

NEW BATHYMETRIC SURVEYING AND PROCESSING SYSTEM BASED ON SEA BEAM 2000†

Akira Asada*

Abstract

The Hydrographic Department, Japan Maritime Safety Agency has installed the most advanced bathymetric surveying system of 90 degrees swath width, called SEA BEAM 2000, which is a new system developed by the SeaBeam Instruments Incorporation, on the newly built survey vessel Meiyō in October 1990. The practical survey using this newest system has been carried out.

The present SEA BEAM 2000 has a good capability of 120 degrees swath width and side scan image output by combining interferometric technologies since February 1992. By adopting the interferometric technique, the resolving performance of bottom reflection wave and the multi beam depth measurement are improved remarkably.

Also, we developed a new integrated navigation system and a new data processing system for the SEA BEAM 2000. For example, the computer program which rejects erroneous data of 1 or more percent abnormalities by automatic analysis of abnormalities based on the continuity of the topographic feature is very useful. Since SEA BEAM 2000 records additionally intensity data of 121 beams, we made grazing angle and position corrections of the beam intensity data and prepared the intensity map by using a digital color photograph printer. Furthermore, we tried to make a 3-dimensional intensity map by using depth data. This map indicates very detailed topography of the sea floor, such as faults, complex rock walls and channels.

Introduction

The Hydrographic Department, Japan Maritime Safety Agency, installed the most advanced bathymetric surveying system of 90 degrees swath width, called SEA BEAM 2000 on the newly built survey vessel Meiyō in October 1990, with the close cooperation of the SeaBeam Instruments Incorporation (SBI).

As the SEA BEAM 2000 was a new system developed by the SeaBeam Instruments Inc., it took a few months to finalize the adjustment step of the instrumentation in the field at sea, before actual survey operations were initiated with the system. The first practical survey using this newest system was carried out in the sea areas off Boso-peninsula in March 1991, followed by the survey conducted off the coastline of Miyagi- and Fukushima-prefecture in April 1991 and around the seamount Mikura in August

† Received 13th December 1992

* 海洋調査課 Ocean Surveys Division

1991.

The present functions of the system incorporated in the SEA BEAM 2000 were confirmed through these survey operations. Also, the integrated navigation system and a new data processing system were contributed at the designing and developing stage proceeded together with the project to build the new Meiyō as replacement of the old Meiyō.

Since February 1992, the Sea Beam 2000 on the Meiyō has been upgraded with addition of capabilities of 120 degrees swath width as well as side scan image output by combining interferometric processing techniques by Sea Beam Instruments Inc. The sea test was conducted in and around the Bonin Trench having varying depths of 100 to 9000 meters, and a good result was obtained (Asada, 1992).

In March 1992, following the test, the bathymetric survey using the Sea Beam 2000 with 120° swath width was conducted around south area of Izu peninsula.

We have processed this data and prepared a detail bathymetric contour chart and an impressive beam intensity map. At the same time, we also tried a simple analysis of the data quality.

In August 1992, we conducted the survey through 20 days around Nankai Trough at the highest ship's speed over 15 knots, because we required the widely covered bathymetric data of a map area 1/500,000. As the result, we acquired the Sea Beam 2000 data covering most of the important area with some error of flow noise. These erroneous data have been rejected satisfactorily by the automatic rejection program of erroneous data.

In October 1992, the signal-to-noise ratio function of the receiver in the Sea Beam 2000 system was improved by the engineer of SBI. After this improvement, the erroneous data of the Sea Beam 2000 under the rough sea condition like the sea state of over 5 or at high ship's speed have been decreased remarkably. The sea test of the system evaluation at the 100 to 2000 meters deep area brought us a noiseless and good result under the conditions of wind speed over 15 meters/second, wave height over 3 meters and ship's speed about 10 knots.

As the Meiyō of 621 tons is a middle size vessel, the rough sea condition or high ship's speed had brought sometime critical damage to the bathymetric data. However, it is now confirmed that the Sea Beam 2000 on the middle size vessel Meiyō enables us to carry out surveys even under such a considerably bad condition. The Sea Beam 2000 have operated well around Bonin Trench in spite of the winter's strict sea condition, such as wind speed of 30 meter/seconds.

1. SEA BEAM 2000 surveying system

To efficiently carry out survey operations with the SEA BEAM 2000 and others, efforts were placed on production of a blue-print for an integrated navigation system based on a designing concept consistent with that of the SEA BEAM 2000. The resulting system was installed on board the new vessel Meiyō.

The integrated navigation system has a reference clock, to which all the surveying devices are synchronized. In the past, a time deviation between the positioning and the sounding data always brought us troublesome headaches. The SEA BEAM 2000 receives the data of clocks, positions, sea-surface temperatures, gyro and log outputs, etc. from the navigation system. The navigation system also records measurements which are transferred from the SEA BEAM 2000. An excellent capability of CPU HP835CHX built in the navigation system, which has been provided by advanced

technologies in the field of computer science, allows us to process measurements acquired onboard, such as to prepare contour charts traced along the tracks of the SEA BEAM 2000, etc.

1 — 1. Improvement of surveying equipment

(1) Special functions of the integrated navigation system

There are 3 models of GPS equipment, a 2-channel type MX4400GPS, a 12-channel type MX4810GPS and a 6-channel type MX4200GPS placed onboard the vessel as the GPS positioning device. In the field at sea, MX4810GPS independently determines position-fixes and also acquires pseudo-range data, and in a reference point on land, another 12-channel type MX4818GPS for differential positioning, which is a reference station systematized with an IBM PS-2 computer, calculates and stores corrections for the pseudo-range data. The reference station has a 600Mb (300Mb on one side) magneto optical disk to record a great number of differential data. Both MX4810 and MX4818 can primarily store about 30 Mb of differential data in a day. A cesium frequency standard supports the reference clock, Loran-C range measurements and GPS fixes. MX4400GPS can determine position-fixes with only 2 GPS satellites. The reference clock for the whole surveying devices onboard is synchronized at a higher accuracy by the time reference function of MX4200.

For Loran-C navigation, 2 sets of specially designed, highly accurate receiving equipments are incorporated. These equipments have a fixing resolution of $0.01\mu\text{s}$ and a capability to determine position-fixes in a hyperbolic and a range-range mode. The Loran-C equipment can fix 4 hyperbolic line-of positions (LOPs) and range lines from 5 transmitters. And the system can select any LOPs to fix position and automatically compute all offset of LOPs by comparing with each LOP with one of GPS fixes determined during a 6-hour period. The operator also can insert corrections either manually or automatically. The corrections are added to the value of each LOP so that no position deviation can result from the change of the LOPs used in due course.

The system also incorporates an ability to operate in a mode of Trisponder; i.e., a microwave position fix system.

The integrated navigation system normally performs a multi-mode measuring function with 5 or more positioning assemblies and continuously outputs the best position-fixes. The 5 assemblies include MX4400GPS, MX4810GPS, 2 sets of Loran-C receiving equipment and SNX(GPS). SNX, we call, calculates a 2-dimensional position from all the pseudo ranges, using GPS data supplied by MX4810GPS. Each range is weighted by HDOP, S/N, etc. Most of the earlier GPS receivers on the market at the time of the development stage of this positioning system generally adopted a method to randomly select and combine 4 GPS satellites for position calculation, not taking account of the optimum combination of DOP, and then produced satellite-fixes in poor quality. In addition, it was frequently experienced that position determinations in 2-dimension with 3 satellites provided more accurate fixes than those in 3-dimension with 4 satellites. Recent GPS receivers have been incorporated with a position calculation technique derived from the similar concept of ours.

In these positioning assemblies, the operator chooses 3 assemblies as the primary measurement tool of the system. The system assesses processing conditions of each assembly and identifies the order of priority for preference; when a higher priority assembly was somehow degraded, the one positioned at the next priority will automatically take the higher place, and when the degraded resumed its normal condition, it automatically goes back to the previous location. We usually select MX4400GPS, MX4810

GPS and R-R Loran-C as the 3 primary assemblies.

A graphic CRT indicates 3 curves of tracks individually produced by the 3 positioning assemblies, together with planned measurement lines and shorelines.

At the same time, navigational information to assist in taking the courses along the measurement lines is also displayed on the CRT, together with current flows, wind directions and wind speeds.

The integrated navigation system is connected to all the surveying devices onboard, and provides necessary information, as well as records all the data from the SEA BEAM 2000, a gravity meter, a geomagneto meter and an acoustic doppler current meter.

Under and after the surveying operation at sea, the system can produce the best position-fixe among the data provided by 4 routs of positioning elements; above 3 asseblies plus DGPS, through a graphic data processing in a conversation mode. This system also enables us to prepare a depth contour chart along the tracks, a track chart and a sounding chart, utilizing the data the SEA BEAM 2000 provides. For the CPU of the system, 835CHX of the HP9000 series is employed. In future, we well improve the processing capability of the system on board, incorporating a processing software being developed for the machines for land use.

1—2. Re-establishment of processing software

We rearranged the existing software (A. Asada, 1988) and relocated them on the HP-400 UNIX computer. Additionally, we developed some new programs to improve the processing capability. We will present these programs in the following paragraphs. Details of the new programs will be presented mainly.

(1) Positioning

- a) GPS differential post-processing
- b) Position-fix correction program

With this program, we can call various data acquired by each of the positioning sensors on the graphic display, set process time to get optimum position data on the CRT screen by using a mouse to select the data and put the data to be processed with an optimum filtering, a calculation to shift determined fixes to absolute positions and a smoothing of data connections, through a graphic conversation technique. The program enables us, easily and at a high speed as well as a good accuracy, to remove spike errors in the position-fixes, to smooth meanderings caused by instability of the position-fixes and to process difference in levels resulted from combination change of the GPS satellites. An example of the display on the processing is shown in Figure 1.

Simultaneously treated position data:

to choose max. 4 pairs from

GPS Positioning Assemblies (Navigation fix, Differential fix),

Loran-C Positioning Assemblies (Hyperbolic Navigation, Range-Range Navigation), and

Micro-wave Positioning Assemblies.

Function of processing

Variable scale indication: to indicate navigation data of 4 paired LOPs at random scales.

Patch-work processing: to connect optimum position data by a patch-work, absolute position shifts and parallel position shifts through a mouse.

Off-setting: to compensate irregular at the data connections created by the patch-work process-

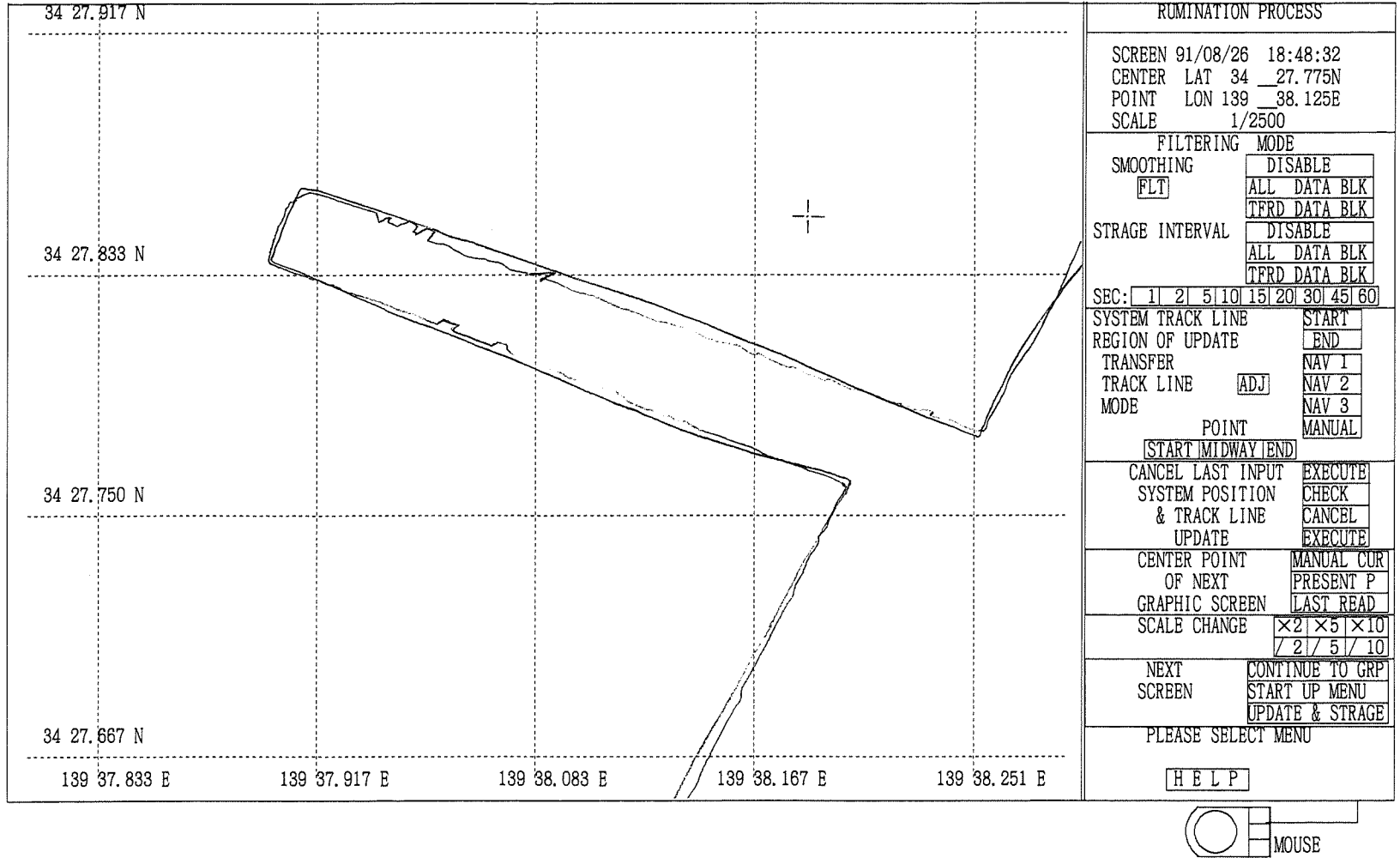
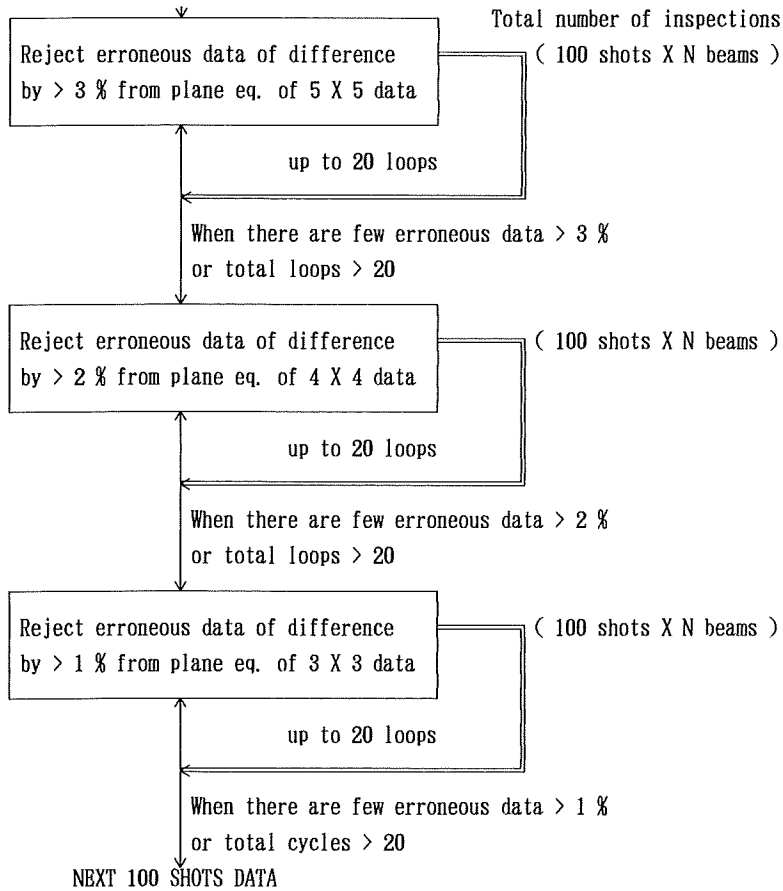


Figure 1. An example of the position-fix correction on the display.

(1) Basic flow of the auto-rejection process of erroneous data $> 1\%$



(2) How to reject erroneous data $> 1\%$

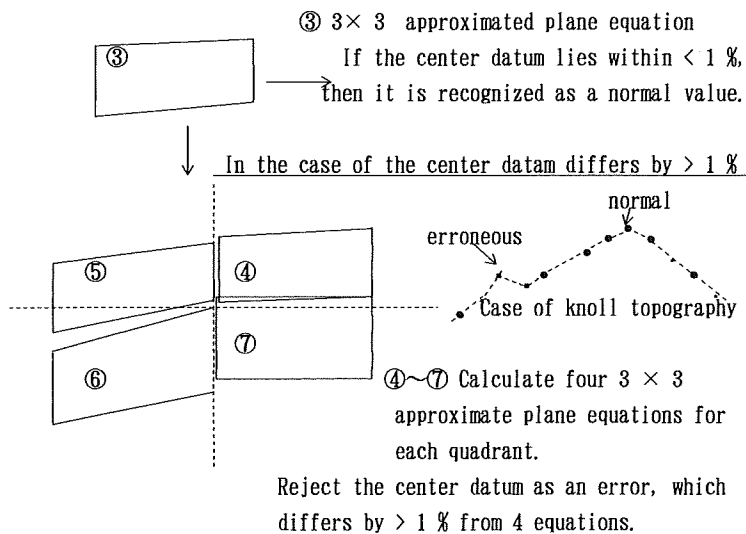


Figure 2. The auto-rejection process of erroneous data

ing.

Filtering: to reproduce actual tracks by filtering wavy track data resulted from variation of the data values.

c) Track chart processing

(2) SEA BEAM 2000

a) Transfer to JMSA unified format

This program changes format of the data provided by all the multi-beam sounding devices to that of the unified in order to process the output data with the programs below. The unified format can treat the data having 1 up to 200 of the beam number. We have so far programmed the software for the SEA BEAM 2000, the SEA BEAM, the Hydrochart II, the HS-10, the HS-200 and the Hydrosweep.

b) Automatic rejection of erroneous data

We have devised a computer program which eliminates 1 or more percent abnormal data by automatic analysis of abnormalities based on the continuity of the topographic feature. We assess raw data and must not modify. A basic flow of the program is shown in Figure 2. The program is somehow adjusted to be consistent with the characterizations of actual data. The foundation to define error data depends on the fact that there is no topographic feature which has only one spike datum. Furthermore, we identify that the data which have no correlation to the surroundings must be erroneous. However, erroneous data sometimes have like a continuous topographic feature. And this phenomenon is often caused when most of data in same shot are bad, and due to flow noise under the transducer. Thus, we designed the program not to identify as erroneous data in the areas with complex topography where there are faults, sea-knolls, etc. This scheme has provided a nearly perfect rejection of erroneous data by an automatic method. The execution of this program was impossible for traditional computers to accomplish it due to the time limitation, because the process requires quite a lot of calculation jobs. The advanced technology on work-stations in the computer system these days, enables us to clear the problems in carrying out a great number of calculations. The several improvements of the program have been made through actual processings. The latest fundamental processing flow of the program is as follows:

1) To read data at the size of 100 shots.

2) To remove much erroneous data, by checking every data for 3 or more percent of abnormality. This is a kind of technique which first eliminates larger errors and then reject smaller errors. Each point datum is judged from the 5 x 5 data which are extracted in the fore and after shots, the left and right beams of itself.

* To extract 7 x 7 data from the fore and after shots, the left and right beams of the checked point.

* To calculate the approximated plane of 5 x 5 around the center.

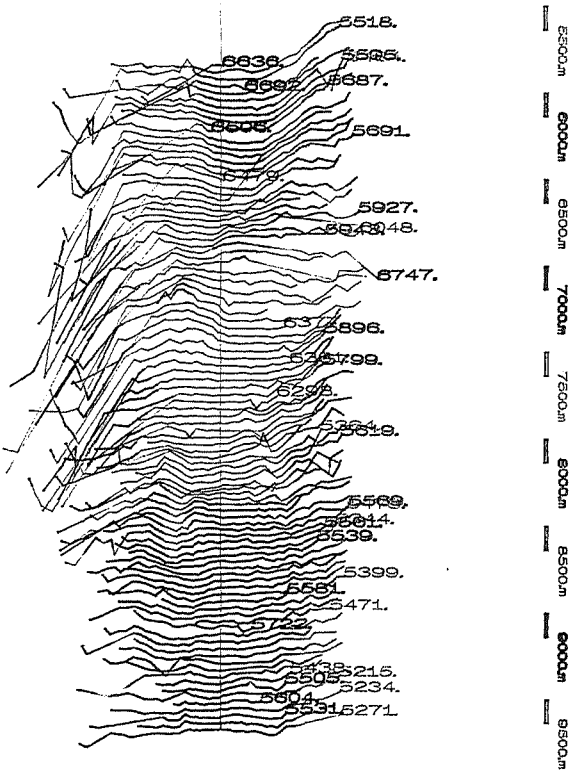
* The data are regarded as normal, when they lie within 3% of the approximated plane.

If the data are regarded as doubtful;

* To calculate the approximated planes of each 5 x 5 corresponding to the four quadrants which place the data point at the origin.

* To remove the data which makes 3 or more percent different from the approximated planes of the four quadrants, identifying the data are approximated planes of the four quadrants, identifying the data are erroneous.

1991175 18 3522.0 .0000 .0000 281.9
color coding interval : 500m
11000.m 11000.m



1991175 18 3522.0 .0000 .0000 281.9
color coding interval : 500m
11000.m 11000.m

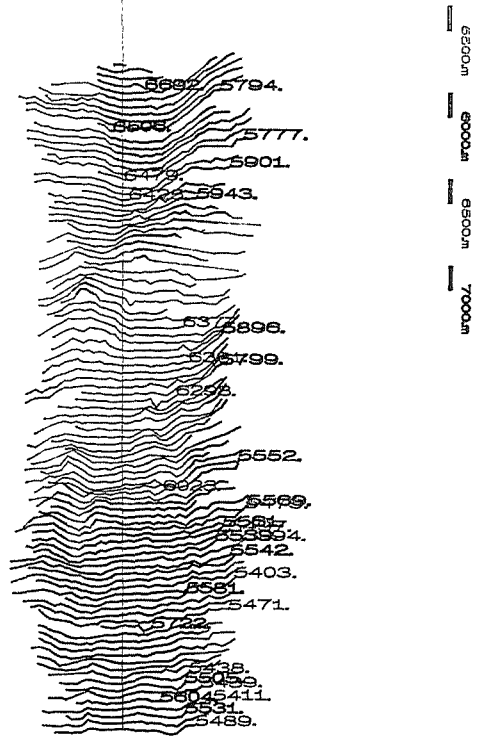


Figure 3. Water-fall display by the Auto-rejection Process of SEA BEAM 2000 data of poor quality. Original data are shown on the left, and processing data is shown on the right.

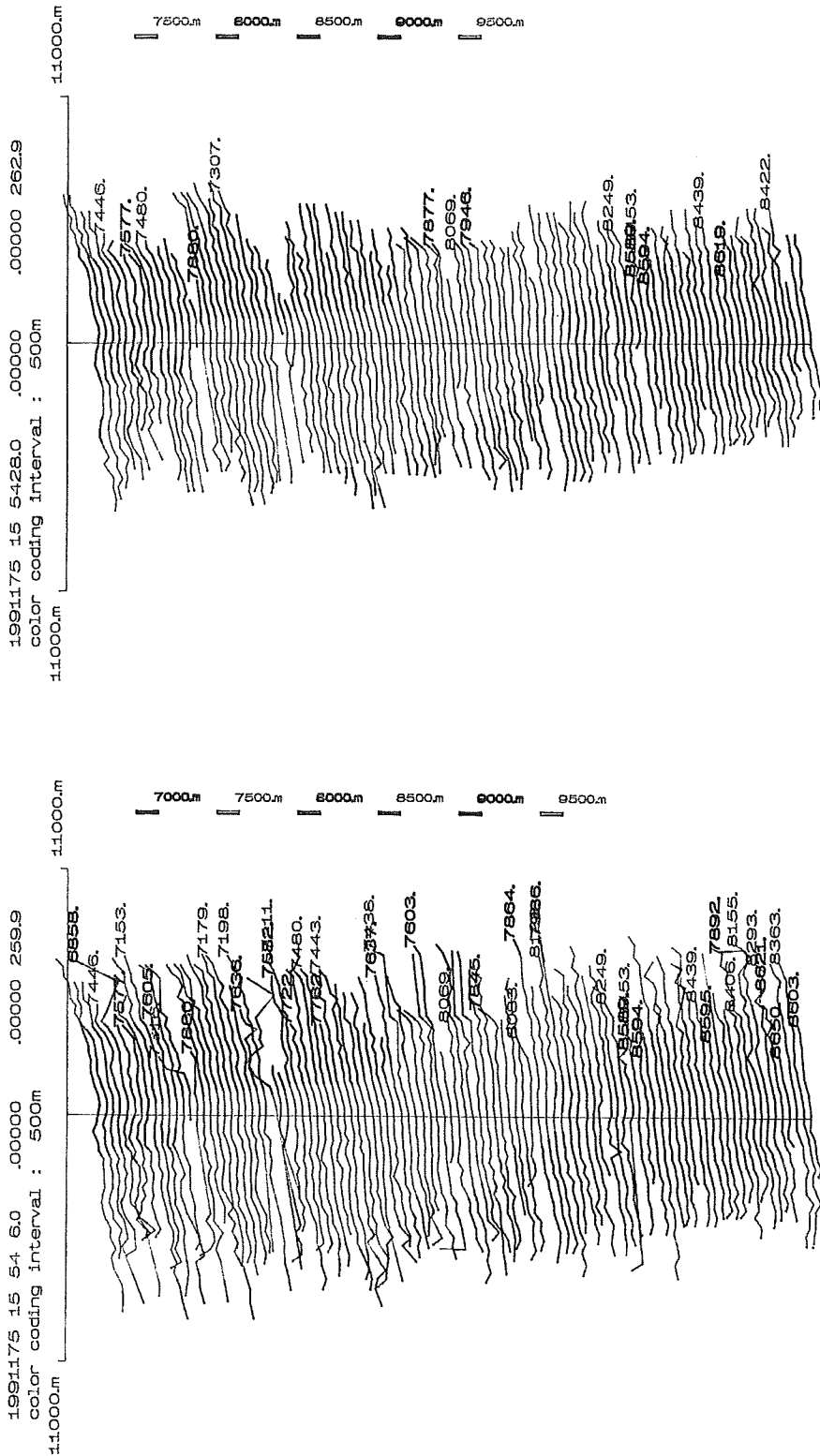


Figure 4. Water-fall display by the Auto-rejection Process of SEA BEAM 2000 data of poor quality. Original data are shown on the left, and processing data is shown on the right.

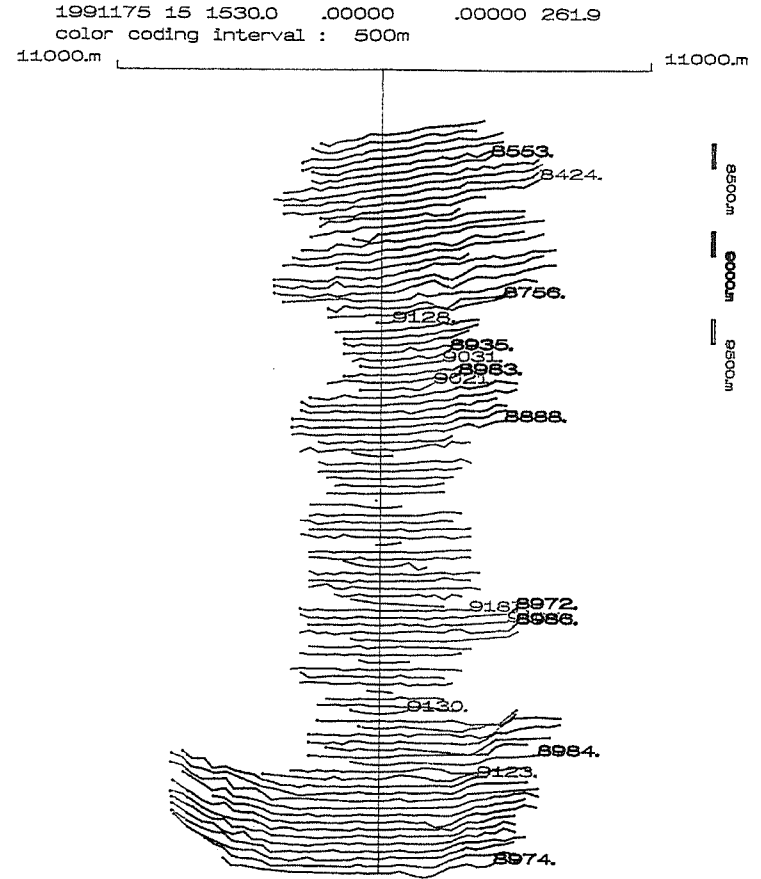
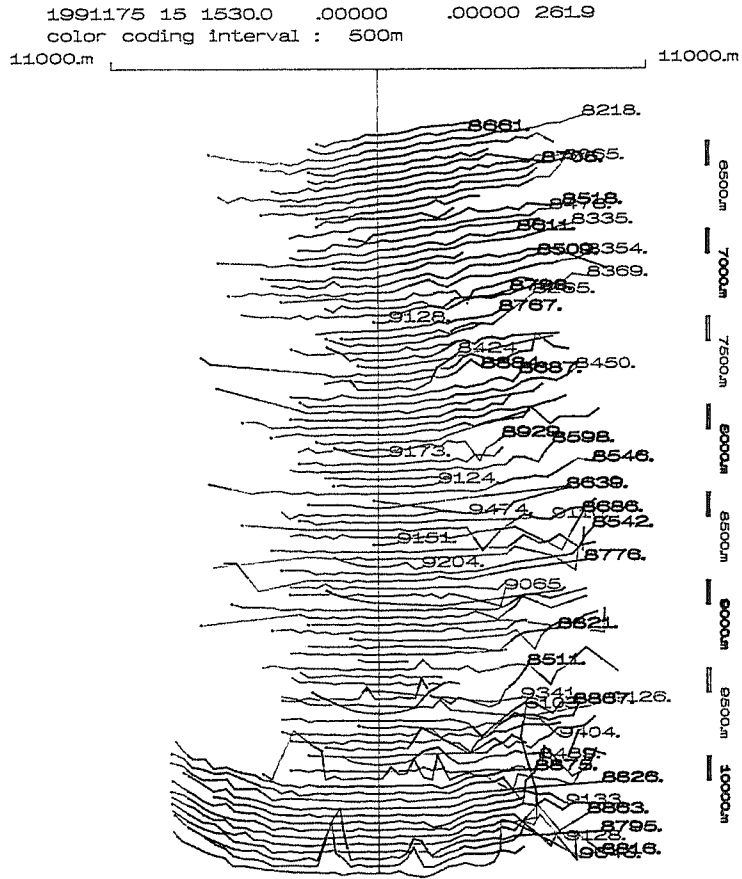


Figure 5. Water-fall display by the Auto-rejection Process of SEA BEAM 2000 data of poor quality. Original data are shown on the left, and processing data is shown on the right.

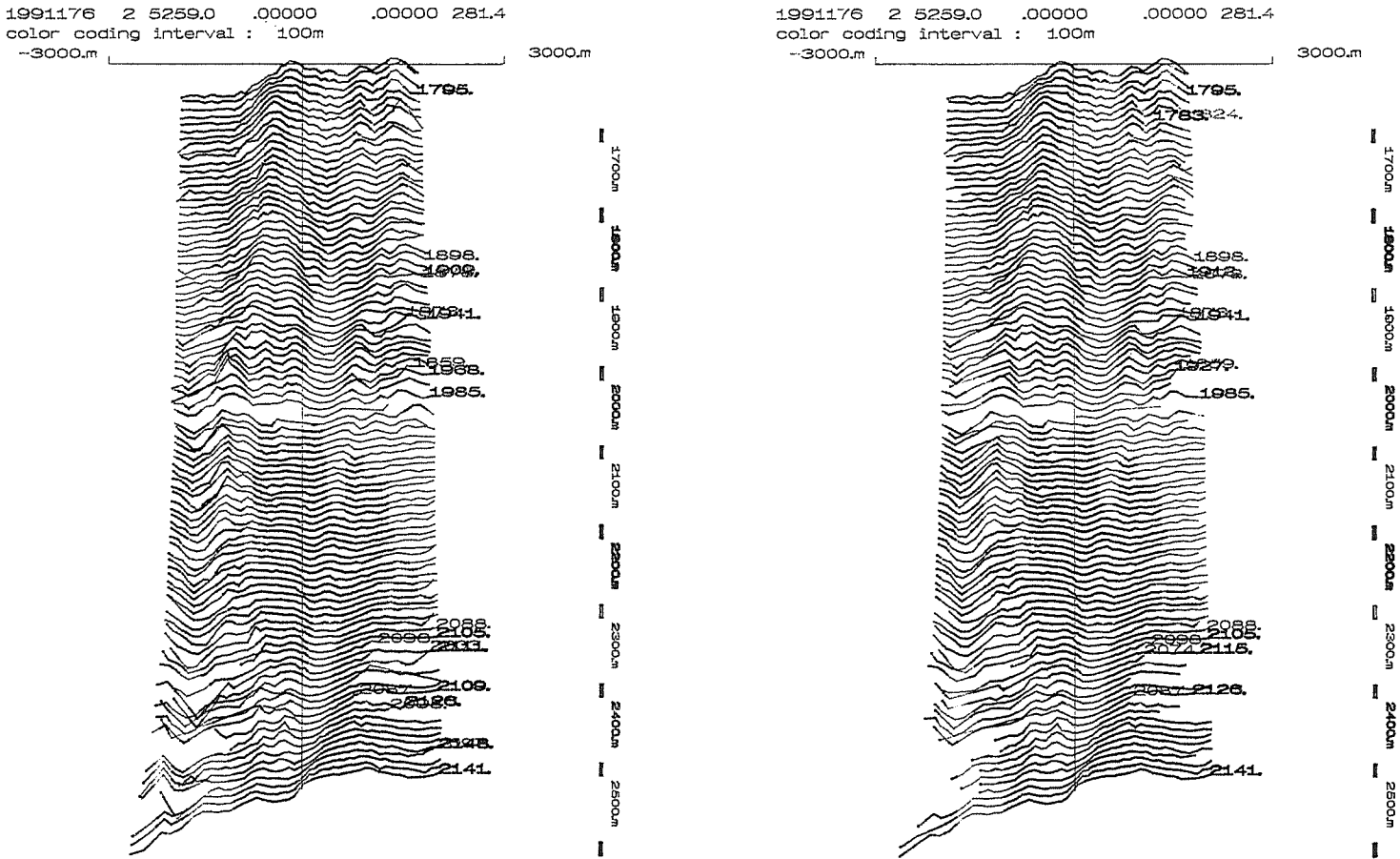


Figure 6. Water-fall display by the Auto-rejection Process of erroneous data. Original data are shown on the left, and processing data on the right. Complex topography data were not rejected.

* To check and remove erroneous data for each beam of 100 shots, repeating the steps above up to 20 cycles or when the erroneous data are few.

3) To check every data of one point for 2 or more percent of abnormality.

This procedure is almost the same as 2). The different points are as follows:

The size of the approximated plane is 4 x 4.

The percent of the judgement is 2%.

4) To check every data of one point for 1 or more percent of abnormality.

This procedure is almost the same as 2) also. The different points are as follows:

The size of the approximated plane is 3 x 3.

The percent of the judgement is 1%.

5) To store the results of the 5th to the 96th shot.

6) To add the 96 shots to remaining the final 4 shots and repeat the steps 1) to 5) above.

Examples of the execution with this program are shown in Figures 3~6. The left side indicates raw data and the right side the processed results. The same information is displayed on the CRT as the same figure. These data explain that the sea area surveyed was in bad condition, the survey operation with the SEA BEAM 2000 was not well accomplished or the sea-bottom had a complex topographic feature. These bad data are suitable to show the performance of the program. As we can see in the figures, only bad data are automatically rejected from the original data; data of sea-knoll and fault, etc. are not rejected. Outputs of the SEA BEAM 2000 for 100 shots require about 18 to 60 seconds to be fully processed by HP400. Data acquired during one segment of a survey operation, which corresponds to about 150 - 500Mb, needs a day for automatic processing.

c) Replacing of the position-fix data to the post-processed data in the unified format

d) Contour processing time-sequentially

This program is to produce a depth contour chart with the swath width along the tracks.

e) Contour processing (A. Asada and A. Nakanishi, 1986)

* Calculate beam position (from center lat., lon., heading, crosstrack distance → to beam lat., lon.)

This is to calculate the latitude and longitude of each beam.

* X, Y Coordinate Transfer (TM, UTM, LAMBELT, MERCATOR & Others)

This program translates the geographic positions of the beam to X-Y coordinates on a chart.

These two processes always allow us to make highly accurate mapping. The heading of a vessel usually differs from the direction on a X-Y chart. The difference becomes greater as the latitude ascends higher. The crosstrack distance of beam is also always different from a distance on a X-Y chart. By these reason, this procedure is very important.

* Meshing (with Z, X, Y dimensions)

Each mesh also has a position information to provide accurate mapping.

* High accurate contouring with Z, X, Y dimensions (not gridding)

This program draws accurate contours based on the Z, X and Y of the meshes so that the contour chart and the sounding chart are in a perfect accordance.

f) Sounding chart processing

g) Application software

Table 1. Comparison between SEA BEAM and SEA BEAM 2000 by the Sea Beam Instruments Inc.

	<u>SEA BEAM</u>	<u>SEA BEAM 2000</u>
DEPTH RANGE (M)	43-11, 000	10-11, 000
FREQUENCY	12. 158 kHz	12 kHz \pm 50 Hz
ACCURACY	0. 25 % of depth	0. 1 % of depth
DOPPLER COMPENSATION	NO	YES
TRANSMIT ARRAY SIZE (M)	2. 8 X 0. 16	4. 6 X 0. 45
PROJECTOR BEAM (DEG)	54 X 2. 67	100 X 2, 4
PULSE LENGTH (MSEC)	7	3 - 20
RECEIVER ARRAY SIZE (M) MOUNTING	2. 9 X 0. 4 (V TO 15 DEG)	5. 25 X 0. 5 (V TO 10 DEG)
RECEIVER BEAM (DEG)		
VERTICAL BEAM	2. 67 X 20	2/4 X 15/30
15-DEG BEAM	2. 67 X 20	2/4 X 15/30
45-DEG BEAM	N / A	2/4 X 15/30
SIDE LOBE LEVEL (DB)	-25	-25
PULSE REP (SECONDS)	1 - 15	1 - 22
NUMBER OF BEAMS	16	61 / 121
BEAM FORMING	HARDWARE	SOFTWARE DIRECTED
COMPUTERS:		
DATA PROCESSOR	DG ECLIPS	DEC VAX 4000
REALTIME-CONTROL	HARDWARE	INTEL 80386
SIGNAL PROCESSING	HARDWARE	TI TMS320C30
ARCHITECTURE	DATA GENERAL	PASSIVE AT BACKPLANE
EQUIPMENT SIZE	2 RACKS	3 RACKS
DISPLAYS:		
CROSS-TRACK PROFILE	YES	YES
BEAM INTENSITY	YES	YES
REAL-TIME CONTOUR	YES	YES
SCROLLING 3-D WATERFALL	NO	YES
NAV-CORRECTED CONTOUR	NO	YES
SIDE-SCAN IMAGE	NO	YES

- * 3-dimensional image processing with color coding by using mesh data (Asada, 1986)
- * Magnitude mapping of sea bottom inclination with color coding by using mesh data
- * Direction mapping of sea bottom inclination with color coding by using mesh data (A. Asada, S. Kato and S. Kasuga, 1989)
- * Intensity or sidescan image processing by using raw data
- * 3-dimensional intensity or sidescan image processing with Color Coding by using raw data

These softwares are available to use a digital color photograph printer, Pictography 2000, instead of the traditional color plotter, such as ink jets, thermal or electrostatic plotters. The pictography 2000 has the capacity of 2048 x 2560 pixels and each pixel contains a 8-bit increments of 0 to 255 for each red, green and blue lights. This equipment prints out relatively small size of A4 but claims to have a most excellent capability in this kind of products in the world.

h) Others

- * RMS error calculation software
- * Roll-bias assessment software
- * Tidal correction software
- * SVP re-calculation software
- * Sounding accuracy assessment software

2. Characteristic of ray correction in SEA BEAM 2000

The details of the SEA BEAM 2000 are described in the paper by W. J. Capell and K. C. Kiesel (1989). Here, we will discuss some advantages of this equipment in correcting and compensating by sounding velocities. Table 1 shows a comparative list of the SEA BEAM and the SEA BEAM 2000.

2—1. Ray curve correction

(1) Refraction correction by mean sound velocity

The SEA BEAM does not provide corrections to the ray curve in terms of a strict sense, because of the narrow swath width. The sound velocity varies according to the depth in the sea water. Thus, sound rays are refracted in water and reach the sea bottom. The SEA BEAM calculates a mean beam refraction angle, determining a mean sound velocity in water for each beam. In other words, the SEA BEAM considers the sound velocity profile in water as one layer with a mean sound velocity.

Some of the other multi-beam sounding equipment apply one value of a mean sound velocity to all the beams and frequently cause a sounding error over 1% at a high beam angle, such as 60°. The results in this case incur much serious problem when the equipment is used for surveys of the sea bottom in complicated features such as in the vicinity of the Japanese archipelago. Each beam will hit separate points at various level of depth and is subject to have different mean sound velocities.

Application of one mean velocity to all beams produces following errors. This method is not used in SEA BEAM, but is used in many systems in the world. Now, a beam at 60° supposedly hits a point at the depth of 1000 m with mean sound velocity 1498.9 under the condition of Table 2 that the depth of vertical beam is measured as 200 m and the mean sound velocity is calculated as 1532.8m/s, which is a quite common assumption in the areas around Japan.

Then, calculated beam angle is

$$\sin\theta / 1532.8 = \sin(60) / 1498.9$$

**NEW BATHYMETRIC SURVEYING AND PROCESSING SYSTEM
BASED ON SEA BEAM 2000**

Table 2. Calculation errors of depths and cross-track distances by mean velocity method, using real CTD profile data.

CALCULATION ERRORS of DEPTHS BY MEAN VELOCITY METHOD

depth (m)	vel. (m/s)	mean V (m/s)	surface ray angle (deg.) & depth (m)							
			0	10	20	30	40	50	60	
.0	1540.3	1540.3	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
50.0	1541.1	1540.7	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0
100.0	1541.9	1541.1	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
200.0	1506.9	1532.8	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.1	200.1
300.0	1494.2	1522.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.1	300.4	300.4
500.0	1490.0	1510.1	500.1	500.1	500.1	500.1	500.1	500.2	500.8	500.8
700.0	1487.7	1504.0	700.1	700.1	700.1	700.1	700.1	700.3	701.1	701.1
1000.0	1486.2	1498.9	1000.1	1000.1	1000.1	1000.1	1000.2	1000.4	1001.3	1001.3
1500.0	1486.1	1494.6	1500.2	1500.2	1500.2	1500.2	1500.2	1500.5	1501.5	1501.5
2000.0	1491.5	1493.2	2000.2	2000.2	2000.2	2000.2	2000.2	2000.5	2001.6	2001.6
2500.0	1498.2	1493.5	2500.2	2500.2	2500.2	2500.2	2500.2	2500.5	2501.6	2501.6
3000.0	1505.8	1494.9	3000.2	3000.2	3000.2	3000.2	3000.2	3000.5	3001.7	3001.7
4000.0	1523.0	1499.8	4000.3	4000.3	4000.3	4000.3	4000.4	4000.9	4002.9	4002.9
5000.0	1540.7	1506.2	5000.7	5000.7	5000.6	5000.7	5000.9	5001.9	5006.4	5006.4
6000.0	1559.4	1513.5	6001.4	6001.3	6001.3	6001.3	6001.8	6004.0	6014.1	6014.1
7000.0	1578.4	1521.4	7002.5	7002.4	7002.4	7002.5	7003.3	7007.6	7028.1	7028.1
8000.0	1597.6	1529.7	8004.1	8004.0	8003.9	8004.1	8005.6	8013.2	8051.2	8051.2
9000.0	1617.0	1538.4	9006.3	9006.2	9006.0	9006.3	9008.8	9021.3	9087.3	9087.3
10000.0	1635.9	1547.2	10009.1	10009.0	10008.8	10009.2	10013.0	10032.4	10141.6	10141.6
11000.0	1658.7	1556.3	11012.7	11012.6	11012.2	11012.8	11018.5	11047.9	11225.2	11225.2

CALCULATION ERRORS of CROSS-TRACK DISTANCES BY MEAN V METHOD

(uppers are true, lowers V MEAN method)

depth (m)	vel. (m/s)	mean V (m/s)	surface ray angle (deg.) & cross-track dist.(m)							
			0	10	20	30	40	50	60	
.0	1540.3	1540.3	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
50.0	1541.1	1540.7	.0	8.8	18.2	28.9	42.0	59.6	86.7	86.7
100.0	1541.9	1541.1	.0	8.8	18.2	28.9	42.0	59.6	86.7	86.7
200.0	1506.9	1532.8	.0	17.6	36.4	57.8	84.0	119.3	173.5	173.5
300.0	1494.2	1522.0	.0	17.6	36.4	57.8	84.0	119.3	173.6	173.6
500.0	1490.0	1510.1	.0	35.2	72.6	115.1	167.2	237.1	343.4	343.4
700.0	1487.7	1504.0	.0	35.1	72.4	114.7	166.4	235.6	339.9	339.9
1000.0	1486.2	1498.9	.0	52.6	108.5	172.0	249.4	352.9	508.8	508.8
1500.0	1486.1	1494.6	.0	52.3	107.7	170.5	246.7	347.6	496.8	496.8
2000.0	1491.5	1493.2	.0	87.2	179.7	284.4	411.7	580.4	830.1	830.1
2500.0	1498.2	1493.5	.0	86.4	178.0	281.2	405.9	569.0	804.8	804.8
3000.0	1505.8	1494.9	.0	121.6	250.6	396.3	573.0	805.8	1147.0	1147.0
4000.0	1523.0	1499.8	.0	120.5	248.0	391.7	564.5	789.2	1110.6	1110.6
5000.0	1540.7	1506.2	.0	173.0	356.4	563.4	813.5	1141.3	1616.6	1616.6
6000.0	1559.4	1513.5	.0	171.5	353.0	557.0	801.8	1118.8	1567.6	1567.6
7000.0	1578.4	1521.4	.0	258.5	532.4	840.8	1212.5	1696.9	2391.8	2391.8
8000.0	1597.6	1529.7	.0	256.4	527.8	832.4	1197.1	1667.4	2327.9	2327.9
9000.0	1617.0	1538.4	.0	343.9	708.1	1117.9	1610.8	2251.3	3164.4	3164.4
10000.0	1635.9	1547.2	.0	341.6	702.9	1108.4	1593.6	2218.2	3092.9	3092.9
11000.0	1658.7	1556.3	.0	429.3	883.8	1395.0	2009.3	2806.0	3937.6	3937.6
			.0	427.1	878.9	1385.9	1992.7	2774.0	3868.4	3868.4
			.0	514.7	1059.8	1672.5	2408.4	3361.9	4713.3	4713.3
			.0	513.0	1055.8	1665.1	2394.9	3335.8	4656.8	4656.8
			.0	686.3	1413.0	2229.9	3210.9	4481.7	6282.0	6282.0
			.0	686.3	1412.9	2229.6	3210.3	4480.5	6279.6	6279.6
			.0	858.6	1767.9	2790.4	4019.1	5612.5	7874.4	7874.4
			.0	861.6	1774.7	2802.8	4041.5	5655.9	7972.1	7972.1
			.0	1031.8	2124.7	3354.5	4833.8	6755.8	9494.6	9494.6
			.0	1039.2	2141.4	3385.2	4889.5	6864.8	9744.0	9744.0
			.0	1205.9	2483.6	3922.5	5655.6	7913.1	11146.2	11146.2
			.0	1219.1	2513.4	3977.2	5755.4	8109.9	11607.2	11607.2
			.0	1381.0	2844.8	4494.6	6485.0	9085.4	12832.1	12832.1
			.0	1401.4	2890.6	4579.1	6639.7	9393.7	13574.2	13574.2
			.0	1557.1	3208.2	5070.9	7322.3	10273.6	14555.5	14555.5
			.0	1586.0	3273.3	5191.1	7543.1	10718.5	15661.0	15661.0
			.0	1734.2	3574.0	5651.7	8167.8	11478.3	16319.1	16319.1
			.0	1773.0	3661.3	5813.2	8466.1	12086.5	17885.7	17885.7
			.0	1912.4	3942.3	6237.1	9021.9	12700.7	18126.6	18126.6
			.0	1962.6	4055.3	6446.6	9410.8	13504.4	20289.1	20289.1

Table 3. Calculation errors of depths and cross-track distances by mean velocity method, using assumption profile data by (V = 1470+ D * 0.017).

CALCULATION ERRORS of DEPTHS BY MEAN VELOCITY METHOD

depth (m)	vel. (m/s)	mean V (m/s)	surface ray angle (deg.) & depth (m)							
			0	10	20	30	40	50	60	
.0	1470.0	1470.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
1000.0	1487.0	1478.5	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
2000.0	1504.0	1487.0	2000.1	2000.1	2000.1	2000.1	2000.1	2000.1	2000.2	2001.0
3000.0	1521.0	1495.5	3000.3	3000.3	3000.2	3000.3	3000.3	3000.4	3001.0	3004.5
4000.0	1538.0	1504.0	4000.6	4000.6	4000.6	4000.6	4001.0	4002.6	4012.4	4012.4
5000.0	1555.0	1512.5	5001.3	5001.2	5001.2	5001.3	5001.9	5005.3	5027.6	5027.6
6000.0	1572.0	1521.0	6002.2	6002.2	6002.1	6002.2	6003.4	6009.8	6054.0	6054.0
7000.0	1589.0	1529.5	7003.5	7003.4	7003.3	7003.5	7005.5	7016.3	7097.9	7097.9
8000.0	1606.0	1538.0	8005.1	8005.1	8004.9	8005.3	8008.3	8025.7	8168.6	8168.6
9000.0	1623.0	1546.5	9007.3	9007.1	9007.0	9007.5	9012.0	9038.5	9281.2	9281.2
10000.0	1640.0	1555.0	10009.9	10009.7	10009.5	10010.2	10016.6	10055.8	10462.3	10462.3
11000.0	1657.0	1563.5	11013.0	11012.8	11012.5	11013.5	11022.4	11078.5	11763.3	11763.3

CALCULATION ERRORS of CROSS-TRACK DISTANCES BY MEAN V METHOD
(uppers are true, lowers V MEAN method)

depth (m)	vel. (m/s)	mean V (m/s)	surface ray angle (deg.) & cross-track dist. (m)							
			0	10	20	30	40	50	60	
.0	1470.0	1470.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
1000.0	1487.0	1478.5	.0	177.4	366.4	581.8	847.4	1208.6	1773.2	1773.2
2000.0	1504.0	1487.0	.0	177.4	366.4	581.8	847.4	1208.6	1773.2	1773.2
3000.0	1521.0	1495.5	.0	355.8	735.1	1168.1	1703.3	2434.6	3589.8	3589.8
4000.0	1538.0	1504.0	.0	356.9	737.5	1172.6	1711.8	2452.2	3635.1	3635.1
5000.0	1555.0	1512.5	.0	535.3	1106.2	1758.9	2567.6	3678.3	5452.4	5452.4
6000.0	1572.0	1521.0	.0	538.5	1113.5	1772.6	2593.4	3732.4	5596.1	5596.1
7000.0	1589.0	1529.5	.0	715.8	1479.8	2354.3	3440.6	4940.3	7363.7	7363.7
8000.0	1606.0	1538.0	.0	722.3	1494.4	2381.8	3492.9	5051.1	7669.1	7669.1
9000.0	1623.0	1546.5	.0	897.4	1855.8	2954.2	4322.4	6221.0	9326.9	9326.9
10000.0	1640.0	1555.0	.0	908.2	1880.2	3000.5	4410.5	6410.4	9870.2	9870.2
11000.0	1657.0	1563.5	.0	1080.1	2234.1	3558.8	5213.0	7521.0	11345.5	11345.5
			.0	1096.3	2271.0	3628.6	5346.8	7812.6	12220.6	12220.6
			.0	1263.8	2614.9	4167.9	6112.6	8840.8	13423.4	13423.4
			.0	1286.5	2666.8	4266.3	6302.2	9260.2	14748.6	14748.6
			.0	1448.5	2998.1	4781.8	7021.4	10181.0	15565.0	15565.0
			.0	1479.0	3067.6	4913.8	7277.3	10756.2	17493.7	17493.7
			.0	1634.3	3383.8	5400.3	7939.3	11542.3	17775.3	17775.3
			.0	1673.6	3473.5	5571.2	8272.5	12303.7	20514.6	20514.6
			.0	1821.2	3771.9	6023.5	8866.6	12925.2	20060.1	20060.1
			.0	1870.5	3884.5	6238.5	9288.6	13906.3	23904.8	23904.8
			.0	2009.1	4162.4	6651.4	9803.4	14330.5	22426.2	22426.2
			.0	2069.6	4300.7	6916.1	10325.9	15568.5	27832.5	27832.5

where, $\theta = 62.3^\circ$

Therefore, an error of calculated depth is

$$\text{Err.} = 1000 / \cos(60) / 1498.9 \times 1532.8 \times \cos(\theta) - 1000 = -50.1\text{m} (5.0\%)$$

This error may become much greater in wider beam angle. When the vertical depth is 500m and the depth at 60° beam is 1000m, the sounding error goes 1.5%. When the vertical depth is 700m, the sounding error goes 0.7%.

(2)SVP Correction

The SEA BEAM 2000 provides true ray curve calculation by sound velocity profile correction. For a wide swath sounding equipment, we must precisely know the beam angle, since a slight off-set of the angle may cause a large sounding error.

Tables 2 and 3 show the results of a simulation to compute the errors in refraction corrections derived by mean sound velocity method. The sound velocity profile of Table 2 is derived from samples of actual CTD measurements.

The profile of Table 3 is from a modeled profile which assumes that the sound velocity varies consistently corresponding to the depth. As the actual sea has various sound velocity profiles depending on the seasons and locations, it is impossible to explain all the cases by applying only this example. The interesting point is the mean sound velocity procedure creating an error of around 0.1% even with a direct beam perpendicular to the sea-bottom. It is clear that the error of the mean sound velocity procedure increases as the depth and the beam angle become greater. A beam sounding with this procedure with a beam angle of 60° produces the higher errors at the depth over 6000m, which are not acceptable levels.

The mean sound velocity procedure is a simplified processing method, devised in the days the computer systems were at a lower ability of processing, which had been employed in traditional SEA BEAMS and many of multi-beam sounding systems. The error of crosstrack distance is also important. For the deep sea, 100m of crosstrack error may be a problem.

2—2. Surface-layer Refraction Correction

The traditional multi beam system introduces errors in ship's roll correction of the beam formed angle. This error becomes greater as the beam angle increases. SEA BEAM 2000, therefore, establishes a real-time beam forming based on the sound velocity at the surface of sea water, continuously observing the velocity. In this way, it always builds up highly accurate beam forming.

Let's consider a case where there is a difference in the sound velocity between a designed one at the stage of beam-forming and an actually observed one at the sea surface. Assuming the beam angle of 45° , the surface sound velocity of 1530m/s, the designed beam-forming sound velocity of 1500m/s and the rolling angle of 5° , we will get:

(1)the beam angle at the surface sound velocity of 1500m/s;

$$45^\circ + 5^\circ$$

(2)the true beam angle at the velocity of 1530m/s;

$$\sin^{-1}(\sin(50) \times 1530/1500) = 51.39^\circ$$

(3)the calculated beam angle by the traditional corrections;

$$\sin^{-1}(\sin(45) \times 1530/1500) + 5 = 51.16^\circ$$

Thus, a roll angle of 5° produces a beam error of 0.23° . A roll angle of 10° will result in a 0.52° error

of the beam angle. The error in the beam angle causes an error in the sounded depth. For example, when a beam angle of 45° will have this angle error at depth 4000m, the errors of depth will be as follows:

for the roll angle of 5° at depth 4000m;

$$\text{Err.} = 4000 \times \cos(45.23)/\cos(45) - 4000 = -16.1 (0.40\%)$$

for the roll angle of 10° at depth 4000m;

$$\text{Err.} = 4000 \times \cos(45.52)/\cos(45) - 4000 = -36.5 (0.91\%)$$

If there is no rolling, this type of the error never occurs. No correction of beam forming by rolling will cause the error of 1.39° in the beam angle at the roll angle of 5°. Then, in this example:

for the roll angle of 5°;

$$\text{Err.} = 4000 \times \cos(46.39)/\cos(45) - 4000 = -98.2 (2.46\%).$$

3. Survey Results of SEA BEAM 2000

The Hydrographic Department, Japan Maritime Safety Agency installed a SEA BEAM 2000 on the newly built survey vessel Meiyō in October 1990. The practical survey using the SEA BEAM 2000 system was carried out in the sea areas off Boso-peninsula in March 1991 as the beginning, off the coastline of Miyagi- and Fukushima-pref. in April 1991 and around the seamount Mikura in August 1991.

At the survey off Boso-peninsula, the SEA BEAM 2000 could get well the data for the depth over 200 m, but could not get the data for the depth of 200m or less. As the sea-bottom at the depth less than 200m forms rather flat topography, data to be processed is replaced by outputs of a 200KHz echo sounder.

In the areas off the coastline of Miyagi- and Fukushima-pref., the SVP corrections were not perfectly made in the field at sea, since the variation of the sound velocity was so great. This allowed us to acquire survey data in shallow areas but the imperfection in the SVP corrections made the detected value by side beams less deep. But, XBT observations were taken with a very thickened manner, we are now making the SVP correction in a post-correction mode with these data. We would say that the SVP re-calculation of depth data is more difficult than the re-calculation by the mean velocity method.

The survey conducted around the seamount Mikura provided very useful data.

Figure 7 shows a contour chart which is drawn up through post-processing. As the processing system was closely established, this chart was made up only in 2 days. For this survey operation, almost no sounding error were detected by the processing of rejecting erroneous data.

Figure 8 shows a 3-dimensional image view map illustrated by using the Pictography which is a color picture developing device in a digital form having a capacity of 2048 x 2560 pixels. The equipment was developed in Japan. Each pixel functions as an excellent color printer, covering 256 increments of each green, red and blue lights. The high resolution of the characteristics has made meshed and irregularity in colors, which have been obscured in a traditional access, appear clearly on the printed. Therefore, we improved the software to divide the meshes in a smaller size. This figure clearly indicates the details of the sea-bottom.

In February 1992, the SEA BEAM 2000 was improved by using interferometric technique, and an evaluation test survey was conducted. By the result, the present SEA BEAM 2000 has a capability of

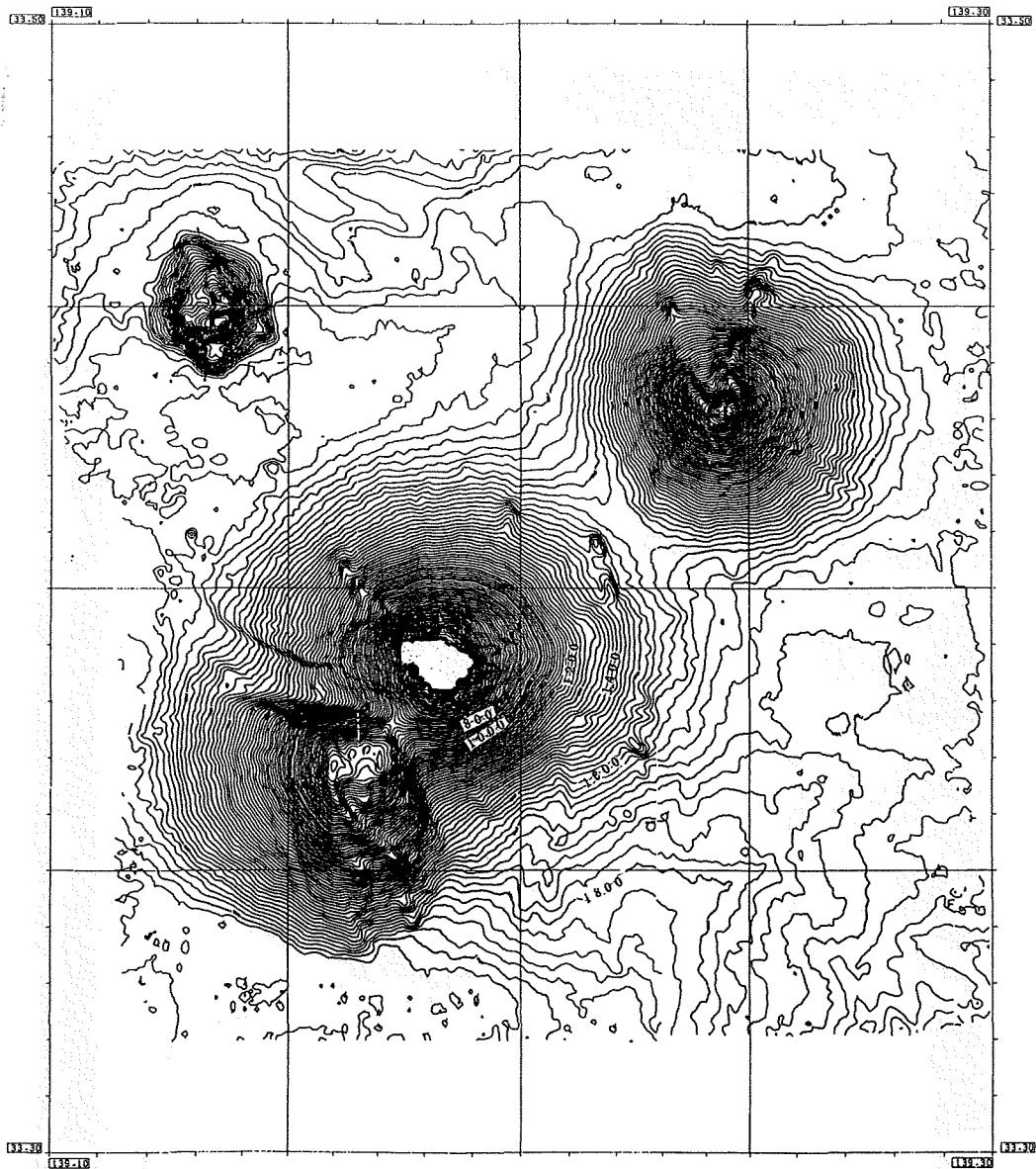


Figure 7 Contour chart of Mikura sea-mount and it's vicinity by SEA-BEAM 2000 survey in August 1991. Contour interval is 20m.

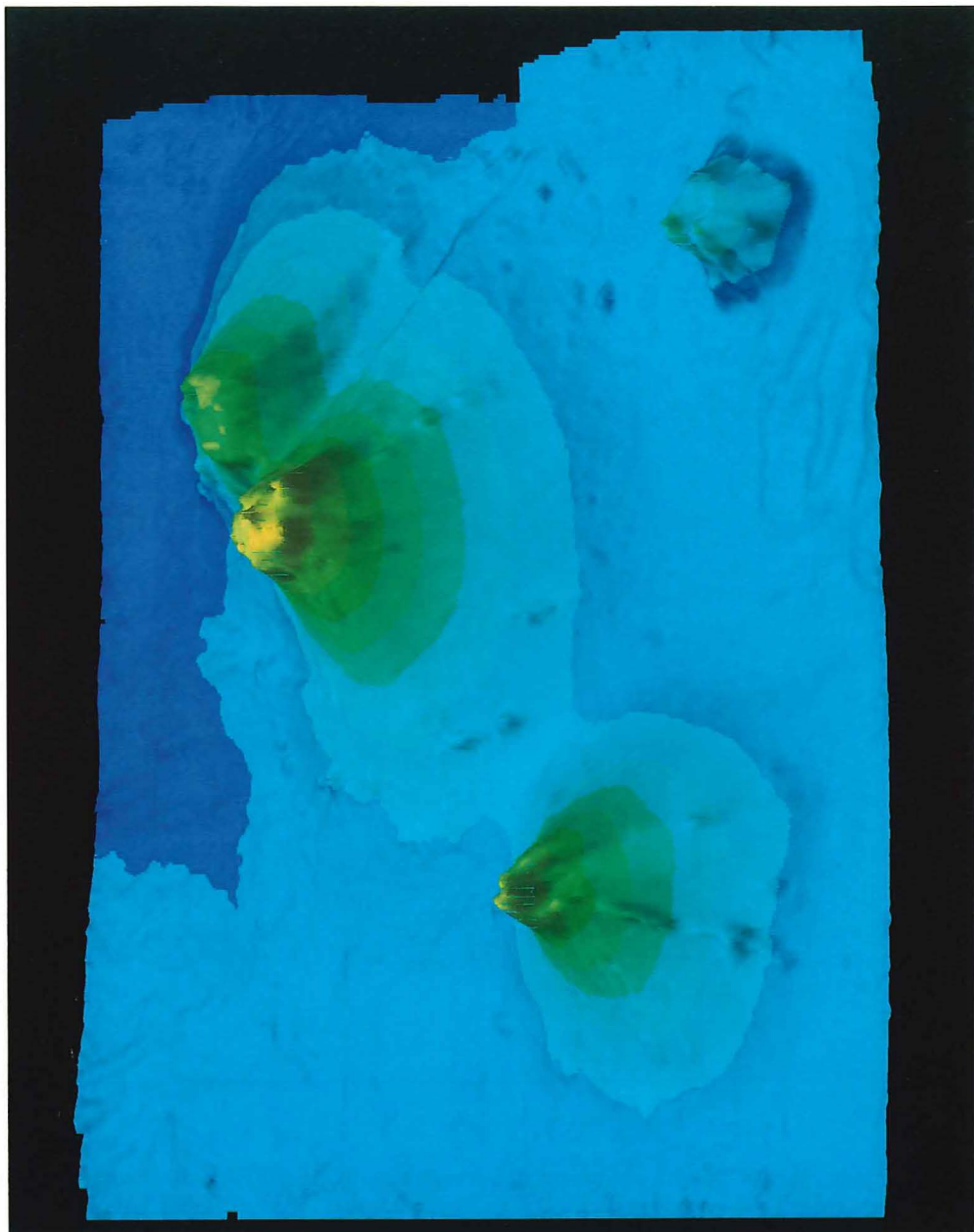


Figure 8 3-dimensional image view from north of Mikura sea-mount and it's vicinity.

of the 120 degrees swath improvement in February 1992.

This chart with 100% coverage survey of 120 degrees swath width indicates that the contours of neighboring sounding lines are in good accordance. In the area up to 5000m deep, SEA BEAM 2000 has good capability of 120 degrees swath survey. In 9000m deep area, about 80% of 90 degrees swath mode proved successful. By adapting the interferometric technique, the resolving performance of bottom reflection wave and the multi beam depth measurement are improved remarkably. Especially as for flat bottom, the phenomenon such as Tunnel Effect (C. de Moustier and M. C. Kleinrock, 1986) will not occur. The white areas of contour lines in the swath were placed the steep slope bottoms, and a few beams in these areas had same reception time from sea bottoms, or the distance in a beam width of 2 degrees was very large. These white areas show a good performance on the multi beam bathymetric survey. The real time contour chart is highly valuable as it indicates the areas of poorly sounded and of requiring additional surveying to the survey program planners. It should also be a great help in dredging as it precisely provides actual features of the sea-bottom. For the vessel Meiyo, the integrated navigation system also can produce the same chart through post-processing.

Figure 10 shows real-time side-scan records with 16 grey levels 1024 pixels per swath in the same area. By a comparison with another side-scan record, this record shows detail topography. Figure 11 shows a post processing intensity map in the same area. SEA BEAM 2000 records additionally intensity data of 121 beams. We made grazing angle and position correctons of the beam intensity data and prepared this map by a Pictography with 256 gray levels. This intensity map is as good as the real-time side-scan record, because the beam intensity has 100 dB dynamic range and position and ship's heading informa-

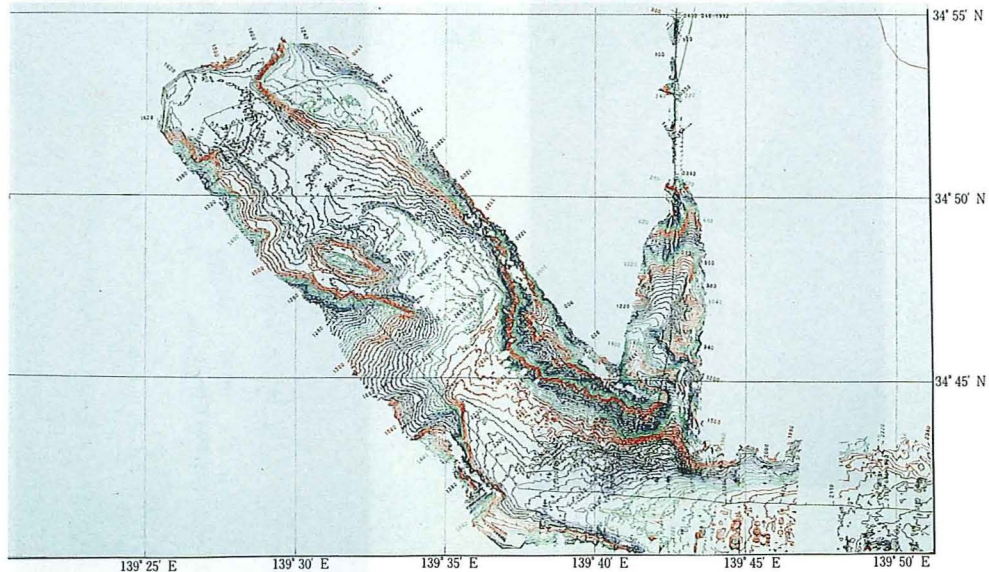


Figure 9 Real-time contour chart of eastern area off Osima Island by SEA BEAM 2000 sea test in February 1992. Contour interval is 20m.

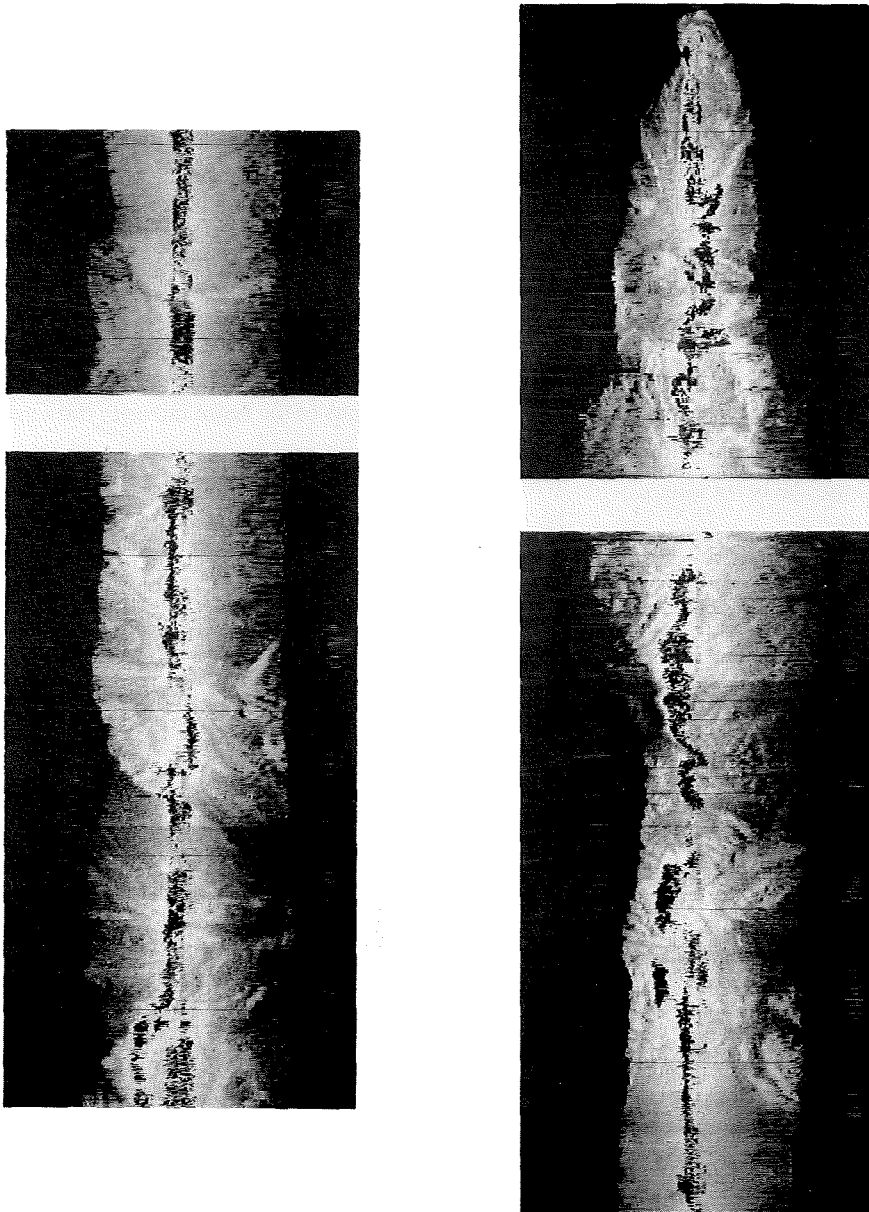


Figure 10 Real-time side-scan records of eastern area off Osima Island by SEA BEAM 2000 sea test in February 1992.

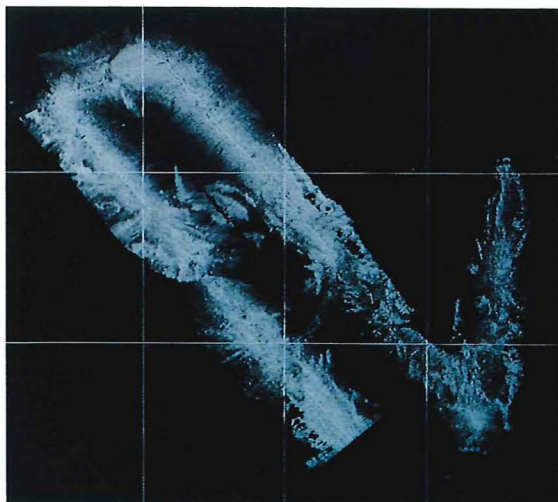


Figure 11 Beam intensity map of eastern area off Osima Island.

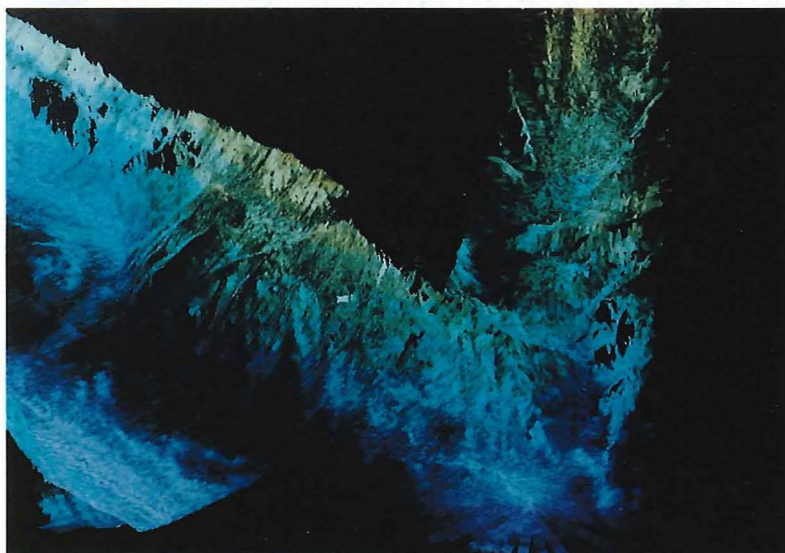


Figure 12 3-dimensional beam intensity map of eastern area off Osima Island.
View direction is from south. Color coding interval 200m.

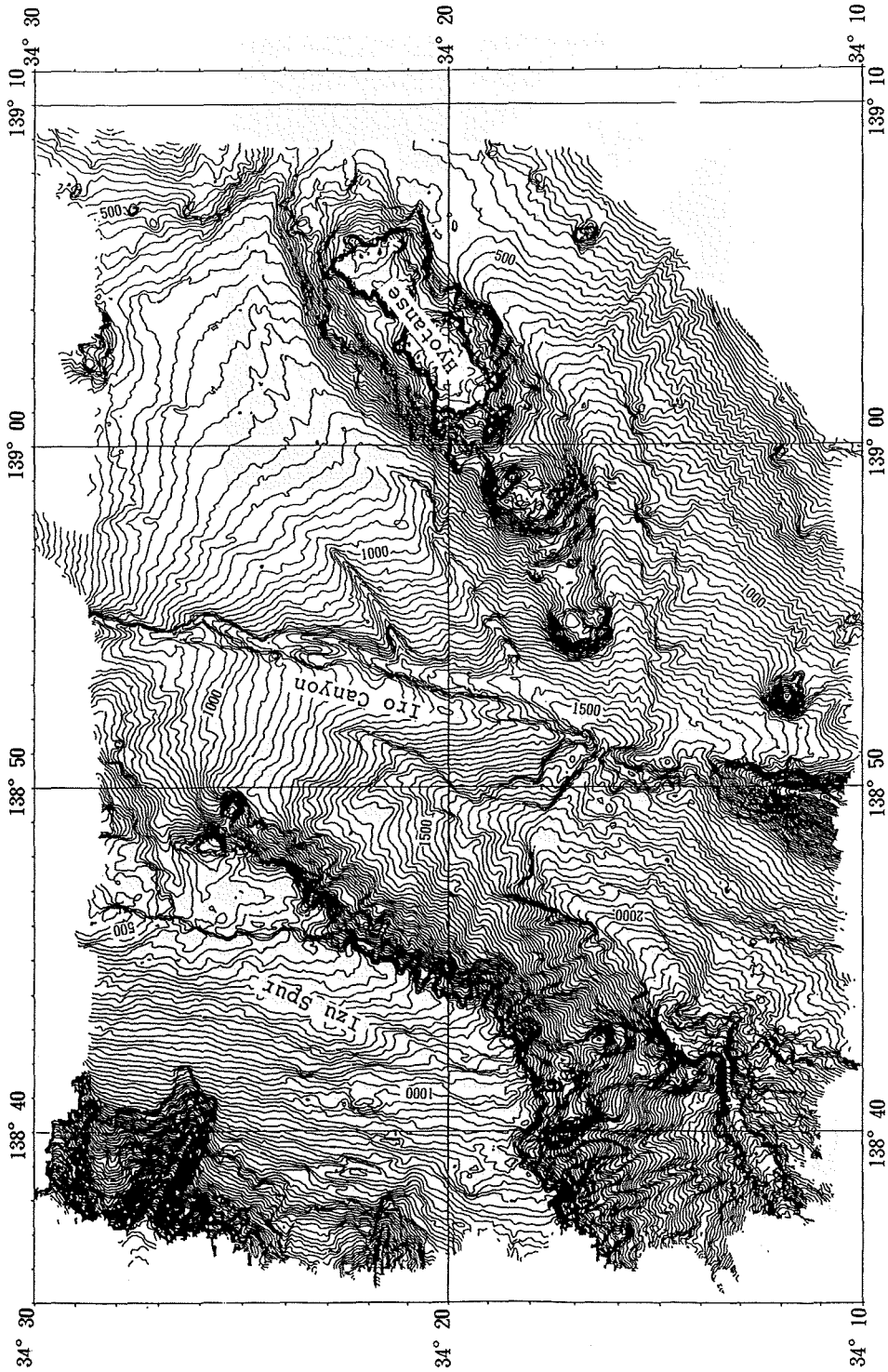


Figure 13 Contour chart of southern area off Izu Peninsula by SEA BEAM 2000 survey in March 1992
Contour interval 20m.

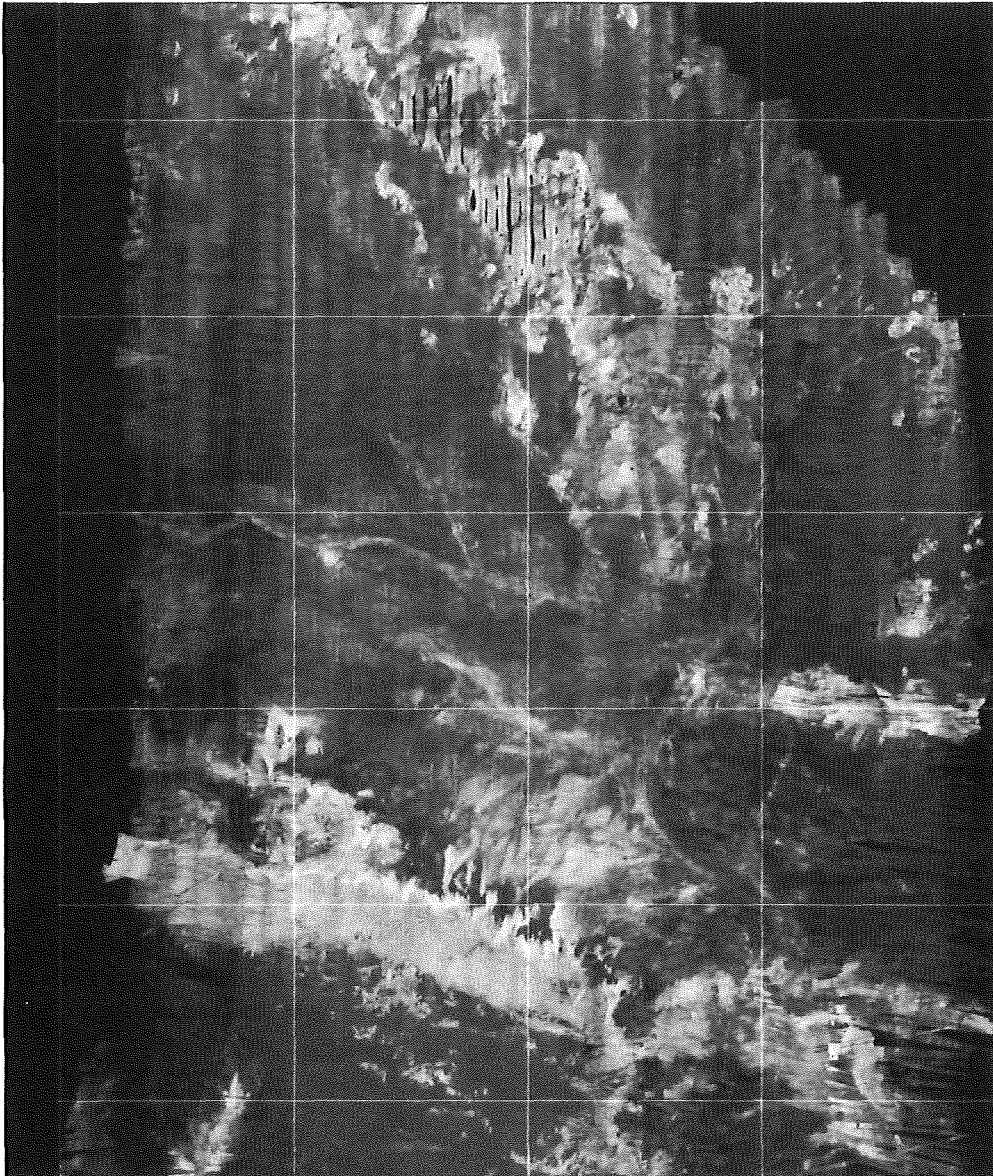


Figure 14 Beam intensity map of southern area off Izu Peninsula .

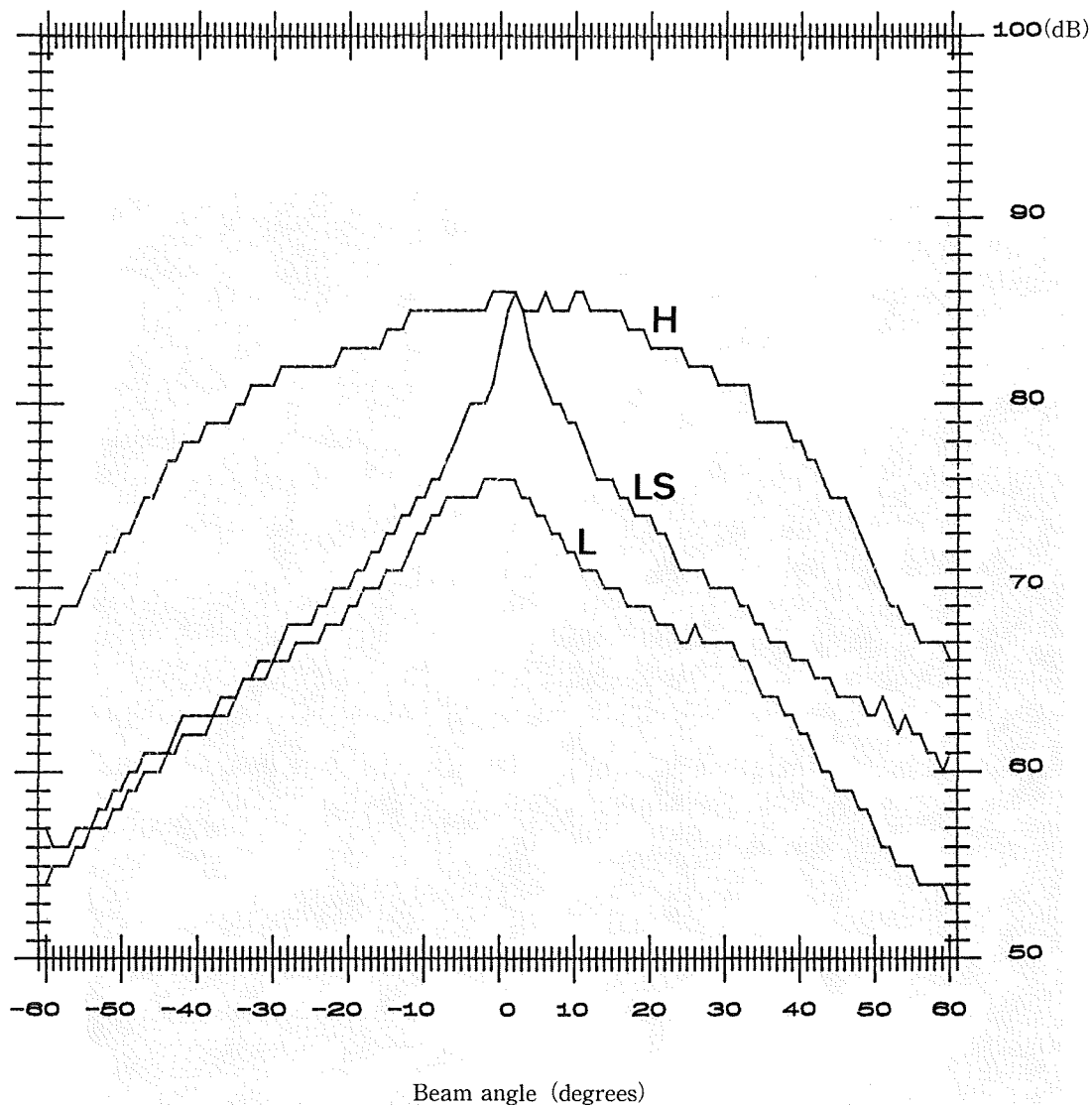


Figure 15 Three patterns of beam intensity measured by survey of southern area off Izu Peninsula. Figure 14 was made by correction using these patterns. H : supposed high intensity bottom, L : supposed low intensity bottom, LS : supposed low intensity and smoothed bottom.

this map by a Pictography with 256 gray levels. This intensity map is as good as the real-time side-scan record, because the beam intensity has 100 dB dynamic range and position and ship's heading information. Furthermore, we tried to make a 3-dimensional intensity map by using depth data as shown on Figure 12. This map indicates very detailed topography of the sea floor, such as complex rock wall and channels. The results of upgrading the SEA BEAM 2000 on the Meiyō seems successful.

A practical survey using the new 120 degrees swath system of the SEA BEAM 2000 was conducted in March 1992. The survey area is located in the south off Izu Peninsula. Figure 13 shows the processed bathymetric chart. Figure 14 shows a post processing intensity map of the same area. Bright area which is the strong reflection area is supposed to be the rock outcrop or rough sea floor. Dark color area which is the weak reflection area is supposed to be the mud and fine sediment covering sea floor. The intensity corrections of grazing angle, sea floor slope and beam directivity were made by using three patterns of real intensity data in Figure 15. This intensity map presents the evident lineament, fault, with 3 to 5 meter displacement at depth 500 meters deep which is not able to be extracted from the bathymetric chart. It is possible that the fault is an earthquake fault which appeared at the Izuhanto-oki Earthquake.

We tried a simple estimation of data quality by analyzing the SEA BEAM 2000 data of the survey off Izu Peninsula. The data was processed by the automatic rejection program of erroneous data. The map area was divided into 7 sections, and the data quality was estimated for each section, because the total number of data was too much about 500Mb.

- a) At first, the data was distributed into the mesh system of 150 x 150 meters dimension.
- b) Because the ocean bottom topography is very complex, only data of flat bottom meshes were processed.

So there are many kinds of data between 100 and 200 data, such as of different beam angles and 100 to 3000 meters depth in a mesh, because the 200% coverage survey of reciprocal and cross tracks was conducted.

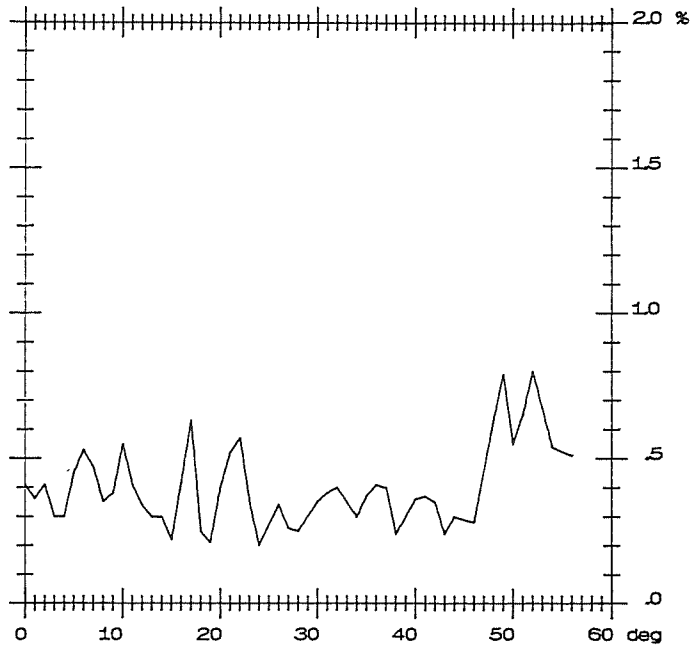
- c) An approximate plane equation of each mesh was calculated by using all data in the mesh, and the difference from the equation was estimated as an error. The error was expressed by the percentage of each data against the equation.
- d) The standard deviation of the difference error at each beam angle was calculated by using all data of each section.
- e) Seven figures of the standard deviations were made (Figure 16).

The data quality of first section seems to be somewhat worse like as 0.4 to 0.8% erroneous, but it is due to including erroneous data under rough sea condition. Other results show that the standard deviations of error are 0.2 to 0.5%. The results include the scattering error, the effects of different beam angles and positioning by reciprocal and cross track survey. The automatic rejection program of erroneous data is very useful in order to extract a practical performance of multi beam data. And the practical accuracy of SEA BEAM 2000 is good.

References

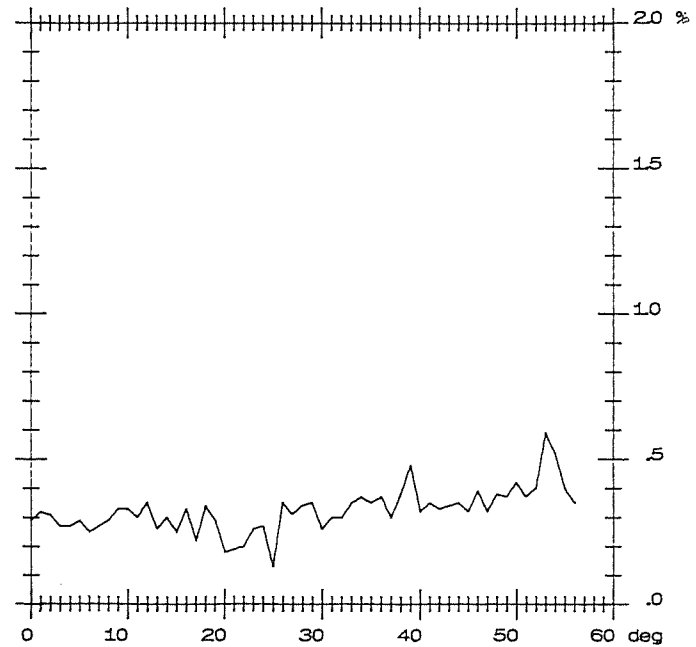
Asada A. : 3-D image processing of Sea Beam Bathymetric data as applied from the Sagami Trough to the Izu-Ogasawara Trench. Rep. Hydrographic Dep., 21, 113-133 (1986).

1 / 7 Standard deviation of error - beam angle



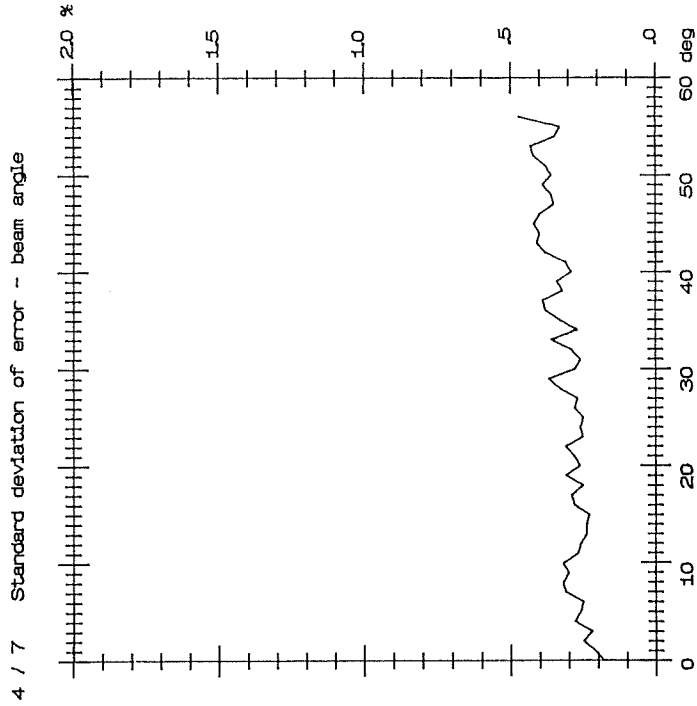
(1) Section of longitude 138°35'—138°40' in figure 13.

2 / 7 Standard deviation of error - beam angle

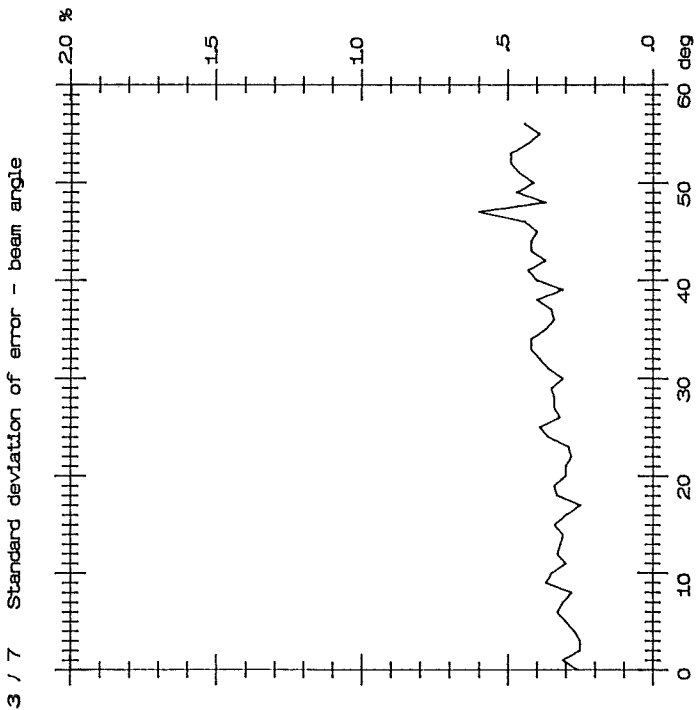


(2) Section of longitude 138°40'—138°45' in figure 13.

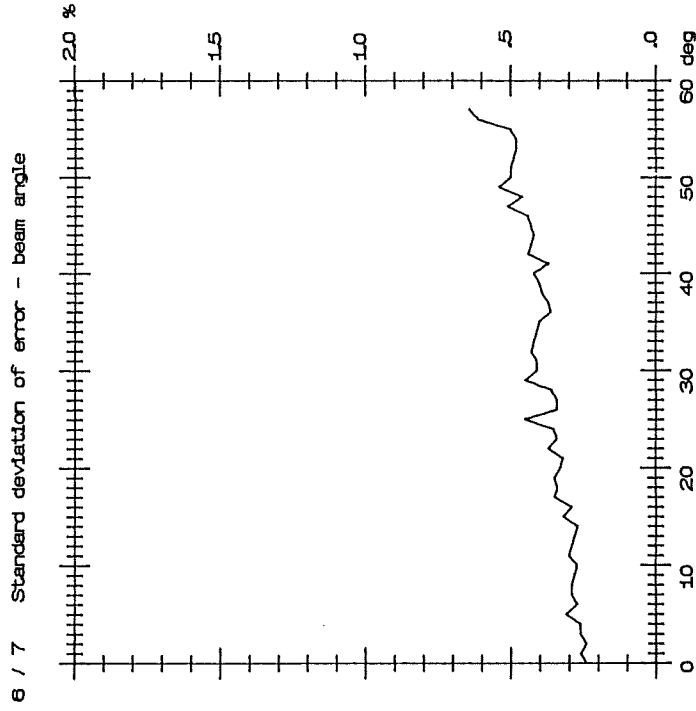
Figure 16 Quality of SEA BEAM 2000 bathymetric data. Standard deviation at each beam angle was calculated from differences between each datum and an approximate plane equation of mesh.



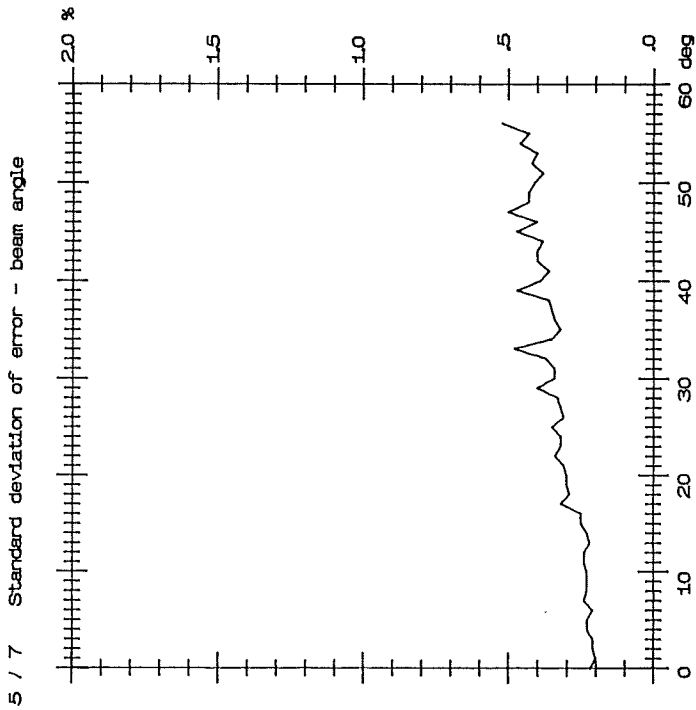
(4) Section of longitude 138°50'—138°55' in figure 13.



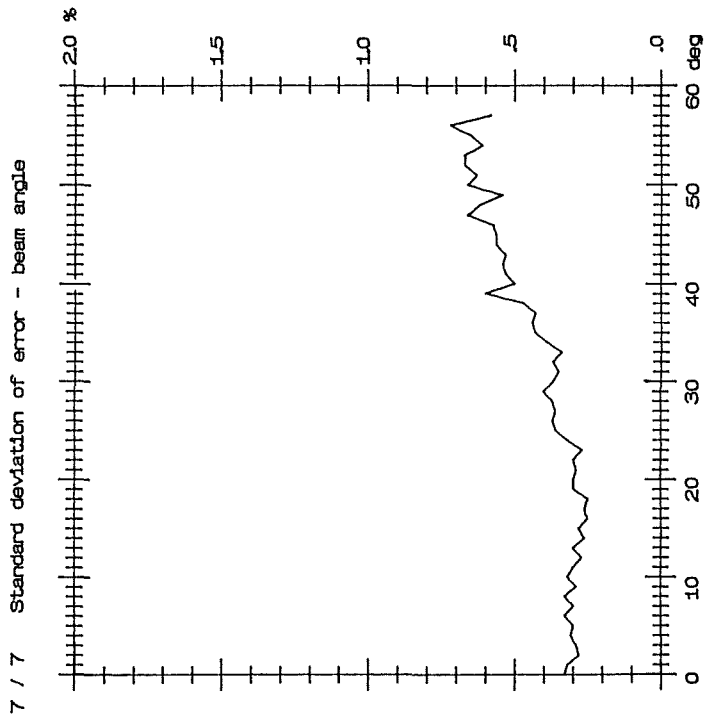
(3) Section of longitude 138°45'—138°50' in figure 13.



(6) Section of longitude 139°00'—139°05' in figure 13.



(5) Section of longitude 138°55'—139°00' in figure 13.



(7) Section of longitude 139°05'—139°10' in figure 13.

- Asada A. and A. Nakanishi : Contour processing of Sea Beam Bathymetric Data. Rep. Hydrographic Dep. 21, 89-112 (1986).
- Asada A. : Contour Processing and 3-D Image Processing of Sea Beam Bathymetric Data. International Hydrographic Review, Monaco, LXV(1), 65-80 (1988).
- Asada A., S. Kato and S. Kasuga (1986) : Tectonic Landform and Geological Structure Survey in the Twyama Trough. Rep. Hydrographic Dep., 25, 93-122 (1986).
- Asada A. : Sea Beam 2000 Bathymetric surveying with interferometry. Sea Technology, 33, 6, 10-15 (1992).
- Christian de Moustier and Martin C. Kleinrock (1989) : Bathymetric Artifacts in Sea Beam Data; How to Recognize Them and What Causes Them. Journal of Geophysical Research, 91, B3, 3407-3424 (1986).
- Capell, W. J. and K. C. Kiesel : An Extend Capability Multibeam Bathymetric Mapping Ssystem, Marine Technology Society Conference (1989).

相模湾西部の海底微地形†

渡辺 一樹*

SUBMARINE MICRO-TOPOGRAPHY IN THE WESTERN PART OF SAGAMI BAY†

Kazuki Watanabe*

Abstract

Hydrographic Department performed the detailed topographic survey with a side-scan sonar and the geological observation of sea bottom with a ROV (Remotely Operated Vehicle) in the western part of Sagami Bay.

At the foot of Oiso Spur, there is the seaward extension of Kozu-Matsuda Fault Line. In Sagami Trough, there are many traces of the debris flow or the turbidity current. A large slumping has happened and that crown cracks and head scarps was observed off Manazuru Misaki. Age determination by nannoplankton fossils of sedimentary rocks from cliffs continued at the north-side slope of Manazuru Knoll indicated 0.5~1.3Ma. At the south-side of Manazuru Knoll, there are crown cracks and head scarps of slumps and many traces of the turbidity current. Manazuru Knoll is surrounded by some Faults and has been upheaved as yet.

1. はじめに

相模湾西部はフィリピン海プレートがユーラシアプレートの下に沈み込むプレートの境界線であり、このプレート境界には小田原市沖から日本海溝へと連なる相模舟状海盆（相模トラフ）が存在し、この相模舟状海盆から直行する方向に伸びる大磯海底谷、平塚海底谷、片瀬海底谷、熱海海底谷等の谷地形が存在する。これらの海底谷を挟んでテーブル状の海丘群が並んでいて、その海丘の周辺部はかなりの急斜面である（勾配20~50%）。特に滴状に伸びる相模小丘（新称：大河内、1990）と、まさに「へ」の字の形をした真鶴海丘は特異な地形である。水路部では1980年から相模湾の海底地形調査を行い、1983年にそれまでの成果をまとめて「相模湾海底地形図」「相模湾海底地質構造図」（縮尺1/100,000）を作成し、その中に多くの伏在断層を指摘した（第1図）。

大河内（1990）は水路部（1983）、東京大学海洋研究所（1989）、地質調査所（1976）が1989年までに相模湾において行った音波探査記録を再度解析し、活構造の分布を把握した上で、相模湾周辺のテクトニクスについて考察した。この中で①相模湾周辺の第四紀テクトニクスを論じる際、相模湾断層-国府津・松田断層系だけが力学境界である必要はない、②真鶴海丘南縁にも力学境界にたる活動度の大きな北傾斜の逆断層が

† Received 30th November 1992

* 沿岸調査課 Coastal Surveys and Cartography Div.

存在する等の注目に値する指摘が為されている。

一方、石橋(1988a,b)は本地域の過去の大地震の震源域から、相模湾西部から箱根東麓の地下に「西相模湾断裂」の存在を指摘し、今世紀末から来世紀初めにマグニチュード7級の大地震が発生する可能性が高いとしている。このようなプレート内部で生じる地震に関しては、いまだ十分な予知体制が確立しているとは言えず、予知に対する基礎研究の必要性が指摘されている。水路部は昭和62年度から、科学技術庁の科学技術振興調整費「マグニチュード7級の inland 地震の予知に関する研究」の一環として相模湾西部の調査を行った。その第I期にはナローマルチビーム測深機(ハイドロチャートII)による精密海底地形調査, サイドスキャンソナーによる海底微地形調査及びそのデータの計算機処理, ROVによる海底露頭の目視観察を行った(菊池ほか1990, 楠ほか1991)。第II期では大磯海脚西部, 真鶴岬東方沖, 真鶴海丘において深海用サイドスキャンソナーによる海底微地形調査と, 大磯海脚西部, 真鶴岬東方沖においてROVによる海底露頭観察を行った。(第2図)。

本研究では, サイドスキャンソナーより得られた海底微地形と, ROVによる露頭観察とその堆積年代を解析し, まず本区域の現在の堆積作用を解釈した上で, 活構造(或いはそれを反映した)と思われる海底微地形を詳解したい。

2. 深海用サイドスキャンソナーによる海底微地形調査

サイドスキャンソナーの調査は,
①大磯海脚西部(国府津・松田断層の海域延長部), ②真鶴岬東方沖(西相模湾断裂があると予測される海域), ③真鶴海丘(西相模湾断裂と相模湾断層の中間に位置し特徴的な地形をもつ)に調査区域を設定し, 測線間隔400mで実施した。曳航ケーブルは3000mのものを使用し, 船位の測定にはトリスポンダーを用いた。大磯海脚西部の北側3分の1は陸に近くかつ海底地形が急斜面であるため, 南北方向にはサイドスキャンソナーを曳航できず, 東西方向に曳航した。それでも, 急傾斜な海底地形に対しワイヤーの巻き上げ速度が追いつかず, 曳航体が海底に接触することもあった。大事にはいかなかったが, ワイヤーの長さや船速により曳航体の深度を調節する作業は, かなりの熟練が必要である。

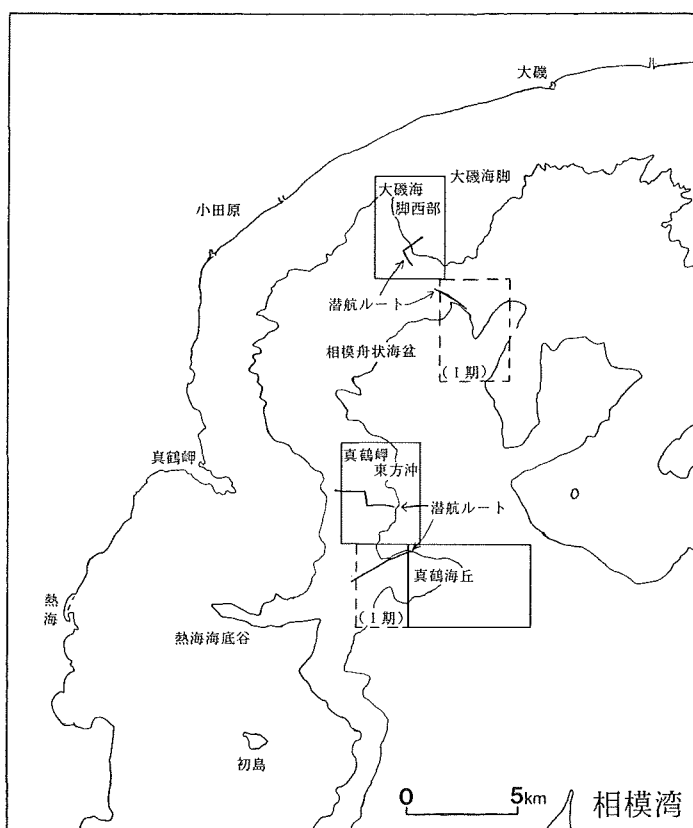


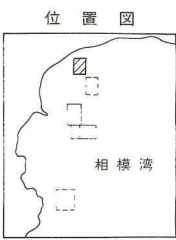
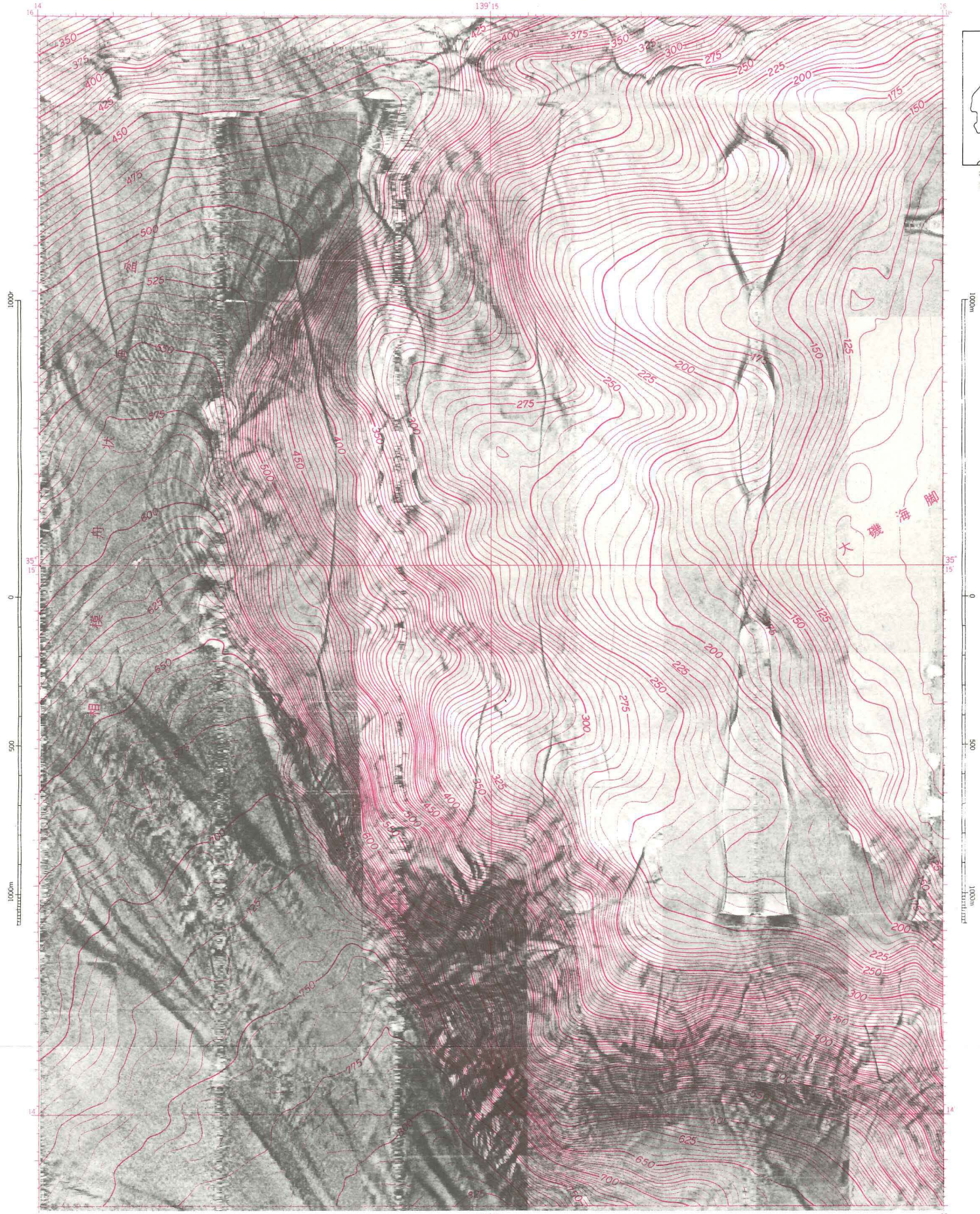
Figure 2. Index map of the areas surveyed with the side-scan sonar and the ROV in the west Sagami Bay.

相模湾西部海底地形図

1 : 10,000 横メルカトル図法(座標原点35° 10' N, 139° 14' E)

大磯海脚西部

昭和63年日本海上保安庁水路部の測量



破線は昭和63年度調査
 実線は平成2年度調査

注意

本図は新海軍に作成されたものでない。新海軍に作成された
 新海軍に作成された海図を引用するもの。

昭和63年5月 海上保安庁水路部測量

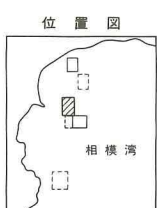
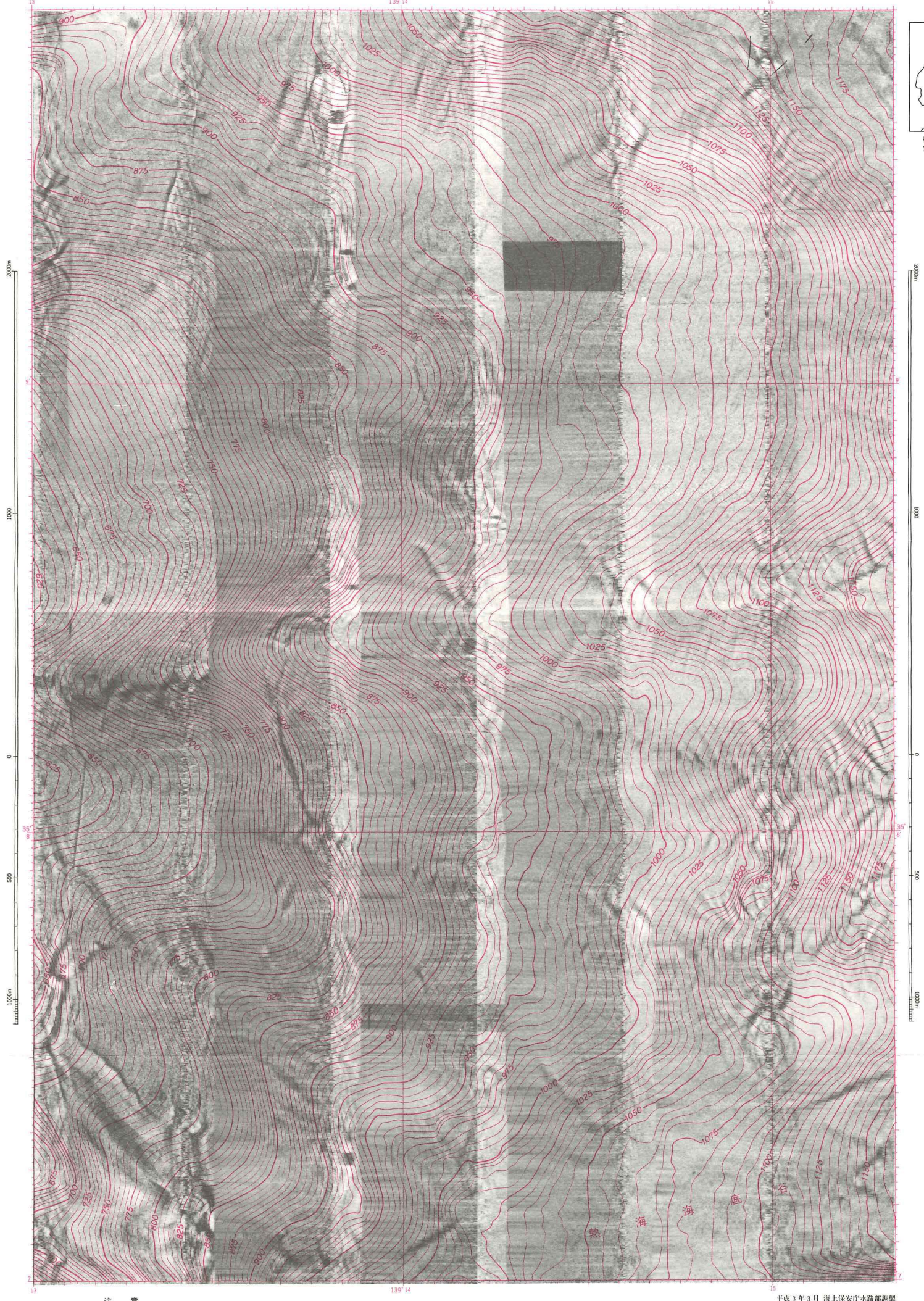
Figure 3. Side-scan sonar image and the detailed topography in the west part of Oiso Spur.

相模湾西部海底地形図

1 : 10,000 横メルカトル図法(座標原点35°10' N, 139°14' E)

真鶴岬東方

昭和63年日本海上保安庁水路部の測量



補図は昭和63年度調査
実線は平成2年度調査

注意
本図は航海用に作成されたものではない。航海にあたっては
航海用に作成された海図を使用すること。

平成3年3月 海上保安庁水路部調製

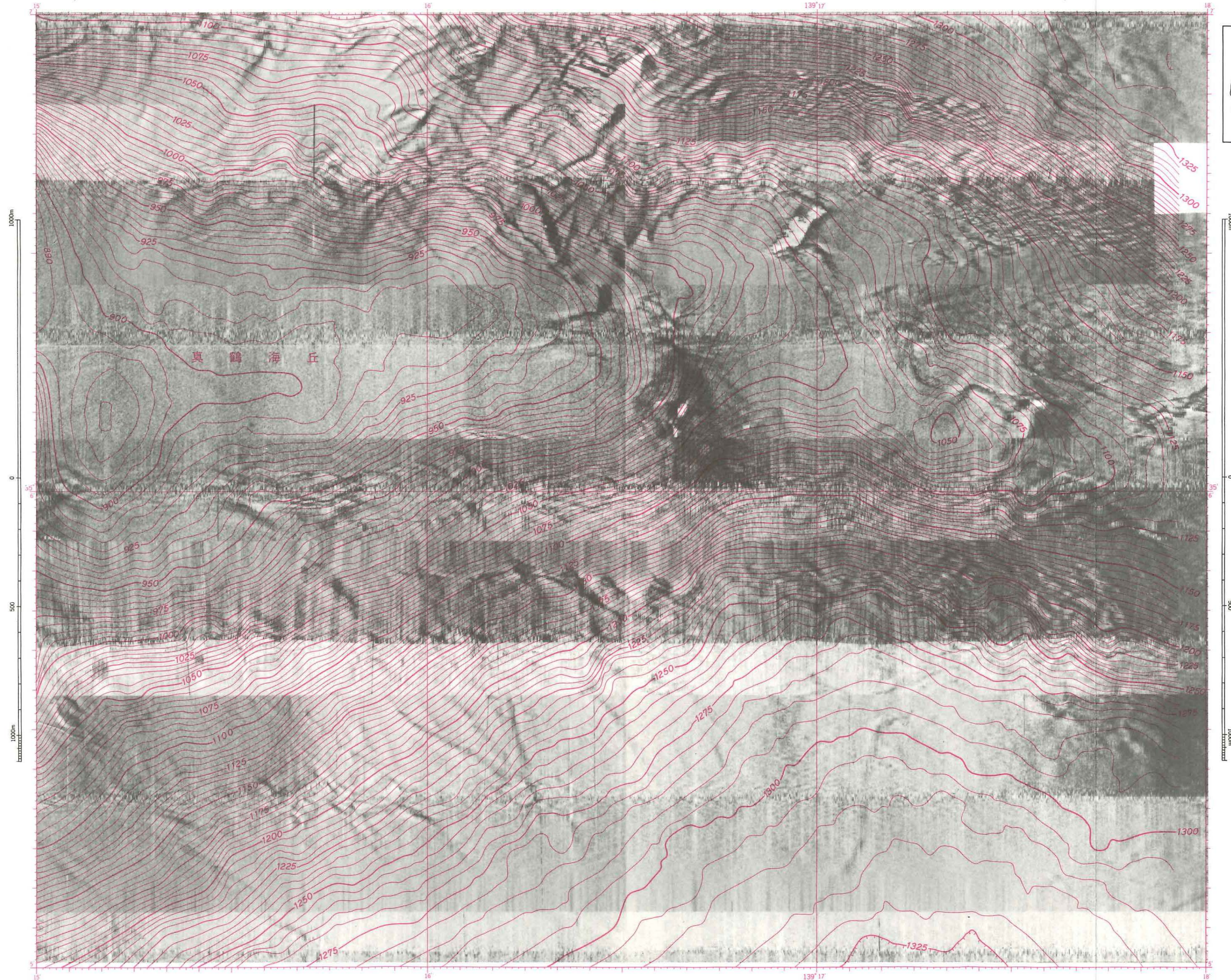
Figure 4. Side-scan sonar image and the detailed topography off Manazuru Misaki.

相模湾西部海底地形図

1 : 10,000 横メルカトル図法(基準原点35°10' N, 139°14' E)

真鶴海丘

昭和63年日本海上保安庁水路部の測量



破線は昭和63年度調査
実線は平成2年度調査

注意
本図は航海用に作成されたものではない。航海にあたっては
航海用に作成された海図を使用すること。

Figure 5. Side-scan sonar image and the detailed topography in Manazuru Knoll.

平成3年3月 海上保安庁水路部測量

サイドスキャンソナーのデジタルデータにノイズの除去，位置補正，斜距離補正，放射量補正，幾何補正を施し，記録を計算機上で貼り合わせ，1万分の1の精密音響写真地図（モザイク図）を作成した。それに海底地形を重ねた精密音響写真地図を第3～5図に示す。

3. ROVによる海底露頭の観察

ROVの母船の船位測定にはGPS受信機を用い，ROVの位置はROV用トランスポンダーにより得られる母船からの方向・距離を用いて決定した。調査内容はカラービデオカメラによる海底の観察，深海スチールカメラによる写真撮影，マニピュレーターによる岩石採取である。採取した試料はナンノプランクトン鑑定により堆積年代を決定した。調査海域は第1図に示したように，深海用サイドスキャンソナーにより，その海脚基部に多数の線構造の発見された①大磯海脚西部，北北西-南南東方向の直線的な小崖と西北西-東南東方向の数kmも連なる小崖群の発見された②真鶴岬東方沖，顕著な露岩域が存在する③真鶴海丘である。

4. 西相模湾の海底微地形

調査した3海域のサイドスキャンソナー記録の解釈図第6～8図に示す。

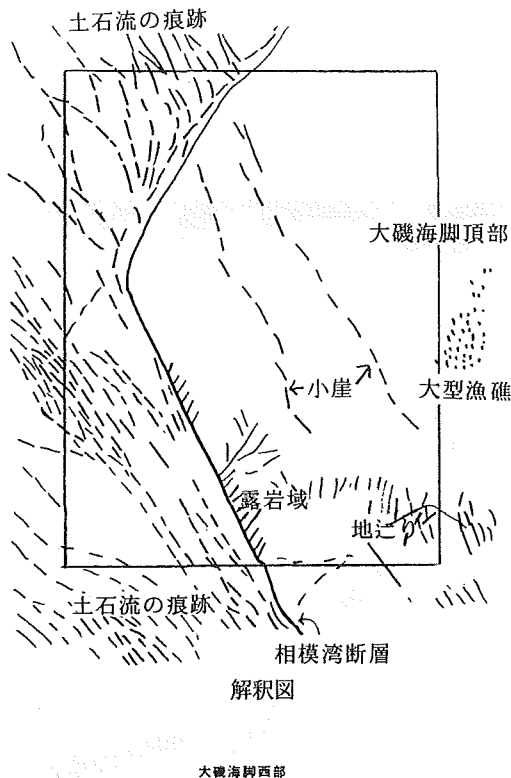


Figure 6. The interpretation map of Figure 3. These lines in Sagami Trough indicate many traces of the debris flow or the turbidity current. Other lines around Oiso Spur indicate cliffs and slump bed.

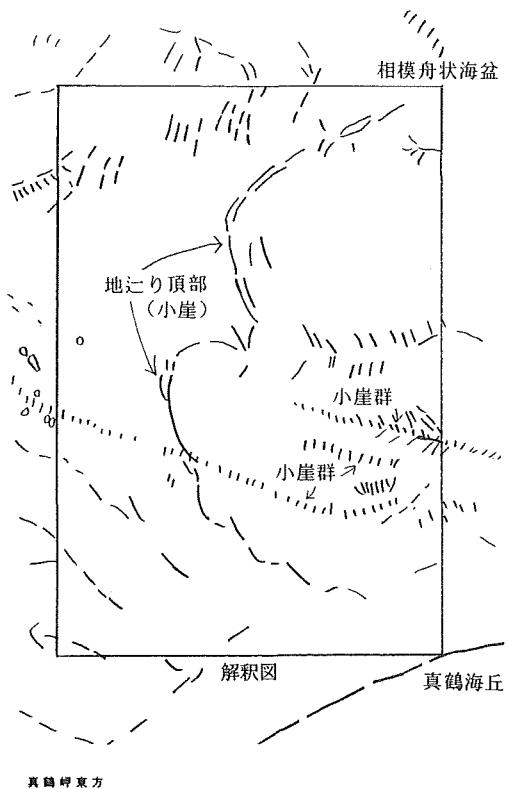


Figure 7. The interpretation map of Figure 4. At the center of the picture there are crown cracks and head scarps of slumps.

採取試料のナンノプランクトン鑑定による堆積年代測定結果を第1表に示した。

第3図の大磯海脚西部の精密音響写真地図では、区域の西半分に相模舟状海盆と平行に走るじょう線が卓越している。これらは北方の浅海域で発生した乱泥流あるいは水中土石流が通過した痕跡であると考えられる。区域の北西部には、陸側から南南東の方向にのびるじょう線と、大磯海脚の基部を南西方向から南東方向に湾曲しながら連なるじょう線が見られる。これらは乱泥流あるいは水中土石流が地形に沿うように流れ下ったことを如実に表している。相模舟状海盆の水深550m付近にはサンドウェーブあるいは地じり地形と思われる凹凸が有り、これがサンドウェーブならば大磯海脚の基部に沿う底層流の存在が推察される。

大磯海脚の南側基部には、北北西-南南東に連なる断層崖（相模湾断層）と思われる露岩域が見いだされる（写真1）。その露岩域には北北東-南南西方向の線構造が多数発見され、ROVによる観察の結果、この線構造は小規模な谷線・尾根線であり、大断層に沿う雁行割目である可能性がある。ROVによる観察の結果、この谷線の基部には上方からの崩落物が小さな扇状地状の地形を形成しており、崩落物の中には火成岩類（写真2）も見いだされた。海脚基部では崩落物と基盤堆積層の識別は困難であり、採取した粘土層のナンノプランクトン鑑定による堆積年代は27万年前以降現在までであったが、これは崩落物である可能性がある。海脚の西側斜面に相模湾断層と平行して2本の小崖が見いだされ、落差の小さい断層地形の可能性もある。その間隔は800m~900mで、南東端付近に同断層に起因すると思われる海底地じりの跡が見られる。

第4図の真鶴岬東方沖では、中央部に北北西-南南東方向の直線的な小崖が分布している。海底地形の勾配の変化や音波探査記録（第9図、第10図）から判断して、同小崖の東側に大規模な地じりが起きている。ROV観察の結果、北北西-南南東方向の小崖は、1~2m程度の堆積層が露出していて、その堆積層は極めて軟弱であり、ほとんど固結していない（写真3）。この堆積層の堆積年代は27万年前以降現在までであるので、地質学的にごく最近に堆積した堆積物が大規模な地じりにより東方に滑落し、その地じりの頂部が露出していると考えられる。

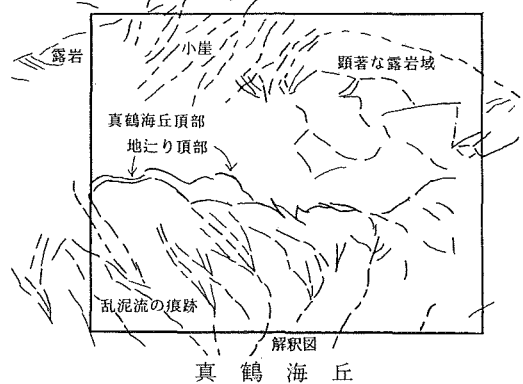


Figure 8. The interpretation map of Figure 5. These lines at the north-side of Manazuru Knoll indicate cliffs. Other lines at the south-side of Manazuru Knoll are crown cracks and head scarps of slumps and many traces of the turbidity current.

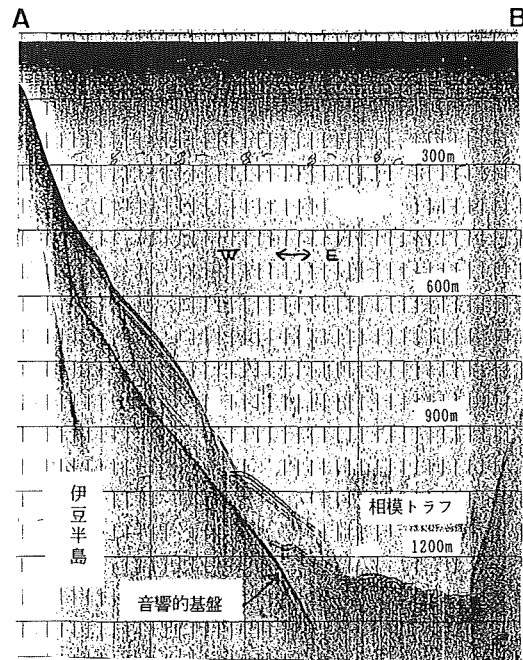


Figure 9. Single-channel seismic profile along a line A-B off Manazuru Misaki in Figure 10. We can see a slump at the foot of the continental slope.

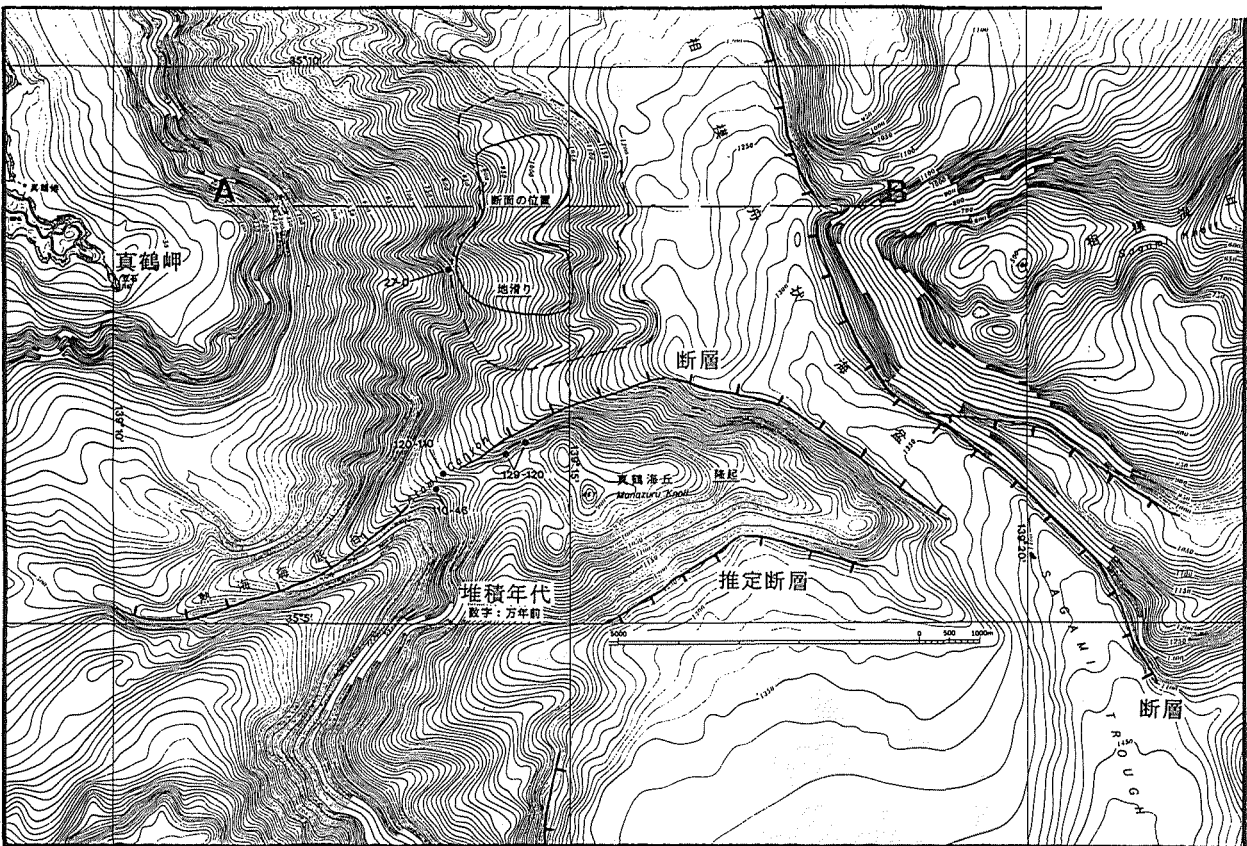


Figure 10. The distribution map of the tectonic landform around Manazuru Knoll. These solid lines with markers indicate faults. These numbers indicate the time-stratigraphy by nannoplankton fossils of sedimentary rocks.

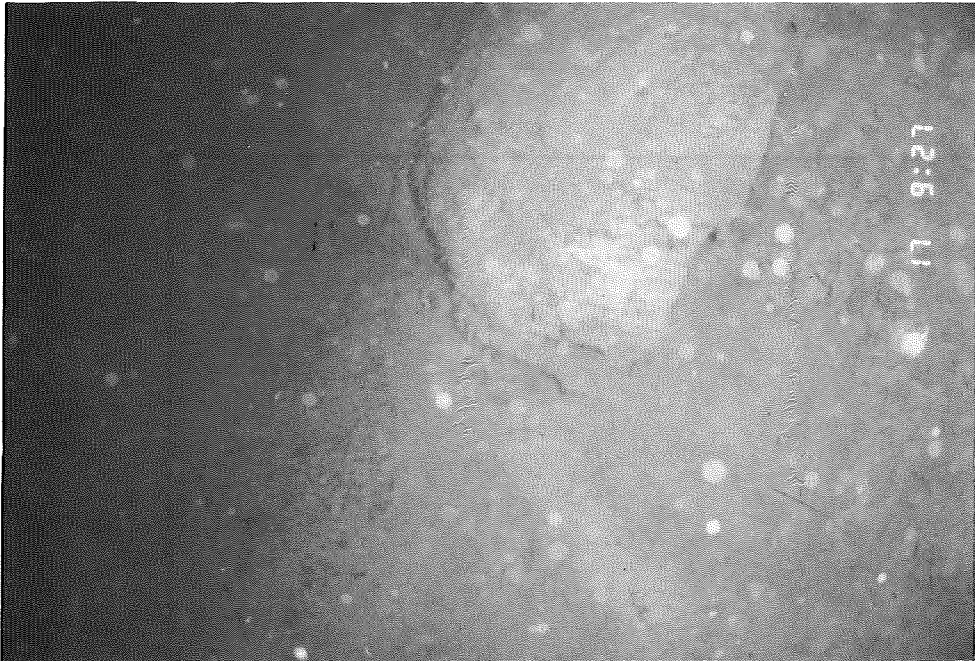


Photo 1. The cliff and clastics at the foot of Oiso Spur.



Photo 2. These clastics of igneous rocks at the foot of Oiso Spur.



Photo 3. Crabs and head scarps of slumps off Manazuru Misaki.

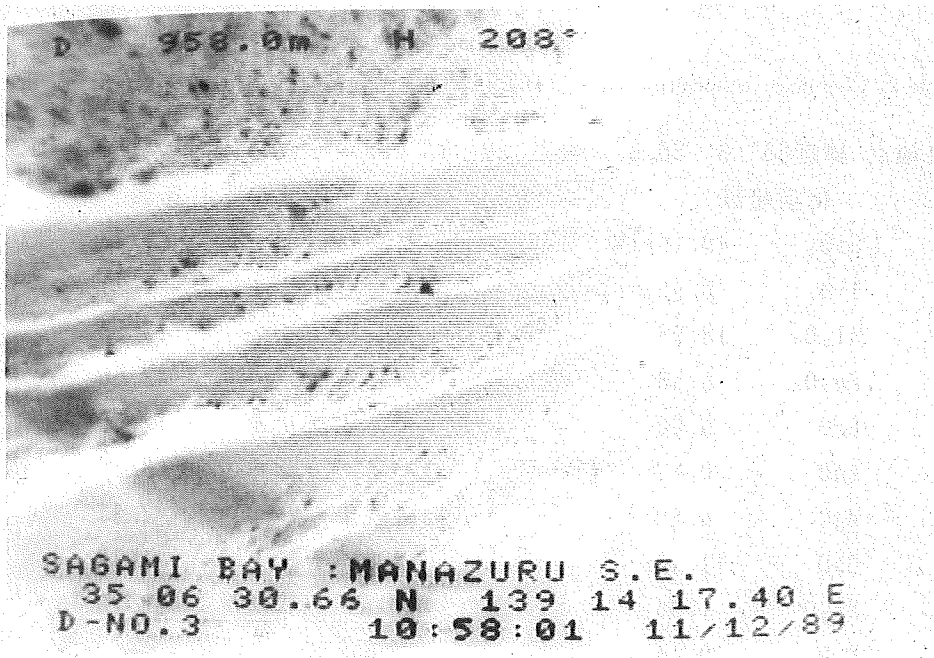


Photo 4. Cliffs continued at the north-side slope of Manazuru Knoll.

調査区域の中央部から東部には西北西—東南東方向に数kmも連なる小崖群が存在する。ROV観察によりこの小崖群は、段差数m程度の階段状の地形であり、全体的に薄い堆積物に覆われている。部分的に露出している堆積層は極めて軟弱であり、ほとんど固結していない。小崖の成因としては、西側斜面の傾斜による地割れが考えられる。

第5図の真鶴海丘の北東斜面には顕著な露岩域が存在する。海丘北西部には露岩域と北東—南西方向の線構造が発見され、この付近から中央部にかけて北西—南東方向に露岩域が続き地形図上でも段差が見られるので、真鶴海丘が強い構造運動を受けていることが推定される。真鶴海丘の南斜面の頂部付近には地汙り地形が、斜面には頂部からの南方に流れ下った乱泥流の痕跡が多数存在する。

真鶴海丘北西斜面の顕著な露岩域では、ROVにより500m以上に渡って同一の地層を追跡することができ

Table 1. Time-stratigraphy by nanoplankton fossils of sedimentary rocks gathered with the ROV from Sagami Bay.

試料番号	緯度	経度	水深	堆積年代	岩質
1	35° 6' 26.9"	139° 13' 35.4"	914m	120~110万年前	シルト岩
5	35° 6' 37.7"	139° 14' 30.8"	993m	129~120万年前	シルト岩
6	35° 6' 30.4"	139° 14' 18.1"	967m	129~120万年前	細粒砂岩
8	35° 6' 13.0"	139° 13' 32.8"	863m	110~46万年前	泥岩
16	35° 8' 11.4"	139° 13' 41.1"	787m	27~0万年前	泥岩
17	35° 13' 55.5"	139° 15' 01.5"	823m	27~0万年前	シルト岩

Table 2. Chemical composition and C. I. P. W. norm of a volcanic rock from Manazuru Knoll.

採取地点 緯度35° 6' 26.9" 経度139° 13' 35.4" 水深914m、単斜輝石玄武岩

化学組成		C I P Wノルム計算表	
SiO ₂	49.19wt%	石英	7.33
TiO ₂	0.96	正長石	1.11
Al ₂ O ₃	18.94	曹長石	16.25
Fe ₂ O ₃	5.48	灰長石	42.56
FeO	5.40	ディオプサイト	12.75
MnO	0.17	ハイパーシーン	8.50
MgO	4.22	磁鉄鉱	7.87
CaO	11.78	イルメナイト	1.82
Na ₂ O	1.95	Total	98.19
K ₂ O	0.15		
P ₂ O ₅	0.06		
H ₂ O ⁻	0.39		
H ₂ O ⁺	0.22		
Total	98.91wt%		

た(写真4)。熱海海脚から真鶴海丘を形成する地層は東に傾き下がるように傾斜しており、その傾斜が真鶴海丘の下では緩やかになっていることが分かった。この露岩域には、約130万年前から約50万年前までの堆積層がほとんど連続的に露出し(第10図、第1表)、玄武岩のシルが露出している部分も発見された。この玄武岩の化学組成は第2表に示したように、ソレアイト系列に属する。

5. 西相模湾の構造地形についての考察

(1) 国府津・松田断層の海域延長部

多数の水中土石流の痕跡が認められる相模トラフ底から、急勾配で立ち上がる大磯海脚南西縁から相模海丘南西縁まで、露岩地帯(断崖)が延々と連なっている。60度近い急勾配の斜面もあり、その基部には上方からの崩落物が多数見いだされた。この大磯海脚基部に発見された断崖は、陸上の国府津・松田断層の延長あるいはそれに伴う小断層であると推察される。この断崖に沿って国府津・松田断層が海域にも延長しているのは明らかである。

(2) 早川・関本断裂帯の海域延長部(西相模湾断裂)

真鶴岬東方沖に発見された小崖は、地質学的にごく最近に堆積した堆積物が大規模な地汙りにより滑落し、その地汙りの頂部が露出したものである可能性が高く、西相模湾断裂が海底に露出したものではないと考えられる。

西相模湾断裂が存在すると予想される海域の内、真鶴海丘より南側の海域ではシロウリ貝の分布や音波探査等により、ほぼ南北方向の断層が確認されているが、これまでの調査で真鶴海丘より北側の海域には、海底表面に明瞭に現れるような変動地形を確認することはできなかった。真鶴岬東方沖には東側に汙り落ちた大規模な地汉り地形が確認され、その規模は音波探査記録やサイドスキャンソナー記録から判断して、小さく見積もっても南北3 km東西2 kmであり、海底地形から見積もると南北5 km東西3 kmに達する規模となる。

(3) 真鶴海丘

現世の堆積層の分布する真鶴岬東方沖に対し、熱海海底谷を挟んで対岸の真鶴海丘北西斜面の顕著な露岩域では、約130万年前から約50万年前までの堆積層がほとんど連続的に露出し、玄武岩のシルが露出している部分も発見された。この真鶴海丘と真鶴岬東方沖との年代差は、真鶴海丘北西斜面に沿うように断層が存在していることを示唆するものであり、この地層の弱線に沿って水中土石流が西から東へと流れ下り、熱海海底谷を形成したと考えられる。

真鶴海丘は大河内(1990)によりその南縁に断層の存在が指摘されていて、サイドスキャンソナー記録からその南縁には地汉り地形と海丘の頂部から南方に流れ下った乱泥流の痕跡が多数確認された。これは北落ちの逆断層により下盤の上に覆い被った真鶴海丘の地塊が、南側に崩れ落ちて断層を覆ってしまったものと考えたと矛盾しない。第I期の成果から真鶴海丘とその西側の熱海海脚との関係は、ウオーピングであると想定したが、周辺の地層分布と比較すると、真鶴海丘は地質学的に極最近の構造運動を顕著に受け、北・東・南側の地塊に対しては隆起していると考えられる。

6. おわりに

本論中の調査研究に従事した水路部の楠勝浩氏、菊池真一氏には資料の提供と多くの助言を頂いた。ここに明記して謝意を表します。

参考文献

- 大河内直彦：相模湾の活構造とテクトニクス，地学雑誌，99,p.458-47,(1890)
- 石橋克彦：“神奈川県西部地震”と地震予知Ⅰ，科学，58,p.537-547.(1988a)
- 石橋克彦：“神奈川県西部地震”と地震予知Ⅱ，科学，58,p.771-780.(1988b)
- 海上保安庁水路部：相模湾海底地形図，相模湾海底地質構造図，(1983)
- 菊池真一・穀田昇一・楠勝浩：マグニチュード7級の内陸地震の予知に関する研究，一海域の変動地形に関する研究一，平成元年度研究成果報告書，海上保安庁，p.72-78,(1990)
- 菊池真一・渡辺一樹：マグニチュード7級の内陸地震の予知に関する研究（第Ⅱ期），一海域の変動地形に関する研究一，平成2年度研究成果報告書，海上保安庁，pp118-123,(1991)
- 楠 勝浩・菊池真一・穀田昇一・深江邦一：相模湾北西海域における変動地形調査，水路部研究報告，27,pp113-131,(1991)
- 地質調査所：海洋地質図“相模灘及付近海底地質図”，(1976)

奄美海台の地質構造と地形

加藤幸弘*

Geological Structure and Topography of the Amami Plateau†

Yukihiro Kato

Abstract

The Amami Plateau is situated at the northwest part of the Philippine Sea Plate. The plateau is characterized by three seamount chains, which trend east-northeast. The north seamount chain is made of submarine conical volcanoes. The center and south seamount chains are composed of ridge-like seamounts trending in an easterly or northeasterly direction. Small basin, which are elongated in a same direction of central seamount chain, are situated between the center and south seamount chains. The southern slope of these seamount chains of the ridge shows horst and graben structures. The Kita-Daito Basin, which is situated between the Amami Plateau and the Daito Ridge, has two magnetic lineation which strike N10°E. And the northern slope of the Daito ridge shows horst and graben structures. It indicates from the above that the Amami Plateau is separated from the Daito Ridge in Eocene time.

1. はじめに

フィリピン海プレートは太平洋プレートなどの代表的な海洋プレートとは異なり、現在活動的な伊豆・小笠原孤、マリアナ孤を除くと、過去の島孤（古島孤）およびそれに付随する背孤海盆から構成される（Karig1975）。古島孤のいくつかについては、海面からの各種地球物理学的観測や採泥、DSDPによるDrilling調査が行われてきているが、古島孤の大部分は沈水しているためフィリピン海プレートの形成過程を解明するデータが少ないのが現状である。特に、フィリピン海プレートの中で最も古い地質要素から構成されると考えられる北西部の大東海嶺群周辺海域については、地質要素が他のところに比べ、連続性が少なく、複雑なため、その形成過程については不明な点が多い。

水路部では、フィリピン海プレート北部において、精度が高く、均質な地球物理データの観測を行っている。我々は、これらのデータを用い、フィリピン海プレートの形成過程のより正確なモデルの構築を目指している。既に、大東海嶺群の大東海嶺、沖大東海嶺の成因を検討を行ってきている（岩淵他1986、春日他1986、沖野・加藤1992）。今回、大東海嶺群のなかで最も古い地質要素とされている奄美海台について、地形・地質構造の検討を行い、奄美海台の形成過程について新たな知見を得たので報告する。

† Received

*大陸棚調査室 Continental Shelf Surveys Office.

2. 使用データ

今回使用したデータは、海上保安庁水路部、昭和62年及び昭和63年に測量船「拓洋」によって実施した大陸棚調査の際、観測されたものである。大陸棚調査では、東西方向に5海里間隔の測線を取り（一部は、10海里間隔）、ナローマルチビーム測深機（Seabeam System）による地形探査、エアガン（352cbi）を音源とするシングルチャンネル音波探査、プロトン磁力計による地磁気全磁力計測、重力測定を行っている。さらに、18チャンネルおよび24チャンネルのマルチチャンネル音波探査を各1測線実施した。なお、調査の詳細については、林田他（1989）及び加藤他（1989）で述べられているので、そちらも参照されたい。また、南西諸島周辺海域においては、一部昭和48年から57年に実施した調査のデータも併せて使用している。

3. 奄美海台周辺海域の地質

奄美海台が位置するフィリピン海プレートの北西部は、九州・パラオ海嶺を境界とし、北側は南海トラフ、西側では南西諸島海溝でユーラシアプレートと接する。フィリピン海プレートのユーラシアプレートに対する収束速度は、北西部では現在NW方向に4 cm/yrである（Seno1977）。

南西諸島海溝北部に沈み込むフィリピン海プレート上には、北から奄美海台、大東海嶺、沖大東海嶺がほぼ東西ないし西北西―東南東方向の走向を持ち、分布している（Figure 1, Figure2）。また、各海嶺、海台の形成年代については、ドレッジにより採取された岩石やDSDPによるDrilling調査により明らかにされている。奄美海台については、 82.4 ± 2.2 、 85.1 ± 2.1 と 48.5 ± 2.1 および 69.5 ± 2.0 、 75.1 ± 2.4 (Ma) のK-Ar年代が得られている（松田他、1975、Ozima et al 1980）。また、大東海嶺については、 59.0 ± 3.0 MaのK-Ar年代が報告されている（Ozima et al 1980）。

海嶺や海台の間には、喜界海盆、北大東海盆、南大東海盆が分布し、海盆中にもいくつかの海山、海丘が分布している。奄美海台と大東海嶺や、その周辺海盆は、現在北西端を南西諸島海溝で区切られているが、地磁気異常のパターンが琉球弧の前弧域まで続いていることから、現在海底に認められる高まりと海盆はその延長部が琉球弧の下に沈み込んでいると推定される（加藤、金子1989）。

奄美海台以外の沖大東海嶺、大東海嶺群については、既に、水路部大陸棚調査データを用い、その地形、地質構造の概要について報告されている（岩渕ほか1986、春日ほか1986、沖野、加藤1992）。

4. 奄美海台の地形

奄美海台は水深3,500mの平行四辺形をした台地状の高まりの上に、東西方向に延びた3列の高まりが存在する地形的な高まりである（奄美海台は、従来の調査で、海底地形特に海嶺状海山の形を明確に捉えておらず、海山がのっている台地状の高まりに注目し、海台という地形属名が与えられている。しかし本来の海台（Plateau）とは異なり、南に分布する大東海嶺や沖大東海嶺と地形的に属名で区分する程の違いは存在しない。）（Figure2）。この小文では、この3列の海山列を北から北列、中央列、南列と仮称する。北列は、円錐状の独立したあるいはそれらが数個集合した比高1,500m前後の海山から構成される。北列の西方延長上の大陸斜面基部に、比高約2,000mの海山（喜界海山）が存在する。この海山は地形的には琉球弧の大陸斜面の一部となっているが、音波探査記録の上では奄美海台の基盤と連続しており（Tokuyama et al. 1986、徳山1985）北列の一部と考えられる。一方、北列の東延長は、湾海山まででそれより東に分布していない。北列と中央列との間には中央列から北あるいは北西に向かって緩やかに傾斜する海盆が存在する。奄美海台の東半分では北列が存在しないため中央列から緩傾斜で北列を東に延長した線まで続き、その場所から斜面の傾斜が急

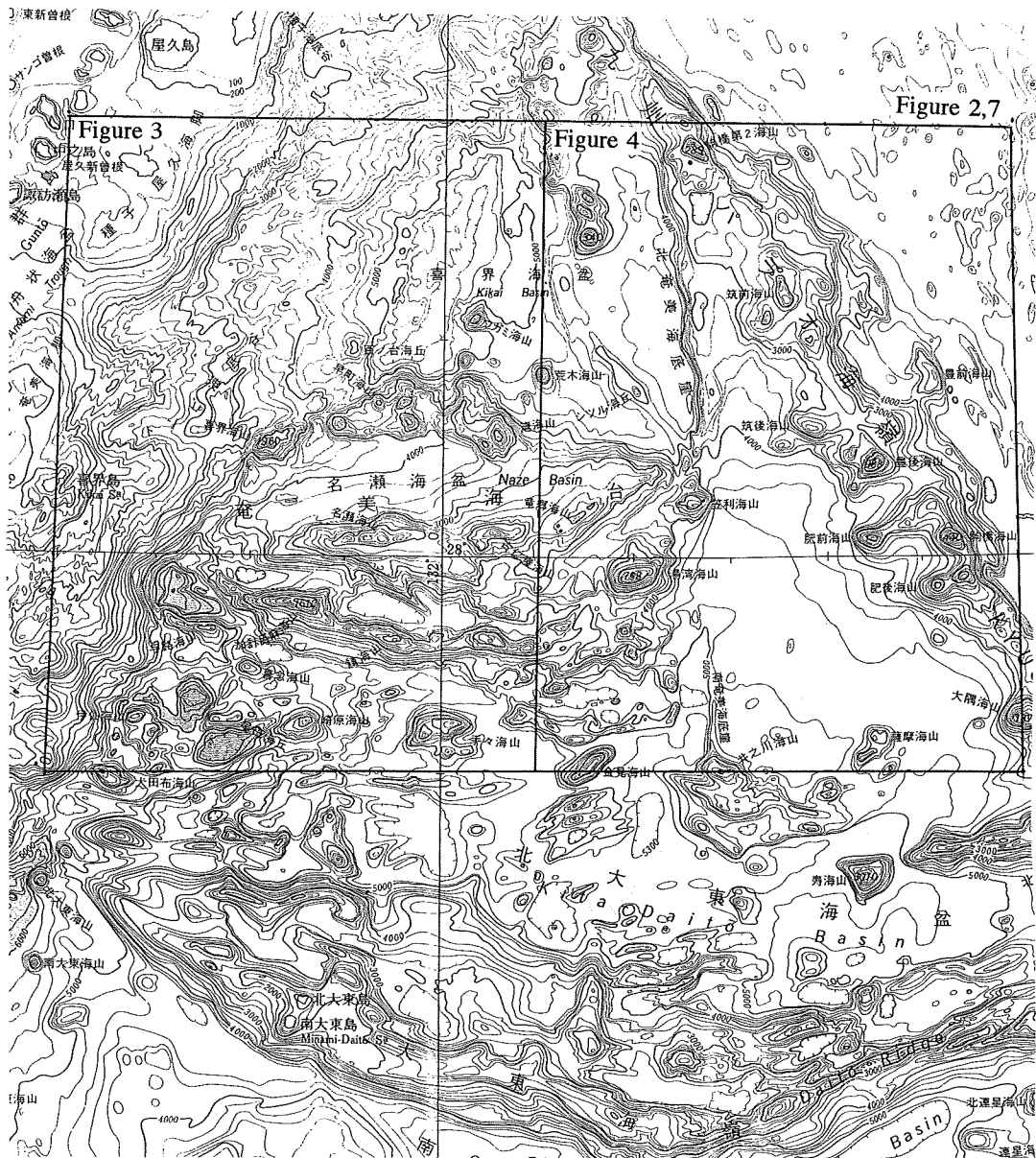


Figure 1 Topography of Daito Ridges with the major topographic names.

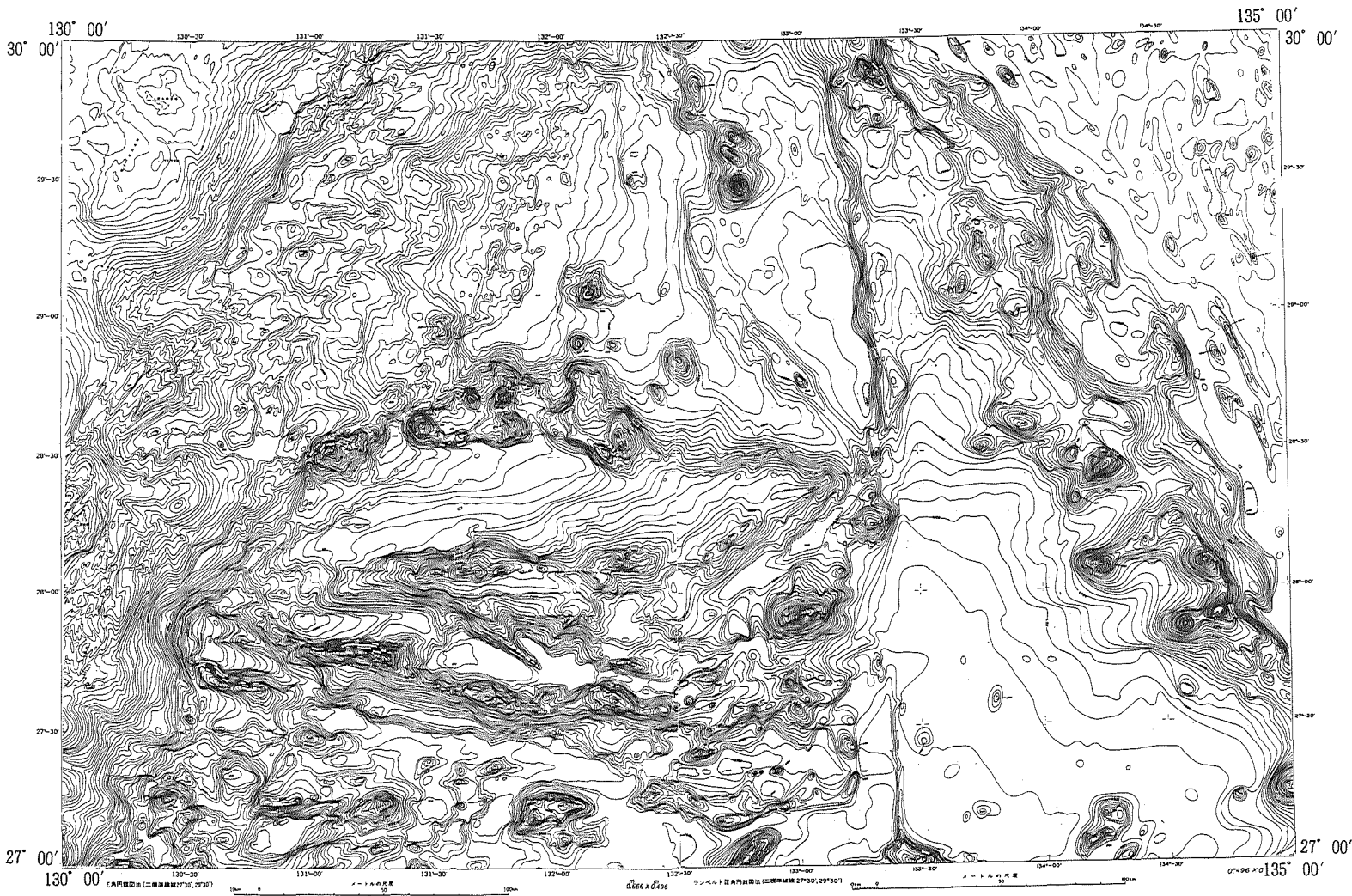


Figure 2 Topography of the Amami Plateau and adjacent area. Contour interval is 100m.

になり、喜界海盆へと続く。中央列はほぼ東西方向に伸びる140kmの海山(名瀬海山、古仁屋海山)及び東経132度30分の線より東の北東方向に延びる長さ70kmの海山(竜郷海山)から構成される。中央列の海山のうち名瀬海山は、北斜面も南斜面も急傾斜の斜面となっているが、古仁屋海山と竜郷海山は、北側斜面は、比較的傾斜が緩いのに対し、南側斜面は、直線的で急斜面をなし、非対称な地形を呈している。南列は東経132度30分より西方では東西方向に伸びる長さ40から60kmの比高1,000から2,000mの海嶺状の海山から構成される。海山の北側斜面は、急で直線的な斜面となっている。一方の北大東海盆側の斜面には、いくつかのベンチが存在し、北大東海盆へと連続している。南列の東経132度30分から東側では西側のような東西に伸びた海山は認められなくなり、九州・パラオ海嶺の西側に分布する海山と同規模の円錐状の海山が多く分布するようになる。中央列と南列の間には、南北幅10から15kmで東西方向40から60kmの細長い盆地が海嶺状の海山に付随するような形で分布する。また東経132度30分より東には北東方向に伸びた幅10km、長さ70kmの海底地溝が存在する。

北大東海盆には東西方向に伸びた小海嶺および東西方向にやや伸びた海山と小海盆が分布する。このような小海嶺は、堆積層が厚く均積していない背弧海盆例えば四国海盆南部やパレスペラ海盆、西フィリピン海盆に広く認められる小海嶺とその比高、長さ、幅が極めて似ている。また、海盆の地形は特に海溝に近づくにつれて起伏が大きくなる傾向が認められる。

5. 奄美海台の地質構造

音響層序

奄美海台周辺で行ったシングルチャンネルの音波探査を用い、奄美海台を構成する地層を音響的な岩相によって、下位からApX, ApIV, ApIII, ApII, ApIの5層に区分した(Figure3,4,5)。

ApX層は、音響的散乱層で、奄美海台の基盤をなし、海山のピークの周辺では海底面に露出する。採泥あるいは音波探査から推定するとApXは奄美海台の基盤をなす火成岩及び火砕物から構成されると考えられる。

ApIV層は、散乱状の記録であるがきわめて強い反射記録を示し、ApX層とは区分される。本層は海山近傍では下位のApX層と指交関係にある。火成岩で構成されると考えられるApX層と指交関係にあることから火砕物の堆積物と推定される。

ApIII層は連続するはっきりした反射面を持ち、奄美海台の上の海盆及び北大東海盆に分布する地層である。また、本層は下位のApIV層に対してアバットする。また南列と中央列の間に存在する海底地溝を形成しているのはApIV層以下であり、ApIII層は形成された地溝を埋積する最初の地層である。

ApII層は、連続するはっきりした反射面を持ち、奄美海台の上の海盆及び北大東海盆、北奄美海盆の分布する地層である。下位のApIII層とは整合関係である。ApII層は奄美海台上の中央列と北列の間の海盆では、周辺に比べてきわめて強い反射面を示す。

ApI層は海山の頂部を除きフィリピン海盆の表層に広く均積する地層である。岩相は透明層あるいは弱い連続性の良い層理を持つ地層である。層厚は、北奄美海盆で0.4秒(往復秒時、以下同様)であるが、奄美海台に近づくにつれて薄くなり0.3~0.2秒となる。北大東海盆では0.3秒の厚さを持つ。

上記の音響層序を、Tokuyama et al. (1986) および徳山(1985)による奄美海台における音響層序と比較すると、ApX層はEに、ApIV層はDに、ApII層とApIII層はCに、そしてApI層はAとBに対比することができる。Tokuyama et al. (1986) が各層に与えた年代をその後、変更すべきデータは存在しないこと

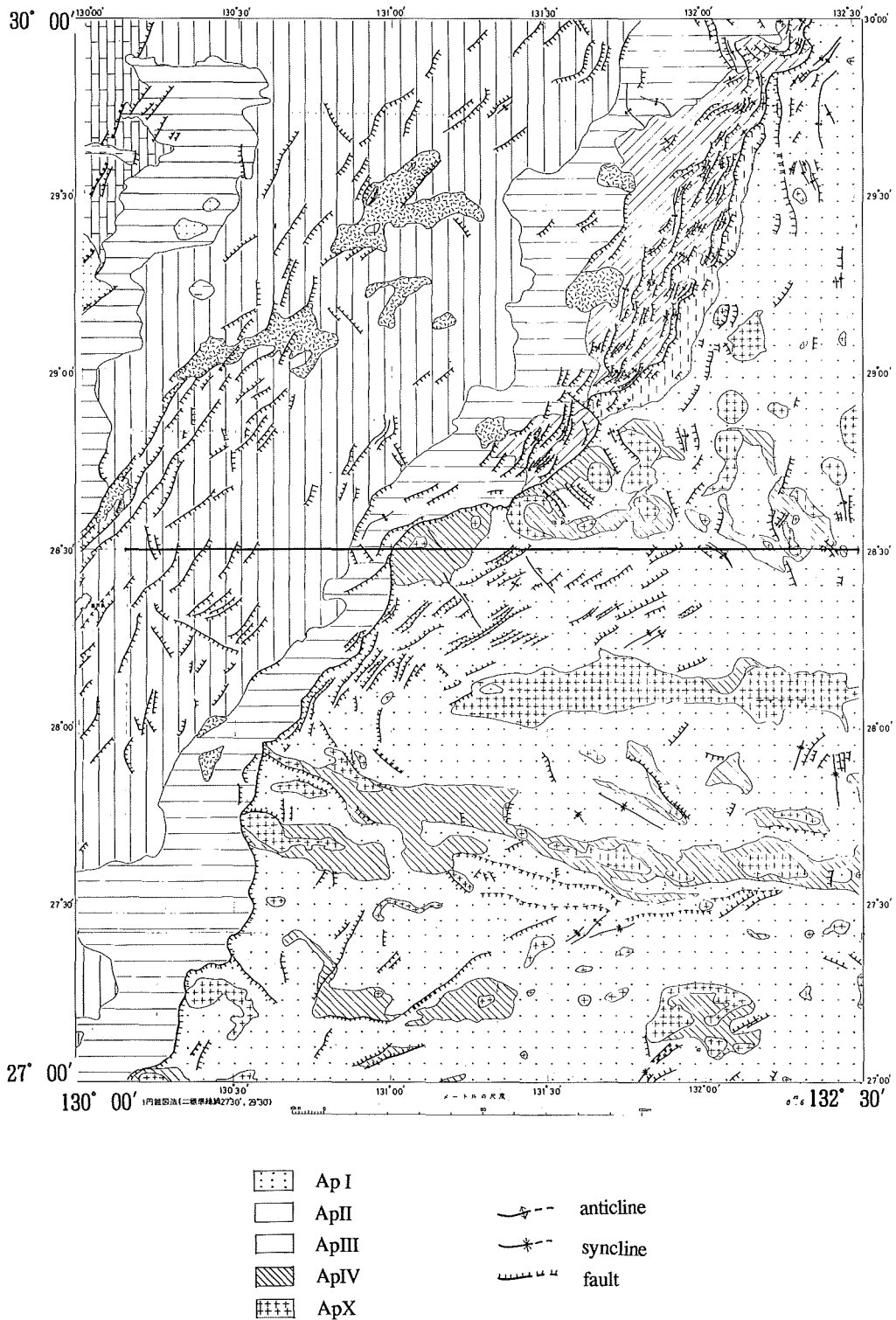


Figure 3 Geological map of the western part of the Amami Plateau.

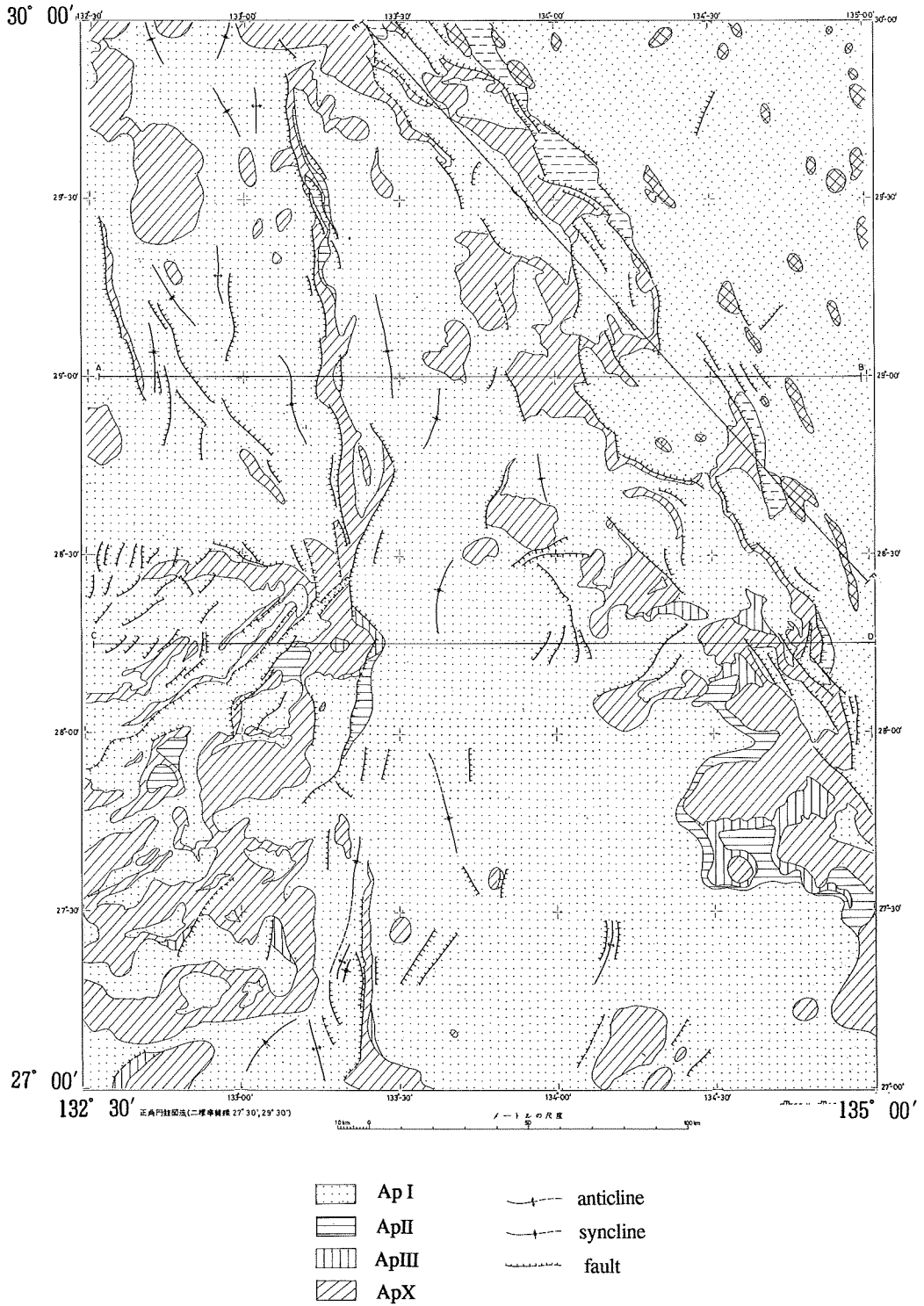


Figure 4 Geological map of the eastern part of the Amami Plateau.

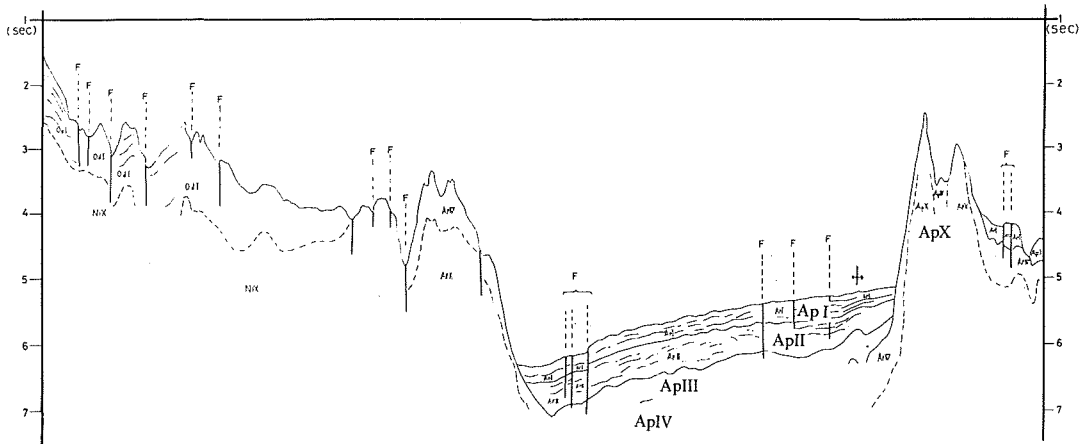


Figure 5 Geological profile of the Amami Plateau. The location of this profile show in Figure 3. ApII and ApIII aren't exposed at the seafloor.

から、今回Tokuyama et al. (1986) の年代をそのまま用いた。したがって各層の年代は、ApX層は後期白亜紀、ApIV層はPaleogene-middle Eoceneに、ApII層とApIII層はlate Eocene-early Oligoceneに、Ap I層はOligocene以降に相当することとなる。

地質構造

奄美海台周辺海域には、フィリピン海プレートが沈み込む事により形成された構造と、それ以前、大東海嶺群が形成された際の構造が認められる。

大東海嶺群が形成された際の構造として、奄美海台の中央列以南から北大東海盆にかけて、東西方向ないし西北西～東南東方向の正断層が顕著である。これらの正断層は中央列と南列の間に海底地溝を形作っている。南列海山の北大東海盆側の斜面にいくつか認められるベンチも、海底地溝を形成したのと同様な正断層で形成されている。

フィリピン海プレートが沈み込む際に形成された構造としては、海溝軸に、平行な方向の断層が認められる。これらの断層は堆積物が厚く堆積する奄美海台上の海盆西部に顕著に発達し、表層のAp I層までを切っており、最近の活動も活動している可能性が高い。また、北大東海盆では海溝軸に近づくにつれて、海溝軸に平行な断層が顕著になり、さらに、前述した東西方向の構造も利用して地形の起伏が大きくなる。一方奄美海台北列では、北北西―南南東方向の断層系が認められるようになる。これらの断層の一部にはあきらかに左横ずれの成分を持つ断層が認められる。喜界海山では海山の裾野に断層による亀裂が生じている。

採泥

今回の調査では、7ヶ所においてチェーンバック式採泥器を用いて採泥を行った(Table1)。そのうち6313 D01においては、多数のMnノジュールが採集され、ノジュールの核として玄武岩が採集された。玄武岩の全岩組成をTable2に示す。

6. 地磁気異常

奄美海台の地磁気異常は、東西方向にのびる2列の、ダイポール型異常が顕著である (Figure7)。北側のダイポール型異常列は、地形の章で述べた、北列に相当し、個々のダイポール型異常は、個々の円錐状海山に

Table 1 List of bottom samples.

No.	Site No.	Position		Depth (m)	Samples
		Lat.	Lon.		
1	6312D01	28° 04' .9N	134° 14' .6E	1500m	Mn nodule Foraminiferaous sand
2	6312D02	27° 06' .1N	132° 49' .1E	4200m	Silt
3	6312D03	27° 04' .3N	132° 50' .0E	3400m	Mn crust, Pumice
4	6312D04	28° 14' .5N	133° 20' .4E	2760m	Pumice, Foraminiferaous sand
5	6312D05	28° 13' .5N	133° 20' .9E	3400m	Pumice, Foraminiferaous sand, Tuff
6	6313D01	28° 06' .7N	132° 15' .9E	1143m	Mn nodule
7	6313D02	28° 32' .8N	132° 17' .2E	1700m	Lime stone gravel

Table 2 Chemical composition of Dredge sample (wt%)

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO
43.16	0.98	16.29	8.74	2.40	0.440	6.35
CaO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O(+)	H ₂ O(-)	Total
8.86	1.73	3.67	0.330	5.94	0.34	99.230

6313D01

対応している。南側のダイポール型地磁気異常は、北側のものに比べ東西方向に連続した形を取っている。この異常列は、地形の、中列に相当している。

地形と地磁気異常列とを比較すると、北列と中列は、対応するダイポール型地磁気異常列が認められるが、地形的に極めてはっきりしている南列には、対応するダイポール型地磁気異常は認められない。

一方、奄美海台の南、大東海嶺までの間に位置する北大東海盆には、地形の起伏には関係ない、東北東—西南西方向ないし東西方向に伸びる振幅の弱い帯状の地磁気異常が認められる。これらの帯状異常は、北大東海盆中に分布する東北東—西南西方向に伸びる小海嶺と平行である。また、手々海山と金見海山の間では、帯状異常がずれており、その間にトランスフォーム断層が想定される。ほぼ東西方向にのびる帯状異常は、方向は異なるものの、水野ほか(1976)で推定された、北大東海盆の帯状地磁気異常と同一のものであると考えられる。

また、奄美海台と北大東海盆に認められる東西方向の地磁気異常パターンは南・北奄美海底崖で途切れ、その東側には分布しない。

7. 考察

奄美海台の形成史

奄美海台は、採取された火成岩の分析(Tokuyama et al. 1986)と屈折法探査(Nisizawa et al. 1983)により、過去の島弧の一部と推定される。しかし、現在活動的な生きている島弧と比較すると、幅が狭く、連続性が乏しいことから、単一の島弧として、過去に形成されたとは考えにくい。今回は、奄美海台および周辺海域のデータを用い、奄美海台がどのような島弧であったかの復元を試みた。

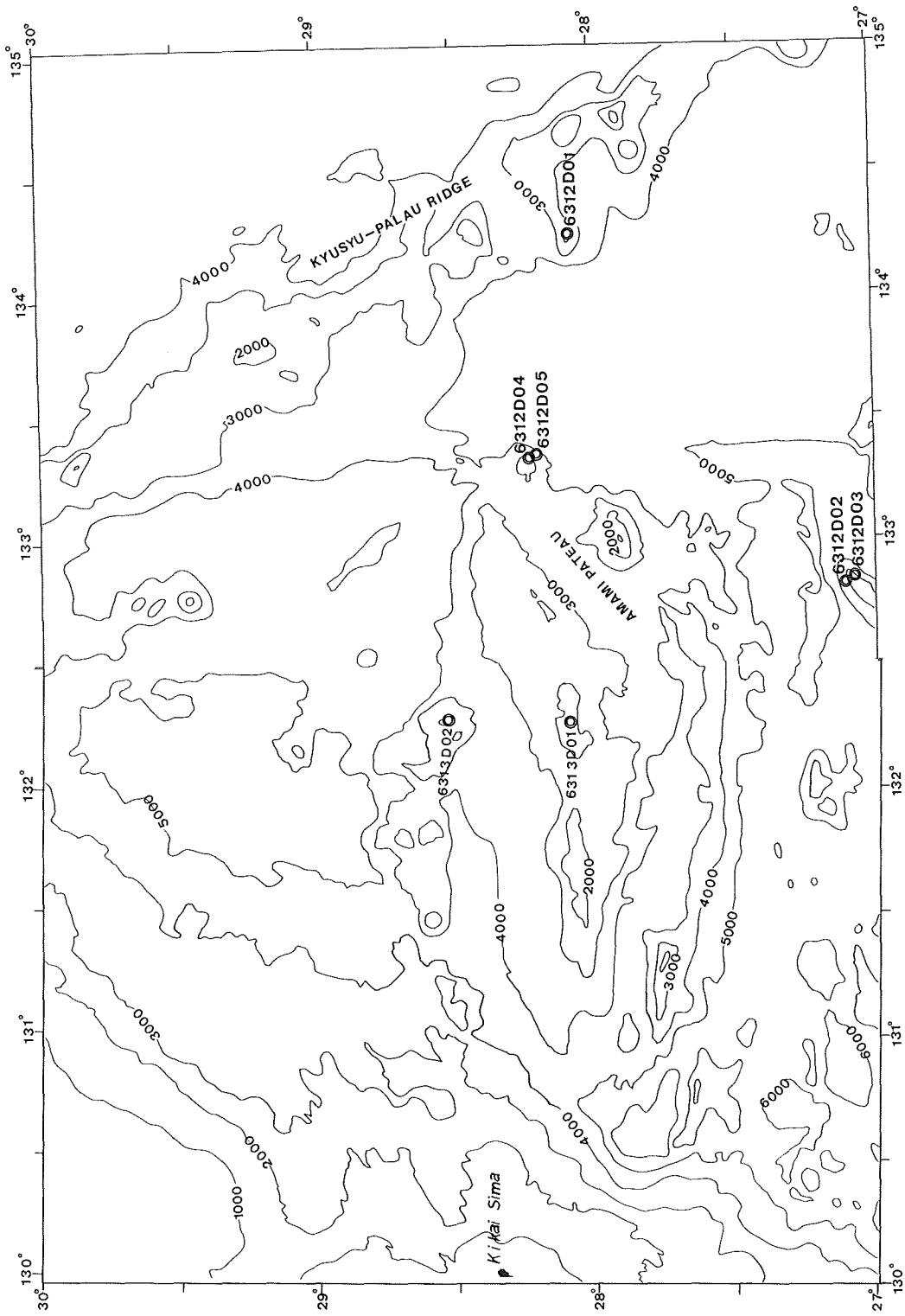


Figure 6 Location of dredge point at the Amami Plateau.

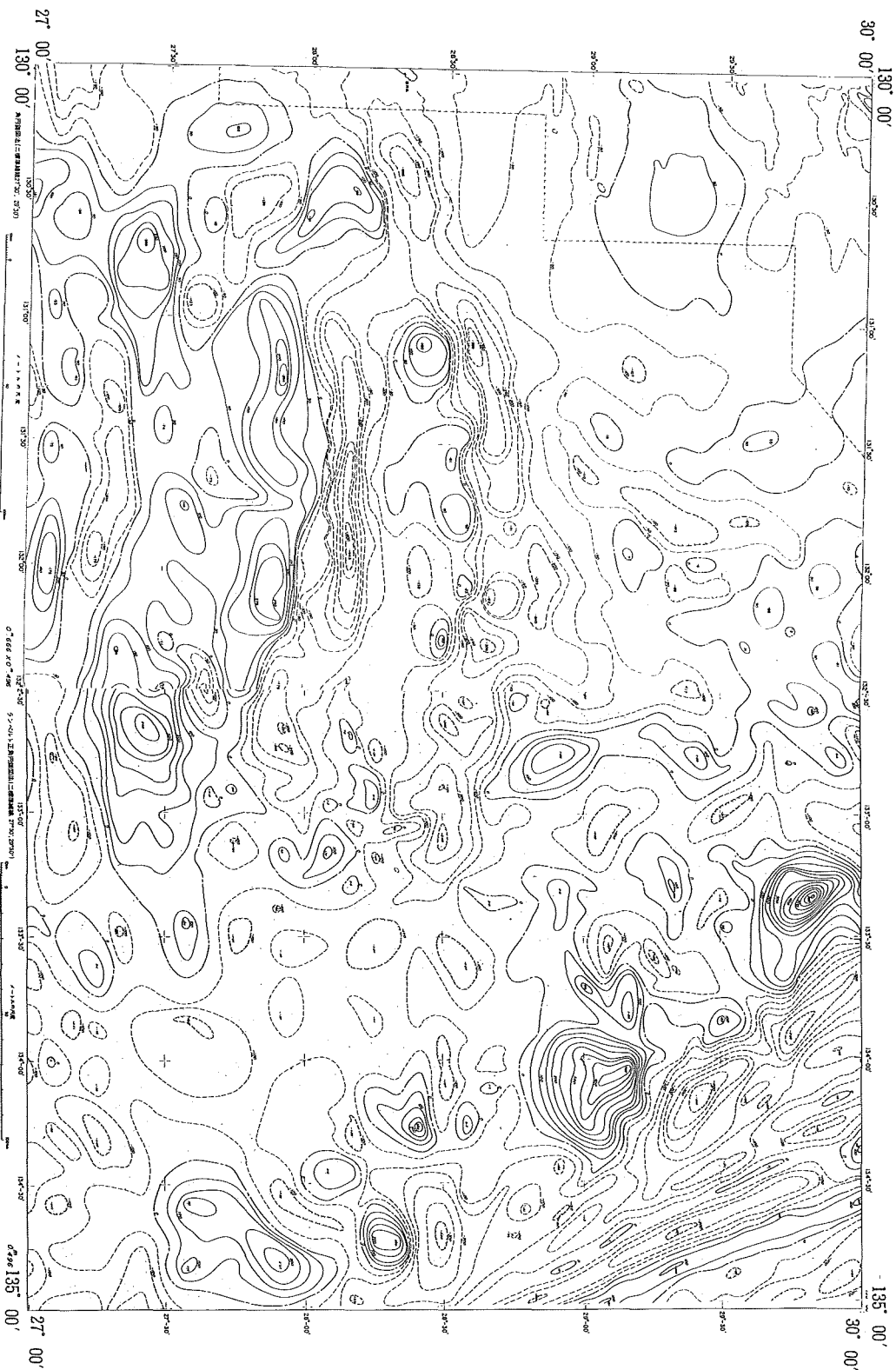


Figure 7 Geomagnetic total intensity anomalies. Contour interval is 20nT. Solid lines are positive and dotted lines are negative.

奄美海台は東西方向の走向の海山列から構成されるが、南北方向の地形は非対称となっている。中列から北側は、緩傾斜の斜面が、円錐状の海山でより北側の喜界海盆と連続している。一方、中列から南側では途中ベンチ、海盆を挟む急傾斜の斜面となっており、南側の北大東海盆へと連続している。音波探査記録では、南斜面の海盆は、正断層によって形成されたハーフグラブであることが読み取れる。

北大東海盆を挟んで南側には、大東海嶺が位置している。大東海嶺も奄美海台と同様東西方向の一般走向を示す海嶺であるが、その南斜面と北側斜面では、地形が大きく異なり、非対称となっている。大東海嶺の南側斜面は、単一の急傾斜な斜面になっているのに対し、北側斜面はいくつかの階段状の地形をなしている(岩渕ほか1986)。地形図では、この階段状の地形は、大東海嶺北部に連続していくつか分布する、海底地溝であることが分かる。このように北大東海盆を挟んで南と北に位置する奄美海台と大東海嶺群の両側に、正断層で形成されたリフト地形が残されている。このリフト地形と北大東海盆に認められる帯状地磁気異常の存在は、かつて大東海嶺と奄美海台は、1つの島弧を形成しており、ある時期にリフティングが起こり海洋性地殻からなる北大東海盆が形成され、現在のように大東海嶺から奄美海台が分離したことを示唆している。もし、大東海嶺群や奄美海台のリフトの形成と、北大東海盆との形成時期が離れておらずば地質時代として連続しておこったものだとすれば、奄美海台が大東海嶺と分離した形成時期は、大東海嶺のグラブで行われたDSDPsiteが示す最下部の砂岩層の示す時代(middle Eocene)から北大東海盆の2本の帯状地磁気異常が形成される間の時期と考えられる。

また、北大東海盆における帯状地磁気異常の分布が南・北奄美海底崖以西に限られることは、このopeningは、海底崖以西に限られたことを示唆している。したがって古大東島弧から分離したのは海底崖以西の部分(現在の奄美海台)のみで、それより東側の部分はそのまま残されたと考えられ、その際南・北奄美崖は右横ずれの断層して活動したと推定される。

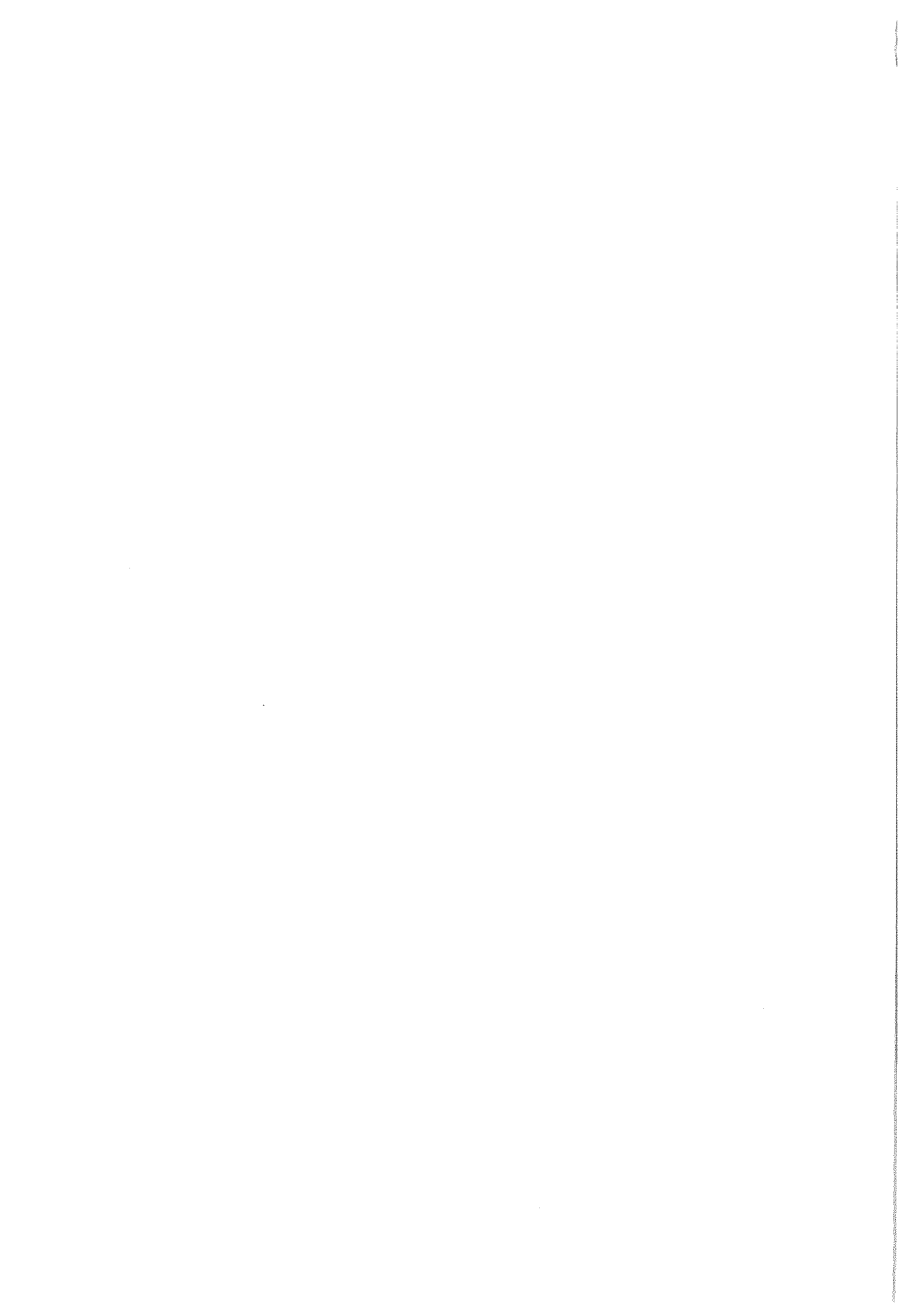
北大東海盆を閉じて、古大東島弧を復元すると、奄美海台の南列は、中列と一体となり、さらに大東海嶺の南北大東島が乗っている南部の高まりと一緒に、1つの高まりを構成する。そして名瀬海盆を挟み北列の円錐形の海山が分布する島弧となる。

本稿を終えるにあたり、大陸棚調査室に尽力された測量船「拓洋」の船長以下の乗組員の方々、および、有益な議論を頂いた大陸棚調査室員の方々には感謝の意を表します。また、奄美海台東部の地質図は、現在長崎大学に勤務されている長岡信治氏作成によるものであることを記し、感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 林田政和・長岡信治・加藤 茂・春日 茂・小川正泰・瀬田英憲・川尻智敏・内田摩利夫・河合晃司：奄美海台東部の大陸棚調査速報，水路部技報，7，25—38，(1989)
- 岩渕 洋・永野真男・桂 忠彦：大東海嶺周辺の地質構造発達史，水路部研究報告，21，p.49—64，(1986)
- Karig, D. E. : Basin genesis in the Philippine Sea, *Init. Rep. Deep Sea Drilling Project*, 31, p.857—879, (1975)
- 春日 茂・小山 薫・金子康江：大東海嶺周辺海域の地磁気・重力異常，水路部研究報告，21，p.65—76，(1986)
- 加藤幸弘・高梨政雄・金子康江・河合晃司：奄美海台西部の大陸棚調査速報，水路部技報，7，39—48，(1989)
- 加藤幸弘・金子康江・加藤 茂：南西諸島海溝北東部の地質構造，日本地質学会，第96回学術大会，p.469，(1989)

- 松田准一・斎藤和男・座主繁男：西フィリピン海，奄美海台におけるアンガンノジュール中岩石のK-Ar年代およびSr同位体比研究，フィリピン海域の地質学的諸問題，地質学会82回学術大会討論資料，99-101，(1975)
- 水野篤行・奥田義久・玉木賢策：大東海嶺群領域の地質とその起源に関する問題，琉球列島の地質学研究，1，p.177-198，(1976)
- Nisizawa, A., Suehiro, K. and Shimizu H. : Seismic refraction experiment at the Amami Plateau, *J. Phys. Earth*, 31, p. 159-171, (1983)
- 沖野郷子・加藤幸弘：沖大東海嶺とは何か，水路部研究報告，28，p.269-292，(1992)
- Ozima, M. Takigami, Y. and Kaneoka, I. : 40Ar-39Ar geochronomological studies on rocks of Deep Sea Drilling Project sites 443, 445 and 446, *Init. Repts. DSDP*, 58, 917-920, (1980)
- Seno, T. : The instantaneous rotation of the Philippine Sea plate relative to the Eurasian plate, *tectonophysics*, 42. (1977)
- 徳山英一：奄美海台と琉球弧の衝突，月刊地球，7-12，p.700-708，(1985)
- Tokuyama, H., Kagami, H. and Nasu, N.: Marine geology and subcrustal structure of Shikoku Basin and the Daito Ridges region in the northern Philippine Sea, *Bull. Ocean Res. Inst. Univ. Tokyo*, 22. (1986)



1991年台風19号によるたか潮と副振動 —水路部所管験潮所の記録—†

小田巻 実*・桑木野 文章**・今西 孚士**・福島 繁樹**・松島 弘**・西田 浩志***
鈴木英一**・石井 操****・伊藤清寿**

RECORDS OF STORM SURGE AND SECONDARY OSCILLATIONS INDUCED BY TYPHOON No. 19, 1991.

Minoru Odamaki*・Fumiaki Kuwakino**・Takanori Imanishi**
Shigeki Fukushima**・Hiroshi Matsushima**・Hiroshi Nishida***
Eiichi Suzuki**・Misao Ishii**** and Kiyohisa Ito**

Abstract

Typhoon No.19 attacked Japan in September 26-28th 1991, and caused severe disaster. Its magnitude has shown record figures such as atmospheric pressure low 935mb at landing on the Kyusyu. Its moving speed was very high and accompanied winds were very strong. Then, the typhoon caused severe storm surges in various coasts around the western area of Japan. In this paper, the storm surges which are shown in the records of tide gauges of the Hydrographic Department, are described.

In 7 tide stations, the water heights at the storm surge exceed the former records. Comparing the times of the highest height and the lowest atmospheric pressure, they are not always matched and sometimes delayed. In some cases the highest heights occurred at the times of the winds blowing against the coasts and sea water piled up to the bays, and in another cases it occurred at the time of the returning uplift of water height induced by the secondary oscillation in the resurgence.

† Received 18th January 1993

* 海上保安大学校 Maritime Safety Academy.

** 沿岸調査課 Coastal Surveys and Cartography Division.

*** 第四管区海上保安本部 Hydro. Dept. 4th R.M.S.Hqs.

**** 第六管区海上保安本部 Hydro. Dept. 6th R.M.S.Hqs.

1. はじめに

平成3年9月27日から28日にかけて日本を席卷した台風19号は、全国で死者・不明57、負傷1,796、建築物の全半壊約1万棟、沈没船69隻（以上「気象」1991年11月号による）、海上保安庁関係でも多くの航路標識や係船施設が損壊するなど、大きな被害が出た。この台風では記録的なたか潮が発生し、通過経路の直下と東側に当たる第七管区と第六管区の所管験潮所では、ほとんどのところで既往最高値を越えた（第1表）。この台風は中心気圧がたいへん低かっただけでなく、風も記録的に強く、たか潮の発生には風による海水の吹き寄せも効いていたようである。さらに、この台風は移動速度が強く、各地の験潮所では、台風通過後、溜まっていた海水が急激に開放されて発生したと思われる大きな副振動が発生した。

以上のように、今回のたか潮の験潮記録は、今後の防災対策の貴重な資料となると考えられることから以下に報告し、記録にとどめておくこととした。

なお、以下の説明の中では、潮高曲線の上に凸になっているところを極高、下に凸になっているところを極低と称し、観測開始以来の最高、最低と区別している。

Table 1. Highest water heights induced by Typhoon No.19. 1991.

験潮所 Tide stn.	偏差(Obs-Pre) Deviation	最高潮位 Date	Highest Hight	前既往最高値 Former value
門司 Mozi	2.2m	27d 19:00	3 m 44	1980/9 3 m 03
博多 Hakata	1.7m	27d 19:00	2 m 84	1966/8 2 m 61
大分 O-ita	1.0m	27d 21:35	3 m 14	1980/9 3 m 03
徳山 Tokuyama	1.9m	27d 20:40	4 m 20	1980/9 3 m 90
広島 Hiroshima	1.8m	27d 22:45	4 m 96	1955/9 4 m 60
呉 Kure	1.5m	27d 22:45	4 m 85	1978/9 4 m 48

(above Datum Level)

2. 台風19号の概要

第1図a, bに台風19号の通過経路と験潮所の位置を示す。気象庁の全国検潮速報（第3集第42号）によれば、「台風19号は、宮古島東方を経て大型で非常に強い勢力で長崎県に上陸（中心気圧940mb、最大風速50m/s、暴風半径300km）したあと日本海を北東に進み、28日に大型で強い勢力で北海道渡島半島に再上陸（中心気圧955mb、最大風速40m/s、暴風半径370km）し、同日中にオホーツク海南部に抜けた。—中略—、上陸時に中心気圧が940mb以下であったのは、昭和46年の台風23号以来20年ぶりである。九州、中国、東北の広い範囲で暴風による大きな被害（家屋一部損壊12万棟余）が生じ、多くの気象官署で最大風速の記録を更新した。—以下略」。この台風によるたか潮について、小西（1992）によれば、気象庁所管の験潮所で最大偏差が50cmを超えたものは20を超え、有明海を中心とする九州西岸及び瀬戸内海西部で大きなたか潮を起こした。最大偏差（実測値—潮汐推算値，o-p）は、有明海の大浦の216cmを最大として8験潮所で極値を更新した。また、最

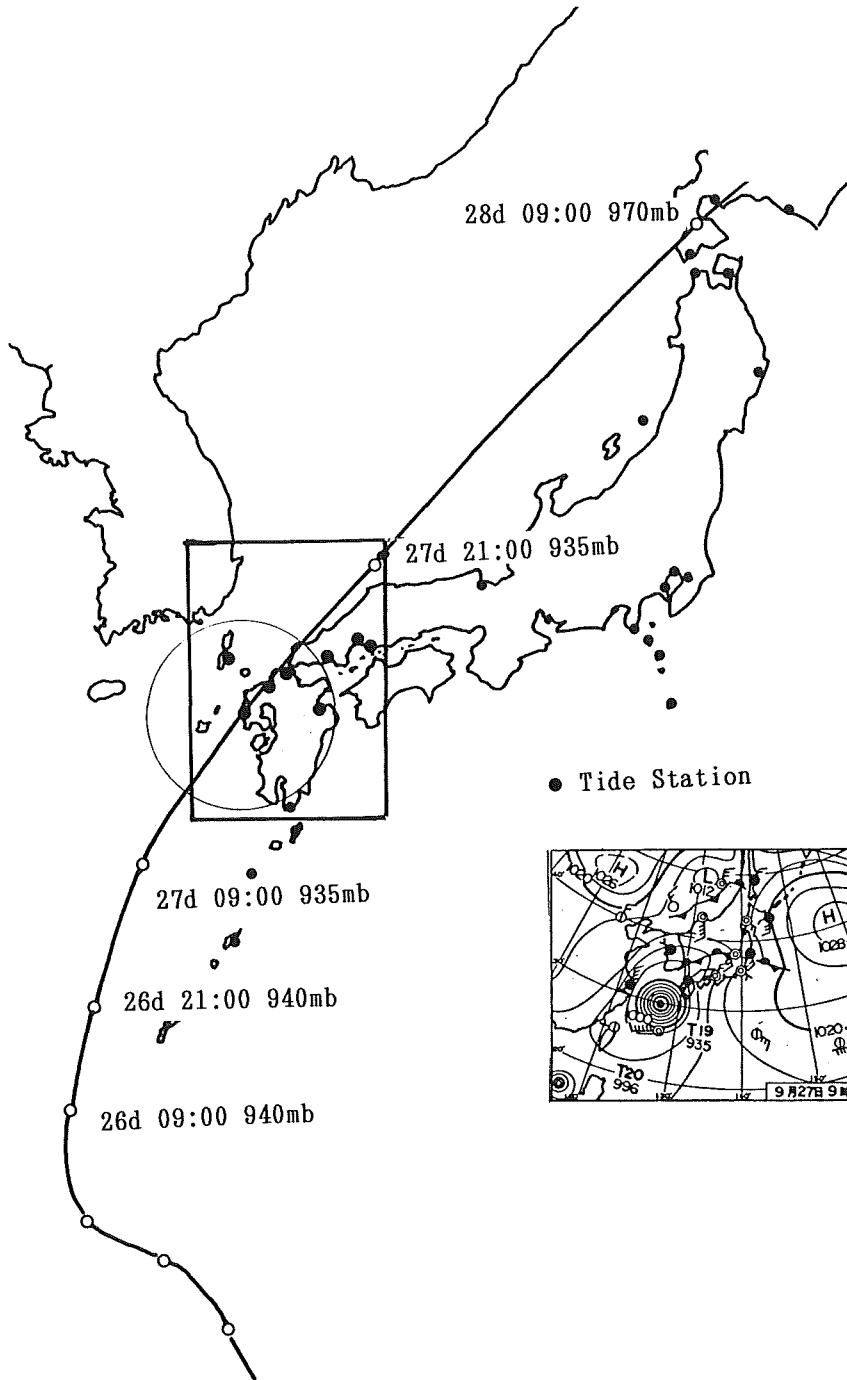


Figure 1a. Path of Typhoon No.19, Sept. 26-28th.

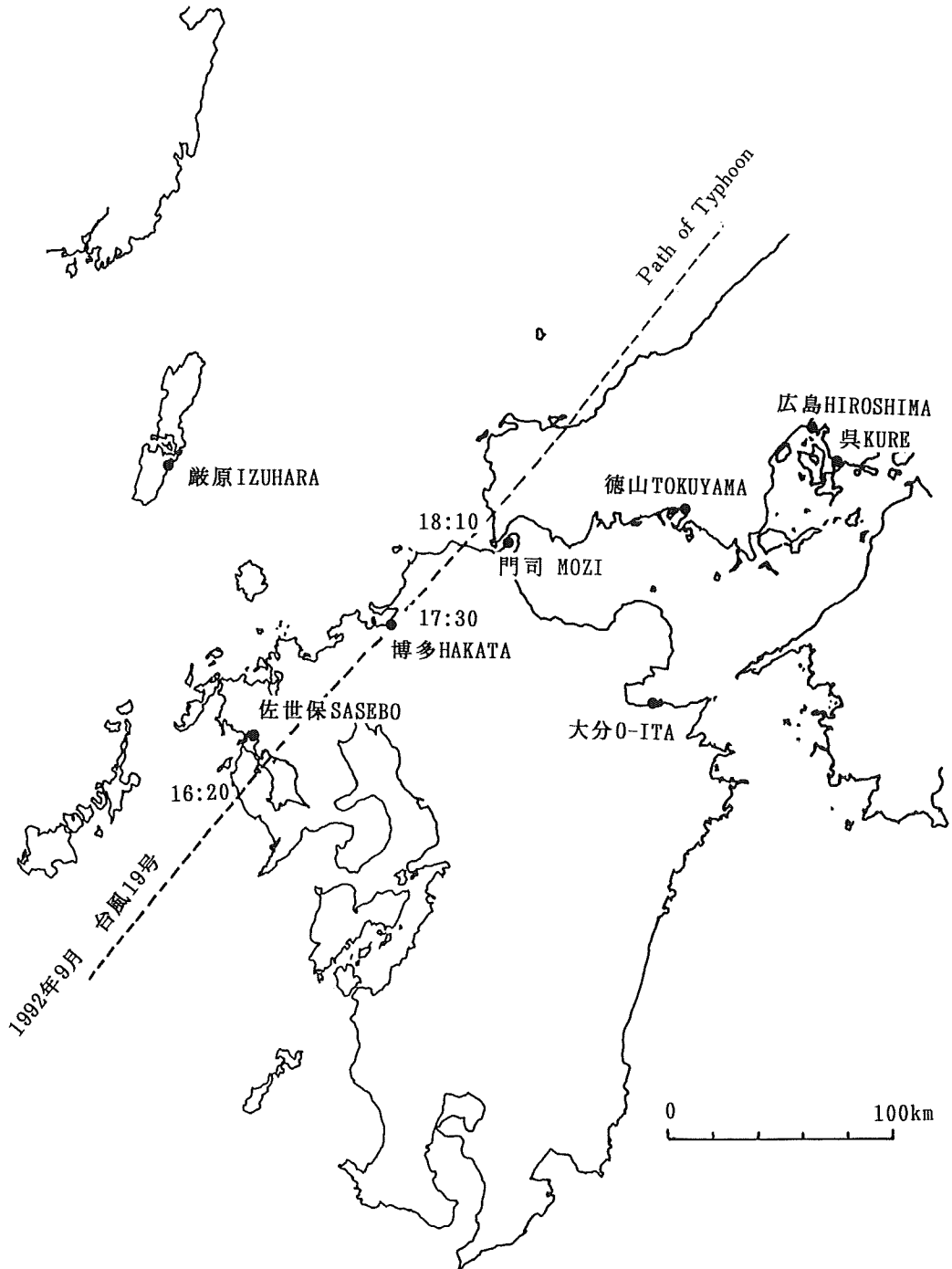


Figure 1b. Location of Tide stations.

高潮位の記録は、松山 (TP上275cm)、宇野 (195cm)、高松 (187cm) の3ヶ所で更新された。さらに高波も記録的で、佐藤 (1992) によれば、鹿児島県の佐多岬では27日午後3時に有義波高6.9m (歴代第三位)、長崎県の福江島では27日午後5時に有義波高5.5m (歴代第四位) を記録した。

3. 台風19号通過時の各地の驗潮記録

(1)九州北西岸

台風19号は、大型で非常に強い台風のまま935mbという極めて低い中心気圧をもって9月27日16時頃長崎県佐世保市付近に上陸した。その後、約80km/hという速い速度で北東に進み、関門海峡付近を通過して日本海に抜けた。佐世保、博多、門司の驗潮所は台風の直下に近く、巖原は台風の左側にあつた。

〈佐世保〉第2-1図。台風の上陸した27日16時20分には、最大偏差 $o-p$ は約115cmに達したが、低潮時と重なったため最高潮位とはならなかった。台風の通過後、周期約80分、振幅約40cmの副振動が発生した。この副振動は、佐世保港の港口を節とする基本振動と思われる。

〈博多〉第2-2図。博多付近では17:30頃に最低気圧942mbを示したが、18:40から19:30頃にかけて偏差 $o-p$ が最大(170cm)となり、19:30には観測最高潮位2m84cm(DL上)に達した。台風通過後、潮位は急激に下降し、最高潮位の1時間後の20:30頃には偏差が負の最大(-55cm)となった。その後、全振幅約50cm、周期約140分の副振動が発生し、半日以上継続した。この副振動は、博多港の接続する福岡湾の基本振動と思われる。

〈巖原〉第2-3図。27日12時頃から徐々に偏差 $o-p$ が大きくなり、予報低潮時刻の16:30頃には約45cmとなった。その後、偏差の大きい状態が続き、20:00頃には最大偏差50cmを示したが、23:00頃には偏差はほとんど無くなり、28日01:00頃には台風通過以前からの偏差約20cmに落ち着いた。また、偏差が大きくなり始めた16:00頃から、全振幅約5cmで数十秒周期の波と、全振幅約20cmで約10分周期の副振動が大きくなり、偏差が小さくなくても続いていた。書誌105号九州沿岸水路誌によれば、「台風がこの港の東側を通過するときは、山のような高い波と強風が港内に侵入する」となっており、そのような状況下にあつたものと思われる。

(2)関門海峡周辺 (第3-1図)

部埼灯台の気圧計(第3-2図)は27日18:10頃に最低値945mbを示した。台場鼻灯台の風(第3-3図)は、18:10を境に東の風25m/sから南西35m/sに変わり、さらに19:10頃には北西38m/sに変わった後、21時過ぎには西北西17m/sに落ち着いた。

〈門司〉第2-4図。驗潮所は門司埼の西側にあり、早鞆瀬戸西流時には潮波が入ってくるため、記録紙上では、見かけ上、潮高曲線が太くなる。潮位の偏差 $o-p$ は、27日12:00頃より大きくなり始め、19:00頃に最も大きくなり、潮波を含む潮位の最高はDL上3m44を示した。その後、19:40にかけて低くなった後、再び上昇に転じ20:10に極高となった。その後、下降して、途中12分ほどフロートがどこかに引っかかって止まっていたが、21:20から21:30頃に極低となった後、21:50頃に再び最高潮位に近くなってDL上3m40を示した。その後、周期60から90分程度の副振動が現れた。一方、潮波は潮位の偏差とともに大きくなり、最高潮位を示した19:00頃には全振幅が約50cm(記録紙の読取值)に達し、その後、徐々に小さくなった。

〈早鞆瀬戸の潮流〉火の山下の潮流信号所の海底設置型潮流測定装置で測られた潮流記録を第4-4図に示す。装置の設置場所が瀬戸中央ではないため、流速値は小さく出ている。破線で示すように、潮汐表の

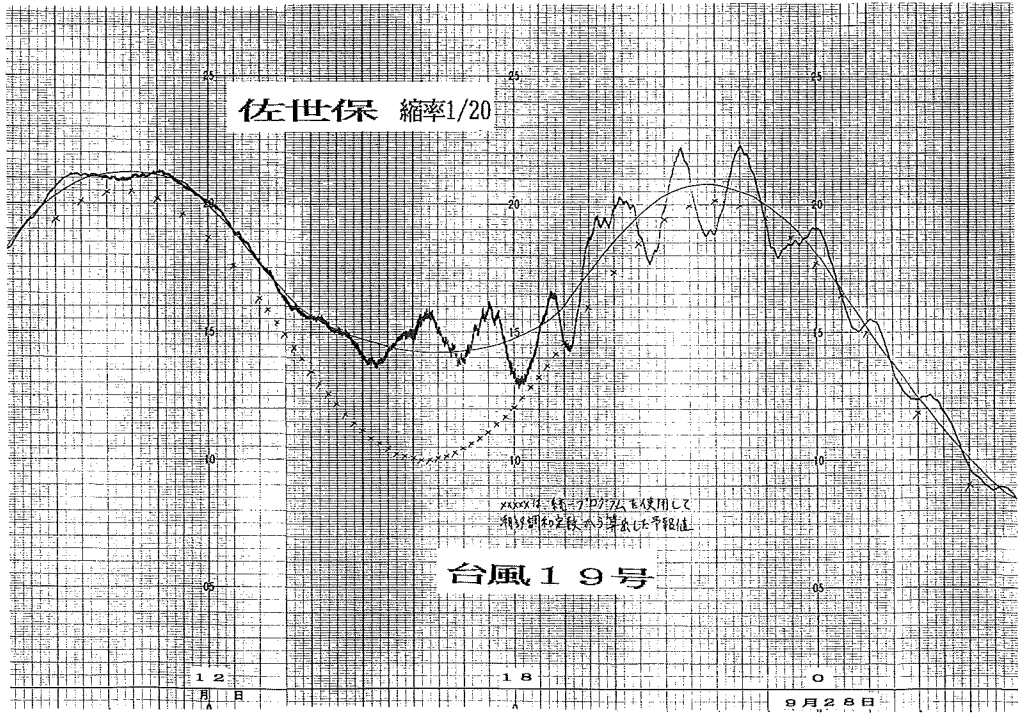


Figure 2-1. Tidal Record, 1991 Sept, 27-28th at Sasebo.

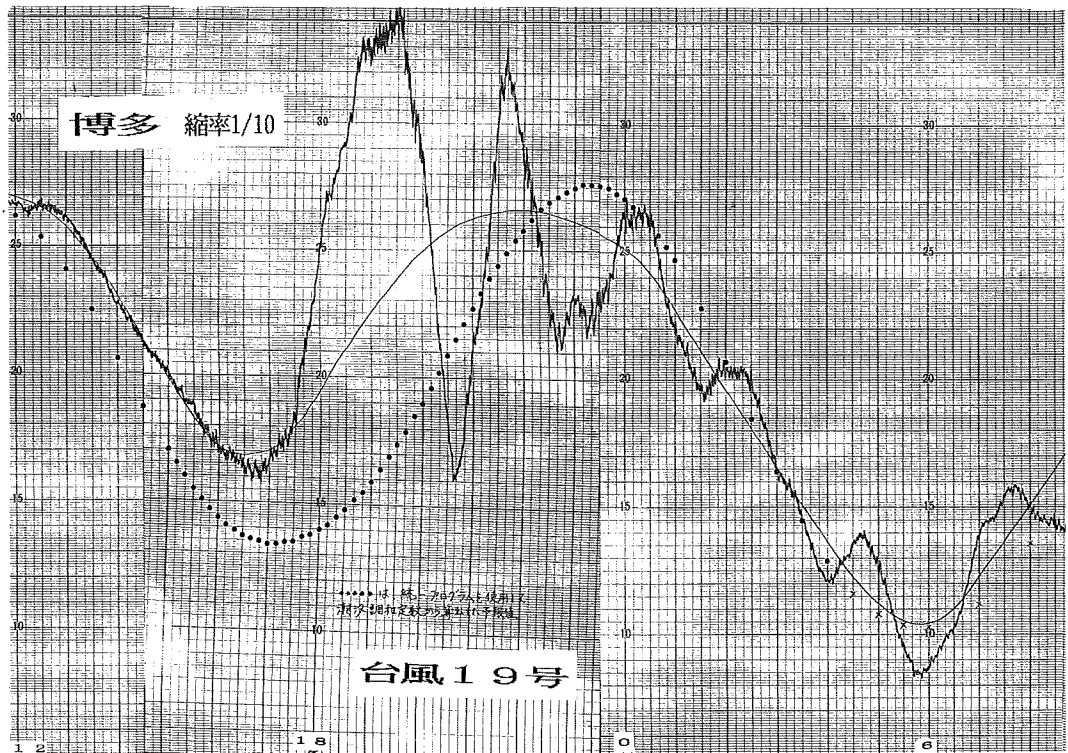


Figure 2-2. Tidal Record, 1991 Sept, 27-28th at Hakata.

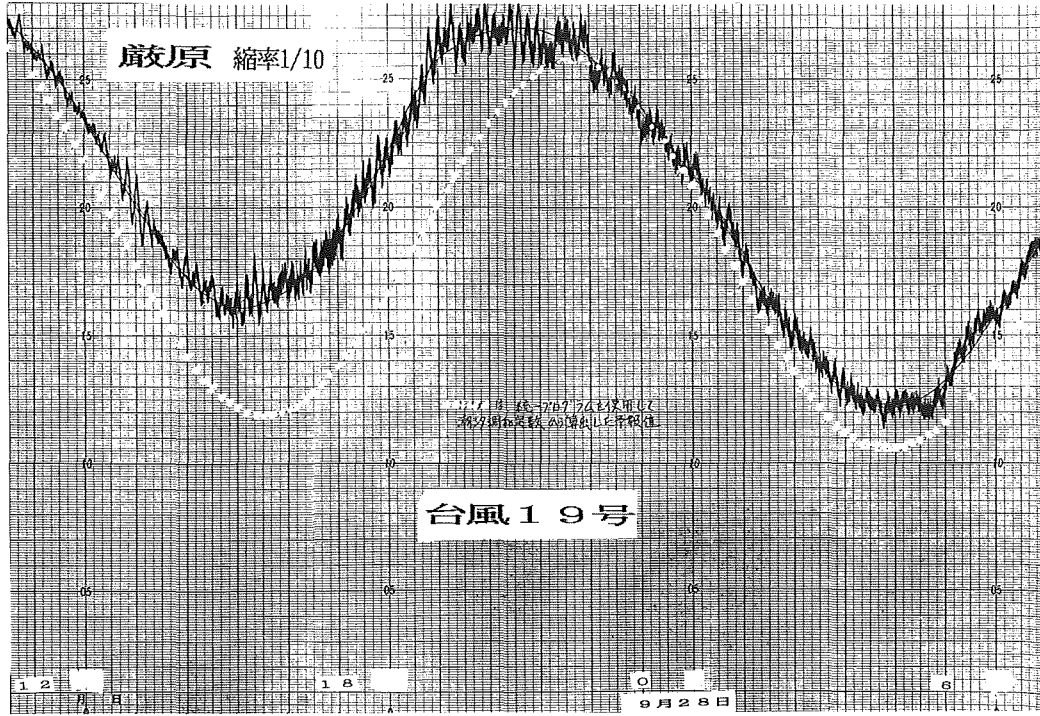


Figure 2-3. Tidal Record, 1991 Sept, 27-28th at Izuhara.

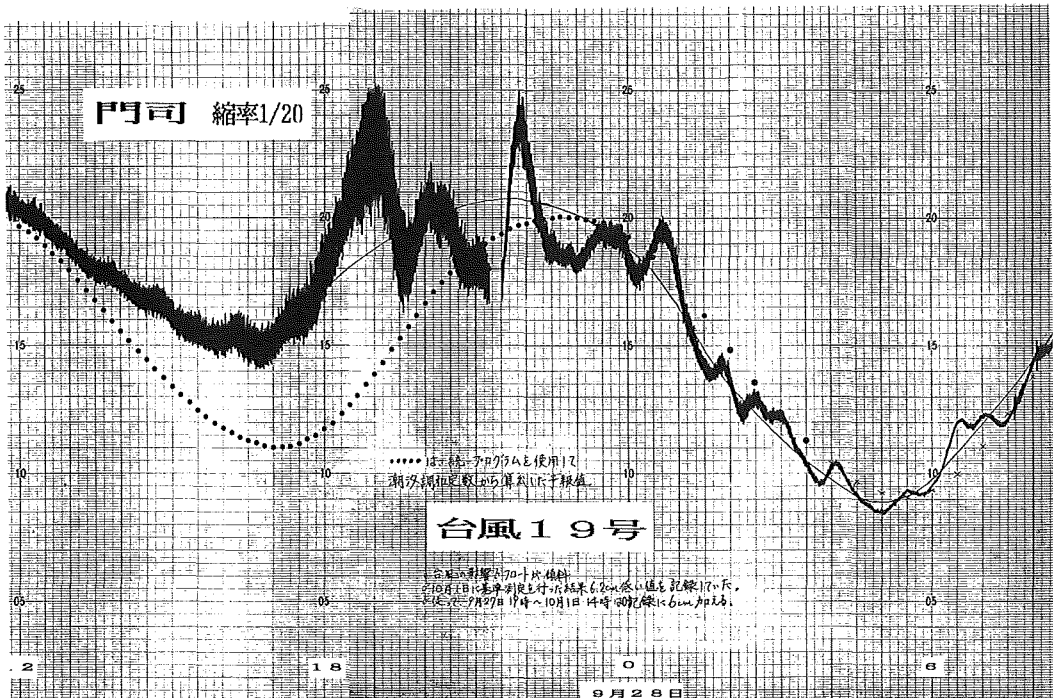


Figure 2-4. Tidal Record, 1991 Sept, 27-28th at Mozi.

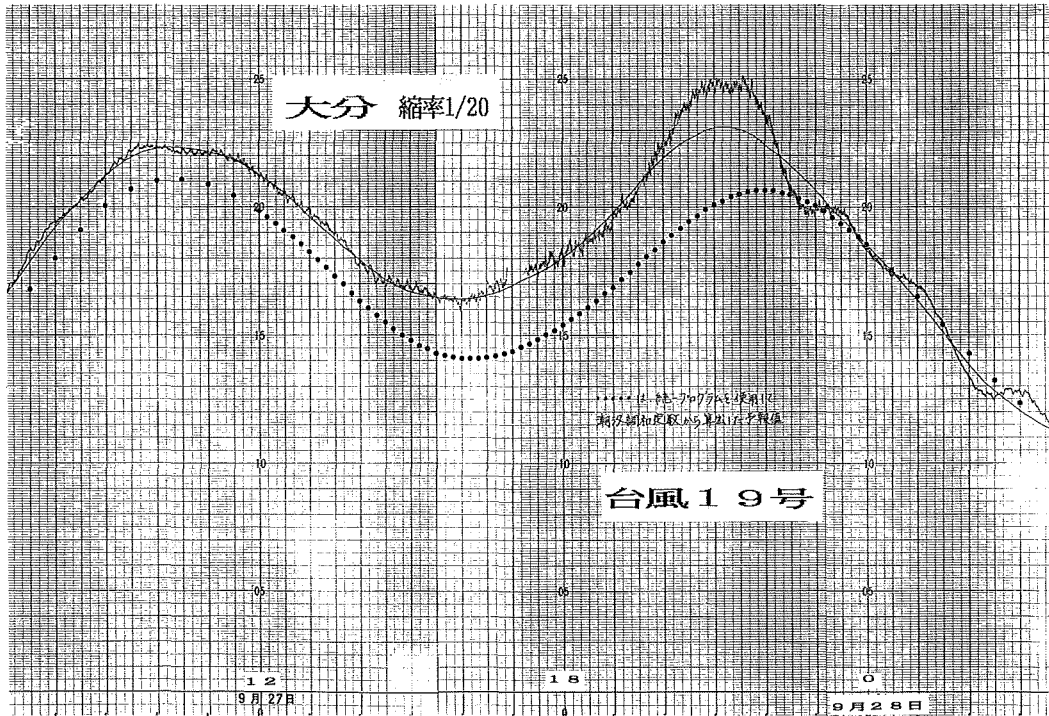


Figure 2-5. Tidal Record, 1991 Sept, 27-28th at O-ita.

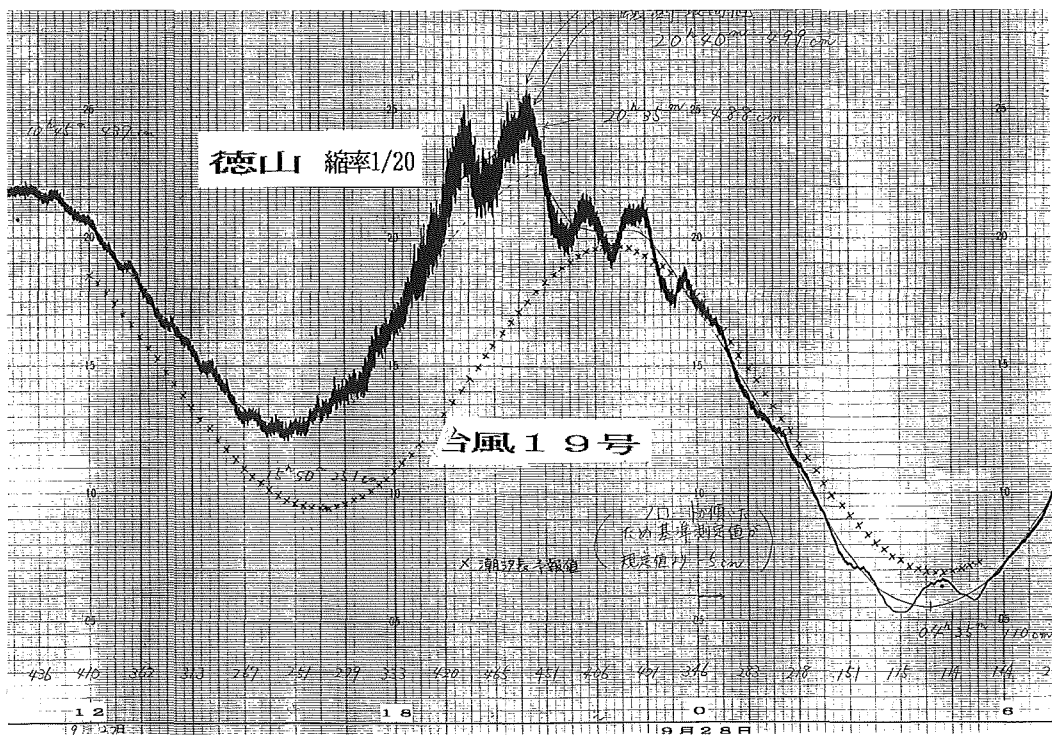


Figure 2-6. Tidal Record, 1991 Sept, 27-28th at Tokuyama.

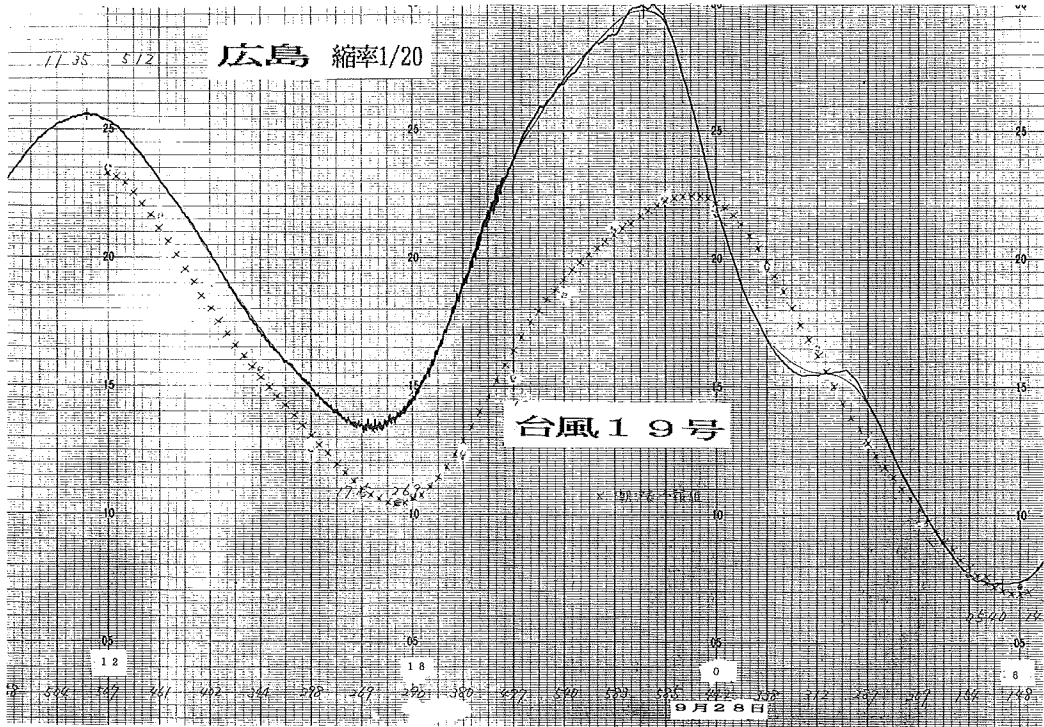


Figure 2-7. Tidal Record, 1991 Sept, 27-28th at Hiroshima.

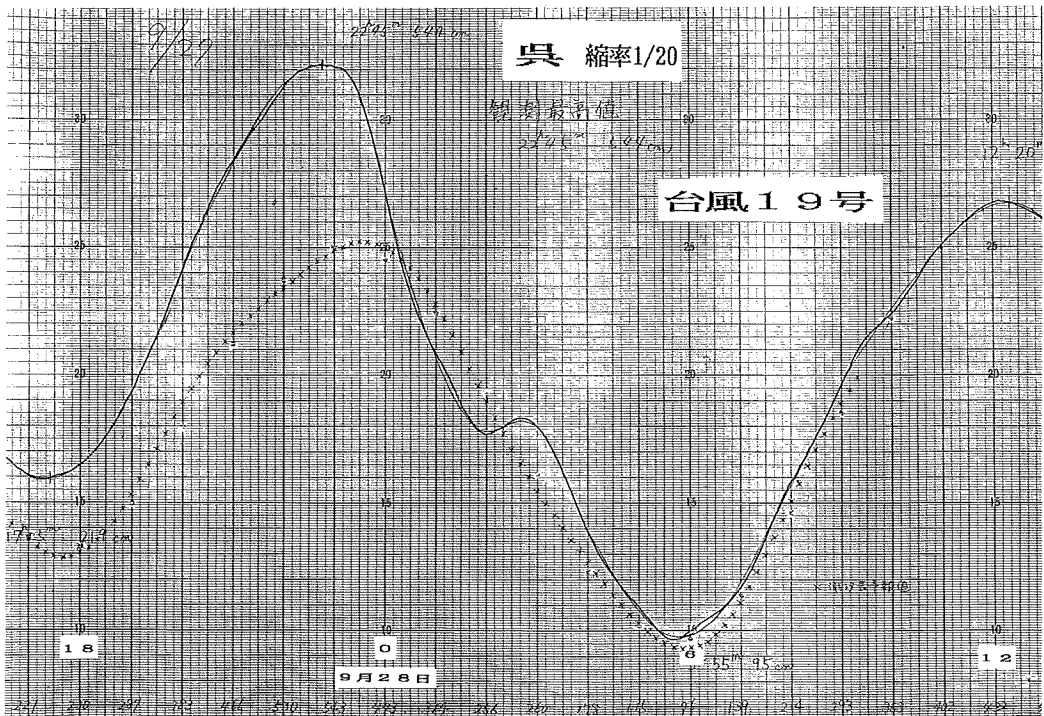


Figure 2-8. Tidal Record, 1991 Sept, 27-28th at Kure.

潮流予報では14:30に西流から東流に転流し、20:00過ぎまで東流が続くのに対し、実測ではこの間ずっと西流が続いていた。20:10頃から20-30分程度だけ東流を示した後、21:00頃には潮汐表どおりの西流となった。

(3)瀬戸内海西部

〈大分〉第2-5図。27日15:00頃まで約40cmの潮位偏差で変わらなかったが、20:00過ぎから大きくなり始め、予報された高潮時に近い21:00には最大となり、21:35には観測最高潮位が3m14(DL上)を示した。22:00以降になると偏差は急速に小さくなり、周期約120分、全振幅約20cmの副振動が現れた。

〈徳山〉第2-6図。27日16:00頃から潮位偏差が大きくなりはじめるとともに、サーフビートが入って潮高曲線が太くなった。潮位偏差が19:25頃に1.9mと最大となって極高を示した後、一旦下降してから上昇し、上げ潮と重なって20:40頃に観測最高値4m20(DL上)を示した。22:00以降、潮位偏差は急速に小さくなり、約90分周期の副振動が発生した。

(4)広島湾

台風は、27日の晩、島根県沖の日本海を通過した。広島では、20時頃に最も気圧が低く風も最も強くなった。

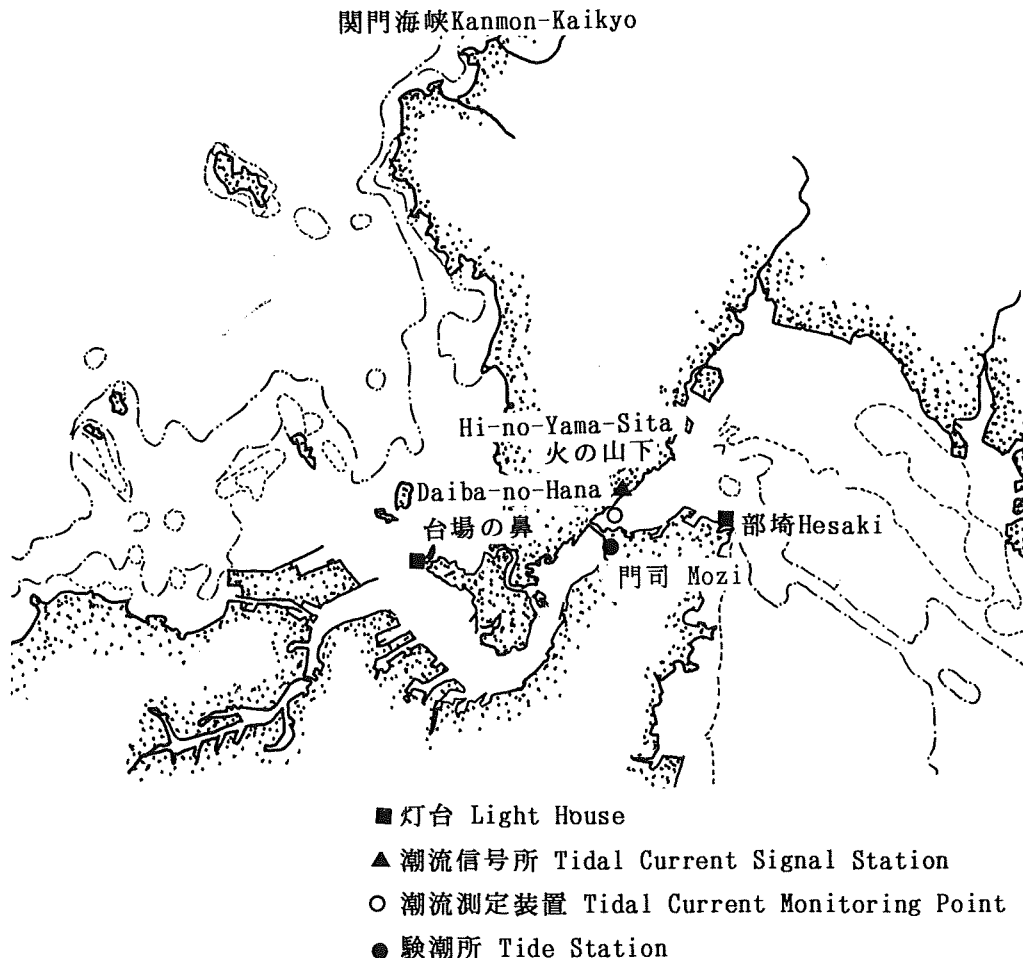


Figure 3-1. Tide, Tidal Current, and Weather stations around Kanmon-Kaikyo.

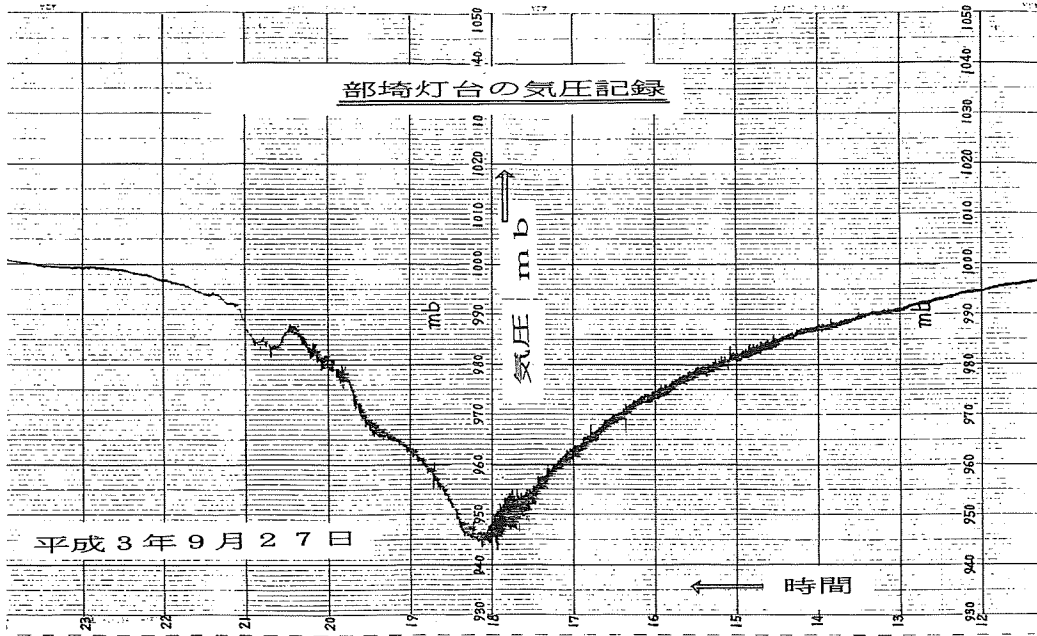


Figure 3-2. Atmospheric Pressure Record at Hesaki.

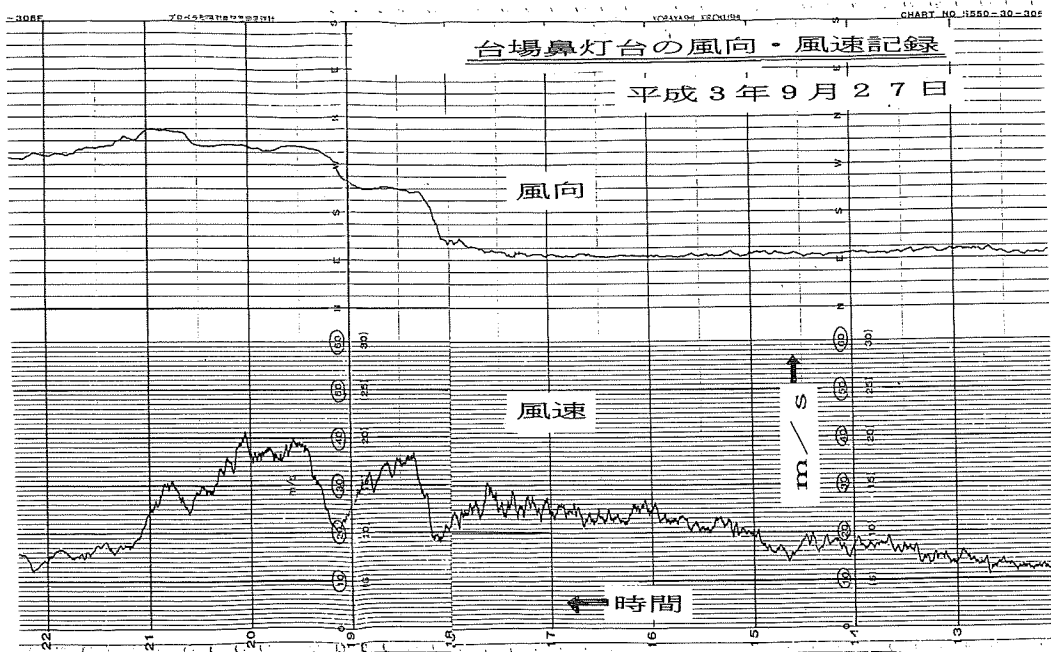


Figure 3-3. Wind Record at Daiba-no-Hana.

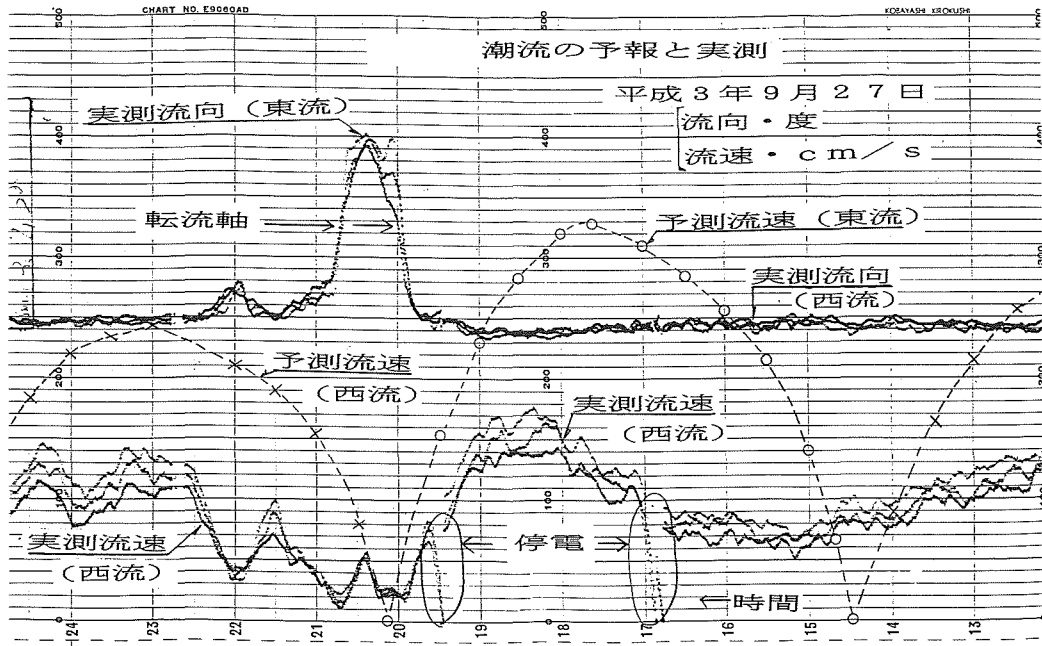


Figure 3-4. Tidal Current Record at Hi-no-Yama-Sita Tidal Current Monitoring Point.

〈広島〉第2-7図。27日17:00から潮位偏差が大きくなり始め、20:00以降1m60あまりとなった。台風の影響が上げ潮と重なって、その後も潮位は上昇しつづけ、潮汐表の高潮予報時刻(23:31)に近い22:45に観測最高潮位4m96(DL上)を示した。そののち急激に潮位が低下し、潮位偏差も小さくなって平常に戻ったが、28日02:30頃に、一旦、下げが止まって小さな極高が現れたのち、再び低下した。

〈呉〉第2-8図。広島と同様、27日17:00頃から潮位偏差が大きくなり始め、たか潮と上げ潮が重なって22:45に観測最高潮位4m85(DL上)を示した。その後、潮位は急激に低下し、潮位偏差も小さくなったが、広島と同様、下げる途中の02:00に極低、02:40に極高が現れた。

4. 考察

海岸工学の教科書(堀川, 1973)の説明では、たか潮の現象は、「まだ台風の原因が陸岸から300~1000km離れていて、気象的な攪乱の影響が現れる以前に平均水面の上昇が始まる。これをforerunner,あるいは前駆波と名づけている。やがて台風域内に入ると海面の上昇は急激となり、この部分をstorm surgeと呼ぶ。つづいて海面が下降したあと、湾の固有振動に伴う海面変動が引き続いて起こり、これをresurgenceという。」となっている。教科書的な説明と比較しながら今回のたか潮の特徴を見るため、第2-1~2-8図の潮高曲線を10分毎に読み取り、各観測所の潮位偏差o-pを描いたのが第5-1~5-7図である。所によっては、付近の気象観測点の気圧と風の毎時値も示した。

佐世保(第4-1図)では、前述の説明の通り、暴風圏に入る依然から平均水面が約30cm上がっており、暴風圏に入ったと思われる14:00過ぎから海面の上昇は急激となり、台風の原因が通過した16:00過ぎに潮位偏差が最大となった後、resurgenceが起こって第一のピークの後すぐに第2のピークが現れ、引き続いて大きな副振動が起こっている。

博多(第4-2図)でも同様に、forerunner, storm surge, resurgenceの現象を示したが、台風の原因

の通過と潮位偏差のピークは一致しておらず、通過時刻の約1時間後に最大となって頭打ちの状態が約1時間続いた後、急激に下降している。これは、博多港の接続している福岡湾の湾口は西に向かって開いており、台風が通過するまで吹いていた東風は、湾内の海水を外に押し出して海面を低下させ、気圧降下による海面上昇を打ち消しているのに対し、通過後に変わった強い西風が湾内に海水を吹き寄せて一気に海面を上昇させ、その後、西風が弱くなるとともに急激に海面が低下したものと考えられる。

厳原(第4-3図)は、台風の通過経路から外れていたため、他に比べて潮位偏差の大きなピークは見られなかった。

門司(第4-4図)では、潮位の実測値(第2-4図)では19:00に最初のピークが出た後、21:00と22:00にもピークが見られたが、後者の二つのピークはresurgenceが起きて、その揺れ戻しが低潮から高潮にかけての上げ潮と重なったために生じていることがわかる。さて、門司(第4-4図)では、博多(第4-2図)と比べ、台風が近づくとつれて比較的速い段階から海面上昇に始まり、また通過後急激に海面が低下し、-70cmに達する負の偏差を示している。これは、図の下部に示すように、台風が近づく頃に東風が連吹して徐々に強くなり、これによって周防灘の海水を関門海峡東口に吹き寄せて、気圧降下とともに海面を上昇させ、さらに、台風の通過後、風が西風傾向に変わって東口に溜まっていた海水を沖に押しだして、気圧の上昇とともに一気に海面を低下させたものと考えられる。一方、関門海峡の潮流は、東口と西口の水位差で生じており、通常の状態では東口の方が潮差が大きく、高潮の時には東口の水位が高いので東から西に流れ、低潮の時には東口の水位が低くなって西から東に流れる。今回のたか潮では、気圧降下だけならば西口の方が先に海面が上昇し、東流傾向が強くなるはずであるのに対し、前述のように周防灘を吹き渡った東風が東口の水位を押し上げたため、潮汐の水位差による東流を抑えて西流になっていたものと考えられる。実際、台風の通過後の20:00過ぎに一時的に東流に転じた(第3-4図)のも、前述のように西に変わった風が東口の水位を西口よりも大きく低下させたため、水位が西から東に傾斜して起こったためと考えられる。その後、この異常な海面低下が収まるとともに潮汐の水位差による西流に復している。

大分(第4-5図)では、鋭いピークは見られず、forerunner, storm surge, resurgenceという典型的なパターンを示した。

徳山(第4-6図)では、19:20に鋭いピークが現れ、その後resurgenceが始まり、1時間ないし2時間ぐらいの副振動が現れながら、海面が低下していることがわかる。徳山の実測(第2-6図)と比べて興味深いことは、観測最高潮位は、潮位偏差の最大の時ではなく、揺れ戻しのピークの20:40に現れていることである。このような内湾のたか潮に関連して、最高潮位が最低気圧時ではなく、副振動が絡んで起時が遅れて、揺れ戻しの時に起きることがあることが指摘されており(小西ほか, 1986)、台風が通過しても油断はできない。

広島(第4-7図)では、最低気圧となった20:00以降もたか潮の状態が続いている。これは、それ以降も日本海を通過した台風が吹き込む南風が続き、広島湾の海水を北側の広島港付近に吹き寄せ続け、さらに21:00頃に南南西風が変わっても、広島は広島湾の北東(第1図b)にあるため、吹き寄せ状態が続いたものと考えられる。呉(第4-7図)では、広島よりもたか潮のピークの起時が遅れ、22:40頃に生じた。これは、広島が湾の北東端にあるのに対し、呉は呉湾の南東部にあり、南風による吹き寄せよりも南西から西の風の方が効果的なものと考えられる。広島と呉では、気圧が上昇し風が止むとresurgenceが始まって急激に海面が低下するが、約4時間後に揺れ戻しの第二のピークが現れている。これは広島湾で発達する6分の1日周潮と同様、広島湾の固有振動の現れと考えられる。

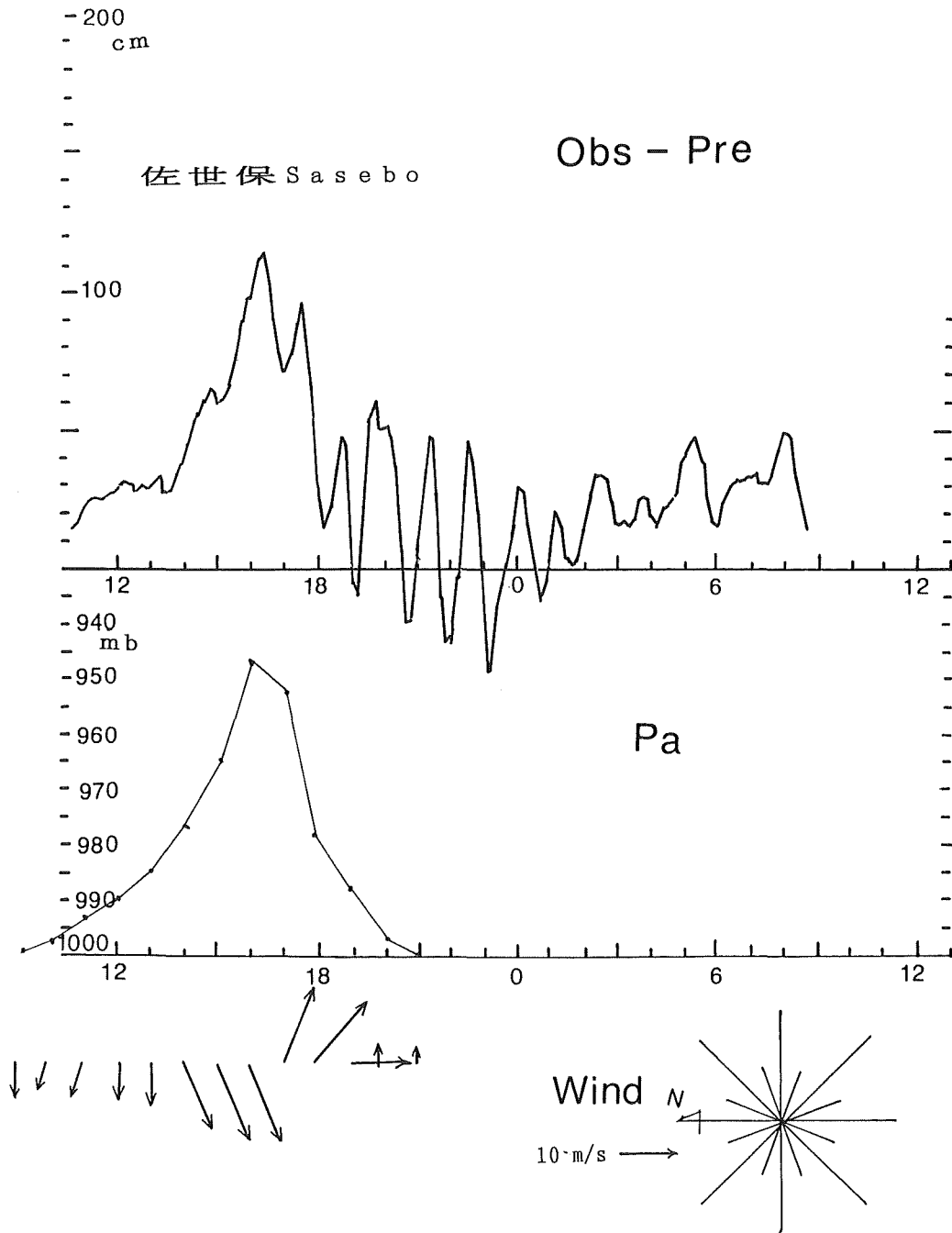


Figure 4.1. Storm Surge induced by Typhoon No.19, 1991 Sept. 27-28th, at Sasebo.

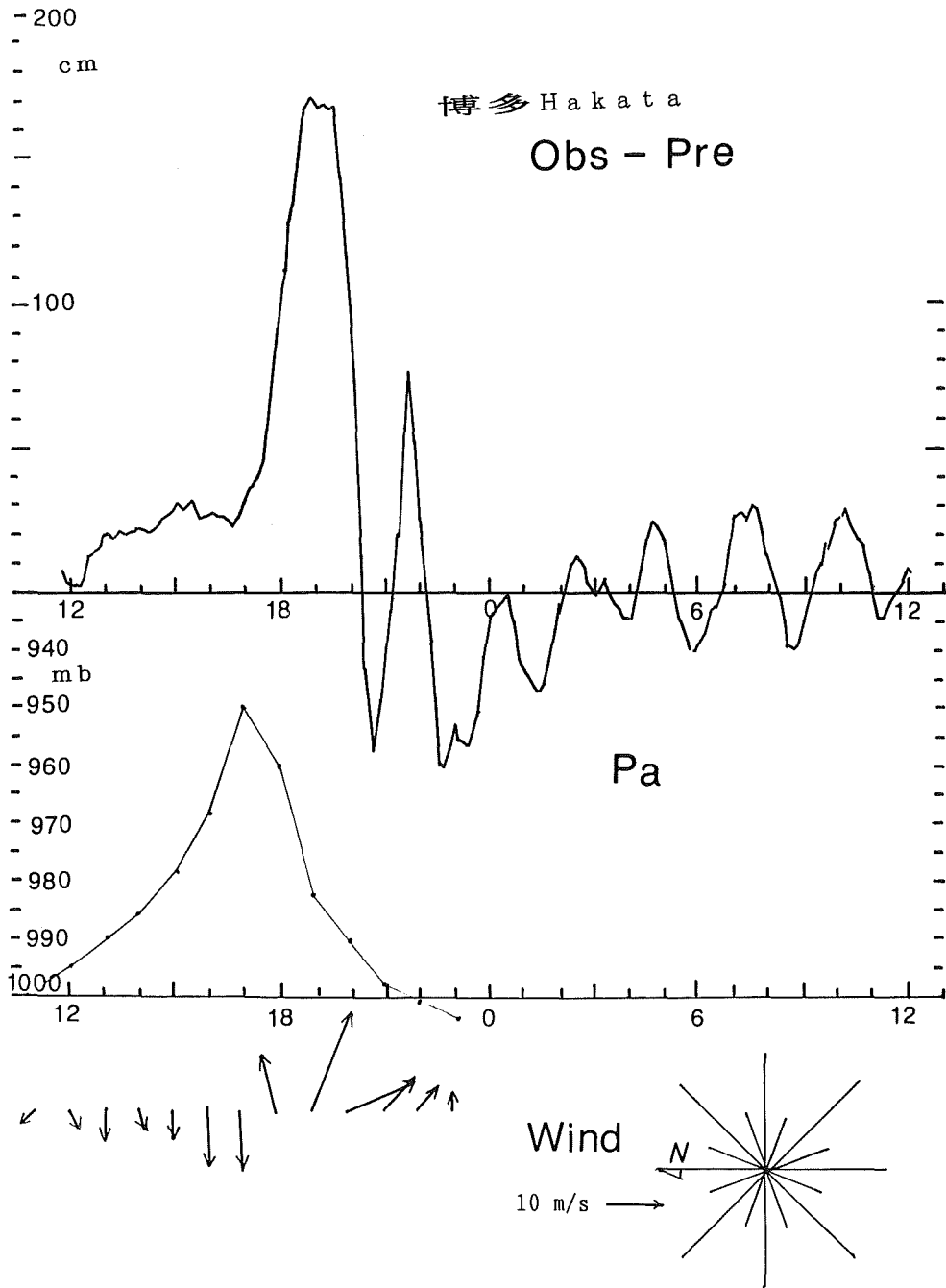


Figure 4-2. Storm Surge induced by Typhoon No.19, 1991 Sept. 27-28th, at Hakata.

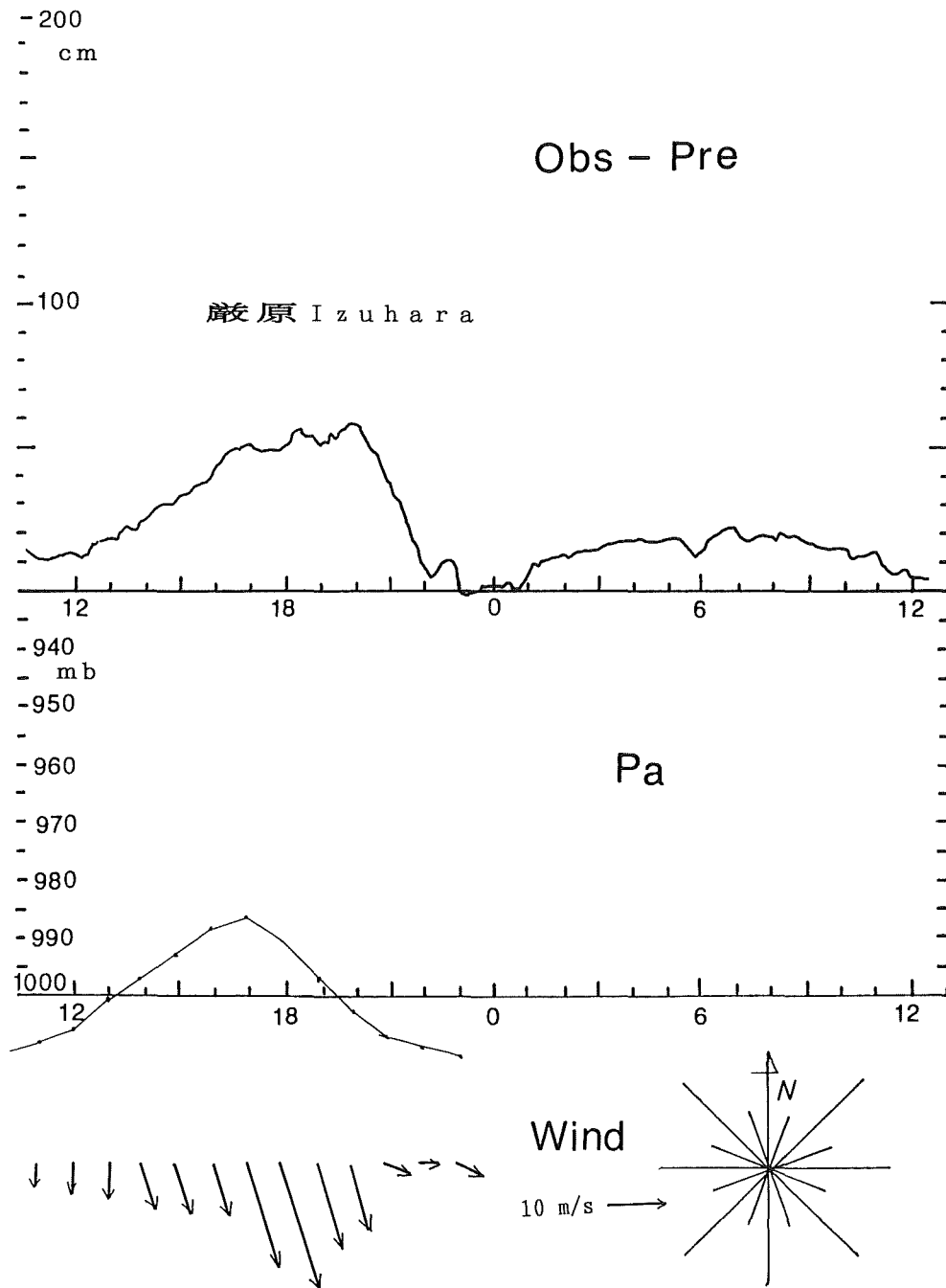


Figure 4-3. Storm Surge by Typhoon No.19, 1991 Sept. 27-28th, at Izu-hara.

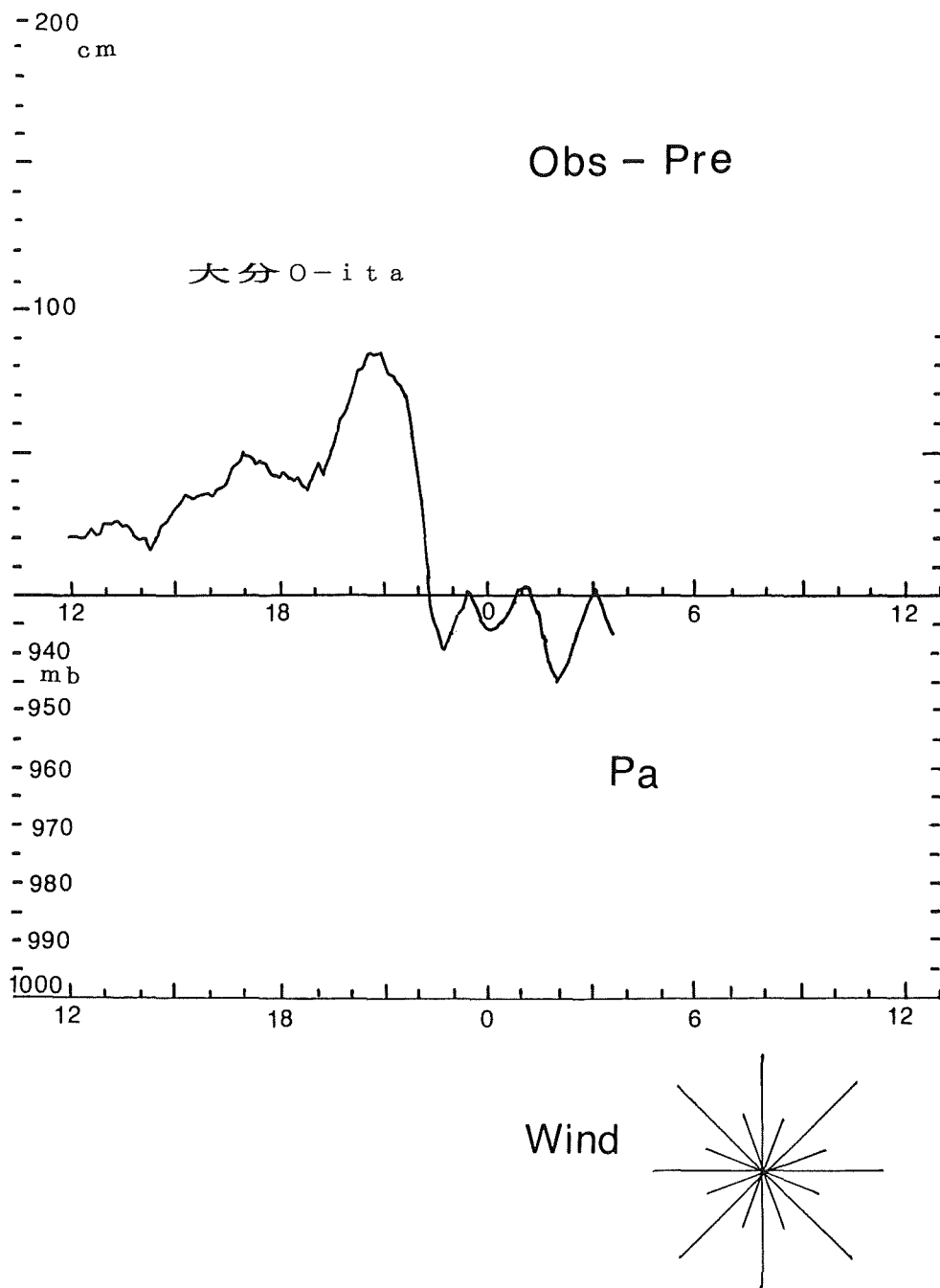


Figure 4-4. Storm Surge induced by Typhoon No.19, 1991 Sept. 27-28th, at

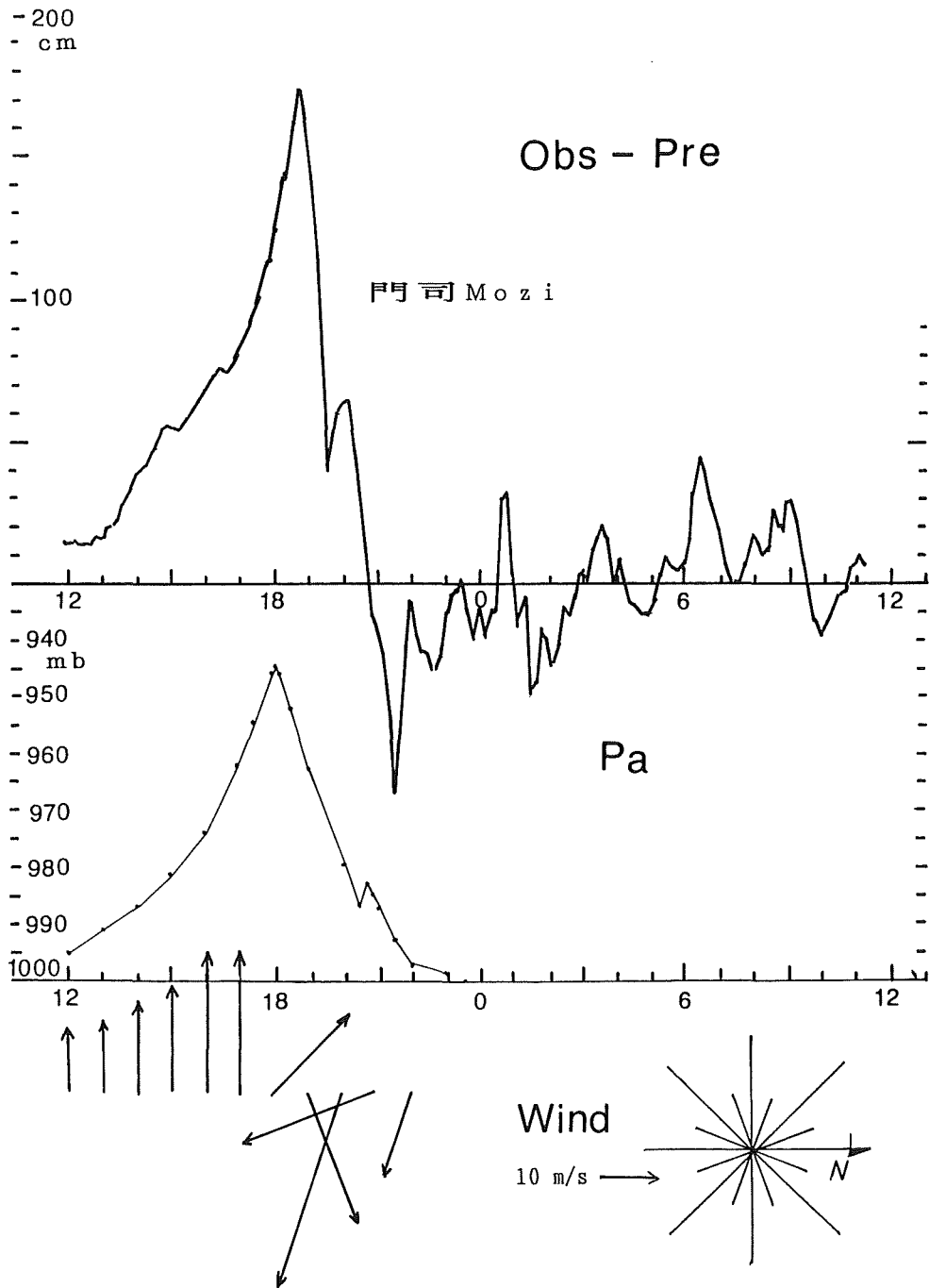


Figure 4-5. Stom Surge induced by Typhoon No.19, 1991 Spet. 27-28th, at

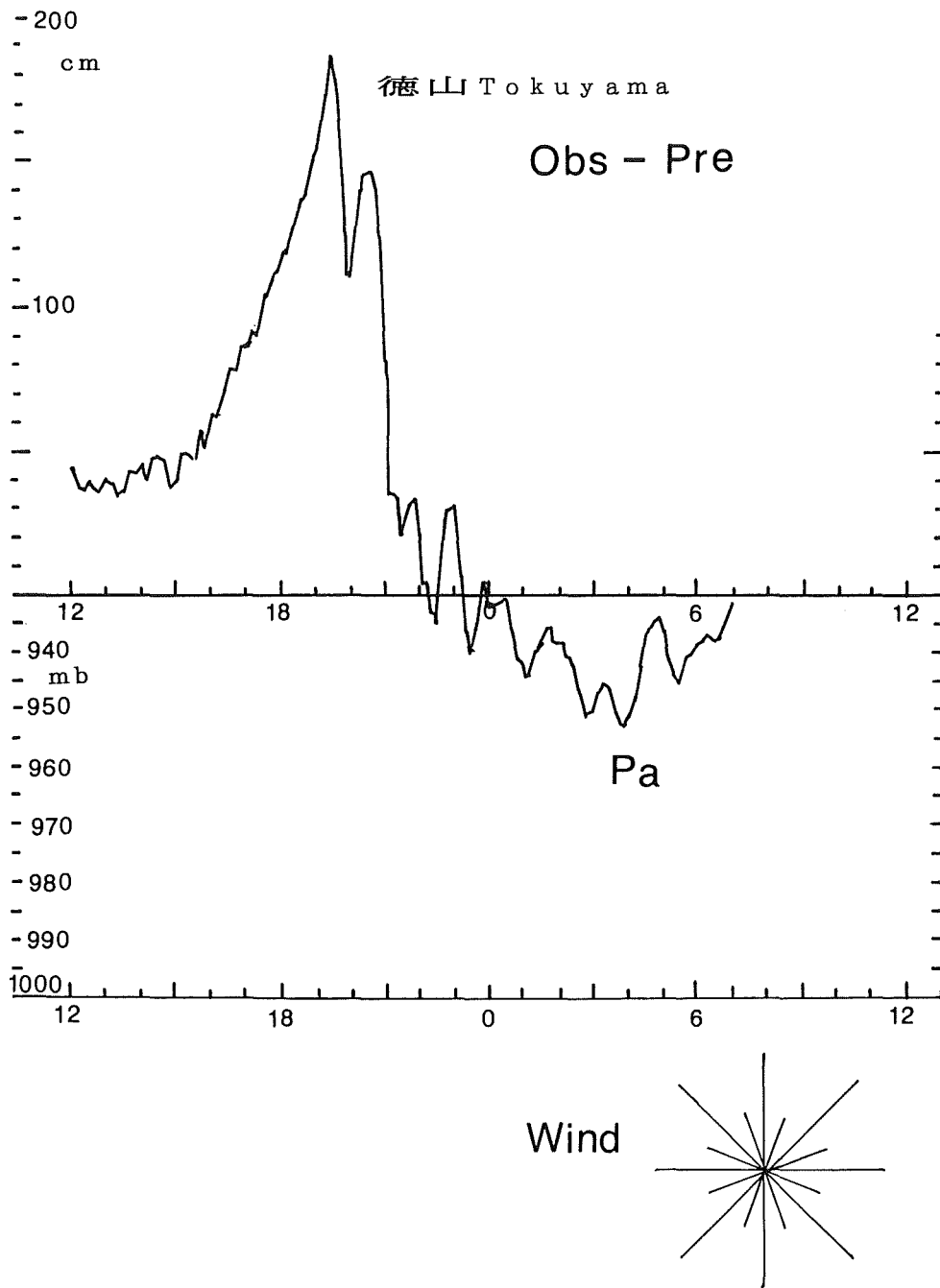


Figure 4-6. Storm Surge induced by Typhoon No.19, 1991 Sept. 27-28th, at Tokuyama.

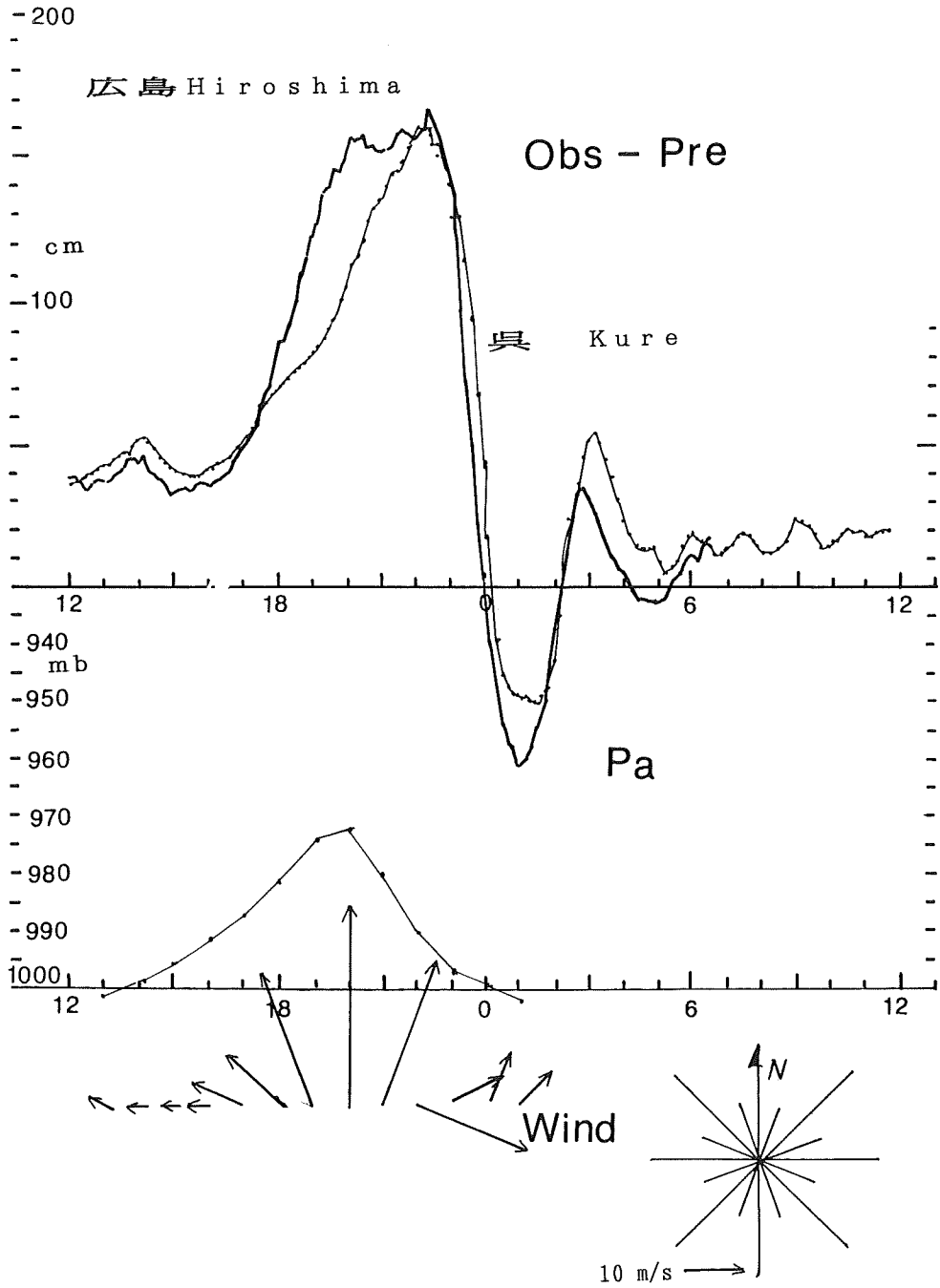


Figure 4-7. Storm Surges induced by Typhoon No.19, 1991 Sep. 27-28th, at Hiroshima and at Kure.

5. まとめ

以上のように今回のたか潮では気圧効果以上に風による吹き寄せが効いており、起時が遅れるだけでなく、台風通過後の揺れ戻しも大きく、副振動が上げ潮と重なって第二のピーク時に最高潮位となる場合も認められた。今後は、台風の気圧変化だけでなく、通過の際の風と港の位置関係やresurgenceによる急激な海面低下や副振動に注意する必要がある。特にこの地域のほとんどの験潮所はテレメータ化されているので、以上のような点に気を付けて気象変化とあわせて潮位変動を監視して行くことが必要である。

最後に、観測資料の収集に協力された第七管区海上保安本部灯台部をはじめとする関係者の方々に感謝する。

参考文献

- 日本気象協会：「天気図日記」及び「1991年9月の日本の天候」, 「気象」, 1991年11月号 (35巻11号), (1991)
- 気象庁海洋気象部海洋課：トピックス台風19号に伴う高潮, 「全国検潮速報」第3集第42号, 1991年9月, (1991)
- 小西達男：日本沿岸の高潮の特性と予測をめぐる問題点, 「沿岸海洋研究ノート」第29巻第2号, p.125-137, (1992)
- 佐藤清富：台風による高波, 「海と安全」第403号 (第26巻8月号), p.9-111, 日本海難防止協会, (1992)
- 堀川清司：海岸工学-海洋工学への序説-, 317pp, 東京大学出版会, (1973)
- 小西達男：上平悦朗・瀬河孝博：台風8506号による高潮と副振動, 「天気」第33号第6号 (1986年6月号), p.13-20, (1986)

海峡の潮流と日本海の潮汐応答特性†

小田 巻 実*

Relation of Tidal Response and Tidal Currents of the Connected Straits of Japan Sea†

Minoru Odamaki*

Abstract

Tidal current in the strait is induced by the difference of independent tides of both sides, and its strength depends on the combined impedance. In here, independent tides mean the tides occurred in both side of boundary if the strait is closed.

In this paper, independent tides and impedances of the straits connected to Japan Sea are discussed using the simple one dimensional model and the observed data. Resultingly, the combined impedance of Tusima Strait is larger than those of other straits. And in Tusima Strait, the gulf impedance Z_g of Japan Sea is larger than the ocean impedance Z_o of the outer sea, East China Sea. In other Straits, Tugaru and Soya Straits, Z_g is much smaller than Z_o . Then it is made clear that in Tusima Strait, tidal current is caused by the co-oscillation of Japan Sea, and in others, Tugaru and Soya Straits by those of the outer seas.

1. はじめに

日本海の潮汐(第1図)について、小倉伸吉(1933)は「半日周潮は対馬海峡を湾口とした双節の振動で説明されるが、日周潮については対馬海峡による単節振動に加えほかの海峡の影響も大きい」こと、さらに寺本(1985)は、起潮力及び荷重変形による独立潮汐も考えられることを指摘した。従来の考え方(Defant 1961)では、「共振潮汐は湾口部に外の潮汐を与えてできる潮汐、独立潮汐は湾口部の潮汐をゼロとして起潮力を与えてできる潮汐」と定義されていた。この定義では、日本海の日周潮のように海峡に無潮点や振動の節ができる場合、独立潮汐だけになって共振潮汐がなくなってしまうジレンマが生じる。Garrett(1975)の新しい定義によれば、「共振潮汐は他の海峡を閉じて起潮力のない状態でその海峡に潮流の流量を与えてできる潮汐、独立潮汐は全部の海峡を閉じて起潮力を与えてできる潮汐」とされる。日本海の各海峡には、水路部が長年蓄積してきた潮流資料があり、潮流の流量を見積もることは難しくない。また、この定義では、接続する海峡が複数ある場合でも、共振潮汐と独立潮汐を容易に重ね合わせることができる。そこで、筆者(Odamaki 1989)は、この定義を用いて、「日本海の半日周潮は対馬海峡による双節の共振潮汐と日本海北部に効く独立潮汐で説明されること、日周潮は対馬海峡による単節の共振潮汐とともに津軽・宗谷海峡から

† Received 17th December 1992

* 海上保安大学校 Hydrographic Division, Maritime Safety Academy

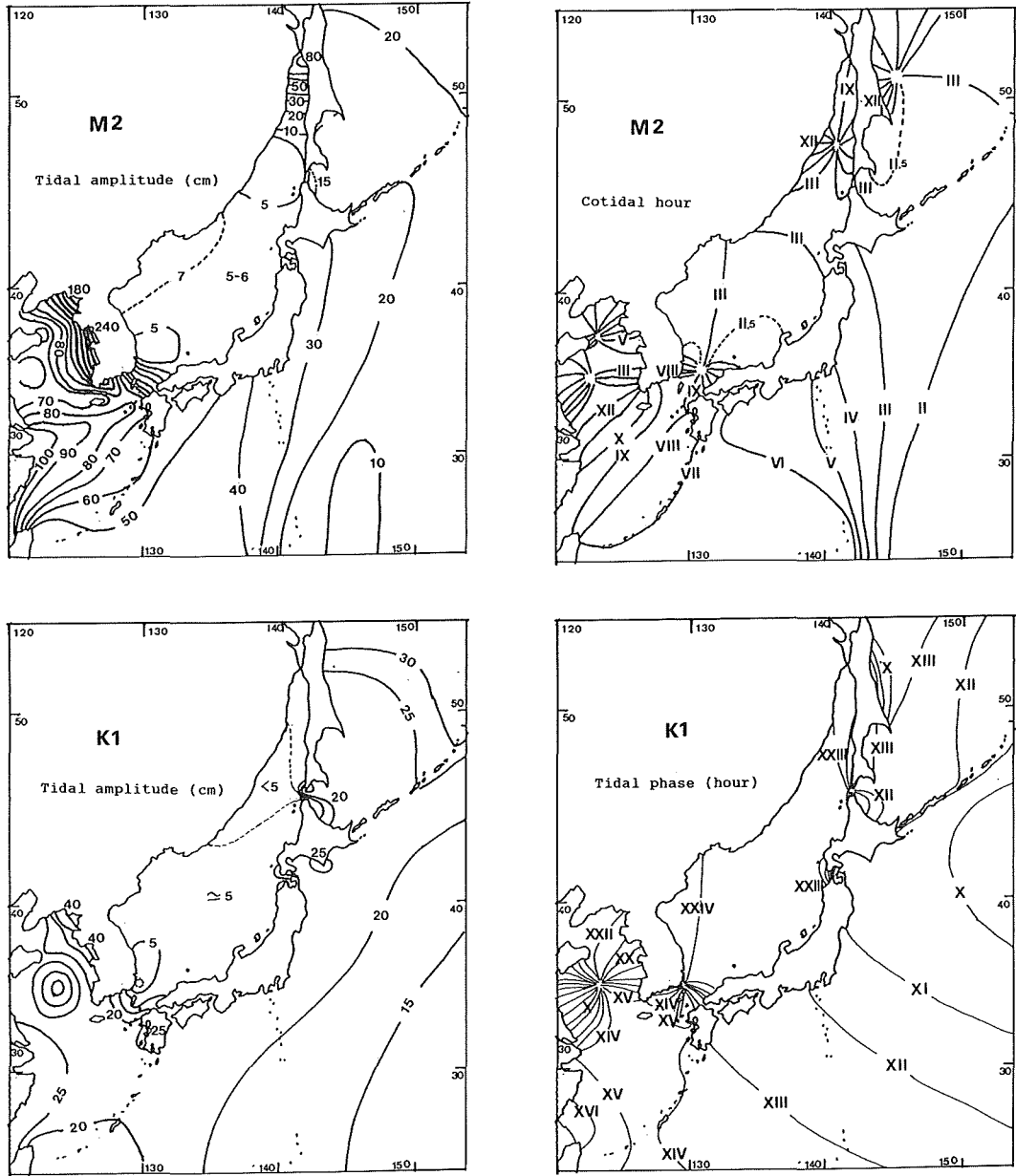


Figure 1. M2 and K1 cotidal charts for Japan Sea.

の寄与が大きいこと、さらにその影響で対馬海峡の無潮点の位置が韓国側に偏っていること」を明らかにした。

以上によって、各海峡の日本海の潮汐に対する寄与はあきらかになったが、それではその起源である海峡の潮流はどのようにして発生しているのだろうか。本稿では、潮流の起源について論ずる。

2. 海峡の潮流の起源

Garrett(1975)に従って考える。湾内外の潮汐を二つの成分に分けて、

(1)海峡を薄い固定壁で塞いだときの潮汐 e_1

(2)海峡に潮流を与えたときの潮汐 e_2

とする。 e_1+e_2 が実際の潮汐を表している。いま、 g と o で湾内側と外洋側を区別することにして、潮汐は連続しているから海峡のところの潮汐 e_m は、

$$e_m = e_{g1} + e_{g2} = e_{o1} + e_{o2}, \tag{1}$$

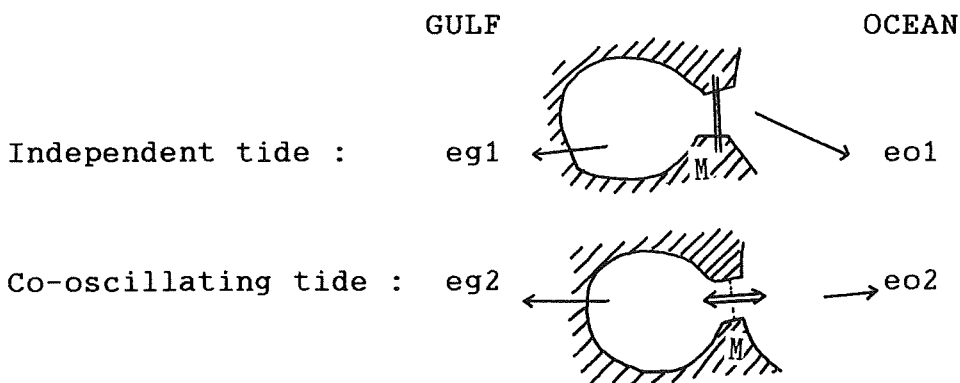


Figure 2. Conceptual model for tidal current generation in the mouth of gulf according to Garrett (1975).

すなわち、海峡の両側それぞれに、海峡の潮流によって生じる共振潮汐(e_{g2} と e_{o2})、海峡を閉じたときに生じている潮汐成分 (e_{g1} と e_{o1}) の和として表すことができる(第2図)。sを海峡を横断する方向の軸として、潮流分布を $F(s)$ とおく。 $e_m, e_{g1}, e_{o1}, e_{g2}, e_{o2}$ もs の関数となっている。単位長さの単位潮流流量 $h_u(s)$ が湾内側と外洋側に起こす潮汐を $K_g(s,c), -K_o(s,c)$ とすると

$$e_{g2}(s) = \int_M K_g(s,c) F(c) dc, \quad e_{o2}(s) = - \int_M K_o(s,c) F(c) dc \tag{2}$$

となる。ここで \int_M は海峡横断方向の積分を表す。さらに潮流の分布関数を $f(c)$ 、潮流の総流量をIとして、

$$F(s) = I \cdot f(s), \quad I = \int_M F(c) dc, \quad 1 = \int_M f(c) dc, \tag{3}$$

とおき、(1)式に $f(s)$ を掛けて海峡の横断方向で積分して平均すると、

$$H_m = H_g + I \cdot Z_g = H_o - I \cdot Z_o, \tag{4}$$

となる。ここで、 H_m, H_g, H_o は平均した潮汐で、 Z_g, Z_o は海峡の潮流と発生する潮汐の比率を表すインピーダンスを意味しており、

$$Z_g = \int_M \int_M K_g(s, c) \cdot f(s) \cdot f(c) dc \cdot ds, \quad Z_o = \int_M \int_M K_o(s, c) \cdot f(s) \cdot f(c) dc \cdot ds \quad (5)$$

である。(4)式を変形すると、

$$I = (H_o - H_g) / (Z_g + Z_o), \quad (6)$$

となる。これは、「海峡の潮流は、海峡を閉じたときに残っている両側の独立した潮汐の差によって励起され、その比率は両側に対するインピーダンスを合わせたものになる」ことを示している。さらに、(6)を(4)式に代入すると、

$$\begin{aligned} H_m &= H_g + (H_o - H_g) \cdot Z_g / (Z_g + Z_o) \quad (7) \\ &= H_g + H_o \cdot Z_g / (Z_g + Z_o) - H_g \cdot Z_g / (Z_g + Z_o) \quad (7)' \\ &= (H_o \cdot Z_g + H_g \cdot Z_o) / (Z_g + Z_o) \quad (7)'' \\ &= H_o \cdot Z_g / (Z_g + Z_o) + H_g \cdot Z_o / (Z_g + Z_o) \quad (7)''' \end{aligned}$$

となり、海峡の潮汐は、両側の独立潮汐の荷重平均によって表されることがわかる。

3. 日本海の海峡の潮汐インピーダンス

(1) 日本海の場合

以上の概念を日本海の各海峡に適用してみる。Odamaki 1989に従って、日本海の潮汐JSTを、独立潮汐IND、対馬・津軽・宗谷海峡の共振潮汐TSM, TGR, SUYにわけ、

$$JST = IND + TSM + TGR + SUY \quad (8)$$

と表す(第3図)。H_gは、その海峡を閉じたときに生じる潮汐だから、1次元モデル(第4図)による計算から<全体の解-その海峡の共振潮汐>として計算される。例えば、対馬海峡の場合、

$$H_g = JST - TSM = IND + TGR + SUY \quad (9)$$

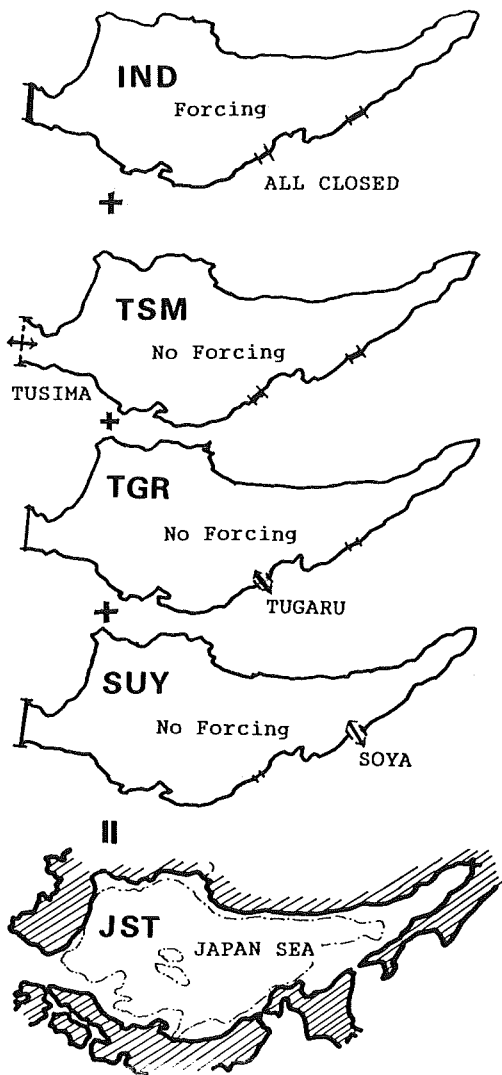


Figure 3. Composition of Independent tide and Co-oscillating tides induced by the straits for Japan Sea tides.

となる。H₀は、同じく海峡を閉じたときに外側の海に生じる潮汐なので、既往の同時潮図(第1図)から海峡の影響がなくなる程度離れた地点の潮汐を採用する。潮流の総流量Iは、観測資料から見積る(第5図)。Z_gは、各海峡の共振潮汐の解で、接続するボックスの潮汐振幅と与えた潮流流量の比を取ることによって計算される。以上によって(4)式を用いてZ₀を計算することができる。第1表に計算結果を示す。

半日周潮(M₂, S₂)のZ_g+Z₀は、宗谷海峡が最も大きく、対馬海峡や津軽海峡に比べて、潮汐差が大きくても潮流が大きくなりにくいことを示している。日周潮(K₁, O₁)のZ_g+Z₀では、対馬海峡が小さく、宗谷海峡や津軽海峡の半分であり、同じ水面差であっても2倍の潮流流量を生じていることを示している。

(2)各海峡の潮汐・潮流特性

(対馬海峡) 海峡両側の潮汐差は、半日周潮の方が日周潮よりも倍以上大きいものに対し、発生する潮流は同程度になっている。これは、日周潮の連結インピーダンスZ₀+Z_gが半日周潮の1/4になっているからである。Z_gとZ₀の大きさを比較すると、4分潮ともZ_gの方が大きく、東シナ海よりも日本海に対する影響が大きいことを示している。言い換えると、|Z_g| > |Z₀|だから、対馬海峡の潮流は、日本海の振動モードに依存して発生していることになる。

(津軽海峡) 振幅だけの差を比較すると日周潮よりも半日周潮の方が大きいけれども、日周潮では遅角が両側で180°近く異なっているため、潮汐差H₀-H_gにすると日周潮の方が大きくなっている。また、連結インピーダンスZ₀+Z_gも日周潮の方が半日周潮よりも小さくなっているため、励起される潮流は日周潮が半日周潮よりも倍近く大きくなっている。Z_gとZ₀を比較すると、Z₀が圧倒的に大きくなっており、同じ潮流で励起される潮汐は外側の方が大きいことを示している。ただし、このモデルでは第4、5図のように津軽海峡西口に境界を設定しているため、励起される潮汐は津軽海峡内に影響するのみで、太平洋側まで及ぶことはないようである(小田巻1984)。また、|Z_g| < |Z₀|, |H_g| < |H₀|を考慮すると、(6)式は、

$$I = (H_0 - H_g) / (Z_g + Z_0) \rightarrow (H_0 - H_g) / Z_0 \rightarrow H_0 / Z_0 \tag{6'}$$

となるので、津軽海峡の潮流は、あきらかに日本海側よりも外側の条件に依存しており、外から「ふいご」のように海水を押し込んだり引き抜いたりして潮流を発生させていると考えられる。

(宗谷海峡) 津軽海峡と同様、振幅差は半日周潮も日周潮も同じ程度なのに対し、遅角を考慮すると潮汐差は日周潮が大きくなり、さらに、日周潮の連結インピーダンスZ₀+Z_gに比べて圧倒的に大きいので、外から潮流を発生させているものと考えられる。ただ、宗谷海峡は、津軽海峡と違って、ほとんど長さのな

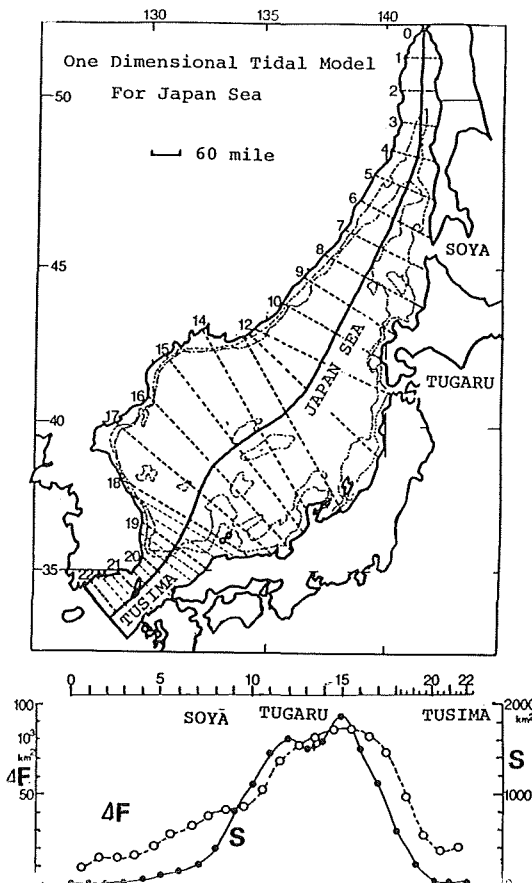


Figure 4. One-dimensional tidal oscillation model for Japan Sea.

Table 1 Tidal Impedances in the straits.

Ho: tides in outer seas, Hg: tides in inner gulf (Japan Sea), I: tidal current flux, Zg: gulf impedance, Zo: ocean impedance.

		Ho	Hg	Ho-Hg	I	Zo+Zg	Zg	Zo					
Tusima	M2	85 270	2 174	87 271	2.14 351	0.41 280	0.43 270	0.07 21					
	S2	35 300	3 44	36 295	0.92 1	0.39 294	0.52 269	0.23 45					
	K1	25 218	3 320	26 212	2.01 294	0.13 278	0.11 270	0.02 323					
	O1	20 187	3 281	20 187	1.71 258	0.12 289	0.10 270	0.04 345					

Tugaru	M2	30 90	7 94	23 88	0.83 167	0.28 282	0.01 91	0.29 282					
	S2	15 135	3 104	12 142	0.28 226	0.44 276	0.00 178	0.44 277					
	K1	25 150	5 4	29 155	1.34 206	0.22 309	0.01 90	0.22 308					
	O1	20 165	11 294	28 147	1.04 196	0.27 311	0.06 259	0.24 323					

Soya	M2	20 90	5 345	22 104	0.36 112	0.61 351	0.00 271	0.61 352					
	S2	8 120	3 110	5 125	0.09 216	0.56 269	0.00 189	0.55 269					
	K1	20 195	4 350	24 191	1.01 236	0.24 315	0.00 90	0.25 313					
	O1	20 165	5 325	24 161	1.03 193	0.24 328	0.01 90	0.24 326					
	cm	°	cm	°	cm	°	x10 ⁶	°	x10 ⁻⁶	°	x10 ⁻⁶	°	x10 ⁻⁶
						m ³ /s		s/m ²		s/m ²		s/m ²	

い海峡なので、潮流で励起される潮汐Zo・Iは、第1図のようにオホーツク海に広がっているものと考えられる。

4. 日本海の応答特性

共振潮汐は、ある種の振動系へ外部入力を与えたものと同じなので、当然、日本海の固有振動に潮汐が近ければ共鳴して大きくなることが想像される。ここでは、日本海の固有振動をみるため、上述の1次元モデルを使っていろいろな周波数に対するモードとインピーダンスについて試算した。

(1)周波数に対する振動モード

各海峡に単位潮流流量を与えて0.2cpd (cycle per day) から2.1cpdまでの周波数に対する振動モードを計算した。対馬海峡(第6-1図)では、0.4cpd(60hour)でちょうど湾口部に節ができる単節振動(Helmholtz mode)となり、周波数が高くなるに従って節が日本海の内部に移動する。そして1.8cpd付近で2番目の節が湾口部にでき、より高周波では双節の振動となる。津軽海峡(第6-2図)では、0.2cpdから1.7cpdまで日本海は一樣に上下振動し、周波数が高くなるほど振幅が小さくなり、1.8cpdで日本海北部に節が現れる。この節は、高周波数になるとさらに北側にゆく。宗谷海峡(第6-3図)では一樣な上下振動が1.4cpd付近で最も小さくなり、1.6cpdで日本海北部に節が現れ初め、2.0cpd付近では日本海北部に二つの節が現れる振動になっている。潮汐周期に対応するモードを見ると、対馬海峡では、日周潮は南部に節のある単節モード、半

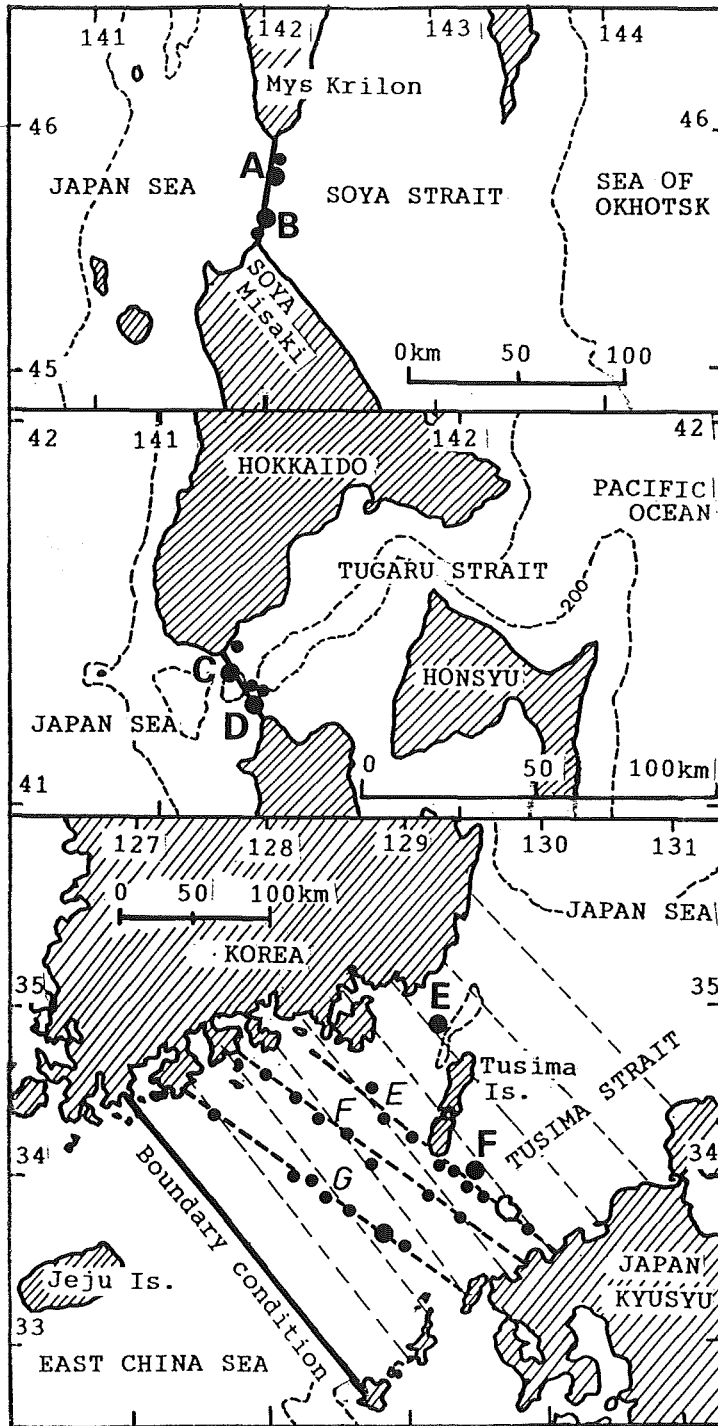


Figure 5. Examined sections of three straits.

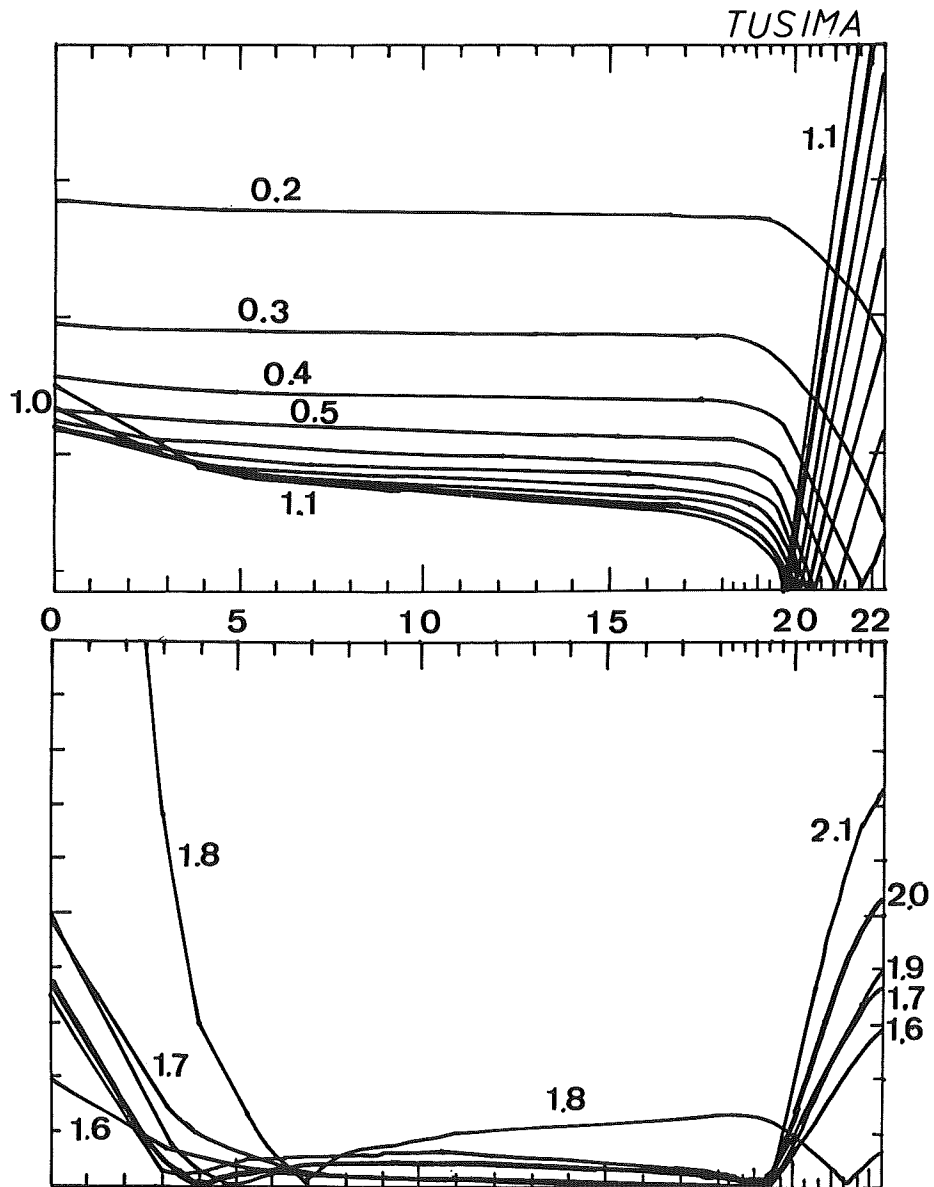


Figure 6-1. Oscillation modes of Japan Sea according to various frequencies for Tusima Strait. Numeral attached to line means frequency which unit is cpd (cycle per day). Vertical axis means amplitude which scale is arbitrary.

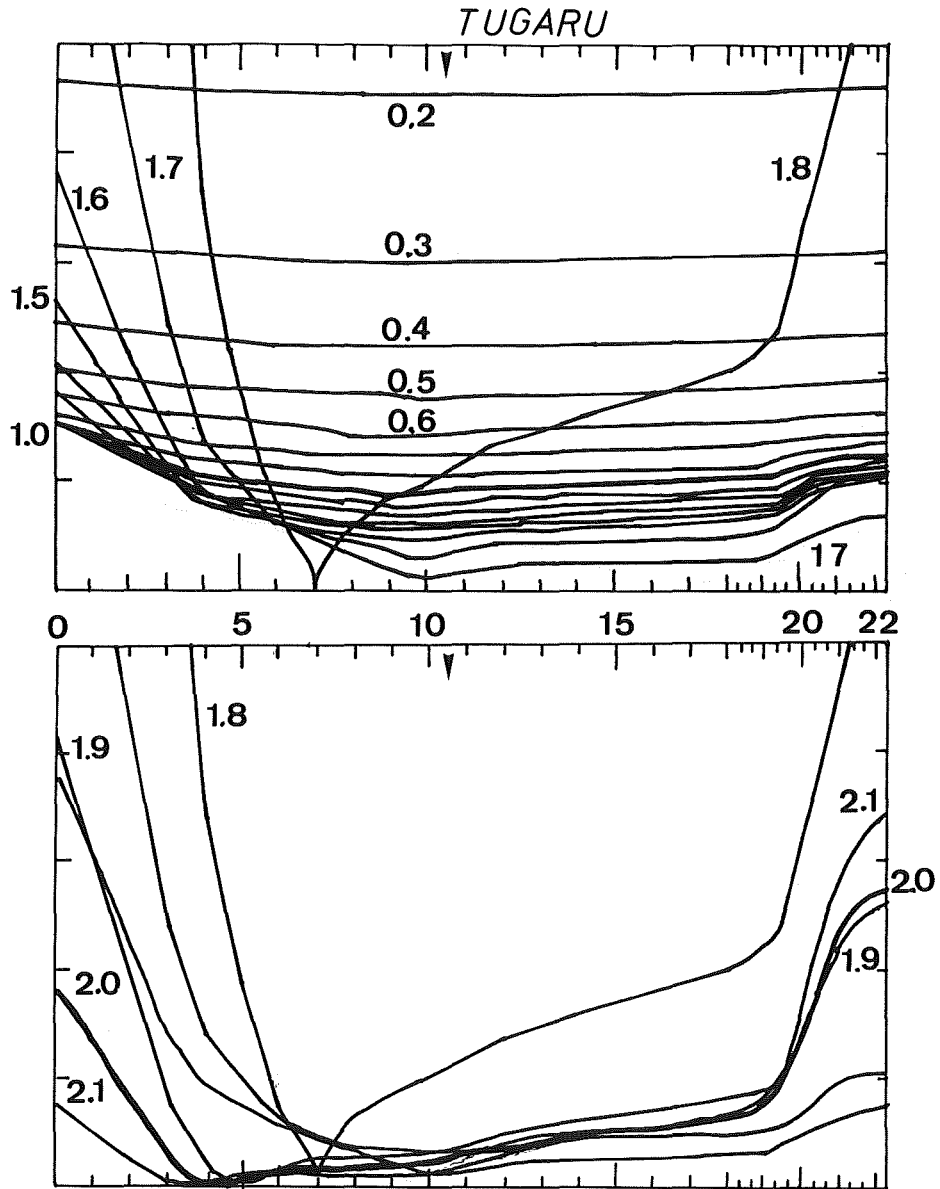


Figure 6-2. Same as 6-1, except for Tugaru Strait.

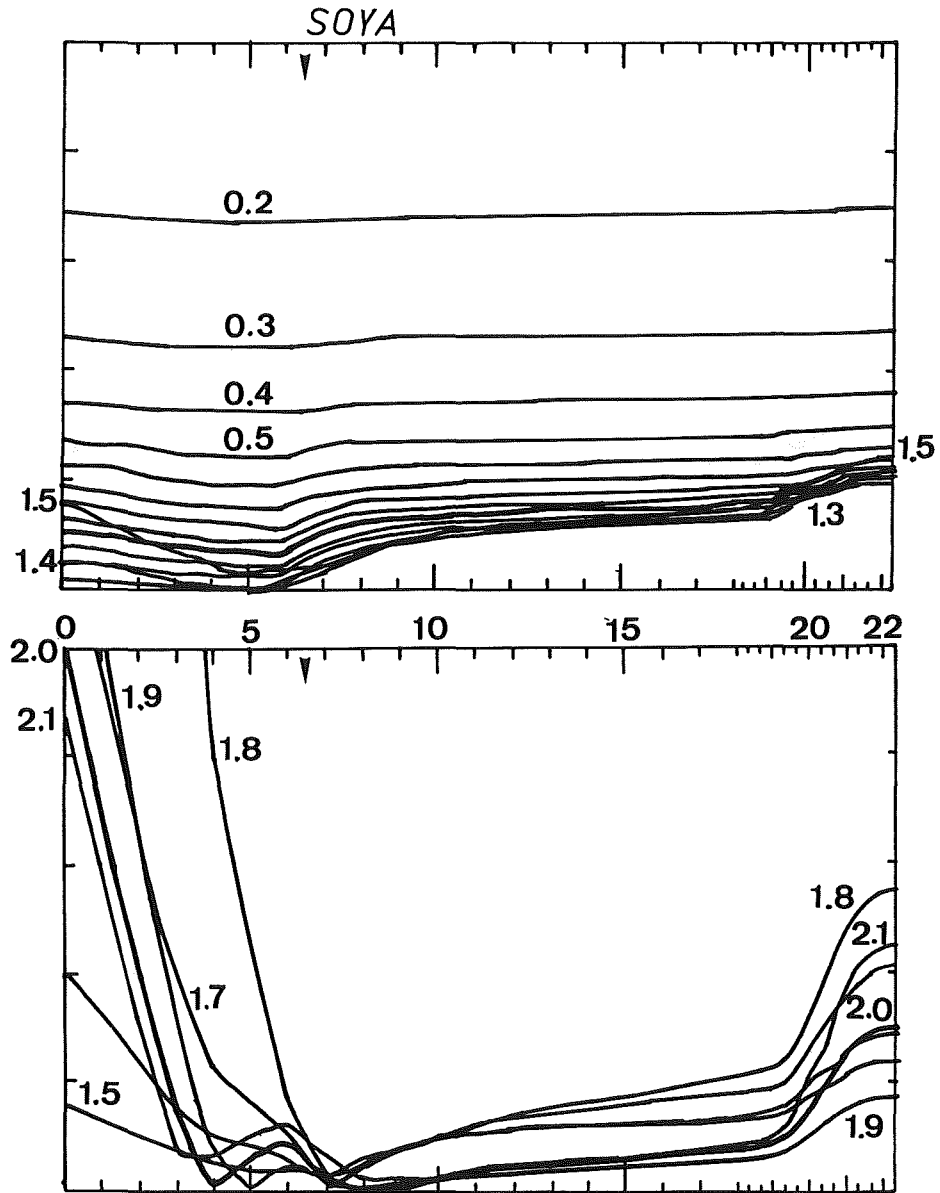


Figure 6-3. Same as 6-1, except for Soya Strait.

日周潮は北部と南部に節のできる双節モードとなっている。津軽海峡では、日周潮は全体一様に上下する均一モード、半日周潮は北部に一つ節のできる単節モードとなっている。宗谷海峡では、日周潮は均一モード、半日周潮は日本海北部に二つの節ができるモードとなっている。

(2)各海峡のインピーダンス

各モードの各海峡における潮汐振幅と潮流流量の比、インピーダンス Z_g を第7図(後の都合で逆数 $1/Z_g$ で表している)に示す。 Z_g がいくら大きいとしても、 $Z_g/(Z_g+Z_o)$ はたかだか1程度であり、

$$Hg + (H_o - H_g) \cdot Z_g / (Z_g + Z_o) \rightarrow Hg + H_o - Hg \rightarrow H_o \quad (10)$$

で外側の潮汐程度にしかならず、共鳴が起きるわけではない。湾の中に大きな振動を励起するのは $Z_g + Z_o$ を最小にするときである。外側の状態による Z_o の分布はいまのところわからないので、 $1/Z_g$ の分布を調べてみた。対馬海峡の $1/Z_g$ では、前述のように0.4cpdにHelmholtz modeのピークがある。津軽海峡の $1/Z_g$ では、一つめの節が日本海北部にできるモードの1.7cpd (13.7hour) に小さなピーク、2.2cpd (11hour) により大きいピークが現れている。宗谷海峡では1.7cpd (14hour) と1.85cpd (13.0hour) に $1/Z_g$ のピークがあり、前者は日本海北部に一つ節ができる単節モード、後者は二つの節ができ始める双節モードに対応している。

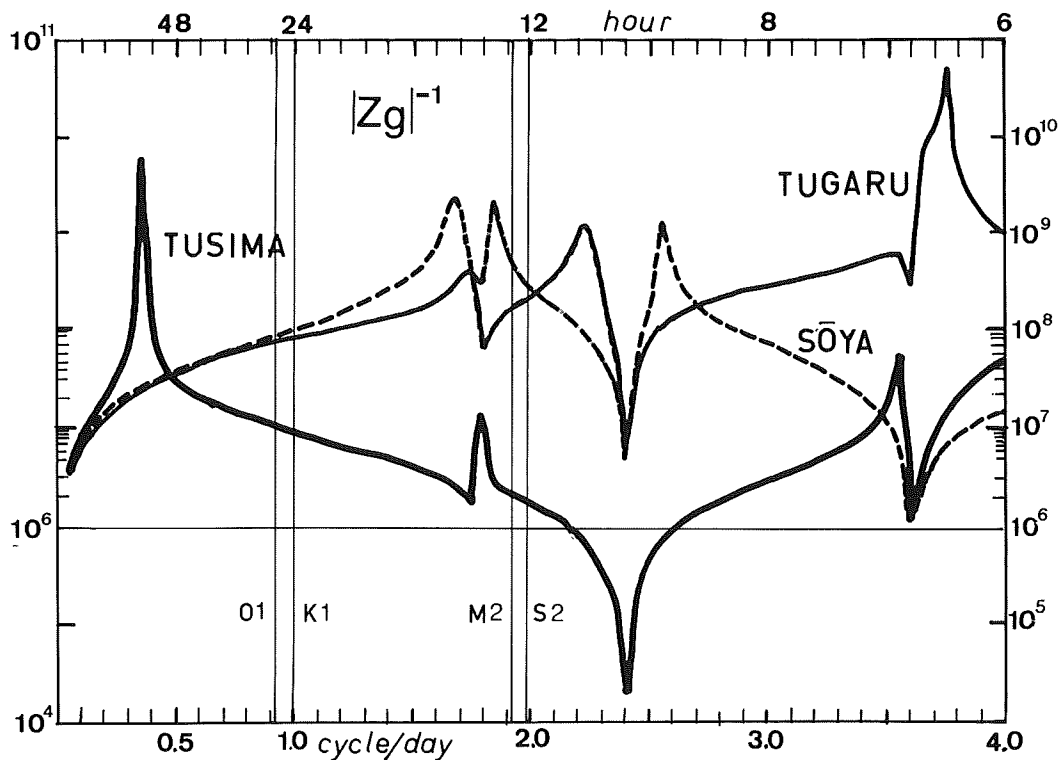


Figure 7. Gulf impedance of Japan Sea.

5. まとめ

各海峡では、(6)式のように両側の潮汐差によって潮流が発生し、それがさらに湾内の共振潮汐を励起する。潮流が発生する程度は、連結インピーダンス $Z_o + Z_g$ によって決まる。今回は、観測値と簡易なモデルからインピーダンスを見積った。

結果の第1表を見てみると、日本海の潮汐は海峡を閉じたとしても大きくないので、 $|H_o| > |H_g|$ だから発生する潮流 I は、 $H_o/(Z_o+Z_g)$ によって決まっている。対馬海峡では、 $|Z_g| > |Z_o|$ なので日本海の Z_g が効いており、いわば外の潮汐 H_o に湾内が呼応して潮流が発生している。津軽・宗谷海峡では、 $|Z_g| < |Z_o|$ なので潮流 I は、外部の潮汐 H_o と Z_o 、 H_o/Z_o で決まっており、いわば外の潮汐が押したり引いたりして潮流を発生させていると考えられる。

本論では、各海峡の潮流発生のイメージを掴むために簡単なモデルで検討した。今回のモデルは対馬海峡に重点があり、津軽・宗谷海峡は副次的な役割となっていてモードの計算などに限界があった。今後、現地観測資料を詳しく解析するとともに、モデルの2次元化などによって、さらに津軽・宗谷海峡の寄与を明確にしてゆくこととしたい。

参考文献

- Defant, A. : Physical Oceanography, vol.2, Pergamon Press. Oxford, 598p, (1961).
Garrett, C. : Tides in gulfs. Deep-Sea Res., 22, 23-35 (1975).
小田巻実 : 津軽海峡の潮汐・潮流, 沿岸海洋研究ノート, 第22巻, pp12-22, (1984).
Odamaki, M. : Co-Oscillating and Independent Tides of the Japan Sea, J. Oceanogr. Soc. Japan, vol. 45, No.1, pp65-82, (1989).
小倉伸吉 : 日本近海の潮汐に就て (其の2), 水路要報, 第12年第6号, pp227-240, (1933).
寺本俊彦 : 世界海洋潮汐の数値モデリングと日本近海の潮汐, 沿岸海洋研究ノート, 第23巻, pp60-72, (1985).

OBSERVATION OF 1991 JULY 11 TOTAL SOLAR ECLIPSE†

Kaoru Koyama* · Masayuki Okumura** · Yoshio Kubo* and Tsuyoshi Kato*

Abstract

Observation of contact times at the 1991 July 11 total solar eclipse was made by the Hydrographic Department of Japan (JHD) by means of flash spectrum cinematography method. Reduction of the observation gives the following correction to the relative position and semidiameter of the Sun and the Moon to be applied to the tabular values in the ephemeris:

$$\begin{aligned}\Delta (\lambda_s - \lambda_M) &= -0.20'' \pm 0.02'', \\ \Delta (\beta_s - \beta_M) &= -0.50'' \pm 0.07'', \\ \Delta (r_s - r_M) &= +0.51'' \pm 0.02''. \quad (4615 \text{ \AA})\end{aligned}$$

Comparing this result with those for the past eclipses observed by JHD by the same method, a significant change in the radius of the Sun is perceived. The effect of errors in the lunar profile charts on the result is also discussed.

Key words: Total solar eclipse, Contact times, Ephemerides of the Sun and the Moon, Radius of the Sun.

1. Introduction

The Hydrographic Department of Japan (JHD) despatched an observation team to the total solar eclipse of 1991 July 11 which was seen in Hawaii and countries in Central and South Americas. The purpose of the observation is to determine the accurate position of the Sun relative to that of the Moon, of which the latter is assumed to have been determined accurately enough by lunar occultation observations, in order to maintain and improve the accuracy of the tabular values in the astronomical ephemeris.

The two members of the JHD observation team, Kaoru Koyama (chief) and Masayuki Okumura, acted as constituents of the official Japanese expedition to the eclipse sent by the Japanese Government throughout the period from the departure from Japan to the return.

The expedition consisted of eleven members from three institutes, i.e., National Astronomical Observatory (NAO), Kyoto University and JHD with Dr. Hiroki Kurokawa of Kyoto University as the leader. The main group of eight members including those from JHD settled the observation site in La

† Received 25th November 1992.

* Geodesy and Geophysics Division, Hydrographic Department

** Bisei Hydrographic Observatory, 6th R.M.S. Hqs.

Paz, Baja California Sur, Mexico. Meanwhile, the other three members from NAO made an observation at a site near the top of Mt. Popocatepetl near Mexico City.

The members to La Paz left Japan on June 11, 1991 and went first to Ensenada on Pacific coast of Mexico, where they received the containers of the equipments which had been shipped from Japan beforehand. Then most members proceeded to La Paz by rental cars accompanying the trucks which carried the containers from Ensenada to La Paz, and arrived in La Paz on June 17. Meanwhile, Dr. Kurokawa and a few members fled to Mexico City for various business jobs and then to La Paz and arrived there before the arrival of the members who followed the trucks.

After the work of installing and adjusting the observation instruments for about three weeks, the JHD members observed the eclipse successfully. This article describes first how the observation was made and then the result of the analysis of the obtained data.

2. Observation Site

The observation site of the Japanese expedition was set in the playground of Universidad Autonoma de Baja California Sur (UABCS), where official parties from countries in all over the world were appointed to settle their observation sites by Comité Universitario Para la Observación del Eclipse (CUPOE). Electricity of 120 V was arranged to be supplied to the observation teams by CUPOE.

In the days preceding the eclipse, observation of both the geographical and astronomical coordinates of the JHD telescope was made. The geographical coordinates were determined by observing NNSS satellites, which were operated under the WGS-84 system at that time. A Magnavox receiver was used for the observation and 337 data for three-dimensional analysis were obtained in the period from June 22 to July 10. The result of the analysis is as follows:

$$\begin{aligned} \text{geographical longitude: } \lambda_g &= 110^\circ 18' 50.83''\text{W} \pm 0.03'', \\ \text{" latitude: } \phi_g &= 24^\circ 06' 02.33''\text{N} \pm 0.01'', \\ \text{height from reference ellipsoid: } H &= +0.4\text{m} \pm 0.3\text{m}. \quad (\text{WGS-84}) \end{aligned}$$

The figures following "±" marks are mean errors throughout this article.

On the other hand, the astronomical longitude and latitude of the same point were determined by equal altitude observation of stars using an Ni-2 type astrolabe of Carl Zeiss. The result is:

$$\begin{aligned} \text{astronomical longitude: } \lambda_a &= 110^\circ 18' 59.2''\text{W} \pm 1.1'', \\ \text{" latitude: } \phi_a &= 24^\circ 06' 07.6''\text{N} \pm 1.5''. \end{aligned}$$

The difference astronomical minus geographical coordinates is the so-called deflection of the vertical for that place. That is:

$$\begin{aligned} \xi &= \phi_a - \phi_g &= +5.3'' \pm 1.5'', \\ \eta &= (\lambda_a - \lambda_g) \cos \phi &= -7.5'' \pm 1.0''. \end{aligned}$$

This means that there exists either a surplus of mass under the ground in the direction of nearly south-east or a lack of mass in the opposite direction.

It should be noticed that the geographical coordinates of the telescope should be used in the reduction in the following.

Meteorological observation was also made during the period from June 24 to July 11. Main features about temperature in this period are as follows:

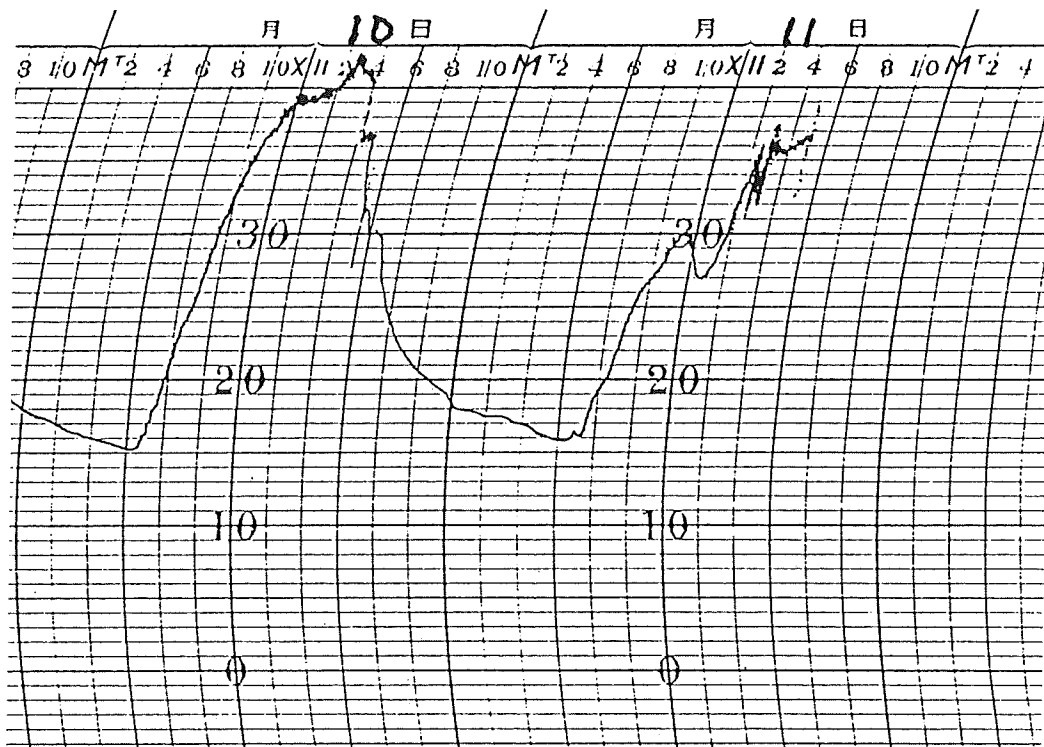


Figure 1. Temperature at the observation site on 1991 July 10 and 11.

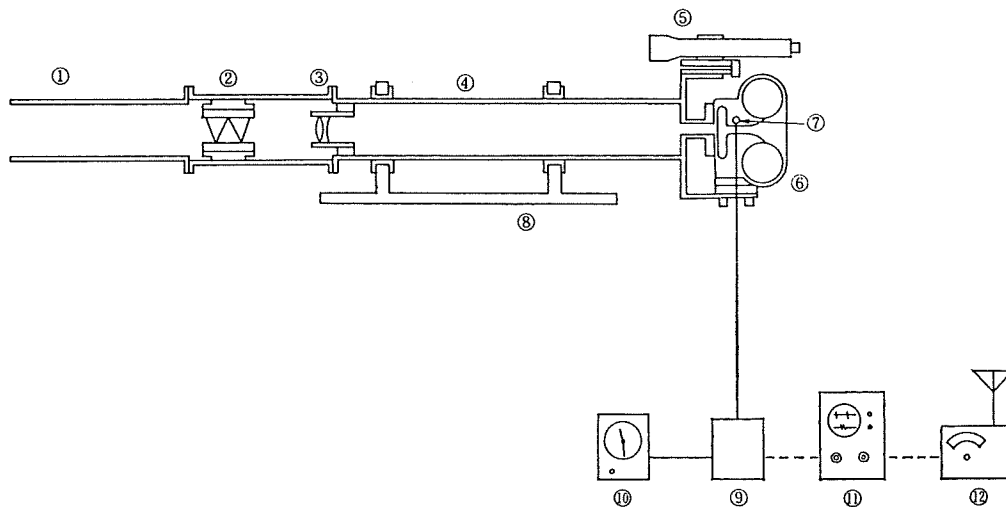


Figure 2. Schematic diagram of the spectrophotographic equipments.

- ①hood ②prisms ③lens ④telescope tube
- ⑤guiding telescope ⑥16-mm movie camera ⑦LED
- ⑧bearings ⑨electronic circuits ⑩quartz clock
- ⑪time difference monitor ⑫Loran C receiver

mean minimum temperature	: 15.9°C,
mean maximum "	: 38.1°C,
mean temperature at 9 ^h local standard time	: 28.3°C.

With the progress of the eclipse on July 11, the temperature went down and recorded a local minimum value 27.0°C about half an hour after the totality, about 5.5°C lower than it would have shown if it were not for the eclipse. In Figure 1 is shown the variation of temperature on the days before and of the eclipse.

3. Observation of the eclipse

The observation of the eclipse on 1991 July 11 was made by flash spectrum cinematography method, which is the same as adopted in the past observations of eclipses by JHD.

A schematic diagram of the equipments used is shown in Figure 2. Since a detailed description of the equipments is given in Mori and Kubo (1971), only an outline of them is explained below.

A spectrotlescope and a 16-mm movie camera boaded on an equatorial mounting constitute the main part of the equipments. Both the equatorial and the movie camera are driven by DC batteries. The optics of the spectrotlescope consists of an objective lens with apperture of 80 mm and focal length of 1200 mm and a direct vision type prism just ahead of the lens. The size of the image at the focal point is 5.8mm/1000" and the dispersion of the prism is 87 Å/mm at 5000 Å.

A Bolex H16 type camera is used for cinematographing of the flash spectra at the 2nd and 3rd contacts. The size of each frame of the film is about 10.5 mm×7.5 mm with the direction of dispersion parallel to the longer side and that of position angle to the shorter side. Time marks of 10 Hz synchronized with UTC were printed along an edge of the film to make enable a precise determination of time for each shot of photographs.

Around the 2nd and the 3rd contacts of the eclipse, photographing was made with a rate of about 22 shots per second. The film used was Kodak Plus X. An example of the photographs is shown in Figure 3.

UTC for the time marks was provided by a quartz clock which was regulated by time aignals of Loran C radio wave emitted from the master station of West Coast U.S. Chain (118°50' W and 42°43' N). The correction for propagation time of 6.315 ms was applied. Thus the UTC for each time mark on the film was determined with an accuracy better than 0.1 ms.

The photographs of the flash spectra were taken for 60 seconds each around the 2nd and the 3rd contacts, but those for 5.5 seconds at each contact were used in the reduction described below.

After the observation of the eclipse, spectral images of a slit were photographed with ND filters of various densities inserted in front of the movie camera for several widths of the slit in order to obtain the relation between light intensity and density on the film.

The development of the film was made by a commercial company after the observation team having returned to Japan.

4. Reduction

The density of the images of spectra of the crescent Sun on the film was measured by a Perkin-Elmer PDS microdensitometer belonging to the Institute of Astronomy, the University of Tokyo. The density

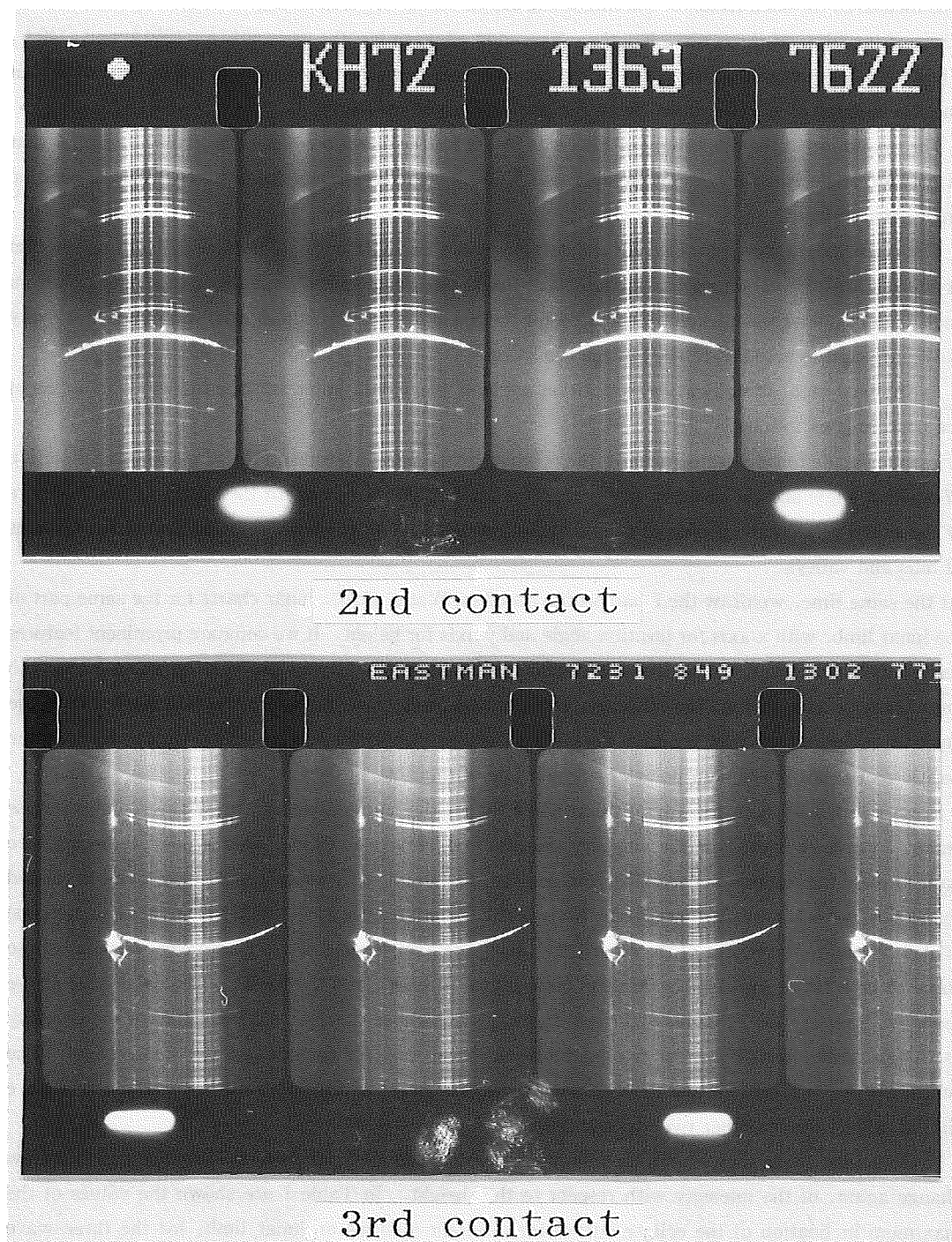


Figure 3. Example of the photographs of flash spectra near 2nd (upper) and 3rd (lower) contacts.

was measured for each frame of the film along the direction of position angle, which is parallel to the edges of the film, at three wave lengths. The adopted wave lengths were 5047 Å, 4960 Å and 4740 Å. They were selected so that the effect of the emission lines from the chromosphere might be avoided but only the density of the continuum from the photosphere be measured.

The dimension of the diaphragm of PDS was 75 μm for the direction of dispersion and 10 μm for that of position angle, the former corresponding to 6.5 Å of wave length and the latter to 0.096° of position angle, respectively.

The density data were obtained for points along position angle with an interval of 1 μm on the film or about 0.01° of position angle for each wave length and recorded on a magnetic tape, but one from each 15 data points was picked up and used for the reduction, that is, the density data about for every 0.144° of position angle were used in the reduction.

As the next step, identification of position angle of every data point must be made. The outline of the process is as follows:

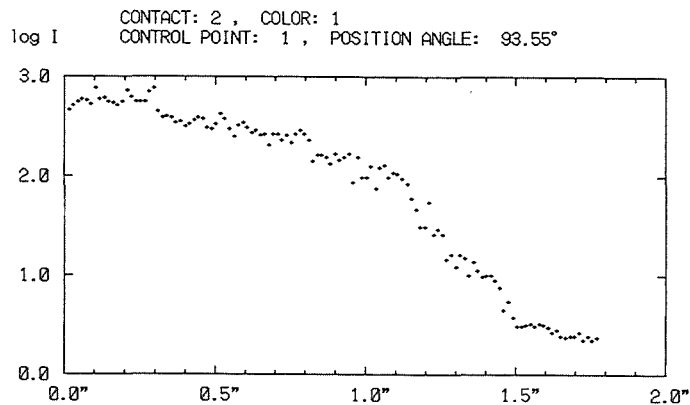
A graph is made for any frame to show the relation between the position on the film along the direction of position angle and the density, with x-axis for the former and y-axis for the latter. Then the curve of the graph reflects the profile of the lunar limb near the contact point, showing prominent features of hills and valleys.

At the same time, we draw the lunar profile based on Watts' (1963) lunar charts for the same part of the lunar limb, with x-axis for position angle and y-axis for height. If we compare prominent features seen in the both curves, we recognize a similarity between them. By a least squares fitting of the both arguments (x-axis values) for common prominent features, we can obtain the relation between the position angle and the film position along the direction of position angle. Thus we can identify the position angle for every data point of every frame of the film.

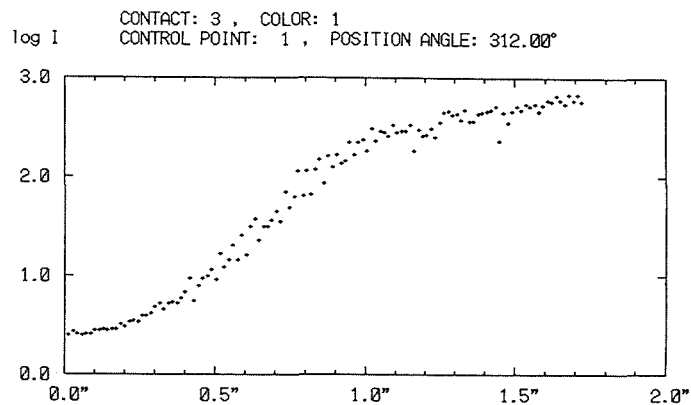
From the density data for any position angle for all the frames, we can draw the so-called eclipse curve, a curve showing how the intensity changes with respect to time. This is possible because we have already the relation between the film density and the intensity of light and every frame is related to the time when it was photographed. Knowing the relative velocity of the Moon to the Sun, the time is also related to the height of the solar edge above the lunar limb easily. So we can consider eclipse curve to be a curve showing the relation between the intensity and the height of the solar edge above the lunar limb as well. Figures 4(a) to 4(d) show such eclipse curves, i.e., logarithm of the intensity vs. height above lunar limb, for two points on the lunar limb for each of 2nd and 3rd contacts. The eclipse curves in Figures 4 and the following reduction as far as Section 5 are for 5047 Å. We have similar results for the other two wave lengths.

Every eclipse curve shows a similar feature, i.e., slow change first, then rapid change and then slow change again, of the intensity with respect to the height. In Table 1 are shown the values of the maximum inclination of the eclipse curves for different features on lunar limb, for the three wave lengths and at each contact. They are accordant with the result for 1970 and 1973 eclipses, $d \log (I/I_0)/dh = 2.8/1''$ (for 4615 Å).

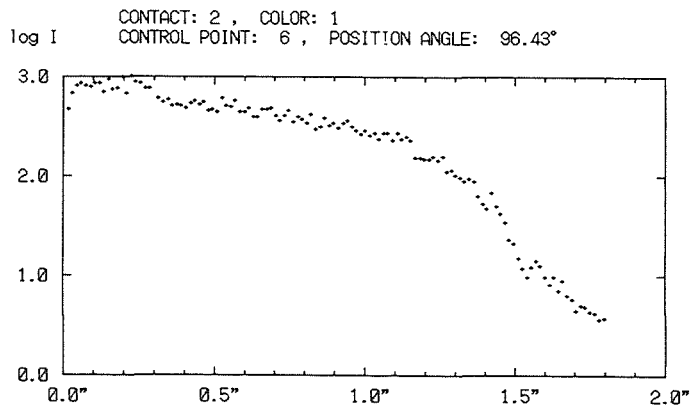
We define the solar edge by the point with the maximum inclination, or the inflection point of the eclipse curve, in the analysis below. In practice, we obtain the density for this inflection point for points of various features on the lunar limb and then their mean values. They may be different for each



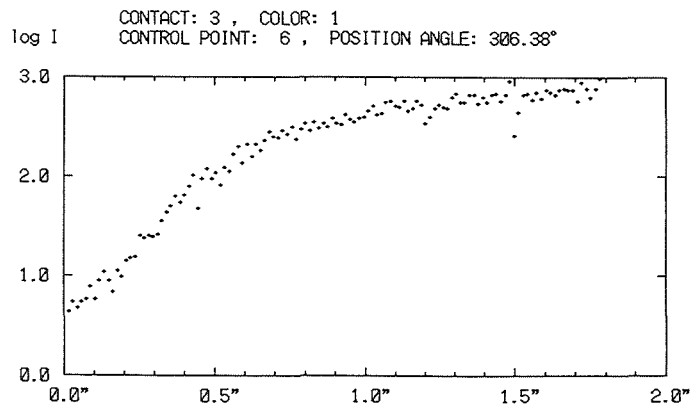
(a)



(c)



(b)



(d)

Figure 4. Example of the eclipse curves ((a) and (b) at 2nd contact and (c) and (d) at 3rd contact).

Table 1. Maximum values of $d \log (I/I_0)/dh$. (Unit : $(1'')^{-1}$)
 Values for each feature are the means of
 several points.

	5047 Å	4960 Å	4740 Å
2nd contact			
Hills	3.14	3.15	2.54
Valleys	3.62	3.47	2.93
Others	3.10	2.98	2.59
Mean	3.27	3.18	2.68
3rd contact			
Hills	2.66	2.64	2.57
Valleys	3.15	3.37	3.21
Others	2.99	3.20	2.92
Mean	2.94	3.08	2.90
Mean of both contacts			
Hills	2.90	2.89	2.56
Valleys	3.39	3.42	3.07
Others	3.04	3.09	2.75
Mean	3.11	3.13	2.79

wave length and for each contact. Then we can obtain for every position angle the time when the density is equal to the mean value thus determined. It should be called the contact time for that position angle. We can get such contact times for many points with some interval of position angle for the both contacts. These contact times constitute the basic data in the following analysis for the relative position of the Sun to the Moon. The 2nd to 4th columns of Table 3 give contact times for points every 0.1° of position angle for the three wave lengths. It should be noticed that they are values for the interval of 0.1° calculated by linear interpolation from the original data which have been obtained for about every 0.144° .

5. Relative Position of the Sun to the Moon and the Radius of the Sun

The data of the coordinates of the Sun and the Moon and the local prediction of the eclipse for the observation site are given in Table 2. They are used as the basis in the following reduction. They are all calculated consistently with the Japanese Ephemeris for 1991. It is completely accordant with IAU (1976) System of Astronomical Constants. The tabular values in the Japanese Ephemeris for the Sun and the Moon are also coincident with those in DE200/LE200 ephemeris within the accuracy of $0.01''$.

However, in the values in Table 2, the following correction to the coordinates of the Moon is applied. This is a correction to reduce the center of mass of the Moon which are given in the Ephemeris to the center of figure which is assumed to be coincident with the center of the Watts' lunar charts. The amount of correction is obtained from observation of lunar occultations of stars by JHD and it is as follows (Japanese Ephemeris for 1993):

$$\Delta\lambda_M = +0.38'' \text{ and } \Delta\beta_M = -0.19''.$$

As for the semidiameter of the Sun s_0 and the radius of the Moon k , the following values are adopted: respectively.

$$s_0 = 959.63'', \text{ (at the distance of 1 a.u.)}$$

$$k = 0.2725076. \text{ (in unit of the equatorial radius of the Earth)}$$

Also the following value for UT1-UTC taken from IERS Annual Report for 1991 is used in the local prediction:

$$\text{UT1-UTC} = +0.213^s.$$

Since TAI-UTC = 26^s at that time and TDT-TAI = 32.184^s , we also have

$$\text{TDT-UT1} = 57.971^s.$$

Correction for the polar motion is not taken into consideration.

Also the following values for the topocentric lunar libration is used:

$$l = +1.00^\circ, \quad b = +0.01^\circ, \quad C = +6.51^\circ.$$

The fundamental equation for the reduction for the relative position of the Sun and the Moon is given in Mori and Kubo (1971) and Mori and Ganeko (1976), although the both expressions are a little different from each other. We adopt in the present calculation the one in Mori and Ganeko, which is written as follows:

$$h = x \cos p + y \sin p + z + H_1 - v(t_c - t_{0i}) \cos(p - \phi) - (r_s - r_M)_i^2 \sin^2(p - p_{0i}) / 2 r_s, \quad (i = 2, 3)$$

with

$$x = \Delta(\delta_s - \delta_M),$$

$$y = \Delta(\alpha_s - \alpha_M) \cos \delta_s,$$

Table 2. The coordinates of the Sun and the Moon and the local prediction for the observation site.

	2nd contact	3rd contact
Contact Time (UTC) (t_0)	18 ^h 47 ^m 33.66 ^s	18 ^h 54 ^m 09.56 ^s
Position Angle of Contact Point ($\mu_0 - 180^\circ$)	92.84°	308.23°
Distance of Centers of Sun and Moon	76.16"	76.22"
Geocentric R.A. of Sun	7 ^h 22 ^m 09.635 ^s	7 ^h 22 ^m 10.756 ^s
" Dec. "	22° 05' 54.68"	22° 05' 52.49"
" R.A. of Moon	7 ^h 21 ^m 23.272 ^s	7 ^h 21 ^m 40.867 ^s
" Dec. "	22° 08' 15.28"	22° 07' 17.66"
Topocentric R.A. of Sun	7 ^h 22 ^m 09.732 ^s	7 ^h 22 ^m 10.837 ^s
" Dec. "	22° 05' 54.36"	22° 05' 52.18"
" S.D. "	943.97"	943.97"
" R.A. of Moon	7 ^h 22 ^m 04.258 ^s	7 ^h 22 ^m 15.144 ^s
" Dec. "	22° 05' 58.13"	22° 05' 05.01"
" S.D. "	1020.13"	1020.19"
Relative Velocity of Moon to Sun (Mag.)	0.3667"/s	
(P.A.)	110.54°	

$$z = \Delta (r_s - r_m),$$

$$H_i = (\delta_s - \delta_m)_i \cos p + (\alpha_s - \alpha_m)_i \cos \delta_{s_i} \sin p + (r_s - r_m)_i = (r_s - r_m)_i \{1 + \cos(p - p_{0i})\},$$

where $i = 2, 3$ mean that the values are those at the time of the 2nd and the 3rd contacts, and S and M for the Sun and the Moon, respectively.

The meanings of the notations are as follows:

p : position angle of a point on the lunar limb,

t_c : contact time for the point,

h : observed height of lunar limb above mean level at the point,

t_0 : predicted contact time given in Table 2,

p_0 : position angle of the center of the Moon with respect to that of the Sun at t_0 , $p_0 - 180^\circ$ appearing in the prediction,

v : magnitude of the velocity of the Moon relative to the Sun,

ϕ : position angle of the direction of the above velocity,

v and ϕ being also shown in Table 2.

It should be noticed that the predicted topocentric values for all those quantities are used in the reduction. Also, in consulting Watts' lunar charts a correction of 0.2° to the argument for the position angle is applied (Appleby and Morrison, 1983 and Kawada and Kubo, 1990).

We have one equation for one point on the lunar limb, and from the equations for all the points for the both contacts we have the equation for the least squares solution. The equation is constructed with the condition that $(h - h_w)^2$ should be minimum, where h_w is the height for the point on the lunar limb read from Watts' charts and reduced to the topocentric distance of the Moon. h_w and h 's for the three wave lengths after the best fit with respect to x , y and z are given in the 5th and the 6th to 8th columns of Table 3, respectively. Those for wave length 5047 \AA are also shown in Figure 5.

Solving the equation, we have corrections to the computed values for the relative position and semidiameter of the Sun and the Moon:

$$\Delta (\delta_s - \delta_m) = -0.52'' \pm 0.07'',$$

$$\Delta (\alpha_s - \alpha_m) \cos \delta_s = -0.28'' \pm 0.03'',$$

$$\Delta (r_s - r_m) = +0.55'' \pm 0.02''.$$

We can also solve the equation for the longitude and latitude if we make the following transformation of the unknowns:

$$x' = \Delta (\lambda_s - \lambda_m) = \cos \alpha \sin \epsilon x + (\cos \delta \cos \epsilon + \sin \delta \sin \alpha \sin \epsilon) y,$$

$$y' = \Delta (\beta_s - \beta_m) = (\cos \delta \cos \epsilon + \sin \delta \sin \alpha \sin \epsilon) x - \cos \alpha \sin \epsilon y.$$

Then we have

$$\Delta (\lambda_s - \lambda_m) = -0.21'' \pm 0.02'',$$

$$\Delta (\beta_s - \beta_m) = -0.55'' \pm 0.07'',$$

$$\Delta (r_s - r_m) = +0.55'' \pm 0.02''.$$

All the above result is for the wave length 5047 \AA as stated before. Reductions have been made also for the other two wave lengths.

They are

$$\Delta (\lambda_s - \lambda_m) = -0.21'' \pm 0.02'',$$

$$\Delta (\beta_s - \beta_m) = -0.57'' \pm 0.07'',$$

Table 3. Position angle (p), contact times (tc), height by Watts (hw) and observed heights (h)
(1) : 5047 Å, (2) : 4960 Å, (3) : 4740 Å. 2nd contact.

p	tc(1)	tc(2)	tc(3)	hw	h(1)	h(2)	h(3)	p	tc(1)	tc(2)	tc(3)	hw	h(1)	h(2)	h(3)
18h 47m								18h 47m							
o	s	s	s	"	"	"	"	o	s	s	s	"	"	"	"
80.1				-0.79				86.1	32.50	32.50	32.49	-0.25	0.02	0.01	0.00
80.2				-0.82				86.2	32.45	32.42	32.41	-0.23	0.05	0.06	0.04
80.3		30.19		-0.87		-0.75		86.3	32.48	32.44	32.42	-0.22	0.06	0.07	0.06
80.4		30.26		-0.97		-0.74		86.4	32.57	32.51	32.50	-0.16	0.05	0.06	0.05
80.5	30.33	30.38		-1.08	-0.72	-0.74		86.5	32.67	32.59	32.59	-0.08	0.04	0.06	0.04
80.6	30.48	30.47	30.31	-1.23	-0.73	-0.74	-0.70	86.6	32.69	32.64	32.62	-0.07	0.05	0.06	0.04
80.7	30.63	30.63	30.45	-1.31	-0.75	-0.75	-0.71	86.7	32.67	32.64	32.62	-0.06	0.07	0.07	0.06
80.8	30.88	30.93	30.75	-1.18	-0.80	-0.82	-0.77	86.8	32.61	32.61	32.56	0.02	0.11	0.10	0.10
80.9	31.19	31.24	31.10	-1.01	-0.86	-0.89	-0.85	86.9	32.33	32.35	32.28	0.11	0.22	0.20	0.21
81.0	31.48	31.53	31.38	-1.01	-0.92	-0.94	-0.91	87.0	32.03	32.04	31.95	0.18	0.33	0.32	0.33
81.1	31.61	31.64	31.51	-1.04	-0.93	-0.95	-0.92	87.1	31.81	31.80	31.74	0.22	0.42	0.42	0.42
81.2	31.59	31.63	31.50	-0.97	-0.89	-0.92	-0.89	87.2	31.73	31.72	31.67	0.21	0.47	0.46	0.46
81.3	31.52	31.57	31.44	-0.89	-0.84	-0.87	-0.84	87.3	31.73	31.72	31.68	0.22	0.48	0.48	0.47
81.4	31.43	31.47	31.32	-0.83	-0.78	-0.80	-0.77	87.4	31.75	31.75	31.70	0.32	0.49	0.48	0.48
81.5	31.32	31.37	31.20	-0.79	-0.72	-0.74	-0.70	87.5	31.75	31.76	31.71	0.43	0.51	0.50	0.49
81.6	31.34	31.40	31.24	-0.76	-0.69	-0.72	-0.68	87.6	31.80	31.80	31.75	0.47	0.50	0.50	0.49
81.7	31.50	31.55	31.40	-0.73	-0.71	-0.74	-0.71	87.7	31.87	31.87	31.81	0.44	0.50	0.49	0.49
81.8	31.66	31.69	31.59	-0.71	-0.74	-0.75	-0.74	87.8	32.00	31.98	31.93	0.34	0.47	0.47	0.46
81.9	31.75	31.76	31.69	-0.67	-0.73	-0.75	-0.74	87.9	32.23	32.18	32.14	0.23	0.41	0.41	0.41
82.0	31.76	31.79	31.72	-0.57	-0.71	-0.73	-0.72	88.0	32.47	32.42	32.39	0.19	0.34	0.35	0.34
82.1	31.71	31.75	31.65	-0.44	-0.66	-0.69	-0.67	88.1	32.68	32.62	32.59	0.21	0.28	0.29	0.28
82.2	31.48	31.52	31.41	-0.32	-0.56	-0.58	-0.56	88.2	32.69	32.68	32.64	0.32	0.29	0.29	0.28
82.3	31.15	31.19	31.04	-0.23	-0.43	-0.45	-0.42	88.3	32.48	32.52	32.44	0.43	0.37	0.35	0.36
82.4	30.87	30.88	30.78	-0.21	-0.31	-0.32	-0.31	88.4	32.21	32.24	32.18	0.45	0.48	0.46	0.47
82.5	30.71	30.72	30.66	-0.20	-0.23	-0.24	-0.24	88.5	32.04	32.05	31.99	0.44	0.55	0.54	0.54
82.6	30.60	30.58	30.55	-0.11	-0.17	-0.17	-0.17	88.6	31.94	31.95	31.88	0.44	0.60	0.59	0.59
82.7	30.45	30.42	30.43	-0.01	-0.09	-0.09	-0.11	88.7	31.92	31.91	31.84	0.44	0.62	0.61	0.61
82.8	30.27	30.23	30.25	0.06	-0.01	0.00	-0.02	88.8	31.96	31.94	31.89	0.44	0.61	0.61	0.61
82.9	30.15			0.09	0.06			88.9	32.04	32.03	31.97	0.44	0.60	0.60	0.59
83.0	30.19			0.06	0.08			89.0	32.09	32.08	32.04	0.44	0.59	0.59	0.58
83.1	30.25	30.20		0.04	0.08	0.09		89.1	32.13	32.13	32.08	0.44	0.59	0.58	0.58
83.2	30.36	30.38		0.08	0.07	0.06		89.2	32.25	32.22	32.18	0.45	0.56	0.56	0.56
83.3	30.53	30.58	30.29	0.14	0.04	0.02	0.10	89.3	32.43	32.39	32.35	0.44	0.51	0.52	0.51
83.4	30.70	30.69	30.55	0.15	0.02	0.01	0.04	89.4	32.65	32.57	32.54	0.34	0.44	0.46	0.45
83.5	30.87	30.84	30.80	0.14	-0.01	-0.05	-0.02	89.5	32.89	32.79	32.75	0.23	0.37	0.40	0.39
83.6	31.02	31.10	30.97	0.08	-0.04	-0.07	-0.04	89.6	33.16	33.03	33.01	0.20	0.29	0.33	0.31
83.7	31.11	31.19	31.05	0.01	-0.04	-0.08	-0.05	89.7	33.44	33.31	33.33	0.18	0.20	0.24	0.21
83.8	31.20	31.27	31.12	-0.03	-0.05	-0.08	-0.04	89.8	33.87	33.80	33.74	0.09	0.07	0.08	0.08
83.9	31.34	31.38	31.27	-0.06	-0.07	-0.09	-0.07	89.9	34.19	34.17	34.06	0.01	-0.04	-0.04	-0.02
84.0	31.51	31.54	31.46	-0.14	-0.10	-0.12	-0.11	90.0	34.23	34.26	34.20	-0.02	-0.04	-0.06	-0.06
84.1	31.71	31.71	31.65	-0.22	-0.14	-0.15	-0.15	90.1	34.05	34.06	34.04	-0.01	0.03	0.02	0.00
84.2	31.89	31.87	31.82	-0.25	-0.18	-0.18	-0.18	90.2	33.80	33.82	33.78	0.09	0.12	0.11	0.10
84.3	32.02	31.99	31.95	-0.25	-0.20	-0.19	-0.20	90.3	33.66	33.66	33.61	0.21	0.18	0.17	0.17
84.4	32.08	32.05	32.02	-0.26	-0.19	-0.19	-0.20	90.4	33.69	33.67	33.62	0.33	0.18	0.18	0.17
84.5	32.08	32.04	32.02	-0.26	-0.17	-0.17	-0.17	90.5	33.70	33.71	33.64	0.43	0.18	0.17	0.17
84.6	32.06	32.03	32.00	-0.24	-0.14	-0.14	-0.15	90.6	33.53	33.58	33.50	0.44	0.25	0.22	0.23
84.7	32.10	32.07	32.03	-0.22	-0.13	-0.13	-0.13	90.7	33.24	33.35	33.20	0.44	0.35	0.31	0.34
84.8	32.22	32.16	32.13	-0.21	-0.15	-0.14	-0.15	90.8	32.88	32.99	32.90	0.49	0.48	0.44	0.45
84.9	32.38	32.32	32.30	-0.22	-0.18	-0.17	-0.18	90.9	32.56	32.63	32.49	0.58	0.60	0.57	0.60
85.0	32.56	32.48	32.48	-0.26	-0.22	-0.20	-0.22	91.0	32.24	32.26	32.15	0.73	0.72	0.70	0.72
85.1	32.73	32.63	32.64	-0.31	-0.25	-0.23	-0.25	91.1	31.99	32.00	31.85	0.86	0.81	0.80	0.83
85.2	32.84	32.76	32.75	-0.38	-0.27	-0.25	-0.27	91.2	31.77	31.75	31.58	0.88	0.89	0.89	0.93
85.3	32.85	32.79	32.79	-0.43	-0.25	-0.24	-0.26	91.3	31.66	31.63	31.50	0.88	0.94	0.94	0.96
85.4	32.82	32.77	32.78	-0.46	-0.22	-0.21	-0.23	91.4	31.67	31.62	31.51	0.97	0.94	0.95	0.96
85.5	32.83	32.77	32.76	-0.44	-0.20	-0.19	-0.21	91.5	31.76	31.71	31.61	1.06	0.91	0.92	0.94
85.6	32.85	32.79	32.79	-0.35	-0.19	-0.18	-0.20	91.6	31.93	31.88	31.80	1.07	0.86	0.87	0.87
85.7	32.90	32.84	32.85	-0.28	-0.19	-0.18	-0.20	91.7	32.18	32.11	32.04	1.02	0.78	0.80	0.79
85.8	32.92	32.88	32.87	-0.35	-0.18	-0.17	-0.19	91.8	32.44	32.38	32.36	0.91	0.69	0.71	0.69
85.9	32.84	32.84	32.82	-0.43	-0.13	-0.14	-0.15	91.9	32.71	32.59	32.57	0.77	0.60	0.64	0.62
86.0	32.66	32.68	32.66	-0.36	-0.05	-0.07	-0.08	92.0	32.94	32.82	32.81	0.62	0.53	0.56	0.54

Table 3 (continued). 2nd contact.

p	tc(1)	tc(2)	tc(3)	hw	h(1)	h(2)	h(3)	p	tc(1)	tc(2)	tc(3)	hw	h(1)	h(2)	h(3)
18h 47m								18h 47m							
o	s	s	s	"	"	"	"	o	s	s	s	"	"	"	"
92.1	33.15	33.04	33.04	0.47	0.46	0.49	0.46	98.1	33.67	33.69	33.65	0.22	0.02	0.01	-0.01
92.2	33.36	33.26	33.29	0.35	0.38	0.42	0.38	98.2	33.43	33.48	33.41	0.28	0.10	0.08	0.07
92.3	33.59	33.51	33.51	0.24	0.31	0.33	0.30	98.3	33.18	33.24	33.15	0.33	0.18	0.15	0.15
92.4	33.75	33.70	33.68	0.16	0.26	0.27	0.25	98.4	33.01	33.05	32.97	0.29	0.22	0.20	0.20
92.5	33.85	33.80	33.78	0.12	0.22	0.23	0.22	98.5	32.96	32.99	32.93	0.23	0.23	0.21	0.20
92.6	33.87	33.85	33.82	0.15	0.22	0.22	0.20	98.6	32.87	32.95	32.88	0.20	0.25	0.21	0.21
92.7	33.84	33.82	33.80	0.19	0.23	0.23	0.21	98.7	32.67	32.81	32.70	0.22	0.31	0.25	0.26
92.8	33.81	33.79	33.76	0.19	0.24	0.24	0.23	98.8	32.44	32.55	32.42	0.30	0.37	0.33	0.35
92.9	33.83	33.80	33.78	0.18	0.24	0.24	0.22	98.9	32.19	32.26	32.12	0.42	0.45	0.42	0.44
93.0	33.95	33.90	33.88	0.21	0.20	0.21	0.19	99.0	31.93	31.97	31.74	0.54	0.53	0.51	0.56
93.1	34.12	34.07	34.03	0.22	0.14	0.15	0.14	99.1	31.68	31.70	31.47	0.65	0.61	0.60	0.65
93.2	34.27	34.23	34.18	0.11	0.09	0.10	0.09	99.2	31.47	31.48	31.24	0.77	0.67	0.66	0.72
93.3	34.33	34.32	34.29	0.01	0.06	0.06	0.05	99.3	31.27	31.25	31.06	0.87	0.73	0.73	0.77
93.4	34.22	34.20	34.22	0.11	0.11	0.11	0.07	99.4	31.11	31.09	30.92	0.89	0.77	0.77	0.80
93.5	33.97	33.96	33.96	0.26	0.19	0.19	0.16	99.5	31.08	31.06	30.87	0.88	0.76	0.77	0.80
93.6	33.70	33.70	33.64	0.27	0.29	0.28	0.27	99.6	31.17	31.13	30.95	0.89	0.72	0.73	0.76
93.7	33.51	33.51	33.45	0.23	0.35	0.35	0.34	99.7	31.26	31.21	31.04	0.88	0.67	0.68	0.71
93.8	33.42	33.39	33.35	0.20	0.38	0.39	0.38	99.8	31.35	31.32	31.13	0.76	0.62	0.63	0.67
93.9	33.45	33.39	33.38	0.19	0.37	0.39	0.36	99.9	31.48	31.46	31.26	0.62	0.56	0.56	0.60
94.0	33.55	33.48	33.48	0.20	0.33	0.35	0.33	100.0	31.57	31.54	31.37	0.56	0.51	0.52	0.55
94.1	33.68	33.61	33.61	0.22	0.29	0.31	0.28	100.1	31.60	31.57	31.41	0.56	0.48	0.49	0.52
94.2	33.76	33.71	33.68	0.22	0.26	0.27	0.25	100.2	31.59	31.55	31.38	0.61	0.47	0.48	0.51
94.3	33.70	33.68	33.65	0.22	0.28	0.28	0.26	100.3	31.58	31.55	31.37	0.65	0.46	0.47	0.50
94.4	33.51	33.53	33.45	0.27	0.34	0.33	0.33	100.4	31.61	31.58	31.40	0.58	0.43	0.44	0.47
94.5	33.25	33.31	33.19	0.31	0.43	0.40	0.42	100.5	31.68	31.65	31.48	0.48	0.39	0.40	0.42
94.6	33.12	33.09	33.02	0.30	0.47	0.48	0.48	100.6	31.71	31.69	31.50	0.48	0.36	0.36	0.40
94.7	33.19	33.10	33.04	0.27	0.45	0.47	0.47	100.7	31.70	31.68	31.49	0.52	0.35	0.35	0.39
94.8	33.40	33.29	33.27	0.22	0.37	0.40	0.38	100.8	31.73	31.71	31.51	0.55	0.31	0.32	0.36
94.9	33.73	33.61	33.58	0.18	0.25	0.28	0.27	100.9	31.76	31.76	31.56	0.58	0.29	0.28	0.32
95.0	33.94	33.89	33.87	0.14	0.17	0.18	0.16	101.0	31.68	31.64	31.46	0.59	0.30	0.31	0.34
95.1	33.94	33.90	33.88	0.11	0.17	0.18	0.15	101.1	31.43	31.37	31.21	0.63	0.37	0.39	0.41
95.2	33.75	33.74	33.72	0.13	0.23	0.23	0.21	101.2	31.06	31.00	30.90	0.79	0.48	0.50	0.50
95.3	33.59	33.57	33.54	0.16	0.28	0.28	0.26	101.3	30.62	30.59	30.59	0.96	0.62	0.63	0.60
95.4	33.49	33.47	33.45	0.20	0.31	0.31	0.29	101.4	30.25	30.16	30.25	1.02	0.74	0.77	0.70
95.5	33.43	33.40	33.40	0.22	0.33	0.33	0.31	101.5				1.04			
95.6	33.43	33.38	33.39	0.19	0.32	0.34	0.30	102.1				1.38			
95.7	33.54	33.46	33.49	0.14	0.28	0.30	0.26	102.2				1.30			
95.8	33.78	33.70	33.70	0.04	0.19	0.21	0.18	102.3				1.12			
95.9	34.07	34.01	33.97	-0.05	0.08	0.09	0.08	102.4	30.36	30.43		0.90	0.49	0.46	
96.0	34.25	34.20	34.16	-0.08	0.01	0.02	0.01	102.5	30.62	30.71	30.44	0.68	0.37	0.34	0.40
96.1	34.35	34.31	34.26	-0.09	-0.03	-0.02	-0.04	102.6	30.75	30.80	30.63	0.50	0.31	0.28	0.31
96.2	34.48	34.43	34.37	-0.15	-0.09	-0.07	-0.08	102.7	30.72	30.76	30.63	0.39	0.29	0.28	0.29
96.3	34.61	34.58	34.53	-0.17	-0.14	-0.13	-0.15	102.8	30.60	30.64	30.53	0.40	0.31	0.29	0.30
96.4	34.63	34.58	34.59	-0.05	-0.15	-0.14	-0.18	102.9	30.46	30.57	30.39	0.47	0.34	0.30	0.33
96.5	34.48	34.44	34.48	0.08	-0.11	-0.10	-0.15	103.0	30.38	30.51	30.33	0.56	0.35	0.30	0.33
96.6	34.29	34.25	34.28	0.08	-0.05	-0.04	-0.08	103.1	30.42	30.54	30.30	0.60	0.31	0.26	0.31
96.7	34.21	34.17	34.17	0.01	-0.03	-0.02	-0.05	103.2	30.59	30.67	30.34	0.49	0.22	0.19	0.27
96.8	34.19	34.15	34.14	-0.09	-0.03	-0.02	-0.05	103.3	30.84	30.86	30.56	0.32	0.11	0.10	0.17
96.9	34.13	34.10	34.10	-0.13	-0.02	-0.01	-0.04	103.4	31.11	31.09	30.88	0.20	-0.02	-0.01	0.03
97.0	33.99	33.97	33.98	0.01	0.02	0.02	-0.01	103.5	31.43	31.34	31.17	0.10	-0.16	-0.13	-0.10
97.1	33.84	33.82	33.82	0.18	0.07	0.07	0.04	103.6	31.59	31.51	31.37	-0.06	-0.24	-0.21	-0.20
97.2	33.78	33.74	33.74	0.21	0.08	0.09	0.06	103.7	31.61	31.52	31.40	-0.21	-0.27	-0.24	-0.23
97.3	33.83	33.78	33.78	0.19	0.05	0.07	0.03	103.8	31.55	31.47	31.34	-0.24	-0.28	-0.25	-0.24
97.4	33.89	33.84	33.84	0.20	0.02	0.03	0.00	103.9	31.47	31.37	31.24	-0.22	-0.27	-0.24	-0.23
97.5	33.92	33.87	33.87	0.22	0.00	0.01	-0.02	104.0	31.34	31.25	31.14	-0.22	-0.25	-0.22	-0.22
97.6	33.91	33.88	33.88	0.22	-0.01	0.00	-0.03	104.1	31.15	31.10	30.98	-0.22	-0.21	-0.19	-0.19
97.7	33.90	33.87	33.85	0.22	-0.02	-0.01	-0.03	104.2	30.93	30.86	30.76	-0.22	-0.15	-0.13	-0.13
97.8	33.96	33.92	33.90	0.22	-0.05	-0.04	-0.06	104.3	30.63	30.59	30.48	-0.22	-0.07	-0.06	-0.06
97.9	33.99	33.98	33.96	0.22	-0.07	-0.07	-0.09	104.4	30.33	30.30	30.16	-0.23	0.01	0.02	0.03
98.0	33.88	33.88	33.87	0.21	-0.04	-0.04	-0.07	104.5	30.13			-0.22	0.06		

Table 3 (continued). 3rd contact.

p	tc(1)	tc(2)	tc(3)	hw	h(1)	h(2)	h(3)	p	tc(1)	tc(2)	tc(3)	hw	h(1)	h(2)	h(3)
18h 54m								18h 54m							
o	s	s	s	"	"	"	"	o	s	s	s	"	"	"	"
295.1				0.00				301.1	12.35	12.36	12.41	0.88	0.86	0.87	0.86
295.2				0.01				301.2	12.17	12.13	12.18	0.86	0.81	0.80	0.79
295.3				0.00				301.3	11.99	11.97	11.99	0.83	0.77	0.76	0.74
295.4				-0.09				301.4	11.92	11.85	11.90	0.74	0.75	0.73	0.72
295.5	12.98			-0.21	-0.25			301.5	11.89	11.82	11.87	0.66	0.76	0.74	0.73
295.6	12.91	13.02	13.06	-0.30	-0.25	-0.20	-0.22	301.6	11.90	11.84	11.89	0.65	0.78	0.76	0.75
295.7	12.86	12.92	12.99	-0.37	-0.24	-0.21	-0.21	301.7	11.99	11.91	11.97	0.65	0.83	0.80	0.80
295.8	12.77	12.87	12.92	-0.37	-0.24	-0.20	-0.21	301.8	12.12	12.02	12.09	0.65	0.89	0.86	0.86
295.9	12.65	12.76	12.82	-0.34	-0.25	-0.21	-0.22	301.9	12.16	12.08	12.14	0.65	0.92	0.89	0.89
296.0	12.48	12.60	12.66	-0.31	-0.28	-0.24	-0.25	302.0	12.13	12.07	12.11	0.74	0.93	0.90	0.89
296.1	12.27	12.36	12.39	-0.30	-0.33	-0.30	-0.31	302.1	12.06	11.99	12.05	0.83	0.91	0.89	0.89
296.2	12.03	12.11	12.13	-0.33	-0.39	-0.36	-0.38	302.2	11.92	11.86	11.92	0.89	0.88	0.86	0.85
296.3	11.81	11.88	11.90	-0.39	-0.44	-0.41	-0.44	302.3	11.74	11.70	11.76	0.88	0.83	0.82	0.81
296.4	11.75	11.83	11.84	-0.43	-0.43	-0.40	-0.43	302.4	11.50	11.51	11.56	0.76	0.76	0.76	0.75
296.5	11.85	11.90	11.95	-0.44	-0.37	-0.35	-0.36	302.5	11.24	11.31	11.32	0.61	0.67	0.70	0.68
296.6	12.05	12.09	12.19	-0.35	-0.27	-0.25	-0.25	302.6	10.98	11.11	11.10	0.51	0.60	0.64	0.61
296.7	12.35	12.36	12.45	-0.25	-0.13	-0.12	-0.12	302.7	10.78	10.91	10.87	0.44	0.54	0.58	0.55
296.8	12.50	12.51	12.61	-0.22	-0.05	-0.04	-0.04	302.8	10.64	10.71	10.69	0.41	0.50	0.53	0.50
296.9	12.48	12.54	12.60	-0.21	-0.03	0.00	-0.01	302.9	10.55	10.58	10.58	0.39	0.48	0.49	0.47
297.0	12.40	12.44	12.49	-0.17	-0.03	-0.01	-0.02	303.0	10.49	10.49	10.52	0.40	0.47	0.47	0.46
297.1	12.30	12.33	12.37	-0.13	-0.04	-0.02	-0.04	303.1	10.51	10.48	10.55	0.43	0.49	0.48	0.48
297.2	12.19	12.25	12.27	-0.16	-0.05	-0.03	-0.05	303.2	10.66	10.58	10.70	0.54	0.56	0.53	0.55
297.3	12.15	12.19	12.24	-0.19	-0.04	-0.02	-0.03	303.3	10.88	10.76	10.94	0.65	0.65	0.61	0.65
297.4	12.20	12.24	12.29	-0.17	0.01	0.02	0.01	303.4	11.19	11.08	11.21	0.66	0.77	0.73	0.75
297.5	12.28	12.31	12.37	-0.11	0.06	0.07	0.07	303.5	11.40	11.33	11.43	0.66	0.86	0.83	0.84
297.6	12.35	12.36	12.42	-0.01	0.11	0.12	0.11	303.6	11.63	11.51	11.63	0.74	0.95	0.91	0.93
297.7	12.44	12.43	12.48	0.10	0.17	0.17	0.16	303.7	11.78	11.68	11.78	0.86	1.01	0.98	0.99
297.8	12.57	12.53	12.58	0.17	0.25	0.23	0.22	303.8	11.89	11.78	11.89	1.00	1.07	1.02	1.04
297.9	12.75	12.68	12.73	0.21	0.33	0.31	0.30	303.9	11.87	11.76	11.88	1.09	1.07	1.03	1.05
298.0	12.82	12.80	12.84	0.21	0.38	0.38	0.36	304.0	11.68	11.62	11.72	1.07	1.01	0.99	1.00
298.1	12.83	12.81	12.88	0.20	0.41	0.41	0.40	304.1	11.40	11.40	11.47	0.99	0.92	0.92	0.92
298.2	12.78	12.78	12.86	0.21	0.42	0.42	0.42	304.2	11.11	11.19	11.20	0.94	0.82	0.85	0.84
298.3	12.68	12.70	12.77	0.22	0.41	0.42	0.41	304.3	10.88	11.00	10.99	0.88	0.75	0.80	0.77
298.4	12.58	12.58	12.66	0.22	0.39	0.40	0.40	304.4	10.79	10.84	10.85	0.76	0.73	0.75	0.73
298.5	12.45	12.45	12.53	0.22	0.37	0.37	0.37	304.5	10.79	10.78	10.85	0.66	0.74	0.73	0.73
298.6	12.32	12.31	12.38	0.21	0.35	0.35	0.34	304.6	10.84	10.81	10.88	0.76	0.76	0.75	0.76
298.7	12.21	12.22	12.25	0.22	0.33	0.33	0.32	304.7	10.79	10.81	10.83	0.87	0.75	0.76	0.75
298.8	12.16	12.15	12.22	0.32	0.34	0.33	0.33	304.8	10.61	10.68	10.67	0.79	0.70	0.72	0.70
298.9	12.15	12.14	12.22	0.41	0.35	0.35	0.35	304.9	10.42	10.46	10.46	0.67	0.64	0.65	0.63
299.0	12.15	12.14	12.21	0.33	0.38	0.37	0.37	305.0	10.25	10.27	10.26	0.62	0.59	0.59	0.57
299.1	12.17	12.15	12.20	0.23	0.41	0.40	0.39	305.1	10.12	10.10	10.12	0.60	0.55	0.54	0.53
299.2	12.26	12.21	12.28	0.23	0.46	0.45	0.44	305.2	10.09	10.05	10.10	0.59	0.54	0.53	0.52
299.3	12.42	12.33	12.41	0.30	0.54	0.51	0.51	305.3	10.09	10.05	10.10	0.59	0.55	0.54	0.53
299.4	12.50	12.42	12.48	0.40	0.59	0.56	0.56	305.4	10.07	10.03	10.07	0.62	0.55	0.54	0.53
299.5	12.55	12.46	12.53	0.50	0.63	0.60	0.60	305.5	9.97	9.94	9.97	0.62	0.52	0.51	0.50
299.6	12.60	12.51	12.59	0.48	0.67	0.64	0.64	305.6	9.76	9.72	9.74	0.54	0.45	0.44	0.42
299.7	12.65	12.56	12.66	0.45	0.71	0.68	0.69	305.7	9.48	9.47	9.48	0.45	0.36	0.35	0.34
299.8	12.62	12.58	12.66	0.50	0.72	0.70	0.70	305.8	9.35	9.32	9.36	0.41	0.32	0.31	0.30
299.9	12.53	12.49	12.57	0.55	0.70	0.69	0.69	305.9	9.31	9.29	9.33	0.40	0.31	0.30	0.30
300.0	12.39	12.34	12.41	0.56	0.67	0.66	0.66	306.0	9.30	9.28	9.31	0.43	0.31	0.30	0.29
300.1	12.22	12.17	12.23	0.56	0.63	0.62	0.61	306.1	9.20	9.14	9.18	0.44	0.28	0.26	0.25
300.2	12.09	12.06	12.12	0.58	0.60	0.59	0.59	306.2	8.99	8.88	8.94	0.34	0.21	0.17	0.17
300.3	12.18	12.11	12.18	0.60	0.66	0.63	0.63	306.3	8.74	8.66	8.71	0.23	0.13	0.10	0.10
300.4	12.27	12.21	12.27	0.58	0.71	0.69	0.68	306.4	8.62	8.60	8.64	0.18	0.09	0.08	0.08
300.5	12.36	12.28	12.35	0.57	0.76	0.73	0.73	306.5	8.67	8.70	8.75	0.17	0.11	0.12	0.12
300.6	12.46	12.36	12.44	0.59	0.81	0.78	0.78	306.6	8.83	8.85	8.88	0.19	0.17	0.18	0.17
300.7	12.58	12.46	12.54	0.65	0.87	0.83	0.84	306.7	8.94	8.94	8.97	0.22	0.21	0.21	0.20
300.8	12.67	12.56	12.64	0.76	0.92	0.89	0.89	306.8	8.98	8.98	9.00	0.21	0.23	0.23	0.22
300.9	12.66	12.60	12.67	0.87	0.94	0.92	0.92	306.9	8.99	8.99	9.02	0.19	0.24	0.24	0.23
301.0	12.55	12.51	12.61	0.89	0.92	0.90	0.91	307.0	9.00	9.00	9.02	0.21	0.25	0.24	0.23

Table 3 (continued). 3rd contact.

p	tc(1)	tc(2)	tc(3)	hw	h(1)	h(2)	h(3)	p	tc(1)	tc(2)	tc(3)	hw	h(1)	h(2)	h(3)
18h 54m								18h 54m							
O	S	S	S	"	"	"	"	O	S	S	S	"	"	"	"
307.1	8.99	8.96	8.99	0.22	0.24	0.23	0.22	312.6	9.22	9.30	9.32	0.22	0.08	0.10	0.09
307.2	8.91	8.85	8.89	0.11	0.22	0.20	0.19	312.7	9.23	9.31	9.33	0.30	0.07	0.10	0.09
307.3	8.76	8.71	8.75	0.01	0.17	0.15	0.14	312.8	9.26	9.32	9.35	0.29	0.07	0.09	0.08
307.4	8.65	8.62	8.67	0.09	0.13	0.12	0.12	312.9	9.28	9.35	9.40	0.26	0.06	0.08	0.09
307.5	8.61	8.61	8.65	0.21	0.12	0.12	0.11	313.0	9.34	9.43	9.48	0.29	0.07	0.10	0.10
307.6	8.63	8.64	8.68	0.23	0.13	0.13	0.12	313.1	9.49	9.56	9.65	0.33	0.11	0.13	0.15
307.7	8.69	8.70	8.75	0.22	0.15	0.15	0.15	313.2	9.71	9.75	9.83	0.37	0.17	0.18	0.20
307.8	8.75	8.77	8.81	0.22	0.17	0.18	0.17	313.3	9.88	9.92	10.00	0.38	0.21	0.23	0.24
307.9	8.80	8.80	8.83	0.22	0.19	0.19	0.18	313.4	10.01	10.04	10.11	0.35	0.25	0.25	0.26
308.0	8.78	8.77	8.80	0.23	0.18	0.18	0.17	313.5	10.11	10.13	10.20	0.33	0.27	0.27	0.28
308.1	8.71	8.67	8.71	0.22	0.16	0.14	0.14	313.6	10.21	10.22	10.31	0.37	0.29	0.29	0.30
308.2	8.56	8.51	8.56	0.12	0.10	0.09	0.09	313.7	10.36	10.36	10.47	0.43	0.32	0.32	0.34
308.3	8.42	8.44	8.47	0.01	0.06	0.06	0.05	313.8	10.53	10.51	10.63	0.49	0.37	0.36	0.38
308.4	8.42	8.46	8.47	-0.02	0.05	0.07	0.05	313.9	10.68	10.66	10.77	0.54	0.40	0.39	0.41
308.5	8.46	8.49	8.51	0.00	0.07	0.08	0.06	314.0	10.77	10.76	10.86	0.60	0.42	0.41	0.43
308.6	8.52	8.57	8.60	0.03	0.09	0.11	0.10	314.1	10.86	10.83	10.97	0.65	0.43	0.42	0.45
308.7	8.63	8.69	8.72	0.07	0.13	0.15	0.14	314.2	10.98	10.93	11.05	0.68	0.46	0.44	0.46
308.8	8.79	8.85	8.87	0.13	0.18	0.20	0.19	314.3	10.96	10.98	11.05	0.66	0.43	0.44	0.45
308.9	8.96	9.04	9.06	0.21	0.24	0.26	0.25	314.4	10.84	10.92	10.95	0.54	0.38	0.40	0.40
309.0	9.14	9.19	9.22	0.32	0.30	0.31	0.30	314.5	10.82	10.82	10.96	0.45	0.35	0.35	0.38
309.1	9.30	9.35	9.40	0.43	0.35	0.37	0.36	314.6	11.09	10.94	11.21	0.51	0.43	0.38	0.45
309.2	9.49	9.53	9.59	0.53	0.41	0.43	0.43	314.7	11.54	11.38	11.68	0.64	0.56	0.50	0.59
309.3	9.72	9.73	9.83	0.62	0.49	0.49	0.51	314.8	11.96	11.97	12.11	0.77	0.69	0.69	0.72
309.4	9.93	9.92	9.99	0.65	0.56	0.55	0.56	314.9	12.38	12.39	12.49	0.87	0.81	0.81	0.83
309.5	10.03	10.03	10.08	0.66	0.59	0.59	0.59	315.0	12.53	12.58	12.67	0.89	0.84	0.86	0.87
309.6	9.99	10.01	10.02	0.67	0.57	0.58	0.57	315.1	12.56	12.61	12.69	0.88	0.83	0.85	0.86
309.7	9.82	9.86	9.87	0.66	0.51	0.52	0.51	315.2	12.54	12.61	12.67	0.89	0.81	0.83	0.83
309.8	9.65	9.69	9.70	0.56	0.45	0.46	0.45	315.3	12.55	12.61	12.69	0.88	0.79	0.81	0.82
309.9	9.60	9.66	9.69	0.45	0.43	0.45	0.44	315.4	12.53	12.59	12.67	0.78	0.77	0.78	0.80
310.0	9.67	9.72	9.77	0.42	0.44	0.46	0.46	315.5	12.52	12.56	12.61	0.67	0.74	0.75	0.76
310.1	9.76	9.80	9.86	0.44	0.47	0.48	0.49	315.6	12.62	12.59	12.65	0.63	0.75	0.74	0.75
310.2	9.80	9.83	9.87	0.44	0.48	0.49	0.48	315.7	12.88	12.75	12.83	0.65	0.82	0.78	0.79
310.3	9.72	9.74	9.76	0.44	0.45	0.45	0.44	315.8		12.98	13.08	0.76		0.83	0.85
310.4	9.53	9.56	9.57	0.43	0.37	0.38	0.37	315.9				0.87			
310.5	9.32	9.33	9.34	0.41	0.30	0.30	0.29	316.0				0.89			
310.6	9.14	9.18	9.20	0.31	0.23	0.24	0.23	316.1				0.88			
310.7	9.09	9.16	9.18	0.23	0.20	0.23	0.21	316.2				0.88			
310.8	9.17	9.26	9.30	0.26	0.22	0.25	0.25	316.3				0.88			
310.9	9.35	9.43	9.48	0.33	0.28	0.31	0.31	316.4	13.10			0.88	0.75		
311.0	9.57	9.63	9.72	0.38	0.35	0.37	0.38	316.5	12.94	13.06		0.88	0.68	0.71	
311.1	9.82	9.84	9.94	0.43	0.43	0.43	0.45	316.6	12.83	12.89	12.96	0.89	0.62	0.63	0.64
311.2	10.07	10.07	10.18	0.54	0.50	0.50	0.53	316.7	12.74	12.77	12.83	0.88	0.56	0.57	0.58
311.3	10.24	10.25	10.34	0.65	0.56	0.56	0.57	316.8	12.68	12.66	12.74	0.78	0.52	0.51	0.53
311.4	10.29	10.33	10.36	0.68	0.56	0.58	0.57	316.9	12.66	12.61	12.69	0.67	0.49	0.47	0.49
311.5	10.20	10.27	10.28	0.66	0.52	0.55	0.53	317.0	12.68	12.64	12.69	0.64	0.48	0.46	0.46
311.6	10.08	10.16	10.18	0.56	0.47	0.50	0.49	317.1	12.74	12.66	12.73	0.65	0.47	0.44	0.45
311.7	10.01	10.09	10.10	0.45	0.44	0.47	0.46	317.2	12.81	12.70	12.79	0.66	0.47	0.43	0.45
311.8	9.95	10.03	10.05	0.42	0.41	0.44	0.43	317.3	12.92	12.82	12.90	0.66	0.48	0.45	0.46
311.9	9.87	9.93	9.94	0.44	0.37	0.39	0.38	317.4	13.05	12.94	13.01	0.65	0.50	0.46	0.48
312.0	9.72	9.80	9.78	0.46	0.31	0.34	0.31	317.5		13.03		0.65		0.47	
312.1	9.55	9.63	9.61	0.44	0.24	0.27	0.25	317.6		13.10		0.66		0.46	
312.2	9.41	9.48	9.48	0.29	0.19	0.21	0.19	317.7				0.66			
312.3	9.31	9.38	9.40	0.12	0.14	0.17	0.16	317.8				0.54			
312.4	9.26	9.33	9.36	0.09	0.11	0.14	0.13	317.9				0.45			
312.5	9.24	9.31	9.33	0.13	0.10	0.12	0.11	318.0				0.52			

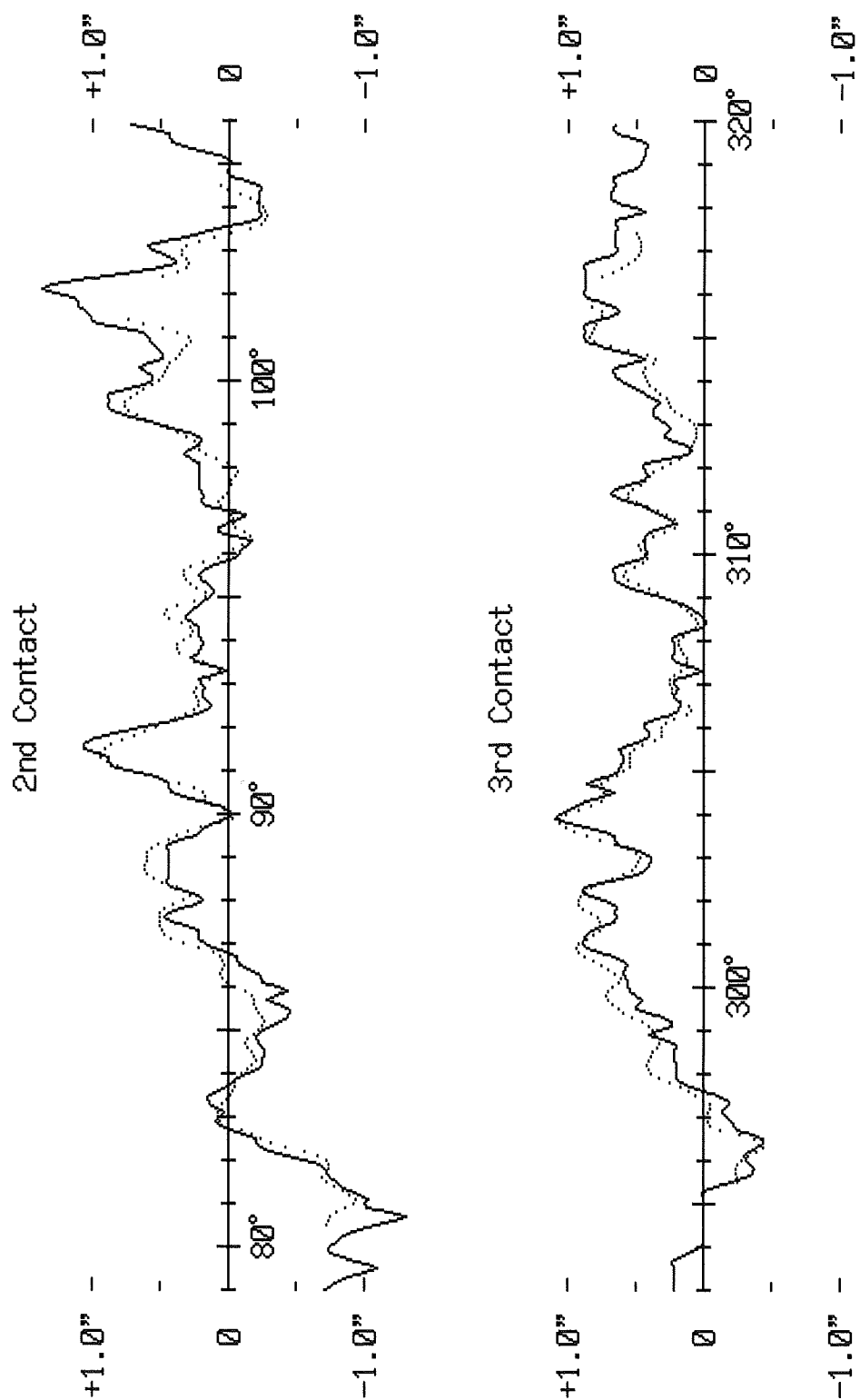


Figure 5. Observed lunar profiles (dotted lines) and those by Watts' charts (solid lines).

$$\Delta (r_s - r_M) = +0.56'' \pm 0.02'', \quad (\text{for } 4960 \text{ \AA})$$

and

$$\Delta (\lambda_s - \lambda_M) = -0.20'' \pm 0.02'',$$

$$\Delta (\beta_s - \beta_M) = -0.51'' \pm 0.07'',$$

$$\Delta (r_s - r_M) = +0.52'' \pm 0.02'', \quad (\text{for } 4740 \text{ \AA})$$

6. Discussion

As seen in Figure 5, the observed lunar limb h and that calculated from Watts' charts h_w show a very good coincidence with each other. This fact means that our observation was made with a sufficiently good accuracy as well as that Watts' charts are correct enough at least for the regions considered. The mean errors of $0.02''$ for longitude and semidiameter and $0.07''$ for latitude, for example, seem to be reasonable in this respect.

Now we compare the present result with those which were obtained at the eclipses in 1970 and 1973 and published in this series of the Report of Hydrographic Researches. It should be noticed, however, that in the past results the ephemerides were different from the current one.

Further, the solar edge defined in the 1970 eclipse analysis is $0.04''$ larger than that defined by the inflection point (Mori and Kubo, 1971).

So we have recomputed the reductions for the 1970 and 1973 eclipses adopting the completely same standard and formula as the present reduction. The result is as follows:

For 1970 March 7:

$$\Delta (\lambda_s - \lambda_M) = -0.17'' \pm 0.02'',$$

$$\Delta (\beta_s - \beta_M) = -0.43'' \pm 0.07'',$$

$$\Delta (r_s - r_M) = +0.29'' \pm 0.02''.$$

For 1973 June 30:

$$\Delta (\lambda_s - \lambda_M) = -0.26'' \pm 0.02'',$$

$$\Delta (\beta_s - \beta_M) = -0.32'' \pm 0.14'',$$

$$\Delta (r_s - r_M) = +0.44'' \pm 0.05''.$$

The result for 1970 and 1973 is for wave length 4615 \AA . So we need for a rigorous comparison to reduce our present result for 1991 to the same wave length by extrapolation. After the reduction to the wave length 4615 \AA , we have

For 1991 July 11:

$$\Delta (\lambda_s - \lambda_M) = -0.20'' \pm 0.02'',$$

$$\Delta (\beta_s - \beta_M) = -0.50'' \pm 0.07'',$$

$$\Delta (r_s - r_M) = +0.51'' \pm 0.02''.$$

By comparison, we notice that the differences of the coordinates as well as of the semidiameter vary fairly largely. The variation in the coordinates, which seems too large, may be partly due to the incompleteness of the ephemeris. On the other hand, the change in the semidiameter is not affected by the ephemeris and seems to be physically significant. Assuming that the radius of the Moon is constant, the change in the radius of the Sun is well accordant with Gilliland (1981).

Throughout the reductions above, however, we have assumed that Watts' charts are perfectly correct. Figure 5 and the corresponding figures in Mori and Kubo (1971) and Mori and Ganeko (1976)

show that this is true at least relatively or locally in small regions of the lunar limb.

However, there exists a possibility that the mean levels of Watts' charts differ from region to region. We can show a proof for that from the result of an analysis of lunar occultations of stars extending for many years (unpublished yet). If we apply this correction to the mean levels of Watts' charts, the result is affected considerably. Though preliminary, it becomes:

For 1970 March 7:

$$\Delta (\lambda_S - \lambda_M) = +0.10'' \pm 0.02'',$$

$$\Delta (\beta_S - \beta_M) = -0.50'' \pm 0.07'',$$

$$\Delta (r_S - r_M) = +0.32'' \pm 0.02''.$$

For 1973 June 30:

$$\Delta (\lambda_S - \lambda_M) = -0.24'' \pm 0.02'',$$

$$\Delta (\beta_S - \beta_M) = -0.28'' \pm 0.14'',$$

$$\Delta (r_S - r_M) = +0.40'' \pm 0.05''.$$

For 1991 July 11:

$$\Delta (\lambda_S - \lambda_M) = -0.17'' \pm 0.02'',$$

$$\Delta (\beta_S - \beta_M) = -0.54'' \pm 0.07'',$$

$$\Delta (r_S - r_M) = +0.47'' \pm 0.02''.$$

A detailed discussion on the correction to Watts' charts and the final result will be published elsewhere.

Acknowledgements

The members of JHD observation team were greatly helped and supported by Dr. Kurokawa, the leader of the Japanese expedition, and other members from National Astronomical Observatory and Kyoto University throughout the expedition. The Institute of Astronomy, the University of Tokyo, kindly permitted the authors to use its PDS for the reading of the film. Mr. Masayuki Sawa of Geodesy and Geophysics Division, JHD, helped them by providing a very detailed local prediction. The authors express their sincere thanks for all of those supports.

References

- Appleby, G.M. and Morrison, L.V.: Mon. Not. R. Astr. Soc., 205, 57 (1983).
 Gilliland, R.L.: Ap. J., 248, 1144 (1981).
 IERS Annual Report for 1991: IERS Central Bureau, Paris (1992).
 Japanese Ephemeris for 1991 and 1993: Hydrogr. Dept., Tokyo (1990 and 1992).
 Kawada, M. and Kubo, Y.: Rep. Hydrogr. Res., 26, 261 (1990).
 Mori, T. and Kubo, Y.: *ibid.*, 7, 39 (1971).
 Mori, T. and Ganeko, Y.: *ibid.*, 11, 43 (1976).
 Watts, C.B.: Astr. Pap. Amer. Eph., 17, (1963).

1991年7月11日の皆既日食の観測 (要旨)

1991年7月11日の皆既日食において、水路部では閃光スペクトル連続撮影法による接触時刻の観測を行っ

た。観測の整約の結果、太陽と月の位置及び視半径の相対値について、天体暦の表値に施すべき次の改正量を得た：

$$\Delta (\lambda_s - \lambda_M) = -0.20'' \pm 0.02'',$$

$$\Delta (\beta_s - \beta_M) = -0.50'' \pm 0.07'',$$

$$\Delta (r_s - r_M) = +0.51'' \pm 0.02'', \quad (4615 \text{ \AA})$$

また、この結果を過去に水路部が同一の方法で行った日食観測の結果と比較したところ、太陽の半径について有意な時間変化が認められた。以上の結果において、月縁図の誤差は少なからぬ影響を及ぼすが、それについても考察した。