

緩傾斜護岸上の越波量に関する LES 数値計算

Nimal Wijayaratna*・岡 安 章 夫**・野 間 崇 史***

1. はじめに

近年、海岸の多面的防御とアメニティの観点から、緩傾斜護岸の築造が多く行われるようになってきた。緩傾斜護岸においても越波・越流の事例が報告されているが、定量的な評価方法は確立されていない。個々の計画においては模型実験等により越波量の評価が可能であるものの、効率的な設計には越波量指標あるいは数値計算等による推算が必要であると考えられる。数値計算については、複雑な形状の護岸についても適用が可能であると同時に、設計条件の変更を反映することが容易であり、効率的な評価への寄与が大きいと期待できる。

そこで本研究では、階段状の緩傾斜護岸について、2次元 LES 数値シミュレーションモデルによる越波量の評価を試みた。入射波の条件は規則波および不規則波であり、入射波諸元、護岸前面の海底勾配、護岸法先での水深等の影響について検討を行った。また、不規則波については合田・岸良 (1976) の実験結果との比較を行うことによって、数値計算の妥当性を検討した。

2. 2次元 LES 数値計算の概要

(1) 基礎方程式

基礎方程式には、以下に示す空間 (格子サイズ) 平均した 2 次元 Navier-Stokes 方程式および連続式を用いた。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial}{\partial x_j} \tau_{ij} + g_i \quad \dots (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad \dots (2)$$

ここで、 i, j は 1, 2 であり、 x_1 は入射境界を基準とした水平岸向き座標、 x_2 は鉛直上向き座標、 u は各方向成分の流速、 t は時刻、 ρ は水の密度、 p は圧力、 ν は水の動粘性係数、 τ_{ij} は sub-grid scale (SGS) 応力、 g は外力 (重力) による各方向成分の加速度である。ここで、 τ_{ij} は最

も簡便な方法として、

$$\tau_{ij} = -2\nu_t D_{ij}, \quad \nu_t = (C\Delta)^2 |D| \quad \dots (3)$$

を用いた (Schumann, 1987)。ここで、 ν_t は渦動粘性係数、 $D_{ij} = 1/2((\partial u_i/\partial x_j) + (\partial u_j/\partial x_i))$ は格子サイズでの変形テンソルである。ここでは、渦粘性項の評価に Smagorinsky モデルを用いており、 $C=0.1$ 、フィルター幅 Δ は格子サイズとした。

(2) 境界条件

沖側境界から、入射波の条件に応じて規則波 (3 次クノイド波または 5 次ストークス波) あるいは不規則波を入射させた。計算領域からの反射波は透過条件とした。底面での境界条件は、流速については no-slip 条件とし、圧力について静水圧で近似した。水表面の追跡には密度関数法を使用した。密度関数法を使用する場合は、当該セルの密度関数 f がある値 (~ 0.5) より大きい小さいかで水表面を判断する。密度関数の支配方程式は以下である。

$$\frac{Df}{Dt} = 0 \quad \dots (4)$$

式 (1) の左辺と式 (4) は CIP (Cubic Interpolated Pseudo-particle) 法 (Yabe ら, 1990) を用いて解いた。水表面外の流速情報が必要なときは、質量保存則が満たされるように補正した。計算領域の設定を図-1 に示す。図中、 h は護岸法先での静水深、 h_c は静水面上の護岸天端高である。

(3) 解法アルゴリズム

水表面は各計算ステップの初めに更新し、続いて Poisson 方程式を用いて圧力場を計算する。Poisson 方程式は式 (1) の左辺第 1 項を次ステップの流速を用いて差分化し、これを式 (2) に代入することによって得られる。これを SOR (Successive Over-Relaxation) 法 (Hino ら, 1983) を用いて解いた。得られた圧力場を式 (1) に代入し、CIP 法により流速場を更新する。

CIP 法による計算は 2 つのステップに分けられる。まず、移流項を除いて差分化した運動方程式 (5) を解く。時間的には前進差分を用い、空間的には staggered mesh を用いた中央差分を使用する。続いてこれにより得られた次ステップの仮の流速値 $\bar{u}_i^*$ を、式 (6) が満足される

* M.Eng. 横浜国立大学大学院工学研究科計画建設学専攻
** 正会員 工 博 横浜国立大学助教授 大学院工学研究科人工環境システム学専攻
*** 横浜国立大学大学院工学研究科人工環境システム学専攻

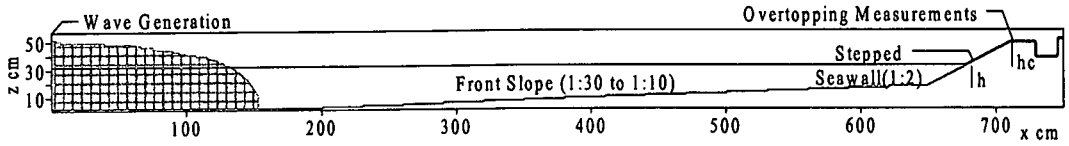


図-1 計算領域の設定

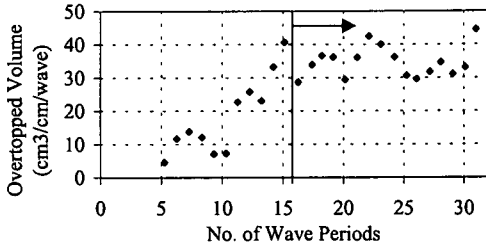


図-2 計算初期の越波量の変動

ように補正し、次ステップの流速値 $\bar{u}_i^{n+1}$ を決定する。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial}{\partial x_j} \tau_{ij}^n + g_i \cdots (5)$$

$$\frac{D\bar{u}_i}{Dt} = 0 \cdots (6)$$

3. 規則波による計算越波量

(1) 初期越波特性

規則波に対する数値実験は、計算の基本的な安定性と越波の基本特性、計算初期の疑似定常状態に到達するまでに要する計算ステップ数等を検討するために行った。図-2は規則波(入射波高 H_0 : 9 cm, 周期 T : 1.1 s, h : 15 cm, h_c : 16 cm)における計算の初期30波分の1波毎の単位幅あたり越波量の変化を示したものである。越波量の評価は護岸天端上沖側端の2つの計算格子で行った。静水状態から計算を開始しているため、入射境界からの到達時間も含めて造波開始後4波目までは越波が観測されない。越波量がほぼ定常に達するのは15, 6波目からであり、この値は入射波の諸元が変わっても(波高9~20 cm, 周期1~2 s)あまり変化は見られなかった。そこで、越波量の解析にあたっては計算当初の16波は除外した。

ほぼ定常状態に達した後も、波ごとで越波量のばらつきが見られるが、これは数値水槽内での長周期振動や護岸上を下る流れと入射波との位相変化によるものと考えられる。これらの変動による誤差を小さくするために、複数の波による平均越波量を用いて検討を行う。

(2) 波浪周期の影響

規則波の周期の違いによる越波量の変動を検討するために、 $H_i=11$ cm, $h=15$ cm, $h_c=16$ cm, 前面海底勾配1/30, 護岸の段高1 cmのケースにおいて、入射波の周期

表-1 周期の違いによる越波量の比較

T (s)	1.0	1.4	1.6	1.8	1.9
越波量 (cm³/波)	21	32	40	48	41

を変化させて数値実験を行った。表-1は異なる周期の規則波を入射させたときの計算越波量の比較である。周期が長くなるに従って越波量も概ね増加している。これは長い周期の方が、1波毎により多くのエネルギーを持っており、結果的に遡上高と越波量が増加するためと考えられる。しかし、周期がある一定値以上になると護岸前面で砕波しなくなるため、護岸遡上時の流速が減少し、従って越波量も減少する。

(3) 護岸前面の海底勾配の影響

護岸前面の海底勾配が緩くなると、相対的に沖で砕波が起こるため、波が護岸に到達する前に多くのエネルギーを失い、一般に越波量は減少する。しかし、護岸法先での水深が大きい場合にはこの限りではない。例えば、満潮時に高潮が重なる様な場合には、護岸のかんりの部分が水没する。このようなケースを想定して行った数値実験では上述の傾向が逆転する場合があった。

図-3は法先水深が大きい場合の規則波による越波量特性を、前面海底勾配を変化させて示したものである。計算条件は、 $H_i=11$ cm, $T=1.6$ s, $h=15$ cm, $h_c=16$ cm, 護岸の段高1 cmである。各波による越波量については変動があるものの、海底勾配が緩やかになるほど越波量が増大していることが分かる。図-4はそれぞれのケースにおける砕波状況を示している。これを見ると、上記の傾向は主に砕波形態の相違によるものであると推測できる。

護岸付近の水深が十分大きくて砕波が起こらない場合には護岸によりかなりエネルギーが反射され、越波量はそれほど大きくなりません。従って、海底勾配が比較的急なため護岸付近での水深が十分に大きい場合は、法先水深が大きい場合でも比較的越波量が少なくなることが予想される。

4. 不規則波による越波量計算

(1) 法先水深が小さい場合の実験値との比較

不規則波に関する数値実験を合田・岸良 (1976) の海

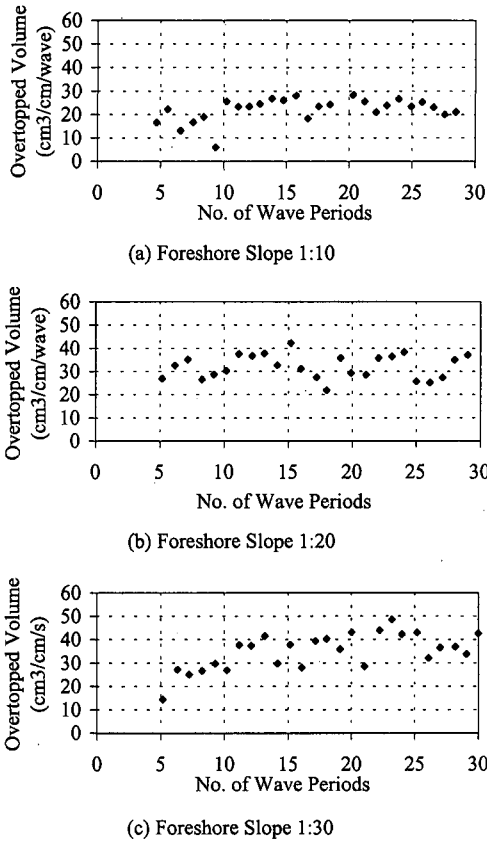


図-3 海底勾配の変化による越波量の比較(法先水深の大きい場合)

浜勾配 1/10, 護岸傾斜 1/2, 段高 9 mm の階段護岸のケースについて行った。合田・岸良では実験に使用した波の時系列データが示されていないので、ここでは計算機により実験条件と同じ有義波高 $H_{1/3}$ 17.8 cm, 有義波周期 $T_{1/3}$ 1.74 s の不規則波を作成し、入射境界に与えた。 h_c はそれぞれ 0 cm, 7.3 cm である。

入射波の水面変動の時系列と本計算モデルにより計算された瞬間越波量の時系列および各波毎の総越波流量を図-5に示す。図の横軸は $T_{1/3}$ で正規化した時間軸である。越波量は当然入射波に大きく左右されるが、規則波と同様 15 波程度までは越波量がほとんど観測されない。また、図から分かるように、波高の大きな波が常に大きな越波流量を示すわけではない。例えば、波高の大きな波が連続した場合、護岸による 1 波目の反射波(引き波)が 2 波目の越波量を抑制する傾向にある。護岸に入射してくる波と引き波との干渉の不規則性により、個々の波による越波量は入射波の時系列からは予測が困難である。図-5(c)から分かるように、周期、波高の異なる様々な波は、砕波点、砕波形態と反射率等が異なり、護岸前面での遡上波と引き波との干渉も相まって、越波量にか

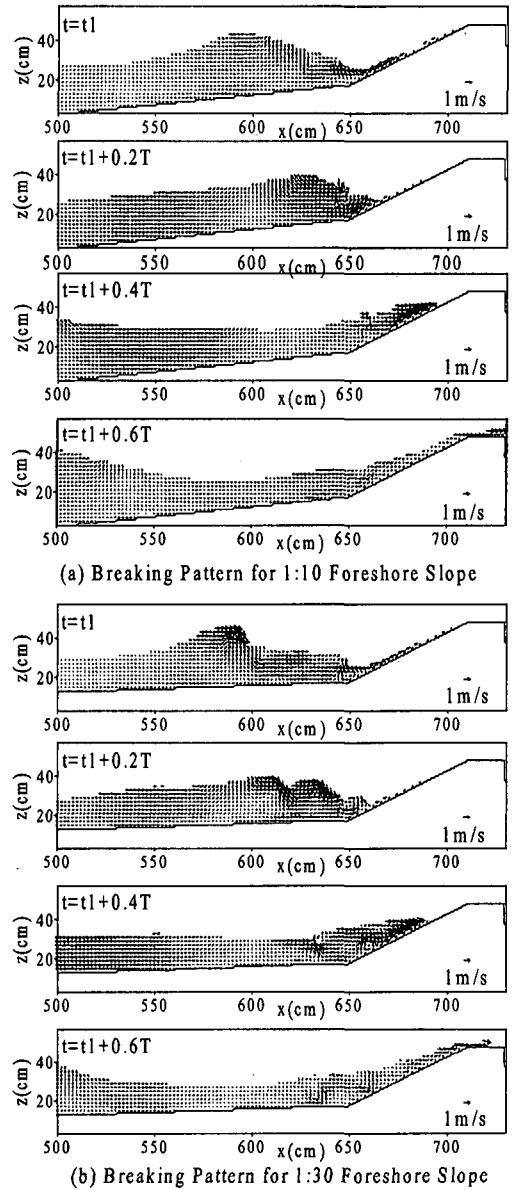


図-4 海底勾配の変化による砕波形態の変化(法先水深の大きい場合)

なり大きなばらつきをもたらす。

図-5(b) を 16 波目以降 (84 波分=145.8 s) について積分した単位幅当たり総越波量は 1580 cm^2 となる。その時間当たりの平均値は $10.8 \text{ cm}^2/\text{s}$ であり、合田・岸良の実験で得られた値 $11.9 \text{ cm}^2/\text{s}$ とほぼ同等である。しかし、図-5(c)が示すように、波によって平均越波量の 4 ~ 5 倍の越波量となる場合もあり、平均越波量は単に越波量の平均値を示すにとどまるということに注意を払う必要がある。

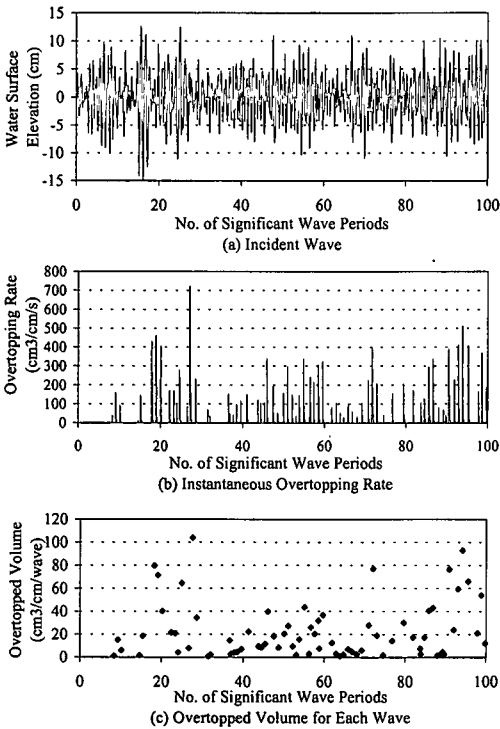


図-5 不規則波による越波量の計算

(2) 法先水深の影響に関する水理模型実験

法先での水深が相対的に大きい場合には、護岸前面の斜面で砕波によるエネルギー減衰が十分起こらないため、大きな運動量を持ったまま波が護岸に到達することにより越波量が増大する場合がある。法先水深が0もしくは小さい場合の数値計算の妥当性については前節で確認されたが、法先水深が越波量に与える影響と数値計算での再現性を検討するため、新たに不規則波による水理模型実験を行い、数値計算の結果と比較した。

水理実験は長さ17 m、幅55 cmの2次元波動水槽を用い、護岸前面に勾配1/20の斜面を7 m設置し、模型護岸(前面勾配1/2、段高9 mm)の高さ h_s を9.0 cm、13.5 cmの2通り、一様水深部の水深 h_i を35.0 cm、37.7 cm、39.5 cmの3通りとした。このときの護岸法先水深 h は0 cm、2.7 cm、4.5 cmである。なお、各ケースの測定時間は最大200秒である。越波量の算定には最低でも総計数百波程度の試行が必要と考えられるが、今回は数値実験と時系列での比較が目的であるので、比較的少数の波で実験を行った。なお、計測された入射波の条件は $H_{1/3}=9.42$ cm、 $T_{1/3}=1.17$ sであった。

図-6はCase 1における累積越波量の時系列変化である。累積越波量の測定は、越波升中に設置した水位計により行ったため、累積量に若干の振動が見られる。

実験より得られた平均越波量 $\bar{q}$ を表-2に示す。実験

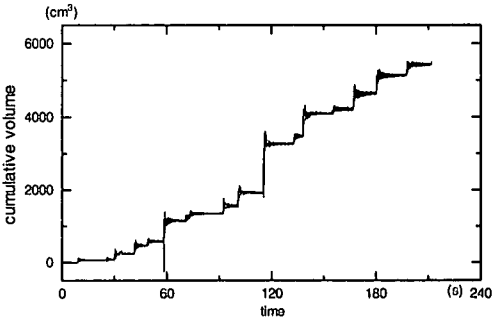


図-6 Case 1における累積越波量の変化(実験値)

表-2 法先水深を変化させた場合の不規則波による越波量の比較

Case	h_i (cm)	h_s (cm)	h (cm)	h_c (cm)	$\bar{q}$ (cm³/s)
1	39.5	13.5	4.5	9.0	0.47
2	37.7	13.5	2.7	10.8	0.0
3	37.7	9.0	2.7	6.3	0.75
4	35.0	9.0	0.0	9.0	0.0

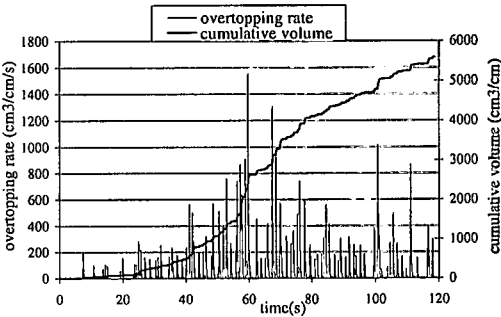


図-7 Case 1における越波量と累積越波量の変化(計算値)

結果より、静水面からの天端高 h_c が等しい場合(Case 1とCase 4)でも、法先水深が大きい場合の方が越波量が多いことが分かる。これは、砕波減衰が十分起こらないために、相対的に運動量の大きい波が護岸に到達するためと考えられる。

(3) 法先水深が大きい場合の実験値との比較

Case 1に対応する計算条件で越波量の数値計算を行った。入射波には実験で計測されたものを用いた。この時の累積計算越波量と越波量の時系列変動を図-7に示す。左縦軸が累積越波量、右縦軸が越波量である。越波量変化を見ると、ほぼ全ての波で越波が計算されていることが分かる。また、計算による平均越波量は47.1 cm³/sであり、これは実験で得られた値より2オーダーほど大きい。

図-8はこのとき計算された2次元流速ベクトルの一例である。護岸前面の斜面上では、波が通過した後も砕波による大規模な流体運動のエネルギーが減少せず、護

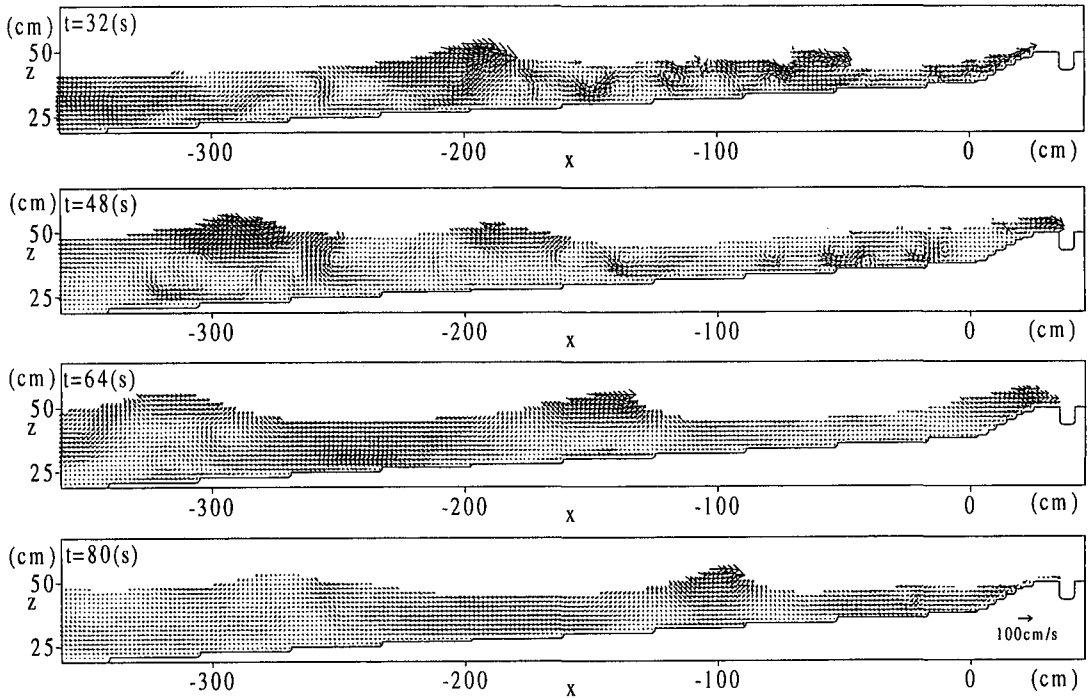


図-8 Case 1 について計算された流速場

岸に入射してくる波も大きな運動量を持っている。このことから、2次元 LES 数値計算では、沿岸方向流速が拘束されるため、砕波帯内沖側(砕波前半)でのエネルギー減衰が過小に評価される傾向にあると判断できる。法先水深が大きい場合の傾斜護岸上の越波については、護岸に達するまで(砕波初期)の波のエネルギー減衰が護岸前面での波の運動量を決定する。従って、この領域でのエネルギー減衰の過小評価が大きな計算越波量をもたらしたものと考えることができる。法先水深が小さい場合には、波のエネルギーは汀線付近までにほぼ減衰しており、越波量は波の遡上高さや遡上波と引き波との干渉、護岸上でのエネルギー減衰といった要因に強く影響されるため、砕波初期のエネルギー減衰の過小評価が結果的に越波量にはさほど影響しないものと考えられる。従って、法先水深が大きい場合には、砕波前半でのエネルギー減衰を妥当に評価できる3次元モデルを用いる必要があると思われる。

5. おわりに

本研究では、2次元 LES モデル数値計算による緩傾斜護岸上の越波量の評価について検討し、以下の結論を得た。

- 1) 法先水深が大きい場合には、護岸前面の海底勾配が小さい場合でも越波量が相対的に大きくなる場合がある。

- 2) 法先水深が小さい場合には、2次元 LES モデルにより、数値計算を用いて緩傾斜護岸上の越波量を評価することができる。
 - 3) 法先水深が大きい場合には、2次元 LES モデルでは砕波による十分な初期エネルギー減衰が得られず、越波量が過大評価となる。この場合には、3次元モデルを用いる必要があると考えられる。
- 今後は、上記3)に述べたように、3次元 LES モデルを用いた越波量数値計算によって検討を行っていく必要があると考えられる。

参考文献

- 合田良実・岸良安治 (1976): 不規則波による低天端型護岸の越波特性実験, 港研資料, No. 242, 29 p.
- Hino, T., H. Miyata and H. Kajitani (1983): A numerical simulation method for nonlinear shallow water waves, J. Society of Naval Architects of Japan, Vol. 153, pp. 1-12.
- Schumann, U. (1987): Direct and large eddy simulation of turbulence — Summary of the state of the art, Lecture series 1987-06, Introduction to the modeling of turbulence, Von Karman Institute for Fluid Dynamics, pp. 1-36.
- Yabe, T., T. Ishikawa, Y. Kadota and F. Ikeda (1990): A multidimensional Cubic-Interpolated Psuedoparticle (CIP) method without time splitting technique for hyperbolic equations, J. the Physical Society of Japan, Vol. 59, No. 7, pp. 2301-2304.