

- 鉄道一般
- 車両
- 施設
- 電気
- 運転・輸送
- 防災
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

# 画像解析データで鉄道トンネルの健全性を診断する

日本の鉄道トンネルの総延長は約4,000kmにもおよび、今後労働人口が減少する中で、検査業務をいかに効率化・高精度化するかが課題となっています。構造物の維持管理の分野において、これまでの目視による監視や検査に代わる技術として、画像技術が活用され始めています。トンネルは、定型の断面形状をもった線状の構造物であることから、壁面の撮影や撮影画像の接合は比較的容易であり、実務への適用は早い時期から行われています。ここでは、トンネル検査の支援技術としての、壁面画像の撮影、パノラマ写真の合成、画像からのひび割れの抽出、ひび割れデータの活用について紹介します。



**野城 一栄**  
Kazuhide Yashiro  
構造物技術研究部  
トンネル研究室長



**鵜飼 正人**  
Masato Ukai  
信号・情報技術研究部  
画像・IT研究室長

## はじめに

構造物の維持管理の分野において、これまでの目視による監視や検査に代わる技術として、画像技術が活用され始めています。画像を解析することにより所定の位置からのずれを求めて異常の有無を検知する技術や、撮影画像を基に検査対象となる構造物を三次元モデルで再現する技術などが開発されてきています。

トンネルは、画像技術の適用が比較的早くから行われてきた構造物で、検査員の目視による全般検査を支援する技術として、20年以上前から壁面画像の撮影・パノラマ写真の合成が行われてきています。

## 壁面画像の撮影

トンネルの検査は変状展開図(図1)を用いて行うのが一般的です。変状展開図は、トンネル覆工に現れるひび割れなどの変状を展開図上に記載したもので、前回の検査結果と比較することにより変状の発生や進展の有無を知ることができるほか、重点的に検査をすべき箇所を検査前に把握しておくことで、限られた検査のための時間を有効に活用することができます。

一方で、変状展開図には、作成者の主観が入りやすい、手書きのため位置が正確でない場合がある、作成に時間を要する、などの課題がありました。このため、変状展開図の自動作成につ

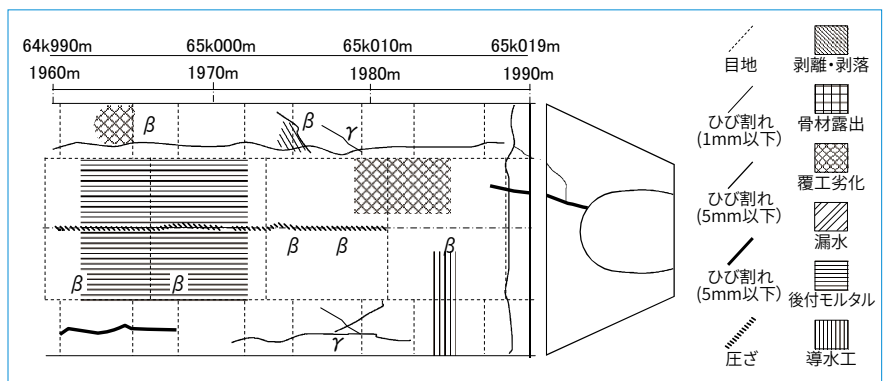


図1 変状展開図の例<sup>1)</sup>



図2 トンネルスキャナーによる撮影

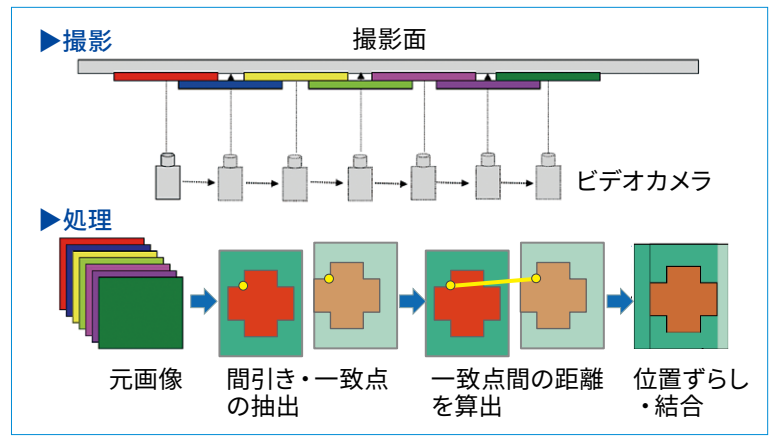


図3 画像の結合の原理<sup>2)</sup>

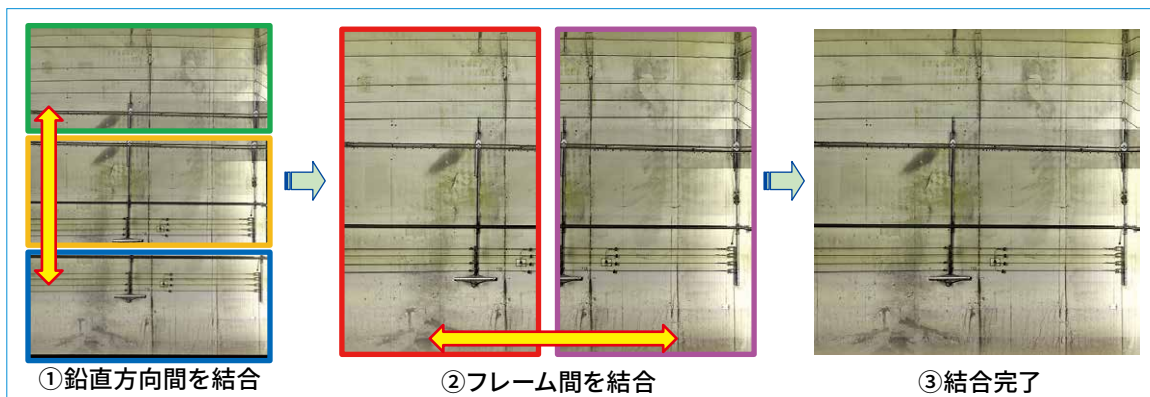


図4 画像の結合の流れ

ながらる基盤技術としてトンネル壁面を撮影しパノラマ写真に合成する技術が開発されました。

鉄道総研では、ラインセンサーカメラやエアロセンサーカメラ(☞参照)を用いて壁面を撮影し、画像を接合して、高繊細のパノラマ画像を作成する装置(トンネルスキャナー)を開発し、これまでに多くの事業者にご利用いただいています。

トンネルスキャナーによる撮影は、軌陸両用トラックや工専用トロッコなどに撮影機材と照明を搭載して列車運行終了後の夜間に軌道上を走行しながら行います(図2)。カメラには、ラインセンサーカメラと、エアロセンサーカメラを使用します。初期の頃はラインセンサーカメラを多用していましたが、最近では、4Kカメラなどの高解像度のカメラが安価に入手できるように

なってきたことから、エアロセンサーカメラを使用している撮影が多くなってきています。トンネルの夜間の作業間合いは数時間程度と限られていますが、トンネルスキャナーは、撮影速度が20km/hと高いため、一晩に30km程度の撮影が可能となっています。

### パノラマ写真の合成

トンネルの壁面全周をくまなく撮影するためには、複数台のカメラによる撮影と画像の合成が必要になります。ここでは、エアロセンサーカメラを例にとり合成の手法を説明します。撮影された画像のうち、位置が隣接する2つのコマを用い、一致点を自動推定してコマ間の移動量を算出し、この移動量分だけずらしながら2つのコマを結合するという技術を用いています(図3)。また、この処理において

は、ゆがみの影響を抑えるために、各フレームの画像中央付近の領域を使用して接合します。最初に、トンネル断面方向にフレームを接合した後、線路延長方向に接合します(図4)。最終的に、スパン単位など、一定の長さで分割して完成となります。

#### ☞ ラインセンサーカメラ

対象を線で撮影するカメラで、コピー機などに使われています。カメラを移動させながら撮影することにより、線で撮像した画像が自動的につなぎ合わされて1枚のパノラマ画像が記録されます。

#### ☞ エアロセンサーカメラ

対象を面で撮影するカメラで、デジタルカメラがその例です。カメラを移動させながら撮影することにより、面で撮像した画像が、フレームレート(1秒あたりの撮影コマ数)に応じて記録されます。

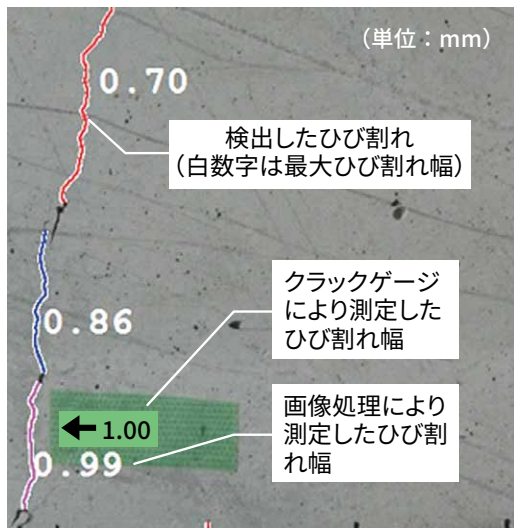


図5 サブピクセル処理による高精度化<sup>3)</sup>

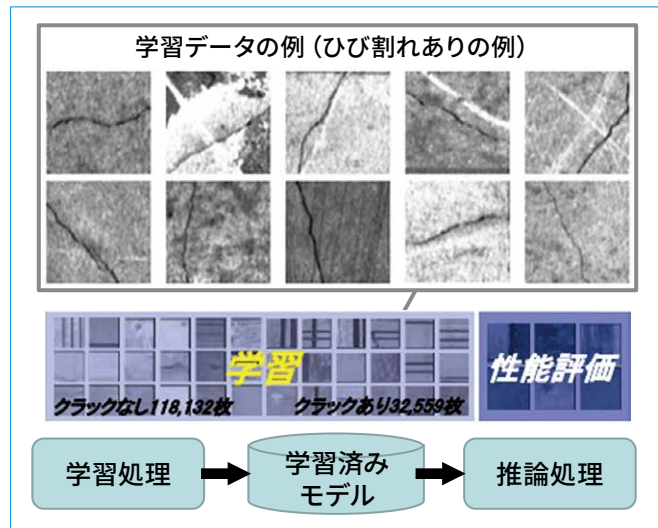


図6 深層学習による識別モデルの作成とその例<sup>4)</sup>

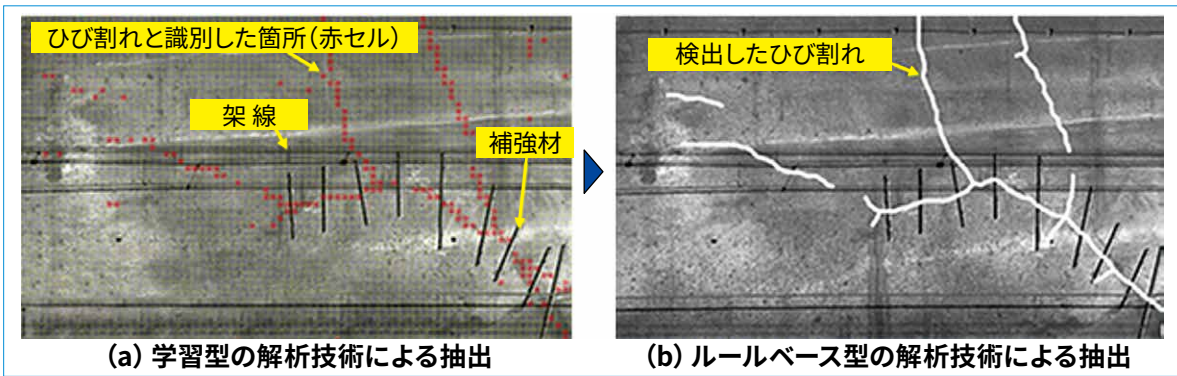


図7 ひび割れ抽出の流れ<sup>4)</sup>

### 画像からのひび割れの抽出

トンネルの変状はひび割れとして現れることが多いこと、過去との比較がしやすいことから、トンネルの検査は、ひび割れの長さや幅、数量、およびそれらの変化にまず着目して行われています。最近では、変状展開図の自動作成につながる技術として、画像からひび割れを自動的に抽出する画像処理手法の開発を進めています。

撮影画像から詳細な変状展開図を作成するために重要なのが、画像の解像度です。単線トンネルを例にとるとトンネルの周長はおよそ13mあり、長手方向に4000画素程度の4Kカメラを7台使用したとしても、切り捨て部や重なり部を考慮すれば14,000画素程度で、1画素1mm相当ということになります。一方で、ひび割れに対する一般的な検

出要求は幅0.5mmであり、このままでは解像度が不足します。そこで、解像度を高める手法として、ひび割れのエッジ部分の画素の濃淡を利用し、あるしきい値よりも濃い領域をひび割れと判定する「サブピクセル処理」を行うことにより、0.5mm程度のひび割れの検出を可能としています(図5)。

画像の解像度を高めることと並行して、撮影画像からひび割れの抽出を行います。鉄道総研では、学習型とルールベース型のハイブリッドによるひび割れの抽出技術を開発しました。

撮影画像に対して、まず学習型の解析技術として、機械学習による画像識別を適用し、ひび割れが含まれる可能性が高い領域を抽出します。その後、ひび割れが含まれる可能性が高いと判断された領域に対して、ルールベース

型の詳細解析を行い、ひび割れを抽出します。

機械学習にはディープラーニング(深層学習)を適用しました。あらかじめ学習データとして、ひび割れが含まれない画像と、ひび割れが含まれる画像を大量に学習させることにより識別モデルを作ります(図6)。このモデルをパノラマ写真に適用して、画像領域のうち、ひび割れが含まれる可能性が高い領域だけを抽出します(図7a)。

ルールベース型は、画像データに対し、フィルターでノイズを除去したのち、ひび割れとそうでない箇所の明暗の変化に基づき、「ひび割れの候補」を検出するというものです。ひび割れの幅については、横断方向の濃淡の変化に基づき検出します。「ひび割れ候補」に対し、終点が隣接しているものを、

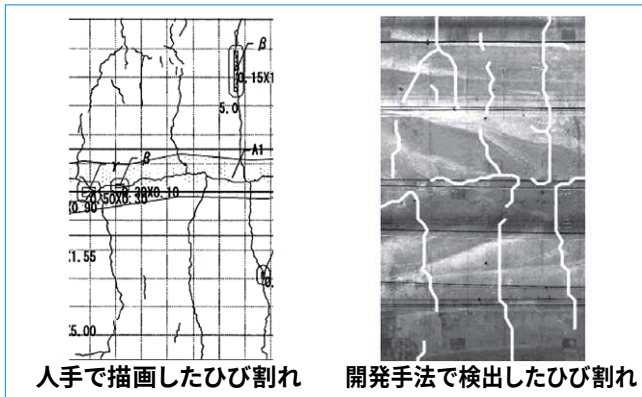


図8 ひび割れ抽出結果の例<sup>5)</sup>

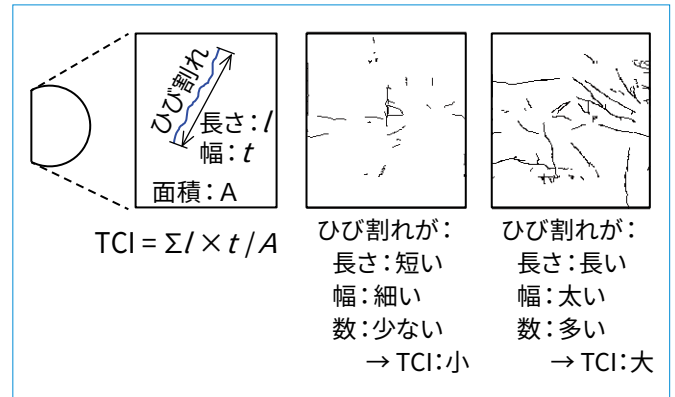


図9 発生しているひび割れとTCIとの関係

その間を補完してつなぎ、一連のひび割れとして最終的に抽出します(図7b)。

図8にひび割れ抽出結果の例を示しますが、人間の判断に近い検出結果が得られており、変状展開図の自動作成につながる要素技術を開発できています。

### ひび割れデータの活用

最近では、変状展開図に記載されたひび割れのデータを健全度判定に積極的に活用する方法が模索されています。

ひび割れを定量化する方法として、トンネルの維持管理の分野では Tunnel Crack Index (TCI) とよばれる指標が目立っています。TCIの詳細な定義は割愛しますが、単位面積あたりのひび割れの長さ×幅の積の合算で表される指標です(図9)。

図10に、あるトンネルにおける壁面画像・ひび割れ展開図・TCIの値の関係を示しますが、検査の結果、変状が多く注意して維持管理すべきと判断された区間において、ひび割れの量が大きくTCIが大きくなっていることがわかります。維持管理においては、TCIにあるしきい値を設けて、この値を超えた区間で重点的な検査を行うといった活用の方法が考えられます。なお、トンネルの健全度は、ひび割れの量のほかにひび割れの質(方向性、発生場所など)などもあわせて考慮のうえ判断する必要があります。

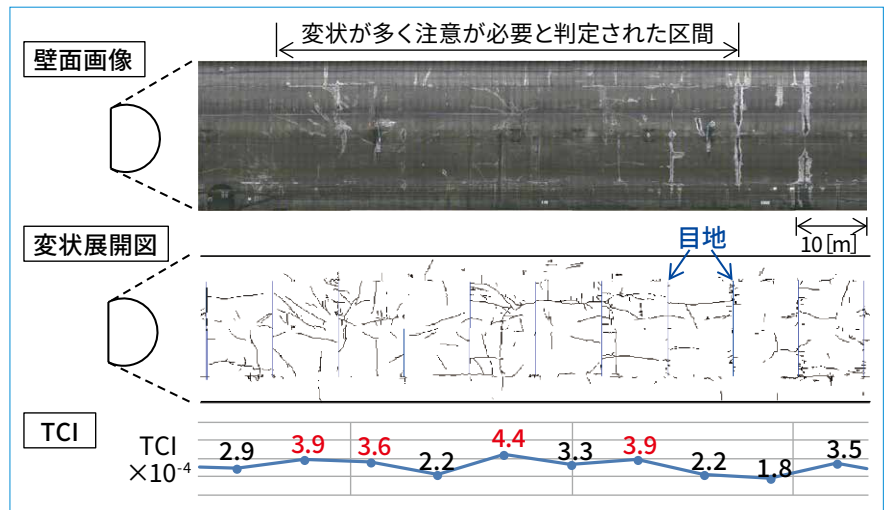


図10 ひび割れ分布とTCIとの関係の例

### おすび

トンネル検査の支援技術としての、壁面画像の撮影、パノラマ写真の合成、画像からのひび割れの抽出、ひび割れデータの活用について紹介しました。画像撮影-ひび割れ抽出-ひび割れデータの活用までの一連の流れを進めていくことにより、必要な箇所を重

点的に維持管理することで、今後労働力人口が減少していく中でも、安全性を維持しつつ保守業務の効率化が可能となると考えられます。AI技術の導入により、画像技術の活用の可能が広がっています。安全な列車運行に貢献する維持管理技術として、今後も研究開発に取り組んでまいります。[RRR]

### 文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編)トンネル，丸善出版，p.169，2007
- 2) 鶴飼正人，長峰望：新しい画像処理技術によりトンネルの高精度検査を実現する，RRR，Vol.69，No.12，pp.24-27，2012
- 3) 鶴飼正人：画像処理技術を用いてトンネルを検査する，RRR，Vol.72，No.9，pp.20-23，2015
- 4) 鶴飼正人：画像技術により鉄道の運行を支援する，RRR，Vol.77，No.9，pp.4-7，2020
- 5) 鶴飼正人：深層学習を用いたトンネル覆工面のひび割れ検出手法の開発，鉄道総研報告，Vol.32，No.5，pp.5-10，2018