報 告

中央北海道南部地域の深部構造*

国安 稔**・山田 泰広***

(Received September 2, 2003; accepted January 15, 2004)

Structural styles of deep zones in southern central
Hokkaido, northern Japan

Minoru Kuniyasu and Yasuhiro Yamada

Abstract: Southern central Hokkaido is an important hydrocarbon province and over 100 wells were drilled by METI and private companies in the past 50 years. The area can be divided into three zones (Zone I, II and III) from the structural styles and stratigraphy, both of which are revealed by the extensive exploration activity. Zone I is characterized by basement horst structures and located in the west of the area. Zone II also has basement horst structures but its shallow sediments are thrust faulted. The thrust faults were originated from the east. East of the area is Zone III and characterized by a thrust-and-fold belt. The structural styles of these zones are in accordance with the tectonic history proposed in studies of surrounding regions. However, the results of palaeostress analysis using core fractures in Zone I and in-situ stress analysis using well logging data in Zone II revealed that the stresses couldn't be fully explained by the tectonic history. This suggests that the nature of structural development processes is far complicated from our tectonic image and we have to continue our effort to construct comprehensive geologic model for exploration of this area.

Key words: southern central Hokkaido, structural styles, stratigraphy, three zones, horst, thrust-and-fold, tectonic history, palaeostress, in-site stress, structural development process

1. はじめに

北海道における石油・天然ガスの探鉱事業は、石油資源開発(株)が設立された1955年以降、同社を中心としては継続的に行われており、これまでに企業や国によって

120坑近くの試掘井や基礎試錐の掘削が実施されている。そのなかでも、石狩堆積盆地と総称される中央北海道南部地域(図1)は、道内でも有数の含油・ガス胚胎地域であるため、これらの坑井のうち約80%が本地域に集中している。本地域の探鉱史を整理すると、いくつかのステージに区分することが可能であり、基礎調査は各ステージにおいて先導的な役割を果たしている。例えば、1970年代前半に行われた基礎物理探査は勇払沖 B-2 号井の天然ガス発見の基礎的データの一部を構成し、本堆積盆地深部における探鉱ポテンシャル認識の重要な契機となった。また、同時期に基礎試錐として実施された「南幌」や「空知」の掘削結果が石狩平野地下に分布する基盤岩などの深部地質データを提供した。基礎試錐「軽舞」や「新冠」においては先第三系には到達できなかったものの、深部地質構造や非常に厚い第三系の層序情報を提供した。これら基礎調査から得られた種々の情

* 平成15年6月24日、平成15年度石油技術協会春季講演会地質・探鉱部門シンポジウム「探鉱の新たな対象への挑戦—基礎調査の貢献と新技術への期待—」で講演 This paper was presented at the 2003 JAPT Geology and Exploration Symposium entitled "Challenges for new exploration targets —contributions from METI exploratory survey and development of new techniques" held in Chiba city, Japan on June 24, 2003.

** 石油資源開発(株)探鉱本部 Exploration Division, Japan Petroleum Exploration Co., Ltd.

*** 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 Department of Civil and Earth Resources Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University.

図1 位置図

破線：坑井層序（図2）の対比線位置、A-A'、B-B'、C-C'の各実線：地質断面図（図3）の断面線位置、一点鎖線範囲：地質構造帯区分（図4）の範囲、●：坑井位置、■：市街地の中心位置、地図中の網部：丘陵および山岳地

報と企業探鉱結果の総合的な解釈が、結果的に深度4,000m以深の基盤岩フラクチャーを貯留層とする勇払油・ガス田の発見に寄与した。さらに、勇払油・ガス田発見以降も、企業探鉱に加えて、基礎試錐「馬追」や「夕張」が実施されており、本地域の深部地質情報は飛躍的に増大している。その例として、1990年以降の試掘井や基礎試錐における掘削深度は4,500~5,500mの大深度となり、その到達層準も先第三系であることが常識化している。この結果、本地域深部の地質構造や石油地質が相当に明確化してきた。

本報告では、中央北海道南部地域における深部地質構造の理解と整理を目的として、まず最近の基礎調査や企業探鉱によって把握された地下地質構造の特徴と想定さ

れる地質構造帯区分を述べ、各地質構造帯の石油地質の特徴について整理する。次いで、各構造帯と堆積盆発達史との相関について検討する。さらには、造構応力史や現在応力場に関しての力学的な予察結果を紹介する。最後にテクトニクスの背景を基とした各地質構造帯の意味について検討を加える。

2. 中央北海道南部地域の深部構造と石油地質

2.1 層序概要

石狩堆積盆地の地下地質は、上位から順に、第四系、鮮新統（荷葉層）、中新統（平取＋軽舞層と滝の上層）、上部漸新統（南長沼層）、始新統（幌内層と石狩層群）および白亜系から構成される（図2）。

本地域の第三系に関する最近の検討によれば、南長沼層は石狩平野南部地域に広く分布していること（栗田・横井，2000）、石狩炭田地域で確認される石狩層群と同様の夾炭層からなる岩相は、石狩平野の地下にも広く分布しており、かつ本地域ではその下位に礫岩層が発達していることが明らかとなった（栗田・横井，2000；武富・西田，2002；花方，2003）。さらに白亜系に関して

図2 坑井層序

Gr：花崗岩類，Ba：玄武岩，An：安山岩，Do：粗粒玄武岩，Ga：はんれい岩，各坑井柱状図の数字：各層境界および主要断層の掘削深度（南勇払 SK-2D の場合は傾斜井のため垂直深度），坑井の対比線は図1を参照

は、石狩平野地下では花崗岩類（石油資源開発札幌鉱業所勇弘研究グループほか、1992）や塩基性火成岩類（石油公団、1971、1974、1998）が広く発達しているのに対し、石狩炭田地域では函淵層群やエゾ累層群が分布していることが判明した（石油公団、1971、1999）。

2.2 深部地質構造の特徴と構造帯区分

前述したように、最近の基礎試錐や企業による試掘井の掘削によって、本地域の地下層序や深部地質構造に貴重な情報が提供された。一方、基礎物理探査「日高地域」（石油公団、1992）を代表とする国や企業による最近の地震探鉱調査も、広域かつ詳細な地下構造情報をもたらし始めている。これらの坑井情報と地震探鉱データの総合により得られた本地域の代表的な地質横断面を図3に示す。一般に、本地域は日高山地の西縁部に発達する褶曲衝上体の前縁部を構成し、地表部～浅部の地質構造は南北性で東傾斜の衝上断層群と褶曲構造群が分布することで表現されることが多いが（吾妻、1961a, b；正谷、1979）、図3から明かなように、本地域の地質

構造は性格を異にした3つの構造スタイルからなり立っている。それは、西側に分布する伸張性構造要素のみから構成される地質構造帯、東側に分布する圧縮性構造要素のみから構成される地質構造帯、そしてその中間域に分布する浅部は圧縮性の構造要素からなり深部では伸張性構造が発達する地質構造帯である（図3、4）。本報告では、これらの3帯を中央北海道南部地域の地質構造帯の基本形と考え、西側から順にⅠ帯、Ⅱ帯、Ⅲ帯と呼称することとする。以下に各構造帯の特徴について記載する。

2.2.1 Ⅰ帯の地質構造と深部石油地質

伸張性の構造要素のみから構成される西側の地質構造帯をⅠ帯とした。図2や図3に示されるように、Ⅰ帯は厚い第四系に被覆されており、浅部における構造変形は極めて乏しい。しかしながら、主に滝の上層以下の地層によって構成される伸張性構造群が地下深部の地質構造を支配しており、一部では石油システムも成立し油・ガス田を成立させている。

図3 地質断面図

1：第四系＋荷葉層，2：平取＋軽舞層，3：川端層および振老層，4：滝の上層，5：南長沼層，6：紅葉山層，7：幌内層，8：石狩層群，9：函淵層群，10：エゾ累層群，11：隈根尻層群および花崗岩類
断面線位置は図1および図4を参照

図4 地質構造帯区分

左図：地表地質図に構造区分を明示，右図：古第三系石狩層群上限の時間構造概略図に構造区分を明示，図中のA-A'，B-B'，C-C'の各破線は地質断面図（図3）の断面線位置，図示範囲は図1を参照

本帯の代表フィールドである勇払油・ガス田（小椋，1993；藤井・森谷，1998；寒河井・青山，1998など）を例として地質構造の特徴を以下に記す。本油・ガス田の地質構造は正断層群に境されたホルスト構造で代表され，この正断層群の多くは南長沼層の層厚変化を規制し，滝の上層にまで達している。以上から，本ホルスト構造は後期漸新世～中期中新世に形成されたものと推定される（栗田・横井，2000；武富・西田，2002）。勇払油・ガス田では逆断層などの大規模な圧縮性の構造要素は確認されていない。すなわち，本油・ガス田を形成する地質構造は伸張性の造構応力場のみで形成されたものと整理でき，他構造区で見られるような強力な圧縮性の応力場は経験しなかったものと考えられる（表1）。

本油・ガス田の石油地質を考えると，上記のホルスト構造形成に関連した石狩層群礫岩層および花崗岩類中のフラクチャーが炭化水素の貯留スペースとなっている（吾妻ほか，1996）。さらには，炭化水素の根源岩は石狩層群炭灰層中の石炭や炭質泥岩であり，油・ガス田の東方沈降域において15Ma以降に生成・排出された炭化水

素が，正断層を介して層準的に下方移動しつつホルスト構造頂部に集積したものである（西田ほか，1997；武富・西田，2002）。このことから，本油・ガス田の形成は本地域の地質構造形成と密接な関係を有していることが分かる（表1）。

2.2.2 II帯の地質構造と深部石油地質

浅部ではスラストなどの圧縮性構造が発達するが，深部では正断層による伸張性構造の発達で特徴付けられる地質構造帯をII帯と称した。本帯は馬追丘陵部の地下地質構造として代表され（図4），その深部地質情報を直接提供した坑井として基礎試錐「馬追」が挙げられる（石油公団，1998）。本試錐では深度3,640mに至るまで厚い南長沼層を掘削したが，その途上で2条のスラストを通過し，本地域の浅部が強烈な圧縮性構造群から構成されていることを明らかとした。このような圧縮性の構造群は荷役層までを變形に巻き込んでいることから，鮮新世以降に大規模な造構運動が起こったものと判断できる。一方，本試錐は，深度3,009mのスラスト以深において数条の正断層を通過し，結果として幌内層以下の層

表1 各地質構造帯の構造的特长と深部石油地質

		I 帯	II 帯	III 帯
代表的ロケーション		勇払油ガス田 恵庭SK-1	基礎試錐「馬追」	基礎試錐「夕張」
地質構造	代表地質構造	ホルスト構造	浅部：スラスト構造 深部：ホルスト構造	スラスト構造 (デュープレックス構造)
	構造形成応力	伸張応力	伸張応力 → 圧縮応力	圧縮応力
	構造形成時期	後期漸新世 ～ 中期中新世	ホルスト：後期漸新世～中期中新世 スラスト：主として鮮新世以降	主として鮮新世以降
石油地質	根源岩	始新統石狩層群夾炭層 トラップ側方にキッチン形成		始新統石狩層群夾炭層 周辺域すべてで熟成～過熟成
	主要貯留岩	白亜系火成岩類 石狩層群燧岩層 (漸新統～中新統粗粒岩類(火砕岩類))		始新統石狩層群砂岩層 白亜系砂岩層
	深部トラップ	基盤ホルスト構造		複数階建てアンチフォーム
	移動集積	正断層部分から層準的に下方移動		コンパートメント内上方移動
	タイミング	中期中新世以降		主として鮮新世以降
	探鉱上の鍵	フラクチャー発達予測 移動経路の推定	サブスラスト構造の認定 フラクチャー発達予測 移動経路の推定	複数階建てアンチフォームの認定 フラクチャー発達予測 タイミングと移動集積の整理

準が作る伸張性のホルスト構造の存在を明らかにした。馬追丘陵の他地域における地震探鉱データの解釈においてもホルスト構造が解釈されており、それを司る正断層が南長沼層～滝の上層下部までを切断していることから(図3)、このような深部伸張性構造群はI帯と同様に後期漸新世～中期中新世に形成されたものと考えられる。すなわち、本地域における浅部と深部で異なった二重性を有する地質構造の形成過程は、後期漸新世～中期中新世のホルスト構造の形成と、主として鮮新世以降のスラスト構造への転換という、テクトニックインバージョンの一形式として示されることが本試錐によって明らかとなった(表1; 栗田・横井, 2000)。

石油地質的な視点からII帯を整理すると、基礎試錐「馬追」は白亜系隈根層群の塩基性火成岩類中にフラクチャー型貯留岩が発達していることを明らかにし(石油公団, 1998)、周辺沈降域に分布する石狩層群夾炭層のキッチンとも併せて、深部においては勇払油・ガス田と酷似したプレイタイプが成立しているものと想定することができる(表1)。

2.2.3 III帯の地質構造と石油地質

圧縮性の構造要素のみから構成される東側の構造帯をIII帯としたが、本帯を代表するフィールドとして石狩炭田地域が挙げられる。鳩ノ巣ドームや万字ドームなどの特徴的な地質構造に表現されるように、III帯の浅部構造は圧縮性の造構応力場の基で形成されたことは明らかであるが(図3, 4)、本帯の深部構造はいかなる変形像を

有しているのであろうか。この課題に関して基礎試錐「夕張」が1つの解を提供した(石油公団, 1999)。本試錐は古第三系～白亜系の幌内層・石狩層群・函淵層群・エゾ累層群を探鉱したが、深度2,813mと3,844mの2条の大規模なスラストによってこれらの地層が繰り返して出現することを明らかにした(図2)。これは、基礎物理探査データの解釈との統合によって、本地域がデュープレックスによる背斜状スタックを成しているものと整理された(図3のA断面)。また、地表との層序対比および重鉱物などの各種分析による後背地の推定から、本試錐で掘削した3つのスラストシートは衝上運動前には上位のスラストシートほど東方に位置し、その短縮量は約20kmに及ぶものと推定された。音波検層速度による圧密度やビトリナイト反射率に代表される根源岩熟成度指標からは、各スラストシートが最大埋没に達した後、最大で3,000mもの上昇量をもたらす衝上断層運動が起こり、さらにはその後の削剝により現在の位置を獲得するに至ったことなどが明らかにされた。これらの主要変形時期は、周辺の地質構造を考慮すると少なくとも平取-軽舞層堆積時以降となり、主に鮮新世以降であるとされる。以上のように、基礎試錐「夕張」で代表されるIII帯の地質構造は、強力な圧縮性の造構応力に起因し最大変形時相を鮮新世以降とする、深部にまで至る複数階建てのスラスト(デュープレックス)構造で特徴付けられるものと総括される(表1)。

本地域の深部石油地質を考えると、上述したI帯やII

帯のホルスト構造に伴われるプレイタイプとは異なったものとなる(表1)。すなわち、根源岩として石狩層群の石炭や炭質泥岩が該当し、トラップとしてデュプレックス構造形成に伴うフラクチャー型貯留層を想定できるなどⅠ～Ⅱ帯と共通する要素も見られるが、探鉱対象構造が断層折れ曲がり褶曲(fault-bend fold)や断層伝播褶曲(fault-propagation fold)などを主体とせざるを得ないこと、またエゾ累層群や函淵層群などの砂岩層が対象となること、炭化水素の移動・集積とトラップ形成のタイミングが複雑であるなどの相違点が多く、より慎重に石油地質を考察する必要がある。

2.2.4 地質構造帯の分布様式

先に述べたように、本地域は極めて特徴的な3つの地質構造帯から構成され、これらの分布様式は基本的に南北方向の配列で示すことが可能である(図4)。

Ⅰ帯は石狩低地帯の主要部を占め、勇払油・ガス田の他に基礎試錐「南幌」や恵庭SK-1号井付近の地下地質構造も本帯に含まれる(図3, 4)。Ⅰ帯の東縁に関しては、岩見沢から千歳東方域にかけては馬追丘陵西縁部に一致するものの、勇払油・ガス田東方においては石狩低地帯内の地下に位置するようになる。本地質構造帯の西縁に関しては全く分かっていないが、坑井や地震探鉱データから明らかとなったⅠ帯の主要分布位置は、いわゆる「苦小牧リッジ」(中井ほか, 1978)と呼称される南北方向の基盤隆起帯に大局的には一致している。このように、本帯は南北性のトレンドを有する地質構造帯として表現することができる。しかしながら、本帯の内部構造様式に関して検討すると、南北方向に配列した小規模ブロックの集合体から構成され、各地塊があたかも差別的な昇降運動を行った結果であると理解することもできる(図4右図)。各々の断層配列様式なども考慮すると、これらの各小規模地塊は明瞭な南北方向を呈しておらず、北東-南西方向の断層系に支配された分布様式となっているものと解釈することも可能である。

馬追丘陵部で代表されるⅡ帯の分布東縁に関しては、中北部域では由仁-安平低地帯付近の向斜部付近であると予測できるが、南部の軽舞・振老油田付近では地震探鉱データによる深部構造情報が不明瞭であるため現段階では明確でない(図3, 4)。本帯の分布位置は、Ogawa and Suyama (1976)が示した「石狩-北上ベルト」の正磁気異常帯に大まかに一致している。本帯の代表部である馬追丘陵の深部構造が、大規模な南北性断層群から構成される事実は(図4)、本帯が第一級の構造線(帯)的な意味を有していることを想起させる。また、図4の地表地質図と石狩層群上限の時間構造概略図の比較においても理解できるように、本帯における浅部

と深部の構造トレンドは大略一致している。地表部において褶曲構造が小規模ないしはほとんど見えなくなる岩見沢周辺や軽舞油田西方においては、深部の構造規模やトレンドも明瞭なものとなっていない。このような浅部と深部の構造発達の関係は、古い深部ホルスト構造の規模と新しい浅部衝上性構造の規模が正の相関を有することを物語っており、本地域の構造形成過程がテクトニクインバージョンであるという考え(栗田・横井, 2000)を裏付けるものである。

Ⅲ帯の西縁については由仁-安平低地帯に対応しているものの、北部の基礎試錐「空知」が掘削された奔別衝上断層地域では複雑となる。この地域は地質構造的にはⅢ帯に属するが、本試錐が限根尻層群を基盤としていること、さらにエゾ累層群と函淵層群が堆積盆地縁辺部を示す岩相から構成されることなど、後述する堆積盆発達史との相関を加味すると、本試錐位置はⅡ帯との接点的な場に相当しているものと推定される。また、南方部の日高地域におけるⅢ帯の分布域についても明確ではない。しかしながら、小椋ほか(1994)が示したように、穂別町富内～平取町荷負地域の地質構造はデュプレックスを伴う複数の圧縮性の構造群で規定できるため、その極近傍部に位置する図3のC断面東縁部はⅢ帯に含まれるものと判断できる(図3, 4)。現在のところ、Ⅲ帯の東縁に関しては確たるアイデアは持ち合わせていない。

いずれにせよ、これら南北トレンドの地質構造の特長は本地域を代表する変形像であり、本地域の石油地質を考察する上で基本的かつ重要な制限則を提供しているものと考えられる。

3. 地質構造帯と堆積盆発達史との相関

本地域を代表する試錐や試掘井で得られた地下層序は地質構造帯毎に異なっていることが図2から分かる。例えば、第四系の厚い分布はⅠ帯に限られること、Ⅲ帯においては古第三系まで削剝が進んでいること、Ⅰ帯とⅡ帯における古第三系石狩層群は夾炭層と礫岩層に区分されること、さらにⅢ帯では白亜系として函淵層群やエゾ累層群が発達しているのに対してⅠ～Ⅱ帯ではそれらを欠いて火成岩類が分布していることなどである。これらの坑井から得られた層序情報に加え、広域地震探鉱データによる層序追跡と地表地質コンパイルによって得られた本地域の地層発達模式概念を図5に示す。前述したように、Ⅲ帯においては大規模な地層の削剝を考慮する必要があるが、その他の地域では累層のすべてを欠如するほどの削剝はないと考えられるため、本概念図は堆積盆地の発達様式を一次近似的に示していることになる。ま

図5 地層発達概念図と既存坑井の配置

地層発達概念図に関しては石油資源開発㈱社内資料を一部追加修正，縦横スケールなし

た，本図には図2に示した代表坑井の層準の位置と地質構造帯区分を併記してある。この図から分かるように，Ⅱ帯中あるいはこれと東西各帯の境界部は，各時代の堆積盆地の縁辺部を司っているものと理解できる。各時代における堆積盆地の分類やテクトニクスの背景については後述するが，Ⅱ帯およびその周辺部は，エゾ累層群と函淵層群からなる白亜紀前弧堆積盆地（新井田・紀藤，1986；Ando，2003）の西縁，南長沼層で示される後期漸新世ブルーパート堆積盆地（栗田・横井，2000）の東縁，いわゆるグリーンタフ相といわれる前～中期中新世の滝の上層火山岩卓越相の東縁，川端層・振老層からなる中期中新世前縁盆地（保柳ほか，1986；保柳，1989）の西縁に一致している。また，本地域全体に分布している石狩層群についても，Ⅰ～Ⅱ帯では礫岩層が灰炭層の下に発達しⅢ帯と岩相が異なっているのに加え，時代的・地史的にもⅠ～Ⅱ帯の石狩層群をⅢ帯の幌内層下部に対比したほうが妥当であるとの見解も最近提案され（花方，2003），始新世の堆積盆地のあり方に関しても一定の制限を与えている。以上に述べたさまざまな事実は，本報告で規定した地質構造帯の1つであるⅡ帯付近が，歴史的にも堆積盆の分布を規制する第一級の構造帯的なものとして位置づけられることを示唆するものである。

4. 力学的な検討

前述したように，中央北海道南部地域の地質構造は南北トレンドの3つの構造帯に区分することが可能であった。また，そうした地質構造の形成過程は後期漸新世～中期中新世の伸張性構造の形成から，主として鮮新世以降の圧縮性構造へ転換するという2つのプロセスにより説明できるものと整理した。それでは，本地域はいかなる造構応力史を有しているのであろうか，あるいは現在の地殻応力場は構造様式といかなる相関を有しているのであろうか。この問題を検討すべく本地域の代表箇所において力学的な予察を行ったので以下に紹介する。

4.1 コアフラクチャーによる古応力場の解析

本項においては，恵庭SK-1号井のコアフラクチャー解析から得られたⅠ帯の応力史について述べる（Yamada and Yamaji，2002）。恵庭SK-1号井では，深度4,448mから掘止深度の5,000mまでの区間において，玄武岩～安山岩質火山岩および同質火砕岩を主体とする白亜系隈根層群を採鉱した（図2）。本井では深度4,573～4,582mの9m区間でコア掘りを実施し，泥岩や凝灰岩のコアを採取した。本コアには層理面が観察されることからFMI*検層イメージとの対比ができ，フラクチャーの定方位化を可能とした。またフラクチャー

* シュルンベルジェ社商標

図6 恵庭SK-1号井のコアフラクチャー投影
コア深度：4573.0-4582.9m, シュミットネット下半球投影, 大円：フラクチャーの走向傾斜, 白丸：条線の方
矢印：スリップセンス

面の条線とずれのセンスは、面上の物質の変形や粗滑法則を考慮して実体顕微鏡で記載した。定方位化と条線記載が可能であったフラクチャーは18条あり、それらは北

北東-南南西走向で東に低傾斜する正断層を示すものが多かった(図6)。しかしながら、それ以外の方向を示す正断層や高角走向移動断層,あるいは逆断層なども観察された。

フラクチャーから応力場を求める方法として、共役断層法や逆解法などのさまざまな手法があるが、今回観察されたフラクチャーに関しては、山路(1999, 2001, 2004; Yamaji, 2000など)が新しく提案した多重逆解法で求めた。多重逆解法は、断層面に記録されたスリップ方向から断層活動時の応力場を計算する方法で、複数の応力場を経験した場合でもそれぞれを分離できるという利点を持つ。解析の結果として以下に示す6つの古応力場を得ることができた(図7)。なお、解析結果には6つの古応力場に属さないものも存在しているが、これらは得られた解がクラスターを形成しておらず、優位な解であるとは判定されなかったものである。

応力A：西北西-東南東方向の軸性圧縮応力場

応力B：東北東-西南西方向の圧縮・北北西-南南東方向の伸張を示す三軸応力場

応力C：東南東-西北西方向の圧縮・北北東-南南西方向の伸張を示す三軸応力場

応力D：南北方向の軸性伸張応力場(ただし、圧縮軸は東30°傾斜)

応力E：南北方向の軸性伸張応力場(ただし、圧縮軸

図7 多重逆解法による恵庭SK-1号井基盤岩の応力解析結果

シュミットネット下半球投影, 左図：tadpole：最大圧縮主応力軸(σ_1)方向, 尾の方向と長さ：最小圧縮主応力軸(σ_3)の方向と伏角, 右図：tadpole：最小圧縮主応力軸(σ_3)の方向と伏角, 尾の方向と長さ：最大圧縮主応力軸(σ_1)の方向と伏角, A~F：応力解析によって得られたクラスター分布域

は東60°傾斜)

応力F: 南北方向の軸性伸張応力場 (ただし, 圧縮軸は鉛直方向)

ここで記載された軸性圧縮応力場, 三軸応力場および軸性伸張応力場とは, 圧縮を正とした際の最大主応力 (σ_1), 中間主応力 (σ_2) および最小主応力 (σ_3) の値により, $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$, $2\sigma_2 = \sigma_1 + \sigma_3$ および $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ で大分類される応力場を各々指している。得られた古応力場を整理すると, 応力Aの東西圧縮場, 応力BとCの東西圧縮・南北伸張の横ずれ応力場, そして応力D, E, Fの南北伸張場の3つに大別することが可能である。

今回観察されたフラクチャーは白亜系の隈根尻層群に発達していたものである。そのため, 得られた古応力場は, 恵庭 SK-1 号井周辺地域における白亜紀以降の造構履歴を表現したものとなる。前述の地質構造帯区分で述べたように, 恵庭 SK-1 号井周辺地域は I 帯に属しており, 主要な地質構造は後期漸新世～中期中新世に形成された南北性の伸張性構造群のみと考えられる。また後述するように, 後期漸新世・南長沼層の堆積盆地は南北性右横ずれのトランスンション場でブルアパート盆地と

して形成されたものと考えられている (栗田・横井, 2000)。以上を整理すると, 本地域が被った応力場は, 東西方向の伸張応力場か北東-南西方向の圧縮で北西-南東方向の伸張を示す三軸応力場で表現されるはずである。しかしながら, コアフラクチャーの解析によって得られた古応力場を見れば, この応力状態に合致するものではなく複雑な像を呈している。例えば, 応力Aの東西圧縮場はⅡ～Ⅲ帯に作用した鮮新世以降の圧縮場に調和的であり, 伸張場のみと判断された本帯においても何らかの新时期圧縮応力が作用したと考えたほうが良いことを物語っている。また, 応力BとCの東西圧縮・南北伸張の横ずれ応力場も後期漸新世の南北性右横ずれ場を満足に説明できるものはない。上記したように I 帯は全体として南北トレンドを呈しているものの, その内部の小規模地塊は明瞭な南北方向を示さず, 恵庭 SK-1 号井周辺地域の断層配列様式にしても北東-南西方向と北北西-南南東方向の2方向に支配されている (図4右図)。以上のことから, フラクチャー解析から得られた応力BとCの古応力場は, I 帯内部の局所的な応力場か小地塊形成発達の応力場を示したものであると考えられる。さらに

図8 基礎試錐「馬追」の地下応力状態と破壊様式

●: DSTより得られた地層圧実測値, ■: リークオフ圧力, □に矢印の付いたもの: リークオフ圧力まで達せず終了したリークオフテストの最大圧力, [W]: 楔型破壊, [SS]: 単一剪断型破壊, [N]: 網目型破壊, [F]: 流動型破壊, [W-SS]: 楔型～単一剪断型破壊, [SS-N]: 単一剪断型～網目型破壊, [N-F]: 網目型～流動型破壊
図中の暗色部: 有効応力値が小さいため断裂の発生しやすいゾーンの概略深度範囲

は、応力 D, E, F で示された南北性の伸張場も単純ではない。しかしながら、I 帯が小規模ブロックの集合体であると考えられ、かつ本地域は南北の両方向における隆起部となっていることを考慮すると、応力 D, E, F の南北伸張場はこの構造配列を形作った際の応力場を示したものと予想することが可能である。

4.2 現在地殻応力場の検討

本項においては、基礎試錐「馬追」の各種データから得られた II 帯の現在地殻応力状態を記載し、本地域の地質構造様式との相関性について検討する。図 8 に本試錐の地層圧プロファイルと三軸圧縮試験から得られた岩石の破壊様式を示した。この図の上加重圧（垂直応力、 σ_v ）は密度検層からの積算により、最小応力（ σ_3 ）はリークオフ圧力を代用し、さらに地層圧（ P_p ）は泥質岩の音波検層速度と DST で得られた値から求めている。これらの各圧力プロファイルから分かるように、得られた最小応力は垂直応力よりも小さい値を呈しており、最小応力は最小水平応力（ σ_{Hmin} ）を示したものであることが分かる。また最小水平応力と垂直応力の値が近似している事実は、垂直応力よりも大きい最大水平応力（ σ_{Hmax} ）の存在を示唆するものである。すなわち、

本井の地下応力配置は、 $\sigma_{Hmax} > \sigma_v > \sigma_{Hmin}$ であり、走向移動断層タイプであると推定される。一方、本井から得られる有効最小応力（最小応力から地層圧を差し引いた値、 $\sigma_3 - P_p$ ）は、深度が増大することによって単純には増加していない。深度に対して有効応力が低くなる現象は深度 3,000 m 付近と 4,500 m 付近に顕著に現れており、この部分は造構応力発生に伴う断層発生箇所に対応すると考えられる。三軸圧縮試験時の封圧に相当する有効最小応力値と岩石の破壊様式の相関を見ると、深度 3,000 m あるいは 4,000 m 付近では楔型破壊～単一剪断型破壊の様式を示し、極脆性～脆性の変形挙動を呈している。すなわち、これらの深度で形成される断層系は剪断面角の極めて小さい脆性断層が形成されることとなる。深度 3,000 m 付近の不安定箇所に対しては、実際の坑井でもスラストを確認していることから上記の検討は裏付けられる。また深度 4,500 m 付近の不安定箇所は、石狩層群夾炭層の分布深度に対応している。これまでのさまざまな地質データから示されるように、本層中には断層が発達しやすいことが判明しており、これもまた本検討の妥当性を物語ったものと考えられる。

前述したように、基礎試錐「馬追」の位置する II 帯

図 9 基礎試錐「馬追」で想定される断層形成メカニズム

右図中の暗色部：有効応力値が小さいためスラストの発生しやすいゾーンの概略深度範囲
縦横スケールは概念的

は、主として鮮新世以降に強烈な圧縮応力場に置かれた地域である。また、このような応力状況は現在もお継続しているものと考えられている (Arita *et al.*, 1998)。しかしながら、上記の検討によって得られた本地域の現在応力場は走向移動断層型を示している。この問題に関しては図9のような応力状況を想定することによって説明することが可能であろう。すなわち、現在は残留応力が残る横ずれ断層タイプの応力場を呈しているものの、強力な造構応力 (C_y) が発生した場合の最大水平応力 ($\sigma_{Hmax}(t)$) は、 C_y を加算したものとなる。また、最小水平応力 ($\sigma_{Hmin}(t)$) にしても、ポアソン数を m とすると C_y/m 分は加算されることになる。結果として、本井付近の造構応力場は $\sigma_{Hmax} > \sigma_{Hmin} > \sigma_V$ の逆断層タイプの配置に転換し、有効応力の低下した部位に脆性なスラストを形成したものと考えられる。

5. テクトニクス的背景

本地域の地質構造像を骨格として、その力学的な背景に関して検討した結果、地域ごとに異なる構造場が存在し、それは堆積盆地の発達史や石油地質と密接に関連したものであることが明らかになった。しかしながら、1つの構造帯でも重複した造構履歴を有する地域もあるため変形像は複雑であり、特にフラクチャー解析から得られた古応力場の検討結果は単純な造構モデルでは説明がつかないことを示していた。以下に、本地域におけるテクトニクス的な背景を引用し、本報告で述べた変形像や応力像の位置づけについて検討を加えることとする。

中央北海道南部地域における白亜紀以降のテクトニクスは、白亜紀～古第三紀初期における前弧盆地のセッティングから始まったと考えられる (新井田・紀藤, 1986; Ando, 2003など)。その後の後期漸新世には、栗田・横井 (2000) によって右横ずれトランステンションによるプリアパート盆地の形成と南長沼層の堆積盆埋積が行われたと解釈された。なお、この右横ずれの運動は前期中新世以降に中央北海道の時計回りのブロック回転運動を発生させたという考えも古地磁気学の検討から最近提案された (竹内, 1997; Takeuchi *et al.*, 1999)。中期中新世には日高帯が隆起を開始し本地域は右横ずれのトランスプレッション場に転換し、川端層などの前縁盆地のセッティングに転換した (保柳ほか, 1986; 保柳, 1989)。さらに後期中新世～鮮新世以降には千島前弧地塊 (スリパー) 西進活発化による強烈な東西圧縮場が提供されたものと考えられている (木村, 1981, 1982; Kimura, 1986など)。

以上のテクトニクス的な背景を考慮しつつ本報告で展開した地質構造場を整理すると、I帯とII帯に分布する

後期漸新世～中期中新世の伸張性構造群は、右横ずれトランステンションのテクトニクスの下で形成されたものであることが理解される。また、II帯とIII帯に発達する新規の圧縮性構造群は、後期中新世～鮮新世以降の東西圧縮テクトニクスを主体とするが、一部は中期中新世からのトランスプレッションのテクトニクスが寄与した可能性を示唆している。一方、恵庭SK-1号井のコアフラクチャーから得られた古応力場に関しては、応力Aの場合は東西圧縮場であることから、前述したように後期中新世～鮮新世以降の東西圧縮テクトニクスの影響が及んでいるものと推定できる。また、応力BとCの東西圧縮・南北伸張の横ずれ応力場については、周辺に分布する断層系の配列からI帯内部の小規模地塊の応力場を示したものであると考えた。I帯に分布する小地塊の配列は北東-南西方向の断裂系に支配された分布様式となっていることを考えると、これらの小地塊は古地磁気学の検討から得られた前期中新世以降の時計回りの回転に関係した古応力場と考えることを支持している。Takeuchi *et al.* (1999) の示した回転ブロック体の西縁は石狩低地帯の中央部を南北に走っており、本報告での構造帯配列トレンドに調和的なものとなっている。先に示したII帯が大規模な南北性断層群から構成され、第一級の構造線 (帯) 的な意味を有しているとの考えは、この回転ブロック帯とも何らかの関係を有しているのかもしれない。さらに、応力D, E, Fで示された南北性の伸張場も応力B, C同様に前期中新世以降の小地塊の回転時の応力場の反映である可能性がある。しかし、この南北方向の差別的な昇降形態については、後期漸新世・南長沼層の堆積様式あるいは始新世・石狩層群の堆積様式を規制している可能性も残されており、その形成時期や造構応力の実像について現段階では結論できない。

6. ま と め

本報告では、最近の基礎調査や企業探鉱によって得られた地下情報を基礎として、いわゆる石狩堆積盆地と総称される中央北海道南部地域の深部地質構造に関して検討を加え、地質構造帯区分を行った。また石油地質の特徴や堆積盆発達史との相関、さらには力学的な予察結果やテクトニクスの背景について紹介を試みた。本報告で得られた知見は以下のようにまとめられる (図10)。

- 1) 本地域は南北トレンドの3つの地質構造帯に区分することが可能である。本報告では、西側に分布する伸張性構造群から構成される構造帯をI帯、その東側に分布し浅部は圧縮性の構造から、深部では伸張性構造が発達する構造帯をII帯、さらに最も東側に分布し圧縮性構造群から構成される構造帯をIII帯

と呼称した。

- 2) I～II帯に発達する伸張性構造群の形成は後期漸新世～中中新世の右横ずれトランステンション場に形成され、II～III帯に発達する圧縮性の構造群は主として鮮新世以降の東西性圧縮テクトニクスによって形成されたものと整理される。
- 3) 深部石油地質の特徴について整理すると、地質構造帯ごとに異なったプレイタイプを考察する必要がある、地質構造の変形像と運動像は本地域の石油地質考察に基本的かつ重要な情報を提供しているものと考えられる。
- 4) 各地質構造帯と堆積盆発達史との関係について検討した結果、II帯付近は白亜紀以降の各堆積盆地の縁辺境界部に位置し、堆積盆地の発生・発展を規定した第一級の構造線(帯)として位置づけられる可能性を示している。
- 5) 造構応力史や現在地下応力場に関しての力学的な予察結果によれば、本地域は非常に複雑な応力履歴を経験し、かつ1つの造構モデルでは説明できないことが理解される。例えば、単純な伸張性構造群か

ら構成されるI帯においても圧縮応力場の履歴が認められ、検討地点に特有な局所的古応力場も抽出される。

- 6) テクトニクスを基とした各地質構造の意味について検討を加えた結果、代表的な地質構造の力学的な背景が明らかになった。また複雑な造構応力史に関しても一定の解釈を加えることが可能である。

以上のように、最近の基礎調査や企業探鉱の成果によって、中央北海道南部地域の深部地質構造や石油地質が相当に明らかとなってきている。しかしながら、広域的に統一性のある地質構造の変形像・運動像・力学像を展開することは不可能で、今後多くの検討課題を残したものとなった。それは、これまでに得られた坑井データや地震探鉱データが依然として散在的であり、したがって深部地質構造を総括することには歴然とした限界があったことによる。特に、力学的な検討に関しては、その一部に対し予察的に実施されたにすぎない。しかし、本報告で展開されたような地質構造の位置づけをより明確化し、それを探鉱成果に結びつけていくことは我々の重要な使命である。そのためにも、さらなるデー

図10 地質構造形成概念図と石油地質のイベント
縦横スケールなし

タの蓄積による総合的なモデルの構築を継続的に試みていくことが今後の大きな課題であると考えます。

謝 辞

石油技術協会探鉱技術委員会には本報告の内容をシンポジウムで発表する機会を与えていただいた。石油公団には基礎調査資料の公表を許可していただいた。石油資源開発株式会社には本報告の公表を許可していただいた。石狩堆積盆地の石油地質に関しては、同社先輩諸氏の成果が集約されている。最近の石油地質の解釈においては、同社の横井 悟、浜田康史、サハリン石油ガス開発株式会社の吾妻高志、アラビア石油株式会社の武富浩各氏の検討結果の一部を引用した。また新潟大学の栗田裕司助教授からは地層発達概念に関する未公表資料を利用させていただいた。服部昌樹、佐賀 肇、高畑伸一、瀬能 修ほかの同僚諸氏には常日頃から有益なご教示をいただいている。京都大学の山路 敦助教授には小断層解析法に関してご指導をいただいた。以上の方々に深く感謝の意を表する。

引 用 文 献

吾妻 稔, 1961a: 由仁平野と馬追丘陵の地下構造 (その1). 石技誌, **26**(4), 169-179.
 吾妻 稔, 1961b: 由仁平野と馬追丘陵の地下構造 (その2). 石技誌, **26**(7), 339-345.
 吾妻高志・横井 悟・稲葉 充, 1996: 北海道勇払地域におけるフラクチャー解析. 石技誌, **61**(1), 45-50.
 Ando, H., 2003: Stratigraphic correlation of Upper Cretaceous to Paleocene forearc basin sediments in Northeast Japan: cyclic sedimentation and basin evolution. *Jour. Asian Earth Sci.*, **21**, 921-935.
 Arita, K., Ikawa, T., Ito, T., Yamamoto, A., Saito, M., Nishida, Y., Sato, H., Kimura, G., Watanabe, T., Ikawa, T. and Kuroda, T., 1998: Crustal structure and tectonics of the Hidaka Collision Zone, Hokkaido (Japan), revealed by Vibroseis seismic reflection and gravity surveys. *Tectonophysics*, **290**, 197-210.
 藤井 健・森谷信明, 1998: 勇払開発10年のあゆみ. 石技誌, **63**(5), 369-375.
 花方 聡, 2003: 有孔虫化石からみた始新統幌内層および漸新統紅葉山層の地史 (再検討). 石技誌, **68**(4), 259-270.
 保柳康一, 1989: 中央北海道中新統タービダイトと日本海拡大. 月刊地球, **11**(5/6), 292-297.
 保柳康一・宮坂省吾・渡辺 寧・木村 学・松井 愈, 1986: "衝突帯"のタービダイト相形成とテクトニクスー中新世・中央北海道の例一. 地団研専報, no. 31, 265-284.
 木村 学, 1981: 千島弧南西端付近のテクトニクスと構

造応力場. 地質雑, **87**(11), 757-768.
 木村 学, 1982: 島弧会合部のテクトニクスー北海道の場合一. 構造地質, no. 28, 5-22.
 Kimura, G., 1986: Oblique subduction and collision: forearc tectonics of Kuril Arc. *Geology*, **14**, 404-407.
 栗田裕司・横井 悟, 2000: 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. 石技誌, **65**(1), 58-70.
 正谷 清, 1979: 北海道海域の堆積盆の分布と性格. 石技誌, **44**(5), 254-259.
 中井順二ほか, 1978: 空中磁気探査法に関する研究報告 (その1)ー陸棚海域地下資源賦存に関する基礎研究一. 地質調査所.
 新井田清信・紀藤典夫, 1986: 北海道における白亜紀島弧ー海溝系ーその地質構成と造構史. 地団研専報, no. 31, 63-79.
 西田英毅・早稲田周・岩野裕継・加藤恵悦, 1997: 北海道原油の地化学的特徴. 石油資源開発(株)技術研究所研究報告, no. 12, 25-31.
 小椋伸幸, 1993: 南勇払油・ガス田. 石油技術協会編, 最近の我が国の石油開発ー石油技術協会創立60周年記念一, 4-5.
 小椋伸幸・葉茸真宝・川田耕司, 1994: 北海道空知ーエゾ帯白亜系ー第三系深部に見られるスラスト・ナップ構造. 構造地質, no. 40, 43-58.
 寒河井正・青山栄享, 1998: 先端技術と新しい発想による北海道勇払の天然ガスおよびコンデンセートの開発. 石技誌, **63**(2), 105-110.
 Ogawa, K. and Suyama, J., 1976: Distribution of aeromagnetic anomalies, Hokkaido, Japan, and its geologic implication. In Aoki, H and Iizuka, S., eds.: *Volcanoes and Tectonosphere*, 207-215, Tokai Univ. Press, Tokyo.
 石油公団, 1971: 平成45年度国内石油・天然ガス基礎調査 基礎試錐「空知」調査報告書.
 石油公団, 1974: 昭和48年度国内石油・天然ガス基礎調査 基礎試錐「南幌」調査報告書.
 石油公団, 1992: 平成3年度国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「日高地域」解釈報告書.
 石油公団, 1998: 平成8年度国内石油・天然ガス基礎調査 基礎試錐「馬追」調査報告書.
 石油公団, 1999: 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.
 石油資源開発札幌鉱業所勇払研究グループ・岡村 聡・加藤孝幸・柴田 賢・鷹澤好博・内海 茂, 1992: 北海道苫小牧市東部における坑井から採取された白亜紀花崗岩類. 地質雑, **98**(6), 547-550.
 武富 浩・西田英毅, 2002: 石狩ー日高堆積盆地における石油システムー勇払油・ガス田の地化学データを中心としてー. 石技誌, **67**(1), 52-61.
 竹内 徹, 1997: 南サハリンの第三紀火山岩類のK-Ar年代とそのテクトニックな意義. 地質雑, **103**(1), 67-79.

- Takeuchi, T., Kodama, K. and Ozawa, T., 1999: Palaeomagnetic evidence for block rotations in central Hokkaido ? south Sakhalin, Northeast Asia. *Earth Planet. Sci. Results*, **127/128**, 1333-1348.
- Yamada, Y. and Yamaji, A., 2002: Determination of paleostress from mesoscale shear fractures in core samples using the multi-inverse method. *Jour. Petrol. Geol.*, **25**, 203-218.
- 山路 敦, 1999: 多重逆解法: 複数の応力を検出する小断層解析の手法. 構造地質, no. 43, 79-88.
- Yamaji, A., 2000: The multiple inverse method: a new technique to separate stresses from heterogeneous fault-slip data. *Jour. Structural Geol.*, **22**, 441-452.
- 山路 敦, 2001: 新しい小断層解析. 地質雑, **107**(7), 461-479.
- 山路 敦, 2004: 新しい小断層解析法の新潟褶曲帯への適用一褶曲成長に不調和だが流体上昇に有利な応力. 石技誌, **69**(2), 181-189.