論文　音の透過特性を用いた道床バラストの健全度評価方法の開発

福中 力也[1]・中村 貴久[1]・桃谷 尚嗣[1]・木次谷 一平[1]・北川 敏樹[2]・宇田 東樹[3]

[1]正会員　（公財）鉄道総合技術研究所　軌道技術研究部　軌道・路盤

（〒185-0034東京都国分寺市光町2-8-38）
E-mail: fukunaka.rikiya.56@rtri.or.jp

[2]正会員　（公財）鉄道総合技術研究所　環境工学研究部　　騒音解析

[3]非会員　（公財）鉄道総合技術研究所　環境工学研究部　　騒音解析

バラスト軌道は，列車の繰返し荷重やつき固め保守作業によりバラストの破砕・細粒化が進行することから，経年によりバラスト内の細粒分含有率が高くなると，排水性が低下して，降雨時には飽和度が高くなり，強度が低下するとともに軌道沈下が急進しやすくなることが知られている．一方で，現地におけるバラストの定期検査は，バラストを掘削して目視での判断が基本となっており，検査者の主観が影響して判定にばらつきが生じやすい．そこで，一般的に知られているバラストの持つ吸音効果に着目し，音の透過特性を用いたバラストの健全度評価方法を開発した．本評価方法により，バラストを非掘削で列車荷重が作用するまくらぎ直下の道床状態を把握することが可能となった．

Key Words : *ballast condition,sound transmission characteristics, ballast inspection, field test*

1.　はじめに

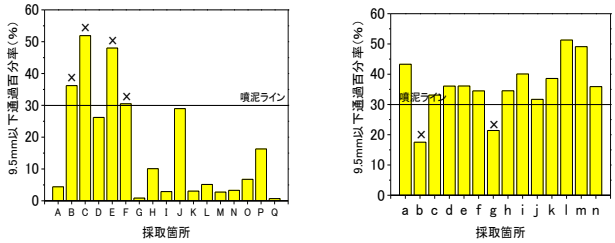
バラスト軌道は，繰返しの列車荷重やタイタンパ等によるつき固め補修により，バラストの破砕・細粒化が進行する．経年により，バラスト内に混入する細粒分が増加して泥土がまくらぎ下から噴出（以下，噴泥）するようになると，沈下進みが増大することから，新しいバラストに交換することが保守量低減の基本的な対策となる．しかし，バラストの定期検査はバラストを掘削して目視により判断する方法が一般的であり，掘削作業に労力を要するとともに，定量的ではないうえに検査者の主観による判定のばらつきが生じるという課題があった．一方，近年では地中レーダーにより連続的にバラスト状態を調査する方法[1)]が提案されているが，測定装置が高価であり，測定結果の判定には熟練した技術が必要である．そのため，客観的な道床検査やバラスト交換の合理的な保守計画の策定のために，バラストの劣化状態を定量的かつ迅速に評価する低コストな測定手法が求められてきた．そこで，今回の研究では，バラストの劣化の程度を迅速かつ定量的に評価する方法として，バラスト内部を透過する音の大きさを用いる方法を検討した．

2.　従来の道床健全度の評価指標

保守頻度が少ない箇所のバラスト状態は，粒度分布が基準粒度に近く，バラストの役割である列車の振動騒音の低減，軌道整備の容易性やバラスト軌道の排水性の確保等を担っている．一方で，経年したバラストは破砕・細粒化して粒度分布が基準粒度から乖離し，細粒分含有率が増加すると排水性が低下して噴泥が生じ，バラストの役割を果たせなくなることが分かっている．

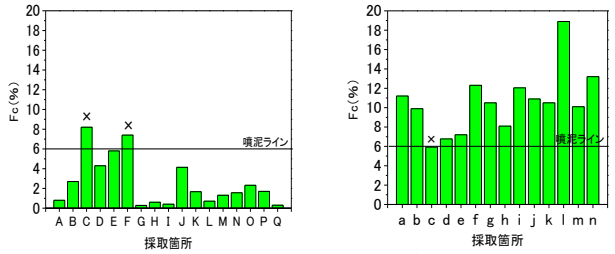
既往の研究や過去の文献より，粒度分布から道床の健全度を評価する指標はいくつかあり，代表的なものを以下に示す．

- 粒径9.5mm以下の通過百分率による評価
  粒径9.5mm以下の通過百分率が30%を超過すると急激に排水性が悪化する．（国鉄道床篩分作業基準より）
- 細粒分含有率（Fc）による評価[2)]
  粒径0.075mm以下の通過百分率が6%以上になると噴泥発生の可能性が増加する．
- Fouling Index（FI）による評価[3)]
  粒径0.075mm以下の通過百分率と粒径4.75mm以下の通過百分率の和が20以上になると噴泥が発生する．



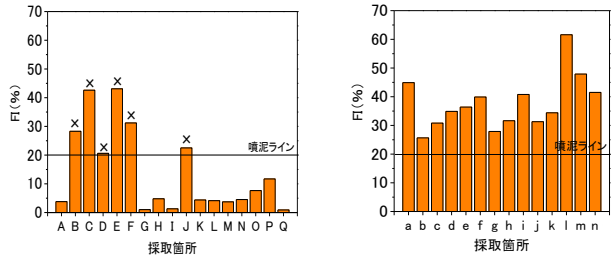
(a)未噴泥箇所の整合性　(b)噴泥箇所の整合性

図-1　9.5mm以下の通過百分率による評価との整合性



(a)未噴泥箇所の整合性　(b)噴泥箇所の整合性

図-2　Fcによる評価との整合性



(a)未噴泥箇所の整合性　(b)噴泥箇所の整合性

図-3　FIによる評価との整合性

これらの評価指標に対して，これまでに現地のまくらぎ直下において，まくらぎ底面から深さ200mm付近までの範囲で採取した試料の粒度分布と採取箇所の道床状態の観察結果（噴泥・未噴泥）を比較し整合性を確認した．その結果（**図-1**から**図-3**），最も現場の道床状態との整合性が高かったものは，細粒分含有率による評価指標であったことから，本研究に取り組むにあたり，細粒分含有率（以下，Fc）を健全度判定する上での指標とした．

3.　バラストの音特性に関する基礎検討

一般的に，遮蔽物に向かって発射された入射音は，反射音と透過音および遮蔽物に吸音されるエネルギーとの間でエネルギー保存則が成り立つ．遮蔽物をバラストに置き換えた場合の音の透過イメージを**図-4**に示す．バラストの吸音作用は，バラスト粒子間の空気に伝達された波動エネルギーが空気と接するバラスト粒子表面との摩擦により熱エネルギーに置換され減衰されることで生じる[4]．そのため，劣化バラストは細粒化により，バラスト粒子の表面積が大きくなるため，吸音作用が大きくなり，透過音が小さくなると考えられる．

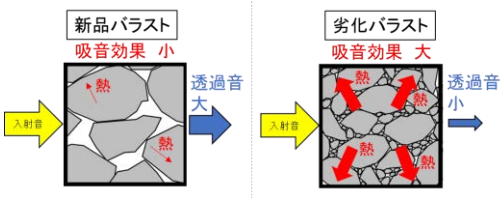


図-4　道床内を音が伝搬するイメージ

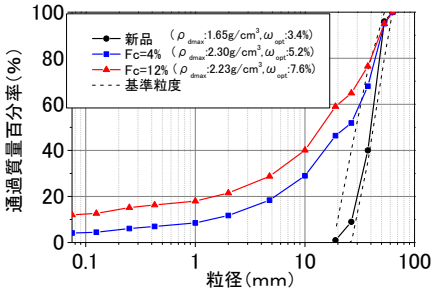


図-5　試料の粒度分布

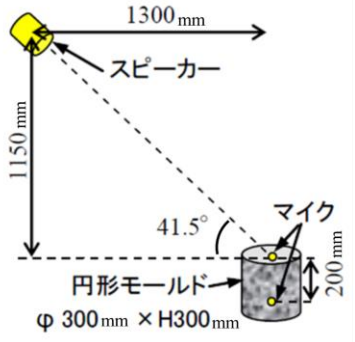


図-6　測定概要図

バラストを透過する音の基礎的な検討を行うために，円柱モールドを用いた透過音の測定試験を実施した．円形モールドは，深さ300mm，直径300 mmであり，劣化したバラストを模擬した細粒土混入バラストを締固め度90%となるように壁打ちバイブレータで締め固め，供試体を作製した．細粒土混入バラストは，Fcが6%を超えると噴泥が発生するリスクが高くなることを参考に4%（噴泥に至らない程度）および12%（噴泥に至る程度）の2種類となるように，バラスト（安山岩），クラッシャラン（安山岩），カオリン粘土を混ぜ合わせて作製した．作製したバラストの粒度分布を**図-5**に示す．使用する試料は気乾状態とした．

測定方法は，道床表面および深さ200mmの道床内部にマイクを埋設し，**図-6**の位置にスピーカーを設置して，入射音としてホワイトノイズを発生させ，マイクの音を騒音レベル計により測定した．透過音はJISC1514:2002に則り，1/3オクターブバンドにて帯域ごとの騒音レベルを求めた．

図-7にバラスト表面とFc=4%およびFc=12%のバラスト内部の各帯域における騒音レベルを，**図-8**にバラスト表面と内部の差分（吸音作用）を帯域ごとに示す．Fc=4%およびFc=12%ともに，2.5kHz以上の高い周波数帯域で

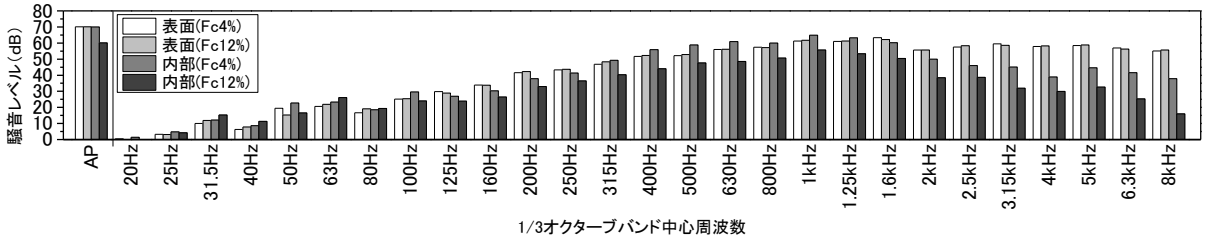


図-7　道床表面と道床内部の透過音（1/3オクターブ）

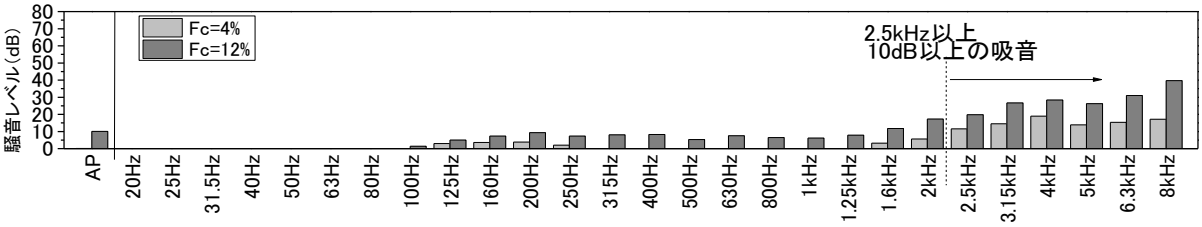


図-8　吸音作用（表面-内部の騒音レベル差分）

10dB以上の吸音作用が発現していることを確認した．また，Fc=4%よりもFc=12%の方が透過音レベルの差分が大きく，吸音作用が大きいことを確認した．

4.　透過音法（表面方式）の検討

(1)　試験概要

前述したバラストの音の透過特性を活用してバラスト状態を評価する方法として，道床表面にマイクを設置してバラストの透過音を測定する方法（以下，透過音法（表面方式））を検討した．測定概要を図-9 に示す．測定手順は以下の通りである．

・スピーカーとマイクを別々の容器に入れて，容器の開放面を道床表面側にして隣接して設置する．
・スピーカーからホワイトノイズを発生させる．
・バラスト内を透過した音をマイクおよび騒音レベル計で測定する．

それぞれの容器には，凹凸のある砕石表面と容器との音漏れを無くすため，境界面に吸音スポンジを設置した．マイク側の容器は，容器内を拡散音場とするため，平行面のない多面体の容器を用いた（図-10）．発生させるノイズ音はAP97dB程度の固定音（以下，測定用ノイズ）とした．評価する騒音レベルは，前章にてバラストの吸音作用を確認した2.5kHz-8kHzの騒音レベルを合成したパーシャルオーバーオール（以下，POA透過音レベル）の10秒間の測定の平均値とした．

試験に用いる試料は，基準粒度範囲内の新品バラスト（Fc=0%）と前章図-2の粒度分布と同じFc=4%およびFc=12%に粒度調整したバラストである．

供試体は，0.9m四方の試験用土槽（深さ450mm）に各試料を投入し，締固め度が90%となるようにプレートコンパクターで締め固め，層厚は400mmとした．各供試体

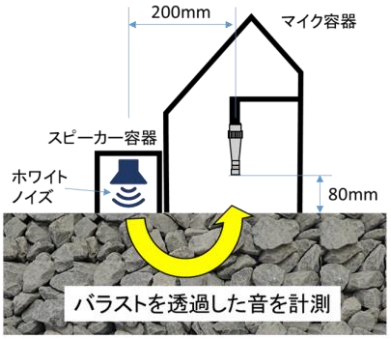


図-9　透過音法（表面方式）の測定概要

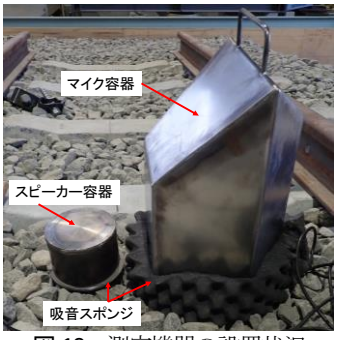


図-10　測定機器の設置状況

図-11　Fc=0%の供試体

図-12　Fc=4%の供試体

図-13　Fc=12%の供試体

を図-11から図-13に示す.

営業線での雨天後の測定や道床密度の高い箇所での測定を想定し，表-1 に示す測定試験を実施した．まず，締固め度 90%の気乾状態で測定試験を行った後に，土槽上からじょうろにて散水し，締固め度 90%の湿潤状態での測定試験を実施した．各土槽の散水量は，新品バラストは，砕石の表面全体が濡れる程度の散水，Fc=4%および Fc=12%については，残留飽和となる含水比を目標に散水した．目標含水比と締固め度 90%の湿潤状態での測定を実施した際の実含水比を表-2 に示す．締固め度 90%の湿潤状態での測定後，Fc=4%と Fc=12%の土槽にて締固め度を 90%から 95%になるように土槽上面からタンピングランマを用いてさらに締め固めて，締固め度 95%の湿潤状態の測定試験を実施した．なお，締固め度 90%と 95%の湿潤状態の測定試験は、同日に連続して実施したため，含水比の変化はほとんど無いものと考えた．最後に，当該土槽を 15 日間自然乾燥させて気乾状態にて測定試験を実施した.

(2) 試験結果

図-14 に気乾状態における締固め度 90%の各試料において計測した 2.5kHz-8kHz までの各帯域における POA 透過音レベルと 1/3 オクターブバンド分析結果を示す．本測定方法では，前章の要素試験と同様に，2.5kHz 以上の周波数帯においてバラストの吸音作用を確認した．図-15 に，POA 透過音レベルと Fc との関係性を示す．細粒分含有率 Fc が増加するにつれて POA 透過音レベルが低下し，近似線で示す関係性が示唆され，バラストの細粒分含有率による吸音作用の違いを確認した．図-16 に，気乾状態・湿潤状態の比較と密度変化の比較の測定結果を示す．含水状態を比較したところ，新品，Fc=4%および Fc=12%のすべてのケースにおいて，気乾状態と湿潤状態で透過音レベルが 1dB 以下の差異であったことから，残留飽和度程度の含水比であれば水の影響は少ないことが分かった．次に，密度の違いに対して，Fc=4%では気乾状態の締固め度 95%で 90%よりも 2dB 程度小さく，Fc=12%では気乾状態・湿潤状態ともに締固め度 95%では 90%よりも 3dB 程度小さくなったが，POA 透過音レベルの 10%以内の変化であることから，±5%程度の密度変化では測定結果に大きく影響しないことが分かった.

以上より，気乾状態から残留飽和程度の含水状態の変化および締固め度 5%程度の密度の変化であれば，バラスト内の空隙の変化は小さいと考えられ，バラストの音の透過特性は，現場の含水状態や密度に影響されにくいことが示唆された．一方で，バラストの劣化に伴い細粒分が増加するほど透過音レベルが低下するメカニズムについては今後の課題である.

表-1 営業線を想定した試験概要

試験条件		新品	Fc=4%	Fc=12%
締固め度 90%	気乾	○	○	○
	湿潤	○	○	○
締固め度 95%	気乾	―	○	○
	湿潤	―	○	○

表-2 湿潤状態の測定条件

	新品	Fc=4%	Fc=12%
目標含水比	―	3.1%	5.9%
散水量	10L	21L	39L
測定時含水比	―	3.8%	6.6%

5. 透過音法（杭方式）の検討

(1) 測定方法

前章で述べた透過音法（表面方式）を応用し，より実用的な方法として，列車荷重が作用するまくらぎ直下の任意の深さでバラストの劣化状態を評価する方法として，まくらぎ両脇から中空杭を挿入して，片方の杭先端から音を出し，もう片方の杭で透過音を測定する方法（以下，透過音法（杭方式））を検討した（図-17）．杭間の間隔は，各種まくらぎ幅に対応できるように 330mm とし

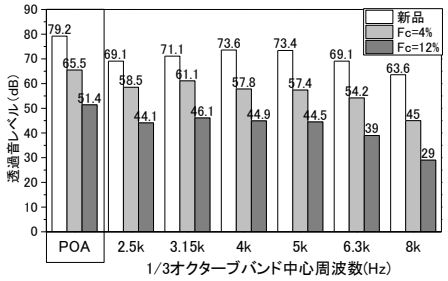


図-14 POA 透過音レベルと高音帯域の騒音レベル

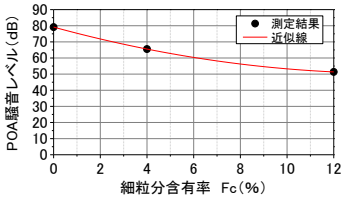


図-15 POA透過音レベルと細粒分含有率Fc

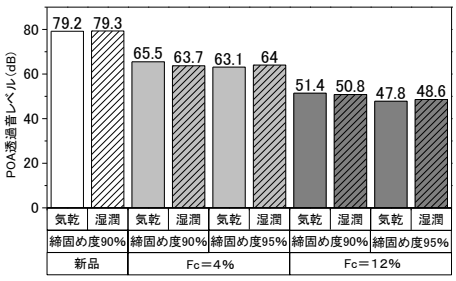


図-16 気乾・湿潤 密度変更後の測定結果

た．専用の中空杭は，JISA1405-2「音響管による吸音率及びインピーダンスの測定」の音響管の内径を基に，測定対象の周波数帯域上限の 8kHz が計測可能な内径 22mm の中空管とした．杭を打設する際は，打設用の芯杭（図-18）を中空杭に通し打設を行うことで，道床の細粒化が進み固結した層への打設を可能にした．入射音は前章と同様の測定用ノイズを用いた．透過音法（杭方式）で使用する測定治具を図-19 に示す．

(2) 要素試験の方法

透過音法（杭方式）の適用性を検討するために，直径 750mm の円柱モールドを用いて，Fc=0%（新品バラスト），Fc=4%および Fc=8%の細粒土混入バラストを想定した供試体を締固め度 95%，層厚 400mm の気乾条件で作製した．円柱モールドの境界条件が透過音に影響を与えることが考えられるが，相対的な評価として透過音の特性を確認した．ここで，バラスト粒度に関して，第

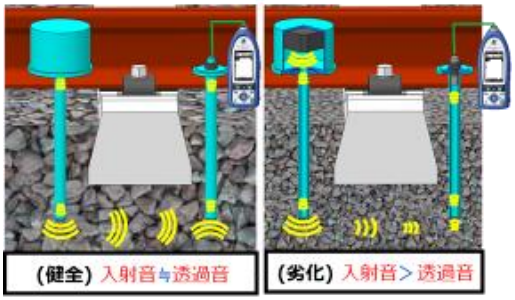


図-17 透過音法（杭方式）の測定概要

図-18 中空杭と打設用芯杭

図-19 透過音法（杭方式）測定治具一式

4 章では劣化の程度を極端に変化させたバラスト状態で検討するために噴泥に至る Fc=12%と噴泥に至らない Fc=4%で比較したが，本試験ではより高い測定精度が必要な条件で検討するため，細粒分を減らした Fc=8%と Fc=4%で比較した．各供試体の粒度分布を図-20 に示す．杭の打込み深さの違いによる測定値のばらつきの影響を確認するとともに，透過音法（表面方式）と同様に細粒分含有率 Fc が増加することで，POA 透過音レベルが低下することを確認するため，2 本の杭を表層深さ 50mm から 300mm まで 50mm ずつ打ち込み，透過音を測定した（図-21）．

(3) 試験結果

図-22に，POA透過音レベルと打込み深さの関係を示す．また，表-3に各供試体の平均値と標準偏差を示す．Fc=0%では，深さ方向の平均値が73.4dB，標準偏差は0.41であり，深さ方向に概ね同様の透過音レベルとなっておりばらつきは小さかった．Fc=4%およびFc=8%では，深さ方向の透過音レベルのばらつきがFc=0%よりも大きかった．特に，打込み深さが最も浅い50mm位置のPOA透過音レベルが最も高く，標準偏差を大きくする要因となった．これは，表層に近いことでバラストの外に音が漏れ，マイクがバラスト内外の音を収録したためと考えられる．そこで，打込み深さを100mm以深で整理すると，50mm以深よりも標準偏差が1 dB程度小さくなり，打込み深さ100mm以深の平均値はFc=4%が34.8 dB，Fc=8%が27.5dB，標準偏差はFc=4%が2.33dB，Fc=8%が1.52dBとなったことから，杭方式による測定は表層から深さ100mm以深であれば測定誤差は少なくなることを確認した．そこで，本測定方法では，深さ方向の細粒分含有率のばらつき，タイタンパのつき固め深さ[5)]や各種まくらぎ厚

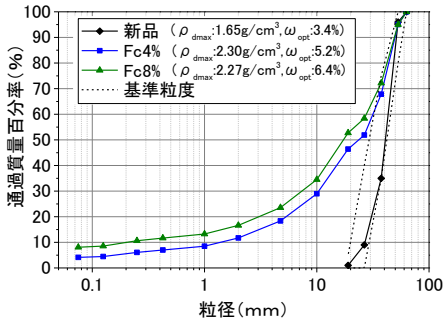


図-20 各供試体の粒度分布

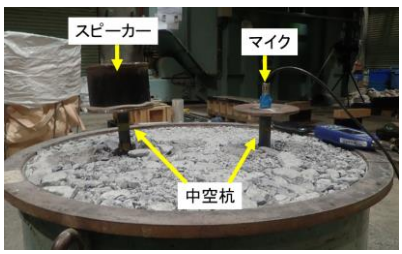


図-21 透過音法（杭方式）の試験状況

を考慮して，杭の打込み深さをまくらぎ下100mmの位置に設定することとした．

図-23に，打込み深さ100mm地点の透過音レベルと1/3オクターブバンド中心周波数の関係を示す．細粒分が増加することで，2.5kHz-8kHzの全帯域において，透過音レベルが低下することを確認した．

また，前章の透過音法（表面方式）の結果と比較（図-24）すると，Fc=0%では差分が5dB程度，Fc=4%以上になると差分が20dB以上となり，透過音法（杭方式）のPOA透過音レベルが全体的に小さいことがわかる．Fc=0%の差分については，音源とマイクの距離が離れているために音圧レベルが減衰したと考えられる．Fc=4%以上については，距離減衰以外に，透過音法（表面方式）では，隣接させたカバーの間で道床内をわずかにしか通らず，空気中に漏れ出た音がマイクに収音されている可能性があるのに対して，透過音法（杭方式）は2本の杭先が道床内にあるために，空気中に漏れ出た音の影響を最小限にし，道床内を伝った音のみを収録できることで，POA透過音レベルが小さくなったと考えられる．また，Fc=0%からFc=4%程度にかけての傾向として，POA透過音レベルの下がり幅が大きく，Fc=4%以降は緩やかに低下していく傾向を示した．噴泥に至る前の状態を把握する検査として有効であることが示唆される．以上のことから，透過音法（表面方式）と比較し，透過音法（杭方式）の方が対象バラストの劣化の程度をより精度良く評価できると考えられる．

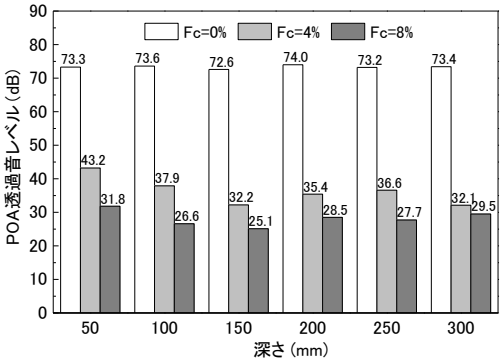


図-22　透過音法（杭方式）の試験状況

表-3　営業線を想定した試験概要

バラスト種類	打設深さ 50-300mm		打設深さ 100-300mm	
	平均値 (dB)	標準偏差	平均値 (dB)	標準偏差
Fc=0%	73.4	0.41	73.4	0.45
Fc=4%	36.2	3.77	34.8	2.33
Fc=12%	28.2	2.13	27.5	1.52

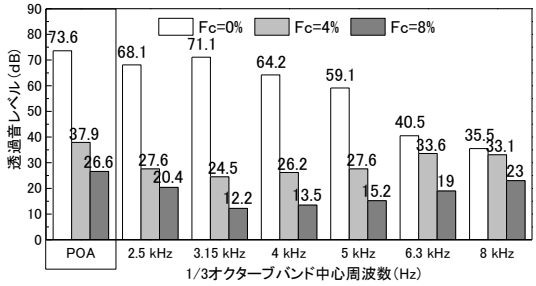


図-23　打設深さ100㎜地点の1/3オクターブ分析結果

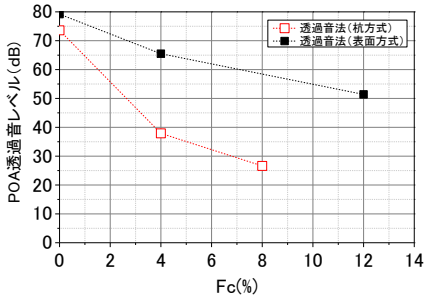


図-24　透過音法（杭方式）・（表面方式）の比較

6.　現地測定の実施

(1)　現地測定の概要

透過音法（杭方式）による評価方法の妥当性を検証するため，営業線のバラスト軌道で測定試験を実施（図-25）するとともに測定箇所より試料を採取して粒度試験を実施し，POA透過音レベルと細粒分含有率の関係を確認した．測定箇所は全14箇所（A地点からN地点）とした．測定手順を以下に示す．

・杭をまくらぎ両脇に杭間隔330mm，まくらぎ底面より100mmの位置まで打ち込む．
・片方の杭より測定用ノイズを発生させる．
・マイクおよび騒音レベル計で透過音を10秒間収録する．
・2.5kHz-8kHzのPOA透過音レベルの平均値を求める．

(2)　現地測定結果

現地のまくらぎ直下におけるまくらぎ底面から深さ200mm付近までの範囲から採取したバラストの粒度分布を図-26に，各地点のFcと海外で広く用いられている道床劣化の評価指標であるFouling Index（FI）[3]を図-27に示

図-25　現地試験　測定状況

す．粒度試験の結果，現地バラストは，Fc=0%からFc=4%未満の箇所が8箇所（A地点からH地点）とFc=4%以上の箇所が6箇所（I地点からN地点）であった．透過音法（杭方式）による現地測定結果を図-28に示す．現地測定の際，M地点およびN地点においては，道床交換工事の準備作業を行っている中での測定であったため，金属音等の高い周波数の音が発生している環境下での測定となった．工事音の影響として，図-28の1/3オクターブバンド分析の結果から，M地点とN地点の6.3kHzと8.0kHzの帯域の音が他と比較し極端に大きくなっており，この帯域を中心に工事音の影響が出ていると考えられる．そこで，2.5kHzから8kHzまでのPOA透過音レベルと2.5kHzから5kHzまでのPOA透過音レベルの2通りの評価を行った．

図-29に2.5kHzから8kHzまでのPOA透過音レベルとFcの関係性を，図-30に2.5kHzから5kHzまでのPOA透過音レベルとFcの関係性を示す．なお，図には前章の室内試験の結果も併せて示す．

図-29より，室内試験結果と現地試験結果を基に，図中で示すような非線形を有した近似関係を確認した．Fc=0%からFc=4%以内は測定結果から推定されるFcと粒度試験結果のFcが±1%以内の差であり，高い相関性があることを確認した．一方で，Fc=4%を超えたバラストでは，POA透過音レベルが20dB付近に測定結果が集まり，粒度試験結果のFcとの差が±2%以上とやや低い相関性になっている．これは，前述した通りM地点，N地点における工事音の影響によるものと考えられる．このことから，マイクに収録する音が小さくなるほど周囲の測定環境の影響による測定誤差が発生しやすい可能性があることが分かった．

次に，工事音の影響を最小限にするため，全測定結果を2.5kHzから5kHzまでのPOA透過音レベルに再整理し，図-30で示すような近似関係を確認した．Fc=0%からFc=4%以内は図-29と同様に測定結果から推定されるFcと粒度試験結果のFcとの差が±1%以内であり，高い相関性があることを確認した．また，Fc=4%を超えたバラス

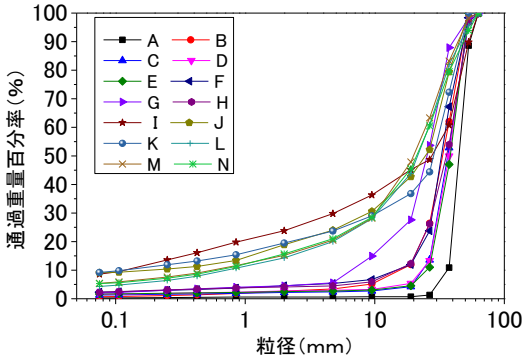


図-26　現地まくらぎ下採取試料の粒度分布

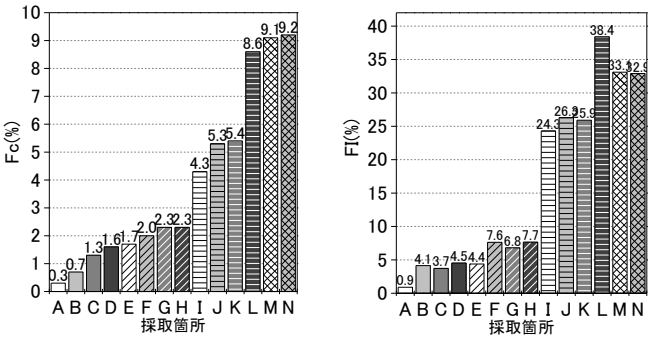


図-27　採取試料のFcとFI

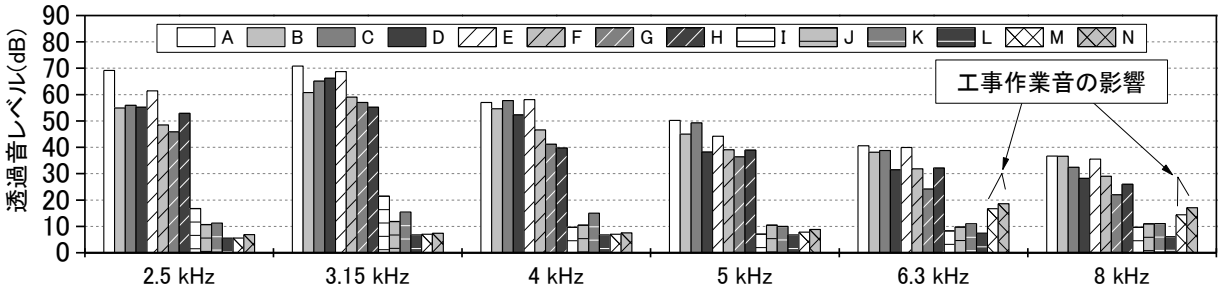


図-28　測定結果の1/3オクターブバンド分析

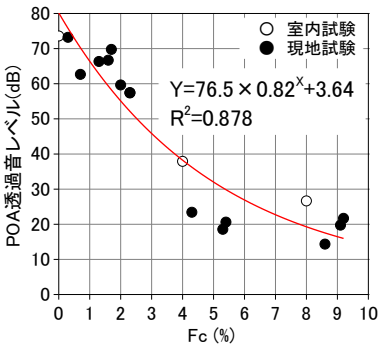


図-29　Fc と POA(2.5kHz-8kHz)の関係

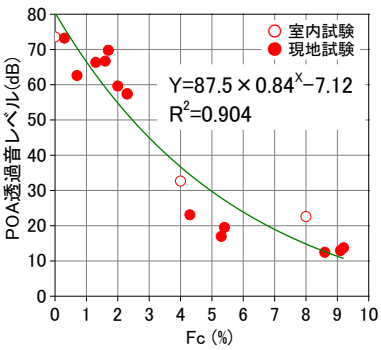


図-30　Fc と POA(2.5kHz-5kHz)の関係

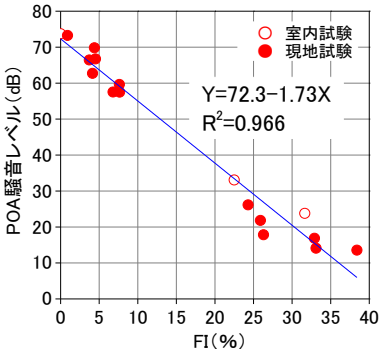


図-31　FI と POA(2.5kHz-5kHz)の関係

トにおいても，粒度試験結果のFcとの差が±2%未満であることを確認し，Fc=4%以上のバラストにおいても多少の誤差はあるものの細粒分含有率Fcの推定が可能であることが示唆された．Fc=6%以上で噴泥に至る可能性があることから，POA透過音レベルが25dBを下回るとバラストの噴泥リスクが高くなることが考えられる．

今回の現地採取試料の粒度試験の結果と相関性の高いPOA透過音レベル（2.5k-5kHz）の測定結果をFIにより整理した結果を**図-31**に示す．POA透過音レベルとFcとの相関では，非線形性を有していたのに対して，図中に示す通り，FIとの相関では，線形の近似関係を示し，各測点と近似線との差も少なく，高い相関性を有していることが分かった．道床のPOA透過音レベルを測定することでFc，FIの両面から道床劣化度合いの推定が可能になることが示唆された．

7. まとめ

本研究では，バラストの音の透過特性を用いた健全度の評価方法を開発した．得られた知見を以下に示す．

1)バラストの透過特性に関する要素試験を行った結果，劣化を模擬したFc=4%およびFc=12%ともに2.5kHz以上の高い周波数帯域で10dB以上の吸音作用を確認した．また，Fcが大きい方が吸音作用は大きくなることを確認した．

2) バラストの音の透過特性において，Fcが増加するほどPOA透過音レベル（2.5kHz-8kHz）が低下することを確認した．また，バラストの音の透過特性は，バラストの含水状態や密度に影響されにくいことを確認した．

3) 透過音法（杭方式）では，非掘削でまくらぎ直下のバラスト状態を評価することができ，Fc=0%からFc=4%程度にかけてPOA透過音レベルの下がり幅は大きく，噴泥するリスクが高くなるFc=6%程度のバラスト状態を把握する検査として有効であることを確認した．

4) 透過音法（杭方式）を現地測定した結果，室内試験と同様にFcが増加するとPOA透過音レベルが低下する傾向を示し，非線形を有する近似線との相関性を確認した．また，POA透過音レベルが25dBを下回ると噴泥するリスクが高まることを確認した．

5) 現地測定したPOA透過音レベルと現地採取バラストから得たFIの相関性を確認した結果，線形の近似関係を示し，相関性があることを確認した．透過音法を用いることで，粒度試験をすることなく，FcおよびFIの推定が可能になることが示唆された．

謝辞：現地調査にご協力いただいた東日本旅客鉄道株式会社，東海旅客鉄道株式会社，西日本旅客鉄道株式会社，四国旅客鉄道株式会社の関係者の皆様に御礼申し上げる．

参考文献

1) Giuseppe,S.Ulrich,M.Sebastian,R.David,C.and Moritz,S.:Georadar-Basis fur nachhaltige Strecken-instandhaltung. ETR Vol.67 No.9,p.91-96,2018.9
2) 中村貴久,福中力也,木次谷一平,桃谷尚嗣：道床の破砕・細粒化過程に関する研究,日本鉄道施設協会誌,2020.1
3) Selig, E. T. and Waters, J. M.:Track geotechnology and substructure management. Thomas Telford Services Ltd., p 428, 1994
4) 高井秀之:保線の常識，非常識（その54），新線路，2008.11
5) 伊藤壱記,村本勝己,中村貴久：タイタンパー補修に伴う道床バラストの密度変化，第46回地盤工学研究発表会,2011.7

（2020. 4.3 受付）

DEVELOPMENT OF BALLAST CONDITION EVALUATION METHOD USING SOUND TRANSMISSION CHARACTERISTICS

Rikiya FUKUNAKA, Takahisa NAKAMURA, Yoshitugu MOMOYA,
Ippei KIJIYA,Toshiki KITAGAWA,Toki UDA

As the ballast track crushes and refines due to the repeated load of the train and compaction maintenance work, the drainage performance decreases when the content of fine particles in the ballast increases over time, and during rainfall, It is known that the degree of saturation increases, the strength decreases, and the track settlement increases On the other hand, ballast inspection in the field is based on visual observation, and the judgment tends to vary due to the subjectivity of the inspector. Therefore, we focused on the sound absorption effect of ballasts, and developed a ballast state evaluation method using sound transmission characteristics. By this evaluation method, it became possible to grasp the ballast state just below the sleeper where the train load acts without excavating the ballast.