

マントルプルームの連行現象と地球内部の混合について

東京工業大学・地球惑星科学専攻 熊谷 一郎 (Ichiro Kumagai)

Department of Earth and Planetary Sciences,

Tokyo Institute of Technology

海洋科学技術センター・IFREE 柳澤 孝寿 (Takatoshi Yanagisawa)

Institute for Frontier Research on Earth Evolution (IFREE),

Japan Marine Science and Technology Center (JAMSTEC)

東京大学・地震研究所 栗田 敬 (Kei Kurita)

Earthquake Research Institute,

The University of Tokyo

1. はじめに

インド・デカン高原やオントンジャワ海台などに代表される巨大火成活動は、地質学的に比較的短期間 ($\sim 100\text{Ma}$) に膨大な玄武岩マグマ ($> 10^6 \text{ km}^3$) を噴出する。このことから, Morgan (1971) や Richard ら (1989) は, マントルプルームと呼ばれるマン

トル深部からの上昇流が存在すると考え, 非常に高い玄武岩マグマの噴出率は, 巨大なマントルプルームの頭部が地表に到達することによって起こる, というモデルを提案した (図 1)。

近年, 地震学的, 地球化学的研究の進歩によって, 個々のマントルプルームについての探索が可能となり, マントル内部の詳細な不均質構造が明らかにされつつある。例えば, Hart

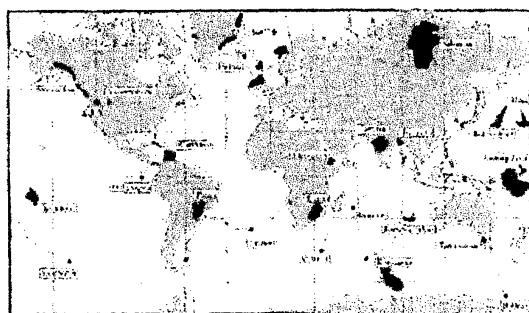


Figure 1: Map of the world showing the locations of major flood basalt provinces and hot spot provinces. The map highlights the Deccan, N. Atlantic, Parana, Karoo, Reunion, Iceland, Tristan, and Pr. Edward regions.

Flood Basalt	Eruption Rate ($10^6 \text{ km}^3/\text{Myr}$)	Hot Spot	Eruption Rate ($10^6 \text{ km}^3/\text{Myr}$)
Deccan	1.5	Reunion	0.04
N. Atlantic	1.0	Iceland	0.02
Parana	0.7	Tristan	0.03
Karoo	1.0	Pr. Edward	0.02

From Schubert et al. (2001) Mantle Convection in the Earth and Planets

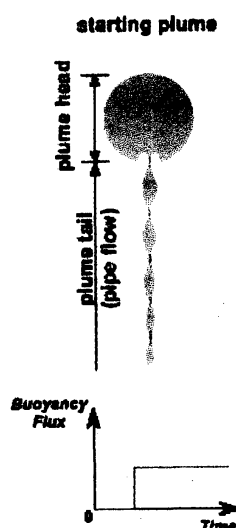


図 1 Starting mantle plume による大規模火成活動

ら(1992)に代表されるマントルプルーム起源と思われる噴出物の同位体組成や微量元素組成についての地球化学的な研究から、プルームの運動による entrainment および混合現象を示唆するような同位体組成の時空間的な不均質パターンが報告され、プルームの外形のみならず、より細かな内部構造についての議論が可能となってきた。こうしたプルーム頭部内の温度や組成などの不均質構造は、流体力学的な研究などにより、マントルプルームの entrainment (連行) 現象によって生ずると考えられ、そこにはプルーム自身の情報のみならず、マントル深部におけるプルーム発生場から地表付近に達するまでの約 3000 km にわたるマントル内部の情報が含まれると考えられる。こうしたプルーム頭部の特徴的な内部構造がどのように形成され、また entrainment 率がどのように決定されるのかについて明らかにすることは、マントルプルーム頭部に蓄えられたプルームの成因から噴出にいたるまでの様々な情報を解読する上で重要である。

そこで本講究録では、マントルプルームなどの層流領域における entrainment 現象に関する簡単なレビューを行い、最近我々が行っているマントル出発プルーム (Mantle starting plume) の entrainment 現象に関する室内実験の一端を紹介する。

2. 層流と乱流の出発プルーム

火山の噴煙柱のような乱流領域における出発プルーム (図2) の entrainment および混合現象に関する研究は、現象が日常いたるところで観察され、また検証もしやすいこともあって、地球科学に限らず工学や物理などの分野で数多くの研究がなされている (例えば Turner, 1962, 1969 など)。一方、マントルプルームなどの層流領域における連行・混合現象に関する研究は、一般に現象のタイムスケールが長いことや日常的な応用例が少ないために極端に少なく、また検証が困難なこともあって不明な部分が多い。

マントルプルームのレイノルズ数 ($Re \equiv UD/\nu$) は、典型的な上昇速度 (U)・サイズ (D)・粘性 (ν) をそれぞれ 10^{-8} m/s・ 10^6 m・ 10^{18} m²/s とすると、 10^{-20} 程度と非常に小さく層流領域のプルームである。図3は、層流領域と乱流領域のプルームについて模式的に表したもの (Shlien, 1979) であるが、その構造は非常に異なっている。この構造の違いが生ずる最も大きな原因として、

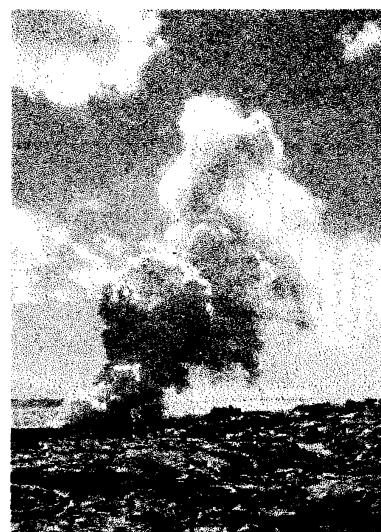


図2 乱流の Starting plume
マグマが海水と接することによって発生した水蒸気の煙
(Hawaii 島)

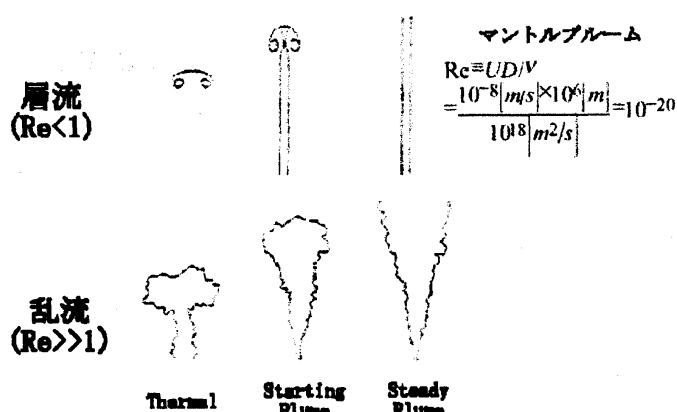


図3 層流と乱流のプルーム
 (Shlien, 1979 の Fig.1 を改変)

層流領域では, entrainment 後のプルーム内部での物質の均質化が極めて遅いことが挙げられる. 例えば固体地球では, 物質の拡散係数は $10^{-17} \text{m}^2/\text{s}$ 程度であるので, その diffusion length は 10 億年で高々 1 メートル程度となり, 物質拡散が効く程度にまでかき混ぜることは非常に難しい. このことは言い換えれば, マントルプルーム内部の局所的不均質構造は比較的保持されたまま地表面に達することが期待され, 地震波

速度の不均質構造や地球化学的不均質としてそれらの情報を捕らえることができることを示している.

3. 層流領域における連行現象

層流領域における出発プルームの上昇速度 $U(t)$ は, 以下に示すように, 基本的には Stokes の球の上昇速度によって記述される (Batchelor, 1967; Whitehead and Luther, 1975).

$$U(t) = C \frac{\Delta\rho(t)gR(t)^2}{\eta_a} \varepsilon(t) \quad (1)$$

$\Delta\rho(t)$, $R(t)$, g , η_a はそれぞれ, プルーム内外の密度差, プルーム頭部(plume head)の半径, 重力加速度, そして周囲の流体の粘性である. C は境界条件によって変わる係数で, $\varepsilon(t)$ は内外の粘性関係によって変化する. ところでこの式には, entrainment 現象の理解の難しさと面白さをともに見ることができる. それは, entrainment が起こると $\Delta\rho(t)$ や $R(t)$ そして $\varepsilon(t)$ といった値が定数にはならず, entrainment とともに変化するので, 速度が一意に決まらないことである. 例えば, 上昇する出発プルームを考えた場合, entrainment とともに周囲の重い物質をその内部に取り込むことによってプルーム内外の密度差が減少し, 上昇速度が減少する方向に働く. しかしその一

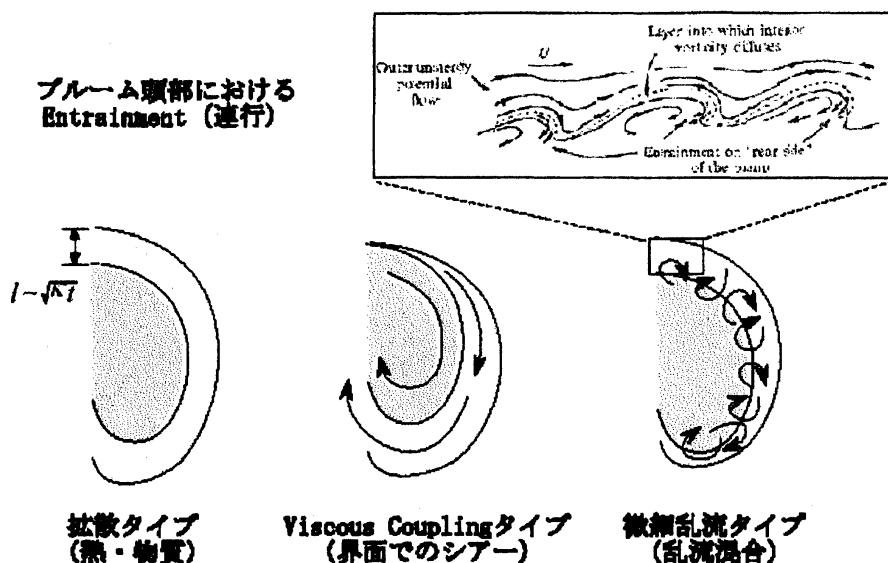


図4 プルーム頭部における連行現象のモデル
(玉井(1987), Maxworthy (1972)などを改変)

方で、そのサイズが大きくなる効果によって、加速される可能性もある。その他プルーム内部の平均的な粘性率も変化するが、いずれにせよそれらの総合的な結果として、プルームがどのような運動をするのかが決まるので、まずは entrainment 現象の諸因子から理解する必要がある。

る。出発プルームの頭部における entrainment におよぼす諸因子は図4に示すように大きく分けて、拡散・Viscous coupling・微細乱流タイプなどが考えられる（玉井, 1987; Maxworthy, 1972 など）が、層流プルームでは、プルーム界面における乱流混合は考えなくても良いので、ここでは拡散と Viscous coupling による連行について述べる。

3.1 熱（物質）拡散による連行現象

固体地球内部のプルーム運動に関する問題では、物質拡散は無視できるほど小さいが、熱拡散による entrainment は重要になる場合がある。層流領域における熱拡散による entrainment に関する研究は幾つかあるが、Griffiths らによる一連の研究が代表的である（例えば Griffiths and Campbell, 1990 など）。彼らは、熱プルームの周囲が温められることによって、密度・粘性ともに小さな薄い層が形成され、それらがプルーム頭部の根元付近から内部に取り込まれる (entrainment), というモデルを提案した（詳細は彼らの論文を参照されたい）。彼らのモデルによれば、Entrainment 率は、プルームの大きさとストークスの球の上昇速度、そして熱拡散による境界層の厚さによって決まる。彼らのモデルは実験結果をよく説明し、また解析と実験から entrainment 率の係数を決定した。そしてマントルプルームへの応用を行った。後に van Keken が数値計算との比較を行い、良い一致を示した (van Keken, 1997)。

3.2 Viscous coupling による連行現象

ブルームは浮力の与え方により、「熱ブルーム」と「組成ブルーム」という 2 つのタイプに分類される。熱ブルームの取り込み現象については、上述のように、Griffiths らの一連の研究によってそのメカニズムが明らかにされているが、組成ブルームに関しては、今までに Neavel & Johnson (1991) の定性的な研究が行なわれているのみで、取り込みのメカニズムや上昇特性などについて十分な成果が得られていない。一方、地球化学的な研究からマントルブルームには組成的不均質が報告されており、また固体地球内部では Prandtl 数が非常に大きいことから、熱拡散が entrainment 現象にあまり効かない可能性もあり、組成ブルームの Viscous coupling による entrainment 現象について明らかにする必要がある。

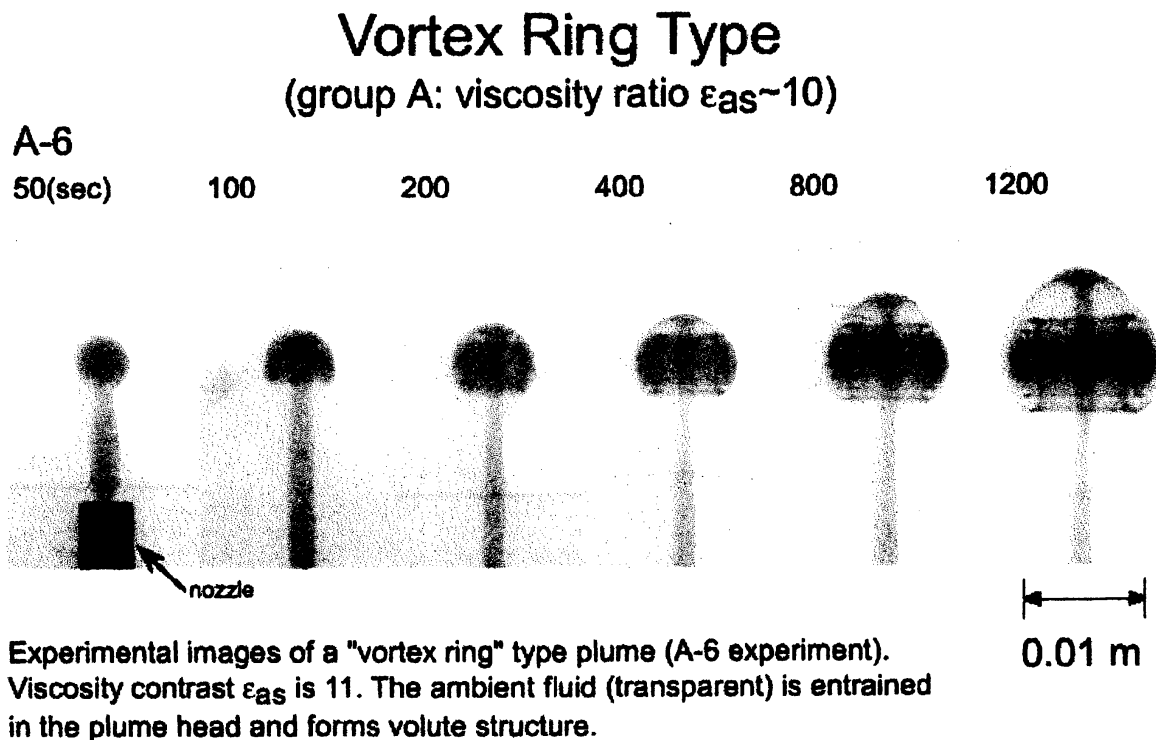


図5 粘性比が小さい場合の出発ブルーム

そこで最近筆者らは、組成ブルームに関する簡単な室内実験を行った。粘性流体を透明な水槽に満たし、水槽最下部のノズルから、より密度・粘性の小さい流体を一定流量で注入し、出発ブルームの entrainment による構造進化と上昇速度変化などの特徴を調べた（詳細については、Kumagai (2002)を参照されたい）。その主な結果として、ブルーム内部に対する外部の粘性の比 ($\epsilon_{as} = \eta_a / \eta_s$) の大きさによって、内部構

造の異なる 2 つのタイプのブルームが発見された (図 5, 6).

まず Vortex ring type (図 5) は低粘性比 ($\epsilon_{as} < \sim 10$) の時に生じ, Griffiths らの熱ブルームの時と似たような渦巻状の構造が見られた. 上昇とともにブルームのサイズは大きくなり, 渦巻きの数も増加した.

一方, 高粘性比の場合 (図 6) には, それとは全く異なる構造が形成された. ブルームの上昇にともない entrainment 現象が起こり, 重い外部流体がその内部に取り

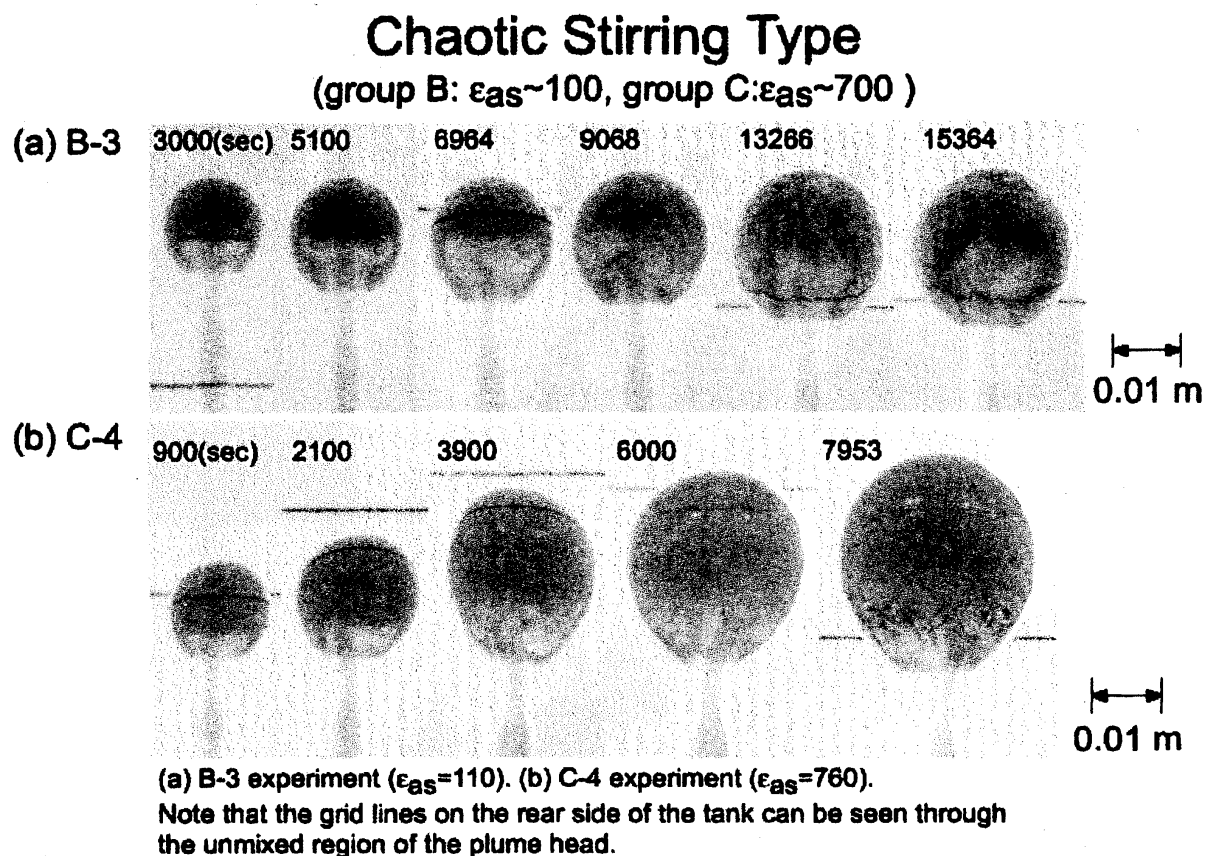


図 6 粘性比が大きい場合の出発ブルーム

込まれたものの, ブルームの最上部までそれらが巻き込まれることはなく, いったんブルーム最下部に溜まった状態で上昇し続けた. しかししばらくして, ブルーム頭部内の上部の軽い流体 (図 6 a の色付部分) と下部の重い流体 (図 6 a の透明な部分) との界面で Viscous coupling による渦が生じ, やがてそれが成長してブルーム全体にわたる攪拌 (Stirring) を行い, カオス的な混合模様を呈した.

これら粘性比による entrainment 現象や内部構造の違いは, ブルームによる熱や物質の輸送効率や地表におけるマントルブルーム起源の火山活動の特徴 (例えば火山の分布や噴出量の時間変動や岩石の組成変化など) に大きな影響を及ぼすと考えられる. しかしながら, Entrainment 率が何によって決まるのかについて, 現時点では未

だ明らかにされておらず、地質学的な観測事実との定量的な対比は今後の課題である。

我々は現在、最近流体計測の分野で急速に発展しつつある PIV (Particle Image Velocimetry)や LIF(Laser Induced Fluorescence)法を導入しつつあり(図7), 今後、定量的な温度場と速度場の同時計測によって entrainment 率などの定量的な見積りを行い、層流領域における entrainment 現象のダイナミクスを明らかにしたいと考えている。

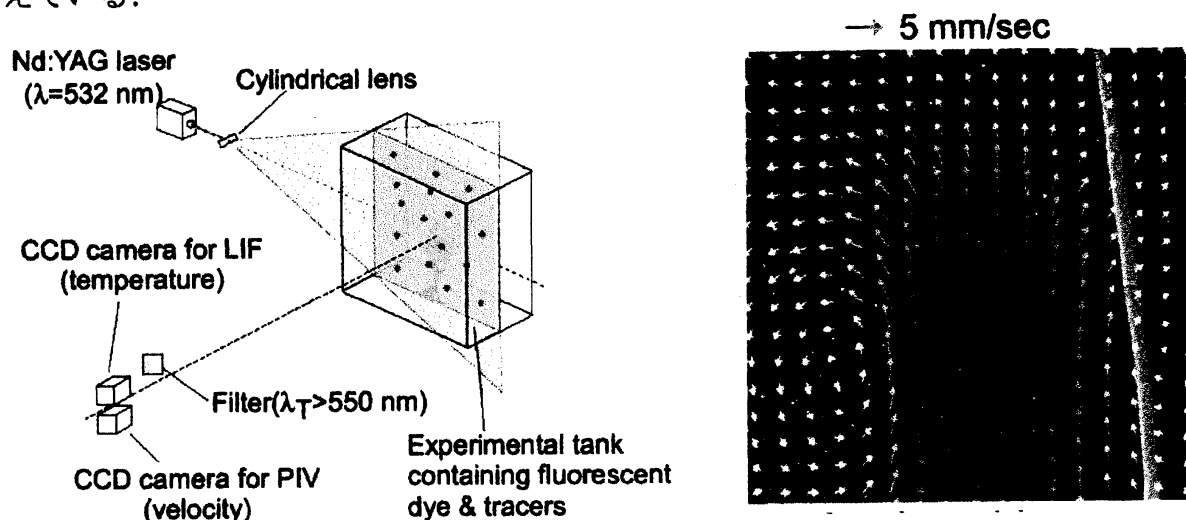


図7 PIVとLIF法による定量的な温度場、流れ場の計測
左は構成図、右は予備実験で得られたプルーム頭部周辺の速度場。

4. おわりに

本講究録では、固体地球科学の分野でやや肩身の狭い立場になりつつある室内流体実験の話をもとに進め、最近流行の数値シミュレーションの話はあえて取り上げなかったが、現在までに、entrainmentに関する数値シミュレーションが幾つかなされている(例えば Kellogg and King, 1997; van Keken, 1997; Farnetani et al., 2002 など)。数値シミュレーションは、マントルへの応用の際に、広範なパラメータスタディが可能であるため、非常に魅力的で強力な手法である。しかしながら entrainment 現象のように、界面での物理プロセスが全体のダイナミクスを決めているような問題については、計算機の演算能力に起因する空間解像度の制約があったり、多相流体や流体塊同士の相互作用を実現するためのプログラム作成(例えば相境界面の記述など)などが困難であったりするので、比較的苦手とする分野である。今後、JAMSTECの地球シミュレーターなどの高度な計算機によって、それらの問題は軽減されるかもしれないが、計算結果の validation などにアナログ実験は必要であるし、また、流体実験で観察される現象には何らかの物理的な意味を必ず含むものであるので、新しい現象やその現象を支配するパラメータを発見するのに有力な手段であると考えている。

参 考 文 献

- Batchelor, G.K., An Introduction to Fluid Dynamics, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1967.
- Farnetani, C.G., Legras, B. and Tackley, P.J., Mixing and deformations in mantle plumes, *Earth and Planetary Science Letters* 196, 1-15, 2002.
- Griffiths, R.W. and Campbell, I.H., Stirring and structure in mantle starting plumes, *Earth and Planetary Science Letters* 99, 66-78, 1990.
- Hart, S.R. et al., Mantle plumes and entrainment: The isotopic evidence, *Science* 256, 517-520, 1992.
- Kellogg, L.H. and King, S.D., The effect of temperature dependent viscosity on the structure of new plumes in the mantle: Results of finite element model in a spherical, axisymmetric shell, *Earth and Planetary Science Letters* 148, 13-26, 1997.
- Kumagai, I., On the anatomy of mantle plumes: effect of the viscosity ratio on entrainment and stirring, *Earth and Planetary Science Letters* 198, 211-224, 2002.
- Maxworthy, T., The structure and stability of vortex rings, *J. Fluid Mech.* 51, 15-32, 1972.
- Morgan, W.J., Convection plumes in the lower mantle, *Nature* 230, 42-43, 1971.
- Neavel, K.E. and Johnson, A.M., Entrainment in compositionally buoyant plumes, *Tectonophysics* 200, 1-15, 1991.
- Richard, M.A., Duncan, R.A. and Courtillot, V.E., Flood basalts and hot-spot tracks: plume heads and tails, *Science* 246, 103-107, 1989.
- Shlien, D.J., Relations between point source buoyant convection phenomena, *Phys. Fluids* 22, 2277-2283, 1979.
- Turner, J.S., The 'starting plume' in neutral surroundings, *J. Fluid Mech.* 13, 356-368, 1962.
- Turner, J.S., Buoyant plumes and thermals, *Annu. Rev. Fluid Mech.* 1, 29-44, 1969.
- van Keken, P., Evolution of starting plumes: a comparison between numerical and laboratory models, *Earth and Planetary Science Letters* 148, 1-11, 1997.
- Whitehead, J.A. and Luther, D.S., Dynamics of laboratory diapir and plume models, *J. Geophysical Research* 80, 705-717, 1975.
- 玉井信行, 連行概念の統一化と連行係数の評価法, 土木学会論文集 381, II-7, 1-11, 1987.