

27. 工事における音源別騒音発生量の分析

独立行政法人土木研究所 山元 弘、吉田 潔
国土交通省 国土技術政策総合研究所 ○吉永弘志

1. 目的

土木研究所では環境影響評価における騒音予測用のデータを土木工事の実測調査に基づいて整備している。土木工事は複数の機械で行われており、予測用データはこの機械の組み合わせを最小単位とし1つの音源とみなしているが、予測の実務担当者からは機械別の発生量が求められている。機械別の騒音発生量の分析ができれば同種の機械を使用する工事騒音の予測、機械別に騒音対策を施した場合の効果の実測、バックグラウンド音が大きい現場での騒音測定など様々な応用が期待できる。そこで平面上に複数の機械が配置され同時に変動騒音が発生している条件で機械別の騒音発生量を分析する技術を開発することとした。

2. 工事騒音の特徴

土木工事騒音は時間の経過に伴い無規則に変動する。本研究はこのような変動騒音を対象とした。日本音響学会ではASJ CN-Model 2002においてこれらの騒音を代表するスペクトルを式-1としている¹⁾。

$$L_{A,rel}(f) = 10 \log_{10} \left(\frac{f}{1,000} \right) \times [4.4548 - 0.1443(10 \log_{10} f + 2)]$$

f : Frequency, Hz (式-1)

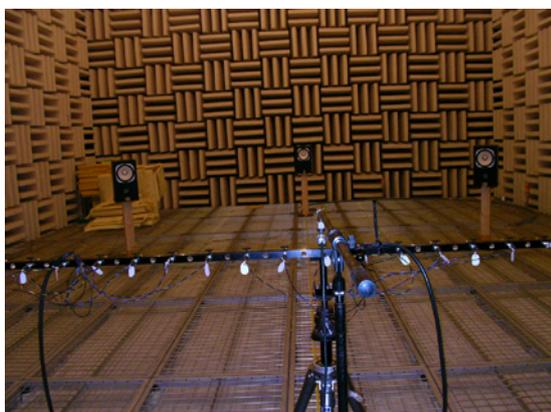


写真-1 無響室での実験

3. 分析方法の検討

機械別騒音の分析方法として1)機械の周囲にマイクロホン配置する方法、2)音源探査で適用されているマイクロホンアレイを応用する方法および3)音響インテンシティを応用する方法を比較し2)マイクロホンアレイを応用する方法が現場での適用性が高いと考え研究対象とした²⁾。マイクロホンは安全のため7m程度離れた位置とし、運搬の便を考慮して全長2mで10cm間隔の21個を基本とした(図-1)。

まず、最初に音源が無遠慮にあり平面波として到達する条件を仮定し、指向性の試算をした。図-2は図-1の左側の配置の場合の指向性の考え方を図示したものである。ある方向から到来する波の波面がマイクロホンアレイの各マイクロホンに到達する時間は音源の方向により異なる。このため音源方向とマイクロホンアレイの直線方向が垂直となる場合に受信信号の和が最大となる。音源方向とマイクロホンアレイが指向する方向がずれていると各マイクロホンが受信する信号の位相がずれるため受信信号の和は小さくなる。このずれの程度は高周波で波長が短いほど大きくなるので高周波ほど指向性が鋭くなる。しかし、高周波では音源方向と異なる方向でも各マイクロホンの受信信号が信

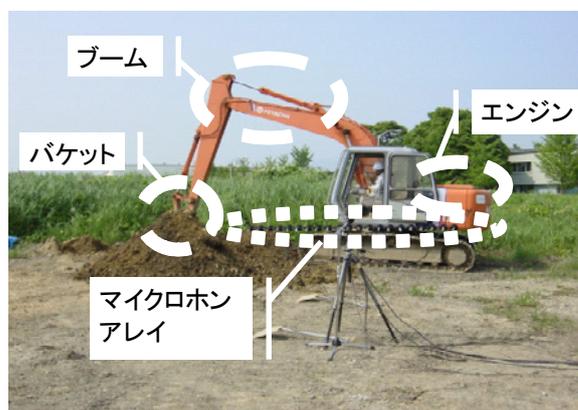


写真-2 屋外での実験

号の周期の整数倍でずれることで音源方向と同じ出力となり、いわゆる虚音源となる。図-4は図-1の左の配置で音源の方向に位相を合わせた場合の指向性を周波数ごとに計算したものである。方向が異なれば音源方向と正反対の方向の音の影響を受けるが正反対の方向に音源が存在しないことが明らかな場合は支障がない。図-1の右の配置では音源の方向からの音波到達時間がマイクロホンごとに異なる。そこで、各マイクロホンの受信信号を時間差だけそれぞれずらして和をとることとした場合の指向性は図-5となる。虚音源は減るが分解能が悪くなる。

複数音源の分離には分解能が高い方が良いので図-1の左の配置を採用することとした。図-4から250Hz以下の低周波では分解能が悪くなり、4000Hz以上では虚音源が出現する。この影響を避けるため、未知の音源を分析するにはバンドパスフィルタをかけることにした。

本マイクロホンアレイは、水平面内で方向別に音源が異なり地表面反射の影響がある現場の実情に合わせて。音源が水平面で異なる方向に存在するのでマイクロホンを面的に配置しないで直線的に配置するだけで音源別の騒音発生量を分析できる。音源別に音源の高さが異なっても高さ方向の音源探査をする必要がなく、水平方向に重点化できる。また、地表面反射については、図-3のようにマイクロホン相互の相対的な遅延時間が地表面からの反射音と直接音の場合でほとんど変わらないため同一の音源由来として分析できると考えた。

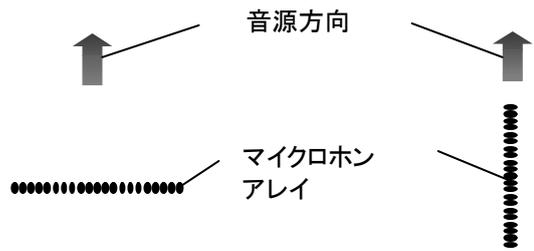


図-1 音源方向とマイクロホンアレイ

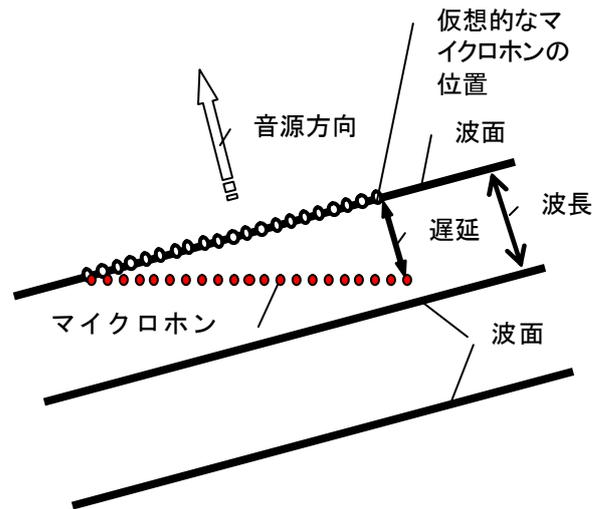


図-2 指向性の基本的な考え方

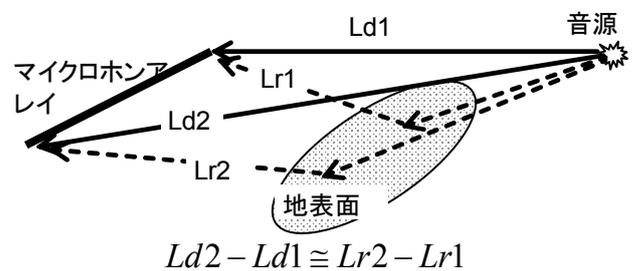


図-3 地表面反射の影響

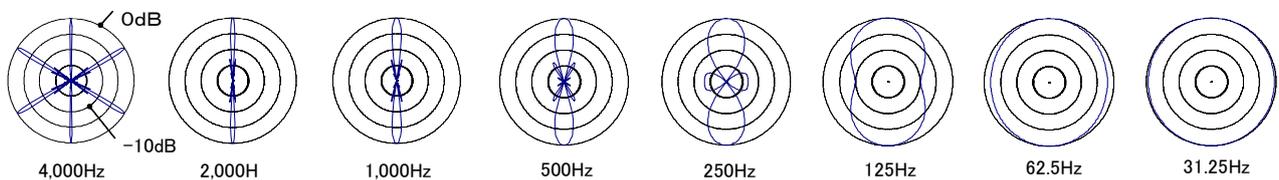


図-4 音源方向に直角にマイクロホンアレイを配置した場合の指向性

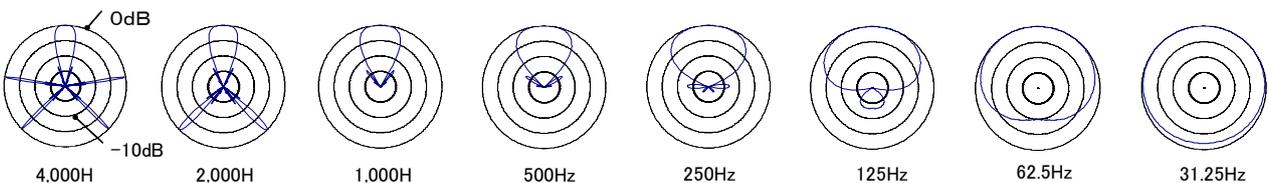


図-5 音源方向にマイクロホンを並べた場合の指向性

4. 実証実験

完全無響(写真-1)、半無響、および屋外(写真-2)の条件で測定を行った。無響室の大きさの制約があったため音源およびマイクロホンアレイの配置は図-6とした。音源は純音、1/1 オクターブバンドノイズおよび建設機械騒音の音源ファイルをスピーカーで再生した。マイクロホンは小野測器の MI-1431 にプリアンプ MI-3110 を付加したものを 10cm 間隔で 21 個配置した。各マイクロホンの出力は TEAC の AD コンバータ LX-20 を使用し 24,000 個/sec で同時サンプルし、建設機械音については LX-20 で A 特性補正をかけ、他は Flat でノートパソコンのハードディスクに記録した(図-7)。各マイクロホンの出力は B&K 4231 による校正値で音圧に変換した。この際、器差も補正される。実証実験は無響室、半無響室、屋外へと固定周波数音、建設機械の再生音、実作業音へと条件を厳しくしていった。

4-1 分析アルゴリズム

図-8 のように音源と各マイクロホン間の距離が異なるためマイクロホンで受信した信号のタイミングはずれている。音源の位置を仮定しタイミングを合わせて加算した値(遅延和)は仮定した音源の位置が真の位置の場合に最大となるはずなのでこの位置を平面内で検索することとした(音源が遠くにあり平面波とみなせる場合には図-2 のように方向のみを考慮して遅延和を計算するが分析では音源までの距離も考慮している)。遅延和は 21 個のマイクロホンの音圧を 2 乗し時間平均したもの(1 個当たりの 212 倍)で比較した。平面内の全領域でしらみつぶしに遅延和を計算すると計算量が莫大となるため計算の工夫をした。遅延和は距離よりも方向に敏感に変化するため最

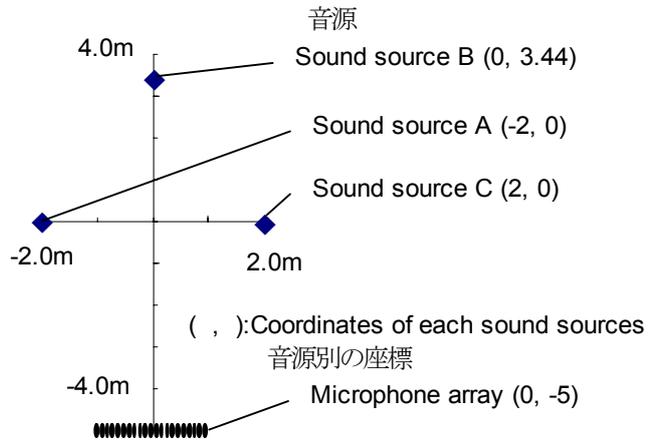


図-6 無響室における配置

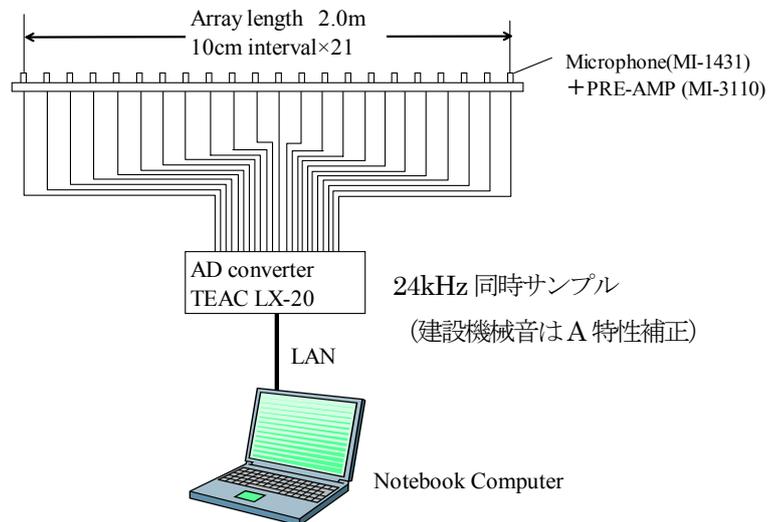


図-7 計測システムの構成

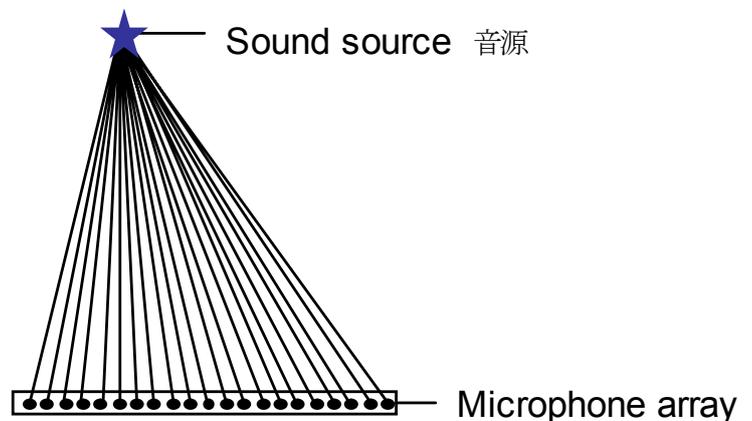


図-8 音源とマイクロホンアレイ

表-1 音源分析の例(1)

音源	方向(°) *3		距離 (m) *3		A特性実効音響パワーレベル(dB)		
	分析値*1	正解	分析値*1	正解	分析値*1	正解*2	誤差
A: 油圧ショベル	-21.7	-21.8	5.8	5.4	99.8	100.9	-1.1
	-21.6		5.9		99.4		-1.5
B: 発電機	-0.1	0.0	14.3	8.4	97.5	95.3	2.2
	0.0		12.6		95.5		0.2
C: ホイールローダー	21.2	21.8	5.6	5.4	99.7	100.2	-0.5
	21.4		5.4		99.3		-0.9
合計					103.9	104.2	-0.3
					103.2		-1.0

*1 マイクロホンアレイの音圧から分析した値

*2 単独の騒音計による測定から計算した値

*3 10秒間の平均値

上段:バンドパスフィルタをかける前

下段:バンドパスフィルタをかけた後

初に一定の距離を仮定して 0.1° ピッチで方向をずらして遅延和を計算し、次に極大点(複数)の方向で距離を 1.1 倍ピッチで変化させ遅延和が最大になる点を音源位置とした。平面内での音源位置の絞り込みのアルゴリズムについてはデータ解析を進めながら簡素化し計算負荷を小さくしていった。計算の手順は①遅延和の計算、②バンドパスフィルタ、③極大値とした。

なお、本アルゴリズムは人が音の位置を認知したり、特定の音を聞き取ることができるのは脳の中に外界と対応する空間があり音源の位置により反応する部位が異なると発想したことに基づいている。

4-2 バンドパスフィルタ

バンドパスフィルタは 250-4,000Hz バンドパス、101 段でハミング窓とした。建設機械の標準スペクトル(式-1)はこのフィルタを通すことで図-10のようにカットされオーバーオールで 1.0dB 少なくなる。図-10は音のエネルギーに面積が比例するように表現した。

4-3 無響室固定周波数音

図-6 の配置で無響室において音源Aから 500Hz 100dB、音源Bから 1000Hz 100dB、音源Cから 2000Hz 100dB の音を発生させ分析した結果、音源A、Cの誤差は 0.1dB だったが音源A、Cに挟まれた音源Bの誤差は 1.8dB となった。音源Bの精度が悪い原因として、それぞれ整数倍の固定した周波数を用いたため干渉の影響を受けていることが考えられる。音源A、B、Cともに 100dB で無相関の 1000Hz のノイズを発生させて分析した結果、0.2~0.3dB の誤差に収まった。無響室の実験で、手法の妥当性を確認した。

4-4 半無響室建設機械音

地表面の反射があり、大きさが変化し、低周波分・高周波分が混在する条件での分析の実証のために半無響室で建設機械の音を模擬的に発生させて実験を行った。音源は図-6の配置でAから油圧ショベルの掘削音(変動音)、Bから発動発電機の音(定常音)、Cからホイールローダーによる岩石運搬の音(変動音)とした。図-9の左側のグラフはある時刻における方向別の

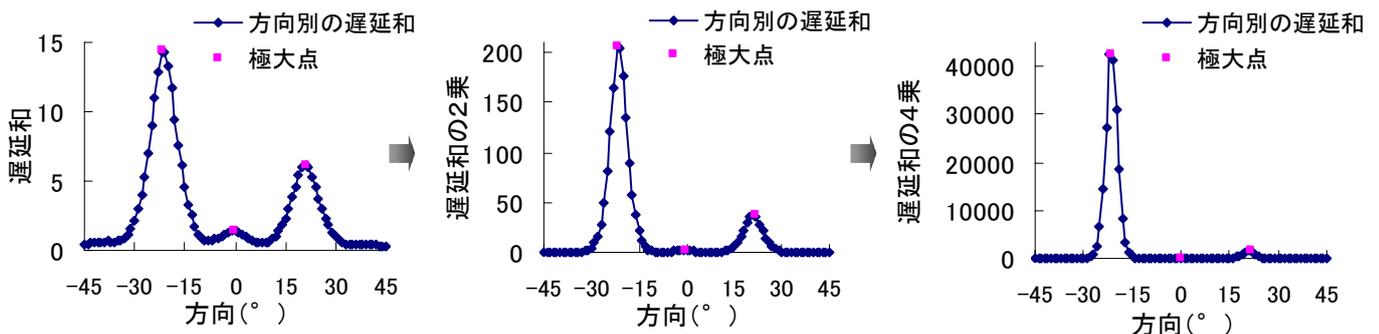


図-9 主音源位置の明確化

遅延和の例である。3つの山は左から油圧ショベル、発動発電機およびホイールローダーの音となる。A、B、Cから同時に発生させて10秒間分を分析した結果が表-1である。正解値はあらかじめ各単独音をマイクロホンアレイの中心の位置で測定した値から計算したものとした。表-1の上段がバンドパスフィルタをかける前である。A、Cはほぼ分析できていると考えて良い。しかし、音源Bの分析値は正解値+2.2dBとなった。これはA、Cからの低周波分の影響を受けているためと考えられる。下段は250-4000Hzのバンドパスフィルタをかけた後の分析値である。音源Bの正解値とのずれは縮小されている。3音源の合計はバンドパスフィルタなしで正解値-0.3dB、バンドパスフィルタをかけた後で正解値-1.0dBとなった。バンドパスフィルタをかけることで0.7dB小さくなり、4-2での想定値と同程度となった。

また、本研究の目的とは異なるが表-1にあるように音圧から音源の位置も分析できた。音源方向の分析精度は良好で誤差はおおむね0.5°以下となった。

4-5 屋外建設機械音

土木工事現場には風、地表面の反射、温度変化など分析値に誤差を与える多くの要因が存在すると考えられる。また音は高周波分および低周波分を含み大きさが変化する。さらに音源は点でなく移動する。このような厳しい条件での実現性を調べるため屋外で建設機械を稼働させて分析した。建設機械は写真-2にある油圧ショベルとした。単独の建設機械でもショベル、ブ

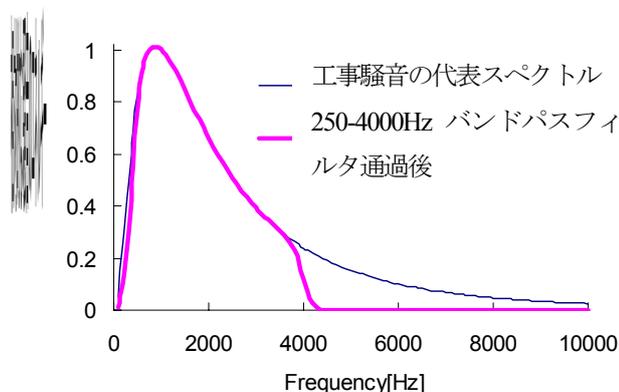


図-10 建設工事代表スペクトルにバンドパスフィルタを適用

ームおよびエンジンと音源が複数存在する。

図-11は1.0秒間の方向別騒音の計算例である。建設機械が模擬作業を行い音源が移動するので分析は0.1秒単位としている。グラフの左側からバケット音、ブーム音、エンジン音のピークがみうけられる。図-12は15秒間の分析結果である。この事例では騒音レベルの合計値が正解値-2.4dBとなった。他にも音源までの距離を変えた実験では-3.8dB、マイクロホンアレイの向きをバケット側に変えた実験で-4.1dBとなるなど大きな誤差が生じた。この誤差のうち1dB程度は4-2で想定したバンドパスフィルタをかけたことによるもので1dB程度は遅延和の過程によるものと考えられる。残り0.4~2.1dB程度の誤差の主要因として音源の移動が考えられる。音源が移動しないエンジン音だけの実験では誤差が-1.4dBとなりバンドパスフィルタと遅延和によると想定される誤差2dBと同程度となった。この誤差はマイクロホンアレイによる音源別の分析値の合計値と単独の騒音計の測定値の差で補正することとした。図-12の測定では表-2のように補正したバケット音71.1dB、ブーム音63.9dBおよびエンジン音70.2dBを音源別の騒音とみなす。

4-6 音源別の音の再生

本研究の目的とは異なるが音源別の音を再生することもできる。図-13は4-5の実験における建設機械の音からエンジン音とバケット音を分離した波形の例である（ブーム音は小さく出現頻度が小さいため分析を省略した）。再生すると良好に分離できていると聞き

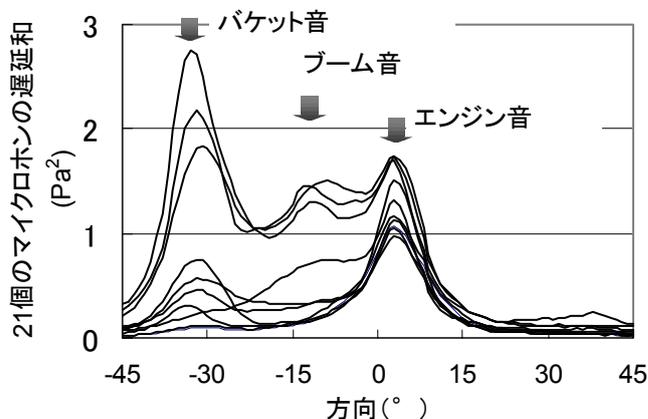


図-11 屋外建設機械稼働音の分析 0.1秒×10

取れる。道路を通行する様々な車両のタイヤ/路面音の抽出への応用なども期待できる。

4-7 低周波音源探査

本マイクロホンアレイは全長が 2m であり 100Hz 以下の低周波音は波長が 2m以上となるので図-4 では指向性がほとんどなく音源探査はできない気がする。

しかし、遅延和は音源方向で最大になるはずなので低周波音でも音源探査ならできるはずである。今回、無響室で250Hzの単音源の方向は誤差1.3°で分析できた。また図-9の中央および右側のグラフは遅延和を2乗、4乗したもので、単純な操作でも見かけ上、主音源方向の分解能を上げることもできる。

以上から、低周波音の音源探査を以下の方法で行うことが可能と考えている。1)低周波用のマイクロホンを使用する。2)観測時間を長くして精度を上げる。

5 まとめ

水平に配置した直線マイクロホンアレイ(延長2m、21個)を使用し、音源から7m程度、離れた位置から音源別の騒音発生量を分析する方法を考案した。

無響室および半無響室においてスピーカーから発生させた3音源を分析できることを確認した後、油圧ショベルを用いた屋外実験でエンジン、ブームおよびバケットの音源別の騒音発生量を分析した結果、分析値の合計値は単独の騒音計の測定値より2.4~4dB程度小さくなった。分析値が小さくなった要因として1dB程度は遅延和をかけたことによるもの1dB程度はバ

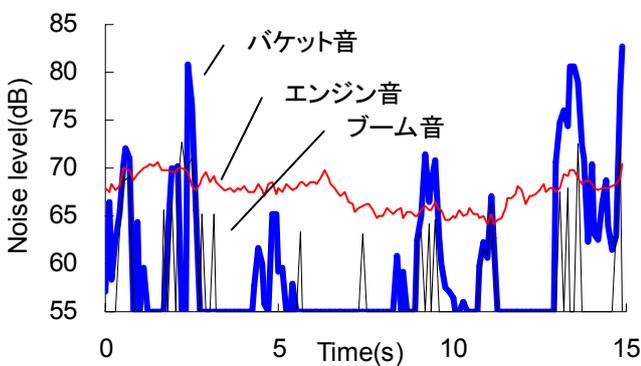


図-12 音源別の建設機械音

表-2 音源分析の例(2)

音源	A特性実効騒音レベル(dB)			分析結果 (補正後)
	分析結果 (補正前) ^{*4}	正解 ^{*5}	補正值	
バケット	68.7	-	-2.4	71.1
ブーム	61.5	-	-2.4	63.9
エンジン	67.8	-	-2.4	70.2
合計	71.7	74.1	-2.4	74.1

^{*4} マイクロホンアレイの音圧からの分析値

^{*5} 単独の騒音計の計測値

ンドパスフィルタをかけたことによるもので残り 0.4~2dB程度は主に音源の移動によるものと考えられる。この誤差については単独の騒音計の測定値の差で補正することで音源別の騒音発生量とみなすこととした。

なお、本研究の目的外であるが音源の位置が音圧から分析できることや音源別に音を再生できることもできた。さらに低周波音の音源探査の可能性も見出すことができた。土木工事騒音以外の他分野での応用も期待できる。

参考文献

- 1) 日本音響学会建設工事騒音予測調査研究委員会: 建設工事騒音の予測モデル“ASJ CN-Model 2002”, 日本音響学会誌 58 巻 11 号, pp.711-731, 2002.11
- 2) H.Yoshinaga, T.Yoshida and A.Hayashi: Analysis of individual machine noise in construction, The 33rd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, 2004.8
- 3) 吉永弘志, 林 輝, 山元 弘: 工事における機械別騒音発生量の分析, 騒音制御, Vol.29, No.6, pp.493-500, 2005

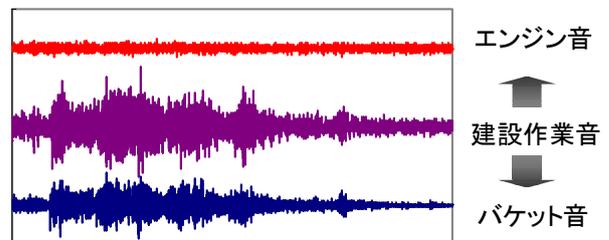


図-13 音源別に騒音を分離