

総 説

洋上風力発電所の建設・稼働時における 海生生物及び漁業への影響に関する文献調査

百田恭輔^{*§}・島 隆夫^{*}

A Literature Survey on the Impacts of Offshore Wind Farms on Marine Organisms and Fisheries during the Construction and Operation

Kyosuke Momota^{*§} and Takao Shima^{*}

要約: 洋上風力発電の導入は世界的に促進されており, 日本においても着床式洋上風力発電の本格的な導入が始まった。洋上風力発電の導入では, 発電施設の建設及び稼働による環境及び生態系, 漁業への影響が懸念される。これらの懸念に対しては, 法令等に基づいた影響評価や監視等の対応が求められることが世界でも一般的となっている。そこで本稿では, この懸念への対応に資する情報集約を目的とし, 主に着床式洋上風力発電施設の建設及び稼働時に懸念される沿岸浅海域の海生生物及び漁業への影響についての先行研究の整理を行った。尚, 海生生物については, 沿岸漁業での漁業対象種を多く含む魚類及び無脊椎動物に焦点を当てている。

キーワード: 洋上風力発電, 漁業, 底生生物, 魚類, 無脊椎動物

Abstract: Construction of offshore wind farms has been accelerating around the world. In Japan, the construction of bottom-mounted offshore wind turbines has started in earnest. There are concerns about the impacts on the environment, ecosystems, and fisheries in the construction and operation of offshore wind farms. To address these concerns, it has become common worldwide to require the impact assessment and monitoring based on laws and regulations. Here, we mainly review previous studies examining the impacts of bottom-mounted offshore wind turbines on marine organisms and fisheries in shallow coastal waters during construction and operation. We focus on fish and invertebrates, including species targeted by coastal fisheries.

Key words: offshore wind farms, fisheries, benthos, fish, invertebrates

まえがき

パリ協定の採択以降, 脱炭素社会の実現に向けた動きは世界的に加速し, COP26終了時点でG20の全ての国を含む154カ国及び1地域がカーボンニュートラルの実現を表明した(経済産業省資源エネルギー庁, 2022a)。こうした機運に乗じて, 洋上風力発電の導入拡大が世界的に促進されている。洋上風力発電の世界の累積容量は, 2021年末時点で約5,600万kWに達したと報告されている

(GWEC, 2022)。2021年に新規導入された洋上風力発電容量は約2,110万kWであり, 中国を中心に驚異的に拡大している。

日本では, 2020年10月の「国内の温暖化ガスの排出を2050年までに実質ゼロとする(カーボンニュートラル)」宣言を皮切りに, 2021年4月には「2030年に向けた温室効果ガスの削減目標を2013年度比46%削減する」という方針が表明され, これらの目標達成に向けた長期戦略が策定されてきた。こうした中で, 洋上風力発電に関しては第6

(2022年11月18日受付, 2023年1月6日受理)

* 公益財団法人海洋生物環境研究所 中央研究所(〒299-5105 千葉県夷隅郡御宿町岩和田300番地)

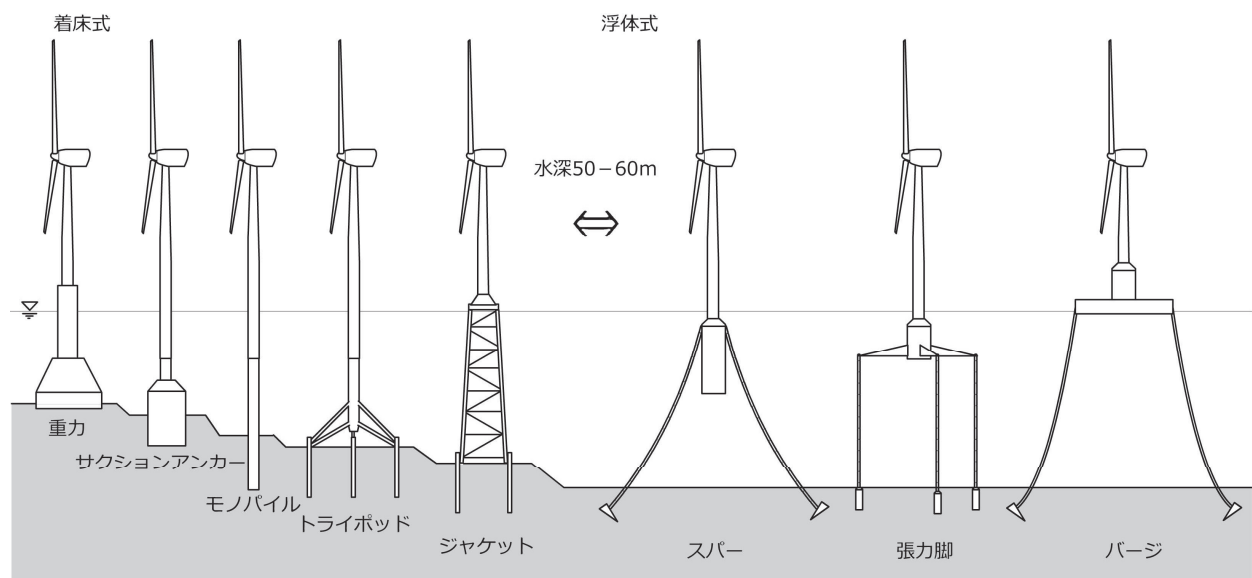
§ E-mail: momota@kaiseiken.or.jp

次エネルギー基本計画の中で、着床式と浮体式を合わせた洋上風力発電の導入容量について、2030年までに1,000万kW、2040年までに3,000～4,500万kWを目指すという具体的な目標が掲げられており、導入拡大に向けた機運が醸成されている。現状、日本の洋上風力発電の累積容量は世界の累積容量の0.5%にも満たないが（IRENA, 2022）、2018年に「海洋再生可能エネルギー発電設備の整備に係る海域の利用の促進に関する法律（再エネ海域利用法）」が制定されて以降、既に20以上の区域で案件が形成されてきており、8つの促進区域^{※1}が指定され、その内の4区域（導入容量は約170万kW）については発電事業者が選定された（2022年10月31日時点；経済産業省資源エネルギー庁、2022b）。

現在、日本国内で導入が拡大しつつあるのは着床式洋上風力発電であり、世界的にも主流の形式である。この形式では、水深50～60 m以浅の浅海域において、風力発電機を海底に設置した支持構造物（基礎）に固定して発電が行われる（第1図）。着床式洋上風力発電の導入では、まず、発電施設の建設及び稼働による周辺海域の環境や生態系への影響が懸念される。そのため、導入に際しては、法令等に基づいた環境への影響の評価や監視が求められることが世界でも一般的である（Popper *et*

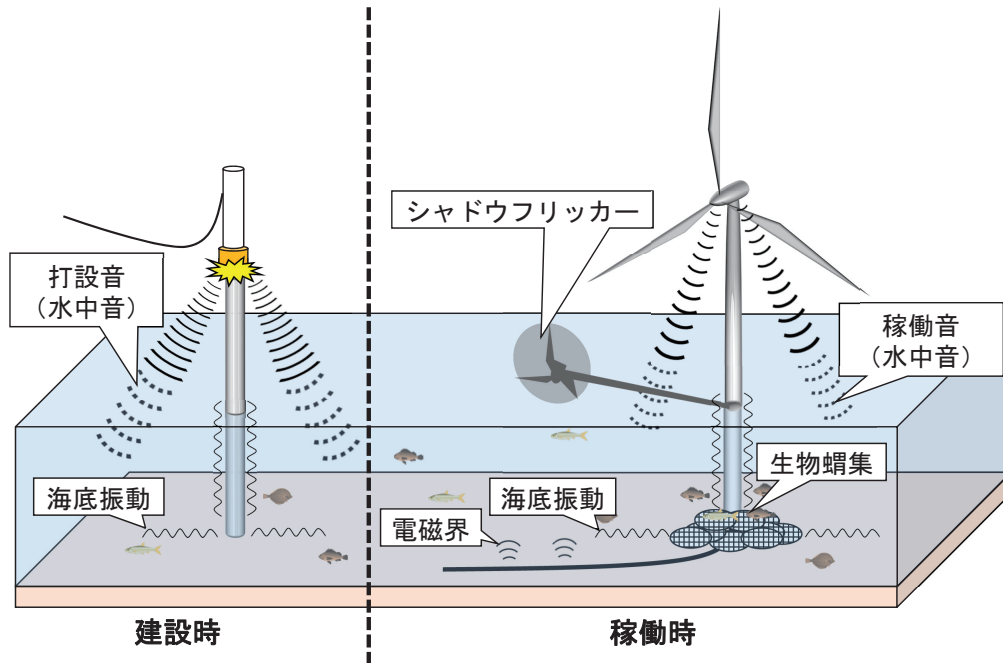
al., 2022）。日本においては、環境影響評価法に基づき調査・予測・評価が為されるが、洋上風力発電の影響を予測・評価するためには課題が多い（環境省、2017；経済産業省、2020）。また、案件形成に係る再エネ海域利用法の手続きにおいては、漁業者を含む地元のステークホルダーとの合意が必須であるため、漁業や漁業対象生物に関する懸念を払拭することが必要となる。しかしながら、日本国内では、これらの影響評価に関連する本格的な動きが始まりつつある段階であり、具体的な検討を進めるに足る科学的知見の集積は充分とは言い難い。

そこで本稿では、主に着床式洋上風力発電施設の建設及び稼働時に懸念される海生生物への影響、その結果生じる漁業への影響についての先行研究の整理を行い、日本国内において生じ得る懸念事項を想定した議論を行う。基礎杭の打設やケーブル敷設工事による攪乱、濁りの発生等もあるが、ここでは基礎杭の打設時や洋上風車の稼働時に発生する水中音及び振動、発電施設の存在による影響等の日本国内で地元住民や漁業者等から懸念されている項目を重点的に扱う（第2図）。尚、本稿で対象とする海生生物は、主要な漁業対象種を多く含むという観点から魚類や無脊椎動物とする。



第1図 洋上風車の基礎構造の種類

※1 長崎県五島市沖、秋田県能代市・三種町・男鹿市沖、秋田県由利本荘市沖（北側・南側）、千葉県銚子市沖、秋田県八峰町・能代市沖、長崎県西海市江島沖、秋田県男鹿市・潟上市・秋田市沖、新潟県村上市・胎内市沖の8区域。



※水中音はタービン支柱や基礎構造を介しても伝達されることに注意

第2図 着床式洋上風力発電で懸念される海生生物への主な影響のイメージ図

水中音

着床式洋上風力発電施設の建設及び稼働時には、様々な過程において水中音が発生する（明田，2021）。水中音が海生生物へ及ぼす影響については、海生生物の現存量や分布等に止まらず、漁業へと波及する可能性が懸念されている。日本では、基礎杭打ち時の水中音（打設音）や、稼働時のナセル^{※2}を音源とする水中音（稼働音）の影響への関心が特に高い。ここでは、打設音及び稼働音に関する知見を紹介する。尚、着床式洋上風力発電施設の建設で発生する水中音の中で、打設音の環境影響の大きさは、水中発破を除けば、最大であるとされている一方で、稼働音の環境影響は船舶運航よりも小さく、最小の部類であるとされている（明田，2021）。

水中音の海生生物への影響を考慮する際、「音圧」は重要な影響度の指標となる。例えば、魚類では曝される音圧の大きさによって受ける影響度が異なることが知られており（第1表）、音圧が高い場合、海生生物の組織が損傷を受け、更には死

に至る危険性がある。また、組織が損傷を受けるとされる水準よりも低い音圧に曝された場合であっても、生理機能や発生・発達、行動等への様々な影響が発生する可能性がある。

音圧については、水中音のタイプや解析目的により様々な方法で表現され（Robinson *et al.*, 2014）、洋上風力発電施設の稼働時に発生する持続的な水中音や背景雑音に対しては「音圧レベル（SPL: Sound Pressure Level）」、杭打ちの衝撃音のような単発的に発生する音に対しては「音響曝露レベル（SEL: Sound Exposure Level）」が用いられる（明田，2021；DOSITS, 2021）。音圧レベルは、基準音圧 p_0 （水中では $1 \mu\text{Pa}$ ）、測定音圧 p を用いて、以下の式で求められる。

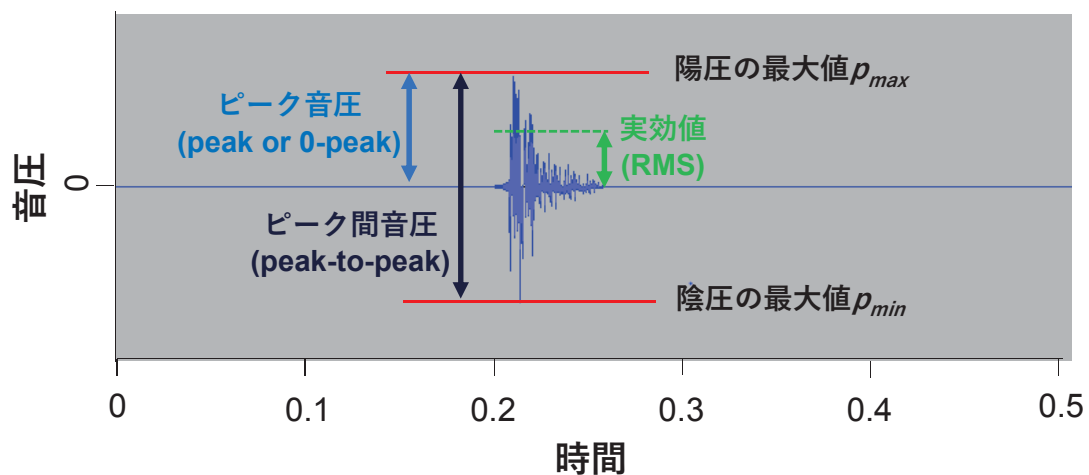
$$SPL = 20 \log_{10} \frac{p}{p_0}$$

基準音圧は 1 m^2 の面積に 1 N （ニュートン）の力が作用する圧力として $1 \mu\text{Pa}$ （ $1/10^6 \times \text{Pa}$ （ N/m^2 ））と定義され、音圧レベルは「dB re $1 \mu\text{Pa}$ （以後、本稿では「dB」と表記する）」という単位で表記される。音圧レベルの算定では、こういった

※2 洋上風車の伝達軸、増速機、発電機等を収納する部分。

第1表 水中音が魚へ与える影響度の音圧レベルによる分類（畠山（1992）を編集）

レベル分類	音圧レベル（RMS）	説明
損傷レベル	220dB 以上	極端に大きな音圧によって内臓が破損する等により，魚が死亡する音圧レベル
威嚇レベル	140-160dB	魚が驚いて深みに潜る，又は音源から遠ざかる反応を示す音圧レベル
誘致レベル	110-130dB	魚にとって快適な音の強さであり，興味のある音であれば音源方向へ寄って来る音圧レベル
聴覚閾値	感度の良い魚で 60-80dB， 一般的な海産魚で 90-110 dB	魚が音を認識できる最小の知覚レベル



第3図 音圧の見方（打設時に発生するパルス音の例）

方法で音圧が測定されたのかについて留意する必要がある、一般的には実効値（RMS：Root Mean Square）、ピーク音圧（peak pressure）、ピーク間音圧（peak-to-peak pressure）の3つの音圧測定方法がある（第3図）。実効値は、測定音圧の変動の二乗平均平方根であり、測定期間中の音の平均測定値と見なすことができる。ピーク音圧は、陽圧の最大値 $p_{\max}$ であり、「0-peak」または「peak」で示される。ピーク間音圧は、陽圧と陰圧の最大の振れ幅（陽圧の最大値 $p_{\max}$ - 陰圧の最大値 $p_{\min}$ ）で示される。これらの測定値に基づく音圧レベルは、基準音圧 p_{ref} を用いて、それぞれ以下の式で求められる。

$$SPL_{RMS} = 20 \log_{10} \frac{p_{RMS}}{p_{\text{ref}}}$$

$$SPL_{\text{peak}} = 20 \log_{10} \frac{p_{\max}}{p_{\text{ref}}}$$

$$SPL_{p-p} = 20 \log_{10} \frac{p_{\max} - p_{\min}}{p_{\text{ref}}}$$

一方、音響曝露レベル（SEL）については、音圧レベルと曝露時間の両方を考慮したエネルギーの尺度であるため、観測期間を T とすると、以下の式で求められる。

$$SEL = 10 \log_{10} \frac{p_{RMS}^2 \cdot T}{p_{\text{ref}}^2}$$

尚、打設音の研究では、杭打ち1回当たり（single strike）の「音響曝露レベル（ SEL_{ss} ）」が算出され、これは1回の杭打ちで発生する衝撃音の音響エネルギーの90%の値と等しいエネルギーを持つ1秒間の持続音のエネルギーレベル（単位は $\text{dB re } 1 \mu\text{Pa}^2\text{s}$ ）として表される。また、複数回の杭打ちによる累積の音への曝露量を測定する際には「累積音響曝露レベル（ SEL_{cum} ）」が算出され、これは杭打ち毎に発生するエネルギーが同等であれば、杭打ち回数を N として、以下の式で求められる。

$$SEL_{cum} = SEL_{ss} + 10 \log_{10}(N)$$

水中音を扱う上でもう一つの重要な指標として、「周波数」が挙げられる。各々の生物には知覚できる音の周波数範囲（可聴周波数帯域）があ

り、本稿で対象とする海生生物では、殆どの魚類は数十Hzから数百Hzの低周波領域で聴覚感度が良く、無脊椎動物の可聴域は1 kHz以下の低周波領域にあることが知られている（Fay, 1998；海洋音響学会, 2021；Jones, 2021）。尚、イカやタコなどの頭足類については音圧ではなく、水の振動を感知しているようである（海洋音響学会, 2021）。一方で、多くの人為的な海中音の周波数領域は主に10 Hzから1 kHzの範囲にあり（海洋音響学会, 2021；Jones, 2021）、船舶運航時や洋上風力発電施設の建設及び稼働時に発せられる音は数十Hzから数百Hzであることが知られている（Slabbekoorn *et al.*, 2010；Duarte *et al.*, 2021）。そのため、本稿で対象とする魚類や無脊椎動物の多くの種は、着床式洋上風力発電施設の建設及び稼働時に発生する水中音を感知できると考えられる。

特定の音を抽出し、環境への影響を調べるためには、水中音の周波数毎の音圧レベルを求める必要がある。周波数スペクトルを求める方法として、フーリエ変換が用いられる。周波数分析幅は、一般的に1 Hzで解析され、1 Hz毎の音圧レベル（ $\text{dB re } 1 \mu\text{Pa} / \sqrt{\text{Hz}}$ ）で表される（海洋音響学会, 2021）。音源の周波数特性が分かっている場合や、大まかに音波の周波数毎のエネルギー分布が知りたい場合には、1/3オクターブ解析もよく用いられる。これは1 kHzを基準に、周波数が $2^{1/3}$ 倍または $1/2^{1/3}$ 倍毎の幅で周波数成分の強度を足し合わせたものである。

また、水中音の大きさは、音源から離れるほど減少（伝搬減衰）することは一般に知られており、深い海で音波が四方八方に球面上に拡散していく場合では音源からの距離が10倍になると音圧は1/10（-20 dB）に減衰する。しかし、着床式洋上風力発電に適した比較的浅く平坦な海では、海面と海底の間で音波が円筒状に拡散していく。この場合、音源からの距離が10倍になると音圧は約1/3（-10 dB）に減衰する（海洋音響学会, 2021）。

1. 打設音及び稼働音について

1) 打設音

着床式洋上風力発電施設の建設時には、重力式を除き、基礎杭を海底に打設する際に打設音が発生する（第2図）。この打設音は短時間（50～100 ms）で音圧が大きく変動するパルス音という種類の音であり、音源音圧レベルはピーク間音圧レ

ベルで250 dBを超える場合があり (Nedwell *et al.*, 2007), 音圧レベルは音源近くで急速に低下するものの, 中程度の音圧レベル (140~170 dB) の伝搬範囲は数十kmに及ぶ可能性が示されている (Andersson *et al.*, 2016 ; Mooney *et al.*, 2020)。打設は通常, 油圧ハンマーを用いて行われ, 一般的に, 打設頻度は15~60回/分, 打設回数は底質や打ち込む深さ等によって異なり, 杭一本当たり500~5,000回と幅がある (Matuschek and Betke, 2009)。杭打ちの音圧レベルは, 打設エネルギーや杭の直径が大きくなるにつれて上昇する (Bellmann *et al.*, 2020)。また, 打設音には数十Hzから数kHzの広い周波数が含まれるが, 500 Hz 以下の周波数帯にエネルギーが集中する (Mooney *et al.*, 2020)。

2) 稼働音

洋上風車の稼働時に発生する音は, 1 kHz以下の低周波音が主であり (海洋音響学会, 2021), ナセル内のギヤボックスのギアの噛み合い周波数 (Gear Mesh Frequency) とその高調波成分が卓越する (Pangerc *et al.*, 2016 ; Tougaard *et al.*, 2020)。ナセル内で発生した音は, タービン支柱と海底の基礎構造を介して水中に伝達される (第2図; Hawkins *et al.*, 2021)。本稿では, この水中に伝達された音を稼働音と定義する。公表されている洋上風車 (0.45~6.15 MW) の稼働音を解析した例では, 洋上風車から100 mの距離における音圧レベル (RMS) は105~125 dBの範囲であり, 総じて, 同じ距離で測定された船舶から発せられた音圧レベルより少なくとも10~20 dB低いことが報告されている (Tougaard *et al.*, 2020)。尚, この研究では, 洋上風車からの距離が10倍になると音圧レベルは23.7 dB減少し, 風速及びタービンのサイズが10倍になると, 音圧レベルはそれぞれ18.5 dB及び13.6 dB増加することも報告されている。

2. 魚類への影響

1) 鰾の有無及び形態による影響の違い

魚類の音に対する感度や聴覚閾値は種によって異なり (Popper, 2005), 鰾 (うきぶくろ) の有無が音に対する感度と密接に関連している。骨鰾類 (コイ目, ナマズ目等) や喉鰾類 (ニシン目) は圧力による鰾の容積変動を内耳に伝える器官を持ち, これらに属する魚種は音に対する感覚が鋭いとされる (河村・安楽, 1998)。鰾と内耳を繋ぐ

器官を持たない非骨鰾類 (サケ目, タラ目, スズキ目等) の聴覚は, 骨鰾類や喉鰾類に比べて劣るとされており, 鰾を持たないカレイ目等の無鰾魚については感覚が鈍いようである。

鰾を持つ魚種 (有鰾魚) では, 累積音響曝露レベル (SEL_{cum}) が210 dB re 1 μPa^2s を超えると鰾周辺の組織の内出血等が確認されている (Halvorsen *et al.*, 2012a,b)。鰾を持つ魚種間でも, 鰾の形態の違いにより影響度は異なるようである。鰾と食道を繋ぐ気道を持ち, 鰾内のガスの出し入れを短時間でできる魚種 (開鰾類: コイ目, サケ目, チョウザメ目, ニシン目等) と, 鰾に気道を持たない魚種 (閉鰾類: タラ目, スズキ目等) では, 同じ音圧に曝露された場合の鰾周辺の組織の損傷度は, 後者の方が大きいことが報告されている (Halvorsen *et al.*, 2012b)。一方, 無鰾魚では, 有鰾魚の組織に損傷が起こる音圧レベルに曝された場合でも影響が認められなかったことが報告されている (Bolle *et al.*, 2012, Halvorsen *et al.*, 2012 b)。

また, ストレスレベルや代謝等の生理的影響についても, 鰾の有無で影響の受け方が異なる可能性がある。メジナモドキ *Spondyllosoma cantharus* やヨーロッパスズキ *Dicentrarchus labrax*等の有鰾魚を高い音圧レベルに曝露した研究では, 酸素消費量の増加または減少, 呼吸数の増加, 血中乳酸濃度の減少等, ストレスレベルが上昇することが確認されている (Bruitjes *et al.*, 2016, Debusschere *et al.*, 2016)。しかし, 無鰾魚であるヨーロッパソノガレイ *Pleuronectes platessa*を暴露した研究では, 酸素消費量の変化は認められていない (Bruitjes *et al.*, 2016)。

鰾のみだけではなく, 体サイズも組織への影響度の違いを生む一因となるようである。仔魚期の魚を高い音圧レベルの打設音に曝露した研究では, 鰾の有無及び形態に関わらず, 打設音に曝露しなかった場合と比べて生残率に差が認められていない (Bolle *et al.*, 2012, 2014)。また, シマスズキ類の交雑種を用いて異なる体サイズの個体間で影響度を比較した研究では, 体サイズが相対的に大きい個体ほど損傷が大きいという結果が得られている (Casper *et al.*, 2013)。この結果について, 著者らは, 打設音のスペクトルエネルギー分布のピークが, 大きな個体の鰾の共振周波数付近にある可能性や, 体サイズの違いで鰾と周辺組織の構造 (接触度) が異なることが関連している可能性

を指摘している。

2) 水中音への曝露後の行動変化

水中音によって魚類の遊泳や採餌といった行動に変化が確認された場合、その変化がどれだけ長い期間継続するかを把握することが影響度を評価するうえで重要になる。しかしながら、当該分野については、実際の洋上風力発電施設における知見は非常に乏しく、曝露実験による知見が徐々に蓄積されてきている状況である。

打設音についての曝露実験に基づく研究では、今のところ、曝露後に継続的な行動変化が起こることは確認されていないが、一方で、種間だけではなく同種個体間でも行動変化に違いが生じることが明らかになってきている。タイセイヨウダラ *Gadus morhua* 及びカレイの一種ヨーロッパソール *Solea solea* をピークレベル150~160 dBの打設音に曝露して遊泳行動を調べた研究では、タイセイヨウダラはその場で動かなくなり、ヨーロッパソールは遊泳速度が上がるといった魚種間で異なる反応が確認されたが、これらの反応は打設音への曝露を繰り返すと見られなくなることが報告されている (Mueller-Blenkle *et al.*, 2010)。また、ヨーロッパズキ *D. labrax* の稚魚の群れ行動に打設音が及ぼす影響を調べた研究では、各個体が互いに動きを調整する能力が損なわれることで混乱が起こることが報告されている (Herbert-Read *et al.*, 2017)。

野外海域における曝露実験の研究としては、餌で集めた魚類を水中スピーカーで再生した打設音を模した断続音 (peak-to-peakで163~171 dB) に曝露して行動を観察した例があり、種間及び同種個体間での反応の違いが検出されている (Roberts *et al.*, 2016b)。この研究では、ハゼの一種 *Gobiusculus flavescens* は反応を示さず、ベラの一 種 *Labrus mixtus* 及びタラの一種ポラック *Pollachius pollachius* では放音と同時に急激な方向転換や一時的に数分間餌から離れる等の反応を示す個体がいる一方で、音に反応せずに摂餌を続ける個体がいることも観察されている。実際の事業海域における研究例としては、ベルギーの Nobelwind Offshore Wind Farm の建設時のモノパイル打設時 (音源から400m地点における音圧レベル: 0~peakで199 dB) に、隣接する既設のウィンドファーム内 (打設地点から2.3~7.1 km離れた海域) におけるタイセイヨウダラ *G. morhua* の行動をバイオテレメトリーにより調べた例がある

(van der Knaap *et al.*, 2022)。この研究では、打設音が計測される海域から遠ざかる行動や遊泳距離等に顕著な変化は認められなかったが、打設中及び打設後には最寄りの洋上風車基部の洗堀防止工に移動したことが確認されている。

洋上風車の稼働音についても、曝露実験による研究では、サイズや成長段階に関わらず行動変化が観察されているが、それらが継続することは確認されていない。大型の魚類の研究例では、洋上風車の稼働音 (RMSで最大165 dB) を水中スピーカーから放音し、畜養生け簀内のタイセイヨウクロマグロ *Thunnus thynnus* の行動変化を観察した例があり、遊泳水深、群れの収縮 (個体間距離の減少)、遊泳速度の増加等が確認されたが、短時間で何度も繰り返し放音されると慣れることが報告されている (Pérez-Arjona *et al.*, 2014)。稚魚への影響を研究した例では、マダイ *Pagrus major* の0歳魚を純音 (周波数: 100 Hz, 音圧: 140 dB re 1 μ Pa / $\sqrt{\text{Hz}}$) に20日間連続で曝露した例があり、突進的な遊泳や水槽底で横臥する等の反応が見られるが、曝露から一時間後には通常の遊泳及び摂餌行動に戻り、以降の曝露期間中でも水中音に曝露しなかった場合と比べて摂餌行動に差が無かったことが報告されている (島ら, 2017a)。

これらの水中音への曝露後に見られる行動の変化は、多くの既往研究で確認されているように、一過性であるのかもしれない。しかしながら、このような短期的な変化が種内・種間の相互作用等にどのように波及するのかについては未知であり、実際の洋上風力発電事業海域における研究によって検証する必要があると考えられる。

3) 生息状況の変化

水中音、厳密には水中音が発生するイベントの前後で事業区域内外の魚類の生息状況がどのように変化するかについては、最も関心が高い項目であると考えられる。しかしながら、現時点では公表されている事例は非常に限られている。

米国のBlock Island Wind Farmでは、異体類の漁獲調査による研究があり、異体類の現存量やサイズ等は時空間的に変動したが、これらは産卵等の生態と関連した変動であり、建設工事や稼働による影響ではないことが報告されている (Wilber *et al.*, 2018)。また、ドイツのAlpha Ventus Offshore Wind Farmで実施された浮魚類 (タイセイヨウニシン *Clupea harengus*, ヨーロッパカタクチイワシ

Engraulis encrasicolus, ニシイワシ *Sardina pilchardus* 等) の現存量の変化を事業区域内と対照海域で比較した研究では、工事期間中は事業区域内の浮魚類の現存量は対照区に比べ減少するが、稼働中では事業区域内外で差は確認されていない (BSH and BMU, 2014)。

洋上風力施設以外の事例では、埠頭の複合施設における杭打ち工事期間中の魚の行動をバイオテレメトリーによって調べた研究がある (Iafate *et al.*, 2016)。この研究では、タイの一種シープスヘッド *Archosargus probatocephalus* 及びフエダイの一種ネズミフエダイ *Lutjanus griseus* の生息状況を調べており、前者の生息状況は変化しないが、移動性が比較的高い後者については、杭打ち工事中に生息場所を移した個体も確認されている。

4) 初期生活史への影響

シロギス *Sillago japonica* の受精卵 (桑実胚期) を水槽に収容し、純音 (周波数: 100 Hz, 音圧: 140 dB re 1 μ Pa / $\sqrt{\text{Hz}}$) に曝露した研究では、正常孵化率、異常卵率等に水中音の影響は確認されていない (島ら, 2017b)。

5) 個体間コミュニケーションの阻害

タラ類、カサゴ類、ニベ類等の多くの魚種が鳴音を発することが知られており、これらの魚類は群れ行動、縄張りの主張、繁殖行動等に鳴音を利用している (Ladich and Winkler, 2017)。洋上風力発電施設から発生する水中音は、これらの鳴音を介した行動を阻害する可能性があるが、今後の研究が必要な分野である。Siddagangaiah *et al.* (2021) は、洋上風力発電施設周辺海域において、2タイプの鳴音について大きさと持続時間を調べ、建設前と比較して、建設及び稼働中には鳴音の大きさの増加や持続時間の延長等の変化が起こったことを報告している。

3. 無脊椎動物への影響

水中音が無脊椎動物へ及ぼす影響については、魚類を対象とした研究例に比べて非常に少ない。この理由として、音の知覚に関しては未知の部分が多いこと等が考えられる。これまでに、イカ類やカニ類の浮遊幼生を対象とした曝露実験に基づく研究が行われてきており、行動の変化だけではなく、発生や発達プロセスにおける影響の可能性が報告されている。

Jones *et al.* (2020, 2021) によるアメリカケンサキイカ *Doryteuthis pealeii* を用いた一連の研究では、録音した打設音に曝露すると、全ての個体で体色変化、墨吐き、突進等の何れかの驚愕反応が観察されたが、ある程度の回数でこれらの反応が無くなる「慣れ」のような反応が観察されており、捕食行動中に打設音を放つ実験では捕食成功率の低下が観察されている。特に、この「慣れ」のような反応については、イカ類を用いた他の国内外の研究でも報告されている (Fewtrell and McCauley, 2012; 高原ら, 2022)。同様に、イカ類であるヨーロッパコウイカ *Sepia officinalis* を複数のレベルの打設音と掘削音に曝露した研究 (Solé *et al.*, 2022) では、最大音圧レベルの打設音及び掘削音 (それぞれ 170 dB re 1 μ Pa² 及び 167 dB re 1 μ Pa²) に曝露した場合、イカの幼体の生存率は音圧レベルの増加とともに低下したが、163 dB re 1 μ Pa² 以下の音圧レベルでは深刻な影響が無いことが確認されている。さらに、この研究では、音圧レベルの増加とともに孵化成功率が低下することが観察されている。

また、水中音は幼生分散のプロセスにも影響を及ぼし得ることが明らかにされている。メガロバ幼生を洋上風力及び潮力発電の稼働音に曝露すると、生息域の水中音に曝露した場合に比べ、稚ガニに変態して着底するまでの時間が遅延することが報告されている (Pine *et al.*, 2012)。幼生分散期に海域特有の水中音を手掛りとして生息適地に着底、もしくは不適地を忌避する魚類や無脊椎動物は数多く存在するようであり (Simpson *et al.*, 2004, 2011), 前述のヨーロッパコウイカ *S. officinalis* の孵化成功率の低下等の研究結果を踏まえると、生活史初期に着目した研究の重要性は非常に高いと考えられる。

上記のような行動や生態への影響の他にも、4種の異なるイカ・タコ類を低周波音 (周波数: 50-400 Hz, 音圧レベル: 157 $\pm$ 5 dB, ピークレベルは 175 dB) へ暴露した研究により、長時間の曝露で全ての種に聴覚器官の損傷が生じたことが報告されており (André *et al.*, 2011), 長期間にわたり連続的に放射される洋上風車の稼働音についても影響を確認する必要があると考えられる。

杭打ちに伴う海底振動

洋上風力発電施設の建設・稼働時には、水中音

と同様、海底基盤に振動（海底振動）が発生する（第2図）。基礎杭の打設時に発生する海底振動については、打設エネルギーや杭の直径が大きくなるにつれて増大すると考えられるが、測定した例は限られている。また、稼働時にはタービン支柱を通じた海底振動の発生も考えられているが、これを測定した例は見当たらなかった。

1. 杭打ちによる振動の測定例

ドイツ（北海）の洋上風力発電所AmrumbankWest建設時に測定された杭打ち（水深：19.6～23.6 m, モノパイル直径：6 m, 打設エネルギー：800 J）で発生した海底振動速度及び周波数特性について整理された例がある（Bruns *et al.*, 2014）。この例では、海底振動は数Hz～数十Hzの低周波であり、杭打ち地点から15 mの距離における振動速度は約7～8 mm/s（0-peak）であり、750 m離れた地点では0.1 mm/sまで減衰している。振動波の到達速度（500 m/s）は、水中の音の伝わる速度（1,487 m/s）よりも遅く、表面波であると考えられる（Bruns *et al.*, 2014）。また、杭打ち地点から500 m離れた地点における振動速度は、1 mm/s程度であるという予測がある（Miller *et al.*, 2014）。

2. 海底振動が底生生物へ及ぼす影響についての研究例

洋上風力発電で発生する海底振動に関する研究は、総じて乏しいのが現状であり、海底振動が海生生物へ及ぼす影響について調べた研究例は極めて少ない。実際には、多くの海生生物が振動を感知できることが確認されてきており、特に海底や基質内に生息する生物への影響が懸念されている（Roberts and Elliot, 2017 ; Hawkins *et al.*, 2021）。影響を受けやすい生物としては、特に底生生物が挙げられ、数少ない既往研究においては底生無脊椎動物が主な対象とされてきている。無脊椎動物は一般に、音に対する感度が低い一方で、振動に対する感度は高いと考えられている（Popper *et al.*, 2001）。

Aimon *et al.* (2021) によるヨーロッパミドリガニ *Carcinus maenas* に振動（20 Hz, 1.08 m/s）を与える室内実験研究では、活動量や触角の動きが増加するといった行動変化が確認されたが、代謝量の指標となる酸素消費量については実験の前後で差が見られなかったと報告されている。これらの行動変化は、雌よりも雄の方で顕著である傾向

があり、著者らは影響を評価する際には性差を考慮することの重要性を指摘している。

野外実験研究としては、浅いタイドプールに生息するヨーロッパホンヤドカリ *Pagurus bernhardus* への杭打ちを模した海底振動（振動速度：0-peakで1.5～3.5 mm/s）を与えた例がある（Roberts and Laidre, 2019）。本種は、新たに「家」として利用できる巻貝の殻を離れた場所から探し出すために、巻貝の殻から放出される化学物質を嗅覚により検知している。この研究では、この嗅覚による探索行動が抑制されたことが報告されている。

また、海底振動の影響範囲については、底生無脊椎動物では数百メートルの広範囲にわたり何かしらの行動影響を受ける可能性がある。ヨーロッパエビジャコ *Crangon crangon*（Heinisch and Wiese, 1987 ; Berghahn *et al.*, 1995）やヨーロッパホンヤドカリ *P. bernhardus*（Roberts *et al.*, 2016a）といった甲殻類についての研究例があり、低周波域の振動（70～170 Hz）に対して感度が高く、反応閾値は振動加速度（RMS）0.11～0.57 m/s²の範囲であることが報告されている。この反応閾値を振動速度に変換すると約0.2～0.9 mm/sであり、前述のAmrumbankWest建設時の杭打ちの測定例に当てはめた場合、これらの種は震源から250 m以上離れた場所でも振動を感知できる可能性が考えられる。

甲殻類以外では、海底振動により誘発される二枚貝の閉殻反応について調べた例がある。ヨーロッパイガイ *Mytilus edulis* を用いた例（Roberts *et al.*, 2015）では、振動刺激による明確な閉殻周期の変化が観察され、甲殻類と比較して、低い周波数域（10 Hz）で感度が高く、反応閾値も非常に低いこと（RMS:0.06 m/s²）が報告されている。また、海域においてパイプロハンマー及びインパクトハンマーを用いた模擬杭打設（杭直径30cm）を行い、イタヤガイ科二枚貝のマゼランツキヒ *Placopecten magellanicus* の殻の開閉への影響を調べた例（Jézéquel *et al.*, 2022）では、杭打ちから8 mの地点（振動加速度レベル：109.95±1.25 dB re 1 μm·s⁻²）ではインパクトハンマーによる打設に同期した閉殻が観察されたが、杭打ちから50 mの地点（振動加速度レベル：87.08±2.88 dB re 1 μm·s⁻²）では確認されていない。この反応は、幼貝で顕著であり、連続した打設による反応の消失（慣れ）は確認されていないが、殻の開閉行動は杭打ち終了後15分程度で通常の状態に戻ることも

報告されている。尚、殻の開閉行動の日周リズムの乱れは確認されていない。

発電施設の存在による流況等の変化

モノパイル式洋上風力発電（第1図）では、海流を受けるモノパイルの下流側で乱流が発生する（van Berkel *et al.*, 2020）。乱流の影響範囲は、下流方向にモノパイルの基礎直径の10倍程度であると考えられている（西村ら, 2018）。また、形式に関わらず、上流風車により下流風車で後流風速が弱まる現象（ウェイク）が発生することにより、風が海面に及ぼす力（風応力）が減少し、海水の湧昇または下降が起こることが想定されている（van Berkel *et al.*, 2020）。これら乱流やウェイクは、底質の再懸濁（濁りの発生）、塩分・水温躍層の乱れ、垂直混合の促進による表層への栄養供給の増加等の海域環境の変化を介して、海洋生態系へ影響を及ぼすことが懸念されている。しかしながら、今のところ、顕著な海域環境の変化が起こった例は報告されておらず、発電施設の存在によって生じる影響と自然変動による影響を区別して評価することは難しいようである（van Berkel *et al.*, 2020）。

発電施設への生物増集

洋上風力発電施設の建設後には、モノパイルや風車基礎部の捨て石（洗堀防止工）等の新たに導入された海中構造物を生息場とする生物が加入する（第2図）。北海の研究例では、水深の違いによる生物の帯状分布が確認されており、水面近くでは大型藻類やイガイ類、中間の深さではフジツボ類等の濾過摂食者、より深い場所ではイソギンチャク等の付着生物が優占していたと報告されている（De Mesel *et al.*, 2015）。同海域における他の研究例では、ヨーロッパイチョウガニ *Cancer pagurus* 等が周年、風車基部に優占して出現したようである（van Hal *et al.*, 2012）。これらの生物の増加が起点となり、栄養段階がより高次の生物を増集すると考えられる（Degraer *et al.*, 2020）。

洋上風力施設に増集する栄養段階が高次の生物については、主要な漁業対象である魚類に関する研究が蓄積されてきている。これらの増集する魚類は、利用目的や利用頻度により幾つかのタイプに分けられることが確認されており、洗堀防止工

等に特異的に生息する生物を主な餌とするタイプ、一時的に風車周辺を増集場として利用するタイプ、風車基礎に生息する生物を増集場として利用せずに風車周辺を一時的な避難所として利用するタイプ等が存在するようである（Degraer *et al.*, 2020 ; Mavraki *et al.*, 2021）。ベルギーのC-Power Wind Farmで実施された胃内容物と安定同位体比に基づく研究では、タラ類（タイセイヨウダラ *Gadus morhua* 及びフランスダラ *Trisopterus luscus*）やカジカ類（*Myoxocephalus scorpioides*）のような移動性の低い底生魚類は風車構造物上で特異的に見られる十脚目（エビ・カニ類）や短脚類等の底生無脊椎動物を主な餌として長期的に利用しているが、移動性の高い浮魚類は増集する目的が異なるようであり、ニシマアジ *Trachurus trachurus* はこれらの表在性底生生物を一時的に集中して捕食し、タイセイヨウサバ *Scomber scombrus* は風車構造物で特異的に見られる生物を殆ど摂餌していないことが報告されている（Mavrak *et al.*, 2021）。同じくベルギーにおける2つの洋上風力発電所を対象とした研究では、1つの洋上風力発電所において、周辺海域の砂地に比べて、ヨーロッパツノガレイ *Pleuronectes platessa* の密度が洗堀防止工により造られた岩場が混ざる砂地エリアで有意に増加したことが報告されている（Buyse *et al.*, 2022）。尚、著者らは、ヨーロッパツノガレイが増加した可能性として、造られた砂地エリアが好適な餌場・避難場となったことを挙げている。隣国のオランダのファームにおける研究では、タイセイヨウダラ *G. morhua* が周年、風車基部に優占したことが報告されている（van Hal *et al.*, 2012）。また、米国のBlock Island Wind Farmにおける研究では、運開から3年後の調査で、風車基部に岩礁域を好むハタ科魚類のブラックシーバス *Centropristis striata* が風車一機当たり100 個体程の高密度で確認されている（Hutchison *et al.*, 2020）。総じて、底生魚類または岩礁域を好む魚類は、洋上風車周辺の環境を生息場として好む傾向がありそうである。ただし、洗堀防止工の工法の違い等により造られる環境が異なることが予想され、カレイ類のように底質との相性が重要である底生魚類については、このような傾向が見られない可能性がある。

浮魚類の増集様式の違いは、上述の利用目的の違いの他に、魚種毎の生態に応じた来遊時期の違いにも因ると考えられる。オランダの例ではタイ

セイヨウサバ *S. scombrus* が夏季に風車構造物周辺に大規模な群れを成して蟬集することが確認されており (van Hal *et al.*, 2012), 日本の例では, 北九州沖におけるハイブリット重力式洋上風車の実証研究で, マアジ *Trachurus japonicus* が秋季に同様に蟬集することが確認されている (NEDO, 2018)。また, このような季節的もしくは一時的に風車周辺を利用する浮魚類には, 沿岸性の魚種だけではなく, 外洋性の強い魚種も含まれるようである。前述のBlock Island Wind Farm周辺海域を利用する漁業者及び遊漁者への聞き取り調査の結果では, 風車周辺で確認された魚種の中には, シイラ *Coryphaena hippurus* やタイセイヨウヤイト *Euthynnus alletteratus* 等の外洋性の強い魚種が含まれていたようである (ten Brink and Dalton, 2018)。

ここまで, 国内外の着床式洋上風力施設の例を紹介してきたが, 日本国内では浮体式洋上風力施設の実証試験が実施されており, その中で得られた魚類の蟬集に関する成果についても紹介する。

長崎県五島沖の浮体式洋上風力発電実証試験では, バイオテレメトリーによるマダイ *Pagrus major* 及びブリ *Seriola quinqueradiata* の行動調査が実施された。その結果, 風車周辺における滞留時間は, マダイは冬季で10日, 夏季では1日程度, ブリは3日程度であり, 両種とも季節に関わらず滞留時間は長くはなく, 発電施設への親和性が低いことが確認されている (Karama *et al.*, 2021)。一方で, 著者らは, 設置後1年の結果であり, 蟬集に重要な餌生物である付着生物群集が安定化するまでには更に時間を要することを挙げ, より長い期間での観察を推奨している。また, 福島県沖の浮体式実証試験では, クロマグロ *Thunnus orientalis* が風車近辺で漁獲されており (福島洋上風力コンソーシアム, 2018), 一時的かもしれないが, 外洋性の強い浮魚類を蟬集させることが示唆されている。浮体式洋上風力施設と類似した構造物として浮魚礁があり, これらはマグロ類等の外洋性の強い浮魚類にとって, 餌場ではなく, 隠れ家や休息場として利用されていると考えられており (伊藤ら, 2010), 浮体式洋上風力施設も同様の機能を有する可能性が考えられる。

以上のように, 生物蟬集に関しては, 種や生物量の増加や一部の生物種の環境利用性については研究が行われてきているが, 蟬集する生物種やそれらの蟬集の程度は海域の環境特性や生物相, 造られる環境の違い等により異なると考えられるた

め, 海域毎の検証が必要になると考えられる。また, 生物蟬集は漁業にポジティブな効果をもたらす可能性があるが, 生態系や漁業に対する具体的な影響については未知数であり, 例えば, 外来種の侵入を助長しないか, 蟬集した生物が水産有用種に悪影響 (捕食等) を与えないか, 蟬集する生物を有効に利用することが可能か等の問題も想定される。

シャドーフリッカー

洋上風力発電におけるシャドーフリッカーとは, 運転に伴い回転する風車のブレードの影により, 海面・海中に明暗が生じる現象を指す (第2図)。シャドーフリッカーが起こるには, 影が生じる天候や時間等の条件が揃う必要があり, 生物に影響を及ぼす時間は限られると考えられる。現状, シャドーフリッカーの生物影響についての研究は, 世界的に見ても, 陸上風力発電について僅かに存在する程度であり, 洋上風力発電については殆ど進んでいない。

陸上の風力発電では, 遡河回遊性サケ科魚類であるタイセイヨウサケ *Salmo salar* に対する影響を文献調査で検討した研究例があるが, 河川を利用する卵～浮上稚魚期, 降河期及び遡上期 (成魚) においては, 何らかの影響を及ぼす可能性を示す生物・生態学的な根拠はなく, 総じて影響の可能性は殆ど無いと予想されている (Dodd and Briers, 2021)。また, 水生生物ではないが, 飼育されている馬を対象とした研究例では, 極一部 (424頭中11頭) が厩舎の窓や放牧中の地面にかかる風車の影を避ける反応を示したが, すぐに慣れたことが報告されている (Seddig, 2004)。

陸上風力発電に関する限られた知見からは, シャドーフリッカーが深刻な影響を及ぼす可能性は示されていない。しかしながら, 洋上風力発電では, 海中の照度への影響や主に水面下を利用する魚類等への影響等といった懸念が残っており, 今後も科学的な根拠を得ていくことは必要であると考えられる。

電磁界

電磁界とは, 送電線の周囲に発生する電界と磁界の総称である。洋上風力施設の場合では, 海底に敷設される送電ケーブル (タービン間を繋ぐイ

ンターアレイケーブル及び、陸上グリッドまでのエクスポートケーブル)の周囲で発生する(第2図)。電磁界の強度はケーブルから距離が離れると急激に減衰(理論減衰率=1/距離³)するため(Gill *et al.*, 2009), 多くの場合、海生生物へ及ぼす影響はケーブルルートに沿った狭い範囲に限られると考えられている(Wilson *et al.*, 2010)。一方で、電磁界の強度はケーブルの設計や敷設工法等により変わることや、電磁界への感受性が高い種は数百メートル離れていても影響を受ける可能性が指摘されている(Gill *et al.*, 2009)。

魚類やエビ・カニ類のような底生無脊椎動物については、電磁界を感知する種の存在が確認されている(Snyder *et al.*, 2019; Albert *et al.*, 2020)。例えば、サケ類やウナギ類等のように大規模な回遊を行う魚種は、地球の自然磁場の強度と方向を認識することで目的地を目指していると考えられている(Snyder *et al.*, 2019)。そのため、送電ケーブルで発生する電磁界の生物への影響は、生理的な面だけではなく、行動にも干渉する可能性が懸念される。

生理機能及び行動への影響については、底生無脊椎動物や魚類を対象とした研究が欧州において蓄積されてきている。ヨーロッパエビジャコ *Crangon crangon* やミナトオウギガニ *Rhithropanopeus harrisi* 等の小型甲殻類と、ヨーロッパイガイ *Mytilus edulis* を電磁界(DC磁界3.7 mT)に34~93日の長期にわたり曝露した研究では、生存、酸素消費量や生殖腺の発達に影響を及ぼさないことが確認されている(Bochert and Zettler, 2006)。ヨーロッパイガイ *M. edulis* については、成体を300 µT及び47 µT(環境の磁界強度)の電磁界に曝露した研究があり、殻の開閉運動や濾水量に有意な差が認められなかったことが報告されている(Albert *et al.*, 2022)。二枚貝であるバルチックシラトリ *Macoma balthica* 及びゴカイの一種であるセイヨウカワゴカイ *Hediste diversicolor* を50 HzのAC磁界(1 mT)に9~12日間曝露した研究があり、生存、摂餌量や呼吸数には影響が認められない一方で、アンモニア排泄量が増加することが報告されている(Jakubowska *et al.*, 2019)。また、Scott *et al.* (2021) による、ヨーロッパイチョウガニ *Cancer pagurus* を異なる強度の電磁場(250 µT, 500 µT, 1000 µT)に曝露した研究では、強度に依存した生理機能及び行動への影響が確認されている。この研究では、250 µTでは顕著な生理機能

及び行動への影響は認められなかったが、500 µTと1000 µTではL-乳酸とD-グルコースの概日リズムの乱れや総血小板数の変化という生理的な影響が確認され、電磁波源である装置に引き付けられる、動き回る時間が大幅に減少するといった行動の変化も確認されたことが報告されている。しかしながら、同じ甲殻類であるヨーロッパロブスター *Homarus gammarus* の稚エビを225±5 µTのACまたはDC磁界に一週間曝露した研究では、隠れ家を探す行動や探索行動には影響が認められなかったことが報告されており(Taormina *et al.*, 2020)、前述のヨーロッパイチョウガニ *C. pagurus* の結果を考慮すると、個々の種で生理機能及び行動への影響は異なる可能性が考えられる。

電磁場を受容するような反応は魚類の研究でも確認されており、Jakubowska *et al.* (2021) によるニジマス *Oncorhynchus mykiss* の稚魚を用いた研究では、DC磁界(10 mT)またはAC磁界(1 mT)に40日間曝露したところ、酸素消費量の変化等のストレス反応は認められないが、曝露期間終了後に曝露条件であった磁界強度を好むようになる傾向がみられたことを報告している。一方、イカナゴの一種 *Ammodytes marinus* の仔魚(孵化後17~24日、体長約12 mm)を高電圧直流(HVDC)で生成されるレベルの磁界強度勾配(50~150 µT)に曝露した研究では、仔魚の空間分布、遊泳速度、遊泳距離等に影響は認められていない(Cresci *et al.*, 2022)。

ここまで紹介した研究は屋内における曝露実験に基づくものであるが、実海域ではバイオテレメトリーを用いた研究例が蓄積されつつある。産卵回遊期のヨーロッパウナギ *Anguilla anguilla* の研究では、130 KVのACケーブルが敷設されているエリアを横切る際に遊泳速度の低下が確認されたが、これによる移動の遅れは僅かであり、影響は小さいと結論付けられている(Öhman *et al.*, 2007)。また、DCケーブル(200 kV, 400 MW, ケーブル付近の磁界強度: 245 nT)がキングサーモン *Oncorhynchus tshawytscha* の降海した稚魚とチョウザメ *Acipenser medirostris* の回遊へ及ぼす影響を研究した例では、これら両魚種の回遊に影響が無いことが報告されている(Kavet *et al.*, 2016)。硬骨魚類以外を扱った研究としては、アメリカンロブスター *Homarus americanus* とガンギエイの一種 *Leucoraja erinacea* のそれぞれの種について、HVDCケーブル(150 KV, 330 MW, 磁界強度: 99.2~

116.6 μ T) 上に設置したケージ内に収容し、行動の変化を観察した例がある (Hutchison *et al.*, 2018)。この研究では、ケーブルに通電すると、移動距離の延長、移動速度の低下、方向転換の頻度の増加、高い電磁界のエリアで過ごす時間の増加といった行動の変化が両種で確認され、*L. erinacea*の方がより強い影響を受けた。

総じて、生理機能及び行動を介した致命的な影響は確認されてきてはいないが、影響の大きさは個々の種や磁界強度に応じて異なる可能性が指摘されている。そのため、生存や分布に影響を与えるか否かを明らかにするために、今後も知見の蓄積が必要であると考えられる。

漁船操業への影響

洋上風力発電施設の建設及び稼働期間中、発電事業区域における漁業操業は、発電事業者が設けるルールや、風車や送電ケーブルといった発電施設の存在等により制限される。ここでは、洋上風力発電が漁業操業へ及ぼす影響について先行地域における知見を紹介する。

1. 発電事業海域への立ち入り制限について

ドイツやベルギーでは、洋上風力発電の事業海域への立ち入りや漁業活動が基本的に禁止されている (Schupp *et al.*, 2021)。イギリスでは、建設期間中は建設現場から半径500 mの範囲、稼働中は風車から半径50 mの範囲への立ち入りは規制されているが、稼働中の洋上風力発電の事業海域内における漁業活動は規制されていない (Gray *et al.*, 2016)。また、欧州外の事例として、米国で現在稼働している唯一の洋上風力発電である Block Island Wind Farmでは、施設近傍への立ち入りや漁業活動は制限されていない (ten Brink and Dalton, 2018)。

2. 漁船操業に関する調査及び研究事例

欧州における洋上風力発電の開発は北海やバルト海に集中しており、これらの海域は遠浅の砂泥底である。そのため、底生生物を対象とした底曳網（ビームトロール、オッタートロール）による漁業が盛んであり、漁場が洋上風力発電の開発海

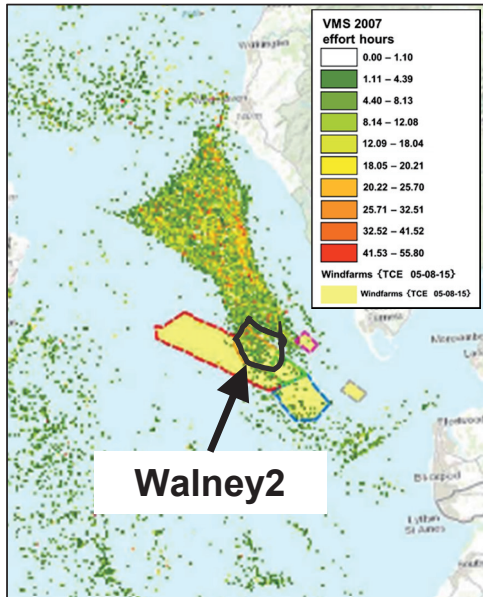
域と重なる場合が多いようである (Stelzenmüller *et al.*, 2020)。特に、底曳網と送電ケーブルの干渉については懸念される重要な課題である。底曳網のような移動式漁法は、固定式漁法（刺網、延縄、籠等）に比べて、送電ケーブルの損壊リスクが遥かに高いと考えられている (Drew and Hopper, 2009)。底曳網と送電ケーブルの干渉については、漁具に形状を変える工夫を施す対策の他に、送電ケーブルを海底に埋設することにより軽減できるようであり、海底の地盤が固い場合は40 cm以下、砂礫質の海底の場合は50 cm、柔らかい泥底の場合は50 cm以上の深さに埋設することが推奨されている (UK Department for Business Enterprise and Regulatory Reform, 2008)。

また、EUでは長さ12 m以上の漁船は衛星通信による船舶モニタリングシステム (VMS : Vessel Monitoring System) の設置が義務付けられおり、漁船の位置や速度等の情報がデータベース^{※3}に集約されている。英国アイリッシュ海では、洋上風力発電事業海域における漁業実態の変化とその原因を探るために、このVMSデータと、発電所運開後の漁業実態調査及び漁業者への聞き取り調査の結果を用いた分析が行われた (Gray *et al.*, 2016)。その結果、底生魚類（カレイ類等）の漁獲努力量と漁獲量の大幅な減少の原因は、洋上風力発電事業ではなく、カレイ類がTAC (Total Allowable Catch : 総漁獲可能量) の対象魚種に指定され、採捕することができる年間の漁獲可能量が減少したことが原因であることが明らかにされた。さらに、ヨーロッパアカザエビ *Nephrops norvegicus* の漁獲量については、発電所の建設前後で変動は認められなかったが、VMSデータでは発電事業区域内における漁業活動に小から中程度の低下が認められており、これは漁業者が送電ケーブルや風車との衝突等のリスクを懸念したことで起こったことが明らかにされた (第4図)。このように、漁獲努力量や漁獲量等の変化の把握に加えて、漁業の操業位置の調査や聞き取り調査を行うことにより、どのような影響が及んでいるのかを具体的に把握することができると考えられる。

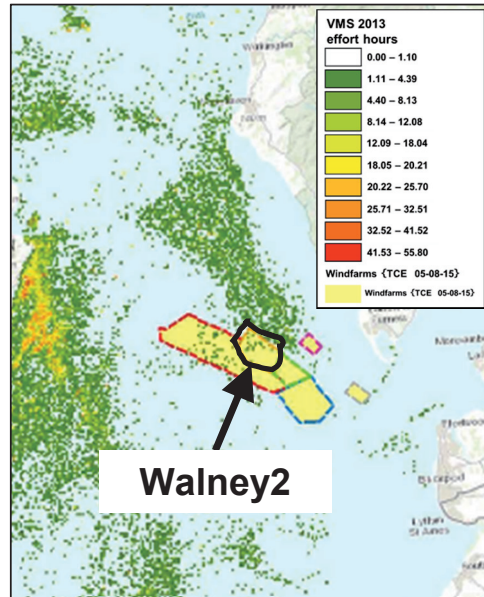
米国では、前述のBlock Island Wind Farmの事業区域を含む海域において、漁業者や遊漁者を対象

※3 英国の場合、政府機関であるMarine Management Organizationがデータを保有している。

(A) 建設前の2007年



(B) 運開後の2013年



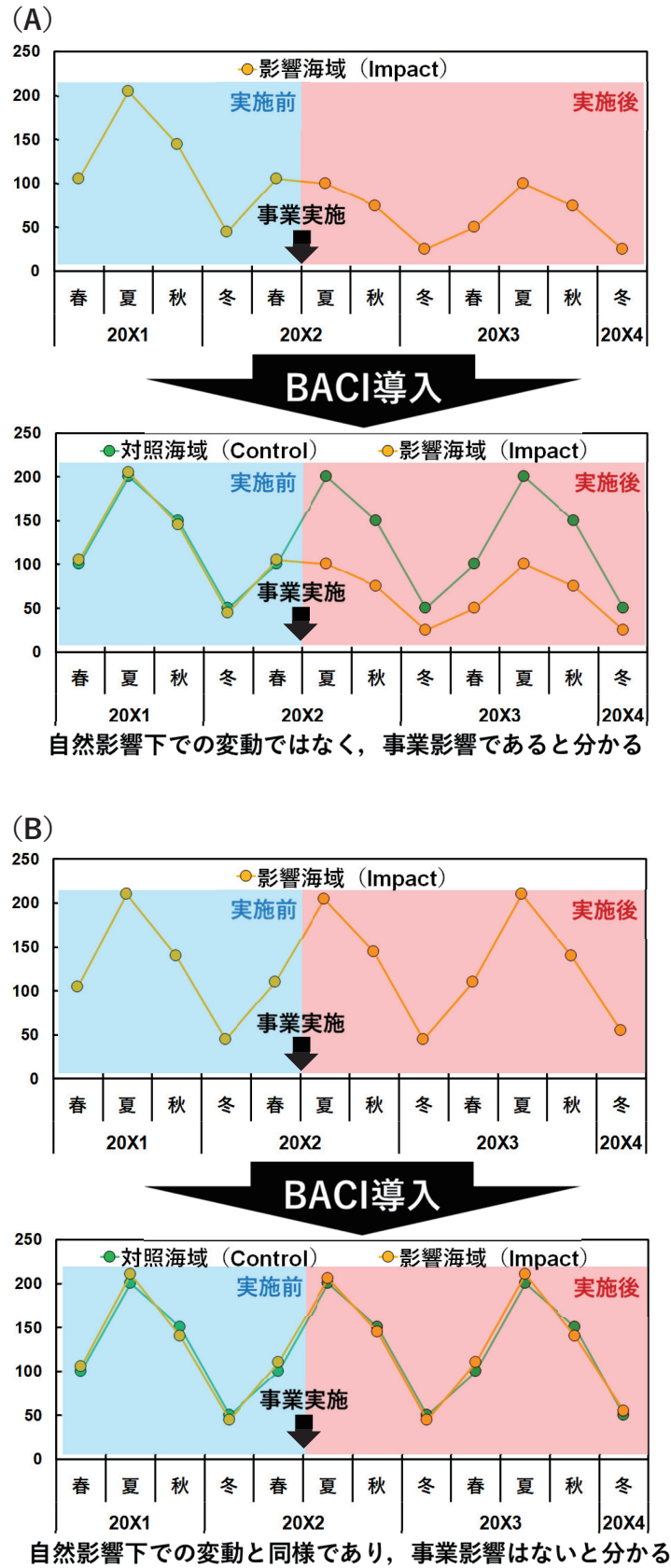
第4図 洋上風力発電所（Walney2）の建設前後での底曳き網漁船の操業状況の変化をVMSデータにより比較した例（Gray *et al.*, 2016の図を一部改変）

とした発電所の運開から1年後の状況についての聞き取り調査が行われている（ten Brink and Dalton, 2018）。この海域では、カレイ・ヒラメ類やホタテガイ類を対象とした底曳網漁業、アメリカンロブスター *Homarus americanus* を対象とした籠漁業をはじめ、刺網等の様々な漁法を用いた漁業が営まれており（Lipsky *et al.*, 2016）、釣りや水中銃による遊漁も盛んである。聞き取り調査の結果からは、遊漁者は洋上風力発電施設の影響をポジティブなものと感じているが、漁業者の一部は遊漁者の増加に伴う漁場の混雑により、操業が妨げられることを懸念していたことが明らかになった。また、漁業者の80%以上が、風車への衝突の危険性、工事中の漁場へのアクセス阻害、漁場の消失、漁具の損傷等について不安を感じていたようである。

影響の評価方法

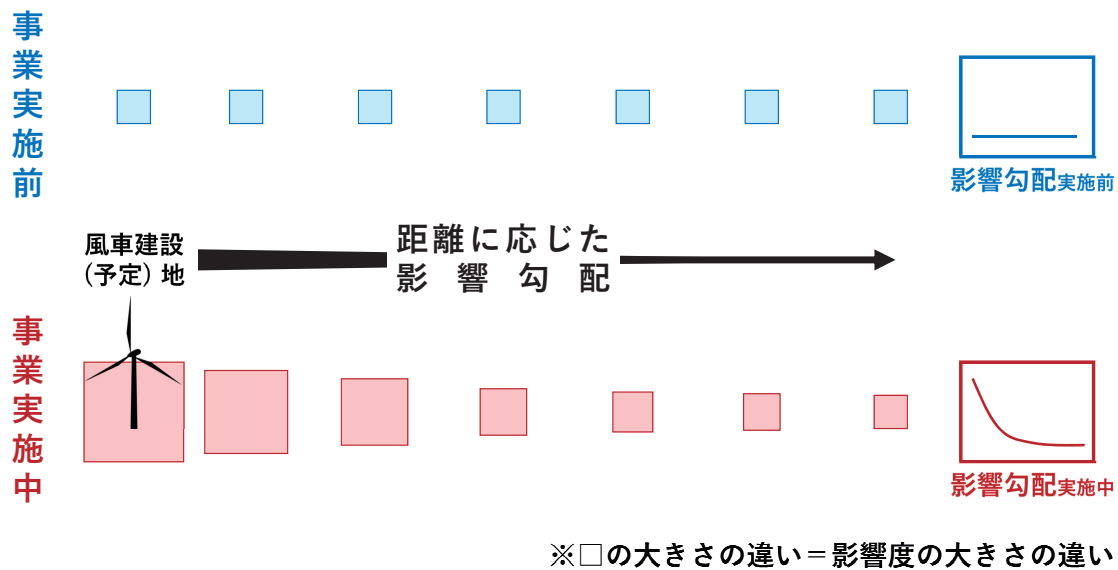
洋上風力発電事業の環境や漁業への影響を事前に予測することは、実海域における情報が少ないこと等の理由から現状では容易ではない。事前予測を可能にしていくためには、まず、モニタリング調査による情報の蓄積・共有が着実に為されていくことが欠かせないと考えられる。また、影響の有無を評価する際には、自然変動による変化と

人為的影響（事業影響）による変化の分離が困難であることが悩ましい問題として付き纏う。この問題に対処するためには、事業実施前の状態と建設中及び運開後の状態の時空間的な比較をすることにより、影響の有無とその程度を把握しなければならない。これらを考慮した影響調査手法として、BACI（Before-After-Control-Impact）デザイン（Green, 1979）によるモニタリング調査が挙げられる。BACIデザインでは、事業影響が想定される事業区域内の海域（影響海域：Impact）と事業影響が及ばないと想定される事業区域外の海域（対照海域：Control）の双方において、事業実施前（Before）と実施後（則ち、建設中及び運開後：After）に調査を行い、その結果を統計的に比較解析することにより、影響の有無とその程度を評価する（第5図）。しかしながら、日本におけるBACIデザインの適用における難点として、環境の複雑性や海域利用等の制約により対照海域を設定することが難しいことや、調査に関する様々な負担の増加といったことが考えられる。これらの難点をクリアできるかもしれない選択肢の一つとして、BAG（Before-After-Gradient）デザインというものがある（Secor, 2018；Methratta, 2021）。BAGデザインによる調査は、水中音や発電施設の存在による流況の変化等の距離に応じて変化する要因の影響を評価する場合に適している



※生物量や調査デザインは仮想であること、変動のパターンを把握することが重要であることに注意されたい。

第5図 BACIデザインの導入による生物量への影響評価の概念図
((A) 影響が有りそうな場合；(B) 影響が無さそうな場合)



第6図 BAGデザインの導入による影響勾配の見え方の概念図（Secor, 2018の図をもとに作成）

とされており、洋上風車（影響源）を基点とした距離に応じた影響勾配を計測するために、一定の距離毎に調査地点を設定して調査が行われる（第6図）。海域特性や漁業実態等に応じて、これらの事業影響を検出するのに適した調査デザインを選定し、影響把握のための調査を設計することが望ましい。

おわりに

ここまで紹介してきたように、欧州を中心に洋上風力発電の導入が始まり10年以上が経過した現時点でも、環境や生物、漁業への影響について結論付けられることは非常に限られている。こうした状況を踏まえると、日本を想定した場合、各地で生じる様々な懸念を払拭しつつ洋上風力発電の導入目標を達成するためには、急速な知見の蓄積が必要となる。何故なら、日本周辺の海洋環境の多様性は高く、漁業についても地域によって漁獲対象種や漁法が異なるため、想定される懸念事項も膨大となるためである。特に、日本では、各地で重要な漁獲対象種への影響が必ず懸念されるため、個々の影響項目についての実験的検証だけではなく、導入期である現時点から実海域における情報を可能な限り網羅的に収集・集約していくことが、洋上風力発電の効率的導入への近道となると考えられる。

漁船操業への懸念については、情報収集手法の効率化が望まれる。日本では、VMSや船舶自動識別装置（AIS: Automatic Identification System）等を搭載した漁船は限られるため、欧州のように漁船の操業状況のデータを一括して得ることはできない。しかし、漁業者の協力を得られる場合、漁船にGPS端末を装備した標本船調査を実施することにより、操業状況を把握することが可能と考えられる。この操業状況のデータと、漁獲量や漁獲努力量等のデータを用いて、洋上風力発電所の建設前後での変化を定量的に比較できると考えられる。また、洋上風力発電と漁業が共存するためには、既存の漁法毎の送電ケーブルや根固め石等との干渉リスクの整理や、洋上風力発電開発海域に適した漁法、漁具の改良等の研究も今後望まれる。

謝 辞

本稿の執筆にあたりご指導やご助力を頂いた公益財団法人海洋生物研究所の清野通康顧問、三浦正治実証試験場長をはじめとする所員の皆様には、厚く御礼申し上げます。また、本稿の一部は経済産業省（資源エネルギー庁）からの委託業務「令和3年度新エネルギー等の導入促進のための広報等事業（地域での洋上風力発電に関する案件形成の促進に向けた調査事業）」で収集した情報に基づいており、関係者各位には深く感謝申し上げます。

ます。

引用文献

- Aimon, C., Simpson, S.D., Hazelwood, R.A., Bruintjes, R. and Urbina, M.A. (2021). Anthropogenic underwater vibrations are sensed and stressful for the shore crab *Carcinus maenas*. *Environ. Pollut.*, **285**. Doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117148.
- 明田定満 (2021). 洋上風力発電施設から生じる水中音が海洋生物に及ぼす影響. 日本水産工学会 誌, **58**, 107-115. Doi.org/10.18903/fisheng.58.2_131.
- Albert, L., Deschamps, F., Jolivet, A., Olivier, F., Chauvaud, L. and Chauvaud, S. (2020). A current synthesis on the effects of electric and magnetic fields emitted by submarine power cables on invertebrates. *Mar. Environ. Res.*, **159**. Doi.org/10.1016/j.marenvres.2020.104958
- Albert, L., Maire, O., Olivier, F., Lambert, C., Romero-Ramirez, A., Jolivet, A., Chauvaud, L. and Chauvaud, S. (2022). Can artificial magnetic fields alter the functional role of the blue mussel, *Mytilus edulis*?. *Mar. Biol.*, **169**. Doi.org/10.1007/s00227-022-04065-4.
- Andersson, M.H., Andersson, S., Ahlsén, J., Andersson, B.L., Hammar, J., Persson, L.K.G., Pihl, J., Sigray, P. and Wikström, A. (2016). A framework for regulating underwater noise during pile driving. A technical Vindval report, Swedish Environmental Protection Agency, Stockholm, Sweden, 1-115.
- André, M., Solé, M., Lenoir, M., Durfort, M., Quero, C., Mas, A., Lombarte, A., van der Schaar, M., López-Bejar, M., Morell, M., Zaugg, S. and Houégnigan, L. (2011). Low-frequency sounds induce acoustic trauma in cephalopods. *Front. Ecol. Environ.*, **9**, 489-493. Doi.org/10.1890/100124.
- Bellmann, M.A., Brinkmann, J., May, A., Wendt, T., Gerlach, S. and Remmers, P. (2020). Underwater noise during the impulse pile-driving procedure: Influencing factors on pile-driving noise and technical possibilities to comply with noise mitigation values. Supported by the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU)), FKZ UM16 881500. Commissioned and managed by the Federal Maritime and Hydrographic Agency (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)), Order No. 10036866. Edited by the itap GmbH. 1-137.
- Berghahn, R., Wiese, K. and Ludemann, K. (1995). Physical and physiological aspects of gear efficiency in North Sea brown shrimp fisheries. *Helgolander Meeresunters*, **49**, 507-518. Doi.org/10.1007/BF02368378.
- Bochert, R. and Zettler, M.L. (2006). Effect of electromagnetic fields on marine organisms. In "Offshore wind energy" (eds. Koller, J., Koppel, J. and Peters, W.), Springer, Berlin, Heidelberg, Germany, 223-234.
- Bolle, L.J., de Jong, C.A.F., Bierman, S.M., van Beek, P.J.G., van Keeken, O. A., Wessels, P.W., van Damme, C.J.G., Winter, H.V., de Haan, D., and Dekeling R.P.A. (2012). Common sole larvae survive high levels of pile-driving sound in controlled exposure experiments. *PLoS One*, **7**. Doi.org/10.1371/journal.pone.0033052.
- Bolle, L.J., Jong, C.D., Blom, E., Wessels, P.W., van Damme, C.J. and Winter, H.V. (2014). Effect of pile-driving sound on the survival of fish larvae. *IMARES-Wageningen UR*, No. **C182/14**, 1-33. https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/358413.
- Bruintjes, R., Simpson, S.D., Harding, H., Bunce, T., Benson, T., Rossington, K. and Jones, D. (2016). The impact of experimental impact pile driving on oxygen uptake in black seabream and plaice. *Proc. Mtgs. Acoust.*, **27**. Acoustical Society of America. Doi.org/10.1121/2.0000422.
- Bruns, B., Stein, P., Kuhn, C., Sychla, H. and Gattermann, J. (2014). Hydro sound measurements during the installation of large diameter offshore piles using combinations of independent noise mitigation systems. *INTER-NOISE and NOISE-CON congress and conference proceedings*, **249**, 5629-5638.

- Institute of Noise Control Engineering.
- BSH and BMU (2014). Ecological Research at the Offshore Windfarm Alpha Ventus: Challenges, Results and Perspectives. Springer Spektrum, Heidelberg, 1–201.
- Buyse, J., Hostens, K., Degraer, S. and De Backer, A. (2022). Offshore wind farms affect the spatial distribution pattern of plaice *Pleuronectes platessa* at both the turbine and wind farm scale. *ICES J. Mar. Sci.*, **79**, 1777–1786. Doi.org/10.1093/icesjms/fsac107.
- Casper, B.M., Halvorsen, M.B., Matthews, F., Carlson, T.J. and Pooper, A.N. (2013). Recovery of barotraumas injuries resulting from exposure to pile driving sound in two sizes of hybrid striped bass. *PLoS One*, **8**. Doi.org/10.1371/journal.pone.0073844.
- Cresci, A., Perrichon, P., Durif, C.M., Sørhus, E., Johnsen, E., Bjelland, R., Larsen, T., Skiftesvik, A.B. and Browman, H.I. (2022). Magnetic fields generated by the DC cables of offshore wind farms have no effect on spatial distribution or swimming behavior of lesser sandeel larvae (*Ammodytes marinus*). *Mar. Environ. Res.*, **176**. Doi.org/10.1016/j.marenvres.2022.105609.
- Debusschere, E., Hostens, K., Adriaens, D., Ampe, B., Botteldooren, D., De Boeck, G., De Muynck, A., Sinha, A.K., Vandendriessche, S., Van Hoorebeke, L., Vincx, M. and Degraer, S. (2016). Acoustic stress responses in juvenile sea bass *Dicentrarchus labrax* induced by offshore pile driving. *Environ. Pollut.*, **208**, 747–757. Doi.org/10.1016/j.envpol.2015.10.055.
- Degraer, S., Carey, D.A., Coolen, J.W.P., Hutchison, Z.L., Kerckhof, F., Rumes, B. and Vanaverbeke, J. (2020). Offshore wind farm artificial reefs affect ecosystem structure and functioning: A synthesis. *Oceanography*, **33**, 48–57. Doi.org/10.5670/oceanog.2020.405.
- De Mesel, I., Kerckhof, F., Norro, A., Rumes, B. and Degraer, S. (2015). Succession and seasonal dynamics of the epifauna community on offshore wind farm foundations and their role as stepping stones for non-indigenous species. *Hydrobiologia*, **756**, 37–50. Doi.org/10.1007/s10750-014-2157-1.
- Dodd, J.A. and Briers, R.A. (2021). The impact of shadow flicker or pulsating shadow effect, caused by wind turbine blades, on Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Scotland's Centre of Expertise for Waters (CREW)*, 1–24. <http://researchrepository.napier.ac.uk/Output/2836906>.
- DOSITS (Discovery of Sound in the Sea) (2021). University of Rhode Island and Inner Space Center. <https://dosits.org/>. (Accessed 19 December 2022)
- Drew, S.C. and Hopper, A.G. (2009). Fishing and Submarine Working Together, 2nd edition. ICPC, Lymington, 1–54.
- Duarte, C.M., Chapuis, L., Collin, S.P., Costa, D.P., Devassy, R.P., Eguiluz, V.M., Erbe, C., Gordon, T.A.C., Halpern, B.S., Harding H.R., Havlik, M.N., Meekan, M., Merchant, N.D., Miksis-Olds, J.L., Parsons, M., Predragovic, M., Radford, A.N., Radford, C.A., Simpson, S.D., Slabbekoorn, H., Staaterman, E., van Opzeeland, I.C., Winderen, J., Zhang, X. and Juanes, F. (2021). The soundscape of the Anthropocene ocean. *Science*, **371**. DOI: 10.1126/science.aba4658.
- Fay, R.R. (Ed.). (1998). Comparative hearing: fish and amphibians (Vol. 11). Springer Science & Business Media.
- Fewtrell, J.L. and McCauley, R.D. (2012). Impact of air gun noise on the behaviour of marine fish and squid. *Mar. Pollut. Bull.*, **64**, 984–993. Doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.02.009.
- 福島洋上風力コンソーシアム (2018). 平成29年度福島沖での浮体式洋上風力発電システムの実証研究事業報告書 (概要版). <http://www.fukushima-forward.jp/reference/pdf/study017.pdf>.
- Gill, A.B., Huang, Y., Gloyne-Philips, I., Metcalfe, J., Quayle, V., Spencer, J. and Wearmouth, V. (2009). COWRIE 2.0 Electromagnetic Fields (EMF) Phase 2: EMF-sensitive fish response to EM emissions from sub-sea electricity cables of the type used by the offshore renewable energy industry. COWRIE 2.0 EMF final report, COWRIE Ltd, London, 1–68.
- Gray, M., Stromberg, P.L. and Rodmell, D. (2016). Changes to fishing practices around the UK as a

- result of the development of offshore windfarms – Phase 1 (Revised). The Crown Estate, London, 1–121.
- Green, R. H. (1979). Sampling Design and Statistical Methods for Environmental Biologists. John Wiley and Sons: New York, NY.
- GWEC (2022). GWEC Global Wind Report 2022. Global Wind Energy Council, Brussels, Belgium, 1–154.
- Halvorsen, M.B., Casper, B.M., Matthews, F., Carlson, T.J. and Popper, A.N. (2012a). Effects of exposure to pile-driving sounds on the lake sturgeon, Nile tilapia and hogchoker. *Proc. R. Soc. B: Biol. Sci. B: Biol. Sci.*, **279**, 4705–4714. Doi.org/10.1098/rspb.2012.1544.
- Halvorsen, M.B., Casper, B.M., Woodley, C.M., Carlson, T.J. and Popper, A.N. (2012b). Threshold for onset of injury in Chinook salmon from exposure to impulsive pile driving sounds. *PLoS One*, **7**. Doi.org/10.1371/journal.pone.0038968.
- 畠山良己 (1992). 魚の聴覚能力. 水産工学, **28**, 111–119. Doi.org/10.18903/fisheng.28.2_111.
- Hawkins, A.D., Hazelwood, R.A., Popper, A.N. and Macey, P.C. (2021). Substrate vibrations and their potential effects upon fishes and invertebrates. *J. Acoust. Soc. Am.*, **149**, 2782–2790. Doi.org/10.1121/10.0004773.
- Heinisch, P. and Wiese, K. (1987). Sensitivity to movement and vibration of water in the North Sea shrimp *Crangon crangon* L. *J. Crust. Biol.*, **7**, 401–413. Doi.org/10.2307/1548290.
- Herbert-Read, J.E., Kremer, L., Bruintjes, R., Radford, A.N. and Ioannou, C.C. (2017). Anthropogenic noise pollution from pile-driving disrupts the structure and dynamics of fish shoals. *Proc. R. Soc. B: Biol. Sci.*, **284**. Doi.org/10.1098/rspb.2017.1627.
- Hutchison, Z.L., Gill, A.B., Sigray, P., He, H. and King, J.W. (2020). Anthropogenic electromagnetic fields (EMF) influence the behaviour of bottom-dwelling marine species. *Sci. Rep.*, **10**. Doi.org/10.1038/s41598-020-60793-x.
- Hutchison, Z., Sigray, P., He, H., Gill, A., King, J. and Gibson, C. (2018). Electromagnetic Field (EMF) Impacts on elasmobranch (shark, rays, and skates) and American lobster movement and migration from direct current cables. Sterling (VA): US Department of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management. *OCS Study BOEM*, **3**, 1–147.
- Iafrate, J.D., Watwood S.L., Reyier E. A., Scheidt D.M., Dossot G.A. and Crocker S. E. (2016). Effects of Pile Driving on the Residency and Movement of Tagged Reef Fish. *PLoS One*, **11**. Doi.org/10.1371/journal.pone.0163638.
- IRENA (2022). Renewable Energy Statistics 2022. The International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 1–435.
- 伊藤靖・三浦浩・上田昌行 (2010). 浮魚礁におけるマグロ・カツオ類の蟄集・滞留効果. 日本水産工学会 学術講演会 講演論文集, **22**, 13–16. Doi.org/10.18903/pamjsfe.2010.0_13.
- Jakubowska, M., Greszkiewicz, M., Fey, D.P., Otremba, Z., Urban-Malinga, B. and Andrulewicz, E. (2021). Effects of magnetic fields related to submarine power cables on the behaviour of larval rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Mar. Freshw. Res.*, **72**, 1196–1207. Doi.org/10.1071/MF20236.
- Jakubowska, M., Urban-Malinga, B., Otremba, Z. and Andrulewicz, E. (2019). Effect of low frequency electromagnetic field on the behavior and bioenergetics of the polychaete *Hediste diversicolor*. *Mar. Environ. Res.*, **150**. Doi.org/10.1016/j.marenvres.2019.104766.
- Jézéquel, Y., Cones, S., Jensen, F. H., Brewer, H., Collins, J. and Mooney, T. A. (2022). Pile driving repeatedly impacts the giant scallop (*Placopecten magellanicus*). *Sci. Rep.*, **12**, 1–11. Doi.org/10.1038/s41598-022-19838-6.
- Jones, I.T. (2021). Assessing anthropogenic noise impacts and relevant soundscape cues for marine invertebrates: leveraging squid and coral reefs as model systems (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
- Jones, I.T., Peyla, J. F., Clark, H., Song, Z., Stanley, J. A. and Mooney, T. A. (2021). Changes in feeding behavior of longfin squid (*Doryteuthis pealeii*) during laboratory exposure to pile driving noise. *Mar. Environ. Res.*, **165**.

- Doi.org/10.1016/j.marenvres.2020.105250.
- Jones, I. T., Stanley, J. A. and Mooney, T. A. (2020). Impulsive pile driving noise elicits alarm responses in squid (*Doryteuthis pealeii*). *Mar. Pollut. Bull.*, **150**. Doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110792.
- 海洋音響学会 (2021). 海中音の計測手法・評価手法のガイダンス. https://www.masj.jp/wp-content/uploads/20210322_guidance.pdf.
- 環境省 (2017). 洋上風力発電所等に係る環境影響評価の基本的な考え方に関する検討会. <https://www.env.go.jp/content/900508901.pdf>.
- Karama, K., Matsushita, Y., Inoue, M., Kojima, K., Tone, K., Nakamura, I. and Kawabe, R. (2021). Movement pattern of red seabream *Pagrus major* and yellowtail *Seriola quinqueradiata* around Offshore Wind Turbine and the neighboring habitats in the waters near Goto Islands, Japan. *Aquac. Fish.*, **6**, 300–308. Doi.org/10.1016/j.aaf.2020.04.005.
- Kavet, R., Wyman, M.T. and Klimley, A.P. (2016). Modeling magnetic fields from a DC power cable buried beneath San Francisco Bay based on empirical measurements. *PLoS One*, **11**. Doi.org/10.1371/journal.pone.0148543.
- 河村軍蔵・安楽和彦 (1998). 魚類の聴側線器の構造と機能. 「魚類の聴覚生理」(添田秀男・畠山良己・河村軍蔵 編), 恒星社厚生閣, 東京, 1–62.
- 経済産業省産業保安グループ電力安全課 (2020). 発電所に係る環境影響評価の手引. https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/sangyo/electric/detail/tebiki.html. (2022年12月13日アクセス)
- 経済産業省資源エネルギー庁 (2022a). なっとく！再生可能エネルギー. https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/yojo_furyoku/index.html. (2022年10月31日アクセス)
- 経済産業省資源エネルギー庁 (2022b). 令和3年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書2022). <https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2022/html/1-2-1.html>. (2022年9月30日アクセス)
- Ladich, F. and Winkler, H. (2017). Acoustic communication in terrestrial and aquatic vertebrates. *J. Exp. Biol.*, **220**, 2306–2317. Doi.org/10.1242/jeb.132944.
- Lipsky, A., Moura, S., Kenney, A. and Bellavance, R. (2016). Addressing Interactions between Commercial Fisheries and Offshore Wind Development: The Block Island Wind Farm. *SeaPlan Archives*, 1–13. Doi.org/10.31230/osf.io/3jpxn.
- Matuschek, R. and Betke, K. (2009). Measurements of Construction Noise During Pile Driving of Offshore Research Platforms and Wind Farms. *Proceedings of NAG=DAGA 2009 International Conference on Acoustics (Rotterdam, Netherlands)*, 262–265.
- Mavraki, N., Degraer, S. and Vanaverbeke, J. (2021). Offshore wind farms and the attraction–production hypothesis: insights from a combination of stomach content and stable isotope analyses. *Hydrobiologia*, **848**, 1639–1657. Doi.org/10.1007/s10750-021-04553-6.
- Methratta, E.T. (2021). Distance-based sampling methods for assessing the ecological effects of offshore wind farms: Synthesis and application to fisheries resource studies. *Front. Mar. Sci.*, **8**. Doi.org/10.3389/fmars.2021.674594.
- Miller, H.J., Potty, R.J and Kim, H. (2014). Pile-Driving Pressure and Particle Velocity at the Seabed: Quantifying Effects on Crustaceans and Groundfish. *J. Acoust. Soc. Am.*, **136**, 2206–2206. Doi.org/10.1121/1.4900001.
- Mooney, T.A., Andersson, M.H. and Stanley, J. (2020). Acoustic impacts of offshore wind energy on fishery resources: An evolving source and varied effects across a wind farm’s lifetime. *Oceanography*, **33**, 82–95. Doi.org/10.5670/oceanog.2020.408.
- Mueller-Blenkle, C., McGregor, P.K., Gill, A.B., Andersson, M.H., Metcalfe, J., Bendall, V., Sigray, P., Wood, D.T. and Thomsen, F. (2010). Effects of pile-driving noise on the behaviour of marine fish. *COWRIE Ref: Fish 06-08, Technical Report*, 1–57.
- NEDO (2018). 着床式洋上風力発電の環境影響評価手法に関する基礎資料(最終版). https://www.nedo.go.jp/library/fuuryoku_d.html. (2022年9月30日アクセス)

- Nedwell, J.R., Parvin, S.J., Edwards, B., Workman, R., Brooker, A.G. and Kynoch, J.E. (2007). Measurement and interpretation of underwater noise during construction and operation of offshore wind farms in UK waters. *Subacoustech Report No. 544R0738 to COWRIE Ltd.*, 1–80.
- 西村規宏・會田義明・中林孝之・臼井雅一 (2018). 海洋構造物で生じる乱れの減衰距離の推定. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), **74**, I_1381–I_1386. Doi.org/10.2208/kaigan.74.I_1381.
- Öhman, M.C., Sigra, P. and Westerberg, H. (2007). Offshore windmills and the effects of Electromagnetic Fields on fish. *Ambio*, **36**, 630–633. Doi.org/10.1579/0044-7447(2007)36[630:OWATEO]2.0.CO;2.
- Pangerc, T., Theobald, P.D., Wang, L.S., Robinson, S.P. and Lepper, P.A. (2016). Measurement and characterisation of radiated underwater sound from a 3.6 MW monopile wind turbine. *J. Acoust. Soc. Am.*, **140**, 2913–2922. Doi.org/10.1121/1.4964824.
- Pérez-Arjona, I., Espinosa, V., Puig, V., Ordóñez, P., Soliveres, E., Poveda, P., Ramis, J., de-la-Gándara, F. and Cort, J.L. (2014). Effects of offshore wind farms operational noise on Bluefin tuna behaviour. *UA2014-2nd International Conference and Exhibition on Underwater Acoustics, Island of Rhodes, Greece*, 1417–1422.
- Pine, M.K., Jeffs, A.G. and Radford, C.A. (2012). Turbine Sound May Influence the Metamorphosis Behaviour of Estuarine Crab Megalopae. *PLoS One*, **7**. Doi.org/10.1371/journal.pone.0051790.
- Popper, A.N. (2005). A review of hearing by sturgeon and lamprey. *Report by Environmental BioAcoustics, LLC, Rockville, MD. Submitted to U.S. Army Corps of Engineers, Portland District*, 1–23.
- Popper, A.N., Hice-Dunton, L., Jenkins, E., Higgs, D.M., Krebs, J., Mooney, A., Rice, A., Roberts, L., Thomsen, F., Vigness-Raposa, K., Zeddies, D. and Williams K.A. (2022). Offshore wind energy development: Research priorities for sound and vibration effects on fishes and aquatic invertebrates. *J. Acoust. Soc. Am.*, **151**, 205–215. Doi.org/10.1121/10.0009237.
- Popper, A.N., Salmon, N. and Horsch, W.K. (2001). Acoustic detection and communication by decapod crustaceans. *J. Comp. Physiol. A*, **187**, 83–89. Doi.org/10.1007/s003590100184.
- Roberts, L., Cheesman, S., Breithaupt, T. and Elliott, M. (2015). Sensitivity of the mussel *Mytilus edulis* to substrate-borne vibration in relation to anthropogenically generated noise. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **538**, 185–195. Doi.org/10.3354/meps11468.
- Roberts, L., Cheesman, S., Elliott, M. and Breithaupt, T. (2016a). Sensitivity of *Pagurus bernhardus* (L.) to substrate-borne vibration and anthropogenic noise. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **474**, 185–194. Doi.org/10.1016/j.jembe.2015.09.014.
- Roberts, L. and Elliott, M. (2017). Good or bad vibrations? Impacts of anthropogenic vibration on the marine epibenthos. *Sci. Total Environ.*, **595**, 255–268. Doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.117.
- Roberts, L. and Laidre, M.E. (2019). Finding a home in the noise: cross-modal impact of anthropogenic vibration on animal search behaviour. *Biol. Open*, **8**. Doi.org/10.1242/bio.041988.
- Roberts, L., Pérez-Domínguez, R. and Elliott, M. (2016b). Use of baited remote underwater video (BRUV) and motion analysis for studying the impacts of underwater noise upon free ranging fish and implications for marine energy management. *Mar. Pollut. Bull.*, **112**, 75–85. Doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.08.039.
- Robinson, S., Lepper, P. and Hazelwood R.D. (2014). Good Practice Guide for Underwater Noise Measurement. NPL Good Practice Guide No. 133, 1–95.
- Schupp, M., Kafas, A., Buck, B., Krause, G., Onyango, V., Stelzenmüller, V., Davies, I. and Scott, B. (2021). Fishing within offshore wind farms in the North Sea: Stakeholder perspectives for multi-use from Scotland and Germany. *J. Environ. Manage.*, **279**. Doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111762.
- Scott, K., Harsanyi, P., Easton, B.A.A., Piper, A.

- J.R., Rochas, C.M.V. and Lyndon, A.R. (2021). Exposure to electromagnetic fields (EMF) from submarine power cables can trigger strength-dependent behavioural and physiological responses in edible crab, *Cancer pagurus* (L.). *J. Mar. Sci. Eng.*, **9**. Doi.org/10.3390/jmse9070776.
- Secor, D. (2018). Designing research and monitoring studies to effectively detect impacts. Presentation at the New York State Energy Research and Development Agency (NYSERDA) Workshop: The State of the Science on Wildlife and Offshore Wind Energy Development, 14 November 2018. https://a6481a0e-2fbd-460f-b1df-f8ca1504074a.filesusr.com/ugd/78f0c4_488375902a284f2ba270229660c7eaf1f.pdf?index=true. (Accessed 9 December 2022)
- Seddig, A. (2004). Gutachten: windenergieanlage und pferde [Report: wind energy plants and horses]. Biology faculty, Bielefeld University, Germany, 1-18.
- 島 隆夫・長谷川 一幸・岸田 智穂・今里 元信・塩荊 恵・井上 俊司 (2017b). シロギス卵発生に及ぼす低周波水中音の影響. 2017年度 日本水産工学会 学術講演会 講演論文集, 19-20. Doi.org/10.18903/pamjsfe.2017.0_19.
- 島 隆夫・長谷川 一幸・塩荊 恵・今里 元信 (2017a). 低周波水中音がマダイ (*Pagrus major*) の摂餌行動および成長に及ぼす影響. 環境アセスメント学会誌, **15**, 77-83. Doi.org/10.20714/jsia.15.1_77.
- Siddagangaiah, S., Chen, C.F., Hu, W.C. and Pieretti, N. (2021). Impact of pile-driving and offshore windfarm operational noise on fish chorusing. *Remote Sens. Ecol. Conserv.*, **8**, 119-134. Doi.org/10.1002/rse2.231
- Simpson, S.D., Meekan, M.G., McCauley, R.D. and Jeffs A. (2004). Attraction of settlement-stage coral reef fishes to reef noise. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **276**, 263-268. Doi:10.3354/meps276263.
- Simpson, S.D., Radford, A.N., Tickle, E.J., Meekan, M.G. and Jeffs, A.G. (2011). Adaptive avoidance of reef noise. *PLoS One*, **6**. Doi.org/10.1371/journal.pone.0016625.
- Slabbekoorn, H., Bouton, N., van Opzeeland, I., Coers, A., ten Cate, C. and Popper, A.N. (2010). A noisy spring: The impact of globally rising underwater sound levels on fish. *Trends Ecol. Evol.*, **25**, 419-427. Doi.org/10.1016/j.tree.2010.04.005.
- Snyder, D., Bailey, W., Palmquist, K., Cotts, B. and Olsen, K. (2019). Evaluation of potential EMF effects on fish species of commercial or recreational fishing importance in Southern New England. OCS Study BOEM 2019-049, Bureau of Ocean Energy Management, US Department of the Interior, Sterling, VA, USA, 1-44.
- Solé, M., De Vreese, S., Fortuno, J. M., van der Schaar, M., Sánchez, A. M. and André, M. (2022). Commercial cuttlefish exposed to noise from offshore windmill construction show short-range acoustic trauma. *Environ. Pollut.*, **312**. Doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119853.
- Stelzenmüller, V., Gimpel, A., Letschert, J., Kraan, C. and Doring, R. (2020). Research for PECH Committee – Impact of the use of offshore wind and other marine renewables on European fisheries. European Parliament, Policy Department for Structural and Cohesion Policies, Brussels, 1-102.
- 高原英生・富安 信・村田政隆・伊藤 靖・桜井泰憲 (2022). 洋上風力発電施設稼働時の水中音と海洋生物の行動. 一般財団法人 漁港漁場漁村総合研究所 調査研究論文集, **32**, 63-67. http://www.jific.or.jp/dispatch/ronbun/pdf_r32/32all.pdf.
- Taormina, B., Di Poi, C., Agnalt, A.L., Carlier, A. and Desroy, N. (2020). Impact of magnetic fields generated by AC/DC submarine power cables on the behavior of juvenile European lobster (*Homarus gammarus*). *Aquat. Toxicol.*, **220**. Doi.org/10.1016/j.aquatox.2019.105401.
- ten Brink, T. and Dalton, T. (2018). Perceptions of Commercial and Recreational Fishers on the Potential Ecological Impacts of the Block Island Wind Farm (US). *Front. Mar. Sci.*, **5**. Doi.org/10.3389/fmars.2018.00439.
- Tougaard, J., Hermannsen, L. and Madsen P.T. (2020). How loud is the underwater noise from operating offshore wind turbines?. *J. Acoust. Soc. Am.*, **148**, 2885-2893. Doi.org/10.1121/10.0002453.

- UK Department for Business Enterprise and Regulatory Reform (2008). Review of cabling techniques and environmental effects applicable to the offshore wind farm industry. *Centre for Environment Fisheries and Aquaculture Science (CEFAS)*, 1–159.
- van Berkel, J., Burchard, H., Christensen, A., Mortensen, L.O., Petersen, O.S. and Thomsen, F. (2020). The effects of offshore wind farms on hydrodynamics and implications for fishes. *Oceanography*, **33**, 108–117. Doi.org/10.5670/oceanog.2020.410.
- van der Knaap, I., Slabbekoorn, H., Moens, T., Van den Eynde, D. and Reubens, J. (2022). Effects of pile driving sound on local movement of free-ranging Atlantic cod in the Belgian North Sea. *Environ. Pollut.*, **300**. Doi.org/10.1016/j.envpol.2022.118913.
- van Hal, R., Couperus, A.S., Fassler, S.M.M., Gastauer, S., Griffioen, B., Hintzen, N.T., Teal, L.R., van Keeken, O.A. and Winter, H.V. (2012). Monitoring- and Evaluation Program Near Shore Wind farm (MEP-NSW): Fish community. *IMARES Report C*, **59**.
- Wilber, D.H., Carey, D.A. and Griffin, M. (2018). Flatfish habitat use near North America's first offshore wind farm. *J. Sea Res.*, **139**, 24–32. Doi.org/10.1016/j.seares.2018.06.004.
- Wilson, J.C., Elliott, M., Cutts, N.D., Mander, L., Mendão, V., Perez-Dominguez, R. and Phelps, A. (2010). Coastal and offshore wind energy generation: is it environmentally benign?. *Energies*, **3**, 1383–1422. Doi.org/10.3390/en3071383.