

## 幌延地域における地質環境の長期安定性に関する研究 ー長期安定性の評価・予測における地域特性の考慮ー

新里忠史\*1 安江健一\*1

本論では、幌延深地層研究センターで実施している地質環境の長期安定性に関する研究について、文献および現地調査の結果を示す。幌延地域は、新第三紀から第四紀にかけての堆積層が広く分布する天北堆積盆に位置する。年代層序学的検討から、天北堆積盆内における堆積域は東部から西部へ移動したことが推定された。また、微小地震の震源、活構造、および第四系の分布は、現在地殻変動の活発な地域が幌延地域の西部であることを示す。加えて、幌延地域とその周辺において実施された反射法地震探査の結果を踏まえると、幌延地域西部では、約 300～200 万年前から現在に至るまで、東から漸次西へ向かって成長する fold-and-thrust 帯をなす地質構造が発達してきたと推定される。幌延地域に広く分布する海成段丘面を利用して解析をおこなった結果、幌延地域西部に位置するサロベツ背斜では、軸部における旧汀線高度が翼部におけるそれよりも高い。また、MIS 1 と MIS 7 の海陸分布を比較した場合、MIS 1 における陸域は幌延地域の活褶曲分布とほぼ一致する。このため、幌延地域において地質環境の変化を評価・予測するに当たっては、約 300～200 万年前以降の期間を対象として、地殻変動場の移動および活断層や活褶曲など活構造の履歴と地殻変動場の移動、およびそれらの影響等に関する資料を十分検討する必要がある。

**Key words :** 地層処分, 地質環境の長期安定性, 地殻変動の変遷, 隆起, 旧汀線の移動, 海成段丘, fold-and-thrust 帯

This article provides the preliminary results of literature and field survey in terms of the long-term stability in and around the Horonobe area. The Horonobe area is situated in the Tenpoku Basin, and is dominated by the Neogene to Quaternary sedimentary sequences. Based on the time-stratigraphy and sedimentary analysis, depositional area has migrated from east to west in the basin. The distribution of hypocenters for micro-earthquake, geologic structures, and the Quaternary sediments indicate that present-day activity has been localized with the western part of the Horonobe area. In addition, the seismic reflection profiles of the Horonobe area show the growth structures of the fold-and-thrust belt of central Hokkaido suggesting that the ongoing-tectonics (neotectonics) in the study area has begun in three to two million years ago.

The Horonobe area has widespread distribution of the marine terrace deposits, which are correlated to the marine oxygen isotope stages (MIS) 9 through 5c. The elevation of these marine-terrace surfaces on axial part is higher than that of on limb in the Sarobetsu Anticline at the western part of the Horonobe area. The former shoreline of MIS 1 proceeded ca. 14 km away from that of MIS 7 although there is no great difference in global-scale sea-level in each stage. The active folds are distributed in area to be changed into land in MIS 1. In order to assess the long-term stability of geological environments in the test-field Horonobe area it is important to consider the faulting and folding effects to the uplifting, subsidence, migration of former shoreline and so on.

**Key words:** geological disposal, long-term stability of the geological environments, geological evolution, uplifting, marine terrace, former shoreline, fold-and-thrust belt

### 1 はじめに

高レベル放射性廃棄物は原子力を利用してエネルギーを得ることにより必然的に発生する。わが国の場合、使用済み燃料から再び燃料として使用できるウランやプルトニウムを回収し、後に残る廃液をガラス原料とともに固化したガラス固化体のことを一般に高レベル放射性廃棄物と呼んでいる。高レベル放射性廃棄物の放射能レベルが地層中に分布するウラン鉱石と同程度に達するまでには数万年以上の長い期間を要する[1]。このため、その対策においては、長期にわたる安全確保に留意する必要がある。現在、わが国を含む世界各国では、高レベル放射性廃棄物を人間の生活圏から安全に隔離する最も現実的で可能性の高い対策として、地下深部の地層に処分する方法（「地層処分」）が選択されている。

日本列島は安定大陸に比べて地震・断層活動などが活発な変動帯に位置するため、わが国における地層処分の概念

は、とくに地質環境の長期的な安定性について配慮し、「長期的な安定性を備えた地質環境」に人工バリア（工学的対策）と天然バリア（地質環境）から構成される多重バリアシステムを構築するという特徴をもつ[2]。この概念に基づき地層処分の長期にわたる安全性を確保するためには、地質環境の変化により地層処分システムの長期にわたる成立性に影響を及ぼすことが想定される天然現象（隆起・沈降、地震・断層活動等の外因的要因）について、その変動傾向、速度の変化および天然現象によりもたらされる地質環境の変化を、数万年以上の期間で評価・予測することが重要である。

評価・予測の方法論については、過去から現在までの変動傾向および影響範囲などから将来を外挿あるいは類推する方法や、現象の発生可能性を数量的に見積もり、発生確率を求める方法が基本となる。とくに、実験が可能な期間よりはるかに長期になる地質環境の予測では、外挿法ならびに類推法が最も重要である[3]。外挿法は過去から現在までに生じた変動の履歴を把握し、その中から時間的および空間的な変動の傾向を見出すことにより、その傾向を将来へ外挿して予測する手法である。類推法は予測しようとする現象と類似の事例を検討することにより現象の一般化を図り、その類推から将来の変動および変化を予測する方法である[4]。いずれの場合においても、「過去の天

A study on the long-term stability of the geological environments in and around the Horonobe area - Consideration of site specific features in assessing of the long-term stability of the geological environments-, by Tadafumi Niizato (niizato.tadafumi@jnc.go.jp), Ken-ichi Yasue

\*1 核燃料サイクル開発機構 幌延深地層研究センター 深地層研究グループ Geotechnical Science and Engineering Group, Horonobe Underground Research Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute

〒098-3207 北海道天塩郡幌延町宮園町 1-8

然現象を詳細に知ること」が将来の変動を評価・予測するに当たっての基盤となる。

幌延深地層研究センターにおける「地質環境の長期安定性に関する研究」では、北海道北部に位置する幌延地域を研究対象として、天然現象の過去から現在にわたる変動の時間的および空間的変化(変動のプロセス)を明らかにし、一連の変動プロセスのなかで現在がどのような地殻変動の場にあるかを把握した上で、これから変動がどのように変化していくかを予測するという事例研究を実施している。本研究の成果は、堆積岩分布地域における天然現象について、過去の変動履歴と現行の地殻変動を把握する調査手法の適用性確認およびそれらに基づく将来予測の研究事例として、実施主体が行う処分事業や国が行う安全規制の策定等に関わる技術的基盤情報となることが期待される。

本論では、幌延地域の地形、地質および地球物理学的特徴をまとめた後、海成段丘を利用した隆起と活構造の関連性、汀線の変遷、および現在まで引き続く地殻変動(ネ

オテクトニクス)について研究の現状を述べる。それらを踏まえて、本地域において地質環境の変化を評価・予測するに当たって考慮すべき重要事項を考察する。

## 2 幌延地域の特徴

### 2.1 地形学的特徴

北海道北部に位置する天北地域は、南北系の山地と丘陵、および沿岸部に広がる平野で特徴づけられる (Fig. 1)。北海道北端の宗谷岬から日本海沿岸の遠別にかけて分布する宗谷丘陵は、ほぼ南北に走る主要な構造線である大曲-豊富断層と幌延断層により、西部、中部、および東部に3分される[5-6]。西部は、大曲-豊富断層より西側の地域である。サロベツ原野とウブシ原野からなる天塩平野と、それらを取り巻くように分布する標高 80~190 m の丘陵からなる。サロベツ原野の縁辺には、海洋酸素同位体ステージ (MIS) 9-5c (約 32~10 万年前に相当) に対比される海成段丘面が分布しており、それらの一部は南北に延びる撓

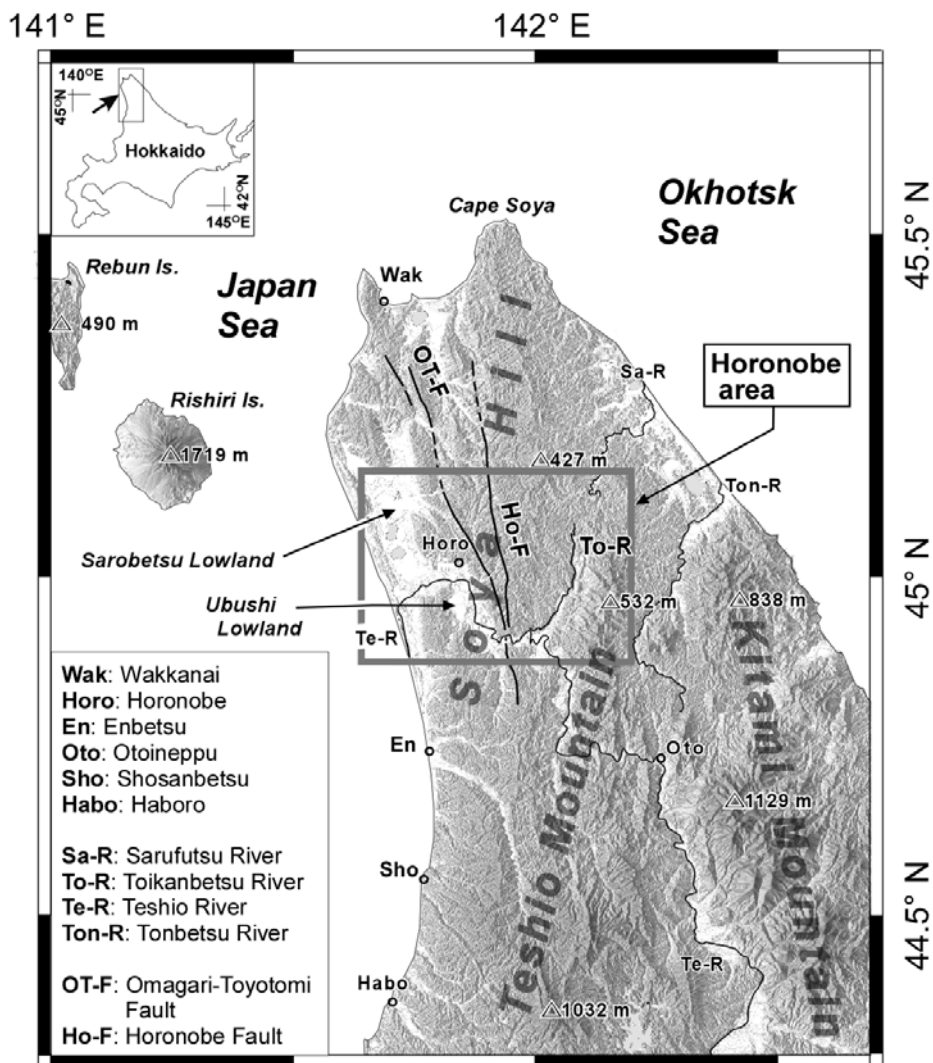


Fig. 1 Index map in and around the Tenpoku area. The Shaded relief map is after Geographical Survey Institute (2001) [15]. Open grey square shows the Horonobe area.

曲によって変位している[7-8]。中部は、大曲-豊富断層と幌延断層とに挟まれた地域である。標高 100~300 m 程の丘陵が分布し、南へ向かって次第に幅が狭くなる。この部分では、地質構造や岩質を反映した谷地形が明瞭に認められる。稚内層分布域では、谷密度が著しく小さく、直線状の谷が発達し、円頂状の尾根をなす。それとは対照的に、声間層分布域では羽毛状に枝分かれした小沢が発達している[6, 9-10]。東部は、幌延断層と猿払川-間寒別川沿いの谷で区切られる範囲にあり、標高 100~300 m 程の丘陵が大部分を占める。さらに、間寒別川の東側には、北海道北部の脊梁をなす天塩山地が分布する。北見山地中部の天塩岳一帯を水源とし、天塩山地の東麓を北に向かって流れる天塩川は、音威子府付近で天塩山地を横断し、その後さらに幌延地域付近で宗谷丘陵を横断して日本海へ達する。

なお、天北地域の範囲は、宗谷岬から天塩川以北までの日本海側のみに限る場合や[11-12]、宗谷岬から初山別までの日本海側と頓別川河口までのオホーツク海側を含む場合[13-14]など研究者ごとあるいは報告書ごとに相違がある。本論では、宗谷岬から遠別までの日本海側と頓別川

河口までのオホーツク海側を含み、その南限を頓別川-音威子府-遠別とする地域を、天北地域とする。また、幌延町とその周辺地域の一部を含む Fig. 1 に示した地域を幌延地域とする。

## 2.2 地質学的特徴

### 2.2.1 地質・地質構造

北海道北部の天北地域は、神居古潭帯を含む中生界の構造的高まりが東部に存在し、その東西両側に新生代堆積盆が分布する。西側の堆積盆では新第三紀から現在に至る堆積物の全層厚が 6000m に達し、天北（第三紀）堆積盆と呼ばれている[16] (Fig. 2)。天北堆積盆は幅約 60km の広がりを持ち、地質断層である幌延断層および大曲-豊富断層の 2 つの断層により東から天北炭田区、稚内-豊富東部区（楔形部）および天塩平野区の 3 つの構造区に分けられる[17]。天北炭田区では白亜系の上に中期中新世以前の地層群が雁行状褶曲群を形成して分布する。稚内-豊富東部区には中期中新世末から鮮新世初頭の地層群が分布し、雁

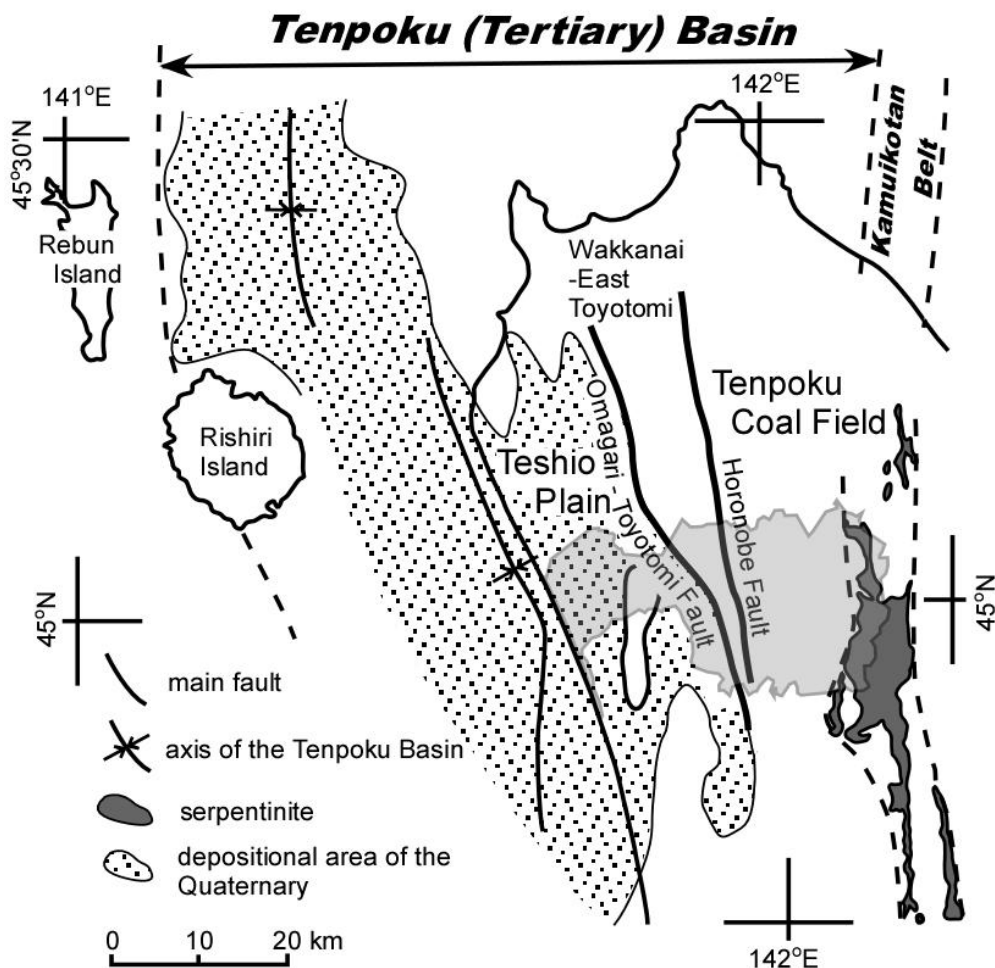


Fig. 2 Tectonic division of the Tenpoku Basin and depositional area of the Quaternary sediments, partly modified from Oka & Igarashi (1993) [11]. Light grey area shows the Horonobe Town.

行状背斜群が存在する。本構造区の南部では、西急東緩の非対称背斜が発達する。天塩平野区は、主に鮮新統および第四系が分布する現在まで続く新しい堆積域であり、他の構造区に比べて緩傾斜の大規模な褶曲構造が発達する。天北堆積盆では、後期鮮新世以降、海域が全体として東部から西方へ移化し、時代が新しくなるに従って東部から西部へと陸成層が広がる傾向がある[18]。これは、より内陸に位置する堆積盆東部が、より早期に陸化したことの反映と考えられており[10]、堆積域が西側に順次移動したことを示唆している。

天北堆積盆の南東部に位置する幌延地域は、その東部に蝦夷累層群を含む中生界と神居古潭帯に属する変成岩類・堆積岩類が分布しており、中央部から西部に向かって、白亜系を基盤とし、それを不整合に覆う古第三紀堆積岩類、白亜系と古第三系を不整合に覆う新第三紀堆積岩類（下位から宗谷夾炭層、鬼志別層、増幌層、稚内層および声問層）および新第三紀末から第四紀にかけての堆積岩類（下位から勇知層、更別層、段丘堆積物）が分布している。天塩平野区では古第三系の地表露出は認められないが、1970年

以降に実施された深層ボーリングにより、古第三系が地下に広く伏在することが確認された[14]。宗谷夾炭層から増幌層への変化は、陸成から浅海成層への移り変わりを示し、増幌層に不整合で重なる稚内層および稚内層の上位に整合漸移関係で重なる声問層、勇知層および更別層は、海成層から淡水成（陸成）層へと至る堆積物である[18-22]。また、幌延地域の西部では、第四系の分布域東縁部において、海洋酸素同位体ステージ 9-5c に相当する海成段丘が分布するとされている[6-7]。

## 2.2.2 活構造

幌延地域を含む天北地域には、地質断層である幌延断層および大曲-豊富断層の他に、活断層帯であるサロベツ撓曲帯（池田ほか[23]の天塩断層帯に相当）、幌延断層の北側に位置する幌延断層帯および間寒別断層帯の各活断層帯が西から順に分布している[8, 23-24]（Fig. 3）。これら活断層については、空中写真判読結果、反射法地震探査断面およびボーリング調査結果等に基づき、活断層の地表露出位置、変位量および変位基準面とその年代等がほぼ明らか

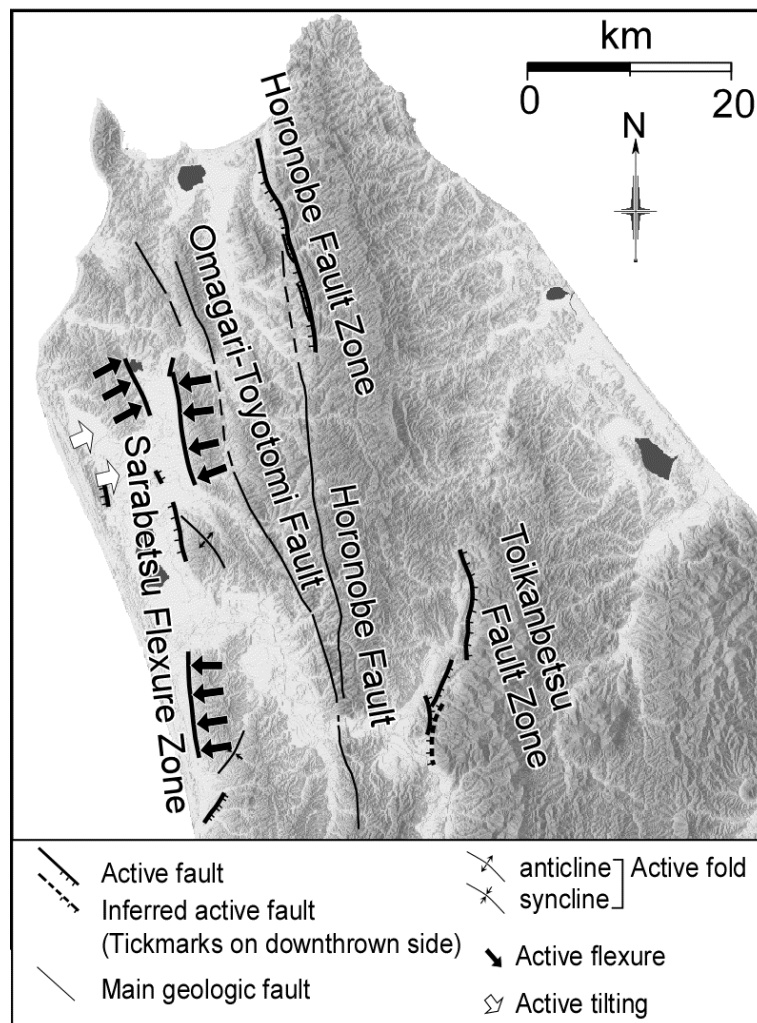


Fig. 3 Distribution of active structures in and around the Horonobe area, after Koike & Machida (2001) [7] and Nakata & Imaizumi (2002) [8]. The Shaded relief map is after Geographical Survey Institute (2001) [15].

となっている[8, 23-24]. 幌延断層帯(本論では、活断層と認定された中田, 今泉[8]による「幌延断層帯」および活断層研究会[25]による「幌延断層」を「幌延断層帯」とする)は、宗谷丘陵北部において北北西-南南東に延びる長さ約 20km の断層帯で、数百m離れて併走する 2 本の断層線により構成される。東側の主断層は海成段丘面を切って東上がりの低断層崖を発達させる。また、断層帯の南半分には南から北に向かって分岐する西上がりの逆断層が認められ、主断層との間に地溝状の低地を形成する。サロベツ撓曲帯は、北北西-南南東に延びる長さ約 10km 前後の複数の断層から構成され、サロベツ原野の縁辺部に分布する総延長約 40km の活断層帯である。地表では丘陵斜面や海成段丘面を変位させる撓曲として現れており、サロベツ原野の縁辺は、南北に延びる撓曲によって限られている。問寒別断層帯は、問寒別川沿いに発達する丘陵中をほぼ南北に連なる長さ約 20km の断層帯である。南半部では南から北に分岐する断層線、北半部では右ステップする断層線によって構成されている。主に段丘面を西上がりに変位させ、低断層崖や撓曲崖を発達させる[8, 24]。これら活構造の分布は、神居古潭帯と新第三系堆積岩類との地質境界

(幌延断層帯および問寒別断層帯)や更別層などの第四系堆積域(サロベツ撓曲帯)に偏在しているといえる。

## 2.3 地球物理学的特徴

### 2.3.1 地震活動

幌延地域を含む天北地域は、従来地震活動が低いと考えられていた。これは定常観測点がほとんど存在せず、地震活動そのものが把握できていなかったためである。1980年代以降、北海道内観測点における地震観測データの併合処理および臨時地震観測等が精力的に行われ、天北地域では微小地震( $M < 3$ )が定常的に発生していることが指摘されている[26-30]。これらの地震活動は神居古潭帯を含む日本海側で顕著であり、オホーツク海側ではほとんど発生していない。北海道の北西部を南北に縦断する幅約 50km の地震帯が認められ、深さ 15-30km 付近に数多くの地震が発生している(Fig. 4) [30-31]。また微小地震の活動度は日本海沿岸に位置するサロベツ撓曲帯においてとくに高い。微小地震のメカニズム解は、深さ 10km 以浅で東西圧縮を最大主応力とする逆断層成分を含む横ずれ断層型、

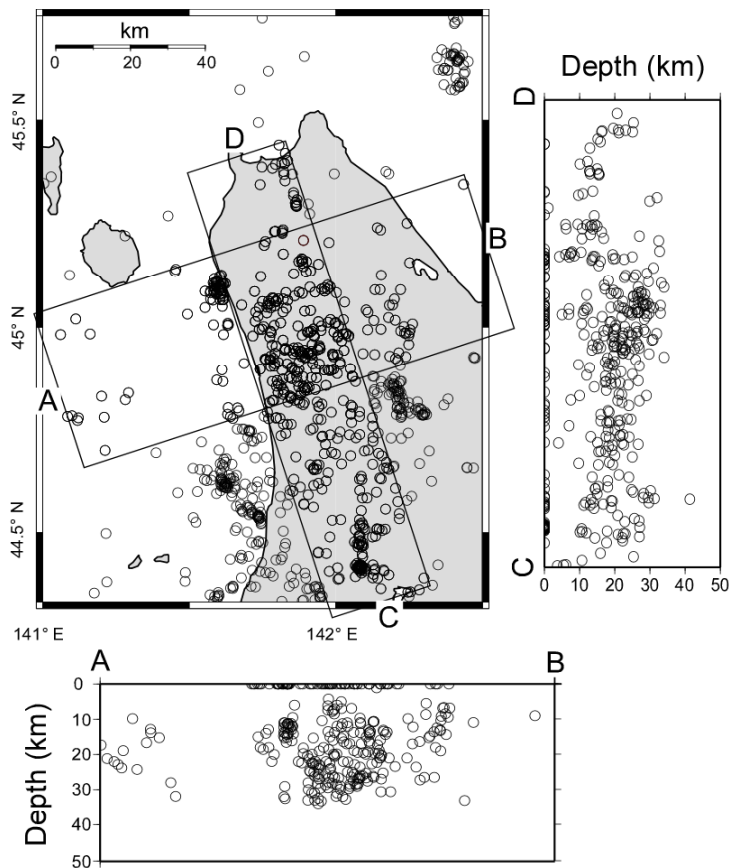


Fig. 4 Hypocenter distribution of shallow earthquakes. Open circles indicate the earthquakes ( $\leq 50$ km; 2000-2002), which are plotted by using of GMT [33] based on Japan Meteorological Agency (JMA) catalogue (2004) [32].

深さ 20km 近辺では正断層型を示す[30]. また、天北地域では群発地震が時折発生することも知られている. 幌延地域に限ってみると、1975 年 12 月、1986 年 8 月および 1992 年と過去に複数回の群発地震が発生しており、1992 年の群発地震では最大 M4.3 を記録している[29-30].

### 2.3.2 重力異常

天北地域では、北海道中軸部を南北に延びる神居古潭帯の西側において、天塩平野に中心を持つ道内有数の「負の異常域」が存在する. この「負の異常域」では、負の最大値が -30mGal を越えており、異常域東縁には重力異常の急変域（勾配 4-5mGal/km）が認められる[34] (Fig. 5). これは、第三系から第四系の比較的低密度の堆積物の存在がその原因と考えられており、先に述べた微小地震の震央分布域と合わせると、微小地震の活動域は負の重力異常域に集中していることが指摘されている[34] (Fig. 5).

以上概観したように、幌延地域では後期鮮新世以降から現在に至るまで、より新しい地層が西部へ向かって累重し、堆積域が天北堆積盆地内で東部から西部へ順次移動したと考えられる. また、現在まで続く新しい堆積域である天塩平野区と活断層帯であるサロベツ撓曲帯の分布とが一致することは、堆積域の形成・移動過程において、断層活動

と褶曲作用が深く関与していることを示唆する. 加えて、微小地震の活動度が日本海沿岸に位置するサロベツ撓曲帯においてとくに高いことから、現在陸域において地殻変動が最も活発である地域は、幌延地域の西部、すなわち天塩平野区と考えられる. 現時点では、これらの現象をもたらした変動のメカニズムは明らかになっていないが、幌延地域における後期鮮新世から現在に至る変動の傾向を、今後百万年の時間スケールで将来に外挿した場合には、地殻変動の活発な地域は天北堆積盆地内をさらに西部へと移動することが推測される. 以上のような地質学的・地球物理学的特徴を持つ幌延地域において、数万年以上の期間にわたる過去から現在に至る変動の履歴を把握するに際しては、地殻変動場の移動および断層活動・褶曲作用の履歴とその影響等に留意する必要がある.

## 3 幌延地域の地質環境にかかわる研究の現状

### 3.1 隆起・沈降

隆起・沈降が地質環境に与える影響としては、地形勾配や土被りの変化による動水勾配や地下水位への影響が考えられる. また隆起が激しい地域では、地下深部に埋もれていた岩盤の地表への接近や、地表水の地下深部への直接

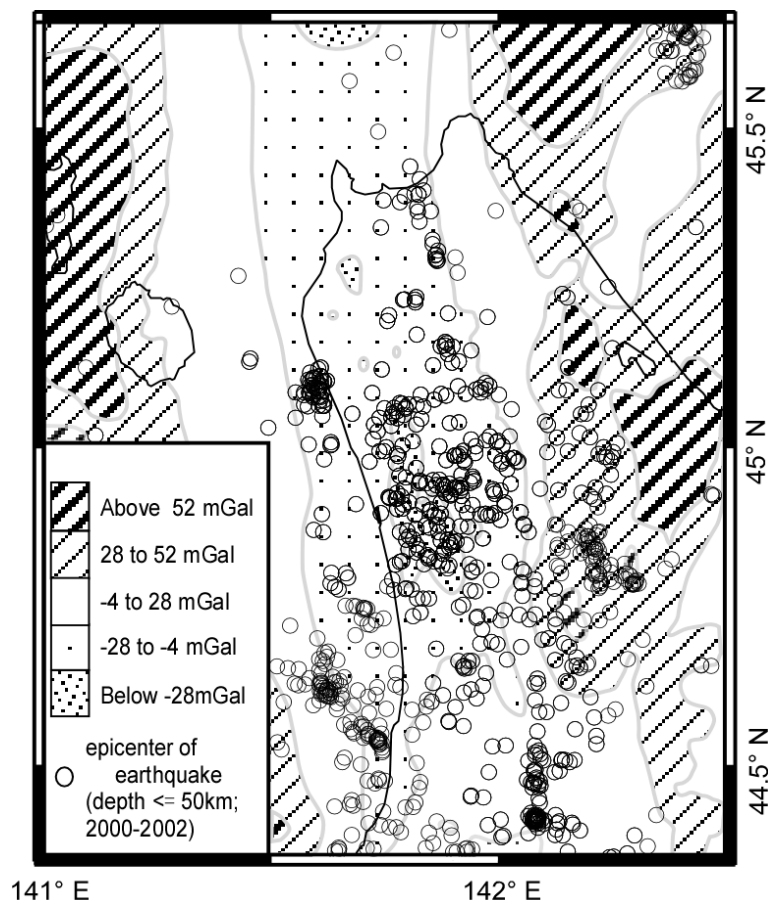


Fig. 5 Bouguer Anomaly and epicenter distribution of shallow earthquakes in and around the Horonobe area. Assumed density is  $2.67 \text{ g/cm}^3$ . Bouguer Anomaly map is simplified from Geological Survey of Japan (ed.), 2004 [35]. Epicenters of earthquake ( $\leq 50\text{km}$ ; 2000-2002) are plotted by using of GMT [33] based on Japan Meteorological Agency (JMA) catalogue (2004) [32].



的混入などにつながる大きな侵食を生じる可能性がある[1]。このため、地質環境の長期的な安定性を評価するためには、隆起・沈降の時間的・空間的分布を把握し、将来どの程度まで変動するのかを予測することが重要な課題である。

サロベツ原野の第四系分布地域の縁辺には、海洋酸素同位体ステージ (MIS) 9-5c (約 32~10 万年前に相当) に対比される海成段丘面が分布している[7]。このため、海成段丘面を用いて過去数十万年間にわたる隆起量および隆起速度を把握することが可能である。既存文献による海成段丘面の分布[7]を参考にして、空中写真を用いた地形判読により海成段丘面の分布を把握するとともに、開析の程度、復元される面の連続、および分布高度に基づき、段

丘面の区分および MIS 対比を実施した。海成段丘面の MIS 対比は、小池・町田[7]に従った。その結果、幌延町内には、現在の海岸線から 20km ほど離れた内陸部においても海成段丘面が広範に分布することが明らかとなった。Fig. 6 に、幌延地域西部における海成段丘面の分布を示す。

得られた海成段丘面の分布図に基づき、サロベツ撓曲帯の東縁部に位置するサロベツ背斜 (幌延地域西部) において背斜軸を跨いだ同一ステージの旧汀線高度を調査した結果、背斜軸部でその高度が高くなる傾向を確認した (Fig. 7)。この傾向は少なくとも MIS 5c および MIS 5e に対比される海成段丘面に認められる。これは、サロベツ背斜の活動による背斜軸部での局所的な隆起を示すと考えられる。また、海成段丘面の MIS 対比に誤りがなく、変位の累積

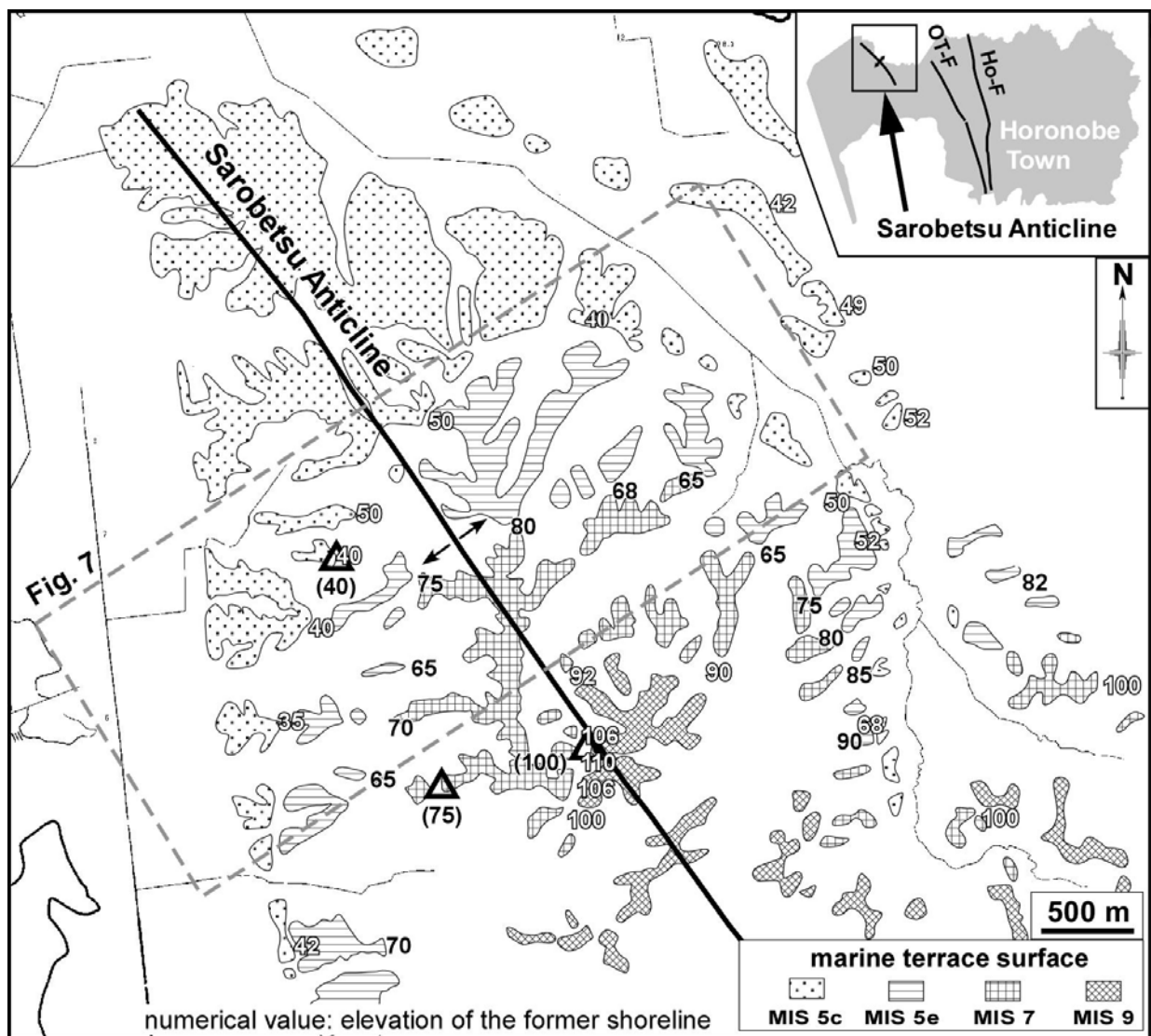
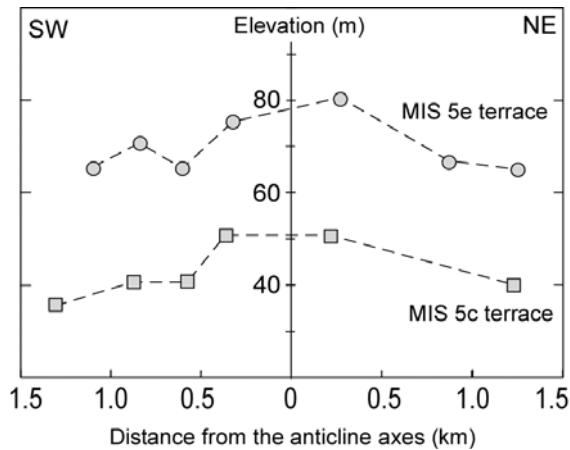


Fig. 6 Geomorphological map around the Sarobetsu Anticline in the western part of the Horonobe area. The MIS correlation is after Koike & Machida (2001). The open triangles and numbers in parentheses indicate the locality and elevation of former shoreline plotted on Fig. 8, after Koike & Machida (2001) [7]. The area enclosed by dashed line indicates the localities of former shoreline plotted on Fig. 7. OT-F: Omagari-Toyotomi Fault, Ho-F: Horonobe Fault.



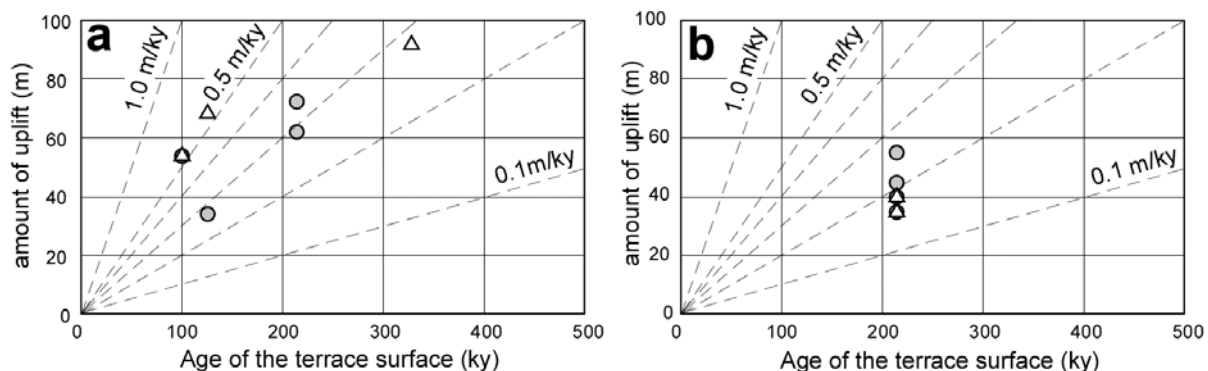
**Fig. 7** Elevation of the former shoreline around the Sarobetsu Anticline (see Fig. 6 for localities). MIS correlation is same as Fig. 6.

性があるとすれば、サロベツ背斜は MIS 5e 海成段丘面の形成年代である少なくとも約 12.5 万年前には活動を開始していたと推測される。試みに、サロベツ背斜以西の幌延地域に分布する海成段丘面について、文献データに基づく隆起速度の見積もり結果を Fig.8 に示す。隆起量については、小池・町田[7]による方法に従い、海成段丘面が示す相対的な旧汀線高度からユースタティックな変動による海水準高度を差し引いて隆起量（垂直変動量）を算定し、海成段丘面の MIS 対比は小池・町田[7] (Fig. 8 a) および小嶋ほか[6] (Fig. 8 b) を参考にした。その結果、上記両文献では、海成段丘面の MIS 対比がそれぞれ異なっているため、最大約 2 倍程度におよぶ隆起速度の見積もり差が生じている。また、小池・町田[7]に従えば、サロベツ背斜付近 (Fig. 6 の範囲) の隆起速度はその周囲 (Fig. 6 の範囲外) における隆起速度より大きくなるが、小嶋ほか[6]に従うと、両者に明瞭な差異は認められない。これらの文献では、幌延地域から 80km ほど離れた地域 (羽幌およびオホーツク海沿岸) の海成段丘面を基準とし、地形学的特

徴からそれら海成段丘面を幌延地域まで対比してきている。このため、基準とした海成段丘面と幌延地域との間に存在する断層変位などの取扱い方により、幌延地域に分布する海成段丘面の対比が研究者ごとに異なる結果となっていると考えられる。以上のことから、今後、隆起量および隆起速度の算定に当たっては、幌延地域に分布する海成段丘面構成層から得られるデータに基づき幌延地域に分布する海成段丘面の形成年代を明らかにし、形成年代が明確となった段丘面を基準として、海成段丘面の対比を実施する必要がある。

### 3.2 汀線の移動

海に面した幌延地域西部では、標高 10m 以下の地域が広範に分布する。このため、隆起・沈降や約 10 万年周期の氷期-間氷期サイクル等に伴う海水準変動などにより汀線位置が変化し、将来数万年以上の時間スケールにおいて、陸域の拡大や海域の縮小が生じると考えられる。汀線位置の変化は地表および地下における塩淡水境界の移動につながることから、地下水流動特性の変化や地下水の地球化学的特性に変化をもたらす可能性がある。前述のように、幌延地域にはサロベツ撓曲帯などの活断層帯が分布しているため、汀線位置の変化についてもそれら活構造の活動に影響を受けることが予想される。このため、幌延地域における汀線位置の変化は、全地球的な気候変動のみではなく、断層活動や褶曲作用などの幌延地域に認められる地殻変動による影響も考慮した上で評価・予測する必要がある。幌延地域には過去数十万年間に形成された海成段丘面が分布することから、それらを用いた MIS 1 および MIS 7 の間氷期における汀線位置を推定した。その結果を Fig. 9 に示す。MIS 1 における汀線位置は小池・町田[7]を参照した。MIS 7 における汀線位置については、小池・町田[7]による海成段丘面の分布および空中写真を用いた地形判読結果に基づく海成段丘面の分布等に基づいて作成した。汎地球的な海水準変動は、MIS 1 および MIS 7 とともに現在



**Fig. 8** The rate of uplift for the marine-terrace surfaces. a: Data after Koike & Machida (2001) [7], b: Data after Koaze et al. (2003) [6]. Open triangles indicate marine terrace surfaces on the Sarobetsu Anticline (see Fig. 6 for localities).



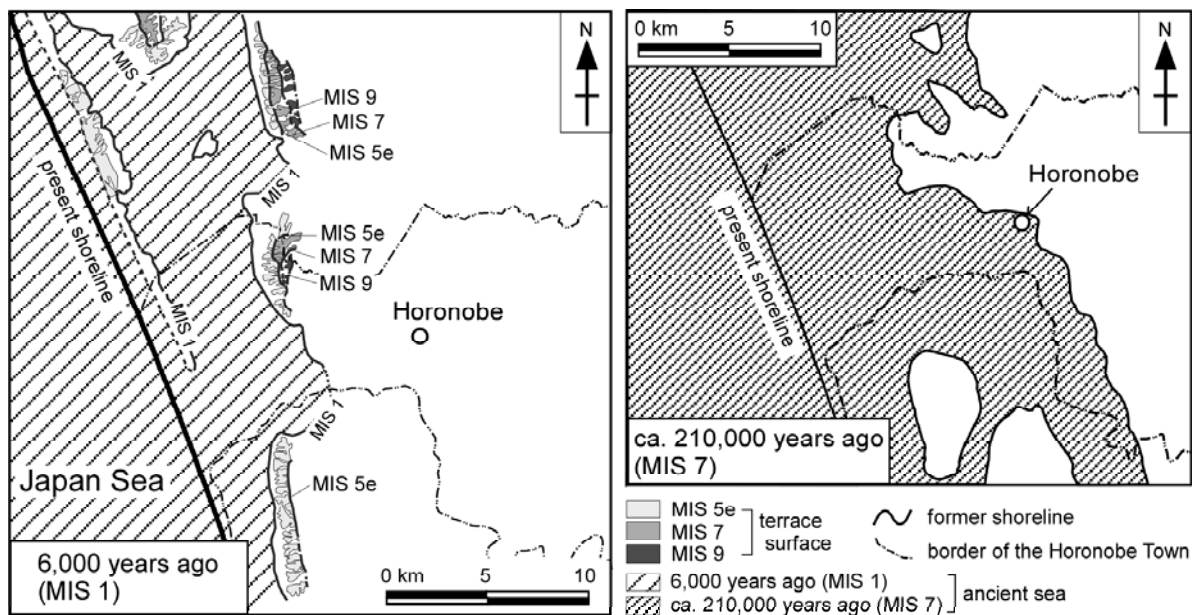


Fig. 9 Paleogeography in 6,000 years and 210,000 years ago inferred from the distribution of marine terrace. Distribution of marine-terrace surface in MIS 1 is after Koike & Machida (2001) [7]. Former shoreline of MIS 7 is modified from Koike & Machida (2001) [7] with additions by the authors.

比-20m～+10mの範囲であり、大きな差異は認められない[1]。一方、幌延町内に限って見た場合、MIS 1（約0.6万年前）の汀線位置は現在の海岸線から最大約7.6 km内陸側であるのに対し、MIS 7（約21万年前）では最大約20kmとなり、両者には2.6倍程度の差異がある。また、MIS 1とMIS 7の海陸分布を比較した場合、MIS 1における陸域は幌延地域の活褶曲分布とほぼ一致する。これらのことは、汀線位置の変化に対して褶曲作用が影響を与えていることを示唆する。今後、隆起速度の推定と同様に、海成段丘面の対比および形成年代等を再検討することにより、汀線位置の変化に対する断層活動や褶曲作用の影響について、時間軸を踏まえた検討が可能であると考えられる。

### 3.3 幌延地域におけるネオテクトニクスの開始時期

地層処分長期にわたる安全性を確保するためには、天然現象の変遷と天然現象によりもたらされる地質環境の変化を数万年以上の期間にわたって評価・予測することが重要であり、評価・予測の方法としては外挿法ならびに類推法が最も一般的であると考えられる[3-4]。この外挿法や類推法による評価・予測方法では、現象を引き起こした原動力が将来も変わらないことを前提とする。このため、外挿法や類推法を適用するに当たっては、現象の発生メカニズムやその根本的な要因の解明が重要となる[4]。

変動帯に位置する日本列島で発生する地震・断層活動や隆起・沈降等の天然現象は、日本列島周辺におけるプレート配置やその運動に関連して生起しており、それらが天然

現象に関する根本的な要因となっていることは疑いがない[1, 36-37]。北海道周辺において、現在まで引き続いている地殻変動（ネオテクトニクス）の根本的な要因を考えるに際しては、オホーツクプレート、アムールプレートおよび太平洋プレート各々のプレート配置およびその運動等がいつ定まったのかが重要となる（Fig. 10）。北海道周辺域に

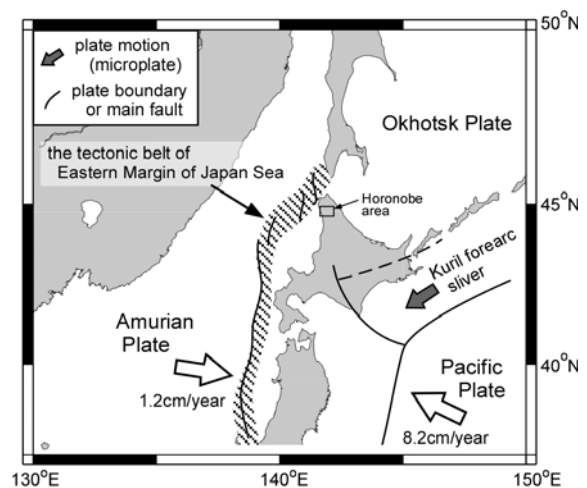


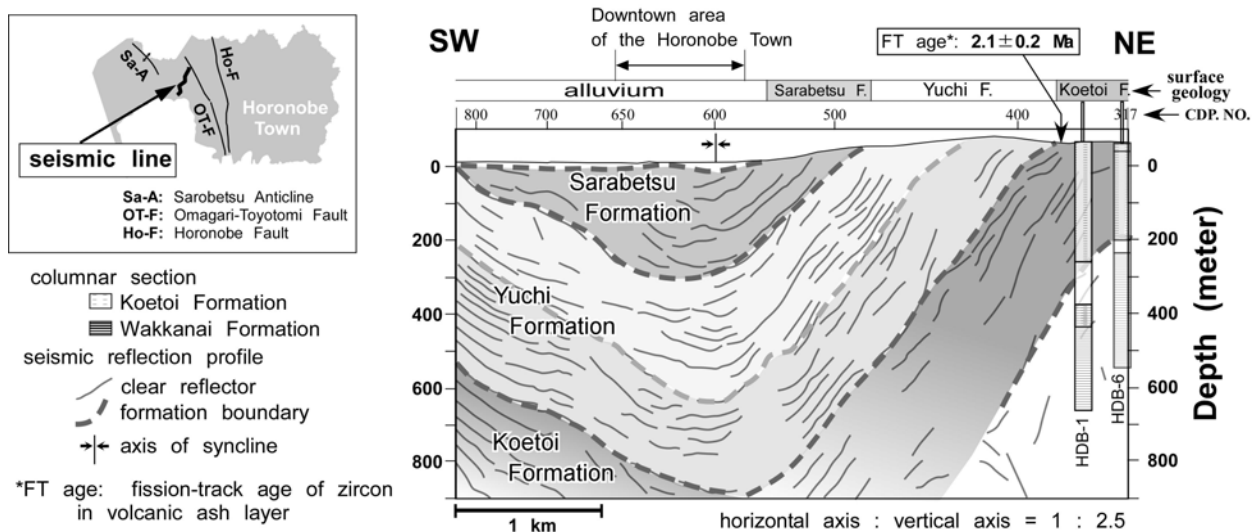
Fig. 10 Current tectonic setting around the Hokkaido, modified from Taira (2002) [44]. Open arrows indicate the direction of relative plate motion of the Amurian and Pacific Plates with respect to the Okhotsk Plate. The direction and the rate of plate motion are after Wei & Seno (1998) [42].

おける過去数百万年前から現在までのプレート配置やその運動等に関しては、既に多くの研究がある[1, 36-42]。これらの文献によると、日本列島周辺を取り巻くプレートシステムの基本的枠組みは、日本海の拡大が終了したとされる約 1,500~1,400 万年前に定まり、プレート運動については約 1,500 万年前以降大きな変化がなく、約 600~200 万年前頃には各プレートの運動方向が現在とほぼ同様になったとされている。しかし、日本列島におけるネオテクトニクスの開始時期については、東北日本弧が約 300 万年前であるのに対し、西南日本弧や伊豆弧などでは 150~70 万年前とされるなど、地域差が認められる[43]。幌延地域周辺のプレート配置を概観した場合、本地域はオホーツクプレートとアムールプレートの境界部に相当すると考えられている「日本海東縁変動帯」に隣接している (Fig. 10)。日本海東縁変動帯の形成時期は、北海道西方の奥尻海嶺上における深海掘削の結果や日本海東縁における音響層序の結果等により、約 300~200 万年前と推定されている[44-45]。日本海東縁変動帯の形成は、日本列島全体のテクトニクス、特に同変動帯を取り巻く地質体に影響を及ぼしている[46]。このため、幌延地域におけるネオテクトニクスおよびその開始時期についても、同変動帯による影響を被っている可能性が推測される。

伊藤[47] は、幌延地域西部のサロベツ背斜 (伊藤[47]では幌延背斜) から大曲-豊富断層にいたる地域において石油公団が実施した反射法地震探査の結果から、サロベツ背斜の成長が勇知層堆積時からであるとし、本地域におけるネオテクトニクスの開始を 270~260 万年前としている。稚内沖約 30km で実施された音響層序および幌延地域北側と南側で実施された反射法地震探査の結果[48]につい

ても同様に、勇知層と更別層において著しい地層の厚化が認められ、勇知層堆積時以降における褶曲の活発な成長を示している。サイクル機構では、平成 14 年に幌延町市街地の北側において、パイプロサイスによる反射法地震探査を実施した[49]。この探査は、サロベツ背斜と大曲-豊富断層の間に位置する向斜軸を含む測線により実施されたため、向斜の形成時期を把握することが可能である。向斜軸部の地質構造を詳細に把握するために、既存反射法地震探査断面を、幌延地域西部に卓越する北西-南東方向の地質構造に対してほぼ直交する断面へ投影した後、地表地質調査と試錐調査結果とを付加して再解釈を実施した[50] (Fig. 11)。その結果、更別層の層厚は向斜軸部付近で厚く、勇知層の層厚についても向斜軸部付近で若干厚くなる傾向が明らかとなった。このことから、サロベツ背斜東側に位置する向斜の形成は、勇知層堆積中のある時期、少なくとも更別層の堆積時には開始していたと考えられる。珪藻化石分析、花粉分析、およびフィッシュ・トラック年代測定に基づいて近年明らかにされつつある幌延地域の年代層序[51-53]を参考にすると、幌延地域西部 (天塩平野区) に分布する勇知層の地質時代は、後期鮮新世の後半である約 250-130 万年頃となる。このため、この向斜の形成は約 250 万年前以降のある時期となり、伊藤[47]および小椋・掃部[48]の結果と矛盾しない。

幌延地域西部に発達する褶曲構造は、微小地震のメカニズム解[30]および反射法地震探査断面に基づく、東西圧縮場における fold-and-thrust 帯の一部を構成しており[47]、泥質岩の流動とスラストの形成により、東から漸次褶曲構造が形成されていったと考えられる[48]。加えて、これら構造の形成に伴い、天北堆積盆内において堆積域の移動が



**Fig. 11** Seismic reflection profile across the syncline in the eastern side of the Sarobetsu Anticline. This profile is obtained by projecting the original seismic profile onto the NE-SW section which is perpendicular to the general trend in the western part of the Horonobe area. The original seismic profile is taken from Eki & Yamasaki (2004) [49]. The fission-track age is after Yasue et al. (2004) [50].

生じたと推定される[53].

幌延地域東部(天北炭田区)の地質構造については、同地域西縁に発達する幌延断層の活動に関連して形成された可能性が推測される。Kimura et al. [39]は、幌延断層に付随する褶曲軸、衝上断層、および逆断層群が北西-南東トレンドを持ちながら全体として南北に雁行状配列することから、幌延断層に沿う変位は右横ずれ断層成分を持つと推定している。また、国や企業がおこなった深層ボーリングの結果を取りまとめた北海道工業振興委員会[14]による幌延地域の地質断面図では、幌延断層東側の天北炭田区および稚内-豊富東部区が、西側の天塩平野区へ衝上している様子が図示されている。これらのことから、幌延断層は右横ずれ成分と逆断層成分を持つと推定される。Kimura et al. [39]では、幌延断層とそれに伴う地質構造の形成は、古第三紀後期から中期中新世までに存在した右横ずれ運動を伴う北東-南西方向の圧縮によるトランスプレッシブな応力場に関連した現象とされている。また、宮坂・松井 [54]では、断層運動の最終時期である鮮新世以降には右横ずれ成分は副次的で、西ないし西南フェルグソンの衝上が主要な造構運動であったと推測している。以上のことから、幌延地域東部に見られる地質構造は、同地域西部のそれに先立つ北東-南西方向の圧縮によるトランスプレッシブな応力場のもと形成され、鮮新世以降は同地域西部と同じ東西圧縮を被ったと推測される。

#### 4 まとめ

幌延地域では、活断層が分布する日本海沿岸の天塩平野区で地殻変動が最も活発であり、今後その地殻変動域は百万年の時間スケールで日本海側へ西進ないし収れんすることが推測された。また、幌延地域西部における地質構造は、東西圧縮場において東から漸次西へ向かって成長するfold-and-thrust帯をなし、約300~200万年前から現在に至るまで、陸域でこの地質構造が発達してきた。この期間、幌延地域における隆起や汀線の移動などの天然現象は、このfold-and-thrust帯を構成する褶曲構造(サロベツ背斜等)および断層による規制を受けて進行した可能性を示した。このため、幌延地域において地質環境の変化を評価・予測するに当たっては、約300~200万年前以降の期間を対象として、地殻変動場の移動および活断層や活褶曲など活構造の履歴と地殻変動場の移動、およびそれらの影響等に関する資料を十分検討する必要がある。その際には、海成段丘面の対比等を現地調査に基づき正確に把握することが不可欠である。

#### 謝辞

本論をまとめるにあたり、新潟大学の小林健太博士および幌延深地層研究センターの高橋一晴博士には、ドラフト

原稿の段階で有益なご助言を頂いた。匿名の2名の査読者には、査読を通じて多くのご教授を頂き、本論は著しく改善された。現地調査を進めるにあたり、幌延町役場および幌延町民の皆様にご協力を頂いた。以上の方々に深く感謝いたします。

#### 参考文献

- [1] 核燃料サイクル開発機構: わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—(総論). 核燃料サイクル開発機構, TN1400 99-020 (1999).
- [2] 梅木博之, 清水和彦, 内藤守正: 地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発2000年レポート—. 資源と素材 **117**, 768-774 (2001).
- [3] 楠瀬勤一郎, 小出 仁: 地質環境予測期間と不確実性の取り扱い. 資源と素材 **117**, 808-815 (2001).
- [4] 田中和広: 地質環境の将来予測の考え方と現状. 月刊地球 **26**, 344-348 (2004).
- [5] 長尾 捨一: 5万分の1地質図幅「豊富」および同説明書. 北海道立地下資源調査所, 札幌, (1960).
- [6] 小嶋 尚, 野上道男, 小野有吾, 平川一臣 編著: 日本の地形2 北海道地方, 東京大学出版会, 東京, (2003).
- [7] 小池一之, 町田 洋 編著: 日本の海成段丘アトラス (+CD-ROM3枚 +付図), 東京大学出版会, 東京, (2001).
- [8] 中田 高, 今泉俊文 編著: 活断層詳細デジタルマップ (+DVD2枚 +付図), 東京大学出版会, 東京, (2002).
- [9] 松井 愈: 幌延町の地質. 白山友正編「幌延町史」, 幌延町, pp.19-46 (1974).
- [10] 岡 孝雄: 2 幌延町の地質. 「新幌延町史」, 幌延町, pp.9-35 (2000).
- [11] 福沢仁之: 北海道天北一羽幌地域の上部新第三系層序の再検討—とくに“稚内”・“声間”層について—. 地質学雑誌, **91**, 833-849 (1985).
- [12] 秋山雅彦, 保柳康一: 7. 天北地域. 日本の地質 1 北海道地方(日本の地質「北海道地方」編集委員会編), 共立出版株式会社, 東京, pp.105-106 (1990).
- [13] 天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会: 新版 日本の石油・天然ガス資源, (1982).
- [14] 北海道工業振興委員会: 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)—, (1990).
- [15] 国土地理院: 数値地図 50 m メッシュ(標高)日本-I (2001).
- [16] 山本裕彦: オホーツク海および天北日本海側海域の地質構造と堆積盆について. 石油技術協会誌 **44**, 260-267 (1979).
- [17] 岡 孝雄: 北海道の後期新生代堆積盆の分布とその

- 形成に関わるテクトニクス. 地団研専報 **31**, 295-320 (1986).
- [18] 福沢仁之, 保柳康一, 秋山雅彦: 北海道中央北部の新第三系の層序と古環境. 地質学論集 **37**, 1-10 (1992).
- [19] 保柳康一, 宮坂省吾, 渡辺 寧, 木村 学, 松井 愈: “衝突帯” のタービダイト相形成とテクトニクスー中新世・中央北海道の例ー. 地団研専報 **31**, 265-284 (1986).
- [20] 福沢仁之: 北海道北部, 新第三紀後期の層状珪質岩の堆積場. 地質学雑誌 **93**, 37-55 (1987).
- [21] 福沢仁之: 新第三紀層状珪質岩の堆積機構ー北海道北部, 上部中新統稚内層を例としてー. 地質学雑誌 **94**, 669-688 (1988).
- [22] 岡 孝雄, 五十嵐八枝子: 北海道北部・間寒別構造盆地の鮮新-更新統一とくに堆積相および花粉層序についてー. 地質学雑誌 **99**, 365-389 (1993).
- [23] 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 編著: 第四紀逆断層アトラス, 東京大学出版会, 東京, (2002).
- [24] 岡 孝雄: 北海道天北・間寒別構造盆地のネオテクトニクス. 活断層研究 **1**, 19-29 (1985).
- [25] 活断層研究会編: 新編 日本の活断層ー分布図と資料, 東京大学出版会, 東京, (1991).
- [26] 森谷武男: 浅い地震活動と起震歪力から見た北海道のテクトニクス. 地団研専報 **31**, 475-485 (1986).
- [27] 笠原 稔: 3 つのプレートの相互作用する地域 (北海道周辺) の地震予知研究. 月刊地球, 号外 **20**, 16-21 (1998).
- [28] 森谷武男: 北海道とその周辺における地震のメカニズム解から推定される地殻内部応力場. 月刊地球 **21**, 557-564 (1999).
- [29] 島村英紀, 森谷武男: 北海道の地震, 北海道大学図書刊行会, 札幌, (1994).
- [30] 田村 慎, 笠原 稔, 森谷武男: 臨時地震観測による北海道北部地域の微小地震活動と地殻構造. 地震 **2** **55**, 337-350 (2003).
- [31] 石川有三: 日本海東縁の地震活動から見た歪み集中帯. 日本海東縁の活断層と地震テクトニクス (大竹政和, 平 朝彦, 太田陽子 編), 東京大学出版会, 東京, pp.151-165 (2002).
- [32] 気象庁: 地震年報 平成 14 年, (2004).
- [33] Wessel, P., W. H. F. Smith: Free software helps map and display data. *EOS Trans. Amer. Geophys. U.* **72**, 441, 445-446 (1991).
- [34] 山本明彦, 森谷武男: 北海道の重力異常と地下構造. 月刊地球 **11**, 377-385 (1989).
- [35] 地質調査総合センター 編: 日本重力 CD-ROM 第 2 版, 数値地質図 P-2, 地質調査総合センター, つくば, (2004).
- [36] 瀬野徹三: プレートテクトニクスの基礎, 朝倉書店, 東京, (1995).
- [37] 原子力発電環境整備機構: 概要調査地区選定上の考慮事項の背景と技術的根拠ー「概要調査地区選定上の考慮事項」の説明資料ー. 原子力発電環境整備機構, NUMO-TR-04-02 (2004).
- [38] 木村 学: 千島弧南西端付近のテクトニクスと造構応力場. 地質学雑誌 **87**, 757-768 (1981).
- [39] Kimura, G., Miyashita, S., Miyasaka, S.: Collision tectonics in Hokkaido and Sakhalin. In: *Accretion tectonics in the Circum-Pacific Regions* (Hashimoto, M., Uyeda, S. ed.) TERRAPUB, Tokyo, pp.123-134 (1983).
- [40] Kimura, G.: The latest Cretaceous-early Paleogene rapid growth of accretionary complex and exhumation of high pressure series metamorphics rocks in northwestern Pacific margin. *Journal of Geophysical Research* **99**, 22,147-22,164 (1994).
- [41] 吉田鎮男, 高橋 晋: 日本近海の中新世以降のプレート運動史. 月刊地球 **26**, 349-355 (2004).
- [42] Wei, D., Seno, T.: Determination of the Amurian plate motion. In: *Mantle Dynamics and Plate Interaction in East Asia* (Flower, M., Chung, S.L., Lo, C.H., Lee, T.Y. ed.), Geodynamic Series 27, pp.337-346 (1998).
- [43] 竹内 章: 日本列島のネオテクトニクスと構造区. 月刊地球 **21**, 537-542 (1999).
- [44] 平 朝彦: 日本海東縁の変動と日本列島のテクトニクス. 日本海東縁の活断層と地震テクトニクス (大竹政和, 平 朝彦, 太田陽子 編), 東京大学出版会, 東京, pp.3-15 (2002).
- [45] 岡村行信, 加藤孝弘: 海域の変動地形および活断層. 日本海東縁の活断層と地震テクトニクス (大竹政和, 平 朝彦, 太田陽子 編), 東京大学出版会, 東京, pp.47-69 (2002).
- [46] 大竹政和, 平 朝彦, 太田陽子 編: 日本海東縁の活断層と地震テクトニクス, 東京大学出版会, 東京, (2002).
- [47] 伊藤谷生: 北海道におけるアクティブテクトニクスの現フェーズはいつ始まったのか?. 月刊地球 **21**, 608-613 (1999).
- [48] 小椋伸幸, 掃部 満: 天北・羽幌地域の石油地質ー深部構造特性と炭化水素ポテンシャルー. 石油技術協会誌 **57**, 32-44 (1992).
- [49] 浴 信博, 山崎眞一: 核燃料サイクル開発機構が進める深地層の科学的研究の現状 (その 2)ー幌延深地層研究センターにおける研究の現状ー. 物理探査 **57**, 373-382 (2004).
- [50] 安江健一, 石井英一, 高橋一晴, 浴 信博, 福島龍朗: 北海道, 幌延地域西部における鮮新世広域火山灰層の年代とネオテクトニクス. 地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会要旨集 CD-ROM, 幕張メッセ国際会議場, 2004 年 5 月 9 日~13 日, G015-004 (2004).

- [51] 岡 孝雄, 五十嵐八枝子: 北海道・天塩平野北部の上部新生界ー特に勇知層・更別層の堆積相と花粉化石層序についてー. 加藤誠教授退官記念論文集, 341-365 (1997).
- [52] 秋葉文雄: 北海道天北地域の勇知層から産出した *Neodenticula seminae* と *Proboscia curvirostris* (珪藻化石), およびその生層序学的意義. 地質学雑誌, **105**, 733-736 (1999).
- [53] 安江健一, 石井英一, 高橋一晴, 舟木泰智: 北海道北部, 幌延地域の声問層・勇知層・更別層の地質年代. 日本地質学会第 111 年学術大会講演要旨, 千葉大学, 2004 年 9 月 18 日~20 日, pp.189 (2004).
- [54] 宮坂省吾, 松井 愈: 中央北海道の新生代末期テクトニクス. 地団研専報 **31**, 333-344 (1986).

