

全球に適用可能な非静力学大気力学コアの定式化

A Non-hydrostatic Formulation of an Atmospheric Dynamical Core Applicable to the Global Domain

榎本剛・莊漢明⁽¹⁾

Takeshi ENOMOTO and Hann-Ming Henry JUANG⁽¹⁾

(1) 米国海洋大気局地球環境予測センター

(1) National Centers for Environmental Prediction, National Oceanic and Atmospheric Administration, USA

Synopsis

A simple and stable non-hydrostatic formulation is proposed and tested using the National Centers for Environmental Prediction Mesoscale Spectral Model (NCEP MSM) in idealized experiments. MSM uses double-Fourier series for horizontal discretization and a vertical coordinate based on the hydrostatic pressure. MSM requires the hydrostatic temperature specified externally or evolved internally. The new formulation uses the horizontally averaged temperature as the hydrostatic temperature to enable its applications to the global domain without an additional prognostic variable. The modified MSM runs stably in the warm and cold bubble experiments. The noise in the perturbation pressure indicative of sound waves may be controlled by the size of the horizontal average of the temperature.

キーワード: Euler方程式系, 音波, 鉛直座標, スペクトル変換法

Keywords: Euler equations, sound wave, vertical co-ordinate, spectral transform method

1. はじめに

静力学近似を用いた大気大循環モデルのほとんどは、気圧 p に基づいた鉛直座標を採用している。静力学近似から、気圧と高度に1対1の対応があるためである。非静力学の場合、等圧面が転倒する可能性があり、鉛直座標にはふさわしくない。実際、大半の非静力学モデルでは、高度に基づく鉛直座標が用いられている。静力学大気大循環モデルと非静力学モデルとの間には、鉛直座標の差異に起因して、方程式系の形ばかりでなく、上方の境界条件や気象学的ノイズに対処する数値手法が異なり、非静力学効果を正しく評価することは困難である。

Laprise (1992)は、高さ方向に多価関数とならない

静力学気圧 $\bar{p}$ （ $\bar{p}$ は静力学を意味する。）を鉛直座標に用いることを提案した。この定式化は、非静力学効果が無視できるとき、プリミティブ方程式系に帰着するため、非静力学効果を取り込んだ自然な拡張となっている。この鉛直座標を用いたEuler方程式系を大気大循環モデルに導入すれば、非静力学効果の適切な評価が可能となる。

Juang (1992)は、Laprise (1992)と同様に z 座標系でのEuler方程式系を静力学気圧に基づく鉛直座標に変換した。2つの定式化は、同じ方程式系を同様な鉛直座標に座標変換したにも関わらず、一部形式が異なっている。

両者の差異は、ジオポテンシャル高度の定義にある。Laprise (1992)は、 $\bar{p}$ 座標でも連続の式が p 座標と

同形となるように比容を鉛直に積分したものをジオポテンシャル高度と定義している．これに対し，Juang (1992)は，静力学の変数間で成り立つ静力学平衡を考え，鉛直座標を定義する補助的な変数として静力学気温 $\bar{T}$ を導入した．

Juang (1992, 2000)は，静力学気温 $\bar{T}$ としていくつかの候補をあげている．

- 時間変化しない一定値：理想実験に用いることはできるが，気温の変化が大きくなるような広領域には適切ではない．
- 外部から与える値：静力学の親モデルの気温を与える．この方法は入れ子にした領域モデルには適用できるが，全球に適用することはできない．
- 内部で予測する値：静力学気温 $\bar{T}$ を予報変数として予測する．この方法は全球にも適用可能であるが，計算コストが増大する．Juang (2000)は，計算コスト節減のため非断熱加熱の計算を省略することを提案している．

これらの方法の他，内部の非静力学変数と静力学気圧を用いて診断的に求めることもできる．

$$\bar{T} = T \left(\frac{\bar{p}}{p} \right) \quad (1)$$

この静力学気温を用いると Juang (1992) が導出した方程式系は Laprise (1992) の得た方程式系に帰着する．

本研究では，これらに代わるものとして水平方向に領域平均した気温を静力学気温として用いることを提案する．一定以上の広さの領域を平均した気温は，より静力学平衡に近く，非断熱加熱を含めて計算されるので，その領域の気温をよく代表している．予報変数を追加することなく，平均操作のみで得られるため計算コストが少ない．本研究では，理想実験を行い，既存の手法と比較しながら，静力学気温として気温の領域平均値を用いた定式化について，検証する．

2. モデルと実験設定

本研究では，米国環境予測センター（National Centers for Environmental Prediction, NCEP）のメソスケール・スペクトルモデル（Mesoscale Spectral Model, MSM, Juang 1992, 2000）を用いる．MSMは，水平に二重フーリエ級数，鉛直に静力学気圧に基づく σ 座標による離散化を採用している．MSMの既定では，静力学気温は境界条件とともに外部から与える．

2.1 実験設定

2次元の理想実験を行うため，MSMにいくつかの改変や設定の変更を施した．まず，物理過程及び境

界での緩和計算は省略した．投影は，赤道付近のメルカトル図法を選択した．3次元モデルで，擬似的に2次元実験を行うため，南北方向に8点配置し，南北に同じ初期値から時間積分を開始した．弱い南北風が生成されるが，無視できる大きさであることを確認した．上部境界付近では鉛直解像度の急変が生じないように，徐々に解像度を粗くした．

本研究では，静力学気温 $\bar{T}$ として以下の3つの場合を比較する．

- 外部から与えた値（以下一定値）
- (1)により診断した値（以下診断値）
- 領域平均値（以下領域平均値）

理想実験は，暖気塊実験（Robert 1993）及び冷気塊実験（Straka et al. 1993）を行う．どちらの実験でも時間刻み幅は $\Delta t = 1\text{s}$ である．

2.2 暖気塊実験

基本場は，無運動で $\sigma = 0.84$ 以下で $\bar{\theta} = 303.16\text{ K}$ の等温位，上空は等温大気とする [Fig. 1a]．暖気塊は260 mの位置におき，中心から50 mまで $\delta\theta = 0.5\text{ K}$ 一定とし，以遠は振幅が e^{-1} になる半径が100 mとなるように指数函数的に減衰させる [Fig. 1b]．水平解像度は $\Delta x = \Delta y = 10\text{ m}$ で，格子点数は128×8である．鉛

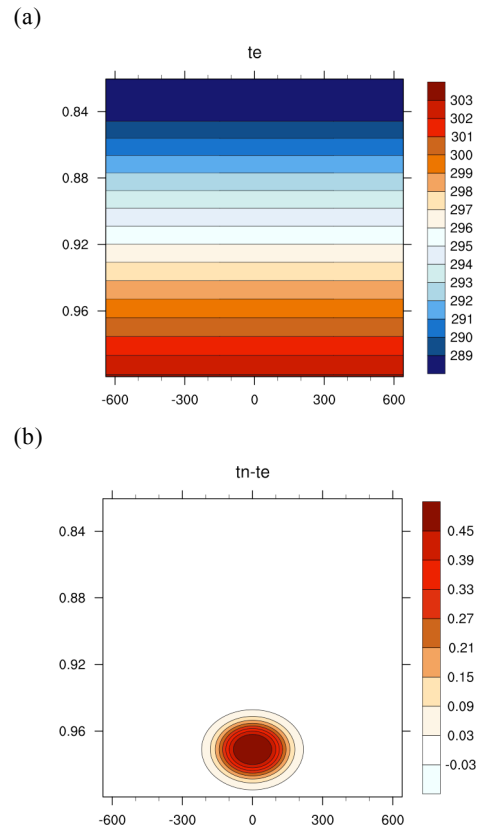


Fig. 1 (a) The basic temperature profile (K) and (b) the initial perturbation temperature (K) in the warm bubble experiment.

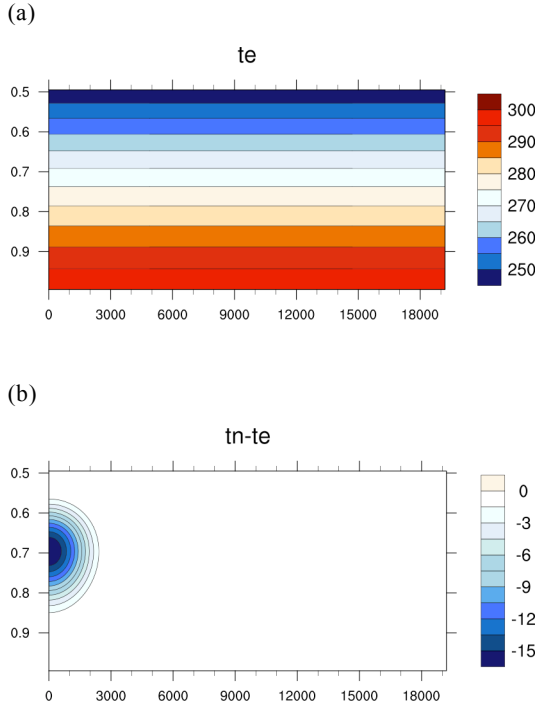


Fig. 2 (a) The basic temperature profile (K) and (b) initial perturbation temperature (K) in the cold bubble experiment.

直解像度は $\sigma \geq 0.84$ で $\Delta\sigma = 0.001$ とし、これより上空は0.002から0.064まで徐々に粗くし鉛直層数を180とする。3 sで振幅が e^{-1} となるような、4次の数値粘性を与えた。

2.3 冷気塊実験

基本場は、無運動で $z = 6000$ m以下で $\bar{\theta} = 300$ Kの等温位、上空では等温大気とする [Fig. 2a]。気温偏差 (K) は地表から $z_c = 3000$ mの位置に $L \leq 1$ の範囲に

$$\delta\theta = -\frac{15}{2}[\cos(\pi L) + 1]$$

という分布で与える [Fig. 2b]。 L は

$$L = \left\{ \left[\frac{x}{x_r} \right]^2 + \left[\frac{z - z_c}{z_r} \right]^2 \right\}^{1/2}$$

で与えられる。 $x_r = 4000$ m, $z_r = 2000$ mである。水平解像度は $\Delta x = \Delta y = 100$ mで、格子点数は512×8である。鉛直解像度は $\sigma \geq 0.4$ で $\Delta\sigma = 0.01$ とし、これより上空は0.02から0.06まで徐々に粗くし鉛直層数を70とする。暖気塊実験と同様な4次の数値粘性を与えたが、2次の拡散は用いなかった。

3. 結果

この節では、静力学気温を変えて行った暖気塊実験及び冷気塊実験の結果について述べる。

3.1 暖気塊実験

暖気塊は、時間とともに浮力により上昇しながら、細く引き延ばされ、渦を巻いていく。時刻 $t = 720$ sにおける温度偏差をFig. 3に示す。静力学気温として、診断値を用いた場合 (Fig. 3b) でも、領域平均値を用いた場合 (Fig. 3c) でも、一定値を与えた場合 (Fig. 3a) とほぼ同じ結果で、暖気が周囲の空気を取り込みながら渦を巻いている。

ところが、気圧偏差には差異が認められる (Fig. 4)。静力学気温として一定値を用いた場合は (Fig. 4a)、暖気塊に伴う渦に対応して -0.05 hPa程度の振幅をもつ気圧の負偏差が対で現れている。静力学気温に診断値を用いた場合にも暖気塊に対応する気圧の負偏差が認められるものの、振幅は小さい (Fig. 4b)。また、中心から東西に広がる気圧の正偏差が顕著であり、先端には衝撃波のような急変がある。これは音波が適切にコントロールされていないことを示唆する。これに対し、静力学気温に領域平均値を用いた場合、気圧の負偏差は静力学気温に一定値を用いた場合と同程度の振幅である (Fig. 4c)。静力学気温に診断値を用いた場合に似た気圧の正偏差はあるが振幅は弱く、衝撃波のような気圧の急変はない。

暖気塊実験の領域の幅は1.28 kmであり、静力学平衡が成り立つとされる水平スケールよりもかなり小さい。そこで、領域の幅10 kmに対応する、一定値との重み平均を静力学気温とした実験を行った。気温偏差は、他の実験とほとんど差はない (Fig. 3d)。領域の幅を10 kmとすると、気圧偏差場のノイズは除去され、一定値を用いた場合に近くなる (Fig. 4d)。

3.2 冷気塊実験

冷気塊は、時間とともに下降して地面に達するとともに、渦列を引き起こす。静力学気温に診断値を用いた実験は、計算不安定を起こした。一定値を用いた場合 (Fig. 5) と同様に、静力学気温に領域平均値を用いた場合 (Fig. 6) は安定した時間積分を行うことができた。図に示す範囲は、計算領域の中心から右に192点分である。渦列に伴う温度偏差の位置や強さはよく一致している (Fig. 5a, 6a)。渦に伴う鉛直流は、静力学気温に領域平均値を用いた場合の方が一定値を用いた場合よりもやや強い (Fig. 5b, 6b)。気圧偏差の振幅もやや強いが、衝撃波のような気圧の急変は見られない (Fig. 5c, 6c)。従って、音波はコントロールされていると考えられる。

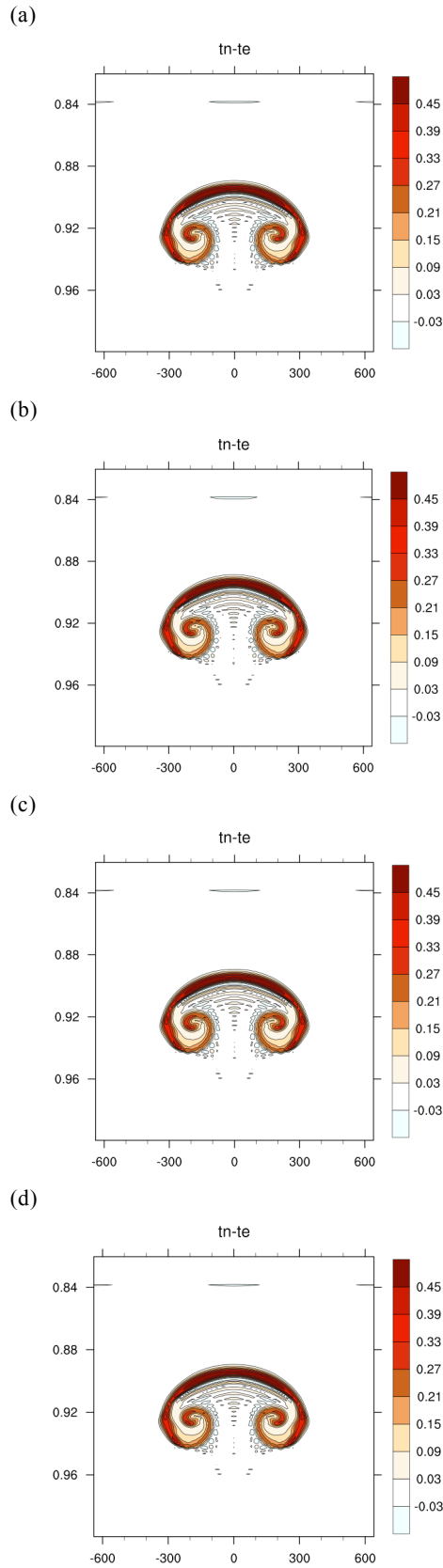


Fig. 3 Temperature perturbation (K) at $t = 720$ s in the warm bubble experiments with (a) the constant value, (b) diagnosed value, (c) domain average value and (d) the weight average of (a) and (c) corresponding to the average in the domain of 10 km.

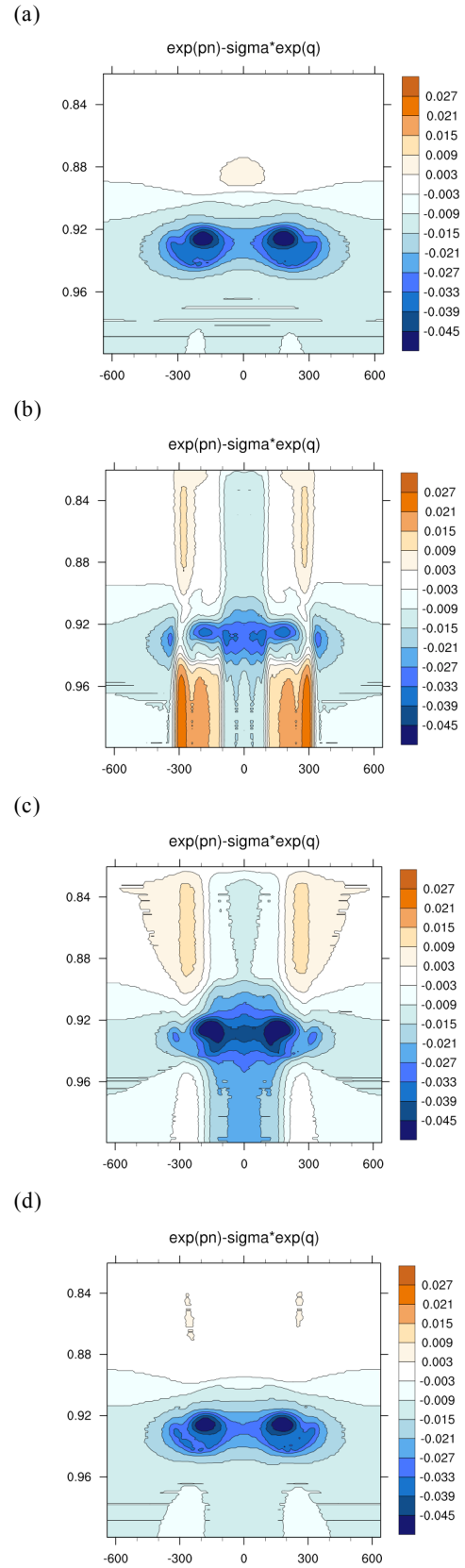


Fig. 4 Same as Fig. 3 but for the pressure perturbation (Pa).

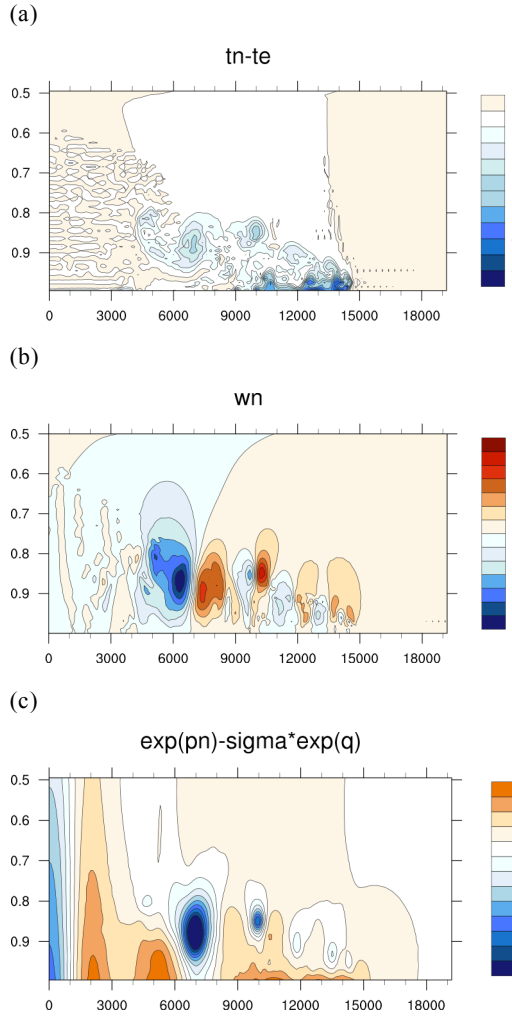


Fig. 5 (a) The potential temperature perturbation (K), (b) vertical wind (ms^{-1}) and (c) pressure perturbation (Pa) in the cold bubble experiment with the time independent value as the hydrostatic temperature $\bar{T}$.

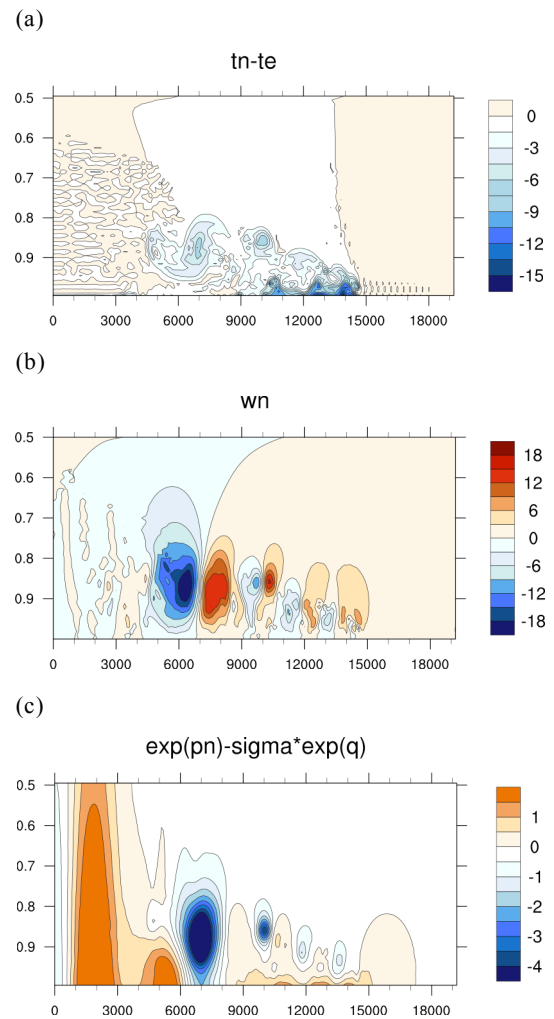


Fig. 6 Same as Fig. 5 but with the domain averaged temperature as the hydrostatic temperature $\bar{T}$.

4. おわりに

静力学気温に領域平均値を用いることにより、NCEP MSMのEuler方程式系 (Juang 1992; 2000) を全球に適用可能なものにした。全球への適用は、静力学気温を予報しても可能 (Juang 2000) であるが、今回の研究で提案された領域平均値は静力学気温の予報を不要とするものである。静力学気圧を鉛直座標に用い、全球に適用可能な定式化としては、ほかに Laprise (1992)の定式化がある。MSMにおいては、静力学気温を内部変数から診断することでLaprise (1992)の定式化を実現できる。

MSMを用いて擬似的な2次元の理想実験を行い、静力学気温に一定値、診断値、領域平均値を用いた定式化を比較した。静力学気温として診断値を用いた場合は、暖気塊実験は安定して計算できるが、冷

気塊実験では計算不安定を起こした。暖気塊実験における気温偏差は、どの定式化でも似通っていたが、静力学気温として診断値を用いた場合には音波の存在が示唆された。静力学気温に領域平均値を用いた場合でも、類似の気圧偏差が見られた。領域の幅が 10 kmとなるようにして、一定値と領域平均値とを重み平均した静力学気温を用いた場合は、気圧偏差のノイズは見られなくなった。冷気塊実験では、静力学気温に領域平均値を用いた場合、鉛直流や気圧偏差の振幅がやや一定値の場合よりも大きい、衝撃波のような構造は認められないことから、音波はコントロールされているものと考えられる。

今回は便宜的に領域平均値を用いたが、スペクトルモデルでは切断を厳しくすることにより容易に粗い解像度の値を得ることができるので、粗い解像度の気温を静力学気温として用いることは容易である。

今後は、MSMや大気大循環モデルに本研究の定式化を実装し、検証を進める予定である。

謝 辞

図は、the NCAR Command Language (Version 6.1.2)を用いて作成した。

参考文献

Juang, H.-M. H., (1992): A spectral fully compressible nonhydrostatic mesoscale model in hydrostatic sigma coordinates: formulation and preliminary results. Meteor. Atmos. Phys., Vol. 50, 75–88.
Juang, H.-M. H., (2000): The NCEP mesoscale spectral model: a revised version of the nonhydrostatic regional spectral model. Mon. Wea. Rev., Vol. 128, 2329–2362.

Laprise, R., (1992): The Euler equation of motion with hydrostatic pressure as an independent variable. Mon. Wea. Rev., Vol. 120, 197–207.

Robert, A., (1993): Bubble convection experiments with a semi-implicit formulation of the Euler equations. J. Atmos. Sci., 50, 1865–1873.

Straka, J. M., Wilhelmson, R. B., , Wicker, L. J., , Anderson, J. R., , and Droegemeier, K. K., (1993): Numerical solutions of a non-linear density current: a benchmark solution and comparisons. Int. J. Numer. Methods Fluids, 17, 1–22.

The NCAR Command Language (Version 6.1.2) [Software]. (2013): Boulder, Colorado: UCAR/NCAR/CISL/VETS. <http://dx.doi.org/10.5065/D6WD3XH5>

(論文受理日：2013年6月11日)