

有限振幅部分重複波の水粒子速度場の特性に関する基礎的研究
Fundamental Study on Velocity Fields of Finite Amplitude Partial Clapotis

岩田好一朗*・富田孝史**

Koichiro Iwata and Takashi Tomita

This paper aims to discuss the velocity field of the finite amplitude partial clapotis experimentally and theoretically. The velocity field varies according to the nonlinearity of incident wave, the wave reflection coefficient and the location such as wave antinode and node. With increasing of the reflection coefficient, the time profile of horizontal velocity at the antinode is steepened at the crest and is flattened at the trough, and the vertical velocity profile becomes asymmetric with respect to the crest. At the node, the profile of horizontal velocity is sinusoidal, while the second harmonics component is prominent in the time history of vertical velocity, as the reflection coefficient increases.

Keywords : partial clapotis, velocity field, finite amplitude

1. はじめに

海岸・港湾構造物が、波形勾配のかなり大きな波が来襲する砕波帯以深の浅海域に設置されるようになってきた現在、構造物周辺の水粒子運動や底面地形変化などを精度高く予知・予測するためには、有限振幅部分重複波の水粒子運動の特性を明らかにしておくことが基本的に重要である。著者らは、部分重複波の3次近似理論が適用されるような部分重複波の水粒子速度場の特性および3次近似理論の妥当性を明らかにしてきたが¹⁾、本論は、砕波にかなり近い波が入射したときに形成される部分重複波の水粒子速度場の特性を部分重複波の5次近似理論²⁾と水理実験の両面から明らかにしようとするものである。

2. 水理実験

図-1に示す名古屋大学工学部土木工学教室の一端にフラップ型造波装置、他端に消波装置が設置されている片面ガラス張りの鉛直2次元水槽(長さ25、幅0.7、高さ0.9m)を使用した。実験では、静水深 h を20cmに固定し、入射波の周期 T_I を0.9、1.1、1.2秒と変化させ、それぞれの周期に対し入射波高 H_I を $H_I/L_I = 0.030$ 、0.045、0.060(L_I は入射波長)と変化させた合計9種類の入射波を発生させた(表-1参照)。それぞれの入射波に対して、不透過鉛直板のみを設置した場合、Healyの方法に基づく波の反射率が0.5と0.3程度になるように不透過鉛直板の前面に透過性構造物(金網籠に消波ブロック模型を詰めたもの)を設置した場合および反射体(不透過鉛直板や透過性構造物)を設置しない場合の合計4種類の実験を行った。反射体を設置した実験では、反射体の前面から1波長離れた波の腹、その沖側の節およびそれらの中間の位置、また、反射体を設置しない実験でも、反射体を設置した実験とほぼ同じ計測領域の1/4波長間隔の3つの位置において、底面近傍($z/h = -0.95$; z は静水面を基準とした鉛直上向き座標)から波谷近傍までの3~5地点の水粒子速度および水位変動をそれぞれ電磁流速計と電気容量式水位計を使用して計測した。データ解析では、反射体からの反射波が造波板より再反射して入射するまでの間の4~5波を対象とした。

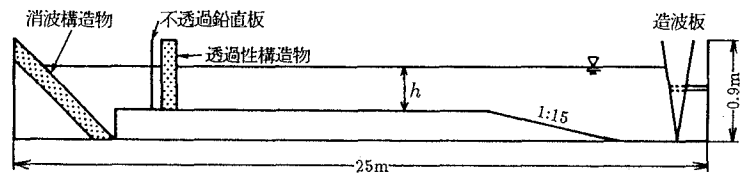


図-1: 実験水槽

表-1: 実験条件

h (cm)	T_I (s)	H_I (cm)	H_I/L_I	$H_I L_I^2/h^3$
20	0.9	3.2	0.031	4.5
		4.8	0.046	6.6
		6.4	0.062	9.0
	1.1	4.1	0.030	10.9
		6.2	0.045	16.4
		8.3	0.060	21.9
	1.2	4.6	0.030	13.8
		6.9	0.045	20.5
		9.2	0.061	27.7

*正会員 名古屋大学教授 工学部土木工学科 (464-01 名古屋市千種区不老町)

**正会員 名古屋大学助手 工学部土木工学科

3. 部分重複波の近似理論における未定パラメータの同定

著者らは、前報¹⁾において示した一定水深域の周波数変化を考慮した部分重複波の3次近似理論を拡張して、部分重複波の5次近似理論解を誘導している²⁾。その理論では、水面波形 η 、速度ポテンシャル ϕ 、入射波と反射波の角周波数、それぞれ σ_I と σ_R 、およびベルヌーイ定数 R が、それぞれ次のように無次元化され、

$$\left. \begin{aligned} k\eta &= \sum_{i=1}^5 \epsilon^i \sum_{j=0}^i \lambda^j \eta_{ij}, \quad \frac{k^2 \phi}{\sqrt{gk \tanh kh}} = \sum_{i=1}^5 \epsilon^i \sum_{j=0}^i \lambda^j \phi_{ij} \\ \frac{\sigma_A}{\sqrt{gk \tanh kh}} &= \sum_{i=0}^4 \epsilon^i \sum_{j=0}^i \lambda^j \sigma_{Iij}, \quad \frac{\sigma_B}{\sqrt{gk \tanh kh}} = \sum_{i=0}^4 \epsilon^i \sum_{j=0}^i \lambda^j \sigma_{Rij}, \quad \frac{R}{g/k \cdot \tanh kh} = \sum_{i=0}^5 \epsilon^i \sum_{j=0}^i \lambda^j R_{ij} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$\epsilon (= kA_{10}; k$ は波数, A_{10} は入射波の1次の振幅)と $\lambda (= A_{11}/A_{10}; A_{11}$ は反射波の1次の振幅)の2つの未定パラメータにより級数表示されている。なお、上式における h と g はそれぞれ静水深と重力加速度である。このため、理論と実験を突き合わせる際には、 ϵ と λ の2つの未定量を同定する必要がある。本論では、Healyの方法に基づく反射率の算定法において波の腹と節の波高を使用することから、波の腹と節の実験波高に理論波高が一致するように ϵ と λ を繰り返し計算から同定した。

図-2は、 $H_I/L_I = 0.030$, $H_I L_I^2/h^3 = 10.9$ の場合の無次元波高 H/L の空間変動を示したものであり、図中の H は波高、 L は波長、 λ_5 は実験と5次近似理論を突き合わせたときに得られた λ である。この図に代表として示されるように、波の腹($x/L = -1.0$)と節($x/L = -1.25$)の波高のみに着目して同定した ϵ と λ を使用した計算結果でも、半波長にわたり実験結果を精度高く表現している。このことは、本論で使用した ϵ と λ の同定法の有用性を示しているものと思われる。

4. 部分重複波の流速場の特性

(1) 最大流速の鉛直分布

$H_I/L_I = 0.060$, $H_I L_I^2/h^3 = 21.9$ の場合の波の腹($x/L = -1$)と節($x/L = -5/4$)における無次元最大水平方向流速 u/C_0 ($C_0 = \sqrt{g/k \cdot \tanh kh}$)の鉛直分布をそれぞれ図-3と4に示す。図中、○は実験値、太一点鎖線は1次理論、細2点鎖線は2次理論、破線は3次理論、実線は4次理論、細実線は5次理論による計算結果を示している。腹の位置では、入射波のアーセル数 $H_I L_I^2/h^3$ が大きくなるほど、図-3に示されるように入射波の進む向き(以下、岸向きとする; 図中、正側)は反射波の進む向き(以下、沖向き; 図中、負側)のものよりも大きくなる。さらに波の反射率が增大するほどこの非対称性は顕著に現れるようになり、例えば、 $z/h = -0.5$ における沖向きに対する岸向きの最大水平方向流速の比率は、 $\lambda_5 = 0.49$ では約2.2、 $\lambda_5 = 0.25$ では約1.6である。この非対称性は、底面近傍においてさえも十分に認められ、このような特性を理論によって表現するためには、2次以上の近似理論が必要であり、特に入射波のアーセル数が大きくかつ波の反射率が大きな場合には、図-3(a)に示されるように4次以上の近似理論が必要になる。

節における最大水平方向流速では、図-4に示されるように、腹における傾向とは逆に、波の反射率が減少するほど岸向きと沖向きの最大流速に非対称性が現れるようになる。沖向き最大流速に対する岸向き最大流速の比でみると、例えば $z/h = -0.5$ において、 $\lambda_5 = 0.49$ では約1.1、 $\lambda_5 = 0.25$ では約1.3になっている。この特

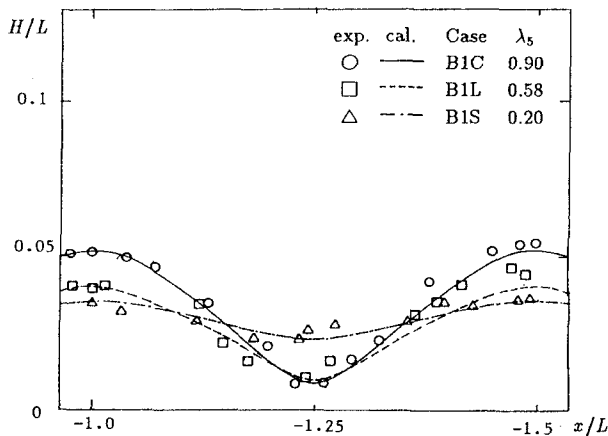
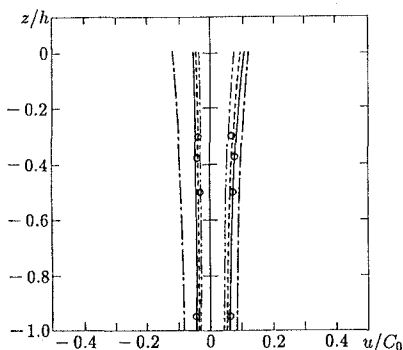
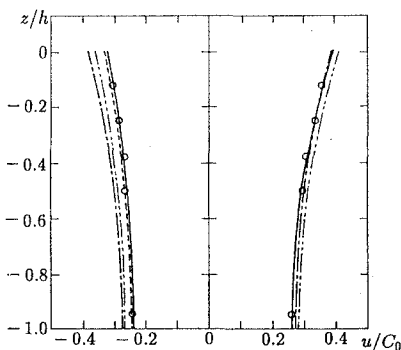


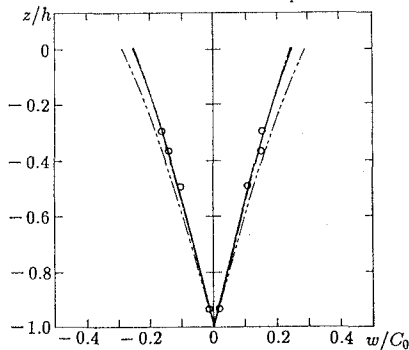
図-2: 波高の空間変動($H_I/L_I = 0.030, H_I L_I^2/h^3 = 10.9$)



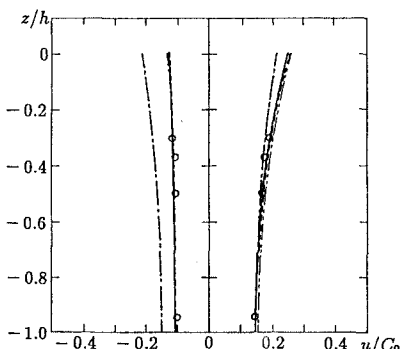
(a) $\lambda_5 = 0.49$ の場合



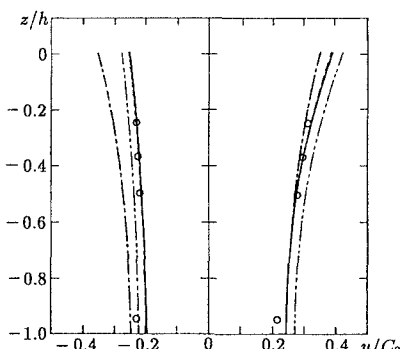
(a) $\lambda_5 = 0.49$ の場合



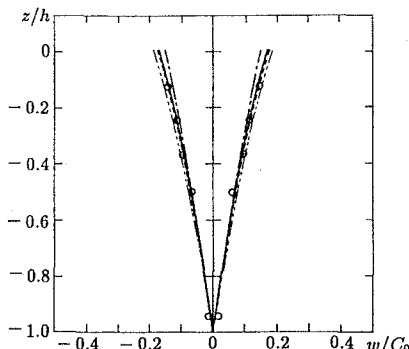
(a) 波の腹の位置 ($x/L = -1$)



(b) $\lambda_5 = 0.25$ の場合



(b) $\lambda_5 = 0.25$ の場合



(b) 波の節の位置 ($x/L = -5/4$)

図-3: 腹の位置 ($x/L = -1$) における最大水平方向流速の鉛直分布 ($H_I/L_I = 0.060$, $H_I L_I^2/h^3 = 21.9$)

図-4: 節の位置 ($x/L = -5/4$) における最大水平方向流速の鉛直分布 ($H_I/L_I = 0.060$, $H_I L_I^2/h^3 = 21.9$)

図-5: 最大鉛直方向流速の鉛直分布 ($H_I/L_I = 0.060$, $H_I L_I^2/h^3 = 21.9$, $\lambda_5 = 0.25$)

(○, 実験値; 太一点鎖線, 1次理論; 細2点鎖線, 2次理論; 破線, 3次理論; 実線, 4次理論; 細実線, 5次理論)

性を部分重複波の2次近似理論^{1),2)}によって簡単に考察してみる。節の位置における水平方向流速の表現式は以下のようであり、

$$\frac{u}{C_0} \Big|_{kx=-\pi/2} = -\varepsilon(1+\lambda) \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \sin \sigma t - \frac{3}{4} \varepsilon^2 (1-\lambda^2) (\coth^2 kh - 1)^2 \cosh 2k(h+z) \cos 2\sigma t \quad (2)$$

λ が1に近づくほど2倍周波数成分の振幅は小さくなる。換言すれば、波の反射率が小さくなるほど、2倍周波数成分の影響が無視できなくなり、岸向きの最大流速の方が冲向きのものよりも大きくなる。

図-5は、 $H_I/L_I = 0.060$, $H_I L_I^2/h^3 = 21.9$, $\lambda_5 = 0.25$ の場合の波の腹 ($x/L = -1$) と節 ($x/L = -5/4$) における無次元最大鉛直方向流速 w/C_0 の鉛直分布を示したものである。上向き (図中、正側) と下向き (図中、負側) の最大流速の鉛直分布形は、腹と節の位置ともに対称形になっている。ただし、同じ入射波条件にもかかわらず、腹の位置では、1次および3次以上の理論による計算結果はほとんど一致しており、実験値も1次理論によって精度よく表現されているのに対し、節の位置では、3次以上の計算結果がほぼ一致し、3次理論によって実験値は表されていることから、最大鉛直方向流速に関しては、腹よりも節の位置において高次近似理論が必要になることが推察される。

(2) 流速の時間波形

流体内部の懸濁物質などの運動や移動を精度高く予知・予測するためには、流速の最大値のみでなく、その時間波形に関する知見も必要になる。水理実験によると、水平方向流速では、自由水面に近づくほど非線形性が若干強く現れるようになるが、入射波条件、波の反射率、波の腹や節の位置などの違いによる時間波形の基本的な特性の変化は、底面近傍の $z/h = -0.95$ における流速の時間波形によっても十分捉えることができるので、本論では、底面近傍 ($z/h = -0.95$) における水平方向流速の時間波形を取り上げ、その基本的な特性を考究する。さらに、鉛直方向流速では、実験で計測可能であった波谷近傍の時間波形を取り上げる。

図-6は、 $H_I/L_I = 0.045$, $H_I L_I^2/h^3 = 20.5$, $\lambda_5 = 0.86$ と 0.40 の場合の波の腹の位置 ($x/L = -1$) における無次元水面変動 η/L , 底面近傍 ($z/h = -0.95$) の無次元水平方向流速 u/C_0 および波谷近傍 ($\lambda_5 = 0.86$ の場合, $z/h = -0.50$; $\lambda_5 = 0.40$ の場合, $z/h = -0.375$) の無次元鉛直方向流速 w/C_0 の平均値まわりの時間変動を示したものである。図中、○印で示される波形は実験波形、1st, 2nd, 3rd, 4th および 5th で示される太実線、太

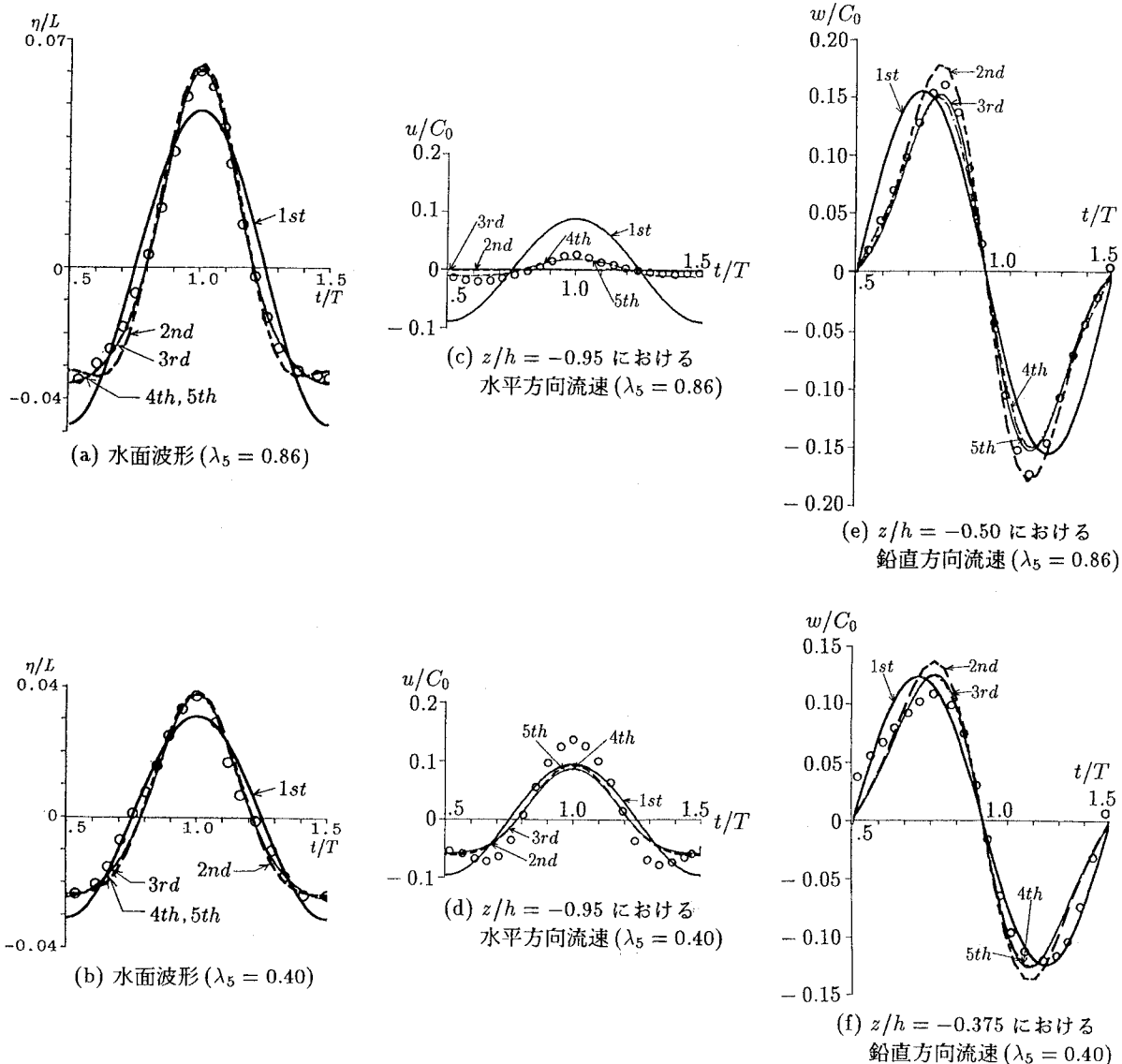


図-6： 波の腹の位置 ($x/L = -1$) における水面変動，水平方向流速，鉛直方向流速の時間波形
 $(H_1/L_1 = 0.045, H_1 L_1^2/h^3 = 20.5)$

破線，実線，破線および点線はそれぞれ1次，2次，3次，4次および5次近似理論に基づく計算波形である。水平方向流速では，水面変動と同様に，入射波のアーセル数が大きな場合，波の反射率が增大するほど上下に非対称な時間波形が現れ，絶対値としては小さいものの尖鋭的に岸向き最大流速が生じるようになる。このような特性をもつ実験波形は， $\lambda_5 = 0.86$ の場合，4次や5次近似理論によってよく表現されている一方で，2次や3次近似理論の波形はほとんど0になっている。これは，2次や3次理論と実験を突き合わせたときに得られた λ の値が1にかなり近くなったためであるが，この影響は水面波形にはほとんど現れず，3次近似理論によって水面の実験波形は精度高く表現されている。このことから，流速場を扱う場合には，水面波形を扱う場合以上に ϵ や λ の推定に注意を払うか，あるいは高次近似理論を用いる必要があることが推察される。また， $\lambda_5 = 0.40$ の水平方向流速の実験波形には，理論波形よりも大きく2倍周波数成分が認められる。これは，透過性構造物内部およびその構造物と不透過鉛直板の間の遊水部において2倍周波数成分の自由波が形成され，それが自由水面よりも流速場に顕著に現れた結果であると思われる。鉛直方向流速では，反射率によるその時間波形の変化は顕著ではないが，入射波のアーセル数が大きな場合にその時間波形のゼロ・アップ・クロス点付近に小さなハンプが現れ，ゼロ・アップあるいはダウン・クロス点を中心とした点対称な時間波形になる。この実験ケースにおいて実験波形と理論波形を比較すると，2次近似理論は実験値を過大評価し，逆に3次以上の理論は過小評価しているが，水面波形において必要である3次理論によって実験波形の特性は概ね捉えることができる。

次に，図-7 は，図-6 と同じ実験条件のときの波の節の位置 ($x/L = -5/4$) における水面変動，底面近傍 ($z/h = -0.95$) の水平方向流速，波谷近傍 ($\lambda_5 = 0.85$ の場合， $z/h = -0.125$; $\lambda_5 = 0.40$ の場合， $z/h = -0.25$)

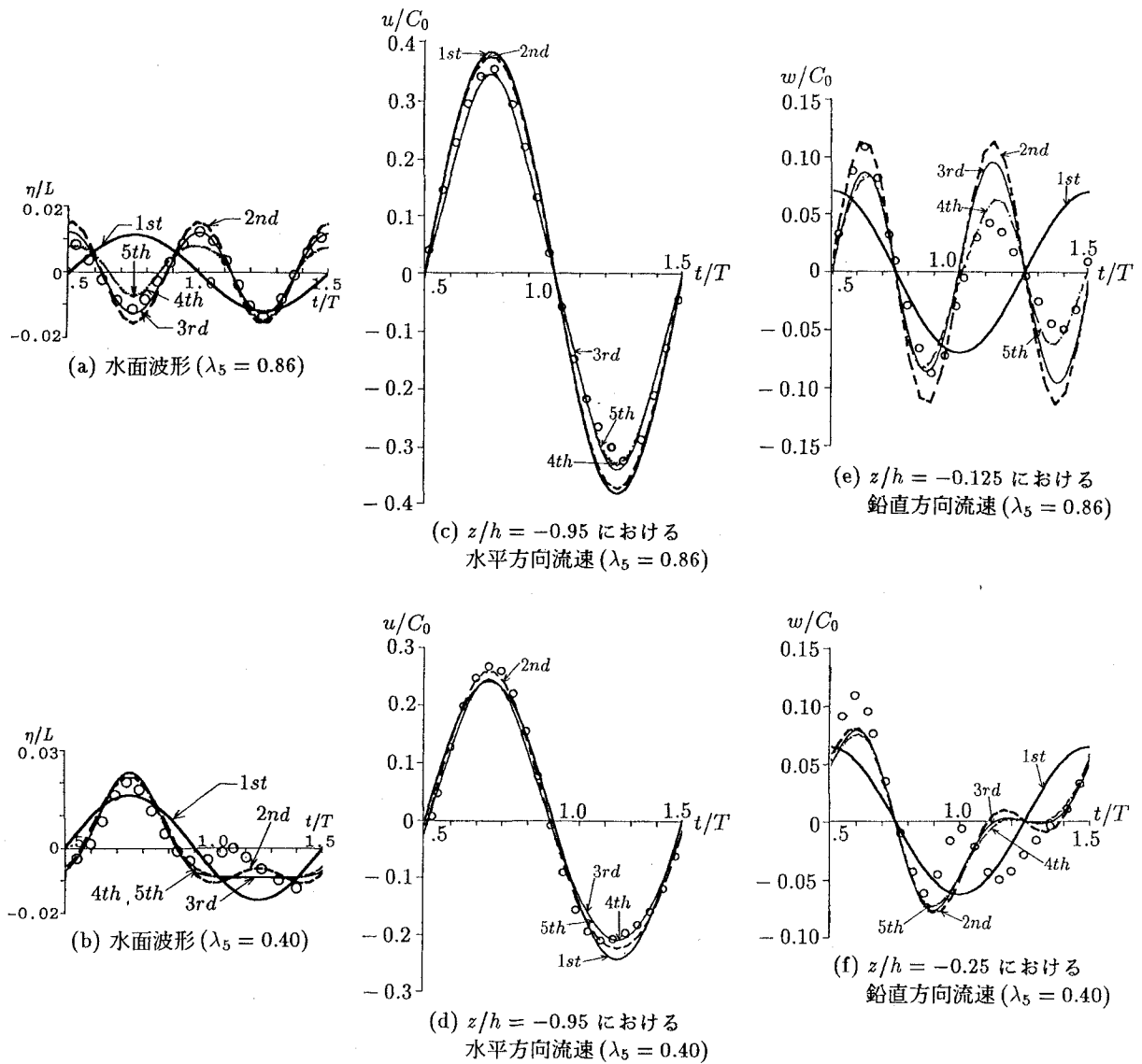
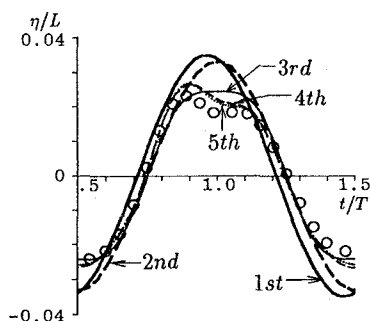


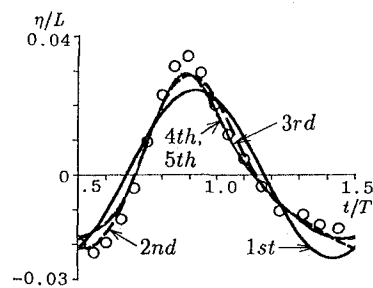
図-7: 波の節の位置 ($x/L = -5/4$) における水面変動, 水平方向流速, 鉛直方向流速の時間波形
($H_1/L_1 = 0.045, H_1 L_1^2/h^3 = 20.5$)

の鉛直方向流速の時間波形を示したものである。節の位置では、反射率が大きくなるほど、水面と鉛直方向流速の時間波形において2倍周波数成分の寄与が大きくなり、谷の位相にハンプが形成されるようになり、さらに反射率が1に近づくとき基本周波数成分の寄与はかなり小さくなるのに対し、2倍周波数成分が大きな影響をもつようになる。このような特性をもつ水面の実験波形は、 $\lambda_5 = 0.86$ の場合、3次近似理論により、 $\lambda_5 = 0.40$ の場合、 $t/T = 1.1$ 付近のハンプは表現できないものの2次あるいは3次近似理論により表現されている。一方、鉛直方向流速では、実験と理論の間に若干の差異が認められるが、 $\lambda_5 = 0.86$ の場合、4次近似理論により、 $\lambda_5 = 0.40$ の場合、水面におけるものと同じ2次あるいは3次近似理論によりその特性は表現されている。さて、水平方向流速では、反射率の増大にともなって、尖った峰と平坦な谷をもった時間波形から正弦的な波形へと変化する傾向が認められ、この傾向は式(30)からも十分推察されることである。これに関して実験波形と理論波形を比較すると、 $\lambda_5 = 0.86$ の場合には4次近似理論、 $\lambda_5 = 0.40$ の場合には2次もしくは3次近似理論により実験波形は表現されている。

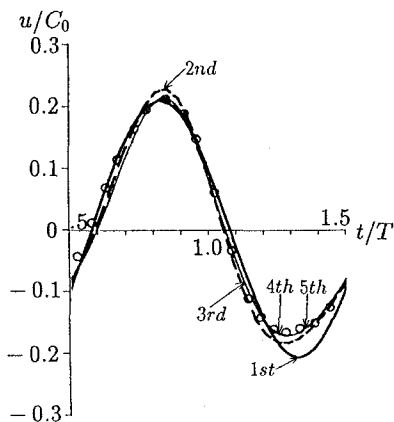
では、波の腹と節の中間の位置 ($x/L = -9/8$) における水面変動と底面近傍 ($z/h = -0.95$) の水平方向流速の時間波形を図-8に示す。入射波の非線形性が強い場合、波の反射率が增大するほど、水面波形は尖った波峰と平坦な波谷をもった上下に非対称な時間波形から、図-8(b)に示すような波峰の前後に非対称な波形を経て、同図(a)に示すような波谷よりも波峰の方が平坦である波形へと変化する。水平方向流速では、反射率の増大によって上下に非対称な波形(図-8(d))から波峰の前後に非対称な波形(同図(c))へと変化するが、反射率が1に近いときに水面波形で認められた峰の平坦な波形は生じないことが実験と理論の両面から明らかになった。こ



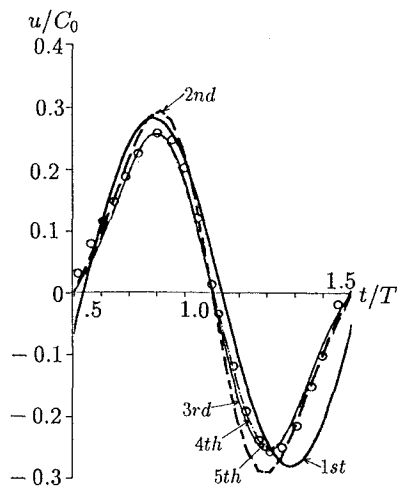
(a) 水面波形 ($\lambda_5 = 0.86$)



(b) 水面波形 ($\lambda_5 = 0.40$)



(c) $z/h = -0.95$ における水平方向流速 ($\lambda_5 = 0.86$)



(d) $z/h = -0.95$ における水平方向流速 ($\lambda_5 = 0.40$)

図-8: $x/L = -9/8$ における水面変動と水平方向流速の時間波形
($H_I/L_I = 0.045$, $H_I L_I^2/h^3 = 20.5$)

のような特性をもった水面や水平方向流速の実験波形は、図示した入射波条件の場合、 $\lambda_5 = 0.86$ より小さい反射率では3次近似理論、 $\lambda_5 = 0.86$ では4次近似理論により精度高く表現されている。

以上、代表的な実験ケースの結果によって流速場の基本的な特性を考究したが、本実験の範囲では、流速場の特性を理論から検討するためには、水面の実験波形を表現したときに必要である次数の近似理論を使用すれば、水平および鉛直方向流速の時間波形の特性を概ね捉えうることが判明した。

5. おわりに

本研究では、水理実験と理論解析の両面から、有限振幅部分重複波の流速場の特性を入射波の非線形性、波の反射率、波の腹や節などの位置と関連づけて考究した。本研究によって得られた主要な結論を以下に要約する。

- (1) 腹の位置では、水平方向流速の時間波形は、水面波形における特性と同様に、波の反射率や入射波の非線形性の増大にともない、その峰で尖り、谷で平坦になる。鉛直方向流速の時間波形は、波の非線形効果によって波峰の前後で非対称になる。
- (2) 節の位置では、入射波の非線形性が大きな場合、反射率の増大にともなう、水平方向流速の時間波形は、尖った峰と平坦な谷をもつ波形から正弦的な波形へと変化し、鉛直方向流速の時間波形では、その谷の位相にハンプが形成される。さらに反射率が1に近い場合には、鉛直方向流速の時間波形は水面波形と同様に2倍周波数成分の卓越した波形になる。
- (3) 腹と節の中間位置の水平方向流速の時間波形は、反射率の増大にともない、尖った峰と平坦な谷をもった波形から波峰の前後で非対称な波形へと変化する。
- (4) 部分重複波の流速場は、水面波形を表現するときに必要な部分重複波の近似解を使用すれば、精度高く予測できる。

参考文献

- 1) 岩田好一朗・富田孝史：部分重複波の流速場の特性に関する研究，海洋開発論文集，Vol.7，pp.13—18，1991.
- 2) Iwata, K and Tomita, T : Fifth-Order Theory of Partial Clapotis in Shallow Water Depth, Memoirs of the Faculty Engineering, Nagoya University, Vol. 43, No. 2, pp. 225—257, 1991.