

資源産業と地質との関わりを直接学べる 南関東ガス田での見学会の魅力とは —石油技術協会の見学会での実施経験を振り返って(温故知新の旅)— 第1部 南関東ガス田とは:その概要

徳橋 秀一¹⁾

1. はじめに

石油技術協会では、1993年度(平成5年度)以後、関東地区(東京都内や千葉市など)で春季講演会が開催された際や、学生など主に非会員を対象とした特別見学会(地質編)が2008年度(平成20年度)の秋に初めて実施されて以後、房総半島の南関東ガス田地域を舞台にした見学会が数多く実施されてきました。

これらの見学会の特徴は、天然ガスやヨウ素といった地下資源の生産施設(工場など)と、それらを地下で胚胎し産出する地層の特徴を地表露出地(露頭)で観察することです。これによって、現在産業として社会を支えている千葉県の貴重な資源と地質との関連性を、現場で体感的に直接学び理解できること、すなわち生きた経験と知識を得ることができることにあります。このことこそが南関東ガス田における石油技術協会の見学会の最も重要な狙いであり、大きな魅力となっています。本シリーズ第1部では、まず南関東ガス田の概要を紹介することにします。そして石油技術協会の見学会の内容については、第2部以降で紹介したいと思います。

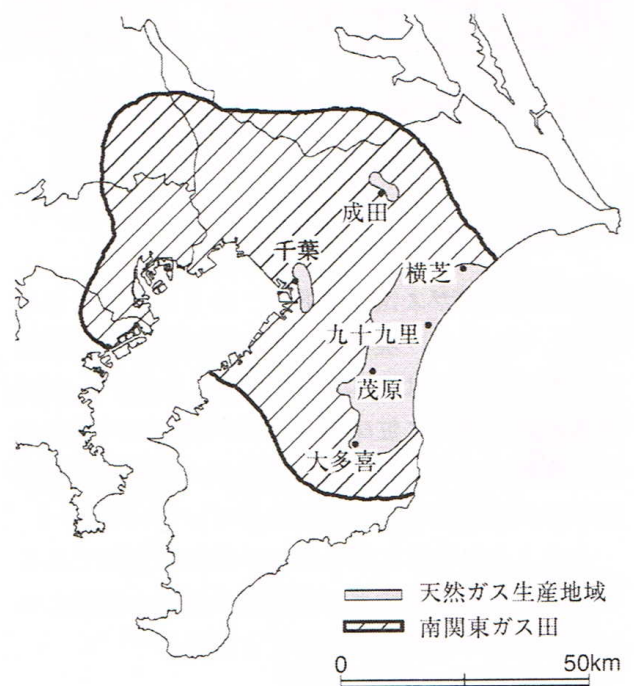
2. 南関東ガス田とは

2.1 南関東ガス田の天然ガスの特徴

国内の石油や天然ガスの産地としては、新潟県や秋田県が昔から知られていますが、実は首都圏のある関東平野の地下にも天然ガスが広く分布しています(たとえば、河井, 1961; 国末, 2010; 佐脇ほか, 2015, 2016など)。特に、千葉県を中心とする東京湾周辺から外洋側の茂原・九十九里地域では、古くから天然ガスの生産が積極的に行われ、南関東ガス田と呼ばれてきました。しかし、その後地盤沈下や工業化・都市化の影響から東京湾沿岸での天然ガスの

生産はそのほとんどが取りやめられ、現在は千葉県東部の大多喜町、茂原市周辺から九十九里地域を中心に、地下数100m以上深の上総層群^{かずさ}とよばれる固結した地層からの天然ガスの生産が積極的に行われ、都市ガスなどとして広域に供給されています(第1図)。

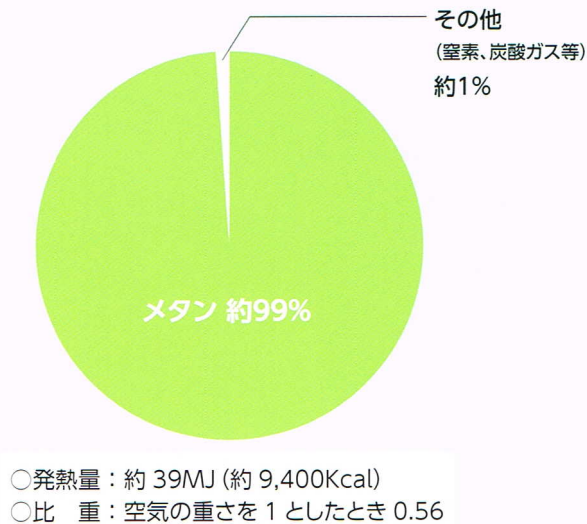
新潟県や秋田県での天然ガスの生産は、そのほとんどが石油の生産と関係するなど油田と共存する地域での産出が多いのに対して、南関東ガス田地域には石油(油田)は存在していません。南関東ガス田では、約500m~2,000mの地下の地層中に蓄えられた天然ガスを含む地層水を個々の井戸(生産井)でのパイプを通して地表に揚水し、減圧によって分離した天然ガスを集めて資源としているために、



第1図 南関東ガス田の分布と天然ガスの主な生産地域
国末(2010)より引用。

1) 産総研 地質調査総合センター地圏資源環境研究部門 客員研究員

キーワード: 南関東ガス田, 房総半島, 上総層群, 水溶性天然ガス, ヨウ素, かん水, ガス水比, 茂原型産出挙動, 通常型産出挙動, 砂岩泥岩互層, タービタイト, 石油技術協会



第2図 天然ガスの組成
天然ガス鉱業会・京葉天然ガス協議会(2019)より引用。



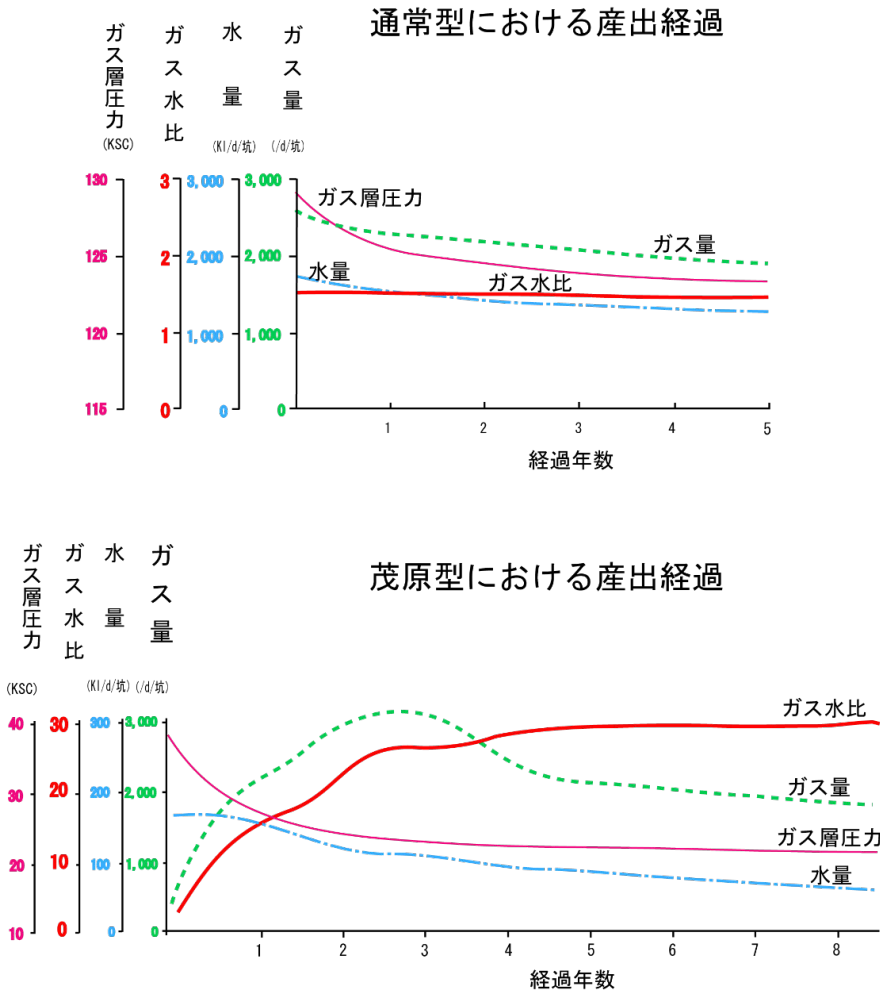
第3図 千葉県内の天然ガスのパイプライン網
天然ガス鉱業会・京葉天然ガス協議会(2019)より引用。

水溶性天然ガスと呼ばれています。南関東ガス田は、国内で最大の水溶性天然ガス田で、千葉県の生産量は、国内の水溶性天然ガス全体の約8割を占めています。他には、宮崎県と新潟県で主に産出しています。また天然ガスを地表にもたらず地層水は、元は地質時代に海底で形成された地層中に取り込まれた海水(化石海水)であることから味が塩辛く、通常“かん水(鹹水)”と呼ばれています。

南関東ガス田の天然ガスは、約99%がメタン、約1%が窒素や二酸化炭素から構成され、一酸化炭素などの不純物をほとんど含まない大変クリーンな天然ガスであるとともに、発熱量は1m³あたり約39MJ(約9,400kcal)、比重は空気を1とした場合約0.56ということで、安全性と経済性にも優れています(第2図)。また、そのほとんどがパイプライン網を通して、千葉県内で都市ガスとして利用されているということです(第3図)。また、南関東ガス田の可採埋蔵量は3,685億m³といわれていることから、多数のガス井戸による現在の年間生産量4.4億m³で割ると約800年間の生産ポテンシャルを有しているということです(天然ガス鉱業会・京葉天然ガス協議会, 2019)。メタンを主体とする南関東ガス田の天然ガスは、その組成や同位体分析結果から、海底で形成された泥層や砂層中に保存された陸由来や海由来の有機物を元に微生物によって形成された、微生物起源の天然ガス(メタン)であるということがわかっています(金子, 2003, 2005; 持丸・鎌形, 2006)。

2.2 生産井の産出挙動にみられる茂原型と通常型

地表に揚げられたかん水とそこから分離して得られた天然ガスの地表条件下での体積比をガス水比といいます。このガス水比は、近くのいくつかの生産井からのかん水(天然ガスを含む)を集めて一括して扱うそれぞれの生産基地における天然ガスの産出ポテンシャルを示す重要な指標となっています。このガス水比の値と経年変化のパターンに基づいて、南関東ガス田での産出挙動には、大きく2つのタイプの存在が知られています(第4図)。ひとつは、ガス水比の値が、通常生産年数の経過とともに高くなっていくパターンで、場合によっては10や20以上といった高い値に達することも珍しくない特異な産出挙動を示します。このタイプは、茂原周辺で比較的浅い層で仕上げた井戸(浅井戸)で主にみられることから、茂原型産出挙動とか単に茂原型と呼ばれています。一方もう一つのタイプは、ガス水比が長期間にわたって低い値(1.5～4前後)で比較的安定したパターンを示すタイプで、通常型産出挙動または単に通常型と名付けられています。この通常型産出挙動は、茂原以外の地域の井戸や茂原周辺でも深い地層で仕上げた井戸(深井戸)などでみられます。天然ガスの生産量に大きく寄与する茂原型産出挙動、すなわち高いガス水比の成因をめぐっては、古くから注目され多くの研究がなされてきました(石和田・本島, 1960; 河井, 1961; 上野ほか, 1964; 本間・山上, 1968; 本間, 1987; 木村ほか, 1993; 田崎, 1994; 国末ほか, 2002; 三田ほか, 2003; 中川ほか, 2006など)。



第4図 通常型と茂原型の産出様式の模式的な例
本間(1987)を一部修正(一部カラー化)して引用。

3. 南関東ガス田のもう一つの宝、ヨウ素

3.1 南関東ガス田から供給されるヨウ素の量

このように南関東ガス田は、クリーンな天然ガス(メタンガス)の一大宝庫であり、地域の貴重な国産資源、すなわち地産地消型ならぬ千産千消型(千葉県産出千葉県消費型)資源の供給源として注目されているのですが、実は、世界に広く供給されているもう一つの重要な資源、いわば「千産世消型」(千葉県産出世界消費型)資源の供給源でもあるのです。その資源とはヨウ素です。南関東ガス田のかん水中のヨウ素濃度は非常に高く100 ppm(mg/ℓ)以上あることも珍しくないことから、実に海水のヨウ素濃度(約0.05 ppm)の約2,000倍の濃度を有していることとなります。こうしたことから、南関東ガス田では、地表に揚水されたかん水は、まずガスを分離した後、集められてヨウ素工場に送られ、そこでかん水中のヨウ素が濃集されて、まずは固体のヨウ素(粒状やフレーク状など)に加工されます(第5図)。日本全体で生産されるヨウ素の生産量は年間約10,000 tで、世界の約30%を占めており、チリに次いで世界第2の生産国となっています。国内での生産割合は、

千葉県が約80%を占め、残りの大部分は宮崎県と新潟県が占めています。そして、国内の生産量の約半分(5,000 t)が海外に輸出されているということです(ヨウ素学会, 2020)。

3.2 ヨウ素の用途とは

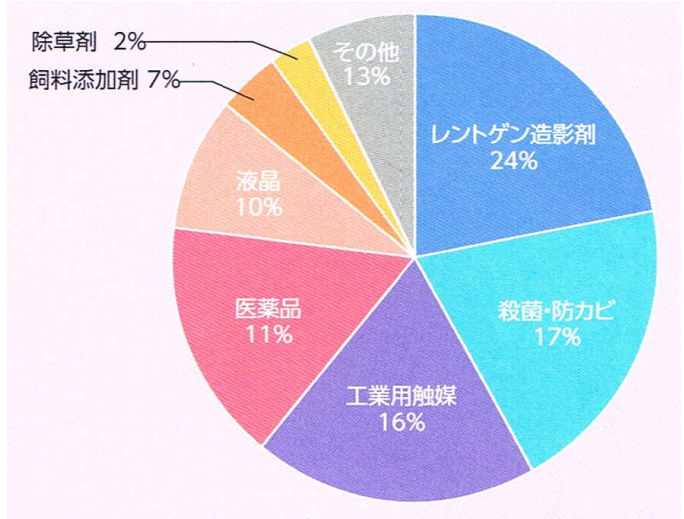
ヨウ素は、レントゲン造影剤(24%), 殺菌・防カビ(17%), 工業用触媒(16%), 医薬品(11%), 液晶(10%), 飼料添加剤(7%), 除草剤(2%), その他(13%)などに利用されており、世界の医薬品や先端技術製品の製造等の産業に不可欠な元素となっています(第6図)。また、ヨウ素は人体成長の必須元素であり、不足するとヨウ素欠乏症(発育不全, 機能障害, 甲状腺異常など)を発症することから、南関東ガス田産のヨウ素は、内陸国などヨウ素欠乏症を起こしやすい国に対する無償供与にも役立てられているということです(天然ガス鉱業会・京葉天然ガス協議会, 2019)。

3.3 天然ガスやヨウ素の生産に直接携わる8つの会社

このように南関東ガス田は、クリーンな天然ガス(メタンガス)の一大宝庫であり、地域の重要なエネルギー資源、

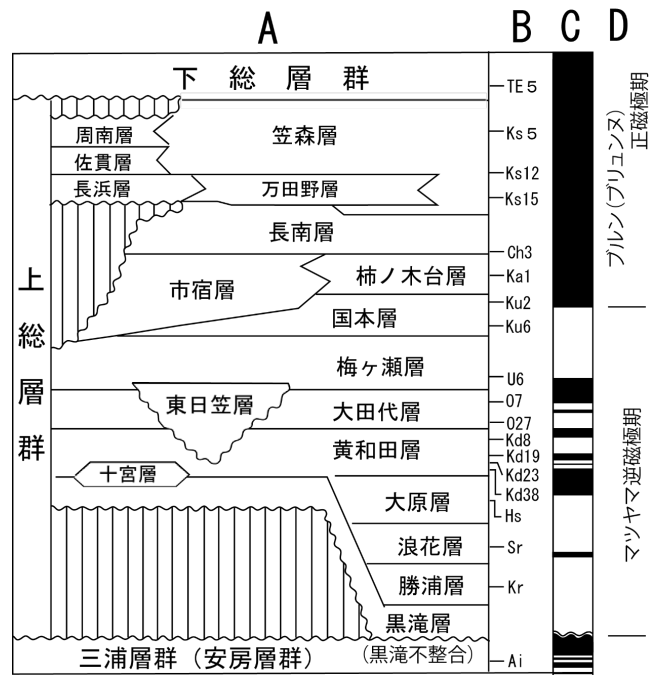


第5図 ヨウ素(粒状)
天然ガス鉱業会・京葉天然ガス協議会(2019)より引用。



第6図 ヨウ素の需要別割合
天然ガス鉱業会・京葉天然ガス協議会(2019)より引用。

すなわち千産千消型資源の供給源であるとともに、海外にも広く輸出されているヨウ素という大変貴重な資源の供給源、すなわち千産世消型資源の重要な供給源でもあるという2つの側面をもった大変希少で貴重な存在であるといえます。そしてこれらの地下資源開発に関わる産業は、千葉県の大変重要な地場産業となっています。現在、南関東ガス田でこのような天然ガスやヨウ素の生産・開発に直接関わり、上記の地場産業の核となっている会社は、次の8社(あいうえお順)です。すなわち、伊勢化学工業(株)、(株)INPEX(旧、国際石油開発帝石(株))、AGC(株)(旧、旭硝子(株))、関東天然瓦斯開発(株)、K&Oヨウ素(株)(旧、日本天然ガス(株))、(株)合同資源、日宝化学(株)、三井化学(株)の8社です。詳しい内容は、それぞれの会社のウェブサイトをご覧ください。これらの会社では、地盤沈下対策などの共通の課題に対して、必要な地下情報の共同管理をはじめとして、各種の情報交流、共同研究を長年行うなど、貴重な地下資源に関する地場産業の発展のために互いに交流・協力しているということです。



第7図 上総層群の層序
主に三梨・山内(1988)、鈴木ほか(1995)、中嶋・渡辺(2005)より編集。A. 地層名, B. 主要な火山灰鍵層, C. 古地磁気層序(黒: 正磁極期, 白: 逆磁極期), D. 古地磁気層序名称。

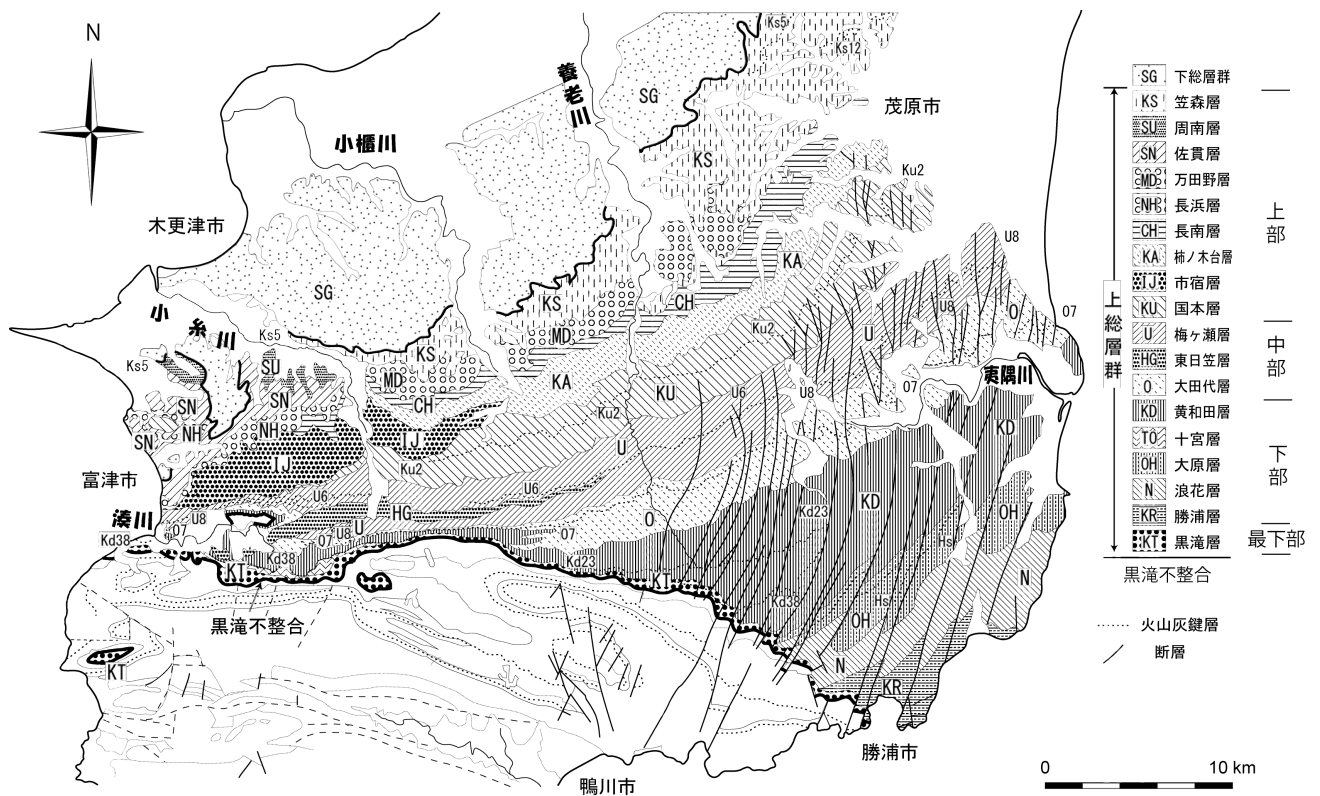
4. 天然ガスやヨウ素の産出母体である上総層群とは

4.1 上総層群の分布の特徴

南関東ガス田で天然ガスやヨウ素を地下からもたらすかん水を供給する地層、母体となっている地層は、今から約250万年前から45万年前の第四紀更新世という時代に海底で形成された上総層群という地層です。実際の資源は地下に分布する上総層群からかん水を揚水して採取するのですが、この上総層群は地下から連続する形で房総半島の

地表にも広く分布しています。この上総層群の地表での層序と分布域の地質図を第7図と第8図に示します。

地質図からわかるように、地表の上総層群は、房総半島中部域に東北東-西南西方向に伸びながら広く整然と分布しています。また、全体が北西方向(東京湾方向)にゆるく緩きながら地層が重なっており、上位の地層ほどより東京湾に近い地域に分布しています。そして主要な河川が、蛇



第8図 上総層群分布域の地質図
主に三梨・山内(1988), 鈴木ほか(1995), 中嶋・渡辺(2005)より編集。

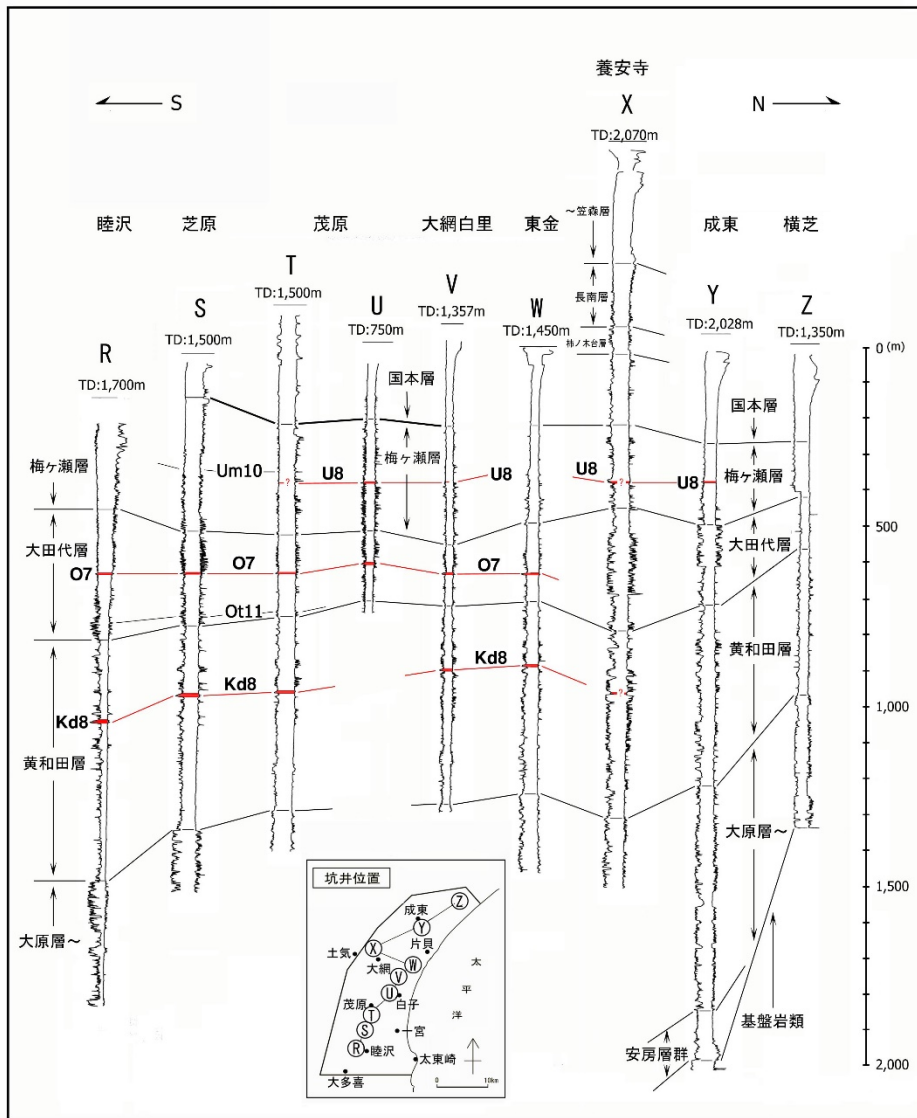
行しながらこれらの地層をほぼ南北に横切るように横断し流下していることから、地層の露出に恵まれています。さらに、火山灰鍵層とよばれる広域的に追跡可能な特徴的な火山灰層(テフラ)が上総層群の地層中に多数挟まれていることなどから、火山灰鍵層入りの大変詳しい地質図が出版されてきました。その結果、これまでに層序・堆積・年代・古生物・古地磁気など幅広い分野で数多くの研究がなされ、それらに基づいた先進的な成果が多数報告されてきました(たとえば、鈴木ほか(1995), 伊藤(1997), 徳橋・渡辺(2008)などの総括的報告を参照)。また、房総半島の上総層群分布域の5万分の1地質図とその報告書としては、姉崎地域(徳橋・遠藤, 1984), 富津地域(中嶋・渡辺, 2005), 茂原地域(七山ほか, 2016), 上総大原地域(宇都宮・大井, 2019)があり、いずれも、そのときどきの最新の調査・研究に基づく成果がまとめられています。さらに、南関東ガス田の活発な生産地域である茂原地域~九十九里地域では、多くの生産井で測定された電気検層データを使って、地下での上総層群の広域的な岩相変化の解析が行われており(第9図), 地表と地下両者を含めた上総層群の層序の総括も行われています(第10図)。

第8図の地質図からわかりますように、上総層群は、

小櫃川^{おびつがわ}辺りから東方に向かって全体の厚さを急速に増大し、太平洋岸の東端部辺りでは3,000 mを超すといわれています。また、岩相も小櫃川辺りを境に特徴が異なる場合も多く、その場合は西部と東部で異なった地層名がつけられています(第7図)。第1図からわかりますように、南関東ガス田の主要な生産地域は房総半島の中部域~東部域(養老川流域~東海岸)に属していますので、ここではこの地域に分布する地層を中心に説明します。この地域に分布する厚い上総層群の地層は、この地域に形成された上総海盆という深い堆積盆を埋め立てて形成された地層であると考えられています(渡部ほか, 1987a, b; 伊藤, 1997)。

4.2 上総層群の地層の特徴

まず下位の三浦層群(安房層群)との間にみられる顕著な不整合(黒滝不整合)の直上を覆う最下部の黒滝層は、多くの場合礫岩を含む粗粒な堆積物から成ります(第11図)。一方、その上位に重なり上総層群の主部を占める下部(勝浦層~黄和田層)から中部(大田代層~梅ヶ瀬層)の地層は、上総海盆主部の堆積物で、大部分が砂岩層と泥岩層から構成されています。特に特徴的でかつ大きな割合を占めているのが、砂岩層と均質細粒な泥岩層が上下に繰り返し何度



第9図 茂原～九十九里地域の検層対比図
 国末ほか(2002)より引用。各検層カーブの左側が自然電位を、右側が比抵抗を示します。

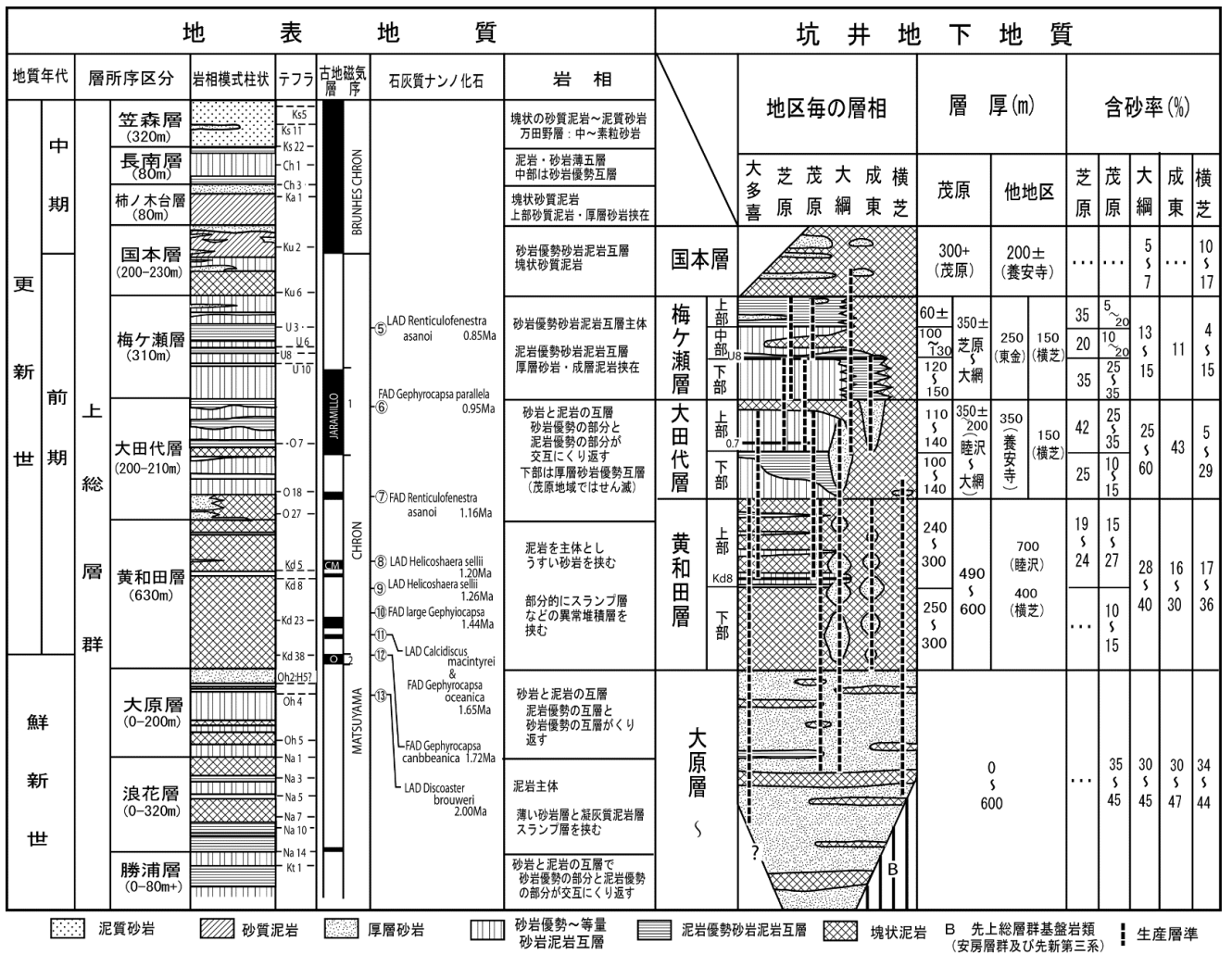
も重なり整然とした律動的な景観(縞模様)を与える地層で、砂岩泥岩互層もしくは砂泥互層とよばれています。上総層群の上部(国本層～笠森層)は、上総海盆の大陸斜面から陸棚で形成された上総海盆後期から末期の地層から構成され、やや粗粒な泥質岩が上位に向かってより粗粒で生痕化石に富む不均質な砂質泥岩層が主体の地層に変わり、最後は浅い沿岸域で形成された砂岩層へと変化しています。なお、国本層や長南層には、一部整然とした砂岩層も挟まれ、砂岩泥岩互層を呈する部分もあります。

上総層群のなかで、天然ガスやヨウ素の主要な供給源となっているのは中部から下部の地層で、特に岩相上最も重要なのは、砂岩泥岩互層(砂泥互層)です。このうち泥岩層は、泥岩を構成する粒子がゆっくりと海中を個別に沈降しながら時間をかけて堆積したもので、固結した現在の厚さで換算すると、上総層群中部の大田代層の場合で、平均して1年で約1mm(1,000年で約1m)の堆積速度で形成されたことがわかっています(辻ほか, 2005)。また、上総

層群上部の粗粒なあるいは砂質な泥岩層と違って、比較的細粒で均質な泥岩(中粒～細粒シルト岩)で特徴づけられています。これらの泥岩中には、深い海に生息していた底生有孔虫の化石が棲息時の状態で保存され、深い海で形成されたものであることがわかります(平山・鈴木, 1968)。このように深い海で、ゆっくりと時間をかけて堆積して形成された泥岩を専門的には半遠洋性泥岩と呼んでいます。

4.3 タービダイト砂岩層とは

このように砂岩泥岩互層(砂泥互層)を構成する泥岩層の断面が均質塊状であるのに対して、一方の砂岩層の断面には、流れに伴って形成されたと考えられる各種の模様(堆積構造)がみられるなど変化に富んでいます。これは砂岩層が、数十年から数百年に1回起きるような大地震の発生などによって、浅い海の大量の土砂(砂粒子など)が崩壊・流動化して発生した海底土石流などの密度の大きな流れが、大陸斜面に発達した海底谷に沿って加速しながら流下し、



第10図 上総層群の地表・地下における模式相層序図

国末ほか (2002) より引用。なお、2009年6月、国際地質科学連合 (IUGS) が、更新世の始まり、すなわち第四紀の始まりの年代を、カラブリアンの始まり (約180万年前) からその下位のジェラシアン (約258万年前) に変更したことから、上総層群は現在すべて更新世に入ります (第21図参照)。

最後に傾斜がゆるくて平坦な深い海盆地 (ここでは上総海盆地) に達したところで急速に減速するようになり、運搬してきた大量の土砂をその海底に流下しながら沈積させて形成されたからと考えられています。

このような重力によって流下する海底の流れを専門的にはタービディティー・カーレント (turbidity current; 日本語では、混濁流もしくは乱泥流) と呼んでいます。その堆積物である砂岩層は、専門的にはタービダイト (turbidite) もしくはタービダイト砂岩層と呼ばれています。なお、混濁流堆積物、乱泥流堆積物と呼ぶこともあります。表現のしやすさから、通常流れを表現する場合は混濁流や乱泥流を、その堆積物を表す場合は、タービダイトやタービダイト砂岩層という表現を使う場合が多く、ここでもその表現を用いています。タービダイト砂岩層は、海盆地を流れる混濁流が減速していくなかで、すなわち運搬能力が減衰し

ていくなかで、流れて運ばれてきた粒子群が沈積しながら形成されていくことから、上方に向かって細粒化していく級化構造という模様 (堆積構造) を有するのが最も基本的な特徴になっています。世界のタービダイト研究の経緯や房総のタービダイトの特徴については、徳橋 (2002, 2005, 2007, 2011) をご参照ください。

大田代層のタービダイト砂岩層中には、浅海域で棲息していた底生有孔虫化石が、多くの場合破損あるいは摩耗した状態で含まれていることが知られ、浅海域から運ばれてきた砂岩層であることがわかります (平山・鈴木, 1968)。タービダイト砂岩層は、混濁流という流れによって運搬され、比較的平坦な海盆地を流動しながら堆積した砂岩層であることから、1枚1枚の砂岩層が連続性に優れているのも重要な特徴です。上総層群のタービダイト砂岩層も、泥岩層に挟まれた特徴を異にする火山灰鍵層の対比・追跡に



第 11 図 上総層群基底の黒滝不整合と最下部の黒滝層
黒滝不整合（人物の頭部の位置付近）を境に，下位の安房層群（三浦層群）清澄層（タービダイト砂岩優勢砂岩泥岩互層）を礫岩主体の上総層群最下部の黒滝層が覆っています。勝浦市吉尾漁港東方のボラノ鼻にて。

よって，横方向に 30 km 前後追跡されるものも珍しくありません（平山・鈴木，1968；Hirayama and Nakajima, 1977）。

4.4 砂岩泥岩互層（砂泥互層）のタイプ

同じ地域でも，砂岩泥岩互層を構成する砂岩層の厚さは多様で，厚さ数 m～10 m の非常に厚いものから，厚さ 1 cm～数 cm 前後の非常に薄いものまでありますが，これは主にタービダイト砂岩層を運搬し堆積した混濁流に大規模なものから小規模なものまであり，その規模を反映したものと考えられています。ただ厚さは違っても，個々の砂岩層が形成される時間は非常に短く，通常の規模の混濁流の場合，数時間から数日程度と考えられています（Kubo *et al.*, 1998）。このように，堆積様式・形成機構が全く異なる砂岩層と泥岩層では，見た目の特徴のみならず，堆積に要する時間も全く異なることがわかります。

ところで，地層中の砂岩泥岩互層にはいくつかのタイプが認められます。たとえば，厚さ 1 m～数 m の厚いタービダイト砂岩層が主体となって砂岩層が卓越する砂岩泥岩互層の場合は，砂岩優勢砂岩泥岩互層（砂勝ち互層）といいます（第 12 図）。また厚い砂岩層は，規模の大きな混濁流に

よって運搬されてきたことから，流動際のエネルギーが高く，しばしば流下の際に当時の海底の泥層を大なり小なり浸食する現象がみられます。その結果，砂岩優勢砂岩泥岩互層の断面をみると，個々の厚い砂岩層の基底では，下位の泥岩層を浸食している現象がしばしば観察されます。また砂岩層の断面には，混濁流が海底面を形成していた泥層を流下中に浸食してできた大小の破片（泥岩片；泥岩偽礫ともいいます）がしばしば観察されます。

一方，タービダイト砂岩層の厚さが数 10 cm 以下の比較的薄い砂岩層が主体で泥岩層が卓越する場合は，泥岩優勢砂岩泥岩互層（泥勝ち互層）といいます（第 13 図）。また，同じような厚さの砂岩層と泥岩層が上下に重なる場合は，砂岩泥岩等量互層（等量互層）といいます（第 14 図）。実際の砂岩泥岩互層の場合には，いろいろな厚さのタービダイト砂岩層が上下にまじりあい，単純に泥岩優勢砂岩泥岩互層，砂岩泥岩等量互層，砂岩優勢砂岩泥岩互層と割り切れない場合もしばしばあります（第 15 図）。

現在の世界の海洋の堆積盆地では，大陸斜面を切る海底谷の出口の周辺一帯に大小の海底扇状地が発達していることが知られています。この海底扇状地は，海底谷を何百回，何千回となく繰り返して流下した混濁流によって形成さ



第12図 タービダイト砂岩優勢砂岩泥岩互層（砂勝ち互層）
褐色～灰褐色部がタービダイト砂岩層で、灰白色部が泥岩層です。養老川中瀬遊歩道沿いの梅ヶ瀬層最下部の地層（大多喜町葛藤）。



第13図 泥岩優勢砂岩泥岩互層（泥勝ち互層）
灰白色部が泥岩層で、暗褐色部がタービダイト砂岩層です。いすみ市文化とスポーツの森にて（いすみ市深谷）。



第 14 図 タービダイト砂岩泥岩等量互層 (等量互層)
大田代層の O7 火山灰鍵層の直上に発達する等量互層。出っ張っている部分が泥岩層で、凹んでいる部分がタービダイト砂岩層です。夷隅川支流紙敷川沿いの紙敷橋近く (大多喜町紙敷)。



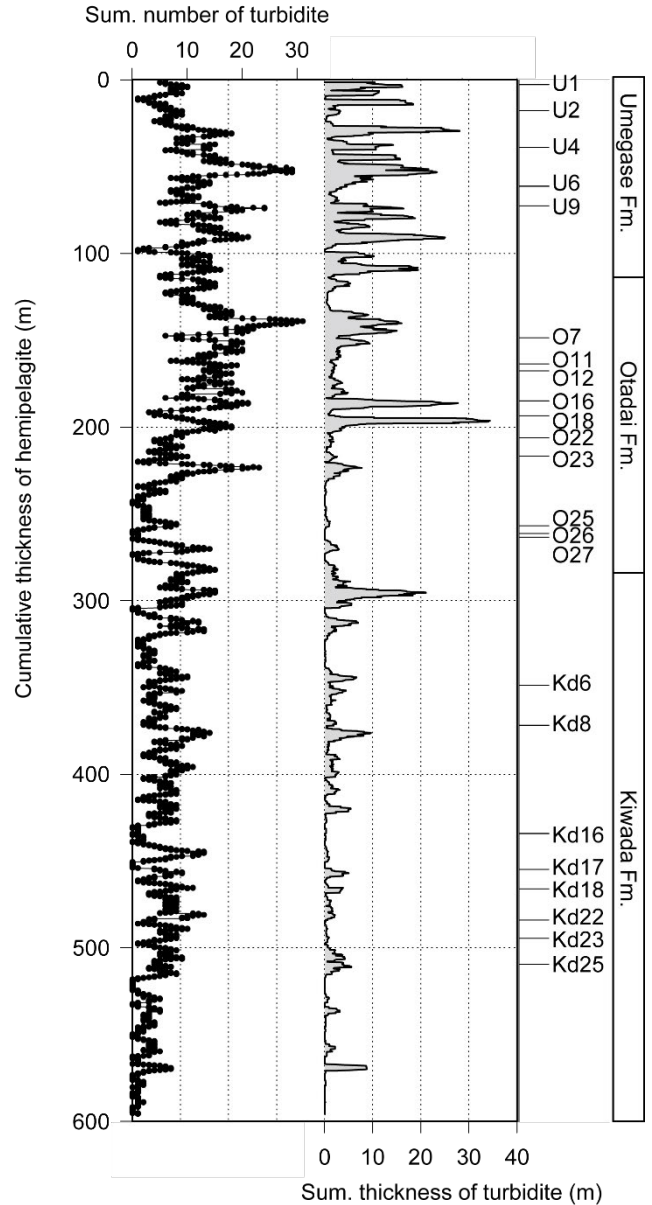
第 15 図 不規則なタイプの砂岩泥岩互層。
白色の部分が泥岩層で、黒色から暗褐色の部分がタービダイト砂岩層。下位から上位へ、等量互層、泥岩優勢互層、タービダイト砂岩優勢互層、スランプ状再堆積性泥岩を含む泥岩優勢互層と細かく変化しています。君津市蔵玉の蔵玉作業道沿いにみられる大田代層の O7 火山灰鍵層の下位の地層。

れたタービダイトによる堆積地形であることがわかっています。タービダイト砂岩泥岩互層が主体となっている上総層群中部の大田代層と梅ヶ瀬層も、上総海盆底に海底扇状地を形成しながら堆積していったものと考えられています(渡部ほか, 1987a, b; 伊藤, 1997; 国末ほか, 2002; 三田ほか, 2003)。

4.5 砂岩泥岩互層(砂泥互層)のタイプを決める要因は

上総層群にみられるいろいろなタイプの砂岩泥岩互層の積み重なり方は、一見すると不規則にみえますが、タービダイト砂岩層と泥岩層(半遠洋性泥岩層)の上下方向での重なり方を、かなりの厚さにわたって連続的にそして数量化して解析すると一定の周期(サイクル)が存在することがわかってきました。たとえば、増田ほか(1989)は、あるルートでの大田代層上部~国本層最下部(約190万年前の火山灰鍵層O18付近~約90万年前の火山灰鍵層Ku5b付近まで)を構成するタービダイト砂岩泥岩互層の1枚1枚の砂岩層と泥岩層の厚さを測定し、その結果を基にタービダイト砂岩層の厚さの上下方向での連続的な変化を解析しました。その結果、ミランコビッチサイクルに相当する約40万年、10万年、4万年、2万年の周期が見いだされることを初めて明らかにしました。このうち40万年と10万年の周期は太陽の周りを回る地球軌道の離心率の変動周期に対応し、4万年および2万年は、それぞれ地球の地軸の傾きの変動周期と地球の自転軸の向きの変動を示す歳差運動の周期に対応すると指摘しました。そして今日、地質時代を通じて地球表面でみられる氷河性海水準変動が、ミランコビッチサイクルと連動していることが広く知られており、海水準が下がった時期に厚いタービダイト砂岩層(タービダイト砂岩優勢互層)が形成されたと解釈されています。今回解析した大田代層上部から国本層最下部の場合も、これらの地層中の化石に基づく古環境解析結果と矛盾しないことから、このような解釈が適用されるとしました。

一方徳橋ほか(2001)は、黄和田層から梅ヶ瀬層に至るタービダイト砂岩泥岩互層を構成する個々の砂岩層と泥岩層の厚さの変化を連続的に測定し、そのデータを基に、一定の厚さの泥岩層(一定の堆積時間と仮定)中のタービダイト砂岩層の枚数と積算層厚の上下方向での変化を解析する時系列解析を行いました。その結果、ミランコビッチサイクルに相当すると考えられる10万年前後と数万年(1万年から4万年)前後の2つのオーダーの周期が認められることを示しました(第16図)。そしてこのようなミランコビッチサイクルに相当するサイクルは、上総層群の下位の安房層群(三浦層群)のタービダイト砂岩泥岩互層(清澄層・安



第16図 黄和田層から梅ヶ瀬層を構成するタービダイト砂岩泥岩互層の時系列解析結果
厚さ5mの積算泥岩層中に挟まれるタービダイト砂岩層の積算枚数(左側)と積算層厚(右側)の上下方向での変化を表現しています。徳橋ほか(2001)より引用。

野層)や新潟堆積盆に分布する新第三紀のタービダイト砂岩泥岩互層にも共通して認められることを、それぞれの時系列解析結果を通して指摘しています。

さらに、辻ほか(1999, 2005)では、連続的なコア試料(長さ約350m)として採取した大田代層上部から梅ヶ瀬層下部のタービダイト砂岩泥岩互層を構成する砂岩層泥岩層の上下方向の厚さの変化の解析に、泥岩(半遠洋性泥岩)中の有孔虫化石の詳細な酸素同位体分析結果などを加えて、タービダイト砂岩層の厚さと海水準変動との

関係を、すなわち海水準の低い時期に厚いタービダイト砂岩層が形成される傾向があることを、初めて直接的、具体的に明らかにしました。

このように、上総層群のタービダイト砂岩泥岩互層のタイプの上下方向での変化には、ミランコビッチサイクルが認められることから、第一にその当時の海水準変動を反映していること、その結果、大雑把にいて、砂岩優勢互層(砂勝ち互層)は地球表面の海水準の下がった時期(寒冷な時期)に、逆に泥岩優勢互層(泥勝ち互層)は地球表面の海水準の上昇した時期(温暖な時期)に形成されたこと、すなわち地球表面の環境変動を反映したものであるといえます。ただ実際の砂岩泥岩互層では、ミランコビッチサイクルのいくつかの異なった周期の複合的な効果を反映していることや供給源となる浅海域の砂層の発達状況(供給能力)や突発的な事象の発生といった偶然性にも左右されることから、上下方向での岩相の変化はかなり複雑なものになっているといえます。

4.6 スランプ堆積物とは

上総層群の下部や中部の地層には、この他に、スランプ

堆積物(スランプ層あるいは単にスランプともいいます)というものがあります。タービダイト砂岩層が、砂などの個々の粒子の集合体の流れ(混濁流、乱泥流)の堆積物であるのに対して、スランプ堆積物は、一度海底の斜面などに塊状の泥層や砂泥互層などとして堆積したものが、何らかの理由で海底下の地層中にできたすべり面を境にその上位の地層がまとまって下方に再移動し、別のところに再堆積した海底地すべり堆積物のことです。スランプ堆積物は、移動途中の剪断応力による圧縮や引っ張りなどの作用によって、元の地層のさまざまな変形体や破断した大小のブロック片の集合体であるのが、その特徴です(第17図~第19図)。スランプ堆積物の規模は、厚さ数mの小規模なものから厚さ数10mの大規模なものまで様々で、上総層群のいろんな層準の地層に含まれています(小池, 1955)。特に大規模なスランプ堆積物の発達が、黄和田層やその下位の大原層に知られています(Utsunomiya, 2018; 宇都宮・大井, 2019)。なお、スランプ堆積物の規模や発生する時期などを規制する要因については、まだ十分明らかにされていません。



第17図 横臥褶曲状の変形体を有するスランプ堆積物
横臥褶曲状に変形した厚さ1m前後のタービダイト砂岩層(褐色部で葉理が発達している)を含む大きな泥岩ブロックが、厚さ20m以上のスランプ堆積物の一部として観察されます。勝浦層の一部で、勝浦市^{へばら}部原海岸の北方で見られます。



第18図 スランプ堆積物とタービダイト砂岩優勢互層
勝浦層の一部で、下部のタービダイト砂岩優勢互層を一部削り込むように、上位の横臥褶曲状変形体を含むスランプ堆積物が覆っています。勝浦市川津の愛宕権現の下付近の海食崖。



第19図 養老川河床面にみられるスランプ堆積物
水の作用によって、泥岩層に対して砂岩層がより削られやすいという違いを反映して、スランプ堆積物の分布域では内部の複雑な変形構造が河床面に浮かび上がっています。一方、それを覆う右側の泥岩優勢互層分布域では、整然とした直線状の層理面の模様がみられます。養老川の中瀬遊歩道沿いでみられる大田代層上部の地層(大多喜町葛藤)。

4.7 岩相と資源供給ポテンシャルとの関係

最も代表的なタービダイト砂岩泥岩互層から成る地層は、上総層群中部の大田代層と梅ヶ瀬層ですが、これらの地層は地表でも地下でも広く分布し、天然ガスとヨウ素を地表にもたらすかん水の主要な供給源となっています。このことは、泥岩層に比べて固結度が低く高い孔隙率を有するタービダイト砂岩層の浸透率が高いために、かん水の供給の大部分が井戸の孔壁のタービダイト砂岩層を経由するためと考えられます。また、個々のタービダイト砂岩層は地下の広い範囲に連続的に分布していることがわかっていますから、タービダイト砂岩層のかん水の供給ポテンシャルは非常に高いことが予想されます。

また天然ガスのポテンシャルとしては、砂岩層の存在とともに泥岩層の存在が重要であることも昔から指摘されています。たとえば河井(1961)は、房総半島の中央部や東部などの高い天然ガスポテンシャルを有する地域は、深い海で形成された上総層群の泥岩層が分布する地域であることを指摘し、今日でいう半遠洋性泥岩の堆積様式が有機物の堆積や保存に適し、ガスの母層として最も重要であると強調しています。また、房総中央部にみられる砂岩泥岩互層の分布域では、高い淘汰度と良好な孔隙率、浸透率を有する未固結の砂岩層が、ガスに富む泥岩層とセットになっていることから、梅ヶ瀬層以下の砂岩泥岩互層が天然ガスの重要な供給源になっていると指摘しています。また、互層中の砂岩層は再堆積性の堆積物であり、当時国内ではまだごく一部の堆積学者や海洋地質学者によって運搬営力として注目され始めたばかりのタービディティ・カーレント説や重力流説に言及するなど、極めて先見的な見解を示しています。その後、国末ほか(2002)や三田ほか(2003)では、地表資料に地下資料を加えて、砂岩泥岩互層のタイプの広域的分布様式をかつての堆積環境との関連で論じ、当時の堆積環境とガス水比の間に密接な関係があることを指摘しています。

また中川ほか(2006)では、揚水による生産井の側壁を通してのタービダイト砂岩層からのかん水の優先的流出によって砂岩層中の間隙水圧が低下し、その結果上下の泥岩層中の間隙水が砂岩層に移動することを指摘するとともに、泥水検層によって存在が確かめられている泥岩層中の遊離ガスが上下の砂岩層中に移動するプロセスを、関連する実験結果を踏まえながら毛細管圧力と浮力に注目して具体的に議論しています。

大田代層下位に位置する黄和田層は、薄いタービダイト砂岩層を挟む泥岩優勢互層が主体ですが、一部にタービダイト砂岩優勢な砂岩泥岩互層を挟み、大田代層や梅ヶ瀬層

に次ぐ天然ガスとヨウ素の重要な供給源となっています。黄和田層には、何枚かの大規模なスランプ堆積物が挟まれていることが知られていますが(Utsunomiya, 2018; 宇都宮・大井, 2019)、スランプ堆積物のかん水供給ポテンシャルについてはよくわかっていません。スランプ堆積物には、変形あるいはブロック化した砂岩層が含まれていることから、一定のかん水供給能力はあると思いますが、上下・横方向への地層の特徴の変化が激しいことから、場所によるポテンシャルの変動も大きいことが予想されます。なお黄和田層の場合、一見泥岩層とみられるものも、よく観察すると泥岩の破片やその変形体(流状変形体も含む)の集合体であったり、あるいは横方向に泥岩破片に富むタービダイト砂岩層に変化するなど、再堆積性の堆積物(いわば“泥岩もどき”)であることも多いことから、観察する際に注意が必要です(第20図)。



第20図 養老川沿いの崩落崖に露出する黄和田層
白色部は泥岩で暗褐色部はタービダイト砂岩。崖の上部には横臥褶曲状に、あるいは折りたたまれるように変形した泥岩層がタービダイト砂岩層中に含まれている様子が、中部には大小の泥岩ブロックが密集している様子が、また下部には、大小の泥岩破片がタービダイト砂岩中に浮かぶように散在している様子がうかがえます。崖の高さは約20m前後。なお、左側にみられる垂直に近い直線は、断層(面)ではなく節理(面)です。養老川沿いに伸びる粟又の滝遊歩道から撮影。大多喜町粟又。

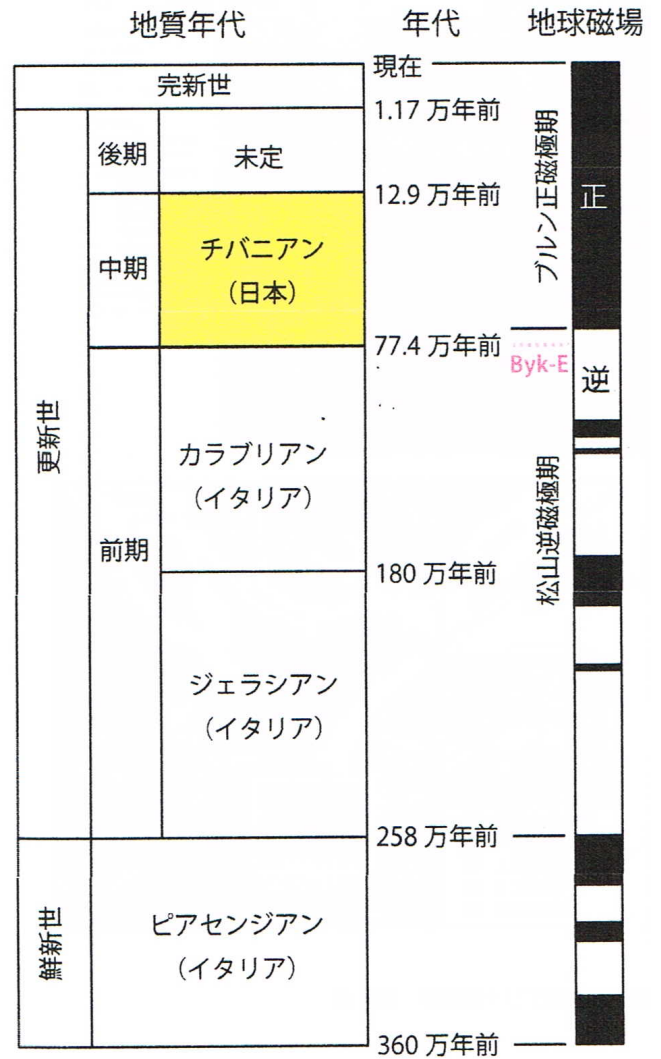
上総層群下部の大原層や勝浦層もタービダイト砂岩泥岩互層から構成され、やはりこれらの資源の供給源になっています。ただ、これらの地層の分布域が陸域では半島の東端部付近に限られることもあり、供給量は限られていることが考えられます。

4.8 茂原型産出挙動や高いヨウ素濃度の成因は

なお、南関東ガス田で天然ガスの生産量に大きく寄与している茂原型産出が、なぜ茂原周辺で特に梅ヶ瀬層や大田代層などの浅層で仕上げた場合にみられるのか、また、南関東ガス田のヨウ素生産に大きく寄与しているかん水中の高いヨウ素濃度の成因は何によるのか、といった疑問については、基本的な問題として古くから注目され議論されてきましたが、近年、現場での生産活動に長年携わってきた地質技術者により、地下の地質関連データ(岩相・層厚・断層など)を広く収集し解析した結果に基づいて、いくつかの具体的なアイデアが出されています(国末ほか, 2002; 三田ほか, 2003; 三田ほか, 2006)。関心のある方は、是非ご参照ください。

5. おわりに：チバニアンの設定で世界的に注目される上総層群

2020年1月17日(金)、韓国釜山で開催された IUGS (国際地質科学連合)において、千葉県市原市田淵の養老川沿いに露出する上総層群上部の国本層の一部の地層が、第四紀(約258万年前から現在)のなかの更新世中期(約77.4万年前～約12.9万年前)の基底を決める GSSP(Global Boundary Stratotype Section and Point: 国際境界模式層断面とポイント)として承認されました。これにより、この時代がチバニアン(Chibanian)とよばれることになりました(第21図)。地質時代を決める地層として国内の地層が認定され、日本由来の名前がつけられたのはこれが初めてという快挙となりました。養老川沿いに露出するこの地層は、マツヤマ逆磁気期～ブルン(ブリュンヌ)正磁極期への変換を記録する地層(古地磁気逆転地層)としていくつかの地図上に記載されるなど従来から知られていましたが、2018年10月には国の天然記念物にも指定されました。そして、この地層がチバニアンのGSSPとなつてからは、千葉セクションとよばれることになりました。このチバニアン成立の過程や千葉セクションに関連した主な研究成果については、千葉セクションGSSP提案チーム(2019)、菅沼(2020)、板木(2020)、岡田(2021)などをご参照ください。



第21図 チバニアン前後の地質年代表
かっこ内は、模式層(GSSP)のある国の名前を示します。
板木(2020)より引用。

このように上総層群は、南関東ガス田の供給母体として、長年人間生活に潤いをもたらす重要な地層としての役割を果たしてきましたが、最近ではひとつの地質時代の基準を与える地層として、学術分野でも希少な価値を有する地層であることが世界的に認知されるに至りました。この結果、社会的認知度も上がり、一般の人からも注目されるようになったのが今日の状況であるといえます。

謝辞：本報告を作成するにあたり、石油学会(第1図)、天然ガス鉱業会・京葉天然ガス協議会(第2図、第3図、第5図、第6図)、天然ガス鉱業会(第4図)、石油技術協会(第9図、第10図、第16図)、産業技術総合研究所地質調査総合センター(第21図)が著作権を有する図面を転載させていただきました。また、関東天然瓦斯開発株式会

社の国末彰司氏には、原稿に目を通していただき、多くの有用なコメントをいただきました。地圏資源環境研究部門長の今泉博之氏には、本シリーズを執筆するきっかけを与えていただきました。これらの機関、個人に厚くお礼を申し上げます。

文 献

- 千葉セクション GSSP 提案チーム (2019) 千葉セクション：下部－中部更新統境界の国際境界模式層断面とポイントへの提案書 (要約). 地質学雑誌, **125**, 5-22.
- Hirayama, J. and Nakajima, T. (1977) Analytical study of turbidites, Otadai Formation, Boso Peninsula, Japan. *Sedimentology*, **24**, 747-779.
- 平山次郎・鈴木尉元 (1968) 単層の解析－その実際と堆積学的意義について－. 地球科学, **22**, 43-62.
- 本間敏夫 (1987) 水溶性天然ガスの開発技術：水溶性天然ガス開発基礎講座 (その1). 天然ガス, **30**, no. 8, 2-18.
- 本間敏夫・山上英夫 (1968) 千葉県下のガス田開発に関する一般的問題点について. 石油技術協会誌, **33**, 97-101.
- 石和田靖章・本島公司 (1960) 茂原ガス田における坑底圧力結果. 地質調査所月報, **11**, 183-187.
- 板木拓也 (2020) 日本初の GSSP：千葉セクションとチバニアン. GSJ 地質ニュース, **9**, 185-191.
- 伊藤 慎 (1997) 上総丘陵の地質. 千葉県の自然誌, 本編 2, 千葉県の大い, 第 2 章第 5 節, 201-239, 千葉県, 823p.
- 金子信行 (2003) メタン生成アーケア (古細菌). 石油技術協会誌, **68**, 450-457.
- 金子信行 (2005) 千葉県の天然ガス・ヨウ素資源. 地質ニュース, no. 605, 33-35.
- 河井興三 (1961) 南関東ガス田地帯についての鉱床地質学的研究. 石油技術協会誌, **26**, 212-266.
- 木村 健・小勝 武・田崎義行 (1993) 南関東ガス田産出挙動の貯留層パラメータ・センシティブティ. 石油技術協会誌, **58**, 447-455.
- 小池 清 (1955) いわゆる層間異常の地史的意義について. 地質学雑誌, **61**, 566-582.
- Kubo, Y., Masuda, F., Tokuhashi, S. and Sakai, T (1998) Spatial variation in paleocurrent velocities estimated from a turbidite bed of the Mio-Pliocene Kiyosumi Formation in Boso Peninsula, Japan. *Journal of the Geological Society of Japan*, **104**, 359-364.
- 国末彰司 (2010) わが国における水溶性天然ガスの開発－特に千葉県の状況を中心に－. PETROTECH, **33**, 177-181.
- 国末彰司・三田 勲・和気史典 (2002) 千葉県茂原ガス田の地下地質と水溶性天然ガス・ヨウ素の生産性について. 石油技術協会誌, **67**, 83-96.
- 増田富士雄・桂 雄三・渡辺幸一・吉野 隆・伊藤 慎 (1989) タービダイト層に記録されたミランコビッチ周期：房総半島の鮮新－更新統上総層群. 堆積学研究会報, no. 31, 43-48.
- 三田 勲・和気史典・国末彰司 (2003) 九十九里地域におけるガス水比およびヨウ素濃度を規制する要因－特に海底扇状地堆積物および断層が果たす役割について－. 石油技術協会誌, **68**, 111-123.
- 三田 勲・樋口康則・樋口朋之 (2006) ヨウ素を含有するかん水の濃集機構. 日本海水学会誌, **60**, 91-97.
- 三梨 昂・山内靖喜 (1988) 上総層群の堆積盆の形成機構. 地質学論集, no. 30, 67-75.
- 持丸華子・鎌形洋一 (2006) 天然ガス・油田地帯の地下古海水中に生息する微生物の生態解明. 日本海水学会誌, **60**, 98-104.
- 中川 勉・小勝 武・田崎義行 (2006) 茂原型水溶性ガス田の産出挙動における毛細管圧力と浮力の働きについて. 石油技術協会誌, **71**, 582-590.
- 中嶋輝允・渡辺真人 (2005) 富津地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 産総研地質調査総合センター, 102p.
- 七山 太・中里裕臣・中島 礼 (2016) 茂原地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 産総研地質調査総合センター, 101p.
- 岡田 誠 (2021) チバニアン誕生：方位磁針の N 極が南をさす時代へ. ポプラ社, 東京, 207p.
- 佐脇貴幸・金子信行・前川竜男・猪狩俊一郎 (2015) 燃料資源図「関東地方」. 燃料資源図 FR-3, 産総研地質調査総合センター.
- 佐脇貴幸・金子信行・前川竜男・猪狩俊一郎 (2016) 燃料資源図「関東地方」について. GSJ 地質ニュース, **5**, 45-49.
- 菅沼悠介 (2020) 地磁気逆転と「チバニアン」－地球の磁場は、なぜ逆転するのか (ブルーボックス (B2132)). 講談社, 東京, 258p.
- 鈴木尉元・小玉喜三郎・三梨 昂・岡 重文・ト部厚志・遠藤 毅・堀口万吉・江藤哲人・菊池隆男・山内靖

- 喜・中嶋輝允・徳橋秀一・楡井 久・原 雄・中山俊雄・奈須紀幸・加賀美英雄・木村政昭・本座栄一 (1995) 10万分の1東京湾とその周辺地域の地質 (第2版) 説明書. 特殊地質図 (20), 地質調査所, 109p.
- 田崎義行 (1994) 関東堆積盆地に賦存する水溶性天然ガスの開発に関する油層工学的研究. 早稲田大学博士論文, 121p.
- 天然ガス鉱業会・京葉天然ガス協議会 (2019) 千葉県天然ガスとヨウ素 (2019.01版). 天然ガス鉱業会・京葉天然ガス協議会, 東京, 14p.
- 徳橋秀一 (2002) タービダイトの話 (地質ニュース復刻版). 実業公報社, 東京, 251p.
- 徳橋秀一 (2005) タービダイトの話—房総半島はタービダイトの一大宝庫です—. 地質ニュース, no. 605, 18-23.
- 徳橋秀一 (2007) “turbidity current” と “turbidite” の用語をめぐる混乱をいかに克服するか—これらの用語の定義に関する歴史的一考察—. 石油技術協会誌, 72, 26-39.
- 徳橋秀一 (2011) 地質ニュース復刻版第2弾ご地層の話—地層観察・地質調査・露頭保存の重要性を唱えつつ—. 実業公報社, 東京, 203p.
- 徳橋秀一・遠藤秀典 (1984) 姉崎地域の地質, 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅), 工業技術院地質調査所, 136p.
- 徳橋秀一・渡辺真人 (2008) 4.2.1 房総地域の上総層群. 日本地質学会編, 日本地方地質誌3, 関東地方, 281-292, 朝倉書店, 東京, 570p.
- 徳橋秀一・クリストファー M. アギンギー・宮田雄一郎・石原与四郎・三田 勲 (2001) タービダイト砂岩分布予測のための堆積学的・岩石学的・数理学的研究—新潟および房総における解析例. 石油技術協会誌, 66, 81-94.
- 辻 隆司・宮田雄一郎・中水 勝 (1999) 堆積物中に残された周期性を利用した年代層序の可能性. 石油技術協会誌, 64, 94-106.
- 辻 隆司・宮田雄一郎・岡田 誠・三田 勲・中川 洋・佐藤由理・中水 勝 (2005) 房総半島に分布する下部更新統上総層群大田代層と梅ヶ瀬層の高精度堆積年代—石油公団研究井 TR-3 コアの酸素同位体比・古地磁気・石灰質ナノ化石に基づく年代層序—. 地質学雑誌, 111, 1-20.
- 上野道隆・椎名 清・本間敏夫・品田芳二郎・樋口 豊 (1964) 茂原ガス田の最近の開発事情と2, 3の問題点. 石油技術協会誌, 29, 39-47.
- Utsunomiya, M. (2018) Distribution, age, and origin of a submarine landslide deposit in the Pleistocene Kiwada Formation, forearc basin fill on the Peninsula, east central Japan: Constraints from tephro- and biostratigraphy. *Island Arc*, 27, e12254. doi:10.1111/iar.12254
- 宇都宮正志・大井信三 (2019) 上総大原地域の地質. 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅), 産総研地質調査総合センター, 127p.
- 渡部景隆・増田富士雄・桂 雄三・岡崎浩子 (1987a) 関東地方の自然環境の移り変わり (1). 地学教育, 40, 1-12.
- 渡部景隆・増田富士雄・桂 雄三・岡崎浩子 (1987b) 関東地方の自然環境の移り変わり (2). 地学教育, 40, 79-90.
- ヨウ素学会 (2020) 日本にたくさんある資源って何だろう? それはヨウ素!! 普及用小冊子, ヨウ素学会, 千葉, 35p.

TOKUHASHI Shuichi (2022) What is the attractiveness of geologic excursions by JAPT (the Japanese Association for Petroleum Technology) in the Southern Kanto Gas Field? Part 1: Outline of the Southern Kanto Gas Field.

(受付：2022年1月17日)