

ビトリナイト反射率から最高被熱温度を推定するための EASY%R₀ 解の近似式
Approximations of EASY%R₀ solutions to estimate maximum experienced temperature from
vitrinite reflectance

○金木俊也・野田博之

○Shunya KANEKI, Hiroyuki NODA

Vitrinite reflectance is commonly used as a paleotemperature proxy for rocks. Among various models used to reconstruct paleothermal histories, EASY%R₀ model has been widely used since 1990. Approximations of EASY%R₀ solutions have been used in the field of structural geology to estimate maximum paleotemperatures. However, comparisons of those approximations with results obtained with EASY%R₀ have not been published, and the errors on the approximations and the limitations of their use remain undocumented. Here, we performed such comparisons and found that the use of those approximations can lead to considerable deviations from the results obtained with EASY%R₀. We then derived new approximations of EASY%R₀ solutions that produced deviations less than 3°C from those obtained with EASY%R₀. We also describe the Jacobian of EASY%R₀, which can be used to propagate errors from vitrinite reflectance to maximum experienced temperature.

1. はじめに

ビトリナイト反射率は、代表的な岩石の被熱履歴指標の一つである。ビトリナイト反射率から岩石の熱史を推定するモデルの中でも、Sweeney & Burnham (1990) (以下、SB1990) によって提案された EASY%R₀ モデルは幅広い分野で用いられてきた。特に構造地質学分野では、EASY%R₀ モデルの元で特定の被熱時間を仮定することで、ビトリナイト反射率から最高被熱温度を推定するための近似式が提案されている (例えば Laughland & Underwood, 1993; Ohmori et al., 1997, 以下それぞれ LU1993; O1997)。しかし、これらの近似解と EASY%R₀ 解との比較の詳細な報告はなく、近似誤差や適用可能な反射率の範囲も不明であった。そこで本研究では、EASY%R₀ 解と近似解との比較を行い、近似誤差および適用可能範囲を評価した。また特定の被熱履歴を仮定することで、既往の近似式よりも小さな近似誤差と広い適用可能範囲を持つ新たな近似式を提案した。EASY%R₀ モデルでのビトリナイト反射率から最高被熱温度への誤差伝播に関する議論も行った。なお、本研究は Kaneki & Noda (2020) によって地質学雑誌に出版されているため、そちらも合わせて参照されたい。

2. EASY%R₀ モデル

SB1990 は、ビトリナイト粒子の複雑な熟成反

応がアレニウスの式に従う一次の化学反応の線形結合で表現できると仮定した。このとき i 番目の反応要素の反応率 ξ_i は、

$$\frac{d\xi_i}{dt} = A(1 - \xi_i) \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right)$$

と記述できる ($i = 1, \dots, 20$)。 A は頻度因子、 E_i は i 番目の反応要素の活性化エネルギー、 R はガス定数、 T は絶対温度である。合計反応率 F は、 i 番目の反応要素の重み f_i を用いて、

$$F = \sum_i f_i \xi_i$$

と表せる。最終的にビトリナイト反射率 R_0 は、

$$R_0 [\%] = \exp(-1.6 + F)$$

から計算される ($0.20\% < R_0 [\%] < 4.7\%$)。一般に絶対温度は時間の関数 $T(t)$ であるため、本研究では2つの代表的な温度履歴として等温過程および等昇温過程を仮定し、EASY%R₀ 解を計算した。

3. EASY%R₀ モデルの近似式

O1997 は、 $t_d = 40$ [Myr] かつ等温過程の元で、EASY%R₀ 解が以下の式で近似できるとした。

$$T_{\max} [^\circ\text{C}] = 172 \log_{10}(R_0 [\%]) + 129$$

一方 LU1993 は、 $t_d = 1$ or 10 [Myr] での EASY%R₀ 解を以下の式で近似できるとした。

$$T_{\max} [^\circ\text{C}] = 93 \ln(R_0 [\%]) + 174 \quad (1 \text{ Myr})$$

$$T_{\max} [^\circ\text{C}] = 90 \ln(R_0 [\%]) + 158 \quad (10 \text{ Myr})$$

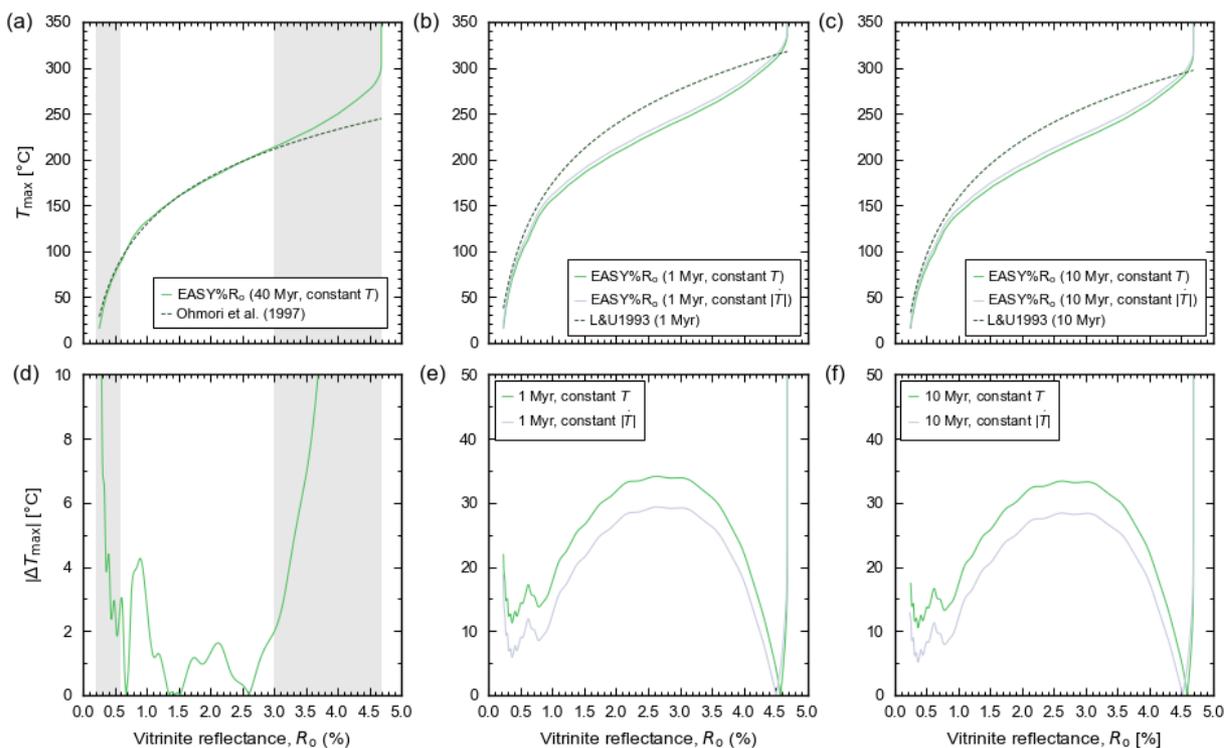


図. EASY%Ro 解と近似解との比較。

それぞれの近似解と EASY%Ro 解の比較を行った結果を図に示す。LU1993 は近似式を適用できる被熱履歴を報告していないため、ここでは等温過程および等昇温過程双方との比較を行った。

O1997 の近似解は、彼らが近似解を適用した反射率の範囲 $0.6\% < R_o[\%] < 3.0\%$ において、近似誤差が $5\text{ }^\circ\text{C}$ 以下となっている。一方 LU1993 の解は、どの被熱時間・被熱履歴においても EASY%Ro 解と著しく異なっており、その近似誤差は $R_o[\%] < 4.5\%$ の範囲で $5\text{--}34\text{ }^\circ\text{C}$ であった。よって、LU1993 の解を EASY%Ro の近似解として使用するのは問題であると考えられる。

これらを踏まえて、我々は既往の近似式よりも小さな近似誤差と広い適用可能範囲を持つ新たな近似式を導出した。被熱履歴は等温過程もしくは等昇温過程、被熱時間は 1 もしくは 10 Myr の元では、EASY%Ro 解を以下の式でよく近似できる。各係数は被熱履歴に依存する定数であり、Levenberg-Marquardt 法による最小二乗フィットで決定した。得られた近似解は、仮定した全ての

被熱履歴において近似誤差が最大でも $3\text{ }^\circ\text{C}$ 以下、反射率が 1% 以上の領域では近似誤差が $1\text{ }^\circ\text{C}$ 以下であった。また、測定した反射率から最高温度への誤差伝播を計算するため、得られた近似解の数値微分からヤコビアンを計算した。ただし本研究で導出した近似式は特定の被熱履歴でのみ適用可能なものであり、他の被熱履歴もしくはより正確な値が必要な場合、直接 EASY%Ro 解を数値的に計算する必要があるだろう。

[参考文献]

Kaneki, S. and Noda, H., 2020, *J. Geol. Soc. Jpn.*, 126, 655–661.
 Laughland, M. M. and Underwood, M. B., 1993, *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, 273, 25–44.
 Ohmori, K., et al., 1997, *Geology*, 25, 327–330.
 Sweeney, J. J. and Burnham, A. K., 1990, *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.*, 74, 1559–1570 (corrected in 1991, *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.*, 75, 848).

$$T_{\max} [^\circ\text{C}] = \begin{cases} a_1 \ln(R_o [\%]) + a_2 & (0.30\% \leq R_o [\%] < 0.95\%) \\ b_1 \ln(R_o [\%]) + b_2 & (0.95\% \leq R_o [\%] < 2.23\%) \\ c_1 \ln\left(\frac{R_o [\%]}{c_2 - R_o [\%]}\right) + c_3 & (2.23\% \leq R_o [\%] \leq 4.60\%) \end{cases}$$