

# 小名浜港の風波について

内 田 則 夫\*・斎 藤 幸 義\*\*  
東 条 貞 義\*\*\*・進 藤 勉\*\*\*\*

## 1. 緒 言

波浪の推測は港湾構造物の設計波高を決定する一方法として広く用いられているが、小名浜港の工事施工に波浪予測を用いるようになって、施工可能波浪  $H_{1/3} < 100$  cm の予測精度を高めるには、特に、風浪の特性やその発達減衰の状況を検討する必要を痛感するようになった。

小名浜港の波浪観測は昭和 28 年から運研式水圧波浪計を用いて波浪観測を始めているが、昭和 33 年 4 月からはかなり継続的な観測が続けられてきている。

昭和 40 年 10 月から始めた波浪予測は上記の観測記録と、その時の気象とを関連づけて利用しているが、その後波浪予測と同時に始めた目視観測によって、従来よりも短周期の 6.4 秒以下の風浪がかなり観測されて、工事施工に影響が大きく、波浪予測上無視できないことがわかってきた。

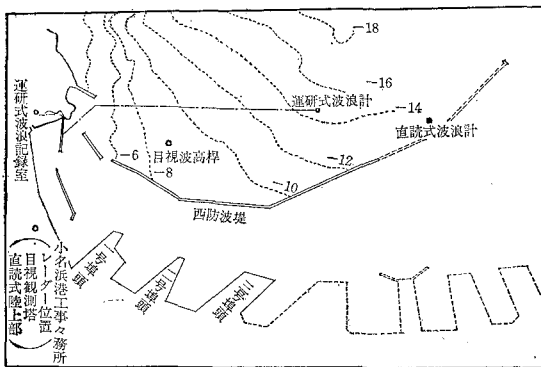
本報告は筆者らが始めた新しい観測から、風波の発達、減衰やその時の特性の解析を試みた第 1 報である。

## 2. 既往調査による小名浜港の気象・波浪特性

### (1) 波高・周期について

小名浜港における波高・周期の継続観測は第二港湾建設局小名浜港で、昭和 33 年 4 月より運研式水圧波浪計を図-1 に設置して観測している。

図-1 小名浜港平面図



\* 正会員 運輸省第二港湾建設局小名浜港工事事務所所長  
\*\* 正会員 同上 次長  
\*\*\* トウジョウ・ウエザー・サービスセンター社長  
\*\*\*\* 同上 調査部長

昭和 40 年 3 月までの測得全日数は全期間の約 50% の 1476 日で、その内訳は表-1 のとおりである。

欠測の主な理由はケーブルの切断によるものである。上記測得記録の分析<sup>1)</sup>の中で、周期別波高出現回数は表-2 のとおりで、波浪特性としては各波高段階とも周期の出現回数は 9~10 秒がきわめて多いが、7.4 秒以下の短周期波はほとんど測得されていない。

表-1 運研式水圧波浪計による測得日数 (日)

| 年  | 昭 33 | 34  | 35  | 36  | 37  | 38  | 39  | 40 | 計    |
|----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|------|
| 日数 | 79   | 161 | 243 | 227 | 167 | 247 | 262 | 90 | 1476 |

表-2 周期別波高出現回数 (回)

| $H_c$ (cm)<br>$T_s$ (sec)       |           | 0~49  | 50~99        | 100~149      | 150~199 | 200~299 | 300~399 | 400 以上 | 合計            |
|---------------------------------|-----------|-------|--------------|--------------|---------|---------|---------|--------|---------------|
| 昭和 33.4<br>昭和 40.3<br>$H_{1/3}$ | 5.5~6.4   | 4     | (1)<br>6     | (1)<br>3     | 2       | 0       | 0       | 0      | (2)<br>15     |
|                                 | 6.5~7.4   | 28    | 129          | 47           | 17      | 8       | 1       | 0      | 230           |
|                                 | 7.5~8.4   | 411   | 842          | 296          | 65      | 37      | 1       | 0      | 1 652         |
|                                 | 8.5~9.4   | 1 323 | 1 800        | 566          | 166     | 41      | 6       | 1      | 3 903         |
|                                 | 9.5~10.4  | 2 043 | 1 953        | 622          | 201     | 80      | 10      | 3      | 4 912         |
|                                 | 10.5~11.4 | 1 585 | 1 438        | 427          | 197     | 125     | 26      | 4      | 3 802         |
|                                 | 11.5~12.4 | 729   | 819          | 380          | 200     | 151     | 20      | 2      | 2 301         |
|                                 | 12.5~13.4 | 220   | 315          | 237          | 190     | 91      | 10      | 2      | 1 055         |
|                                 | 13.5~14.4 | 62    | 131          | 108          | 98      | 57      | 12      | 12     | 480           |
|                                 | 14.5~15.4 | 23    | 22           | 28           | 19      | 22      | 3       | 0      | 117           |
|                                 | 15.5~16.4 | 4     | 2            | 1            | 8       | 5       | 0       | 0      | 20            |
|                                 | 16.5以上    | 0     | 0            | 0            | 0       | 0       | 0       | 0      | 0             |
|                                 | 合 計       | 6 432 | (1)<br>7 457 | (1)<br>2 715 | 1 163   | 617     | 89      | 24     | (2)<br>18 497 |

しかし、井島が昭和 30 年 9 月に小名浜港で、実体視式波高測定器と運研式水圧波浪計で同時観測して、測得した報告<sup>2)</sup>の中に図-2の水面周期と水底圧力による周期比較図が掲載されているが、この図は水底圧力周期が 6 秒以下を測得していなくても水面波形は 6 秒以下の周期の実在があらわれていて、運研式水圧波浪計を用いている小名浜港の既往の観測が 7.4 秒以下の周期波を測得できていないと判断できる。

### (2) 南風と波浪

表-2 に示すように、小名浜港は外洋波浪の常襲港湾で、特に、南風の強風は地形上もっとも港内をじょう乱し、過去における多くの港湾内事故の原因となっている。小名浜港における南風について、昭和 30~34 年の 5 年間の気象・海象を統計調査した小曾納の報告<sup>3)</sup>によ

図-2 運研式波浪計の水面波形と水圧波形との対応

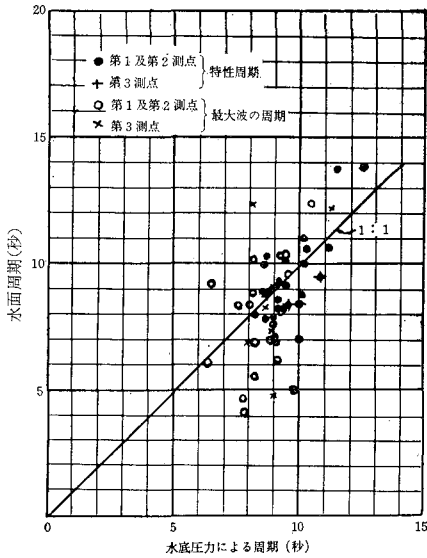


表-3 5年間の月別最大風速 (30~34) (m/sec)

| 月 | 風 向         | 風 速  | 月   | 風 向 | 風 速  |
|---|-------------|------|-----|-----|------|
| 1 | NW          | 18.5 | 8   | SSE | 15.8 |
| 2 | SSW         | 20.6 | 9   | SSE | 22.9 |
| 3 | S           | 22.6 | 10  | SSE | 18.5 |
| 4 | NW          | 19.7 | 11  | S   | 15.5 |
| 5 | S           | 16.6 | 12  | S   | 17.3 |
| 6 | SSE         | 13.0 | 全 年 | S   | 23.3 |
| 7 | N, NNE, SSE | 23.3 |     |     |      |

れば、月別最大風速は表-3となっていて、強風はSでは 15~23 m/sec にも達する。

また、南風の原因別月別回数は表-4に示すように、日本海低気圧が多くなっているが、高気圧((イ)移動性高気圧の後面・(ロ)南偏した移動性高気圧・(ハ)高気圧におおわれた型)の場合に吹く回数も割合に多い。また、冬から春にかけて不連続線の通過時に一時的に吹くのも見逃せない。

表-4 原因別月別回数 (回)

| 月      | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7 | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 計   |
|--------|----|----|----|----|----|----|---|----|----|----|----|----|-----|
| 日本海低気圧 | 10 | 8  | 11 | 17 | 15 | 7  | 2 | 4  | 5  | 10 | 5  | 8  | 102 |
| 南海低気圧  | 0  | 0  | 0  | 1  | 2  | 1  | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 4   |
| 不連続線   | 7  | 1  | 4  | 6  | 2  | 0  | 2 | 3  | 2  | 2  | 3  | 8  | 40  |
| 高 気 圧  | 5  | 4  | 3  | 20 | 14 | 2  | 1 | 5  | 5  | 2  | 3  | 4  | 68  |
| 台 風    | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 2 | 5  | 6  | 1  | 0  | 0  | 14  |
| 計      | 22 | 13 | 18 | 44 | 33 | 10 | 7 | 17 | 18 | 15 | 11 | 20 | 228 |

南風の吹き出しについても小曾納はつぎのような特性を挙げている。

a) 日本海低気圧による場合 強風の吹出した時の

低気圧の位置は図-3となり、吹き出す時刻は図-4に示す 10~13 時の間に吹き出すが多い。

図-3 強風の吹き出した時の低気圧の位置

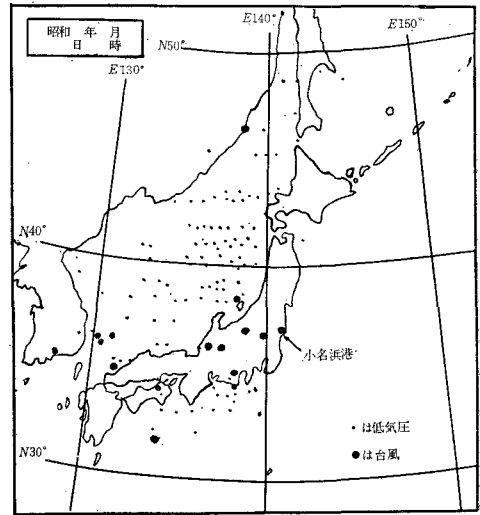
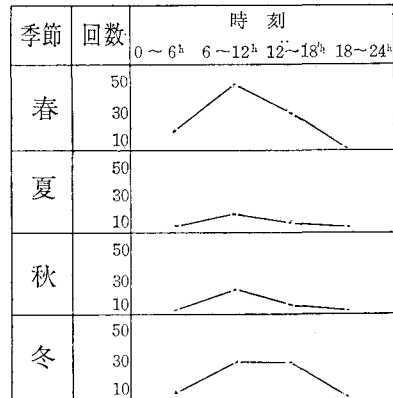


図-4 吹き出し時刻の特性



b) 南海低気圧による場合 吹く回数が少なく、低気圧が北緯 32° 以北、東経 134° 線に入ると吹き出している。

c) 高気圧

① 高気圧の後面：高気圧が関東沖にぬけた場合が大部分であるが、夏には太平洋高気圧の張り出し内で吹くことがあり、最大風速  $U_{max}$  は 10 m/sec 以内である。しかし、後面に低気圧または前線がある場合は南風が吹続し、 $U_{max}$  13 m/sec に達する。

② 南偏した高気圧：高気圧の中心が本州中部・西部・および東支那海方面にあって本邦をおおっている場合で、冬と春に多く、 $U_{max}$  11 m/sec 程度である。

波浪のエネルギー スペクトルの 変化については、台風時における小名浜港の波浪を立体写真法を用いて調査した井島の報告<sup>2)</sup>で、風浪は発達とともに図-5に示す

ようにスペクトルのピークが速かに長周期帯に移動するとともに、エネルギーは全体的に増加し、特に、短周期のエネルギーはほとんど一定のまま次第に長周期帯の成分のみが増加してゆくことを述べている。

小名浜港の風浪の発達 は地形上 0.8~1.0 m 以上の波が立ち得るのは観測結果からも風速が 7 m/sec 以上のときで、7 m/sec 以上の風は表

一5の風向別波高出現回数のおりで、Sの風向がもっとも卓越している。

(3) 波向について

過去における小名浜港の波向測定例は昭和 31 年 10 月 7 日 4 時の 20 分間のみである。

しかし、過去の波向推測は昭和 33 年 4 月から昭和 40 年 3 月に至る波高データを活用して、この期間のそれぞれの対応気象と関連づけて推測する方法で、侵入波向を

図-5 風波の発達 (井島) 昭和 28 年 13 号台風

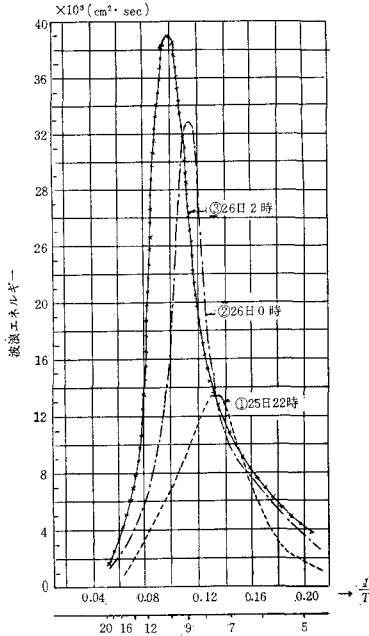


表-5 風向別 (7 m/s 以上) 波高出現回数 昭 33.4~昭 40.3

| 波高<br>風向 | $H_{1/3}$ | 0~49 | 50~99 | 100~149 | 150~199 | 200~299 | 300~399 | 400以上 | 合 計   |
|----------|-----------|------|-------|---------|---------|---------|---------|-------|-------|
| NNE      |           | 13   | 37    | 19      | 16      | 3       | 2       | 1     | 91    |
| NE       |           |      | 3     | 1       | 2       | 3       |         |       | 9     |
| ENE      |           | 1    | 2     |         | 1       |         |         |       | 4     |
| E        |           |      | 3     |         |         | 2       | 1       |       | 6     |
| ESE      |           |      |       | 4       |         | 1       |         |       | 5     |
| SE       |           | 4    | 3     | 4       | 2       | 2       | 3       |       | 18    |
| SSE      |           | 23   | 36    | 28      | 23      | 7       | 2       | 2     | 121   |
| S        |           | 79   | 112   | 60      | 39      | 34      | 3       | 2     | 329   |
| SSW      |           | 19   | 22    | 14      | 2       | 5       | 1       |       | 63    |
| SW       |           | 6    | 5     |         |         | 1       |         |       | 12    |
| WSW      |           | 2    | 1     | 1       |         |         |         |       | 4     |
| W        |           | 7    | 15    | 6       | 3       | 1       | 1       |       | 33    |
| WNW      |           | 63   | 60    | 16      | 9       | 8       | 1       | 1     | 158   |
| NW       |           | 103  | 104   | 42      | 14      | 9       | 1       |       | 273   |
| NNW      |           | 48   | 52    | 22      | 16      | 9       | 2       | 3     | 152   |
| N        |           | 20   | 51    | 28      | 29      | 19      | 6       | 2     | 155   |
| 合 計      |           | 388  | 506   | 245     | 155     | 105     | 23      | 11    | 1 433 |

求めている<sup>4)</sup>。

これは前記 7 年にわたる波高の測定日について気象図の上で浪源を求め、浪源から小名浜港まで来る波高をうねりの予測法を逆用して推定し、沖波向を求め、さらに、港口波向は波の屈折図により沖波向から導いたもので、波向別波高出現回数は表-6 に示したように、沖波向の分布が広いのに対し、港口波向はほとんど 140°~200° の間に分布した値となっている。

3. 波浪予測

波浪予測の導入をはかった実施当初の予測方法<sup>5),6)</sup>は、その後たえず実況と対比させて、実施以来 1 年半に

表-6 波向別波高 ( $H_{1/3}$ ) 出現回数

昭 33.4~昭 40.3

| 沖 波     |         |         |         |         |       |       | 港 口 波   |         |         |         |         |       |       |
|---------|---------|---------|---------|---------|-------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|-------|
| 波高 (cm) | 100~149 | 150~199 | 200~299 | 300~399 | 400以上 | 合 計   | 波高 (cm) | 100~149 | 150~199 | 200~299 | 300~399 | 400以上 | 合 計   |
| 波向 (度)  |         |         |         |         |       |       | 波向 (度)  |         |         |         |         |       |       |
| 30      | 9       | 1       | 2       |         |       | 12    | 30      |         |         |         |         |       |       |
| 40      | 32      | 9       | 5       |         |       | 46    | 40      |         |         |         |         |       |       |
| 50      | 86      | 24      | 13      |         |       | 123   | 50      |         |         | 2       |         |       | 4     |
| 60      | 79      | 28      | 35      | 1       |       | 143   | 60      |         |         |         |         | 2     |       |
| 70      | 88      | 49      | 15      | 1       |       | 153   | 70      |         |         |         |         |       |       |
| 80      | 37      | 14      | 13      |         |       | 64    | 80      |         |         |         |         |       |       |
| 90      | 72      | 29      | 21      | 2       |       | 124   | 90      |         |         | 1       |         |       | 1     |
| 100     | 27      | 15      | 7       |         |       | 49    | 100     |         |         |         |         |       |       |
| 110     | 24      | 20      | 13      | 2       |       | 59    | 110     |         |         |         |         |       |       |
| 120     | 45      | 16      | 5       |         |       | 66    | 120     |         |         |         |         |       |       |
| 130     | 44      | 22      | 7       |         |       | 73    | 130     |         |         |         | 1       | 1     | 2     |
| 140     | 31      | 35      | 7       | 2       | 1     | 76    | 140     | 445     | 192     | 120     | 11      | 1     | 769   |
| 150     | 26      | 13      | 5       | 1       |       | 45    | 150     | 143     | 77      | 24      | 1       | 1     | 246   |
| 160     | 42      | 16      | 5       | 1       |       | 64    | 160     | 176     | 78      | 26      | 6       | 3     | 289   |
| 170     | 20      | 17      | 3       | 1       | 1     | 42    | 170     | 25      | 4       | 2       |         |       | 31    |
| 180     | 107     | 36      | 15      | 4       | 2     | 164   | 180     | 10      | 6       | 5       | 2       |       | 23    |
| 190     | 21      | 13      | 10      | 1       | 1     | 46    | 190     | 6       | 1       |         |         |       | 7     |
| 200     | 10      | 5       | 3       |         |       | 18    | 200     | 7       | 1       | 2       |         |       | 10    |
| 210     | 8       |         | 1       |         |       | 9     | 210     | 1       |         |         |         |       | 1     |
| 220     | 7       |         |         |         |       | 7     | 220     |         |         |         |         |       |       |
| 230     | 3       | 1       |         |         |       | 4     | 230     |         |         |         |         |       |       |
| 240     | 4       |         |         |         |       | 4     | 240     |         |         |         |         |       |       |
| 合 計     | 822     | 363     | 185     | 16      | 5     | 1 391 | 合 計     | 813     | 359     | 182     | 22      | 8     | 1 383 |

表-7 明日予測における目測値との予測誤差の分布

昭 40.12.1~昭 42.3.31

| 誤差<br>年月 | -175<br>~-199 | -150<br>~-174 | -125<br>~-149 | -100<br>~-124 | -75<br>~-99 | -50<br>~-74 | -25<br>~-49 | 0~-24 | 0~24 | 25~49 | 50~74 | 75~99 | 100<br>~124 | 125<br>~149 | 150<br>~174 | 175<br>~199 | 合 計   |
|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------------|-------------|-------------|-------|------|-------|-------|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------|
| 回 数      |               | 1             | 7             | 17            | 12          | 57          | 99          | 265   | 261  | 120   | 41    | 23    | 15          | 7           | 5           | 2           | 932   |
| %        |               | 0.1           | 0.8           | 1.8           | 1.3         | 6.1         | 10.6        | 28.4  | 28.1 | 12.9  | 4.4   | 2.5   | 1.6         | 0.8         | 0.5         | 0.2         | 100.0 |

表-8  $T_{1/3} < 6.5 \text{ sec}$  の時の目測値との予測誤差の分布

昭 40.2.1~昭 42.3.31

| 誤差<br>年月 | -175<br>~-199 | -150<br>~-174 | -125<br>~-149 | -100<br>~-124 | -75<br>~-99 | -50<br>~-74 | -25<br>~-49 | 0~-24 | 0~24 | 25~49 | 50~74 | 75~99 | 100<br>~124 | 125<br>~149 | 150<br>~174 | 175<br>~199 | 合 計 |
|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------------|-------------|-------------|-------|------|-------|-------|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----|
| 回 数      |               | 1             |               | 6             | 3           | 10          | 18          | 30    | 23   | 10    | 6     | 8     | 3           | 3           | 1           |             | 122 |
| %        |               | 0.8           |               | 4.9           | 2.5         | 8.2         | 14.8        | 24.6  | 18.9 | 8.2   | 4.9   | 6.6   | 2.5         | 2.5         | 0.8         |             | 100 |

予測手法を数多く改良し、目標は  $\pm 20 \text{ cm}$  以下に予測誤差をおさめるように努めている。しかし過去の予測精度は表-7のように  $\pm 24 \text{ cm}$  以内は 56.5%,  $\pm 49 \text{ cm}$  以内は 80% である。

誤差の大きくなる原因のうち、もっとも大きいのは気圧配置の予想が実況と合わなかった場合で、気圧配置が狂うと風向・風速・吹続時間が変わり、ときには 100 cm 以上の誤差も出す。

この影響はうねりよりも風波の方が大きく、4.(3)に述べるように周期  $T < 6.5 \text{ sec}$  の風浪とみなされる場合の予測誤差は表-8のように  $\pm 24 \text{ cm}$  以内は 43.5%であり、 $\pm 49 \text{ cm}$  以内でも 66.4%で、うねりの予測に比して風波の予測がはるかに悪い。

#### (1) うねりの予測

うねりの予測には Munk のうねりの伝達図<sup>7)</sup>を用いている。うねりの波浪特性はできるだけ船舶の報告を利用しているが、船舶報告の利用できない時は、最近まで Walden<sup>8)</sup>の図を用いたが、周期を短く予測している結果が多いので、その後 Bretschneider<sup>9)</sup>の風浪発達図を用いるように改めた。

浪源の予測において、急速に移動する低気圧や台風の場合はフェッチや吹続時間の決め方でいままでも各種の提案があるが、筆者らは船舶の資料を合成して作成したモデル図<sup>10)</sup>によって今後は浪源特性を求めることにしている。

うねりの到達時間と波高は Munk のうねりの伝達図を用いていて、割合によく合うが周期は一般に実況よりも長い傾向である。また、浪源におけるフェッチがきわめて広い場合は波高が小さく、フェッチが短いと大きく出る傾向となっている。

その他、2000 km 以上離れた西経 170° 付近の浪源で 600 cm 以上の波が小名浜港において 100 cm 以上のうねりとして測得されている。

#### (2) 風波の予測

風波の予測は昭和 42 年 2 月までは Walden の三場図<sup>8)</sup>を用いてきた。Walden の三場図からの予測値は実測値に対して波高は合うが、周期は短かすぎる。図-6

(a),(b)は Walden と Bretschneider の風浪発達図を用いた場合の比較の一例で、昭和 42 年 3 月以降は Bretschneider の図を用いるように改めているが、波高は Walden の場合と大差なく、実況よりはやや高目の傾向で、周期はこの方が実測値に合うように思われる。

図-6(a) 目測値と予測値の比較

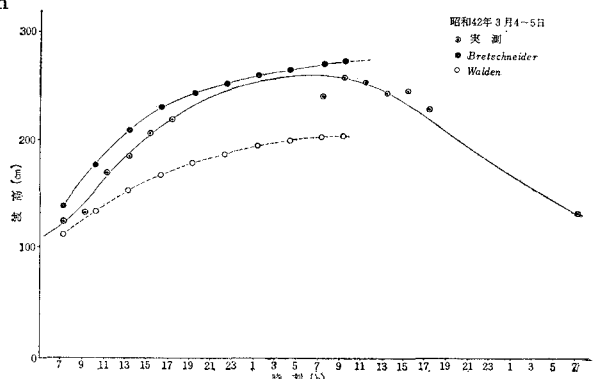
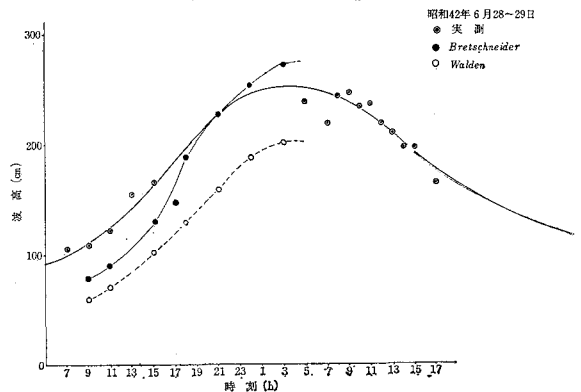


図-6(b) 目測値と予測値との比較

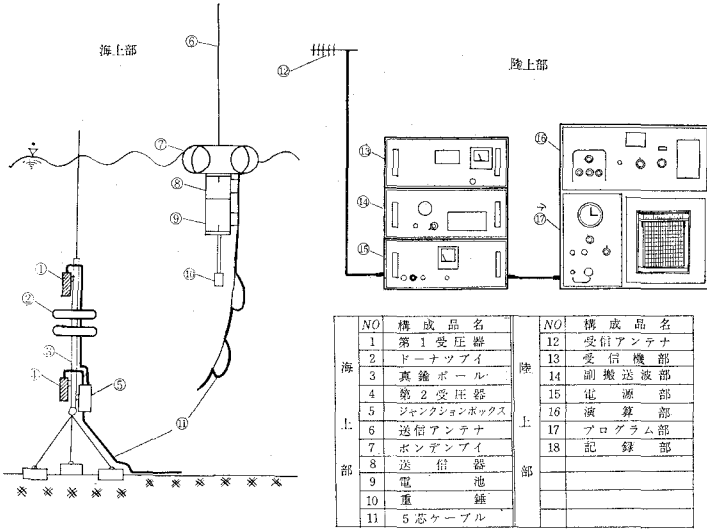


小名浜港の波浪はうねりがその大部分を占め、 $T_{1/3} < 6.4 \text{ sec}$  を風波とみなせば約 17% である。このように出現頻度は低くても、工事施工に用いる波浪予測の誤差は大きく、もっと検討を進める必要がある。

### 4. 新しい実測による小名浜港の風波特性

小名浜港における波浪観測は従来からの運研式波高計

図-7 トウジョウ式直読波浪計 (TWX-TMWR 2 型)



水深  $h$  の地点において、受圧器を適当な深さ  $d_1, d_2$  におくことによって、潮位  $h'$  の変動に対して定数  $\alpha_1, \alpha_2$  の値が直線的に変化し、かつ式 (3) の  $(r)$  の値が近似的に1になるようにして表面変化量  $a$  を連続的に取り出すことを用いている。

測定位置での海中部の受圧変動は主・副搬送電波としてテレメーター用の 400 Mc 帯にのせて送信し、陸上部で受信した FM 電波は DC 変換して自動演算のうえ、直接記録紙に波形を自記する波浪計である。

装置の主要性能は下記のようなものである。

に加えて波浪予測を用い始めた昭和 40 年 10 月からは波高桿による波浪の目視観測を併用し、さらに昭和 41 年 10 月からはトウジョウ式直読波浪計ならびに沖電気製の波向観測レーダーを用いて、波高・周期・波向観測も加えて小名浜港の波浪特性の把握につとめている。

(1) トウジョウ式直読波浪計の仕様

運研式水圧波浪計が水底での水圧変動の周期・振幅を読みとって、周期  $T$ 、水深  $h$ 、潮位  $h'$  ならびに受圧部水深  $d$  より波長  $L$  を式 (1) より求め、

$$\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 = \frac{2\pi g}{L} \tanh\left\{\frac{2\pi}{L}(h+h')\right\} \dots\dots\dots(1)$$

さらに、水圧の水頭変化量  $b$  に対して式 (2) より  $K$  を計算し、表面変化量  $a$  を求める方法によっているが、

$$a = b \times \frac{\cosh\left\{\frac{2\pi}{L}(h+h')\right\}}{\cosh\left\{\frac{2\pi}{L}(h+h'-d)\right\}} = b \times K(L, h') \dots\dots\dots(2)$$

この計算によって1波ごとに求めた  $a$  に、さらに、1.3 程度の補正定数を乗じて波高を求めるため、波高換算は膨大な労力を必要とする。

直読式波浪計は図-7 に示すように、海中のある地点に2段に受圧器を設置して、一方の受圧器の受圧量より表面波を演算に必要な係数を自動選択させ、ついで22分間同一波を2段の受圧器より同時に受圧し、自動的に表面波を演算自記せしめる波浪計で、原理は2つの受圧器の同時変圧量を  $b_1, b_2$  とするとき、式 (2) より式 (3) が得られ、

$$\alpha_1 b_1 - \alpha_2 b_2 = a \times \left( \frac{\alpha_1}{K_1(L, h')} - \frac{\alpha_2}{K_2(L, h')} \right) = a \times (r) \dots\dots\dots(3)$$

① 受圧送信部

受圧器形状 (1 段当り): 直径 60 mm, 長さ 220 mm, 重量 4 kg

送信機: 使用電波 FM 411 Mc

② 受信記録部

受信機 二重スーパーヘテロダイナ受信機, 自動待受け方式, 八木空中線

測定記録器

記録紙送り速度 1 mm/sec

記録時間 27 分/2 時間・回

記録可能最大波高 10 m

タイマー 1 回/分

傾斜信号発信装置

(5° 以上朱書 15 秒)

波浪エネルギー積分値自記装置

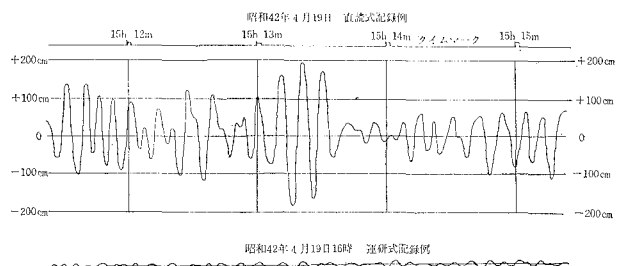
小名浜港の設置例

設置水深  $h = -12$  m, 潮位  $h' = \pm 1.5$  m, 第1受圧深さ  $d_1 = -4.5$  m, 第2受圧深さ  $d_2 = -7.5$  m, 補正定数は

表-9  $T$  と  $(r)$  との関係

| $T_{(s)}$ | 3.0  | 4.0  | 5.0  | 6.0  | 7.0  | 8.0  | 9.0  | 10.0 | 11.0 | $\infty$ |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----------|
| $(r)$     | 3.00 | 1.50 | 1.15 | 1.04 | 1.00 | 0.99 | 0.99 | 0.98 | 0.99 | 1.00     |

図-8 直読式波浪計記録例



潮位0のとき  $\alpha_1=2.99$ ,  $\alpha_2=1.99$  で与える。周期  $T$  と  $(r)$  との関係は表—9のとおりで、周期7秒以上は直読する。

また、7秒以下の短周期は自記波高にその波の周期に対応した  $(r)$  を乗じて測得している。図—8は記録の一部で、下段に運研式の同一時刻頃の記録を併載した。

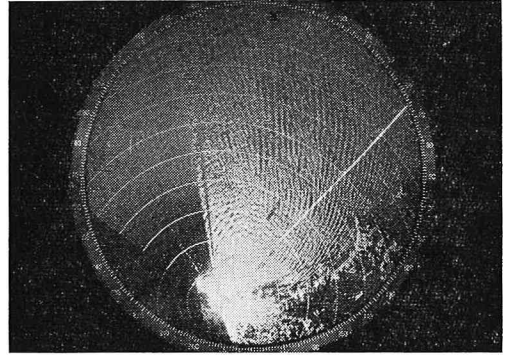
## (2) 波向観測レーダー CPH-4C の仕様と観測

小名浜港において用いている波向観測レーダーは井島が鹿島港において試作した CPH-4 A<sup>(1)</sup> の改良型で、装置の主要性能は下記のようなのである。

|         |                                                   |
|---------|---------------------------------------------------|
| 周波数     | 34 860 Mc/s ( $\lambda=8.6$ mm)                   |
| 尖頭送信出力  | 30 kW 以上                                          |
| 空中線ビーム幅 | 水平アンテナ長 2.4 m で 15°<br>垂直 15°                     |
| 空中線回転数  | 20 rpm                                            |
| パルス幅    | 0.022 $\mu$ s $\pm$ 10%<br>0.22 $\mu$ s $\pm$ 10% |
| くり返し周波数 | 4 000 c/s, 1 000 c/s                              |
| 雑音指数    | 19 db 以下                                          |
| 中間周波帯域幅 | 50 Mc                                             |
| 指示方式    | 12 吋ブラウン管 PPI 離心表示式                               |
| 距離範囲    | 0.5 km, 1.5 km, 2.5 km, 5 km, 10 km               |
| 距離分解能   | 4 m                                               |
| 最小探知距離  | 6 m                                               |
| 方位分解能   | 15°                                               |
| 映像記録カメラ | 35 mm ニコン F, 150 枚自動撮影                            |
| 撮影用制御器  | 自動 (5 分間隔 3 枚連続にて<br>20 分間 / 2 時間) 手動両用           |

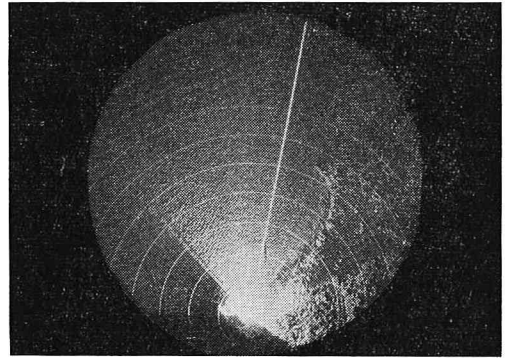
図—9 うねりの写真

(昭和 41 年 12 月 14 日 13 時  $\bar{H}_{1/3}=190$  cm  $\bar{T}_{1/3}=13.7$  sec)  
 $H \times 290$  cm  $T \times 15.1$  sec



図—10 風波の写真

(昭和 42 年 2 月 23 日 13 時  $\bar{H}_{1/3}=214$  cm  $\bar{T}_{1/3}=4.8$  sec)  
 $H \times 280$  cm  $T \times 3.8$  sec



レーダーを用いての波向観測要領は昭和 41 年 10 月以降毎日 9 h, 11 h, 13 h, 15 h (必要に応じて夜間自動撮影) に 3 秒ごとに 3 回、これを 5 分間隔で 3 回撮影し

表—10  $\bar{H}_{1/3} \geq 100$  cm 波浪の周期分布

昭 41.10.1~昭 42.3.31

| 周期<br>頻度 | 0<br>~1.4 | 1.5<br>~2.4 | 2.5<br>~3.4 | 3.5<br>~4.4 | 4.5<br>~5.4 | 5.5<br>~6.4 | 6.5<br>~7.4 | 7.5<br>~8.4 | 8.5<br>~9.4 | 9.5<br>10.4 | 10.5<br>11.4 | 11.5<br>12.4 | 12.5<br>13.4 | 13.5<br>14.4 | 14.5<br>15.4 | 15.5<br>16.4 | 16.5<br>17.4 | 17.5<br>18.4 | 18.5<br>19.4 | 19.5<br>20.0 | 計   |
|----------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----|
| 回数       |           |             |             | 4           | 10          | 5           | 3           | 5           | 13          | 22          | 17           | 17           | 12           | 9            | 5            | 1            | 1            |              |              |              | 124 |
| %        |           |             |             | 3           | 8           | 4           | 2           | 4           | 10          | 18          | 14           | 14           | 10           | 7            | 4            | 1            | 1            |              |              |              | 100 |

た9枚の写真から、あらかじめ定めた 12 の観測点の波向を読取り、各観測点ごとに平均したものを観測時における各点の波向としている。レーダー写真はうねりのみの場合は図—9のように波峰が数キロにわたって連続した状況で、きれいな縞模様で観測されるが、風波の場合は図—10のように波峰が短く乱雑であるので、レーダー観測によって風波とうねりは大体見分けることができる。

## (3) 風波特性

昭和 41 年 10 月以降の  $\bar{H}_{1/3} > 100$  cm の周期分布は表—10のように2つのピークがあり、6.5秒が境となっている。本報告では、この  $T=6.5$  sec 以下を風波として取扱ってみた。

a) 原因別気圧配置  $T=6.5$  sec 以下の波浪の原

因別波高は表—11のとおりで、

① 西高東低型の冬期の気圧配置では弱いうねりしか来襲しない。

② 出現頻度も最高波向も高いのは日本海低気圧型、

表—11 風波の原因別波高

昭 40.12.1~昭 42.3.31

| 気 圧 配 置  | 回 数 | 目測平均波高 | 目測最高波高 |
|----------|-----|--------|--------|
| 南岸低気圧    | 14  | 156    | 264    |
| 日本海低気圧   | 29  | 133    | 233    |
| 寒冷前線     | 8   | 125    | 240    |
| 台風       | 1   | 480    | 480    |
| 東高西低型    | 30  | 89     | 128    |
| 海陸風      | 40  | 82     | 144    |
| 西高東低型(冬) | 31  | 52     | 123    |

と南岸低気圧型である。

図-11 うねりの波向図

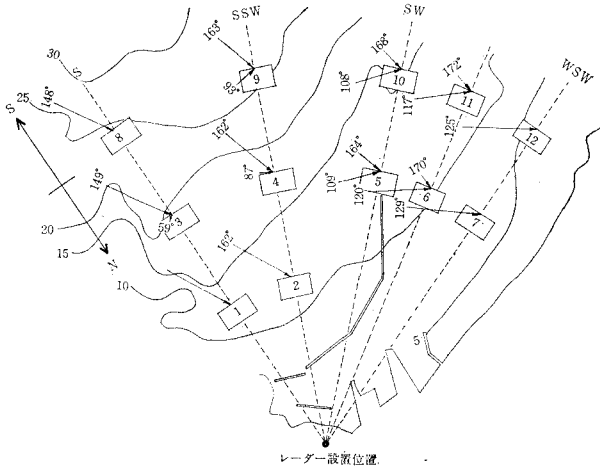
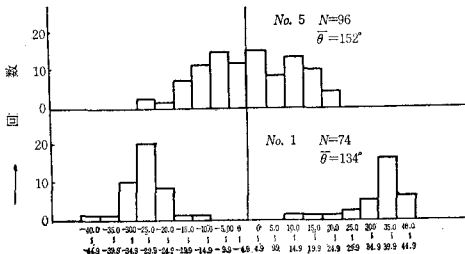


図-12 波向分布図

表-12 各地点における風波 ( $H_{1/3} > 100 \text{ cm}$ ,  $T_{1/3} < 6.5 \text{ sec}$ ) の平均波向と偏差分布

| 偏差(度) | -15.0 | -10.0 | -5.0 | 0    | 5.0 | 10.0 | 15.0 | N   | 平均波向               |
|-------|-------|-------|------|------|-----|------|------|-----|--------------------|
| 地点    | -19.9 | -14.9 | -9.9 | -4.9 | 4.9 | 9.9  | 14.9 | (回) | $\bar{\theta}$ (度) |
| 1     | 1     |       | 1    | 6    | 6   | 4    |      | 18  | 165                |
| 2     |       |       |      | 8.5  | 8.5 | 1    |      | 18  | 170                |
| 3     | 1     |       | 2    | 5.5  | 3.5 | 6    |      | 18  | 163                |
| 4     |       |       | 3    | 7    | 7   | 1    |      | 18  | 168                |
| 5     |       |       | 3    | 4.5  | 9.5 | 1    |      | 18  | 172                |
| 6     |       | 1     | 2    | 4.5  | 6.5 | 2    |      | 17  | 178                |
| 7     | 1     | 2     |      | 3.5  | 5.5 | 2    | 1    | 15  | 181                |
| 8     |       | 1     | 1    | 5    | 5   | 4    |      | 16  | 163                |
| 9     |       | 1     | 1    | 5.5  | 5.5 | 3    |      | 16  | 167                |
| 10    |       |       | 1    | 6    | 9   |      |      | 16  | 173                |
| 11    | 1     | 1     | 2    | 2.5  | 6.5 | 2    | 1    | 16  | 176                |
| 12    | 1     |       | 6    | 2    |     |      | 2    | 11  | 183                |

## b) 波 向

① うねりと考えられる  $H_{1/3} > 100 \text{ cm}$ ,  $T_{1/3} > 6.5 \text{ sec}$  の場合は、図-11 のように海岸近くの 1, 2, 7, 12 の測点では、図-12 の測点 1 のように、平均波高を中心とした狭い方向に 1 グループとなっているが、測点 5, 6 では測点 5 のように、2 方向に卓越方向がほぼ同程度の頻度でわかれている。過去の推測においては沖波向がどの方向であっても、港口波向は屈折効果により、 $140^\circ \sim 200^\circ$  の波向となると推定していたが、本調査でうねりでも  $90^\circ$  以下の来襲波向を観測しているのに注目したい。

② 風波と考えられる  $H_{1/3} > 100 \text{ cm}$ ,  $T < 6.5 \text{ sec}$  の

場合の頻度は表-12 のように波向の変動も少なく図-13 に示すように大体  $170^\circ$  方向前後である。

c) 波高・周期(目視観測の場合) 目視観測の波浪桿は図-1 に示す位置に設置して、昭和 40 年 10 月以降毎日 7 h, 9 h, 11 h, 13 h, 15 h, 17 h に小名浜港工事事務所に併置した観測塔より倍率 20 倍の双眼鏡にて 20 分間中の高い波 20 波の目視観測を行なって  $H_{\max}$ ,  $H_{\text{mean}}$ ,  $T_{\text{mean}}$  を求めている。

表-13 と既往調査の表-2 と対比すると

① 既往  $H_{1/3}$  は 6.4 秒以下の周期の波がほとんど観測されていないのに対し、目視観測では、①全体の 12.2%, ②特に  $H_{1/3} > 100 \text{ cm}$  の場合は全体の 13.2% を測得している。

② 台風、または低気圧の接近にともなう風波では、 $T_{1/3}$  が 5 秒程度で、 $H_{1/3}$  が 5 m 以上の高波が測得されている。

このように既往調査で把握していない 6.4 秒以下の短

図-13 風浪の波向図

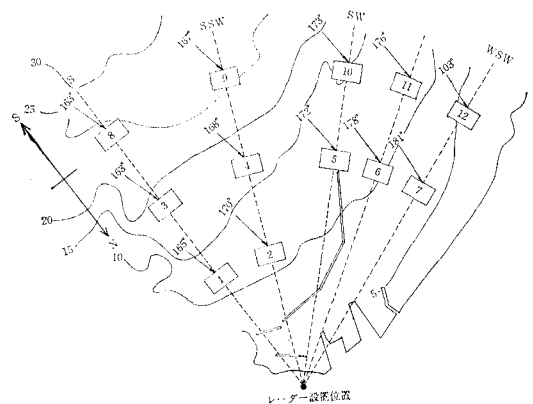


表-13 周期別目測波高出現回数

昭 40.10.1~昭 42.3.31

| $H_{1/3}(\text{cm})$  | 0~49 | 50~99 | 100~149 | 150~199 | 200~299 | 300~399 | 400~499 | 500~599 | 合計    | %    |
|-----------------------|------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|------|
| $T_{1/3}(\text{sec})$ |      |       |         |         |         |         |         |         |       |      |
| ~1.4                  | 40   | 4     | 1       |         |         |         |         |         | 45    | 12.2 |
| 1.5~2.4               | 22   | 14    | 7       | 1       |         |         |         |         | 44    |      |
| 2.5~3.4               | 7    | 32    | 5       | 1       |         |         |         |         | 45    |      |
| 3.5~4.4               | 4    | 20    | 13      | 3       | 2       |         |         |         | 42    |      |
| 4.5~5.4               | 5    | 35    | 13      | 11      | 8       | 4       | 1       | 2       | 79    |      |
| 5.5~6.4               | 8    | 43    | 15      | 8       | 11      | 1       |         |         | 86    |      |
| 6.5~7.4               | 14   | 96    | 21      | 10      | 4       | 0       |         |         | 145   | 87.8 |
| 7.5~8.4               | 55   | 246   | 48      | 8       | 7       | 1       |         |         | 365   |      |
| 8.5~9.4               | 119  | 453   | 105     | 36      | 17      |         |         |         | 730   |      |
| 9.5~10.4              | 122  | 333   | 137     | 31      | 13      | 2       |         |         | 638   |      |
| 10.5~11.4             | 48   | 155   | 72      | 35      | 15      | 1       |         |         | 327   |      |
| 11.5~12.4             | 13   | 52    | 43      | 15      | 3       | 1       |         |         | 127   |      |
| 12.5~13.4             | 17   | 23    | 17      | 12      | 3       |         |         |         | 72    |      |
| 13.5~                 | 3    | 7     | 10      | 24      | 6       |         |         |         | 50    |      |
| 合 計                   | 477  | 1513  | 507     | 195     | 90      | 10      | 1       | 2       | 2795  |      |
| %                     | 17.1 | 54.5  | 18.1    | 7.0     | 3.2     | 0.1     | 0.0     | 0.0     | 100.0 |      |

図-14 昭和42年4月20日9時天気図

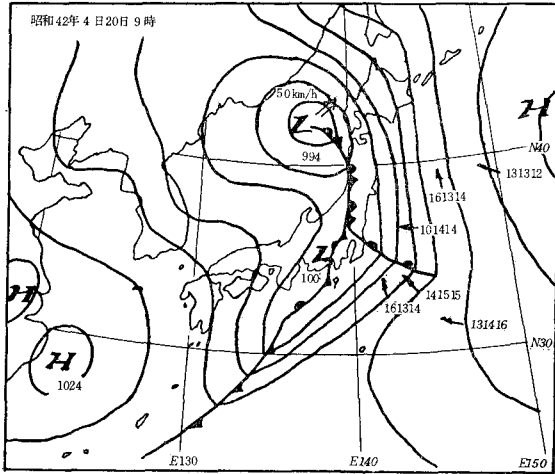


図-17 風波の減衰（井島）

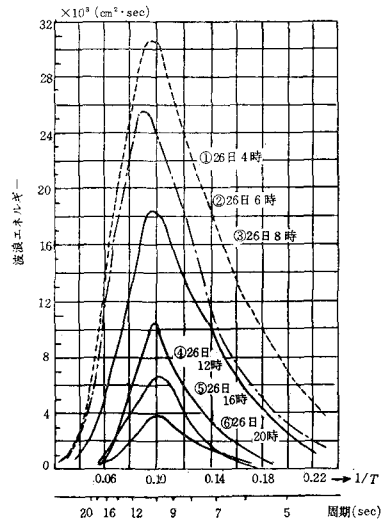
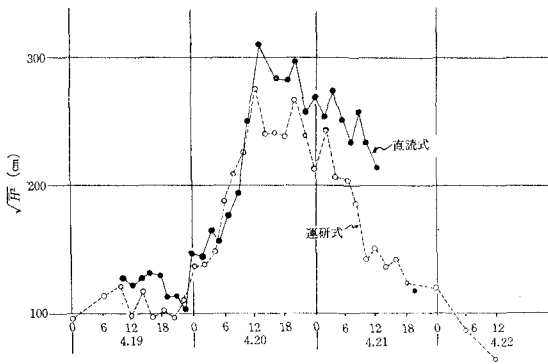
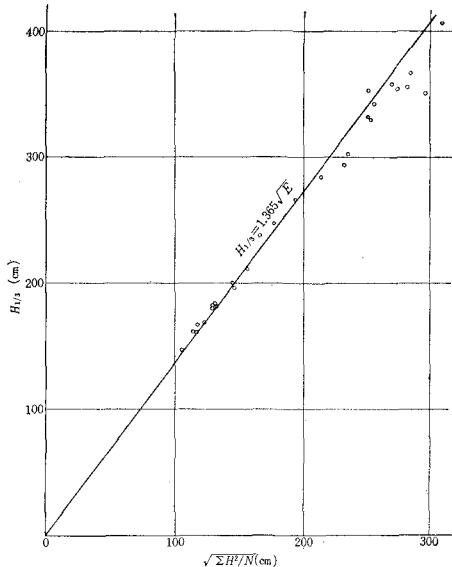
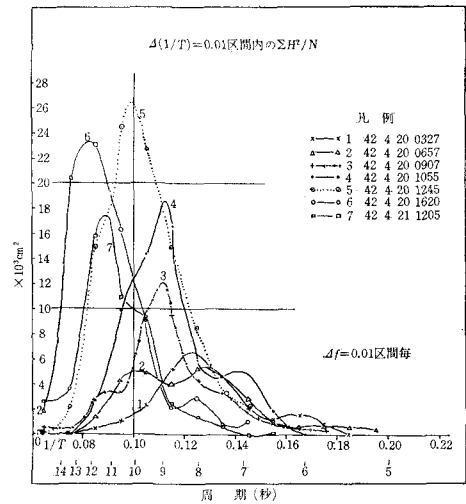
図-15  $\sqrt{H^2}$  の変化図-16  $\sqrt{H^2}$  と  $H_{1/3}$  との関係

図-18 波浪エネルギー分布図



周期の風波がかなり存在し、施工上波浪予測において見逃すことのできない  $H_{1/3} > 1.0 \text{ m}$  が 10% 以上も観測されている。

#### (4) 南風による風波発達のケース・スタディー

##### a) 昭和42年4月20日における例

日本海で990 mbに発達した低気圧に吹き込む南風による場合で、図-14は20日9時の天気図で、その後低気圧の主力は日本海をNE進して北海道へ向かったが、別の低気圧は山陰から関東を経て三陸沖へ向かい、20日12時には中心が小名浜付近をすぎた。図-15はこの時の風波の  $\sqrt{H^2}$  の変化を直読式と運研式のそれぞれについて与えている。

図-19 風波初期のエネルギー分布図

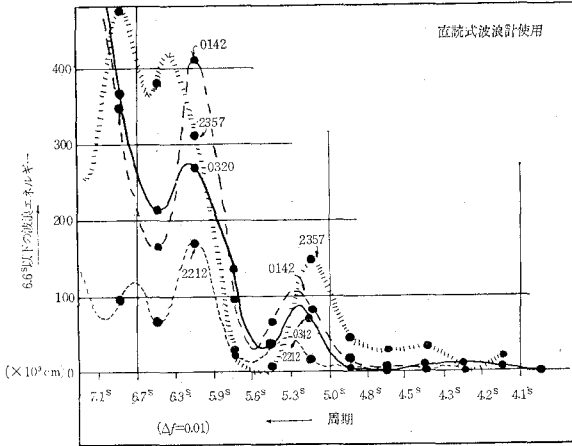
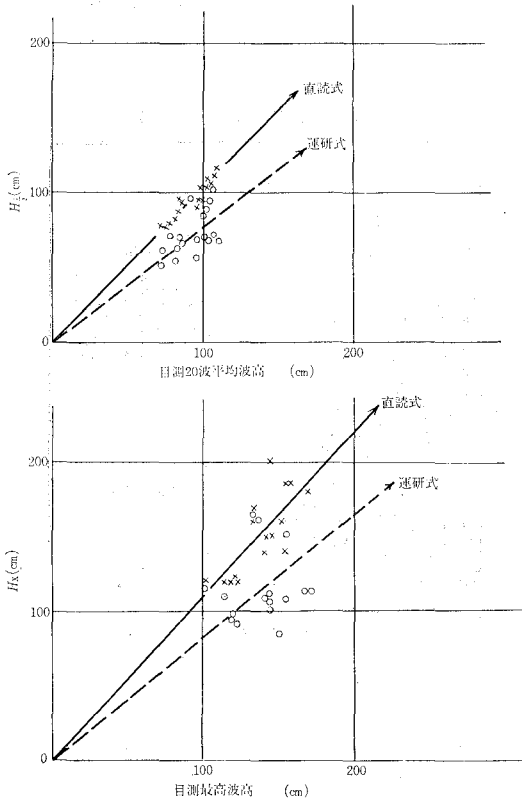


図-20  $H_X$ ,  $H_{1/3}$  と目測値の相関図



20日0時頃より風波が発達しはじめ、正午には  $\sqrt{H^2}$  で 300 cm をこえた。

このときの  $\sqrt{H^2}$  と  $H_{1/3}$  との関係は 図-16 に示すように

$$H_{1/3} = 1.365 \sqrt{E}$$

$$\therefore H^2 = E \dots\dots\dots (4)$$

となっている。

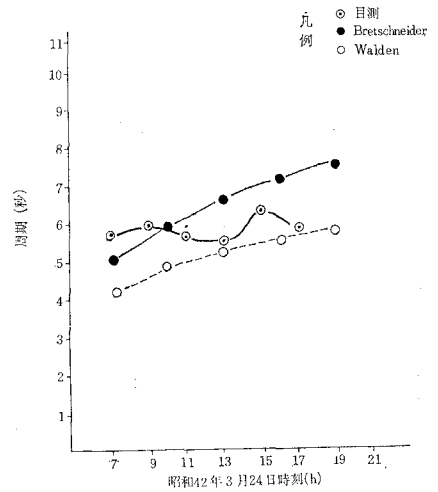
小名浜港における風波の発達・減衰時の周波数別のエ

表-14 風浪発達時の波高例 (cm)

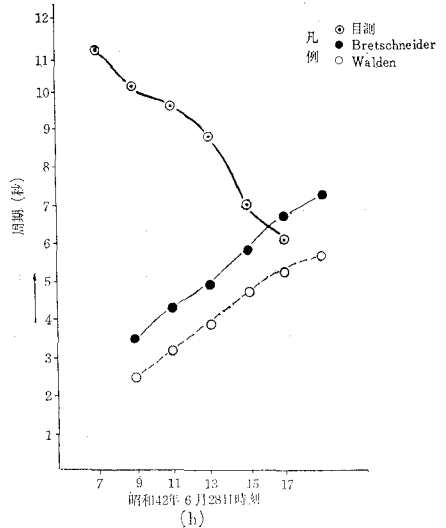
| 周期      | 6.3  | 5.9  | 5.6  | 5.3  | 5.0  | 4.8  | 4.5  | 4.3  | 4.2 | 4.17 |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|
| 日時分     | ~6.6 | ~6.2 | ~5.8 | ~5.5 | ~5.2 | ~4.9 | ~4.7 | ~4.4 |     |      |
| 42.4.19 |      |      |      |      |      |      |      |      |     |      |
| 1842    | 60   | 80   | 32   | 25   | 52   | 32   | 31   |      | 33  |      |
| 2027    | 88   | 99   | 75   | 42   | 47   | 32   | 23   |      | 44  |      |
| 2212    | 111  | 113  | 76   | 82   | 54   | 49   | 43   | 31   | 37  |      |
| 2357    | 170  | 138  | 160  | 80   | 106  | 117  | 91   | 175  |     | 66   |
| 42.4.20 |      |      |      |      |      |      |      |      |     |      |
| 0142    | 224  | 153  | 132  | 100  | 85   | 130  | 19   | 27   |     | 54   |
| 0327    | 167  | 137  | 158  | 108  | 103  | 72   | 34   | 57   | 64  | 34   |

図-21 目測値と予測値の比較

(a)



(b)



ネルギーの解析については、台風時について 図-5、図-17 の井島の報告があるが、本例のエネルギー分布は 図-18 で、7時頃までは7秒~10秒の間に広くエネルギーが分布しているが、20日9時よりしだいに9秒の波の方にエネルギーが集中発達しはじめ、発達と共に 10

秒にピークは移っている。その後、波は減衰に入ると、12 秒位の波がながくだらだらと残っている。

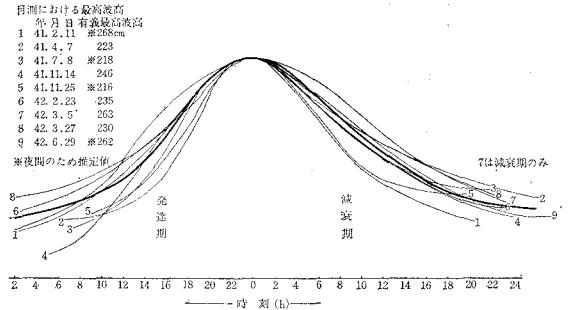
図-19 は風波発達初期の 6 秒以下のエネルギー変化で、19 日 22 時より急増しはじめ、20 日 0 時から 2 時にかけて最高に達しており、その後、6.7 秒以上の周期帯へエネルギーの増大は移行しているのがみられる。この発達途次の  $H_{1/3}$  は 5.9~6.2 秒において、表-14 に示すように 150~250 cm の高波が測得されている。また、運研式と直読式の記録より、4 月 22 日~26 日の観測値をとって  $H_{1/3}$ 、 $H_X$  と目測平均とを比較すると図-20 となり、直読式と目測平均とは運研式よりはるかによい相関性を示し、とくに  $H_{1/3}$  はきわめてよい一致をしている。

b) 風波予測のケース・スタディー 昭和 42 年 3 月 4~5 日と同年 6 月 28~29 日の場合についてはいずれも風浪がもっともよく発達する日本海低気圧型の場合で、そのときの予測は図-6 (a), (b) のように Walden 法よりも、Bretschneider 法の方が目測値とよく近似している。

図-21 (a), (b) はこのときの周期について、目測と Walden 法および Bretschneider 法の予測値との比較で、あまりよい対応はない。表-15 は目測周期である。これは古い波の周期が卓越していたり、風波の目測がむづかしいためと考えられる。

しかし、風波発達前の古いうねりや、減衰期のうねりの 28 日 11 時および 29 日 13 時の波浪について、レ

図-22 風浪の盛衰図



ーダー写真の中より深淺図と対比しながら同じ水深上の波長  $L$  の前者は 10 波、後者は 20 波を読み取り、その平均波長  $L$  を使って、微小振幅波の波速  $C$  の式を用いて換算周期  $T'$  を算出し、目測と比較した結果、表-16 のようにきわめてよい一致が得られた。このことからうねりの場合は目測周期値もかなり精度がよいと思われる。

また、風波の時間的変化について、図-22 のように、最近半年間における主なる風波についてピークを合わせて図化すると、大体同じような傾向をたどっている。

## 5. 結 語

以上、筆者らは目測、直読波浪計、レーダーを用いた新しい観測によって、波浪予測のデータとして用いた運研式の記録の検討を行ない、目測法が波高測定においてはかなり信頼性の高いことを認識できるとともに、うねりの場合には周期もよい結果を与えてくれることを知り得たが、夜間観測が困難な欠点がある。小名浜港では直読式波浪計を用いることによって連続観測体制をととのえ、波浪エネルギーからも波浪を統計的に究明してゆけるようになった。

また、レーダーの利用は波向特性をかなり把握できるとともに、波長・波速も直接測得できることを示したが、雨や霧の日は映像が出にくく、荒天時の観測に未解決な問題を残している。

本報告までには直読式波浪計を使用開始してからの期間が短く、そのため、風浪の盛衰の大きいケースが少なく、わずかのケース・スタディーしかできず、波浪エネルギーバンドにおける周波数の移行についても、その特性の概要を知るにとどまったが、引続き直読式波浪計とレーダーを用いた連続観測を行なってゆき、うねりの究明とその予測法はかなり前進させ得ると思われる。

しかし、風波は今回の解析により、うねりよりはるかに実況が複雑で究明がむづかしく思われるので、今後は発生原因別にケース・スタディーを重ねることによって研究を進めてゆきたいと考えている。

表-15 目測周期

| 年月日                 | 時刻 | 周期<br>0.5 | 1.5 | 2.5 | 3.5 | 4.5 | 5.5 | 6.5 | 7.5 | 8.5 | 9.5  | 10.5 | 平均<br>(sec) |
|---------------------|----|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|-------------|
|                     |    | 1.4       | 2.4 | 3.4 | 4.4 | 5.4 | 6.4 | 7.4 | 8.4 | 9.4 | 10.4 |      |             |
| S42<br>March<br>4th | 7  |           |     |     | 4   | 6   | 6   | 1   |     |     |      |      | 5.5         |
|                     | 9  |           |     |     | 2   | 6   | 7   | 1   |     |     |      |      | 5.8         |
|                     | 11 |           |     |     | 3   | 10  | 4   |     |     |     |      |      | 5.4         |
|                     | 13 |           |     |     | 6   | 5   | 7   | 1   |     |     |      |      | 5.3         |
|                     | 15 |           |     | 1   |     | 4   | 8   | 2   |     |     |      |      | 6.1         |
|                     | 17 |           |     | 1   | 3   | 4   | 7   | 2   |     |     |      |      | 5.7         |
| S42<br>June<br>28th | 7  |           |     |     |     |     |     |     |     | 4   |      | 14   | 11.0        |
|                     | 9  |           |     |     |     |     |     |     | 1   | 8   | 4    | 7    | 10.1        |
|                     | 11 |           |     |     |     |     |     |     | 3   | 5   | 10   | 2    | 9.5         |
|                     | 13 |           |     |     |     | 1   |     | 3   | 4   | 5   | 6    | 1    | 8.7         |
|                     | 15 |           |     |     |     | 2   | 4   | 7   | 5   | 2   |      |      | 6.9         |
|                     | 17 |           |     |     |     | 5   | 9   | 5   | 1   |     |      |      | 6.0         |

表-16 レーダー観測波長と目測周期の相関性

| 日 時   | 波長    | $n$<br>波数 | $d$<br>水深 | $C = (gL/2\pi \tanh \frac{d}{L})^{1/2}$ | $C' = L/T$ | $T$<br>目測周期 | $T' = L/C$ |
|-------|-------|-----------|-----------|-----------------------------------------|------------|-------------|------------|
| 日 時   | m     |           |           | m/s                                     | m/s        | s           |            |
| 28 11 | 85.9  | 10        | 10        | 9.14                                    | 9.04       | 9.5         | 9.4        |
| "     | 100.9 | 10        | 15        | 10.76                                   | 10.62      | 9.5         | 9.4        |
| "     | 112.2 | 10        | 20        | 11.89                                   | 11.82      | 9.5         | 9.4        |
| "     | 120.4 | 10        | 25        | 12.74                                   | 12.68      | 9.5         | 9.5        |
| 29 13 | 91.5  | 20        | 10        | 9.24                                    | 8.80       | 10.4        | 9.9        |
| "     | 106.1 | 20        | 15        | 10.85                                   | 10.20      | 10.4        | 9.8        |
| "     | 119.5 | 20        | 20        | 12.07                                   | 11.49      | 10.4        | 9.9        |
| "     | 141.7 | 20        | 25        | 13.34                                   | 13.63      | 10.4        | 10.6       |

## 参 考 文 献

- 1) 小名浜港：「小名浜港の風と波」，昭和 39，40 年.
  - 2) 井島・高橋・中村：「波高計による波浪の観測」(第 8 報)  
運研技報 6.8, 1956.8.
  - 3) 小曾納：「小名浜および付近の南風について」
  - 4) 小名浜港：「小名浜港の波向」昭和 41 年 1 月.
  - 5) 吉村：「ケーソン防波堤の急速施工例」土木学会 51.9  
p. 41~47.
  - 6) 吉村・内田：「防波堤工事に対する 波浪予報の導入」港  
湾 43.12 p. 24~30.
  - 7) Sverdrup. H.U., Munk. W.H. : "Wind, Sea, and  
Swell, Theory of relations for forecasting" U.S.  
Hydrogr. Office Pub. No. 601, 1947.
  - 8) H. Walden : "Die Winderzeugten Meereswellen"  
1958.
  - 9) Bretschneider, C.L. : "The generation and decay of  
wind waves in deep water", T.M.G. Un, 33.
  - 10) 小名浜港：「港湾工事における波浪予測」昭 41.12.
  - 11) 井島・高橋・佐々木：「波向観測等におけるレーダーの  
応用」第 11 回海岸工学講演集，昭 39.11, p. 88~91.
-