

波群によって引き起こされる平均海面の共振応答

Resonant Response of Mean Sea Water Level by Incoming Wave Groups

琉球大学 正員 仲座 栄三 E. Nakaza

東京工業大学 正員 日野 幹雄 M. Hino

1. はじめに

(1) 本研究の目的

1977年、日野・沢本¹⁾によって、沿岸に形成される平均海面の長周期変動、Surf-beatやRip-current系を過渡応答すなわち非定常海浜流系としての観点から見直す事の必要性がいち早く指摘され、更に平均海面の過渡応答に関する第一次近似解が提示された。こうした平均海面の長周期変動は、その周期が数分から数十分である事から比較的ゆったりとした現象であると(個々波との比較において)一般に考えられているようである。しかし最近、筆者らの現地観測及び台風災害調査によつて、明確な固有周期を有する海岸には来襲波群との干渉によって平均海面の共振応答が引き起こされ、平均海面の長周期変動(Surf-beat)は極めてダイナミックな(激しい)現象であることが明かとなりつつある。すなわち、汀線近傍のSurf-beatは津波の来襲に酷似していると考えられるのである(水深が浅く、砕波点と汀線との距離が長い場合)。そうすると、沿岸に形成される非定常海浜流系は、湾内(あるいは港内)振動を引き起こしたり、海岸のトラッピングモードと干渉を引き起こすだけの十分なエネルギーを有しているのではないか?、沿岸にはダイナミックな非定常海浜流系が引金となる様々な現象が生じているのではないだろうか?。筆者らの知る限りにおいて、海岸工学の教科書あるいは水理公式集のいずれにも非定常海浜流系の重要性は明記されていない。本研究においては、以上の事を鑑み、第一段階として自然海浜に形成される平均海面の共振応答について検討を行う。また、本論文では、なるべく海岸防災的な面を避けるようにした。

(2) Surf-beatに関する主な研究

沿岸における平均海面の長周期変動は、1948年 Munk²⁾によって発見された。彼は、砕波帯への輸送水量が変動することによって引き起こされているのであろうと考え、平均海面の長周期変動を "Surf beat" と名付けた。それ以来多くの研究者らによってSurf-beatの発生メカニズムに対する検討や、現地観測が実施されてきた。例えば、Tuckerは³⁾、高波群が砕波し余分な水量が吐き出されそれが沖方向へ反射され長周期変動として観察されるものとした。また、Longuet-Higgins & Stewartは⁴⁾、Radiation Stressの概念を導入し、高波群の下では平均海面の低下が存在しそれが砕波点近傍から反射されて長周期変動を引き起こすことを理論的に検討した。最近、Symonds & Bowenらは⁵⁾⁶⁾、波群に伴う砕波点の時間的な変動によってSurf-beatが発生する事を主張し、バー型海浜では波群との干渉によって平均水面の共振応答が発生する可能性のあることを理論的に示した。一方、Gallagherは⁷⁾、沿岸方向に進行する長周期波と来襲波群との干渉によってSurf-beatが強調される事を理論的に示し、現地観測データとの比較を行っている。Gallagherの長周期波は、上述の波が岸沖方向であるのに対し沿岸方向に進行する波である。現地観測におけるSurf-beatの定量的な評価は、合田⁸⁾によってなされ、観測データからSurf-beatの振幅の算定式を提案している。また、加藤は⁹⁾、現地観測をもとに、長周期波が沿岸砂州の形成に関与していることを述べており、最近筆者らと同様、海浜流系をダイナミックな非定常現象としてとらえている(1987年、第34回海岸講演会における懇親会にて、Private communication)。

2. 実験装置及び方法

本研究においては、明確な固有周期(あるいは、トラッピングモード)を有する海浜に図-1に示すようなステップ型海浜を選んだ。実験装置は、東京工業大学・土木工学科の長さ20m、幅0.4mの二次元水槽を用いた。なお、波送りには、無反射式造波装置(株)三井造船システム技研製)を用いている。実験に用

Diagram of a spillway structure. The spillway crest is at an elevation of 10.0 m. The apron has a horizontal length of 20.0 m and a vertical drop of 0.3 m. The channel bed is at an elevation of 10.04 m. The water surface elevation is 10.0 m. The distance from the spillway crest to the channel bed is 4.2 m. The distance from the channel bed to the downstream structure is 6.0 m. The downstream structure is a vertical wall with a gate. The unit is m.

図-2 実験装置及び海浜モデル

図-1に示すような海浜を二次元的に考えた場合、近似的に、式(1)で示すような固有周期が存在する。

ここで、 T : ステップ上水域（浅海部）の有する固有周期、 L : ステップ長、 h : 浅海域の水深である。一方、沿岸に來襲する暴浪は、うねり性の（群をなして來襲する）波であることが多い。合田¹¹⁾、木村¹²⁾の現地観測及び理論的な検討を参考にすれば、高波の繰り返しの連の平均長は、

RUN	T(s)	T _g (s)	$\bar{H}(\text{cm})$	$\Delta H/\bar{H}$
1	1.6	9.6	6.5	0.5
2		14.4		
3		22.4		
4		27.2		
5		32.0		
6		40.0		

3～10分 ($n=1$) と計算される。また、波浪の周期を約15秒程度と考えると波群の周期は $T=2\sim6$ 分程度となる。すなわち、周波数でのみ判断すると来襲する波群と沿岸水域の固有周期との干渉は十分考えられるのである。

(I) 基礎方程式

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial U(h+\eta)}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + F_x + \frac{1}{\rho(h+\eta)} \cdot \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon \frac{\partial U}{\partial x} \right) + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

—572—

シュを用いた。非線形項には、計算の安定性を増すために風上差分を用いた。式(3)における Radiation Stressは、入射波が群をなして来襲することから時間的に変動する事になる。前述したように、日野・沢本¹⁾は、上式を線形近似し平均海面の過渡応答を求めた。一方、Symonds & Bowenらは^{5), 6)}、日野・沢本¹⁾と同様、線形近似によって Surf-beatの解析解を与えている。Symonds & Bowenらは、砕波後の波高が静水深に比例するとし、Radiation Stressの変動を砕波点の移動として捉えそれを造波板とのアナロジーで長周期波が発生するものとしている。このような解釈には、多少疑問を有するが、ここでは述べないことにする。

(II) 境界条件

流体の数値シミュレーションで、往々にして問題となるのが境界条件である。特に、任意反射率境界をいかに取り扱うかが問題となる。波動問題で一般に用いられているのは、谷本・小舟の任意反射率境界や長波近似境界である¹³⁾。しかしながら、これらは、無反射造波境界に不向きであったり、多成分合成波には使えない、計算がややこしいなどの点で不敏である。筆者らは、計算が単純でしかも上述の不敏さを解消する新しい境界を開発したのでここで簡単に説明する(1987年10月日野によって発見)。図-3に示す境界点の η_{im} を計算する際に $U_{im+1}=0$ として(すなわち、固定境界となる。また、 $U_{im+1}=-U_{im-1}$ としてもよい。)計算する。この η_{im} は、完全反射という条件で求めたものであるから境界点の求めべき(透過境界条件の場合) η_{im} は、 $\eta_{im}=\eta_{im}'/2$ として得られる。もし、沖から入射波 η_w があれば $\eta_{im}=\eta_{im}'/2+\eta_w$ として与えればよい。また、境界が反射率 K_r であれば、 $\eta_{im}=(1+K_r)\cdot\eta_{im}'/2$ として境界点の η を求めればよいことになる。本計算法の妥当性は、後に述べる計算結果で説明するが、その発見と詳細は、文献14), 15)を参照して頂きたい。汀線での境界は、一般には移動境界として取り扱われるが、ここでは、汀線に固定壁を設置することにした。すなわち、 $U=0$ として取り扱った。

(III) 数値計算方法及び結果

まず、式(2), (3)の差分計算の検証を、定常状態における一様勾配の理論解との比較で行う。表-2の Case-1 の条件を用いて数値計算を行った結果を図-4に●印で示した。図-4における横軸は、汀線から砕波点までの距離で無次元化した無次元距離であり、縦軸には、平均水面の変動量を入射波高で無次元化した量で示してある。また、実線は、理論値である。数値計算値と理論値は良好な一致度を見せており、本計算の信頼性及び安定性は高いものと考えられる。次に、Surf-beatの計算を行う。本研究で問題とするのは、極めてダイナミックな現象を対象としているので、式(3)の非線形項を落とす訳にはいかない。また、砕波点近傍の Wave-setdown を無視するとその分 Set-up が大きくなることになるので、波高の浅水変形をも考慮する必要がある。砕波波高は、長周期波との干渉によって定常波の場合と異なると考えられるが、津嘉山・仲座¹⁴⁾の定常波を用いた実験結果を考慮し、合田の砕波指標で係数を $\alpha=0.14$ とした値を用いることにした。また、ステップ上の浅海域における波高に関する情報は余りにも未熟なものであるので、定常波を用いた場合のデータを用いた。すなわち、砕波後の波高は、水深($D=h+\eta$)に比例し、図-5の Set-up 量を用いて、 $H=0.33\cdot(h+\eta)$ で与えられる波高まで逡減するものと仮定するのである。図-6に、

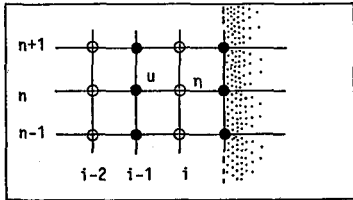


図-3 計算メッシュ

表-2 数値計算諸元

計算条件	case-1	case-2
T(s)	1.6	1.6
Tg(s)	0.0	28.2
H(cm)	2.0	6.0
ΔH (cm)	0.0	3.0
ΔX (m) *	1.0	0.075
Δt (s) *	0.05	0.041

* $\Delta t, \Delta X$ は、差分量を示す。

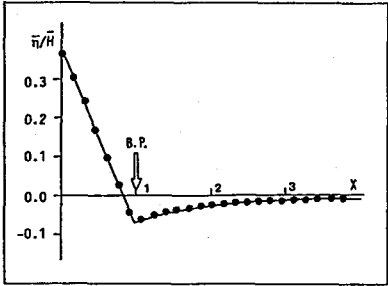


図-4 一様斜面上における理論値と数値計算値との比較

この仮定を用いて平均水位の変動量の計算値と定常波を用いた実験値との比較を行った。定常波の場合、この仮定はほぼ妥当である事が分かる。Surf-beatは、入射波群に伴う波高の変化により、式(3)中のRadiation Stressが変化することによって引き起こされると考え、入射波高を $H(t)=H \cdot (1+\alpha) \cdot \sin(\sigma t)$ ($H(t)$:入射波波高の時間変化, H :平均波高, α :波高変調率, σ :波群の周期を用いた波数) で正弦的に変化させ、式(2), (3)の非定常計算を行った。 η の時間的・場所的変動を三次元的に示したのが図-7である。なお、計算諸元は、表-2のCase-2である。ステップ上では、平均的なSet-upが生じ、砕波点近傍ではSet-downが形成されているまた、汀線におけるSurf-beat波形は、非線形性によってかなり前傾化している。これは、海浜流を非定常系として取り扱うことによって初めて現れるものであり、また、筆者らの言うダイナミックなSurf-beatの一面を示唆するものである。

Symonds & Bowenらも指摘しているが砕波点から岸では、重複波が形成され、沖側では、沖向き進行波が生じている。

(3)実験結果

表-1のRun-1の条件に対応する測定結果を図-8に示した。測定点は、図-2の点Cである。図-8で H は、点Cにおける入射波の波形であり、 U 、及び W は、それぞれ測定点における水位、水平流速及び鉛直流速の変動(それぞれr.m.s.の値で正規化してある)を示し

ている。また、図の下にまとめた数値は、それぞれの平均値及びr.m.s(標準偏差値)を示している(c.g.s.単位)。()内の数値が長周期変動の値である。なお、滑らかな曲線は、長周期変動成分であり、個々波の周期でSmoothingをかけてある。水位の長周期変動は、大きく前傾化しており、流速変動もその先端付近で激しく変動している。すなわち、長周期変動は、極めてダイナミックな現象として捉える必要が理解される。こうした長周期波の激しさは、海岸防災上の問題点を多く含んでいるが、これについては別の機会に述べたい。図-9は、水位変動の平均値を示し、図中●印が実験結果である。実線は、数値計算結果である。この場合、実験値と計算値は、一致した傾向にある。図-10は、入射波の平均波高に対する波高の変動量を $H/H=0.5$ ($H=6.5\text{cm}$)と一定に保ち、入射波群の周期を9.6~40.0秒まで変化させ、波群の来襲による平均水面のr.m.s共振応答を検討したものである。縦軸には、平均水位の変動量(r.m.s)を入射波高で無次元表示してある。横軸は、波群の周波数である。○及び●印が、それぞれ点B及び点Cにおける実験値であり、△印は、数値計算で求めた点Cにおける値である。また、実線は、それぞれの平均的な値を曲線で近似した

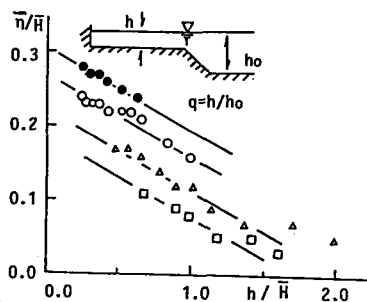


図-5 単一波を用いた実験による最大Set-up量

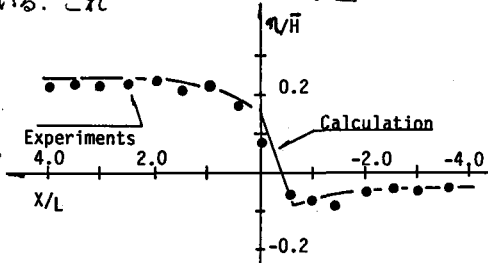


図-6 単一波によるSet-up, Set-downの実験値と計算値との比較

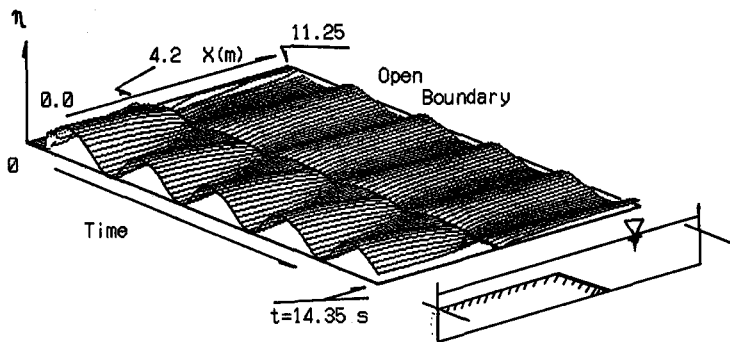


図-7 Surf-beatの空間・時間変化

ものである。矢印で示した周波数は、式(1)によって推定した共振振動数であり、それぞれ $n=1$, $n=2$ に対応している。実験値は、 $n=1$ に対応する周波数より若干低い振動数で共振を生じている。定常時における汀線近傍の Wave-setup が入射波高の 1~3 割程度 (図中斜線で示した枠内) であることを考えれば、広い振動数にわたって有意な共振応答が生じていることが理解される。共振曲線の実験値と数値計算値とを比較した場合、数値計算値はかなり小さい値を取っている。

もちろん、その原因は、主として、数値計算する際の仮定にあると考えられる。図-11に、波群中の個々波の波高の場所的变化を示した (RUN-4)。この図で、例えば、番号1と4、2と3はそれぞれほぼ同じ入射波高であるが、それらの場所的変動パターンは大きく異なっている。一方、計算に用いた波高の場所的变化は、実験値よりもかなり小さく、この点が実験値よりも理論値が小さく現れる原因であり、これは流れと波の干渉によるものである。更に、実際には Radiation Stress の時間的な変動と同時に、波の質量輸送速度も変動することになり、今後は、この点を改善していく予定である。

4. おわりに

本研究における主な結論を列挙すると以下ようになる。

- (1) 明確な固有周期を有する海岸には、来襲波群によって平均海面の共振応答が形成される。
- (2) その結果、平均海面の beat 振幅は、広い周波数帯にわたって極めて大きく、この現象を三次元的に捉えた場合、それが引金となる特異な沿岸水理現象を引き起こすに十分なエネルギーを有するものと考えられる。

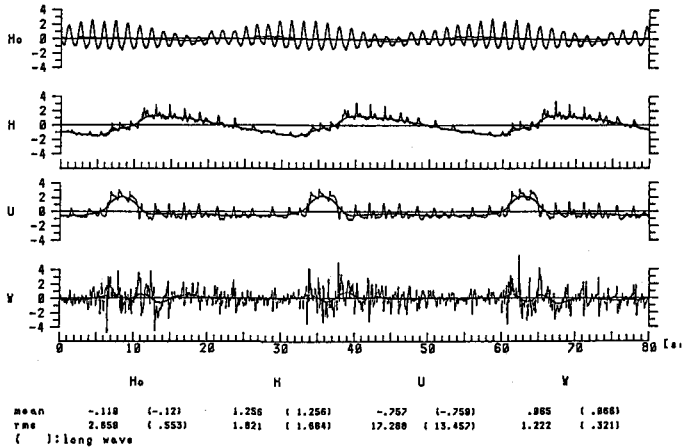


図-8 Surf-beatの波形及び流速変動

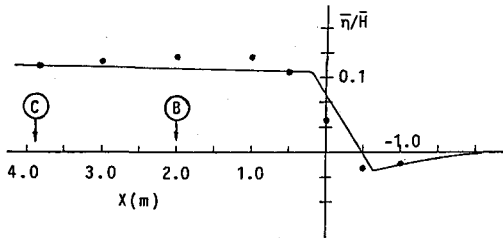


図-9 水面変動の定常成分

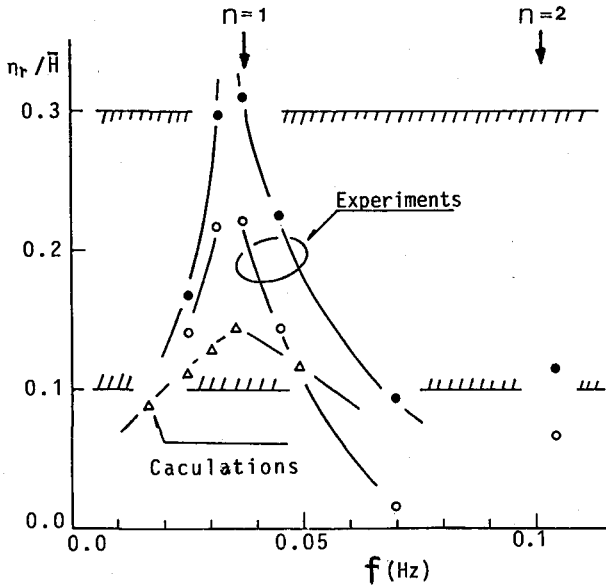


図-10 平均水面のr.m.s共振応答

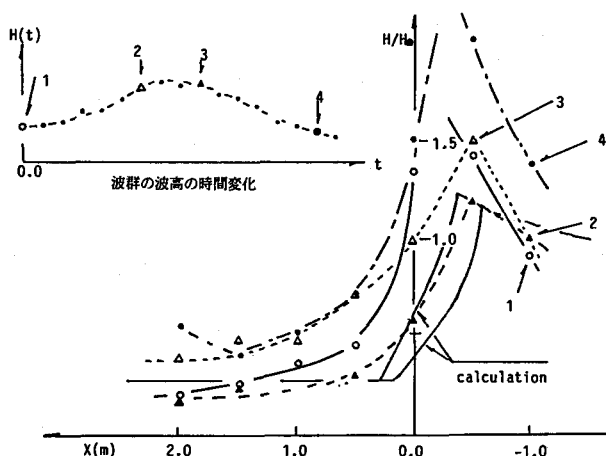


図-1 1 波群中の個々波の変形パターン

(3) こうしたSurf-beatは、津波の来襲に酷似した形で来襲する。

(4) 数値計算値は、実験値よりもかなり小さく、今後検討すべき点が多い。

(5) 数値計算における新しい任意反射率境界条件を開発した。

最後に、本研究を行うにあたり、東京工業大学・琉球大学の両水工学研究室には甚大な協力を受けており、ここに感謝致したい。

また、この研究の一部は、文部省科学研究費(奨励研究(A))の援助を受けている事を付記しておく。

参 考 文 献

- 1) 日野幹雄・沢本正樹 (1977): 非定常過程としての海浜流の研究, 第24回海岸工学会論文集, 596-599.
- 2) Munk, W. H. (1949): Surf beats, Trans. AGU, Vol. 30, NO. 6, 849-859.
- 3) Tucker, M. J. (1950): Surf beats, sea waves of 1 to 5 minute period, Proc. Roy. Soc. A, Vol. 202, 505-573.
- 4) Longuet-Higgins, M. S. and Stewart, R. W. (1962): Radiation Stresses and mass transport in gravity waves with application to surf beats, Jour. Fluid Mech., 13, 481-504.
- 5) Symonds G., Huntly D. A., Bowen, A. J. (1982): Two-Dimensional Surf beats: Long wave generation by a time-varying breakpoint, Jour. Geophysical Research, Vol. 97, NO. C1, 492-498.
- 6) Symonds G., Bowen, A. J. (1985): Interaction of nearshore bars with incoming wave groups, Jour. Geophysical Research, Vol. 89, NO. C2, 1953-1959.
- 7) Gallagher, B. (1971), Generation of surf beat by non-linear wave interactions, Jour. Fluid Mech., 49, Part 1, 1-20.
- 8) 合田良実 (1975): 浅海域における波浪の碎波変形, 港研報告, 第14巻第3号.
- 9) Katoh, K. (1984): Multiple longshore bars formed by long period waves, 港研報告, Vol. 23, No. 2.
- 10) 日野幹雄・福西祐・小林智尚: 新しいA/D変換機的设计・制作, 論文投稿予定
- 11) 合田良実 (1985): 波浪の統計的性質に関する二, 三の数値的検討, 港研報告, Vol. 24, No. 4, 65-102.
- 12) 木村晃 (1987): 不規則波の隣合う波高の相関性について, 第34回海岸工学講演会論文集, 136-140.
- 13) 本間仁 (1985): 海岸環境工学, 東京大学出版会, 212-271.
- 14) 日野幹雄 (1987): 外境界における無反射条件の極めて簡単な計算スキームの提案, 東京工業大学土木工学科研究報告.
- 15) 日野幹雄・仲座栄三: 続報
- 16) 津嘉山正光・仲座栄三 (1987): 2次元リーフによる波の変形と平均水位変化, 第34回海岸講演会論文集, 76-80.