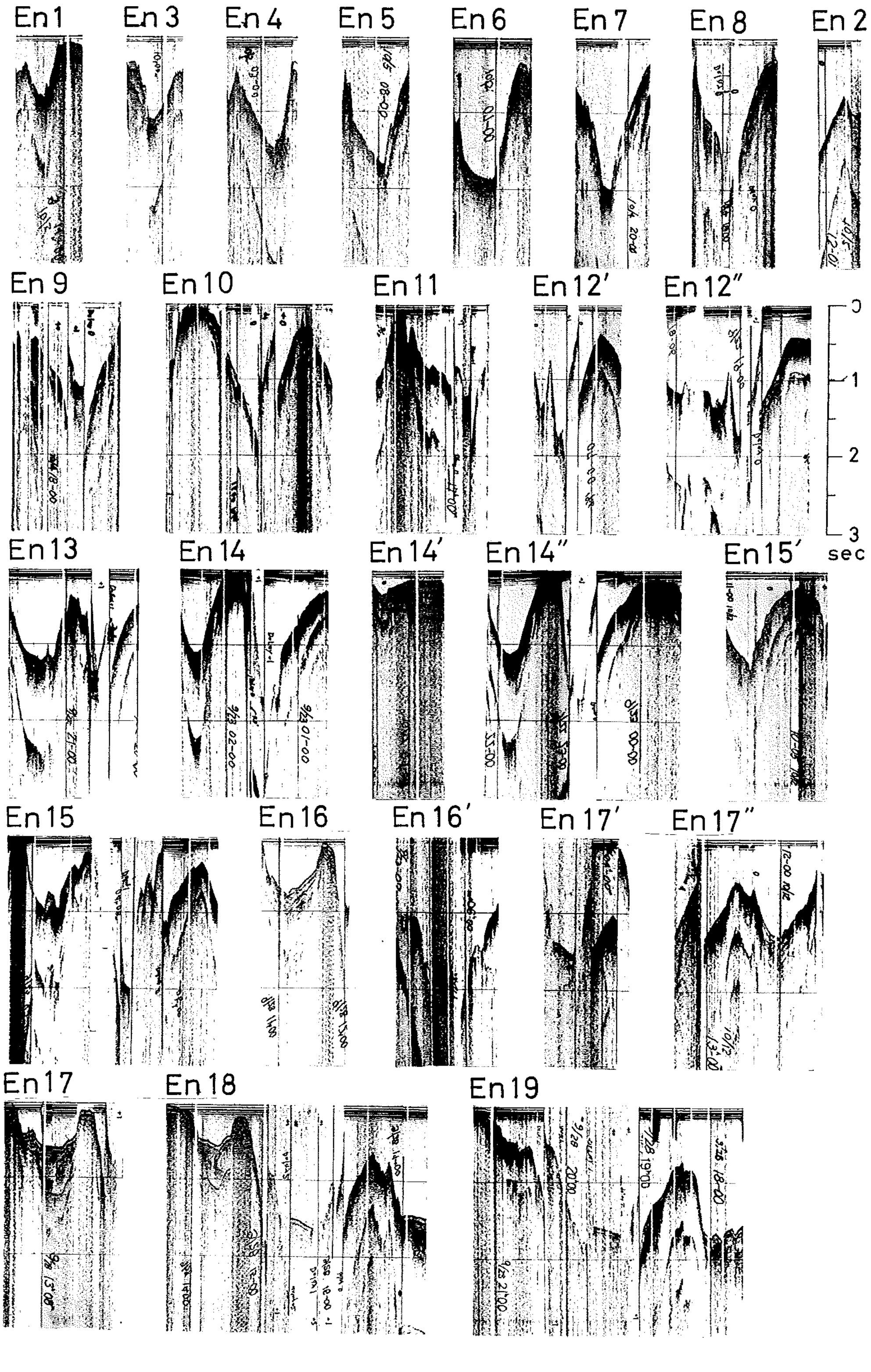
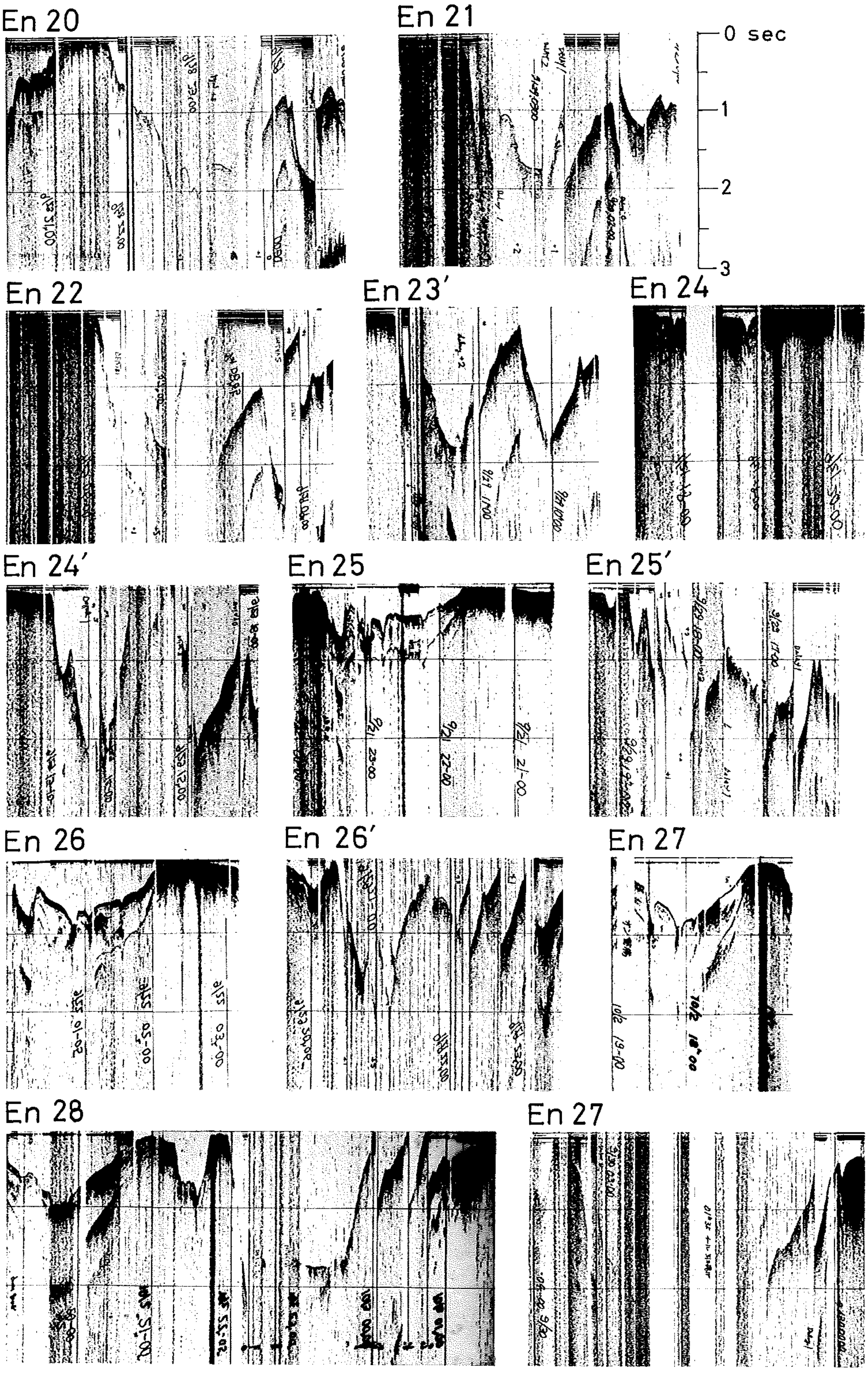
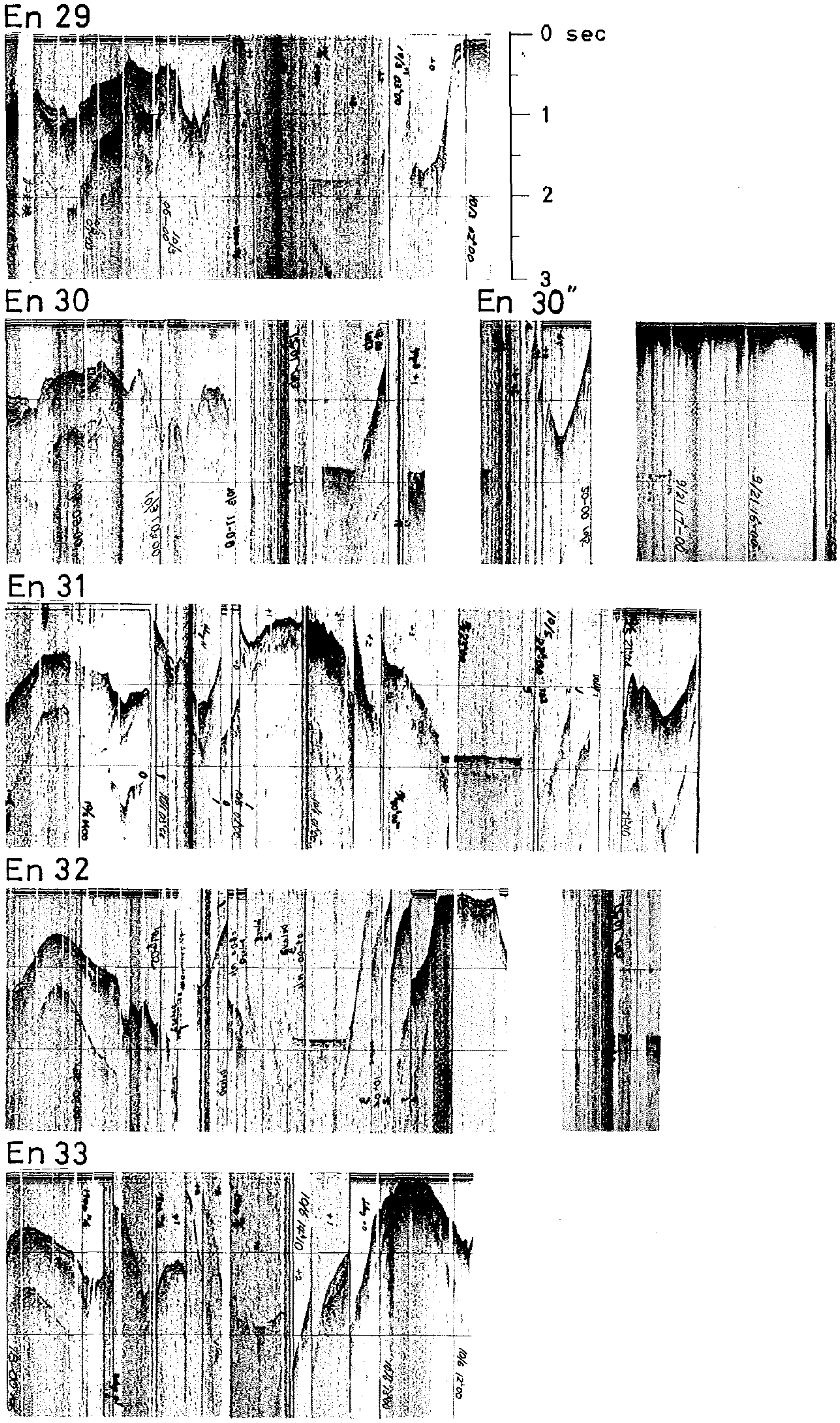


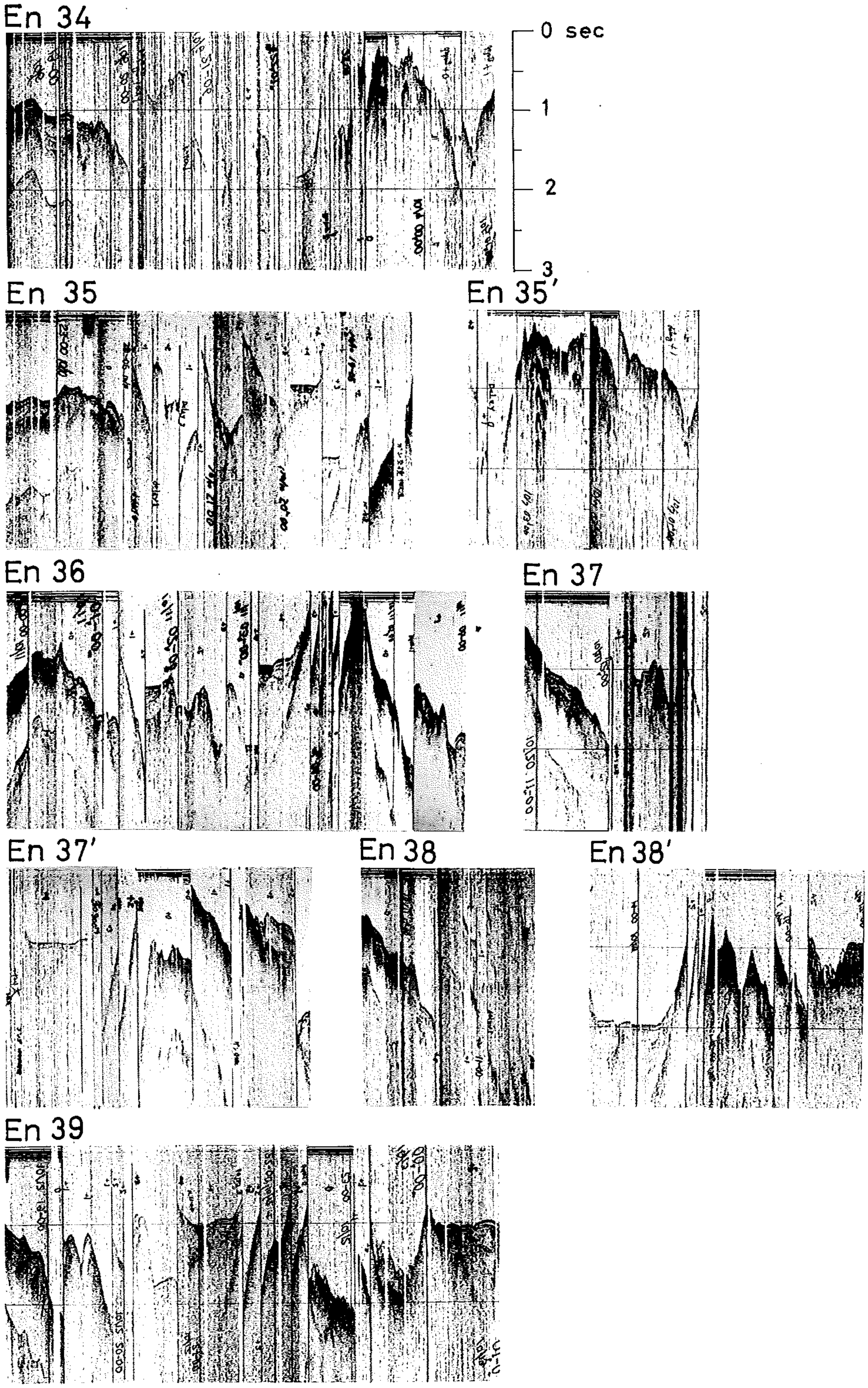
Fig. 5 Submarine Geological Map of Enshu-Nada

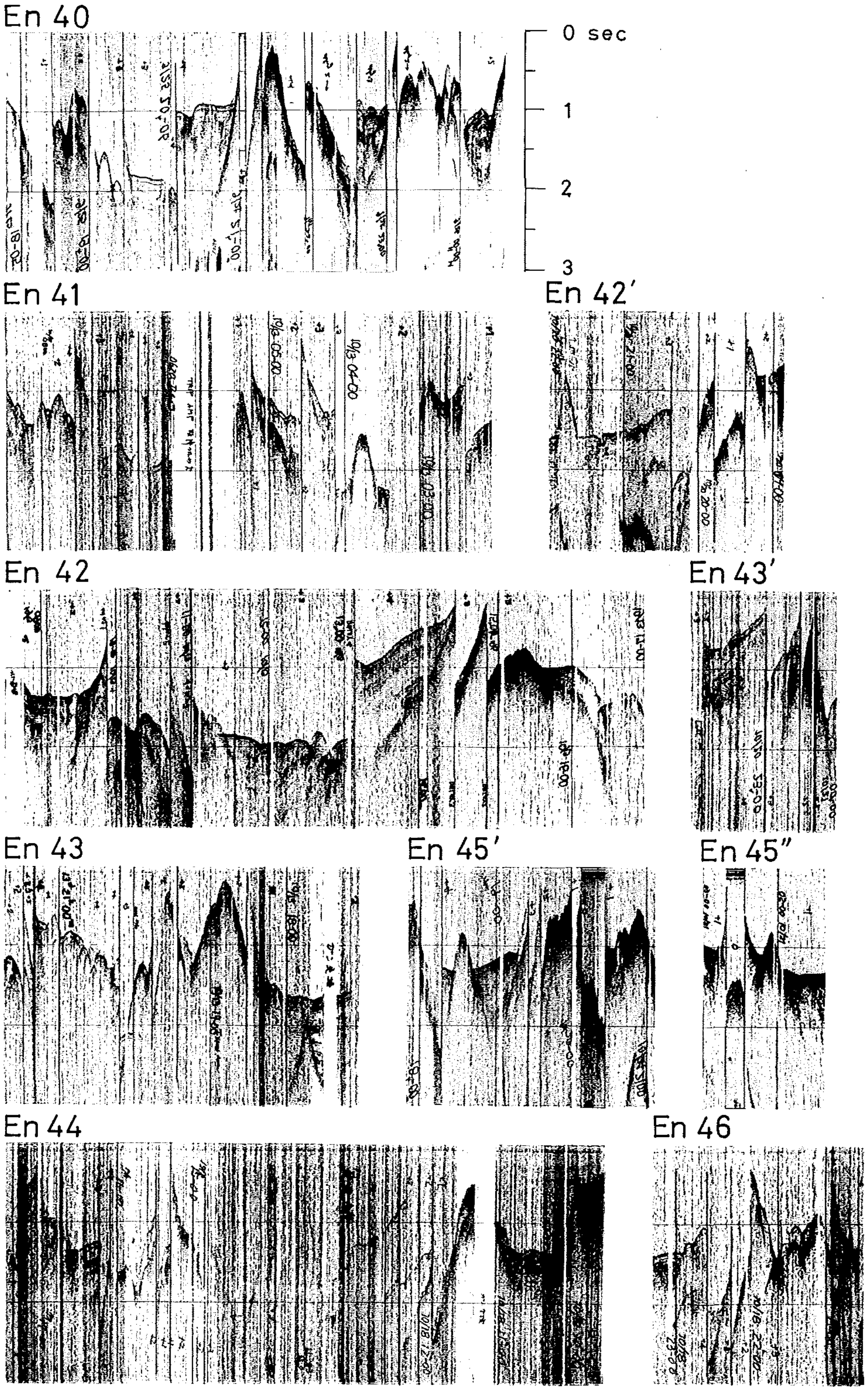


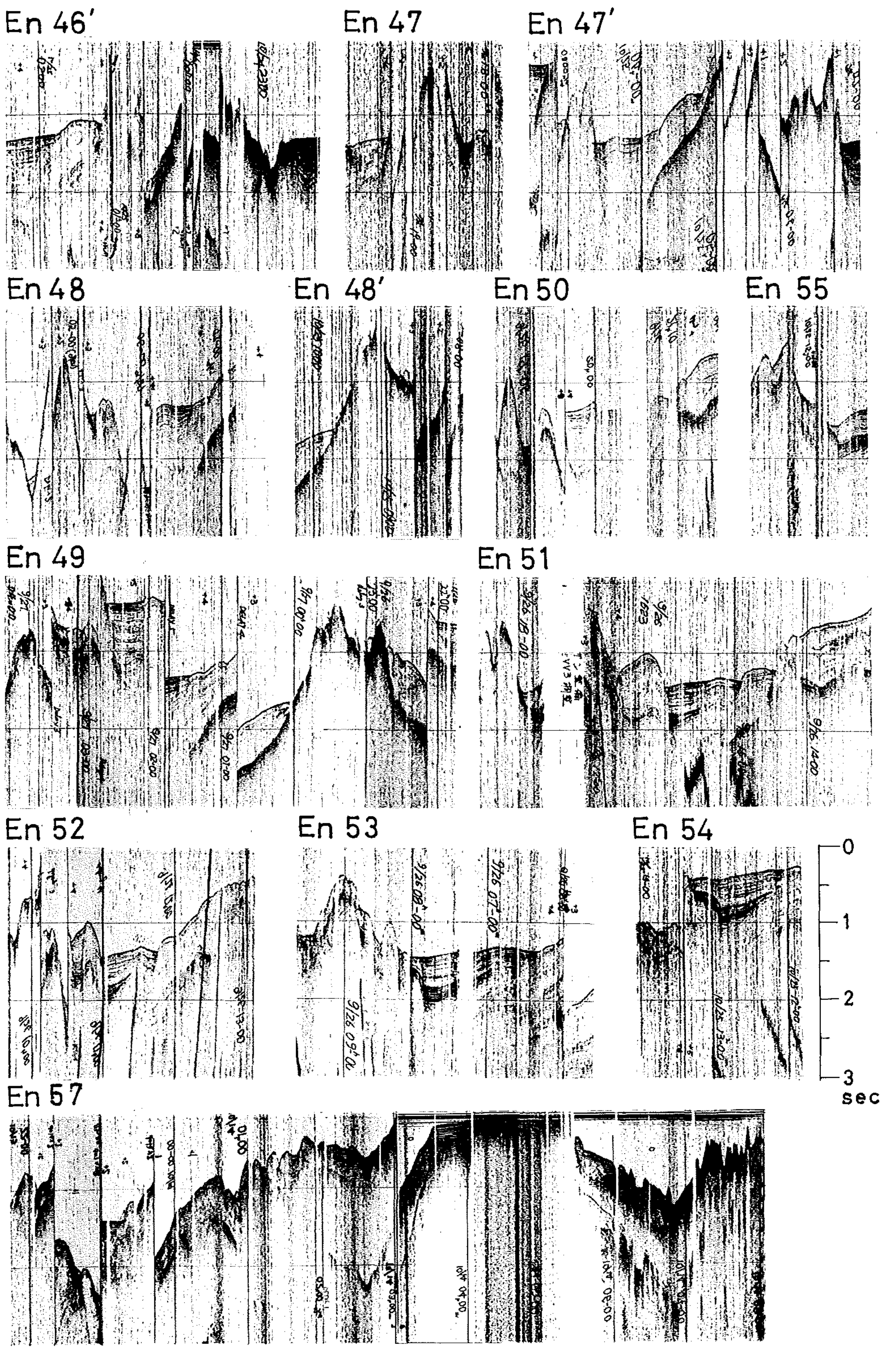
En 1
En 3
En 4
En 5
En 6
En 7
En 8
En 2
En 9
En 10
En 11
En 12′
En 12″
0
1
2
3
sec
En 13
En 14
En 14′
En 14″
En 15′
En 15
En 16
En 16′
En 17′
En 17″
En 17
En 18
En 19

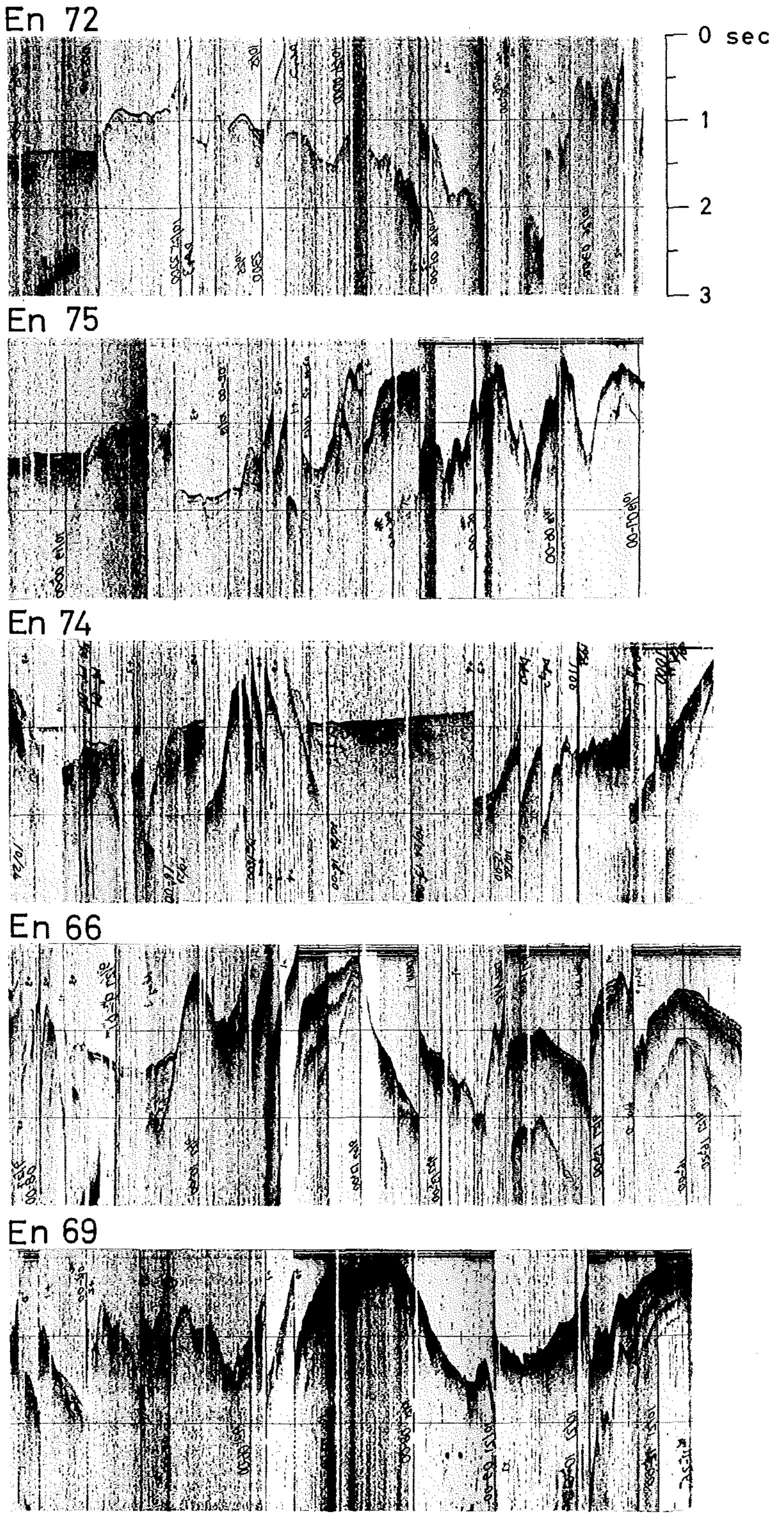

En 20
En 21
0 sec
1
2
3
En 22
En 23′
En 24
En 24′
En 25
En 25′
En 26
En 26′
En 27
En 28
En 27

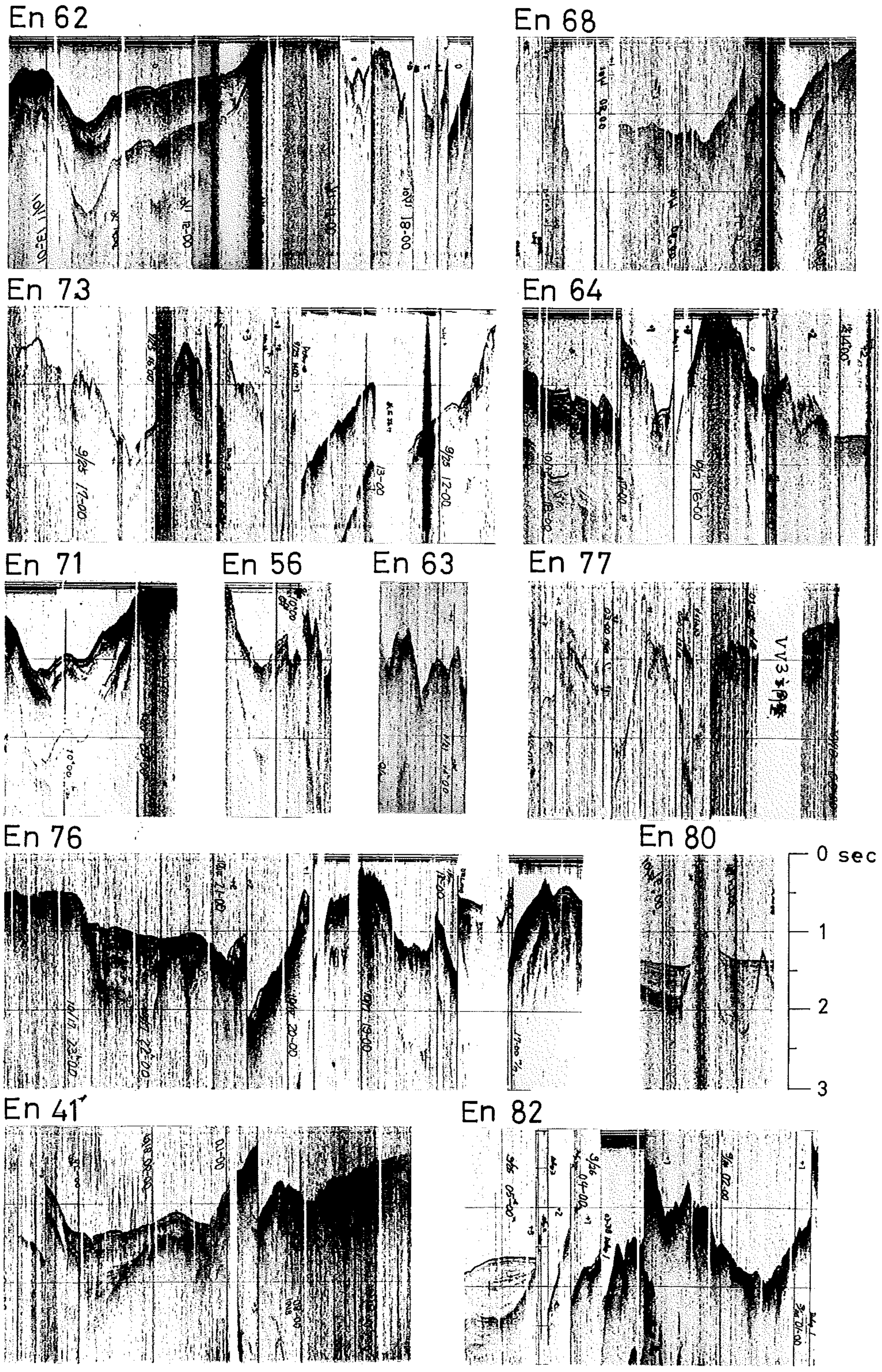

En 29
0 sec
1
2
3
En 30
En 30"
En 31
En 32
En 33

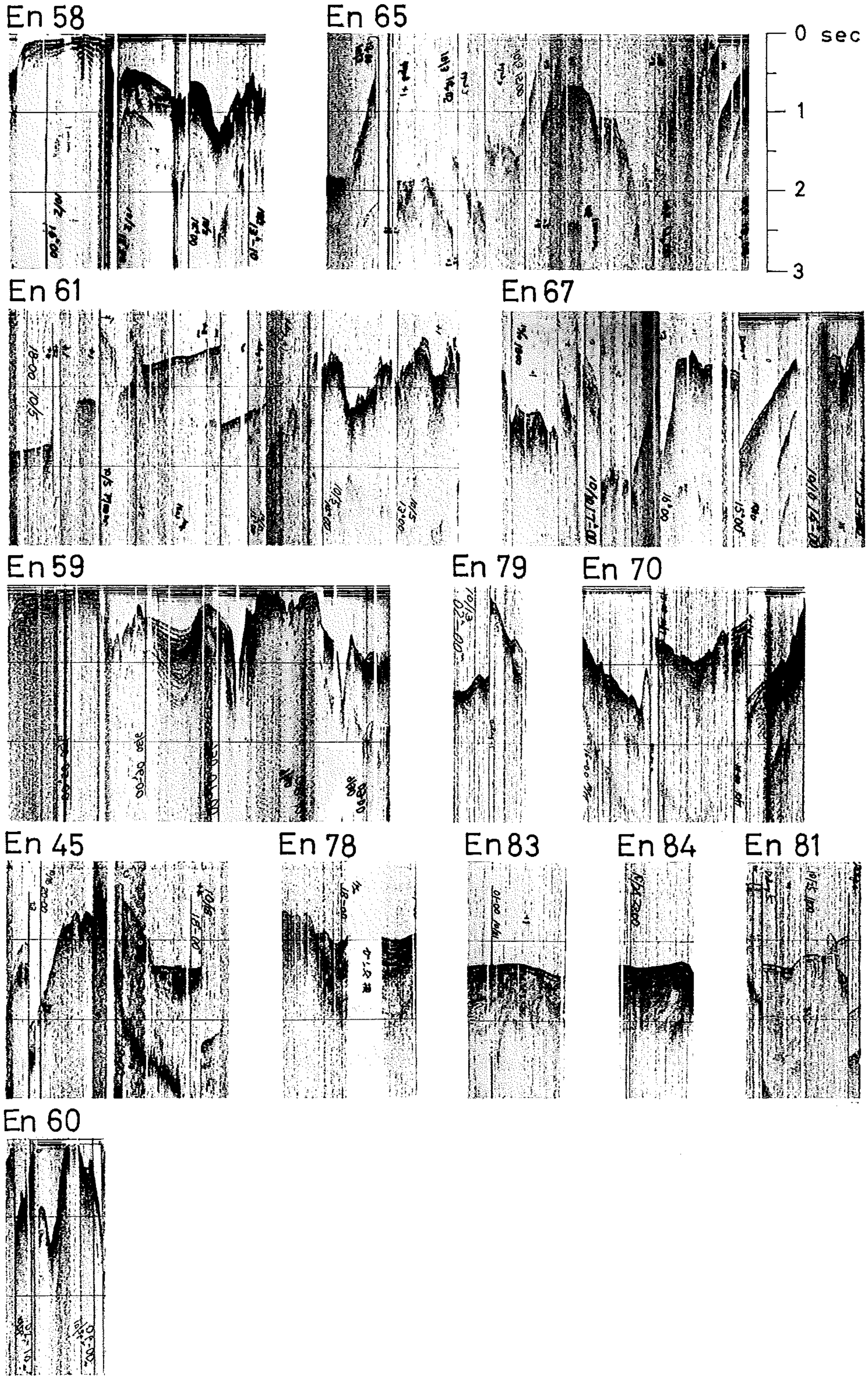

En 34
0 sec
1
2
3
En 35
En 35′
En 36
En 37
En 37′
En 38
En 38′
En 39

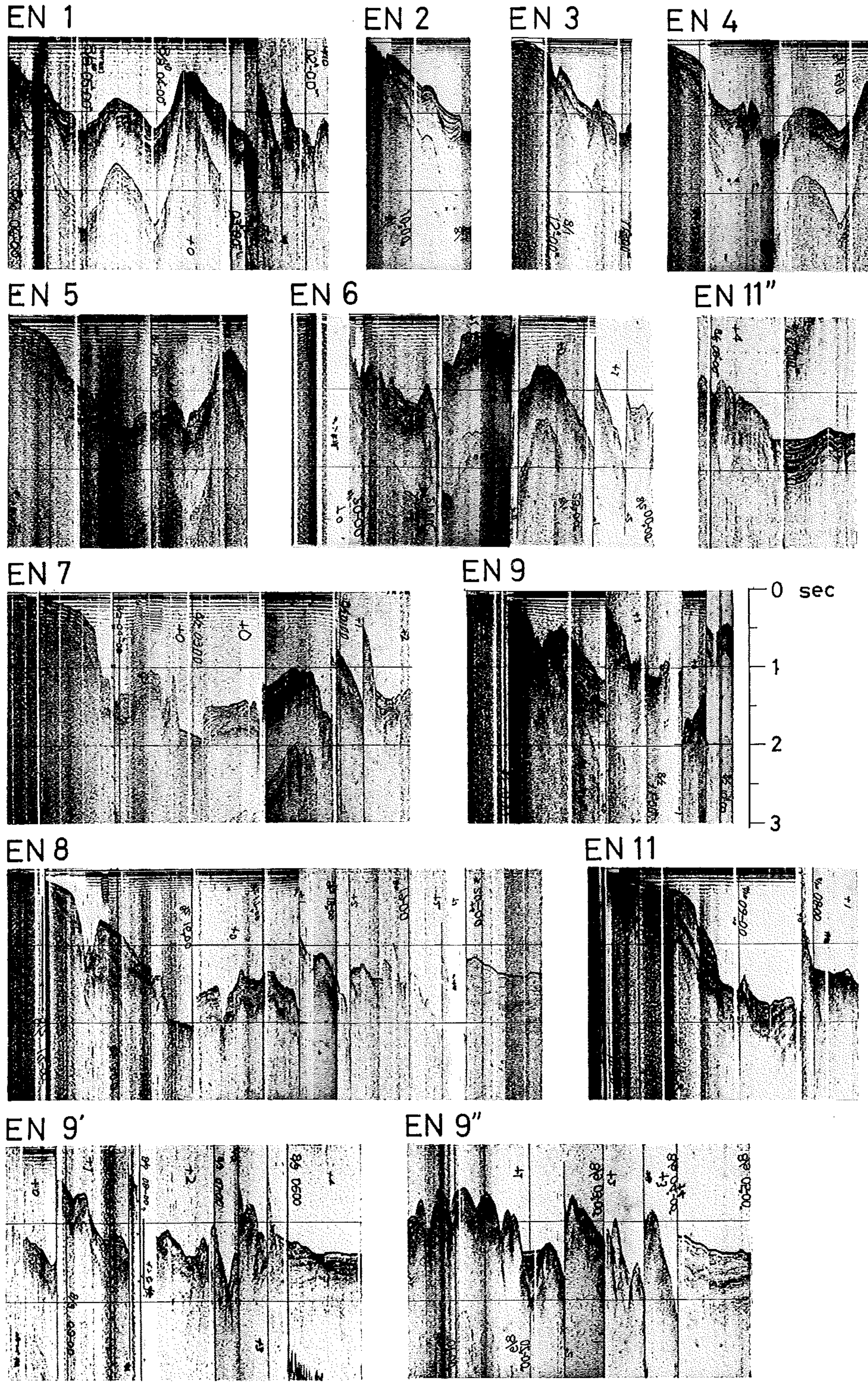

En 40
0 sec
1
2
3
En 41
En 42′
En 42
En 43′
En 43
En 45′
En 45″
En 44
En 46

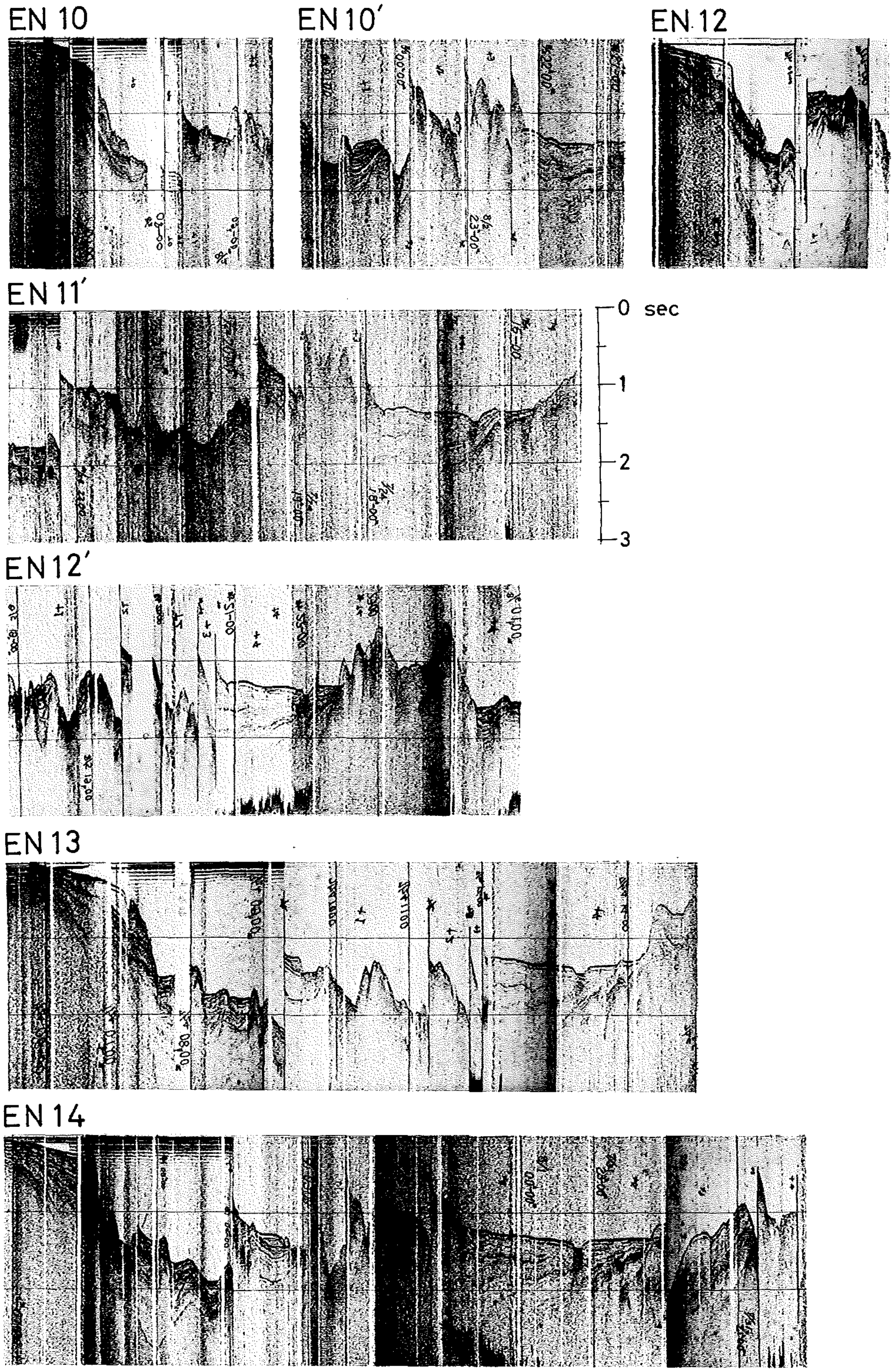

En 46′
En 47
En 47′
En 48
En 48′
En 50
En 55
En 49
En 51
En 52
En 53
En 54
En 57
0
1
2
3
sec

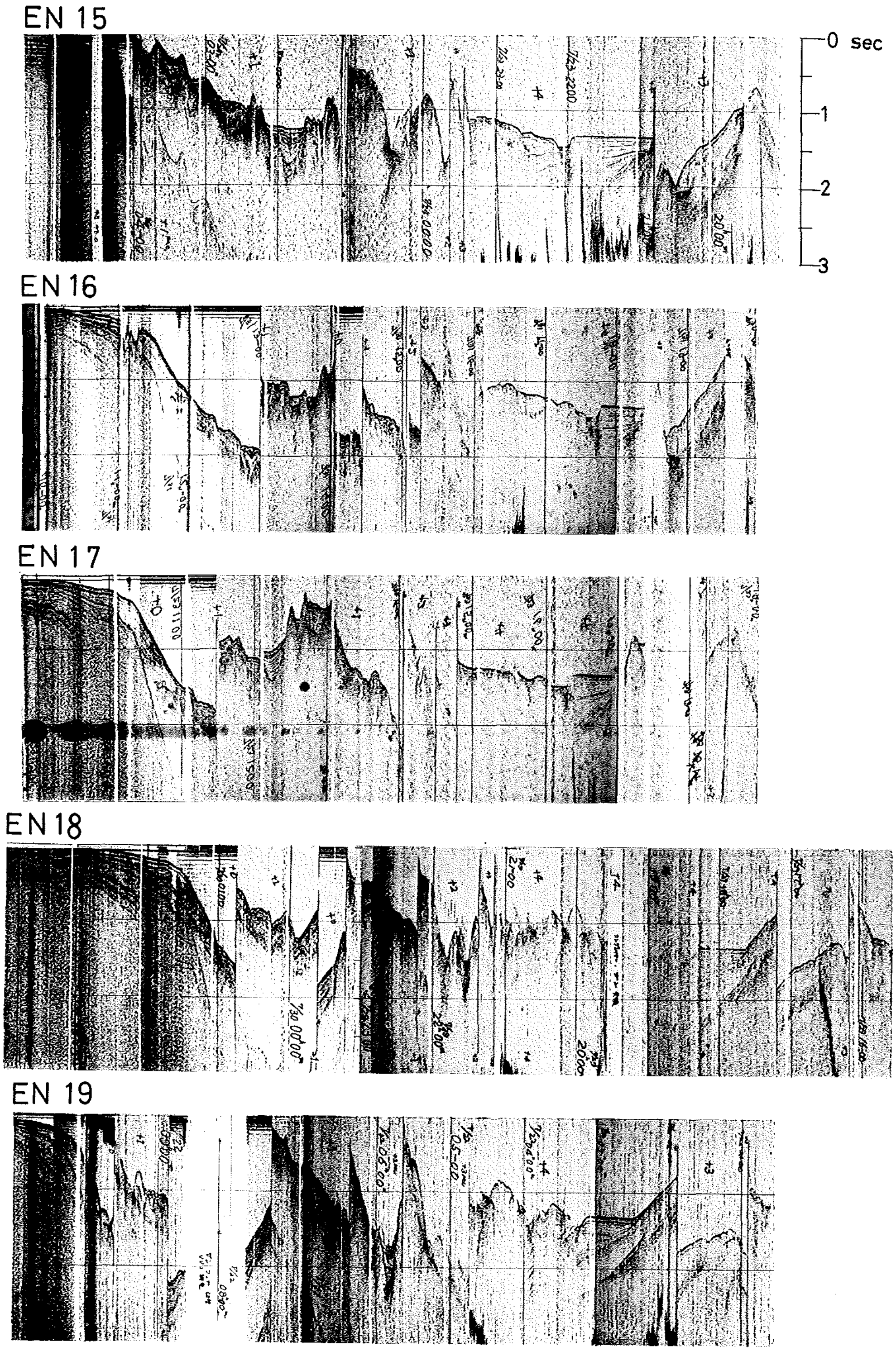

En 72
0 sec
1
2
3
En 75
En 74
En 66
En 69


En 62
En 68
En 73
En 64
En 71
En 56
En 63
En 77
En 76
En 80
0 sec
1
2
3
En 41
En 82

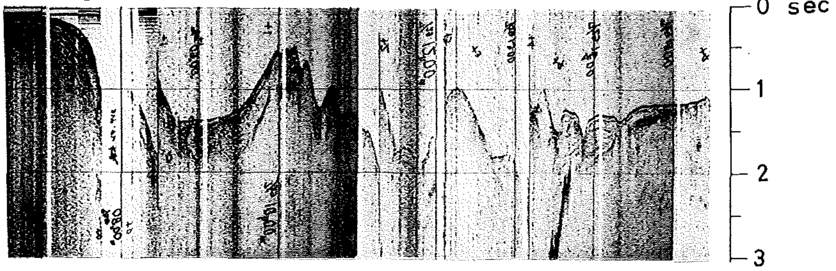

En 58
En 65
0 sec
1
2
3
En 61
En 67
En 59
En 79
En 70
En 45
En 78
En 83
En 84
En 81
En 60


EN 1
EN 2
EN 3
EN 4
EN 5
EN 6
EN 11"
EN 7
EN 9
0 sec
1
2
3
EN 8
EN 11
EN 9'
EN 9"

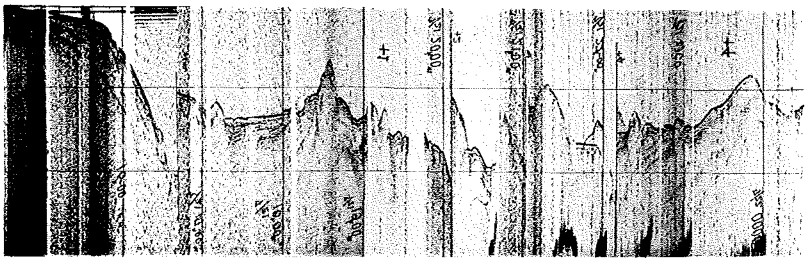

EN 10
EN 10′
EN 12
EN 11′
0 sec
1
2
3
EN 12′
EN 13
EN 14


EN 15
0 sec
1
2
3
EN 16
EN 17
EN 18
EN 19

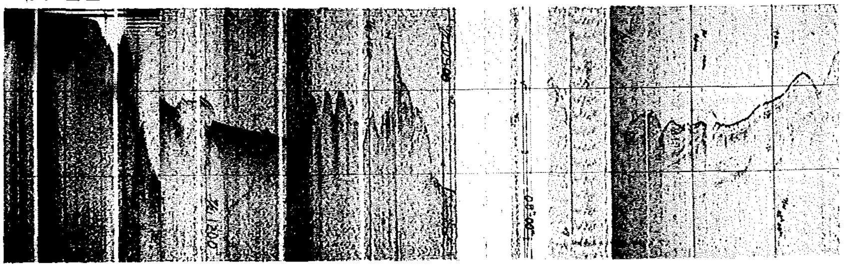
EN 20



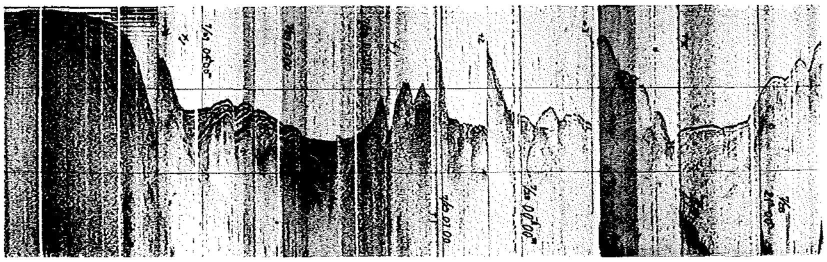
EN 21



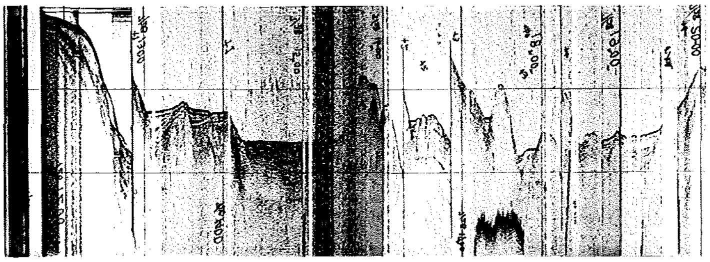
EN 22

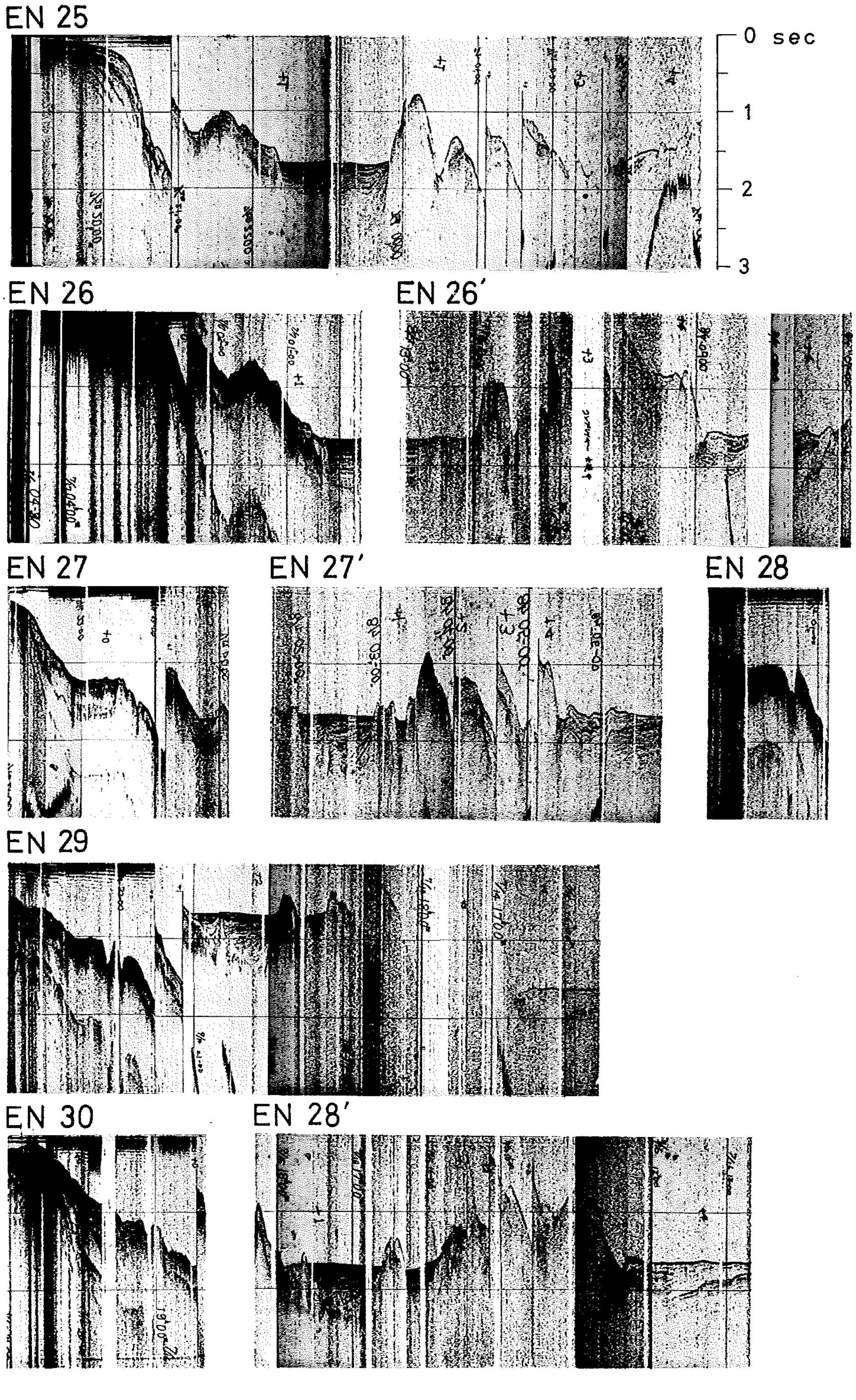


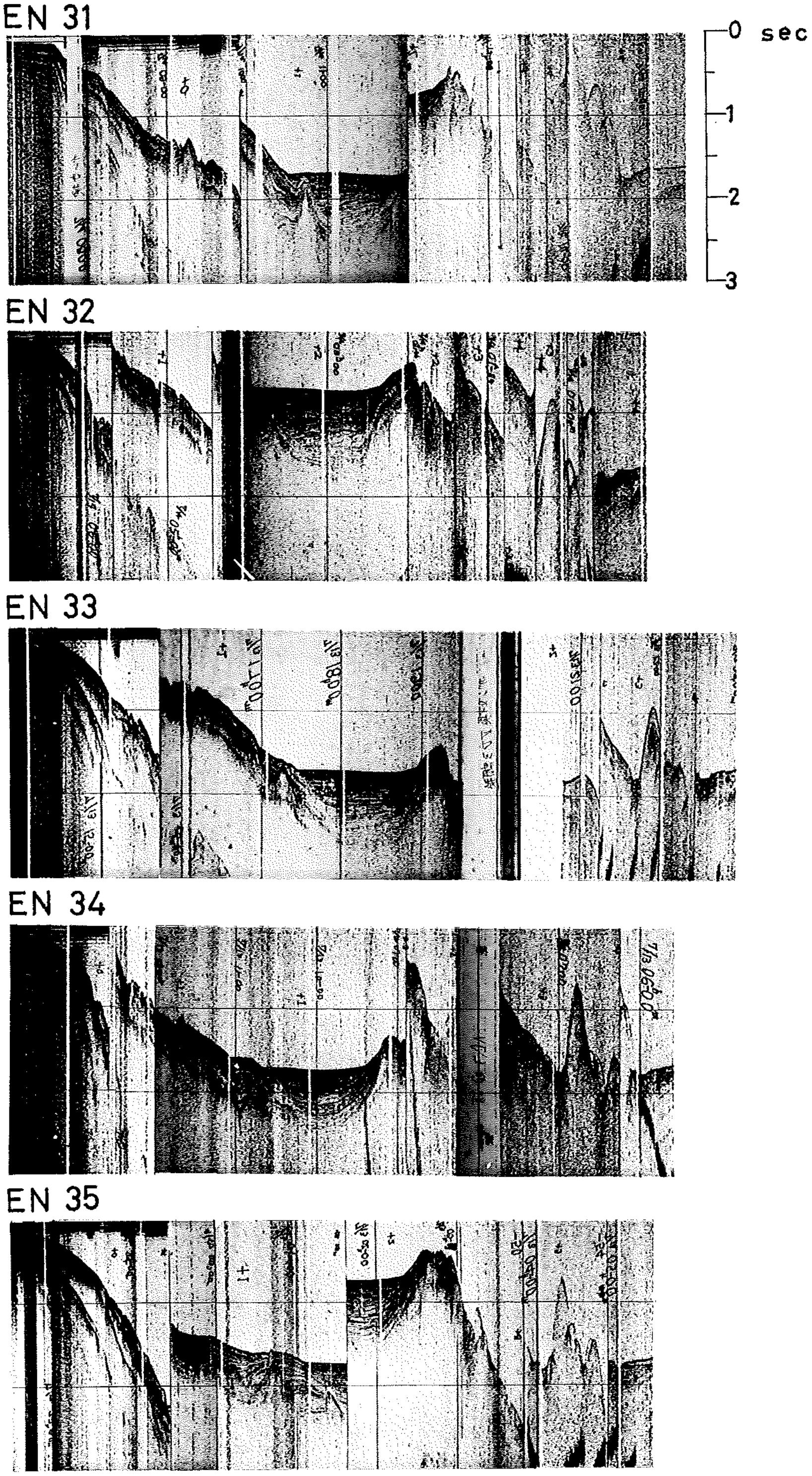
EN 23

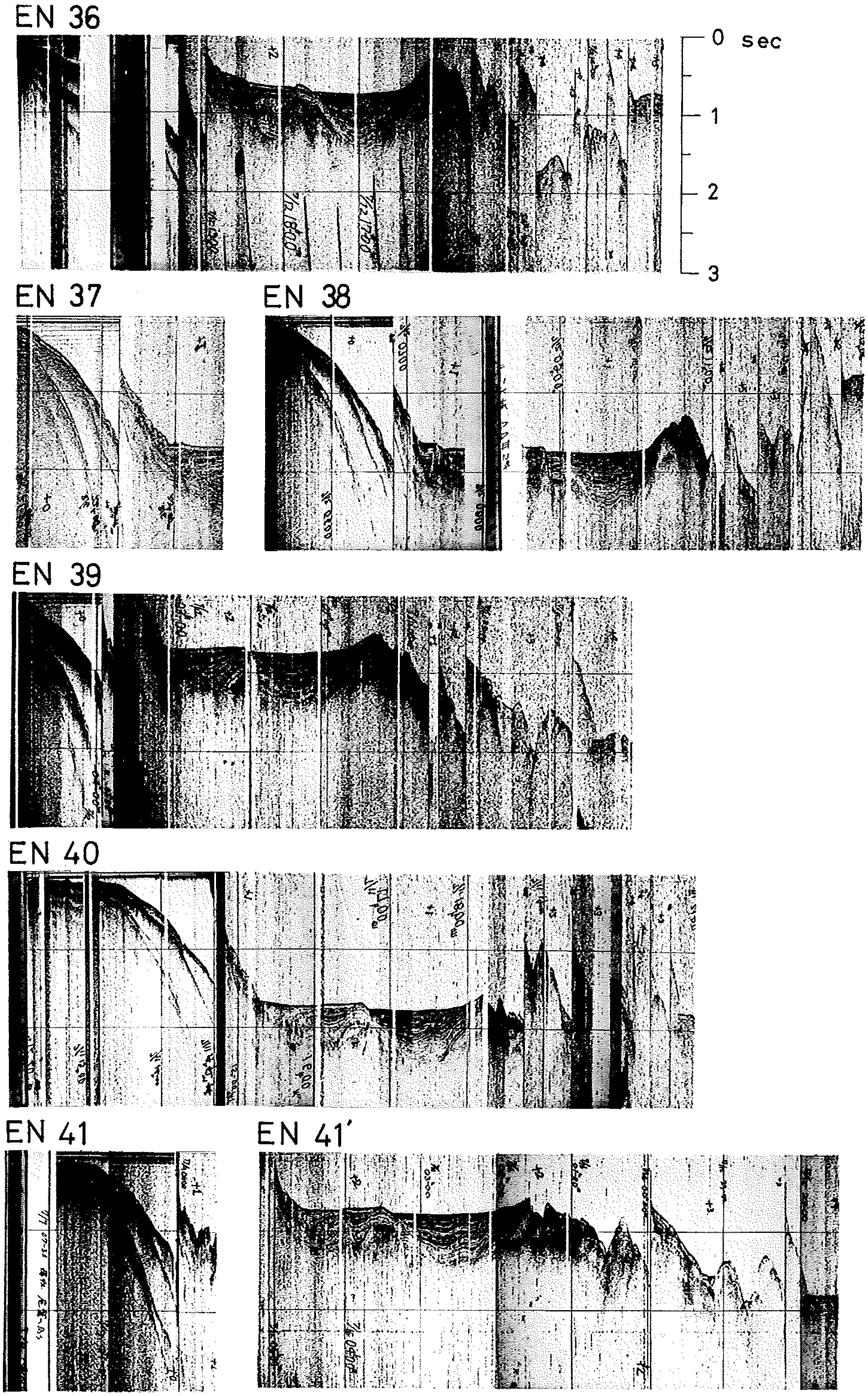


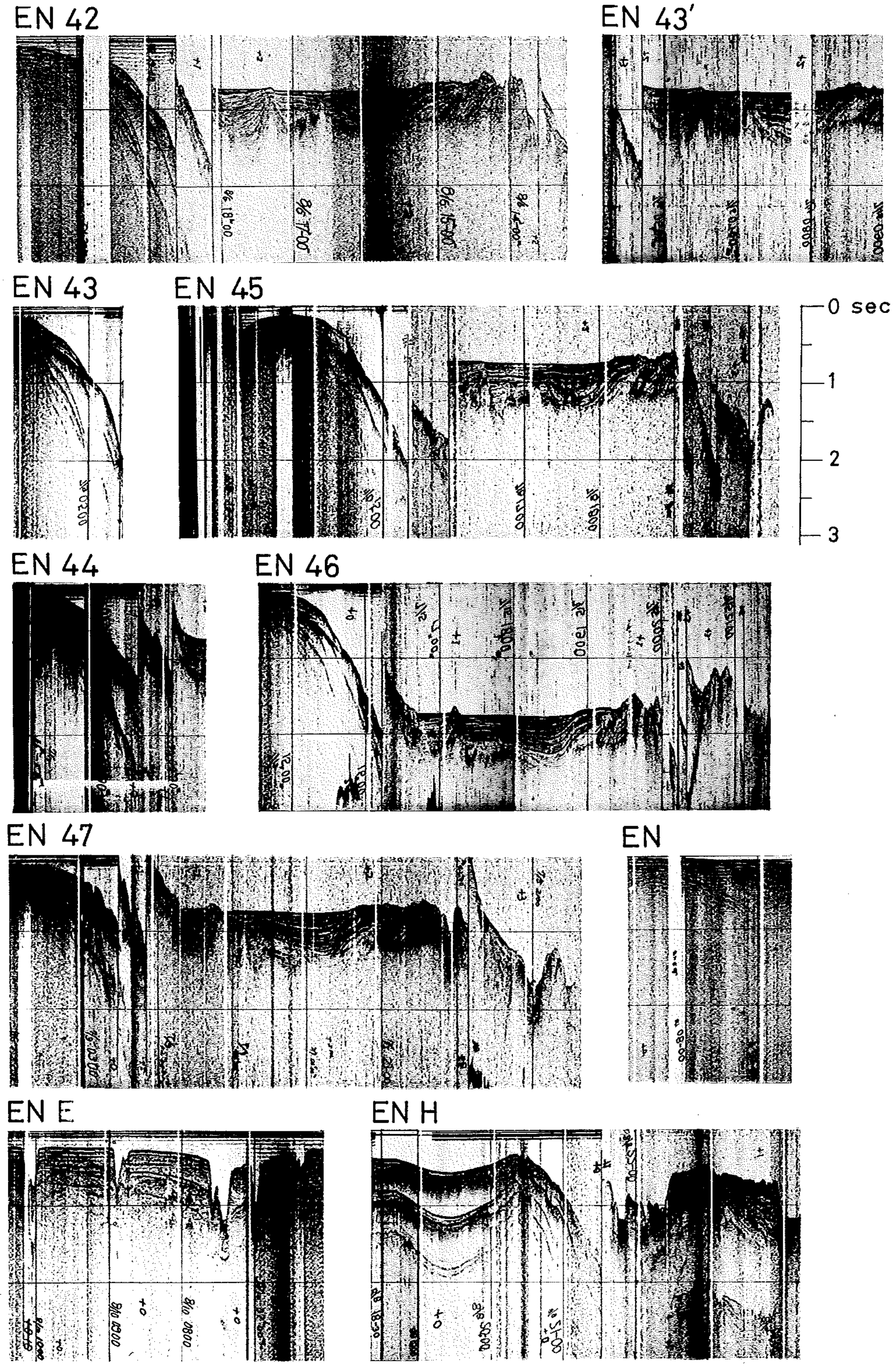
EN 24

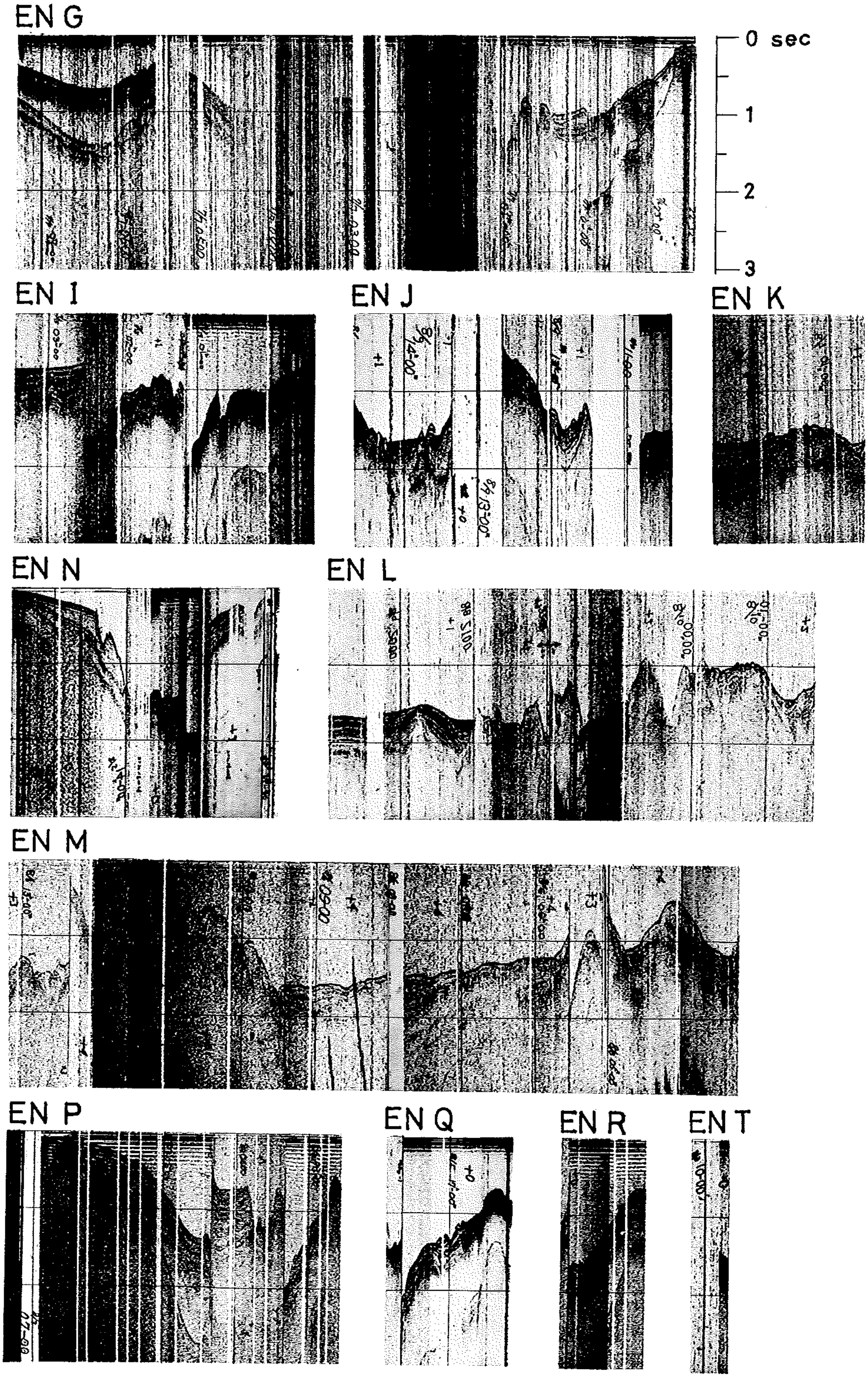


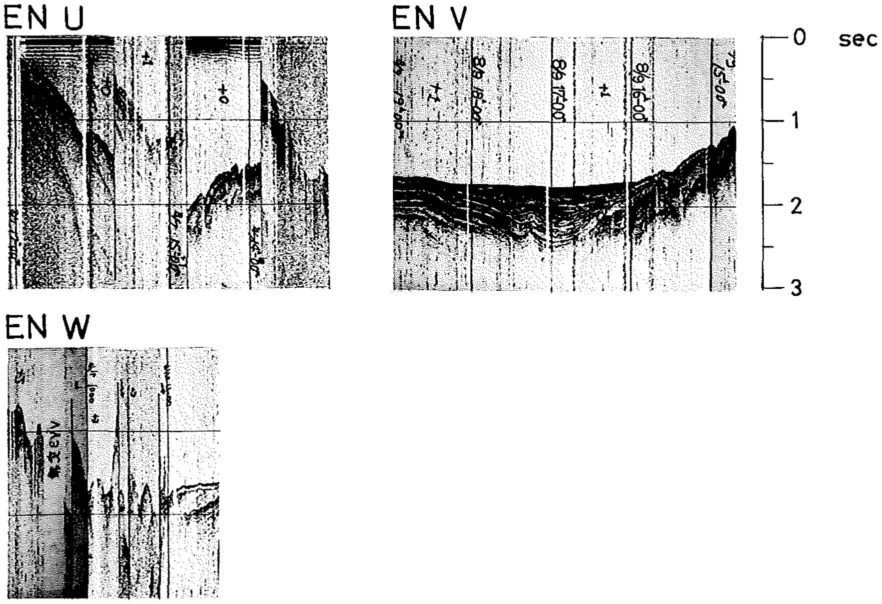

EN 25
0 sec
1
2
3
EN 26
EN 26′
EN 27
EN 27′
EN 28
EN 29
EN 30
EN 28′


EN 31
0 sec
1
2
3
EN 32
EN 33
EN 34
EN 35


EN 36
0 sec
1
2
3
EN 37
EN 38
EN 39
EN 40
EN 41
EN 41′


EN 42
EN 43′
EN 43
EN 45
0 sec
1
2
3
EN 44
EN 46
EN 47
EN
EN E
EN H


EN G
0 sec
1
2
3
EN I
EN J
EN K
EN N
EN L
EN M
EN P
EN Q
EN R
EN T


EN U
EN V
EN W
0 sec
1
2
3
8/9 17:00
8/9 16:00

REPORT OF HYDROGRAPHIC RESEARCHES No. 12, March, 1977

西之島火山に対する噴火予知研究（第1報）
――マルチスペクトル画像による解析――

杉浦邦朗*・土出昌一*

SURVEILLANCE OF NISI-NO-SIMA VOLCANIC ISLAND BY MULTISPECTRUM IMAGE TECHNIQUE

Kuniro Sugiura and Masakazu Tsuchide

Received 15 October 1976

Abstract

The first submarine eruption occurred at the east side of Nisi-no-Sima Island was on 12 April, 1973. Nisi-no-Sima Island is located in the western site (27° 15′ N/139° 53′ E) of 130km from the Ogasawara Islands, and is about 650m long and 25m high. We know well that this island is one of the summits of an extensive submarine volcano, but we have not any records that the eruption of this volcano was observed in history. After the continuous eruptions in a period of about 8 months, the new active volcanic island was formed in the same site of the first eruption.

Taking this opportunity, the Hydrographic Department has started to study the technique of prediction of future eruption about the submarine active volcanoes, especially in Nisi-no-Sima Volcanic Island. The method of study that we have employed for prediction was the surveillance by the multispectrum image camera and the thermalcamera.

In this paper, the results for our surveillance for Nisi-no-Sima Volcanic Island in case of a superimposed multispectrum image are described. The superimposed multispectrum images are produced by printing simultaneously with a negative film of one band image and a positive film of another band image. Our surveillance was carried out from October 1974 and will be continued in future.

1. はしがき

わが国には噴火の可能性をもつ火山が多数ある．海底火山においても然りである．それにも拘らず，的確に，然も定量的に火山噴火予知を行うには，現在の火山観測および火山学研究の体制はまだ十分でない．世界有数の火山国であるわが国において，火山噴火予知は地震予知と共に国民全体の強い関心事でもあり，その実用化に対する社会的要請はますます強くなってきている．

昭和48年6月29日，文部省測地学審議会は内閣総理大臣，文部大臣および運輸大臣に対して，火山噴火予知計画の推進について建議を行った．そして，今後推進すべき課題として，赤外線による主要な火山の熱的状態の隔

* 測量課

測などの噴火予知の研究を指示している．また，この建議において，上述の試験研究を含め，この研究等は，大学・気象庁・海上保安庁水路部・国立防災科学技術センターが協力して行うこととされているため，われわれは，たまたま西之島海底火山が活動期に入った機会に，この建議をうけて火山噴火予知研究に着手することとした．

本報告においては，当部において当面実施しようとしている研究の内容を概述し，今回は目下研究進行中であるが，特にマルチスペクトル画像による西之島火山についての解析の結果について述べることとする．

2. 火山噴火予知研究の概要

有史以来噴火の記録のない西之島火山が突如として1973年4月12日に活動を開始した．そしてこの火山活動の開始は西之島周辺の海面に変色水が発見されたことで確認された．その後も付近で操業する漁船から次々と変色海面発見の通報があったため，同年5月30日からわれわれは主として航空機（海上保安庁ＹＳ—11機）による監視を開始した．西之島火山はこの噴火発生地点を始点に活発な活動を続け，次第に陸島化し，同年12月21日にこの新火山島は「西之島新島」と命名された．その後の激しい噴火活動は翌1974年3月ごろまで継続して，以後休止した模様である．西之島火山における長期の火山活動をふまえ，更に，前述の測地学審議会による火山噴火予知計画の推進に関する建議をバックに，われわれはこの西之島火山の噴火活動に対する研究計画を立案し，1974年度から5か年計画の初年度としての研究に着手することとした．

西之島火山の噴火は，水中爆発に先立って黄色の変色海面が発生したことで開始したと見られる．明神礁の1952年および1970年の活動の際も，海底火山活動に特有の現象として，付近海面が黄色ないし茶かっ色に変色する現象が発見されている．最近，小坂丈予（1975）は，これらの変色水は SiO_2，Al_2O_3，Fe_2O_3，H_2O などを主体とした非晶質の沈殿で，地下から海中に放出された火山噴出物の微細な懸濁物であると述べている．火山泉の場合についても類似の変色水が海面に分布することがあるが，これも前述のものと同じ化学組成を有する懸濁水であることが薩摩硫黄島において同氏によって確められている．更に，Fe_2O_3 分が多くなると色も茶かっ色度を増すことは言うまでもないが，これにより「火山発散物の混入割合の増率状態」を媒介に，海底火山活動の活発度が定性的には類推できるはずである．

一方，久保寺章（1974）は，赤外線エアーボーン方式を用いて，西之島，同新島の地表面および周辺海域の表面温度を測定して，新島の周辺部に高温海域が広がっており，特に新島の北側の高温部が著しいことを指摘した．更に，その結果，この高温海域が変色水海域と必ずしも対応しないこと，および海面上のやや高温の部分は海底から熱の供給をうけたものであり，2～3か月後にはこの部分が陸地化した事実を得た．

このように海底火山については，本噴火に先立って，周辺海域の温度上昇かまたは火山噴出物の混入による海面表層の変色が想定される．そこで，これらの噴火の前兆現象を事前に把握し，海底火山噴火予知に資するに必要な機器の整備と技術の開発に当ることとしたものである．当面，前述の二つの現象を対象として試験研究を行うこととし，温度測定方式とマルチスペクトル画像方式を並行して推進する計画である．温度測定方式とは，大気の吸収の少ない2～14ミクロン帯の赤外線エネルギーを赤外線映像装置で検出することにより，航空機から噴火活動海面付近の温度分布を撮影監視し，海底火山の熱的前駆現象を把握する研究をいう．また，マルチスペクトル画像方式とは，マルチバンドカメラの適正なフィルターを選択して，肉眼では視認できない海底火山による噴出物・漂流物・浅海海底地形を映像としてとらえ，火山の本噴火に先立つ先駆的現象を画像的に把握するのに必要な調査技術の研究開発をいう．特に，マルチスペクトル画像方式については，われわれの研究の対象であるカメラ方式の外に，スキャナー方式・レーダー方式があるが，それぞれ一長一短があり，主として陸の火山に

関してはスキャナー方式による熱映像的研究が最近大学研究者によって行われるようになった〔江原幸雄ほか(1975)，加茂幸介・西　潔 (1975)，硫黄島火山活動調査グループ (1976)，気象研究所地震火山研究部 (1975)，北海道大学理学部ほか (1975)〕.

使用したマルチバンドカメラは米国 I^{2}S 社製のMK－1である．これは焦点距離 150mm の4個のレンズによって，幅約24cmの赤外航空フィルムに約9cm×約9cmの4個の映像を同時に撮影できる．カメラの各レンズには 400～500nm (青バンド)，500～600nm (緑バンド)，600～700nm (赤バンド) および 700～900nm (赤外バンド) のそれぞれの波長域のバンドパスフィルターが取り付けられており，これによりそのおのおのの波長域における物質 (被写体) の分光反射特性に応じた黒白の濃淡画像がフィルム上に記録される．このカメラのシャッタースピードは4個のレンズに共通であり，各露光量はレンズ毎の絞りによって個々に調節できるようになっている．

西之島火山に対するマルチバンドカメラによる火山活動調査は，同島新島がすでに形成され，噴火活動がおさまった状態になった以後について実施された．現在なお同島は噴火活動を休止しているが，この間，1974年10月29日・翌1975年5月27日・同年8月13日および同年11月12日にほぼ同じ撮影諸元による画像を得た．同島の周辺海面に特徴のある若干の情報がそれぞれの画像に得られたので，火山活動の消長を追跡する目的で解析を試みた．

一般に，各バンドの画像についてネガフィルムとポジフィルムとを作成しておき，適宜のバンドの組み合わせを選んで画像を重ね合わせて密着写真を作ると，被写対象物のもつ分光反射特性が強調されることがある．また，対象としない画像の部分若しくはバックグラウンドをこの方法で平均化することも可能である．ネガフィルムとポジフィルムの重ね合わせは16通りあるが，その全ての組み合わせが有効であるとは限らない．それはある被写対象物の分光反射特性にはある組み合わせの適宜解があって，その有効性が少数の組み合せに限られるであろうからである．また，ネガフィルムおよびポジフィルムの露光の程度によっても，この効果はかなり変化するものである．なお，ある対象物に対する適宜解を求める作業は今日では試行錯誤によらざるを得ないが，全く止むを得ない．

次節において，青ポジ・緑ネガ等の表現を使用しているが，これらは例えば青バンドのポジフィルムの画像と緑バンドのネガフィルムの画像とを重ね焼きした合成密着写真であることを意味している．また各写真の隅に1・2・3・4 のいづれかの数字の示されたものがあるが，それはそれぞれ青バンド・緑バンド・赤バンド・赤外バンドの画像であることを示すマルチバンドカメラのインデックスである．

3. マルチスペクトル合成画像の解析

図1は1974年10月29日に撮影されたマルチバンド写真であって，西之島，西之島新島の南側および周辺海域が示される．画像の中央下の部分に雲が白く写っているほかに，雑音情報若しくは妨害映像はない．図2および図3は，この画像をベースに作成した緑ネガ・赤外ポジおよび青ポジ・赤外ネガの合成写真である．これらをそれぞれ画像Aおよび画像Bと呼ぶこととする．

画像　A　　緑ネガ・赤外ポジ (Gn+IRp)

この合成写真には雲は全く見られない．それに対して変色海面域が薄い灰色に比較的鮮明に示されている．赤外領域の光は水をほとんど透過しないため，その画像は水の情報をほとんど有していない．したがって赤外バンドの画像を他のバンドの画像に組み合わせる場合は，海面上の比較的顕著でない情報は除去され，変色海面のような情報が強調される．この合成密着写真はネガフイルム・ポジフィルムの現象の状況によっても情報内容がか

なり変化するものである.

画像 B 青ポジ・赤外ネガ (Bp+IRn)

画像Aと同様海面上の雲の映像は消えているが，変色海面が画像Aと比べて狭くかつ不鮮明となっている．これは主として青バンドと緑バンドとに映っている画像の違いによるものであって，画像Aに比較して効果的でない．また，変色海面が一般海面より黒く写っているが，これはネガフィルムとポジフィルムの関係が画像Aの場合と逆になっているためである．

図4は，図1と同日に撮影されたマルチバンド写真であって，同図の北側の部分に当る．画像の中央から上方に伸びている舌状のものは比較的顕著な変色水域である．このデータから画像C・D・EおよびFを作成した．これらをそれぞれ図5・6・7および8に示す．

画像 C 青ネガ・緑ポジ (Bn+Gp)

画像 D 青ポジ・緑ネガ (Bp+Gn)

画像Cと画像Dとは同じ青バンドと緑バンドの写真を用いた合成密着であって，合成の際にそれぞれネガフィルムとポジフィルムを逆にしたものである．共に変色海面をよく示しているが，両者の間には視覚的な差が認められる．画像Cは変色海面そのもの，およびその海面の細かい情報を浮き出しにしているように思われる．また，図4に示す緑バンドの写真の顕著な波紋が，画像Cにおいては映像の平滑化の効果によって消滅しており，雑音除去の一策として効果的であることと知見された．なお，画像Cおよび画像Dにおいて，画像中央部に黒色および灰色に写し出されている模様は浅所またはそこで砕ける波しぶきである（画像G参照）．これらの浅所から新島にかけて連らなる潮目も画像Cにおいては同じ色調で表現されている．

画像 E 緑ポジ・赤ネガ (Gp+Rn)

画像 F 緑ポジ・赤外ネガ (Gp+IRn)

両画像とも変色水の分布が明確に示されているが，赤バンドと赤外バンドとのハレーションの差（図4参照）があたかも変色水の分布のバンドによる違いを示すかのように見える例であって，とくに画像Fにおいて変色水の舌状の延びが際だって写し出されている．このように両画像において，赤バンドと赤外バンドとの画像の差が舌状の変色水域において認められるが，更に島の周辺の変色水域において特に著しく，これは画像Eにのみ見られる．そこで変色水は舌状に分布していて，その基部すなわち写真画面中央部あたりに何らかの湧き出し口があるに違いないと推測するのは危険である．

図9は，1975年5月27日の調査の折のマルチバンド写真の一部で，図4とほとんど同じ海面のものである．同図において，バンド4が真黒で何も写っていないのは使用したフィルムが赤外フィルムではなくて，通常のパンクロ航空フィルムであったため，感度が赤外バンドに対して得られなかったからである．これをベースに図10および図11に示す同じ組み合わせの青ネガ・緑ポジの画像GおよびHを作成した．

画像 G 青ネガ・緑ポジ (Bn+Gp)

画像 H 青ネガ・緑ポジ (Bn+Gp)

画像Gと画像Hとは全く同じ組み合わせによるものであるが，使用したネガフィルムおよびポジフィルムとも低コントラストの場合に画像Hのようになる．したがって，画像Hにあっては画面の左上および左中央の雲の映像は顕著に平滑化されており，全体が一様な調子のものとなっている．変色水に関する情報は十分に温存されていて，マルチスペクトル写真の特性如何によっては利用度の高いパターンであるのかもしれない．

なお，この時期の西之島新島の変色水の分布状況についてであるが，1974年10月29日の時期と比較して顕著ではなく，新島自体に源をもつ変色水が北方に穏やかに拡散しているにすぎず，この海面における活動の恐れはないものと推断される．われわれの航空機による西之島火山に対する監視によれば，約半年間はこの海域からの変色水の拡散はなかったようである．

図12は，図9と同日に得られた西之島新島と同島旧島を含む周辺の海面についての映像であって，このデータにもとづいて図13に示す画像Iを作成した．同図においてバンド4の映像が得られていないのは図9について述べたと同じ理由によるものである．

画像　I　　青ネガ・緑ポジ（Bn+Gp）

この画像には西之島西側および同島と西之島新島の接続部の南側に浅所がかなり明白に示されている．この浅所は図1にも把握される．したがってかなり前から存在しているものと考えてよい．この合成写真においては，両島の周囲に分布する変色水がネガフィルムとポジフィルムによる重ね合わせで平滑化され，浅所のみが黒く浮き出るはずであったが，青バンドのネガフィルムの焼き込み不足のためか所望のものが得られなかった．一般的に変色海面と，もともと潜在する恒久地形情報を区別する手法として，原理的には可能である．

図14は同じ年の8月13日の調査の折に得られたマルチバンド写真の一部であって，この日は天気が極めて良好で撮影時刻がほぼ太陽の南中時であったため，同図には各画像とも中央部がハレーションのため白く輝き，その周辺部にも波による太陽のグリッターが顕著である．したがって，図14からは西之島新島北方の浅所も，通称月浦湾内にかつてよく見られた変色模様も確認することができない．このデータにより

画像　J　　青ネガ・緑ポジ（Bn+Gp）

を作成してみた．これを第15図に示す．この画像においては太陽光のグリッターがかなり取り除かれているのが特徴的で，このために西之島新島北方の浅所がわずかに視認できる．しかし，画像全体に拡がって存在する漠然とした映像は，一部は海面における火山活動に伴う一種の情報であり，一部は現像処理上に発生した写真雑音であろう．その両者の識別はこの場合極めて困難である．われわれが求める情報を強烈にマスクするサン・グリッターを除去し，その部分から所望の情報を抽出する手法として最も適切なものは「青ネガ・緑ポジ」であろう．

図16および図19は，1975年11月12日に撮影されたマルチスペクトル画像であるが，両図とも月浦湾海面を除く両島の海岸線は強風による真白な砕波で取り囲まれているばかりでなく，それ以外にも太陽によるグリッターが著しいという良質でないデータである．とくに赤外バンドについてサン・グリッターの映像が顕著である．

図16から画像KおよびL，図19から画像Mを作成し，それぞれ図17・18および20に示す．

画像　K　　緑ポジ・赤外ネガ（Gp+IRn）

画像　L　　赤ポジ・赤外ネガ（Rp+IRn）

画像　M　　青ポジ・赤ネガ（Bp+Rn）

画像Kと画像Lの違いは次の2点において顕著である．その第1は，新島南岸付近に拡がっている変色海面についてであって，緑バンドに現われている変色水域と赤バンドに現われている変色水域の分布がかなり異なっているということである．これは変色海面の色の分布状況を示すもので，例えば画像Lのタイプの変色水の拡散で火山活動の兆候を知るといった木目の細かい判断が必要になるものかもしれない．その第2は，月浦湾の東南岸に示される顕著な変色水である．これも赤かっ色系のものかと推察され，画像Kには検知できない．これは画像

Mにおいてとくに強調されるところである.

これまでも，月浦湾は変色水の発生源の一つであったが，ほとんど緩徐な状況が続いていた．1975年11月の時点で，この地点における変色水源の発生は，その位置の検知と共に，近い将来における何らかの異変に結びつく推測すら可能そうである.

4. 結論

マルチスペクトル画像による西之島火山に対する噴火予知研究は，前述したように，西之島の噴火活動が結果的に一応休止した後に開始されたものであるので，直接予知につながる結果を得るようなことはなかったが，少なくとも1974年10月・1975年5月・同年8月に行った西之島火山に対するマルチスペクトル画像解析にもとづいて，西之島火山に上陸を実施して危害なしとの判断を得たのは，そのことを予知し得たとの効果を評価してよいと考える．かくして同年8月下旬，海上保安庁水路部は文部省総合研究班と共に「海中噴火による火山島の生成とその変化に関する基礎的研究」のために西之島に上陸を行ったものである（1976).

前後4回にわたる調査飛行の際に得たマルチバンド写真から，画像Aから画像Mまでの13枚の資料を含む数多くの合成写真を作成し，これにより月浦湾内の一部，西之島旧島北西岸および西之島新島南西部沖に火山泉（これも一種の火山活動ではあるが）と推定される濁源をしばしば検出したが，それ以外には著しいものはなく，強いて注目するとすれば，前述したとおり画像LおよびMに見られる月浦湾奥の変色水が挙げられるかと思われる.

本研究報告においては，マルチスペクトル画像の解析のために，2バンドを選定して情報処理を行う場合の特性と結果について述べたものであるが，適宜3バンドを選定して解析を進めることも可能である．この場合と言えども，情報抽出における基本的関係は同じであって，この範囲においては何らの特異性はないが，この手法によった場合，2バンドでは得られなかった有効な手掛りがあるものかもしれない．このために，われわれはマルチスペクトル画像合成装置を開発し，写真処理上発生する問題をシステマティックに排除することを考えて行きたい.

われわれがこの研究に従事していた2年有余の期間は，西之島火山は活動を休止しており，他の一応活動の懸念のあった若干の海底火山についても，ほとんど静穏に過ぎた．しかし，海底火山活動が熾烈を極める折，またはそのような活動の開始の直前にあっては，これらの解析研究は速断を迫られるものとなる．そこで，われわれは本研究の如き基礎的要素についてこれを進めると共に機能化を図るための数値解析法の開発研究を推進して参りたいと考えている.

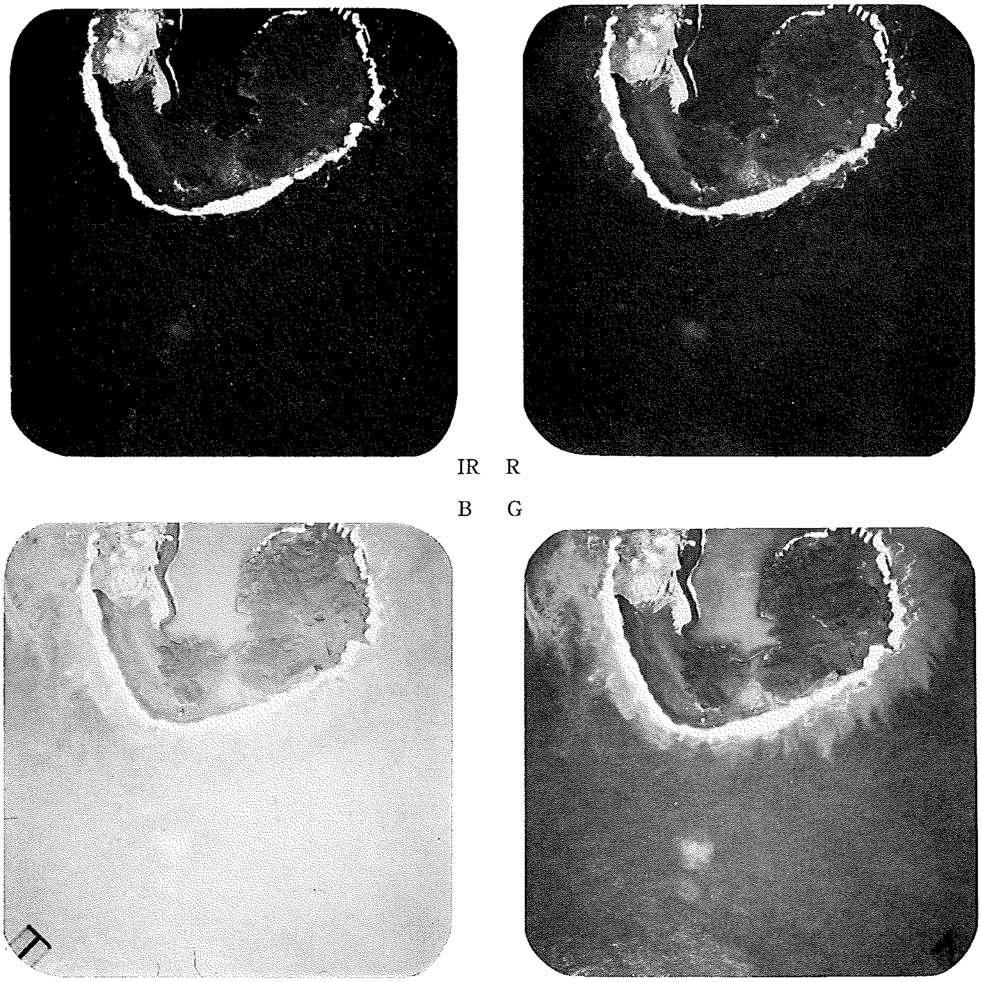


Fig. 1 Multispectrum image taken on 29 October 1974 (1)

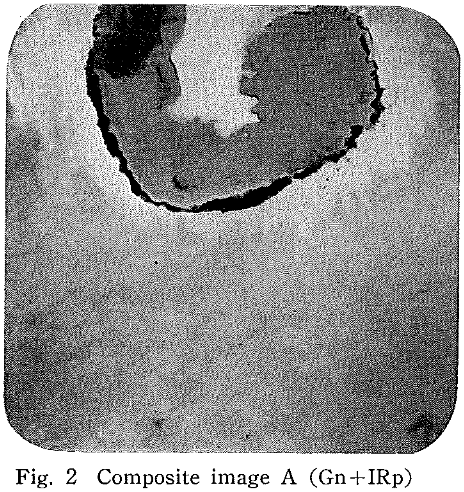


Fig. 2 Composite image A (Gn+IRp)

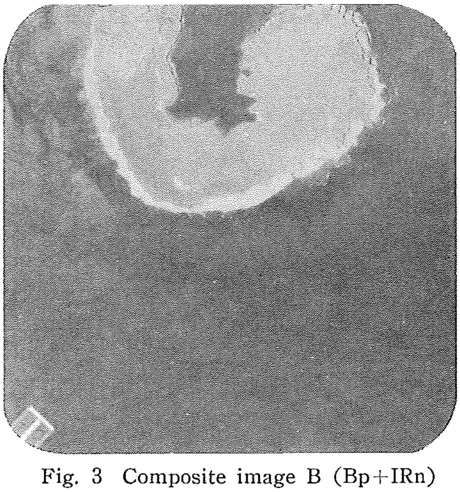


Fig. 3 Composite image B (Bp+IRn)

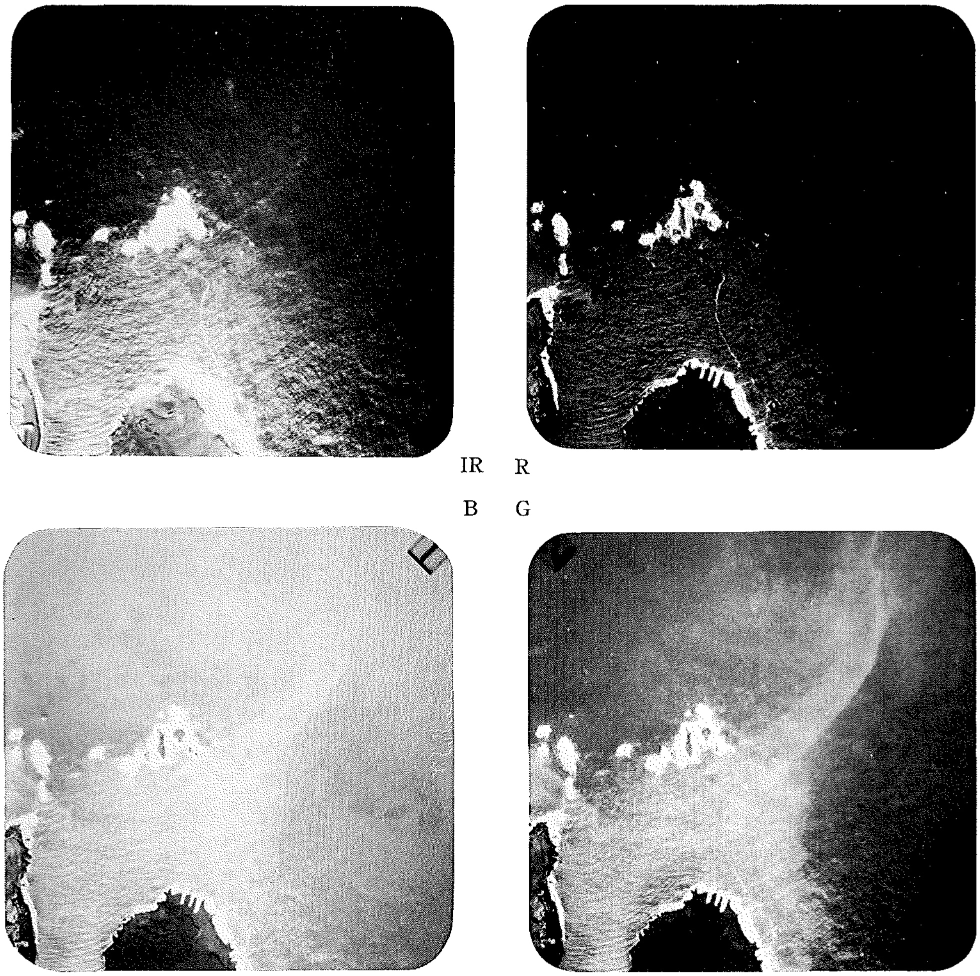


Fig. 4 Multispectrum image taken on 29 October 1974 (2)

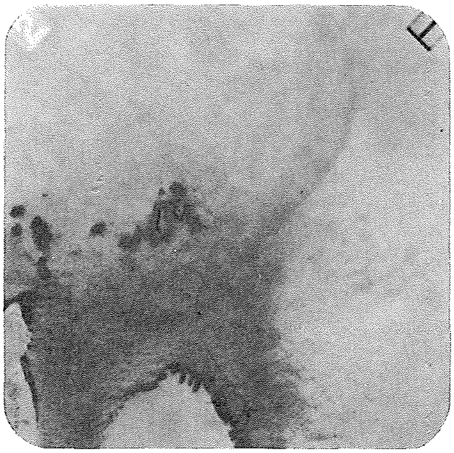


Fig. 5 Composite image C (Bn+Gp)

Fig. 6 Composite image D (Bp+Gn)

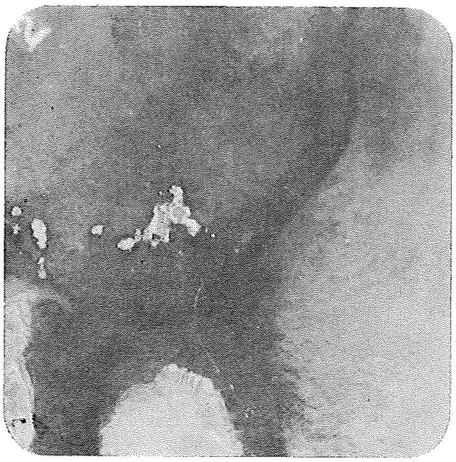


Fig. 7 Composite image E (Gp+Rn)

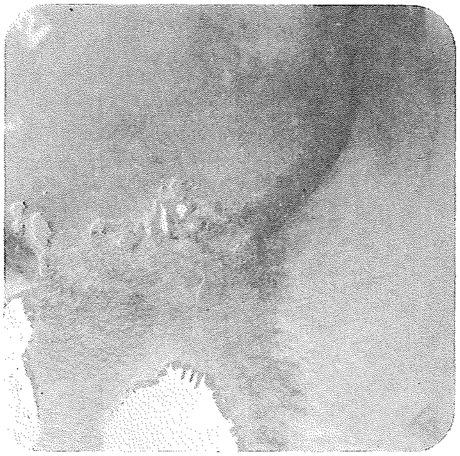


Fig. 8 Composite image F (Gp+IRn)

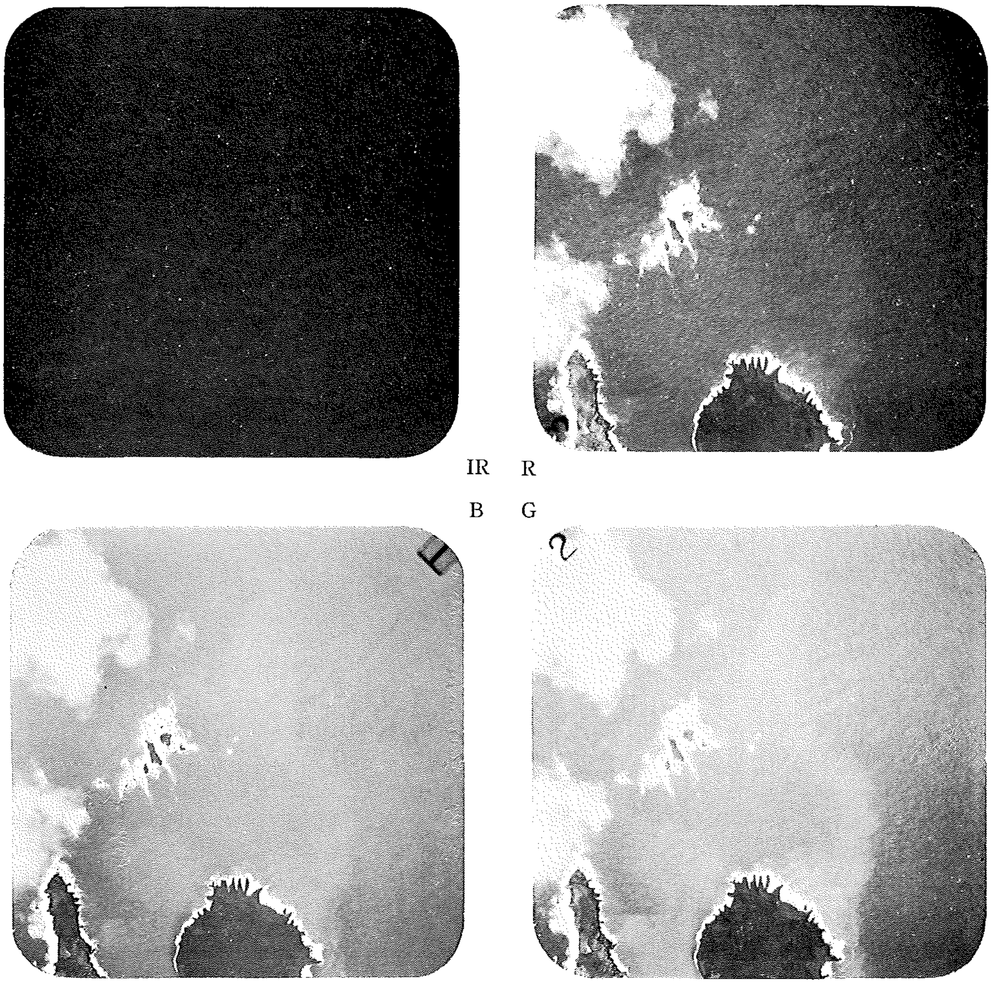


Fig. 9 Multispectrum image taken on 27 May 1975 (1)

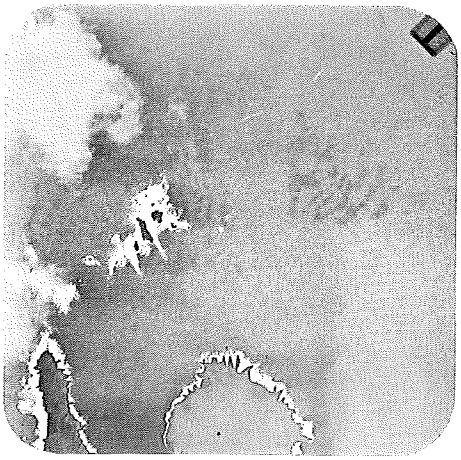


Fig. 10 Composite image G(Bn+Gp)

Fig. 11 Composite image H(Bn+Gp)

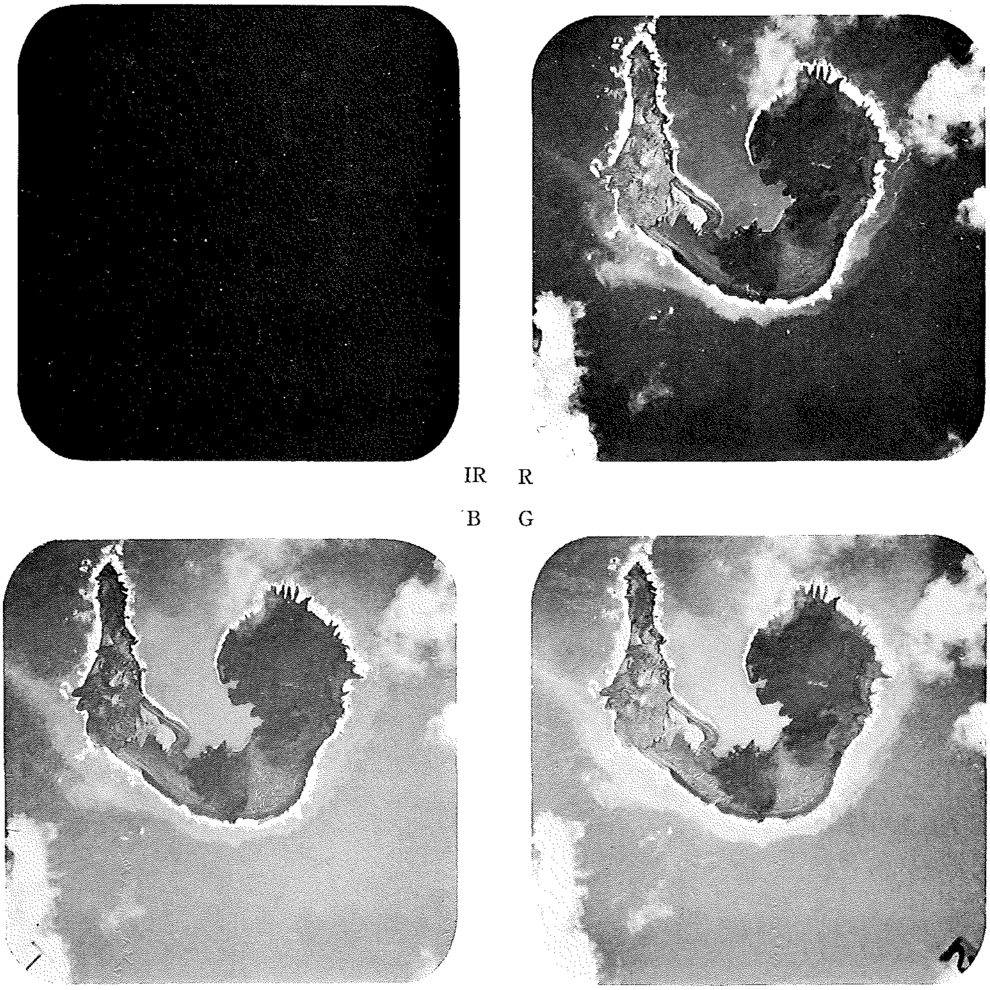


Fig. 12 Multispectrum image taken on 27 May 1975 (2)

Fig. 13 Composite image I (Bn+Gp)

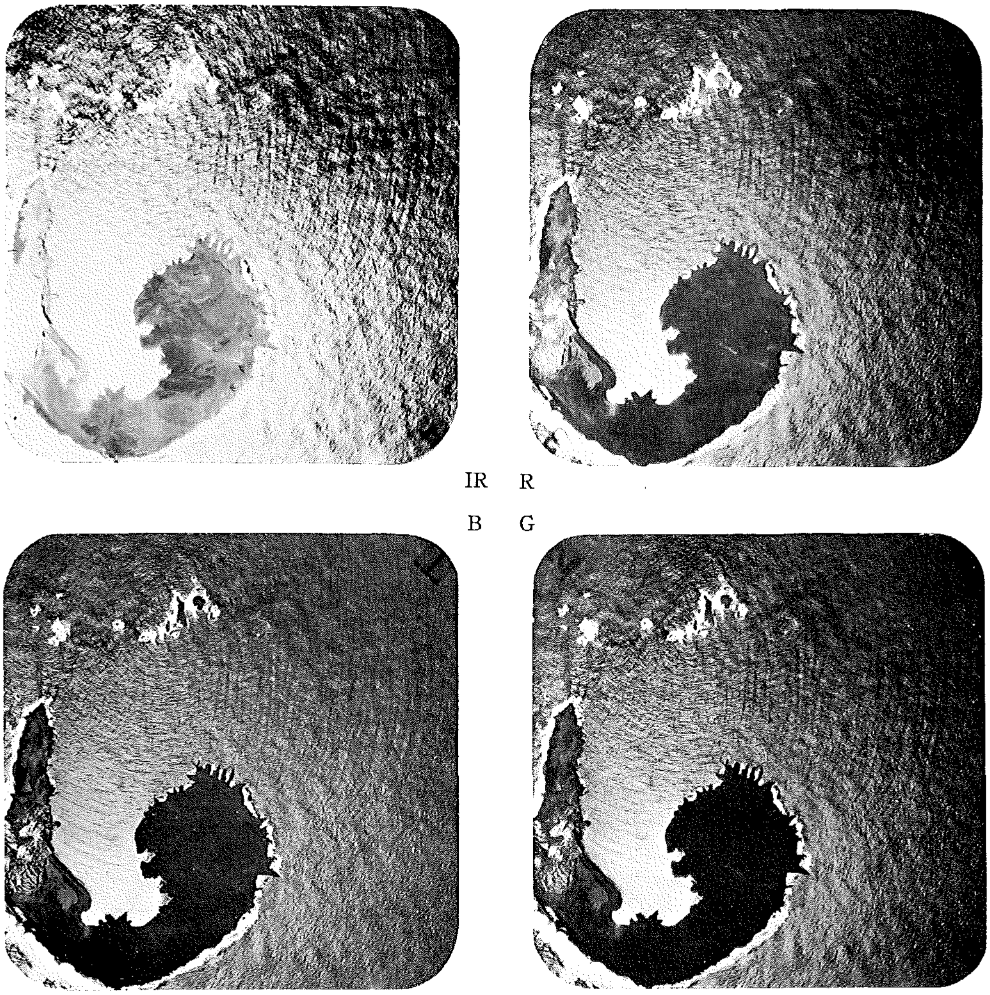


Fig. 14 Multispectrum image taken on 13 August 1975

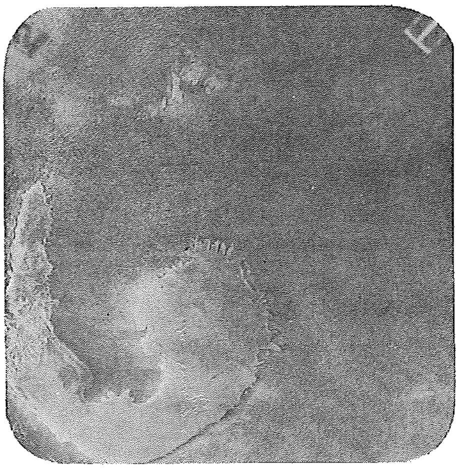


Fig. 15 Composite image J (Bn+Gp)

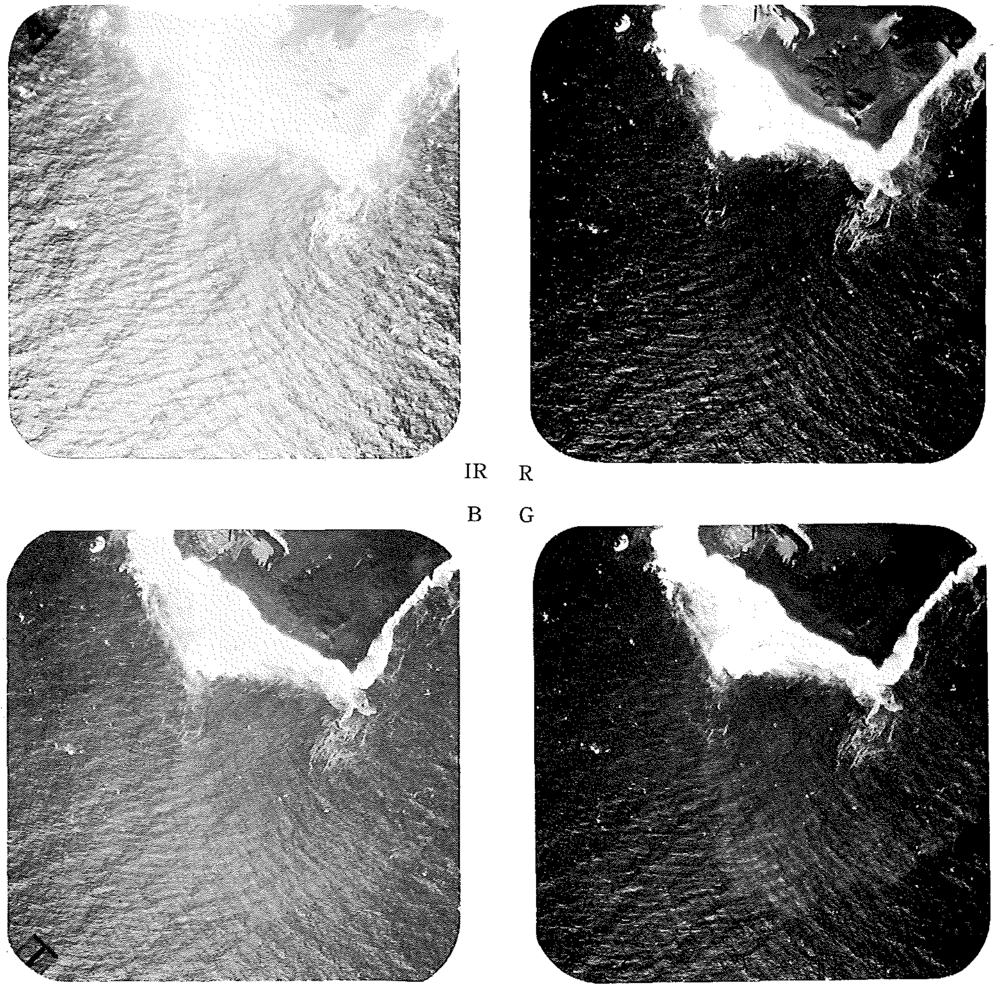


Fig. 16 Multispectrum image taken on 12 November 1975 (1)

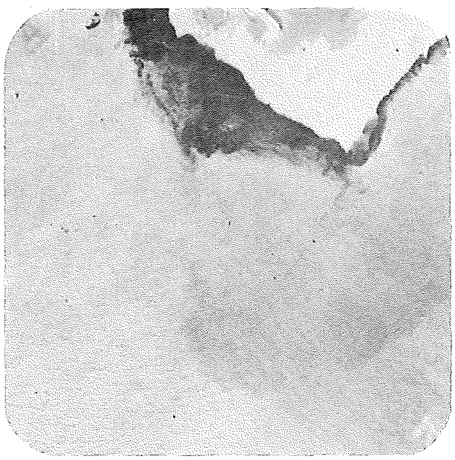


Fig. 17 Composite image K (Gp+IRn)

Fig 18. Composite image L (Rp+IRn)

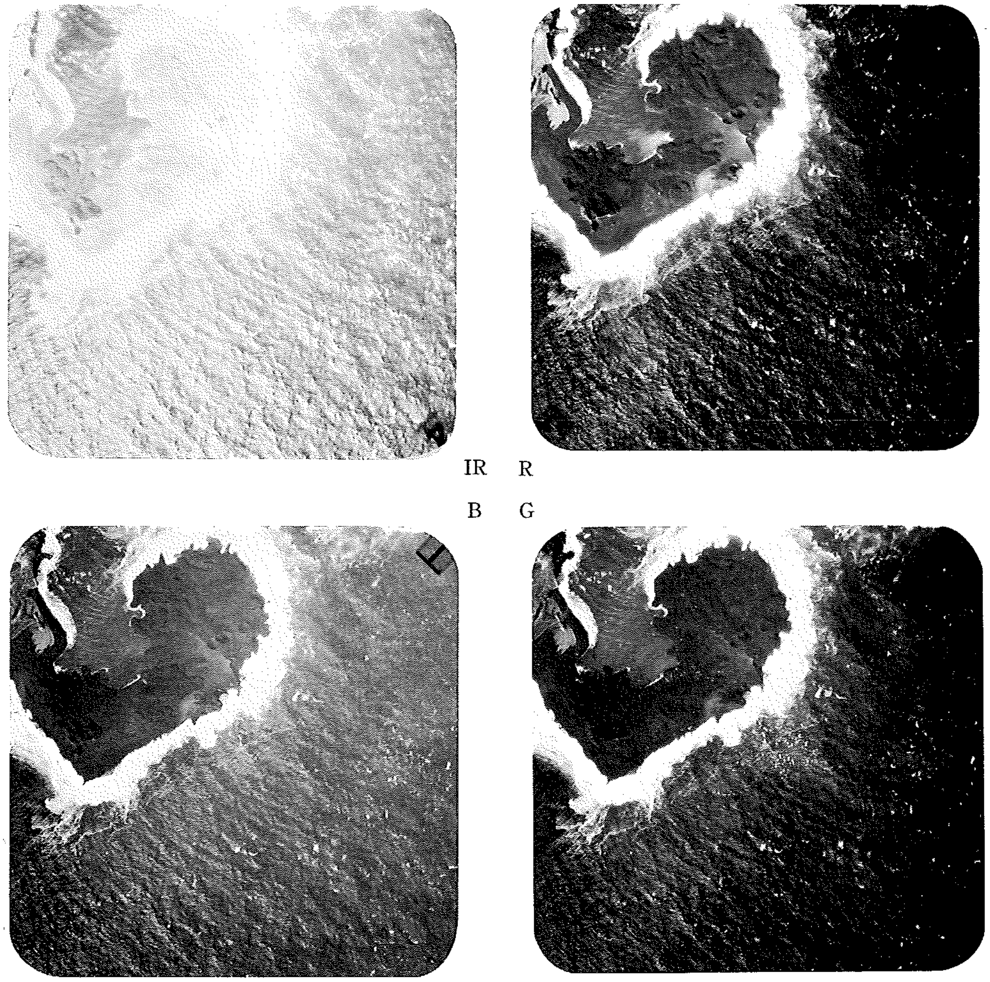


Fig. 19 Multispectrum image taken on 12 November 1975 (2)

Fig. 20 Composite image M (Bp+Rn)

参考文献

久保寺　章（1974）：西之島　赤外線エアーボーン方式による温度測定結果，火山噴火予知連絡会々報，第1号，pp. 35～41

海上保安庁水路部（1974）：西之島の火山活動について，火山噴火予知連絡会々報，第1号，pp. 42～56

小坂丈予（1975）：海底火山および火山島のリモートセンシングによる観測，「日本国土海洋総合学術診断」事業報告書第二編研究報告，pp. 173～177，ブルーシーアンドグリーンランド財団

江原幸雄・横山　泉・下鶴大輔・宮崎　務（1975）：伊豆大島三原山の熱分布，伊豆大島三原山の集中観測－1974年6月－，pp. 8～16

加茂幸介・西　潔（1975）：赤外映像による桜島南岳の地表温度異常域の調査，桜島火山の総合調査報告（昭和49年12月～昭和50年3月），pp. 33～39

北海道大学理学部・東北大学理学部・東京大学地震研究所（1975）：空中赤外映像による鳥海山の観測，火山噴火予知連絡会々報，第2号，pp. 11～14

気象研究所地震火山研究部（1975）：赤外線熱映像による阿蘇山および桜島の火山観測，火山噴火予知連絡会々報，第3号，pp. 17～21

海上保安庁水路部・文部省総合研究班（1976）：西之島火山の最近の状況，火山噴火予知連絡会々報，第5号，pp. 10～23

硫黄島火山活動調査グループ（1976）：小笠原硫黄島最近の変動について，火山噴火予知連絡会々報，第6号，pp. 26～41

REPORT OF HYDROGRAPHIC RESEARCHES No.12, March, 1977

三陸沖産業廃棄物排出海域における深層海流

堀　定清*・背戸義郎*・倉本茂樹**・陶　正史*

DEEP SEA CURRENT IN THE DUMPING AREA FOR INDUSTRIAL WASTE OFF SANRIKU DISTRICT

Sadakiyo Hori, Yoshio Seto, Shigeki Kuramoto
and Masashi Sue

Received 15 October 1976

Abstract

To examine the magnitude of deep sea current in the dumping areas which is designated for industrial waste by law, a continuous measurement for twelve days was done in one of these areas (40°09′.3 N, 145°21′.1 E) from Jully to August 1975.

A rotor-type current meter with magnetic recording was installed, with an acoustic release system, 80 meters above the sea bed where the water depth was 5270 meters.

The obtained current velocities were distributed between 8 and 20 cm/sec and the current directions between 355° and 38°. Simple average of all the data gave mean current of 13.3 cm/sec in velocity and 14.7° in direction.

The north component of mean current is 13 cm/sec and is four times higher than the east component (3 cm/sec).

Variations of the current which have longer periods such as 11.6, 5.8 and 3.9 days were noticed from the Fourier analysis of the data series.

Fairly remarkable changes of tidal period such as 12 and 25 hours were found only for the north component after examination of their self-correlations.

I. は じ め に

有害物質を含んだ産業廃棄物の海洋投棄については，海洋汚染および災害の防止に関する法律によって，その排出海域，排出方法が定められている．水路部では，海洋環境の保全および海洋汚染の防止に資するため，産業廃棄物排出海域（A海域）において，油分・ＰＣＢ・重金属等についての分析調査を実施しているが，昭和49年度より同海域の海底環境の実態把握を目的とした深層海流測定を実施することとなり，50年３月の相模湾での実験を経て，50年７～８月にかけ三陸沖A海域（緯度，40°—09′.3N，経度，145°—21′.1E，水深5270m・測流水深5190m）において12日間の深層海流測定を実施したので，その結果について報告する．

* 海象課　　** 防衛庁海洋業務隊

II. 目的および調査海域

産業廃棄物排出海域（A海域）は図1に示すように，日本の周辺に5海域が設けられており，同海域には，有害物質（水銀又はその化合物・カドミウム又はその化合物・鉛又はその化合物・有機りん化合物・六価クロム化合物・ひ素又はその化合物・シアン化合物）を含んだ水底土砂をコンクリート固形化したものが排出されることになっている．このようなコンクリート容器が深海へ投棄された場合，水圧又は海底へ着底の際の衝撃により破壊すると，上記有害物質の漏洩を生じ，水平垂直方向へ拡散し，その結果，汚染物質が食物連鎖を通じ我々人類に直接的，間接的影響を与へることが考えられる．そのような事態に対処するために，5海域の深層海流の流速，流向の資料を早急に整備する必要があり，昭和49年度には相模湾での機器の作動テストを行い，昭和50年度には，海洋汚染調査と併せて，三陸沖A海域での深層海流測定を実施した．深海流速計の設置にあたっては，観測船が現場に到着後，音響測深機による海底地形調査を行い，起伏の少ない平坦な場所を選んだ．

III. 調査に使用した機器

深層海流測定に使用した機器は，浮上用ブイ・船上切離し指令装置・水中音響切離し装置・深海流速計・水浸型フラッシュライト・アンカー・ロープ類でその概略は次のとおりである．

1. 浮上用ブイ（ORE社製，SG16B—8型）

このブイは，中空のガラス球（直径16インチ）をプラスチックカバーで覆い，プラスチック架台にそれを8個取付けたもので，空中重量167kg・浮力154kg・耐圧深度6000m・最大荷重900kgで，架台上部に水浸型フラッシュライト・発信装置等が取付けられる構造となっている．

2. 水浸型フラッシュライト（OAR社製，SF500—100型）

本器は，発光部にキセノンランプを使用し，電源としてアルカリ電池（単2，4本）を使用し，水中では感圧スイッチが働いて，電源を断とし，水面に出た時電源が入り，1秒1閃の割合で発光する．光の到達距離は6～10マイル・発光時間は100時間・耐圧深度は7000mで，浮上用ブイに取付けて使用する．

3. 船上切離し指令装置（AMF社製，200型）

船上より指令音波を水中音響切離し装置へ送る装置で，出力増幅部・コーダー・レシーバー・送受波器から構成されており，発射される指令音波には，水中切離し装置の応答ピンガー（後述）を作動させるものと，発火装置に点火・切離しを実行させる2種類があり，これを1組とし，10組の音波を出すことが出来，複数の水中音響切離し装置を個別に作動させることが出来る．

4. 水中音響切離し装置（AMF社製，242型）

本器は，船上切離し指令装置からの指令音波により，設置場所を知らせるための応答ピンガー・あらかじめセットした時間が来ると発火装置に点火させるタイマー・発火装置・送受波器から構成されている．船上装置からの指令2の音波で応答ピンガーが作動し，1秒1回の割合で1分間発信する．その発信音を船上装置で捉えた後，指令3の音波を船上から発射すると，発火装置内の火薬に点火され，アンカーを切離した後，1秒1回の割合で発信を開始，揚収後，電源を断にするまで発信を継続する．また本器は，深海に設置するのを目的としているので，内部の空気中に含まれる水分が，水温の低下によって凝縮，電気回路に付着した結果，短絡等の事故の

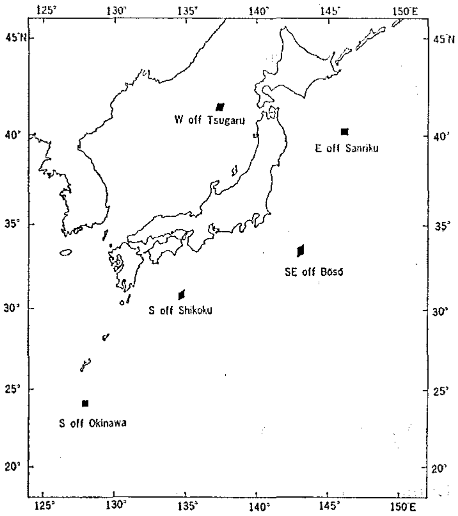


Fig. 1 The Legally Designated Dumping Areas for Industrial Waste Around Japan

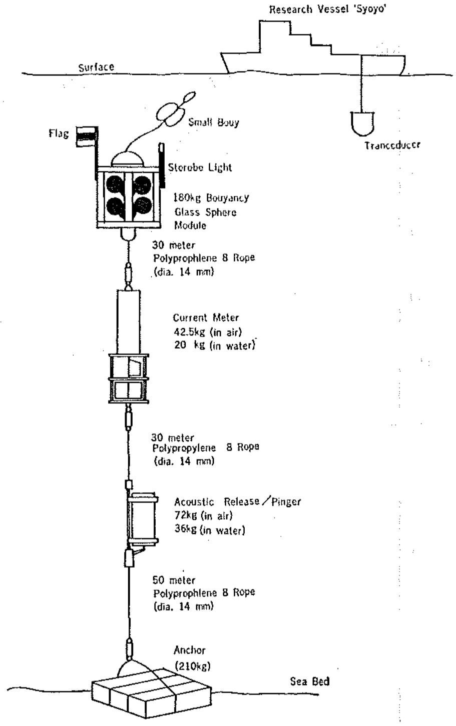


Fig. 2 Typical Arrangement for Current Meter System

生ずるのを防止するため，フレオンガスを注入し，内部の空気と置換し，防湿効果をもたらすと同時に，装置のリークテストにも使用出来る．

5. 深海流速計（鶴見精機製，ＭＴＣＭ－３型）

本器は，海中の流向・流速を長期間にわたり，自動的に測定・記録するもので，流向・流速のデータは，すべてデジタル形式で小型カセット式テープレコーダーに記録されるものである．その構成は，サーボニアスロータ ー（流速センサー）・ベーン（流向センサー）が装置の外部にあり，耐圧チャンバー内部は，傾斜角検出器・コンパス偏位角検出器・プリント板部・時計および時間計数器・データレコーダー・ベーン偏位角検出器から成り立っている．性能としては，流速 0.05～4 ノット・流向 0～360度・傾斜角 0～35度・測定期間は，連続測定の場合，約50時間・5分毎の測定の場合，約1か月・15分毎の測定の場合，約3か月・30分毎の測定の場合，約6か月・1時間毎では，約1年間のデータを取ることが出来る．

6. ロープ

今回，深海流速計の係留に使用したロープは，ポリプロピレン製エイトロープ（直径14mm）を使用した．係留にロープを使用することについては，荷重をロープにかけた場合に生ずるロープの伸びのため，測定器の正確な設置深度が不明になることが指摘されている（高野，1972）．この問題については，今後解決して行きたい．

7. アンカー

今回使用したアンカーは，一般に使用されるものではなく，レール（60kg/m）を，1mに切断したものを3本とチェーン（30kg）を使用した．

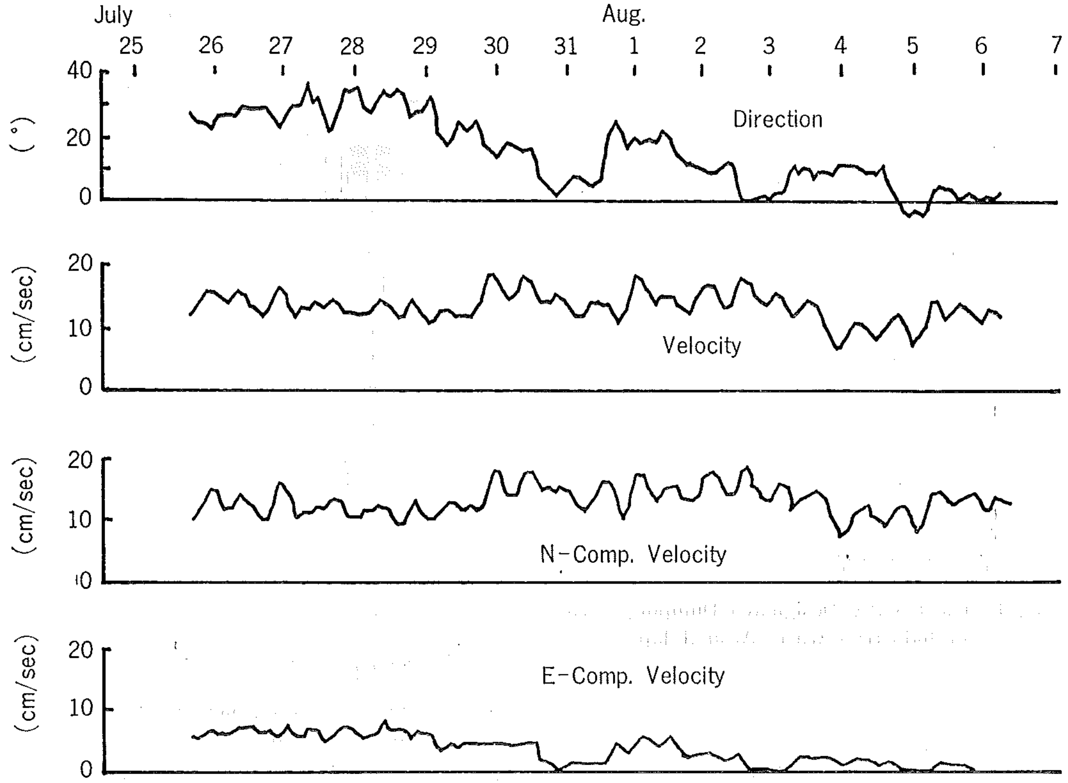


Fig. 3 Observed Current (from top, Direction, Velocity, North and East Comonent).

Ⅳ. 設置方法および揚収

深海流速計の設置方法については，種々の報告（Berteuax 1973, Morey 1973, Walden 1973, 五十嵐 1976, 今脇 1976）があるが，我々は，図2に示した設置方法をとった．また，観測船からの投入については，デリックの位置等を考慮した結果，アンカーより逐次投入する方法をとり，浮上用ブイが，水面まで降りたところで，つり下げ用ロープを切断し，投入作業を終了，以後，応答ピンガーの音の強弱と，NNSS・ロランCにより，流速計の海底設置場所を確認し現場を離れた．約12日経過後，NNSS とロランCにより，設置場所へもどり，水中音響切離し装置の応答ピンガーを作動させ，その発信音の最強となる地点で切離しを行わせ，システムの浮上を開始した．システムの上昇速度は，あらかじめ次式で計算し，毎秒1.8m であることを，相模湾での実験で確認，今回は浮上まで約50分を要し，応答ピンガーの発信音をレシーバーでモニターしながら現場で待機した．海面への浮上は，予定時刻どおりに行われ，浮上用ブイより逐次揚収した．

$$m\frac{dv}{dt}=-F\cdot g+C\frac{\rho v^2 A}{Z}$$

g; 重力の加速度，v; 上昇速度，ρ; 流体の比重量，F; 浮力，C; 抗力係数，m; システムの質量，A; 基準面積

Table 1 Results of Fourier Expansion

No.	Period		N-Comp.		E-Comp	
	Hour	Day	Amplitude	Phase Ang.	Amplitude	Phase Ang.
	h	d	cm/s		cm/s	°
1	278.5	11.60	1.45	190.3	2.38	87.6
2	139.3	5.80	1.15	38.8	1.52	99.8
3	92.8	3.87	1.25	31.9	0.13	136.1
4	69.6	2.90	0.96	247.8	1.17	93.6
5	55.7	2.32	0.29	329.2	0.48	358.8
6	46.4	1.93	0.65	131.8	0.70	122.1
7	39.8	1.66	0.30	277.9	0.15	247.7
8	34.8	1.45	0.30	111.7	0.47	92.7
9	30.9	1.29	0.12	192.7	0.16	158.8
10	27.9	1.16	0.38	161.6	0.32	133.6
11	25.3	1.06	0.55	67.6	0.33	91.0
12	23.2	0.97	0.06	112.9	0.22	12.7
13	21.4	0.89	0.20	2.3	0.04	213.7
14	19.8	0.83	0.25	239.0	0.15	12.6
15	18.6	0.77	0.59	183.8	0.21	32.9
16	17.4	0.73	0.42	335.7	0.14	121.9
17	16.4	0.68	0.17	287.0	0.23	24.8
18	15.5	0.65	0.24	319.7	0.29	142.0
19	14.7	0.61	0.42	112.5	0.07	179.3
20	13.9	0.58	0.65	115.9	0.11	59.4
21	13.3	0.55	0.34	109.2	0.20	35.5
22	12.7	0.53	1.04	357.8	0.32	115.9
23	12.1	0.51	0.96	216.6	0.29	173.2
24	11.6	0.48	0.24	267.3	0.01	313.9
25	11.1	0.46	0.49	261.2	0.06	300.2
26	10.7	0.45	0.38	255.3	0.21	79.8
27	10.3	0.43	0.13	206.4	0.22	1.2
28	9.9	0.41	0.14	128.0	0.10	168.7
29	9.6	0.40	0.29	0.8	0.14	53.0
30	9.3	0.39	0.44	122.5	0.14	202.8
31	9.0	0.37	0.16	197.2	0.09	20.6
32	8.7	0.36	0.23	264.4	0.06	152.0
33	8.4	0.35	0.09	299.6	0.18	50.0
34	8.2	0.34	0.09	192.1	0.05	75.9
35	8.0	0.33	0.09	10.2	0.08	87.9
36	7.7	0.32	0.02	139.3	0.03	40.5
37	7.5	0.31	0.04	24.9	0.03	90.9
38	7.3	0.31	0.14	134.0	0.07	137.9
39	7.1	0.30	0.14	98.7	0.05	89.6
40	7.0	0.29	0.02	35.3	0.06	225.0
41	6.8	0.28	0.06	274.5	0.07	60.1
42	6.6	0.28	0.14	179.1	0.05	326.7
43	6.5	0.27	0.07	26.6	0.09	24.9
44	6.3	0.26	0.13	297.4	0.11	112.1
45	6.2	0.26	0.09	84.8	0.09	70.0
46	6.1	0.25	0.03	219.7	0.04	253.0
	Average		12.646cm/s		3.310cm/s	

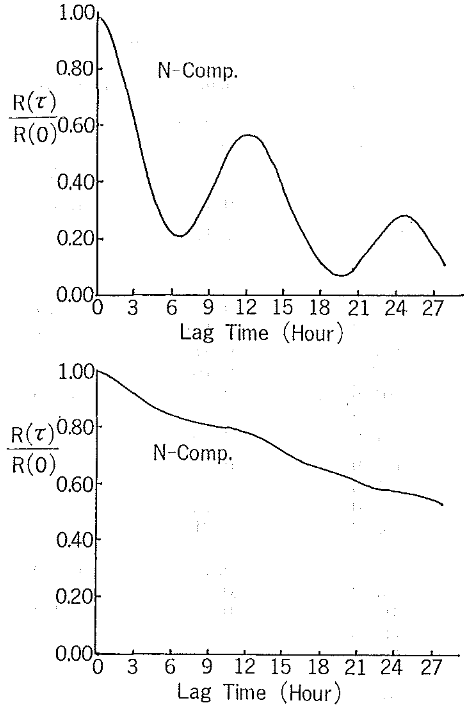


Fig. 4 Auto-Corelation of North and East Component

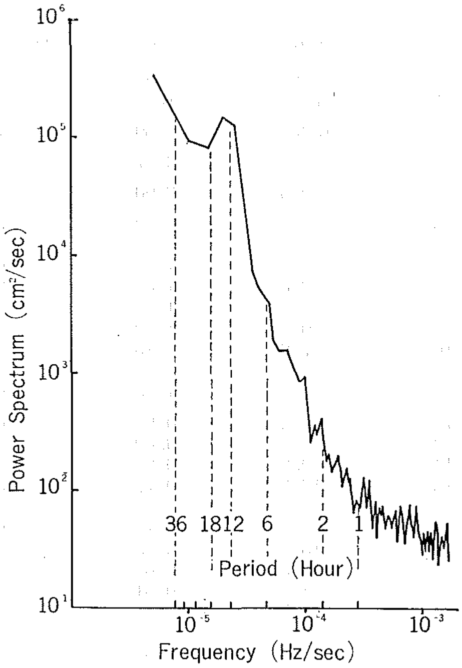


Fig. 5 Power Spectrum of North Component

Table 2 Results of Tidal Harmonic Analysis.

Component	Velocity Lag Angle	M_2	S_2	K_2	K_1	O_1	P_1	M_4	MS_4	Constant
North Comp.	V(cm/sec)	1.19	0.27	0.07	0.18	0.58	0.06	0.09	0.02	12.65
	K (°)	232.8	50.5	50.5	319.5	13.5	319.5	320.0	203.8	
East Comp.	V(cm/sec)	0.24	0.30	0.08	0.45	0.20	0.15	0.05	0.12	3.13
	K (°)	318.2	355.7	355.7	16.2	10.3	16.2	344.1	149.1	
Main Dir.	V(cm/sec)	1.99	0.33	0.09	0.31	0.61	0.10	0.11	0.07	
	K (°)	58.3	212.3	212.3	170.6	190.3	170.6	142.9	345.2	
(205.3°)										

V. 測定結果および考察

深海流速の測定は，昭和50年7月25日17時15分から昭和50年8月6日07時35分までの278.5時間にわたって，5分間毎に行った．カセットテープの記録を解析装置にかけ，流向・流速，北方および東方成分をデジタル化した結果を図3に示した．流向は355度から38度の間で変化しており，7月30日から急に変化しているのが注目される．流速は毎秒20cmから8cm位で変化している．流向がほとんど，北向きであるため，図中の北方成分が東方成分に比較して大きくなっている．なお測定期間中流速計は垂直に保たれていた．

全期間の観測データの個数（1回の測定で20回のデータサンプリングを行った平均値を1個とする）は，3341

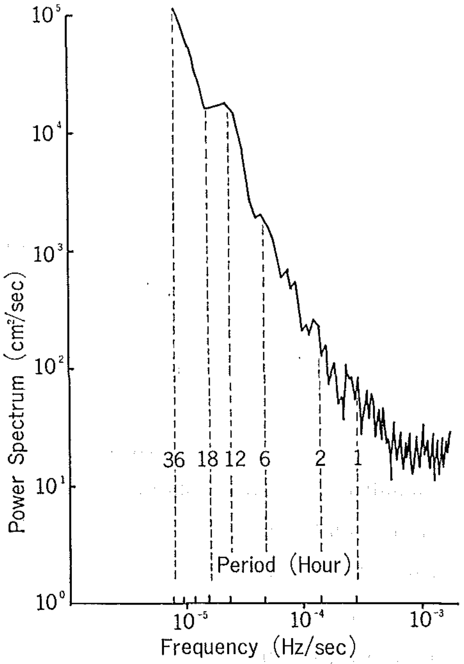


Fig. 6 Power Spectrum of East Component

個であるが，この個数全体を1周期として，フーリェ級数に展開し，その結果の1部を表1に示した．北方分速の平均流速は，毎秒13cm，東方分速は3cmで，これをベクトル合成した平均流向は14.7度・平均流速は13.3cmであった．表値の初めの数項についてみると，11.6日・5.8日・3.9日と，1日より長い周期のものがあることが推察される．これらの流速は，毎秒1cm程度であった．1日より短い周期のものについては，北方分速では，毎秒0.6cm，半日周期のものが，毎秒2cm程度の値が算出された．

また，測定地点の北緯40度付近では，もし慣性流があるとするならば，その周期は

$$T=2\pi/f \qquad f=2\omega\sin\varphi \qquad \omega：角速度,\ \varphi：緯度$$

で表わされ，18.6時間となるが，北方分速については1日周期と同程度の毎秒0.6cmが算出された．東方分速について，慣性流がこれと同程度に算出されない理由については不明である．これらの結果から，この付近の周期成分はそれ程顕著でなく，北方への恒流ともいうべき，深海としては比較的大きな流れがあることが分かる．次に各成分について，334個までの自己相関係数をとった結果を図4に示す．図の上が北方成分・下が東方成分のものである．これによっても，北方分速で，12時間・25時間のところに，割合はっきりしたピークが認められ，半日・1日周期のものがあることが判る．東方成分については，表1からも分かるがはっきりした周期性が認められない．自己相関係数からパワースペクトラムを算出し，その結果を図5・6に示した．北方分速では，12時間周期のものが，2×10^5 cm²/sec・東方成分では，2×10^4 cm²/sec 程度である．これらの図からも先に述べた長周期変動があることが分る．パワースペクトラムは，これらの長周期成分・恒流成分を除いて求めるべきであろう．一方，記録をスムージングして，毎日の月の上経過時から1時間2分毎のデータを読み取り，11日間の記録を用いて，数昼夜の調和分解を行なった結果を表2に示す．周期成分が極めて小さいので，はっきりしたことは言え

ないが，M_2およびK_1分潮の遅角は，これまで言われている（小倉　1934）この付近でのそれぞれ2時間・10時間とほぼ合致している．

VI．あとがき

深層海流の観測およびシステムの係留等について，未だ確立されておらず，今後の経験をふまえた上で方法の確立をはかって行きたい．また，今回の三陸沖の観測結果をみても，深層海流の長周期成分の充分な把握，拡散係数の見積りなど究明すべき問題は多く残っている．更に観測計画がもたれている他のA海域の結果と併せて検討を加えて行きたい，この報告を書くにあたって，観測に際し御協力頂いた「昭洋」乗組員の方々，計算にあたって，多大の御助力を頂いた海象課桑木野調査官に深く感謝する．

参考文献

小倉伸吉（1934），潮汐学

高野健三・今脇資郎（1972）うみ，日仏海洋学会誌，No. 4，178 pp. Nov.

H. O. Berteaux and R. H. Heinmiller, JR (1973) Collected Reprint, wood Hole Oceanogr. Part 1.

R. G. Walden and N. N. Panicker (1973) ibid, part 2.

R. L. Morey and H. O. Berteaux (1973) ibid, part 2.

五十嵐　宏（1976）海洋科学　Vol. 8 pp. 266～272.

今脇資郎（1976）海洋科学，Vol. 8. pp. 340～350.

REPORT OF HYDROGRAPHIC RESEARCHES No.12, March, 1977

月の暦のプログラム

井 上 圭 典*

COMPUTER PROGRAMMES FOR THE MOON'S EPHEMERIDES

Keisuke Inoue

Received 10 December 1976

Abstract

Computer programmes for the moon's ephemerides have been prepared at the Hydrographic Department of Japan (JHD). Programme for j=0 ephemeris is strictly based on the ILE without any modification and programme for j=2 ephemeris is strictly based on EWE (1966) with modification by Bixby and Van Flandern (1970). Instead of numerical differenciation, planetary aberrations are calculated directly for the date by differenciating the series for true longitude and latitude. See. eqs. (4.5), (4.6) and (4.7). Coefficients for this calculation are given in TABLE 3.

Ephemerides thus calculated have been compared with those printed in the ILE and A. E. for all half-day data from 1952 to 1980. See TABLE 4. Although discrepancy by ± 2 in the printed last figure never appears, there exist clearly systematic differences especially in apparent latitude on j=2. These discrepancies seem to be due to omissions and simplifications of small terms in the AE-programme. Comparison has been also made with *Fundamental Lunar Ephemeris* (FLE) of the U. S. Nautical Almanac Office supplied by Dr. Van Flandern for sample dates. See TABLES 5 and 6. Since agreements in nutation and aberrations are satisfactory as shown by (6.1) and (6.2), discrepancy in apparent longitude seems to be caused mostly by the difference in correction of terms due to the earth-figure perturbations. If a small correction, eq. (7.1), is applied to the FLE, agreement improves much as shown in TABLE 9. Similarly, improvement in agreement for horizontal parallax is achieved by adding the fifth order term to the FLE as shown in TABLE 6. Accordingly, respective mean values of differences between the amended FLE and JHD are 0±0.02 at the last decimal places printed in the A.E. for apparent longitude, apparent latitude and horizontal parallax. In other words, if the JHD and amended USNAO data would be tabulated down to the same decimal places as in the A. E., the frequency of discrepancy by ± 1 at the last figures would be less than 2%, which is remarkably superior to those between the A. E. and JHD given in TABLE 4. TABLE 4 thus suggests that the calculation accuracies of the A. E. are around $\pm 0''.0010$ for apparent longitude, $\pm 0''.003$ for apparent latitude and $\pm 0''.000006$ for horizontal parallax. Correction due to the earth-figure given in *the A.E. 1968 Supplement* has been extended to the smaller terms and is shown in TABLE 10, as has been done by Van Flandern (1976a). As far as the numerical consistency is concerned, the JHD-

* 編暦課 (Astronomical Division)

programmes are considered to provide the most strict ephemerides of the moon based on the Brown-Eckert theory.

Frequencies of discrepancy in nutation between the A. E. and JHD are presented in TABLE 7 for sample dates, and agree with Wilkins' (1954) remark, concerning the errors due to the use of the cyclic packs adopted in the A. E. data.

Contents : Sec. 1. Introduction,
Sec. 2. Fundamental formulae and notations employed in the Brown's theory,
Sec. 3. Calculation procedure of j=0 ephemeris,
Sec. 4. Calculation procedure of j=2 ephemeris,
Sec. 5. Structure of the programmes and flow chart,
Sec. 6. Comparisons with the A. E. and FLE,
Sec. 7. Correction of terms due to the earth-figure perturbations,
Sec. 8. Explanation of the auxiliary constants F_1, F_2, F_3,
Sec. 9. Notes on j=1 ephemeris and the printed ephemeris in the A.E. 1972,
Sec. 10. Closing remarks.

Key words: moon's ephemeris.

1. はじめに

現在，わが国の天体位置表（Japanese Ephemeris, J. E.）を始めとして，各国の天体暦（national ephemeris）に掲げられている月の暦は Brown の理論に基いた計算式から得られたものである．Brown の理論は Hill の理論を一層精密に発展させたもので，1892～1908年の間に完成し，月位置推算表 Tables of the Motion of the Moon（Brown, 1919 以下 *Table* と略す）として刊行され，これによる月の暦がアメリカ暦（American Ephemeris）に採用されたのが1923年であった．以来この理論の有効性は現在でも失われておらず，ニュートン以後，万有引力法則をもとにした数多くの月の暦の歴史上，最も寿命の長い暦の基礎となっている．ここでいう寿命とはより精密な理論が現われるまでということもあるが，新理論の有無にかかわらず観測結果と合致しなくなってしまうことをいう．その理由として (a)理論そのものに欠陥がある，(b)理論から計算式を導く際に当時の計算手段と観測精度とに見合う程度に展開したが，時代の推移でそれが現状に合わなくなる，(c)採用した天文定数，すなわち運動方程式の積分定数や解を表現するために導入された orbital parameter 等が改訂されないままでいること，等があげられる．(a)の理由は致命的であるが Brown の理論にはそれが見出されていない．彼がその *Table* を発表した時，いわゆる経験項が加わっていたが，それは地球自転の不規則性が時間引数ひいては黄経に反映してしまったもので，理論の不十分のために付加せざるを得ない性質のものではない．事実，暦表時を採用した1960年の暦からこの項は除かれている．(b), (c)は理論は精密であるが適用が不十分なのである．Brown の理論から計算式を導く際にも当時の観測精度と天文定数との制約下にあったので，この (b), (c)による精度不足が月の暦に現われたが，これは適用法を改めることによって解消される．これは具体的には，天体暦における次のような変遷となって現われている．

地球自転速度の不整の性質が明らかになったことに伴い，国際天文学連合 IAU は第8回総会（1952年）において，天体の運動の計算および天体暦に，従来の世界時 UT に代わって，暦表時 ET を用いる勧告を採択した．その骨子は次のとおりである．

(1) ET の単位は 1900.0年における1太陽年の長さ（IAU 第9回総会，1955年，における修正）とし，その時刻は Newcomb (1895) の太陽表の与える太陽の平均黄経で定義する．

(2) Brown の *Table* による月の暦をＥＴによって表現するために，その平均黄経から上述の経験項を除き，$-8''.72-26''.75\,T-11''.22\,T^2$ を加える． T は1900年１月0.5日 ET から起算したユリウス世紀（36525日）数．

(3) Brown の *Table* による月の視黄経に $+0''.018\cos(l-2D)+0''.007\cos 2D$ を加える．（第3.1節参照）．

(4) 天体暦には，月の位置を赤経で $0^s.001$，赤緯で $0''.01$ まで掲げることとし，その計算には Brown の理論に基き三角級数で直接に黄経・黄緯・地平視差を求める．

(5) 天体暦は1960年から ET を用いる．

上記(2)によって太陽と月の暦は同じ時刻系で表現されることになり，ET は実際には月の位置の観測と暦との比較から決定される．

アメリカ IBM の Watson Scientific Computing Laboratory の Eckert は，この勧告に従った月の黄経・黄緯・地平視差を，彼の指導により製作された真空管式の計算機 SSEC を用いて，1952～1971年について計算した．このうち1952～1959年の部分は Improved Lunar Ephemeris という名称で1954年に出版され，1960年以降の部分は各国の天体暦の本文に採用された．これらを併せて ILE と略称する．

その後，(i) IAU は第12回総会（1964年）において天文定数系を改訂したが，これに伴い Brown の計算式の係数の数値を変更することが必要になり，また (ii) Eckert (1966) は Brown の *Table* 第182項の係数値の誤りを発見した．さらに (iii) Eckert は太陽による摂動について高精度の詳細な展開式を求めた．これをその共同発表者の名を併せて EWE と称する (Eckert, Walker, Eckert, 1966)．

そこで IAU は第13回総会（1967年）において，月の暦を記号 j によって区別することとして，ILE を j=0，これに上記の (i) と (ii) の補正を施したものを j=1，これにさらに (iii) を補正したものを j=2 とし，またこれらの月の暦を用いて求めた暦表時をそれぞれ $ET_{j=0}$，$ET_{j=1}$，$ET_{j=2}$ と記すことを勧告した．天体暦における月の暦の経過を下表に示す．ここに EFW は黄緯に関する補正である（第9.2節参照）．

Moon's data contained in national ephemerides

	main part	correction table	
		AE	JE
— 1959	Brown's Table		
1960 — 1967	j=0		
1968	j=0	j=0→1 (every day)	j=0→1 (every day)
1969 — 1971	j=0	〃 〃	〃 (every half-day)
1972	j≒2		EFW (every day)
1973 —	j=2		

この稿の目的は，上記(b)，(c)による月の暦と観測値との不一致を解消することについて，j=0，j=1，j=2 の暦がその適用の具体例と成果であることを示すことにある．また Brown の *Table*, ILE, EWE 等はその構造を理解するだけでも多大の労力と日時を要するので，これらについて基本的な解説を施す．さらに具体的な計算法の詳細はこれまで発表されていないので，グリニジ天文台およびアメリカ海軍天文台で採られている方法の調査およびこれらとわれわれの方法との比較・検討についてやや詳しく述べる．これらは，現在のプログラムによる月の暦の計算を誤りなく実行し，かつ将来の改訂に容易に対処できることを意図したものである．

本稿では，簡単のために上記 Brown の *Table*, ILE, EWE の略号に加えて以下の略記を用いる．

HMNAO：グリニジ天文台編暦課（Her Majesty's Nautical Almanac Office, Royal Greenwich Observatory）または同課による計算値，

USNAO：アメリカ海軍天文台編暦課（Nautical Almanac Office, U. S. Naval Observatory）または同課による計算値，

JHD：日本水路部編暦課（Astronomical Division, Hydrographic Department of Japan）または同課による計算値，

IAU 64：IAU 第12回総会（1964年）において採択された天文定数系 IAU (1964) System of Astronomical Constants またはこれに基いて導かれた諸数値，

AE：1960年以降のイギリス暦（Astronomical Ephemeris）およびアメリカ暦（American Ephemeris）を併せ称する．両者の内容は同一である．

AE 1968 Sup.：1968年の AE の巻末付録（Supplement to the A. E. 1968），IAU 64 の解説およびこれの導入に伴う天体暦の諸数値の変更が説明してある．この記事は

Exp. Sup. AE：HMNAO・USNAO 共編（1974），Explanatory Supplement to the Astronomical Ephemeris and the American Ephemeris (3rd impression) の pp. 497～523 に再録してある．

なお，ILE および EWE に掲げられた表を引用する場合には，例えば ILE の TABLE I を ILE-I 表，EWE の TABLE III を EWE-III 表と記し，これらとの混同を避けるために本稿の表は TABLE 1，TABLE 2 というように記す．

本稿では，とくに断らない限り，時刻を表わす独立変数としての T は1900年1月0.5日 ET から起算したユリウス世紀（36525暦表日）数であり，

$$T = (\text{J.D.} - 2\,415\,020.0)/36525 \tag{1.1}$$

で計算される．J. D. は任意のユリウス日，2 415 020.0 は1900年1月0.5日 ET におけるユリウス日である．また，これを暦表日単位で表わした時刻を t とする．すなわち

$$t = 36525T \tag{1.2}$$

2. Brown の計算式

一般に月運動論（lunar theory）と呼ばれているものは，地球・月・太陽の三体問題において地球・月系の重心が太陽の周りをケプラー運動するとして，すなわち太陽の運動を既知量として議論を進めている．これは3元連立2階常微分方程式によって表現される運動方程式を解くことに帰着する（Brown, 1895）．Brown はこの三体問題の解を太陽項（solar term）と呼び，太陽系の他の天体による月の運動への直接・間接の影響，地球の形状による摂動，地球の潮汐による月の加速等による付加項を惑星項（planetary term）と呼んでいる．

Brown は Hill (1877a) の理論に従い運動方程式の一般解を黄道直角座標 X, Y, Z として得た．この太陽項の最終結果は

$$\mathrm{a}\sum C_i M_i {}^{\sin}_{\cos}(il + jl' + kF + mD) \tag{2.1}$$

の形を採る．ここで a は linear constant と呼ばれ，Hill の中間軌道の半径である．これは地球・月の二体運動から得られる軌道半径 a との間に

$$\mathrm{a} = F_2 a = 0.999\,093\,141\,962\,a \tag{2.2}$$

の関係がある（第8.2節参照）．C_i は数係数で，任意定数の一つである月の平均運動 n が $m = n'/(n-n')$ の形

における定数としてこの C_i の中に混り込んでいる．ここに n' は太陽の平均運動である．M_i は Hill-Brown の parameter $\mathrm{e}, e', \mathrm{k}, \bar{\alpha}_1$ の各巾乗の積，すなわち

$$\mathrm{e}^{\alpha} e'^{\beta} \mathrm{k}^{\gamma} \bar{\alpha}^{\delta} \qquad (\alpha, \beta, \gamma, \delta \text{ は0を含む正整数})$$

の形 (algebraical form) によって表わされており，Brown はこれを characteristic と呼んでいる．$\mathrm{e}, \mathrm{k}, \bar{\alpha}_1$ はそれぞれ

$$\mathrm{e} \doteqdot 2e, \quad \mathrm{k} \doteqdot \gamma = \sin\frac{I}{2}, \quad \bar{\alpha}_1 = \frac{\mathrm{a}}{a'}\left(\frac{E-M}{E+M}\right)$$

である (Brown, 1896)．ここに e は月の軌道の離心率，I は黄道と白道の交角，a' は太陽の軌道半径，E, M はそれぞれ，地球，月の質量である．

l, l', F, D は Delaunay の引数 (argument) で，それぞれ軌道要素および orbital parameter との間に次の関係がある．

$$\left.\begin{aligned} l &= \mathrm{c}\,(n-n')(t-t_1) = L - \tilde{\omega}, \\ l' &= \mathrm{m}\,(n-n')(t-t_3) = L' - \tilde{\omega}', \\ F &= \mathrm{g}\,(n-n')(t-t_2) = L - \Omega, \\ D &= \quad (n-n')(t-t_0) = L - L'. \end{aligned}\right\} \qquad (2.3)$$

c は月の近地点の前進をを決める係数，g は月の昇交点の後退を決める係数であって，$\dot{\tilde{\omega}}, \dot{\Omega}$ とそれぞれ

$$\dot{\tilde{\omega}} = n\left(1 - \frac{\mathrm{c}}{1+\mathrm{m}}\right), \quad \dot{\Omega} = n\left(1 - \frac{\mathrm{g}}{1+\mathrm{m}}\right),$$

の関係がある (Hill, 1877b; Brown, 1896)．L, $\tilde{\omega}$, Ωはそれぞれ月の平均黄経，近地点黄経，昇交点黄経，L', $\tilde{\omega}'$ はそれぞれ太陽の平均黄経，近地点黄経，e' は太陽の軌道の離心率である．なお6個の積分定数は e, $\mathrm{k}, n, t_0, t_1, t_2$ である．

Brown はこの解 X, Y, Z を黄経 λ，黄緯 β，視差正弦 $\sin\pi$ に変換する際に parameter $\mathrm{e}, e', \mathrm{k}, \bar{\alpha}_1$ を Delaunay の parameter e, e', γ, α_1 に変換し，各項を

$$\mathrm{a}C_i e^{|i|} e'^{|j|} \gamma^{|k|} \alpha_1 (1 + ae^2 + be'^2 + c\gamma^2 + d\alpha_1^2 + \cdots\cdots) \begin{matrix}\sin \\ \cos\end{matrix} (il + jl' + kF + mD) \qquad (2.4)$$

のように変換した．Brown は $e^{|i|} e'^{|j|} \gamma^{|k|} \alpha_1^{r}$ (r は m が奇数のとき 1，偶数のとき 0) を principal characteristic と呼んでいる．ここで α_1 は

$$\alpha_1 = \frac{a}{a'}\,\frac{E-M}{E+M} \qquad (2.5)$$

であり，e と e, k と γ との関係式は EWE-Ⅷ 表に掲げてある．

TABLE 1 は月の理論および暦に採用された orbital parameter の一覧であって，EWE-Ⅰ 表から引用した．この表で "Mem." (原著誌名による略記) は Brown (1908) が理論を展開して計算式として表現する際に採用した値，"Table" は Brown が *Table* を作製する際に採用した値である．Brown は *Table* の本体を完成した後に，これらの定数の最終値として "ILE" の欄に示す値を指定した．しかし *Table* の表値はそのままにしておき，使用法を一部手直して，この最終値を用いた場合と同じ結果を得るようにした．すなわち Brown の *Table* の与える暦は，この最終値に従っており，ILE がこれを採用したのである．"IAU 64" は1964定数系に基いた値である．また λ_l は黄経の太陽項の主項の係数，β_F は黄緯の太陽項の主項の係数，$\sin\pi$ は視差正弦の太陽項の定数項 (constant of sine parallax for moon)，e は月の軌道の離心率 (constant of eccentricity of moon's orbit)，e' は太陽の軌道の離心率 (eccentricity of sun's orbit)，γ は黄道に対する白道の傾斜角の $\frac{1}{2}$ の正弦，α_1 は月角差の項すべてにかかっている定数である．このほか c, g の algebraic expression

TABLE 1. Orbital parameters

	Mem.	Table		ILE		IAU 64
λ_l	22 639″.580	22 639″.500	≑	22 639″.550	=	22 639″.550
β_F	18 461″.480	18 461″.350	≑	18 461″.400	=	18 461″.400
$\sin \pi$	3 422″.700	3 422″.700	≑	3 422″.540	≑	3 422″.451
e	0.054 900 56	0.054 900 367 8	≑	0.054 900 489 1	=	0.054 900 489 1
γ	0.044 887 16	0.044 886 844 7	≑	0.044 886 966 9	=	0.044 886 966 9
α_1	0.002 505 32	0.002 512 73	=	0.002 512 73	≑	0.002 509 351
e'	0.016 771 91	0.016 751 04	=	0.016 751 04	=	0.016 751 04

は EWE-VI 表に掲げられている.

3. j=0 の暦の推算

3.1 j=0 の暦の特長

j=0 の暦は，第1節で説明したように IAU (1952年) の勧告に従ったものである．すなわち Brown の *Table* の作製に用いた計算式に直接数値を入れることによって計算するが，その際に次の改訂を加える．

(a) orbital parameters の値を TABLE 1 の "Table" から "ILE" に変える (第2節参照).

(b) 平均黄経から

経験項 $10''.71 \sin [140^\circ.0 (t_c-18.5)+170^\circ.7]$

を除去し，その代わりに次の項を加える．

$$-8''.72-26''.75\, T-11''.22\, T^2 \tag{3.1}$$

ここに $t_c=19.0+T$ である．

(c) 赤経を $0^s.001$，赤緯を $0''.01$ の精度で算出する． Brown の *Table* では惑星光行差を別個に考慮していないが，結果的には平均黄経に $-0''.703$，近地点黄経に $-0''.350$ という光行差補正を施したことになっている．しかし，これでは上記の要求精度を満たさないので，不十分ながら，次の量を平均黄経に補正する (Clemence 他，1952).

$$+0''.018 \cos(l-2D)+0''.007 \cos 2D \tag{3.2}$$

(d) 章動は Woolard (1953) の展開式を用いて計算する．(IAU第8回総会，1952年，勧告)

3.2 用語と記号およびデータの掲載個所

(1) Fundamental arguments

ILE-I 表 (p.288) の上から順に $L(\mathrm{i}\theta)$, $*L(\mathrm{i}\theta)$, $\tilde{\omega}(\mathrm{i}\theta)$, $\Omega(\mathrm{i}\theta)$, $L'(\mathrm{i}\theta)$, $\tilde{\omega}'(\mathrm{i}\theta)$, $\mathrm{V}(\mathrm{i}\theta)$, $\mathrm{J}(\mathrm{i}\theta)$, $\mathrm{M}(\mathrm{i}\theta)$, $S_n(\mathrm{i}\theta)$, $\mathrm{Q}(\mathrm{i}\theta)$, $\mathrm{T}(\mathrm{i}\theta)$, $L_0(\mathrm{i}\theta)$, $l(\mathrm{i}\theta)$, $l'(\mathrm{i}\theta)$, $F(\mathrm{i}\theta)$, $D(\mathrm{i}\theta)$ である．V, J, M, S_n, Q, T, L_0 はそれぞれ金星，木星，火星，土星，水星，地球，月の平均黄経．l, l', F, D は (2.3) 式に与えてある．V, J, M, S_n, Q, T, L_0 は 1850.0 の春分点と黄道とを基準にした量，他は瞬時の春分点と黄道とを基準にした量である．これらは太陽項および惑星項の引数の主要部となる．$*L$ は L に (3.1) 式を加えた量である．

(2) Additive terms

ILE-II 表 (pp.290, 291) の上から順に，第1項から第29項までを $\delta L(\mathrm{i}\eta)$，第30～36項を $\delta\tilde{\omega}(\mathrm{i}\eta)$，第37～41項を $\delta\Omega(\mathrm{i}\eta)$，第42～45項を $\delta\mathrm{T}(\mathrm{i}\eta)$，第46～48項を $\delta\gamma(\mathrm{i}\eta)$，第49項を $\delta\mathrm{J}(\mathrm{i}\eta)$，第50項を $\delta S_n(\mathrm{i}\eta)$ とする．

これらはそれぞれ L, $\tilde{\omega}$, Ω, T, γ, J, Sn に付加する長周期項である.

(3) Periodic terms

ILE-Ⅲ 表 (pp. 292～343) が周期項であって, 次のように分類される.

太陽項	黄経	$\delta L(\mathrm{i}\alpha)$	pp. 292～304,
〃	黄緯の S	$\delta S(\mathrm{i}\beta)$	pp. 304～311,
〃	〃 $\gamma_1 C$	$C\gamma_1$	pp. 311～316,
〃	〃 N	N	p. 316,
〃	〃 主項		p. 316,
〃	地平視差	$\delta \sin\pi(\mathrm{i}\gamma)$	pp. 317～322,
惑星項	黄　経	$\delta L(\mathrm{i}\delta)$	pp. 323～335,
〃	黄　緯	$\delta \mathrm{Lat}(\mathrm{i}\varepsilon)$	pp. 335～340,
〃	地平視差	$\delta \sin\pi(\mathrm{i}\zeta)$	pp. 341～343.

これらは次のような形を採る.

太陽項の一般形 $$K^{\sin}_{\cos}(il+jl'+kF+mD) \tag{3.3}$$

惑星項の一般形 $$K^{\sin}_{\cos}(il+jl'+kF+mD+aL_0+b\Omega+Angle+c\mathrm{T}+d\mathrm{P}) \tag{3.4}$$

ここで i, j, k, m, a, b, c, d は整数, $Angle$ は角度, P は V, J, M, Sn のうちどれかの惑星の黄経, iα～iθ は Brown の *Table* の List iα～iθ に対応する.

3.3 引数および係数の計算式ならびに定数変更に伴う係数の改訂法

引数 l, l', F, D の計算式:

$$\left.\begin{aligned} l &= {}^*L\,(\mathrm{i}\theta)+\delta L(\mathrm{i}\eta)-\delta\tilde{\omega}\,(\mathrm{i}\eta), \\ l' &= L'(\mathrm{i}\theta)+\delta l'(\mathrm{i}\eta), \\ F &= F\,(\mathrm{i}\theta)+\delta L(\mathrm{i}\eta)-\delta\Omega\,(\mathrm{i}\eta), \\ D &= D\,(\mathrm{i}\theta)+\delta L(\mathrm{i}\eta)-\delta l'\,(\mathrm{i}\eta). \end{aligned}\right\} \tag{3.5}$$

係数 K の計算式:

D の係数 m が奇数のとき $$K=Ne^{|i|}e'^{|j|}\gamma^{|k|}\alpha_1(1+Ae^2+Be'^2+C\gamma^2+D\alpha_1^2+\cdots\cdots) \tag{3.6}$$

〃 偶数 〃 $$K=Ne^{|i|}e'^{|j|}\gamma^{|k|}(1+A'e^2+B'e'^2+C'\gamma^2+D'\alpha_1^2+\cdots\cdots) \tag{3.7}$$

i, j, k は引数の係数と同じ. N, A, B, ……, A', B', ……は数係数である. この K の値は既に計算してあり, Brown の *Table* の諸表説明 pp. 8～28 に "Coef. of sin", "Coef. of cos" として, また ILE pp. 292～343 に "Coefficient" として掲げられている.

係数 K の改訂法:

上記 Brown の *Table* または ILE に掲げられている K の値は, TABLE 1 の "Table" の e, e', γ, α_1 に基いているから, これを "ILE" または "IAU 64" の e, e', γ, α_1 に基いた K に変えたときには, 厳密には

$$K(\mathrm{new})=N(e+\Delta e)^{|i|}(e'+\Delta e)^{|j|}(\gamma+\Delta\gamma)^{|k|}(\alpha_1+\Delta\alpha_1)\{1+A(e+\Delta e)^2+B(e'+\Delta e')^2+\cdots\cdots\} \tag{3.8}$$

等となる. Δe 等は新旧両値の差である. これは新定数, 新 parameter を (3.6), (3.7) 式に代入することを意味し, 全面的に計算し直して新しい計算式を作り出すことになる. これを避けるために (3.8) 式を次の式で近似する.

$$K(\text{new})=Ne^{|i|}e'^{|j|}\gamma^{|k|}\alpha_1\left(1+\frac{\Delta e}{e}\right)^{|i|}\left(1+\frac{\Delta e'}{e'}\right)^{|j|}\left(1+\frac{\Delta\gamma}{\gamma}\right)^{|k|}\left(1+\frac{\Delta\alpha_1}{\alpha_1}\right)(1+Ae^2+Be'^2+\cdots\cdots)$$
$$+ut+v\delta\gamma+w$$
$$=K\left(1+\frac{\Delta e}{e}\right)^{|i|}\left(1+\frac{\Delta e'}{e'}\right)^{|j|}\left(1+\frac{\Delta\gamma}{\gamma}\right)^{|k|}\left(1+\frac{\Delta\alpha_1}{\alpha_1}\right)+ut+v\delta\gamma+w$$

これによって既存の K の値が利用できる．u, v, w は高次補正項の係数であり，ILE-Ⅳ 表（p. 347）に掲げられている．$\delta\gamma$ は $\delta\gamma(\mathrm{i}\eta)$ を revolution で表わした値である．ここで

$$\text{Corr.}=\left(1+\frac{\Delta e}{e}\right)^{|i|}\left(1+\frac{\Delta e'}{e'}\right)^{|j|}\left(1+\frac{\Delta\gamma}{\gamma}\right)^{|k|}\left(1+\frac{\Delta\alpha_1}{\alpha_1}\right) \tag{3.9}$$

とおけば

$$K(\text{new})=(\text{Corr.}\times K)+ut+v\delta\gamma+w \tag{3.10}$$

ここで，m が奇数のときには Corr. に $(1+\Delta\alpha_1/\alpha_1)$ を含み，偶数のときには含まないことに注意．

j=0 の暦に適用する Δe は TABLE 1 の "ILE" と "Table" との差であるから

$$1+(\Delta e/e)=1.000\ 002\ 209\ 456 \tag{3.11}$$

$\Delta e'$ は e' の永年変化による改正量で，天文定数が変わらなくても時間経過とともに補正してゆかなくてはならない量．運動方程式には既知量として e_0' の形で入っており，$e'=e_0'+e_1't+e_2't^2+\cdots\cdots$ の形で入れてない．そして解の中で e_0' の代わりに $e_0'+e_1't$ を入れることにしている．具体的には Brown は解を求める際に

$$e'=0.016\ 751\ 04$$

を採用している．そこで得られた解の中の e' に

$$e'=0.016\ 751\ 04-0.000\ 041\ 80T-0.000\ 000\ 126\ T^2$$

を入れなければならない．T^2 項を無視して $e'=0.016\ 751\ 04\ (1-6.831\ 943\ 7\times10^{-8}\times t)$

したがって

$$1+(\Delta e'/e')=1-6.8319437\times10^{-8}\times t \tag{3.12}$$

$\Delta\gamma$ は γ の定数の改訂による変化量 $d\gamma$ と惑星の摂動による補正 $\delta\gamma$ との二つからなる．すなわち γ は，1 次に限っていえば $\beta_F\fallingdotseq2\gamma$，$\Delta\beta_F\fallingdotseq2d\gamma$ であるから，

$$\gamma+d\gamma+\delta\gamma=\gamma\left(1+\frac{d\gamma}{\gamma}+\frac{\delta\gamma}{\gamma}\right)\fallingdotseq\gamma\left(1+\frac{\Delta\beta_F}{\beta_F}+\frac{\delta\gamma}{\gamma}\right) \tag{3.13}$$

の形となる．TABLE 1 から

$$\frac{\Delta\beta_F}{\beta_F}=\frac{18\ 461.400-18\ 461.350}{18\ 461.350}=0.000\ 002\ 708\ 361 \tag{3.14}$$

また ILE-Ⅱ 表の $\delta\gamma(\mathrm{i}\eta)$ を revolution で表わすと，$\gamma=0.044\ 886\ 844\ 7=\overset{\text{rev}}{0.}007\ 143\ 963\ 213$ から

$$\delta\gamma/\gamma=139.978\ 324\ \delta\gamma \tag{3.15}$$

ゆえに

$$1+(\Delta\gamma/\gamma)=1.000\ 002\ 708\ 361+139.978\ 324\ (\delta\gamma)^{\text{rev}} \tag{3.16}$$

$\Delta\alpha_1$ は周期項のうち (3.6) 式だけに関わる．TABLE 1 によると "Table" から "ILE" へは α_1 に関しては変動がないので $\Delta\alpha_1=0$，よって

$$1+(\Delta\alpha_1/\alpha_1)=1 \tag{3.17}$$

ILE から IAU 64 (j=1, 2) は α_1 に変動があるので (3.17) 式は 1 にはならない．第4.2節(f)参照．

以上をまとめると (3.9) 式の右辺の値は

$$\text{Corr.}=(1.000\ 002\ 209\ 456)^{|i|}(1-6.831\ 943\ 7\times10^{-8}\times t)^{|j|}$$

$\times(1.000\ 002\ 708\ 361+139.978\ 324\ \delta\gamma)^{|k|}$ (3.18)

となる.

3.4 視黄経 λ, 視黄緯 β, 地平視差 π の計算式

視黄経$={}^*L(\mathrm{i}\theta)+\delta L(\mathrm{i}\eta)+\delta L(\mathrm{i}\alpha)+\delta L(\mathrm{i}\delta)+\delta L(\mathrm{Corr})+\Delta\psi+$〔(3.2)式〕 (3.19)

${}^*L(\mathrm{i}\theta)$……ILE-Ⅰ表の第2項 $a_2+b_2t+c_2t^2+d_2t^3$ 〔L に(3.1)式を加えたもの〕

$\delta L(\mathrm{i}\eta)$……ILE-Ⅱ表, Ser. No. 1628—1662 の29項の和,

$\sum K_i \sin(a_i+b_it+c_it^2)$ 〔第3.1節の経験項を除いてある〕.

$\delta L(\mathrm{i}\alpha)$……ILE-Ⅲ 表, Ser. No. 0—396 の390項の和,

$\sum$ Corr. $\times K_i \sin(il+jl'+kF+mD)$.

$\delta L(\mathrm{i}\delta)$……ILE-Ⅲ 表, Ser. No. 986—1401 の410項の和,

$\sum$Corr. $\times K_i \sin(il+jl'+kF+mD+aL_0+b\Omega+Angle+c\mathrm{T}+d\mathrm{P})$

$\delta L(\mathrm{Corr})$……ILE-Ⅳ 表の黄経に関する15項の和, $\sum(ut+v\delta\gamma+w)\sin(il+jl'+kF+mD)$

$\Delta\psi$……………Woolard (1953) の黄経の章動69項の和.

$$\text{視黄緯}=(\alpha\gamma_1+\alpha\gamma_1 C)\left[\sin S+\frac{\gamma_2}{\gamma_1}\alpha^2\sin 3S+\frac{\gamma_3}{\gamma_1}\alpha^4\sin 5S+\frac{1}{\alpha\gamma_1}\{N+\delta N(\mathrm{Corr})\}\right]$$

$$+\delta\,\mathrm{Lat}(\mathrm{i}\varepsilon) \qquad (3.20)$$

$S=F(\mathrm{i}\theta)+\delta L(\mathrm{i}\eta)-\delta\Omega(\mathrm{i}\eta)+\delta S(\mathrm{i}\beta)$

$\alpha=1+(\Delta\gamma/\gamma)=1.000\ 002\ 708\ 361+139.978\ 324\ (\delta\gamma)^{\mathrm{rev}}$

$\gamma_2/\gamma_1=-6.241/18519.700=-3.369\ 924\ 998\times10^{-4}$
$\gamma_3/\gamma_1=0.004/18519.700=2.159\ 862\times10^{-7}$
$\gamma_1=18\ 519''.70$
} ILE-Ⅲ 表 Ser. No. 797—800

$\gamma_1 C$………………ILE-Ⅲ 表, Ser. No. 641—786 の146項の和, $\sum$Corr. $\times K_i\cos(il+jl'+kF+mD)$.

$F(\mathrm{i}\theta)$……………ILE-Ⅰ 表の第16項 $a_{16}+b_{16}t+c_{16}t^2+d_{16}t^3$.

$\delta L(\mathrm{i}\eta)$ …………ILE-Ⅱ 表, Ser. No. 1628—1662 の29項の和, $\sum K_i\sin(a_i+b_it+c_it^2)$.

$\delta\Omega(\mathrm{i}\eta)$…………ILE-Ⅱ 表, Ser. No. 1632—1672 の5項の和, $\sum K_i\sin(a_i+b_it+c_it^2)$.

$\delta S(\mathrm{i}\beta)$ …………ILE-Ⅲ 表, Ser. No. 397—639 の234項の和,

$\sum$Corr. $\times K_i\sin(il+jl'+kF+mD)$.

N ………………ILE-Ⅲ 表, Ser. No. 787—796, 1679, 1680 の12項の和,

$\sum$Corr. $\times K_i\sin(il+jl'+kF+mD)$.

$\delta N(\mathrm{Corr})$………ILE-Ⅳ 表の5項の和, $\sum(ut+v\delta\gamma+w)\sin(il+jl'+kF+mD)$

$\delta\,\mathrm{Lat}(\mathrm{i}\varepsilon)$ ………ILE-Ⅲ 表, Ser. No. 1402—1555 の154項の和,

$\sum$Corr. $\times K_i\sin(il+jl'+kF+mD+aL_0+b\Omega+Angle+c\mathrm{T}+d\mathrm{P})$

$$\text{地平視差}=\sin\pi+\frac{1}{6}\sin^3\pi$$

$\sin\pi=\delta\sin\pi(\mathrm{i}\gamma)+\delta\sin\pi(\mathrm{i}\zeta)+\delta\sin\pi(\mathrm{Corr})$ (3.21)

$\delta\sin\pi(\mathrm{i}\gamma)$……ILE-Ⅲ 表, Ser. No. 801—985 の181項の和,

$\sum$Corr. $\times K_i\cos(il+jl'+kF+mD)$

$\delta\sin\pi(\mathrm{i}\zeta)$……ILE-Ⅲ 表, Ser. No. 1556—1627 の66項の和,

$\sum$Corr. $\times K_i\cos(il+jl'+kF+mD+aL_0+b\Omega+Angle+c\mathrm{T}+d\mathrm{P})$

$\delta\sin\pi$(Corr)…ILE-Ⅳ 表の2項の和，$\sum(ut+v\delta\gamma+w)\cos(il+jl'+kF+mD)$

さて，a_e を地球の赤道半径とすれば，$\sin\pi=a_e/r$ であり，r の Brown の解は $\mathrm{a}/r=(\mathrm{a}/r)_0+$周期項 の形で与えられているから，

$$\sin\pi=\frac{a_e}{\mathrm{a}}\ \frac{\mathrm{a}}{r}=\frac{a_e}{\mathrm{a}}\left\{\left(\frac{\mathrm{a}}{r}\right)_0+\text{周期項}\right\} \tag{3.22}$$

となる．a_e が変わらなければそのままでよいが，a_e が変われば｛ ｝の中はそのままで，a_e/a を変えればよい，TABLE 1 の定数 $\sin\pi$ は $(a_e/\mathrm{a})(\mathrm{a}/r)_0$ であるから a_e の変化に比例する．よって *Table* の定数を用いて得られた最終結果の $\sin\pi$ に

$$3422.540/3422.700=0.999\ 953\ 253\ 2 \tag{3.23}$$

を掛ければ "ILE" の定数によった $\sin\pi$ が得られる．

3.5 視赤経 α，視赤緯 δ の計算式

黄道座標から赤道座標への変換は，通常の球面座標変換式による．

$$\left.\begin{aligned}\cos\delta\cos\alpha&=\cos\beta\cos\lambda\\ \cos\delta\sin\alpha&=\cos\beta\sin\lambda\cos(\varepsilon+\Delta\varepsilon)-\sin\beta\sin(\varepsilon+\Delta\varepsilon)\\ \sin\delta&=\cos\beta\sin\lambda\sin(\varepsilon+\Delta\varepsilon)+\sin\beta\cos(\varepsilon+\Delta\varepsilon)\end{aligned}\right\} \tag{3.24}$$

ここに黄道傾角 ε は Newcomb (1895) の太陽表から

$$\varepsilon=23°27'08''.26-46''.845T-0''.0059T^2+0''.00181T^3,$$

$\Delta\varepsilon$ は Woolard (1953) の章動計算式における黄道傾角の章動40項の和．

4. j=2 の暦の推算

j=2 の暦は Brown の理論の許す限りの高い精度で月の位置を与えるもので，太陽項については Brown の *Table* の展開式の代わりにEWEの展開式を用いる．これは *Table* の展開式を基礎にして"numerical method" で太陽項の各項の数係数をより一層精密に（黄経・黄緯で1桁，地平視差で2桁余分に）求めたものである．この方法は Brown (1938) が *Table* 完成後，より精密な暦を得るために確立したもので，これを Eckert (1958) および Eckert, Smith (1962) が改良し，この方法を電子計算機に適用して得られたものである．

4.1 計算の順序

j=2 の暦の計算は次の順で行う．基礎諸量と適用方法は本質的には j=0 の暦の場合と同じであって，これに天文定数，orbital parameter の変更に伴う改訂を施し，精度向上のために項数を多く採る．

(a) ILE に用いた平均軌道要素のうちで L と $\tilde{\omega}$ の定数項にそれぞれ $+0''.703$，$+0''.350$ を加える．したがって l, F, D にもそれぞれ $+0''.353$，$+0''.703$，$+0''.703$ を加える．

(b) 平均黄経の式において，経験項 $10''.71\sin\{140°.0(t_c-18.5)+170°.7\}$ を除き，$-8''.72-26''.75T-11''.22T^2$ を加える．

(c) Brown の *Table* の Ref. No. 182 の項について，$-1''.298\sin(2l-2F)$ の代わりに $-1''.372\sin(2l-2F)$ を用いる．

(d) 黄経と地平視差に関する太陽項については，ILE-Ⅲ 表と EWE-Ⅱ 表を併用する．この場合，両者に共通する引数を持つ項は，その係数を加えて1項にまとめる．黄緯の太陽項は EWE-Ⅲ 表だけを用い，ILE-Ⅲ 表は用いない，この場合の係数は $\beta+\Delta\beta$ とする．高次補正項については ILE-Ⅳ 表の代わりに EWE-Ⅴ 表を用いる．

(e) 惑星項は ILE を用いる.

(f) Orbital parameter および天文定数の変更に伴う改訂を施す. orbital parameter については第3.3節で述べた方法を適用し, 視差正弦定数についても j=0 の場合に準ずる. orbital parameter に含まれない天文定数のうちで地球の扁率と光行差定数が変更されたが, 地球扁率の改訂に伴う補正法は Bixby, Van Flandern (1970)の方法による. 惑星光行差は(h)で全く独立に計算するから光行差定数の改訂については考慮を要しない.

(g) 章動は Woolard (1953) の計算式を採る.

(h) 真黄経・真黄緯によって惑星光行差を計算し, 視黄経・視黄緯を求める.

4.2 計算の内容

上記(a)〜(h)の解説と具体的な数値を記す. 以下の(a), (b), ……は上記の(a), (b), ……に対応する.

(a) 惑星光行差を切り離して(h)において厳密に補正することに伴う措置である. すなわち Brown の *Table* に含まれた惑星光行差 (第3.1節(c)参照) を除去し, 幾何学的位置にもどすことを意味する.

(b) 第3.1節の(b), (c)参照.

(c) Brown の計算の誤りの訂正.

(d) EWE-II 表は, 黄経と地平視差の太陽項について, Brown の *Table* による値 (すなわち ILE-III 表による値) への補正値 $\Delta\lambda$, $\Delta\sin\pi$ を, 各引数 $il+jl'+kF+mD$ に対して与える. 引数の係数 i, j, k, m にはいずれも50を加えてある. 例えば, p.316 の最左欄, 上から10段目は

Arg.					
l	l'	F	D	$\Delta\lambda$	$\Delta\sin\pi$
51	50	50	48	11−	131−

であって, $i=51-50=1$, $j=50-50=0$, $k=50-50=0$, $m=48-50=-2$, すなわち

$$\Delta\lambda=-0''.0011\sin(l-2D),\qquad \Delta\sin\pi=-0''.000131\cos(l-2D),$$

を意味する.

ILE-III 表で, これらと同じ引数 $(l-2D)$ を持つ項は, 黄経では Ser. No. 8 (p.292) であって, その係数は, $-4586''.465$, 地平視差では Ser. No. 809 (p.317) であり, 係数は $+34''.3117$ である. これらを EWE-II 表とそれぞれまとめて, 黄経の項を$-4586''.4661\sin(l-2D)$, 視差正弦の項を $34''.311569\cos(l-2D)$ とする. 実際には Eckert 等は, 太陽項の再計算によって, これらの係数値として上記の$-4586''.4661$および$34''.311\ 569$を得て, これらと ILE-III 表との差を EWE-II 表に $\Delta\lambda$, $\Delta\sin\pi$ として収めたのである. (EWE-II 表と共通引数を持つ項が ILE-III 表にない場合は, EWE が新しく追加した項であることを意味する.) つまり, この $\Delta\lambda$, $\Delta\sin\pi$ は太陽項に対する補正であるから, 太陽項と惑星項とを区別して補正する必要のある場合には, このことをよく注意しておかなければならない.

ここで ILE-III 表に掲げられている項の指定番号について説明しておく. 上記 Ser. No. 8 では最左欄の Ref. No. の欄に二つの番号 1173, 8 が並記してある. Ser. No. は ILE の計算における通し番号であり, Ref. No. は Brown の *Table* の No. である. Brown の *Table* の Ref. No. 8 は太陽項であり, その値は $-4586''.426\sin(l-2D)$, Ref. No. 1173 は惑星項であり, その値は $-0''.039\sin(l-2D)$ である. ILE では引数が共通の項を一つにまとめており, この場合には$-4586''.465\sin(l-2D)$ とし, これを Ser. No. 8 の項としたのである. (Brown の *Table* の Ref. No. と ILE の Ser. No. とは必ずしも共通ではない.)

黄緯の太陽項については, EWE は ILE とは全く違った計算式を採っている. すなわち ILE では黄緯を $(1+C)(\gamma_1\sin S+\gamma_2\sin 3S+\gamma_3\sin 5S+N)$ の形 (第3.4節) で計算するのに対して, EWE では

$$\beta=\sum K\sin(il+jl'+kF+mD)$$

の形で計算する．それで EWE-III 表には i, j, k, m にそれぞれ50を加えた値と β, $\Delta\beta$ が掲げてある．$K=\beta+\Delta\beta$ である．例えば，p. 319，中央の欄，上から19段目は

		Arg.			
l	l'	F	D	β	$\Delta\beta$
49	49	51	52	88904	5

であって，これは $8''\!.8909\sin(-l-l'+F+2D)$ という項を意味する．

(f) orbital parameter については TABLE 1 における等号・不等号によって補正の必要の有無がわかり，これに従って (3.9) 式の Corr. を計算する．すなわち e, e', γ は j=0 と j=2 に共通であるから，第3.3節の (3.11)，(3.12)，(3.16) 式による改訂係数が j=2 の場合にもそのまま適用できる．月角差定数 α_1 については，TABLE 1 の "IAU 64" と "ILE" との差を $\Delta\alpha_1$ として

$$1+(\Delta\alpha_1/\alpha_1)=0.998\ 655\ 247\ 48 \tag{4.1}$$

となる．太陽項・惑星項を問わず，D の係数 m が奇数である引数を持つ項の係数 K に，この (4.1) の数値を乗ずる．

以上をまとめて，D の係数 m が偶数である引数を持つ項の係数，すなわち (3.7) 式の K としては，(3.18) を (3.10) 式の Corr. に代入したものを用い，m が奇数である引数を持つ項の係数，すなわち (3.6) 式の K としては，(3.18) と (4.1) の積を (3.10) 式の Corr. に代入したものを用いる．

視差正弦定数 $\sin\pi$ の変更に伴う補正としては，j=0 における (3.23) 式に対応して，j=2 の場合には

$$3422.451/3422.700=0.999\ 927\ 250\ 416 \tag{4.2}$$

を，視差正弦の最終結果に乗ずる．

地球の扁率が月の位置に及ぼす影響に関しては，j=0 では Brown の *Table* に用いた扁率 $f=1/294$ を採用しているが，j=2 の暦では $f=1/298.25$ を用いる．月への摂動は幾何学的扁率 f ではなく力学形状係数 J_2 に比例する．J_2 と f との間には次の関係がある．

$$\frac{3}{2}J_2=f-\frac{1}{2}\sigma \tag{4.3}$$

この σ は地球の赤道における遠心力と重力の比 $a_e\omega^2/g_e$ に近い値である．ここに a_e は地球の赤道半径，ω は地球自転の角速度，g_e は赤道における重力加速度である．Brown は $(3/2)J_2=0.001\ 667\ 36$ を用いたが，IAU 64 では 0.001 624 05 を採用している．したがって地球の形状による摂動項に

$$0.001\ 624\ 05/0.001\ 667\ 36=0.974\ 024\ 806 \tag{4.4}$$

を乗ずることによって $j=2$ の暦となる (Bixby, Van Flandern, 1970)．ILE-II 表，-III 表においてこの対象となる摂動項を TABLE 2 に示す．

(h) j=2 の計算法は λ, β, $\sin\pi$ として幾何学的位置（真黄経・真黄緯・真地心距離）を与えるから，これに惑星光行差を補正して視黄経・視黄緯とする．これを行うのに AE, USNAO はいずれも数値微分法によっている．このためには対象とする時刻をはさんで前後数時点における真黄経・真黄緯を計算しなければならない．われわれの計算法では，対象とする時点について直接に視黄経・視黄緯が得られるようになっている．以下この方法を説明する．

真黄経・真黄緯の計算式は，周期項の引数部分の，そのまた周期項を省略すると

$$\lambda=L+\delta L+\sum K\sin\ (A+Bt+Ct^2+Dt^3),$$
$$\beta=\sum k\sin\ (a+bt+ct^2+dt^3),$$

TABLE 2. Perturbations by the earth's figure

Ref. No.	term	additive to	Ref. No.	term	additive to
1375	$+7''.261 \sin \Omega$	L	1293	$+0''.083 \sin(F+2\Omega)$	β
1401	$-2.076 \sin \Omega$	$\tilde{\omega}$	1294	$+0.003 \sin(F-2T)$	β
1407	$+95.96 \sin \Omega$	Ω	1295	$+0.005 \sin(F+2\Omega+l)$	β
1413	$-4.318 \cos \Omega$	γ	1296	$-0.005 \sin(F+2\Omega-l)$	β
1173*	$-0.039 \sin (l-2D)$	λ	1292	$-0.007 \sin(L_0-2D)$	β
1174	$-0.004 \sin (l-2F)$	λ	1290	$-0.017 \sin L_0$	β
1179	$-0.038 \sin 2\Omega$	λ	(*85ページ脚注参照)		

の形になる．これを時間で微分して

$$\left.\begin{aligned}\dot{\lambda} &= \dot{L}+\delta\dot{L}+\sum K\cos(A+Bt+Ct^2+Dt^3)(B+2Ct+3Dt^2)^{\rm rad}\\ \dot{\beta} &= \sum k\cos(a+bt+ct^2+dt^3)(b+2ct+3dt^2)^{\rm rad}\end{aligned}\right\} \quad (4.5)$$

与えられた時刻における月の視黄経・視黄緯は，その時刻に地心に到達した光が月を離れた時刻における月の真黄経・真黄緯である．いま光が地球の赤道半径に等しい距離だけ進む間の λ, β の変化量を $\dot{\lambda}$, $\dot{\beta}$ とすれば，λ, β の惑星光行差はそれぞれ $-\dot{\lambda}/\sin\pi$, $-\dot{\beta}/\sin\pi$ である．(4.5) 式において t^2 より高次の項を無視するならば，λ, β における光行差 $\delta\lambda$, $\delta\beta$ は次式で計算される．

$$\delta\lambda = -\{0''.001\ 168\ 05+\sum F\cos(G+Ht)\}/\sin\pi \quad (4.6)$$

$$\delta\beta = -\{\sum f\cos(g+ht)\}/\sin\pi \quad (4.7)$$

F, G, H, f, g, h の数値を TABLE 3 に掲げる．この F, f は $\delta\lambda$, $\delta\beta$ の各項の結果を4捨5入したときに $\pm 0''.000\ 01$ 以上になる項をすべて拾いあげたものである．

4.3 引数の計算式

視黄経，視黄緯，地平視差の周期項の計算に使う引数はすべて次のような値でなければならない．第4.1節(a)の項参照．

$$\left.\begin{aligned}l &= {}^*L\,(i\theta)+\delta L(i\eta)-\delta\tilde{\omega}\,(i\eta)+0''.353\\ l' &= L'(i\theta)+\delta l'(i\eta)\\ F &= F\,(i\theta)+\delta L(i\eta)-\delta\Omega\,(i\eta)+0''.703\\ D &= D\,(i\theta)+\delta L(i\eta)-\delta l'\,(i\eta)+0''.703\end{aligned}\right\} \quad (4.8)$$

(4.8) 式において，$\delta L(i\eta)$, $\delta\tilde{\omega}(i\eta)$, $\delta\Omega(i\eta)$ のそれぞれの中に含まれている $7''.261\sin\Omega$, $-2''.076\sin\Omega$, $95''.96\sin\Omega$ に，また引数ではないが $\delta\gamma$ 中の $-4''.318\cos\Omega$ に，それぞれ 0.974 024 806 を掛ける．第4.2節(f)項参照．

4.4 視黄経，視黄緯，地平視差の計算法

$$\begin{aligned}\text{視黄経} = {} & L(\text{ILE-I})+\delta L_A(\text{ILE-II})+\delta L_S(\text{ILE-III})+\delta L_S(\text{EWE-II})+\delta L_S(\text{EWE-V})\\ & +\delta L_P(\text{ILE-III})+\Delta\psi+\delta\lambda\end{aligned} \quad (4.9)$$

L(ILE-Ⅰ)………(ILE-Ⅰ 表の第2項，$a_2+b_2t+c_2t^2+d_2t^3$) $+0''.703$.

δL_A(ILE-Ⅱ)……ILE-Ⅱ 表の $\delta L(i\eta)$，29項の和．このうち $7''.261\sin\Omega$ には (4.4) を掛ける．

δL_S(ILE-Ⅲ)……ILE-Ⅲ 表の $\delta L(i\alpha)$，390項の和 (Ref. No. 182 は改訂しておく)．係数改訂のための

TABLE 3. Aberration terms

$F\times10^8$	G	H	$f\times10^8$	g	h
″	rev	rev	″	rev	rev
291	0.897 09	0.135 452 769	32	0.928 34	0.172 200 964
24 833	.948 54	.067 726 384	1 895	.979 80	.104 474 580
53	.719 60	.171 744 414	104 964	.031 25	.036 748 196
3 089	.771 06	.104 018 030	2 989	.082 71	− .030 978 189
127 120	.822 51	.036 291 646	56	.134 17	− .098 704 573
22 306	.873 97	− .031 434 739	329	.802 31	.140 766 226
590	.925 43	− .099 161 123	11 415	.853 77	.073 039 841
10	.976 89	− .166 887 508	− 137	.905 22	.005 313 457
− 266	.944 31	.070 464 163	64	.956 68	− .062 412 927
− 283	.995 77	.002 737 779	63	.105 83	.135 909 319
1 661	.047 22	− .064 988 606	2 104	.157 28	.068 182 934
39	.098 68	− .132 714 990	− 71	.208 74	.000 456 550
− 655	.974 27	.033 863 192	347	.260 20	− .067 269 834
312	.593 57	.140 309 676	− 21	.975 56	.107 212 359
8 636	.645 03	.072 583 291	− 40	.027 02	.039 485 974
− 159	.696 48	.004 856 907	130	.078 48	− .028 240 410
299	.747 94	− .062 869 477	126	.984 03	.101 736 802
12	.799 40	− .130 595 862	26	.035 49	.034 010 417
− 48	.766 82	.106 755 809	− 63	.086 94	− .033 715 967
− 662	.818 28	.039 029 424	− 59	.005 52	.070 611 388
914	.869 74	− .028 696 960	− 107	.093 76	.110 244 587
65	.921 19	− .096 423 345	− 14	.145 22	.042 518 203
228	.775 29	.101 280 252	42	.624 82	.177 057 871
767	.826 75	.033 553 867	1 047	.676 28	.109 331 487
− 151	.878 20	− .034 172 517	− 100	.727 74	.041 605 103
− 10	.929 66	− .101 898 902	37	.283 31	.099 617 673
78	.042 99	− .062 250 827	176	.386 23	− .035 835 096
− 125	.011 05	.141 222 776	34	.437 68	− .103 561 480
− 4 680	.062 51	.073 496 391	− 62	.849 53	.075 777 620
− 49	.113 96	.005 770 007	90	.161 52	.065 445 156
− 92	.796 78	.070 154 838	24	.806 54	.138 028 447
− 32	.899 70	− .065 297 931	73	.858 00	.070 302 063
102	.970 04	.036 600 971	− 14	.153 05	.070 920 713
29	.416 08	.176 601 321	18	.255 96	− .064 532 056
609	.467 54	.108 874 937	− 11	.828 04	.106 903 034
− 84	.518 99	.041 148 553	− 23	.916 27	.146 536 233
− 89	.640 79	.075 321 070	− 32	.271 25	.073 952 941
− 10	.692 25	.007 594 685	90	.498 79	.145 623 133
25	.743 71	− .060 131 699	− 18	.550 25	.077 896 748
25	.597 80	.137 571 897	18	.563 71	− .072 126 741
105	.649 26	.069 845 513	− 11	.672 05	.112 069 266
30	.865 50	− .025 959 182	13	.680 51	.106 593 709
12	.779 52	.098 542 473			
12	.830 98	.030 816 089			
− 14	.882 44	− .036 910 296			
− 27	.833 56	.177 514 421			
− 766	.885 02	.109 788 037			
− 30	.708 55	.030 521 639			
− 228	.760 01	− .037 204 746			
− 152	.811 46	− .104 931 130			
10	.670 75	.038 720 099			
14	.792 55	.072 892 616			
44	.290 05	.145 166 583			
− 11	.341 51	.077 440 198			
11	.471 77	.106 137 159			
− 90	.707 53	.146 079 683			

Corr. は D の 係数 m が偶数のときは (3.18) を，m が奇数のときは (3.18) と (4.1) とを掛けた値を用いる．TABLE 2 の中の Ref. No. 1173，1174 の項の係数には (4.4) を掛けて，この太陽項の中に加えておく．

δL_S(EWE-II)……EWE-II 表の $\Delta\lambda$ に関する683項の和，第4.2節(d)項参照．

δL_S(EWE-V)……EWE-V 表の黄経に関する部分の $ut+v\delta\gamma+w$，43項の和．

δL_P(ILE-III)……ILE-III 表の $\delta L(\mathrm{i}\delta)$，410項の和，係数改訂のための Corr. の取扱い方は δL_S(ILE-III) の場合と同じ．TABLE 2 の中の Ref. No. 1179 に (4.4) を掛けてからこの項の中に加える．

$\Delta\phi$……黄経の章動69項の和．Woolard (1953) の式．

$\delta\lambda$……黄経の惑星光行差，TABLE 3 の左側の56項の和，計算式は (4.6) 式．

$$\text{視黄緯} = \delta\beta_S(\text{EWE-III}) + \delta\beta_S(\text{EWE-V}) + \delta\beta_P(\text{ILE-III}) + \delta\beta \qquad (4.10)$$

$\delta\beta_S$(EWE-III)……EWE-III 表の 685 項の和，$\sum$ Corr. $\times K_i \sin(il+jl'+kF+mD)$．係数改訂のための Corr. の取扱い方は δL_S(ILE-III) の場合と同様．

$\delta\beta_S$(EWE-V)……EWE-V 表の黄緯に関する部分の $ut+v\delta\gamma+w$，24項の和．

$\delta\beta_P$(ILE-III)……ILE-III 表の δ Lat(iε)，154項の和．係数改訂のための Corr. の取扱い方は δL_S(ILE-III) の場合と同じ．TABLE 2 の中の Ref. No. 1293，1294，1295，1296，1292，1290 の項の係数に (4.4) を掛けてから，この惑星項の中に加える．

$\delta\beta$……黄緯の惑星光行差，TABLE 3 の右側の42項の和．計算式は (4.7) 式．

$$\text{地平視差} = \sin\pi + \frac{1}{6}\sin^3\pi + \frac{3}{40}\sin^5\pi \qquad (4.11)$$

$$\sin\pi = A\,[\delta\sin\pi_S(\text{ILE-III}) + \delta\sin\pi_S(\text{EWE-II}) + \delta\sin\pi_S(\text{EWE-V}) + \delta\sin\pi_P(\text{ILE-III})]$$

A……………………0.999 927 250 416，(4.2) 式参照．

$\delta\sin\pi_S$(ILE-III)……ILE-III 表の $\delta\sin\pi(\mathrm{i}\gamma)$，181項の和．係数改訂のための Corr. については δL_S(ILE-III) を求める場合と同じ．

$\delta\sin\pi_S$(EWE-II)……EWE-II 表の $\Delta\sin\pi$ に関する572項の和．この表の適用については第4.2節の(d)項参照．

$\delta\sin\pi_S$(EWE-V)……EWE-V 表の視差に関する部分の $ut+v\delta\gamma+w$，36項の和．

$\delta\sin\pi_P$(ILE-III)……ILE-III 表の $\delta\sin\pi(\mathrm{i}\zeta)$，66項の和．係数改訂のための Corr. については δL_S(ILE-III) を求める場合と同じ．

4.5 視赤経・視赤緯の計算

視黄経・視黄緯から視赤経・視赤緯への変換は (3.24) 式による．

5. プログラムの構造および流れ図

j=2 の暦のプログラムの構造を，現在われわれが使用しているものについて説明する．j=0 の場合も基本的には同じである．もっとよい構想に基くならば，より明快な構造のプログラムを作ることができるはずである．

5.1 データカード

ILE-I 表：No. Arg.，$a, b, c\times10^{20}$，$d\times10^{25}$．ここに $L, \tilde{\omega}, l, F, D$ の a には第4.1節の(a)の補正を施す．1カードに1項．

ILE-II 表：Ser. No.，係数 (Coefficient)，l，F，D，Ω，T，P，($t_c-18.5$) の係数，*Angle*．このうち

TABLE 2 の中にある項は係数に (4.4) を乗じたものを係数としておく．1カードに1項．

黄経と地平視差の太陽項：ILE-III 表と EWE-II 表の引数が共通な項は，それぞれ係数を加えて一つの項とする．この場合，係数の和が0になるならば，その項を除去する．また D の係数 m が奇数ならば (4.1) の値 0.998 655 247 48 をその係数に乗じておく．次に Brown の *Table* の Ref. No. 182 の訂正を施す．さらに計算機の記憶場所の節約のために引数の係数 i, j, k, m を次の一つの数Nにまとめる．

$$\mathrm{N}=(i+50)\times10^6+(j+50)\times10^4+(k+50)\times10^2+(m+50) \quad (5.1)$$

1カードに1項．

黄緯の太陽項：EWE-III 表の $\beta+\Delta\beta$ を係数とする．D の係数 m が奇数の場合に (4.1) を乗ずること，および i, j, k, m を一つの数 N にまとめることとは上の場合と同じ．1カードに1項．

ILE-III 表の惑星項：Ser. No.，係数，引数の係数，*Angle*. m が奇数の場合に (4.1) を乗ずること，および i, j, k, m を N にまとめることは上の場合と同じ，また a, b, c, d, *Angle* を次のMにまとめる．

$$\mathrm{M}=(a+50)\times10^9+(b+50)\times10^7+(c+50)\times10^5+(d+50)\times10^3+Angle \quad (5.2)$$

1カードに1項．

EWE-V 表：u, v, w, 引数の係数を1カードに1項．係数をNにまとめることは上と同じ．

章動：No.，係数，引数の係数を1カードに1項．引数は $il+jl'+kF+mD+n\Omega$ の形であり，その係数は次の N′ にまとめておく．

$$\mathrm{N}'=(i+50)\times10^8+(j+50)\times10^6+(k+50)\times10^4+(m+50)\times10^2+(n+50) \quad (5.3)$$

光行差：TABLE 3 の F, G, H, f, g, h を1カードに1項．これをデータ文で入れる．

5.2 プログラミング言語

プログラムは NEAC 2200-500 の FORTRAN L で組んでいる．これは JIS 7000 を含み，さらに機能の拡張された FORTRAN である．

5.3 計算の対象とする期間

採用した天文定数・orbital parameters・平均軌道要素の適用可能限界を無視するならば，過去・未来を通じて任意の日時における暦が計算できるようになっている．時間間隔は特に指定しない限り 0.5 日間隔で連続的に計算を進める．間隔を指定すればその間隔で計算する．

5.4 印字する結果

第1期の目標：特に指定しなければ，ユリウス日・グレゴリオ暦の年月日・時分秒・視黄経・視黄緯・地平視差・視赤経・視赤緯を印字する．

第2期の目標：出力の精度を上げ，または途中結果まで印字すること等の諸要求に応ずる処置を施す．第 5.6 節の流れ図を参照．

5.5 計算・入力・出力の諸モード

第1期の目標：指定された時点における視黄経・視黄緯・地平視差・視赤経・視赤緯を計算する．出力は印字と同時に磁気テープに収録する．

第2期の目標：月の暦の計算は長時間を要するので，途中結果を印字しておく方が経済的である．また定数・パラメータ・データ等の一部修正にも応じて出力できることが好ましいので，次の諸モードを用意する．これらは必要に応じて磁気テープに記録できるように別のオプションカードで制御する．

(a) orbital parameter を入力データによって変更できるようにする．すなわち orbital parameter をプログラムの中に内臓・固定しておかない．

(b) 格納してあるデータ（ILE, EWE の諸表の係数等）を改訂できるようにする．入力カードを差し換えるのではなく，磁気テープに記録してあるデータをコアに呼び出して計算する直前に，改訂したい箇所の修正データだけをカードで入力して改訂するのである．

(c) 計算結果の出力印字精度を2けた上げる．

(d) 視黄経・視黄緯・地平視差・視赤経・視赤緯のほかに，章動・光行差・地心距離・赤道直角座標等を出力印字する．

(e) 途中結果を，軌道要素・太陽項・惑星項・光行差・章動等に分けて印字する．

(f) 別の計算法（例えば AE, USNAO の方法）による結果も同時に印字する．

5.6 流れ図

計算の過程を流れ図によって示す．これは JIS 規格フローチャート記号に必ずしも従っていない．

1. ILE-I 表の No., a_i, b_i, c_i, d_i を磁気テープ（MT）から中央処理装置（CPU）へ．

↓

2. ILE-II 表の Ser. No., Coeff., l, F, D, Ω, T, P, $(t_c-18.5)$の係数，*Angle* を MT から CPU へ．

↓

3. ILE-II 表のデータから a_i, b_i, c_i, d_i を計算．

↓

4. λ, $\sin\pi$ に対しては ILE-III 表に EWE-II 表の補正を加えたものの，β に対してはEWE-III表の，それぞれの Ser. No., Coeff., N, M を MT から CPU へ．

↓ N=(5.1)式，M=(5.2)式

5. EWE-V 表の No., Coeff., N を MT から CPU へ．

↓

6. 章動の No., 係数，N′ を MT から CPU へ．　　N′=(5.3)式

↓

7. 出力装置（k_1 の値で選択），出力内容（k_2 の値で選択）を指示するカードを読む．

↓

8.	$k_1=0$	$k_2=1$	$k_3=2$
	計算開始の年月日を入力カードから読む． ↓ 新しい MT へ書き込む準備をする．	既に計算されている最後の日付を見つけ，その0.5日後からの計算結果をMTに書き込む準備をする．	計算開始の年月日を入力カードから読む． ↓ 計算間隔の日時分秒を入力カードから読む． ↓ 計算終了の年月日を入力カードから読む．

↓

k_2 の値によって次の内容を出力する．それぞれに標題を印字する．

↓

k_2	出　力　内　容
1	ユリウス通日，グレゴリオ暦の年月日時分秒，視黄経（0″.01），視黄緯（0″.01），地平視差（0″.0001），視赤経（0$^{\rm s}$.001），視赤緯（0″.01）．
2	ユリウス通日，グレゴリオ暦の年月日時分秒，視黄経（0″.0001），視黄緯（0″.0001），地平視差（0″.000001），視赤経（0$^{\rm s}$.001），視赤緯（0″.01）．
3	ユリウス通日，グレゴリオ暦の年月日時分秒，視黄経（0″.0001），視黄緯＋AEに合わせるための経験項（0″.0001），地平視差（0″.000001），黄経の章動（0″.0001），黄道傾角の章動(0″.0001)．
4	ユリウス通日，グレゴリオ暦の年月日時分秒，視黄経（0″.0001），視黄緯＋AEに合わせるための経験項（0″.0001），地平視差（0″.000001），視赤経（0″.001），視赤緯（0″.01）．
5	ユリウス通日，グレゴリオ暦の年月日時分秒，視黄経（0″.0001），視黄緯（0″.0001），地平視差（0″.000001），視赤経（0$^{\rm s}$.001），視赤緯（0″.01），地心距離（10^{-8}），黄経の章動，黄道傾角の章動，黄経の光行差，黄緯の光行差 各(0″.000001)．
6	主要な途中結果を印字する．計算時刻，fundamental argument, additive term, 引数，黄経，黄緯，地平視差の太陽項，同惑星項，高次補正項，章動，光行差，赤道直角座標，黄道傾角，赤経，赤緯等．
7	ユリウス通日，視黄経，視黄緯，地平視差，視赤経，視赤緯，平均黄道傾角，黄経の章動，黄道傾角の章動，赤道直角座標，光行差（黄経，黄緯），平均黄経，平均黄経へのadditive term の和，黄経，黄緯，地平視差それぞれの太陽項と惑星項，等．
8	赤道直角座標（1950.0 の赤道，春分点基準；瞬時の平均春分点，平均赤道基準；瞬時の真春分点，真赤道基準；視黄経と視黄緯と地平視差から赤道直角座標を求める）．
9	同一時刻の JHD と USNAO との計算法による視黄経，視黄緯，地平視差，視赤経，視赤緯を並べて印字する．
10	諸データ，諸定数を印字する．
11	orbital parameter, 平均軌道要素の値を差し換えて計算し，印字する．
12	additive term, 太陽項，惑星項の係数を差し換えて計算し，印字する．
13	orbital parameter, 平均軌道要素，additive term, 太陽項，惑星項の一部を差し換えて計算し，印字する．

(注意) 計算日が1601年以前の場合にはユリウス通日だけを印字し，グレゴリオ暦は省く．この段階では標題だけを印字する．

↓

9.	$k_1=0$	$k_1=1$	$k_1=2$

$k_1=2$ → 計算終了日時かどうか？ → 終了ならば 7. にもどる

↓

10.　t=J. D. −2415020.0

↓

11. t における（以下いちいち断らない）fundamental argument を計算.

↓

12. additive term を計算.

↓

13. 太陽項の argument（fundamental argument+additive term）を計算.

↓

14. 黄経の太陽項を，有効数字を生かすために，主項・係数が 100″ 以上の項・100″以下の項の三つに分けて和をとる．係数は採用天文定数，orbital parameter に改訂する．（以下この改訂についてはいちいち断らない，どの場合にもこの改訂はすべきである）.

↓

15. 黄緯の太陽項を主項・係数が 100″ 以上の項・ 100″ 以下の項の三つに分けて和をとる.

↓

16. 視差正弦の太陽項を主項・係数が 10″ 以上の項・ 10″ 以下の項の三つに分けて和をとる.

↓

17. 惑星項の引数のうちで惑星の平均黄経以外の引数を計算.

↓

18. 金，火，木，土星の平均黄経（木，土星に対しては additive term を加える）から各天体による黄経に対する摂動項を計算.

↓

19. 黄経と同様にして金，火，木星による黄緯に対する摂動項を計算.

↓

20. 黄経と同様にして金，火，木星による視差正弦に対する摂動項を計算.

↓

21. principal characteristic 以外の高次のパラメータの変更に伴う改訂式（これを高次補正項と略称），$ut+v\delta\gamma+w$ を黄経，黄緯，視差正弦に分けて計算.

↓

22. 黄経の章動，黄道傾角の章動を計算.

↓

23. 黄経と黄緯の光行差を計算，（視差正弦はそのままにしておく.）

↓

24. 視黄経，視黄緯，地平視差を計算.

↓

25. 赤道直角座標，視赤経，視赤緯，黄道傾角，地心距離を計算.

↓

26. k_2 の値によって指定された量を製表装置（LP）で出力する．指定される量は step No. 8 と 9 との間にある $k_2=1-13$ に応ずる出力内容表を参照．

↓

27. k_1 の値によって MT に記録するか否かを決める．0, 1 のときには記録する．記録する内容は k_2 の値による．

↓

28. ユリウス日を計算間隔の時間だけ増やす．

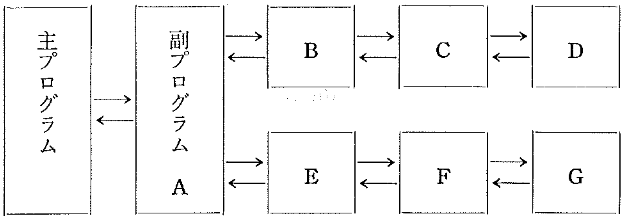
↓

29. センス・スイッチがONになっているならば計算を中止する．ONにするにはコンソールを通し手動で行う．

↓

30. センス・スイッチが OFF ならば step No. 9 にもどる．

以上が主プログラムである．これに副プログラム20個が加わる．一例として惑星項 Corr.$\times K_i\sin(il+jl'+kF+mD+aL_0+b\Omega+Angle+c\mathrm{T}+d\mathrm{P})$ の計算を図示する．(3.4) 式参照．



ここで

A：K_i，N＝(5.1) 式および M＝(5.2)式 から Corr. $K_i\sin$ (Arg.) を計算する．Corr. は (3.18) 式で与えられ，また Arg.$=il+jl'+kF+mD+aL_0+b\Omega+Angle+c\mathrm{T}+d\mathrm{P}$.

B：Nから $|i|$，$|j|$，$|k|$ を求める．

C：N/100 から $|i|$，$|j|$，$|k|$ を求める．

D：Nから i，j，k，m を求める．

E：K_i，N，M，P（金・火・木・土星のうちの一つの平均黄経）を与えて $K_i\sin$ (Arg.) を計算する．

F：N，M，P を与えて Arg. を求める

G：N，Mを与えて i，j，k，m，a，b，c，d を求める．

5.7 プログラム作成に要した日数，カード枚数および計算実行に要する時間

プログラム作成の所要日数を確定した数字で表わすことは困難であり，またそのプログラムの最終的なカード枚数についても同様である．しかし，このような数字から，このプログラムの規模の一面がわかり，後に同じようなプログラムを作る場合の参考になると思われるので，次の表に掲げておく．使用した計算機は NEAC-2200，モデル 500 である．

	j=0	j=2	note
Spent time	h	h	
planning	480	240	including literature research
data compilation	40	104	including designing of procedure and formulae
data punching	136	224	including verification
programming	220	240	coding in FORTRAN
programme punching	120	208	including verification
debugging	128	176	including machine time
test calculation	64	240	including machine time
Number of cards			
data	1686	2801	aberration for j=2 in *DATA*-sentense
main programme	490	1131	variable according as amendment and revision
sub programmes	289	289	common to j=0 and j=2.

このプログラムを東京大学東京天文台の FACOM 230/58 によって実行したときの所要時間は次のとおりである．

Calculation time for the moon's ephemerides : λ, β, π, α, δ
by FACOM 230/58 at Tokyo Astronomical Observatory

	one date (e.g. one half-day data)	one year (about 730 dates)
	s	m
j=0	~1.7	~21
j=2	2.1	26

水路部では1930年以来，経常業務として毎年その4年先の月の暦を Brown の *Table* によって推算し，天測暦（当時は航海年表）・天測略暦（当時は航空年表）・天体位置表（1943年から）を編集した．その経過の大要は秋吉（1954）が書き残している．1960年の ILE の導入に伴い，この推算は中止されたが，その直前における推算所要日数を次表に示す．これは当時第一法と呼ばれた形式による推算で，実際には，これと独立な形式による第二法の推算を並行して行い誤算を防いだ．上記 FACOM 230/58 による現在の所要時間と比較されたい．

Spent time by manual calculation of the Brown's Tables at JHD

half-day values of "1st scheme" for one year	numbers of			actual term for calculation of ephemeris for 1958
	sheets	man-days	personnel	
arguments, $\sum_n, A_n, B_n$	81	84	3	1953 Sep. 25—1953 Oct. 28,
apparent longitude	126	201	3	Oct. 29—1954 Jan. 10,
apparent latitude	80	108	4	1954 Jan. 20— Mar. 6,
horizontal parallax	52	62	4	Mar. 7— Mar. 31,
conversion to α, δ	65	93	3	Apr. 1— May 13.
total	404	548		

"2nd scheme" was made in parallel using modified forms for checking.

TABLE 4. Frequency of differences ILE/AE-JHD in the last figures. Differences never exceed by±1 in the published last figures.

diff. in last figure		App. Long. (0".01) n	%	App. Lat. (0".01) n	%	Hor.Par. (0".001) n	%
−1		30	4.1	20	2.7	12	1.6
0	1952	657	89.8	691	94.4	697	95.2
+1		45	6.1	21	2.9	23	3.1
−1		40	5.5	18	2.5	4	0.5
0	1953	634	86.8	678	92.9	706	96.7
+1		56	7.7	34	4.7	20	2.7
−1		18	2.5	19	2.6	5	0.7
0	1954	658	90.1	691	94.7	710	97.3
+1		54	7.4	20	2.7	15	2.1
−1		18	2.5	19	2.6	5	0.7
0	1955	654	89.6	695	95.2	705	96.6
+1		58	7.9	16	2.2	20	2.7
−1		23	3.1	19	2.6	9	1.2
0	1956	659	90.0	695	94.9	705	96.3
+1		50	6.8	18	2.5	18	2.5
−1		31	4.2	16	2.2	19	2.6
0	1957	643	88.1	693	94.9	690	94.5
+1		56	7.7	21	2.9	21	2.9
−1		23	3.2	15	2.1	2	0.3
0	1958	646	88.5	697	95.5	712	97.5
+1		61	8.4	18	2.5	16	2.2
−1		26	3.6	14	1.9	9	1.2
0	1959	653	89.5	696	95.3	705	96.6
+1		51	7.0	20	2.7	16	2.2
−1		30	4.1	33	4.5	8	1.1
0	1960	660	90.2	680	92.9	710	97.0
+1		42	5.7	19	2.6	14	1.9
−1		11	1.5	33	4.5	14	1.9
0	1961	666	91.2	676	92.6	696	95.3
+1		53	7.3	21	2.9	20	2.7
−1		10	1.4	21	2.9	6	0.8
0	1962	671	91.9	698	95.6	697	95.5
+1		49	6.7	11	1.5	27	3.7
−1		44	6.0	25	3.4	8	1.1
0	1963	629	86.2	682	93.4	690	94.5
+1		57	7.8	23	3.2	32	4.4
−1		14	1.9	29	4.0	10	1.4
0	1964	677	92.5	680	92.9	706	96.4
+1		41	5.6	23	3.1	16	2.2
−1		17	2.3	18	2.5	8	1.1
0	1965	647	88.6	698	95.6	698	95.6
+1		66	9.0	14	1.9	24	3.3
−1		10	1.4	15	2.1	9	1.2
0	1966	654	89.6	704	96.4	703	96.3
+1		66	9.0	11	1.5	18	2.5
−1		24	3.3	21	2.9	2	1.0
0	1967	646	88.5	693	94.9	708	97.0
+1		60	8.2	16	2.2	15	2.1

diff. in last figure		App. Long. (0".01) n	%	App. Lat. (0".01) n	%	Hor.Par. (0".001) n	%
−1		20	2.7	26	3.6	2	0.3
0	1968	673	91.9	688	94.0	706	96.4
+1		39	5.3	18	2.5	24	3.3
−1		28	3.8	16	2.2	10	1.4
0	1969	652	89.3	683	93.6	691	94.7
+1		50	6.8	31	4.2	29	4.0
−1		38	5.2	19	2.6	6	0.8
0	1970	642	87.9	685	93.8	706	96.7
+1		50	6.8	26	3.6	18	2.5
−1		32	4.4	29	4.0	7	1.0
0	1971	641	87.8	686	94.0	706	96.7
+1		57	7.8	15	2.1	17	2.3
−1	1952	487	3.3	425	2.9	160	1.1
0	~	13062	89.4	13789	94.4	14047	96.1
+1	1971	1 061	7.3	396	2.7	403	2.8
						(0".0001)	
−1		15	2.1	57	7.8	6	0.8
0	1973	674	92.3	600	82.2	699	95.7
+1		41	5.6	73	10.0	25	3.4
−1		23	3.2	87	11.9	12	1.6
0	1974	679	93.0	545	74.7	705	96.6
+1		28	3.8	98	13.4	13	1.8
−1		44	6.0	91	12.5	25	3.4
0	1975	681	93.3	524	71.8	674	92.3
+1		5	0.7	115	15.8	31	4.2
−1		42	5.7	123	16.8	13	1.8
0	1976	683	93.3	491	67.1	695	94.9
+1		7	1.0	118	16.1	24	3.3
−1		22	3.0	105	14.4	4	0.5
0	1977	692	94.8	534	73.2	691	94.7
+1		16	2.2	91	12.5	35	4.8
−1		5	0.7	81	11.1	12	1.6
0	1978	675	92.5	566	77.5	693	94.9
+1		50	6.8	83	11.4	25	3.4
−1		3	0.4	52	7.1	11	1.5
0	1979	657	90.0	633	86.7	685	93.8
+1		70	9.6	45	6.2	34	4.7
−1		1	0.1	17	2.3	9	1.2
0	1980	645	88.1	696	95.1	702	95.9
+1		86	11.7	19	2.6	21	2.9
−1	1973	155	2.7	613	10.5	92	1.6
0	~	5386	92.2	4589	78.5	5544	94.9
+1	1980	303	5.2	642	11.0	208	3.6

6. AE および FLE (USNAO) との比較

われわれの当初の目的は，ＡＥと全く同じ暦を与えるようなプログラムを作ることであった．第3節・第4節に記した方針に従って一応のプログラムが1975年夏に完成したので，これとＡＥ（1959年以前はＩＬＥ）とを毎半日値の全数について比較した．AE−JHD の値の頻度分布を TABLE 4 に掲げる．AE に与えてある最終けたは，視黄経および視黄緯で 0″.01，地平視差で 0″.001（1960年以後は 0″.0001）であり，このけたにおいて両者の差 AE−JHD が ±2 となることは全く無かったが，±1 となることは予想以上に多い．ことに j=2 の黄緯に著しく，ここでは紙面の都合で掲げないが，明らかにある振幅とある周期でもって ±1 があらわれる．つまり採用した計算式または基礎データについて，ＡＥとＪＨＤとの間には違いのあることが推察される．黄緯は 900 余項の和の形で計算されるから，その中の１項にでも係数または引数の値に違いがあれば，これら比較差の分布にそれとわかる様子を示すものである．

現在 USNAO において月の種々の暦の計算を試みている Van Flandern 氏に，この AE−JHD について意見を求めたところ，大要以下のような回答 (Van Flandern, 1975b) が寄せられた．

(1) j=2 の暦について，USNAO と HMNAO は両者のプログラムによる結果を比較し，AE に印刷される最小けたの 1/2 単位まで合っていることを確認し，これによって HMNAO は AE を計算している．しかし，今回水路部が行ったような厳密な追跡計算は行ってない．

(2) AE−JHD の原因は，ほとんどが AE のプログラムの不備にあると思われる．ことに地球の扁率の変更に伴う補正について，TABLE 2 に掲げた項のうち係数値の大きいはじめの 4 項（平均軌道要素に加える項）Ref. No. 1375, 1401, 1407, 1413 だけに (4.4) 式を乗じて，係数値の小さい残りの 9 項には乗じてないとしたならば，AE−JHD はかなり説明できるであろう．

この推定を確めるために，JHD のプログラムの黄経・黄緯に下表の改悪 $\Delta\lambda$, $\Delta\beta$ を施して，AE に近づくかどうかを調べた．

Retrogressive revision of JHD-programme
for correction of terms due to the earth's figure

Ref. No.	$\Delta\lambda$	Ref. No.	$\Delta\beta$
1173	$-0''.001\,013 \sin(l-2D)$	1290	$-0''.000\,442 \sin L_0$
1174	$-0.000\,104 \sin(l-2F)$	1292	$-0.000\,182 \sin(L_0-2D)$
1179	$-0.000\,987 \sin 2\Omega$	1293	$+0.002\,156 \sin(F+2\Omega)$
		1294	$+0.000\,078 \sin(F-2\mathrm{T})$
		1295	$+0.000\,130 \sin(F+2\Omega+l)$
		1296	$-0.000\,130 \sin(F+2\Omega-l)$

This revision means that the factor (4.4) due to the change of the earth's figure is applied only for the first four terms in TABLE 2, while remaining nine terms with smaller coefficients are unchanged.

1974, 1976, 1978, 1979年の１月と２月の毎半日値について，この改悪を施した結果をＡＥと比べると，次のようになる．

Improvement in numbers of agreement dates between AE and JHD
due to the retrogressive revision in JHD
for half-day ephemerides in every January and February, 1974, 1976, 1978, 1979.

for λ (before)	for λ (after)	for β (before)	for β (after)
−1 on 19 dates	↗ −1 on 0 dates	−1 on 48 dates	↗ −1 on 16 dates
	↘ 0 on 19 dates		↘ 0 on 32 dates
0 on 434 dates	↗ −1 on 2 dates	0 on 370 dates	↗ −1 on 7 dates
	→ 0 on 423 dates		→ 0 on 358 dates
	↘ +1 on 9 dates		↘ +1 on 5 dates
+1 on 21 dates	↗ 0 on 11 dates	+1 on 56 dates	↗ 0 on 28 dates
	↘ +1 on 10 dates		↘ +1 on 28 dates

すなわち，黄経ではかなり一致が良くなるが，黄緯ではそれほどでもなく，まだ問題が残っていることになる．これについてはさらに考察を要する面があり，第7節で触れることにする．

上記 Van Flandern 氏 (1975b) の書翰には，同氏が作製した Fundamental Lunar Ephemeris (FLE と略す) のプログラムによって計算したデータが添えてあり，これは λ, β を小数点下5位，$\sin\pi$ を小数点下7位まで与える詳細な計算であった．これと比較できるように，JHDのプログラムも，かなりの項について単精度を倍精度に改め，また光行差の項数を大幅に増加する等の改訂を施した．その結果が第4節で説明したものである．

この改訂プログラムによる計算結果と FLE (USNAO) との比較を TABLE 5 および TABLE 6 に示す．TABLE 5 における第3列，つまり "TableⅡ" は，ILE-Ⅱ表に地球扁率の変更に伴う補正 (TABLE 2 のはじめの4項の改訂) を施して得られる和を意味する，また下段の "Table Ⅲ, Sums" は，λ および $\sin\pi$ については ILE-Ⅲ表と EWE-Ⅱ表の和，β については EWE-Ⅲ表の和を意味する．さらに惑星項も加わっている．TABLE 6 では，度・分の位の数値は省略してある．

この TABLE 5 および TABLE 6 に関して Van Flandern 氏 (1976b) から，計算中間結果，太陽項，惑星項，ILE-Ⅱ表の係数等のデータの提供を得た．これらを検討した結果，次の事実がわかった．

(a) 章動については，USNAO および JHD それぞれのプログラムは実用上全く一致した値を与える．すなわち

$$\left.\begin{aligned} \Delta\psi(\mathrm{USNAO})-\Delta\psi(\mathrm{JHD})&<\pm 0''.000\,003, \\ \Delta\varepsilon(\mathrm{USNAO})-\Delta\varepsilon(\mathrm{JHD})&<\pm 0.000\,001. \end{aligned}\right\} \tag{6.1}$$

TABLE 7 に章動における AE と JHD の差の例を示す．この差はほとんど AE の略算によるものであり，この表の示す度数分布は Wilkins (1954) の説明とほぼ一致する．

(b) 光行差についても，USNAO と JHD は実用上一致した値を与える．第4.2節(f)項で触れたように両者は全く違った方法を採っているが，計算結果の差は次のように小さい．

$$\left.\begin{aligned} d\lambda(\mathrm{USNAO})-d\lambda(\mathrm{JHD})&<\pm 0''.000\,04, \\ d\beta(\mathrm{USNAO})-d\beta(\mathrm{JHD})&<\pm 0.000\,01. \end{aligned}\right\} \tag{6.2}$$

(c) USNAO と JHD はいずれも，太陽項と惑星項を $\pm 0''.0001$ の精度で計算機内に格納しているが，USN

AO では ILE-II 表が ±0″001 の精度で，しかも地球扁率の変更に伴う係数を乗じた上で四捨五入し格納している．

(d) USNAO では，π を求めるための $\sin^{-1}\pi$ の展開を3次項までに止めている．(4.11) 式参照．

TABLE 6 は限られた日付けに対する例であるが，USNAO と JHD との差 U は地平視差について著しく，黄経と黄緯では大差はないが，黄経の方がやや一致が悪い．黄経・黄緯における差は上記(a)，(b)からわかるように，章動・光行差の計算の違いによるのではなく，(c)の地球扁率の変更に伴う処理の違いに原因がある．これに

TABLE 5. Intermediate calculations for 1974 January 8.5.

U = USNAO − JHD

J D = 244 2056.0

Fundamental argument		Table II	Argument	U
L	107°29′59″523 78	(−0″703)	107°29′58″820 78	+13
$*L$	107 29 24.855 93	8.086 30	107 29 32.942 23	+40
$\tilde{\omega}$	106 14 40.941 03	0.151 07	106 14 41.092 10	+ 3
Ω	267 31 19.825 27	−93.399 43	267 29 46.425 84	+69
L'	287 39 29.531 40	—	287 39 29.531 40	+ 7
$\tilde{\omega}'$	282 29 37.086 00	—	282 29 37.086 00	+13
V	97 16 07.859 12	—	97 16 07.859 12	+11
J	323 48 24.482 91	352.332 87	323 54 16.815 78	−544
M	60 48 15.703 24	—	60 48 15.703 24	+ 7
Sn	90 29 13.612 09	−886.170 55	90 14 27.441 54	+1406
Q	297 57 10.794 62	—	297 57 10.794 62	+ 4
T	105 55 36.317 25	−5.396 71	105 55 30.920 54	+ 2
L_0	105 45 33.768 54	—	105 45 33.768 54	+10
l	1 14 43.914 57	7.935 23	1 14 51.849 80	+71
l'	5 09 52.440 27	−5.396 71	5 09 47.043 56	+19
F	199 58 05.030 43	101.485 73	199 59 46.516 16	+ 3
D	179 49 55.324 35	13.483 01	179 50 08.807 36	+52

	λ	(U)	β	(U)	$\sin\pi$	(U)
Table III, Sums	−123″735 85	(−6)	−6 157″595 88	(+16)	3 690″072 5792	(−45)
Nutation	18.170 05	(0)	—		—	
Aberration	−0.757 10	(+2)	0.065 98	(0)	—	
Σ	−106.322 90		−6 157.529 90			

Ephemeris :

$\lambda = *L + \text{Table II} + \Sigma = 107°27'46''619\ 3$ (+ 4)

$\beta =$ $\Sigma = -1\ 42\ 37.529\ 9$ (+ 2)

$\pi =$ 61 30.000 949 (−33), cf. $O(\sin^5\pi) = -29$.

ついては第7節で検討する．地平視差における系統差は，USNAO が $\sin^{-1}\pi$ の5次項を落していることにほとんど起因する．この5次項を USNAO に加え JHD と比較したのが TABLE 6 の U* である．また(c)の地球扁率の変更に伴う処理についても USNAO の黄経を補正し，JHD と比較したものが TABLE 9 の U* である．すなわち黄経の U*，黄緯の U，地平視差の U* のいずれについてもその平均は 0±2 となった．このことは，もし計算の最終結果を四捨五入して，AE と同じけた数で表示するならば，USNAO と JHD の値の末尾が，±1 の差となる頻度は2%以内ということを意味する．これは AE−JHD における頻度（TABLE 4）と比べて格段に優れている．

一方，TABLE 4 の j=2 の欄に示すように，AE−JHD が AE の印刷末尾で ±1 となる頻度は，黄経で8%，黄緯で22%，地平視差で5%であるから，AE−JHD の分散はそれぞれ

$$\sigma_\lambda=\pm0''.0010, \quad \sigma_\beta=\pm0''.003, \quad \sigma_\pi=\pm0''.00006$$

と推定される．JHD と USNAO は良く一致していることから，これらの分散値は AE の計算精度と見なし得るであろう．なお，TABLE 4 は1975年夏における JHD のプログラムによる暦と AE との比較差であって，その後，JHD のプログラムは改訂されているが，これは TABLE 4 の表値にはほとんど影響しない．

TABLE 6. JHD-ephemeris for j=2.

U =USNAO−JHD

U*=π(USNAO)−π(JHD)+O(sin⁵π)

			App. Long.	U	App. Lat.	U	Hor. Par.	U	U*
		d							
1974	1	8.5	46″.6193	+4	−37″.5299	+2	30″.000 949	−33	−4
	1	16.5	43.7672	+8	−38.9059	+1	37.605 350	−16	+1
	1	24.5	6.3856	+6	+40.3995	+3	13.989 878	−13	+2
	2	1.5	44.5888	−1	+38.7484	+1	44.579 732	−26	−4
	2	9.5	36.1507	+5	−25.5930	0	24.536 259	−25	0
	2	17.5	2.4390	+12	+47.9758	0	4.648 496	−16	−1
	2	25.5	23.4413	+7	+18.4478	+1	13.917 936	−17	+1
1976	1	6.5	21.2063	−5	+19.6721	+2	37.596 270	−14	+2
	1	14.5	18.1228	+5	−59.5644	−1	51.330 975	−19	0
	1	22.5	30.0196	+3	−46.0280	−2	29.706 945	−25	−1
	1	30.5	37.8692	0	+32.3984	+1	4.062 230	−17	+2
	2	7.5	44.4975	+1	+17.2938	+1	26.339 454	−11	+5
	2	15.5	16.6955	+6	−31.5183	−5	10.941 812	−27	−2
	2	23.5	29.7849	+3	+ 0.2464	0	37.639 950	−20	+1
1978	1	3.5	25.1263	−5	+10.2740	0	17.603 100	−23	−1
	1	11.5	21.0266	0	+14.7349	0	57.314 184	−21	+4
	1	19.5	26.7772	+8	−13.4920	−5	9.560 737	−14	+1
	1	27.5	6.7681	−1	−37.9036	−3	43.868 088	−15	+2
	2	4.5	51.5590	−5	+ 1.7817	+1	26.233 310	−30	−4
	2	12.5	25.0839	+2	−56.0306	−2	23.905 871	−20	−1
	2	20.5	14.5695	+8	− 7.0802	−5	37.260 300	−17	−2
	2	28.5	46.5351	0	+12.4893	+3	18.311 323	−20	+1
Mean of U and U*				+3±5		−0±2		−20±6,	0±2

TABLE 7. Frequency of differences in nutation between AE and JHD at 0^h ET of each first 50 days in 1960～1980.

	$\Delta\psi$			$\Delta\varepsilon$		
		(0.″001)			(0.″001)	
	−1	0	+1	−1	0	+1
1960	8	37	5	7	38	5
1961	7	37	6	9	38	3
1962	3	31	16	7	34	9
1963	2	33	15	12	35	3
1964	4	32	14	10	37	3
1965	3	34	13	5	38	7
1966	8	38	4	10	31	9
1967	9	34	7	5	37	8
1968	19	31	0	5	37	8
1969	6	37	7	10	35	5
1970	7	30	13	7	39	4
1971	3	35	12	2	38	10
1972	5	31	14	1	29	20
1973	6	35	9	5	38	7
1974	7	36	7	6	37	7
1975	6	31	13	5	38	7
1976	4	33	13	3	36	11
1977	11	30	9	13	32	5
1978	5	38	7	3	36	11
1979	4	38	8	6	35	9
1980	3	41	6	6	35	9
total	130	722	198	137	753	160
%	12	69	19	13	72	15

7. 地球の扁率の変更に伴う補正法の検討

7.1 USNAO−JHD

AE の計算の実態については近く Wilkins氏 から回答があるものと期待している．特に地球扁率の変更に伴う補正については，以下に記すようなことから，JHD と USNAO と同じ方法を使っているものとみなされる．(1) 1973年の AE の序文に月の暦は，1972年のように ILE に補正することとしないで，直接計算をしたと書いてある．(2) 直接計算となると，平均軌道要素を改訂する方法（JHD と USNAO ともこの方法）を言うのであって既成の暦に対して普通行なわれる級数による補正法は採らないであろう．(3) もし級数による補正法として第7.2節の方法を採用したとすると，1972年の暦が JHD との間に有していた大きな差違と同程度の差違が1973年以降の暦でも存在するはずであるが，そうはなっていない．

そこで JHD, HMNAO, USNAO それぞれが採用している係数値を TABLE 8 に示す.*

この表で Ref. No. 1375, 1401, 1407, 1413 は平均軌道要素または orbital parameter に対する地球扁率の摂動による付加項，Ref. No. 1173, 1174, 1179 は黄経に，Ref. No. 1290 から 1296 までは黄緯に対する付加

* （校正時における追記）Van Flandern 氏の指摘によって，TABLE 8 の JHD の Ref. No.1173 の係数は違っていることがわかった．正しい値は +0.″038480 であって，これを使うと (7.1) 式の第2項は消える．TABLE 2 のこの項の係数は −0.″039+0.″020−0.″020 から成り，この最後の係数が地球の形の摂動である．

TABLE 8. Comparison of adopted coefficients

Table	Ref. No.	Brown's expression	JHD	HMNAO (?)	USNAO
ILE-II	1375	+ 7″.261 sin Ω	+ 7″.072 394	+ 7″.072 394	+ 7″.072
〃	1401	− 2.076 sin Ω	− 2.022 076	− 2.022 076	− 2.022
〃	1407	+95.96 sin Ω	+93.467 421	+93.467 421	+93.467
〃	1413	− 4.318 cos Ω	− 4.205 839	− 4.205 839	− 4.206
ILE-III	1173	+ 0.039 sin $(2D-l)$	+ 0.037 986*	+ 0.039	+ 0.0385
〃	1174	+ 0.004 sin $(2F-l)$	+ 0.003 896	+ 0.004	+ 0.0039
〃	1179	− 0.038 sin 2Ω	− 0.037 013	− 0.038	− 0.0370
〃	1290	− 0.017 sin L_0	− 0.016 558	− 0.017	− 0.0166
〃	1292	− 0.007 sin (L_0-2D)	− 0.006 818	− 0.007	− 0.0068
〃	1293	+ 0.083 sin $(F+2\Omega)$	+ 0.080 844	+ 0.083	+ 0.0808
〃	1294	+ 0.003 sin $(F-2\mathrm{T})$	+ 0.002 922	+ 0.003	+ 0.0029
〃	1295	+ 0.005 sin $(F+2\Omega+l)$	+ 0.004 870	+ 0.005	+ 0.0049
〃	1296	− 0.005 sin $(F+2\Omega-l)$	− 0.004 870	− 0.005	− 0.0049

TABLE 9. Modification of λ(USNAO).

			(1) JHD	(2) USNAO	(3) $\Delta\lambda_U$	(4)=(2)+(3)	U*=(4)−(1)
					(0″.0001)		(0″.0001)
		d					
1974	1	8.5	46″.6193	46″.6197	−4	46″.6193	0
	1	16.5	43.7672	43.7680	−9	43.7671	−1
	1	24.5	6.3856	6.3862	−4	6.3858	+2
	2	1.5	44.5888	44.5887	+1	44.5888	0
	2	9.5	36.1507	36.1512	−4	36.1508	+1
	2	17.5	2.4390	2.4402	−9	2.4393	+3
	2	25.5	23.4413	23.4420	−4	23.4416	+3
1976	1	6.5	21.2063	21.2058	+1	21.2059	−4
	1	14.5	18.1228	18.1233	−7	18.1226	−2
	1	22.5	30.0196	30.0199	−6	30.0193	−3
	1	30.5	37.8692	37.8692	+1	37.8693	+1
	2	7.5	44.4975	44.4976	0	44.4976	+1
	2	15.5	16.6955	16.6961	−7	16.6954	−1
	2	23.5	29.7849	29.7852	−6	29.7846	−3
1978	1	3.5	25.1263	25.1258	+4	25.1262	−1
	1	11.5	21.0266	21.0266	−1	21.0265	−1
	1	19.5	26.7772	26.7780	−6	26.7774	+2
	1	27.5	6.7681	6.7680	0	6.7680	−1
	2	4.5	51.5590	51.5585	+4	51.5589	−1
	2	12.5	25.0839	25.0841	−1	25.0840	+1
	2	20.5	14.5695	14.5703	−6	14.5697	+2
	2	28.5	46.5351	46.5351	0	46.5351	0
							mean of U*=0±2

項である（TABLE 2参照）．この表に見られるような異なった係数値を用いた場合の月の暦の最終結果に現われる差は，$\lambda \cdot \beta \cdot \sin \pi$ それぞれの計算式について微分式を作り，これに係数値の差を代入することによって知ることができる．TABLE 6に掲げた USNAO と JHD との差 U について，これを調べてみる．提供された USNAO の計算例は，視黄経と視黄緯を 0."0001，地平視差を 0."000 001 まで与えてある．$\lambda \cdot \beta \cdot \sin \pi$ の微分式において，TABLE 8に掲げる係数値の違いが，視黄経と視黄緯で 0."000 05，地平視差で 0."000 000 5 より大きい項は，β と $\sin \pi$ にはなく，λ についてだけ

$$\Delta\lambda_U = -0.''000\ 39\ \sin\Omega + 0.''000\ 51\ \sin(2D-l) \tag{7.1}$$

がある．これを USNAO から引き，JHD と比べたのが，前節で触れた TABLE 9の U* である．TABLE 8によって，その他の小さい項までさらに詳しく補正するならば，黄経の U* および TABLE 6の黄緯の U，地平視差の U* は，いずれもさらに小さくなることがじゅうぶんに期待できる．

7.2 AE 1968 Sup. の方法の拡張

地球扁率の変更に伴う補正法は，JHD・USNAO・AE の三者に共通しているが，AE 1968 Sup. pp. 16s-19s=Exp. Sup. AE (3rd imp.), pp. 510-513 には，これと全く違う補正法が掲げてある．これについて検討する．

第4節で述べたように，地球の形による月の位置の摂動は（4.3）式で示した $\frac{3}{2}J_2$ に比例する．Hill (1884) はこの値として 0.001 759 5 を採用し，これを自分の algebraic な式に代入し数値展開を行った．Brown の *Table* には $\frac{3}{2}J_2$ として 0.001 667 36 が採用されており，また IAU 64 では 0.001 624 05 である．すなわち Brown の *Table* がこの摂動として与える量は，Hill の展開式において各項の数係数に 0.001 667 36/0.001 759 5 を乗ずることによって得られる量に等しい．同様に IAU 64 を採用するときには各係数に 0.001 624 05/0.001 759 5 を乗ずればよい．したがって Brown の *Table* に IAU 64 を適用する場合に必要な補正量は Hill の展開式に

$$\frac{0.001\ 624\ 05 - 0.001\ 667\ 36}{0.001\ 759\ 5} = -0.024\ 615 \tag{7.2}$$

を乗ずることによって得られる．上記 AE 1968 Sup. p. 17s=Exp. Sup. AE (3rd imp.), p. 511 には，このようにして得た補正式が掲げてある．係数値が 0."0010 以上の項だけを採っているので，黄経で11項，黄緯で10項あり，地平視差はない．

これではわれわれの議論に精度が足りないので，この AE 1968 Sup. の方法に従って，けた数と項数を増やすことによって精度を高めることを試みた．これが TABLE 10 の "Coeff" である．No. の右肩に * 印のついている項だけが AE 1968 Sup. に掲げられている．この表において，例えば $\Delta\lambda$ の No. 8項は $-0.''1888 \sin(-F+L)$，$\Delta\beta$ の No. 19項は $+0.''0022 \sin(-l+2D+L)$，$\Delta \sin \pi$ の No. 2 項は $-0.''000\ 047\ \cos(-l+F+L)$ を意味する．ここに $\Delta\lambda$ と $\Delta\beta$ の関数は sin であるのに対し，$\Delta \sin \pi$ の関数は cos であることに注意する．

この Coeff によって λ, β, $\sin \pi$ を補正する場合に，被補正量を間違えないように注意しなければならない．すなわち，第4節の（4.4）式を TABLE 2の係数に乗じてはならない．4.2節(f)項における改訂を行なってはならない．何故なら本節の方法は平均軌道要素を修正しないで，結果的にはその修正をしたと同じ効果をもたらすような級数による補正法なのである．したがって TABLE 8 の JHD・USNAO・AE のどの値も採用してはならず，Brown の原式そのものを使わなければならない．そうしておいて得られた λ, β, $\sin \pi$ に TABLE 10 の Coeff. による補正 $\Delta\lambda$, $\Delta\beta$, $\Delta \sin \pi$ を施すのである．

Van Flandern (1976a) は，Brown の *Table* に採用されている $\frac{3}{2}J_2$ の値は 0.001 667 36 ではなく 0.001 672 4 であると推定し，Technical Summary (Bixby, Van Flandern, 1970) における改訂法（第4.2節(f)）

TABLE 10. Additional correction for the earth-figure perturbations

No.	l	l'	F	D	L	Coeff.	V	V*
				$\Delta\lambda$		(0.″0001)		
1	−1	0	+2	0	0	− 1		
2	−1	0	0	+2	0	− 5		
3*	0	0	+1	0	+1	−96	− 11	− 11
4*	+1	0	+1	0	+1	−10		− 1
5	+2	0	+1	0	+1	− 1		
6*	−1	0	+1	0	+1	−14		− 2
7	−2	0	+1	0	+1	+ 1		
8*	0	0	−1	0	+1	−1888	−211	−220
9	0	−1	−1	0	+1	− 1		
10	0	+1	−1	0	+1	+ 1		
11*	+1	0	−1	0	+1	−128	− 15	− 15
12	+2	0	−1	0	+1	− 8		− 1
13	+3	0	−1	0	+1	− 1		
14*	−1	0	−1	0	+1	−128	− 15	− 15
15	−2	0	−1	0	+1	− 8		− 1
16	0	0	−3	0	+1	− 4		
17	−1	0	−3	0	+1	+ 1		
18	0	0	+1	+2	+1	− 1		
19	−1	0	+1	+2	+1	− 2		
20*	0	0	−1	+2	+1	−24	− 2	− 3
21	0	−1	−1	+2	+1	− 1		
22	+1	0	−1	+2	+1	− 2		
23*	−1	0	−1	+2	+1	−18	− 2	− 2
24	−1	−1	−1	+2	+1	− 1		
25*	0	0	+1	−2	+1	−13		− 1
26	0	+1	+1	−2	+1	− 1		
27	−1	0	+1	−2	+1	+ 2		
28*	0	0	−1	−2	+1	−16	− 2	− 2
29	0	+1	−1	−2	+1	− 1		
30*	+1	0	−1	−2	+1	−14	− 2	− 2
31	−1	0	−1	−2	+1	− 1		
32	0	0	−1	+1	+1	+ 1		
33	0	0	0	0	+2	+ 1		
34	0	0	−2	0	+2	+10		+ 1
35	+1	0	−2	0	+2	+ 1		
36	−1	0	−2	0	+2	+ 1		
				$\Delta \sin \pi$		(0.″000 001)		
1	0	0	0	0	0	−10		+ 2
2	−1	0	+1	0	+1	−47		− 3
3	+1	0	−1	0	+1	−41		− 10
4	−1	0	−1	0	+1	+41		+ 10
5	0	0	0	0	+2	−43		

No.	l	l'	F	D	L	Coeff.	V	V*
				$\Delta\beta$		(0.″0001)		
1	0	0	−1	+2	0	+ 1		
2*	0	0	0	0	+1	+2148	+241	+250
3	0	−1	0	0	+1	+ 1		
4	0	+1	0	0	+1	− 1		
5*	+1	0	0	0	+1	+112	+ 12	+ 13
6	+1	−1	0	0	+1	+ 1		
7	+1	+1	0	0	+1	− 1		
8	+2	0	0	0	+1	+ 5		
9*	−1	0	0	0	+1	−121	− 14	− 14
10	−2	0	0	0	+1	− 5		
11	0	0	+2	0	+1	− 2		
12	−1	0	+2	0	+1	− 1		
13*	0	0	−2	0	+1	−87	− 10	− 10
14*	−1	0	−2	0	+1	−10		− 1
15	−2	0	−2	0	+1	− 1		
16*	0	0	0	+2	+1	+13		+ 1
17	0	−1	0	+2	+1	+ 1		
18	+1	0	0	+2	+1	+ 2		
19*	−1	0	0	+2	+1	+22	+ 3	+ 3
20	−1	−1	0	+2	+1	+ 1		
21	0	0	−2	+2	+1	− 3		
22*	0	0	0	−2	+1	−79	− 8	− 9
23	0	−1	0	−2	+1	+ 2		
24	0	+1	0	−2	+1	− 4		
25	0	0	+2	−2	+1	− 1		
26	0	0	−2	−2	+1	− 1		
27	+1	0	−2	−2	+1	+ 1		
28	+1	0	0	−4	+1	− 1		
29	0	0	0	+1	+1	− 1		
30*	0	0	−1	0	+2	−21	− 2	− 3
31	+1	0	−1	0	+2	− 1		
32	−1	0	−1	0	+2	+ 1		
33	0	0	−1	−2	+2	+ 1		
34*	+1	0	0	−2	+1	−19	− 2	− 2
35	+1	+1	0	−2	+1	− 1		
36	+2	0	0	−2	+1	− 2		
37	−1	0	0	−2	+1	− 4		

* Terms listed in AE 1968 Sup., p. 17s=Exp. Sup. AE (3rd imp.) p. 511.

の数値の変更に伴う周期摂動項の変動を補正式として求めた．これが TABLE 10 のVである．すなわち Coeff. とVの和が正しい j=2 の暦を得るための補正の係数ということになる．このVの値は，次のようにしても求められる．Coeff. の数値は (7.2) によって計算したものであるが，もし Brown の *Table* の $\frac{3}{2}J_2$ が 0.001 672 4 であるのならば (7.2) の代わりに

$$\frac{0.001\ 624\ 05-0.001\ 672\ 4}{0.001\ 759\ 5}=-0.027\ 479 \qquad (7.3)$$

を用いなければならない．したがって (7.3)−(7.2)=−0.002 864 を Hill の展開式に乗じて得られる値 V*と Coeff. の和が Brown の Table から IAU 64 への補正となる．V*の数値も TABLE 10 に掲げる．これと V とは本来一致するはずである．

8. 補助係数 F_1 (F), F_2, F_3 の説明

IAU 第16回総会（1976年）において天文定数系の改訂に関する勧告が採択された．この新しい定数系は，正式には IAU (1976) 天文定数系と呼ばれるが，ここでは IAU 76 と記す．この定数系では IAU 64 に含まれていた補助係数 F_1, F_2, F_3 が消えてしまい，わずかに定数系の説明の項に F_1 が F として現われているのに過ぎない．しかし月の暦を Brown の理論に基いて考える限り，これらの係数のことは知っておかなければならないので，以下，簡単に述べておく．

8.1 光行差定数を求める係数 F（IAU 64 では F_1）

F は地球の平均軌道速度とガウスの仮想惑星の平均軌道速度の比として定義され，次の式で計算される．

$$F=\frac{n}{k}\ \frac{a}{(1-e^2)^{1/2}} \qquad (8.1)$$

ここに k はガウスの重力定数，n は太陽の対恒星平均運動，a は摂動を受けた太陽の平均距離，e は地球軌道の平均離心率である．

IAU 64 では n, a, e として Newcomb (1895) の値が十分の精度で適用できるとしてあり (AE 1968 Sup. p. 7s=Exp. Sup. AE, 3rd imp., p. 501)，今回の IAU 76 の原案でも，これを J 2000.0 に適用して，F=1.000 141 312 とし，これから光行差定数として κ=20″.495 518 が示された．しかし IAU 76 では惑星の質量も改められるので，これに応ずる a の値を計算してみた．Newcomb (1895, p. 10) は a を計算するのに

Evaluation of the aberration constant (J 2000.0)

	Perturbations by	
	Venus-Saturn	Mercury-Pluto
a	1.000 000 227 785	1.000 000 289 011
n (Newcomb, Tables of the Sun)	0.017 202 124 27	
e (Newcomb, Tables of the Sun)	0.016 709 114	
F	1.000 141 326	1.000 141 387
κ	20″.495 518 6	20″.495 519 9

Masses of the planets : IAU (1976) System,
Sidereal mean motion of the plantes : Clemence, (1949).

金星から土星までの摂動しか考慮してないが，今回は水星から冥王星まで考慮に入れた．（計算の結果，冥王星の摂動は実際には効かないことがわかった．）a の計算には Newcomb (1891, p. 402) の式を使い，n と e は Newcomb (1895, p. 9) によった．その結果は89ページの表のとおりである．以下すべて J 2000.0=2000年1月1日12^h ETにおける値である．

また，惑星の軌道要素として Seidelmann 他 (1974) の平均要素を用いて同様の計算を行った結果，次のように κ の値は上と完全に一致した．

Evaluation of the aberration constant (J 2000.0)
using Seidelmann's (1974) mean elements of planets

a	1.000 000 231	1.000 000 293
F	1.000 141 325	1.000 141 387
κ	20″.495 518 6	20″.495 519 9

IAU 76 では最終的には F=1.000 1414 として κ=20″.495 52 が示され，これがグルノーブルにおける第16回総会で採択されたのであるが，この席上，この数値の根拠として，上記の F=1.000 141 325－1.000 141 387 が引用された．

8.2 月の平均距離を求める係数 F_2

Hill がその月運動理論において，三体問題の解 (main problem, すなわち太陽項) を求めてゆくための基本解として採用した variational curve は，他の人の理論のように二体問題のケプラー解ではなく，ポテンシャル関数を $e'=0$, $(1/a')=0$, $Z=0$ と簡略化した制限三体問題の特別解であった．この解がいわゆる Hill の中間軌道である (Hill, 1877a)．これは周期解が存在するという仮定のもとに，2個の積分定数を観測から求めて，無限級数の係数をぼう大な逐次近似計算によって求めたものであり，その級数が驚くほど収束の速い解として得られた．この級数には (2.1) 式に見られるように，中間軌道の半径 a が掛かっている．これはケプラー運動における月の平均距離 a との間に，Hill (1877a) の scale factor (a/a) を通じて

$$\mathrm{a}=(\mathrm{a}/a)a$$

の関係にある．Hill はこの scale factor を 0.999 093 141 962 とした．IAU 64 では，これを F_2 と書き，F_2=0.999 093 142 とした．上の式は

$$\mathrm{a}=F_2 a \tag{8.2}$$

となる．なお上記制限三体問題の一般解は Brown (1893) が展開式によって求めている．

8.3 月角差を求める係数 F_3

月角差定数 constant of parallactic inequality $P_☾$ は次式で定義される．

$$P_☾=F_3\,\alpha_1$$

この α_1 は constant of lunar parallax と呼ばれ，(2.5) 式において $\mu=M/E$ と書けば

$$\alpha_1=\frac{1-\mu}{1+\mu}\,\frac{a}{a'} \tag{8.3}$$

Hill の中間軌道では，月がどこにいようと太陽からの引力は一定という条件 (太陽質量無限大，距離無限遠) 下で解を求めたのであるが，実際は質量，距離とも有限であり月・太陽間の距離には月の軌道直径だけの増減がある．これによる不等が月角差 parallactic inequality として月の運動に現れる．

Brown (1892) は，この月角差の展開式の主要項を次の形で表わした（記号の意味は第2節参照）．

$$f(\mathrm{m})(a/a')\sin D$$

この展開式は地球・月系の重心における値を与えるものであるから，地球中心における値に直すためには，展開式の各項に $(1-\mu)/(1+\mu)$ を乗じなければならない．すなわち上記の主要項に対応するものは (8.3) 式によって $f(\mathrm{m})\alpha_1\sin D$ の形になる．この係数が Brown による月角差定数 $P_☾$ である．

$$P_☾=f(\mathrm{m})\alpha_1 \quad (8.4)$$

Brown の Table では，この主要項として Ref. No. 21 に $-125''.154\sin D$ が掲げられている．すなわち Brown の月角差定数は 125″.154 である．また α_1 (*Table*, 諸表説明, p. 3) として

$$\alpha_1=0.002\ 512\ 73$$

が採用されている．したがって

$$f(\mathrm{m})=125''.154/0.002\ 512\ 73=49\ 808''.0$$

(8.2), (8.3), (8.4) 式から

$$P_☾=\frac{f(\mathrm{m})}{F_2}\ \frac{1-\mu}{1+\mu}\ \frac{\mathrm{a}}{a'}$$

ここで

$$F_3=f(\mathrm{m})/F_2 \quad (8.5)$$

とおけば

$$P_☾=F_3\frac{1-\mu}{1+\mu}\ \frac{\mathrm{a}}{a'} \quad (8.6)$$

これが IAU 64 における月角差定数の定義式である．

IAU 64 では，n と n' は Brown の値と同じであるから上記の $f(\mathrm{m})$ の値も変らない．したがって (8.5) から

$$F_3=49853''.2$$

が採用されている．このほか IAU 64 では $\mu=1/81.30$, $\mathrm{a}=384\ 400\times10^3\mathrm{m}$, $a'=149\ 600\times10^6\mathrm{m}$ が採られているから

$$P_☾=124''.986$$

である．また

$$\alpha_1=\frac{1-\mu}{1+\mu}\ \frac{\mathrm{a}}{a'}\ \frac{1}{F_2}=0.002\ 509\ 36$$

となる．

混乱を避けるために，第8.2節と第8.3節では第2節と同じ記号を用いた．このうち IAU64 では，a' をA, a を $a_☾$, n を $n_☾$, n' を $n_\odot$ と記してある．

9. 付 記

第1節に掲げた月の暦の変遷に関する表に関連して若干の解説をしておく．

9.1 j=1 の暦

j=1 の暦が天体暦の本文に掲げられたことはない，1968～1971年の天体暦には，j=0 から j=1 を求めるための改正表が添付されている．これは AE 1968 Sup. p. 18s=Exp. Sup. AE (3rd imp.) p. 512 の改正式から計算したものである．

9.2 1972年の月の暦

1972年の天体暦に掲げられた月の暦は，1968年から1973年にかけての変遷の中でも特異なものである．この年の暦は j=2 の暦ということになっているが，これは1973年以降の暦とは成り立ちが違い，かつ黄緯に誤りを含んでおり，したがって赤経・赤緯にも波及している．

これは EWE の誤りとして Eckert, Van Flandern, Wilkins (1969, 第1節の表で EFW と略記) が指摘したものである．すなわち EWE において黄緯について新しい展開式を導く際に，その係数を k_i と Δk_i とに分解し，$\sum k_i \sin(\text{argument})$ の計算値は Brown の *Table* の黄緯の値と一致するようにしたのであるが，その k_i と Δk_i とを分解することについて Brown の原式の意味の取り違いおよび有効数字の不足があったのである．

1972年の月の暦は，j=0 から j=1 への改正量と，EWE にある j=2 のための改正量とを加える，という過渡的な方法で計算されており，この際に EFW の指摘による訂正が入っていない．この訂正は10項から成るが，そのうち少くとも係数の最も大きい $0''.034 \sin(F-2D)$ を加えるように EFW は述べている．日本の天体位置表だけが，この1項による改正表を巻末に添えているが，この改正だけでは厳密には j=2 の暦にはならない．この年の暦の地平視差にも問題のあることを，青木信仰氏が早くから指摘している．j=2 の暦とくらべこの地平視差には $\pm 0''.0010$ の振幅をもつ周期的な相違がある．

10. 結　語

さきに述べたように，われわれの当初の目的は，AE と全く同じ月の暦を作ることであった．しかし作業を進めてゆくうちに AE の不備がしだいに明らかになり，また USNAO からその FLE に関する種々のデータの提供を受け，これとの比較の必要から計算式を改良し，その結果，当初意図したよりはるかに高い精度のプログラムが一応完成した．これは現存する暦の中で，j=2 の理論に最も忠実かつ厳密なものと思われる．

もちろん，月の位置観測からは，これほど高い精度は要求されないし，また j=2 そのものの理論の精度は，水路部における星食観測の整約結果からみても $\pm 0''.2$ 程度と推定され，この誤差の大部分は Brown-Eckert の理論における惑星項の不備によるものと考えられる．一方，短い期間については観測と良く合う実用的に精度の高い暦が，数値積分によって種々得られている．例えば Garthwaite 等 (1970), Oesterwinter および Cohen (1972), Van Flandern (1975a).

しかし天体暦の第一の目的は，天体力学理論の験証とその改良であり，そのためには解析的手法に基く精密な暦の改良・開発が不可欠である．今回われわれが行った詳細な追求が，このような今後の研究およびこれに伴う暦の改良に種々の面で役立つことを期待する．

このプログラムの作製に当って U. S. Naval Observatory-Nautical Almanac Office の Dr. Thomas C. Van Flandern から貴重な情報と助言に併せて種々の計算資料を頂いたことに深く感謝する．また東京天文台の青木信仰教授から具体的な御指導を賜ったことに深く感謝する．この仕事は水路部編暦課の業務の一つとして課内の多くの方々の種々の段階における参加・協力によって遂行できたものである．関係された各位に厚く感謝する．特に進士晃氏には終始，支援と励ましを受け，仙田昭夫氏にはプログラム作成技術について，久保良雄氏には力学理論について御教示を受けた．さらに最大の謝意を川田光男氏に表したい．データおよびプログラムの作成，計算の実行，結果の検討等，すべての段階における作業の実行は大部分同氏によるものである．また東京天文台の古川麒一郎氏には FACOM 230/58 のためのプログラム変換等にお世話になったことを感謝したい．

参考文献

秋吉利雄，(1954)，航海天文学の研究，恒星社厚生閣，東京 pp. 10～21.

Bixby, J.E., Van Flandern, T.C., 1970, "Technical summary of fundamental lunar ephemeris (FLE) for j=2," U. S. Nautical Almanac Off.

Brown, E.W., 1892, "On the part of the parallactic inequalities in the moon's motion which is a function of the mean motions of the sun and moon," "*Amer. J. Math*, vol. 14, 141.

Brown, E.W., 1893, "The elliptic inequalities in the lunar theory," *Amer. J. Math.* vol. 15, 244.

Brown, E.W., 1895, "Investigations in the lunar theory," *Amer. J. Math.* vol. 17, 318.

Brown, E.W., 1896, *An introductory treatise on the lunar theory*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, pp. 19—25, 115—132, 195—236, 248—268.

Brown, E.W., 1908, "Theory of the motion of the moon," Pt. 5. *Mem. R.A.S.* **59**, 1.

Brown, E.W., 1919, *Tables of the motion of the moon*, Yale Univ. Press, New Haven.

Brown, E.W., 1938, "The equations of motion of the moon," *Amer. J. Math.* vol. 60, 785.

Clemence, G.M., 1949, "First-order theory of Mars," *Astr. Pap. Amer. Eph.* Vol. XI, Pt. 2.

Clemence, G.M., Porter, J.G., Sadler, D.H., 1952, "Aberration in the lunar ephemeris" *A.J.* **57**, 46.

Eckert, W.J., 1958, "Improvement by numerical methods of Brown's expressions for the coordinates of the moon," *A.J.*, **63**, 414.

Eckert, W.J., 1966, *Tr. IAU*, **12 B**, 113.

Eckert, W.J., Jones, R., Clark, H.K., 1954, *Improved Lunar Ephemeris 1952-1959.* U. S. Government Printing. Off., Washington, D.C., (abbreviated ILE).

Eckert W., Smith, Jr. H.F., 1962, *Tr. IAU*, **11 B**, 447.

Eckert, W.J., Van Frandern, T.C., Wilkins, G.A., 1970, "A note on the evaluation of the latitude of the moon," *M.N.* **146**, 473.

Eckert, W.J., Walker, M.J., Eckert, D., 1966, "Transformations of the lunar coordinates and orbital parameters," *A.J.* **71**, 314, (abbreviated EWE).

Garthwaite, K., Holdridge, D. B., Mulholland, J. D., 1970, "A preliminary special perturbation theory for the lunar motion," *A.J.* **75**. 1133.

H.M. Nautical Almanac Office and U. S. Nautical Almanac Office, 1966, *The Astronomical Ephemeris for 1968* or *The American Ephemeris and Nautical Almanac, for 1968. Supplement*, (abbreviated AE 1968 Sup.)

H.M. Nautical Almanac Office and U.S. Nautical Almanac Office, 1974, *Explanatory Supplement to the Astronomical Ephemeris and the American Ephemeris and Nautical Almanac*, 3rd impression, (abbreviated Exp. Sup. AE).

Hill, G.W., 1877a, "Researches in the lunar theory," *Amer. J. Math.* vol. 1, 5.

Hill, G.W., 1877b, "On the part of the motion of the lunar perigee which is a function of the mean motions of the sun and moon," *Acta Math.* vol. VIII, 1.

Hill, G.W., 1884, "Determination of the inequalities of the moon's motion which are produced by the figure of the earth," *Astr. Pap. Amer. Eph.* vol. III, Pt. 2, 340.

Newcomb, S., 1891, "Perturbations of the longitudes and radii vectores of the four inner planets of the first order as to the masses," *Astr. Pap. Amer. Eph.* vol. III, Pt. 5.

Newcomb, S., 1895, "Tables of the motion of the earth on its axis and around the sun," *Astr. Pap. Amer. Eph.* vol. VI, Pt. 1.

Oesterwinter, C., Cohen, C, J., 1972, "New orbital elements for moon and planets," *Celest. Mech.* 5, 317.

Seidelmann, P.K., Doggett, L.E., DeLuccia, M.R., 1974, "Mean elements of the principal planets," *A.J.* **79**, 57.

Van Flandern, T.C., 1975a, "A determination of the rate of change of G," *M.N.* **170**, 333.

Van Flandern, T.C., 1975b, private communication to A.M. Sinzi.

Van Flandern, T.C., 1976a, "Note on the earth-figuer perturbations in the lunar theory," *Celst. Mech.* 4, 511.

Van Flandern, T.C., 1976b. private communication to A.M. Sinzi.

Wilkins, G.A., 1954, "Calculation of the nutation for the new series," in *ILE*, p. 420.

Woolard, E.W., 1953, "Theory of the rotation of the earth around its center of mass," *Astr. Pap. Amer. Eph.* vol. XV, Pt. 1.

REPORT OF HYDROGRAPHIC RESEARCHES No. 12, March, 1977

AN EXPERIMENTAL SYSTEM FOR SATELLITE LASER RANGING

Minoru Sasaki*

Received 15 December 1976

Abstract

A satellite laser ranging system has been made under cooperation with the Hydrographic Department and the Geographical Survey Institute. The receiving telescope is of a Cassegrain type with 40cm diameter installed on 3-axes type mountings which are driven by pulse motors in combination with encorders in three different tracking modes: manual, programing and automatic. A 0.1 nsec-resolution counter is prepared for measuring flight time. The system has a 500 MHz oscilloscope with a remote controlled camera which makes it possible to study the shapes of the transmitted and received light for accomplishing high ranging accuracy. According to the test operations the transmitted laser energy attains to 3.3 Joules and the pulse width is 21 nsec. These correspond to 160 MW at peak. In the case of using an electro-optical shutter which is adopted for sharpening the transmitting light, those values become 0.2 Joule, 6 nsec and 43MW, respectively. It has been definitely shown by some experiments and test operations that the developed system is valid for precise ranging.

Key words: laser ranging system

1. Introduction

Since the first launching of artificial satellite in 1957, researches on application of satellites to geodetic work have been conducted at the Hydrographic Department of Japan (JHD), as are reported, for example, by Yamazaki (1971) and Yamazaki et al. (1972). JHD has also continued an investigation on the design of satellites for geodetic uses with the Geographical Survey Institute (GSI) of Ministry of Construction. One of such satellites has been planned to be a balloon of 10m in diameter which can be observed by photographing and laser ranging so that its direction and distance can be determined simultaneously with high precisions. The body of the satellite is a hard spherical hull coated by aluminum leaf. Some thousands of corner-cube prisms are sticked on the surface uniformly for laser ranging. Since the satellite keeps spherical shape and shines brilliantly by reflecting the solar rays, it is possible (i) to photograph the trailed image of the satellite while images of reference stars in background are taken as fixed dots on the photographic plate (equatorial mode), and (ii) to evaluate the geometrical relation between the reflection point and the center of the satellite's mass. Hence, the direction of the satellite can be measured on the photographic plate with the same accuracy as that of ordinary astrometry. On the other hand, since the pattern of laser reflection does not change with the satellite's attitude but is constant, the distance of the center of the sate-

* Astronomical Division, Hydrographic Department.

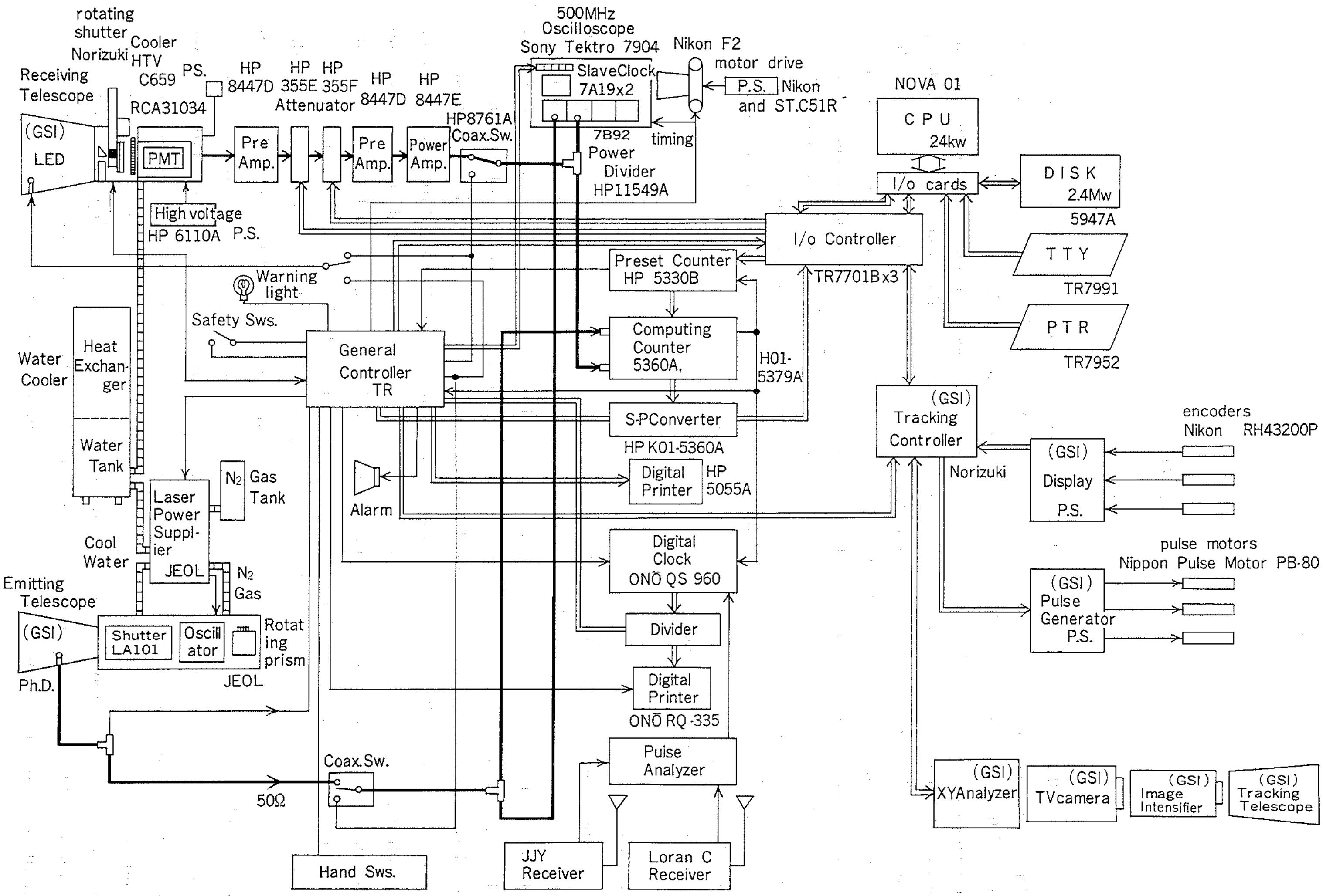


Fig. 1 Block diagram of the experimental satellite laser ranging system

llite's mass from the observer can be measured with a sufficient accuracy by comparing shapes of returning light pulses with transmitted ones.

The satellite is planned to be launched for the purpose of practical use to rectify the national geodetic net of Japan and to extend it to the ocean areas. Since the equipment for photographic observation of this satellite can be manufactured by some slight modifications of an apparatus which was designed by Ono (1966 and 1968) and has been verified its utility in practical observations in these ten years, it had been concerned mostly to develop the apparatus for distance measurement. In accordance with the launching project of the satellite, JHD and GSI have been cooperating to develop a satellite laser ranging system on an experimental basis.

The principal object of the development of this laser ranging system is various experimental investigations for designing a system to be employed practically for the observation of the geodetic satellite mentioned above. Main features of the present system are ;

(i) Since sharpness of the transmitted wave is indispensable for obtainning high accuracy of distance measurement, an electro-optical shutter is attached to the transmitter as a trial for this purpose.

(ii) A high resolution oscilloscope is linked on line to investigate fully the forms and patterns of transmitted and returning lights.

(iii) Because of the high brilliancy of the satellite, tracking by optical method can be easily applied. If precise tracking would be realized, the beam width of the transmitted rays would be made extremely narrow. Such a narrow width would contribute in making the whole system smaller in size and higher in performance of its function. Since development of tracking system of simple mechanism and of high precision is one of the subjects of the present research equipments for automatic optical tracking has been manufactured.

Research on laser ranging system was undertaken already in 1967 at the Tokyo Astronomical Observatory (TAO) and valuable works have been performed with an experimental device at its Dodaira station. It is remarked that the results and various experiences of the researches were availed fully to start present research.

The present research is now under way, scheduling the practical observation in near future. In the present paper, a construction of the system and some results of experiments are described laying emphasis on the part which the JHD-team has been charged.

2. Instrumentation

The present system is composed of optics and tracking system, which are in charge of GSI, laser transmitting system, detecting system, measuring system and control system, which are in charge of JHD. See Fig. 1.

(1) Optics and tracking system

The system has four telescopes : a transmitting telescope, $\phi=7$cm, f=27cm ; a receiving Cassegrain type telescope, $\phi=40$cm, f=660cm (effective) ; a guide tele-

scope for automatic tracking, $\phi=12.5$cm, f=60cm; a guide telescope for visual and manual trackings, $\phi=8$cm, f=120cm.

These telescopes are set on a 3-axes type mounting which is driven in altitude-, azimuth- and tracking modes by three independent pulsemotors with 1.8 deg/step resolution. The maximum driving speeds of them are 30′/sec for altitude and azimuth axes and 65′/sec for tracking axis. The rotation angles per an input pulse are 2.″2 for altitude and azimuth axes and 0.″9 for tracking axis. The angles of these axes are read out in three photoelectric encoders, respectively. The reading resolution is 0.′1/pulse after five-time enlargement.

(2) Laser transmitting system

The laser oscillator is a ruby rod of 1.25cm in diameter and 10cm in length with a rotating prism as Q-switch and a herical Xenon lamp as the pumping source. The oscillator is cooled by a water cooling unit of circulation type. The light pencils have a divergence of 5mrad. They are emitted at a rate of 0.2Hz and then pass to an electro-optical shutter (LA-101, Japanese Electron-Optics Laboratories) for regulating the shape. The shutter is composed of two polarizers, of which polarization planes make a right angle with each other, and a Pockels cell is laid down between them. The light pencil is cut off to about 5nsec width by an abrupt rotation of the polarization direction of the Pockels cell. The part for the abrupt rotation is in need of nitrogen gas of about 10atms.

(3) Detecting system

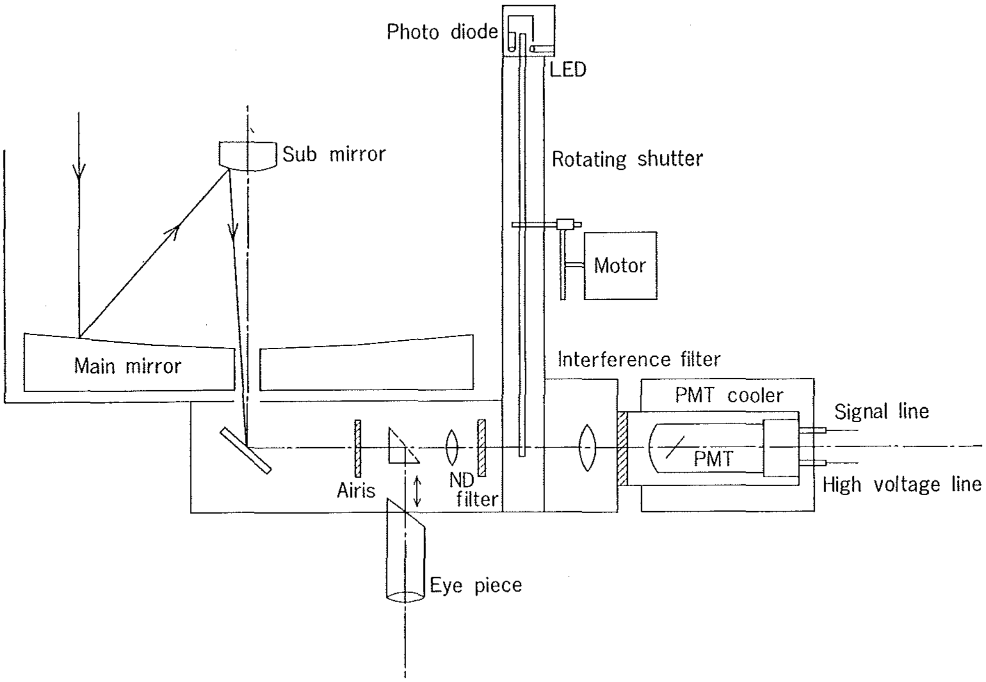


Fig. 2 Receiving equipments

The transmitted laser light is detected by a high speed photodiode. The signal is devided by two power-deviders into three equipments. One is led to a digital clock and it makes record the laser firing time. The other one starts a counter for flight time measurement of laser light pencil. The last one is sent to a high resolution oscilloscope and is photographed for analysis of the wave form of transmitted light.

The light reflected by the corner-cube prisms on a satellite surface is collected by the main telescope and it passes an iris and an interference filter (±5A in band width at 6943A) which decreases light noises before it reaches a photomultiplier (PMT). It can also be brought to the eyepiece through a bascule-prism attached in front of the PMT, as shown in Fig. 2. PMT in the system is RCA 31034. Its gain is 10^7 at the maximum voltage of 2200V. A part of circulating water to cool the laser oscillator is utilized for heat emission from electronic-cooler for PMT.

A rotating shutter, of which rotation is synchronized with the firing, is also attached for protecting the PMT against the scattered light of the emission.

(4) Measuring system

Two pre-amplifiers with a gain of 26dB and a range of 100k∼1.3 GHz and a power-amplifier with a gain of 22dB and a range of 100k∼1.3 GHz are prepared to amplify the signals from PMT. In order to analyze wave form at nearly the same wave height for any signals, the signals have to be decreased to almost the same levels. For this purpose two attenuators with a range of DC∼1 GHz, which is controlled by computer in every 1dB step from 0 to 132dB, are combined with the amplifier. The amplifyed signal is devided by a power devider. One is led to the flight time counter to stop counting and another is led to the oscilloscope for investigation of the wave form.

As flight time counter a computing counter, Hewlet Packard (HP) 5360A, is adopted. This counter has following specifications; 0.1nsec in timing resolution, 1 nsec in timing accuracy, 5×10^{-10} a day and 5×10^{-11} for 1 sec averaging in time base accuracy and 300mV in minimum sensitivity. For precise measurement of time interval HP H01-5379A which is a plug-in option of 5360A is used. This has a gate circuit called arming circuit. When an external arming signal is on, the counter can t operate. This circuit prevents miscounting caused by light noises within the time interval from a laser firing to just before the returning of the light. The external signal is made by a preset counter driven in computer control.

A digital clock integrates the standard frequency of 1MHz sent from the computing counter and keeps time. The time is calibrated by Loran-C using a comparison unit. Such a system was developed ten years ago at JHD and has been in practical use.

An oscilloscope of 500MHz (Tectronix 7904) has been adopted as the oscilloscope for wave form analysis. Its technical data are; 0.8nsec of rise time, 0.5nsec/div in writing speed and 10mV/div in maximum sensitivity.

(5) Control system

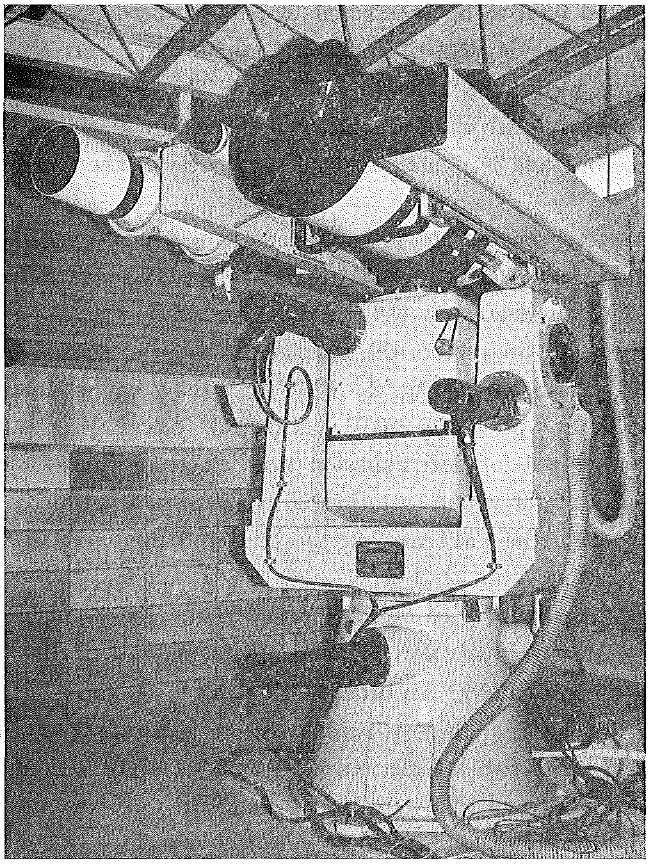


Fig. 3 Telescopes and mounting

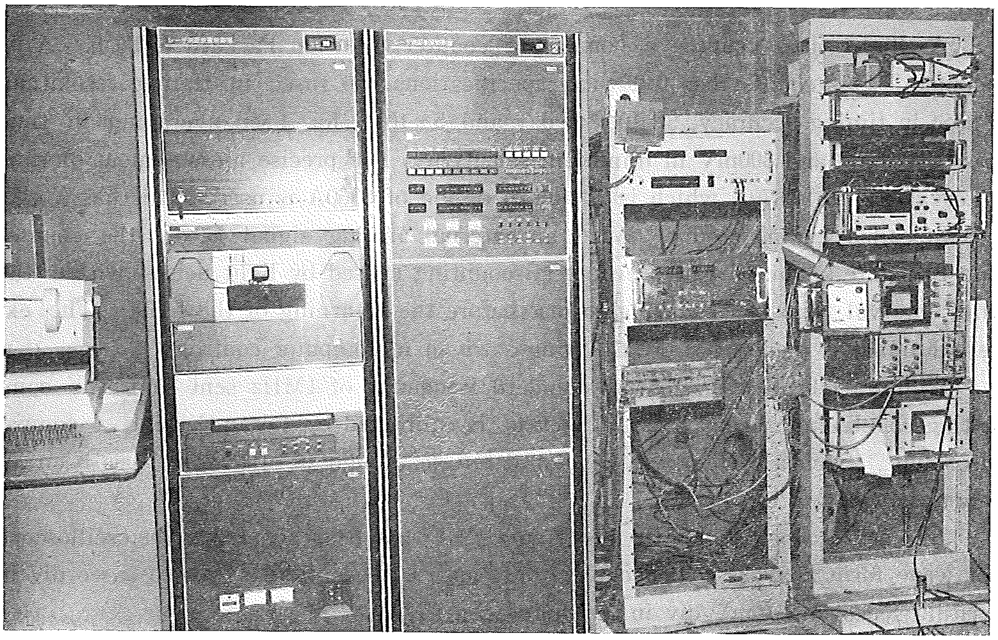


Fig. 4 Measuring equipments and computer system

This system has two controllers. One is the controller for laser transmission and range measurement. Another is for mounting control.

The former controls laser transmission, operation of measuring equipments, photographing of images on the oscilloscope screen, shutter rotation, I/O cycles between CPU and measuring equipments and between CPU and mounting controller. Firing intervals can be set by digital switches from 5 sec to 99 sec. Every I/O cycle between CPU and mounting controller is selected from 0.1 sec to 9.9 sec by this controller. Though the computer treats many data, manual control can be executed without the computer if necessary. At that case time of laser fire and flight time are printed out by two back-up printers, respectively.

The latter controller with arithmetic circuits controls the mounting. Tracking of satellite is performed in either of three modes; manual, programing and automatic. In any case the mounting is driven by pulse moters and the pointing direction of the telescopes are detected by encoders.

In manual mode, rough tracking are performed according to the set values on a key board. Fine adjustment of the driving speed of the mounting axes is made manually with handswitches by sighting the satellite in the telescope field visually.

In programing mode, the computer provides tracking velocities to the controller for pulse motor driving and reads out the integrated values of output pulses of encoders from the controller. If a deviation between the position of the actual satellite and one of the prediction exists, the observer controls the direction of the telescope visually with hand switches and commands the computer to correct the prediction suitably. Then, tracking accuracy is superior to that of the manual mode.

In automatic mode, the telescope for tracking follows the satellite motion automatically after capture of the satellite image. Main units of this mode are; telescope, image intensifier, TV camera and XY-analyzer. Tracking is executed in the following way. If a satellite image deviates from a set point of the TV camera, the XY-analyzer detects it's amount and generates voltage level corresponding to the displacement. The output level from the analyzer is digitalized in A/D converter and then added to the tracking speeds initially set in the arithmetic logic unit. Thus the satellite image is kept stationary at the same position on the screen.

Two controllers are fully available in case of using computer. NOVA-01 (Nippon Mini-Computer) with core-memory of 24kilowords is adopted as computer with peripherals of a magnetic disk of 24Megawords, a paper tape reader and a tele-typewriter. Measuring equipments and two controllers are linked to CPU through interfaces of six I/O modules and three multiplexer modules. In addition to the on-line system control, CPU calculates and revises the prediction. The CPU also processes the obtained data and stores them into the disk.

(6) Self check and safety system

The system has following check-up functions. The system controller has laser transmitting and receiving simulation circuits which check measuring instruments and I/O cycles of the computer. According to the switched values of delay time of

laser transmission and flight time these circuits generate simulation pulses. The computing counter has self-check mode. The I/O data of the computer are checked by a software checking program.

The system contains some sources of danger. They are high output power laser which seriously harms eyes when it goes in and high voltage power supply of big capacity. In order to avoide accidents safety switches are prepared at critical points and they stop the system when someone opens these switches. In addition laser firings are warned by buzzar sounds.

3. Tests of each part of the system

Some performance tests of each part and examinations of their specifications have been made.

(1) Laser

The pattern of the transmitted laser beam was examined by exposuring on photographic printing paper and a circular image of almost uniform intensity has been obtained. Output energy was measured by using caloriemeter. Examples of the result are shown in Fig. 5. Fig. 6 shows relation between output power and pressure of nitrogen gas. The output energy attains to 3.3 Joules in maximum and half height width is 21nsec. They correspond to 160 Mw. When the shutter is equipped those values becomes 0.2 Joules, 6nsec and 34Mw. The wave forms are shown in Fig. 7 and 8, respectively.

(2) PMT

Quantum efficiency has been measured by use of spectrometer. As can be seen in Fig. 9, the efficiency is 4% at tne wave length 6900A. Transit time and rise time, both of which affect the accuracy of distance measurement directly, have been measured with pulse generator, high speed photodiode and TK 7904. Obtained data are shown in Fig. 10.

(3) Miscellaneous

Fair results have been obtained in the various tests about the performance of the control system and relating parts. For instance, many electric circuit tests, delay time measurements of simulation signals, laser and telescope divergence test, adjusting of field center of telescopes and so on. As for the tracking, the automatic mode was examined for stars up to 6th magnitude. Some superior results were reported by a member of GSI.

(4) Ranging tests to a ground target

A ground target was set at 18511 meters apart from the system and ranging tests were performed. In a case, the measured mean distance was 18527.8$\pm$0.1m by 34 emissions without the electro-optical shutter and the standard deviation to one pulse was 0.6m. The main part of difference in distance will be explained by the delays of amplifiers (2.0m), PMT (10.2m), attenuators (1.2m) and cables. The remainder is interpreted as relative triggerlevel-difference between transmitted signals and received signals. The further investigation for the difference is con-

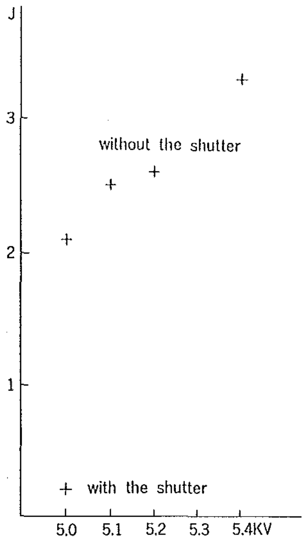


Fig. 5 Output laser energy and supply voltage (cooled at 15℃)

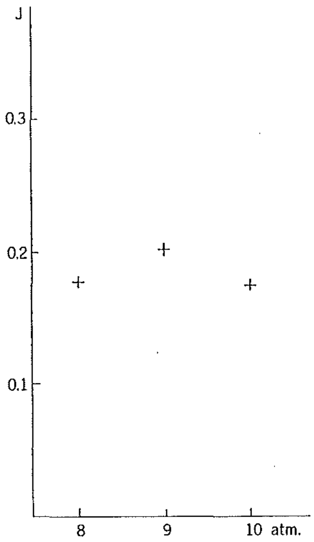
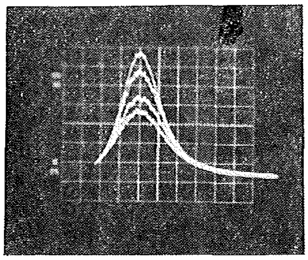
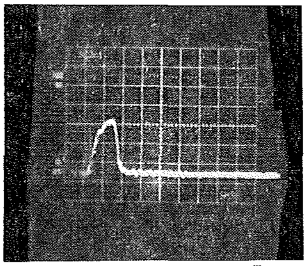


Fig. 6 Output laser energy and supply N_2 gas pressure



10nsec/div

Fig. 7 Laser output wave forms at 4.9, 5.0, 5.1, 5.2KV of supply voltage



5nsec/div

Fig. 8 A laser output wave form with the shutter at 5.0KV of supply voltage and 8atms of N_2 gas pressure

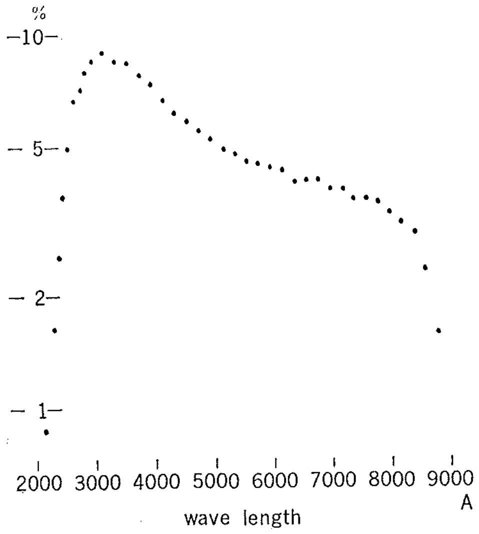


Fig. 9 Observed values of quantum efficiency of RCA31034

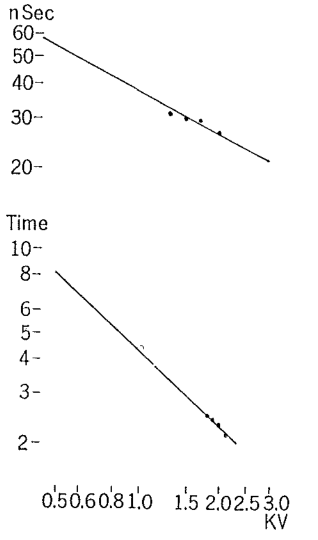


Fig. 10 Transit time and rise time of RCA31034

tinued.

4. Concluding remarks

Although it is difficult to assert that the system has been completed, the fundamental problems are considered to have been solved through the manufacturing works and some tests described above.

(i) The electro-optical shutter effects satisfactorily to sharpen the emitting light, though output power has not been as large as was aimed at first. However, this situation is considerd to be improved by inserting a power amplifier of laser light between the shutter and the transmitting telescope. It is desired that the actual type for field works is equipped with an amplifier.

(ii) Specifications of present system are summarized in Table 1, where values followed by an asterisk (*) are those taken from the original design or from the data catalogs of each equipment or estimated values. According to these data and some assumed values relation between number of receiving photoelectrons and range are estimated using the formula;

$$N=(E/h\nu)G_T A_S G_S A_R (T^2/\rho^4)\alpha\beta\gamma\eta$$

where E : laser energy (3.3 Joules without the shutter and 0.2 Joule with the shutter), $h\nu$: energy per photon (at wave length $\lambda=0.69\times10^{-6}$m), G_T : transmitter gain (full width $\theta=1.0\times10^{-3}$rad), A_S : satellite effective area (0.09m^2), G_S : satellite mirror gain ($\theta=1.0\times10^{-4}$rad), A_R : receiver area (diameter d=0.4m), T : atmospheric transmission factor (0.5), ρ : range to satellite, α : transmitting efficiency (0.5), β : mirror efficiency (0.5), γ : receiver efficiency (0.2) and η : quantum efficiency (0.04).

Estimated values are following. The range which can be measured with only one photoelectron at 3.3 Joules of laser energy without the shutter is 1.0×10^4km and and the similar range is 5.0×10^3km at 0.2 Joule with the shutter. But with only one photoelectron the received wave form can't be analyzed. If fifty photoelectrons can be obtained the analysis can be fully performed. The ranges with fifty photoelectrons are 3.8×10^3km without the shutter and 1.9×10^3km with one.

(iii) Experiments of the automatic tracking system has given satisfactory results. Although trackings in programing modes have not been tried, they seem to concern only softwares involving proficiency of observers because the tracking mechanisms have been designed to have an accuracy of $\pm0.'5$ and their satisfactory performances have been certificated in the automatic mode.

(iv) This system had been intended to be a portable type but it could not be realized because of some restrictions. On the stage of field works the portability is indispensable Since the present system can be operated without computer as mentioned in section 2-(5), in the case of the next system for practical use it is desired that the system will be operated without computer as the tracking are easily performed owing to the brightness of the satellite. But precise tracking is so important because light divergence affects the intensity of returning light as square of its amount. If the divergence can be a half it makes possible to lessen the aperture

of the receiving telescope by a half or output power of transmitting light by a quater. Considering these matters minimization of the system has to be performed within limits of high reliability and high accuracy. Corresponding to the minimization of the laser oscillator, telescopes and mounting, it is required to make those equipments of electric power supply and cooling tower for laser smaller.

Table 1 Specifications of the Laser Ranging System

			with the shutter	
Laser energy	3.3	Joule	0.2	Joule
half-power full width (min.)	21	nsec	6	nsec
power (max.)	160	Mw	34	Mw
light divergence of ruby rod	5	mrad*		
frequency of emission	0.2	Hz		
shutter type	Pockels cell with nitrogen gas			
cooling type	cooled water			
Transmitter objective ϕ	76	mm		
transmitting divergence	1~3	mrad* (variable)		
Receiver objective ϕ	400	mm		
focal length	1200	mm (6600mm effective)		
Range (max., with one photoelectron)	10000	km	5000	km
range (max., with 50 photoelectrons)	3800	km	1900	km
ranging accuracy	1	m*	0.5	m*
Tracking system	3	axes type		
tracking modes	manual, programming and automatic			
drive	3	pulse motors		
direction reading	3	encoders		
auto-tracking	image intensifier, TV camera and XY-analyzer			
tracking accuracy	±1	mrad*		
PMT transit tim (min.)	26	nsec		
rise time (min.)	2.1	nsec		
Oscilloscope resolution	0.5	nsec/div*		
rise time	0.8	nsec*		
Counter resolution	0.1	nsec*		
Amplifier rise time	0.4	nsec*		
CPU memory	24	kwords		
Disk memory	2.4	Mword(real time disk operating system)		

This research is a joint work of the Hydrographic Department and the Geographical Survey Institute. The staffs are

JHD : T. Mori, Y. Ganeko E. Nishimura and M. Sasaki (author)

GSI : T. Hokugo, Y. Miyazaki, Y. Baba and H. Kaneko,

The author is deeply indebted to Dr. A. Tsuchiya and Mr. K. Tomita of the Tokyo Astronomical Observatory for their precious advices and discussions.

References

Kozai, Y., Tsuchiya, A., Tomita, K., Kanda, T., Sato, H., Kobayashi, N. and Torii, Y. 1973, Tokyo Astronomical Bulletin, 223, 2597.

Ono, F. 1966, Report of Hydrographic Researches, No. 1, 63.

Ono, F. 1968, ibid. No. 4, 59.

Tomita, K. and Kanda, T. 1973, Tokyo Astronomical Observatory Report, 16, No. 3, 657.

Yamazaki, A. 1971. Report of Hydrographic Researches, No. 7, 1.

Yamazaki, A., Mori, T. and Ganeko, Y. 1972, *Researches in Hydrography and Oceanography, in commemoration of the centenary of the Hydrographic Department of Japan*, Ed. D. Shoji, Tokyo, p. 251.

REPORT OF HYDROGRAPHIC RESEARCHES No.12, March, 1977

A GEOID OF THE IZU ISLANDS AREA

Yasuhiro Ganeko*

Received 15 October 1976

Abstract

Two kinds of geoid map have been drawn for the area of the Izu Islands by employing the data of over sea levelling among the islands and of vertical deflection at each island. The over sea levelling has been made since 1967, and two closed levelling loops have been constructed among the islands and the Izu Peninsula, joinning at Nii Sima to each other. Closure error of each loop is within 20—30cm, when geoid undulation inside of each island and vertical deflection are taken into consideration. A geoid map thus drawn on the Tokyo Datum indicates a systematic shift of the Tokyo Datum. Another geoid map on a global datum, SAO-SE3, shows effects of the gravity low over the trench lying to the east of the mainland of Japan and the gravity high over the southern area of the Izu Islands. Extention of the geoid undulation from the mainland of Japan (Ganeko, 1976) to this area seems satisfactory.

Key words: geoid——over sea levelling.

1. Introduction.

Over sea levelling by the trigonometric method have been made by the Hydrographic Department since 1967 at the area of the Izu Islands which is one of the active regions of earthquake. Purpose of this project is to obtain basic data for the earthquake prediction.

Observations have been performed at a rate of one pair islands (or mainland) per annum. A view of relative positions of the islands connected by the over sea levelling is shown in Figure 1. Observation year is attached to each connecting line.

At each of pair islands, two observation sites have been located with a short distance but an adequate height difference. Zenith distances of two sites at the confronted island have been measured mutually from each site at about same time. As shown in Figure 2, observation data of eight zenith distances are thus obtained every time. We shall call them as one *set* of data. Measurements have been made by theodolites: Wild-T3, and-T2 and Kern-DKM3A and-DKM3. Individual observation data obtained from 1967 to 1975 with fuller description about observation method are reported by Ganeko and Sasaki (1977).

Except for the heights for Kōzu Sima and Sirahama, geodetic positions of the sites are referred to those of the nearby national triangulation points. Geodetic coordinates of the triangulation points have been taken from the "Resulting Table" of the Geographical Survey Institute (GSI). In general the list contains the coordi-

* Sirahama Hydrographic Observatory

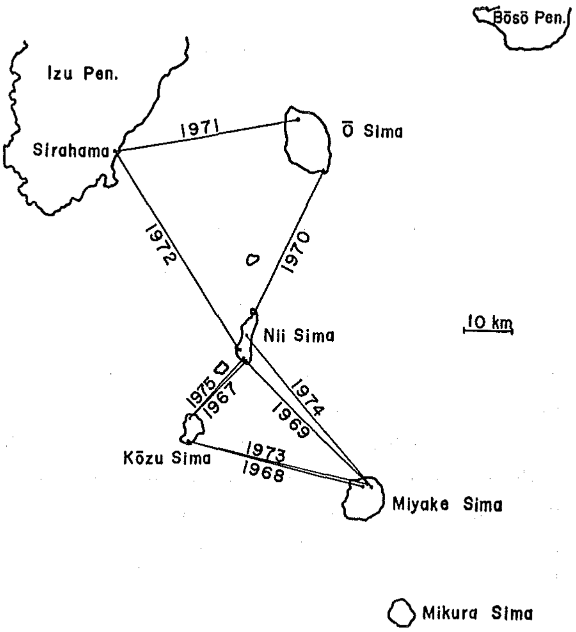


Fig. 1 Networks of over sea levelling for the Izu Islands area.

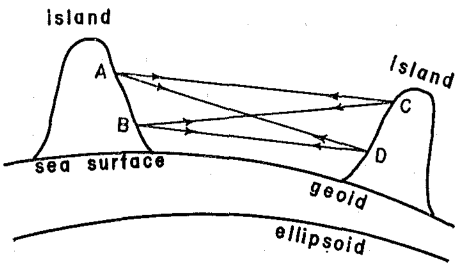


Fig. 2 Over sea levelling observation.

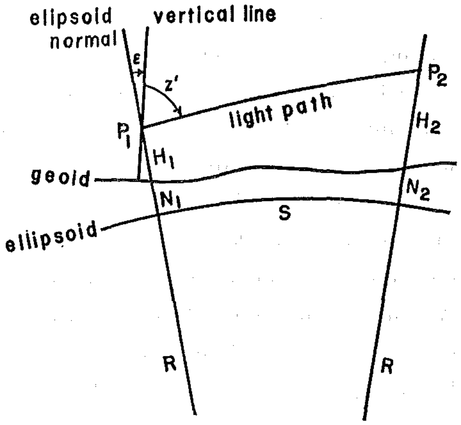


Fig. 3 Geometry of trigonometric levelling. Ellipsoidal height $h = H + N$

nates of the triangulation points referred to the Tokyo Datum. However, for the triangulation points in Nii Sima, Kōzu Sima and Miyake Sima, to which the 3rd order triangulation net of the mainland has not been connected, the Resulting Table gives the height determined independently at each island from its local mean sea level. During the period of the over sea levelling observation, heights of the observation sites in Kōzu Sima were connected ditectly to the bench mark (4.88m) at Kōzu Sima Tide Station. Heights of the sites at Sirahama were connected directly to the bench mark Itiki of the national levelling net.

Besides the over sea levelling, observations of astronomic position have been made over the Izu Islands, including most of the levelling sites, by means of the constant altitude method. Vertical deflection is obtained as the difference between astronomic and geodetic positions for each site. Devices employed are Tsubokawa photoelectric astrolabe, Carl Zeiss Ni-2 astrolabe with a 60°-prism and Kern-DKM3A with high sensitive levels and an impersonal micrometer. Individual data with preliminary reduction of these observations have been reported by Suzuki and Harada (1966), Suzuki and Sugimoto (1967), Sugimoto and Harada (1968), Takemura and Koyama (1970) and Sasaki and Kanazawa (1977).

In the following the geoid undulations over the Izu Islands area are calculated using the above two kinds of observation data.

2. Geoid-height difference by over sea levellings.

We suppose that the zenith distance z' of a point P_2 is measured at another point P_1. See Figure 3. Let

h_1 and h_2 : ellipsoidal heights of P_1 and P_2,

α : azimuth of P_2 at P_1,

ξ and η : vertical deflection components at P_1 along meridian and prime vertical,

ε : vertical deflection component at P_1 in the direction of $\overrightarrow{P_1P_2}$,

s : ellipsoidal distance between P_1 and P_2,

R : radius of mean curvature of the ellipsoidal arc between P_1 and P_2,

K : refraction coefficient.

α, s and R are calculated from the geodetic coordinates of P_1 and P_2. We can calculate ε from ξ and η through the well known relation

$$\varepsilon=\xi \cos \alpha+\eta \sin \alpha.$$

The observed zenith distance refers to the local plumb line, with which the ellipsoidal zenith distance z at P_1 is related by

$$z=z'+\varepsilon.$$

Hence, the difference in the ellipsoidal height between P_1 and P_2 can be calculated from z by the formula

$$h_2-h_1=s \cot z+\frac{s^2}{2R}-\frac{s^2}{2R}K. \tag{1}$$

The second term of the righthand side of (1) corresponds to the curvature of the ellipsoid with sufficient accuracy in our case, because the ellipsoid heights of P_1 and

P_2 are far smaller than the length of R and the zenith distance is very close to 90°. The third term is a correction for the curvature of the light pass, assuming it to be a part of circle. The effects of this assumption will reflect in the various errors estimated in the procedure of data reduction.

The ellipsoidal height is the sum of the height above mean sea level (above the geoid) H and the geoid height N, namely

$$h=H+N. \tag{2}$$

From (1) and (2) we obtain the difference in geoid height

$$\Delta N = N_2-N_1= -(H_2-H_1)+s\cot z+\frac{s^2}{2R}-\frac{s^2}{2R}K. \tag{3}$$

Since ε is a small quantity, we can rewrite (3) as

$$\Delta N= -(H_2-H_1)+s\cot z' -s\varepsilon+\frac{s^2}{2R}-\frac{s^2}{2R}K, \tag{4}$$

so that the effect of the vertical deflection appears explicitly. The magnitude of the last term of (4) amounts to about 10 m in our case, say, for $s=30$ km for example. Actually K is not a constant but a variable quantity depending on atmospheric condition and hence changes with time. Its value varies in a range of 0.13~0.15 usually.

In principle it is possible to evaluate K using the meteorological data. But such a procedure have great difficulties practically, especially in gathering the data of vertical gradient of air temperature. Therefore, it is more practical to consider (4) as an observation equation with two unknowns ΔN and K. It is remarked here that the geoid-height difference between the two sites in the same island is negligibly small because they are located enough closely to each other. Hence only the two unknowns above are reasonably adopted to be solved through observation equations for each observation set.

We can figure out other observation equations with more unknowns taking the effect of height dependence of the refraction into consideration. There sometimes happened also that the apparent zenith distance changed suddenly at one site solely; this fact may suggest the air blocks of small size take an important part in the large change of observed zenith distance. If this would be true, an expression of the refraction coefficient by a simple function of height would have no advantage but would increase the mean errors of ΔN and K calculated by (4). However, since the purpose of the present paper is to get a view of the geoid undulations around the Izu Islands area, we shall not make further investigations on the refraction effect for the present.

Result of the least squares calculation of (4) is given in Table 1 and discussed in Section 4.

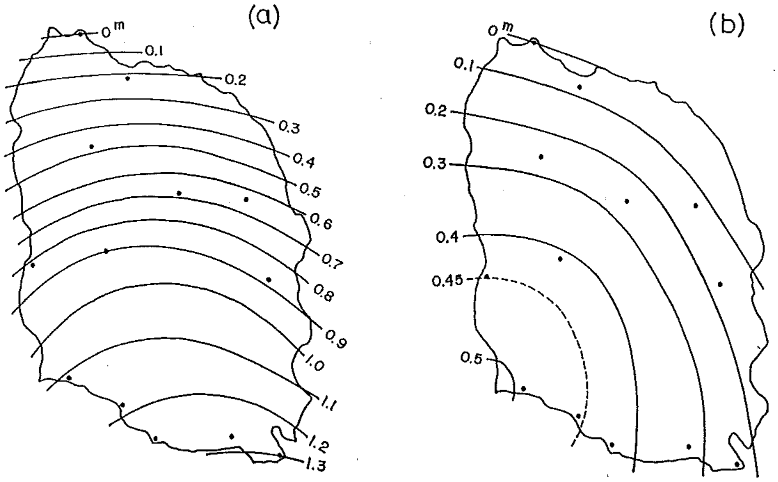


Fig. 4 Astrogeodetic geoid of Ō Sima.

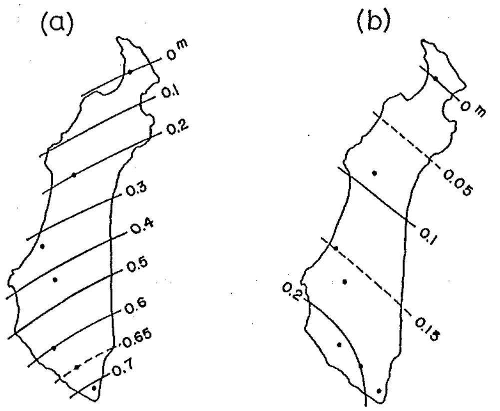


Fig. 5 Astrogeodetic geoid of Nii Sima.

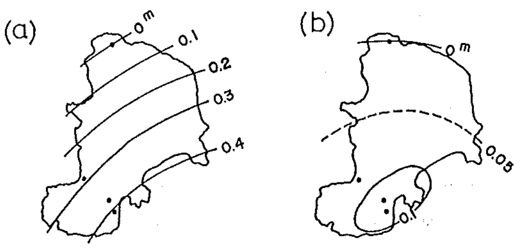
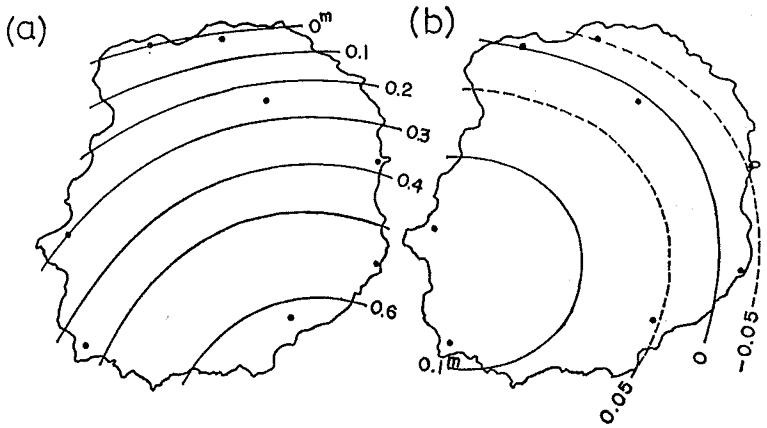


Fig. 6 Astrogeodetic geoid of Kōzu Sima.



(a) Tokyo Datum (b) SAO-SE3 system

Fig. 7 Astrogeodetic geoid of Miyake Sima.

3. Inland geiod of the Islands.

The geoid undulations inside of an island are computed by using the Helmert's formula

$$N_q - N_p = -\int_P^Q (\xi \cos A + \eta \sin A)\ ds, \tag{5}$$

where N_p and N_q are the geoid heights at points P and Q; ξ, η are components of the vertical deflection in the conventional expression; A is azimuth of tangential line of the integral path from P to Q. If the distance between them is not so large, the integral is approximatad by

$$N_q - N_p = -(\varepsilon_p + \varepsilon_q)s/2, \tag{6}$$
$$\varepsilon_p = \xi_p \cos A + \eta_p \sin A,$$
$$\varepsilon_q = \xi_q \cos A + \eta_q \sin A,$$

where A is the azimuth of the line $\overrightarrow{PQ}$. (6) can be applied effectively to the case in which data of vertical deflection are available only at P and Q.

The geoid undulations on the Tokyo Datum inside each island are calculated by using (6) for Ō Sima, Nii Sima, Kōzu Sima and Miyake Sima, and they are shown in Figures 4 (a), 5 (a), 6 (a) and 7 (a), where one of the deflection stations in the north part of each island is taken as the starting point ot the integration. Locations of the deflection stations are indicated by dots in the figures. Accuracies of the geoid undulations presented here are estimated to be several centimeters for Ō Sima and about 10 cm for the other islands. We see the systematic effect due to the adoption of the Tokyo Datum in the Figures (a)'s.

In order to eliminate this effect, the following datum shift is applied to reduce geocentric rectangular coordinates to one of the world geodetic system, SAO-SE3 (Gaposchkin et al., 1973):

$$DX = -136\text{ m},\ DY = +541\text{ m},\ DZ = +681\text{ m}. \tag{7}$$

Using (7) we can calculate the distance between the reference ellipsoids of the Tokyo Datum and of the SAO-SE3 as illustrated in Figure 8. By adding this distance to the relative geoid undulations on the Tokyo Datum, we can translate the geoid undulations on to the SAO-SE3 system. They are seen in Figures 4 (b), 5 (b), 6 (b) and 7 (b). The local features of the geoid proper to each of the islands are now apparent in these figures, and it can be seen that the highest point of the geoid at each island is not situated at the centre of the island. This fact is interesting especially for Ō Sima and Miyake Sima.

It may be expected that the peak of the local geoid of Ō Sima is located at the center of the island from a view of the distribution of free-air gravity anomaly as shown in Figure 9 which has been produced by using the data reported by Yokoyama and Tajima (1957). We suppose here that the apparent shape of the geoid is produced by a superposition of a local geoid caused by mass concentration at the island and a general geoid which has a simple shape over wider area around the island. We can estimate the feature of the general geoid by applying any of suitable models, the following assumption is introduced: the local geoid has a shape of

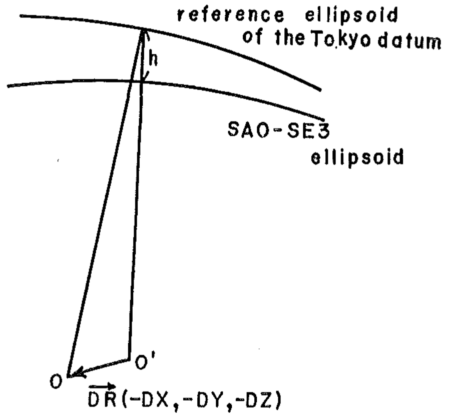


Fig. 8 Conversion of geodetic datums.

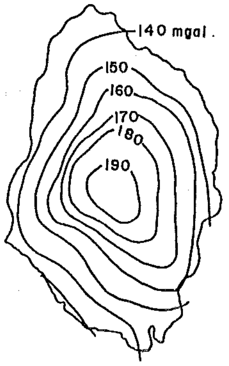


Fig. 9 Free-air gravity anomaly over Ō Sima.

rotational parabola and the general geoid is expressed by a plane : namely the vertical cross sections of them are expressed by the following formulae, respectively,

$$N_L = -as^2 + N_{LO}, \qquad a>0 \qquad (8)$$

$$N_S = -bs + N_{SO}, \qquad b>0 \qquad (9)$$

where N_{LO}, N_{SO} are constants and s is a parameter of distance. The shape of actual geoid is formed by the sum of (8) and (9)

$$N_A = N_L + N_S = -a\left(s + \frac{b}{2a}\right)^2 + N_{LO} + N_{SO} + \frac{b^2}{4a}.$$

Now we find that the peak of the geoid is shifted by the amount of $b/2a$ to the direction of the higher portion of slope of the general geoid. Applying this simple model to Ō Sima, we find that the island is located on a geoid slope with a gradient by 5 cm/km down to the northeast. Similarly for Miyake Sima, the gradient is estimated to be about 2 cm/km downward in the same direction.

4. Geoid around the Izu Islands.

As described in Section 1, we have horizontal coordinates on the Tokyo Datum at each levelling site, and vertical deflection data are also available for the most of the sites. For those sites where observations of astronomic position have not been made, vertical deflections are estimated from the data at the nearest astronomic sites. We can thus calculate the geoid-height difference between each island pair from the eight observation equations of the form of (4) for each observation set. Results are listed in Table 1 with some relevant data. In the 4th column are given the weighted means of the geoid-height difference with formal mean errors obtained through the least squares calculations. However, in practice, errors due to the adopted vertical deflections and to the adopted heights of the levelling sites are certainly larger than the formal errors. Error ($\delta\varepsilon$) of the observed vertical deflection is estimated to be $\pm 1\sim 2''$ depending on the method of observation.* In the 5th

Table 1 Geoid-height difference by over sea levelling

pair island A−B	observation date	distance	geoid-height difference N_B-N_A		Possible error for $\delta\varepsilon=\pm2''$	mean refraction coefficient	geoid-height difference on SAO-SE3
		km	m	m. e. m	m		m
Nii Sima - Kōzu Sima	1967. 11. 22	15. 6	+0. 83	±0. 02	±0. 15	0. 1458	+0. 72
	1975. 5. 27	15. 7	+0. 83	0. 02	0. 15	0. 1385	+0. 66
Kōzu Sima - Miyake Sima	1968. 11. 16	35. 9	+2. 00	0. 03	0. 35	0. 1462	−0. 20
	1973. 10. 23, 24, 25	37. 2	+1. 94	0. 04	0. 36	0. 1440	−0. 34
Nii Sima - Miyake Sima	1969. 11. 23	35. 3	+3. 52	0. 03	0. 34	0. 1489	+0. 84
	1974. 10. 14, 15	38. 8	+4. 03	0. 03	0. 38	0. 1438	+1. 07
Ō Sima - Nii Sima	1970. 11. 21	31. 5	+1. 54	0. 04	0. 31	0. 1407	+0. 53
Sirahama - O Sima	1971. 12. 6, 7	36. 8	−0. 05	0. 05	0. 36	0. 1455	−1. 39
Sirahama - Nii Sima	1972. 11. 14, 15	46. 5	3. 08	0. 02	0. 45	0. 1503	−0. 40

column are given values of $s \cdot \delta \varepsilon$, taking $\delta \varepsilon = \pm 2''$, as an example for estimating the effect to the geoid-height difference. As described in Section 1, heights of the levelling sites are referred to those of the triangulation points, and errors in these references may be around $\pm$20cm.

It was incidentally found through the investigation of the levelling data that the heights of the triangulation points in Kōzu Sima given in the GSI Resulting Tables are 2.8m higher than those by actual measurement from the mean sea level at the bench mark of tide station in Kōzu Sima. If these nominal values would be adopted in the calculation of the geoid-heght difference, there would appear an abnormal dent of geoid around the island. Such a dent could not be interpreted from the distribution of gravity anomaly around the Izu Islands area (Segawa and Bowin, in press). Then, we have adopted the actual height for Kōzu Sima to evaluate the geoid-height difference given in Table 1. (See addendum in proof.)

The geoid-height differences transformed into the SAO-SE3 system are also given in the last column of Table 1.

We can now view the geoid undulation around the Izu Islands in Table 1 and the geoid inside of each island in Figures 4, 5, 6 and 7. As shown in Figure 1, two loops of the levelling have been formed, i. e. Sirahama, Nii Sima, Ō Sima, Sirahama; Nii Sima, Kōzu Sima, Miyake Sima, Nii Sima. Loop closures of the geoid-height differences are within 14 cm for the former loop and about 30cm for the latter. The large misclosure for the latter loop comes mainly from the bad accuracy of the vertidal deflection data at Kōzu Sima and Miyake Sima where astronomic observations were made mostly by visual method.

A geoid contour map around the Izu Islands on the Tokyo Datum is produced by extending the astrogeodetic geoid map of Japan made by Ganeko (1976). It is presented in Figure 10, in which the geoid-height at Sirahama is taken to be zero for convenience's sake. Figure 11 is the geoid in the SAO-SE3 system, which is also drawn by extending the geoid map of the same kind by Ganeko (1976), in which the datum point of the Tokyo Datum is taken as the reference point of the geoid-height. In preparing these maps, the over sea levelling between Miyake Sima and Kōzu Sima is less weighted than the others because of the bad accuracy of the vertical deflection data as explained above. In Figure 12, the free-air gravity anomaly map by Segawa and Bowin (in press) is laid on Figure 11. We can easily understand the rapid change of the direction of geoid contour lines in the Izu Island area on seeing the existence of a vast area of gravity high to the south of Izu Islands. The gravity high may overcompensate the gravity low of the Izu-Ogasawara Trench, and contribute to a geoid rise over the south area of the Izu Islands. On the other hand, the gravity lows in Suruga Bay and off Ensyū Nada may contribute to a geoid dent there. The geoid slope suggested in the last paragraph of Section

* For example, visual observations with Carl Zeiss Ni-2 astrolabe include some amount of personal equation in longitudinal component. They are, of course, corrected in the reduction, but the resultant deflections are still considered to be not accurate enough for the author.

3 is clearly found in Figure 11 and its gradient agrees fairly well with those estimated there.

5. Concluding remarks.

Due to the restriction of mutual distances, determination of geoid height difference by means of the over sea levelling cannot be applied to the area further from Mikura Sima. Evalultuin of geoid undulation for the outer area in the Pacific Ocean has to be made by other methods ; one of them is gravimetrical one using terrestrial gravity data. A simple application of the Stokes' integral requires gravity data over the entire surface of the earth, but the combination of the terrestrial gravity data and the coefficients of the earth potential derived from the satellite tracking data enables to compute a detailed gravimetric geoid, although the terrestrial data are not available at present with sufficient density to cover the whole surface of the earth (Strange et al., 1972 : Ganeko, 1975). By applying this method, computation of a gravimetric geoid in Japan and the adjacent seas is now under preparation. The geoid obtained in the present paper will be of use for the calibration of the detailed gravimetric geoid.

The accuracy of the geoid-height at Miyake Sima is roughly estimated to be about ± 30 cm. Since positions of the levelling sites are based on those of the triangulation points, the accuracy of the height above mean sea level (above the geoid) of the triangulation points directly reflects into that of calculated geoid-height differences. Although the case of Kōzu Sima may be an unusual one, the possibility of some error still remains concerning the other islands. Further investigation on this problem and improvement in the accuracy of the vertical deflection data are needed to compute the geoid undulations more precisely.

It should be remarked that the derivation of the geoid maps in Figures 10 and 11 are based on two serious assumtions. They are (i) assumption that the adopted heights of the levelling sites are referred to the ture mean sea levels at respective islands, and (ii) assumption that the mean sea level represents the geoid surface. Ultimate sources of the heights in Nii Sima, Kōzu Sima and Miyake Sima are tide observations in 1910's, detailed records of which seem to have gotten scattered and lost. It is probable that the periods of these observations were limited in some short terms. On the other hand, the mean sea levels in the Izu Islands change significantly according as the situation of the flow axis of the Kuroshio. In particular at Kōzu Sima and Miyake Sima, monthly means of sea level change often over 50 cm within one year (e. g. Shoji, 1972). Detailed analysis of tide observation data for longer periods is desired.

Mean sea surface never coincides with the geoid surface, especially in the area where ocean current dominates. Investigation on the discrepancy between them is entangled with the analysis of tide data stated adove, and is an important problem for research in marine geodesy as well as in oceanography. Information from the gravimetric geoid may become a good tool to separate these two surfaces so that

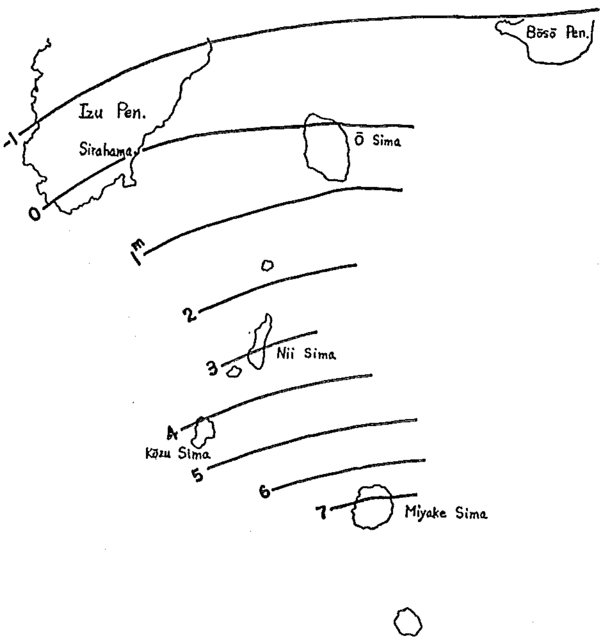


Fig. 10 Geoid contours around the Izu Islands on the Tokyo Datum. Geoid height at Sirahama is taken to be zero.

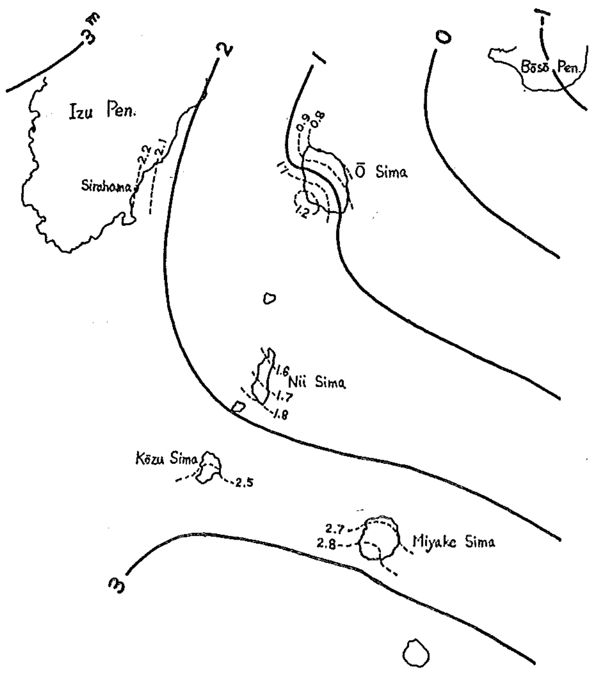


Fig. 11 Geoid contours around the Izu Islands in the SAO-SE3 system, extended from the astrogeodetic geoid map of Japan by Ganeko (1976).

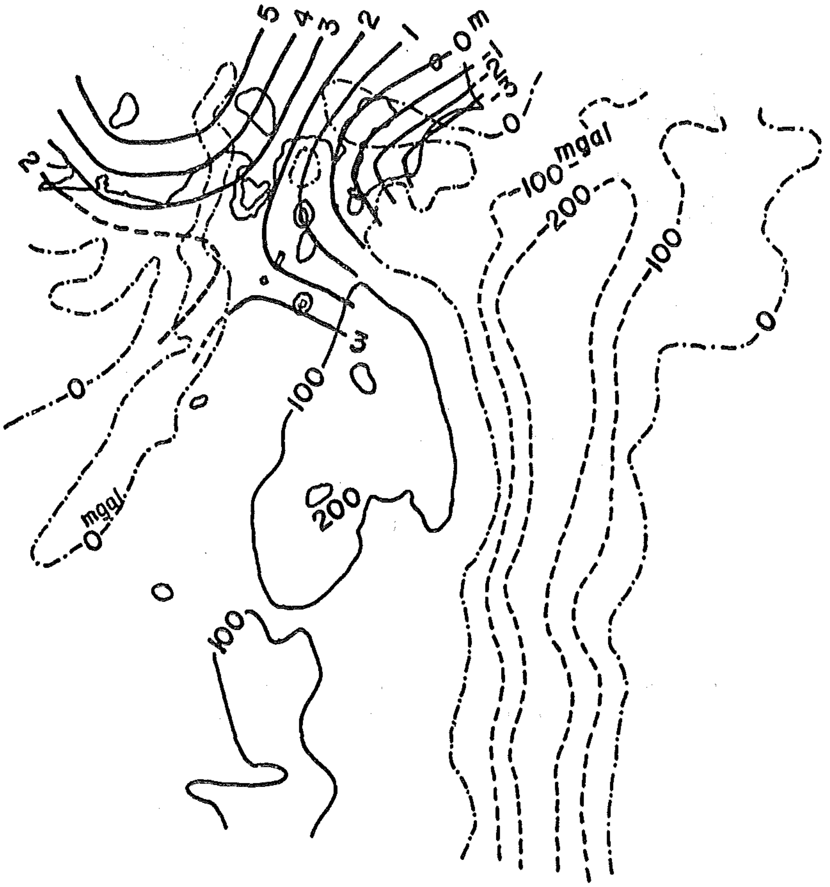


Fig. 12 Free-air gravity anomaly (Segawa and Bowin, 1976) laid on Figure 11.

dynamics of the ocean current be improved. Such improvement may be fed back to refine our knowledge on the geoid in ocean area.

The author is indebted to Drs. J. Segawa and C. Bowin for kind permission to use their result before publication. Thanks are due to Dr. A. M. Sini and Mr. T. Mori for advice to prepare the manuscript. This paper would not appear without the accumulation of data obtained with great effort in many years by the members of the Astronomical Division, JHD. The author wishes to express his appreciation to all of them.

References

Ganeko, Y. 1975, *Center for Astrophysics, Harvard College Observatory and Smithsonian Astrophysical Observatory*, Preprint Series No. 399.

Ganeko, Y. 1976, *SAO Special Report* 372.

Ganeko, Y. and Sasaki, M. 1977, *Data Report of Hydrographic Observations, Series of Astronomy and Geodesy*, No. 12. p. 60.

Gaposchkin, E. M., Latimer, J. and Veis, G. 1973, *SAO Special Report* 353, p. 315.

Sasaki, M. and Kanazawa, T. 1977, *Data Report of Hydrographic Observations, Series of*

Astronomy and Geodesy, No. 12, p. 47.
Segawa, J. and Bowin, C. in press, *Jour. Phys. Earth.*
Shoji, D. 1972, The Kuroshio south of Japan in 1965 in *Researches in Hydrography and Oceanography, in commemoration of the centenary of the Hydrographic Department of Japan*, Ed. D. Shoji, Tokyo, p. 113.
Strange W. E., Vincent, S. F., Berry, R. H. and Marsh, J. G. 1972, A detailed gravimetric geoid for the United States in *The Use of Artificial Satellite for Geodesy*, Ed. S. W. Henriksen, A. Mancini and B. H. Chovitz, *AGU Monograph* 15, Washington, D. C., p. 169.
Sugimoto, K. and Harada, Y. 1968, *Data Report of Hydrographic Observations, Series of Astronomy and Geodesy*, No. 3, p. 14.
Suzuki, H. and Harada, Y. 1966, *ibid.*, No. 1, p. 36.
Suzuki, H. and Sugimoto, K. 1967, *ibid.*, No. 2, p. 20.
Takemura, T. and Koyama, K. 1970, *ibid.*, No. 5, p. 19.
Yokoyama, I. and Tajima, H. 1957, *Bull. Earthquake Inst.*, No. 36. pt. 1, p. 23.

Addendum in proof: GSI, having found the height data for Kōzu Sima to be erroneous, is now making remeasurement at the island.

REPORT OF HYDROGRAPHIC RESEARCHES No.12, March, 1977

日本標準海水のカルシウム成分について

日向野良治*

ON THE CALCIUM CONCENTRATION OF THE JAPANESE STANDARD SEA WATER

Ryoji Higano

Received 15 October 1976

Abstract

Calcium carbonate of sediments in the polyethylene bottles, which had contained 20 liters of sea water for 4 years since it had been collected in the area south of Honshu (Japan mainland), were analyzed.

The results of the analysis can be summarized as follows:

Calcium concentration of sea water in these bottles was decreased by 0.1% from the initial composition, and this decrease corresponded to 10 to 20 percent of variation in the ratio of calcium to chlorinity of sea water in the ocean.

Although this 0.1% decrease in the ratio of calcium to chlorinity makes the electric conductivity ratio lower for the salinity determination by use of a salinometer, this change is still the same order as the sensitivity of salinometer.

1. まえがき

海水の塩分を測定するには，硝酸銀溶液で，海水中のハロゲン（塩素・臭素）イオンを定量する“塩素定量法”が，「海洋探査のための国際委員会（1902年創立）」によって標準法として採用されている．

海洋の調査研究を目的として使用されるこの分析法では，全世界共通の標準を使用する必要があるので，1900年，コペンハーゲンで調製された原標準海水を基にして，Martin Knudsen の指導の下に検定された標準海水と比較されて塩素量が検定された海水（容量約250 m*l* の硝子アンプールに封入された，いわゆるデンマークの標準海水），（モナコ海洋研究所報告 No. 1047）が，各国において使用されて来た．

第2次大戦勃発当時，我国では，ヨーロッパとの運輸がとだえ，デンマークの標準海水の輸入がほとんど不可能になったので，学術研究会議測地学および地球物理学部海洋学分科会内に，臨時に標準海水委員会が設立され（昭和16年1月），昭和17年に最初の日本標準海水が作製された．以後，委員会の監督の下に，この作業が継続されて来た．

1960年代には，海水の状態方程式に関する国際会議が何回か開かれ，電気伝導度と塩分との詳しい関係や，塩素量と塩分との新しい関係が認められた（UNESCO 1965）．

* 海象課海洋汚染調査室

現在，海水の塩分を求めるには，ほとんどの場合，標準海水と試水の電気伝導度の比較測定によっている．

その測定精度は，塩分として，±0.003‰程度であり，海水の組成の変化に基づく値のふらつきの領域に入る精密さである（海水の Ca/Cl 比および Mg/Cl 比には，0.5～1％の変化がみられる）．

海水中には，炭酸カルシウムのように，過飽和の成分も含まれている．したがって，海水を長期間硝子瓶に入れて置くと，必ず，瓶内壁に炭酸カルシウムが析出してくる．

日本標準海水の作製に際しては，有機物の酸化分解を待ち，組成の安定化を考え，海水採取後4～5年間保存されてから，沪過され，十分混合された後，100ml あるいは 200ml のアンプールに封入されている．

海水の貯蔵に硝子瓶を用いた頃は，海水と硝子との境界面付近では pH が高くなり，瓶内壁には，相当の炭酸カルシウムが沈殿したものと想像されるが，標準海水が塩素量としての標準にだけ用いられていた当時は，全く問題にならなかったはずである．しかし，近年，ほとんどの海洋調査機関は，電気伝導度法による塩分測定法（サリノメーター方式）を採用している．

若し，海水中のカルシウムが炭酸カルシウムとして沈殿するならば，同じ塩素量でも電気伝導度は下がるはずである．最近では，日本標準海水用海水の貯蔵には，ポリエチレン瓶が用いられているが，この場合でも，貯蔵中に炭酸カルシウムの沈殿が起る可能性がある．

昭和50年度の標準海水委員会で，その件について検討の必要性を提言した筆者を含めた3人が，実際の試料について検討するよう決められていたが，都合により，筆者1人で分析することになった．

2. 実　験

1) 試　料

1972年10月，気象庁の凌風丸によって採取された本洲南方（北緯30度，東経147度）の表層海水（塩分 34.7‰）を 20l ポリエチレン瓶63本に満たして貯蔵したうち，その2本について1976年5月に分析した．

2) 前処理

20l ポリエチレンの海水貯蔵瓶中の海水を静かに別の容器に移し，空になった瓶の内壁を 0.5l の0.1%塩化アンモニウム溶液（アンモニヤ水で pH=8.3 に調節）で静かに4回洗った．

次に，容器の内壁を6規定塩酸（超特級）の 50ml で洗い，更に，蒸溜水 50ml で洗った．

洗液を合わせて，固形水酸化ナトリウムで中和し，加熱後，水酸化鉄の沈殿を沪別した（沪紙 No. 1）

Table 1　Results of analysis of calcium carbonate deposited in the sea water storage bottle for preparation of Japanese Standard Sea Water

項　目	試　　料	M/100 EDTA の消費量 ml	瓶内壁に析出した Ca，Mg 量	瓶内海水中の濃度減少率
Ca	瓶No.1 200ml 中50ml を使用	6.64	10.7 mg	1.29×10^{-3}
	瓶No.2 200ml 中20ml を使用	2.08	8.34 mg	1.01×10^{-3}
	M/100 Ca標準溶液 10mlを使用	(10.00, 10.01 滴定値)		
Mg	瓶No.1 200ml 中10ml を使用	0.05 (1.38—1.33)	0.24 mg	0.94×10^{-5}
	瓶No.2 200ml 中20ml を使用	0.15 (2.23—2.08)	0.36 mg	1.4×10^{-5}
	約5/100M Mg溶液2mlを使用	(12.23, 12.22滴定値)		

沪液を 200ml 定容とし，カルシウム，マグネシウムの分析試料とした．

3) **カルシウム，マグネシウムの定量**

分析用試料の一定量をとり，5%シアン化カリウムの 2ml を加え，更に10%水酸化ナトリウム溶液を加えてpH=12.0とした後，ドータイトNNを指示薬として，N/100 EDTA 溶液でカルシウムを滴定した．

マグネシウムの場合は，pH=10.0 として，BT指示薬を使用し，N/100 EDTA 溶液でカルシウム，マグネシウムを滴定し，カルシウム分を差引いた．分析値は表1に示した．

3. 検　討

海水の成分イオンの電気伝導度の分担率 (Kilho Park and wayne V. Burt 1965a) で，Ca^{2+} は 0.77%，Mg^{2+} は，2.7%であるから，炭酸カルシウム等の析出のために，カルシウムおよびマグネシウムの濃度減少 (表1に示す) に基づく電気伝導度の変化割合は，$(0.77\times0.0013)+(2.7\times0.00001)=0.0010\%$ 即ち，1×10^{-5} となる．

カルシウムと結合した炭酸イオンの影響については，複雑なので*，ここでは Park 等 (Kilho Park and wayne V. Burt 1965b) の論文中の炭酸カルシウムの 2mmol の溶解で，電気伝導度が約 0.002 増加することを，逆向きに適用すると，カルシウム濃度が，約0.01mmol 減少した貯蔵海水の電気伝導比は，0.00002 減少することになる．

一方，サリノメーターの測定感度は，$\pm3\times10^{-5}$ (電気伝導度比として) なので，炭酸カルシウム等の沈積に基づく塩分変化は，サリノメーターの測定感度と同じ程度とみることが出来る．

海水の塩分組成の中で，カルシウム成分については，深度と共に増加していることが分かり，若し，このカルシウムを酸性炭酸カルシウムであるとすると，電気伝導度法で測定した塩分は，約0.01‰増加することに相当する (UNESCO・1963) ことが述べられている．

筆者は，黒潮源泉海域から本洲南方海域までで，黒潮をまたいでの両海域と，その混合水域である黒潮の中でCa/Cl 比の観測 (Cl 測定の精度に匹適するよう器具の工夫とキレート逆滴定を採用) を実施して，陸側と沖側の水塊，あるいは，表層と中層以深の水で，0.5～1%の差のあることを経験している (日向野・1967)

角皆氏等は (角皆，西村，中谷. 1968，角皆，山崎，西村・1971). 本洲，北海道の東方海域や，日本の南極地域観測隊の往復航路筋および南極海等で集めた海水試料について分析して Ca/Cl 比を求め，水塊の指標としての有用性を明示しているが，Ca/Cl 比の変化幅は，約1%である．

これらの Ca/Cl 比の変化の幅と，今回の標準海水用貯蔵海水のカルシウム濃度減少とを比較すると，後者は，前者の1～2割程度である．器壁面で pH 変化の起らないポリエチレン瓶でも，この程度のカルシウム濃度の変化は，貯蔵中の水温の変化に伴って，当然生じることであろうし，また，この事により，アンプール封入後の標準海水の塩類組成の安定性が増加したともみることが出来る．

4. あ と が き

日本標準海水に用いるため本洲南方で採取される表層水は，採取後4年間，ポリエチレン瓶に貯蔵された場合

---

* 海水中の炭酸イオンの減少があれば，炭酸物質間の化学平衡を保つように，重炭酸イオン濃度が変化するのであろう．海水に，食塩や炭酸ソーダを加えて，炭酸イオンの増加に対する電気伝導度比の変化を測定してみたが炭酸イオンの効果が負に出てしまった．これは，肉眼では検出し得ない炭酸カルシウムの生成に起因するものと考えている．CO_2 の増加に対する伝導度の減少については，溶液の粘性の変化等も考えられている．

瓶の内壁に炭酸カルシウムを析出する．この瓶内の海水のカルシウム成分の減少割合は，自然に海洋で起る変化量の１〜２割程度である．

また，塩分測定の場合は，サリノメーターの感度と同程度，あるいは，それ以下であり，今回のテストでは全く問題はなかった．

塩素量の表示だけしかない標準海水が，現在では，塩分測定のための電気伝導度の標準として使用されているので，標準海水の塩類組成の安定性がその信頼性に影響する．したがって，深層水や底層水の塩分測定に関しては，今後もこのような検討は必要であろうう．

かつて，筆者は，海水と電気伝導度の温度係数が等しく，かつ，純粋な物質として求め易いものを探したことがあったが，残念なことに，単一なものでは見当らなかった．

若し，安定な電気伝導度の溶液として，海水の代理となる二次標準溶液が作られるようになれば便利であると思う．

参　考　文　献

Helge Thomsen Instractions pratiques sur la determination de la salinite de 1 eau mer par la methode de titrage de Mohr-Knudsen. Bulletin de 1 Institut Oceanographique N°1047 30, VII 1954 Monaco

UNESCO (1963). Second report of joint panel on the equation of state of sea water.

UNESCO (1965). Second report of the joint panel on oceanographic tables and standards. Unesco technical papers in marine science No. 4 1965.

Kilho Park and Wayne V. Burt (1965a). 海水の電気伝導度と塩分計（その１），(英文)，日本海洋学会誌，21巻２号

Kilho Park and Wayne V. Burt (1965b). 海水の電気伝導度と塩分計（その２），(英文)，日本海洋学会誌，21巻３号

日向野（1967)，フィリピン東方およびルソン海峡の化学成分について，“シンポジウム”黒潮および隣接水域の化学（昭和42年１月17日)，日本海洋学会誌　23巻２号1967

角皆静男，西村雅吉，中谷　周（1968)，海水のカルシウムおよびマグネシウム含量とトレーサーとしてのカルシウム／塩素量比（英文）日本海洋学会誌　24巻４号

角皆静男，山崎忠茂，西村雅吉（1971)，南極海におけるカルシウム（英文）日本海洋学会誌 27巻５号

REPORT OF HYDROGRAPHIC RESEARCHES No.12, March, 1977

石油の水中拡散に関する水槽実験（その 1）

日向野良治*

AN EXPERIMENT ON THE DISPERSION AND DISTRIBUTION OF PETROLEUM IN A WATER TANK (PART 1)

Ryoji Higano

Received 15 October 1976

Abstract

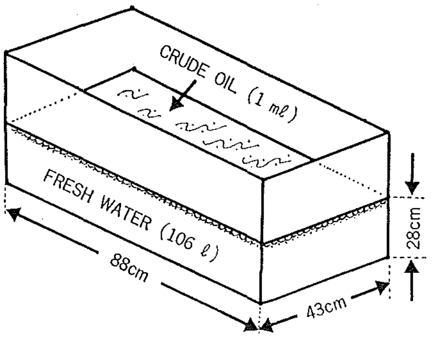
This report gives the results of a fundamental experiment on the dispersion and distribution of crude oil in a water tank which is 88cm long, 43cm wide and 50cm high and contains 106 liters of water.

As the initial state of the experiment, 1 ml of crude oil was added to the water surface in the tank, and then dispersion state of the oil was observed with time.

About half a year later, distribution of the oil (in percentage) in the water tank was found as follows:

81.8% of the total oil in the tank was distributed as the surface oil film, 4.8% as the dispersion oil particles in the water, 11.3% as the oil adhered to the glass wall at the boundary of water and air, and 2.6% as the oil sediments at the bottom of the tank.

According to the measurment of infrared ray absorption spectrum of those samples, the spectrum of the surface oil and that of oil perticles in the water are similar to that of the crude oil, but, as regards the oil adhered to the glass wall and the oil sediments at the bottom of the tank, the absorbance of about 1700cm^{-1} in wave number indicated greater values than that of the crude oil.



水　量 ……………………………………106l
水面の面積……………………………………3784cm^2
水面の周囲の長さ ……………………………262cm
初期の平均油膜厚 ……………………………2.6 μ

quantity of water……………………………………106l
area of water surface ……………………………3784cm^2
length around water surface……………………262cm
initial thickness of surface oil film ………2.6μ

Fig. 1 Glass-walled tank used in the experiment.

* 海象課海洋汚染調査室

1. はじめに

実際に海洋へ放出された石油の行動については，実験や流出事故等についての報告がある（科学技術庁1968;日本海難防止協会1968・1970; 英国海洋生物学協会プリマス研究所1968).

しかし，水面の薄膜状石油の状態の変化について，長期間にわたって観測した報告は少ない（日本海難防止協会1972).

この報告は，海洋に流出した石油の形態の推移を知るため，その手始めとして，第1図のような水槽に水を入れ，これに原油の 1 ml を滴下しておき，時間の経過と共に原油の分布状態の変化する様子を観察した結果について述べたものである.

2. 実験および観察

昭和50年8月6日，上記水槽にメスピペットで採取したオーマン原油 1 ml を滴下した．第1表は，その観測記録である.

Table 1 Observation of the state of thin oil film spreaded on the water in a tank

経過時間	水槽内の石油の状態
直後	油膜の厚さが不均一なので細い硝子棒の先でかきまぜ，均一に分布させた．微視的には，油膜の厚さは極めて不均一のものであり，水中へ分散することなく油膜の厚さを均一にすることは困難である.
3時間後	揮発性成分が蒸発して，残留分の油膜中には，極めて微細な黒色の粒子がみられる.
3日後	水面上には透明な油膜があり，その油膜中に黒かっ色の微細な粒子状物質（アスファルト，レジン芳香族成分の1部等）が分散している（100～500個/cm²)．また，硝子壁面（側面）に付着油の這い上りがみられる（付着幅約5 mm).
10日後	油膜中の黒かっ色粒子が互に結合して，より大きな粒子（1 mm以下で液状）となっている.
25日後	黒かっ色粒子群は数個ずつ結合して，アメーバーが偽足をのばした形をしている.
1か月後	黒かっ色粒子群（数mm）は凹凸に富み，透明な油膜より垂れ下っている.
3か月後	粒子群の一部は水面下（0～5 mm下）に沈み，一部は水槽の底に沈殿している.
6か月後	水面下（0～1 cm）に沈む粒子群の数が増し，器壁に付着した油の幅も約1 cmに広がっている．水槽の底に沈殿した油粒子の量も増加している.
7か月後	水面上の油膜，水中に分散した油粒子，水槽の内壁（側面）および水槽の底にある油をそれぞれ別個に回収した.

3. 回収後の処理

1) 油膜は，30メッシュのステンレス金網で，下層の油粒子をとりこまないようにすくい上げ，エチルエーテル中に溶解した．溶媒のエーテルを揮発させ，残りを化学天秤で測定した.

2) 水中に分散した油粒子については，油膜をすくった後の水槽内の水を，上部から約5 cmの厚さ毎に採取し

て沪別した（沪紙 No. A）. 沪紙上の油粒子は，顕微鏡で観察した後，最初エーテルで洗い，エーテル不溶分はベンゼンで洗った．ベンゼン溶液を先に乾固し，それにエーテル溶液を加え，エーテルを揮発させ残部を秤量した．

3) 底に沈殿した油粒子の場合は，上部の水をサイホンでほとんど除いた後に，水槽を傾斜させて，ビーカーで水と一緒にとり出し，最後は 50ml ホールピペットでとり出した．これらの懸濁液は，沪紙で沪過し，沪紙の沈殿物に 6 規定塩酸を加えた後，油分をエーテルで次にベンゼンで抽出した．なおこれらの溶液から希硫酸で鉄を洗い出した後，溶媒を揮発させ残りを秤量した．

4) 水槽の側面に約 1 cmの幅で付着した油は，最初乾いた沪紙でふき，次にベンゼンでぬらした沪紙で完全にふき取った後，これらの沪紙からエーテルおよびベンゼンで抽出した．

5) 沪紙上に集めた油粒子（水中に分散していたもの）を顕微鏡で観察すると，粒子の大きさは，0.1mm～数mmまでみられ，上層には大きな粒子が多く分布し，下層ほど小さな粒子になっていた．

大きな粒子は，かご状かかまきりの卵のから，あるいは，焼いたタラコか粟オコシの破片のようにみえ，小さな粒子では少量のジャムかママレード，あるいはノリの佃煮状に見えた．

4. 結果および考察

水槽に水を入れ，この水面上に原油の薄い膜を浮かべ，水槽にふたをして約半年経過した場合に，水槽内の各部に分布していた油量の 100 分率は第 2 表のとおりである．

Table 2 Distribution of oil in the water in a tank

水槽内の油の存在する位置	油の存在量（mg）	分布の 100 分率
水面上に残留した油	300.3	81.3
水中に分散した油粒子	17.7	4.8
器壁（側面）に付着した油	41.7	11.3
器底に沈殿した油粒子	9.5	2.6
合　　計	369.2	100.0

上表中，器壁が存在しない場合には，この部分に付着した油は表面に残るものと仮定すれば，静止した淡水の表面に原油が薄膜状に流出した場合，半年後には，表面になお 9 割の油が残り，1 割の油が水中に分散したり，沈降するものと考えられる．

なお，水槽内の水は，水道水を用いたが，水道水の鉄含量は約 1 ppm（原子吸光光度計でチェック）なので，水槽内の全水量 106l 中の鉄は約 10mg であり，この水酸化鉄が油粒子の沈殿の媒体や石油の風化の解媒として関与していたことが考えられる．

赤外線吸収スペクトルからみると，表面に残った油および水中に分散してた油粒子は，常温で揮発成分を除いた場合の原油の吸収スペクトルと同様であったが，水槽の側面についた油や底に沈んだ油の吸収スペクトルは，1700cm^{-1} 付近に吸収がみられ，炭化水素中の炭素に酸素の結合が生じていることがうかがわれる．これは，器壁部に付着した油は這い上がり現象により酸素との接触があり，また，沈降した油粒子は，水酸化鉄と接触して

その触媒効果が効いているものと思われる.

6. おわりに

海洋の石油汚染レベルの分布とその経時変化を知るには，定期的に実際の観測を行うと同時に，海上に放出された石油が，海面の薄膜状から海底へ移行する機構を解明する必要がある.

今回は，その手始めとしての真水を使用した水槽実験を行ったが，次回は海水を使用して更に観察と検討を進めていきたいと考えている.

参考文献

科学技術庁（1968），船舶廃油による海水汚濁に関する特別研究報告書
日本海難防止協会（1968），海水汚濁防止の調査研究報告書（水質関係）
英国海洋生物学協会プリマス研究所報告（1968），日高孝次・宇田道隆訳　トレー・キャニオン号海難による海洋汚染と生物環境　第8章　難波につづく油の放出と油の運動のパターン
日本海難防止協会（1970），海水汚濁防止の調査研究　中間報告書
日本海難防止協会（1972），海洋汚染防止の調査研究　中間報告書
海上保安庁　昭和47年度（1973），研究成果報告書