

別府温泉からの地熱性メタン放出量の推定

大沢信二*・網田和宏*

Estimation of Geothermal Methane Flux from Beppu Spa

Shinji OHSAWA* and Kazuhiro AMITA*

ABSTRACT

Methane flux from Beppu spa was estimated to be 40-530 kg/day and 68 kg/day on average from CH₄ / H₂O ratios and discharge rates of steam from steam and boiling spring wells. The geothermal CH₄ annually discharged from Beppu (ca. 3 × 10⁻⁵ Tg/yr) will make quite a slight contribution to the global CH₄ discharge (535 Tg/yr). The CH₄ flux from Beppu is larger than those from Kuju-Iwoyama and Etona volcanoes (2.3 and 0.008 kg/day, respectively), whereas CO₂ flux from Beppu (135 ton/day) is almost equal to or smaller than those from the volcanoes (168 and 1375 ton/day, respectively). This inversion would result from difference on equilibrium conditions of the reaction CO₂ + 4H₂ = CH₄ + 2H₂O in hydrothermal fluid and volcanic gas. Extensive exploitation of low temperature geothermal system might lead to discharge of a large quantity of CH₄ into the atmosphere, because CH₄ is probably produced in large quantities by the expense of CO₂ by the reaction as mentioned above.

1. はじめに

メタン(CH₄)は、二酸化炭素(CO₂)とともに地球温暖化の原因物質(温室効果ガス)として重要視されている物質の一つである。地球大気(対流圏)におけるCH₄濃度は、1.7ppmv程度と、CO₂濃度の200分の1にも満たないが、赤外線吸収効率が大きく(CO₂のその40倍)、産業革命以降1992年までを積算したCH₄の地球温暖化への寄与率は、CO₂に次ぎ約19%を占めている(小倉・一國, 2001)。地球全体でのCH₄の年間発生量は、535 Tgと推定され、発生源としては、湿地、水田、牛などの反芻動物の腸内発酵が重要であると言われている。

温泉地や地熱地帯の自然噴気や噴気井などから放出される蒸気にもCH₄が含まれているが、その放出量はほとんど把握されておらず、他の発生源からの放出量に比べて大きいのか無視できるのかは不明である。地熱性メタンの地球環境への影響を知るためには、世界全域の地熱地帯や温泉地からの放出量を把握しなければならず、地道な観測が必要である。また、ここで対象としているのは陸上の地熱系であるが、海嶺熱水系からの放出量(0.11Mt/year; Welhan and Craig, 1979)と比べて大きいのか小さいのかといった地熱学的視点からも、たいへん興味深い。

本研究では、手始めに、規模・放出水量・放熱量において世界でも最大級である別府温泉の噴気・沸騰泉から放出されるメタンの総量を、水蒸気放出量と化学組成(CH₄/H₂O)の既存データを用いて見積もった。また、同様な方法で、九重火山の噴気地(九重硫黄山)から放出されるCH₄も見積もり、別府温泉の値と比較したところ、若干の知見が得られたので、合わせて報告する。

2. 別府温泉の噴気と沸騰泉

別府温泉は、鶴見岳-伽藍岳連山の東斜面に広がる別府扇状地の北と南に、古来より存在した自然湧出温泉や噴気地帯を核に掘削により開発された温泉地である。この開発により扇状地のほぼ全域に温泉井が分布するまでになったが、1970年以降、泉源数の増加は頭打ちとなった。1985年から1987年の期間の統計によれば、活動源泉の総数は2244、そのうち約250孔(約10%)が噴気と沸騰泉である。数の上では泉温が沸騰点に達しない温泉(別府では慣例的に“一般温泉”と呼ぶ)が大半を占めるが、噴気・沸騰泉からの放出水量は全体の43%を占め、熱量にいたっては78%を占める(由佐, 1995)。噴気・沸騰泉は、扇状地低地部の天満町や照波園町に小規模に分布するものを除く

* 京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設
〒874-0903 大分県別府市野口原
Beppu Geothermal Research Laboratory, Kyoto University, Noguchibaru Beppu 874-0903, Japan

と、標高 100m 以上の高地部に集中して分布し (Fig. 1)、そこから放出される蒸気は湯煙として遠望することができる。

噴気井から放出される蒸気の温度は 100°C を越すこともめずらしくないが、その蒸気は火山ガスではなく、地下に存在する熱水から沸騰・分離してきたものであり (大沢, 2000)、沸騰泉の分離蒸気と化学的には同種のものである。すなわち、別府温泉の場合、沸騰熱水が蒸気とともに地表に噴出するのが沸騰泉、熱水が地下に留まり、蒸気だけが放出されるのが噴気ということになる。

3. 方法

別府温泉に約 250 孔も存在する噴気・沸騰泉の活動状況を把握するための調査が、1959～1961 年、1973～1975 年、1985～1987 年の過去 3 度に渡って行われており、個々の噴気・沸騰泉から噴出する水蒸気量 (D) が計測されている。従って、個々の噴気・沸騰泉から噴出する蒸気の $\text{CH}_4 / \text{H}_2\text{O}$ 比が分かれば、以下の式 [1] から CH_4 放出量の全量 (F) が算出できる。

$$F = \sum [(\text{CH}_4 / \text{H}_2\text{O}) \times D] \quad [1]$$

しかし、上述の噴気・沸騰泉の調査時には、噴出蒸気の $\text{CH}_4 / \text{H}_2\text{O}$ 比は求められておらず、3 回目の調査の後 (1987 年、1994 年および 1998 年と 1999 年) に別の目的で採取された噴出蒸気の化学分析データ (NEDO, 1989; Sturchio et al., 1996; 網田・大沢, 未公表データ) を利用するしかない。しかも、化学分析データが存在する噴気・沸騰泉は (Fig. 1 の ● A から ● O)、全体の 1 割ほどの 15 孔にすぎず、分析データのない噴気・沸騰泉については、何らかの方法で噴出蒸気の

$\text{CH}_4 / \text{H}_2\text{O}$ 比を推定する必要がある。

全ての噴気・沸騰泉から放出される水蒸気の含量の経年変化を、別府温泉の温泉井 (噴気+沸騰泉+一般温泉) の総数および温泉井からの全放出熱量の経年変化とともに Fig. 2 に示す。温泉井の数の増加が頭打ちとなった 1970 年以降、噴気・沸騰泉からの全水蒸気放出量は、温泉井からの全放出熱量と同様に大きく変化していないことが示されている。また、1980 年以降は沸騰泉の熱水の化学組成にも大きな変化は見られないことから (Yusa et al., 2000)、1980 年以降であれば、異なる年に測定された水蒸気放出量と噴出蒸気の化学分析データを使っても、 CH_4 放出量の概算に大きな支障とならないと考える。そこで、個々の噴気・沸騰泉からの水蒸気放出量のデータは、1985 年から 1986 年にかけて計測可能な井戸 (194 孔) において測定された値 (由佐ほか, 1987) を用いることにした。

蒸気の $\text{CH}_4 / \text{H}_2\text{O}$ 比が求まっている先の 15 の噴気・沸騰泉 (Table 1) について、水蒸気の放出量と CH_4 の噴出量の関係を調べたところ、Fig. 2 に示すような穏やかな正の相関があることが判った。実線 a が回帰直線で、相関係数は 0.5 程度である。そこで、分析データ ($\text{CH}_4 / \text{H}_2\text{O}$ 比) のない噴気・沸騰泉については、この回帰直線を用いて、上述の水蒸気放出量の実測値から CH_4 の放出量を算出した。また、推定の上限と下限を示すために、Fig. 3 の点線 b と破線 c を用いて同様に CH_4 の放出量を推定した。以上のようにして求めた個々の噴気・沸騰泉からの CH_4 放出量を合計して、全量とした。

九重硫黄山から放出される CH_4 の全量は、神宮寺・江原 (1996) によって求められている 3 つの噴気地帯 (A - , B - , C - リージョン) からの全水蒸気放出量 (1995 年 7 月 28 日に測定) と、大沢ほか (1997) によ

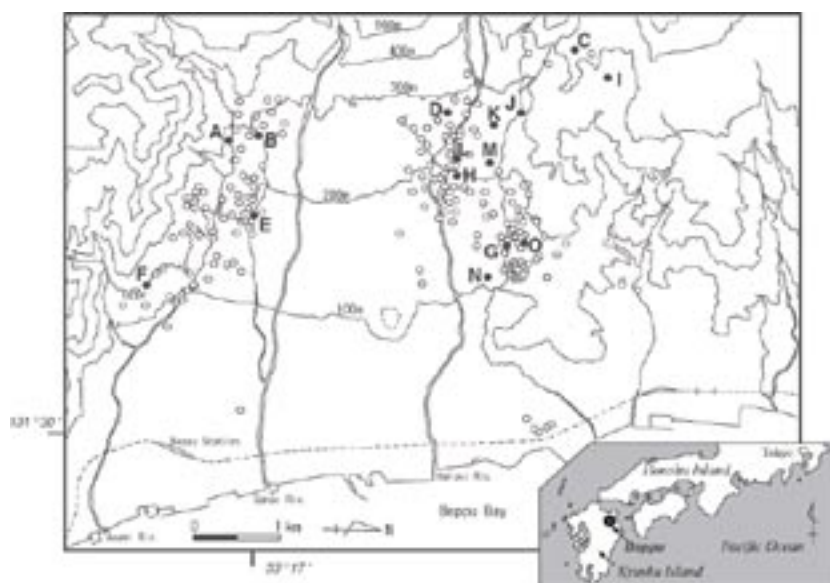


Fig. 1 Location map of steam wells and boiling spring wells in the Beppu spa. English alphabets correspond to those in Table 1.

て高温噴気孔（166℃～297℃）から採取された火山ガスの化学分析値（1995年8月8日と31日に採取）を用いて、上述の式〔1〕より算出した。

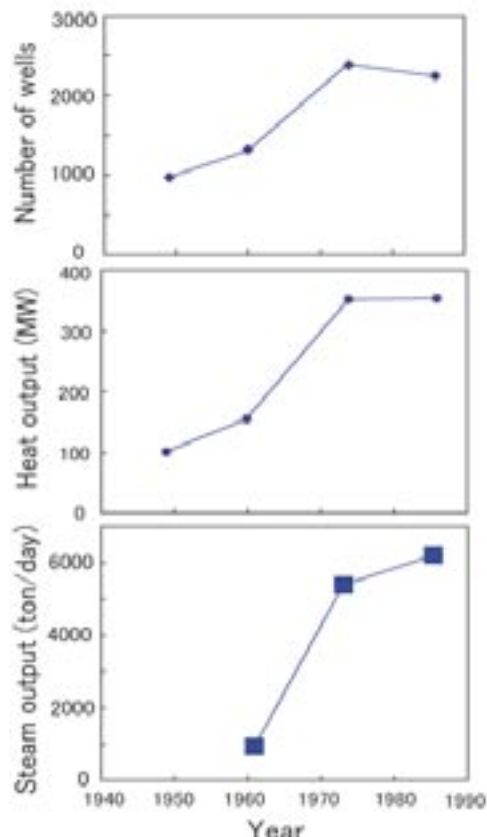


Fig. 2 Changes in the number of drilled wells, heat output from the whole drilled wells and steam output from steam and boiling spring wells in the Beppu spa.

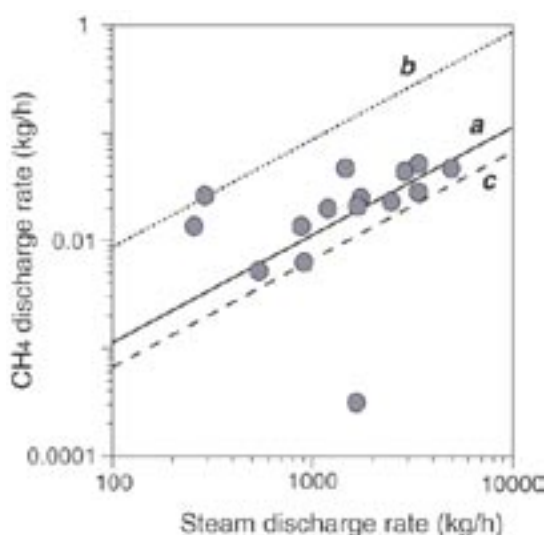


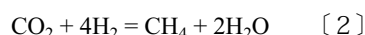
Fig. 3 Relationship between steam and CH₄ discharge rates of the 15 steam and boiling spring wells (● A to ● O in Fig. 1) in the Beppu spa. For lines a, b and c see text.

4. 結果および考察

第3項で示した方法によって見積もった別府温泉の噴気・沸騰泉から放出されるCH₄の全量を、九重硫黄山の噴気地帯からのそれとともに Table 2 に示す。また同表には、文献値として、エトナ火山から放出されるCH₄量も掲載した。さらに、CH₄放出量との比較検討のために、別府温泉、九重硫黄山、エトナ火山からのCO₂の放出量（火山体から土壌CO₂として放出される分は除く）の文献値も載せた。

別府温泉のCH₄の放出量は、1日あたり40～530kg（平均的な値：68kg/day）と推定され、1年間の放出量に換算すると $1.5 \times 10^5 \sim 1.9 \times 10^4$ Tg となり、地球全体でのCH₄の年間発生量の535 Tg (IPCC, 1994) の千万分の1～百万分の1程度であることが判った。仮に、別府温泉クラスの規模の温泉地・地熱地域が全世界に1,000存在するとしても、地熱性CH₄の発生量は地球全体でのその千分の1から1万分の1の寄与でしかない。

以上のように、別府温泉から放出されるCH₄は、少なくとも量的には、地球環境（大気）に大きな影響を与えている可能性は少ないと言えるが、活火山からのCH₄の放出量に比べると意外にも無視できないことが判明した。即ち、別府温泉のCH₄の放出量40～530kg/dayは、九重硫黄山の2.3kg/dayより1桁ないし2桁多く、エトナ火山の 8×10^{-3} kg/day に比べると1,000倍以上であることが判った。これは、別府温泉からのCO₂放出量135ton/dayが、九重硫黄山の168ton/dayとほぼ同じ、エトナ火山の1375ton/dayより小さいのと対照的である。CH₄の放出量については地熱系の方が大きく、CO₂については火山の方が大きいという関係は、地熱流体内や火山ガス中で生じている以下の化学反応の平衡状態の違いを反映したものと考えられる。



つまり、一般に、地下における地熱流体の温度は、火山ガスのそれより低く（例えば、別府温泉の本源地熱流体は約300℃（大沢, 2000）、九重硫黄山のマグマからの火山ガスは500～600℃（平林ほか, 1996））、また、地熱流体の方が火山ガスより低酸化状態の地下環境に置かれていることが多いので、化学反応〔2〕の平衡が地熱流体ほど右に偏るからであろう。

この知見は、以下に示すような重要な示唆を与えていると思われる。現在の地熱開発では、別府温泉と同様な高温の地熱系をターゲットとしているが、より低温の地熱系が開発対象となった場合は、上述の化学反応〔2〕の平衡移動によってより多くのCH₄が生成している可能性があるため、掘削により地下から多量のCH₄が大気中へ開放されることになるかもしれないということである。調査の段階で、地熱流体のCH₄濃度に注意を払っておく必要がある。

Table 1 Steam discharge rates, CH₄/CO₂ ratios and calculated CH₄ discharge rates from 15 steam and boiling spring wells in the Beppu spa

| Location No. | Discharge Temp. (°C) | Steam discharge rate ^s (kg/h) | CH ₄ /H ₂ O (μ mol/mol) | CH ₄ discharge rate (kg/h) | Sampling date | Reference |
|----------------|----------------------|--|---|---------------------------------------|---------------|-----------|
| A | 129 | 900 | 16 | 0.013 | Aug. 1994 | [1] |
| B | 132 | 552 | 9.9 | 0.005 | ditto | ditto |
| C | 120 | 3473 | 16 | 0.049 | ditto | ditto |
| D | 99 | 1786 | 15 | 0.024 | ditto | ditto |
| E | | 2538 | 9.8 | 0.022 | Sep. 1987 | [2] |
| F | | 1498 | 34 | 0.045 | ditto | ditto |
| G [#] | | 296 | 94 | 0.025 | ditto | ditto |
| H | | 5068 | 10 | 0.045 | ditto | ditto |
| I [#] | 98 | 2958 | 16 | 0.042 | Nov. 1998 | [3] |
| J | 120 | 1717 | 13 | 0.020 | ditto | ditto |
| K [#] | 98 | 262 | 54 | 0.013 | ditto | ditto |
| L | 98 | 1224 | 17 | 0.019 | ditto | ditto |
| M | 123 | 928 | 7.3 | 0.006 | Dec. 1998 | ditto |
| N [#] | | 1694 | 0.2 | 0.0003 | Jan. 1999 | ditto |
| O | | 3464 | 8.7 | 0.027 | ditto | ditto |

(Remarks) [1]: Sturchio et al. (1996), [2]: NEDO (1989), [3]: Amita and Ohsawa, unpublished data
[#] : Boiling spring well, ^s : data collected between 1985 and 1986 (Yusa et al., 1987)

Table 2 Estimated values of CH₄ and CO₂ fluxes from the Beppu spa with those from active volcanoes

| Name | Flux ^s | |
|----------------------|--------------------------|---------------------------|
| | CH ₄ (kg/day) | CO ₂ (ton/day) |
| Beppu spa | 68 (40~530) | 135 [2] |
| Kuju-Iwoyama volcano | 2.3 | 168 [3] |
| Etona volcano | 8 x 10 ⁻³ [1] | 1375 [1] |

(Remarks) ^s: except for diffusive emission of soil gas, [1]: Lu Guern et al/ (1988), [2]: Yusa et al. (1975), [3]: Ehara et al. (1981)

5. まとめ

別府温泉に約 250 孔存在するの噴気・沸騰泉のうち十数点について、水蒸気放出量とメタン放出量の関係を調べたところ、正の相関関係（相関係数 0.5 程度）が認められた。そこで、この関係を利用して、194 孔の噴気・沸騰泉から放出される蒸気量からメタン放出量を計算し、合算してメタンの全放出量を求めた。その結果、別府温泉からのメタンの全放出量は、1 日当たり 40 ~ 530kg と推定され、1 年間の放出量に換算すると、 10^{-5} Tg オーダーであることが示された。この量は、地球全体での CH_4 の年間発生量 535 Tg/year に比べ極めて小さい。しかし、1 つの火山からの CH_4 放出量（九重硫黄山；2.3kg/day、エトナ火山；0.008kg/day）と比べると、かなり大きいことが判明した。これは、別府温泉からの CO_2 放出量（135ton/day）が、火山からの CO_2 放出量（九重硫黄山；168ton/day、エトナ火山；1375ton/day）と同じか小さいのと対照的である。 CH_4 の放出量については地熱系の方が大きく、 CO_2 については火山の方が大きいという関係は、地熱流体内や火山ガス中で生じる化学反応（ $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 = \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ ）の平衡状態の違いを反映したものと考えられる。地熱性 CH_4 の主要な部分は、この化学反応によって CO_2 から生じたものであり、地下の地熱流体の温度が低いほど平衡移動によってより多くの CH_4 が生成している可能性がある。現在の地熱開発では、別府温泉と同様な高温度の地熱系をターゲットとしているが、より低温の地熱系が開発対象となった場合は、掘削により地下から多量に開放されるかもしれない CH_4 に注意を要する。

参考文献

江原幸雄・湯原浩三・野田徹郎（1981）：九重硫黄山からの放熱量・噴出水量・火山ガス放出量とそれらから推定される熱水系と火山ガスの起源。火山, Vol.26, 35-56.

平林順一・大場武・野上健治（1996）：九重山 1995 年 10 月噴火と地球化学的研究。文部省科学研究費（No.07300017）突発災害調査研究成果報告書「1995 年 10 月九重火山の水蒸気爆発の発生機構と火山活動推移の調査・研究」, pp63-73.

IPCC（1994）：Climate Change 1994, Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios. Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Bruce, J., Hoesung L, Callander, B.A., Haites, E.F., Harris, N., Maskell, K. (eds), Cambridge University Press, Cambridge, UK.

神宮寺元治・江原幸雄（1996）：最大噴気直径を利用

した火山噴気放出量及び放熱量測定法。火山, Vol.41, 23-29.

LeGuern, F., Faivre-Pierret, R.X., Garrec, J.P.（1988）：Atmospheric Contribution of Volcanic Sulfur Vapor and its Influence on the Surrounding Vegetation. J. Volcanol. Geotherm. Res., Vol.35, 173-178.

NEDO（1990）：平成元年度全国地熱資源総合調査（第 3 次）広域熱水流動系調査 鶴見岳地域 流体地化学調査 報告書要旨, 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 236.

大沢信二・由佐悠紀・大上和敏・北岡豪一（1997）：阿蘇火山地域から放出される噴気ガスの不活性ガス組成, 温泉科学, Vol.47, 56-67.

大沢信二（2000）：噴気ガスの化学・同位体組成からみた別府温泉の地熱流体の起源及び性状, 大分県温泉調査研究会報告, Vol.51, 19-28.

小倉紀雄・一国雅巳（2001）：環境化学, 裳華房, pp33-34.

Sturchio, N.C., Ohsawa, S., Sano, Y., Arehart, G., Kitaoka, K., Yusa, Y.（1996）：Geochemical characteristics of the Yufuin outflow plume, Beppu hydrothermal system, Japan. Geothermics, Vol.25, 215-230.

Welhan, J.A., Craig, H.（1979）：Methane and hydrogen in East Pacific rise hydrothermal fluids. Geophys. Res. Lett., Vol.6, 829-831.

由佐悠紀・大石郁朗・川野田実夫（1987）：別府地熱地帯における噴気・沸騰泉の観測（資料）. 昭和 61 年度科学研究費補助金 一般研究 (B) 研究成果報告書「地熱地帯における地熱水循環過程の研究（59460041）」, 52-67.

由佐悠紀・野田徹郎・北岡豪一（1975）：地熱地域を含む温泉地からの流出水量、熱量および化学成分量, 温泉工学会誌, Vol.10, 94-108.

由佐悠紀（1995）：別府地域の温泉と物理。「別府の自然」, 別府市環境部環境保全課, 55-83.

Yusa, Y., Ohsawa, S., Kitaoka, K.（2000）：Long-term changes associated with exploitation of the Beppu hydrothermal system, Japan. Geothermics, Vol.29, 609-625.