

東南アジア地域の新しい地殻熱流量データ

松林 修¹⁾

1. はじめに

地殻熱流量とは地球深部から地表面に向けて鉛直方向に輸送される微少な熱エネルギーの流量のことである。この地殻熱流量の大きさが地域的にどう変化するかを調べることによって様々な地学的過程の原因を明らかにすることができ、その意味で地震波速度構造や重力異常などの他の広域地球物理的観測量と同様に貴重な情報源の一つと考えられている。

地殻熱流量 Q (以下では単に「熱流量」と言う)の定義は:

$$Q = dT/dz \times k$$

であり、通常は地中鉛直温度勾配 (dT/dz) の測定とそれに対応する深度での熱伝導率 (k) の測定とが独立に行われる。世界の熱流量の地域的分布をシート・マップの形で最初にまとめたものとしては、現在でもなおしばしば引用される Jessop et al. (1976) が有名であって、その当時に見られた熱流量測定点の地理的偏りは20余年を経た現在もそれほど改善されてはいない。すなわち、堆積物の厚い深海底では、長さ数メートルの槍型プローブでの温度勾配測定が精度良くできるのに対して、堆積物の少ない露岩地形の海底では槍型センサーがさららないため熱流量測定がそもそも困難である。更に、大陸棚の海域と陸上では、数100メートルより深いボーリング孔が何らかの目的で掘られた場所でなければ熱流量を求めることはできないという方法論上の大きな制約がある。

本小論にて紹介する新しい熱流量データのほとんどは、東南アジアの大陸棚の石油・天然ガス探

鉱のために掘られた深い試錐坑 (ボーリング) を利用してその温度データ及び検層データを収集整理して計算された熱流量である。世界の熱流量測定点の分布から見て東南アジア地域は未踏地域の一つと見なされていたところであり、その理由から今回の新しいデータの地球科学的意義は大きい。データの収集にあたっては、東南アジア各国および東アジア (ここでは中国・韓国・日本をさす) の国立地質調査研究機関のユニークなネットワークである CCOP (東・東南アジア沿岸沿海地球科学計画調整委員会) という組織のもとで、地質調査所と CCOP との協力プロジェクトとして実施されたこと (長谷ほか, 1995) も特記すべきであろう。筆者は、この熱流量マップ作成プロジェクトのコーディネータ及びジェネラル・コンパイラーを主たる業務として、1993年8月までの2年間タイのバンコクにある CCOP 事務局に派遣されていた。この度最終的な印刷物として、デジタル・イメージを印刷原稿とする新しい方式により地質調査所特殊地質図 No.36 「東・東南アジアの地殻熱流量図 1:5,000,000」 (口絵2-1参照) が出版の運びとなった。諸般の事情により、オリジナル・データが取得されてから出版まで時間的に相当な遅れが生じてしまう結果となり、各国で協力していただいた方々にはお詫びをしなければならぬ。東アジア各国のナショナル・コンパイラーの氏名と所属を第1表に示す。本プロジェクトの立案以来今日にいたるまで、地質調査所と CCOP 事務局の先輩多数のあたたかいご支援を受けることができた。特に、嶋崎吉彦 (元海洋地質部長)、平山次郎 (元燃料資源部長)、花岡尚之 (地質情報センター長)、奥村公男 (国際地質課長)、石原丈実 (海洋物理探査研究室長)、及び CCOP 事務局

1) 地質調査所 資源エネルギー地質部

キーワード: 熱流量測定, 東アジア, 東南アジア, CCOP, 地殻熱流量図, 地温勾配, 熱伝導率, 大陸棚

第1表 東・東南アジアの熱流量図プロジェクト各国編集者.

ジェネラルコンパイラー： 松林 修 (地質調査所)
 国別コンパイラー：

中国	Fang Zheng; Chen Gang (Shanghai Bureau of Marine Geological Survey)
インドネシア	Sandjojo Subono and Siswoyo (R & D Centre for Oil and Gas Technology)
韓国	Jeong-Ung Lim; Hyoung-Chan Kim (Korea Institute of Geology, Mining and Materials = KIGAM)
マレーシア	Wan Ismail Wan Yusoff; Mod Firdaus Abdul Halim (Petronas Research and Scientific Services)
タイ	Thara Lekuthai; Sunton Srigulwong; Manoj Vacher (Department of Mineral Resources = DMR)
ベトナム	Tran Huyen; (Vietnam Petroleum Institute) Do Van Dao (PetroVietnam)

長の G.R.Balce (1992年3月まで), Wang Daxiong (1995年3月まで), Kim Sahng-Yup (1995年4月から現在まで)の方々には大変お世話になった。さらに印刷出版の過程では寺島美南子室長を始めとする地質情報センター情報管理普及室の方々には特段のご配慮をいただいた。以上の各位に厚く感謝の意を表す。

2. 熱流量の計算法

地温勾配 (dT/dz) の求め方は、同一深度で実測された坑底温度 (BHT) の組から地層平衡温度を外挿計算して、海底面平均温度 (観測値) との差を深度で割算した。もう一つのパラメータである熱伝導率については、多くの場合岩相を砂質と泥質とに大きく区別してその2成分モデルを使って検層データから得られた空隙率を熱伝導率に換算し、深

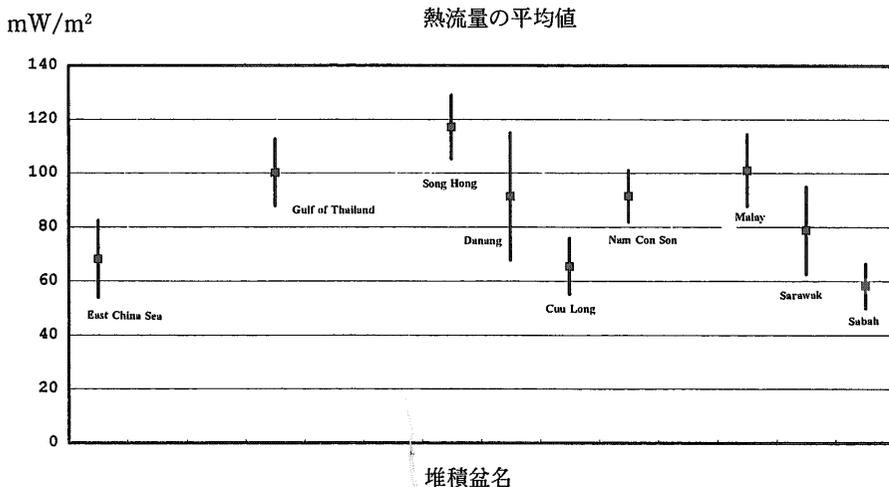
さ方向の平均熱伝導率を求めた。なおこの際に代表的な実サンプルの熱伝導率測定から空隙率ゼロの両端成分 (砂と泥) の粒子熱伝導率を求めた値が使われ、更に熱伝導率の温度係数も考慮して平均熱伝導率が得られている。炭酸塩岩が含まれる場合には、同様な考え方でもう一つの成分を入れた3成分モデルとして計算する。

3. 地域毎のデータのハイライト

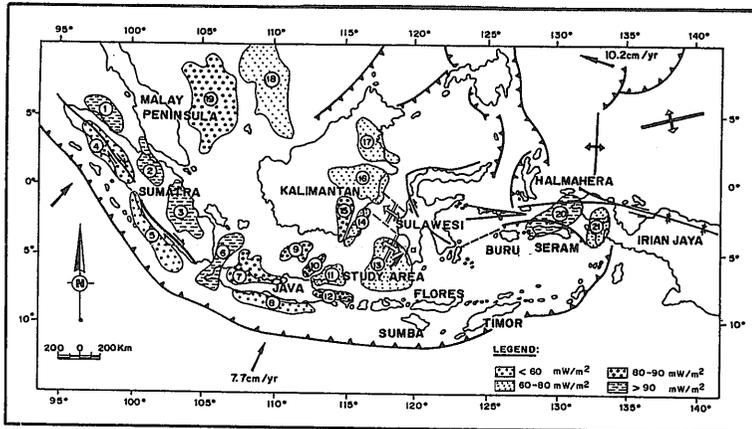
大きな堆積盆を単位とした熱流量平均値を比較すると第1図のとおりである (但し、データがより詳細に得られているインドネシアを除く)。以下には、ベトナムからインドシナ半島に沿って南下してインドネシアへ、そして北の韓国・中国の沖の熱流量データの特徴をハイライト的に述べる。特殊地質図 No.36には日本周辺や中国内陸・台湾・フィリピン群島陸域・フィリピン海・インド洋などでの既存データも含まれているが、ここではそれらには触れない。

(1) ベトナム沖

ベトナムの開放政策の一環で大陸棚の石油資源探査が日本を含む外国企業との協力によって近年盛んに行われ、反射法地震探査による地質構造調査はもとより試錐も数多くなされた。それらの試錐 (新規データとしての坑数は109本にも上り、今回の編集プロジェクトでは国別にみると最も多い) について、上記の方法に従って熱流量の値が計算された。首都ハノイの近傍の大規模堆積盆である



第1図 東シナ海及び東南アジア (インドネシアについては第2図参照) の堆積盆における熱流量平均値。縦の棒は標準偏差 (±1σ) を表す。



第2図
インドネシアの堆積盆における熱流量の地理的変化。地図上には現在のプレート運動ベクトルとサブダクション帯などの位置も示されている(Subono and Siswoyo, 1995による)。

Song Hong Basin (英語名 Red River Basin) においては熱流量が平均でも 118 mW/m^2 と最も高く、断層運動に関連するものと解釈される。ベトナム中部の Danang 地域でも平均熱流量 98 mW/m^2 が得られ、ベトナム東縁に見られる新しい火山・地熱活動とも密接な関係があるように思われる。それに対して、ホーチミン・シティ(旧サイゴン)の沖合いの Cuu Long Basin では平均 64 mW/m^2 と比較的低い。中間の値を持つのがインドネシアやマレーシアとの境界に接する Nam Con Son Basin である(平均値 80 mW/m^2)。

(2) タイ

シャム湾(Gulf of Thailand)の石油探査試錐を用いて、既に述べた方法により熱流量が求められた。25本の坑井によりシャム湾における熱流量の分布が明らかになり、熱流量分布が堆積盆構造と良く関係づけられることが明らかになった(Lekuthai et al., 1995を参照)。ここでも平均熱流量が 100 mW/m^2 以上と概して高めの値である。

(3) マレーシア

マレーシアで熱流量測定が行われた地域は、マレー半島の東にあるマレー堆積盆とサラワク州・サバ州(ボルネオのマレーシア領部分)の沖の堆積盆とに大きく分かれる。前者は大きくはタイ領海シャム湾の構造の南への延長であり、熱流量的にも全般的に高い傾向が見られる。Khalid et al. (1996)の最近の仮説によると、浅所に貫入した高温・大規模な岩体を中心として熱収縮沈降により現在なお熱流量の高い堆積盆が放射状の3つの方向に形成された、とのことである。

サラワクとサバの沖では東経114度付近に熱的

第2表 インドネシアの堆積盆毎の熱流量平均値のデータ (Subono and Siswoyo, 1995による)。

No.	堆積盆	地温勾配 ($^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$)	熱伝導率(K)		熱流量(Q)	
			HCU ($\text{m cal/cm}^2 \text{ s}^{\circ}\text{C}$)	S1 ($\text{W/m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$)	HFU ($10^{-4} \text{ cal/cm}^2 \text{ sec}$)	S1 (mW/m^2)
1.	N. Sumatera	4.69	5.01	2.10	2.38	96
2.	C. Sumatera	6.76	4.84	2.03	3.27	137
3.	S. Sumatera	5.22	4.90	2.08	2.58	107
4.	Sibolga	2.14	5.65	2.37	1.21	51
5.	Bangulu	2.15	4.51	1.89	0.97	41
6.	Sunda	4.63	4.49	1.88	2.08	90
7.	N.W. Java	4.31	4.45	1.87	2.92	80
8.	South Java	2.43	4.86	2.04	1.18	49
9.	Bliton	3.84	5.26	2.21	2.02	84
10.	Pati	3.84	5.26	2.21	2.02	84
11.	N.E. Java Sea	3.50	4.63	1.93	1.62	66
12.	N.E. Java	4.14	5.07	2.13	2.10	88
13.	Makassar	3.19	5.34	2.24	1.70	71
14.	Asem-Asem/Pasir	3.28	5.39	2.28	1.77	74
15.	Baito	3.46	5.63	2.36	1.95	81
16.	Kufai	3.13	5.24	2.20	1.64	69
17.	Tarakon	3.40	4.94	2.07	1.69	70
18.	E. Natuna	3.24	4.81	2.02	1.56	65
19.	W. Natuna	3.81	5.36	2.25	2.04	85
20.	Salawati	4.44	5.16	2.17	2.29	96
21.	Bintuni	3.65	4.33	1.82	1.58	66

な顕著な境界があって、その西では熱流量がやや高く(60 mW/m^2 程度)東で低い($35-40 \text{ mW/m}^2$)という広域的な違いが見られるが、この理由はよく分かっていない。

(4) インドネシア

インドネシアでは、既に1980年代に精力的な熱流量のマップ作りがM.Thamrinらによって行われ、今回のデータ編集にはその時の結果がまとめて提供された(第2図, 第2表)。インドネシア西部では $80-137 \text{ mW/m}^2$ の高い熱流量値が観測され、カリマンタン(ボルネオのインドネシア領部分)の周辺と Natuna 堆積盆では $66-80 \text{ mW/m}^2$ 、そして東インドネシアでは Salawati 堆積盆 (96 mW/m^2) を除き $60-80 \text{ mW/m}^2$ の比較的低い値となっている。熱流量の分布とインドネシア地域のテクトニクス及び地

質との関係については, Thamrin (1985) 及び Subono and Siswoyo (1995) などに詳しく述べられており, ここではこれ以上の議論は紙面の都合もあるので割愛する。

(5) 東シナ海

東シナ海は, 沖縄トラフを除いて水深が比較的浅く上述のように長さ数メートルのプロブ(又はコアラ)を用いた熱流量測定では正しい熱流量が得られないため, これまではデータの空白域となっていた。今回のCCOPによるデータ・コンパイルに際しては大陸棚での石油資源探査の数1,000メートル深度の試錐を利用して新たに熱流量を求めた。得られた熱流量の値は, この地域では驚くほど一定であって, $55-70\text{mW/m}^2$ という比較的低い範囲に入っている。細かく見ると, 中国大陸側から沖縄トラフに近づくにつれてわずかながら増加するという帯状の分布があるかもしれない。

(6) 南シナ海

南シナ海は東アジアの地理的中心にあつて最も面積の大きな海洋性地殻の海である。これまでに概観してきたインドシナ半島とインドネシアの大陸棚(これらは大陸性地殻から成る)から「深い海」に向かって, 構造上の大陸・海洋遷移地域を横切ったとき地殻の熱的構造がどう変化するか, を見ることができるのがこの南シナ海である。中国大陸の南から南北に走る3つの測線に沿った熱流量のプロファイルが得られており, 典型的な値としては大陸斜面において $80-90\text{mW/m}^2$ という結果が得られている。これらのデータはその後, 米国の研究者の手によって詳しく解析され論文となっている(Niessen *et al.*, 1995)。中国に面した北の縁以外にもまだ同様に興味深い遷移地域が西側(ベトナムとの接点), 南側(カリマンタン島との接点), 東側(フィリピンとの接点)にもあるので, これらを熱流量の測定にもとづいて比較するというのも今後の課題かもしれない。

4. 終わりに

本文では, 地質調査所からこのほど出版された「東・東南アジアの地殻熱流量図1:5,000,000」の編集経緯と各々の地域での熱流量データの特徴など

を簡単にレビューした。熱流量データがカバーできない地殻内温度の分布を面的に補うものとして, 地磁気異常をスペクトル解析して行う「キュリー点深度解析法」があり, 実際に東南アジア地域にこの方法を適用して良い結果が得られている(田中ほか, 1997)。反対に, 熱的な情報をよりローカルなスケールで見て, 比較的小さな空間スケールの地学的現象の問題に応用する立場も見過すべきでない。その一つの例は, 沖縄トラフにおける海底熱水系の場で測定された熱流量データであり(Kinoshita *et al.*, 1997), 東南アジア地域を対象としてはこのような研究がまだ余りなされておらず, 幾つものプレートが衝突してネオ・テクトニクスの良き研究フィールドとなっているインドネシア弧などにおいても, ローカル・スケール熱流量研究の今後の発展が期待される。

引用文献

- 長谷紘和・富樫幸雄・松林 修・村上文敏 (1995) : 1994年第31回CCOP年次総会(マレーシア)に参加して。地質ニュース, no.492, 25-32.
- Jessop, A.M., Hobart, M.A. and Sclater, J.G. (1976) : World heat flow data compilation - 1975. Geothermal Series, No. 5, Earth Physics Branch, Dept. of Energy, Mines and Resources, Ottawa 3 Ontario, Canada.
- Khalid, N., Madon, M. and Tjia, H.D. (1996) : Role of pre-Tertiary fractures in formation and development of the Malay and Penyu basins. in Hall and Blundell (Eds.) "Tectonic Evolution of Southeast Asia", Geol. Soc. Special Publication, No.106, 281-289.
- Kinoshita, M. and Yamano, M. (1997) : Hydrothermal regime and constraints on reservoir depth of the Jade site in the Mid-Okinawa Trough inferred from heat flow measurements. Jour. Geophys. Res. Vol. 102, 3183-3194.
- Lekuthai, T., Charusirisawad, R. and Vacher, M. (1995) : Heat flow map of the Gulf of Thailand, CCOP Tech. Bull., Vol.25, 63-78.
- Niessen, S.S., Hayes, D.E., Yao, B., Zeng, W., Chen, Y. and Nu, X. (1995) : Gravity, heat flow, and seismic constraints on the processes of crustal extension: Northern margin of the South China Sea. Jour. Geophys. Res. Vol.100, 22,407-22,433.
- 田中明子・大久保泰邦・松林 修 (1997) : 東・東南アジア地域のキュリー点深度解析。地震, Vol.50, 183-194.
- Subono, S. and Siswoyo (1995) : Thermal studies of Indonesian oil basins. CCOP Tech. Bull., Vol.25, 37-53.
- Thamrin, M. (1985) : An investigation of the relationship between the geology of Indonesian sedimentary basins and heat flow density. Tectonophysics Vol.121, 45-62.

MATSUBAYASHI Osamu (1997) : New heat flow data in Southeast Asia.

< 受付 : 1997年8月14日 >