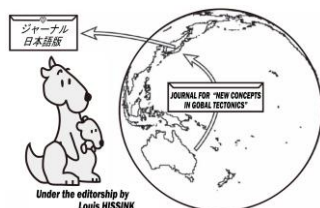


NCGT Journal, Volume 12, Number 2, June 2024

<http://www.ncgtjournal.com/>

『グローバルテクトニクスの新概念』日本語版 発行 2024 年 8 月

<https://www.ncgtj.org/>



編集長: Louis HISSINK (louis.hissink@outlook.com)

編集委員: Bruce LEYBOURNE, USA (leybourneb@iascc.org)

Giovanni P. GREGORI, Italy (giovannipgregori38@gmail.com)

Per MICHAELSEN, Mongolia (perm@must.edu.mn)

Lev MASLOV, USA (lev.maslov@cccs.edu)

Masahiro SHIBA, Japan (shiba@dino.or.jp)

目次

■ 原著論文 Articles

Quaternary Tectono-sedimentary History of the central Honshu area, Japanese Islands -- Masahiro Shiba

日本列島中部地域の第四紀構造―堆積史 (柴 正博 訳) 34

Electromagnetic signals that preceded the destructive earthquakes that occurred in Taiwan between April 2 and 3, 2024 -- Daniele Cataldi, Gabriele Cataldi and Valentino Straser

2024 年 4 月 2 日から 3 日にかけて台湾で発生した破壊的な地震に先行する電磁シグナル
(要旨のみ 柴 正博 訳) 51

Occurrence of Italian Earthquakes and UTC time -- Daniele Cataldi, Gabriele Cataldi & Valentino Straser.

イタリア地震の発生と UTC 時間 (要旨のみ 柴 正博 訳) 51

Electromagnetic signals that preceded the M4.8 magnitude earthquake that occurred between

New Jersey and New York on April 5, 2024 -- Daniele Cataldi, Gabriele Cataldi and Valentino Straser

2024 年 4 月 5 日にニュージャージーとニューヨークの間で発生したマグニチュード M4.8 の
地震に先行した電磁シグナル (要旨のみ 柴 正博 訳) 52

The Earth's global system of lineaments Statistics in distribution by length and the fractal dimension of the crust

-- Lev Maslov and Vladimir Anokhin

地殻のフラクタル次元と長さ分布によるリニアメント統計学の地球グローバルシステム
(柴 正博 訳) 53

The P-velocity models of continental tectonosphere (Territory of Ukraine) -- V. V. Gordienko and L. Ya. Gordienko

大陸構造圏の P 波速度モデル (ウクライナ領土) (足立久男 訳) 59

Direct Prospecting Methods of Satellite and Photo Images, Frequency-Resonance for Hydrocarbon Searching
in Coal and Shale Basins -- Mykola Yakymchuk, Ignat Korchagin and Valery Soloviev

衛星画像と写真画像の直接探査法, 石炭・頁岩層における炭化水素探査のための周波数共鳴法
(本文と図の一部を省略して要約 岩本広志 訳) 67

■ NGCT ジャーナルについて

..... 82

日本列島中部地域の第四紀構造—堆積史

Quaternary Tectono-sedimentary History of the central Honshu area, Japanese Islands

Masahiro Shiba

Museum of Natural and Environmental History, Shizuoka

(柴 正博 訳)

要旨: 日本列島の第四紀の地殻変動は、山脈の急速な隆起と沿岸と内陸の盆地の相対的な沈降を引き起こした。本州中部 33 海域の鮮新世から第四紀堆積物の年代層序学的・相層序学的解析から、構造—堆積史は以下の 4 段階で発達したことが明らかになった。1) 鮮新世～前期更新世前期には、内陸盆地が発生し、深海盆にタービダイトが堆積した。2) 前期更新世後期～中期更新世前期には、島弧の隆起が起こり、内陸盆地の沈降域は拡大して分化し、海域では斜面がファンデルタによって埋積されて扇状地が拡大した。3) 中期更新世後期には、島弧の地殻隆起が加速され、同時に沿岸盆地には海水準変動に対応した堆積物が累積した。4) 後期更新世以降は、海水準の下降と地殻の隆起で段丘が形成された。このような第四紀地殻変動の特徴は、島弧地殻の大規模隆起と海水準変動によって形成されたものと考えられる。特に中期更新世後期（43 万年前）以降には、新たな大規模隆起運動と海水準が約 1,000 m 上昇して、現在の地形が形成された可能性がある。大規模な隆起と海面上昇による島弧の形成は、プレートの沈み込みや衝突では説明できない。

Keywords: Pleistocene, Tectono-sedimentary History, large-scale uplift, sea-level rise, Neotectonic Movement, MIS.

はじめに

日本列島の第四紀地殻運動の特徴として、松田・衣笠（1988）は、現在の主要山地が急激に隆起し、その周辺に礫質堆積物を発達させて陸地が拡大するいっぽう、沿岸地域や内陸地域では沈降が起こり、特に本州中央部では断層運動が前期更新世後半（カラブリアン）から開始され、地塊がブロック化したことを述べた。このような日本列島の第四紀の地殻運動の原因について、松田・衣笠（1988）は第四紀の日本列島が概して東西（ないし西北西—東南東）方向に圧縮されていて、そのような地域が日本周辺プレートの収束境界—衝突境界とその近傍にあることから、第四紀はプレート運動史の上でもそれ以前の新第三紀とは異なった特殊な時代（衝突の時代）であるとした。

第四紀の日本列島において、藤田（1968, 1983）は中期更新世以降の島弧の大規模隆起運動を「六甲変動」と呼

び、急上昇をはじめた山地から供給された多量の粗粒碎屑物と海水準上昇によって、当時の沿岸部に巨大な臨海扇状地が形成されたことを復元した。藤田（1970, 1982）は、第四紀の地殻変動はそれ以前のグリーンタフ変動とは別個の新しい変動であるとし、鮮新世に始まり中期更新世に最盛期を示す隆起・傾動運動を「島弧変動」と呼んだ。星野（1983, 1991）は、中新世末期と前期更新世後期の海水準がそれぞれ現水深で 2,000 m と 1,000 m の位置にあり、海底を含む地殻の大規模隆起と海水準の上昇によって現在の地形が形成されたとし、鮮新世以降の変動を「ネオテクトニクス変動」と呼んだ。

本州中央部の地形起伏は日本列島の中で最も大きく、3,000 m を超える大起伏地形からなり、それは最新期に形成されたものであるという（貝塚, 1989）。このような第四紀の大規模隆起は、現在の島弧—海溝系のテクトニクスそのものであり、それは新第三紀までのテクトニクスとは大きく異なったものであると思われる。このような

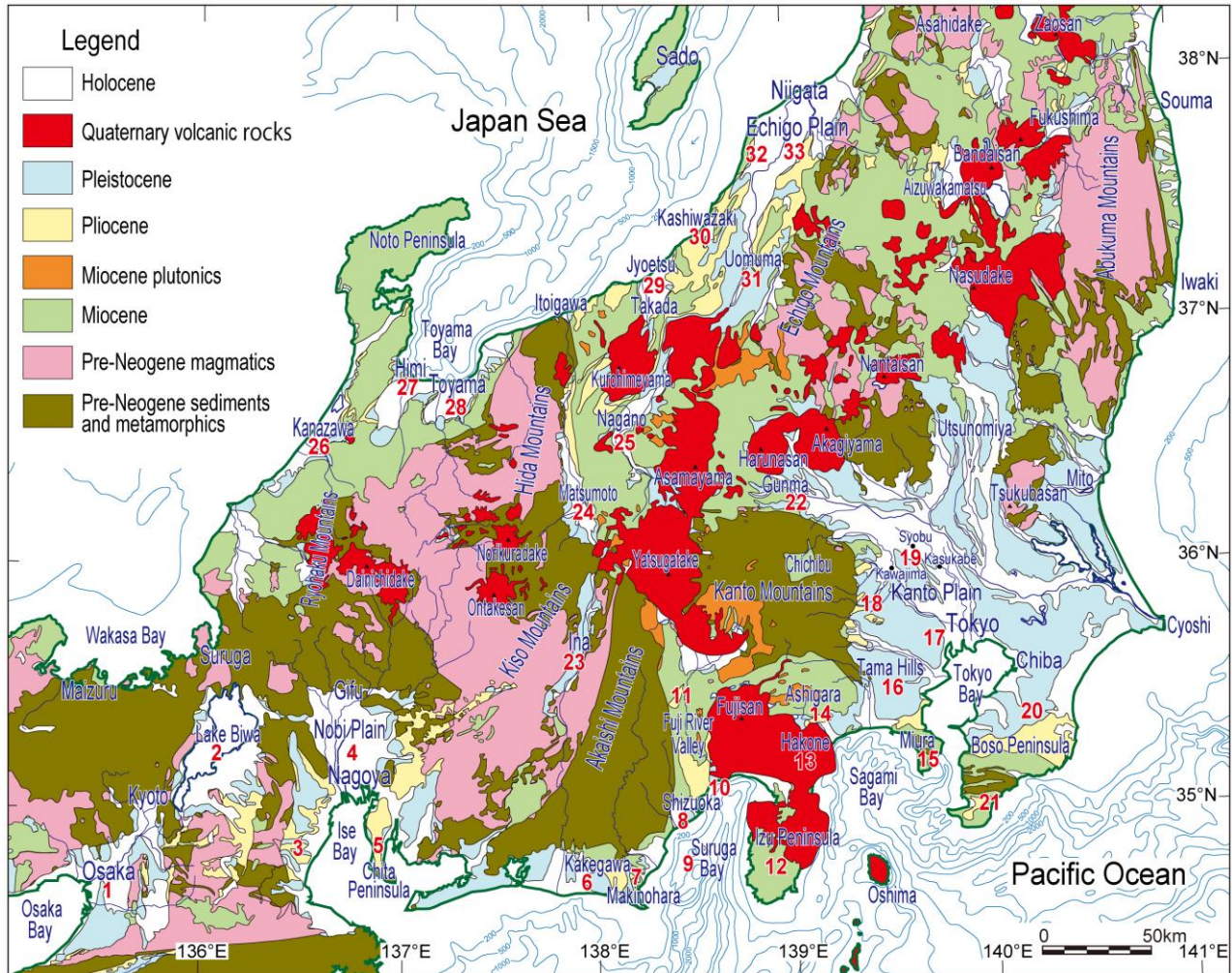


図1 鮮新統と更新統の分布を示す本州中央部の地質図 (Shiba and Committee of the science symposium, 2020 による). 数字は図2の層序柱状の位置を示す.

概念は広く共有されているが、第四紀の隆起運動がいつ、どのように開始して、どのような過程で進行したかという実態については、必ずしも明確ではない。

筆者は中部日本の太平洋地域と南部フォッサマグナ地域の上部新生界を長年にわたって調査研究してきた。これらの地層の年代・古環境・堆積過程にもとづいて、赤石山脈はじめ関東山地や丹沢山地などの後背山地の隆起過程についても年代精度の高い復元を行ってきた(柴 1991, 2017a, 2017b)。最近では、本州中央部～周辺地域の山間盆地・海岸平野・海底堆積盆地(図1)の堆積物について堆積年代や堆積環境の詳細が明らかになっている。それらの知見を総合することができれば、本州中央部の山脈とその周辺地域における隆起過程の全体像を高い年代精度で解明することが可能になると考えられる。

本論文の目的は、柴(2021a)に従い、本州中部山岳の隆起過程をその周辺の堆積物に記録された各地の層序対比(図2)に基づいて再構築し、鮮新世から第四紀の堆積過程を解析することである。なお、図2の造構―堆積史の欄には、4つの発達段階、各地域の島弧内における構造

的位置づけ、主要堆積環境、ならびに山地の起伏特性を示した。

本州中央部各地域の鮮新統～第四系

近畿地域

大阪平野(図1と図2の地域番号(1)、以下同様)周辺の丘陵地に分布する大阪層群は、全層厚が約300～400 mで、礫層・砂層・シルト層・粘土層からなり、Ma番号が付された海成粘土層が挟在する(吉川, 2012)。また、大阪平野の地下にも大阪層群が分布する。大阪平野の地下の鮮新世以降の地層は、基盤岩類を不整合に覆う厚さ1,500 mの粘土・シルト・砂・砂礫層からなり、下半部(都島層)の淡水成層と上半部(田中層)の海成・淡水成層に分けられる(吉川・三田村, 1999)。堆積層に挟在する海成粘土層の層準は海洋酸素同位体ステージ(MIS)と対比されている(吉川・三田村, 1999)。

吉川(2012)は、大阪平野の第四系について、大阪平野へ大量の外洋海水が流入した高海水面期は、Ma3層(MIS

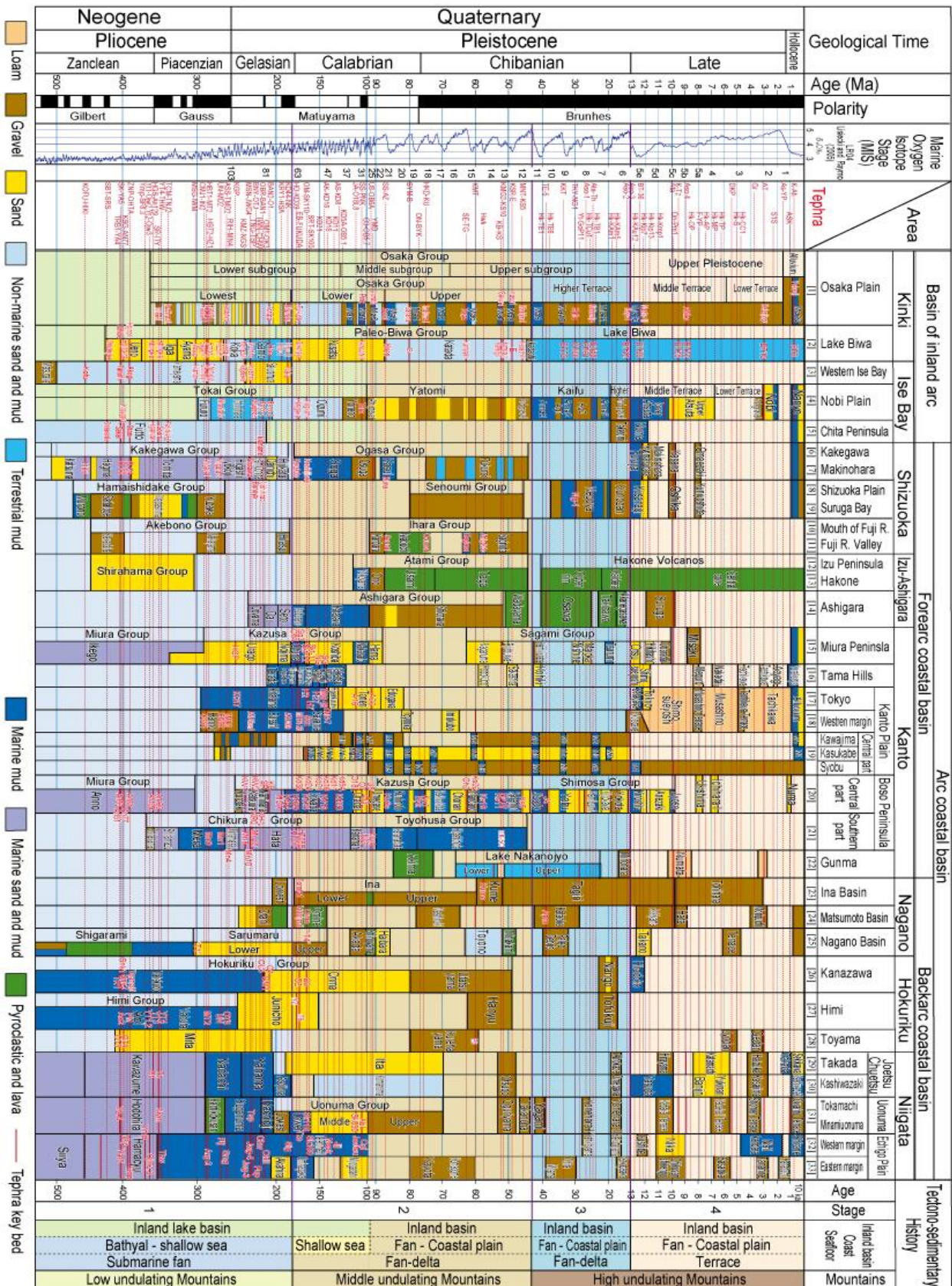


図2 本州中央部の33地域の鮮新統～完新統の層序対比と造構-堆積史段階 (Shiba and Committee of the science symposium, 2020に加筆).
造構-堆積史の番号は段階を示す (1: 鮮新世～前期更新世前期, 2: 前期更新世後期～中期更新世前期, 3: 中期更新世後期, 4: 後期更新世～完新世).

21), Ma6 層 (MIS 15.5), Ma9 層 (MIS 11) の堆積期が特に温暖で、地球規模の気候変動との関連からも重要であるとした。そのうち、Ma9 層は中期更新世の最も大規模な海進によって形成され、最も温暖で海水準も高い間氷期 (Shackleton 1987) に相当し、気候システムの変換期である Mid-Brunhes Event (MBE) (EPICA Community Members 2004) と一致するとした (吉川, 2012)。

藤田 (1976) は、近畿地方における山地・盆地の発展過程を 3 つの時期に分け、約 200 万年前までの第 I 期を「盆地発生時代」、それ以後から大阪層群のほぼ Ma9 層までの第 II 期を「盆地の沈降・拡大の時代から盆地の移動・分化の時代」、Ma9 層堆積後の第 III 期を「山地上昇と段丘形成の時代」と位置付け (第 3 図)、第 III 期以降には断層地塊運動が活発化して隆起速度が増大したことを指摘した。

琵琶湖周辺 (2) には古琵琶湖層群が分布し、琵琶湖底には琵琶湖層が分布する (吉川・山崎, 1998)。古琵琶湖層群を堆積させた古琵琶湖盆は、鮮新世の中期ごろに伊賀・上野盆地で発生し、その後に湖盆が北方へ移動して現在の琵琶湖となった (川邊, 1981)。川邊 (1981) によれば、移動の原因は北北西-南南東と東北東-西南西方向の互いに直交する断層や撓曲によって 3-6 km² の 6 つの地塊が古琵琶湖層群堆積中に段階的に沈降・傾動運動を行ったという。

古琵琶湖盆の移動をみると、200 万年前頃に発生した蒲生層堆積盆地は、それまでの上野層～甲賀層の堆積盆地に比べて、急激に北方ないし西方へ移動・拡大した (林・古琵琶湖団体研究グループ, 1981)。その最大沈降部が蒲生層堆積盆地の中でも北部にあり、蒲生層最上部の堆積期には北側山地から湖東流紋岩礫を主体とする粗粒堆積物の供給によって滞水域が縮小した (川邊, 1983)。そして、草津層堆積期にはおもに東側の鈴鹿山脈由来の多量の礫の供給があり、堆積域の中心はより北に移り、鈴鹿山脈の隆起の顕在化に伴い滞水域が縮小した (川邊, 1983)。

公文 (1999) によれば、琵琶湖底の琵琶湖層 (琵琶湖粘土層) の基底年代は約 40 万年前と推定され、それ以降に琵琶湖およびその周辺の近江盆地は場所によってかなり異なる沈降速度をもっていて、現在の琵琶湖および近江盆地の変動はこの約 40 万年前に始まった新しい変動の反映とみられるという。また、里口 (2010) も琵琶湖の北湖地域は 0.6~0.45 Ma 以降に沈降が活発化し、その中央を南北にのびる中央撓曲は少なくとも 44 万年前までには消滅したという。

以上のように、近畿地域 (1~2) では、(1) 鮮新世に堆積盆地が発生し、(2) 約 200 万年前からは地塊運動による新たな沈降が始まって堆積盆地が移動・拡大し、大阪平野には海成粘土層が堆積し始めた。その後、(3) 約 40

万年前から山地の急速な地塊状隆起が始まり現在の堆積盆地の骨格が形成され、山地上昇と段丘形成の時代となり、海岸平野では海洋酸素同位体ステージに対応した海成粘土層が周期的に堆積した。(4) 13 万年前以降には、ほぼ現在の地形配置に沿って中位・低位段丘群が形成された (第 2 図参照)。

伊勢湾周辺地域

伊勢湾周辺の各地、すなわち伊勢湾西岸 (3)、濃尾平野 (4)、知多半島 (5) には鮮新-更新統の東海層群が、その中央に位置する濃尾平野 (4) の地下に更新統～完新統が分布し、渥美半島から浜松地域には中部～上部更新統が分布する。

吉田 (1990) は、東海層群が堆積した東海湖盆の古地理の変遷について次のように述べている。鮮新世の初めに知多半島南部から伊勢湾西岸南部を結ぶ方向に隆起帯が生じ、その北側の沈降部に東海湖が形成され、鮮新世を通して南側の隆起帯から砂礫質堆積物が供給された。そして、鮮新世末期には東海湖盆の東～北東側の設楽火山岩-濃飛流紋岩類地域から堆積物の供給が卓越した。前期更新世前半には、湖盆の堆積域はさらに北西～西側に移動し、新たに北方～西方の養老山地と鈴鹿山脈からも堆積物が供給された。前期更新世後半には、堆積域は湖盆北西縁に移動縮小し、最後は鈴鹿山脈東麓に極限された堆積域に同山脈由来の粗粒堆積物からなる米野層が集積した。

鮮新世から前期更新世にかけて存在した東海湖盆の消滅後、伊勢湾周辺地域には断層地塊運動が活発化して、上昇域の山地塊、垂上昇域の丘陵地帯、沈降域の盆地の 3 つの地域が区別されるようになった (桑原, 1980)。そして、沈降域の盆地には中期更新世以降の地層が西に厚くかつ深くなる濃尾傾動盆地が形成された (桑原, 1968)。しかし、盆地の地下では東海層群相当層下部およびそれより下位の地層群はむしろ東側に厚く、中期更新世以降の傾動運動の影響は受けておらず、傾動運動の開始は東海層群相当層最上部の米野層堆積期からと推定される (牧野内 2005)。すなわち、伊勢湾周辺の下部更新統は新第三系の堆積環境を引き継いでいるのに対して、中期更新世以降の地層は新たな堆積盆地に形成されており、両者には明瞭な差異がある (牧野内 2005) とされている。

桑原 (1980) によれば、鈴鹿山脈北部の上昇は、扇状地性の厚い礫層からなる米野層の堆積に反映されていて、伊勢湾周辺の基盤山地の隆起運動は前期更新世後期にすでにその萌芽が認められるという。また、桑原 (1980) は、弥富層中にも海成の堆積物は認められるが、顕著な海成粘土層が挟まれるのは海部層基底からであると述べている。須貝ほか (1999) によれば、濃尾平野の過去 90 万年間の堆積に関しては海洋酸素同位体ステージと対応

させて、大阪平野や関東平野との層序対比が可能になったとされる。

以上のように、伊勢湾周辺地域（3～6）では、(1) 鮮新世には東海湖盆が発生し、前期更新世前半には堆積盆地が北西に移動した。(2) 前期更新世後半に西側の鈴鹿山脈から粗粒堆積物が供給されて東海湖盆が消滅し、その後、伊勢湾周辺地域に断層地塊運動が活発化して、濃尾傾動盆地が形成された。(3) 約 40 万年前以降に濃尾傾動盆地には顕著な海成粘土層が堆積し、海洋酸素同位体ステージに対応した海水準変動を反映して海成粘土層が周期的に堆積した。(4) 13 万年前以降には、熱田層や濃尾層が堆積し、同時に中位・低位段丘群が形成された（図 2 参照）。

静岡地域

掛川地域（6）には、鮮新統～下部更新統下部の掛川層群と下部更新統上部～中部更新統下部の小笠層群が分布し、牧ノ原台地（7）には上部更新統の入江～扇状地堆積物と海成段丘堆積物が分布する（柴，2017）。掛川層群はおもにタービダイトからなる海底扇状地の堆積物からなり、約 180 万年前から赤石山脈が大規模に隆起し始めると、それに伴ってこの地域全体も隆起して、赤石山脈から供給された粗粒堆積物によって礫質ファンデルタが前進・拡大して海底が埋積され、小笠層群が堆積した（柴，2017）。

小笠層群の堆積過程について、柴（2017）は以下のように述べている。約 180 万年前に始まった隆起により小笠丘陵より北側が陸となり、小笠丘陵西部にあった陸棚斜面全体も浅海になった。120 万～100 万年前に天竜川からの礫が北西－南東方向のチャネルを埋積し、つづいて大井川からの大量の礫質堆積物によって小笠丘陵東麓に沿って大規模なファンデルタの前置面が形成され、陸棚斜面上部の海底を北から南に急速に埋積していった。そして、90 万～80 万年前には小笠丘陵から西側の天竜川地域まで広く浅い海が侵入し、その後に約 40 万年前まで河川扇状地が南側に広がった。

牧ノ原台地には、上部中新統と鮮新統からなる基盤の上位に、後期更新世の入江の堆積層が分布し、それを覆って海浜堆積物と扇状地堆積物が分布し、その上位にいくつかの海成段丘堆積物が海岸に向かって階段状に分布する（柴，2017）。

静岡平野（8）には、北東側の山地に海成鮮新統の浜石岳層群が、静岡平野南部の有度丘陵には中部～上部更新統が分布する。浜石岳層群は海底チャネルや海底扇状地に堆積した礫岩や砂岩を主体とした地層からなる（柴 1991, 2017）。有度丘陵を構成する更新統は約 30 数万年前以降の礫質ファンデルタ堆積物からなり、根古屋層～草薙層の堆積時期には少なくとも 6 回の海水準上昇と礫

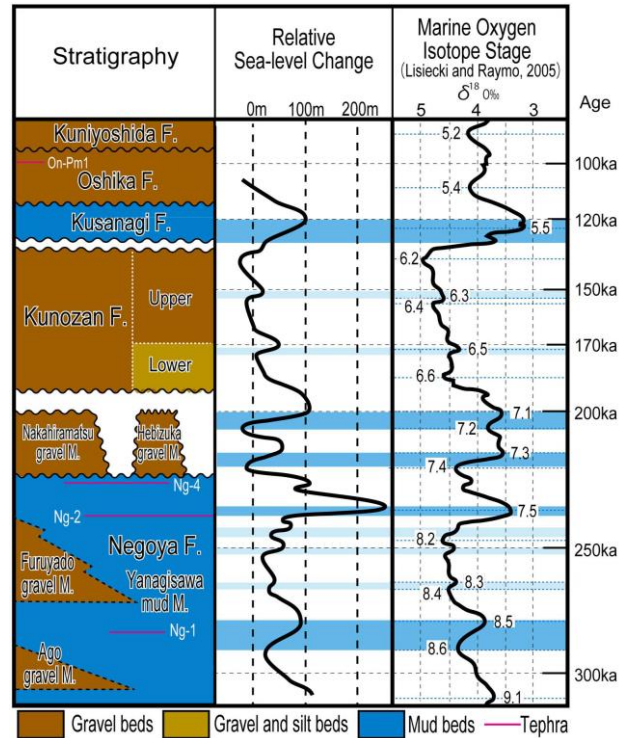


図 3 有度丘陵における根古屋層～国吉田層の海水準変化曲線（Shiba 2017 をもとに改編）。海洋酸素同位体比曲線の数字は海洋酸素同位体ステージの番号。ka：1000 年。

質ファンデルタの発達があり、各海水準上昇期は海洋酸素同位体ステージと対比できる（柴ほか，2012；柴，2017）（図 3）。

駿河湾西部（9）の海底には、陸棚斜面から最大水深約 900 m の石花海盆を隔てて頂上水深が 100 m 以浅の石花海堆という隆起地形がある。石花海堆は下部～中部更新統の礫層などのファンデルタ堆積物からなる石花海層群（岡村ほか，1999）からなり、その礫層の礫は安倍川に由来する（柴ほか，1991b）。また、伊豆半島西岸の大陸斜面には鮮新統と更新統と間に侵食不整合が確認されている（小山ほか，1992；岡村ほか，1999）。

富士川河口（10）に分布する下部～中部更新統の庵原層群は礫質ファンデルタ堆積物からなり、火山岩類を挟む（杉山・下川 1982；柴 1991, 2017）。下位から蒲原層、岩渕層、鷺ノ田層からなり、蒲原層は約 100 万年前のファンデルタの前置面に堆積した礫層からなり、岩渕層はおもに陸上噴火活動で形成された火山噴出物からなり、鷺ノ田層は内湾～扇状地堆積物からなる（柴，2017）。庵原層群の堆積過程は、岩渕層の火山活動を除くと同層準の小笠層群の堆積過程に類似する。庵原層群の礫は主に赤石山脈や御坂山地から富士川によって供給されているが、北東部の礫層の礫は丹沢山地に由来する（柴ほか，1991a）。

富士川谷（11）には後期中新世の海底扇状地堆積物や海底火山堆積物からなる富士川層群が分布し、その北西

部で鮮新世の礫質ファンデルタ堆積物からなる曙層群に不整合に覆われる(柴ほか, 2013)。

富士川谷および静岡平野北側の上部中新統～更新統の基盤は、北北西－南南東方向と北西－南東方向、北東－南西方向の断層によって区切られた基盤ブロックによって構成されていて、それぞれが個別に上昇して形成された高まりの間の盆地に地層が堆積し、堆積した地層は基盤ブロックの上昇により堆積と同時に褶曲構造が形成された(柴 1991, 2017)。また、その基盤ブロックの上昇は、後期中新世に北東側の関東山地の隆起に連動して始まった。鮮新世には北東部の御坂山地が陸上に顔を出し、その後西側の赤石山脈が領岸、中期更新世には赤石山脈側が急激に上昇して、南北方向で西傾斜の衝上断層群が形成された(柴, 1991, 2017)。

以上のように、静岡地域(7～12)では、(1) 鮮新世には、富士川谷では礫質ファンデルタや海底扇状地が、掛川地域では前期更新世前期まで海底扇状地が発達した。(2) 約 180 万年前～約 40 万年前には、赤石山脈が大規模に隆起して、そこから供給された礫質堆積物により遠州灘～駿河湾西岸の陸棚斜面が埋積されて大規模な扇状地が形成された。(3) 約 30 数万年前以降には、後背地の隆起と海水準上昇により沿岸域で礫質ファンデルタが形成され、(4) 後期更新世には、海水準上昇につづく海水準低下に伴い海成段丘が形成された(図2 参照)。

伊豆－足柄地域

伊豆半島(12)は、後期鮮新世に陸上侵食域にあったが、前期更新世～中期更新世前期になるとその北部に熱海層群が堆積した(小山, 1986)。熱海層群基底の横山シルト岩層と大野礫岩層は、大陸斜面を埋積したファンデルタ堆積物で、足柄層群の畑沢層と塩沢層に対比される。熱海層群主部は前期更新世末～中期更新世前半の宇佐美・多賀火山の陸上噴出物からなり、両火山の活動は約 40 万年前以降の箱根火山(13)の活動として継続した(長井・高橋, 2008)。

箱根火山の北～北東側の足柄地域(14)には更新統の足柄層群が分布する(足柄団体研究グループ, 1986)。足柄層群の瀬戸層までは海底扇状地に堆積した砂層と泥層からなるが、畑沢層(今永, 1999 の畑層)からはファンデルタの礫質堆積物になる(今永, 1999 ; Ito, 1985)。今永(1999)によれば、足柄層群下部の構成礫は関東山地と丹沢山地に由来するが、塩沢層の礫はすべて丹沢山地起源であり、塩沢層堆積期に丹沢山地が急激に隆起したと推定される。塩沢層は丹沢山地前縁における南東傾斜のファンデルタ堆積物であるが、現在では北西へ急傾斜していて、足柄層群堆積後に南東側が大規模に隆起したことを示している。

以上のように、伊豆足柄地域(12～14)では、(1) 後

期鮮新世に伊豆半島は陸上侵食域にあったが、前期更新世前期に足柄地域～伊豆半島北部に海底扇状地が発達した。(2) 前期更新世後期には丹沢山地の急上昇によって海底扇状地の上位に礫質ファンデルタが発達し、伊豆半島北部ではその直後に陸上で多賀火山の活動が始まった。その後も火山活動が継続し、(3) 中期更新世後期には箱根火山の外輪山とカルデラが、(4) 後期更新世には中央火口丘が形成された(図2 参照)。

関東地域

関東地域南部には、三浦半島の葉山から房総半島南部の鴨川まで連続する丹沢－嶺岡隆起帯(小池, 1957)があり、それにより関東堆積盆地は南縁を画される。この隆起帯の北側には中期中新世～鮮新世の三浦層群と更新世の上総層群としもうさ層群が、関東堆積盆地の中心に向かってつぎつぎに重なっている(小玉ほか, 1986)。三浦半島(15)、多摩丘陵(16)、東京・武蔵野(17)、関東平野西縁部(18)、関東平野中央部(19)、房総半島の中央部(20)と南部(21)にかけての地域とその地下には、三浦層群と上総層群、下総層群とそれらの相当層からなる鮮新－更新統が分布する。中期更新世後期以降に陸化した地域は箱根火山や富士火山などに由来するテフラ層、いわゆる関東ローム層によって順次覆われている。

上総層群は 3,000 m の層厚をもち、タービダイト堆積物には砂層の卓越する層準と泥層が卓越する層準の繰り返し認められる。それは、水平的には南西に向かって堆積物は粗粒になり、北東方向の古流向が一般に卓越する(Hirayama and Nakajima, 1977)。前期更新世の上総層群下部は、北東地域では深海盆底、海底扇状地、下部斜面の堆積物で、南西地域では上部斜面から陸棚堆積物で特徴づけられる(Katsura, 1984)。上総層群下部は、全体の岩相変化からみて基底より Kd18 テフラ層の層準までが海進、その層準より上位が海退パターンを示す(Ito and Katsura, 1993)。

関東平野西部の武蔵野台地東部における上総層群の堆積場は 170 万～150 万年前には外洋性～半深海域であったが、およそ 130 万年前に浅海域に移行した(佐藤ほか 2004)。関東平野中央部の地下には厚さ 600 m の上総・下総層群相当層があり、上総層群相当層は 160 万年前前後に 50～100 万年の堆積間隙をもつ不整合によって二分され、それ以降は海洋酸素同位体ステージに対応した海水準変動を反映して陸成層と海成層が繰り返し連続して形成された(納谷ほか, 2017)。上総層群上部(約 72 万～45 万年前)は、海洋酸素同位体ステージに対応する約 2 万～9 万年周期の 6 つの堆積シーケンスで構成され、北東へ前進する陸棚～陸棚斜面堆積物と一部に海岸の堆積物を含む(Ito, 1992)。

貝塚(1987)は、最終間氷期に形成された地形面の高

度分布から、関東平野中央部が関東平野における現在の沈降中心であることと、そこが第四紀を通じて継続的に沈降していることを指摘した。なお、関東平野中央部では、約 43 万年前（地蔵堂層相当層堆積期）に沈降中心が北西部の利根川中流低地へ移動したことが、平社（2008）によって指摘された。

須貝ほか（2013）は、氷河性海水準変動と関東平野各地における局所的基準面変動（氷河性海水準との比高）から高度年代曲線を求めた。その結果、海進が最大に達した MIS 11 頃に、三浦半島～関東平野東部で造構運動が沈降から隆起へ転換し始め、この転換が時間とともに関東平野中央部から北西部へ拡大したとした。さらに、関東平野は MIS 12/11 を境に間氷期と氷期の繰り返しに応じて「浅海底と低地が繰り返される時代」となり、MIS 5/4 を境に「丘陵化時代」へと進化したと述べた（須貝ほか、2013）。

なお、関東平野西縁部では、飯能礫層上部層の堆積期に関東山地の隆起が活発になり、関東平野西縁の諸丘陵の位置に扇状地が広く形成された（正田ほか、2005）。また、関東平野の北西側にあたる群馬地域（22）では、中之条盆地と沼田盆地に中期更新世と後期更新世に湖成堆積物が堆積した（新井、1986；竹本、1986）。

以上のように、関東地域（15～22）では、（1）鮮新世には三浦・房総半島に海底扇状地が発達し、北側の関東平野部は陸域で、前期更新世前期になると関東平野の西縁に浅海域が広がった。（2）前期更新世後期～中期更新世前期にはそれまでの海域は浅海から海岸平野に変化し、特に関東平野中央部ではその後の時期も含めて海洋酸素同位体ステージに対応した海水準変動を反映して陸成層と海成層が繰り返し連続して形成された。（3）43 万年前以降もその前の時期と同様に浅海底と海岸平野での堆積が繰り返したが、房総・三浦半島付近や平野東部から平野中央～北西部に向かって徐々に陸化が進行し、陸化した地域は関東ローム層によって覆われ、（4）後期更新世以降は中位段丘・低位段丘が順次形成された（図 2 参照）。

長野地域

赤石山脈の西側にある長野県の伊那盆地（23）には、更新統の伊那層や久米層などの扇状地礫層が分布する（松島、1995；菅沼ほか、2003）。菅沼ほか（2003）は、それらに挟在する広域テフラ層の対比から、赤石山脈の本格的な隆起が 140 万～100 万年前に開始したことと、木曽山脈の本格的な隆起が約 60 万年前以降に開始したことを明らかにした。森山・光野（1989）は、伊那谷～赤石山脈にみられる比高 2,500 m に達する東上がりの傾動地形を形成した前期更新世後期以降の地殻変動を伊那一赤石傾動地塊運動と呼んだ。

北部フォッサマグナ西縁の松本盆地（24）の第四系は、

海成の新第三系と断層関係で接する大峰帯の陸成下部更新統と、松本盆地および周辺の多くの地形面を構成する中部更新統～完新統からなる（矢野ほか、2020）。竹下ほか（2007）は、最も旧期の地形面をつくる梨ノ木礫層に挟在するテフラ層の対比にもとづいて、梨ノ木礫層が 78 万～64 万年前に堆積し、それは飛騨山脈の隆起の顕在化を反映していると推定した。飛騨山脈の隆起に関して原山ほか（2003）は、飛騨山脈北東部の火山岩類の活動の研究から、飛騨山脈の隆起運動を第 1 段階（鮮新世後半～更新世初頭）と第 2 段階（前期更新世後半の 130 万年前～）に区分し、第 1 段階は曲隆運動、第 2 段階は東への傾動を伴う大規模な隆起運動であったとした。

長野盆地（25）の北西側に分布する鮮新統～下部更新統は、下位から海成のしがらみ層と猿丸層からなる（加藤・赤羽、1986）。しがらみ層は、泥岩層と砂礫岩層からなる下部と、安山岩質火砕岩層からなる中部、暖流系軟体動物を含む砂質泥岩層からなる上部に三分される（矢野ほか、2020）。猿丸層は、おもに砂岩層と礫岩層からなり、一連の上方粗粒化層序に特徴づけられ、浅海性砂岩からなる下部と網状河川性の礫質堆積物からなる上部に区分される（矢野ほか、2020）。

猿丸層下部層上半部からは、飛騨山脈の先新第三系基盤岩類に由来する礫が優占し、急速に上方粗粒化する。このことから、Yano（1989）は飛騨山脈の隆起運動の顕在化を 250 万年前ころであるとし、それは原山ほか（2003）の飛騨山脈での研究結果とも整合する。長野盆地の西側の犀川流域には、中新統～下部更新統の褶曲構造を裁頂する侵食平坦面化としての大峰面群が標高 700～1,500 m に広く発達する（仁科、1972）。大峰面は中期更新世以降の扇状地性の段丘礫層などの地層に不整合に覆われる（加藤・赤羽、1986）。

以上のように、長野地域（23～25）では、（1）鮮新世には中・南部が陸域、北部は古日本海にひらく内湾浅海環境にあった。（2）前期更新世には隆起運動が広く顕在化し、赤石・飛騨山脈などが成長を始めるとともに、北部では大規模な褶曲構造が形成された。大峰面の形成後、（3）中期更新世には山地が急速に隆起するとともに、現在の内陸盆地の基本骨格が形成された。（4）後期更新世には内陸盆地を扇状地礫層はじめ河川性堆積物が埋積した（図 2 参照）。

北陸地域

北陸地域の金沢地域（26）や氷見地域（27）、富山地域（28）に分布する鮮新統～下部更新統の北陸層群や氷見層群は古日本海沿岸の海成堆積物である。背後の両白山地～飛騨山脈の山麓部にはそれらを不整合に覆う、おもに中部更新統の扇状地礫層が広く分布する。それらは埴生層や卯辰山層、呉羽山礫層などと呼ばれ（坂本・野沢

1960), 山地・山脈の隆起時期を示す堆積物として注目されてきた(鮎野ほか, 1993).

中嶋ほか(2019)によれば, 富山県東部に分布するくればやま礫層は 60 万年前ないしそれより少し古い年代をもつと推定され, 下位のみた層との間には 100 万年間余りの時間間隙をもった傾斜不整合が存在するとされる. これらの扇状地礫層は新第三系とともに「いすぎ変動」(藤井ほか, 1976) などの変動を受けて傾動し, 中部更新統上部の東福寺層など高位段丘層に不整合に覆われ, 高位段丘層の堆積期以降にそれまでと異なった新しい変動が始まったと考えられる(藤井ほか, 1976; 鮎野ほか, 1988).

北陸地域の上部更新統は能登半島地域では, 貝化石を多産する浅海性の平床層と, 海進期に堆積した海成粘土層をはさむ海成中位段丘構成層に代表される. 富山県東部では山麓部に中・低位河成段丘あるいは旧期扇状地の構成層が分布する(鮎野ほか, 1988).

以上のように, 北陸地域(26~28)では, (1) 鮮新世~前期更新世には古日本海沿岸の浅海が広がり, (2) 中期更新世前期には両白山地~飛騨山脈の隆起に伴い扇状地礫層が発達し, これらの地層も山地の段階的隆起にともなう傾動変形をうけた. (3) 中期更新世後期には, これらの扇状地礫層を高位段丘礫層が不整合に覆い, (4) 後期更新世には海進以降に段丘または扇状地が形成された(図2参照).

新潟地域

新潟地域(上越地域の高田(29)と中越地域の柏崎(30), 魚沼地域(31), 越後平野の西縁(32)と東縁(33))では, 鮮新世~前期更新世の地層はおもに海成堆積物からなり, 中期更新世以降の地層は段丘や扇状地堆積物などの陸成層からなり, 南東から北西に陸域が広がった(小林ほか, 1986).

上越・中越地域(29, 30)の鮮新統の川詰層下部~中部は, 海底扇状地の上部~中部を示す礫質~砂質タービダイト相を主体とし, 上部は陸棚斜面環境の泥岩相からなる(遠藤・立石 1985; 大村 2000). 川詰層の上位の名立層と谷浜層は砂質泥岩を主体とし, 名立層はおもに外側陸棚~内側陸棚, 谷浜層は外側陸棚の堆積環境を示す(大村, 2000). 荒戸・保柳(1995)は, 新潟堆積盆地の堆積史を後期中新世~前期更新世前期(650 万~140 万年前)の「盆地底タービダイト堆積期」と, 前期更新世後期(140 万~70 万年前)の陸棚斜面前進期・陸棚拡大期・デルタ前進期に区分した.

魚沼地域(31)の魚沼層群はおもに礫・砂・シルトからなり, 全般的な上方粗粒化傾向を示す. 層相は海成層と陸成層とに区分され, 海と陸の境界は時間とともに北西へ移動し, 海退傾向を示す(風岡ほか, 1986). 魚沼層群

の碎屑物の後背地は, 東方の越後山脈および南方の新潟~長野県境付近の火山岩類分布域であり, 越後山脈は魚沼層群堆積初期から隆起を始めていた(風岡ほか, 1986).

風岡(1988)は, 魚沼層群の堆積過程を以下のように推定した. 最下部堆積期には, それまでの浅海域がデルタまたはファンデルタによって急速に埋積され, その末期には沼沢地が広範囲に広がった. 下部の堆積期に入るとデルタや扇状地は縮小し, 沼沢地がさらに広範囲に広がった. 中部堆積期には大規模な河川が形成され, その中期ころからは東方の越後山地側から扇状地が大きく発達し始めた. 上部堆積期には東部ではさらに扇状地が拡大し, 魚沼丘陵の一部が隆起し始めた.

高浜(1987)によると, 魚沼層群中部層上部には約 150 万年前の山寺不整合が, 上部層基底の約 100 万年前の笹岡不整合という縁辺不整合があり, 不整合形成に伴って縁辺部で大量の礫が供給された. さらに, 約 70 万年前には魚沼堆積盆地が離水し, 東方の山地のブロック隆起により, その上位層と間に五頭不整合が形成された. 久保田ほか(2018)によれば, 越後山脈南部は約 80 万年前(前期更新世末)以前に大隆起して六日町(南魚沼)盆地側に大量の土石流礫を供給したが, その後は六日町盆地側が隆起し始めたために越後山脈からの礫の供給が途絶えた.

新潟県の海岸地域と新潟・高田・柏崎の各平野, 信濃川や阿賀野川沿いの中部~上部更新統の最下部は砂礫層からなり, 鮮新統~中部更新統を不整合に覆って分布し, その上位には高位段丘堆積物が広く分布する(吉越, 1988). 渡辺・ト部(2003)によると, 信濃川の段丘面の変位から, 北西側では中位段丘形成期初期までは顕著な造構性隆起運動は認められないが, その後に, 隆起運動が活発になった.

以上のように, 新潟地域(29~33)では, (1) 鮮新世には海底扇状地が発達していたが, 前期更新世前期には浅海化した. (2) 前期更新世後期~中期更新世前期には山地が大規模に隆起し, 浅海域がデルタまたはファンデルタによって急速に埋積され陸化した. (3) 中期更新世後期には, 海岸平野と信濃川や阿賀野川沿いに高位段丘群が形成された. (4) 後期更新世には中位・低位の河成段丘が形成された(図2参照).

鮮新世以降の隆起運動と海水準変動の特徴

これまで述べた本州中央部の各地域の鮮新統~第四系の詳細な編年・層序対比を基礎に, それらの岩相と, 堆積相, 後背地とその運動などに関する特徴を抽出された. その結果, これらの地層形成過程の特徴は地域それぞれで異なっているが, いっぽうで本州中央部の各地域は相互に共通する次の 4 段階(ステージ 1~4)の造構~堆積

史をたどったことも明らかになった。ステージ1は鮮新世～前期更新世前期，ステージ2は前期更新世後期～中期更新世前期，ステージ3は中期更新世後期，ステージ4は後期更新世～完新世であり，変換年代はそれぞれ180万年前，43万年前，12.9万年前である（図2参照）。

ステージ1：鮮新世～前期更新世前期

近畿地域では，鮮新世に堆積盆地が発生したことが特徴であり，琵琶湖周辺や伊勢湾周辺地域でも内陸盆地が発生し，断層や撓曲によって区分された地塊が段階的に沈降・傾動運動を行い，堆積盆地が北側または西側に移動した（川邊，1983；吉田，1990）。このステージは藤田（1976）による山地・盆地の発展過程のうち約200万年前までの陸成の内陸盆地発生時代にほぼ相当する。

静岡地域では，富士川谷で礫質ファンデルタや海底扇状地が発達し，その後背地の赤石山脈と御坂山地が隆起して堆積物が供給された。いっぽう掛川地域では，海水準上昇による浅海域の拡大と海盆の深化によって掛川層群が堆積した（柴，2017）。静岡平野から伊豆半島にかけて地域は，300万～100万年前までの地層がないことから，この時期にこの地域のほとんどが陸上侵食域であった可能性がある。

関東地域では，鮮新世には三浦・房総半島に海底扇状地が発達し，両半島間の関東平野部は陸域で，前期更新世前期になると関東平野西縁に浅海域が広がった。この時期に海盆底や海底扇状地，陸棚斜面や陸棚堆積物で特徴づけられる上総層群が堆積し始めた。上総層群の基底には黒滝不整合があり，亀尾・関根（2013）によれば房総半島西部では三浦層群安野層の上限はおおむね300万年前と推定され，少なくともそのころに房総半島西部は部分的に陸になっていたと思われる。また，上総層群の堆積物は南西方向から供給されていたことと沈降部が北東へ移動することから，上総層群の堆積盆地の南西縁をなす丹沢・嶺岡隆起帯が，上総層群の堆積期に隆起し陸化していたことが推定される（貝塚，1987）。なお，三浦半島と房総半島を除く関東地域の特に多摩丘陵から関東平野中央部に300万年前まで地層の堆積がないことから，それまでこの地域は陸域であったと思われる。

関東平野西縁部では，関東山地の隆起により約300万～250万年前以降に扇状地が広く形成された（正田ほか，2005）。このことから，この時期以降に関東地域およびその周辺地域の隆起運動が活発化したと考えられる。貝塚（1987）は，関東山地・足尾山地・阿武隈山地は300万年前ごろには小起伏山地（いわゆる準平原）であり，その後の隆起によりこれらの山地から山麓の上総層群へ礫が供給されたと推定した。

長野地域は，鮮新世には中・南部が陸域，北部は古日本海にひらく内湾浅海環境にあった。また，その北西側

の北陸地域は古日本海沿岸の浅海が広がり，北東側の新潟地域には海底扇状地が発達し，前期更新世前期には浅海化した。新潟堆積盆地では，荒戸・保柳（1995）の「盆地底タービダイト堆積期（約650万年前～140万年前）」にほぼ相当する。また，このステージは高野・中嶋（2019）による北部フォッサマグナ信越堆積盆の堆積テクトニクス変遷史のステージ3（6.5～1 Ma）にほぼ相当する。高野・中嶋（2019）は，後背地の隆起による碎屑物供給の段階的增加化と堆積盆地内での堆積同時性褶曲の発達が顕著になり，トラフ充填型海底扇状地→斜面→陸棚→デルタ→河川といった堆積システムの浅海化とプログラデーションが信越堆積盆南部から北部へ向かって顕著に発生し，堆積盆の浅海化・埋積が顕著となったとしている。

このステージには，大阪平野～伊勢湾周辺は内陸盆地（弧内盆地）に河川や湖沼が広がり，掛川地域～房総半島にかけての太平洋側（前弧沿岸盆地）と松本盆地～新潟地域などの日本海側（背弧沿岸盆地）では海底扇状地～陸棚斜面，または大陸棚の海域が広がっていた。そのため，当時の本州中央部の陸域は現在よりも狭く，浅海～漸深海の海域が広がったと考えられる（図2，図4-1，図4-2）。

300万年前以前におけるファンデルタ～扇状地堆積物は，富士川谷北部の曙層群と長野地域の柵層下部（権田砂岩礫岩層：矢野ほか，2020）にみられ，陸域では赤石山脈と飛騨山脈が顕著な隆起域として出現し，礫質堆積物を供給したと考えられる。また，300万年前以降になると，関東平野西縁（飯能層）や新潟南魚沼（魚沼層群最下部）でもファンデルタ～扇状地堆積物がみられ，関東山地や越後山脈の隆起が顕著になったことが推定される。

なお，多摩丘陵から関東平野中央部は約300万年前まで陸上であり，いっぽう掛川地域を除く静岡地域と伊豆半島では300万～100万年前まで陸であったと考えられる。すなわち，300万年前付近を境に造構的または海水準変動におけるなんらかの変換があった可能性がある。このことから，このステージの古地理図を二つに分けて，その前期にあたる約400万年前の鮮新世（図4-1）と後期にあたる前期更新世前期の約200万年前（図4-2）の古地理図を示す。

このステージの造構―堆積史の特徴は，陸域では藤田（1976）の陸成の内陸盆地発生時代，海域では荒戸・保柳（1995）の「盆地底タービダイト堆積期」という表現がその内容をよく表している。また，柴（2017）はこのステージの変動を掛川変動と呼んで，島弧の隆起と海水準上昇により浅海域の拡大と海盆の深化が起こり，海底扇状地が発達したことを特徴とした。

すなわち，このステージでは，後期中新世からつづく基盤断層によって区分された地塊ブロックが上昇し，それにより形成された盆地に隆起を始めた後背地の山地か

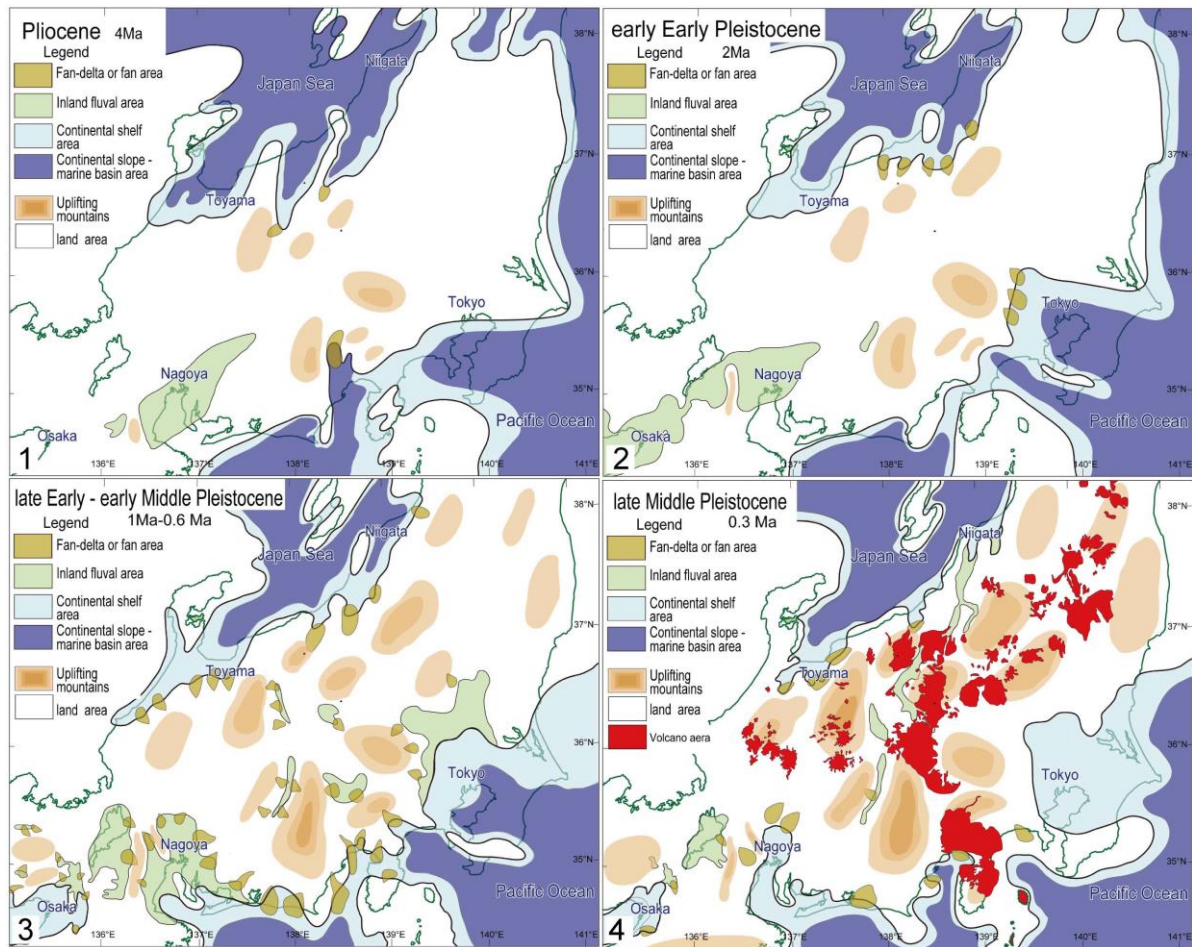


図4 本州中央部の鮮新世～中期更新世後期の古地理図。1：鮮新世（4 Ma），2：前期更新世前期（2 Ma），3：前期更新世後期～中期更新世前期（1 Ma-0.6 Ma），4：中期更新世後期（0.3 Ma，中期更新世以降の火山地域を表示）。

ら供給された堆積物によって地層が形成された（柴，1991，2017）。その隆起によって，浅海化または陸化する地域があるいっぽう，同時に起こった海水準上昇により海域の拡大と深化も起こったと考えられる。

ステージ2：前期更新世後期～中期更新世前期

近畿地域では，約 200 万年前には地塊運動による新たな沈降が始まって堆積盆地が移動・拡大した。このステージは藤田（1976）の約 200 万年前から大阪層群のほぼ Ma9 層（約 43 万年前）までの第Ⅱ期，すなわち盆地の沈降・拡大の時代から盆地の移動・分化の時代にはほぼ相当する。古琵琶湖周辺では，東側の鈴鹿山脈の隆起により多量の礫が供給され，淡水域が縮小した（川邊，1983）。伊勢湾周辺地域では，堆積盆地が北西に移動し，鈴鹿山脈などの周辺山地が隆起して東海湖盆が消滅し，中期更新世以降に濃尾傾動盆地が形成された（桑原，1968）。

静岡地域では，赤石山脈の大規模隆起とともにこの地域全体も隆起し，深海域は浅海化して大規模な礫質ファンデルタ堆積物が形成された。掛川地域では小笠層群，駿河湾西部では石花海層群，富士川河口では庵原層群がそれらにあたる（柴，2017）。特に 100 万～90 万年前には

大量の礫質堆積物の供給があり，陸棚斜面が埋積されて扇状地が広がり，90 万～80 万年前には海進があり内湾を形成し，その後に広大な扇状地が形成された（柴，2017）。柴（2016，2017）はこのステージの変動を小笠変動と呼んだ。

伊豆足柄地域でもファンデルタ堆積物が形成された。伊豆半島北部では伊豆半島の隆起と火山活動により熱海層群が，足柄地域では丹沢山地の急激な隆起により足柄層群上部が礫質ファンデルタに堆積した（今永，1999）。

関東地域では，海域だった地域は浅海から海岸平野に変化し，関東平野中央部ではその後のステージも含めて海洋酸素同位体ステージに対応した海水準変動を反映して陸成層と海成層が繰り返し連続して形成された。このステージの海域には，上総層群の黄和田層上部以降の地層とその相当層が堆積していて，関東平野西部では外洋性～半深海性の海域が約 130 万年前以降には浅海域へ移行した（佐藤ほか，2004）。房総半島中央部でもこれとほぼ同時期から海退の堆積パターンとなり（Ito and Katsura，1993），上総層群の堆積盆地が急速に埋積され浅海化が進んだ。また，関東平野中央部の地下では，上総層群相当層は 160 万年前頃の不整合によって二分され，それ以降

は海洋酸素同位体ステージに対応した海水準変動を反映して陸成層と海成層が繰り返し連続して形成された（納谷ほか 2017）。

長野地域では、140 万～100 万年前から赤石山脈が本格的に隆起を開始し、約 60 万年前以降に木曾山脈の本格的な隆起が開始した（菅沼ほか 2003）。末岡ほか（2011）は、赤石山脈においてジルコン He 年代値が西方から東方にかけて系統的な若返りを示し、それは赤石山脈の鮮新世以降の隆起・剝削による岩体の上昇・冷却に起因するとして、赤石山脈の真の隆起量が現在の比高より数 km 大きかった可能性を示唆した。

松本盆地では、その西側の飛騨山脈が 130 万年前以降に、それ以前の広範な隆起と異なり東への傾動を伴う大規模な隆起運動が生じた（原山ほか、2003）。そして、飛騨山脈の隆起の顕在化を反映して梨ノ木礫層が約 78 万～64 万年前に形成された（竹下ほか、2007）。犀川両岸から長野地域には、前期更新世後期に広域隆起によって段階的に侵食平坦面である大峰面が形成された（仁科、1972）。

北陸地域では、後背地の両白山地～飛騨山脈の隆起に伴い扇状地礫層が発達し、これらの地層も山地の段階的隆起にともなう傾動変形をうけた。富山地域の呉羽山礫層に代表される扇状地礫層は 60 万年前より少し以前から堆積した（中嶋ほか、2019）。新潟地域では、東側の越後山脈などの後背地の隆起によって堆積盆地の堆積物は海成堆積物から陸成の扇状地堆積物へ移行し、南東部ほど陸域が広がる時期が早く、北西部ほど海域が遅くまで残った（小林ほか、1986）。新潟堆積盆地では、荒戸・保柳（1995）の「陸棚斜面前進期・陸棚拡大期・デルタ前進期（約 140 万年前～70 万年前）」にほぼ相当した。魚沼層群では約 150 万年前と約 100 万年前に東縁の部分不整合の形成に伴って東方山地から大量の礫が供給され、約 70 万年前に東方山地のブロック隆起により魚沼堆積盆が消滅した（高浜、1987）。

このステージでは、本州中央部地域の全域は浅海と陸に移行する傾向が顕著になり、特に約 100 万年前からは陸棚斜面を埋積して扇状地を発達させるファンデルタの形成により礫層が広く堆積した（図 2、図 4-3）。いっぽう、これまで陸域だった大阪平野と濃尾平野、関東平野中央部には海進堆積物がみられるようになる。特にその後の 90 万年前以降からは、大阪層群と関東平野の地下、房総半島などで、海洋酸素同位体ステージに対応した海水準変動を反映して、海成泥層とデルタまたは扇状地の砂層や礫層が繰り返し累積する地層が共通してみられる。

このステージでは、本州中央部に礫質堆積物が広域に発達し、前述のとおり後背山地が全般的に隆起し始めたと考えられる。すなわち、赤石山脈は 140 万年前から急激な隆起が起これ、それにより伊那盆地とともに遠州灘

～駿河湾岸に礫質ファンデルタが形成された。飛騨山脈は約 80 万～60 万年前に隆起が顕在化して、富山地域と松本盆地に粗粒堆積物が供給された。それ以外にも、鈴鹿山脈や丹沢山地や関東平野周辺の山地、両白山地、越後山脈などが大規模に隆起して、隣接する堆積盆地に粗粒堆積物を供給した。

いっぽう、海岸平野では約 90 万年前以降に海洋酸素同位体ステージに対応した海水準変により、海成泥層とデルタの砂層や礫層が繰り返し累積する地層が累積した。このことは、大阪層群の Ma3 層や小笠層群の可睡層などでみられたように、約 90 万年前に MIS 21 に相当するやや大きな海水準上昇があり、それまでに広がっていた臨海扇状地の上に海域が広がり、それ以降の微妙な相対的海水準変動が記録されやすくなったと考えられる。

なお、このステージに日本列島は何度か大陸と接続したことが、古脊椎動物の研究により明らかになっている。河村（2014）は、本州域に約 120 万年前（MIS 36）に中国からトロゴンテリゾウ（*Mammuthus trogontherii*）が、63 万年前（MIS 16）に東シナ海を経由して南からトウヨウゾウ（*Stegodon orientalis*）が、43 万年前（MIS 12）に中国北部から朝鮮半島を経由してナウマンゾウ（*Paleoloxodon naumanni*）が渡来したとし、日本列島がアジア大陸と約 120 万年前と、63 万年前、43 万年前に接続していた時期があったとした。河村（2014）が示したこれら 3 つの時期は、日本列島の隆起が活発だった 140～120 万年前と 70 万～60 万年前、そして 43 万年前の時期にほぼ一致し、それを反映したものと考えられる。

ステージ 3：中期更新世後期

このステージは、MIS 11～MIS 6 の層準にあたる（図 2、図 4-4）。近畿地域では、この時期から山地の急速な地塊状隆起が始まり、現在の堆積盆地の骨格が形成された。このステージは藤田（1976）の断層地塊運動が活発化して隆起量が増大した第Ⅲ期に含まれ、すなわち「山地上昇と段丘形成の時代」に相当する。琵琶湖周辺では現在の琵琶湖に琵琶湖層の堆積が始まり、現在につづく新しい変動が開始した（公文、1999）。伊勢湾周辺では濃尾傾動盆地に海域が広く侵入し、海成粘土層と礫層の繰り返しからなる海部層と高位段丘層が形成された。

静岡地域では、有度丘陵を構成する中部更新統の根古屋層と久能山層の層準にあたり、礫質ファンデルタの発達と海水準上昇によって特徴づけられる（柴ほか、2012）。柴（2016、2017）は、有度丘陵のファンデルタの発達の要因は隆起量の増大であり、相対的海水準曲線の海水準下降は隆起によるみかけのもので、海水準は上昇しつつけてその上昇量は上位の草薙層の堆積時期まで含めて 900 m 以上に達したと推測した。

また、駿河湾の海底の石花海北堆を構成する石花海層

群の礫層の礫が安倍川から供給された(柴ほか, 1991b). 伊豆半島西岸の大陸斜面に鮮新統と更新統との侵食不整合がある(小山ほか, 1992; 岡村ほか, 1999). これらのことから, 柴(2016, 2017)は, 約40万年前以降に駿河湾兩岸の陸側と石花海堆が隆起し, それと並行して海水準も約900 m以上上昇したために, 石花海海盆と伊豆半島の大陸斜面は隆起にとり残されて, 上昇する海水準に対して沈水したと推定した(図5).

有度丘陵の中部更新統上部の堆積と駿河湾の地形形成は, どちらも同時に起こった現象である. すなわち, 有度丘陵の地層を形成させた海水準の約900 mの上昇と, 石花海海盆の約900 mに及ぶ相対的沈降は同時に起こった. このことから, 柴(2016, 2017)は中期更新世の約40万年前以降に地殻の大規模隆起と約1,000 mにおよぶ海水準上昇が同時に起こり, 駿河湾の地形と地層が形成されたとした. そして, 柴(2016, 2017)はこの変動を有度変動と呼んだ.

関東地域では, 房総半島と関東平野中央部の地下で下総層群とその相当層が堆積した. これらの地層は, ステージ2の約90万年前から継続して浅海底と低地での堆積を繰り返したが, 房総・三浦半島付近や関東平野東部から平野中央〜北西部に向かって徐々に陸化が進行した. そして, 陸化した地域は関東ローム層によって覆われた. 須貝ほか(2013)は, この時期を関東平野で浅海底と低地が繰り返される時代と呼んだ.

北陸地域では, 東福寺層など高位段丘層の堆積期に当たり, 藤井ほか(1976)と鮎野ほか(1988)によれば, この時期からそれまでとは異なった新しい変動が始まったという. 新潟地域では, 鮮新統〜中部更新統を不整合に覆う高位段丘堆積物が広く分布する(吉越, 1988).

このステージの堆積層の基底にあたる MIS 11 の層準は, 大阪平野では Ma9 層, 濃尾平野では海部層基底の Amg1 層, 房総半島〜関東平野中央部では下総層群基底の地蔵堂層とその相当層などの海成泥層からなり, この層準に大規模な海進があったと推定される(吉川, 2012). そして, それ以降は, 海洋酸素同位体ステージに対応した海水準変動を反映して, 海進・海退の地層の累積が上記の平野や有度丘陵の根古屋層などの中部更新統にみられ, それらの地層に挟まれる海進層の層準はどこでもほぼ共通した層準に認められる.

また, このステージには相対的な海水準変動があるという. 山地上昇が激しく, 断層地塊運動が活発化して地殻の隆起量が増大し, 海陸分布・大起伏山地・大規模水系など, 今日の本州中央部の地形骨格がほぼ完成した. なお, このステージ以降の隆起運動は, それまでの傾動隆起運動がそのまま連続したものではなく, 現在の地形を形成する新たな隆起運動となったと考えられる.

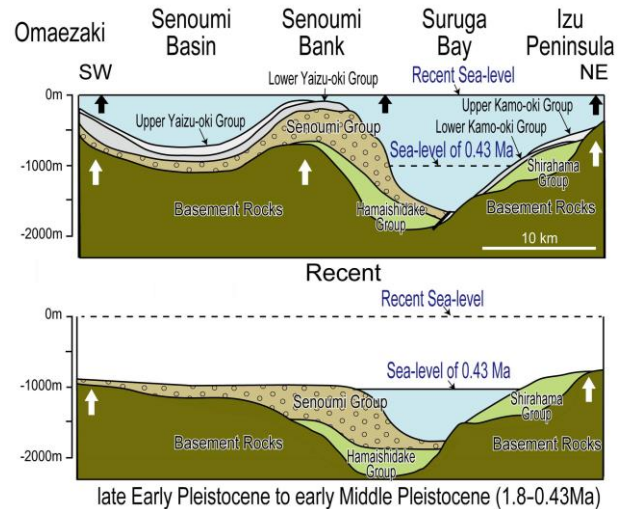


図5 駿河湾の北東-南西地質断面と中期更新世後期以降におけるその形成モデル (Shiba, 2017 をもとに改編). 43 万年前の海水準は現在より 1,000 m 低く, その後の隆起と海水準の上昇により現在の駿河湾が形成された. 白矢印は隆起を示し, 黒矢印は海水準上昇を示す.

ステージ4: 後期更新世〜完新世

このステージの堆積層の基底は, MIS 5c の海進層で特徴づけられ, その後に全域でいわゆる中位段丘から低位段丘が形成され, 完新世に沖積層が堆積した. 須貝ほか(2013)は, MIS 5/4 を境に関東平野は隆起により丘陵化時代へと進化したとした. このステージの造構-堆積史のおもな要因は, 最終間氷期からの氷河性海水準変動と隆起運動である. 最終間氷期の海水準上昇により MIS 5 層準に海進層が堆積し, その後海水準は最終氷期の海水準に向かって段階的に下降しながら海成または河成段丘が形成された. 海成段丘が現在陸上で観察できるのは形成後の隆起のためであると考えられる.

静岡地域の牧ノ原台地では, MIS 5 層準の海成泥層(古谷層)が現在では海拔 150 m まで隆起し, それ以降の海成段丘が階段状に海に向かって地形的下位に分布する(柴, 2017). このことから, 牧ノ原台地における 12.9 万年前以降の年平均隆起量を現在の海水準を基準に計算すると (150 m/12.9 万年), 牧ノ原台地は 1 年に約 1.16 mm 上昇したことになる. 最終氷期以降, 海水準は上昇して現在の海水準へ定置し, これによって海岸地域などに沖積層が形成された. 柴(2017)は, このステージの変動を牧ノ原変動と呼んだ.

山地の隆起と海水準上昇

本州中央部の鮮新世以降の地層形成過程の特徴を整理すると, 各時期で山地の隆起と盆地の沈降, 海域の拡大と陸化が起こり, それらによりさまざまな環境に堆積層が形成された. そして, それらの造構-堆積史は前述し

たように 4 つの各ステージで異なっていたと考えられる。そして、その原因はそれぞれのステージの隆起運動と海水準変動の性質が異なっていたためであると考えられる。

第四紀の地殻変動の特徴は、山地が急激に隆起するといった沿岸や内陸地域で沈降が起こり、断層運動により地塊がブロック化したことである（松田・衣笠, 1988）。第四紀の地殻運動を特徴づける隆起と沈降が同時に起こるというパラドックスについて、菊地（1997）は関東構造盆地を埋積した下総層群の形成過程を例に、従来からある 4 つの説を以下のように検討して考察を行った。

第 1 の説は、隆起する堆積盆地において堆積物が盆地を次第に埋積したために、浅海化したとするものである。これは、隆起運動が継続しつつ海水準変動の影響を受けているため、堆積サイクルをもつ地層が削剥されない状態で上位に累積することを完全に説明することができない。

第 2 の説は、沈降運動が継続して累積構造が形成され、後に隆起運動に変わるというものである。それには、構造盆地全域を含む地塊が一斉に沈降運動から隆起運動に変わる場合（テクトニックな盆地反転：岡村・中村, 1995）と、傾動する地塊において一方にある隆起地域が次第に拡大するにつれて他方の沈降地域が隆起地域に転化する運動を示す 2 つの場合がある。この説については、関東構造盆地が本来隆起していたことを考慮すると、反転が生じたことに対して疑問が残る。

第 3 の説は、盆地を埋積する堆積物のアイソスタティックな沈降運動により説明するものである。海水準が上昇し地層が堆積する際にアイソスタティックな沈降が生じると考えるが、関東構造盆地においてはこの説にもとづいて考察された例はない。

第 4 の説は、関東構造盆地は隆起しつつ、ユースタティックな海水準上昇によって地層の累積構造が形成されたとするものである。テクトニックな沈降運動と見えたものはユースタティックな海水準上昇、すなわちテクトノユースタシーによる沈水現象であったとする考えである。この説は、星野（1968, 1983, 1991）の一連の研究によって主張されている説と共通するもので、菊地（1997）はこの説に賛同すると述べている。

近畿地域の第四系の堆積と構造運動について、藤田（1983）も隆起域に当たる近畿地方の山間盆地内に山麓扇状地あるいはデルタの地形を残す堆積物があることなどの事実を上げ、これらは絶対的な海水準上昇によってのみ説明されるとしている。

これまでみてきた更新世の堆積盆地の地層には、海洋酸素同位体ステージに対応した海水準変動を反映して、海成泥層とデルタや扇状地の砂礫層が繰り返し重なる地層が共通して存在する。すなわち、海水準変動を反映した地層が連続して累積し保存されている。このことは、

海水準変動だけでは堆積した地層が削剥されてしまうため、地層の累積と保存のために堆積盆地の相対的沈降が必要となる。しかし、更新世の堆積盆地のように隆起する堆積盆地における相対的沈降を説明するためには、絶対的な海水準上昇を想定せざるをえない。

また、そのような地層形成過程で形成された海成泥層の複数の層準が、本州中央部の異なった多くの堆積盆地でほぼその堆積時期が一致して共通に認められる。このことは、その原因が地域的な盆地の沈降では説明できず、絶対的な海水準上昇、すなわちユースタティックな海水準上昇であったことを強く示唆するものと考えられる。多くの堆積盆地でみられた海洋酸素同位体ステージに対応した相対的な海水準変動は、絶対的な海水準上昇量に対するその堆積盆地の隆起量との差により生じたものである。特に 43 万年以降にそれが共通して認められることは、海水準上昇量が大きかったと推測される。

柴（2017）は、前期更新世後期の初め（約 180 万年前）以降の赤石山脈の隆起により駿河湾の西側に大規模な礫質ファンデルタが形成され、つづけて約 40 万年前以降に起こった駿河湾の東西両岸の大規模隆起と海水準の 1,000 m のおよぼ上昇によって、現在の地形が形成されたと推定した。この約 40 万年前以降に起こった、駿河湾と駿河湾周辺の山地の地形を形成した変動（有度変動）は、海底も含めた地殻の大規模隆起と海水準の 1,000 m におよぼ上昇という現象からなる。この有度変動は、駿河湾とその周辺の山地を形成させただけでなく、同時に大陸斜面や海溝を含めた現在の日本列島という島弧の地形全体を形成させた大規模な地殻の隆起運動であったと考えられる（柴, 2017）。

この中期更新世以降の変動は、陸域だけでなく駿河湾はじめ海域でも知られている。井内ほか（1978）は、紀伊水道の上部大陸斜面の中期更新世以降の最上部層が現在の地形に調和的に海盆に水平に堆積しているにもかかわらず、それ以下の地層が上部大陸斜面の地形と不調和に分布していることから、中期更新世以降に上部大陸斜面が形成されたことを明らかにした。また、岡村（1990）は、高知県東部の室戸岬沖にある土佐藩では、中期更新世以降の地層が海側に前進するデルタ性の地層（クリノセム）の組み合わせが幾層も大陸棚から陸棚斜面にかけて積み重なっていて、それらのクリノセムの形成と土佐藩の地形形成から、現在の南北方向または島弧に沿った外縁隆起帯が第四紀になってから隆起を始め、最近まで成長しつつあったとした。その隆起量はところによって 1,000～2,000 m におよぶという。すなわち、これらのことは大陸斜面の海底もこの時期に大規模に隆起していたことを示唆する。

海水準が中期更新世後期以降の約 43 万年間に 1,000 m 上昇したということは、一般的に信じがたいことかもし

れない。しかし、本稿で示した広域で大規模な隆起と海水準上昇を説明するためには、検討すべき重要な仮説と考えられる。43 万年間に海水準が 1,000 m 上昇すると、その海水準は 1 年に平均して 2.33 mm 上昇したことになる。海水準がそのような値で上昇し続けると 1,000 年で 2.33 m にもなる。しかし、陸域も同量かそれ以上に隆起上昇すると仮定すると、その間の海岸線の移動はそれほど顕著でなかった可能性がある。

星野 (1991) によれば、海水準の上昇は、海洋地殻内へのマグマの進入による深海底や海嶺、海膨などの隆起と、海底火山での溶岩流出により、海底が上昇してその上の海水が押し上げられることにより起こるとしている。この海水準上昇をもたらした大規模な地殻の隆起の原因は、星野 (1991) と Hoshino (1998, 2007) で述べられている上部マントルからのソーレイト質玄武岩マグマの上昇と地殻内への進入によると考えられる。現在の陸域は海水準上昇量より隆起量が大きかったことで陸域でありつづけた地域であり、隆起量が小さかった地域は上昇する海水準に対して沈水してしまったために海域になったと考えられる。

第四紀の前期更新世後期 (約 180 万年前) 以降、本州中央部は隆起量が増大した。そして、中期更新世後期 (約 43 万年前) 以降からはそれ以前までの隆起運動の連続ではなく、新しい地殻の隆起運動が起こり、それと同時に海水準が約 1,000 m 上昇した。そして、その最終段階にあたる後期更新世から現在までは海水準上昇に対して隆起量が大きく、海岸平野が拡大することが顕著になったと考えられる。

図 6-4 の中期更新世後期以降の古地理図には中期更新世以降の火山地域の分布を示した。本州中央部の火山地域は、北北西-南南東方向の伊豆海嶺の北側の延長と東北東-西南西方向の本州弧の隆起軸方向に分布する。これら 2 つの隆起軸の交差部は、3,000 m を超える大起伏地形を形成する本州中央部の中心部に相当する。また、火山地域は、本州中央部の各隆起山地の縁辺部に位置する特徴がみられる。このことは、中期更新世以降の隆起運動が地殻内でのマグマの上昇に起因している可能性を強く示唆するものと考えられる。

中期更新世後期以降に海水準が大規模に上昇したという仮説は、日本列島を含めた世界の島嶼の固有哺乳類の分布の謎を解く陸橋の存在を明らかにする可能性があり (柴, 2020)、大規模隆起の実態とともに、今後の第四紀の地質学研究における最も重要な課題の一つになると考えられる。

まとめ

日本列島中部の第四紀の地殻変動の特徴は、山地が急

速に隆起するいっぽう沿岸や内陸地域で沈降が起こったことである。本稿では、本州中央部の各地域の層序と層序対比からみられる地層形成過程の特徴を整理し、鮮新世以降のその変遷にもとづき、造構-堆積史を次の 4 つのステージに区分した。

各ステージの隆起と海水準上昇のイメージについて、遠州灘-木曾山脈の地形断面の概観の変化を図 6 に示す。
ステージ 1 (鮮新世-前期更新世前期) : 陸成の内陸盆地が発生し、海域ではおもに深海盆にタービダイトが堆積し、沿岸ではファンデルタや浅海の堆積物が厚く堆積した。

ステージ 2 (前期更新世後期-中期更新世前期) : 島弧の全体的な隆起が起こり、内陸盆地は沈降域を拡大して、その後に盆地の移動と分化が起こった。沿岸海域ではファンデルタによる陸棚斜面の埋積と陸化、そして扇状地が拡大した。

ステージ 3 (中期更新世後期) : 山地の急激な隆起と海水準の上昇が起こり、海陸分布・大起伏山地・大規模水系など今日の本州中央部の地形骨格がほぼ完成した。また、隆起量と海水準上昇量の差により生じた、海洋酸素同位体ステージに対応した相対的海水準変動を反映して、海成泥層とデルタの砂礫層が繰り返し重なる地層が形成した。

ステージ 4 (後期更新世-完新世) : 最終間氷期の海水準上昇の後、最終氷期にむかう海水準下降とその後の上昇があり、同時に隆起も加わり海成または河成の中位段丘以降の段丘と沖積層が形成された。

ステージ 1 に始まる礫質堆積物の供給は、ステージ 2 を通じて下総堆積盆中央部を除き広域的に増大し、礫質扇状地が広く出現した (図 6-3)。ステージ 3 と 4 でもその傾向は継続したが、ステージ 3 では海水準上昇量が大きかったため礫質扇状地の分布はステージ 2 より顕著ではない。これまで鮮新世-第四紀とされた島弧の隆起運動は、本稿の詳細な広域的編年・対比によって、本州中央部ではステージ 2 (180 万-43 万年前) に急速に進み、ステージ 3 と 4 (43 万年前以降) に極大したことが明らかになった。

このような本州中央部における第四紀の造構-堆積史の特徴は、島弧の隆起にみられる地殻の大規模隆起と海水準上昇によって形成されたものと考えられる。すなわち、前期更新世後期 (約 180 万年前) から本州中央部を中心に本州弧の隆起量が増大し、つづく中期更新世後期 (約 43 万年前) からはそれ以前までの隆起運動とは異なる新しい地殻の大規模な隆起が起こり、それと同時に海水準が約 1,000 m 上昇して、現在の地形が形成されたと考えられる。これまで述べてきたように、第四紀における島弧の形成は、それ以前の第三紀とは異なる地殻変動によるものであり、大規模な隆起と海面上昇による島

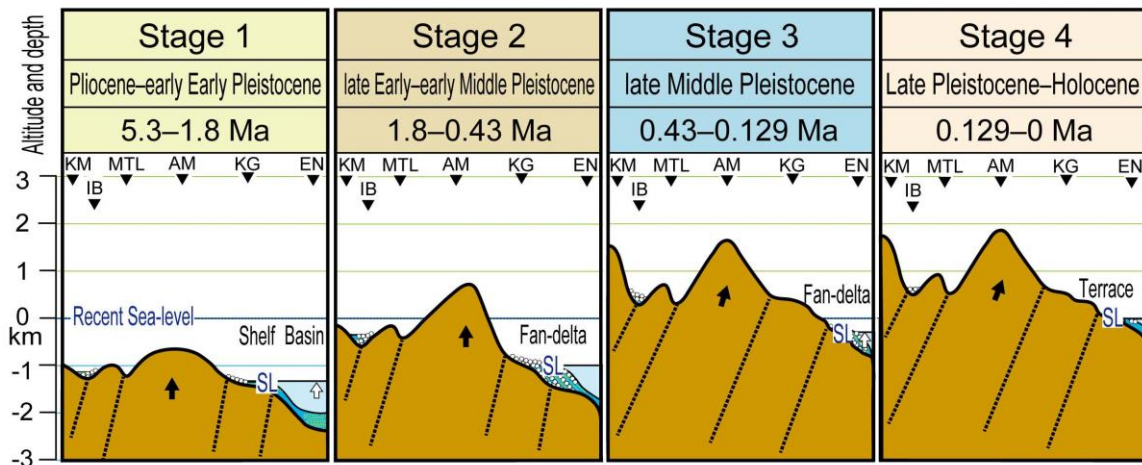


図6 本州中央部の遠州灘～木曽山脈にかけての鮮新世～完新世までの造構―堆積史における各ステージの地形断面イメージ。ステージ1：鮮新世～前期更新世前期（5.3 Ma–1.8 Ma），ステージ2：前期更新世後期～中期更新世前期（1.8 Ma–0.43 Ma），ステージ3：中期更新世後期（0.43 Ma–0.129 Ma），ステージ4：後期更新世～現在（0.129 Ma–0）。黒矢印は地殻の隆起，白矢印は海水準上昇を示す。

弧の形成は、プレートの沈み込みや衝突では説明できない。

文 献

- Arato, H. and K. Hoyanagi (1995) Three types of 4th-order depositional sequence model in the Niigata Sedimentary Basin. *Mem. Geol. Soc. Japan*, 45, 118–139. (in Japanese with English abstract)
- Ashigara Research Group (1986) Stratigraphy and geological structures of the Ashigara Group. Study of the Tertiary and Quaternary systems in the Ashigara Area (2). *Earth Science*, 40, 47–63. (in Japanese with English abstract)
- Arai, F. (1986) 3.4. Pleistocene in the northern part of the Kanto Plain, (1) Nakanojo and Numata Basins. 177–180, In *Geology of Japan Kanto Region* Editorial Committee ed.: *Geology of Japan*, 3, Kanto Region, Kyoritsu Publishing, Tokyo. (in Japanese).
- Endo, M and M. Tateishi (1985) Depositional environment of the Upper Neogene Formation, especially the Tsunago Conglomerate, Northeast of Nishi-Kubiki, Niigata Prefecture, Japan. *Contribut. Depart. Geol. Miner., Niigata Univ.*, 5, 33–48.
- EPICA Community Members (2004) Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature*, 429, 623–628.
- Fujii, S., T. Takemura and O. Yamamoto (1976) Isurugi Movement: Quaternary crustal deformation in the Toyama sedimentary basin. *Abst. Geol. Soc. Japan*, 83, 110. (in Japanese).
- Fujita, Y. (1970) Types of orogenic movements and their correlations around island arcs in the northwestern Pacific. 1–30, In Hoshino, M. and H. Aoki eds.: *Island Arcs and Oceans*, Tokai Univ. Press, Tokyo. (in Japanese with English abstract)
- Fujita, Y. (1982) On the Island Arc Disturbance. *Monograph. Assoc. Geol. Collab. Japan*, 24, 1–32. (in Japanese with English abstract)
- Harayama, S., K. Ohya, Y. Miyama, H. Adachi and R. Shukuwa (2003) Eastward tilting and uplifting after the late Early Pleistocene in the eastern-half area of the Hida Mountain Range. *The Quaternary Research*, 42, 127–140. (in Japanese with English abstract)
- Hayashi, T. and Paleo-Biwa Lake Research Group (1981) The Life of Lake Biwa. *Chigakukyoiku and Kagaku-undo*, 10, 92–97. (in Japanese)
- Hirakoso, S. (2008) Sedimentary facies and depositional sequences of the Middle-Upper Pleistocene in the central Kanto Plain. *Earth Science*, 62, 29–41. (in Japanese with English abstract)
- Hirayama, J. and T. Nakajima (1977) Analytical study of turbidites, Otadai Formation, Boso Peninsula, Japan. *Sedimentology*, 24, 747–779.
- Hoshino, M. (1968) On sedimentation of marine Pliocene series. *J. Geol. Soc. Japan*, 74, 363–370. (in Japanese with English abstract)
- Hoshino, M. (1983) *Marine Geology*. Assoc. Geol. Collab. Japan., 373p. (in Japanese)
- Hoshino, M. (1991) *The Basaltic Stage: Basic Concepts of Geological Science*. Tokai Univ. Press, Tokyo, 456p. (in Japanese with English abstract)
- Hoshino, M. (1998) *The Expanding Earth, Evidence, Causes and Effects*. Tokai Univ. Press, Tokyo, 295p.
- Hoshino, M. (2007) *Crustal Development and Sea Level: with special reference to the geological development of Southwest Japan and adjacent seas*. E. G. Service Press, Sapporo, 199p.
- Hujita, K. (1968) Rokko Movements and its appearance: Intersecting structural patterns of southwest Japan and Quaternary crustal movements. *The Quaternary Research*, 72, 127–140. (in Japanese with English abstract)
- Hujita, K. (1976) IV Theory of Mountain Formation in Japan. *Ecology of Mountain Forests*. 85–140, Collected Papers of Dr. Nishiki Imanishi, Chuo Kyoiku Shya, Tokyo. (in Japanese)
- Hujita, K. (1983) *Theory of Mountain Formation in Japan: Between Geology and Geomorphology*. Souju Shobo, 436p. (in Japanese)
- Imanaga, I. (1999) Structure of the Ashigara Group. *Kanagawa Pref. Mus., Research Rep. (Nature)*, 3, 41–56.
- Inouchi, Y., Y. Okuda and F. Yoshida (1978) On the age of formation of upper continental slope configuration in the south of the Kii Straits. *J. Geol. Soc. Japan*, 84, 91–93. (in Japanese)
- Ito, M. (1985) The Ashigara Group: A regressive submarine fan-fan delta sequence in a Quaternary collision boundary, north of Izu Peninsula, central Honshu, Japan. *Sedimentary Geology*, 45, 261–292.
- Ito, M. (1992) High-frequency depositional sequences of the upper part of the Kazusa Group, a middle Pleistocene forearc basin fill in Boso Peninsula, Japan. *Sedimentary Geology*, 76, 155–175.
- Ito, M. and Y. Katsura (1993) Depositional sequences in turbidite successions of the lower Kazusa Group, the Plio-Pleistocene forearc basin fill in the Boso Peninsula, Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, 96, 523–536.

- Kaizuka, S. (1987) Quaternary crustal movement in Kanto, Japan. *Jour. Geography*, 96, 223–240. (in Japanese with English abstract)
- Kaizuka, S. (1989) Fossa Magna in terms of large landforms and geological structure. *Chikyu monthly*, 11, 532–538. (in Japanese with English abstract)
- Kameo, K. and T. Sekine (2013) Calcareous nannofossil biostratigraphy and the age of the Anno Formation, the Awa Group, in the Boso Peninsula, central Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, 119, 410–420. (in Japanese with English abstract)
- Kaseno, Y., S. Miura and S. Fujii (1988) 5.2. Hokuriku district. (1) 2. Tectonic Movement. 145–146. In *Geology of Japan Chubu Region II* Editorial Committee ed.: *Geology of Japan*, 4, Chubu Region II, Kyoritsu Publishing, Tokyo. (in Japanese).
- Kaseno, Y. (1993) Geological journal of Ishikawa Prefecture. Ishikawa Prefecture and Hokuriku Geological Research Institute, 321p. (in Japanese with English abstract)
- Kato, H. and S. Akahane (1986) Geology of the Nagano district. with geological sheet map at 1:50,000, *Geol. Surv. Japan*, 120p. (in Japanese with English abstract)
- Katsura, Y. (1984) Depositional environments of the Plio-Pleistocene Kazusa Group, Boso Peninsula, Japan. *Sci. Rep. Inst. Geosci. Univ. Tsukuba, Sec. B, Geol. Sci.*, 5, 69–104.
- Kawabe, T. (1981) The Kobiwako Group in the Ayama-Koka Hills, Kinki district, Central Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, 87, 457–473. (in Japanese with English abstract).
- Kawabe, T. (1983) On the Pliocene Pleistocene sedimentary basins in Kinki District, especially of the Kobiwako Group, central Japan. *Monograph. Assoc. Geol. Collab. Japan*, 25, 79–100. (in Japanese with English abstract)
- Kawamura, Y. (2014) Research on Quaternary mammal in Japan and adjacent East Asian areas: A review of my research. *The Quaternary Research*, 53, 119–142. (in Japanese with English abstract).
- Kazaoka, O. (1988) Stratigraphy and sedimentary facies of the Uonuma Group in the Higashikubiki Hills, Niigata Prefecture, Central Japan. *Earth Science*, 42, 61–83. (in Japanese with English abstract).
- Kazaoka, O., M. Tateishi and I. Kobayashi (1986) Stratigraphy and facies of the Uonuma Group in the Uonuma district, Niigata Prefecture, central Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, 92, 829–853. (in Japanese with English abstract)
- Kikuchi, T. (1997) Forming Process of marine Pleistocene succession, the Shimousa Group, in the Kanto Tectonic Basin. *Earth Science*, 51, 117–132. (in Japanese with English abstract)
- Kobayashi, I. and M. Tateishi, S. Yasui, O. Kazaoka, K. Kurokawa, H. Aburai and K. Watanabe (1986) Stratigraphy and paleoenvironment of Nishiyama and Haizume Formations and Uonuma Group in Niigata Sedimentary Basin. *J. Geol. Soc. Japan*, 92, 375–390. (in Japanese with English abstract)
- Kubota, Y., Team Niigata Plain and Collaborative Research Group for Geology of the Western Margin of the Niigata Plain (2018) Geomorphic processes accompanying the forward-uplifting around the Echigo Plain during the Middle to Late Pleistocene: A discussion of the formation model of the isolated hills. *Earth Science*, 72, 125–142. (in Japanese with English abstract)
- Kodama, K., I. Suzuki and K. Kanehira (1986) 2.2. Southern Kanto Region (1) Boso Peninsula. 79–87, In *Geology of Japan Kanto Region* Editorial Committee ed.: *Geology of Japan*, 3, Kanto Region, Kyoritsu Publishing, Tokyo. (in Japanese).
- Koike, K. (1957) Geotectonic Development of the Southern Kanto Region, Japan. *Earth Science*, 34, 1–16. (in Japanese with English abstract)
- Koyama, M. (1986) Geohistory of Izu Peninsula and Pleistocene of Asigara and Oisho Region. *Chikyu monthly*, 8, 743–752. (in Japanese with English abstract)
- Koyama, M., N. Niitsuma, K. Kano, K. Takagi, R. Uchimura, T. Yoshida, J. Karasawa and H. Tanabe (1992) Geology and Tectonics of the Izu Slope of the Suruga Trough: Results of Dive 579 of the Shinkai 2000. Report of the 8th Shinkai Symposium, Japan Marine Science and Technology Center, 145–161. (in Japanese with English abstract)
- Kumon, F. (1999) Structural Basins and Sedimentary Environment of the Omi Basin from Deep Boring Data of Lake Biwa. *Lake Biwa Museum Research Report*, 12, 155–162. (in Japanese with English abstract)
- Kuwahara, T. (1968) The Nobi Basin and its Fault Block Movements. *The Quaternary Research*, 7, 235–247. (in Japanese with English abstract)
- Kuwahara, T. (1980) The Middle Pleistocene sediments around Ise-bay, Central Japan -1st distribution and fault blocks-. *The Quaternary Research*, 19, 149–162. (in Japanese with English abstract)
- Makinouchi, T. (2005) 3.3. Setouchi-ku. 186–190, In *Editing Committee of Geology of Japan Supplement ed., Geology of Japan Supplement Edition*, Kyoritsu Publishing, Tokyo (in Japanese)
- Matsuda, T. and Y. Kinugasa (1988) Quaternary Tectonic Movements - the characteristic and the related problems on the Japanese Islands. *The Quaternary Research*, 26, 251–254. (in Japanese with English abstract)
- Matsushima, N. (1995) Geomorphological History of Inadani - Active faults and Quaternary geology of Inadani. *Iida City Museum of Art Research Report*, 3, 145p. (in Japanese with English abstract)
- Moriyama, A. and K. Mitsuno (1989) The uplifting of the Kiso and Akaishi Mountain regions deduced from the sedimentary deposits and the Ryuto surface in the Southern Ina Valley. *Geograph. Review Japan*, 62, A-10, 691–707. (in Japanese with English abstract)
- Nagai, M. and M. Takahashi (2008) Geology and formation history of Hakone Volcano. *Kanagawa Pref. Mus., Research Rep. (Nature)*, 13, 25–42. (in Japanese with English abstract)
- Nakajima, T., H. Iwano, T. Danhara, T. Yamashita, Y. Yanagisawa, Y. Tanimura, M. Watanabe, T. Sawaki, S. Nakanishi, H. Mitsuishi, O. Yamanashi and S. Imahori (2019) Revised Cenozoic chronostratigraphy and tectonics in the Yatsuo Area, Toyama Prefecture, central Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, 125, 483–516. (in Japanese with English abstract)
- Naya, T., M. Hongo, T. Ueki, S. Hachinohe and K. Mizuno (2017) Stratigraphy and tectonics of the Plio-Pleistocene beneath the central Kanto Plain, central Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, 123, 637–652. (in Japanese with English abstract)
- Nishina, Y. (1972) Development of the Omine Erosion Surface in the northern part of Fossa Magna. *Mem. Geol. Soc. Japan*, 7, 305–316. (in Japanese with English abstract)
- Okamura, Y. (1990) Geological structure of the upper continental slope off Shikoku and Quaternary tectonic movement of the outer zone of southwest Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, 96, 223–237. (in Japanese with English abstract)
- Okamura, Y. and K. Nakamura, (1995) Inversion tectonic or basin inversion: a short introduction including examples in the eastern margin of the Japan Sea. *Earth Science*, 49, 302–305. (in Japanese)
- Okamura, Y., M. Yuasa and S. Kuramoto (1999) Submarine Geologic Chart of Suruga Bay. *Submarine Geologic Chart*, 52, *Geol. Surv. Japan*, 44p. (in Japanese with English abstract)
- Omura, A. (2000) The third-order depositional sequence of the Pliocene strata in the Nishikubiki area, Niigata Prefecture, central Japan, with reference to sedimentary organic matter. *J. Geol. Soc. Japan*, 106, 534–547. (in Japanese with English abstract)
- Sakamoto, S. and T. Nozawa (1960) 1:50,000 geological map Yatsuo.

- Geol. Surv. Japan, 69p. (in Japanese with English abstract)
- Sato, M., T. Suzuki and T. Nakayama (2004) Stratigraphy and correlation of Early Pleistocene tephra in two drilling cores at Haginaka and Akatsuka Parks, Tokyo metropolitan area, central Japan. *Jour. Geology*, 113, 816–834. (in Japanese with English abstract)
- Satoguchi, Y. (2010) Long-term stratigraphy of Lake Biwa sediments and examination of lake tectonics, central Japan. *The Quaternary Journal*, 49, 85–99. (in Japanese with English abstract)
- Shackleton, N. J. (1987) Oxygen isotopes, ice volume and sea level. *Quaternary Science Reviews*, 6, 183–190.
- Shiba, M. (1991) The Geological Structure of the Southwestern Part of the South Fossa Magna Area: Geology of the Shimizu and Ihara districts in Shizuoka Prefecture, Central part of Japan. Monograph. Assoc. Geol. Collab. Japan, 40, 98p. (in Japanese with English abstract)
- Shiba, M. (2016) How was the Suruga Bay formed? *Jour. Fossil Research*, 49, 3–12. (In Japanese)
- Shiba, M. (2017a) Formation of Suruga Bay - Large-scale uplift of arc and sea level rise. Tokai Univ. Press, 406p. (In Japanese)
- Shiba, M. (2017b) Geology of the island arcs in the northwestern margin of the Pacific Ocean and their formation by a large-scale uplift and sea level rise - the formation of Suruga Bay. *NCGT Journal*, 5, 532–548.
- Shiba, M. (2020) Distribution of island endemic animals and sea level rise of 1,000m since the late Middle Pleistocene. *Jour. Fossil Research*, 53, 1–17. (in Japanese with English abstract)
- Shiba, M. (2021a) Characteristics of crustal uplift since the Pliocene in central Honshu, Japan, and sea level rise. *Earth Science*, 75, 37–55. (in Japanese with English abstract)
- Shiba, M. (2021b) Distribution of island endemic animals and the late Middle Pleistocene land bridges as evidence of sea level rise of 1,000 m since 430 ka. *NCGT Journal*, 9, 60–78.
- Shiba, M. and Committee of the science symposium (2020) Stratigraphic correlation of Plio-Pleistocene in central Honshu, Japan. *Earth Science*, 74, 201–210. (In Japanese).
- Shiba, M., Y. Hirose, T. Nobuhara, K. Takagi, M. Yasuda, K. Fuji and M. Nakamura (2013) The stratigraphy and fossil molluscan assemblages of the so-called Shizukawa Group, the Neogene series in the Fuji River Valley, central Japan. *Earth Science*, 67, 1–19. (in Japanese with English abstract)
- Shiba, M., Y. Hisamatsu, H. Okazaki, T. Watanabe and H. Shiba (2012) Fossil foraminiferal assemblages and the transition of depositional environment of the Middle Pleistocene Negoya Formation in the Udo Hills, Shizuoka City, central Japan. *Sci. Rep. Mus. Tokai Univ.*, 11, 23–41. (in Japanese with English abstract)
- Shiba, M., K. Nemoto and S. Izu (1991a) Origin of the gravels of the northern Semoumi Bank, Suruga Bay. Monograph. Assoc. Geol. Collab. Japan, 38, 11–18. (in Japanese with English abstract)
- Shiba, M., K. Sase, F. Tsunoda, R. Shichi and T. Tanaka (1991b) Basement of Mt. Fuji. Monograph. Assoc. Geol. Collab. Japan, 38, 1–10. (in Japanese with English abstract)
- Shoda, K., T. Kikuchi, T. Suzuki, S. Takekoshi and Research Group for Geology of the Western Hills of the Kanto Plain (2005) Tephrostratigraphy of the lower part of the Hanno Gravel, western part of the Kanto Plain, central Japan, and the correlation with some widespread tephra. *Earth Science*, 59, 339–356. (in Japanese with English abstract)
- Sueoka, S., B. P. Kohn, Y. Ikeda, K. Kano, H. Tsutsumi and T. Tagami (2011) Uplift and denudation history of the Akaishi Range based on low-temperature thermochronologic methods. *Jour. Geography*, 120, 1003–1012. (in Japanese with English abstract)
- Sugai, T., H. Matsushima and K. Mizuno (2013) Last 400 ka landform evolution of the Kanto Plain: under the influence of concurrent Glacio-eustatic sea level changes and tectonic activity. *Jour. Geography*, 122, 921–948. (in Japanese with English abstract)
- Suganuma, Y., T. Suzuki, H. Yamazaki and T. Kikuchi (2003) Chronostratigraphy of the Ina Group, central Japan, based on correlation of volcanic ash layers with Pleistocene widespread tephra. *The Quaternary Journal*, 42, 321–334. (in Japanese with English abstract)
- Sugiyama, Y. and K. Shimokawa (1982) The geologic structure of the Ihara district and the Iriyama fault system in the South Fossa Magna region, Central Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, 33, 293–320. (in Japanese with English abstract)
- Takahama, N. (1987) Unconformity at the margin of the Uonuma sedimentary basin. *Chikyu monthly*, 9, 319–323. (in Japanese with English abstract)
- Takano, O. and T. Nakajima (2019) North Fossa Magna as the major sediment supply system to the Toyama Deep-sea Channel: Late Cenozoic deep-sea depositional systems and tectonosedimentary processes. *J. Geol. Soc. Japan*, 125, 467–481. (in Japanese with English abstract)
- Takemoto, H. (1986) Late Quaternary accumulation processes of Ogawajima peat bogs and its surrounding basin, Northwest Kanto, central Japan. *Geogr. Res.*, Komazawa Univ., 16, 35–40. (in Japanese with English abstract)
- Takeshita, Y., Y. Miyake and J. Sakai (2007) Correlation of the Middle Pleistocene tephra beds from the older Ontake Volcano with those in the southern part of Matsumoto basin, central Japan. *The Quaternary Research*, 46, 131–146. (in Japanese with English abstract)
- Watanabe, H. and A. Urabe (2003) Formative ages, of fluvial terraces and their upheaval movements in the northwest part of the Tokamachi basin in central Japan. *Earth Science*, 57, 173–191. (in Japanese with English abstract)
- Yano, T. (1989) Late Cenozoic geohistory in the northern Fossa Magna region, Central Japan. *Jour. Sci. Hiroshima Univ. (Ser. C, Geol. and Mine)*, 9, 81–132.
- Yano, T., T. Kosaka, T. Midori and S. Kawano (2020) Late Cenozoic environmental change in the southern part of the northern Fossa Magna. *Bull. Omachi Alpine Mus.*, 47–68. (in Japanese with English abstract)
- Yoshida, F. (1990) Stratigraphy of the Tokai Group and paleogeography of the Tokai sedimentary basin in the Tokai region, central Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, 41, 303–340. (in Japanese with English abstract)
- Yoshikawa, S. (2012) Quaternary stratigraphy of the Osaka sedimentary basin, central Japan. *The Quaternary Research*, 51, 1–19. (in Japanese with English abstract)
- Yoshikawa, S. and M. Mitamura (1999) Quaternary stratigraphy of the Osaka Plain, central Japan and its correlation with oxygen isotope record from deep sea cores. *J. Geol. Soc. Japan*, 105, 332–340. (in Japanese with English abstract)
- Yoshikawa, S. and M. Yamazaki (1998) Transition of Paleo-Lake Biwa and the formation of Lake Biwa. *Urban Kubota*, 37, 2–7. (in Japanese)
- Yoshikoshi, M. (1988) 4.2. Sea of Japan coastal areas. 123–124, In *Geology of Japan Chubu Region I Editorial Committee ed.: Geology of Japan*, 4, Chubu Region, Kyoritsu Publishing, Tokyo. (in Japanese)

2024 年 4 月 2 日から 3 日にかけて台湾で発生した 破壊的な地震に先行する電磁シグナル

Electromagnetic signals that preceded the destructive earthquakes
that occurred in Taiwan between April 2 and 3, 2024

Daniele Cataldi¹, Gabriele Cataldi² and Valentino Straser²⁻³

(1) Radio Emissions Project, Radio Direction Finding (Italy – I). daniele77c@hotmail.it

(2) Radio Emissions Project, Solar and Terrestrial Interaction (Italy – I). ltpaobserverproject@gmail.com

(3) University of Makeni (Sierra Leone - SL). valentino.straser@gmail.com

(要旨のみ 柴 正博 訳)

要旨 : 2024 年 4 月 2 日から 3 日にかけて、台湾で 2 つの強い地震が発生し、多数の死者と数百万ユーロの被害が出た。また、第一次地震では津波が発生し、人口とインフラを圧倒した。本研究では、これらの地震が発生する数日前の自然電磁スペクトルを分析し、地震の準備段階における物理現象の候補となり得る電磁シグナルを調査することを目的としている。検出された信号は、他の潜在的に破壊的な地震の際にすでに指摘されている非常に低い周波数と、地震前の信号候補に起因する RDF 信号によって特徴づけられる。

イタリア地震の発生と UTC 時間

Occurrence of Italian Earthquakes and UTC time

Daniele Cataldi¹, Gabriele Cataldi² and Valentino Straser²⁻³

1) Radio Emissions Project, Radio Direction Finding (Italy – I). daniele77c@hotmail.it

2) Radio Emissions Project, Solar and Terrestrial Interaction (Italy – I).
ltpaobserverproject@gmail.com

3) University of Makeni (Sierra Leone - SL). valentino.straser@gmail.com

(要旨のみ 柴 正博 訳)

要旨 : 2023 年から 2024 年にかけて、イタリアで多くの地震が発生したいくつかの期間を分析した。本研究では、これらの地震が発生した UTC 時刻と地震発生回数に関係があるかどうかを検討し、これらのデータと前兆地震発生現象の特定との間に新たな関係があるかどうかを検証した。データを分析した結果、地震発生の周期性は、太陽日の特定の時間帯にあると仮定できることがわかった。

2024 年 4 月 5 日にニュージャージーとニューヨークの間で発生した マグニチュード M4.8 の地震に先行した電磁シグナル

Electromagnetic signals that preceded the M4.8 magnitude earthquake that occurred
between New Jersey and New York on April 5, 2024

Daniele Cataldi¹, Gabriele Cataldi² and Valentino Straser²⁻³

- 1) Radio Emissions Project, Radio Direction Finding (Italy – I). daniele77c@hotmail.it
- 2) Radio Emissions Project, Solar and Terrestrial Interaction (Italy – I).
ltpaobserverproject@gmail.com
- 3) University of Makeni (Sierra Leone - SL). valentino.straser@gmail.com

(要旨のみ 柴 正博 訳)

要旨: 本研究は、2024 年 4 月 5 日の地震に先立ち、イタリアで電波方向探知システムによって検出された電磁気データを紹介する。UTC 14:23:00 に M4 の中規模地震が発生した。 .8, 米国, ニュージャージー州, ニューヨークから数キロのホワイトハウス駅。本研究で取り上げたデータは、24 時間 365 日の連続モニタリングの結果であり、ローマ観測所とニューヨークとの間にかなりの距離があるにもかかわらず、電磁波信号の到来方向が将来の震源域の方向と関連づけられるかどうかを検証するために検討された。特に、モニタリング中、地震発生 の 10 日前にすでに、将来の震源域から来る方位で低い周波数が記録されていた。地震発生 の 9 日前と 4 日前にも同様の周波数が観測された。

地殻のフラクタル次元と長さの分布による リニアメント統計学のグローバルシステム

The Earth's global system of lineaments Statistics in distribution
by length and the fractal dimension of the crust

Lev Maslov¹ and Vladimir Anokhin²

1) LCC International University, Klaipeda, Lithuania, lmaslov@lcc.lt;

2) St. Petersburg Federal Research Center RAS, St. Petersburg, Russia vladanokhin@yandex.ru

(柴 正博 訳)

要旨: 地球の地殻変動 (はっきりとした断層を含む) は, 4 つの支配的な方向を持つクラスターにまとまっている: N-S, E-W, NW-SE, NE-SW である. 各系統のリニアメントの向きは, 回転楕円体の軸方向圧縮の変化により弾性殻に作用する主応力の向きに対応している. 対角線上の NW-SE 系と NE-SW 系は, この惑星で観測されるリニアメントの二重らせん系を形成している. 斜めのリニアメントのシステムは, リニアメントの方位の角度分布が二峰性 (一般に多峰性) である. この二峰性は, 偏差応力の符号の変化による主せん断応力 (対角線) の向きの変化によって生じる. リニアメントの長さによる分布は, 乗法過程を記述する対数ロジスティック関数で近似される. リニアメント系の Hausdorff-Besicovitch (フラクタル) 次元は約 1.5~1.6 に等しく, Sierpinski gasket のフラクタル次元 1.58 に近いことがわかった.

Keywords: lineaments, faults, fractures, fractals, multiplicative process, topography, Earth's rotation, stress.

はじめに

地球表面のテクトニック構造とその形成メカニズムの研究は, 月や太陽との相互作用の過程における地球のジオダイナミクスを理解する上で重要である. さまざまな地殻構造の中で, 明確な断層を含むリニアメントは特別な位置を占めている. これらは, 深部から地表への熱エネルギーの移動経路であり, 地表への流体やマントル物質の移動経路であり, 地震や火山の多い場所である. このため, a) 地球表面におけるリニアメントと断層の空間的分布の規則性を知ること, b) リニアメントの形成とその活動に至るメカニズムとプロセスを理解すること, が重要となる. この分野における最初の発表のひとつは, W. H. Hobbs (1904) による大西洋国境地帯の研究である. この分野の研究の包括的なレビューは, Voronov (1968), Katterfeld and Charushint (1970), および Anokhin (2006, 2011) で紹介されてい

る. リニアメントの規則的なネットワークが発見されたことで, 科学者たちはそのネットワークがどのようなプロセスで, どのようなメカニズムで形成されているのかという疑問に対する答えを求めるようになった.

地殻の断層が地震や火山の発生源であることはよく知られているが, 断層は地表に流体が移動し, 鉱床が形成される場所でもある. しかし, 地球規模のテクトニクスにおけるリニアメントのネットワークの役割は明確ではない. それとも, 深部から地表に流れ込むエネルギーや流体の受動的な伝導体なのだろうか? 本研究では, a) リニアメントネットワーク研究の方法論的側面, b) リニアメントネットワーク生成のメカニズム, c) 長さによるリニアメント分布の統計的側面について議論する. リニアメント」という言葉は, 明確に定義された断層を含む, 直線的な (メルカトル図法で見た) 地形の特徴を指す言葉として, 本研究では使われている.

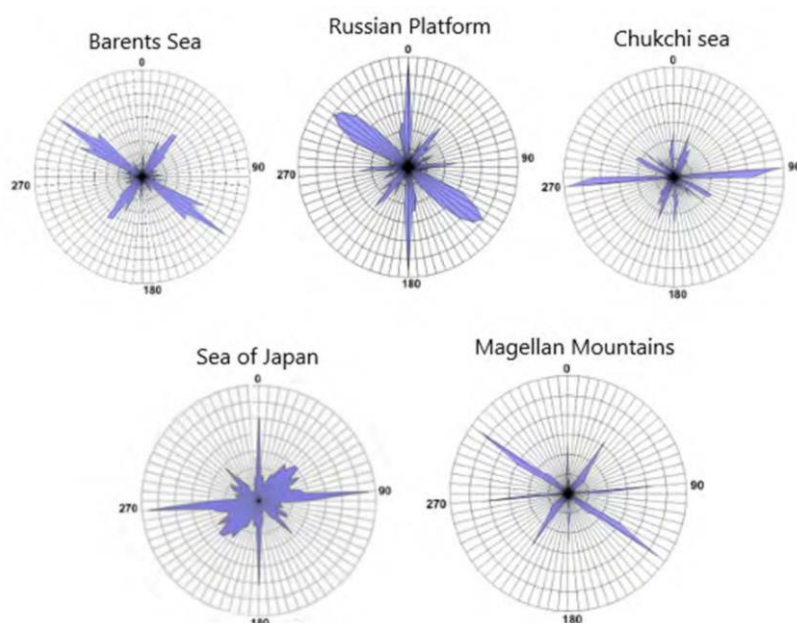


図1 バレンツ海, ロシア台地, チュクチ海, 日本海, マゼラン山脈のリニアメントネットワークのローズダイアグラム. 図の線の長さは, 対応する方向のリニアメントと断層の数に比例する.

リニアネットワーク研究の方法論的側面

このセクションで論じるアプローチは, Anokhin (2006, 2011) の著作で紹介されている. 元データのソースとして, ローカルなものからグローバルなものまで, さまざまな縮尺の紙地図を使用した. 大陸地殻, 海洋地殻, 遷移帯の領域が研究された. 約 70 の構造的な地域からデータが収集され, 研究された. その中には, バレンツ海, ロシア台地, チュクチ海, 日本海, マゼラン山脈が含まれる. リニアメントはメルカトル図法の地図上で視覚的に検出された. リニアメントの方位角と長さも手作業で測定した. 図1は, 上記の5つの地域について作成したリニアメントの方位のローズダイアグラムである. この図から, すべての地域に共通するリニアメントの方向には, いくつかの支配的な方向が存在することがわかる.

地域別のローズダイアグラムに加えて, オセアニア地域のローズダイアグラム図も作成した (図2).

図1と図2のローズダイアグラムは, 2つの惑星リニアメント系を構成するリニアメントの方向を示している. 1つ目のシステムは, 緯度方向 (方位角 $0^{\circ} \sim 10^{\circ}$) と経度方向 (方位角 $80^{\circ} \sim 90^{\circ}$) の2つの互いに直交する成分で構成され, 2つ目のシステムは, (方位角 30°

$\sim 60^{\circ}$) と (方位角 $120^{\circ} \sim 150^{\circ}$) の2つの互いに直交する対角成分で構成される. リニアメント系 (メガトレンド) の直交性は, 太平洋の地球規模や地域規模で観察された (Smoot, 1999 を参照).

上述した方法は主観的なものであり, 得られた結果は十分な根拠がないと批判された. 主観を避けるため, デジタル地形図を用いて地形形態を調査した (Florinsky, 2008). 地形属性のグローバルなパターンをよりよく表現するために, デジタル情報をフィルタリングする特別なアルゴリズムが作成された. その結果, リニアメントの地図が視覚的に分析された.

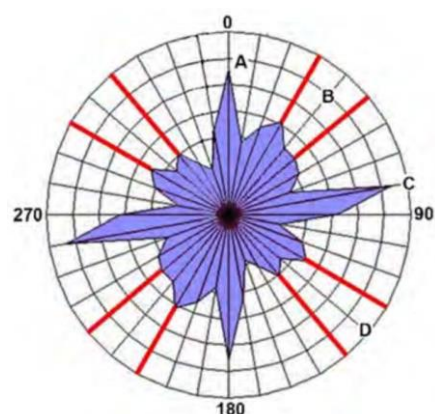


図2 オセアニア地域のリニアメントネットワークの一般化されたローズダイアグラム (Anokhin, 2006, 2011).

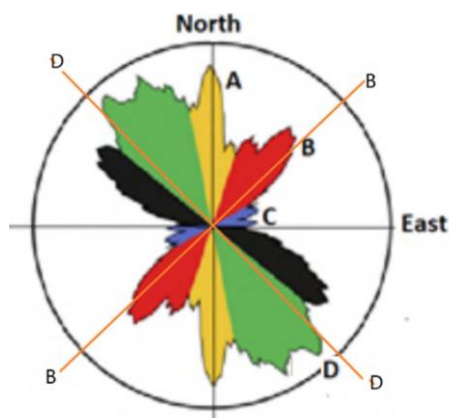


図3 ノルウェーのボムロ島のリニアメントと断層の方位を10万分の1の縮尺で示したローズダイアグラム (Ceccato et al., 2022). AとCは緯度方向と経度方向のリニアメント, BとDは対角線方向のリニアメント. 対角線リニアメントの方位が明らかに多峰性であることに注意.

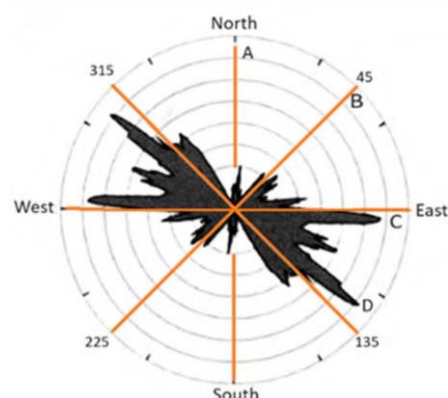


図4 フライ法で作成したブラジルの堆積物アラインメントの方位のローズダイアグラム. 4つの支配的な方位: この図には, A, C, B, Dの4つの支配的な方位がはっきりと示されている (Haddad-Martim et al., 2017).

Florinsky (2008) によると, デジタル地形モデリングは, 地球表面の二重らせん構造の存在という仮説を支持するものであった. なお, 地球全体の二重らせん構造は, 他の科学者たちによって以前から観測されていた (O'Driscoll, 1980).

リニアメントと断層系の徹底的な研究は, Ceccato et al. (2022) で紹介されている. 著者らは, ノルウェーのボムロ島の特定地域でリニアメントシステムの研究を行った. マルチスケール解析に使用した縮尺 1:100, 1:5,000, 1:25,000, 1:100,000 のリニアメントマップは, 同じデジタル地形モデルを手作業で抽出して作成した. 解析の目的は, a) リニアメントの方向性を調べることであり, b) リニアメントネットワークのフラクタル次元を調べることであり. リニアメント方位のバラ図を作成し, 縮尺を分析した. 図3は縮尺10万でのバラ図である.

図3は, ノルウェーのボムロ島のリニアメントと断層の方位を示すローズダイアグラムである. 文字AとCは南北と東西の方位を示し, 文字BとDは惑星の二重らせん系を形成する2つの対角線の互いに直交する方位を示す.

ブラジルのカラジャスにおける酸化鉄-銅-金 (IOCG) 鉱床の分布の規則性, および関連するリニアメントシステムを研究するための完全自動アプローチは, Haddad-Martim et al. (2017) で実施された. リニアメントは堆積アラインメントとみなされた. フライ法を用いて, 著者は整列の方向を示すローズダイアグラムを作成した (図4).

これとは別に, SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) から対象地域のリニアメントマップを作成した. リニアメントの抽出は, STRM のデジタル標高方位から得られた4つの異なる陰影レリーフ画像を用いて, PCI-Geomatica ソフトウェアで自動的に行われた. ブラジルのカラジャスにある30鉱床/鉱脈の点状パターンのフラクタル次元 b を調べるために, ボックスカウンティング法を用いた. ほとんどの地域のフラクタル次元は $b = 1.5-1.8$ であった.

リニアメントネットワーク形成のメカニズム

地球表面で観測されるリニアメント系の起源を説明するために, いくつかのモデルが提案された. Rance (1967, 1968) は球体のねじれ変形に関する物理数学的モデルを開発した. このねじれは, マントル対流が地殻に作用したためと考えられている. 実際, このモデルはその場しのぎで考案されたものだ. 天球上の惑星の逆行運動を説明するためにその場しのぎで考案された小さな円軌道である. リニアメントネットワークの起源を説明するもう一つのアプローチは, 地球の軸回転という現実的なメカニズムに基づいている. 弾性的な軸対称楕円殻の軸方向圧縮の変化によって生じる応力場は, 殻の理論 (Dolitsky and Kiiko, 1963) の手法を用いて理論的に計算された. 計算によると, 主な機械的応力 s_1 と s_2 は球体の緯度方向と経度方向に作用し,

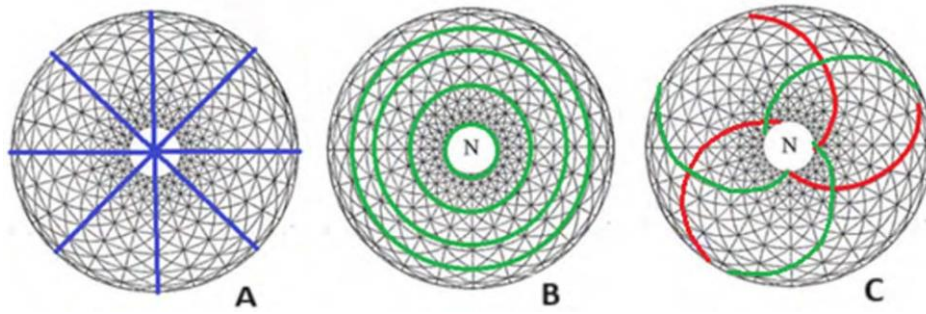


図5 主応力テンソルの緯度A成分、経度B成分（法線）、対角C成分（剪断）..

剪断応力 δ は対角線方向に沿って作用する（図5）。

主要な機械的応力の4つの方向は、上に示したリニアメントと明瞭な断層の4つの方向と完全に一致する。したがって、論理的な連鎖を結論づけると、地球の軸回転の変動と、それに対応する地球の楕円体の扁平化の変化が、観測されたリニアメントネットワークの原因であることを認めざるを得ない（唯一の原因ではないかもしれない）（Dolitsky and Kiiko, 1963）。惑星外殻の応力は、周期的減速の過程で約100万年後に強度限界に達すると推定されている（Maslov, Anokhin, 2006） - 地殻材料が破壊された物質に変化するのに十分な時間。地球の軸回転の周期的な減速に加えて、地球の軸回転の急激な変動は、マグミチュード σ_1 , σ_2 , δ 応力を増加させ、地殻と上部マントルの破壊を激化させる可能性がある。

対角線系における方位リニアメントの二峰性

対角リニアメントシステムの興味深い特徴は、方位角45度と135度付近で対称的に相対的な最大値を持つリニアメントの向きの多峰性である（図2）。対角線リニアメントと断層系における方向の多峰性分布は、他の科学者たちによって以前から観察されていた（Voronov, 1968）。多峰性は、理論的な斜め45度方向に対する剪断破壊方向の角度の ± 15 度程度の変化によって引き起こされることを示唆している（図6）。

破壊力学理論によれば、剪断破壊角は一軸伸長下では45度より大きく、一軸圧縮下では45度より小さい（Fan, 2019）。惑星の軸回転の変化、つまり角加速度または角減速度は、伸長から圧縮への偏動応力の符号を変化させ、したがって理論的な対角線45度方向（赤線）に対する剪断破壊の角度を変化させることができる。

長さによるリニアメントの分布

長さによる分布線形の統計を研究するために、ワイブル分布、対数正規分布、対数ロジスティック分布など多くの分布が検討された。対数ロジスティック相補累積分布関数（CCDF）は、次の形式で書くことができる。

$$N(l \geq x) = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{a}\right)^b}$$

この式では、 $N(l \geq x)$ - 長さ $l \geq x$ のリニアメントの数； $b > 0$ と $a > 0$ の実数定数。乗法過程における要素の大きさによる分布は、漸近的にべき乗関数で記述されることが示されている（Sornette, 1998; Guerrero, Garcia-Banos, 2020）。バレンツ海、ロシア台地、チュクチ海、日本海、マゼラン山脈におけるリニアメントの長さ別分布を対数ロジスティック近似した結果を図6

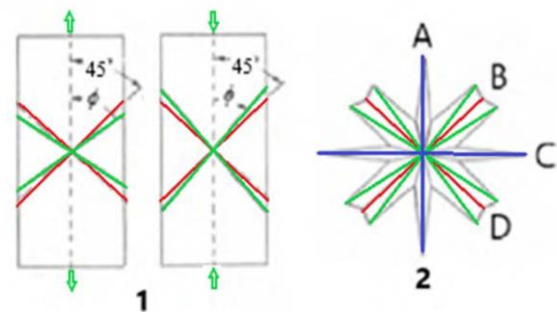


図6 伸長または圧縮下の試験片における剪断応力の方向(1)と、それに対応する二峰性のローズダイアグラム(2)。A, B, C, Dの方向を持つローズダイアグラムは、図1-4のローズダイアグラムを一般化したものである。

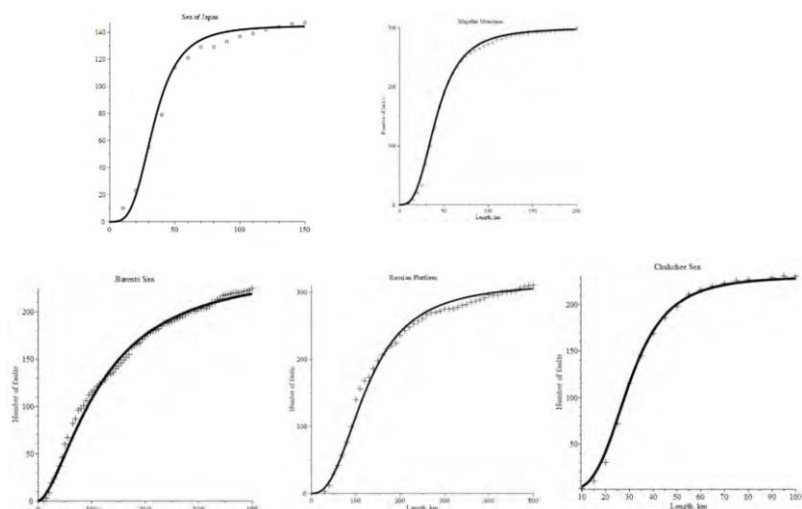


図7 観測されたリニアメントの長さ分布を対数ロジスティック関数で近似.

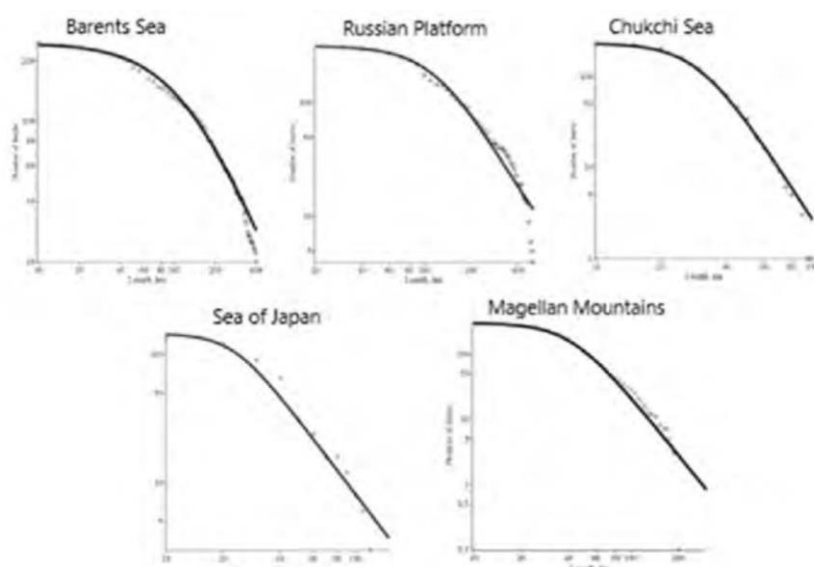


図8 バレンツ海 ($b=1.9$), ロシア台地 ($b=1.58$), チュクチ海 ($b=1.47$), 日本海 ($b=1.4$), マゼラン山脈 ($b=1.25$) の対数プロット.

に示す. 図7は, バレンツ海, ロシア台地, チュクチ海, 日本海, マゼラン山脈のデータを対数座標系でプロットしたものである.

曲線の「直線」部分の傾き b は, この領域のリニアメントネットワークのハウスドルフ・ベシコビッチ(フラクタル)次元を表す. バレンツ海では $b=1.92$, ロシア台地では $b=1.58$, チュクチ海では $b=1.47$, 日本海では $b=1.40$, マゼラン山脈では $b=1.25$ である. Ceccato et al, (2022) によると, ボムロ島群島の不連続露頭に露出したリニアメントネットワークはフラクタル次元 $b=1.51$ で特徴付けられ, これは本研究で得られた結果と一致する. バレンツ海の高い b 値 1.95 は, おそらく

図6の対応するグラフを, 対数ロジスティック関数の最大積載量と呼ばれる最大値まで完成させなかったことで説明できる. このグラフの構造は図8のグラフと似ている. これは, 鉱物原料の鉱床分布が同じフラクタル次元 b を持つ同じべき乗則に従っていることを意味している.

つまり, ある地域のリニアメントの特徴間の関数的相関関係を導き出し, 鉱床埋蔵層の分布調査に利用することができる.

リニアメントネットワークの次のような特殊性: a) 表層のリニアメントの向きの4つの異なる方向, b) 斜めのリニアメントの向きの方位角的な多峰性, c) ~ 1.5

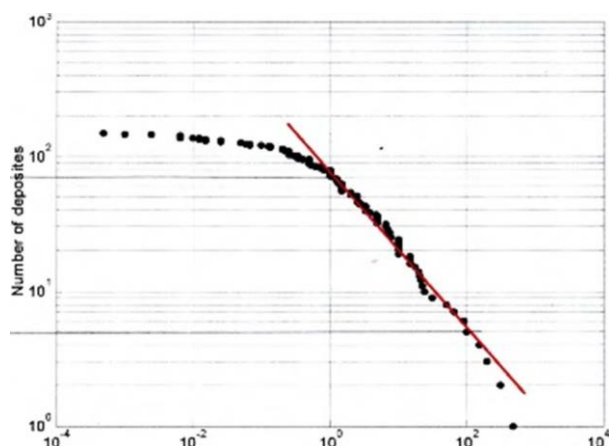


図 9 対数座標におけるカーボナタイト岩石中の鉱石埋蔵量の正規化値の観測分布 (Rodkin et al., 2008).

～1.8 フラクタル次元のリニアメント分布は、惑星のリニアメントと明確な断層のシステム全体が、1 つのグローバルなメカニズム、1 つのグローバルな力によって作られ維持されていることを示している。このメカニズムは地球の軸回転である。マントル対流が、上に述べたリニアメント構造の形成にどのような役割を果たすのか、もし果たすのであれば、それは明らかではない。先に行われた理論的な実験 (Rance, 1967, 1968) は失敗だったと認めざるを得ない。

地球の軸回転のほかに、潮汐変形、すなわち潮汐性惑星固体波の走行が、さまざまなテクトニック現象や構造の源であると考えなければならない (Kosygin and Maslov, 1986; Nesi et al., 2023) 回転と潮汐のメカニズムに関係する力は、重力と慣性のもので、一方向に何億年も持続的に作用し、累積的な効果をもたらす。

我々は、現実的な地殻変動理論 (仮説) は、a) 惑星のリニアメント規則正しいネットワークの存在と、b) 地殻と上部マントルシェルのフラクタル (割れ目) 構造を考慮に入れなければならないと考えている。

文 献

- Anokhin, V. M. The global disjunctive network of the Earth: structure, origin, and geological significance. Saint-Petersburg, Nedra, 2006, 162pp.
- Anokhin, V. M. Structure of the planetary lineament network. LAP LAMBERT Academic Publishing, GmbH & Co. KG. Saarbrücken, Germany, 2011, 247pp.
- Ceccato, A., Tartaglia, G., Antonellini, M., Viola, G. Multiscale lineament analysis and permeability heterogeneity of fractured crystalline basement blocks, 2022. *Solid Earth*, 13, 1431–1453, 2022, <https://doi.org/10.5194/se-13-1431-2022>
- Dolitsky, A.V. and Kiyko, I.A., On causes of deformation of the Earth's crust. In Nalivkin, D.V. and Tupitsin, N.V. (eds.): *Problems of Planetary Geology*, Moscow: Gosgeoltekhizdat, 1963, 291–312.
- O'Driscoll, E.S.T., The double helix in global tectonics, *Tectonophysics*, 1980 (63), 397–417.
- Fan J., Evaluation of the material strength from fracture angle under uniaxial loading. *Front. Struct. Civ. Eng.* 2019, 13 (2), 288–293, <https://doi.org/10.1007/s11709-018-0480-8>
- Florinsky, I., Global lineaments: application of digital terrain modeling. In the book: *Advances in Digital Terrain Analysis*. Springer. Editors: Q. Zhou, B. Lees, G.-A. Tang, 2008, 365–382, doi:10.1007/978-3-540-77800-4_20
- Guerrero, F. G., Garcia-Banos, A., Multiplicative processes as a source of fat-tail distributions. *Helveta* 6, 2020.
- Idziak, A., Teper, L. Fractal dimension of faults network in the upper Silesian coal basin (Poland): Preliminary studies. *PAGEOPH*, 1996 (147), 239–247. <https://doi.org/10.1007/BF00877480>
- Haddad-Martim, P. M., Souza Filho, C. R., Carranza E. J. M. Spatial analysis of mineral deposit distribution: A review of methods and implications for structural controls on iron oxide-copper-gold mineralization in Carajás, Brazil. *Ore Geology Reviews* 81, 2017, 230–244.
- Hirata, T., Fractal dimension of fault systems in Japan: Fractal structure in rock fracture geometry at various scales. *Fractals in Geophysics*, 1989, 157–170.
- Hobbs, W.H. Lineaments of the Atlantic Border Region. *Geological Society of America Bulletin*, 1904 (15), 483–506.

大陸構造圏の P 波速度モデル(ウクライナ領土)

The P-velocity models of continental tectonosphere (Territory of Ukraine)

V. V. Gordienko and L. Ya. Gordienko

S.I. Subbotin Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine

(足立久男 訳)

要旨: この研究の目的は、ウクライナ領土の地殻と上部マントルの 3 次元 P 波速度モデルを構築することである。マントル部分のモデルは熱モデルによって作成された。その方法には、速度と温度との間の相関関係の利用と、典型的なマントルを構成する岩石の異なる圧力条件下での溶融物の存在が含まれている。このようなモデルは初めてつくられた。これは、以前にウクライナの構造圏における様々な年代の深部プロセスについて構築したスキームに基づいており、主な最近の活性化 (RA) 中の熱および物質移動の結果を考慮している。その結果は、卓状地 (東ヨーロッパ卓状地とドンバスの領域)、カルパチアのアルプス地向斜、スキチアンプレートのヘルシニア-キンメリア地向斜のモデルに重ね合わさる。最近の活性化の不完全なプロセスは、著者らが用いた地質学的理論では正確に記述できない。適切な熱・物質移動のスキームを選択するために、ユーラシア、北アメリカ、大西洋、太平洋を横断する全長 50,000 km を超える北半球のプロファイル・システムで重力モデリングが行われた。現実 (観測された重力場) に最もよく対応するプロセススキームが特定された。このスキームはウクライナで使用され、非常に高い精度で活性化領域が決定された。南側では、深さ 400 km で黒海の凹地によってモデルが制限されている。下部マントルまでの遷移帯の速度は考慮されていない。マントルの各深度における P 波速度の値は、バックグラウンド (卓状地) の温度との差によって決定された。固相線以上の温度での溶融物濃度はごくわずか (約 1.5%) と考えられた。これは 0.1 km/s の速度低下に相当する。試行速度モデルは特別に選択された独立のモデルと比較された。深さ 50 km から 150 km までの計算誤差 (0.035 km/s) と速度の等値線の区画 (0.1 km/s) が決定された。深度 25 km では、DSS のデータを用いてモデルを構築した。誤差-0.13 km/s。速度の等値線の区画は 0.4 km/s。最近の活性化帯の中心から非活性化卓状地下までの速度の差は、深さ 50~100 km で 0.6 km/s、深さ 150~300 km で 0.1 km/s、深さ 400 km で 0.2 km/s に達する。モデリングの結果、より詳細かつ合理的なレベルで地殻変動プロセスのスキームを構築することが可能になり、ウクライナ全領土の地震状況のレベルや特徴を確実に予測することができるようになる。

Keywords: recent activation, deep process, tectonosphere, velocity model.

はじめに

本稿は、ウクライナの構造圏における深部過程と地殻・上部マントル構成岩石の物性分布の統一モデルを構築することを目的とした第 2 段階の研究成果に基づいて執筆された。これらの問題は、著者の参加のもと長年にわたって包括的に検討されており、ウクライナ的全領域をカバーするモノグラフで紹介されている (Gordienko et al., 2018, etc.)。参考文献は特に (Gordienko, 2017, etc.) に紹介されている。他の大陸や海洋地域の

研究とともに、一般的な地質学理論を打ち立てることができ (Gordienko, 2022a,b), 多くの鉱床の起源やその探索方法の開発など、多くの問題を解決することができた。第 1 段階では、構造圏の温度 (T) 分布が研究され (Gordienko et al., 2023), 得られた情報は、独立したデータとして管理されている。第 2 段階では、これらの結果を用いて、ウクライナ領土の上部マントル構成岩石の縦波弾性波速度 (V_p) を計算した。地殻深度 (25 km) については、利用可能な DSS データを使用した。

温度モデル

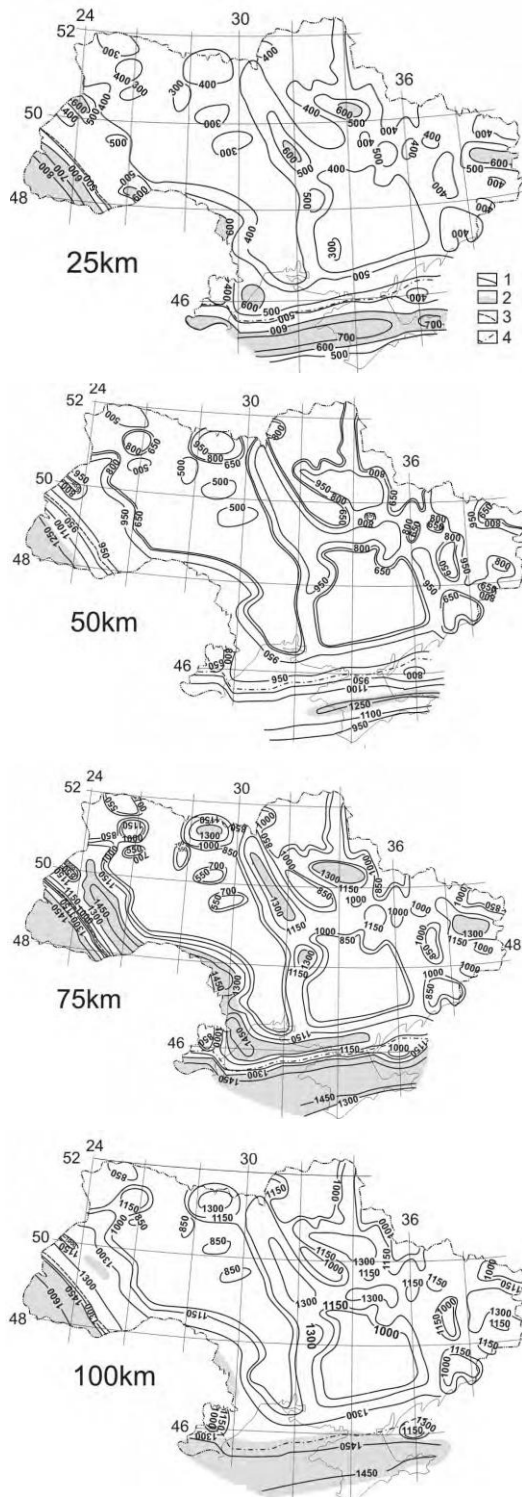


図1 ウクライナ領土の深さ 25, 50, 75, 100 km における温度分布. 1-等温線, 2-部分融解帯の境界, 地域間の境界: 東ヨーロッパ卓状地とカルパチアプレート(3), スキチアプレート(4).

P 波速度モデルとその構築に使用された温度を比較することは、読者にとって興味深いことと思われる。そ

こで、この論文の主な内容を紹介する前に、図1と図2で温度モデルを紹介する。温度モデルの構築方法は、(Gordienko et al., 2023) に記載されている。

速度モデル

構造圏の速度モデルは、(Gordienko, 2017 etc.) で詳細に議論されている方法論に基づいて計算されている。地球のマントル構成岩石の化学組成の実際の変化は、数百分の数 km/s 以下の、平均からの地震波速度の差を生み出すことがわかっている。地震波速度の差は、エクロジャイトの鉱物共生が出現したときにのみ大きくなる。地殻とマントルの交換プロセスが活発な現代風なデザインの殻が存在する間、その質量の少なくとも半分が地殻エクロジャイトの形でマントルに入ることが知られている。しかし現在では、これらの岩石のほとんどすべてが、実際の PT の条件に、より合致するペリドタイトの鉱物共存へと変化している。エクロジャイトは、比較的若い地溝帯の地域にのみ大量に保存されている。したがって、温度変化は速度異常を生み出す上で大きな役割を演じている。当然ながら、この影響は岩石が部分融解している地帯で最も大きくなる。研究の予備段階で作成されたウクライナの上部マントルの熱モデルを考えると、計算は単純に思える。これは、深度が異なる場合のよく研究された依存性 $\Delta V_p = f(\Delta T)$ にあっている。異なる地域における異なる RA 発生時間 (Gordienko et al., 2023) や、独立したデータで計算された V_p 値を制御するための材料の選択によって、問題が生じる可能性はある。

地殻のモデル要素は他から別に作成されている。分布は、ウクライナ領内の DSS プロファイルのかなり密なネットワークからのデータに基づいている (図3)。もちろん、速度の等値線を適切に描くためには、地殻断面のパラメータを決定する際の誤差を知る必要がある。このような情報は、通常、出版物には記載されていないか、近似的なものである。例えば、(Ilchenko, 1991) では、深さ約 20 km までの誤差は 0.1 km/s と見積もられているが、それ以上の深さになると誤差は大きくなる。誤差のレベルを定量化するために、DSS プロファイルに沿った速度断面が、他のプロファイルと交差する点と、最も接近するいくつかの点で比較された。合計で約 50 の速度差異が使用され、その分布は図4に示

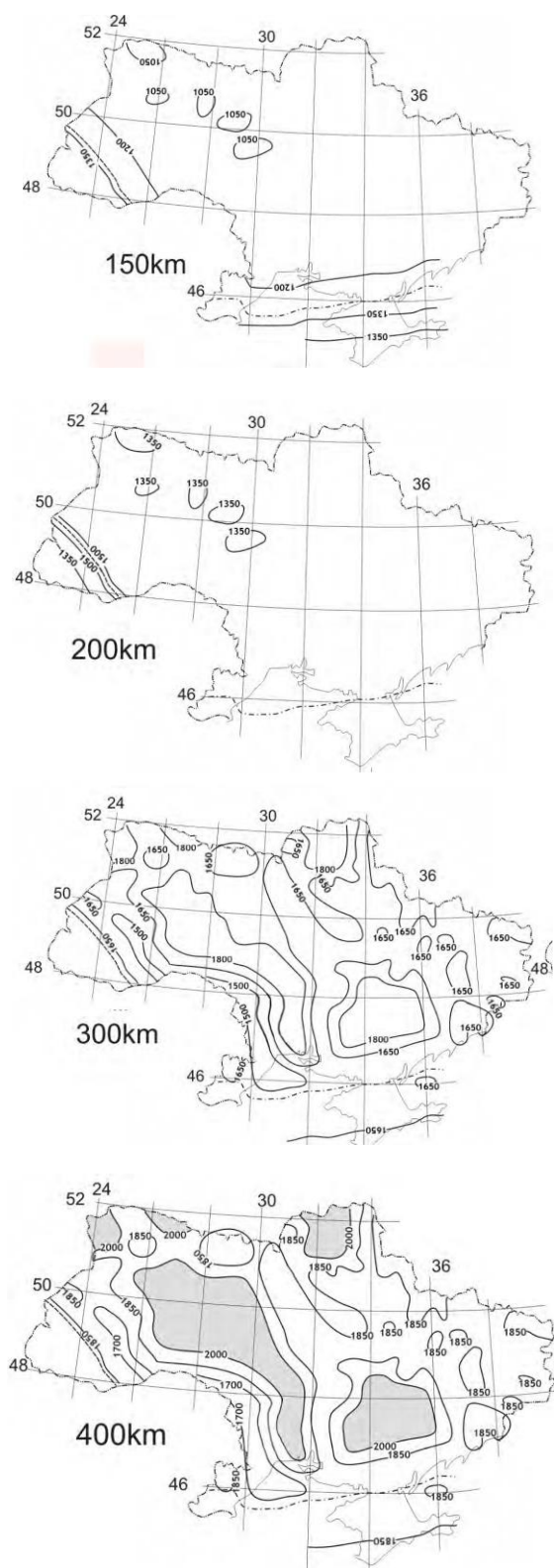


図2 ウクライナ領土における深さ 150, 200, 300, 400km の温度分布. 記号は図1に示す.

されている。

平均差異は 0.2 km/s である。したがって、個々の速度断面での誤差は約 0.13 km/s である。深さ 25 km で信

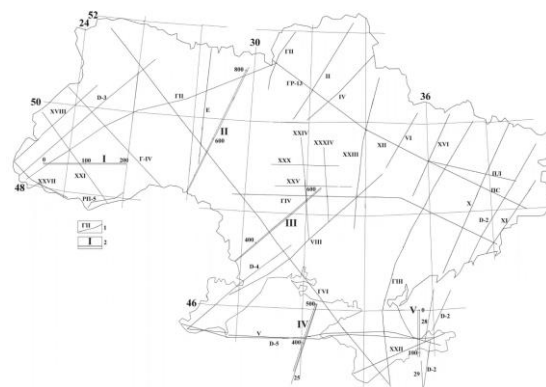


図3 ウクライナ領内のDSS プロファイルの位置. 1 - DSS プロファイル; 2-コントロール・プロファイル(上部マントルの計算データと地震データの比較, 後述参照).

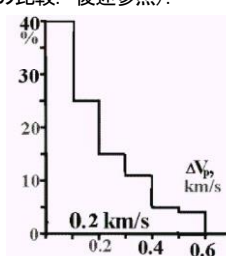


図4 深さ 25 kmにおける V_p 値の差の分布のヒストグラム. その交点における DSS プロファイルの速度断面データに基づいている.

ことができる．そのため，ウクライナ領内の速度分布の特徴は非常に限られている（図 3）．

2本の速度の等値線(6.6 km/sと7.0 km/s)の輪郭に基づいて、少なくとも、地質学的な歴史や最近の活動において異なる運命をたどっているウクライナの主要地域の地殻の特徴的な要素を見ることは困難である。深さ約25 kmにおいて、実用上で重要な様々な速度異相できる速度の等値線は、0.4 km/sの差異でのみ引く

常を決定することは可能であり、この速度異常は(理論的には)、例えば石油・ガス盆地の開発地域を定性的なレベルでのみ決定することができる。より浅い深度(堆積層)では信頼できるようになる。また、地殻の下部では、ドニエプル-ドネツ盆地(DDB)のヘルシニアンリフティング期おける岩石の塩基性化があることは疑いない。このような背景から、最近の活性化の影響を確実に診断することは不可能である。

ウクライナの上部マントルの温度分布データ (Gordienko et al. 2023) に基づく速度値の計算手順は、予備的な熱モデルを変更することなく実施された。観測された重力場との対応による深部熱物質移動スキームの制御は継続された。総延長 20,000 km を超える北半球のプロファイルのシステムでは、以前の研究

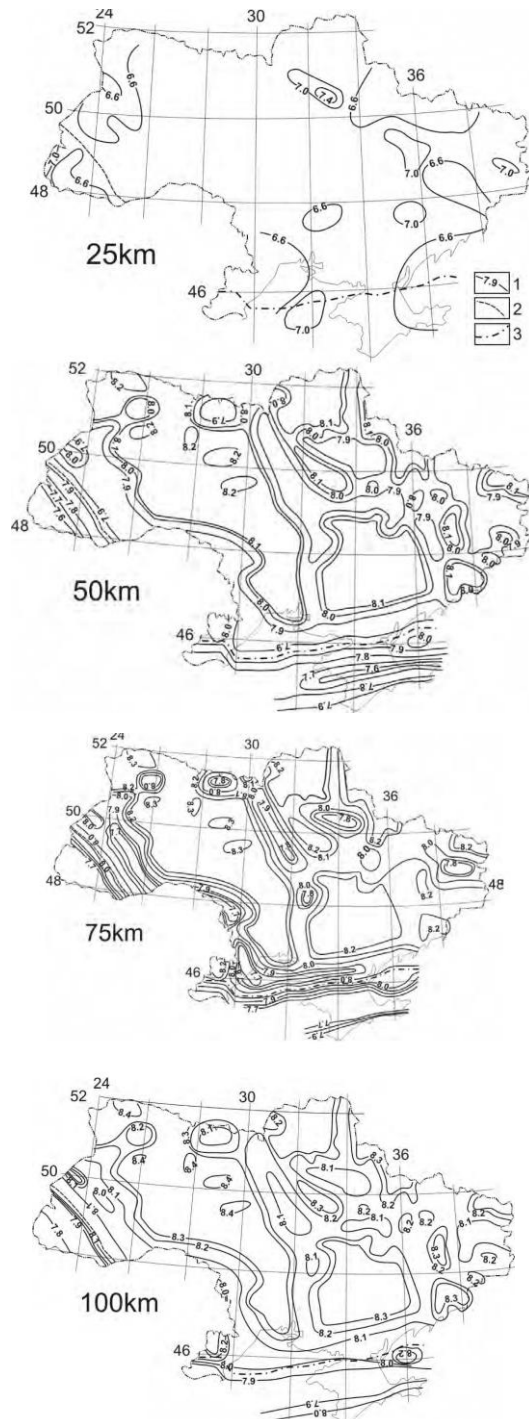


図5 ウクライナ領土の深度25, 50, 75, 100 kmにおける縦波地震波速度の分布。1 - 速度の等値線, 2 - カルパチアアルプス地向斜の境界, 3 - スキチアンプレート内のヘルシニアン - キンメリアン地向斜の境界。

(Gordienko et al., 2022a) と同じ結果が得られた。これは、使用したアプローチの確認と考えることができる。モデル化の過程で、プロファイル D-4, GVI, VIII (図3) の領域における最近の活性化帯の境界を、(Gordienko et al., 2023) で用いられたものと比べて若

表. 上部マントル物質のパラメータ。

Depth, km	Platform temperature, °C	Solidus temperature, °C	Thermal reduction V_p , km/s/100°C	Platform V_p , km/s
50	520	1200	0.062	8.15
75	730	1290	0.058	8.22
100	940	1370	0.055	8.30
150	1220	1510	0.053	8.37
200	1460	1650	0.051	8.44
300	1820	1850	0.049	6.56
400	2000	1980	0.047	8.70

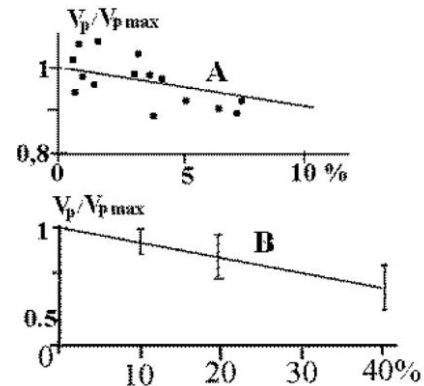


図6 岩石中の液体量に対する速度依存性: A-実験データ, B-計算データ。最近のマグマ活動が活発な地域で観測された速度異常の分析に基づいて、モデルのこの部分を考慮しても、同じ結論が得られる。図5と図7の計算は、この追加を用いたものである。

干変更する必要ない。速度の計算には、表中のデータを用いた。

縦波弾性波速度の低下に対する部分的な岩石融解の影響を考慮するには、特別な検討が必要である。想定される溶融濃度については、考え方に大きな相違がある。著者らは、マグマ濃度が顕著に記録されている局所的な火山システムは地質学的に短命で存在するという明白な事実から出発した。固相線より高い温度を持つが生じた。これは温度計算結果には大きな影響を与え、大規模で長い間存在する地質学的対象物については、1~2%の最小濃度が特徴的であると考えられた。“余分な”メルトはすでに分離され、上方に移動している。利用可能なデータ (Lee et al., 2017 etc.) (図6) に従って示された液体の量は、0.1 km/s のレベルで付加の速度異常を生んでいる。

下部マントルへの遷移帯をモデルに含めることを避けるため、最大探査深度は400 kmに制限されている。その限界内の状況はまだ未解明である。その研究は、特定の地震発生条件と研究技術が集中している地域でのみ現実的には可能である (Tauzin et al., 2013)。

上部マントルの異なる深さで構築された速度モデルは、7.6 から 8.8 km/s の値のかなりの範囲の変化を決定

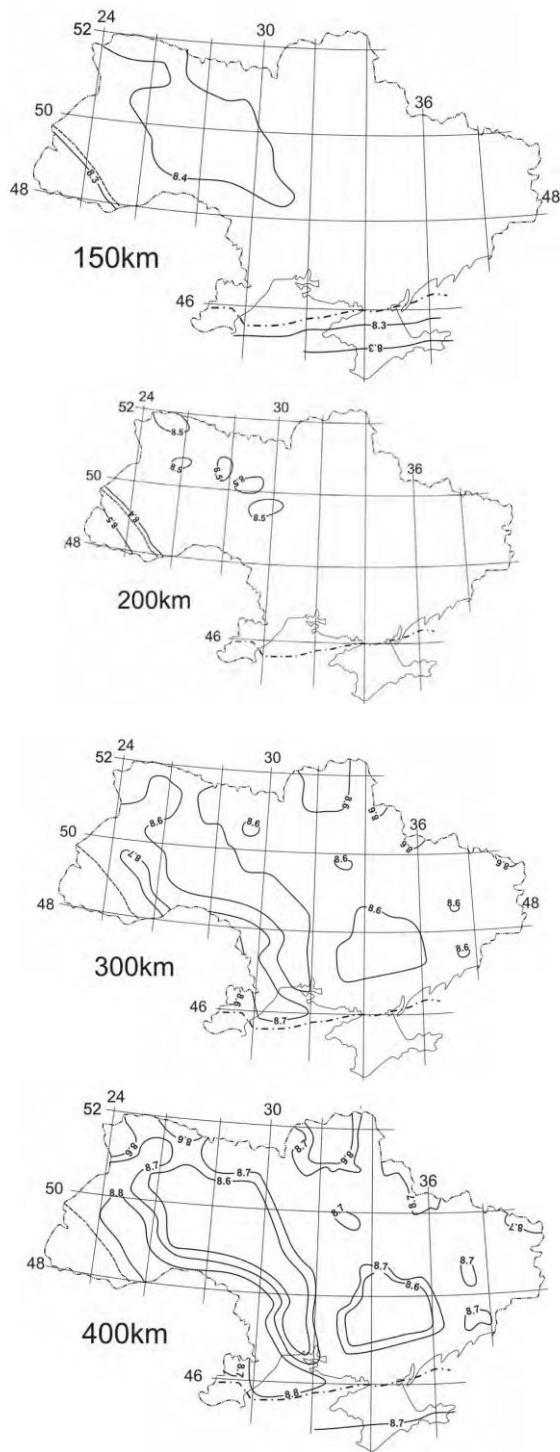


図7 ウクライナ領土の深さ 150, 200, 300, 400kmにおける縦波地震波速度の分布.

している。同じ深さでの主な速度異常は、もちろん、最近鉛直方向に移動した物質の体積が集中する区間に固有であり、これらは50-100 kmと350-400 kmにある。これらの範囲の上部では変化は0.6 km/sに達し、下部では0.2 km/sである。上部マントルの主要部では、0.1 km/sとごくわずかである。

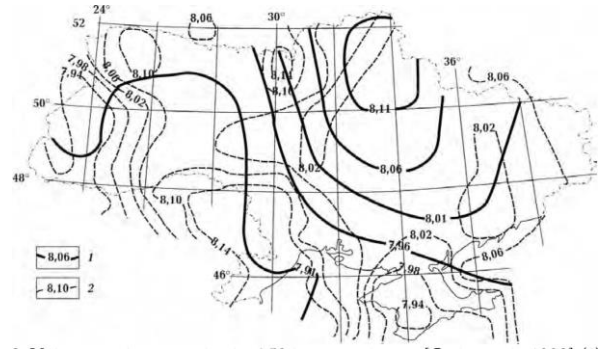


図8 Geiko et al. (1998) (1) と Piromallo et al. (2003) (2) による深さ 50 km での等速度線.

独立した地震データを用いたモデルの制御

上記は、上部マントルの速度モデルが初めて構築されたという記述である。これは、地質学的プロセスや他の地球物理学的分野の異常と一致する、既存の速度変化に対応する実際のモデルを指している。このようなモデルは、著者らによって構築されたもの (Gordienko et al., 2018 etc.) を含めて存在するが、領土の一部のみであり、また、3次元のものではない。

ウクライナの上部マントルの地震波トモグラフィモデルはあるが、それらは全く非地質学的である。この問題については、著者らの論文 (Gordienko et al., 2018, etc.) で比較的詳細に検討されている。ここでは、2つのモデル (Geiko et al., 1998, Piromallo et al., 2003) の例を用いて、その主な特徴のみを簡単に述べる (図 8)。

この2つの発表の結果は、温度分布から予測される結果とも、互いにほとんど共通していない。最大速度の地域 (ウクライナ楕状地の北西部とその斜面で熱流量が最小) と最小速度の地域 (最近の火山活動のあるトランスカルパチア) では、1本の速度の等値線がある (Geiko et al., 1998)。

これは別のモデルの6本の速度の等値線と交差している。形式的には、等値線の交点での値を比較することによって、モデル間の速度値の不一致を決定することができる。その誤差は0.08 km/sである。つまり、それぞれの方法による決定の誤差は約0.06 km/sである。各モデルについて、1-2本の速度の等値線が、三重誤差に等しいステップで図中に描かれている。

地震波トモグラフィを用いた研究の著者たちによる、得られた結果の誤差の判断は、十分に合理的であるとは考えにくい。例えば「数多くのテストにより、...速

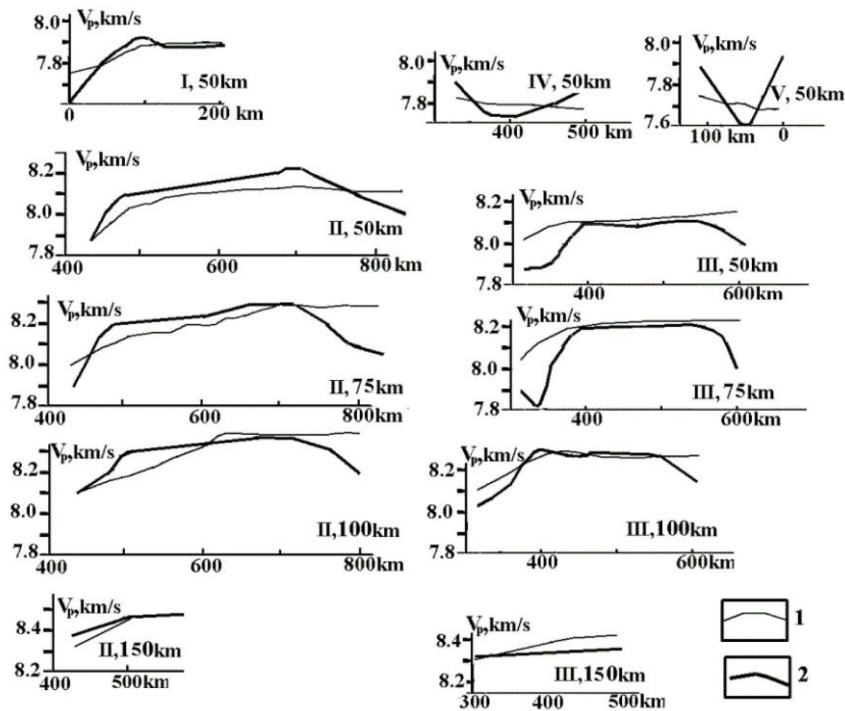


図9 制御プロファイル I-V (図 3) に沿った地震波速度 (1) と計算速度 (2) の分布。

度を決定する際の最大差は ± 0.015 km/s を超えない...ことが立証されている. この精度は, ...パラメータが厳密に関連し, 相互に条件付けされたモデルの枠内でのみ正当化される" (Geiko et al., 1998, p. 69). この文の延長として, 0.05 km/s で信頼できる等値線を描く可能性が仮定された. 当然ながら, 「モデルの精度の範囲内」の誤差は, 速度値の誤差を網羅的に特徴付けることはできない. このような誤差の推定は, その明らかな原因を考慮していないということを証明するのは簡単である (Gordienko et al., 2018).

この方法の欠点の分析と代替案の説明は, 例えば論文 (Kissling et al., 1994) に示されている. 著者らは, 東カムチャッカの地下のマントルで E. Kissling によって得られた結果と比較し (Gontovaya et al., 2007 etc), かなり完全に一致することを証明した. E.Kissling のアプローチの欠点は, 研究対象地域の非常に高密度の地震ネットワークが必要であること (これまでのところ, 世界で数個のモデルしか構築されていない) と, 震源よりも深い位置でモデリングを続けることができないことである.

結果をコントロールするために, 独立した他の方法 (Gobarenko et al. 2009, Kharitonov et al. 1993, 1995, Yanovskaya et al. 2016, Weber 2002) (熱モデルではなく) によって行われた研究のデータを使用した. これ

らはプロファイル曲線の色で示されており, その位置は図 3 に示されている. 比較を図 9 に示す.

比較は主に深さ 50 km で行われた. 深さ 75 km と 100 km, 深さ 150 km の地点もある. すべての場合において, データサンプリング点は 50 km 間隔で配置された. 結果は図 10 にまとめられている.

計算速度と観測速度の平均差はそれぞれ 0.05 km/s で, 誤差は 0.03-0.04 km/s である. 信頼できる速度の等値線は 0.1km/s 刻みで描くことができる. しかし, この楽観的な結果は不完全なものである. 理論 (Gordienko, 2022b) によると, 構造圏の活動過程における物質の移動は, 直径約 60 km のテクトニック作用量子 (QTA) の形で起こる. これは, このような物体が, ある深さで活動する領域全体を満たし, 同一の性質を持つことを意味する. このような状況を想定して温度計算が行われた. 実際の QTA では, 年数や大きさが顕著に異なることがあり, QTA が埋める空間には隙間があるかもしれない. したがって, QTA が占める層の一部は異なる特性を持つことになる. この点については (Gordienko et al., 2023) で部分的に議論されている. このような図式は, 活性化前の地質学的履歴が異なる地域の境界で特に起こりやすい. 我々の場合は, RA 卓状地帯とカルパチアまたはスキチアンプレートの境界である. したがって, 計算されたモデルは, 活性化さ

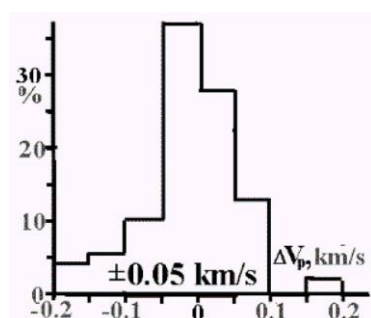


図 10 (Vpc-Vpo) 値分布のヒストグラム。Vpc は計算された縦波速度、Vpo は観測された縦波速度である。

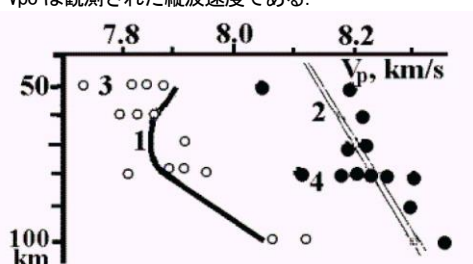


図 11 ヴォリン-ポドリスクプレート (VPP) およびウクライナ楕状地の西斜面 (USh) 下のマントルにおける地震波速度の計算値と観測値の分布。1, 2 - VPP (1) and USh (2) の場合で計算された Vp, 3, 4 - VPP (3) and USh (4) の場合で観測された Vp。

れた領域内で一般化されたものとして認識する必要がある。

著者らは、ヴォリン-ポドリスクプレートの RA 帯と、ウクライナ楕状地の斜面上のそののゾーンにおける 50-100 km の範囲の異なる深さにおける速度を決定した。使用された地震と地震観測所はこれらの地域内に位置している (Gordienko et al., 2018)。得られた結果を、本稿で各深度において計算した平均値と比較する (図 11)。

不一致の平均値は 0.06-0.07 km/s である。つまり、実際の誤差は速度分布の詳細を決定することはできないが、モデルの主な特徴を非常によく特徴づけている。

結 論

ウクライナにおける構造圏の地球物理学的モデル構築の第 2 段階として実施された研究は、設定された目標を達成した。初めて、熱モデルに基づく 3 次元速度モデルが深度 400 km まで構築され、独立した地震データによって制御できるようになった。この点が、精度がコントロールできなかったり、深さに制限があったりする他のものと異なる点である。ウクライナ地域の深部構造と地球ダイナミクスを研究する上で、この結

果が有用であることに疑いの余地はない。同時に、得られた結果の実際的な意義は、潜在的なものとして評価されるべきである。製作された構造物の直接的な応用は、関連する問題を解決する場合に見出すことができる。密度モデルを構築した後、速度モデルを用いて岩塊の伸張性のあるエネルギー容量を計算することができる。エネルギーは、破壊の瞬間までせん断変形の結果として媒体の体積に蓄積される。この特性は、地震発生条件を研究する際に有用である。

これまでのところ、活性化に伴う炭化水素鉱床を研究する際に、RA 帯の内部構造が複雑であるという概略的な可能性だけが、追加的な基準として役立つ。しかし、これを行うには、対応する地域の地殻および地殻下の深さにおける電気伝導度モデルを構築した後に行うのが現実的である。

ウクライナの構造圏の物質の物理的特性に関する一連のモデルを拡張する必要があることは明らかである。また、最近の活性化帯の境界の明確化も引き続き必要である。

文 献

- Geiko, V. S., Tsvetkova, T. A., Sannikova, N. P., Livanova, L. P., Geiko, K. V. (1998). Regional 3-D P-velocity structure of the northwestern Eurasian mantle. *Geophysical Journal*, 20(3). 67-91 (in Russian).
- Gobarenko, V. S., Nesterov, A. N. (2009). Velocity structure of the transition zone crustupper mantle in the West-Black Sea basin. *Kultura narodov Prichernomor'ya*, 156. 9-15 (in Russian).
- Gontovaya, L. I., Gordienko, V. V., Popruzhchenko, S. V., Nizkous, I. V. (2007). A depth model of the upper mantle of Kamchatka. *Vestnik KRAUNTS, Nauki o Zemle*, 1, issue. 9. 78-92 (in Russian).
- Gordienko, V. V. (2017). Thermal processes, geodynamics, deposits. Retrieved from <https://ivangord2000.wixsite.com/tectonos>
- Gordienko, V. V., Gordienko, L. Ya. (2018). Velocity model of the Ukrainian subcrustal mantle. *Geophysical Journal*, 6. 29-50 (in Russian).
- Gordienko, V. V., Gordienko, I. V. (2023). Temperature distribution in the crust and upper mantle of Ukraine. *Geodynamics*, 1(34), 47-56. <https://doi.org/10.23939/jgd2023.01.047>
- Gordienko, V. (2022a). Density models of the tectonosphere of continents and oceans. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 7. 805-822.
- Gordienko, V. (2022b). About geological theory. *Geophysical Journal*, 2. 68-92.
- Ilchenko, T. V. (1991). Some aspects of geodynamics of the central part of the Ukrainian Shield. *Geophysical Journal*, 4. 85-89 (in Russian).
- Kharitonov, O. M., Krasovsky, S. S., Kuprienko, P. Y., Kutas V.V., Sologub N.V., Drogitskaya G.M. Timoshenko V.I., Shlyahovsky, V.

- A. (1993). Lithospheric transect Vrancea - South-Ukrainian NPP. *Geophysical Journal*, 5. 23-31 (in Russian).
- Kharitonov, O. M., Omelchenko, V. D., Drobitskaya, G. M., and Kutas, V. V. (1995). Lithospheric transect Bucharest-Chernobyl. *Reports of the NASU*. 5. 84-87 (in Russian).
- Kissling, E., Ellsworth, W. L., Eberhart-Phillips, D. and Kradofler, D. (1994). Initial reference models in local earthquake tomography. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 991(B10), 19635-19646. DOI:10.1029/93JB03138.
- Lee, A., Walker, A., Lloyd, G. and Torvela, T. (2017). Modeling the impact of melt on seismic properties during mountain building. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 18(3), 1090-1110. DOI:10.1002/2016 GC006705
- Piomallo, C. and Morelli, A. (2003) P Wave Tomography of the Mantle under the Alpine-Mediterranean Area. *Journal of Geophysical Research*. 108, Published Online. <http://dx.doi.org/10.1029/2002JB001757>
- Tauzin, B., van der Hilst, D., Wittlinger, G. and Ricard, Y. (2013). Multiple transition zone seismic discontinuities and low velocity layers below western United States. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 118(5), 2307-2322. DOI: 10.1002/jgrb.50182
- Wéber, Z. (2002) Imaging Pn velocities beneath the Pannonian Basin. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 129(3), 283-300. DOI: 10.1016/S0031-9201(01)00299-0
- Yanovskaya, T. B., Gobarenko, V. S., Egorova, T. P. (2016). Subcrustal structure of the black sea basin from seismological data. *Izvestiya Physics of the Solid Earth*, 52(1). 14-28. DOI: 10.1134/S1069351316010109 (in Russian).

衛星画像と写真画像の直接探査法, 石炭・頁岩層における 炭化水素探査のための周波数共鳴法

Direct Prospecting Methods of Satellite and Photo Images, Frequency-Resonance
for Hydrocarbon Searching in Coal and Shale Basins

Mykola Yakymchuk¹, Ignat Korchagin² and Valery Soloviev²

(1) Institute of Applied Problems of Ecology, Geophysics and Geochemistry, Kyiv,
Ukraine, yakymchuk@gmail.com

(2) Institute of Geophysics, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, korchagin.i.n@gmail.com,
solvalera@ukr.net

(本文と図の一部を省略して要約 岩本広志 訳)

Keywords: China, France, Ukraine, USA, Argentina, England, UAE, coal basin, shale basin, oil, gas, methane, basalts, hydrogen, phosphorus, bacteria, direct searches, deep structure, volcano, abiogenic genesis, sounding of the cross-section, remote sensing data processing.

要旨: 中国, フランス, ウクライナ, 米国, アルゼンチン, 英国, アラブ首長国連邦の石炭盆地とシェールガス生産地域の一部で, 衛星画像の直接探査技術と写真の周波数共鳴処理を用いた偵察調査の結果を紹介する. 石炭盆地内の現地偵察調査のデータは, 石炭鉱床の下断面の深部および超深部における石油, コンデンセート, ガス鉱床の検出の可能性を示している. フーマン油田とルンタン 1 号深井掘削現場での実験的研究の資料から, 石油・ガス掘削のための深井戸の最適な場所を選定する過程で, 直接探査法を使用する潜在的な可能性と実現可能性が示された. タクラマカン砂漠の超大深度坑井掘削地点では, 深度 7,120 m 以上でヘリウム鉱床が発見される可能性がある. この断面を詳細にスキャンすることで, 貯留層内のヘリウム埋蔵深度を決定することができる. 流体, 化学元素, 鉱物の移動のための深い水路は, 1-6 群の堆積岩で満たされており, 調査したすべてのシェールガス生産現場で見つかった. 今回得られた測定データは, 頁岩層を含む炭化水素の深部 (原生) 合成の概念を支持する新たな証拠と考えられる. イギリスの調査地内には, 目に見える水素脱ガスの局所的なゾーンが多数存在する. これらの局所的なゾーンをより詳細に研究するために, これらの場所で追加調査を行うことが望ましい. ウィリントン盆地のシェールオイルの領域内での実験的研究でも, 断面の深い層に炭化水素鉱床が存在することが確認された. 世界各地の石炭盆地や頁岩盆地に埋蔵されている炭化水素を探索するためには, 詳細な地質学的探査を行うことが望ましい! ウィリントン盆地の東側には, 水素と生きた (癒しの) 水を持つ玄武岩火山構造の大集団があり, 水素とリンが大気中に移動する過程が機器測定によって明らかにされた. 一般に, 実施された実験研究の資料は, 構造要素や地表の外観, 鉱石や可燃性鉱物, 水の鉱床の形成に関する火山様モデルを支持する追加的な証拠とみなすことができる. 研究結果は, 衛星画像や写真の周波数共振処理とデコードのモバイル技術を, 大規模なブロックや地域内の石油・ガス埋蔵ゾーンの検出と位置特定に使用することの実現可能性を示している. 超高性能かつ低コストの直接探査技術の使用は, 石油, ガス, 天然水素, 鉱石鉱物の探査プロセスを大幅にスピードアップし, その実施にかかる財政コストを削減する.

はじめに

2019 年から 2023 年にかけて, 衛星画像と写真の周波数共振処理とデコード (1-2) のスーパーモバイル直

接探査技術が, 世界のさまざまな地域でテストされた (3-29). この技術の大規模な試験と承認 (3-29) の間に, 1) 地球の水素脱ガス過程における石油, 凝縮水, ガスの深部 (生物起源) 生成, 2) 地球惑星の大気中へ

のガス（メタン）、二酸化炭素、水素の移動、3）構造要素の形成と地球、惑星、太陽系の衛星の出現、炭化水素、鉱石鉱物鉱床や、水に関する「火山性」モデル、を支持する数多くの事実（証拠）が得られた。また、地球上の様々な地域で実施された実験調査の結果、使用されたスーパーモバイル技術により、可燃性鉱物や鉱石、水の探査プロセスを大幅にスピードアップし、最適化（低コスト化）することが可能であることが示された。

地球の深部脱ガスの概念の枠組みにおける炭化水素の深部（原生）起源の観点から、石炭盆地や頁岩盆地では、石油、コンデンセート、ガスの鉱床も断面の深部（および超深部）に存在すると仮定することができる。この観点から、中国、インド、カザフスタン、フランス、ウクライナの石炭鉱床のある地域や、アメリカ、アルゼンチン、イギリスのシェールガス生産地域の一部で、スーパーモバイル直接探査法を用いた偵察的な実験研究が実施された。2021年には、米国北部のウィリントン盆地にある石油の大規模な鉱床（プレイ）内でも調査が行われた。本論文では、実施された実験結果を紹介する。また、中国における石油・ガスの大深度鉱床、超大深度井戸、大深度井戸掘削の現地偵察調査のデータも掲載した。

調査地点での機器測定の結果を発表することが可能なのは、フランス企業がロレーヌ炭田流域で天然水素

とメタンの探索を意図しているためであり（30-32）、また中国北西部の石炭鉱床内で大規模なメタン鉱床が発見されたとの情報もある（33）。

研究方法

Mykola Yakymchuk & Ignat Korchagin 衛星画像と写真画像の周波数共鳴処理による直接探査法:オーストラリアと ニュージーランド地域での評価結果, NCGT Journal No. 11-3, 研究手法, p. 77-80 参照.

中国での偵察調査地域

モバイル直接探査法をテストする際には、公表された論文に掲載された衛星写真や写真画像を使用し、Google Earth ソフトウェアパッケージも使用して作成した。また、最初の3つの調査地点では、限られた機器による測定しか行われなかった。Luntan-1 深掘井戸のあるサイトでは、かなり大量の測定が行われた。同じ性質の処理手順は、最初の3つのローカルエリアでも追加的に実施することができる。さまざまな地域の炭鉱がある地域の偵察調査の結果の一部は、論文（6,7, part 1）で紹介されている。

榆林市の深層コールベッドメタン(CBM) 鉱区（中国）（33）。国営の中国海洋石油総公司（CNOOC）は、初



図4 中国北西部の陝西省玉林市にある神府深層コールベッドメタンフィールドの景観 (4)。



図5 中国北西部、新疆ウイグル自治区のタリム盆地にある福満油田の風景。/中国メディアグループ（36）。



図6 タクラマカン砂漠の深井戸掘削現場の写真[39] (タリム盆地). 図7 ルンタン1号深掘井掘削現場写真[10] (タリム盆地)

の深層コールベッドメタン (CBM) 鉱区の発見を発表した. 中国西北部の陝西省にある標高約 1,500 m の炭層で, 埋蔵量は 1,100 億 m^3 を超えると報告されている.

神府深層 CBM 鉱区の炭層は深さ約 2000 m, 1 層の厚さは 6 m から 23 m で, 石炭 1 t あたりの平均ガス含有量は 15 m^3 に達する. 現在, この地域では 100 以上の試掘井戸が掘られており, 1 井戸あたりの 1 日の最大ガス生産量は 26,000 m^3 である (33).

タクラマカン砂漠 (タリム盆地) の深井戸 (39). 2023 年, 中国の専門家たちは, 設計深度 11,100 m の科学探査坑井を掘削するプロジェクトの実施を開始した. このプロジェクトを実施するために, 高温高压条件下での大深度掘削を可能にする掘削装置が開発された. 坑井は, タリム盆地のタクラマカン砂漠の奥地で掘削される. 2023 年 10 月末現在, 掘削深度は 8,000 m を超えている. 坑井位置の写真を図 6 a.b に示す.

図 6a の坑井のある場所の写真の周波数共振処理では, 炭化水素周波数の信号は検出されなかった. 黒リン, ロンスデーライト, カリウムマグネシウム塩, ヘリウム (堆積岩 (珪質岩) の第 10 グループ) からの応答が 14 秒間の測定から記録された!

大深度坑井 Luntan-1 (中国). この論文の要旨には, 掘削された大深度坑井 Luntan-1 (40) に関する情報が含まれており, この坑井では, 深度 8,203~8,260 m の区間から石油とガスの流入が確認されている. 処理には, 現地から借用した掘削装置の写真 (図 7) を使用した (40). (41)

石炭盆地における偵察調査サイト

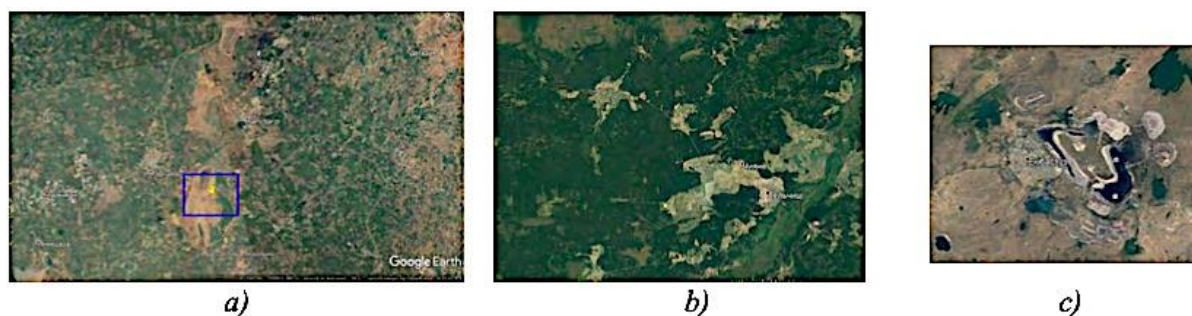


図8 インド・レルチツァ褐炭埋蔵地域 (a, b; クローズアップ) とエキバストゥズ石炭盆地 (カザフスタン共和国) (c) の衛星画像.

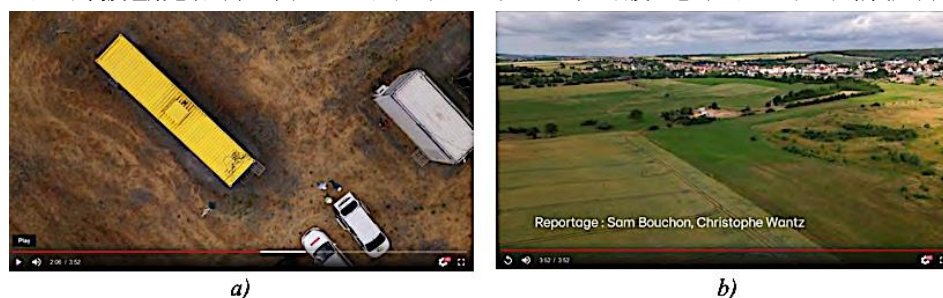


図9 ロレーヌ地方にある掘削井の場所 (a) と周辺 (b) の写真 (3)].

世界のさまざまな地域の石炭盆地内で、石炭鉱床の位置より下の深部構造の特徴を調べるための調査が行われた。

インドの褐炭鉱床内の琥珀採掘現場 長方形の輪郭で示された図 8a の画像の小さな断片が処理された。処理中、コンデンセート、ガス（インテンシブ）、琥珀、ガスハイドレート、水、氷の周波数で応答が記録された。

レルチツァ褐炭鉱床 鉱床地域の衛星画像を図 8b に示す。画像の周波数共振処理中に、褐炭、コンデンセート、ガス（インテンシブ）、琥珀、ガスハイドレート、堆積岩の 1, 2, 4, 5, 6 グループからの信号が記録された。石油とマグマ岩石からの信号はなかった。

エキバストゥズ石炭盆地（カザフスタン共和国） 図 8c の衛星画像を周波数共振処理したところ、石油、コンデンセート、ガス、琥珀色、堆積岩の 1, 2, 3, 4, 5, 6, 12 グループの応答が得られ、火成岩の信号は得られなかった。石炭の反応は約 1400 m まで記録された。深さ 470km に根を持つ堆積岩の深いチャンネルが設置された。

ロレーヌ地域の褐炭田（フランス） ウェブサイト (32) の文書では、ロレーヌ炭田地帯で掘削され、天然水素が発見された坑井に関するいくつかの情報を提供している。また、坑井現場からのビデオ・レポートも掲載されており、その中の 2 つの画像が図 9 に示されている。

調査エリア断面の深層に炭化水素や天然水素が埋蔵されている可能性を評価するため、図 9 の写真の周波数共振処理を加速モードで行った。実験では、限られた測定手順が実施された。

現場写真（図 9a）の周波数共振処理中に、炭化水素（石油、ガスコンデンセート、ガス）とリン（黄色）の周波数の信号が表面から記録された。また、第 7 堆積岩群（石灰岩）から 57 km 離れた合成地表でも、炭化水素周波数の反応が記録された。

広域の写真（図 9b）の周波数共振処理中に、炭化水素（オイル、ガスコンデンセート、ガス）とリン（黄色）の周波数の信号が地表から記録された。

ウクライナの石炭鉱床



図 12 リヴィウ・ヴォリン石炭ベーズンの衛星画像

ウクライナ領内における実験的研究は、衛星画像の周波数共振処理中に実施される機器測定の方法論的技術を向上させること、およびそれらが位置する地域の深部構造の特徴を研究することを目的として実施された。ウクライナの石炭盆地でも、深部流体の垂直移動経路の探索が行われた。

ドンバス地方 長方形で示したドネツク地方の地域は、この地域でより詳細に調査された。この地域内では、堆積岩の 1, 2, 3, 4, 5, 6, 12（石炭）グループからの応答が記録され、火成岩のすべてのグループからの信号は記録されなかった。

リヴィウ・ヴォリン石炭盆地 図 12 の画像全体の周波数共振処理中に、石油、コンデンセート、アンバーガス、石炭、水からの反応が登録された。堆積岩（弱）、3（弱）、4（弱）、5（弱）、6（弱）、7（強）、8, 9, 10, 11, 12 グループとマグマ性岩石の 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 グループからの信号が受信された。

チェルボノグラード地域（ウクライナ） チェルヴォノフランド市の領域（図 12 の長方形のコンターで示される）の衛星画像の断片を処理するとき、褐炭、コ

ンデンセート、ガス、琥珀、ガスハイドレート、水からの応答（強烈的）が記録されたが、石油からの信号は存在しなかった。

シェール盆地内の偵察調査

米国、アルゼンチン、英国におけるシェールガス生産地域の一部における偵察調査は、断面の深部（および超深部）における石油、コンデンセート、ガス鉱床の検出のために、移動式直接探査法を用いて実施された。

イーグルフォード盆地（米国テキサス州）この盆地の衛星画像（図 13）は、サイトから借用した（42）。図 13b と 13c を比較すると、この盆地のある部分で 15 年間にどれだけの坑井が掘削されたかを知ることができる。坑井のある盆地の画像の断片（図 13c）を処理すると、石油、コンデンセート、ガス、琥珀、および堆積岩の 1, 2, 3, 4, 5, 6 グループからの応答が記録され、火成岩からの信号はなかった。

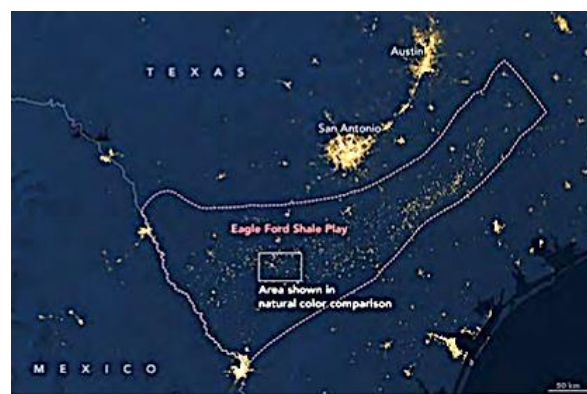
図 14 は、炭化水素（シェール・プレイを含む）の生産量が多い米国の各州の地域（郡）を示している（43）。これら 7 つの地域すべての衛星画像を処理したところ、角礫岩とシェールガスからの応答が記録された。

ヴァカ・ムエルタ盆地（アルゼンチン）ヴァカ・ムエルタ盆地のシェールガス生産現場の写真を図 15 に示す（44）。その処理中に、ガス、コンデンセート、石油、琥珀、石炭、アルジェライト角礫岩、および堆積岩の 1, 2, 3, 4, 5, 6, 12（弱）群から応答が得られた。火成岩からの信号は受信されなかった。

米国における天然ガス大量生産地域 米国でガス生産が盛んな 7 つの地域（郡）（図 14）の衛星画像を図 16 に示す（43）。これらの画像を周波数共振処理することで、深部断面の油ガス田の可能性を評価した。

図 16 の調査ブロックの衛星画像を処理したところ、すべてのブロックで石油、コンデンセート、ガス、アンバー、オイルシェール、石炭の信号が表面から記録された。ミッドランド郡（TX）・エディ郡（NM）ブロックでは無煙炭からの弱いシグナルが記録された。

イギリスのシェールガス生産現場 2019 年 10 月上旬、インターネットサイトに Cuadrilla Resources（45）が Preston New Road（イングランド、ランカシャー州）の坑井での水圧破碎（フラッキング）を停止したとい



2016 年 2 月 15 日



2000 年 12 月 17 日



2015 年 12 月 18 日

図 13 イーグルフォード・シェールオイル・ガスベーズンとその分割断面（長方形コンター）の衛星画像（42）。

う情報がインターネットサイトに掲載された（46）。この事態の主な理由は、2019 年 8 月の一連の水圧破碎後の地震である。この点で、坑井のある場所の写真と衛星画像を処理することが望ましい。加工用の写真（図 17）は情報メッセージ（46）から、衛星画像（図 18）は Cuadrilla Resources のウェブサイト（45）から借用した。サイトの衛星画像（図 18）を分析すると、水素の脱ガスが見られる局所的な領域（斜線ゾーン）がその境界内に固定されていることがわかる。初期段階では、

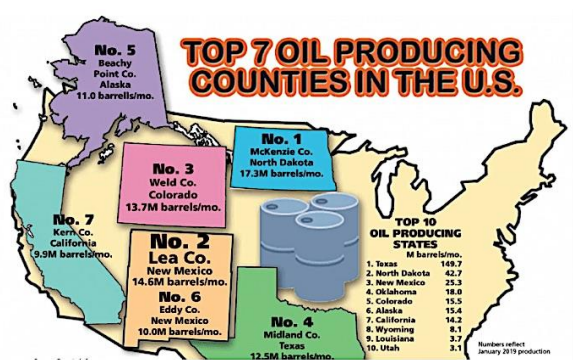


図 14 シェールプレイで最も大量の炭化水素が生産された、米国各州（右側のリスト）とその個別地域の位置（郡）を示す概略図 [43]（シェールプレイに限らず在来型の石油生産を含む）イーグルフォード盆地の位置するテキサス州の石油月産量は全米トップで 1.497 億バレル=2,380 万 m³。ちなみに世界石油日消費量は約 1 億バレル。

調査地点の断面における石油、コンデンセート、ガス、琥珀の存在（不存在）の判断のみが行われた。

図 18 に矩形の等高線で示した 8 つの局所ゾーンの画像を個別に処理した。その結果、これらのゾーンごとに水素と玄武岩からの応答が記録された。

ウィリストン盆地での偵察調査。 シェールプレイの領域 ウィリストン盆地（米国）の大規模なシェールプレイ上部の構造図を図 19 に示し（47），調査地域の衛星画像を図 20 に示す。画像には、シェールプレイの中央部（主要部）にある 4 箇所のマーカーが示されている。作業の最初の段階で、マーカーで示された図 20a の画像の断片が処理された。

図 20a の衛星画像の断片の周波数共振処理中に、石油、コンデンセート、ガス、琥珀、二酸化炭素、バクテリア（メタン酸化バクテリア、その個体数は MicroPro GmbH 社の石油・ガスの微生物学的探査法で分析される）、リン（黄色）、オイルシェール、ガスハイドレート、無煙炭、氷、死水、第 1～6 群の堆積岩の周波数で表面からの反応が記録される。水素、塩、火成岩からの反応は得られなかった。

水素脱ガス領域 プレイロケーションの領域の衛星画像を分析する際、著者らは、目に見える水素ガス脱ガスのゾーンに特徴的な、局所的な場所や浮き彫りのある広い領域（地表）に注目した。水素脱ガスのゾーンとセクションの調査は、図 20b の右上隅に色付き（楕円形）の輪郭で示された大きなゾーンから始まった。

この多角形コンター内の衛星画像の断片（図 20b）の周波数共振処理中に、地表からリン（赤）、水素、水素



図 18 プレストン・ニューロード（ランカシャー州）地域の井戸の衛星画像（45）。

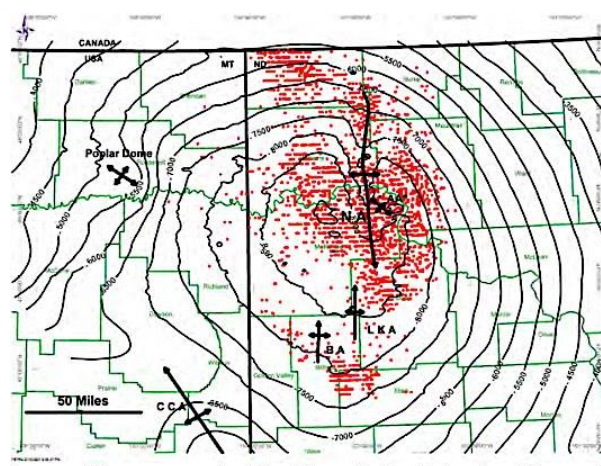


図 19 上部のスリーフォークス層のシェール・プレイ構造図。等高線間隔は 500 フィート。同鉱床からの重油生産地域は赤い点で示されている（47）。

バクテリア（図 21）、生活水（強）、死水（低強度）の応答が記録された。

地表では、第 1～6 群の堆積岩、第 6 群（斑れい岩、玄武岩）、6A 群（ドレライト、安山岩）の火成岩からの信号も記録された。

追加調査。 追加の機器測定を行う際には、シェール層内の坑井から採取したコアの写真（図 22）（47）と、メタン栄養細菌（メチルトロフの一群、異なる目から 7 個体）（図 23）が用いられた。この段階で、図 20b の衛星画像の多角形と矩形の輪郭で示された個々の断片の周波数共振処理が行われた。

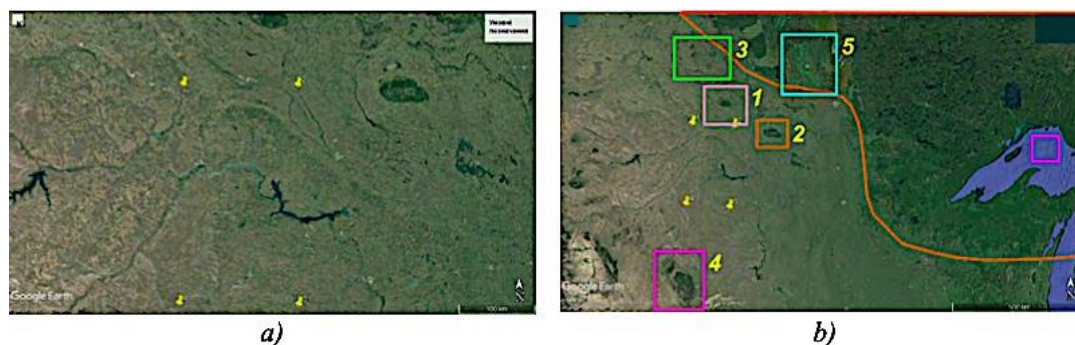


図 20 アメリカ北部ウィリントン・ベースンのシェール層周辺の衛星画像.

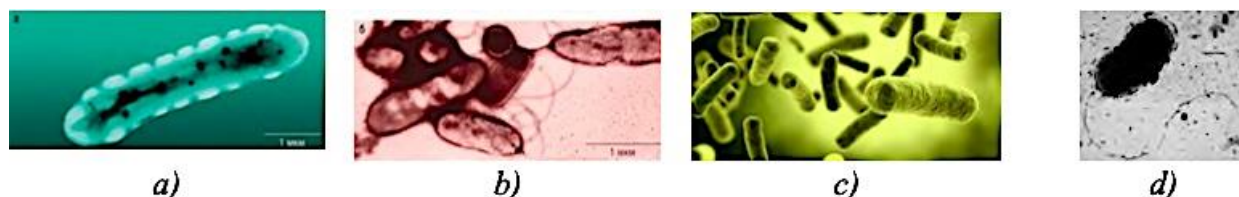


図 21 水素を吸収する（「むさぼる」）バクテリアの写真.

図 20b の衛星画像の断片の周波数共振処理では、図 20b の衛星画像の断片のうち、多角形と矩形の輪郭で示した断片の周波数共振処理が行われた。図 20b の右上の多角形の輪郭の中に断片がない場合、石油、コンデンセート、ガス、琥珀、炭酸ガス、メタン酸化細菌、リン（黒と黄色）、オイルシェール、ガスハイドレート、無煙炭、ロンスデーライト、カリウムマグネシウム塩、第 1～6 群と第 7 群（石灰岩）の堆積岩、第 7, 8, 9, 10, 14 群の火成岩の周波数で表面からの応答が記録された。

領域 1. (図 20b) の画像の断片を処理したところ、堆積岩の第 9 (泥灰岩) グループ。

領域 2. 堆積岩の第 7 (石灰岩) グループ、石油、コンデンセート、ガス、メタン酸化細菌、リン（黄色）および死水からの応答。地表面では、ガスとリンからの応答が断面の上部から得られており、大気中への移行を示している。

領域 3. 堆積岩の第 8 (ドロマイト) グループと死水からのみ応答が記録。

領域 4. 堆積岩の第 9 (泥灰岩) グループからの応答のみが記録。

領域 5. リン（白）と岩塩。地表では、石油、コンデンセート、ガスからの弱い強度の信号。

メタン酸化細菌を用いた実験 シェールプレイ (図 20a) 内では、図 23 の 7 種のバクテリアからの応答が地表面から記録され、地表下 520 cm 以浅から記録された。

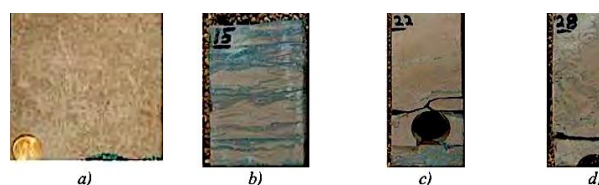


図 22 シェール層内のボーリング孔からのコアの写真。(a) -砂岩 (47)。

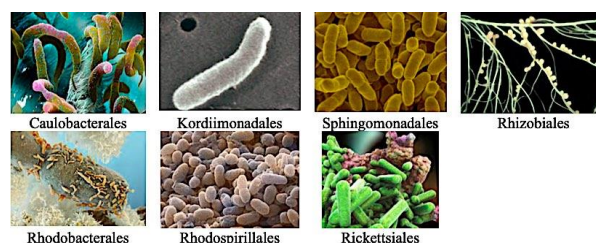


図 23 7 種のメタン菌の写真.

領域 2 でも、7 種のバクテリアからの応答が地表面から 528 cm まで記録。

領域 5 では応答が記録されなかった。大気中へのガスの移動は機器測定では確認されなかった。

湖（長方形）のサイトでは、7 種のバクテリアからの応答が地表面から記録されず、ガスの移動は確認されなかった。

水素細菌の実験. 図 21 は 4 つの水素細菌の写真である。多角形の輪郭 (図 20b, 右上隅) 内では、図 21 の a-c バクテリアと d のバクテリアからの信号が表面から記録されたが、深さ 540 cm ではそれらからの応答は

なかった。500 cm から 1 mm ステップで断面をスキャンすると、3 つのバクテリアからの応答が 524 cm まで、d のバクテリアからの応答が 530 cm まで記録された。湖の局所的な断片（長方形）では、深さ 500 cm で a~d のバクテリアからの反応が記録された。500 cm から 1 mm ステップで断面をスキャンすると、a~d のバクテリアの反応は 525cm まで記録された。

シェールプレイの領域では、a~d の水素細菌からの応答は地表面・深さ 500 cm でも記録されず、プレイ内で大気中への水素の移動はない。

UAE のいくつかの鉱区内での偵察調査

2020 年には、UAE の非在来型炭化水素探索のための大規模鉱区内でも調査が実施された。さらに、断面の岩石中のシェールガスの有無を確認するため、8 つの炭化水素鉱区内で偵察調査が実施された。

非在来型炭化水素探査鉱区 UAE における非在来型炭化水素探査鉱区の位置を図 24 に、UAE 衛星画像上の位置を図 25 に示す。図 25 の長方形の輪郭は、偵察モードで周波数共振処理を行った画像の断片を示している。

偵察調査の現場で実施された機器測定の結果の紹介に進む前に、以下のことに傾注する。シェールガスは非在来型炭化水素のカテゴリーに属する。頁岩流域での機器測定の結果から、シェールガスは堆積岩の第 1 グループ（礫岩）に含まれるガスであるという予備的な結論を得ることができた。堆積岩の第 1 グループのどの試料にガスが含まれているかを特定する目的で追加実験を行った結果、ガスの周波数の応答は堆積岩の第 1 グループの 1 つの試料であるアルジェライト（泥岩）角礫岩からのみ受信された。以上のことから、本調査の全エリアにおいて機器測定を実施する際には、アルジェライト角礫岩のガス（シェールガス）だけでなく、アルジェライト角礫岩の周波数の応答（信号）を記録する手順を実施した。従って、以下では、アルジェライト角礫岩からのガス（シェールガス）と同様に、シェールガスの周波数での応答（表現）は、同じ物質を表す。

非在来型貯留層におけるガス探査エリア 赤い四角の画像（図 25）を地表面から周波数共振処理したところ、オイル、コンデンセート、ガス、琥珀、白リン、赤リ

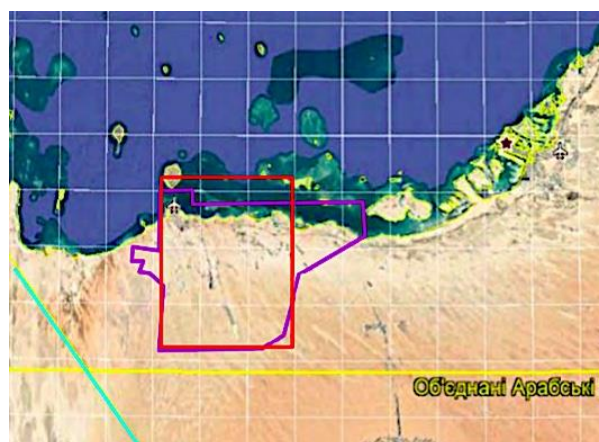


図 25 アラブ首長国連邦の衛星画像から非在来型炭化水素を探索したブロックの位置。

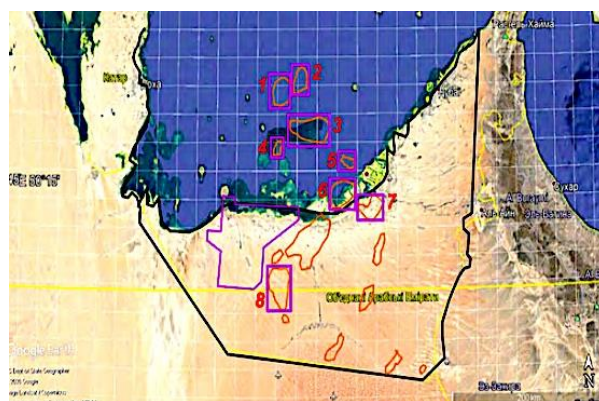


図 28 アラブ首長国連邦の衛星画像上の炭化水素堆積物の位置。矩形輪郭は検査の局所的な断片を示す（周波数共鳴処理）

ン、オイルシェール、アルジェライト角礫岩、ガスハイドレート岩、ガスハイドレートと氷、石炭、無煙炭、死水、1~6 群の堆積岩の周波数で応答が記録された。水素、生きた（治癒した）水、岩塩、火成岩からの信号は記録されなかった。

井戸の写真 地表面から長方形に坑井がある場所の写真（図 26）の断片を周波数共振処理したところ、石油（35 秒〜）、コンデンセート（7 秒〜）、ガス、琥珀、白リン、赤リン、オイルシェール、アルジェライト角礫岩、ガスハイドレート岩、ガスハイドレートと氷、石炭、無煙炭、1~6 群の堆積岩の周波数で応答が記録された。水素、生きている水と死んだ水、岩塩、火成岩からの信号は記録されなかった。

炭化水素鉱床の位置 UAE における炭化水素鉱床の位置の概略図を図 27 に、UAE 衛星画像上の鉱区の位置を図 28 に示す。長方形の輪郭は、検査の局所的な

断片を示している（偵察モードでの画像周波数共振処理）。

フラグメント 1. 表面から 1 番目の長方形（図 28）の画像の断片を処理すると、石油（低強度）、コンデンセート（低強度）、ガス、琥珀、白リン、赤リン、オイルシェール、アルジェライト角礫岩、ガスハイドレート岩、ガスハイドレートと氷、石炭、無煙炭、死水、1～6 群の堆積岩の周波数で応答が記録された。水素、生水、塩、火成岩からの信号は記録されていない。様々な深さでの反応を固定することにより、1～6 群の堆積岩で満たされた火山様の根元は深さ 470 km に決定された。

断片 1. 第 1 矩形の画像断片では、地表から、石油（低強度）、コンデンセート（低強度）、ガス、琥珀、白リン、赤リン、オイルシェール、アルジェライト角礫岩、ガスハイドレート岩、ガスハイドレートと氷、石炭、無煙炭、死水、1～6 群の堆積岩の周波数で応答が記録された。水素、生水、塩、火成岩からの信号は記録されていない。

断片 2. 第 2 矩形の画像断片では、表面から、石油（遅延あり）、コンデンセート（14 秒から）、琥珀、二酸化炭素、白リンと赤リン、オイルシェール、シェールガス、ガスハイドレートの岩石、ガスハイドレートと氷、石炭、無煙炭、1～6 群の堆積岩の周波数で信号が記録された。水素、死活水、岩塩、火成岩からの信号は記録されていない。

断片 3. 第 3 矩形の画像断片を処理では、石油（遅延あり）、コンデンセート、シェールガス、琥珀、二酸化炭素、白リンと赤リン、オイルシェール、ガスハイドレートと氷、石炭、無煙炭、1～6 群の堆積岩の周波数で応答が記録された。水素、死活水、岩塩、火成岩からの信号は記録されていない。

断片 4. 第 4 矩形の画像断片処理では、表面からの応答が、石油（遅延あり）、コンデンセート（遅延あり）、シェールガス、琥珀色（遅延あり）、二酸化炭素、白リンと赤リン、オイルシェール、アルジェライト角礫岩、ガスハイドレートと氷、石炭、無煙炭、1～6 群の堆積岩の周波数で記録された。水素、死活水、塩からの信号は受信されなかった。

断片 5. 第 5 矩形の画像の周波数共振処理では、ガス、白リン、岩塩、火成岩の第 7（超苦鉄質）グループの周波数で地表からの応答が得られた。石油、コンデ

ンセート、琥珀、二酸化炭素、赤リン、オイルシェール、シェールガス、ガスハイドレート、氷からの信号は記録されなかった

断片 6. 第 6 矩形の画像断片を処理では、ガス、白リン、岩塩、堆積岩の第 8（ドロマイト）グループの周波数で地表からの応答が得られた。石油、コンデンセート、琥珀色、赤リン、水素、水（生きているものと死んでいるもの）、火成岩の信号は記録されなかった。

断片 7. 第 7 矩形の画像断片処理では、地表から、石油、コンデンセート、ガス、琥珀、二酸化炭素、白リンと赤リン、オイルシェール、シェールガス、ガスハイドレートと氷、石炭、無煙炭、1-6 グループの堆積岩の周波数で応答が記録された。噴煙、水素、死活水、岩塩、火成岩の信号は記録されなかった。

断片 8. 第 8 矩形の画像フラグメントの周波数共振処理中に、ガス、白リン、岩塩、堆積岩の第 8（ドロマイト）グループの周波数で表面からの応答が得られた。石油、コンデンセート、火成岩からの信号は記録されなかった。

結果の考察と主な結論

本論文は、様々な地質学的問題を解決する際に使用される移動式直接探査法の方法論的技術を向上させるだけでなく、追加試験を目的とした実験的研究で得られた資料（機器測定の結果）を紹介するものである。第一に、限られた数の機器測定手順が、調査されたブロックと領域で加速モードで実施されたことに留意すべきである。

実施された実験作業の基本的に重要な結果は、衛星画像と写真画像処理中に得られた、地球の水素脱ガス過程における石油、コンデンセート、ガスの深部（生物起源）発生を支持する追加的な事実（証拠）である（48, 49）。現在、ほとんどの専門家は、炭化水素の生成に関する生物起源説の原則と規定によって実務を指導している。この観点から、地球の大気中に移動するメタンやその他のガスの量は、著しく過小評価される可能性がある。世界の様々な地域（調査地域内を含む）において、石油、コンデンセート、ガスからの信号（応答）がその合成境界 57 km で固定されている数多くの事実は、地球大気中への莫大な量の非生物発生源メタンの移動について仮定することを可能にする！

我々はまた、本論文で紹介した実験的調査結果や、開発した測定装置を用いて行った著者らの他の出版物の結果が、可燃性鉱物や鉱石鉱物（水素や水を含む）の堆積物だけでなく、様々な構造要素や地球、惑星、太陽系の衛星の外観の形成に関する「火山性」モデルを支持する重要な論拠であるという事実に着目している。

一般的に、中国、フランス、ウクライナ、アメリカ、アルゼンチン、イギリス、アラブ首長国連邦のいくつかのブロックとサイトでの実験的研究の結果は、世界の様々な地域で調査された構造と鉱床の既存のデータベースを補充する。このデータベースに埋蔵された研究資料により、可燃性鉱物と鉱石鉱物の探索のための方法的性質の、統計的に実証された勧告を策定することができる。

実施された研究は、使用されるスーパーモバイル技術が、可燃性鉱物、鉱石鉱物、および水の探査プロセスを大幅にスピードアップし、最適化（低コスト化）することが可能であることも示している。

また、多くの研究者が、様々な種類の鉱物の探査プロセスを高速化することの便宜性に注目していることにも注目したい。特に、(50) の論文では、石油とガスに関する試掘調査のパラダイムを議論・分析し、試掘作業の新しいモデルを提案している：「石油・ガス産業は、困難な経済シナリオに直面し、新たなやりがいのある探鉱機会を提供しうる広大なフロンティア地域を探鉱する必要性に迫られているため、有望な手掛かりをより迅速かつ低コストで、より直接的な方法で特定・評価することに重点を置いた新たな探鉱モデルを採用する必要がある。この変化を実現するカギとなるのが、新しいテクノロジーである。幸いなことに、これらの技術のいくつかは現在利用可能であり、効果的で新しい探鉱モデルに適合することが証明されている (50, P. 140) 。

論文 (51) では、鉱物探査のための画期的な技術について論じている。この論文 (51) の著者も、探査プロセスにおける地球リモートセンシング (ERS) データの利用の重要性に言及している。現代のリモートセンシングデータの処理と解釈の技術によって、地球 (52)、火星 (53)、金星 (54) において、さまざまなタイプの何万もの火山様構造を検出することが可能になった。

NASA が、地表のメタン・プルームを検出するために使用される Emit (地表鉱物塵源調査) 技術を開発したことを、上記に付け加える必要がある (55)。NASA は、その衛星能力を利用して、世界中で少なくとも 50 のいわゆる「メタンスーパーエミッター」を発見したと述べている。図 29a は、パーミアン・シェールベーズンにおけるメタン・プルームをマッピングしたものである。NASA の専門家は、その発生を石油・ガス生産インフラと関連付けている (56)。直接探鉱法技術は、メタン・プルームが存在する地域の深部構造を調査するために利用できる。

大規模な神府炭層メタン鉱床内のある地域の偵察調査の結果は、石炭盆地の深部および超深部における石油、コンデンセート、ガス鉱床の検出の可能性について、以前に実施された調査から導き出された結論を再び確認するものである。世界各地の石炭鉱床に埋蔵されている炭化水素鉱床を探索するために、詳細な地質学的探査を実施することが望ましい！

フーマン油田とルンタン 1 号深井戸掘削現場での実験的研究の資料は、石油とガスのための深井戸掘削のための最適な場所を選択する過程で使用される直接探査法の潜在的な可能性と実現可能性を示している。

タクラマカン砂漠の超深度坑井掘削地点では、深度 7,120 m 以上でヘリウム鉱床が発見される可能性がある。この区間を詳細にスキャンすることで、貯留層内のヘリウム埋蔵深度を決定することができる。

地球上のさまざまな地域（ウクライナ領土を含む）の石炭鉱床のある地域で、衛星画像と写真画像の周波数共振処理による直接探査方法を承認した結果、炭化水素の埋蔵は、流体と鉱物の移動の深いチャネル内の石炭盆の下層で検出できることが示された。褐炭鉱床のある地域では、加速モードでの機器測定では、石油の周波数での応答は記録されない。

図 9 の写真を使った限定された一連の機器測定の結果から、以下のことが言える。

1. 坑井のある地域は石灰岩で満たされた火山コンプレックス内にあり、深さ 57 km に炭化水素合成のための条件が存在する。合成境界で使用されなかった水素は、ガスとともに断面上部の地層に移動し、大気中に放出される可能性がある。

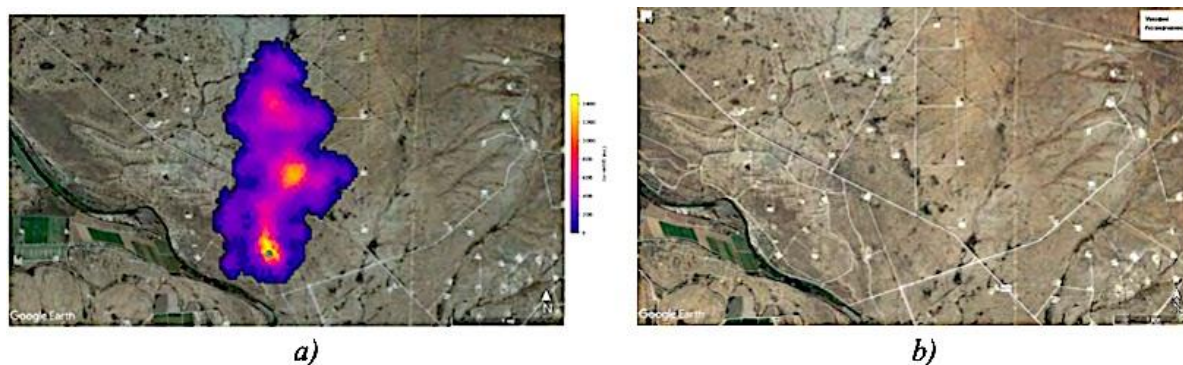


図 29 パーミアン・ペースン(TX, USA)の石油・ガスインフラに関連した、長さ 3 km のブルーム (56)。

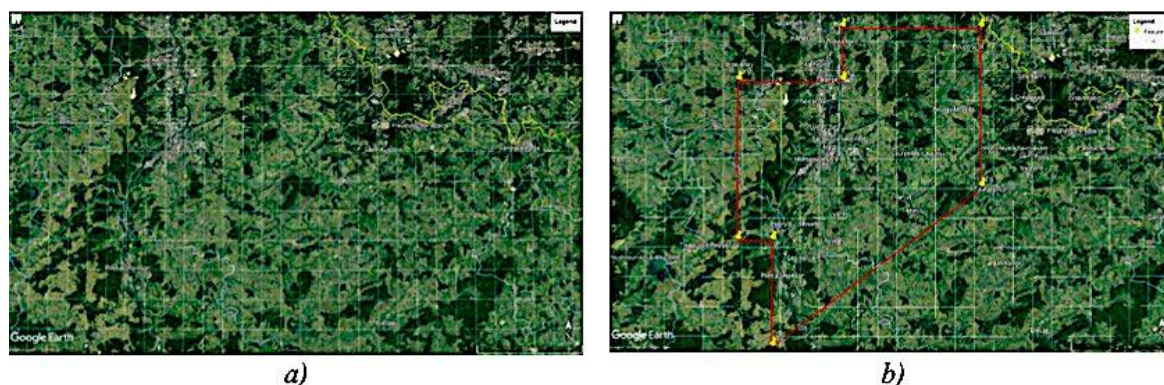


図 30 トロワ・エヴェシェのライセンス区画があるフランス領土の衛星写真。

2. 水素の周波数で表面からの反応が遅れて検出されるのは、堆積物断面における水素の量がわずかであることを示している可能性がある。

3. 調査地点では珪質岩からの信号も記録された。この地域には、これらの岩石で満たされた火山複合体が存在する可能性もある。天然水素を探索するために実施された実験作業の結果は、珪質岩が商業的な量の天然水素の鉱床（埋蔵）を形成するための良好な（理想的な）シールとなり得ることを示している。

4. 情報メッセージ (30-31) は、フランス、ロレーヌ地方の石炭流域における天然水素の大規模な埋蔵の発見に関するデータ、および La Française d'Énergie (FDE) 社による Trois Evechés ライセンスブロック内での天然水素の探索と生産の申請に関するデータを提供している。偵察調査のための様々な場所からの情報を使って、フランスのこの地域の領土の断片の衛星画像（図 30）が作成された。領域の衛星画像上のブロックの輪郭を図 30b に示す。図 30a の衛星画像を偵察モードで周波数共鳴処理（2023 年 9 月 19 日）したところ、水素、水素バクテリア、第 6 火成岩群（玄武岩）の周波数の信号が登録された！

5. 衛星画像上のブロックの領域は、詳細な試掘作業や天然水素のための井戸の掘削に有望である！ロレーヌ地方の石炭流域では、衛星画像を直接探査する方法と、機器測定手順一式を使用した写真周波数共鳴処理で、詳細な研究を行うことが望ましい。このような調査には多大な時間を費やす必要があるが、天然水素や炭化水素の埋蔵量を探索するための商業プロジェクトの枠組みの中で、迅速に実施することができる。

シェールガス生産地域で実施された実験的調査は、偵察的な性格のものである。すべての調査地点で、限られた（不完全な）数の「探索」作業が行われた。流体、化学元素、鉱物のための深い移動チャネルは、1～6 群の堆積岩で満たされており、調査されたすべてのシェールガス生産地で発見された。

シェールベースン内での機器測定の結果、シェールガスは堆積岩の第 1 グループ（プセファイト）に含まれるガスであるという予備的な結論を得ることができた。また、第 1 堆積岩グループのどの試料にガスが含まれているかを調べるための追加実験では、第 1 堆積岩グループの 1 つの試料（泥岩角礫岩）のみからガス周波数の応答が得られた。

特に興味深いのはイギリスの調査地点であり、この地点には水素の脱ガスが見られる地域がかなりある。これらの局所的なゾーンをより詳細に調査するために、その領域で追加調査を実施することが望ましい。

米国北部のウィリントン盆地にあるシェールオイル・プレイで実施された実験的研究により、断面の深層に炭化水素鉱床が存在することが再び確認された。石油、コンデンセート、ガス、琥珀の反応が、57kmの炭化水素合成の境界で得られた。地表から10kmまでの断面を走査した場合、5つの堆積物探索区間から油の周波数の信号が得られた。10kmの地表では、石油、コンデンセート、ガスからの応答も記録され、断面の深い地層にそれらが存在することを示している。

米国北部、ウィリントン盆地の東側では、水素と生きた（治癒済みの）水を含む玄武岩火山構造の巨大な（面積比）クラスターの存在が機器測定によって確認され、玄武岩内の水素とリン（赤色）の大気中への移動過程が記録された。

また、米国北部の調査地域内において、メタン酸化細菌と水素細菌の実験を多数行った。測定の結果、メタン酸化細菌はガス（メタン）が大気中に移動する領域でのみコロニーを形成し、水素細菌は水素が移動する領域でのみコロニーを形成することがわかった。バクテリアのいる断面の層（間隔）の厚さは550cmを超えない。このことから、バクテリアはメタンや水素を生成せず、これらのガスを使用して個体群の生存能力を維持していると結論づけることができる。機器による測定中にバクテリアからの反応が記録されたことは、調査地域内にメタンと水素の埋蔵があることを示す追加的な基準である。

アラブ首長国連邦における非在来型炭化水素の探索領域では、1〜6群の堆積岩で満たされた火山複合体、断面上でシェールガス、大気中へのガスと白リンの移動の存在が、機器測定によって確認された。

実験的研究の結果、シェールガスの周波数における反応は、堆積岩の第1群であるアルジェライト角礫岩のサンプルから記録されることが改めて示された。

1〜6群の堆積岩で満たされた多くの火山様構造では、石炭、無煙炭、ガスハイドレート、二酸化炭素の周波数でも信号が記録される。

炭化水素鉱床のある地域の調査結果によると、シェールガスは、1〜6群の堆積岩を持つ火山様複合体のある地域でも見つけることができる。

いくつかの炭化水素鉱床では、1〜6群の堆積岩で満たされた流体、化学元素、鉱物の深い移動経路が発見された。

直接探鉱法による水素鉱床探索の特徴といくつかの結果は以下の通りである。

1. 深さ57kmのある種の火山様構造の輪郭において、多数の機器による測定で直接探査法をテストする際、下から移動してくる水素と炭素から石油、コンデンセート、ガスを合成するための条件が作られる境界が設定された。石油、コンデンセート、ガスの周波数の信号（応答）は、この境界とその上方で記録され、より深いところでは水素と炭素の信号のみが記録される。

2. このような機器測定の結果は、この境界で水素がすべて炭化水素の合成に使用されない場合（とりわけ炭素の不足のため）、水素が炭化水素とともに断面の上部の地層に移動し、断面の油層やガス層を満たす可能性があることを示唆している。水素は、石油やガスのために掘削された井戸で発見された。

3. 各地の調査地点や地域で、偵察（加速）モードで、ほとんど遅れない実験的調査を行うと、水素と第6火成岩群（玄武岩）の共振周波数で、しばしば激しい反応が記録された。さらに、玄武岩の周波数の信号を記録する手順を先に行った場合、水素の周波数の応答は、水素からの信号を記録する手順を行う段階でほとんど記録され、その逆も同様であった。

4. そこで、今後、天然水素の詳細な地質学的探査に有望な地域を検出し、局在化させるための実験作業を行う際に、玄武岩、水素、水素細菌、赤リンの周波数における応答（シグナル）を測定する手順を実施した。さらに、水素や赤リンの大気中への移動の有無（有無）を確認するための機器測定も行った。水素細菌は、水素が大気中に移動している地域の断面の表面近くにコロニーを作ること、赤リンの周波数の信号は、玄武岩質火山複合体の輪郭にほぼ常に記録されることに注意しよう。

5. (57)にある文書を補足しておこう：「水素とメタンの共存に関して、異なる意見を持つ科学者もいる。特に(58)では、水素はメタンとその同族体の生成に費やされるため、炭化水素鉱床の外側に水素鉱床が形

成される可能性がある」と指摘している。炭化水素と水素鉱床の検出は、「炭化水素があるところには水素はない」という原則に従って、単一の複雑なタスクとして解決されるべきであることが強調されている。(58)によれば、この推定水素は、流域の炭化水素埋蔵量の形成、維持、そして可能な限り近代的な増加に、すでに大部分が費やされている。活性炭素の欠如やその他の理由により、炭化水素の形成に関与しなかった部分のみが有望である。おそらく、メタンと水素の共存に関しては、どちらの視点も適切であり、それは自然発生の様々なプロセスによって引き起こされる。起源が一般的なもの、例えば生物起源であれば、メタンと水素の両方が岩塊のガス組成に存在する可能性がある。水素が炭素とともにメタン生成の構成物質である場合、水素の量は制限されるか、あるいは全く存在しない。」

6. HyTerra 社 (59) がジェネバ (米国ネブラスカ州) の Hoarty NE3 坑井で実施した水素の有望区間をテストする作業は、商業的な量の水素埋蔵の発見に関する情報の公表をもって、いまだ完了していない。おそらく、HyTerra 社はこの坑井でのさらなる作業を継続することはないだろう。2019 年に、坑井掘削現場からの写真の周波数共鳴処理が実施されたことを付記する。写真の断片の周波数共鳴処理の結果に基づき、掘削された坑井に商業的な量の水素埋蔵は検出されないと結論づけられた。この掘削エリアは炭化水素探索に有望である。処理結果は 2019 年に発表された (5)。現在、これらの結果は掘削によって確認されたと言える。また、2019 年～2023 年という時間間隔にも注意を払うことが望ましい！

7. 天然水素の探索と掘削井戸のある地域の偵察調査の結果から、水素が発見された掘削井戸のある地域で、投資家や企業が試掘作業や掘削を行うことに重点を置いて、近い将来、工業的 (商業的) な水素の埋蔵の発見にはつながらないと結論づけることができる！このような状況において、世界経済の地質学、地球物理学、鉱業業界は、世界の経済を未来の環境に優しい燃料である水素の使用に転換するための大規模プロジェクトに資金を供給する競争に敗れつつある！

8. (3-19) 衛星画像と写真の周波数共鳴処理のためのスーパーモバイル直接探査法の大規模なテストは、地球の様々な地域の局所的な領域と大規模なブロックで、天然の水素の周波数の集中的な信号は、玄武岩で

満たされた火山複体内でほとんど常に記録されていることを示している。また、多くの場合、玄武岩を覆う岩石複体の浅深度でも水素の反応が記録されている。このような結果から、玄武岩コンプレックスを有する地域やブロックが、天然水素を導出するための詳細な試掘作業や坑井掘削の主要なターゲットであると結論づけることができる。

一般に、上に示した実験的偵察研究の結果は、調査地域内の石油、ガス、天然水素の集積を検出する見込みを総合的に評価する際に、また、断面における予測される鉱床の発生深度と厚さを決定する際に、衛星画像と写真の周波数共鳴処理のための直接探査方法の操作性、情報量、効率性を改めて明確に示している。本論文の資料は、衛星画像や写真の周波数共鳴処理とデコードのモバイル技術を、大規模なブロック内や局所的なエリア内の石油・ガス集積ゾーンの検出と位置特定に使用することの利便性を証言している。この技術は、「石炭」や「シェール」の炭化水素産業集積地帯の探索・探査にも利用できる。超効率的で低コストの直接探査技術の使用は、石油、ガス、天然水素、鉱石鉱物の探査プロセスを大幅にスピードアップし、その実施にかかる財政コストを削減する。

引用文献

1. Yakymchuk N.A., Korchagin I.N., Bakmutov V.G., Solovjev V.D. (2019) Geophysical investigation in the Ukrainian marine Antarctic expedition of 2018: mobile measuring equipment, innovative direct-prospecting methods, new results. *Geoinformatika*, 2019, no. 1, pp. 5-27. (in Russian).
2. Yakymchuk N.A., Korchagin I.N. (2019) Integral estimation of the deep structure of some volcanoes and cymberlite pipes of the Earth. *Geoinformatika*, 2019, no. 1, pp. 28-38 (in Russian).
3. Yakymchuk, N. A., Korchagin, I. N. (2019) Ukrainian Shield: new data on depth structure and prospects of oil, gas condensate, gas and hydrogen accumulations detection. *Geoinformatika*, 2019, no. 2, pp. 5-18 (in Russian).
4. Yakymchuk, N. A., Korchagin, I. N., Levashov, S. P. (2019) Direct-prospecting mobile technology: the results of approbation during searching for hydrogen and the channels of migration of deep fluids, mineral substances and chemical elements. *Geoinformatika*, 2019, no. 2, pp. 19-42 (in Russian).
5. Yakymchuk N.A., Levashov S.P., Korchagin I.N. (2019) Application of technology of frequency- resonant processing of satellite images and photographs on area of hydrogen production and hydrogen degassing of the Earth. Conference Proceedings, 18th International Conference on Geoinformatics - Theoretical and Applied Aspects, May 2019, Volume 2019, p.1 - 5 DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902022>

- <https://www.earthdoc.org/content/papers/10.3997/2214-4609.201902022>
6. Yakymchuk, N. A., Korchagin, I. N. (2019) Application of mobile frequency-resonance methods of satellite images and photo images processing for hydrogen accumulations searching. *Geoinformatika*, 2019, no. 3, pp. 19-28 (in Russian).
 7. Yakymchuk, N. A., Korchagin, I. N. (2019) Studying the internal structure of volcanic complexes of different type by results of frequency-resonant processing of satellite and photo images. *Geoinformatika*, 2019, no. 4, pp. 5-18 (in Russian).
 8. Yakymchuk, N. A., Korchagin, I. N. (2019) Technology of frequency-resonance processing of remote sensing data: results of practical approbation during mineral searching in various regions of the globe. Part I. *Geoinformatika*, 2019, no. 3, pp. 29-51. (in Russian).
 - Yakymchuk, N. A., Korchagin, I. N. (2019) Technology of frequency-resonance processing of remote sensing data: results of practical approbation during mineral searching in various regions of the globe. Part II. *Geoinformatika*. 2019. no. 4, pp. 30-58. (in Russian).
 - Yakymchuk, N. A., Korchagin, I. N. (2020) Technology of frequency-resonance processing of remote sensing data: results of practical approbation during mineral searching in various regions of the globe. Part III. *Geoinformatika*. 2020. no. 1, pp. 19-41. (in Russian).
 - Yakymchuk, N. A., Korchagin, I. N. (2020) Technology of frequency-resonance processing of remote sensing data: results of practical approbation during mineral searching in various regions of the globe. Part IV. *Geoinformatika*. 2020. no. 3, pp. 29-62. (in Russian).
 - Yakymchuk, N. A., Korchagin, I. N. (2021) Technology of frequency-resonance processing of remote sensing data: results of practical approbation during mineral searching in various regions of the globe. Part V. *Geoinformatika*. 2021. no. 3-4, pp. 51-88. (in Russian).
 9. Yakymchuk, N. A., Korchagin, I. N. (2020) Approbation of direct-prospecting technology of frequency-resonance processing of satellite images and photo images at known hydrocarbon deposits in different regions. *Geoinformatika*, 2020, no. 2, pp. 3-38 (in Russian).
 10. Yakymchuk, N. A., Korchagin, I. N., Yanushkevich K.P. (2020) Approbation of frequency- resonance methods of satellite and photo images processing on the geological structure "Chicxulub Crater". *Geoinformatika*, 2020, no. 2, pp. 39-49 (in Russian).
 11. Yakymchuk, N. A., Korchagin, I. N. (2020) On the possibility of application the frequency- resonance technology of satellite images and photos images processing for studying objects of the solar system and far space *Geoinformatika*, 2020, no. 2, pp. 98-108 (in Russian).
 12. Yakymchuk, N. A., Korchagin, I. N., Yanushkevich K.P. (2020) Features of the depth structure and prospects of oil and gas potential of the Carpathian region by results of cross-section frequency resonance sounding. *Geoinformatika*, 2020, no. 2, pp. 50-68 (in Russian).
 13. Yakymchuk, N. A., Korchagin, I. N. (2020) Direct-prospecting technology of frequency-resonant processing of satellite images and photos images: results of use for determining areas of gas and hydrogen migration to the surface and in the atmosphere. *Geoinformatika*, 2020, no. 3, pp. 3-28 (in Russian).
 14. Yakymchuk, N. A., Korchagin, I. N. (2020) New evidence in favor of the abiogenic genesis of hydrocarbons from the results of the testing of direct-prospecting methods in various regions of the world. Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine. 2020. No 9, pp. 55-62. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2020.09.055> (in Ukrainian)
 15. Yakymchuk, N. A., Korchagin, I. N. (2020) Direct-prospecting technology of frequency- resonance processing of satellite images and photo images: potential opportunities and prospects of application for natural hydrogen accumulations searching. *Geoinformatika*, 2020, no. 4, pp. 3-41 (in Russian)
 16. Yakymchuk, N. A., Korchagin, I. N. (2021) Depth structure features of large zones of hydrogen degassing in various regions of the earth by results of frequency-resonance processing of satellite and photos images. *Geoinformatika*, 2021, no. 1-2, pp. 3-42 (in Russian).
 17. Yakymchuk, N. A., Korchagin, I. N. (2021) On the prospects of the technology of remote sensing data frequency-resonance processing using when conducting profiles geoelectric and seismic studies. *Geoinformatika*. 2021. no. 3-4, pp. 18-50. (in Russian).
 18. Yakymchuk M., Korchagin I. (2022) Direct-prospecting technology of satellite images and photos images frequency-resonance processing: results of large blocks and hydrogen degassing areas surveying in Greece and Italy. *Annali d'Italia*. No32/2022, pp. 61-77. ISSN 3572-2436 DOI: 10.5281/zenodo.6684155 <https://www.anditalia.com/>
 19. Yakymchuk, N. A., Korchagin, I. N. (2022) Results of a reconnaissance survey of large zones of hydrogen degassing in various regions of the world. Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine. 2022. No 1. P. 79-91. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2022.01.079> (in Ukrainian)
 20. Yakymchuk N.A., Korchagin I.N., Javadova A. (2022) Results of a survey by mobile direct- prospecting methods in the location of the active Dashly volcanic complex in the Caspian Sea. *Azerbaijan Geologist*. # 25, 2022, pp. 42-53. <https://www.azgeologist.com/geolog/>
 21. Mykola Yakymchuk, Ignat Korchagin, Sergiy Levashov, Valery Solovyov. (2022) Volcanism and degassing processes in the structures of the Earth's polar regions (review based on the results of frequency-resonance studies). Dodo Books Indian Ocean Ltd. And OmniScriptum S.R.L Publishing group. 2022, 276 p. (in Ukrainian). ISBN: 978-620-0-63606-5 <https://morebooks.de/shop-ui/shop/search?q=978-620-0-63606-5&page=1>
 22. Mykola Yakymchuk, Ignat Korchagin. (2022) Direct-prospecting technology of satellite images and photos images frequency-resonance processing: results of large blocks and hydrogen degassing areas surveying in Great Britain. *New Concepts in Global Tectonics Journal*. Volume 10, No 2, June 2022. pp. 120-155. ISSN 2202-0039. <http://www.ncgtjournal.com/journals.html>
 23. Valery Soloviev, Nikolay Yakymchuk, Ignat Korchagin. (2023) Pockmarks, seep sources, and degassing processes in the polar region structures. *New Concepts in Global Tectonics Journal*. Volume 11, Number 1, March 2023. pp. 35-47 ISSN 2202-0039. <http://www.ncgtjournal.com/journals.html>

24. Levashov S.P., Yakymchuk N.A., Korchagin I.N. (2012) Frequency-resonance principle, mobile geoelectric technology: new paradigm of geophysical investigations. *Geofizicheskiy zhurnal*, 2012, vol. 34, no. 4, pp. 166-176 (in Russian).
25. Mykola Yakymchuk, Ignat Korchagin. (2023) Direct-prospecting methods of satellite and photos images frequency-resonance processing: results of approbation on Australia and New Zealand territories. *New Concepts In Global Tectonics Journal*. Vol. 11, N 3, September 2023, pp. 179-213. [www.ncgtjournal.com](http://users.neo.registeredsite.com/6/9/1/18560196/assets/NCGTJ_V11N3_pub.pdf)
http://users.neo.registeredsite.com/6/9/1/18560196/assets/NCGTJ_V11N3_pub.pdf
26. Mykola Yakymchuk, Ignat Korchagin. (2023) Mobile technology of satellite images and photographs frequency-resonance processing: some results of demo-projects implementation in various regions of the globe. Publisher.agency: *Proceedings of the 2nd International Scientific Conference «Progress in Science»* (April 13-14, 2023). Brussels, Belgium, 2023, pp. 197-208. ISBN 978-5-8949-1634-7 DOI 10.5281/zenodo.7833896
<https://ojs.publisher.agency/index.php/PS/issue/view/26>
27. Mykola Yakymchuk, Ignat Korchagin. (2023) Publisher.agency: *Proceedings of the 2nd International Scientific Conference «Foundations and Trends in Modern Learning»* (April 27-28, 2023). Berlin, Germany, 2023, pp. 342-362. ISBN 978-2-9003-7194-7 DOI 10.5281/zenodo.7882250
<https://ojs.publisher.agency/index.php/FTML/issue/view/28>
28. Mykola Yakymchuk, Ignat Korchagin, Valery Solovyov. (2023) Technology of satellite images and photographs frequency-resonance processing: results of application for studying the territory of "Taoudenni 002" meteorite founding in Mali. Publisher.agency: *Proceedings of the 3rd International Scientific Conference «World Scientific Reports»* (June 29-30, 2023). Paris, France, and photographs frequency-resonance processing: about expediency of its practical application for Direct-prospecting technology of satellite images hydrocarbons and hydrogen searching and deep structure of earth studying 2023, pp. 161-173. ISBN 978-6-3690-8142-3. DOI 10.5281/zenodo.8106753.
<https://ojs.publisher.agency/index.php/WSR/issue/view/37>
29. Yakymchuk, M., Korchagin, I., Soloviev, V., (2023). Some Results of Direct FR Technology Applied to Study Methane Seepage Areas in the Arctic Region. *Advances in Geological and Geotechnical Engineering Research*. 5(3), pp. 25-38. DOI: <https://doi.org/10.30564/aggr.v5i>
30. Messad, P.(2023) Excitement grows about 'natural hydrogen' as huge reserves found in France. <https://www.euractiv.com/section/energy-environment/news/excitement-grows-about-natural-hydrogen-as-huge-reserves-found-in-france/>
31. FDE announces the discovery of natural hydrogen in the Lorraine mining basin. <https://www.francaisedelenergie.fr/en/news/>
32. Hydrogen deposit of staggering proportions discovered in Lorraine. <https://today.rtl.lu/news/luxembourg/a/2079150.html>
33. Huge 100 billion m3 deep coalbed methane found in China. <https://news.cgtn.com/news/2023-10-23/China-discovers-its-first-110-billion-m-deep-coalbed-methane-field-1o8ah35NBjG/index.html>
34. Tesla N. Patents. - Samara: Publishing House "Agni", 2009. - 496 p. (in Russian).
35. Tesla N. Articles. - Samara: Publishing House "Agni", Moscow: Publishing House "Russian Panorama", 2010. - 584 p. (in Russian).
36. "Electronic petrographic reference book-identifier of magmatic, metamorphic and sedimentary rocks" for operational use in the creation of Gosgeolkart1000/3 and 200/2 for the territory of the Russian Federation. St. Petersburg, 2015. <http://rockref.vsegei.ru/petro/> (in Russian).
37. China discovers 900m-tonne oil and gas field in Xinjiang. <https://news.cgtn.com/news/2021-06-18/China-discovers-900m-tonne-oil-and-gas-field-in-Xinjiang-11csCgsqbmjg/index.html>
38. China's largest ultra-deep oilfield outputs 3-mln-tonne oil in 2022. <https://news.cgtn.com/news/2022-12-28/China-s-largest-ultra-deep-oilfield-outputs-3-mln-tonne-oil-in-2022-1g7TZhlzWDe/index.html>
39. China has drilled a 6,000 metre deep hole in the Earth's crust. <https://www.yourweather.co.uk/news/trending/china-drilled-6-000-metre-deep-hole-in-earth-s-crust-geology.html>
40. 8,882 meters! PetroChina drills Asia's deepest oil well on land. <https://news.cgtn.com/news/2020-01-20/8-882-meters-Petro-China-drills-Asia-s-deepest-oil-well-on-land-NpbVdB9Lxu/index.html>
41. Yang Haijun, Chen Yongquan, Tian Jun, Du Jinhui, Zhu Yongfeng, Li Honghui, Pan Wenqing, Yang Pengfei, Li Yongl, An Haiting. (2020) An important discovery in Well Luntan-1 of the Tarim Basin, China, and its significance for ultra-deep oil and gas exploration. *China petroleum exploration*. Vol. 25, Issue 2, March 2020, pp. 1-12.
42. Eagle Ford: Shale Revolution: As Clear as Night and Day <https://earthobservatory.nasa.gov/images/87725/shale-revolution-as-clear-as-night-and-day>
43. Lea advances to nation's No. 2 county in oil production <https://www.hobbsnews.com/2019/05/14/lea-advances-to-nations-no-2-county-in-oil-production/>
44. http://www.biodiversidadla.org/Documentos/Argentina_Vaca_Muerta_un_megaproyecto_que_se_extiende
45. <https://cuadrillaresources.com/our-sites/lancashire/>
46. Fracking equipment removed from Cuadrilla site after operations suspended: 'Work at this site could soon be at an end' <https://www.independent.co.uk/environment/fracking-cuadrilla-lancashire-preston-new-road-suspended-equipment-removed-a9126671.html>
47. Stephen A. Sonnenberg. (2021) The giant, continuous Three Forks Play, Williston Basin. *First Break*, volume 39, April 2021, pp. 75-85.
48. Bagdasarova M.V. (2014). Earth degassing is a global process that forms fluidogenic minerals (including oil and gas deposits). *Electronic journal "Deep Oil"*. No. 10, pp.1621-1644 (in Russian).
49. Shestopalov V.M., Lukin A.E., Zgonik V.A., Makarenko A.N., Larin N.V., Boguslavsky A.S. (2018) Essays on Earth's degassing. Kiev, BADATA-Intek Service. 2018, 632 p. (in Russian).
50. Cleveland M. Jones. (2018) The oil and gas industry must break the paradigm of the current exploration model. *J Petrol Explor Prod Technol*, 8:131-142. <https://doi.org/10.1007/s13202-017-0395-2>
51. Okada, K. (2022) Breakthrough technologies for mineral exploration. *Mineral Economics*, 35, pp. 429-454. <https://doi.org/10.1007/s13563-022-00317-3>

52. "It's just mind boggling." More than 19,000 undersea volcanoes discovered. <https://www.science.org/content/article/it-s-just-mind-boggling-more-19-000-undersea-volcanoes-discovered>
53. NASA Confirms Thousands of Massive, Ancient Volcanic Eruptions on Mars. <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2021/nasa-confirms-thousands-of-massive-ancient-volcanic-eruptions-on-mars>
54. Venus has thousands more volcanoes than we thought, and they might be active (85,000). https://www.livescience.com/venus-volcano-map?utm_term=44ECB896-8E87-4E40-BB4B-378A1DAC13A3&utm_campaign=C8BE61D2-E32A-4D67-9F95-2269F88D92E6&utm_medium=email&utm_content=3B3942FA-8062-4397-8D72-42A55926B151&utm_source=SmartBrief
55. Methane 'Super-Emitters' Mapped by NASA's New Earth Space Mission. https://www.jpl.nasa.gov/news/methane-super-emitters-mapped-by-nasas-new-earth-space-mission?utm_medium=email
56. NASA discovers massive methane plume over Permian Basin. <https://energymarketingpro.org/energy-news/nasa-discovers-massive-methane-plume-over-permian-basin/>
57. Bezruchko K.A. (2022) Natural sources and conditions of geological hydrogen generation (in the context of hydrogen deposits searches). *Geophysical Journal*, 44(2), pp. 93-124. DOI: <https://doi.org/10.24028/gj.v44i2.256267>
58. Shestopalov, V.M. (2020) On geological hydrogen. *Geophysical Journal*, 2020. 42(6), pp. 3-35. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i6.2020> (in Russian).
59. HyTerra (ASX:HYT) <https://hyterra.com/>

NCGT ジャーナルについて

NCGT ニュースレター（現在の NCGT ジャーナルの前身）は、1996 年 8 月に北京で開催された第 30 回国際地質学会議でのシンポジウム “Alternative Theories to Plate Tectonics” での議論から始まった。その名称は、1989 年にワシントン D.C.で開催された第 28 回国際地質学会議に関連して開催されたシンポジウムの名称に由来している。NCGT ニュースレターは 1996 年 12 月に創刊され、2013 年に NCGT ジャーナルに名称を変更した。NCGT ジャーナルの目的は以下のとおりである：

1. 地質学、地球物理学、太陽惑星物理学、宇宙論、気候学、海洋学、電気宇宙論 (electric universe)、その他、地球の核から大気圏の上部に至るまで、地球上で起こっている物理過程に関連ないしは影響を及ぼしている分野において、新しいアイデアやアプローチを自由に交流するための国際フォーラムを提供すること。
2. 支配的なテクトニックモデルの範疇に収まらない創造的なアイデアのための組織的な目標を創り出すこと。
3. とくに検閲や差別があった場合には、そのような研究の転載と出版の基礎を構築すること。

■ 寄付については、ジオプラズマ研究所のブルース・レイボーン研究部長 (leybourneb@iascc.org) まで、お気軽にご連絡ください。

■ NCGT ジャーナルへの連絡・通信・原稿掲載には次の方法をご利用ください：NEW CONCEPTS IN GLOBAL TECTONICS. E メール：louis.hissink@outlook.com (MS Word か ODT ファイル、図は gif, bmp, tiff, png フォーマット) を別ファイルで送付、電話 +61 419 283 775. 免責事項：このジャーナルに掲載されている意見、見解、アイデアは寄稿者の責任であり、必ずしも編集者や編集委員会の意見を反映しているわけではありません。NCGT ジャーナルは国際的査読オンラインジャーナルで、3 月、6 月、9 月、12 月に発行されます。英文版 ISSN 番号：ISSN 2202-0039

An international journal for New Concepts in Global Tectonics 日本語版発行チーム

(連絡先) 柴 正博 (shiba@dino.or.jp)

(翻訳メンバー) 足立久男・岩本広志・川辺孝幸・小坂共栄・小松宏昭・柴 正博・宮城晴耕・村山敬真

(事務局メンバー) 足立久男・岩本広志・金井克明・川辺孝幸・柴 正博 (代表)・宮城晴耕