

# 深海カルデラ内の熱水活動によって誘起される 流れの数値解析

日本大学・理工学部 小紫 誠子 (Satoko Komurasaki)  
College of Science and Technology, Nihon University  
東邦大学 大西 梢平 (Shuheh Ohonishi)

Toho University

東北大学 茂田 正哉 (Masaya Shigeta), 福西 祐 (Yu Fukunishi)  
Tohoku University

**ABSTRACT** In order to investigate the material advection and diffusion driven by submarine hydrothermal plumes, the hydrothermal convection in a submarine caldera was studied by a numerical simulation.

As a result of the computation, hydrothermal flow fields in the submarine caldera were captured. It was shown that, when the temperature of the water inside the caldera was stratified, the hydrothermal plumes developed mixing the water near the seabed and spread horizontally at a height lower than the somma. On the other hand, without temperature stratification inside the caldera the horizontal spreading took place at the height of the somma. The behavior of the water at the bottom of the caldera was found to be different depending on the locations of the hydrothermal vents. That is, the water lower than the hydrothermal vent was hard to mix.

Although the computational results showed a tendency to equalize the density inside the caldera in this study, a further study is needed to clarify its mechanism.

## 1 緒言

深海は、その過酷な環境から長らく未知の世界であったが、近年の観測機器の高性能化に伴って探索が進み、その姿を現しつつある。外的環境の影響を受けにくい深海は古代の姿をそのまま残していると考えられ、学術的にも大変貴重である。しかしながら、超高水圧の環境は簡単には近づけない世界であることには変わりはなく、未だ知られていないことは多い。

深海環境を形成するひとつの要因として、海底での熱水活動が知られている。低温熱水も含め、世界中の海底の各所で熱水の噴出が確認されており、300℃を超える熱水噴出孔も多く見つかっている。高温熱水の場合には、高圧のため気化しない液体の水と共に溶岩なども噴出し、周囲の1~2℃の海水によって急激に冷やされて噴出孔の周りに壁をつくり煙突(チムニー)を形成していく。直径はせいぜい十数センチ程度という熱水噴出孔の

チムニーの周辺には、熱水とともに噴出される硫化水素を餌にする生物が群れを成しており、暗黒の深海には不似合いな印象の、豊かな生物社会を形成していることが知られている。熱水噴出によって発生する熱対流は、海水中と一緒に放出された硫化水素をはじめとする種々の海底下の物質を移流拡散させ、それらを餌とするバクテリアの分布などの生物環境や、地質学的環境に影響を与える。気象や海流などの影響を受ける表層と違って流れがほとんど無い深海では、このように熱水噴出によって誘起される流れの影響は大きい。

本研究では、実地観測が主な解析手段となっている深海探索に対して、流体力学的立場から数値シミュレーションを用いて深海環境を解析することを目的として、熱水噴出により引き起こされる熱対流の数値シミュレーションを行う。とくに、南部マリアナトラフに位置する深海カルデラのひとつで、熱水噴出が確認されている TOTO カルデラ (Fig. 1) をモデルとして、カルデラ地形を考慮した熱水の移流拡散を数値計算によって捉えることを試みる。

TOTO カルデラは、外輪山最浅部が水深 2400m、カルデラ内最深部が 3150m で、Fig. 2 のように、カルデラ内部は長径が 2000m、短径が 1000m の楕円形となっている。また、通常深海では海水温度は深度が増すにつれてわずかながら低下していくが、TOTO カルデラ内部では温度は深度によらず一定となっていることが分かっており、カルデラ内の熱水噴出と関係があるものと考えられている。Fig. 3 は、TOTO カルデラ付近の鉛直方向における温度、塩分濃度、濁度を表している。

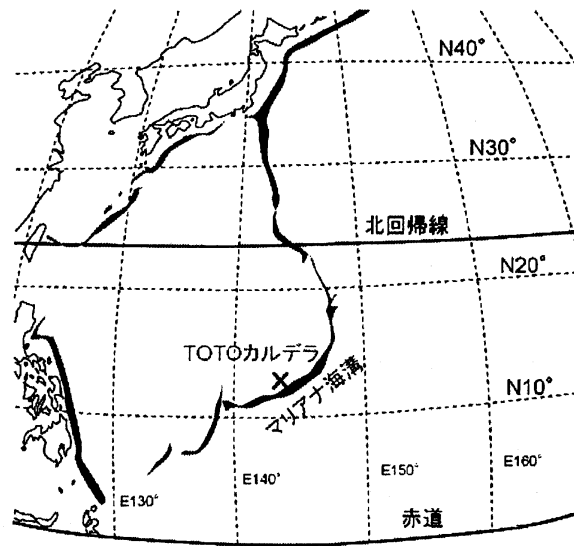


Fig. 1 TOTO Caldera in Southern Mariana Trough.



Fig. 2 Topography of TOTO Caldera.

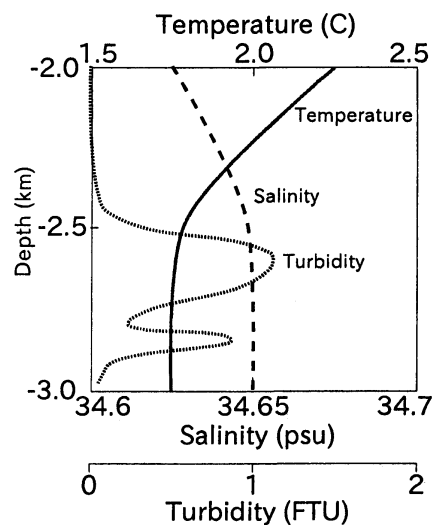


Fig. 3 Vertical profiles of temperature, salinity and turbidity in TOTO Caldera.

## 2 数値解析法

### 支配方程式

本計算では、支配方程式として非圧縮性 Navier-Stokes 方程式とエネルギー保存式を用いる。実際には、直径十数センチの噴出孔から高温の熱水が噴出されるが、ここでは熱対流を比較的大規模なスケールで捉えることを目的としていることと、高温の熱水は周囲の海水で直ちに冷やされることを考慮し、流体の温度変化は大きくないものと仮定して Boussinesq 近似を用いる。なお、深海では塩分濃度もわずかに変化するが、温度差による密度変化の方が支配的であるため、本計算では塩分濃度は扱わない。

支配方程式は projection 法により圧力のポアソン方程式を導出して解く。

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla p + \frac{1}{\text{Re}} \Delta \mathbf{v} + \mathbf{F}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) T = \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \Delta T$$

$$T : \text{temperature}, \quad \mathbf{F} = \left( 0, 0, \frac{\text{Gr}}{\text{Re}} \Delta T \right) : \text{external force}$$

Re : Reynolds Number, Pr : Prandtl Number, Gr : Grashof Number

### 支配方程式の離散化

支配方程式の離散化には差分法を用いる。とくに、計算を安定かつ高速に進めるために多方向差分を適用する。移流項に対しては3次精度上流差分 (KK スキーム) を用いることで、高レイノルズ数非圧縮流れの高精度かつ安定な計算を実現する。その他の空間微分に関しては2次精度中心差分を用いる。また、Navier-Stokes 方程式の時間積分には Crank-Nicolson 陰解法を用いる。圧力のポアソン方程式は、前の時間ステップからの差についての方程式に直し、多重格子法を採用して解くことで高速高精度計算を行う。

### 計算領域

計算領域は、Fig. 4 のように TOTO カルデラを含む海底地形を数値データを用いて再現した海底を底面とし、最深部を基点として高さ 3000m 程度、水平方向は 50000m×50000m 程度の広さをとる。計算格子には、海底付近およびカルデラ内により多く格子点を配置し底面地形に沿うような不等間隔格子を採用する (Fig. 4)。格子点数は 129 × 129 × 65 点とした。

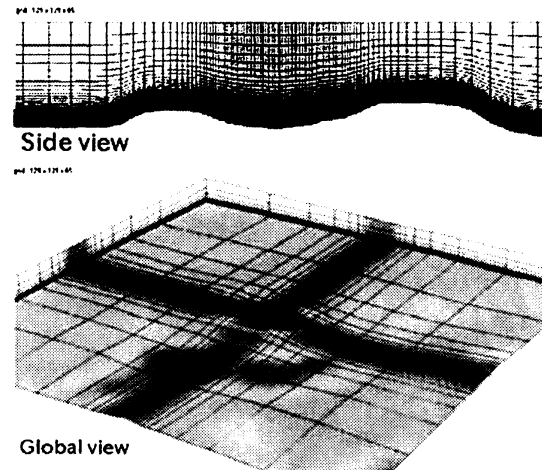


Fig. 4 Computational domain and grid.

## 初期条件・境界条件

計算は Table 1 のように 4 通りの条件の下で行う。熱源温度  $\delta T_h$  は周囲との温度差として  $1.0^\circ\text{C}$  とし、熱源面積  $S_h$ 、噴出孔における吹き出し速度  $w_h = 1.25 \times 10^{-3} \text{m/s}$  とする。また、熱水噴出によって供給される熱量  $Q_h$  を





$$Q_h = \text{比熱} \times (S_h \times w_h \times \text{密度}) \times \delta T_h$$

として計算する。

現実にはカルデラ内の数ヶ所で熱水噴出や湧水に伴う現象が確認されているが、具体的な噴出孔の位置は未確定であるため、一般的な熱水活動域での熱放出量が  $100 \sim 1000 \text{MW}$  程度であることを参考にして熱源面積  $S_h$  を適当に与え、カルデラ内底部縁に沿って熱源を配置した場合 (Case IA, IB, II) と、カルデラ内最深部に熱源を配置した場合 (Case III) について計算を行った。また、初期の海水温度はカルデラ内も含めて深さが増すにつれて  $0.001^\circ\text{C/m}$  下がるような成層状態としているが、Case IB においてはカルデラ内のみ初期温度を一定としている。

速度に関しては、熱源以外では初期速度 0、境界は底面では滑りなし、他は外挿し流入流出量がつり合うように各時間で修正する。

Table 1 計算条件

| Case | IA  | IB  | II   | III   |
|------|---|---|--|---|
| 熱量   | 1700 MW   | 1700 MW   | 640 MW   | 1700 MW   |
| 初期温度 | 成層  | 一定  | 成層   | 成層  |
| 熱源   | 底部縁   | 底部縁   | 底部縁  | 最深部   |
|      |  |  |  |  |

## 3 計算結果

流れ場を分かりやすく表現するため、仮想の移流拡散物質  $\alpha$  と  $\beta$  をマーカーとして流れ場と共に解いた。これらは流れに影響を与えないよう常に比重が 1 となるようにして、計算された流れに従って移流する。また拡散係数は熱のそれに比べて十分小さくとった。 $\alpha$  は熱水噴出孔から噴出させるよう、熱源において  $\alpha = 1$  それ以外では  $\alpha = 0$  を与えた。 $\beta$  に関しては計算領域全体にわたって鉛直上向きに一定の割合で増加するような成層状態を初期に与えた。

Fig. 5 は、それぞれ Case IA ~ III における移流拡散物質  $\alpha$  の等値面の初期とある程度時間が経った後の 2 つの結果を示し、噴出孔から噴出した熱水の移流拡散の様子が表れている。カルデラ内の海水の初期温度分布に関わらず、熱源から噴出した移流拡散物質  $\alpha$  がカルデラに蓋をするように分布している。これは濁度の鉛直分布がカルデラ外輪山の高さ付近で高い値を示すという実際の観測結果に沿うものである。

また移流拡散物質  $\beta$  の鉛直断面での分布を Fig. 6 に示す。これらの図より、カルデラ内に発生している流れの様子が分かる。熱源がカルデラ最深部に配置された Case III では流体は最深部から混合し温度の均一化が見られるが、カルデラ底部縁に熱源が配置された Case IA ~ II では、熱源よりも深いカルデラ底付近の流体は混合せず滞留する傾向にある。

Fig. 7 はカルデラ底部から出発する流線と鉛直面上の移流拡散物質  $\alpha$  の分布を表示した図である。Case IA ~ III いずれにおいても対流が途中で水平方向に向きを変えて広がっていく。初期のカルデラ内の海水温度分布が異なる Case IA と IB を比べると、海水温度が成層状態の Case IA の方はカルデラ外輪山の高さよりも低い位置で水平方向に広がるのに対し、海水温度が高さによらず一定である Case IB の場合にはほぼカルデラ外輪山の高さで水平方向に広がる傾向が見られる。Case IB では、対流がカルデラ内の流体をあまり混合させることなく、カルデラ外輪山の高さまで一気に上昇する。

Fig. 8 ~ Fig. 10 は、それぞれカルデラ内の温度、移流拡散物質  $\beta$  および  $\alpha$  の鉛直方向分布を、Case IA, IB, III について示したものである。これらのグラフと Fig. 6, 7 から、カルデラ内の初期の海水温度が成層状態である場合には、熱水プルームが熱源周辺の海底に近い流体を巻き込みながら発達することがわかる。流れがより発達することで流体の混合が進み、結果としてカルデラ内の温度や密度が一様化することも考えられるが、そのためにはさらに計算を進めて確認する必要がある。

## 4 まとめ

深海カルデラにおける熱水噴出を想定した熱対流の3次元計算を行い、カルデラ内の熱源の配置や大きさ、初期の海水温度場を変えて、流れ場を再現し、熱水噴出に伴うカルデラ内部の流れの構造を捉えた。

カルデラ内の海水の初期温度分布に関わらず、熱水噴出孔から噴出した移流拡散物質がカルデラに蓋をするように分布する様子が示された。またカルデラ内の海水温度が成層をなしている場合の方が、温度が一定のときよりも低い高さで、対流が横に広がる傾向が確認された。

熱源の配置により、カルデラ底付近の流体の混合に違いが生じる現象が見られた。すなわち、カルデラ最深部付近に熱源が配置された場合には最深部から流体が混合して温度等の一様化が見られるのに対し、それ以外の場合では熱源より深いカルデラ底の流体は混合しない傾向にあった。

カルデラ内の初期の海水温度が成層状態である場合には、熱水プルームが熱源周辺の海底に近い流体を巻き込みながら発達する様子が捉えられた。これはやがてカルデラ内の温度や密度等の一様化をもたらす可能性もあるが、さらに計算を進めて確認する必要がある。

## 5 謝辞

本研究を遂行するにあたり、東京大学理学系研究科の砂村倫成助教および海洋研究開発機構の山本啓之博士に多くの助言及び資料の提供を頂いた。ここに謝意を表す。

## 参考文献

- [1] 満澤 他, "中部及び南部マリアナ熱水活動域「よこすか」深海曳航調査速報," JAMSTEC 深海研究, 17 (2000), pp. 73-87.
- [2] 益田 他, "南部マリアナトラフの地形と海底熱水活動," JAMSTEC 深海研究, 18 (2001), pp. 83-88.
- [3] Kuwahara, K., "Unsteady Flow Simulation and Its Visualization," AIAA Paper 99-3405 (1999).

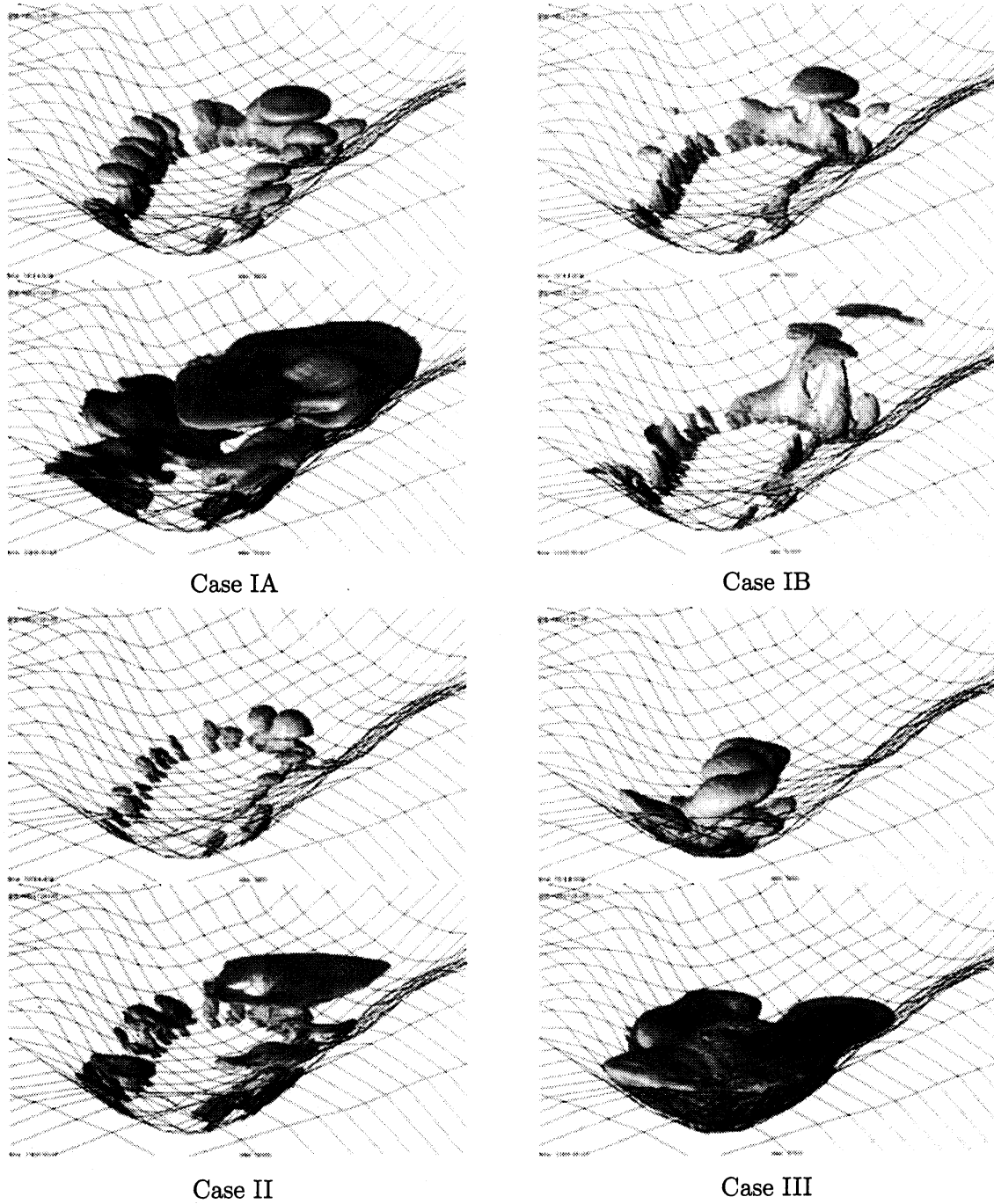


Fig. 5 A contour surface of advection-diffusion substances  $\alpha$ .

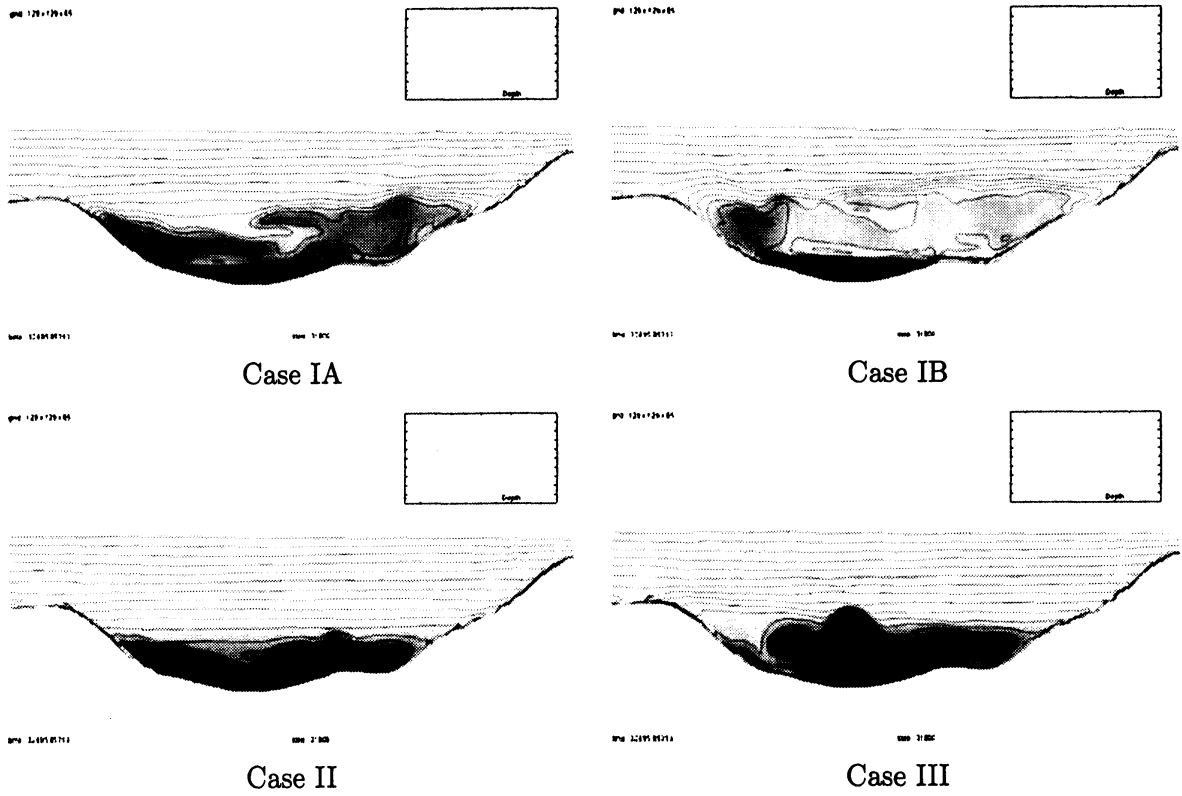


Fig. 6 Distributions of advection-diffusion substances  $\beta$  in a vertical plane visualized by shading and contour lines.

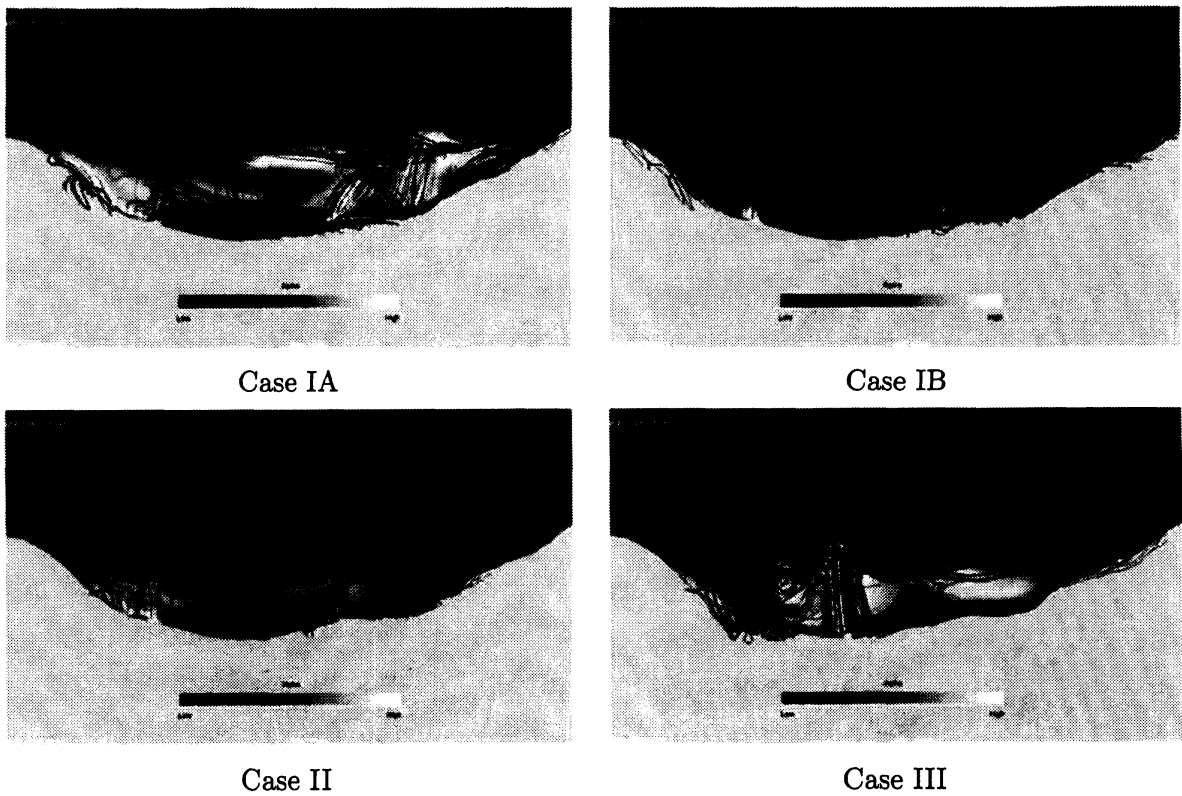


Fig. 7 Stream lines start from the bottom of the caldera with shading of  $\alpha$  in a vertical plane.

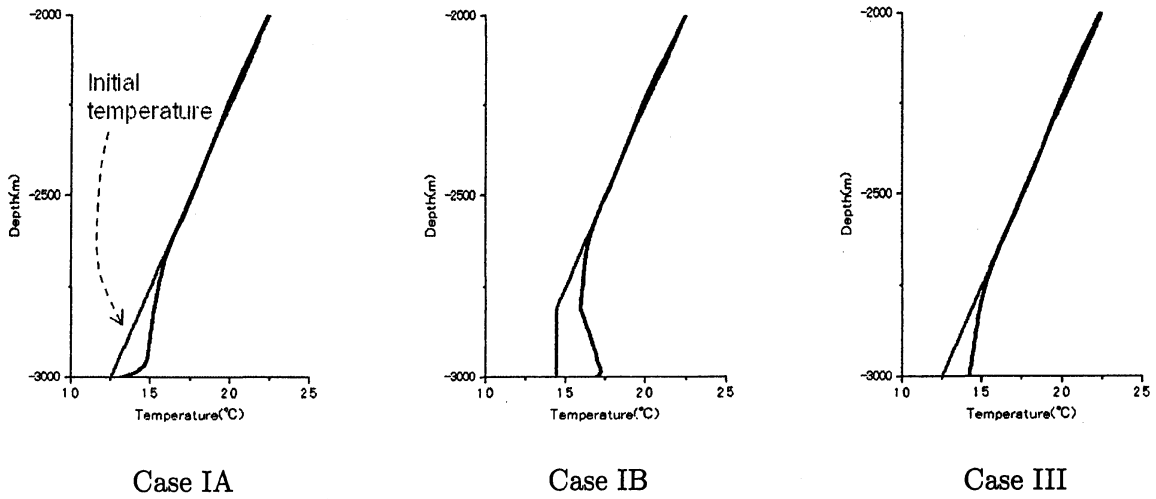


Fig. 8 Vertical profiles of temperature inside the caldera.

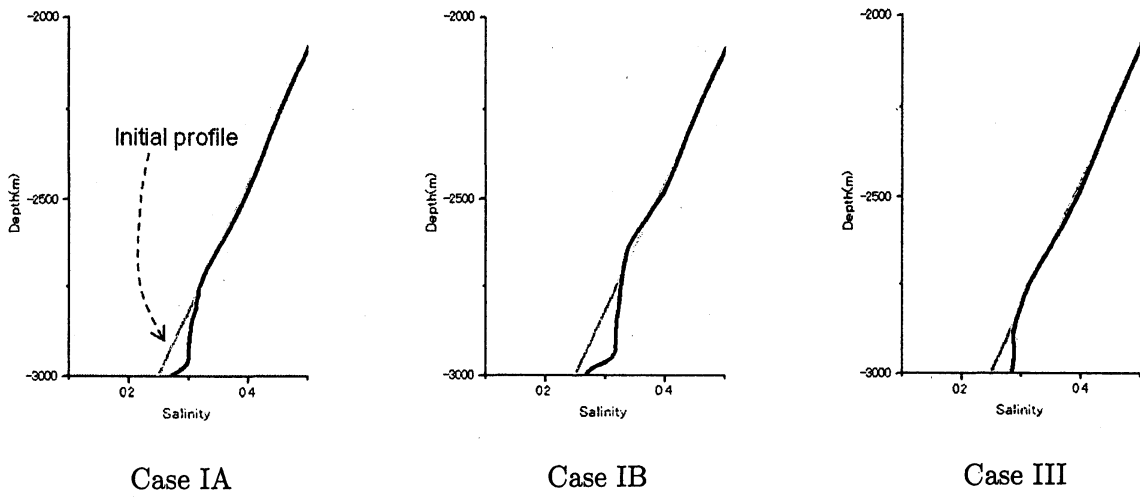


Fig. 9 Vertical profiles of advection-diffusion substances  $\beta$  inside the caldera.

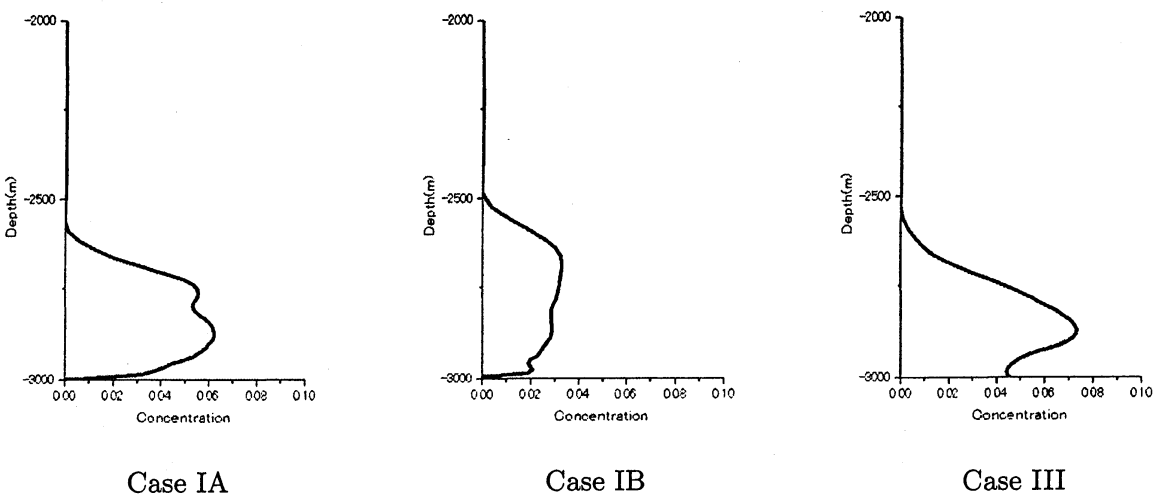


Fig. 10 Vertical profiles of advection-diffusion substances  $\alpha$  inside the caldera.