

(論文)

iNDr冷却システム搭載極低騒音型油圧ショベル

Ultra-low-noise Hydraulic Excavators Using Newly-developed iNDr Cooling System



中島 一*1

Hajime NAKASHIMA



上田員弘*1

Kazuhiro UEDA



土橋知之*1

Tomoyuki TSUCHIHASHI



木村康正*2

Yasumasa KIMURA



山口善三*2

Zenzo YAMAGUCHI

Reducing the noise from construction machinery is important in creating a comfortable environment for residents near construction sites and for operators and workers as well, particularly in the present situation with the number of construction projects increasing in urban areas and at night. This article describes a newly-developed ultra-quiet hydraulic excavator that incorporates a patent-pending integrated Noise and Dust reduction (iNDr) cooling system. The power level of the sound from the excavator is 5dB lower than the most stringent restriction level set by the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism of Japan. The excavator has been released as one of our general purpose models.

まえがき＝建設機械の騒音低減に対する要求は、都市部や夜間での工事の増加も含め、稼働現場周辺の住民やオペレータへの環境改善の観点から、近年ますます強まってきており、建設機械メーカーにとって重要な課題となっている。

これに伴い騒音に関する法規制も年々整備強化されてきている。国内においては国土交通省が建設機械に対する低騒音型建設機械の型式指定制度を設け、低騒音型とさらに6 dB低い超低騒音型建設機械の判定基準を設定している。一方、欧州においてはEUの定める騒音規制値を超える機械の流通制限が行われており、規制値も年々厳しくなっている。また、2012年より中国でも騒音規制が開始される。

図1に油圧ショベルに対する国内の騒音基準値とEUの騒音規制値を示す。騒音の評価は、機械の音源から放射される全音響エネルギーを示す音響パワーレベル(PWL)で基準化されている。両方の規制をクリアするため、最近では機械の騒音レベルの低減が進んでおり、超低騒音型建設機械の指定が増加傾向にある。今後ますます低騒音化への拍車がかかるものと予想される。

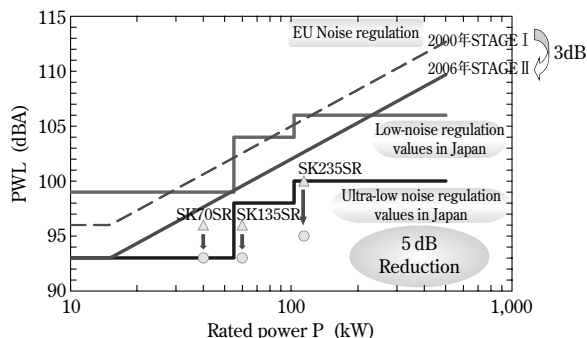


図1 騒音規制値と新型シリーズの騒音レベル
Fig. 1 Noise level of new SR series and noise regulations

騒音レベルの低減だけでなく、音質への配慮も重要である。音は受け手により、また時と場合により感じ方が大きく異なる。建設機械の音は、周辺住民にとっては環境悪化の元凶であるが、運転者にとっては機械の動きの状況を伝える情報源となる場合もある。周辺の住民に対して不快感を与えず、かつ運転者や周囲の作業者が安全で効率よく作業ができ、疲れにくい音環境への配慮が重要となっていく。

今回、最も厳しい国土交通省の超低騒音型基準値をさらに5 dB低減した極低騒音の都市型油圧ショベル汎用機種種のACERA Geospec SRシリーズを開発し、他社製品との差別化を達成した。

本機種では、喧騒感の改善に大きく寄与する騒音レベルの低減と、それに伴う音質の悪化に対して不快感の小さい音質を追求する両方のアプローチを採用した。ここではその改善事例としてiNDr (Integrate Noise & Dust Reduction Cooling System) の開発内容を紹介する。

1. 油圧ショベルの音源と特徴

油圧ショベルの構造と主要音源を図2に示す。油圧ショベルは、ディーゼルエンジンで油圧ポンプを駆動して、圧油をコントロールバルブを経由して各油圧シリンダおよびモータへ送って動作させる。エンジン、ファン、油圧ポンプ、およびエアクリーナはエンクロージャ内に配置され、その開口部より音が放射される。音源を閉じ込める囲いをここではエンクロージャとする。

主要な音源としては、ファン音、エンジン機関音、エンジン吸排気音、油圧ポンプやコントロール弁などの油圧機器音、そして旋回歯車音、履帯(キャタピラ)音、作業時の打撃音とがた音があげられる。寄与度の大きさは、ショベルのクラスや作業状況により異なるが、一例

*1コベルコ建機(株) 開発生産本部 要素開発部 *2(株)神戸製鋼所 技術開発本部 機械研究所

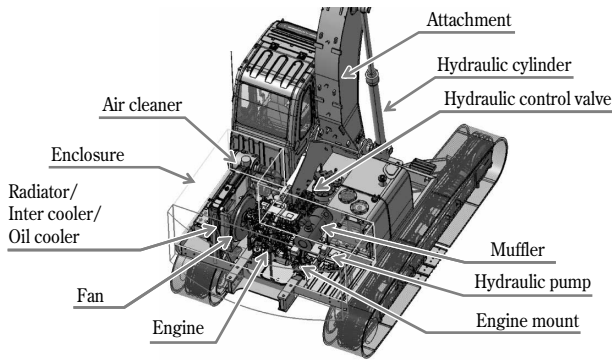


図2 油圧ショベルの主要騒音源
Fig. 2 Main noise sources of hydraulic excavators

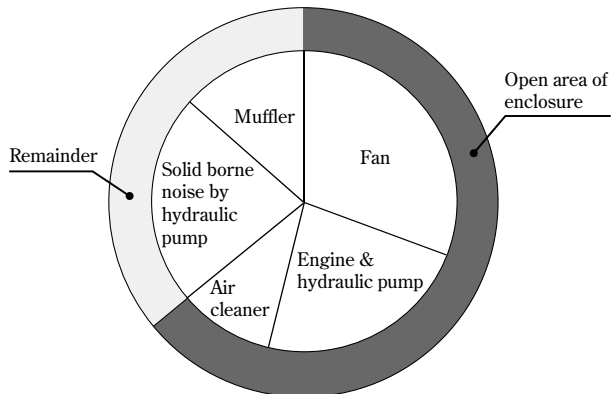


図3 油圧ショベルの音源寄与度の例
Fig. 3 Ratio of measured sound power of main sources

として図3に中型油圧ショベル作業時の音源寄与度の例を示す。図中の5種類に分けた音源について、個別遮音により各寄与度が求められている。内側の円グラフは各音源寄与度のエネルギー比を示し、外側の円グラフはエンクロージャ開口部とそれ以外からの寄与度比率を示す。

自動車と異なり、油圧ショベルは走行風のない定置作業である上にエンジン負荷率が高い。このため、冷却ファンを高速回転せざるを得ず、ファンは大きな音源となる。作業時には、動力源に高負荷がかかってエンジン機関音と油圧音が急激に大きくなり、レベル変動を増幅して音質に悪影響を与える。油圧固体伝播（でんぱ）音は、油圧脈動振動が伝播してフレームやアタッチメントなどから放射される音で、エンクロージャ以外から発生する。

エンジンと油圧ポンプから発生する音は、吸音材を内張りしたエンクロージャの中に収められて吸・遮音されるが、冷却風の通路である開口部より放射される。開口部からの漏れ音低減とヒートバランス成立のための通風量確保との二律背反が重要な設計課題となる。

2. 極低騒音化とiNDRの開発

2.1 開発の狙い

図4左図に示したように、環境騒音公害の調査結果¹⁾では建設作業騒音の苦情は工場騒音に次いで多い第2位であり、また、都市部に集中している（図4右図）。都市部での建設工事の特徴は工事現場が狭く、周囲に対する作業制限が多いことがあげられる。さらに、安全性、周

囲への配慮が求められ、コンパクトで静かな機械が必要となる。

そこで検討の結果、従来機に対して下記の改善目標を設定した。

①違いが明らかに分かる静かさ

周囲環境の保護：規制値パワーレベルを5 dB低減

②機側騒音の低減

運転席側の最もうるさい点を10dB低減

これにより、夜間工事や病院などでも安心して工事ができる。また、作業中の作業員間での良好なコミュニケーションを図ることができ、安全に作業を進めることができる。

2.2 iNDRの構造

前述の最も寄与度の高いエンクロージャ開口部騒音を大幅に低減するための対策が必要である。

エンクロージャ内の冷却風量を確保しながら音の放射を抑える構造を設計検討した。これにより防音性能が大幅に向上する効果が得られた。また、この構造を利用してダクト通路内に防塵フィルタを設けることにより、今まで建設機械として大きな問題であったラジエータやオイルクーラなど熱交換器の清掃性も大幅に改善した。そのiNDR構造を図5に示す。また従来型との対比を図6に示す。

本構造における設計ポイントは以下の5点である。

①隙間を徹底的に塞ぎ、エンジンルームへの空気の入れ、および排出の開口を集中させる。

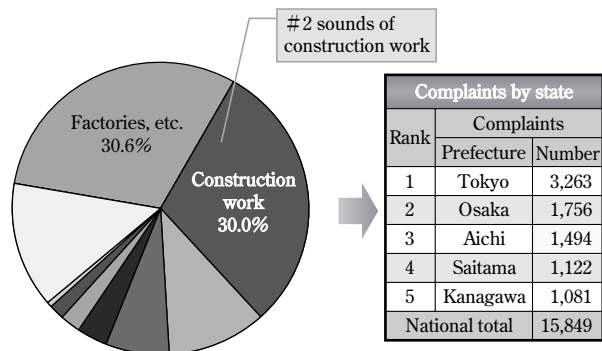


図4 環境騒音公害の現状
Fig. 4 Status of environmental noise pollution

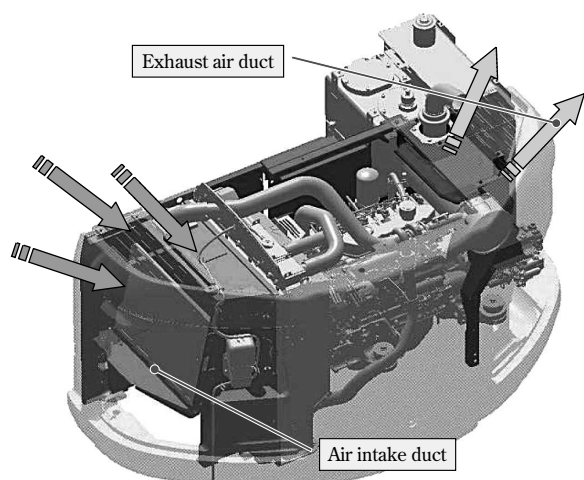


図5 iNDR構造
Fig. 5 iNDR structure

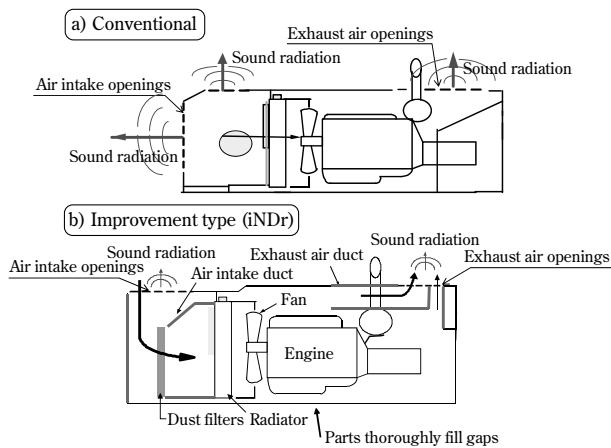


図6 iNDR構造 (従来型との対比)

Fig. 6 Comparison of conventional type and improvement type (iNDR)

- ②従来型では開口部から音源が直視できるため消音効果が十分得られない。改善型は開口部をオフセット吸音ダクト構造にして放射音を大幅に低減させる。
- ③機械のすぐ横での騒音や排風に配慮して、開口部は基本的に上面に限定する。
- ④吸音材により、エンクロージャ内の吸音性能を向上させる。
- ⑤ラジエータ前ダクト部に防塵フィルタを設置して、ワンタッチで脱着できる構造とする。

とくに吸気ダクト部は、通風抵抗と減音量のトレードオフの関係にあることから、通路における開口部と冷却ファンのオフセット量を解析およびベンチ試験での検討により最適化した。

周辺特許も含め、合計8件の特許を出願した。

2.3 解析および実験方法

2.3.1 エンジンエンクロージャの防音性能実験手法

前述のとおり、開口部からの漏れ音低減と通風量確保が二律背反することが設計課題となっており、エンクロージャの防音構造の検討が必要となる。これには数値シミュレーションに加えて実機サイズの実験が有効な場合も多く、改造が容易なモックアップ模型装置の導入によって開発効率を向上させることができた²⁾。図7にエンクロージャを模擬した実験装置の概略を示す。

主音源のファンはエンジンの代用として電動機によって駆動させ、エンジン音はエンジン近接に設置した超薄型平面スピーカから発生させるものである。音の評価は、ISO6395が規定する建設機械より放射される外部騒音の測定方法に基づき、半球面上の6点の騒音計測値より算出される音響パワーレベルとラジエータなど熱交換器の通過風量を同時に計測して行う。

実機と同模擬装置との音響パワーレベルの1/3オクターブ周波数特性比較(図8)に示すとおり、両者はほぼ良好な一致を示しており、事前予測手法としての有効性が確認されている。

1/3オクターブバンド周波数分析は、音響信号の分析としては最も一般的な方法であり、耳の周波数分解能の特性に合わせて対数的にバンドフィルタを設定したものである。

2.3.2 流体解析による冷却風量の推定

コンピュータの高速化と併せて解析手法も進化している。これまでは数箇月かかっていた流体解析がエンジンルームを丸ごとモデル化した場合でも約2週間で結果を出せるようになり、機種開発での適用が可能となった。図9に格子ボルツマン法によるエンジンルーム内の冷却風流れ解析の結果を示す。格子ボルツマン法とは、有限個の速度をもつ多数の仮想粒子の集合体として流体を近似し、各粒子の衝突と並進の運動を格子ボルツマン方程式を用いて速度分布関数を計算し、流れ場の流速、圧力などを求める数値計算法である。従来のナビエ・ストークスの数値計算法に比べ、大規模なモデルの計算速度に優れており、また実形状を簡素化することなくそのまま

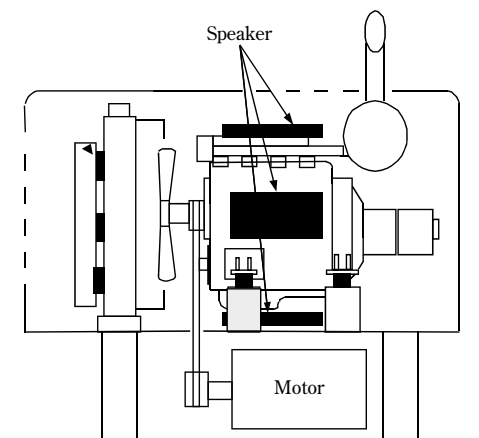


図7 ベンチ模擬試験装置

Fig. 7 Experimental apparatus of mock up model

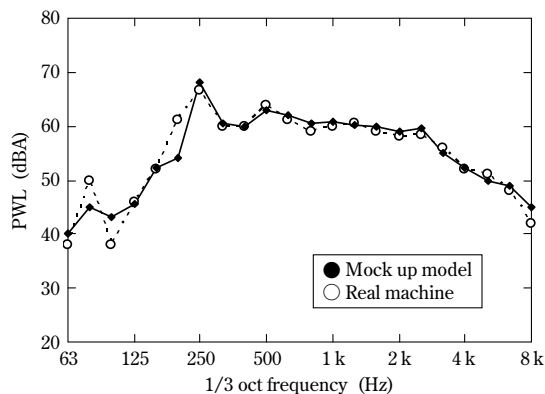


図8 実機とベンチ模擬装置の周波数特性比較

Fig. 8 Comparison of sound power between mock up and real model

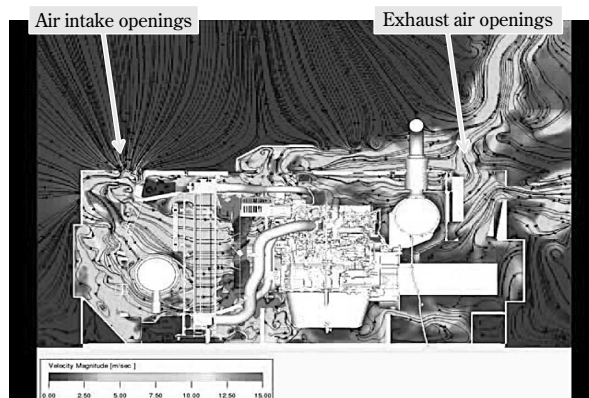


図9 エンジンルーム内の冷却風流れ解析

Fig. 9 Analysis of cooling air flow in engine room

の形状で計算が実施できるメリットがある。風量の数値評価だけでなく、流れのよどみや渦の発生を確認でき、対策案の抽出にも役立つ。

2.3.3 音響解析

従来は膨大な解析時間や音源モデルの複雑化などにより、実用化レベルに達していなかった。今回は(株)神戸製鋼所機械研究所振動音響室との取組で機種開発へ対応できるレベルまで達成したので以下に概要を示す。

1) 高周波領域の音場解析技術

従来、音場解析は数値解析手法の一つである境界要素法 (Boundary element method) が用いられることが多い。境界要素法は場の支配微分方程式から導出される境界積分方程式を離散化することによって数値的に解く方法である。対象空間の境界面のみメッシュ分割すれば良く、開領域問題 (例: 屋外への音響放射) のための特別な境界条件が不要であるために音の解析に有利であるという特長がある。しかしながら、境界要素法によって境界を離散化する場合、十分な解析精度を確保するためには音波の波長の1/8程度で分割する必要がある。このため、波長が短く高周波音になるほど要素を細かくする必要があり、計算時間とメモリ容量が膨大になる問題がある。

図10に解析手法と要素数、解析時間の関係を示す。建設機械規模の音場解析を想定すると、図に示すとおり、500Hz程度が限界と考えられてきた。近年、コンピュータの性能向上やアルゴリズムの開発 (高速多重極境界要素法: Fast multipole boundary element method) により解析周波数は徐々に高い周波数の解析が可能となってきているが、計算時間、メモリ容量ともに設計に活用できるようなレベルではない。これに対して、高周波音であれば波動性の影響が小さいことに着目し、熱の解析や光の伝搬解析 (CG レンダリング手法) で利用されるラジオシティ法^{3), 4)}を音響問題に適用し (音響ラジオシティ法)、音場を解析する手法を開発した。音響ラジオシティ法も境界のみの要素分割で良いため、境界要素法とモデルを共有することができる。約500Hzまでの低周波域を境界要素法、それ以上の高周波域を音響ラジオシティ法で解析することにより、計算時間を従来の1/30に短縮させることができた。

2) 音源のモデル化技術

音場解析を実施する場合、従来方法は構造物の全要素に振動速度を入力する必要がある。要素数の多い高周波では、図10に示すとおり数万要素の解析モデルとなるた

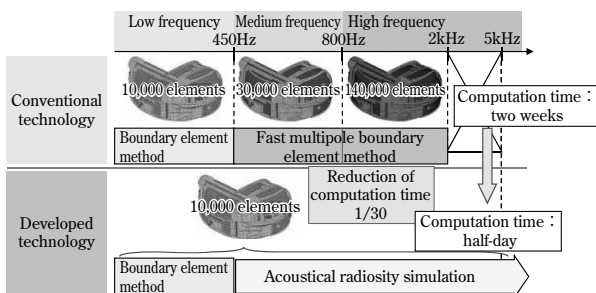


図10 高周波領域の音場解析技術

Fig.10 Sound analysis technology of high-frequency region

め、振動速度も数万点という膨大な計測点のデータが必要となり、解析を行うことは事実上不可能である。これに対して、等価な単純音源に置換える等価音源法を開発することにより、計測点を数万点から数十点規模まで大幅に減らすことができた。具体的には下記の手順で音源を同定する。

- ①実働状態で周囲音圧 p を計測する
- ②表面上に音源を仮定し、周囲音圧との伝達関数 H を測定する
- ③実働状態の音圧分布を満たす等価音源 q を求める ($p=Hq$)

図11は、4kHzまでの音場を解析するために、入力条件としての振動速度が波長の1/8程度である10mm間隔とする必要があるエンジンに対し、振動速度データを200mm間隔 (200Hz以下の解析のみに適用できる間隔) で入力した場合と、本技術により等価音源を同定して200mm間隔で入力した場合の精度検証結果を示す。今回の等価音源法は、200mm間隔音源入力にて従来の10mm間隔入力と同等の精度を確保でき、解析および計測時間の短縮が可能となることを示している。また、本技術は振動を直接計測することが困難な、ファンのようなものもモデル化が可能である。

2.4 評価結果

図12に現行機と改良機の音響パワーレベルの1/3オクターブ周波数特性を示す。騒音レベルの低減として、400Hz以上の高周波数域で従来機比10dB以上の効果が得られ、喧騒感の低減に寄与できている。

また、図13には機側1m点での騒音レベル値の変化

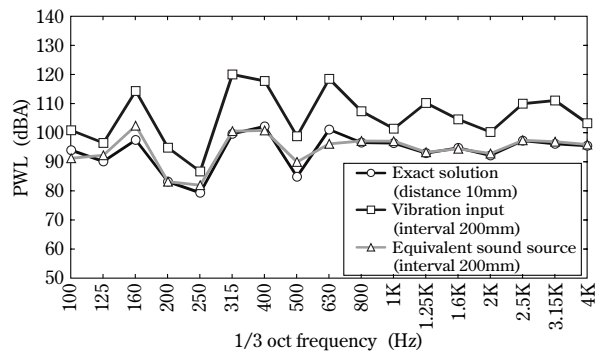


図11 音源モデル化手法の精度検証

Fig.11 Modeling Accuracy of of the sound source

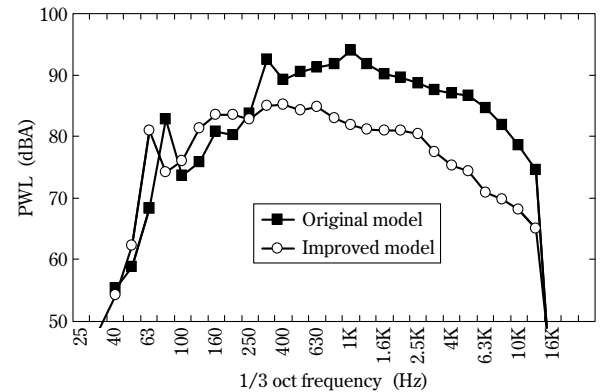


図12 改良前後の音響PWL(実測値)比較

Fig.12 Comparison of measured PWL between original and improved enclosure

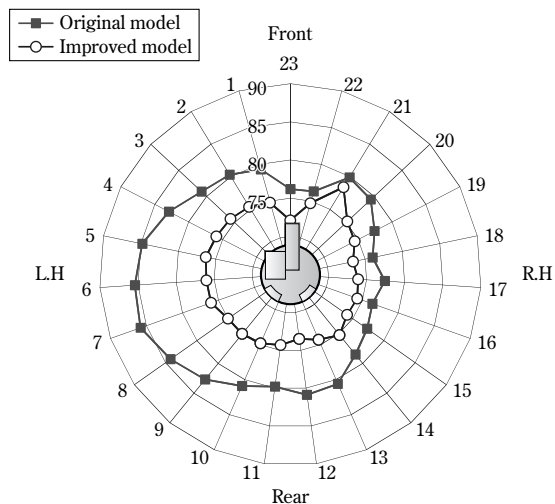


図13 機械の近接騒音比較
Fig.13 Comparison of noise near machine

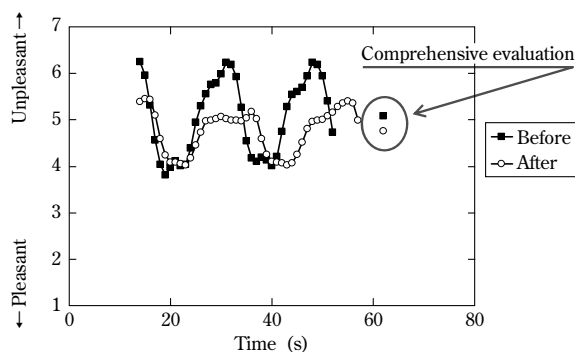


図14 快-不快聴感評価結果
Fig.14 Result of subjective evaluation of pleasant-unpleasant

を示す。機械のすぐ横での音は、運転席の左側で10dBと大幅に低減しており、工事作業員間のコミュニケーションも十分に図ることができるようになった。

一方、エンクロージャ開口部からの放射音が大幅に低減すると機械表面の振動から放射される油圧固体伝播音が目立つようになり、音質を悪化させる結果となった。そこで、音質改善の手法を用いて油圧配管支持部の振動伝達率を低減させる対策を施した。図14に対策前後の掘削作業3サイクルの聴感評価⁵⁾での「快-不快」の時刻歴変化を示す。対策後は評価値の変動が小さくなり総合評価も改善した。

2.5 商品展開とNETIS

本技術をACERA Geospec SRシリーズの3モデルに搭載した。前述の図1に示したように、各機種現行(△印)から新型(○印)へ騒音低減させ、SK135SR、SK235SRでは、最も厳しい騒音規制値である国土交通省超低騒音型

基準値を5dB下回ることができた。SK70SR、SK135SRにおいてはミニショベル並みの低騒音レベルとなっている。

また、2010年に国土交通省の新技术情報提供システム「NETIS(New Technology Information System)」の審査を受けて登録したことにより、顧客が工事成績評定に加算することができ、本商品をさらに有効に活用いただいている。

2.6 更なる低騒音化に向けて

今後のさらなる騒音レベルの低減に向けては、最大の音源であるファン音の低減が必要である。ファン自体およびその周辺部品を含めた風の流れに着目した改善や、より低騒音化が可能な冷却システムの開発が望まれる。最近では、ファンの流体騒音解析技術が大幅に進化しており、これを適用した抜本的な対応も期待される。ただし、ファン音の改善は機械音の中の定常的な成分の低減につながり、今までファン音にマスキングされて目立たなかった作業時の変動成分が卓越してくることによる音質の悪化に注意が必要である。

むすび=油圧ショベルの低騒音化は今後さらに進んでいくものとする。しかしその一方で、排ガス規制の強化も加速度的に進んでおり、その影響として、エンジン発熱量の増加による冷却系騒音の悪化や、排ガス浄化装置の追加による機体レイアウトや防音構造の見直しといった新たな課題が生じている。また、エンジンルームからの音以外で掘削装置や走行装置などの稼働時の衝撃音などに対する低減対策もクローズアップされてくる。

今後のさらなる低騒音化に向けて、新たな改善アイテムの開発が期待される。音質面においては、受音者のそれぞれの立場に立った取組が必要である。とくに今後は、周囲だけでなく運転席でのオペレータの快適性に対し、騒音レベルの低減に加えて、長時間運転時の疲労度や操作に必要な音を意識した音質の改善が求められるものとする。油圧ショベルの音響設計の立場から、今後も快音化を推進し、広く社会のニーズに適合する油圧ショベルの提供に寄与していきたいと考える。

参考文献

- 1) 環境省水・大気環境局大気生活環境室. 平成22年度騒音規制法施行状況調査について, p.8-9.
- 2) 田中俊光ほか. R&D神戸製鋼技報. 2007, Vol.57, No.1, p.43.
- 3) A. Le Bot et al.. J. Acoust. Soc. Am. 2000, Vol.108, No.4, p.1732.
- 4) S. Siltanen et al.. J. Acoust. Soc. Am. 2007, Vol.122, No.3, p.1624.
- 5) Hatano et al.. 17th ICA Proceedings Room. 2001, Vol. IV, p.189.