

軌道回路に代わる車上式レール破断検知システム

細田 充* 相澤 宏行* 山本 隆一*

Rail Broken Detection System from Vehicle as an Alternative to Track Circuits

Mitsuru HOSODA Hiroyuki AIZAWA Ryu-ichi YAMAMOTO

In order to develop a method for detecting rail breakage from vehicle, we focused on non-contact air coupled ultrasonic wave, accelerometer, and sound level meter, to conduct a basic study on their applicability. Furthermore, we optimized the detection conditions such as frequency of ultrasonic sensor and probe size so on to utilize the non-contact air coupled ultrasonic technology to rail broken detection. Also, we analyzed axil box acceleration when vehicle run through rail opening and the noise from the sound level meters installed on both sides of vehicle body. This paper describes the results of these basic studies and rail broken detection method developed based on them.

キーワード：レール破断検知, 非接触式空中超音波, 軸箱加速度, 車体騒音, 軌道回路

1. はじめに

現在、営業線において車両位置を検出するための仕組みは信号電流による「軌道回路」が用いられている¹⁾。一方で、無線式の車両位置検知手法が開発され、日本の鉄道事業者も既に一部導入している。現状では、レールに信号電流を流す軌道回路によって、レール破断を検知することが可能であるが、軌道回路の代わりに無線式列車制御システムを導入した場合、軌道回路に代わるレール破断検知手法が必要となる。この手法の一つとして、超音波および帰線電流等²⁾を利用した手法が検討されている。しかし、これらも主に地上設備を利用した手法であり、地上に新たに設備を構築するために大きなコストを要する。そこで、本研究では、車両がレール破断箇所を走行する際に、車上からレールの破断を検知する手法を確立することを目標に、非接触空中超音波技術（以下、「空中超音波」という）や加速度および騒音等に着眼し、レール破断検知技術としての適用可能性について検討した。

2. 車上式レール破断検知技術の事前検討

車上式レール破断検知の技術開発の事前検討として、現行の破断検知方法、車上式レール破断検知手法への適用が期待される技術について調査した。

2.1 現行の破断検知方法

車両の位置検知を目的として、軌道回路が従来から用いられている。軌道回路はレール破断検知の機能も有しており、その原理は、レール破断が発生すると信号電流

が遮断されることによるものである。なお、破断時に開口しないと検知できない場合があり、現場作業員の定期的な巡回等による目視検査および列車乗務員による異音検知等で破断を発見する場合もある。

2.2 車上式レール破断検知技術としての適用が期待される技術

車上からレール破断を検知するために適用するセンサー等については、

① 車両に取り付け可能でレールに対して非接触で、一定の応答が得られること

② 破断部で得られる応答が明確

であることが求められる。これらの観点から候補となる検出手法の特徴を表1に評価してまとめた。

特に超音波を利用した技術についてはレール長手方向にガイド波を発生させて、レールが破断した場合に超音波が遮断される原理を利用した方法が国内外で検討されている³⁾。これは、破断時において明らかに通常時と異なる応答が得られ、レールが開口しなくても応答が得られるという点では有効な手法ではあるが、地上設備を前提とした開発が主であり、コスト面に課題があった。一方で近年、非接触で検査対象に超音波を入力する技術開発が進められている。また、加速度計や騒音計といったセンサーは、現行の軌道検測車等でも利用されており、取り付けの容易さやデータの取り扱いやすさという観点では利点大きい。一方で、センサーで得られる測定値に対して、破断部を判定する閾値の設定方法を含め、取得信号の処理方法については未検討である。

以上の観点から、車上式レール破断検知への適用が期待される技術として、本研究では空中超音波、加速度および騒音の各種センサーを利用して、開発を進めること

* 軌道技術研究部 レールメンテナンス研究室

表1 車上方式の各種手法の評価

手法	技術の概要	破断を検知する閾値設定	センサーとレール間の離隔
空中超音波	プローブから、非接触でレールに超音波（ガイド波）を入力させて、検知する。	○	○（100mm 以上）
電磁超音波	電磁波により、非接触でレールに超音波を発生させて、検知する。	△	△（極めて小さい）
渦電流	遊間での渦電流の変化を利用している。現行、継目検知の目的で使われている。	○	△（極めて小さい）
騒音、加速度、変位	現行、軌道検測車等で測定している。レール傷や凹凸箇所と判別が必要である。	△	◎（車体、台車等に取付け可能）
画像	データの容量、処理等が破断検知の用途では現状困難。	△	◎（車体に取り付け可能）

◎：良好
○：適用可能
△：課題有

とした。また、これらのセンサーを利用した破断検知手法の共通課題として、①レール破断箇所を少なからず列車が走行することを想定しなければならず、レール破断部を走行した場合の走行安全性の評価が必要となる、②継目を対象から除外するデータ処理の検討が必要であるということが挙げられる。①については文献3等のレール開口部の走行シミュレーションで検討中であり、②については、以下でその開発内容を示す。

3. 車上式レール破断検知技術の開発

3.1 空中超音波によるレール破断検知手法の検討

レール破断検知への適用を想定している空中超音波システムは、図1に示すように台車枠に取り付けた超音波プローブからレールに非接触で超音波を送信し、輪軸を挟んで同様に台車枠に取り付けた超音波プローブにて受信する構成となっている。レール頭頂面を長手方向に伝搬するように台車枠（車両）に取り付けた送信プローブから非接触で超音波を入射することで、健全な箇所であれば受信プローブにて透過エコーが連続して受信でき（a図）、レール破断が発生した箇所では、受信プローブに超音波が伝わらないため（b図）、破断を検知することが可能となる。

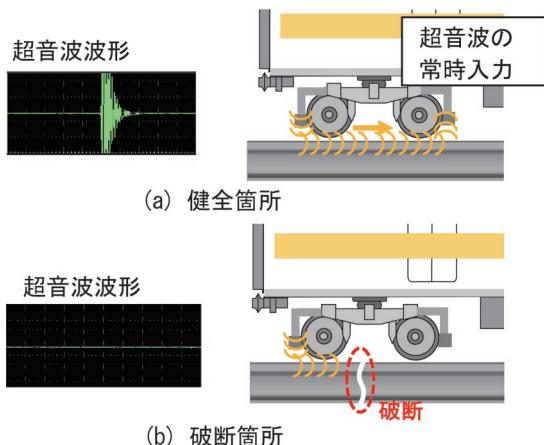


図1 空中超音波によるレール破断検知

一方で、空中超音波は、空気を経由して対象物に入力されるため、低感度という不利な点を有する。例えば、空気から鋼への往復透過率は 3.7×10^{-5} であり、直接接触の1万分の1程度となる。そこで、市販の超音波探傷器では感度が不足するため、一般的な超音波探傷で用いられるパルス波より強力なバースト波を送受信できる高出力、高感度のパルサ・レシーバ（超音波送受信機）と外付けプリアンプの使用が必須となる。本研究で使用した非接触空中超音波探傷装置は、図2に示すように制御用パソコン、パルサ・レシーバ、外部プリアンプおよび送受信プローブで構成されており、パソコンを除く機器はジャパン・プローブ（株）製⁴⁾である。

空気とレールでは音響インピーダンスが大きく異なるため、レール長手方向に超音波を伝搬させる際には、空気からレールへの入射角度が制限される。空気およびレールにおける超音波の音速をパラメータとし、スネルの法則によって空気からレールへの横波臨界面角度を計算すると約6°となる。またプローブとレールの離隔の大きさによっても受信強度が減衰することが考えられる。そこで、角度および離隔をパラメータとして、レールに超音波を透過した際の超音波強度を測定した。図3に試験概況、表2に本試験で適用したパラメータ、表3に試験結果を示す。ここでは、最大の受信強度が得られた「離隔100mmおよび送受信角度6°」での値を基に他の試験条件における強度を正規化した。この結果より送

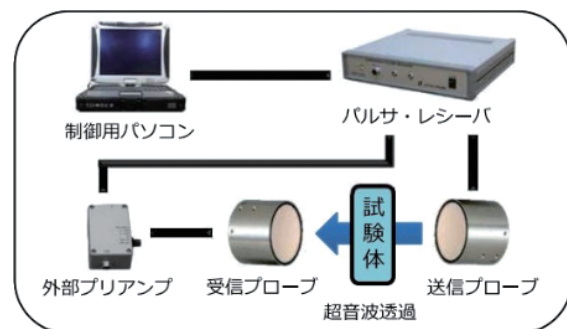


図2 空中超音波システムの構成（文献4）

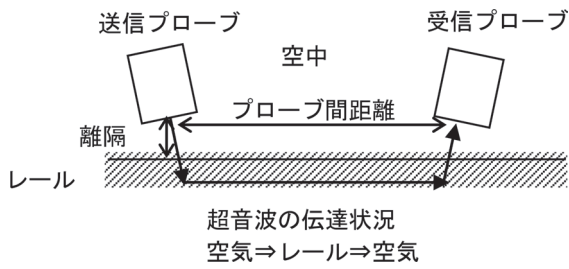


図3 最適角度，離隔の減衰程度の検証試験

表2 本研究で用いた超音波のパラメータ

波の種類	バースト波	プローブ間距離	300mm
探傷周波数	200kHz	探傷感度	105dB
波数	5波	チャープ比	2.0
離隔	10~200mm	パルス電圧	500V

受信角度が6°の場合を中心として大きな受信強度が得られることがわかる。離隔200mmの場合は，100mmの結果と比較すると強度が小さくなる。しかしながら，在来線のレールとの離隔に対する車両限界は75mmであるため本システムでは十分な強度を得ることができると考えられる。また，大きな受信強度が得られる角度範囲が明確になった。以上の知見に基づき，空中超音波をレール破断検知手法として適用するために，周波数およびプローブサイズを検討した。

(1) 周波数

一般的に超音波の空中での送受信は，周波数が小さい方がその減衰が小さい。今回のように移動体に設置した場合，走行中に上下変位が発生することが想定されるため，できるだけ減衰が小さく安定して超音波強度が得られる低い周波数の超音波を検討することとした。高橋ら⁵⁾は，上記した空中超音波のシステムにおいて空气中で送受信した場合の透過率とプローブ間の空气中的距離の関係が，周波数200kHzおよび400kHzの超音波でそれぞれ -16.5×10^{-3} dB/mmおよび -39.5×10^{-3} dB/mmであることを示している。さらに，今回，周波数100kHzの

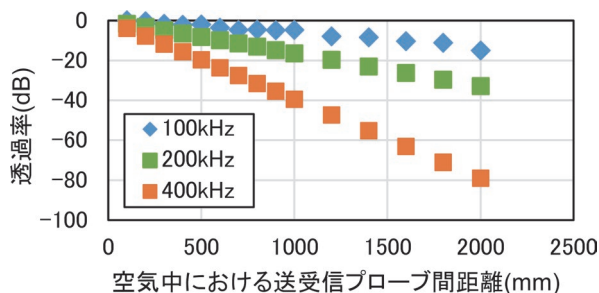


図4 透過率，周波数および空气中における送受信プローブ間距離の関係

表3 プローブ設置角度の受信強度に及ぼす影響
(a) 離隔100mm

		受信プローブ角度				
		≒2°	≒4°	≒6°	≒8°	≒10°
送信 プロ ーブ 角度	≒0°	0.5	0.5	0.5	0.4	0.3
	≒2°	0.8	0.7	0.8	0.4	0.3
	≒4°	1.0	0.8	1.0	0.6	0.4
	≒6°	1.0	1.0	1.0	0.7	0.3
	≒8°	0.7	0.9	1.0	0.6	0.4
	≒10°	0.5	0.8	0.9	0.5	0.4
	≒12°	0.4	0.5	0.9	0.4	0.5
≒14°	0.3	0.4	0.5	0.3	0.4	

(b) 離隔200mm

		受信プローブ角度				
		≒2°	≒4°	≒6°	≒8°	≒10°
送信 プロ ーブ 角度	≒0°	0.3	0.6	0.4	0.5	0.6
	≒2°	0.4	0.5	0.5	0.4	0.3
	≒4°	0.3	0.6	0.5	0.4	0.4
	≒6°	0.5	0.4	0.5	0.5	0.3
	≒8°	0.5	0.4	0.5	0.4	0.4
	≒10°	0.4	0.4	0.3	0.4	0.3
	≒12°	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
≒14°	0.5	0.3	0.4	0.3	0.3	

条件で測定した結果，図4に示すように -7.2×10^{-3} dB/mmとなり，減衰が小さいことが確認できたため，本研究では100kHzの周波数帯域を採用することとした。

(2) プローブサイズ

プローブのサイズについてはレール断面方向のずれを念頭に検討を主に行った。曲線では軌間をスラックで拡大しており，例えば急曲線であれば最大20mm軌間を広げている。このため，プローブサイズが小さいとレール上から外れて，超音波の送受信ができなくなる可能性があるため，比較的大きいサイズのプローブを選定する必要がある。ここではレール頭部幅65mmにスラックを考慮して，幅80mmのプローブを用いた。空中超音波システムにおいてレールに超音波を透過させながら，送信プローブをレール軸中心からレール断面方向に移動し，得られる超音波信号の変化を把握する試験を実施した。図5にレール軸中心からの距離と超音波強度の関係を示す。プローブから平行に超音波が送信されていることから，プローブがレール軸中心から離れるに伴い，線形的に超音波強度が低下している。急曲線におけるス

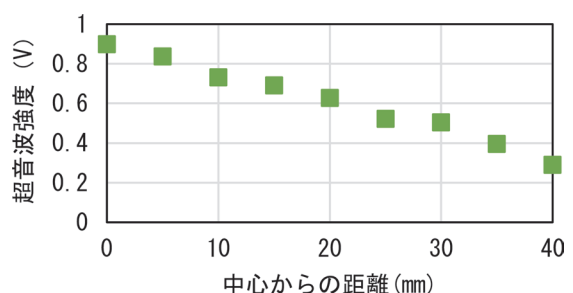


図5 超音波強度とレール軸中心からのプローブ位置の関係 (プローブ幅80mm)

ラック等を考えると、受信強度はプローブがレール軸中心から離れることで減少するものの、開口部を通過した場合との受信強度の差は顕著であると判断し、プローブ幅 80mm を適用することとした。

3.2 車両に取り付けた加速度計および騒音計を用いたレール破断検知手法の検討

(1) 加速度計によるレール破断検知手法

複数の検知手法を組み合わせることで、車上式レール破断検知の精度向上が見込まれる。そこで、データ取得が容易な軸箱加速度を用いる手法を考案した。この手法は、上下方向の軸箱加速度データを用いてレール破断部通過時特有の波形成分を抽出するものである。軸箱支持装置とそれに取り付けられた加速度計を図6に示す。

一般に車両が軌道を走行する際には、軌道と車両のばね下質量が連成して振動している。この連成振動の周波数は、軌道を有効長の考えに基づいて質点化した場合に、ばね下質量および質点化された軌道が接続されたばね-質量系の固有振動数から推定される⁶⁾。有効長は梁としてモデル化されたレールのたわみから求められるが、図7に示すようにレールのたわみは連続であるレール中間部と不連続であるレール開口部で異なる。したがって、レール中間部とレール開口部では質点化された軌道のばねと質量の値が異なり、ばね下質量と軌道が接続された振動系の固有振動数が変化する。上記のばね-質量系により計算した連成振動の周波数は、軌道の状態にも依存するが、レール中間部においては 50Hz 程度、レール開口部においては 30Hz 程度となる。したがって、レール破断部を車両が通過した際に得られる軸箱加速度には局所的に低周波の成分が多く含まれることになると推測される。そこで、走行車両の軸箱支持装置に加速度計を設



図6 軸箱支持装置と加速度計

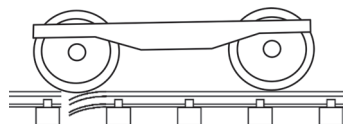


図7 輪軸が開口部を通過するイメージ



(a) 全体図



(b) 設置箇所の拡大

図8 車体へのマイク取り付けの様子

置して軸箱上下加速度を測定し、得られた軸箱加速度データに 30Hz のローパスフィルター（以下、「LPF」という）を適用することで、レール破断部において大きな振幅が得られると考えられる。

(2) 騒音計によるレール破断検知手法

車体に装荷したセンサーでレール破断検知が可能であれば、上述した手法よりも車両運用の上で簡便なシステムを構築できると考えられる。そのため、騒音計にも着目した。

騒音計によるレール破断検知手法は、鉄道車両の車体の左右に騒音計およびマイクを設置して、レール破断を検知する手法である。図8に車体に設置されたマイクを示す。図9に示すように、一般に、レール破断は左右レールのどちらか一方で発生するものであり、継目のように両レールで同時に衝撃音を発生することはない。したがって、左右の騒音の差が有意に大きければレール破断が疑われることになる。

軌道と車両および騒音計の位置関係について考える。片レールのみが衝撃音の発生源になっている場合、各マイクで得られる音圧レベルは単一音源から放射される音響エネルギー密度と音源からの距離によって決定される。図10に示すように半自由空間において、音源から距離 r の場所で観測される音圧レベル $L_p(r)$ は式(1)によって算出される。

$$L_p(r) = L_w - 20 \log_{10} r - 8 \quad (\text{dB}) \quad (1)$$

ここで、 L_w は音源のパワーレベルであり、上式を距離減衰式と呼ぶこととする。一般に車両床下の障害物による遮へい等の影響を受けるため、床下を伝搬する音は単純な距離による減衰よりも大きく減衰すると推測され

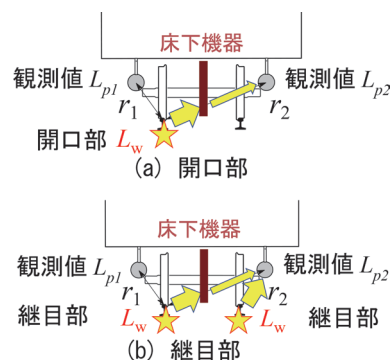


図9 開口部と継目部で発する騒音の違いのイメージ

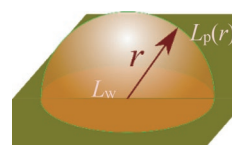


図10 音源 L_w から距離 r の場所で観測される音圧レベル $L_p(r)$

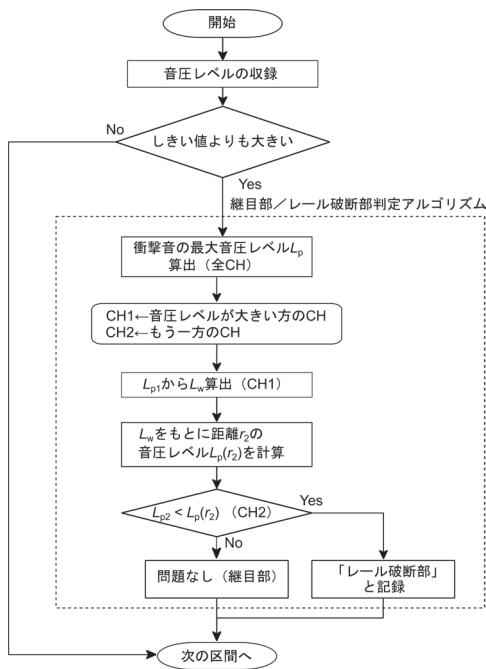


図 11 騒音による手法のフローチャート

る。図 11 のフローチャートに従い、左右の音圧レベル観測値が小さい方の距離減衰式による計算値 $L_p(r_2)$ と観測値 L_{p2} を比較し、 L_{p2} が $L_p(r_2)$ より小さい場合は軌道の片側のみが騒音源となっていると考えられるため、レール破断が疑われる。

3.3 各レール破断検知手法の検証試験

開発したレール破断検知手法の適用性を検証するため、試験車両に各種センサーを設置し、所内試験線で走行試験を行った。所内試験線は直線および最小の曲線半径 105m (最大スラック約 20mm) が含まれる軌道である。10~25m 程度の間隔で継目が存在し、その区間を評価区間として 400m 程度走行した。また、レール破断

を模擬する目的で、開口部を設定した。図 12 に曲線区間に設定した開口部を示す。これにより、一般区間、通常の継目部および開口部を通過時の空中超音波、軸箱加速度、騒音の各データを分析することとした。走行速度は 30km/h 以下である。

(1) 空中超音波

図 13 に空中超音波システムを設置した試験車両の台車の外観を、図 14 に得られた波形例を示す。台車の前後に送受信プローブを設置し、随時超音波を送受信しながら試験走行した。図 15 に走行中に本システムで受信し、前節の手法により処理した時刻歴波形を示す。走行の際、継目等が存在しない一般部では、十分な強度の信号が得られており、設置したシステムによる超音波の送受信が走行中においても可能であることを確認した。また、継目部や開口部が存在するカ所では、一般部の 0.4 倍以下に強度が低下した。走行区間には 13 個の継目に加えて、終点近くの 12 番目 (⑫) と 13 番目 (⑬) の継目間にレールを切断して開口部を設けている。そのため、継目部および開口部を合わせて 14 個の不連続部が存在し、図に付番したように、全ての不連続部において安定的に、強度が 0.4 以下になっていることがわかる。このシステムによって、破断の判定を行うためには、例えば、検査区間において予め継目部の数を把握しておき、検査走行した際に信号強度が 0.4 以下となる箇所をカウントして比較することによって、後者の方が多くなっている場合、破断部が存在していると判断できる。また、車上に取り付けた他のセンサーとのデータによる測定結果と組み合わせることにより破断等の判定を精度よく行えると考えられる。但し、きしり音が発生している場合は信号波形が著しく乱れた。

(2) 加速度計および騒音計による取得データ

図 16 に曲線部のレール開口部を含む区間 (開口量 70mm) を 30km/h で走行した際の軸箱加速度、LPF で



図 12 開口部の外観図



図 13 空中超音波システムを装着した台車の外観

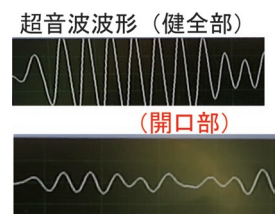


図 14 得られた波形例

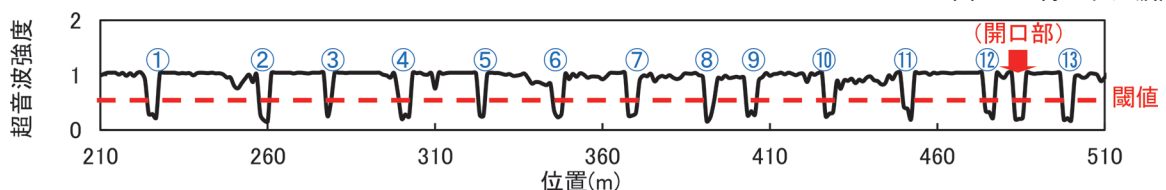


図 15 提案した空中超音波システムにより出力された超音波強度の時刻歴波形

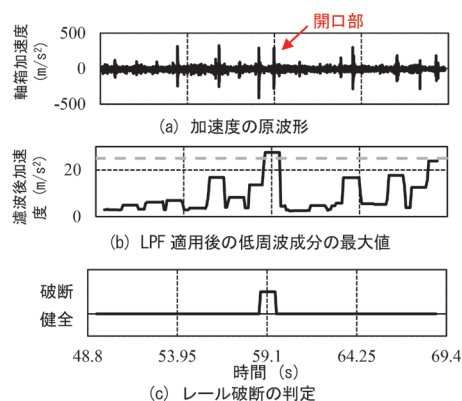


図 16 軸箱加速度による破断検知判定の例

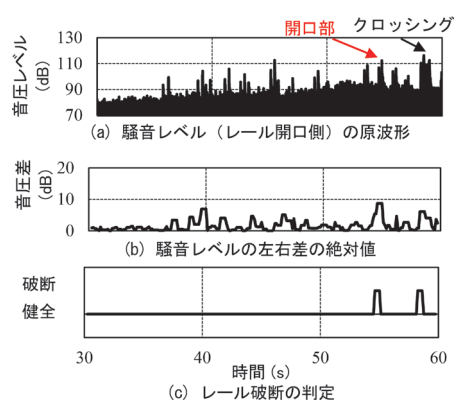


図 17 騒音による破断検知判定の例

濾波後の加速度，レール破断の判定結果を示す。

加速度については，得られた軸箱加速度の波形に対して1sの窓を0.125s間隔で移動し，各窓における30HzのLPF適用後の波形の最大値をプロットしている。図16(b)に示すように開口部では大きな加速度が得られていることがわかる。また，レール継目部は継目板の剛性によりレール中間部とほぼ同等の剛性が確保され，レール開口部のような低周波成分は励起されないと考えられる。ここで，30HzのLPF適用後の波形に対して，レール開口部通過時の値より小さく，レール継目部等レール開口部以外の箇所を通過する時の値より大きいしきい値が設定できれば，レール開口部を検出することができる。図16(b)では 25m/s^2 をしきい値として，この値を超えた場合に開口部と判定しており，レール開口部のみでこのしきい値を超過する結果となっている。一方，レール開口部を走行した際に得られる軸箱加速度の値は走行速度と開口量に依存する。したがって，効果的にレール破断検知を行うためには，走行速度と検知対象とする開口量に依存するように閾値を設定することが理想的であるが，検知率を大きくすれば誤判定領域が大きくなることから，運用する際には各線区の状態に応じ検知率と誤判定領域のバランスを取ったしきい値を設定する必要がある。

図17に直線部のレール開口部を含む区間（開口量100mm）を速度30km/hで走行した際の騒音レベル，左右マイクの騒音レベルの差，レール破断の判定結果を示す。騒音については，得られた音圧レベルに対して0.5sの窓を0.125s間隔で移動し，各窓における左右マイクの音圧レベルの最大値の差をプロットしている。開口部の判定は，距離減衰の式から求められた音圧の推測値と，実際に測定された音圧値の比較により行っている。レール開口部だけでなくクロッシングでもレール開口部と判定されているが，クロッシング部では片側レールのみが騒音源となるため，誤検知されていると考えられる。

なお，加速度を用いた手法は直結系軌道においては応答が小さいこと，また騒音を用いた手法は曲線部においてきしり音が干渉するため，両手法の実用化において，これらは今後の検討課題である。

4. まとめ

本研究では，車両がレール破断箇所を走行した場合に，車上からレールの破断を検知する手法を確立することを目標に，非接触空中超音波や加速度計および騒音計等に着目し，レール破断検知技術としての適用可能性について基礎的検討を行った。

(1) 非接触空中超音波技術をレール破断検知に適用するため，超音波センサーの周波数やプローブサイズ等の計測条件の適正化等を行った。台車に本センサーを設置し走行試験を実施した結果，レール中間部と比較してレール開口部で超音波の受信強度が減衰することを確認した。

(2) レール開口部を走行した際に取得した軸箱加速度データをローパスフィルタで濾波して得た振動波形を分析した。かつ，鉄道車両の車体の左右に設置された騒音計の騒音データも分析した。その結果に基づいて，開口部を区別するための分析手法およびフローを提案した。

文献

- 1) 寺田夏樹：鉄道技術 来し方行く末 軌道回路，RRR，No.71，pp.28-31，2014
- 2) 元好茂，本間健一：レール損傷検知システム（超音波方式，帰線電流方式）の開発，新線路，No.66，pp.33-35，2012
- 3) Nishinomiya, Y, Kataoka, H and Hiraide, S : Development of the vehicle dynamic simulation model of running on rail gaps, Proc. of International Symposium on Speed-up and Sustainable Technology for Railway and Maglev Systems (STECH2015), 3C13, 2015.
- 4) ジャパンプローブ：ジャパンプローブ (online), available from <http://www.jp-probe.com/>, (参照日: 2020年9月15日)
- 5) 高橋雅和，星野秀和，小倉幸夫：非接触空中超音波探傷検査法の開発，自動車技術会学術講演会前刷集，Vol.20，No.9，pp.13-16，2009
- 6) 佐藤裕：軌道構造の構築振動におよぼす影響，土木学会論文報告集，Vol.240，pp.63-70，1975