

海岸波浪の予知に関する研究(第1報)

——伊勢湾台風時における沖波の推算——

岩 垣 雄 一・柿 沼 忠 男

STUDIES ON WAVE FORECASTING (1st Report)

—ESTIMATION OF DEEP-WATER WIND WAVES DUE TO ISE-BAY TYPHOON ON SEPTEMBER 26, 1959—

by Dr. Eng. Yuichi IWAGAKI and Tadao KAKINUMA

Synopsis

Wave forecasting is one of the most important problems in coastal engineering at present. The problem of forecasting storm waves in deep water is, however, somewhat handicapped by lack of adequate data for storm winds and waves and by lag of the development of mechanical procedures of forecasting for moving fetches and variable wind vectors.

In this paper, the graphical approach by Wilson in 1955 for moving fetches and variable wind vectors is discussed, and a modified new graphical approach is proposed.

Both approaches are applied to the analysis of deep-water wind waves generated by Ise-Bay Typhoon.

1. 緒 言

近年、相次ぐ海岸災害にともなつて、海岸構造物を設計するため、海岸波浪を適確に予知あるいは追算することの必要性が増してきた。

現在、沖波の予知法には大別して二つの思想がある。一つは Sverdrup および Munk¹⁾ の基本的かつ理論的な概念によつて示唆され、また次元解析の原理からも導かれる無次元量を用いた数多くの経験的な関係^{2)~7)}に依存する有義波法であり、これらは Sverdrup-Munk-Bretschneider 法 (SMB 法) によつて代表される。こうした有義波の概念による取扱いによつて、風波の発達に関する研究はかなりの進歩を示しており、また風波発生に関しても二、三のすぐれた研究^{8),9)} がなされつつあるが、他の一つは最近、海面状態の複雑な性質に関して、より基本的な理解を要求する波浪スペクトル法であり、Pierson-Neumann-James 法 (PNJ 法)¹⁰⁾、あるいは Neumann の波浪スペクトル¹¹⁾とはまったく異なつた波浪スペクトルに基づく Darbyshire 法^{12),13)}といったものがこれに属する。

しかしながら、SMB 法にせよ、PNJ 法あるいは Darbyshire 法にせよ、風速が一樣でかつ風向が一定の風域に対して適用されるものであり、台風のように連続的に風向、風速が変化する性質をもつた風域に対しては、どちらの方法を適用するとしても難点が存在することはまぬがれないであろう。

こうした問題に関しては、風域があまり不規則でなくて、しかも進行がかなりゆるやかな場合に対して Kaplan¹⁴⁾が一つの試みをなしており、さらに Wilson は Munk¹⁵⁾、Barber および Ursell¹⁶⁾、および Darbyshire¹⁷⁾ らによる風域の距離—時間表示の概念をとり入れて一つの図式解法を提案し¹⁸⁾、メキシコ湾沿いの海岸について、ハリケーンによる波高および周期の方向別頻度分布図を作成している¹⁹⁾。

台風によつて生ずる沖波を予知しようとする問題は、外洋における台風と波浪に関する二、三の資料^{20), 21)}があるだけで、十分な資料に欠けているためにいくぶんか立ち遅れているが、こうした問題に関しては、Wilson の図式解法が現今においては最も満足すべき方法であるといわれている。

この論文は、Wilson の図式解法によつて1959年9月26日の伊勢湾台風時における伊勢湾内の沖波の波高と周期の時間的変化を推算するとともに、Wilson の図式解法に疑問な点があることを見出したので、これに若干の検討を加えて、台風下における沖波の予知法として Wilson 法を修正した新しい方法を提案したものである。

2. 資料の整理

伊勢湾は南北約 60km、東西約 15～40km の対岸距離と最大水深 34m の湾であつて、巾約 20 km の伊良湖水道によつて外海と通じ、知多半島と三重県海岸によつて囲まれている (Fig. 1)。

移動性風域に対する波浪の予知を行なうには、まず種々の地点へ波浪が近接する線にそつた詳細な距離—時間風域を知ることが必要である。伊勢湾台風時には、風速、風向に関する海上における十分な観測結果がなかつたので、京都大学地球物理学教室気象学研究室の厚意により、1959年9月26日15時から27日0時の間、1時間ごとの伊勢湾海面上 10 m における風速、風向分布図の提供を受け²²⁾、これをもとにして波浪の推算を試みた。

また、伊勢湾沿岸の波浪の実測値としては、名古屋港管理組合によつて名古屋港外に1点だけえられているが、機械の故障のため測定時刻については十分な信頼度がなく、また波形記録に一部スケールアウトが見られたようであるが、この記録から名古屋港外においては9月26日18時から23時の間の有義波の波高は 2.0～2.4 m、周期は 5.7～6.5 sec の範囲にあり、最高有義波高は 2.4 m、周期は 6.5 sec が妥当であるといわれている²³⁾。

3. 推算方法

(1) 波浪推算位置 伊勢湾において、海図中 30 m の等深線上の 5 点 A, B, C, D, E へ近接する特定の方向にそつて波浪を推算し、各点における波高と周期の時間的変化を求めた。これは、A 点は津の付近、

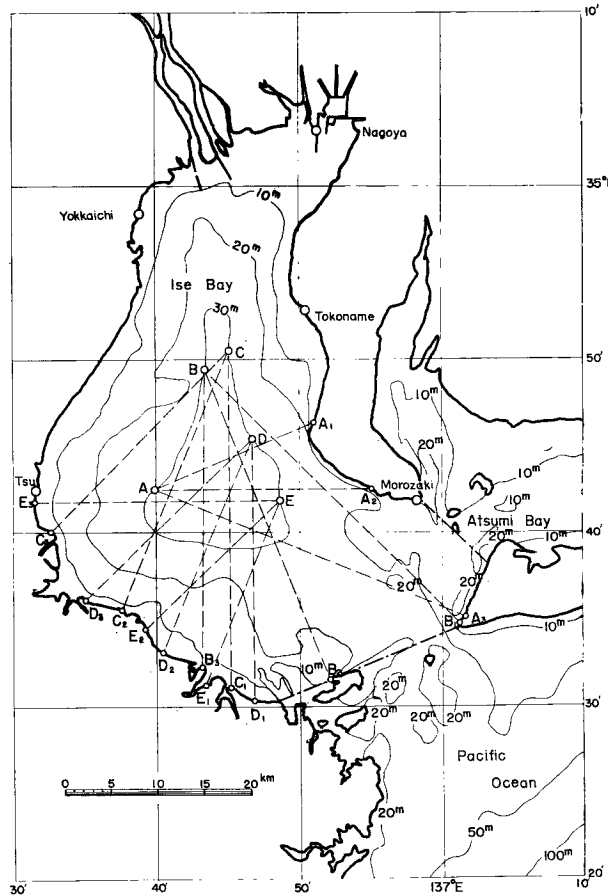


Fig. 1 Key diagram of reference stations and approach directions for the synoptic map of Ise Bay

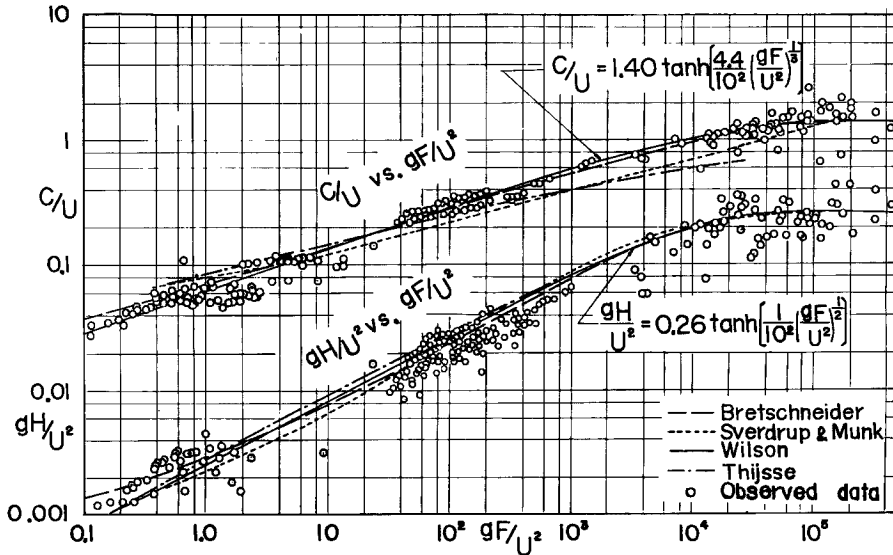


Fig. 2 Relationships of wind-wave parameters for conditions of unlimited duration (after Wilson)

B点は四日市付近、C点は名古屋付近、D点は常滑付近、E点は師崎付近の各海岸へ到達する波浪を対象とするもので、浅海領域における波浪の推算を将来行なうときの資料とするためである。波浪推定位置をあらわすこれらの点および波浪の近接方向は Fig. 1 に示されているが、推算にあたり次の仮定をしている。(1) 伊勢湾は伊良湖水道で外海と断絶され、小中山水道および師崎水道で渥美湾と区切られているものとする (Fig. 1 中の鎖線)。(2) 風速、風向は前述のように京都大学地球物理学教室気象学研究室によつて作成された風域図によるものを用い、Wilson にしたがつて、考えている波の伝播方向への風速の分値がその方向に伝播する波の発達に寄与するものとする。(3) 風域は都合上、10 m/s 以上のものを用い、5 m/s 間隔の等風速線によつて描くものとする。

(2) Wilson の図式解法 Fig. 2 は一定速度の風によつて十分な吹送時間後に発達する沖波に関する経験的な関係を示したもので¹⁸⁾、吹送距離と風についての無次元量 gF/U^2 に対して、波浪についての無次元量 c/U および gH/U^2 をプロットしたものである。ここに、 F は吹送距離、 g は重力加速度、 U は風速、 H は有義波の波高、 c は波速である。この図から、Wilson は定常状態に関して、つぎのような関係式を沖波予知曲線として与えている。

$$\frac{gH}{U^2} = 0.26 \tanh \left[\frac{1}{10^2} \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{1/2} \right] \quad \text{.....(1a)}$$

$$\frac{c}{U} = 1.40 \tanh \left[\frac{4.36}{10^2} \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{1/3} \right] \quad \text{.....(1b)}$$

これらの式によつて示される沖波予知曲線は SMB 曲線¹⁹⁾と少し異なっているが、定常状態においてどちらがより正確であるかを判定することは困難である。

また、風上側の境界や状態変化の影響が風下側、すなわち波浪の伝播方向へ伝わっていく速度は群速度に等しいから、次式が成立する。

$$\frac{dF}{dt} = c_g = \frac{c}{2} \quad \text{.....(2)}$$

ここに、 t は吹送時間、 c_g は沖波の群速度である。Wilson は (1a)、(1b)、および (2) 式から風速 U を

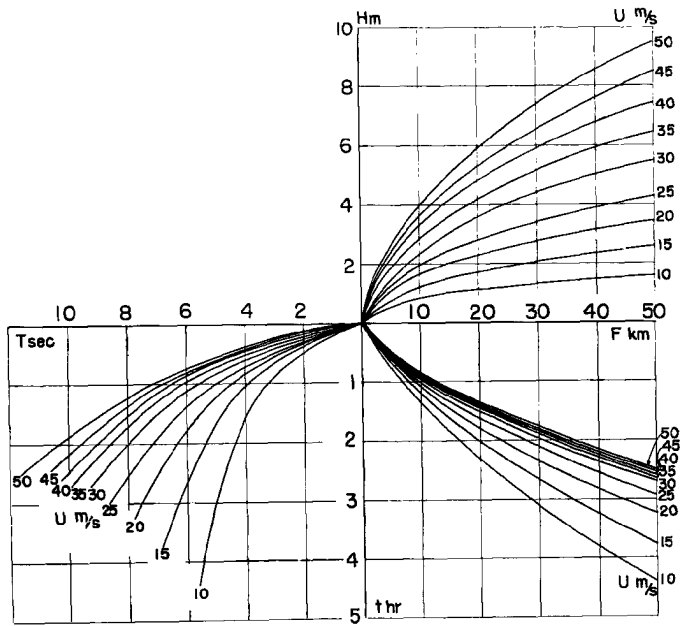


Fig. 3 Relationships for graphically forecasting significant heights and periods of waves in deep water (by Wilson)

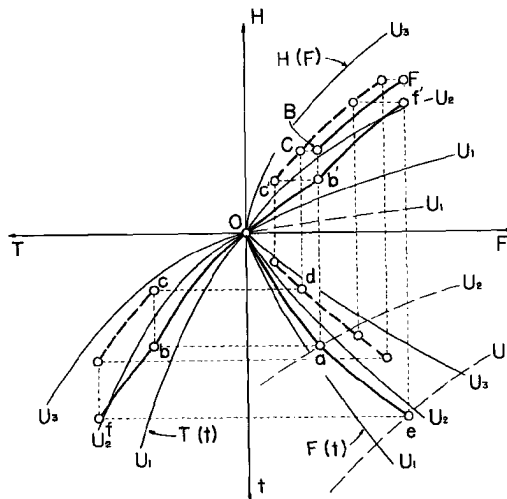


Fig. 4 Significant heights and periods of waves generated in a variably moving wind system of variable wind velocity (by Wilson's method)

パラメーターとして、Fig. 3 に示すような波高、時間、距離、周期の関係を示す $H-t-F-T$ diagram を作り、これを用いて風速と風向が距離や時間とともに変わる移動性風域において発達する沖波を図式的に予知する方法を提案している。Fig. 4 はその方法を示したもので、いま原点 O から出発する特性曲線（この場合、距離-時間曲線を特性曲線とよぶことにする）を考えよう。風速 U_1 上にある原点 O から出発する境界の影響（攪乱）は風速 U_1 と U_2 の平均風速 $(U_1 + U_2)/2 (= U_i)$ に対する特性曲線 $F(t)$ にそって進み、風速 U_2 の等風速線との交点 a に達する。同一時間間隔において、有義波の周期は U_i に対する周期-時間曲線 $T(t)$ にその線分 Ob にしたがって増大する。 a に到達した攪乱は、さらに風速が U_2 から U_3 に変わる領域を進行する。 a から e までの特性曲線は風速 U_2 と U_3 の平均風速 $(U_2 + U_3)/2 (= U_j)$ に対応するものであるが、線分 Oa の a におけるこの配（切線のこの配）と同一のこの配、すなわち同一の群速度で a から出発しなければならないとしている。この風速 U_i から U_j への遷移点 a において群速度を等しくするというののために、つぎの操作をする。まず一定の周期を示す垂直線 bc を引き、 U_j に対する $T(t)$ との交点を c とする。さらに水平線 cd を引き U_j に対する $F(t)$ との交点を d とする。 d を通って引いた U_j に対する特性曲線 $F(t)$ は a における曲線 Oa のこの配と d において同一のこの配をもつはずである。深海においては、群速度は周期に比例するからである。つぎに d から出発する特性曲線 $F(t)$ に平行に ae を描き、 Oa に ae を接続させる。このような方法によつて、風速 U_3 の等風速線上に点 e をきめる。

同様な理由から、 U_j に対する $T(t)$ の c からの曲線を下方へ平行移動し、 b において Ob に接続させ、さらに特性曲線上の e に対応する点 f の位置をきめる。有義波の周期に関する最終的な曲線は Obf である。

対応する有義波の波高の増大を示す図式解法もまた上述と同じように取り扱う。風速 U_1 から U_2 までの領域における曲線 Ob' は a を通る垂直線との交点 b' までが U_i に対する波高-距離曲線 $H(F)$ となる。風速 U_2 から U_3 までの次の領域における波高の増大は b' における波高と同一の波高から出発する U_j に対する $H(F)$ と接続しなければならないとして、 c' からの U_j に対する曲線 $H(F)$ を水平方向に移動し、 b' 点で Ob' に接続する $Ob'f'$ を得る。 f' は特性曲線上の e に対応する点である。有義波の波高に関する最終的な曲線は $Ob'f'$ である。

以上が Wilson の図式解法であつて、風速が不連続的に変化する遷移点 a において群速度を等しくすることから、周期-時間曲線上で b から c を導き、そして $F(t)$ 上に d を求めているが、このとき波高は d を通る垂直線 dC と U_j に対する $H(F)$ との交点 C のもつ値を示すはずである。したがつて、 U_j に対する C からの曲線 $H(F)$ を平行に移動させ、点 C を点 B (a を通る垂直線と C を通る水平線との交点) までもつてくる。点 e に対応する点 F であるから、 BF が ae に対応する波高の増大を示すことになるはずである。したがつて、周期と波高を別々に求めた Wilson の方法は、用いようとした基礎曲線のもとになっている波形この配と波令との相関関係をみずから放棄したことになる。

結局、異なつた風速 U_i, U_j による風波の発達状態が同等であるという意味を、Wilson が主張するようにそれぞれの風波の群速度が等しいということにすれば、波高の最終的な曲線は Wilson の方法による $Ob'f'$ でなく、 Ob', BF となり、点 b' で不連続となるのが正しいということになる。このことから Wilson の方法はその考え方と図式的な取扱い方に統一がない。

(3) 著者らの提案する図式解法 一般に、波の伝播にともなつて、その方向に波のエネルギーが輸送される。すなわち、エネルギーが輸送される速度は群速度 c_g に等しいから、 E を波のもつ単位面積あたりの平均エネルギーとすれば、エネルギーが単位巾の垂直面を単位時間に横切つて輸送される量は $c_g E$ に等しい。したがつて、有義波の発達は $c_g E$ の増大によつて規制されると考えてよい。すなわち、異なつた風速によつておこされる風波の発達状態が同等であるということは、それぞれの風波のもつ $c_g E$ が等しい状態であると考えてよいであろう。こうした立場から、著者らは風速と風向が距離や時間とともに変わる移動性風域において生ずる沖波を予知しようと試みたわけである。沖波に対しては、 $c_g = c/2 = (g/2\pi)T$ であり、また $E = (1/8)\rho g H^2$ であるから、 $c_g E$ は $H^2 T$ に比例する。したがつて、Wilson が風速変化時の波浪特性を

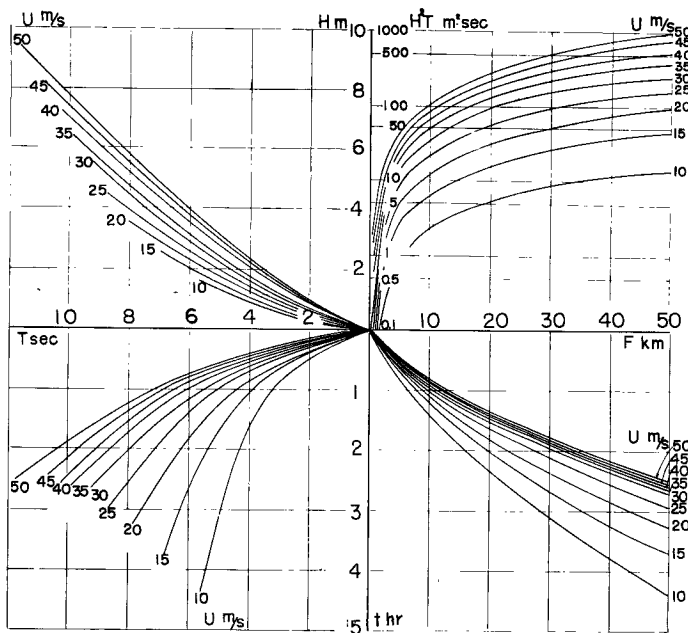


Fig. 5 Relationships for graphically forecasting significant heights and periods of waves in deep water (by authors)

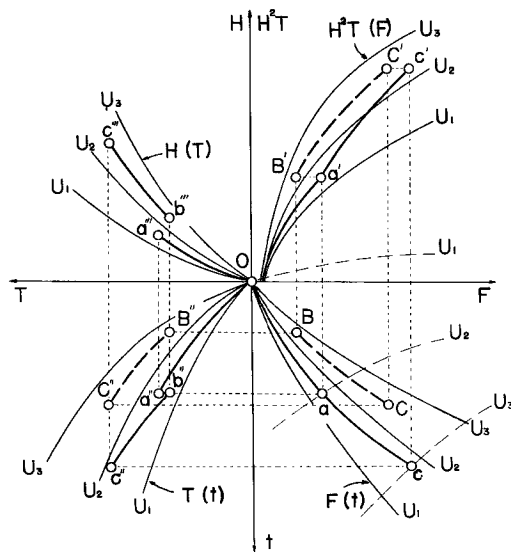


Fig. 6 Significant heights and periods of waves generated in a variably moving wind system of variable wind velocity (by authors' method)

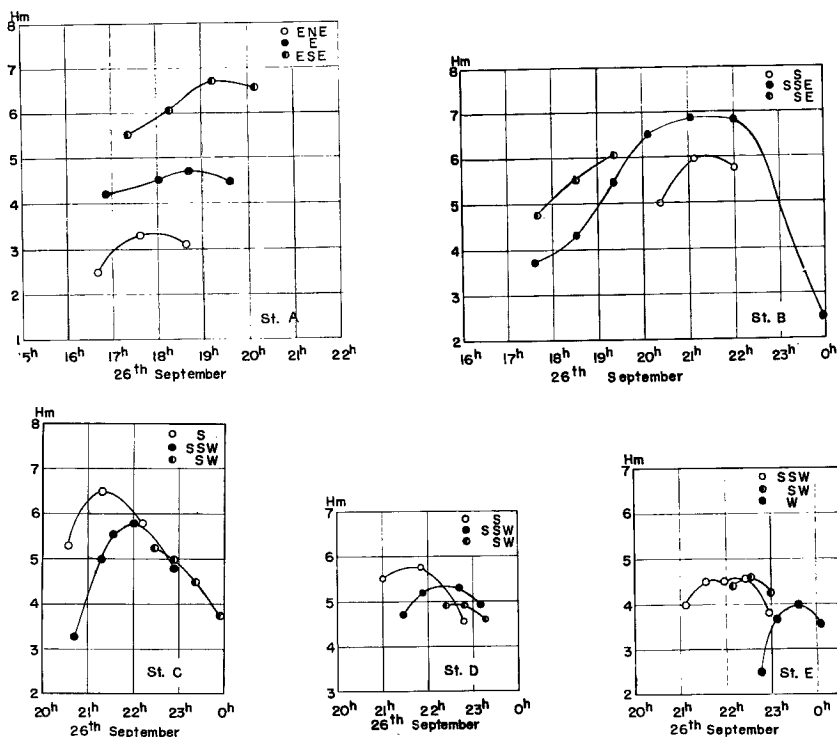


Fig. 7 Significant wave heights obtained by Wilson's method

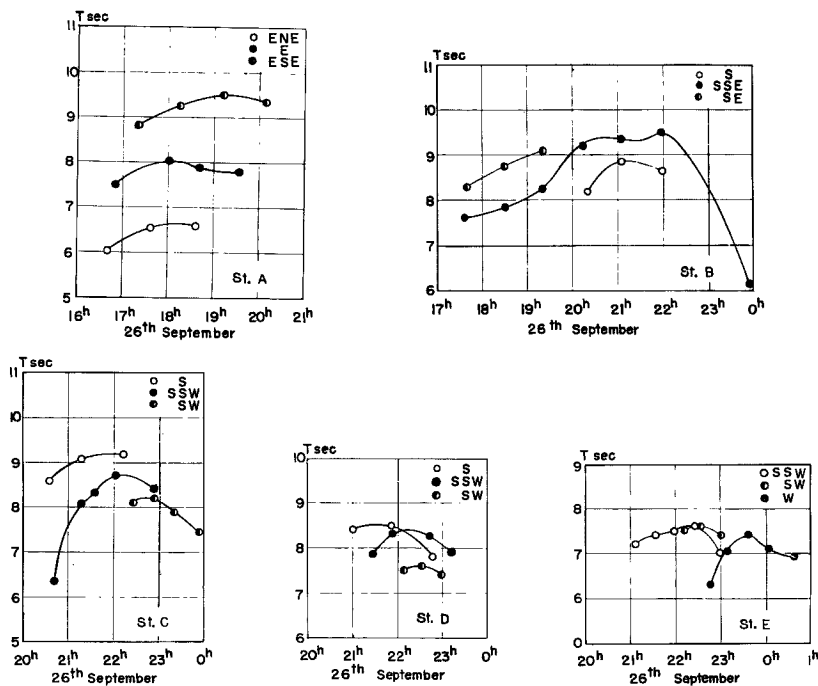


Fig. 8 Significant wave periods obtained by Wilson's method

接続する条件として c_g すなわち T を等しくする代りに、著者らの方法では $c_g E$ すなわち $H^2 T$ を等しくすることになる。

Fig. 5 は定常状態に関して Wilson が見出した関係式 (1a) 式と (1b) 式、および (2) 式から風速 U をパラメーターとして描いた $H^2 T$, $H-t-F-T$ diagram である。diagram を用い移動性風域において発

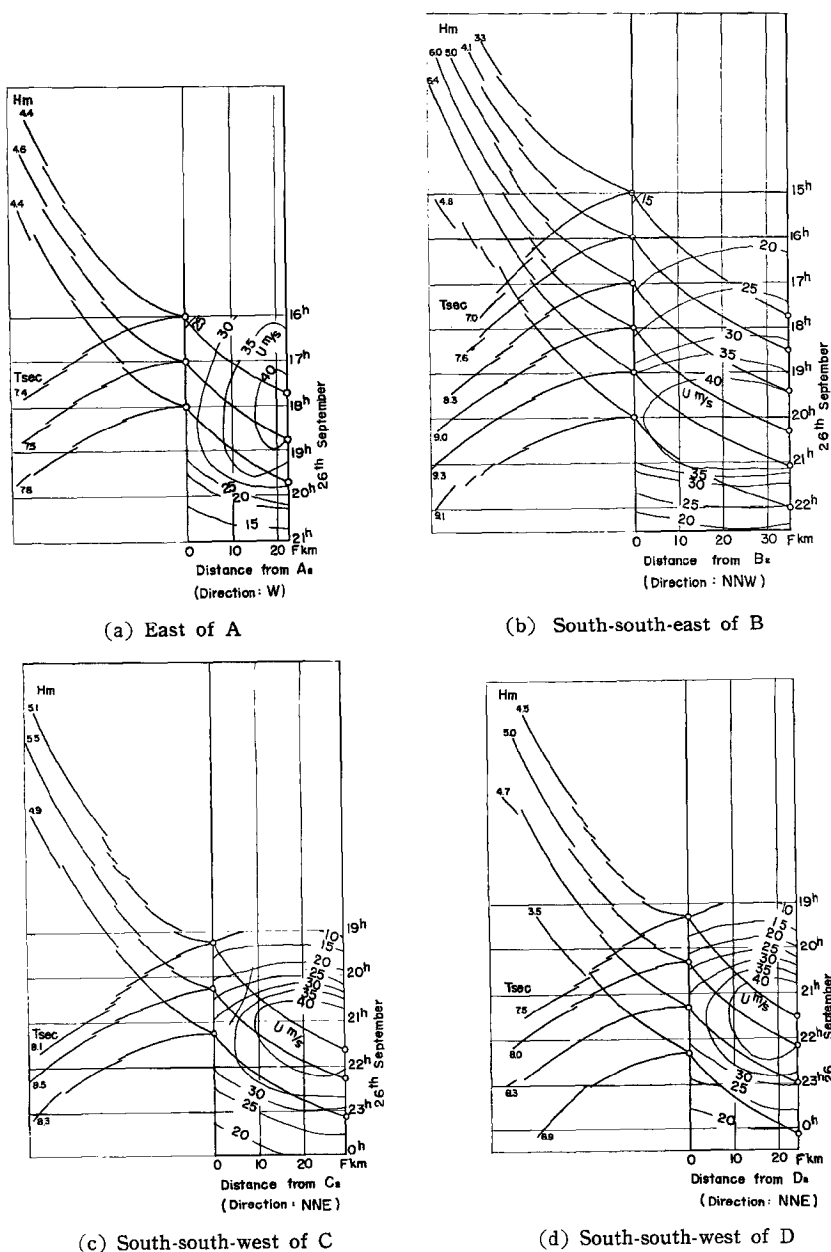
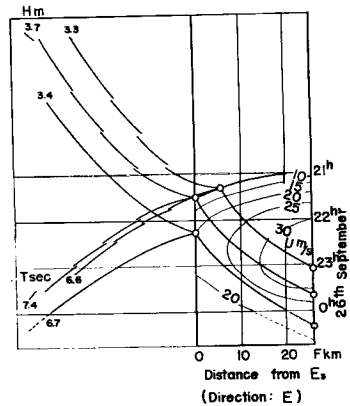


Fig. 9 Space-time wind-fields along approach directions (1)

達する沖波を図式的に予知しようとする著者らの方法を示したものである。いま、Wilsonの方法で説明したように、原点Oから特性曲線が出發するものとする。風速 U_1 の等風速線上にある原点Oから出發した攪乱は風速 U_1 から U_2 までの領域を、平均風速 $(U_1 + U_2)/2 (= U_i)$ に対する特性曲線 $F(t)$ にそつて進み、風速 U_2 上の点aに達する。同一時間間隔において、 H^2T , T , および H はそれぞれ U_i に対する曲線 $H^2T(F)$, $T(t)$, および $H(T)$ にそつて a' , a'' , および a''' に達する。aに到達した攪乱は風速 U_2 から U_3 までの領域へ進行し、平均風速 $(U_2 + U_3)/2 (= U_j)$ に対応する線分 ac を作る。すなわち、 U_i から U_j への遷移点aにおいて H^2T が等しいという条件を満たすために、 $H^2T \sim F$ 平面において水平線 $a'B'$ を引き、 U_j に対する $H^2T(F)$ との交点を B' とし、さらに垂直線 BB' を引くことにより、点Bを U_j に対する $F(t)$ 上に求める必要がある。この $F(t)$ は曲線 Oa がaにおいてもつ H^2T と同一の H^2T をBにおいてもつことになる。したがつて、aからBCに平行に ac を描き、風速 U_3 の等風速線との交点をcとすれば、 U_j に対する特性曲線が求められる。この場合点aでは曲線が折れる。すなわち Oa と ac の両曲線のaにおけるこう配は等しくない。

対応する有義波の周期の増大に関しては、水平線 BB'' と U_j に対する曲線 $T(t)$ との交点 B'' を求め、



(e) West of E

Fig. 9 Space-time wind-fields along approach directions (2)

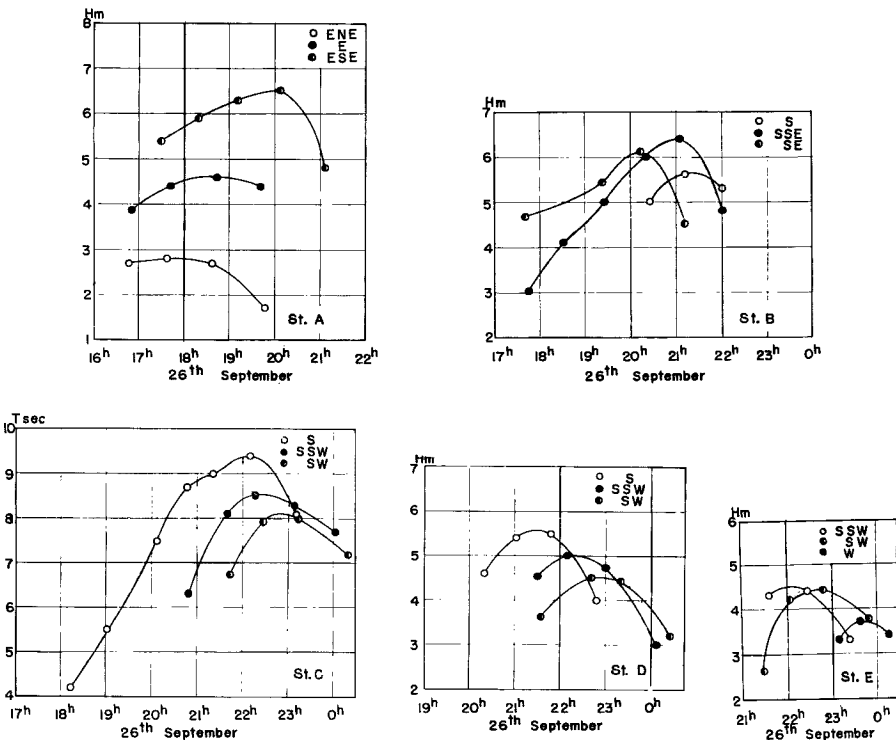


Fig. 10 Significant wave heights obtained by authors' method

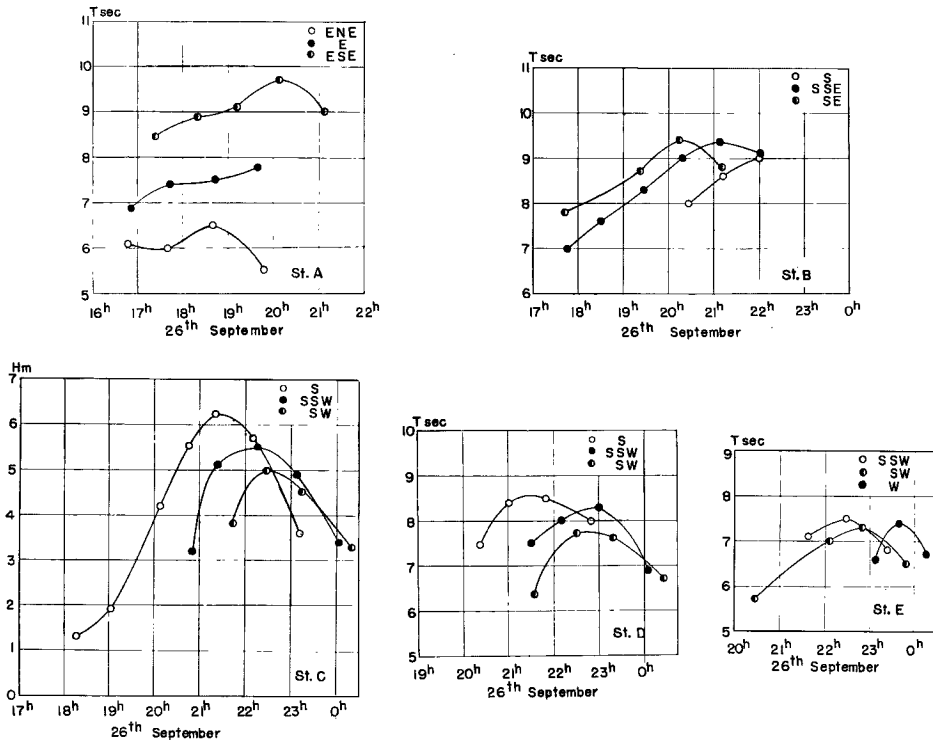


Fig. 11 Significant wave periods obtained by authors' method

B'' から始まる U_j に対する曲線 $T(t)$ を下方へ平行に移動させ、 $b''c''$ をえがくことにより点 b'' と点 c'' の位置が決められる。 b'' は水平線 ab'' と垂直線 $B''b''$ との交点であり、 c'' は水平線 cc'' 上にある。したがって、有義波の周期に関する最終的な曲線は Oa'' , $b''c''$ である。また、 a''' まで増大した波高は風速 U_2 から U_3 までの領域においては、 U_j に対する $H(T)$ の線分 $b'''c'''$ にそって増大する。点 b''' , c''' はそれぞれ垂直線 $b''b'''$ および $c''c'''$ と U_j に対する $H(T)$ との交点である。したがって、有義波の波高に関する最終的な曲線は Oa''' , $b'''c'''$ である。

4. 推 算 結 果

Fig. 7 および 8 はそれぞれ Wilson の図式解法により Fig. 1 に示した 5 点に関して、伊勢湾台風時における沖波としての波高と周期の時間的変化を各方向について求めた結果である。また、Fig. 9 は著者らの提案する図式解法による代表的な推算例を示したものであるが、曲線 $H^2T(F)$ についてはこの図に記入するのを省略した。Fig. 10 および 11 は著者らの提案する図式解法によつて求めた波高および周期の時間的変化を推算した結果で、それぞれ Fig. 7 および 8 に対応するものである。Fig. 7 と Fig. 10 からわかるように、波高に関しては、Wilson の図式解法による結果は著者らのそれより一般にいくらか大きい値がえられている。また、Fig. 8 と Fig. 11 からわかるように、周期に関しても Wilson の図式解法による値が著者らのそれより全般的には大きい傾向を示すが、風速が減少する領域が含まれる風域に対しては、著者らの方が大きい。なお、著者らの図式解法によつて求めたものから波形勾配を求めると、風速が単調増加である風域に対しては、ほぼ 0.04 から 0.05 の値をとり、風速が減少している領域を含む風域に対しては、ほぼ 0.03 から 0.04 の値をもつことがわかった。

5. 結 語

以上、著者らは台風のように連続的であつ急速に変化する性質をもつ風域における沖波の発達状態を、Wilson 法を修正した新しい方法によつて解析しようとした。

しかし、この研究においては、波の伝播方向への風速の分値が波の発達に寄与するものと仮定しており、こうした問題に関してはさらに進んだ研究がなされねばならない。また、このようにしてえられた沖波は浅海領域に入り海岸に達するわけであるが、この浅海においては海底摩擦など未開拓な問題が含まれている。著者らはこの研究をさらに発展させて、海岸波浪の正しい予知法を確立したいと考えている。

最後に、この研究を行なうにあつて、作図、計算などに助力して頂いた大学院学生甞受昌とおよび学部学生立白正光の両君に深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) Sverdrup, H.V. and Munk, W.H.: Wind, Sea and Swell; Theory of Relations for Forecasting, H. O. Pub. No. 601, 1947, pp. 1-44.
- 2) Thijsse, J. Th. and Schijf, J.B.: Report on Waves, Proc. 17th International Navigation Congr., Sec. II, Communication 4, Lisbon, 1949.
- 3) Arthur, R.S.: Wave Forecasting and Hindcasting, Proc. 1st Conf. on Coastal Eng., 1951, pp. 82-87.
- 4) Bretschneider, C.L.: Revised Wave Forecasting Relationships, Proc. 2nd Conf. on Coastal Eng., 1952, pp. 1-5.
- 5) Johnson, J.W. and Rice, E.K.: A Laboratory Investigation of Wind-Generated Waves, Trans. A.G.U., Vol. 33, 1952, pp. 845-851.
- 6) Hamada, T., Mitsuyasu, H. and Hase, N.: An Experimental Study of Wind Effect upon Water Surface, Report of Transportation Tech. Research Inst., 1953, 22 pp.
- 7) Bretschneider, C.L.: Revisions in Wave Forecasting: Deep and Shallow Water, Proc. 6th Conf. on Coastal Eng., 1958, pp. 30-67.
- 8) Hayami, S. and Kunishi, H.: A Wind Flume Study on the Generation of Waves, Proc. Intern. Oceanog. Congr. (Preprints), 1959, pp. 735-755.
- 9) 国司秀明: 風波に関する最近の研究, 海岸工学の最近の進歩, 土木学会関西支部, 昭36, pp. 198-217.
- 10) Pierson, W.J., Neumann, G. and James, R.W.: Practical Methods for Observing and Forecasting Ocean Waves by Means of Wave Spectra and Statistics, H.O. Pub. No. 603, 1955, pp. 1-284.
- 11) Neumann, G.: On Ocean Wave Spectra and a New Method of Forecasting Wind Generated Sea, Beach Erosion Board, Tech. Memo. No. 43, 1953, pp. 1-42.
- 12) Darbyshire, J.: An Investigation of Storm Waves in the North Atlantic Ocean, Proc. Roy. Soc., London, Vol. 230 (A), 1955, pp. 560-569.
- 13) Darbyshire, J.: An Investigation into the Generation of the Waves When the Fetch of the Wind Is Less Than 100 Miles, Quarterly Journal, Roy. Met. Soc., London, Vol. 82, 1956, pp. 461-468.
- 14) Kaplan, K.: Analysis of Moving Fetches for Wave Forecasting, Beach Erosion Board, Tech. Memo. No. 35, 1953, pp. 1-39.
- 15) Munk, W.H.: Tracking Storms by Forerunners of Swell, Jour. Met., Vol. 4, 1947, pp. 45-57.
- 16) Barber, N.F. and Ursell, F.: The Generation and Propagation of Ocean Waves and Swell,

- Phil. Trans. Roy. Soc., London, Vol. 240 (A), 1948, pp. 527-560.
- 17) Darbyshire, J.: The Generation of Waves by Wind, Proc. Roy. Soc., London, Vol. 251 (A), 1952, pp. 299-328.
 - 18) Wilson, B.W.: Graphical Approach to the Forecasting of Waves in Moving Fetches, Beach Erosion Board, Tech. Memo. No. 73, 1955, pp. 1-31.
 - 19) Wilson, B.W.: Hurricane Wave Statistics for the Gul of Mexico, Proc. 6th Conf. on Coastal Eng., 1958., pp. 68-95.
 - 20) 宇野木早苗：台風内の波浪の構造について，第5回海岸工学講演会講演集，昭33，pp. 1-6.
 - 21) 坂本信雄，井島武士，木村茂雄：太平洋沿岸の台風による波の特性とその推定法，第8回海岸工学講演会講演集，昭36，pp. 1-12.
 - 22) 山元龍三郎，光田寧：台風域内の風の分布の推算法，京大防災研究所年報第5号（10周年記念号），昭37.3，pp. 139-146.
 - 23) 井島武士，佐藤昭二，青野尚：伊勢湾台風による外海および伊勢海沿岸の波，第7回海岸工学講演会講演集，昭35，pp. 149-161.