

## 土木構造物の非破壊 検査技術に関する 研究開発



内藤 孝和\*



露木 寿\*



秋山 保行\*\*



小関 昌信\*

当社では、電磁波レーダを用いて土木構造物の内部変状を検査する線路下空洞探査車（UTRAS）とトンネル覆工検査車（新幹線CLIC）の2種類の機械を過去に開発導入した。今回は線路下空洞探査車の更新時期に合わせて、検査効率を向上するための次期探査車の技術開発を行い、アンテナ配置と解析装置の開発によって、検査速度を向上した際にも現行探査車と同等性能を維持するという目標を達成した。また、トンネル覆工検査車は在来線トンネルに適用するための技術開発を行い、レーダ保持機構などの開発によって、検査速度を向上した際にも現行検査車と同等性能を維持するという目標を達成した。

●キーワード：線路下空洞探査車、トンネル覆工検査車、電磁波レーダ、検査速度向上

### 1. はじめに

JR東日本の土工設備やトンネルなどの土木構造物検査については、従来から目視や打音検査などを主体とした検査を実施してきた（図1、2）。この検査は構造物の変状を直接目で確認できる長所があるが、目で確認できない変状は把握しづらい点や、検査結果が人間の判断力に依存するため、精度にばらつきが生じるなどの短所がある。



図1 土工設備の目視検査



図2 トンネルの打音検査

そのような状況を解決するため、テクニカルセンターでは電磁波レーダを用いて構造物の内部変状を検査する機械の開発を進めてきた。平成12年度には、路盤陥没を引き起こす路盤内の空洞を検査する線路下空洞探査車（UTRAS：Under-track survey car）を導入した（図3）。また、平成16年度にはトンネル覆工の剥落を引き起こす覆工内の変状を検査するトンネル覆工検査車（新幹線CLIC：Concrete Lining Inspection Car）を新幹線トンネルに導入した（図4）。今回、UTRASの更新時期に合わせて次期UTRASの開発を行い、また新幹線CLICを在来線トンネルに適用するための開発も実施したので、本稿で報告する。



図3 UTRAS



図4 新幹線CLIC

### 2. 次期 UTRAS の開発

#### 2.1 開発の背景

UTRASは導入してから10年以上経過し、更新時期を控えており、検査効率の悪さが課題になっている。それらの問題を解決するため、次期UTRASの技術開発を平成21年度から実施してきた。

UTRASは電磁波レーダを用いており、1個の送信アンテナから地中に向けて電磁波を送信し、周囲の土と電気的特性が異なる物質、例えば空洞や伏びなどの線路下構造物で反射されて返ってくる電磁波を受信アンテナ2個で捉えることで、路盤状態を検査している（図5）。しかし、UTRASの検査速度は2.5km/hであり、またレーダが地表面にはほぼ接触しているため、地上子箇所ではその都度回避しなければならず、検査効率が悪いという課題がある。そのため、路盤陥没の発生が懸念される場所などの局所的な検査に用いられてきた。

## 2.2 開発の概要

次期UTRASは全線を5年周期で検査するために、最低10km/h以上の検査速度で、現行UTRASと同等の検査性能（検査深度1.5m、50cm立方相当の空洞検出）を維持できるレーダの開発を行った。速度向上した際にも地中からの反射波を的確にとらえるために、送信アンテナを4個、受信アンテナを4個に増やしたレーダを開発した（図6）。また、地上子などの地上設備と衝突しない高さ（地表面から最大25cm高さ）にレーダを設置した。

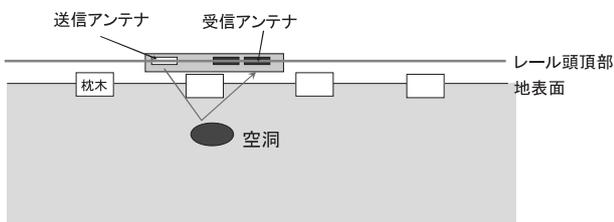


図5 UTRASのレーダ

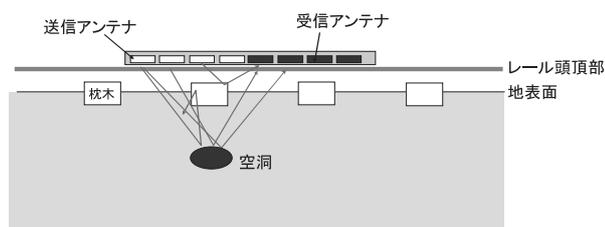


図6 次期UTRAS用に開発したレーダ

## 2.3 営業線での性能確認試験

開発レーダの性能を確認するため、鉄道用トロにレーダを搭載して営業線で試験を実施することとした。

### 2.3.1 試験方法

営業線にて、軌道自動自転車で鉄道用トロを牽引して試験を実施した（図7）。なお、試験時の最高検査速度は30km/hとした。線路下を横断する陶管（φ30cm）を空洞と仮定して検査し、どのような検査画像が得られるか検証した。

### 2.3.2 試験結果

図8に、10km/h・20km/h・30km/hで検査した深さ2mの陶管の検査画像を示す。30km/hになると陶管の波形は確認できないが、20km/hでは十分確認することができた。



図7 営業線での性能確認試験状況

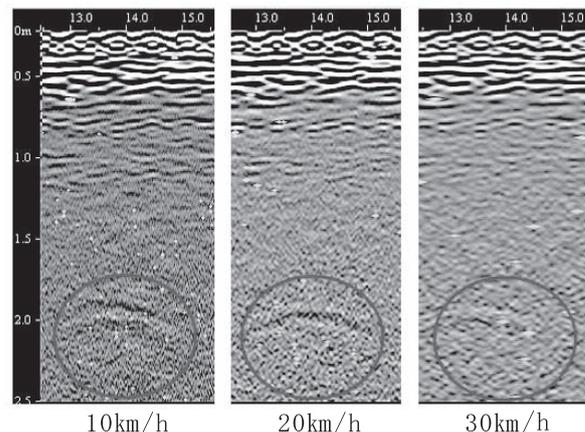


図8 深さ2mの陶管（φ30cm）の検査画像

### 2.3.3 マーキング機能の改良

空洞や埋設管を簡易的に区別するため、過去に開発導入したマーキング機能がある。これは、同深度の反射強度の平均値と比較して、あらかじめ設定されたしきい値を越える反射波を受信した場合に、検査画像に赤/黄色マーキングをつける機能である（図9）。

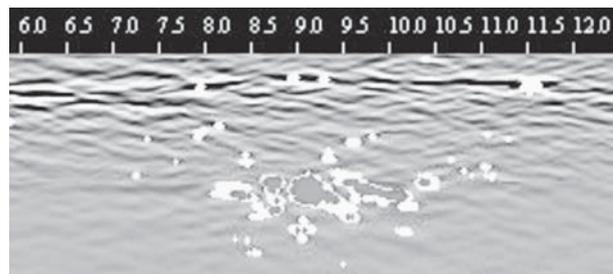


図9 空洞にマーキングがついた検査画像例

今回も同様にマーキングを試みたが、図8の検査画像の陶管にはつかなかった。マーキングがつかなかった原因として、レーダ高さを上げたために外部からノイズが入り、相対的な反

射強度比が小さくなったためと考えられる。ノイズを低減させるために、画像処理の汎用技術である平均化処理とメディアンフィルタ処理を施した(図10)。この処理は、細かなノイズを除去し、対象とするものだけを鮮明に映し出す効果がある。図8の20km/hで検査した画像で検証した結果、図10に示すように周囲のノイズが除去され、陶管部分のマーキングが増加する傾向がみられた。これにより、陶管の視認性が格段に向上することが確認できた。以上の取組みによって、20km/hで現行UTRASと同等性能を維持するという目標を達成できた。

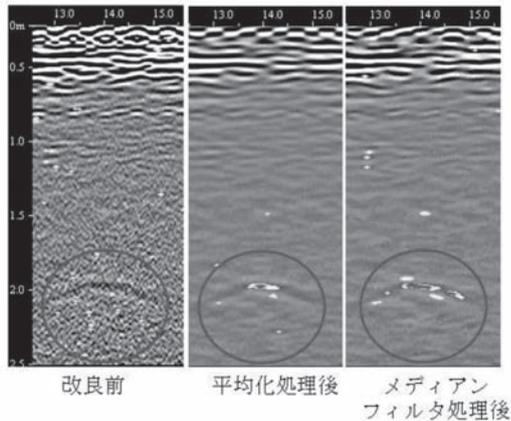
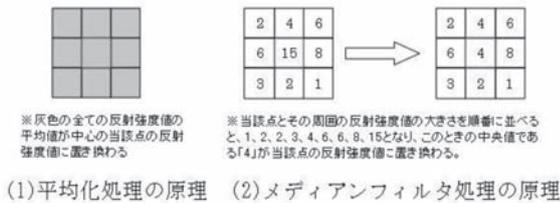


図10 マーキング機能の改良結果

### 3. 在来線 CLIC の開発

#### 3.1 開発の背景

新幹線CLICはマルチパルスニアアレイレーダ(MPALレーダ)を搭載しており、トンネル覆工面に密着して検査することで、内部の空洞やジャンカなどを三次元で検出している(図11)。新幹線トンネルは添架物などの障害物が少ないために検査しやすいが、在来線トンネルは反対に障害物が多いため、在来線トンネルに適用するには新幹線CLICの機構はそのまま使用できない。そのため、在来線CLICの技術開発を平成21年度から実施してきた。

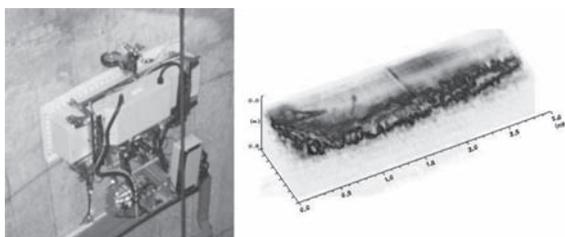


図11 MPALレーダの検査状況(左)と検査画像(右)

#### 3.2 開発の概要

在来線CLICの開発を実施するにあたり、以下の性能を目標に取組んだ。

- (1) 20年周期で運用するために、検査速度は新幹線CLICの3.5km/hから7km/hに速度向上する
- (2) MPALレーダの検査性能は、新幹線CLICと同等性能(40cm深さの10mm厚の空洞が検出可能)を維持する
- (3) MPALレーダが在来線トンネルに設置されている障害物を乗り越えるために、5cm高さ以上の障害物乗り越え能力(新幹線CLICは3cm高さ)を有する

#### 3.3 MPALレーダの基礎試験

速度向上した場合のMPALレーダの検査性能を確認するため、トンネル覆工モデルを使用した性能確認試験を実施した。検査速度を目標の7km/hに向上するためには、検査ピッチを新幹線CLICの1cmから2cmに拡大する必要がある。2cmピッチに拡大した場合に、新幹線CLICのMPALレーダと同等の性能を維持できるか検証した。試験は空洞モデルをトンネル覆工モデルに埋設して実施した(図12)。また、トンネル覆工モデルの表面は在来線単線トンネルの基本的な曲率半径を想定し、最小2.2m、最大2.8mの2種類を再現した。40cm深さの空洞モデルの検査画像を基準に評価すると、7km/hに相当する2cmピッチでは空洞を検出する性能を有していることが分かった。また、曲率半径の変化に対しても検査性能が変化しないことを確認した(図13)。

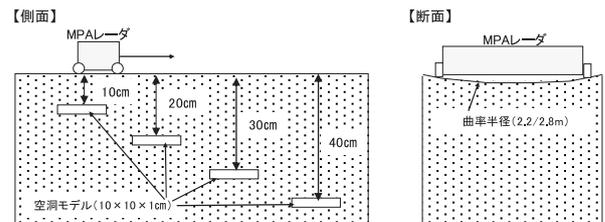


図12 トンネル覆工モデル

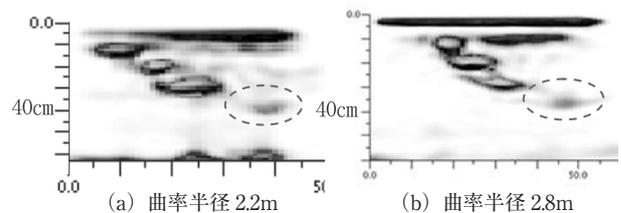


図13 2cmピッチ(7km/h相当)の検査画像(断面)

#### 3.4 レーダ保持機構の開発

MPALレーダの基礎試験の結果、レーダ性能面で7km/hまで速度向上できる見通しがたった。しかし、実際に速度向上した場合、MPALレーダは保持機構によりトンネル覆工面に密着した状態で検査するため、トンネル覆工面への追従性が

重要になる。また、障害物に衝突した際にそれを乗り越える能力が求められるため、新しいレーダ保持機構の開発に取り組んだ。在来線CLIC用に開発したレーダ保持機構は、新幹線CLICの平行リンク式からリニアガイド方式に変更することで、トンネル覆工面へのレーダ押付力を低減して柔軟に動けるようにし、速度向上による追従性を向上させた。また、障害物と直接衝突するソリの先端部形状を変更し、5cm高さ以上を乗り越えるためにソリの傾斜高さを5cmから7cmに高くした(図14)。開発した機構は軌陸トラックのブーム装置の先端に装着し、トンネル内で実際に検査できるようにした。

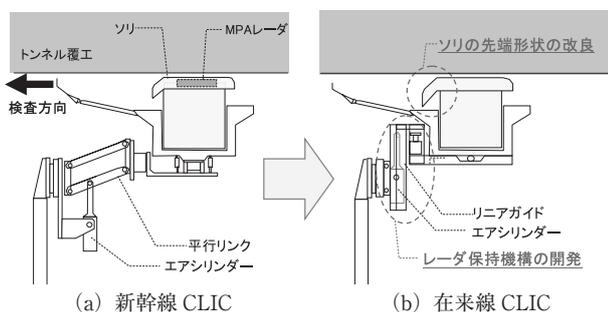


図14 開発したレーダ保持機構

### 3.5 廃線トンネル内の走行試験

廃線トンネル内に仮設レールを敷設し、実際に軌陸トラックを載線させた状態で、7km/hでのMPAレーダのトンネル覆工面追従性と、ソリの障害物乗り越え能力を確認した(図15、16)。トンネル覆工面追従性については、リニアガイドの動きをレーザ式測距センサで測定し、速度による応答変化を確認した。障害物乗り越え能力については、トンネル覆工面に障害物モデルを仮設して、MPAレーダを衝突させて乗り越えられるか確認した。



図15 試験状況



図16 障害物乗り越え試験

速度を変化させながら同区間を走行して、MPAレーダのトンネル覆工面追従性をレーザ式測距センサで測定した結果を図17に示す。3~7km/hで走行した際のMPAレーダとトンネル覆工面の離隔変化の標準偏差を求めた結果、3km/hが8.2mmであったに対して7km/hは8.7mmであり、速度向上による追従性の低下はほとんど起きないことを確認した。また、障害物乗り越え能力については、7km/hで6cm高さの障害物モ

デルを乗り越える性能を発揮した。

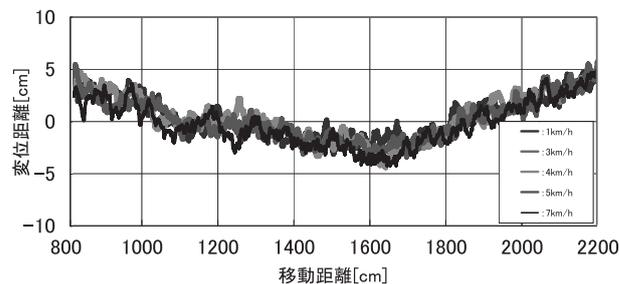


図17 MPAレーダのトンネル覆工面追従性

### 3.6 在来線トンネル内の走行検査試験

在来線トンネル内で走行検査試験を行い、7km/hに速度向上させた場合のMPAレーダの検査性能を検証した。図18に、同区間を新幹線CLICと同条件である3km/h(1cmピッチ)で検査した画像と、今回の目標7km/h(2cmピッチ)で検査した画像を示す。比較評価すると、7km/hでは3km/hと比べて画像の解像度は低下するものの、変状の有無や位置などの検出性能は同等であることを確認した。以上の取組みによって、7km/hで新幹線CLICと同等の性能を維持するという目標を達成できた。

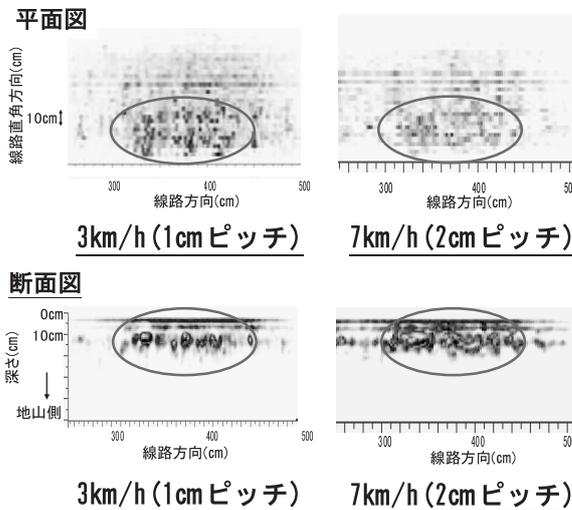


図18 速度ごとの検査画像(ジャンカの可能性)

## 4. おわりに

次期UTRASと在来線CLICは、以上の開発取組みにより、検査速度をそれぞれ20km/h、7km/hに向上しても現行機械と同等の検査性能を維持できることを確認した。今後は実用車両の検討を進め、平成25年度の導入をめざす。

### 参考文献

- 1) 大澤裕之、赤井司；トンネル覆工検査車の導入、日本鉄道施設協会誌、Vol.42,2004.12