

洋上風力発電施設からの水中放射音に関する研究

塩苅 恵*, 今里 元信**, 石田 茂資***, 井上 俊司***

Study on the underwater sound from offshore wind turbines

by

Megumi SHIOKARI, Motonobu IMASATO, Shigesuke ISHIDA and Shunji INOUE

Abstract

Japan has small land area, but has so large sea area including the exclusive economic zone (EEZ). Accordingly, the developments of ocean renewable energy in the EEZ are very important for sustainable society in Japan. When offshore wind turbines are developed, it is necessary to evaluate environmental impacts on the marine life. In this study, the authors measured the underwater sound from offshore wind turbines during operation and construction, developed the methods for the estimation of sound propagation, and investigated the impacts of the operational sound on fish. As a result, it is revealed that the sound from wind turbine during operation is not so large level against environmental noise, and the frequency of the sound is ranged mainly in the low frequency zone. Besides, it is revealed that the sound may be generated in the nacelle and propagated underwater mainly via the tower and base of wind turbine. On the other hand, the sound during construction (pile-driving) is very large and changes over time. The authors made the estimation method of sound propagation and estimated the time changes of the sound source level. In addition to the method, the 3D FDTD simulation model is developed for underwater sound propagation. Moreover, the authors investigated the impacts on fish by tank test and found that neither feed intakes nor growth of Red sea bream *Pagrus major* will be affected from the sound so much.

*国土交通省：研究当時海上技術安全研究所, **水中工学系：研究当時水中工学センター

***洋上再生エネルギー開発系

原稿受付 平成27年4月15日

審査日 平成27年7月23日

目 次

1. まえがき	103
2. 着床式洋上風力発電施設周辺での水中音観測	103
2.1 着床式洋上風力発電施設の供用時における水中音観測	103
2.1.1 観測日時と気海象条件	103
2.1.2 主な観測機器	104
2.1.3 観測方法	104
2.1.4 データ解析方法	104
2.1.5 解析結果	105
2.1.6 観測結果の考察	106
2.2 着床式洋上風力発電施設の建設時における水中音観測	106
2.2.1 観測日時と気海象条件等	106
2.2.2 主な観測機器	107
2.2.3 観測方法	107
2.2.4 観測結果	108
2.2.5 当該海域における水中音伝搬特性の調査	110
2.2.6 打設音の音源音圧レベル推定	111
2.2.7 観測結果および音源音圧レベル推定結果についての考察	113
3. 水中音伝搬モデルの開発	113
3.1 支配方程式と定式化	113
3.2 境界条件の設定	114
3.3 モデルの検証	114
3.4 モデルの有用性	115
4. 水中音の生物影響実験	116
4.1 水中音による慢性影響	116
4.2 実験方法	117
4.2.1 実験使用音の周波数と音圧レベルの設定	117
4.2.2 対象魚種	117
4.2.3 実験条件	117
4.3 実験結果	119
4.3.1 行動	119
4.3.2 摂餌日周リズム	119
4.3.3 摂餌量	119
4.3.4 体重変化	120
4.4 実験結果の考察	120
5. まとめ	121
謝辞	121
参考文献	121

1. まえがき

我が国は国土面積が狭い一方、広大な排他的経済水域（EEZ）を有しており、その利活用に関する政策や研究等が進められている。エネルギー基本計画¹⁾においては再生可能エネルギーの導入加速の必要性が記されており、太陽光や風力、地熱等の自然エネルギーへの関心も高まっている。しかし、我が国の狭い国土面積ではこれらの発電施設の設置に限界があり、風力発電の陸上の適地も飽和状態となっている。そこで、陸上に比べて周辺の住居や地形等の制約が少なく、安定した風が吹く洋上に風力発電施設を設置する動きが強まっている。現在、国内の沿岸部にも洋上風力発電施設が建設されている場所が複数あり²⁾³⁾、商業用に実用化されているのは全て着床式の施設であるが、浮体式の研究開発の進展によって、より沖合に進出して行くと見られている。施設が陸から遠ざかれば人間を含む陸上生物への影響は小さくなると思われるが、海洋生物等に何らかの影響を及ぼす可能性がある。こうした状況において、海上技術安全研究所（以下、当所）では、洋上風力発電の環境負荷に関する研究を進めてきた。本報告では、洋上風力発電施設からの水中放射音の実態および推定法と水中音の魚類への影響評価法に関する研究結果について報告する。

2. 着床式洋上風力発電施設周辺での水中音観測

本章では、国内の着床式洋上風力発電施設について、運用時や建設時に発生する水中音を観測した結果を紹介する。まず第1節では着床式施設の供用時における風車運転中および停止中の水中音観測結果について説明し、次の第2節では着床式施設の建設時におけるモノパイル基礎打設工事時の水中音観測結果と水中音減衰曲線の推定法、および音源音圧レベルの推定法について説明する。

2.1 着床式洋上風力発電施設の供用時における水中音観測

ウィンド・パワーかみす洋上風力発電所（茨城県神栖市南浜地先、図2.1）の1号機デッキ上にて水中音と空中音の同時計測を実施した。詳細を以下に示す。

2.1.1 観測日時と気象条件

- ・ 観測日時：平成23年9月27日 15:10～16:00
- ・ 気象条件：晴れ、気温 20℃、風向 北北東（1号機のログより）、平均風速 10.4 m/sec、うねり波高約 3～4 m（目視）



図 2.1 ウィンド・パワーかみす洋上風力発電所（茨城県神栖市南浜地先）

2.1.2 主な観測機器

- ・ ハイドロホン（オキシーテック，OST2130）：1 台
- ・ ハイドロホン用アンプ（オキシーテック，OST4300）：1 台
- ・ 騒音計（RION，NL-15）：1 台
- ・ リニア PCM レコーダー（SONY，PCM-M10）：1 台

2.1.3 観測方法

ハイドロホンを水深約 3 m に、騒音計をデッキ床上約 1.5 m（水面から約 10 m）にそれぞれ設置した。風車の運転中および停止中において、施設近傍の水中音および空中音を連続観測し、さらにタワー内の空中音も観測した。水中音および空中音のデータ記録条件はサンプリング周波数 48 kHz，16 bit とし、水中音はハイドロホンからアンプを介して、空中音は騒音計から直接リニア PCM レコーダーに録音した。水中音観測では、ハイドロホンの波浪による揺れを低減するため、ハイドロホンを錘付きロープに固定して降下した。現場の水深が 3～5 m 程度のため、ハイドロホンが水深約 3 m に設置できるように水中に降下した。この観測中にデッキから撮影したハイドロホンの降下の様子を図 2.2 に示す。

水中音および空中音（タワー外）の計測は風車の回転中から開始し、約 10 分後に風車の停止に入り、完全に停止した時点から約 5 分後に再起動させた。再起動後、定格速度まで戻った時点からさらに約 3 分後に計測を終了した。この一連の変化を連続記録した。一方、風車タワー内の空中音計測は、これらの計測終了後に約 5 分間計測した。

2.1.4 データ解析方法

上記の観測において記録した水中音および空中音のデータについてスペクトル解析を行った。観測データには碎波音が混入するなどしており定常音ではないため、ここでは 30 秒間のデータの平均スペクトルを算出した。1 度にフーリエ変換するデータ数は 65,536 ($= 2^{16}$) 個（約 1.365 秒間）であり、これを 1 秒ごとに解析して 30 秒間の平均とした（つまり 0.365 秒間ずつ重複して解析している）。周波数分解能は約 0.732 Hz ($= 48,000/65,536$) である。なお、低周波音に着目しているため、2 kHz 未満を解析対象とした。

風車回転中のタワー内空中音、風車の回転中および停止中における水中音、空中音のスペクトル解析結果を次項に示す。

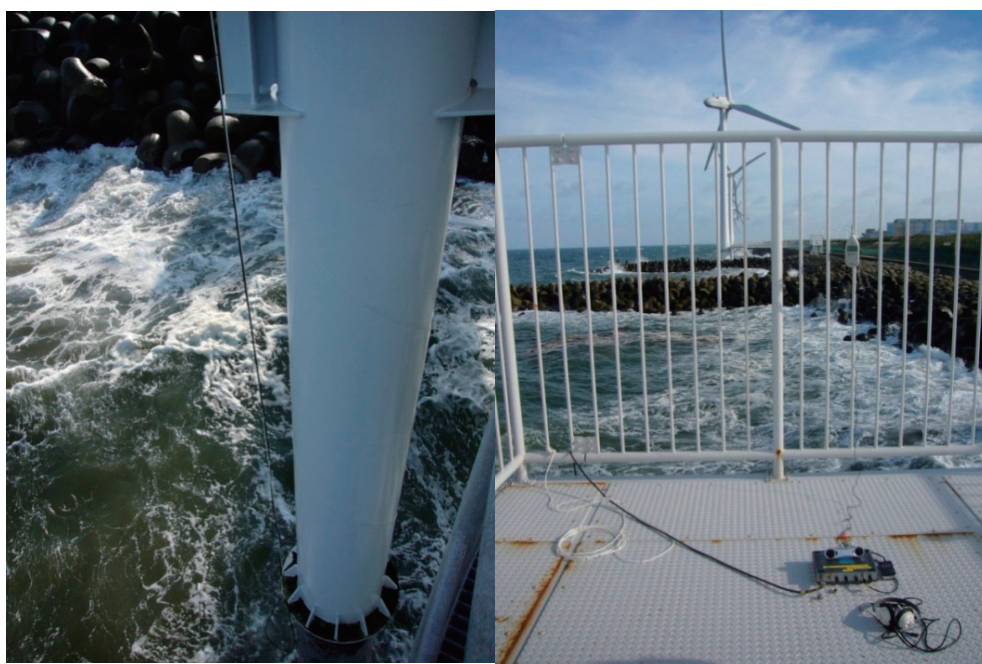


図 2.2 水中音観測の様子（右図のハイドロホンケーブルの先が左図の風車基礎付近）

2.1.5 解析結果

風車回転中のタワー内の空中音データ解析結果から 8, 30, 100, 150 Hz 付近にピーク周波数が確認された（図 2.3）. また、風車回転中および停止中の水中音データ解析結果を比較すると、風車回転中は全体的にレベルが高く、風車停止中の水中音には含まれていない、30, 80, 145 Hz 付近の 3 つのピーク周波数が現れている（図 2.4）. これらのピークは風車停止後に再起動したあとも、再び同じ周波数に出現した. ただし、砕波音が大い場合には全体の音圧レベルが上がり、ピーク周波数の音圧レベルを超えるため、これらのピークが見えなくなることが分かった.

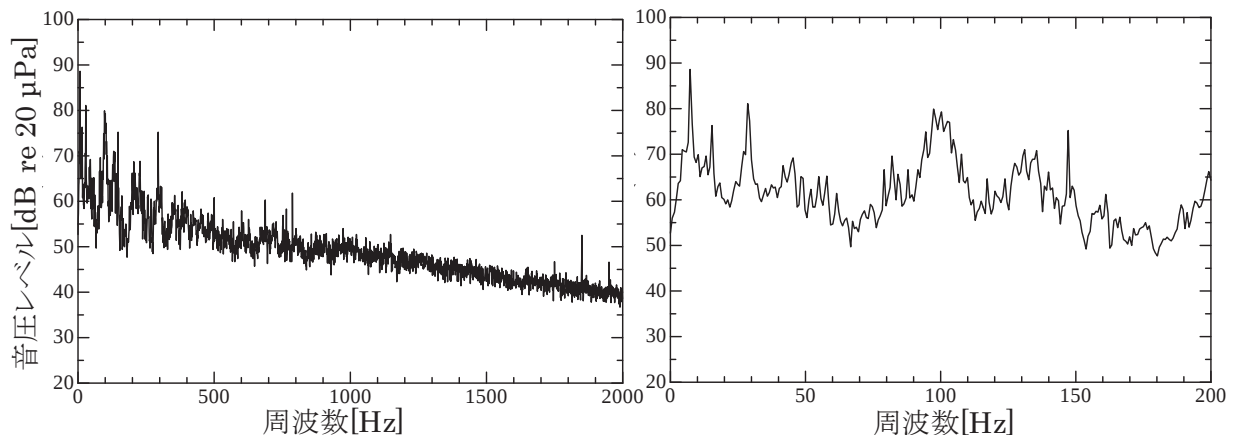


図 2.3 風車回転中のタワー内空中音の解析結果（右図は左図の横軸拡大）

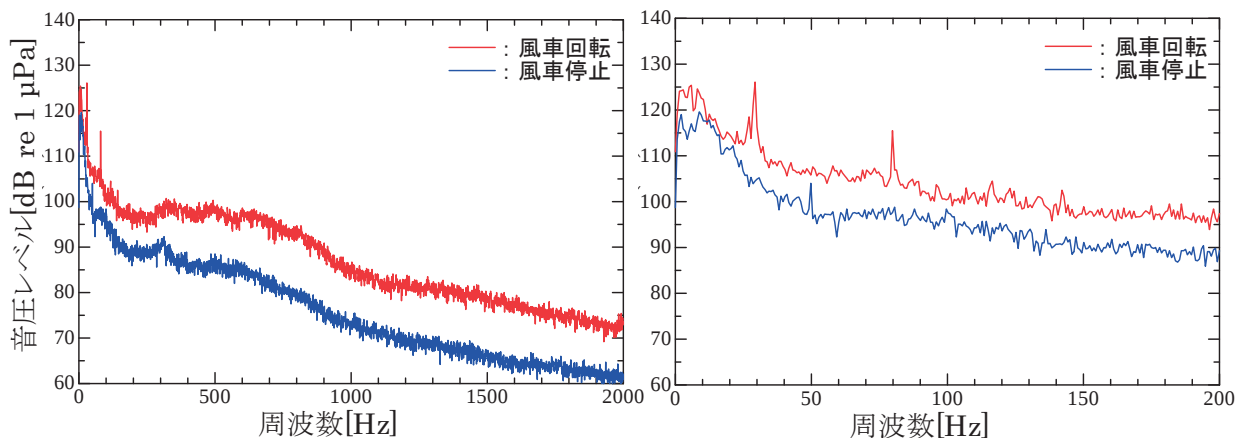


図 2.4 風車回転中および停止中の水中音の解析結果の比較（右図は左図の横軸拡大）

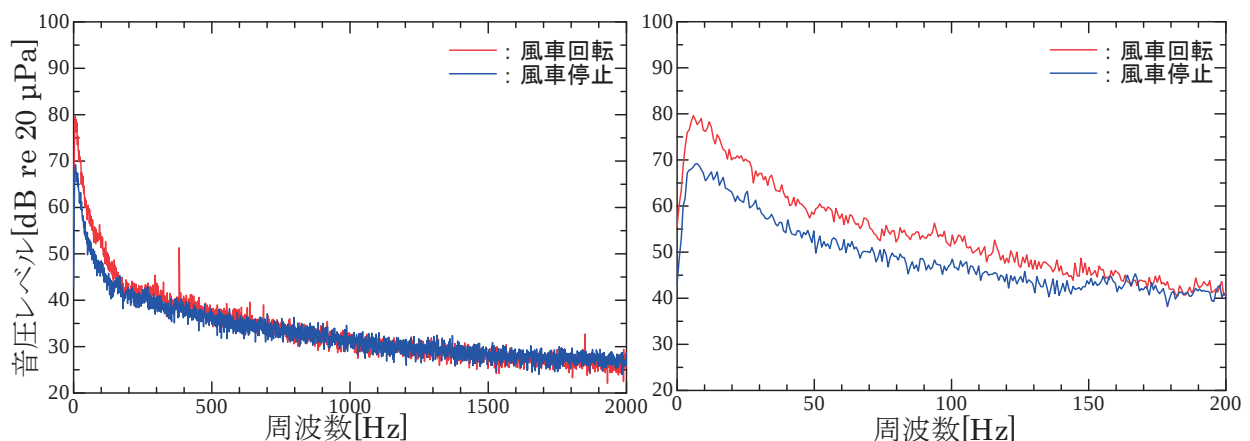


図 2.5 風車回転中および停止中のタワー外空中音の解析結果の比較（右図は左図の横軸拡大）

風車停止中には東日本の交流電流周波数である 50 Hz のピークが確認できたが、ほかに目立ったピークは確認されなかった。この周波数 50 Hz は風車電気設備の振動が音源となって水中音として観測された可能性があるが、ハムノイズが混入した可能性も否定できず、どちらであるかは区別不能である。なお、前述のとおり、計測機器は全て乾電池駆動とし、交流電源からのハムノイズ混入をできるだけ防ぐようにした。しかし、計測機器設置場所付近にタワーと陸上間の送電線等が敷設されていると思われ、この送電線から放出される電磁波が、ハイドロホンのケーブル等に影響を与えた可能性もある。

いずれにせよ、この 50 Hz の周波数音は風車内の電気設備に関連して発生していると考えられるため、風車の回転中および停止中のいずれにおいても発生していると考えられるが、風車回転中には低周波域全体の音圧レベルが上昇したため、このピークがはっきりと確認できなかったと推測される。

一方、タワー外における空中音観測データの解析結果を見ると、防風スクリーン装着時のデータにおいて約 380 Hz のピークが出現したが（図 2.5）、タワー内空中音や水中音との関連は確認できなかった。

2.1.6 観測結果の考察

これらの解析結果から、風車回転中は停止中と比べて施設周辺の水の中音の音圧レベルが高く（図 2.4）、タワー外の空中音観測データでは低周波域の音圧レベルだけが高いことが分かった（図 2.5）。それぞれのデータについて周波数に着目してみると、水中音については 30 Hz と 145 Hz 付近にピークがあるという点でタワー内空中音（図 2.3）と共通しているが、タワー外空中音には共通の周波数にピークは確認できない。この結果から、タワー内に存在するピーク周波数の音は、タワーの外部には伝わりにくく、タワー内から基礎を介して水中に伝搬する可能性が高いことが予想される。これは風力発電施設からの水中放射音の伝搬経路は空中からの寄与度が低く、構造物を介して水中に伝搬する経路が主であることを裏付けるデータであり、海外文献による報告内容とも一致する⁴⁾⁵⁾。

また、共通ピークが現れた周波数の音源を確認するため、風車メーカーに問い合わせたところ、30 Hz は発電機の定格速度、140～150 Hz は冷却ファンの回転速度に対応していることが分かった。しかし、水中音観測データについて碎波音の影響を検証したところ、碎波音が大きいときにはこれらの共通周波数のピークは碎波音に隠れてしまうことが分かり、風車稼働時の水中放射音の大きさは碎波音と比べて小さく、その影響は限定的であることが予想される。

その他、一般的に風車の騒音源として着目される周波数は、風車回転数、タワーとブレードとの空力的干渉から発生するブレード周波数（風車回転数×翼数）である。本章の観測対象とした風車の諸元⁶⁾より、前者は 0.18～0.33Hz 程度、後者は 0.56～0.98Hz 程度である。しかしハイドロホンの特性上、20 Hz 未満の周波数は計測できないため、本観測ではこれらの周波数を確認できなかった。また、風車の風切り音なども一般的に風車からの騒音源として考えられているが、その周波数等は明確になっていない。このような周波数不明音については、水中音への影響を直接評価することはできないが、上述の通り、タワー外空中音データと水中音データに共通する周波数ピークが見られないことから、風車の風切り音のような空中で発生した音が水中に侵入している可能性は低いと考えられる。

一方、風車停止中の水中音に関しては、本章の観測においては東日本の交流電流の周波数である 50 Hz のピークが確認された。

2.2 着床式洋上風力発電施設の建設時における水中音観測⁷⁾⁸⁾

平成 24 年 6 月に、前節の施設に隣接した沿岸部に建設中であったウィンド・パワーかみす第 2 洋上風力発電所 7 号機のモノパイル基礎打設時における水中放射音の観測を行い、その時刻歴特性や周波数特性を調査した。また、水中スピーカーを用いて当該海域における水中音伝搬特性を調査し、これらの結果から、着床式洋上風力発電施設の建設時水中放射音の音源音圧レベルを推定した。

2.2.1 観測日時と気象条件等

- ・ 観測日時：平成 24 年 6 月 18 日 12:30 頃～14:00 頃
- ・ 気象条件：晴れ，風向 南東，風速 4.6 m/s（気象庁，銚子，13:00），有義波高約 1.0 m（港湾局）

- ・ 満潮時刻と満潮時の潮位：2:03・225 cm, 16:36・210 cm (気象庁, 銚子)
- ・ 干潮時刻と干潮時の潮位：9:31・107 cm, 21:28・181 cm (気象庁, 銚子)
- ・ 月齢：28.1 (国立天文台, 水戸, 正午)

2.2.2 主な観測機器

本観測では、以下の機器を使用した。これらの機器は全て乾電池で駆動可能であり、ハイドロホンによる計測音をリニア PCM レコーダーに記録した。GPS ロガーとレーザー距離計は相対距離計測のために用いた。

- ・ ハイドロホン (オキシーテック, OST2130) : 2 台
- ・ ハイドロホン用アンプ (オキシーテック, OST4300) : 2 台
- ・ リニア PCM レコーダー (SONY, PCM-M10) : 1 台
- ・ GPS ロガー : 2 台
- ・ レーザー距離計 : 1 台

2.2.3 観測方法

打設地点からの距離を変えて複数地点で観測を行った。打設地点から 300 m, 200 m, 500 m, 700 m の順に目標とする距離を変えて移動し、各地点で数分間観測した。ただし、観測中は観測船自体が発する水中音の混入防止を目的とし、観測船をブラックアウトさせたため、風・波・潮流によって観測船が観測中に移動しており、必ずしも目標とする距離では観測ができていない。実際に観測を行った地点と打設点の位置関係を図 2.6 に示す。これらの観測点を便宜上、計測時間の順に観測点①～⑩とする。移動の軌跡を示す矢印の実線は意図的な移動、破線は風・波・潮流による意図せぬ移動を意味する。

ハイドロホンは 2 セット用意し、観測地点の水深も考慮して、ハイドロホンの水深がそれぞれ 3 m と 5 m になるように設置した。ハイドロホンが波や潮流に流されるのを防ぐため、錘付きロープ 1 本にハイドロホン 2 台を固定し、ロープを観測船の舷側クリートに固縛した。

リニア PCM レコーダーの記録設定は、サンプリング周波数 48kHz, 分解能 16bit とし、2 台のハイドロホンからアンプを介して記録を行った。

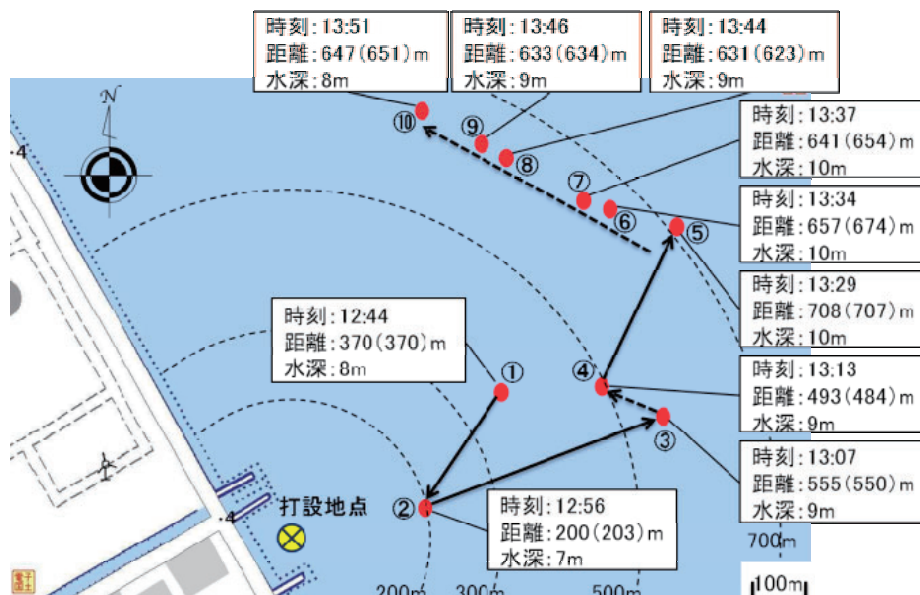


図 2.6 打設地点および観測位置⁷⁾

(電子国土 (<http://cyberjapan.jp/>) のデータに加筆。各点の位置は GPS ロガーの緯度経度データより、打設地点からの距離は緯度経度から算出、カッコ内はレーザー距離計による参考値。水深は航海用電子海図 AlphaMap Pro のデータより、観測点②の水深を 7 m, ⑤の水深を 10 m とし、その他は内挿によって求めた。)

2.2.4 観測結果

(1) 時刻歴特性

観測点②, ④, ⑥, ⑦においては観測音がハイドロホンの受波感度レベルを超過（レベルオーバー）しており、波形の振幅の先端部が完全に記録できていない。レベルオーバーが発生した例および発生していない例として、それぞれ観測点②および③における観測データを図 2.7 に示す。全観測点での観測データの波形を見ると、打設の時間間隔について、観測点①および②での観測時には 6 秒間で 6 回、それ以降は 6 秒間に 5 回の打設音の波形が現れており、それぞれ約 0.95 秒と 1.2 秒の間隔で発生していることが分かった。これは打設作業船の打設作業ログからも確認することができた。

また、全観測点でのデータに共通して約 670 Hz のピーク周波数が現れたが、これは音圧レベルが小さいことから、打設音ではなく、打設に伴って発生する機械音のようなものではないかと考えられる。なお、観測点④以降では観測点①～③のデータと比べて、800～1600 Hz の周波数成分のパワーが小さくなる傾向があったが、この理由については不明である。

打設開始直後の観測点①および②での観測データでは、打設音の残響の持続時間が比較的長く振幅も大きいですが、それ以降のデータでは減衰が早く、全体の振幅も徐々に小さくなった。これは音源音圧レベルの変化と観測点までの距離の変化の両方の要因が考えられる。

なお、水深 3 m に設置したハイドロホンによるデータは、水深 5 m に設置したハイドロホンによるデータに比

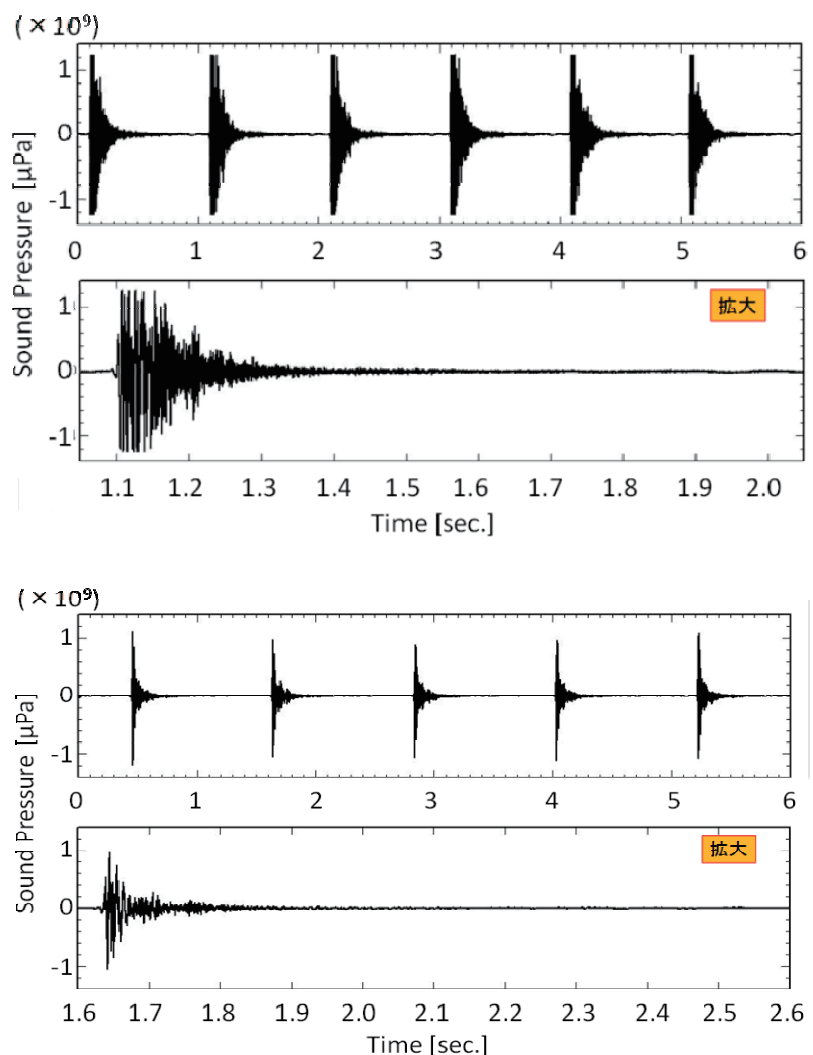


図 2.7 観測点②（上）および観測点③（下）における水中音データの時刻歴特性⁷⁾
（ハイドロホン設置水深 5m, 下図は上図の横軸方向拡大）

べて振幅がやや小さいが、波形や周波数特性（次節で説明）でも大きな差はなかったため、以下の議論においては水深5 mに設置したハイドロホンのデータのみを利用することとする。

(2) 周波数特性

モノパイル基礎打設中の水中音観測データについて、1打ごとのスペクトル解析を行い、連続30打の平均パワースペクトルを算出した。観測点①における打設開始前の水中音（背景雑音）の解析結果を図2.8に、全観測点における打設中の水中音の解析結果をまとめて図2.9に示す。打設中の平均パワースペクトルでは、全ての観測点

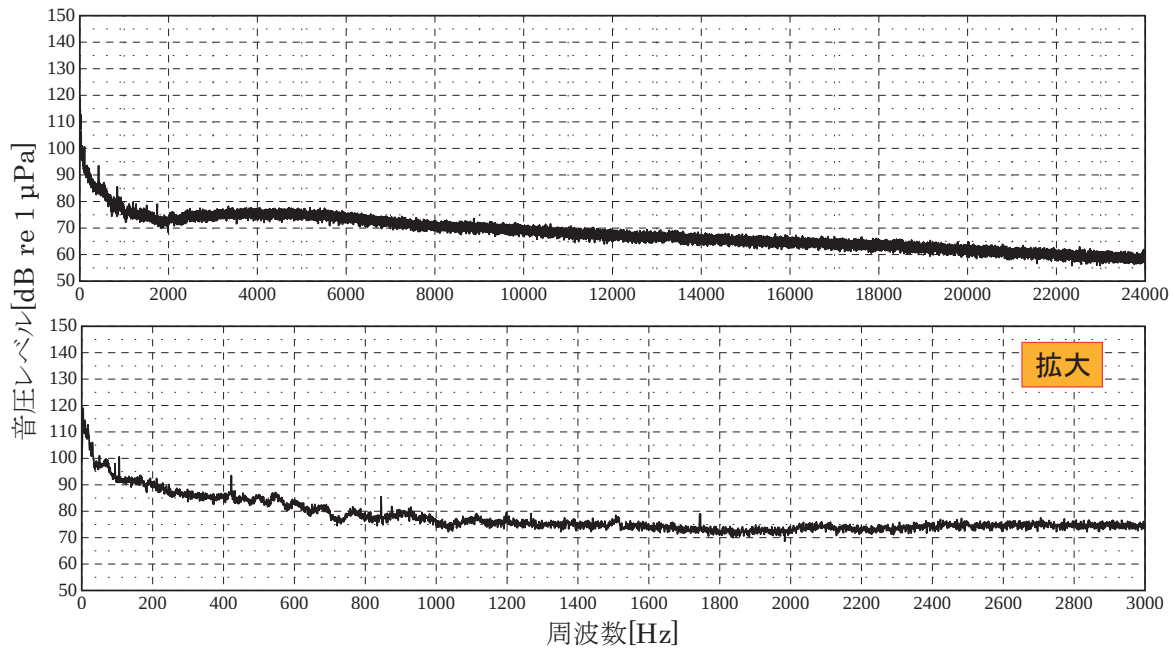


図2.8 観測点①における打設開始前の水中音（背景雑音）平均パワースペクトル
（12:39頃、370 m（目標300 m）、ハイドロホン水深5 m、30秒間平均、下図は上図の横軸拡大。）

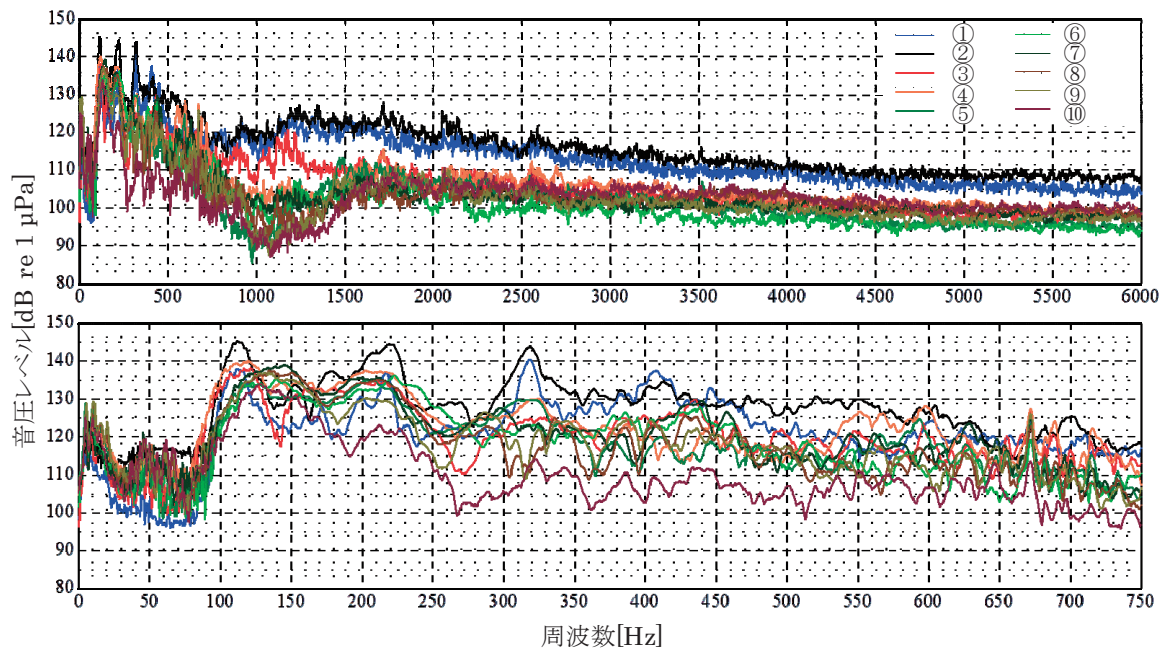


図2.9 全観測点における水中音データの周波数特性⁷⁾
（ハイドロホン水深5 m、各地点30打の平均、下図は上図の横軸方向拡大、凡例の番号は観測点番号。）

において 100 Hz 以上の周波数帯の音圧レベルが上昇していた。打設開始直後の観測点①および②では約 111 Hz, 約 217 Hz, 約 318 Hz のピーク周波数が現れており, これらは 111 Hz を基本周波数とする基本波とその第二・第三高調波と考えられる。その後, 観測点③以降ではこれらのピークが不明瞭であったり, 周波数が多少移動しているところもあるが, 全ての観測点においてこれらの周波数付近の音圧レベルが高くなっていることが確認できた。このことから, 打設音の基本周波数は約 111 Hz であったことが推測される。

2.2.5 当該海域における水中音伝搬特性の調査

打設地点の周辺海域における水中音の伝搬特性を調査するため, 打設音の観測前日, 打設地点付近で打設作業船より水中スピーカーを水深約 1 m に降下し, 予め作成した単一周波数音を再生した。このスピーカー降下地点から約 100 m および約 300 m 離れた地点で観測船よりハイドロホンを降下し, スピーカーからの再生音を収録した。打設音の観測時と同様に, ハイドロホン設置水深は 3 m と 5 m, 観測中は観測船をブラックアウトした。

なお, この打設作業船は船体から 4 本のレグを出して自己昇降が可能であり, 本観測時にも船体は海面より上部に出ていたため, スピーカーから放射された水中音が船体に反射することはない。また, レグによる反射は小さく, 無視できるものと考えた。

観測の後日, 当所の落下試験水槽内において, ハイドロホンとスピーカーの距離を 1 m に設定して実験を行い, これを音源音圧レベルの基準として上記の観測データと合わせ, 水中音伝搬特性の評価に用いた。このとき使用した水槽の大きさは 25 m × 15 m, 底面は深さが 1.5 m ~ 3.0 m である。ハイドロホンとスピーカーは水深 1.5 m 側に, 図 2.10 に示すように設置した。水槽壁面や底面からの反射が懸念されるので, 反射の影響が少なくなるように水中音の再生時間を短く設定した。観測した波形は作成したものと同一の単一周波数波形を示し, 位相遅れ等の反射波の影響と思われる波形が混入していなかったことから, 本実験においても反射の影響はほとんどないと考えられる。

この調査に水中スピーカーを用いた理由は, 複数のピーク周波数を含む打設時の観測音より, 単一周波数の人工的な音源で明確に背景雑音と区別できる方が良いと考えたためである。また, 水中スピーカーが音源であれば, 打設音の計測と異なり, 1 m の距離にも接近して音源音圧レベルを計測することができるという利点もある。

上記の観測および実験によって得られたデータを表 2.1 に示す。このうち, スピーカーからの距離 1 m において計測したデータを音源音圧レベルとして設定し, このレベルからの減衰を計算した。なお, データ解析方法は 2.1.4 項と同様であり, スペクトル解析によって音圧レベルを求めている。減衰の計算式を以下の式(2.1)に示す。

$$p(r) = p_0 - TL(r) \quad (2.1)$$

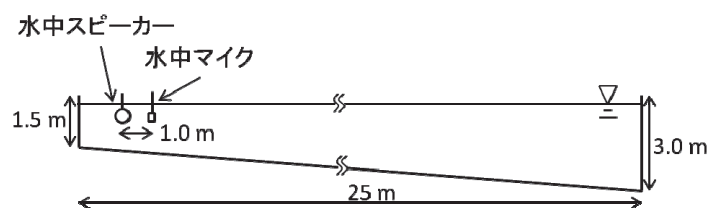


図 2.10 水中スピーカー再生音の音源音圧レベル推定実験の概要

表 2.1 各観測点における周波数ごとの水中音圧レベル[dB re 1μPa]
(距離は目標値であり, カッコ内は実際の観測中の GPS ロガーによる音源との相対距離)

周波数[Hz] 距離[m]	125	250	500	1000
1	139~153	130~140	119~138	139~146
100 (125~127)	115~124	113~116	105~108	106~113
300 (276~289)	101~109	103~107	100~102	109~113

ここで、 r は音源からの距離[m]を表わし、 $p(r)$ は距離 r における音圧レベル[dB re 1 μ Pa]、 p_0 は音源音圧レベル[dB re 1 μ Pa@1 m]、 $TL(r)$ は距離 r に到達するまでの音圧レベルの減衰量[dB re 1 μ Pa]を示す。

$TL(r)$ を伝搬損失（Transmission Loss）といい、以下のように表わされる⁹⁾。

$$TL(r) = 10 \log r + \alpha r \quad (2.2)$$

式(2.2)の第1項は拡散損失を表わし、当該海域は水深が浅いため円筒拡散が適切であると判断した。 α は減衰定数であり、これを含む第2項は海水中のイオン等による吸収損失を示すものである。

減衰定数を求めるためによく用いられる Thorp の式¹⁰⁾や Schulkin and Marsh の式¹¹⁾等では、適用できる水深や周波数域が限定的であり、また、これらは海水中のイオン等による吸収のみを考慮しているが、当該海域は水深が浅く、海面や海底面による吸収の影響が大きいと考えられるため、これらの実験式をそのまま用いることはできない。

そこで、本研究ではこの減衰定数に海水中のイオン等による吸収損失のみでなく、海面や海底面での吸収による損失を含めた形で推定することとし、減衰定数をパラメータとして変化させ、当該海域の伝搬特性の表現に適した減衰定数を推定する。ただし音源音圧レベル（スピーカーからの距離1 mにおける計測値）にもばらつきがあるため、これを計測値の範囲内で1 dB ずつ変化させ、減衰定数と同様にフィッティングパラメータとして利用する。図 2.11 は 125 Hz の音源について、約 100 m および約 300 m 地点で計測された水中音データに合うように減衰定数を調整した結果である。最小二乗法により、減衰曲線上の理論値と各計測点4回分の計測値との誤差の合計が最小になるときの減衰定数を求めた。他の周波数音源についても同様に推定した。各周波数の減衰定数推定結果を表 2.2 に示す。

2.2.6 打設音の音源音圧レベル推定

(1) 推定手法

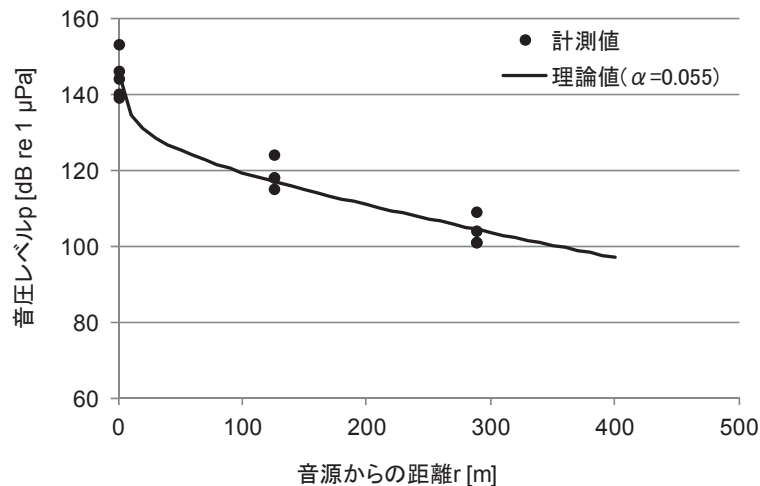


図 2.11 125 Hz の音の減衰定数 α 推定の様子⁷⁾

表 2.2 各周波数の減衰定数推定結果とその平均値⁷⁾

周波数[Hz]	減衰定数 α [dB/m]
125	0.055
250	0.017
500	0.005
1000	0.026
全周波数平均(α_{ave})	0.026

前章で推定された減衰定数の全周波数平均値 α_{ave} を式(2.2)の α に代入して TL を求め、これを式(2.1)に代入することで減衰曲線の式を得る。この式の p_0 を変化させ、減衰曲線が任意の観測点における水中音圧レベルのデータに合うように調整することで、その観測時刻における打設地点での音源音圧レベル p_0 が推定される。これを全観測点のデータについて行う。

ここで、全ての観測データを一つの減衰曲線にフィッティングするのではなく、個々のデータに対して先に求めた減衰曲線をフィッティングし、各観測時刻における音源音圧レベルを推定したのは、本観測の対象であるモノパイル基礎の打設音は、打設の進行に伴い時間変化していると考えたためである。

この推定手法には減衰定数の違いによる不確実性を伴うため、前章で算出した全周波数の平均値 α_{ave} のみでなく、全ての推定結果の中の最大値 α_{max} (125 Hz のデータから推定された 0.055) および最小値 α_{min} (500 Hz のデータから推定された 0.005) についても同様の推定作業を行った。

(2) 推定結果と考察

上記の手順で各観測時刻における音源音圧レベルの OA 値 (0 Hz~24 kHz) を推定した結果を図 2.12 に示す。図中、上向き矢印が記入されている点は、ハイドロホンのレベルオーバーが発生した観測点であり、実際の音圧レベルは観測値より高い可能性がある。この図より、音源音圧レベルは打設開始から徐々に大きくなり、打設終了前には少し小さくなったことが分かる。

この推定結果とハイドロホンのレベルオーバーの発生を関連付けて考察すると、音源音圧レベルの時間変化の理由として、打設開始直後はモノパイルが海底に深く貫入していなかったため水中に放射される音が小さく、観測点①ではハイドロホンのレベルオーバーが発生しなかったが、その後、貫入深度が深くなるにつれ徐々に放射音が大きくなり、観測点②、④、⑥、⑦での計測時にはレベルオーバーが発生したと考えられる。

また、貫入深度だけではなく、打設位置の高さによる影響も考えられ、開始直後には海面との距離が大きく水中に伝わる音が小さかったが、しばらく経過してモノパイルが海底に深く入ると打設位置が低くなり、海面との距離も小さくなるので、水中に伝わる音も大きくなった可能性も考えられる。

さらに、打設時の打撃エネルギーの変化も関係している可能性があり、図 2.12 の推定音源音圧レベルの時間変化に、打設作業船で記録された油圧ハンマーの打設ログから得られた打撃エネルギーの時間変化を追加したものを図 2.13 に示す。ここで打撃エネルギーの時系列データは、水中音の観測時刻に合わせてログから抽出した。この図から、推定音源音圧レベルと打撃エネルギーは同様の時間変化を辿っていることが分かる。特に相関が強いと思われる α_{ave} と α_{max} による推定音源音圧レベルと打撃エネルギーとの相関を調べた結果、どちらの推定結果についても打撃エネルギーと正の相関関係があることが確認できた。

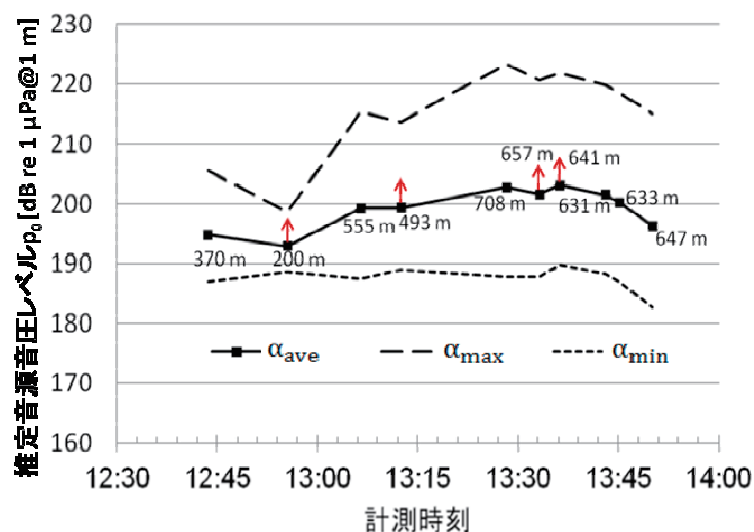


図 2.12 推定音源音圧レベル (OA 値) の時間変化⁷⁾

(図中、上向き矢印が記入されている点はハイドロホンのレベルオーバーが発生した観測点)

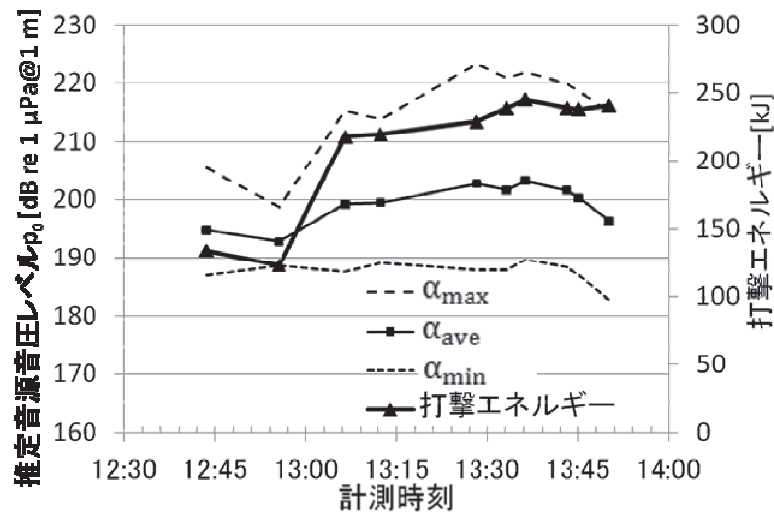


図 2.13 推定音源音圧レベル（OA 値）と打撃エネルギーの時間変化

2.2.7 観測結果および音源音圧レベル推定結果についての考察

ウィンド・パワーかみす第2洋上風力発電所7号機の建設中における水中放射音の観測およびそのデータ解析により、モノパイル打設による水中放射音の時刻歴特性および周波数特性を明らかにした。打設中は全ての観測点において100 Hz以上の周波数帯の音圧レベルが上昇し、約111 Hzを基本周波数とする基本波とその第二・第三高調波が現れた。このことから、打設音の基本周波数は約111 Hzであったことが推測される。

また、水中スピーカーを用いた単一周波数音の観測による当該海域における水中音伝搬特性の推定を行い、当該海域における水中音の吸収損失による距離減衰は、周波数によって差はあるが、平均で0.026 dB re 1μPa/mであると推定された。さらに、推定された減衰曲線を利用した建設時水中放射音の音源音圧レベルの推定と、この推定音源音圧レベルと打設時の打撃エネルギーとの相関関係を捉えることができた。この結果、本観測時のモノパイル打設による音源音圧レベルは概ね182.7～223.3 dB re 1μPa（OA 値）程度であったと推定された。

なお、ここで推定された減衰定数の数値そのものは当該海域においてのみ有効なものであるが、この推定手法はどの海域においても適用可能なものであり、減衰定数の推定手法が提案できたとと言える。

3. 水中音伝搬モデルの開発

前章で述べたように、浅海域での水中音の伝搬は海面や海底面での反射や吸収等の影響が大きく、減衰曲線の理論式による推定のみでは正確に伝搬状況を推定することが難しい。この問題を解決するには、海面や海底面での反射・吸収を考慮した水中音伝搬シミュレーションモデルを利用し、より詳細に伝搬状況を再現する必要がある。本章ではFDTD法（Finite Difference Time Domain method, 時間領域差分法）¹²⁾を用いた3次元水中音伝搬シミュレーションモデルの開発について述べる。このモデルは参考文献12), 13)および14)を参考に作成した。

3.1 支配方程式と定式化

水中音の伝搬の計算には、下記に示す連続の式(3.1)および運動方程式(3.2)～(3.4)を用いる。

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\kappa \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (3.2)$$

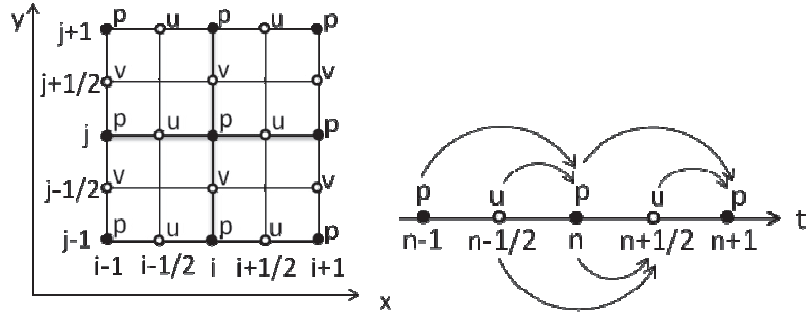


図 3.1 各変数の xy 平面上の空間領域での配置（左）と時間領域での配置（右）の概念図

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (3.4)$$

ここで、 t は時間変数[s], p は音圧[μPa], u, v, w はそれぞれ x, y, z 方向の粒子速度[m/s], κ は媒質の体積弾性率 [N/m^2], ρ は媒質の密度 [kg/m^3] であり、音速（音波の位相速度） c [m/s] は式(3.5)のように表される。

$$c = \sqrt{(\kappa/\rho)} \quad (3.5)$$

FDTD 法では、式(1)～(4)を中央差分で近似して定式化し、時空間領域に蛙とび差分によって配置する。図 3.1 に xy 平面における p, u, v, w の空間領域での配置および、 p と u の時間領域での配置の概念図を示す。ただし、 n はタイムステップ、 i, j はそれぞれ x, y 方向のグリッド番号である。

本研究では、上記の定式化により Fortran による 3 次元プログラムを作成した。

3.2 境界条件の設定

海面および海底面では音波が反射し、それ以外の境界では反射は起こらず、無限遠方まで音波が伝搬していくよう、境界条件を設定した。

音波の反射は、密度や音速の異なる 2 つの媒質の境界において発生し、反射率は入射角・屈折角および、密度と音速の積である音響インピーダンスによって決まる¹⁵⁾。海面は海水と空気の境界であり、両者の音響インピーダンスの差は極めて大きく、透過率は小さいと考えられるため、本モデルでは海面において $p=0$ 、すなわち全反射の設定とした。一方、海底面での反射については、海底地質の密度・音速を持つメッシュを海底面下に配置し、海水との音響インピーダンスの差によって反射が起こるようにした。

それ以外の境界では反射が起こらないよう、吸収境界条件¹²⁾を設定した。なお、海底地質部分の外部（計算領域の境界）についても吸収境界条件を適用した。図 3.2 にモデルの概要を xz 平面における断面で示す。送波点と受波点は本来同一の断面には存在しないが、便宜上同じ断面に記載した。

3.3 モデルの検証

作成したモデルの検証のため、以下の条件で試計算を行った。

- ・ 計算領域
 $x = y = z = 600$ [m], $dx = dy = dz = 3.0$ [m]
水深 570 m ($570 < z \leq 600$ の領域は海底地質)
- ・ 境界条件
海面は全反射 ($p = 0$)

海面以外の境界は Higdon 2 次の吸収境界条件¹²⁾

- ・ 計算時間
計算時間 1.2 s, $dt = 0.0006$ [s]
- ・ 音の条件
周波数 25 Hz, 音源音圧レベル 100 dB re 1 $\mu\text{Pa}@1$ m
ガウシアンパルス波
- ・ 媒質の条件
海水のパラメータ: 密度 1025.0 kg/m^3 , 音速 1500 m/s
海底地質のパラメータ: 密度 1500.0 kg/m^3 , 音速 1700 m/s

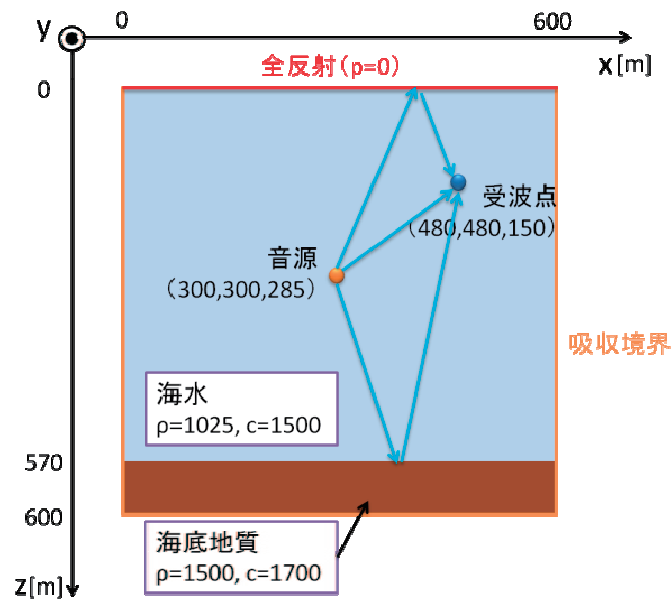


図 3.2 モデルの概要

計算結果として、図 3.3 に音源(300, 300, 285)および水中受波点(480, 480, 150)での波形を示す。また、図 3.4 は計算開始から 0.12 秒後および 0.48 秒後の $x = 300$ [m]における yz 断面の瞬時音圧レベルの分布である。これらの結果から、海面および海底面での反射が再現できていることが確認できた。

また、音源と受波点の距離および水中での音速から、受波点で観測された波形の第一波が直接波、第二波が海面からの反射波、第三波が海底面からの反射波であることが推定され、振幅比から計算される減衰量も球面拡散による理論値とよく一致していることが確認できた。例えば直接波の最大振幅から計算される音圧レベルは図 3.3 中の計算式より約 50 dB re 1 μPa であり、音源音圧レベルから約 49 dB re 1 μPa 減衰している。一方、この受波点は音源から約 288 m 離れており、球面拡散による拡散損失は $20\log 288 = 49$ (dB re 1 μPa)と推定され、本プログラムによる計算結果と理論値はよく一致している。

3.4 モデルの有用性

本プログラムによって、モデル海域における音波の伝搬状況や海面および海底面での反射の様子が再現できた。従来の中音伝搬シミュレーションプログラムは 2 次元のものが多く、本プログラムは 3 次元計算が可能のため、2 次元では計算できない球面拡散が計算できる。

洋上風力発電等の海洋再生可能エネルギー施設の建設に当たっては、事前に周辺海域への水中放射音の伝搬による海棲生物等への影響を評価することが望ましく、その評価の一環として、事業者が施設建設予定地における水中放射音の伝搬状況を予測するため、本プログラムを用いたシミュレーションを行うことができる。

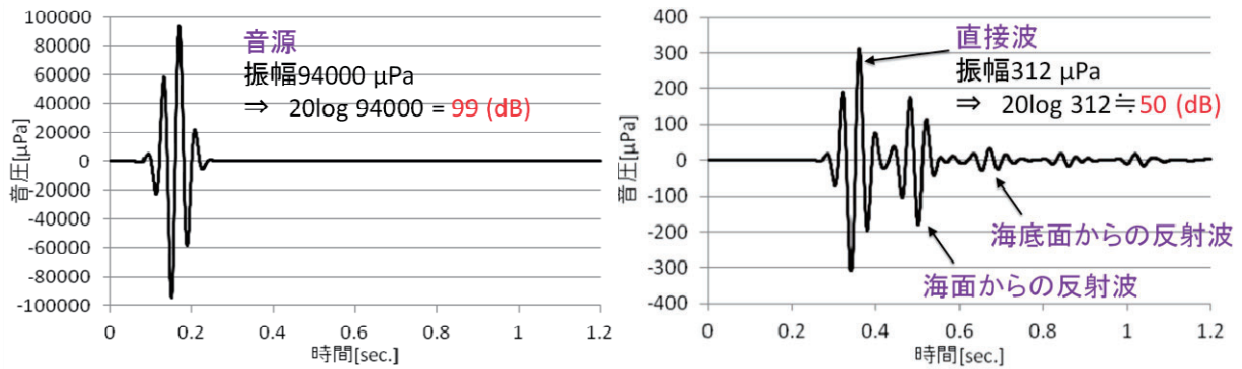


図 3.3 音源（左図）および水中受波点（右図）における波形の時間変化

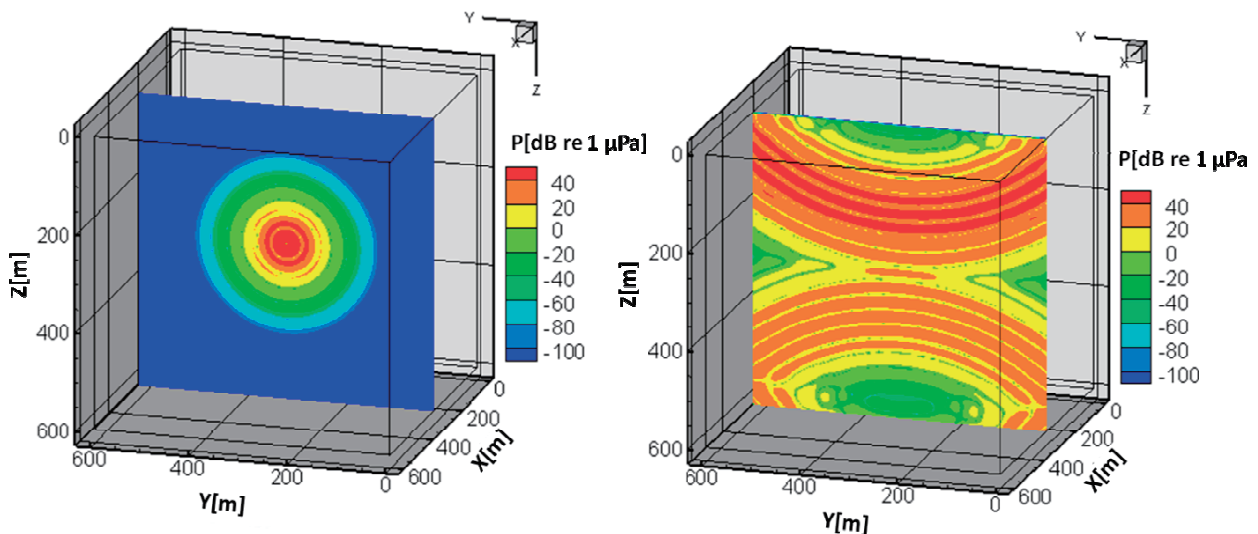


図 3.4 音源（左図）および水中受波点（右図）における波形の時間変化

4. 水中音の生物影響実験^{16) 17)}

現在の我が国の環境影響評価法で評価項目として不足している「洋上風力発電に特有の環境影響」のうち、施設放射音による海棲生物への影響の評価方法を確立するには、施設放射音が魚類等の海棲生物に与える影響を実験等によって調査し、許容可能なレベルを判断することにより基準値を設ける必要がある。諸外国での調査例は全て着床式に関するものであり、運用中の水中騒音は音圧レベルが低く環境影響は小さいとして、主に基礎の杭打ち工事中の水中騒音に関する影響の評価に主眼を置いている。しかし、我が国では浮体式施設の大規模展開を目指して研究開発を進めており、工事中には着床式のような大きな音は発生しないと考えられることから、諸外国の環境影響評価法で設定されている基準をそのまま準用することは適切ではない。また、運用中の水中放射音レベルが低いとはいえ、生物に影響がないということが証明されているわけではない。

そこで本研究では、洋上風力発電施設の運転による水中放射音が魚類に与える慢性影響の評価法の検討を目的とし、水槽実験を行った。本章ではその実験内容について述べる。

4.1 水中音による慢性影響

本実験で水中音による慢性影響を評価対象としたのは、以下の理由による。

まず、逃避行動や聴覚への影響は、魚類の聴覚特性の研究等によってある程度既往の知見があるが、摂餌行動等の慢性影響を評価したものはほとんどない。また、逃避行動は施設の設置直後には発生する可能性があるが、時間の経過に伴い「慣れ」が生じるため、その影響は小さいと考えられる。さらに、既往の知見から風車運転中の水中放射音の音圧レベルは聴覚に障害を生じさせるレベルではないと考えられることに加え、もし聴覚に影響を及ぼす可能性があっても魚類が施設周辺から逃避することで回避可能と考えた。特に魚類の「慣れ」については、施設に生物が付着することで沖合では貴重な餌場となる可能性もあり、多少の水中音が発生していてもレベルがそれほど大きくなければ餌の確保を優先し、慣れてくると逃避行動を起こさないばかりか、逆に蟄集効果が得られる可能性もある。しかし、このような状態において魚類に何の影響もないとは言いきれず、小さいながらもストレスを感じていた場合、その蓄積によって摂餌行動や体重の増加率(成長率)に影響を及ぼす可能性が考えられる。このような理由により、本研究ではこれらの慢性影響に着目して実験を行った。

4.2 実験方法

4.2.1 実験使用音の周波数と音圧レベルの設定

第3章で示したような風力発電施設の運転時放射音に関する既往の調査結果を参考に、本実験では仮に100 Hzの単一周波数音を使用することとし、音圧レベルを3段階に設定した。風力発電施設を140 dB re 1 μ Paの点音源と仮定した場合、この音の球面拡散での減衰を考えると、音源からの距離10 mで120 dB re 1 μ Pa、100 mで100 dB re 1 μ Paまで減衰することになる。本実験ではこれらの3つの音圧レベルを使用することにした。

実際の施設周辺海域での観測音のように複数の周波数音を含む音ではなく、単一周波数音を用いた理由は、複数の周波数を含む音では実験によって何らかの影響が確認できた場合に、その影響がどの周波数による影響であるかを判断することが困難であるため、まずは単一周波数音での影響を評価しようと考えたためである。単一周波数音での実験方法を確立することで、今後、異なる周波数での実験や、複数の周波数を組み合わせた実験等への拡張における基礎を作ることができる。

4.2.2 対象魚種

本研究では、マダイ(学名:*Pagrus major*)の稚魚を対象に実験を行った。マダイは水産有用種であり、種苗生産技術が確立されているため実験に用いる個体を集めることが比較的容易であること、また、マダイの摂餌生態が後述の自発摂餌装置を使用した実験に適していることから、本研究の対象魚種に選定した。実験で使用したマダイ稚魚の詳細については次項において説明する。

4.2.3 実験条件

(1) 環境条件

実験水槽には600 L円形水槽を4基使用し、海水500 Lを注水した。海水は9 L/min.で常時注水し続け、水槽内の海水量が一定になるようにオーバーフローさせた。水深は約60 cm、水温は25°Cで一定に設定した。外部からの光は遮光幕によって遮断し、光条件は30 W蛍光灯照明で12時間点灯、12時間消灯のリズムで制御した。なお、明期開始と終了のそれぞれ30分間は徐々に光量を変化させ、薄明、薄暮を再現した。この暗幕の設置状況と暗幕内の様子を図4.1の左図に示す。

(2) 水槽内音場条件

4基全ての水槽内には水面直下に水中スピーカー(Fostex, US300)を取り付けた。このうち1台のスピーカーはダミーであり音は再生しない。一方、音を再生する3台のスピーカーには車載用アンプ(TOA, CA-407SD)を接続し、SDカードに収録した音を再生できるようにした。スピーカーの設置状況を図4.1の右図に示す。音のデータは100 Hzの単一周波数音を、それぞれ100 dB re 1 μ Pa @ 1 m, 120 dB re 1 μ Pa @ 1 m, 140 dB re 1 μ Pa @ 1 mで再生されるように作成した。なお、実験は遮音空間において実施するのではなく、環境雑音内にこれらの単一周波数音を加える形式とした。これは、実際の海中でも環境雑音が存在し、そこに人工的な音が加わることの影響を評価するためである。

図4.2は100 Hzの単一周波数音を140 dB re 1 μ Pa @ 1 mで再生した水槽内(以下、140 dBの水槽と表記、他の音圧レベルについても同様。)の水中音の周波数特性と、環境雑音のみの水槽内の水中音の周波数特性を示してい

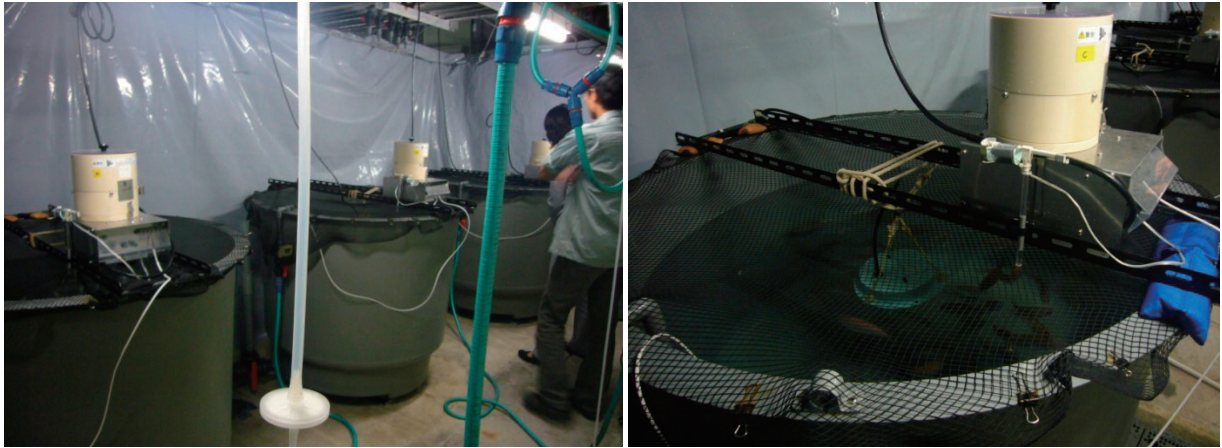


図 4.1 暗幕内の水槽設置状況（左）と水槽内のスピーカー設置状況（右）

る．これらのデータは水深約 40 cm，水中スピーカーの中心からの水平距離で約 30 cm の位置で計測した．水中音の拡散損失は，距離が 2 倍になると球面拡散の場合で 6 dB re 1 μ Pa，円筒拡散の場合で 3 dB re 1 μ Pa であり，水面直下に水中スピーカーを設置した本実験の条件ではこれらの 2 つの損失量の間の値となることが推測される．本実験での設定音圧レベルは音源からの距離を 1 m としたときの値であり，図 4.2 は音源から 50 cm 未満の距離での計測データなので，本来は設定音圧レベルより 3～6 dB re 1 μ Pa 大きい値が計測されるべきである．しかしこの図から，むしろ設定音圧レベルより小さい値が計測されていることが分かり，これは水槽内の音波の反射による影響と考えられ，複数の反射波が直接波とぶつかり合うことで音波の打ち消し等が生じ，このような計測結果になったのではないかと推測される．

(3) 供試魚と摂餌に関する条件

上記の条件に設定した水槽に，それぞれ 50 匹の養殖マダイを収容した．供試魚は各水槽で体重に偏りが出ないように選別し，いずれの水槽においても平均湿重量が約 6.9 g であった．

各水槽には自発摂餌装置を設置し，供試魚が餌を欲するときに自発的に摂餌が行えるようにした．一度の作動により装置から給餌される量は 0.057 ± 0.0048 [g]（各水槽の平均±標準偏差）であり，供試魚が装置を作動させた時刻はイベントデータロガー（Onset Computing, HOBO EVENT）により記録された．

本実験に使用した自発摂餌装置は，自動給餌機（松阪製作所，さんし郎）とこれに接続した自発摂餌スイッチから構成されている．自発摂餌スイッチは，マイクロスイッチ（オムロン，5GL-SS）のアクチュエーターにステンレスバネ線を接続し，このバネ線の先端に釣り糸（よつあみ，ケブラート 10 号）を取り付けて製作した．装置の仕組みとしては，供試魚が自発摂餌スイッチの釣り糸を咥えて引っ張ることにより，下方へ約 50 mN 以上の負荷がかかると自動給餌機が作動し，一定量の飼料が給餌される仕組みとなっている．給餌機の中には市販の養魚用ペレット（日清丸紅飼料，おとひめ EP-1，粗タンパク 48%，粗脂肪 13%，粗繊維 2%，粗灰分 17%）を入れた．

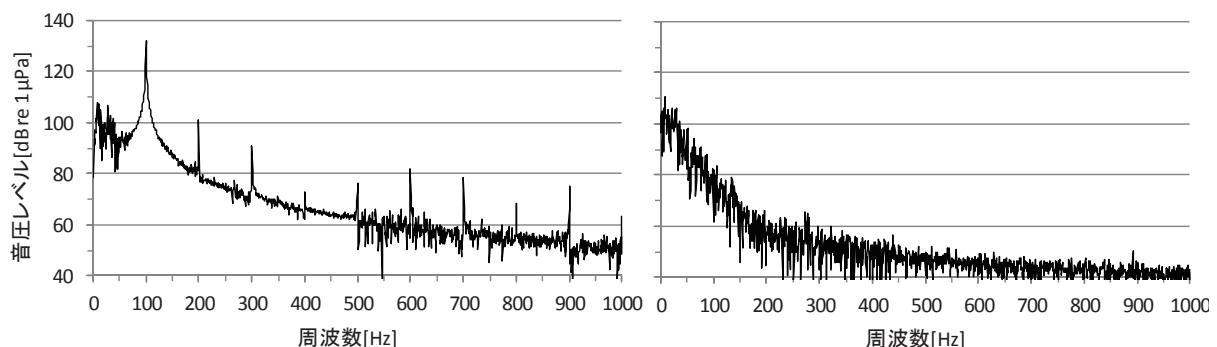


図 4.2 水槽内水中音の周波数特性（左：140 dB，右：環境雑音のみ）

(4) 実験期間と各期間の実施内容

実験期間は次の通りである。（日付は全て2013年）

- 調整期間：9月10日～16日（7日間）
- 試験期間：9月17日～11月10日（55日間）
 - ・ 期間①（音の再生前のデータ取得期間）：9月17日～10月6日（20日間）
 - ・ 期間②（音の再生中のデータ取得期間）：10月7日～10月24日（18日間）
 - ・ 期間③（音の再生後のデータ取得期間）：10月25日～11月10日（17日間）

調整期間中は、供試魚の実験水槽への馴致、並びに適正な餌サイズの選定、自発摂餌装置一作動当たりの給餌量の設定を行い、残餌が発生しないことを確認した。

7日間の調整期間を経て試験を開始し、まず期間①において、いずれの水槽内でも水中スピーカーから音を再生せず、環境雑音のみの状態で20日間摂餌行動を記録した。その後、期間②において、3基の水槽では上述の設定のように18日間音を再生し続けた状態で供試魚の摂餌行動を記録し、最後に音の再生を停止し、期間③として17日間同様に記録を行った。以上の実施内容により、音の再生によって供試魚の摂餌量や摂餌リズムに変化が生じるかどうかを確認した。また、実験前後に各水槽のマダイ稚魚の平均湿重量を計測し、体重変化への影響も確認した。なお、音は18日間の再生期間中を通して常に再生されていた。

4.3 実験結果

実験によって得られた結果を、供試魚の行動、摂餌日周リズム、摂餌量、体重変化の観点から以下に整理する。

4.3.1 行動

期間①において、供試魚はいずれの水槽内においてもほとんどの個体が水面近くをランダムな方向に定位、遊泳しており、水中スピーカー周辺に定位している場合も多く観察された。その後、音の再生を開始すると、140 dBの水槽内では音の再生直後に供試魚が水槽底に向かって突進し、水槽底付近で停止と遊泳を繰り返し、約1時間は水面近くにほとんど近付かなかった。その後も期間②の間は、ほとんどの供試魚が水槽内の緩やかな水流に対抗して遊泳しており、水中スピーカー周辺に定位することはなかった。一方、120 dBおよび100 dBの水槽内では、音の再生による供試魚の顕著な行動変化は観察されず、環境雑音のみの水槽内と比べてもほとんど変化がなかった。

4.3.2 摂餌日周リズム

①～③の各期間における供試魚の摂餌日周リズムはほとんどが明期に見られ、明期開始から2時間後および終了1時間前にわずかなピークが確認された。140 dBの水槽では、音の再生開始から約1時間にわたり摂餌要求が認められなくなったが、その後再び摂餌要求を開始し、翌日には安定した摂餌要求が認められた。他の水槽では音の再生に伴う摂餌要求への顕著な影響は認められなかった。結果として、140 dBの水槽での音の再生直後を除くと、いずれの水槽においても試験期間を通して供試魚の摂餌日周リズムに顕著な変化は認められなかった。

4.3.3 摂餌量

実験開始時における供試魚1尾あたりの摂餌量は0.65～0.75 g/day程度であり、実験開始から10日目まではいずれの水槽内においても摂餌要求回数は増加する傾向が認められた。10日目以降の摂餌量は日により変動しつつも一定の水準で推移し、実験終了前の10日間における平均摂餌量は1.0～1.5 g/dayの範囲であった。

試験期間中の1日あたり・供試魚1尾あたりの摂餌量の変化を図4.3に示す。これは9月18日から11月9日の期間中のデータを示しており、試験期間の初日と最終日のデータは半日分しかないため除いてある。各図中、網掛けした部分は3基の水槽で100 Hzの単一周波数音を再生していた期間②を示す。120 dB、100 dBの水槽および環境雑音のみの水槽内での供試魚の摂餌量は、期間②の音の再生中においてもほぼ音の再生開始前の水準を維持しており、期間③に入っても変化は認められなかった。一方、140 dBの水槽では期間②において音の再生を開始した後、次第に摂餌量が減少する傾向が認められ、音の再生停止後においても、期間③の8日目までは減少傾

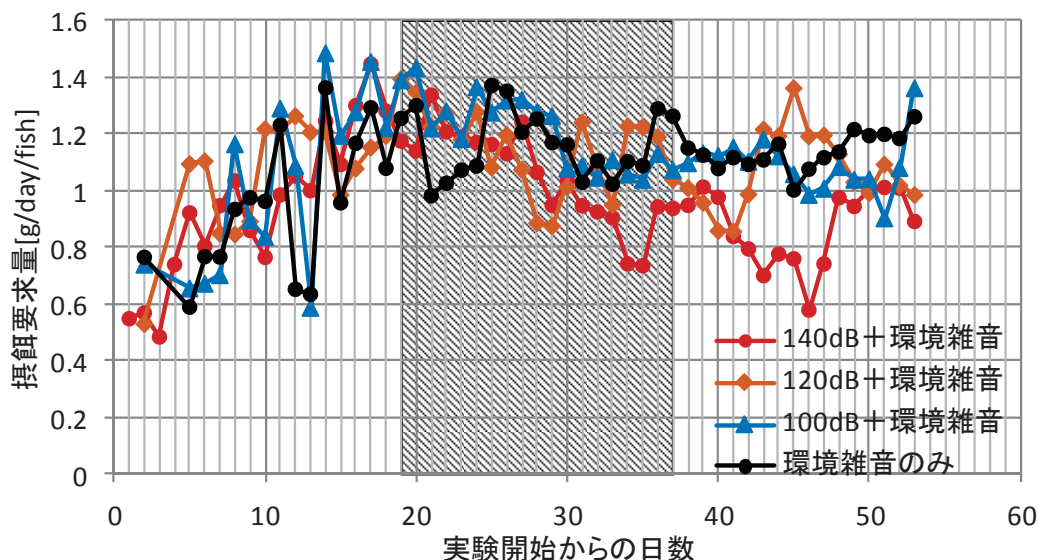


図 4.3 各水槽内の供試魚の摂餌量の変化（図の網掛け部は音の再生期間）

向があり、以降増加に転じた。しかし他水槽における同期間の摂餌量と比較するとそれほど大きな差ではなかった。

なお、各水槽において自発摂餌装置のトラブルにより給餌が正常に行われなかった日のデータは除外して表示しており、120 dB の水槽ではグラフの 1, 3, 4 日目のデータ、100 dB の水槽では 48, 49 日目のデータ、環境雑音のみの水槽では 20 日目のデータが除外されている。

4.3.4 体重変化

実験前後における各水槽の稚魚の平均体重の変化を図 4.4 に示す。この結果から、140 dB および 120 dB の水槽内の稚魚は、100 dB の水槽および環境雑音のみの水槽の稚魚と比べて実験終了時の体重がやや軽く、成長が遅いことが分かる。しかし、この結果について「各水槽の供試魚の体重の平均値は全て等しい」という帰無仮説を立てて Z 検定を行った結果、棄却域を 10 % にした場合でも棄却されず、この実験結果からは各水槽内の稚魚の体重に有意差はないと判断された。

4.4 実験結果の考察

本実験では、100 Hz の単一周波数音を 100 dB または 120 dB で再生した場合、その水槽内の供試魚の行動、摂

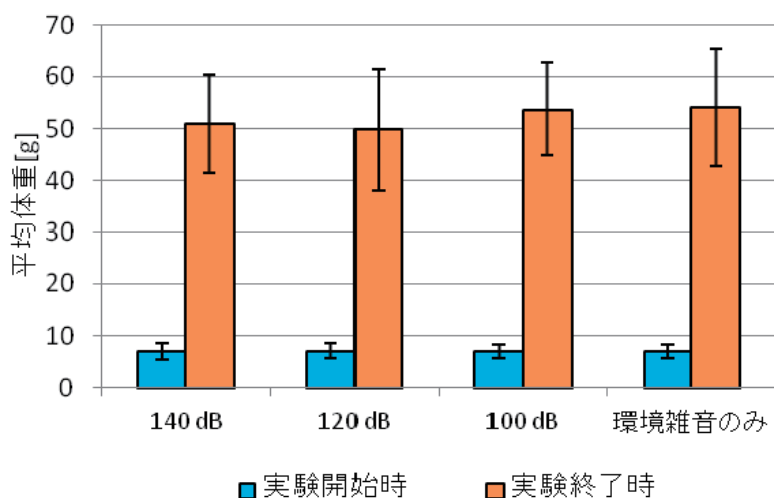


図 4.4 実験前後の各水槽の供試魚の体重の変化（エラーバーは標準偏差）¹⁶⁾

餌日周リズム、摂餌量について、環境雑音下で飼育した供試魚との間にほとんど差は認められなかった。一方、140 dB で再生した場合には、再生開始直後に水槽内の供試魚の行動に顕著な変化が現れ、摂餌行動も停止したが、これらの顕著な変化は数時間後には収まった。しかし音の再生前の期間①と同じ状態に戻ったわけではなく、行動、摂餌量ともに多少変化が残っており、摂餌量は期間②以降減少傾向が見られた。ただし摂餌量は他水槽と比べて明確に少ないとは言えない差であった。体重の変化については、140 dB または 120 dB の水槽内の供試魚において、環境雑音のみの水槽内の供試魚より成長が遅れているように見えたが、統計的な有意差は確認できなかった。

以上の結果から、今回の実験では人工的に加えた 100 Hz 単一周波数音の音圧レベルの違いによる魚類の行動および摂餌行動への僅かな影響が確認できたが、体重の変化、すなわち成長率への明確な影響を確認することはできなかった。しかし摂餌行動の変化があるということは、成長への影響が起こる可能性も否定できず、実験期間や実験開始時期、供試魚の数等の実験条件を改善することで体重の変化にも有意差が確認される可能性はある。

仮にこのような実験結果を基に水中放射音に関する環境影響評価の基準値を決めるとすれば、洋上風力発電施設からの発生音の音圧レベルを、影響が現れない音圧レベル以下に抑えるべき、というように基準を定めることができる。

なお、実海域においては施設からの放射音を感知した魚類が逃避することも可能であるが、本実験は水槽内という閉鎖空間で実施されたことに留意する必要がある。ただし、適切な生息環境が施設近傍に限られる場合や、付近に養殖施設等が存在する場合、また、上述したように魚類が逃避するレベルではない場合や音に慣れた状態でも自覚のないストレスを感じていたり、施設への付着生物等の好影響の方が大きく多少のストレスを我慢している場合の慢性影響評価には、今回のような実験手法は有用であると考えられる。

5. まとめ

本研究では国内の洋上風力発電施設を対象に、供用時および建設時における施設周辺の水中音観測を行い、水中放射音の実態に関する知見を得た。また、当該海域での水中音減衰特性の調査方法と減衰曲線の推定方法を確立し、対象音の音源音圧レベルの推定結果を示した。さらに、より詳細に水中音の伝搬状況を推定するための手法として、FDTD 法による 3 次元シミュレーションモデルを作成した。一方、施設供用時を想定した水中音の魚類への慢性影響を評価する水槽実験を試行した。対象としたマダイ稚魚の場合、今回の実験条件においては摂餌行動への僅かな影響が確認できたが、成長には大きな影響を与えなかった。

なお、今回行った計測、計算、実験の各手法は、今後、洋上風力発電の環境影響を評価する際の有用な手段になると考えられる。

謝 辞

本研究第2章1節の着床式施設を対象とした観測では株式会社ウィンド・パワーの小佐々誠様にお世話になった。第2章2節は東光電気工事株式会社の岡野雅史様との共同研究により実施した。また、第4章は海洋生物環境研究所の島隆夫様、長谷川一幸様との共同研究により実施した。これら関係各位のほか、水中音観測において作業を分担して頂いた当所の宮田修様に感謝申し上げる。

参考文献

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁：エネルギー基本計画について、
http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/，最終アクセス日：2015.6.12.
- 2) せたな町公式サイト風海鳥（かざみどり），<http://www.town.setana.lg.jp/modules/tinycontents/index.php?id=27>，最終アクセス日：2015.6.12.

- 3) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構，東京電力株式会社：NEDO NEWS Release，国内初「沖合洋上風力発電」が本格実証運転を開始 ―銚子市沖で NEDO・東電共同プロジェクト―，
http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100180.html，最終アクセス日：2015.6.12
- 4) J. Nedwell, D. Howell: A review of offshore windfarm related underwater noise sources. Report No.544 R 0308, Collaborative Offshore Wind Energy Research Into the Environment, 2004.
- 5) Ingemansson Technology AB: Utgrunden off-shore wind farm - Measurements of underwater noise, 2003.
- 6) 株式会社 日立製作所：諸元 風力発電システム HTW2.0-80，株式会社 日立製作所，
http://www.hitachi.co.jp/products/power/wind-turbine/products/htw2000_80/specification/index.html，最終アクセス日：2015.3.9.
- 7) 塩莉恵，今里元信，宮田修，岡野雅史：着床式洋上風力発電施設の建設時における水中放射音の調査，沿岸域学会誌，Vol.26，No.1，pp.81-90，2013.
- 8) M. Shiokari, M. Imasato, O. Miyata, M. Okano: Survey on the Underwater Noise from the Bottom Fixed Offshore Wind Turbine during Construction, Proceedings of the International Symposium on Marine and Offshore Renewable Energy, 2013.
- 9) 鎌田弘志：ソーナー入門，海洋音響の基礎と応用第4章，海洋音響学会編，成山堂書店，2004.
- 10) W. Thorp: Analytic description of the low frequency attenuation coefficient, Journal of the Acoustical Society of America, Vol.33,1961, pp.334-340.
- 11) M. Schulkin, H. Marsh: Sound absorption in seawater, Journal of the Acoustical Society of America, Vol.34, 1962, pp.864-86.
- 12) 宇野亨：FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析，コロナ社，1998.
- 13) 土屋健伸：数値解析に基づく海洋内音波伝搬解析，海洋環境と音響技術，海洋音響学会部会報告書，2004，pp.54-59.
- 14) 佐藤雅弘：FDTD 法による弾性振動・波動の解析入門，森北出版株式会社，2003.
- 15) 鎌田弘志：音響の基礎，海洋音響の基礎と応用第3章，pp.16-25，海洋音響学会編，成山堂書店，2004.
- 16) 塩莉恵，今里元信，島隆夫，長谷川一幸：洋上風力発電施設からの水中放射音の環境影響評価手法の提案および実験例，第24回海洋工学シンポジウム講演要旨集，2014.
- 17) 島隆夫，長谷川一幸，塩莉恵，今里元信：低周波水中音がマダい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，投稿中