

観測データを用いた拘束長周期波高と 長周期波高全体との関係解析

ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP BETWEEN BOUND WAVES AND TOTAL INFRAGRAVITY WAVES USING OBSERVED WAVE DATA

仲井圭二¹

Keiji NAKAI

¹正会員 理修 株式会社エコー 環境水工部 (〒110-0014 東京都台東区北上野2-6-4 上野竹内ビル)

Kato et al. (2005) presented formulae to estimate bound wave heights for various $S_{\max}$. This paper generalized their idea and presented a formula which can estimate bound wave heights for arbitrary $S_{\max}$. Bound wave heights have been calculated with observed wave data and analysis has been carried out on the relationship between bound waves and total infragravity waves. The result suggests that the ratio of the bound wave height to the total infragravity wave height depends on Ursell number and the water depth.

Key Words : *infragravity wave, bound wave, $S_{\max}$, Ursell number*

1. はじめに

従来, 観測された長周期波の時系列から拘束長周期波高を推定する場合 1 方向波を仮定せざるを得ず, しかも煩雑な計算を必要とした. しかし, 実際の波浪には方向分散が存在し, しかも方向分散が大きいほど拘束波高が小さくなることが知られている.

加藤ら(2004, 2005)は数値シミュレーションによって, 有義波高に対する拘束波高の波高比は, アーセル数によってうまく整理できることを示すと同時に, いくつかの方向集中度に対して, 波高比とアーセル数との関係式を提案している¹⁾²⁾.

本研究は, この加藤らの提案式を利用して, 観測された有義波高と有義波周期とから, 拘束長周期波高を簡易的に推定するとともに, 長周期波高全体との関係を解析し, 方向分散の影響について考察することを目的として実施した.

2. 単一方向波の場合の拘束波高

観測された波形から拘束波を推定する際に単一方向波を仮定することはこれまでもよく行われている. また, 加藤ら(2004)は数値シミュレーションを用いて, 拘束波高をアーセル数から簡易的に算出する式を提案している. 2つの周波数スペクトルに対して加藤ら(2004)が提案した式を以下に示す.

WALLOPS型 ($m=8$)

$$H_B / H = 0.0101 U_r^{0.969} \quad (1)$$

JONSWAP型

$$H_B / H = 0.0086 U_r^{1.025} \quad (2)$$

ここに, H_B : 拘束波高, H : 有義波高, $U_r = HL^2/h^3$: アーセル数, L : 波長, h : 水深 である.

一方, Bowers(1992)も単一方向波の場合の拘束波高を推定する以下の式を提案している³⁾.

$$H_B = 0.074 H^2 T_p^2 / h^2 \quad (3)$$

ここに, T_p はピーク周期である. 波高と水深の単位をm, 周期の単位をsとすると, 比例係数0.074は m/s^2 の単位を持つ.

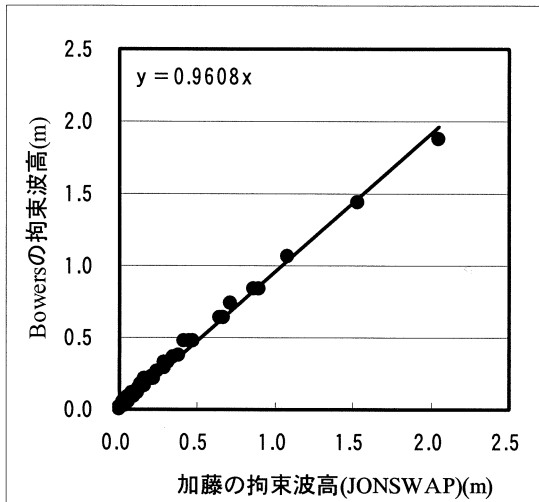
本研究では, まず加藤らとBowersの提案式で算出した拘束波高の比較を行った. 入射波の条件は, 以下の組み合わせで100通りとした. ここで, T は有義波周期であり, $T_p=1.05T$ と設定した.

有義波高: 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 m (4通り)

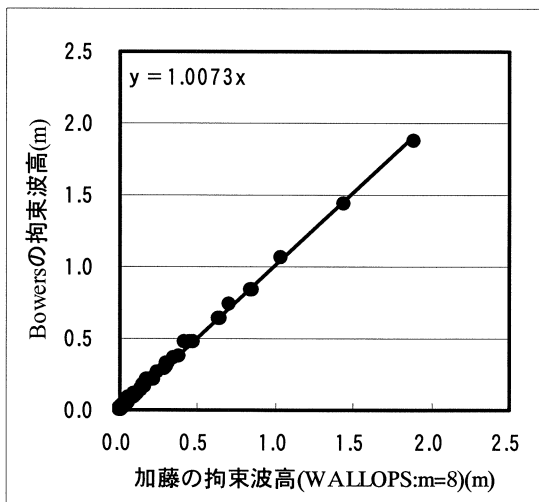
有義波周期: 8, 10, 12, 14, 16秒 (5通り)

水深：10, 15, 20, 25, 30 m (5通り)

この入射波に対して計算される拘束波高を比較した結果を図-1に示す。



(a)JONSWAP型スペクトル入射の場合



(b)WALLOPS型スペクトル入射の場合

図-1 加藤らとBowersによる推定拘束波高の比較
(回帰式のx, yはそれぞれ横軸, 縦軸を示す.)

2つのスペクトル形状でやや違いはあるものの、加藤らの提案式とBowersの提案式で計算した拘束波高は数%の差しかなく、よく一致しているといえる。

3. 方向分散の考慮

加藤ら(2005)は、多方向シミュレーションによって方向分散の影響を調べた。その結果、方向分散が大きくなるほど拘束長周期波の波高は小さくなることを示している。

方向集中度別に提案された式は以下の通りである。

$$\left. \begin{aligned} S_{\max} = 1000 : H_B / H &= 0.00897 U_r^{0.992} \\ S_{\max} = 100 : H_B / H &= 0.00527 U_r^{0.972} \\ S_{\max} = 10 : H_B / H &= 0.00295 U_r^{0.995} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここに、 $S_{\max}$:方向集中度である。

この提案式から、 H_B/H と U_r との関係を図-2に示す。加藤らも述べているように、拘束波高と有義波高との波高比とアーセル数との関係に対数表示した場合、両者の関係を示す直線は、方向集中度の変化によって、平行移動的に変わっている。

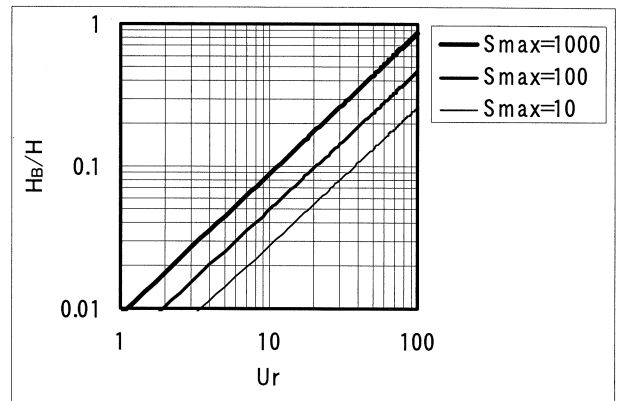


図-2 H_B/H とアーセル数 U_r との関係 (加藤ら, 2005)

ここで、いずれの式においても U_r の係数が1に近いことに注目し、(4)式を、 U_r に比例する形に書き換えた。係数の決定に際しては、加藤らの数値シミュレーション条件に合わせて、 U_r を1から100の範囲で変化させ、加藤らの式によって計算される値との差が最小になるようにした。書き換えた後の式を(5)式に示す。

$$\left. \begin{aligned} S_{\max} = 1000 : H_B / H &= 0.0087 U_r \\ S_{\max} = 100 : H_B / H &= 0.0047 U_r \\ S_{\max} = 10 : H_B / H &= 0.0026 U_r \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

また、この関係を図-3に示す。図-2と図-3とを比べると殆ど違いは見られないが、より厳密に比較した結果を図-4に示す。この図は、方向集中度100の場合に、加藤らの提案式と、本研究の提案式によって計算した波高比 H_B/H を比較したものである。両者の差は1%以下である。方向集中度が1000, 10の場合も同様に、両者の差は1%以下であり、いずれの提案式を用いても実質的な差は殆どないといえる。

このため、本研究で提案した式を用いた場合も、加藤らの提案式を用いた場合と同様、アーセル数と波高比との関係を示す直線は、方向集中度の変化に伴って平行移動的に変化している。

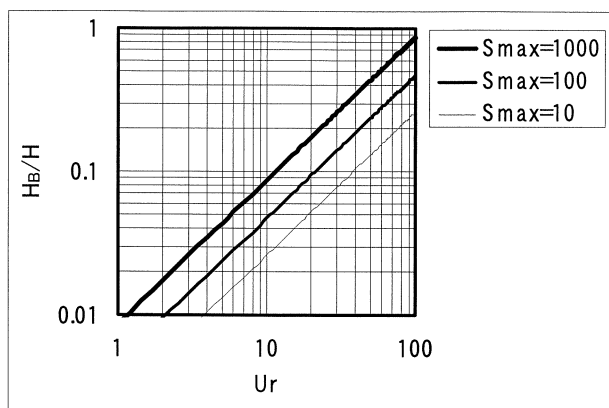


図-3 H_B/H とアーセル数 U_r との関係
(U_r の係数を1に変更)

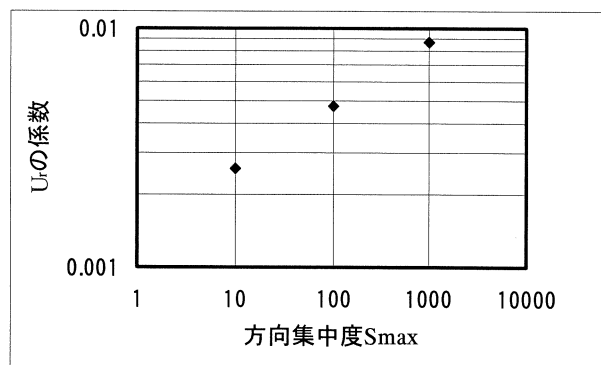


図-5 方向集中度と U_r の係数との関係

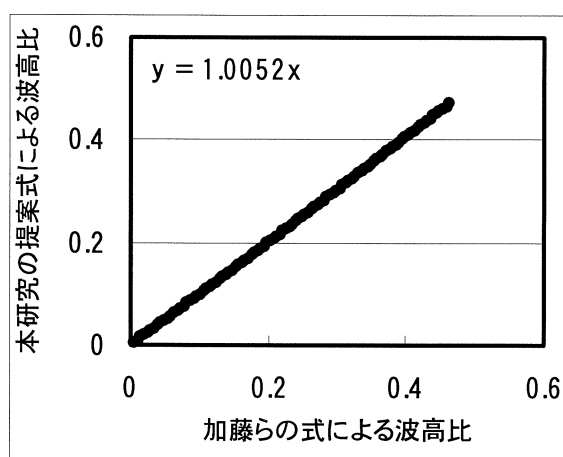


図-4 加藤らの提案式と、本研究の提案式で
計算した波高比の比較 ($S_{\max} = 100$)
(回帰式の x , y はそれぞれ横軸, 縦軸を示す.)

(5)式に示した U_r の係数と方向集中度との関係を対数表示したところ、両者は図-5に示すように良い直線関係を示すことが分かった。

両者の関係を回帰直線で近似すると、 U_r の係数 a を方向集中度の関数として、(6)式のように表現することができる。

$$\log a = 0.2623 \log(S_{\max}) - 2.849 \quad (6)$$

この式を用いると、方向集中度が10～1000の範囲で(5)式を一般化した(7)式が得られる。

$$H_B / H = 0.001416 S_{\max}^{0.2623} U_r \quad (7)$$

この式から、方向集中度が高く、波浪の非線形性の程度を示すアーセル数が大きいほど、拘束長周期波高は大きいことが分かる。

4. 観測値を用いた拘束波高の推定

3. で提案した(7)式を用いて、全国の波浪観測地点における波高、周期から拘束波高を推定し、長周期波高(30～300秒の周期成分の波高)との比を調べた。推定に必要な方向集中度は波形勾配から見積もった⁴⁾。

拘束波高 H_B と長周期波高 H_L との比率は H_L が大きいほど増大すると言われており、この関係を調べた結果の例(久慈、石巻)を図-6に示す。確かに H_B/H_L と H_L とは関係しているが、両者の相関は必ずしも良くない。

次に、同じ2地点について、 H_B/H_L とアーセル数との関係を調べた。結果を図-7に示す。 H_B/H_L はアーセル数と良い直線関係を示すが、その傾きは地点によって異なっている。これは、観測点毎の水深の違いによるものではないかと考え、

$$H_B / H_L = b U_r \quad (8)$$

とした時の、 b と水深との関係を調べた。解析対象地点(国土交通省のNOWPHAS)と水深を表-1に示す。係数 b と水深との関係は、図-8に示す通りである。

水深が大きいほど、係数 b は大きい傾向がある。相関係数は0.47と必ずしも高くはないが、 h の単位をmとして、両者の関係を1次回帰式で近似すると、以下の関係が得られた。

$$H_B / H_L = (0.0006h + 0.0357) U_r \quad (9)$$

この式から、同じアーセル数であれば、水深が深いほど長周期波全体に占める拘束波の割合は大きいことが分かる。

(9)式を用いて、アーセル数と水深から H_B/H_L を推定した値と観測された値とを比較した。結果を図-9に示す。

この図には、久慈と石巻の結果を同時に示してある。両地点で値の範囲に違いはあるが、推定値と観測値とは平均的に一致しており、(9)式の有効性が確認された。

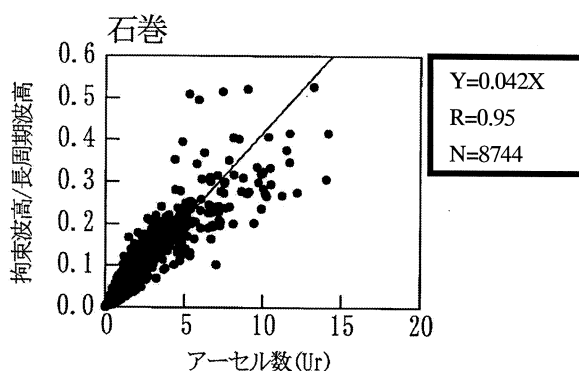
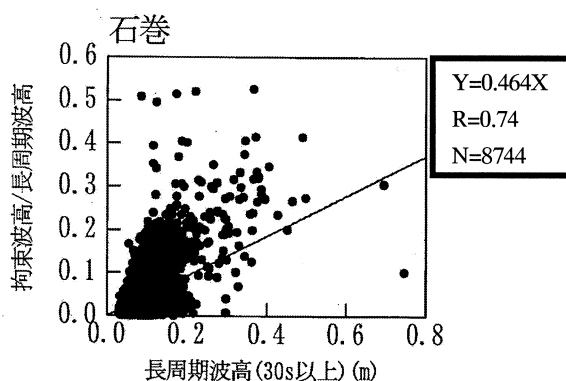
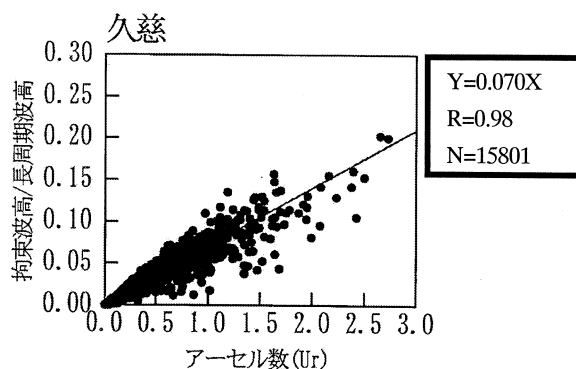
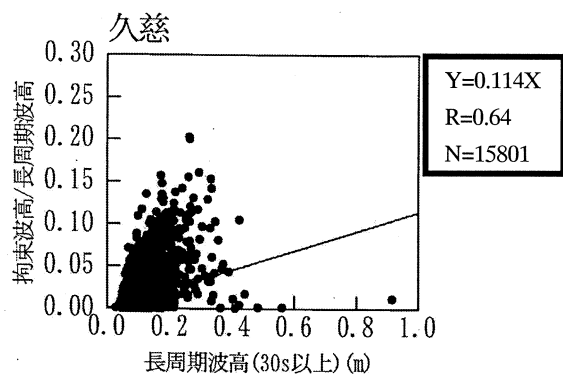


図-6 拘束波高／長周期波高と長周期波高との関係の例
(回帰式のx, yはそれぞれ横軸, 縦軸を示す。
R: 相関係数, N: データ数 である。)

図-7 拘束波高／長周期波高とアーセル数との関係の例
(回帰式のx, yはそれぞれ横軸, 縦軸を示す。
R: 相関係数, N: データ数 である。)

表-1 解析対象地点と水深

観測地点	水深(m)
中城湾	39.6
細島	48.3
玄界灘	39.5
鳥取	30.9
柴山	41.1
金沢	21.1
富山	20.0
直江津	32.7
酒田	45.9
留萌	49.8
瀬棚	52.9
苫小牧	50.7
紋別(南)	52.6
久慈	49.5
石巻	20.8
小名浜	23.8
常陸那珂	30.3
波浮	48.3
下田	51.1
清水	51.8
御前崎	22.8
潮岬	54.7
室津	26.8
高知	24.1
上川口	27.9

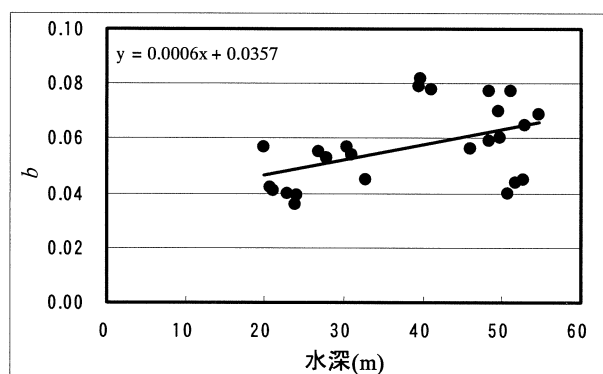


図-8 bと水深との関係
(回帰式のx, yはそれぞれ横軸, 縦軸を示す。)

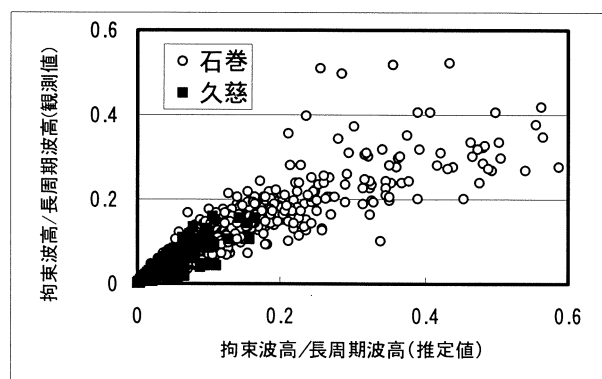


図-9 拘束波高／長周期波高の推定値と観測値との比較

また、(9)式を(7)式と組み合わせることによって、以下の(10)式が得られる。

$$H_L = 0.001416 H S_{\max}^{0.2623} / (0.0006h + 0.0357) \quad (10)$$

このことから、方向集中度が高い場合、水深が浅い場合に長周期波が発達することが分かる。

5. 方向集中度と非線形性の影響

加藤らが示したように、拘束波高は、波浪の非線形性を示すアーセル数とともに、方向集中度にも依存する。しかし一方で、長周期波高全体はアーセル数には依存せず、方向集中度と水深に依存する。このことから、長周期波高全体の発達には、方向集中度は影響するが、非線形性は余り影響しないということが分かる。長周期波が、拘束波と自由波とから構成されと考えると、自由波は、波浪の非線形性に影響を受けない長周期波であることが示唆される。

6. 今後の課題

本研究では加藤らが提案した(4)式を拡張して、10～1000の任意の方向集中度に対応した式を提案したが、この提案式の信頼度を確認するためには、10, 100, 1000以外の方向集中度の場合のシミュレーション結果を追加して解析するのが望ましい。しかし、本研究では既往の文献のデータを引用しただけなので、追加データを入手することができなかった。今後、より多くのシミュレーション結果を追加して、拘束波高の推定精度を高めることが課題である。

7. 結論

本研究の主要な結論を以下に示す。

- (1)加藤らとBowersが提案した方法で計算した単一方向波の拘束波高はよく一致した。
- (2)加藤らがいくつかの方向集中度について作成した式を用いて、任意の方向集中度の場合に拘束長周期波高を推定する式を提案した。
- (3)拘束長周期波高と長周期波高全体との比を、波浪の非線形性を示すアーセル数と水深から推定する式を提案し、全国沿岸の波浪観測データを用いてその適用性を確認した。
- (4)上記の結果を組み合わせ、長周期波高全体を、有義波高、方向集中度、水深から推定する式を提案した。長周期波高全体は、方向集中度が大きく、水深が浅いときに大きくなるが、非線形性との関連は低いことが分かった。

謝辞

解析に用いた波浪と長周期波の観測値は、独立行政法人港湾空港技術研究所・海象情報研究室からご提供頂いた。ここに感謝する次第である。

参考文献

- 1) 加藤始, 信岡尚道, 小松崎泰光: 非線形の波の数値シミュレーションにおける2次波の性質, 海岸工学論文集, 第51巻, pp156-160., 2004.
- 2) 加藤始, 信岡尚道: 非線形の波の数値シミュレーションにおける2次波の性質(2), 海岸工学論文集, 第52巻, pp136-140., 2005.
- 3) Bowers, E.C.: Low frequency waves in intermediate water depth, *Coastal Engineering* 1992, pp832-845., 1992.
- 4) 合田良実, 鈴木康正: 光易型方向スペクトルによる不規則波の屈折・回折計算, 港湾技研資料, No.230, p.45, 1975.