

海岸波浪の周波数分析器による解析

岩垣 雄一・樋口 明生・柿沼 忠男・宮井 宏

ANALYSIS OF OCEAN WAVES BY A SPECTRUM ANALYZER

By Yuichi IWAGAKI, Haruo HIGUCHI, Tadao
KAKINUMA and Hiroshi MIYAI

Synopsis

The performances and characteristics of the spectrum analyzer at Disaster Prevention Research Institute are firstly described.

The tape speed of the data recorder : 7.5 inch/sec,

The time compression : 1/100 or 1/1000,

The type of the analyzer : heterodyne,

The band width of the bandpass filter : 2 cps or 4 cps,

The range of analyzing frequency : 5~1000 cps.

Second, some examples of the amplitude and energy spectra obtained by this analyzer are presented. The energy spectra obtained are compared with those by the digital analyses of the same records. The agreement of the spectral shapes obtained by the two methods is fairly good except in the range of extremely low frequency.

1. 緒 言

Pierson-Marks¹⁾が random noise の解析法を、波浪の解析に適用して以来、風波の発達、うねりの減衰、浅海波の屈折などの諸現象が、波浪記録のエネルギースペクトルにもとづいて解明されてきた^{2) 3) 4)}。

こうしたエネルギースペクトルを求めるには、デジタル方式⁵⁾による場合とアナログ方式^{6) 7)}による場合とがある。アナログ方式による解析器は、これまで、いくつか特別に設計され、用いられてきたが、その成功の程度はさまざまであった^{8) ~15)}。

著者らは、従来、デジタル方式を用い、京都大学の電子計算機 KDC-1 によって波浪スペクトルを求めてきたが、KDC-1 の使用時間は、現状ではきわめて少なく、しかも、計算に要する時間が長いので、海岸波浪の解析に迅速性を欠いていた。京都大学防災研究所で、このたび購入した日本電気KK製の周波数分析器は、最初から解析器が受け入れる形で資料を記録すれば、経済的かつ計算時間がきわめて短かくてすむという長所と、いつでも使用できるという便利さがあるので、今後はこれをも大いに活用していくことができる。しかし、アナログ方式もまだ完全なものとはいいいがたく^{5) 6) 7) 16)}、現在なお多くの問題点が残されているので、これらを一つ一つ解明していくことが必要になってくる。

この論文は、周波数分析器によって波浪スペクトルを求めるとともに、KDC-1 による解析結果とも比較検討して、周波数分析器の特性を調べようとしたものである。

2. 周波数分析器

2.1 概 要

この周波数分析器は、有限長さの波の記録を、電氣的にフーリエ解析することから成り立っている。すな

わち、まず、波を時間の関数として磁気テープに記録し、この磁気テープをループにする。つぎに、このル

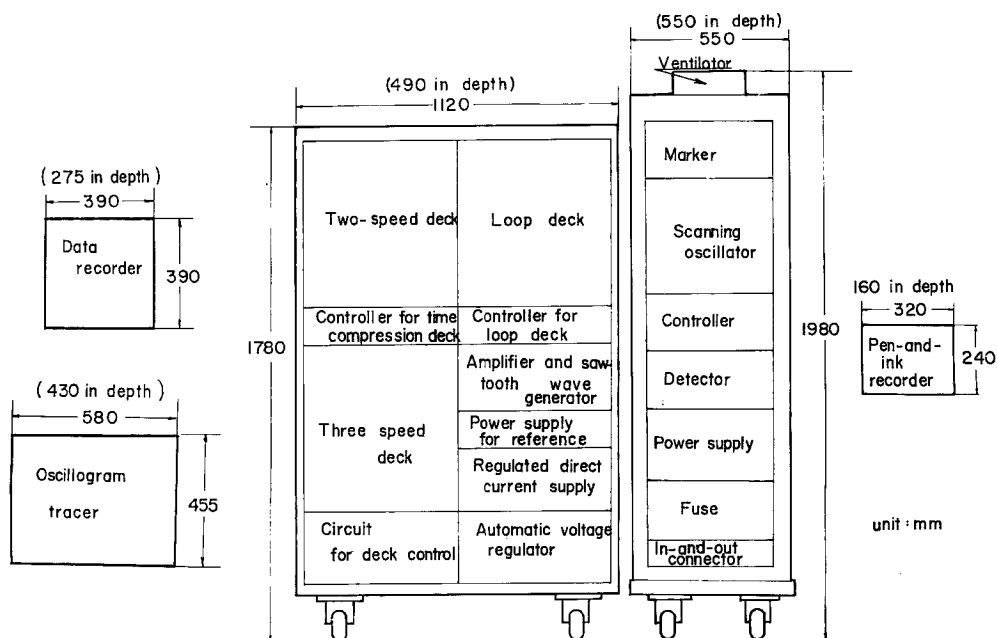


Fig. 1 Sketch of recorder, time compression playback and spectrum analyzer.

ープを連続的に繰返し再生しながら、そうした信号を、周波数範囲を一樣な速さで走査する他の1つの信号

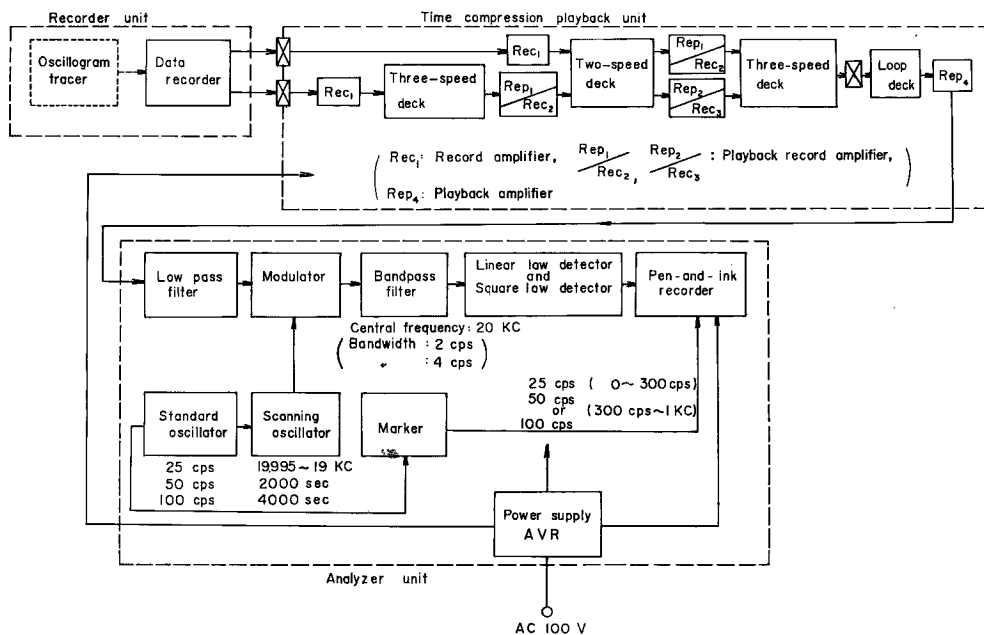


Fig. 2 Block diagram of time compression playback and spectrum analyzer.

で周波数変調し（ヘテロダイン方式），こうしてできた波を固定帯域濾波器に通し，直線検波あるいは二乗検波して，amplitude spectrum あるいは power (energy) spectrum を得るわけである。

Fig. 1 は，こうした解析器の外観を示し，Fig. 2 は，ブロックダイアグラムを示す。

2.2 構成および性能

この解析器は，3つの部分：（a）記録ユニット，（b）増速再生ユニット，（c）周波数分析ユニットからなりたつ。

（a）記録ユニット

1）データ・レコーダ

テープ：1/4inch幅，25分間テープ(900ft)
テープ速度：7.5inch/s
入力電圧：±1Vピーク値
SN比：40dB以上
電源：DC24V±2V，約1A
録音時のモニター可能

使用リール：5inch径
記録再生方式：PWM変調方式
出力電圧：±1Vピーク値
ドリフト：記録開始1min後，1巻につき1%以下
キャリア除去用のフィルター：10cps，100cps

2）オシログラム・トレーサ（日本電気機材KK製，OT-50型）

時間軸：（連続送り）送り速度：30，60mm/min，送り精度：±5%，（ステップ送り）ステップ幅：1，2，5mm/step，ステップ幅精度：±0.5%
現象軸：追跡方式：手動，追跡座標の種類：直角および円弧（直角座標）最大追跡幅：250mm，等比可能最小幅：40mm，直線性：0.2%以下（円弧座標）最大振れ角度：±30°，適応可能な曲率半径：80～150mm，直線性：0.2%以下
着装記録紙：最大幅：300mm，全長：制限なし
追跡面照明：記録紙の裏面より透過光による（照度調整可能）
印字指令：足踏スイッチによる

（b）増速再生ユニット

1）磁気テープ増速再生器 この装置は，波動現象の周波数（1）0.05～10 cps，（2）0.005～1 cps を100倍または1000倍に変換して周波数成分を分析するためのテープ・レコーダである。

（1）の場合は，直接データ・レコーダで記録したものを，（2）の場合は，オシログラム・トレーサからの出力を，それぞれ100倍，1000倍に増速して，ループ再生機で繰返し再生する。

2）速度および3速度用デッキ

	2速度用デッキ	3速度用デッキ
テープ幅	1/4inch	"
使用リール	10inch径	"
テープ速度	1%，18%，18 1/2 inch/s	1%，18%，18 1/2 inch/s
記録再生方式	PWM変調方式	"
記録入力	±1Vピーク値	"
出力電圧	±1Vピーク値	"
SN比	（ループ出力にて）35dBrms	"

ループ用デッキ

テープ幅	1/4inch	テープ速度	75inch/s
テープ長	最大12sec(22.9m) 最小1sec(1.9m)	ゲート出力	縫目を反射式フォトランジスタで検出して，リレーのトランスファーの接点を出す
記録再生方式	PWM変調方式		

2速度あるいは3速度デッキで記録したテープを再生する。Table 1 は，現地での波浪記録の長さ 20 min を例にとって，増速比100倍および1000倍の場合を示したものである。

（c）周波数分析ユニット

1）周波数分析器 2.2（b）でのべたような5～1000 cps の波形を，この装置にかけ，20 Kc±1 cps または 2 cps の帯域濾波器を通して，2000 sec または 4000 sec の時間で周波数成分を取り出し，直線検波器，または二乗検波器を通して，自動平衡形ペン書記録計に周波数分布状態を画かせて周波数分析を行なう。

Table 1 Time compression playback for 20 min record
(a) 100 times

	Data recorder			Two-speed deck			Three-speed deck			Loop deck		
	Frequency (cps)	Time (min)	Speed (inch/s)	Frequency (cps)	Time (min)	Speed (inch/s)	Frequency (cps)	Time (min)	Speed (inch/s)	Frequency (cps)	Time (sec)	Speed (inch/s)
Record	0.05~10	20	7½	0.05~10	20	17½	0.5~100	2	7½			
Reproduce	0.05~10	20	7½	0.05~100	2	18¾				5~1000	12	75

(b) 1 000 times

	Data recorder			Three-speed deck			Two-speed deck			Three-speed deck			Loop deck		
	Frequency (cps)	Time (min)	Speed (inch/s)	Frequency (cps)	Time (min)	Speed (inch/s)	Frequency (cps)	Time (min)	Speed (inch/s)	Frequency (cps)	Time (sec)	Speed (inch/s)	Frequency (cps)	Time (sec)	Speed (inch/s)
Record	0.005~1	20	7½	0.005~1	20	17½	0.05~10	2min	17½	0.5~100	12	7½			
Reproduce	0.005~1	20	7½	0.05~10	2	18¾	0.5~100	12sec	18¾				5~1000	1.2	75

入力電圧： $\pm 1V$ ピーク値
 検波出力：直線検波器、二乗検波器ともに、最大
 10V
 帯域濾波器(水晶)：①中心周波数20kc，帯域幅2cps，減衰
 特性 $\pm 10cps$ で35dB以上
 ②中心周波数20kc，帯域幅4cps，減衰
 特性 $\pm 10cps$ で30dB以上
 走査発振周波数：20kc $\sim$ 19kc.
 走査時間：2,000sec または4,000sec.
 周波数マーカー：0 $\sim$ 300cps, 25cps ごと $\pm 1cps$ 以内300
 $\sim$ 1,000cps, 50cps または100cps ごと，
 $\pm 1cps$ 以内

入力周波数(分析周波数)：5cps $\sim$ 1kc.
 入力低域濾波器：0 $\sim$ 1,000cps (02dB以内)，カットオフ
 周波数2kc.
 分析器の周波数特性：10 $\sim$ 800cps., 0.2dB以内
 発信周波数直線性：3%以内
 選択速度： $(\frac{1}{2})cps/s$ または $(\frac{1}{4})cps/s$.
 電源：50または60cps, 100V $\pm 10V$, AVR
 自蔵

3. 解析結果

この解析に用いた波浪資料は、京都大学防災研究所で、大阪府二色の浜海岸¹⁷⁾ および鳥取県日吉津海岸¹⁸⁾ において、波浪観測を行なって得たものである。すなわち、海岸線からほぼ直角に沖側からブイNo. 1, No. 2, No. 3 を浮べ、それらの上下運動を、望遠レンズ付きの16mm撮影機によって、2コマ/sec の速さで撮影し、10 $\sim$ 15分間の同時観測をして得たフィルムを、映写機によって映写し、ブイの上下運動を読みとることによって得た。読みとり間隔は0.5 sec である。

また、波浪スペクトルは、前記論文^{17) 18)} においては、デジタル方式を用い、京都大学の電子計算機KDC-1によって、Tukeyの計算法(1949)¹⁹⁾ を用いて5分間の波浪記録から求めた(自由度:30)わけであるが、周波数分析器によって波浪スペクトルを求める場合には、読みとり間隔0.5 sec ごとの読みとり値を曲線で結んで、デジタル方式に対応する5分間の波浪記録を資料とした。

(1) 周波数分析器で求めたスペクトル

Fig. 3 と 4 は、それぞれ、同一資料に対して、周波数分析器で求めた amplitude spectrum と energy spectrum の実例を示したものであるが、(a) は帯域濾波器の帯域幅2 cps, (b) は4 cps によるもので、走査時間はともに4 000 sec で解析したものである。また、Fig. 5 (a) と (b) は、それぞれ、走査時間2 000 sec と4 000 sec で求めた同一資料に対する energy spectrum を示す。記録計の都合上、途中で感度を変える必要があるが、Fig. 3, 4, 5 中、左方の矢印は、ペン書き記録計の感度を上げた位置を示す。

Fig. 3, 4 をみると、(a) のするどいピークが、(b) では、かなりなめらかになっていることがわかる。

なお、この解析では、0.1 cps の low-pass filter を用い、解析資料すべての loop period は1 sec であった。

(2) 周波数分析器で得たエネルギースペクトルとデジタル計算機 KDC-1 で得たエネルギースペクトルとの比較

Fig. 6 (a) $\sim$ (j) は、周波数分析器(帯域濾波器の帯域幅：4 cps, 分析周波数：5 cps $\sim$ 250 cps, 走査時間：1 000 sec) および KDC-1 で求めた、二色の浜海岸と日吉津海岸でのエネルギースペクトルを、両者の最大のピークの高さのみを一致させてプロットしたもの

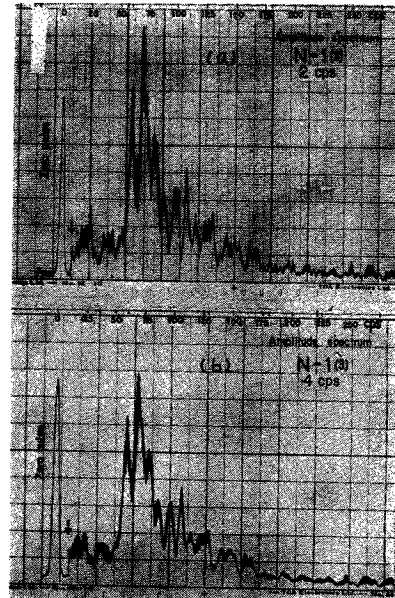


Fig. 3 Records of amplitude spectra.

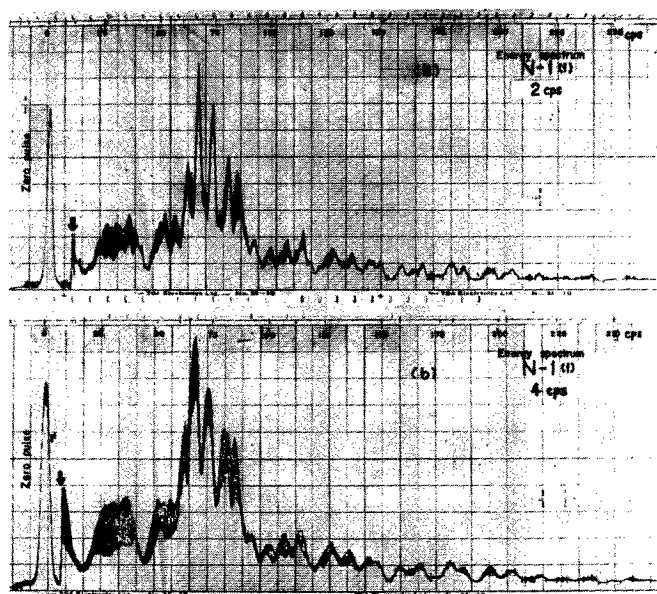


Fig. 4 Records of energy spectra.

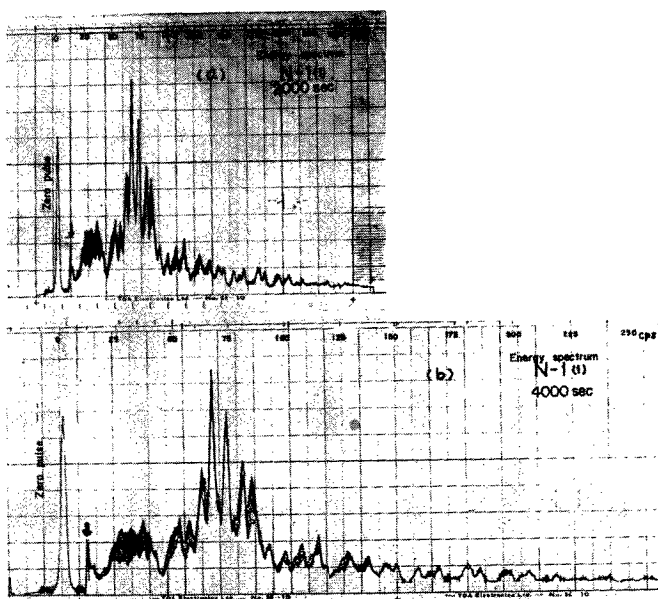
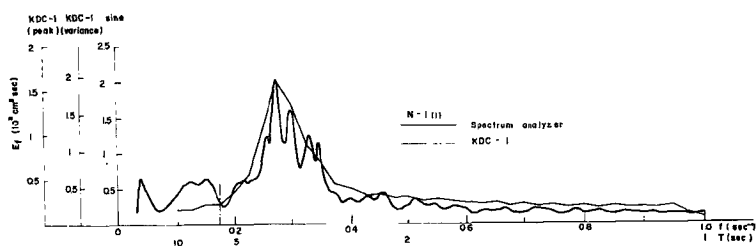
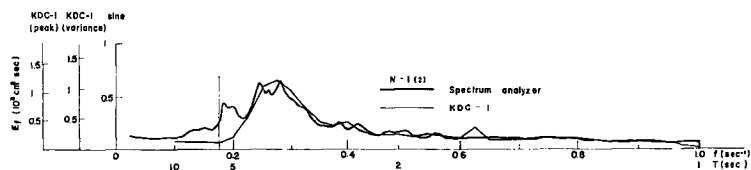


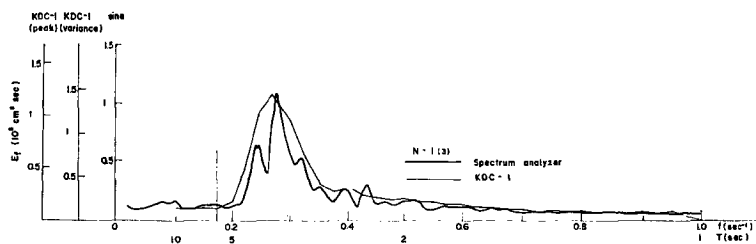
Fig. 5 Records of energy spectra (scanning time : 2'000 sec and 4'000 sec).



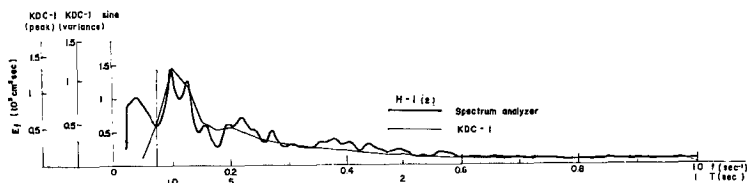
(a)



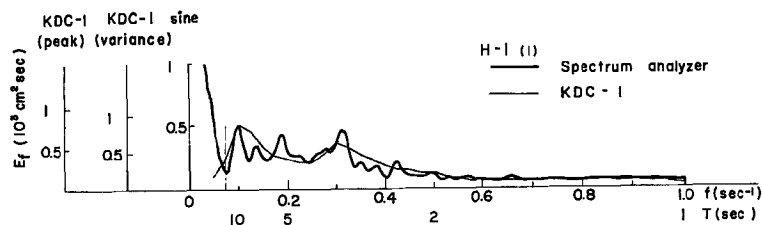
(b)



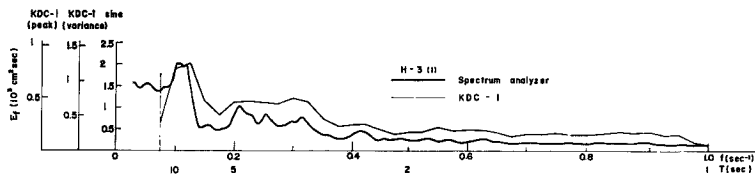
(c)



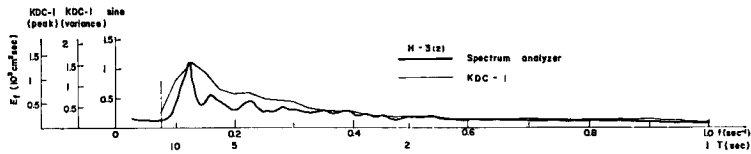
(d)



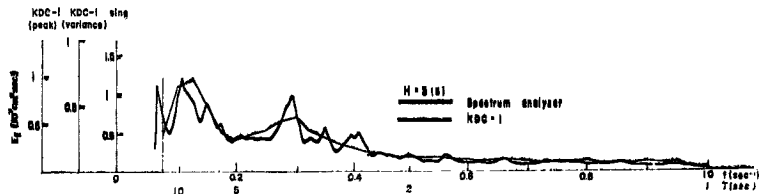
(e)



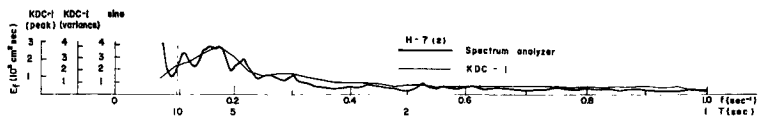
(f)



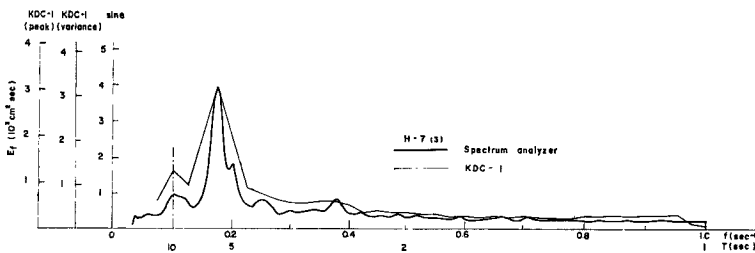
(g)



(h)



(i)



(j)

Fig. 6 Comparisons of energy spectra obtained by the spectrum analyzer with those by the digital computer, KDC-1.

である。図中、周波数分析器による結果は、Fig. 4 (b) をみるとわかるように、縦軸方向にある幅をもった解析の結果が得られているので、そうした幅の中央の値を代表値としてプロットしたものである。

Fig. 6 (a)~(j)をみると、いずれの場合も、周波数分析器と KDC-1 によって得たエネルギースペクトルの最高のピークの現われる周波数は、完全に一致していることがわかる。また、二色の浜海岸での解析結果では、 0.2 sec^{-1} (分析周波数: 50 cps) 以下、日吉津海岸では、 0.1 sec^{-1} (分析周波数: 25 cps) 以下の低周波側を除けば、周波数分析器と KDC-1 によって得たエネルギースペクトルの全体的な傾向もよく似ていることがわかる。しかし、周波数分析器で得たスペクトルはぎざぎざしており、海岸波浪の統計的性質を調べるには、これを平滑化して用いた方が都合がよいので、今後、帯域濾波器的帯域幅を、たとえば 20 cps あるいは 50 cps と広くする¹⁴⁾ ことによって、周波数分析器の自由度⁵⁾を高めて、検討していきたい。

さらに、周波数分析器で得たスペクトル密度の絶対値についてであるが、Fig. 6 中に、3本の縦軸：(1) KDC-1 (peak), (2) KDC-1 (variance), (3) sine を示す。(1)は、周波数分析器で得たスペクトルの最高のピークのスペクトル密度の値を、KDC-1の最高のピークのスペクトル密度の値としたものであり、(2)は、周波数分析器で得たスペクトル下の面積 S (Fig. 6 中、左方にある鎖線に対応した周波数から分析周波数 250 cps までの周波数帯における) が、KDC-1で得た同一周波数帯における variance σ^2 に対応するものとして、周波数分析器で得た最高のピークを含んだせまい周波数帯 $4f$ でのスペクトル下の面積 S_p を S と比較して、周波数分析器で得たピークのスペクトル密度 E_f を決定したものであり [$E_f = (1/4f) \cdot (S_p / S) \cdot \sigma^2$], (3)は、便宜的な方法で、正弦波では、variance と振幅との間に一定の関係があることを利用して決定したものである。すなわち、CR 発信器 (大松電気KK製, Model LAG-55) によって、振幅 1 volt, 周波数 100 cps の正弦波を発信させ、その信号を周波数分析器で解析して、そうした信号のエネルギースペクトル下の面積 S_0 とピークの高さ h_0 を求め、(2)でのべた波浪資料の S と、スペクトルの最高のピークの高さ h と比較して、 E_f を決定した [$E_f = (10/W) \cdot (S/S_0) \cdot (h/h_0) \cdot a^2$] ($10/W$: 振幅 1 volt の正弦波を周波数分析器で解析して得たエネルギースペクトルのピークのスペクトル密度 ($V^2 \text{ sec}$), ここに、 W : 帯域濾波器的帯域幅, a : 1 volt に対応する海岸波浪の振幅 (cm))。以上の解析において、(2)と(3)は Parks の方法¹³⁾に類似している。

Fig. 7 は、この解析において周波数分析器で得た前述のスペクトル下の面積 S と KDC-1 で得た前述の variance σ^2 の 2 倍の値 E との関係を示す。この図をみると、 S と E とは直線的な関係にあることがわかるが、今後、さらに波浪資料を追加し、検討を加えて、 S - E 関係図を作成したい。

Fig. 8 は、周波数分析器で得た波浪エネルギースペクトルの絶対値を決定しようとしたもので、前述の 3 つの方法によるものを区別してプロットしたものである。横軸には、得たスペクトルの記録紙上の大きさ c (cm) および d (division) を示し、縦軸には、エネルギー密度 E_f ($\text{cm}^2 \text{ sec}$) が示してある。この図をみると、同一の c あるいは d に対して、3つの方法で求めた E_f の値はかなり異なり、また、各方法で求めた E_f と c あるいは d との関係も、直線的ではあるけれども、かなりばらついていることがわかる。今後、さらに波浪資料を追加し、スペクトルの平滑化とも関連して、精度を高めて、 c あるいは d - E_f 関係図を作成したい。

4. 結 語

以上、著者は、周波数分析器によって海岸波浪スペクトルを求めるとともに、京都大学の電子計算機 KDC-1 による解析結果とも比較検討して、この周波数分析器を用いて、海岸波浪を解析できる見通しを得

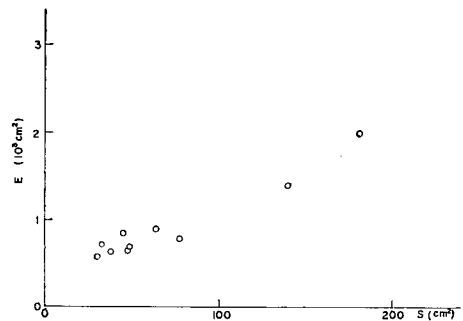


Fig. 7 Relationship of the area measured, S against E ($2\sigma^2$) obtained by KDC-1.

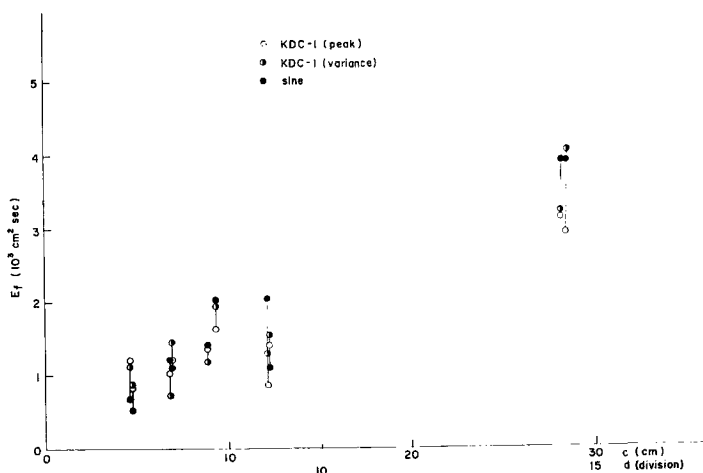


Fig. 8 Absolute values of energy spectral density obtained by the spectrum analyzer.

た。

しかし、この解析において周波数分析器で得た波浪スペクトルの平滑化や絶対値については、さらに詳細な検討が必要である。現在、テープスピード 15/16 inch/sec のデータ・レコーダを製作中であり、これをも大いに活用して、海岸波浪の予知に必要な基礎的資料を得たいと思っている。

最後に、この研究を行なうにあたり、周波数分析器の作製に際して、日本電気KKの西田道典氏および国洋電機KKの山崎尚氏には絶大な協力をいただき、また資料の整理や計算に際して、防災研究所の人見哲夫技官には大いに助力をいただいた。ここに深謝の意を表する次第である。なお、この研究は文部省特定研究費による研究の一部であることを付記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Pierson, W. J., Jr. and W. Marks : The Power Spectrum Analysis of Ocean-Wave Records, Trans. A. G. U., Vol. 33, No. 6, Dec. 1952, pp. 834-844.
- 2) Pierson, W. J., Jr., G. Neumann, and R. W. James : Practical Methods for Observing and Forecasting Ocean Waves by Means of Wave Spectra and Statistics, H. O. Pub. No. 603, 1955, pp. 1-284.
- 3) Munk, W. H. and F. E. Snodgrass : Measurements of Southern Swell at Guadalupe Island, Deep-Sea Research, Vol. 4, No. 4, 1957, pp. 272-286.
- 4) Pierson, W. J., Jr., I. J. Tuttle, and I. A. Woolley : The Theory of the Refraction of a Short-Crested Gaussian Sea Surface with Application to the Northern New Jersey Coast, Proc. 3rd Conf. on Coastal Eng., 1953, pp. 86-108.
- 5) Blackman, R. B. and J. W. Tukey : The Measurement of Power Spectra, Dover Pub., Inc., New York, 1958, 190 pp.
- 6) Barber, N. F. : Experimental Correlograms and Fourier Transforms, Pergamon Press, 1961, 136 pp.
- 7) Kharkevich, A. A. : Spectra and Analysis, Consultant Bureau, New York, 1960, 220 pp.
- 8) Tucker, M. J. : The N. I. O. Wave Analyzer, Proc. 1st Conf. on Coastal Eng., 1951, pp. 129-133.

- 9) Pierson, W. J., Jr. : An Electronic Wave Spectrum Analyzer and Its Use in Engineering Problems, B. E. B. Tech. Memo., No. 56, Oct. 1954, pp. 1-91.
- 10) Austin, W. E. : A Very Low Frequency Recording and Analyzing Instrument, NAVORD Rept. 3615, 1954.
- 11) Chang, S. S. : A Magnetic Tape Wave Recorder and Energy Spectrum Analyzer for the Analysis of Ocean Wave Records, B. E. B. Tech. Memo., No. 58, July 1955, pp. 1-29.
- 12) 西田道典, 降旗常雄 : スペクトラム計算機 MERIAC-I-F について, 電気通信学会雑誌, 第42巻, 11号, 昭34. 11, pp. 71-76.
- 13) Parks, J. K. : A Comparison of Power Spectra of Ocean Waves Obtained by an Analog and a Digital Method, J. G. R., Vol. 65, No. 5, May 1960, pp. 1557-1563.
- 14) Caldwell, J. M. and L. C. Williams : The Beach Erosion Board's Wave Spectrum Analyzer and Its Purpose, Proc. Conf. Ocean Wave Spectra, 1963, pp. 259-266.
- 15) 浜田徳一, 柴山煒彦, 加藤始 : 風浪の発達に関する実験的研究, 第10回海岸工学講演会講演集, 昭38. 10, pp. 7-12.
- 16) Chang, S. S. L. : On the Filter Problem of the Power-Spectrum Analyzer, Proc. I. R. E., Aug. 1954, pp. 1278-1282.
- 17) 樋口明生, 柿沼忠男 : 二色の浜海岸における波浪観測について, 京都大学防災研究所年報第9号, 昭41. 3, pp. 685-702.
- 18) 樋口明生, 柿沼忠男 : 日吉津海岸における波浪観測について, 京都大学防災研究所年報第8号, 昭40. 3, pp. 459-478.
- 19) Tukey, J. W. : The Sampling Theory of Power Spectrum Estimates, Symposium on Applications of Autocorrelation Analysis to Physical Problems, 1949, pp. 47-68.