

高茎草本の洪水時の挙動

Altherbosa behavior during flood

研究第四部 主任研究員 狩野 晋一
研究第四部 次 長 森 吉尚

オギやヨシのような茎が堅く背の高い草本（高茎草本）は全国の河川における代表的な植物であり、河川特有の景観や生物と密接に関係している。一方、洪水時においては、これらの草本が繁茂する領域は死水状態に近くなるため、倒伏せずに河道断面の多くを占めると流下能力に影響する。すなわち、高茎草本が倒伏するかしないかによって河川の流下能力に大きく影響することがあり、倒伏の判定や倒伏・非倒伏に応じた適切な粗度係数設定が重要である。

本報は、実河川での洪水時の草本の状況や実験水路での草本の倒伏状態について観察された事項を整理するとともに、従来の粗度係数設定方法に用いられたデータに、その後の実験データやフィールド調査データを加え、倒伏判定や粗度係数の推定方法について検討したものである。

検討の結果、従来把握されていなかった、“洪水時の水位より草丈が高い区間”における倒伏判定や粗度係数の推定方法を提案した。

キーワード：高茎草本、倒伏、粗度係数、推定方法

Tall, hard-stemmed, herbaceous plants (altherbosa) such as *Miscanthus sacchariflorus* and *Phragmites communis* are typical plants growing along the rivers in Japan, and are closely related to waterfront landscapes and living organisms in and around rivers. In times of flood, areas densely covered with these herbaceous plants become "dead water" or "near dead water" areas, so if they occupy a sizable portion of the channel cross section and are not pushed down by flood water, the discharge capacity of the channel is severely affected. It is therefore important to set the roughness coefficient at a proper level according to whether or not the plants are actually pushed down.

In this study, the results of observation of herbaceous plants pushed down by water in a river and in a laboratory flume are reviewed. The criteria for judging whether or not herbaceous plants will be pushed down and the methods of estimating roughness coefficient are also studied by adding newly collected test data and field survey data to existing data used for the conventional method of determining roughness coefficient. The study proposes methods for judging whether or not plants will be pushed down and for estimating the roughness coefficient in a river section where the plants grow higher than the flood water level.

Key words : altherbosa, pushed down (by water), roughness coefficient, estimation method

1. はじめに

河川植生の繁茂は、河積を狭め洪水の流下を阻害するという一面がある一方で、河岸の侵食を防止したり、様々な生物にすみ場やえさを提供するという機能も有しており、河道内の植生管理を如何に行うかは、河川管理者にとって治水上、環境上それぞれの観点から非常に重要な課題となっている。

河川植生の特徴や生物との関係等については、「河川植生の基礎知識」¹⁾において、河川を代表する植生に関する情報が整理されている。また、樹木に関しては、「樹木管理の手引き」²⁾として、治水上の機能や影響等が整理されている。しかし、河道内の草本による治水上の作用に関しては、「河道計画検討の手引き」³⁾において草本域の粗度係数の設定方法が示されているが、適用範囲が限られるなどの課題を有していた。

河道内の草本域は、流速や水深によって草本の倒伏状況が変化し、倒伏状況によって流れへの影響（粗度係数）が変化するという特徴がある。流速が大きく出水後に一面倒伏が認められるような区間や、出水時の水位が草丈に比べて高くしかもある程度の流速を生じるような区間では、倒伏すると仮定して従来の方法により粗度係数を設定できる。しかし、緩流部や河口部では倒伏するかまたは倒伏しないかの確認や推定が困難であり、また、草本域に設定する粗度係数により、掘削等により確保すべき河道断面が変化するという問題がある。

そこで本報では、実河川での洪水時の草本の状況や実験水路での草本の倒伏状態について観察された事項を整理するとともに、従来の粗度係数設定方法に用いられたデータ⁴⁾に、その後の実験データ^{5)、6)、7)}やフィールド調査データを加え、倒伏判定や粗度係数の推定方法について検討したものである。

なお、本報は以下の条件を持つ河川区間に適用することとする。

- ・オギ、ヨシ、ツルヨシ、オオイタドリ、ススキ、マコモのような背の高く茎の太い草本（高茎草本）が密生して生育する区間（写真-1参照）。
- ・上記草本の洪水時の挙動や水理的な作用が不明なため、河川の管理に課題を有する区間



写真-1 本報が適用される河川区間の例

2. 高茎草本の洪水時の挙動

高茎草本の洪水時の倒伏状況は、作用する外力、河道の形状、草本そのものの倒伏し易さ等様々な要因により変化し、また、倒伏の範囲も高水敷の中で場所により異なることがある。ここでは、洪水時の実河川や実験水路での高茎草本の状態について観察された事項を整理した。

2-1 高茎草本の形状特性

高茎草本は、以下のような特徴を有する。

- ・草丈 (hv) が1.5~3.0m程度^(注)
- ・茎が太くて堅い
- ・幅の広く長い葉を有する

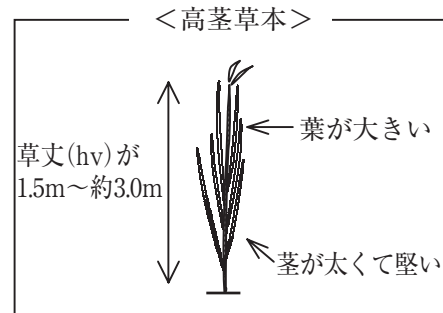


図-1 高茎草本の特徴

(注) hvは、地上から茎の先端までの高さをとる。茎の先端から葉が伸びているが、これはhvに含めない。

2-2 水没・非水没、倒伏・非倒伏の定義

本報では、洪水時の草本の状態を、倒伏と非倒伏、水没と非水没の2つの観点から整理している。図-2に倒伏・非倒伏、水没・非水没の本報における定義を示す。

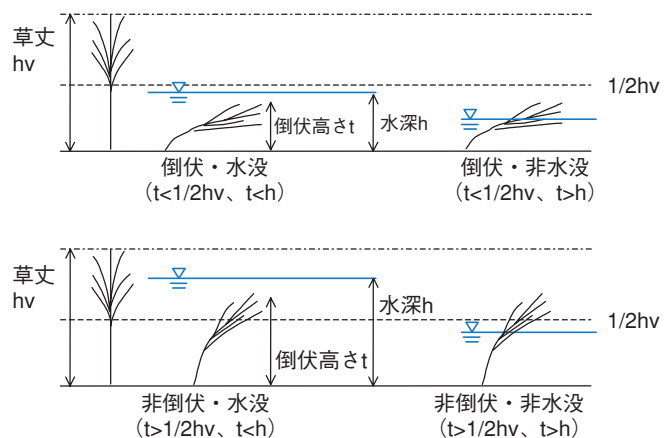


図-2 倒伏・非倒伏、水没・非水没の本報における定義

〈倒伏・非倒伏の定義〉

洪水時の外力によりたわみ状態になった草本の倒伏高さが、草丈の1/2より小さい場合を“倒伏”、全くたわんでいないか、たわんでも草丈の1/2より低くならない場合を“非倒伏”とする。

〈水没・非水没の定義〉

洪水時の草本の倒伏・非倒伏に係わらず、草本が冠水していれば“水没”、冠水していなければ“非水没”とする。

2-3 洪水時における高茎草本の挙動

(1) 実河川での観測事例

図-3は、吉井川における洪水時のツルヨシの倒伏・水没状況の観察結果から水深・草丈比 (h/hv) の時間的変化を示したものである。草丈1.8m程度のツルヨシは、水深1.36m、 $h/hv \approx 0.75$ の時 (12時20分) に完全に水没する。すなわち草本がたわんだ状態となって水没したことを表している。その後、水没した状況が約3.5時間続き、その間での倒伏状況は不明であるが、15時50分に再び h/hv が約0.75になった時点で穂先が現れた。

一方、図-4は同様の観測を利根川 (草丈2.5mのオギ) で行った結果である。この場合、 $h/hv \approx 1.0$ で水没し、水没時にはほとんど草本がたわんでいなかった。さらに、水没から30時間後の0時時点では、 $h/hv \approx 0.6$ と水深が小さくなったにも係わらず水没したままであった。

また、利根川調査地点には洪水後のオギの倒伏が認められ、吉井川では一部斜めになった草本もみられるが、全体としてはほぼ直立状態である。

洪水時の高茎草本は水位や流速の増加に伴い徐々にたわみ、水没し、さらに流量が増加すると倒伏状態になると考えられる。

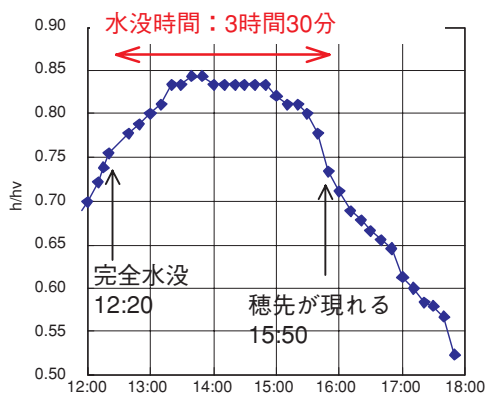


図-3 吉井川のツルヨシのh/hvの時間的変化

※h/hv：水深(h)と草丈(hv)の比

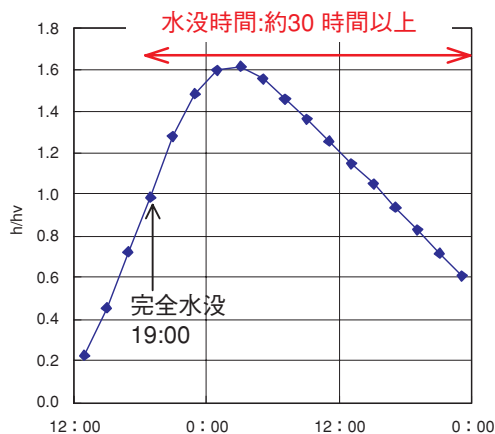


図-4 利根川のツルヨシのh/hvの時間的変化



写真-2 洪水後のツルヨシ
(吉井川河床勾配：1/900)



写真-3 洪水後のオギ
(利根川河床勾配1/2,800)

六角川では、ヨシの繁茂する高水敷に複断面形状の実験水路を造設し、洪水時のヨシの挙動を観察している (写真-6) 7)。水路内のヨシの倒伏領域は、流量の増加、水深・流速の増大に伴い、上流側から下流方向、

横方向に拡がっていくことがわかった。また、ヨシの倒伏は、低水路と高水敷との境界から拡がる場合が多いが、流量規模によっては、密度が低い箇所等から拡がる場合もある。

ケース1

低水路側から倒伏



ケース2

高水敷の中央部から倒伏



写真-4 六角川実験水路のヨシの倒伏範囲の拡がる状況

※ヨシの倒伏はケース1のように低水路との境界側から拡がる場合が多いが、流量規模によっては、密度が小さい場所などヨシ群落内の弱いところから倒伏が始まる場合がある。

(2) 倒伏状況とその要因

洪水時の草本の倒伏状況について、実河川の洪水時のデータと水路実験データの収集を行い整理した結果、洪水時に草本が倒伏するか否かは、以下の要因が係わることが観察された。

- ・作用する外力（水深や流速）
- ・河道の縦横断・平面形状
- ・周辺の地被状況
- ・草本そのものの倒伏しやすさ

水深と草丈の比 h/h_v を縦軸にとり、洪水時や実験時の水面勾配を横軸にとり、倒伏・非倒伏を分けてプロットしたものが図-5である。なお、図中のデータは大型水路実験⁵⁾や現地実験等による既往研究成果^{6), 7)}と実河川での調査結果である。水面勾配が大きいと流速が大きくなるため h/h_v が小さくても倒伏するが、水面勾配が緩くなると、 h/h_v が1を超えても、すなわち草丈以上の水深となっても倒伏しない場合がある。

図-5に示すように、水面勾配と h/h_v の関係より、水面勾配が急なほど、また、 h/h_v が大きいほど倒伏しやすいという傾向が見られる。なお、現地では、全体的に倒伏傾向にあるが部分的には倒伏していない場所や、横断的に倒伏高さの異なる場所もある。河道の形状や周辺の地被状況により、草本域への流れの作用が異なってくるため、場所的な倒伏状況の違いが生じたものである。

倒伏状況に影響する外力（水面勾配と h/h_v の関係）以外の要因としては、以下のものが挙げられる。

● h/h_v 以外で倒伏状況に関係する要因

- ・草本域とみず道の幅の関係

中州や河岸に高茎草本が繁茂する場合は、みず道の幅が草本域の幅と同程度以上ある場所では水深が低いと高茎草本は倒伏せず、みず道の幅が狭いとその流速が早くなり、流れに接する草本が倒伏しやすくなる。
- ・上流の地被状況

高茎草本の上流側は流れの作用を直接的に受けるため倒伏し易い。また、高茎草本の上流側に倒伏しやすい柔らかい草が繁茂している場合でも、柔らかい草が倒伏し、流れが直接ぶつかるようになり高茎草本も倒伏し易い。
- ・周辺の地被状況

柔らかい草と高茎草本が混生し高水敷上にパッチ状に高茎草本が生育する場合は、柔らかい草が倒伏しそこにみず道が形成されると、高茎草本は倒伏しにくくなる。
- 場所によって倒伏状況が異なる場合に作用する要因
 - ・平面的な流況

中州の上流や水際、水衝部など流れが直接ぶつかる場所では草本は倒伏しやすい。また、幅の広い河岸や高水敷に草本が繁茂する場合は、堤防側の方が倒伏しにくい。

- ・横断的な河床高、高水敷高の変化
利根川のように広い高水敷に高茎草本が繁茂する場合は、高水敷の横断的な河床高に応じて水深が変化し、それに伴って倒伏状況も横断的に異なるようになる。
- ・草本そのものの倒伏しやすさ
流量の増加とともに、草本そのものの倒伏しやすさにより倒伏しやすい場所から倒伏が始まり、流量がさらに増加すると全面的に倒伏する。

(3) 水没状況

高茎草本がたわまない場合、 $h/h_v > 1$ となる水深で水没するが、実際には流れにより草本がたわむため、 $h/h_v < 1$ の水深であっても草本は水没する。

図-6はさきの図と同様に h/h_v と水面勾配の関係のグラフに水没・非水没を分けてプロットしたものである。水面勾配が大きいほど h/h_v が小さくても水没することが判る。水面勾配が大きいほど流速が速くなり、たわみが大きく倒伏高さが小さくなるためである。

3. 粗度係数の推定方法

高茎草本の繁茂する領域は、草本が水没しないと流速がきわめて遅くなり、流下能力評価の上からは死水域として扱うことができる。また、流速が作用して徐々に草本がたわみ水没すると、草本の上層に死水域とはみなせない流れが生じるようになる。

このように、高茎草本域では倒伏・非倒伏、水没・非水没の別が流下状況を左右するため、洪水時の倒伏状況等を適確に把握しておくことが重要である。以下では倒伏状況等を推定する方法について述べ、さらにそれをもとに粗度係数を推定する方法を示した。

3-1 洪水時の倒伏、水没状況の判定

(1) 倒伏判定

従来より、草本域の粗度係数推定において高茎草本は、摩擦速度 $u_* > 22\text{cm/s}$ で倒伏、 $u_* < 12\text{cm/s}$ で直立、その間がたわみであるとして扱われている。本報では、倒伏高さが草丈の半分以下になる場合を倒伏、それ以外を非倒伏と定義しているの、従来の考え方とは異なっている。

従来のように摩擦速度を倒伏の判定条件とすると横軸（対数軸）を勾配、縦軸を水深とするグラフ上では倒伏判定ラインは逆比例の直線となるはずである。実際のデータからもその傾向はみられる。しかし、勾配が大きい範囲や小さい範囲ではデータが少ないこともあるが、直線として倒伏判定を行うと水位評価上危険側となる範囲にデータが分布している。これを考慮す

ると、倒伏判定には実際の倒伏データを包絡するような曲線を用いることが適切である。

さらに、図-5に実線で示すラインは結果的に水路実験の結果（青色）が包絡されている。これに対して実河川のデータ（赤色）は上方にずれた位置にある。実河川では実験水路のような単純な流れでなく、また、地形や草本の生育も単一でないことから、実河川のデータを包絡する破線のラインで倒伏判定を行うことが望ましい。

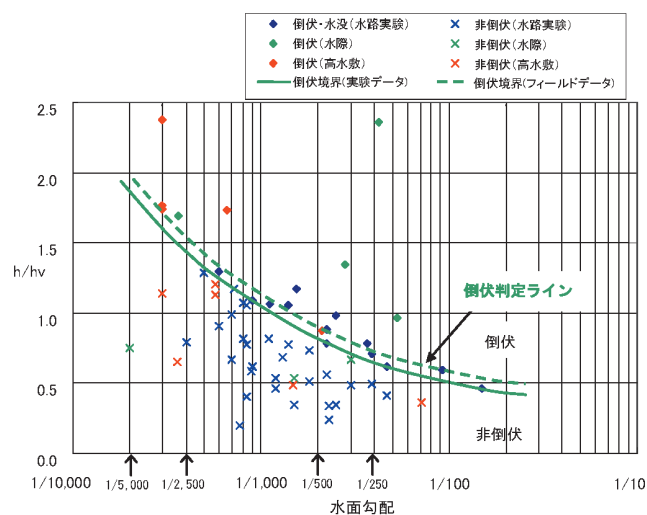


図-5 h/h_v と水面勾配による倒伏判定グラフ^{6), 7), 8)}

(2) 水没判定

図-6は倒伏（水没）とともに水没・非水没の別を整理したものであるが、倒伏判定ラインと同様な曲線によって水没・非水没のデータが区別される。そこで、このラインを水没判定ラインとして用いることとする。なお、 $h/h_v = 1.0$ では草本が直立していても水没することから、その直線とデータによる水没・非水没境界で水没判定ラインとしている。

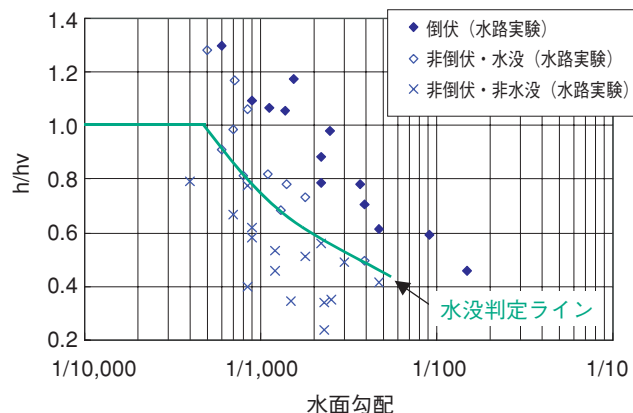


図-6 水面勾配、 h/h_v と水没の有無の関係

3-2 粗度係数の推定

洪水時に草本に作用する外力とそれによる草本の倒伏形状及び粗度係数については図-7のような関係があり、草本の倒伏状態に応じた粗度係数を設定することが重要となる。

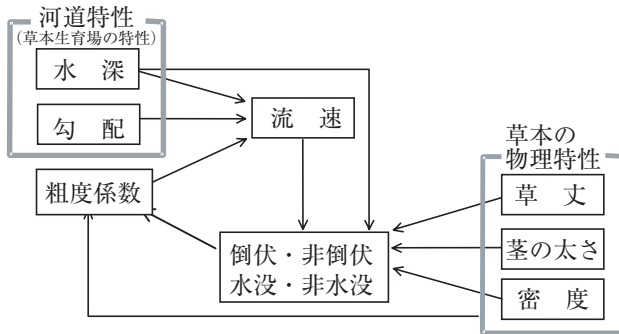


図-7 洪水時の外力と草本の状態～粗度係数の関係

図-8は草本域の平均流速測定値とそれをもとに算定した粗度係数の関係を示したものである。これによると、流速が0.4m/s以上ではすべて倒伏データであり、粗度係数は0.06程度となる。なお、実河川のデータは流速や勾配の精度が低いので参考として捉える必要がある。

また、流速が0.15m/s以下は非水没のデータ領域であり、粗度係数は0.15以上となっている。このような領域は実用上死水域とみなすことができる。

図-9は、水没した草本域の粗度係数と前述の倒伏、水没判定ラインを示したものである。倒伏判定ラインよりも上側のデータはすべて $n=0.06$ 程度かそれ以下であり、水没判定ラインに近いほど n は大きくなっている。

h/h_v が1.1より大きい領域については従来の粗度係数推定方法を用いることができることから、 h/h_v が1.1以下の場合には、この等値線をもとに粗度推定を行うこととする。

図-10は、 n の値が0.09、0.12、0.15となる境界を図-9をもとに図示したものである。実データにおける n の等値線は観測誤差等により必ずしも図-10のように滑らかではないが、倒伏（水没）すれば $n \approx 0.06$ であること、および小さくなれば、倒伏（水没）しなくなり徐々に死水状態へ移行することから、図-10の近似は妥当であると考えられる。

たとえば、図-10は次のように利用することができる。すなわち、計画高水位に相当する h/h_v とその区間の河床勾配から n を求め、これを第一近似値として準二次元不等流計算等を実施する。その結果をもとに、 h/h_v や水面勾配をチェックし第一近似値での仮定値と

差があればそれらの値を用いて再度図-10から n を求める。また、流速と計算に用いた n の関係が図-8の関係を整合するかチェックする。 n の設定方法をフローチャートで示せば、図-11のとおりである。

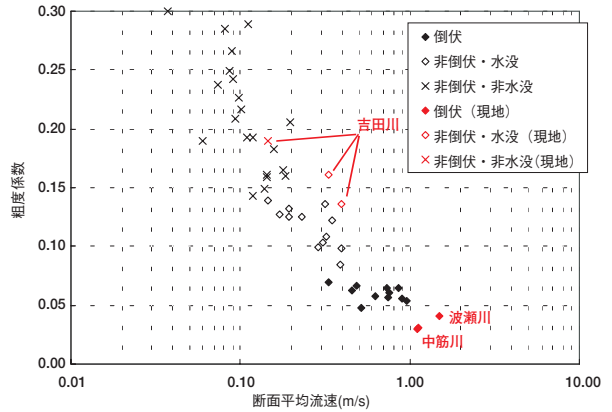
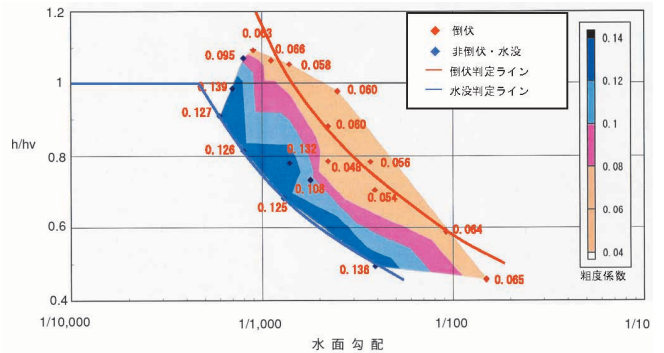


図-8 水路実験及び現地データの流速と粗度係数の関係



図中の赤字が粗度係数

図-9 h/h_v 、水面勾配と粗度係数の関係

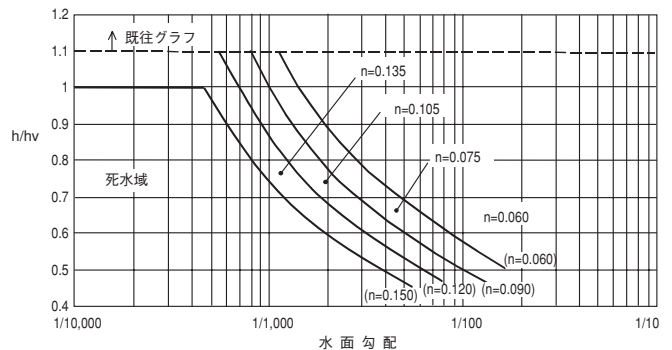


図-10 粗度係数推定グラフ

なお、以上のデータは、主に水路実験で得られたものであり、水路の条件上以下のような範囲内のデータ

しか収集できていない。

- (a) h/h_v …最大1.3
- (b) 水面勾配…倒伏したデータ：1/67～1/1,250
非倒伏・水没のデータ：1/259～1/1,667
- (c) 草本の特性…草丈：1.5～1.8m
茎の直径：0.4～0.7cm
繁茂密度：15～80本/m²（ただし、実験対象草本のみの本数であり、下草の本数は考慮していない）

そのため、図-10の利用にあたっては、適用する河川での草本の特徴や洪水時の観測データ等をもとに推定された粗度係数の精査を行う必要がある。また、今後も観測データの蓄積を図り、図-10を補強し粗度係数の推定方法を確立することが望ましい。

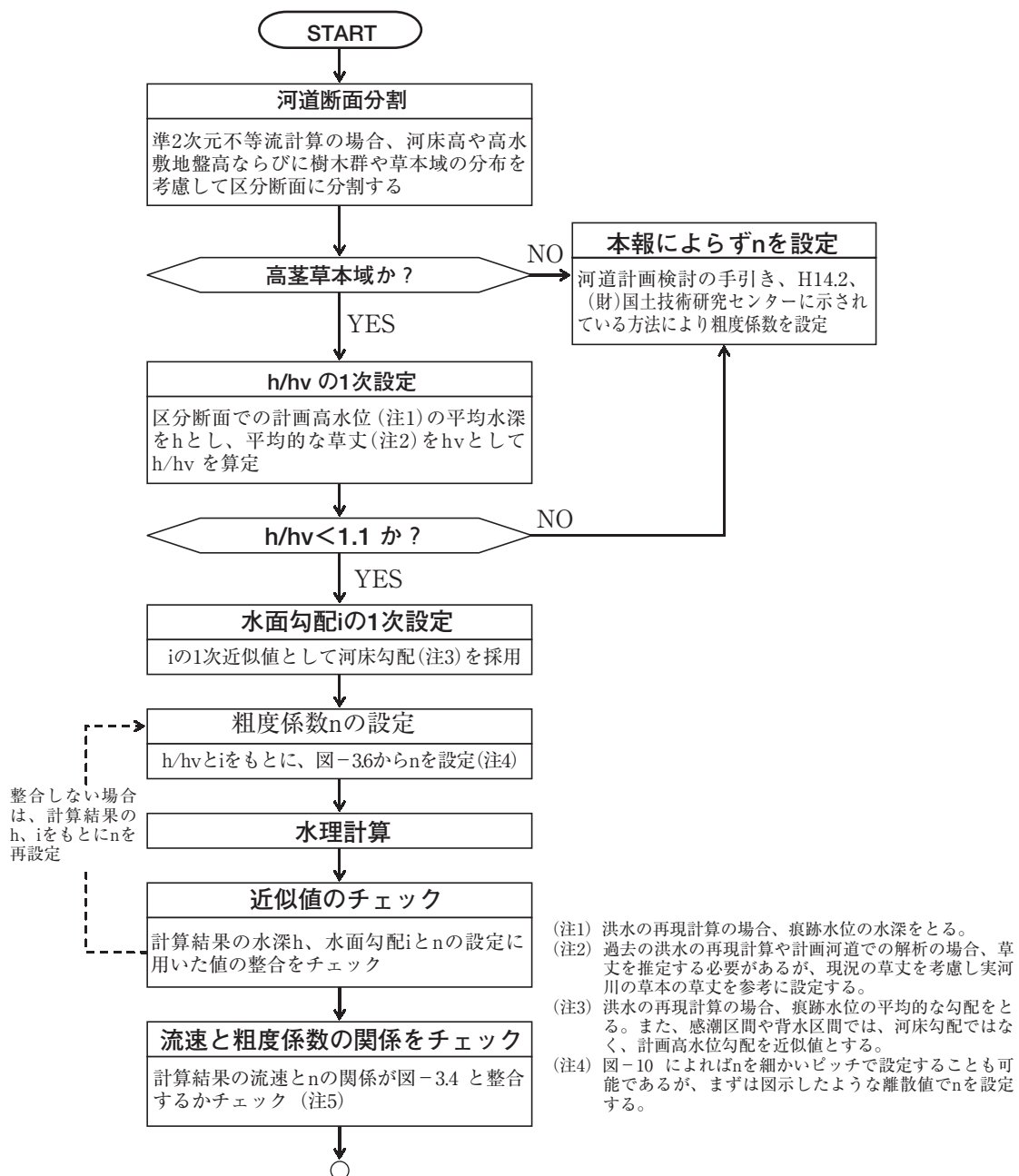


図-11 粗度係数設定の流れ

4. おわりに

本報では、既往の実験データやフィールド調査データを再整理し、従来カバーされていなかった、“洪水時の水位に比べて草丈が高い区間”における倒伏判定や粗度係数の推定方法を提案した。河川の管理や計画において、草本域の倒伏有無の判断や粗度係数の設定に課題を有している河川では実用的な方法を提示できたと考えているが、洪水時における流水中の草本の挙動および流れとの相互作用に関しては未だ十分な知見が得られていない。したがって、より高い精度の結果が求められる河川においては、独自に詳細な調査や実験を行う必要があるほか、今後、広く洪水後の草本の倒伏実態や痕跡水位等を調査し、検証材料を蓄積することが望まれるものである。

なお、本報告は筆者らが事務局を務めていた「河川における草本類管理に関する検討会」（委員長 福岡捷二 広島大学大学院教授）の成果をとりまとめたものである。検討会ならびにデータの提供等をいただいた関係機関の皆様にご心より謝意を表す次第である。

<参考文献>

- 1) (財)リバーフロント整備センター：河川植生の基礎知識，2000
- 2) (財)リバーフロント整備センター編：河川における樹木管理の手引き，1999
- 3) (財)国土技術研究センター編：河道計画検討の手引き，2002
- 4) 建設省河川局治水課，建設省土木研究所：河道特性に関する研究，1989
- 5) 服部・瀬崎・近藤・藤田：ヨシ群落上流れに関する大型水路実験と抵抗則の検討，土木学会第55回年次学術講演会講演概要集第2部，2000
- 6) 福岡・渡辺・盛谷・日比野・大村：オギ原上を流れる洪水流に関する現地実験とオギ原の抵抗特性，第3回河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集，1997
- 7) 福岡・島谷・田村・泊・中山・高瀬・井内：水流による高水敷上のヨシ原の倒伏・変形と粗度係数に関する現地実験，河川技術論文集第9巻，2003
- 8) 島谷・高瀬・泊・中山・福岡・田村・鶴田：ヨシ原現地通水実験結果の六角川河道計画への適用，河川技術論文集第9巻，2003
- 9) (財)リバーフロント整備センター：川の植物図典，1996，山海堂
- 10) 狩野・五道：治水・環境のための草本管理，土木技術資料VOL.46 NO.6，2004