

# 液中における二次元レイリー・ベナル対流に対する非オーバーベック・ブジネスク影響 Non-Oberbeck-Boussinesq effect on two-dimensional Rayleigh-Bénard convection in liquids

○杉山 和靖, 東大工, 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, E-mail: sugiyama@fel.t.u-tokyo.ac.jp

Enrico CALZAVARINI, Laboratoire de Physique de École Normale Supérieure de Lyon and CNRS, France  
Siegfried GROSSMANN, Fachbereich Physik der Philipps-Universität, Germany

Detlef LOHSE, Physics of Fluids Group, Department of Applied Physics, J.M. Burgers Centre for Fluid Dynamics, Twente University, The Netherlands

Kazuyasu SUGIYAMA (Dept. of Mech. Eng., the Univ. of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo)

Non-Oberbeck-Boussinesq (NOB) effects in the two-dimensional Rayleigh-Bénard turbulence for water and for glycerol are numerically investigated by means of direct numerical simulations. The temperature dependences of the viscosity, the thermal diffusivity and the thermal expansion coefficient are fully considered. The center temperature  $T_c$ , and the deviation from the Oberbeck-Boussinesq (OB) Nusselt number  $Nu_{NOB}/Nu_{OB}$  are on the focus of the present study. The Rayleigh number  $Ra$  and the temperature difference  $\Delta$  between top and bottom plates are varied up to  $Ra = 10^8$  and  $\Delta = 60\text{K}$ . Our numerical results of  $T_c$  and  $Nu_{NOB}/Nu_{OB}$  are consistent with the available experimental data. In addition,  $T_c$  is found to be well predicted by the Prandtl-Blasius Boundary layer theory and weakly dependent on  $Ra$  for fixed  $\Delta$ . To quantify the physical mechanism to alter the Nusselt number from the OB to the NOB for fixed  $Ra$  and  $\Delta$ , we decompose the Nusselt number ratio  $Nu_{NOB}/Nu_{OB}$  as the product of two effects: (1) the change of the thermal boundary layer thickness and (2) the changes of  $T_c$  and thermal diffusivity at top and bottom walls. This decomposition indicates that while for glycerol  $Nu_{NOB}/Nu_{OB}$  is governed by the first effect, for water it is by the second one.

多くの Rayleigh-Bénard (RB) 対流の研究では、浮力項における密度が温度に線形的に変化する以外には、媒質の物性値が温度に依存しないとす Oberbeck-Boussinesq (OB) 近似が用いられる。この OB 近似は、上下壁の温度差  $\Delta$  が小さく、物性値の温度依存性が弱いとみなせる場合に妥当性がある。しかしながら、 $\Delta$  が大きい条件では、非 OB (Non-OB; 以下 NOB と表記) 影響が現れることが想定できる。これまで、NOB 影響に関する実験的、理論的研究が行われており、OB 近似を前提とした統計値、スケーリング則の変調について考察が行われてきた。また、著者らは、液体を媒質二次元 RB 乱流系を対象として、NOB 影響を直接数値計算により調査してきた (1)–(3)。NOB の影響による熱流束の変調について述べる。(i) 壁面上での平均温度勾配から求まる温度境界層厚さ  $\lambda_t^{sl}$  の関数  $F_\lambda = 2\lambda_{OB}^{sl}/(\lambda_t^{sl} + \lambda_b^{sl})$  と、(ii) 中心高さ温度  $T_c$  の関数  $F_\Delta = (\kappa_t(T_c - T_t) + \kappa_b(T_b - T_c))/(\kappa_m \Delta)$  (ここで、 $\kappa = \Lambda/(\rho_m c_{p,m})$ ) であり、下付き添字  $t, b$  は、それぞれ、上 (top), 下 (bottom) の壁面を表す) を用いると、ヌッセルト数比は、 $Nu_{NOB}/Nu_{OB} = F_\lambda \cdot F_\Delta$  として与えられる。 $Ra = 10^8$  の条件における、 $Nu_{NOB}/Nu_{OB} (= F_\lambda \cdot F_\Delta)$ ,  $F_\lambda$ ,  $F_\Delta$  と  $\Delta$  の関係を図 1 に示す。水の場合、直接数値計算結果は、高レイリー数 ( $10^8 \leq Ra \leq 10^{10}$ ) で行われた実験 (4) とよく一致する。水の場合、NOB-BL 理論において現象論的に仮定された  $F_\lambda \approx 1$  の関係は良い近似である。 $F_\lambda \approx 1$  が成立することは、NOB 影響によるヌッセルト数の変調が、主に、中心高さ温度  $T_c$  の変化に従うことを表す。この水の結果とは異なり、グリセロールの場合、 $F_\lambda$  は  $\Delta$  に強く依存し、NOB 影響によるヌッセルト数の変調は、主に、温度境界層厚さの変化に従う。

## 謝辞

本研究は、NWO FOM, CNRS の研究プログラムの支援を受けました。

## 参考文献

- (1) Sugiyama, K., Calzavarini, E., Grossmann, S. and Lohse, D., "Non-Oberbeck-Boussinesq effects in two-dimensional

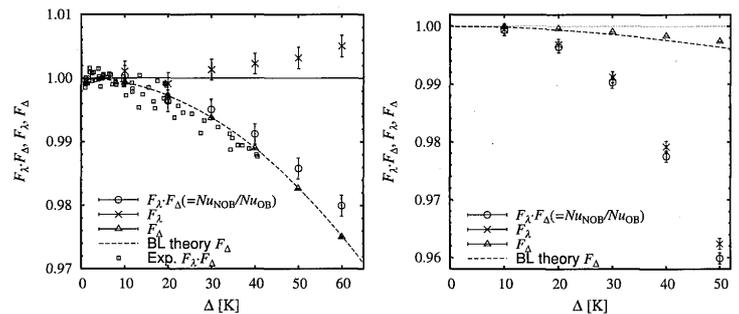


Fig. 1 Nusselt number ratio  $Nu_{NOB}/Nu_{OB} = F_\lambda \cdot F_\Delta$ ,  $F_\lambda$ , and  $F_\Delta$  versus  $\Delta$  for water (upper) and for glycerol (lower), both at fixed  $Ra = 10^8$  and  $T_m = 40^\circ\text{C}$ . Symbols  $\circ$ ,  $\times$  and  $\triangle$  show the DNS results. Lines show the NOB-BL prediction. On right panel also the experimental data for water ( $\square$ ) are shown (4).

Rayleigh-Bénard convection in glycerol," *Europhys. Lett.*, **80** (2007) 34002.

- (2) Ahlers, G., Calzavarini, E., Fontenele Araujo, F., Funfschilling, D., Grossmann, S. and Lohse, D. and Sugiyama, K., "Non-Oberbeck-Boussinesq effects in turbulent thermal convection in ethane close to the critical point," *Phys. Rev. E*, **77** (2008) 046302.  
 (3) Sugiyama, K., Calzavarini, E., Grossmann, S. and Lohse, D., "Flow organization in two-dimensional non-Oberbeck-Boussinesq Rayleigh-Bénard convection in water," *J. Fluid Mech.*, (2009, in press).  
 (4) Ahlers, G., Brown, E., Fontenele Araujo, F., Funfschilling, D., Grossmann, S. and Lohse, D., "Non-Oberbeck-Boussinesq effects in strongly turbulent Rayleigh-Bénard convection," *J. Fluid Mech.*, **569** (2006) pp. 409–445.