

油圧ショベルの極低騒音 (iNDr) と快音化

中 島 一

建設機械の騒音低減に対する要求は、近年ますます強まってきており、国内外の規制も強化されてきている。機械の騒音レベルの低減も進んでおり、また、音質面での改善も進められるようになってきている。騒音低減を押し進めると、これまで埋もれていた音が耳につき出して新たな耳障り感の問題となる事もあり、快い音にするためには、騒音レベルと音色・音質の両面での取り組みが重要である。

本報文では、こうした油圧ショベルの快音化への取り組みについて、改善手段や評価方法の具体的な事例を紹介する。また、その中で極低騒音 (iNDr) の構造についても紹介する。

キーワード：騒音、音質、快音化、ファン音、エンクロージャ、油圧脈動音、音響心理評価、不快感

1. はじめに

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2006年1月より現行に対して3 dB 低く抑えられた。図-1に油圧ショベルの国内の騒音基準値とEUの騒音規制値を示す。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

んできており、超低騒音型建設機械の指定が増加傾向にある。また、超低騒音型の基準値をさらに5 dB 低減した極低騒音の都市型建設機械も登場してきており、他社製品との差別化の観点からも、ますます低騒音化への拍車がかかるものと予想される。

騒音レベルの低減だけでなく、音色や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、且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くる。

このような背景の下、機械の快音化には喧騒感の改善に大きく寄与する騒音レベルやラウドネスレベルの低減と、同じレベル値でもより不快感が小さな音色や音質を追求する両方のアプローチが必要となる。ここでは快音化へのアプローチの改善事例¹⁾を最新の極低騒音 (iNDr) を含めて紹介する。

2. 油圧ショベルの音源と特徴

油圧ショベルの作業時の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等の油圧機器音、そして旋回歯車音、履帯音、作業時の打撃音とガタ音が挙げられる。これらの主要音源を図-2に示す。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

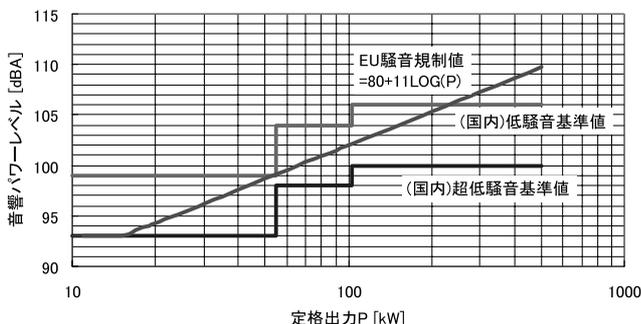
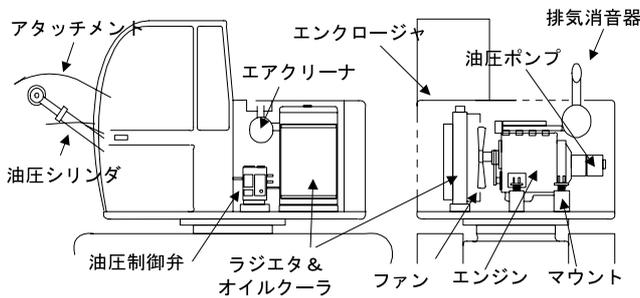
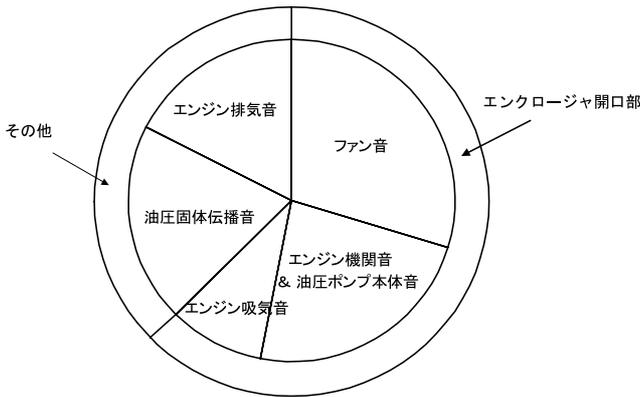


図-1 油圧ショベルの騒音基準値



図一2 油圧ショベルの主要騒音源



図一3 油圧ショベルの音源寄与度の例

例として図一3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。

油圧ショベルは、自動車と異なり、走行風の無い定置作業であり、またエンジン負荷率が高いため、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り、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音質に悪影響を与える。油圧固体伝播音は、油圧脈動振動が固体伝播してフレームやアタッチメント等から放射される音でエンクロージャ以外の音源である。

エンジンと油圧ポンプは吸音材を内貼りした囲い(エンクロージャ)の中に収められ吸遮音されるが、冷却風の通路としての開口部より音が放射される。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。

3. 騒音レベルの低減と極低騒音 (iNDr)

(1) 模擬動作時の音響パワーレベルの計測評価

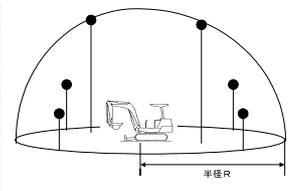
1997年の「低騒音型建設機械」新規格測定法によ

り、それまでの無負荷ハイアイドル運転時定常音計測から機体の90度旋回と一連の掘削作業サイクルの模擬動作時の非定常音の等価騒音レベル計測への変更がなされた。また4方向の騒音レベルの平均値から、半球面上6点の計測音圧から算出する音響パワーレベルへ変更となり、建設機械の音響性能の表示がより実態に近づいた。さらに、EUの騒音規制と計測方法が統一され国際的な整合化も図られるようになっている。

図一4に同法による測定時のマイクロフォン位置の概略、写真一1に測定状況を示す。機械中心から半径16m以内はコンクリート面であり、測定半径の3倍以内には建屋等の反射面が無く、高精度な計測を可能としている。測定は6点の同時計測である。



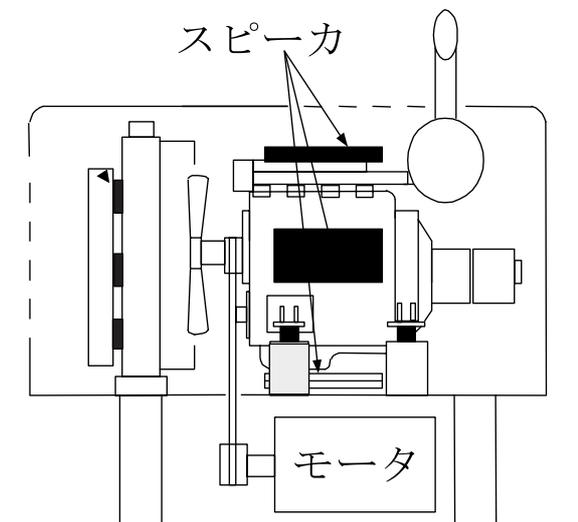
写真一1 測定状況



図一4 マイクロフォン位置

(2) エンジンエンクロージャの防音性能実験手法

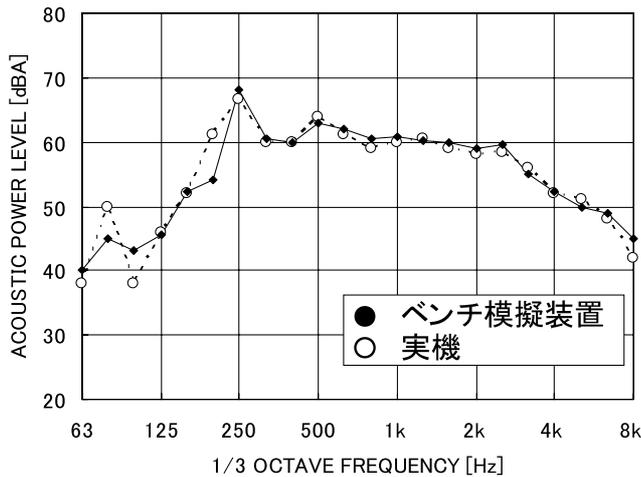
前述の通り、開口部からの漏れ音低減と通風量確保とが二律背反の設計課題であり、エンクロージャの防音構造の検討が必要となる。これには数値シミュレーションに加えて実機サイズの実験が有効な場合も多く、改造が容易なモックアップ模型装置の導入により、開発効率を向上させることができた。図一5にエンクロージャを模擬した実験装置の概略を示す。主音源のファンは電動機をエンジンの代用として駆動させ、エンジン音はエンジン近接に超薄型平面スピーカを設



図一5 ベンチ模擬試験装置

置して音を発生させるものである。6点の騒音計測による音響パワーレベルとラジエータ等熱交換器の通過風量を同時に計測して評価判断できる。

実機と同模擬装置との音響パワーレベルの周波数比較は図一6に示す通り、両者はほぼ良い一致を示しており、事前予測手法としての有効性が確認されている。



図一6 実機とベンチ模擬装置の周波数特性比較

(3) エンジンエンクロージャの高防音性能構造 極低騒音 (iNDr) の構造

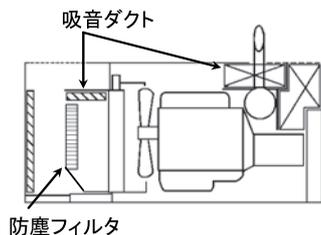
エンクロージャの中に吸音ダクトを構成させることにより、現行機に対して5 dBの防音性能向上を得た。そのエンクロージャ構造を図一7と写真一2に示す。

本構造は、各部の隙間を徹底的に塞ぎ、エンジンルームの空気の入力、排出の開口を集中させている。その上で、通過風量を確保させながら、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た。また、同時に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し、今まで建設機械として大きな問題であったラジエータ、オイルクーラ等熱交換器の清掃性も大幅に改善させた。この構造をiNDr (Integrate Noise & Dust Reduction Cooling System) と呼んでいる。

騒音レベルの低減として、400 Hz以上の周波数域

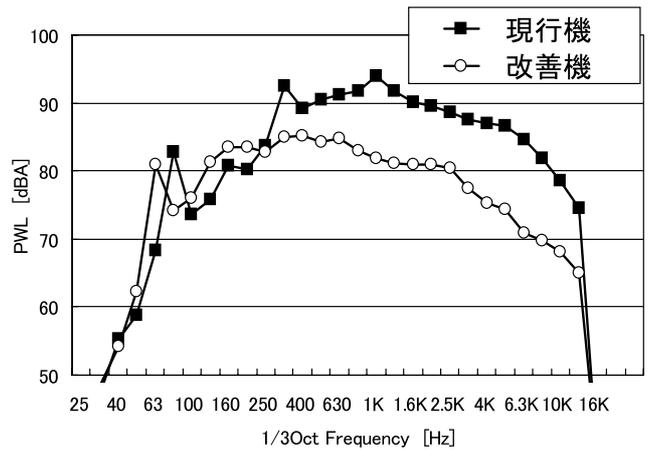


写真一2 iNDr 構造

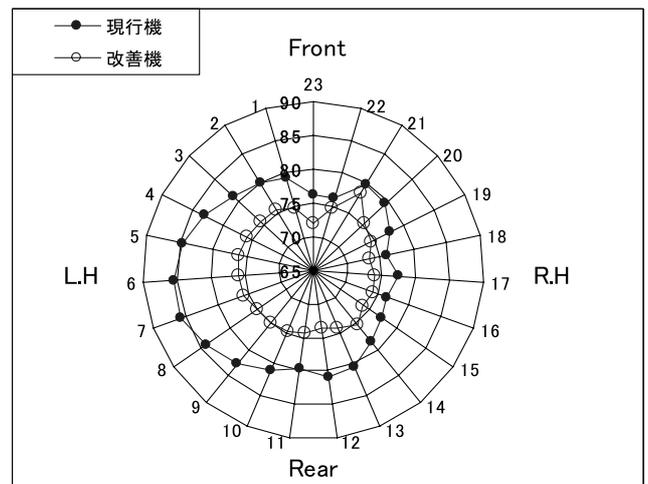


図一7 高防音性能エンクロージャ構成

で10 dB以上の防音効果量を得られ、高周波領域の低減により、喧騒感の低減に寄与できているのが、図一8に示す現行機との音響パワーレベルの周波数特性分析の比較結果でわかる。また、機械のすぐ横での音は、運転席のある左側で10 dB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充分図ることができるようになった。図一9には機側1 m点での騒音レベル値の変化を示す。



図一8 改良前後の音響PWL (実測値) 比較



図一9 周囲近接騒音比較

しかし、エンクロージャ開口部からの放射音を大幅に低減すると、その他の音源の油圧固体伝播音が目立ち、音質を悪化させた。対策として、後述の4項での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事で対応した。

(4) 更なる騒音レベルの低減へ

今後更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。ファン自体及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。ただし、ファン音の改善は定常的な成分の低減につながり、マスキング効果の減少により、作業時の変動成分の卓越に注意が必要である。

4. 音色・音質の改善

騒音レベルの低減を押し進めると、これまで埋もれていた音が耳につき出して新たな喧騒感や耳障り感が発生するといった問題が生じることがよくある。一方、建設機械は長時間作業をする機械であり、周辺の住民に対して不快感を与えない配慮や、運転者に対して疲労を与えない静粛性と共に、操作に見合った音反応により機械の動きの状況を把握しながら、快適に作業できる事が望まれる。そのため、騒音レベルだけでなく、音質や音色が心理に与える官能の影響も考慮した、より合理的な音の設計が必要になる。

(1) 音色・音質の改善設計手順

設計手順は、①問題音の特定→②目標音色の策定→③音色改善効果の予測→④目標音色の決定→⑤対策箇所の音響的目標設定→⑥設計→⑦試作→⑧評価→⑨量産となる。音の主観評価データから、一般性のある客観特性を捉え、設計に反映できる具体的な改造内容へと落とし込む取り組みである。図-10に評価音の加工・合成・音提示システムを示す。前述の手順の中の①②③④の段階で用いられている。感覚量と物理量との対応パラメータとしては、loudness (大きさ), sharpness (かん高さ), fluctuation strength (変動感), roughness (粗さ), booming index (こもり感)²⁾などが用いられる。

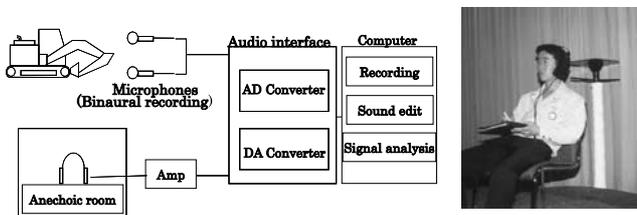


図-10 評価音の合成・加工・音提示システム

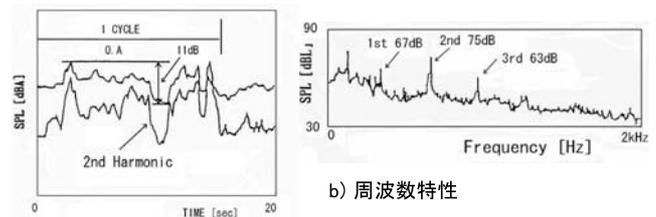
(2) 油圧脈動音の対策事例³⁾

掘削作業時に油圧音が卓越し、油圧ショベルの音質や音色を大きく決定づけることがある。その作業音改善へのアプローチである油圧音の音質改善の取り組み例を述べる。

(a) 音響心理評価に基づく目標音響特性の決定

油圧ショベルの基本動作である掘削、旋回、放出の一連の作業音を、被験者 50 名が 16 個の形容詞対で 7 段階評価を行った。SD 法による因子分析を行い、因子負荷率の高い 5 対の形容詞対 (静かなーうるさい、澄んだー濁った、割れたー溶け合った、快いー不快な、かん高いー落ちついた) を評価項目に設定した。これらの形容詞対を用いて、これまでに高い評価を得ている油圧ショベルと問題ショベルとの一対比較官能試験を行った結果、問題ショベルは、うるささ、不快感、かん高さの点で評価が特に劣ることが判明した。

この対象機の作業音の周波数特性とオーバーオール値の時間変動を図-11に示す。かん高さの原因となる 500 Hz から 2 KHz の中高周波数域において、油圧ポンプの脈動周波数の 2 次および 3 次成分のピークが大きく卓越していた。また、オーバーオール値の変動幅が大きく、油圧 2 次成分がそれに寄与している事が分かる。波形と周波数分析結果から、油圧脈動の卓越性と時間変動が劣化の原因と推定され、①現行音、②現行から脈動 2 次を -10 dB、③現行から脈動 2 次を -20 dB、④現行から脈動 2 次を -20 dB、3 次を -10 dB の 4 種類の試験音を作成して聴感評価し、④を改善目標の音色・音質とした。

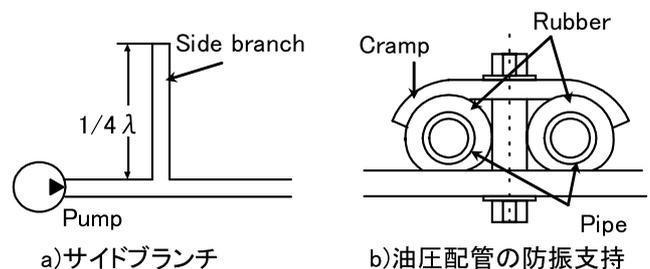


a) 騒音レベルの時間変動

図-11 油圧ショベル作業サイクル中の音の変動

(b) 対策内容と改善効果

対策としては、①油圧脈動 2 次成分の低減にはサイドブランチを装着、②パネルやフレームへの油圧脈動振動の固体伝搬の低減には油圧配管の防振支持を行った。図-12にこの①、②の対策内容を図示する。



a) サイドブランチ

b) 油圧配管の防振支持

図-12 油圧脈動音の対策方法

これらの対策により、注目位置における油圧脈動2次成分が22 dB、3次成分が14 dB低減し、目標低減量以上の周波数特性を達成した。図-13に対策後の騒音周波数特性とオーバーオール値の時間変動を示す。これより油圧脈動2次成分の卓越性が低下し、時間変動幅が減少したことがわかる。

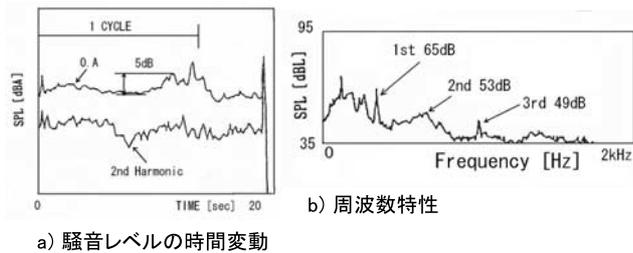


図-13 対策後ショベル音の時間変動と周波数特性

以上の対策効果を、前述の高評価の油圧ショベル音と一対比較した聴感評価結果として図-14に示す。かん高さと不快感の改善が大きく、高評価油圧ショベル音を上回る結果を得た。

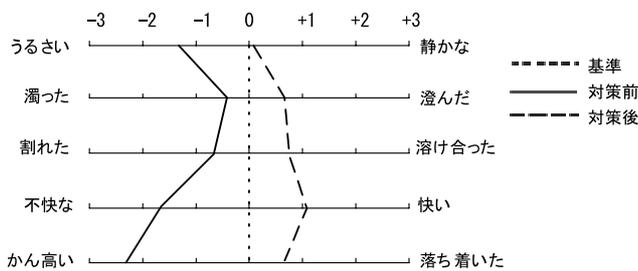


図-14 対策前後の音質・音色の官能評価試験結果

油圧音は作業時の音質に大きく寄与するため、他にもいろいろな対策が進められている。そのひとつに弁板の開口形状による改善がある。油圧ポンプの吸入工程から吐出工程、及び吐出工程から吸入工程への遷移領域において、ポンプ室内圧の急激な変化を緩和する様に、弁板のノッチ形状を最適化するものである⁴⁾。

この他にも、プランジャを不等ピッチ配置として高周波音の低減による音質改善を狙ったものが出てくるなど、さまざまな改善案が開発されているが、その機械の音質改善の狙いにあった対応策を選択していく必要がある。

(3) 対策前後の総合音の聴感評価例

ここでは、油圧ポンプの脈動対策や配管系の対策を実施した音質改善音の総合的な聴感評価事例を以下に示す。評価方法は、模擬掘削ワークサイクルの時々

刻々について⁵⁾聴感評価を行うものである。油圧ショベル全体音の聴感評価「快—不快」の変化を模擬掘削ワークサイクル3回について図-15のa)に示している。また音の大きさ及びかん高さ感とそれぞれ対応が良い物理量である loudness と sharpness の計算値の時刻歴変化を図-15のb), c)に示した。快—不快の音響心理評価での不快感の低減、さらには Sharpness と loudness の値が低下し、音質の大幅な改善が確認できる。これにより、全体的な評価と局所的な評価及び変動感の評価が可能である。また、計算による定量評価へとつながっていく。

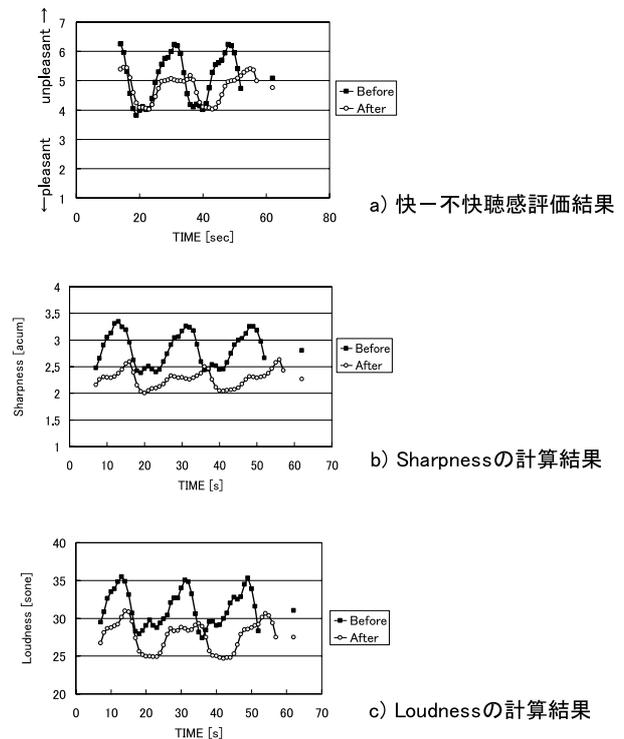


図-15 各感覚尺度の時刻歴変化比較

5. おわりに

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的に進んでおり、その対応策の影響として、エンジン発熱量の更なる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レイアウトや防音構造の見直しといった課題が生じている。今後の更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音色・音質作りが必要であり、特に今後は運転席で快適に気持ちよく作業できる音環境が求められるものとする。そして嗜好の問題はあるが、ブランドイメージにも繋がる個性ある音色への取り組み

にも拡がりをみせていくのではないだろうか。油圧シヨベルの音響設計の立場から、今後も快音化へのアプローチを推し進め、広く社会のニーズに適合する油圧シヨベルの提供に寄与していきたいと考える。

J|C|M|A

[筆者紹介]

中島 一 (なかしま はじめ)
コベルコ建機(株)
開発生産本部
要素開発部 プロジェクトGr
マネージャー



《参考文献》

- 1) 田中俊光ほか：R&D 神戸製鋼技報, **57** [1], pp.43 (2007)
- 2) 橋本竹夫ほか：音響技術, No. 118/Jun, pp.42 (2002)
- 3) 木村康正ほか：日本機械学会設計工学・システム講演論文集, [940-22], pp.222 (1994)
- 4) 田中俊光ほか：R&D 神戸製鋼技報, **38** [3], pp.7 (1988)
- 5) S.Hatano et al. 17th ICA Proceedings Rome IV, pp.18 (2001)

建設機械施工安全技術指針 指針本文とその解説(改訂版)

◆「指針本文とその解説」目次

第I編 総論

- 第1章：目的
- 第2章：適用範囲
- 第3章：安全対策の基本事項
- 第4章：安全関係法令

第II編 共通事項

- 第5章：現地調査
- 第6章：施工計画
- 第7章：現場管理
- 第8章：建設機械の一般管理
- 第9章：建設機械の搬送
- 第10章：賃貸機械等の使用

第III編 各種作業

- 第11章：掘削工，積込工
- 第12章：運搬工
- 第13章：締固工
- 第14章：仮締切工，土留・支保工
- 第15章：基礎工，地盤改良工
- 第16章：クレーン工，リフト工等

- 第17章：コンクリート工
- 第18章：構造物取壊し工
- 第19章：舗装工
- 第20章：トンネル工
- 第21章：シールド掘進工，推進工
- 第22章：道路維持修繕工
- 第23章：橋梁工

● A5版 / 330頁

● 定 価

非会員：3,360円 (本体3,200円)

会 員：2,800円 (本体2,667円)

※学校及び官公庁関係者は会員扱いとさせていただきます。

※送料は会員・非会員とも

沖縄県以外 450円

沖縄県 1,050円

※なお送料について、複数又は他の発刊本と同時申込みの場合は別途とさせていただきます。

● 発刊 平成18年2月

社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-8 (機械振興会館)

Tel. 03 (3433) 1501 Fax. 03 (3432) 0289 <http://www.jcmanet.or.jp>