3.2.3 沿岸海域および海陸統合構造調査

目 次

- (1) 業務の内容
 - (a) 業務題目
 - (b) 担当者
 - (c) 業務の目的
 - (d) 8 か年の年次実施計画(過去年度は、実施業務の要約)
 - 1) 平成25年度
 - 2) 平成26年度
 - 3) 平成27年度
 - 4) 平成28年度
 - 5) 平成29年度
 - 6) 平成30年度
 - 7) 平成31年度
 - 8) 平成32年度
 - (e) 平成29年度業務目的
- (2) 平成29年度の成果
 - (a) 業務の要約
 - (b) 業務の実施方法と成果
 - 1) 調査地域の地質概要
 - 2) データ取得
 - 3) データ解析
 - 4) 地質学的解釈
 - (c) 結論ならびに今後の課題
 - (d) 引用文献
 - (e) 成果の論文発表・口頭発表等
 - (f) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定
- (3) 平成30年度業務計画案

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

2.3 沿岸海域および海陸統合構造調査

(b)	担	当	者
$\langle \sim \rangle$		_	_

所属機関	役職	氏名
東京大学地震研究所	教授	佐藤 比呂志
	教授	岩崎 貴哉
	助教	石山 達也
	助教	蔵下 英司
	特任研究員	加藤 直子
	特任研究員	Claringbould,
		Johan S.
	技術職員	田中伸一
	技術職員	辻 浩
岩手大学理工学部	教授	越谷 信
愛知教育大学	教授	戸田 茂
新潟大学理学部	教授	豊島 剛志
	講師	小林 健太

(c) 業務の目的

震源断層・津波の波源断層の位置と形状を明らかにするために、北海道から九州北部に いたる日本海沿岸地域において、マルチチャンネル反射法地震探査を行う。また、海陸統 合構造調査を行い日本海~陸域にいたる複雑な海陸接合部を含む基本的な地殻構造を明ら かにし、津波波源モデル・震源断層モデルの高度化のための基礎資料を得る(図1)。

(d) 8 か年の年次実施計画(過去年度は、実施業務の要約)

1) 平成25年度:

中越〜上越、富山トラフ、能登半島沖、金沢沖の二船式による反射法地震探査、富山ト ラフ海陸統合反射法地震探査を海域 715 km、陸域 15 km の区間で実施した。計 10 測線 において、海底活断層の深部形状の推定に資する基礎資料が収集できた。また、富山トラ フの地殻構造が明らかになった。

2) 平成26年度:

福井沖〜鳥取沖の沿岸海域において、反射法地震探査を実施した。堆積盆地の構造も含めた総合的な検討により、断層の再活動過程についての情報が得られた。海陸統合調査は、 能登半島西方の羽咋沖海域から砺波平野を経て富山平野西端にいたる領域「かほく-砺波測 線」で実施した。海陸統合反射法地震探査では、羽咋沖から砺波平野、富山平野西部を構 成する堆積盆地の基本的な形状と断層の深部形状が明らかになった。 3) 平成27年度:

山口~北九州沖の沿岸海域において、反射法地震探査を実施した。海陸統合測線は、南丹市美山町静原から、若狭湾に至る約80 kmの陸上及び海域区間からなり、既存の新宮・舞鶴測線と連続させ、島弧・背弧海盆の基本的な地殻構造を把握するための基礎データを取得した。

4) 平成28年度:

鳥取県倉吉から沖合の大和海盆南部に至る測線で海陸統合反射法地震探査を実施し、宍 道褶曲帯と呼ばれる背弧変形帯の地殻構造の特性を明らかにし、震源断層の形状を明らか にした。また、測線直下で発生した 2016 年鳥取県中部地震(Mw6.2)震源域の地殻構造 の特徴を明らかにした。

5) 平成29年度:

北海道天売島周辺から石狩湾にいたる反射法地震探査を行い、震源・津波波源断層の深 部形状を明らかにするための資料を収集した(サブサブテーマ2.2.1参照)。夕張から西方 に石狩低地東縁断層帯を横切り約68 kmの陸域区間と、石狩湾を横切り日本海盆にいたる 約250 kmの海域区間(サブサブテーマ2.2.1参照)において、海陸統合地設構造探査を行 い、日本海盆から日高衝突帯にいたる地殻構造の特性と、活断層の深部形状を明らかにし た。

6) 平成30年度:

積丹半島沖から松前半島沖に至る沿岸海域において、反射法地震探査を行い、震源・津 波波源断層の深部形状を明らかにするための資料を収集する。北海道南部を東西に横断す る50 kmの陸域区間と、1993年北海道南西沖地震の震源域を横切り日本海盆にいたる約 250 kmの海域区間(サブサブテーマ2.2.1参照)において、海陸統合地殻構造探査を行う。 この探査では、函館平野西縁断層帯や北海道南西沖震源域周辺の震源断層の深部形状や海 洋地殻である日本海盆と北海道南部の大陸地殻など地殻構造の特性を明らかにする。

7) 平成31年度:

松前半島沖の沿岸海域において、反射法地震探査を行う。山形・宮城県境付近の奥羽山 脈から新庄盆地・出羽丘陵をへて庄内平野にいたる60 kmの陸域区間と、庄内沖から大和 堆にいたる約300 kmの海上区間(サブサブテーマ2.2.1参照)で、海陸統合地殻構造調査を 実施する。この測線では火山弧から背弧海盆にいたる基本的な地殻構造を明らかにする他、 多数の活断層を横断し、それらの深部形状を明らかにする。

8) 平成32年度:

データのとりまとめを行う。とくに、データ解析手法などに大きな進展があった場合に は、初期のデータの再解析等を行い、均質なデータとして利用可能にする。



図1 日本海地震津波調査プロジェクトにおける制御震源を用いた構造探査地域。 H は平成の省略。活断層は日本列島の地質編集委員会編(1996)¹⁾による。

(e) 平成29年度業務目的

北海道天売島周辺から石狩湾にいたる反射法地震探査を行い、震源・津波波源断層の深 部形状を明らかにするための資料を収集する。夕張から西方に石狩低地東縁断層帯を横切 り約60kmの陸域区間と、石狩湾を横切り日本海盆にいたる約250kmの海域区間(サブサ ブテーマ2.2.1参照)において、海陸統合地殻構造探査を行い、日本海盆から日高衝突帯に いたる地殻構造の特性と、活断層の深部形状を明らかにする。

(2) 平成29年度の成果

(a) 業務の要約

震源・津波波源断層の形状把握と島弧・背弧海盆の基本的な地殻構造を把握するために、 北海道中軸部の日高衝突帯西部から、石狩平野を東西に横断する約 68 km の陸上区間とそ

の西方海域の日本海盆に至る 250 km の区間において、海陸統合地殻構造探査を行った(サ ブサブテーマ 2.2.1 参照)。陸上区間では、バイブロサイス車 4 台を使用した反射法地震 探査発震の他、発破とバイブロサイス車5台の集中発震による屈折法・広角反射法地震探 査により、深部反射法断面の他、P 波速度構造を明らかにした。さらに、海域でのエアガ ン発震を陸上で受振することにより、地殻上部の速度構造を得た。得られた反射法地震探 査断面では、夕張から馬追に至る日高衝突帯西部と、石狩平野部分では反射面のパタ ーンが大きく異なる。日高衝突帯西部は、短縮量が著しい褶曲-断層帯の地質構造を反 映して、反射面の連続性に乏しい。今回の探査では、従来の反射法地震探査に比べ長い 展開長を活かした速度構造が明らかになった点に特徴がある。東傾斜のスラスト群に 伴う、速度の逆転構造が顕著に見られる。速度構造の上から、南幌・江別間で凸型を呈 する高速度領域(5.5 km/s)が約4 kmの深度に位置する。夕張に至る日高衝突帯西部 のP波速度は、低速度で 5.5 km/s の等速度線は西に向かって低下する。高速度層の欠 如から基本的にはシンスキン (thin-skinned) 型の変形を示している。日高衝突帯の前 縁断層は、馬追丘陵西縁の石狩低地東縁断層帯であり、深部の形状は20~25°で東に 傾斜する反射面から推定される。先端部では深さ3kmに伏在し、楔状の形状を示す。 石狩平野下では連続性の良好な反射面が深さ 6~4km まで分布する。東から野幌背斜、 太美背斜、海岸背斜に対応した褶曲が見られる。野幌背斜の西翼には地下 5~8 km で 東傾斜の断層が推定される。この断層の上盤側には西側に層厚が増化する堆積層が分 布し、見かけ上、正断層活動にともなう成長層と推定される。成長層は幌内層・石狩層 群などの古第三系が相当する可能性が高い。この正断層は、反射面のパターンから荷 菜層堆積時以降に逆断層として反転したと推定される。野幌背斜の西方に位置する太 美背斜についても、背斜下に東傾斜の断層が存在し、正断層の反転構造を示している。 日高衝突帯西部の変形様式とは異なり、石狩平野下の構造は、シックスキン (thickskinned)型を示しており、日高衝突帯西部と同様の東傾斜の逆断層から構成されてい るが、それぞれ独立したものである。石狩低地東縁断層帯、野幌背斜、太美背斜はいず れも断層関連褶曲であり、本探査によって震源断層の断面形状が明らかになった。

(b) 業務の実施方法と成果

1) 調査地域の地質概要

北海道中軸部には主として新第三紀に形成された南北に伸びる短縮変形帯が発達する。 この短縮変形帯は日高衝突帯とよばれ、基本的には千島弧と東北日本弧との島弧-島弧衝突 によって形成されたと考えられている²⁾。日高衝突帯は東傾斜の大規模なスラスト群から 構成され、中軸部には中部地殻を構成する岩石が変成岩として露出し³⁾、その西側には短 縮変形を被る第三系が分布する。褶曲・断層帯の西縁は、西方に凸型の平面形状を示す活断 層群を構成し石狩低地東縁断層帯⁴⁾と呼ばれる。日高衝突帯の構造は、南部地域において は深部反射法地震探査や屈折法地震探査が行われ、主要な断層が東傾斜のスラストである ことが明らかにされている ^{5.6,7,8)}。断層帯の先端部は堆積層中での伏在断層であり、しば しばウェッジスラストを伴う ^{9,10,11)}。

日高衝突帯の西側には、石狩平野が広がる。石狩川周辺では、北方の樺戸山地と南方の 道南山地に挟まれた北西方向に伸びる堆積盆地を形成し、約4kmの厚さを示す新第三系 ~第四系が分布する^{12,13}。このような堆積盆地の分布と形状は、重力異常から推定される 密度構造によく現れている^{14,15}。この堆積盆地には南北ないしは北西方向の軸跡を示す褶 曲が形成されている^{16,17}。野幌背斜は、南北方向の軸跡を示す褶曲で、活褶曲として知ら れている¹⁸。その西方は札幌東部・当別沈降部を経て、石狩湾岸褶曲部に至る¹⁶。石狩湾 岸褶曲部には東部の NNE-SSW 方向の軸跡を示す太美背斜、石狩川の北岸には NNE-SSW 方向の石狩湾海岸背斜などが分布する他、石狩川以南の石狩低地域では北西・南東方向の 10 km 程度の軸跡を示す褶曲が知られている¹⁷。

野幌丘陵を構成する背斜など、石狩平野下の褶曲は断層関連褶曲と推定されるものの、 それらの深部構造が明らかになっていないため、震源断層の位置や形状を明らかにするこ とが難しい。このため、人口稠密な札幌市が位置する石狩平野から日高衝突帯西縁にかけ ての領域を対象として深部反射法地震探査を実施した(図2,3)。尚、本探査はより深部の 地殻構造の基本的な特徴を把握するために、陸域測線と海洋研究開発機構が実施した海域 地殻構造探査(サブサブテーマ2.2.1参照)と共同で海陸地殻構造統合探査として実施し た。

本探査を進めるにあたり、測線の設定、地下構造の把握について、石油資源開発株式会 社から、未公表資料の参照などを含め、多大なるご協力をいただいた。記して謝意を表す。



図2 調査測線概略図。



図 3 調査測線概略図。地質調査所 20 万分の1 地質図幅 『札幌』¹⁹⁾ 『夕張岳』²⁰⁾ に加筆。 青字の数字は受振点番号。

2) データ取得

北海道石狩市石狩河口付近から夕張市南部地域にいたる陸域測線において、反射法地震 探査・屈折法探査のデータを取得した(図2)。また、陸域測線の延長上の海上測線でのエ アガン発震データを陸域に固定した受振器で記録することにより、海陸境界部を含み連続 的な速度構造を得るための波形記録を収集した(図2)。

a) 調査測線

本調査測線は、石狩市石狩川河口付近を起点として石狩郡当別町、江別市、空知郡南幌 町、夕張郡長沼町、由仁町、栗山町を経て、夕張市南部地域に至る投影距離約 68.5 kmの 測線を設定した。また、本プロジェクトの一環として、当該陸域調査と同時期に海域に於 いて海洋研究開発機構(JAMSTEC)により海上地震探査が実施された。

b) 調查仕様(表 1)

陸域測線全域の投影測線上 68.5 km における受振展開は、投影測線上で 50 m 間隔の投 影受振位置を 1,358 点設定し、実際の受振展開が可能な道路に再投影して受振点位置を決 定した。観測装置として GPS 刻時装置ならびにバッテリー、AD 変換器、デジタル記録機 器を内蔵した 3 ch または 1 ch 仕様の独立型受振システム (GSX-3 または GSR)を使用し た。震源には大型バイブロサイス車を標準 4 台使用した (図 4)。 RP1~RP617(図3)の西側区間(石狩河口川付近~南幌町:投影距離約31.5km)では 浅部から深部にかけての構造イメージングに向けた発震間隔50m(投影)・スウィープ数 3回を標準とした反射法データを取得した。本区間では固有周波数10Hzの地震計を使用 した。

RP618~RP1358(図3)の東側区間(南幌町~夕張南部:投影距離約37km)では低周 波成分の確保による深部反射波抽出に向けた発震間隔100m(投影)・スウィープ数8回 を標準とし、この区間では固有周波数5Hzおよび4.5Hzの地震計を使用した広帯域デー タを取得した。

屈折法では全点固定展開(約68.5 km)を確保し、含水爆薬(薬量100 kg)による発震 1点、大型バイブロサイス5台による夜間集中発震1点および大型バイブロサイス4台に よる集中発震15点による屈折データを取得した。

屈折法地震探査のため、測線の東側の一点では含水爆薬による発震作業を行い、西側で は石狩川河川敷に於いて大型バイブロサイス5台による850回に及ぶ集中発震を夜間から 明け方において実施した。

測定期間中データ品質の確認のため、準モニタリングを実施した。適宜、一部区間(探 鉱器12台分)を設定し、観測終了後に収録データの吸い上げ・切り出し・波形によるシグ ナル確認作業を実施した。



図4 大型バイブレータによる発震。



図5 含水爆薬発破前の井戸元。

表1 データ取	得仕様一覧
---------	-------

調査測線		地震探査測線(ISKR2017)				
調査項目	反射法	反射法 屈折法				
総測線長		68.5km(書	と影測線上)			
調査測線位置	石狩市石狩川河口(石狩市石狩川河口付近~石狩郡当別町~江別市~空知郡南幌町・夕張郡長沼町・由仁町・栗山町~夕張市南部地城				
発震系パラメータ						
	大型バイブレータ	大型バイブレータ	大型バイブレータ			
震源	HEMI402台	HEMI402台	HEMI402台	今水爆蒸		
1 Decem	HEMI502台	HEMI502台	HEMI502台			
a a	TILA TI O OTTA D		Y-24001台			
バイプレータ台数	50 (40.87) 32 but 2 BB (46	4台	5台	-1		
標準発震点間隔	50m(投影)西側区間(約	4km				
スウィープタイプ	al.akm)	MD Sweep		- \		
スウィープ長		20sec		\neg		
スウィープ周波数		3.0 · 40Hz		\neg \land \neg		
カットオフ周波数		6.84Hz		\neg \land		
And the last hand the set of the		Start5.0Hz		\neg \land \mid		
弗		End9.5Hz				
		Start1.0cycle		\neg \land \land		
7-7-		End0.5cycle				
バイブレータアレイ長		BtoB(Integer VP)				
標進発露回数/発震点	3回西側区間	50回	850回			
60. 76 dib 1: #L	8回東側区間	15.0				
総 免 展 品 剱 事 具		15点	1点	1点		
采重 刀虎巡庫				100kg		
北坡長				17.65m		
30米以 の指式パラメータ				17.001		
支援 示: // /		50m ((投影)			
标中文版系问册		SM-24.3S(10Hz) Loc	1~618(618ch)			
		SG-5(5Hz) Loc 619	$2 \sim 1208(589ch)$			
受振器種別		$GS^{-1}(D(4,5H_2)) = Loc (3000-112) (3000-$				
		GS-11D (35(4,5H2)Loc.1352~1358(7ch)				
		SM-24 3S(10Hz)3個	組			
27.4C2 00.844 (27.4C2 00.006 cm)		SG-5(5Hz)1個組				
文俶奋威/文俶奋植別		GS-11D(4.5Hz)1個組	1			
		GS-11D 3S (4.5Hz)3	個組			
受振器アレイ/受振点		バン	チング			
展開パターン		固定	展開			
総受振点数(チャンネル数)		135	58点			
記録系バラメータ						
探飯器		GSR/GSX/GSX	・3(独立記録システム)			
サンプルレート		4ms				
フリテンフケイン		30	ab Dhaaa			
アンメーンヨンノイルター		Linear	' Phase			
现的工作下		Window Longth 4000	270G	N		
Dimonsity Edit 1571-4		window Length4000ms				
Diversity Edit 7778-7		Overlap Length2000ms				
相互相関		Scale Factor2.0				
記録長	10秒	14	和			
DUMPAR.	1019	1	17			

c) 観測記録

i)陸域観測データ

陸域で取得された反射法発震記録例を図 6~8 に、屈折法発震度記録例を図 9~11 に示 す。反射法発震記録では、西側では低重合発震であったにも関わらず、発震記録の品質は 良好であった。測線西側の石狩平野内における発震記録の品質は馬追丘陵より東側の発震 記録に比べて良好で、浅部から深部にかけて反射波が明瞭である。また、屈折初動も西側 の方が視認性は高い。

他機関による海上エアガン発震に対する陸域観測記録例を図 12~13 に示す。



図 6 陸上測線西部の反射法発震記録例。発震系仕様概要:大型バイブロサイス車4台、 出力エネルギー70%、スイープ回数12回。測線図は地質調査所20万分の1地質図幅 『札幌』19)『夕張岳』20)に加筆。



図7 陸上測線中央部の反射法発震記録例。発震系仕様概要:大型バイブロサイス車4台、 出力エネルギー60%、スイープ回数24回。測線図は地質調査所20万分の1地質図幅 『札幌』19)『夕張岳』20)に加筆。



図 8 陸上測線東部の反射法発震記録例。発震系仕様概要:大型バイブロサイス車4台、 出力エネルギー70%、スイープ回数32回。測線図は地質調査所20万分の1地質図幅 『札幌』¹⁹⁾『夕張岳』²⁰⁾に加筆。



図 9 陸上測線西部の屈折法発震記録例 SP-3V (バイブロサイス集中発震)。発震系仕様概要: 大型バイブロサイス車 5 台、出力エネルギー70%、スイープ回数 745 回。測線図 は地質調査所 20 万分の1 地質図幅『札幌』¹⁹⁾『夕張岳』²⁰⁾ に加筆。



図 10 陸上測線中央部の屈折法発震記録例 SP-8V (バイブロサイス集中発震)。発震系仕様概要:大型バイブロサイス車4台、出力エネルギー60%、スイープ回数50回。測線図は地質調査所20万分の1地質図幅『札幌』¹⁹⁾『夕張岳』²⁰⁾に加筆。



 図 11 陸上測線東部の屈折法発震記録例 SP-1D (含水爆薬による発震)。発震系仕様概要: 薬量 100 kg、孔底深度 44.75 m、装薬長 17.65 m。測線図は地質調査所 20 万分の 1 地質図幅『札幌』¹⁹⁾『夕張岳』²⁰⁾に加筆。

	· · · · ·		
	TOMAHAHAHAU U U U U U U U U U U U U U U U U		0 20 20 40 10 20 20 40 10 20 20 40 10 20 20 10 10 20 10
the set of the set	MI Contraction of the	High A Line	

 図 12 JAMSTEC による海上エアガン発震に対する陸域観測記録例[1] SP51201
 発震系仕様概要:エアガン容量 5,300 cu.in.、エアガン圧力 2,000 psi、エアガン深度 10 m / 表示: Band-pass filter (4/5-20/30 Hz)。



 図 13 JAMSTECによる海上エアガン発震に対する陸域観測記録例[2] SP51805
 発震系仕様概要:エアガン容量 5,300 cu.in.、エアガン圧力 2,000 psi、エアガン深度 10 m / 表示: Band-pass filter (4/5・20/30 Hz)。

3) データ解析

a) 反射法データ解析

陸域反射法データに関して解析を行った。図 14 にデータ処理フローを、各処理に関す るパラメーター覧を表 2 に示す。



図 14 反射法データ処理フロー

表2 反射法解析パラメ	ーター覧
-------------	------

		Survey Name	平成29年度石狩平野横断地殼構造調查
N-	Descare	Line Name	ISKR2017
110.	Format Conversion	rarameters	SEG-V to SuperX format
2	Geometry Setting		SLO-1 to Super A format
3	Refraction Analysis	Method	Time-Term Inversion
L		First Break Picking	All Shot Records
		Offset Range (Standard)	300 m ~ 700 m
4	Minimum Phase Conversion		
	First-break Suppression	First Break Surppression	
0	Linear Radon Filter	Domain Tempolary Process	t-p domain Pro NMO statios AGC(300ms)
1		Reference Offset	5000m
L		Standard Offset Interval	50m
1		Moveout Range	-7000 ~ 7000 msec/5km
1		Number of Transformed Traces	2500 traces
L		Pass Moveout (Noise Component)	-4000 ~ 1500 msec/5km
L		Terret English	$1500 \sim 4000 \text{ msec/5km}$
	E V Bradiation Filter	Larget Frequency	2 ~ 50 Hz
Ľ	r-A rediction riter	Tempolary Process	AGC(300ms), NMO, FX Interporation
L		Operator Length	15 traces
L		Gate Length	105 traces
L		Time Gate Length	500 msec
		Time Gate Overlap Length	250 msec
8	F-X Velocity Filter	Domain	Comoon Shot domain
L		Tempolary Process	AGC(300ms), NMO, FX Interporation
1		Operator Length	21 traces
1		Velocity Range	$0/0 \sim 900/1200 \text{ m/s}$
L		Operator Type	Symmetry
9	CMP Sort	CMP Interval	25.0 m
		Radius Limit	None
10	Static Correction to Floating Datum	Vw	800 m/sec
1		Estimation of Vsw Paplacement Valacity	Variable(Block size:2500 m)
- 11	Amplitude Correction	Method	2000 m/sec
	Amphilude Correction	Gate Length	600 msec
1		Sliding Velocity	-
12	Deconvolution	Method	Trace-by-Trace Type
L		Mode	Time Variant
L		Gate Start Time at 0m offset	300 msec
L		Gate Length	2800 msec
L		Operator Length	280 msec
L		Gate Sliding Velocity	4 msec 2500 m/sec
1		White Noise	1.05
13	Velocity Analysis	Method	Constant Velocity Stack Method
1		Analysis Interval	1000m
		Analysis Velocity	1400-6500m/s
14	NMO Correction	Strech Factor	2.5
15	Outside Mute	Method	Mannually Design
10	Amplitude Conditioning before Stacking	Method	AGC(1000ms) Median Fit Criterion
17	Residual State Correction	Maximum Allowable Time Shift	8 msec
L		Correlation Space Gate	41
L		Time Gate	300 msec - 2000 msec
L		Offset Range	100 - 3000 m
L		Structure Smoothing Gate	5 CDP
	CMD Stanking	Number of Iteration	5 SOPT
10	Datum Correction	Datum	500m from MSL
20	F-X Prediction Filter	Operator Length	15 traces
1		Gate Length	105 traces
1		Time Gate Length	500 msec
		Time Gate Overlap Length	250 msec
21	F-K Coherency Filter	Power	1.4
22	Post-Stack Time Migration	Method	T-X FD Migration
L		Extrapolation Step	45 degree
L		Velocity Type	Stacking Velocity
L		Velocity Scaling Factor	90% : 0msec
L			80% 500msec
1			70%: 1000msec~
1		Upper edge taper	5 CDP
1		Lower edge taper	50 CDP
23	Band-nass Filter	Method	230 msec Snace Time Variant
Ĩ.,	pass i ner	Operator Length	1000 msec
1		Gate Overlap Length	500 msec
1		Phase Type	zero phase
1		Frequency Difinition	1: 8/12 - 38/42 Hz
L			2: 8/12 - 38/42 Hz
1			3: 6/8 - 38/42 Hz
1			4: 3/5 - 28/30 Hz 5: 2/5 - 18/20 U-
1		Time Difinition	5: 5/5 = 18/20 HZ CMP100: 4-500-1000-1500-10000 msee
1		intersection	CMP350: 4-250-2000-3000-10000 msec
1			CMP100: 4-500-2000-2500-10000 msec
1			CMP1400: 4-500-1500-2000-10000 msec
			CMP1500: 4-250-1000-1500-10000 msec
24	Depth Conversion	Final Datum	500 m
1	1	Model	Smoothed TraveltimeTomography Velocity

i) フォーマット変換およびデータ編集(Format Conversion and Trace Edit)

フィールドユニットに記録された原記録(GSR Original Format)について、SuperX(JGI Internal Format)フォーマットへ変換を行った。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、バイブ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。また、バイブロサイス発震記録は発震点番号の昇順にしたがって抽出した。下記に示す様に、反射法データ解析結果には、本調査で取得された全てのバイブロサイス発震記録 746 点の寄与が含まれている。

標準発震点	VP.1.0	~	730.0 (730 点)
バイブロサイス集中発震点	SP-1V	~	SP16V(16 点)

ii) トレースヘッダーへの測線情報の入力(Geometry Application)

SuperXトレースヘッダーに関して、発震点、受振点及び各 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 準標高面は平均海水面位置に設定した。また、CMP 重合測線は下記の基準によって決定し た。

CMP 間隔	25.0m
CMP 範囲	1 - 2745
重合測線からの最大偏倚制限	なし

図 15 に受振点及び発震点位置図及び重合測線位置を示した。CMP の各種情報(重合数分 布、オフセット距離分布、アジマス分布、標高および偏差分布)を図 16~17 に示す。

iii) 屈折波初動解析(Refraction Analysis)

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2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、 $s_{k,0}, \delta_k, \Delta_{ijk}$ 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 ('Generalized Linear Inverse Method')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、Tm は'Time-Term'、Vw は表層速度、Vsw は表層基底層速度である。図 18 に 改良型タイムターム法による解析結果を示す。 iv) 最小位相変換(Minimum Phase Conversion)

バイブロサイス発震記録については、零位相であるバイブ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 (First-break Suppression)

強振幅の屈折波初動部分を抑制する目的で、以下のパラメータによる初動抑制処理を実施した。

vi) リニアノイズ抑制処理 (Linear Noise Suppression)

発震記録上に混入する屈折初動の繰り返しを抑制し、以降の速度解析における読み取り 精度の向上を図ると共に、重合処理における重合効果の向上を図る目的から、線形ラドン フィルターを適用した。

vii) ランダムノイズ抑制処理(Random Noise Suppression)

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、周波 数-空間領域の予測フィルターを適用した。

viii) コヒーレントノイズ抑制処理 (Suppression of Coherent Noise)

発震記録に含まれる表面波やその他の線形ノイズを抑制し、以降のデコンボリューション処理における反射波スペクトル推定の誤差の軽減を図ると共に、重合処理における重合効果の向上を図る目的で、発震記録において周波数-空間領域の速度フィルターを適用した。

ix) 共通反射点編集(Common Midpoint Sorting)

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。

x)浮動基準面に対する静補正(Static Corrections to FDP)

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 Te: 観測面を一定基準面へ補正する。

$$Te = - (He - Hb) / Vec$$

・表層補正 Tw:低速度の表層構造変化による影響を除去する。

Tw = Sd * (-1/Vw + 1/Vsw)

ここに、 He: 発震点あるいは受振点標高(m)

Hb:基準面 [海抜*m]

Sd:表層厚(m)

Vw:表層速度(m/s)

Vsw:表層基底層速度(m/s)

Vec:標高補正速度(2,000m/s)

である。本処理では標高補正速度(Vec)として下記の基準面補正速度(Vc)と同じ値を用い

た。

表層補正値は、前述iii)の屈折波初動解析による結果を用いて計算された。本測線の基準 面(Datum)は平均海水面位置に設定されたが、絶対値の大きい標高補正値の適用を回避 するため、CDPに近接する受振点標高を基に長波長成分を抽出して CMP アンサンブル上 において平均標高を定義し、これを浮動基準面(FDP:Floating Datum Plane)とした。こ の FDP から基準面までの基準面補正量 Td は、下記のように定義される。

Td = -2.0 * (Hf - Hb) / Vc

ここに、

Hf:浮動基準面 (FDP)

Vc:基準面補正速度(2,000 m/sec)a

である。この FDP の計算には CMP 内のオフセット距離 0-500 m の比較的近いトレー スが用いられた。

x i)振幅補償(Gain Recovery)

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。

x ii) デコンボリューション (Deconvolution)

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。

x iii) 重合速度解析 (Stacking Velocity Analysis)

以下に示す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。

解析点間隔 : 1,000 m
解析速度数 : 68(1,500 - 6,400 m/sec)

x iv) NMO 補正 (Normal Moveout Corrections)

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。

x v) $z \rightarrow \downarrow$ (Outside Mute after NMO)

NMO 補正に伴う波形の伸長及び'Far'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。

x vi) 重合前振幅調整(Amplitude Conditioning before Stacking)

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。

x vii) 残差静補正(Residual Static Corrections)

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。

x viii) 共通反射点重合処理(CMP Stacking)

NMO 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。

x ix) 基準面補正 (Datum Corrections)

浮動基準面から基準面への時間補正を適用した。

x x)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。

x x i)周波数--波数領域コヒーレンシーフィルター(F-K Coherency Filter) 周波数-波数領域において Powering を適用して射波の連続性を向上させる F-K コヒー レンシーフィルター処理を実施した。

x x ii) 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を用いた。また、90~70%の時間 可変のスケーリングを適用した。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。

x x iii)時間-空間可変帯域通過フィルター(Space-Time Variant Band Pass Filter) 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。

x x iv) 深度変換(Depth Conversion)

屈折トモグラフィ解析により推定された区間速度分布から、浮動基準面を起点とする鉛 直下向きの平均速度を計算し、時間及び空間方向に平滑化した平均速度分布を用い て、'Vertical Stretch' 法による深度変換を実施した。

以上の処理ステップを逐次経ることによって、図 19 の CMP 重合処理断面図、図 20 の 時間マイグレーション断面図が得られた。また、これらの重合記録及び時間マイグレーシ ョン記録を用いて深度変換を実施した結果を図 21 に示した。



図 15 調査測線位置図【受振点、発震点及び CMP 重合測線】国土地理院 20 万分の 1 地 勢図札幌・夕張岳・留萌・旭川に加筆。



図 16 CMP 各種情報[1] (重合数分布、オフセットダイアグラム、発震レイアウト)



図 17 CMP 各種情報[2] (アジマス分布、重合測線からの偏差、標高分布)



図 18 推定された表層構造図



図 19 CMP 重合時間断面図。測線図は地質調査所 20 万分の1 地質図幅『札幌』¹⁹⁾『夕 張岳』²⁰⁾ に加筆。



図 20 重合後時間マイグレーション断面図。測線図は地質調査所 20 万分の1 地質図幅 『札幌』¹⁹⁾『夕張岳』²⁰⁾ に加筆。



図 21 重合後時間マイグレーション深度断面図。測線図は地質調査所 20 万分の1 地質
 図幅『札幌』¹⁹⁾『夕張岳』²⁰⁾に加筆。

b) 特殊解析(CRS 処理)

特殊解析処理として、マルチディップ型 CRS 法(MDRS 法)を採用した。入力とする データは a) x ii)の処理適用後の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 22 に MDRS 解析技術概念図を示す。また、特 殊解析に関するパラメーター覧を表 3 に示す。



図 22 MDRS 解析技術解説図

表 3 反射法解析パラメーター覧

	Survey Name 平成29年度 石狩平野橫断地殼構造調查				
	Line Name		ISKR2017		
No.	Process	Parameters			
1	Super Gather Generation	super gather range	81 CMP		
2	Constant Velocity Scan	Semblance Window	36 msec		
		Stretch Limit	1.414		
3	MDRS SCAN	Offset (CMPs) :	7, 81		
		Surface Velocity :	1500 m/sec		
		Number of Dips :	201		
		Dip interval :	12 msec/km		
		Minimum N-Wave Curvature :	-0.8		
	Maximum N-Wave Curvature :		1.2		
		Semblance Window :	36 msec		
		Stretch Limit :	1.414		
		Guide Velocity :	Stacking Velocity		
		Low Velocity Guide Scale :	75 %		
		High Velocity Guide Scale :	150 %		
4	MDRS Picking	Dip range	-700 ~ 700 msec/km		
5	MDRS Stack	Method	1st - 2nd Highest Semblance Point		

i) スーパーギャザーの作成 (Super Gather Generation)

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(MDRS Scan)

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、傾斜の範囲を 201 分割し、それぞれにおいて CRS スキャンを実施した。 傾斜範囲は、-120 msec/km から+120 msec/km(12 msec/km 間隔)とした。求まった 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、それぞれの傾斜範囲にお いて重合処理を行った。この手順により、傾斜の範囲毎に 1 枚ずつ、合計 201 枚のセクシ ョンを作成した。

iv) MDRS ピッキング (MDRS Picking)

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。これに際して、並べ替えに用いる傾斜範囲に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(MDRS Stack)

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、a)節の反射法データ解析と同様のパラメータ を適用した。以上の処理ステップを逐次経ることによって、図 22 の MDRS 重合処理断面 図、図 23 の MDRS 重合処理時間マイグレーション断面図が得られた。また、これらの重 合記録及び時間マイグレーション記録を用いて深度変換を実施した結果を図 25 に示した。



図 23 MDRS 重合処理時間断面図。測線図は地質調査所 20 万分の1 地質図幅『札幌』 ¹⁹⁾『夕張岳』²⁰⁾に加筆。



図 24 MDRS 重合後時間マイグレーション断面図。測線図は地質調査所 20 万分の 1 地 質図幅『札幌』¹⁹⁾『夕張岳』²⁰⁾ に加筆。



- 図 25 MDRS 重合後時間マイグレーション深度断面図。測線図は地質調査所 20 万分の 1 地質図幅『札幌』¹⁹⁾『夕張岳』²⁰⁾ に加筆。
 - c) 屈折法データ解析

本節では、屈折法データを用いた P 波トモグラフィックインバージョンによる屈折法デ ータ解析内容について記述する。図 26 に屈折法データ処理フローを示す。また、屈折法解 析に関するパラメーター覧を表 4 に示す。



図 26 屈折法データ処理フロー

表 4 屈折法処理パラメーター覧

Survey Name		平成29年度 石狩平野横断地殼構造調查		
Line Name		ISKR2017		
	Analysis	陸城屈折法データ解析	海陸統合屈折法データ解析	
Inversion Parameter	Method	Turning Ray Tomography	Turning Ray Tomography	
Inversion Algorithm		Simultaneous Iterative Reconstruction Method	Simultaneous Iterative Reconstruction Method	
	Traveltime Calculation	Linear Traveltime Interpolation	Linear Traveltime Interpolation	
	Grid Size in Lateral Direction	50m	250m	
	Grid Size in Vertical Direction	50m	125m	
	# of Grids in Lateral Direction	1365	833	
	# of Grids in Vertical Direction	331	560	
	# of Segments along Lateral Cell Boundary	20	20	
# of Segments along Vertical Cell Boundary Effective Range from center location of raypath # of Iteration Threshold for Slowness Correction		20	20	
		100m	1000m	
		15	10	
		30%	30%	
	Allowance for Velocity Reversal	Allowed	Allowed	
	Smoothing in Lateral Direction	17 grids	11 grids	
	Smoothing in Vertical Direction	9 grids	5 grids	
Initial Model Definition	Condition of Model Generation	Linear Gradient Models at Random	Linear Gradient Models at Random	
	# of Models	100	100	
	速度設定範囲	Surface : 1500 - 3000m/s	Surface : 1500 - 3000m/s	
		at 2500m : 2400 - 4500m/s	at 16000m : 4000 · 6500m/s	
1		at 5000m : 3500 - 5500m/s		
		at 16000m : 4000 - 6500m/s		

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基本的に、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²¹⁾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提供できる。 ii) 陸域屈折法データ解析 解析条件

使用した発震点は屈折法発震(17点)および反射法発震(730点)である。初動の読み 取りは屈折法発震においては受発震オフセット 20km を超えて初動走時が得られたが、反 射法発振においてはオフセット 2~15km 程度までの初動が得られたデータを含む。図 27 に読み取った初動走時分布を示す。計算領域は発震点・受振点を含む 2 次元断面において、 水平方向には重合測線を直線 66,250 m、鉛直方向には標高 500 m から深さ 15,500 m ま での 16,000 m とした。投影測線を図 28 に示す。メッシュサイズは水平方向に 200 m、鉛 直方向に 100 m とした。また速度の修正における更新対象格子の範囲は、波線から 100 m までの距離とした。

初期速度構造モデルは、ランダムな条件での 100 ケースについて構築し、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 1,500~3,000 m/s、深度 2,500 m で 2,500~4,500 m/s、深度 5,000 m で 3,500~5,500 m/s、深度 16,000 m で 4,000~ 6,500 m/s をランダムに選択した。初期モデルの分布を図 29 左図に示す。

構築した異なる初期構造モデルに対して、それぞれ反復回数15回とした。反復回数の設 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。

iii)陸域屈折法データの解析結果

100 ケースの初期速度構造モデルから得られた結果の平均をとって、トモグラフィック インバージョンによる最終的な速度分布とした。図 29 右図にトモグラフィ解析における 走時残差の収束の様子を示す。全ての初期モデルに対して走時誤差が収束していることを 確認できる。得られた最終的な速度分布および各トモグラフィックインバージョン結果か ら計算される標準偏差分布・平均波線密度を図 30 に示す。なお、同図における速度分布表 示は、トモグラフィ解析投影測線から反射法 CMP 測線に再投影したものであり、波線の 存在する部分にのみ表示した。



図 27 陸域屈折初動読み取り図



図 28 陸域トモグラフィ投影測線。国土地理院 20 万分の1 地勢図札幌・夕張岳・留 萌・旭川に加筆。



図 29 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



図 30 陸域トモグラフィ解析結果(速度分布、標準偏差、波線密度)

iv)海陸統合屈折法データの解析条件

使用した発震点は陸域の屈折法発震(17点)および反射法発震(730点)と海上発震点(1,033点)である。初動の読み取りは屈折法発震においては受発震オフセット20kmを超える記録で走時が得られたが、反射法発振においてはオフセット2~15km程度までの初動が得られたデータを含む。図 31 に読み取った初動走時分布を示す。計算領域は発震点・受振点を含む2次元断面において、水平方向には重合測線を直線66,250m、鉛直方向には標高500mから深さ15,500mまでの16,000mとした。投影測線を図32に示す。メッシュサイズは水平方向に200m、鉛直方向に100mとした。また速度の修正における更新対象格子の範囲は、波線から100mまでの距離とした。

初期速度構造モデルは、ランダムな条件での 100 ケースについて構築し、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 1,500~3,000 m/s、深度 2,500 m で 2,500~4,500 m/s、深度 5,000 m で 3,500~5,500 m/s、深度 16,000 m で 4,000~ 6,500 m/s をランダムに選択した。初期モデルの分布を図 33 左図に示す。

構築した異なる初期構造モデルに対して、それぞれ反復回数15回とした。反復回数の設 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。 v)海陸統合屈折法データの解析結果

100 ケースの初期速度構造モデルから得られた結果の平均をとって、トモグラフィック インバージョンによる最終的な速度分布とした。図 33 右図にトモグラフィ解析における 走時残差の収束の様子を示す。全ての初期モデルに対して走時誤差が収束していることを 確認できる。得られた最終的な速度分布および各トモグラフィックインバージョン結果か ら計算される標準偏差分布・平均波線密度を図 34 に示す。



図 31 海陸統合屈折法データ解析 屈折初動読み取り図



図 32 海陸統合屈折法データ解析 トモグラフィ投影測線



図 33 海陸統合屈折法データ解析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









図 34 海陸統合屈折法データ解析トモグラフィ解析結果 (速度分布、標準偏差、波線密度)

4) 地質学的解釈

得られた重合後マイグレーション処理後の深度変換断面と、MDRS 断面、屈折トモグラ フィ解析によって得られた P 波速度構造断面について、公表されているボーリング・反射・ 地表地質などのデータを基に、地質学的解釈を行う。測線西部の日高衝突帯の地質構造解 釈については、石油公団の基礎物理探査が実施され、これらを用いた地質構造解釈が公表 されている^{9,22,23)}。今回の調査によって、深部までの速度構造が判明したこともあり、よ り現実的な深度変換断面が明らかにできたが、正確な解釈のためには詳細な地表地質・既 存の地下地質データとの対比・検討が必要であるので、ここでは断層面の深部形状など、 暫定的な地質解釈にとどめる。

測線周辺では、石油公団の基礎試錐「南幌」²⁴⁾「石狩湾」²⁵⁾「夕張」²⁶⁾が実施されてい る。基礎試錐の成果は、公表論文に記述されている^{9,11,13,27,28,29,30)}。周辺地域には、古 第三系から第四系までの地層が分布する(図 35)。それらの層序区分については、日本の 石油・天然ガス資源編集委員会(1992)³¹⁾、岡村・高野(2010)³²⁾・栗田(2010)³³⁾・尾 崎・小松原(2014)¹⁷⁾吉田ほか(2007)²⁹⁾などに記載されている。ここでは、図 36 に 示したように基礎試錐の層序区分をもとに、それらの地層境界に層準を設定し、地質解釈 断面に記述した(図 37)。



図 35 調査測線周辺地質図【受振点、発震点及び CMP 重合測線】地質調査所 20 万分の 1 地質図幅『札幌』¹⁹⁾『夕張岳』²⁰⁾ に加筆。



図 36 石狩平野横断反射法地震探査断面の地質学的解釈で使用した基礎試錐「石狩湾」 と「南幌」の層序と使用した層準(図 37 参照)。

行った地質学的な解釈断面を図 37 に示す。ここでは、深度変換断面に屈折トモグラフ ィによって求めた速度構造(図 30)を重ねて示した。屈折トモグラフィによる速度構造を 見ると、P 波速度 5.4 km/s の層は測線中央部で凸型の形状を示し、西側に低下する。日高 衝突帯西部では厚い堆積岩が複雑な短縮変形を示し、全体としては前縁盆地(foreland basin)型の形状を示す。こうした速度構造は、Iwasaki et al. (2004)⁸⁾による日高山脈南 部で得られている速度構造とよく類似する。本測線東部の日高衝突帯西部では、速度構造 の逆転(図 30)や東に傾斜する反射面(例えば図 23)が見られるが、連続性の良好な反射 面に乏しい。



図 37 反射法地震探査深度変換断面の地質学的解釈。屈折トモグラフィによる速度構造 (図 30)を重ね合わせて表示。層準と地層名の略号は、図 35 参照

測線中央部から西部の石狩平野下では、連続性の良好な反射面が地下 5~6 km まで分布 している。石狩平野下の反射断面と対比可能なボーリングデータとしては基礎試錐「南幌」 がある^{24,27,34)}。基礎試錐「南幌」において滝上層基底の層準は、東方には馬追丘陵下まで ほぼ水平に追跡される。西方には、野幌背斜を経てさらに西方の向斜部まで追跡される。 より西方へは反射面が不明瞭となる。基礎試錐「南幌」の西方 CMP1250 付近には、P 波 速度 5.4 km/s の上面が測線を通じて最も浅く深さ 4 km に位置する。CMP800-1500 間で 滝上層基底の層準から P 波速度 5.4 km/s の速度周辺の区間は、より浅い部分に比べると、 不明瞭なものの連続性のいい反射面が分布し、速度構造と合わせて堆積岩である可能性が 高い。また、P波速度 5.4 km/s 層の上面付近には、振幅の大きな反射面群が位置しており、 石狩層群に相当すると判断した。この領域は、野幌背斜の東翼下で最も厚く、東傾斜の断 層の正断層運動に伴って形成された可能性が大きい。基礎試錐「南幌」では萌別・鵜川層 が荷菜層の上位に重なるが、野幌背斜の層厚変化では、萌別層より以降の地層が背斜部で 層厚の減少が見られ、萌別層堆積時以降に背斜の成長が開始された可能性が高い。以下の 地層の層厚変化と、野幌背斜を形成させた逆断層運動を合わせて判断すると、正断層から 逆断層への反転により野幌背斜が形成されたものと考えられる。この断層の見かけ上の傾 斜は、東に約30度となる。断層モデルの構築には、三次元的な構造の検討が必要である。

CDP450付近には、太美背斜が位置する。この背斜の西側には CDP175付近を軸跡とす る海岸背斜が分布する。この間では、層準の対比を高い精度で行うための、反射断面がえ られていない。断層などの可能性もあるため、基礎試錐「南幌」からの層準を追跡するこ とが困難であった。このため、基礎試錐「石狩湾」から得られている層準を追跡すること とした。基礎試錐「石狩湾」^{25,29)}は測線の西方延長約7kmに位置する(図 35)。石油資 源開発(株)では資源探査のために実施した石狩湾内で実施した反射法地震探査の未公表 資料がある。本測線での層位学的な対比を行うために、未公表資料を用いて基礎試錐「石 狩湾」の層準を海岸線付近まで延長させた。本測線西端部での層準の解釈は、この層準を 東側に延長させて行った。基礎試錐「南幌」の層準を直接、基礎試錐「石狩湾」と対比す ることは困難であるため、異なる層準として表記した(図 36)。

太美背斜の東翼において、荷菜層の層厚が、背斜軸部に向かって薄化しており、荷菜層 堆積時から背斜が成長しているものと判断される。この層厚変化から判断して、褶曲の形 成時期は野幌背斜よりも有意に早い。太美背斜の軸部の地下において、地下 4~6kmの深 度において東翼下に発達する反射面が西方に消失することから、東傾斜の断層を推定した。 太美背斜は西翼が急傾斜の非対称褶曲であり、東傾斜の逆断層に関連した断層関連褶曲と いう推定と調和的である。太美背斜は、野幌背斜から派生するデタッチメントにより連続 して形成されたと推定することも可能である。しかしながら、太美背斜の形成は、野幌背 斜の成長に先立っていた可能性が高く、それぞれが独立した断層運動に伴う断層関連褶曲 と推定される。太美背斜の西方には海岸背斜が形成されている。ここでは、西翼急傾斜の 形状と褶曲構成層が浅部に限られることから、太美背斜に関連した褶曲を推定した。今後、 平面的な地質構造の検討が必要である。

石狩低地東縁断層帯は、浅部では馬追丘陵の周辺で複雑な形状を示すが、基本的には東 傾斜のスラストであり、石油公団資料に基づく従来の見解や屈折法による速度構造解析か ら得られている構造と同様である。日高衝突帯西部の地質構造についての本断面について の詳細な解釈は、今後、破線追跡法による構造解析も予定しており、今後の課題としたい。 図 37 には、産業総合研究所(2007)³⁰⁾による石油公団が取得した反射法地震探査断面に 基づく地質構造解釈を暫定的に示した。

(c) 結論ならびに今後の課題

反射法地震探査では、発震周波数を低周波側に寄せたことにより、石狩平野下でも 地下8kmに及ぶ深度までの反射イメージが得られた。また、固定展開による海陸統合 探査により、深部までの速度構造が明らかになった。

得られた反射法地震探査断面は、日高衝突帯西部と、石狩平野部分では反射面のパ ターンが大きく異なる。日高衝突帯西部は、短縮量が著しい褶曲・断層帯の地質構造を 反映して、反射面の連続性に乏しく、東傾斜のスラスト群を伴う、速度の逆転構造が見 られる。高速度層の欠如から基本的にはシンスキン(thin-skinned)型の変形を示して いる。日高衝突帯の前縁断層は、馬追丘陵西縁の石狩低地東縁断層帯であり、深部の形 状は東に緩く傾斜する反射面から推定される。先端部では深さ3kmに伏在し、楔状の 形状を示す。

石狩平野下では連続性の良好な反射面が深さ 4~6 km まで分布し、東から野幌背斜、 太美背斜、海岸背斜に対応した褶曲が見られる。野幌背斜の西翼には地下 5~8 km で 東傾斜の断層が推定される。この断層の上盤側には西側に層厚が増化する堆積層が分 布し、見かけ上、古第三紀の正断層活動にともなう成長層と推定される。この正断層 は、反射面のパターンから荷菜層堆積時以降に逆断層として反転したと推定される。 野幌背斜の西方に位置する太美背斜についても、背斜下に東傾斜の断層が存在し、正 断層の反転構造を示している。日高衝突帯西部の変形様式とは異なり、石狩平野下の 構造は、シックスキン (thick-skinned)型を示しており、日高衝突帯西部と同様の東 傾斜の逆断層から構成されているが、それぞれ独立したものである。石狩低地東縁断 層帯、野幌背斜、太美背斜はいずれも断層関連褶曲であり、本探査によって震源断層の 断面形状が明らかになった。

今回は、屈折トモグラフィ法による速度解析を実施したが、今後、明瞭な速度構造境界 を把握するために、破線追跡法による速度構造解析を実施し、日高衝突帯西部の断層構造・ 地質構造を把握する予定である。また、平面的に平野部の地下地質データを検討し、断層 モデルの構築に資する資料を収集する。

(d) 引用文献

- 1) 日本列島の地質編集委員会編:日本列島の地質(理科年表読本 コンピューターグラフィックス), 丸善, 1996.
- 2) 在田一則:日高衝突帯(日高山脈)の地質と岩石.日本地質学会編 日本地質地方誌1 「北海道地方」,115-118,2010.
- 3) 小松正幸:北海道中軸部の構造帯-その構造,性格および構造運動-.地質学論集,25, 137-155,1985.
- 4) 地震調査研究推進本部 地震調査委員会:石狩低地東縁断層帯の評価(一部改訂),34p., 2010.

- 5) Den, N. and Hotta, H.: Seismic refraction and reflection evidence supporting plate tectonics in Hokkaido. Pap. Meteorol. Geophys. 24, 31-54, 1973.
- 6) Tsumura, N., Ikawa, H., Ikawa, T., Shinohara, M., Ito, T., Arita, K., Moriya, T., Kimura, G. and Ikawa, T.: Delamination-wedge structure beneath the Hidaka Collision Zone, Central Hokkaido, Japan inferred from seismic reflection profiling. Geophys. Res. Lett., 26, 1057-1060, 1999.
- 7) Ito, T.: Active faulting, lower crustal delamination and ongoing Hidaka arc-arc collision, Hokkaido, Japan. In Fujinawa, Y. and Yoshida, Y., eds., Seismotectonics in Convergent Plate Boundary, Terrapub, 219-224, 2002.
- 8) Iwasaki, T., Adachi, K., Moriya, T., Miyamachi, H., Matsushima, T., Miyashita, K., Takeda, T., Taira, T., Yamada, T. and Ohtake, K.: Upper and middle crustal deformation of an arc-arc collision across Hokkaido, Japan, inferred from seismic refraction/wide -angle reflection experiments. Tectonophysics, 388, 59-73, 2004,
- 9) 栗田裕司, 横井悟: 中央北海道南部における新生代テクトニクスの変遷と油田構造形成. 石油技術協会誌, 65, 58-70, 2000.
- 10) Kato, N., Sato, H., Orito, M., Hirakawa, K., Ikeda, Y. and Ito,T.: Has the plate boundary shifted from the central Hokkaido to the eastern part of the Sea of Japan? Techtonophysics, 388, 75-84, 2004.
- 11) 国安稔,山田泰広:中央北海道南部地域の深部構造.石油技術協会誌, 69, 131-144, 2004.
- 12)日本地質学会編:日本地質地方誌1 北海道地方.631p.,2010.
- 13) 北海道鉱業振興委員会編:北海道の石油・天然ガス資源・その探査と開発(昭和 52 年 ~63 年).北海道商工労働観光部資源エネルギー課,158p.,1990.
- 14)山本明彦:石狩平野とその周辺の重力異常アトラス.北海道大学地球物理学研究報告,
 66, 33-62, 2003.
- 15) 産業技術総合研究所地質調査総合センター:日本重力データベース. 産業技術総合研究 所地質調査総合センター, 2013.
- 16) 岡孝雄:北海道とその周辺海域のネオテクトニクスに関する諸問題一付, 札幌付近での 活断層の存在と地裳発生についての考察加藤誠教授退官記念論文集, 427-449, 1997.
- 17)尾崎正紀・小松原琢:石狩低地帯及び周辺地域の 20 万分の 1 陸域地質図及び説明書 海陸シームレス地質情報集,石狩低地帯南部沿岸域,海陸シームレス地質図 S-4, 1-28, 2014.
- 18)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, 2002.
- 19) 石田正夫, 曽屋龍典, 須田芳朗: 20万分の1地質図幅「札幌」, 地質調査所, 1980.
- 20) 中川充,渡辺寧,紀藤典夫,酒井彰,駒澤正夫,広島俊男: 20 万分の1 地質図幅「夕 張岳」. 地質調査所, 1980.
- 21) 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ー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,63,4,345-356,2010.

- 22) 伊藤谷生:日高衝突帯ー前緑摺曲・衝上断層帯の地殻構造.石油技術協会誌,65,103-109,2000.
- 23) 香東卓郎, 菊池伸輔, 伊藤谷生: 日高衝突帯前緑褐曲・衝上断層帯の地下構造: 石油公 団日高測線(H91-2, 3) 反射記録の再処理と再解釈. 東京大学地震研究所彙報, 77, 97-109, 2002.
- 24)石油開発公団:昭和48年度天然ガス基礎調査 基礎試錐「南幌」調査報告書, 35p, 1973.
- 25) 石油公団:平成6年度国内石油・天然ガス基礎調査 基礎試錐「石狩湾」調査報告書, 118p., 1995.
- 26) 石油公団: 平成9年度, 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎試錐「夕張」調査報告書, 91p., 1999.
- 27) 嵯峨山積:北海道石狩平野の深層掘削井から採取した新第三紀堆積岩の地質年代,北海 道立地質研究所報告,80,1-6,2009.
- 28)米山真由子,岡村聡,八東翔,前田卓哉,今村武志,前田仁一郎:中央北海道南部の後 期漸新世火山岩の岩石学的検討-背弧拡大の初期火山活動-,岩石鉱物科学,40,153-173, 2011.
- 29) 吉田邦一,吉見雅行,鈴木晴彦,森野道夫,滝沢文教,関口春子,堀川晴央:長周期地震動計算のための石狩平野および勇払平野の三次元堆積盆地構造モデル,活断層・古地震研究報告,7,1-29,2007.
- 30) 産業技術総合研究所:石狩低地東縁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. H18-8, 35p., 2007.
- 31) 改訂版「日本の石油・天然ガス資源」編集委員会:改訂版「日本の石油・天然ガス資源」, 天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会, 525p.,1992.
- 32) 岡村聡, 高野修: 樺戸山地西部地域, 日本地方地質誌 北海道地方, 193-196, 2010.
- 33) 栗田裕司:夕張·馬追地域,日本地方地質誌 北海道地方,200-203,2010.
- 34)藤岡展价, 佐賀肇: 基礎試錐「南幌」における滝の上層と幌内層群の境界, 石油技術協会誌, 45, 11-19, 1980.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
Tatsuya Ishiyama,	Structures and active	Tectonophysics	平成 29 年
Hiroshi Sato, Naoko	tectonics of		
Kato, Shin Koshiya,	compressionally		
Susumu Abe, Kazuya	reactivated back-arc failed		
Shiraishi, Makoto	rift across the Toyama		
Matsubara.	trough in the Sea of		
	Japan, revealed by		
	multiscale seismic		
	profiling. (論文発表)		
Tatsuya Ishiyama,	Geometry and slip rates of	Tectonophysics	平成 29 年
Naoko Kato, Hiroshi	active blind thrusts in a		
Sato, Shin Koshiya,	reactivated back-arc rift		
Shigeru Toda, Kenta	using shallow seismic		
Kobayashi.	imaging: Toyama basin,		
	central Japan.		
	(論文発表)		
池口直毅, 佐藤比呂志	北部フォッサマグナ地域に	石油技術協会誌	平成 29 年
	おける後期新生界の褶曲-断		
	層帯の構造と形成史		
	(論文発表)		
Sato, H., T.	The origin of seismogenic	The 12 th	平成 29 年
Ishiyama, N. Kato,	source faults in the back-	Workshop of the	10月30日
S. Abe, S. Kawasaki,	arc of the Japanese island	International	
A. Hashima, A. V.	arcs and their reactivation	Lithosphere	
Horne, J.	(口頭発表)	Program Task	
Claringbould, M.		Force VI	
Matsubara		Sedimentary	
		Basins	
		(キプロス)	
Ishiyama, T., H.	Styles of active	The 12 th	平成 29 年
Sato, N. Kato, S.	deformation and	Workshop of the	10月30日
Koshiya, M.	earthquake behavior of	International	
Matsubara, S. Abe	reactivated failed rift:	Lithosphere	
	examples from the Toyama	Program Task	
	trough, the Sea of Japan	Force VI	
	back-arc basins	Sedimentary	
	(口頭発表)	Basins	

		(キプロス)	
Tatsuya Ishiyama,	Transfer fault earthquake	European	平成 29 年
Naoko Kato, Hiroshi	in compressionally	Geosciences Union	4月25日
Sato, and Shin	reactivated back-arc failed	General Assembly	
Koshiya	rift: 1948 Fukui	2017(ウィーン)	
	earthquake (M7.1), Japan.		
	(口頭発表)		
Hiroshi Sato,	Onshore-offshore	European	平成 29 年
Tatsuya Ishiyama,	seismic reflection	Geosciences Union	4月28日
Naoko Kato,	profiling across the	General Assembly	
Shigeru Toda,	southern margin of the	2017(ウィーン)	
Shinji Kawasaki,	Sea of Japan: back-arc		
Akira Fujiwara,	opening, shortening and		
Yasuhisa Tanaka,	active strike-slip		
and Susumu Abe.	deformation.		
	(ポスター発表)		
Naoko Kato, Hiroshi	High-resolution seismic	European	平成 29 年
Sato, and Tatsuya	profiles of the active	Geosciences Union	4月25日
Ishiyama.	wedge thrusts in the	General Assembly	
	Toyama basin, central	2017(ウィーン)	
	Japan. (ポスター発表)		
Johan Claringbould,	Structural evolution of the	日本地球惑星科学連	平成 29 年
Hiroshi Sato,	Tsushima Strait, Southern	合 2017 年大会	5月23日
Tatsuya Ishiyama,	Sea of Japan, and its role	(千葉市)	
Naoko Kato, Shinji	in active faulting.		
Kawasaki, Susumu	(口頭発表)		
Abe.			
佐藤比呂志, 石山達	2016年鳥取県中部地震震源	日本地球惑星科学連	平成 29 年
也, 加藤直子, 戸田	域を横切る倉吉・倉吉沖海陸	合 2017 年大会	5月24日
茂, 川崎慎治, 阿部	統合地殼構造探查	(千葉市)	
進,藤原明,田中康	(口頭発表)		
久, Claringbould			
Johan, Van Horne			
Anne.			
Anne Van Horne,	Strike-slip reactivation of	日本地球惑星科学連	平成 29 年
Judith Hubbard,	regional scale thrust	合 2017 年大会	5月23日
Hiroshi Sato,	faults with moderate dips.	(千葉市)	
Tetsuya Takeda and	(ポスター発表)		
Takaya Iwasaki			

新部貴夫, 柾谷将吾,	陸上難地域地震探査記録に	日本地球惑星科学連	平成 29 年
阿部進,松浦紳二,佐	対するフルウェーブインバ	合 2017 年大会	5月25日
藤比呂志, 石山達也	ージョン適用とイメージン	(千葉市)	
	グ処理の高精度化		
	(口頭発表)		
佐藤比呂志, 石山達	2016年倉吉-倉吉沖海陸統	石油技術協会春季講	平成 29 年
也, 加藤直子, 戸田	合地殻構造探查	演会(東京都)	6月15日
茂,川崎慎治,藤原	(口頭発表)		
明,田中康久,阿部進			
石山達也, 佐藤比呂	背弧リフト系の構造に支配	日本地質学会第124	平成 29 年
志, 加藤直子, 越谷	された北陸地域の活構造と	年学術大会	9月18日
信, 松原誠, 阿部進	地震発生様式 (口頭発表)	(松山市)	

(f) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウエア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 30 年度業務計画案

北海道南西沖から奥尻海脚を横断する約250kmの海域区間(サブサブテーマ2.2.1参照)と檜山郡江差町海岸付近から、亀田郡七飯町に至る投影距離約50kmの陸域区間において、海陸統合地殻構造探査を行い、日本海盆から渡島半島にいたる地殻構造の特性と、活断層の深部形状を明らかにする。函館西縁断層帯については、詳細な断層形状を明らかにするために、測線長約8kmの高分解能反射法地震探査を実施する(図38)。



図 38 渡島半島横断地殻構造探査測線図。 赤実線:探査測線、黒実線:活断層(産業技術総合研究所 活断層データベースによる)