

Ⅱ-8 時間反転波を用いるトンネル内の異常音検知

Detection of Abnormal Sounds in a Tunnel Using Time-Reversal Wave

田中勝大¹・海老原格²・水谷孝一³

Masahiro TANAKA, Tadashi EBIHARA, and Koichi MIZUTANI

抄録：トンネル内で剥落・崩落等の異常は事前に予期することが難しく、異常が起きた場合、事故に発展する可能性が高い。本研究では、トンネルの出入口に設置したマイクロフォンアレイで受信した音波の時間反転波を、計算機上の三次元モデル内で逆伝搬させることで異常音の起きた概ねの位置と発生時刻を求める。波動伝搬シミュレーションには伝達線路行列法を用いる。計算機シミュレーションを行った結果、ヒストグラムの形状から異常の起きた時刻を求めることができた。また、発生時刻における音圧分布から異常の起きた位置を求めることができた。

キーワード： トンネル, 異常音, 時間反転波, 伝達線路行列法, 逆伝搬, シミュレーション
Keywords : Tunnel, Abnormal Sound, Time-Reversal Wave, Transmission-Line Matrix Modeling, Backward propagation, Simulation

1. はじめに

トンネルの老朽化に伴う壁面の剥落や崩落は人的被害を発生しうる事故である。そこで、トンネル内における剥落・崩落などの異常が発生する前に異常の傾向を発見することを目的とした予防的な検査手法が多く開発されている。そして、打音検査¹⁾や赤外線画像解析²⁾などが実際に広く用いられている。一方、トンネル内で発生した壁面の剥落や崩落などの異常がひとたび発生してしまった場合、事故拡大を防止する観点から速やかにその発生を検知することが望ましい。トンネル内における異常を常時監視できるシステムとしては、ワイヤレスセンサーネットワークによるトンネル内の監視^{3,4)}等が提案されている。

我々は、少ないセンサでトンネル内における剥落・崩落などの異常が発生した際に速やかにその発生位置、発生時刻を検知するシステムを提案する。本システムは、トンネル両端の開口部にマイクロフォンアレイを設置し、壁面の剥落や崩落などによる異常音を受信し、時間反転波⁵⁾の原理を利用して、受信した異常音を計算機上のトンネルモデル内で逆伝搬させることで異常音の発生位置と時刻を求めるものである。このシステムはトンネル内を常時監視することができ、施工もトンネルの出入口にマイクロフォンアレイを設置するのみで容易である。更に、複数の位置で同時に異常が発生した場合でも独立に異常を検知することができる。

本報告では、この提案システムの有効性をシミュレーションにより検証する。トンネル内における異常音伝搬や、トンネルモデル内における逆伝搬には、伝達線路行列法⁶⁾による波動伝搬シミュレーションを用いた。また、異常音の発生位置と時刻を求めるための検討も併せて行う。

2. 原 理

(1) 時間反転波・逆伝搬

時間反転波とは受信した波を時間軸について反転した波のことである。発生した音をマイクロフォンアレイで受信するまでの音の伝搬を順伝搬、時間反転波を受信した各位置から送信することを逆伝搬と呼び、順伝搬とは逆向きの音の伝搬となる。トンネル内における順伝搬・逆伝搬の様子を図-1に示す。マイクロフォンアレイで受信した音波の時間反転波を逆伝搬させると、音源の位置で収束し、収束した波が最初に発生した異常音波を時間反転した信号になるという性質を持っているため異常音の再現も可能である。

(2) トンネルモデルにおける逆伝搬解析

順伝搬及び逆伝搬の流れは以下のようになる。トンネル内で異常音が発生すると、その音波が壁面や床面で反射を繰り返しながらトンネル内を順伝搬し、トンネル両端の開口部に設置されたマイクロフォンアレイにより受信される。

1： 非会員 工学 筑波大学 学群生 第三学群工学システム学類

(〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1 筑波大・音響システム研究室, Tel: 029-853-5468, E-mail: tanaka@aclab.esys.tsukuba.ac.jp)

2： 正会員 工博 筑波大学 大学院システム情報工学研究科 助教 (E-mail: ebihara@iit.tsukuba.ac.jp)

3： 非会員 工博 筑波大学 大学院システム情報工学研究科 教授 (E-mail: mizutani@iit.tsukuba.ac.jp)

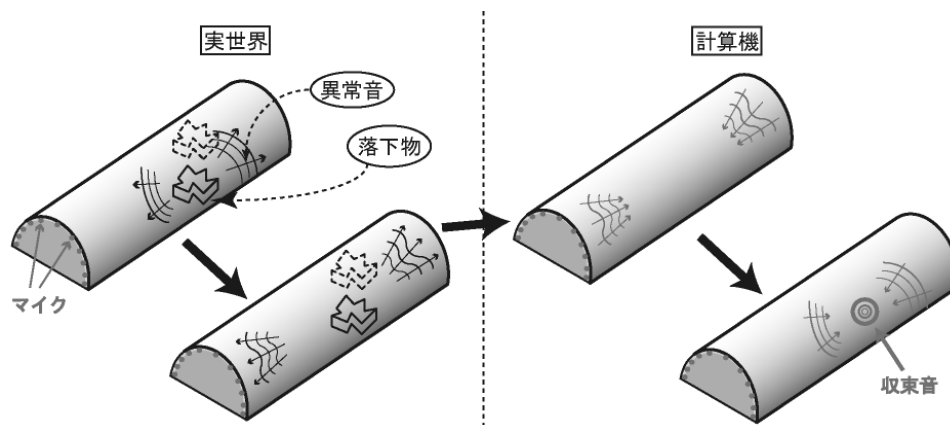


図-1：順伝搬と時間反転波による逆伝搬

次に、マイクロフォンアレイで受信された音波を時間反転し、アレイの各素子を音源として送信し時間反転波の逆伝搬シミュレーションを行う。このとき音波を受信した時間よりも長い時間のシミュレーションを行うことによって、残響を除外する。

逆伝搬シミュレーションの過程で異常音の発生位置と時刻を求めるために、音圧の分布から時間平均パワー分布と音圧のヒストグラムを用いる。これらの手法は共に、収束時には伝搬時と比べて高い音圧が現れることを利用したもので、それぞれの計算内容により以下のような特徴があり、異常音の位置検知と発生時刻検知に用いる。

a) 時間平均パワー分布による位置検知

時間平均パワー分布は、全音場における音圧の二乗値を時間領域で平均を取ったものである。これにより、シミュレーション全体を通じてどの位置で最も高い音圧が現れたかを求めることができる。長所はシミュレーション時間の長さに依らず高い音圧が現れる位置を求めることができることである。しかし、時間領域において平均を取ってしまうので、その音圧がいつ現れたかを求めることができない。

b) ヒストグラムによる時刻検知

ヒストグラムは各時刻における全音場の音圧の分散度合いを調べるための方法である。このヒストグラムを用いると、図-2のように逆伝搬過程と収束時で音圧分散に明らかな違いが現れる。

逆伝搬過程では低い音圧が全体に散らばって分布している状態のためヒストグラムの中心線、つまり音圧ゼロ付近に集中する。しかし収束時前後にはそれまで散らばっていた小さな波が一箇所に集まることで局所的に高い音圧が現れるのである。この時、ヒストグラムの中心線から音圧が左右に広がって見え、左右への広がりが最大になった時が収束した瞬間と考えることができる。このように、ヒストグラムでは先の時間平均パワー分布では求められなかった収束時間を求める

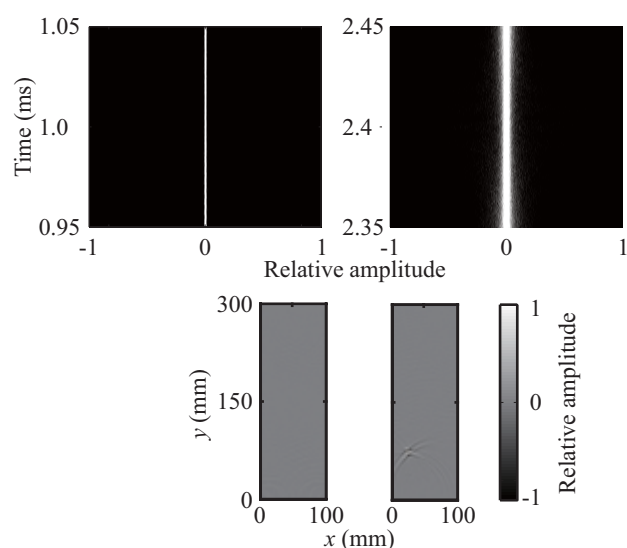


図-2：音圧の分散度合いと、その時刻における逆伝搬の様子

ことができるが、ヒストグラムは音場全体をひとまとめに扱ってしまうため収束位置を知ることはできない。

以上の二つの検知手法は互いの短所を補うことができ、更にはヒストグラムで求めた時間における逆伝搬シミュレーションの結果も求めることで、概ねの収束時間と位置を求めることができるようになる。

3. シミュレーションによる検証

(1) シミュレーション条件

シミュレーションで用いる計算機モデルは、図-3で示すように $x = 100$ (mm), $y = 300$ (mm), $z = 50$ (mm) とした半円筒型のトンネルである。音源は直径 5 (mm) の円形で、ホワイトノイズとしている。ホワイトノイズに含まれる周波数は計算機シミュレーションが可能な周波数の制限によって 70 (kHz) 以下としている。シミュレーションを行う時間 t は、順伝搬を $t = 2.5$ (ms),

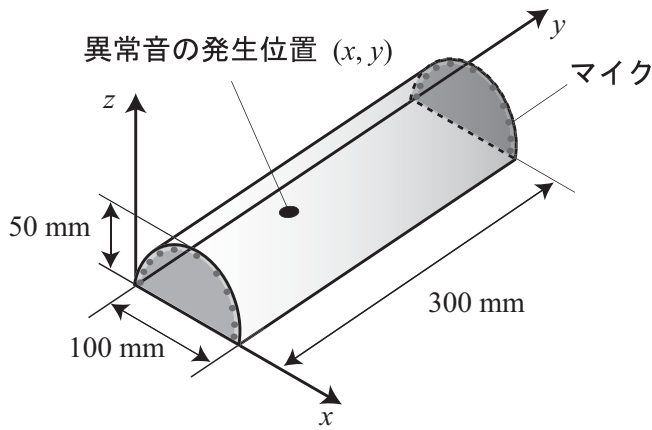


図-3：トンネルモデルの概形

逆伝搬を $t = 3.0$ (ms)としている．逆伝搬の方が長いのは，残響する音圧を抜けさせて時間平均パワー分布をより正確にするためである．逆伝搬シミュレーションにおける収束時間 $t = 2.4 \sim 2.5$ (ms)の間になるようにしている．

異常音を発生させる位置を， $(x, y) = (25, 150)$, $(25, 75)$, $(25, 2)$ (mm) の三つの場合について実施した．

(2) シミュレーション結果

異常発生位置が $(x, y) = (25, 150)$ (mm) の場合における逆伝搬解析結果を図-4に示す．上にヒストグラム，左下に時間平均パワー分布，右下に収束時間までの逆伝搬結果となっている．このヒストグラムでは中央に近いほど音圧が小さく，左右に広がるほど音圧の絶対値が大きくなる．そのため，収束時間付近では左右への音圧分散が大きくなるので最も分散の大きな時刻から収束時間を求めた結果，2.409 (ms)となり，異常音の発生時間と一致した．また，時間平均パワー分布は収束位置に高めのパワーが出ているものの，トンネル中央に収束する段階において音圧が相当小さくなってしまっているため，他の場合に比べて収束位置が求めにくくなってしまっている．一方，ヒストグラムから求めた収束時間まで行った逆伝搬の結果では，異常音の発生した位置と一致した．

次に，異常発生位置を $(x, y) = (25, 75)$ (mm)とした場合の逆伝搬解析結果を図-5に示す．こちらも同様に収束する時間で音圧分散がより大きくなっていることが確認できる．時間平均パワー分布はやや高い音圧の取れる範囲が広いが，収束位置で交差するようになり音圧が最も高くなっている．また，収束時間までの逆伝搬も，時間平均パワー分布から得られた収束位置と同じ場所で収束していることが確認できる．

最後に異常発生位置を $(x, y) = (25, 2)$ (mm)とした場合の逆伝搬結果を図-6に示す．他の場合と比べると，ヒストグラムの音圧分散の広がり方がより鋭くなっているのが見て取れる．また，時間平均パワー分布や逆

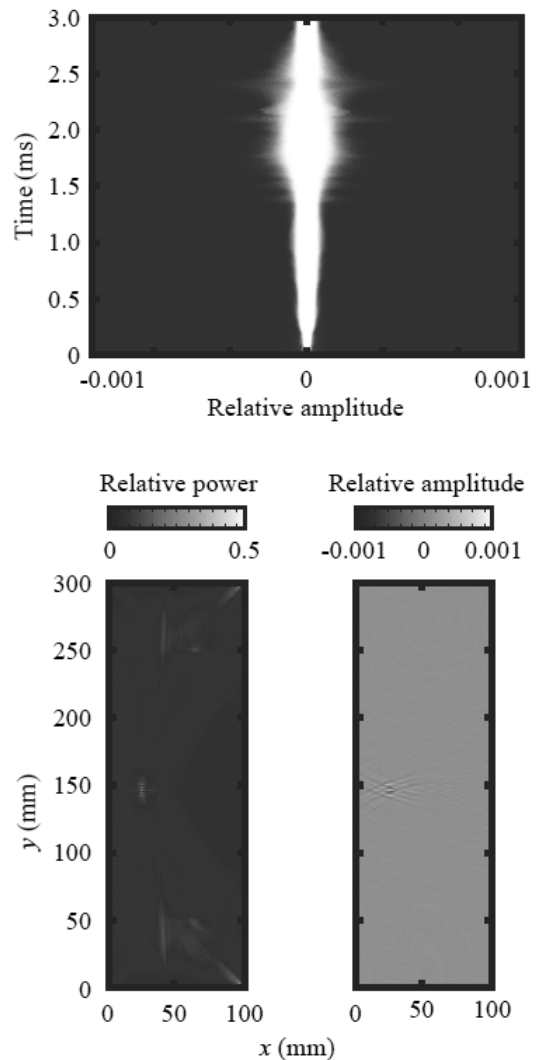


図-4： $(x, y) = (25, 150)$ (mm)における逆伝搬結果

伝搬結果は，実際に異常音の発生した位置よりややトンネル内側を示してしまっているのがわかる．これは異常発生位置が出口に近いので，マイクで異常音を受信できず，トンネル外に放射されたためだと考えられる．もう一つの理由として，時間平均パワー分布・逆伝搬ともに出入口両方からの音波が収束位置で合わさることで高い音圧が得られるのだが，入口付近で異常音が発生すると，空気中を伝搬する際の減衰が大きすぎるため出口側のマイクロフォンアレイからの音波がほとんど届かない．そのため，収束位置に届く音波は入口側からのみの音波となってしまった結果，やや曖昧になってしまったと思われる．

シミュレーションの結果から，異常音の発生した時間及び位置を時間平均パワー分布・ヒストグラム両手法により特定することが可能であることがわかった．ヒストグラムは異常の起きる位置とマイクロフォンアレイとの距離によって音圧分散の広がり方に差が出ることがわかった．また，ヒストグラムによって求めら

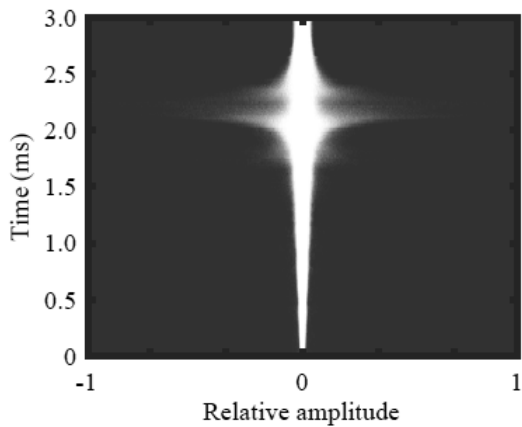


図-5 : $(x, y) = (25, 75)$ (mm)における逆伝搬結果

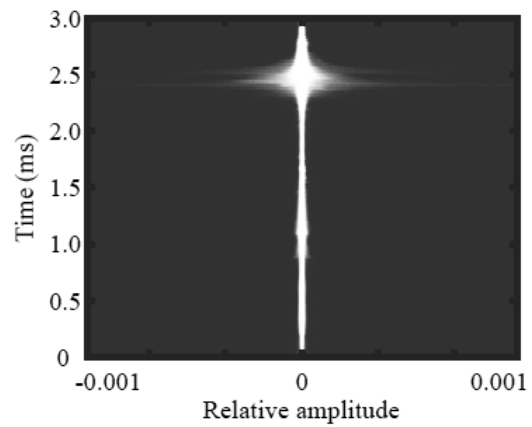


図-6 : $(x, y) = (25, 2)$ (mm)における逆伝搬結果

れた収束時間まで逆伝搬シミュレーションを行うことで収束位置を求めることができた。時間平均パワー分布は収束位置を求めることはできるものの、異常の起きる位置によっては収束位置を求めにくい場合が存在することがわかった。

4. おわりに

トンネル内の常時監視及び異常が起きた際の迅速な検知をするために、時間反転波の逆伝搬を用いることによる可能性についてシミュレーションを行うことで検証した。時間平均パワー分布やヒストグラムを用いることで、異常の発生した概ねの位置や時刻を求めることが可能であることがわかった。

今後は順伝搬を計算機上ではなく、実世界でマイクを使って行い、その受信波の時間反転波の逆伝搬でも異常検知が可能であるかについて検討する。また、音源が複数になった場合や、音源の大きさが変化した場合についても検討する。

参考文献

- 1) 久保元樹, 中野泰宏, 大高道夫, 小島俊一, 極檀邦夫: コンクリートテスターによるトンネルの剥離・強度の推定, <http://www.itecs.jp/download/H1802.pdf>. (入手 2010.7.28)
- 2) 外川勝, 小出博, 赤松幸生, 虫明成生: 可視画像と赤外線画像によるコンクリート劣化調査, 土木学会第 56 回年次学術講演会, V-417, 2001, pp.834-835
- 3) Sivaram Cheekiralla; Wireless Sensor Network-Based Tunnel Monitoring, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.120.5929&rep=rep1&type=pdf> (入手 2010.7.28)
- 4) Mo Li, Yunhao Liu; Underground Structure Monitoring with Wireless Sensor Networks, Proceedings of the 6th international conference on Information Processing In Sensor Networks 2007, 2007, pp.69-78
- 5) 志村拓也, 渡邊佳孝, 菊池年晃: 時間反転処理した音波の収束音場, 信学技報 US2003-36, 電子情報通信学会, pp.7-12, 2003.
- 6) Takao Tsuchiya, Yukio Kagawa; Digital Equivalent Circuits for Acoustic Field Based on Discrete Huygens' Modeling, Japanese Journal of applied physics, Vol. 44, No.6B, 2005, pp.4297-4300