

6. 災害廃棄物再生利用促進に関する調査・研究 ＝打音による材料特性評価に関する基礎的検討＝

中村吉男¹⁾、倉橋奨¹⁾、古木宏和²⁾、小島淳一³⁾

1) 愛知工業大学、2) 日本工営(株) 中央研究所 先端研究センター、3) (株)アイコ

1. はじめに

地震や土砂災害および風水害等によって排出された廃棄物（災害廃棄物）は事業活動によって発生した廃棄物ではないことから「一般廃棄物」に該当し、その処理責任は地方公共団体（区市町村）に帰属する。今後発生することが確実視されている南海トラフ巨大地震では、太平洋沿岸の広範囲にわたり多量の災害廃棄物が発生されると予測されており、その発生量¹⁾は東日本大震災の経験を基に推計すると約3億トンにおよび、この内約1億トンが土砂混合廃棄物であると想定されている。災害からの早期復旧・復興のためには、これら土砂混合廃棄物を復興資材（盛土材）として処理し、公共性の高い土地用途に積極的に利用することが不可欠である。一方、盛土に関する最近のトピックとして、令和3年7月に熱海で起きた土砂災害は盛土の規制が不十分であったことが原因の一つとして挙げられ、盛土等を行う土地の用途やその目的に関わらず危険な盛土等を全国一律の基準で包括的に規制する「宅地造成及び特定盛土規制法」（通称盛土規制法²⁾）が令和5年5月26日に施行された。そして、令和7年度より各自治体において本格的な運用・規制事務が開始されようとしている。土砂混合廃棄物を盛土材料に流用する場合に限らず、盛土地盤の良否を判定するためには、現場締固めエネルギーレベルの管理を前提とした地盤の剛性・強度を指標とした管理が有効であり地盤の剛性を簡易的に評価できる落球探査法の有効性が提案³⁾されている。この落球探査法を用いた調査・研究事例では、①落球の加速度波形をAI画像解析することにより地盤の土性及び地盤物性の類型化が図れること、②地盤の土性に応じた落球音が存在し加速度波形と音波形のピークと連動していること、③地盤特性を類型化するうえで、落球音の卓越周期、重心周波数が有効な因子となり得ることなどが報告されており、この中で、③の落球音における地盤特性の評価は新たな知見であるが、落球音を精度よく取得するためにはさらなる検討が必要であることが指摘されている。本研究では、落球音を含めた材料の打音測定手法の確立と打音の周波数特性から材料特性を評価することを目的とし、その前段として携帯電話を用いて集音した純音（音叉）の周波数特性から簡易集音手法の実用性評価を行い、次いで、この集音システムを用い落球探査時の重錘音による土性区分並びにハンマー打音による各種材料の周波数特性について報告するものである。

2. 純音の周波数特性に着目した音の簡易集音手法の実用性評価

2.1 集音システムと打音実験の概要

（1）携帯電話の内蔵マイク

iPhoneに内蔵されているマイク⁴⁾は、図－1に示す様に「底面」「前面上部」「背面上部」の3か所に配置されており、「底面マイク」は、通話時に口元近くにあることから、発した声を集めるメインマイクの役割を果たしている。録音時や音声アシスタント（Siri）使用時の集音も、底面のマイクで行われ、iPhoneを手で平行に持ち、底面に向かって話しかけている人を見かけるが、意味のある実用的な利用方法と言える。「前面上部マイク」は、通話時に耳にあてる部分で、相手の声を聞くスピーカーであり、底面のマイクと少し離れた場所にあることで、周囲の雑音などを感知し、音を下げるといふノイズキャンセリングの役割を担っている。「背面上部マイク」は、前面上部と同様に、ノイズキャンセリングのために配置されており、前面上部の補助として、逆方向の雑音などを感知し、音を下げるといふ役割を担っている。

Androidマイクは主に上下2箇所に配置されている機種が多い。音の特性として、低音は減衰が早く指向性が低い集音が難しくなり、高音は指向性が高くマイクに対して距離があれば反対側のチャンネルにも届き集音がしやすくなると考えられる。ここで、指向性とは、音、電波、光などのエネルギーが空間中に出力される際に、その強度が方向によって異なる性質を指し、大別して一方向だけの集音を行う単一指向性、前後の集音を行う双指向性、360°どの角度に対しても指向性をもつ無指向性の3種類に区分される。携帯のマイクは、その内蔵配置から考えて単一指向性を有しているものと考えられる。また、機種毎によりマイクの性能、OSシステムによるノイズキャンセ



図－1 iPhoneの代表的な内蔵マイク配置⁴⁾

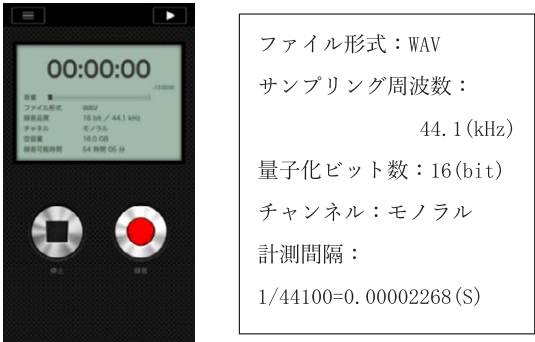
リング機能等も様々であり、携帯電話を用いた打音収納システムを構築するに当たっては、機種ごとの集音特性を調べて適正および有効性の評価を行う必要があるものと考えられ、本研究では、①iPhone15、②iPhone13promax、③Android Xperia10Vの3機種について、音叉を音源とした純音の周波数特性を比較検討し各機種の集音特性の評価を行った。

(2) 実験音源

物体が振動すると空気中の圧力に変化が起こり、波（疎密波）が生じる。この波が人間の耳の鼓膜を揺らすと人間はそれを音として感知する。また、音の特性は振動を起こすもの（音源）とその振動を伝えるものにより変化し、音源が同じでも音を伝える媒体が異なれば違った音として認識される。音の違いは、3つの要素（高さ、強さ（大きさ）、音色）から識別され、『高さ』は、振動の速さで決まり、振動数が多いほど音は高くなり、少ないほど音は低くなる。『強さ』は、振動の大きさで決まり、強い（大きい）振動の方が大きい音として聞こえる。コンクリートなど固く振動し難いものは、強く叩いても大きい音が発生し難い。『音色』は、音の波の形によって変わり、倍音の含み方によって変化する。人の声がみんな違うように聞こえるのは、体や喉の構造でそれぞれ違う倍音を生んでいるためであり、換言すれば、倍音を全く含まない純音は、高さや強さは違っても同じように聞こえる。「澄んだ音」とは、音叉や時報などの倍音を含まない「純音」と呼ばれるもので、人の可聴範囲と倍音の関係から、高い音ほど澄んだ音に聴こえる。



図－2 音源として使用した音叉



図－3 PCM録音の概要⁵⁾

人が音として知覚できる周波数の範囲は概ね20～20,000Hzと言われており、普段の話し声は男性で120～200Hz、女性で200～300Hzであり、破裂音や「さしすせそ」などの摩擦音を含むと20,000Hzに達する。

本研究では、純音の周波数特性に着目し図－2に示す30、128、256、440Hzの音叉を音源とし、各機種で収録した周波数特性を比較検討することにより携帯電話の集音機能について吟味・検証した。

(3) 音声ファイルの収録とデジタル化

携帯電話に内蔵されているマイクロフォンユニットの振動版に届いた音は電気信号に変換される。これをフリーソフトであるPCM録音⁵⁾を用いて音声ファイル（WAVファイル）として収録した。図－3にPCM録音の概要を記す。また、収録した音声ファイルは、フリーソフトであるGOLD WAVE⁶⁾を用いてデジタル化し、周波数解析データとして整理した。

2.2 集音された純音の周波数特性

(1) 音波形の特徴

図－4は、計測された音波形を横軸に時間（s）、縦軸に正規化された音圧（An）をとりに整理したものである。計測処理された音圧は正規化されており、音の大きさ自体を比較することはできないが、基調周波数と正規化された最大音圧の関係は、表－1に示す通りとなり各機種で違いが見られ、Androidによる音圧はiPhoneの音圧より小さな値が出力されていることが分かる。ただし、iPhone13とiPhone15にも音圧の差はみられ、加えて周波数に依存する傾向は認められないことから、音圧に関しては機種ごとに特異性を有しているものと思われる。一方、波形の滑らかさは440,256Hzで高く、128Hzの波形は高周波のノイズが乗った正弦波として検知されている。また、30Hzの波形は音叉自体の揺動等に起因するうなりを伴う合成音が観測され、30Hzの基調周波数に比べ360Hz程度の高周波が卓越した波形を呈している。ただし、波形成分には図中○で示す様に30Hz周期成分が検知されていることから本節（3）項で示す低域通過濾波処理等を施すことにより基調周波数を抽出することは可能であるものと考えられる。

表－1 各機種で計測された正規化音圧の最大値

基調周波数	Android Xperia10V	iPhone13pro max	iPhone15
440Hz	0.014	0.07	0.008
256Hz	0.04	0.02	0.49
128Hz	0.01	0.2	0.62
30Hz	0.02	0.21	0.38

表－2 各機種で計測された卓越周波数

基調周波数	Android Xperia10V	iPhone13pro max	iPhone15
440Hz	440	436	439
256Hz	253	256	256
128Hz	127	127	129
30Hz	359	366	357

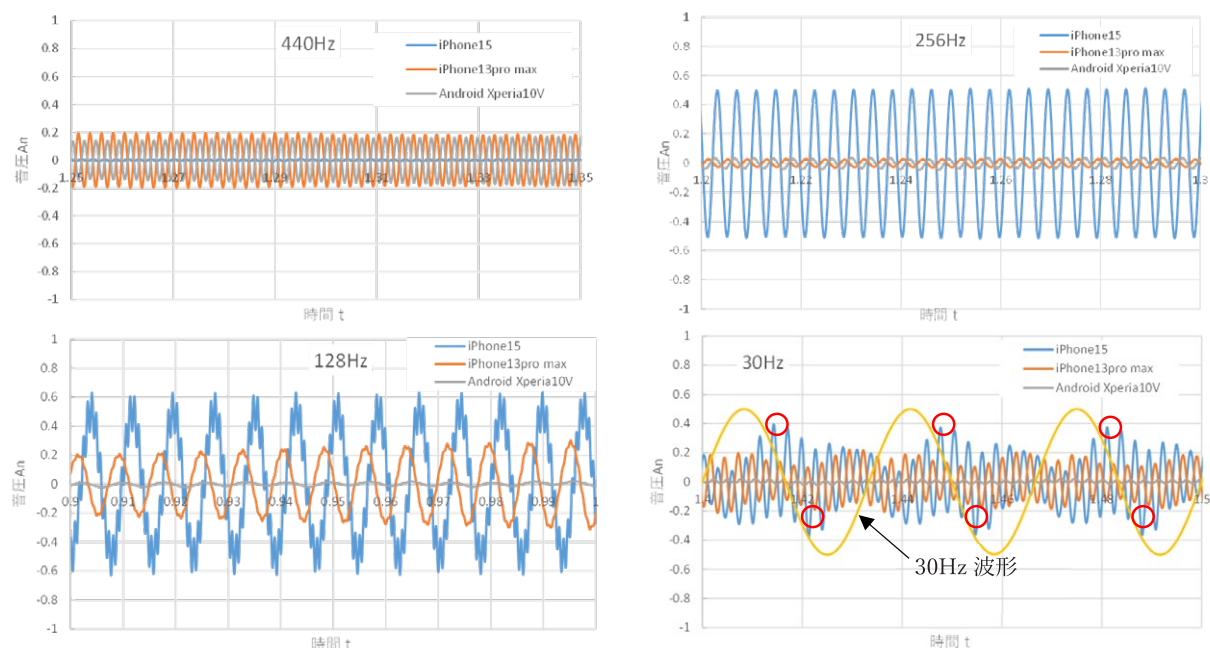


図-4 音波形（時間～正規化音圧の関係）

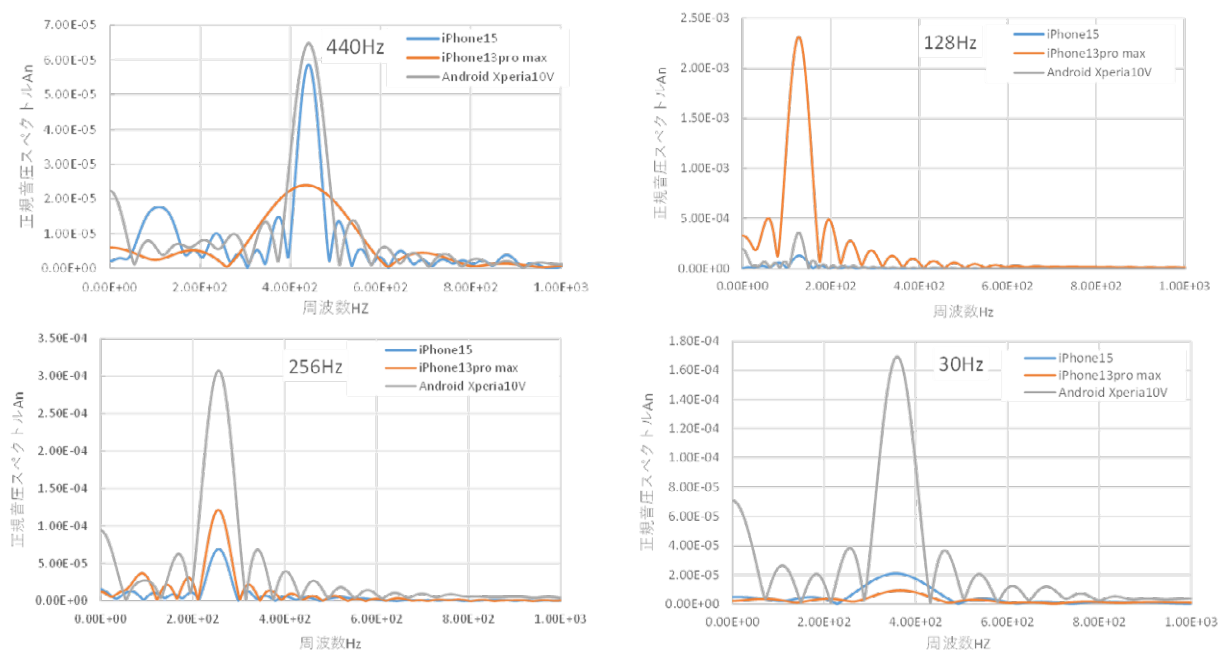


図-5 音波形のフーリエスペクトル

(2) 周波数特性

音波形をフーリエ変換し図-5に整理した。図に示す通り計測された音波形は、サイドローブを伴い明瞭なメインローブが出現し、これより卓越周期を読み取ると、表-2に示す結果が得られた。前述したように各機種種の正規化音圧には違いが見られるが、卓越周期はほぼ一致した結果が得られており、携帯電話による集音機能は十分具備しているものと判断される。

(3) 低域通過濾波処理（ローパスフィルタの適用）

ローパスフィルタは、時系列データから高周波数のデータを除去する変換で、一般にノイズ除去処理にとして用いられる。その処理手法には、①移動平均法、②周波数空間でのカットオフ、③ガウス

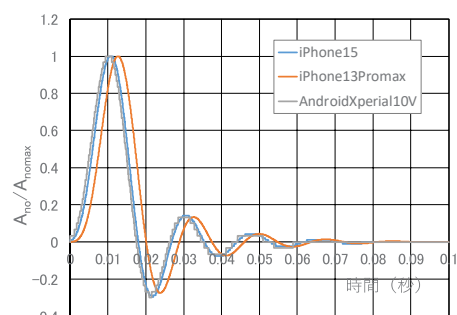


図-6 ローパスフィルタを適用した波形

畳み込みと④一次遅れ系の4手法があり、本研究では、②の周波数空間でのカットオフによる方法を適用した。

図-6は、30Hz音叉に対しローパスフィルタを適用した波形を示したものであり、縦軸は、出力された正規化音圧 (Ano) を最大値 (Anomax) で除して正規化し整理している。波形は機種によらず一致した形を呈しており、図より一次固有周期を読み取ると $t_1 \approx 0.027 \sim 0.029$ s となる。これより固有周波数は $f_p \approx 1 / (0.027 \sim 0.029) = 37.0 \sim 34.5$ Hz が得られ、いずれの機種においても音叉の基調周波数に近い値を示す波形が計測されていることが分かる。これより材料の周波数帯を吟味し、周波数帯で特定の周波数帯域のみを通過させ、それ以外の周波数帯域は減衰させるバンドパスフィルタを適用することで、材料個々の周波数特性をより精度よく評価することが出来るものと判断される。

3. 音による材料特性評価

3.1 落球探査時における重錘衝突による土性区分

落球探査法は、加速度センサーを内蔵した半球状の金属製重錘を用いるサウンディング手法である。図-7は加速度波形と上記した集音システムで計測した重錘音の波形を比較したものであり、重錘音と重錘加速度の間にはかなり高い相関があることが分かる。また、砂地盤及び礫質土地盤において計測した重錘音の波形から算出した卓越周期と正規化音圧の関係は図-8に示す通りであり、両地盤の卓越周波数には特徴があることからこれを指標とした地盤の土性判定の可能性が示唆される。

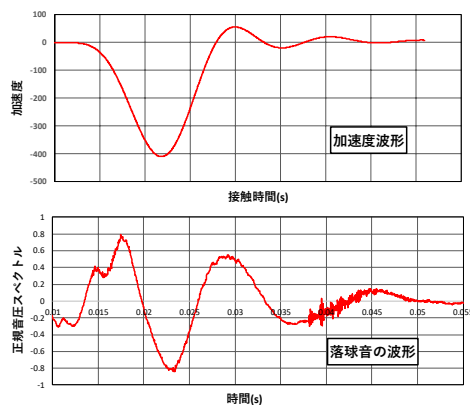


図-7 加速度波形と音波波形の比較例 (砂地盤)

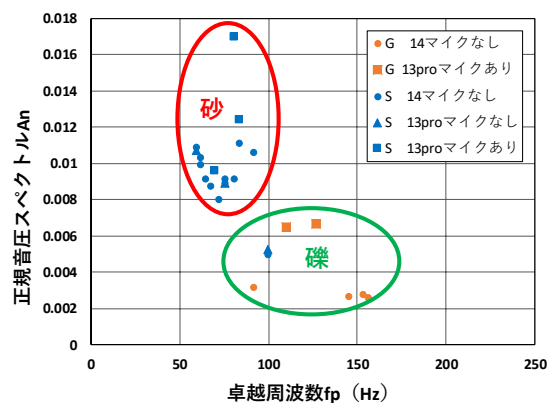


図-8 卓越周波数と正規化音圧の関係

3.2 ハンマー打音による各種材料の周波数特性

地質ハンマーによりアスファルト舗装、岩石 (花崗岩及び砂岩)、レンガ壁、コンクリート壁を打診し、一連のシステムで計測した打音波形の周波数解析結果から各材料の卓越周期を整理すると図-9に示す通りとなる。各材料の卓越周期は、アスファルト舗装で1,000Hz、岩石で1,000~2,000Hz、レンガ及びコンクリート壁で3,000~4,500Hzとなっておりそれぞれの材料の特性が卓越周期の変化に現れているものと考えられる。打撃音のような過渡的な音の基本的な特性には周波数以外にも振幅や減衰、位相などに現れるので、今後ともデータを集積し、音による材料検査の有効性を検証したいと考えている。

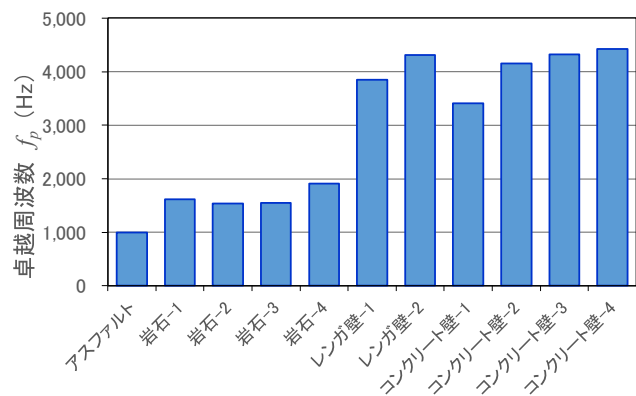


図-9 材料毎のハンマー打音による卓越周期

参考文献

- 1) 環境省：災害廃棄物の発生量の推計，平成25年度巨大地震発生時における災害廃棄物対策委員会第4回配布資料2，2014
- 2) 宅地防災：「宅地造成等規制法の一部を改正する法律」（盛土規制法）が公布されました～危険な盛土等を全国一律の基準で包括的に規制します！～国土交通省 (mlit.go.jp)（参照 2025-04-30）
- 3) 中村吉男他：災害廃棄物由来の分別土砂の締固め特性・締固め管理，基礎工，2022.4
- 4) Phoneのマイクはどの機種にも3つある。https://media.voista.jp/life/iphone-microphone（参照 2025-04-30）
- 5) PCM録音の使い方！録音や保存・共有方法のまとめ！https://dc.wondershare.jp/（参照 2025-04-30）
- 6) GoldWave https://goldwave.com/release.php（参照 2025-04-30）