

簡易指標を用いた 安定河道縦断形の設計手法の提案

2026/6/19 西口亮太，秋田麗子

1. はじめに

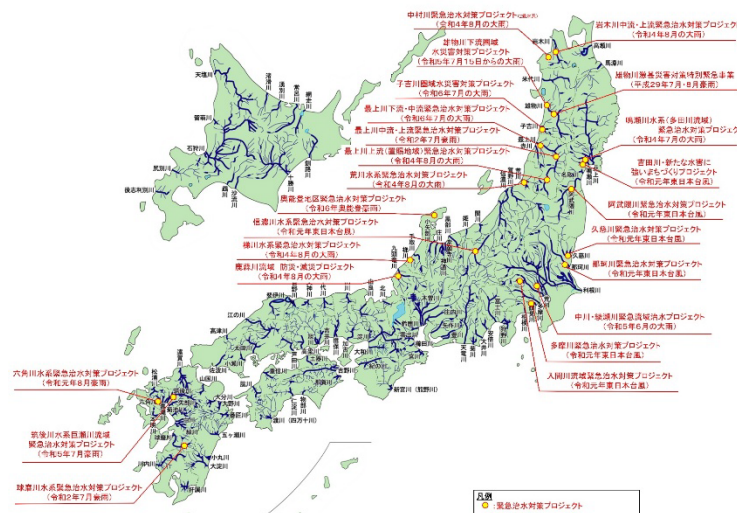
- ・ 背景
- ・ 実務における課題、技術開発の必要性
- ・ 過去の研究から得たヒント
- ・ 本研究における取組概要

1. はじめに

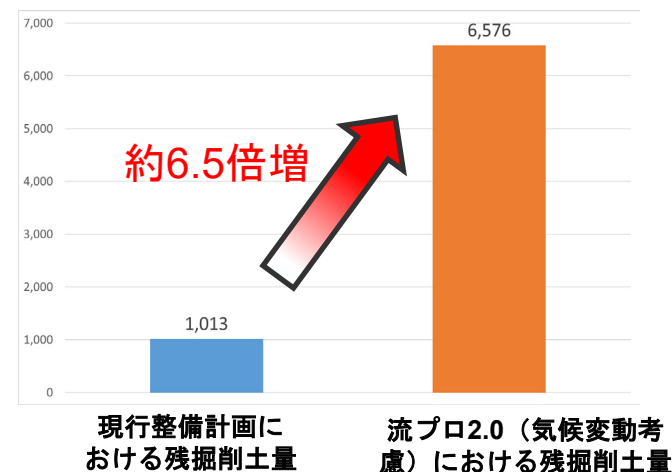
大規模河道掘削の機会増大

● 背景：気候変動の影響による洪水の激甚化

- 洪水被災箇所における**再度災害防止に向けた短期事業**（緊急治水対策プロジェクト等）による大規模河道掘削の推進
- 計画降雨の見直しに伴う、計画高水流量や整備計画目標流量の増加、**計画掘削土量の増大**



▲ 緊急治水対策プロジェクトの実施状況



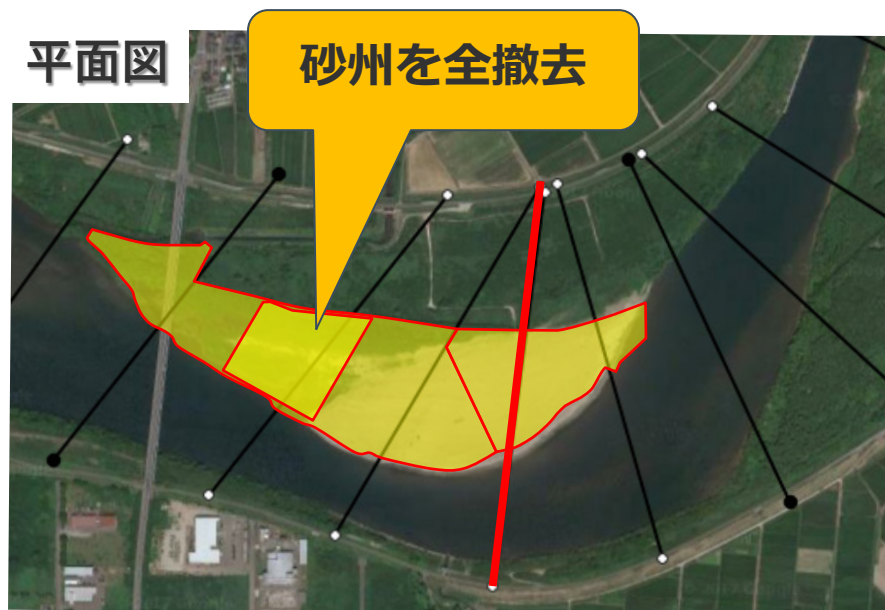
▲ 気候変動考慮前後における
残掘削土量比較

※東北12水系の直轄管理河川の合計値で比較

1. はじめに

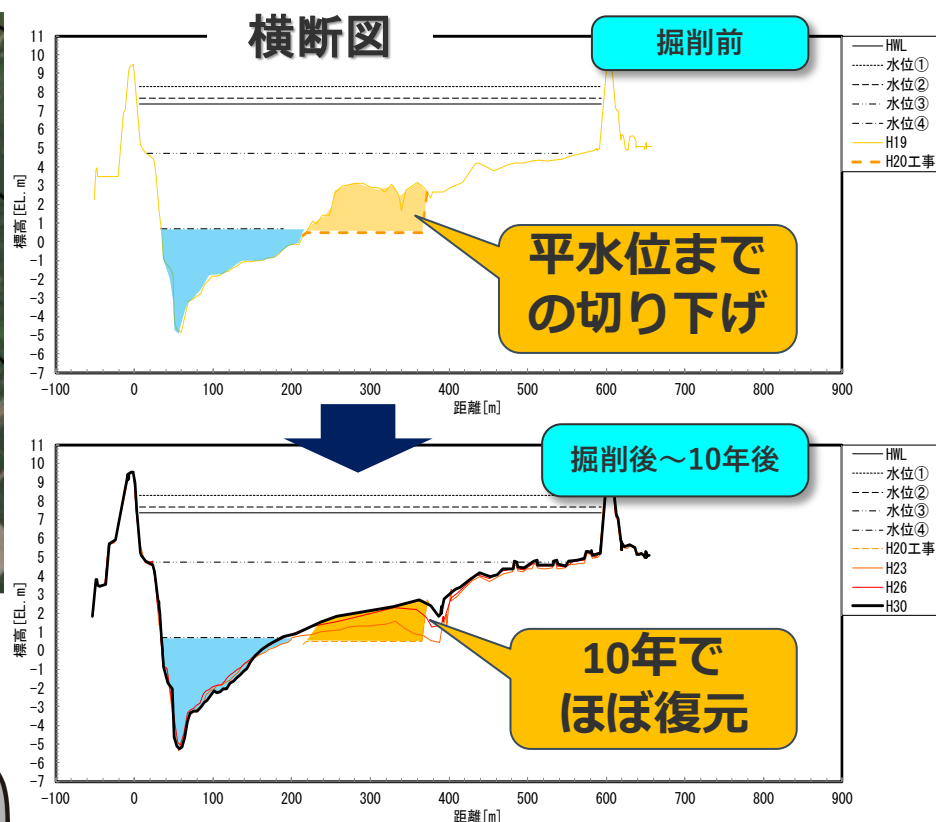
過去の大規模河道掘削からの教訓

- 掘削後から再堆積が進行し、数年～10年程度で元に戻る事例が多い。
- 他にも、低水路拡幅後に河岸が再形成される例、新たに中州が形成される例、堰の可動化後に堆積してゲート操作が困難になる例もある。



▲砂州を全撤去した事例

設計段階から河道安定性を志すことが重要。

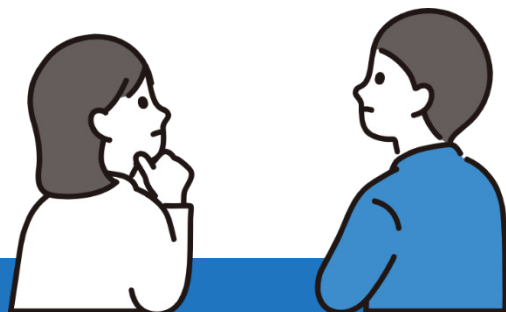


1. はじめに

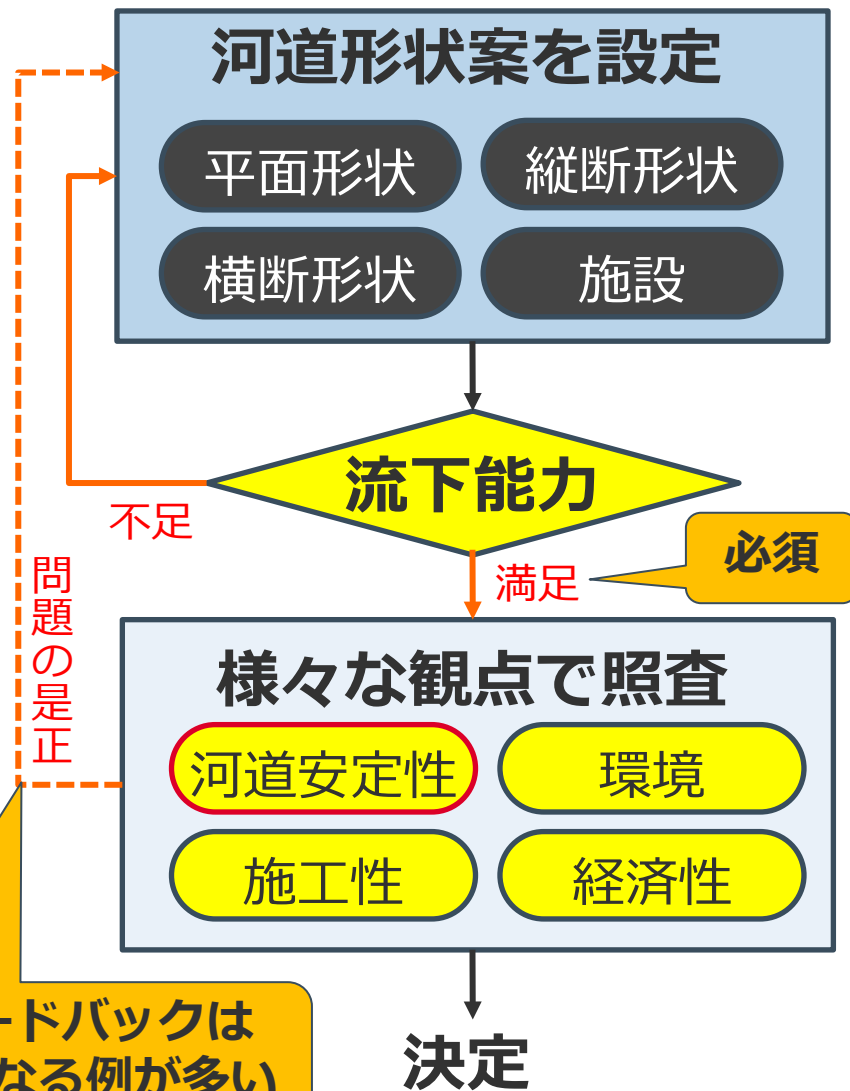
河道計画・設計の実務での扱い

- 河道形状案を設定した後、必須条件とするのは「流下能力」。
- 「河道安定性」は、その他の様々な観点による照査項目の一つとなっている場合が多い。
- この場合、フィードバックが任意であり、必ずしも河道安定性を満たす計画とならない。

設計段階から、流下能力のみでなく、河道安定性も満足するような河道を志すには？！



フィードバックは任意となる例が多い

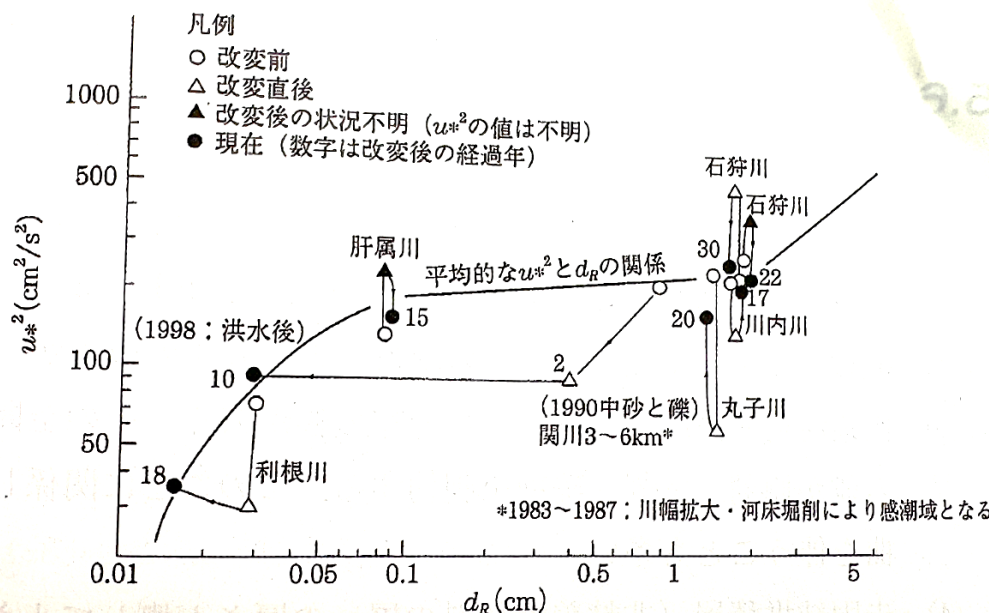


1. はじめに

河道計画・設計における河道安定の評価（１）

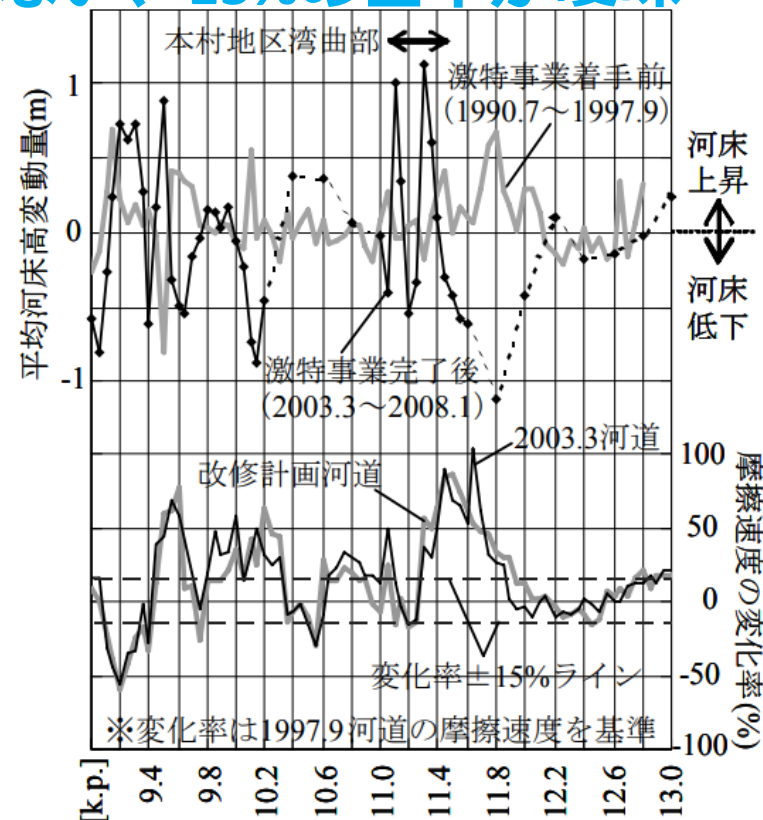
- 平均的な粒径～摩擦速度の関係性（山本ら）を逸脱しない。
- 摩擦速度の変化率を小さく留める。

現況の不安定さを考慮できない、15%の基準が曖昧



▲粒径～摩擦速度の関係性（山本ら）

対数プロットで幅が大きい



▲摩擦速度の変化率と河床変動実績（佐藤・武内・服部）

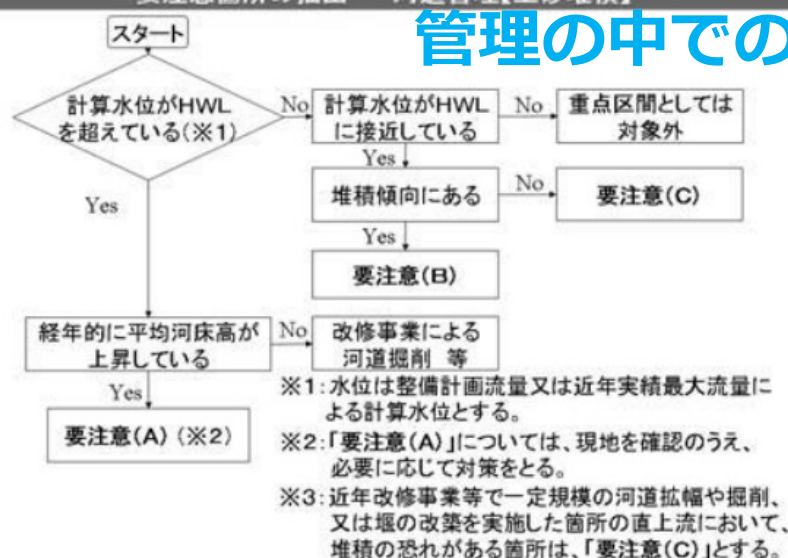
1. はじめに

河道計画・設計における河道安定の評価（2）

労力を要する

- 河床変動計算で評価（一次元/二次元、掃流砂/浮遊砂、植生影響等）
- 変化傾向を掴みながら対応

要注意箇所の抽出 ～河道管理【土砂堆積】～



b) 土砂堆積に関する判断フロー

図-2 河道管理基本シートを用いた判断フロー

▲河道変化傾向を用いた判断（藤田ら）

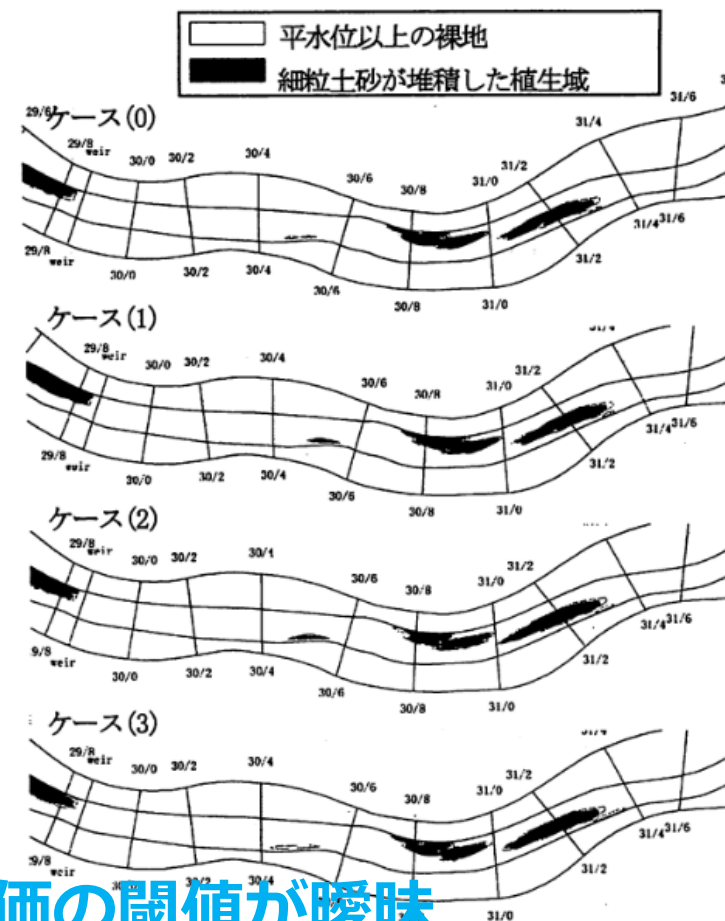


図-6 ケース②での10年後の平水位以上の裸地及び細粒土砂が堆積した植生域

▲河床変動計算による評価（大沼・武内ら）

1. はじめに

本研究で目指した設計手法

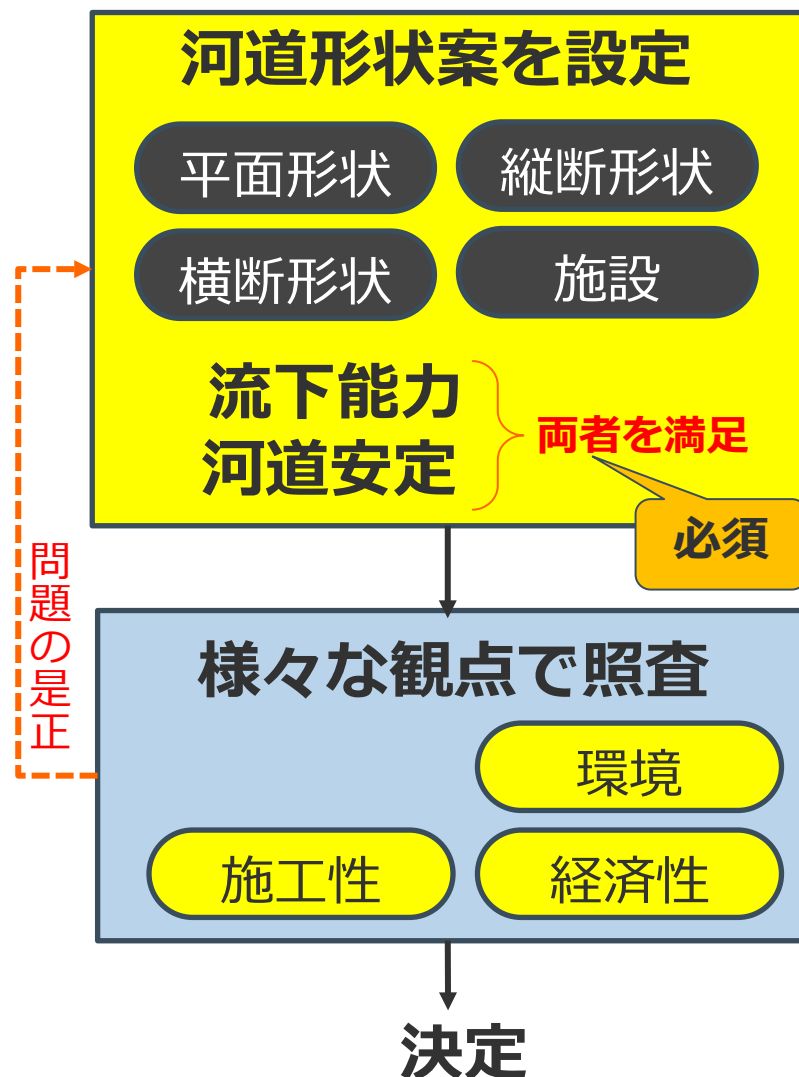
- 流下能力と河道安定性の2つを満足する河道の設計方法



- 流下能力は一次元不等流計算の考え方をを用いる。
- 河道安定性は、事後チェックではなく、プロセス中の最適化に用いられるような新たな評価手法が必要。



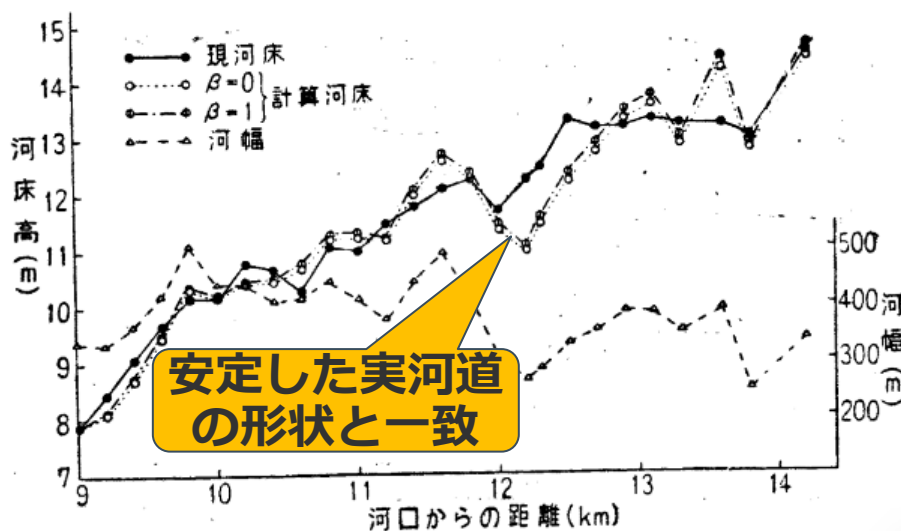
- 新たな評価方法に求められる事項
 - **因果関係が明白**（何を直せば改善するか）
 - **評価基準と閾値が明白**（フィードバックの必要性を判断）



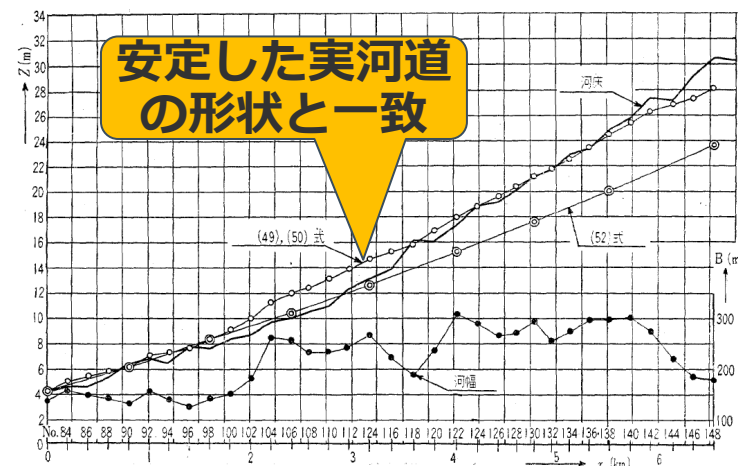
1. はじめに

着目した過去の研究

- 1950～1960年代の**安定的な河床縦断形状を理論的に求める手法**
- 動的安定状態を「縦断的に各断面を通過する流砂量が一定であること」と定義し、流砂量式から安定条件を設定。
- 複数の研究者が検証し、概ね現河川の実態に合うことが報告された。
- 課題：複断面・混合粒径への拡張、適用範囲の確認など



▲ 椿らによる仁淀川での検証 (1959)



▲ 増田・河村による牧田川での検証 (1960)

◎ 因果関係が明白

◎ 評価基準と閾値が明白



1. はじめに

この部分を考案

本研究の内容

- 以下の評価方法を用いて、事後チェックではなく、**設計プロセス中で両者を満たす河道形状を求め**ためのアルゴリズムを考案

□ 流下能力

➡一次元不等流計算

□ 河道安定性

➡安定的な河床縦断形状を
理論的に求める手法

河道設計の中で河道安定性を志すことが当たり前になるように…



河道形状案を設定

平面形状

縦断形状

横断形状

施設

流下能力
河道安定

両者を満足

必須

問題の是正

様々な観点で照査

環境

施工性

経済性

決定

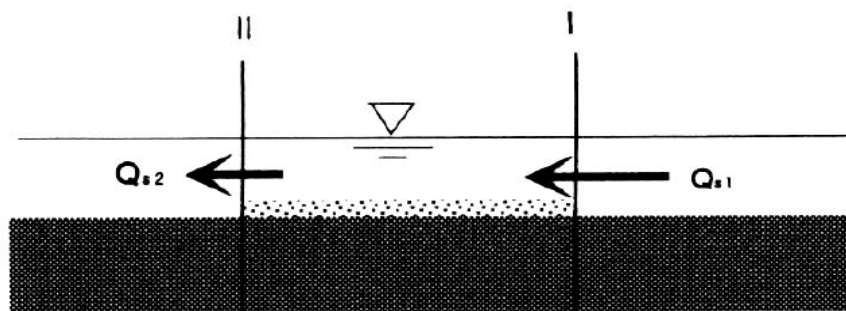
2. 安定河道縦断形の求め方

- ・モデル化のための前提・仮定
- ・安定条件式

2. 安定河道縦断形の求め方

安定な河道状態の定義

- ある区間の上流端流砂量と下流端流砂量がつり合い、河床材料と交換しながらも、大きな河床変動（収支の変化）のない**動的平衡の状態**とする。



$Q_{s1} > Q_{s2}$ 堆積

$Q_{s1} = Q_{s2}$ 変化なし

$Q_{s1} < Q_{s2}$ 侵食

動的平衡 ($Q_{s1} > 0$ 、 $Q_{s2} > 0$)

静的平衡 ($Q_{s1} = Q_{s2} = 0$)

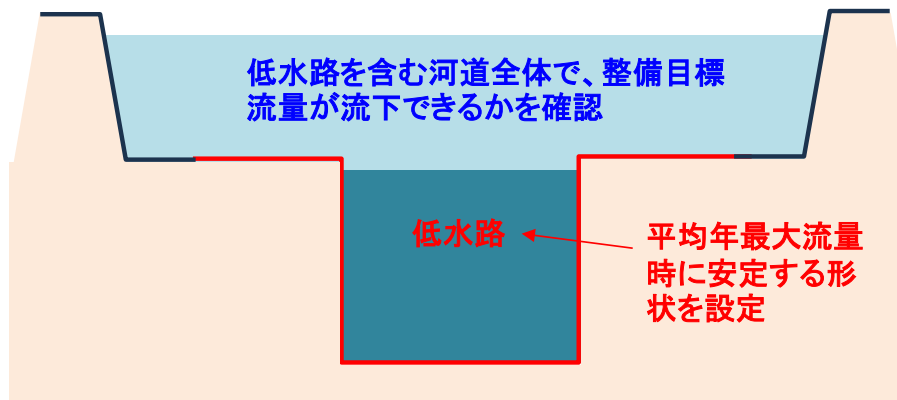
図-1 河床変動の概念

水山・藤田：河床変動計算のススメ，砂防学会誌，V01. 50, No. 1, pp. 67-171, 1997

2. 安定河道縦断形の求め方

モデル化のためのいくつかの仮定

- 既往研究の**縦断河道安定式**と同じ仮定
 - 河床変動に直接的に影響する**掃流砂**を対象とする。
 - **代表粒径（単一粒径）**を対象とする。
- 既往研究の**縦断河道安定式**との相違
 - **複断面**への拡張を行う。
 - ✓ 中長期的な河道の安定性は**低水路**に対して適用する。
 - ✓ この時の支配流量は、**低水路満杯流量**とする。



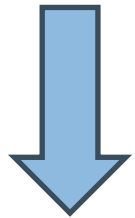
2. 安定河道縦断形の求め方

断面流砂量の算出

- 断面流砂量（Brown式）

$$\frac{q_b}{\sqrt{\rho_s g d^3}} = \alpha \tau_*^\beta = \alpha \left[\frac{R i_e}{\rho_s d} \right]^\beta$$

マンニング則より


$$i_e = \left(\frac{Q n}{A R^{2/3}} \right)^2$$

$$Q_b = q_b B = R^{-\beta/3} A^{-2\beta} \alpha \rho_s^{0.5-\beta} g^{0.5} d^{1.5-\beta} Q^{2\beta} n^{2\beta} B$$

Q_b : 流砂量, ρ_s : 土粒子の水中比重, g : 重力加速度, α, β : 流砂量式の係数, $R(=A/S)$: 径深, A : 河積, S : 潤辺, d : 河床材料の粒径, i_e : エネルギー勾配, Q : 流量, n : マニングの粗度係数, B : 川幅または掃流幅

2. 安定河道縦断形の求め方

縦断安定を規定する指標“ D_s ”の定義

- 動的安定（動的平衡） = Q_b が縦断的に一定（ $\frac{dQ_b}{dx} = 0$ ）

$$Q_b = R^{-\beta/3} A^{-2\beta} \alpha \rho_s^{0.5-\beta} g^{0.5} d^{1.5-\beta} Q^{2\beta} n^{2\beta} B$$



d, Q, n が一定の区間では...

- 動的安定（動的平衡） = D_s が縦断的に一定（ $\frac{dD_s}{dx} = 0$ ）と言い換えられる

$$D_s \equiv R^{-\beta/3} A^{-2\beta} B = A^{-7\beta/3} S^{\beta/3} B$$



本論文で新たに定義した、
縦断安定を規定する指標

矩形断面の場合、

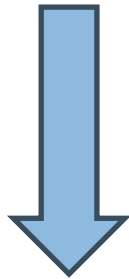
$$D_s \equiv B^{1-2\beta} h^{-7\beta/3}$$

2. 安定河道縦断形の求め方

指標 D_s を縦断的に一定値とするための縦横断形の逆算

- 動的安定（動的平衡） = D_s が縦断的に一定（ $\frac{dD_s}{dx} = 0$ ）

$$D_s \equiv B^{1-2\beta} h^{-7\beta/3} \quad : \text{矩形断面の場合}$$



- 目標とする D_s に対して、 B （あるいは h ）が既知であれば、安定する河道形状を逆算できる
 - ✓ B が既知であれば、 h が決まる
 - ✓ h が既知であれば、 B が決まる



2. 安定河道縦断形の求め方

指標 D_s を縦断的に一定値とするための縦横断形の逆算

- 一次元不等流計算の基礎式（矩形断面）

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{Q^2}{2gh^2B^2} + h + z_b \right) = i_e$$



$$-\frac{dz_b}{dx} = \frac{d}{dx} \left(\frac{Q^2}{2gh^2B^2} + h \right) - i_e$$

- 安定河道（ D_s が一定）の場合

$$D_s \equiv B^{1-2\beta} h^{-7\beta/3} = \text{const.}$$



Q と B が既知の場合、
下流断面の z_b に対して、
上流断面の z_b が求められる



川幅 B に応じて、動的安定となる河道縦断形状 z_b が求められる

2. 安定河道縦断形の求め方

指標 D_s を縦断的に一定値とするための縦横断形の逆算

- 一次元不等流計算の基礎式（矩形断面）

$$\frac{dB}{dx} = \frac{\left(1 - \frac{Q^2}{gh^3B^2}\right) \frac{dh}{dx} + \frac{dz_b}{dx} - i_e}{\frac{Q^2}{gh^2B^3}}$$

- 安定河道（ D_s が一定）の場合

$$D_s \equiv B^{1-2\beta} h^{-7\beta/3} = \text{const.}$$

Q と z_b が既知の場合、
下流断面の B に対して、
上流断面の B が求められる

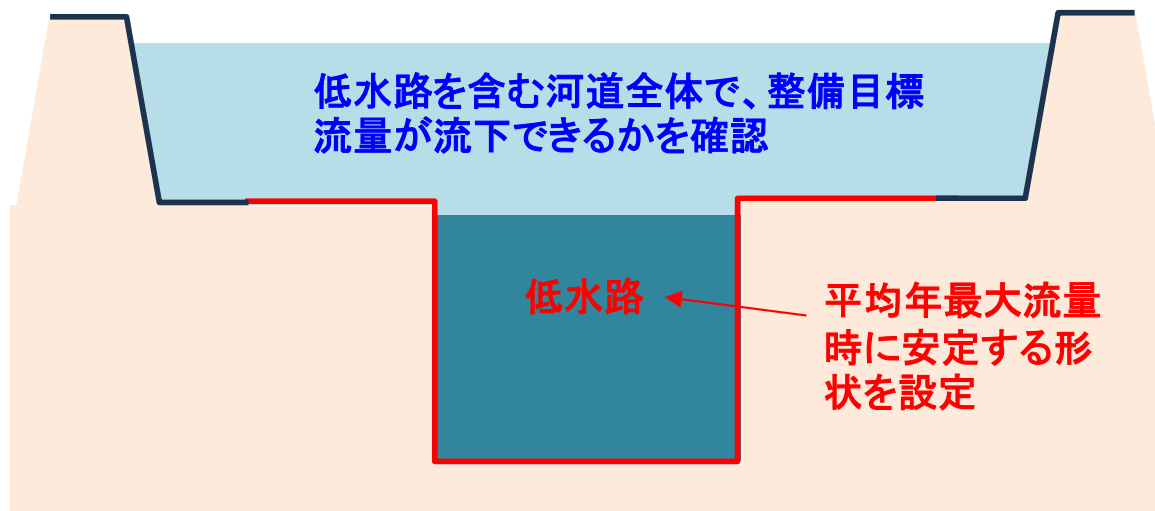
河床高 z_b に応じて、動的安定となる川幅縦断分布 B が求められる

3. 河道設計のアルゴリズム

- ・ 複断面のモデル化
- ・ 流下能力確保の手法
- ・ 設計フロー

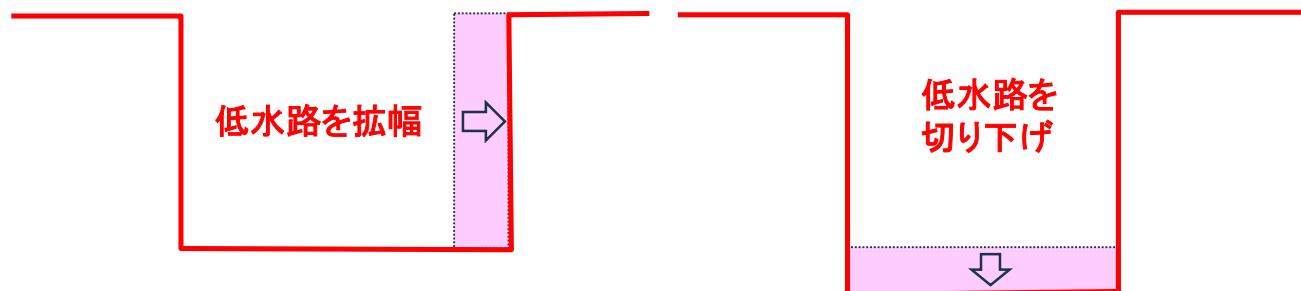
流下能力の評価方法

- 流下能力については、以下のように評価する。
 - 一次元不等流計算により算出
 - 目標流量流下時の計算水位が目標水位（H.W.L等）を下回ることを制約条件とする。
 - 流下能力は、低水路と高水敷を含む全断面を対象に評価する。



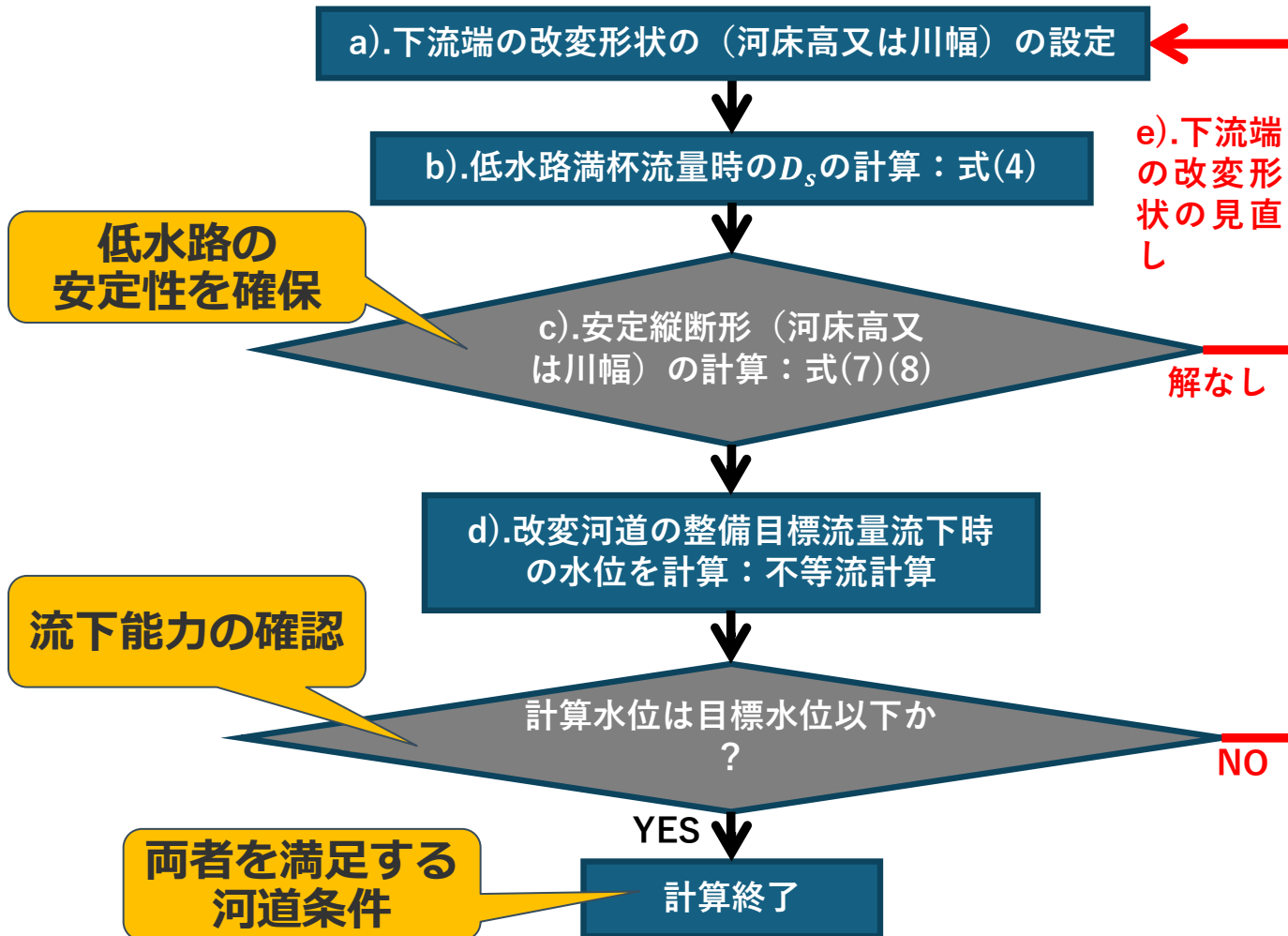
流下能力を拡大する場合の考え方

- 一次設定河道において、流下能力を満足しない場合、以下のように河積を拡大する。
 - 低水路の拡幅（又は切下げ）によって河積を拡大する。
（今回は、高水敷の切下げや引き堤を考慮しない）
 - 最下流において、拡幅（又は切下げ）を想定し、再び、河道安定条件を満たすような低水路分布（又は河床高縦断分布）を下流から順に求める。



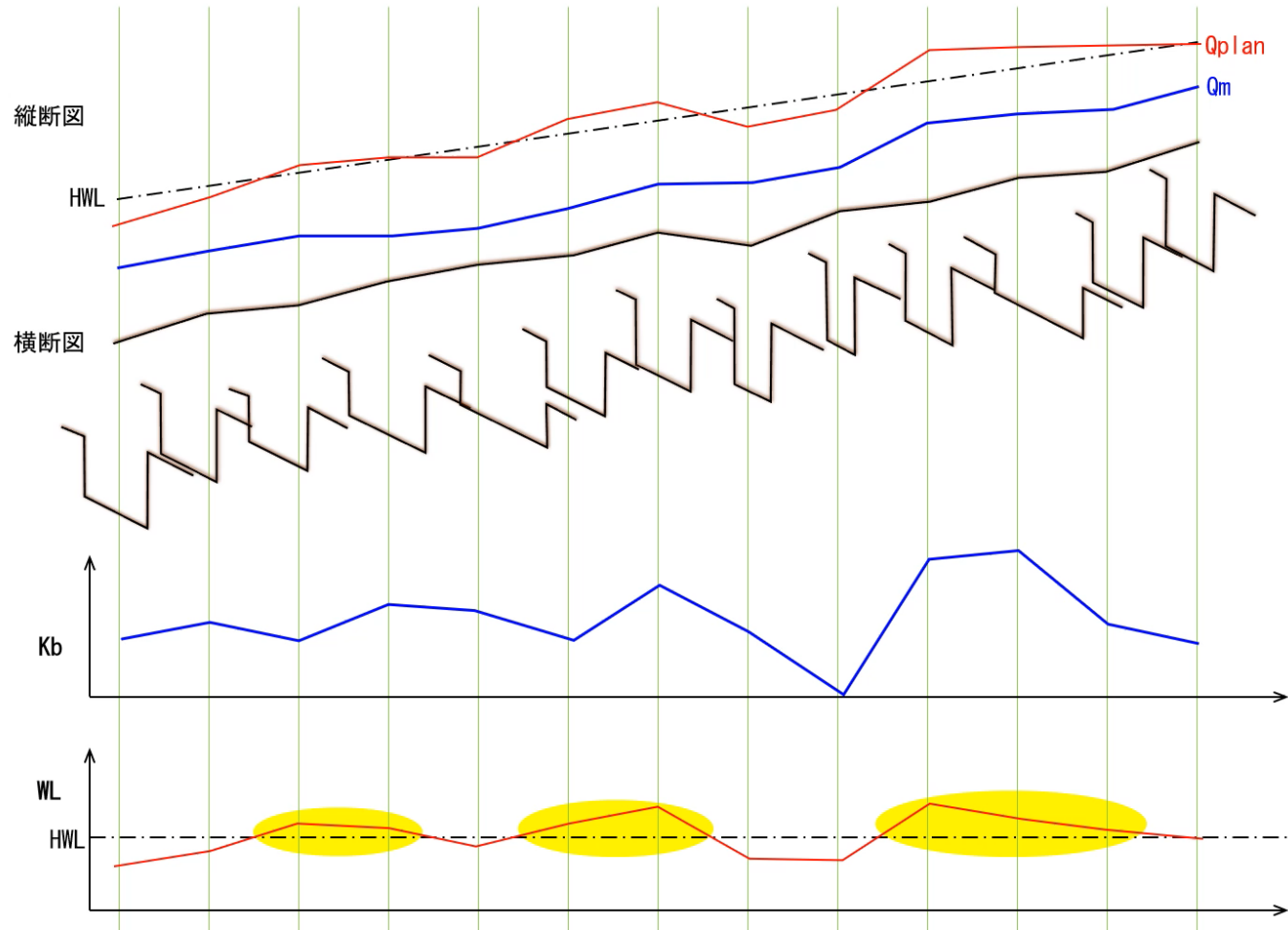
3. 河道設計のアルゴリズム

流下能力と安定性を満足する河道設計のフロー



3. 河道設計のアルゴリズム

流下能力と安定性を満足する河道設計の内部計算イメージ



4. 実河川への適用と検証

- ・ 本アルゴリズムを実河川に適用した結果
- ・ 従来手法との比較
- ・ 河道安定性に対する検証
- ・ 実務上の意義

4. 実河川への適用と検証

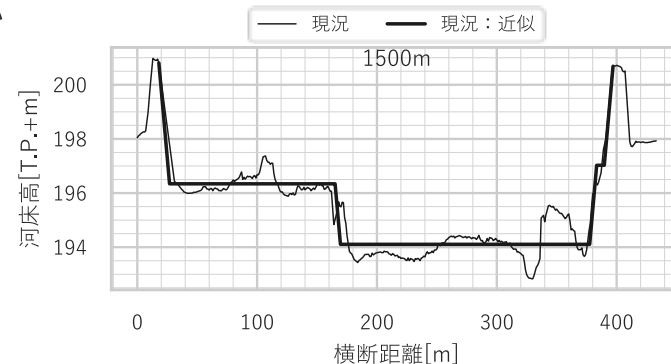
実河川（A川）への適用

- A川の約4km区間（平均河床勾配1/500）を対象
- 中間（1,300m地点）に固定堰（高さ約3m）があり、流下能力の支障
- 固定堰の上流側は満砂し、ほぼ安定形状
- 河床材料は全区間で概ね同程度

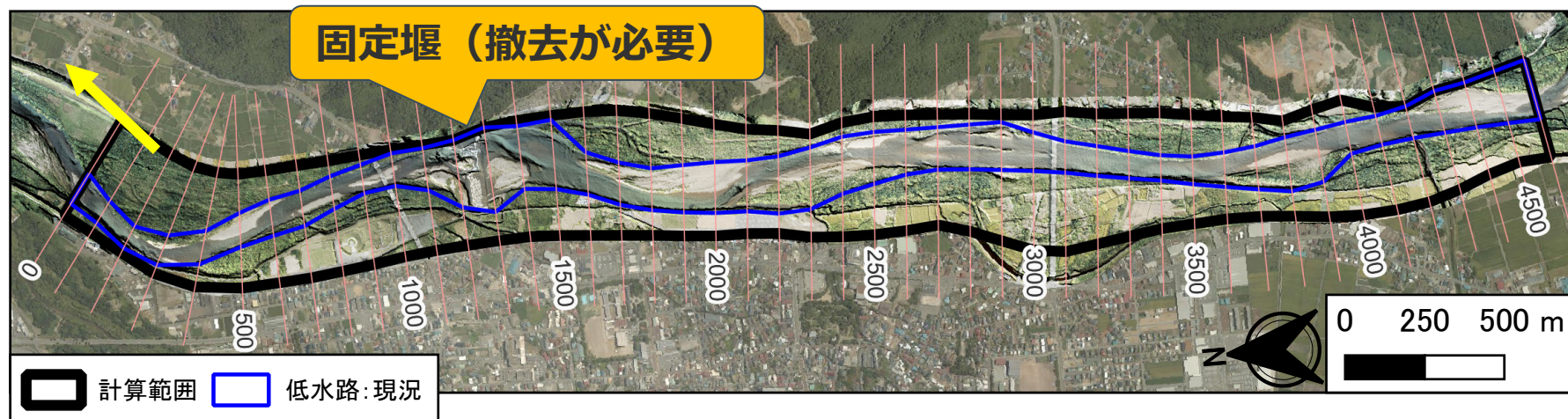


- 固定堰の撤去を前提とし、河床が安定するような縦断形状を検討

提案式で計算できるように河道横断面をモデル化



▲河道横断面のモデル化（台形近似）



4. 実河川への適用と検証

検討ケース

- 以下 3 ケースを検討。（Case3は、比較のため従来設計手法として）

	低水路幅	河床高	備考
Case 1	現況	安定式により算出	
Case 2	安定式により算出	現況	固定堰上流の河床高は一部切下げ
Case 3	手動（一定幅となるよう拡幅）	手動（一定勾配となるよう切下げ）	従来設計の手法

今回提案する手法

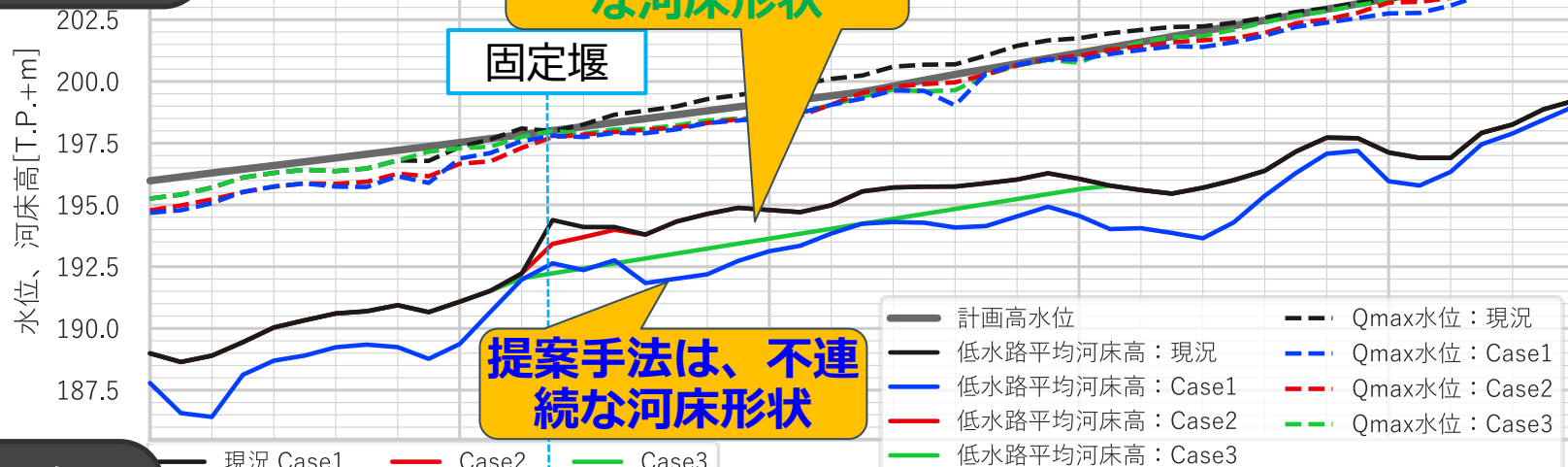
従来の設計手法

4. 実河川への適用と検証

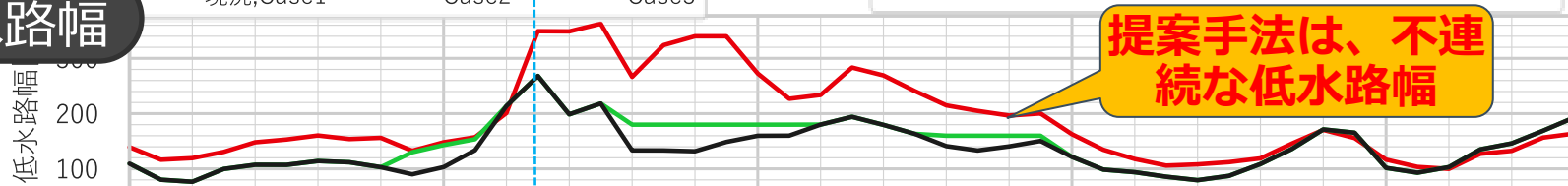
検討結果①

	低水路幅	河床高
Case 1	現況	安定式により算出
Case 2	安定式により算出	現況
Case 3	手動	手動

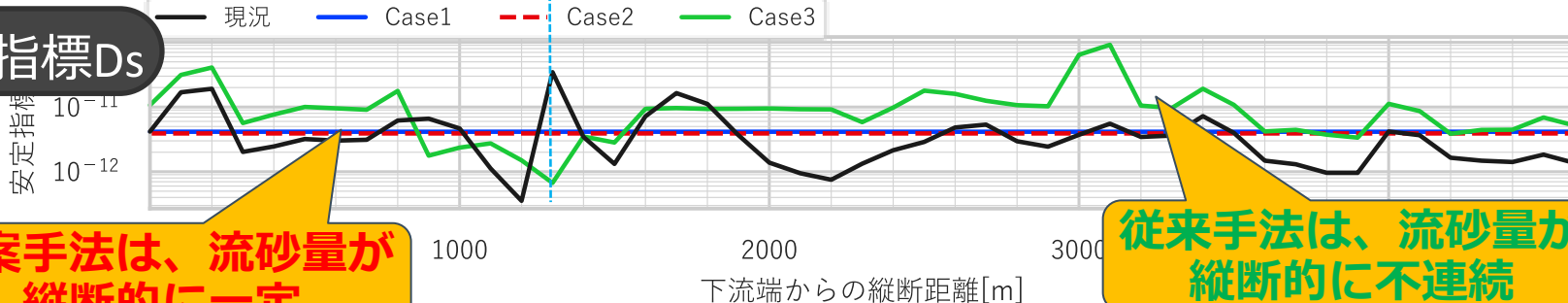
水位・河床高



低水路幅



安定指標Ds

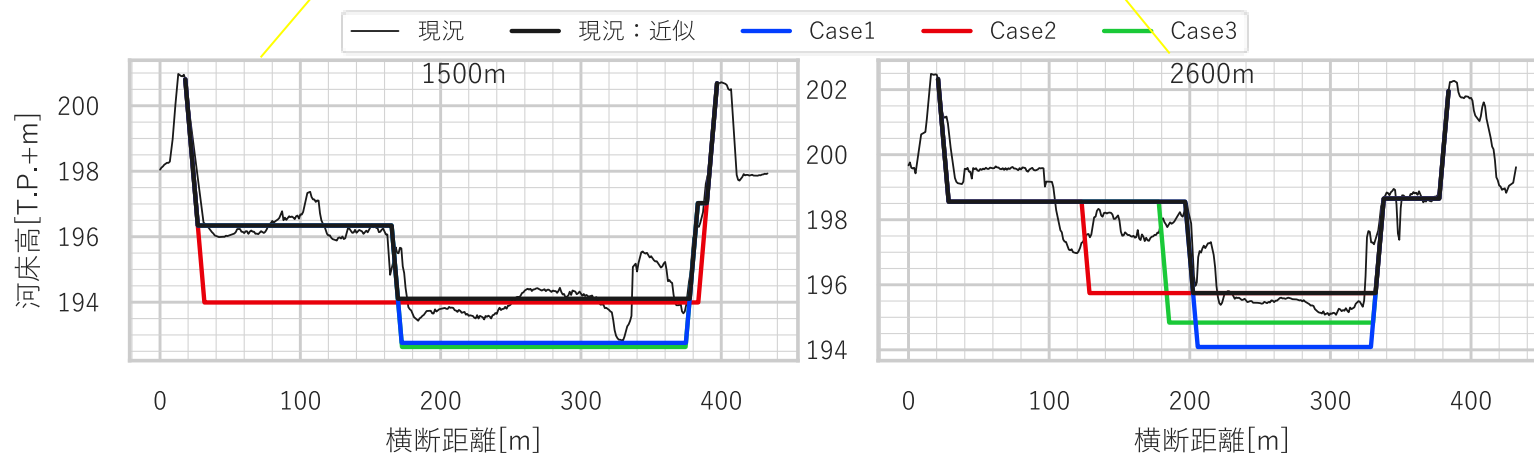
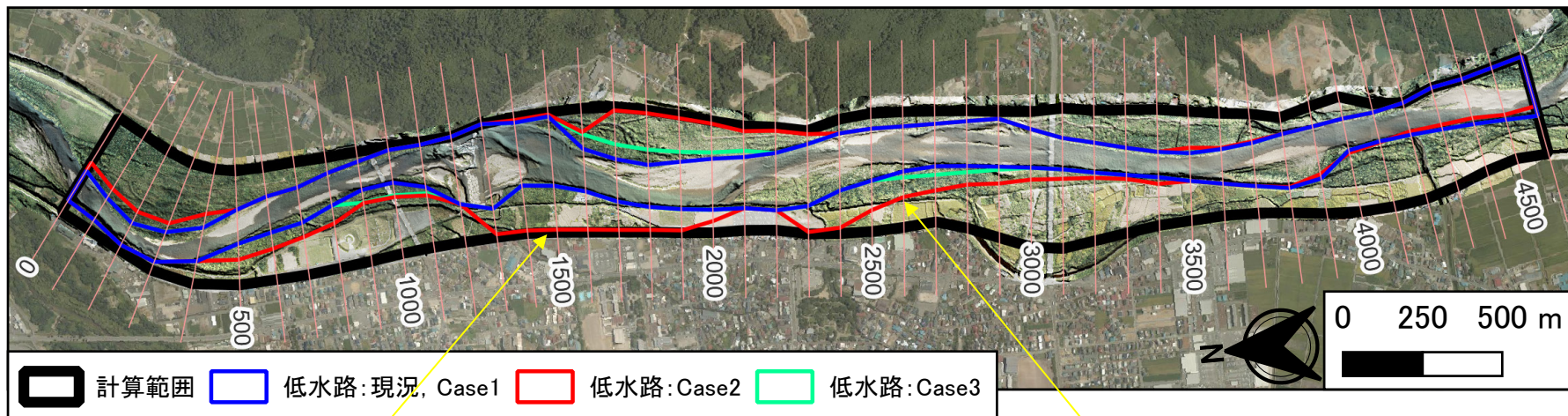


4. 実河川への適用と検証

検討結果②

- 従来設計と遜色ない現実的な結果。

	低水路幅	河床高
Case 1	現況	安定式により算出
Case 2	安定式により算出	現況
Case 3	手動	手動



4. 実河川への適用と検証

河道安定性の検証

- 設定河道について、一次元河床変動計算による検証を実施。

- 検討対象河道：

	低水路幅	河床高	備考
Case 2	安定式により算出	現況	固定堰上流の河床高は一部切下げ
Case 3	手動	手動	従来設計の手法

- 流れ：一次元不等流計算
- 河床変動：掃流砂のみ（単一粒径）
- 対象流量：

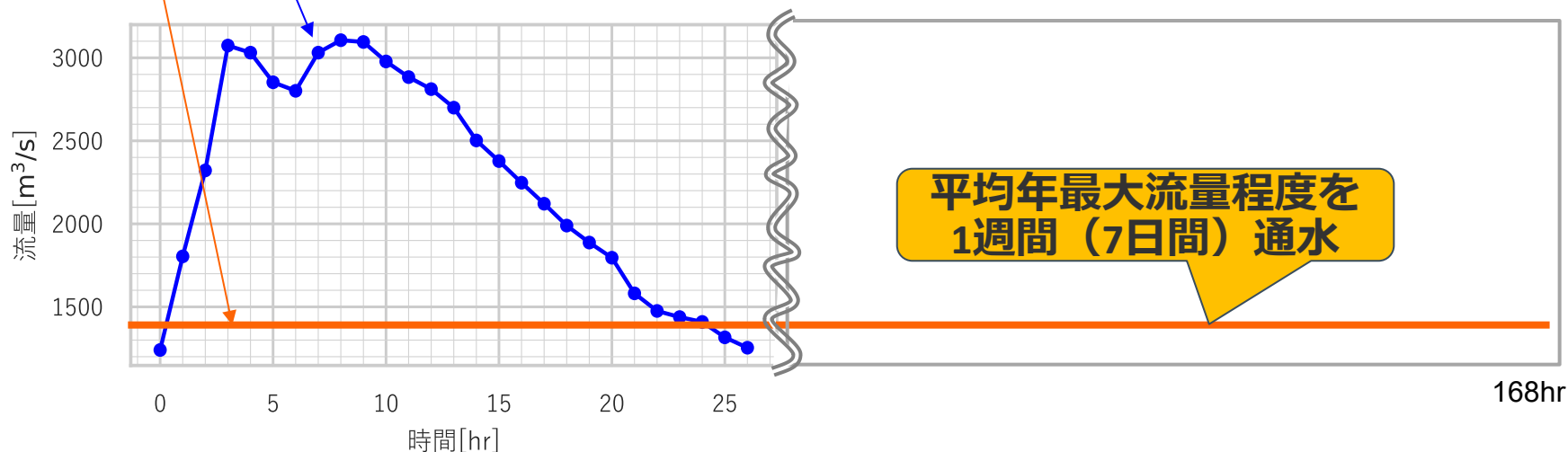
	目的	河床高
パターンA	長期的な安定性の評価	低水路満杯流量の一定通水
パターンB	大規模出水時の安定性評価	当該地区における近10年の最大流量波形

4. 実河川への適用と検証

河道安定性の検証

- 対象流量

	目的	河床高
パターンA	長期的な安定性の評価	低水路満杯流量の一定通水
パターンB	大規模出水時の安定性評価	当該地区における近10年の最大流量波形

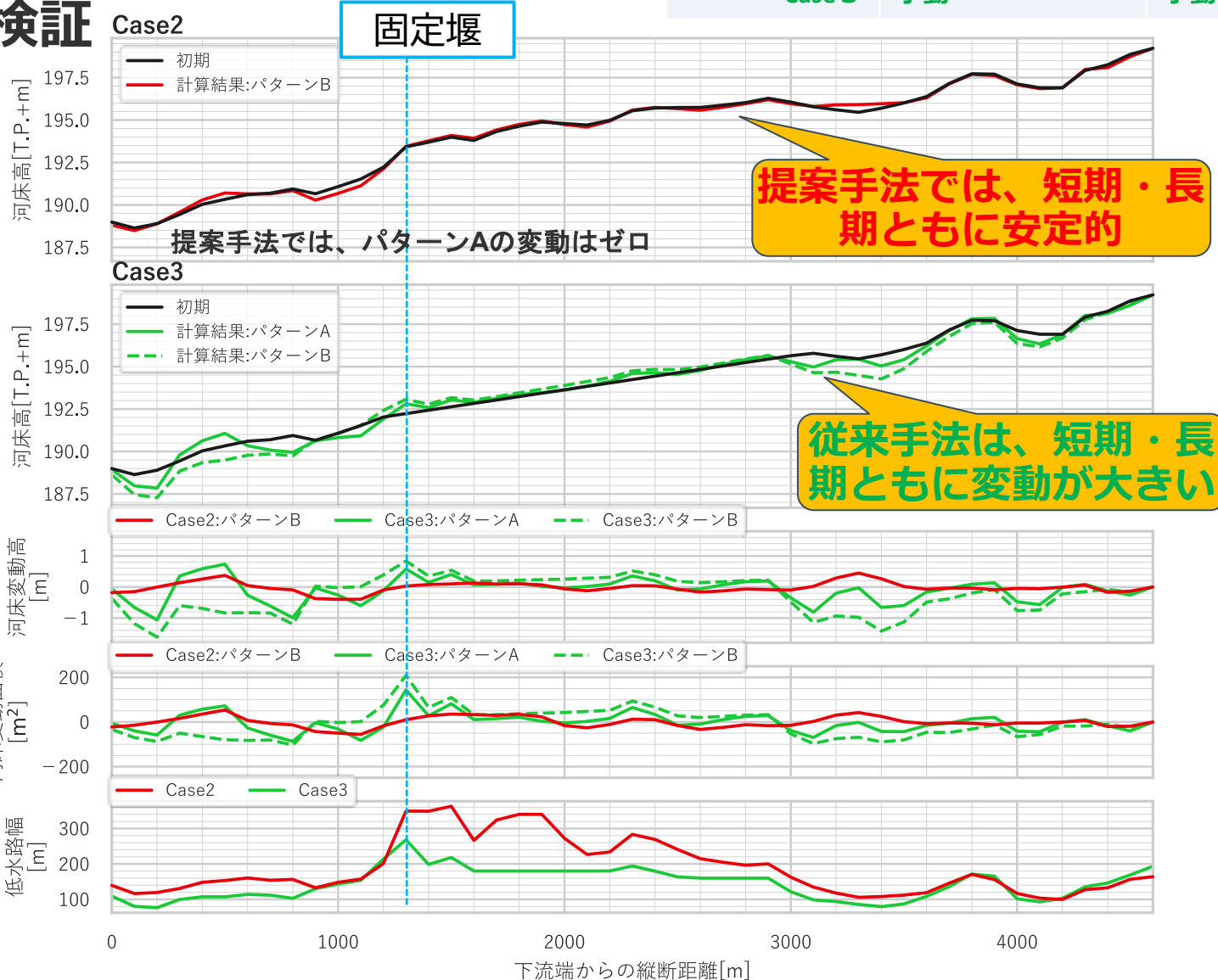


4. 実河川への適用と検証

	低水路幅	河床高
— Case 2	安定式により算出	現況
— Case 3	手動	手動

河道安定性の検証

河床高



河床変動高

変動面積

低水路幅

5. おわりに

- ・ 結果概要
- ・ 今後の課題

5. おわりに

この部分を考案

本研究の内容（再掲）

- 以下の評価方法を用いて、事後チェックではなく、**設計プロセス中で両者を満たす河道形状を求め**ためのアルゴリズムを考案

□ 流下能力

➡一次元不等流計算

□ 河道安定性

➡安定的な河床縦断形状を
理論的に求める手法

河道設計の中で河道安定性を志すことが当たり前になるように…



河道形状案を設定

平面形状

縦断形状

横断形状

施設

流下能力
河道安定

両者を満足

必須

問題の是正

様々な観点で照査

環境

施工性

経済性

決定

実河川への適用を通じて

- 従来設計と比べても、河道形状、掘削規模などの観点から、特に遜色のない現実的な結果が得られた。
- 河床変動計算により、河道安定性が大きく向上することを確認。



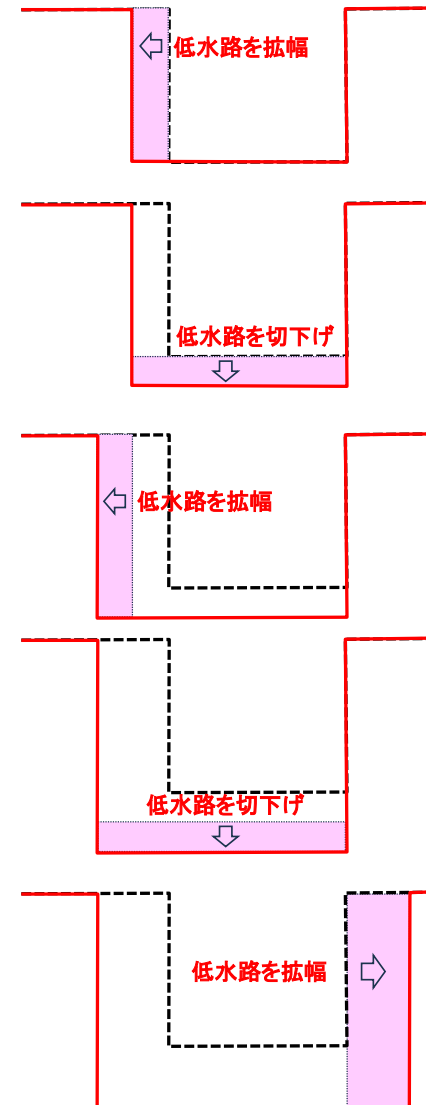
**流下能力、河道安定性の両者を満足する
実用的な設計手法を提案できた**



- 従来設計における課題（河道設定案を手動で設定）に対して
 - 本手法で**自動化**が可能に（曖昧さ・ブラックボックスを排除）
 - 対外的な**説明性**がアップ（アルゴリズムが明白、再現性が確保）
 - 現地形の成り立ちに応じた**合理化**が可能に（流砂量は一定だが、河道形状は不連続）

今後の課題

- より現実的な河道設計に向けた改善
 - …拡幅・切下げを併用した河積確保
- 河道の安定条件の拡張
 - …低水路満杯流量以外の流量帯、混合粒径、浮遊砂の扱い
- 断面モデルの拡張（改良）
 - …一般断面への拡張、平面線形の反映
- 上下流との連続性への対応
 - …設計区間の上下流区間との接合部の扱い



▲より現実的な河道設計例

