

水圧式波浪計の補正係数 n の周波数スペクトルについて

今 里 哲 久・芹 沢 重 厚
西 勝 也・國 司 秀 明

ON THE FREQUENCY SPECTRUM OF CORRECTION FACTOR “ n ” OF PRESSURE TYPE WAVE GAUGE

By *Norihisa IMASATO, Shigeatsu SERIZAWA, Katsuya NISHI*
and *Hideaki KUNISHI*

Abstract

It is well known that the correction factor “ n ” must be inevitably used in estimating a frequency spectrum of surface wave pattern from a record of pressure-type wave gauge. Therefore, frequency spectrum of this factor, which has not been understood well, is studied by analysing some simultaneous observation records of capacitance-type and pressure-type wave gauges at the Shirahama Oceanographic Tower Station in Tanabe Bay. Values of this factor “ n ” obtained from the cross spectrum analysis are 1.13 at 0.1 c/s, 1.39 at 0.3 c/s, and 1.60 at 0.5 c/s and agree well with Seiwel’s and Folsom’s observed results. Corrected power spectra obtained from underwater pressure records at the Tower Station using our present correction factor “ n ” show an equilibrium range of wind wave spectrum characterized by f^{-5} law.

§1. ま え が き

風浪の発達に関する理論的取り扱いが進み、実験や観測を通じてその妥当性を検討し、風浪の発達機構を把握しようとする試みがさかんにおこなわれている。これらの努力は風浪の発達機構を理解するためだけでなく、防波堤等の海岸構造物建設のためにも必要不可欠である。風浪の発達過程を理解していくためには、表面波形を忠実にとらえることが必要であり、そのために測器開発に多くの努力がはらわれ、超音波式や容量式等のすぐれた波浪計が得られるようになった。しかしながら、現地海洋では潮汐による水面変動は数メートルに達するし、台風時や冬の季節風時の荒波、水質汚濁や生物活動等が、これらの測器の有効な作動を妨げ、恒常的な波浪観測資料の集積をむつかしくしている。この意味では、現地海洋における恒常的な波浪観測をおこなうための決定的な測器は得られていないといっても過言ではなく、現在でも従来からよく使われてきた圧力式波浪計によって観測がおこなわれている場合がほとんどである。

ただこの測器がとらえるある水深での圧力変動は、よく知られているように、hydrodynamical filter を通して表面波形と結びつけられるために、表面波形そのものを表現しているとはいえない。しかも実際には、さらに性質もその大きさもあまりよくわかっていない、いわゆる波高補正係数 n を導入しなければならない等の欠点を持っている。それにもかかわらず、恒常的現地観測の手段として現在なお有用であり、京大防災研の白浜海象観測所でも恒常的波浪観測には圧力式波浪計を使用して、台風時や冬季節風時の波浪スペクトルを測定してきた。したがって、この補正係数 n が周波数とともにどの様に変化し、圧力式波浪計から求めた波浪スペクトルにどれだけの補正を加えて表面波形のスペクトルを推定すればよいかを知ることは重要なポイントである。

この補正係数 n については、現地観測からは Seiwel¹⁾, Folsom²⁾, 井島等³⁾⁴⁾ の報告があり、水理実験か

らは Folsom²⁾, 浜田等⁵⁾, 本間等⁶⁾ などの報告がある。これらの値はまとめて Fig. 6 の中に示したが、近代的なスペクトルの取り扱いをしているのは本間等⁶⁾ の水理実験からの報告のみであることは注目を要する。この論文の目的は、この係数 n の周波数スペクトルを求め、これを用いて表面波形のパワースペクトルを推定することにある。

§2. 測器の構成と補正係数 n

使用した圧力式波浪計は京大防災研白浜海象観測塔のもので、その構成は Fig. 1 に示されている。1a

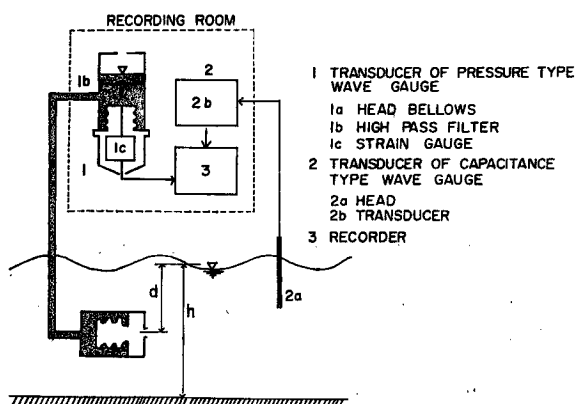


Fig. 1 Schematic diagram of measuring system of under water pressure and surface pattern.

のペローで受けた圧力変動をシリコンオイルを満したパイプを通して観測室に導き、1b の high pass filter を通した後、1c の歪計を通して電圧変化として記録計に記録されている。観測塔の平均水深は約 5 m で波浪計は底から 3.2 m のところに固定されている。一方表面波形は水平方向に水圧式波浪計から約 20 cm ばかり離れて設置された容量式波高計によって記録されている。

このような水深 d のところに設置した圧力計が記録する圧力変動 $\eta_P(t)$ は、微小振巾波を仮定すれば、よく知られているように次のように表現することができる。

$$\eta_s(t) = n \cdot \frac{\cosh kh}{\cosh k(h-d)} \cdot \eta_P(t) \quad (1)$$

ここで h は水深、 k は波数、 n は波高補正係数、 $\eta_s(t)$ は表面波形である。この式は周波数 f を使って書きかえ、次式のようにあらわすことができる。

$$\eta_s(t) = n \cdot \frac{1}{G(f)} \cdot \eta_P(t) \quad (2)$$

この式をみると、 $\eta_s(t)$ は、入力信号を $\eta_P(t)$ 、伝達関数を $n/G(f)$ とした場合の出力信号をあらわしていることがわかる。

この関係から、係数 n について現在われわれの意図している問題への有用な情報を得るためには、 $\eta_s(t)$ 、 $\eta_P(t)$ を周波数空間に移して考えなければならない。その一つは $\eta_s(t)$ と $\eta_P(t)$ のパワースペクトル $S_s(f)$ と $S_P(f)$ とを利用する方法で、これを使って (2) 式を書きかえたと次式が得られる。

$$S_P(f) = \frac{|G(f)|^2}{n^2} \cdot S_s(f) + S_n(f) \quad (3)$$

ここで $S_n(f)$ はこの系に含まれる雑音のパワースペクトルである。従ってもし $\eta_P(t)$ から $\eta_s(t)$ への信号伝達の系に雑音がなく、 $S_n(f) = 0$ と仮定することができれば係数 n は次のようにあらわすことができる。

$$n = G(f) \cdot \{S_s(f)/S_p(f)\}^{1/2} \dots\dots\dots (4)$$

入力信号 $\eta_s(t)$ と出力信号 $\eta_p(t)$ との間のよく知られている今一つの関係は、 $\eta_p(t)$ と $\eta_s(t)$ とのクロススペクトル $S_{ps}(f)$ を使う方法であって、この場合には $\eta_p(t)$ から $\eta_s(t)$ への信号伝達の系に入り込む雑音には無関係に、(2)式は次のように書きかえられることが知られている。

$$S_{ps}(f) = \frac{G(f)}{n} S_s(f) \dots\dots\dots (5)$$

従って、係数 n は次の (6) 式であらわすことができ、この場合には系に含まれる雑音は無関係となり、(4)式を導いた時のような $S_n(f)=0$ の仮定は不要である。

$$n = G(f) \cdot \frac{S_s(f)}{S_{ps}(f)} \dots\dots\dots (6)$$

以下、(4)式が与える係数 n を n_{ps} 、(6)式が与える係数 n を n_{cs} と表わすことにする。

§3. 解析と結果

解析に使用した資料は 1967 年 9 月に得たもので、その一例を Fig. 2 に示した。太線が容量式波高計に

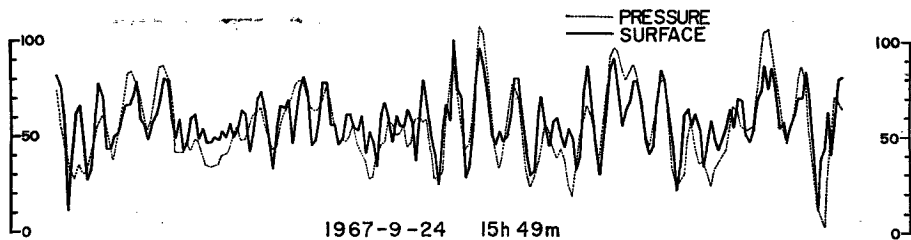


Fig. 2 An example of observed recorded of under water pressure and surface pattern.

よる表面波形、細線が圧力式波浪計による記録である。圧力変動の記録をみると表面波形にあらわれている短周期の変動は消えたり、歪を受けたりしていることがうかがえる。この記録のパワースペクトルとコヒーレンスを Fig. 3 に示した。上側がコヒーレンス、下側がパワースペクトルで実線が表面波形から、点線が圧力変動から得られたものである。これをみると 0.08c/s 付近に外洋からのウネリがあり、さらに 0.35c/s 付近に局地的な風によって作られたかなり大きい風浪が存在していることがわかる。圧力変動のスペクトル密度は高周波側に移るにつれて表面波形のスペクトル密度よりかなり小さくなり、hydrodynamical filter の効果がかかなり大きいことがうかがえる。0.5c/s あたりから急激に圧力波形のパワー密度が減少しているが、これは波浪計の受感部のペローの応答特性によるものである。この関係はコヒーレンスの図で 0.5c/s から高周波側へ向って相関が急に小さくなっていることにもあらわれている。1967 年 9 月の 6 例の観測結果から (4)、(6)式に従って n_{ps} と n_{cs} を求めたが、そのうち n_{cs} だけを Fig. 4 に示した。これらの値の平均値を実線で、また n_{ps} の平均値を点線で同じ図に示してある。この図をみると全ての周波数にわたって n_{ps} が n_{cs} より小さいことが明瞭に示されている。これは明らかに (4)式で $S_n(f)=0$ と仮定したためであって、もし (4)式で $S_n(f) \neq 0$ ならばこの式から求められる係数 n_{ps} は

$$n_{ps}'(f) = G(f) \cdot \{S_s(f)/S_p(f)\}^{1/2} \{1 - S_n(f)/S_p(f)\}^{-1/2} \dots\dots\dots (7)$$

$$\begin{aligned} &\doteq G(f) \cdot \{S_s(f)/S_p(f)\}^{1/2} \{1 + S_n(f)/2S_p(f)\} \\ &= n_{ps}(f) \cdot \{1 + S_n(f)/2S_p(f)\} \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

で与えられる。この n_{ps}' が、雑音の影響を受けていないとみられる n_{cs} に等しいとすれば、(8)式から

$$S_n(f) = 2 \cdot S_p(f) \{n_{cs}(f)/n_{ps}(f) - 1\} \dots\dots\dots (9)$$

と表わすことができる。この雑音の大きさがどの程度のものであるかをみるために、(9)式の関係から

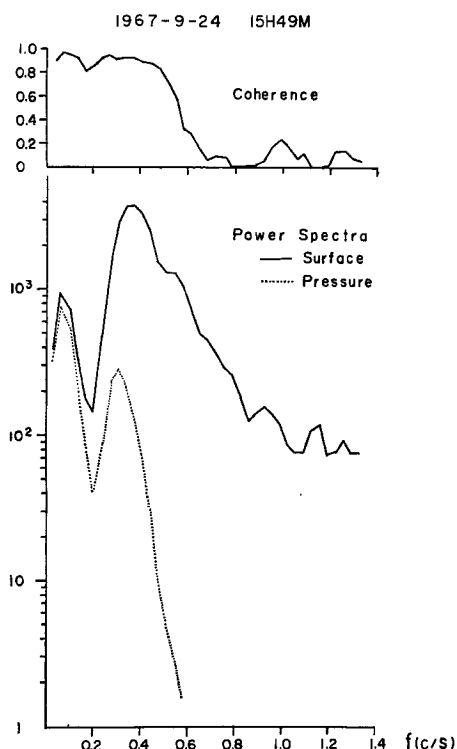


Fig. 3 Observed power spectra and coherence of under water pressure and surface pattern.

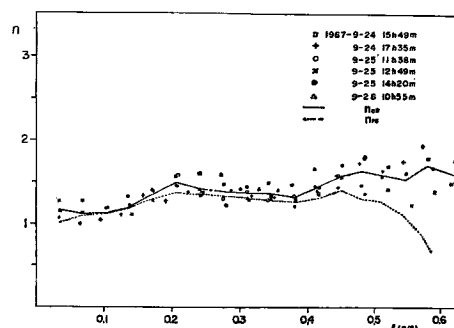


Fig. 4 Frequency spectrum of correction factor n_{CS} from cross spectrum method. Solid line is the mean value of n_{CS} and broken line that of n_{PS} .

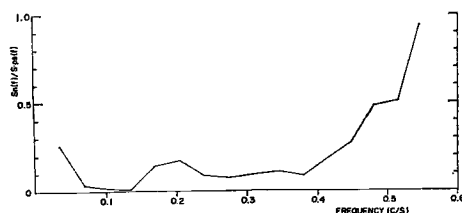


Fig. 5 Frequency power spectrum of noise S_n .

$S_n(f)/S_P(f)$ の形で示したものが Fig. 5 である。値は周波数と共に大きくなっていき、0.4 c/s まではほぼ 0.02~0.1 位の値であるが、0.4 c/s から急激に大きくなり、圧力計の応答特性が悪くなると共に、この系に入り込む雑音が増大し 0.55 c/s では $S_P(f)$ と同じ程度の大きさにも達することがわかる。

以上の考察でもわかるように圧力波形から表面波形への換算に雑音を無視することができない。したがって、係数 n としては、現在のところクロススペクトル法による値 n_{CS} を採用するのが妥当である。

Fig. 4 に実線で示される係数 n_{CS} の平均値は Table 1 に示してあるが、0.1 c/s で 1.13, 0.3 c/s で 1.39, 0.4 c/s で 1.40, 0.5 c/s で 1.60, となっている。この値とこれまでに報告されている係数 n の値との関係を見るために、これらの値を一まとめに示したのが Fig. 6 である。本間等の実験値⁶⁾とは 0.3~0.4 c/s 付近で同じ位の値となっているが、浜田等の実験値⁵⁾は 0.3~0.4 位小さい値を示している。しかし、Seiwell, Folsom らの現地海洋での観測値^{1), 2)}とは非常によく一致していることがわかる。なお、この係数 n は H/h , h/L (H : 波高, L : 波長, h : 水深) 等の関数であるともいわれているが、われわれのデーターでは、図には示さなかったが、有意な関数関係がみつめられなかった。

われわれが得た係数 n_{CS} を用いれば圧力式波浪計から推定したウネリや風浪の表面波形のスペクトルがどのようになるかを、既に発表した白浜海洋観測塔での観測例⁷⁾をもとにして検討してみよう。そのうちの 1 例は Fig. 7 (a) に示した台風 6420 号が接近していた 1964 年 9 月 25 日 00 時からの記録で、台風による周期 14 秒位の顕著なウネリを持っている。他の 1 例は 1965 年 9 月 8 日 00 時のもので (Fig. 7 (b)), 周期 4 秒位の風浪を含むものである。これらの図で、点線が水圧変動のパワースペクトル、係数 n_{CS} を用いた場

Table 1 Correction factor
 n_{cs} from cross-spec-
trum method.

FREQUENCY (c/s)	n_{cs}
0.050	1.23
0.075	1.12
0.100	1.12
0.125	1.17
0.150	1.26
0.175	1.37
0.200	1.47
0.225	1.45
0.250	1.41
0.275	1.38
0.300	1.38
0.325	1.38
0.350	1.37
0.375	1.34
0.400	1.40
0.425	1.49
0.450	1.58
0.475	1.63
0.500	1.61
0.525	1.56
0.550	1.57

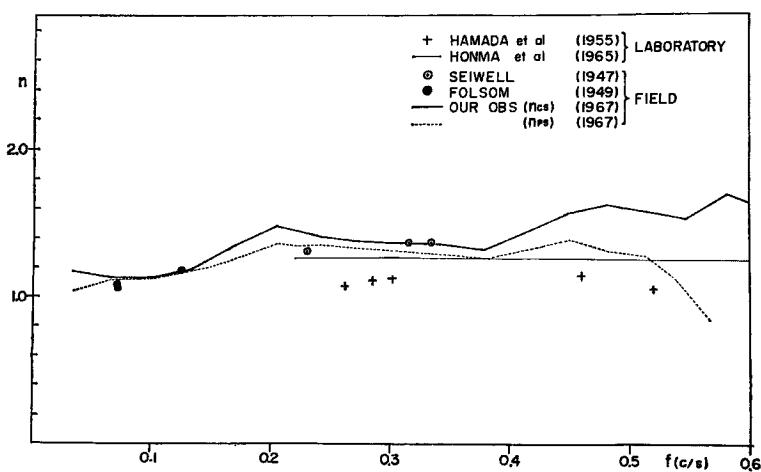


Fig. 6 Correction factor n .

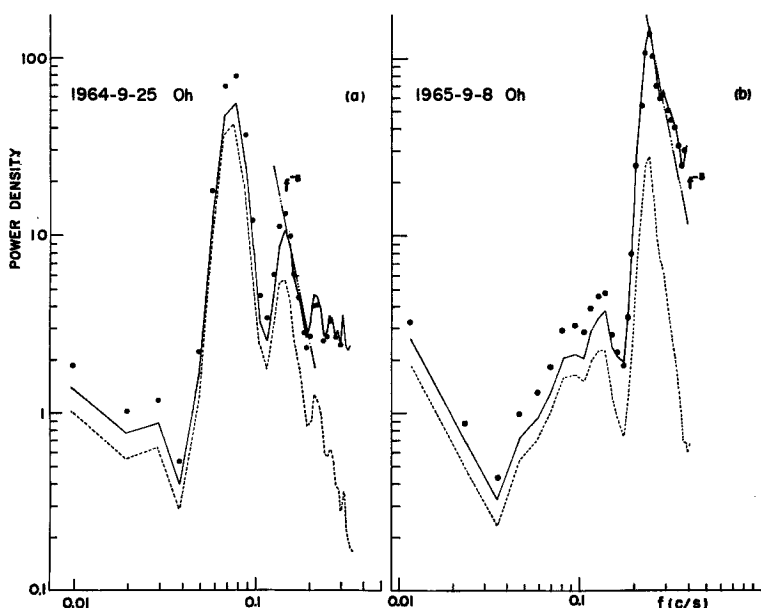


Fig. 7 Corrected power spectrum obtained from under water pressure records at the Tower Station by using our present correction factor n . Solid line is the corrected power spectrum, black dots are the corrected power spectrum by using the correction factor $n=1.35$, and broken line is the power spectrum of under water pressure.

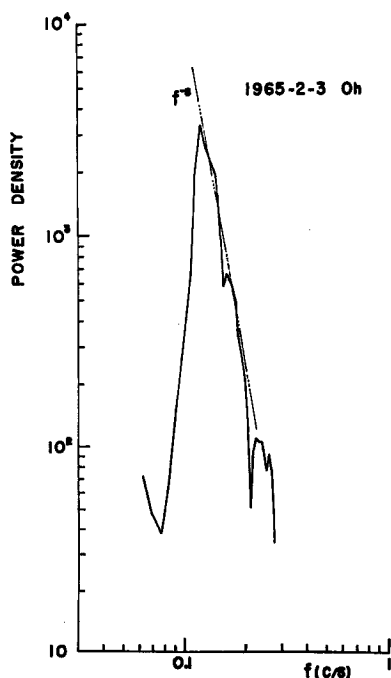


Fig. 8 Corrected power spectrum at the Tower Station.

合の表面波形のスペクトルが実線で示してある。図にみられるように、エネルギーは14秒のウネリに対しては約1.2倍、4秒の風浪に対しては5.5倍になっており、 n_{CS} のスペクトルから当然予想されることではあるが、特に風浪に対して大きな補正を必要とし、場合によっては卓越周期もわずかながら大きい方へ移る可能性のあることが考えられる。また、風浪のスペクトルピークより高周波側の f^{-5} の平衡領域がよく再現されていることに注目しなければならない。この事実は冬の季節風による風浪の例 (Fig. 8) により明瞭に示されている。

これまで我国では、Seiwellの現地観測にもとづく報告¹⁾が出て以来、慣例的にこの係数は周波数に無関係に1.35という値を用いることが多かったが、この場合には低周波側のウネリの波高をより大きく、高周波側の風浪の波高をより小さく推定することになる。この値を用いたスペクトルを同じ図に同時に●印で示してある。

§4. む す び

ごく簡単な取り扱いから、補正係数 n の周波数スペクトルを求めた。測定に使用した圧力式波浪計が応答し得る 0.5 c/s より低周波領域では、 n は $1.1\sim 1.6$ 位の値を示している。この値は平均的波浪要素を使って求められた従来報告値と一見よい一致を示しているが、重要なことはこの値が周波数によって変化していることである。**Fig. 3** あるいは **Fig. 7** から明らかなように、 0.70 c/s 付近のウネリに対しては、表面波形に変換する場合の補正はわずかでよいが、 0.15 c/s 付近から高周波側の風浪に対しては、エネルギーにして10倍の補正が必要になることがわかる。しかし、この補正によって、スペクトル解析から求めた波浪場の卓越周期が大きく変わることはなかった。また、 f^{-5} のいわゆる平衡領域を再現することができて、風浪の発達機構の議論にも十分利用できると思われる。

今回の解析に利用した資料の数が少なかったことにもよるが、この係数 n の性質、例えばどのような波浪特性に依存するのかは明瞭に示すことができなかった。

この解析の計算には京都大学計算機センターの KDC II 及び FACOM 230-60 を利用させていただいた。本研究に使用した白浜海象観測塔の波浪計の設置維持及び観測に協力していただいた京都大学理学部田中耕三郎技官に感謝します。また資料解析に協力していただいた斉田悦子さんに感謝します。

参 考 文 献

- 1) Seiwel, H. R.: Investigation of under water pressure records and simultaneous sea surface patterns, T. A. G. U., Vol. 28, No. 5, 1947, pp. 722-724.
- 2) Folsom, R. G.: Measurements of ocean waves, T. A. G. U., Vol. 30, No. 5, 1949.
- 3) 井島武士・柴山煒彦：波高計による波浪の観測（第2報），運輸技術研究所報告，第3巻，1953，pp. 318-332.
- 4) 井島武士・高橋智晴・中村憲一：波高計による波浪の観測（第3報），水圧式波高計及びそれによる小名浜港における波浪観測（その1），運輸技術研究所報告，第4巻，1954，pp. 257-292.
- 5) 浜田徳一・光易 恒・長谷直樹：進行波による水底圧力の変動，海岸工学講演会講演集，1955，pp. 33-40.
- 6) 本間 仁・堀川清司・小森修蔵：水圧変動波形と水面波形の相関性，海岸工学講演会講演集，1965，pp. 76-83.
- 7) 國司秀明・西 勝也・今里哲久：白浜海洋観測塔における波浪の研究(II)，京大防災研年報，第10号B，昭42，pp. 313-320.