

# 水中騒音の予測

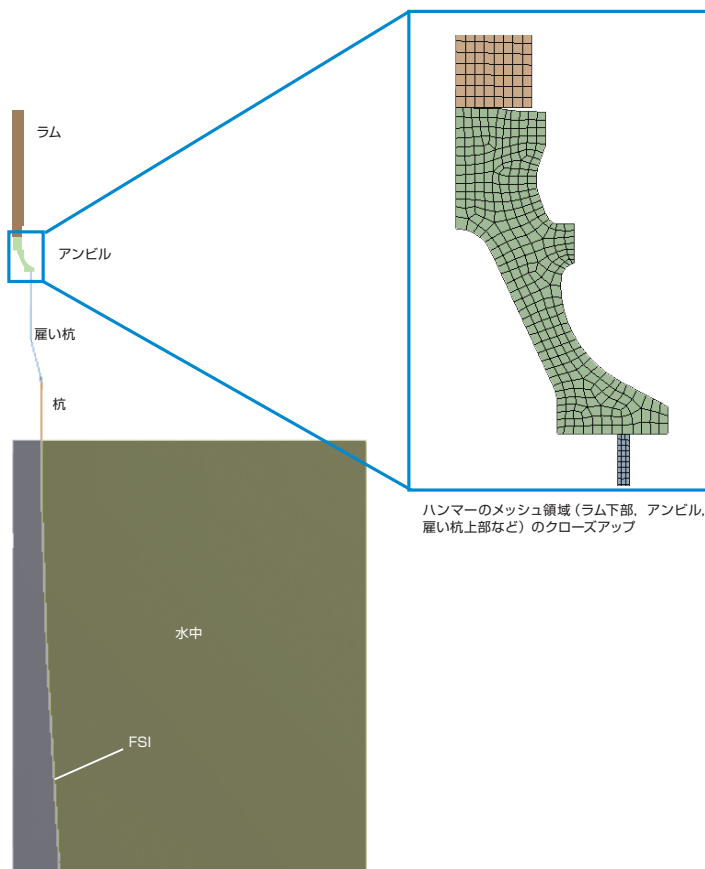
## シミュレーションにより、海上杭打ち時に発生する水中騒音を確実に予測

Ulrich Steinhagen (ドイツ カルテンキルヘン, MENCK GmbH, 研究開発プロジェクトコーディネーター)  
Marold Moosrainer (ドイツ グラーフィング, CADFEM GmbH, コンサルティング部門責任者)

地球上の広大な海洋では、様々な自然発生源と人工的発生源から音が局所的に発生しており、ここ数十年では、人工的発生源（船舶の運航、掘削、採掘、音響探知機など）が水中騒音を増大させています。成長を続けている海上風力発電業界では、こうした人工的発生源を水中に設置し運用する際に生じる音響放射に対する懸念が高まっています。これは、人工的発生源の設置場所周辺に生存する水生生物に対して音響放射が大きな影響を与えている可能性があるからです。



MENCK 社の油圧ハンマー



ハンマーのメッシュ領域(ラム下部、アンビル、雇い杭上部など)のクローズアップ

ANSYS Mechanical を使用して作成した 2 次元軸対称シミュレーションモデル。このモデルは、ラム、アンビル、雇い杭、杭のほか、これらが使われる海水と海底領域を表現したものであり、FSI 解析の対象となる領域は、線で示されている。

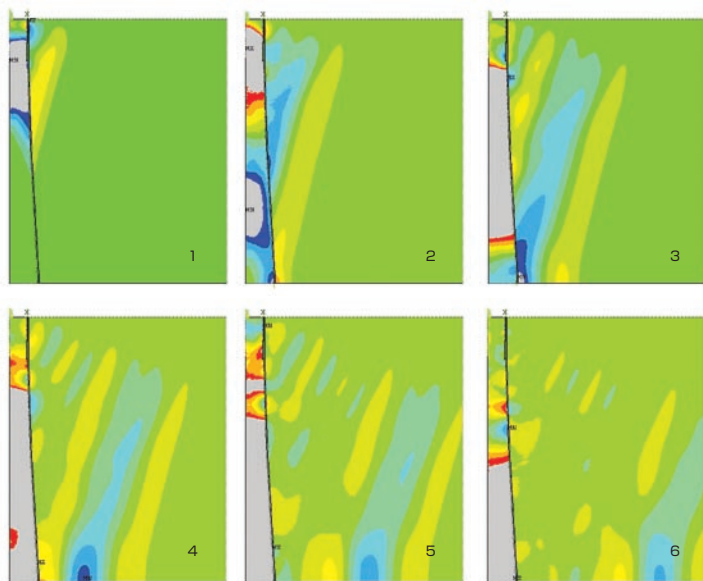
多くの場合、風力タービンなどの巨大な海上構造物の基礎を形成する際には、油圧ハンマーを利用して杭を海底に打ち込みます。ドイツに本拠地を置く MENCK 社は、水深 2,000m までの水中で使われるこうしたハンマーの開発、製造、運用に取り組んできた実績を有しており、音響放射の厳しい基準値を満たす必要がある設置業者にとって、海上杭打ち時の水中騒音を予測することが重要な課題となっていることを認識しています。たとえば、ドイツでは、建設現場から 750 m 離れた場所で測定される水中騒音暴露レベルの規制限度が、基準圧力 1 マイクロパスカル ( $1 \times 10^{-6}$  Pa) で 160dB となっています [1]。設置業者が建設前にこうした音響放射を把握しておけば、地域のプロジェクト要件を満たす騒音保護システム（杭の周囲に設置される気泡カーテンや空気式防水堰など）の選択や設計を簡単に行うことができます [2]。しかし、あらゆる状況に 1 つのシステムで対応することは不可能であり、水中騒音の低減がいまだに研究され続けています。

このような経緯があり、MENCK 社のエンジニアチームは、コンピュータ支援設計ソフトウェアとサービスを提供する CADFEM 社と協力してアプリケーションプロジェクトを開始しました。このプロジェクトでは、ANSYS 社のシミュレーションツールを利用して水中音響放射を数値的に予測しました。ラム、アンビル、アダプタープレート、雇い杭など、大きな荷重が加わるハンマー部品の機械特性を評価する場合には、通常、杭打ちによる衝撃力の非常構造解析を行います。MENCK 社のエンジニアチームは、この初期シミュレーションを拡張して、杭の振動と水圧の双方向連成に起因する騒音伝搬を解析しました。その際に使用したのが、ANSYS Mechanical の音響要素です。

ラム、アンビル、雇い杭、杭、土、海水を対象にした2次元軸対称シミュレーションでは、ANSYS Mechanicalの流体-構造連成解析 (FSI) 機能を使用して、海水領域と杭の構造要素を連成しました。次に、MENCK社のエンジニアチームは、ラム以外のすべての部品の動作を停止させて、ラムの初期速度を設定し、衝撃エネルギーを適切に表現しました。また、土の弾性を水平ばねとしてモデリングするとともに、海底音響反射と外部境界面の吸音を境界条件として設定しましたが、短時間で距離が短い音響伝搬のみを調査する場合には、音響問題の非定常解析で反射が大きな問題にならないため、単純な吸収境界条件を設定しました。なお、水と空気の界面は、圧力が加わらず非剛性境界に適した自由表面として近似しました。

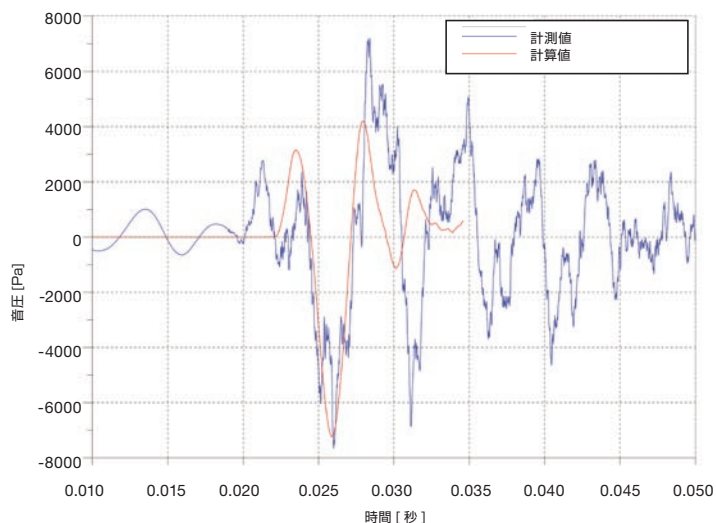
FSIと音響パラメータを制御するために、ANSYS Workbench環境でAPDL (ANSYS Parametric Design Language) コマンドを使用して、シミュレーションの設定を行いました。音響要素FLUID29は、音場をモデリングしてモーダル解析、調和解析、非定常解析を行うことができます。この要素の音響理論は、数値流体力学 (CFD) と同じ基本方程式 (質量と運動量の保存方程式) をベースとしています。しかし、このプロジェクトでは、ゼロ流速や非粘性圧縮性流体などの仮説を立て、音響方程式を線形化しました。これは、音圧レベルが非常に高い場合でも、音圧の変化が周囲圧力の約0.2%に過ぎないことが多いからです。

MENCK社のエンジニアチームは、FLUID29要素と構造領域に対し変位自由度を加えたインターフェースを使用し、流体 (音響) 領域と構造領域の完全な連成モデルを作成し、構造物の振動による放射音のほか、この音圧場の追加荷重が構造物に加わる様子を解析することができました [3]。次に、杭近傍領域の解析結果を用いて、遠方領域の音圧レベルを予測したところ、音響伝搬に対する一般的な海洋特性の影響も解析することができました。なお、このモデルは、音響伝搬の試験データから導いた解析的関係を、水深特性と海底特性を考慮に入れた距離の関数として表現したものです。



水中での音響発生・伝搬の時間変化を一連のスナップショットで示したものの、鋼製杭内部の音速は毎秒約5,000m、水中の音速は毎秒約1,500mであり、これによって放射パターンと特殊な傾斜角が形成されている。

杭から245m離れた場所で測定した値と計算値の比較



杭から245m離れた場所で音圧を測定した値と計算値を比較したグラフ。この領域の音響伝搬則を把握すれば、杭から750m離れた場所で発生する音圧を求めて、デシベル (dB) に変換することができる。

北海に位置する政府出資の風力エネルギー調査プラットフォーム「FINO3」に単杭を設置した際には、こうしたシミュレーションを行って数値的に予測し、その結果を検証しました [4]。たとえば、この杭から245m離れた場所で音圧を測定した値と計算値を比較したところ、最初の圧力ピークの振幅において高い相関関係が見られました。しかし、単杭の近くで観測したピーク音圧レベルが周囲の水中圧力に比べて高く、線形波理論に反する可能性があるため、今後も解析を行って検証する必要があります。ただ、その際にANSYS Mechanicalと流体シミュレーションソフトウェアANSYS CFDを組み合わせれば、上記のように線形音響についての一般的な仮説を立てることなく、完全なFSI解析を行うことができます。■

## Reference

- [1] Abromeit, C. Licensing Requirements and Conditions in the German EEZ, Federal Maritime and Hydrographic Agency (BSH). Proceedings of 24th Conference of the European Cetacean Society, Stralsund, Germany, March 2010.
- [2] Nehls, G.; Betke, K.; Eckelmann, S.; Ros, M. Assessment and Costs of Potential Engineering Solutions for the Mitigation of the Impacts of Underwater Noise Arising from the Construction of Offshore Windfarms; BioConsult SH report on behalf of COWRIE Ltd.: Husum, Germany, September 2007.
- [3] Moosrainer, M. Analyzing Vibration with Acoustic-Structural Coupling. ANSYS Advantage, 2009, 3(2), pp. 40-42.
- [4] Steinhagen, U. Transient FE Simulation of the Hydro-Acoustics during Pile Driving. Proceedings of ANSYS Conference & 27th CADFEM Users Meeting, Leipzig, Germany, November 2009.