

北海道の温度勾配図とシミュレーション

大久保 泰邦¹⁾・秋田 藤夫²⁾・田中 明子¹⁾

1. はじめに

地球は内部に熱をもち、これを宇宙空間に放出する。この地球内部の熱放出の結果としてマントル対流、海洋性プレートの形成、火山の形成などが起こると考えられている。すなわち地球の温度構造は地球のダイナミズムそのものであると言える。これらを理解する上で重要となるのが、地殻熱流量などの温度に関する観測データである。

また地球内部の温度構造をより具体的に理解するためには、地表で取得されたデータだけでは不十分である。そこで実験場を野外からコンピュータに移し、解析を行う。実際には物理法則を表現する支配方程式群を用いてシミュレーションを行うこととなる。

日本列島の陸域での地殻熱流量の観測は1960年代から上田誠也らのグループによって開始され、熱流量値が明らかにされた(Uyeda, 1972)。その大きな特徴の一つは、火山では $200\text{mW}/\text{m}^2$ 以上にも達する高い熱流量を示すことである。また日本列島周辺海域での熱流量測定によって、火山前線から大陸側にかけては火山を除きおよそ $100\text{mW}/\text{m}^2$ 、海洋側のアサシスミックフロント近傍では約 $50\text{mW}/\text{m}^2$ 、さらに海溝付近までは $30-40\text{mW}/\text{m}^2$ の熱流量を示すことも分かってきた(Yasui *et al.*, 1968)。

熱流量は深度方向の地下温度上昇率である温度勾配と、熱の伝わり易さの指標である岩石の熱伝導率の積で表される。しかし、陸域のボーリングコアの熱伝導率を測定するとかなりバラツキが見られ、熱流量の値に変換すると深度方向に値がまちまちになってしまう。このため陸域においては温度分布を表す指標として、ある深度、例えば100m深

での地温分布や深度方向の温度上昇率である温度勾配図で表すことが行われてきた。

そこで大久保(1993)は熱流量測定で得られた温度勾配値と地熱探査を目的とした坑井データを編集し、123点の温度勾配値を求め、日本列島の陸域の大局的な温度勾配図を作成した。しかし、これらの成果は観測データが不足していたため、火山の局所的な異常を十分に表現するものとはなっていない。

近年温泉開発ブームに伴って火山地帯を含む多くの地域で深部ボーリングが実施され、地下温度情報が蓄積されてきている。これまでなら温泉開発が行われなかったような地温勾配が小さな地域でもボーリングが行われ、貴重な温度データを提供してくれている。北海道立地下資源調査所(1995)は北海道においてこれらのデータを基に、火山周辺の局所的な異常を表現した詳細な温度勾配図を作成した。

ここでは測定密度が高い温度勾配値によって表された北海道の詳細な温度構造を紹介し、さらにシミュレーションの例として北海道のデータから地殻内の温度構造を求める試みを行い、シミュレーションの意義について考察を加える。

2. 陸域の温度調査

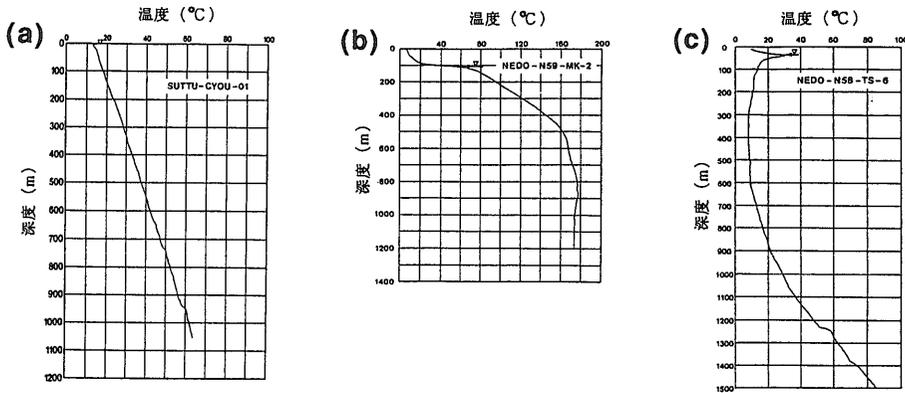
陸域の温度調査には航空機や人工衛星を利用した空中からの調査と地表での調査がある(物理探査学会, 1989)。

空中からの調査は主に地表面が放射する赤外線エネルギーを計測し、その温度分布を映像化する方法である。

地表での調査としては火山・地熱地帯などで自

1) 地質調査所 地殻物理部
2) 北海道立地下資源調査所

キーワード: 北海道, 温度勾配, 熱流量, キュリー点, シミュレーション, 支配方程式



第1図 典型的な温度曲線。(a)伝導型。(b)上昇流型。(c)下降流型。

然放出される熱量を測定する放熱量調査や坑井や地下坑道を利用した温度測定が挙げられる。坑井を利用した測定では、一般に坑井内の温度検層を行い、いくつかの深度での温度を測定し、深度対温度の曲線（ここでは温度曲線と呼ぶ）を作成する。これと並行してコアの熱伝導率などの熱物性値を測定して熱流量を求めることや、湧水や逸水の状況を調べ、地下水の有無や亀裂状況などから熱の移動を解明することも行われる。

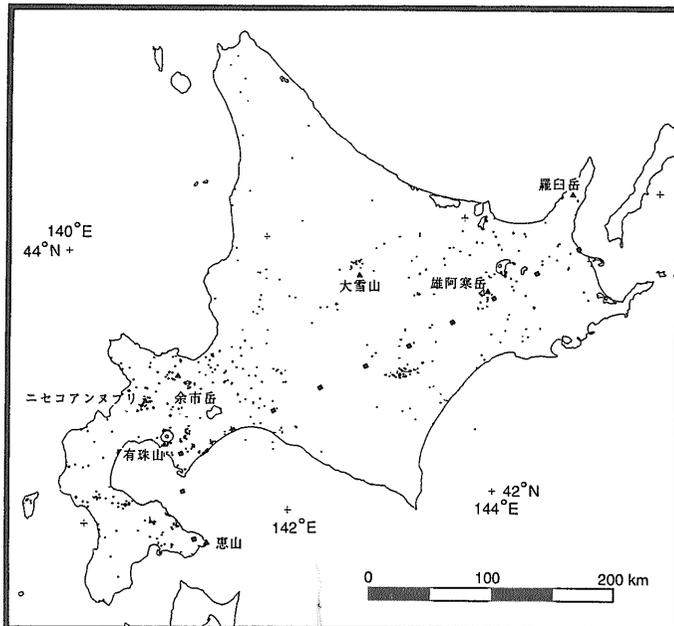
温度曲線の形態は大まかに、ほぼ直線となる伝導型（第1図(a)）、上に凸の曲線を描く上昇流型（第1図(b)）、下に凸の下降流型（第1図(c)）、それらの混合型、に分けられる。伝導型は熱移動が主に熱伝導だけである場合であり、後者の3つの型

は熱移動が熱伝導だけでなく、熱水対流、すなわち流体流動に伴う熱移動を含んでいる。

坑井掘削時には泥水を循環させるため、掘削直後の坑内は真の温度を示さず、正確な温度測定を行うためには元の温度に回復するまで何日も待たなければならない。実際の測定では簡便のため24時間とか48時間の回復試験を行いながら、坑内温度を推定する。

3. 北海道の温度勾配図

北海道立地下資源調査所(1995)は総計650本の坑井データと11ヵ所の鉱山の坑内での温度測定データ(第2図)から北海道の温度勾配図を作成し



第2図 測定点位置図(北海道立地下資源調査所, 1995)。黒四角は火山前線の位置を示す。

た(口絵3-1). 650本の内訳は地熱・温泉井が601坑, 石油・天然ガス井が28坑, 金属資源探査井が5坑, 基礎試錐が10坑, 石炭調査井が5坑, 土質調査井が1坑である.

地熱井や石油・天然ガス井は一般に長時間の温度回復試験を行う. しかし温泉ボーリングなどでは掘削直後に温度を測定し, 回復試験を行わない場合がある. また各深度での温度を測定せず, 坑底の温度だけ測定する場合もある. すなわち温度検層データにはさまざまな精度のものが存在する.

温度勾配の読み取りは, 地表の平均基準温度を10℃と仮定して, この温度と坑底温度を直線で結んだ時の深度に対する温度上昇率を勾配値として行った.

北海道の場合, 非火山地帯の温度勾配は20-40 K/km, 火山・地熱地帯では40-160K/kmとなった(口絵3-1). 温度勾配が100K/km以上を示す地域は, (1) 羅臼岳周辺; (2) 雌阿寒岳・雄阿寒岳周辺, (3) 大雪山・十勝岳周辺, (4) 定山溪・余市岳周辺, (5) ニセコアンヌプリ・チセヌプリ周辺, (6) 有珠山東と登別温泉周辺, (7) 濁川温泉周辺とその西方の遊楽部岳, (8) 恵山・南茅部町周辺, の火山・地熱地帯である.

4. 温度構造

大久保(1993)の温度勾配図はデータ点数が少ないことから, わずかに大雪山周辺とニセコから恵山にかけての二つの高温度異常域と両者に挟まれた低温度勾配域を抽出した. 口絵3-1の温度勾配図はこれに比べ多くの異常域を抽出し, いくつかの問題はあるものの大久保(1993)に比べ遥かに詳細な温度データとなっている. 次に口絵3-1に示されている温度勾配値を境界条件としてシミュレーションによって火山・地熱地帯を含めた広域の地下温度構造を求める試みを行う.

地下の概略の温度構造を求めるための適当なモデルを要約すると以下の(a)から(e)となる(第3図).

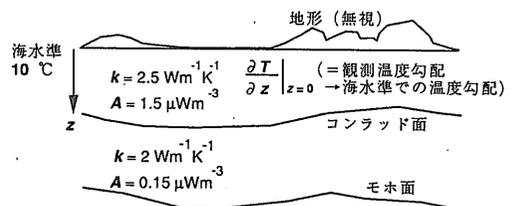
- (a) 熱対流は存在しない1次元, 定常状態とする.
- (b) 熱伝導率を上部地殻で2.5W/m・K, 下部地殻で2W/m・Kとする.
- (c) 発熱量は地表からコンラッド面までは1.5 μ

モデル

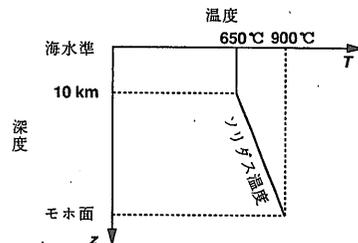
エネルギー保存則

- 定常 —> 時間項 = 0
- 熱移動は熱伝導だけ —> 熱水対流の項 = 0
- 水平方向の温度変化0 —> 水平方向成分 = 0
- 熱伝導率一定

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + A = 0$$



ソリダス温度モデル



第3図 シミュレーションのためのモデルと境界条件. T は温度, k は熱伝導率, A は内部発熱である. モホ面とコンラッド面の深度はZhao et al. (1992) による.

W/m^3 で一定, コンラッド面からモホ面までは $0.15 \mu W/m^3$ で一定とする.

(d) ソリダス温度以上の領域は部分溶融域とし, 部分溶融域内の温度構造は第3図の下のソリダス温度モデルに従うとする.

(e) 熱流量はコンラッド面で連続する.

このモデルに従って大雪山を横切り, 火山前線にはほぼ直行する断面上の温度構造を求めると口絵3-2になる. 大雪山の下で高温域が浅部にまで達し, ソリダス温度に達する深度(ソリダス深度)は10km以浅となる. ソリダス深度が10km以浅になる範囲の南北幅は約40kmである. すなわち深度

数kmに水平方向の大きさ40km程度の部分溶融域が存在する。

またある深度での温度分布や、ある温度の等温面の深度を描くこともできる。一例として500℃の等温面深度を描いたものが口絵3-3の図である。

5. キュリー点深度と500℃の等温面深度との比較

キュリー点深度図とは磁気異常解析より求めた岩石の強磁性を失う温度、キュリー点、に達する深度分布を表す図のことであり、火山地帯を含めた温度構造を表現する図として利用されてきた(大久保, 1984)。キュリー点はボーリングの温度データとキュリー点深度との比較の結果、約450℃と推定された(Okubo *et al.*, 1989)。磁鉄鉱のキュリー点は580℃であり、チタンの増加によって低下する(Nagata, 1961)ことを考え併せれば、キュリー点は500℃前後となり、500℃の等温面深度はほぼキュリー点深度を表す。

第4図はキュリー点深度図(Okubo *et al.*, 1989)であり、口絵3-3は500℃の等温面の深度図である。これらはともに前弧側で深く、火山地帯で浅くなり、両者の分布パターンはよく似ている。

しかしキュリー点深度図は陸域で8kmから15kmの狭い範囲の深度分布を示すのに対し、500℃の等温面深度は5kmから30kmまで広い範囲に分布



第4図 磁気異常解析から求めたキュリー点深度図(Okubo *et al.*, 1989)。

する。また温度勾配が特に低い神居古潭帯と日高帯の一部では、地殻内では500℃に達しない。これは500℃の等温面が深い場所ではキュリー点深度はそれより浅くなり、逆に浅い場所ではそれより深い値を示す傾向があることを示す。キュリー点解析では数10～数100km四方の磁気異常のパワースペクトルからキュリー点深度を求めるため、結果は数10～数100km四方の平均的な深度となる。キュリー点深度が実際には浅い場所で深く、深い場所で浅くなるのはこの平均効果のためと考えられる。

口絵3-3に従えば、500℃の等温面深度図は火山列では5km、その周辺では20km以深、あるいはモホ面にも達し、大きく変化していることがわかる。500℃は室内実験結果から、岩石の脆性破壊と延性破壊の境界温度に近く(嶋本, 1989)、500℃の等温面はほぼ力学境界を表すと推定され、この深度の変化が応力の分布や時間変化に影響を与えることとなる。

6. 予期せぬ何かと醤油を入れすぎたシミュレーション

仮想現実(バーチャルリアリティ)を作り出すシミュレーション技術が地球科学の分野でも利用されるようになり、マントル対流や沈み込み帯の形成などさまざまなモデルを視覚化する試みがなされている(南雲, 1996a, 南雲, 1996b, 南雲, 1996c)。これらは地球を時間的に変動する(進化する)一つの系として捉え、進化する過程を物理法則で表現し、定量化するというものである。シミュレーションの旨みはこの進化する地球を表現することによって予期せぬ何かが見えてくるところにある。すなわち従来はスナップ写真を作っていたのだが、映画の様に連続写真を作ることによって何かが見えないかしらということである。

シミュレーションについてももう少し掘り下げて考えて見ると以下のことを行っていることが分かる。

- (1) 対象の設定(例えば、マントル対流、沈み込み帯の形成、マグマの上昇、地殻の歪、海洋性プレートの形成など)
- (2) 支配方程式群の設定(物理法則による定量化)

- (3) モデルの設定 (先験的な洞察力や観測データによるモデル作成)
- (4) 境界条件の入力 (主に観測データの入力)
- (5) 数値計算

支配方程式とはエネルギー保存則とか質量保存則などのある物理現象を表現する方程式のことである。実際には温度や流体速度など、多くのパラメータが未知量となるため、シミュレーションするためには未知量の数だけ支配方程式が必要になる。この一連の方程式を支配方程式群と呼ぶ。

物理法則を表す支配方程式群からは一般に多くの解を導くことができる。例えば定常状態の1次元熱伝導と内部発熱(A)の関係を表す式、

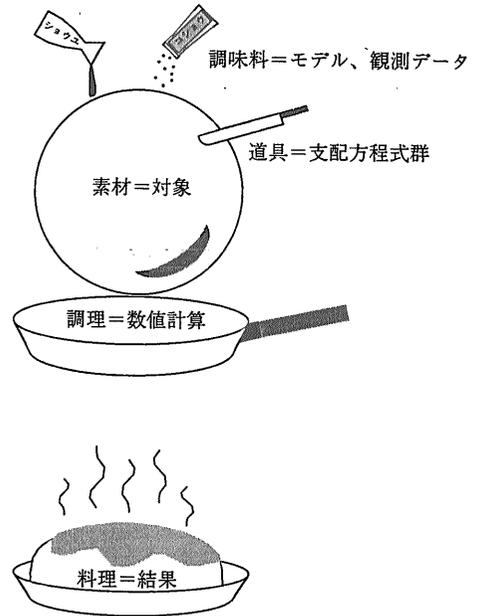
$$k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + A = 0 \quad (1)$$

においてk(熱伝導率)とAが既知で、温度Tが未知量であった場合、未知量は一つであるから、(1)式で表された支配方程式一つでTについて解くことができる。しかし不定項が入り込んでしまうためこの解は無限に存在することになる。

これを解決するためにモデルや境界条件の設定を行う。実は(1)式は定常状態とか1次元モデルなどの仮定(モデルの設定)をすでに行って、エネルギー保存則を表す支配方程式から導出した式である。すなわちモデルの設定によって得られた(1)式を解くためにもさらにモデルや境界条件が必要になる。

ここまで考えると予想がつくことであるが、結局得られる答はモデルに依存するということである。これを料理に例えれば、「対象」が「素材」、「方程式群」が包丁などの「道具」、「モデルや境界条件」は「調味料や火加減」、「数値計算」(これも巧拙がある)は実際の「調理」、「結果」ができ上がった「料理」となる(第5図)。モデルの良否は調味料や火加減の巧拙であり、料理の味を大きく左右する。先に述べたシミュレーションの旨み、すなわち予期せぬ何かを見るためには、調味料を余り入れ過ぎないで素材の味を生かすことである。

口絵3-2の温度断面をもう一度見てもらいたい。これは地表で観測した温度勾配値(境界条件にあたる)を深度方向に数字を置き換えた(深度対温度

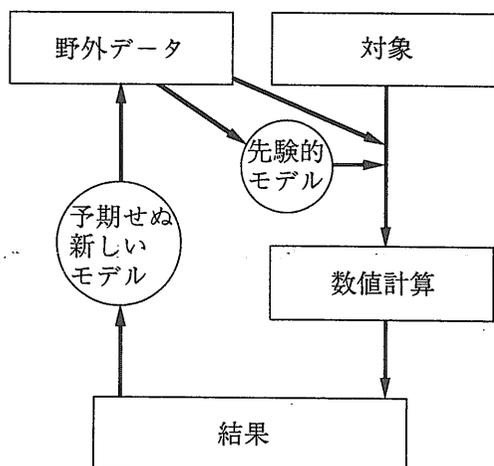


第5図 シミュレーションを料理に例えれば。

の関係を定量化した)のほとんど変わらない(これだけでも意義あることであるが)。どうしてこうなったかと言えば、地殻内で存在するであろう対流や側方への熱移動、時間変動などを無視してモデル化したためである。すなわちこれは調味料の入れすぎで、予期せぬ何かどころか、すでにモデルを設定した時点で、結果がある程度予想できたことになる。この調味料は淡泊な味なのでさしずめ醤油というところであろうか。

もし我々がカルデラは火山の自重と熱のために地殻が沈降してできたのではないかと考えたとする。これが物理法則と合致している限りシミュレーションによって再現できる。そうすると我々はカルデラ形成の新しい理論を作り、この理論はシミュレーションによって正しいことが証明されたと言う。しかし先の議論で分かる通り、「シミュレーションによって正しいことが証明された」という言い方は間違っている。なぜならば、これは解の一つでしかなく、可能性の一つであることを証明したに過ぎないからである。答を予想したモデルの設定は調味料の入れすぎで、予期せぬ味ではない。

支配方程式群の解は無限にあるため、我々は先験的な洞察力によるモデルを作りたがる。しかし解を制約するもう一つのもの、観測データ、はつい



第6図 多様な味を楽しむシミュレーション。

忘れがちである。適度なモデルと信頼性の高いたくさんのデータが予期せぬ味を生み出す秘訣だと思ふ。

7. むすび

口絵3-1はいくつかの火山・地熱地帯において過小評価や過大評価をしている可能性があるものの、大久保(1993)の温度勾配図よりも詳細な温度異常を表現している。今後は北海道以外の地域でデータ収集を行い、日本列島全体の温度勾配図を1998年には出版する予定である。

これらの温度データから地球内部の温度構造を求めるにはシミュレーションが最適である。シミュレーションは従来、自分が考えたモデルを他人に視覚的にアピールするために用いられてきた。この利用の仕方は、料理で言えば自分固有の調味料をじ

ゃぶじゃぶにふりかけて味付けを行うことである。支配方程式群の解は多様であり、この多様な味を楽しむことがこれからは重要になると考える。シミュレーションによって予期せぬ何かが見えたとき、再び野外に出てそれを実証するデータを取得するとういことを繰り返すことによって、新しい地球像が得られるはずである(第6図)。

参考文献

- 物理探査学会(1989): 図解物理探査, 239p.
 北海道立地下資源調査所(1995): 60万分の1北海道地温勾配図.
 Nagata, T. (1961): Rock Magnetism, Maruzen, Tokyo, 225p.
 南雲昭三郎(1996a): 地球深部の運動像をめぐる研究動向(その1). 地質ニュース, no.497, 7-17.
 南雲昭三郎(1996b): 地球深部の運動像をめぐる研究動向(その2). 地質ニュース, no.503, 39-48.
 南雲昭三郎(1996c): 地球深部の運動像をめぐる研究動向(その3). 地質ニュース, no.508, 31-40.
 大久保泰邦(1984): 全国のキュリー点解析結果. 地質ニュース, no.362, 12-17.
 大久保泰邦(1993): 日本列島の温度勾配図, 日本地熱学会誌, 15, 1-21.
 Okubo, Y., Tsu, H. and Ogawa, K. (1989): Estimation of Curie point temperature and geothermal structure of island arcs of Japan, Tectonophysics, 159, 279-290.
 嶋本利彦(1989): 岩石のレオロジーとプレートテクトニクス, 科学, 59, 170-181.
 Uyeda, S. (1972): Heat flow. The crust and upper mantle of the Japanese area, Part 1 Geophysics, 97-105.
 Yasui, M., Kishii, T., Watanabe, T. and Uyeda, S. (1968): Heat flow in the Japan Sea, in The Crust and Upper Mantle of the Pacific Area, Am. Geophys. Union Monogr., 12, 3-16.
 Zhao, D., Horiuchi, S. and Hasegawa, A. (1992): Seismic velocity structure of the crust beneath the Japan Islands, Tectonophysics, 212, 289-301.

OKUBO Yasukuni, AKITA Fujio and TANAKA Akiko (1997): Thermal gradient map of Hokkaido and its simulation.

<受付: 1997年8月5日>