

デジタル処理によるシングルビーム音響測深の波浪の影響除去に関する検討

吉澤 信：海洋調査課

Examination concerning removal of influence of waves on sounding by digital processing

Makoto YOSHIKAWA : Hydrographic Survey Division

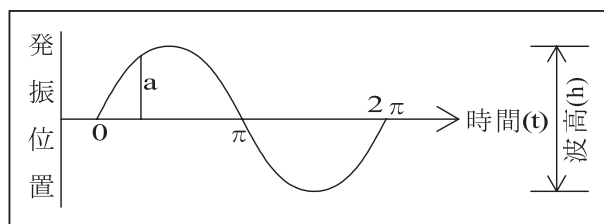
1 はじめに

浅海用音響測深機の水深データをデジタルで収録することが可能になってから10年以上が経過しているが、一向にそのデジタルデータを利用して資料整理を効率化する手法が確立されていない状況である。その1つに、波浪の影響により測深記録上に現れた海底記録の凹凸の処理がある。現在は、手作業により記録紙上で平滑化し、読みとった水深をデジタル記録に入力する方法が多く行われている。これでは、デジタルで記録される利点が全く活用できない。そこで、波浪による凹凸の海底記録をデジタルデータとして処理する方法について検討した。

2 平滑化による処理

水路測量業務準則施行細則では、「波浪の影響により海底の音響測深記録が凹凸を呈した場合、砂泥質の自然海底に限って、海底記録の相隣れる凸（浅）部と凹（深）部との水深差が1メートル以内のときは、その1/3を凸部の水深に加えた値を海底の水深とすることができる。」と規定している。アナログ記録の処理では波浪による凹凸の海底記録を手作業により平滑化する処理が一般的であった。デジタル記録の処理では、単純移動平均処理で平滑化した後、波高1/3にシフトしなくてはならないが、このシフトの処理が複雑となり困難である。このため、デジタル記録の処理では、海上が平穏な状態の海底記録と波浪によるセンサの上下動を分離して考えることにする。

細則の表現を整理すると、



第1図 送受波器の上下動（正弦波）

Fig.1 Up-and-down motion of a transducer

- ①海底は砂泥質であり急峻な変化はない
- ②海底記録の凹凸は、送受波器の上下動による
- ③最大波高（送受波器の上下動）は、1mとなる。ここでは、②の海面付近の現象である、送受波器の上下動について注目し、これから、細則の要件を満たす処理を考えてみる。

まずは、送受波器が理想的な波形である正弦波として上下動する場合について考えてみる。第1図は、送受波器の上下動を縦軸、時間(t)を横軸とって、 $t=0$ から $t=2\pi$ までをグラフにした。波高をh、任意の時間における送受波器の位置と波浪がない場合の送受波器の位置の差をaとする。

凸部の水深をL、波浪がない場合の水深をDとすると、D、aは、

$$D=L+\frac{1}{2}h$$

$$a=\frac{1}{2}h\cdot\sin t$$

と現せる。

ここで、 $t=0 \sim \pi$ のaの平均を求めると

$$\frac{\sum a}{\pi} = \frac{\int_0^\pi \frac{h}{2} \sin t dt}{\pi} = \frac{h}{\pi} \dots \textcircled{1}$$

同様に、 $t = \pi \sim 2\pi$ の a の平均は、

$$\frac{\sum a}{\pi} = \frac{\int_\pi^{2\pi} \frac{h}{2} \sin t dt}{\pi} = -\frac{h}{\pi} \dots \textcircled{2}$$

となる。

海底記録の凹凸が凸部になるのは、第1図で送受波器の上下動が最下部 ($t = 3/2 \cdot \pi$) の位置にあたる。 h の $1/3$ を凸部の水深に加えた値は、第1図では、負の位置になることになる。

このことから、 D に $\textcircled{2}$ の $1/2$ を加えてみる。

$$\begin{aligned} D - \frac{h}{2\pi} &= L + \frac{h}{2} - \frac{h}{2\pi} \\ &= L + \frac{h}{2} \left(1 - \frac{1}{\pi}\right) \\ &= L + b \cdot h \end{aligned}$$

ただし、 $b = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\pi}\right)$

b は定数なので計算すると、 $0.3408 \dots$ となる。

送受波器の軌跡は、正弦波のような理想的な波形だけではなく、正弦波より図形の面積の広がりが大きかったり、狭く三角波に近い波形になることもある。経験則から実際の波形は、矩形波から三角波の間にあると考えられるので、三角波と矩形波について同様に検討してみる。

まずは、最も図形の面積が狭くなる三角波について、同様の検討を行う。三角形の場合、積分せずとも面積は底辺×高さの $1/2$ で求められる。これを平均すると、底辺で除算することになり、解は波高 h の $1/4$ になる。この解の $1/2$ を D に加える。

$$\begin{aligned} D - \frac{h}{8} &= L + \frac{h}{2} - \frac{h}{8} \\ &= L + \frac{3}{8}h \\ &= L + b \cdot h \end{aligned}$$

三角波の場合、 $b = 0.375$ になる。

三角波とは反対に面積が広がる場合として、矩形波（長方形）の検討を行う。平均値は、波高の

$1/2$ に等しくなる。この $1/2$ を D に加える。

$$\begin{aligned} D - \frac{h}{4} &= L + \frac{h}{2} - \frac{h}{4} \\ &= L + \frac{h}{4} \\ &= L + b \cdot h \end{aligned}$$

矩形波の場合、 $b = 0.250$ になる。

細則は、 $b = 0.3333 \dots$ となるように規定しているが、波高は最大で 1 m であるので、三角波の場合で最大 4.2 cm 深く、矩形波の場合で最大 8.3 cm 浅くなる。この結果から水深の誤差は 0.1 m 以内であると言える。

実際の処理では、移動平均と測定値の差の絶対値を a として計算する。移動平均を $M(x)$ 、サンプル数を中心値の前後 n 個 ($i = -n \sim +n$)、測定水深を $d(x)$ とすると

$$M(x) = \sum_{i=-n}^n \frac{d(x+i)}{2n+1}$$

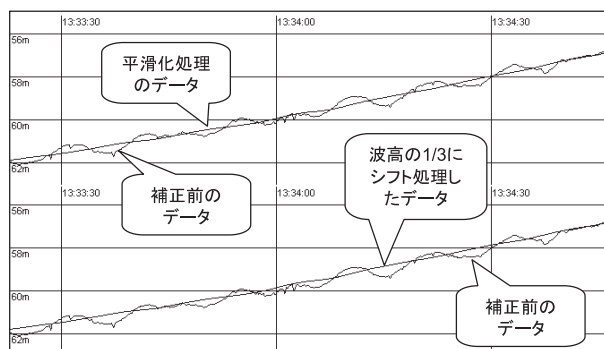
となり、波高の $1/3$ にシフトした値は

$$D(x) = d(0) + \frac{1}{2} \sum_{i=-n}^n \frac{|d(x+i) - M(x+i)|}{2n+1}$$

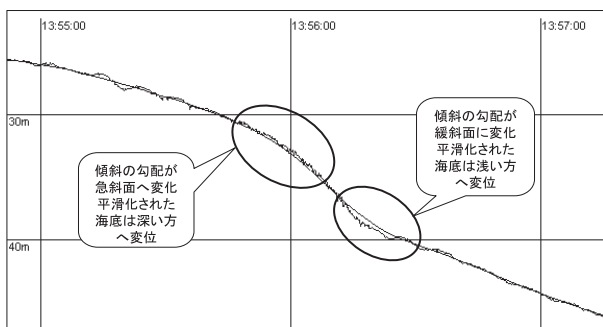
となる。第2図に処理例を示す。

移動平均による平滑化処理は、

- ① サンプル数が多いほど波長の長い凹凸を平滑化できる
- ② サンプル数が多いと傾斜の変化を追従できない (第3図)
- ③ サンプル数が少ないと半周期遅れた凹凸が現れる



第2図 平滑化による処理の例
Fig.2 An example of processing by smoothing



第3図 傾斜の変換点
Fig.3 Conversion point of a slant

④異常記録も平滑化してしまうという特徴を持っている。

3 デジタルフィルタによる処理

平滑化による処理を行う場合、細則は「…、砂泥質の自然海底に限って、海底記録の相隣れる凸（浅）部と凹（深）部との水深差が1メートル以内のときは、…」との制限を設けている。

海底が砂泥質でなかったり、波高が1 mを超えるような海上模様の場合、何らかの方法で波浪による影響を補正する必要がある。また、平滑化による処理では、異常記録が平滑され、その記録前後にある海底記録に埋もれてしまい、その存在を見落とす危険が高くなる。この原因は、移動平均処理がロー・パス・フィルタ（LPF）であるため、高周波成分

となるスパイクノイズを減衰させているためである。これを改善するための処理方法として他のデジタルフィルタを利用してみる。

デジタルフィルタによる処理は、サンプル数を $2n+1$ 個、 $i=-n\sim+n$ 、フィルタの係数を $h(i)$ 、測定水深を $d(x)$ 、処理後の水深を $D(x)$ とすると次式で与えられる。

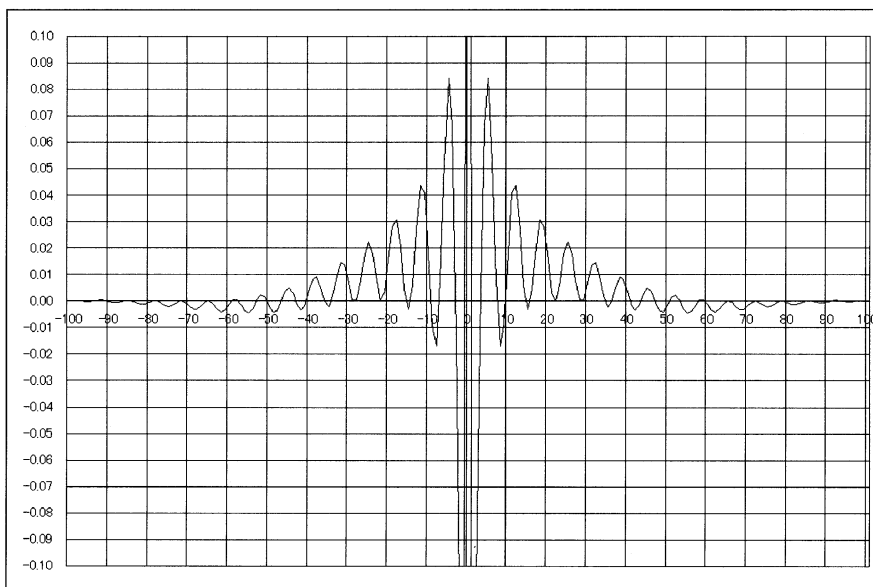
$$D(x) = \sum_{i=-n}^n h(i)d(x+i)$$

この処理を行うためには、まず、海底記録に現れる凹凸の周期にあわせてデジタルフィルタを設計し、係数 $h(i)$ を得ておく必要がある。デジタルフィルタの設計では、①サンプリング周波数、②通過域または遮断域、③サンプル数、④減衰量の4つの要素を設定する。

サンプリング周波数は使用した音響測深器の仕様に依存し、発振間隔の逆数となる。例として、0.2133秒間隔で発振している音波の反射波すべてを記録している場合、4.6875Hzとなる。

通過域または遮断域は海底記録にある凹凸の波長（周波数）により設定する。緩やかな海底地形は低周波、急峻な地形やスパイクノイズは高周波で現される。

サンプル数の設定は、デジタルフィルタの係数の特徴を知る必要がある。デジタルフィルタの係数を



第4図 デジタルフィルタの係数
Fig.4 A coefficient of a digital filter

グラフ化して第4図に示している。係数は中央が最大で、波の振幅が広がるように中央から離れるほど、振幅が小さくなっている。この振幅が水深の計算に影響しないところで打ち切れれば良いことになる。例えば、水深100m付近で適用する場合は、係数が±0.001未満であれば水深に±0.1m未満を加算することになり、水深に影響がなくなる。サンプル数を少なくすると遷移域（通過域から遮断域に移行する部分）が広がる。

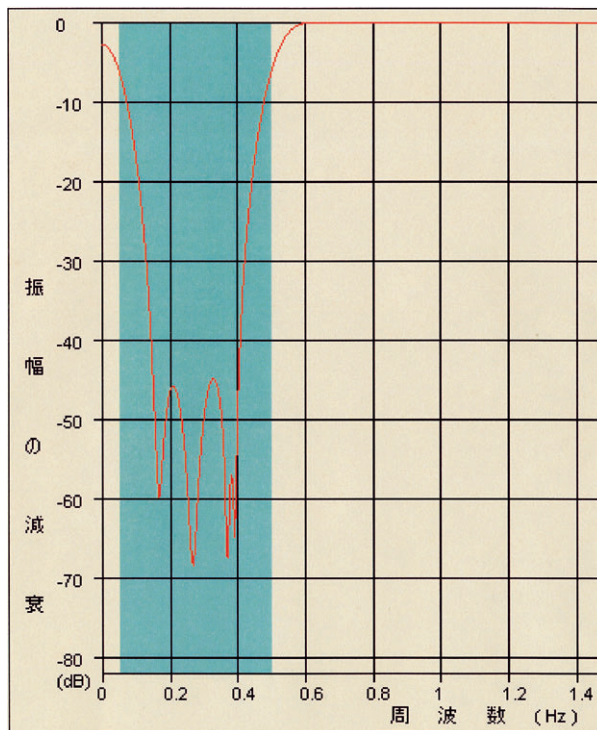
減衰量（振幅比）は、小さくすると遷移域の周辺にリップルが発生する。

第5図は、遮断域を0.05Hz～0.50Hz、サンプル数を201個、減衰量を50dBとして設計したバンド・リジェクト・フィルタ（BRF）の周波数特性を示している。背景が緑色の部分は遮断域を示している。

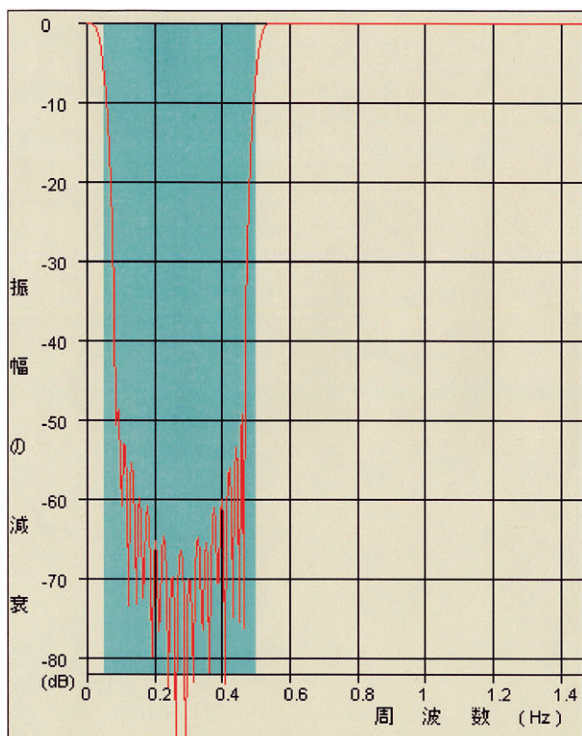
第6図は同様に、遮断域を0.05Hz～0.50Hz、サンプル数を71個、減衰量を50dBで設計したBRFの周波数特性を示しているが、遷移域が広いことに加え、低域の周波数は正しく再現されない可能性がある。低周波域が正しく表現されないということは、緩やかな地形の正確な水深を再現できないことになる。実際にこのBRF処理の結果は0.00Hz～0.05Hz

に減衰が生じているため水深60m付近で15m以上は浅くなっている。

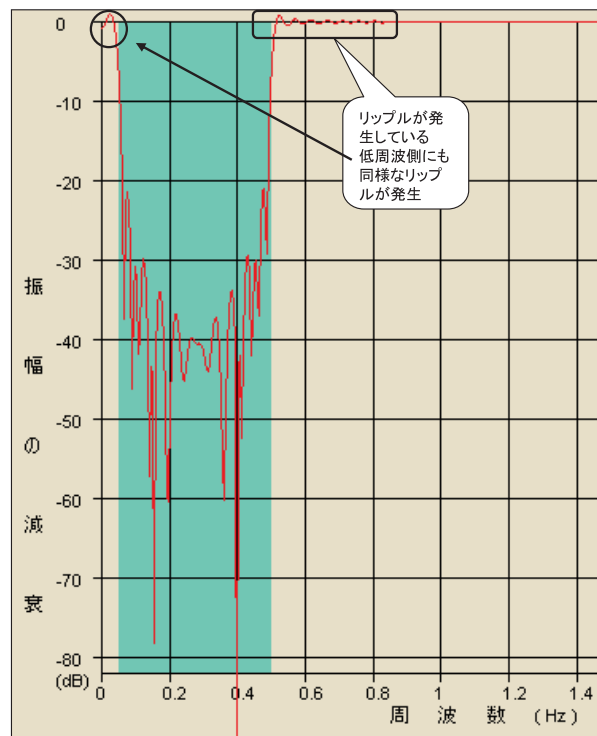
第7図は遮断域を0.05Hz～0.50Hz、サンプル数を



第6図 BRFの周波数特性②
Fig.6 A frequency characteristic of BRF



第5図 BRFの周波数特性①
Fig.5 A frequency characteristic of BRF



第7図 BRFの周波数特性③
Fig.7 A frequency characteristic of BRF

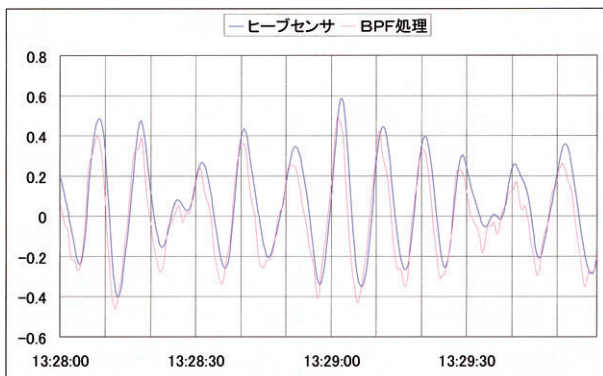
201個，減衰量を20dBとして設計したB R Fの周波数特性をしているが，遮断域の両脇に小さな波（リップル）ができてることが確認できる．リップルの発生により正確な海底の再現は期待できない．

海底のデジタル記録は，本来の海底地形は低周波，急峻な地形などは高周波，波浪による凹凸はその中間の周波数で重複しており，波浪による凹凸だけを除去することは極めて慎重に扱う必要がある．

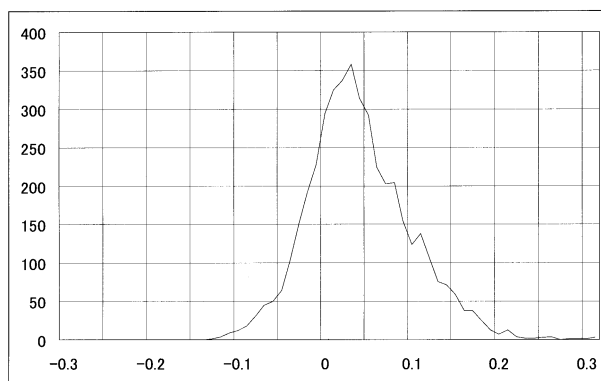
4 デジタルフィルタの使用例

第8図は，測深データから送受波器の上下動によるものと思われる周波数成分を取り出すため，砂泥質の海底から得られた水深データを通過域0.05Hz～0.30Hzのバンド・パス・フィルタ（B P F）にとおし，ヒープセンサのデータとB P F処理の結果を重ねて表示した．この図では，ヒープセンサの測定値よりB P F処理の値が全体的に負側へ偏重しているように見えるが，ヒープセンサの測定値が若干，正側を中心に上下していることに起因するものであるが，ここでは横道にそれるのでヒープセンサのバイアスについて触れることをさける．この結果は，ヒープセンサに代わってデジタルフィルタによる測深データへの補正処理が不可能ではないことを示している．

B P Fをとおしたデータとヒープセンサの測定値との差をとると，-0.13m～+0.32mの間で0.03mを中心に正規分布を示している（第9図）．全サンプル数



第8図 ヒープデータとの比較①
Fig.8 Comparison with a curve of heave-sensor and a BPF curve

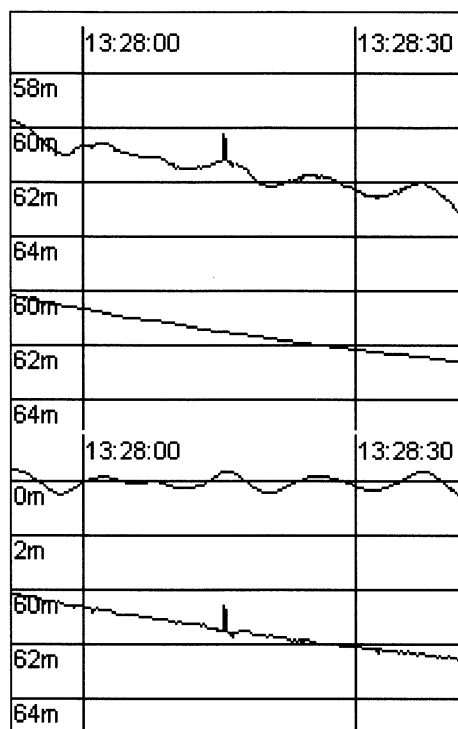


第9図 ヒープデータとの差の度数分布
Fig.9 Frequency distribution of a difference with Home Economists In Business data

は4,343個で，標準偏差は0.06m，-0.10m～+0.10mの間に3,711個のサンプルがあり，全体の85%を占めている．

次に，平滑化処理の問題点である異状記録の検出について検討してみる．

第10図は異状記録を埋め込んだ場合の各種処理の結果を示している．上から順に原記録，平滑化処理の出力，B P F処理の出力，B R F処理の出力である．平滑化処理では，異状記録も平滑化されて異状

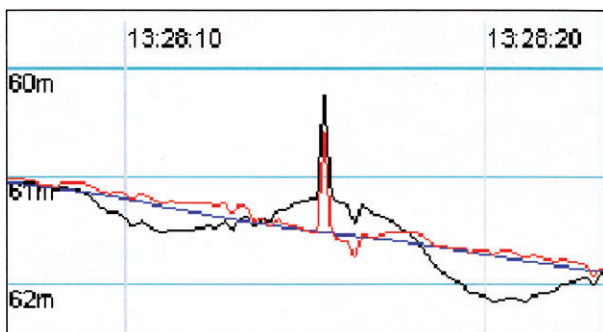


第10図 異状記録の処理
Fig.10 Handling of error sounding

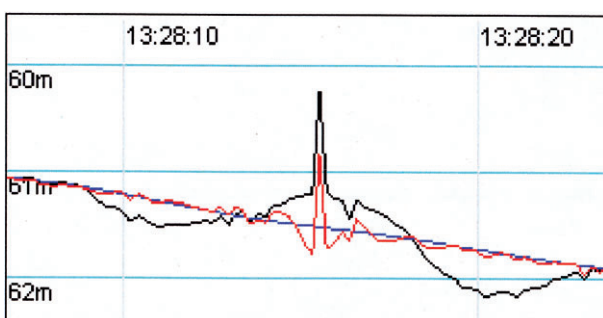
記録の存在そのものが確認不能である。平滑化処理ではサンプル数を少なくすることで、異状記録の確認はできるようになるが、比高の再現にはいたらない。B R F処理は、送受波器の上下動を抽出し、処理波形に異状記録の影響が現れないことが期待されるが、この処理結果には異状記録の影響はなく期待される結果が得られている。一方、B R F処理は、海底記録から低周波成分による波形の凹凸が除去されることになり、海底記録に異状記録が残ることが期待される。B R F処理の結果では凹凸が除去されるとともに、海底に異状記録が確認でき、こちらも期待どおりの結果が得られている。

第11図に、この部分の拡大を示す。黒線は原記録、赤線はB R F処理、青線は平滑化処理の記録を示している。原記録では、異状記録のトップが60.3m、その隣の水深は61.2mで比高0.9mとなっている。平滑化処理の結果は61.5m、B R F処理の結果はトップで60.6m、その隣は61.5mで比高0.9mとなり、期待どおりの値が再現できた。

第11図に使用したB R Fは、遮断帯域0.05Hz～



第11図 B R F 処理の拡大①
Fig.11 Expansion of a BRF processing curve



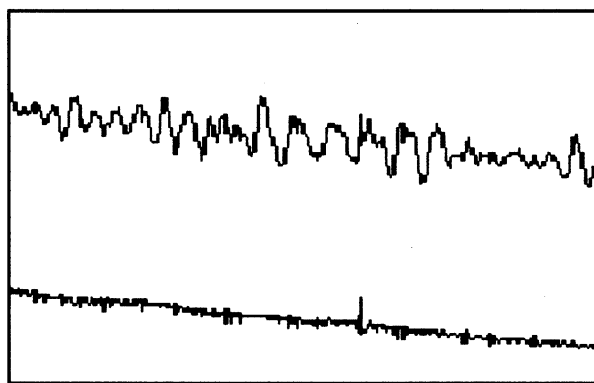
第12図 B R F 処理の拡大②
Fig.12 Expansion of a BRF processing curve

0.30Hz, サンプル数201個, 減衰量50dBで設計されている。不適切な処理例として遮断帯域0.05Hz～0.70Hz, サンプル数201個, 減衰量50dBで設計したB R Fで処理した結果を第12図に示す。この結果は遮断周波数を高周波側に広げすぎたため、異状記録であるスパイクノイズの高周波成分が減衰され、異状記録の頂部で0.3m深くなっている。

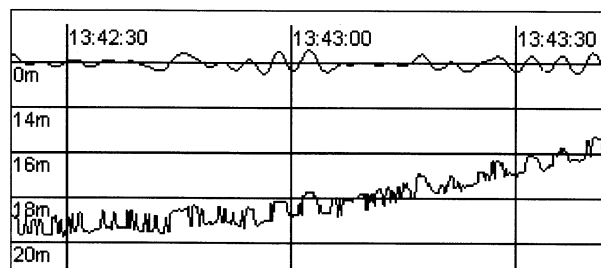
第13図に示すように、原記録に異状記録の存在が確認できないような場合でも、デジタルフィルタ処理では検出が可能である。

次に岩盤や魚礁など海底が平坦でない場合の記録について見てみる。第14図は魚礁区域を測深した原記録（上部）とB R F処理の結果（下部）を示している。

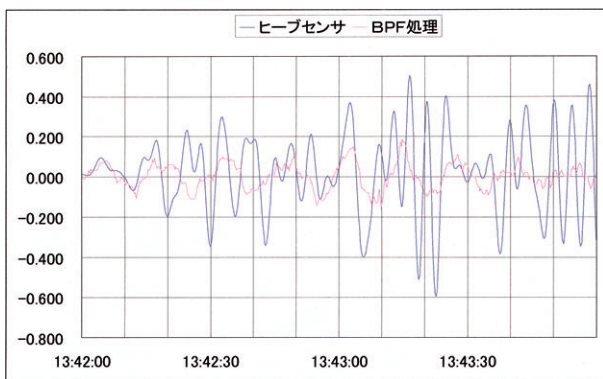
第14図からは、B R F処理の結果が魚礁の表面形状の凹凸に影響を受けていることが判る。第15図は、ヒープセンサの測定値とB R F処理の結果を表示しているが、B R F処理の結果は波浪による上下とは無関係な結果を出力している。このように波浪の周期に近い大きさの海底記録が存在する場合には



第13図 B R F 処理の例
Fig.13 An example of BRF processing



第14図 魚礁区域
Fig.14 A profile of fish-heaven area



第15図 ヒーブデータとの比較②
BPF処理の値は、海底に設置されている魚礁の凹凸に影響されてヒーブセンサの値とまったく異なる値となっている

Fig.15 Comparison with a curve of heave-sensor and a BPF curve A BPF processing curve is different from a heave-sensor curve in the area of fish-heaven

正確な処理は期待できない。

5 まとめ

波浪の影響による海底記録の凹凸を補正するには、移動平均による平滑化処理が簡便な方法である。しかし、平滑化処理では、異状記録も平滑化されてしまう、サンプル数を少なくすると海底記録の凹凸の波長によりその凹凸と反対の凹凸が現れる、サンプル数を多くすると海底の傾斜が大きく変化する箇所などで海底記録にみられる形状と異なる処理結果となるという欠点がある。

この平滑化による処理の欠点を改善するため、デジタルフィルタの利用が有効であるが、次の点に注意が必要である。

- (1) デジタルフィルタの設計は、①サンプリング周波数、②通過域または遮断域、③サンプル数、④振幅の減衰量の4つの要素が適切に設定されなければならない。
- (2) 海底記録に急峻な凹凸が混在する場合、デジタルフィルタは正確な海底地形を再現できない。
- (3) 同じ波でも測量船の針路の変化や同じ針路でも地形の変化により海底記録にみられる凹凸の波長は変化するので、デジタルフィルタの

処理は、可能な限り必要な箇所に限定すべきである。

- (4) 異状記録を検出した場合は、原則、再測を実施する必要がある。

なお、(2)～(4)は平滑化処理の場合においても同様である。