

高性能ボーリングマシンの低騒音化・自動化 再生可能エネルギー熱の普及に向けた取組み

伊藤 春彦

福島第一原発事故後において、国内では冷暖房や融雪等で使用する地中熱ヒートポンプシステム設置件数が前年比 20%で増加し続けている。地中熱ヒートポンプシステムの普及では、コスト高（熱交換井設置工、ヒートポンプ設置工、室内空調施設設置工）が課題となっており、コスト削減への取組みが急務となっている。弊社では平成 26 年度より導入コスト 20%削減を目標に NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）との共同研究を実施している。共同研究では熱交換井設置工（深さ 100 m 掘削）で使用するバイブレーションタイプの高性能ボーリングマシンの低騒音化技術開発と自動化技術開発を進め、掘削費用を従来技術（「ロータリードリル トリコンビット」工法、「パーカッションドリル 二重管」工法）と比べ 36.4%コスト削減することを目標としている。

以下では、共同研究の最終年となる平成 28 年度の 10 月時点での開発成果を報告する。

キーワード：再生可能エネルギー、地中熱、低騒音化、自動化、ソニックドリル

1. はじめに

福島第一原発事故後に策定された第 4 次エネルギー基本計画は、再生可能エネルギー導入の拡大と省エネの強化（ZEB・ZEH への取組み等）を図ると同時に、多層的なエネルギー需給を目指すなど、新たな長期的エネルギー政策の構築に向け重要な役割を果たすものである。再生可能エネルギー導入の拡大では、地中熱や下水・工場排水夏など温度差熱利用の再生可能エネルギー熱を含め、環境への負荷が少ない純国産のグリーンエネルギーの確保と経済の活性化が期待されている。しかし、新たなエネルギー導入では低コストでのエネルギー供給を図り、継続的な経済成長を実現させることが不可避であり、導入コストや運用コスト削減のための研究開発が急務となる。

地中熱の利用においても、地中熱ヒートポンプシステム導入時でのコスト高が課題となっている。その中でも掘削コスト（熱交換井設置工）の大幅な削減を図るため、バイブレーションタイプの高性能ボーリングマシン（以下「ソニックドリル」と略す）の低騒音化技術開発と自動制御技術開発への取組み状況を報告するものである。

2. 開発目標

研究開発対象機は、平成 14 年度～平成 15 年度に実施した NEDO 事業を基に開発したソニックドリル（175 馬力エンジンを搭載）をベースとしている。

本研究開発での目標を以下に示す。

(1) 低騒音化技術開発

ソニックドリルは地層によっては 1 日で 100 m の掘削を可能とするが、都市部での地中熱ヒートポンプシステムの構築では、生活環境保全（騒音）の要求により、機械能力（打撃エネルギー換算）の約 46%での地中熱採熱孔の掘削を強いられている。従って、低騒音化技術開発では機械の騒音レベルを 6 dB (A) 低減を目標とし、機械能力の約 81%での掘削を可能とする。

(2) 自動化技術開発

地中熱採熱孔の掘削では、5 人体制（オペレータ 1 人、泥水管理 1 人、ロッド継ぎ足し等の作業 3 人）となっているが、3 人体制に削減する。これは、オペレータを若手技術者で対応を可能とし、遠隔操作により技術者の作業範囲を拡大すると同時に、ロッド（1 本：長さ 3 m、質量 100 kg）の継ぎ足し作業専用のロッドチェンジャを導入することで、技術者数の削減を実現する。

3. 低騒音化技術開発

低騒音化の評価は、国土交通省が低騒音型建設機械の可否を決定する際の騒音測定条件（以下「静的状態」と略す）と、掘削作業を想定して静的条件にバイブレーション起振力を最大にした時の騒音を加えた測定条件（以下「動的状態」と略す）で実施している。なお、従来のソニックドリルの同機種での騒音測定では、動的状態でのA特性補正音圧レベル（以下「騒音レベル」と略す）は静的状態と比較して5dB（A）高くなるのが分かっている。

(1) 騒音・振動測定方法

騒音・振動測定は一般社団法人日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所（以下「施工総研」と略す）のテストフィールドを使用し、同位置で継続的に測定を実施している。騒音・振動測定方法を表一に示す。

表一 騒音・振動測定方法

測定方法	対象	解析手法
音響パワーレベル測定	騒音	1/3 オクターブ分析
指向性測定	騒音	1/3 オクターブ分析
機械側（部位）測定	騒音 振動	FFT（高速フーリエ変換）による狭帯域分析
		1/3 オクターブ分析
音響カメラ測定	騒音	ビームフォーミング解析

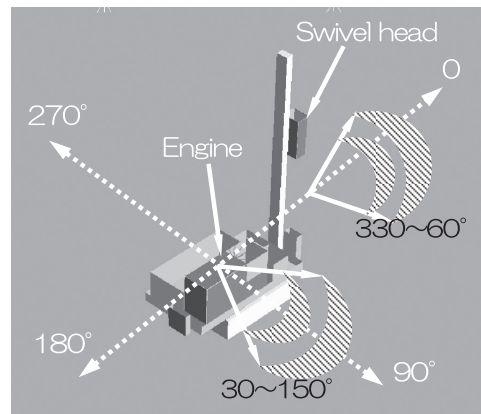
(2) 従来機の発生騒音

従来機となるソニックドリルの騒音特性は以下となる。

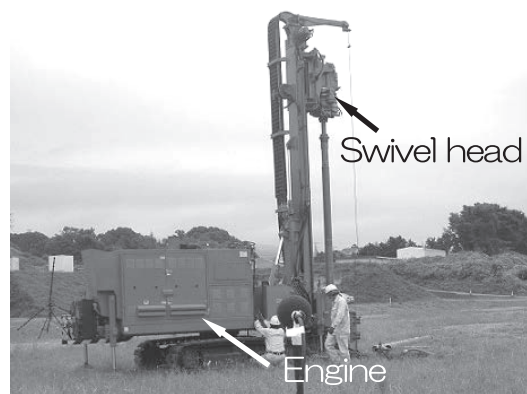
(a) 指向性測定による騒音特性

指向性測定では、機械中心より半径16mの円弧上で、30°毎に高さ1.5mの位置で騒音レベルを測定する。本測定より得られた従来機の騒音特性は以下となる。

- ①静的状態では30～150°、動的状態では330～60°での騒音レベルが突出しており、機械部位測定結果からも静的状態ではエンジン部（Engine）、動的状態ではスイベルヘッド（Swivel head）が主な騒音発生部位となっている（図一1、写真一1）。なお、スイベルヘッドは穿孔装置とも呼ばれ、掘削時にボーリングロッドに対して振動、回転、給進を与える装置となり、静的状態では稼働していない。
- ②周波数特性では、静的状態で250Hz付近、動的状態では315～630Hz付近での騒音レベルが大きい。



図一1 主な発生騒音源



写真一1 従来機

(b) 騒音シミュレーションによる騒音特性

騒音シミュレーション（ISO 9613-2に準拠）は機械側（部位）測定結果を基に作成したものであり、発生騒音部位の寄与レベルや防音材選定（吸音、遮音、防振、制振）で利用する。なお、本シミュレーション結果は音響パワーレベル測定および指向性測定結果と比較して、静的条件で誤差平均値0.7dB（A）、動的条件で測定を誤差平均値0.8dB（A）と1.0dB未満に収まっており有効と判断する。

静的・動的状態で共通して騒音レベルが大きい30°に着目すると、「スイベルヘッド」、「エンジンカバー」、「油圧ユニット」での騒音寄与レベルが大きい。

(c) 振動加速度測定による騒音特性

動的状態で最も寄与レベルの高いスイベルヘッドに対して振動加速度測定を実施し、振動分布より防音対策箇所を選定する。本装置では振動加速度の大きい箇所が水平方向で帯状に存在する。

(3) 低騒音化対策

従来機の発生騒音特性により、表二に示す低騒音化技術の適用を検討した。なお、これらの技術の適用に応じて、オイルポンプおよびオイルクーラーの仕

表一2 低騒音化技術

低騒音化技術	エンジン部	スイベルヘッド部
吸音対策	適用	適用
遮音対策	-	適用
防振対策	-	適用
制振対策	適用	適用
消音対策	適用	-
構造対策 A	適用	-
構造対策 B	適用	-
構造対策 C	適用	-

注) 構造対策はエンジンルーム内に限定

様、エンジンルーム内の換気位置、マフラー構造、エンジン排気口方向等の変更も行っている。

(a) 熱流調査

エンジンルーム内の雰囲気温度は、気温 40℃時で 80℃以内を目標としている。エンジンルーム内の 18箇所にセンサー（熱電対、熱戦風速計等）を設置し、エンジンルーム内の発熱量（空気の受熱量）を推定することで雰囲気温度を算定する（表一3）。

表一3 エンジンルーム内の雰囲気温度算定例

項目	記号	単位	夏場想定
外気温	t_o	℃	40
空気の密度	ρ	kg/m ³	1.127
空気の比熱	c_p	kJ/kgK	1.008
換気空気の質量流量	M	kg/s	1.88
換気空気の体積流量	V	m ³ /s	1.67
換気入口温度	t_{in}	℃	40
換気出口温度	t_{ex}	℃	85.2
温度上昇	Δt	℃	$\Delta 45.2$
エンジンルーム内発熱量 (空気受熱量)	Q	kW	85.7
ECU 近傍の温度		℃	75.5
コントローラ近傍の温度		℃	78.1

注) $Q = M \times c_p \times (t_{ex} - t_{in})$

(b) 消音装置

消音装置は低周波数領域（50 Hz ～ 250 Hz）の騒音に対して、低減したい騒音と正反対の強弱波形となる音波をスピーカより放射して打ち消す技術となる。本装置は、エンジン排気口を覆うダクト、制御用スピーカ、冷却ファン、エラーマイク、制御装置で構成される。エンジン排気音対策として、軽量・コンパクト化を念頭に改造している（図一2）。

(4) 性能照査結果

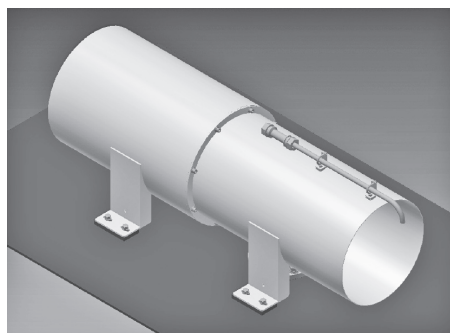
性能照査時での機械仕様概要を表一4に示す。なお、表中での方向を示す「前・右・後・左」は、図一1で示した「0°、90°、180°、270°」を指し、タイプ名は仕様の差異を示すための標記となる。

(a) 指向性

静的状態での指向性測定結果を、騒音レベル 30 dB (A) 範囲内のレーダチャートで表示したものを図一3に示す。低騒音化対策は Model III 以降で全方向において有効に働いている。

(b) 振動加速度

従来機 (Model1) と Model4 でのスイベルヘッドに着目した振動加速度測定結果例を表一5に示す。なお、Model4 ～ 6 でのスイベルヘッドは同じ構造となる。



図一2 消音装置 (参考図)

表一4 性能照査時での機械仕様概要

Model	適用技術		オイルポンプ		オイルクーラ			ラジエータファン		エンジンルーム換気		マフラー構造 (Type)	排気口
	静的状態	動的状態	Type	台数	Type	台数	回転数 (min ⁻¹)	Type	回転数 (min ⁻¹)	位置	方向	(Type)	方向
1	従来機		K3	2	LH	1	2,890	CA	1,100	後	上	SD	上
			PG	2	LD	1	3,060						
2	吸音, 防振 構造対策 A, B	適用 なし	PG	4	LH	1	1,480	CA	1,100	前	前	MA	後
			PV	2	LD	1	3,060						
3	吸音, 防振 構造対策 A ~ C	適用 なし	PG	4	LH	1	2,000	TA	1,000	前	前	MA	後上方
			PV	2	LD	1	3,060						
4	Model3 + 制振	吸音, 遮 音, 防振, 制振	AS	6	LD	2	3,060	TA1	1,000	前	右	MA	後
5	Model3 + 制振・消音				LD	2	3,060						後上方
6	Model3 + 制振				LD	2	3,060						後上方

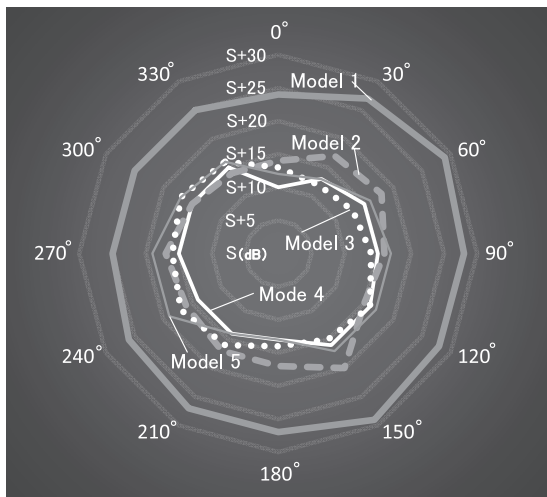


図-3 指向性測定結果

表-5 加速度測定結果例

測定点	従来機 (m/s ²)	Model4 (m/s ²)	測定点	従来機 (m/s ²)	Model4 (m/s ²)
①	58.0	61.6	⑨	63.1	108.6
②	103.1	3.2	⑩	36.2	35.2
③	203.7	4.2	⑪	92.4	3.7
④	198.4	4.4	⑫	159.2	4.7
⑤	40.9	39.2	⑬	109.1	6.3
⑥	39.6	19.6	⑭	91.1	134.2
⑦	179.2	7.5	⑮	68.0	13.7
⑧	192.2	17.2			

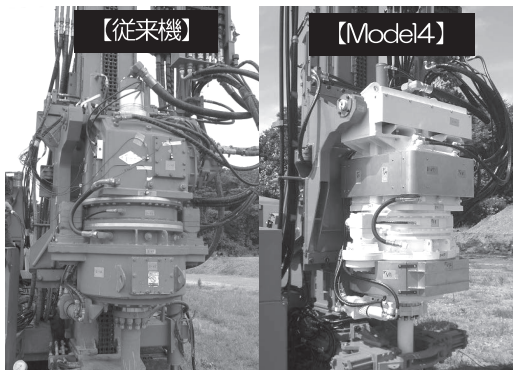


写真-2 振動加速度測定状況

測定点①, ⑨, ⑭では Model4 での振動加速度が大きくなっているが、低騒音化対策により振動加速度は大幅に低減されている (写真-2)。

(c) 騒音レベル

施工総研で実施した騒音レベル測定結果を、従来機からの騒音レベル低減量として表-6 に示す。なお、Model4 および Model5 では、エンジンルーム内の雰囲気温度が、気温 40℃ 時で 81.1℃ となることが予想され、目標温度である 80℃ 以内を満足していない。

熱流調査結果も踏まえ、現況では従来機と比較して

表-6 性能照査結果

Model	測定日	騒音レベル低減量 dB (A)	
		静的状態	動的状態
2	2015年4月	8	-
3	2015年7月	12	7
4	2016年8月	11	10
5	2016年8月	12	10
6	2016年9月	11	10

静的状態で 11 dB (A)、動的状態で 10 dB (A) の騒音レベル低減を達成している。したがって、目標とする 6 dB 低減を満足すると同時に、「低騒音型建設機械」へ該当することは確実となる。

4. 自動制御技術開発

自動制御システムでのアプリケーション開発では、国際標準規格 (IEC61131-3) に準拠したソフトウェアである CoDeSys (Code Development System) を用い、ストラクチャード・テキスト (ST 言語) によりプログラムを作成している。

自動掘削では掘削技術者のノウハウを分析した初期設定値を出発点として、掘削時にリアルタイムで速度を上昇させていくアルゴリズムの完成を目指している。自動掘削テスト状況を写真-3 に、主なアプリケーション概要を以下に示す。



写真-3 自動掘削テスト状況 (2016.10.28)

①エンジン回転数制御

オイルポンプ圧力を圧力センサーで感知して、エンジン回転数を制御する。さらに、一定時間で圧力変動が認められない場合は、アイドル状態へ移行する。

②姿勢制御

ポストフレームに設置した XY 角度センサーよりブーム起伏/マスト左右操作を油圧制御し、マストの鉛直度を確保する。

③掘削開始・停止制御

起動／停止時の操作を、各制御のタイムラグもしくはラップタイムを考慮して効率的に作動させる。

④掘削速度制御

フィードストロークセンサーにより掘削速度の計測を行い、大幅な地層変化、および地盤内の空洞に遭遇した場合でのロッドおよびヘッドの速度異常を検知し制御する。

⑤循環水制御

循環水ラインに電磁流量計を設置し、循環水の送りを一定量に確保できるように監視制御する。

⑥逸水監視制御

掘削口元に電磁流量計を設置し、循環水の戻り量を監視し、透水層での逸水が生じた場合には表示画面に警告表示する。

⑦掘削負荷制御

循環水ポンプ圧力を測定し、粘土・シルトによるロッド内の詰まりを検知する。検知後は、ヘッドおよび掘削ツールを孔底から引き上げることで、設定ポンプ圧力まで低減する。

⑧危険回避制御

各センサーの負荷データ（トルク、圧力、速度等）を移動平均値に換算し、設定条件値と比較することで地層判断し、孔内洗浄作業を指令する。

⑨孔内洗浄制御

危険制御による指令で、ヘッドおよび掘削ツールを孔底からの上下運動（指定距離・回数）での掘削に切り替える。さらに、循環水の速度を上げて、掘削屑の迅速な回収を図る。

⑩オシレータ周波数制御

掘削速度をモニタリングし、掘削速度が確保できるオシレータ周波数の増減制御を行う。

⑪ロッド分離制御

ロッド分離作業時を、各制御のタイムラグもしくはラップタイムを考慮して効率的に作動させる。

⑫モニタリング（データグラフィック機能付）

「ビット荷重」、「回転トルク」、「循環水送水圧力」、「オシレータ圧力」、「エンジン回転数」、「掘削速度」、「スピンドル回転数」、「ポスト傾斜角度」を常時監視する（写真—4）。



写真—4 モニタリング画面例

⑬データ記録・活用

時系列データとして、「ビット荷重」、「スピンドルトルク」、「スピンドル回転数」、「循環水量（送水）」、「循環水量（戻水）」、「オシレータ圧力」、「深度」、「掘削時間」、「日時と時間」等の記録を行う。

5. おわりに

低騒音化技術開発では目標を大幅に上回る結果が既にえられている。また、自動制御技術開発でも社内実地掘削を11月より開始する予定であり、平成26年度に提案を行った共同研究開発の実施計画目標を達成することは確実である。来年度（平成29年度）では、多くの層（砂、シルト、泥岩、岩盤、玉石、礫）での掘削データを収集し、事前に地層が判明していない場合での自動制御を可能とする。また、自動制御での信頼レベルを向上させるためには、多くのサンプリング数が必要となるため、機械学習を付加した制御技術の構築を図りたい。

JICMA

《参考文献》

- 1) 経済産業省、エネルギー白書、(株)ウィザップ、104-138、2014年8月
- 2) 北海道大学 地中熱利用システム工学講座、「地中熱ヒートポンプシステム」、(株)オーム社、32-33、2007年9月
- 3) 内野・宮崎・井上・石橋・吉岡、「重機等の排気低周波音低減用アクティブ消音器の開発」、公益社団法人日本騒音制御工学会秋季研究発表会講演論文集、133-136、2014年9月



【筆者紹介】
伊藤 春彦（いとう はるひこ）
（株）東亜利根ボーリング
代表取締役