

2011.2.23
神戸大15:00～16:00

気泡が地球を救う

翼型気泡発生装置による 船舶の抵抗低減

熊谷一郎・村井裕一・田坂裕司

櫛田崇文・大藪剛志・中村直哉・高橋義明

北海道大学・工学研究院・流れ制御研究室

ランドエンジニアリング社

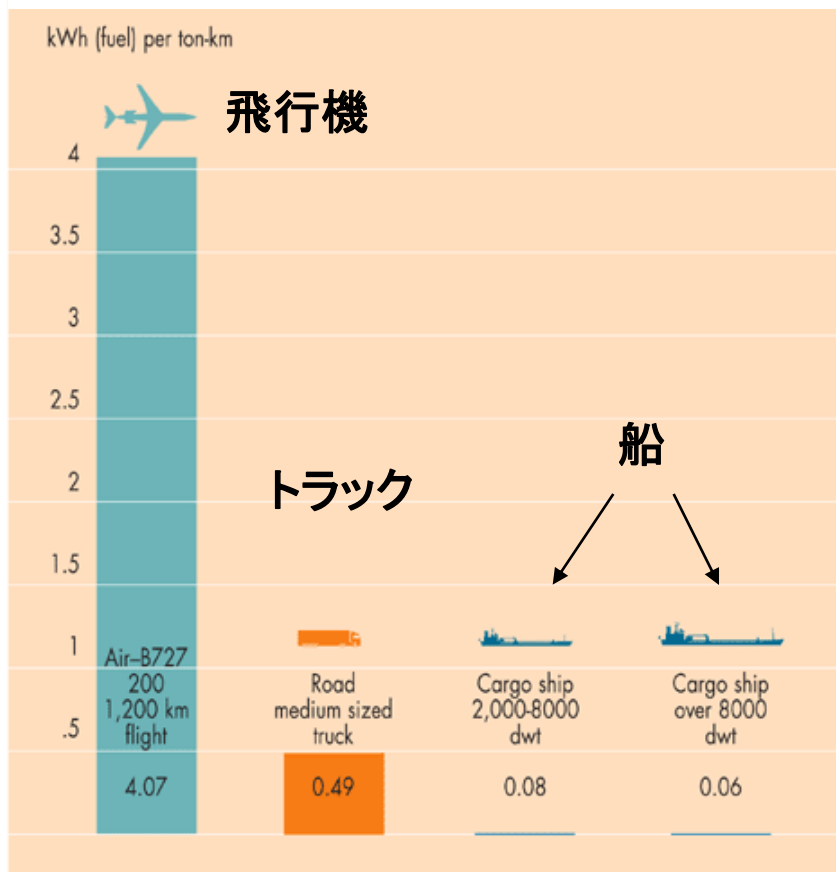
船はエライ？



日本船主協会HPより

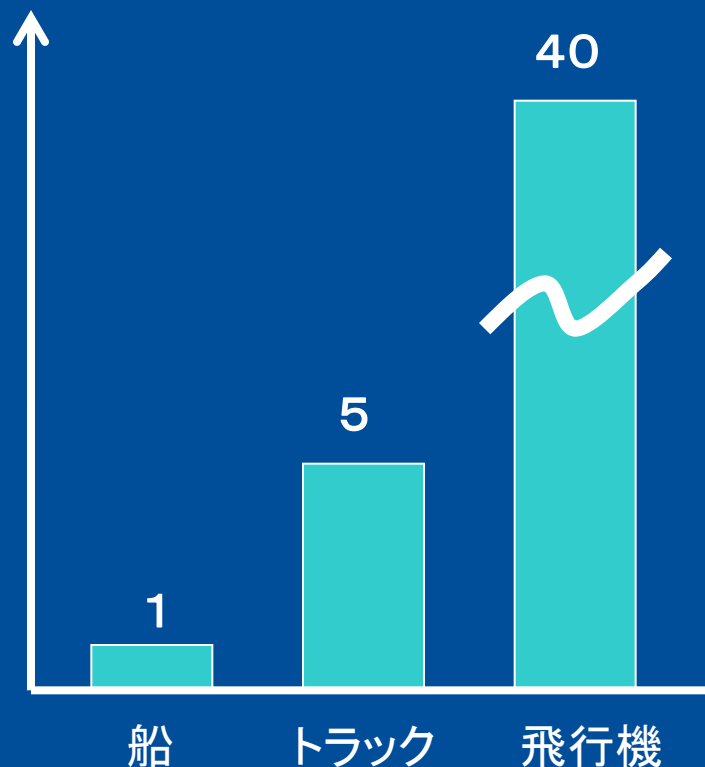
船(ふね)～地球に優しい輸送手段～

1トンの貨物を1km輸送した場合
に必要なエネルギー



1トンの貨物を1km輸送した場合
に排出する二酸化炭素

CO₂排出量



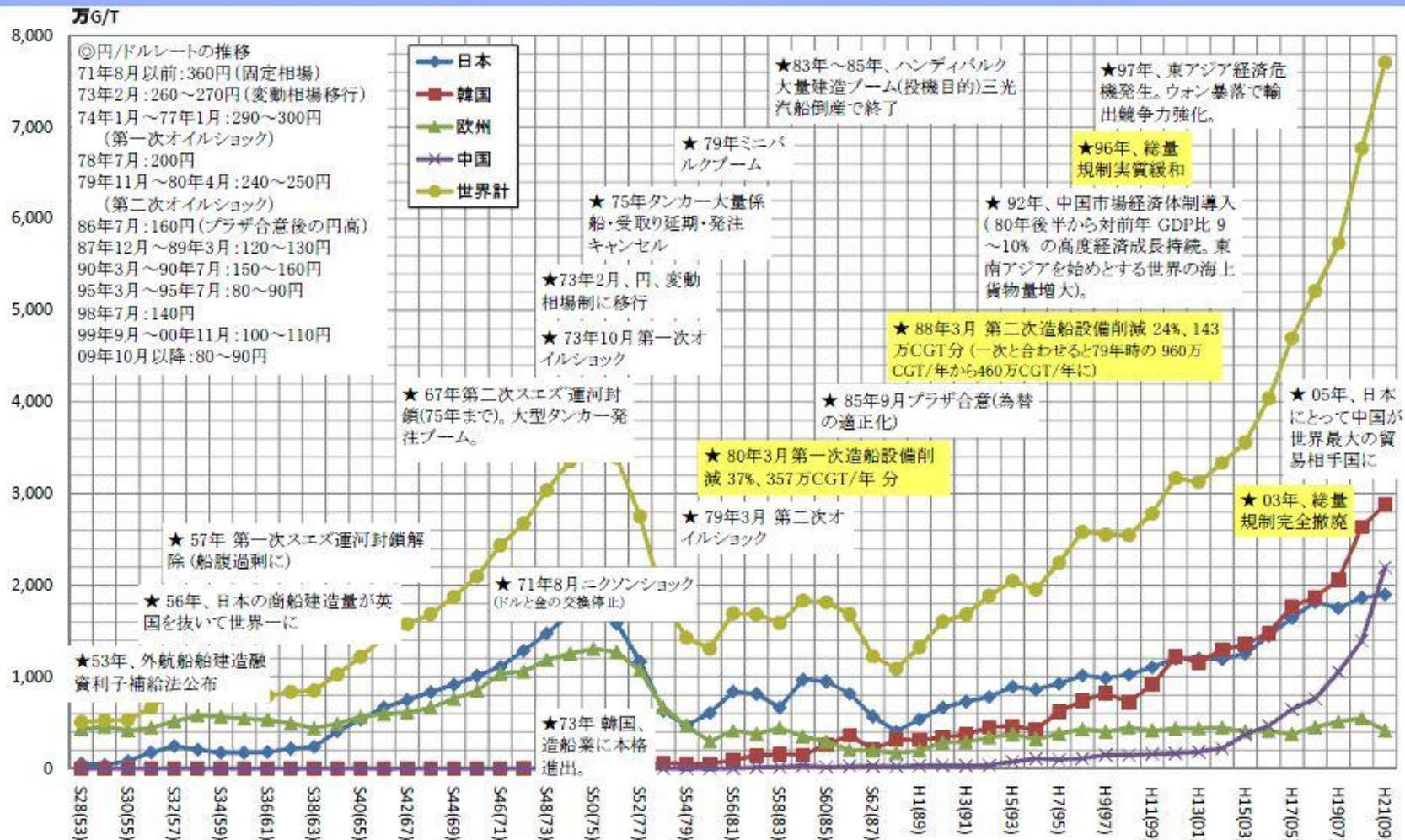
dwt: 載荷トン数

<http://www.marisec.org/shippingfacts/home/>

船の最新知識: 池田良穂(2009)

日本の造船業界の現状

世界の新造船建造量推移と政治・経済環境の変遷



日本の造船業界の現状

流体力学屋としての貢献

2010年12月6日 日本経済新聞

造船巻き返しへ支援策

国交省方針 省エネ船など重点

国土交通省は造船分野の総合対策を策定する方針を固めた。二酸化炭素（CO₂）の排出量の少ない船の建造や海洋資源開発向け施設などを政府系金融機関の支援や補助金や税制による優遇策で重点支援する対策を来年6月にまとめる。約20年間、造船量で世界首位だった日本がここ数年で韓国、中国に抜かれたこと

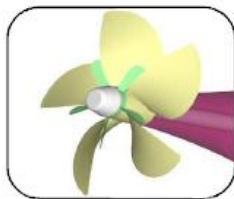
を受け、巻き返しを狙う。造船分野で総合対策を作るのは造船不況に対応し国内の造船量を減らし

た1970年代以来。月内に有識者や関係企業の担当者が参加する研究会を新設。優遇策の一部

技術開発

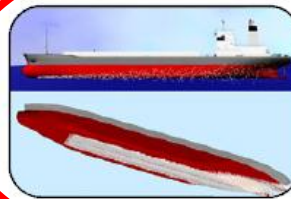
- 革新的な船舶の省エネルギー技術の開発 (H23要求：7.5億円)
- 海上輸送の環境性能向上のための総合対策 (H23要求：0.8億円)
- シップリサイクルに関する総合対策 (H23要求：0.2億円)
- 浮体式洋上風力発電施設の安全性に関する研究開発* (新規H23要求：0.5億円)
※H22 は外洋上プラットフォームの研究開発を実施 (H22：0.5億円)

船舶の省エネ技術開発例



空気潤滑法による摩擦低減技術

プロペラ付加装置



船舶の抵抗

船舶の抵抗

空気抵抗

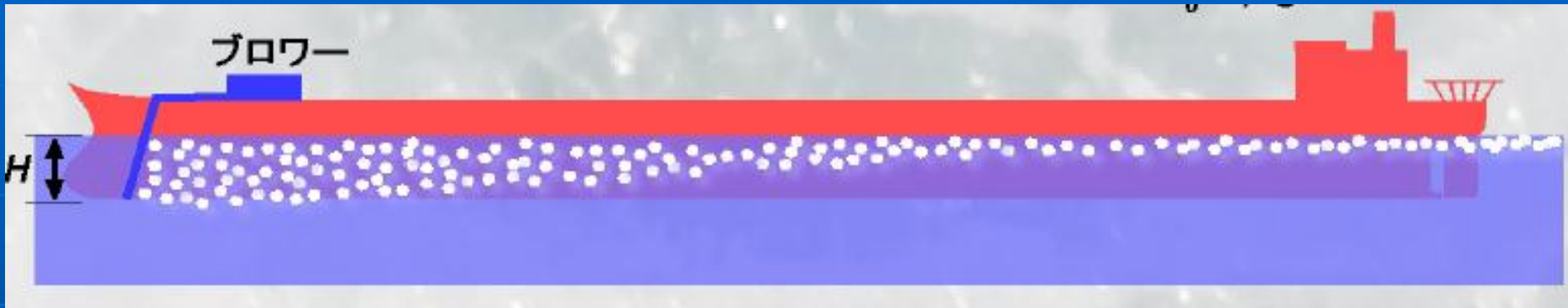
造波抵抗



海水との摩擦抵抗

タンカー、コンテナ船などの肥大船：
全抵抗の約7割が海水との摩擦抵抗

気泡を用いた船舶の抵抗低減

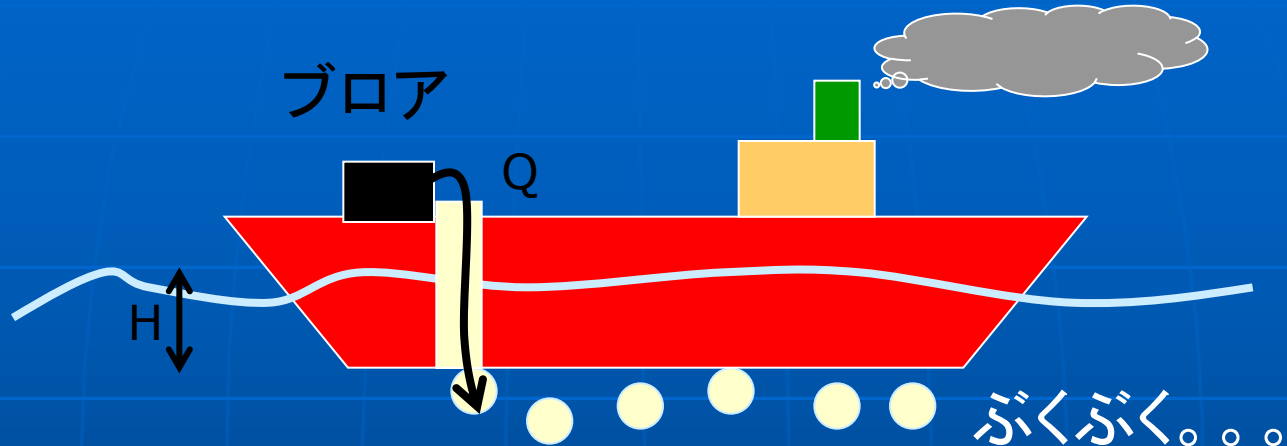


- 長さ300mクラスの石油タンカー、大型コンテナ船→約5万馬力の動力が必要
- 約70~80%が海水との摩擦に打ち勝つためのエネルギー
- 摩擦抵抗10%の低減で3MWの節減

動力を10%低減できると。。。

- 全世界の大型船舶1300隻の抵抗低減によるエネルギー節約量: 3800 MW
- 日本の電力: 98000 MW
 - 太陽光発電: 860 MW
 - 風力発電: 930 MW
 - 水力発電: 9040 MW
 - 地熱発電: 540 MW

空気を船底に送り込むためには？



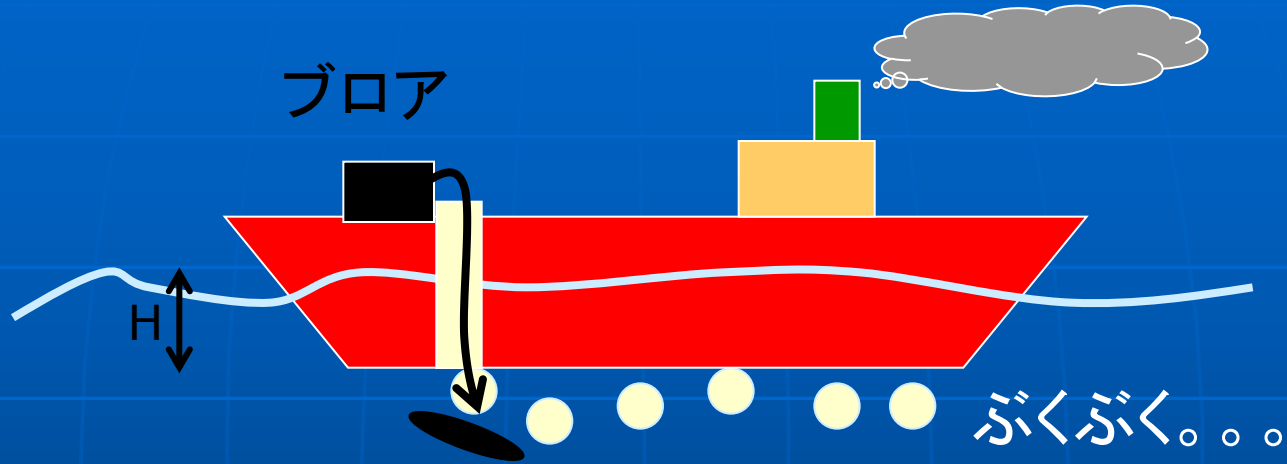
2007 NEDO 130m 運搬船 低減率 11%

圧送に必要な動力

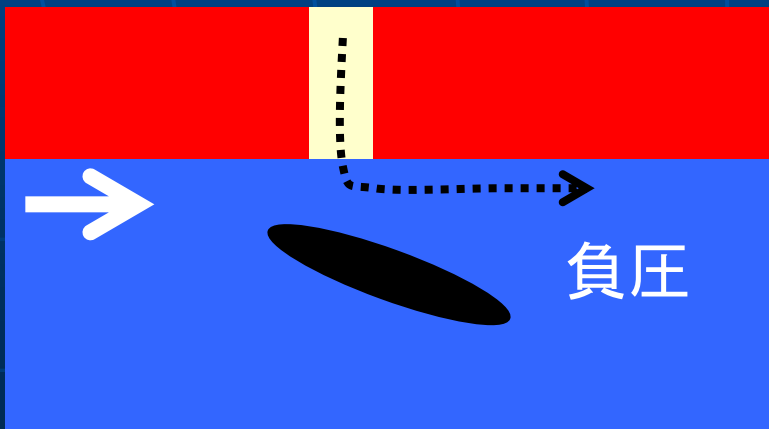
$$W_{\text{圧送}} = W_0 = \rho g H Q + \alpha$$

正味の低減率 5%

空気の船底への導入を助ける工夫



$$W_{\text{圧送}} = W_0 - W_{\text{翼負圧}} + W_{\text{翼抵抗}}$$



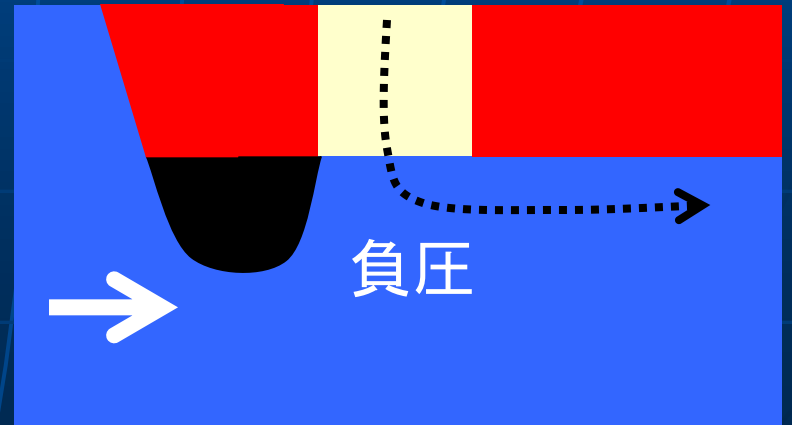
この部分を如何にマイナスにするか



ポンプを使わずに空気を船底へ 導入することは可能か？

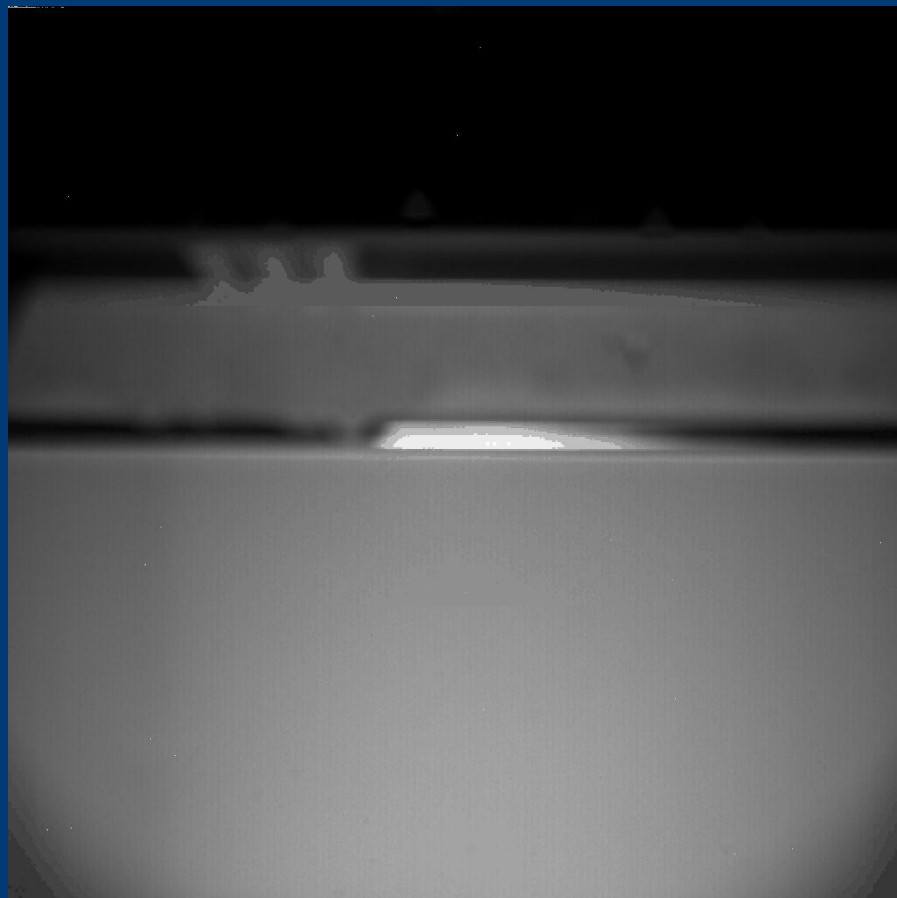


空気導入のための穴



ポンプを用いずに空気の導入は可能か？（演示実験）

$U = 900 \text{ mm/s}$



横から撮影した画像

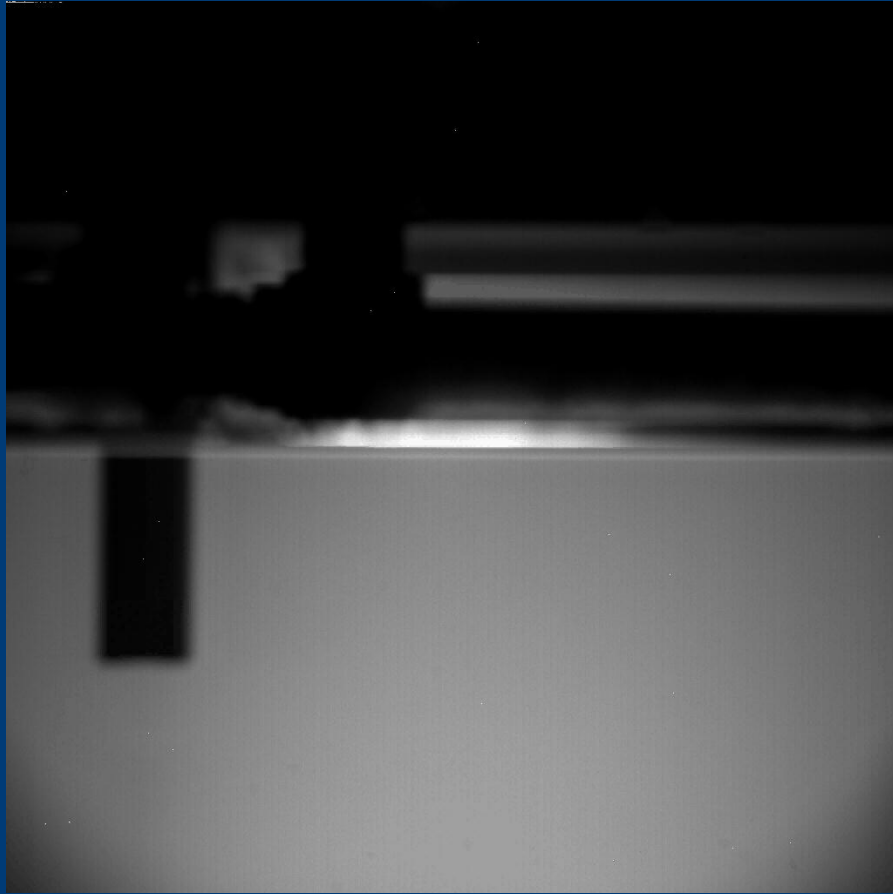
$U = 900 \text{ mm/s}$



下から撮影した画像

逆方向に動かすと、どうなる？

$U = -900 \text{ mm/s}$



横から撮影した画像

$U = -900 \text{ mm/s}$



下から撮影した画像

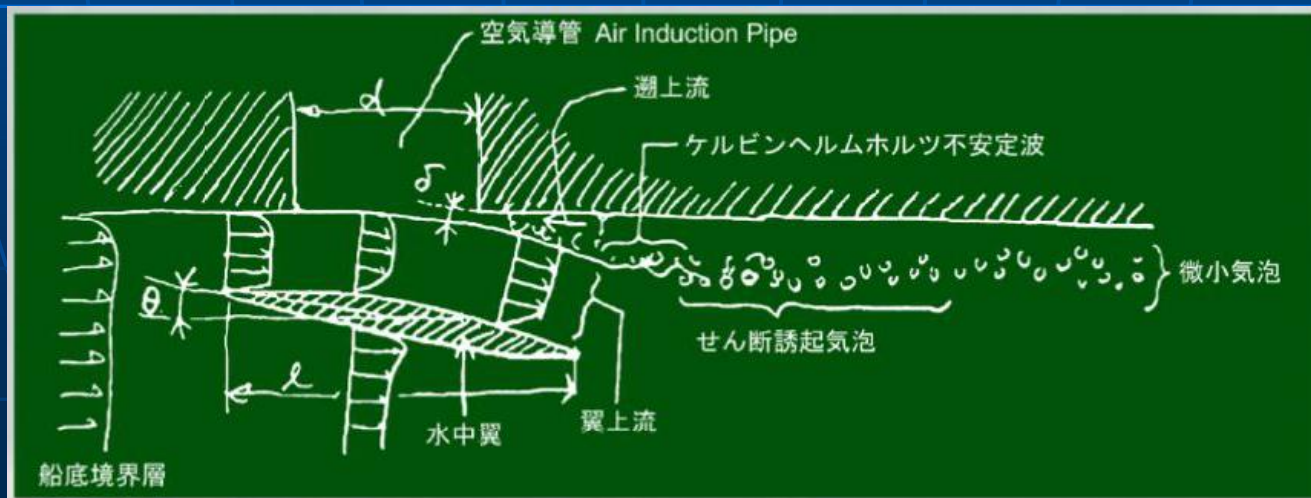
WAIP: Winged Air Induction Pipe

$$W_{\text{compressor}} = W_0 - W_L + W_D$$



(Murai & Takahashi, 2008)

- 効率的に空気を船底へ導入
- 摩擦抵抗低減に効く気泡の生成



NEDO: 流体力学的基础研究 (平成20年6月~)

- 室内実験

- 自由界面近傍を運動する物体
(円柱、WAIPなど)による空気の連行と気泡生成

- 理論

- 水中翼による気泡発生動力節減効果

- 計算

- 2相流の数値シミュレーション

- 実船試験

- 軸動力低減効果の計測

室内実験による基礎研究

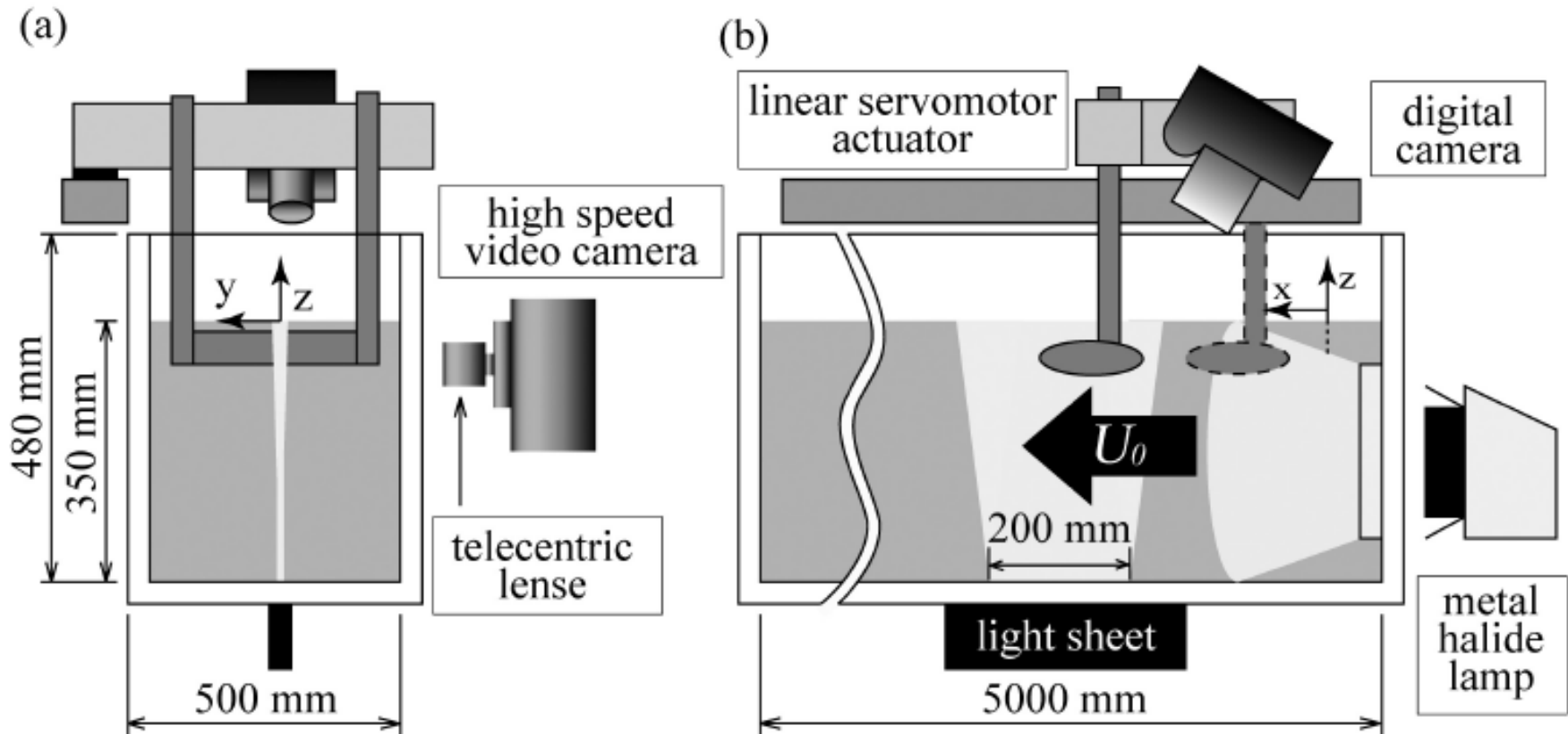
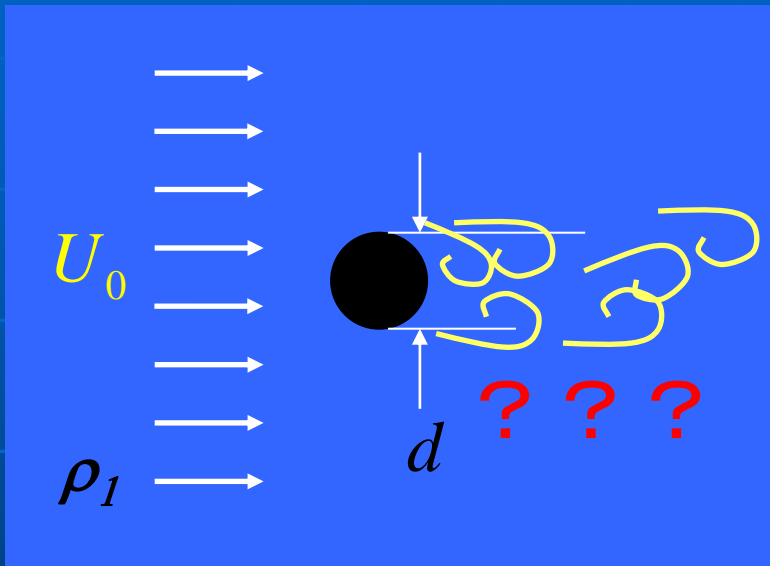


Fig. 2 Experimental equipment (a) side view (b) front view.

曳航物体： 円柱・角柱・楕円柱・翼など

Flow past a cylinder close to a free surface



$$Re_D = \frac{U_0 d}{\nu}$$

$$St = f U_0 / D$$

$$a = \frac{h}{d}$$

$$\gamma = \frac{\nu_{air}}{\nu}$$

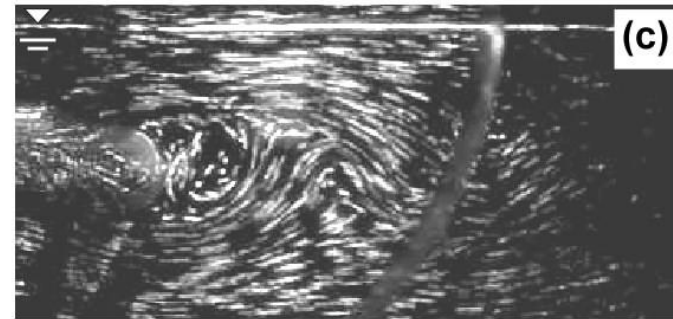
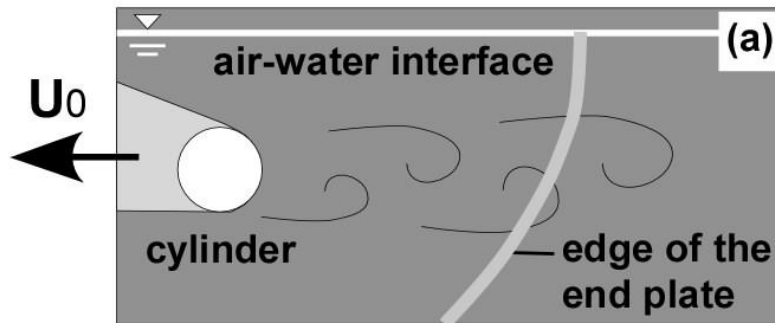
$$We = \frac{\rho U_0^2 s}{\sigma}$$

$$Fr_h = \sqrt{\left(\frac{\rho_1}{\Delta\rho}\right) \frac{U_0^2}{gh}}$$

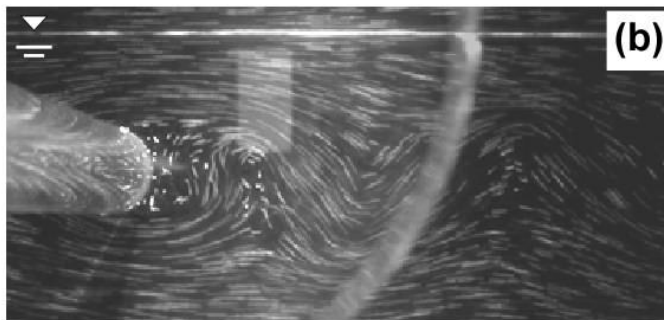
気液界面と流れとの相互作用はどのようなになるであろうか？

実験画像例 (Reynolds数変化)

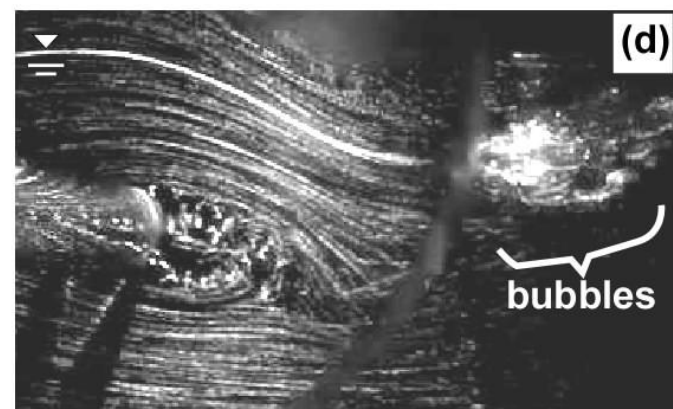
無次元水深 $a=1.0$



$Re \sim 3000$

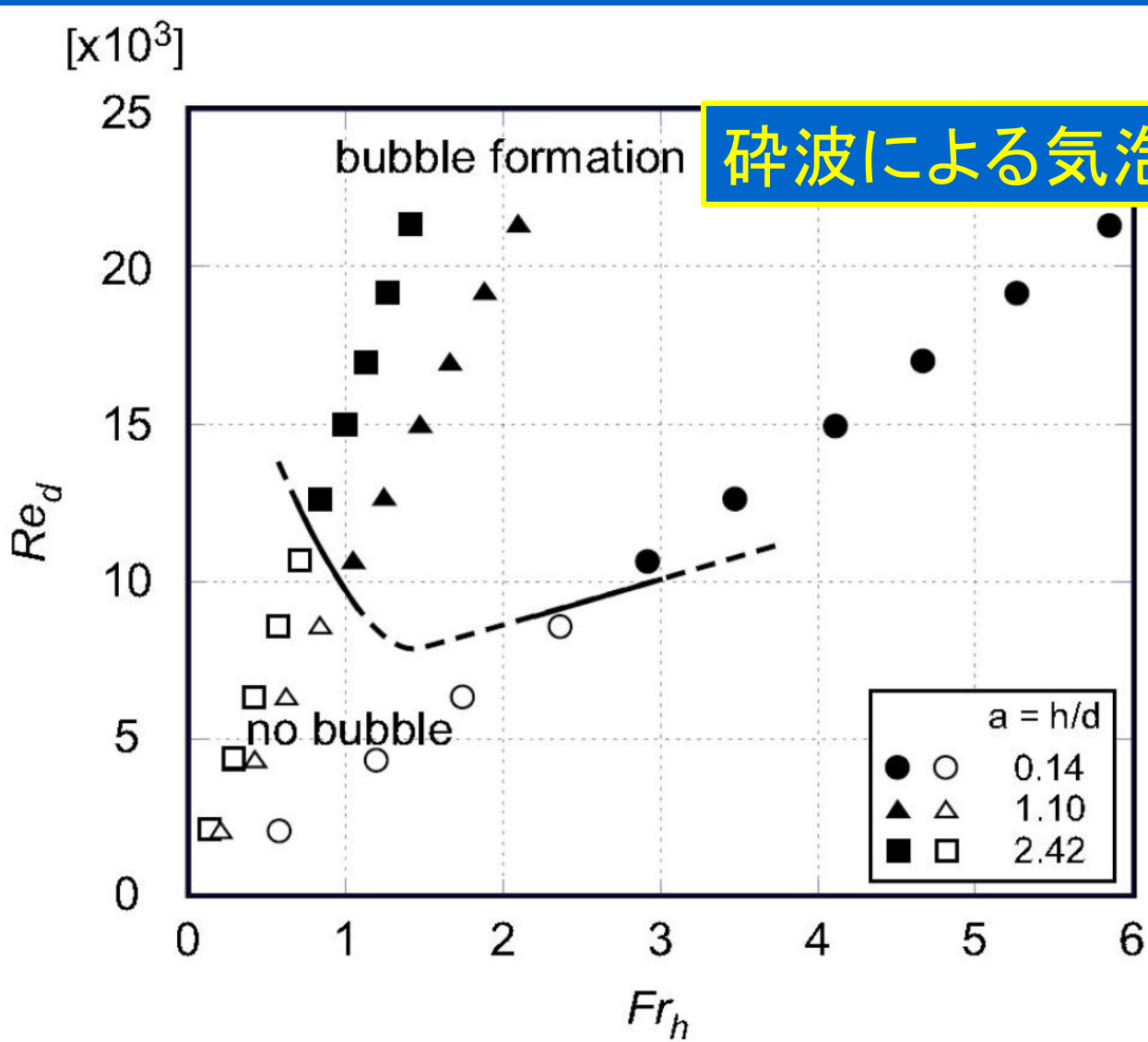


$Re \sim 600$

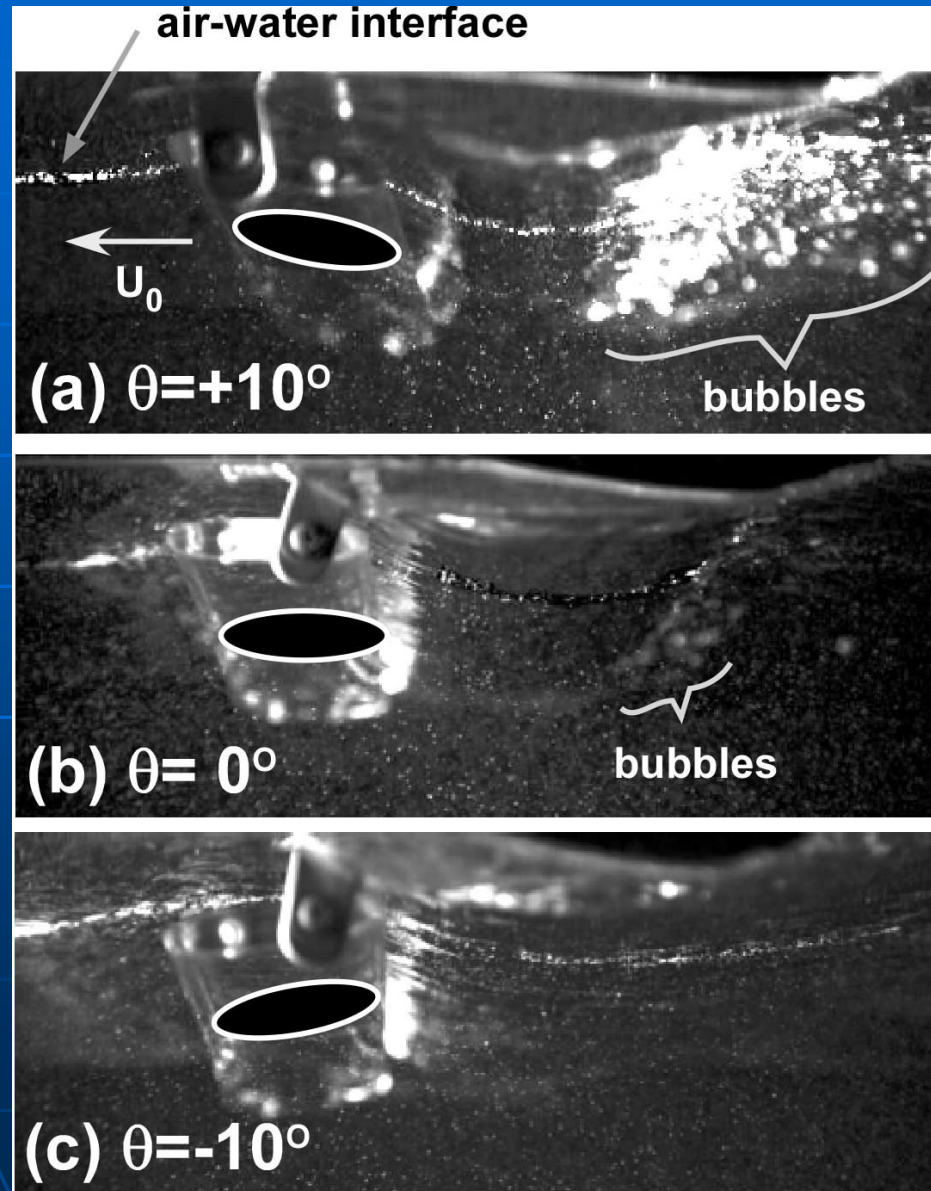


$Re \sim 12000$

Regime diagram for bubble generation



楕円柱による実験: Angle of attack

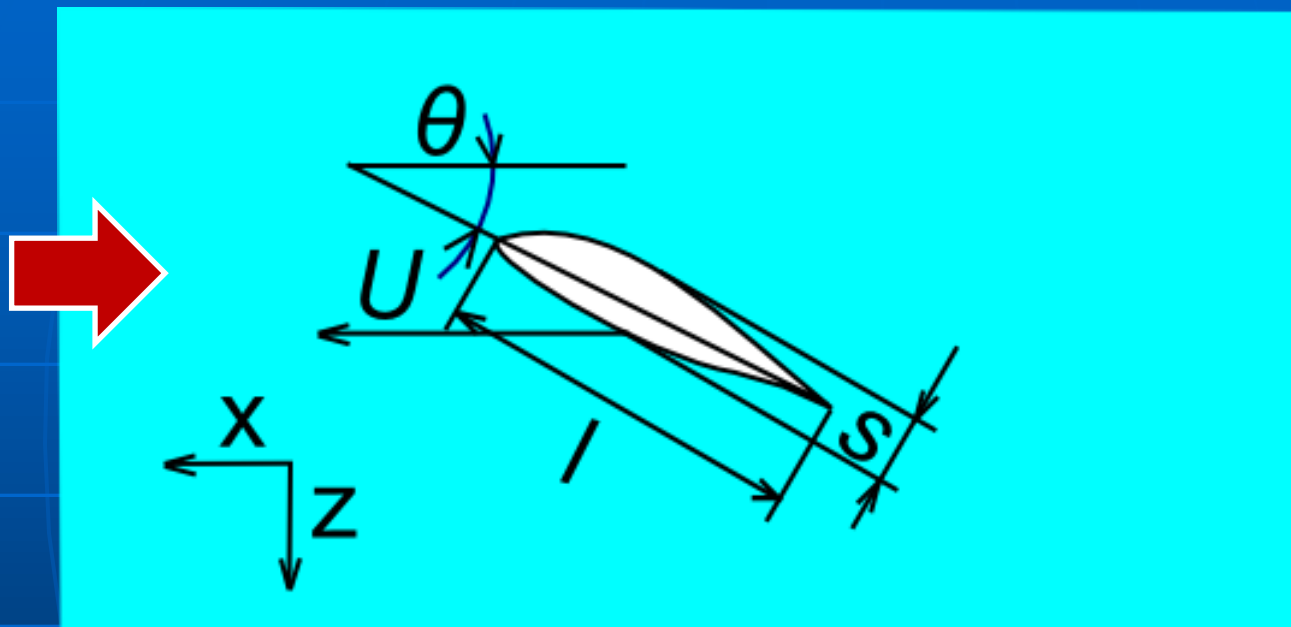


$U_0 = 580$ mm/s
 $h = 5$ mm

WAIP用水中翼を用いた実験



界面変形の振る舞い



$$Re = \frac{U}{\nu}$$

$$\theta$$

Effective Froude number Fr_e

0.57~5.9

Velocity U

100~1000

Reynolds number Re

$2.6 \times 10^3 \sim 2.8 \times 10^4$

Thickness s

7[mm]

Gap ratio a

1, 2, 4

Chord length l

40[mm]

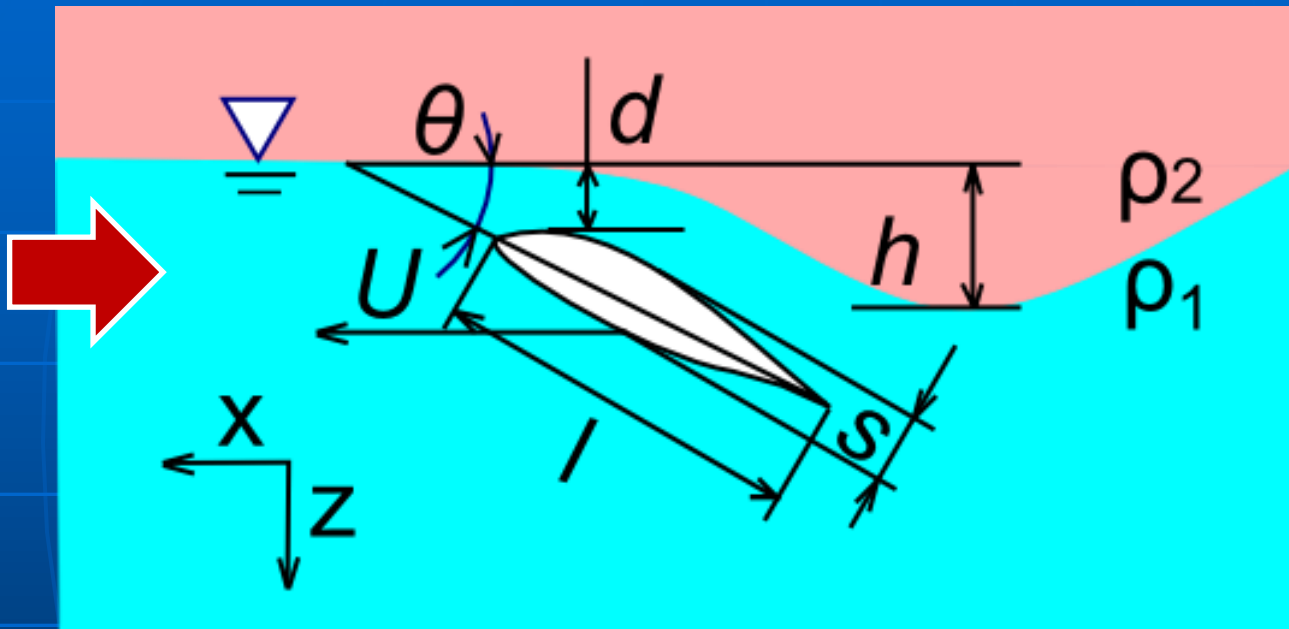
Angle of attack θ

5° , 15° , 30°

Hydrofoil
model

NACA65₃-
618

界面変形の振る舞い



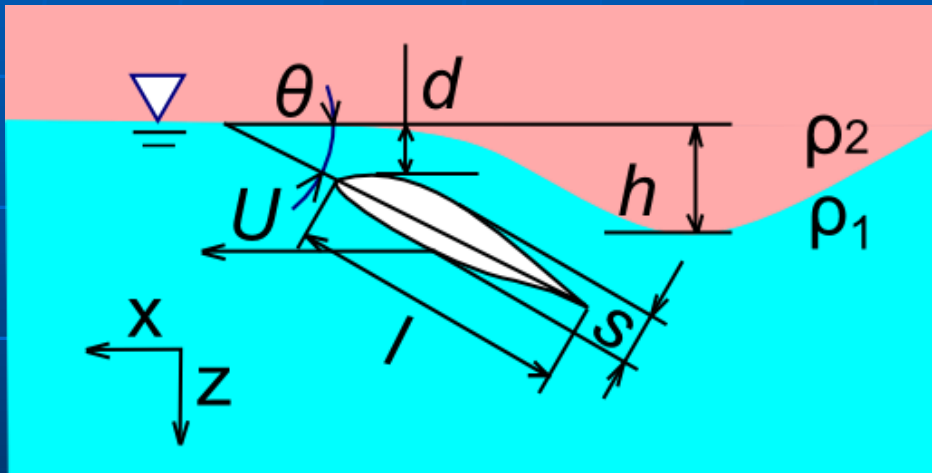
$$Re = \frac{U}{\nu}$$

θ

$$a = \frac{d}{s}$$

$$Fr_e = \frac{U}{\sqrt{gs(\rho_1 - \rho_2) / \rho_1}}$$

翼による界面下降量を考えてみる (Fluid dynamic scaling)

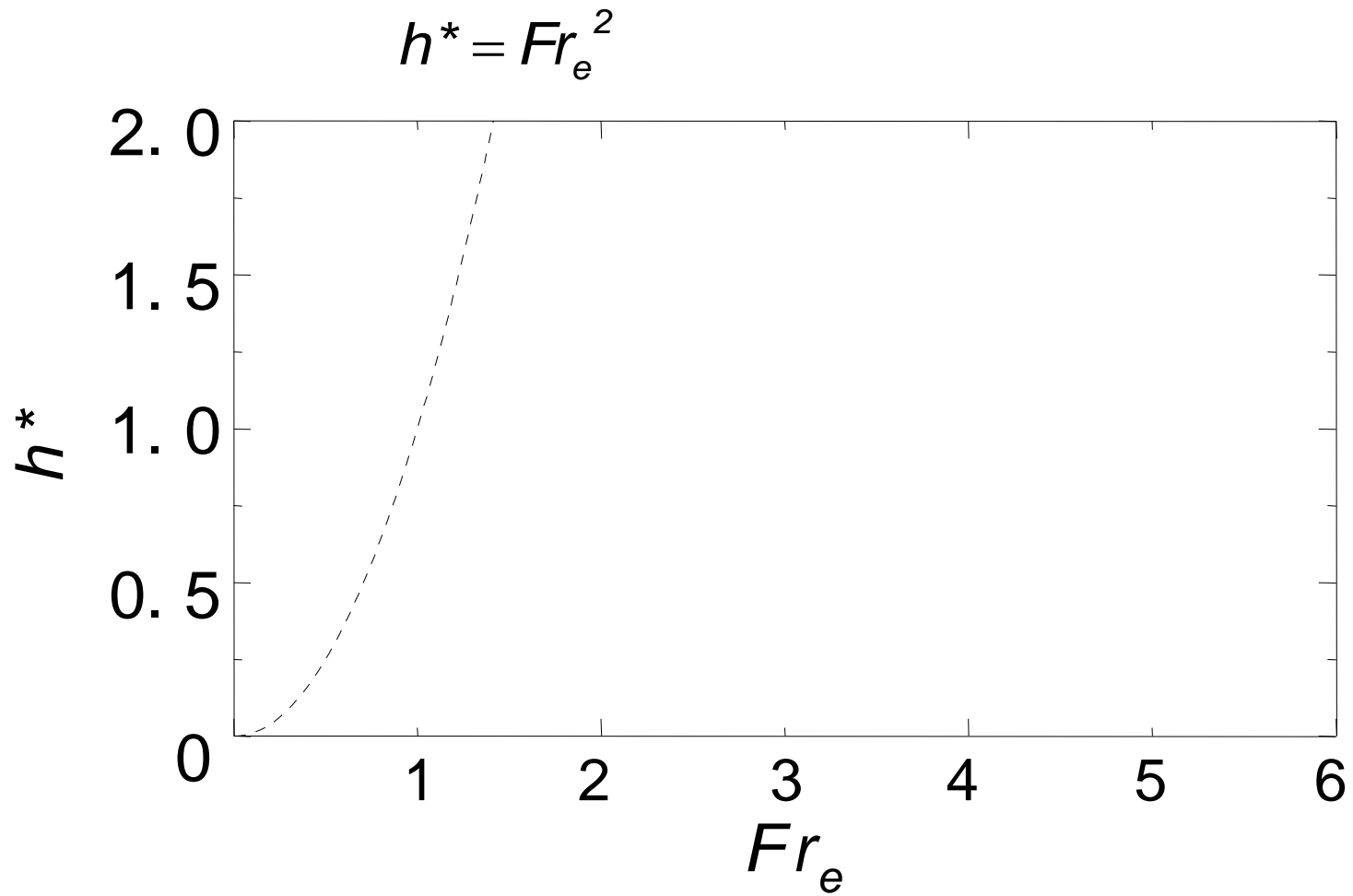


$$\frac{1}{2} C_p \rho_1 U^2 \sim (\rho_1 - \rho_2) g h$$

$$U \left\{ 2 \frac{(\rho_1 - \rho_2)}{\rho_1} g s \right\}^{-\frac{1}{2}} \sim \left(\frac{h}{s} \right)^{\frac{1}{2}}$$

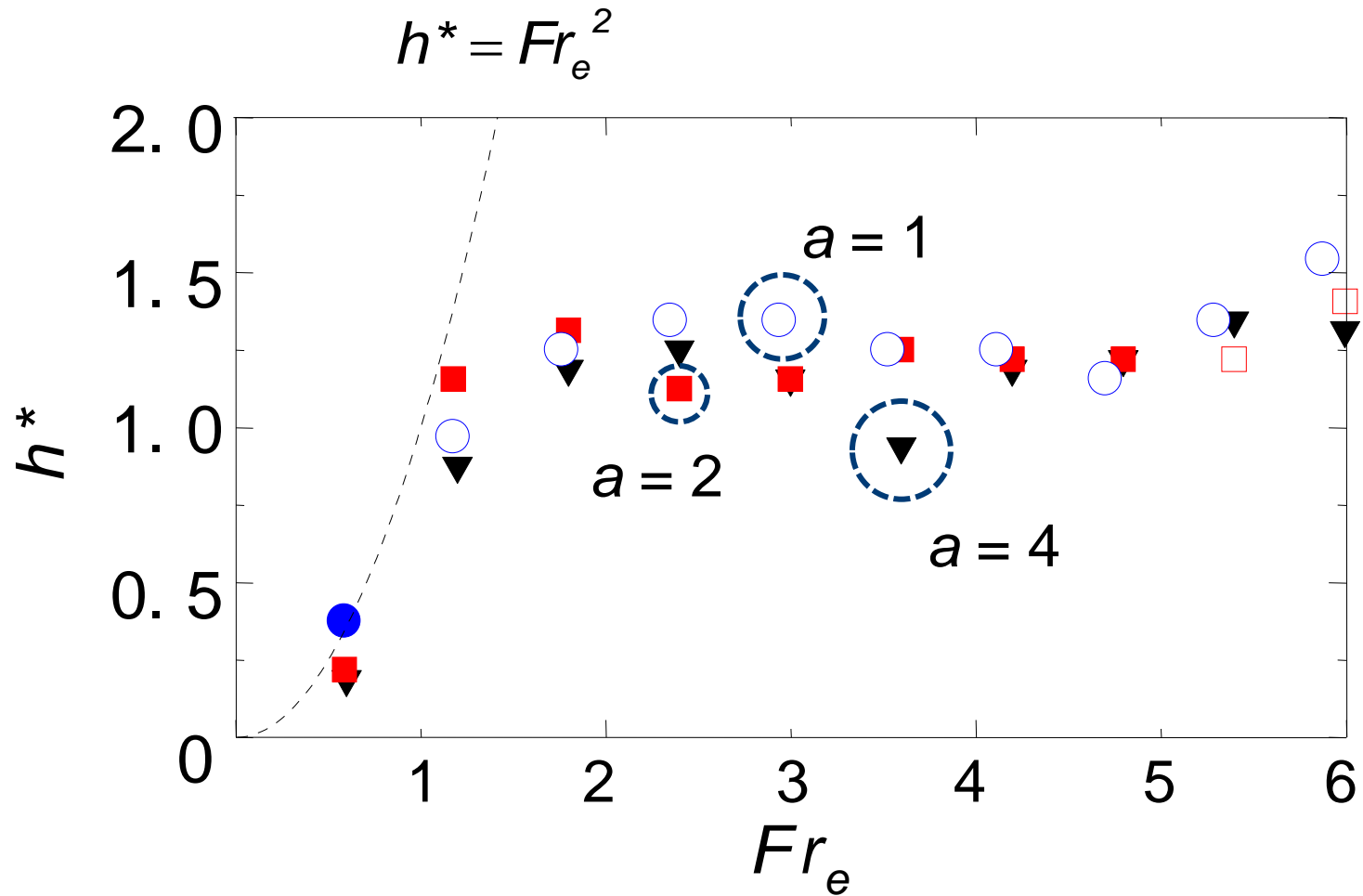
$$h^* \propto Fr_e^2$$

Effect of gap ratio



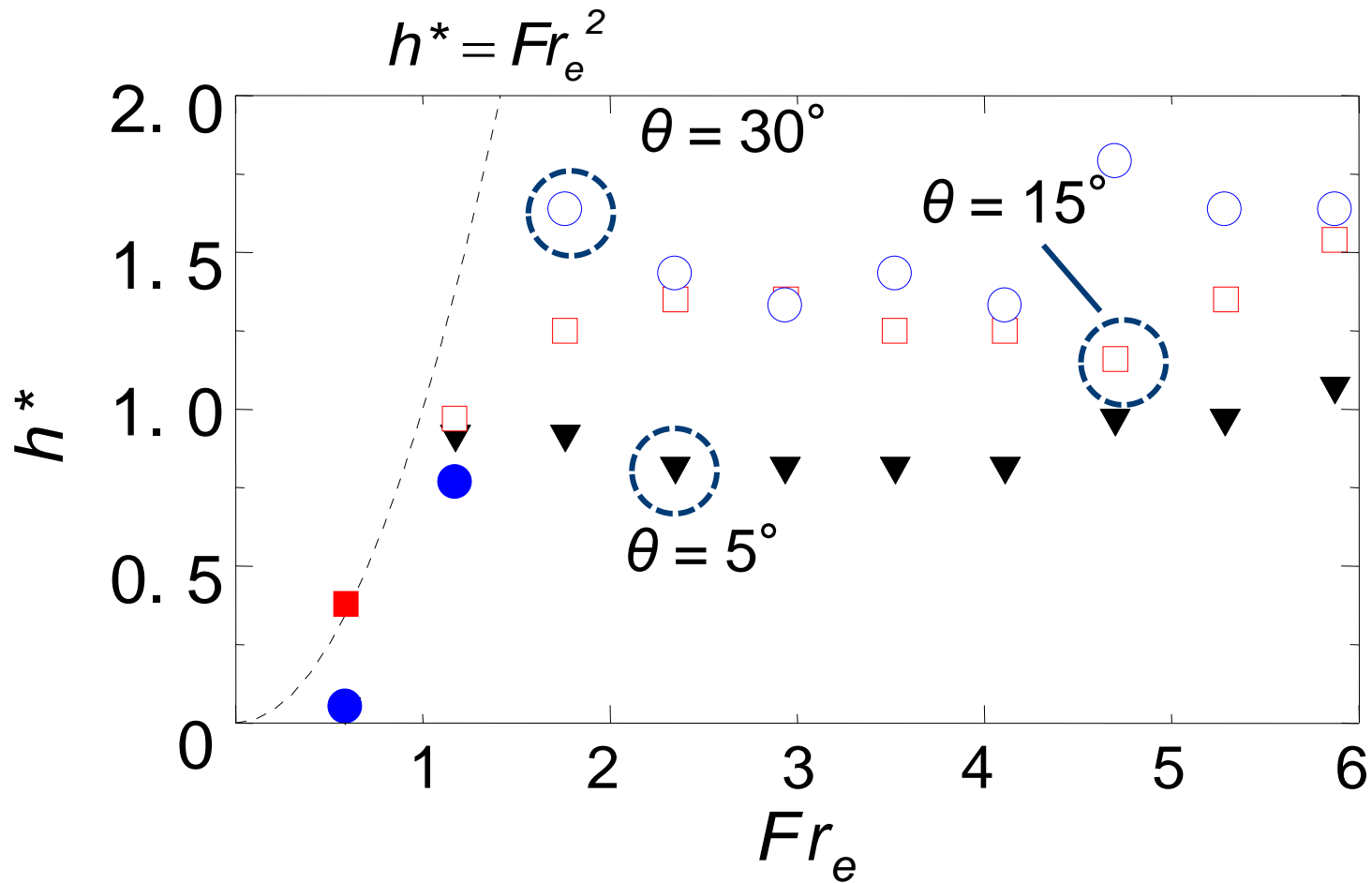
Effect of gap ratio

$\theta = 15^\circ$



Effect of angle of attack

$$a = 1$$



WAIPに関する理論

気泡発生理論動力(村井ら 2010)

ベルヌーイ定理, 質量保存, 翼揚抗力理論を結合

$$W = \rho B \left\{ gH\alpha \cdot U - \frac{1}{2} \left(C_P\alpha - \frac{A}{B} C_D \right) U^3 \right\}$$

必要動力 翼負圧による動力節減

無動力条件による抵抗節減効果の臨界船速 U_C

$$U_C = \sqrt{\frac{2gH\alpha}{C_P\alpha - (L/h)C_D \sin\theta}}$$

例えば、NACA 65-410を用いた場合

$\theta=10^\circ$ $C_p=1.50$ $C_d=0.015$ $\alpha=5\%$ $L=50\text{mm}$ $h=20\text{mm}$

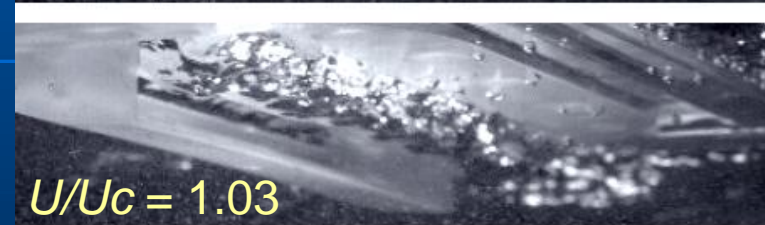
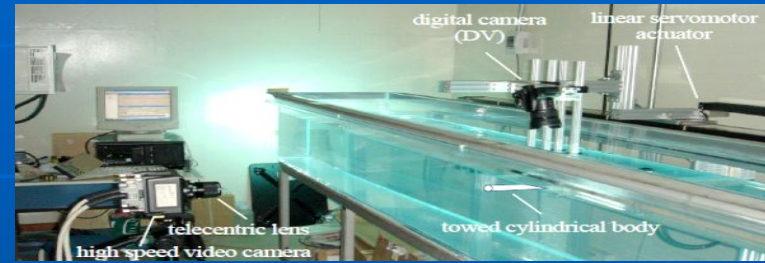
とすると、

喫水 2 m で 10.3 knots 喫水 5 m で 16.6 knots

Answer

多くの船舶の巡航速度において良く適合する！

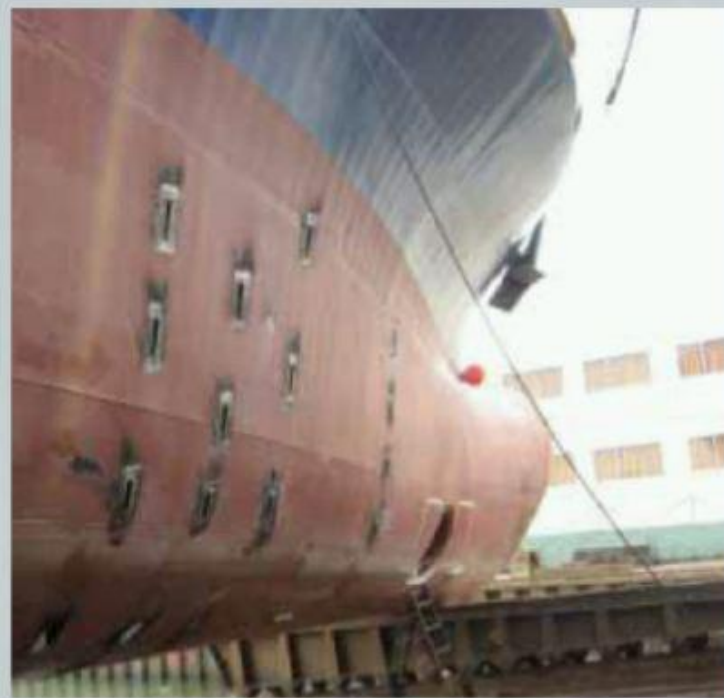
実験による検証



実船実験: WAIPの性能試験

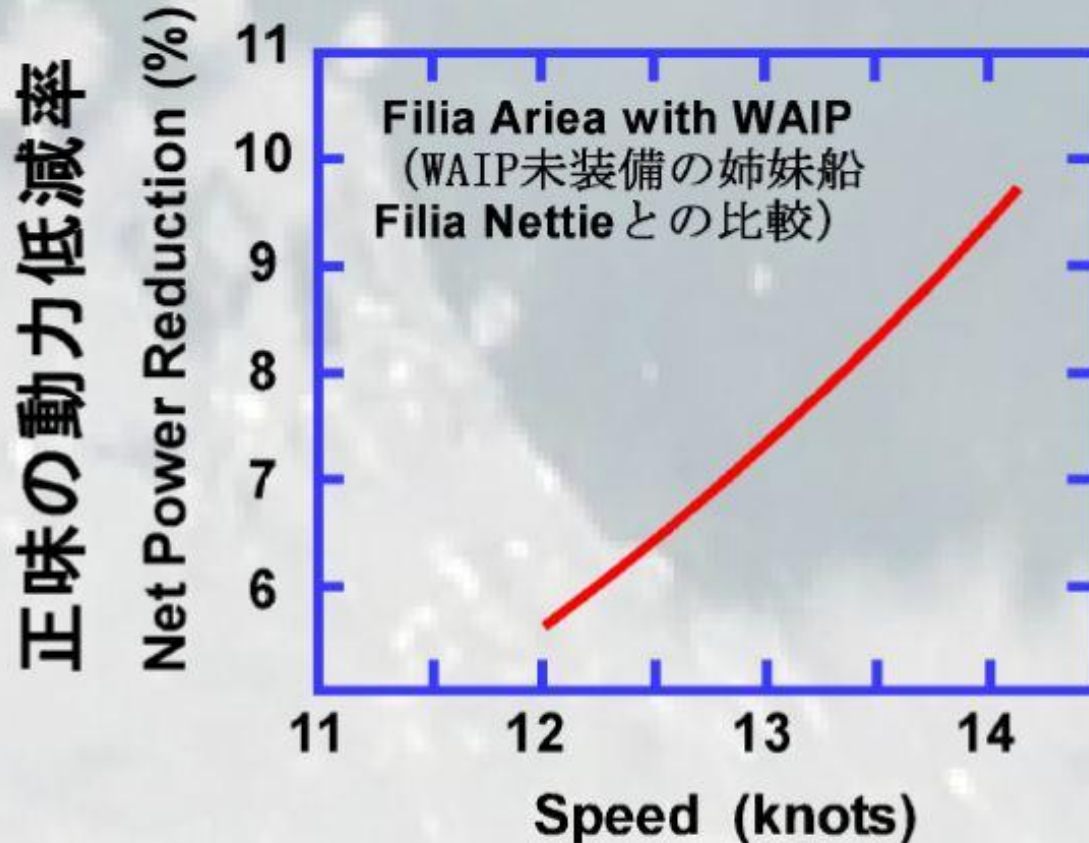


実験を行った船 Filia Arica (85m)



WAIP装着例

WAIPの性能試験



WAIPの装着によって約10%の
正味の抵抗低減を達成
高速船ほど効果が大きい

10%を達成。まだ伸び代がある。

WAIP saves our planet & your money

300mクラスの大型船の推進動力が5万馬力、全世界で1300隻とすると…

WAIP
装着

正味25%動力低減

正味10%動力低減

従来の気泡抵抗低減法
正味5.3%

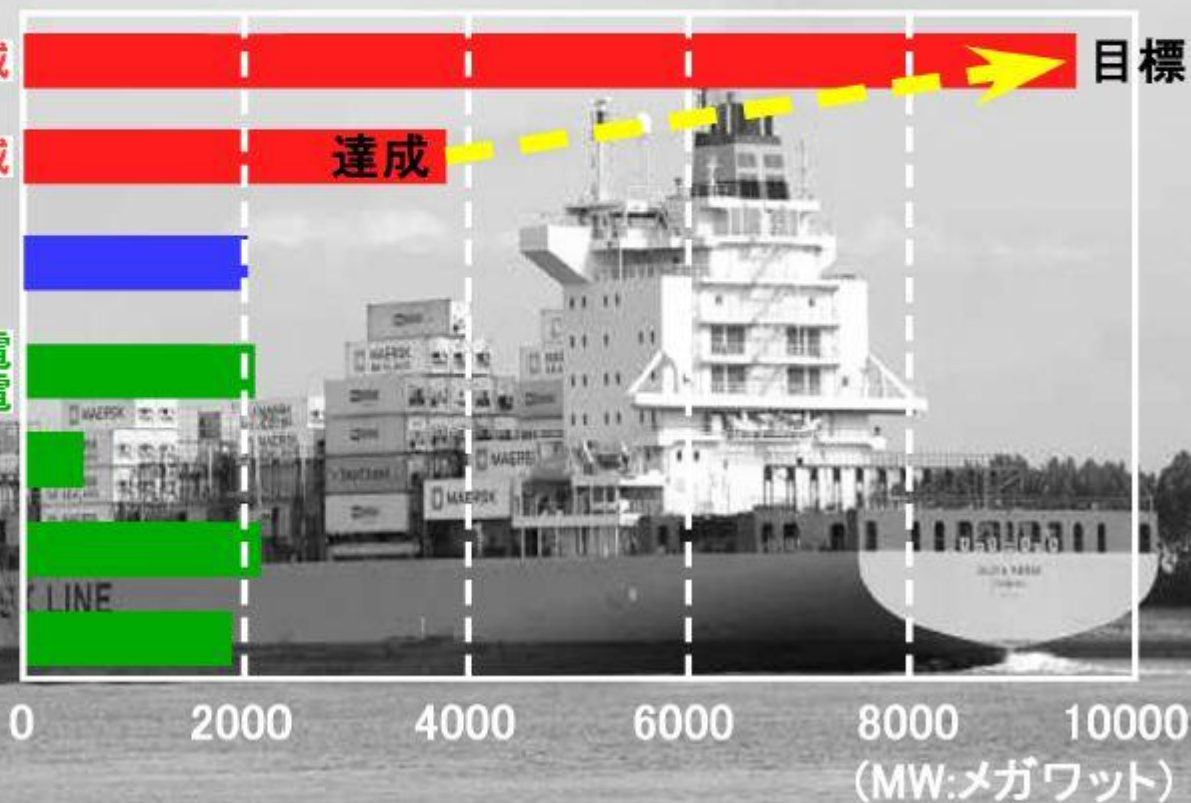
新エネルギーによる
日本の総発電量

バイオマス発電
+ 廃棄物発電

地熱発電

太陽光発電

風力発電



前半、おしまい

地球内部のプルームのふるまい 流体力学的なイメージ

熊谷 一郎

(北大・工・流れ制御)

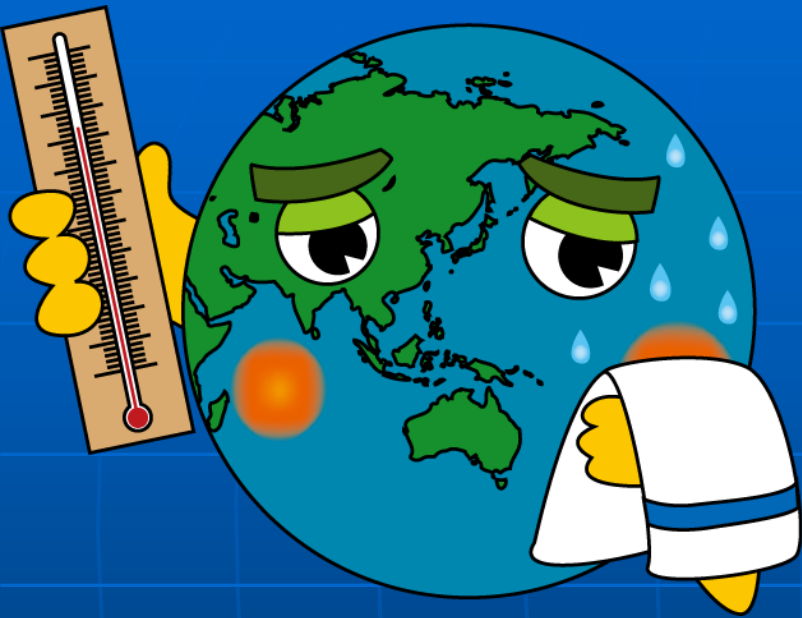
Davaile Anne

(パリ地球物理学研究所・CNRS)

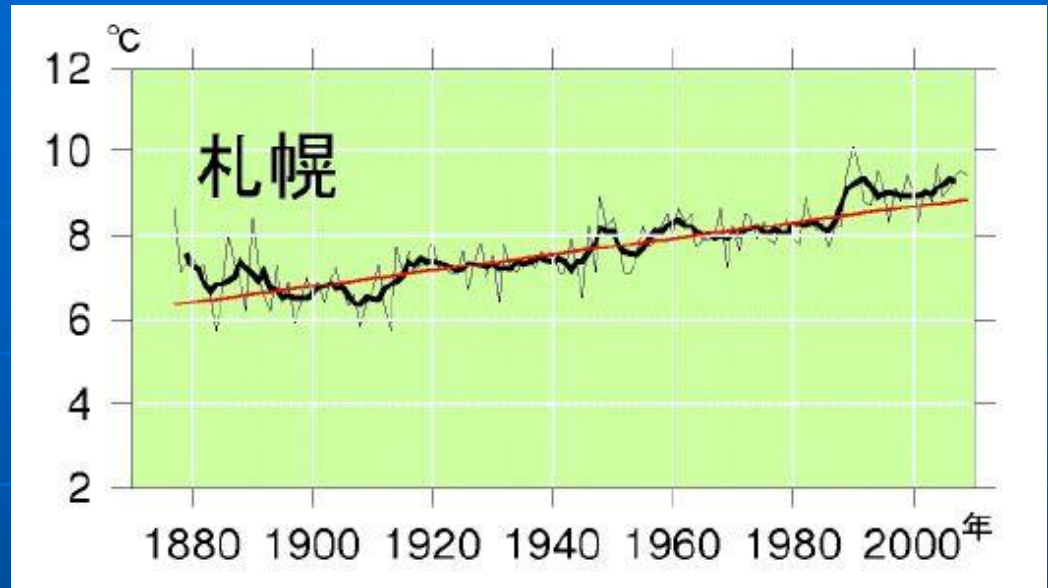
栗田 敬

(東大・地震研)

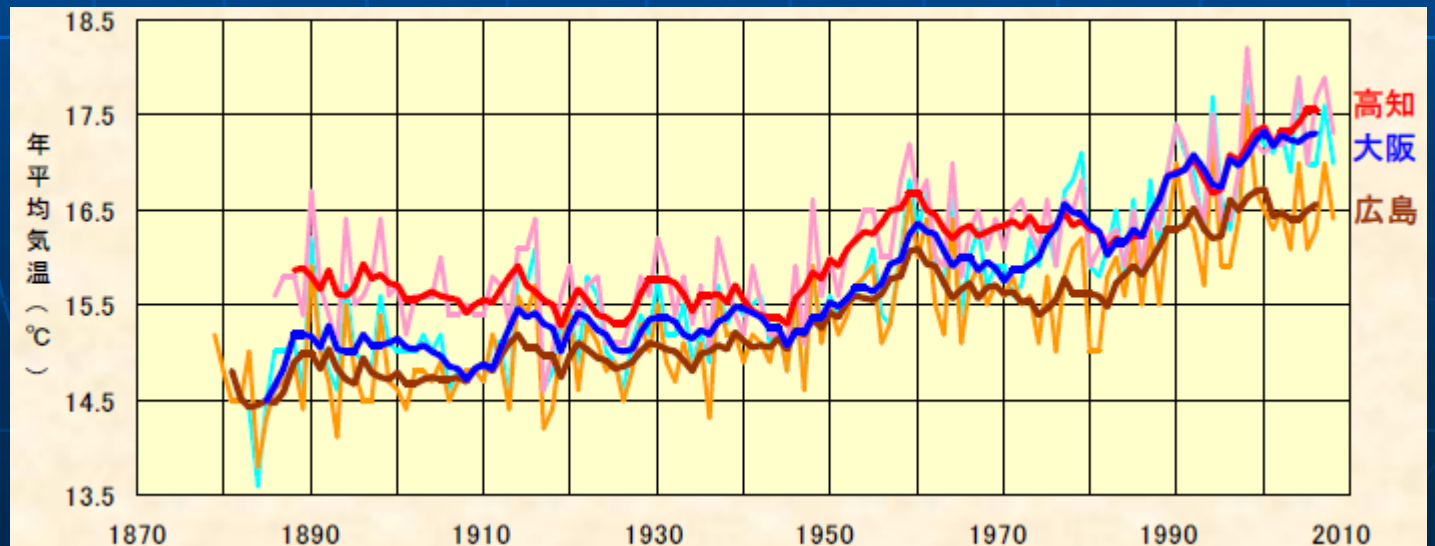
地球温暖化問題



Illpop.com



年平均気温の推移
札幌管区气象台・函館海洋气象台(平成22年12月)



大阪管区气象台など
(H21)

地球冷却化問題

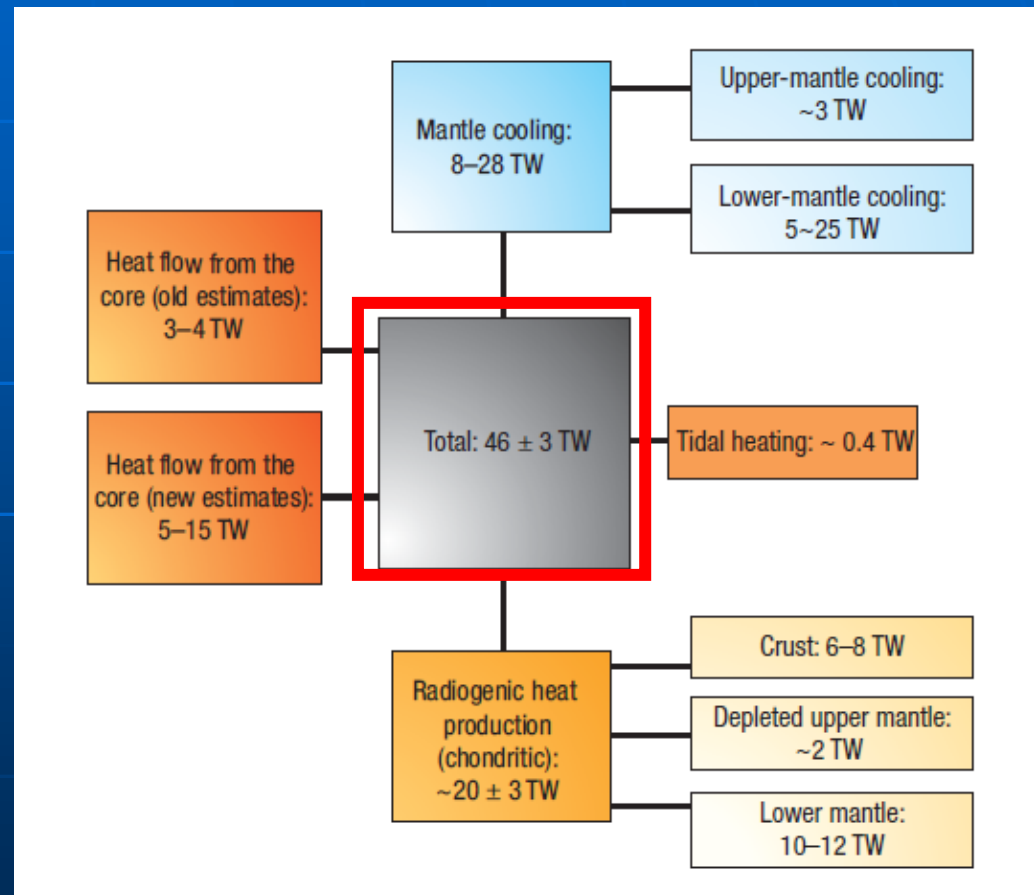
地球の表層から外へ放出される熱: 46 TW

日本の電力
98 GW

北大生協が推奨する必要摂取量:
1600~2000 kcal/day
~87.5 W

日本の人口 1.27×10^8 人

日本人の総パワー(?)
11.1 GW



Lay et al. (2008)

ギョギョ、マントルプルーム？

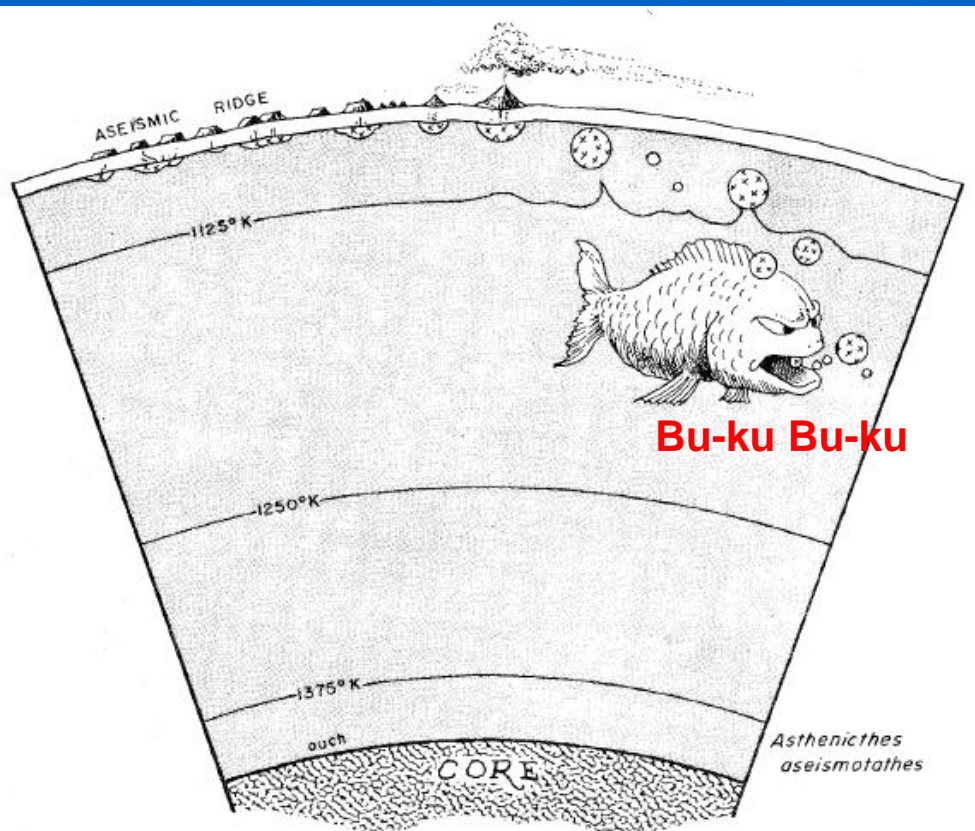
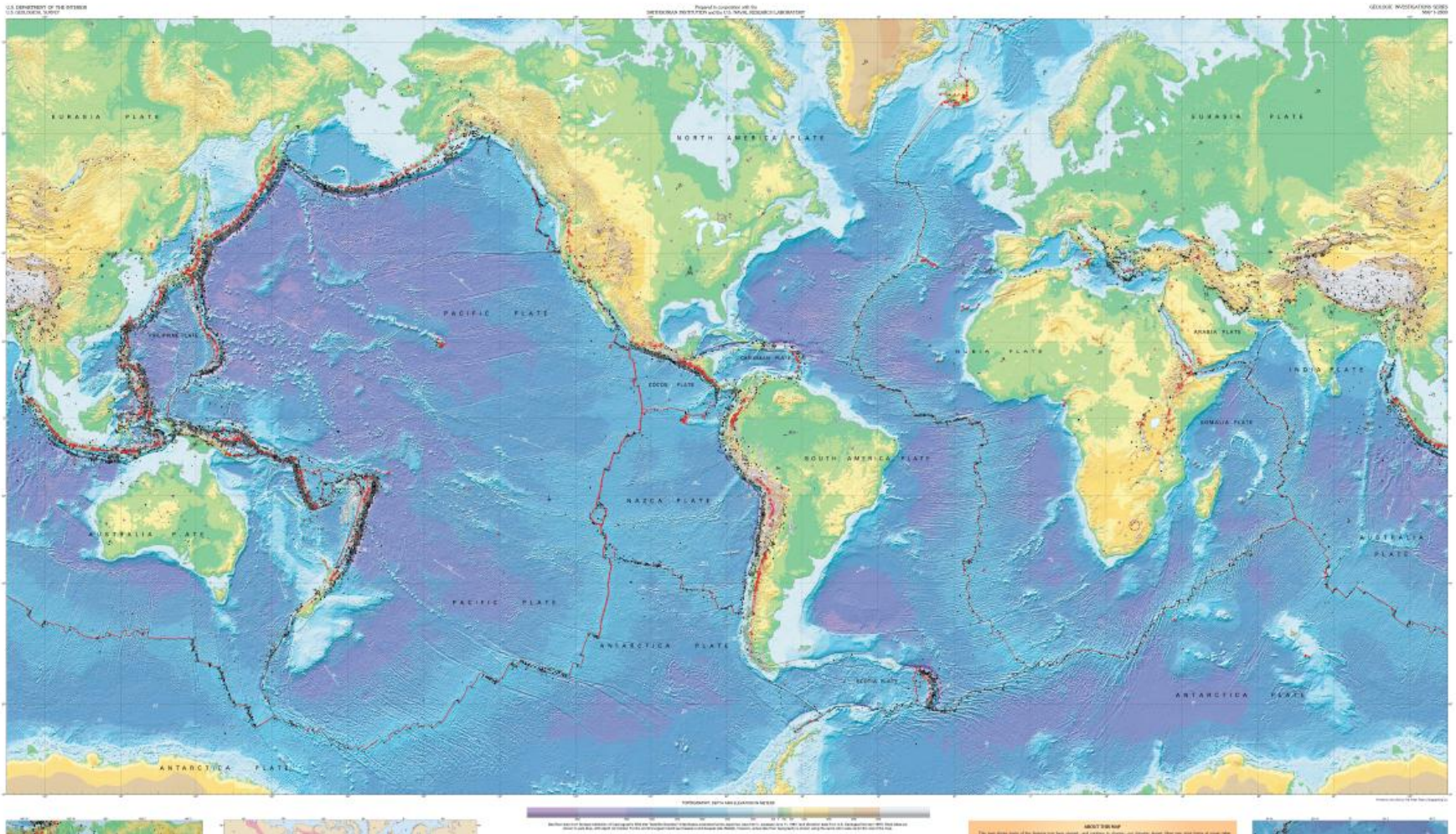


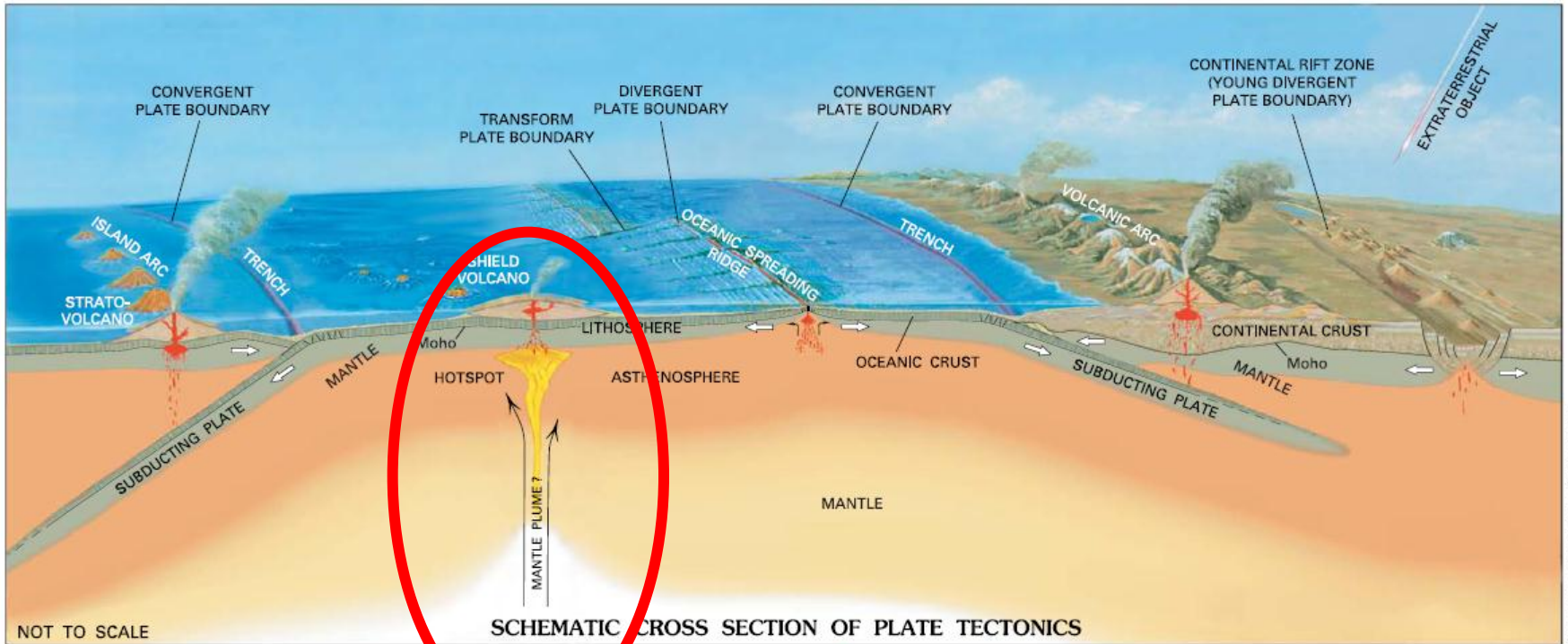
Fig. 4. Alternative to the mantle plume theory (based on an ancient Japanese legend).

Plumes, antiplumes, and propagating fractures are certainly not the only possible explanations for features such as the Hawaiian chain. Ancient legend has it that the island of Japan is situated atop a giant carp and that every time the beast shifts position Mount Fuji erupts. As most legends have some basis in fact, we propose that this creature also finds its home throughout the viscous asthenosphere (Figure 4). Could it be that as it swims, at a rate of only a few centimeters per year within the mantle, it leaves behind a buoyant trail of tholeiitic bubbles which rise ponderously to create aseismic ridges? We name this fish *Asthenichthes aseismotathes*, or the asthenospheric fish that makes aseismic ridges. No doubt there are some who would question our taxonomy and would want to call the species a form of crappie. Readers may find something fishy about this theory, but then there is at least something fishy about the other theories as well.

マントルプルームはどこにある？ World Map of Volcanoes



3 types of volcanoes



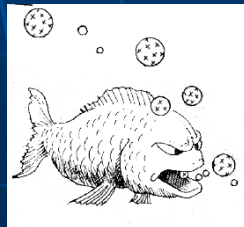
José F. Vigil and Robert I. Tilling



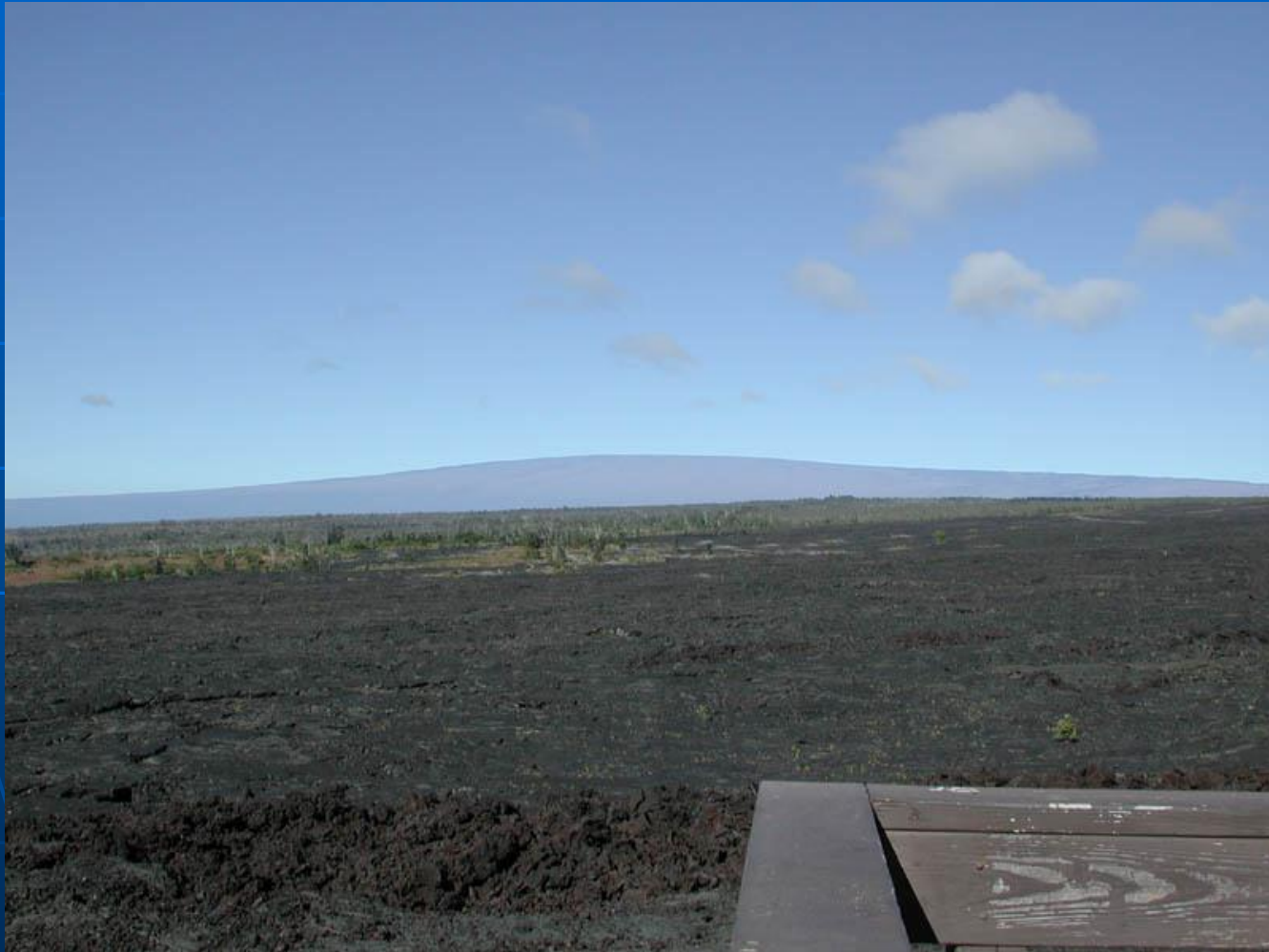
Smithsonian Institution



U.S. Naval Research Laboratory

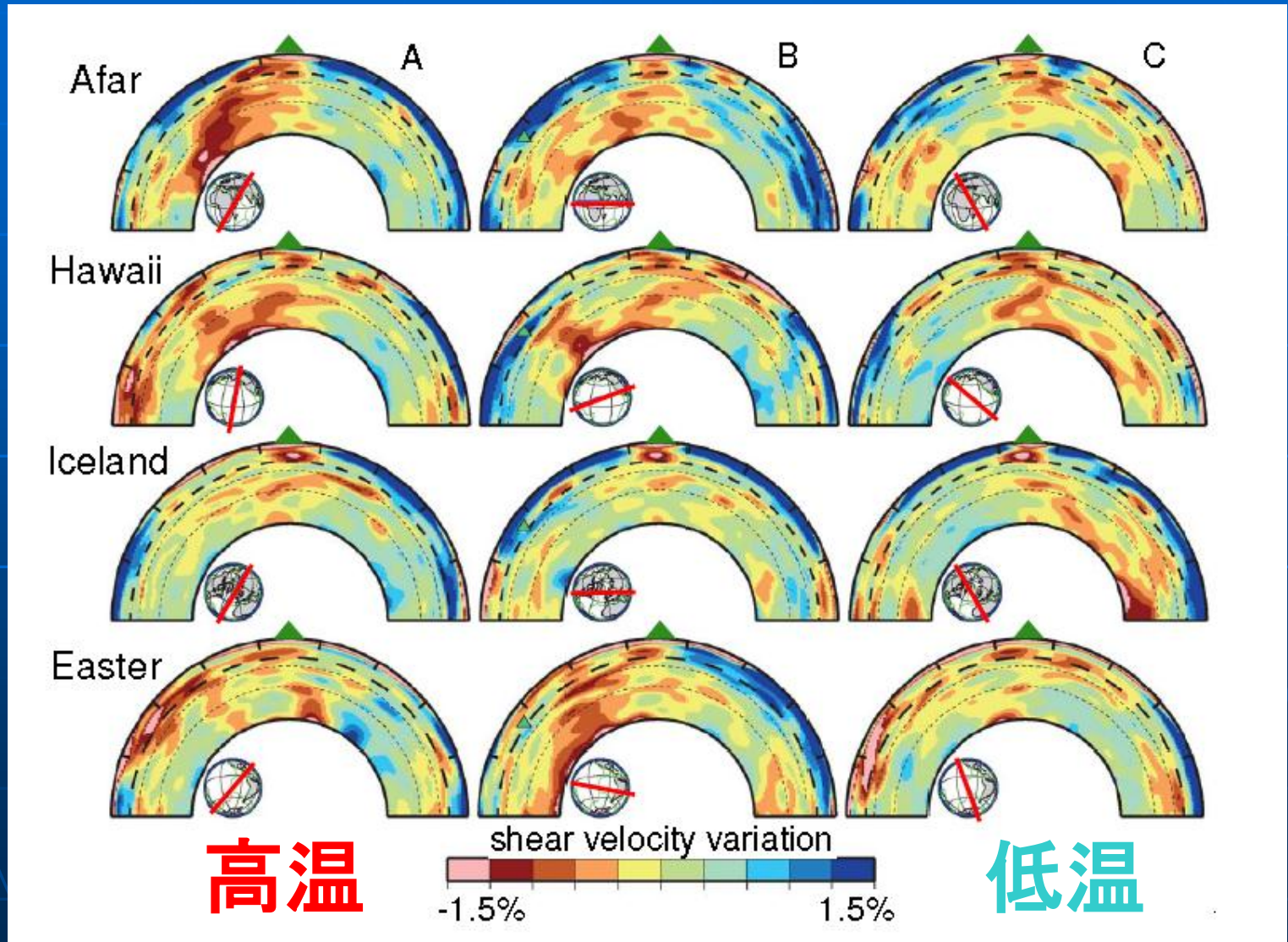


現在も活発な活動をするハワイ



2002, ハワイ電磁気観測(柳澤ら)

地球の断層画像：地震波トモグラフィ



Mantle Plume?

Viscosity $\sim 10^{21}$ - 10^{22} Pa s

Density $\sim 4 \times 10^3$ kg/m³

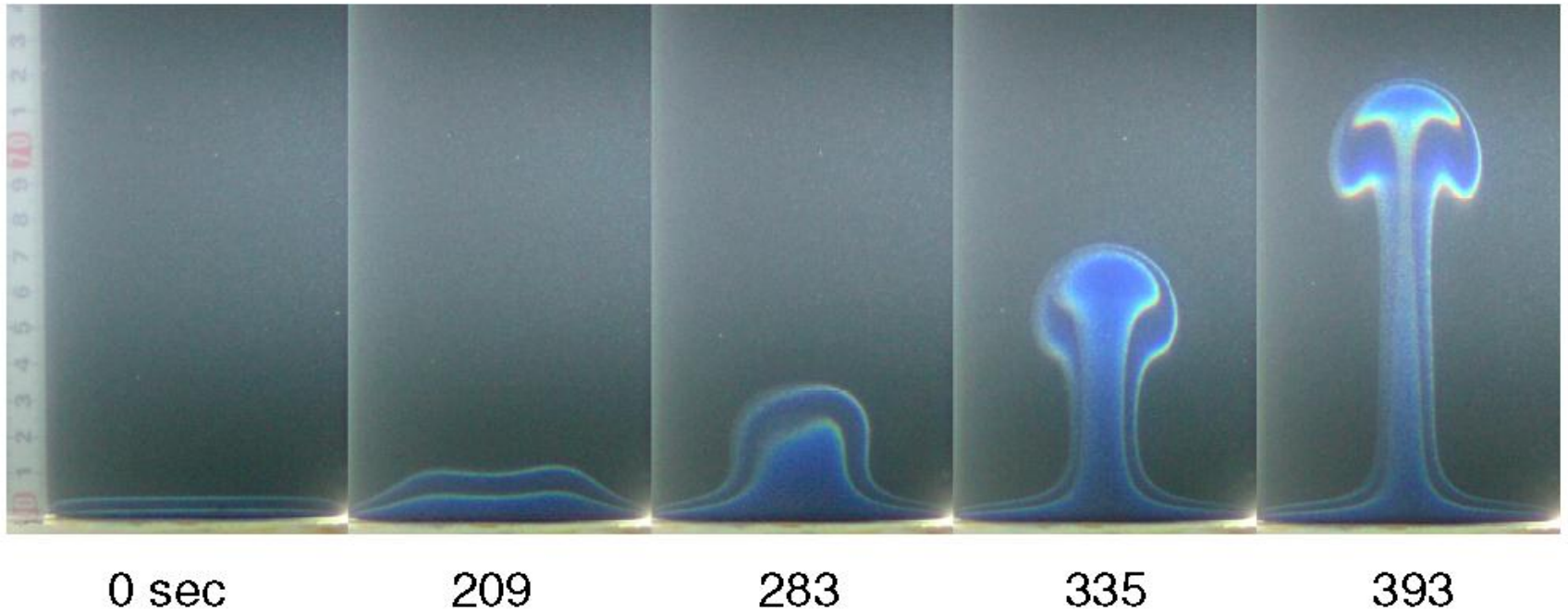
Velocity ~ 10 cm/yr

Plume size $\sim 10^2$ - 10^3 km

$Re = UD/\nu \sim 10^{-20} \ll 1$

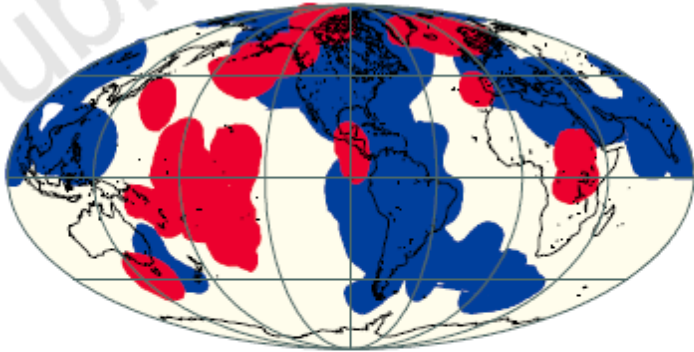


実験室で観る層流の熱出発プルーム (laminar thermal starting plume)

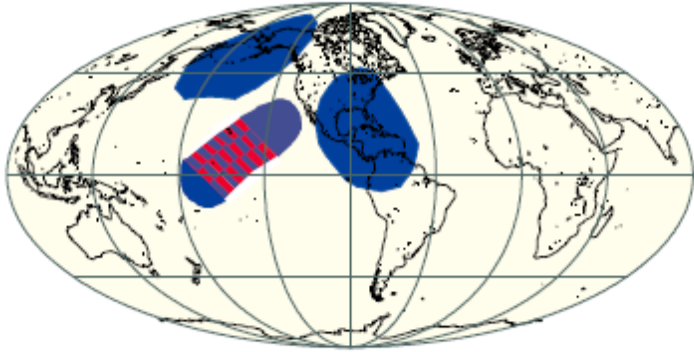


Compositional Heterogeneity in the lowermost mantle

a ULVZ: red - observed, blue - not observed



b D'' anisotropy: red - SV > SH, blue - SH > SV



c D'' shear discontinuity: blue - observed, red - not observed

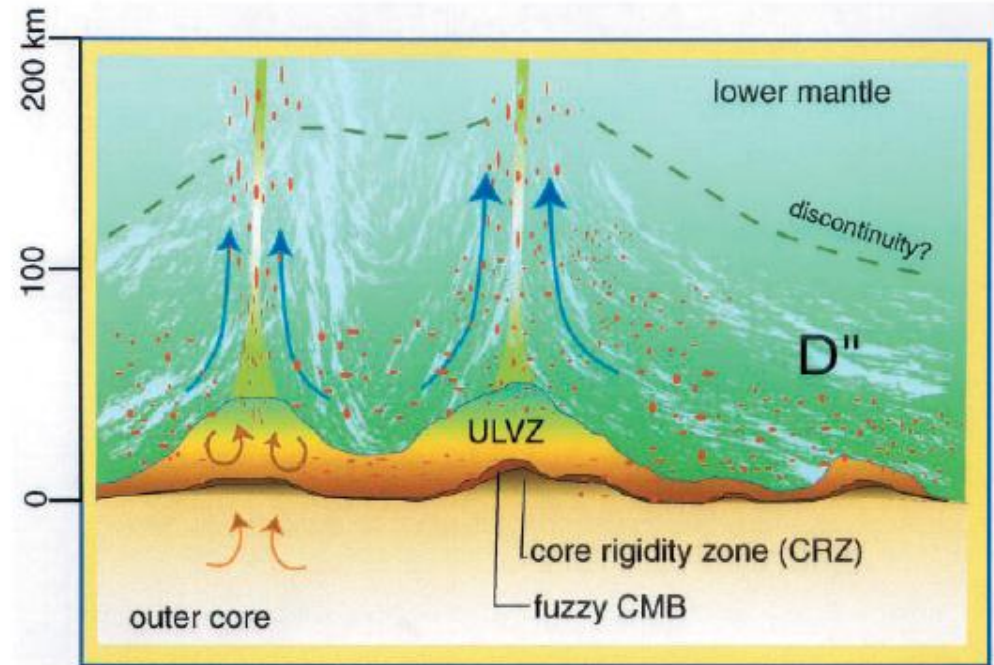
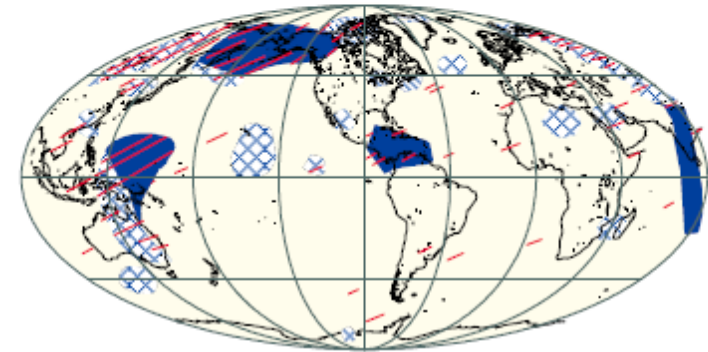
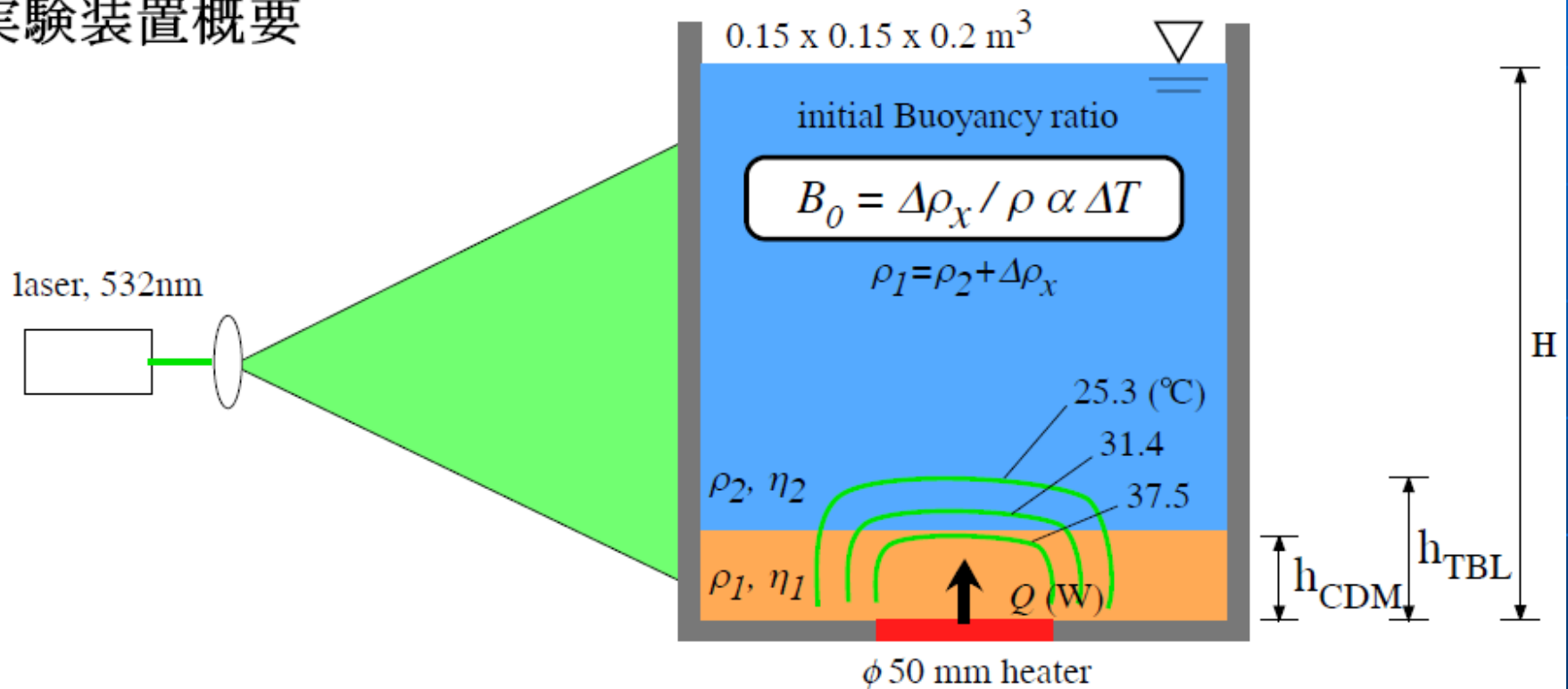


Figure 12 Schematic cartoon of the possible constituent CMB features beneath a warmer than average D'' region. This includes an ultra-low velocity zone of partial melt and chemical heterogeneity, a transitional or fuzzy CMB with underside pockets of nonzero rigidity, chemical and melt scatterers throughout D'', alignment of crystals, heterogeneity or melt in D'' to produce D'' anisotropy, and possibly roots of plumes.

Thermo-chemical plume experiments

実験装置概要



Schematic diagram showing our experimental tank containing sugar syrups ($\sim 4 \text{ Pa s}$, $\text{Re} \ll 1$). A thermal starting plume is generated by operating a circular plate heater ($\phi=50 \text{ mm}$, $6.2\text{-}25.6 \text{ W}$) placed at the bottom of the tank.

温度場の可視化

Thermochromic Liquid Crystals (TLCs)

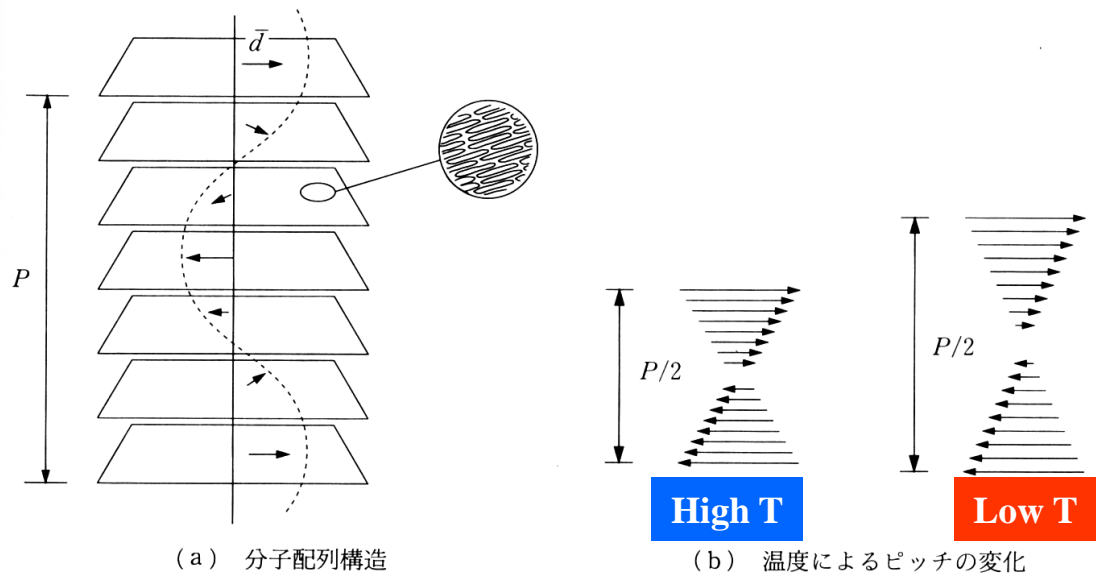


図 3.1 コレステリック液晶の構造

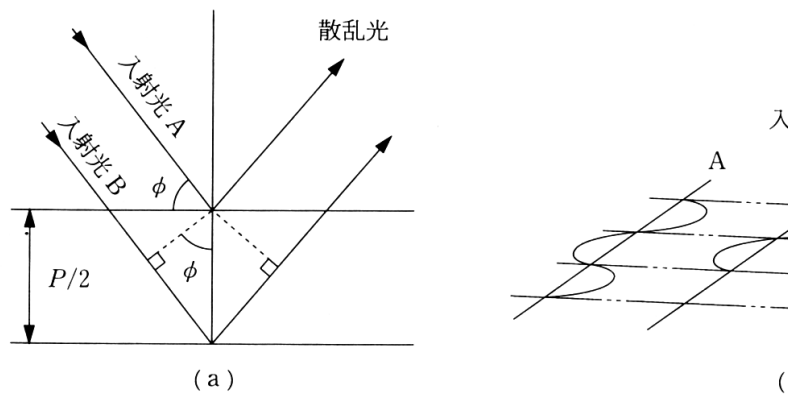
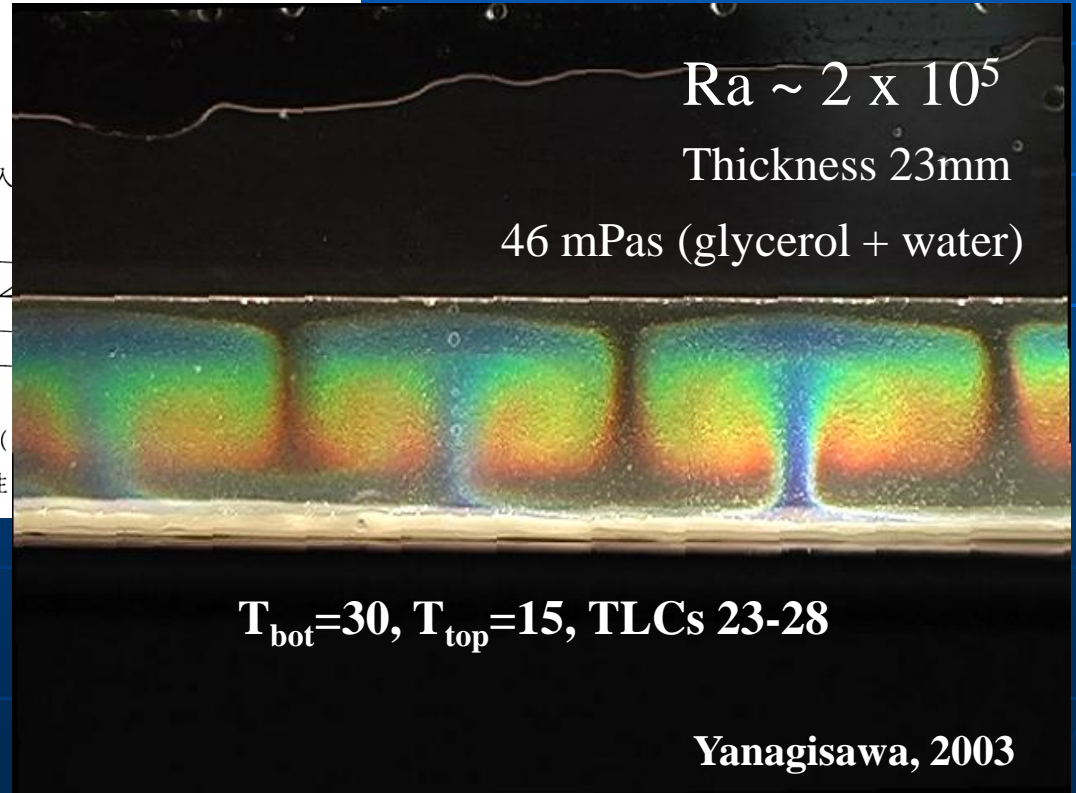
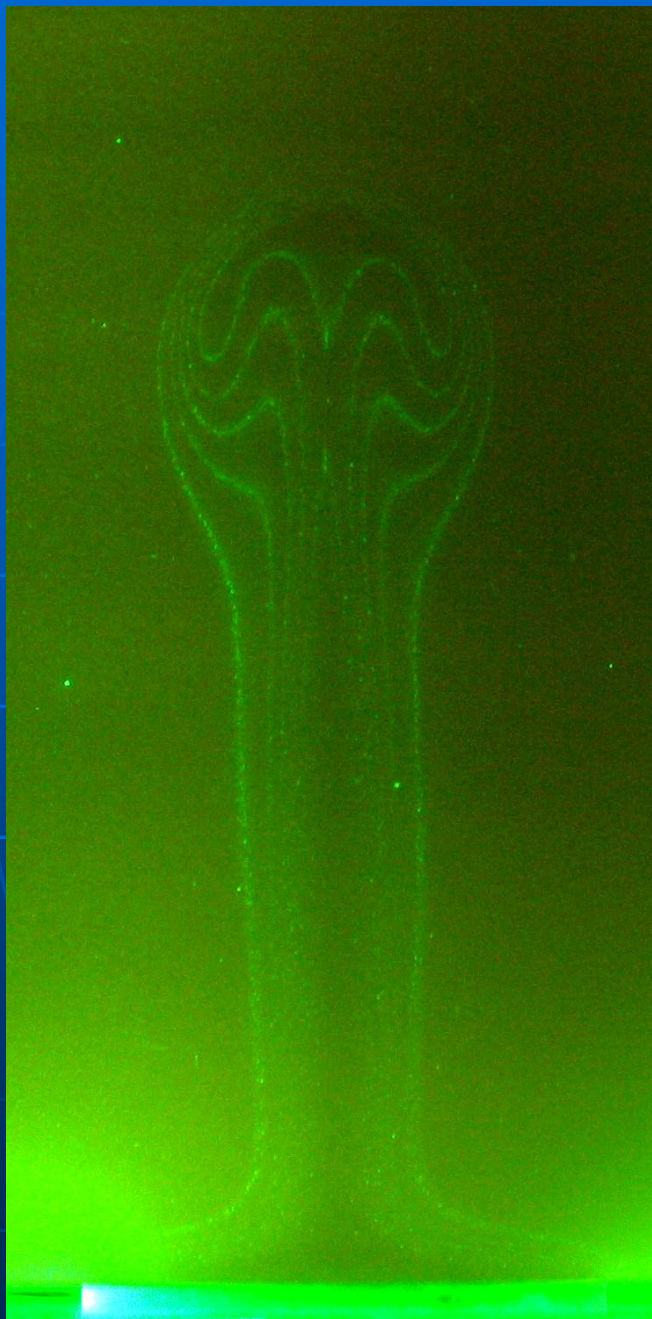


図 3.2 コレステリック液晶の反射散乱特性



Yanagisawa, 2003

複数の感温液晶と レーザーを用いた温 度場の可視化



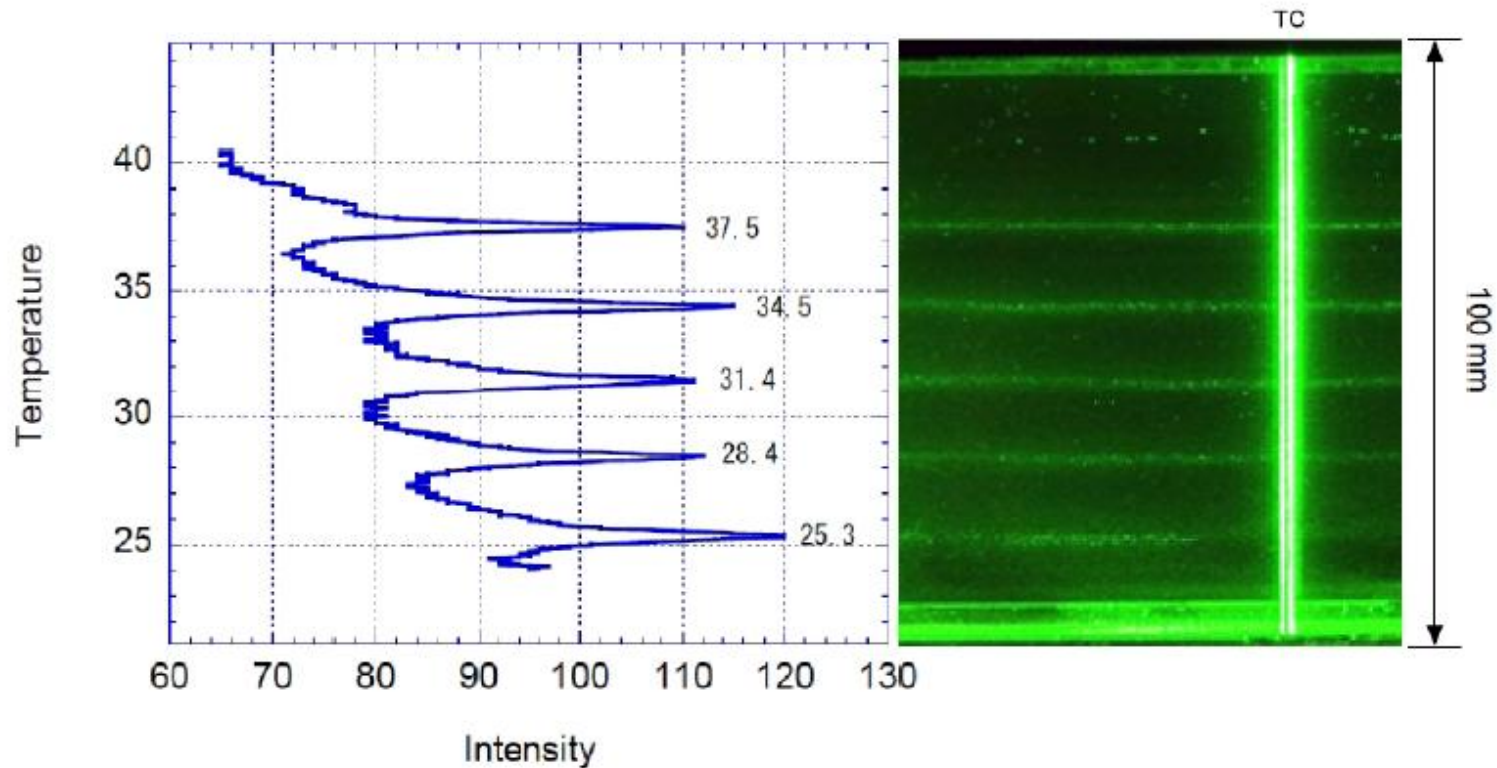
メリット

- ・光シート厚が薄い、指向性が良い
→シャープな画像

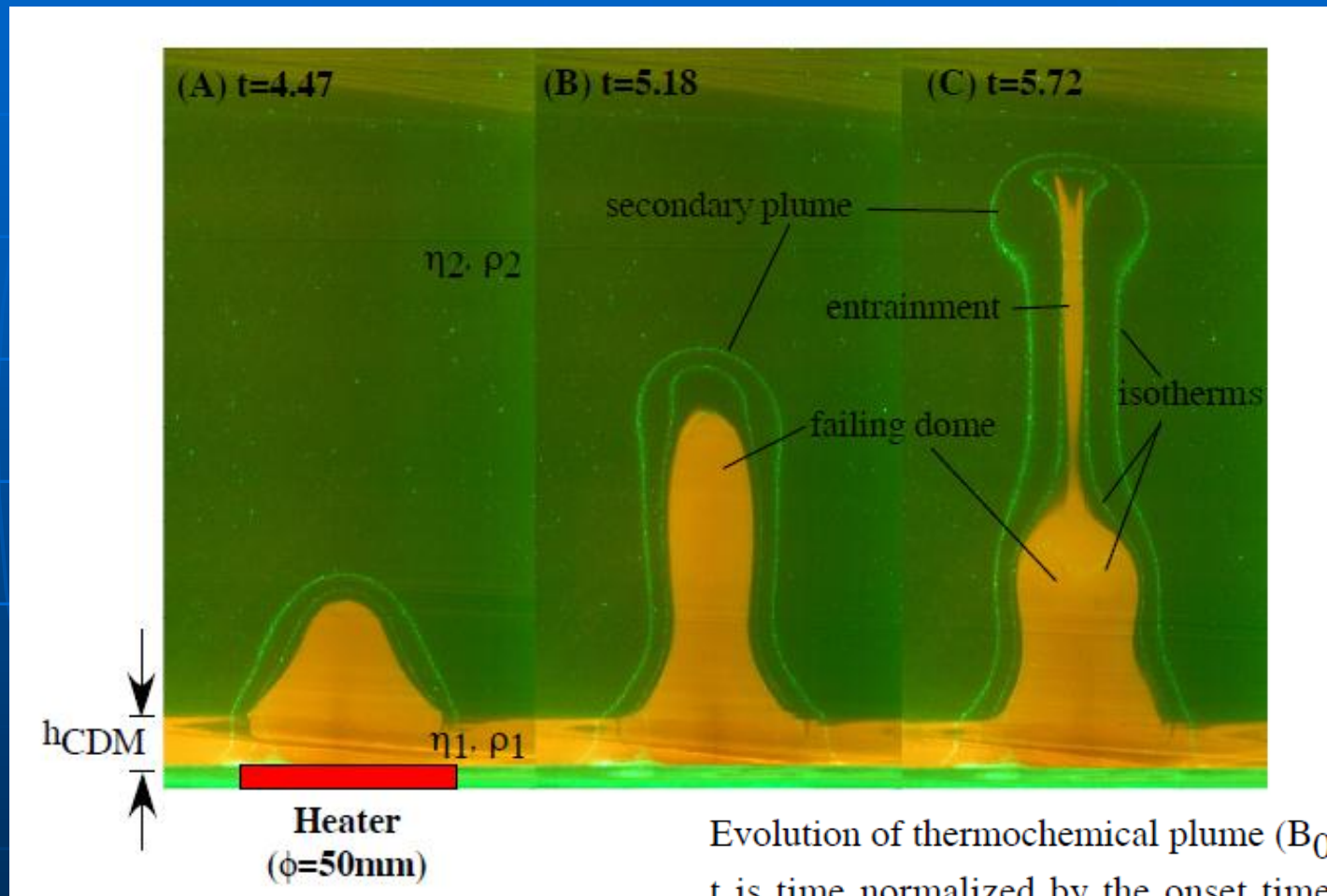
デメリット

- ・1種類の感温液晶で1本の等温線
→複数種の感温液晶を入れる

Temperature Calibration



Temperature & composition

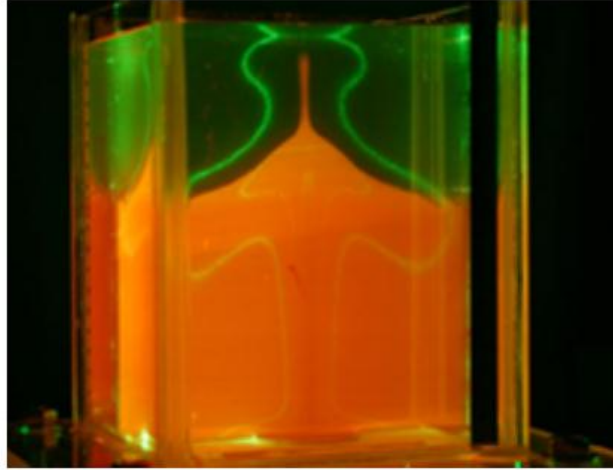


Evolution of thermochemical plume ($B_0=0.83$).

t is time normalized by the onset time of doming ($t_{\text{cr}} = 191$ sec). The isotherms are 25.3, 31.4, and 37.5 ° C. The compositionally dense material (CDM) is colored by Rhodamine B.

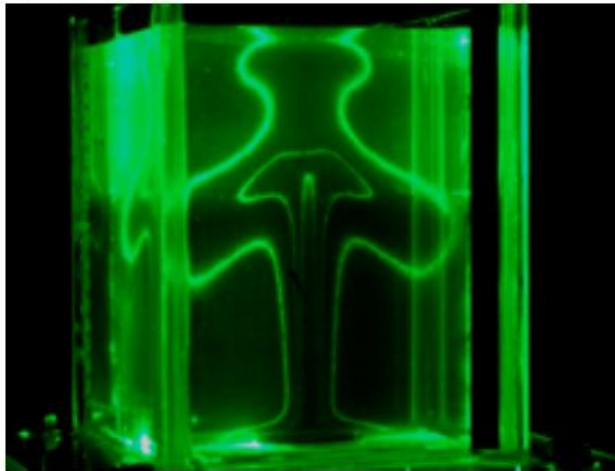
Visualization technique composition & temperature

(a)



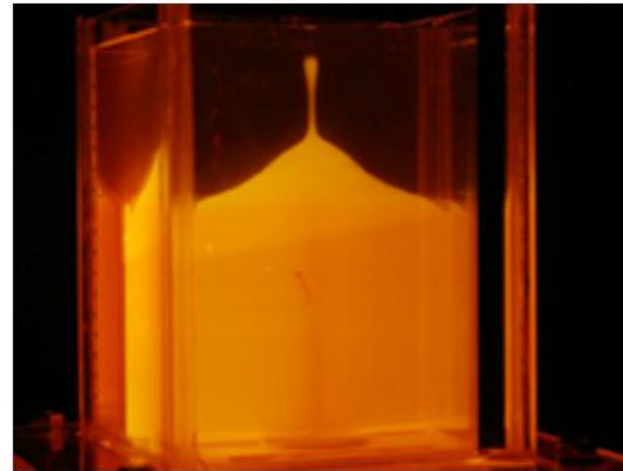
Original Image

(b)



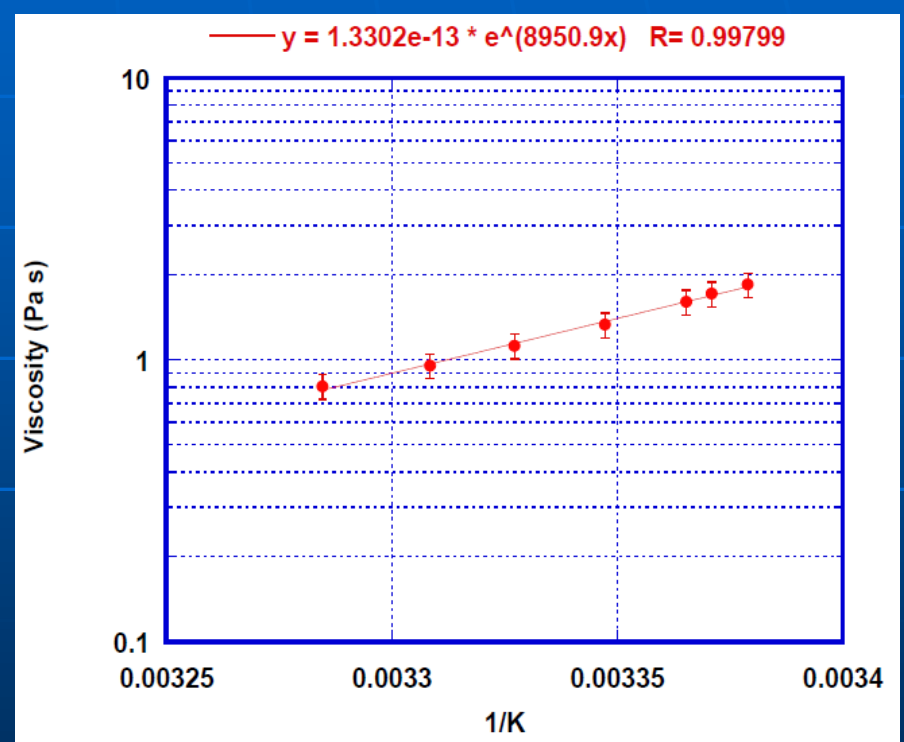
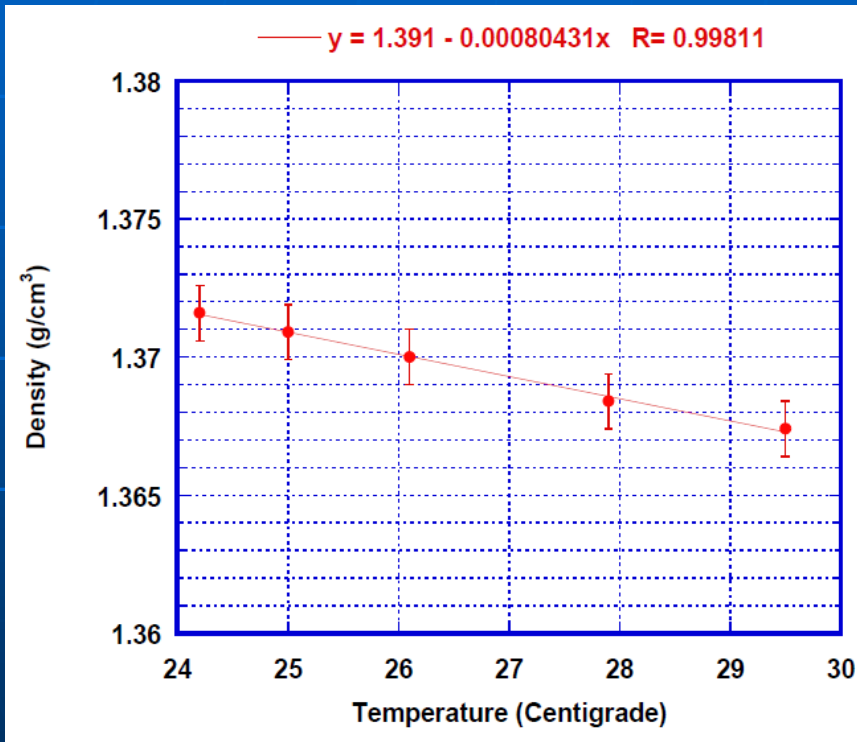
Temperature field
Isothermal lines
(TLCs + band pass filter)

(c)



Compositional field
(Fluorescent dye + cut-off filter)

Fluid properties (sugar syrup + water)



High T

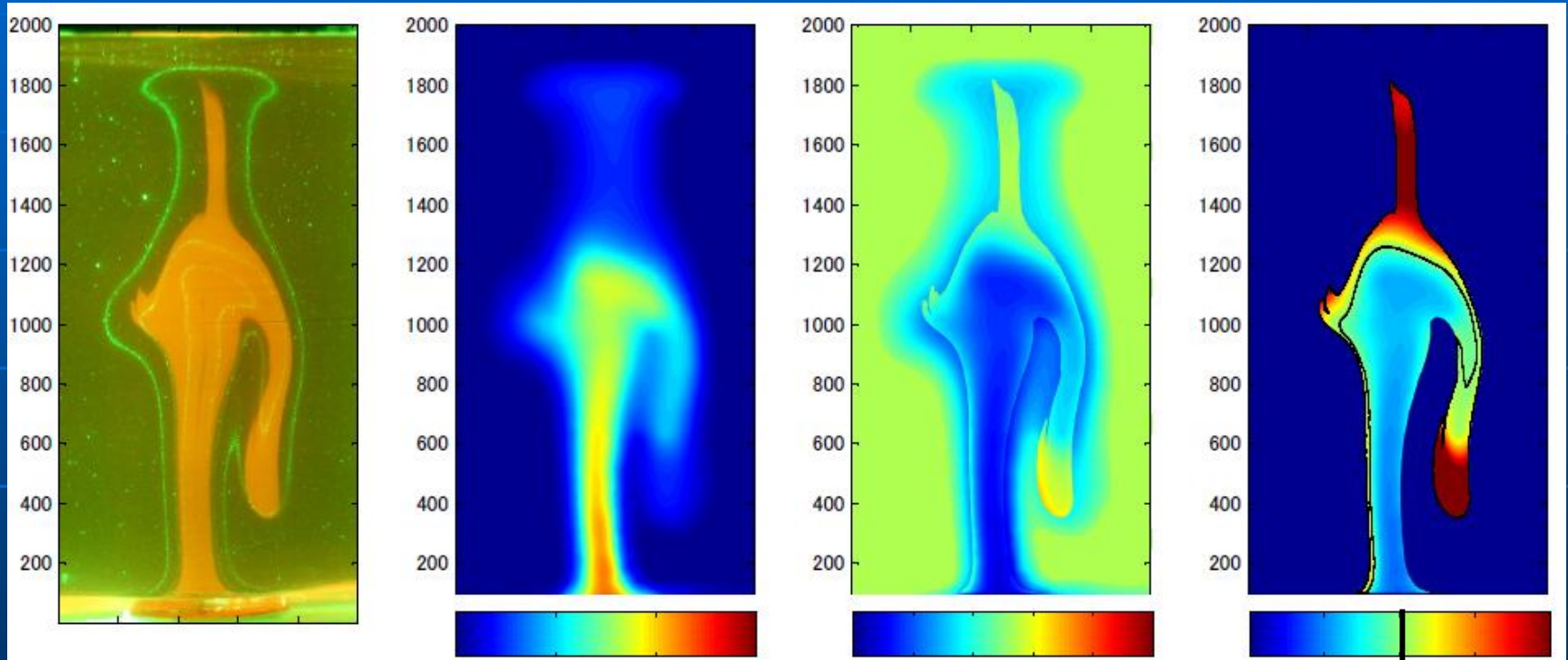
Anatomy of thermo-chemical plume

original

ΔT

viscosity

B_{local}



Initial $B_0 =$
0.54

0

[K]

30

0

[Pa s]

5

0

1

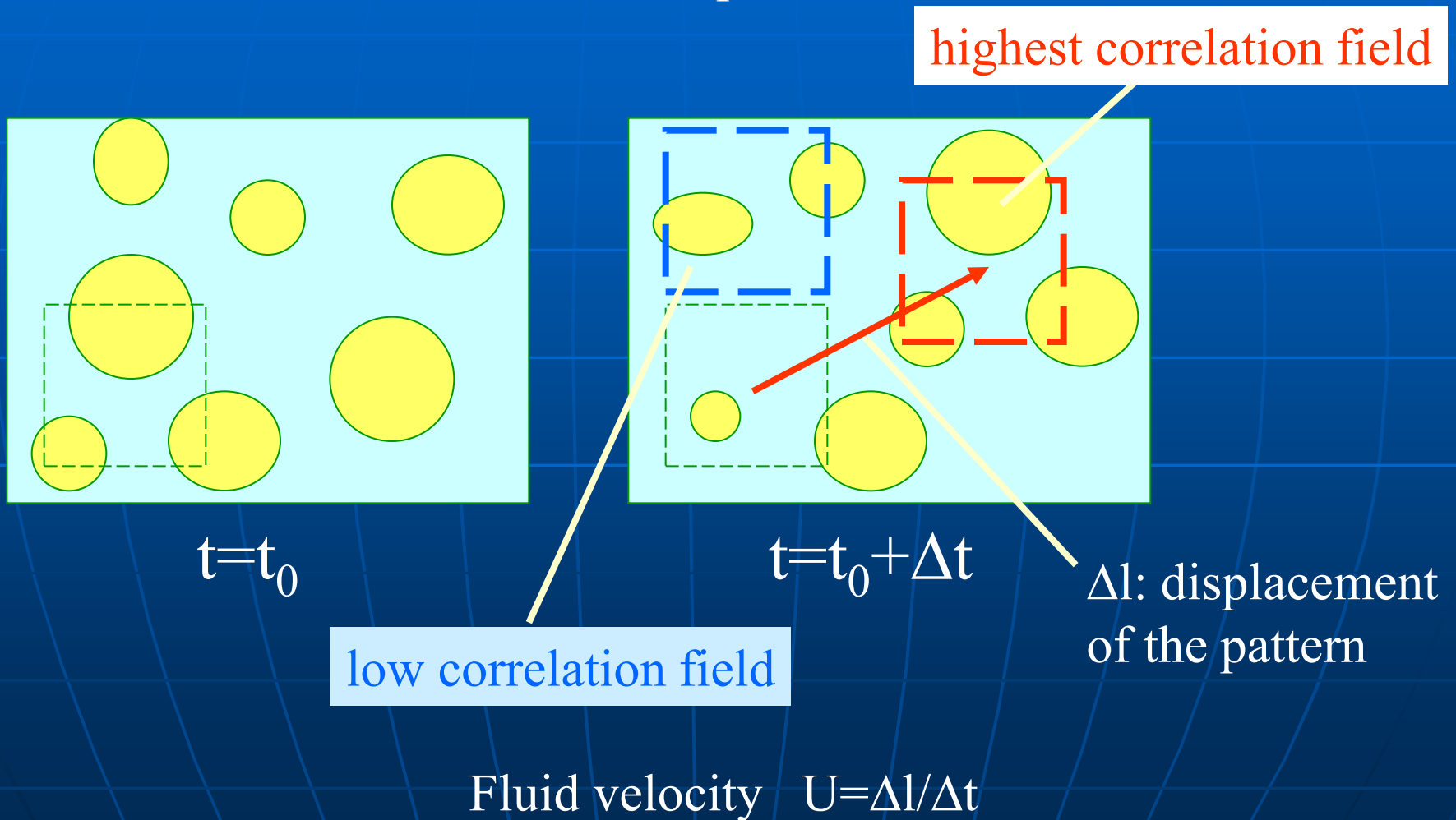
2

$$B_1(x,y,z) = \Delta\rho_X(x,y,z) / \rho\alpha [T(x,y,z) - T_0]$$

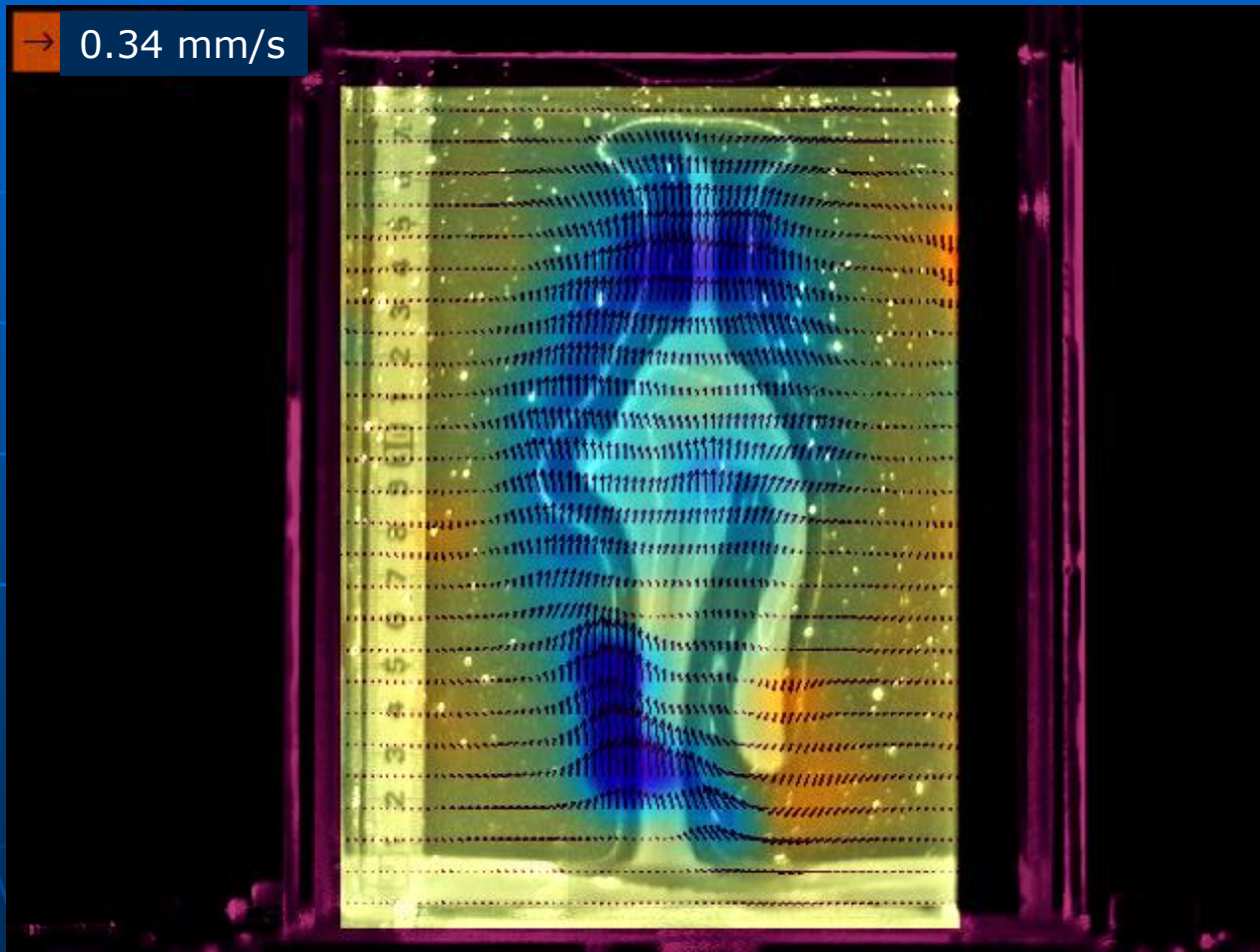
Particle Image Velocimetry (PIV)

Principle of PIV

Cross-correlation of a pair of two fields

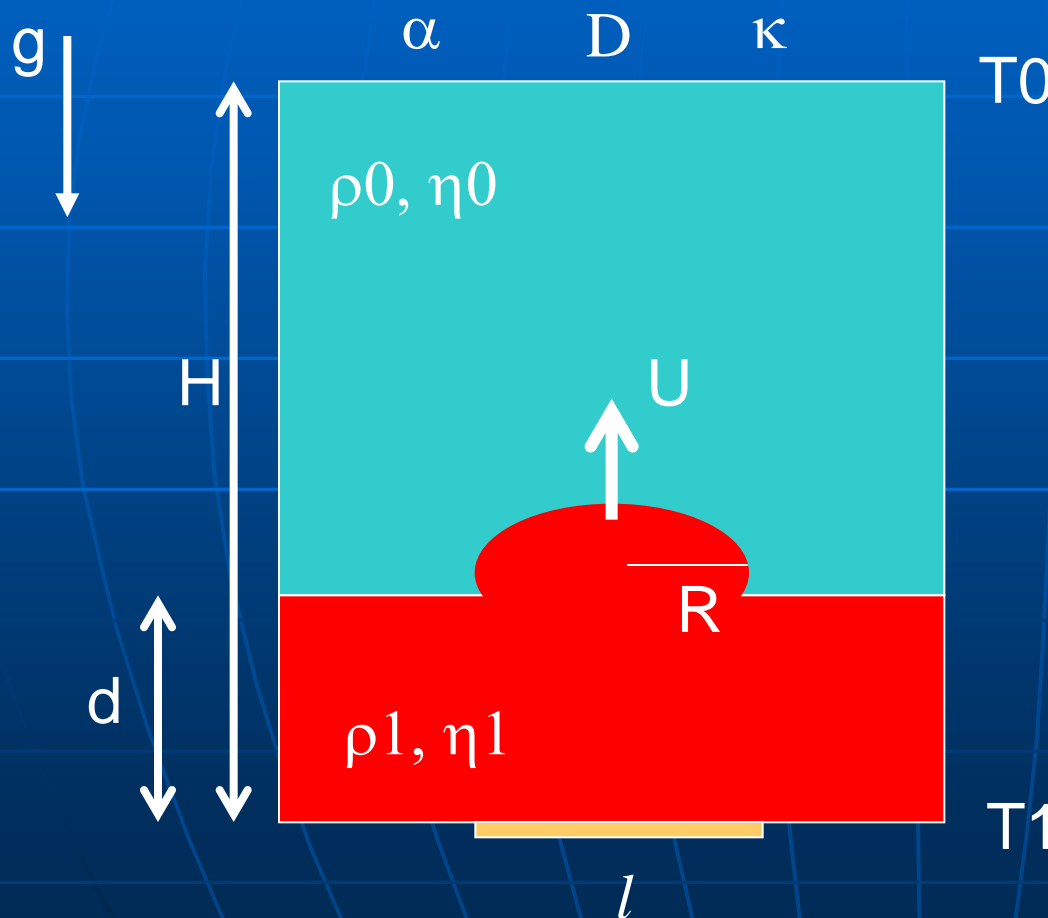


2次元の流速場 (PIV)



組成(密度)の異なる2層の熱対流現象で系を特徴付ける無次元パラメータは？

Buckingham's Pi theorem



$$Le = D / \kappa \ll 1$$

$$Pr_i = \nu_i / \kappa \gg 1$$

$$Ra_i = \alpha g \Delta T H_l^3 / \nu \kappa$$

$$\gamma = \nu_0 / \nu_1$$

$$a = H / d$$

$$B = \Delta \rho_c / \Delta \rho_T$$

$$Re = U R / \nu_l \ll 1$$

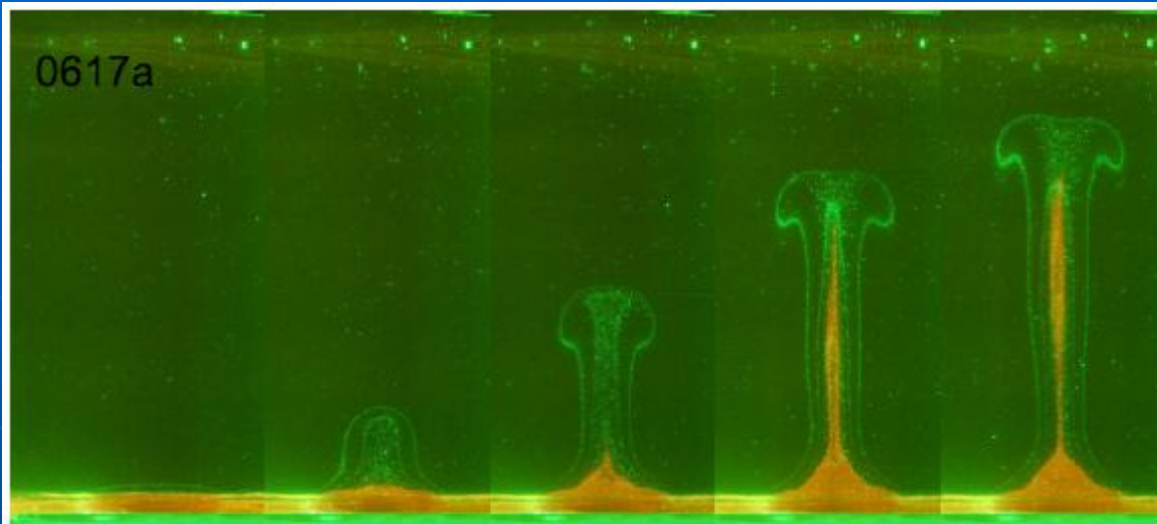
$$b = l / d$$

Parameters

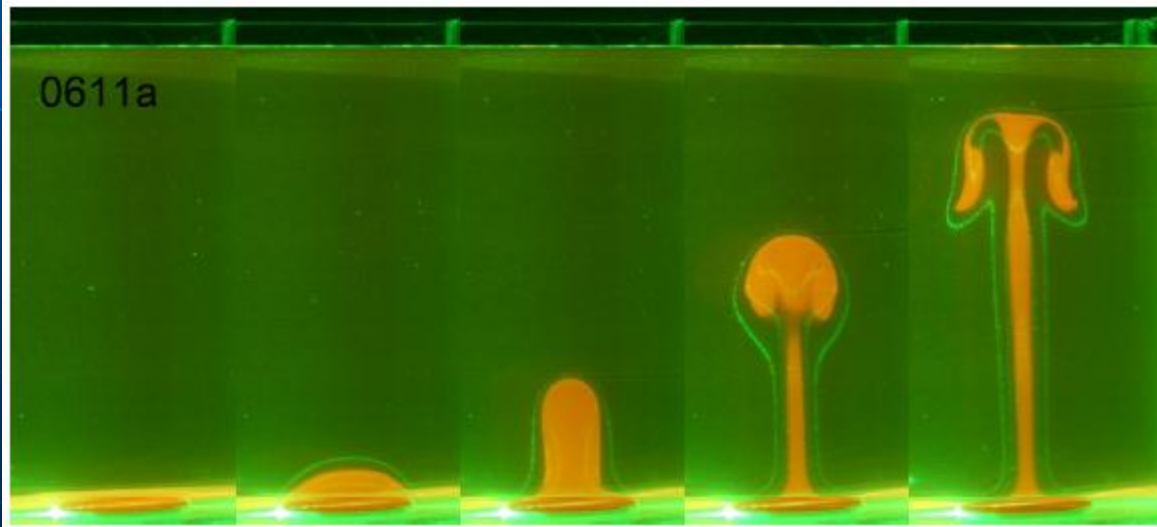
Table 1: Dynamics parameters for the laboratory experiments and for the Earth's mantle.

Parameters	Laboratory experiments	Mantle
$Ra = \alpha g \Delta T_{\text{eff}} H^3 / \kappa \nu_m$	$2.2 \times 10^6 - 9.6 \times 10^6$	$> 10^6$
$\gamma_P = \nu_m / \nu_{\text{hot}}$	5 - 150	$1-10^3 ?$
$\gamma_{\text{ref}} = \nu_m / \nu_{\text{ref}}$	0.4-1.8	$\sim 1 ?$
$a = H / h_{\text{CDM}}$	17-169	$> 10 ?$
B_0	0 - 1.30	0 - 10 ?
$h_{\text{TBL}} / h_{\text{CDM}}$	1 - 4.20	1-10 ?
$\Delta \rho_x / \rho$	0.0 - 2.35 %	0 - 10% ?

Buoyancy Ratio: $B_0 = \Delta\rho_x / \rho_0 \alpha \Delta T$



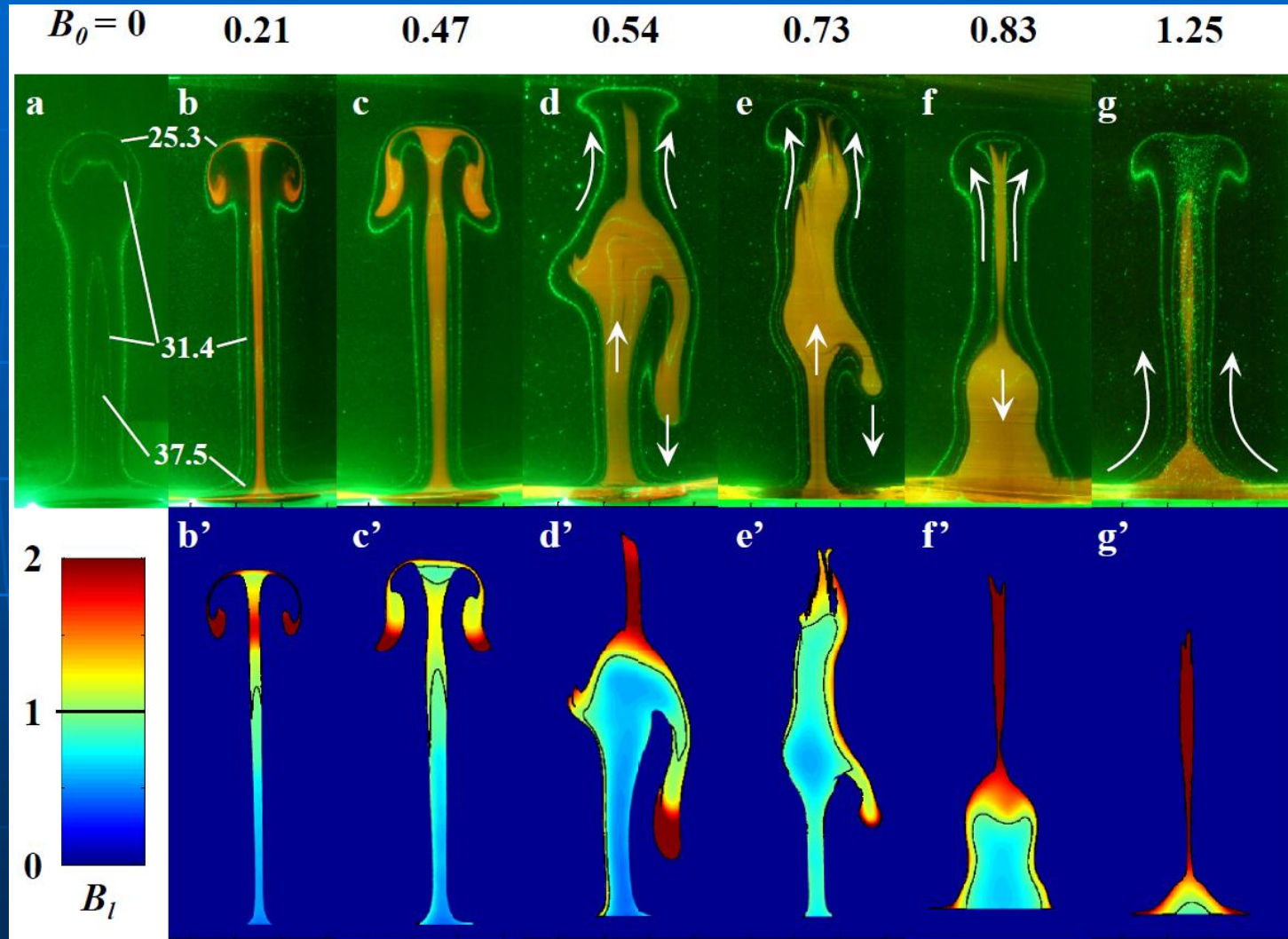
Large B_0 (1.25)
Stratified mode



Small B_0 (0.47)
Doming mode

Initial Buoyancy ratio

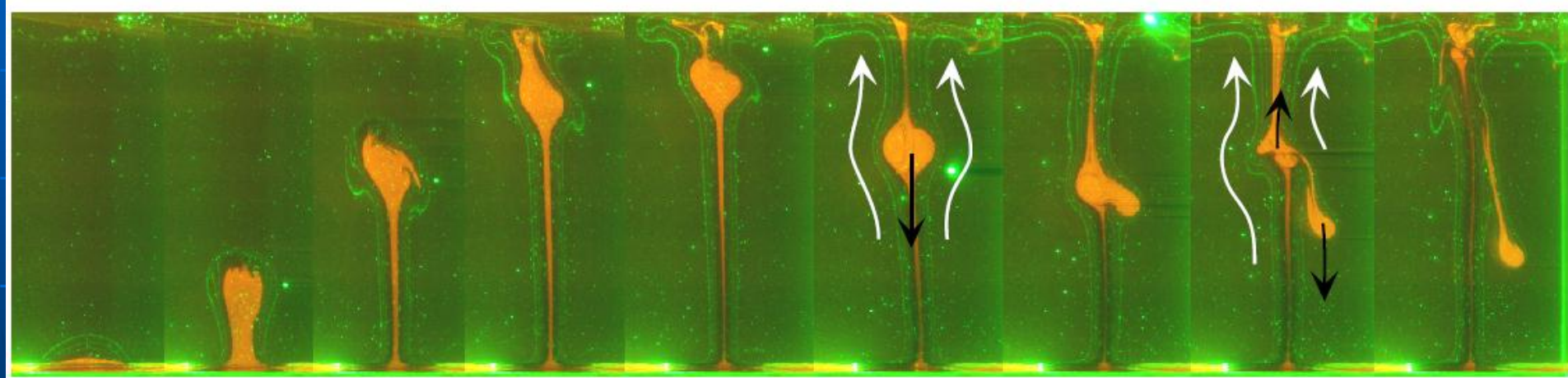
$$B_0 = \Delta\rho_x / \rho_0 \alpha \Delta T$$



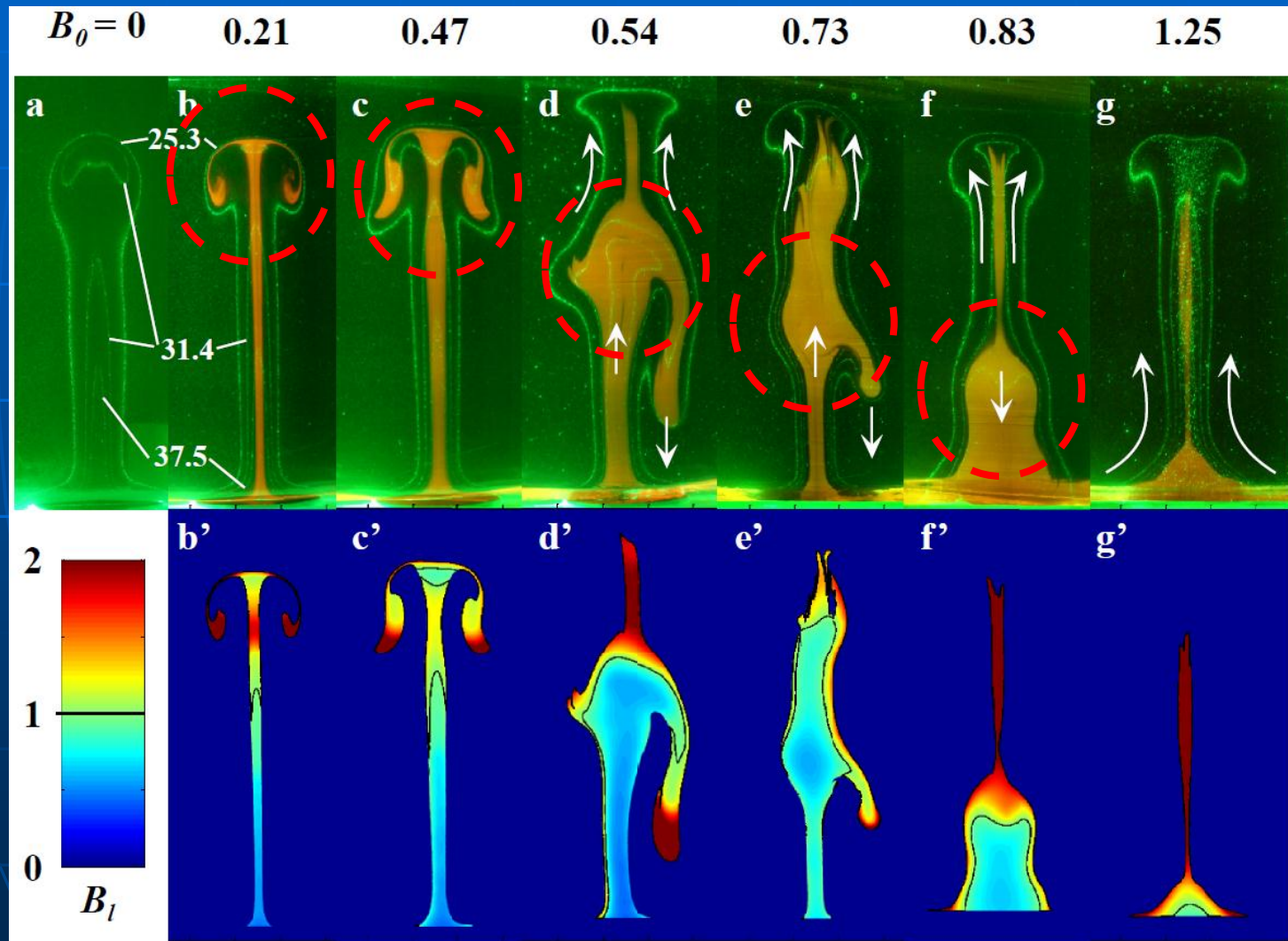
Time dependence

$B_0=0.67$, $t_{cr} = 66$ sec

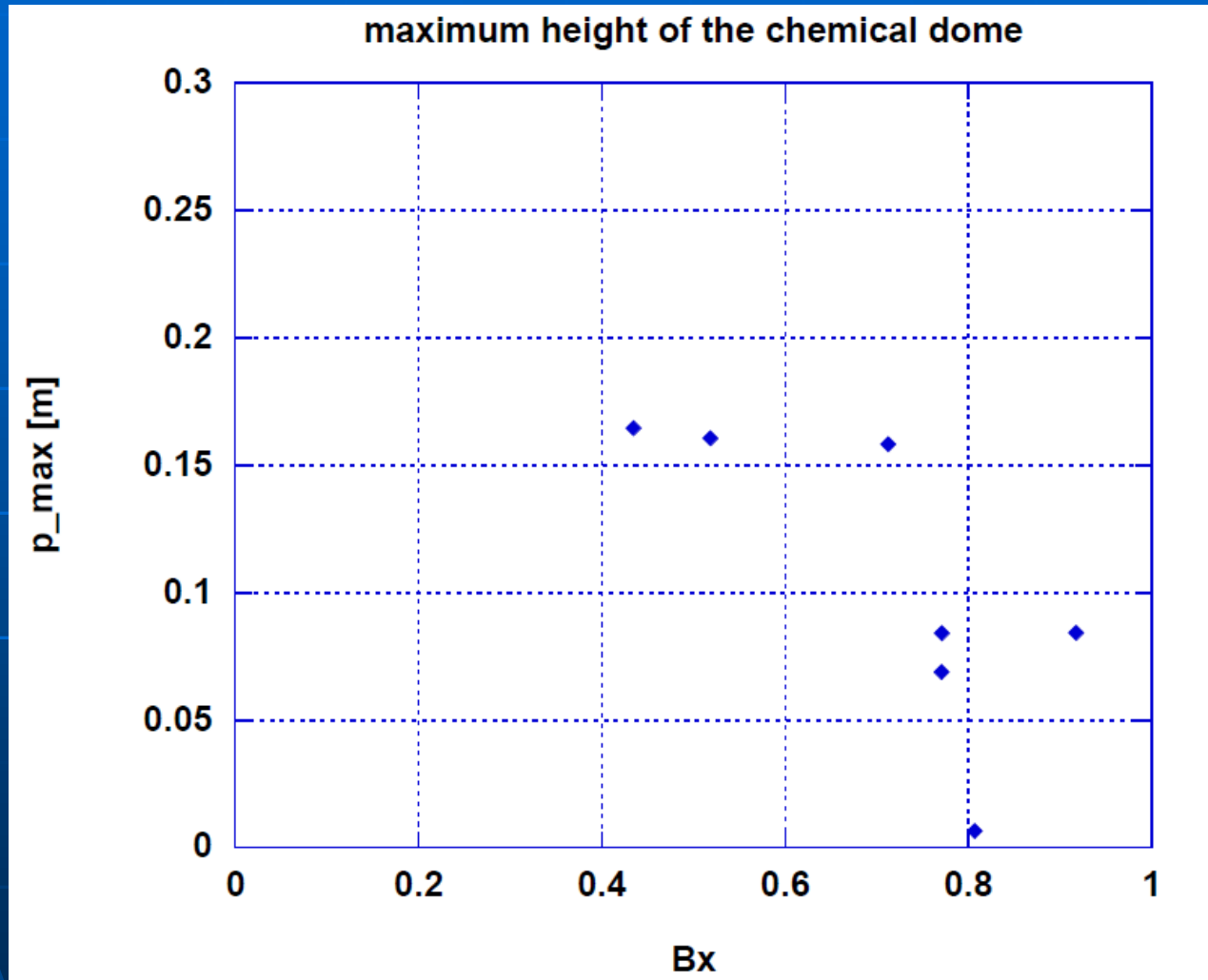
t=2.5 t=3.3 t=4.0 t=4.7 t=5.0 t=6.7 t=7.4 t=7.8 t=8.1



熱組成プルームの本体は どの高さまで上昇するのか？



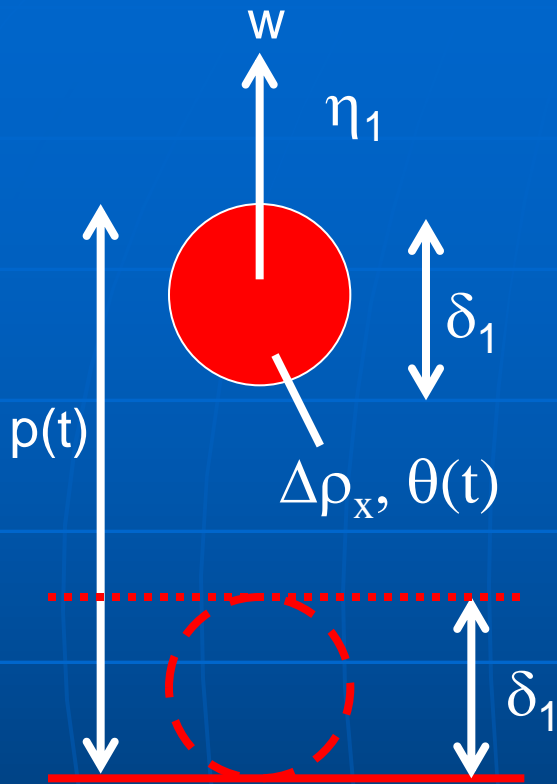
高温の組成プルーム頭部の最大高さ



$$Bx = (\rho_x - \rho_0) / \rho_x \alpha \Delta T$$

熱組成ブルームの最大高さ

Le Bars and Davaille, 2004をもとに



力のつりあい

$$\eta_1 \frac{w}{\delta_1^2} \sim (\alpha \rho \theta - \Delta \rho_x) g$$

pは高さ

$$\frac{dp}{dt} \sim w$$

冷却の効果

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} \sim -\kappa \frac{\theta}{\delta_1^2}$$

$$p(0) = 0$$

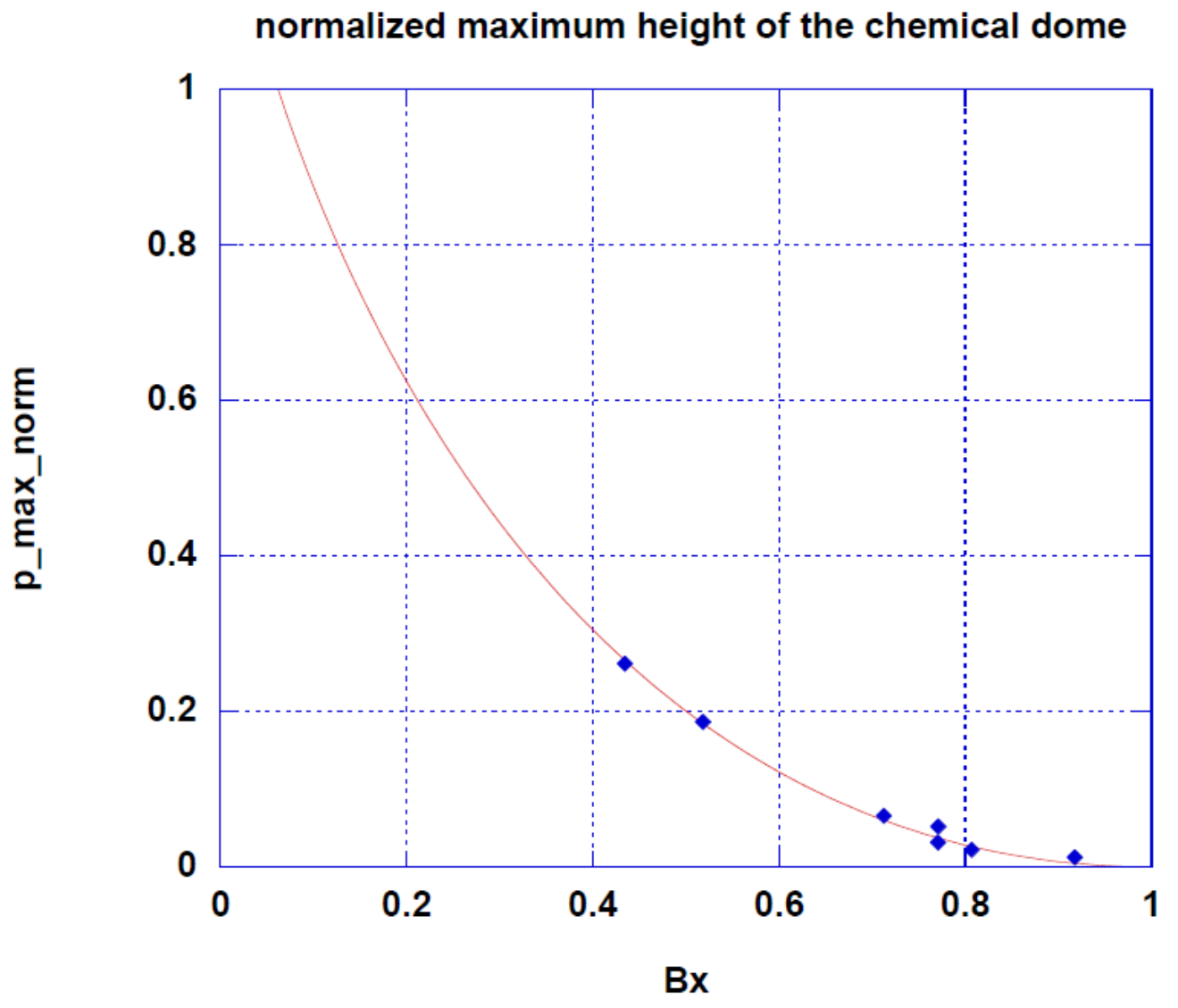
$$p(t) = C_1 \frac{\alpha \rho g \Delta T \delta_1^4}{\kappa \eta_1} \left(1 - \exp(-t/\tau) - B \frac{t}{\tau} \right)$$

$p(t_{max})$ のとき $w=0$

$$p(t_{max}) = C_1 \frac{\alpha \rho g \Delta T \delta_1^4}{\kappa \eta_1} (1 - B + B \ln(B))$$

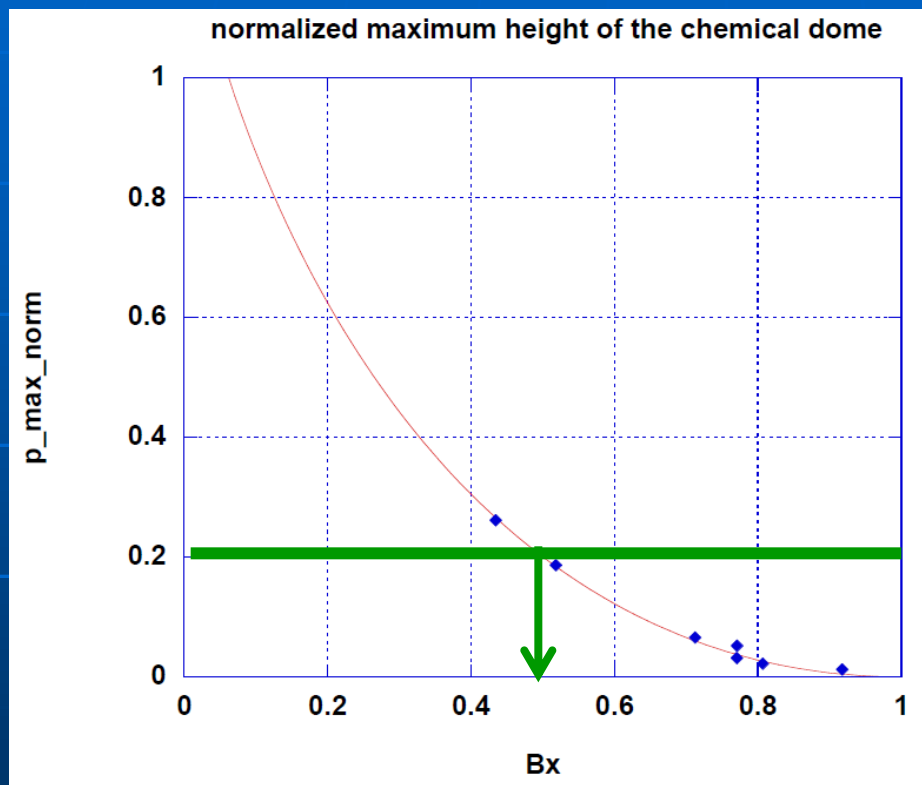
無次元高さ

$$p(t_{max}) / (\alpha \rho g \Delta T \delta_1^4 / \kappa \eta_1)$$



例えば、高温の熱組成プルーム頭部が、 地表まで到達するためには...

$$p(t_{max}) / (\alpha \rho g \Delta T \delta_1^4 / \kappa \eta_1)$$



$$\rho(t_{max}) \sim 3000 \text{ [km]}$$

$$\alpha \sim 3 \times 10^{-5} \text{ [1/K]}$$

$$g \sim 10 \text{ [m/s}^2\text{]}$$

$$\Delta T \sim 500 \text{ [K]}$$

$$\delta_1 \sim 100 \text{ [km]}$$

$$\kappa \sim 10^{-6} \text{ [m}^2\text{/s]}$$

$$\nu \sim 10^{18} \text{ [m}^2\text{/s]}$$

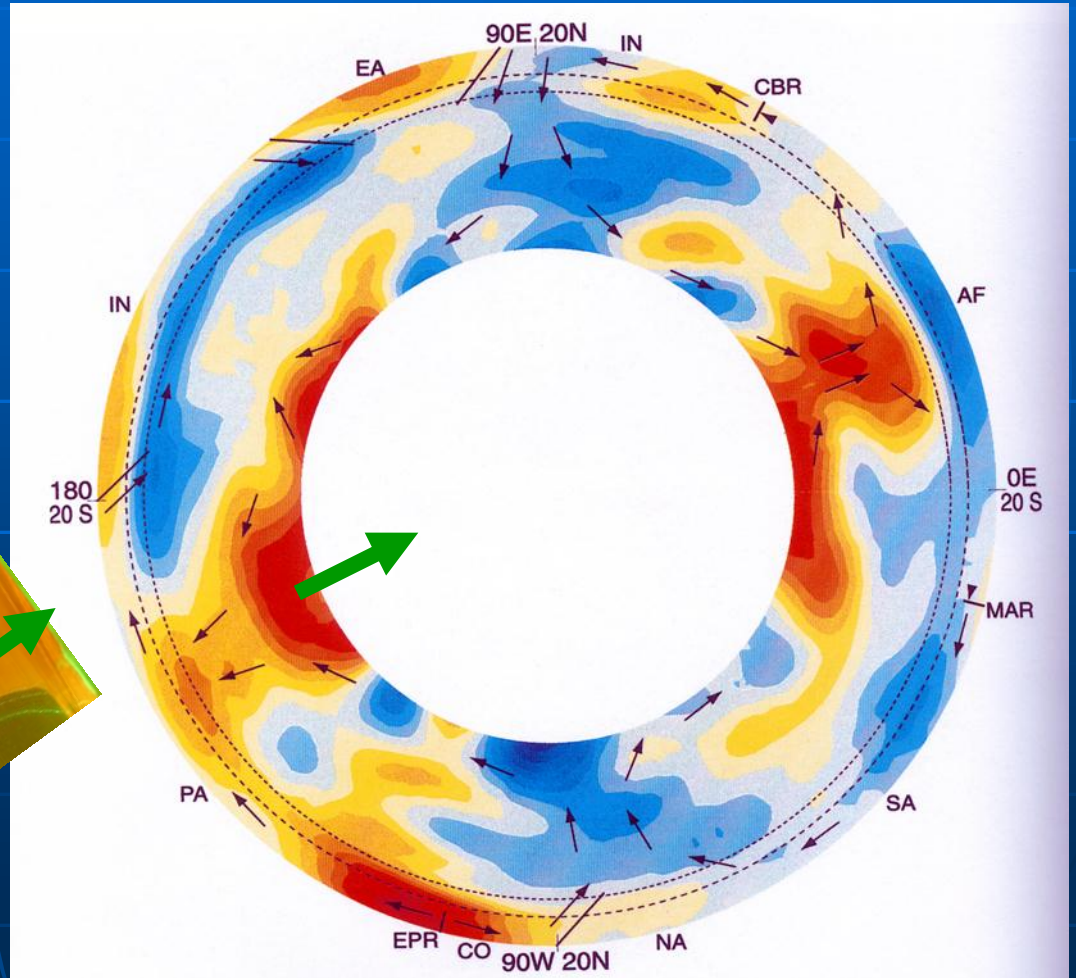
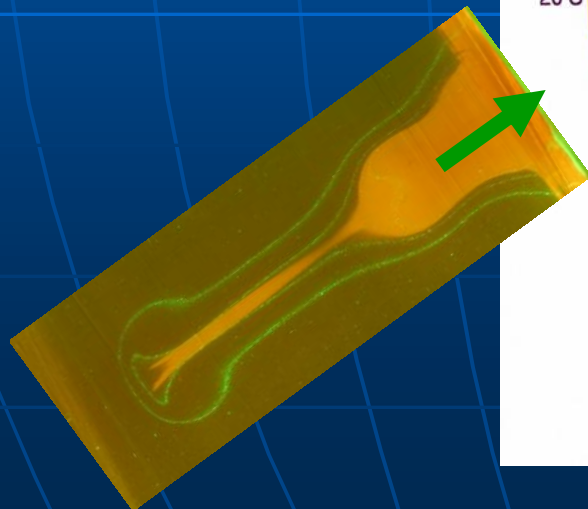
$$Bx = (\rho_x - \rho_0) / \rho_0 \alpha \Delta T \sim 0.5$$

$$(\rho_x - \rho_0) / \rho_0 \sim 0.75\%$$

結論

熱組成プルームの振る舞いは、、、

- Initial B ratio
- Time



昔は意志が通じあっていたのにね。。。。

地表

CMB

小樽の雪祭りより