海岸護岸周辺の常時微動特性と波浪諸元との 関連性に関する研究

泉宮 尊司¹・菊地 優太²・石橋 邦彦³

¹正会員 新潟大学教授 工学部建設学科 (〒250-2181 新潟市西区五十嵐二の町8050番地)

E-mail:izm@eng.niigata-u.ac.jp

² 新潟県 新潟地域振興局津川地区振興事務所 (〒959-4402 東蒲原郡阿賀町津川1861-1)

E-mail:kikuchi@pref.niigata.lg.jp

³正会員 新潟大学技術職員 工学部建設学科 (〒250-2181 新潟市西区五十嵐二の町8050番地)

E-mail:isibasik@eng.niigata-u.ac.jp

本研究では、常時微動の特性と起源を明らかにするために、新潟西海岸において広帯域速度計を用いて、常時微動を計測している。観測された常時微動には、周期が3s～4sの変動成分が卓越しており、これは丁度新潟西海岸に襲来している波浪の有義波周期の約半分であった。また、常時微動の卓越振動方向についても調べたところ、ほぼ北向きが卓越しており、波浪の大きい日本海の北東部に向いていることが明らかとなった。常時微動と波浪との関係を調べるために、Longuet-Higgins¹⁾およびHasselmann²⁾の理論を用いて、常時微動と海底面圧力のスペクトルの比較も行った。その結果、両者の形状およびピーク周波数はよく一致し、彼らの理論がほぼ正しく、波浪の非線形干渉による圧力変動が常時微動の主要因であることが明らかとなった。

Key Words : *microseisms, microbaroms, directional wave spectrum, nonlinear wave interaction, Rayleigh wave, infragravity waves*

1. 緒言

地盤構造や地震動の増幅特性を簡易に評価する方法として、常時微動が幅広く用いられている^{3),4),5)}。また、構造物の固有振動の変化を計測することにより、構造物の損傷度合や構造物周辺の洗掘状況の把握に利用されている⁶⁾。常時微動の起源は、波浪による海底圧力変動によるもの^{1),2),7)}、風圧および風の摩擦力によるもの、交通荷重や振動に由来するもの、外部重力波(Infragravity wave)によるもの、大気重力波によるもの、および地球の常時自由振動に由来するものなどがある^{8)~17)}。常時微動を利用して地盤構造や構造物の損傷状況などを推定する際には、これら常時微動の起源および特性を十分に把握した上で、利用することが必要である。

常時微動に関する科学的知見と関心は、Longuet-Higgins・Ursell⁷⁾により提起され、Longuet-Higgins¹⁾により理論的な解析が行われ、非線形重複波が常時微動の原因であることが初めて明らかにされた。その後、Hasselmann²⁾により、非線形多方向不規則波に拡張され、圧力変動の周波数スペクトルが理論的に求められた。一方、常時微動の起源として、外部重力波(Infragravity wave)やLove波、および地球の常時自由振動によるとする研究

も数多く存在する。

そこで本研究では、様々な気象条件の下で、海岸護岸および海岸付近の地盤上で常時微動を観測し、その振動特性を詳しく調べ、その伝搬特性や波浪および気象特に風速との関係を明らかにすることを研究の目的とする。

2. 常時微動の励起源の理論の概要

常時微動の起源は、前節で述べたように、様々な原因が考えられている。Longuet-Higgins・Ursell⁷⁾は、Micheが最初に発見した重複波による海底面上の圧力が一定ではなく、振幅の2乗に比例し、深さ方向に減衰しないことを重要視して、その一般化を実施した。

$$\frac{\tilde{p} - p_0}{\rho} - gh = -2a_1 a_2 \sigma^2 \cos 2\sigma t \quad (1)$$

ここに、 $\tilde{p}$ は圧力変動、 p_0 は大気圧、 ρ は海水の密度、 g は重力加速度、 h は水深、 $a_i (i = 1, 2)$ は波の各振幅、 $\sigma = 2\pi/T$ は角周波数、 T は周期である。上式より、海底面上の圧力変化は水深 h に関係なく有意な値を示し、基本周波数の2倍の振動数で変動することである。

式(1)の結果は、規則波の重複場の解であるが、Hasselmann²⁾は非線形多方向不規則波に拡張して、圧力

変動および圧力の波数・周波数スペクトルを理論的に誘導している。いま、圧力を $p(\mathbf{x}, t)$ とすると、

$$p(\mathbf{x}, t) = \iiint dP(\mathbf{k}, \omega) \exp[i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} + \omega t)] d\mathbf{k} d\omega \quad (2)$$

と表される。ここに、圧力の波数周波数スペクトルは、

$$F_p(\mathbf{k}, \omega) = \langle |dP(\mathbf{k}, \omega)|^2 \rangle / (d\mathbf{k} d\omega) \quad (3)$$

である。ここに、 $\mathbf{x} = (x_1, x_2)$ は平面座標、 $\mathbf{k}$ は波数、

ω は角周波数、 $\langle A \rangle$ は、 A のアンサンブル平均である。

常時微動の発生に関わる圧力の波数周波数スペクトルは、水位 ζ の波数周波数スペクトルを用いて、以下のように近似される。

$$F_p(\mathbf{k}, \omega) = \frac{\rho_1^2 \omega^7}{64 g^2} \int_{-\pi}^{\pi} F_{\zeta}(\mathbf{k}') F_{\zeta}(-\mathbf{k}') d\theta' \quad (4)$$

となる。ここに、 $\mathbf{k}' = \omega^2 / 4g$ 、 θ' は $\mathbf{k}'$ の角度、 ρ_1 は密度である。水位変動の方向スペクトル密度を $S_{\zeta}(\omega, \theta)$ とし、次の関係 $S_{\zeta}(\omega, \theta) = F_{\zeta}(\mathbf{k}) k dk / d\omega = 2F_{\zeta}(\mathbf{k}) (k^2 / \omega)$ を用いて、式(4)を書き換えると、

$$F_p(\mathbf{k}, \omega) = \frac{\rho_1^2 g^2 \omega}{2} \int_{-\pi}^{\pi} f_{\zeta}(\omega/2, \theta) f_{\zeta}(\omega/2, \pi + \theta) d\theta \quad (5)$$

となる。水位変動の周波数スペクトルを $S_w(f)$ 、圧力のスペクトルを $S_p(f)$ とすると、上式は以下のように書き換えられる(Kibblewhite and Ewans⁹⁾).

$$S_p(f) \cong K f^3 S_w^2(f/2) G(q) \quad (6)$$

ここに、 K はある定数、 q は方向集中度を表すパラメータ、 $G(q)$ は方向分布関数に関わる変数で、1～5程度に値が変化する。

3. 海岸周辺の常時微動の現地観測

(1) 常時微動の現地観測

常時微動の現地観測は、新潟西海岸の五十嵐浜、新潟大学工学部棟裏松林、寄居浜東、マリンピア日本海前、関屋分水左岸および右岸で行った。計測装置は、写真-1に示すように東京測振の広帯域のサーボ型速度計VSE-355EIを用いた。計測レンジは速度2m/s、加速度20m/s²、周波数レンジ0.018Hz～100Hz、ダイナミックレンジ136dBである。したがって、周期0.01s～55s程度の微動が計測できる広帯域の速度計である。

写真-1 広帯域サーボ型速度計VSE-355EI

写真-2 工学部棟裏松林での観測状況

常時微動の観測に際しては、サーボ型速度計のx軸を東西方向、y軸を南北方向、z軸を上下方向に設置し、本研究では高周波数の振動を対象としないので、速度をレコーダに10Hzで記録した。なお、観測装置への風の影響を抑制するために、写真-2に示すようにポリバケツを用いて、速度計全体に覆い被せた状態で計測を行った。

(2) 波浪観測データ収集および海底水圧変動の観測

常時微動と波浪および風との関連を調べるために、信濃川下流河川事務所での観測されている関屋分水河口の西方約1.5kmに位置する関屋観測所(設置水深約16m)の10分毎の有義波高および有義波周期の波浪データを用いた。

また、風速に関しては観測地点において、高さ約2mでの1分間平均風速を計測すると同時に、信濃川下流河川事務所のHPより10分毎の平均風速を用いた。なお、極浅海域ではあるが、五十嵐浜の防波堤側面の水深約2mの位置において、Pressure Systems社製のEsterline(KPSI)を用いて海底圧力の変動の計測も10Hzで行っている。

図-1は、五十嵐浜および松林における常時微動観測時の新川漁港での海底圧力水頭の周波数スペクトルを示したものである。観測日時は、2016年1月22日の11時04分～12時49分であり、関屋分水沖では有義波高1.3m～1.4m程度であった。冬季の日本海としては、波浪が比較的小さい状況である。この図に示すように、水深が約2mと浅いため、0.05Hz以下の長周期波成分も有意に発生しており、非線形性のため、ピーク周波数の約0.1Hzの2倍の周波数のエネルギーも比較的高い状態にある。

図-1 常時微動観測時の新川漁港での海底圧力のスペクトル

4. 観測結果とその考察

(1) 常時微動の卓越振動方向

新潟大学工学部棟裏の松林で計測された常時微動の速度波形を、図-2に示している。観測日時は、2016年1月22日12時24分～12時49分である。上図は東西方向を、中図は南北方向の速度波形を示しており、下図は上下方向のそれを示している。南北方向と上下方向の振幅が大きく、周期が3s～4s程度であることも分かる。

この常時微動の速度のスペクトルを算定したのが、図-3である。この図に見られるように、周波数が0.3Hz前後のエネルギーが卓越しており、この時の有義波周期が5.5s前後であるので、およそ半分の周期であることが分る。また、周期が数10sの変動が見られるが、この成分がInfragravity waveに関連した変動であるかについては、位相関係等さらに詳細な検証を行う必要がある。周波数が0.2Hzから1Hzの範囲では、明らかにx軸すなわち東西方向の振動が小さく、yz平面での振動が卓越している。

図-2 新潟大学工学部棟裏の松林の速度波形

図-3 常時微動の速度のスペクトル(工学部棟裏の松林)

図-4は、同じく五十嵐浜で観測された常時微動の波形を示している。振動振幅は、y軸およびz軸の変動が大きく、周期がおおよそ3s～4s程度であることは、新潟大学工学部棟裏の松林で計測された常時微動と同じである。しかしながら、前者と大きく異なることは、1Hz以上の高周波数変動成分が顕著には存在しないことである。この1Hz以上の振動成分は、交通振動から来るものと推測される。すなわち、新潟大学工学部棟裏の松林は数10m近くに道路があり、一方五十嵐浜は200m程度以上道路から離れているので、その影響が振動の減衰により軽減されたものと思われる。

図-5の常時微動のスペクトルを見てみると、工学部裏の松林で観測された結果と同様に、x軸すなわち東西方向の振動エネルギーが1オーダー程度小さく、エネルギーピーク周辺では、yz平面に沿った振動が卓越している。エネルギーの値自体は小さいが、波浪のピーク周波数よりやや小さい周波数に鋭いピークも存在しており、遡上波に対応した振動成分の可能性があると考えられる。

図-4 五十嵐浜の常時微動の速度波形

図-5 常時微動の速度のスペクトル(五十嵐浜)

図-6 振動の卓越方向(工学部棟裏の松林)

図-7 振動の卓越方向(五十嵐浜)

常時微動の卓越周期成分の伝搬方向を調べるために、バンドパスフィルタを用いて、周期が1.3s~5.0sに対応する成分を抽出して、 (u,v) 成分をプロットしたのが、図-6(工学部棟裏の松林)および図-7(五十嵐浜)である。これらの図に示されているように、常時微動の卓越周期成分はある特定の方向に集中していることが分る。磁北から測った卓越波向 θ_p は、工学部棟裏の松林および五十嵐浜で、それぞれ 4.3° および 1.9° であった。場所の違いによる卓越波向の差異は 2° 程度とかなり小さい。これらの伝播方向を航空写真にプロットしたものが、写真-3である。赤い矢印が常時微動の伝搬方向を示しており、波浪のより大きい日本海の中北部の方向を指している。

写真-3 常時微動の卓越方向(赤矢印) Google Earth 2016 より

(2) 水平速度スペクトルと圧力スペクトル

水平速度スペクトルと式(6)で示す海底圧力スペクトルを比較したものが、図-8および図-9である。前者が五十嵐浜、後者が新潟大学工学部裏の松林で観測した結果である。水位変動の周波数スペクトルは、Bretschneider-光易型スペクトル¹⁸⁾を用い、有義波高および有義波周期は関屋分水沖の観測値を用いている。いずれも、振動の

図-8 常時微動の速度のスペクトルと圧力スペクトル (五十嵐浜)

図-9 常時微動の速度のスペクトルおよび圧力スペクトル (新潟大学工学部棟裏の松林)

図-10 常時微動の速度のスペクトルおよび圧力スペクトル (関屋分水右岸護岸上)

図-11 護岸上および地盤上の常時微動のH/Vスペクトル比
(寄居浜東: $H_{1/3}=0.33\text{m}$, $T_{1/3}=3.5\text{s}$)

図-12 強風・高波浪時の常時微動のH/Vスペクトル比
(関屋分水右岸: $H_{1/3}=1.47\text{m}$, $T_{1/3}=5.3\text{s}$)

大きいy軸およびz軸の常時微動は、0.4Hz～0.8Hzの範囲で海底圧力スペクトルの形状によく類似しており、エネルギーピークの位置もよく一致している。

一方、護岸上では図-10に示すように、護岸前面に働く衝撃波圧を含む波力によって護岸が振動するために、水平成分(y軸)の常時微動は、波浪の卓越周期成分の変動が顕著となる傾向にあることが分かった。

(3) 常時微動のH/Vスペクトル比の特徴

常時微動のH/Vスペクトル比は、地震動のそれに類似しており、地盤の卓越周期の推定にも用いられている。

図-11は、寄居浜東で観測された護岸上およびその背後の地盤上の常時微動のH/Vスペクトル比を示したものである。1台の速度計で計測しているので、10数分程度観測時刻がずれているが、ほぼ同様なスペクトル比が得られている。しかしながら、詳しく見ると周波数が1.15Hz周辺で地盤上の方がスペクトル比が大きくなっており、この周波数が地盤の卓越周期に近いと推測される。

強風時で波浪がやや大きい場合には、図-12に示すようにH/Vスペクトル比の値全体が、1オーダ以上大きくなり、卓越周期に対応するピークは埋もれて見えなくな

っている。しかしながら、波浪のピーク周波数に対応する変動は顕著となっており、特に護岸上ではより明確に表れている。

5. 結論

海岸付近で広帯域の速度計を用いて、常時微動を計測し、波浪および風速との関係および常時微動の伝播方向などを調べた結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 海岸付近(五十嵐浜)での常時微動は、卓越周波数が存在し、その値は0.3Hz前後であり、波浪のピーク周波数のおよそ2倍周波数であった。より長周期の変動(数10s～数100s)も見られるが、これについては完全に解明できていないが、その周波数帯から外部重力波および地球の常時自由振動の可能性が考えられた。
- (2) 波浪のピーク周波数付近にも常時微動の幾分小さいピークが存在が認められた。特に、護岸上では波力による振動も顕著であるため、2倍周波数のピークの値を上回ることもあった。しかしながら、この周波数のピークは海岸からの距離に従って急激に減衰していた。
- (3) 常時微動の卓越周波数帯の伝搬の卓越方向は、ある特定の方向に限定されており、それは何れも海岸の方向であった。すなわち、この周波数帯の常時微動は海岸の方向から襲来していることが明らかとなった。
- (4) Hasselmannの理論より水圧の周波数スペクトルを算定し、実測の周波数スペクトルと比較すると、2倍周波数の所にエネルギーピークがあることは上手く再現されており、Longuet-HigginsやHasselmannの理論がほぼ正しいことが示された。
- (5) 2倍周波数以上のスペクトル密度の大きさは、風圧および摩擦力に依存した振動成分であり、風速が大きい気象条件下では、平均的なパワーレベルも1～2オーダ大きくなっていったことから確認された。
- (6) H/Vスペクトル比を算定することにより、2倍周波数の卓越部分は見かけ上消滅し、波浪のピーク周波数および地盤や構造物の卓越周波数がやや顕著に表れる傾向にあった。また、波浪が大きく護岸で衝撃砕波圧が作用する条件下では、波の卓越周波数付近に常時微動のピークが表れるが、海岸から遠くに離れるに従って、急速に減少していた。

謝辞：本研究の一部は、科学研究費基盤研究Cによったこと、また本研究で用いた波浪観測データは、国土交通省北陸地方整備局信濃川河川下流事務所の観測データを利用したことを付記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) Longuet-Higgins, M. S. : A theory of the origin of microseisms. Phil. Trans. Roy. Soc. London A, Vol.243, pp. 1–35, 1950.
- 2) Hasselmann, K. : A statistical analysis of the generation of microseisms. Rev. of Geophys. 1 (2), pp. 177–210, 1963.
- 3) 野田節男, 上部達生 : 海岸堤防の常時微動観測, 港湾空港技術研究所資料, No. 205, pp. 1-75, 1975.
- 4) 丸山喜久, 山崎文雄, 本村 均, 浜田竜也 : 常時微動の H/V スペクトル比を用いた地震動推定法の提案, 土木学会論文集, No. 675, I-55, pp. 262-272, 2001.
- 5) 笹川考義ら : 常時微動アレイ観測による新潟の地盤特性, 地盤工学研究発表会 発表講演集 第 39 回地盤工学研究発表会, pp. 1016, 2004.
- 6) 長尾毅 : 常時微動を用いた護岸舗装直下の空洞の検出に関する研究, 海岸工学論文集, 第 50 巻, 土木学会, pp.1376-1380, 2003.
- 7) Longuet-Higgins, M. S., Ursell, F.: Sea Waves and Microseisms, Nature, Vol.162, pp. 700, 1948.
- 8) 鏡味洋史ら : やや長周期の微動観測と地震工学への適用-8-波浪との同時比較観測, 地震, 日本地震学会編, 36(4), pp. 609-617, 1983.
- 9) Kibblewhite, A. C and Ewans, K. C. : Wave-wave interactions, microseisms and infrasonic ambient noise in the ocean. Journal of the Acoustical Society of America 78: pp. 981-994, 1985.
- 10) Webb, S. C. : Broadband seismology and noise under the ocean, Reviews of Geophysics, Vol. 36, No.1, pp. 105-142, 1998.
- 11) Bromirski, P. D., Duennebie, F. K. : The near-coastal microseism spectrum: Spatial and temporal wave climate relationship, Journal of Geophysical Research, Vol.107, pp.5-1 - 5-20, 2002.
- 12) Webb, S. C. : The Earth's 'hum' is driven by ocean waves over the continental shelves, Nature, Vol.445, Nature Publishing Group, pp.754-756, 2007.
- 13) Tanimoto, T. : Excitation of microseisms, Geophysical Research Letters, Vol.34, American Geophysical Union, pp.1 -4, 2007.
- 14) Kedar, S., Longuet-Higgins, M. S., Webb, F., Graham, N., Clayton, R., Jones, C. : The origin of deep ocean microseisms in the North Atlantic Ocean, Proceeding of the Royal Society A, Vol.464, pp.777-793, 2008.
- 15) Fukao, Y., Nishida, K. and Kobayashi, N. : Seafloor topography, ocean infragravity waves, and background Love and Rayleigh waves. J. Geophys. Res. Vol. 112 (10), B04302, DOI: 10.1029/2009JB006678, 2010.
- 16) Arduin, F. and Herbers, T. H. C. : Noise generation in the solid Earth, oceans, and atmosphere, from non-linear interacting surface gravity waves in finite depth, J. Fluid Mech., Vol. 716, pp. 316-348, 2013.
- 17) 西田 究 : 常時地球自由振動, 地震 第 2 輯 第 61 巻, 日本地震学会, pp. 115-121, 2009.
- 18) 合田良実 : 耐波工学, 鹿島出版会, 430p., 2008.

(2016.3.16 受付)

CHARACTERISTICS OF MICROSEISMS MEASURED NEAR THE NIIGATA WEST COAST IN RELATION TO WAVE FREQUENCY SPECTRUM

Takashi IZUMIYA, Yuta KIKUCHI and Kunihiko ISHIBASHI

Microseisms were measured on the Niigata West Coast by using broadband seismometer in order to reveal the features and the origin of them. The observed microseism contained a predominant fluctuating component with the period of 3s to 4s, which is about a half of the significant wave period. There exists a predominant direction of the propagation of microseism that is pointing northward, the northeastern part of the sea of Japan where larger waves are generating. Using the theory of the generation of microseisms by Longuet-Higgins(1950) and Hasselmann(1963), the bottom pressure spectrum was calculated and compared with the spectrum of microseisms. It was found that the peak frequency and shape of the pressure spectrum agree well with those of the spectrum of microseisms. It means that observed microseisms were generated by the bottom pressure fluctuations with a frequency of $2f_p$.