

## 海潮流観測システム

徳江猪久二・岡田貢・小野房吉・菱田昌孝・寄高博行

## SEA CURRENT OBSERVING SYSTEM

Ikuji Tokue, Mitugu Okada, Fusakichi Ono, Masataka Hisida, and Hiroyuki Yoritaka

## 1. はじめに

四面を海に囲まれたわが国は、海運、水産及び土地造成という形で海洋を利用してきたが、経済社会の発展と科学技術の進歩に伴い、沿岸部の海洋利用は著しく進み、特に大湾域及び内海に面した大都市周辺を中心に著しく増加している。従って、今後の海洋利用は沿岸部のみならず沖合に利用の場を求める必要があるが、沖合の大水深という厳しい環境下に大規模な海洋構造物を建設するためには、革新的な技術が必要である。このため、運輸省では、運輸技術審議会の「海洋構造物の建造に関する技術的重要事項とその実施方策に関する答申」（昭和52年6月9日）に基づき、技術開発をすすめてきたがこれらの技術を集大成して、プロトタイプによる実証実験を行って安全性、信頼性を確認することが必要となった。

このため、運輸省では、特に今後活用が期待される各種の海洋構造物の設計・施工技術並びにこれらの構造物を設計するために必要となる海象観測・予測技術について、昭和61年度から5ヶ年計画で開発研究を進めることとし、海上保安庁では上記の海象観測技術の内、海潮流観測システムについての研究開発を実施した。

## 2. 海潮流観測システムの概念設計

## (1) 研究開発の効果と背景

本来船舶用レーダは海面上の物標を識別するため、海面からの復帰信号はシークラッター(海面じょう乱)としてノイズ除去されてきたが、昭和56年に神戸商船大学の井上教授はこのシークラッターによる海面の明暗パターンを光電変換し、コンピューター解析による解析による波長と波向の計測方法を発表した。

その後、昭和57年から日本造船振興財団は「海洋波浪等に関する調査研究事業」において、レーダ信号から海面波浪の波長、波向、波速及び波高の波浪要素を抽出する試みとその理論的考察を行った。

昭和60年度を初年度とする運輸新技術「異常海難防止システムの総合研究」の一環として、波浪からのスペクトル信号をFFTを用いる空間スペクトル解析によって、波浪要素をリアルタイムに算出する装置が実用化された。

## (2) 深海波の計測による方法の理論

水深  $h$  に比べて波長  $L$  の極めて短い場合(少なくとも  $h > 2L$ ) には、波は、"トロコイド波"(Trochoidal wave) となり理論上つぎの関係が成立つようになる。

$$C = (gL/2\pi)^{1/2}$$

$$T = 2\pi c/g$$

$$L = gT^2/2\pi$$

$g$  : 重力, 速度

$C$  : 波浪の伝搬速度

$L$  : 周期

これらの式より

$$C = (1.56 L)^{1/2}$$

となるのでこの  $C$  を理論波速とする。

レーダ信号を取り出せば、これが正弦波となる。この正弦波の移動速度を波速としてよいことは、理論的にも成立つ。

### (3) 浅海波の計測による方法の理論

水深が浅くなって、前記(2)以外のばあいには、楕円トロコイド波の理論により、波の伝搬速度  $C$  は波長  $L$  のみならず水深  $h$  にも関係し、

$$C = \left\{ \frac{gL}{2\pi} (\tanh 2\pi h/L) \right\}^{1/2}$$

$$T = \left\{ \frac{2\pi L}{g} (\coth 2\pi h/L) \right\}^{1/2}$$

$$L = CT$$

となる。

観測海面において水深  $h$  を入力して、 $L$  がレーダ信号の処理により計測出来るので、理論波速  $C$  が求められる。

### (4) ソフトウェアのアルゴリズム

本装置は、次に示すアルゴリズムを採用している。

- 1) 最小平均二乗平滑化により海面からの反射波の強度について距離補正を行う。
- 2) 極座標から直交座標系へ変換を行う。
- 3) 高速フーリエ変換をおこない、クロススペクトルとパワースペクトルを算出する。
- 4) 連続する2スキャン間の映像信号におけるクロススペクトルから波の到来方向と実波速を算出する。
- 5) パワースペクトルから波長、理論波速、波高を算出する。
- 6) 観測海面の深さに対する理論波速の補正を行う。
- 7) 実波速と理論波速との差のベクトル演算より潮流速を算出する。

## 3. 海潮流観測システムの製作

### (1) 設計製作

昭和62年度には昭和61年度に実施した概念設計に基づき、第1図の点線内の装置を作成した。

入力信号は次表(第1表)のとおり。この装置の主たる機能は、船から約1.5マイル内のレーダ信号を収録し、その海域のうねりの波長、波速、波向を算出し、最後にその場所の海潮流を求めることである。これらの作業を、表示器と対話型制御器を使ってキーボード入力を最小にすることにより、誰でもが簡単に操作できるようにした。即ち、表示器上の画面の指示事項に従って、行いたい機能を設能を設定選択し、最小限のキーボード操作により、自動的に収録、演算が可能となるようにした。

### (2) レーダ信号の収録

四分円分の、レーダビデオ信号の連続2画面を、40 ns 間隔で A/D 変換して収録する。つまり船から3072 m までのレーダビデオ信号を、海上距離 6 m 毎の 512 個に分割し 512 スイープの信号をデジタル化して記録

する。この間は、実海面上の事象の経過時間として約 0.55 秒間にあたる。さらにこれから約 2.2 秒後の同じ場所の次の画面についても同上の処理を行って、1 件のデータ収録が終るようにした。四分円域の設定操作や機器間のデータの遣り取りに時間を要するので、収録間隔は最小でも 1 分である。

(3) 波長等の計算

収録ずみの極座標画面について、表示器の上で対話型制御器を使って、船からの方位、距離を指定して、一辺 1500 m (単位海上距離 6 m × 250 個) の直交座標系の分画面を設定し、連続する 2 画面分に対して二次元 FFT を使った解析によって、うねりの波長、波速、波向、を求めて出力するようにした。さらにこの観測波長と分画面中央の水深を代表値として与えて、深海波、浅海波の区別に従って本来そのうねりが持つべき理論波速を求めて出力するようにした。

(4) 海潮流の算出方法

これは、二つ以上の観測波に最小二乗法を適用して海潮流のベクトルを求める方法である。いま波浪  $i$  (A, B, C, ……) の観測波速、観測波向(真方位)、及び理論波速をそれぞれ、 $V_{oi}$ ,  $Z_{oi}$ ,  $V_{ci}$  ( $i = A, B, C, ……$ ) とすれば、流れの波の進行方向成分、 $\Delta V_i$  は  $V_i = V_{oi} - V_{ci}$  となる。従って、測地座標系上の北方成分、東方成分を  $V_N$ ,  $V_E$  とすれば、観測された波浪  $i$  (A, B, C, ……) の各波について、次の観測方程式が成立する。

$$\begin{aligned} \Delta V_A &= V_N \cos Z_A + V_E \sin Z_A \\ \Delta V_B &= V_N \cos Z_B + V_E \sin Z_B \\ \Delta V_C &= V_N \cos Z_C + V_E \sin Z_C \\ &\vdots \\ \Delta V_i &= V_N \cos Z_i + V_E \sin Z_i \end{aligned} \quad (3-1)$$

この方程式は、未知数が  $V_N$ ,  $V_E$  の二つであるから、データが最低二つあれば解けることになるが、それ以上あれば最小二乗法を適用して、より精度の高い解が得られる。すなわち、3-1 式の  $\cos Z_i$ ,  $\sin Z_i$ ,  $\Delta V_i$  をそれぞれ  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  とおき、 $(a_i a_i)$ ,  $(a_i b_i)$ ,  $(a_i c_i)$ ,  $(b_i b_i)$ ,  $(b_i c_i)$  のそれぞれの積和を計算して、次の観測方程式をつくる。

$$\begin{aligned} V_N [a_i a_i] + V_E [a_i b_i] &= [a_i c_i] \\ V_N [a_i b_i] + V_E [b_i b_i] &= [b_i c_i] \end{aligned} \quad (3-2)$$

上式から  $V_N$ ,  $V_E$  が求められる。

さらに流れの絶対値  $V_A$ , 流れの方向  $Z_A$  は

$$\begin{aligned} V_A &= \sqrt{V_N^2 + V_E^2} \\ Z_A &= \tan^{-1}(V_E / V_N) \end{aligned} \quad (3-3)$$

これより、波浪データから流れを算出することができる。

第 1 表 システムへの入力信号

レーダから	レーダのデジタルビデオ信号 レーダのアンテナ方位信号 レーダのトリガー信号
航海計器から	時刻信号 測位信号 船首方位信号 真方位信号 対水速度, 対地速度信号
手動入力	水深信号 風向, 風速信号

#### 4. 海潮流観測システムの概要

海潮流観測システムは、船舶用レーダで周辺海域の海面波浪を観測し、レーダ単局による海面反射の2画面信号を2次元FFTを行って波浪の波長、波向、波速及び波高を算出する。観測された実際の波速値と波浪伝播の波速理論値との差から表層の流れを分離抽出するシステムである。

波は一つの卓越した周期を持つ波のほか波高と位相及び波向の異なる様々な波の集合である。これまで船舶用レーダにおいては、これらの波の集合からの反射信号（シークラッター）を取除くようにしてあるが、このシステムの重要な処理過程の一つであるうねりの検出では、船舶用レーダとしての使用時では捨てられてきたこのシークラッターを逆に利用しようとするものである。従って、船上では、シークラッターが捕捉できるように、停船又は錨泊した後、レーダを最高感度に調整し、このアンテナの回転に伴って得られる画像情報として収録する。

システムは、収録部と解析処理部から成っており、レーダ部を除く主なハードウェアは収録部としてはパーソナルコンピュータPC-9801 VXをまた、解析処理部としてはPC-98 RL及びPC-PR 406 LMを利用している。

以下、システムの構成各部について説明する。

##### (1) 収録部

「昭洋」レーダJMA-850-9CAは、使用周波数が9375 MHzであり、アンテナの常用喫水高が20.3 mである。

このレーダの自動衝突予防装置(ARPA)用のビデオ端子から、ビデオ信号や船首方位信号を取り出し、システムに収録する。

このシステムは半径3072 mのレーダの円画面を、メモリー量の制約から4分割し、船首方位を基準にして、中心角90度の扇形の画面(以下扇形画面と言う)をデジタル収録する。サンプリング間隔は、40 ns(距離にして約6 mに相当する)、即ちレーダ画面で0~3072 mの掃引当り512個の画素に区切られて512掃引分(即ち中心角90度に相当する)が収録の対象エリアとなる。約2秒後の次のアンテナスキャンについても同様に収録し、合計2画面分を1セットとする。このような収録作業を四個の扇形画面つまり全方位(360度)について行い、カートリッジ磁気テープに記録する。

##### (2) 解析処理部

ハードウェアとしての解析処理部は、上記の収録部も兼ねているので、船上での収録作業が終了次第、システムは陸上に持ち帰る。

収録データはカートリッジ磁気テープから処理部本体のメモリーに転送され、扇形画面内で処理を希望する任意の場合に、実距離で縦横1500 m×1500 mの処理区域(以下ウィンドウと言う)を設定する。

写真1に示すように、そのウィンドウ内のうねりによるレーダ反射強度の周期的な分布(縞模様)に着目し、周期性が卓越するうねりの波長、波向及び波速を求める。複数方向からのうねりが収録されている場合には、順次うねりとしての周期性の卓越度に応じて、最大4方向までのうねりをFFTにより演算検出する。この際、雑音によるランダムな疑似うねりが検出されることがあるので、これを消去するため扇形画面内に5個のウィンドウを設定しさらに4個の扇形画面つまり全方位について上記の演算をおこなう。

次に、これで得た2方向以上のうねりの要素から2, 3, 4で記述の最小二乗法により海潮流をベクトル計算で求める。

5. 海潮流観測システムの海上試験とその結果

昭和62年度に試作した当システムは昭和62年度と昭和63年度及び平成元年度にわたり、ハードウェアとソフトウェアの改良と実証実験を繰り返してさらに、平成2年度には最終的な実証実験を実施してその有効性を確認した。

(1) 海上実験

平成2年度には測量船「昭洋」により、本州南方海域において最終的な実証実験を行った。

(2) 結果

1) 平成2年度の成果(第2表・第2図)

平成2年度の海上実験では比較的明瞭なうねりの存在を目視出来る状況であったと言うことで全体的には良好な結果を得ることが出来た。即ち、ADCPと当時の周囲の流況図(第2図)を参考にして検討してみると、D7を除いて流向に関してはほぼ満足し得る結果であるが流速に関しては半数以上はADCPに比較し数倍大きく検出されている。これは、レーダの空中線が1回転する間にうねりが移動する距離を求める時に生ずるソフト面の誤差と考えている。

なお、D1~D7に関してADCPの値を真の値と仮定してシステムの値との相関係数と標準偏差を計算してみると次のようになる。

	相関係数	標準偏差
流 向	0.9	62°
流 速	0.4	0.5 m/sec

従って、このシステムでは流向に関しては概略の結果は得られるが、流速に関しての信頼性は特に流速の小さい時に少ないといえる。

6. おわりに

上に記したように本実験は全てが船上実験であって、実験中は漂流状態であるため風圧と船首方向の変動のためADCPによる正確な海潮流の測定は不可能に近い状況であったため上記のような結果を得たが、本研究の本来目的である海洋構造物上でのこのシステムの運用では、上記の問題はなく、且つ、一定水深のため精度は、かなり向上し得るものと考えている。したがって、今後、海洋構造物上または、陸上において検証実験を重ねてその有効性を確認する必要がある。又、海潮流を算出する過程での波浪解析の結果、相関係数が0.8、標準偏差が5.0cmの範囲で波高が観測出来ることが判明したことも収穫の一つであった。

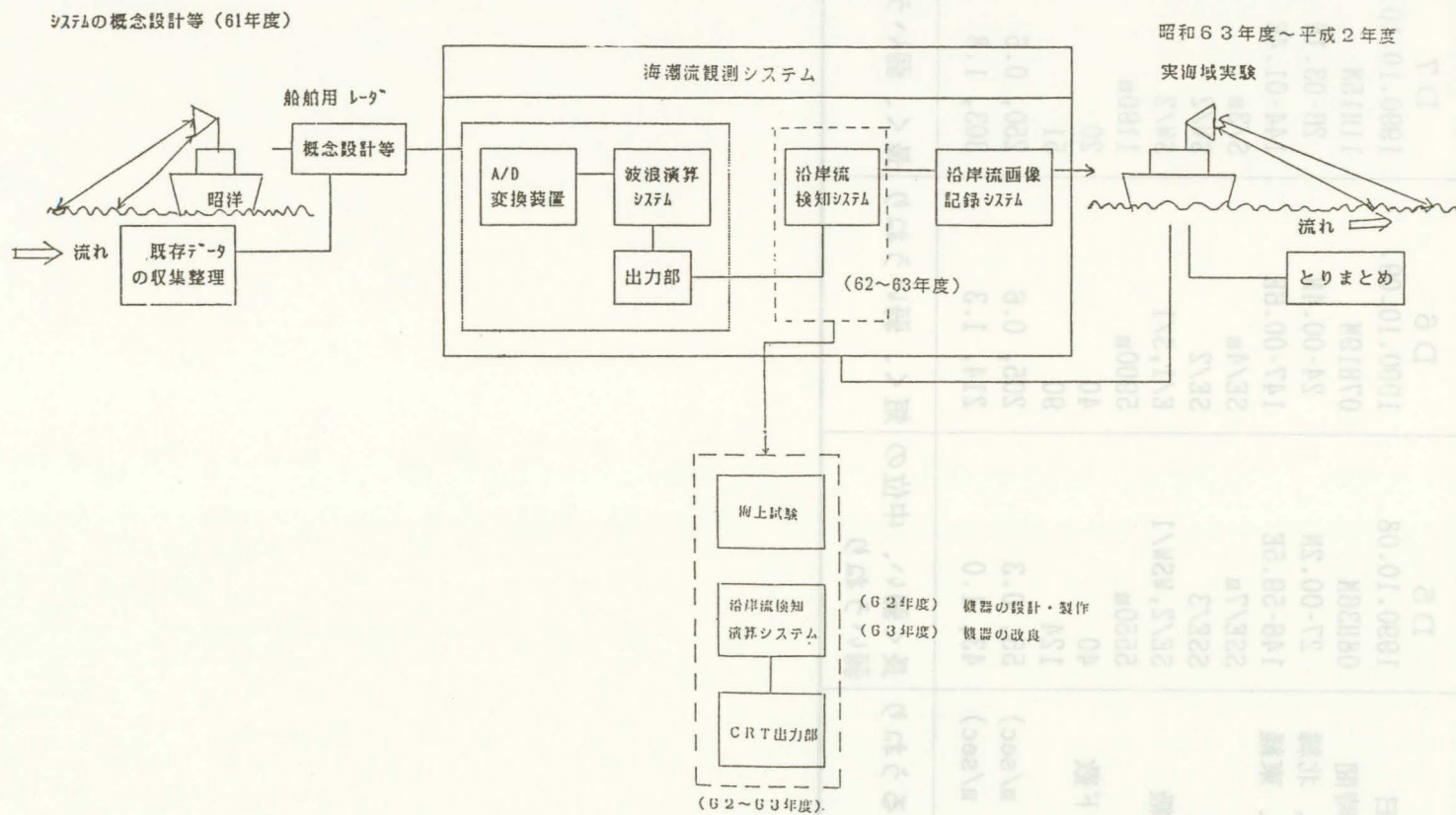
第2表 平成2年度海上実験成果表

観測項目	D 1	D 2	D 3 - 1
観測年月日	1990.10.04.	1990.10.05.	1990.10.05.
観測開始時間	08H10M	07H30M	12H30M
観測位置、北緯	34-00.2N	30-20.2N	30-00.1N
観測位置、東経	147-00.7E	147-00.0E	146-59.9E
風	E/5m	SE/6m	SE/5m
風波階級	E/1	SE/3	SE/3
うねり階級	NE/2, SSE/2	NE/2, SSE/1	NE/2, SSE/1
水深	5770m	6150m	6150m
全ウインド数	40	40	20
使用波数	150	128	71
ADCP(度、m/sec)	100, 0.6	58, 0.4	123, 0.7
システム(度、m/sec)	99, 0.7	42, 0.5	195, 1.6
目視によるうねりの状況	明瞭な二方向からのやや高いうねり	長く弱い、中位の弱いうねり	長く弱い、中位の弱いうねり

観測項目	D 3 - 2	D 3 - 3	D 4
観測年月日	1990.10.06	1990.10.06	1990.10.07
観測開始時間	06H30M	14H26M	10H08M
観測位置、北緯	30-00.0N	30-00.2N	29-40.9N
観測位置、東経	147-00.2E	146-59.0E	146-59.7E
風	SE/5m	SE/3m	S/6m
風波階級	SE/1	SE/2	S/4
うねり階級	E/2, S/1	E/2, S/1	SE/3
水深	6150m	6120m	6120m
全ウインド数	40	20	40
使用波数	155	67	160
ADCP(度、m/sec)	119, 0.3	119, 0.3	128, 0.3
システム(度、m/sec)	181, 0.2	172, 1.7	129, 0.5
目視によるうねりの状況	長く弱い、中位の弱いうねり	長く弱い、中位の弱いうねり	比較的短くやや高いうねり

第2表 平成2年度海上実験成果表

	D 5	D 6	D 7
測点番号			
観測年月日	1990.10.08	1990.10.09.	1990.10.10.
観測開始時間	08H36M	07H19M	11H15M
観測位置、北緯	27-00.2N	24-00.4N	26-03.1N
観測位置、東経	146-59.5E	147-00.6E	144-01.4E
風	SSE/7m	SE/4m	S/3m
風波階級	SSE/3	SE/2	SW/2
うねり階級	SE/2, WSW/1	E/1, S/1	SW/2
水深	5550m	5900m	1190m
全ウインド数	40	40	20
使用波数	124	90	51
ADCP(度、m/sec)	55, 0.3	205, 0.6	250, 0.5
システム(度、m/sec)	43, 1.0	214, 1.3	303, 1.8
目視によるうねりの状況	長く弱い、中位の弱いうねり	短く、弱いうねり	長く、弱いうねり



第1図 システムの構成図



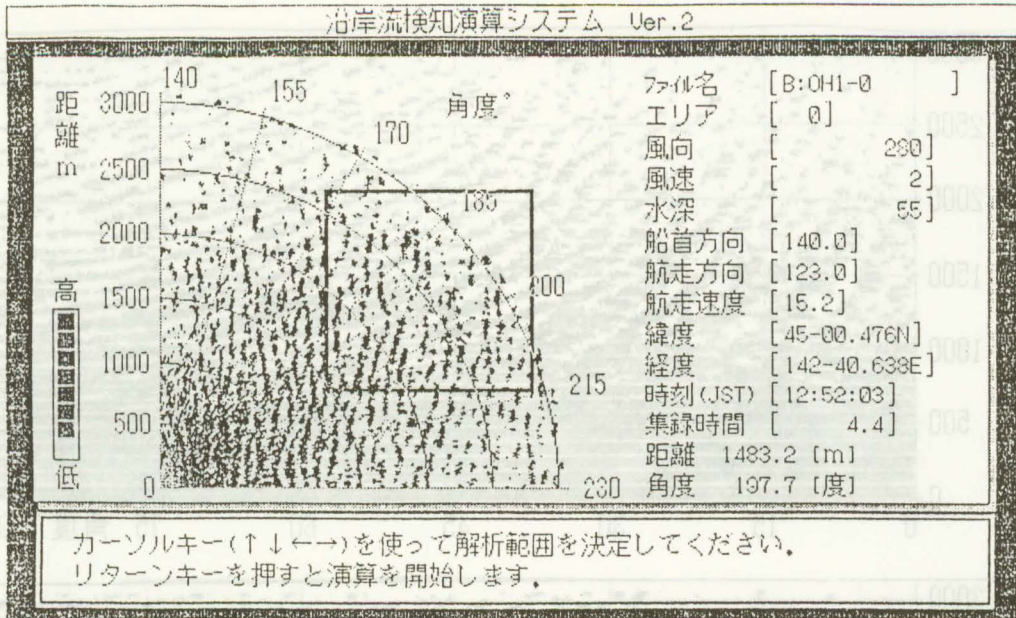


写真1 ウインド内に表れたうねり

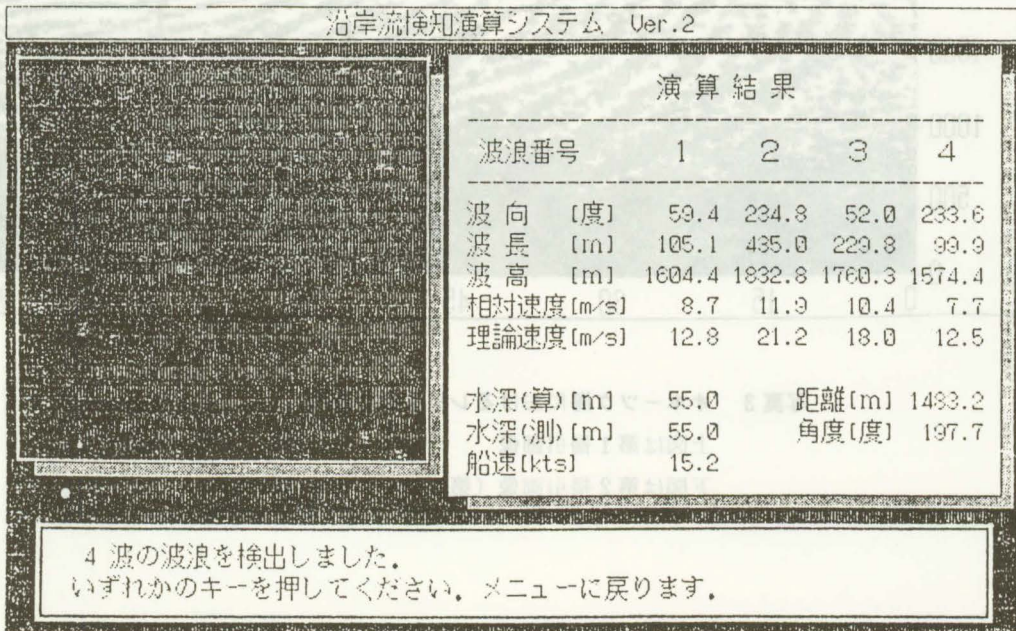


写真2 うねりの要素

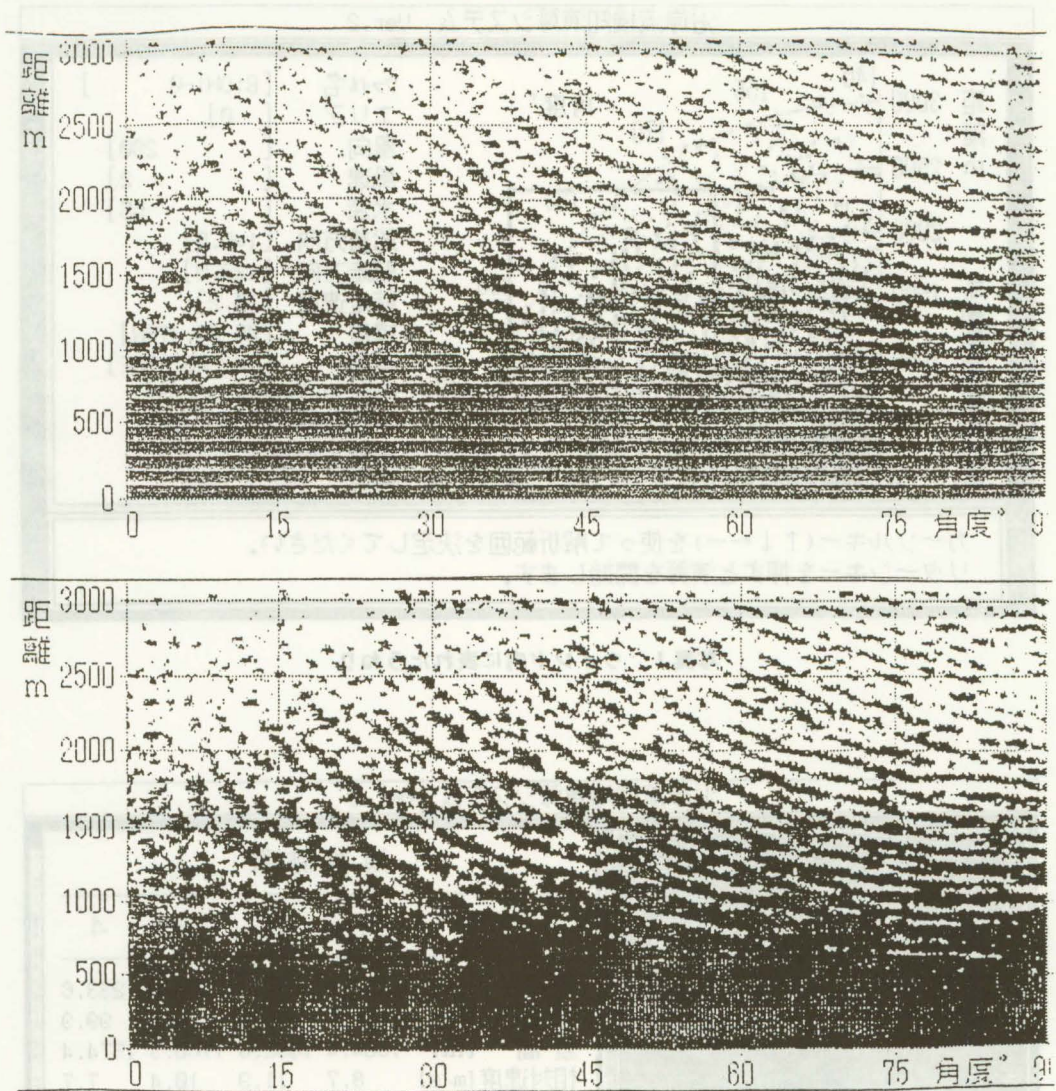
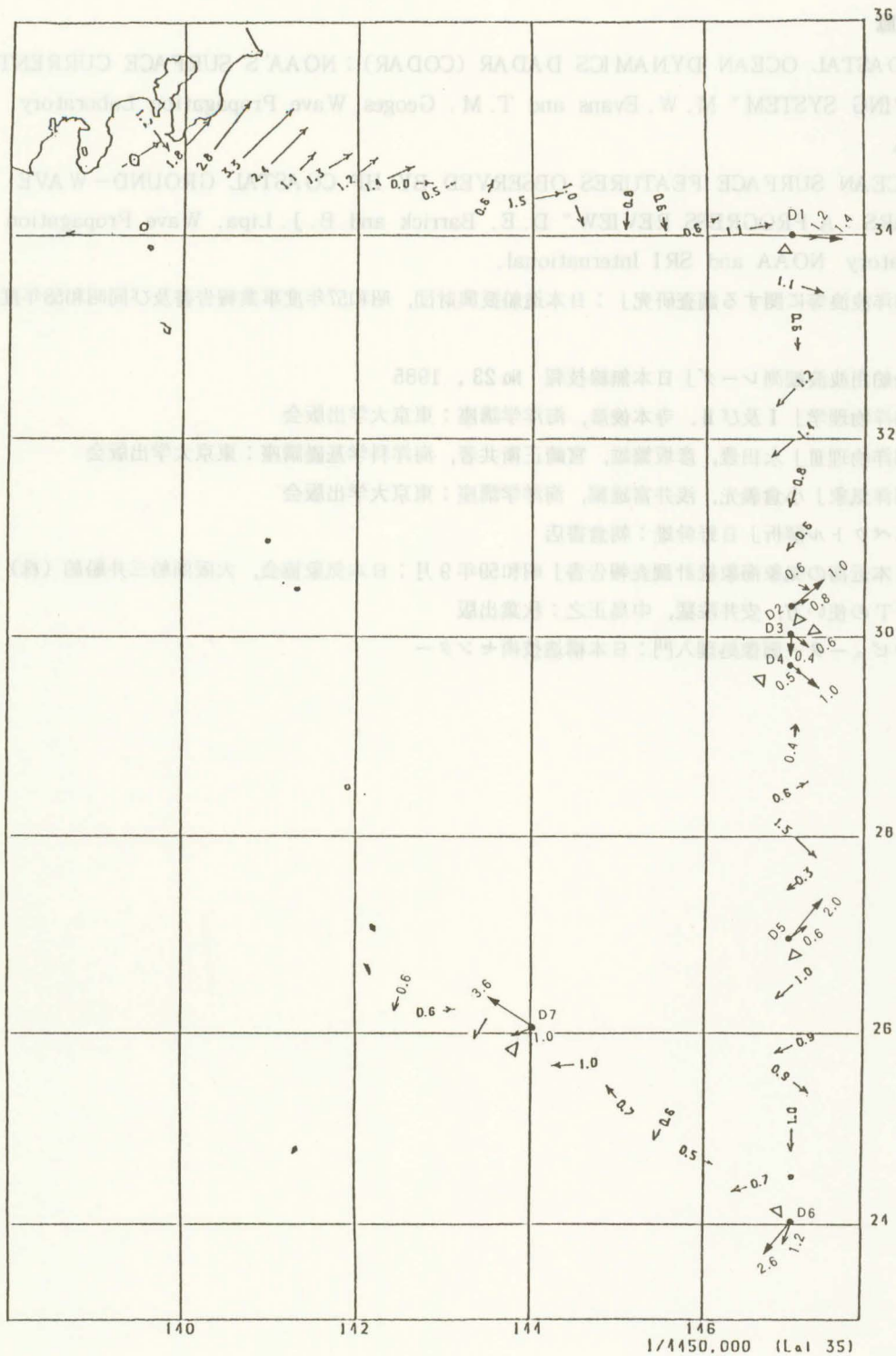


写真3 オホーツク海におけるレーダの2画像

上図は第1掃引画像

下図は第2掃引画像(第1掃引から4.4秒後)



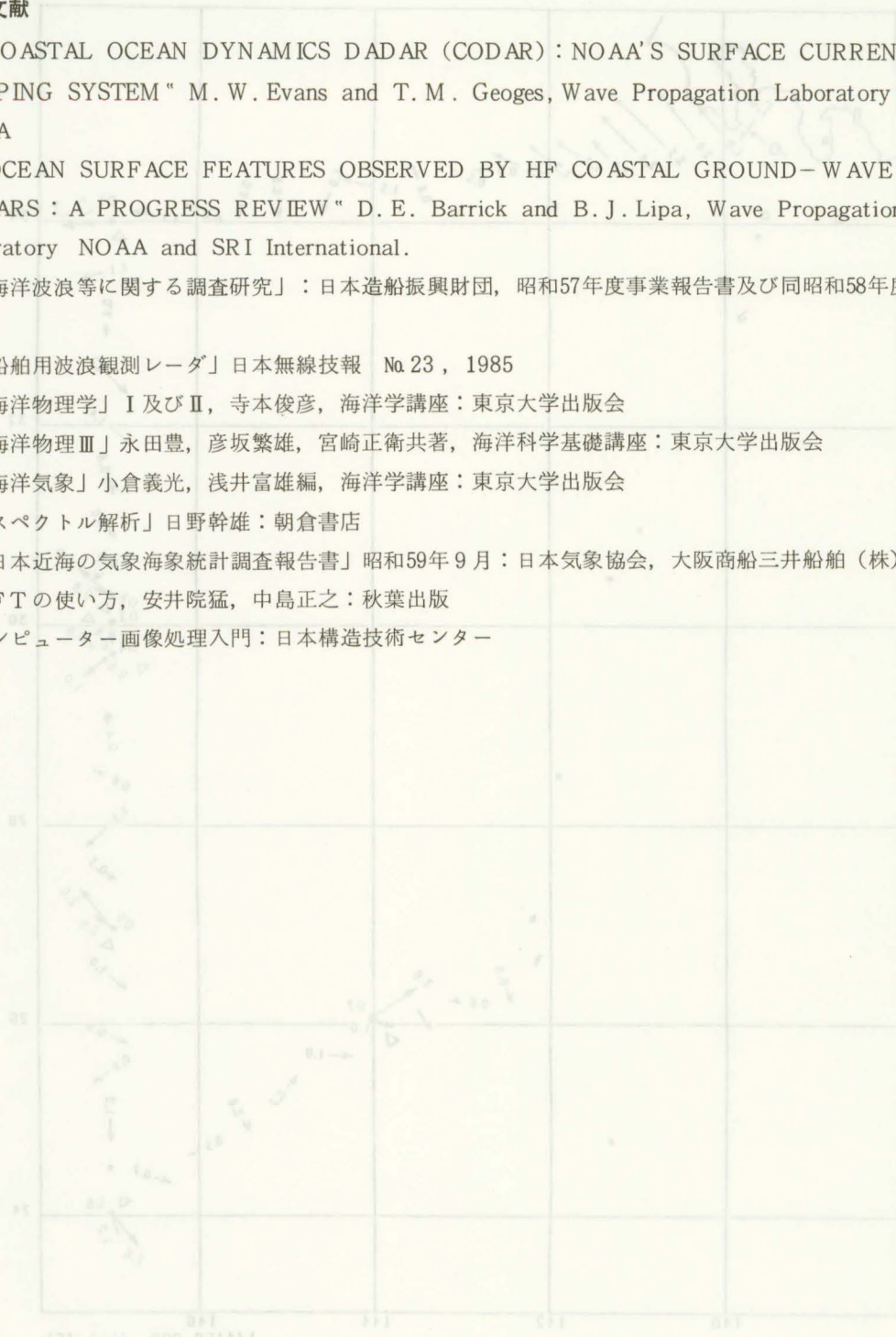
第 2 図 本州南東方海域の海流図 (nt)

→印は ADCP による, →印はシステムによる

▽印は観測点

参考文献

1. "COASTAL OCEAN DYNAMICS DADAR (CODAR) : NOAA'S SURFACE CURRENT MAPPING SYSTEM" M. W. Evans and T. M. Geoges, Wave Propagation Laboratory NOAA
2. "OCEAN SURFACE FEATURES OBSERVED BY HF COASTAL GROUND-WAVE RADARS : A PROGRESS REVIEW" D. E. Barrick and B. J. Lipa, Wave Propagation Laboratory NOAA and SRI International.
3. 「海洋波浪等に関する調査研究」：日本造船振興財団，昭和57年度事業報告書及び同昭和58年度事業報告書
4. 「船舶用波浪観測レーダ」日本無線技報 No.23，1985
5. 「海洋物理学」I及びII，寺本俊彦，海洋学講座：東京大学出版会
6. 「海洋物理III」永田豊，彦坂繁雄，宮崎正衛共著，海洋科学基礎講座：東京大学出版会
7. 「海洋気象」小倉義光，浅井富雄編，海洋学講座：東京大学出版会
8. 「スペクトル解析」日野幹雄：朝倉書店
9. 「日本近海の気象海象統計調査報告書」昭和59年9月：日本気象協会，大阪商船三井船舶（株）
10. FFTの使い方，安井院猛，中島正之：秋葉出版
11. コンピューター画像処理入門：日本構造技術センター



(注) 図表紙の製表式東南本 図を渡

ADPCに...  
印刷は...