

米国地質調査所 (USGS) 公開の高温熱水系シミュレータ HYDROTHERM INTERACTIVE (v.3.1) の紹介

茂野 博¹⁾

1. はじめに

近年, 高精度の多種多様な地理・地球科学情報が, 日本においても無料~低価格で電子公開されるようになってきた. これらの情報をうまく統合的に利用することによって, 地圏分野の資源開発, 環境保全, 災害防止などに関する様々な情報処理を, 効率的に低費用で進めることが可能になりつつある(例えば, 地質調査総合センター, 2007).

同時に, パーソナルコンピュータ(以下パソコンと略記)の性能向上, 低価格化などが著しい. 最近ではパソコンの基本ソフトウェア(以下ソフトウェアはソフトと略記)として, Linux (UNIXと互換性の高いオープンソースのフリーソフトでGNU/Linuxとも呼ばれる; Debian, Ubuntu, Fedoraなど様々なディストリビューション・パッケージがある)の利用が無料~低価格で非常に容易になってきた. Microsoft社(以下MSと略記)のWindows系を基本ソフトとする一般的なパソコンでも, Linux環境をCD-ROM, DVD-ROMなどから立ち上げるLive版が, パソコン関係雑誌の付録などとしても提供されており, オフィスプログラムを始めとした様々な無料ソフトの利用が可能である.

UNIX環境では, ~1970年代から米国の大学・研究機関を中心に, 各種分野の高機能ソフトが開発されて, オープンソースで無料~低価格で公開されてきた. これらのソフトの多くは, 現在インターネット・WWWを通じてダウンロードが可能であり, 上記のパソコン-Linux環境で様々な利用が可能となっている(ただし, 日本語への対応は限られる). また, プログラミング環境として, GCC (GNU C言語コンパイラ; 最新版(v.4)ではgfortran (Fortran 77~95)などにも統

合的に対応化)も無料で利用可能であり, ソースコードからのプログラムの改良なども不可能ではない. さらに, これらのソフトの一部では, MS Windows系を基本ソフトとしたパソコン上で利用可能なバージョンが提供されるようになってきた.

これらの多様なソフト, 特に高機能の数値シミュレータなどをうまく利用することによって, 上述した各種の電子地理・地球科学情報を様々な目的でより幅広くより高度に, 低費用で活用することが可能になるであろう. 本説ではその一例として, 米国地質調査所(以下USGSと略記)が開発・公開するオープンソースのフリーソフトの数値シミュレータであるHYDROTHERM (特にHYDROTHERM INTERACTIVE v.3)を, 地熱資源の評価などに資する目的で試用した例を紹介する. なお, 筆者によるHYDROTHERMの利用の現状については, 7.おわりにを参照されたい.

注記: 本説が紹介する内容を実際に試みる場合に, 何らかの問題が発生しても, 実施者の自己責任であることに注意を願いたい.

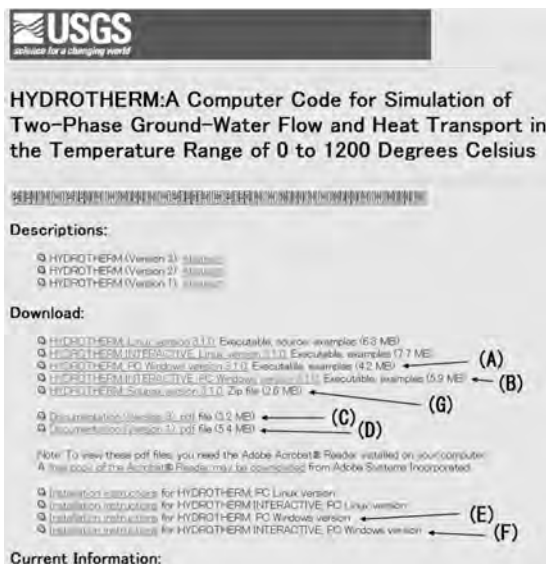
2. HT-3とHTI-3の概要・インストール・使用試験

2.1 HT-3とHTI-3の概要(その1)

HYDROTHERMは, USGSの研究者達によって断続的に開発・公開されてきた数値シミュレータである. その目的は, 地下空間3次元の複雑な岩石(空隙率・浸透率などが異なる)の分布環境にあると同時に, 幅広い温度・圧力条件下(0~1,200°C・0.5~10,000bar)にある熱水系(熱水のみならず, 蒸気・超

1) 産総研 地圏資源環境研究部門

キーワード: 熱水系, 数値シミュレーション, 数値シミュレータ, HYDROTHERM, HYDROTHERM INTERACTIVE, オープンソース, 米国地質調査所, マグマ, 地熱貯留層, 地熱資源評価



第1図 米国地質調査所 (USGS) の熱水系数値シミュレータ HYDROTHERM の WWW ホームページ (http://wwwbrr.cr.usgs.gov/projects/GW_Solute/hydrotherm/)。Microsoft社のWindows系を基本ソフトとしてHT-3・HTI-3を使用する場合には、実行可能形式プログラムの(A)・(B)、HYDROTHERMの説明書の(C)・(D)、インストールの説明書の(E)・(F)、必要に応じてHT-3のプログラムソース(Fortran 90による)の(G)などをダウンロードする必要がある。

臨界水を含む)について、多様な状態・流動の数値シミュレーションを可能とすることにある。HYDROTHERMでは、最新版のv.3.1.0(以下HT-3と略記)の提供と同時に、HYDROTHERM INTERACTIVE v.3.1.0(以下HTI-3と略記)も提供されるようになった(第1図参照)。

HT-3は、数値シミュレータ本体にあたり、空間3次元(基本的にX-Y-Zの直交座標系を用いるが、円筒座標系の使用も可能)を対象とすることができる。HT-3では、圧力とエンタルピーを独立変数とし、基本的に差分法を用いて、(1)岩石中の水(熱水・蒸気・超臨界水;以下同様)の質量保存・ダルシー則に従う流動、(2)岩石・水の熱エネルギー保存・移動に、(3)水の密度・粘性・気液飽和度の圧力・比エンタルピー(温度)依存性(熱力学表)、(4)各種の境界条件、(5)初期条件を加えて、連立方程式をNewton-Raphson法に基づいて陰解法で解いている(旧版からのSSOR法と、HT-3で追加された大規模計算に向くGMRES

法がある)。なお、近分野の他の数値シミュレータと同様に、対象領域を分割した各セル(ブロック)中の岩石-流体の熱平衡仮定、毛細管圧力の無視、放射による熱移動の無視などの単純化仮定が行われている。

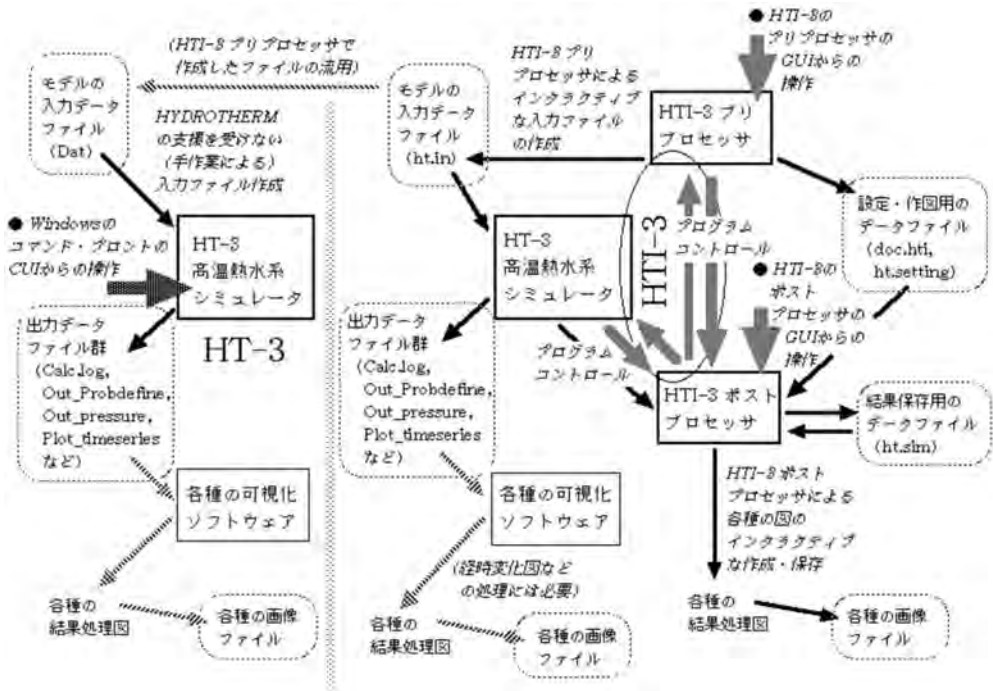
HT-3の利用のためには、複雑な対象のモデル化とシミュレーション手法に対応した多項目の入力データファイルの作成(前処理)、シミュレーション結果として得られる多様な出力データファイル群からの各種図化などの作業(後処理)が必要である。HT-3はキャラクタ・ユーザ・インターフェース(以下CUIと略記)を通じて操作されるものであり、対象とする問題が大規模で複雑な場合には、上記の前・後処理は容易ではなく長時間の労力を要する。

HTI-3は、この問題を統合的に解決するために新たに開発・公開されたもので、HT-3のシミュレータ本体にグラフィカル・ユーザ・インターフェース(以下GUIと略記)を持つプリプロセッサとポストプロセッサを繋ぎ合わせて、数値シミュレーションに係わる一連の作業を容易にしている。ただし、その利用は空間2次元の垂直断面(X-Z)図形式までに限られる。第2図に、HT-3を単独で使用する場合の処理(左)とHTI-3を利用する場合の処理(右)の流れの違いを示す。

なお、HT-3は従来のHT-2に比較して、自由地下水系の処理を可能とした点、地表面などの境界条件の設定自由度を高めた点、岩石物性値分布の時間・深度依存性の関数化処理を可能とした点などにも改良が加えられている。従って、実際の多様な火山・地熱地域の環境への適応性の向上が期待される。

2.2 HT-3とHTI-3の概要(その2)

第1表に、HYDROTHERMの断続的な開発の歴史の概要を示す。数値シミュレータ本体であるHYDROTHERMの概要は、Hayba and Ingebritsen (1994)、Kipp *et al.* (2008)などによって説明されている(後者はHTI-3の説明も含む)。また、HYDROTHERMを用いたシミュレーションの例は、Ingebritsen and Sanford (1998)、Ingebritsen *et al.* (2006)などに紹介されており、日本でも蘭ほか(2007)、Fujimitsu *et al.* (2008)、岡ほか(2008)などがHT-2の利用例を報告している。しかし、公開後それほど時間が経過していないHT-3とHTI-3の利用例は、まだ限られているようである。



第2図 HT-3をMS Windows系のCUIから利用する場合(左)とHTI-3のプリプロセッサとポストプロセッサのGUIを通じて利用する場合(右)のシミュレーション処理の流れの違い。

第1表 米国地質調査所 (USGS) の熱水系数値シミュレータHYDROTHERM (HYDROTHERM INTERACTIVEを含む)の開発史の概要。

西暦年	シミュレータの名称・版など	開発者 (所属)
1980	GEOTHER	Faust, D. R. & Mercer, J. W. (USGS → Geotrans, Inc.)
1983	(Modification)	Ingebritsen, S. E. (Stanford University → USGS)
1990	(Rewriting)	Hayba, D. O. (USGS)
1993	HYDROTHERM v.1 (v.1.1 & v.1.2)	Hayba, D. O. & Ingebritsen, S. E. (USGS)
1997	HYDROTHERM v.2 (v.2.1 & v.2.2)	Hayba, D. O. & Ingebritsen, S. E. (USGS)
2008	HYDROTHERM v.3 (v.3.1)	Kipp, K. L. (USGS) ©
	HYDROTHERM INTERACTIVE v.3 (v.3.1)	Hsieh, P. A. & Carlton, S. R. (USGS) ©

© MS Windows系が基本ソフトのパソコンへの対応版あり。

時代的な制約からHT-2は、基本的にUNIXを基本ソフトとした特定のワークステーションを利用環境として想定しており、FORTRAN 77で作られていた(オープンソース)。これに対してHT-3とHTI-3は、基本ソフトとしてLinux系およびWindows系に対応したものが提供されている。HT-3については実行可能形式とともに、新たにFortran 90で書き直されたソースコードのファイル群が公開されている。一方、HTI-3については実行可能形式のみが公開されており、C言語とJava (v.1.5)で書かれたソースコードのファイル群は一般には公開されていない(ただし、依頼すれば入手は可能のようである)。

本説では、MS Windows XP(日本語版)を基本ソフトとした各種のパソコン(旧式のノート型を含む)を使用した場合について以下に述べる。

2.3 プログラムのダウンロードとインストール

プログラムのダウンロードとインストールの手順は、以下のとおりである。なお、パソコンのハードディスクの容量として、合計60MB程度が必要である。また、

第2表 HYDROTHERMおよびHYDROTHERM INTERACTIVE (v.3.1)に付属する例題 (Examples)の一覧表。

例題 01:	単一セルの問題 (定エンタルピー注入)
例題 02:	単一セルの問題 (定圧力膨張)
例題 03:	定常・均一上昇流の問題 (定流量境界)
例題 04:	定常・均一上昇流の問題 (定温度境界)
例題 05:	単一坑井への放射状流動の問題 (円筒座標系)
例題 06:	2相領域の拡大問題 (1次元垂直貯留層)
例題 07:	2相領域の拡大問題 (3次元貯留層) ★5
例題 08:	間欠泉の問題 (10 x 11グリッド)
例題 09:	近臨界点における自由対流の問題 (2次元)
例題 10:	単一マグマ注入起源の貫入岩体の冷却問題 ★3
例題 11:	垂直カラムでの非定常不飽和浸透の問題
例題 12:	水平カラムでの不飽和流の問題
例題 13:	定常2次元排水 (地表浸み出し)の問題
例題 14:	定常2次元排水 (地表浸み出し)の問題 (基底熱流量と暖降水の寄与を含める)
例題 15:	堆積盆における熱流の問題
例題 16:	1相自由対流の問題
例題 17:	非定常1次元水平飽和流動 (熱移動を伴う)問題
例題 18:	定期的間欠泉の1次元モデル問題
例題 19:	ヒートパイプの1次元モデル問題
例題 20:	Lassen 火山の熱水系 (蒸気卓越系) 発達の問題 ★4
例題 21:	高浸透率の堆積盆における移流と自由対流の混成問題

備考(1) HT-3には、例題 01～例題 14 が伴われる (例題 01～例題 10 は、旧版の HT-2 から継承)。
 備考(2) HTI-3には、例題 01～例題 21 が伴われる (ただし、空間3次元問題の例題 07 を除く)。
 備考(3) HT-3 と HTI-3 には該当一覧表のファイル (Table_of_Contents) が C:\Program Files\USGS\HTI\examples と C:\Program Files\USGS\HTI\examples の中に置かれている (Windows 系の基本ソフトの場合) 各々の例題は、上記の examples フォルダの中に例題毎のフォルダとして存在し、その中に「orig」の拡張子をつけた入力・出力ファイル群 (大部分はテキスト形式) が置かれている。
 備考(4) ★3・★4・★5は、本文の 3, 4, 5 で例題として使用した。

HTI-3のインストールについては、Javaの実行環境 (Java Runtime Environment v.1.5以降)の事前インストールが必要である。

- (1) インターネット・WWWにより、USGSのHYDROTHERMのサイト(第1図)へアクセスする。
- (2) ダウンロードの項目の中から、HYDROTHERMの実行可能形式プログラムのパッケージを選択してパソコンへダウンロードする。同時に説明書、インストール手引書などのダウンロードを行う(第1図)。
- (3) パソコンのデスクトップ上でht-3.1.0.msi・hti-

第3表 HYDROTHERMとHYDROTHERM INTERACTIVE (v.3.1)の入力・出力データファイルの一覧表 (Kipp et al. (2008, p.79-80)に、◇のHTI-3専用の3ファイルを追加)。

(1) 入力ファイル (4+2種類)	
input_filename	ユーザ作成 (含 HTI-3) の入力ファイル (◇ ht_in)
Dat.strip	シミュレータによって一時的に作成される入力ファイル (B)
IC_pressporo.xxx	前回のシミュレーションによって計算されたデータ (圧力・空率分布) (注: 多段シミュレーションの場合)
Out_restart.dump.xxx	前回のシミュレーションによって計算された各種データ (温度分布など) (注: 多段シミュレーションの場合)
◇ doc.hti	HTI-3の GUI 処理のための主要な設定データ (B)
◇ ht.settings	HTI-3の GUI 処理のための作図表パラメータデータ
(2) 出力ファイル (26+1種類)	
Calc.log.xxx	時間ステップ毎の計算記録と関連情報
IC_pressporo.xxx	将来の処理に初期条件とするための保存データ
Out_Probdefine.xxx	シミュレーションの問題設定に関する情報
Out_balance.xxx	全領域の流体とエネルギーの全体バランス表
Out_boflow.xxx	境界セルでの流量についての列形式表
Out_boflow2.xxx	境界セルでの流量についてのメッシュ行列表
Out_density.xxx	密度の分布
Out_dimensionless.xxx	無次元のヌセット数・熱ヘクレ数の分布
Out_enthalpy.xxx	比エンタルピーの分布
Out_permeability.xxx	浸透率と熱水・蒸気の相対浸透率の分布
Out_pmthermalprop.xxx	岩石空隙の熱特性の分布
Out_porosity.xxx	空率率の分布
Out_potential.xxx	水圧とポテンシャル水頭の分布
Out_pressure.xxx	圧力の分布
Out_residual.xxx	流体と熱の移動についての差分式の残差の分布
Out_restartdump.xxx	将来の処理に初期条件とするための保存データ
Out_saturation.xxx	流体 (水・蒸気・臨界水) の飽和度の分布
Out_source.xxx	井戸・点流体源についての流量の表
Out_temperature.xxx	温度の分布
Out_velocity.xxx	流速と流量の分布
Out_viscosity.xxx	粘性の分布
Out_watertable.xxx	水位面標高の分布 (自由地下水のみ)
Plot_scalar.xxx	可視化処理のための圧力・比エンタルピー・温度・熱水飽和度の分布
Plot_scalar2.xxx	可視化処理のための水位面標高分布 (自由地下水)
Plot_vector.xxx	可視化処理のための流速データの分布
Plot_timeseries.xxx	可視化処理のための圧力・比エンタルピー・温度・熱水飽和度の経時変化 (シミュレーション観測点における)
◇ ht.sim	HTI-3の GUI 処理のためのシミュレーション結果 (B)

◇ は、HTI-3 で用いられる入力・出力ファイルの種類 (名) を示す。行末尾の (B) は、バイナリ形式のファイルを示す。

- 3.1.0.msiとして標準的な形式で圧縮されているプログラム・パッケージの各アイコンをダブルクリックし、表示に従いボタンを選択することによってインストールを実行する (各々1分程度で簡単に終了)。
- (4) 上記の作業の結果、HT-3・HTI-3のプログラムや各種の関連ファイルは、デフォルトでは「C:\Program Files\USGS」フォルダ中の「HT」・「HTI」の2フ

フォルダ内に各々置かれる。

2.4 例題による使用試験

上述した「HT-3」・「HTI-3」のフォルダの中には、各々「examples」フォルダが存在する。この中には、それぞれ多様な例題が14個と20個のフォルダに整理されており、また例題の一覧表ファイル「Table_of_Contents」と共通の入力データの様式ファイル「Data_form」が存在する。上記の例題の一覧表を、簡略的に日本語化して第2表に示す。また、HT-3・HTI-3で用いられる入力・出力データファイルの種類とその概要を、同様に第3表に示す。上記の各例題フォルダの中には、それぞれHT-3あるいはHTI-3の各入力ファイル群・出力ファイル群が一式納められている(一部のファイルは省略されている)。

上記の多様な例題については、上述したHYDROTHERMの説明書の中に記載されている。また、Ingebritsen *et al.* (2006) などでも、取り上げられている。これらの様々な例題を用いてHT-3・HTI-3の使用試験を行うことが、その習熟への近道と思われる。ただし、まだ使用実績が少ないHTI-3については、後述するように例題のモデルや処理に問題が残っている可能性があり、注意を要する。

3. HTI-3による深成岩体周辺における熱水系発達の2次元シミュレーションの例 (例題 Ex10)

3.1 深成岩体周辺における熱水系の発達

地殻浅部にマグマ溜まりが生成し、その冷却が進んで深成岩体となる場合、その周辺(特にその上位)に分布する岩石(母岩)には、マグマ-深成岩体から供給される熱・流体(主に水)と対流する地下水によって環境条件に応じて熱変成帯や熱水系が発達し、恵まれた環境では各種の金属・非金属鉱床も生成する。この問題について、Hayba and Ingebritsen (1997) はHT-2によって各種の条件を変えて地下状況の経時変化のシミュレーションを行い、定量的な比較検討を進めた。HT-3とHTI-3にもこの事例がEx10として添付されている(第2表参照)。なお、マグマの上昇・定置過程や、マグマ溜まり内のマグマの対流や冷却固化などの過程は、モデルの対象外である。

第4表 HYDROTHERM INTERACTIVE (v.3.1) のオンライン・ヘルプの項目(特に、シミュレーションの設定の方法・順序に注意)。

Overview

- Preprocessor
- HYDROTHERM 3
- Postprocessor
- Zooming and stretching the display
- Graphics buffering

How to Set Up a Simulation

1. Create a new document file
2. Select model options
3. Specify rock properties
4. Set up the drawing area
5. Load site map (optional)
6. Draw the domain
7. Draw the rock units
8. Specify simulation periods
9. Specify initial conditions by contours (optional)
10. Specify boundary conditions
11. Specify fluid sources (optional)
12. Specify observation points (optional)
13. Lay out the grid
14. Evaluate the discretization

How to Run a Simulation

- Display simulation results
- Simulation control
- Save simulation results on disk for later playback

File Management

- Document Files
- HYDROTHERM 3 Model Input Files
- HYDROTHERM 3 Model Output Files
- Saved Simulation Files

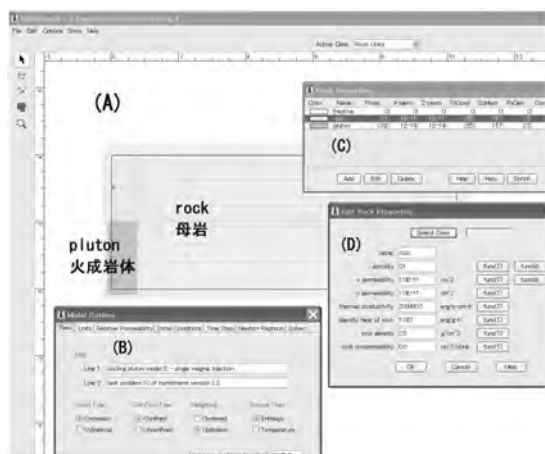
The Postprocessor in Standalone Mode

- Printing the Drawing Window
- Exporting the Drawing Window as a Bitmap

3.2 HTI-3とEx10の起動

Windows XPのメニュー・バーの「スタート」から始めて、プログラム群の中から「Hydrotherm Interactive」を選択し、HTI-3を起動する。これによって、プリプロセッサのGUIの主ウィンドウが開く。その上部のメニュー・バーから「File」の「Open」を選択し、「HTI」フォルダ中の「examples」フォルダ内から、「Ex10」フォルダを選択する。下方のテキスト・ボックスのファイルタイプを「すべてのファイル」に変えて、一覧枠に出現した「pluton.hti.orig」ファイルをダブルクリックする。

以下に、プリプロセッサとポストプロセッサでの処理



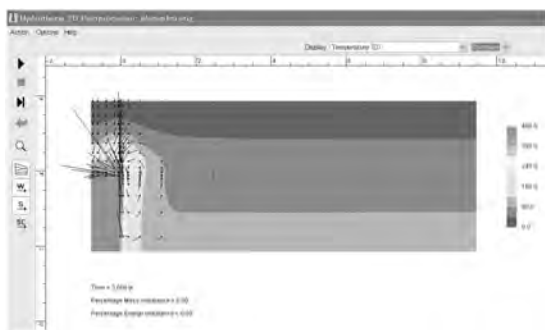
第3図 HTI-3のプリプロセッサの画面の例。深成岩体の冷却の2次元シミュレーション(Ex10)の場合を示す。プリプロセッサの(A)主ウインドウ(縦・横のメニュー・バーと岩石単元分布・グリッド分布の断面を描画した主画面)とともに、(B)モデルと処理についての基本選択の小ウインドウ「Model Options」、(C)分布する岩石の特性の一覧小ウインドウ「Rock Properties」、(D)岩石特性の編集小ウインドウ「Edit Rock Properties」を示す。モデル領域は横が10km、縦が4kmである(厚さは1kmを想定)。

について、操作の概略を紹介する。機能や操作について、詳しくはKipp *et al.* (2008)に書かれている。また、プリプロセッサとポストプロセッサのメニュー・バーにも詳しい「Help」(第4表)があり、これを手引きとすることが可能である。以下の3.3~3.4では、基本的にモデルの変更などは行わない。

3.3 プリプロセッサでの処理

(1) 上記の作業によって、プリプロセッサのGUI主ウインドウの中にマグマ-深成岩体と母岩の2次元垂直断面分布モデルの全体領域の枠線が現れる(第3図(A))。主ウインドウの上部のメニュー・バーから「Options」を選択し、「Model」を選択すれば、出現する小ウインドウによってシミュレーション・モデルの概要を見ることができる(第3図(B))。

(2) 上部のメニュー・バー中央下の「Active Data:」の項目選択によって、主ウインドウの中に該当するデータの分布(岩石単元、初期条件、境界条件、流体源、シミュレーション観測点、グリッドなど)が表示さ



第4図 HTI-3のポストプロセッサの画面の例。深成岩体の冷却の2次元シミュレーション(Ex10)の場合を示す。ポストプロセッサの描画ウインドウとして、縦・横のメニュー・バーとともに、温度分布と熱水流動ベクトルの分布(3,000年経過後)を示す。本図では温度分布の表示について、等高線形式(セル値を平滑化)を選択した。

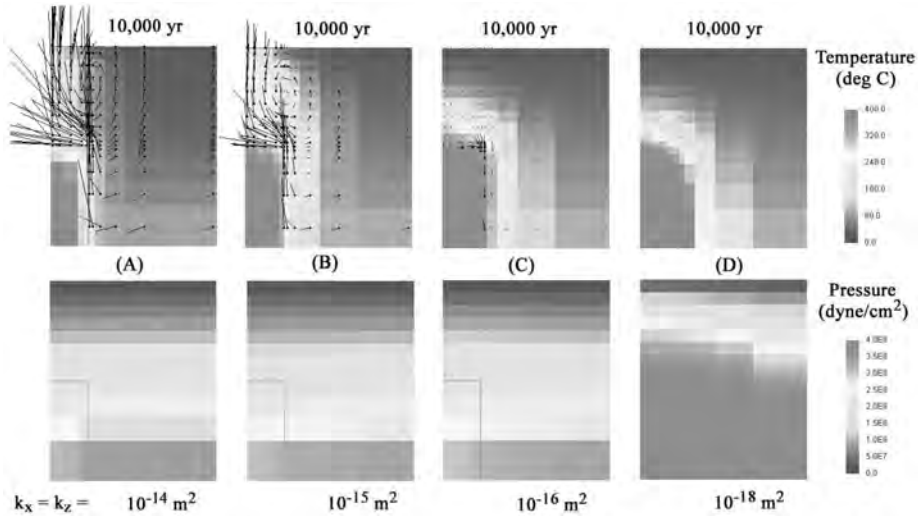
れる。例えば、「Rock Units」を選択・表示した場合には、主ウインドウの中に各種岩石(本例では2種類)の分布がカラー表示されるとともに、小ウインドウに各岩石単元に設定された物性値パラメータの一覧表(第3図(C))が出現する(主ウインドウ左方のメニュー・アイコン列も、対応して同時に変化する)。この一覧表を操作することによって、新たな岩石単元の追加、パラメータ値の変更などを行うことができる(第3図(D))。

(3) メニュー・バー上部の項目「Show」のプル・ダウン・メニューの最下部には、「Postprocessor」の項目がある。この選択によってポストプロセッサのGUIの描画ウインドウが出現し、初期状態が表示される。

3.4 ポストプロセッサでの処理

(1) 表示されたポストプロセッサのGUIのカラー描画ウインドウ(第4図)について、左側のメニュー・アイコン列の最上部の「▲」をクリックすると、数値シミュレーションが開始し、その進行に応じた結果がウインドウに表示される(経過時間(Time)も下部に表示)。途中で左側のメニュー列の上から2番目の「■」をクリックすると、シミュレーションが一時停止する。

(2) 一時停止時あるいはシミュレーション終了後、上部のメニュー・バー中央下の表示項目「Display:」の選択によって、その時点のシミュレーション結果から各種の項目(圧力、比エンタルピー、温度、熱水飽和



第5図 HTI-3による深成岩体の冷却の2次元シミュレーション(Ex10)の結果の例(1)。HTI-3に添付された事例Ex10の「pluton.hti.orig」ファイルをそのまま用いた。本図では、パラメータとして深成岩体の周辺の岩石(母岩)の浸透率(k_x , k_z)のみを変化させた4つの場合について、10,000年経過後の温度(・熱水の流動ベクトル)と圧力の分布の違いを示す。各々縦軸長が約4kmに相当し、深成岩体(初期温度950℃、浸透率は 10^{-18}m^2)は左下に位置する(第3図・第4図参照；右側に広がる低温部は省略)。原図はカラー(青-赤系虹色)表示のため、8ビット・グレー化した本図では高低が分かりにくい点、流動方向は矢印ではなく、セル中心(小さな■)からの黒線で表示されている点、圧力の表示には dyne/cm^2 ($=10^{-6} \text{bar}=10^{-6} \text{atm}=0.1 \text{Pa}$)が使用されている点などに注意。本図は、HTI-3のポストプロセッサによって作成・保存した8枚の画像を、画像処理ソフトを用いて編集したものである。詳しくは本文およびHayba and Ingebritsen (1997)を参照。

度、熱水・蒸気流量、メソット数などの分布)の表示を切り替えることができる。表示される各種データのスケールと凡例色(青-赤系虹カラーのみ)は、上部のメニュー・バーの「Options」から「Color Scale」を選択して調整することができる。

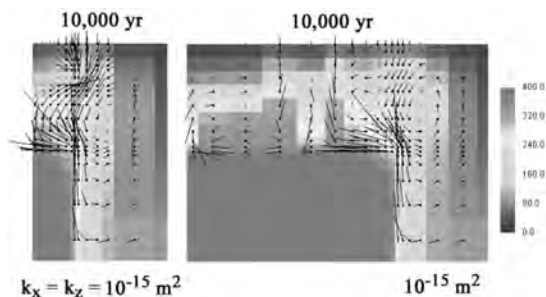
(3)また、左側のメニュー列にもいくつかの選択アイコン・ボタンがあり、岩石単元の分布境界線や熱水などの流動ベクトルを表示することができる。ベクトルの長さスケールも、上と同様に「Options」の「Vector」から調整可能である。

(4)表示画像は、プリプロセッサとポストプロセッサの両者ともに、上部のメニュー・バーの「File」中の「Print」・「Export bitmap」を用いて印刷・保存することができる。また、数値シミュレーション結果は別に多数の項目別の出力データファイル(テキスト形式；第3表・第2図)としても保存されるので、これを独自に解析・表示することも可能である。

3.5 深成岩体周辺における熱水系発達のシミュレーション結果例

例題Ex10のモデル(第3図・第4図参照)では、左端の垂直線(不透性の境界条件)を左右対称の軸として右半部のみが対象とされており、母岩(rock)の浸透率は 10^{-15}m^2 、マグマ-深成岩体(pluton, 初期温度950℃)の浸透率は 10^{-18}m^2 に設定されている(なお、Ex10では浸透率の単位に cm^2 を使用していることに注意；第3図(C)参照)。今回、Hayba and Ingebritsen (1997)の検討に沿って、母岩の浸透率を $10^{-14} \sim 10^{-18} \text{m}^2$ の範囲で大きく変えてみた(第3図(D)参照)。HTI-3を用いた各々のシミュレーション結果を、整理して第5図に示す(第5図説明に注意)。

当然であるが、第5図はHayba and Ingebritsen (1997)の検討結果に調和的である。すなわち、母岩の浸透率が高い場合には、深成岩体の上位に地下水の寄与が大きな高温熱水対流系が発達する(母岩の浸透率が $\sim 10^{-15} \text{m}^2$ の条件で継続時間が最長とな



第6図 HTI-3による深成岩体の冷却の2次元シミュレーション(Ex10)の結果の例(2)。プリプロセッサを用いて、事例Ex10の「pluton.hti.orig」ファイルから岩石分布やグリッド分布を変化させた場合の結果を示す。左は、深成岩体の上位の地下浅部に帽岩($k_x = k_z = 10^{-18} \text{ m}^2$)を設定した条件、右は、深成岩体の幅を大きく(5倍化)した条件でのシミュレーション結果(10,000年後の温度と熱水流動ベクトル)を示す。第5図の説明を参照。詳しくは本文およびHayba and Ingebritsen (1997)を参照。

る)。これに対して、母岩の浸透率が低い場合には、地下水の対流(特に、深部で熱膨張した高温流体の上昇)が難しく、10,000年経過時でも高温部が地下浅部に達していないと同時に、深部に異常高圧域が発達する。

さらに、Hayba and Ingebritsen (1997)に沿ってより複雑な地下環境として、第6図の左には地下浅部に帽岩(cap rock; 浸透率が低い3番目の地質单元)が分布する場合、同右にはマグマ-深成岩体がより大規模で幅が広い場合のシミュレーション結果を示す。これらの場合も、基本的にはEx10のオリジナルのモデルを使用した。それぞれプリプロセッサの各種の機能を用いてモデルに修正を加えた。なお、第6図の両者ともに単純な修正ではシミュレーションが最終時点に到達できず(ポストプロセッサの出力画面が途中で停滞)、その解決にはグリッドの緻密化処理が必要であった(Kipp *et al.* (2008) 参照)。

第6図も Hayba and Ingebritsen (1997)の検討結果に調和的である。熱水の対流は深成岩体と母岩の境界部や帽岩の縁辺部で活発である。また、第6図左では、帽岩の上位と下位に流動の停滞域が生成し、同右では、幅広い深成岩体の上位にベナール・セル群が生成して下降流の部分も存在することが示されて

いる。

以上のように、HTI-3によってマグマ-深成岩体の周辺に発達する熱水系についての各種の検討が、2次元断面形式に限られるが、比較的容易に可能である。

4. HTI-3による Lassen 火山下の蒸気卓越系発達の2次元シミュレーションの例(例題 Ex20)

4.1 Lassen 火山の蒸気卓越系

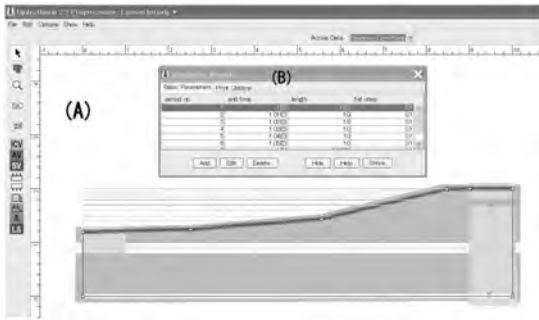
イタリアの Larderello、米国カリフォルニア州 The Geysers、日本の岩手県松川などの地熱発電地域では、地下に自然に蒸気相が卓越する(連続相として圧力を規制する)高温熱水系が分布している。Ingebritsen and Sorey (1988)は、この蒸気卓越系について3種類の型のモデル化と数値シミュレーションを行い、各々の生成機構について検討を進めた。

HTI-3の例題Ex20がモデル化している Lassen 火山は、米国太平洋岸のカスケーズ火山脈の最南部(カリフォルニア州最北部)に位置する複成火山(標高 3,187m)で、1915年頃に噴火-崩壊などを生じて国立公園に指定されている。本火山の南方の山頂部近傍には噴気地(Bumpass Hell・Sulfur Works)があり、南方山麓部には温泉(Growler・Morganなど)が分布している。Ingebritsen and Sorey (1988)は、上記の山頂部近傍の噴気地の地下には、モデルII型の蒸気卓越系が発達していると推測している。

4.2 HTI-3 と Ex20 の起動

3.2と同様に、Windows XPのメニュー・バーの「スタート」から始めて、プログラム群の中から「Hydrotherm Interactive」を選択し、HTI-3を起動する。これによって、プリプロセッサのGUIの主ウィンドウが開く。その上部のメニュー・バーから「File」の「Open」を選択し、「HTI」フォルダの中の「examples」フォルダ内から、「Ex20」フォルダ(第2表参照)を選択する。下方のテキスト・ボックスのファイルタイプを「すべてのファイル」に変えて、一覧枠に出現した「Lassen.hti.orig」ファイルをダブルクリックする。

残念ながら、後述するようにオリジナルの「Lassen.hti.orig」ファイル(2009.03.12版)は、Ingebritsen and Sorey (1988, p.13644-13649)のモデルIIか



第7図 HTI-3による米国Lassen火山における蒸気卓越系の発達過程の2次元シミュレーション(Ex20)のモデルの修正版。プリプロセッサの(A)の主ウインドウに表示された岩石単位、境界条件、流体供給源、シミュレーション観測点、グリッドの各分布とともに、(B)の小ウインドウ「Simulation Period」に表示された経時変化のシナリオ(深部からの本源的熱水の供給流量が変化する8つの期間)を示す。(A)の左側のアイコン・メニュー列は、境界条件の設定「Boundary Conditions」時のものである。事例Ex20の「Lassen.hti.orig」ファイルのモデル、シナリオとパラメータ分布を、Ingebritsen and Sorey (1988)のモデルIIに沿って大幅に変更した。モデル領域は横が10km、縦が2kmである(厚さは1kmを想定)。

らは大きく異なっており、多くの問題を含んでいる。そのため、今回Ingebritsen and Sorey (1988)のモデルIIに沿って、「Lassen.hti.orig」ファイルにかなり大幅な変更を加えた(第7図参照；同時に「Lassen.hti.TA」のようにファイル名を変更)。

以下4.3～4.4では、プリプロセッサとポストプロセッサでの変更処理を中心に、操作の概略を紹介する。操作法などについては、必要に応じてKipp *et al.* (2008)や上記の「Help」を参照願いたい。

4.3 プリプロセッサでの処理

(1) 上記の作業によって、プリプロセッサのGUI主ウインドウの中にLassen火山の2次元垂直断面分布パラメータモデルの領域枠線が現れる。主ウインドウの上部のメニュー・バーから「Options」を選択し、「Model」を選択すれば、小ウインドウが出現してシミュレーション・モデルの大枠を見ることができる。また「show」を選択し、「Simulation Period Window」を選択すれば小ウインドウが出現し、Ingebritsen and

Sorey (1988)に合わせて、8つの期間が設定されている(第7図(B))ことを確認することができる。これらについては、今回特には変更しない。

(2) 上部のメニュー・バー中央下の「Active Data:」の項目選択によって、主ウインドウの中に該当するデータの分布(岩石単位、初期条件、境界条件、流体源、シミュレーション観測点、グリッドなど)が描画される(第7図(A)参照)。まず1番目に、オリジナルの「Lassen.hti.orig」ファイルの設定では「Rock Units」の4種類の岩石単位(r1、不透水層；r2、水平透水層；r3、垂直透水層；r4、；帽岩)について、Ingebritsen and Sorey (1988)とは水平・垂直2方向の浸透率(kx, kz)の設定値が異なっているため、これを合わせる必要がある(単位に注意)。

(3) 2番目に、「Active Data:」の項目の「Boundary Conditions」についても、オリジナルの「Lassen.hti.orig」ファイルではモデル上部の左右両端部(地表への熱水・蒸気の流出域にあたる)の境界条件が熱・流体について移動ができない設定になっている。これが非常に大きな問題となっており、シミュレーションの結果を非現実的にしている(後述)。従って、上部全体の境界条件を、大気圧下で熱水・蒸気の流出が可能な設定とする必要がある。このためには、「Boundary Conditions」を選択した画面で、上部の境界線(複数に分割されている)をダブルクリックして、出現する小ウインドウの中で設定を「specific pressure and associated temperature」に改めて、圧力を大気圧とする(温度は地下の隣接セルの値となる)。同時に上部のメニュー・バーの「Edit」の最下部の「Corner policy」について、「Vertical boundary」から「Horizontal boundary」に変更する必要がある(詳しくは上述の「Help」を参照)。なお本モデルは、右端線(火山体中心部)を概略的に左右対称の軸として左半部のみを対象化したものとなっており、左右両方の垂直境界が不透性条件に設定されている。また、下部境界は不透性で、一定の地殻熱流量(80mJ/cm²)が付加されている。

(4) 3番目に、「Active Data:」の項目である「Fluid Source」についても、オリジナルの「Lassen.hti.orig」ファイルでは非常に大きな深部からの本源的熱水の供給が設定されている。この修正として、「Fluid Source」を選択した主ウインドウで、右下に現れる小さな赤い「□」印をクリックし、出現する小ウインドウ

の中で設定を改める必要がある(第7図(A)参照). 4.3(1)で述べた8つの期間に対応して, Ingebritsen and Sorey (1988)に合わせて流量を $\sim 1/7$ に減少させる(開始時に50kg/s, 1,000年経過後に50年間で10kg/sへと変化)とともに, 比エンタルピーも $\sim 10\%$ 低下させた($1125 \times 10^7 \text{erg/g} = 1125 \text{J/g}$).

(5) 4番目に, 「Active Data:」の項目である「Grid」についても, オリジナルの「Lassen.hti.orig」ファイルでは分布密度が不十分であり, 上記の修正モデルではシミュレーションが安定的に進行しなかった. このため, 「Grid」を選択した画面で, 縦・横のグリッド線を各6本・10本ずつ増やした(特に浸透率が大きく異なる岩石単元の分布境界部を対象).

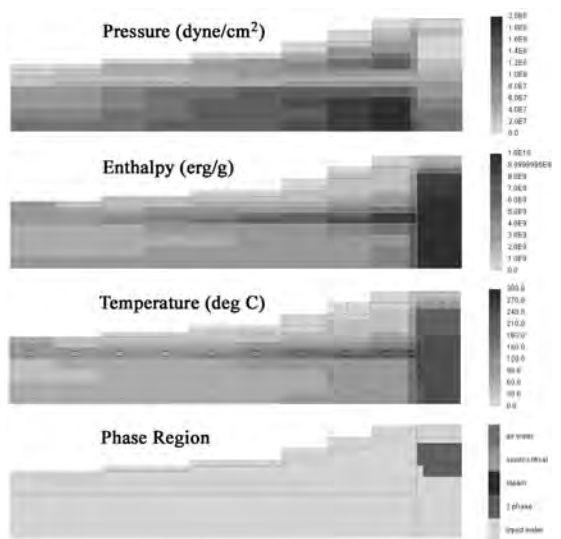
(6) 上記の4つの修正に合わせて, 「Active Data:」の項目中の「Observation Points」についても, 修正を加えた. すなわち, オリジナルの「Lassen.hti.orig」ファイルの観測点(小さな黒い「◇」印)の2点を削除し, 新たに帽岩の直下に観測点を設定した(第7図(A)参照). この観測点の観測時間間隔は, 上記の(1)の「Simulation Period Window」の小ウインドウから「Print Options」を選択し, 「Plot_timeseries (ts)」ファイルの各期間のプリント時間間隔を変更することによって設定することができる. またこの小ウインドウでは, 各種の出力データファイル(第3表参照)の作成の指示や設定変更も行うことができる.

4.4 ポストプロセッサでの処理

プリプロセッサのメニュー・バー上部の項目「Show」の最下部に, 「Postprocessor」の項目がある. この選択によって, ポストプロセッサのGUIの描画ウインドウが出現し, 初期状態が描画される.

ポストプロセッサでの処理については, 3.4と同様であり, 誌面の都合によりここでは省略する. 3.4の(1)～(4)を順に参照されたい.

なお, シミュレーションが問題を生じて停止した場合(ポストプロセッサの主ウインドウの左側メニューの「▲」など3つのアイコンが灰色に変わる)には, 2.で述べた「C:\Program Files\USGS\HTI\examples」フォルダ中の「Ex20」フォルダ内から「Calc_log」ファイル(テキスト形式)を開き, その内容を検討することによって原因を明らかにすることができる(Kipp *et al.* (2008)参照). また, プリプロセッサのGUIで作成されたモデル, パラメータ分布などについての入力デー

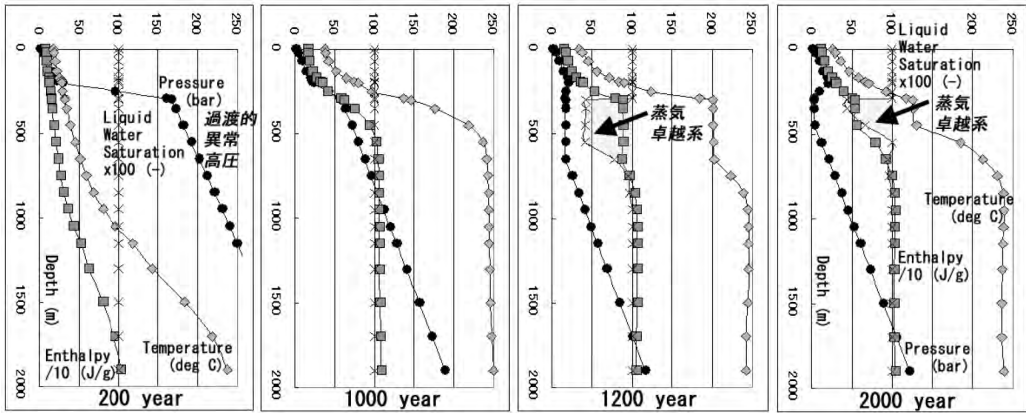


第8図 HTI-3による米国Lassen火山における蒸気卓越系の発達過程の2次元シミュレーション(Ex20を修正)の結果の例(1). 1,200年経過後の圧力・比エンタルピー・温度・流体相の断面分布を示す. 圧力の単位に $\text{dyne/cm}^2 (= 10^{-6} \text{bar} = 0.1 \text{Pa})$, 比エンタルピーの単位に $\text{erg/g} (= 10^{-7} \text{J/g})$ が使用されていることなどに注意. 本図については見やすくするために, HTI-3のポストプロセッサによって作成・保存した4枚の画像(青-赤系虹色カラー)を, 特別に自作の小プログラムRGB2Gray (MS Visual Basic v.6による)で各々白-黒の8ビットのグレースケール画像に変換し, 画像処理ソフトを用いて編集した. シミュレーションに用いたモデルは, 第7図を参照. 詳しくは本文およびIngebritsen and Sorey (1988)を参照.

タファイル「ht.in」の内容は, より分かりやすく「Out_Probdefine」ファイルに記述されているので, 問題解決の手掛かりとすることができる.

4.5 Lassen火山の蒸気卓越系発達のシミュレーション結果例

上記4.3の修正モデルに基づくLassen火山の蒸気卓越系発達シミュレーション結果例を, 1,200年経過後の圧力, 比エンタルピー, 温度, 熱水飽和度(分布流体相)の4断面図として第8図に示す(ポストプロセッサの出力画像を編集). また, 第9図にはモデルの右端列(火山中心部)における上記4項目の深度分布図を4つの時点(200～2,000年経過後)について示す.

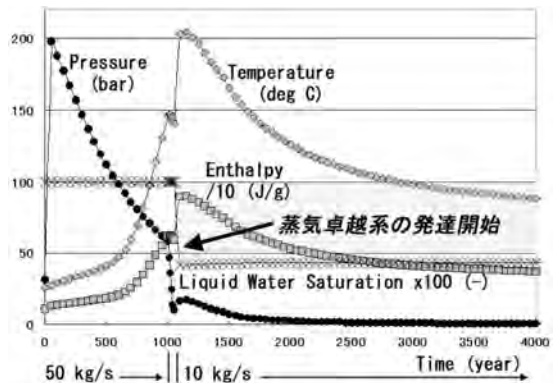


第9図 HTI-3による米国Lassen火山における蒸気卓越系の発達過程の2次元シミュレーション(Ex20を修正)の結果の例(2)。第7図のモデルの右端列(火山中心部)における圧力・比エンタルピー・温度・熱水飽和度の垂直分布を示す(縦軸が深度)。左から、200年、1,000年、1,200年、2,000年経過後の状況を示す。帽岩(浸透率 $k_z=5 \times 10^{-17} \text{m}^2$)の下位には、初期の多量の本源的高温熱水の供給によって200年経過時点では異常高圧が発生し、1,000年以降の供給量の低下によって蒸気卓越系が発達している。本図は、出力ファイル「Out_pressure」などを用いてMS Excelのグラフ作成機能により作図し、画像処理ソフトを用いて編集した。詳しくは本文・第7図・第8図およびIngebritsen and Sorey (1988)を参照。

さらに第10図には、火山中心部の帽岩直下における上記4項目の経時変化(0~4,000y)を示す。第9図・第10図は、テキスト形式の出力ファイル群を用いて、表計算ソフトMS Excelのグラフ作成機能により描画し、画像処理ソフトによって加工したものである。

大きな火山体の中心深部から本源的な高温熱水が上昇し、地下浅部で熱水と蒸気が分離する場合には、熱水は水平的に流動して山麓部に温泉を形成するのに対して、蒸気は垂直的に上昇して山頂部近傍に噴気地を形成する傾向を持つ。この時、噴気地の地下浅部に帽岩(低浸透層)が形成されるとともに、特定の環境条件が揃った場合には、蒸気卓越系が発達すると考えられ、これをIngebritsen and Sorey (1988)はモデルII型の蒸気卓越系として、Lassen火山を例に検討を進めた(上記の特定の環境条件としては、本源熱水の供給量の経時低下が想定された)。

Ex20のオリジナルの「Lassen.hti.orig」ファイルでは、原因は不明であるが、Ingebritsen and Sorey (1988)のモデルとは大きく異なる条件が設定されており、多量の本源高温熱水の供給(初期には320kg/s)と閉鎖的な境界条件のために、圧力が爆発的に高い異常値(~3,000bar)に達していた。ただし、シミュレーション計算は10,298年後まで継続し、山頂部の地下



第10図 HTI-3による米国Lassen火山における蒸気卓越系の発達過程の2次元シミュレーション(Ex20を修正)の結果の例(3)。帽岩の直下位のシミュレーション観測点(第7図右端上部の◇印)における4,000年間の圧力・比エンタルピー・温度・熱水飽和度の経時変化を示す。最下部に示す地下深部からの本源的な高温熱水の~1,000年経過後の供給量低下によって、その前後でシミュレーション観測点周辺の状態が非常に大きく変化している。本図は、出力ファイル「Plot_time-series」を用いてMS Excelのグラフ作成機能により作図し、画像処理ソフトを用いて編集した。詳しくは本文・第7図~第9図およびIngebritsen and Sorey (1988)を参照。

に蒸気卓越系が生成する(エラーにより終了)。

今回の修正モデルでは、4.3で述べたようにIngebritsen and Sorey (1988)のモデルの環境と値がほぼそのまま使用されている。第7図～第10図の結果は、Ingebritsen and Sorey (1988)の第14図などとかなり調和的であり、1,000年経過後の本源熱水の供給低下(50 → 10kg/s)によって、山頂部の地下に蒸気卓越系が発達している(熱水飽和度が～0.43で、系内の圧力・温度は漸次低下していく)。ただし問題点として、(1)シミュレーション計算が～5,000年経過時点で非常に遅くなる、(2)グリッド線の設定位置の微妙な違いによってシミュレーションの安定性がかなり大きく変化する、(3)地表の開放的な境界条件の設定に起因して5,000年経過時点では地表の高温化が進行するなどが認められた。

5. HT-3による開発に伴う地熱貯留層の経時変化の3次元シミュレーションの例(例題Ex07)

ここでは、直接HT-3を使用する空間3次元シミュレーションの例題Ex07(HTI-3では処理できない)の試用例について簡単に述べる(第2図左参照)。なお、誌面の都合によりモデルやシミュレーション結果について図表類は省略したので、必要に応じてHayba and Ingebritsen (1994)の説明を参照されたい。

5.1 3次元地熱貯留層の経時変化

地下の地熱貯留層から地熱流体(熱水・蒸気)を長期間採取(-還元)すると、貯留層の圧力、温度、熱水飽和度などの3次元分布に経時変化を生じる。例題Ex07は、単純な環境下(～4km×5km×2kmのX-Y-Z領域;1本の生産井における4期間を通じた生産増加)を想定して、6×5×7の3次元格子でシミュレーションを行ったものである。なお、HYDROTHERMでは、3次元空間データの構造は基本的にX-Z格子面(垂直断面のスライス)を水平Y方向に重ねた形となっており、入力・出力テキストファイルの中でもこの形式に沿っている。

地熱資源(熱水系型)の調査・開発では、貯留層環境の実態把握や維持・管理の最適化の目的で、数値シミュレーションを通じて各種の検討が行われる(例えば、石戸, 2002)。そのため、数種類の高機能の数

値シミュレータ(TOUGH2, STAR, SING-IIなど)が米国を始め世界各国で開発・利用されてきた。Ex07のシミュレーションは、HYDROTHERMがこの目的での利用が可能であることを確認するために1980年頃に行われたもので、他のシミュレータを用いた結果とほぼ同様の結果が得られている。

5.2 HT-3とEx07の起動

HT-3の起動は、2.で述べた「C:\Program Files\USGS\HT」フォルダ中の「bin」フォルダ内のHT-3(実行可能形式)のアイコンをダブルクリックすることによって、MS Windowsのコマンド・プロンプトのウィンドウ(MS-DOS命令をCUIで入力することを可能とする)を出現させることによって始まる。

今回は、「HT」フォルダ中の「examples」フォルダの中から、「Ex07」フォルダの例題(第2表参照)の処理を行った。そのため、便宜的に事前に「Ex07」フォルダ中の「Dat.ex7.orig」ファイルをコピーし、上記の「bin」フォルダの中にペースト・保存した。

上記のCUIウィンドウで、HT-3が表示する「Enter name of input data file」の指示に対して、「Dat.ex7.orig」とキー入力する。次にHT-3の「Enter i.d. for output files (up to 14 characters)」の指示に対して、出力ファイル名の識別子として例えば「Test.txt」とキー入力する。これにより、HT-3の数値シミュレーションが開始し、14個の出力ファイル群が短時間(使用パソコンの能力によるが数10秒程度)で作成される。

5.3 入力データの作成作業

上述した5.2の処理では、例題Ex07として予め準備されていた入力ファイルを使用した(新たな問題の場合には、テキストエディタなどを用いて入力ファイルを作成する必要がある)。入力ファイルの内容は非常に多項目に渡っており、その作成は上述した「Data_form」ファイルとマニュアル(Kipp *et al.* (2008))に従う必要がある。

項目としては、数値シミュレーションのモデル内容(浸透率などの空間分布、初期条件、境界条件など; Ex07の場合は空間3次元で非定常的な地熱流体の生産を含む)のみならず、数値シミュレーションの計算アルゴリズムのパラメータ、出力ファイルのコントロールパラメータなどもある。具体的には、上述した「Dat.ex7.orig」ファイルをテキストエディタなどで開い

て検討願いたい。

なお、HT-3の入力ファイルの様式は、HT-2の場合から若干変更されており注意(特に数・名称・内容が変更された出力ファイルへの対応)が必要である。また、HTI-3のプリプロセッサ(GUI)を用いて作成した入力ファイルを、HT-3での処理に利用することが可能であるが、逆にHT-3用に独立に作成した入力ファイルをHTI-3で用いることはできない(第2図の「doc.hti」ファイルなどが必要なため)ことに注意が必要である。

5.4 出力データの処理作業

HT-3の直接使用では、出力ファイル群は基本的にテキスト形式に限られる。従って、結果を図として可視化する必要がある(第2図)。その処理には各種のソフトの利用が可能である。なお、HT-2ではフリーソフトとして広く使用されているgnuplot (v.3.5 ; USGSからHTgnu (plot)という簡易的なポストプロセッサを提供)用のファイル群を作成することができたが、HT-3では基本的には特定のソフトには対応していない。今回は、表計算ソフトMS Excel (v.2002)に付属するVisual Basic for Applications (VBA)を用いて簡易的なプログラム群を試作し、シミュレーション結果を可視化した(同時に単位系をSIに変換(ただし圧力にはbar (~atm)を使用))。

具体的には、(1)「Out_pressure」などの出力ファイルを用いた～6年間経過後(蒸気相が発生・拡大)の地熱貯留層の圧力、温度、熱水飽和度などの各種の断面分布図(Excelの描画オブジェクトを利用)、(2)「Plot_timeseries」の出力ファイルを用いた貯留層中心部における圧力、温度、熱水飽和度などの経時変化図や「Out_source」の出力ファイルを用いた生産ヒストリー(設定シナリオに基づく)の経時変化図(Excelのグラフウィザードを利用)などである。

5.5 出力結果

今回、Ex07のオリジナルの「Dat.ex7.orig」ファイルを用いたシミュレーションの処理・表示結果は、Hayba and Ingebritsen (1994)と同様であった。また、生産ヒストリーや貯留層の浸透率分布などを変更したいくつかのモデルでのシミュレーションでも、問題なく処理が進行して妥当性の高い結果が得られた。

6. 若干の考察

HYDROTHERMの新版であるHTI-3は、上述したようにGUIによって対話形式の前・後処理を可能としており、高温熱水系のシミュレーション(空間2次元まで)を地熱工学分野などの専門家以外の人々にも試みやすいものとしている。しかし、現実の地熱系は空間3次元の動的で複雑多様なものであり、その理解に向けたHYDROTHERMの利用には様々な問題点・注意点がある。同時に、HYDROTHERMには様々な可能性や発展性がある。ここでは、これらの点について若干述べる。

6.1 問題点

熱水系・地熱貯留層のモデル化・評価などの利用におけるHT-3シミュレータの基本的な問題点・注意点(Kipp *et al.* (2008) 参照)として、特に以下の点が挙げられる。

(1) 地下の環境として重要な断裂系(岩石の通常の空隙とは空隙率・浸透率が異なる)の分布に対応していない(別の貯留層シミュレータではダブルポロシティ・モデル(MINC法)などが用いられている)。

(2) 流体の状態・特性に影響を与えるガス濃度・塩濃度の効果に対応していない。

(3) 変質作用を通じて岩石の物性に大きな影響を与える水-岩石化学反応に対応していない。

(4) 熱応力(空隙中の流体の熱膨張を含む)や広域応力によって発生し、岩石の物性に大きな影響を与える岩石の変形や断裂生成などに対応していない。

(5) 水の熱力学表に欠落部分(高圧・低比エンタルピー条件の場合など)が存在する。

(6) 差分法の使用にも関連して、温度勾配が大きい複雑な領域が対象に含まれる場合には、シミュレーションが困難になる傾向が強い(処理が長時間を要するあるいはエラーにより停止して、より密な空間格子のモデルへの変更が必要となる)。

これらの問題に対処する機能をHT-3に組み込む作業は、負荷が大きいため、現状では検討されていないようである。長所と短所・限界を理解の上、利用者がHT-3とHTI-3を使用することが必要である。なお、特定の環境下で行ったシミュレーションの結果を出力ファイル(「IC_pressporo」・「Out_restartdump」; 第3表参照)として保存することが可能であり、これを

初期条件として変化後の環境下のシミュレーションを進めることが可能である。従って、上記(3)・(4)の変化などについては、この方法によって対応することがある程度可能になっている。

本説の各所に述べたように、公開後まだ年月が経過しておらず、また利用者数も恐らく限られるため、HTI-3のGUIと例題群は各種の不十分な点や問題点を残しているようである。HTI-3の利用者には、これらの点について注意が必要である。また、HT-3についても、Fortran 90によるプログラムの書き直し(機能拡張や構成改変を含む)が行われており、利用に当たっては結果の十分な検証が望まれる。問題点、疑問点などについては、上記のHYDROTHERMのWWWサイトの様式を用いて、担当のKipp氏にメールで問い合わせを行うことが可能である(本説末尾の追記を参照)。

なお、十分な検討を行っていないが、HTI-3のLinux版では、一部のディストリビューション環境で動作不良を生じた。これらの環境では、正規のJava(Sun Microsystems社の無償提供の開発・利用環境(JDK・JRE))がデフォルトとなっておらず、ライブラリーの互換性などが問題の原因ではないかと推定される。

6.2 発展性

オープンソースであるHT-3は、Fortran 90(ANSI準拠)によって書かれており、メインプログラムのほか合計100個以上のサブプログラムやモジュールから構成される(他に、オープンソースの代数計算ライブラリーのBLAS-1を使用)。各種のFortran 90コンパイラを用いて、このソースコードの修正やサブプログラムの追加を行うことによって、様々なプログラムの改良・拡張が可能である。これにはHT-3の使用目的に応じて、出力データフォーマットの修正程度の初歩的・小規模なものから、上記6.1の問題点を解決する非常に高度・大規模なものまで様々な可能性がある。なお、HT-3はLinux版の方が開発の本流となっているようで、Windows版の改変に当たってはLinux版を参照する必要があるかもしれない。

残念ながらKipp *et al.* (2008)は、HT-3のソースコードの構成などについての説明に乏しい。プログラムの基本的な構成と処理の流れは、「hydrotherm.f90」、「init_ht.f90」、「time_step_ht.f90」、「gdata.f90」などの

ファイルに書かれている。なお、Hayba and Ingebritsen (1994)には、HT-2についてFORTRAN 77ソースコードの構成などの説明があり、参考となる。

近年パソコンの演算速度・容量が飛躍的に増大している。これに伴い、HT-3でも従来よりも大規模・長期間のシミュレーションが可能になっている(ただし、HT-3は64 bit CPUや並列処理などには未対応のようである)。スクリプト言語(特にUNIX shell script)などをうまく利用すれば、パラメータ値の組み合わせを変えた一連のシミュレーションの自動実行や、実際の観測データとの適合性が高いパラメータ値の組み合わせを求める逆解析なども、ある程度可能であろう。

HTI-3については、2.2で述べたようにソースコードを第1図のUSGSのサイトからダウンロードすることはできないが、入手は必ずしも不可能ではないようである。従って、HTI-3についても、HT-3と同様に必要に応じて各種機能の改良・拡張などが可能であろう。

なお、6.1で述べたHT-3の基本的な問題点の克服については、必ずしもHT-3の利用に固執する必要はないであろう。高温熱水系の数値シミュレーションなどの目的では、いくつかのソフトウェアが利用・開発されており、各々特徴を持っている(機能、価格、オープンソースか否か、実績などについて多様)ようである。これらの利用・開発例は、例えば石戸(2002)、松島(2008)、松本(2009)などによって紹介されている。使用目的・利用環境などに応じて、適合性の高いシミュレータを選択することが望ましいであろう。

7. おわりに

本説は、筆者が進めてきた公開電子地理・地球科学情報を利用した統合的な地熱資源の評価の研究の一環を紹介したものである。茂野・阪口(2002)、茂野(2005a, 2005b)などでは、規格化・標準化・共通化した階層メッシュ形式の多種類データの利用によって、比較的容易に様々な手法による多様な地熱資源の評価が可能であることを示した。これに、さらに汎用的な熱水系数値シミュレータによる処理を組み合わせることによって、より高精度で信頼性の高い広域的～局地的な地熱資源評価～貯留層評価が、継承・発展的に可能になることが期待される。

さて、記録をたどると、筆者がHYDROTHERMの利用について実質的に検討を始めたのは2008年の2

月頃であった。当時はv.2.2がUSGSのWWWサイトから提供されており、実行可能形式シミュレータの使用環境はUNIX系のワークステーションのみが想定されていた。このため、筆者はApple社のMacintosh OS-X v.4.0の環境で、Intel Fortran (Mac版; 有料) を用いてFORTRAN 77によるソースコードをコンパイルし、付属している事例群に基づいて利用の検討を進めた。具体的には、(1) MS Visual Basic v.6を用いて平面メッシュ形式の各種地理・地球科学情報を、半自動的に2次元断面群形式の入力データフォーマットに流し込むブリプロセッサの設計、(2) MS Excel VBAを用いて各種の出力データファイルから各種の地図、経時変化図などを半自動的に作成するポストプロセッサの試作、(3) 出力ファイルの半自動化処理を容易にするためのHT-2のソースコードの出力サブルーチンの書き換えなどである。これらの短期間の検討の成果の一部については茂野(2008a, 2008b, 2009)を通じて公表したが、事情により検討は約1年間中断した。

その後、2009年の2月頃に再度検討を始めたところ、HYDROTHERMはバージョンアップされたHT-3がHTI-3とともに提供されており、Linux系とMS Windows系の両基本ソフトでの利用が可能となっていた。なお、前述したようにHT-3とHTI-3はオープンソースであり、プログラムの修正、拡張などが必要に応じて無料でも可能となっている。しかし、この検討も短期間で中断して、再々度の検討を2009年11月に開始した。

しかし残念ながら、時間的制約や個人的な事情により、当初目標としたHYDROTHERMなどを利用した地熱資源の統合的な評価(広域的な熱水系型の評価、同時にマグマ型、高温岩体型、深層熱水型の評価、より局地的な調査・開発段階の貯留層の評価など)の試みは、中断(~終了)の予定である。そのため、本説では中間的な整理としてHYDROTHERM INTERACTIVE (v.3.1)を用いた例題の処理を中心に取りまとめを行った。

本説の紹介が、日本におけるHYDROTHERMの幅広い利用(より大きくはオープンソースの各種ソフトの利用・開発)に向けて、また電子地理・地球科学情報の今後の発展的利用に向けて、一つの参考となれば幸いである。ただし、現実の地下3次元のマグマ熱水系環境は動的で非常に複雑であり、ごく一部の地域を除いて地下深部の観測・編集・公開データがま

だ非常に乏しいこともあって、そのよりよい理解・評価に向けた数値シミュレーションには様々な困難が伴うと予想されることを付記する。

謝辞: 様々な有益な地球科学情報、情報処理手法などを提供されてきたUSGSの関係の方々には感謝します。特に、HT-3の作成者のKipp氏には、様々な問題点・疑問点についてのメールでの質問に、迅速で丁寧な回答を繰り返し頂いたことを、記して感謝します。

文 献

- 蘭幸太郎・江原幸雄・藤光康宏(2007): 九重火山の深部熱構造の数値的検討。九大地熱・火山研究報告, no.16, 14-25.
- 地質調査総合センター(2007): 九州-大分-豊肥地域の地熱データ処理集: 「地理情報システム(GIS)を利用した地熱資源の評価の研究(2001-2005年度)」のまとめと簡易統合的処理データ・プログラム集(CD-ROM)。数値地質図, GT-3.
- Fujimitsu, Y., Ehara, S., Oki, R. and Kanou, R. (2008): Numerical model of the hydrothermal system beneath Unzen volcano, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **175**, 35-44.
- Hayba, D. O. and Ingebritsen, S. E. (1994): The Computer Model HYDROTHERM, A Three-Dimensional Finite-Difference Model to Simulate Ground-Water Flow and Heat Transport in the Temperature Range of 0 to 1,200°C. *USGS Water-Resources Investigation Report* 94-4045, 85p.
- Hayba, D. O. and Ingebritsen, S. E. (1997): Multiphase groundwater flow near cooling plutons. *Jour. Geophys. Res.*, **102**, 12235-12252.
- Ingebritsen, S. E. and Sorey, M. L. (1988): Vapor-dominated zones within hydrothermal systems: evolution and natural states. *Jour. Geophys. Res.*, **93**, 13625-13655.
- Ingebritsen, S. E. and Sanford, W. E. (1998): *Groundwater in Geologic Processes*. Cambridge University Press, 341p.
- Ingebritsen, S. E., Sanford, W. E. and Neuzil, C. E. (2006): *Groundwater in Geologic Processes, 2nd ed.* Cambridge University Press, 536p.
- 石戸経士(2002): 地熱貯留層工学。日本地熱調査会, 176p.
- Kipp, K. L., Jr., Hsieh, P. A. and Charlton, S. R. (2008): Guide to the Revised Ground-Water Flow and Heat Transport Simulator: HYDROTHERM - Version 3. *USGS Techniques and Methods* 6-A25.
- 松本光央(2009): 簡易な陽的解法と並列計算による蒸気熱水対流系の数値シミュレーション。日本地熱学会誌, **31**, 213-229.
- 松島喜雄(2008): 数値シミュレーションによる薩摩硫黄島硫黄岳の火山熱水系の考察。日本地熱学会誌, **30**, 97-106.
- 岡 大輔・江原幸雄・藤光康宏(2008): 高透水性破碎帯の形成による非火山性熱水系の発達。九大地熱・火山研究報告, no.17, 27-49.
- 茂野 博・阪口圭一(2002): 地理情報システム(GIS)を利用した地熱資源の評価(アセスメント)新計画。地質ニュース, no.574, 24-45.
- 茂野 博(2005a): 標準250mメッシュレイヤー系を用いた地熱資源

- 評価の事例研究(その1): 20万分の1地勢図「大分」地域の二次元的有望地域抽出, 地質ニュース, no.609, 19-30.
- 茂野 博(2005b): 標準250mメッシュレイヤー系を用いた地熱資源評価の事例研究(その2): 20万分の1地勢図「大分」地域の簡易3次元的資源評価, 地質ニュース, no.610, 22-32.
- 茂野 博(2008a): Excel VBA (Visual Basic for Applications)を用いた様々な地熱データの「オープンソース」処理の試み, 日本地熱学会平成20年学術講演会講演要旨集, P10.
- 茂野 博(2008b): Excel VBA (オープンソース)による地球科学データの処理 - (1) 水化学データの図化を例にして -, 地質ニュース, no.652, 21-30.
- 茂野 博(2009): Excel VBA (オープンソース)による地球科学データの処理 - (2) 標高・地質メッシュデータの組み合わせ図化を例にして -, 地質ニュース, no.656, 29-38.

追記: USGSではHYDROTHERMの開発と利用支援を継続しており, 2009年12月~2010年1月間のメールによる著者の質問や問題点指摘に対して, 担当者のKipp氏から迅速な回答とともに, 今後の改善希望点などについての問い合わせなども頂いた。従って, 本説で紹介したHT-3とHTI-3の内容(特に指摘した問題点など)は, それほど遠くない将来に変更(改訂)される可能性があることに留意願いたい。

SHIGENO Hiroshi (2010): An introductory Japanese guide to the USGS simulator, HYDROTHERM INTERACTIVE (v.3.1), for high-temperature hydrothermal systems.

<受付: 2010年2月2日>