

コ字配置した無反射多方向造波機を用いた反射波吸収実験

伊藤一教*・勝井秀博**・望月正志***・磯部雅彦****

1. 緒 言

造波機を一列配置した一般的な多方向不規則波実験では、波浪場が一様となる実験領域が狭いこと、模型や水槽からの反射波が精度良く吸収できないことが問題である。広い実験領域を創出する方法として、一列配置した多方向造波機の端部に反射壁を設置する方法(平石, 1991)や造波機をJ型に配置する方法(平石, 1990)があり、それらは実験領域拡張のための有効な方法である。しかし、模型を造波機や反射壁で囲む場合、造波機や反射壁からの再反射波の影響が大きくなり反射波を吸収することが重要になる。それゆえ、反射波吸収造波の理論を、川口(1988)は一方向波に対して、池谷ら(1992)や伊藤ら(1994)は多方向不規則波に対して提案している。一方、多方向造波機を用いた反射波吸収実験は、川口の方法に基づく反射波吸収装置を多方向造波機に適用した実験(平口ら, 1991)が報告されているものの、波向を考慮した反射波吸収理論に基づく実験は報告されていない。

そこで本論では、著者らが提案した多方向不規則波の反射波吸収理論の検証基礎実験として、主に斜め規則波に対して詳細な検討を行い、その結果に基づいてコ字配置した多方向造波機の有効性について検討した。

2. 反射波吸収実験

2.1 反射波吸収理論と制御方法

反射波吸収理論は、微小振幅波理論の下で反射波の狭帯スペクトルを仮定することによって展開され、式(1)で表される。

$$A = H\eta^r + \frac{\partial H}{\partial \omega} \left\{ \frac{1}{2\bar{\omega}} \left(-\bar{\omega}^2 \eta^r - \frac{\partial^2 \eta^r}{\partial t^2} \right) \right\} + \frac{\partial H}{\partial \theta} \cdot \left\{ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\bar{c}}{\bar{c}_\theta} \right) \cot \bar{\theta} \times \eta^r - \frac{1}{2\bar{\omega}^2} \left(1 + \frac{\bar{c}}{\bar{c}_\theta} \right) \cot \bar{\theta} \times \frac{\partial^2 \eta^r}{\partial t^2} - \frac{1}{\bar{k}\bar{\omega} \sin \bar{\theta}} \frac{\partial^2 \eta^r}{\partial x \partial t} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 A は反射波吸収信号、 η^r は反射波水位、 $\bar{\omega}$ は反射波の代表角周波数、 $\bar{\theta}$ は反射波の代表波向、 $\bar{k}$ 、 $\bar{c}$ および $\bar{c}_\theta$ は $\bar{\omega}$ に対応する波数、位相速度および群速度である。 H は反射波水位と反射波吸収信号の伝達関数で、減衰定常波 (evanescent wave) も含んでいる。式(1)の右辺第1項は多方向波のピーク成分に対応する代表的な波を吸収するための項で、右辺第2項は周波数分散性に対する補正項、右辺第3項は方向分散性に対する補正項である。

実際の制御では式(1)中の微分演算子を差分近似する。式(1)中の未知量は $\bar{\omega}$ と $\bar{\theta}$ であり、 $\bar{\omega}$ はあらかじめ造波する目的波と一致させて与え、 $\bar{\theta}$ は式(2)を差分化して時々刻々の波向 $\theta(t)$ を求め、それを時間平均して求める(式(3))。

$$\theta(t) = \cos^{-1} \left[-\bar{c} \frac{\partial \eta^r / \partial x}{\partial \eta^r / \partial t} \right] \dots\dots\dots (2)$$

$$\bar{\theta}(t) = \frac{1}{N} [(N-1) \times \bar{\theta}(t - \Delta t) + \theta(t)] \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 N は吸収制御の経過時間を Δt で割った、サンプリング回数である。

造波吸収を同時に行う場合、造波板前面で計測される水位は、造波した波の水位とそれに伴う減衰定常波、反射波と吸収制御に伴う減衰定常波からなる。造波した波の水位とそれに伴う減衰定常波は造波理論によってあらかじめ算出できるので、計測データからそれを差し引くことによって反射波と吸収制御に伴う減衰定常波が検出できる。反射波水位は吸収信号を計算するために用いると同時にメモリーに蓄積する。そして、メモリーに蓄積したデータは微小時間 Δt 過去のデータとして用いる。まず、複数の現在のデータと過去のデータから差分近似した微分値を計算する。具体的には、 x については中央差分、 t については片側差分する。ついで式(2)、(3)から $\bar{\theta}$ を求め、 H 、 $\partial H / \partial \omega$ および $\partial H / \partial \theta$ を計算したのち、最終的に A を算出する。

2.2 実験装置と実験方法

(1) 実験装置

多方向造波機は52台の造波機で構成され、連続型のピストン式造波機である。幅50cmの造波板には2台の容

* 正会員 工修 大成建設(株)技術研究所
 ** 正会員 博士 大成建設(株)技術研究所
 *** 三井造船(株)物流・メカトロ総括部
 **** 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

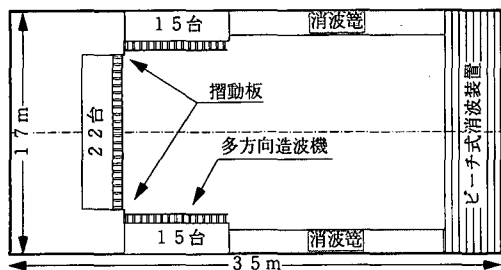


図-1 コ字配置した多方向造波機

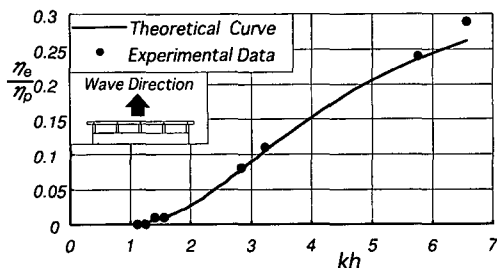


図-3 減衰定常波の実験値と理論値の比較

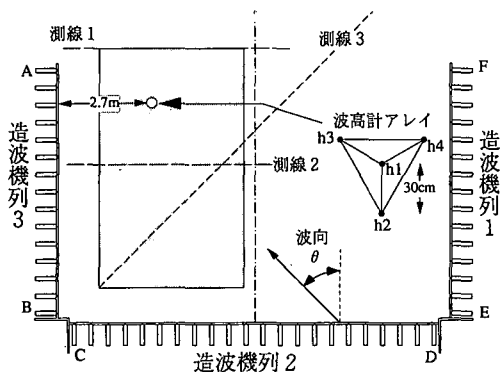


図-2 計測位置と波向の定義

量式波高計が 25 cm 間隔で取り付けられており、波高計の位置は駆動軸の前面とふたつの駆動軸の中央である。

多方向造波機は図-1 に示すように、35×17 m の平面水槽内にコ字型に配置した。各辺の造波機台数は 15, 22, 15 台である。また、水槽の長辺方向に 30 台、短辺方向に 22 台とする L 字配置もできる。コ字型配置の隅角部には、摺動板と呼ぶ止水壁が設置してある。各造波板の中立位置は±40 cm のストロークの範囲で任意にシフトでき、各駆動軸の出力も任意に調整できる。

(2) 実験方法

実験は、図-2 中の造波機列 1 と 2 から造波し、造波機列 3 を式 (1) による吸収制御として行った。造波機列 1 および 2 の片側端部 (C, F) は寛田ら (1993) にない駆動軸 5 本の出力を 100 % から 0 % になるように制御し、端部からの回折波の影響を低減した。また、式 (1) によって吸収制御する場合の両端部は回折波低減の目的で端部制御を行った。

水位変動は、図-2 中のハッチングで示した造波機列 3 の前面の領域を 30 cm 間隔の格子点 (24×15) で計測した。

2.3 減衰定常波の検討

ピストン型造波機で浅海波を造波する場合、減衰定常波の振幅は小さく、深海波の場合に大きい。そこで、図-2 に示す造波機列 2 から直角方向に規則波を発生させ造

波板前面の水位を計測し減衰定常波を計測した。計測条件は周期を 0.7, 1, 1.5 秒、水深を 50, 60, 70, 80 cm、波高を 0.5~8 cm と変化させた。図-3 は、 $\theta=0$ 度の場合の波長水深比 kh と進行波成分と減衰定常波成分の振幅比 η_e/η_p の関係を示し、比較のため理論曲線も示した。図より、実験値と理論値はよく一致している。 $kh<2$ の場合には η_e/η_p は 0.02 以下と無視できる程度であるが、 $kh>3$ の条件になると無視できなくなる。減衰定常波は、波向の関数でもあり波向が斜めになるほど η_e/η_p は小さく、例えば、水深 80 cm、周期 1 秒、波向 45 度の場合、約 0.03 程度である。

2.4 規則波に対する吸収性能

図-4 は、周期 1 秒、波向 45 度、波高 5 cm、水深 80 cm の入射波に対して造波機列 3 を吸収制御した場合の波高分布である。比較のため造波機列 3 を固定して反射壁とした場合、入射波の波向を造波板に対して直角と限定し、減衰定常波を無視した場合 (波向を無視した方法) の結果を示す。

造波機列 3 が入射波を吸収できる場合には造波した波の波浪場が形成され、吸収できない場合には入射波と反射波の 2 方向重複波浪場が形成される。図-4(a) 反射壁の場合、造波機列 3 の前面で重複波浪場が形成されている。また、(b) 波向を無視した方法では波高変動が小さくなるものの、重複波浪場が形成されている。これは、波向を無視したことによる吸収効率の低下を示している。一方、式 (1) で吸収制御した (c) ではほぼ一様な波高分布となっている。ただし、造波機端部 A の周辺では重複波浪場形成の傾向が見られるが、周期を 1.5 秒にした図-5 についても同様の結果となっており、式 (1) による吸収効率は高い。ついで、波向を 60 度とした場合の結果を図-6 に示す。図より、等値線のパターンは若干異なるものの重複波浪場の形成される領域や等値線の値に明瞭な差異がなく、両吸収制御で同程度の吸収効率と判断できる。

図-7, 8 は、図-2 の各測線について $\theta=45$ 度と 60 度の場合の波高を比較したものである。図中の実線で示した曲線は Issacson (1989) と同様の境界要素法を用いて

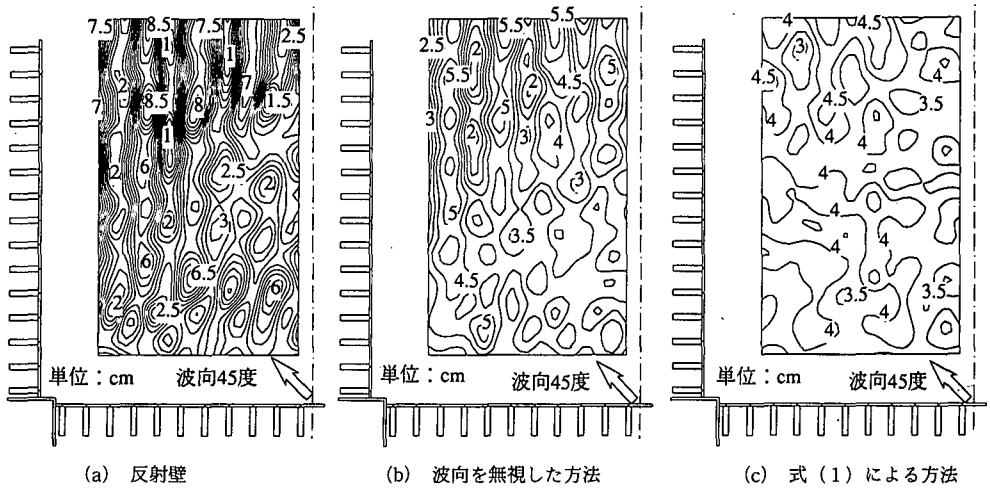


図-4 波高分布の比較 ($T=1\text{ s}$, $H=5\text{ cm}$, $\theta=45\text{ 度}$, 規則波)

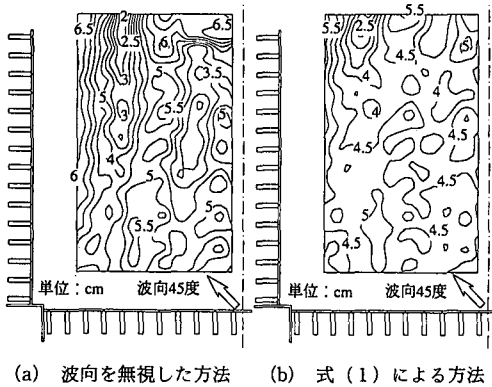


図-5 波高分布の比較
($T=1.5\text{ s}$, $H=5\text{ cm}$, $\theta=45\text{ 度}$, 規則波)

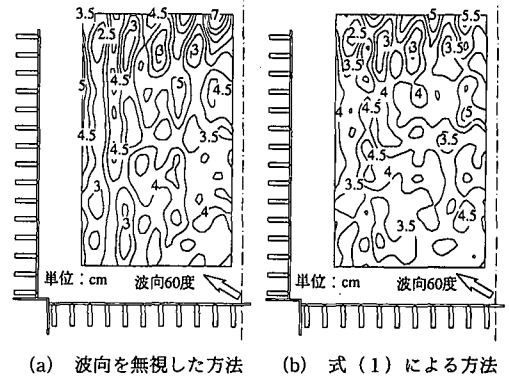


図-6 波高分布の比較
($T=1\text{ s}$, $H=5\text{ cm}$, $\theta=60\text{ 度}$, 規則波)

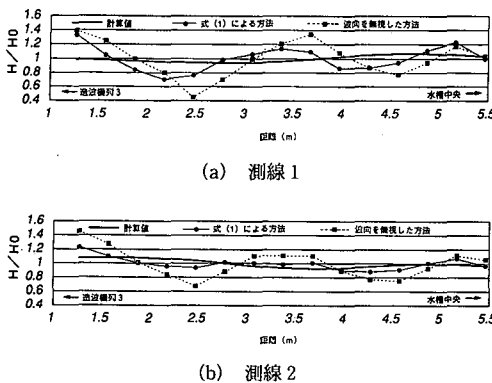


図-7 各測線における波高分布の比較
($T=1.5\text{ s}$, $H=5\text{ cm}$, $\theta=45\text{ 度}$, 規則波)

実験条件にあわせて計算した結果である。ただし、計算では造波機列3を開境界とした。また、波高 H は各測線の平均波高 H_0 で無次元化した。図-7 ($\theta=45\text{ 度}$)より、

(a) 測線1における波高分布は、吸収制御の違いにより波高変動の絶対値に違いはあるものの、吸収制御方法によらず大きく変動している。これは、端部制御によって造波板の動きが小さくなり、そこからの反射波と端部からの回折波の影響による。一方、測線2の式(1)による方法の波高分布は一樣で、計算値とも比較的一致している。しかし、図-8 ($\theta=60\text{ 度}$)の場合には、測線2においても両者共に波高変動が大きい。この結果は、波向60度になると造波機列2にとって波向30度となるため幅50 cmの造波板で造波するには厳しい入射波条件となり、入射波自体が一樣な波高分布になっていないことと、造波機列3に対して入射角が直角に近くなるため吸収制御の違いが現れないことによる。

2.5 多方向不規則波に対する吸収性能

ここでは、多方向不規則波の吸収性能について検討する。多方向不規則波を造波機列1・2から造波し、造波機列3で吸収制御を行い、方向スペクトルを推定して検

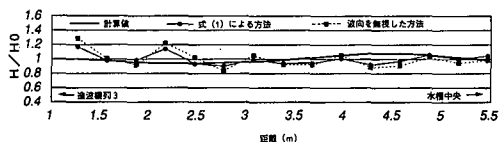
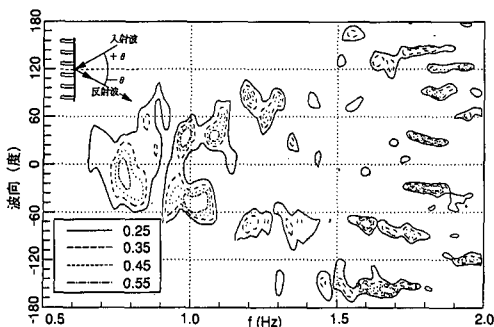
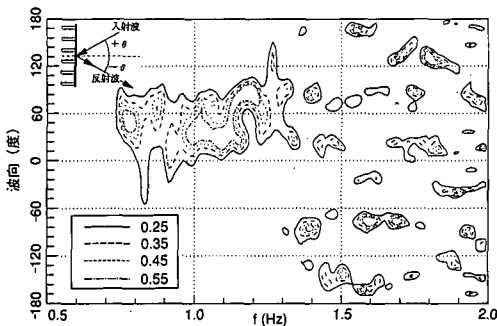


図-8 測線2における波高分布の比較
($T=1$ s, $H=5$ cm, $\theta=60$ 度, 規則波)



(a) 反射壁



(b) 式(1)による方法

図-9 波浪場の方向スペクトル推定値
($S_{\max}=70$, 主波向45度)

討した。方向スペクトルの推定はMLM法(1969)を用いた。MLM法は、入・反射波共存場となる領域では入・反射波の位相干渉によって推定精度が低下する可能性がある(磯部・近藤(1983))。そこで、波高計アレイの配置は造波板から一波長以上(2.7 m)離れた位置に設置した。

図-9は、ブレッダシュナイダー・光易型周波数スペクトル、光易型方向関数、方向集中度 $S_{\max}=70$ 、有義波高4.5 cm、有義波周期1秒、主波向45度の方向スペクトルの結果である。図-9(a)反射壁の場合、周波数0.75 Hz、1 Hzおよび1.2 Hz付近にピークがある。1 Hzと1.2 Hzの入射波にたいして反射波が明瞭に現れている。0.75 Hzのピークは造波機列1と3の間で再反射を繰り返す成分であることを観察により確認した。一方、図-

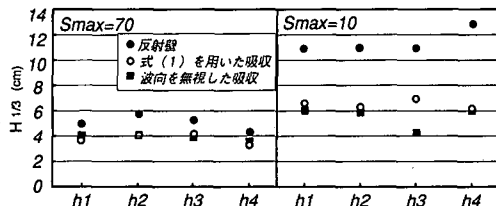


図-10 各測点の波高の比較(主波向45度)

9(b)造波機列3を吸収制御した場合、1.3 Hz以下の範囲では入射波成分の波向範囲にエネルギーが存在するのみで反射波のエネルギーが非常に少ない。これは、式(1)の吸収制御が高い吸収性能を有していることを示している。一方、1.3 Hz以上の高周波成分になると反射波が存在する。これは、式(1)が反射波の狭帯スペクトルを仮定していることと、造波板幅が有限長であることに起因している。また、 $S_{\max}=10$ の場合も同様の結果であった。ついで、同じ実験条件で、波向を無視した制御方法も行った。その結果、方向スペクトルは式(1)による結果とほぼ同じ結果となった。この結果は、波向を無視した方法は不規則な入射波の特定の波群(例えば、波向が直角に近いもの)に対して精度良く吸収でき、それ以外の場合に反射波が発生するが、方向スペクトル推定の際に、反射波の影響がクロススペクトルの推定誤差に吸収され、スペクトルの平滑化によって表面化しないことによっていると考えられる。

図-10は、波高計アレイ(h1~4)の有義波高を示している。方向集中度の高い $S_{\max}=70$ の場合には制御方法に依存せず一様である。しかし、方向集中度の低い $S_{\max}=10$ の場合、式(1)による結果は一様な波高であるのに対し、波向を無視した方法では波高が一様になっていない。これは浅い角度の反射波を十分吸収できないためと考えられる。

3. 多方向造波機のコ字型配置の有効性

多方向造波機をコ字型配置した場合、隅角部からの回折波により波浪場が乱れることが問題となる。ここでは、隅角部からの回折波低減方法について検討する。

連続式の造波機をコ字配置する場合、構造上の理由から隅角部に造波機を設置することは容易ではない。よって、隅角部はエネルギー供給のない不連続領域となり回折波が発生する。具体的には図-11に示すように隅角部に波高の低い領域が現れ、回折波により波浪場が乱れる。そこで、回折波の影響を低減する方法として二つの方法を検討する。第一は、造波板の中立位置を水槽内側にシフトして摺動板の張り出した部分を小さくする現実的な方法(図-12)。第二に図-13に示すように、他の造波機の駆動力を利用して隅角部に簡易な造波装置を設置する

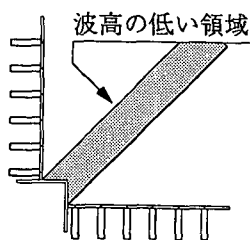
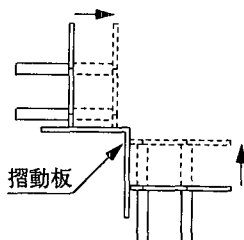
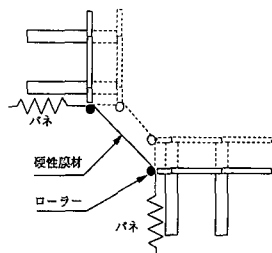
図-11 隅角部の影響
概念図図-12 回折低減方法
その1

図-13 回折低減方法その2

方法を考える。この装置は、膜材（硬性ゴムなど）を端部の造波板にローラーなどを介して取付け、膜材の両端はパネで緊張する。そして、造波板の動作に追従して緊張した膜材も動くものである。図-14 は測線3における実験値と計算値の波高分布を比較したものである。造波条件は周期1秒、波向45度で、中立位置シフト量を0および399mmとした場合、および中立位置シフト量0mmで図-13の装置があるとした場合の3通りを検討した。図より、中立位置シフト量を399mmとした実験値と計算値は比較的一致する傾向にある。中立位置シフト量を変化させた計算結果を比較すると、中立位置を前方にだすことによって波高変動が小さくなり、これにより隅角部の影響を低減できることがわかる。また、図-13の装置がある場合には、中立位置シフト量0mmであっても一様な波高分布が得られることがわかる。造波のみ行う場合には中立位置を前方に移動することで一様な波高分布が得られるが、吸収造波を行う場合には、駆動軸のストロークに余裕が必要となるので図-13の装置が有効になってくる。ただし、図-13の装置の実現性については、今後の検討課題である。

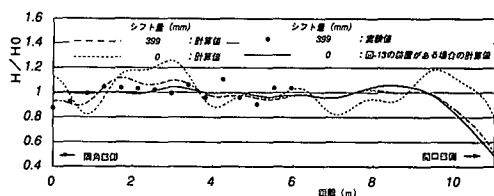


図-14 隅角部からの回折波の影響と低減方法の効果

4. 結 論

反射波吸収理論（式（1））の検証実験を、コ字配置した多方向造波機を用いて実施した結果、高い吸収効率を有することがわかった。また、反射波吸収制御と端部および隅角部の回折波通減制御を併せて行うことによって、コ字型造波機配置による実験領域拡張が可能になることを明らかにした。

謝辞：本研究を行うに当たり、大成サービス（株）野口隆光氏、安西真樹氏、岸裕之氏に多大なる御助力を頂いた。また、中央大学水口 優教授には有益な助言を頂いた。ここに、謝意を表します。

参 考 文 献

- 池谷 毅・秋山義信・今井亘爾 (1992): 多方向不規則波の吸収造波理論, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 81-85.
- 磯部雅彦・近藤浩右 (1983): 入・反射波共存場における方向スペクトルの推定法, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 44-48.
- 伊藤一教・磯部雅彦・勝井秀博 (1994): 多方向不規則波の反射波吸収造波理論, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 101-105.
- 寛田博章・水口 優・森屋陽一 (1994): 多方向造波装置において一様な波の場を作るための端部制御方式, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 106-109.
- 川口 隆: 波面検出及び速度制御を用いた無反射造波方式, 三井造船技報, 128号, pp. 20-24.
- 平石哲也 (1991): サーベント型造波装置の有効造波領域の拡張法に関する実験的検討, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 126-130.
- 平石哲也 (1990): カナダ造波装置探訪記, 埋立と浚渫, No. 156, pp. 30-38.
- 平口博丸・鹿島遼一・田中寛好・石井敏雅: 多方向不規則造波機の反射波吸収性能に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 121-125.
- Capon, J. (1969): High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis, Proc. IEEE, 57, pp. 1408-1418.
- Isaacson, M. (1989): Prediction of directional wave due to a segmented wave generator, Proc. of 23rd IAHR Congress, Vol. C, pp. 435-442.