

(91) 土木分野における弾性波トモグラフィ技術の適用と課題

顧問組 正会員 ○ 世一英俊  
顧問組 正会員 蓮井昭則  
山口大学工学部 正会員 中川浩二

State-of-the-art on Seismic Tomography  
-Its Application & Future Development-

Hidetoshi YOICHI, Hazama Corp.  
Akinori HASUI, Hazama Corp.  
Koji NAKAGAWA, Yamaguchi Univ.

Abstract

This report describes the recent tendency on geophysical tomography technique, focused upon the seismic tomography applied to the geological survey on the field of construction. In this study, many examples of experimental or practical use of seismic tomography technique are reviewed, and technical problems to be solved are derived.

From this study, the following recommendations to be developed could be proposed for future practical application.

- seismic, electro-magnetic, resistivity tomography technique should be use properly corresponding to the information in the rock mass to be estimated, respectively.
- rock mass might be totally evaluated with several characteristics of rock obtained from integrating various tomography techniques.
- the distribution of physical properties of rock should be converted into that of mechanical properties suitable to design/construction.
- economical approach should be considered according to the importance of the structure and the necessity for geotechnical characterization.

1. はじめに

原位置における調査・試験法の1つに、岩盤内部の地質構造や岩盤特性の分布状況を非破壊に把握、可視化することのできる地球物理学的トモグラフィ技術 (geophysical tomography technique、ジオトモグラフィと呼ばれることが多い) がある。この技術は、土木分野において岩盤上に建設される大型構造物の増大に伴って、設計・施工のための岩盤の調査・解析・評価の高度化の要求とともに実際の調査にも適用されるようになってきた。このジオトモグラフィ技術は、原理的には医学分野で広く利用されているX線CTスキャンと同様なものであるが、測定上の制約や、波動に起因する特性によって解析アルゴリズムを異にし、技術を複雑にしている。ジオトモグラフィ技術に関して各種の研究が進められてきているが、調査の媒体としては現在のところ、弾性波や電磁波といった岩盤中を透過する波動を利用する方法と地盤・岩盤の比抵抗 (電位ポテンシャル量) を利用する方法が挙げられる。また、弾性波ならびに電磁波を利用する場合、伝播の特性として、速度に加えて振幅減衰を取扱う方法も最近注目を集めている (表-1 左半分参照)。

本報では、地盤・岩盤の調査方法として土木分野、土木技術者に従来から利用され、岩盤の特性と最も関連の深い弾性波を利用したトモグラフィ技術を中心として、現在までに発表された研究事例ならびに実際の現場への適用の事例をレビューする。その上で、特に評価の精度を向上させるためのハード、ソフトに関連した技術的課題を整理し、今後の実用化に向けての方向性を示唆したい。最後に、トモグラフィ技術を土木構造物の設計・施工のための原位置調査方法として実用化する場合の望ましい姿を提案してみた。

## 2. 土木分野での適用事例のレビューと技術動向

現在までのジオトモグラフィー技術に関する研究の動向を概略整理すると、以下に示す2つの流れに分類することができる。まず第1には、トモグラフィー画像の再構成に関わる数値解析手法（アルゴリズム）の改良の研究を挙げることができる。反復法はジオトモグラフィーのデータの解析法として最も多く利用されているが、地質調査においては、断面全周から様々の方向に投影されたデータをとることが困難なことから断面のセル分割方法、各セル毎の初期値の設定の仕方、理論走時の計算、速度モデルの修正方法等解析解の再現性を向上させるための解析的研究が進められている。17)18)19)

一方、第2の方向として、数値解析手法研究の動向を睨みながら、実際の地盤・岩盤への適用実験へと展開させることで、地盤・岩盤状況の評価（岩盤等級分類、断層・亀裂の分布、力学特性との相関等）を試みていくという実証実験的研究がある。本報告においては、主として第2の研究動向に焦点を絞り、さらに土木構造物建設に伴う調査への適用事例の多い弾性波トモグラフィー技術を中心に検討を行った。

最近の文献発表にみる弾性波トモグラフィー技術の主な適用事例を表-2に整理し、同表より以下に示す技術動向を抽出した。

### (1) 調査の目的と適用トモグラフィー技術について

土木分野におけるジオトモグラフィー技術の対象構造物はトンネル、ダム、大規模橋梁等各種基礎岩盤であり、調査対象の範囲はせいぜい数10m四方の岩盤に限定されている。これら構造物の建設にあたって、①地質状況の把握、②地表面付近の風化領域、③亀裂分布の調査、④掘削による緩み領域の把握、⑤グラウト等による岩盤改良効果の把握、等を目的に適用実験が行われている。

適用したトモグラフィー技術は弾性波速度トモグラフィーが基本であるが、亀裂の分布状況や連続性を評価するにあたっては速度トモグラフィーでは的確に表現することが困難なことから限界があり、振幅減衰トモグラフィーに対する研究動向が顕著である（文献10)、14)。一方、比抵抗トモグラフィーとの併用により、岩盤の電氣的な特性の評価を組合せる提案（文献6)、8)や岩盤の電磁波透過特性と電気抵抗特性を岩盤中の水みち（亀裂内流れ）の検証ならびに評価に用いた報告（文献15)）もある。さらには、同地点で同じボーリング孔を用いて弾性波速度・振幅、電磁波速度・振幅、比抵抗の5種類のジオトモグラフィーを実施し、総合的に岩盤の評価を試みた事例もみられる（文献16)）。

### (2) 調査手法、解析手法について

調査手法における1つのポイントとして、発振（起振）の方法が挙げられる。通常、発振は瞬発電気雷管あるいは少量の爆薬による場合が多い。一方、一定エネルギー繰返し発振を可能とする機械的発振装置と高周波数まで感度一定の圧電型加速度計を用いた受振器による高分解能システムを開発し、比較的狭い範囲での弾性波トモグラフィーを実施した事例がある（文献5)、16)）。このようなシステムは発振ならびに受振波運動の振幅を捉えることができるため、振幅減衰トモグラフィー実施においてその特徴を發揮する。

一方、解析の手法については、反復法による解析が多用されており、波線の屈折を考慮できる手法に主流が移っている。また、理論値計算を行った後のモデル修正に改良工夫が進められている。振幅減衰トモグラフィーにおいては粘性減衰以外の要素を除去する方法や、周波数の変化の影響を除去する方法等の研究も進められている（文献10)、14)等）。

表-1 各種トモグラフィー技術とこれに対応した岩盤情報試案

トモグラフィー種別	測定量	再構成像	岩盤特性情報試案
弾性波トモグラフィー（速度） （振幅）	初動走時 初動振幅	速度分布 振幅減衰分布	地質状況、岩盤等級分類、破砕帯検知 亀裂ゾーン、亀裂連続性検知
電磁波トモグラフィー（速度） （振幅）	初動走時 初動振幅	速度分布 振幅減衰分布	地質状況、破砕帯検知 亀裂ゾーン、水みち検知
比抵抗トモグラフィー	電位	比抵抗分布	地質状況、風化帯、含水状態、亀裂検知

\*弾性波、電磁波のfull waveformを用いた反射、回折、散乱のトモグラフィーも提案されている。

表一 最近の文献発表にみる弾性波トモグラフィ技術  
適用事例(土壌・構造物調査を主として)

No.	著者名 文献名	論文題名	適用tomography	調査の目的	a)調査の手法 b)解析の手法	主な成果	他調査手法 との比較検討	備考 (残された課題等)
1)	羽茂忠男・西川寛 (1985) 物理探査学会秋季講演会 講演予稿集	クロスホールサイズミ ックトモグラフィの 橋梁基礎地盤調査への 適用性(その2)	弾性波 速度	風化花崗岩 橋梁基礎 (地質状況)	a)孔内発振起振、地 表面・孔内受振器 b)反復法解析、直線 波線、最小自乗法	・橋梁基礎岩盤状 況の把握 (弾性波速度構造 の再構成画像)	ボーリングデー タ、屈折法調査	・2点で3方向受振 ・波線密度の偏りに 起因した像の歪み ・地表測定精度低い
2)	稲崎・神保・高橋・ 渡辺(1985) 物理探査学会秋季講演会 講演予稿集	地質断面法(その6) -トンネル切開・ 地表面調査結果-	弾性波 速度	併設トンネル間 岩盤状況の調査 (地質状況)	a)併設坑で発振起振 -受振器設置 b)反復法による解析 屈折波線考慮	・トンネル地山部 分岩盤評価、低 速度帯評価	トンネル側壁面 の地質状況観察	・地表付近の影響有 ・地質断面法その3 (ダム基礎岩盤で の適用実験例あり)
3)	菅原・玉田・双木 (1985) 土質工学会 土と基礎 Vol.33, No.7	C/T法の地質調査への 適用	弾性波 速度	計画中のダムサ イトにおける 岩盤評価、断層 破砕帯の検出	a)調査機坑間で発振 起振 b)反復法による解析 屈折波線考慮	ダム基礎岩盤の 等級区分、大域的 な地質状況が把握 できた。	横坑内速度、 屈折法による速 度、C/T法によ る速度対比	・3次元地質構造の 影響(縦横斜割) ・屈折考慮効果小 ・節理、小断層無理
4)	大友秀夫 (1986) 物理探査学会 物理探査 Vol.139, No.6	ジオトモグラフィ 技術の現況	弾性波 速度 電磁波 速度	弾性波、電磁波 tomographyの現 状と今後の方向性 と適用にあつた 課題抽出	a)測定システムの現 況と今後の方向性 b)解析法の現況と精 度、問題点	・新しい物理探査 技術として期待 ・調査、解析法に より再構成現度	-	・エネルギー、指向 性を考慮した振源 ・初動のみでなく、 full wave dataを
5)	世一・蓮井・山下 (1987) 第7回岩の力学に関する シンポジウム講演論文 集	原位置岩盤における 孔内弾性波測定結果と その処理について	弾性波 速度・ 振幅	トンネル周辺岩 盤のゆるみ ダム基礎岩盤 状況の把握	a)機坑内孔内発振装 置(高周波数) b)反復法、直線波線	・高分解能の調査 システム ・弾性波速度、 振幅減衰再構成	・電磁波tomo graphyとの比 較 ・岩盤節理観察	・岩盤内弾性波伝播 特性(理論的考察) ・弾性波振幅減衰の 意味するもの
6)	島裕雄・斎藤秀樹 (1987) 第7回岩の力学に関する シンポジウム講演論文 集	ジオトモグラフィの 岩盤調査への適用性 について-数値実験による 検討-	弾性波 速度・ 比抵抗	構造モデルでの 弾性波-比抵抗 トモグラフィ- 比較数値実験	b)初期モデル設定 (BPT) -理論値計算 (ray tracing) → モデル修正(DLST)	・弾性波速度-比抵抗トモ グラフィとの比較 検討 ・偽像やボケの出方はやや異なるもの の、岩盤の特徴を表現できる	-	・再構成プログラムの 更なる改良 ・観測点配置に對する 配慮が必要
7)	青木・広野・戸井田 上野(1988) 第20回岩盤力学に関する シンポジウム講演論文 集	サイゼミック・トモ グラフィの岩盤調査への 適用について	弾性波 速度	岩盤中の大規模 なシームや破砕 帯の存在と連続 性の検知	a)スプーカ起振、圧 電素子加速度計受振 掛け矢起振、速度計	地表面からの第1 速度層内速度評価 面内の破砕帯調査	地質調査結果 速度換層結果	・その他坑間C/Tも 実施-破砕帯調査 ・波線と直交する破 砕帯が検知不能
8)	菅原・棟屋・斎藤・ 島(1989) 第21回岩盤力学に関する シンポジウム講演論文 集	岩盤調査における ジオトモグラフィの 適用性の検討	弾性波 速度・ 比抵抗	ダム基礎岩盤の 弾性波速度、比 抵抗tomography の適用性の検討	a)孔内、地表受振器 発振起振、28Hz b)反復法;屈折考慮 最小二乗法	・弾性波速度、比 抵抗tomography併 用の有効性確認 ・各特性zone分割	比抵抗トモ グラフィ;二極法 電極配置、解析 alfa-center 法	類似論文として、 斎藤、島(1989): 物理探査学会第80回 学術講演会論文
9)	戸井田・小淵・升元 ・青木(1990) 物理探査学会第83回学術 講演会論文	サイゼミック・トモ グラフィの亀裂調査への 適用性について	弾性波 速度・ 振幅	亀裂の検知 (単一亀裂の 分布状況) (試験坑道)	a)雷管起振、速度型 地震計受振 b)ART 法tomography メディアフィルタ	・速度分布からは 単一亀裂の検知 には限界あり ・振幅低下に期待	速度換層、ルジ オン試験、B T V観察、cross- hole透水試験	・弾性波振幅低下に ついては、発振、受 振のエネルギーの正 確な把握評価が必要
10)	渡辺俊樹・佐々宏一 (1990) 物理探査学会第83回学術 講演会論文	振幅を用いたトモ グラフィによる現場デー タの解析(2)	弾性波 振幅	初動振幅を用い た弾性波減衰 特性の分布を 再構成する	a)粘性減衰以外要因 による振幅減衰& 伝播中の周波数変 化の影響を除去	・粘性減衰のみの 減衰特性分布 ・周波数変化の影響 除去をQ値分布	-	類似論文として、渡 辺、佐々;物理探査 学会第83回、第85回 学術講演会論文
11)	二宮・杉原・伊藤・ 亀村・青木(1991) 第23回岩盤力学に関する シンポジウム講演論文 集	ジオトモグラフィに よる地下空洞周辺緩 領域の評価について	弾性波 速度	坑道掘削による 周辺岩盤の物性 変化の把握(緩 領域の分布)	a)雷管起振、多連式 速度計 b)反復法、屈折考慮 DLSTモデル修正	坑道掘削前後の トモグラフィ結果 から掘削による速 度変化領域を検知	屈折法弾性波探 査と緩領域の比 較 その他透水試験	計測誤差に起因する tomography解析の取 束性、他の岩盤物性 変化との相関性
12)	中田・小淵・佐々木 ・福留(1991) 第23回岩盤力学に関する シンポジウム講演論文 集	岩盤空洞周辺の緩 領域の調査について	弾性波 速度	坑道周辺岩盤の 物性変化の把握 (緩領域の分 布)	a)雷管起振、加b速度 型&マイクロフォ ン型受振器(1-10KHz) b)直線波線、SIRT法	セル速度とコア 速度との比 $\leq 0.9$ の範囲を緩領域 と判定(2-3m幅)	コア弾性波速度 各種岩石試験 BTV電磁観察 孔内水平電磁	-
13)	桑原・鈴木・平岡 (1991) 第23回岩盤力学に関する シンポジウム講演論文 集	断層を含む軟岩地山 のサイゼミック・トモ グラフィ調査	弾性波 速度	泥岩、凝灰岩層 中に横断する主 断層の検知	a)スプーカ振源、ジ オフォン受振 b)直線、屈折、初期 BPT法修正ART, SIRT	断層の再現性を ある程度表現できた スプーカ3孔内非 破壊振源と有望	岩石物理力学試 験、コアP波速 度、PS換層	断層の走向・傾斜、 速度コントラスト、 解析手法等により 断層再現性が異なる
14)	谷本・岸田・池内・ 岡村(1991) 第23回岩盤力学に関する シンポジウム講演論文 集	弾性波周波数特性と ジオトモグラフィに 関する基礎的研究	弾性波 振幅	トンネル切開前 方での亀裂頻度 分布を表す振幅 減衰tomography	b)初動振幅、エネル ギ-広がり補正、 受振方向修正→ 内部弾性減衰除去	内部弾性減衰分布 (tomography)が 実際の岩盤状況を より表現している	切開面の観察、 スケッチ 弾性波速度解析	振幅減衰tomography により亀裂頻度分布 を表現する
15)	北村・米田・寺戸 ・登内・中川(1991) 第23回岩盤力学に関する シンポジウム講演論文 集	岩盤レーダー-比抵抗 探査による水みちおよ びグラウト効果の調査	電磁波 振幅 比抵抗	亀裂性岩盤にお ける水みち調査 ・グラウト効果 (塩水注入)	a)電磁波振幅減衰 tomography b)比抵抗tomography b) BPT, ART, FEH 法	・塩水注入前後の差 tomographyより 水みちが、グラウト 前後の水みち 変化が検知できた 電磁波振幅と比抵抗 tomography比較	-	岩盤の透水性、グラ ウトによる止水性改 良効果等定量的評価 力学定数との相関性
16)	山下・北村・西田・ 中川・蓮井(1991) 第23回岩盤力学に関する シンポジウム講演論文 集	弾性波、電磁波、比 抵抗トモグラフィによ る地盤状況の推定につ いて	弾性波、 電磁波速 度・振幅 比抵抗	亀裂性岩盤にお ける岩盤状況の 調査、評価	a)弾性波速度・振幅 電磁波速度・振幅 比抵抗の5種類の tomographyを比較	5種類のtomogra phy 結果より地質 構造、岩盤等級、 亀裂分布を推定	検証用boring 露頭、コア観察 BTV電磁観察	5種類の特性と岩盤 特性との相関、詳細 亀裂分布形態並びに 定量的評価が課題

### (3) 結果の評価について

トモグラフィーで表示される低速度帯は定性的には周辺の状況に応じて、①地表面付近の風化層、②成層状態における低速度岩種層、③断層破碎帯、④亀裂集中ゾーン、等の評価がなされる。一方、定量的評価の項目として、①低速度帯の層厚、②高速度層との速度コントラスト、③破碎の程度、亀裂頻度等が挙げられるが、定性的評価に比較して推定の域を越えない状況にある。

トンネル周辺岩盤の緩み領域、グラウトによる岩盤の改良効果等岩盤状況の変化検出を目的とする場合、変化発生前後における差のトモグラフィーを用い、変化した領域のみを強調して評価する事例(文献 11)、15) )があり、この方法は岩盤の経時的变化の可視化に繋がるものと期待される。一方、土木構造物の設計・施工に直結した岩盤評価を目的として、弾性波速度 $V_p$ 、 $V_s$ の分布から弾性係数 $E_d$ の分布を求めている(文献5)等、岩盤の力学定数の分布への変換を試みる動きもある。

## 3. 技術的課題の抽出と今後の方向性

本節ではジオトモグラフィー技術の土木分野での実用化のための技術的課題および今後の方向性について検討を加えた。

### (1) 調査法に関する精度向上のための課題 17)

- ・発振(起振)法の改良……雷管(小爆破)起振の場合、孔壁崩壊の防止や発振秒時の誤差、起振エネルギーのばらつきがあり、繰返し発振可能な高エネルギーの機械的発振装置や可変周波数発振装置が必要と思われる。
- ・受振法の改良……計測の精度を向上させるために高周波数波動を利用し、波形より多くの情報を抽出するために低周波数から高周波数まで感度一定の受振器(センサー)が必要である。
- ・測定点配置の考慮……ボーリング孔間だけの測定点配置では偽像発生の可能性も高い。解析精度向上のためにも地表面も含めた3方向配置が望ましい。

### (2) 岩盤評価法に関する課題

- ・波動特性と岩盤特性との関連性についての研究……伝播してくる波動には岩盤の各種特性が含まれている。特に、振幅減衰トモグラフィーの場合、対象を粘性減衰とするか、粘性減衰以外の減衰要素(亀裂の影響等)とするかはこれからの課題となる。また、岩盤の異方性と弾性波速度異方性との関連性、岩盤の応力状態による弾性波速度の変化等岩盤の基本的特性に関わるトモグラフィー結果の解釈についても数多くの研究が必要である。
- ・定性的評価から定量的評価への展開……現状のトモグラフィー結果からは岩盤状況の相対的、定性的評価にとどまるものが多く、例えば弱層の厚さや力学的特性、亀裂の頻度、岩盤強度といった定量的評価へと展開する必要がある。そのためには、①より精度の高いトモグラフィー調査、②探査特性と岩盤特性の基本的関係の研究、③ボーリングコア調査・試験結果等他の調査結果をも取入れた総合的評価手法の確立、等が求められる。

また、他の探査特性によるトモグラフィー結果をも複合的に組合わせて岩盤特性を評価する方法等の確立が必要となる。

## 4. 土木分野への実用化にあたっての提案

土木構造物の設計・施工に役立つ調査法として、弾性波トモグラフィーを中心としたジオトモグラフィー技術を確立し、実用化を進めていくために、以下に示すような方向性を提案としてまとめた。

- a) 知りたい岩盤の情報に対応してジオトモグラフィー技術を使い分ける……岩盤中を伝播する弾性波、電磁波それぞれの基本的特性、岩盤の比抵抗特性(電気)の物理的意味を検証した上で、知りたい岩盤の特性情報を抽出するための最良のトモグラフィー種別を取捨選択して利用する。前出表-1右半分に抽出可能な岩盤特性(試案)をも示した。

- b) 異なったジオトモグラフィー結果を重ね合せ、総合的評価を行う……… a) に述べた方向性に追加し、異なったジオトモグラフィー結果を重ね合せ、2種類以上の岩盤特性（例えば、堅硬な岩盤であるが、亀裂が発達し、一部粘土鉱物を介在するといった特徴）により岩盤を特徴づけ、総合的評価に発展させる。図-1に総合的岩盤特性評価のイメージを示した。
- c) 設計・施工に直接反映できる力学特性に変換した分布図を描く………土木分野から求められるジオトモグラフィー結果とは、設計・施工に直接反映できる岩盤等級の分布であり、力学特性の分布である。必要に応じて、弾性波速度 $V_p$ 、 $V_s$ の分布から動的弾性係数 $E_d$ （図-2参照）、さらには静的弾性係数 $E$ やせん断強度の分布へと発展させる場合もあり、その意味でも岩盤情報データベースの構築が望まれる。
- d) 構造物の重要度、要求される精度を考慮し、経済性を追及する………土木構造物の詳細調査に必要な領域はせいぜい数10mの範囲であり、構造物の重要度、調査の目的に応じてジオトモグラフィー結果に要求される精度も異なる。従って、精度の高いジオトモグラフィー技術の研究と同時に、面的な岩盤の状況、等級区分の推定を直接の目的とし、利用頻度の高い簡易なトモグラフィー技術の確立も必要であろう。

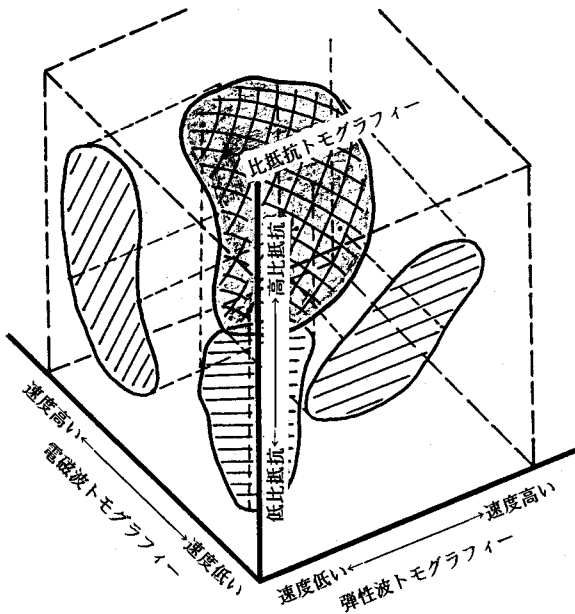


図-1 トモグラフィー技術を用いた総合的岩盤特性評価のイメージ

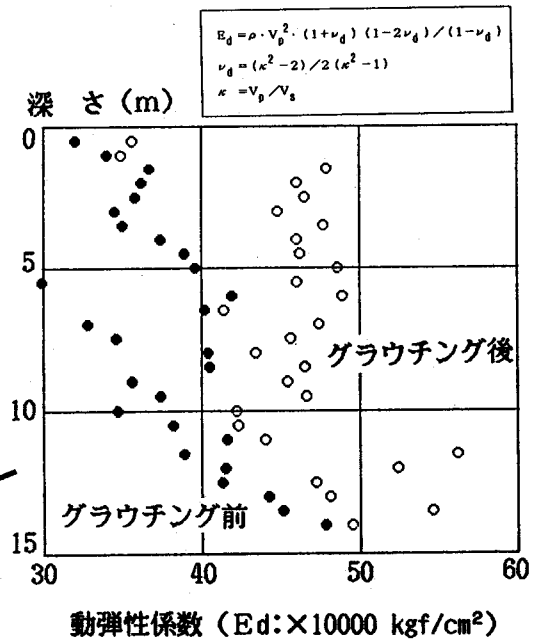


図-2  $V_p$ 、 $V_s$ の分布から求めた動弾性係数の分布（文献5）より

参考文献：

- 1)～16) については本文中表-2に示した。
- 17) International Society for Rock Mechanics. Suggested Methods for Seismic Testing Within and Between Boreholes, (Edited by K.Sassa), ISRM Commission on Testing Methods, Pergamon Press, Oxford(1988).
- 18) 六川修一：ジオトモグラフィー—その理論的背景—、物理探査、Vol.39、No.6、pp51-57、1986。
- 19) 山田、小澤ら：弾性波トモグラフィー解析に利用するレイトレーシングについて、物理探査学会第80回学術講演会論文集、pp27-29、1989。