

長周期波算定のための異常データ処理における アルゴリズム開発

DEVELOPMENT OF A METHOD TO DETECT OF OUTLIER FOR CALCULATION OF LONG PERIOD WAVES

北村康司¹

Yasushi KITAMURA

¹正会員 博(工) 株式会社ソニック (〒190-1222 東京西多摩郡瑞穂町箱根ヶ崎東松原19-6)

Long period waves sometimes terminate the cargo handling and cause the break of mooring ropes in Japanese several ports. The reason why long period waves with small amplitudes cause such damages is the resonance with natural period of mooring system. Long period waves are calculated by ocean wave power spectrum. In the case that outlier is included in observed data, estimated long period waves from wave power spectrum are outlier. The purpose of this study is to develop for stable consecutive observation of long period waves. It is difficult to find all of outlier by using the standard method. In this study, a new algorithm improved the standard method. As a result, in the case that outlier is included in observation data, it is possible that the outlier can be detected by the proposed algorithm.

Key Words : skewness, kurtosis, long period waves, DWM, outlier

1. はじめに

近年、沿岸域における大規模構造物の建設にともない、詳細な海洋情報の必要性が求められている。しかし、海象観測は様々な観測機器によって独立に行われることが多く、また観測点の制約などもあり、同一地点での多項目にわたる定常観測は困難である場合が多い。そのため単体センサによる精度良い波浪や波向、潮位、潮流を定常的に観測できるセンサの開発が望まれていた。このような背景のもと海象計 (DWM)^{1), 2)} は、波向観測の標準化を目指して開発され、わが国の沿岸域に多数設置されている。海象計は、超音波センサと水圧センサによる水位変動測定と超音波のドップラ効果を応用した多層式流速計の機能を有している。現在では幅広いユーザーに提供されており、その使用目的は近年多様化している。これに伴い、より安定した観測を行うための改良が継続的になされてきた³⁾。特に水中超音波を利用した波浪観測における課題として、砕波や航行船舶の影響などによる気泡混入時の異常データがあげられる。この異常データによって、正確な波浪緒元が得られなくなる。特に波浪のパワースペクトルから求められる長周期波高に異常データがおよぼす影響は大きい。

長周期波高は、港内が静穏であるにもかかわらず外洋から港湾に侵入し船体動揺を引き起こし係留索

の破断による荷役中止が各港湾で報告されている^{4), 5)}。そのため船舶の入港管理や作業においては、長周期波高による入港管理を行っている港湾もいくつか存在する。そのため、船舶などの入港において長周期波高は非常に重要な要素であり、信頼性の高い安定した観測が求められる。波浪のパワースペクトルより求められる長周期波高において、波形に異常データが混入した場合、スペクトルのエネルギーが大きくなり異常値を出力する恐れがある。そのため、長周期波高を計算するための前処理(異常データ処理)は非常に重要であり、適切な処理を行うことによって信頼性の高い安定した連続観測が可能となる。海象観測データにおける異常データ処理手法については、いくつか提案されており、詳細については、次節で述べることとする。

本研究では、現在海象計で用いている異常処理データの改良を行い長周期波高の安定した連続観測を目的とした異常データ処理手法を開発し、その検討を行った。

2. 異常データ処理アルゴリズムについて

波浪緒元は、通常 20 分間の水位変動記録から算出され、海象計の超音波センサで観測される水位変動の波形記録には、異常データ(雑音)や波浪とは異

なる周期をもつ各種波動現象が同時に観測される。このように様々な成分をもつ表面波(波形記録)から波浪成分を取り出して、波浪緒元を計算するための前処理(異常データ処理)について検討する。

(1) 従来のアルゴリズムについて

海象観測データにおける異常データ処理手法については、いくつか⁹⁾提案されている。本研究では現在海象計で用いている手法について詳細な導出方法について述べることにし、他の手法についての詳細な導出方法については、解説書⁹⁾を参照されたい。

図-1 に、現在海象計で用いている異常処理手法を手法 1 としフロー図を示す。まず② 超音波で観測された水位変動(表面波データ)の 20 分データ $x(i)$ から欠測以外のデータを対象として、2 次曲線を当てはめそれを潮位のトレンドとし、元のデータ $x(i)$ からトレンドを差し引く。③ 観測された表面波データの標準偏差の 2 倍以内のデータから平均値を求め、その平均値を差し引いたデータから平均周期を求め t_m とする。また、表面波データの標準偏差の 2.4 倍を x_m とする。④ 一定値が 5 秒以上継続する場合は異常値とみなす。⑤ ②、④ で処理されたデータに対して、(1) 式、(2) 式、(3) 式のそれぞれの絶対値が設定した閾値を超える場合は異常値と判断する。図中⑤ で用いられる計算式および係数を以下に示す。

$$|x(i)| > x_m \times cof_1 \quad (1)$$

$$|x(i+1) - x(i)| > 2\pi(dt/t_m)x_m \times cof_2 \quad (2)$$

$$|x(i+1) - 2x(i) + x(i-1)| > 2\pi(dt/t_m)^2 x_m \times cof_3 \quad (3)$$

ここで、 $x(i)$ は波形データ、 dt はサンプリング間隔、係数 $cof_1=5.0$ 、 $cof_2=6.0$ 、 $cof_3=30.0$ である。

⑥ ③～⑤で欠測が 2 秒未満なら線形補間を行う。
⑦ 最後に処理されたデータから歪度(skewness)、尖鋭度(kurtosis)、有義波高に対する最高波高の比を計算し、異常値判定を行うものである。ここでは、歪度 0.4、尖鋭度 4.0、波高比 2.3 を超えるものに関しては異常値とし欠測として扱う。

二つ目は、図-1 中② のトレンド除去後の 20 分観測データに対して標準偏差を計算し、標準偏差の 6 倍以上の値を欠測とする。次に正常と判断されたデータに対し再び標準偏差(σ)とピークツーピーク周期の平均値周期(T)を計算する。(4)式の絶対値が設定した閾値を超えると異常値と判定し欠測処理を行う。最後に処理されたデータから図-1 中⑦ と同様の異常値判定を行い、条件を超えた場合は欠測とする。

$$|x(i+1) - x(i)| > 2\pi(dt/T)\sigma \times 4.46 \quad (4)$$

三つ目は、橋本⁹⁾により提案された二つ目の手法の簡易版である。まず、異常に大きな値および図-1 中② のトレンドを除いた 20 分観測データから標準偏差および一階微分の標準偏差を計算する。次に各標準偏差の 6 倍以上を異常データと判断する。ここで異常データが検出された場合、この異常データ取り除いたデータを用いて各標準偏差を再計算し、再度異常データの検出を行う。最後に得られた観測データより図-1 中⑦ と同様の異常値判定を行う。

現在海象計で用いている手法は、他の 2 つの手法と比較して異常データの判定に対して緩い基準を設定している。これは、閾値の条件を厳しくすることで正常なデータに対しても異常データとして処理することを避けるためである。また異常データを完全に除去することは自動処理だけでは難しく、最終的には解析者が目視による判断をする必要がある。そのため、緩い基準を設定することで、解析者が目視によって異常データを判別することを主としている。

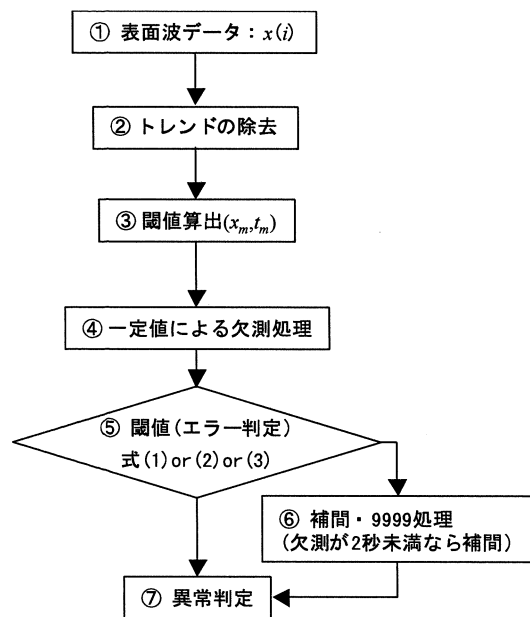


図-1 異常データ処理の流れ(手法 1)

(2) 従来のアルゴリズムの検討

図-2 に検討に用いた海象計の超音波で観測された表面波の経時変化の波形を示す。データのサンプリング間隔 dt は 0.5 秒である。図より、20 分～40 分の間でほとんどのデータが異常データとなっており、その前後では異常データはほとんど見られないことがわかる。このようなデータに対して現在用いている異常データ処理(手法 1)を適応し、どの程度異常データが検出できるか検討を行った。

図-3 に処理方法の模式図を示す。図-3 は、データ処理を 20 分ずつ更新しながら処理を行う様子を示している。このときの検出できた異常値の個数は 0 分～20 分で 0 個、20 分～40 分で 8 個、40

分～60分で0個となった。図-2の表面波に着目すると20分～40分ではほとんどのデータが異常データと思われるのに対して、手法1の結果は異常データが8個と少ない結果となった。そこで、手法1についてももう少し詳細な検討を行った。その処理方法の模式図を図-4に示す。図-4では、最初0分～20分までの2400データに対して異常処理を行い、その後1分ずつデータを更新しながら処理を行う様子を示している。その結果を図-5(a), (b)に示す。図-5中(a)に検出できた異常データの個数を示し、(b)に閾値の基準の一つとなる x_m の値を示した。横軸は経過時間を示し、図-2の観測データを図-4に示した模式図に従い20分間ずつ処理したときの中央値を示している。つまり図-5の横軸10分は、図-2における0分～20分間のデータについて処理を行った結果であり、30分は20分～40分について処理を行った結果である。図-5(a)より最初の10分値では異常データは検出されておらず、その後徐々に異常データの個数は増大し、30分では、異常データがほとんど検出されていない。図-5(a)の横軸30分値の処理は、図-2における経過時間20分～40分を示しており、この期間は最も異常データが多いことが図-2よりわかる。このことから手法1では、このようなデータに対して異常データを検出できない結果となっている。

次に図-5(b)の閾値の条件の一つである x_m について着目すると異常データがない10分では閾値 x_m の値は50cm前後であることがわかる。その後、異常データの増大とともに、 x_m の値も大きくなり、30分では x_m の値がもっとも大きい値を示している。その後、 x_m の値は徐々に減少し50分では再び50cm前後となっている。図-2で示した表面波に着目し、20分～40分間の異常データを取り除くと x_m は、ほぼ一定であることが予測される。このことから、異常データが多く含まれる場合、閾値の条件となる x_m の値が大きくなり手法1では異常データを適切に検出できない事例が存在することがわかる。ただし、手法1では先に述べたように異常処理後の波形が|歪度|0.4と尖鋭度4.0を超えると、そのデータから算出される代表波高は異常データ(図-1, ⑦)とし、水圧データによる補間を行っている。これは、表面波のデータに対し、検出されない異常データが含まれていた場合でも、歪度と尖鋭度によって判別を行うものである。しかし、この手法では観測データに対し異常値がわずかであっても、その異常値によっては歪度と尖鋭度は大きな値を示す場合があり、その場合には超音波で観測された有効なデータが利用できない。そこで、このような問題を解決するために、手法1に対して異常値を検出したとき(図-1, ⑦)にのみ、閾値を変更(図-1, ⑤)するような異常処理の改良を試みた。

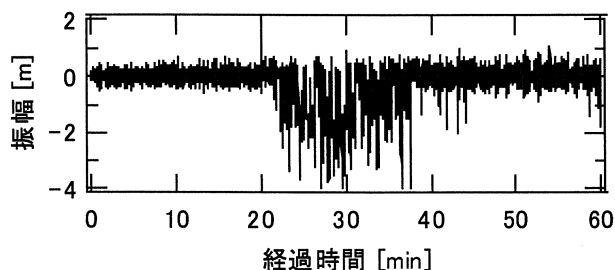


図-2 異常データを含んだ表面波の経時変化(2008/2/24)

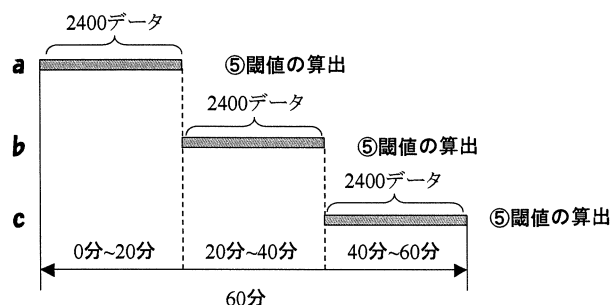


図-3 データ処理の模式図(20分更新)

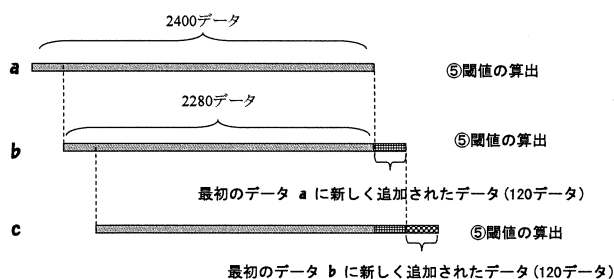
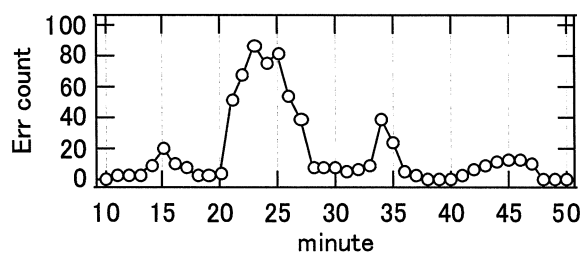
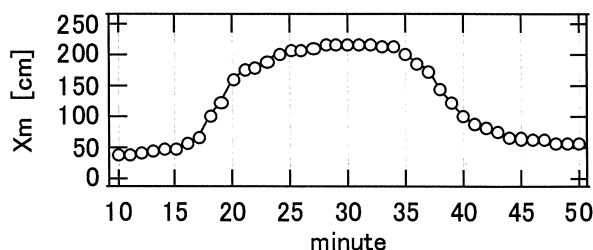


図-4 データ処理の模式図(1分更新)



(a) エラー個数の経時変化



(b) x_m の経時変化

図-5 手法1による結果

3. 新しいアルゴリズムの検討および考察

(1) 新しいアルゴリズムについて

現在のアルゴリズムに対する改良案としてはいくつか考えられる。具体的には、手法 1 における図-1中③で算出される x_m , t_m の値について前回の値と比較して著しく異なっていた場合、前回算出された x_m , t_m の値を用いる手法。また、連続観測を行っている場合、20 分観測データを 1 分ずつ移動させながら処理を行い、一度異常データと判定されたデータは用いないなどである。しかし、ここで上げた手法では、図-2 で示した 20 分更新による処理方法や 1 時間に 1 回の観測を行う間欠動作の場合には適応が難しいなどの問題点が上げられる。

そこで本研究では、現在海象計で用いている手法 1 のアルゴリズムと同様に間欠動作にも適応可能なアルゴリズムの開発を行った。図-6 にそのフロー図を示し手法 2 とした。その閾値の条件として新たに歪度 (*skew*) と尖鋭度 (*krt*) を設定し、その条件を満たすように *cof* の係数を徐々に小さくし、繰り返し計算を行うものである。具体的な手順は、ii) まず表面波 $x(i)$ に対して手法 1 の処理(③~⑤)を行う。iii) 次に歪度と尖鋭度を算出する。iv) 次に歪度と尖鋭度が設定した閾値を満たさない場合、再度手法 1 の処理(③~⑤)を行い、歪度と尖鋭度を算出する。v) iv で算出した歪度と尖鋭度が設定した条件を満たさなければ *cof* の係数を vi に従い小さくし、ii で再度手法 1 (③~⑤) で計算を行い、条件を満たすまで繰り返し計算を行うものである。ここで繰り返し計算の回数は 15 回までとした。これは繰り返し計算が無限となることを回避するためである。また、*cof*₁ および *cof*₂ は 1 を下回らないものとする。iii および iv の歪度と尖鋭度の設定条件として、 $|\text{歪度}| < 0.6$ 、尖鋭度 < 6.0 とした。歪度と尖鋭度の設定条件の妥当性については、次節以降で述べることとする。

(2) 新しい(手法2)におけるアルゴリズムの検討

手法 2 において閾値の条件である歪度と尖鋭度について客観的な基準はない。しかし、歪度に関しては多くの場合が正で、浅海域では砕波付近では 2.0 を超す事があり、砕波帯外で 1.0 ~ 1.5 程度⁷⁾、深海域で 0.33 ± 0.21 ⁸⁾ との報告がある。尖鋭度に関してはほとんどの場合が 3 以上で、砕波帯付近で 10、砕波帯外では最大でも 6 程度⁷⁾ である。一般的には 3.7 ± 0.7 程度との報告もある⁸⁾。

海象計の設置水深は概ね 30m ~ 50m 程度であることから、手法 2 における歪度と尖鋭度の閾値は 0.6 と 6.0 としてまず計算を行い、アルゴリズムの妥当性の検討を行った。

図-7 に手法 2 の結果を示す。図-7中(a)に検出

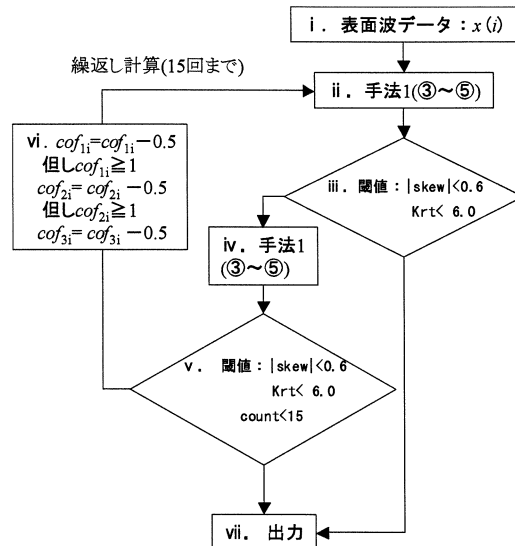
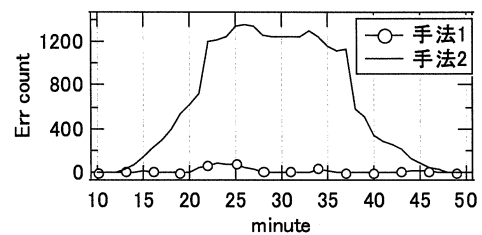
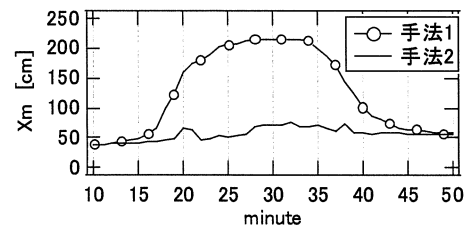


図-6 提案する異常データ処理のフロー(手法 2)



(a) エラー個数の経時変化



(b) x_m の経時変化

図-7 手法2による結果

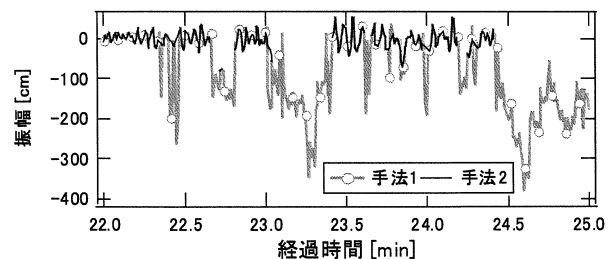


図-8 手法 1 と手法 2 の異常データ除去後の波形

できた異常データの個数を示し、(b)に閾値の基準となる x_m の値を示した。図中には手法 1 の結果も合わせて示した。図-7(a)より異常データと判別できた個数は徐々に増大し、25 分 ~ 35 分の間で最も多く、その後、徐々に減少していく様子が分かる。この異常データの個数は図-2 の波形データの

20 分～ 40 分で見られる異常波形とよく対応しており、手法 1 では検出できない異常データを検出したこと示している。また、図-7 (b) の x_m についても 50cm 前後とほぼ一定となっており、0 分～ 20 分の異常データ混入前と同等の値を示している。最後に図-8 に手法 1 と手法 2 の異常データ除去後の波形を示す。手法 2 の波形は手法 1 と比較して異常データをよく除去できていることがわかる。これらのことから手法 2 による波形では異常データの検出が適切に行なわれていることが分かる。

4. 長周期波浪への適用

図-9 に、海象計で得られた超音波観測による別のケースの表面波の水位変動記録(サンプリングタイム 0.5s, 2400 データ)を示した。図より表面波のスパイクノイズ的な異常データが確認できる。これは、現場報告から航行船舶の影響によるものであることが確認されている。

図-10(a), (b) に 20 秒～ 200 秒までの長周期波高の経時変化を示す。データ処理については図-3 の模式図の 20 分更新を用いた。図中○印は手法 1 による結果であり、実線は手法 2 による結果である。図より、手法 1 で得られた長周期波高は、手法 2 と比較して、急激に大きな波高を示す時間帯が見られる。この時間帯について、目視による未処理データの確認を行った結果、異常データが含まれていることが確認できた。また他の時間帯においては、異常データは確認できなかった。このことから、手法 1 では異常データ処理が適切に処理できておらず、高い波高値となっていると考えられる。手法 2 においては、手法 1 と比較して波高値は比較的一定値を示していることがわかる。

次に手法 2 の閾値の条件である歪度と尖鋭度についていくつか検討を行った。そのときの条件を表-1 に示す。表-1 中 case6 は、長周期波高におけるノイズ処理手法の検討⁶⁾で報告された手法である。この報告の中では、水位変動の全波形データの標準偏差と一階微分の標準偏差の 3 倍を超えた波形データを異常値として取り扱っている。本研究では、case6 の条件から得られた結果を基準とし検討を行った。ここで、図-10(a), (b) 中で異常データが確認できた事例に対してのみ検討を行った。そのときの長周期波高の平均値と標準偏差の結果を表-2 に示す。その結果、歪度と尖鋭度の条件が緩くなるにしたがい長周期波高の平均値は大きくなっている。また標準偏差は case2 がもっとも小さい結果となった。case1 については、設定条件が厳しく、正常なデータも異常データと判断する事例がいくつか確認された。次に case4 および case5 においては、設定条件が緩く異常データを検出しない事例が

数多くみられた。そのため設定する閾値は、case2 か case3 が妥当であると考えられる。合田による報告^{7),8)}や正常データを異常データと判断する誤処理などを回避すること、また case6 の結果と比較して平均値に近いことから、case3 が妥当であると判断される。

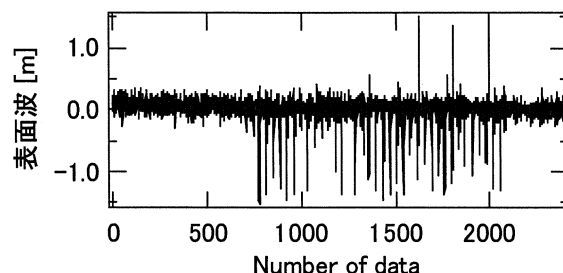


図-9 航行船舶による異常データを含んだ表面波の経時変化

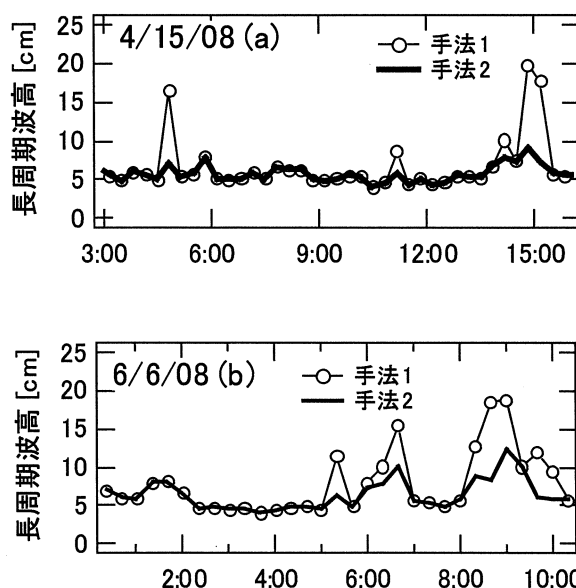


図-10 手法1および手法2による長周期波高の経時変化

表-1 歪度と尖鋭度の計算ケース

	歪度	尖鋭度
case1	0.40	4.0
case2	0.50	5.0
case3	0.60	6.0
case4	0.80	8.0
case5	1.00	10.0
case6	標準偏差の3倍	

表-2 長周期波高の平均値と標準偏差の結果

	case1	case2	case3	case4	case5	case6
平均値(cm)	7.10	7.66	7.87	8.29	9.13	8.04
標準偏差(cm)	1.64	1.57	1.82	2.18	2.34	2.80

最後に、図-9 に示した表面波のデータを目視による異常データ除去を行い、手法 2 の case3 の条件で処理した結果のスペクトルと比較した。図-11 に図-9 で示した波形を目視による異常データの処理後の波形と手法 1 および手法 2 の異常データ除去後の波形から求めたスペクトルの比較を示す。図より、手法 1 のスペクトルと目視による異常データ処理のスペクトルを比較すると、手法 1 によるスペクトルは、0.2Hz 以下の周期成分と 0.5Hz 以上の周期において、エネルギーが増大しており、異常データがスペクトルに影響を及ぼしていることがわかる。その結果、手法 1 では 20 秒(0.05Hz)~200 (0.005Hz) 秒までの長周期波高は 21.3cm と大きな波高値を示している。このことから、図-10 における手法1の高い波高値は、異常データ処理が適切に処理できておらず、そのためスペクトルのエネルギーが大きく算出され、スペクトルから算出される長周期波高においても高い波高値となっていることがわかる。手法 2 で処理された波形のスペクトルと目視による異常処理後のスペクトル波形は同等となり、スペクトルから得られる長周期波高(20 秒~200 秒)においても手法 2 と目視による結果は近い値となった。これらのことから、本研究で提案したアルゴリズムの機能が適切に機能していると判断される。

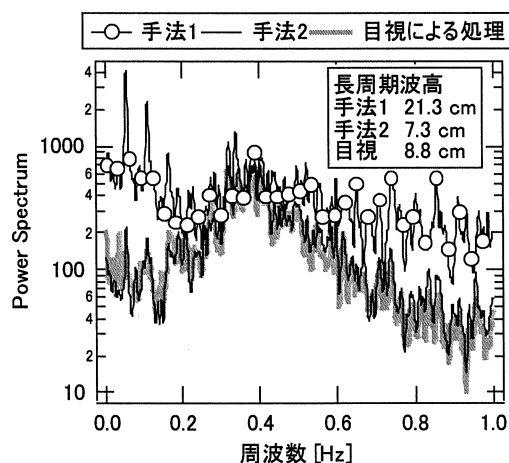


図-11 手法1および手法2によって得られたスペクトルと目視による異常データ除去後のスペクトルの比較

6. おわりに

長周期波高の安定した連続観測を可能とするための異常データ処理手法を開発しその検討を行い、以下の知見を得た。

- (1) 手法 1 では、異常データが増大すると拘束条件が緩くなり異常データを検知できない事例があり、その結果波浪スペクトルから算出される長周期波高が高く算出された。

- (2) 手法 2 は手法 1 と比較して、異常データに対して適切に検知することができた。
- (3) 手法 2 における閾値の条件の一つである歪度と尖鋭度を検討した結果、|歪度| 0.6, 尖鋭度 6.0 が妥当であると判断される。
- (4) 長周期波高において、目視による異常データ処理後のスペクトルと手法 2 のスペクトルを比較した結果から、手法 2 で得られる長周期波高は適切であり、本アルゴリズムの有効性が示された。

本研究では、海象計で用いているデータ処理手法について検討を行っており、他の手法との比較検討などは行っていない。また、解析対象とした期間などごく限られた事例に対して処理を行った結果であり、統計的な検討について十分であるといい難い。今後は、他の手法についても比較検討していくとともに、解析対象地点や期間を増やし検討を行っていく予定である。今後、波浪条件によって閾値条件が変わるようなアルゴリズムの開発なども行う予定である

参考文献

- 1) 高山知司, 橋本典明, 永井紀彦, 高橋智晴, 佐々木弘: 水中ドップラー式波向計(海底設置式波浪計)の開発について, 海岸工学講演論文集, 第39巻, pp.176-pp.180, 1992.
- 2) 橋本典明, 永井紀彦, 高山知司, 高橋智晴, 三井正雄, 磯辺憲雄, 鈴木敏夫: 水中音波のドップラー効果を応用した海象計の開発, 海岸工学講演論文集, 第42巻, pp.1081-pp.1085, 1995.
- 3) 三井正雄, 岩崎峯夫, 橋本典明, 永井紀彦: 海象計により計測された波浪情報のデータ処理手法 -安定した波浪情報の供給を目指して-, TECNO-OCEAN, 1998.
- 4) 平石哲也, 田所篤博, 藤咲秀可: 港湾で観測された長周期波の特性, 港研報告, Vol.35, No.3, pp. 3-35, 1996.
- 5) 平石哲也, 河野信二, 片山祐之, 松島三郎: 鹿島灘における長周期波の出現頻度と荷役稼働率について海岸工学論文集, 第45巻, pp.316-320, 1998
- 6) 沿岸開発技術研究センター: 沿岸波浪・海象観測データの解析・活用に関する解説書, 2000.
- 7) 合田良実: 港湾構造物の耐波設計増補版, 鹿島出版会, pp.1-333, 1990.
- 8) 合田良実, 永井康平: 波浪の統計的性質に関する調査・解析, 港湾技術研究所報告, 第13巻, 第1号, pp.3-37, 1974.