

斜面上での内部波の碎波機構と残差流

Residual Current and Mechanism of Internal Wave Breaking over a Uniform Slope

中山恵介¹・古川恵太²・宮澤功³・山敷庸亮⁴

Keisuke NAKAYAMA, Keita FURUKAWA, Takumi MIYAZAWA and Yosuke YAMASHIKI

This paper describes the mechanism of internal wave breaking and its effect on the occurrence of residual currents when internal waves break over a uniform mild slope. PIV technique was applied to visualize flow field around the area where internal waves break and run up over a slope. PIV analysis enabled us to compute residual currents which revealed that undertow appears below the interface. Numerical computation was carried out using two-dimensional non-hydrostatic LES model. From the comparisons with laboratory experiment results, numerical computations were confirmed to be successfully conducted with good agreements on residual currents. A bore was found from numerical computation results to have a tail which provides baroclinic energy and enhances the occurrence of down-draft.

1. はじめに

一般的に閉鎖性内湾では、淡水流入や日射の影響により水表面付近と底層付近の密度差が 0.01 kg/m^3 にもおよぶことがあり、非常にはっきりとした界面が形成される傾向にある。成層が形成されると、例えば、一定方向に吹いている風の風速が急激に変化したり、風速が一定ではあるが風向が周期的に変化したりすると、その変化に対応して界面変位が生じ内部波が発生する。その内部波の振幅は、表面波の振幅と比較すると大きく、湾奥でも数 m から 10 数 m にまで成長する。閉鎖性内湾の多くは比較的緩やかな地形勾配を持ち界面下の水深が上層に比較して小さくなるので、内部波の影響により発生する斜面上での流速は大きなものになる (Steinman, 1997; Whyhenmeyer, 1998)。

例えば東京湾奥において (地形勾配約 $1/2000$)、数 m の振幅を持つ内部波により発生する流速は 10 cm/s 以上にまで発達するため、物質輸送の観点から湾奥における物質伝播に重要な役割を果たしていると言える。さらに、斜面上に内部波が作用することにより表面波にも見られる碎波が発生し、界面付近に貫入現象を発生させることも知られている (中山・Imberger, 2003; 梅山ら, 2004; Umeyama・Shintani, 2006)。この貫入現象は、表面波が碎波する際に発生する undertow と非常に類似した現象であることが報告されている。また、碎波により内部波のエネルギーはほとんど失われ、斜面からのエネルギーの反射は非常に小さいものであることも報告されている (中山・Imberger, 2005)。

貫入現象により発生する流速は、斜面上で発生する最大流速に比較しても大きく、長期的な物質輸送に大きな影響を及ぼしていることが予想される。そのため、閉鎖性内湾の湾奥における内部波の作用による物質循環メカニズムを解明することは、長期的な生態系システムの解析のために重要な意義をもつと言える。また、これまでに検討された斜面上での内部波の碎波は、比較的斜面勾配が大きな場合を対象としており、Boegman ら (2005) により指摘されている通り、成層強度、斜面勾配、振幅、内部波波長などを変化させて検討する必要がある。

そこで本研究では、これまでの研究で行われた実験よりも緩やかな勾配 (Nakayama ら, 2006; 中山ら, 2007) を用い、内部波が斜面上で碎波する際における碎波のメカニズムおよび、残差流による物質輸送機構の解明を目的とする。

2. 室内実験

本章では、内部波が斜面に連続的に作用することによりどのような流れ場が発生し、長期的な物質輸送がどのように形成されるかを検討するために、PIV による流れ場の可視化を行った。

(1) 実験装置

内部波が斜面に作用する場合を検討するために用いた室内実験装置は、長さ 6 m 、幅 0.4 m 、高さ 0.5 m の水槽である (図-1)。上層・下層それぞれに厚さ 0.15 m の淡水・塩水を満たし、上下層の密度差比は 0.02 とした。内部波を連続的に発生させるために、クランクタイプの造波装置を用い、上層・下層それぞれに同じ流速で逆向きの流れを与えることで傾圧エネルギーのみを与え、順圧エネルギーは極力発生させないようにした。造波装置と逆側には、斜面勾配 $0.15/2.6$ の斜面 (斜面長 3.6 m) を設置した。

1 正 会 員 博(工) 北見工業大学教授工学部土木開発工学科
2 正 会 員 博(工) 国土技術政策総合研究所室長
3 学生会員 日本大学理工学研究科土木工学専攻
4 正 会 員 博(工) 日本大学講師理工学部土木工学科

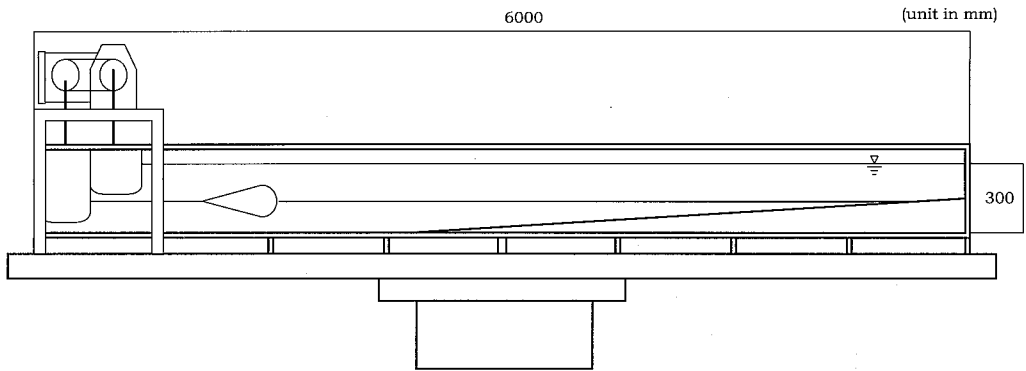


図-1 内部波発生装置と水槽。図左端に設置されたクランクタイプの造波装置を逆位相で操作することにより、順圧エネルギーの発生を極力抑え、傾圧エネルギーを卓越して発生させ内部波を作成した。

内部波を発生させる際に用いた周期は13.5秒であり、波高は0.01m程度を与えた。波高0.01m程度と曖昧な表記を使用した理由は、中山ら(2007)で示されている通り、内部波の進行速度が表面波の進行速度に比較して遅いため、水槽内における摩擦によるエネルギーの散逸を無視することが出来ず、波高の減衰率が1.5mでおよそ数%から10数%であるためである。内部波の波高の測定には、鉛直方向に1cm間隔で7つ設置された電気伝導度計を用い、初期状態における密度の鉛直分布形が維持されるものとしてフィッティングを行い、内部界面位置の推定を行った。測定間隔は0.02秒であった。

本実験装置は本来、地球自転の効果も考慮できるように回転可能なものであるが、今回の実験では回転させず、鉛直2次元断面での現象が卓越する場合を対象として実験を行った。

(2) PIVによる可視化

斜面上での内部波の砕波による流れ場の変化を詳細に検討するために、Yag Laser (カノマックス, CW532-600M型) とカメラ (DALSA) を用いた。高速カメラは1600×1200の解像度を持ち、30fpsの撮影が可能であるが、内部波により発生する流速の最大値が10cm/s以下であることから、15fpsでの撮影とした。可視化に用いた粒子は、比重1.02、平均直径8μmのものとした。撮影サイズは横縦26.7cm×20.0cmとし、静止状態において界面が斜面に接する地点から造波装置側に50cmの地点を中心とし、上層を中心として最初の鉛直断面の撮影を行った。計測された鉛直断面は、合計2つであり、最初の断面の中心からさらに25.0cm離れた点を中心として第2番目の鉛直断面での測定を行った。

PIVにより得られた結果をよりはっきりと示すために、ベクトルを縦横に一つずつ間引いて、第1断面の流速ベクトルを表示した(図-2)。中山・Imberger(2003)に報告されている通り、内部波が砕波しrun-upすることで発生するdown-draftが、斜面直上で確認さ

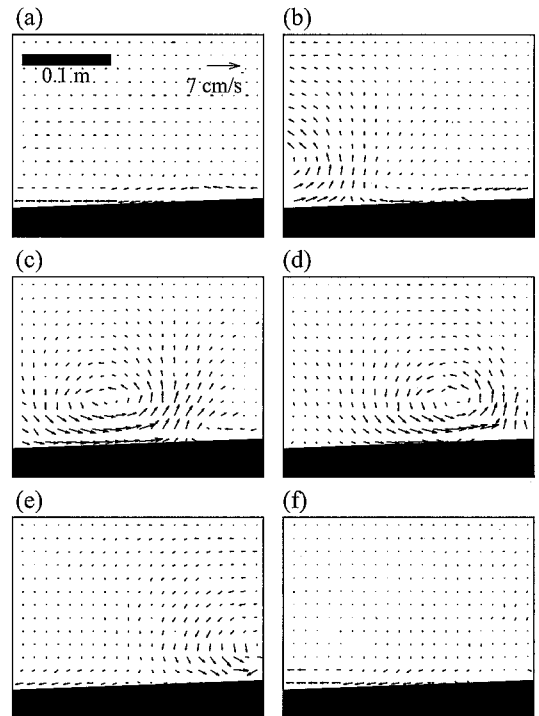


図-2 静止状態において界面が斜面に接する地点から造波装置側に50cmの地点を中心とした上層領域におけるPIVによる可視化結果。(a)から(f)にかけて13.5/8秒間隔でのベクトル分布図。

れた(図-2(a))。そのdown-draftが、砕波により発生したboreの前面と衝突し大きな上昇流を生じていた(図-2(b))。その後、boreは斜面付近の流速を増大させながら進行して行き(図-2(c)(d))、上層との混合によりエネルギーが散逸し(図-2(e))、boreにより持ち上げられた下層の相対的に密度の大きな水塊がdown-draftを発生(図-2(f))させている様子が確認された。

長期における物質輸送に関して検討を行うために、残

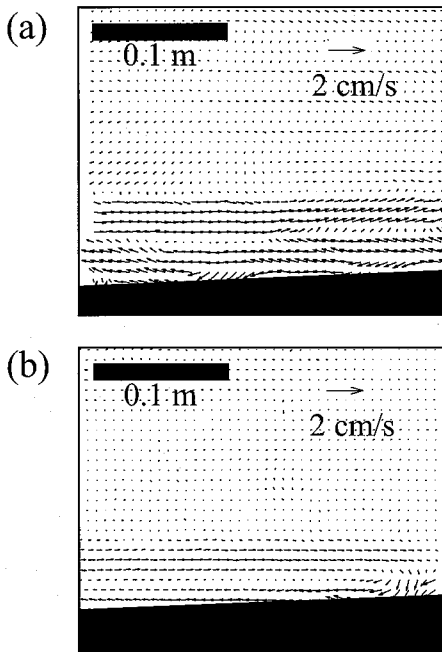


図-3 PIVにより得られた残差流ベクトル。(a)(b)に対して左側の領域における残差流ベクトル。(c) 図-2に対応する領域での残差流ベクトル。

差流ベクトルを計算した(図-3)。内部波の周期が13.5秒であったことから、PIVにより得られた0.1秒間隔での流速ベクトル分布図を13.5秒平均し、残差流ベクトルとした。その際、図-2と異なり、大きな流速が発生している範囲が狭い範囲に限られていたことから、流速ベクトルの間引きを行わなかった。第1断面では、進行波成分による界面直上での斜面に向かう流れが卓越して発生していることが確認された。また界面下では、その流れを補償するdown-draft起因のundertowが発生していることが確認された。

3. 数値実験と室内実験の比較

室内実験で再現された流れ場と残差流をより詳細に、より正確に理解するために、数値モデルによる再現計算を行った。

(1) MEL2D-cv

本研究で用いたモデルは、2次元非静水圧LESモデルである。成層の効果による鉛直方向の渦拡散の影響を考慮するため、Schumann (1991)により提案されているSecond-Order Closureの代数方程式から導かれたブランドル数が用いられている。これにより、成層の効果による渦拡散係数の変化を考慮し、水平方向の渦拡散係数との違いを再現することができる。LES定数は、慣性小領域の等方性乱流の考え(Lillyら, 1967;

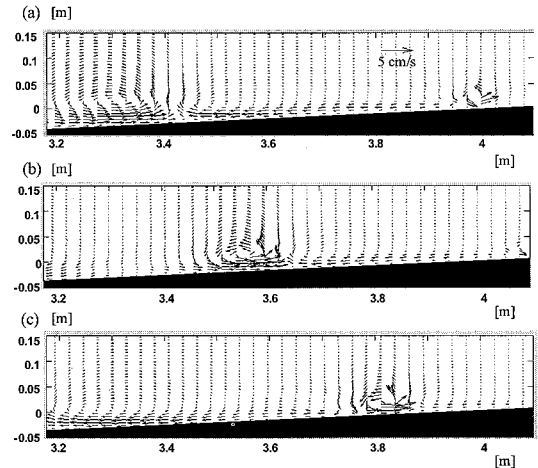


図-4 数値実験により得られた斜面上での内部波の砕波。(a)ある任意時間における流速ベクトル。(b)(a)から13.5/3秒後の流速ベクトル。(c)(b)から13.5/3秒後の流速ベクトル。

Schmidt・Shumann, 1989)から導かれる値を用いている。HSMAC(Hirtら, 1975)、CIP法(Yabeら, 1990)、残差切除法(Tamuraら, 1997)を利用したスキーム(中山・佐藤, 1999; Nakayamaら, 2005; Nakayama, 2006; Okada・Nakayama, 2007)を用いて計算が行われており、内部ソリトン波の再現などにおいて、その適用度の高さが示されているモデルである。

(2) 計算結果の解析及び室内実験との比較

室内実験と同様な振幅を与え、内部波の砕波の再現を行った(図-4)。計算メッシュ数は 1100×100 、メッシュ間隔 $0.045 \text{ m} \times 0.003 \text{ m}$ とし、出来る限り細かい鉛直解像度を与え、成層場の再現性を高めた。時間ステップには0.01秒を与えた。計算結果は、室内実験の結果を確認することができるものであり、砕波により発生したboreの斜面直上での流速の増大および減衰を再現することが出来ていた。また、bore自身のサイズが大きく変化しており、フロントにおける混合等がエネルギー散逸に大きく影響していることが確認できた。

図-4から判断する限り、down-draftはboreの後方における下降流による効果、およびboreのrun-upによる高密度水塊の輸送による傾圧の効果、の2つを発生要因として発生していると考えることが出来る。そこで、どちらの効果がよりdown-draftの発生に寄与しているかを理解するために、発達したbore周辺の上下層の中間密度の位置、および鉛直流速分布を調べた(図-5)。その結果、boreフロントにおける上昇流の最大値は 1 cm/s 以上であるのに対して、後方の下降流は 0.2 cm/s 程度であることが分かった。そのため、boreフロントで上昇した上層の密度の小さな水塊はboreの後方に強

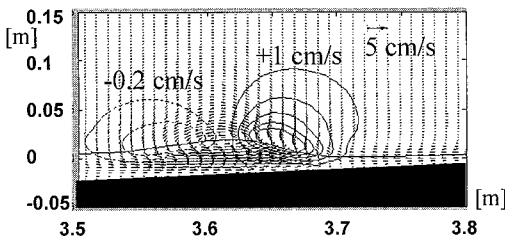


図-5 $x=3.5\text{m}$ から 3.8m における bore の run-up. 実線コンタ：上昇流。破線コンタ：下降流。画面中央の実線：上下層の中間密度線。

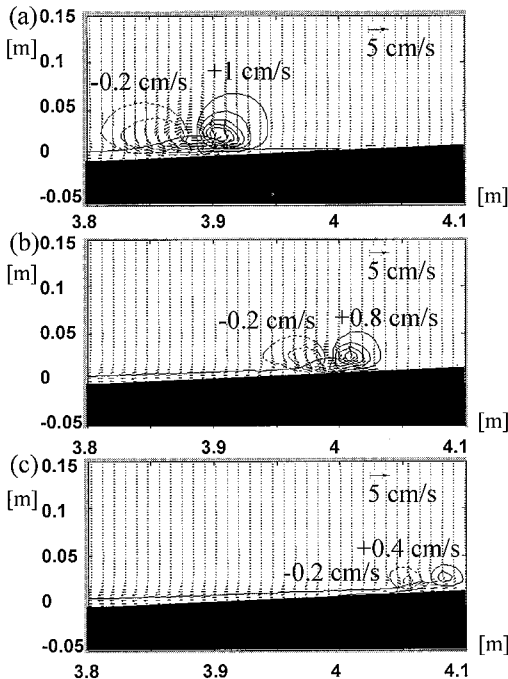


図-6 $x=3.8\text{m}$ から 4.1m における bore の run-up. 実線コンタ：上昇流。破線コンタ：下降流。画面中央の実線：上下層の中間密度線。(a) から (b) にかけて 13.5/3 秒間隔で流速ベクトル図。

制的に輸送されることがなく、bore が単独で存在しているというよりは、bore は尻尾のような後続部を持って斜面上を run-up しているということが分かった。つまり、後続部における密度の大きな水塊の存在により、傾圧エネルギーが発生し、down-draft が誘起されたものと考えられる。

後続部の存在を確認するために、図-5 より bore が run-up した領域における同様な図を描画した (図-6)。Bore のサイズが減少するとともにフロントでの上昇流速が減少し、図-6(c) ではフロント前後の上昇流と下降流の流速がほぼ等しくなっていた。そのような状態になるまで、bore のフロントから後続部にかけて下層の密度の大きな水塊が存在していた。しかし、Wallace・

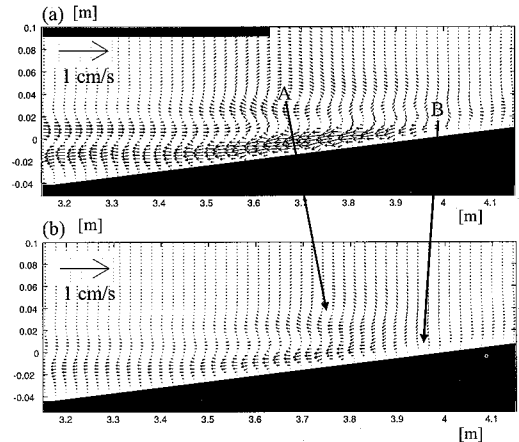


図-7 数値実験により得られた斜面上での残差流ベクトル図。(a) 室内実験に対応する残差流ベクトル図。(b) 室内実験で与えた振幅を半分にして得られた残差流ベクトル図。

Wilkinson (1988) や Helfrich (1992) は、斜面勾配をよりマイルドにすることにより bore が単独で存在し、下層の水塊を上層へと輸送するという現象を実験により示しており、今後、より多くの密度条件、勾配条件を変えた検討を行う必要があると考えられる。

(3) 残差流について

室内実験で得られた残差流ベクトルが、数値実験による結果とどの程度の整合性を持つかを検討するために、数値実験結果を用いて残差流の計算を行った (図-7(a))。図中の横軸 3.45m が室内実験の第 1 断面の中央に対応する点であり、界面直上直下の進行波成分および undertow を再現することが出来ていた。しかし数値実験では、進行波による成分の上には undertow と同じ向きの残差流が再現されており、室内実験では確認できなかった流れが存在していた。また室内実験では、界面直上の進行波成分による流速が直下の undertow に比較して同等な大きさを持っているにもかかわらず、数値実験では undertow の方が大きく再現されていた。その結果、数値実験では進行波成分の直上に undertow と同じ方向の流速成分が大きく再現されたと考えられる。今後、この問題に関して、PIV による可視化の精度向上、数値実験における適切な境界・初期条件の設定を検討し、整合性を高めてゆく予定である。

その他、数値実験を利用して、与えるエネルギーの違いによる残差流の発生形態についての検討も行った (図-7(a)(b))。図-7(b) では、図-7(a) の半分の振幅を与えて残差流を計算した。その結果、上層での渦の中心 A は斜面方向に、undertow の発生点 B は斜面から遠ざかる方向に移動していることが確認された。bore の影響による領域 (A-B) が小さくなった要因としては、内

部波の碎波によるエネルギー散逸が, bore の小さな図-7(b)の方が小さかったためと考えられる。このことから, 碎波の形態により残差流ベクトル分布が異なる可能性が高いことが示され, 前節でも述べたように種々の条件化での残差流ベクトル分布の評価が必要であることが分かった。

4. ま と め

- a) 内部波が斜面に進行し碎波する場合における物質輸送の解析を行うために, PIV による可視化を試みた。その結果, 中山・Imberger (2003) により数値計算や室内実験結果の目視により確認された現象が, PIV を用いることにより定量的に評価することが出来た。また, PIV により得られた流速分布より, undertow の発生を確認することが出来た。
- b) 数値実験を行うことにより, 碎波により発生した bore は後続部を持ち進行し, down-draft を発生させていることが確認された。
- c) 碎波形態の違いにより, 発生する残差流ベクトル分布が大きく異なることが分かった。

参 考 文 献

- 梅山元彦, 新谷哲也, 中山恵介(2004): 緩勾配斜面を伝播する内部波の可視化実験と浅水・碎波域での物理現象に関する理論的考察, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.16-20.
- 中山恵介, Jorg Imberger(2003): 斜面に連続的に作用する内部波の碎波と残差流, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.531-534.
- 中山恵介, Jorg Imberger(2005): 斜面に連続的に作用する内部界面の理論解の適用性の検討, 土木学会論文集, No.789, pp.59-72.
- 中山恵介, 佐藤圭洋(1999): LES モデルによる水平面上張り出しブルームの解析, 土木学会論文集, No.628, pp.97-114.
- 中山恵介, 宮澤巧, 山数庸介, 宮澤兼佑, 金刺俊之(2007): 斜面上で碎波する内部ケルビン波による誘起される流れ, 水工学論文集, 第51巻, pp.1385-1390.
- Boegman, L., G. N. Ivey, and J. Imberger(2005): The degeneration of internal waves in lakes with sloping topography, *Limnol.Oceanogr.*, Vol.50, pp.1620-1637.
- Helfrich, K.R. (1992): Internal solitary wave breaking and run-up on a uniform slope, *J. Fluid Mech.*, Vol.243, pp.133-154.
- Hirt, C.W., Nichols, B.D. and Romero, N.C.(1975): A numerical solution algorithm for transient fluid flows, Los Alamos Scientific Laboratory, report LA-5852.
- Lilly, D. K., Waco, D. E., and Adelfang, S. I. (1967): The representation of small-scale turbulence in numerical simulation experiments, *Proc. IBM Sci. Comput. Symp. on Environmental Science*, pp. 195-210.
- Nakayama K. (2006): Comparisons of using CIP, compact and CIP-CSL2 schemes for internal solitary waves, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol.51, pp. 197-219.
- Nakayama K., T. Miyazawa, Y. Yamashiki and K. Furukawa (2006): Mixing due to the breaking of internal Kelvin waves on a uniform slope, *Stratified flow*, Vol.3, GFD1, pp. 1-6.
- Nakayama K., T. Okada and M. Nomura (2005): Mechanism responsible for fortnightly modulations in estuary circulation in Tokyo Bay, *Estuarine Coast and Shelf Science*, Vol. 64, pp. 459-466.
- Okada T. and K. Nakayama (2007): Modeling of dissolved oxygen in an enclosed bay with sill, *Journal of Environmental Engineering - ASCE*, Vol. 133, Issue 4, pp. 447-453.
- Schmidt, H., and Schumann, U., (1989): Coherent structure of the convective boundary layer derived from large-eddy simulations, *J. Fluid Mech.*, Vol. 200, pp. 511-562.
- Schumann, U. (1991): Subgrid Length-Scales for Large-Eddy Simulation of Stratified Turbulence, *Theoret. Comput. Fluid Dynamics*, Vol. 2, pp. 279-290.
- Steinman, B., Eckert, W., Kaganowsky, S., and Zohary, T. (1997): Seiche-induced resuspension in lake Kinneret: A fluorescent tracer experiment, *Water, Air and Soil Poll.*, Vol. 99, pp. 123-131.
- Tamura A, Kikuchi K, Takahashi T. (1997): Residual cutting method for elliptic boundary value problems. *Journal of Computational Physics*, Vol. 137, pp. 247-264.
- Umeyama, M. and Shintani, T. (2006): Transformation, Attenuation, Setup, and Undertow of Internal Waves on a Gentle Slope, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, in press.
- Wallace, B.C., and Wilkinson, D.L. (1988): Run-up of internal waves on a gentle slope in a two-layered system, *J. Fluid Mech.*, Vol. 191, pp. 419-442.
- Whyhenmeyer, G.A. (1998): Resuspension in lakes and its ecological impact - a review, *Arch. Hydrobiol. Spec. Issues Advanc. Limnol.*, Vol. 51, pp. 185-200.
- Yabe, T., Takeo, I., and Yusaku, K. (1990): A multidimensional cubic-interpolated pseudoparticle (CIP) method without time splitting technique for hyperbolic equations, *Journal of the Physical Society of Japan*, Vol. 59, No.7, pp. 2301-2304.