

管路及び開水路における非定常流れの乱流構造の相違について

Difference between Turbulent Structures in Unsteady Open-Channel Flows and those in Pipe Flows

中川博次* 瀬津家久** 石田吉宏*** 門田章宏**** 藤本英典*****
By H.Nakagawa, I.Nezu, Y.Ishida, A.Kadota and H.Fujimoto

Compared with *pipe flow*, turbulent structures in *unsteady open-channel flows* have not been well understood as yet, because experimental equipments to generate unsteady open channel flows were hard to be constructed and because the measurement of turbulence of unsteady flume were also very difficult by conventional hot-film anemometers. Authors successfully measured turbulent structure in unsteady open-channel flow with a LDA system. In this report, the difference between turbulent structures in unsteady open-channel flows and those in pipe flows is indicated

Keywords; Mean velocity profile, Turbulent intensity, Reynolds stress, Friction velocity

1 はじめに

開水路流れの一つである河川の流れでは、その非定常流の乱流構造とそれに伴う物質輸送を解明することが、安定河道の設計といった河川計画上の問題や水域環境を考える上で重要である。なぜなら河川の流れは洪水流に代表されるように非定常流であり、その洪水流が発生するとき、乱れ的作用によって土砂輸送に及ぼす影響が大きくなり、そのことが治水工事の主たる目的である氾濫防止への対策の一つ、河道の安定に直接関係してくるからである。

しかし、これまで実験装置や計測機器の制限から非定常開水路流れの乱流計測を高精度に行うことは非常に困難であった。したがって、従来の洪水時の乱流構造の研究はいくつか存在するが、これらは洪水時のピーク流量を基準とした準定常流とみなして解析されており、その乱流構造に及ぼす非定常効果に関しては不明な点が多い。このことに関する課題にまず着手したのが林ら(1988)¹⁾で、彼らはホットフィルム流速計によって、洪水の増水期(加速流)の方が減水期(減速流)より乱れが強いことを示唆した。また実河川での洪水観測でも、増水期の方が浮遊砂濃度が大きくなり、乱れも強いと推測されている。²⁾

一方、自由水面がない閉管路の乱流構造は、山口(1992)³⁾が大動脈流を対象として、その血液速度を計測したところ、加速期より減速期の方が乱れが強くなり、開水路乱流の非定常構造とはまったく逆の特性が存在するようである。

そこで本論文では、最近開発された流量自動制御装置とレーザ流速計を使用し、開水路非定常流の基礎的な乱流特性を調べ⁴⁾、従来の研究で行われている閉管路での非定常乱流特性をピックアップし、両者の相違を考察する。

* 正会員 工博 京都大学工学部教授 環境地球工学教室 (〒606 京都市左京区吉田本町)

** 正会員 工博 京都大学工学部助教授 環境地球工学教室

*** 学生員 京都大学大学院 環境地球工学専攻

**** 学生員 京都大学大学院 環境地球工学専攻

***** 学生員 京都大学工学部 土木工学科

2 非定常管路流の乱流構造

ここでは、自由水面のない閉管路での非定常乱流構造について、滑面の交番振動流に関する研究を取り上げ、簡単にレビューする。振動流はその一周期の中で、ゼロ流速を中心に加速⇄減速と流速が変化するため、慣性項を無視しえないこと、常に変動する圧力勾配に支配を受けている、などの特徴があり、乱流遷移、抵抗則、乱流構造などの面で準定常流とみなすことのできない現象である。また振動流は、サージングや水撃圧などの人工管路の他に、血管中の脈動流や呼吸気管系においても見られる現象で、様々な分野で研究の対象とされる問題である。

まず、Hino・Sawamoto・Takasu⁶⁾の乱流遷移に関する実験結果をもとに、滑面振動流の乱流特性について示す。図-1は、高レイノルズ数での瞬間流速の様子である。図中、 T はゼロ流速から最大流速まで加速される時間で無次元化された時刻であり、 $T=1$ が正の最大流速、 $T=3$ が負の最大流速（反転）を表す（ y :中心軸からの距離、 d :円管直径）。また、 $T=2\sim4$ での流速は反転するが、熱線流速計のためこの反転は検出されない。この図からわかるように、減速時（ $1 < T < 2$ ）に高周波の激しい乱れが生じ、加速時（ $0 < T < 1$ ）には滑らかなものとなる。この乱れは、激しい運動量交換などの乱流特有の性質を持っており、これが現れると流速分布が急激に変化し、対数分布となる（図-2）。このことは、流速が軸付近では急激に減少し、逆に管壁近くで増加することから言える。次に、日野ら⁷⁾の交番振動流の各位相における平均流速分布、乱れ強度分布、レイノルズ応力分布などの乱流構造についての実験結果を示す。この実験は空気振動流を対象としたものであるが、レイノルズ数が同一ならば水流振動流と同じである。図-2は、加速時及び減速時での流速分布を片対数表示したものである。加速時には対数則の成立する範囲が狭く、減速時になると（急激に乱れが発生、発達する結果）、対数分布則は広い範囲にわたって成立し、その範囲は T とともに増加する。このように、減速域では対数則に従い、定常流の場合と同じく $\kappa = 0.4$ 、 $A_0 = 5.5$ となるようである。

各位相での乱れ強度 u', v' が図-3に示されている。管路の中心軸までは壁面の影響は及ばないので、乱れは小さく、 $u' \cong v'$ の等方化指向が見られるが、壁面に近づくにつれ、乱れ強度は減速域で一段と強くなるのみでなく、 u' が v' の2倍或いはそれ以上となり非等方性が強くなる。さらに、圧力勾配が順勾配（ $-dp/dx > 0$ ）の位相では、流れは加速されているが、圧力勾配がゼロになると流速はほぼ最大値に達し、逆勾配（ $-dp/dx < 0$ ）となると、流速が減少し始め、乱れの発生は圧力勾配が負でゼロに近い位相で起こる。⁸⁾

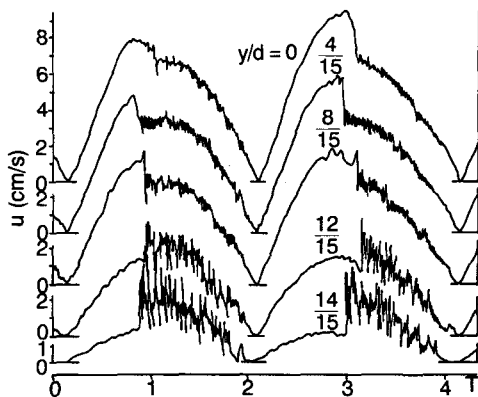


図-1 瞬間流速の位相変化

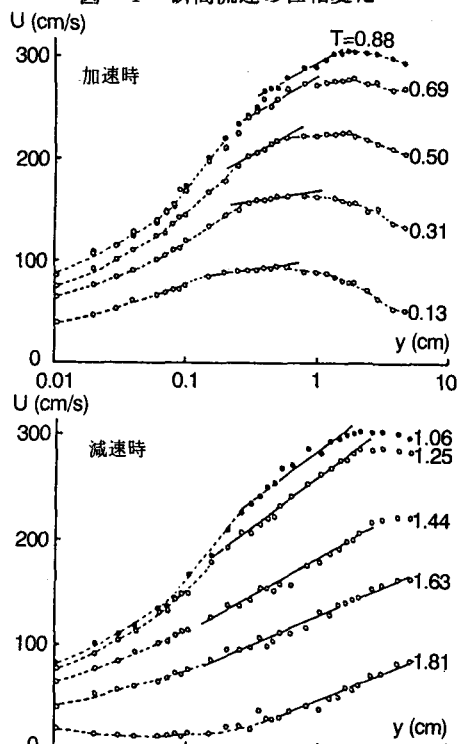


図-2 加速時・減速時の対数則の成立範囲

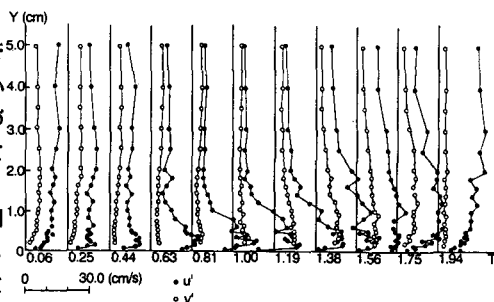


図-3 乱れ強度の位相変化

3 非定常開水路流の乱流構造

3.1 実験水路及び水理条件

実験は、長さ 10m、幅 40cm、高さ 50cm の可変勾配型循環水路で行われた。水路への流量 $Q(t)$ は、コンピューターで制御された電磁流量計とインバータ揚水ポンプで任意の非定常ハイドロ波形を設定できる。⁴⁾

非定常開水路流れの基本的特性をまず検討するために、滑面乱流を対象にした。また、非定常流を発生させる直前のベースフローの流量 $Q_b = 2.5(\ell/s)$ 、水深を $H_b = 4.0(cm)$ 、水路勾配 $i = 1/10000$ とした。

流量変化は三角波とし、増水時間及び減水時間を等しく設定して $\Delta t = 30, 60, 90, 120(sec)$ の

表-1 水理条件

Δt	30sec	60sec	90sec	120sec
Case	FT3T0	FT3T1	FT3T2	FT3T3
$Q_p(\ell/s)$	7.5	7.5	7.5	7.5
$H_p(cm)$	5.65	5.85	5.95	5.95
F_{rp}	0.446	0.423	0.413	0.413

4通りとし、計4ケースの実験を行った。水理条件を表-1に示す。流速はDantec社の2成分レーザ流速計、水深変化は容量式波高計(計測技研製)で計測され、AD変換後、大型計算機で電算処理された。波高計はレーザ流速計の計測位置(上流端から7m)近傍に設置された。

3.2 解析方法及び非定常パラメータ

非定常流の乱流構造を解析する上でもっとも困難となる点は、平均流速成分 $U(t) \equiv \bar{u}(t) - u(t)$ をいかに定義するかである。ここで、 $\bar{u}(t)$ は瞬間流速、 $u(t)$ は乱れ成分である。極低周波数で構成される平均流速成分と高周波の乱れ成分とを分離する解析法には、(a) 移動平均法、(b) フーリエ成分法、(c) アンサンブル平均法がある⁴⁾。非定常流の理論では(c)が最も妥当である。しかし、非定常の開水路実験では、アンサンブル個数を十分多くするには非常に長時間の計測を要し、一般には困難である。また、増水開始のトリガとなる水深変化(管路では圧力変化に対応し、高精度の圧力計測が可能である)の計測精度が管路に比べて低く、開水路では(c)は適切でない。そこで、(a)と(b)を用いて解析結果の比較を行ったところ、(b)の方法が平均流データのばらつきが小さくなるので、本研究では(b)を採用した。なお、フーリエ成分の項数は $m = 7$ にとり、バースト周期よりも1オーダー以上大きいため、極低周波の平均流と高周波の乱れを合理的に分離できると考えられる⁴⁾。

流れの非定常性をマクロに表すパラメータの一つとして、洪水波を一次元 Kinematic Wave と見なし、高橋(1969)⁹⁾のパラメータ等があるが、本研究では、Kinematic な準定常的な乱流でなく、非定常性の強い Dynamic な乱流構造にも注目しているので、新たに非定常性パラメータを水深上昇速度と移流速度との比を用いて以下のように定義する。

$$\alpha \equiv \frac{(h_p - h_b)/T_p}{U_c} \quad (1)$$

ここで、 h_b と h_p はベース及びピーク時の水深である。また、移流速度 U_c は、以下の式で近似的に表す。

$$U_c \approx \frac{U_p + U_b}{2} \quad (2)$$

ここで、 U_b と U_p はベース及びピーク時の平均流速である。

3.3 実験結果および考察

3.3.1 平均流速分布

図-4は、増水期及び減水期の平均流速 $U(t)$ を無次元時間 $T = t/t_p$ をパラメータとして片対数表示したもので、 $T = 0 \sim 1$ で増水期、 $T = 1 \sim 2$ で減水期となる。また、増水期及び減水期の各々の図に対し、定常流(ベース流)で成立する対数分布を白丸で併示した。この図から、レーザ流速計で測定され

た平均流速は片対数グラフ上で良好に直線分布している。すなわち、 $T = 0$ で定常流の対数則に従うが、増水期になるとこの勾配はやや急になる。一方、減水期になると、この勾配は次第に減少し、 $T = 2$ のベース流に戻ると、定常流の対数則に漸近する。

境界層、管路、開水路、さらに複雑乱流においても、主流の条件によらず、定常流での対数則におけるカルマン定数 κ が0.41の普遍定数であることが認められている¹⁰⁾。そこで、平均流速分布の勾配から摩擦速度 U_* 及びせん断応力 $\tau = \rho U_*^2$ が評価できる(これらの特性については後述)。

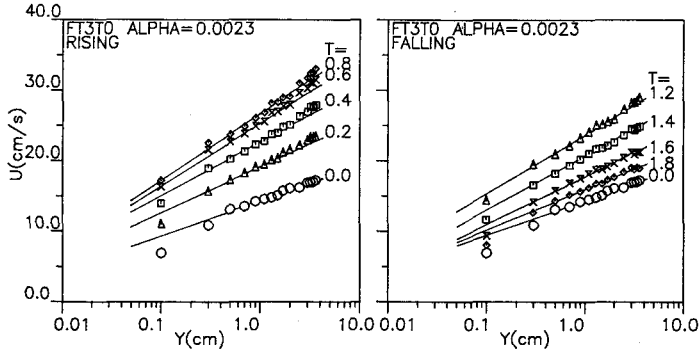


図-4 平均流速分布

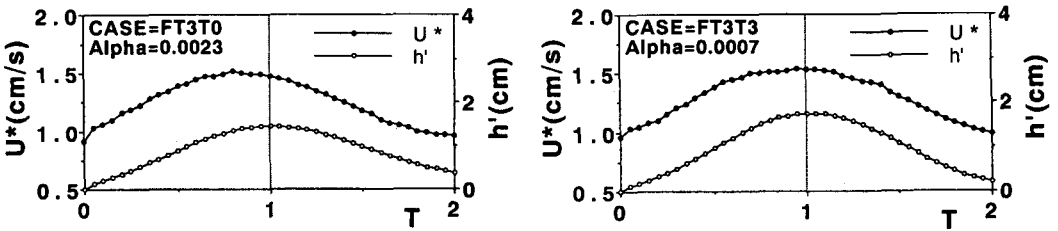


図-5 U_* 及び水深変動量 h' の位相変化

3.3.2 摩擦速度及び河床せん断応力の変化特性

摩擦速度 U_* は、乱流理論で最も重要な特性速度スケールであり、各種の乱れ特性値の普遍関数表示や組織渦などのスケール則を確立する上で不可欠な水理量である。

図-5は、非定常パラメータを系統的に変化させた場合の摩擦速度 U_* とベースフローからの水深変動量 $h' = h - h_b$ を無次元時間 $T = t/T_p$ 上にプロットした図である。

この図から、摩擦速度あるいはせん断応力は、水深が最大になる以前にピークに達し、この両者の位相のズレは非定常パラメータ α が大きいほど顕著になることが、重要な点として挙げられる。

摩擦速度のピーク時から h' のピーク時までの遅れ時間(Lag Time)と、非定常パラメータ α の関係を示したのが図-6である。また、増水期の平均せん断応力と減水期の平均せん断応力の比 τ_r/τ_f と非定常パラメータ α との関係を示したのが図-7である。両図から、非定常性が大きくなるほど、ほぼ直線的に増加し、大きな時間遅れ、及び増水期と減水期の平均せん断応力の差が大きくなっていくことがわかる。このように、増水期で水深が最大になる以前にせん断応力がピークをとることは、土砂輸送を考えると上できわめて重要な知見である。

図-8では、 U_* が水深変化 h'/h_p に対して反時計回りのループを描いており、非定常性が大きいほど(α が大きいほど)このループの描く面積が大きくなる。すなわち、同一水深において増水期のほうが U_* が大きくなり、非定常性が大きくなるほどそれらの差が顕著に現れてくることがわかる。

上述のように、摩擦速度 U_* が乱れに大きく関与しており、礫津の普遍分布式から、 U_* が大きくなるほど、乱れが強くなる。したがって、開水路非定常流においては、減水期より増水期の方が乱れが強くなることがわかり、2.の非定常管路流の特性とは異なったものとなる。

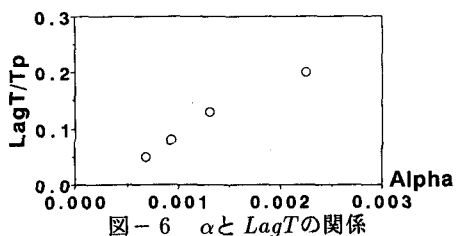


図-6 α と $LagT$ の関係

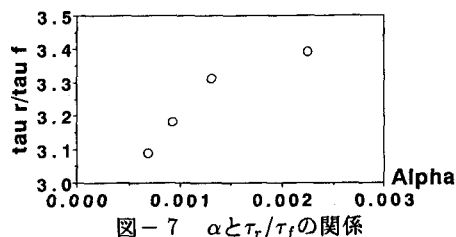


図-7 α と τ_r/τ_f の関係

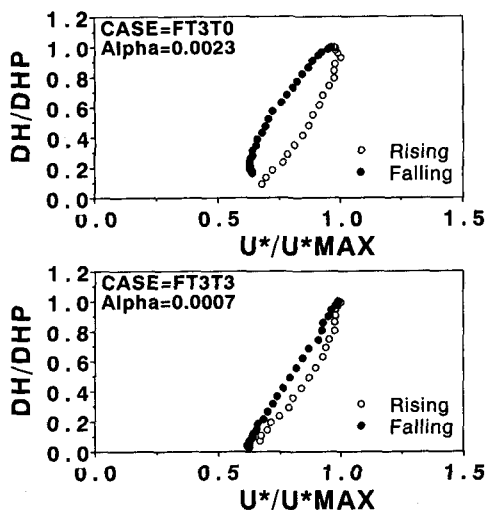


図-8 水深変化に対する摩擦速度の変化特性

3.3.3 乱流構造に及ぼす非定常効果

同一計測点における増水期・減速期の乱流構造について考察する。図-9は、底面からの高さ $Y = 5mm$ の位置での平均流速 U 、乱れ強度 u' 、 v' 、レイノルズ応力 uv の実測値を水深変化 h'/h'_p に対して、時間をパラメータと示したものである。図-9から明らかに平均流速 U も水深変化に対して反時計回りのループを描いている。このループは α が大きくなると大きく弧を描いた反時計回りのループとなり非定常効果が大きくなる。また、流量 Q は $h \cdot U$ に比例するから、非定常開水路の $h-Q$ 曲線は図-9のようにループを描くことになる、この事実は洪水河川でよく観測されている。すなわち、同一水深では、増水期の流速や流量の方が減水期より大きく、このためせん断力も大きくなる。また一方、乱れの計測値にはかなりのばらつきが見られるが、平均流速と同じ向きにループを描いているようであり、同一の水深かつ同一地点に対して、増水期の乱れの方が減水期より大きくなる可以说。また、図-3での壁面近傍の同一地点における乱れ強度の位相変化は減速期の方が大きくなるのに対し、開水路では逆の特性となることがわかる。

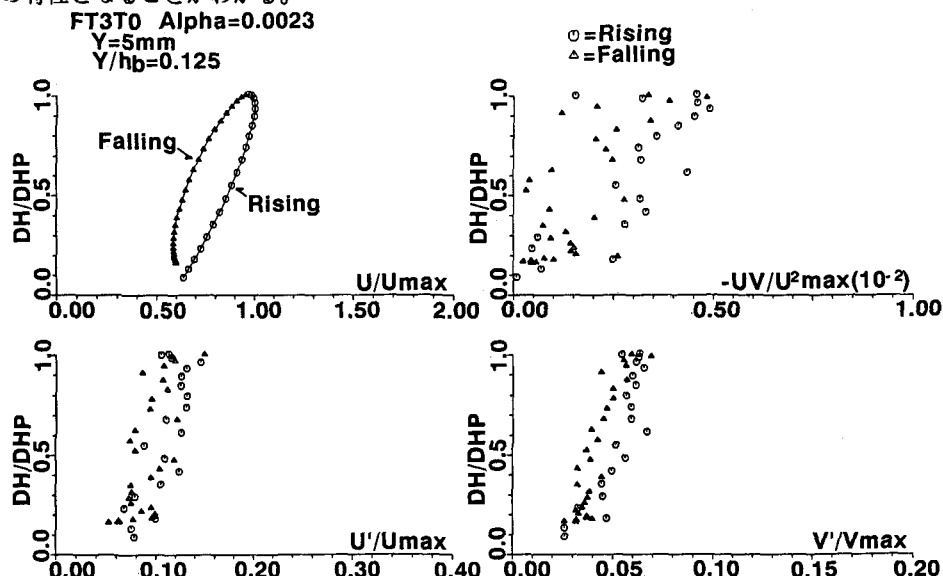


図-9 水深変化に対する平均流速、乱れ強度及び Reynolds 応力の変化特性

4 おわりに

非定常開水路流の乱流構造に関して得られた実験データと、非定常管路流に関する従来のデータを比較検討した結果、次の結論が得られる。(1) 平均流速に関して、管路非定常流では減速時に乱れが発生し、乱流の対数則が成立する。一方、開水路流では、乱流であれば非定常性に関係なく常に対数則が成立する。(2) 壁面近傍においては、摩擦速度、乱れ強度及び Reynolds 応力の時間変化は、管路非定常流では減速時において大きく、開水路非定常流では増水期に大きくなる。(3) 開水路非定常流では、非定常パラメータ α が大きくなるにつれ、水深のピークと摩擦速度のピークの位相差が大きくなり、増水期及び減速期の平均せん断応力の比が大きくなる。また、同一水深かつ同一の場所での乱れは、増水期の方が減水期に比べて大きくなる。

以上の結論は、ある固定地点の平均流速 U の時間的变化に注目して、管路流の加速時(減速時)を開水路流の増水期(減水期)に対応させ、それらの非定常乱流特性の相違について述べたものである。ところが、これを圧力勾配 ($-dp/dx$) に注目して考えると以下ようになる。

非定常開水路流の圧力勾配は、圧力 $p \approx \rho g(H - z)$ と仮定すると、次式で表される。

$$-\frac{dp}{dx} = -\rho g \frac{dH}{dx} = -\rho g \left(\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{U} \frac{\partial H}{\partial t} \right) = -\rho g \left(-\frac{1}{c} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{U} \frac{\partial H}{\partial t} \right) = -\rho g \frac{1}{U} \frac{\partial H}{\partial t} \left(1 - \frac{U}{c} \right) \quad (3)$$

上式で、波速 $c > U$ であるから、増水期では $-dp/dx < 0$ 、減水期では $-dp/dx > 0$ となる。一方、非定常管路流では、加速時では $-dp/dx > 0$ 、減速時では $-dp/dx < 0$ となるから、非定常流における乱れの発生機構は表-2 のように整理できる。

表-2 圧力勾配による乱れの発生機構の分類

$-dp/dx$	< 0	> 0
Unsteady Open-Channel Flow	Rising Stage	Falling Stage
Unsteady Pipe Flow	Deceleration Period	Acceleration Period
Turbulent Production	Increasing	Decreasing

以上のことから、非定常流の乱れの発生機構は、圧力勾配に大きく影響を受けることが考えられる。また、開水路流の乱流構造に及ぼす非定常効果を考える場合、非定常管路流・境界層流に関して圧力勾配を考慮した非定常パラメータがいくつか存在するのと同様に、開水路流の非定常パラメータを圧力勾配と関連させる必要があることがわかる。

参考文献

- 1) 林・大橋・大島, 第 20 回乱流シンポ講演論文集, pp.154-159., 1988
- 2) 長谷川和義, 種々のスケールにおける流れと流砂運動の同時計測による土砂輸送・河床変動機構の解明, pp.45-55., 1992
- 3) 山口隆美, 第 24 回乱流シンポ講演論文集, pp.48-53., 1992
- 4) Nezu, I and H. Nakagawa, International Symposium on THE TRANSPORT OF SUSPENDED SEDIMENTS AND ITS MATHEMATICAL MODELLING, pp.165-189., 1991
- 5) 橋津・中川・越智, 第 24 回乱流シンポ論文集, pp.144-148., 1992
- 6) Hino, Sawamoto and Takasu, J. Fluid Mech. 75, pp.193-207., 1982
- 7) 日野・柏柳・中山・原, 交番振動流の乱流構造に関する実験的研究 (1), なかれ, pp.180-216, 1986
- 8) 日野・柏柳・中山・原, 第 25 回水講演論文集, pp.455-462, 1981
- 9) 高橋保, 一樣水路の不定流, 京大防災研年報, 第 12 号 B, pp.515-527, 1969
- 10) Nezu, I and H. Nakagawa, Turbulence in Open-Channel Flows, IAHR-Monograph, Balken 出版社