

三重県桑名市の長島地域における温泉付随ガス中炭化水素系 可燃性天然ガスの代替エネルギー化の検討

森 康則^{1)2)*}, 村田 将¹⁾, 志村恭子¹⁾, 山口哲夫¹⁾,
野原精一³⁾, 加治佐隆光²⁾, 大沼章子⁴⁾

(平成 24 年 7 月 31 日受付, 平成 24 年 8 月 28 日受理)

Feasibility Study of Inflammable Natural Gas in Incidental Gas from Hot Spring Water as Alternative Petroleum in Nagashima Area, Kuwana City, Mie Prefecture

Yasunori MORI^{1)2)*}, Sho MURATA¹⁾, Kyoko SHIMURA¹⁾, Tetsuo YAMAGUCHI¹⁾,
Seichi NOHARA³⁾, Takamitsu KAJISA²⁾ and Shoko OHNUMA⁴⁾

Abstract

The composition of inflammable natural gas incidental to hot spring water in Nagashima area, Kuwana City, Mie Prefecture, was analyzed in terms of its feasibility as an alternative to petroleum. Wells with a depth of about 1,500 m are located at the south-western margins of the Kisogawa gas field. Based on the concentration of methane in the natural gas, the amount of hot spring water discharge and the gas-water ratio, an emission of 87,000 m³ of methane per year was estimated in the case of maximum hot spring utilization. This amount of natural gas containing methane corresponds to 8.7 million yen in the case of maximum hot spring utilization, and 15 million yen over the entire Nagashima hot spring area. From the calculated carbon isotope ratio, the origin of methane is assumed to be microbial rather than thermogenic. These results suggest that the use of incidental gas from hot spring water may contribute to finding ways of solution for energy shortages and global warming.

Key words : petroleum alternative, inflammable natural gas, incidental gas from hot spring water, Kisogawa gas field, global warming

¹⁾三重県保健環境研究所 〒512-1211 三重県四日市市桜町 3684-11. ¹⁾Mie Prefecture Health and Environment Research Institute, 3684-11 Sakura-cho, Yokkaichi 512-1211, Japan. *Corresponding author : E-mail moriy04@pref.mie.jp, TEL 059-329-2917, FAX 059-329-3004.

²⁾三重大学大学院生物資源学研究所 〒514-8507 三重県津市栗真町屋町 1577. ²⁾Graduate School of Bio-resources, Mie University, 1577 Kurimamachiya-cho, Tsu 514-8507, Japan.

³⁾独立行政法人国立環境研究所 〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2. ³⁾National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba 305-8506, Japan.

⁴⁾中部大学生命健康科学研究所 〒487-8501 愛知県春日井市松本町 1200. ⁴⁾The Research Institute of Life and Health Sciences, Chubu University, 1200 Masumoto-cho, Kasugai 487-8501, Japan.

要 旨

三重県桑名市長島町内で湧出する温泉付随ガス中の炭化水素系可燃性天然ガスを対象に、石油代替エネルギーとしての活用可能性の検討を目的として、メタンを含むガス組成および炭素同位体比の分析を行った。長島地域の温泉湧出地帯は、かつて天然ガスの採掘を目的として大深度掘削開発がなされた地域で、掘削深度は1,500 m 前後であり、木曽川ガス田と呼ばれる天然ガス湧出地域の南西端に位置している。温泉付随ガス中のメタン濃度、温泉水の湧出量およびガス水比から推算したところ、最大の温泉で年間 8.7 万 m³ のメタンが放出され、これを金額換算すると年間 870 万円相当、地域全体では 1,500 万円相当の燃料ガスが大气放出されていると見積もられた。炭素同位体比分析の結果、その多くが微生物起源ガスであると考えられた。これらの温泉付随ガスの利活用は、エネルギー問題への有効な対策のみならず、地球温暖化対策にも資するものと考えられる。

キーワード：石油代替エネルギー、炭化水素系可燃性天然ガス、温泉付随ガス、木曽川ガス田、地球温暖化

1. はじめに

東日本大震災・東京電力福島第一原発事故、それに伴う原発の安全性に係る危惧の高まりにより、全国的な電気エネルギーの不足が懸念されている。その中において「電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法」(以下、再生可能エネルギー特措法)(2011年(平成23年)8月30日法律第108号)が制定されたように、太陽光エネルギー、風力エネルギー、水力エネルギー、地熱エネルギー、バイオマスエネルギー等、従来の主要なエネルギー体系のパラダイムにとらわれない、新たな視点からのエネルギー施策を再評価する社会的機運が高まっている。

温泉付随ガス中の可燃性天然ガスが、再生可能エネルギー特措法により定義される「再生可能エネルギー」に該当するか否かの議論はあるものの、環境省によって温泉付随ガスの実用化を目指した「温泉エネルギー活用加速化事業」や地域主導による自立・分散型エネルギー導入支援を目指した「再生可能エネルギー等導入推進基金事業(グリーンニューディール基金)」が創設される等、国は温泉付随ガスのエネルギー活用を促進している。この社会的潮流は、地域資源の有効活用やエネルギーの「地産地消」のほかにも、二酸化炭素の21倍の温室効果を有する温泉付随ガス中のメタンの大気放出抑制にも寄与し、地球温暖化対策にも資すると考えられる。

2008年10月の改正温泉法の施行以来、特に地方公設試験研究機関において、当該所管地域の温泉付随ガスの爆発事故の防止を目的とした安全性を重視した研究成果が、いくつか報告されてきた(代田・小田原, 2008; 小池ら, 2009; 内野ら, 2010; 矢野・川元, 2011)。しかしながら、これらの報告は、災害防止のためには非常に有用な報告ではあるものの、温泉付随ガスの代替エネルギーとしての利用について可能性が検討されたものではないため、天然ガス田地域における一体的な温泉付随ガス中可燃性天然ガスの賦存状態や実用化の可能性を検討するまでには至っていない。

本研究では、三重県における木曽川ガス田周縁に位置する長島地域に着目した。本対象地域に湧出する温泉は、現在では全国的に主流となっている掘削深度1,000 m を超える大深度非火山性温泉の端緒とされており(宮崎, 2011)、1950年代後半から1970年代半ばまでに、現在長島町内で稼働しているほとんどの温泉の掘削がなされた。かつては天然ガスの採掘を目的として掘削されたが、現在では温泉水の採取を主目的として、維持管理がなされている。したがって、本対象地域は、大深度掘削泉の集中地域であるとともに、その温泉付随ガス中には、メタンをはじめとする炭化水素系可燃性天然ガスが多量に含まれることが知られている。なお、この天然ガス湧出地域は、三重県内の長島地域を含む北勢地方北部、愛知県海部郡周辺を含めて、「木曽川ガス田(Kisogawa Gas field)」

と呼ばれている (矢崎, 1976).

そこで著者らは, この地域で湧出する温泉付随ガスの代替エネルギーとしての実用化を目的として, その可能性を検討するための基礎データの収集を行った. 具体的には, 当該地域における温泉付随ガス中可燃性天然ガスの濃度分析, 同位体比分析を行うとともに, 地質環境を勘案した資源地質的検討を行った. その結果, 有用な知見が得られたので, 以下に報告する.

2. 方 法

2.1 長島地域の地質と対象温泉

長島温泉の地下構造は, 天然ガス田として掘削された当時の深層ボーリングの結果によって窺い知ることができる (高田ら, 1969). 同地域の地質断面図を Fig. 1 に示す. 長島温泉の地下には, 鮮新・更新統の湖盆堆積層が卓越しており, この堆積層は東海層群 (Tokai group) と呼ばれている.

本研究で対象とした温泉の位置図を Fig. 2 に示す. 本研究では三重県北部の桑名市長島町内にお

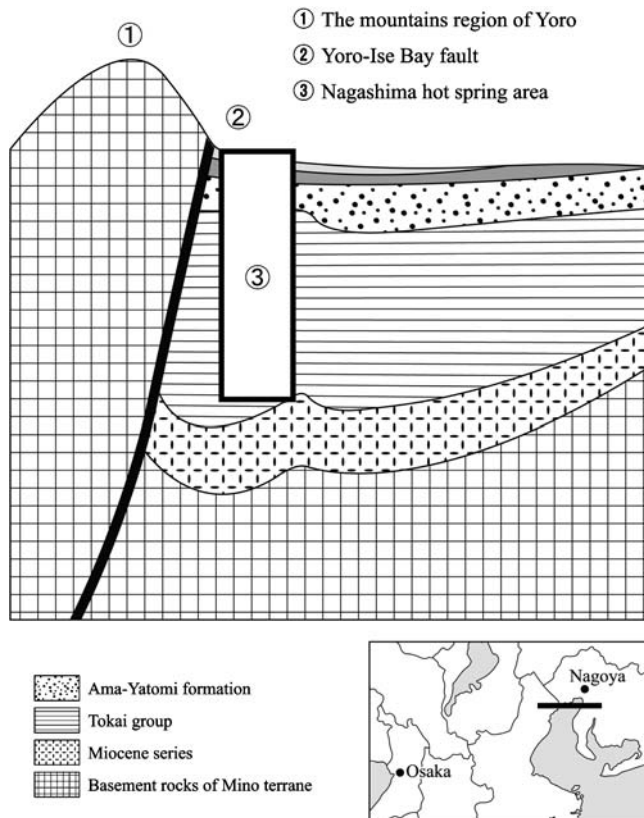


Fig. 1 Geological profile of Nagashima area (Takada *et al.*, 1969). Black bar in the lower map indicates the cross section point of Nagashima hot spring area. A thick layer of accumulated sediments (named the Tokai group) is located beneath the observation area. Nagashima wells were drilled to a depth of about 1,500 m. The strainer is situated in the Biroku conglomerate of the Tokai group and serves as the aquifer of hot spring water.

いて、現在稼働している温泉を対象とした。長島町内は輪中地域であり、伊勢湾から内陸へ数 km までの沿岸地域に温泉が集中的に分布している。掘削深度は、その多くが 1,500 m 前後である。取水部は、東海層群の基底層である美麓層、あるいはその周辺層とされる。美麓層は、古生層に由来する淘汰の悪い礫から構成されることから、孔隙率が大きく帯水層として機能していると推定される。ただし、美麓層は、広範囲に堆積したものではなく、美麓層上層の古野層との岩相変化に乏しいため、東海層群の基底層を、主に泥層と砂層から構成される古野層とする解釈もある(吉田ら, 1991)。

2.2 温泉付随ガスおよび温泉水分析

温泉付随ガスおよび温泉水の分析方法は、以下のとおりとした。

(1) 温泉付随ガス

CH₄: 熱伝導度型検出器型ガスクロマトグラフ法
 測定機器: 株式会社島津製作所製ガスクロマトグラフ GC-8A 型
 カラム: SHINCARBON SUS 2m×3mmφ (信和化工株式会社製)
 検出器: TCD
 試料注入量: 1mL
 キャリアガス (流量): He (40mL/min)
 検出器温度: 200°C
 カラム温度: 40°C

炭化水素系ガス組成: 熱伝導度型検出器型ガスクロマトグラフ法

水素炎イオン化検出器型ガスクロマトグラフ法

測定機器: アジレント・テクノロジー株式会社製ガスクロマトグラフ

GC7890A valve System 型

試料導入: 250 μL サンプルループにより導入

検出器: TCD, FID

カラム: O₂, N₂, CO₂ 分離用

1: HaySepQ 80/100Mesh 0.5m×1/8 (シグマアルドリッチジャパン株式会社製)

2: HaySepQ 80/100Mesh 6ft×1/8 (シグマアルドリッチジャパン株式会社製)

3: Molecular Sieve 5A 60/80 Mesh 6ft×1/8 (シグマアルドリッチジャパン株式会社製)

CH₄-C₆H₁₄ 分離用

4: HP-AL/S 25m×0.32mm×8μm (アジレント・テクノロジー株式会社製)

キャリアガス (流量)

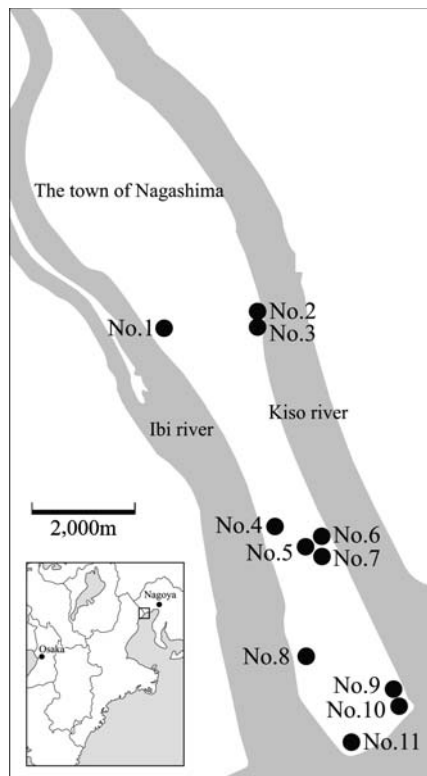


Fig. 2 Locations of observation wells in the Nagashima area. The town of Nagashima (Kuwana City, Mie Prefecture) is a southern suburb of Nagoya, central Japan. Most Nagashima wells are 1,500 m deep.

- 1 : He (20 mL/min)
- 2, 3 : He (25 mL/min)
- 4 : He (1.86 mL/min)

炭素同位体 : ガスクロマトグラフ燃焼同位体質量分析法

測定機器 : GV Instruments 社製ガスクロマトグラフ燃焼同位体質量分析装置
GC-C-IRMS IsoPrime-GC

カラム : PoraPLOT Q (長さ 25 m, 内径 0.32 mm, 膜厚 10 μ m)
(アジレント・テクノロジー株式会社製)

方式 : 猪狩 (1996) に準拠

昇温条件 : 35 $^{\circ}$ C (4 min hold) - 150 $^{\circ}$ C (20 $^{\circ}$ C/min 5 min hold)

測定結果 : 標準試料 (PDB : Pee Dee Belemnite) で規格化

ガス水比 : 定量容器による簡易測定

測定場所 : 現地

(2) 温泉水

泉温 : 標準温度計による測定

測定場所 : 現地測定

pH : ガラス電極法

機器 : 東亜ディーケーケー株式会社製 pH メーター HM-60G

測定場所 : 実験室内

(試料採取後, 実験室に持ち帰り 1 時間以内に測定する.)

Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ : 原子吸光光度法

機器 : 株式会社島津製作所製原子吸光光度計 AA-6800 型

方式 : Air-C₂H₂ フレーム

試料 : HCl 固定

F⁻, Cl⁻, SO₄²⁻ : イオンクロマトグラフ法

測定機器 : 日本ダイオネクス株式会社製イオンクロマトグラフ DX-120

カラム : AS-23 (4 \times 250 mm) および AG-23 (4 \times 50 mm)

(いずれも日本ダイオネクス株式会社製)

方式 : サプレッサ ASRS300 4mm (日本ダイオネクス株式会社製)

移動相 : 4.5 mmol/L Na₂CO₃ + 0.5 mmol/L NaHCO₃ 溶液

流速 : 1.00 mL/min

試料 : 0.45 μ m メンブレンフィルター (日本ミリポア株式会社製) ろ液

HBO₂ : ICP 発光分光分析法

機器 : 株式会社島津製作所製 ICP 発光分光分析装置 ICPS-8100 型

測定結果 : 鉱泉分析法指針 (改訂) (環境省, 2002) に基づき計算

H₂SiO₃ : モリブデンイエロー比色法

機器 : 株式会社島津製作所製紫外可視分光光度計 UV-2200A 型

測定結果 : 鉱泉分析法指針 (改訂) (環境省, 2002) に基づき計算

酸素・水素安定同位体比 : 安定同位体比質量分析法

機器 : サーモフィッシャーサイエンティフィック株式会社製質量分析装置

DELTA plus XL 型

試料：0.45 μm シリンジフィルターろ液

測定結果：標準平均海水 (SMOW : Standard Mean Oceanic Water) で規格化

なお、温泉水の揚湯量については、各温泉施設の管理担当者にデータ提供を依頼し、直近の1ヶ月から半年程度の利用量から、日平均揚湯量を算出した。

3. 結果および考察

3.1 温泉水の主成分および酸素・水素同位体比の分析

長島地域に湧出する温泉に含まれる主要な成分の分析結果について、Table 1 に示す。

泉温は 39.6~60.1℃の範囲であり、鉱泉の分類上、No. 5 の 1 箇所を除いて全て高温泉であった。特に高温であったのは、No. 10 の 60.1℃、No. 1 の 59.9℃、No. 2 の 57.8℃、No. 4 の 57.5℃等であった。これらの温泉に共通する特徴は、近隣の遊戯施設や温泉団地等、普段から供給先の需要量が膨大であり、日常的に活発な揚湯が行われている点にある。したがって、これらの温泉が高温であるのは、人為的な揚湯量の関係上、揚湯管内の温泉水の流通が盛んであるために、浅層で湯温が冷めることなく湧出したことに起因しており、泉温はこの地域の地温勾配の違いを表すものではないと考えられる。

pH は 8.01~8.74 で弱アルカリ性~アルカリ性であった。

溶存成分については、本研究の分析対象項目の中では、いずれの温泉においても、カチオンはナトリウムイオン、アニオンは塩化物イオンが最も濃度の高い成分であった。なかでも、No. 3 がナトリウムイオン 628 mg/kg、塩化物イオンが 690 mg/kg と突出して高かった。しかしながらこれらの成分は海水のそれらの成分濃度よりは極端に低く、長島地域南部は海岸に近いものの、海岸に近づくほどこれらの塩分が高くなるというような地域的な傾向は認められなかった。

なお、大野・小瀬 (1971) によると、本研究対象地域の温泉水の多くは、カチオンではナトリウムイオンが最も val 値が高い主成分であり、アニオンでは炭酸水素イオンが最も val 値が高い主成分、次いで塩化物イオンが副成分として構成されていることが示されている。

長島地域の一部の温泉においては、メタケイ酸、メタホウ酸濃度が高いという化学的特徴を有する。メタケイ酸については、No. 9 が 71.1 mg/kg、No. 8 が 58.9 mg/kg、No. 11 が 51.6 mg/kg、No. 1 が 50.8 mg/kg の濃度であり、温泉法に規定するメタケイ酸の規定値 (50 mg/kg) を上回っていた。また、メタホウ酸については、No. 3、No. 5 がいずれも 6.9 mg/kg と温泉法に規定するメタホウ酸の規定値 (5 mg/kg) を満たしていた。

また、長島地域から湧出する温泉水の挙動、特に現世海水や化石海水からの寄与の有無を明らかにするため、酸素・水素安定同位体比分析を行った。同分析に供する検体としては、海岸から近距離に位置する温泉を選ぶこととし、No. 8 と No. 11 で湧出した温泉水を対象とした。

その結果を Fig. 3 に示す。δダイアグラムの酸素・水素安定同位体比は、式(1)により算出した。

$$\delta (\%) = \frac{R_{\text{試料}} - R_{\text{SMOW}}}{R_{\text{SMOW}}} \times 1,000 \dots\dots\dots (1)$$

$R_{\text{試料}}$: 試料中の酸素あるいは水素の安定同位体比

R_{SMOW} : 標準試料 (SMOW) 中の酸素あるいは水素の安定同位体比

ただし、水素安定同位体比の場合 $R = D/H$

酸素安定同位体比の場合 $R = {}^{18}O/{}^{16}O$

なお、δダイアグラムに示した天水線 (Meteoritic water line) は、式(2)のとおりである (Craig,

Table 1 Chemical composition of hot spring water in Nagashima area.

Well ID	Sampling date	Water temperature (°C)	pH	EC (mS/m)	Na ⁺ (mg/kg)	K ⁺ (mg/kg)	Mg ²⁺ (mg/kg)	Ca ²⁺ (mg/kg)	F ⁻ (mg/kg)	Cl ⁻ (mg/kg)	Br ⁻ (mg/kg)	SO ₄ ²⁻ (mg/kg)	H ₂ SiO ₃ (mg/kg)	HBO ₂ (mg/kg)
No. 1	4/Jan/2012	59.9	8.29	86.4	276	3.9	0.1	6.3	1.2	72.8	0.2	1.2	50.8	1.3
No. 2	19/Jan/2012	57.8	8.19	121	316	4.6	0.5	11.6	1.2	122	0.3	1.1	47.1	2.7
No. 3	19/Jan/2012	54.6	8.01	256	628	7.3	1.4	25.4	0.9	690	2.0	0.6	43.0	6.9
No. 4	20/Jan/2012	57.5	8.51	70.0	198	2.4	<0.1	4.2	0.8	57.7	0.2	0.1	49.6	0.6
No. 5	20/Jan/2012	39.6	8.74	124	294	9.6	0.4	3.6	1.1	239	0.6	0.1	11.1	6.9
No. 6	20/Jan/2012	50.8	8.49	67.2	195	2.3	0.1	5.0	0.6	78.3	0.2	0.9	48.0	0.6
No. 7	20/Jan/2012	51.3	8.54	76.9	191	1.4	0.2	7.2	0.5	116	0.3	<0.1	46.2	0.9
No. 8	4/Jan/2012	56.0	8.35	49.7	142	2.1	<0.1	3.4	0.4	33.6	0.1	0.1	58.9	0.5
No. 9	4/Jan/2012	46.0	8.36	45.4	122	1.6	0.2	3.2	0.5	14.6	<0.1	0.9	71.1	0.8
No. 10	4/Jan/2012	60.1	8.48	58.9	164	2.1	0.2	3.6	0.6	49.5	0.1	0.1	47.9	0.6
No. 11	17/Jan/2012	52.3	8.69	59.1	97.0	0.9	<0.1	3.8	0.3	11.0	<0.1	0.6	51.6	0.4

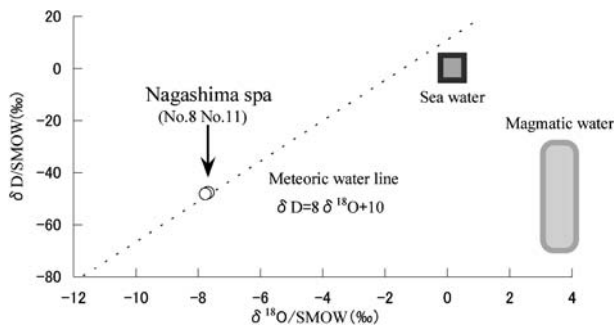


Fig. 3 $\delta^{18}\text{O}$ - δD -diagram of hot spring water from Nagashima spa.

Table 2 Methane concentration, gas-water ratio and quantity of water discharge of hot spring water and incidental gas in Nagashima area. Emission of CH_4 is calculated from these parameters.

Well ID	Sampling date	CH_4 concentration (%)	Gas-water ratio (%)	Quantity of water discharge (m^3/day)	Emission of CH_4 (m^3/day)
No. 1	4/Jan/2012	66.4	10	1174	78
No. 2	19/Jan/2012	77.1	13	242	24
No. 3	19/Jan/2012	76.5	22	1423	239
No. 4	20/Jan/2012	42.8	2	503	4
No. 5	20/Jan/2012	11.2	9	0	0
No. 6	20/Jan/2012	35.8	8	329	9
No. 7	20/Jan/2012	24.7	1	1939	5
No. 8	4/Jan/2012	54.7	3	1079	18
No. 9	4/Jan/2012	19.5	0.05	0	0
No. 10	4/Jan/2012	44.9	6	900	24
No. 11	17/Jan/2012	42.8	2	1100	11

1961).

$$\delta\text{D} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10 \dots\dots\dots (2)$$

この結果、長島地域から湧出する温泉水 (No. 8 と No. 11) の酸素・水素安定同位体比は、いずれも天水線上にプロットされた。このことから、これらの温泉は海水の近傍に位置するものの、酸素・水素安定同位体比に海水の影響はほとんど認められず、現世海水や化石海水の直接的な帯水層への流入はないことが明らかになった。また、温泉水の主成分の分析の結果、ナトリウムイオンや塩化物イオンに代表される海水に特徴的な成分濃度が、一般的な海水の成分濃度に比べて極端に低いこともこの事実を支持するものと考えられた。

3.2 温泉付随ガスの炭化水素系ガス組成および炭素同位体比の分析

長島地域に湧出する温泉付随ガス中のメタン濃度およびガス水比 (体積比)、日平均揚湯量を Table 2 に示す。

メタン濃度については、調査対象の中で No. 2 が最も高く、77.1%であった。次いで No. 3 が 76.5%、No. 1 が 66.4%であった。また、ガス水比については、No. 3 が 22%と突出して高く、次いで No. 2 が 13%、No. 1 が 10%であった。

メタン濃度, ガス水比, 揚湯量をそれぞれ乗じて, 通常揚湯時にどれだけの量のメタンが大気放出されているかを算出した. その結果を Table 2 に示す. 放出量は, No. 3 が 239 m³/日と突出して多く, 次いで No. 1 が 78 m³/日, No. 2 と No. 10 が 24 m³/日と続いた. 調査対象地域の北部で湧出する温泉ほどメタン濃度が高く, またガス水比が高い (ガス量が多い) 傾向が認められた.

炭素同位体比については, 炭素の安定同位体 ¹³C と ¹²C の比とし, 標準試料 (PDB) からの偏差を示す δ¹³C として, 式(3)により算出した.

$$\delta^{13}\text{C} (\text{‰}) = \frac{R_{\text{試料}} - R_{\text{PDB}}}{R_{\text{PDB}}} \times 1,000 \dots\dots\dots (3)$$

R_{試料}: 試料中の炭素同位体比 (¹³C/¹²C)

R_{PDB}: 標準試料 (PDB) 中の炭素同位体比 (¹³C/¹²C)

δ¹³C については, メタン, 二酸化炭素, エタン, プロパン中の炭素について分析した. メタン (C₁), エタン (C₂), プロパン (C₃) の比 (C₁/(C₂+C₃)) とそれぞれのガス成分における δ¹³C の分析結果を, Table 3 に示す.

また, 炭化水素など温泉付随ガスの組成分析の結果を Table 4 に示す. この温泉付随ガス組成および炭素同位体比分析用のガスのサンプリングにあたっては, 湧出現場で水上置換法により捕集してから, 測定場所へのガス捕集管の送付のために2~3日のタイムラグを置いて測定を行った. その結果, 採取日当日に TCD-GC で測定したメタン濃度の分析結果 (Table 2) と異なり, メタン濃度が低く, サンプルガスの散逸とそれに伴う空気の混入が示唆された. 特に, No. 1 の試料については, 分析の結果, 大気と同レベルの酸素が混入していたことが明らかになったため, 以後の議論には使用しないこととした. 本研究では, メタン濃度の放出量等の定量的議論にあたっては Table 2 の値を用いることとし, Table 3, Table 4 の値による議論は, この条件を加味したうえで行うこととした. なお, Table 4 に示してはいないものの, ブタン (i-C₄, n-C₄), ペンタン (i-C₅, n-C₅), ヘキサン (n-C₆) についても分析を行ったが, いずれも検出されなかった.

3.3 温泉付随ガスの炭化水素系可燃性天然ガスの起源と挙動

炭化水素系可燃性天然ガスとして大部分を占める生物起源ガスは, 微生物分解起源ガス (Microbial) とケロジェンの熱分解起源ガス (Thermogenic) に大別される.

Table 3 C₁/(C₂+C₃) and δ¹³C in inflammable natural gas and CO₂ contents in incidental gas from hot spring water in Nagashima area.

Well ID	C ₁ /(C ₂ +C ₃)	δ ¹³ C (‰)					
		C ₁	C ₂	C ₃	i-C ₄	n-C ₄	CO ₂
No. 1	780.48	-17.4					-12.8
No. 2	3018.49	-44.4	-35.6				-13.7
No. 3	2673.52	-50.3	-38.6				-9.6
No. 4	4336.06	-56.7	-32.4	-25.5			-11.7
No. 5	3058.23	-48.5	-40.2				-15.1
No. 6	3507.11	-43.5	-28.9				-13.7
No. 7	4315.30	-56.0	-28.3				-14.8
No. 8	3876.45	-48.8	-34.5				-15.4
No. 9	6757.32	-58.5					-14.1
No. 10	3847.55	-42.4					-13.7
No. 11	5827.77	-60.3					-15.1

Table 4 Chemical composition of incidental gas from hot spring water in Nagashima area.

Well ID	Gas composition (vol.%)					
	O ₂	N ₂	C ₁	C ₂	C ₃	CO ₂
No. 1	19.82	77.89	2.16	0.003	<0.001	0.13
No. 2	9.91	47.78	41.46	0.013	0.001	0.83
No. 3	7.12	39.54	52.39	0.019	<0.001	0.93
No. 4	0.79	21.03	77.53	0.017	0.001	0.62
No. 5	11.11	60.08	28.66	0.009	0.001	0.14
No. 6	12.95	58.49	28.33	0.008	<0.001	0.22
No. 7	9.69	56.85	33.20	0.008	<0.001	0.25
No. 8	11.84	57.61	30.26	0.007	0.001	0.29
No. 9	13.01	70.43	16.34	0.002	<0.001	0.21
No. 10	13.96	63.71	22.06	0.005	0.001	0.27
No. 11	9.96	62.80	27.04	0.005	<0.001	0.20

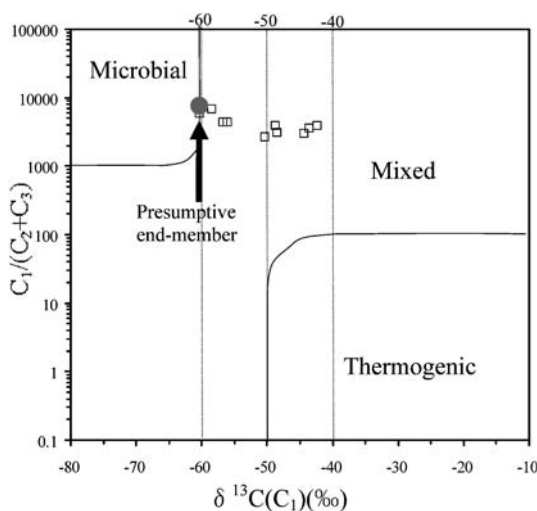


Fig. 4 Correlation between $C_1/(C_2+C_3)$ and $\delta^{13}C(C_1)$ observed in this study.

これらの2つの起源のガスは、メタン/(エタン+プロパン)比(以下、 $C_1/(C_2+C_3)$)や炭素同位体比の化学的特徴が異なる。 $C_1/(C_2+C_3)$ が高く(通常1,000以上)、メタン炭素同位体比が小さい(通常-60‰以下)ガスは、一般に微生物による有機物の分解で生成したガスとみなされる。一方で、 $C_1/(C_2+C_3)$ が低く(通常100以下)、メタン炭素同位体組成比が大きい(通常-50‰以上)ガスは、一般にケロジェン由来の熱分解起源ガスとみなされており、商業的に稼行されている天然ガス田は熱分解起源ガスが圧倒的に多い(早稲田・岩野2007)。

このことをふまえて、本研究で得られた温泉付随ガスの炭化水素系可燃性天然ガスの分析結果から、これらの起源と賦存状況について、以下に考察する。

Figure 4に $\delta^{13}C(C_1)$ と $C_1/(C_2+C_3)$ の相関プロット図を示す。この相関プロット図からわかるように、長島温泉のメタン炭素同位体比は-60~-40‰程度であり、また、 $C_1/(C_2+C_3)$ は、1,000~

10,000 程度と、微生物分解起源の組成領域付近にプロットされた。

ただし、特に炭素同位体比については、 -60% から -20% 程度の同位体比が大きい方向への連続的なプラスシフトが認められる。特にその傾向が顕著な No. 1 については、 $\delta^{13}\text{C}(\text{C}_1)$ が -17.4 の分析値が得られているが、 O_2 が $19.82\text{ vol}\%$ であり、大気とほぼ同じ濃度レベルである。しかし、 C_1 、 C_2 、 CO_2 の濃度は大気とは明らかに異なるので、単純に大気と入れ替わったのではなく、ガス捕集管の栓を通して、選択的にガスが入れ替わったと考えられる。質量の軽い炭素が濃度の低い大気中へ散逸しやすい性質を考慮すると、同位体分別が進行した可能性が高く、同位体組成の重い方向への連続的なシフトは、このことによって説明される。このことから、本プロット図から推定される本源ガス（エンドメンバー）は、微生物分解起源ガスの組成領域の $\delta^{13}\text{C}(\text{C}_1)$ がおよそ -60 、 $\text{C}_1/(\text{C}_2 + \text{C}_3)$ がおよそ $6,000$ の付近に位置することが推定される。

Fig. 5 に、温泉付随ガス中のメタン炭素同位体比 ($\delta^{13}\text{C}(\text{C}_1)$) とエタン炭素同位体比 ($\delta^{13}\text{C}(\text{C}_2)$) のプロット図を示す。プロット図上の曲線は、秋田・新潟地域におけるメタン・エタンおよび炭素同位体組成と Berner and Faber (1996) のモデルから推定される熟成ラインである。熟成が進むとともに、曲線に沿ってプロット図右上に向かって同位体比がシフトする。熟成の度合いを評価するために、ビトリナイト反射率が利用される。曲線上に示した数値 R_o (%) はビトリナイト反射率を示す (早稲田ら, 2002)。

熱分解熟成ラインと長島地域のプロットエリアは大きく異なり、長島温泉のメタン炭素同位体比、エタン炭素同位体比ともに炭素同位体組成は軽いことが明らかである。ただし、熱分解ガスと微生物分解起源ガスの混合ライン上にもプロットされないのは、ガスサンプリング後の同位体分別

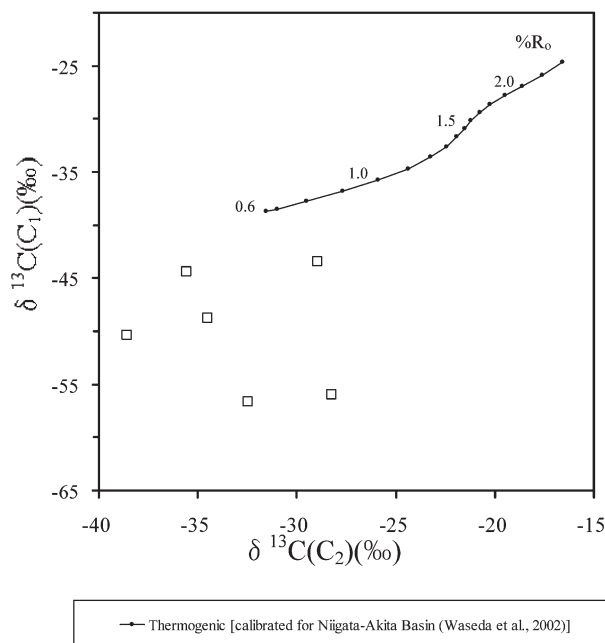


Fig. 5 Correlation between $\delta^{13}\text{C}(\text{C}_1)$ and $\delta^{13}\text{C}(\text{C}_2)$ observed in this study. The vitrinite reflectance/methane and ethane carbon isotope composition line is obtained by calculations using formulas from Waseda *et al.* (2002) and Berner and Faber (1996). $R_o(\%)$ indicates vitrinite reflectance.

による炭素同位体比のプラスシフトによる影響と推測される。

3.4 長島地域に湧出する温泉から放出される天然ガス量の試算とエネルギー実用化可能性検討

本研究によって得られた結果を用いて、長島地域に湧出する温泉付随ガス中の天然ガス量の試算と、それを石油代替エネルギーとして実用化する可能性について、検討した。

Table 2 に示したように、調査対象とした温泉の中で最もメタン放出量が多いのは No. 3 で、揚湯ポンプを 12 時間稼働と仮定した場合、放出量は $239\text{m}^3/\text{日}$ と見積もられた。No. 3 の直近に隣接する No. 2 は $24\text{m}^3/\text{日}$ であるから、両源泉の温泉付随ガスを分離しているガスセパレータは日量 263m^3 のメタンガスを大気放出していると推定される。次いで、No. 1 のメタン放出量が $78\text{m}^3/\text{日}$ 、No. 10 は $24\text{m}^3/\text{日}$ 、No. 8 は $18\text{m}^3/\text{日}$ 、No. 11 は $11\text{m}^3/\text{日}$ と算出される。

これらのデータから、長島地域全体で考えると、温泉の人為的揚湯によって、日量約 400m^3 、年間約 $15\text{万}\text{m}^3$ のメタンが大気放出されていると推定される。燃料ガスを 1m^3 当たり 100 円として金額換算すると (東京ガス株式会社 (2012) の web サイトに掲載された一般契約料金ガス料金表 (東京地区) の基準単位料金 $61.42\sim 152.97\text{円}/\text{m}^3$ より、平均的な基準単価として 1m^3 当たり 100 円/ m^3 と仮定した)、最もメタン放出量の多い温泉で年間 870 万円分、長島地域全体で年間 1,500 万円分の天然ガスが大気放出されていると推計される。

加えて、メタンは二酸化炭素の 21 倍の温室効果がある (環境省自然環境局自然環境整備担当参事官室, 2009)。このことから、温室効果ガス (二酸化炭素換算) の排出量として計算すると、長島地域全体で、日量約 $8,700\text{m}^3$ 、年間約 $320\text{万}\text{m}^3$ の排出量があると見積もられる。したがって、温泉付随ガス中の天然ガスのエネルギー利活用は、地球温暖化対策上も有効である。

これらの試算値を鑑みると、実用化のメリットは十分にあるように見受けられるが、実際にはいくつかの現実的な課題がある。課題要因の中からいくつかを列举すると、まず鉱業法 (1950 年 (昭和 25 年) 12 月 20 日 法律第 289 号) の規定が挙げられる。同法の規定では、鉱山によって得た利益から鉱区税を支払うことが必要である。また、2012 年 (平成 24 年) 1 月 21 日に施行された改正法により、可燃性天然ガスは「特定鉱物」としての取扱いを受けることとなった。このため、従来の先願方式が改められ、採掘地を国が鉱区候補地 (特定区域) として指定し、開発事業者を募集する方式に改正された。このことにより、新規の事業者が鉱区を新たに取得しようとする場合は、従来のように随時申請ができないこととなる。

その他、鉱山保安法も大きな課題要因のひとつとなっている。鉱山保安法では保安統括者・保安管理者の選任が必要であるが、これには 3 年ないしは 5 年の実務経験年数が必要であり、鉱山自体が少なくなっている我が国においては、保安統括者・保安管理者の地域的偏在が問題となっている。また、事業化の内容によっては、電気事業法やガス事業法等、他法令の規制を受ける等、数多くの課題要因が存在する。

その一方で、環境省は「温泉エネルギー活用加速化事業」や「再生可能エネルギー等導入推進基金事業 (グリーンニューディール基金)」による補助を行う等、温泉付随ガスのエネルギー活用に対して、推進する姿勢を見せている。これらのエネルギー利活用を推進させるためには、これらの事業に対するインセンティブを与える助成制度を構築するとともに、特区制度の活用等による一定程度の規制緩和も検討されるべきではないかと思われる。

5. ま と め

本研究によって、以下の知見が得られた。

- ・長島地域から湧出する温泉水は、酸素・水素安定同位体比の分析の結果、天水線上にプロットされた。このことから、現世海水や化石海水の直接的な帯水層への影響は、ほとんどないことが明らかになった。
- ・長島地域から湧出する温泉で、メタンの大気放出量は、最も多い温泉で日量 239 m³であった。長島地域全体では、年間 15 万 m³のメタンが放出されていると推算された。
- ・これらのメタンを天然ガスとして金額換算すると、最も多い温泉で年間 870 万円分、長島地域全体では、1,500 万円分の価値に相当すると推定された。
- ・長島地域から湧出する温泉付随ガス中メタン、エタンの炭素同位体比は比較的小さいことから、これらは微生物分解起源ガスを主体としていることが明らかになった。

調査の結果から、木曾川ガス田の周縁に位置する長島地域から湧出する温泉付随ガスには、相当量の可燃性天然ガスが含有されており、一部温泉では商業的な利用が可能なレベルにあることが明らかになった。しかしながら、本研究で対象とした長島地域は、全国的に見てそれほど天然ガスの湧出量が突出して多い地域ではない。このような温泉付随ガスの有効活用を行うに値する地域は、全国的にも数多く存在している。

このように温泉付随ガスとして天然ガスが湧出する環境に恵まれていながら、実際には有効活用が進んでいない要因のひとつとして、本研究では鉱業法や鉱山保安法の規制を挙げた。これらの法規制は、比較的大規模な鉱山を想定しているため、温泉付随ガスの有効活用を行うような小規模な「鉱山」が想定されておらず、現状として法規制に合致するような整備へのハードルが高いためである。

エネルギーのパラダイムシフトに対する社会的要請が高まる中で、現在国を挙げて開発を進めている南海トラフで採取されるメタンハイドレートやシェールガスと、物質としては同一である温泉付随ガスもまた、これまで以上に着目されるべきであろう。

謝 辞

温泉付随ガスの採取にあつては、長島観光開発株式会社総務課今中稔主任心得、林護管理課長、長島総合開発株式会社伊藤昌史総務部長、名古屋鉄道株式会社不動産事業本部不動産事業部猪野恭平サブチーフ、株式会社名鉄サニールンド牧光一管理部長ほか、多くの方々に献身的な御協力を頂いた。本研究の計画策定、および温泉付随ガスの採取方法やデータ解釈の上で、独立行政法人産業技術総合研究所地質調査総合センター地圏資源環境研究部門の佐脇貴幸地圏化学研究グループ長、金子信行主任研究員、猪狩俊一郎主任研究員、前川竜男主任研究員には有益なアドバイスを頂いた。温泉付随ガスの炭素同位体比分析や図表の作成、データの解釈については、石油資源開発株式会社技術研究所の早稲田周探鉱研究室長、分析グループ古田土俊夫氏、探鉱研究室地球化学グループ奥村文章氏、環境・新技術研究室 CO₂地中貯留グループ赤工浩平グループ長には大変有益なアドバイスを頂いた。ここに記して深謝いたします。

なお、本研究の一部は、公益財団法人岡三加藤文化振興財団研究助成金により進められたものである。

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. *Org. Geochem.*, **24**, 947-955.
- Craig, H. (1961) : Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, **133**, 1702-1703.

- 代田 寧, 小田原啓 (2008): 神奈川県における温泉付随ガスの実態調査結果 (第 1 報). 神奈川県温泉地学研究所報告, **40**, 79-84.
- 猪狩俊一郎 (1996): 日本の天然ガスの炭化水素比間の関係について. 地球化学, **30**, 47-54.
- 環境省 (2002): 鉱泉分析法指針 (改訂) (2002 年 3 月), 1-86.
- 環境省自然環境局自然環境整備担当参事官室 (2009): 地球温暖化防止のための温泉施設における可燃性天然ガスの有効利用・処理ガイドブック, 1-86.
- 小池恭子, 中橋千春, 本多幸康, 伊藤 徹, 林留美子, 三上栄一, 大沼章子 (2009): 愛知県における温泉付随ガスの賦存状況について. 第 46 回全国衛生化学技術協議会年会講演集, 226-227.
- 宮崎哲郎 (2011): 東海地方から発祥した新しい温泉: 大深度非火山性温泉. 東海化学工業会会報, **268**, 7-15.
- 大野武男, 小瀬洋善 (1971): 温泉の泉質に関する調査研究 (第 3 報) —超深層地下水の水質—. 温泉工学会誌, **8**, 1-8.
- 高田康秀, 大塚寅雄, 近藤善教 (1969): 超深層ポーリングと深部地質構成. 名古屋地盤総論, コロナ社, 19-24.
- 東京ガス株式会社 (2012): <http://www.tokyo-gas.co.jp/index.html>
- 内野栄治, 青柳直樹, 中山憲司 (2010): 北海道における改正温泉法によるメタン検出温泉の分布とその地球化学的特徴. 温泉科学, **59**, 282-294.
- 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**, 3-15.
- 早稲田周, 岩野裕継 (2007): ガス炭素同位体比組成による貯留槽評価. 石技誌, **72**, 585-593.
- 矢野美穂, 川元達彦 (2011): 兵庫県下の温泉付随メタンガスの濃度分布とガス分離設備によるメタンの除去. 温泉科学, **61**, 49-63.
- 矢崎清貴 (1976): 日本油田・ガス田分布図 (第 2 版), 地質調査所.
- 吉田史郎, 栗本史雄, 宮村 学 (1991): 桑名地域の地質 地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅). 地質調査所報告, **26**.

(2012 年 9 月 28 日第 65 回日本温泉科学会大会にて発表)