

3. 研究報告

3. 1 活断層の詳細位置・形状・活動性及び周辺の地下構造解明のための調査

3. 1. 1 活断層の詳細位置・形状・活動性解明のための調査

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 活断層の詳細位置・形状・活動性解明のための調査

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立大学法人東京大学地震研究所	准教授	石山 達也
国立大学法人東京大学地震研究所	准教授	蔵下 英司
国立大学法人東京大学地震研究所	名誉教授	佐藤 比呂志
同志社大学理工学部	教授	堤 浩之
法政大学人間環境学部	教授	杉戸 信彦
国立大学法人岡山大学教育学部	教授	松多 信尚
国立大学法人信州大学教育学部	教授	廣内 大助
国立大学法人富山大学都市デザイン学部	准教授	安江 健一
国立大学法人富山大学都市デザイン学部	准教授	立石 良
ふじのくに地球環境ミュージアム	准教授	中西 利典
日本大学文理学部	助手	加藤 直子
国立研究開発法人防災科学技術研究所地震津波火山ネットワークセンター	主任研究員	松原 誠

(c) 業務の目的

森本・富樫断層帯の変動地形調査を行い、断層帯を構成する活断層の詳細な位置・分布を明らかにする。その結果を踏まえて、断層活動時期・平均活動間隔・1回のずれ量・平均変位速度など、本断層帯の長期評価に資する高精度の断層活動性を解明する調査研究観測を複数の調査地点で行う。また、本断層帯および隣接する断層帯を横断する浅部・深部構造探査を行い、浅部から深部の断層形状や隣接する断層帯との構造的関係について明らかにする。さらに、断層帯の分布・活動履歴等を考慮し、隣接する断層帯との構造・活動の関連性について検討する。

(d) 3ヵ年の年次実施業務の要約

1) 令和4年度：

変動地形調査を実施し、活断層の位置・分布・変位様式を把握すると共に、次年度以降の活動性調査の地点・手法の検討を行った。また、断層・堆積盆地の構造を明らかにするために、断層帯中央部において深部構造探査を行った。加えて、次年度以降の活動性調査・深部構造探査・震源断層モデル構築に向けて、既存の調査研究資料の収集・整理を行った。

2) 令和5年度：

変動地形調査を実施するとともに、高分解能反射法地震探査・群列ボーリング調査等による活断層の活動性調査を実施する。また、本断層帯・砺波平野断層帯西部を横断する測線で深部構造探査を行い、断層・盆地構造および近接する断層帯の構造的関係の解明を進める。さらに、震源断層モデル構築に向けて既存の構造探査データの再解析を行う。

3) 令和6年度：

引き続き変動地形調査を行い、その結果を踏まえて断層帯中南部の地点においてトレンチ掘削調査・高分解能反射法地震探査・群列ボーリング調査等あるいはこれらを組み合わせた調査手法で活断層の活動性調査を実施する。また、断層帯南部において浅層反射法地震探査を行い、浅部の断層形状を明らかにする。さらに、これまでに得られた変動地形・地質・地震発生層厚さなどの情報を考慮して、断層帯の震源断層モデルの構築を行うとともに、本断層帯の分布・活動履歴および隣接する断層帯との構造・活動の関連性についてとりまとめを行う。

(2) 令和4年度の成果

(a) 業務の要約

森本・富樫断層帯の位置・形状を明らかにするために、米軍および国土地理院撮影の小～大縮尺空中写真の判読と、航空レーザー測量による0.5 mグリッドの数値標高モデル(DEM)の解析及び収集・整理した既往文献に基づき、断層帯を構成する主要な活構造に沿って分布する変動地形の検討を行った。その結果、断層帯を構成する代表的な活構造である森本断層・野町断層・富樫断層沿いに、これまで未確認のものを含めて完新世後期に形成された撓曲崖等の変動地形が断続的に分布する可能性があることがわかった。この結果を元に、次年度以降の活動性調査の地点・調査方法を検討した。また、断層帯中央部において測線長約24 kmの深部構造探査を行い、野町断層等の活断層が中角度で東に傾斜する逆断層であり、厚さ4 km程度の新第三系・第四系盆地堆積物を変形させることや、断層帯中央部の盆地構造・P波速度構造が明らかとなった。

(b) 業務の成果

1) 変動地形調査

森本・富樫断層帯は長さ26 km、北北東走向、東傾斜の逆断層であり、森本断層・野町断層・富樫断層などで構成される(図1；地震調査研究推進本部地震調査委員会，2001；2013)。これらの断層に沿っては、中～後期更新世および完新世の地形面を変位させる変動地形がほぼ連続的に分布するとされる(東郷・他，1998a，1998b；東郷，2000)。今回、変動地形を再検討するにあたり、断層帯周辺で取得された既存の航空レーザー測量データを収集し、点群データから改めて0.5 mグリッドのDEMを作成した。このDEMを用いて後藤(2012)の手順に従ってアナグリフを作成し、米軍および1960～70年代国土地理院撮影の小～大縮尺空中写真とともに断層帯周辺の変動地形を検討した。

森本・富樫断層帯北部を構成する森本断層は、森本(砺波山)丘陵西縁に分布する逆断

層である。今井（1959）・坂本（1966）によって森本丘陵西縁部において第三系・第四系が西に急傾斜する構造が指摘され、さらに三崎（1980）によって中期更新世に形成された、丘陵背面を構成する高位砂礫層（高位段丘堆積物）の西向き撓曲変形が指摘された。その後、東郷・他（1998b）や東郷（2000）によって、森本丘陵西縁の直線的な急崖地形基部よりも平野側に 500 m 程度離れた位置に、沖積低地面を変位させる撓曲崖地形が連続的に分布することを指摘した。東郷・他（1998a）、池田・他編（2002）、中田・今泉編（2002）は、基本的に東郷・他（1998b）・東郷（2000）の見解を踏襲している。東郷・他（1998b）は、森本断層中央部にあたる森下川左岸にて、縄文海進期以降に形成された沖積低地面が上下 2 面に分化しつつ撓曲変形を受けていることから、縄文海進期以降に少なくとも 2 回の断層活動があった可能性を指摘している。今回、森本断層沿いの変動地形を再検討した結果、断層北端部に近い津幡町太田から金沢市利屋付近にかけて、沖積低地面に累積的な上下変位を伴う撓曲崖を見出した（図 2；図 1 の地点 1 の近傍）。上述の森下川左岸と同様に、ここでも縄文海進期以降に形成された沖積低地面が上下 2 面（図 2 中の I・II 面）に分化しており、ともに撓曲変形するほか、上位面は背斜変形を伴う（図 3）。I 面および II 面はさらに浅い開析谷によって刻まれるが、この谷底平野面（図 2 中の III 面）が変形を受けているかどうかは不明瞭である。この様な撓曲崖地形は、縄文海進期以降に少なくとも 2 回の断層活動があったとする東郷・他（1998b）の見解と整合的である。II 面では、産業技術総



図 1 森本・富樫断層帯の位置図（地震調査研究推進本部地震調査委員会，2013）

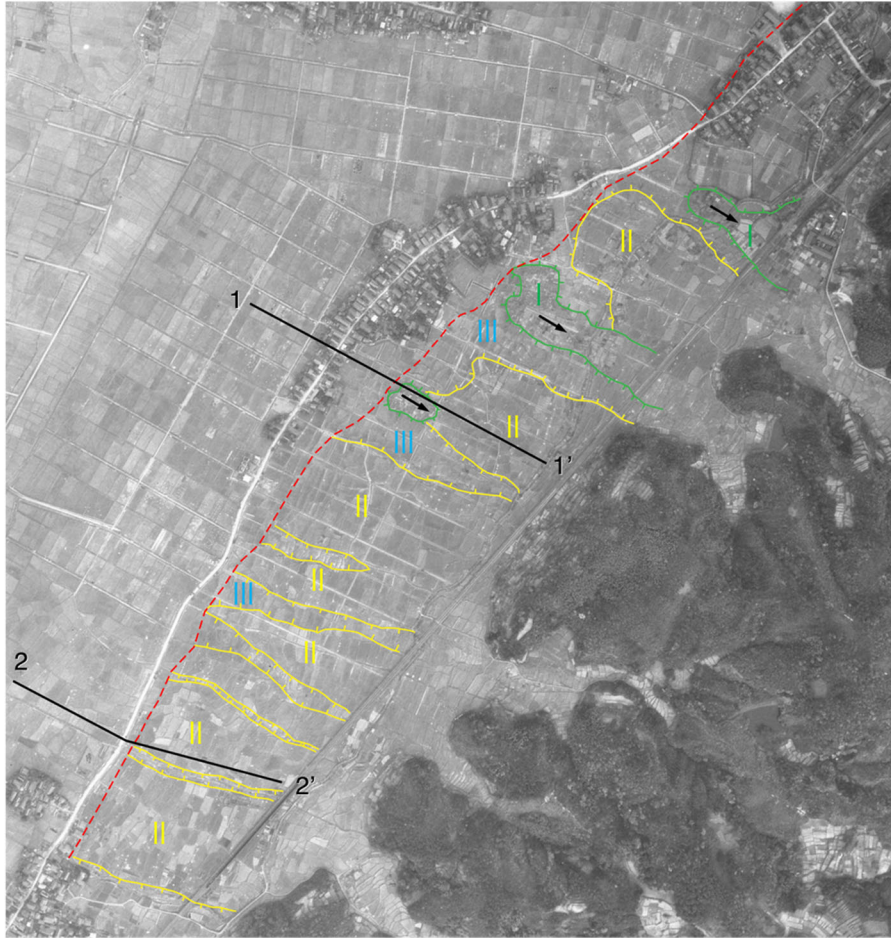


図2 森本断層北部、津幡町太田から金沢市利屋にかけての変動地形。赤破線は撓曲崖の位置を示す。また、図3の地形断面図の位置を示す。基図の空中写真は USA-M199-57 (米軍 1952 年撮影、縮尺 15,000 分の 1)。

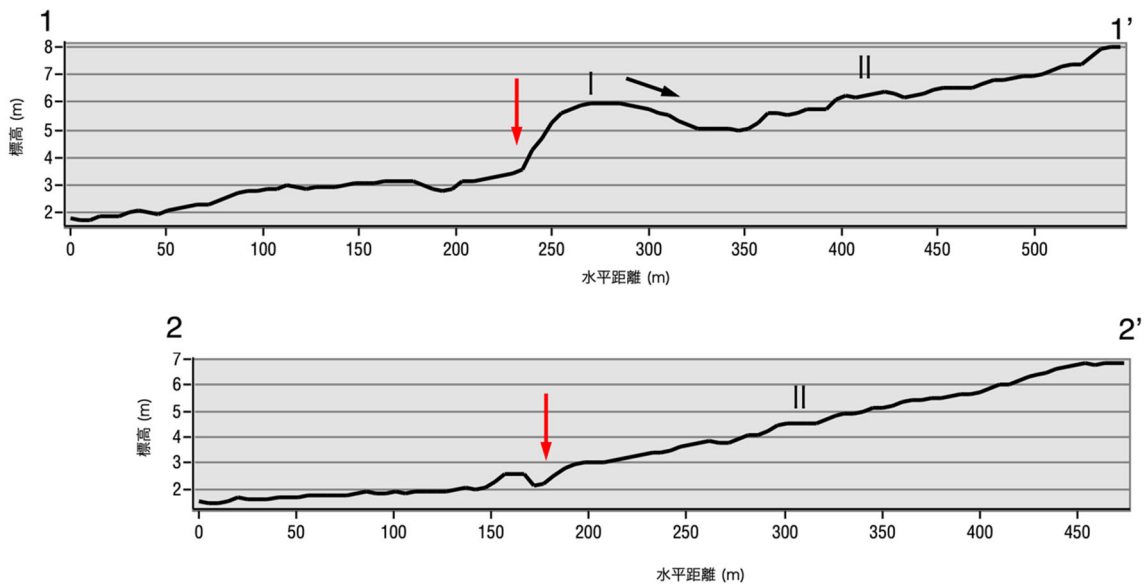


図3 森本断層北部、津幡町太田から金沢市利屋にかけての撓曲崖を横断する地形断面図。赤矢印は撓曲崖基部の位置を示す。断面の作成には基盤地図情報の 5 m グリッド DEM を使用。

合研究所（2008）にて群列ボーリング及びジオスライサー調査を実施している。得られた¹⁴C年代値にはばらつきがあるものの、Ⅱ面構成層はおおよそ1,000年前以降に形成されたことを示唆しており、これも最新活動が非常に新しいとする考え（東郷・他, 1998b）と整合的である。このように、森本断層沿いに分布する、縄文海進期以降の沖積低地面を分化させる撓曲崖は、最近の断層活動を解明する手がかりとなる重要な地形学的証拠であり、活動性解明のための調査研究に適した対象であると言える。

森本・富樫断層帯の中央部を構成する野町断層は、金沢市の中心部を通過しており、断層の位置・分布の正確な把握は、防災上非常に重要である。今回、0.5 mグリッドDEMによるアナグリフ・米軍空中写真等を利用して変動地形を検討した結果、従来の野町断層のトレースよりも西側に、南北方向に延びる背斜を伴う西向き撓曲が見出された（図4、5）。撓曲は沖積低地面（犀川の沖積扇状地面）を変形させているとみられ、野町断層の最近の断層活動を示す変動地形として注目される。また、浅野川右岸にも沖積低地面を変位させる新期の西向き撓曲崖（位置不明瞭）が存在する可能性がある（図5の断面4-4'）。

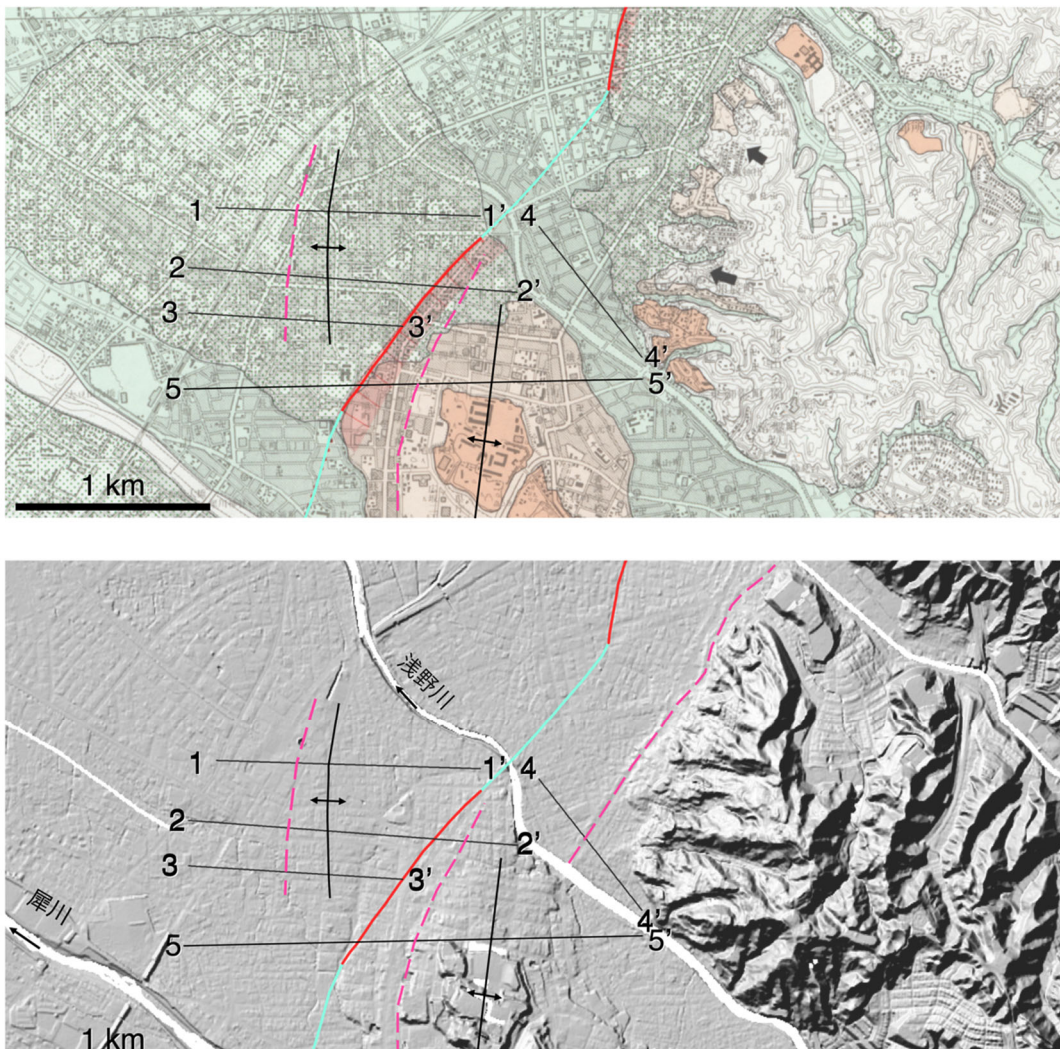


図4 野町断層沿いの変動地形。赤・青線は東郷・他（1998a）、中田・今泉編（2002）の断層トレースの位置を示す。また、マゼンタ色の破線は新たに見出した断層トレースを示す。また、図5の地形断面図の位置を示す。上図の基図は東郷・他（1998a）、下図の基図は基盤地図情報の5mグリッドDEMにより作成した陰影起伏図。

金沢市中心部では寛政 11 年(1799 年)金沢地震 ($M=6.0\pm 1/4$; 宇佐美・他, 2013) によって局所的な被害が発生しており(寒川, 1986)、関連性が注目される。さらに、野町断層によって西向きの変曲を受けた低位段丘面に背斜変形が認められる(図 5 の断面 5-5') など、従来よりも複雑な変位様式を呈する可能性がある。このことは、断層帯中央部でこれまで得られている平均上下変位速度(木村, 2002; 中村・他, 2003; 中村・他, 2006)では考慮されておらず、今後の更なる検討が必要である。

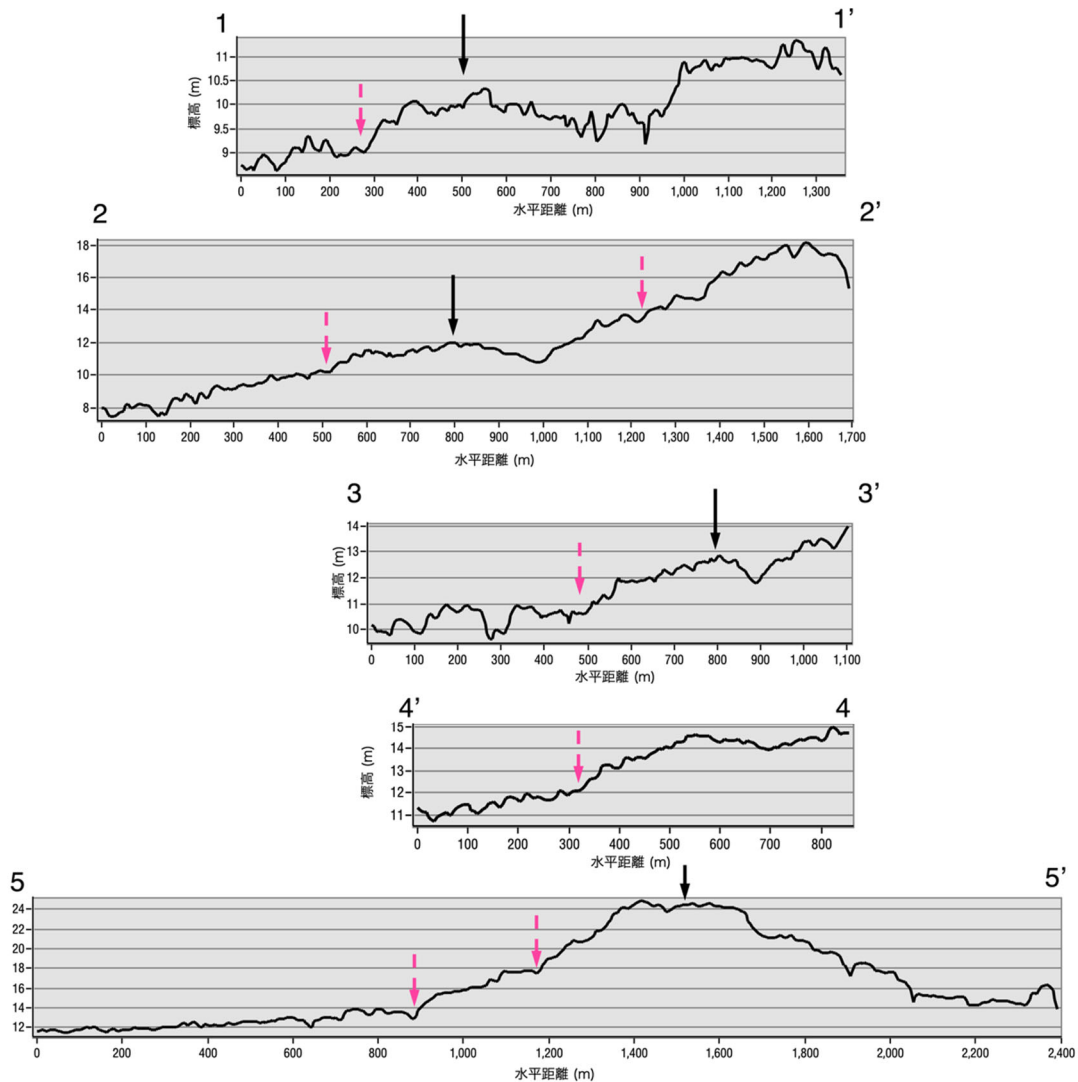


図 5 野町断層の撓曲崖を横断する地形断面図。マゼンタ色の矢印は今回見出した撓曲崖基部の、また黒矢印は背斜軸の位置を示す。断面の作成には基盤地図情報の 5 m グリッド DEM を使用した。

森本・富樫断層帯南部を構成する富樫断層に沿っては、富樫丘陵西縁部から流下する支流性河川によって形成された完新世の合流扇状地群の一部が変位を受け、丘陵西縁部に沿って断続的に撓曲崖・低断層崖が形成されている(東郷・他, 1998a; 東郷・他, 1998b; 松多・他, 2016)。断層南部では、撓曲崖は富樫丘陵西縁部から離れて手取川の沖積扇状地面

に背斜を伴う比高 2 m 程度の撓曲崖が形成されている（図 6；東郷・他，1998b の第 10 図に加筆）。この撓曲崖が存在する白山市小柳地区では広汎に圃場整備が実施されており、撓曲崖地形の大半が人工改変を受けている。北陸鉄道石川線小柳駅の約 200 m 南方には、かろうじて人工改変を免れた崖地形が現存している（図 7）。撓曲崖は手取川の沖積扇状地面を変位させることから、最近の断層活動を解明する手がかりとなる重要な地形学的証拠である。ただし、ただし、この図 7 の崖地形自体は新期の撓曲崖が側方浸食を受けて形成された浸食崖の可能性もある（東郷・他，1998b）。

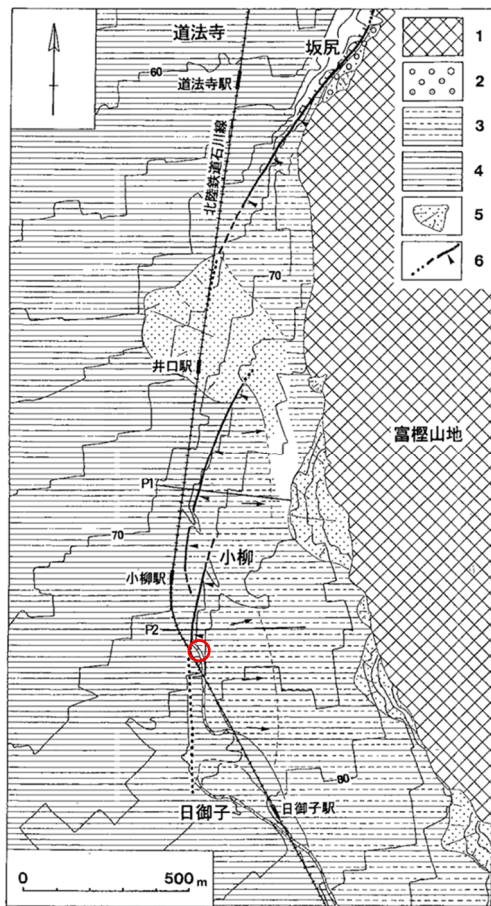


図 6 富樫断層南部の変位地形の詳細図（東郷・他（1998b）に加筆）。赤丸は図 7 の位置を示す。記号は以下のとおり； 1：山地、 2：低位段丘面、 3：手取川沖積扇状地 1 面、 4：手取川沖積扇状地 2 面、 5：崖錐・小扇状地、 6：活断層線（破線：位置不明瞭、点線：伏在部、矢印：地形面の撓曲とその向き）



図 7 富樫断層南部、北陸鉄道石川線小柳駅の約 200 m 南方に見られる西向き崖地形。位置は図 6 に示す。2023 年 2 月撮影。

森本・富樫断層帯と近接する断層帯との関係を議論するために、今年度は邑知潟断層帯南端部（地震調査研究推進本部地震調査委員会，2005；堤・他，2010）と近接する、断層帯北端部の地形について、上述と同様の手法で再検討した（図8）。従来の研究（東郷・他，1998a；中田・今泉編，2002）では、森本・富樫断層帯北端部は津幡川右岸付近とされていた。これより北の宝達丘陵およびその西縁部では、上述した森本断層で見られた上下に分化した沖積低地面を变形させる明瞭な撓曲崖地形は認められない。しかし、丘陵西縁部には複数段の段丘面群が分布するほか、一部では沖積段丘面の存在が認められる。また、丘陵西縁部を開析する河川沿いにも沖積段丘面が認められるなど、丘陵西縁部よりも東側に累積的な隆起の証拠が森本断層北端部から約2 km北まで断片的に分布する。このような地形学的証拠から、森本断層北端部の北方延長にあたる宝達丘陵西縁部に活断層（位置不明瞭）が存在する可能性がある。

以上の変動地形調査の結果を踏まえると、断層帯の活動性調査については、まず森本断層・津幡町太田～金沢市利屋にかけての撓曲崖地形を対象とした活動性調査が挙げられる。産業技術総合研究所（2008）による群列ボーリング・ジオスライサー調査の結果から、沖積面構成層が完新世海水準変動に対応して形成された泥層・砂層・泥炭層から主に構成さ

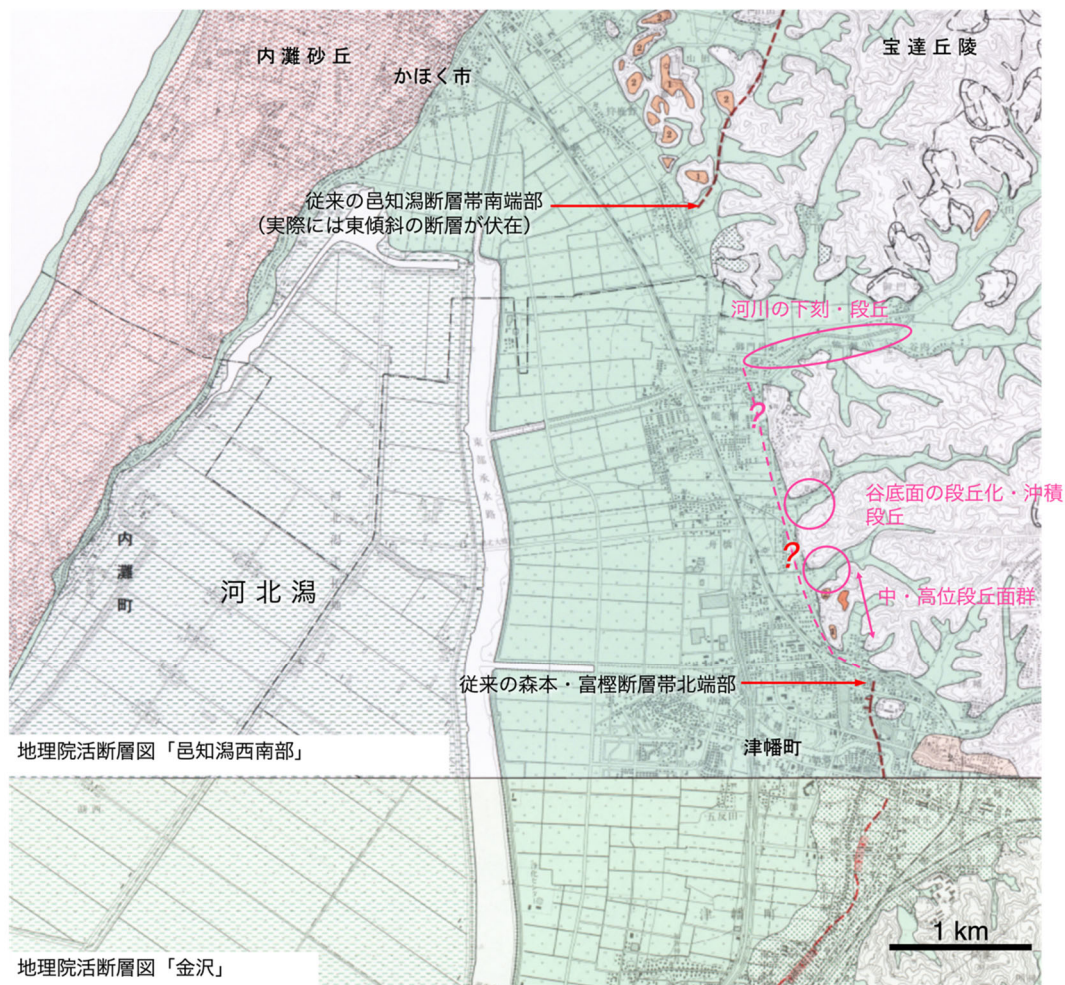


図8 森本・富樫断層帯と邑知潟断層帯南端部付近の変位地形（東郷・他（1998a）、堤・他（2010）に加筆）。マゼンタ色の破線が今回推定した断層（位置不明瞭）。

れることが判っており、年代試料も豊富である。このことから、群列ボーリング等により採取した地質試料について詳細な堆積相解析を行うと共に十分な試料の吟味を経た上で年代測定を実施し、周辺の沖積層の層序資料（北村・他, 1998; K-Ah (7.3 ka; 町田・新井, 2003) を狭在) を考慮しつつ詳細に地層を対比すれば、断層活動性についての情報が得られると期待される。また、これまでの反射法地震探査の結果（石山・他, 2017; Ishiyama et al., in prep.）によれば、断層が伏在している可能性が高いことから、高分解能反射法地震探査を同時に実施することで詳細な変形構造の把握に基づく活動性の解明が期待される。

断層帯南部・富樫断層南端部の撓曲崖地形についても、断層活動時期を解明するための調査対象となり得る。ただし、上述のように、僅かに現存する崖地形自体は側方浸食の影響を受けた可能性がある。浸食崖が否かを判断するためには、地形改変前に撮影された米軍の大縮尺空中写真等による航測図化により地形を復元し、撓曲崖地形の詳細な地形解析を行った上で、活動性調査の対象として適切かどうかを判断する必要がある。このようなより詳細な変動地形学的検討を2年目に行った上で、活動性調査の対象とするかどうかの判断を行う。

また、森本・富樫断層帯北端部と邑知潟断層帯南端部の近接部については、両者の地表トレースのギャップが従来の研究よりも小さくなる可能性が指摘された。今後は、日本海地震・津波プロジェクトで取得した深部構造探査断面（石山・他, 2017; Ishiyama et al., 2017）や来年度実施する既存構造探査断面の再解析結果等に基づき、断層の深部形状を考慮して更に検討を行う必要がある。

2) 森本・富樫断層帯中央部の深部構造探査

森本・富樫断層帯においては、可探深度 2 km 程度の反射法地震探査はこれまで実施されてきた（石川県，1997；産業技術総合研究所，2008；石山・他，2017；Ishiyama et al., in prep.）。一方、断層の深部形状や、第四系・新第三系堆積盆地の構造を把握することを目的とする構造探査は、未だ実施されていない。そこで、森本・富樫断層帯の深部形状や第四系・新第三系堆積盆地の詳細な構造およびその速度構造を推定する目的で、断層帯中央部を横断する 24 km の測線にて深部構造探査（犀川-医王山測線）を実施した。以下では、先ず構造探査のデータ取得・解析について述べ、最後に得られた地下構造断面の地質学的な解釈と活構造との関係について議論する。

a) 深部構造探査のデータ取得

深部構造探査は、東端の医王山付近から主に県道 209 号線および犀川に沿って西端の犀川河口付近に至る全長約 24 km の区間に調査測線を設定して実施した（図 9，10，11）。主要な活断層の深部形状や第四系・新第三系堆積盆地の地質構造・地震波速度構造に関する情報を得ることを目的として、調査測線は金沢（加賀）平野と森本・富樫断層帯の中心部に分布する野町断層と長坂撓曲・野田山撓曲の延長部、および断層上盤側に分布し、新第三系堆積盆地の下部にあたる下部中新統（医王山層）を横断するように設定した。

観測は 2023 年 1 月 6 日から 1 月 23 日の 18 日間を作業期間とし、測量作業・受振器設置・回収作業および発震作業を実施した。受振点（RP）展開は道なりに 25 m 間隔で 970 点設定した。観測装置として、GPS 刻時装置、バッテリー、AD 変換器およびデジタル記録機

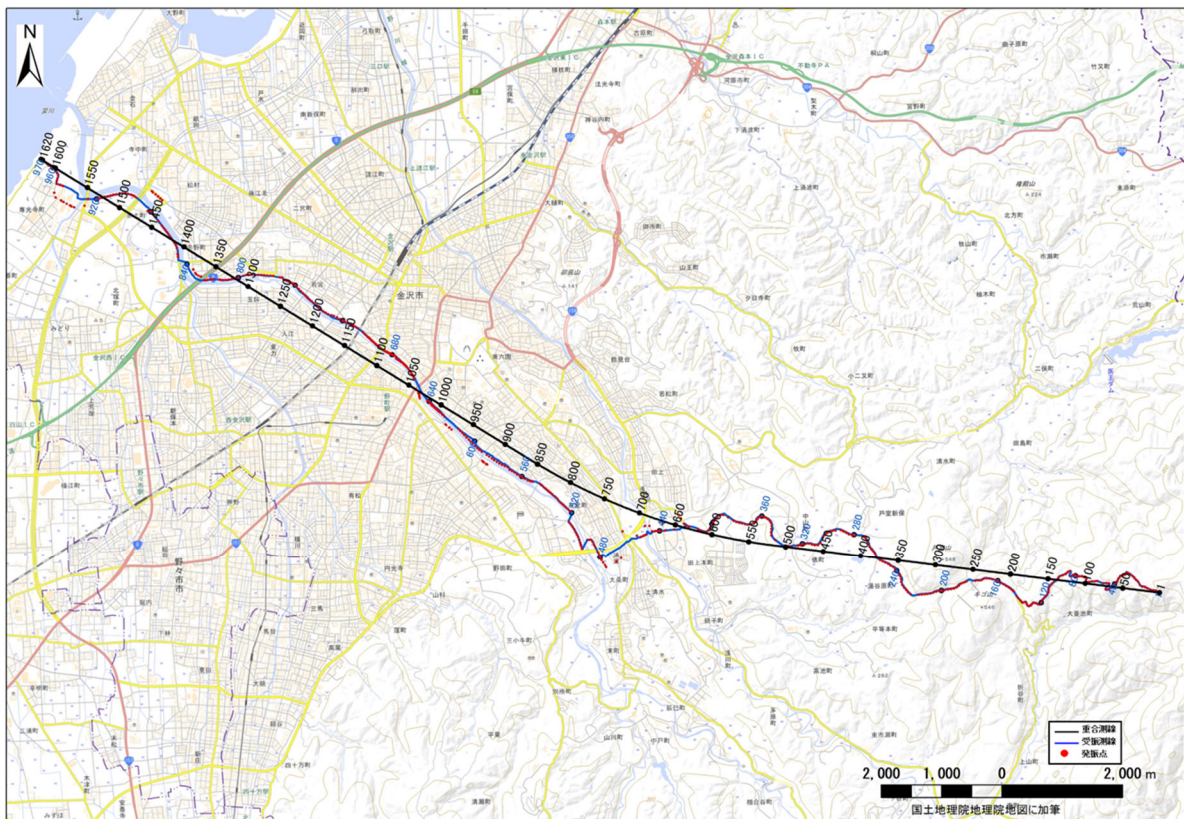


図 9 調査測線図。背景は地理院地図による地形図を使用。青線は受振測線、黒線は重合測線、赤点は発震点を示す。

器を内蔵した 1 ch 仕様の独立型受振システム (UNITE) と、有線テレメトリ型受振システム (Sercel1428XL) を併用した。有線テレメトリ型の記録を利用して発震作業と同時にリアルタイムで記録の確認を行い、独立型の記録は準リアルタイム観測として翌日までにデータの回収及び記録の確認を行った。震源には中型バイプロサイズ車を標準 4 台使用し、発震点 (VP) 間隔 50 m、スイープ数 6 回を標準とした反射法データ取得 (片側展開長 5 km 以上) を実施した。また、追加発震点 VP20860 を除き、全点展開長を確保した上で、中型バイプロサイズ 4 台、スイープ数 50~100 回による集中発震 7 点の屈折法データを取得した。加えて、野町断層地表位置付近の測線中央西側約 2 km 区間 (RP630~700) では、中型バイプロサイズ 2 台または 1 台を使用して発震間隔 25 m の稠密発震作業を実施した。受振点・発震点の測量はネットワーク型 RTK 法 (VRS 方法) の単点観測法による測定を行い、座標値及び標高値を得た。データ取得仕様を表 1 に示す。

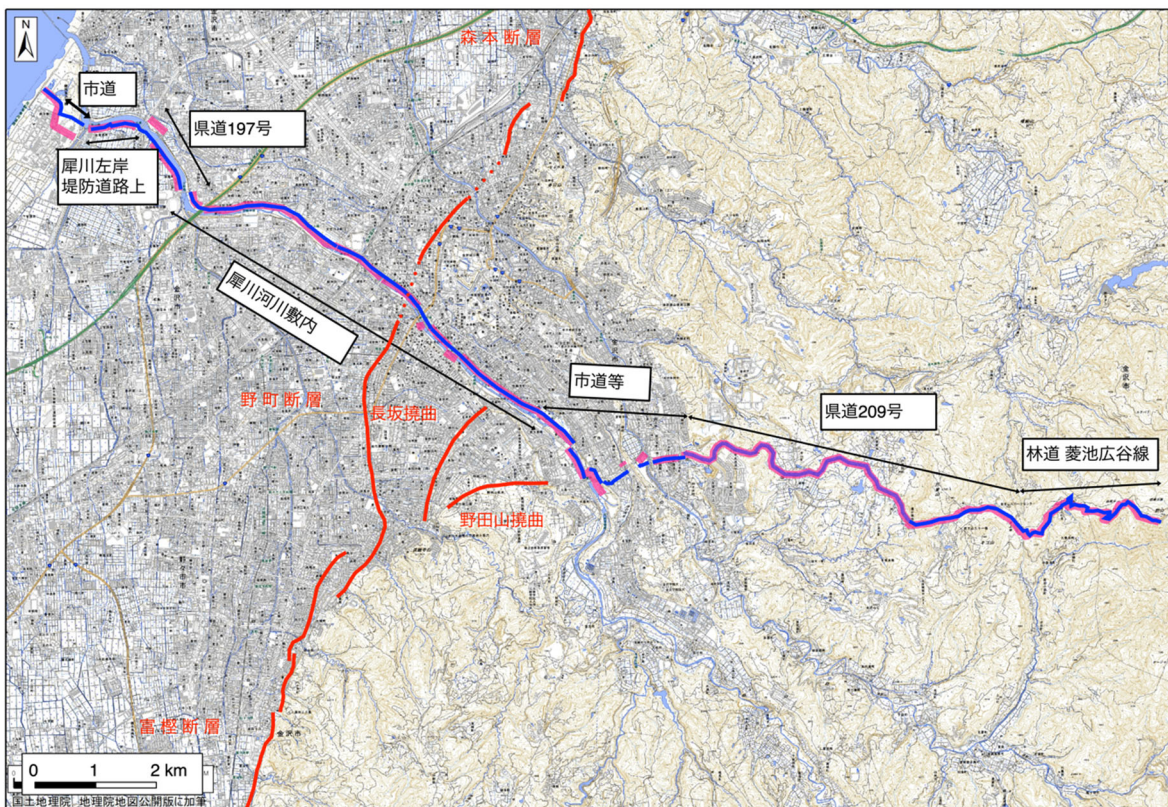


図 10 調査測線図。背景は地理院地図による地形図を使用。青線は受振測線、赤点は発震点を示す。活断層の位置は中田・今泉編 (2002) による。

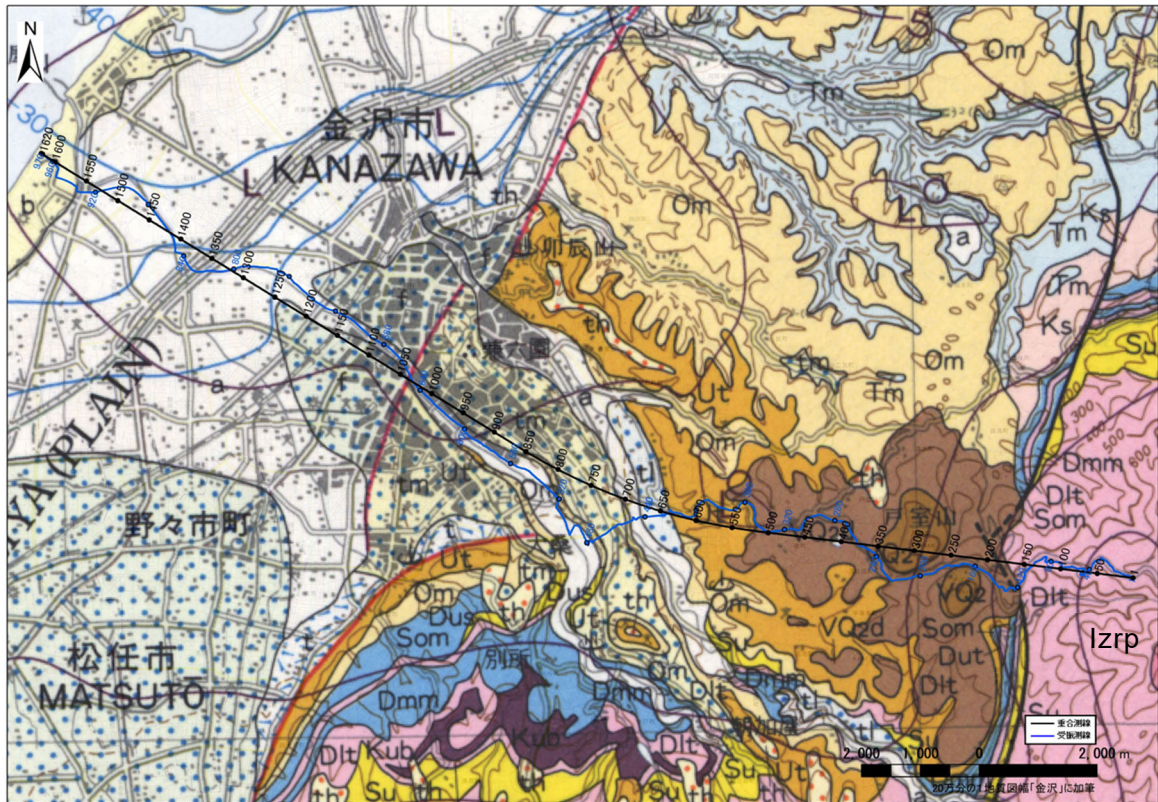


図 11 調査測線。背景は 1/20 万地質図「金沢」(鹿野・他, 1999) を使用。記号は図 9 と同じ。主な表層地質の略称は以下の通り; VQ_{2d}: 戸室山火山岩層なだれ堆積物、VQ₂: 戸室山火山溶岩および火砕堆積物、Ut: 卯辰山層、Om: 大桑層、Tm: 高窪層、Ks: 蔵原層、Som: 犀川層および御峯層、Dmm: 朝屋層、Dlt: 七曲層および土山層、Su: 砂子坂層、Izrp: 医王山層。

表 1 データ取得仕様一覧

調査測線	反射法		屈折法
	標準	稠密発震区間	
総測線長	約 24 km		
調査測線位置	石川県金沢市普正寺地内から同大菱池地内		
発震系パラメータ			
震源	IVI EnviroVib		
バイプロサイス台数	標準 4 台	1 ~ 2 台	4 台
標準発震点間隔	50 m	25 m	約 5 km
スイープタイプ	Linear Up Sweep		
スイープ長	24 sec		
スイープ周波数	8~80 Hz		8~30 Hz
テーパー	300 ms		
バイプロサイスアレイ長	BtoB		
発震点位置	Half Integer		Integer
標準発震回数/発震点	6 回		50~100 回
総発震点数	411 点	51 点	7 点
受振系パラメータ			
標準受振点間隔	25 m		
受振器種別	SM-5、SG-5 (5 Hz)		
受振器数/受振点	1 個組		
受振器アレイ/受振点	バンチング		
総受振点数 (チャンネル数)	970 点		
展開パターン	片側 5 km 以上		固定展開
記録系パラメータ			
探鉱器	Sercel1428XL (有線) : RP 1 ~ 408 UNITE (独立型) : RP409~970		
サンプルレート	4 ms		
プリアンプゲイン	12 dB		
デシメーションフィルター	Linear Phase		
Diversity Edit パラメータ	Window Length...4000 ms Overlap Length...2000 ms Scale Factor...3.0		
相互相関	CAS		
記録長	8 sec		12 sec

図 12 から図 17 に反射法で、図 18 から図 24 に屈折法で、それぞれ取得された発震記録例を示す。以下に主な測線状況を記す。

① 林道菱池広谷線 (RP 1 ~142) : 医王山山頂方面から県道 209 号線に合流するまでの林道であり、有線テレメトリを設置した。行政による除雪対象外の路線であり、調査開始一ヶ月前の時点で約 1.5 m の積雪があったため、事前に除雪作業を行い測線の始点までの道路を開通させた。調査期間中は路面への積雪は限定的であったものの、本来受振器を設置するはずの道路脇の地面が厚い雪に覆われていた。そこで、可能な場合には除雪して受振器を設置し、地面の露出が困難な場合には雪を踏み固めて設置するか、スタンドを用いて路肩に設置した。測線周辺的环境は、早朝から昼前にかけて登山客の通行があったものの車両の通行はなく静穏であった。ショット記録によれば、雪上に設置した地点ではカップリング不足による S/N の低下が認められた。気温の高い日には雪上に設置した受振器の多くが融雪によって傾いたため、スタンドを付けて路肩への設置に切り替えた。融雪水の流出量が多い一部の区間ではノイズレベルが上昇する傾向がみられた。ほとんどの発震点でバイプロサイズ車 4 台での発震が可能であった。

② 県道 209 号線 (RP143~421) : RP408 までが有線テレメトリの設置区間である。交通量はやや多いが大型車両の通行は少なく、また、発震点の路面状況や受振器のカップリングが良い点が多かったため、ショット記録は良好であった (図 12、18)。点在する民家に近接した際にフォースアウトや台数を減じた一部の点を除き、ほとんどの発震点でバイプロサイズ車 4 台での標準発震が可能であった。

③ 県道から犀川河川敷への接続区間 (RP422~478) : 民家が密集する区間であり、大半の発震点でフォースアウトおよび震源車の台数を減じて発震を実施した。しかし、この区間における発震記録の屈折初動は片側 5 km 程度まで届いており、浅部に複数の反射イベントが確認できるなど記録の品質は比較的良好であった (図 13、19、20)。また、発震点の欠落を最小限に抑えるためオフセット発震を多数設定した。付近を走る県道 22 号線は大型車両も含め非常に交通量が多く、この区間の受振点におけるノイズレベルは高い傾向があった。

④ 犀川沿い区間東側 (RP479~725) : 犀川沿いの区間のうち、市街地近傍に位置する。犀川沿いの市道および法定外道路・河川敷内 (緑地公園内) の護岸および管理道路を利用して発震作業を行った。住宅地を含む市街地に近接していたことから、ほとんどの区間でフォースアウト及び震源車の台数を減じて発震する必要がある。そのため、市街地中心部に近い発震では S/N が低下しているものの、いずれの記録もオフセット 2 km 程度・往復走時約 1.5 秒付近まで明瞭な反射イベントが複数確認できる (図 14~16、20、21)。

⑤ 犀川沿い区間西側 (RP726~RP970) : 犀川沿いの区間のうち、市街地の中心部から離れ、河口付近に至るまでの西側区間である。河川敷内の管理道路・堤防道路・河川沿いの市道及び県道・健民海浜公園内の道路を利用した。住宅地からは距離が離れており、震源車 4 台での発震作業が概して可能であった。一方、工場等が多い地域であり、大型車両を含む交通量も多いことから、全般にノイズレベルは高かった。屈折初動の到達が明瞭に確認できたオフセットは反射法記録で 2 km 程度、屈折法記録でも 10 km 程度にとどまり、他の区間の発震点に比べてやや品質が低下する傾向がみられた。オフセット 2 km 程度までのニア

オフセットでは明瞭な反射イベントが往復走時約 1.5 秒付近まで複数確認できる (図 17、22~24)。

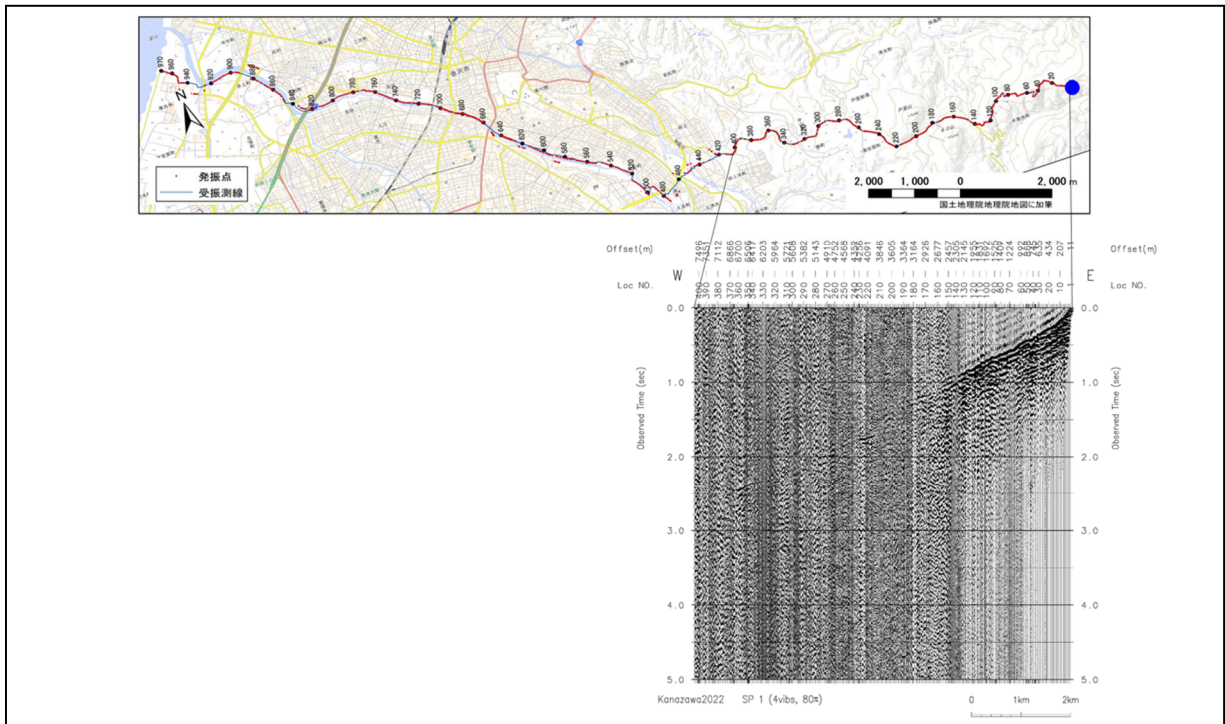


図 12 反射法発震記録 (VP1)。Loc No. は受振点 (RP) 番号を示す。発震系仕様概要：中型バイブロサイス車4台、出力エネルギー80 %、スイープ回数6回。

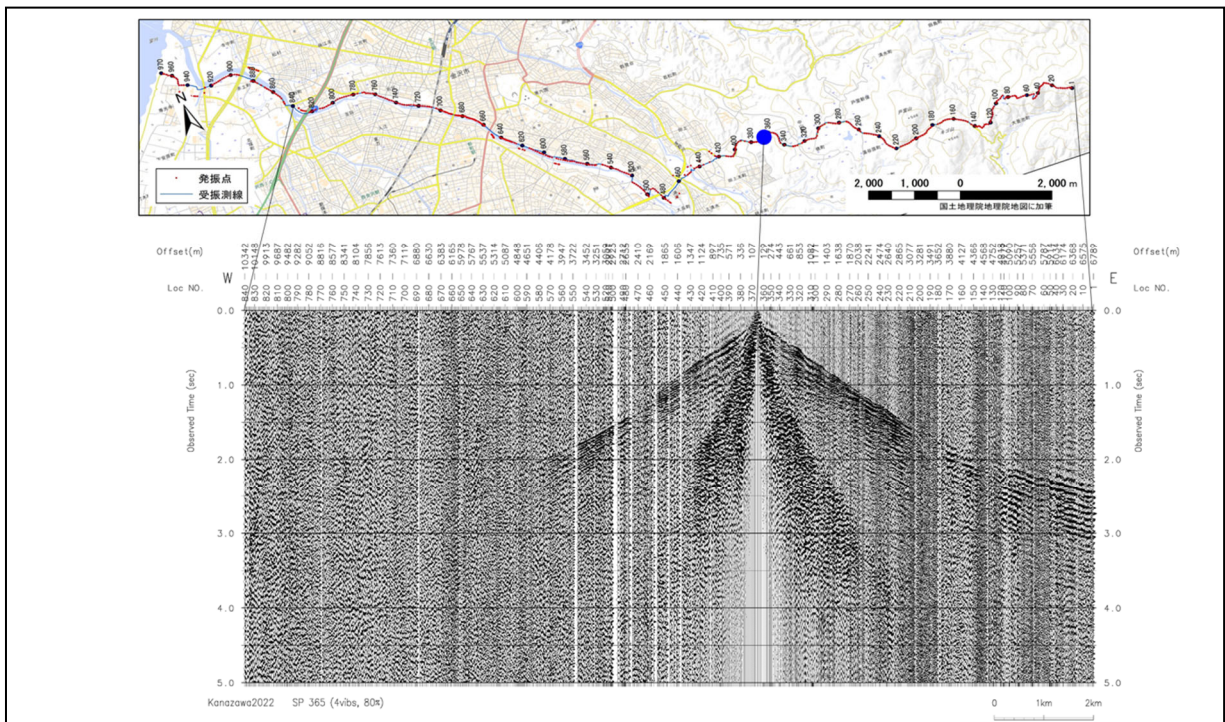


図 13 反射法発震記録 (VP365)。発震系仕様概要：中型バイブロサイス車4台、出力エネルギー80 %、スイープ回数6回。

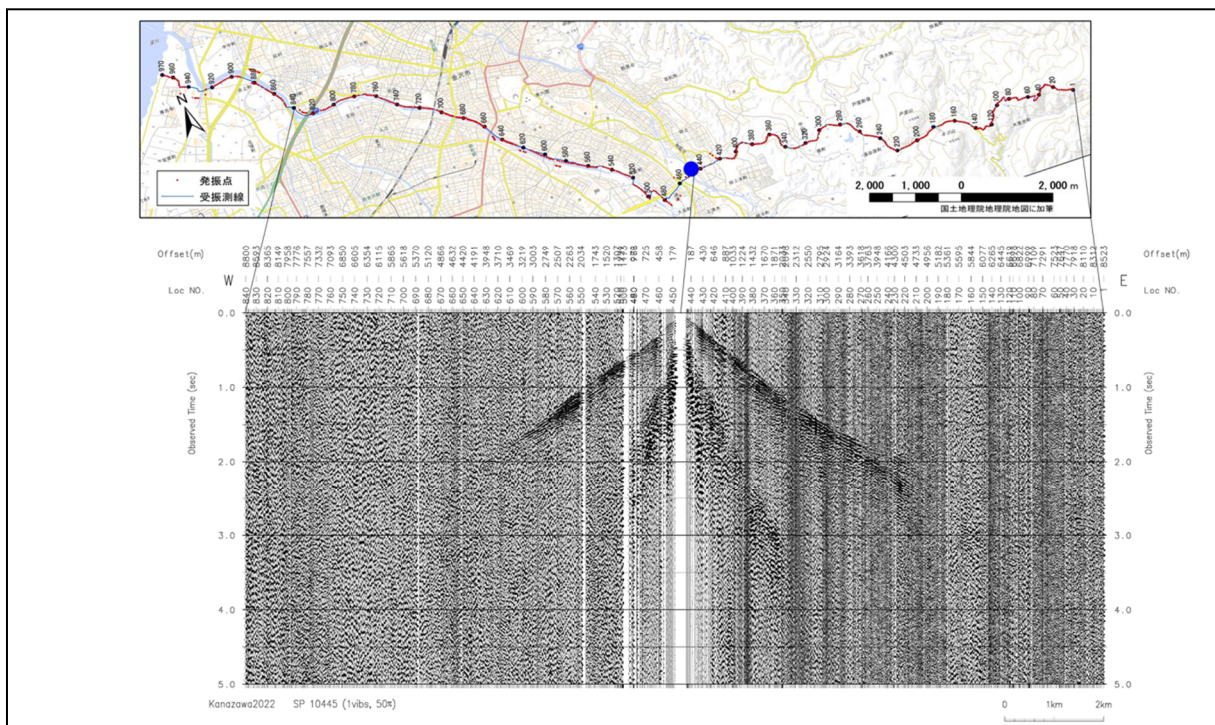


図 14 反射法発震記録 (VP10445)。発震系仕様概要：中型パイプロサイズ車 1 台、出力エネルギー 50 %、スイープ回数 6 回。

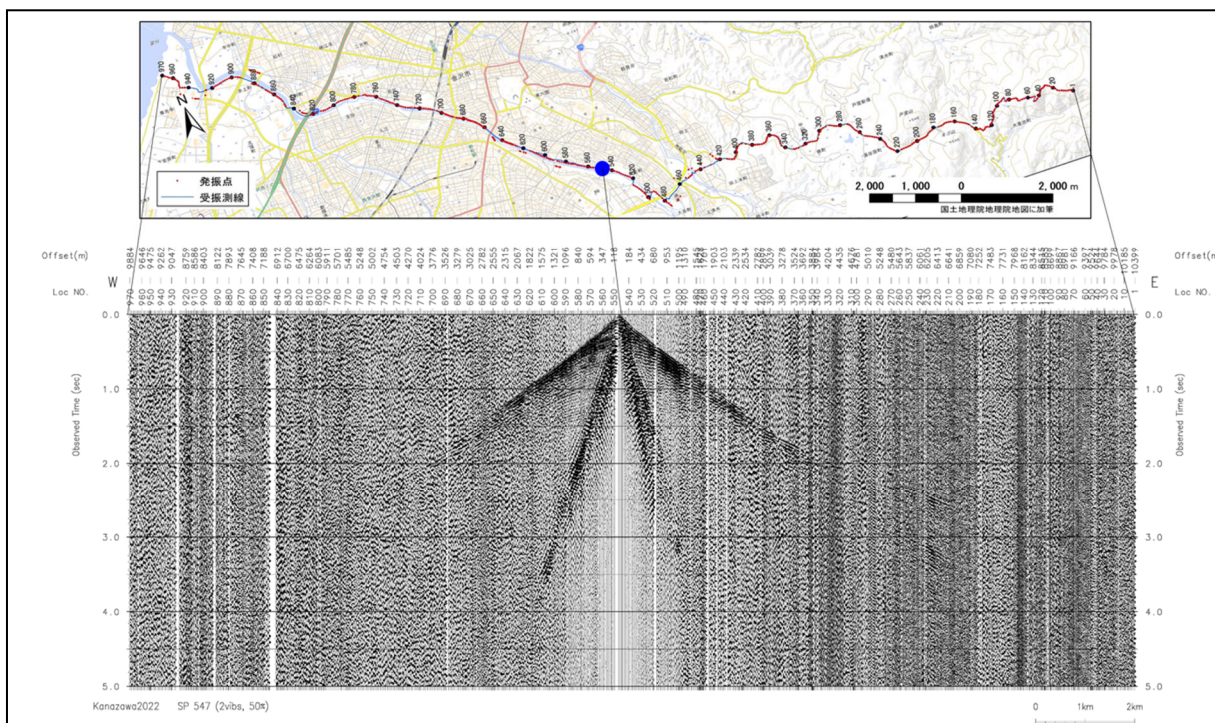


図 15 反射法発震記録 (VP547)。発震系仕様概要：中型パイプロサイズ車 2 台、出力エネルギー 50 %、スイープ回数 6 回。

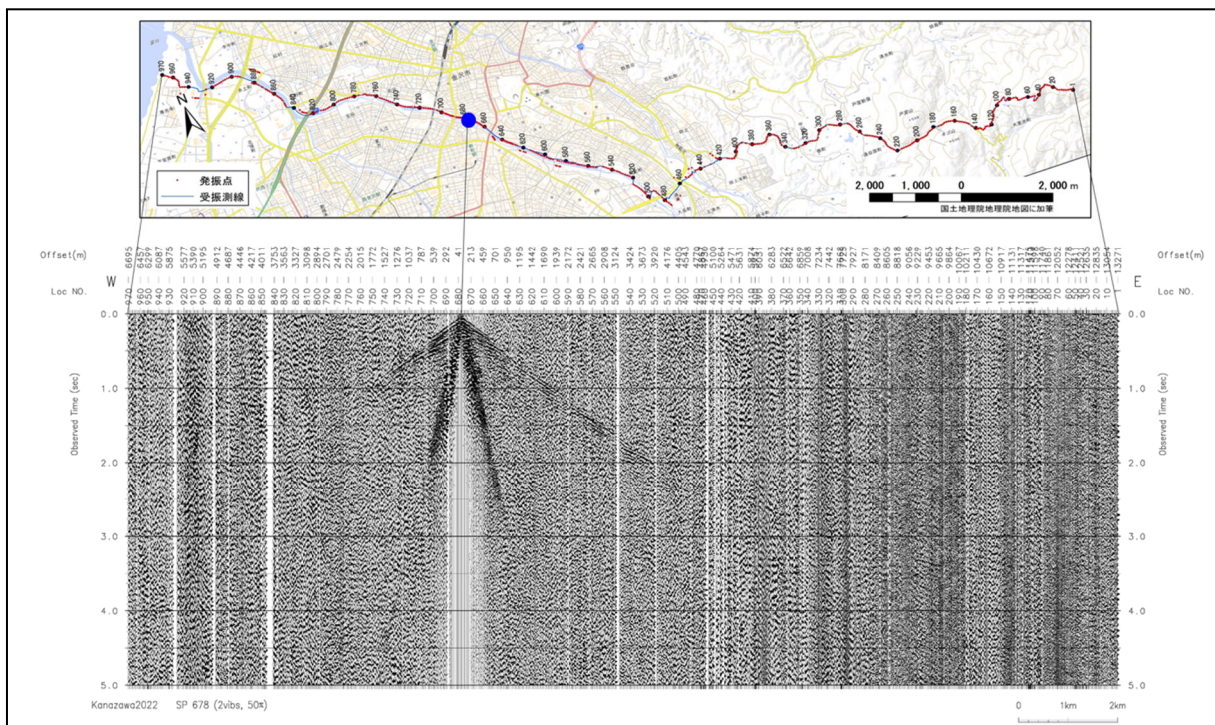


図 16 反射法発震記録 (VP678)。発震系仕様概要： 中型バイプロサイズ車 2 台、出力エネルギー50 %、スイープ回数 6 回。

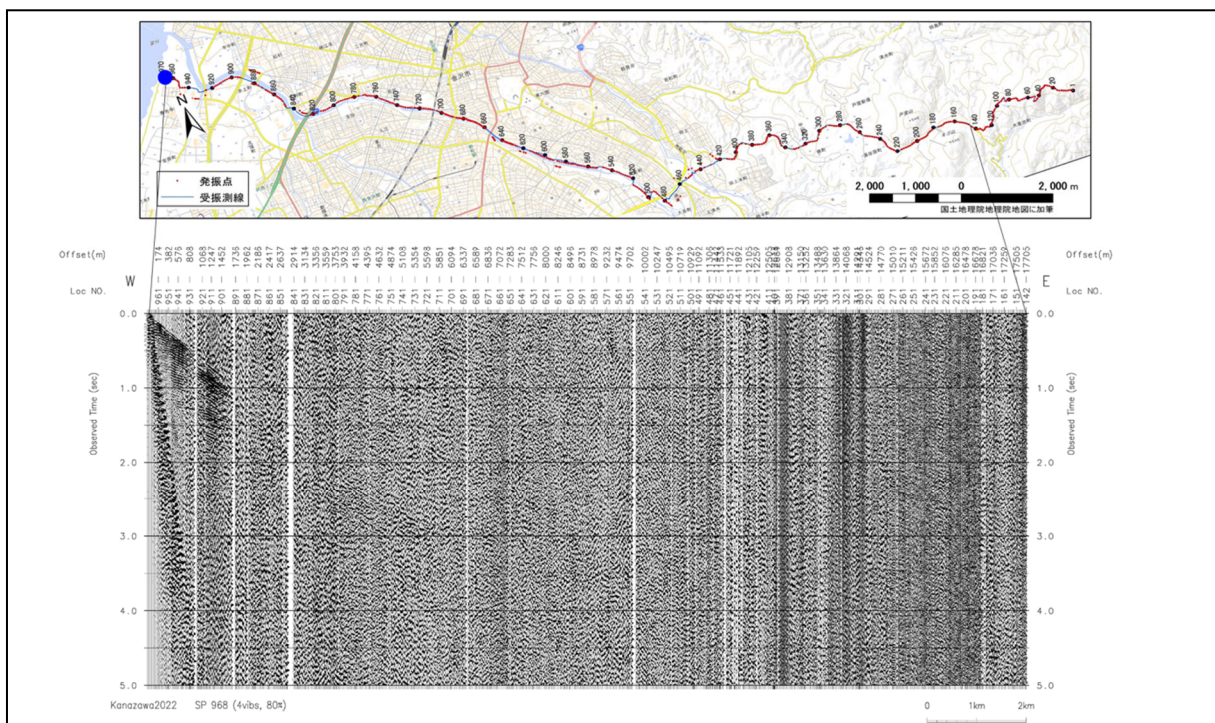


図 17 反射法発震記録 (VP968)。発震系仕様概要： 中型バイプロサイズ車 4 台、出力エネルギー80 %、スイープ回数 8 回。

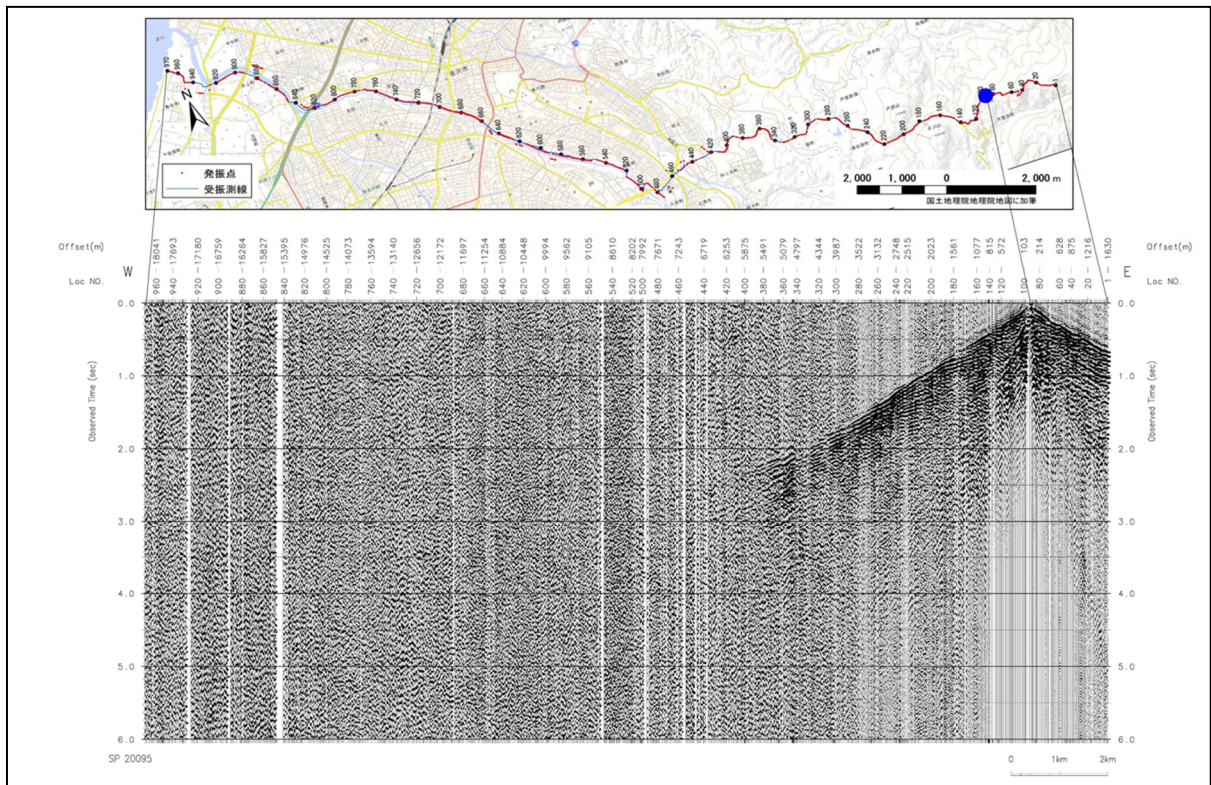


図 18 屈折法発震記録 (VP20095)。発震仕様概要: 中型バイプロサイズ車 4 台、出力エネルギー80%、スイープ回数 50 回。

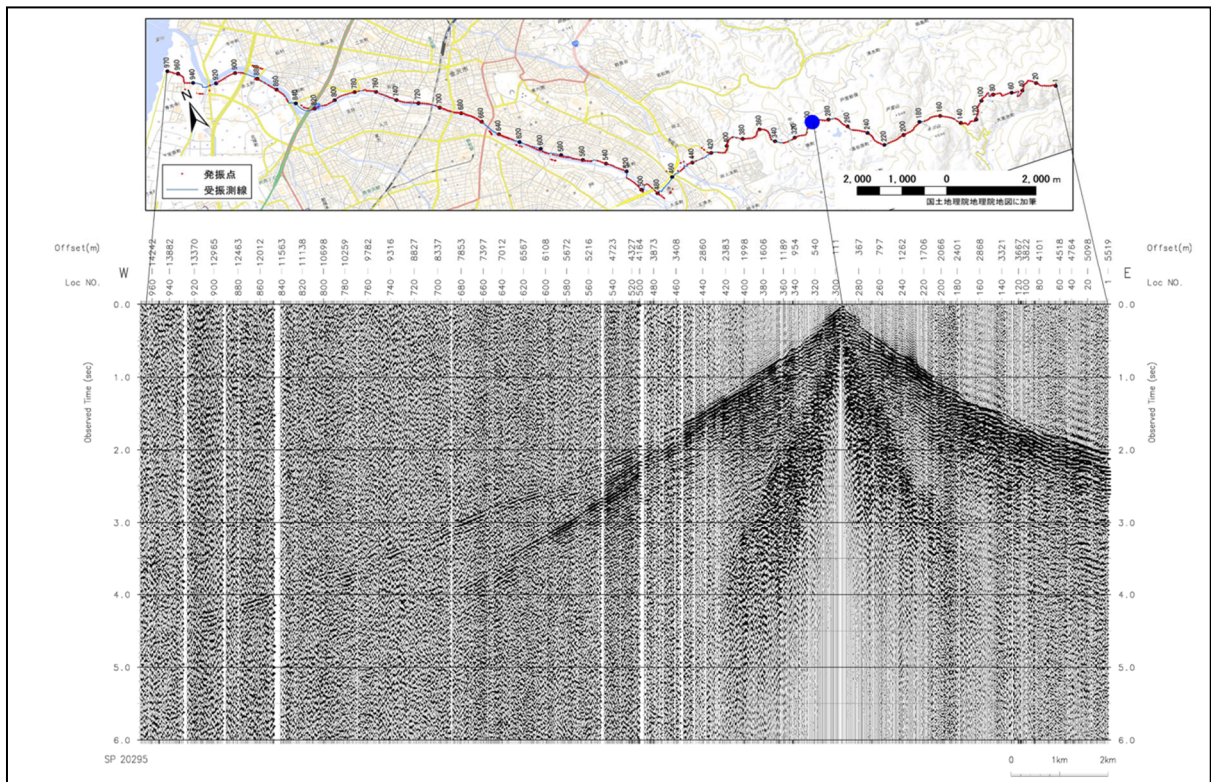


図 19 屈折法発震記録 (VP20295)。発震仕様概要: 中型バイプロサイズ車 4 台、出力エネルギー80%、スイープ回数 50 回。

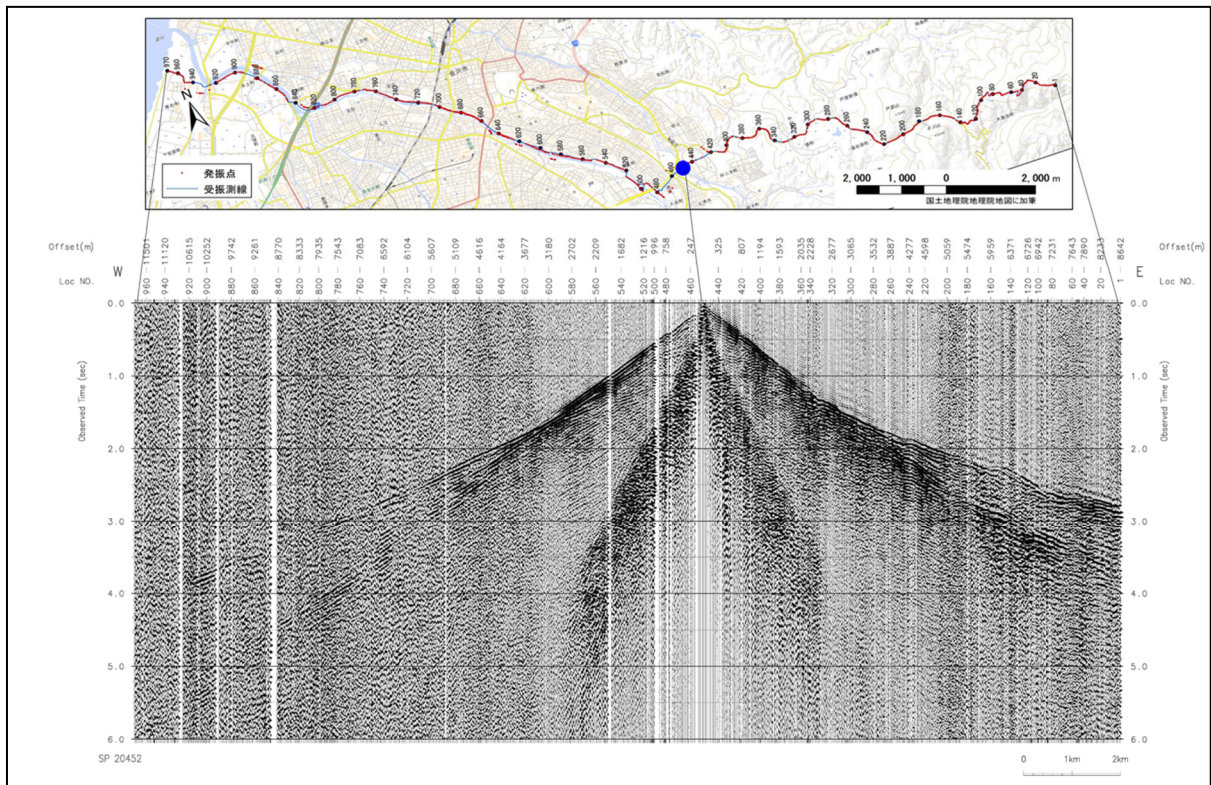


図 20 屈折法発震記録 (VP20452)。発震仕様概要: 中型バイプロサイズ車 4 台、出力エネルギー80%、スイープ回数 50 回。

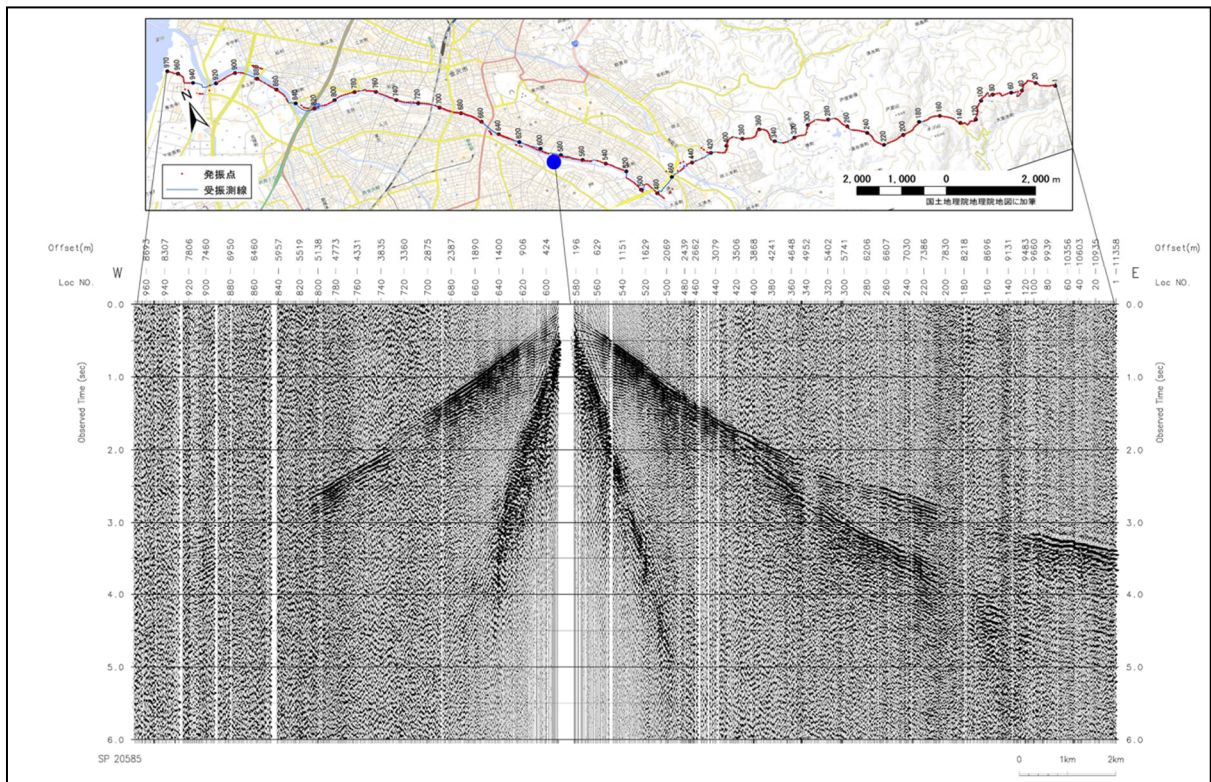


図 21 屈折法発震記録 (VP20585)。発震仕様概要: 中型バイプロサイズ車 4 台、出力エネルギー80%、スイープ回数 50 回。

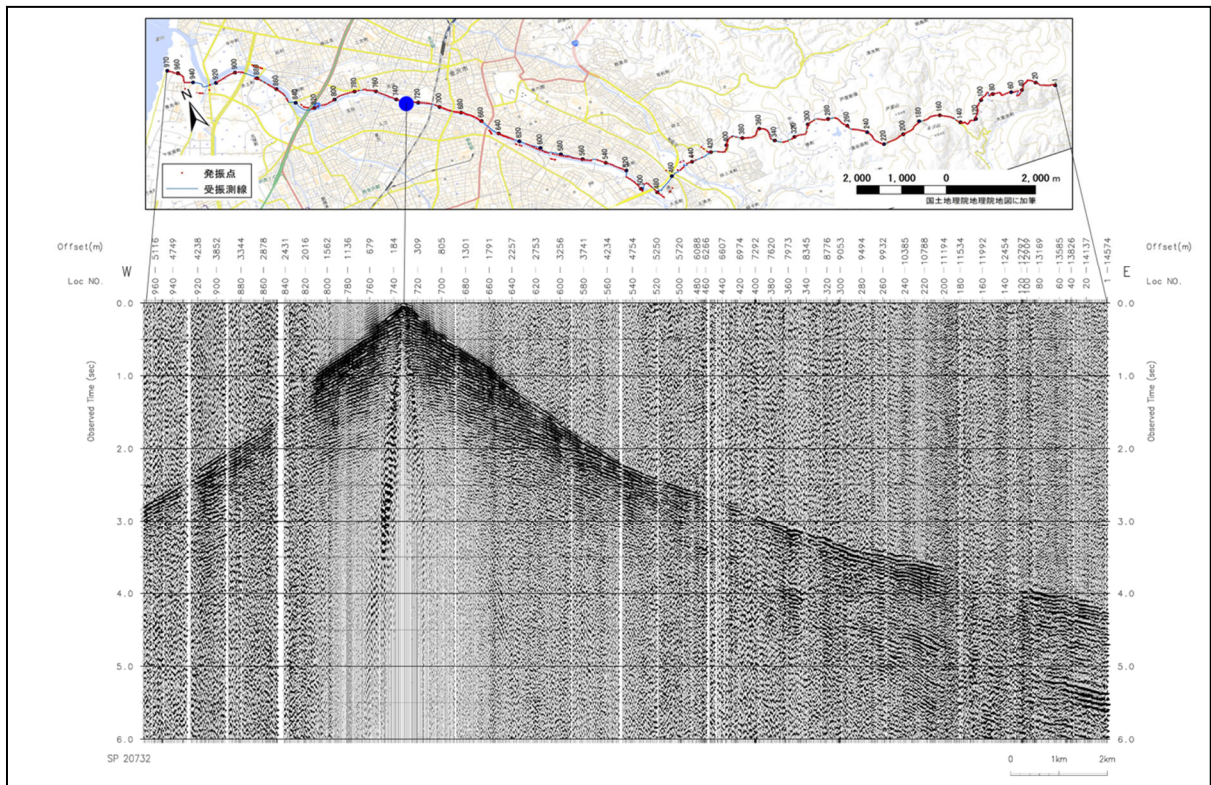


図 22 屈折法発震記録 (VP20732)。発震仕様概要: 中型バイプロサイズ車 4 台、出力エネルギー80%、スイープ回数 100 回。

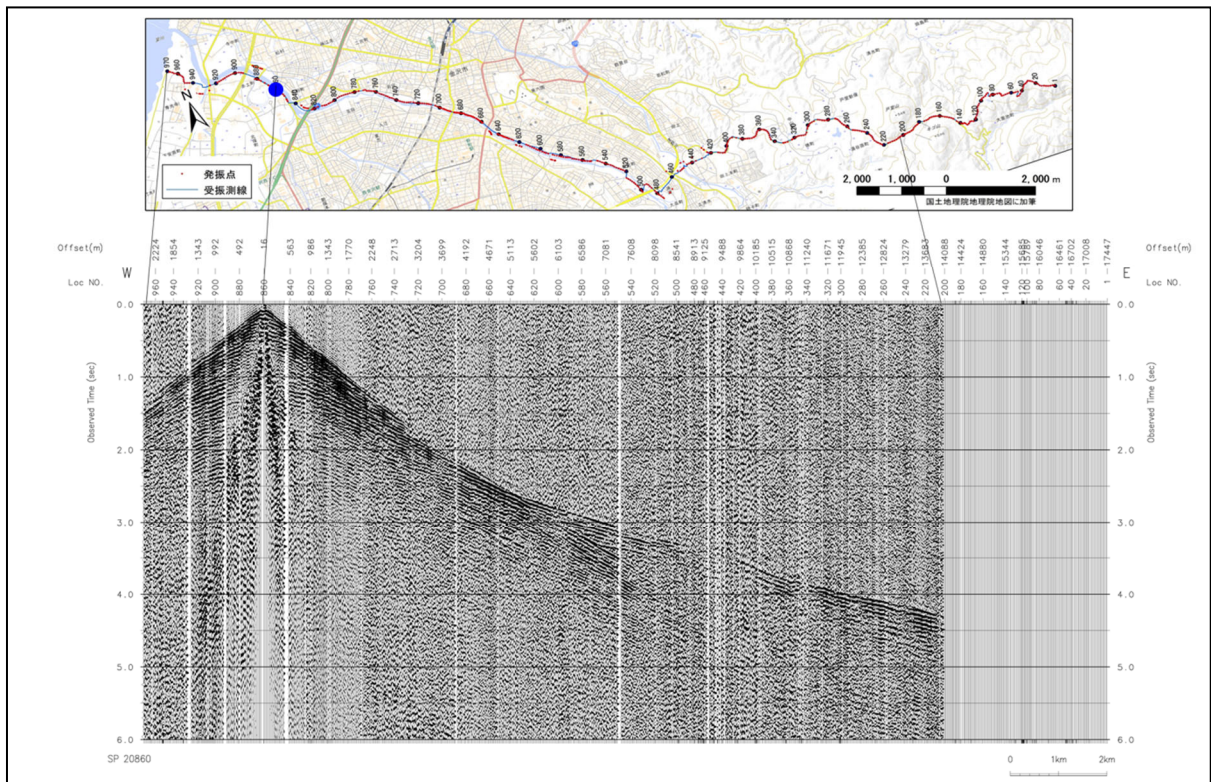


図 23 屈折法発震記録 (VP20860)。発震仕様概要: 中型バイプロサイズ車 4 台、出力エネルギー80%、スイープ回数 100 回。

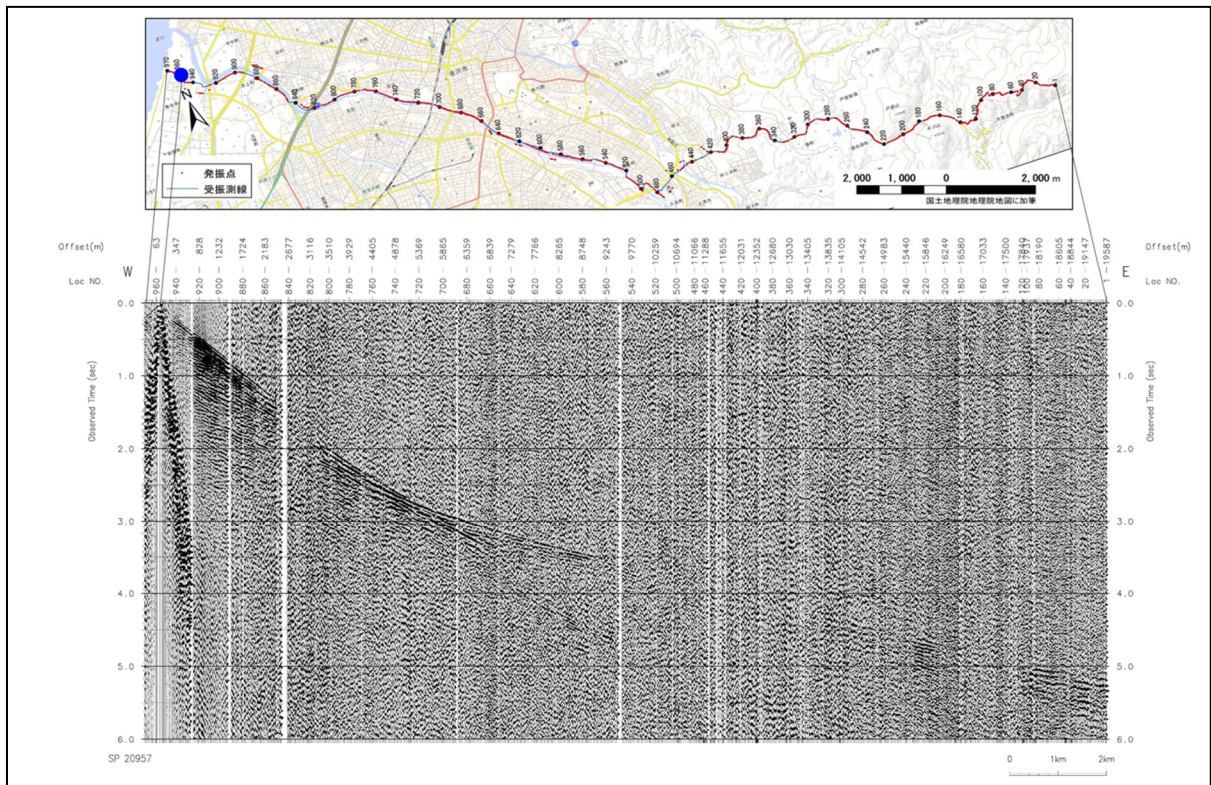


図 24 屈折法発震記録 (VP20957)。発震系仕様概要: 中型バイプロサイズ車 4 台、出力エネルギー80%、スイープ回数 100 回。

b) 反射法データ解析

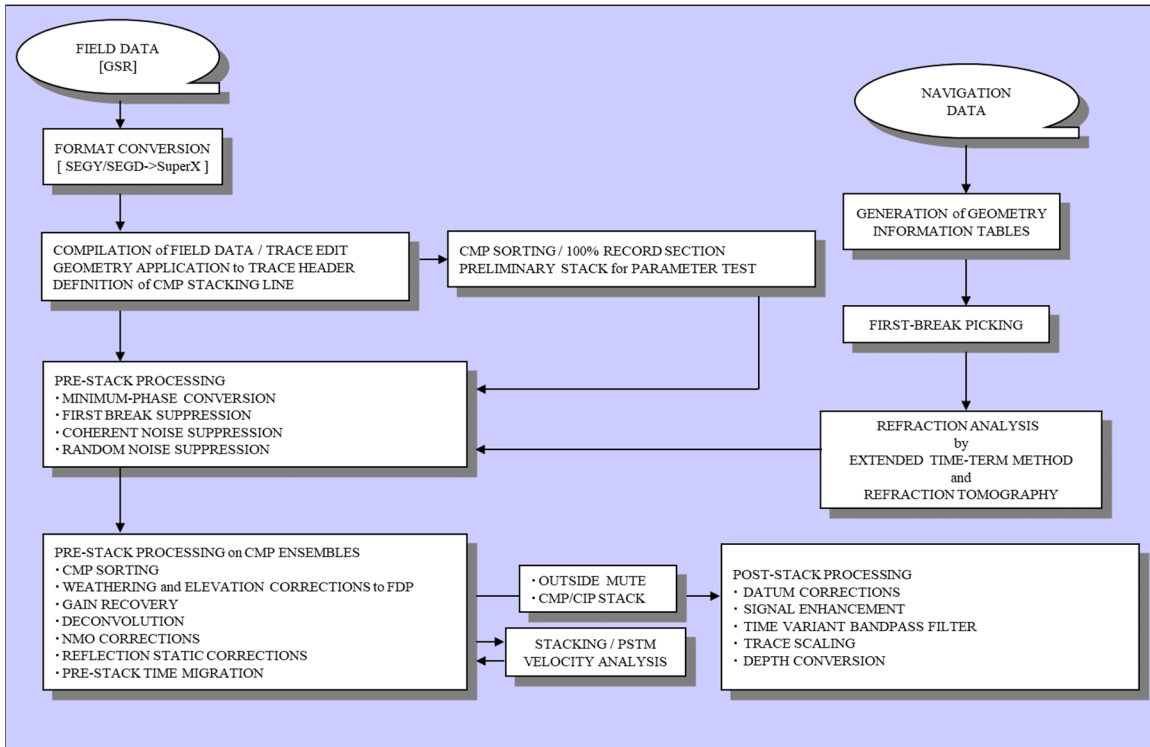


図 25 反射法処理ワークフロー。

反射法データ解析の処理ワークフローを図 25 に示す。以下に処理内容を詳述する。

i) フォーマット変換およびデータ編集

フィールドユニットに記録された原記録（SEG-D フォーマット）を、データ処理ソフトウェアの内部フォーマットへ変換した。その際、すべての発震記録毎にノイズエディットを伴う垂直重合を用い、バイプロサイスのリファレンス波形との相互相関処理を行った。

ii) トレースヘッダーへの測線情報の入力

各トレースのヘッダーに、受発振点及び各共通中間点（Common Midpoint: CMP）のインデックス、座標、標高値、オフセット距離、基準面標高値等の測線情報を入力した。データ解析における基準標高面は標高 800 m に設定した。また、CMP 重合測線は下記の基準によって決定した。

- CMP 間隔 12.5 m
- CMP 範囲 1 ~ 1620
- 重合測線からの最大偏倚制限 なし

重合数及び重合測線位置の空間的な位置関係について、オフセット距離に制限を与えない場合（図 26）とオフセット距離制限 5,000 m を与えた場合（図 27）の結果を示した。また、CMP の各種情報（重合数・オフセット距離分布・発震レイアウト、アジマス・偏差分布・標高分布）を図 28 および図 29 に示す。

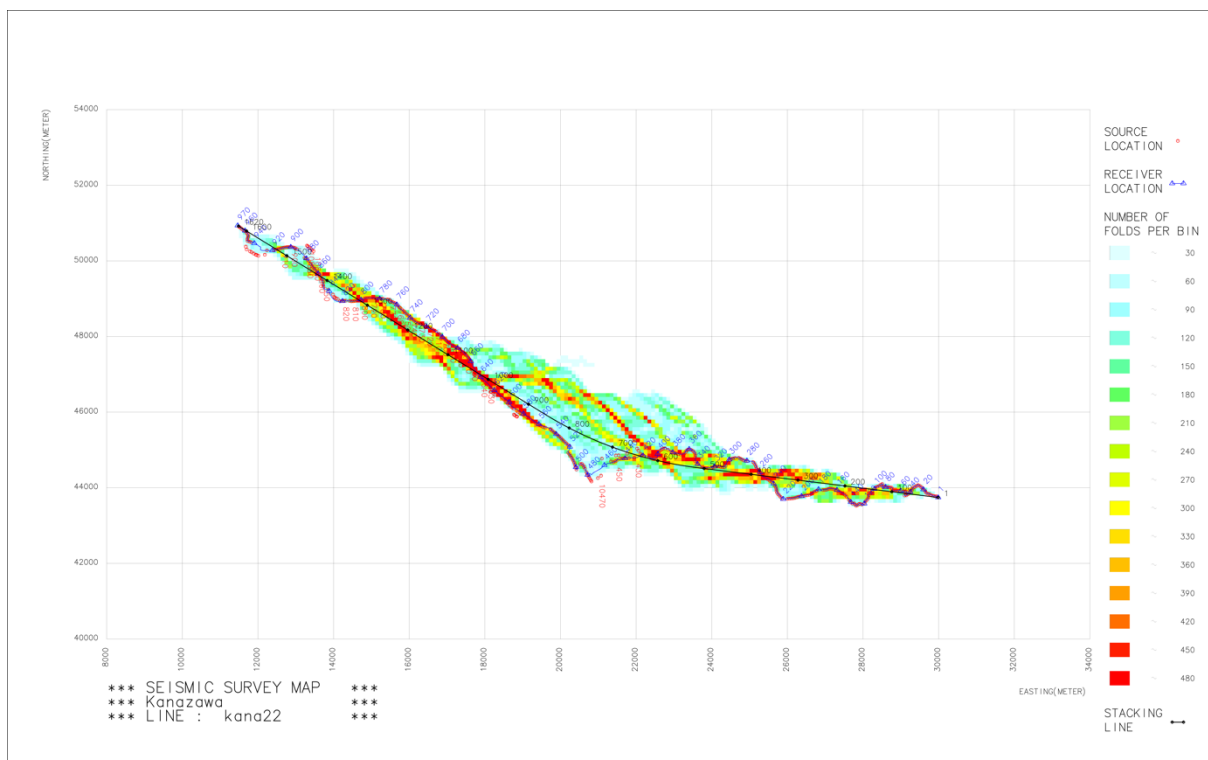


図 26 CMP 重合測線及び重合数分布。オフセット距離制限なし。

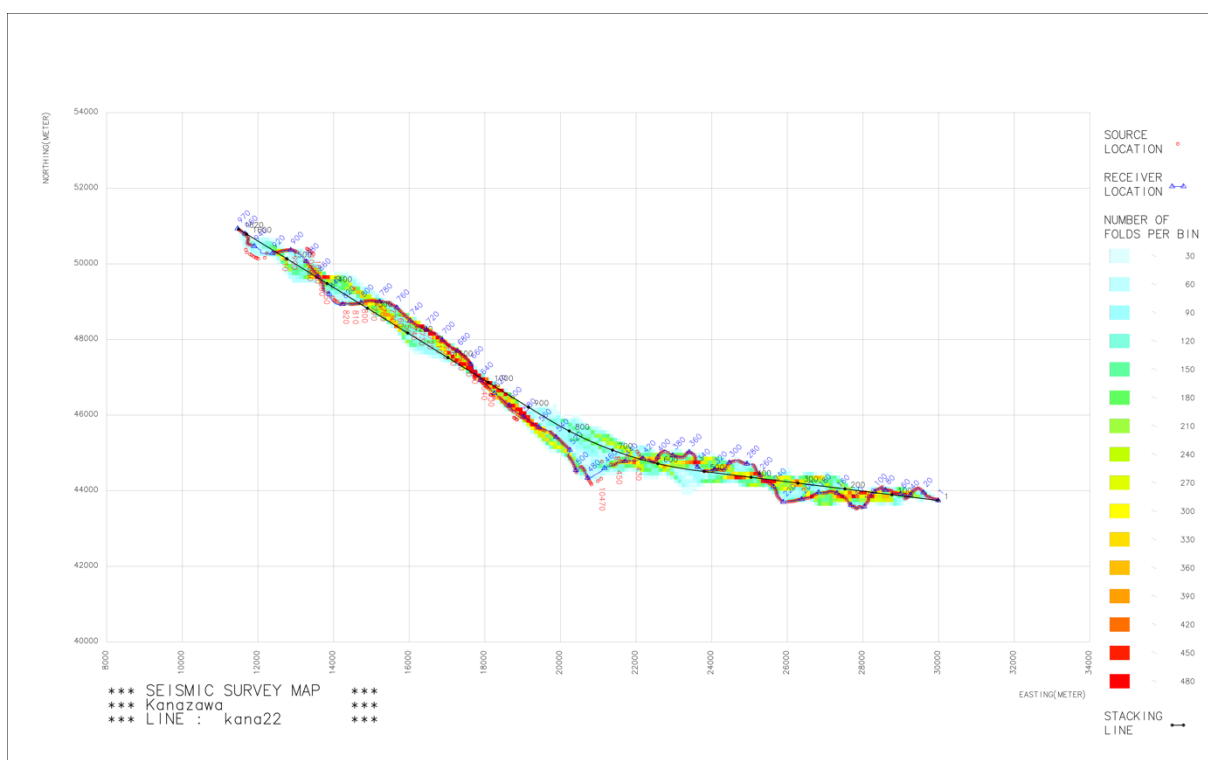


図 27 CMP 重合測線及び重合数分布。オフセット距離 5,000 m 以下。

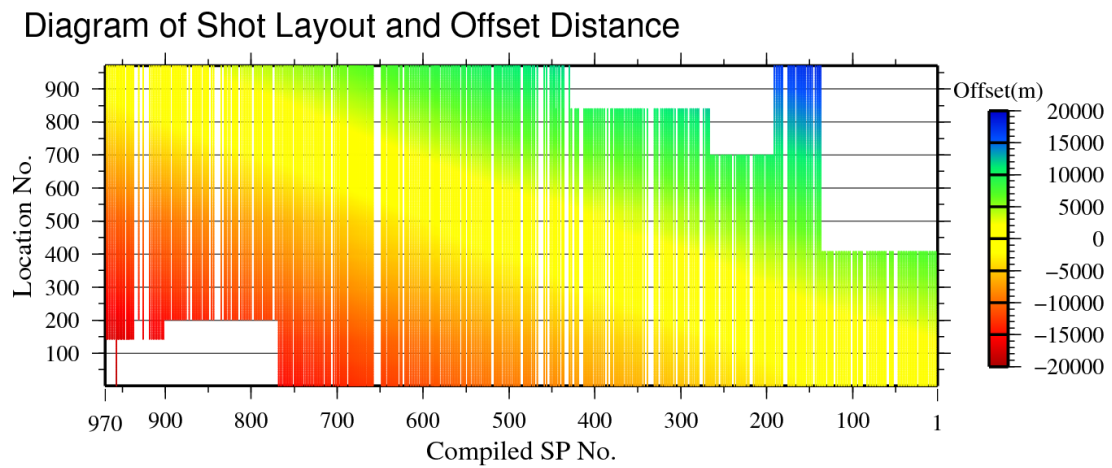
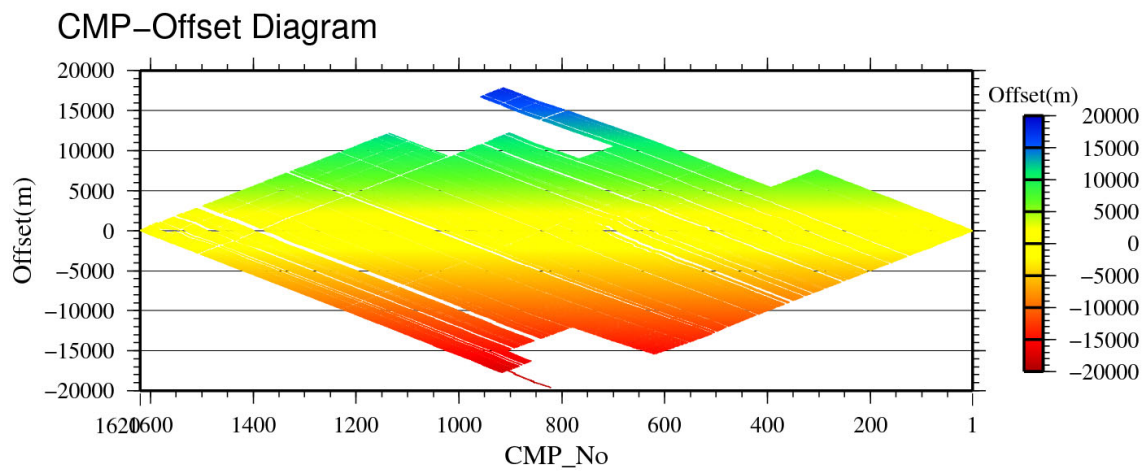
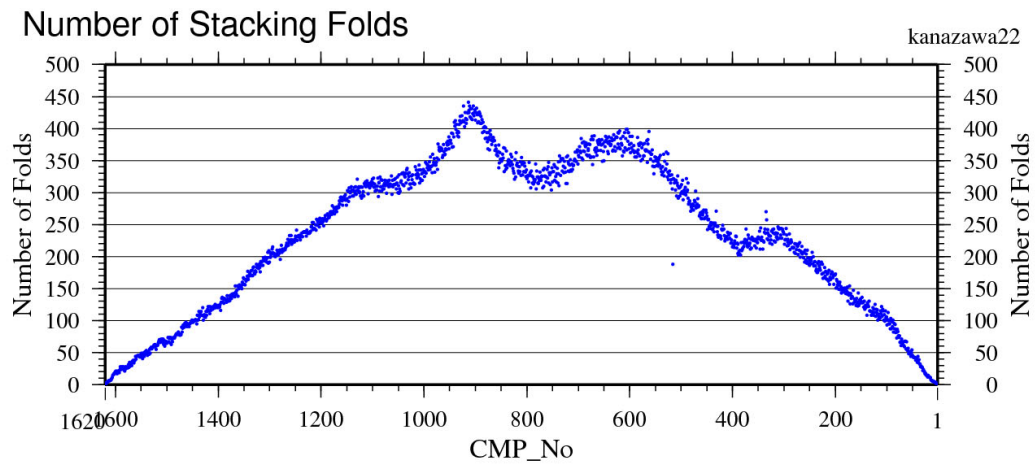


図 28 CMP (共通中間点) 沿いの (上) 重合数分布・(中) オフセットダイアグラム及び(下) 発震レイアウト。Location No. は受振点 (RP) 番号, SP No. は発震点番号を示す。オフセットは発震点に対して西側を正とする。

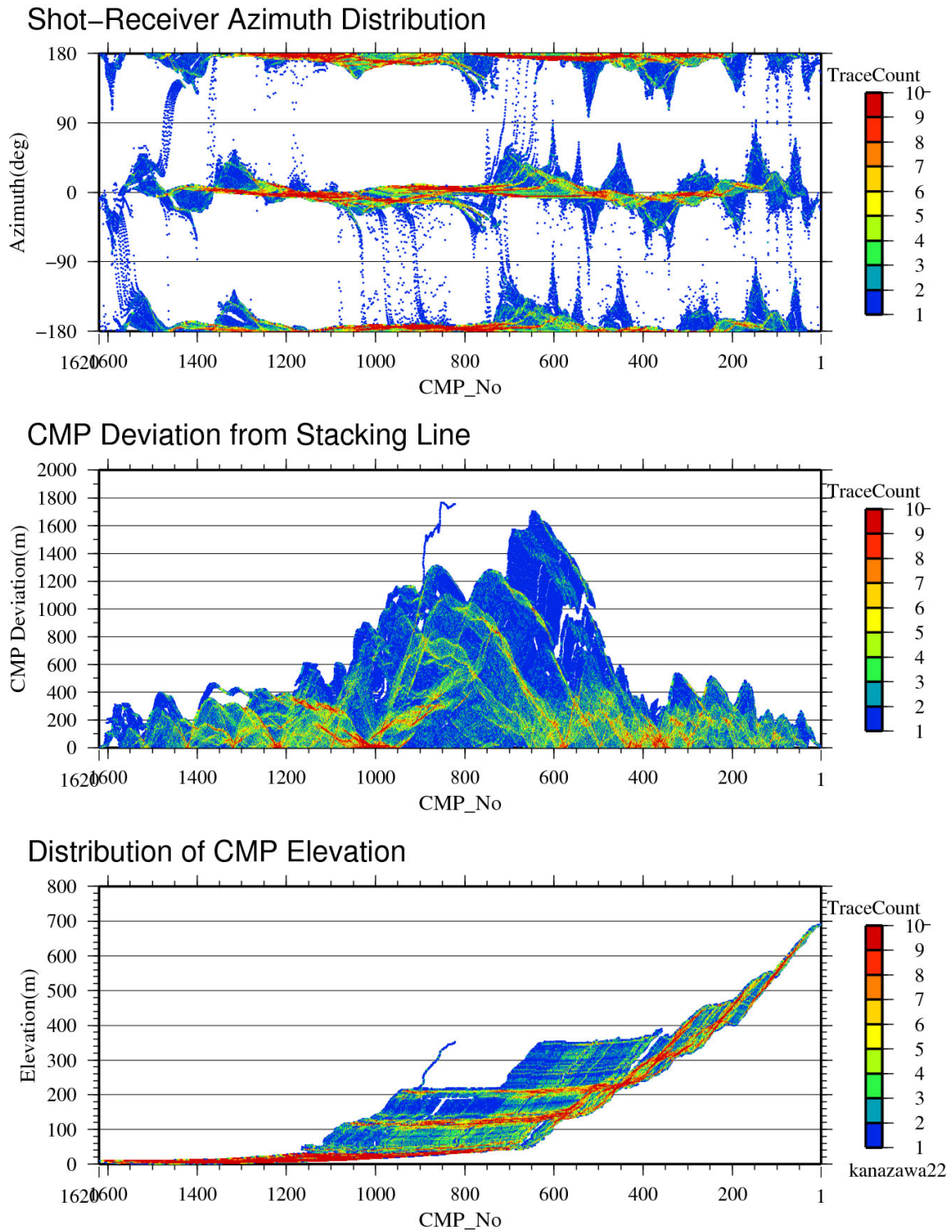


図 29 CMP（共通中間点）沿いの（上）アジマス分布，（中）重合測線からの偏倚，（下）標高分布。アジマスは重合測線の方向と発震点—受振点のなす方向を示す。

iii) 屈折波初動解析

改良型タイムターム法による屈折初動解析を行い、受振点及び発震点タイムターム値と表層基底層速度を算出した。この手法では解析対象とする屈折面が二次元ブロックに分割され、各ブロックに対して表層基底層速度が定義される。このモデルは以下の関係式で記述される。

$$T_{ij} - \sum_k S_{k,0} \Delta_{ijk} = a_i + b_j + \sum_k \delta_{S_k} \Delta_{ijk}$$

ここに、 T_{ij} は屈折初動走時、 a_i 、 b_j は発震点及び受振点タイムターム、 $S_{k,0}$ 、 δ_{S_k} 、 Δ_{ijk} は各ブロックにおけるスローネス初期値、スローネスの初期値からの偏倚量及び屈折波線長である。この受振点及び発震点タイムターム値と表層基底層速度はインバージョンによって算出される。改良型タイムターム法解析の結果を用いて、表層基底深度 D_w は各発震点及び各受振点について以下の様に計算される。

$$D_w = \frac{T_m}{\sqrt{1 - \left(\frac{V_w}{V_{sw}}\right)^2}} \cdot V_w$$

ここに、 T_m はタイムターム値、 V_w は表層速度、 V_{sw} は表層基底層速度である。図 30 に改良型タイムターム法による解析結果を示す。

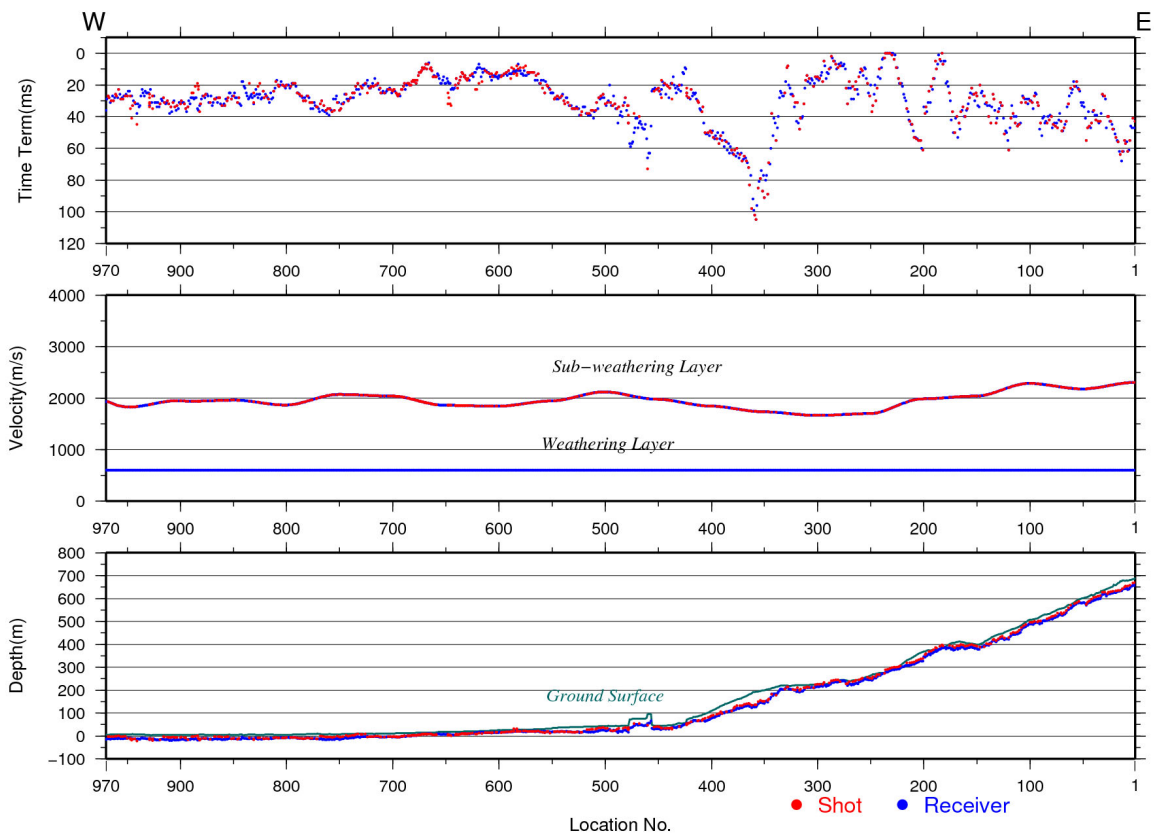


図 30 推定された表層構造図

iv) 最小位相変換

バイプロサイス発震記録については、零位相であるバイプロサイス震源のスウィープ波形（探鉱器’ A/D Decimation Filter (DCF)’ 及び相互相関処理実施後のスウィープ波形）について、最小位相変換処理を適用した。

v) 初動ミュート

強振幅の屈折波初動およびその繰り返しを抑制する目的で、初動抑制処理を実施した。処理においては、後述する屈折法解析に向けて読み取った屈折初動走時を参照して、それに平行する波群を抽出し、原記録から減算した。

vi) ランダムノイズ抑制処理

発震記録に見られるランダムノイズを抑制し反射波の連続性を改善する目的で、共通発震点ギャザーおよび共通受振点ギャザー上で周波数-空間領域の予測フィルターを適用した。

vii) コヒーレントノイズ抑制処理

振源に起因する表面波および線形ノイズの抑制を目的として、共通発震点ギャザー上で周波数-空間領域の速度フィルターを適用した。

viii) 共通反射点編集

上述 ii) のパラメータによって、共通反射点の編集を実施した。

ix) 浮動基準面に対する静補正

浮動基準面に対する静補正を実施した。静補正については、下式で定義される標高補正量及び表層補正量の和として各発震点、受振点について与えられる。

標高補正 T_e : 観測面を一定基準面へ補正する。

$$T_e = - (H_e - H_b) / V_{ec}$$

表層補正 T_w : 低速度の表層構造変化による影響を除去する。

$$T_w = S_d * (-1/V_w + 1/V_{sw})$$

ここに、

H_e : 発震点あるいは受振点標高 (m)

H_b : 基準面 (m)

S_d : 表層厚 (m)

V_w : 表層速度 (m/s)

V_{sw} : 表層基底層速度 (m/s)

V_{ec} : 標高補正速度 (2000m/s)

である。本処理では標高補正速度 (V_{ec}) として下記の基準面補正速度 (V_c) と同じ値を用いた。

表層補正值は、前述 iii) の屈折波初動解析による結果を用いて計算した。本測線の基準面 (Datum) は標高 800 m に設定したが、複雑な地形による標高変化に対応するため、CMP ア

ンサンプル上においてオフセット 1 km 以内のトレースを用いて平均標高を定義し、移動平均によるスムージングをかけたものを浮動基準面 (FDP: Floating Datum Plane) とした。この FDP から基準面までの基準面補正量 T_d は、下記のように定義される。

$$T_d = -2.0 * (H_f - H_b) / V_c$$

ここに、

H_f : 浮動基準面 (FDP)

V_c : 基準面補正速度 (2000 m/sec)

である。

x) 振幅補償

弾性波の震源からの伝播に伴う幾何減衰、多層構造内を透過、多重反射することによる伝播損失及び非弾性効果による減衰、さらには受振点、発震点毎のカップリングの相異に起因する振幅特性の変化を補償することを目的として、自動振幅調整による振幅補償を行った。

xi) デコンボリューション

震源波形、地層効果、記録系の集積としての基本波形を地震トレースから推定・除去し、記録の分解能向上を図るためにデコンボリューションを適用した。

xii) 重合速度解析

以下に示すパラメータで定速度重合法による速度解析を実施した。尚、残差静補正後に再解析がなされている。図 31～34 に重合速度解析例を、図 35 に重合速度プロファイルを示す。

解析点間隔 : 1000 m
解析速度数 : 50 (1400～6000 m/sec)

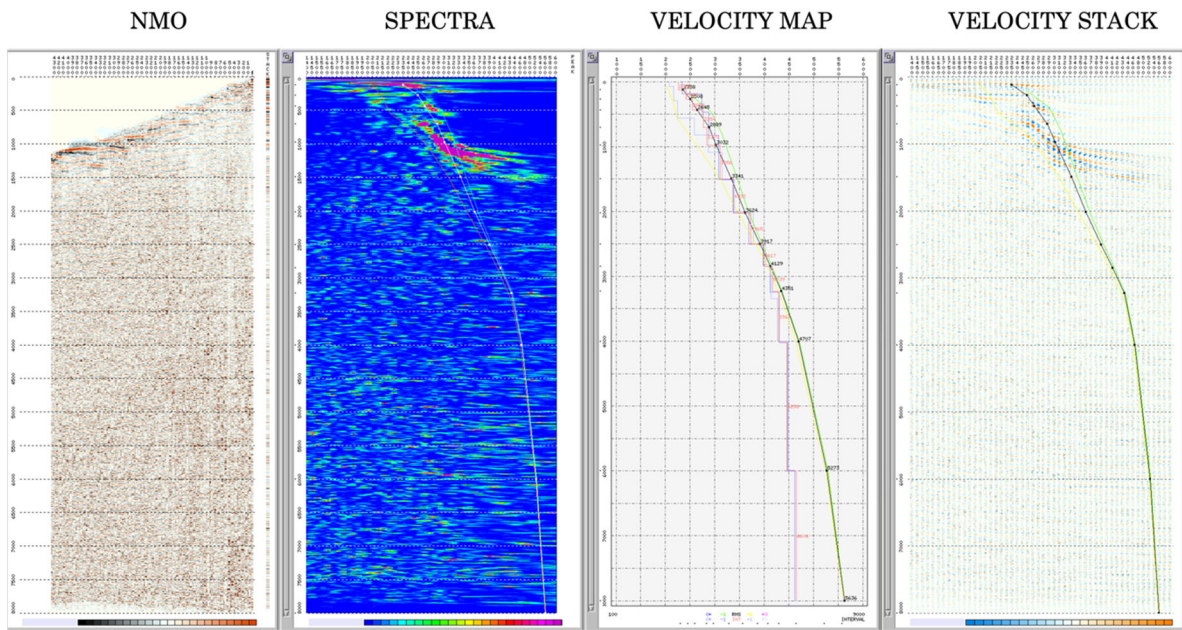


图 31 速度解析結果例 (CMP160)

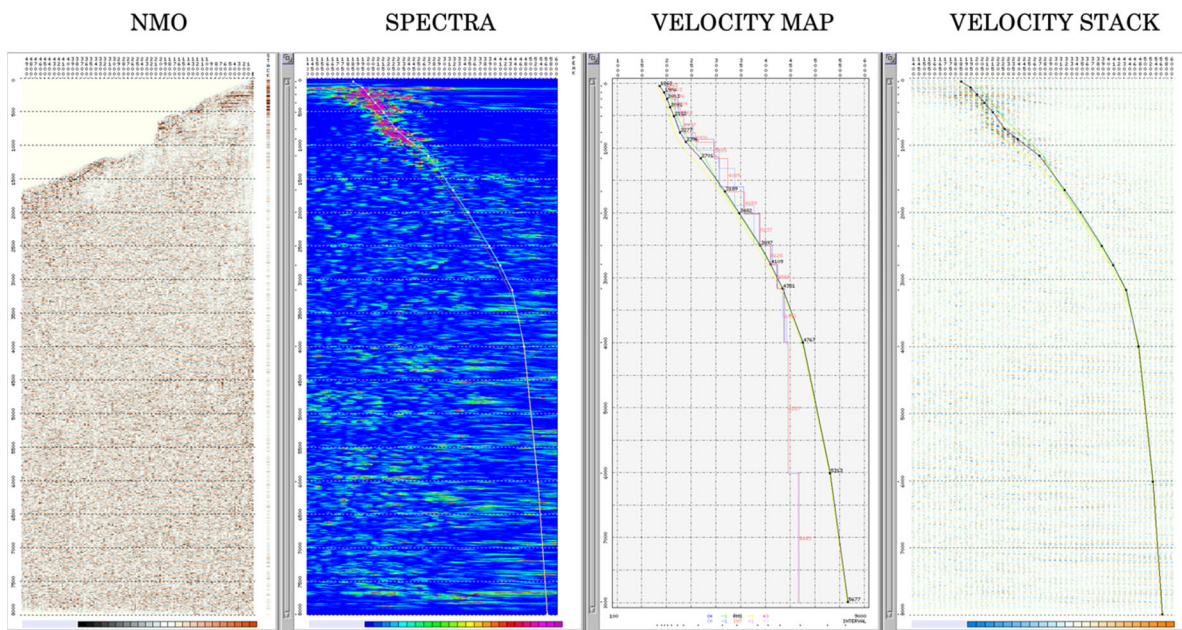


图 32 速度解析結果例 (CMP810)

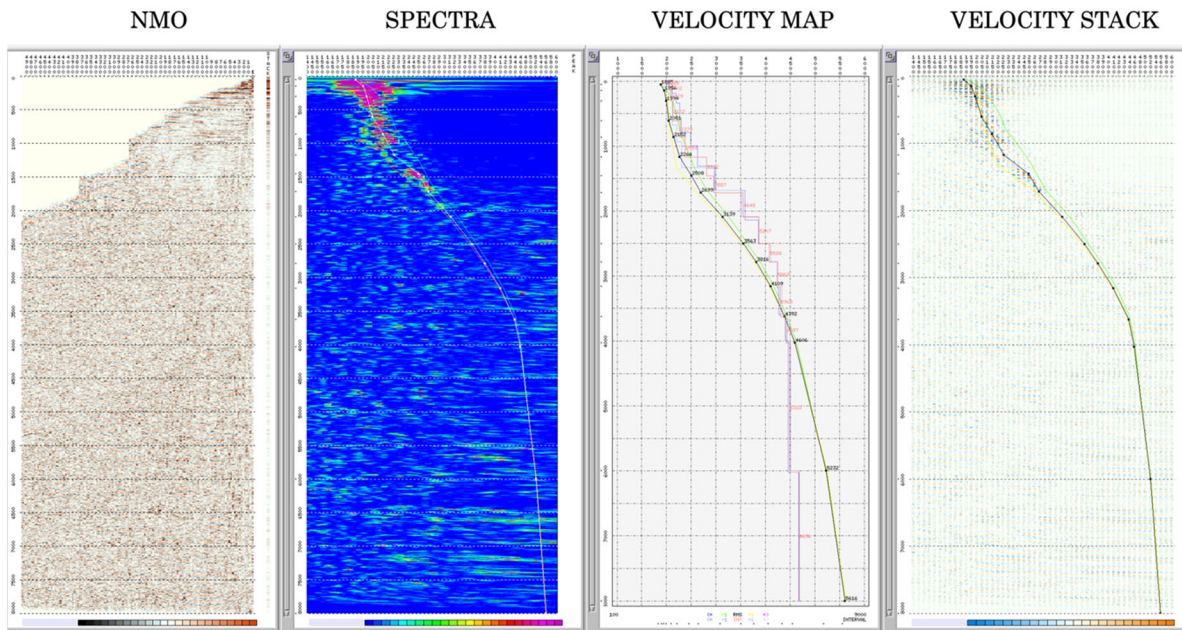


图 33 速度解析结果例 (CMP1130)

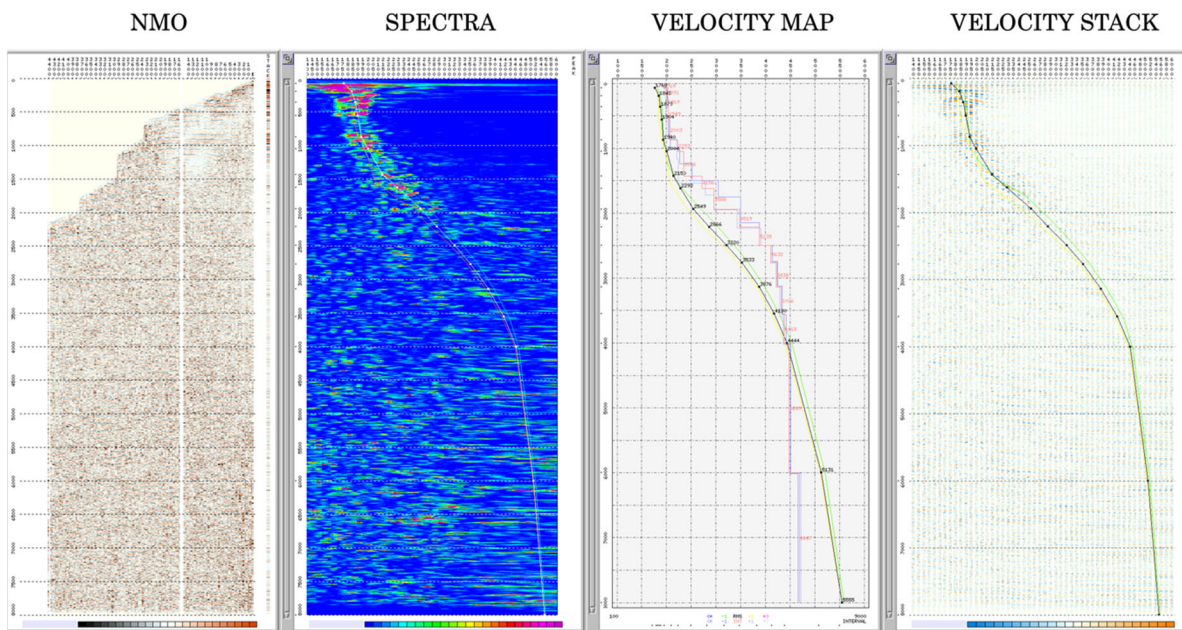


图 34 速度解析结果例 (CMP1450)

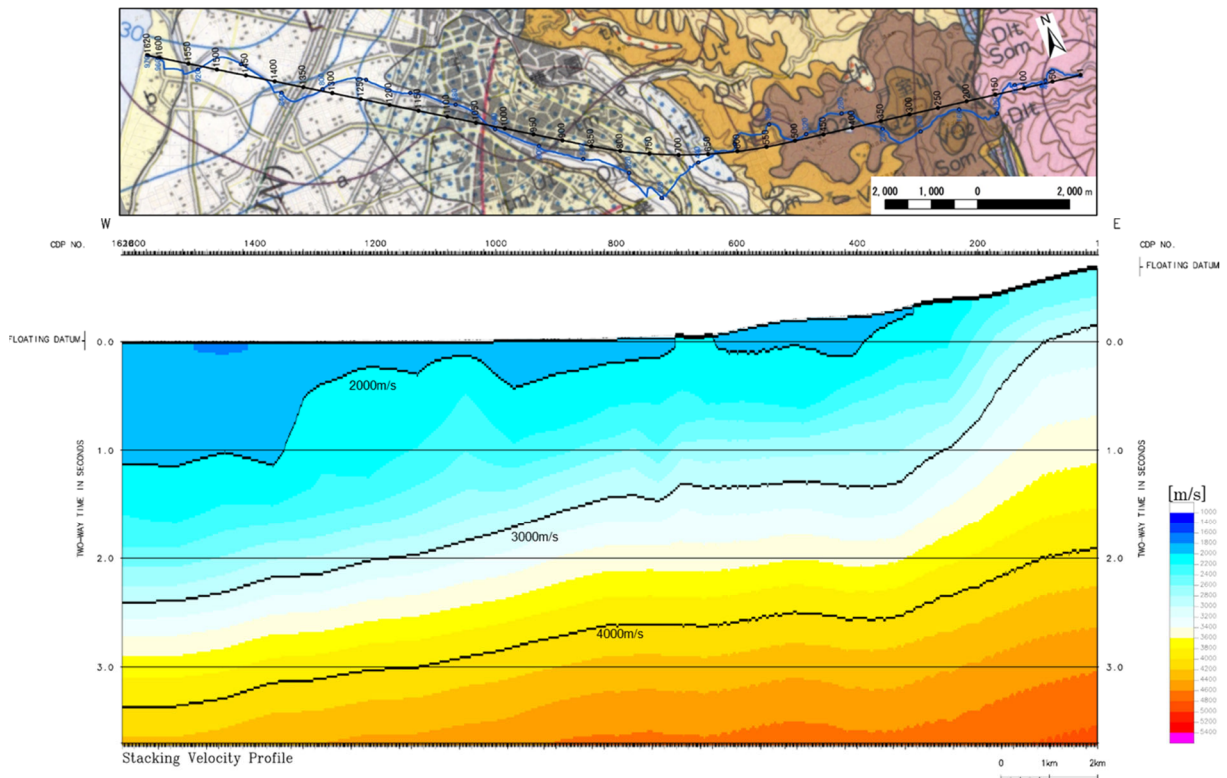


図 35 CMP 重合速度プロファイル

xiii) NMO 補正

速度解析によって求められた重合速度-時間の関数を時間-空間方向に内挿し、その速度テーブルに従って NMO 補正を適用した。

xiv) ミュート

NMO 補正に伴う波形の伸長及びファーオフセット側に残留する屈折波初動部分の抑制(アウトサイドミュート)を目的として、全 CMP アンサンブルについて空間方向に変化するミュートパターンを設計し適用した。

xv) 重合前振幅調整

トレース間の振幅バランスを調整するため、自動振幅調整による振幅補償を行った。

xvi) 残差静補正

NMO 補正後の CMP アンサンブルを入力として、基準トレースとの相互相関関数から得られる最大ラグ値を用いて、'Surface-consistent' な発震点、受振点残差静補正量を LTI(Linear Travel-time Inversion)によって統計的に計算し、これを適用した。図 36 に、推定された受振点及び発震点残差静補正量を表示する。

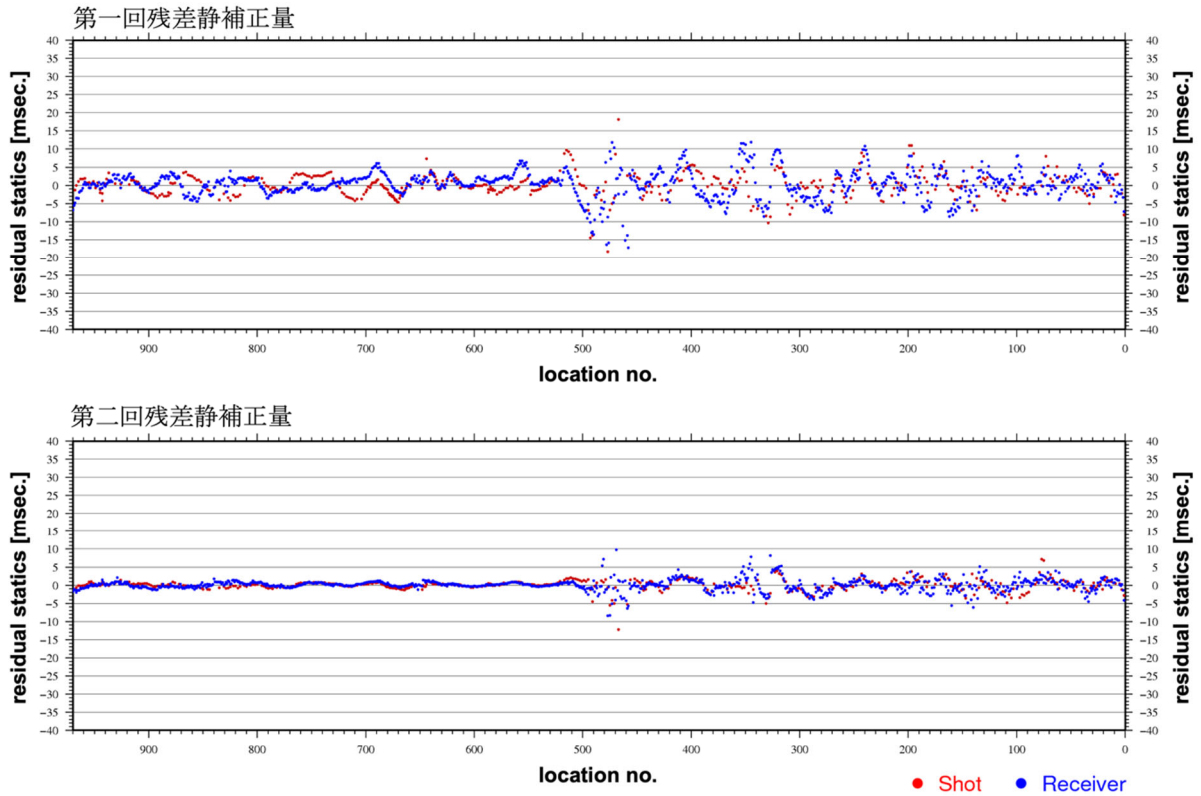


図 36 推定された残差静補正量 (単位は msec)

xvii) 共通反射点重合処理

NM0 補正及び残差静補正適用後の共通反射点アンサンブルに関して水平重合処理を実施した。なお、本処理は重合前時間マイグレーション処理とは別個に実施するものである。

xviii) 重合前時間マイグレーション (PSTM; Pre-Stack Time Migration)

反射波の見かけ上の位置を真の反射点位置に移動し、同時に回折波を回折点に復元するため、重合前時間マイグレーションを適用した。ここではキルヒホッフ積分法マイグレーションを用いた。まず xii) で得られた重合速度を用いてマイグレーション処理を行い、処理結果のギャザー (CIP(Common Image Point)ギャザー) に対して xii) と同様の速度解析を改めて行い、得られた速度 (PSTM 速度) を用いて再度 PSTM を適用した結果を出力ギャザーとした。このギャザーに PSTM 速度を用いて xvii) の重合処理を適用し PSTM 重合断面を得た。

xix) 基準面補正

浮動基準面から基準面への時間補正を適用した。

xx) 周波数-空間領域予測フィルター (F-X Prediction Filter)

周波数-空間領域において複素型予測フィルターを設計・適用してランダムノイズを抑制し相対的に S/N を向上させる F-X 予測フィルター処理を実施した。

xxi) 時間-空間可変帯域通過フィルター

反射波の有効周波数帯域が周波数成分解析によって決定され、時間-空間可変の零位相帯域通過フィルターを適用した。以上の処理で得られた CMP 重合時間断面図を図 37 に、重合前マイグレーション断面図を図 38 に示す。

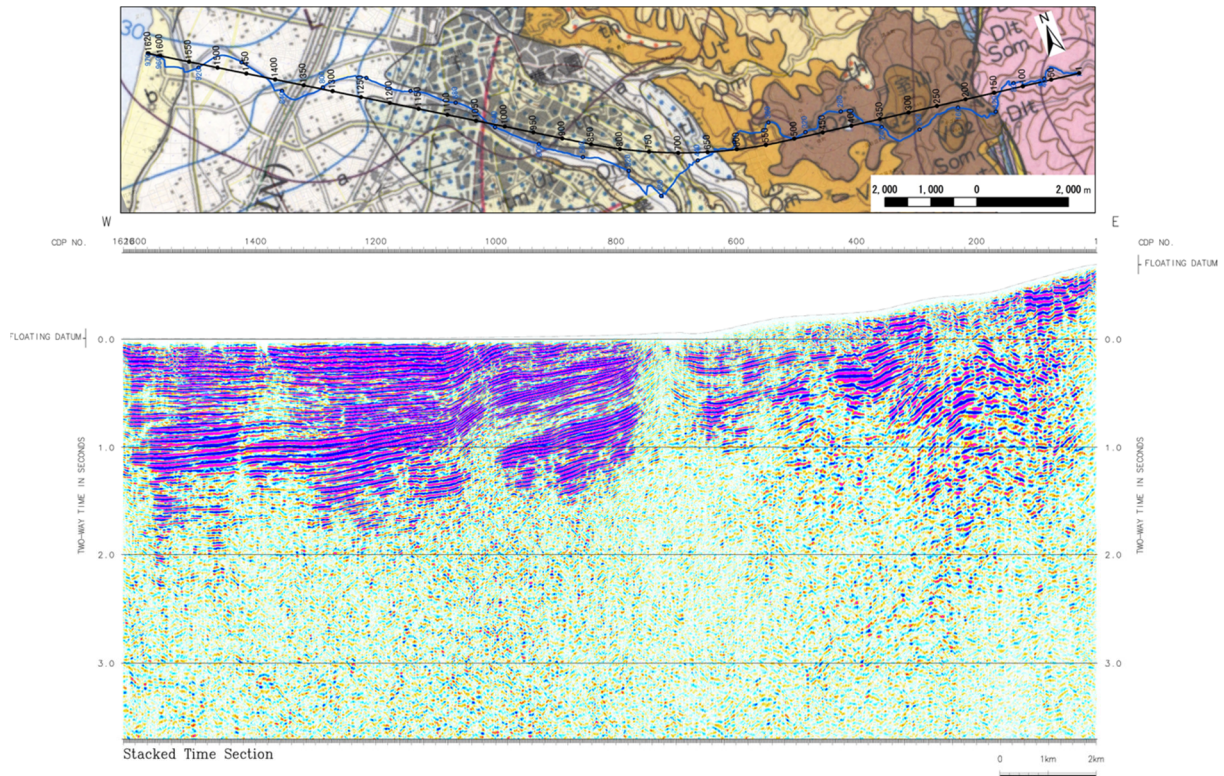


図 37 CMP 重合時間断面図 (濃淡表示)

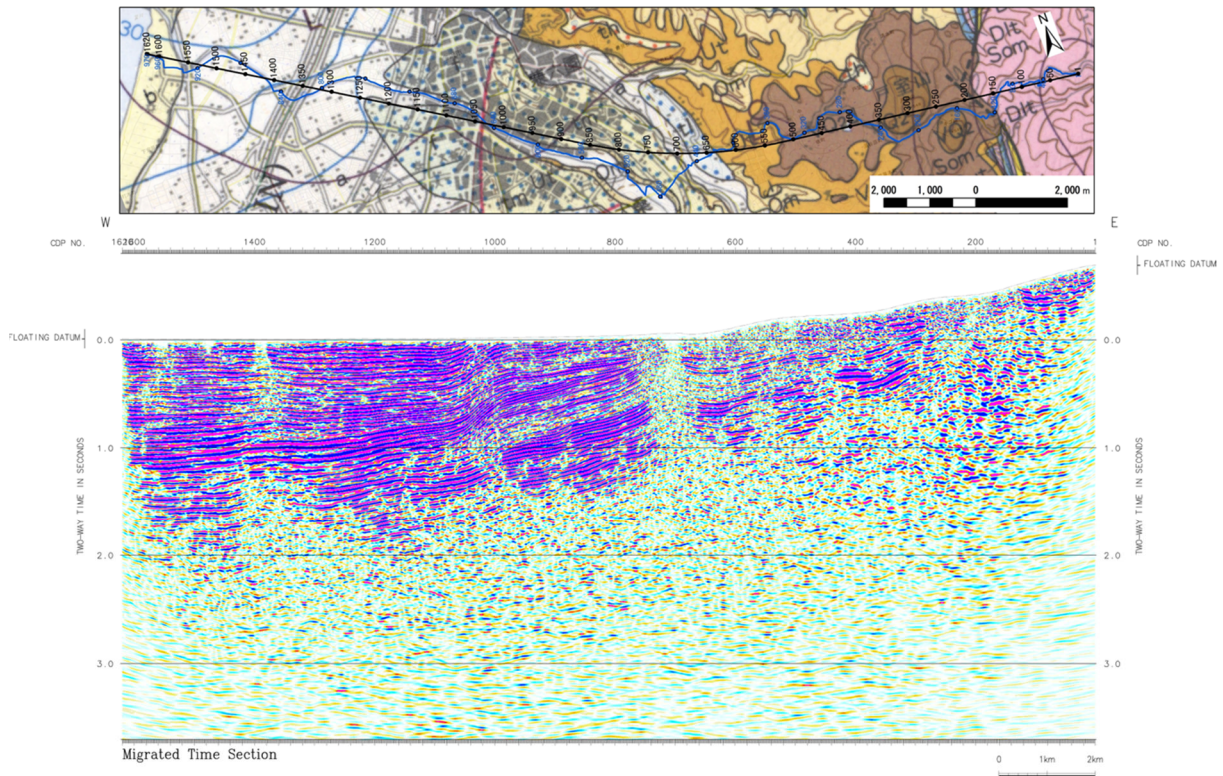


図 38 重合前時間マイグレーション断面図（濃淡表示）

xxii) 深度変換

速度解析で求めた速度を 2 km 間隔に間引き、時間及び空間方向に平滑化した RMS 速度を用いて、Vertical Stretch 法による深度変換を実施した。得られた CMP 重合深度断面図を図 39 に、濃淡及び面積表示の重合前時間マイグレーション深度断面図を図 40 及び図 41 に示す。

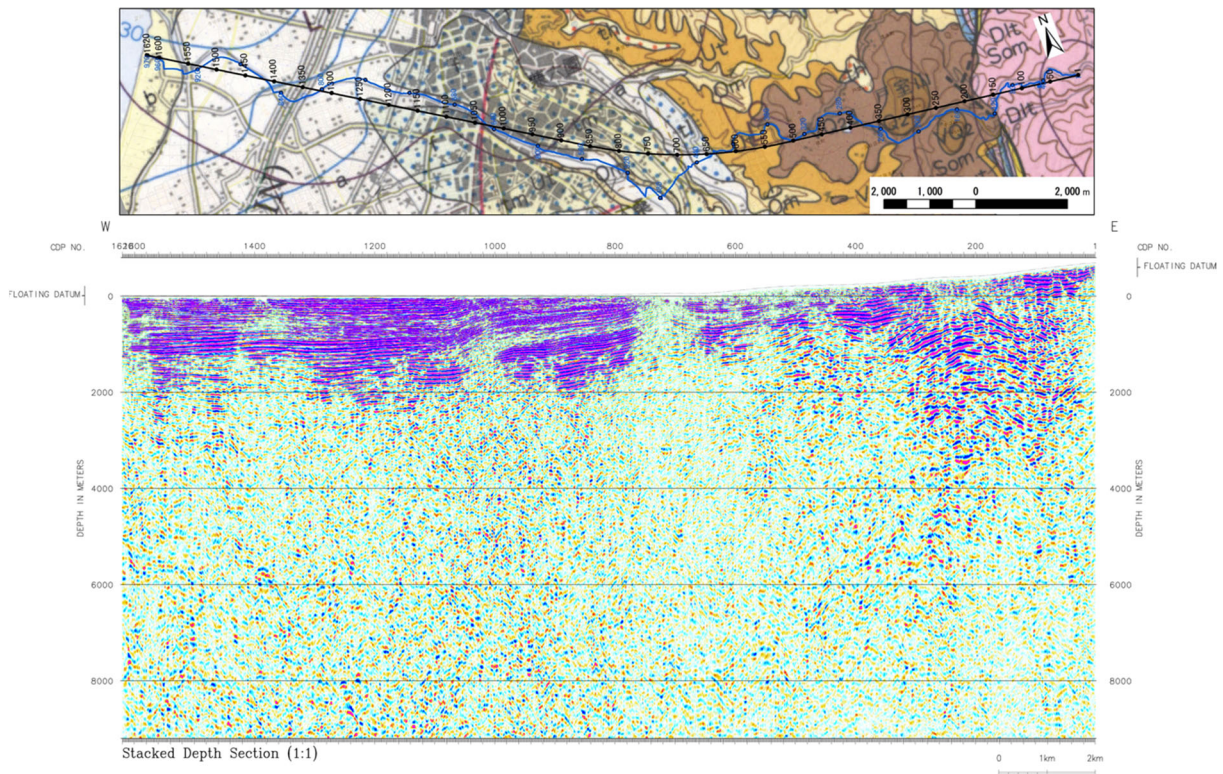


図 39 CMP 重合深度断面図（マイグレーションなし）（濃淡表示）。縦横比は 1:1。

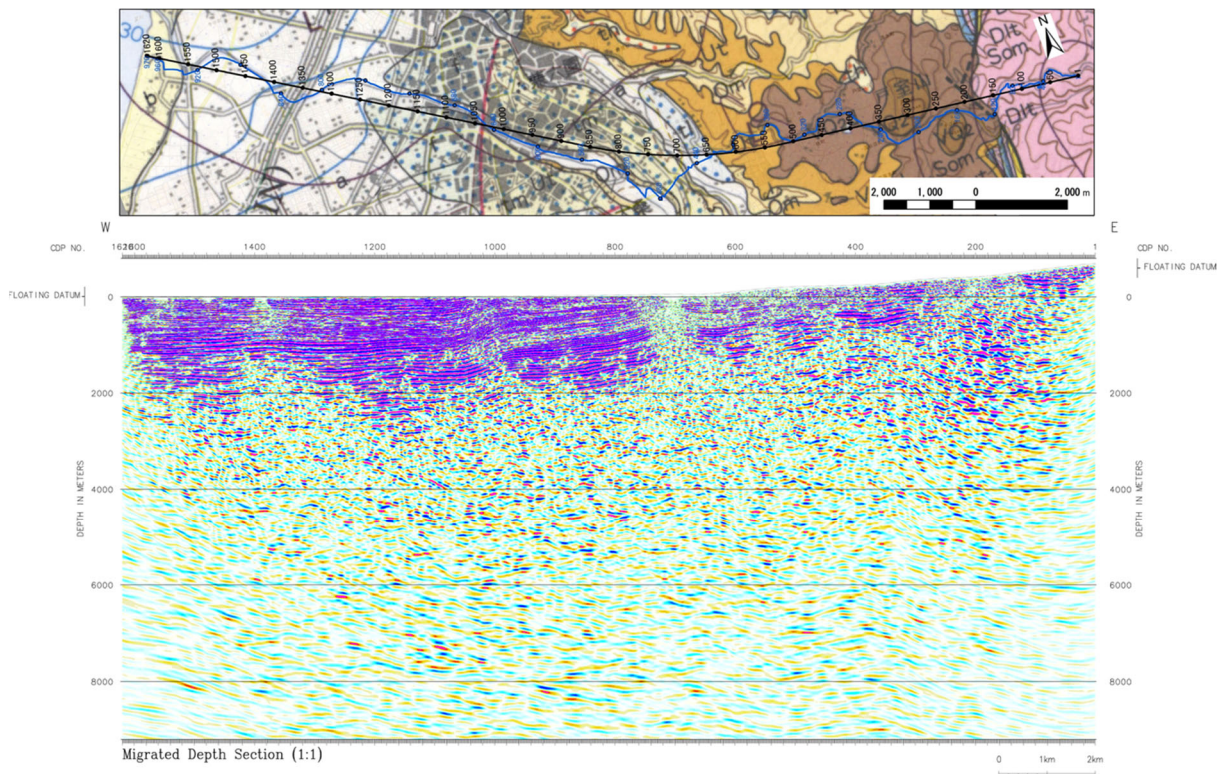


図 40 重合前時間マイグレーション深度断面図（濃淡表示）。縦横比は 1:1。

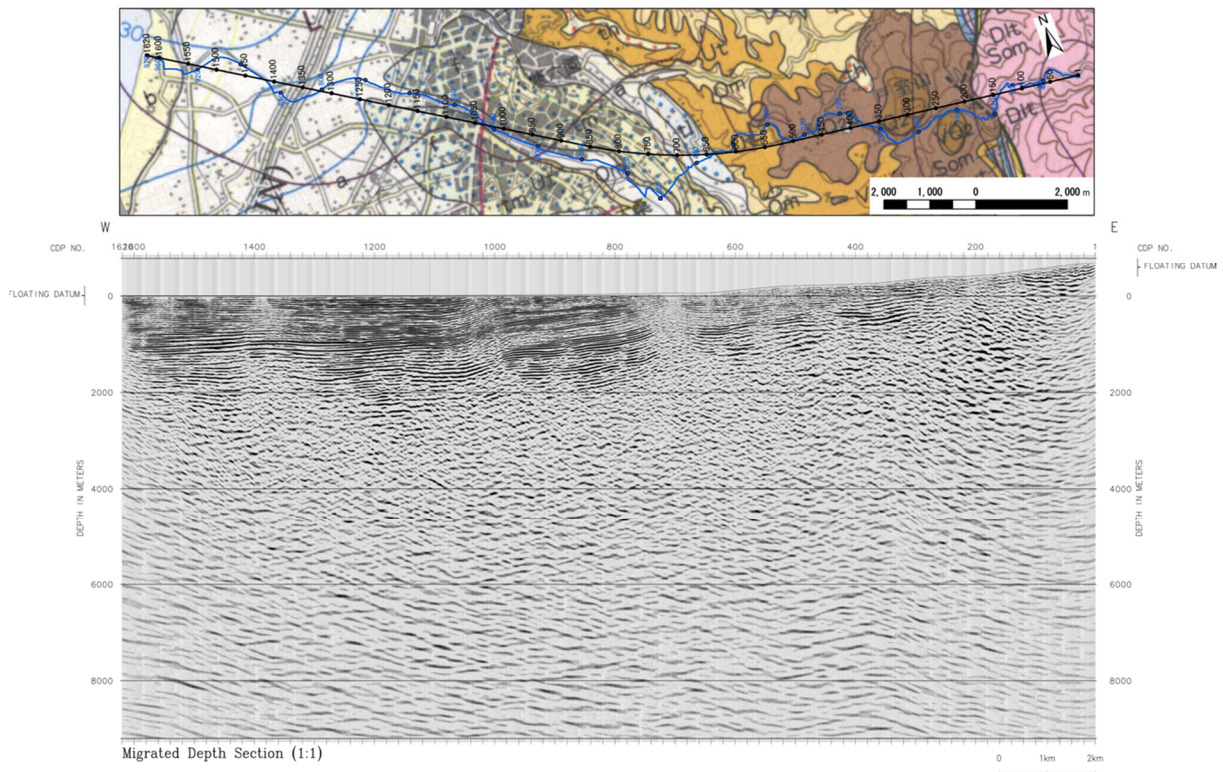


図 41 重合前時間マイグレーション深度断面図（面積表示）。縦横比は 1:1。

また、野町断層地表位置付近の RP630～RP700 区間（約 2 km）では 25 m 間隔の稠密発震を実施した。この区間では空間的に密なショット記録が得られていることを利用して、この区間の浅部構造をより詳細にイメージングするため、重合処理に使用するオフセットの最大値を 1 km に限定し、最大 25 Hz のローカットフィルタを適用した断面図を作成した（図 42～45）。

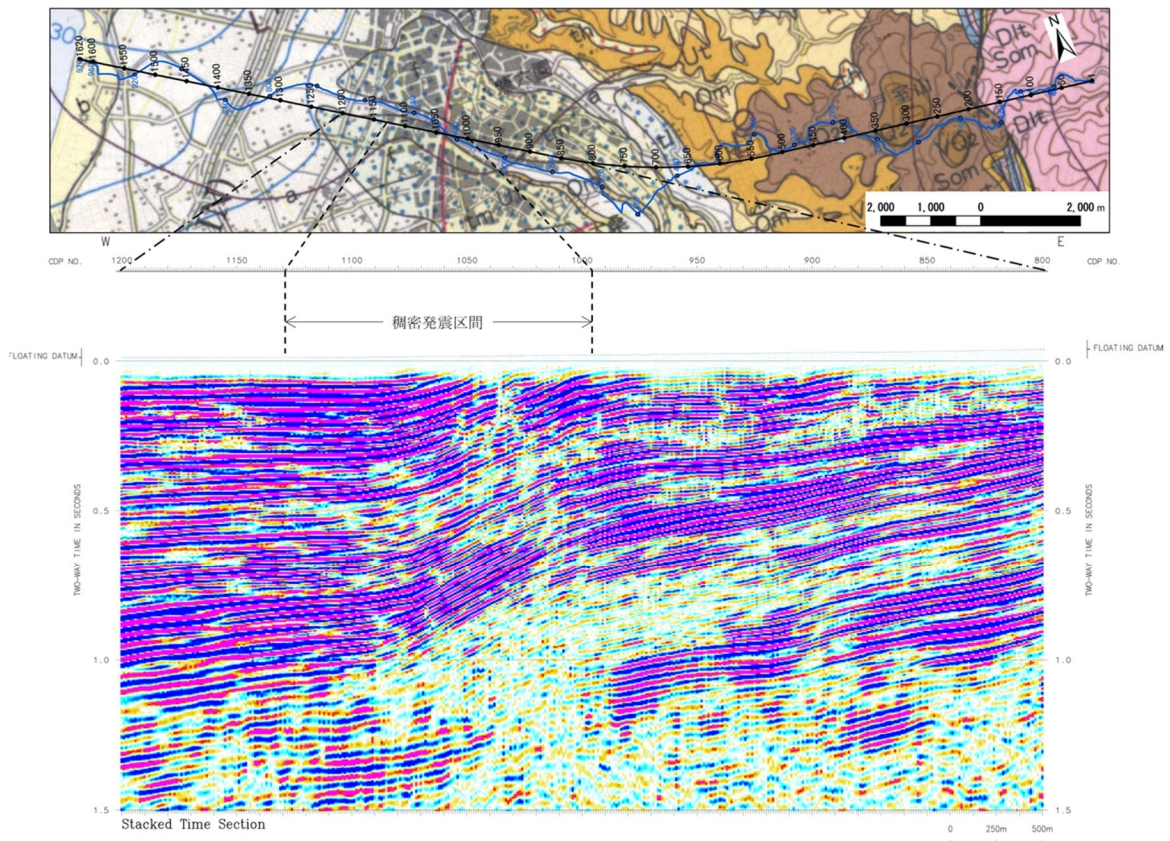


図 42 稠密発震区間の CMP 重合時間断面図（濃淡表示）

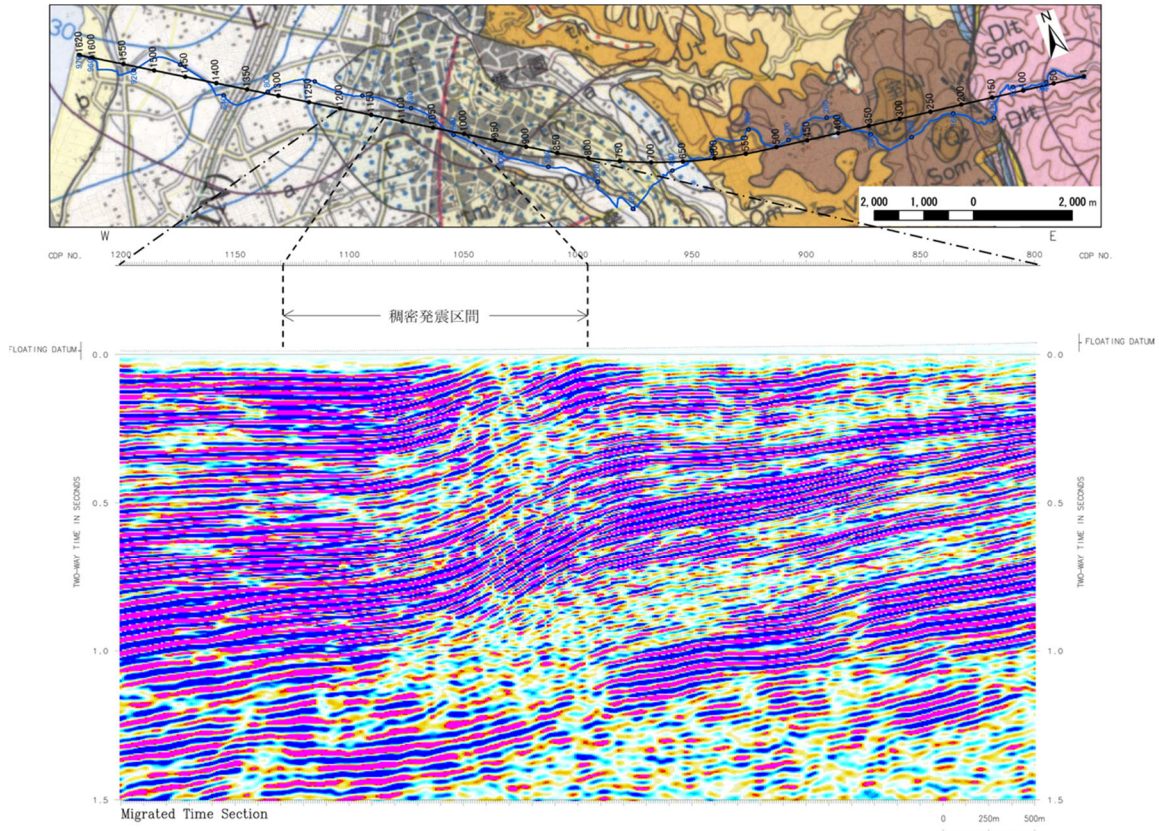


図 43 稠密発震区間の重合前時間マイグレーション断面図（濃淡表示）

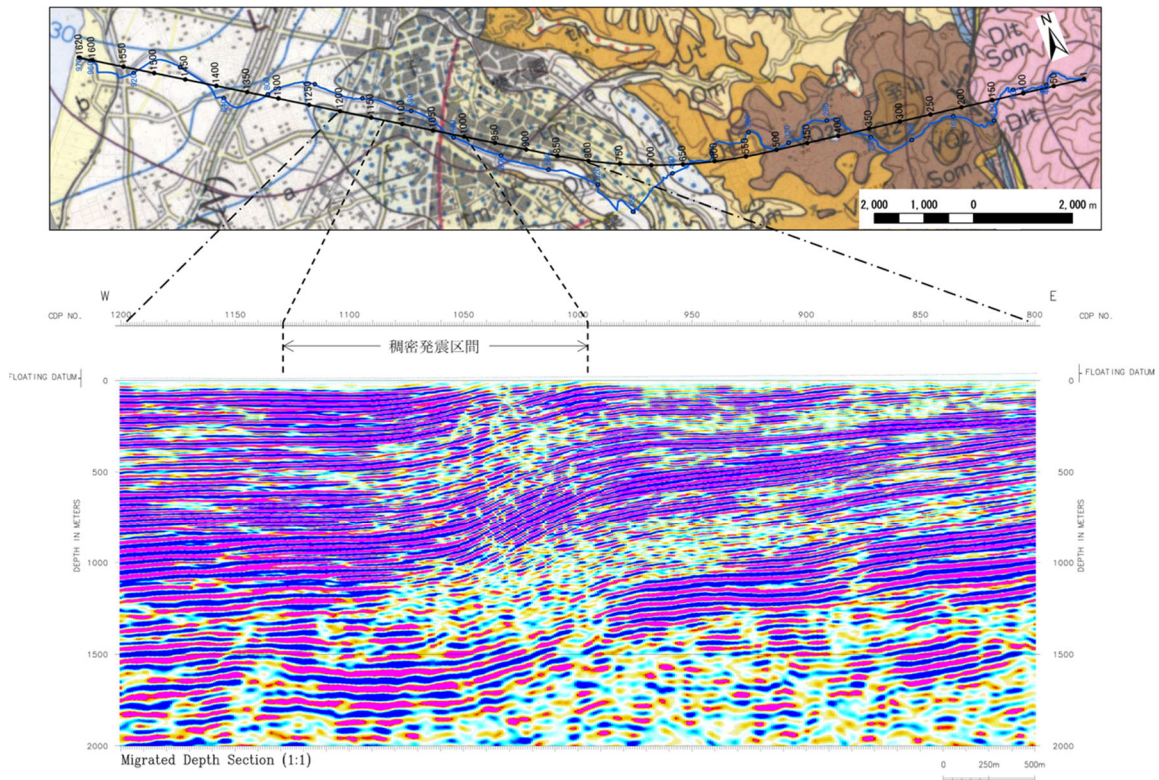


図 44 稠密発震区間の重合前時間マイグレーション深度断面図(濃淡表示)。縦横比は 1:1。

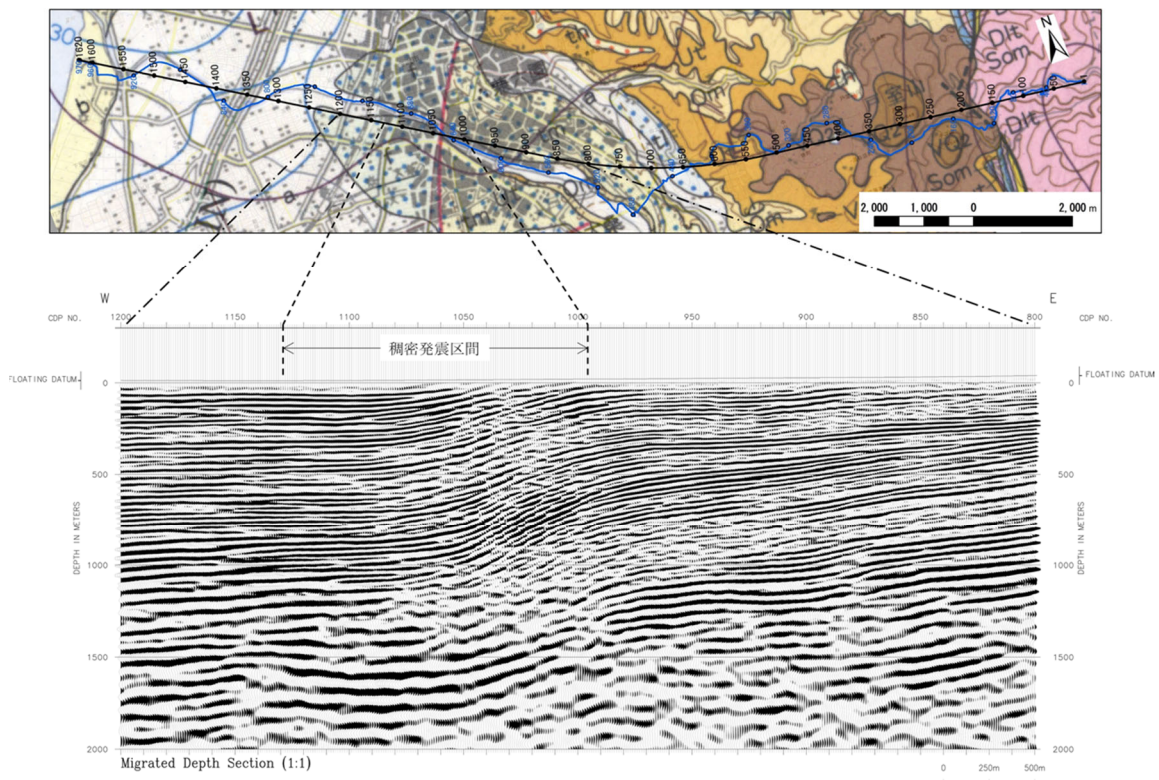


図 45 稠密発震区間の重合前時間マイグレーション深度断面図(面積表示)。縦横比は 1:1。

c) MDRS (Multi-Dip Reflection Surfaces) 処理

反射波の連続性の改善および深部反射波の重合効果の向上を目的として、マルチディップ型 CRS (Common Reflection Surface) 法 (MDRS 法) を適用した。入力とするデータは b) 反射法データ解析の xi) までの処理結果に xvi) 残差静補正の処理を適用した共通反射点編集後のギャザーである。以下に、主要パラメータ及び処理手順の概要を記述する。図 46 に MDRS 解析概念図を示す。

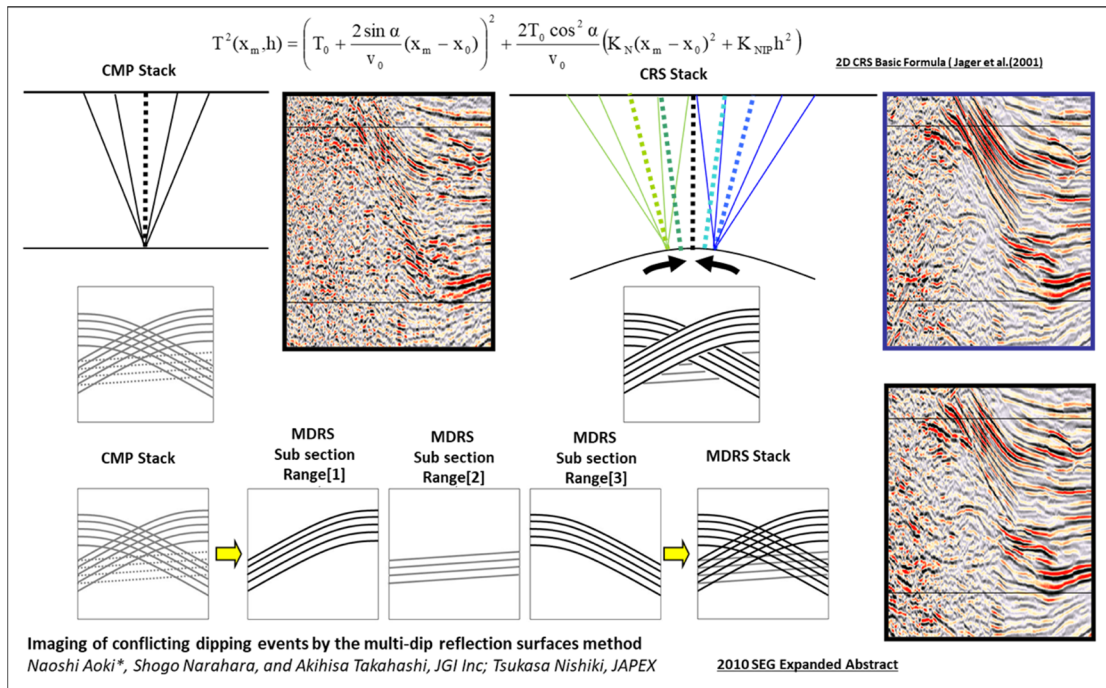


図 46 MDRS 解析概念図 (Aoki et al., 2010)

i) スーパーギャザーの作成

以降の MDRS 処理のために近隣の CMP ギャザーを併合しスーパーギャザーを作成した。

ii) 定速度スキャン (Constant Velocity Scan)

定速度重合パネルと関連する各アトリビュートパネルを作成した。

iii) MDRS スキャン

CRS 法は CMP に属するトレースだけでなく、その近傍の CMP 多数を併せたスーパーギャザーを重合処理することで、従来の CMP 重合法に比べて飛躍的に高い S/N 比を得る手法である。しかし CRS 法では各時間サンプルで 1 つの傾斜角 (1 組の CRS パラメータセット) しか選択できないため、異なる反射面からの反射波が交差する状況 (コンフリクティング・ディップ) には対応できない。本処理の対象地域のように、複雑な地質構造を有する地域ではゼロオフセット断面上でコンフリクティング・ディップの存在が予想されるため、ここではマルチディップ CRS スキャンを実施した。

手順として、傾斜範囲を設定し、それぞれの傾斜に対して CRS スキャンを実施した。求めた CRS アトリビュートを用いてスーパーギャザーへの走時補正を行い、それぞれの傾斜に対して重合処理を行った。

iv) MDRS ピッキング

重合結果及び関連するアトリビュートに対してサンプル毎にセンブランス値の高い順に並べ替えを行った。この際、並べ替えに用いる傾斜範囲に対して制限を設けることで不要な傾斜ノイズを除去した。

v) MDRS 重合

センブランス値の高い方から2番目までのセクションを用いて MDRS 重合を実行し、コンフリクティング・ディップに対応した CRS 重合記録を作成した。このようにセンブランス値の高い方から複数枚のセクションを加算することで、ゼロオフセット断面上で複数(ここでは最大2つまで)の反射波が交差する状況に対応した。

尚、MDRS 重合処理後の処理に関しては、b) 反射法データ解析と同様のパラメータを適用した。

vi) 重合後時間マイグレーション (Post-Stack Time Migration)

時間断面上の反射点位置を実際の位置に移動させ、回折波を回折点に復元することを目的として、時間-空間座標領域における差分法時間マイグレーションを実施した。マイグレーション速度には時間及び空間方向に平滑化した重合速度にスケールリングを適用して用いた。また、標高変化を伴うデータに対し、基準面 (Datum) から浮動基準面 (FDP) までの区間を零速度層によって充填する手法を採用した。

以上の処理ステップを逐次経ることによって、MDRS 重合時間断面図 (図 47)、MDRS 重合後時間マイグレーション断面図 (図 48) を得た。また、これらの記録に対して深度変換を行い、MDRS 重合深度断面図 (図 49)、MDRS 重合後時間マイグレーション深度断面図 (図 50、51) を得た。

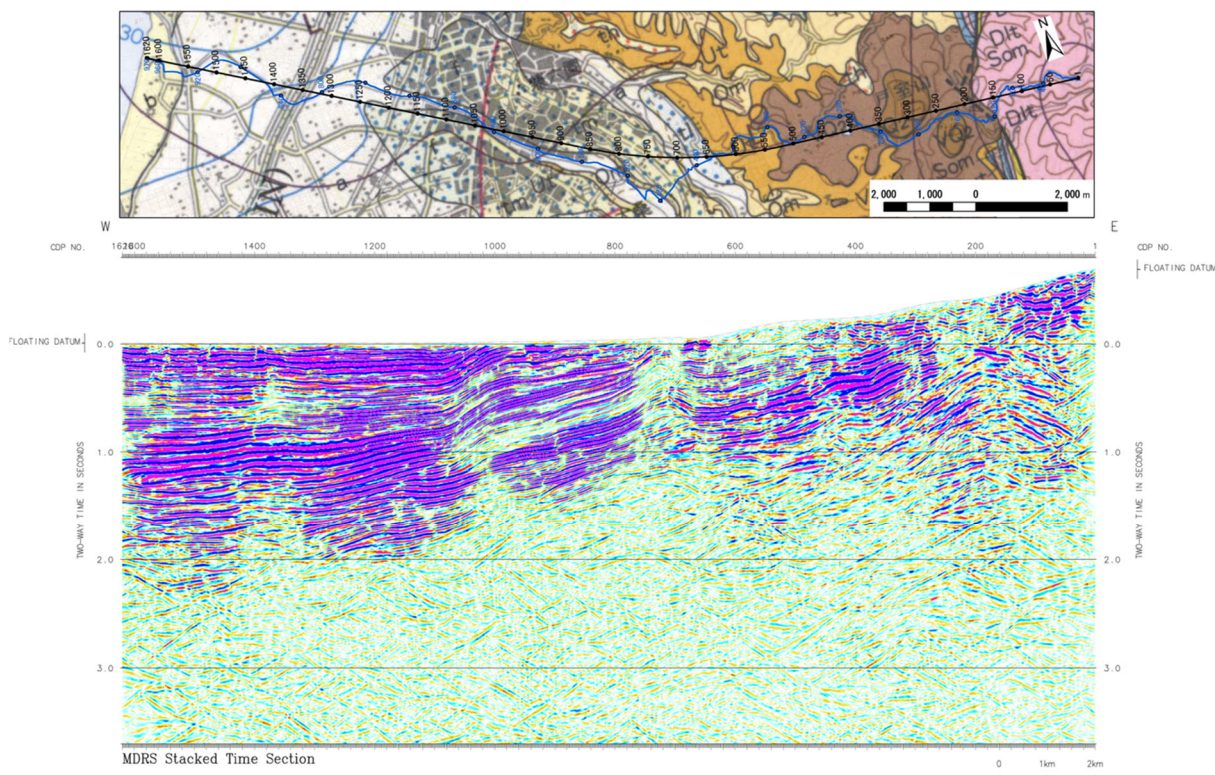


図 47 MDRS 重合時間断面図 (濃淡表示)

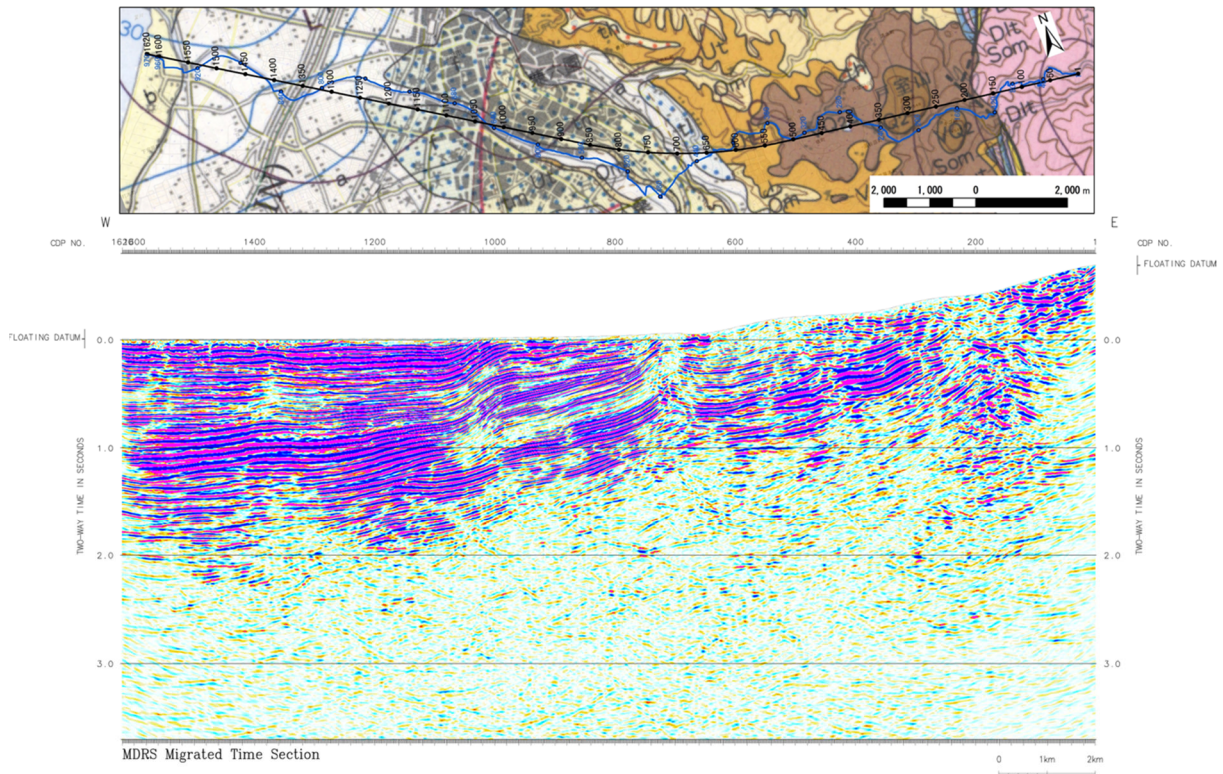


図 48 MDRS 重合後時間マイグレーション断面図（濃淡表示）

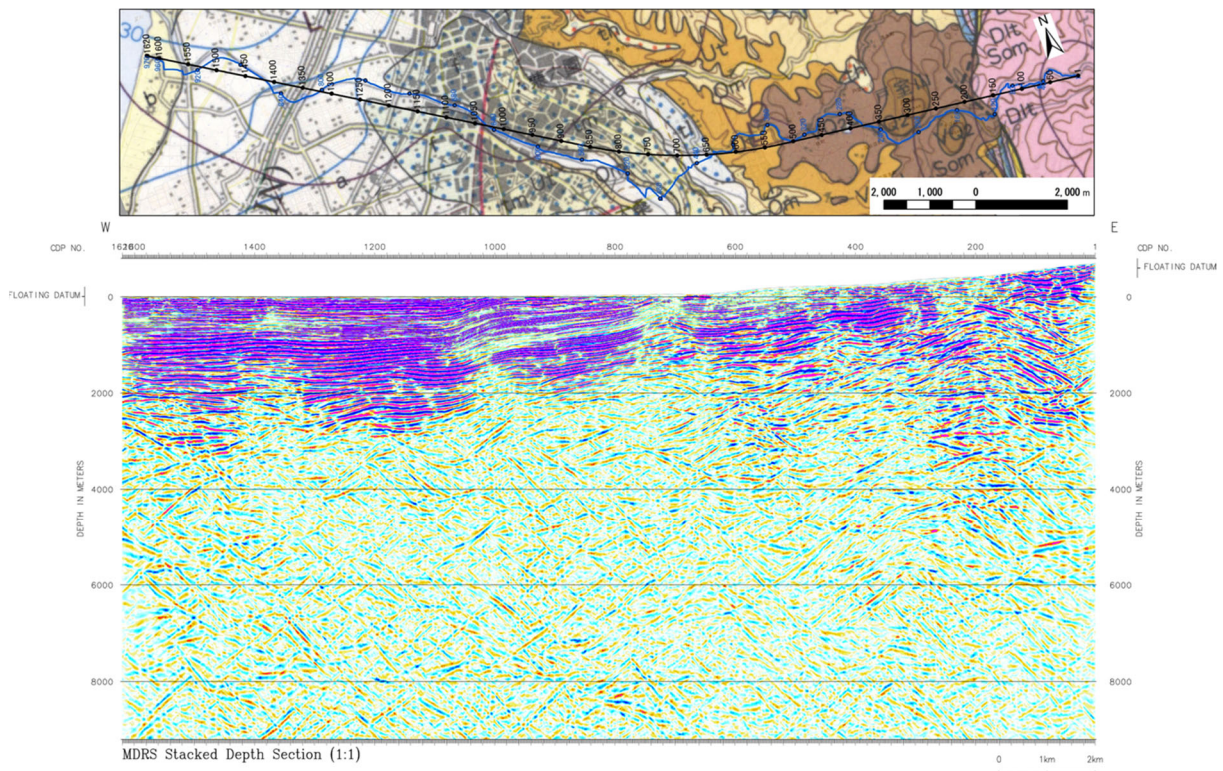


図 49 MDRS 重合深度断面図(マイグレーションなし)（濃淡表示）。縦横比は 1:1。

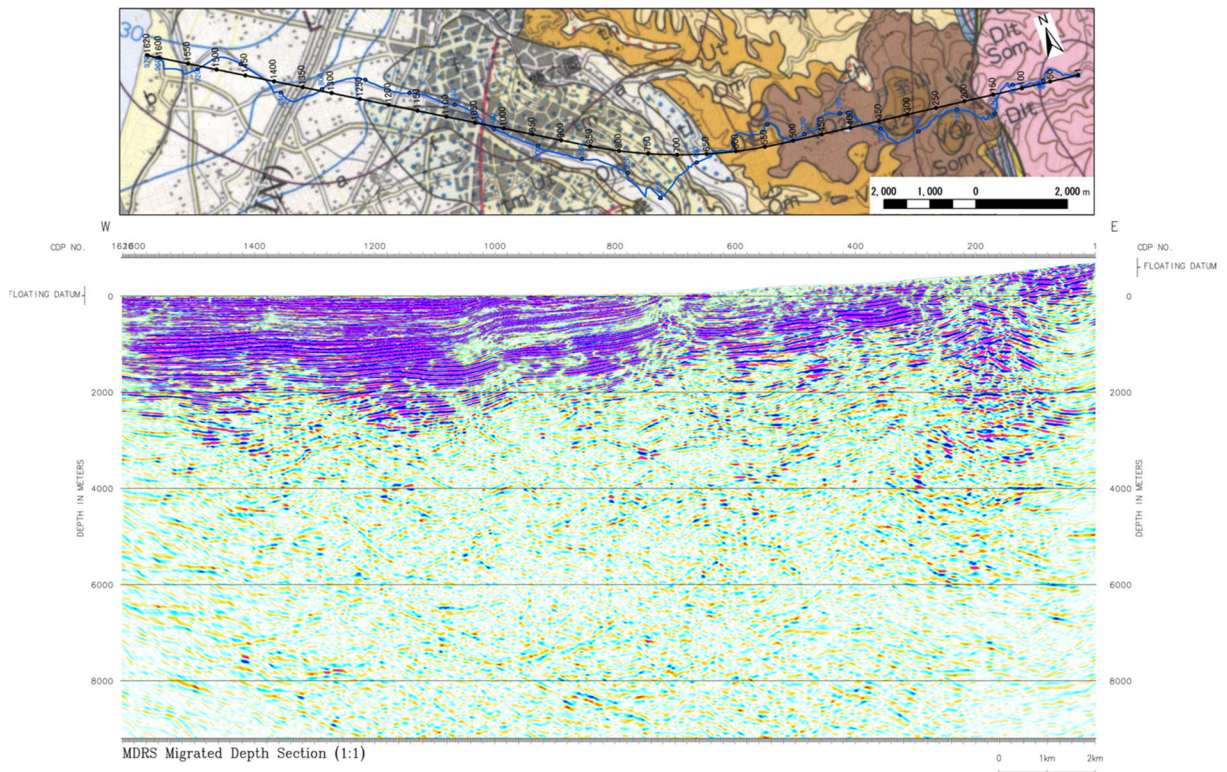


図 50 MDRS 重合後時間マイグレーション深度断面図（濃淡表示）。縦横比は 1:1。

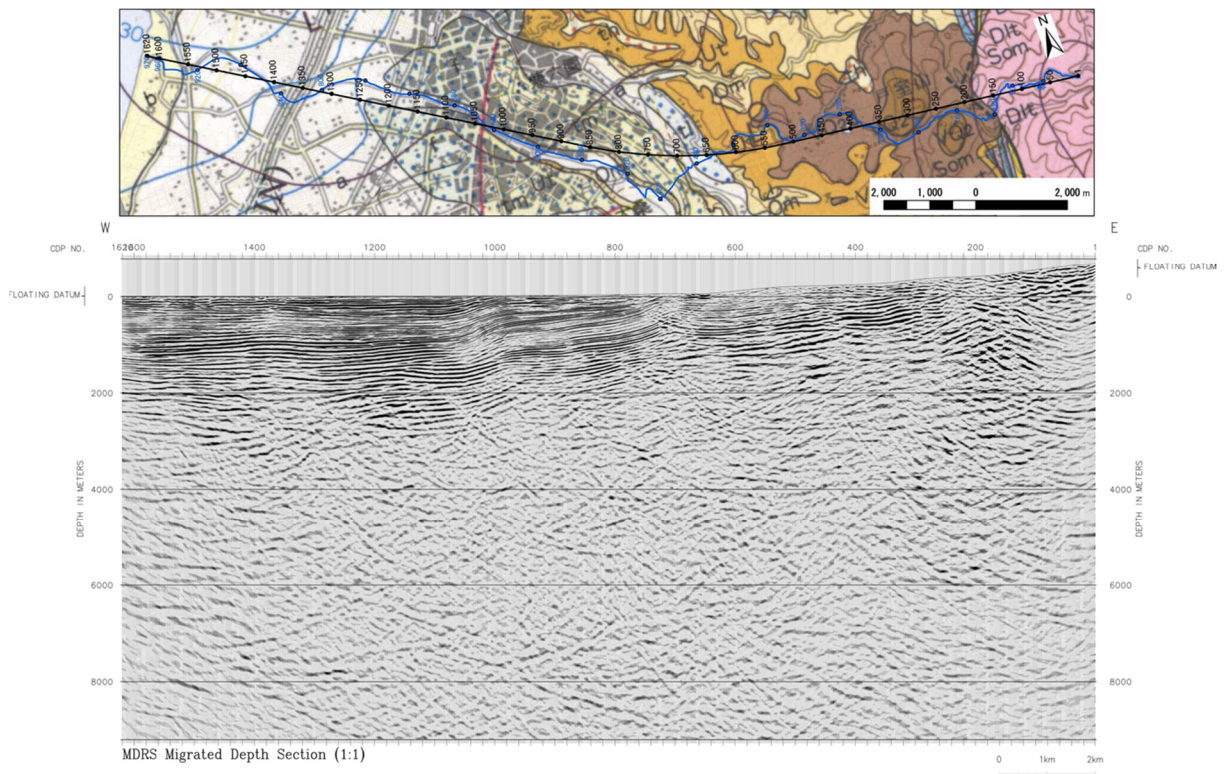


図 51 MDRS 重合後時間マイグレーション深度断面図（面積表示）。縦横比は 1:1。

d) クロスディップ補正

測線の屈曲による影響を補正するクロスディップ補正処理を適用した。本調査測線は全体的には西北西-東南東方向の二次元測線であるが、中央部および西側の犀川河川敷区間と東側の県道 209 号線区間との接続部分において南南西側に凸のやや大きい屈曲を呈している。このため、反射点（受発振点の midpoint）分布には重合測線直交方向のばらつきが生じており、特に屈曲箇所の周辺ではばらつきが大きい。一方、当該箇所近傍の地層面は概ね北傾斜とされていることから、CMP ギャザー内では反射点のばらつきによる反射波走時の乱れが生じ、重合効果が低下している可能性がある。

反射面が重合測線の直交方向に傾斜している場合、受発振点 midpoint の重合測線からの偏倚（クロスディスタンス）が異なるトレースにおいて走時差が生じる。クロスディスタンスの大きさに対応する見かけの傾斜（クロスディップ）を補正するため、クロスディップ補正を適用した。全域で一定のディップを仮定してそれを補正した場合の重合断面を、複数のディップ値において作成し、解析点における重合効果が向上するディップ値を読み取ることで補正量を決定した。クロスディップの値は紙面手前側への傾斜を正、紙面奥側への傾斜を負としている。

読み取った補正量を図 52 に示す。クロスディップ補正適用前・適用後の重合時間断面を比較すると、測線屈曲部にて補正前に見られる東向き（右向き）の急な構造が補正後には抑制されており、適切に補正されていると考えられる（図 53）。クロスディップ補正適用後の記録に対して重合処理、重合前時間マイグレーション処理、深度変換処理を適用して得られた断面図を図 54～57 に、同様にクロスディップ補正適用後の記録に対して MDRS 重合処理、MDRS 重合後時間マイグレーション処理、深度変換処理を適用して得られた断面図を図 58～61 に示す。

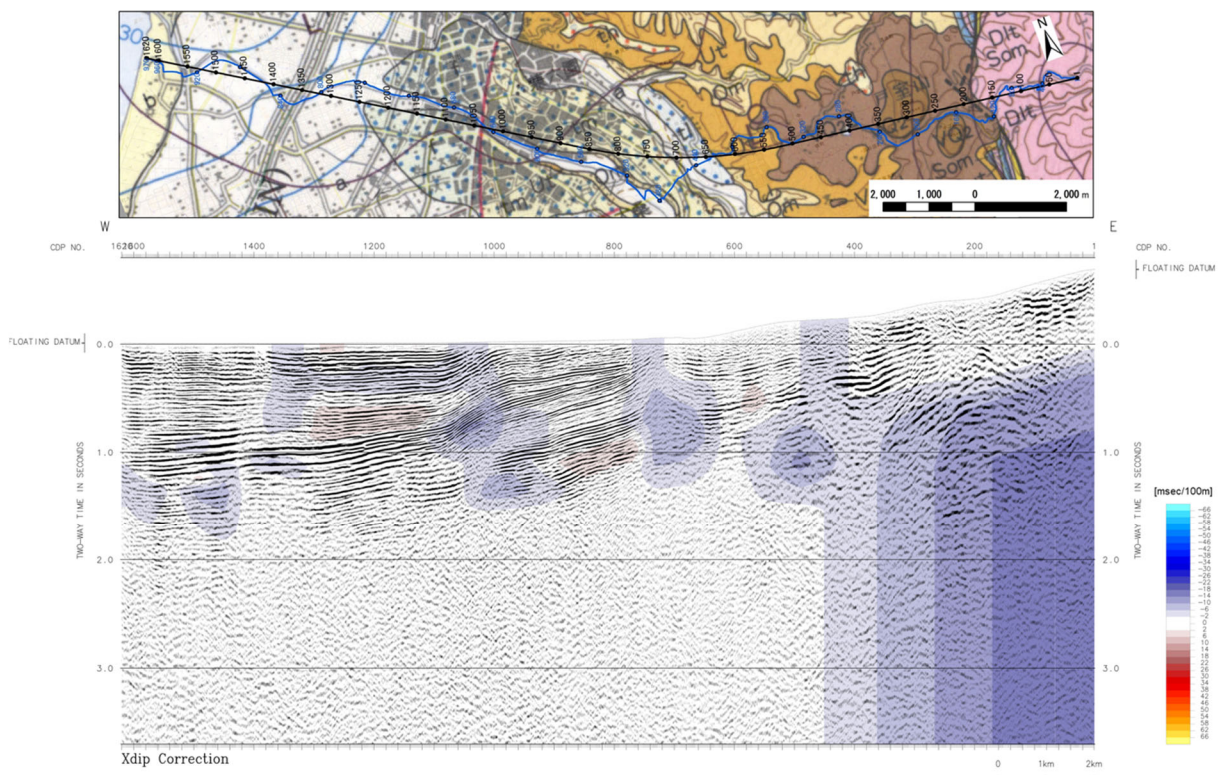


図 52 クロスディップ補正量

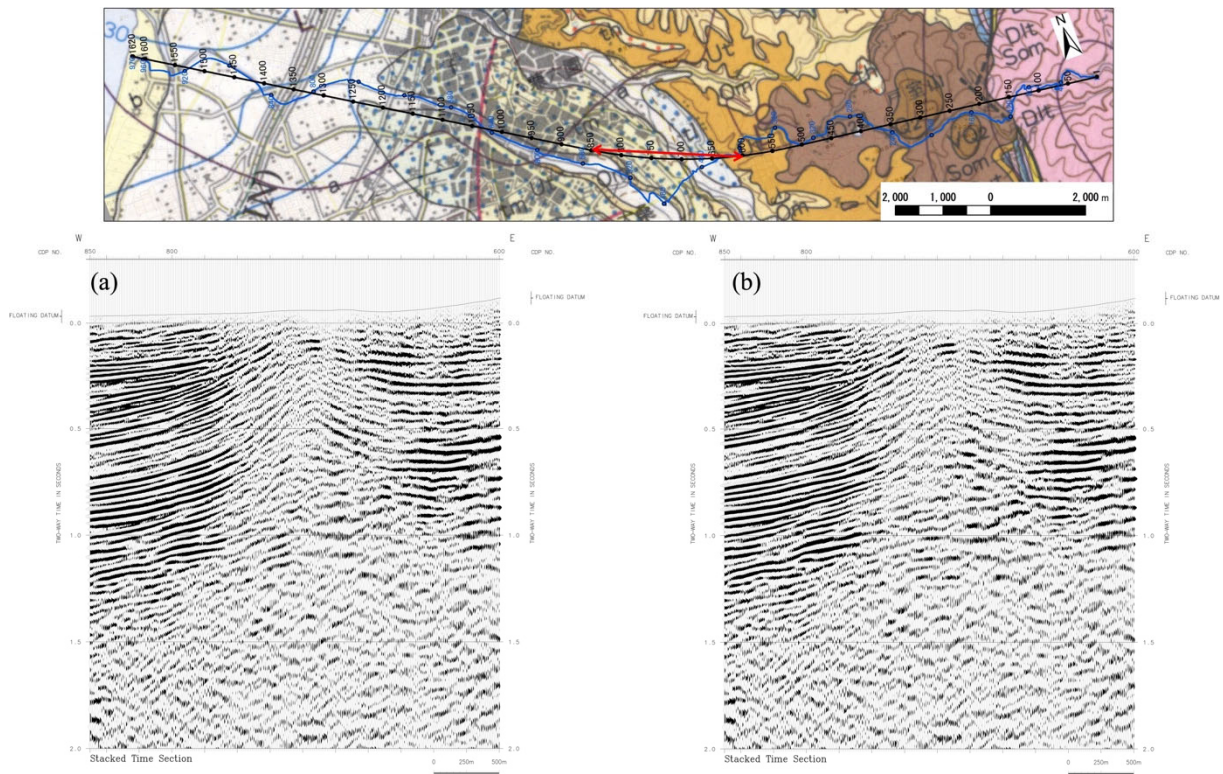


図 53 (a)クロスディップ補正を適用前、(b)適合後の重合時間断面図（面積表示）。

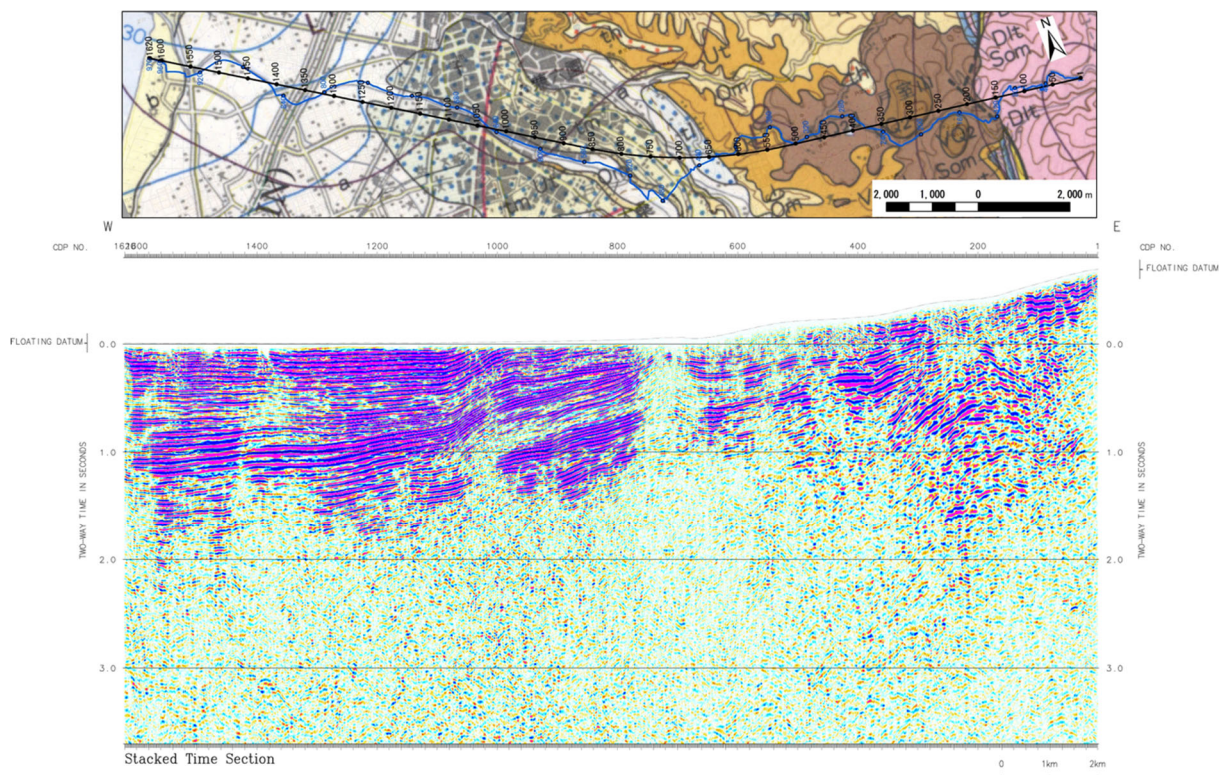


図 54 クロスディップ補正を適用した重合時間断面図（濃淡表示）

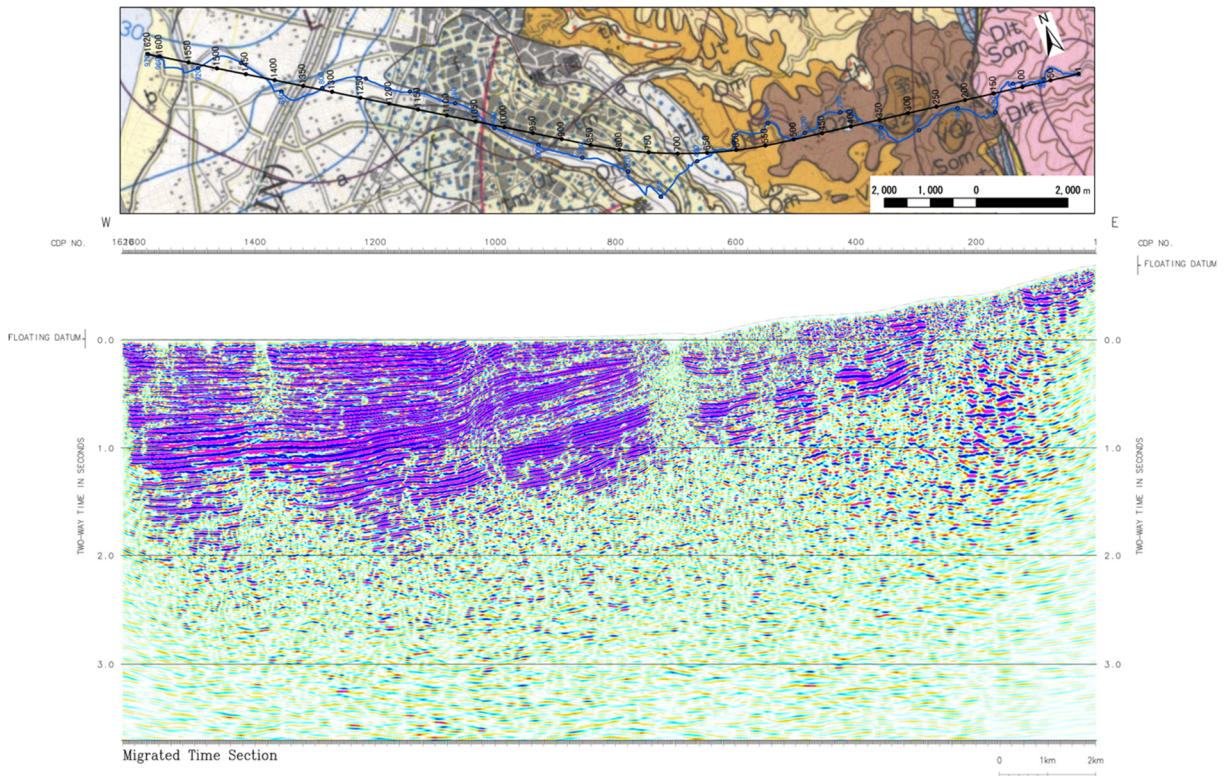


図 55 クロスディップ補正を適用した重合前時間マイグレーション断面図（濃淡表示）

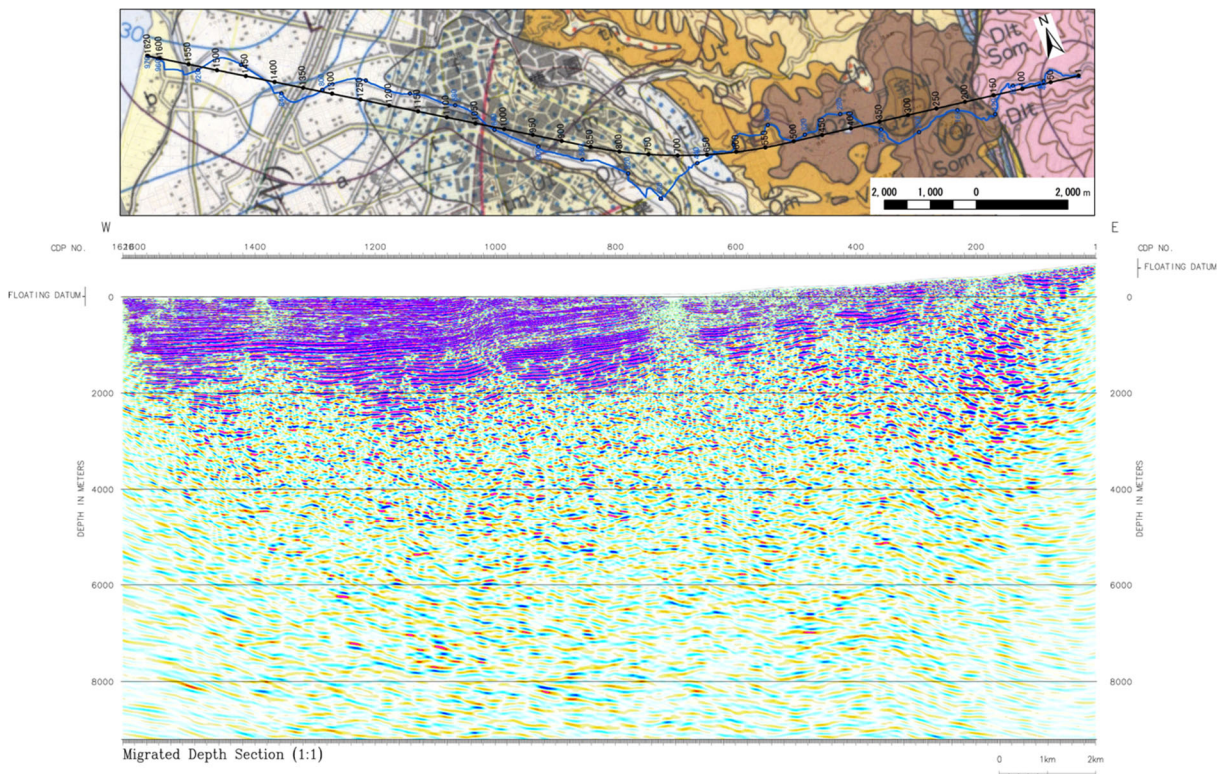


図 56 クロスディップ補正を適用した重合前時間マイグレーション深度断面図（濃淡表示）。縦横比は 1:1。

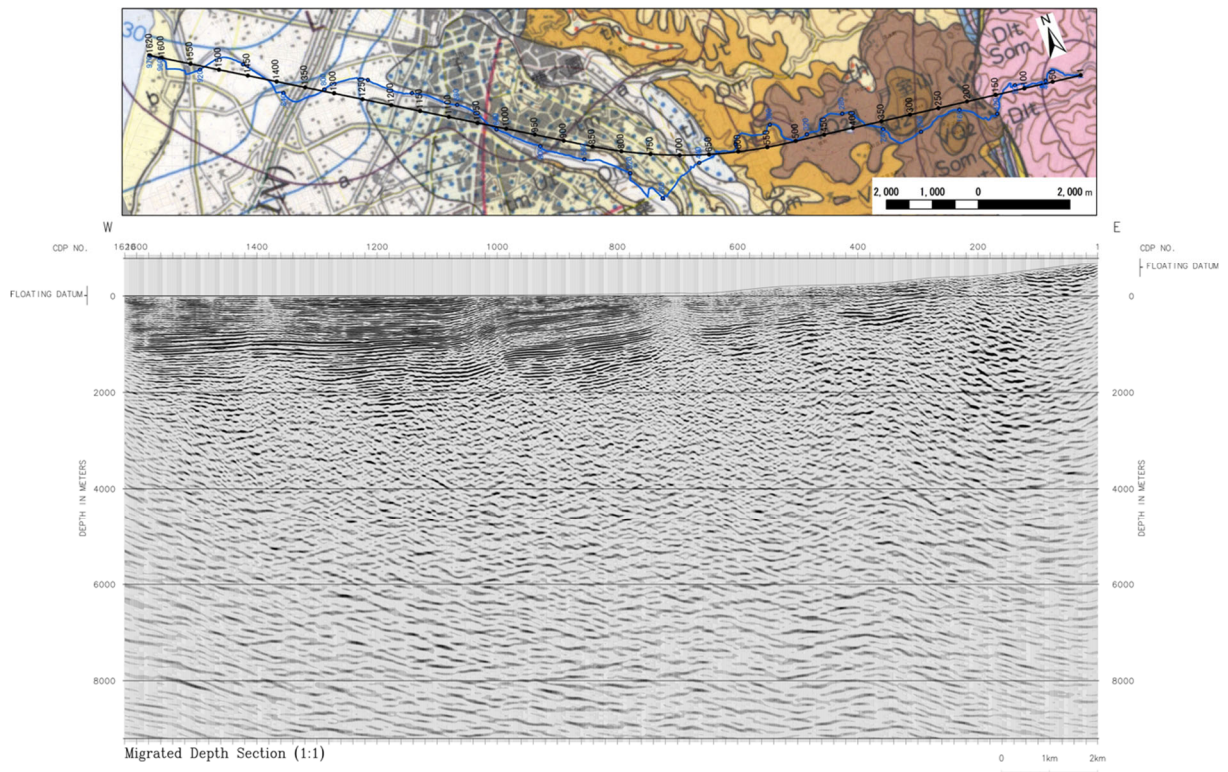


図 57 クロスディップ補正を適用した重合前時間マイグレーション深度断面図（面積表示）。縦横比は 1:1。

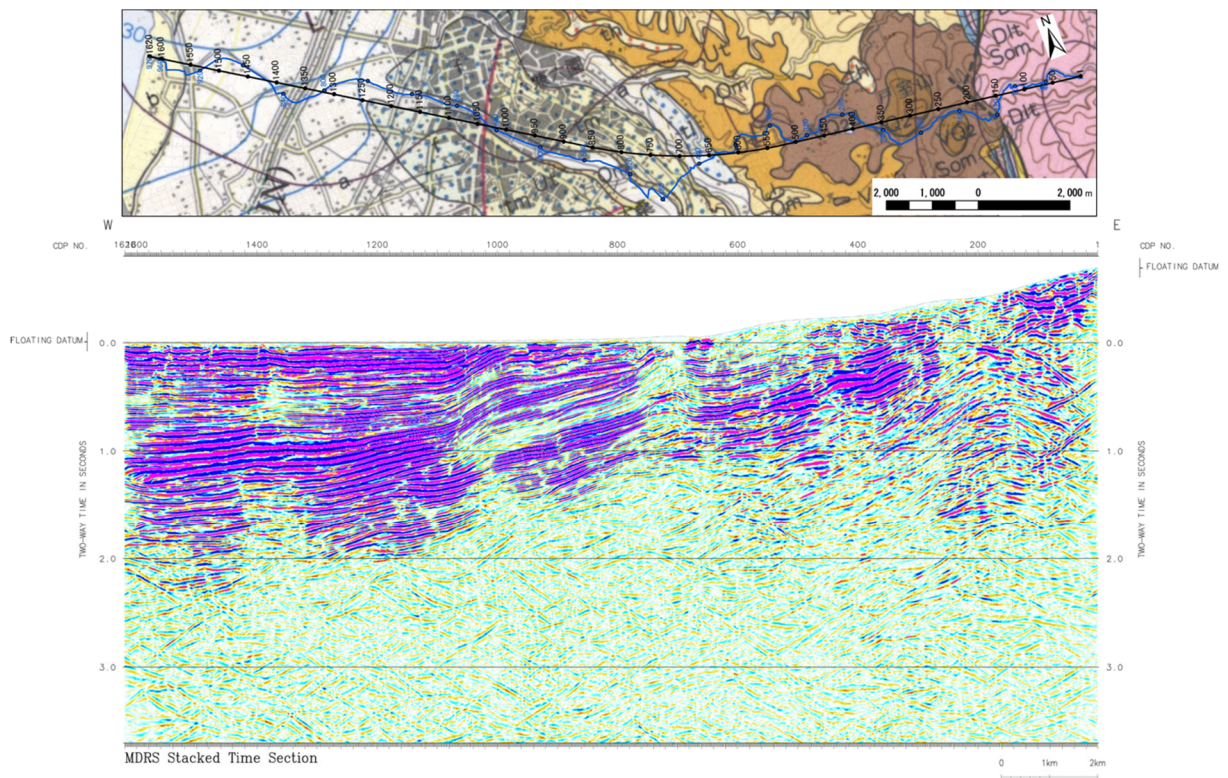


図 58 クロスディップ補正適用 MDRS 重合時間断面図（濃淡表示）

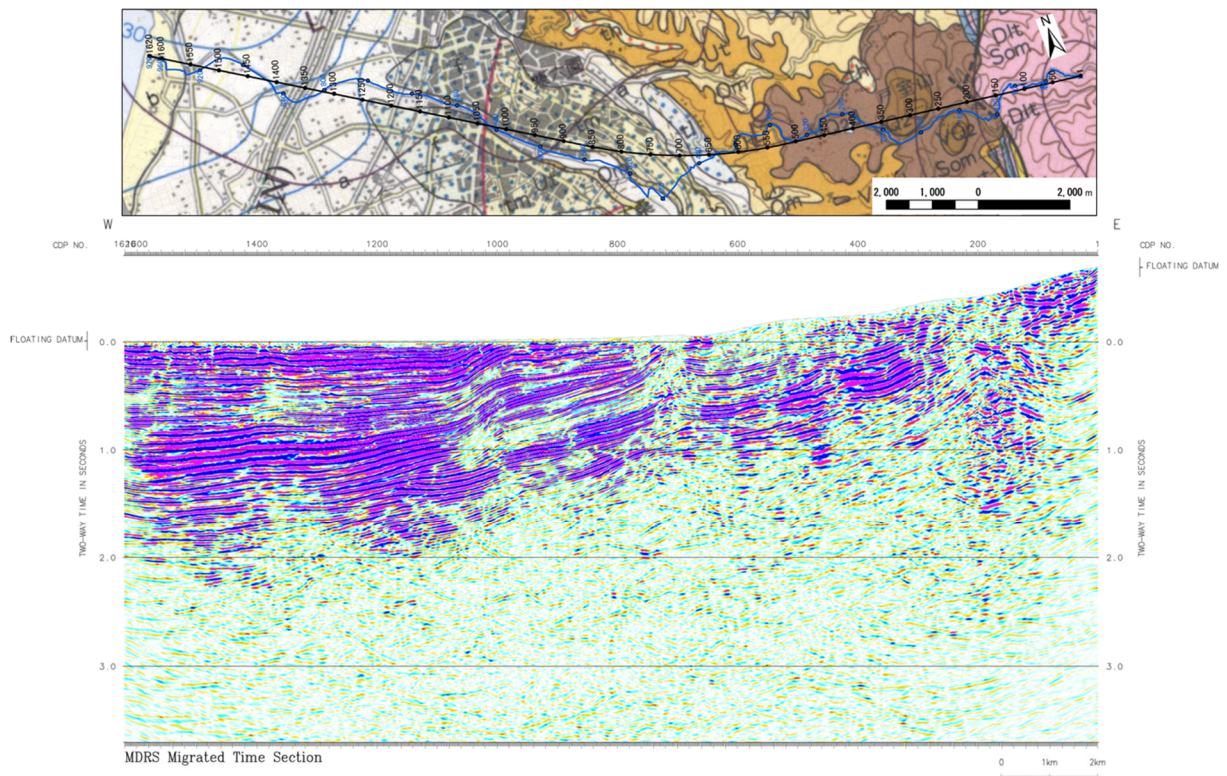


図 59 クロスディップ補正適用 MDRS 重合後時間マイグレーション断面図（濃淡表示）

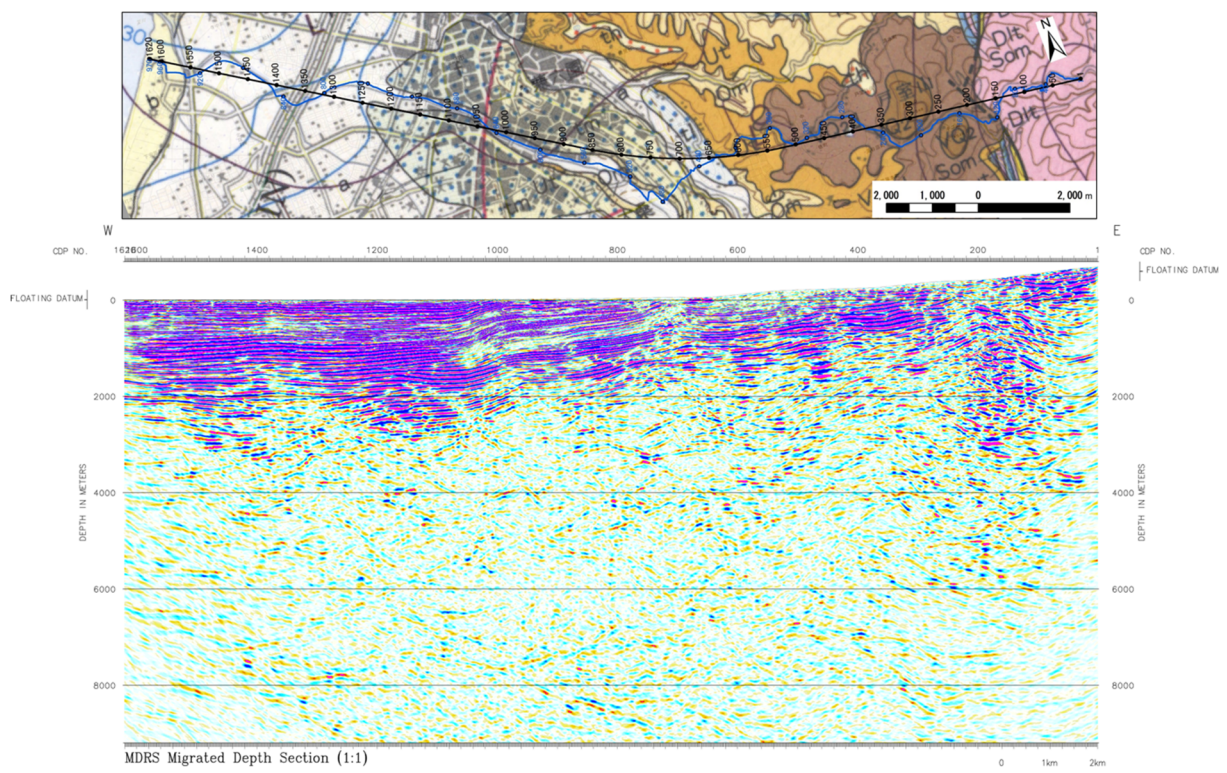


図 60 クロスディップ補正適用 MDRS 重合後時間マイグレーション深度断面図（濃淡表示）。
縦横比は 1:1。

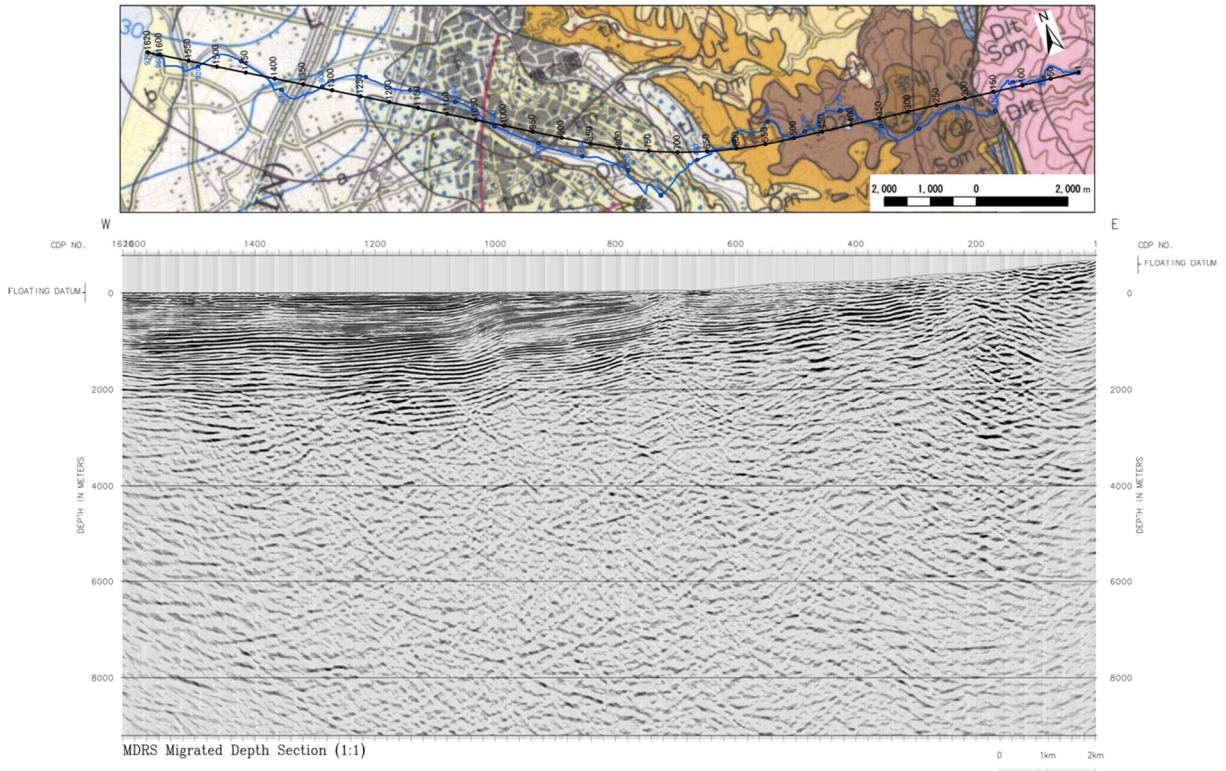


図 61 クロスディップ補正適用 MDRS 重合後時間マイグレーション深度断面図(面積表示)。縦横比は 1:1。

e) 屈折法データ解析

屈折法データ解析の処理ワークフローを図 62 に示す。

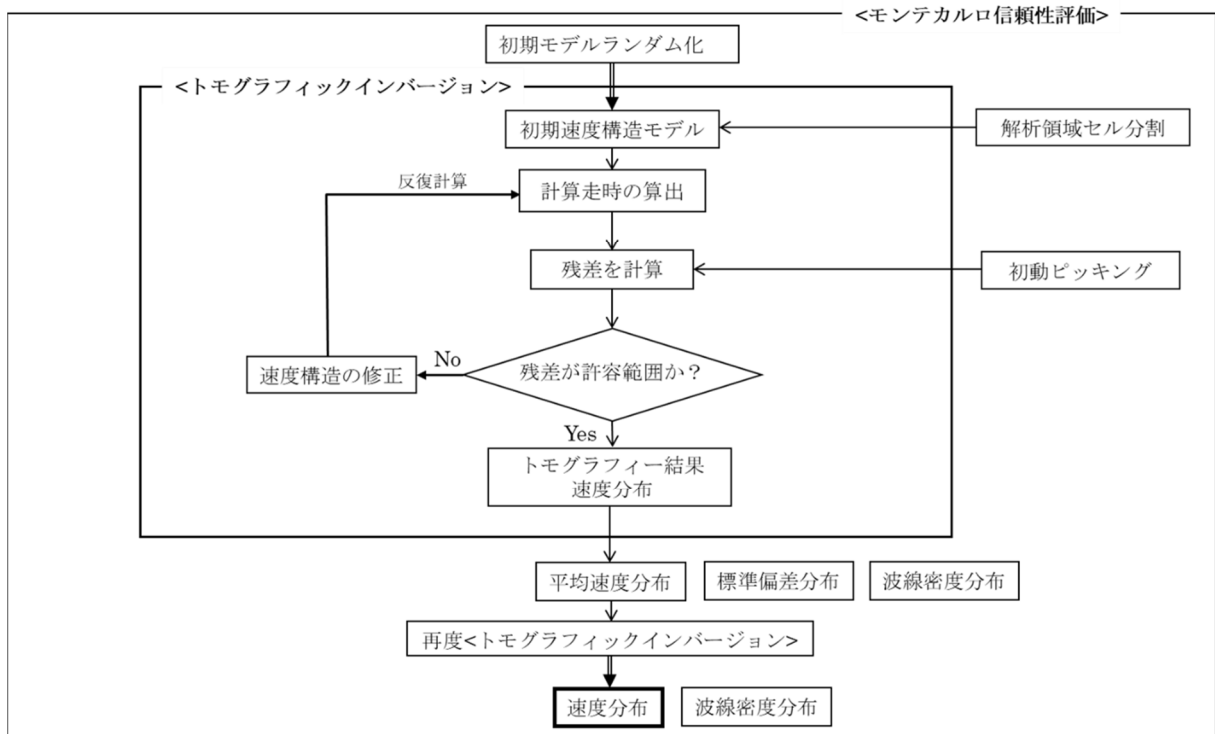


図 62 屈折法データ処理ワークフロー

i) トモグラフィ解析の概要

トモグラフィックインバージョンにおける理論走時のフォワードモデリングには、Linear Traveltime Interpolation 法(LTI 法; Asakawa and Kawanaka, 1993)を用いた。波線の計算では対象の領域を格子に分割し、各格子を通る波線を求める。LTI 法は各格子をさらに細かく分割し、隣接する格子上の各分割点を結ぶ波線の走時を計算した後、得られた走時の組を用いて走時が最小になるよう波線を補間する。格子のサイズ・分割点にかかわらず走時が最小になる波線経路を計算することにより、他の走時計算法と比較して正確さと安定性に利点を持つ。

インバージョンのアルゴリズムには Simultaneous Iterative Reconstruction Technique(SIRT 法)を用いた。トモグラフィックインバージョンでは一般に、格子に分割された領域に対し波線経路に沿った格子上に走時の観測値と計算値の差を速度の修正値として割り振り、波線計算と速度修正値の決定の反復計算をする Algebraic Reconstruction Technique(ART 法)によるインバージョンを行う。通常の ART 法では各格子上で波線ごとに計算した速度の修正値をそれぞれ逐次的に適用するが、SIRT 法では全波線で計算した速度の修正値の平均を取った値による修正を適用する。さらに本解析に用いる SIRT 法では、速度の修正値の計算において各格子内を波線が通過する時間により残差走時を比例配分する改良を施してある。また波線周辺の格子を波線からの距離に応じた重みをつけて更新対象にすることで、計算の安定化を図っている。

インバージョンの信頼性評価として、初期モデルランダム化によるモンテカルロ不確実性解析(白石・他, 2010)を行った。ランダムに生成した多数の初期モデルに対してトモグラフィ解析を実施し、全ての結果を平均した速度分布および平均値からのばらつきを示す標準偏差分布を得る。これら二つの情報はそれぞれ、トモグラフィ解析による速度構造モデル解とその確からしさの指標として利用できる。

ii) 解析内容

計算領域は発震点・受振点を含む直線投影測線を設定した(図 63)。解析データとして、屈折法発震(7点)および反射法発震(462点)から読み取った屈折初動走時(図 64)を用いた。

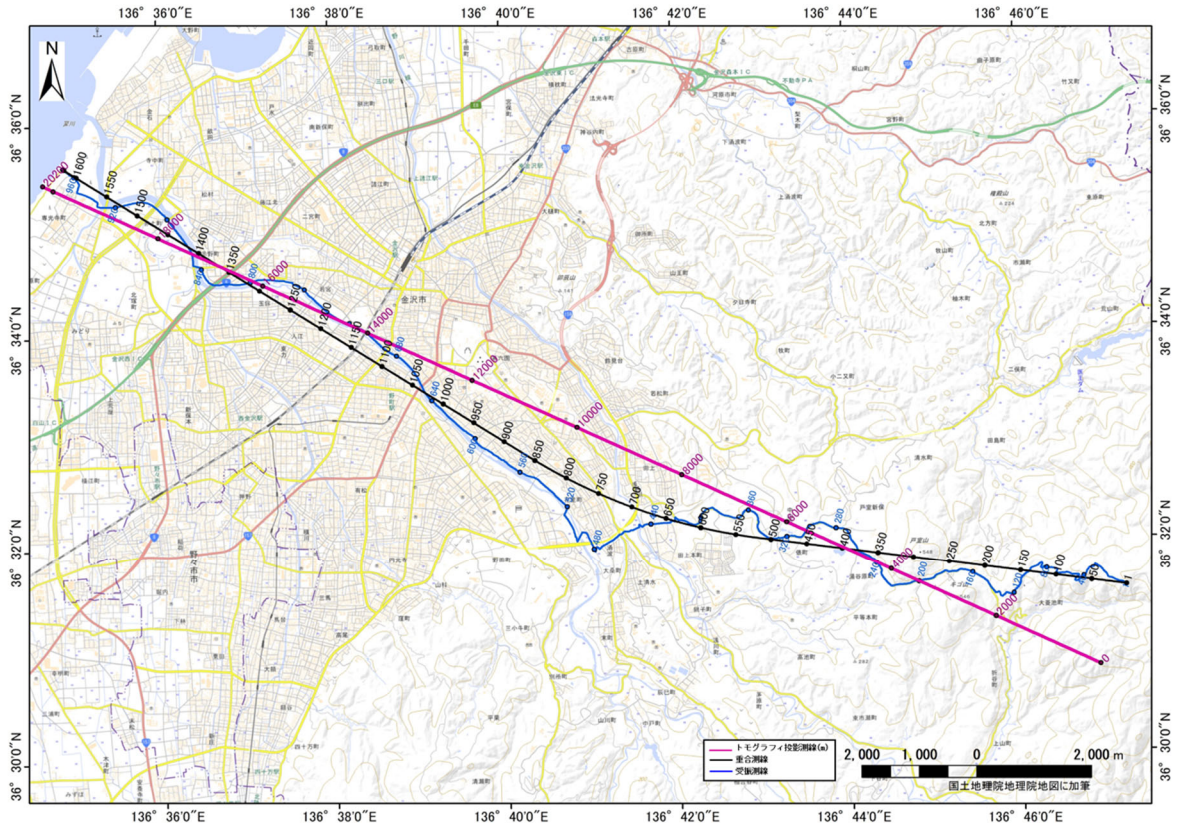


図 63 トモグラフィ投影測線 (赤線)

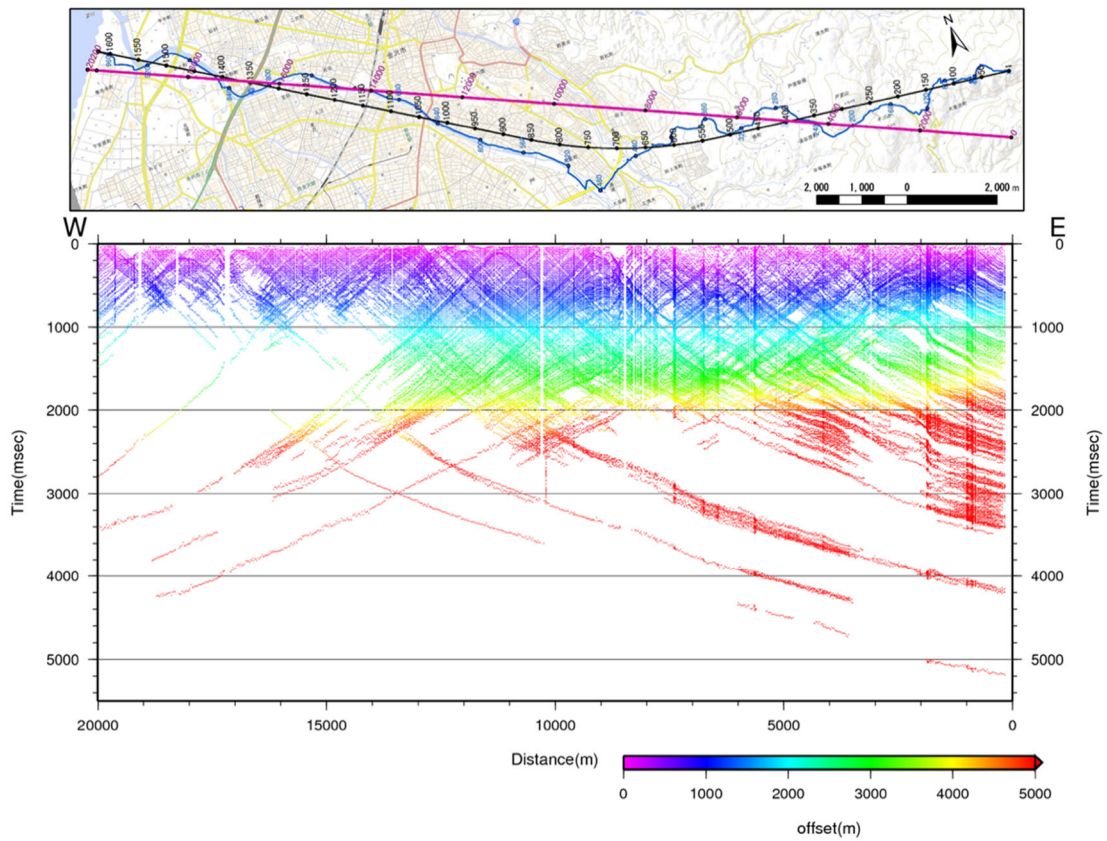


図 64 屈折初動読み取り図

初期速度構造モデルはランダムな条件での 100 ケースについて設定し、各々についてトモグラフィックインバージョンを行った。初期速度構造モデルの生成条件としては 2 点の折れ点を含む一定速度勾配の速度範囲として、地表面で 500~3,000 m/s、深度 2,000 m で 2,500~5,500 m/s、深度 6,000 m で 4,000~7,000 m/s、深度 10,000 m で 5,000~8,000 m/s をランダムに選択した。設定した異なる初期構造モデルに対して、それぞれトモグラフィックインバージョンの反復回数を 15 回とした。反復回数設定においては、観測走時と計算走時の残差に十分な収束が得られる値を選択した。初期モデル群と反復回数と走時誤差の収束の関係を図 65 に示す。

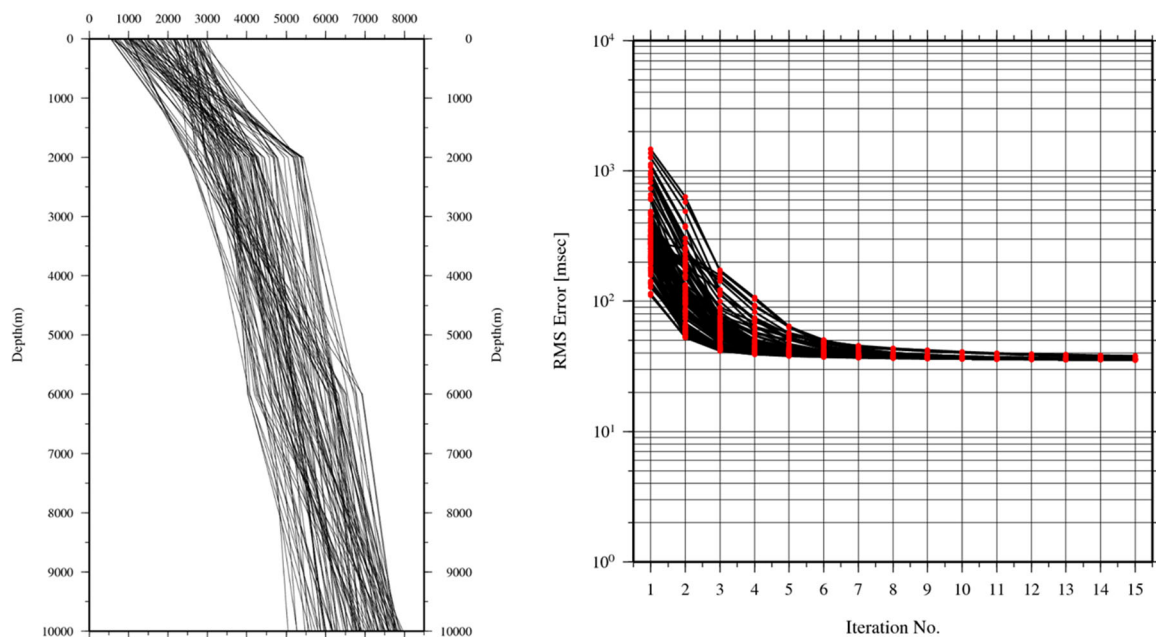


図 65 トモグラフィ解析における初期モデル群と走時誤差の収束

100 ケースの解析結果として得られた速度分布から計算される平均速度分布・標準偏差分布・平均波線密度に対して、トモグラフィ解析投影測線から反射法 CMP 測線に再投影し、波線の存在する部分にのみカラースケールを与えて表示したものを図 66 に示す。

さらに、100 ケースの結果の平均速度分布を、改めて初期速度構造モデルとし、カスケード式に再度トモグラフィ解析を実施した。

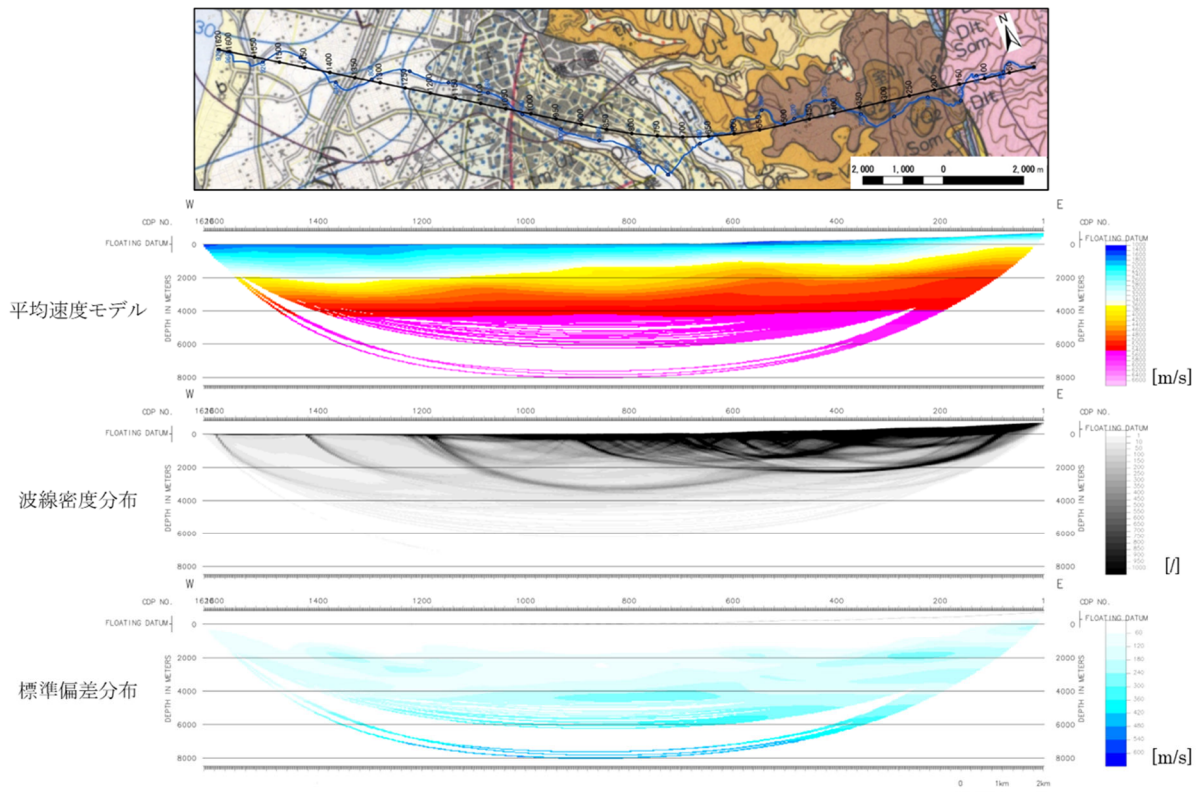


図 66 初期トモグラフィ解析結果（速度分布、波線密度、標準偏差）

iii) トモグラフィ解析結果

カスケード式に実施したトモグラフィックインバージョンの結果を最終的な速度分布とした。得られた最終的な速度分布および波線密度に対して、トモグラフィ解析投影測線から反射法 CMP 測線に再投影し、波線の存在する部分にのみカラースケールを与えて表示したものを図 67 に、波線密度を図 68 に示す。加えて、反射法処理によって得られた重合前時間マイグレーション深度断面図と、屈折法解析の結果を対比するために、屈折法解析結果を重合測線に投影し重ね合わせを行った（図 69）。

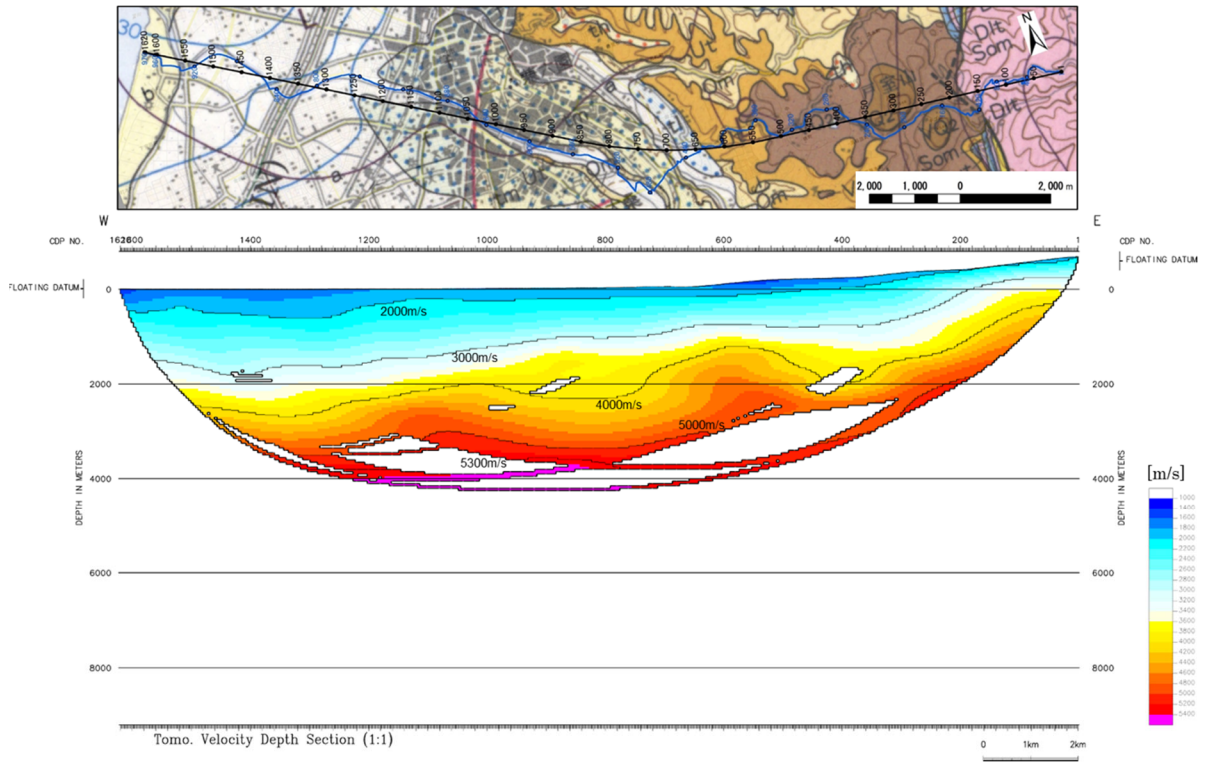


図 67 トモグラフィ解析により求められた P 波速度分布

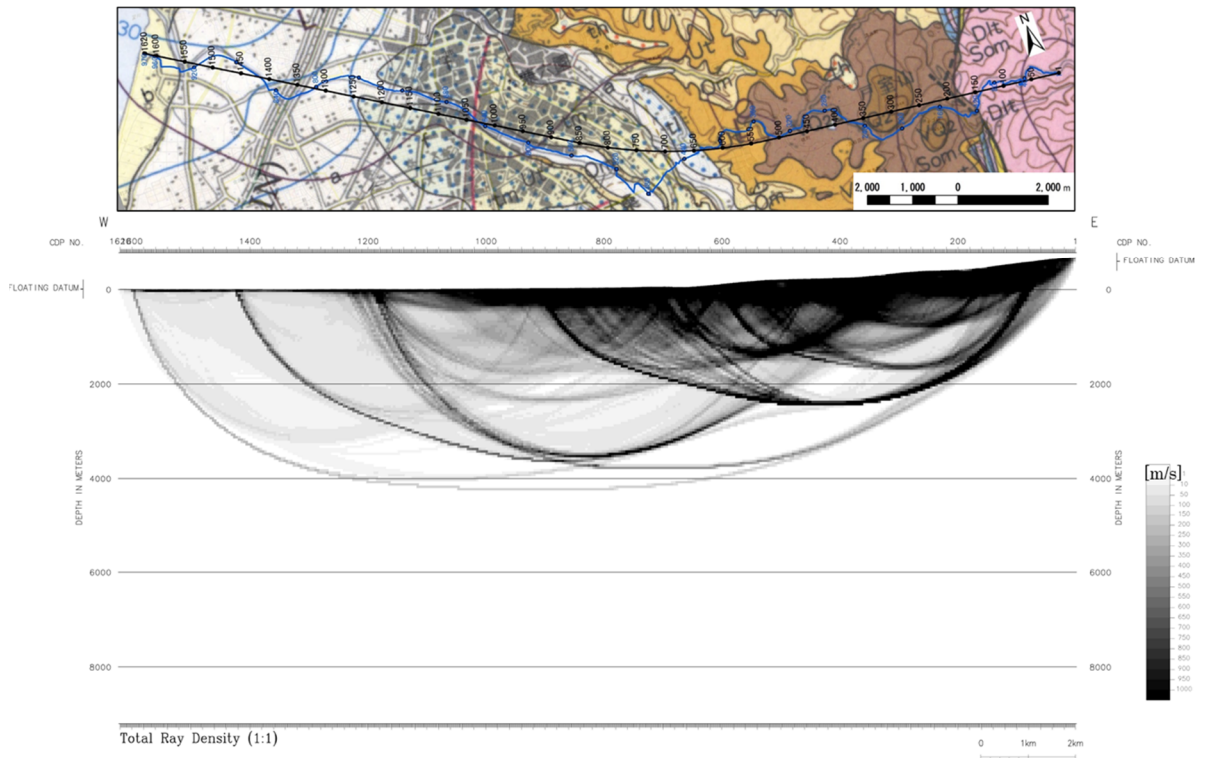


図 68 トモグラフィ解析による波線密度

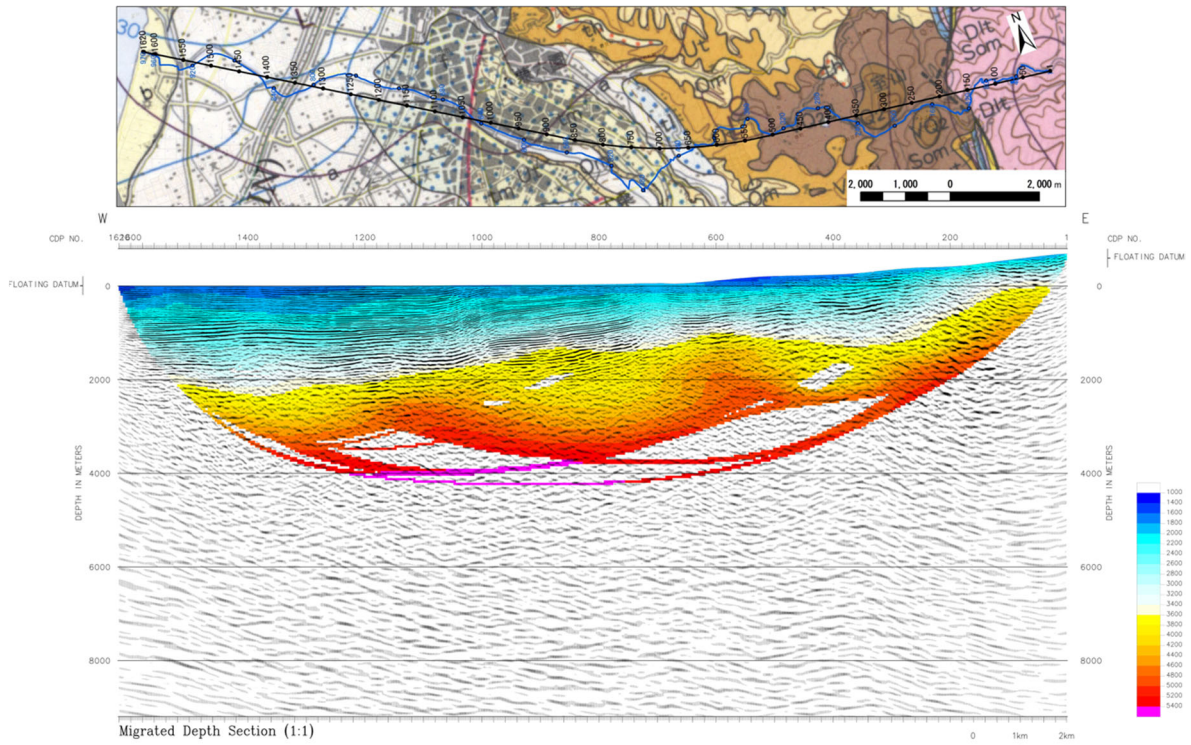


図 69 重合前時間マイグレーション深度断面図（面積表示）と屈折法による P 波速度構造の重ね合わせ表示

f) 構造探査断面の地質学的な解釈

犀川—医王山測線の構造探査およびそのデータ解析により得られた反射法断面に基づき、地質断面解釈を行った。解釈にあたっては、本研究の成果に加えて、活断層・活構造の既存研究（活断層研究会編，1980，1991；東郷・他，1998a；中田・今泉編，2002）や、測線周辺の地質図などの地質情報（坂本，1966；別所・他，1967；楡井，1969；粕野編，1993；中川・他，1996；鹿野・他，1999；柳沢，1999a；柳沢，1999b）を参照した。

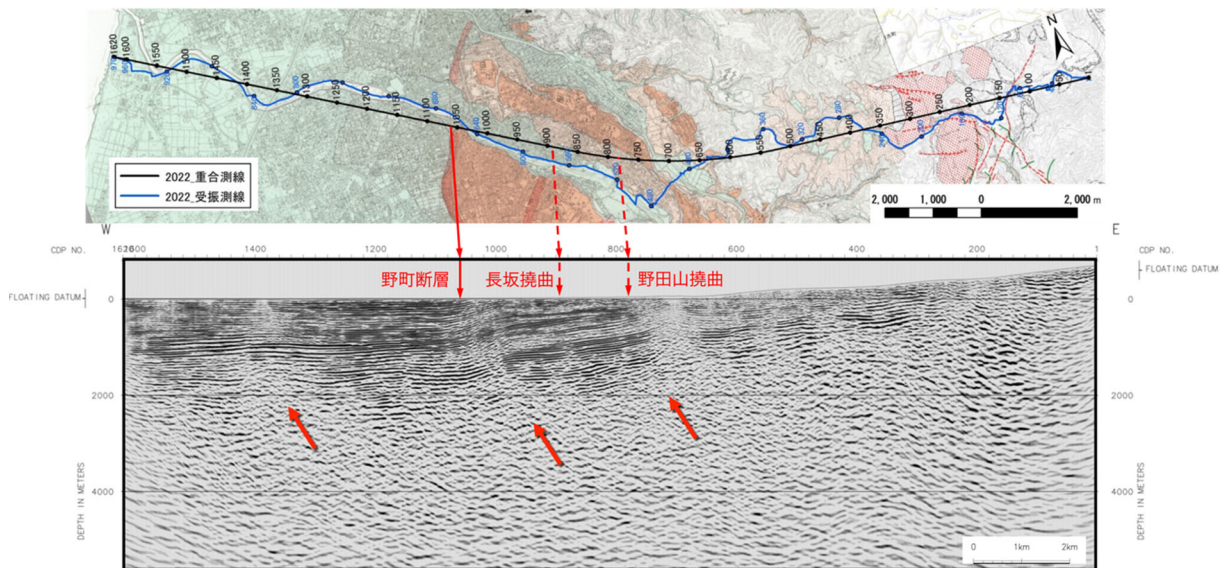


図 70 犀川—医王山測線の深度断面と活断層の位置（東郷・他，1998a）の比較。

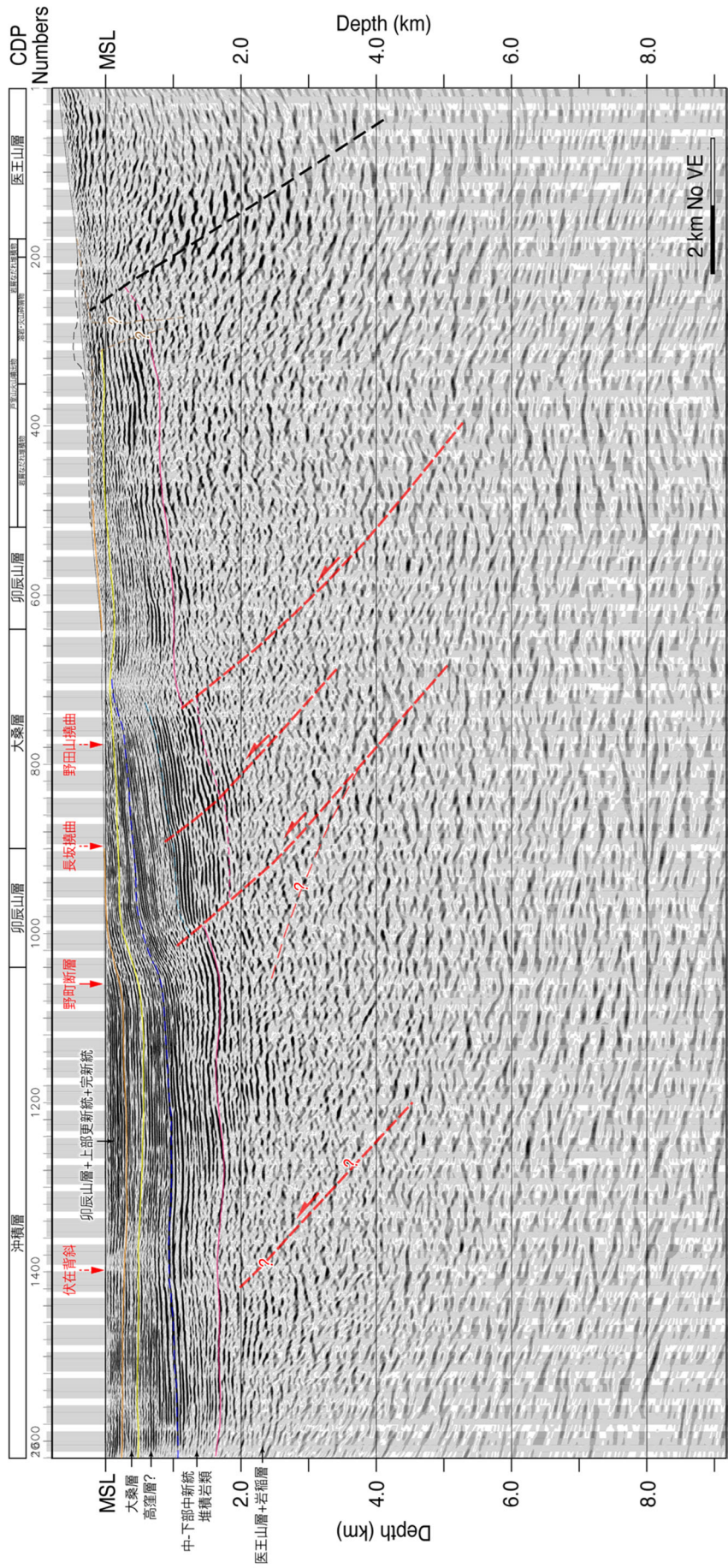


図 71 犀川一医王山測線の解釈深度断面(重合前時間マイグレーション深度断面図)。図の上部に表層地質を示す。

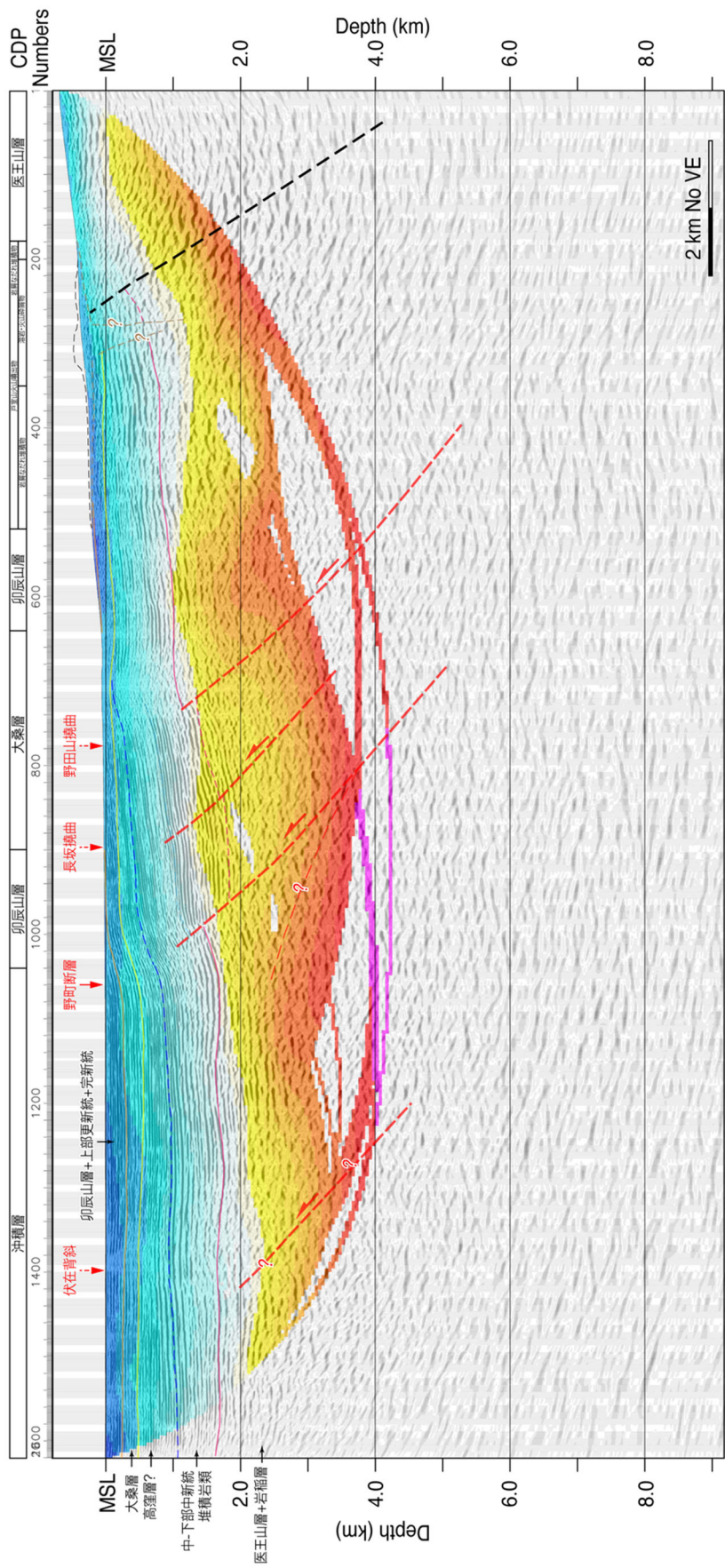


図 72 犀川—医王山測線の解積深度断面(重合前時間マイグレーション深度断面図)。速度構造を重ね合わせ表示。

深度断面と活断層の対応関係を検討すると、測線を横断して分布する野町断層・長坂撓曲・野田山撓曲に対応して、反射面群の不連続が認められる(図70)。このほか、測線西部の沖積低地面下にて、連続的に追跡される反射面群が上に凸の起伏を呈する様子が、深さ約2 kmまで追跡される。反射面と下部更新統大桑層・鮮新統高窪層相当層・下部中新統医王山層の各層上面を対比した断面(図71、72)によると、野町断層・長坂撓曲・野田山撓曲の下方延長部に逆断層が存在することがわかる。逆断層はいずれも東傾斜で中角度の断層面であり、断層の先端は地表に到達せず伏在している。また、野町断層の上盤側では中新統が厚いのにに対して下盤側で薄くなっていることから、中新世に形成された正断層が逆断層として再活動していると推定される。加えて、測線西部の沖積低地面下では、大桑層・高窪層相当層・医王山層上面が参加する西急・東緩の非対称背斜が存在すると推定される。これらの層準の構造的起伏には累積性が認められる。現在の活動性については、大桑層より上位の地層の層厚変化や、地表変形の有無などを今後検討する必要がある。なお、地層の対比については、特に断層下盤側についてより確実なものとするために、次年度に既存構造探査の再解析を実施する予定である。

(d) 結論ならびに今後の課題

航空レーザー測量データを収集・解析して作成した0.5 mグリッドDEMおよび基盤地図情報の5 m DEM、小～大縮尺空中写真等を用いた変動地形解析を行い、森本・富樫断層帯および隣接する邑知潟断層帯南西部との境界部の変動地形を再検討した。その結果、森本・富樫断層帯中央部では新たに沖積低地面や低位・中位段丘面に背斜・撓曲変形が認められたほか、森本丘陵基部にも西向き低断層崖・撓曲崖が断続的に分布するなど、既存研究よりも複雑な断層トレースを呈する可能性があることがわかった。また、邑知潟断層帯南西部との境界部では、森本・富樫断層帯北端部から、宝達丘陵西縁部に段丘地形や谷底平野の段丘化が断続的に認められ、位置不明瞭な活断層が従来よりも約2 km北に続く可能性が示唆された。2・3年目以降も各種DEM・空中写真等による変動地形解析・地表踏査・ボーリングDBの活用により、検討を続ける。

以上の変動地形解析と既往研究の結果をあわせた検討を踏まえて、変位地形の現況も考慮し、2年目は断層帯北部に分布する沖積低地面を累積的に変形させる完新世後期の撓曲崖において、断層活動時期・平均変位速度を推定する群列ボーリング等の掘削調査と高分解能極浅層反射法地震探査を行うこととする。また、3年目は断層帯南部・手取川右岸に発達する新期の撓曲崖地形を候補とし、更に検討を行う。

また、断層帯中央部において中型バイプロサイズ車4台を震源とする測線長約24 kmの深部構造探査(犀川-医王山測線)を実施した。その結果、新第三系～第四系が野町断層・長坂撓曲・野田山撓曲に対応する西急・東緩の非対称背斜構造に参加する構造が確認された。これらは東傾斜の伏在断層によって形成されたと考えられる。一方、測線西部の沖積低地面下に緩やかな背斜状の構造が認められる。これらを含めた解釈の詳細は、2年目に行う基礎物理探査測線の再解析を行い、新第三系・第四系との対比をトレースした上で再度検討を行う。

(e) 引用文献

Aoki, N., S. Narahara, A. Takahashi, T. Nishiki, Imaging of conflicting dipping

- events by the multi-dip reflection surfaces method, SEG Expanded Abstracts, 29, 3604-3608, 2010.
- Asakawa, E. and T. Kawanaka, Seismic ray tracing using linear travelttime interpolation, Geophy. Prosp. vol.41, 99-111, 1993.
- 別所文吉・藤 則雄・柿沢紀生・末吉勝久・出口幹雄・今井芳正・西村 勇・藤田昌宏, 金沢周辺の地質, 金沢大学教育学部紀要, 16, 119-125, 1967.
- 後藤秀昭, 数値標高モデルから作成した日本列島の地形アナグリフ: 解説と地図, 広島大学大学院文学研究科論集, 特輯号, 72, 1-69, 2012.
- 池田安隆・今泉俊文・東郷正美・平川一臣・宮内崇裕・佐藤比呂志編「第四紀逆断層アトラス」, 東京大学出版会, 254pp., 2002.
- 今井 功, 5万分の1地質図「金沢」図幅及び同説明書, 地質調査所, 79pp., 1959.
- 石川県, 「平成 8 年度地震調査研究交付金 森本断層系に関する調査成果報告書」, 165pp., 1997.
- 石山達也・加藤直子・佐藤比呂志・戸田 茂、高分解能反射法地震探査の結果から推定される森本・富樫断層帯の構造的特徴, 日本地球惑星科学連合 2017 年大会, SSS12-15, 2017.
- Ishiyama, T., Sato, H., Kato, N., Koshiya, S., Abe, S., Shiraishi, K., and Matsubara, M., Structures and active tectonics of compressionally reactivated back-arc failed rift across the Toyama trough in the Sea of Japan, revealed by multiscale seismic profiling, Tectonophysics, 710, 21-36, 2017.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 「森本・富樫断層帯の評価」, 17pp., 2001.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 「邑知潟断層帯の評価」, 25pp., 2005.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 「森本・富樫断層帯の長期評価(一部改訂)」, 33pp., 2013.
- 鹿野和彦・原山 智・山本博文・竹内 誠・宇都浩三・駒澤正夫・広島俊男・須藤定久、20万分の1地質図幅「金沢」, 地質調査所, 1999.
- 粕野義夫・編, 石川県地質誌, 新版・石川県地質図(縮尺 10 万分の 1)および説明書, 石川県, 321pp., 1993.
- 活断層研究会編, 「日本の活断層一分布図と資料一」, 東京大学出版会, 363pp., 1980.
- 活断層研究会編, 「新編日本の活断層一分布図と資料一」, 東京大学出版会, 437pp., 1991.
- 木村佳織, 金沢南方の段丘面編年と変動地形, 国土地理院時報, 99, 67-75, 2002.
- 北村晃寿・東野外志男・中橋雅彦・小川義厚・吉田智洋・阿部和生, 加賀平野で発見された白山起源の火山灰層, 第四紀研究, 37, 131-138, 1998.
- 町田 洋・新井房夫, 「新編火山灰アトラスー日本列島とその周辺」, 東京大学出版会, 336pp., 2003.
- 松多信尚・岡田篤正・岡田真介・澤 祥・平川一臣・廣内大助・八木浩司, 1:25,000 地理院活断層図「鶴来」, 国土地理院技術資料, D1-No.742, 2016.
- 三崎徹雄, 石川県, 金沢-羽咋間の活構造, 地理学評論, 53, 280-289, 1980.
- 中川耕二・竹内清和・中川重紀, 金沢市街と金沢平野における大桑層・卯辰山層の分布と構造及び水理地質, 北陸地質研究所報告, 5, 287-309, 1996.
- 中村洋介・金 幸隆・岡田篤正・竹村恵二, 金沢市街地における河成段丘の形成時期と森本

- 富樫断層帯野町撓曲の第四紀後期における上下変位速度, 活断層研究, 23, 69-76, 2003.
- 中村洋介・宮谷淳史・岡田篤正, 森本-富樫断層における平均上下変位速度分布, 活断層研究, 26, 151-162, 2006.
- 中田 高・今泉俊文編, 「活断層詳細デジタルマップ」, 東京大学出版会, 68pp.+DVD 2枚+付図1葉, 2002.
- 楡井 久, 金沢市周辺の卯辰山層について, 地質学雑誌, 75, 471-484, 1969.
- 坂本 亨, 富山積成盆地南半部の新生界とその構造発達史, 地質調査所報告, 213, 1-28, 1966.
- 寒川 旭, 寛政 11 年(1799 年)金沢地震による被害と活断層, 地震第 2 輯, 39, 653-663, 1986.
- 産業技術総合研究所, 森本・富樫断層帯の活動性および活動履歴調査, 基盤的調査観測対象断層帯の追加・補完調査」成果報告書 No. H19-3, 2008.
- 白石和也・阿部 進・岩崎貴哉・斉藤秀雄・佐藤比呂志・越谷 信・加藤直子・新井隆太・川中 卓, 屈折初動走時トモグラフィ解析における初期モデルランダム化による解の信頼性評価, 物理探査, 63, 345-356, 2010.
- 東郷正美, 「微小地形による活断層判読」, 古今書院, 206pp., 2000.
- 東郷正美・池田安隆・今泉俊文・澤 祥, 1:25,000 都市圏活断層図「金沢」, 国土地理院技術資料, D.1-355, 1998a.
- 東郷正美・池田安隆・今泉文・澤 祥・平野信一, 森本-富樫断層帯の詳細位置と活動性について, 活断層研究, 17, 72-83, 1998b.
- 堤 浩之・石山達也・杉戸信彦・中田 高・平川一臣, 1:25,000 都市圏活断層図 邑知潟断層帯とその周辺「邑知潟西南部」, 国土地理院技術資料 D.1-561, 2010.
- 宇佐美龍夫・石井 寿・今村隆正・武村雅之・松浦律子, 「日本被害地震総覧 599-2012」, 東京大学出版会, 694pp., 2013.
- 柳沢幸夫, 金沢市南部地域に分布する中新統の珪藻化石層序, 地質調査所月報, 50, 49-65, 1999a.
- 柳沢幸夫, 富山・石川県境の医王山地域に分布する中新統の珪藻化石層序と対比, 地質調査所月報, 50, 67-81, 1999b.

