論 説
 Original Article

ガス炭素同位体組成からみた北蒲原地域における炭化水素の移動・集積*

早稲田 周**・岩野 裕継**・浅利 康介***

(Received October 4, 2010 ; accepted January 12, 2011)

Migration and accumulation of hydrocarbons in the Kitakanbara area, Niigata, Japan, based on gas carbon isotope compositions

Amane Waseda, Hirotugu Iwano and Yasuyuki Asari

Abstract : Molecular and isotope compositions of gas samples from oil and gas fields, and two exploration wells in the Kitakanbara area were analyzed. Most gases are classified into mixture of microbial and thermogenic gases. Maturity assessments of the reservoir gases were performed using ethane and propane carbon isotope compositions in two representative fields in the area, the Iwafuneoki and Higashiniigata fields. In both fields, vertical migration of thermogenic gas through a large fault system is inferred. In one exploration well, thermogenic gas migration to reservoir horizons was observed based on the carbon isotope composition of headspace gas, mud gas and drill stem test gas samples. On the other hand, no migration of thermogenic gas was detected in the other exploration well, despite hydrocarbons are deposited in the Higashiniigata field located in the updip of the well, suggesting that hydrocarbons passed through a deeper level below the total depth of the well. These results suggest that the hydrocarbons generally migrated laterally within the source horizons and did not migrate vertically into shallower reservoir horizons until the hydrocarbons reached the large fault systems.

Keywords : gas, carbon isotope, origin, maturity, migration, biodegradation, Kitakanbara area

1. はじめに

天然ガスの炭化水素組成、炭素同位体組成からはガスの起源・熟成度・微生物分解などの情報が得られる (Fuex, 1977 ; Schoell, 1983 ; Berner and Faber, 1996 ; Waseda and Iwano, 2008 など)。坑井掘削時には、ヘッドスペースガス法によりカッティングス吸着ガスを一定間隔で採取・分析することにより、地層中のガスの起源や熟成度の深度変化を把握することができる (早稲田・重川, 1988b)。近年では、泥水検層ラインからマッドガスを深度に対して高密度で採取することにより、貯留層内での組成変化を検知することができるようになってきた (Tilley *et al.*, 2002 ; Ellis *et al.*, 2003 ; 早稲田, 2009)。

本論文では、新潟県北蒲原地域の油・ガス田から採取された生産ガスについて、炭化水素組成、炭素同位体組成からガスの起源、熟成度などについてまとめたあと、海域で

2008 年に掘削された試掘井 2 坑から採取されたヘッドスペースガス、マッドガス、DST ガスの炭化水素組成・炭素同位体組成から熱分解起源ガスの移動の有無について考察する。さらに、岩船沖油・ガス田および東新潟ガス田への炭化水素の移動・集積について、生産ガスの炭素同位体組成から検討する。

2. 試料および分析法

ガス試料を採取した北蒲原地域の油・ガス田の分布と試掘井の聖籠沖 MS-1 号井および阿賀野川沖 MS-1 号井の位置を図 1 に示す。生産ガスの分析を実施したのは、陸域の東新潟ガス田、紫雲寺ガス田、新胎内ガス田、平木田ガス田、海域の阿賀沖油・ガス田、岩船沖油・ガス田である。これらの油・ガス田を含む新潟堆積盆地に胚胎する油・ガスの根源岩層準は、七谷層～寺泊層の泥岩と考えられている (関口ほか, 1984)。平井ほか (1995) は特に下部寺泊層を北蒲原地域の根源岩層準と推定している。

坑井産出テストガス、生産ガスは、ガラス瓶に水上置換法で採取した。ヘッドスペースガス採取法の詳細については早稲田・岩野 (2007) を、マッドガス採取法については早稲田 (2009) をそれぞれ参照されたい。炭化水素組成の測定は、ガスクロマトグラフ (島津 GC-7A および Agilent GC 6890) を用いた。炭素同位体組成の測定は、安定同位

* 平成 22 年 6 月 9 日、平成 22 年度石油技術協会春季講演会、地質・探鉱部門シンポジウム「地層流体の移動と炭化水素の集積－最新の予測・評価技術－」で講演 This paper was presented at the 2010 JAPT Geology & Exploration Symposium entitled "Migration of Formation Fluids and Accumulation of Hydrocarbon : Latest Technologies for Prediction and Evaluation" held in Fukuoka, Japan, on June 9, 2010.

** 石油資源開発技術研究所 JAPET Research Center, Japan Petroleum Exploration Co., Ltd.

*** 石油資源開発技術研究所 Nagaoka Office, Japan Petroleum Exploration Co., Ltd.

る (Oremland *et al.*, 1988)。微生物起源のエタンは、 -50% 以下の軽い炭素同位体組成を持つ (Mattavelli *et al.*, 1992; Waseda and Didyk, 1995)。エタン炭素同位体組成について、微生物起源ガスの端成分を -54% 、熱分解起源ガスの端成分を -24% に想定して引いた混合ラインを図3に示す。全体的にはこの混合ラインに近い位置に多くのデータがプロットされる。しかし、混合ラインについては微生物起源ガスが90%を超えるまでは、エタン炭素同位体組成がほとんど変化していないのに対して、今回のデータが示すトレンドはメタン炭素同位体組成とエタン炭素同位体組成が相関しているようにみえる。同じ根源岩からガスが生成する場合、熟成度が高いほど炭素同位体組成は重くなることを考えると、メタンとエタンの間での炭素同位体組成の相関は、一般的に微生物起源ガスの混合量が少ない深部のガスほど、熱分解成分の熟成度が高い傾向があることを示唆している。

3.3 エタン炭素同位体組成とプロパン炭素同位体組成

エタン炭素同位体組成とプロパン炭素同位体組成によるガスの熟成度評価を図4に示す。メタン炭素同位体組成が、微生物起源ガスと熱分解起源ガスの混合割合に大きく規制されるのに対して、エタン・プロパン炭素同位体組成は、主に熱分解起源ガス生成時の根源岩の熟成度に規制されて変化する (早稲田ほか, 2002)。ただし、微生物起源ガスが主体の場合には、上記のようにエタン炭素同位体組成についても、軽い炭素同位体組成を持つ微生物起源エタンの影響を受ける場合がある (図4の左向き矢印)。また、プロパン炭素同位体組成については、微生物分解の影響により、異常に重い値を示す場合がある (図4の上向き矢印)。

図4 北蒲原地域油・ガス田生産ガスおよび坑井産出ガスのエタン炭素同位体組成とプロパン炭素同位体組成

印; James and Burns, 1984)。岩船沖油・ガス田および東新潟ガス田の一部試料に微生物起源エタンの影響が、東新潟ガス田と平木田ガス田の一部試料にプロパンの微生物分解の影響が、それぞれ認められる。これら以外の大部分のガスは熱分解起源ガスの熟成ライン近くにプロットされる。ただし、ほとんどの試料は図上で熟成ラインよりも右下にプロットされている。このことは、これらの試料がある熟成度で瞬間的に生成したものではなく、異なる熟成度で生成したガスの混合、あるいは広い熟成度範囲で生成したガスの累積したものであることを示唆する (早稲田・岩野, 2007)。大部分のガスが生成した熟成度はビトリナイト反射率 (R_0) 換算で $0.9 \sim 1.3\%$ 程度と見積もられる。

4. 試掘井のヘッドスペースガス、マッドガス、DST ガスの炭素同位体組成深度変化からみた炭化水素の移動

4.1 阿賀野川沖 MS-1 号井

阿賀野川沖 MS-1 号井におけるヘッドスペースガス、マッドガス、DST ガスのガス組成・炭素同位体組成の深度変化を図5に示す。メタン炭素同位体組成は、大部分が $-60 \sim -50\%$ 程度で変化しており、微生物起源ガスと熱分解起源ガスの混合であることを示す。No.1 DST が実施された部分とその直下ではメタン炭素同位体組成が -50% よりも重くなっており、熱分解起源ガス主体であることが分かる。No.2 DST の部分では微生物起源ガスと熱分解起源ガスの混合ガスが胚胎していると判断される。

DST が実施された部分では、上下の層準よりもエタン、プロパン炭素同位体組成が重く、ヘッドスペースガスのウェットネス (メタン～ブタンに対するエタン～ブタンの割合) が上昇している (図5)。この結果は、熱分解起源ガスが側方から両層準に選択的に移動してきていることを示す。

No.2 DST のメタン、エタン、プロパン炭素同位体組成は、近傍の阿賀野川沖・ガス田産出ガスの組成範囲に入っており (図2～図4)、阿賀野川沖・ガス田と同様にビトリナイト反射率 1.0% 程度 (図4) で根源岩から生成したガスが移動してきていることを示す。

4.2 聖籠沖 MS-1 号井

聖籠沖 MS-1 号井におけるヘッドスペースガス、マッドガス組成の深度変化を図6に示す。本井では DST は実施されなかった。メタン炭素同位体組成が浅部から掘止めまで -60% 前後で推移しており、微生物起源ガス主体であることを示す。エタンおよびプロパンの炭素同位体組成については、北蒲原地域油・ガス田産出ガスや阿賀野川沖 MS-1 号井の DST 試料が -30% より重い値を示すのに対して、本井のほとんどの試料は -30% より軽い値を示している。これは、本井の熱分解起源ガスについては、油・ガス田を形成するような大量の炭化水素が生成される熟成度よりも低い熟成度で、少量生成したガスであることを示唆する。また、本井におけるビトリナイト反射率の測定結果は、3,500 m 付近 (西山層最下部) から熟成帯に入っているこ

図5 阿賀野川沖 MS-1 号井における炭化水素組成・炭素同位体組成の深度変化

図6 聖籠沖 MS-1 号井における炭化水素組成・炭素同位体組成の深度変化

図7 岩船沖油・ガス田の南北地質断面とプロパン炭素同位体組成

図8 岩船沖油・ガス田の2100m層上限地下構造図とプロパン炭素同位体組成

とを示している。これらの結果は、本井の深部で認められる低熟成度のガスは坑井近傍で少量、生成した可能性が高いことを示す。したがって、十分に熟成した熱分解起源ガスは本井の位置では掘止め層準である椎谷層上部に浅に移動してきていないと考えられる。後述するように、本井のアップディップに位置する東新潟ガス田では、油・ガスが断層を通して深部から椎谷層・西山層に移動していると推定されることから、炭化水素は本井の掘止め深度よりも下位を通過している可能性が高いと考えられる。

5. 岩船沖油・ガス田における炭化水素の移動・集積

新潟市の北東 30 km の大陸棚上に位置する岩船沖油・ガス田 (図 1) では、南西へ沈降する背斜鼻状部で構造上位に尖滅する西山層・椎谷層の複数のタービダイト砂岩に油・ガスを胚胎した層位・構造組み合わせトラップを形成している (宮崎ほか, 1987)。南北方向の断面図を図 7 に示す。貯留層のうち、1200~1600 m 層 (西山層) はガス層、1900~2100 m 層 (西山層) は油層、2800~2900 m 層 (椎谷層) はガスコンデンセート層である。2100 m 層上限の地下構造図を図 8 に示す。

本油・ガス田内における産出ガス炭素同位体組成の水平方向・垂直方向の変化から炭化水素の移動・集積について検討する。本検討では生産やガス圧入による操業中の組成変化の影響を避けるため、試掘および初期の開発井から採取した試料のデータを主に使用した。

メタン炭素同位体組成とエタン炭素同位体組成の産出層準による違いを図 9 に示す。1200 m 層、1300 m 層のガスは微生物起源ガスがほぼ 100%，椎谷層のガスは熱分解起源ガスがほぼ 100% と推定され、深部ほど熱分解起源ガスの割合が増加する傾向がある。エタン炭素同位体組成とプロパン炭素同位体組成の産出層準による違いを図 10 に示す。2000 m 層以浅のガスの一部は熟成ラインよりもエタン炭素同位体組成が軽い側にプロットされており、微生物起源エタンの影響が認められる。その他の試料については、熟成ラインの近くにプロットされている。ガスの熟成度はビトリナイト反射率換算で 0.7~1.3% 程度で変化しており、椎谷層のガスは西山層のガスよりも全体的に高い熟成度を示している。また、1900 m 層や 2100 m 層では、貯留層内部で熟成度に違いがあることがわかる。

図9 岩船沖油・ガス田生産ガスのメタン炭素同位体組成とエタン炭素同位体組成

図10 岩船沖油・ガス田生産ガスのエタン炭素同位体組成とプロパン炭素同位体組成

岩船沖油・ガス田における炭化水素組成、炭素同位体組成の深度変化の例として、プラットフォームから北方に向かって掘削された坑井A（図7および図8）の分析結果を図11に示す。ガスの起源については、メタン・エタン炭素同位体組成の深度変化から1200～1300 m層は微生物起源ガス主体、1500～1600 m層は混合ガス、1750 m層以深は熱分解起源ガス主体であることがわかる。プロパン炭素同位体組成から熱分解起源ガス成分の熟成度をみると、微生物起源主体の1300 m層の熟成度が低いことを除くと、1850 m層から2100 m層の間では熟成度はほぼ一定と推定される。

各試料のプロパン炭素同位体組成を、南北方向の断面図上に示す（図7）。プロパン炭素同位体組成が -24% より重く熟成度が相対的に高い試料はプラットフォームの直下を中心に分布している。西山層と椎谷層では全体的な熟成

図11 岩船沖油・ガス田の坑井Aにおける炭化水素組成・炭素同位体組成の深度変化

度に違いがあるが、1500～2100 m層の西山層内では深部の貯留層ほど全体的に熟成度が上昇するような傾向は認められない。以上の結果から、1500～2100 m層では垂直方向の熟成度の変化は小さく、水平方向の熟成度変化が大きいことがわかる。

1500～2100 m層（西山層）産出ガスと椎谷層産出ガスのプロパン炭素同位体組成を2100 m層構造図上に示す（図8）。1500～2100 m層ガスのプロパン炭素同位体組成の水平的変化は、構造東側の断層に近い坑井でガスの熟成度が高いことを示す。

根源岩から生成・排出された炭化水素が地質学的な時間をかけてトラップに移動・集積する場合、生成・移動する炭化水素の熟成度は時間とともに上昇する。トラップが一端から満たされる場合、水平方向の混合に要する時間が長いため、熟成度に勾配が生まれ、根源岩に近いほど熟成度は高くなる（England, 1994）。

プラットフォームを通る東西方向の断面図とプロパン炭素同位体組成を図12に示す。西山層の貯留層については西側沈降部の寺泊層根源岩熟成域から生成したガスが寺泊層内を移動した後、構造東側の断層を通路として上方移動して各貯留層にチャージされ、熟成度が低く早期に生成したガスほど各層準内を遠くまで移動したと考え、本油・ガス田におけるプロパン炭素同位体組成の分布を説明することができる。

椎谷層については、構造南西側の3坑井しかデータがないため明確ではないが、やはり東側の断層に近い構造南側に位置する坑井の熟成度が最も高く、断層から離れた構造西側に位置する坑井の熟成度が最も低い傾向がある（図8）。この結果は、西山層と同様に椎谷層のガスについても断層を介して炭化水素が供給されている可能性が高いこと

図 12 岩船沖油・ガス田の東西地質断面とガスのプロパン炭素同位体組成

を示す。

6. 東新潟ガス田における炭化水素の移動・集積

東新潟ガス田は、新潟市の中心から東方 10 km の阿賀野川河口の東側とその沖合に位置し（図 1）、背斜構造を形成する西山層、椎谷層の多数の砂岩層にガスが胚胎している。2900 mA 層上限の地下構造図を図 13 に示す。

東新潟ガス田におけるメタン炭素同位体組成とエタン炭素同位体組成の産出層準による違いを図 14 に示す。水溶性ガスは微生物起源ガス 100%，椎谷層 3400 m 層のガスは熱分解起源ガス 100%と推定され、他の北蒲原地域油・

図 13 東新潟ガス田の 2900 mA 層上限地下構造図とエタン炭素同位体組成

図 14 東新潟ガス田生産ガスのメタン炭素同位体組成とエタン炭素同位体組成

ガス田と同様に深部ほど熱分解起源ガスの割合が増加する傾向がある。

エタン炭素同位体組成とプロパン炭素同位体組成の産出層準による違いを図 15 に示す。1100～1200 m 層のガスに微生物起源エタンあるいはプロパンの微生物分解の影響が認められる以外、2000 m 層以深のガスについては、エタン・プロパン炭素同位体組成は熟成度を反映していると考えられる。2900 mA,B 層は熱分解成分の熟成度が低いものから高いものまで変化しているのに対して、それ以外の層準は変化が小さく、ビトリナイト反射率換算で 1.1～1.2% 程度の範囲に集中している。つまり、西山層貯留層ガスの熟成度は、椎谷層貯留層の中でも相対的に熟成度の高い試料と同じであることを示す。

東新潟ガス田の主力層で水平的な広がり大きい 2900 mA, B 層（椎谷層）における熟成度の水平方向の変化について、構造図上で検討する（図 13）。岩船沖油・ガス田では熟成度の指標として、微生物起源ガスの影響のないプロパン炭素同位体組成を用いた。ここではエタン炭素同位体組成が微生物起源エタンの影響を受けていないと判断されること、プロパンについては含有量が低く炭素同位体組成を分析できなかった試料も多いことから、ガスの熟成度の指標としてエタン炭素同位体組成を用いる。

2900 mA, B 層のエタン炭素同位体組成を 2900 mA 層構造図上に示す（図 13）。構造頂部に貯留するガスのエタン炭素同位体組成が重く、周辺部に向かって軽い値に変化していることから、構造頂部に貯留するガスの熟成度が高く、周辺部へ行くほど熟成度が低下していると考えられる。この結果は、東西性の多数の断層が発達する構造頂部付近に断層を通路として深部から椎谷層貯留層に炭化水素がチャージされ、早期にチャージされた低熟成度の油・ガスを、後から移動してきた高熟成度のガスが貯留層周辺方向に押し広げたことを示唆している。この高熟成度の熱分解起源ガスは断層を介して、さらに上位の層準へ垂直移動

図 15 東新潟ガス田生産ガスのエタン炭素同位体組成とプロパン炭素同位体組成変化

し、微生物起源ガスと混合して西山層のガス層を形成していると推定される。

7. 北蒲原海域根源岩キッチンからの移動・集積

北蒲原地域における寺泊層根源岩の熟成域は、岩船沖油・ガス田と阿賀沖油田・ガス田の間の向斜部に広く分布している（齋藤ほか，2008；図 1）。聖籠沖 MS-1 号井は、この寺泊層熟成域の中に入り、キッチンで生成した炭化水素の東新潟ガス田への移動経路と推定される背斜軸上に位置する。東新潟ガス田には西山層・椎谷層に炭化水素が胚胎しているにもかかわらず聖籠沖 MS-1 号井では熟成した炭化水素の移動が椎谷層上部以浅に認められないこと、東新潟ガス田では断層を介した移動が推定されたことから、寺泊層から椎谷層への炭化水素の上方移動は東新潟ガス田の断層群に達するまで起こっていないと推定される。また、岩船沖油・ガス田においても断層を介した貯留層への炭化水素のチャージが推定された。以上のことから、本海域の寺泊層キッチンで生成した炭化水素は寺泊層内をアップディップへ移動し、上位の椎谷層・西山層への移動は、それ以上の側方への移動を遮るような主要な断層に到達するまで起こっていないと推定される。守屋ほか（2007）、齋藤ほか（2008）は、本海域での炭化水素の移動・集積シミュレーションを実施し、移動をコントロールする重要なパラメータとして泥岩のシール能力を挙げている。今回の結果は、泥岩のシール能力が本海域では比較的高く、水平移動を妨げるような断層や背斜構造、層位トラップがない場合、上方移動が起こりにくい状況である可能性が高いことを示唆している。

8. ま と め

北蒲原地域油・ガス田産出ガスと海域で掘削された試掘

井 2 坑から採取したガス試料の炭化水素組成・炭素同位体組成を測定し、ガスの起源・熟成度を評価した。また、ガスの熟成度から、本地域における炭化水素の移動・集積について検討し、以下の結果を得た。

- ・ 北蒲原地域の油・ガス田に胚胎するガスは微生物起源と熱分解起源の混合ガスが多く、貯留層深度が浅いほど、微生物起源ガスの割合が高い傾向がある。
- ・ 阿賀野川沖 MS-1 号井：阿賀沖油田・ガス田に貯留するガスと同様な熟成度をもつガスが椎谷層貯留層へ移動している。
- ・ 聖籠沖 MS-1 号井：東新潟ガス田への炭化水素の移動経路上に位置するにもかかわらず、熟成したガスの移動が認められない。ガスは、本井の掘止め層準より深部を通過していると推定される。
- ・ 岩船沖油・ガス田：西側沈降部の寺泊層根源岩熟成域から生成したガスが、構造東側の断層を通路として上方移動して各貯留層にチャージされた。
- ・ 東新潟ガス田：ガスは、構造中心部付近の断層を通路として椎谷層・西山層の各貯留層にチャージされた。

以上の結果から、寺泊層キッチンで生成した炭化水素は寺泊層内をアップディップへ移動し、椎谷層・西山層への上方移動はそれ以上の側方への移動を遮るような主要断層に到達するまで起こっていないと推定される。

謝 辞

本稿の公表を許可していただいた、石油資源開発株式会社、三菱ガス化学株式会社、出光オイルアンドガス開発株式会社に感謝します。本論を改善する上で有益なご意見をいただきました 2 名の査読者の方々にも厚く感謝します。

引 用 文 献

- Berner, U. and Faber, E., 1996 : Empirical carbon isotope/maturity relationships for gases from algal kerogens and terrigenous organic matter, based on dry, open-system pyrolysis. *Organic Geochemistry*, **24**, 947–955.
- Ellis, L., Brown, A., Schoell, M. and Uchytel, S., 2003 : Mud gas isotope logging (MGIL) assists in oil and gas drilling operations. *Oil & Gas Journal*, **101** (21), 32–41.
- England, W. A., 1994 : Secondary migration and accumulation of hydrocarbons. In Magoon, L. B. and Dow, W. G., eds. : *The Petroleum System-From Source to Trap*. *AAPG Memoir*, **60**, 211–217.
- Fuex A. N., 1977 : The use of stable carbon isotopes in hydrocarbon exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, **7**, 155–188.
- 平井明夫・岡田静子・若松屋伸一・宮本泰行・八戸和巳, 1995 : 有機地球化学的にみた新潟地域における原油とその根源岩の関係. 石技誌, **60** (1), 87–97.
- James, A. T. and Burns, B. J., 1984 : Microbial alteration of

- subsurface natural gas accumulations. *AAPG Bull.*, **68**, 957–960.
- Mattavelli, L., Ricchiuto, T. and Martinenghi, C., 1992 : Deep isotopic light methane in northern Italy. In Vially, R., ed. : *Bacterial Gas*, 121–132, Technip, Paris.
- 宮崎 浩・公手 忠・秋葉文雄・深沢 光・浅野清継, 1987 : 岩船沖油田の地質—貯留岩分布の考察—. 石技誌, **52**(2), 173–187.
- 守屋俊治・山根照真・齋藤雄一・加藤 進・中山一夫, 2007 : 岩船沖油・ガス田のタービダイト砂岩への炭化水素移動・集積モデル. 石技誌, **72**(1), 89–97.
- Oremland, R. S., Whiticar, M. J., Strohmaier, F. E. and Kiene, R. P., 1988 : Bacterial ethane formation from reduced, ethylated sulfur compounds in anoxic sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **52**, 1895–1904.
- 齋藤雄一・山本哲也・山根照真・守屋俊治・西村瑞恵・高野 修, 2008 : 北蒲原沖合における砂岩せん滅層位トラップの探鉱評価事例—“第二の岩船沖油ガス田” 発見へのチャレンジ—. 石技誌, **73**(1), 38–46.
- Schoell, M., 1983 : Genetic characterization of natural gases. *AAPG Bull.*, **67**, 2225–2238.
- 関口嘉一・重川 守・平井明夫・宮本泰行, 1984 : 地化学的見地からみた長岡・柏崎地域のグリーンタフ油・ガス鉱床の形成. 石技誌, **49**(1), 56–64.
- Tilley, B., Miller, R. and Muehlenbachs, K., 2002 : Evaluation of the effectiveness of regional seals using carbon isotope mud gas depth profiles, west-central Alberta, Canada. *AAPG Hedberg Research Conference : December 1–5, 2002, Barossa Valley, South Australia*, Abstract, 82–83.
- 早稲田 周, 2009 : マッドガス同位体検層. 石技誌, **74**(1), 107–110.
- Waseda, A. and Didyk, B. M., 1995 : Isotope compositions of gases in sediments from the Chile continental margin. In Lewis S. D., Behrmann J. H., Musgrave R. J. and Cande S. C., eds. : *Proc. ODP, Sci. Results*, **141**, 307–312.
- 早稲田 周・岩野裕継, 2007 : ガス炭素同位体組成による貯留層評価. 石技誌, **72**(6), 585–593.
- Waseda, A. and Iwano, H., 2008 : Characterization of natural gases in Japan based on molecular and carbon isotope compositions. *Geofluids*, **8**, 286–292.
- 早稲田 周・重川 守, 1988a : 本邦油・ガス田地帯における天然ガスの起源に関する地球化学的考察. 石技誌, **53**(3), 213–222.
- 早稲田 周・重川 守, 1988b : ヘッドスペースガス分析からみた天然ガスの生成・移動・集積. 石技誌, **53**(5), 337–347.
- 早稲田 周・岩野裕継・武田信従, 2002 : 地球化学からみた天然ガスの成因と熟成度. 石技誌, **67**(1), 3–15.