

音響診断法を用いたシールド掘進機の運転監視方法に関する研究

秩父顯美¹・吉野広司²・佐藤一彦³

¹正会員 工修 株式会社フジタ 技術センター (〒243-0125 神奈川県厚木市小野2025-1)

²正会員 工修 株式会社フジタ 技術センター (〒243-0125 神奈川県厚木市小野2025-1)

³工博 室蘭工業大学 情報工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町27番1号)

設備診断法の一つである音響診断技術を適用してシールド掘進機の運転監視システムを開発することを目的に、加速度センサによる検出信号を用いた掘進機の異常診断や切羽地質の推定方法などについて検討した。その結果、異常を表す信号にはある特定の狭帯域における周波数スペクトルが卓越するという特徴があり、広帯域と狭帯域のエネルギー比を指標として掘進中の異常現象を検出できる可能性があることが判明した。また、検出信号の正規化されたパワースペクトルを特徴変数として主成分分析を行うことにより、掘進機の仕様や運転方法の異なる事例での検出信号を同じ特徴空間において地質別にパターン分類できることが判明した。これらの結果から、掘進機においても音響診断の適用性は高いと言える。

Key Words : shield tunnel, acoustic diagnosis, pattern classification, principal component analysis

1. まえがき

社会资本の維持管理に要する費用が増加するに伴い、新たに資本を構築する建設工事のコストダウンが強く要請されるようになってきている。シールド工事も例外ではなく自動化施工による省力化、高速施工や長距離施工による工期短縮など様々な工夫による工事費低減が試みられている。しかし、地盤内の過酷な条件下において長期間連続して作業を進めるシールド工事では、掘進機の劣化や損傷が著しく機械が故障して掘進作業が中断することも少なくない。特に最近では礫や岩盤を含む複雑な地盤における工事が増加する傾向にあり、掘削地盤が相対的に硬いことに加えて、地層の変化点などが事前調査と著しく異なることが多いため、適切な運転操作を選択するタイミングが遅れ地表面沈下や機械の損傷などのトラブルに巻き込まれるケースも増えている。

最近の自動運転システムでは、多数の計測データをコンピュータによって瞬時に処理できる利点を活かし、制御間隔を短縮して運転操作の異常を速やかに修正することによりトラブルを回避する方法が取られている。しかし、従来からシールド機で用いられている各種センサでは、運転操作に必要な機械量データの計測は可能であるが、掘進機に発生した劣

化や損傷による異常現象、切羽での掘削状況などを直接検知することは困難である。このため、掘進中に機械の損傷が徐々に進行し、大規模な修理を必要とする事態に巻き込まれることも少なくない。シールド工事では、掘進作業を中断することがその経済性を損ねる最も大きな要因となるので、コストダウンを図るためにトラブル要因を早期に発見するセンシング技術の開発が急務の課題である。

このような背景から、筆者らは機械装置の設備診断で用いられている音響診断技術に着目し、シールド掘進機の運転監視システムを開発することを目的とした研究を進めてきた^{1), 2), 3), 4), 5)}。本研究ではこれらの成果を取りまとめ、掘進中に発生した機械の異常を検知し掘進機の運転状態を診断する方法について検討した結果を報告する。また、切羽地質の推定を目的に、検出信号を地質別にパターン分類する方法を検討した結果についても述べる。

2. 切羽探査法に関する既往の研究

シールド工事で発生するトラブルの多くは掘削地盤の状態を目視・観察できないことに起因するとの考え方から、密閉された掘進機の前面を探査する技術

の研究開発が各方面で進められてきている。これらは大きく、切羽面の地質性状を探査する方法と切羽前方にある障害物や地層が変化する境界などを探査する方法とに分けることができる。

前者には超小型ビデオカメラをバルクヘッドから挿入し切羽面の地質性状やカッタの摩耗状況などを直接観察する方法⁶⁾、カッタヘッドに電極を配置し土の含水状態や密度の違いにより電気抵抗値が変化することを利用して切羽面の土質分布を推定する方法⁷⁾などがある。また、カッタヘッドに設置した検知棒に振動センサやAEセンサを取り付け、ヘッドの回転にともなう摩擦振動を計測して切羽面の地質分布を推定する方法⁸⁾も提案されている。一方、後者では電磁波や弾性波などを送受信するレーダをカッタヘッドに設置し、前方の障害物や地層が変化する境界からの反射波の到達時間や特性の変化を利用してその位置や地質性状を検出する方法^{9), 10)}が提案されている。

既往の方法には実用に供されたものもあるが、実際の工事において試験的にその適用性を検証した段階のものが多く、シールド工事の全区間にわたって連続的に探査する手法として必ずしも実用化されていないのが現状である。この理由には装置自体が高価なことに加えて、センサ設置のために掘進機の改造を必要とし計測コストが高いこと、結果の解釈に高度な専門知識を要するものが多いこと、計測のために作業を中断する必要があることなどが挙げられる。また、高度成長時に急増した工事量の多くが軟弱で均質な地盤に集中したため、必要性が低かったこともその一因であると考えられる。

3. シールド工事への音響診断技術の適用

(1) 掘進機における音響診断

機械装置の設備診断では稼動中の振動をセンサで計測し、何らかの異常が発生すると本来持っている振動の大きさや性質に変化をもたらすことを利用して装置の異常を検出する方法が多く用いられている。音響診断はこのような診断方法と基本的には同じであるが、高帯域の周波数までを計測対象としている点が大きく異なる。一般に、設備診断では機械結合部のゆるみやガタなど機械本体にかかる比較的大きな欠陥の検出には数kHz以下の低周波振動が有効であり、軸受、歯車などの機械要素の損傷による異常は数kHz～数10kHzの中間的な振動を利用して効果的に検出できると言われている。また、数10kHz以上の高周波振動を計測し材料の微小

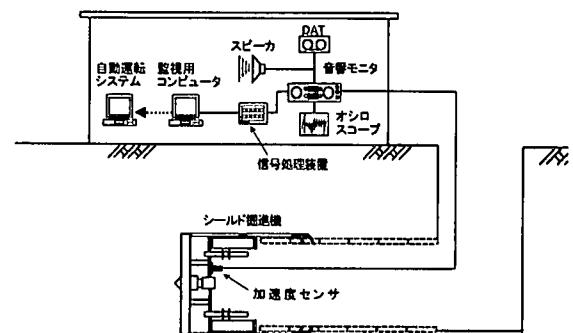


図-1 シールド掘進機における音響診断の計測方法

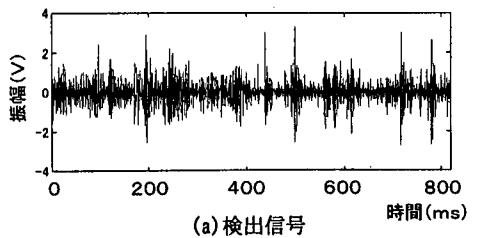
割れなどの欠陥をも検出可能である¹¹⁾。このような特長を持つ音響診断法は異常発生の予知・予防も可能な診断方法として注目され、すでに切削工具(ドリル)の摩耗や折損の監視¹²⁾や生産ラインにおける自動検査システム¹³⁾など多くの実績がある。

密閉された掘進機の前面で掘削作業を行うシールド工事では、技術者による掘進状況の観察が困難なため、カッタで地山を掘削する際の振動を利用して掘削状況を直接推定することができれば掘進管理に非常に有用であると考えられる。シールド工事に音響診断法を適用する目的には次のようなものがある。

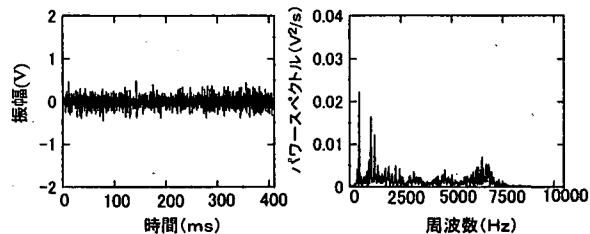
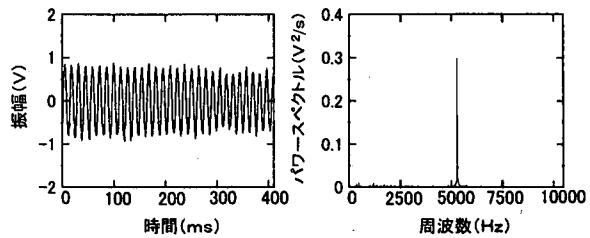
- ① 掘進中に発生する機械の劣化や損傷に伴う異常現象を早期に発見し、その原因を究明する。
- ② 掘進機前面での掘削状況を把握し、無理な運転操作による異常の発生を監視する。
- ③ 切羽の地質性状を推定し、事前の調査結果を補完して地質の変動箇所や著しく地質特性の異なる地盤の出現などをリアルタイムに検知する。

(2) 音響診断の計測システム

シールド掘進機における音響診断の計測方法を図-1に示す。運転中に発生する掘進機の振動はブリアンプ内蔵の加速度センサで受信され、地上の制御室に設置した計測装置(音響モニタ)で必要に応じて増幅しフィルタによって低周波ノイズが除去される。加速度センサには駆動モータによる掘進機固有の振動やカッタで地山を切削する振動などが受信され、掘進機に機械全体の欠陥や機械要素の損傷などによる異常が発生した場合にはその振動が重なり合った形で計測される。本システムでは計測対象の周波数帯域を可聴音帯域と類似の100Hz～20kHzとしているが、これは現象を解明するにあたって人間の聴覚による判断を利用するためである。



(a) 検出信号



A/D: アナログ信号をデジタル
信号に変換
サンプリング周波数: 40kHz or 20kHz
サンプリング時間: 200ms or 400ms

(b) 信号処理方法

図-2 検出信号の信号処理方法

従来から提案されている切羽探査法の多くが前面のカッタヘッドにセンサを配置するのに対して、本計測では内側のバルクヘッドにマグネットを用いて取付けるため、機械の改造が不要であり計測コストが安価である。また、掘進途中で不測の事態が発生した場合にもセンサを設置して計測を開始することも可能である。

(3) 検出信号の信号処理方法

加速度センサによる検出信号は図-2(a)に示すような連続信号となるので、その信号処理は所定のサンプリング速度で繰り返し入力された固定長の信号データに対して行う必要がある。信号処理では高速フーリエ変換法(FFT法)によりパワースペクトルを求め、後述する掘進機の動作状態の識別や切羽地質分類に有効な特性値を抽出するのに用いた。

実際の掘進管理で利用するにはリアルタイムに特性値を算定する必要があるため、本研究では新たに信号処理装置を開発した。この装置では図-2(b)に示すように、10秒間に40個の信号データの処理が可能であり、設定した時間間隔毎に計算結果をコンピュータに転送することが可能である。

4. シールド掘進機の異常診断

(1) 異常診断方法

掘進中に発生する掘進機の異常にはカッタヘッドの回転軸受や駆動モータなどの機械要素の損傷、油

図-3 異常発生時(上図)と正常運転時(下図)の検出信号およびそれらのパワースペクトルの比較

圧系統の故障、カッタの劣化や損傷などがある。このような異常に対する診断は、従来から設備診断で用いられている方法と同様に正常運転時における検出信号の状態量を基準として行われる。しかし、定置式の機械装置とは異なりシールド掘進機は地盤内を移動するため、正常運転時においても検出信号が掘削地盤の影響を受けて変化する。従って、単純に信号の変化に注目するだけでは異常の発生を検知することは難しく、検出の指標には掘削地盤の影響を受けない状態量を用いる必要がある。

異常信号が検出されると掘進機の状態はその発生状況の経時変化から診断できる。すなわち、異常信号が継続的に発生しその発生数が増加するようであれば掘進機に何らかの異常があると判断できる。ただし、異常の種類によっては長時間にわたって徐々に進行し異常信号の発生が断続的な場合もあるので、発生が認められる場合にはその経時変化を常に監視していく必要がある。

(2) 異常信号の特徴とその検出方法

異常信号の例として、後述の事例-1で検出した信号とそのパワースペクトルを図-3に示す。これは泥岩層を掘削中にセンタシャフトの回転軸受部で潤滑材不足が生じたときに発生したものである。同図に示す正常運転時のスペクトルと比較すると、異常信号には正常時に見られない特徴がある。すなわち、正常時の検出信号は不規則波でその周波数成分は広帯域に分布しているが、機械に異常が生じると狭帯域にスペクトルの明瞭なピークを持つ信号が検

表-1 異常が検出された事例の工事概要

	事例-1	事例-2
施工延長	1340m	1860m
掘削地盤	前半泥岩層 後半砂礫層	粘性土層から 中硬岩層まで
掘進機の仕様	径2140mm 岩盤対応泥土式	径2140mm 岩盤対応泥土式
異常形態	回転軸受の潤滑油不足	カッタ偏摩耗 機械の振動

出される。異常時には機械の特定部位のこすれや摩擦などの現象が繰り返し発生し、これに伴って振動が生じるためである。このような特徴を利用して異常信号を検出するため、本研究では狭帯域の占めるエネルギーの割合に着目した。

今、 Δt の間隔でサンプリングされた N 個の時系列データを FFT 法により周波数領域に変換したとき、検出信号の総エネルギー E はスペクトル面積として次式で表すことができる。

$$E = \sum_{i=1}^n P(f_i) \Delta f \quad (1)$$

$$\begin{aligned} n &= N/2 \\ \Delta f &= 1/(N\Delta t) \end{aligned}$$

上式で $P(f_i)$ は周波数 f_i のパワースペクトルである。上限周波数 $f_{N/2}$ までの周波数帯域を m 個の狭帯域に等分割したとき、 j 番目の狭帯域のもつエネルギー $E_{NB}(j)$ は次式で演算される。

$$E_{NB}(j) = \sum_{i=a}^b P(f_i) \Delta f \quad (2)$$

$$j = 1, 2, \dots, m$$

ここで a, b はそれぞれ j 番目の狭帯域の始点と終点を表している。これより、信号データの総エネルギーに対して各帯域の占めるエネルギーの割合 $R(j)$ は次式で求めることができる。

$$R(j) = E_{NB}(j)/E \quad (3)$$

本研究では式(2)で算定される $E_{NB}(j)$ が最大となる狭帯域の中心周波数をピーク周波数、このときの式(3)で定義されるエネルギー比 $R(j)$ をピークエネルギー比とそれぞれ呼ぶことにする。ここでは、計測対象の周波数の上限を 20kHz とし、狭帯域への分割数

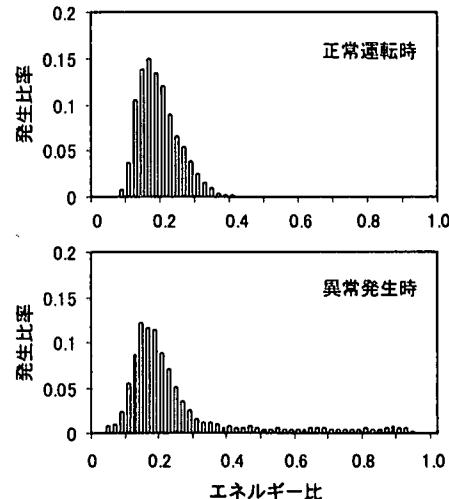


図-4 正常時と異常時のピークエネルギー比の分布

を $m=128$ として検討した。ある特定の周波数成分が卓越するほどピークエネルギー比は大きくなり、あらかじめ決められたしきい値以上の信号が検出されると、掘進機に何らかの異常が発生したと推定できる。

このような異常信号の検出方法を、実測データにもとづいて検証した結果を以下に説明する。なお、検証は表-1 に示す工事例において、掘削中に異常が発生した区間での計測データを用いて行った。

(3) センタシャフトの回転軸受部の異常

事例-1 では泥岩層を掘削中に掘進機の異常を表す信号（図-3）が観測された。当初その発生要因については不明であったが、検出信号の波形解析や掘進機の点検を行った結果、センタシャフトの回転軸受部で用いられているボールベアリングの潤滑材が不足したため焼付けを起こしていると推定された。そこで、数回にわたってグリースを注入したところ異常信号は検出されなくなった。

a) ピークエネルギー比とピーク周波数

掘進機に異常が発生した区間とそれ以前で正常運転しているときの信号特性を比較するために、各 1 リングの掘削区間（1 リングは 90cm の掘進長に相当）から求めたピークエネルギー比の分布状況を示すと図-4 のようになる。ここで、ピークエネルギー比は掘削リングあたり 3 分間の録音データを信号処理装置に再入力して求め、全信号数（7200 個）に対する比率で表示している。図より正常時の信号のピークエネルギー比は高々 0.4 であるのに対して、異常時にはこの範囲を越える値を持つ信号も多く発生していることがわかる。

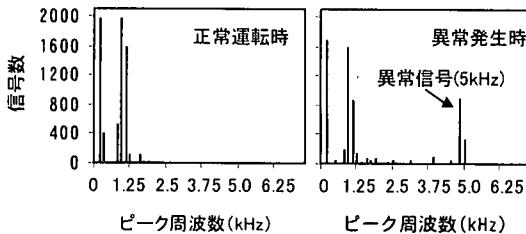


図-5 正常時と異常時のピーク周波数の比較

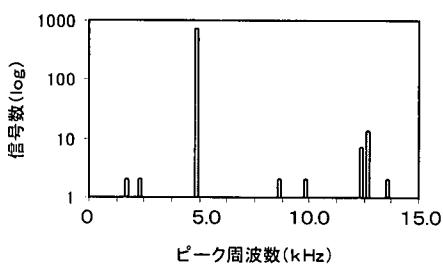


図-6 ピークエネルギー比 0.5 以上を持つ信号の
ピーク周波数分布（異常発生時）

各信号のピーク周波数を見ると、図-5に示すように正常時には 100Hz～2kHz の範囲に分布するのに對して、異常時にはこれ以外にも 5kHz 付近にピーク周波数を持つ信号が多数検出されている。図-6 は異常時の検出信号のうち、ピークエネルギー比が 0.5 以上の信号についてピーク周波数別の頻度分布を示したものである。5kHz 付近にピーク周波数を持つ信号が大部分を占め、信号総数 773 個のうち 732 個 (95% 以上) がこれに該当する信号である。これより、しきい値をピークエネルギー比 0.5 として回転軸受の異常による信号の検出が可能であると言える。

b) 経時変化

図-7 は上述のしきい値を用いて各リング毎に検出した異常信号の発生数を示したものである。図より 173 リング付近から異常信号の発生数が急激に増加し、約 10 リング区間連続的に発生していることがわかる。実際の工事では 182 リングから数リングにわたって潤滑材を注入しているが、その効果を除々に発揮して 195 リング付近ではほとんど発生しなくなる状況が図から読み取れる。

また、この事例では異常信号がオシロスコープ上で頻繁に観察されるようになってから対策を講じているが、図では頻繁に発生する約 20 リング以前においても異常信号が認められ、提案する検出方法が異常の早期検知にも有効であることを示していると言える。

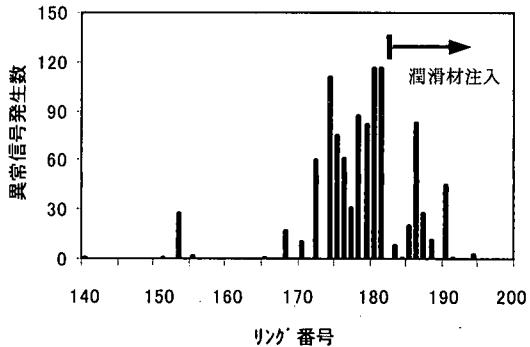


図-7 回転軸受の損傷に伴う異常信号発生数の経時変化

(4) ディスクカッタ損傷に伴う異常検出

発生要因の異なる異常現象としてディスクカッタの異常を取上げ、同様な方法の適用性を検証した。岩盤層や巨礫層などを含む地盤で用いられるディスクカッタは、カッタヘッドの回転に伴うカッタの自転を利用して地盤を掘削するため、回転部が故障して自転できなくなると、カッタを地盤に強く押付け引摺くようにして掘削することになる。正常運転時の回転運動に伴う摩擦と比較するとカッタの一部だけが偏摩耗するためその進行が著しく、掘削能力は急激に低下する。

a) 異常信号の検出と異常の形態

事例-2 では第1回目(273 リング)と第2回目(467 リング)のカッタ交換地点間において、22 個のディスクカッタうち半数以上が写真-1 に示すように著しく損傷した。写真からディスクカッタの回転部に土粒子が進入し、上述のような損傷が発生したことがわかる。異常信号の検出はこの区間において計測された各リング 5 分間の信号データを用い、回転軸受の場合と同様な方法で行った。しきい値をピークエネルギー比 0.4 とし、これ以上の値を持つ信号についてそのピーク周波数と発生数を示すと図-8 となる。ここで検出しきい値を 0.4 と小さくしたのは、巨礫層や岩盤層のように硬い地盤では検出信号の振幅値が大きく、算定されるピークエネルギー比が相対的に小さくなるためである。

図よりこの区間では要因の異なる 2 種類の異常現象が発生し、ピーク周波数はそれぞれ 1100Hz と 390Hz 付近にあることがわかる。カッタ交換時の状況と周波数特性から判断して、前者はディスクカッタの回転が停止しカッタに偏摩耗が生じているときの信号であると考えられる。一方、後者は低周波の信号であることから、無理な運転操作によって過大な負荷がかかり掘進機自体が振動しているときに発



写真-1 デスクカッタの破損状況

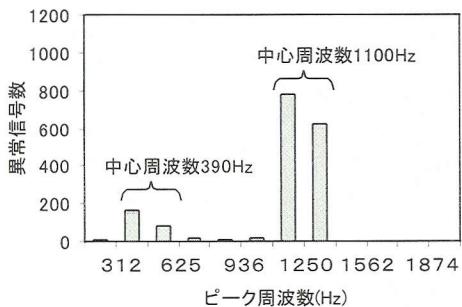


図-8 デスクカッタの損傷に伴う異常信号のピーク周波数の分布

生したものであると推定される。

b) 異常信号発生数の経時変化

図-9はリング毎に求めた異常信号の発生数をその形態別に示したものである。掘削土砂の観察記録と録音テープの音から推定した掘削地盤の地質特性と対比して検討すると次のようなことが言える。

まず最初に1100Hz付近にピーク周波数を持つカッタの偏摩耗による異常信号の発生数をみると、1回目のカッタ交換後約50リング経過した320リング付近から発生し始め、岩盤層の続く346リング付近まで断続的に発生していることがわかる。中間の粘性土層では検出されなくなるが、その後岩盤層に入り20リング程度経過した434リング付近から再び活発に発生し始めている。しかし、2回目の交換直前では岩盤層を掘削しているにもかかわらず、その発生数は少なくなる傾向を示している。このような結果は、ディスクカッタの偏摩耗が必ずしも摩耗の進行した段階で回転部の故障に伴って発生するのではなく、初期の段階においても発生することを示している。すなわち、岩盤層のような硬い地盤において掘進速度を上げるために過大な推力をかけて運転するとディスクカッタに大きな負荷がかかり、回転が

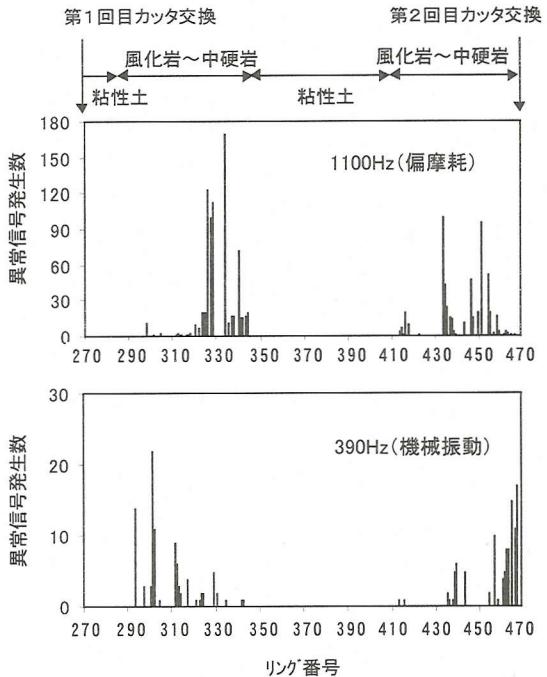


図-9 デスクカッタの損傷に伴う異常信号の経時変化

一時的に低速化または停止し偏摩耗が発生すると考えられる。

また、回転部が故障すると数リング継続して偏摩耗が発生するが、摩耗が進行してディスクカッタの刃先が切羽面と接触しなくなると他のカッタでその負荷を受け持つため、損傷と偏摩耗が次々に残りのカッタに転移していくものと考えられる。

一方、390Hz付近にピーク周波数を持つ信号の変化を見ると、前半の岩盤層に入った直後と2回目のカッタ交換直前に集中し、偏摩耗の発生時期とは必ずしも一致していない。この信号は過負荷を受けた掘進機の振動によるものと考えられるので、前半部では岩盤層に入り掘削抵抗が急に大きくなり無理な運転操作を行った可能性が高い。その結果、一部のディスクカッタの回転部が損傷して偏摩耗を起こし、次々にその損傷が拡大したものと推定される。また、カッタ交換の直前ではディスクカッタの損傷により掘削能力が著しく低下したにもかかわらず、トルクなどの過大な負荷をかけて運転操作を行ったために機械振動が発生したものと考えられる。

(5) 考察

シールド掘進機の異常検出方法を提案し、2つの事例で計測された3種類の異常現象に伴う異常信号を用いて検証した結果、異常信号にはある特定の周

波数のみが極端に卓越するという特徴があり、狭帯域と広帯域のピークエネルギー比を用いることによって検出できる可能性があることが判明した。また、検出信号の周波数特性は異常現象の形態によって異なり、そのピーク周波数から異常の原因を直接推定しうる可能性があることも判明した。このような異常信号の特徴は米山¹³⁾らが計測したファンモータの異常音にも見られ、類似の検出方法がすでに生産ラインの検査システムとして利用されている。シールド掘進機は生産ラインなどよりも複雑な作業条件の下で稼働するのでさらに多くの検証例が必要であることは言うまでもないが、掘進機においても提案するような異常監視方法が有効である可能性が高いと考えられる。

今回の検証例では異常信号のピークエネルギー比のしきい値は発生地点の地盤特性を考慮して、回転軸受けの異常で 0.5、ディスクカッタの損傷では 0.4 と設定した。しかし、掘進機で発生する異常にはこの他にもいくつかの形態が考えられ掘進機の仕様も様々であるため、合理的なしきい値の設定方法を確立するにはさらに多くのデータの蓄積が必要である。また、ピーク周波数と異常現象との関係についても同様である。

今回検証に用いた事例に対してこのような異常診断方法を適用しリアルタイムな監視を行ったと想定すると、事例-1 では異常信号が頻繁に発生し始める 20 リング程度前に異常の兆候を検知し、活発に発生始めた直後に適切な対応を取ることも可能であったと推定できる。また、事例-2 では前半の岩盤層において、無理な運転操作による機械振動の発生を検知した時点で推力等を調整して適切な運転方法に切替えることにより、回転部の損傷を回避し偏摩耗の発生を防止し、ディスクカッタの寿命を長くすることも可能であったと推定できる。

5. 検出信号による切羽地質の判別

(1) 判別方法

検出信号から切羽の地質性状を推定するためには、まず最初に判断の基準となる地質データベースを構成しておく必要がある。これには各種地盤で計測された信号データがその特徴変数を用いた判別分析により地質毎にクラスタとしてグループ化されることが不可欠である。地質データベースが作成されると新たに検出された信号は、特徴変数空間における対応する点と各クラスタ重心までのマハラノビス距離を用い最短距離のクラスタの地質グループに属

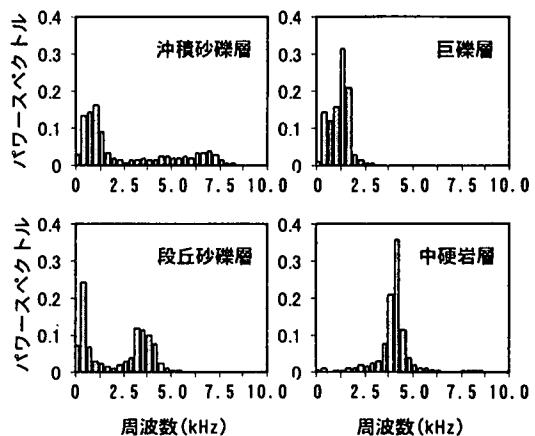


図-10 地質別の正規化されたパワースペクトル

すると判定される¹⁴⁾。また、このとき χ^2 検定にもとづいて各クラスタへの帰属確率も算定できるので、判別の信頼度に関する情報も同時に得られる¹⁴⁾。

本文では紙面の関係から判別分析を行うことによって地質別にパターン分類しうる可能性があることを述べるに止める¹⁴⁾。

(2) 地質判別のための特徴変数

地質判別に利用する検出信号の特徴変数は次のような特性を有している必要がある。

- ① 異なる工事における検出信号を同じスケールで取り扱うことができ、相互に比較できること
- ② オンラインでの処理が簡単に実行できること
- ③ ミクロな地質の変化に敏感に反応して変化せず、再現性があること

このような要件を満たす特徴変数として、本研究では式(1)で定義される全帯域エネルギー E で正規化したパワースペクトルを用いた。これは検出信号がその伝播経路や掘進機の運転方法、センサの設置場所や設置状況などの影響をも受け、類似の地盤であっても異なる工事例ではスペクトルの強さが異なる可能性が高いためである。また、FFT 法によるパワースペクトルは 2 のべき乗個の離散量として表現されデータ量が莫大となることから、データを集約するため 10kHz までの周波数を有効成分とし、この区間を 32 分割したときの式(3)で定義されるエネルギー比の組（以下、正規化されたパワースペクトルと称す）を特徴変数とした。

図-10 は各種地盤における検出信号の特徴変数の例を示したものである。図より正規化されたパワースペクトルの形状は地盤の特性に対応して固有の特徴を示すことがわかる。しかし、正規化するこ

表-2 パターン分類に用いた地質別の信号データ

地質	沖積砂礫層	段丘砂礫層	巨礫層	中硬岩層
特徴	砂質土中心 20mm位まで の礫を含む	10~30mmの 礫が中心	300~500mm の巨礫	一軸圧縮強度 20~40MPa 程度の岩盤
試料数	A-18 B-10 D-23	A-29 B-10 D-19	A-46 B-19	A-23 C-21 E-20
総数	28	62	65	64

A, B, C, D, Eは工事例を示す。

とによってスペクトルの強さ以外にも有為な情報が除去されている。例えば、中硬岩層では3~4kHz付近の周波数の卓越する度合いが大きく、正規化するとこれ以外の周波数成分が小さくなっている。逆に、砂礫層では極端な卓越成分がないため高周波成分も多い信号となっている。正規化されたパワースペクトルにはこのような欠点があるが、検出条件の異なる事例での信号を、同じスケールで取り扱える利点を活かし本研究では特徴変数として利用した。

(3) 地質別パターン分類

a) 分類に用いた信号データ

本研究では分類すべき地質を表-2に示す4種類とし、各地質に属する計219個の信号データを異なる5事例から選んで用意した。これらの事例では、いずれも掘削外径2140mmの岩盤対応型の掘進機が用いられているが、機械の構造、カッタの個数や配列などの詳細な仕様が異っている。特徴変数は掘削リング毎の2分間の信号データに対して前述の方法で信号処理を行い、得られた結果を平均して求めた。各データがどの地質グループに属するかは、掘削土砂の観察記録と録音テープの再生音から推定した。

b) 主成分分析

検出信号のパターン分類には多変量解析の一つである主成分分析を利用した。この方法は互いに関係を持つ多数の変量を、関係のない少数の変量（主成分）に要約する手法である¹⁵⁾。今、各信号の正規化パワースペクトルから求めた特徴変数を s_i とする。その第*i*主成分 Z_i は次式に示す線形和で求めることができる。

$$Z_i = a_{i1}s_1 + a_{i2}s_2 + \cdots + a_{ip}s_p \quad (4)$$

$$i = 1, 2, \dots, p$$

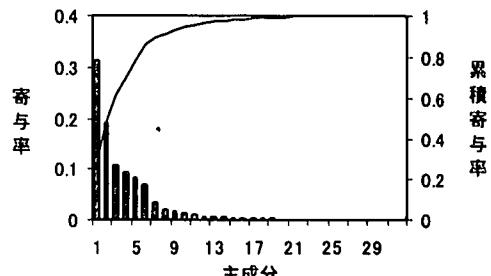


図-1-1 寄与率の変化グラフ

ここで、 $(a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{pj})$ は m 個の特徴変数の組 s_j ($j=1, 2, \dots, m$; $i=1, 2, \dots, p$) から算定した相関行列を用い、固有値解析によって求めた固有ベクトルである。また、各主成分への情報集約の程度を表す寄与率は固有値 $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p)$ を用いて次のように表すことができる。

$$\nu_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_p} \quad (5)$$

固有ベクトルは主成分算出における線形和の係数であり、各変量が主成分の値にどの程度寄与しているかを表わしている。しかし、標準化されたデータを用いて求められる固有ベクトルは物理的な意味を持っていないので、一般には $\sqrt{\lambda_i} \times a_{ij}$ で求められる負荷量を用いて主成分と各変量の関係が論ぜられる。

(4) 分類結果とその考察

a) 寄与率と因子負荷量

各主成分による寄与率を図-1-1に示す。主成分分析では特徴変数（ここでは31個）と同数の主成分が何らかの寄与率を持つことになるので、変数の数が多くなると相対的に寄与率は小さくなる。この分析では第1主成分と第2主成分の累積寄与率は50%程度にとどまり、80%以上の累積寄与率を得るためにには第5主成分まで利用する必要がある。

次に、因子負荷量を用いて主成分と各変量の関係を調べるために、第1主成分から第4主成分に対する負荷量を示すと図-1-2となる。図より、第1主成分では3.5kHz(分割番号12)付近を境に符号が反転し、これより高い周波数成分を持つ信号ほどその値は大きくなる。従って、第1主成分は高周波の信号か低周波の信号かを判別する特性値であると言える。一方、第2主成分では第1主成分の符号が正から負に反転する境界付近前後とそれ以外で負荷量の

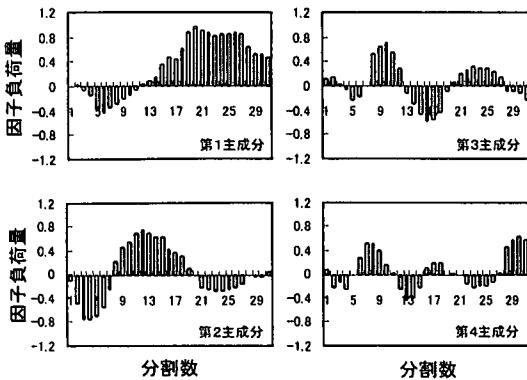


図-1 2 第4主成分までの因子負荷量

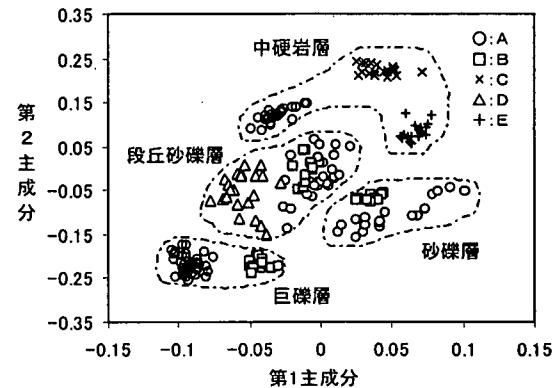


図-1 3 主成分空間における分類結果
(正規化されたスペクトル)

符号が反転している。従って、第2主成分は第1主成分で信号の周波数特性を判別した境界付近の周波数成分が多いか否かを判別する主成分であると言える。第3主成分以降ではさらに周波数成分を細分化し、その組み合わせによって信号の分類に寄与する特性値が求められている。

b) 主成分空間における分類

各データを第1主成分と第2主成分空間にプロットすると図-1 3 のようになる。比較のために同じデータを用い、正規化しない本来のパワースペクトルを特徴変数として主成分分析を行うと図-1 4 に示す結果となる。スペクトルの強さの影響を受けて主成分の値は大きくばらつき、異なる工事例での検出信号を同じスケールで取り扱えないことがわかる。

次に判別結果について見ると、何れの地質においても同じ工事例では明瞭に地質別にグループ化されているが、事例が異なると同じ地質での検出信号であっても異なる位置にプロットされている。特に中硬岩層と巨礫層においてこのような傾向は顕著である。また、地質別に見ると砂礫層と段丘砂礫層において同じ事例内でのばらつきが巨礫層や中硬岩層よりも大きくなる傾向がある。正規化することにより検出条件の影響が除去されているとすると、これは現位置での地盤の強度特性や鉱物組成、礫の粒径などの特性が異なり、これらの影響を受けて検出信号の特性が異なるためであると考えられる。

表-2 では主に録音テープの音から4種類の地質グループに分かれるとして検討を進めたが、信号の特性からはさらに詳細な地質グループに分けが必要であることを示している。明瞭な地質データベースを構成するためには、地質性状の再分類と各グループに属する信号データの蓄積が必要であるが、今回検討した方法は検出信号のパターン分類に有効な方法であることを示唆している。

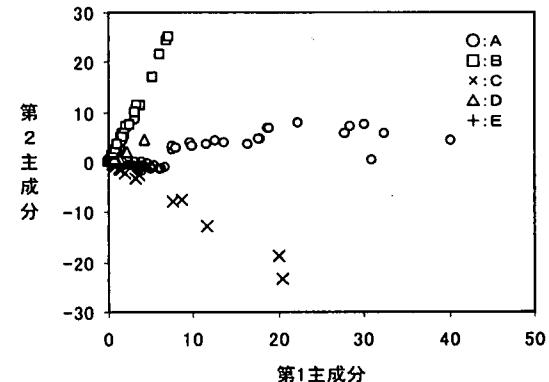


図-1 4 主成分空間における分類結果
(本来のパワースペクトル)

6. まとめ

以上、シールド工事に音響診断技術を適用することを目的に、加速度センサによる検出信号から掘進機の異常診断や地質性状の推定方法について検討した。この方法の利点は、計測方法が非常に簡単で他の類似の方法に比べて計測コストが安価なこと、掘進機の改造等が不要なため掘進途中からでも計測を開始できること、掘進作業を停止することなく計測できることなどにある。また、シールド工事の掘進管理に有用な情報を簡単に入手できるので、その実用性は高いと言える。本研究で得られた知見をまとめると次のようになる。

- ① 掘進機の異常を表わす信号はある特定の周波数帯域の信号が卓越するという特徴があり、パワースペクトルから算定した狭帯域と広帯域の

エネルギー比を指標として異常信号の検出が可能である。ただし、検出のためのしきい値は掘削地盤の状況に依存し、本研究における2つの検証例では0.4~0.5程度であった。

- ② 異常時のピーク周波数は異常の形態によって異なり、本研究の計測事例によれば、回転軸受の損傷では5000Hz、ディスクカッタの偏摩耗で1100Hz、過負荷による機械全体の振れは390Hz付近にそれぞれあった。今後、ピーク周波数と異常形態のデータベースを作成することにより、検出信号からリアルタイムに異常要因を判別することも可能となる。
- ③ 地質判別に利用する検出信号の地質データベースの構成には、正規化されたパワースペクトルを特徴変数とする主成分分析が有効と考えられる。正規化されたパワースペクトルを用いることによって、掘進機の仕様や運転方法、計測方法などが異なる事例間でも地質パターンを対比することが可能になると考えられる。

参考文献

- 1) 秩父顕美、菊地正、和氣輝幸、小林収：A E法によるシールド掘進の監視、第9回アコースティックエミッション総合シンポジウム、pp.151~156、1993。
- 2) 秩父顕美、小林収、和氣輝幸：異常音を利用したディスクカッタの健全度診断、土木学会第49回年次学術講演会VI、pp.360~361、1994。
- 3) 秩父顕美、吉野広司：シールド工事における掘進管理のためのA E計測の利用、施工管理と工程監視のための地下計測ワーキングショップ、pp.35~40、1993。
- 4) 秩父顕美、吉野広司、佐藤一彦、柴 淳：シールド掘削音による切羽地質の判定方法について、土木学会

- 5) 第52回年次学術講演会VI、pp.196~197、1997。
- 6) 秩父顕美、吉野広司、佐藤一彦：シールド掘削音の信号処理システムの開発、第11回アコースティックエミッション総合シンポジウム、pp.147~152、1997。
- 7) 山下幸夫、藤田謙二郎：シールド切羽監視システムの現場適用例、建設の機械化、NO.490、pp.48~51、1990。
- 8) 須藤桂一：電気探査法による地下探査技術の解説、月刊推進技術、VOL.5、NO.4、pp.8~9、1991。
- 9) 白井勝、長谷川昌弘：密閉式シールドにおける切羽土質性状判別装置の適用性、第30回土質工学研究発表会、pp.2021~2022、1995。
- 10) 笠博義、黒台昌弘、巽治、木下正生、森井俊明：音波探査法によるシールド前方探査システムの構築とデータ処理方法に関する検討、土木学会第47回年次学術講演会、pp.140~141、1992。
- 11) 稲田義和、堀崎敏嗣、板場道夫、谷本公正、松永聖：地中探査システムの開発、土木学会第47回年次学術講演会、pp.242~243、1992。
- 12) 山崎弘郎：異常の検出と予知、工業調査会、1988。
- 13) 相田収平、稻崎一郎、福岡真一郎：A Eを利用した工具チッピング検出システムの開発、日本機械学会論文集(C編)、pp.2563~2569、1986。
- 14) 米山隆雄、佐藤式也、菊地和雄、大川友弘、田口勇二、深浦圭吾：A E法によるモータ異常音診断技術の開発、非破壊検査、pp.642~649、1992。
- 15) 奥野忠一、久米均、芳賀敏郎、吉沢正：多変量解析、日科技連出版社、pp.259~273、1971。

(2000.1.18 受付)

MONITORING SYSTEM USING ACOUSTIC DIAGNOSIS TECHNIQUE IN SHIELD TUNNELING OPERATION

Akiyoshi CHICHIBU, Hiroshi YOSHINO and Kazuhiko SATO

A monitoring method using acoustic diagnosis technique is proposed to improve the management of shield tunneling operation. Relative energy contained in a specific frequency band in power spectrum to the whole energy is used for detecting anomalies in the machine health. The investigation on data sets obtained from two construction sites shows that the signals associated with the anomalies have an energy ratio over 0.4. Moreover, principal component analysis is employed to perform the pattern classification of the signals for detecting the changes in ground conditions. The study shows that the normalized power spectrum is useful for the classification.