

海上工事で発生する海底振動が 周辺生物へおよぼす影響

竹山佳奈・磯貝哲也

海上工事に伴って発生する水中騒音や海底振動は、周辺海域に生息する水生生物に影響を与える可能性がある。水中騒音に対する魚類の反応および影響についてはいくつかの研究報告がなされているが^{1) 2)}、海底振動に対する生物の反応については、これまで研究事例が少ない。そこで、沿岸域に生息する底生生物に対して工事で発生する海底振動を再現した振動を与え、振動に対する生物の耐性を把握するための実験を実施した。その結果、影響が発生する振動加速度レベルは、周波数および対象生物によって異なっていた。このデータを参考に、杭打ち工事等において海底振動をモニタリングし、施工時の環境管理を行うことも試みられている。

キーワード：海上工事，杭打設，海底振動，水中騒音，底生生物，振動実験

1. はじめに

沿岸域および海上の工事において、周辺海域の環境に及ぼす影響を事前に把握し、影響を軽減することが求められている。例えば、水質汚濁については、水産用水基準等を参考に設定された具体的な管理基準値に基づいた濁度管理を行う場合が多い。一方で、騒音や振動に関しては、陸上での規制値はそれぞれ設定されているが、水中を伝播する水中騒音や海底振動について、具体的な環境管理基準値は設定されていない。

そのため、海上工事をおこなう際には施工時に発生する水中騒音や海底振動の発生レベルを把握し、周辺海域に生息する水生生物への影響を考慮した管理目標値を設定して管理していく必要がある。水中騒音に対する魚類の各種反応については、過去の大規模工事における漁業環境影響調査等で、多くの調査・測定事例が報告されている。一般的な魚類が感知できる水中音は、周波数 50～1000 Hz の範囲であり¹⁾、この範囲で音圧レベル別に魚類の行動が類別され、魚類はこの周波数の範囲で 60～110 dB (dB re 1 μPa) から水中音を感知し始める。魚類が快適と感じる音の強さは 110～130 dB (誘致レベル)、音源から逃げる行動をとる強さは 140～160 dB (威嚇レベル) で、220 dB 以上になると魚の体に損傷を与える (損傷・致死レベル) とされている^{1) 2)}。そのため、海域の工事による水中騒音の管理目標値はこの結果を参考に、誘致レベルの上限値の 130 dB 以下、あるいは威嚇レベルの下

限值である 140 dB 以下に設定されることがある。

一方で海底振動に対する底生生物の反応については、これまでにほとんど研究事例がない。そこで、施工時に発生する海底振動が、周辺に生息する貝類、エビ類や底生魚類等の底生生物に影響をおよぼす周波数および振動加速度レベルを把握するために、底生生物の振動耐性について実験的に評価した。

海上工事において杭の打設作業による海底振動は大きく、周辺環境に与える影響も大きいことが予測される。そこでパイプロハンマや油圧ハンマによる杭の打設場所を発生源とした、海底振動を再現し実験をおこなった。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 次元的に振動が伝播する現象である³⁾。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⁴⁾、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。そのため周波数の差異についても考慮して実験をおこなった。実験の対象とした生物は、杭打設工事などをおこなう沿岸域の砂泥域に分布している底生生物のうち水産有用種を対象とした。また、岩礁域に振動が影響することも想定し、岩礁性の水産有用種も対象とした。

2. 実験装置および実験方法

(1) 対象生物

対象生物は、沿岸性底生生物のうち重要な水産有用種であり、入手が容易な種である二枚貝類のバカガイとアサリ、甲殻類のクルマエビ、底生魚類のヒラメを用いた。また、岩礁域の生物として比較的波あたりの強い場所に生息するサザエおよびカサゴも対象種とした。なお、生物のサイズは主に成体サイズを用いた。

(2) 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（型式 BF-50 UD、アイデックス社製：周波数設定域 10～65 Hz）の加振テーブル上にプラスチック製の水槽を固定し、水槽ごとに 2 軸合成振動（垂直・水平）の振動を与えた。振動加速度レベルは、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）を用いて調整した（写真—1、表—1、2）。また、振動加速度レベルは dB re 1 μPa を用いて評価した。

対象生物は水槽（300 mm × 200 mm × 205 mm）



写真—1 実験装置全景

表—1 振動試験機仕様

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

表—2 振動測定器仕様

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

に約 3.3%濃度の人工海水（テトラ社製テトラマリンソルト）を水位 50 mm まで入れ、実験直前まで水温 20℃のエアレーション下で馴致させた。20℃の設定温度は生物活性の面から設定し、温度調節はサーモスタット付ヒーターを用いた。

なお、潜砂する生物を対象とする場合には、水槽底に 50 mm の層厚で相馬硅砂 5 号 (D₅₀ = 0.439 mm) を配置した。この砂の粒径は対象生物の生息環境を考慮したものである。

(3) 実験ケース

杭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るが、振動周波数は 0～60 Hz の範囲のものが主となっている。また、発生する振動は杭打設位置近傍では 100 dB 程度である⁴⁾。

このため、実験に用いる振動加速度レベルの範囲は、杭打設位置付近で発生する振動加速度レベルを考慮して、100 dB、110 dB、120 dB、130 dB の 4 段階で設定した。また、振動周波数は振動試験機の性能の範囲内で基本的に各振動加速度レベルにつき 10 Hz、15 Hz、30 Hz、60 Hz の 4 段階で設定した（表—3）。

表—3 実験ケース

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

(4) 評価方法

生物を投入した水槽を振動試験機に固定し、加振前から加振後までの状態を観察し、生物の状態を評価した。なお、生物は実験前に予め水槽で馴致させ、潜砂性の生物については全個体が潜砂した状態、岩礁性のサザエは水槽壁面に付着した状態、カサゴは水槽の底で静止した状態から実験を開始した。

生物の状態は、実験開始前、加振後 5 分及び 10 分の写真撮影、全実験状況を固定位置より撮影したビデオ録画および目視により観察した。各生物の振動に対する影響は、表—4 の評価基準により評価した。

表—4 評価基準

		評価項目	影響無し	影響有り
潜砂性 生物	アサリ バカガイ	殻	開殻	閉殻
		入水管状態	入水管出ている	入水管引っ込む
	クルマエビ ヒラメ	潜砂行動	潜砂	砂上に出てくる
		潜砂行動	潜砂	砂上に出てくる
岩礁性 生物	サザエ	軟体部状態	付着している	殻中に引っ込む
	カサゴ	遊泳行動	じっとしている	落ち着きなく泳ぐ

3. 実験結果

対象生物の振動実験結果を図一1に示す。なお、アサリ、バカガイ、サザエについては、90 Hz 以下で実験をした他の報告例による結果⁵⁾も合わせて図示した(図一1)。

(1) 二枚貝 (バカガイ・アサリ)

二枚貝に影響をおよぼす振動加速度レベルは周波数によって異なっていた。10 Hz および 15 Hz の周波数では、110 dB 以下の振動条件下において、振動の開始と同時に反射的に水管を収縮した個体がみられたものの、すぐに平常時の状態に戻り、実験終了時まで殻を閉じる個体は出現しなかった。しかしながら、120 dB 以上の振動になると、底質が液化化して二枚貝は底質上に浮上してしまった。この状況は 30 Hz で 100 dB 以上、60 Hz で 110 dB 以上の振動下でも発生した。ビデオおよび目視観察の結果、試験開始後に振動により対象生物の殻が底質上に浮上しそうになると、足(斧足)をさらに底質中に差し込みながら潜砂行動を繰り返していたが、底質表面に完全に露出した個体は再び潜砂することなく、試験終了時まで殻を閉じて底質上を転がっていた。しかしながら、振動を停止するとこれらの二枚貝は再び潜砂し、すぐに平常時の状態に戻った。

(2) クルマエビ

クルマエビは 10 Hz の周波数では、130 dB 以下の振動条件下において、平常時と変わらず潜砂してお

り、振動による影響は発生しなかった。しかしながら、15 Hz と 60 Hz の周波数では 110 dB 以上、30 Hz では 100 dB 以上になると底質が流動化し、底質上に出てしまい、再び潜砂しようとする付着肢を動かす個体や、水槽内を落ち着きなく動き回る個体が発生した。しかしながら、振動を停止すると再び潜砂し、すぐに平常時の状態に戻った。

(3) ヒラメ

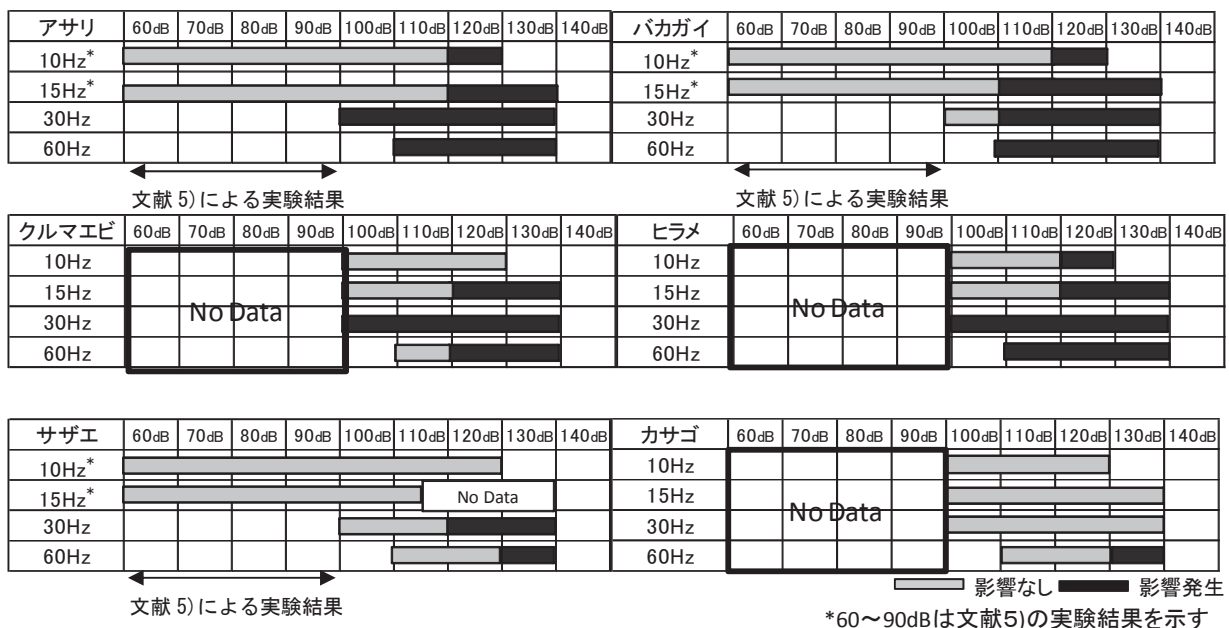
ヒラメは 10 Hz、15 Hz の周波数では 120 dB 以上、60 Hz の周波数で 110 dB 以上、30 Hz の周波数で 100 dB 以上の振動条件下において、底質上に露出してしまう、再び潜砂することができずに水中を落ち着きなく泳ぎ回る個体が発生した。しかしながら、振動を停止すると再び潜砂し、すぐに平常時の状態に戻った。

(4) サザエ

水槽壁面に付着しているサザエは、10 Hz の周波数では 130 dB 以下の振動条件下でも特に変化が見られなかった。30 Hz の周波数で 120 dB、60 Hz の周波数で 130 dB になると、振動により水槽表面から剥がれおち、その後軟体部を貝殻内に収縮して水槽内を転がる状態が観察された。しかしながら、振動を停止すると、5分以内に再び軟体部を出して、水槽内を這いまわりの様子が確認された。

(5) カサゴ

カサゴは 10 Hz ~ 30 Hz の周波数では、130 dB 以下の振動条件下で変化はみられず、振動による影響は



図一1 振動実験結果

観察されなかった。60 Hz では 120 dB 以下まで影響は発生しないが、130 dB になると口を開けながら落ち着かない様子で水中を遊泳しており、異常遊泳行動を示した。しかしながら、振動を停止すると再び水槽の底に潜伏し、平常時の状態に戻った。

4. 考察

(1) 生物に影響をおよぼす振動加速度レベル

今回の実験では一定の振動レベルを超えると底質が液状化してしまい、潜砂していた底生生物が底質上に浮上させられる現象が発生した。一旦底質表面に浮上すると、振動がなくなるまで潜砂することができなかった。周波数によって影響発生個体が出現する振動加速度レベルは異なっていたが、潜砂性の生物は概ね 110 dB を超えると、底質の液状化により、底質上に浮上してしまう結果となった。

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⁶⁾、実験に用いた底質である 5号珪砂の比重 2.6⁷⁾ 前後よりも軽い。潜砂性の二枚貝であるアサリやバカガイは、潜砂時には足(斧足)を砂中に差し込み、その先端部をアンカー状に膨張させる。次に足の長さを収縮させ、同時に足の両脇から水を出して底質を液状化させながら潜砂する⁸⁾。このため、今回の建設工事を想定した振動実験結果では、底質が液状化すると、底質中で定位置に留まらずに底質上に押し出されてしまった。

砂上への露出に対する貝類の影響については、バカガイを露出した状態で約 60 cm/s の流速振幅にさらすと 3 日でへい死した⁹⁾ ことなどが既往の研究により報告されており、生体にとって強いストレスとなっていると考えられる。また、クルマエビやヒラメも平常時には潜砂状態であることから、底質表面への露出は大きなストレスであることおよび底質上に露出することにより、外敵に捕らえられやすくなることが推察される。

(2) 実施工への適用と今後の課題

過去の測定結果によると、杭打ちで発生する海底振動は打設位置から 30 m の距離では 100 dB 以下、100 m の距離では約 80 dB に減衰していた¹⁾。このため、杭打ちで発生する振動は、生物に影響をおよぼす可能性のある振動加速度レベルよりも低く、杭打ち工事によって発生する海底振動が直ちに生物に影響をおよぼす可能性は低いことが分かった。

しかしながら、実海域においては、様々な条件によ

りバックグラウンドの振動が加わり、予想よりも大きな振動が発生する場合もある。そのため、周辺海域の環境に配慮する必要がある海上工事において、杭打ちで発生する海底振動を測定し、実験結果を参考に管理目標値を設定し、海底振動の管理を実施する事例もある。

今回の実験は限られた条件下での実施であったため、今後さらなる検証やデータの蓄積が必要である。例えば、底質の違いによって、液状化を引き起こす振動加速度レベルが異なる可能性が考えられる。このため、対象となる場所底質材料を用いた振動実験をおこない、どの程度の振動加速度レベルで底質が不安定となるのかを把握することが望ましい。また、今回は杭打ちのバイプロハンマによる打設で発生する振動周期や振動加速度レベルを想定した実験をおこなったが、捨石工やサンドコンパクションの打設等、工種によって発生する振動が異なる。

なお、実際的水中振動測定は、専用の機器が一般に市販されていないので、水中振動の測定にあたっては各種の工夫が必要である。特に振動加速度計については、水中で使用可能な仕様に作成し、水中騒音と合わせて測定をおこなった(図-2)。図-3は鋼矢板打設中の測定により得られた振動加速度波形である。縦軸には振動加速度レベル、横軸には計測時間を示し、これらの結果をもとにPCにより周波数分析をおこなって、杭打ちで発生する海底振動の状況を把握している。今後、各種の施工方法や底質条件における水中振動の計測を蓄積して、工事による水中振動が環境に与える影響評価および管理の技術を向上させてゆくつもりである。

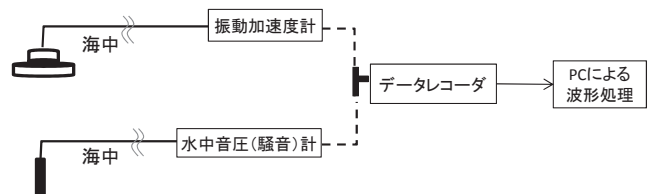


図-2 海底振動・水中騒音測定ブロック図

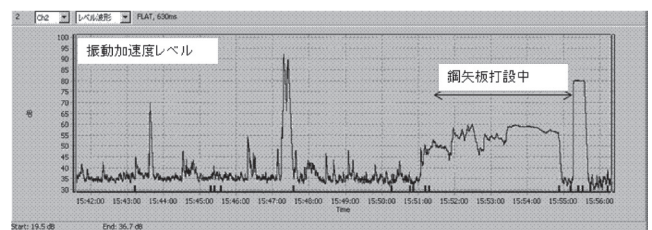


図-3 杭打ちで発生する海底振動(測定事例)

《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, (社)日本水産資源保護協会, pp.2-27, pp.73-109, 1997.
- 2) 畠山良己, 魚の聴覚能力, 水産工学, Vol.28, No.2, pp.111-119, 1992.
- 3) 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, 第426号, pp.115-125, 1991.
- 4) パイプロハンマ工法技術研究会編, パイプロハンマ設計施工便覧, パイプロハンマ工法技術研究会, p.63, 2006.
- 5) 田中ゆう子・五十嵐学・鈴木秀男, 海底振動の貝類に及ぼす影響について, 平成20年度 日本水産工学会学術講演会, pp.15-16, 2008.
- 6) 山下・金子・新山・永田・北原, 振動流場での砂連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.
- 7) 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.
- 8) David, R. and Stephen, H, 潮間帯の生態学(上), 文一総合出版, pp.263-266, 1999.
- 9) 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.



【筆者紹介】

竹山 佳奈 (たけやま かな)
五洋建設株式会社
土木本部 環境事業部



磯貝 哲也 (いそがい てつや)
五洋建設株式会社
土木本部 環境事業部
部長

橋梁架設工事の積算 ——平成23年度版——

■改訂内容

1. 鋼橋編

- ・セッティングビーム工追加 (歩掛設定)
- ・製作工労務単価, 間接労務費率の変更に伴う架設用の製作部材単価改訂
- ・積算例題の見直し

2. PC橋編

- ・支保工関連
- ・トラッククレーン架設の適用範囲拡大と据付条件の追加
- ・橋台・橋脚回り足場ブラケット歩掛の追加
- ・枠組足場日当り賃料, 基本料の追加 ほか

■ B5判/本編約 1,100頁 (カラー写真入り)
別冊約 120頁 セット

■定価

非会員：8,400円 (本体 8,000円)
会 員：7,140円 (本体 6,800円)

※別冊のみの販売はありません。

※学校及び官公庁関係者は会員扱いとさせていただきます。

※送料は会員・非会員とも

沖縄県以外 600円

沖縄県 450円 (但し県内に限る)

■発行 平成23年5月

社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8 (機械振興会館)

Tel. 03 (3433) 1501 Fax. 03 (3432) 0289 <http://www.jcmanet.or.jp>