

海上工事で発生する振動が 周辺海域の底生生物におよぼす影響

THE INFLUENCE THAT VIBRATION TO OCCUR BY MARINE CONSTRUCTION GIVES
TO THE BENTHOS OF THE PERIPHERAL SEA AREA

上田佳奈¹・山下徹²・中瀬浩太³

Kana UEDA, Toru YAMASHITA, Kota NAKASE

¹非会員 水修 五洋建設株式会社 環境事業部 (〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)

²非会員 五洋建設株式会社 東京土木支店 (〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)

³正会員 五洋建設株式会社 環境事業部 (〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)

It is possible that an underwater noise and vibration which occurred by marine construction have an influence on marine benthic invertebrates and fishes. For the present, we must to consider that the environmental impact about an underwater noise and vibration. There are many reports about the influence of underwater noise about fishes. However, the influence of an underwater vibration on the benthos is not clear. Therefore, we experimented to prove that the influence on the benthos (Bivalve, Gastropod, Crustacean, Fish) by the vibration.

As a result, the vibration was caused liquefaction and burrowing benthos pushed out the surface. The influence appeared remarkably by 110dB or more and 30Hz.

Key Words : Underwater vibration, Influence on benthos, burrowing, liquefaction

1. はじめに

建設工事をおこなう際には様々な環境への配慮が求められている。例えば海上工事については、周辺海域の生物に対する影響を最小限にするために、水質汚濁、騒音や振動などに配慮した施工方法が必要とされている。

水質に関する管理値は、建設工事によって発生する水の濁りやコンクリートあくによるpHの上昇などの生物への影響を設定した水産用水基準によって、河川、海域それぞれについての環境基準値が設定されている。

建設工事で発生する騒音・振動の管理値は、陸上工事では人体に対する影響を対象として、騒音は騒音規制法、振動は振動規制法に基づいて環境基準値を設定する場合が多い。一方、海上工事で発生する水中騒音や海底振動は、周辺に生息する生物や漁業活動に対する影響を考慮して設定されている場合が多いが一般化された基準はない。

水中騒音に対する魚類の反応について、海上工事に伴う漁業環境影響調査などで多くの調査、測定がおこなわれている¹⁾。一般的な魚類の可聴域は周波数50~1000Hzの範囲である。また、魚類の水中音と

の関係は、最少知覚レベルの聴覚閾値は60~110dB、快適な音の強さである誘致レベルは110~130dB、忌避行動が発生する威嚇レベルは140~160dB、損傷(致死)レベルは220dB以上の4段階に分けられており、威嚇レベル以上で影響をおよぼすとされている²⁾。そのため、海域の工事では水中騒音は魚類の反応を参考に、誘致レベルの上限値130dB以下に設定することがある。

一方、海底振動が周辺海域の生物におよぼす影響に関しては、水中発破や投石などで発生する水中音と振動に対する浮魚の反応²⁾³⁾などについて数例の報告がある程度で、底生生物に対する海底振動の影響についてはほとんど明らかになっていない。そのため、一般的に人体に有意な生理的影響が生じ始める振動レベルは80~90dB以上⁴⁾とされており、同じ生物である底生生物の数値が参考となると考えられている。

建設工事に関する騒音、振動の基準は、人体に対する影響を考慮して環境基準が整備されてきた経緯があり、生物への影響、特に振動に関する研究事例が少ない。今後は、周辺環境にも配慮した施工が求められると考えられることから、本研究では知見が少ない海底振動と底生生物の影響について実験的に評価することにした。

建設工事の中でも杭の打設作業による振動は大きく⁶⁾⁷⁾(表1)、周辺環境に与える影響も大きいことが予測されたため、杭の打設作業で使用するバイブロハンマや油圧ハンマによって発生する振動を再現して実験を行った。杭の打設の際に発生する振動は、衝撃荷重あるいは振動荷重が地盤に与えられ、地盤内を3次的に振動が伝播する現象であると考えられている⁵⁾。振動の伝播特性として、高周波の振動は距離減衰量が大きいため振動発生源付近ですぐに吸収されるが、低周波の振動は距離減衰量が小さく⁶⁾、施工時における振動の影響を広域におよぼす可能性がある。そのため実験では周波数の差異についても考慮するものとした。

対象生物は、海底振動の影響を強く受けると考えられる潜砂性の二枚貝、甲殻類、魚類および岩礁性の巻貝などの底生生物とし、海底振動が生物におよぼす影響について把握するための実験をおこなった。

表1 建設機械の振動レベル(発生源より30mの距離)⁶⁾

	振動レベル (dB)					
	40	50	60	70	80	90
バイブロハンマ		■	■	■		
ディーゼルハンマ			■	■		
ブルドーザー	■	■				
振動ローラー		■	■			
コンクリートブレーカー	■					
空気圧縮機	■					

2. 実験装置および実験方法

(1) 実験装置および環境条件

海底振動を再現するために、振動発生機の加振テーブルに水槽を固定し、水槽底面から振動を与えた。振動発生機は、汎用型振動試験機(型式BF-50UD、アイデックス社製:周波数設定域10~65Hz)を使用し、2軸合成振動(垂直・水平) + α の振動を再現した。振動レベルは、デジタル加速度計(HM-20アイデックス社製)および汎用振動計(VM-20A リオン社製)を用いて調整し(写真1, 図1, 表2, 3)、振動レベルはdBを用いて評価した。

水槽はプラスチック水槽(300mm×200mm×205mm)を使用し、海水はテトラマリンソルト(テトラ社製)を使用し、塩分濃度は約33‰になるように設定した。対象生物は実験前にプラスチック水槽に投入し、実験直前までエアレーションをかけて馴致させた。水温は生物の活性が高まる20℃程度になるようサーモスタットにて調整した。また、砂泥底で生息する生物については砂を敷設し、生息環境を再現した状況で実験をおこなった。

また、使用した砂は対象生物の産地周辺の干潟の粒度組成(図2)に近い、相馬硅砂5号(D₅₀=0.439mm)

を使用し、生物が潜砂可能な層厚50mm、水深は50mmとした。



写真1 実験装置全景

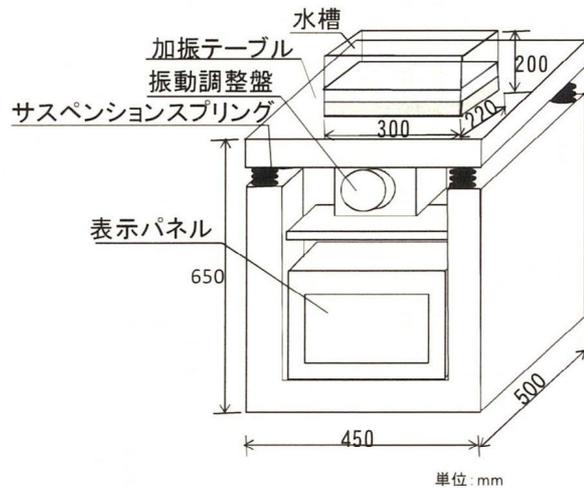


図1 振動発生機および水槽の模式図

表2 振動発生機仕様

	①汎用型振動試験機
周波数設定域	10~65Hz (0.1Hz単位)
許容加速度	98m/s ² (10G)
振幅調整範囲	0.2~3.0mmp-p

表3 振動試験機仕様

	②デジタル加速度	③汎用振動計
測定範囲	0~19.9G	加速度(AOG) 60~150dB (0dB-10 ⁻³ m/s ²)
周波数特性	0~100Hz±0.5%	加速度(AOC) 5~8,000Hz ±0.5dB

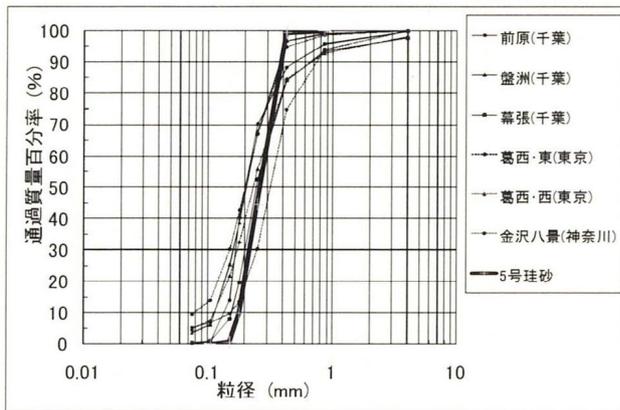


図2 5号珪砂および干潟の粒度組成⁵⁾

(2) 実験ケース

杭の打設作業の際には打設位置近傍では100dB程度の振動が生じている⁶⁾。打設に使われる作業機械は地盤条件や杭の形状等によって使い分けられ、発生する振動周波数は0～60Hzの範囲のものが主となっている⁶⁾。

こうした建設工事の現状を踏まえ、実験範囲は生物への影響および杭打設位置付近で発生する振動レベルを考慮して、100dB、110dB、120dB、130dBの4段階で設定した。また振動周波数は作業機械の性能を考慮して、各振動レベルにつき10Hz、15Hz、30Hz、60Hzの4段階で設定した(表4)。



写真2 杭打打設状況(パイプロハンマ使用)

表4 実験ケース

振動レベル (dB)	周波数(Hz)			
	10	15	30	60
100	○	○	○	-
110	○	○	○	○
120	○	○	○	○
130	-	○	○	○

(3) 対象生物

対象生物は、沿岸性底生生物のうち、水産有用種として重要とされている代表的な種類とした。対象種は、砂泥底に潜砂して生息している二枚貝類のバ

カガイ *Mactra chinensis* (千葉県富津産) およびアサリ *Ruditapes philippinarum* (千葉県市川産)、甲殻類のクルマエビ *Penaeus japonicus* (鹿児島県奄美大島産)、魚類のヒラメ *Paralichthys olivaceus* (愛知県渥美産) とした。また、岩礁域の比較的波あたりの強い場所に生息する巻貝のサザエ *Batillus cornutus* (千葉県千倉産) および魚類のカサゴ *Sebastes marmoratus* (愛知県渥美産) についても対象種とした。生物のサイズは主に成体サイズを用い、水槽あたりの個体数は、水槽サイズを考慮して、二枚貝類は10個体、他の生物は3～5個体とした(表5)。また、各ケースにつき3回、個体を変えて繰り返し実験をおこなった。

表5 対象生物および水槽あたりの個体数

	和名	種名	水槽あたりの個体数	殻長および体長(mm)
二枚貝	バカガイ	<i>Mactra chinensis</i>	10	50-60
	アサリ	<i>Ruditapes philippinarum</i>	10	20-50
巻貝	サザエ	<i>Batillus cornutus</i>	3	50-100
甲殻類	クルマエビ	<i>Penaeus japonicus</i>	5	100-150
魚類	カサゴ	<i>Sebastes marmoratus</i>	3	50-70
	ヒラメ	<i>Paralichthys olivaceus</i>	5	50-70

(4) 評価方法

振動実験は加振テーブルにプラスチック水槽を設置し、振動中の対象生物の状態について観察し、それらの行動状況より影響を評価した。

プラスチック水槽に生物を投入した後、潜砂性の生物に関しては、全ての個体が潜砂した状態、岩礁性のサザエは水槽壁に付着した状態、カサゴは水底で動きを止めて静止した状態になってから実験を開始した。振動暴露時間については、予備実験で30分間の連続振動を与えた結果、開始10分以降は生物の状態に変化がないことが確認されたため、振動暴露時間は10分間とした。

振動暴露中の生物の状態は、目視観察およびビデオカメラによる撮影と、写真撮影(振動前、5分後、10分後)より記録した。

各生物の振動に対する影響については、二枚貝類は殻の開閉状況・水管の収縮状況・潜砂状況について着目し、クルマエビは潜砂状況、魚類は潜砂状況や泳泳状況に着目して作成した評価基準を用いて評価した(表6)。

表6 評価基準

	評価項目	影響	
		影響無し	影響有り
二枚貝	殻・入水管状態	開殻・入水管出ている	閉殻・入水管引っこむ
	潜砂行動	潜砂	潜砂不能
	その他特異行動	無し	有り
巻貝	基質付着状況	付着	付着せず
	軟体部	出ている	殻中に引っ込こむ
甲殻類	潜砂行動	潜砂	潜砂不能
	その他特異行動	無し	有り
魚類	威嚇レベル	無し(有りでもすぐに馴致)	有り(継続)
	その他特異行動	無し	有り

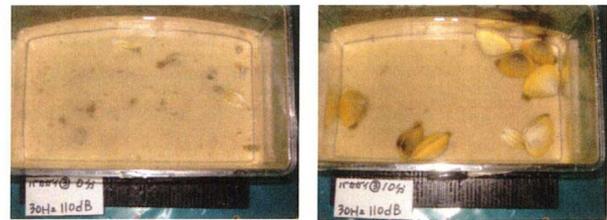
3. 実験結果

(1) 二枚貝類(アサリ・バカガイ)

アサリやバカガイは潜砂性の二枚貝で、水管を砂上に出して呼吸・摂餌している。また、潜砂方法は斧足を砂面に差し込み、殻を垂直に起こして斧足を膨張させて錨を形成し、足の両脇から水を押し出して底質の液状化をおこしながら砂中に潜砂する⁹⁾。

振動開始時に、水管を収縮させる個体もいるが、周波数10Hzと15Hzでは概ね110dBまでは、すぐに事前の状態に戻り、振動中もさらに深く潜砂する個体もみられたことから、振動による影響はないものと考えられた。10Hzと15Hzで120dB以上、30Hzで100dB以上および60Hzで110dB以上の振動になると、振動開始とともに砂が液状化して流動状態になり、二枚

貝は砂上に露出した(写真3)。殻長によって多少異なるが、バカガイの比重は約1.4前後、アサリの比重は約1.5前後で¹⁰⁾、5号珪砂の比重2.674¹¹⁾よりも比重が軽いので、液状化により底質表面に露出したものと考えられる。



振動開始前

10分後

写真3 バカガイ (30Hz 110dB)

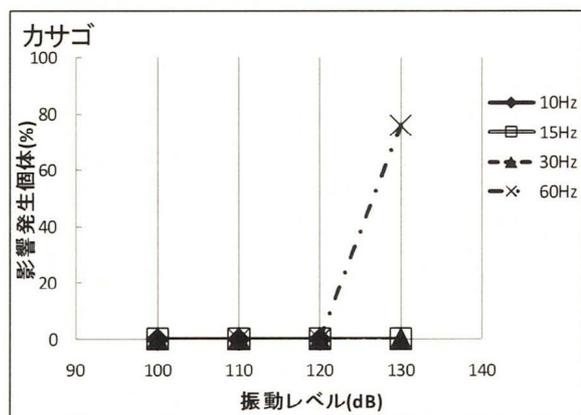
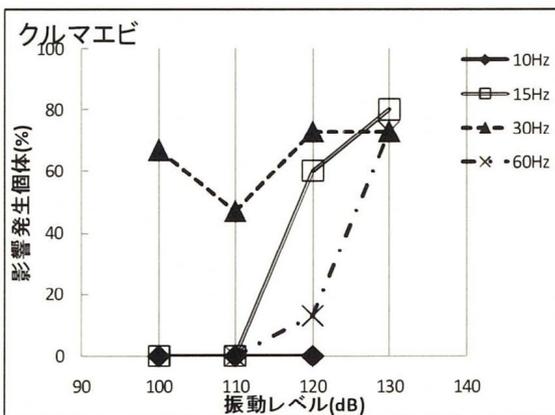
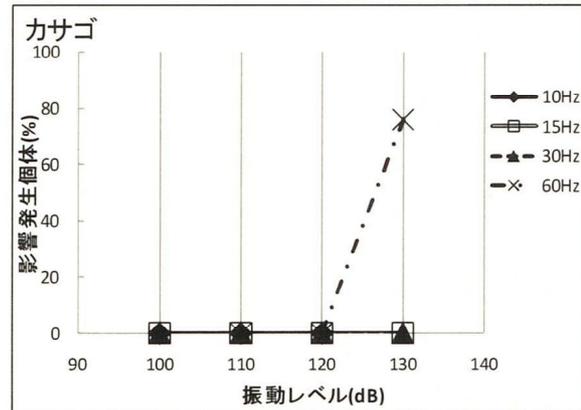
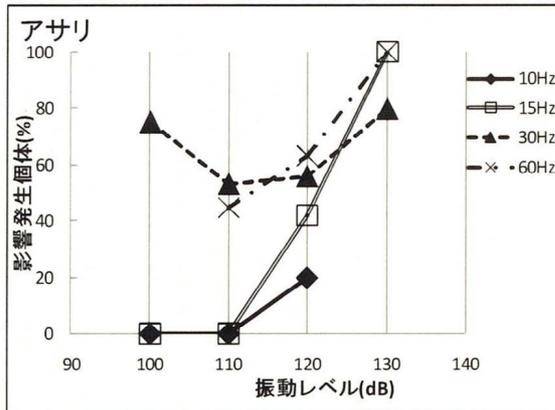
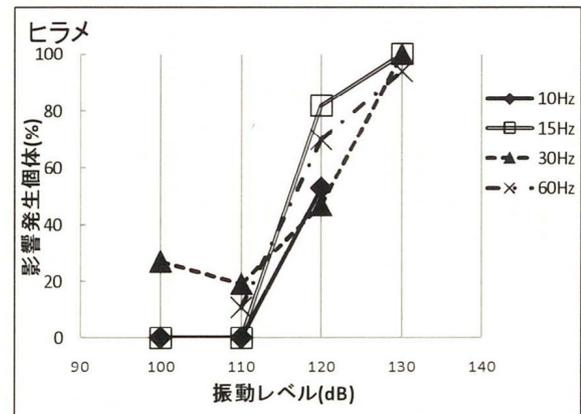
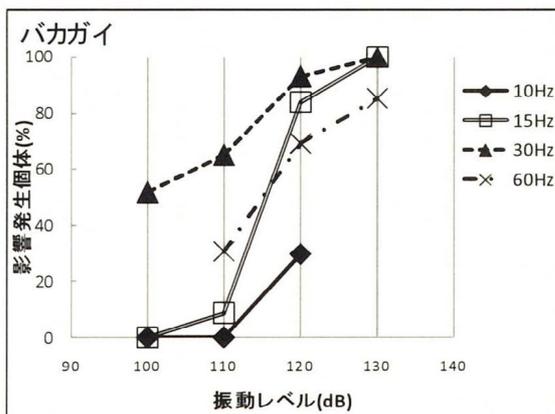


図3 実験結果

露出したケースでは、振動開始後から5分間程度までは、地表面に押し出されそうになると、斧足を更に地中に差し込みながら、潜砂行動を繰り返していたが、開始5分以降になると地表面に浮き出る個体がみられた。130dBではどの周波数でも振動開始と同時に、潜砂していた貝類は砂とともに攪拌されて砂上に露出した。なお、一旦地表に露出した個体は、振動暴露中は再び潜砂することはできずに、殻を閉じて砂上を転がっていた。

(2) クルマエビ

クルマエビは潜砂性の甲殻類で、付属肢を素早く動かし、細かい動きにより底質の液状化を起こしながら潜砂する⁹⁾。

実験開始時に潜砂していたクルマエビは、10Hzではどの振動レベルでも影響はなかったが、15Hzと60Hzで110dB以上および30Hzでは二枚貝同様に100dB以上で流動化した砂上に露出し、再び潜砂しようと付属肢を動かすが、液状化により流動状態となった砂中には潜砂できずに砂上に露出したままの状態であった。また、砂上に露出した個体は潜砂行動をとり続け、水槽内を動きまわった。130dBでは砂中に頭を突っ込んだまま倒立して動かなくなってしまう個体も出現したが、どの個体も振動終了時には再び潜砂した。

(3) ヒラメ

ヒラメは通常海底に潜砂している魚類であるため、供試魚を水槽で静置し、水槽底面で砂潜した状態で実験を開始した。実験開始時に潜砂していたヒラメは10Hz、15Hzで120dB以上、60Hzで110dB以上、30Hzでは100dB以上の振動レベルで流動化した砂上に露出してしまう個体が出現した。露出した個体は潜砂行動を繰り返していたが、振動中は潜砂できずに水中を遊泳していた。なお、クルマエビと同様に振動終了時にはすぐに潜砂して実験開始時と同様の状態に戻った。

(4) サザエ

サザエは水槽底面あるいは壁面に付着した状態から実験を開始した。10Hzではどの振動レベルでも付着したまま特に変化はみられなかった。30Hzで120dBおよび60Hzで130dBになると、振動により剥がれ落ち、その後軟体部を貝殻内に収縮して水槽内を転がっていた。なお実験終了時5分以内には再び軟体部を出して、水槽内を這いまわる様子が確認された。

(5) カサゴ

カサゴは岩礁に接して潜伏する底生魚類であるため、供試魚を水槽中で静置し、水槽底面で動かなくなった状態で実験を開始した。10Hz～30Hzでは、どの振動レベルでも変化はみられず、振動による影響はなかった。60Hzでは120dBまで影響はないが、130dBになると口を開けて威嚇するような行動をしながら、水中を遊泳していた。

4. まとめ

(1) 生物に影響をおよぼす振動レベル

振動による生物への影響は、振動レベルが大きくなるほど顕著であった。また、周波数が高くなるにつれて、同じ振動レベルでの影響発生個体は増加した。また、130dBの振動レベルでは、周波数に関わらず振動開始直後に砂とともに生物が攪拌されて、潜砂生物は地表に露出し、岩礁性の生物は水中で定位できなくなった。

振動レベルに関しては、どの周波数も概ね110dBを超えると潜砂生物が露出する割合が大きくなった。また、周波数30Hzでは、他の周波数よりも小さな振動レベルで生物に影響が発生しており、この周波数では他の周波数より感覚が鋭いことが推察された。

以上の結果より、生物に対する直接的な影響130dB以下の振動レベルでは、振動刺激による直接的なストレスよりも、底質が流動して砂上に露出すること

表8 底質の物理的攪乱が生物におよぼす影響

研究内容	対象生物	研究結果	出典
高波浪による稚貝の露出機構、潜砂可能な限界流速、潜砂速度と水温、地形侵食速度と貝の放出確率について検討した。	ウバガイ	・ウバガイの放出限界は地形侵食速度と潜砂速度の比で決定される。 ・殻長が小さく、波高が高く、水温が低いほど砂上へ露出しやすい。	10)
細粒分を含んだ砂地盤の一次元水圧変動下での液状化に対する安定性と水圧変動下でのアマモの引き抜き抵抗を検討した。	アマモの模型	・一次元水圧変動下で細粒分を含んだ砂地盤の表層で液状化が発生した。 ・液状化が起こるとアマモ模型の引き抜き抵抗は減少した。	11)
二枚貝の分布および潜砂行動に対する底質の泥分の影響や潜砂速度を実験した。	チョウセンハマグリ コタマガイ	・稚貝を用いて周期0.63秒～1.62秒で振盪実験を行った結果、影響はみられなかった。	12)
潜砂に及ぼす底質攪乱の影響を検討した。	バカガイ アサリ ウバガイ	・殻長とともに潜砂・放出限界が大きくなった。 ・露出するシールズ数はバカガイ：0.20、ウバガイ：0.25、アサリ：0.17である。	13)
砂中から露出する流動条件を検討した。	ウバガイ	・ホッキガイ稚貝は周期、殻長に関わらずシールズ数約0.25で砂から流出した。 ・稚貝は底面流速45cm/秒(周期4秒時)55cm/秒(周期8秒時)以下に抑えれば流出しない。	14)
振動流場での流速場と貝の移動過程の詳細な測定をおこなった。	二枚貝の模型	・砂漣上での貝の移動状況は比重、殻長によって異なる。	15)
ウバガイの潜砂行動に及ぼす振動流の影響を調べ、潜砂に適する流動条件を検討した。	ウバガイ	・潜砂可能な振動流速の限界値は小型群で15-20cm/s、中型群で15-25cm/s、大型群で20-25cm/sである。	16)

による影響が大きいと考えられる。

なお、バカガイを砂上に露出して約60cm/sの流速振幅にさらすと3日でへい死した¹⁷⁾ことなどが既往の研究により報告されており、潜砂生物が砂上に露出することは強いストレスとなっていると考えられる。

以上の結果より、海上工事で発生する振動が周辺海域の底生生物に影響を与える振動レベルは、周波数に関わりなく100dB以上であると考えるのが妥当である。

なお、実験終了後、砂上に露出した生物は再び潜砂し、サザエも5分以内に這い出したことより、短期間の振動による影響は生物に大きなダメージを与えるものではないと考えられる。

(2) 液状化による生物の砂上への露出

振動実験結果より、海底振動で底質の液状化が発生し、比重の軽い潜砂性の生物が浮力によって砂上に押し出され、潜砂不能となることが予測された。建設工事で発生する海底振動が引き起こす液状化と生物の露出についての報告はこれまでに無いが、潜砂生物が砂上に露出する現象に関しては多くの研究報告がある。

これらの報告では、振動流による地形侵食や底質の巻き上げおよび水平振動による液状化によって、生物が砂上に露出する機構について記述されている。また、種や個体サイズによって砂中からの放出限界値が異なり、成長と共にその値は増大することなどが明らかにされている(表8)。二枚貝以外に、砂泥底に生育する種子植物のアマモが、強波浪時に根ごと引き抜かれた現象に関する研究報告もあり、波浪により地盤内の過剰間隙水圧が土圧を超えた際に発生する液状化を再現して、アマモの引き抜き抵抗について実験がおこなわれている¹¹⁾。

以上の報告はいずれも波浪による底質の物理的攪乱を明らかにし、高波浪時に種苗放流した二枚貝の稚貝が砂上に露出し減耗する現象や、生物の分布適地を把握することを目的としたものである。

(3) 今後の課題

本研究では建設工事で発生する振動について、周辺生物に影響をおよぼす振動レベルを明らかにすることを目的とした実験をおこなった。しかしながら実験で使用したのは成体および未成魚であった。今後、稚魚や稚貝など生物サイズの違いによる影響発生状況の相違や産卵など生理的現象に与える影響についての研究が待たれる。

また、今回の実験では100dB以上の以下の振動レベルを再現したが、実際の建設工事で発生する振動レベルは、今回の実験による影響出現レベルよりも小さい値の範囲となることが多い。そのため、建設工事による振動の影響という視点では、今回の実験内容で概ねカバーできたと考えている。しかしなが

ら、30Hzでは他の周波数よりも振動に対する影響が顕著であり、100dBから生物に対して影響が出ているため、閾値を明らかにする必要がある。また、他の周波数についても、100dB以下の振動レベルを再現して実験をおこなう予定である。

参考文献

- 1) (社)日本水産資源保護協会編:水中音の魚類に及ぼす影響, p. 2-27, p. 73-109, 日本水産資源保護協会, 1997.
- 2) 畠山良己:魚の聴覚能力, 水産工学, Vol. 28No. 2, pp. 111-119, 1992.
- 3) 藤井, 西藤, 中野:水中音及び海底振動と魚類の反応に関する実験, 日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集, pp. 205-208, 1980.
- 4) (社)日本建設機械化協会編:建設工事に伴う騒音振動対策ハンドブック第3版, p. 72.
- 5) 花里:杭打ちによる地盤振動に関する解析, 日本建築学会構造系論文報告集, 第426号, pp. 115-125, 1991.
- 6) バイプロハンマ工法技術研究会編:バイプロハンマ設計施工便覧, p. 63, バイプロハンマ工法技術研究会, 2006.
- 7) 土質工学会編:建設工事に伴う公害とその対策-現場技術者の土と基礎シリーズ6, 土質工学会, p. 203, 1983.
- 8) 姜, 高橋, 奥平, 黒田:自然・人工干潟の地形および地盤に関する現地調査-前浜干潟の耐波安定性に関する検討-, 港湾空港技術研究所資料, No. 1010, pp. 46-77, 2001.
- 9) David, R. and Stephen, H.:潮間帯の生態学(上), 文一総合出版, 1999.
- 10) 山下・木下・和田・明田・谷野:振動流場での二枚貝の放出限界と潜砂限界, 海洋開発論文集, Vol. 12, pp. 467-472, 1996.
- 11) 土田, 浅海, 一井:波浪による一次元水圧変動下のアマモ場海底地盤の安定性, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 1251-1255, 2006.
- 12) 日向野, 木元, 安永:潜砂行動と物理環境の関係からみたチョウセンハマグリとコタマガイの分布特性, 水工研研究報告, 14, pp. 65-87, 1993.
- 13) 櫻井:底質の物理的攪乱によるバカガイの生息限界, 水産工学, Vol. 39, No. 2, pp. 155-160, 2002.
- 14) 櫻井:砂浜域の物理環境と漁場形成. 2. 地盤変動に対するホッキガイの行動特性, 北水試だより39, pp. 14-17, 1997.
- 15) 山下, 金子, 新山, 永田, 北原:振動流場での砂漣上の二枚貝の移動機構に関する実験的研究, 海洋開発論文集, Vol. 14, pp. 11-15, 1998.
- 16) 櫻井, 中島, 山下:ウバガイの潜砂行動に及ぼす振動流の影響, 日本水産学会誌, Vol. 64(3), pp. 406-411, 1998.
- 17) 山下, 松岡:波浪による二枚貝の挙動と消耗に関する実験的研究, 海洋開発論文集, Vol. 10, pp. 119-122, 1994.