Horner プロット法による平衡地層温度の信頼性

佐々木 詔 雄*

(昭和62年1月12日受付, 62年3月16日受理)

A Reliability of Horner-plot Method for Estimating Static Formation Temperature from Well Log Data

By

Akio SASAKI

Abstract: A static formation temperature (TBU) is estimated from bottom-hole temperature (BHT) circulating time (t_k) and the elapsed time after circulation stopped (Δt), using a Horner-plot method. TBU is compared with reservoir temperature measured in conjunction with bottom-hole pressure survey (TBHP) or with drill stem test (TDST) in the oil and gas fields with various geothermal gradients.

The Horner-plot method gives a reliable static formation temperature in regions of low geothermal gradient. The TBU in high temperature wells is lower than TDST and TBHP. The difference between TBU and TDST or TBHP in the regions of the high geothermal gradient is caused basically by the equation Eq. 1 of the Horner-plot method.

$$BHT = T_f - C \log \frac{(t_k + \Delta t)}{\Delta t} \quad \text{Eq. 1}$$

Where, T_f is true formation temperature.

According to DOWDLE and COBB (1975), comparative analytical studies of the temperature buildup and pressure buildup using the diffusivity equation showed that the two method are not completely analogous. And, Eq. 1 is not correct theoretically.

MIDDLETON (1982) has proposed that the temperature behavior at the bottom-hole was presented by the equation Eq. 2.

$$BHT = T_m + (T_f - T_m) [\exp(-a^2/4\kappa \cdot \Delta t)] \quad \text{Eq. 2}$$

Where, borehole of radius a , thermal diffusivity κ . As compared with Eq. 2, Eq. 1 does not include main factors of the thermal diffusivity and mud temperature (T_m) in BHT stabilization model.

However, the Horner-plot method is useful to estimate the reliable static formation temperature from BHT in the regions of low to middle geothermal gradient less than about 4°C/100 m. A careful observation is necessary in approximating TBU at the high-temperature field.

1. はじめに

正確な地層温度は、炭化水素の生成、自生鉱物の晶出、貯留岩の特性変化など、堆積物の続成変化の考察、陸域や大陸棚周辺の地殻熱流量の推定 (SEKIGUCHI, 1984) および地下の熱的構造の探究にとって不可欠である。また、油層工学的研究、掘削計画の作成や掘削時における坑井管理特にセメンティング、並びに油・ガス田の開発生産技術分野における機器材の選定になくてはならない重要な基礎データの一つでもある。

地下の地層温度分布を求めるとき、最も信頼できる温度資料は、油・ガス田の生産井における貯留岩の坑底圧測定時に計られた最高温度 (以下、坑底圧測定時温度: TBHP) である。また、試験掘井の産出テスト (Drill Stem Test) 時に記録された温度 (以下、DST 測定時温度: TDST) も真の地層温度に近似するとみなされている。しかし、これらの温度は、いずれも堆積盆地の局部的場所 (油田やガス田など) でしか得られず、地下数1,000mの地質断面のうちごく限られた深度に偏り、十分に地下の温度分布を反映していない。

そのため、TDST や TBHP のない深度、または構造

* 三井石油開発株式会社

ではそれに代わるものとして、通常の物理検層の実施時に測定される坑底温度（検層時坑底温度、 BHT ）を補正した値が利用されている。この検層時坑底温度から平衡地層温度（Static Formation Temperature）を求める方法には、TIMKO and FERTL (1972)、DOWDLE and COBB (1975)、NWACHUKWU (1976)、MIDDLETON (1979, 1982) や佐々木 (1985) などによって提唱された幾つかの手法がある。FERTL (1985) は、次の2つの方法が信頼性のある平衡温度の概算値を与えると記述した。

- ① DOWDLE and COBB (1975) や FERTL and WICHMANN (1977) の Horner プロット法
- ② MIDDLETON (1979, 1982) や LEBLANC ら (1981) が提唱した坑底温度の挙動標準曲線 (master curve) の一つと実測値を重ねて求める Curve Fitting 法。

上記の方法は、いずれも温度を時間の関数として取り扱っているが、温度データの他に①の方法が泥水循環時間 (t_k) と泥水循環の停止からの経過時間 (Δt) の資料を必要とするのに対して、②の方法は泥水循環停止からの経過時間のみでよい。

一般に検層時坑底温度は、泥水の冷却によって真の地層温度より約10～45°C低い値を示し、泥水の循環停止後長時間放置しておく、次第に平衡温度状態に近づき、無限大の時間で真の地層温度となる。この坑底泥水温度の上昇変化が現象的に貯留岩の圧力上昇過程に類似することを利用したのが、DOWDLE and COBB (1975) らの Horner プロット法である。

この方法から求められた平衡地層温度 (TBU) は、既知の地層温度にはほぼ等しく、地層温度分布の推定に役立つという (田中・佐藤, 1977; FERTL and WICHMANN, 1977)。そして、DOWDLE and COBB (1975) は、数時間より短い泥水循環時間のとき信頼できる平衡温度が得られ、さらに高い地温勾配の地域において、特に有効であるとうと結論づけた。

最近の坑井では、この Horner プロット法が用いられているものの、その精度に対する報告は少ない。そこで、本論では幾つかの油・ガス田における Horner プロット法による平衡地層温度 (TBU) と DST 測定時温度および坑底圧測定時温度を比較検討し、Horner プロット法の信頼性を考察する。

2. Horner プロット法による平衡地層温度の精度

DOWDLE and COBB (1975) や FERTL and WICHMANN (1977) は、検層時坑底温度を時間の関数として Horner グラフで解析し、無限大の時間の平衡（静止）温度を求

めた。この方法は、ある同一深度で連続的に測定された数次の検層時坑底温度の上昇値 (BHT)、検層実施直前の泥水循環時間 (t_k) と泥水循環停止から各種目の検層開始までの経過時間 (Δt) の三要素から地層温度 (T_f) を推定するもので、次の関係式で表される。

$$BHT = T_f - C \log \left(\frac{t_k + \Delta t}{\Delta t} \right) \quad (1)$$

ただし、 C は常数。

この式は Δt を無限大にした時、右辺の対数項が0になるので、 $BHT_{(\Delta t \rightarrow \infty)} = T_f$ が求まる。

図1 Horner プロット法による平衡地層温度の推定—地温勾配の低い坑井の事例—

図1は、地温勾配の低い地域で掘削された試掘井における Horner プロットの例である。深度 3,100m (●印) と 3,200m (▲印) における数次の検層時坑底温度は、いずれも Horner グラフ上で直線に並ぶ。これらの直線を $(t_k + \Delta t)/\Delta t = 1$ まで延長すると、平衡地層温度 (TBU) は深度 3,100m で 97°C、3,200m で 96°C となる。

Horner グラフから得られたこれらの平衡地層温度と同一構造で測定された DST 測定時温度 (TdSt) を比較し、両者の相関性を求めた (図2)。TdSt 値から求められた地温勾配は、2.59°C/100m と低く、泥水循環の停止後最初に測定された検層時坑底温度 ($BHT_{1st \log run}$)

注1: DOWDLE and COBB (1975) の T_{wi} と T_i はそれぞれ本論の BHT と T_f に相当する。

図2 平衡地層温度 (TBU) と DST 測定時温度 (TdST) の比較 地温勾配の低い油田構造の例

図4 同一深度での平衡地層温度と DST 測定時温度の比較

図3 平衡地層温度と DST 測定時温度の比較
—地温勾配 3~4°C/m の油田構造の例—

から求めた地温勾配 $2.28^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ の 1.14 倍である。また、泥水循環停止から 15~20 時間後の検層時坑底温度 (●印) は、TdST より約 $5\sim 6^{\circ}\text{C}$ 低いにすぎない。深度 3,000

~3,250m 間の温度分布を図 2 右上に拡大して示した。深度 3,100m と 3,200m の TBU 値 97°C と 96°C は、深度 3,052m と 3,241m における TdST 値 94.4°C と 99°C に近似し、TBU と TdST の差はわずかに $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ である。そして、Horner グラフから求められた TBU は、ほぼ TdST より推定された地温勾配 $2.59^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ の線の上に落ちる。

佐々木 (1984) によれば、地温勾配が $2.18^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ と低い基礎試錐「遠別」の地層温度は、深度 1,720m (DST) で 75°C 、その上位の 1,611m (TBU) で 74.4°C を示す。この深度差を補正すると、深度 1,720m における TBU 値は約 76°C となり、ほぼ TdST と一致する。また、著しく低い地温勾配 $1.89^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ の磐城沖ガス田 (関口, 1986) において、深度約 2,400m の TBU 値は、ガス層の坑底圧測定時温度 TBHP にほぼ等しい。

油・ガス田の中で比較的多い $3\sim 4^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ の地温勾配を有する構造の TBU と TdST の深度分布図を図 3 に示した。深度 1,700m~4,100m 間の 6 箇所 で TBU が得られており、これらは地温勾配 $3.33^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ の直線上に落ちる。それに対して、深度 1,750m から 3,350m 間で測定された多数の TdST 値は、約 10°C の幅で分散するが、TBU 値に近似するかあるいはそれより $7\sim 10^{\circ}\text{C}$ 高い。そして、TdST から求められた地温勾配 $3.71^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ は、TBU による地温勾配 $3.33^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ より 1.11 倍大きい。

図5 平衡地層温度とDST測定時温度の比較および検層時坑底温度の変化—高温地域の坑井の例—

TBU から求められた地温勾配が $5.14^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ の構造で掘削された坑井において、同一深度の TBU と TDST を比較した(図4)。深度3,342m, 3,600mおよび4,000m で得られたTBUは、それぞれ 106°C 、 120.6°C と 149.4°C であり、地温勾配 $5.14^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ の直線上に位置する。一方、深度3,345m で記録されたTDST (E点) は 132°C であり、わずか3m上位の深度3,342m (D点) におけるTBUより 26°C 大きい。

図5は、高温地域で掘削された試掘井における各種の温度データを示す。この構造は、更新統～中部中新統の砂岩泥岩互層から成る。深度1,700mと2,626m (B点) の2箇所DSTが実施され、TDSTはそれぞれ 136°C と 199°C であり、それらの値から得られた地温勾配は $6.53^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ である。ここで、深度2,639mの検層時坑底温度に注目すると、泥水循環停止から5時間後に測定された検層時坑底温度は 112.8°C であったが、時間の経過とともに急激に上昇し、24時間後のそれは 153.3°C に達した。そして、Hornerプロット法から求められたTBUは $173.9\sim 183.9^{\circ}\text{C}$ の中央点 179°C (A点) である。このTBU値は、検層深度(2,639m)より13m浅い深度2,626mのTDST値(B点, 199°C)より 20°C 低い。また、TDSTによる地温勾配 $6.53^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ をこの構造における真の温度分布と仮定すると、その温度分布とTBUの温度差は、1,221mで 27°C 、2,143mで 29°C 、2,937mで 43°C と大きい。そして、第1検層時坑底温度から計算された地温勾配 $3.56^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ とTDSTによる地温勾配との比は1.83に達する。

地温勾配の異なる幾つかの油・ガス田構造におけるTBUとTDSTとの相関性について記述したが、次にタイ沖ガス田における坑底圧測定時温度(TBHP)とTBUおよびTDSTを比較する(図6)。TBHPは、ガスの生産に伴う膨張冷却作用によって幾らかの温度低下が考

図6 ガス田における坑底圧測定時温度(TBHP)とDST測定時温度および平衡地層温度の比較

図7 Hornerプロット法による平衡地層温度の推定—高温地温勾配の坑井例(図6のA点)—

られるが、地層とチュービング内の温度が平衡状態に達しており、この深度における真の地層温度を表している。このガス田のTBHPは、深度1,800～2,500mの間の9

層で測定され、若干ばらつくものの、 $4.77^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ の地温勾配の直線に並ぶ。一方、試掘井の TDST と TBU から推定された地温勾配は、 $4.27^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ で、TBHP から得られた地温勾配値に近似するが、TBHP (地層温度) は、全体的に TDST や TBU より約 10°C 高い。

深度 2,271m の TDST (146.7°C , B 点) は、C 点の TBHP と同一坑井、同一ガス層であるが、TBHP より 10°C 低い。試掘井の試ガス時に記録された温度が生産時の坑底圧測定時温度より低い現象は、泥水循環停止からの経過時間の差に起因すると考えられる。すなわち、TDST は、完全に温度平衡に達していない状態における温度とみなされる。さらにこのガス層より 12m 浅い深度 2,259m (同一坑井) で物理検層が実施されている。検層実施直前の泥水循環時間は 3.5 時間で、循環停止から 4.3 時間後に行われた第 1 検層 (DLL) の坑底温度 (a 点) は 98.3°C であった。また、循環停止から 17.5 時間後の HDT の温度 (b 点) は 120°C を記録した。これらのデータを基に TBU を求めた (図 7)。第 1 検層 DLL の温度を除く他の 3 点は、Horner グラフで直線状にあり、その直線を延長すると、 $\text{TBU}=140^{\circ}\text{C}$ が導かれる。この TBBU 値は、深度差 12m を考慮したとしても TDST や TBHP よりそれぞれ 7°C , 17°C 低い。

上述のごとく、地温勾配が約 $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 以下の構造の TBU は、TDST や TBHP とはほぼ一致するのに対して、地温勾配が約 $5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 以上の高温構造における TBU は、TDST や TBHP より低い値を示す。

3. Horner プロット法の精度に与える要因

Horner プロット法は、検層時坑底温度から平衡地層温度を推定するのに役立つ簡易的手法であり、低い地温勾配の地域では信頼性の高い補正値が得られる反面、高地温勾配の地域では、TDST や TBHP より低い値を示し、ややその精度が落ちる。この温度差 (低下現象) をもたらす要因として、次のようなことが考えられる。

- ① 泥水循環時間の影響
- ② 物理検層実施における温度・時間データの精度
- ③ Horner グラフでの解析誤差
- ④ 坑底における泥水温度の挙動

次にこれらの要因がどの程度 Horner プロット法の精度に影響を与えるかについて考察する。

3.1 泥水循環時間の影響

DOWDLE and COBB (1975) は、Horner プロット法に対して理論的理由づけができなかったとしながらも、この手法の実用性に注目し、いかなる条件下で有効かを考察した。その中で、Horner グラフの解析に与える泥水循環時間の影響を探究するために、泥水循環時間 2.4

図8 平衡地層温度の推定に及ぼす泥水循環時間の影響

時間と50時間の例で考察した結果、泥水循環時間が長い程、Horner プロット法から得られる平衡地層温度値は、より大きい誤差を生じると結論づけた。

一方、AADLAND and PHOA (1981) は、低～高地温勾配の坑井で泥水循環時間の実測値 (1～3 時間) と異なる循環時間 (仮定値) を与え、実測値と仮定値それぞれから求められた平衡地層温度を比較検討した。その結果、両者の平衡地層温度差は $0.5\sim 2.8^{\circ}\text{C}$ と小さい。すなわち、数時間程度の泥水循環の差であれば、Horner プロット法による平衡地層温度はほとんど泥水循環時間の影響を受けないことを示した。

そこで、FERTL and WICHMANN (1977) の坑井温度資料を基に、泥水循環時間の実測値 6 時間を 1, 3, 10 時間に変化させ、それぞれの TBU を求めた (図 8)。実測値から得られた TBU が 112.8°C (235°F) であったのに対し、仮定値から求められた TBU は 112.2°C (234°F)～ 113.3°C (236°F) で、いずれも解析誤差程度の範囲にあり、AADLAND らの結果と一致する。このことから、通常の泥水循環時間以内 (ほぼ 5 時間以内、佐々木, 1984) であれば、Horner グラフから求められる平衡地層温度 TBU は、泥水循環時間の影響をあまり受けないと考えられる。

3.2 物理検層の温度と時間データの精度

検層時坑底温度の測定と実施時間の記録は、主目的である物理検層の補助的作業であるため、検層機器が坑底に達した時の坑底泥水温度と泥水循環停止から検層機器の着底までの経過時間を正確に記録されていない場合がある。そこで、TBU に与える経過時間の差異の影響につ

図9 泥水循環停止後の経過時間と坑底温度の関係
—地温勾配 1.73~2.51°C/100m の場合—

図10 泥水循環停止後の経過時間と坑底温度の関係
—地温勾配 5.00~6.53°C/100m の場合—

いて検討する。

図9は、TBU や TDST から求められた地温勾配が 1.73~2.51°C/100mの坑井における経過時間に対する坑底温度の上昇変化を示す。佐々木 (1984) がすでに指摘しているごとく、低温地域の坑底温度は、非常に緩かに上昇する。温度上昇率は平均 0.5°C/時間と小さく、ほぼ直線的である。それに対して、TBU や TDST による地温勾配が 5.0~6.53°C/100mの坑井における坑底温度は、経過時間の増加と共に急激に上昇する(図10)。そして、その温度上昇率は 2.0~2.5°C/時間と大きい。すなわち、1時間当たりの検層時坑底温度の差は、低地温勾配の坑井ではわずかに±0.5°Cにすぎないが、5°C/100m以上の高地温勾配の坑井では±2~2.5°Cの温度差を生じる。

図1および図5の坑井を用いて、この温度差によるTBU値の変化を図11に示す。地温勾配 6.53°C/100mの坑井(深度 2,143m)において、実測値から得られたTBUは137°Cである。ここで、第4次の検層時坑底温度124.4°C(図中の4)を±2.6°C^{注2}変化させてTBU値を求めると、それぞれ142°Cと132°Cで実測値の137±5°Cとなる。また、地温勾配 2.59°C/100mの坑井(図1)で同様に試みたが、温度上昇率が0.5°C/時間と小さいため実測値のTBUとほとんど変わらない。地温勾配 6.53°C/100m

注2：温度上昇率 2.6°C/時間に相当する。

図11 検層時坑底温度の測定差による平衡地層温度の変化

の例を示したが、このような高温地域の坑井は希である。最も一般的な 3~4°C/100mの構造における温度上昇率は 1~1.5°C/時間と比較的小さい。そのため、検層時坑底温度の差によるTBU値の誤差は、数°C程度であろう。

3.3 Horner グラフでの解析誤差

Horner グラフにおける $(t_k + \Delta t)/\Delta t$ 対温度の関係が理論的に非直線であるため、各点を通る直線をもとに解析されたTBU値は、常に真の平衡温度より低くなる(DOWDLE and COBB, 1975)。

図12は、坑底温度の上昇変化が大きい地温勾配 5.67°C/100mの坑井におけるHornerグラフの特徴を示した。本坑井では泥水循環を2時間行った後、検層を5回連続的に実施した。検層時坑底温度は、泥水循環停止から4時間後で103.3°C、21時間後で132°Cであった。Hornerグラフ上の各点は、明らかに弧状の曲線(図12の細実線)を描く。この傾向は図7および図11でも認められる。

このような弧状配列からTBU値を求めようとすると、各点に隣接する幾つかの直線が引ける。それらの異なった直線から得られるTBU値は、ほぼ139°C~161°Cの範囲に入り、150°C±11°Cとなる。Hornerプロット法の基本的概念は、BHTと $(t_k + \Delta t)/\Delta t$ が直線関係になることにあり、各点を結ぶ線が曲線となる場合、得られる

図12 Horner グラフにおける解析誤差—高温地域の坑井例—

TBU は大きな解析誤差を持つことになる。

さらに注目されることは、仮りに泥水循環停止から18時間と21時間経過した検層時坑底温度値（図12の4,5）がなかったとすれば、残りの点から得られる TBU 値は、129~132°Cとなり、実測値（132°C）より低い値を示す。このように高地温勾配の坑井では、Horner グラフの各点が曲線的配列となるため、直線の引き方によって解析誤差が生じる。また、泥水循環停止から長時間経過した坑底温度がない場合、解析値は小さい値となる。それに対して、低い地温勾配の坑井では、Horner グラフの各点が直線的に並ぶことから（たとえば図1）、Horner プロット法の解析誤差は小さく、信頼できる平衡温度（TBU）が得られる。

3.4 坑底における泥水温度の挙動

地温勾配の違いによって、異なる解析精度をもたらす要因は坑底における泥水温度挙動の違いと推定される。坑底における泥水温度の挙動に関与する要因には、泥水の冷却作用、掘削による温度攪乱、熱対流、泥水タンクの泥水温度（in-mud temperature）や地層・泥水の熱的特性（熱拡散係数、熱伝導率）などが挙げられる。

泥水によって冷却された坑底の地層そのものの温度は測定できないが、坑壁と接する泥水が平衡状態にあると

図13 Temperature Sub による循環泥水温度の挙動記録 (VENDITTO and GEORGE, 1984)

A点：循環開始 305.5°F

B点：循環停止（240分後）250.7°F

仮定すれば、坑底の循環泥水温度（downhole circulating temperature）に等しい。坑底における循環泥水温度は、EDWARDSON *et al.* (1962) や HOLMES and SWIFT (1970) らによって理論的に解明されているが、最近の深部（高温）掘削に伴ってセメンチングの良否を支配する正確な坑内泥水温度分布が不可欠となった。そのため、APIの規定から求める以外に実際の循環泥水温度を直接測定する方法が考案されている。その主なものは、掘進中に循環泥水温度を測定する MWD 法、0.95cm 径の球に温度センサーを組み込んだ Downhole Circulating Temperature Probe (DCTP) による測定法やトリップ時にビット直上に Temperature Sub を取り付けする方法などである。

VENDITTO and GEORGE(1984)が示した Temperature Sub による坑底の循環泥水温度の挙動記録（図13）によると、深度 3,782m (12,490 ft) における泥水循環開始直前の坑底温度 151.9°C (305.5°F) は、循環開始から約1時間の間に急激に低下した後、非常に緩やかな変化となり、240分後には 121.5°C (250.7°F) となっている。この挙動記録から判断して、循環泥水の冷却効果は循環開始から約1時間以内で最も著しく、循環開始後1~4時間では小さくなる。

この坑底における循環泥水温度は、泥水循環を停止した瞬間の検層時坑底温度（ $\Delta t=0$ における BHT）に相当し、泥水循環が1~4時間の範囲であれば、BHT（ $\Delta t=0$ ）は近似値を示すであろう。そして、この範囲の坑底温度の上昇変化は、類似すると推定される。

このように、泥水循環中と循環停止から約3~4時間以上経過した坑底温度の挙動は、MWD, Temperature

図14 (2)式に基づく熱平衡曲線 (MIDDLETON, 1982)
 $\Delta T = T_f - T_m$, T_f : 地層温度, T_m : 泥水温度,
 BHT : 坑底温度, Time: 泥水循環停止後の経過時間

Sub, DCTP, や物理検層・温度検層で測定できる。しかし、循環停止直後から約3～4時間までの間の坑底温度変化は、実際に測定されていない。そのため、この間の詳しい坑底温度挙動について論じられないが、比較的複雑な変化をしているものと考えられる。たとえば、高速でビットノズルから放出されていた泥水は注3、循環を停止した後もしばらくの間惰性運動を続け、坑底付近の温度を攪乱しているであろう。さらに、この惰性運動がほとんどなくなると、次に坑底で暖められた泥水は、ゆっくりと上方へ移動し始め、熱対流が生じるに違いない。

もし、泥水の惰性運動や熱対流による熱の拡散が坑底付近に存在すると、坑底温度は泥水循環停止の瞬間から時間の経過とともにある一定の割合で上昇せず、これらの運動がない理想状態に比べて、ある時間の間坑底の温度上昇率は小さくなると推測される。このような惰性運動・熱対流の存在と坑底温度に与える影響度や実際の温度変化は、現時点では不明であり、今後の測定を待たねばならない。

MIDDLETON (1979, 1982) や LEBLANC *et al.* (1981) は、坑底の中心における泥水温度の挙動を数学的に解析し、熱平衡モデル (Thermal Stabilization Model) を提唱した。坑井の半径 a 、熱拡散係数 κ 、泥水循環停止からの経過時間 Δt とすると、 Δt における坑底温度 BHT は、次式で表わされる (MIDDLETON, 1982)。

$$BHT(\Delta t) = T_m + (T_f - T_m) [\exp(-a^2/4\kappa\Delta t)] \quad (2)$$

ここで、 T_m : 泥水温度

T_f : 地層温度

図14は、(2)式を基に、坑径を10cm、熱拡散係数を0.003cm²/sec. としたときの ($BHT - T_m$) と経過時間の

関係を示したものである (MIDDLETON, 1982)。この図から明らかにように、 BHT は泥水循環停止から10時間以内の間に急上昇し、次第に緩やかな上昇勾配に移行する。また、地層温度と泥水温度の差 ($T_f - T_m$) によって、($BHT - T_m$) のパターンが異なる。このパターンの差異は、坑底温度の上昇率が泥水温度の影響を強く受けることを示す。そして、この泥水温度は、調泥時の冷却効果や季節的気温差によって異なり、 BHT の平衡に深く関係することを示唆する。

坑底温度の挙動に關与するもう一つの要因、熱拡散係数 (κ) は物質によって異なる値 (水=0.00144cm²/sec) を有し、熱伝導率 (K)、比熱 (c)、密度 (ρ) との間に次の関係式が成り立つ。

$$\kappa = K/\rho \cdot c$$

地層 (岩石) の熱伝導率、比熱および密度は、主に岩相と孔隙率の変化に支配される (MIDDLETON, 1982; SEKIGUCHI, 1984)。そのために、地下深部における正確な熱拡散係数を求めることは非常に難しい。MIDDLETON (1982) は、地層温度と泥水温度の差を60°Cと仮定して、熱拡散係数の増減に対する ($BHT - T_m$) の変化を求めた (図15)。それによると、熱拡散係数が大きい時の ($BHT - T_m$) は、小さい場合に比べてより急激に上昇する。

上述のように、泥水循環停止後の坑底温度の理論的挙動は、地層温度と泥水温度の差、および坑底周辺の熱拡散係数の違いによって変化する。一方、物理検層の時に記録された坑底温度 (BHT) は、上記の主要因が互いに影響しあった温度値であると言える。しかし、Horner プロット法の(1)式には、泥水温度と熱拡散係数の要因が加味されていない。そのために、Horner プロット法で得られた平衡温度 (TBU) は、地温勾配の高い坑井で大きな解析誤差が生じると考えられる。

図15 熱拡散係数 (κ) の差による熱平衡曲線の変化 (MIDDLETON, 1982)

図中の K_b : 熱拡散係数 (本論の κ)

注3: 8 1/2" bit x 6 1/4" DC x 5" DP で深度 3,000m 付近における流速は、一般的に DP 内で 100-130m/秒、アニュラスで 40-50m/秒程度である。

4. ま と め

検層時坑底温度から地層温度（平衡温度）を推定する Horner プロット法は、現在最も多用されている経験的手法である。この手法から得られる平衡地層温度（TBU）と DST 測定時温度（TdST）および坑底圧測定時温度（TBHP）を比較し、TBU の信頼性と誤差に関与する要因について考察した結果、TBU は地温勾配約 $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 以下の坑井では TdST や TBHP と近似し、信頼性の高い値を示す。それに対して、地温勾配が約 $5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 以上の高温地域の坑井では TdST や TBHP より低い値を示すことが明らかになった。

この現象は、DOWDLE and COBB (1975) の指摘の通り、Horner プロット法の(1)式が MIDDLETON (1982) の熱平衡モデルの(2)式と異なり、理論的根拠のない簡便式であること、および坑底温度の挙動に関与する泥水温度や地層の熱拡散係数の要素が(1)式に考慮されていないことに起因する。そのために、Horner プロットから求められた平衡温度は、絶対値でなく、常にある誤差を持った値であり、特に高温地域でその精度が悪くなる。

しかしながら、Horner プロット法が比較的信頼できる推定値を概算することは、実際の探鉱・掘削作業や地質学的考察などを行う上で役立っている。そこで、次の点を留意することによって、Horner プロット法の優れた実用性を生かすことができるであろう。

- ① 長時間泥水循環を行った坑井の TBU は低い値を示す。
- ② 高温地域における Horner グラフの各点は弧状に並ぶ。そのため、TBU の解析誤差は大きくなる。
- ③ 泥水循環停止後の経過時間が短い検層時坑底温度しかない場合、TBU は小さくなる。
- ④ TBU は地温勾配が高くなるにしたがって、大きい誤差（低い値）を生じる。
- ⑤ MIDDLETON (1982) らの Curve Fitting 法や佐々木 (1985) の経験式による平衡地層温度と比較する (LEBLANC *et al.*, 1982)。

謝 辞

本研究に際して、資料検討の機会を与えられ、その結果の公表を許可された三井石油開発(株)常務取締役石原寿夫氏と同社常務取締役坂本 紘氏、並びに東南アジア石油開発(株)常務取締役牧野登喜男氏に衷心より謝意を示す。また、有益な助言をして頂いた三井石油開発(株)野博仁君に感謝する。

文 献

- AADLAND, A.J. and PHOA, R.S.K., 1981: Geothermal Gradient Map of Indonesia. *Indonesian Petroleum Asso.*, 1-43.
- DOWDLE, W.L. and COBB, W.M., 1975: Static Formation Temperature From Well Logs—An Empirical Method. *JPT*, **27**, 1326-1330.
- EDWARDSON, M.J., GIRNER, H.M., PARKINSON, H.R., WILLIAMS, C.D. and MATTHEWS, C.S., 1962: Calculation of Formation Temperature Disturbance Caused by Mud Circulation. *JPT*, 416-426.
- FERTL, W.H. and WICHMANN, P.A., 1977: How to determine static BHT from well log data. *World Oil*, **184** (1), 105-106.
- FERTL, W.H., 1985: Logs help approximate reservoir temperature. *Oil and Gas Jour.* (Apr. 29), 89-93.
- HOLMES, C.S. and SWIFT, S.C., 1970: Calculation of Circulating Mud Temperatures. *JPT*, 670-674.
- LEBLANC, Y., PASCOE, L.J. and JONES, F.W., 1981: The temperature stabilization of a borehole. *Geophysics*, **46** (9), 1301-1303.
- LEBLANC, Y., LAM, H.L., PASCOE, L.J. and JONES, F.W., 1982: A Comparison of Two Methods of Estimating Static Formation Temperature from Well Logs. *Geophysical Prospecting*, (30) 348-357.
- MIDDLETON, M.F., 1979: A model for bottom-hole temperature stabilization. *Geophysics*, **44** (8), 1458-1462.
- MIDDLETON, M.F., 1982: Bottom-hole temperature stabilization with continued circulation of drilling mud. *Geophysics*, **47** (12), 1716-1723.
- NWACHUKWU, S.S., 1976: Approximate Geothermal Gradients in Niger Delta Sedimentary Basin. *AAPG*, **60** (7), 1073-1077.
- 佐々木詔雄, 1984: 地層温度の推定—検層時坑底温度の補正法とその問題点. 石技誌, **49** (5), 287-295.
- 佐々木詔雄, 1985: 地層温度の推定—検層時坑底温度の補正法とその問題点(改訂)—. 石技誌, **50** (1), 17-19.
- SEKIGUCHI, K., 1984: A Method for Determining Terrestrial Heat Flow in Oil Basinal Areas. *Tectonophysics*, 103, 67-79.
- 関口嘉一, 1986: 石油井を利用した地殻熱流量の算定. 田口一雄教授退官記念論文集, 199-208.
- 田中 隆・佐藤勝義, 1977: 東北日本の油田地域における地下温度の推定. 石技誌, **42** (4), 229-239.
- TIMKO, D.J. and FERTL, W.H., 1972: How downhole

temperatures pressures affect drilling, Part 5: Predicting hydrocarbon environments with wireline data. *World Oil*, 175, (Oct.), 73-88.

VENDITTO, J.J., and GEORGE, C.R., 1984: Better wellbore temperature data equals better cement jobs. *World Oil* (Feb.) 47-50.