

吉野川第十堰技術評価特別委員会 報告書

社団法人 土木学会

平成19年5月

目 次

序	1
第 章 . 流域流出・気候変動評価班報告	3
第 章 . 堰・堤体安全性評価班報告	6
第 章 . 流域物質収支班報告	22
第 章 . 環境影響評価班報告	29
第 章 . 土木史評価班報告	38
技術評価と提言	67
委員名簿	70

序

土木学会では、平成 12 年に水理委員会内に「吉野川第十堰技術評価特別小委員会」を設け、現堰および対策案の評価に係わる技術的手法について、土木工学の専門的および総合的立場から検討し、その合理化に向けて学会としての中立的指針を提示する（吉野川第十堰技術評価特別小委設置趣意書）こととし、その審議を行い、平成 13 年 10 月 1 日に「平成 12 年度吉野川第十堰技術評価特別小委員会中間報告書」を取りまとめた。

その後、平成 18 年度土木学会会長の要請を受け、平成 12 年度のような専門委員会内での検討でなく、「土木学会第十堰技術評価特別委員会」を設置して学会全体としての取り組みを行うこととした。

平成 12 年度の審議では、その検討対象は工学的課題である「堰安全性評価」、「堤体安全性評価」、「環境評価」、「流域流出」、「流域土砂収支」であったが、今回はこれらを再編成し、「堰・堤体安全性評価」、「環境影響評価」、「流域流出・気候変動評価」、「流域物質収支」、「土木史評価」とした。その主な理由は、堰と堤体の安全性は一体的に評価する必要があること、この数年間わが国においても気候変動に伴うと思われる異常気象が頻発し始めており、このことを検討対象に含むべきであること、環境を評価する上で土砂のみでなく、栄養塩類などの物質についても考慮する必要があること、第十堰は少なくとも 18 世紀半ばには建設され、その後の様々な歴史的経緯を有する土木構造物であることから土木史的評価が望まれること、である。

検討に当たっては、平成 13 年 10 月の中間報告書取りまとめ以後に展開された学術研究の進歩・技術的発展、自然的・社会的変化、などを考慮し、それらを平成 13 年の中間報告書に追加・修正する形で取りまとめることとした。また、平成 11 年に制定された「土木学会倫理規定」により土木技術者がよって立つべき価値の基準が示されたが、この規定に基づいて第十堰について考える上での価値の判断基準を示したことも今回の報告書の特徴である。

平成 18 年度第十堰技術評価特別委員会審議経過の概要

【第 1 回委員長・班長会議】平成 18 年 8 月 21 日 14:00～16:00 土木学会役員会議室

- ・ H12 委員会の経緯とその後の経緯
- ・ 今回の委員会の趣旨説明
- ・ 班構成、メンバーの人選
- ・ 各班からの検討方針の説明と質疑応答

【第 1 回委員会】平成 18 年 9 月 21 日（木）9:00～10:30 立命館大学びわこ草津キャンパス、イーストウィング 3 階 第 4 会議室

- ・ 委員長挨拶、委員紹介
- ・ 各班活動報告
- ・ 現地見学会案内

【第 2 回委員長・班長会議】平成 19 年 2 月 23 日（金）13:30～16:00
ホテルニューショウヘイ（四谷）

- ・ 各班からの報告と追加修正事項の確認
- ・ 最終まとめに向けての方針と今後の予定

【第 2 回委員会】平成 19 年 3 月 6 日（月） 12:00～13:00

- ・ 各班からの報告と追加修正事項の確認
- ・ 全体を通しての確認
- ・ 最終まとめに向けての方針と今後の予定

・流域流出・気候変動評価班報告

1. 担当領域

流域流出・気候変動評価班では、洪水防御計画の基本となる河川流量を算出するに当たり、基本的考え方、考慮すべき事象、これらに基づいて採用されるべき流出計算法などについて技術的指針を示す。具体的には、計算の基礎となる降雨の考え方、森林の状態の変化などを含む近年の流域特性の変化の取り扱い方、このような流域特性の変化を的確に取り込むことのできる流出計算法の備えるべき特性などを示す。ここでは技術的課題のみを対象とし、社会的・経済的な検討課題については、その重要性について述べるに止め、具体的な評価方針については触れないこととする。

2. 注目すべき現象や問題点

洪水防御計画策定のための河川流量の目標値の設定には、従来から大きく二つの方法が考えられてきた。一つは懸案地点での既往最大流量を用いる方法、もう一つは水文資料の統計的な解析に基づく方法である。前者は継続的な水文資料の不足していた時代や地域における計画に用いられてきた。実績に基づくため現実感はあるものの、既往最大値を上回る流量の出現により新たな計画洪水を設定するいわゆる流量改定を行わなければならないことや、懸案地点以外を含む対象流域の包括的な扱いなどの計画の整合性に問題が生ずる。これに対して、水文資料の統計解析および流出解析による方法では、解析手法およびその前提となる条件の適切な考慮によってより合理的な目標値の設定が期待できる。その実施にあたっては、河川管理の公平性のために標準的な技術的手法が参照されることは当然のことであるが、その際、洪水防御の重要性、資料の存在状態と水文学の将来的な変動傾向、地域の特性の考慮が不可欠な項目と考えられる。それらは、(a)設定する確率年の妥当性、(b)資料に基づく確率降雨の妥当性と気候変動に伴う降雨量変化の可能性、(c)流量の妥当性の議論に集約される。

さて、(a)確率年の妥当性、(b)確率降雨の妥当性と気候変動に伴う降雨量変化の可能性、(c)流量の妥当性、について、その評価技法を考えるに当たって、(b)と(c)は技術論の立場から議論できるが、(a)については技術論だけで議論することはできない。確率年の設定や妥当性については、国民の生命財産の安全と財政負担さらには歴史的経緯と国民や住民の価値認識に関わる高度に社会・経済的判断を伴う問題であるからである。ここでは、(a)については技術評価の対象から除外するが、本来、計画の基幹に関わる最も大事な部分であるために、別途慎重な議論を行う必要がある。また、その議論の過程は、近年の情報公開の原則に鑑み、国

民に対して明示すべきであり、さらに、十分な理論的背景をもっている必要がある。平成 17 年 11 月には、吉野川水系河川整備基本方針が策定された。現在、それに基づき吉野川水系河川整備計画の策定に向けた議論が進行中である。流域住民と河川管理者との相互の理解に基づく整備計画の策定が望まれる。

3. 検討すべき技術課題

3.1 確率降雨の妥当性の評価

国土交通省河川砂防技術基準に従って、計画降雨を策定していく際には、以下の点に留意する必要がある。

- (1) 計画降雨の 3 要素である、降雨量、降雨量の時間分布および地域分布について、でき得るかぎり地域の特性を考慮する必要がある。中でも地域分布について、吉野川ではその流下方向と台風の進行方向とが一致する場合に洪水規模が相対的に大きくなりやすいという特性がある。雨域の移動等を考慮し、各要素について充分検討する必要がある。また、これらの決定過程と結果は公開する必要がある。
- (2) 2 日間の継続時間をもつ計画降雨を用いて計算されたピーク流量と、流量データを用いて得た同じ確率年を持つピーク流量との整合性をチェックしておく必要がある。
- (3) 従来、水位の継続時間は計画の対象としては扱われてこなかったが、堤体の安定の評価などには特定水位以上の継続時間を評価する必要がある。したがって、特定水位以上の継続時間の確率分布についても検討を行っておく必要がある。
- (4) 既往最大 2 日雨量の 578mm (昭和 51 年) は、降雨継続時間が 6 日間と非常に長かったために、現計画の中では棄却されている。しかし平成 17 年台風 14 号での 2 日間雨量が 505mm であったように、近年降雨特性が変化してきている可能性もあり、将来の計画のためには 578mm を考慮した統計解析を行うことも必要である。この場合も情報の公開として重要な意味があると考えられる。
- (5) 地球温暖化の可能性とそれに伴う長期的な降水量特性の変化の可能性に留意する必要がある。

3.2 地球温暖化に伴う降水量変化の可能性

気象庁による地球温暖化予測第 6 巻¹⁾には、水平分解能 20km を有する地域気候モデル (RCM20) を用いた約 100 年後と現在とを比較した日本付近の気候変化の予測結果が掲載されている。これによれば、吉野川流域を含む西日本太平洋側においては、夏季の降水量の増加が予測されており、月降水量およびその標準偏差の増加、また降水日数の増加と降水強度の増加が示されている。

これは、現時点で得られている T 年確率降水量が将来的には T 年以下となる可能性があること

を示しており、仮に現時点で、ある治水安全度を満たす河川整備がなされているとしても、将来的にはその治水安全度が低下することを意味している。気候モデルの高精度化や異なる温室効果ガス排出シナリオの設定によって、今後、さらに精度の高い温暖化時の降水量予測情報が提示されることは間違いない。これらの数値実験結果を河川流量情報に翻訳し、治水安全度の低下の可能性に留意しつつ洪水リスクの変化を分析する必要がある。

3.3 流量の妥当性の評価

計算に用いる流出モデルは正しく流域特性を表現できるものでなくてはならない。このためには、以下の各点に十分に留意しつつ流出モデルの構成を進める必要がある。

- (1)流域特性の経年変化を把握し、この変化が流出特性の変化となって現れているかどうかを把握する必要がある。
- (2)その上で、この変化を流出モデルで再現する必要がある。すなわち、流域特性の変化をモデルパラメータの値の変化として表現することができる合理的な流出モデルを用い、流出量の変化を再現できなければならない。
- (3)流域のモデル化、流出モデル、用いるパラメータ値は合理的なものでなければならない。また、予測値とともに予測値の不確かさを提示できることが望ましい。
- (4)得られたハイドログラフ群から基本高水を選定する方法は、予測の不確かさを考慮した上で合理的な判断がなされねばならない。
- (5)平成 16、17 年には多数の台風によって大洪水が発生した。中小規模の洪水時と大洪水時とは流出機構が大きく異なることが考えられる。これらの大洪水時のデータを吟味し、流出モデルの検証に用いる必要がある。
- (6)また、流域特性を人工的に変化させた場合の流出特性の変化に関する検討を別途行う必要がある。洪水ピーク流量を下げる対策として、流域内の樹種や林相を変化させ洪水流出を抑制することが選択枝の一つとして考えられるが、現状においては、中小規模の降雨から治水計画に用いられるような豪雨までの各降雨条件に対して、流出量の変化を明確に推定するための観測資料が備わっているとは言い難い。これに対応できるように樹種や林相の異なる流域からの流出資料の収集・蓄積・検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) 気象庁：地球温暖化予測情報，第 6 巻，2005，
<http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/GWP/Vol6/contents.html>

II. 堰・堤体安全性評価班報告

II-1 堰安全評価(水理学、河川工学的観点からの評価)

1. 担当領域

現堰が計画規模の洪水を安全に流下させることができるかどうかは極めて大きな問題である。本班では、堰の安全性の検討に関して、検討課題を整理するとともに最新技術によるその安全性予測の可能性を判断する際に注目すべき課題を整理し、その結果を報告する。

2. 注目すべき現象と問題点

堰の安全性を検討するためには、出水時の流況や土砂輸送、およびこれらが堰本体および堤防、河床、河岸に与える影響を予測する必要がある。特に近年の気候変動に伴う異常出水に対しても堰本体が安全かどうか検討する必要がある。至近の例では平成16年にピーク流量が約16,000m³/sを超える出水が記録されており、この時観測・調査データも活用した検討が望まれる。出水時の流れや土砂輸送、河床変動の予測は一般的に模型実験や数値シミュレーションにより行うが、技術革新の著しい数値シミュレーションが洪水時の流れや土砂輸送の有力な予測手法と考えられる。以下に具体的に注目すべき点を以下に挙げる。

(1) 堰上げ

斜め固定堰による水位への影響(水位上昇の大きさと範囲)を把握することが必要である。

(2) 局所流

斜め堰の存在によって発生する迂回流、流れの集中・偏倚、跳水や段落ち流の状況などの局所的な流れに注目する必要がある。さらに、これらの局所流による堰体やコンクリートブロックの「めくれ」、「吸出し」にも着目する必要がある。これらの検討には鉛直2次元による圧力(変動)の解析が必要である。局所流の検討は、大流量時には左岸側の迂回流が顕著になり、中小流量時には斜め跳水や落ち込み流が卓越すると考えられるので、幅広い流量に対する検討が必要である。

(3) 透過流

透過流が存在する場合の流体力(揚力・抗力)と覆工のめくれ上がりや砂礫の吸出しの影響を検討する必要がある。

(4) 土砂輸送

上記の局所流による局所洗掘・側岸侵食・河床変動を把握する必要がある。この場合、堰を通

過する土砂量の把握が重要である。これらの土砂に関連した検討を行う場合は、堰の越流水深と堰下流の水深との関係から必ずしも大流量（既往最大流量や計画流量）時が最も危険な状態になるとは限らないので、幅広い流量範囲とその継続時間を考慮した検討が必要である。

また、上流域のダム等による土砂の捕捉を含めた長期的な土砂供給量の減少の影響についても検討が必要である。

（５）深掘れが堰の安全性に与える影響

斜め堰下流右岸において深掘れが顕著に発生することがこれまでに実施された模型実験や現地調査により確認されており、この進展は堰および下流堤防の破壊につながる可能性があり、その影響を検討する必要がある。

3. 検討すべき技術課題

（１）数値シミュレーションでの検討課題

適切な計算条件の設定

計算条件は計算結果を大きく左右する最も重要な要素であるにもかかわらず、不確定な要素も多く含まれるため、十分な配慮が必要である。

i) 流量

数値シミュレーションは対象とする河川の計画高水流量に対して行われることが多いが、これは、水位に関しては大流量ほど危険となるためである。しかし、洗掘や侵食に対しては必ずしも大流量ほど危険とは限らない。本件のように堰（段落ち）を有する流れにおいては、流量規模や下流の水位条件によって、「段落ち」や「もぐり」など局所的に異なる流れの状況が現れることも想定される。このため、幅広い流量規模での検討が必要である。

ii) 粗度

河床や河岸の粗度の与え方によって計算結果は大きく異なる。このため、明確な根拠に基づいて与えることが必要である。本件の場合、堰本体、下流のコンクリートブロック敷設範囲、その他の河床部分などについて個々に粗度の検討が必要である。また堰上流右岸部分には樹木帯が存在するため、樹木の抵抗も考慮する必要がある。

iii) 境界条件

下流端水位の条件は潮位（干満）や台風による高潮の影響も考慮して決定すべきである。また、土砂輸送を伴う流れの計算を行う場合には上流端からの供給土砂量も適切に決定する必要がある。また、堰を越える掃流砂量の有無あるいはその量の把握も必要である。

iv) 地形・河床材料

地形データの与え方(地形測量の密度)や流砂を伴う計算における河床材料の与え方も計算結果を大きく左右する。出来るだけ堰の形状の影響を抽出出来るよう密な測量に基づいて与えることが必要である。

v) 対象区間

人為的に与えた境界条件が流れに与える影響が十分に小さくなるように計算区間を設定することが必要である。

vi) 計算メッシュ

計算に使用するメッシュの配置や密度は計算結果に大きな影響を及ぼす。堰周辺で発生する複雑な現象を解析するためには十分な空間解像度を有するメッシュを使用することが必要である。

vii) 自由水面の計算法

内部(水面下)の流れの計算と自由水面の位置の計算法の整合が取れた計算法を採用する必要がある。

数値シミュレーション手法(モデル)の選択

現在、様々な計算手法が提案されているが、それぞれの長短所・適用限界を整理した上で計算手法を選択することが必要である。

i) 基礎式

流れの計算の次元数(1次元、2次元、3次元)、流砂の考慮の有無(掃流砂、浮遊砂)、流砂の非平衡性の考慮の有無、現象の非定常性(流量の非定常性、局所的な流れの非定常性)など、着目する現象に応じた基礎式の選択が必要である。特に自由水面の計算法(取り扱い方)に注意を要する。

ii) 計算スキーム(離散化手法)

数値シミュレーションにおいて基礎式を忠実に解くためには、計算スキームの選択が計算精度に大きな影響を与える。本件のように局所的に急変部を含む計算においては従来の風上差分ではなく、近年提案されている高精度スキームの使用が不可欠である。具体的に各種のスキームの長短所を明確にした上で計算スキームを採用すべきである。

(2) 模型実験での検討課題

水理現象を予測するためのもうひとつの有力な手段として、模型実験が挙げられる。ただし、実験の方法や条件、計測方法、さらには、実験そのものの妥当性などに関する十分な配慮が必要である。特に、移動床(河床材料の移動を伴う実験)においては、実際の河川と模型の間での河

床変動量の対比をつけるのは必ずしも容易ではないので注意が必要である。具体的には現地と模型での河床形態（小規模、中規模）や流送土砂の形態が相似となるように配慮して実験の水理条件や実験に使用する河床材料を選択する必要がある。

なお、模型実験で配慮すべき事項は、上記の数値シミュレーションにおける適切な条件の設定に関するもの[(i)~vii)]と同様である。

II-2 堰安全評価(地盤工学的観点からの評価)

1. はじめに

第十堰は河床から 4m 程度の高さで構築されている固定堰である。この堰は低い堰で、一見すると安定しているように判断されるが、本体の構造上の問題や、堰の下流の河床が局所洗掘される等の河川構造物としての形状上の問題が生じており、ここでは、堰周辺の地質調査結果や、河床の洗掘状況から堰本体の安定性の評価法に関して検討する。

2. 第十堰周辺の基礎地盤

吉野川の第十堰周辺の堤防基礎のボーリング調査より、第十堰の基礎は約 20m 近くまで沖積の砂礫層である。このような場所に堰を建設する際には、この沖積の砂礫層の止水が大きな課題になる。

堰を設けることにより、上流と下流に表面水に水位差が生じる。もし、堰の直下の沖積層のような比較的透水性の良い層をグラウトが止水壁によって十分に止水をしていない場合には、堰の上流と下流の水位差により、水は地下に浸透して、新しい流れが生じ、その流線に沿って侵食し、止水がなければポイリングやパイピング現象が生じる。特に堰が難透水性の構造物で構築されていると、堰と地盤の境界にルーフィングという「水みち」が生じて、その浸透によって堰直下下流端の土砂が徐々に流亡し、堰本体と基礎地盤の間に大きな水みちが生じる。これが現在の第十堰の現状である。堰の基礎が岩盤であればこのような水みちは生じないが、現在の第十堰は基礎の止水もあまり十分になされていない地盤の上に堰を施工しているため、透過構造の堰になっている。石積みであるため透過構造であるが、本来、堰の基礎に水みちができないような十分な根固めをした基礎の上に堰を構築すべきであったと考えられる。

現在の第十堰は砂利で堰を造り、その表面を石で被覆している。現在では、その石の代わりに堰本体の砂利が侵食されないように厚さ約 1m 近いコンクリートで被覆されている構造である。

このような構造では、堰の下を水が浸透し、コンクリートや石の難透水層と砂利の間に水みちが生じ、その空洞が経年的に大きくなって、河川流による基礎地盤の侵食が一層大きくなる。

このような現状に対しての対策として、堰の基礎を止水できる構造に改修し、その止水壁の上に堰を連結する構造にする必要がある。このように考えると、現状の問題を改修する対策は現在の堰本体を取り除いて新しい堰を構築することと同じことになる。

3. 堰本体の安定性について

第十堰では、洪水毎に堰の下流の局部洗掘が進行し、堰の基礎の土砂が吹出しや侵食によって流亡をしている。このような小さなダメージが繰り返されることによって、堰全体の崩壊がいつの日か来ることが予測できる。

第十堰の全体的な崩壊を防ぐためにどのような補修をする必要があるかを検討すると、まず、堰下流の右岸の局部的な洗掘箇所を砂利等によって埋め戻し、その局部的な洗掘を再び生じさせないような根固め工が必要である。もし、この対策をしないなら、第十堰のこの部分の崩壊が生じ、一部が崩壊すると、この崩壊箇所に流れが集中して、一層洗掘が進んで、最終的に堰全体の崩壊になる。また、堰下流の右岸の洗掘により、右岸の kp14.2～kp14.6 の堤防の基礎の洗掘が進み、この区間の堤防が基礎の洗掘崩壊を起こす危険がある。

第十堰本体に対しては、下流端の基礎部の砂利が吹出しや侵食によって下流に流亡してしまうため、下流端の堰本体がオーバハング状態になって崩壊している。これは何回となく起こり、このような崩壊は徐々に堰の上流に進行し、堰本体の崩壊へと進展していく可能性がある。このような進行性の崩壊を防ぐためには、堰の下流の広い範囲にわたって根固めや護床を行って、堰の下流端の基礎の浸透(流れ)による侵食を防止する必要がある。

現在も、右岸の局所的な洗掘対策を実施しているが、その対策は抜本的な対策になっておらず、対策後、その基礎の砂利が再び流亡してしまっていて、深掘りが再度生じるような状況である。これは河道に対する堰本体の形状や構造上の問題であるように考えられる。このような状況に対しては、堰下流に局部的な洗掘が生じない根本的な対策が必要である。

4. 堰本体の調査法・解析手法に関する注意点

第十堰は最初の建設（1752年）から250年を経ており、木杭の間に石基礎を構築しその上をコンクリートブロックなどで覆ってできた複雑な構造物と見られる。また、直下の基礎地盤は礫質や砂質地盤であるが、下部には沖積の粘土層があり、地盤としては砂粘土の互層地盤と見られる。このように見ると、堰本体は石とコンクリートで構成される上部と、下部の砂礫地盤の一部から構成されていると考えることができる。このような構造物が1800mにわたり河川を横断している、また、上堰と下堰から構成されるもので2段式斜め堰と呼ばれている。このような堰に対する外力として、以下洪水と地震の2つを考えてみる。

どの外力に対しても、まず、堰の構造深さと広がり把握することが重要である。その次に堰の下部の地盤構成を調べる必要がある。構造調査には、ボーリングによりコアを採取する方法と非破壊の物理探査法がある。ボーリングについてはある程度の量は可能であるが連続性と広がり
の点で限界があるが、最小限必要である。次に、非破壊検査であるが、まずパルス式地中レーダ探査が考えられる。この方法は空洞調査に用いられる方法で2-4mくらいまではかなり正確な測定が可能である。一方、堰は5-6mの高さであるため、それより下部の地盤まで調査するには、深度10-15mまで調査可能は連続波レーダ探査が有効である。第十堰はかなり幅も広いので、連続波レーダ法のワイドアングル法も適用可能と考えられる。

最近、電磁波速度を測るこの方法により、土質区分も可能となっている。経年により、石の沈みこみや沈下があると考えられ、堰の下部はかなり複雑で不規則な形状になっていることが推量される。境界条件が定めれば、次に解析に進むことになるが、このような問題の解析の難しさは、水の流れ、堰構造物と地盤の変形浸透という異なる物理問題を解くことにあり、典型的なマルチフィジックス問題である。解析には、まず堰の形状を特定し、水の流れを解き、その流れ解析から得られる水圧などを境界条件として、堰と下部地盤の浸透変形を解析する方法が現在の時点では可能かつもっとも進んだ方法である。解析のための材料定数などの決定は、下部では石、コンクリートブロックなどと地盤が混じり合っておりかなり難しいが、観測結果から逆に決める方法も可能であろう。

最後に、液状化に対する安全性照査であるが、堰構造物と地盤の相互作用と浸透を同時に解くことのできる有効応力に基づく解析法が必要である。堤防の解析のところでも述べたように、浸透と変形を別々に評価する慣用の安全性照査法には、限界があり、すべり破壊などの崩壊時点のみでなく、崩壊の前兆を見出せる安全性照査法が必須である。さらに、洪水で基礎地盤に流れがある場合の液状化の解析が、堰の場合重要であり浸透との連成の可能な解析法が望まれる。

5. まとめ

吉野川第十堰は岩盤の基礎の上に構築された河川構造物ではなく、沖積砂礫層の地盤の上に砂利で堰をし、その表面の砂利が侵食しないように昔は石積みで、現在はコンクリートで被覆した構造になっている。

このような構造に対して、水の流れあるいは基礎の中を水が浸透する水の浸透力、その水圧等で、堰の基礎は下流から徐々に崩壊しており、また、河川水の流れによって堰直下の右流が局部的に深掘り現象が生じており、この現象は洪水の規模が大きくなればなるほど拡大していくものと考えられる。これは現在の豪雨の降り方を考えると、一日でも早く抜本的な対策によってこの

局所的な深掘りに対して対策をたてる必要がある。これは第十堰本体だけではなく、その下流の右岸の堤防の破堤にも関係する対策である。

また、堰本体は経年的に徐々に下流端より基礎の砂利の侵食等による流亡によって崩壊している。このような進行性の崩壊に対しても、一日も早く根本的な対策が望まれる。

II-3 河川堤防の安全性評価

1. はじめに

河川堤防の調査法・解析においては、詳細な境界条件や解析が必要であるが、以下述べるように、堤体安定性評価に関してできるだけ最近の地盤力学、探査技術や計算力学の成果を取り入れることが必要であると考えられる。詳細な解析法による照査は、古典的な安定解析法の結果を再評価することにも役立つ。また、今後、現在堤防安定照査で検討事項に上げられていない越流による堤防の変形破壊も検討する必要がある。

2. 調査法

堤体断面の調査に関しては、河川堤防の特質としての不均質性が問題である。この点、定量的安定性評価を高めるためには、実測評価が重要となるが、河川堤防では長大な延長が障害となるといわれている。河川堤防に対して、最近、弾性波探査、電磁探査や地中レーダ探査などの探査技術の適用が行われてきている。不均質性や改築履歴のある堤防の調査には、ボーリング調査と同時にこのような探査技術の適用が有効である。この場合、探査の結果を有効に解釈し、利用するため、コーン貫入試験などの原位置試験、ボーリング調査や3軸試験など室内力学試験による探査結果のキャリブレーションが必要である。

堤防調査法としては、堤防そのものに対する現位置調査や堤防材料を用いた室内試験の他に、堤防を含む広域の地下水分布や古地図を用いた水みちの検討など広域調査も大切である。

2.1 現位置調査法

1) 表面波弾性波探査

弾性表面波探査：比較的深部までの堤防内部・基礎地盤の土層構造を概略的に把握することが可能である。高密度のものは、堤防縦断測線上に等間隔で受振器を多数設置し、一定間隔で起振した振動波形を受信し、データを地点ごとの波形データ群に波形処理・編集し、鉛直方向のS波速度分布を求め、最終的に測線下の鉛直断面を逆解析し、地下構造を推測する。

水平方向の分解能は低いのでボーリング結果との併用が必要。インバージョンのための標準貫入試験、RI コーンなどから求めたN値分布など堤体や基礎地盤の調査に適している。S波を通

して地盤物性との関係が得られる。

2) レーダ探査

電磁波の反射イメージや速度から、地盤構造や物性を調べることができる。レーダ探査は、河川構造物周りでも可能であり、吉野川第十堰の下部構造の劣化探査に向いている。

・パルスレーダ探査：2-3m の比較的浅い地盤の調査に向いている。地中の導電率の異なる面や反射面をもとめ、断面を可視化する。空洞などの構造判別に適している。土の物性は無理がある。堤体内部や樋門周りの調査に適する。

・連続波レーダ探査：送信信号の周波数帯域幅を広く、かつ掃引時間を長くとることで、パルスレーダ探査より高分解能で地盤深部（10-15m）まで調査することが可能である。2通りの方法があり、プロファイル法で測線下の反射断面（時間断面）を得ることができる。次に、ワイドアングル法で地中の電磁波の伝播速度分布を求める。プロファイル法による反射断面の時間断面をワイドアングル法で求めた伝播速度を用いて深度断面に変換する。10m-15mくらいまでの比較的深い深度までの計測が可能。EM探査や表面波探査より高分解能力、空隙率が大きいと電磁速度は高速度になるため、空洞などの構造判別や透水性などの物性調査も可能である。探査例を図II-1に示す。解析例中の数字は電磁波速度($\times 10^{-8}m/sec$)あり、空隙率が大きいと速く、含水率が大きいと遅くなる。この例は、淀川水系の堤防で行った探査例であるが、結果はN値分布とよく適合しており、深さ15mくらいの比較的深い地盤深度まで探査が可能であることが示されている¹⁾。

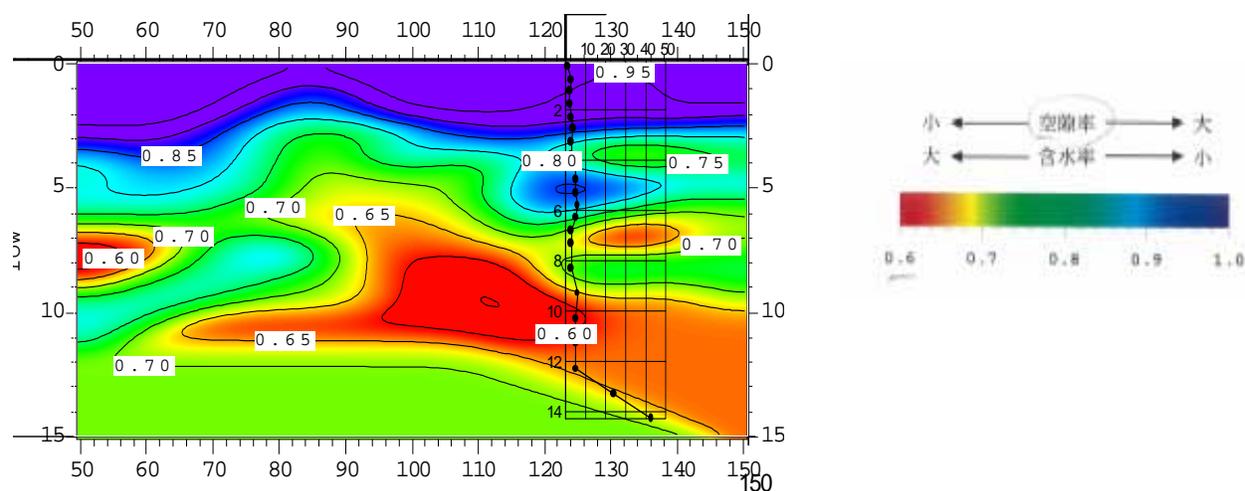


図 II-1 連続波レーダによる地盤の解析例

3) 電磁探査

電磁探査には周波数領域電磁法と時間領域電磁法があり、導電率や比抵抗を調べることができる。深度は 20m くらいの深いところまで、コイルの間隔によって変えることができる。探査能力として、含水率を調べることが容易で地盤の含水率判別に適している。

周波数領域の方法として、簡易電磁 EM 探査では、一定間隔の送・受信コイルを持って、測線上を数メートル間隔で静止測定することにより、二次磁場の同相および離相成分を計測し、両成分の関係から地中の導電率あるいは比抵抗値を算出する。浅部探査には送・受信コイル一体型の装置を用いるが、深部探査ではセパレート型を用い、コイル間隔を 2 種類で測定することにより異なる深度の導電率情報も観測できる。

時間領域の方法として、過般型送信ループを用いる方法がある。

4) 標準貫入試験 (N 値)、不飽和な堤体を泥水を使って掘削する場合、他のサウンディング試験で結果を確認する必要がある。

5) サンプリング：攪乱サンプルを用いて、コンシステンシー試験、粒度分析を行い、地盤種別を特定する。不攪乱試験は 3 軸試験などに用いる。

6) コーン貫入試験、RI コーン貫入試験は水分特性も把握できる。

7) スエーデン式サウンディング試験、礫が多い場合は、ラムサウンディング試験が適当である。

8) 現場透水試験

9) 孔内検層 PS 検層

2.2 室内試験

強度と変形特性を求めめるため、3 軸試験 (CU , \overline{CU} , CD 試験) を行う。試料は、飽和試料および不飽和試料を用いる。試料は自然不攪乱試料が望ましい。次に、室内透水試験から透水係数、水分特性曲線を求める。

2.3 堤防周辺の地盤調査

河川堤防の安定性の評価をするためには、河川堤防を含む流域を対象とした地下水位の分布や、その地域の伏流水系の挙動等を調査する必要がある。

洪水時に堤外地で生じる填砂現象は、隣接した河川からの直接の浸透も原因となっているが、図 11-2 のような旧河道の存在も影響していることがある。

このような流域の水理構造を調査する方法を整理すると、表 11-1 のようになる。この表において、古地図より旧河道の状況を推定し、現状の土地利用を考慮して、実際に地元での調査を行い、地下水利用状況や井戸の構造、分布の調査をする。

旧河道の位置の予測が可能となった所で、広域の地盤の物理探査を実施して旧河道の位置および幅等を確認する。物理探査はあくまで間接的な調査方法であるため、その探査結果の妥当性を確認するために、必要な所にボーリングし、地層構成の妥当性を確認する。対象地区の広域の地盤図がある場合には、その地盤図との整合性も確認する。広域地盤図がない場合には、自治体の道路建設や建築のためのボーリング調査結果も参考にする。

ボーリング調査では地質構成の把握とともに、そのボーリング孔を用いて、各層での原位置透水試験を実施して、それぞれの帯水層の浸透特性（透水係数）を求める。また、地下水検層も実施して、帯水層の中でどの深度が「みずみち」になっているかを探査する。

ボーリング孔を用いた原位置での単孔式透水試験からでは浸透特性として透水試験しか求められない。この透水試験だけでは洪水波形に対応した非定常の地下水の挙動の予測が不可能であるため、不圧帯水層では、ボーリングにより試料を採取して不飽和土の浸透特性である水分特性曲線と飽和度に依存した不飽和土の透水試験を求める必要がある。

また、被圧帯水層に対しては、揚水試験を実施して、帯水層の比貯留係数(S_s)の値を測定する必要がある。しかし、河川堤防の安定評価のため広域の各帯水層の比貯留係数の値を測定することはきわめてまれである。したがって、このような現状の中でどのようにして比貯留係数の値を求めるかは今後の課題である。

ボーリング孔および既存の井戸を対象として、地下水位の観測網を構築する。ここでの注意は、各帯水層で地下水位（水圧）は異なるため、観測結果はどのような状況のデータかを十分に吟味して、地下水位、水圧の分布状況を評価する必要がある。

種々の要因により地下水位（水圧）は変動しており、その挙動を記録した結果より、先に述べた被圧帯水層の比貯留係数の値を求める方法も考えられる。

観測井内の地下水の水質調査により、対象としている帯水層と河川水との関係もある程度評価できる。

3. 解析手法

河川堤防の安定性の検討には、河川堤防の構造検討の手引きに示されているように、浸透破壊、浸食と地震に対する検討が検討項目としてあげられている。浸透に対する安定解析としては、浸透時の円弧すべり解析によるすべり破壊の検討とパイピングによる破壊が検討されている。このような堤防の安全性の照査では、現在は高水時の浸透解析と円弧すべりを仮定する安定解析法に基づいて別々に行われているが、これらの既往の解析法では、浸透と変形の連成や変形及び進行性破壊のメカニズムは考慮されない。このため、安全性と経済性の確保のためには、既存の堤防

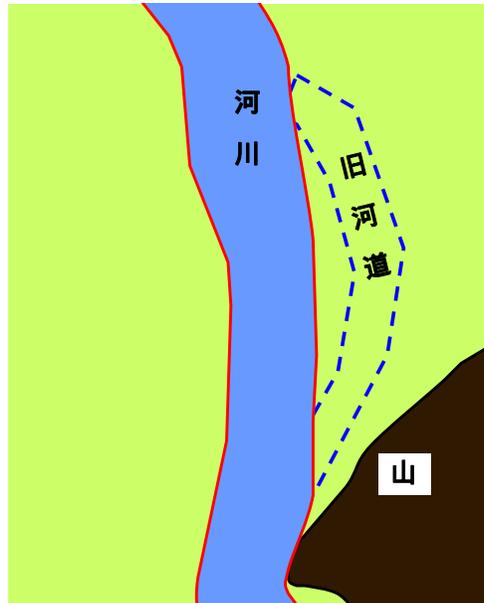


図 11-2 現河川と旧河道

表 11-1 流域の水理構造の調査法

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> (1) 古地図等文献調査 (2) 土地利用，現地調査 (3) 井戸の分布 (4) 物理探査 (5) 広域地盤図 (6) ボーリング調査 (7) ボーリング孔内検層 (8) 地下水検層 (9) 原位置透水試験 (10) 揚水試験 (11) 広域地下水位（水圧）調査（モニタリング） (12) 地下水位の水質調査 |
|---|

の安全性照査法の高度化と見直しが必要であるとの考えから、近年、数値解析法に基づく浸透変形連成解析法が提案されてきている。吉野川の堤防においても、このような先進的な解析法を適用し、安定照査を行うことが望ましい。

3.1 浸透変形連成解析

最近、不飽和浸透 - 変形連成解析手法が提案されている²⁾。従来の安全性評価手法は、浸透解析による局所動水勾配による浸透破壊の予測と、円弧すべり解析による滑り破壊の検討を別個

に行うものであり、洪水時に起こりうる堤防の破壊形態を必ずしも正確に模擬したものとはなっていない。最近の不飽和浸透 - 変形連成解析手法では、多相系材料の変形解析法、具体的には、2相混合体理論に基づいて、不飽和浸透 - 変形連成解析手法を定式化し、不飽和浸透時に起こりうる土骨格の変形問題の解析を行う。 間隙空気の運動までは考慮する3相系解析法と、空気圧をゼロと仮定する簡易な2相系の解析法がある。不飽和浸透特性については、水分特性曲線を与えることにより、サクションと土中の水分量との関係を考慮する。この手法を用いることにより、堤防盛土の透水性、および堤防下に存在する基礎地盤の透水性、堤防断面内への不透水層の設置や堤防法面への遮水シートの設置等の各種堤防強化工法の効果についても評価することが可能である。堤防の安全性の評価にあたっては、従来の限界水平動水勾配=0.5で評価してきたパイピング破壊の再考や堤防法面の変形に着目し、局所破壊と判断されるひずみや発生するまでの時間を用いることにより、進行性の変形破壊を考慮することができる。さらに、越水時にもこの方法は用いることができるが、その際、単に越流水深一定の境界条件を用いることなく、水の流れを精度よく予測しておくことが必要である³⁾。

3.3 液状化解析

地震時液状化が懸念される場合の河川堤防の安全性については、円弧すべり解析や簡易液状化予測法のみではなく、スーパー堤防の設計で用いられている有限要素法による有効応力を考慮した液状化動的解析法、ただし、透水を考慮できる動的解析法⁴⁾の適用が有効であろう。また、最近洪水時における地震の発生も懸念されていることから、先に述べた浸透 - 変形連成解析法と有効応力液状化解析法を連続して用いることも重要である。特に吉野川下流は沖積低地にあり、兵庫県南部地震によって下流部で液状化が発生したように、今後も液状化の影響を考慮する必要がある。

4. 河川堤防等の調査に関する注意事項

河川堤防の安定性を評価するためには、その堤体の内部構造を正確に把握する必要がある。従来はこのような堤体の内部構造を把握するために、堤体に直接ボーリングをしてその内部の構造を評価するのが主流であったが、ボーリングのデータはあくまで点か線のデータであり、全体の構造の把握は困難である。このような現状に対して、近年、物理探査による地盤や土構造物内の構造の評価手法の新しい技術が開発されて来ている。ただ、物理探査はあくまで間接的な調査で必ずボーリング試験により、その構造を確認する必要がある。

堤防の調査法を表 11-2 にまとめた。まず、堤防の過去の改修や構築された年代等についての参考資料があればそれを調査する。当然、過去の破堤の歴史についても調査をする。堤体の中で

どの部分が危険であるかを評価することはきわめて困難であるが、堤体の外形や河川形状よりある程度、詳細調査が必要な場所は特定できる。また、物理探査を実施する事によって堤体の内部構造が把握され、ボーリング調査によって、その層からのサンプリングにより、対象層の浸透特性も明確になる。ただ、現行のボーリング技術では、堤防の安全性で最も大切な砂質層、礫質土層のサンプリングがきわめて困難である。凍結サンプリングに替わるもう少し簡単な手法であまり乱さない砂礫層のサンプリング技術の確立が急務になって来ている。

不飽和領域の砂質土層のサンプリングでは気泡ボーリングが有力であり、孔径を大きくとると、内部の飽和度もあまり変化させないで試料のサンプリングが可能である。

ボーリング孔を用いての原位置での透水試験が実施されるが、河川堤防のような飽和度の状態での E-19 法的な原位置透水試験法により、本当に見掛け飽和状態の透水係数が求められているかどうかについてはまだまだ議論の余地がある。E-19 法はロックフィルダムのコア材の品質管理のための透水試験で、あくまで比較的飽和に近い状態に締め固めた場を対象とした試験である。また、それより求められる透水係数の妥当性に関してもサンプリングした試料による試験や数値解析手法によって確認されている。

したがって、今後の課題として、砂層や砂礫層を対象とした不飽和土の浸透特性を、ボーリング孔を用いた試験によって計測する手法の確立が大きな課題となる。サンプリングした砂層か礫層の試料に関しての室内における不飽和状態での pF 試験法についてはある程度確立されているが、不飽和状態での透水試験は透水試験法に対してはまだまだ複雑な試験法が必要であるため、もっと簡略化した簡単な試験法が必要である。

堤体の洪水時の飽和度の変化とその浸透水圧によって堤防は破壊を生じる。これに対しての数値解析的な評価手法に関しての研究も先に記述しているので、その内容に関してもここでは割愛するが、そのモデルの妥当性の評価のために、堤体内の降雨時の飽和度のモニタリングや間隙水圧のモニタリング結果が必要である。堤体が不飽和であれば降雨浸透や洪水の水の浸透によって堤体内の空気圧も変化するため、間隙空気圧の計測もきわめて大切である。一般に負の間隙水圧の計測にはテンションメータが用いられるため、長期の負の間隙水圧の計測はきわめて困難である。そのため、ADR、TDR、FDR 法等の誘電率を計測して飽和度を求める手法が主流になって来ている。このような不飽和領域の飽和度は、降雨によって増加し、表面からの蒸発散によって減少する。したがって、常時の堤体内の飽和度の計測より、どの程度の降雨が浸透し、どの程度の水分が蒸発散するのかを予測し、豪雨時の洪水、豪雨による堤体内の経時的な水分予測のため「初期の内部状態」の予測が必要である。

この「初期の内部状態」の予測は、従来は先行降雨量によって斜面の危険度を予測していたような手法に対抗するもので、より正確に堤防の危険度を時間項も入れて評価しようとするものである。

堤体の底部の地下水面下の水圧のモニタリングデータは、河川水位との連動性が河床の状況を予測するために必要である。

5. 堤体安定性評価における課題

河川堤防の被災形態別分類によると、越水による破堤が全体の70%を占めている。したがって越水しない堤防、越水しても破堤しない堤防にする必要がある。しかしながら、実際に破堤した堤防を調査すると、浸透により堤内地で局部的な表面崩壊が生じ、その後越水すると、表面崩壊の場所が簡単に表面洗掘されて堤防が破堤するようなシナリオが考えられる。

多くの堤防の表面は植生によって保護されており、越水してもそれほど洗掘が生じていないが、堤体の内部より崩壊すると、植生の保護層に欠陥が生じ、越流によって容易に堤防が破堤するため、堤体内の浸透による局部的な崩壊を防止する事はきわめて大切であることがわかる。

今後は堤防に関する調査手法を一層確実なものとして、図 11-3 に示すような浸透に関する安定性評価手順や、さらに進んで3.1で述べた浸透 変形連成解析を行って安定性を照査するとともにモニタリングも含めた総合的な河川堤防の安全性評価手法の確立が必要である。

表 11-2 堤防の水理構造の調査法

- | |
|-----------------------|
| (1) 文献調査 |
| (2) 物理探査 |
| (3) ボーリング調査 |
| (4) 原位置透水試験 |
| (5) 室内透水試験 |
| (6) 室内における不飽和土の透水試験 |
| (7) 室内における不飽和土の水分特性試験 |
| (8) 堤体内の飽和土の分布調査 |
| (9) 堤体内の飽和土のモニタリング |
| (10) 堤体底部の水圧のモニタリング |
| (11) 堤体内の空気圧のモニタリング |
| (12) 堤体内の間隙水圧のモニタリング |

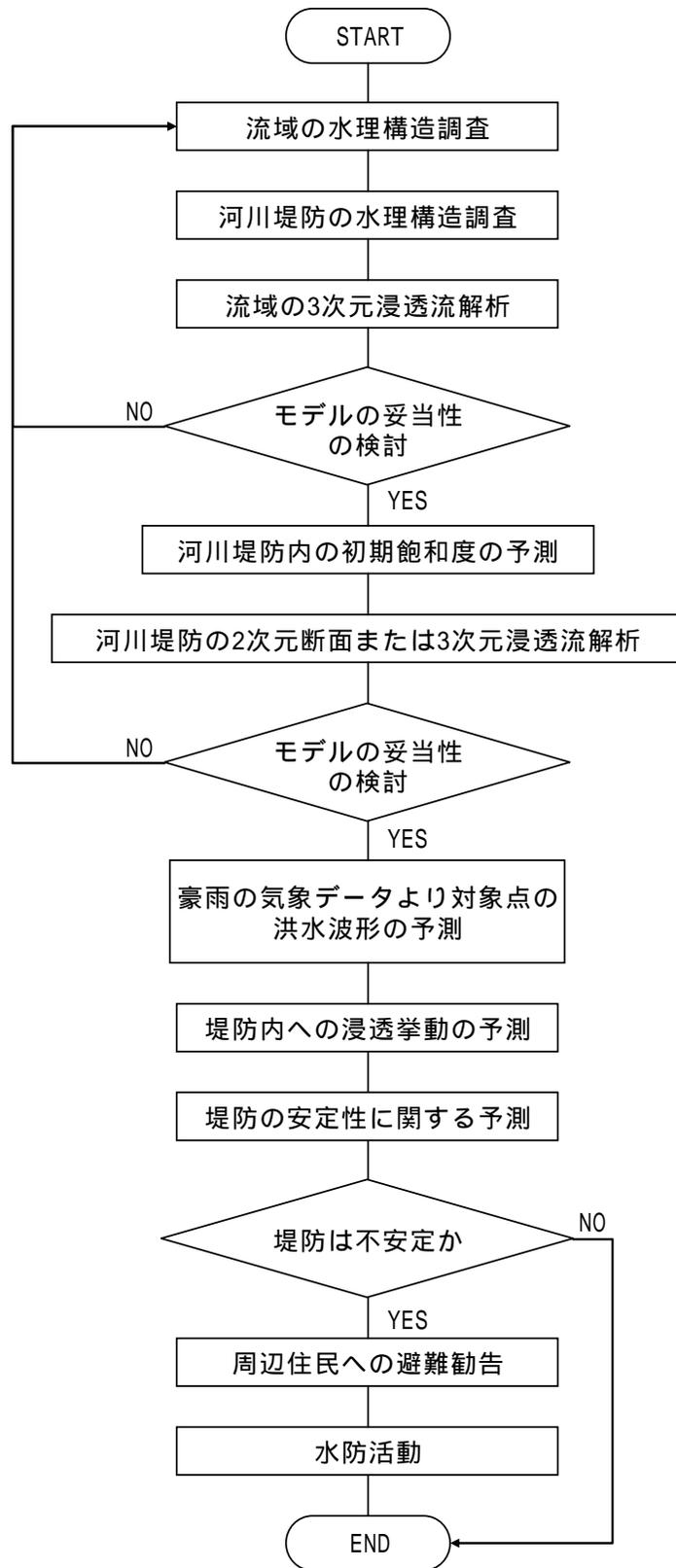


図 11-3 河川堤防の浸透に関する安定性評価手順

参考文献

- 1) 小高、岡、木元、芝田、服部、北川、山田、基礎工、pp.35-37, 2006
- 2) 岡 二三生、小高 猛司、木元小百合、加藤 亮輔、水-土連成数値解析法による洪水・地震時の土構造物 の変形・破壊予測、第 55 回理論応用力学講演会講演論文集、pp. 15-18、2006
- 3) 高田ら、堤防盛土の空気-水-土-多相浸透-変形連成解析、第 41 回地盤工学研究発表会平成 16 年度発表講演集、鹿児島、2006、7、No. 623、2006
- 4) リバーフロント整備センター高規格堤防盛土設計・施工マニュアル

・流域物質収支班報告

1. 担当領域

流砂・河床変動および流砂を含む物質収支に対する堰やダムインパクトの評価するためには、流域全体を視野に入れたそれらの取り扱いが必要である。ここでは、これらに関連して、河川整備上の技術的な課題を評価するための方法の現状を紹介する。

2. 注目すべき現象や問題点

2.1 流域規模における土砂流出現象

降雨出水により生産された土砂は、崩壊・土石流、掃流砂、浮遊砂および wash-load の形態で輸送される。これら流砂の量と質の時空間分布の把握は、下流域の物質収支特性及び河床変動特性に大きな影響を与える。また、計画規模またはそれ以上の出水においては、大量の土砂が一度に河道に供給され、河床材料が細粒化するとともに流砂量が増える。このように河道に供給された土砂の粒度は、その後の中小出水で次第に粗粒化し、流砂量は減衰していく。吉野川流域においては、平成 16 年に既往最大流量を記録した出水が発生し、下流域への土砂供給条件に大きな変化が発生したと考えられ、平成 16 年以降の流砂特性について特に注目すべきである。

吉野川流域の地質特性は、中央構造線を境にして南北で異なっている¹⁾。中央構造線よりも北側は、主として和泉砂岩により形成されており、風化されやすい。一方、南側は変成岩であり、主として緑色片岩と黒色片岩により形成されている。このような地質特性の違いによる土砂流出特性の違いにも注目すべきである。

山地域からの土砂流出特性は、山地斜面の森林の状態によって影響を受ける。例えば、吉野川流域は杉の人工林が多い²⁾が、人工林は密生して植えられているため、下草が生えにくく、自然林に比べて土砂流出量が多くなる。また、一つの斜面から一度に樹木を伐採すると、同時期に全ての根が枯れ、斜面が崩壊し易くなる。そのため、森林の状態と土砂流出特性との関係についても注目すべきである。

2.2 河道域における流砂・河床変動

堰やダムなどの河道横断構造物は、流砂の量及び粒度分布の時空間的な変化を介して河床・流路形状及び河床材料の粒度に影響を与える。堰が設置されている地点は、河床低下が発生せず、さらに、流れの堰上げ効果により、堰上流域において土砂の貯留が発生する。その結果、堰上流域の河床上昇とともに、堰下流域において河床低下を発生させる。また、河

床材料の粒度も堰上流域で細粒化、下流域で粗粒化する。ただし、吉野川第十堰周辺については、砂利採掘等による河床低下が顕著であり、現在の河床形状と河床材料の粒度は、このような一般的な傾向を示していないため、注意が必要である。ダム貯水池のような大型河道横断構造物では、ほとんどの流砂がダム内に堆積するため、ダム下流域において河床が低下するとともに、河床材料が粗粒化する。また、支川における砂防ダムや落差工の上流域においても土砂の貯留が発生し、吉野川本川への土砂供給量を減少させている。さらに、河川の河床・流路形状及び河床材料の時空間的な変化は、砂利採掘によっても発生している。国土交通省の砂利採掘許可量³⁾によると、吉野川の直轄区間において昭和40年～平成2年の間に行われた砂利採掘の量は、約22,800,000m³である。一方、同期間の吉野川の国土交通省直轄区間の土砂収支は、約-36,600,000m³であり、河床低下の多くが砂利採掘によるものであることがわかる。そこで、ダムや堰等の人工構造物がある場合と無い場合、砂利採掘を行った場合と行わなかった場合でどのように流砂・河床変動特性が異なるかを把握する必要がある。これらによって、対象としている河川が、現在どの程度の人為的インパクトを受けているかも把握できる。また、将来の流砂・河床変動特性を予測する場合は、ダムや堰などの人工構造物が有る状態、無い状態、さらには人工構造物を改修した場合のそれぞれに対して調べ、将来の流砂の量と質及び河床が時空間的にどのように変化するか把握する必要がある。特に、第十堰の撤去・改修等については、現在、堰の上流と下流の河床位の差が非常に大きくなっており、下流への急激な土砂供給を引き起こす可能性があるため、注意が必要である。また、平成16年の出水時には、支川から本川へ大量の土砂供給があったものと予想される。これらの土砂供給により、第十堰周辺の地形及び河床材料の粒度がどのように変化したか注目すべきである。

2.3 栄養塩の流出過程

流域における栄養塩類の動態を把握しておくことは、第十堰が河川環境に与えている影響を検討する上でのインプットデータとして重要である。ここでは、吉野川流域全体および第十堰周辺域における栄養塩動態特性について述べる。

吉野川流域においては、洪水時に想定される栄養塩動態として、家庭系、工業系からの排出ではなく、畜産系、農業系、そして自然系からの排出が支配的であると考えられる。これは、畜舎周辺から発生する排泄物や土壌に含まれる肥料分の流出が顕著であることを意味する。特に、土砂に吸着した状態で存在するリン、家畜排泄物やリターなどに含まれる窒素の動態を降雨毎にとらえることは重要である。洪水時は河川において輸送される物質の絶対量が非常に大きいので、第十堰の上下流側での栄養塩類の収支は、河川域における生物相への影響評価を検討する際の重要な基礎的データとなる。特に、平成16年に既往最大流量を記録した出水時には、堰上流部では、新たな土砂やリターの堆積や底質の再懸濁などによ

って堰付近における栄養塩環境が著しく変化したことが予想されるので、大きな出水毎に水および底質における栄養塩の計測は欠かせない。

一方、非洪水時では、全ての系から溶存態成分の排出が顕著であると考えられる。人間生活や畜産業に関わる処理水に含まれる窒素やリンの排出や地下水の浸出水に含まれる窒素の動態を、水路や河川内の植生域における吸収や水田における脱窒などの作用を含めた形として日単位でとらえることが重要である。特に、窒素成分は溶存態で輸送される割合が大きく、非洪水時に輸送される割合も土砂やリンに比べて大きいので、その動態に着目する必要がある。第十堰周辺領域では、堰による水の移動形態の変化に伴い堰の上流側では富栄養状態となる可能性があるため、定期的な調査が必要不可欠である。なお、第十堰付近には数十もの観測井があることから、地下水流動も含めた物質動態の検討が可能である。

これらの河川における栄養塩動態は、流域における土地利用や人間活動によって著しく変化する。例えば、徳島県の統計資料⁴⁾を参照すると、農業、畜産業の就業人口の減少に伴い、水田面積および家畜頭数は減少傾向にある。水田は畑地に転換され利用される機会が多くなり、硝酸態窒素の流亡が顕著になり、河川水質にも影響を及ぼす可能性が高い。また、徳島県は平成 17 年に酪農・肉用牛生産近代化計画⁵⁾を発表し、生産の集約化を目標としている。そのため、局所的な負荷の増大が予想され、その規模と位置情報が河川水質への寄与の重要な要素となり得る。また、家庭系や工業系から発生する栄養塩も、人口や事業所の分布の変化に大きく影響される。このように、堰周辺域における栄養塩の流入量の評価や河川における栄養塩負荷の将来予測を行う場合には、社会的動向を加味した負荷源面積の予測が同時に必要となる。そのため、負荷源の種類や原単位の変化を流域のGISとして整理しておくことが課題となる。

2.4 植生、流木、リター

河道内の植生は、貯水ダムによる洪水ピーク流量の低下によって砂州上への流れの攪乱が減少し、草本類から木本類へ遷移している場所も多くみられる。これらの植生の質的・空間的变化は、流れや流砂の時空間分布を変化させるため、その特性を十分に把握しておく必要がある。また、植生域は窒素やリンなどの栄養塩の吸収体として機能するが、流失することによってリター等の有機物の供給源となるので、物質収支を考える上でも大切な因子となる。

平成 16 年の既往最大流量を記録した出水のように、計画規模またはそれ以上の出水で、河道には大量の土砂が供給されるとともに、草本類と幼木は掃流され、成長した木本類の一部についても河岸浸食とともに流送される。裸地となった砂州上には、植生が再び侵入・成長を始め、流砂・河床変動特性を変化させる。このように、出水によるインパクトによって大きく変化した河相が、どれぐらいの時間スケールでインパクトを受ける前の状態に戻るかを

把握することは重要である。

流木については、堰を改修した場合の形状によっては、堰に対する衝突による破損や堆積による洪水流下能力の低下などの問題が発生するため、発生起源や発生量について把握することは重要である。また、ダムによる捕捉や河道内に残された流木の人的除去により、河道及び海域への流木の供給量は減少している。これらが生態システムに与える影響について把握しておくことも重要である。

吉野川河口に形成されている干潟の構成材料には、wash-load 等の細粒土砂やリターなどが含まれる。wash-load やリターは、ダム貯水池への堆積により、河口域への供給量は発生量よりも減少している。また、河道内に植生が多く繁茂している時は、植生域に wash-load やリターが堆積する。一方、植生が一掃されるような出水では、植生域内の wash-load やリターが下流域へ供給されることとなる。このような wash-load やリターの供給量の変化が干潟の形成・維持にどの程度影響を与えているかも把握しておく必要がある。

3. 検討すべき技術課題

3.1 流域規模における土砂流出現象の予測と評価

山地流域における土砂流出現象は、崩壊・土石流、掃流砂、浮遊砂などの流出形態に見られるように極めて複雑である。これらは、流域の地形・地質、植生、気象・水文条件などの自然的条件および流域における土地利用や生産活動をはじめとする人為的あるいは社会的条件に依存することは言うまでもない。さらに、崩壊・土石流の発生については、我々が容易に評価し得ないような条件にも支配されていることを認識しておかなければならない。

土砂流出予測は、ダム堆砂データに基づく経験的方法および水理・水文学的方法を相補的に用いて行われているのが現状である。そのため、崩壊、土石流、地滑りなどの土砂移動現象と地形・地質、土地利用、水文条件などとの関係やダム貯水池及び砂防ダムにおける堆砂と流出土砂の量及び質との関係を念頭にデータの収集整理に努め、予測問題に用いる。生産された土砂は土石流、掃流・浮遊、wash-load の形態で流出する。流出土砂の量および質の特性を予測するには、これらの流砂形態別の評価が可能なモデルとしておく必要がある。また、輸送過程を追跡する際の初期条件とするために、河道の形状ならびに河道内堆積土砂の分布と粒度構成の実態把握をしておくことも必要である。このようにして得られた流出土砂の量と質は、下流域の流砂・河床変動特性を予測するための境界条件となる。

降雨・流量条件には、実測データを用いるとともに、計画規模、またはそれ以上の大出水を含む降雨・流量条件を用い、大出水時における大量の土砂生産とその後の河道堆積物の粗粒化による流砂量の減衰プロセスを再現できるようにする。

3.2 河道域における流砂・河床変動の予測と評価

数十年以上の長期の流砂・河床変動特性を予測・評価するには、1次元河床変動解析を用い、平面2次元河床変動解析は、数洪水程度の短期の流砂・河床変動特性を予測・評価するのに用いるのが良い。流れの基礎方程式は、非定常流れによるものが望ましい。河道横断形状は、非定常流れや植生繁茂に対応できるようにするとともに流砂量を適切に見積もるため、1次元解析においても一般断面形状とする。流砂形態は、掃流砂、浮遊砂、そして wash-load を考慮し、河床材料は混合砂として扱う。

流量条件には、解析上流端付近の実測データを用いるとともに、計画規模、またはそれ以上の大出水を含むハイドログラフも用いる。下流端の水位は、可能な限り、実測水位データを用いる。また、吉野川河口域では、台風の通過時に洪水流量と高潮のピークが同時生起する可能性が高いため、下流端が河口付近の場合は、洪水ピーク流量と高潮のピークが同時生起する条件も含めた解析が必要である。土砂供給量および給砂の粒度は、3.1のような方法により、山地域からの流出土砂の量と粒度を予測し、それらを用いる。解析上流端付近の浮遊砂や wash-load の濃度や粒度のデータがある場合は、それらを用いる。河床材料の粒度は、砂州上や水際だけでなく、流路内においても採取し、解析に用いる。植生については、航空写真、レーザー測量、現地観測などの成果を用いて密生度と植生高さを調査し、解析に用いる。

3.3 栄養塩の流出過程の予測と評価

栄養塩のモニタリングには、浮遊砂や wash-load の計測に用いられる濁度計などの汎用的な機器は少なく、採水および実験室での分析によって計測されるので、流域内の動態を検討するためには多大な労力を要する。そのため、着目している第十堰周辺領域への栄養塩流入量を検討するためには、解析モデルを用いた評価・予測技術の援用は欠かせない。栄養塩の予測手法には多くの手法がある。最もシンプルな予測手法に L-Q 式がある。河川において輸送される負荷量を流量のべき乗の関数で表現したものであり、観測によって得られた流量と負荷濃度から係数が決定される。

L-Q式では負荷の排出源の特定が難しく、人口や土地利用の遷移などに対応した流出量の変化を明確に表現することはできない。そこで、各種土地利用から排出される負荷量を原単位として試算し、その量をタンクモデルなどの流出解析モデルに組み込む方法^{例えば⁶⁾}が広く用いられている。

さらに、近年では、窒素の形態変化および動態を現象に即して表現する分布型物理モデルも多く開発されている。例えば、土木研究所において開発が進められている水循環モデルに、WEPモデル(Water and Energy transfer Process Model)⁷⁾があり、窒素の動態を組み込んだ形で検証が進められている⁸⁾。また、米国農務省で開発されたSWAT (Soil & Water Assessment Tool)⁹⁾は、流域の水循環、栄養塩、農薬等の水および物質の循環を各項目の現象に即した形で表現されている。さらに、SWATは汎用的なGISデータと連携して計算可能であり¹⁰⁾、欧米を中心

とした世界中の多くの流域へ適用されているが、日本への適用事例は無い。このように、栄養塩の物質収支に関する現状把握および将来予測に用いる分布型物理モデルが現在利用可能であるので、吉野川流域でも今後積極的に活用することが望まれる。

以上の流域規模の解析結果を境界条件として、堰周辺域の比較的小規模領域における物質の移流拡散機構や生物活動による代謝作用も取り入れた詳細な栄養塩動態解析技術を適用することで、適切な環境評価や影響予測が可能になる。

3.4 植生、流木、リターなどの予測と評価

植生は、粗度、または流水に対する抗力として評価し、植生域内の流砂は有効掃流力を用いて算定する。植生の時空間的な変化を予測できるだけの知見は、現時点では得られていないが、解析方法の妥当性を検証するために過去のある時期の河床変動特性の再現計算などを行う場合、期間内の植生の繁茂状態の変化は実測データを用いて考慮するのが望ましい。流木の発生起源（山地起源なのか河道起源なのか）や量については、ダム貯水池における流木貯留のデータや河道内植生の変化等から把握するのが良い。また、倒伏した流木の流下および堆積の過程などの流達過程の評価も必要である。リターの発生過程は、供給源の植生分布や発生量、そして流達過程の把握が必要となる。これらの植物体の流出過程の予測技術は十分に発展している段階にはなく、時空間的な分布変動に関する調査や各流出過程のモニタリングが不可欠である。

参考文献

- 1) 建設省徳島工事事務所: 吉野川流域水害地形分類図説明書、1995.
- 2) 熊谷幸三: 吉野川流域における森林整備の方向について、吉野川、創刊号、11-31、1997.
- 3) 国土交通省四国地方整備局徳島河川国道事務所提供資料より
- 4) 徳島県 県民環境部 統計調査課: 2005 年農林業センサス 農林業経営体調査結果概要（概数値） - 徳島県 - 、2005.
- 5) 徳島県 農林水産部 畜産課: 徳島県酪農・肉用牛生産近代化計画書、2005.
- 6) 加藤亮、黒田久雄、中曽根英雄: 分布型モデルによる浄化型湿地の配置と窒素負荷除去量の評価、農業土木学会論文集、235、43-50、2005.
- 7) 末次忠司、河原能久、賈仰文、倪広恒: 都市河川流域における水・熱循環の統合モデルの開発、土木研究所資料第 3713 号、2000.
- 8) 賈仰文、木内豪、吉谷純一、戸嶋光映、倪広恒: WEP モデルと組み合わせる分布型汚濁負荷流出モデルの構築と検証、水文・水資源学会 2001 年研究発表会要旨集、44-45、2001.

- 9) Arnold, J.G., A. Williams, R. Srinivasan, B. King, and A. Griggs: SWAT, soil and water assessment tool. Temple, TX 76502. ARS, USDA, 1994.
- 10) Arnold, J.G. and N. Fohrer: SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling. *Hydrol. Process.* 19(3), 563-572, 2005.

環境影響評価班報告

1. 担当領域

1.1 環境と環境影響評価について

一般に、「環境」とは、生物・無生物を問わず、ある主体の周辺を取り巻くものの全体という極めて曖昧な意味しか持ち得ていない言葉である。したがって、第十堰の存在が河川の状態に影響を及ぼしている区間の環境を評価する場合、まず、そこが何にとっての環境かということを確認しておく必要があり、それがなされて初めて、検討すべき技術的課題が明らかとなる。さらに、「環境影響評価」では、第十堰がその周辺である「環境」に与えている影響を明確にして、その内容を評価することになるので、「堰」及び「その周辺」を生活環境、生息・生育環境の全部または一部としている様々な生物にとって、堰がこれまでどのような役割を果たしてきており、また、現在果しているかに焦点を当てて議論するためには、現時点でどのような課題があり、その解決のためにはどのような方策があるかを明らかにすることが本班の担当領域と捉えられる。

1.2 第十堰と河川の生物生息環境について

通常、河川は水辺を含んだ広い空間を有しているので、多くの動植物の生息・生育にとって重要な場を与えており、これが「河川の生物生息環境」となっている。しかしながら、そこを生息・生育の場としている生物は、環境（の基盤）を形成している諸条件に縛られていて、結局、その条件に許容される、あるいは、それを受容できる生物しか、生き長らえ、かつ、種を存続させることができない。第十堰のように、人工構造物であっても、川を横断する大きな規模を有し、それが2世紀半以上にも亘って存在している場合には、その周辺に存在する生物（群集）は第十堰が造り出してきた場を環境として受容できうるものであって、堰の存在とはある種不可分の関係にあるといえ、堰の環境影響評価はこの関係を解明することから始まることとなる。この周辺に多くの生物が生息する以上、それらの間にも例えば食物連鎖のような何等かの相互関係があって、この関係を考慮しながら種類数や個体数を明らかにしていけば、生態系を持続的に支える場や機能として、この堰が周辺の「河川環境」に及ぼしている影響をある程度捉えることができる。

一方で、河川を身近にしていたり、訪れることに楽しみや歴史を感じたりする人々にとっては、河川は生活環境の一部として重要な位置を占めている空間であって、ここでは、これが「堰がもたらしている河川環境」と考えられているであろう。したがって、良好な環境かそうでないかは、主体が何であるかによって全く異なってくるが、人々が普通に「良い河川

環境」と感じるのは、清らかな水が豊かに流れ、石礫に覆われた川原の低位部に木々や草花の繁茂した高位部が連続していて、そこに多種多様の（清流を好む）昆虫類、魚類、鳥類、哺乳類などが多数棲んでいるような河川の状態と思われる。そして、実際にそれが第十堰によって真にもたらされているなら、第十堰はよい影響を与えるものと評価される。

1.3 第十堰の環境影響評価について

第十堰が上記のような状態をもたらしてきたものであるか否かは、河川の水域と陸域について、生物相の調査や生息場の物理・化学指標測定を実施すれば相当な程度で把握することができる。さらに、最近では、生物体を形づくっている物質の組成分析や同位体計測によって、対象生物がどこに由来した物質を取り入れて生長し、食物連鎖などを通じてどこに影響を与えているのかも解明されるようになってきている。

しかしながら、第十堰とその上下流に関する「自然環境調査」や「水環境調査」では、堰改築の議論が実質的に一時棚上げ状態になっていることもあって、それまで、かなり集中的、先進的に実施されてきたこれらの調査が若干停滞しているような状態となっている。すなわち、かつての堰の改築を巡って議論が戦わされていた時期には、第十堰がこの河川区間の環境形成に果たしている役割を考察し、評価するための資料は、多量に蓄積されつつあって、各生物の生息場の環境条件、場の物理的・化学的条件を特定することが可能となりつつあると考えられた。しかし、その後、堰に関する直接的な研究調査がそれ以前に比して活発でなくなってきたことを受けて、最近河川工学分野でも進展してきている、物質収支を細部に亘って解明し、そこから環境、あるいは、諸条件が環境に及ぼす影響を評価する試みは進められていないように判断される。そこで、以下では、生物の生息・生育場の物理的・化学的条件の形成にどのような水理現象が関わっており、その機構を明らかにするためには、現在どのような技術があるかを述べて、第十堰が周辺の河川環境の形成に果たしている役割を評価できる技術的課題について考察する。

2. 注目すべき現象や問題点

2.1 第十堰とその周辺の特徴

第十堰とその周辺の環境にとっては、それが平水時には上下流間に約4 mに及ぶ水位差を生み出しながら斜めに河川を横断する長大な構造物であるということが周辺環境に影響を与える最大の要因になっている。そのような構造物であるがゆえに、堰は、上流区間に関しては、平水時には湛水域の形成要因として、一方、洪水時には流れの堰上げ要因として、と同時に、河床変動に影響する床止め効果を持ち、下流区間に対しては、複雑な局所流の発生要因として、また、入退潮の影響を遮断する完全な潮止め効果を有している。平均河床高縦断

図¹⁾に基づいて、その影響範囲を上下流区間について概観すれば、上流側には、約 10km 上流にある柿原堰までの区間が河床変動の背砂区間となるような床止めとしての影響を与えている。すなわち、このほぼ全区間の河床が昭和 30～50 年の間に 2 m 以上も低下したにも拘らず、ほぼ同程度の河床勾配を有していて、この勾配が上流からの土砂供給量に見合った平衡勾配と見なされることからそのように判断される。なお、昭和 30 年および 40 年の縦断形状は、この勾配が堰を越えてその下流にまで維持されていたことを物語っている。また、この区間は、交互砂州の波長と河道の緩蛇行の波長とが一致した、砂州の固定区間であって、その様子は平均河床高の縦断図にも、極大・極小箇所が平均的な河床低下の前後でもほぼ一致していることにも現れている。この縦断形状の変化状況は、第十堰が昭和 50 年以降安定した河道状態をもたらしてきたものとして、堰上流区間の環境やその形成と維持に影響を与えてきた諸条件について考える場合の基本となるものである。

一方、下流区間では、河口から 6 km 地点までの区間は平均 2 m 程度の河床低下となっており、そこから堰のある約 14km 地点までは約 4 m の河床低下となっていて、12km 地点までの平均河床高は A P - 2 m とはほぼ水平といってよい形状を示している。これが堰の下流区間が汽水域となっている最大の要因であることはいうまでもない。しかしながら、第十堰は年平均で毎秒約 40 トンの水を旧吉野川に取水させる機能を果たしていて、恒常的に吉野川河口域に到達する淡水量を減少させている。これが、吉野川河口部（河口から約 10km 地点辺りまで）では表面から 1 m 以下がほぼ海水状態という、弱混合形態が極めて出現しやすい状況をつくり出している。また、出水後も太平洋側の河川としては珍しいほど、塩分躍層の回復は早く、こうした、特殊な汽水域の状況が河口域を中心に多くの稀少種のハビタートとしての環境を維持していると考えられている。

2.2 河川環境の基本的視点と第十堰の環境評価に関わる諸課題

さて、河川内の個々の位置における環境を第一に支配する基本的要因は、水際から陸域方向あるいは水域方向にどの程度離れているかという「距離」と「高低差」であって、後者は水中では勿論水深であり、それは通常流速とも強く結びついており、陸上では「冠水頻度」として、洪水による攪乱・更新の頻度と強度とに密接に関連している。さらに、河川では、水中はいうまでもなく、陸上でも水際に近い位置ほど、その環境は水質の影響を強く受ける。そして、流量によって水際の位置が大きく変化し、その流量の変動特性が地域によって異なるところに、また、上下流境界における物質やエネルギーといった各種フラックスの流入流出条件に強く影響されるところに、河川環境が湖沼や海岸の環境と大きく相違する点が存在している。例えば、一見境界がオープンなように見られる汽水域であっても、通常の状態では、1 日 2 回動くタイダルプリズムが同時間内の河川水の流入流出総量に比してかなり大き

く、また、外海域での混合・交換量もこのタイダルプリズムに比較すると小さいため、同時に、タイダルプリズムの大きい汽水域ほど、一般に生産性の高い広い干潟を有しているために、物質収支を考えると、実際には境界がクローズしている湖沼などに近い状態となっていると見なしうる場合が多い。

以上から、ここでは、河川環境の基本的視点を、各々の地点における物理的条件と、その物理的条件と境界条件によってほぼ決定される水域や土壌の化学的条件が、時間的・空間的変動を含めて類似していれば、そこに生物のシーズが来さえすれば、ほぼ同じ生物生息生育場が形成されると見なすことにおいておきたい。

逆にいうと、その場所がある時期にある環境条件を満たすことができなければ、そこで生息生育の不可能となる種が存在するということである。これを第十堰について考えると、この堰がないと生活史を全うできない生物は存在するのか、第十堰がなくなるとどういった生物が壊滅的打撃を被るのか、といった点が明確に示されたことはあるのだろうかとのという疑問が浮かび上がってくることも否定できない。元来、河川空間は、生物の生息・生育にとって冗長性に富んだ、代替機能を確保しうる環境構造を有しており、それだけに、そのような構造を大切に保全・維持しなければならない空間であって、こうした認識をできるだけ共有しなければならない。しかしながら、旧吉野川に第十樋門を通して必要水量を確保し、大規模掘削による河道断面拡大の恩恵を上流まで伝えることのできる固定堰の解消と可動堰の設置によって、どのような生物が、日本からとはいわないまでも、徳島県からいなくなるのか、明確な指摘はかなり困難な作業であると思われるが、やはり、こうした点を曖昧にしたまま、漠然と不安を煽って、人間の生命・財産の安全・安心を蔑ろにしてもよいとはいえないことも指摘できる。社会的・自然的条件の下で、堰が築造され、現在の形になっていく過程で、その状況に対応できてきた生物（群集）がそこを生息生育場にしているわけであって、その善し悪しを人間が果たして論議できるのかどうかの問題も同時に存在している。

これまでに述べてきたことや上記の視点によれば、以下に列挙する諸点が第十堰の環境評価に関連して着目すべき課題となる。

- (1) 第十堰の現況が形成されてきた過程
- (2) 第十堰の築造されている吉野川下流区間の河道特性と堰の影響
- (3) 堰とその影響域において注目すべき動植物の特定とその生息場所の水利条件
- (4) 彎曲した曲線形状を持った長大な堰と周辺が有する水利特性
- (5) 河床から突出している堰による不連続性の評価
- (6) 土砂収支、とくに、堰による粗粒分の流下扞止効果等、粒径別の土砂収支
- (7) 堰上流の湛水域と下流の感潮域の流動特性と水質・底質
- (8) 堰や上下流区間での一次生産も考慮した有機物・栄養塩の物質収支

- (9) 堰越流による曝気効果、落差や内部構造による濾過効果等、堰の水質改善効果
- (10) 流れと物質収支に基づいた水質形成の解析モデル
- (11) 外来種の生育・生息問題と堰の存在

以上の11点は、相互に関連しているが、堰とその周辺における生物現存状況の正確な把握はいうまでもないことであって、それを前提とすると、これらは、堰とその周辺の物理環境の形成に関する課題、落差を持った横断構造物としての堰の機能に関する課題、堰周辺の水・物質循環解析に基づく生物生息場の形成条件に係わる課題の3点に大別することができる。堰の直接的な影響範囲へ流入してくる、流水、土砂、有機物、栄養塩などの評価や条件設定に関する技術的課題については、流域流出・気候変動評価班および流域物質収支班が、また、第十堰の現況が形成されてきた歴史的な過程とその背景については、景観・土木史的評価班が論述しているので、次項では、第十堰が直接関与する環境影響評価の面に限って、これらの3点に関する技術的課題について述べる。

3. 検討すべき技術課題

3.1 堰と周辺の河道状態の形成に関する課題

河川環境の基盤である河道状態の形成にとって、その地点が水系や流域の中のどのような位置にあるかは本質的な条件であり、これはその場所の植生や到来する動物といった生物にとっても重要な要素である。この点については、自然地理学的な分類やセグメントの議論があるが、縦断形状や河床材料といった河道条件のみではなく、沿川の地形や土地利用も加味した検討が必要であることは、流域物質収支班が指摘している通りである。また、上堰と下堰からなる曲線的な平面形状と均質ではない堤体構造をした第十堰は、江戸時代中期に本川となった別宮川に対して、農業用水の確保に困った農民たちが現在第十樋門からなされているように、その取水を確保するために造ったと伝えられており、その経緯の詳細については景観・土木史的評価班が報告している。

さて、昭和22年に撮影された空中写真によると、当時の河道は一面多量の土砂に覆われた白い川原となっていて、堰の上下流とも水域は限られており、植生もほとんど認められない状況であった。周辺の田園や背後の山々ともよくマッチしているとも感じられる水に恵まれた景観は、昭和40年代を中心とした砂利採取による人為的改変が最大の形成要因になっている。堰の上流区間の河床もそれによって大きく低下して、直上流の水域も広がっているが、度重なる洪水によってかなりの自然修復作用が加わったにも拘らず、既述したように、この区間では、砂州の配置や平面形状には顕著な変化は認められず、現状の比較的安定した河床・河道状況が形成・維持されていて、生物に落ち着いた環境をもたらしていると考えられる。

この過程については、現在では精緻な数値シミュレーションも計算時間を掛ければ可能となっていて、それによって、逆に、上流からの流水や土砂の供給条件設定の妥当性に関する評価も進み、流域物質収支のチェックポイントとしての機能を持ちうるものと判断される。また、こうした検討・評価を通じて、数値シミュレーションの結果は、上流区間における植生の変遷やエコトーン形成、あるいは、水生動物のハビタット形成やそれらの評価について有意義な情報を与えるものとなりうる。

元来砂利採取は計画河床形状に基づいて許可されるが、これによって第十堰の下流区間では洪水処理能力が格段に向上し、同時に、汽水域が拡大している。その結果、砂利の河原が大半を占め、汽水域は限定されていたそれまでの河道に対して、塩水が大量に定在するという、以前とはかなり異なった生息環境がもたらされたわけであって、こうした環境の変化についての客観的な評価を加えることが必要とされている。この変化は、一面では、堰直下の右岸法先部のような極度の河床洗掘箇所などにおいて、密度の高い海水が滞留して無酸素状態を現出させやすい状況を生じさせているので注意が必要である。いずれにしても、現在の環境を正しく理解するには、砂利採取の量的な実態把握と出水やそれに伴う土砂供給量の履歴を再確認し、その後の堰と周辺の変化過程を把握しなければならないであろう。堰の上流区間の河床勾配が砂利採取以前のものでそれほど変わらないにも拘らず、堰の下流への土砂堆積がわずかであって、こうした状態が維持されてきた理由も明確にされなければならない。これには、流域物質収支班の指摘を踏まえて流入土砂量を正確に推定することとともに、既に述べたように、河床変動解析が有効な評価手段となる。

3.2 落差を持った横断構造物としての堰の機能に関する課題

斜め堰の環境水理的機能と生物生息場に与えている不連続性の解明が技術的課題である。前者では、河道に5割程度の勾配で4mに及ぶ水位差が500m以上の延長で常時存在していることの意味を明らかにすることが課題である。

前者に関して、透過構造といわれている堰本体の通過量、堰下部からの浸透量、堤内地への浸出量の実測あるいは浸透解析による堰上下流間の水収支の把握、さらに、堰による曝気や濾過等の水質改善効果についての実測による検討が望まれると指摘されていた。この指摘に関して、漏水調査²⁾が実施され、堰の災害復旧のための調査として堤体構造の調査^{3・5)}も順次行われている。漏水調査として実施された平成17年の1、2月における2回の流量観測から求められた漏水量は、それぞれ毎秒約2.5、同3.0トンとかなり近い値となっている。しかしながら、流入流量を測定した15.400km断面と越流流量を測定した下堰との間の水域面積が広いために伏流水となる可能性も否定できないので、これがそのまま堰の透過流量であるとは即断できない。また、堰下流の13.600km断面における流量と、堰の越流量や15.400km

断面の流量とは値が大きく相違しており、堰周辺の水収支は明確にはなっていない。このためには、流水が堰内部をどのような経路を伝って流下し、堰を透過したり越流したりした流水がどのように下流に広がっていくかを詳細に把握しなければならないといえる。

後者の不連続性に関しては、堰下流左岸寄りの土砂堆積とともに、堰を流下する流れが大小の局所洗掘を引き起こし、長い延長の構造物であるだけに、やはり、限られた魚道だけでは全面越流時などに十分な機能を発揮することが極めて困難であることが問題となる。第十堰は一見全面魚道のように見えるが、堰下流端における河床洗掘のために干潮時には落差が生じており、満潮時でも約1/5の勾配で20~30mも流れると最下流の流速は加速されて薄い水脈となり、遊泳魚にとっては、水深・流速の両面で厳しい環境となるだけでなく、鳥類等の外敵からの脅威にも曝されやすくなる。これを補うために設置されている魚道も、前述のように、堰直下では河道中央から右岸に行くに従って河床洗掘が著しくなっており、堰先端部では水面上にオーバーハング状となり、魚道の先端が水面から浮いてしまう場合や、それを避けるために魚道を延長すると魚類の迷入が避けられなくもなる。これには、斜め堰であるために堰延長が長く、かつ、右岸方向への流量集中とその補償流れという複雑な流れのため、水叩きや護床工の造成が困難となっていることの影響も考えられる。これらの面については局所流特性を環境水理学的に検討することが必要であり、同時に、流量によって変動する堰上の越流速と遡上魚・降河魚などの対応能力を十分に検討しなければならない。

一方、このように越流部の面積が広大であるということは、そこに付着するかなりの生物量を見込めることにもなり、洪水時の土砂流送に伴うそれらの剥離は、河口部の干潟を維持する有機物や栄養塩の供給に繋がるものとして、実態を解明することも課題となる。確かに、河口域への供給の絶対量となると、面積から判断すると流域からの直接流出量が支配的であると推察されるが、流域物質収支班の記述にもあるように、その大半は大洪水時のものであるので、平水から小洪水までの通常時における堰の役割について検討が望まれる。

3.3 堰周辺の水・物質循環解析に基づく生物生息場の形成条件とその評価に係わる課題

先に述べたように、これまでの環境調査によって堰上下流部の生物生息状況や水質・底質の変化の現況については資料が蓄積されてきたが、現在の研究レベルから見ると、さらに充実を図る必要性が指摘される。以前に指摘していた水域の流動現象に関する資料蓄積の障害となっていた測定の困難さも、現在では、河川用AD(C)P(音響ドップラー流向流速分布計:ADPが一般名称、ADCPはRD Instrument社の登録商標と聞いている)使用の一般化もあって、洪水時等特殊な場合を除いて、これは必ずしも大きな支障とはならなくなっており、実際既に前述の漏水調査には使用されている。こうした機器と多項目水質測定器などを組み合わせ、GPSや自動追尾型光波測距儀を併用し、また、試料を適切に採取して

以下に述べるような分析をすることで、流れと栄養塩に代表される生元素の物質フラックスを広域的に把握することが容易になってきている。このような試みによって、様々な流量段階について、堰上流側の湛水域の流れ場や、堰を流下した水流の混合拡散現象も加味した入退潮に伴う感潮域の流動特性についてはどんどん明確にできるようになってきている。有機物についてはBOD、CODばかりではなくてTOCが全体の指標となり、栄養塩なども含めて同位体比の計測も一般的に行われるようになってきているので、それらによって、付着藻類の一次生産の由来や消長などについても議論が可能となっており、生産者 - 消費者といった食物連鎖も明確に把握できるようになるなど、生物生息環境の内部メカニズムが議論できるようになっている。

しかしながら、最近の河川環境調査において、徐々に一般化してきている、上に述べたような一次生産から物質収支を積み上げて、環境の構造を解明するといった手法に基づいた調査は、第十堰の周辺については行われる状況に至ってはいない。こうした手法による研究調査は一般化してきたとはいえ、まだまだその実施は高価なものであるため、事前に十分な計画を立てて調査に臨まなければならない。こうした点が今後の大きな課題になっていると考えられる。その成果を活かして、水環境に関する数値シミュレーションを行っていけば、第十堰が現在有している環境機能がより明らかにされて、周辺環境に及ぼしている影響の的確な評価に繋がるものと推察される。

例えば、こうした測定・調査を通じて、汚濁負荷源と見られている神宮入江川と上堰と下堰との間の水域の働きが明らかにされ、また、付着生物について同様の調査を実施することで、堰や上流区間の石礫や砂礫床における一次生産量の見積もりが可能になり、堰の平面形状や石礫の分布と平水時の流れが創り出すハビタット構造の役割が解明できる。一方、堰下流の底質についても同様の調査を実施することで、シルト等の細粒分や有機物の分布と河床形状や流れとの対応関係などの調査結果に対しても、生産 - 消費の物理的・生物学的な内部機構に入り込んだ議論を行ってその環境面の役割を検討するが可能となり、河口部干潟への影響解明に関しても、こうした調査を実施していくことが望まれる。

また、生物調査結果についても、生息生育域の条件を河道の物理的（水理的）指標や化学的指標との関連から検討・考察していくことには論を待たないが、生産 - 消費という物質収支の観点から、塩分、水温、懸濁態物質濃度の計測に加えて、有機物・栄養塩濃度やそのフラックスについては溶存態・粒子態の別に計測する必要が指摘される。こうした調査時における採取試料の物理条件などを特定することによって、計測結果の代表性などについての情報を充実させていく作業が重要である。それによって、生物生息の現況に堰が環境へ与えている影響の評価も説得力を持つことになると考えられ、こうした計測の充実は、今後求められる技術的課題の一つである。

環境の評価や影響の予測にとっては、上述の溶存態・粒子態を区別した水質の形成機構や、有機物や微小生物を含んだ底質の形成機構を流れの物理的特性や河川内での生物・化学的反応との因果関係に基づいて、現象を適切に表現できる物質収支モデルを構築することが避けられない。このためには、例えば、物理的には水質物質の移流拡散機構に立脚し、生物学的には物質の代謝作用も組み込んだモデルを構築していくことが不可欠であり、このようなモデルの適用に当たっては、河川の場合、諸量の流出入フラックス条件についても、それらの時空間的特性を十分把握・解明する努力を続けていくことがとくに強調される。また、上述した計測の充実はこうした高度なモデルの検証には欠かせない事項である。

参考文献

- 1) 建設省徳島工事事務所、第十堰改築事業に関する質問へのお答え、p.9、1997.10
- 2) 国土交通省徳島河川国道事務所、第十堰の形状把握調査結果、5 .漏水量調査、p.5-1-5-2、2005.4
- 3) 国土交通省徳島河川国道事務所、第十堰の形状把握調査結果、2 .変状調査、p.2-1-2-102、2005.4
- 4) 国土交通省徳島河川国道事務所、第十堰の形状把握調査結果、3 .空洞化調査、p.3-1-3-4、2005.4
- 5) 国土交通省徳島河川国道事務所、平成 17 年度 第十堰の形状把握調査結果、2006.8

. 土木史評価班報告

1. 担当領域

吉野川第十堰を技術的に評価する場合、土木史という視点は重要な位置を占める。土木史とは言うまでもなく、時代的背景に規定された自然条件と社会条件を基本とした土木技術が具現化された歴史であり、第十堰を河川開発史と土木史という視点から検証することによって、第十堰の技術的、構造的特徴が明らかになる。

第十堰とは、吉野川という主流型放水路と現川・旧吉野川の分派点にあって、分派点直下の放水路、吉野川の河道を横切って建設された固定式の分流堰のことで、主流型放水路とは、現川の洪水全量と平水の多くを負担する放水路を指し、派川型放水路と対比して、一見して本川と見間違ふような放水路のことである¹⁾。吉野川その他、新淀川、荒川放水路、雄物川放水路などがその代表格である。

以下、3章に亘り第十堰の土木史上の特徴またその評価を述べる。

2. 注目すべき第十堰の建設経緯に関係する諸問題

吉野川第十堰の建設経緯は、それ自体が第十堰の特殊性を規定している²⁾。従って、第十堰の建設経緯の検証は、土木史の上から第十堰を正當に評価するために欠かせない。ここでは、建設経緯を概観した上で、堰体が建設されるに至った必然性として吉野川下流部の自然条件、そして、放水路開発史を通して堰体工事の特殊性を述べる。

2.1 新吉野川(別宮川)の開削とこれに伴う第十堰建設

第十堰建設の直接的な原因は、新吉野川の開削にある。この新吉野川は、1701(元禄 14)年頃、徳島城下に至る航路の確保や灌漑を目的に、蜂須賀藩が、吉野川下流右岸の第十地点近傍から分岐するかたちで開削したと言われている³⁾。但し、1926(大正 15)年の内務省大阪土木出張所による「吉野川改修工事概説」や『吉野川百年史』等、吉野川に関する文献には、新吉野川の開削年が 1672(寛文 12)年と記述されている^{4、5)}。何れにしる、新吉野川は 1700年代初頭には開削されたと理解される。開削当時の新川の名称が別宮川である。『吉野川百年史』や『吉野川事典』によると、それ以前の 1646(正保 3)年の「正保国絵図」には、既に吉野川下流右岸の第十地点近傍から徳島城下に至る派川が描かれていたと有るから^{3、5)}、新吉野川の開削工事は、完全な新川開発というよりも、当時、存在した派川を拡幅するなどして開削されたものと考えられる。



図 -1 建設直後の第十堰の状況（『村々沼川堰留之図』⁶⁾に加筆）

新吉野川の開削幅は、当初 8 間（14.5m）程度と狭かったけれども、新吉野川の分派点には特段、流水を制御するような構造物が存在しなかったとみられ、このため洪水毎に吉野川の流水が切れ込む事態となり、この結果、1750(寛延 3)年には新川が主流化するようになってしまった。そして新吉野川の開削される以前の河道（現在、旧吉野川と呼ばれる）、つまり現川・旧吉野川は流水が枯渇する事態を招いてしまったのである。現川の流水の枯渇状態がどの程度のものであったかは不明であるが、こうした流況の変化を受け、これに対処するため、新川開発起点の流頭部に流水を制御する構造物が建設された。第十堰である。

現川下流部における農業用水の水量確保、また現川河口からの塩水遡上の防止、さらに現川の舟運を維持するには、分派点直下の新河道の流頭部を狭窄したり堰上げるなどして、一定量の平水を現川下流へと導く必要があったのである。

第十堰は、このように吉野川の流況の変化を直接的な契機にして 1752(宝暦 2)年、二百二十間（400m）の長さで、新川流頭部を狭窄するかたちで建設された。但し、堰体が河道を全横断する構造であったかどうかは不明で、また第十堰の建設年を寛文年間(1661～1673)とする説もあるが⁵⁾、ここでは第十堰の建設年を一応、1752(宝暦 2)年としておく。

第十堰の建設直後に描かれたとみられる絵図が「村々沼川堰留之図」⁶⁾、図 -1 である。但し、当該絵図の作成年は不詳である（原図は上が南となっているので、図 -1 はこれを 180°回転させている）。建設直後の第十堰は、このように吉野川の流れに沿って細長く描かれる。堰体の平面形状は、縦堰（別名、待堰）として表現され、しかも舟通しは存在しないから、建設当時の第十堰、また新川、別宮川の役割は以下のように考えられる。



図 -2 大正年代の第十堰

(国土地理院発行の大正6年測図「川島」1/50,000 地形図に加筆)

十堰は新川、別宮川の締切堤とは考えられない。

むしろ、横越流の越流堤のように見られる。とすれば、新川、別宮川は、現川・吉野川の洪水の一部を負担する放水路として機能したことになる。

さて、第十堰は、その後、堰体が継ぎ足されて1792(寛政4)年に五百間余(909m)、文久年間(1861～1864)に五百六十二間(1,021m)、1870(明治3)年には五百八十間(1,054m)の長さとなった(堰長の起終点は不明)。第十堰の延長工事は、新吉野川の川幅の拡大に併せて、その都度、実施されたと考えられる。なお、図-2に示すのが、後述する明治直轄改修の完成前における現川・旧吉野川と新川・吉野川、そして第十堰の位置関係である。

2.2 第十堰建設と関係する吉野川下流部の自然条件

第十堰は以上のような経緯をもって建設されたが、その建設経過には、幾つかの問題点と疑問がある。その一つが吉野川下流部における自然条件、そして第十堰の建設主体の問題である。

まず新川開発の結果、平水の多くは何故、新川側へと傾くようになったか、という問題がある。これを考えるために、ここで新たに開削された新吉野川と現川・旧吉野川の河床勾配を比較すると、河床勾配は現川1.00に対し新川は1.57となる(但し現流路の比較)。例えば1927(昭和2)年の「吉野川改修工事概要(内務省土木局)」には「同川八第十以下梢直線二海二通シ勾配急ナルヲ以テ現状ニアリテモ広闊ナル河幅ヲ有シ河床低ク河積大ナルニ反シ本流八迂曲ヲ極メ勾配緩ナルヲ以テ」⁷⁾とある。現川には大きな蛇行部があって、このため新川に比べ海へと到達する河道距離が長いからで、この河床勾配を取り挙げただけでも、現川に比べて、流水が新川へと流れ易くなることが判る。しかも、新吉野川の開削場所は、後述す

る新大和川や赤堀川と異なり、沖積低地であった。つまり、新大和川や赤堀川の開削場所は比較的固結した堆積物で占められる洪積台地であったのに対し、新吉野川の河床や河岸はルーズで柔らかい堆積物で占められるから、掘削し易い反面、河床は洪水によって洗掘され易く、河岸は洪水流や洪水波によって洗掘や崩落が生じ易い。このため、明治期にあっても、吉野川の出水時には無堤の川岸の崩落が続いた⁸⁾。河岸決壊の発生である。

前記のような自然条件に加えて、吉野川下流域には固有の地質条件がある。例えば、国土庁の『土地分類調査・徳島県』には、以下の記述がある。すなわち「吉野川沿岸での変位速度は、過去2万年間に平均数m/1,000年で、北側が相対的に隆起している。…しかし、明治以降、四国全域にわたって行われた4回の水準測量の結果からは、中央構造線に沿って特別な変位は認められていない」⁹⁾。同書はさらに、新吉野川の南側に、更新世末期の吉野川旧河道が描かれて、地下水の塩水化が、この旧河道跡に沿って遡上していると説明する。これに加えて、科学技術庁の「吉野川流域の水害地形と土地利用」には、「1946(昭和21)年に発生した南海地震の際、吉野川流域では相対的に南側が下がり、北側が上がった」¹⁰⁾と記述される。つまり、過去、吉野川下流域では、吉野川の主流が現位置よりも更に南側を流れていた形跡があり、しかも吉野川北岸を東西に走る中央構造線を挟み、南側、すなわち新吉野川が流れる方向が沈降域となっていたと考えられているのである。

以上のような地形地質条件を考えるならば、新たに開削された新吉野川は、現川・旧吉野川に比べて、平水が傾き易く、また洪水が切れ込み易い自然条件の下に置かれていたことになり、このため現川における流水の枯渇や途絶は必至であったとみられる。この状況に対処するには、新川流頭を締め切るか、或いは第十堰のような分流堰を建設するよりほか、現川における流水の途絶現象を食い止める手だては無かったのである。つまり、自然条件という第十堰建設の与件である。

なお、新吉野川の開削の結果として、新吉野川は拡大を続け、遂に吉野川本川という性格を獲得して、それが徳島城下を流れるようになったけれども、新吉野川は徳島城下に洪水の脅威をもたらしていない。吉野川の治水策は、第十堰上流右岸で洪水氾濫させることにあり、現川・旧吉野川筋が洪水で氾濫することは有っても、明治大正期に至るまで、新吉野川は徳島城下で氾濫していない。徳島城下の洪水の脅威と言う場合、それは吉野川右支川の鮎喰川に求められるのである。

2.3 第十堰建設と関係する社会条件

第十堰は、以上のような自然条件の与件を得て建設されたと考えるが、次に問題とするのは、第十堰の建設に藩権力がどうかかわったか、という点である。

第十堰の建設は、『吉野川事典』によると、「1750(寛延3)年、下板44村が連判して新川の堰止めを藩に嘆願したところ、翌1751(宝暦元)年、藩が現地調査を行い、1752(宝暦2)年に

藩庁の許可を得て農家が着工した」³⁾、とあるから、これに従えば、第十堰は、農家による普請というかたちで着工したことになる。第十堰の建設目的の一は、現川・旧吉野川へと流水を導いて、沿川の利水活動、すなわち農業用水を満足させることにあり、これに加えて塩水の遡上の防止や航路の確保があったと考えられ、現川の流水途絶によって一義的に被害を受けるのは、確かに現川沿川の農家ではある。しかし、現川の流水が途絶するような事態をもたらした原因者は新吉野川を開削した藩権力なのである。但し、第十堰の一期工事には、工事見積銀五十九貫三百九十五匁四分四厘金両が下付されているし、1767(明和 4)年から 10 年間は藩が年に米 75 石を出し、また文久年間(1861～1864)には藩が米百石を出して第十堰が延長され、1877(明治 10)年には地方税と村費の折半で堰体の維持費が支出されているから⁵⁾、第十堰の建設工事に藩が全く関与しなかった訳ではない。ただ原因者の藩が何故、直接、1752(宝暦 2)年の第十堰建設の一期工事を行わなかったのか、という疑問が残ってしまうのである。ちなみに、内務省による明治改修に至るまでの間にあって、第十堰の増築や修築、管理は基本的に現川・旧吉野川沿川の農家が担って来たと理解されている(第十堰の管理は 1882(明治 15)年に水利土功会に移行している。)。

一方、現川における流水の途絶現象がもたらす影響を考えると、現川の流量減に伴う農業用水の相当量の減少によって、農業生産力が低下するのは否めないところである。現川・旧吉野川と新川・新吉野川の平水分流の実態は、後述するが、江戸時代にあって、農業生産力の低下は、取りも直さず、藩権力の財政力の低下を意味する。しかし、小出博は『日本の河川研究』で、現川・旧吉野川筋の水田開発はそれほど進んでいなかったと指摘する¹¹⁾。つまり、現川における流水の途絶現象は、藩の財政力の低下に直結するけれども、ダメージはそれほど大きく無かったと示唆するのである。小出博は続けて、「阿波藩は吉野川に対してほとんどみるべき治水を施していない。その理由として藍作重点の政策によるところが大きいと考えられており、用水の開発に対してもきわめて冷淡であって藍作第一主義が貫かれた結果であることは否定しえない」¹¹⁾と述べる。

藩が冷淡であったかどうか、また藩財政に直接的な被害があったか否かは、確かに重要な問題ではある。そこで、ここで吉野川流域の藍作について若干、述べておく。藍作と吉野川の治水策は、密接に関係しているからである。

吉野川流域における藍作の起源には各説があるが、確定的にいえることは、少なくとも 1500 年代には吉野川流域で作付けが開始されていることである。三好昭一郎の『阿波藍史』¹²⁾によると、藍は当初、麦の間に移植されたと言う。麦が日除けと風除けになるからである。従って、藍は基本的に畑作、それも地下水位が低い場所が適地であったことになる。麦刈りが終わると本格的な水取りが開始された。水は井戸を水源にして、「はねつるべ」を用いて地下水が揚水された。

この藍作と治水の関係で重要な点は、藍は連作がきかないこと、また収穫期が秋口、つまり台風の襲来前に位置していることに有る。連作障害を防止するには、毎年、作付け地を移動させるか、若しくは収穫後の畑地に適宜、客土を施す必要があるが、吉野川の藍作の場合、藍は、吉野川の洪水氾濫の主因をなす台風襲来前に収穫され、連作障害は洪水氾濫がもたらす客土によって解決された。吉野川の藍作と治水の関係は、これまで、以上のように考えられて来た。すなわち、藍作第一主義 = 治水策の放棄であると。実際、吉野川下流デルタの農地は、近世を通して、圧倒的多数が藍作であった。

では、藍作と水田耕作の経済比較はどうなっているか。三好昭一郎は『阿波藍史』で、宝暦年代における藍作を以下のように評価している。すなわち、「1764(宝暦 14)年の史料によると、反当収量は 35 貫目(約 120kg)の葉藍、その代金が銀で 274 匁、当時の米価が 1 石で 70 匁ほどということから考えて、葉藍代金で米を買うとしたら約 4 石買うことができる。米の反当収量が約 2 石であったから、藍の方が倍も有利であったと思っはならない。葉藍の栽培には干鰯を銀で 100 匁必要としたし、諸経費として 40 匁を支出しているから、葉藍代金から金肥や諸雑用を差し引くと 134 匁の実収となるから、米作と比べて絶対に有利などは決していえない」¹²⁾。藍作は、必ずしも水田耕作より経済的に有利であった訳では無かったのである。しかも、洪水氾濫に伴う流送土砂による客土は、中小洪水の場合は有効であったとみられるが、大洪水の場合は必ずしも、そうではなかった。例えば、1757(宝暦 7)年の吉野川大洪水によって、多くの藍作人は藍の栽培ができない状態となり、翌 8 年には葉藍の歩合銀も納められなくなっている¹²⁾。つまり、藍作は、吉野川の中小洪水には適していたけれども、大出水には無抵抗であったのである。

この吉野川流域の藍作に対して、財政収入を増やそうと、徳島藩が藍の流入に介入するようになったのは、藍方役所を設けた 1625(寛永 2)年が最初である。1625 年と言えば、別宮川開削の 50 年前のことである。そして、吉野川流域の藍作は、明治期になって終焉した。幕末から明治 10 年代の間は、全国的に棉作を藍作に転換する地方が拡大し、その一方で、明治 20 年代に染料はインド藍や化学染料へと転換が進み、1904(明治 37)年、藍畑は水田へと急激に転換が進行したのである。

さて、ここで第十堰着工に至る施工主体の問題に戻ると、農家の普請で第十堰を着工せざるを得なかった背景には、放水路開発に係わる当時の河川技術の問題が大きな妨げになっていたと考える。第十堰建設当時における国内の河川開発の状況を見ると、この時期、大河川における放水路開発はことごとく失敗しているからであって、例外とも言うべき事例が新大和川の開発、また赤堀川の開削と関係して利根川から分派するようになった江戸川分派点の流頭部の処理で、両者共に幕府直轄工事である。

新大和川は、現川・大和川沿川の新田開発と水害防除という二つの大きな目的を得て

1704(宝永元)年、上町台地という洪積台地を開削して建設された。河床勾配は、この時点では現川が大きい。分派点には、唯一、現川側の流頭に樋門が設置された。そして、幕府は、新大和川の流水が途絶するような事態になっても、現川筋への流水確保を至上命題とした¹³⁾。現川筋が奈良と大阪を結ぶ柏原船の主要航路であったからである。一方、赤堀川は、当時の利根川の一分派川として、1621(元和7)年、上総台地を開削するかたちで着手された。建設目的は利根川の航路開発、さらに松浦茂樹は栗橋周辺などの狭小な地域の治水そして日光街道の整備とその防御があったとしている¹⁴⁾。水路幅は極めて狭小で、1621(元和7)年で7間(12.7m)、1698(元禄11)年で27間(49m)しかなかったから、赤堀川の開削は、利根川中流部や江戸の治水策には直結しない。赤堀川は、その後、利根川の主流と位置付けられるまで長年月をかけて拡幅拡張され、その一方で、利根川の複数の派川が整理され、江戸川が利根川の中流部で最も有力な派川として固定された。そして、江戸川分派点の流頭には、1822(文政5)年頃、河道を狭窄する目的で「棒出し」が建設された。流頭部は、1898(明治31)年になって、棒出しで更に9間強まで狭窄された。1927(昭和2)年に分派点で関宿水閘門が建設されるまで、この「棒出し」によって江戸川へと流れ込む洪水が制御された。

新大和川の一連の工事や利根川から分派する江戸川のように、二川分岐が維持され、二川の双方に平水が分流するように措置されたのは、国内の河川では極めて珍しい。例外的な事例であると言って良い。大和川や江戸川にあって、二川の双方へと平水分流が可能となったのは、新川の開削場所、分派点の地質条件が洪積台地であったことが大きいと考えられる。前述したように、洪積台地を構成する堆積物は、沖積低地に比べて河岸浸食や河床低下に卓越する地質条件なのであり、実際、新大和川や赤堀川の掘削には難儀を極めていたのである。

しかし、大和川また利根川と関係する江戸川、以外の放水路開発は、失敗するか、若しくは新川または現川の何れかが、平時に流水を見ない状態に置かれた。つまり、新川と現川との分岐点には洪水時越流堤が建設され、新川または現川の何れかが洪水専用水路であった。これが、江戸時代における治水技術の限界で、大河川にあっては新川と現川の二川双方に平水を導くことが難しかったのである。

事実、第十堰建設の20年前、幕藩権力を震撼させるような出来事が他河川で発生していた。新発田藩が1728(享保13)年に着工し、1730(享保15)年に完成させた松ヶ崎放水路、すなわち阿賀野川の洪水を日本海へと放流するため、新潟砂丘を堀割って開削された新川である。放水路の流頭には越流式の横断固定堰が建設され、洪水時に限って新川へと洪水が越流するよう措置された。ところが、完成したばかりの1730(享保15)年、春先の融雪洪水によって越流式の横断固定堰が破壊され、結果、新川が幹川化して、北国一の良港、新潟港へと流れ込む現川阿賀野川の流水が断流したのである。新潟港への河川流入量の減少は、港湾の水深の低下を招いて、港湾機能の低下を惹起した。これ以降、新潟港の港湾関係者は、信濃川大河津

分水路の建設や早通川の新川放水路等の放水路計画に対し、徹底した反対運動を展開するようになったのである。そして、同様の現川の流水途絶現象がはるか西国で発生した。舞台は、阿賀野川よりも流域面積が劣るけれども、幹川流路延長が阿賀野川に匹敵する四国第一の河川、吉野川である。吉野川における事態が幕藩権力に、どの程度認識されていたかは不明ではあるが、当時の情報交換はかなりの頻度で行われていたとすれば、東の阿賀野川、西の吉野川という一大事件が幕藩権力の関係者間に噴出したことになる。

第十堰の建設は、このように松ヶ崎放水路工事の失敗の余韻が残る状況下で着工されたことになり、それは吉野川という四国第一の大河川で、それも沖積地における新川と現川双方への平水分流という国内初の工事になったのである。

現川・旧吉野川における流水の途絶現象を防止するには、本来ならば、藩自らが何等かの計画を樹て、これに当たるべきところ、当時の技術水準からみて決定打は無かったと判断され、第十堰建設は、現川の流水途絶現象による被害を直接受ける農家が主体とならざるを得なかった社会的背景がここに有ると考えられる。つまり、阿波藩は、小出が言うように、単に冷淡であっただけでなく、松ヶ崎放水路の失敗を眼前にして、表面に出る訳にもいかず、かと言ってこれに係わる技術力も持ち得なかった可能性があり、藩は農家に工事費として下付金を出すのが精一杯の状態であったのではないかとみられる。さらに付け加えるならば、利根川、信濃川、北上川、木曾三川、淀川、筑後川等、国内の大河川の多くは、その流域が複数の藩や幕府直轄地で構成されていた訳であるから、阿波藩という一地方藩が管理するには吉野川は余りに大河川であったことになる。

他方、第十堰の延長工事は前述したように延々と続いた。多年に亘る継続工事である。こうした継続工事に関して、松浦茂樹は『アーカイブス利根川』で、利根川の赤堀川と関係する工事に関し興味深い指摘を行っている。すなわち、「（羽生領等の農業整備と赤堀川開削と関係する）舟運と羽生領、庄内領、幸手領の治水という...二つの相違した目的を果たすために長い年月をかけて、『そろりそろり』と成果を吟味しながら、当地域の河川処理が行われた」¹⁵⁾。当時の河川技術を見据えた的確な指摘である。そういう意味で考えれば、第十堰も同様、大河川で且つ沖積地における新川と現川双方への平水分流という国内初の工事であったから、堰体の延長工事は流況の変化を見ながら、「そろりそろり」と進められた可能性がある。

河道を横切る第十堰の平面線形が、幾つかの場所で微妙に曲がっていたり、或いは明治期になり上堰が追加されて二段構造の堰体になったのは、新吉野川の川幅の拡大を見ながら、これに併せて様子見の工事が継続していたことが原因にあると考えられる。そして、第十堰が後述するような特殊な堰体、すなわち大河川にあって唯一の平水越流の横断固定式の分流堰、また国内唯一の二段構造の斜め堰となったのも、以上のような建設経緯に規定されると

ころが大きいと判断できる。言い換えれば、第十堰は、流況の変化に対応した長年に亘る河川技術の試行錯誤や苦心、努力が積み重ねられていることになる。第十堰という河川構造物を河川開発史また土木史という視点で考える場合、地先住民や河川管理者の試行錯誤、さらに苦心や努力の積み重ねという点は重要で、第十堰は、300年近くに亘って現役の分流堰として残されている点において、土木史上の価値が認められる。

2.4 近世の吉野川の治水策

前節では、「阿波藩は吉野川に対してほとんどみるべき治水を施していない。」という小出博の言説を引用したところである。実際、近世から近代にかけて、吉野川では見るべき治水策が実施されて来なかった、とこれが定説のように発言される。しかし、吉野川沿川の治水構造を見ると、実態は必ずしもそうで無かったことが明らかになる。

その一つが、第十堰上流右岸の治水策である。結論から先に述べれば、吉野川の治水策の焦点は、第十堰上流右岸にあった。これと関係する施設が、前掲の図 -2 に示す江川の流頭部の知恵島堰（別名、江川堰）そして神宮入江の流頭部に位置する八ヶ村堰で、両堰は図 -3、図 -4 のように、徳島県立図書館所蔵の天保 11 年吉野川絵図に明瞭に描かれている（絵図は上が南向きなので、前掲図はこれを 180° 回転させている）、江川そして神宮入江ともに、吉野川本川右岸から分派する派川河道で、流末は吉野川本川に合流する。

なかでも後者は、前掲の「村々沼川堰留之図」⁶⁾に微細な平面構造が記される。図 -5 は、その流頭部の状態で、図 -6 は当該絵図を元に作成した八ヶ村堰の概念図である。但し、当該図の原図は上が南を向いているので、図 -5、図 -6 は北が上を向くよう図面を 180° 回転している。

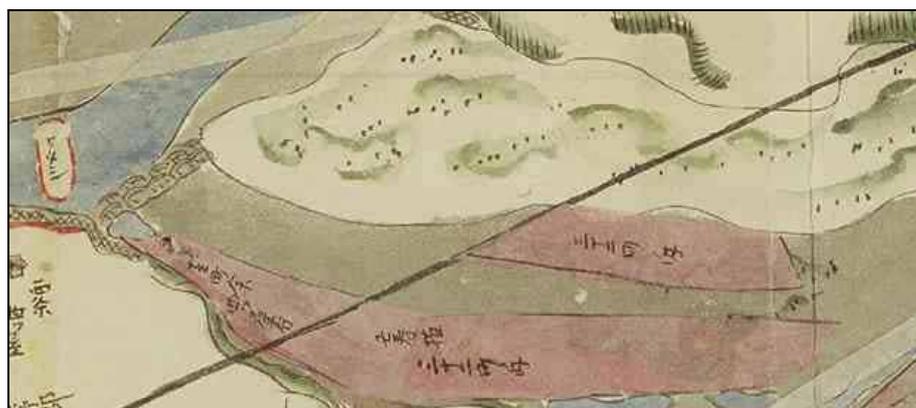


図 -3 天保 11 年吉野川絵図(徳島県立図書館所蔵)に記載された知恵島堰



図 -4 天保 11 年吉野川絵図(徳島県立図書館所蔵)の八ヶ村堰

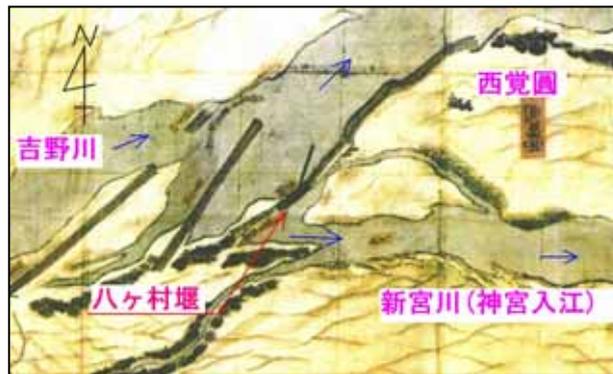


図 -5 八ヶ村堰流頭部の状況 (『村々沼川堰留之図』⁶⁾に加筆)

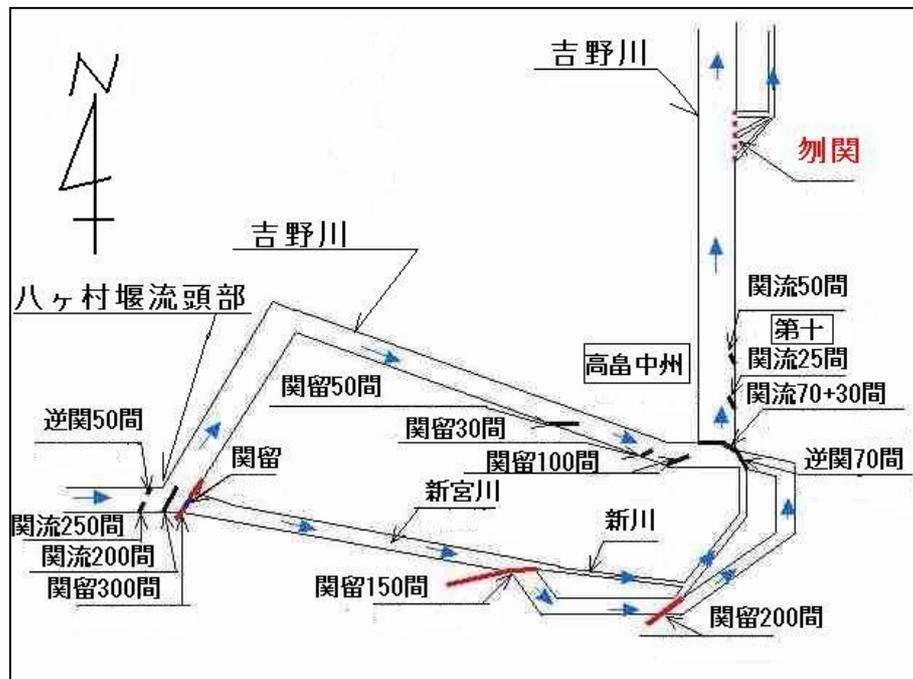


図 -6 八ヶ村堰の概念図

八ヶ村堰は、第十堰上流右岸に位置する神宮入江の呑口であって、流頭部の越流堤を経、神宮入江の河道には2段の関留、そして吉野川合流点には逆関、すなわち逆流防止堰が築かれていた。

流頭の八ヶ村堰は、建設年が不詳であるけれども、『名西郡誌』には「斜に長500間に亘り」¹⁶⁾とある。八ヶ村とは、神宮入江の下流に位置する高畑、東覚円、西覚円、天神、高川原、加茂野、市楽、桜間の八村である。また八ヶ村堰と関係する訴訟問題を論じた立石恵嗣は、論文中で「神宮河分岐点に、八箇村堰と称するものありて分流を遮り、平時水なく、殆ど内地各村と地続きの観あれども、一朝大雨に際せば、濁水奔注して本流と相競ひ、中間の村落は、宛然孤島の状態に陥り、年年汎濫の患ありて」¹⁷⁾とあり、「八ヶ村堰八従来放水堤ナリシ」¹⁷⁾と記述された文献を紹介している。

他方、この八ヶ村堰と知恵島堰（江川堰）に関し、明治21年8月27日刊行の普通新聞、つまり徳島の地方新聞には、以下のような記述がある。「八ヶ村堰なりといふものあれども元より八ヶ村堰にて分岐せば幾分水勢を減ずるに相違ないけれども江川堰の如きは副因中或いは上位を占めんか此等は無益の詮索なれども同所の突堤は甚だ堅固且横堰惣体も近く修繕を加へ江川へ落る水流は大に減じ西覚円村西部にて高原村に添ひ吐出の水勢弱く本流を貫流し名東郡北井上村を過ぎ大第十の西部にて吉野川と合せり古来洪水汎濫の時は本村の惨害名状すべからざるなりしが明治の初年に當て今の神宮入江の河頭大字西覚円に於ける水越堤（高畑、東西覚円、天神、高川原、加茂野、市楽、桜間の八ヶ村連合より成る世に八ヶ村堰と称す）を築しも…」と有る。

吉野川中流部右岸で吉野川から分派する江川には、流頭部に知恵島堰という越流堤が配置され、第十堰上流右岸で吉野川から分派する神宮入江には流頭部に八ヶ村堰という越流堤が配置されていた。ともに洪水時にあって、洪水の一部を派川へと分流させる機能があった。分流した洪水を、江川、神宮入江という派川河道で遊水、滞留させることによって、吉野川の治水安全度が確保されて来たのである。そして、神宮入江の南岸の堤防跡、つまり高原村との村境付近に東西に続く堤防跡が当該地域で最も古い簡易堤防、「新宮堤防」である。これが吉野川中流部右岸の最後の守りで、これの前面は藍の作付け地であると同時に、洪水時の遊水域として機能していたのである。

吉野川中下流部における知恵島堰と八ヶ村堰の築造に、阿波藩がどのようなかたちで係わったかは不明で、またこうした措置が計画的に実施されたかどうか不明であるが、吉野川の洪水被害を防止し、且つ洪水汎濫に伴う藍畑への自然の客土効果を期待するには、地先の農家自身が、洪水を徐々に流して遊水させるという方法を採用した可能性も考えられる。何れにしても、吉野川右岸側の治水構造は、このように、かなり精緻に考案された治水策であったのである。

2.5 吉野川明治改修工事と第十堰

明治5年、吉野川下流部で両岸の築堤計画がたてられた。場所は、第十堰上流右岸の覚円地先と左岸の佐野塚地先で、ここに連続堤の計画が樹立された。計画したのは明治直後に吉野川下流域を一時的に管轄した高知県である。従って、この時期、当該地域は、高知県阿波国第二大区一小区名西郡石井村、等々と記録される。この一連の改修計画のなかで、前述した右岸側の八ヶ村堰、つまり神宮入江の流頭部は明治8年に締め切られた。但し、八ヶ村堰の締切は完全締切では無い。神宮入江の締切堤防は、前後の堤防より低かった。1901(明治34)年作成の吉野川実測平面図(徳島県文書館所蔵)に図化された八ヶ村堰の締切堤は、図 -7

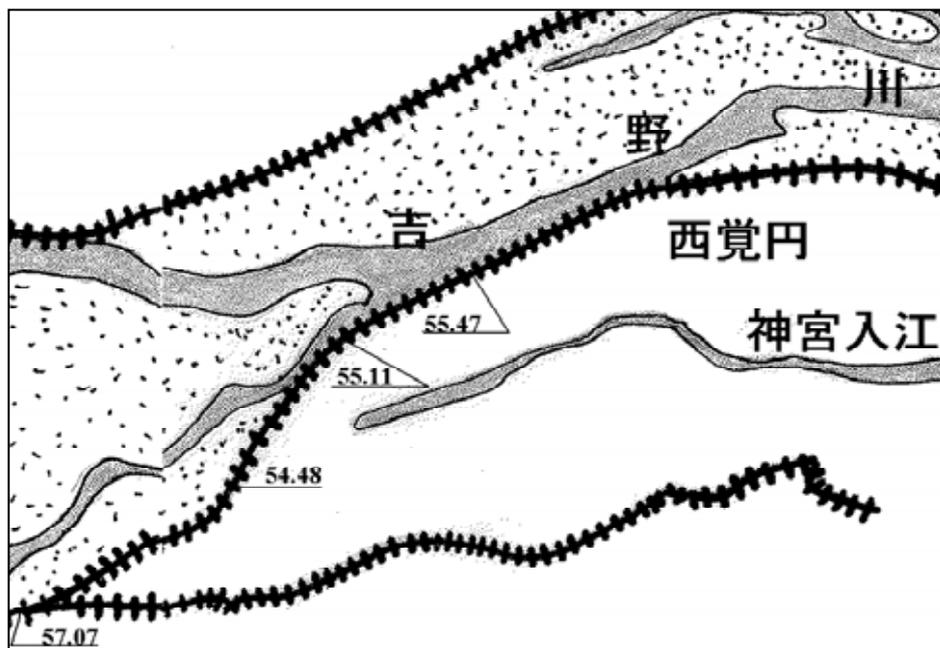


図 -7 明治34年の八ヶ村堰締切堤の堤高(原図は徳島県文書館所蔵)

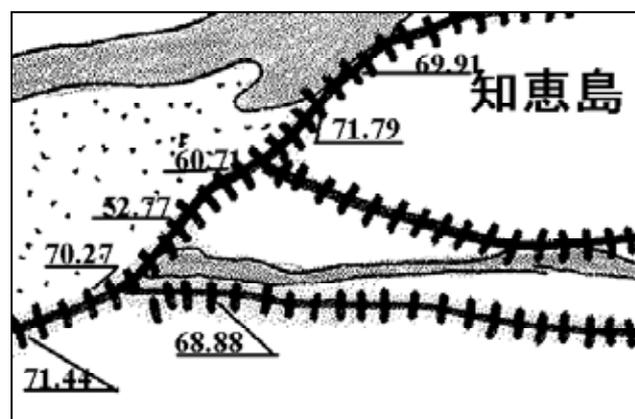


図 -8 明治34年の知恵島堰締切堤の堤高(原図は徳島県文書館所蔵)

に見るように、本堤より 1~3 フィート（或いは尺表示かも知れない）つまり 0.3~0.9m低かったし、江川流頭部の知恵島もまた、締切堤は図 -8 のように、前後の右岸堤が 70 フィートである一方で、締切堤は 52~60 フィートと記載され、右岸堤本堤より締切堤は 3~5.4 m低く築かれた（図 -7 と図 -8 は、後掲する図 -10 をベースにした各所の拡大図）。

ところが、この右岸堤の築堤に対し、地元農家は高知県令に訴えを起こした。所謂、八ヶ村堰訴訟である。地先の農家は、明治 8 年に八ヶ村堰が締め切られたけれども、この時、神宮入江の吉野川本川合流点は開放状態に置かれ、これが原因となって合流点から洪水が逆流し、従来より洪水被害が激化した、と訴えたのである。当該訴訟は治水問題を巡る裁判であると同時に、明治期で初めて大審院まで持ち込まれた裁判として特記できるものであるが、その詳細は措くとしても、結果は明治 9 年、大審院から大阪高等裁判所への差し戻し、つまり原告農家の勝訴、被告（この時は徳島県）の敗訴で完結した。完結した、というのは、これ以降、原告、被告とも、行動を起こさなかった、という意味の完結である。そして、明治 5 年の吉野川下流築堤計画に伴う改修工事の記録もまた、これ以降、途絶えている。結果から見れば、八ヶ村堰訴訟が災いして、吉野川下流の築堤計画が頓挫した可能性があるともみている。

この明治初期にあつて、第十堰上流の吉野川本川の澇筋が変化して、現川と新河道がほぼ一直線上に並ぶようになったと各種の文献には記録されている。新旧の吉野川が分派点から並列して流れる当時の様は、図 -2 に示す 1917(大正 6)年測図からも読み取ることができる。この結果、現川下流には以前に比べて平水が流れに難くなり、1878(明治 11)年、従来の堰体の上流右岸側に上堰が 150 間(273m)と 200 間(364m)の「喰い違い堰」の構造で追加、建設された。そして、上堰は 1882(明治 15)年に三十九間(71m)、翌 1883(明治 16)年に五十間(91m)、1884(明治 17)年に百間(182m)と断続的に継ぎ足されて建設され、この結果、第十堰は二段構造の堰体となった。しかし、新吉野川には依然として大量の平水が流れ込むので、1882(明治 15)年、堰体は更に延長されたのである。なお、前記の「喰い違い堰」の特徴などは後述する。

そして、明治 17 年、内務省は蘭人御雇工程師、デ・レイケ (J. de Rijke) に吉野川の調査を要請することになり、ここにデ・レイケは、6 月 13 日から 7 月 4 日にかけて 22 日間に亘り

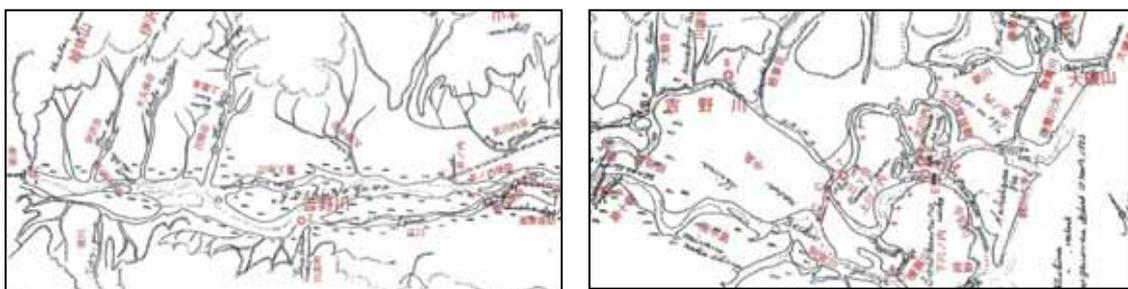


図 -9 デ・レイケの吉野川検査復命書附図（国土交通省提供資料）

吉野川を現地踏査した。このデ・レイケの現地踏査に関し、明治 17 年 7 月 2 日の普通新聞には以下のような記述がある。「内務省御雇蘭人デ・レイケ氏の一行は一昨日撫養地方より帰着し昨日は勝浦川末流小松島辺を巡回され同夜一先づ徳島へ帰られ本日は再び第十村へ出張し川流水量を測り直ちに帰着せらるべき筈とか」。

デ・レイケは、こうして吉野川沿川を踏査し、この調査結果を「吉野川検査報告書」に著し、内務省に復命した。

こうして明治 18 年、デ・レイケの「吉野川検査復命書」に基づき、吉野川砂防工事が中流部左支川の曾江谷川で着手されると同時に、同年 2 月、内務省土木局は舟運の便並びに流路の固定のため、明治 19 年度以降 11 ヶ年工事として吉野川の改修工事に着手したのである。

ここでデ・レイケの「吉野川検査復命書」から吉野川改修と直結する箇所を抜き出すと以下のようなになる。「治川工事 主要トスル所八川島町ヨリ上流及ヒ下流ニ於ケルノ幹川並ニ別宮川トス。但シ別宮川ヲ先トスベシ其故他ナシ第十村堰隸撤去ノ後ニ至リテハ諸工ノ造営更ニ甚タ艱難トナルヘキノ理ナルヲ以テナリ。...我ハ此地ニ来リ倏チ簡易ナル一計ヲ案シ断シテ曰ク此堰隸ト其上ミノ杭樁ト悉皆刻除センヨトヲ要スト。又タ覚円村ニ放錯セル堤防モ亦撤去シテ下流ノ一端ヨリ上流狭隘部ヲ過キ七里標杭ニ至ルノ間ヲ平クベシ。...第十村ノ堰隸(D.S.ノ符合ヲ附ス)ヨリ上流若干距離ニ於ケル湾入左岸中一所ヲ撰定シテ一渠口ヲ鑿チ是ヨリ左方ノ田野ニ 渠ヲ開通スヘシ。... 渠溝ノ末ハ第十村ノ下方ニ於ケル吉野川末流(G.Y.の符合ヲ記ス)ノ一所ニ接スヘシ」¹⁹⁾。すなわち、第十堰を撤去して新川・別宮川を本川となし、吉野川、つまり現川には第十堰上流左岸から新たな水路を開いて、ここから所要の水量を導水するよう提案したのである。図 -9 では、下流右岸の八ヶ村堰から連続する覚円堤防と第十堰に「×」表示がされ、各々を引堤したり、撤去することが図化され、旧吉野川の移設ルートは破線の直線で描かれている。

デ・レイケの報告書に基づき開始されたこの明治初期の吉野川改修工事は、一般に吉野川低水工事と記されている。基本は沈床工を用いた流路と護岸線の固定で、明治 18 年 2 月には、右岸、覚円村地先で第 1 号の沈床工が施工された。

内務省による沈床工事に対し、徳島県は高水工事を行った。従って、この時期の改修工事は、直轄による低水工事と県による高水工事の 2 本立てという工事内容であった。県が着手したのは第十堰上流右岸の覚円村地先の引堤工事である。

ところが工事途上の明治 21 年 7 月 31 日、吉野川は大出水し、施工中の覚円堤が決壊した。

吉野川では、このように明治初期にあって、第十堰上流右岸の八ヶ村堰とその直下流、覚円堤で 2 つの治水問題が噴出し、顕在化した。原因は、何よりも、当時の治水工事の段取りが余りに杜撰だったことにあるとみられる。第十堰上流右岸の神宮入江という遊水域を放棄する代替え策が用意されることなく、また第十堰下流の吉野川河道に変更を加えることなく、

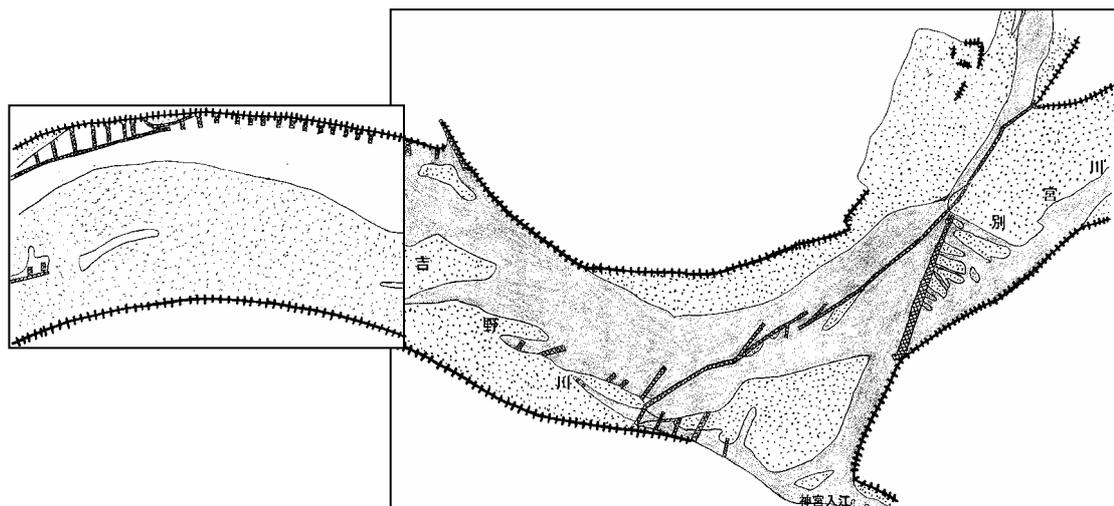


図 -10 明治 21 年の第十堰周囲の状況(明治 21 年吉野川実測図)
(原図は徳島県文書館所蔵)

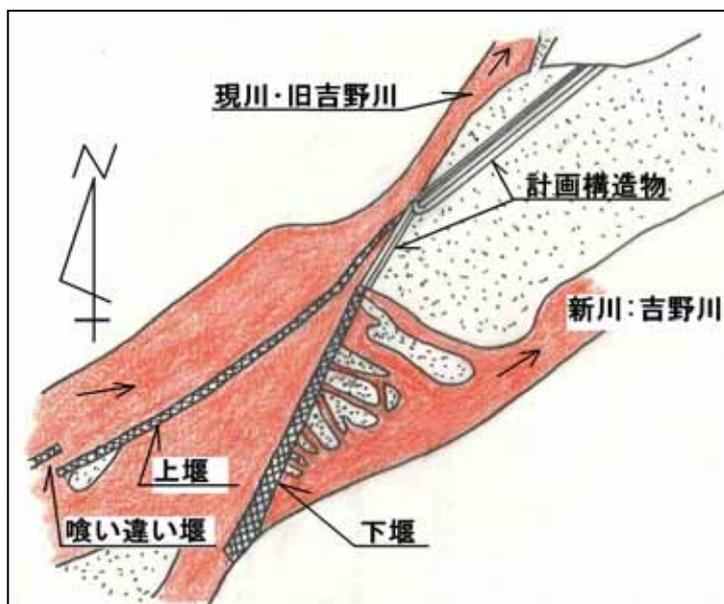


図 -11 明治 21 年実測図に記載された第十堰左岸側の計画構造物

第十堰の上流から開始された改修方針そのものに問題があった、とみるべきである。下流改修を先行するという河川改修の基本が脱落した工事であったのである。

内務省では、明治 21 年洪水による覚円堤の破堤を受け、吉野川改修工事は廃止と言わずに中止としておくのがよからうとの省議で⁵⁾、明治 22 年 7 月、ここに吉野川の明治初期工事は中止となった。

図 -10 と図 -11 は、明治第 1 期改修前、徳島県による吉野川改修が打ち切られた直後の第十堰の状況を図化した明治 21 年吉野川実測平面図をトレースしたもので、原図は徳島県文書館に所蔵されている。なお、図 -11 は、図 -10 の拡大図である。

図 -10、図 -11 を見ると、上堰の喰い違い堰は、この時、まだ開放されていることが判る。そして、第十堰上流左岸には、多数の水制工が、また第十堰の直上流右岸にも数基の水制工が配置されている。しかも、上堰中央には刎ね堰と見られる水制工が有る。こうした一連の水制工は、その配置状況からみて、吉野川の流水、主に平水を現川・旧吉野川へと導く役割が有ったと考えられる。

一方、明治 21 年吉野川実測図には、図 -11 に示す計画構造物が描かれる。当該構造物は、新川・新吉野川の流頭部を左岸から狭窄する型式を取った横断固定堰と見られ、下堰を強化する役割を持って計画されたと考えられるが、結果から見れば、着工されることも無かった。

他方、図 -10、図 -11 を見ると、第十堰の周辺状況は、明治 21 年から大きな違いはない。特記できることは、図 -11 に示す第十堰の下堰左岸側が左岸、祖母ヶ島に接続していないことである。これは何を意味するか。下堰が左岸に接続していなかった、という見方も有るかも知れない。しかし、当該図を良く見ると、下堰左岸側の開放部、すなわち下堰突端と祖母ヶ島の間は、ドット表示になっている。明治 34 年の吉野川実測図は、明治第 1 期改修計画を策定する際に必要な現況図という性格が有り、実測当時、下堰左岸側は砂礫に埋積していたと考えるのが素直である。とすれば、当時、第十堰を埋積させるような流送土砂が吉野川で発生していたことになるが、吉野川の砂防問題は、これ以上、立ち入らない。

その一方で、新吉野川は、明治期に入った後も以降、成長を続けて川幅が広がり続けた。そうするうちに、新吉野川は、吉野川の主流を獲得するまで河積が拡大した。他方、明治 25 年、26 年、27 年、28 年、29 年、30 年、31 年、32 年、33 年、34 年と吉野川は破堤を伴う連年災にあい、ここに同 34 年 4 月、吉野川は河川法に基づく施行河川に認定された。そして、内務省は明治第 1 期改修（明治 40 年～大正 10 年）を実施することになったのである。

明治第 1 期改修の主要な改修内容は、新吉野川という放水路の建設、現川側分派点における第十樋門の建設、そして第十堰の固定化と維持、そして中流部の善入寺島の遊水地化（遊水地化の問題は以下、略する）である。

デ・レイケは、1884(明治 17)年、前述したように、第十堰を撤去する旨を記した「吉野川検査復命書」を内務省に提出したけれども、内務省はデ・レイケ案を退けて第 1 期改修方針を決定したのである。

新吉野川は、内務省が「吉野川改修工事概説」に「別宮川ヲ放水路トシテ其改良ヲ行フ」⁴⁾と記すように、主流型の放水路として改修され、他方、第十堰は、1902(明治 35) 年、内務省第五区土木監督署技師、沖野忠雄と宮川清の連名による「吉野川高水防御工事意見書」のなかで「第十堰ハ現形ノ儘存置ス...堰ノ上下流ニ於テ川底ニ著シキ高底ノ差ヲ来セリ今之ヲ除去センカ上流川底落ヲ避クル為メ...是レ本堰ノ据置ヲ必要トスル処以ナリ」⁵⁾と記されて、分流堰という治水施設、換言すれば治水装置の一つとして存置されることになった。つまり、

第十堰を挟んで上下流の河床の高低差が大きく、堰体を撤去すると、河床低下が進行するので、河床の安定化、換言すれば床止工としての機能を発揮させるために第十堰が残されたのである。

ただ、明治第1期改修は、実施するなかで、幾つかの工事変更がなされている。特に新吉野川と現川・旧吉野川の洪水配分、そしてこれに規定される分派点の構造である。そこで、改修当初の第十堰周辺の関係図を図-12に掲げる。当該図は明治第1期改修を行う直前、内務省が実施した明治34年吉野川実測図をトレースしたもので、図-13は図-12の拡大図である。

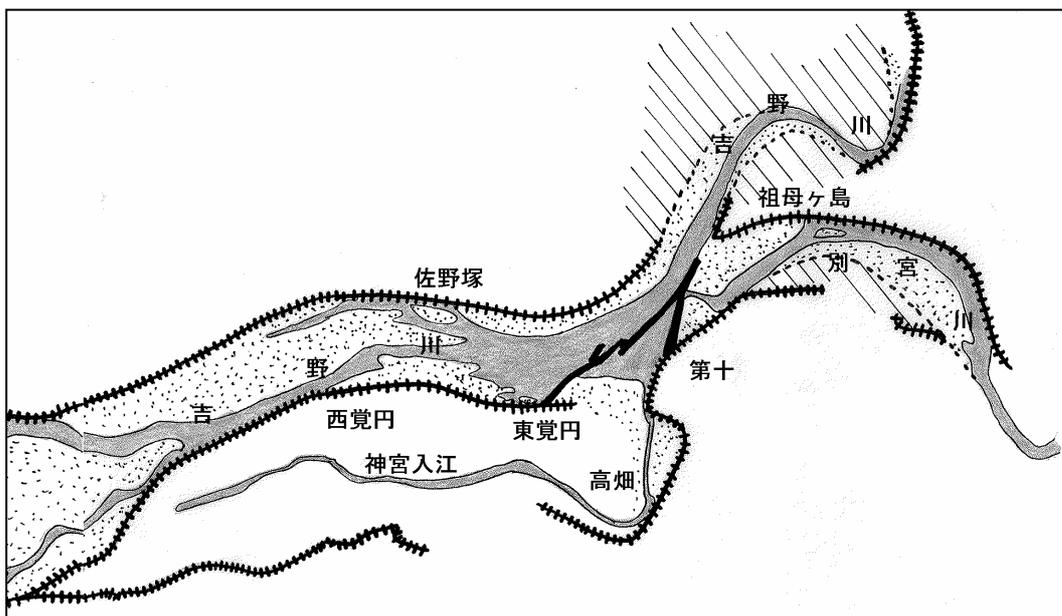


図-12 直轄改修前の第十堰周囲の状況(明治34年吉野川実測図)
(原図は徳島県文書館所蔵)

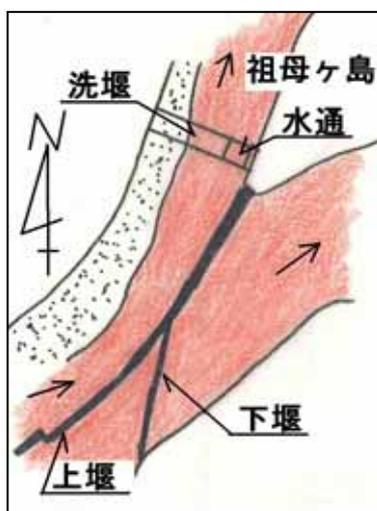


図-13 明治34年実測図に描かれる吉野川本川制水工

両図と前掲の図 -10、図 -11、つまり明治 21 年実測図を見比べると、第十堰の周辺状況は、明治 21 年から大きな違いはないことが判る。明治 34 年の吉野川実測図で注目すべきは現川・旧吉野川流頭部の制水工、つまり図中に示す吉野川本川制水工である。図面には図 -13 に示すように、左岸側に洗堰、そして右岸側に水通が記載される。前記の「吉野川高水防御工事意見書」には、以下のようにある。「本川高水最大流量ヲ五十万立方尺ト定メ高水防御計画ノ基トナス別宮川ヲ派シタル後の吉野川（現川のこと）ハ...十萬立方尺ヲ以テ本流（現川のこと）ニ通シ得可キ最大流量トシテ可ナルモノノ如シ...其ノ可通最大流量タル十萬立方尺ヲ流スニ止メ別宮川トノ分水口ニハ五十間ノ航路ヲ存シ石堤洗堰ヲ以テ制水工ヲ施シ該工以下全流ヲ基儘々据置クモノトスル」⁵⁾。すなわち、新吉野川は 40 万立方尺、現川・旧吉野川には 10 万立方尺の洪水流量が配分され、これまで開放されていた現川側分派点には新たに石堤と洗堰を組み合わせた制水工を設置することになった。

明治第 1 期改修は、明治 40 年から用地買収等の事前準備が進められ、明治 44 年によく起工されることになったが、その直後の明治 45 年、前記の「吉野川高水防御工事意見書」に基づく工事設計が変更された。「分水ヨリ起ス困難ト危険トヲ除キ得ヘシ」として、具体的には「従来本流（現川のこと）ハ洪水毎ニ其口ニ土砂堆積シ動モスレバ水路ヲ閉塞セラレントスルノ傾キアルヲ以テ吉野川改修工事ハ既定ノ計画ニ従ヒ遂次之ヲ施行シ来リシニ別宮川分流本口ニ於ケル工事ニ於テ其計画ヲ変更スルノ必要ヲ発見セリ。...十萬ヲ採テ之ヲ本流（現川のこと）ニ派シ流サシメントス故ニ本流ニ対シテハ只此分派ヲシテ容易ナカラシメンカ為メニ其口ニ於テ洗堰石堤ヲ築造スルニ止メ其他何等ノ設備モ之ヲ施行センコトトス」⁵⁾と、まず現川側分派点の工事を一旦中止させ、そして大正 4 年にこれが改修工事設計変更というかたち決定された。すなわち、「本計画ニ於テ八十萬ノ洪水量ハ之ヲ本流（現川のこと）ニ放流セント定メテイルモ此水量ヲシテ快通セシメンニハ堤防ノ新設嵩置腹付ノ工事ヲ施ササルヘカラス而シテ之ニ要スル費用亦僅少ニ非ラサル...加之...一定ノ量ニ分派セントスルハ水理ノ計算上容易ナルヘキモ之ヲ實際ニ施スルニ当テハ往々甚シキ齟齬ヲ来スノ場合アリテ其実行ノ困難ナルニ随テ大ナル危険ヲ伴フノ虞レアリ...従来本流...土砂堆積...ヲ以テ是小規模ノ浚渫ハ幾回カ之ヲ施行セリ...石堤築造ノ後ニ於テハ...其程度ヲ輕減セサルノミナラス却テ之ヲ増加シメントス...以上ノ弊害アルヲ以テ本計画ハ之ヲ変更シ倅ニ別宮川ノ既設ノ工事ニ多少ノ嵩置ト浚渫トヲ加フルニ於テハ又五十萬ノ洪水ヲシテ容易ニ疏通セシムルコトヲ得ルヲ以テ本流（現川のこと）ハ全ク遮断シ之ニ代フルニ佐藤塚ノ上方ヨリ斜メニ本流ニ連結スル運河ヲ開削シ...時々壱萬疋ノ水量ヲ放流シテ流束ニ停滞スヘキ塩分ヲ洗滌セシメントス」⁵⁾と、洪水配分はここに大きく変更されて、現川への洪水分流は基本的にゼロ配分となったのである。

そして、旧吉野川は、1919(大正 8)年から 1926(大正 15)年にかけて、第十運河という名称で、

当時の分派点から上流 1,000m地点へと呑み口、つまり新たな分派点が移設され、分派点流頭には、今日も現地に見られる第十樋門が建設された。「吉野川高水防御工事意見書」には、分派点の移設に関し、以下のように記述されている。「現在ノ分派口ハ河床高く低水ニ於テ浅遊ヲ感じ且ツ航行ニ不便ナルヲ以テ少シク上流ニ之ヲ附換ヘ取入口ニ水門ヲ設ケ」⁵⁾た、と有る。つまり、現川・旧吉野川の分派点の移設は、土砂堆積等によって分派点の呑み口周辺の河床が高くなり、航路の維持が困難になったので、これを解決するために実施されたと理解できる。

吉野川の明治第 1 期改修は、こうして新淀川や荒川放水路と同じように、主流型放水路として位置付けられ、現川への洪水分流は行われなくなった。今日、各地で施行される主流型放水路の原型がここに誕生したことになる。さらに付け加えるならば、吉野川における明治第 1 期改修は、別宮川を放水路として位置付ける一方で、第十堰を分流堰として残し、他方で第十堰上流右岸側の遊水域の放棄を約束する一大地域開発であったのである。

1928(昭和 3)年、吉野川第 1 期改修の完成にともない、同年、第十堰は旧河川法に基づき内務省大阪出張所から徳島県に引き継がれた。第十堰はここに河川管理者が管理する施設(河川管理施設)として認定されたことになる。内務省から徳島県への管轄引継書類には、河川の附属物の一つとして堰堤、第十上堰、第十下堰と記されている⁵⁾。その後の 1965(昭和 40)年、河川法が改正されて、吉野川が 1 級河川に指定されるに伴い、第十堰の管理は建設省に移行した。

第十堰は、こうして、明治改修という吉野川の基本改修を経て、現在に至るも斜め堰という型式を有した二段構造の堰体が維持されたのである。そして堰長は、国交省徳島河川国道事務所によると、現在、上堰が 1,250m、下堰が 550m、延べ 1,800m となっている。但し、上堰と下堰の堰体の延長表記には、若干の疑義がある。堰体の建設経緯は前述したように、下堰が先行して河道を全横断するように建設され、その後、下堰に接続するかたちで上流、右岸に上堰が追加建設された訳であるから、堰体延長は下堰の方が長いのが当然である。堰体の延長表記は河川管理上、上堰の方が河道を全横断している、と見なした結果かも知れない。

戦後に至り、第十堰は河川管理施設として、建設省、現・国土交通省により管理、維持されて来た。1961(昭和 36)年以降の第十堰災害復旧工事の履歴を示すと図 -14 のようになる。第十堰は維持工事というよりも、災害復旧工事によって各所が補強され、また改良されて来たと言って良い。この災害復旧工事で使用された材料は、その多くがコンクリートとその二次製品である。

ここで、第十堰を構成する部材を述べれば、基部は全て青石、つまり中央構造線の外帯側、吉野川南岸山地に分布する三波川結晶片岩(緑色片岩)である。青石は吉野川の河川改修等、普遍的に用いられてきた部材で、例えば、明治 21 年の徳島県による吉野川改修工事では、護

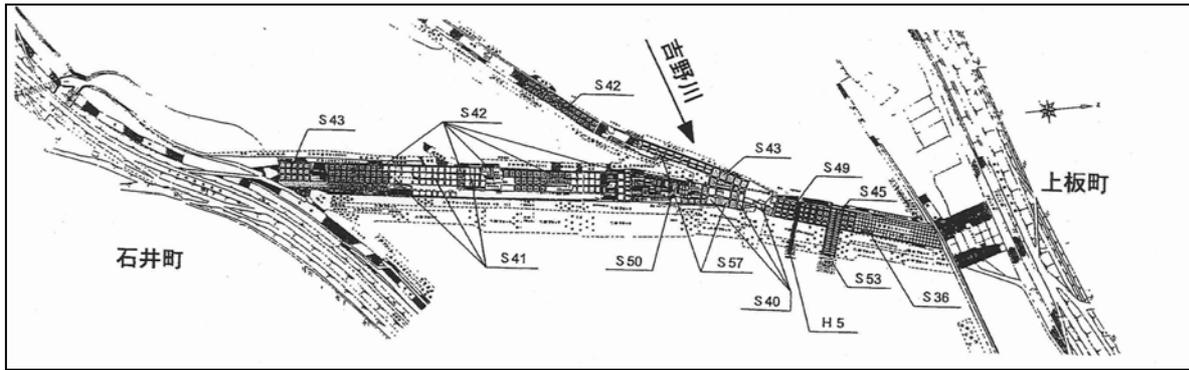


図 -14 第十堰災害復旧工事履歴図
 (国土交通省徳島河川国道事務所提供資料)

岸部材として青石が計上された。ところが、当該工事が中止になったのを受け、当時、調達した青石、そして青石生産者の救済問題が県内で顕在化するほどであった。

戦後の第十堰を特徴付けるものは、構成部材の変更、つまり第十堰本体がコンクリート製品で覆われたことにある。なお、第十堰下堰における魚道2箇所は、図 -14 に見るように、1970(昭和45)年と1974(昭和49)年に新設されている。

2.6 第十堰による平水の分流実態

さて、第十堰の役割の一つは、一義的に現川・旧吉野川へと平水を分流することにある。現川筋への流水の安定的な供給である。これがため、第十堰では、様々な旧慣や発議がなされてきた。例えば、舟通しの閉鎖である。

第十堰下堰の舟通しは、1754(宝暦4)年に建設されたが、舟通しを開放すれば、必然的に平水の一部は新吉野川、つまり別宮川へと落ちることとなり、結果、現川へと流れる平水量は減少する。このため、舟通しの締切りは、三月朔日から七月晦とされて来た。舟通しは、現川筋が最も流水を必要とする灌漑期に閉鎖されたのである。換言すれば、舟通しを閉鎖しなければならない程、現川筋の流況、そして分流方策が切羽つまっていたことになる。

一方、堰体が被災して部分的に開放状態になると、現川へと導かれる流量が減少し、現川末流は断流状態に陥った。例えば、1880(明治13)年から1882(明治15)年の間は、初播種の時期、そして稲生育の時期、現川末流には清水が一滴も無かったと記録される¹⁸⁾。現川へと分流される平水量が減少すると、とりわけ現川末流に問題が顕在化し、これに現川の河口状態の変化が加わると、塩水はますます上流へと遡上することになった¹⁸⁾。1867(慶応3)年は、丁度、こうした状況下にあったと見られ、現川の河口閉塞が開放されて、このため「五から十日も晴天が継続すると、若汐が遡上し、水田耕作が出来なくなった」¹⁸⁾と記録される。

現川・旧吉野川における前記のような流量減とこれに伴う問題の顕在化に対し、現川末流の農家は、しばしば「北川(現川)への流勢弱く、南川(別宮川)へと傾く流水が多かった」

¹⁸⁾と訴えた。例えば、1792(寛永4)年文書には、「新川へ水三步、北川へは七歩程」で且つ北川の水落ち狭く、現川への流量が減少を来していたと有り、これの対策として、長さ500間の第十堰に対し「佐野須村地方から姥ヶ島へ請関仕二重二相成候へは、第十村地方佐野須加地方勸農御手当も不被遊候」、「二重之関二相成候へは、関之間八砂原二相成」と笹木野村庄屋から御蔵所あて、第十堰改築の発議が行われている¹⁸⁾。要は、第十堰の堰体幅を拡張し、そうすることによって堰体の強度を強化し、漏水防止を企図しようとした訳である。しかし、寛永年代の発議による堰体幅の拡張工事の有無や実態は不明である。なお、現在は旧吉野川河口堰と今切川河口堰の完成によって、現川河口からの塩水遡上の問題は解決している。

では、現川・旧吉野川と新川・吉野川の分流実態は、どのようなものであるか、という視点から、現在の分流比等を図-15と図-16に示す。国土交通省提供の1963(昭和37)年から2002(平成14)年までの吉野川本川・中央橋地点の日流量と旧吉野川地点の日流量に係わる40年間のデータを元に作成した多年平均グラフである。図-15は、中央橋流量から旧吉野川流量を差し引いた数値を図化したもので、図-16は旧吉野川流量を中央橋流量で除した百分比で、両図を通して、本川流量に対する旧吉野川流量の大きさが判る。なお、中央橋地点は、現川・旧吉野川の分派点から上流約10kmに位置し、この間に主たる支川の流入は無い。

両図で特徴的なことは、冬期、主に1月前後に旧吉野川流量が中央橋流量を超過すること、また中央橋流量に対して、現川・旧吉野川流量への分流比が年平均72%と高いことである。勿論、流量データには、元来、流量観測精度上の誤差があるから、直ちに、1月前後に旧吉野川流量が中央橋流量を超過しているとは断定できないが、冬期に限って言えば、現川・旧吉野川は、本川のほぼ全流量近くを分流しているとみて間違いなく、事実、2006年11月5日の土木史評価班による第十堰現地調査の際、本川流量の全量は現川・旧吉野川へと流れ込み、第十堰には越流水が無く、魚道も完全に干上がっていたのを確認している。吉野川という主流型放水路とこれと対比する現川・旧吉野川における流況上の最大の特徴がここに有る。

他方、図-17は、旧吉野川の日流量の年変化(1963年~2002年平均)で、旧吉野川では夏期に流量が増加することが判る。因みに、多年平均流量は 44.9m^3 である。

ここで、国土交通省提供の水利台帳を元にして、旧吉野川の水利構造を見ると、現在、都市水道が $1.08945\text{m}^3/\text{sec}$ (うち早明浦ダム手当 $0.94945\text{m}^3/\text{sec}$)、工業用水が $2.5293\text{m}^3/\text{sec}$ (うち早明浦ダム手当 $2.03\text{m}^3/\text{sec}$)、農業用水が6月1日から9月10日の灌漑期最大で $11.572\text{m}^3/\text{sec}$ (うち早明浦ダム手当 $0.22\text{m}^3/\text{sec}$)、計 $15.19075\text{m}^3/\text{sec}$ である。但し、農業用水の利水量は、旧吉野川河口堰の干満操作時であって、且つ柿原取水分の下流取水の暫定を含む。

旧吉野川の現行の利水量は、このように旧吉野川の多年平均流量より $30\text{m}^3/\text{sec}$ 強、小さい。その差 $30\text{m}^3/\text{sec}$ は旧吉野川を維持するために必要な流量、すなわち維持流量に相当している

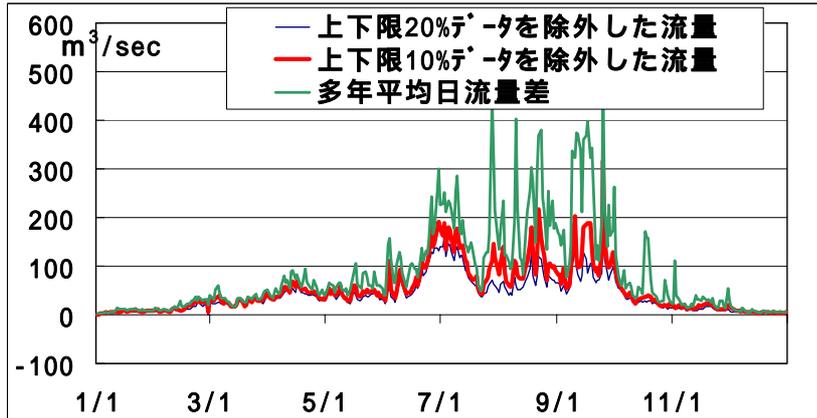


図 -15 旧吉野川流量と吉野川本川流量日の減数值(吉野川本川の中央橋流量から旧吉野川流量を差し引いた値。多年平均日流量)

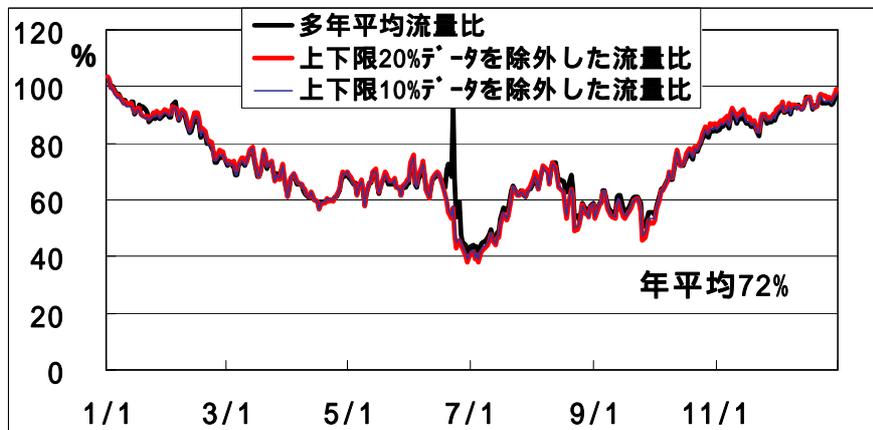


図 -16 日流量の比率
(旧吉野川流量 / 吉野川本川中央橋流量 × 100. 多年平均)

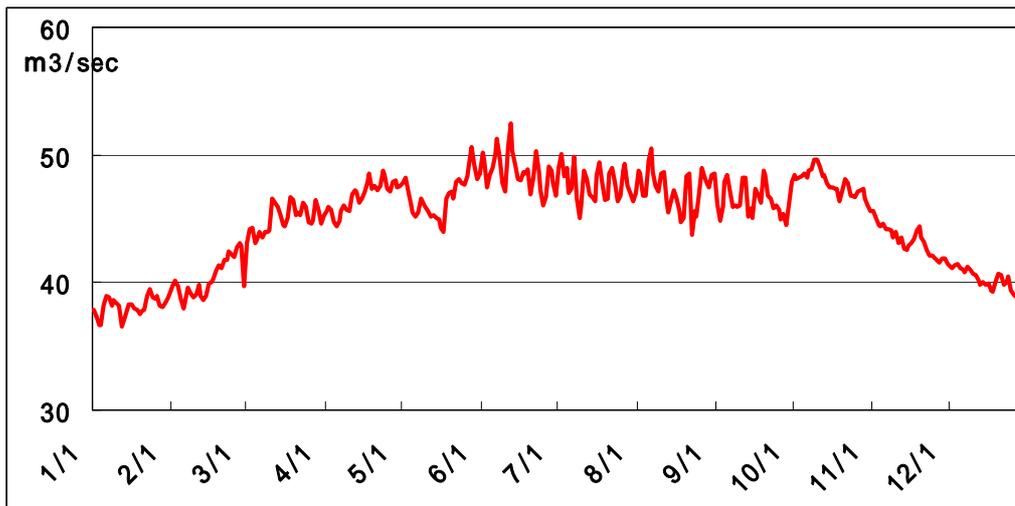


図 -17 旧吉野川の多年平均日流量(1963年～2002年)
(図 -15～図 -17 は国土交通省提供の吉野川流量データに基づく)

とみられる。

前記のように、冬期にあって、現川・旧吉野川が吉野川本川の全量近くを分流する結果として、第十堰下流の新吉野川が一時的に断流することは有っても、旧吉野川には利水量を大きく超過する流量が流れる。このように、現川・旧吉野川の平時の流況は、第十堰下流の吉野川本川よりも豊かである。換言すれば、新吉野川は、まさに高水対策用の河道、すなわち放水路としての性格が強く反映されている。国内の主流型放水路を代表する新淀川や荒川放水路、雄物川放水路には見られない現川への大量の分流である。こうした分流を可能にしているのが第十堰という分流堰の存在であって、これが第十堰の最大の役割である。

以上のように、第十堰は、1700年代の建設以来、今日まで、現役の吉野川分流堰として機能してきた。250年とか300年という長い歴史を持つ現役の分流堰は国内に存在しないから、この点において、第十堰は土木史上で価値のある河川構造物であると判断する。

3. 第十堰の構造的特徴

国内には大小、数多くの放水路がある。既に改廃したものもあるし、現存する放水路も数多くある。以下は、第十堰の構造的特徴は何処にあるかという視点で、放水路の開発実態を通して、これを考えてみる。

さて、放水路に固有の構造物、分流構造物は、4つの基本型式をもとにして、延べ38類型あることを岩屋が『日本の放水路』¹⁾で明らかにしている。こうした放水路の分流構造物のなかで、第十堰は、放水路側に位置して平水時に越流する横断固定式の分流堰という類型に分類される。ところが、この型式の分流堰は、国内の事例数が極めて少ない。しかも該当する放水路は多くが中小河川である。大河川では、吉野川の第十堰が唯一の存在である。つまり、第十堰は、国内の大河川で唯一、放水路側に位置して平水時に越流する横断固定堰なのである。

他方、第十堰を特徴付ける構造の一つが、河道を斜めに横切る平面形状、すなわち斜め堰である。図-18に示すのが、利水施設に限定した国内の斜め堰の平面形状とその類型である²⁾。少なくとも、放水路の分流堰でこうした斜め堰は雲出川の香良洲堰と第十堰以外、国内に他例が無い。

さらに、第十堰は、下堰と上堰という二段構造、すなわち、「二線式斜め堰」と呼ぶべき平面形状となっている。そもそも斜め堰は、利水施設に位置付けられる取水堰の原型と考えられ、取水堰には今なお、この斜め堰が各地に残っている。しかし、二段構造の斜め堰は、取水堰の斜め堰にも存在しない。つまり、他例がないのである。

第十堰は、このように放水路の分流構造物というなかで、また斜め堰というなかで、極めて特殊な堰体である。堰体が特殊な構造となったのは、これを繰り返せば、前章で述べたよ

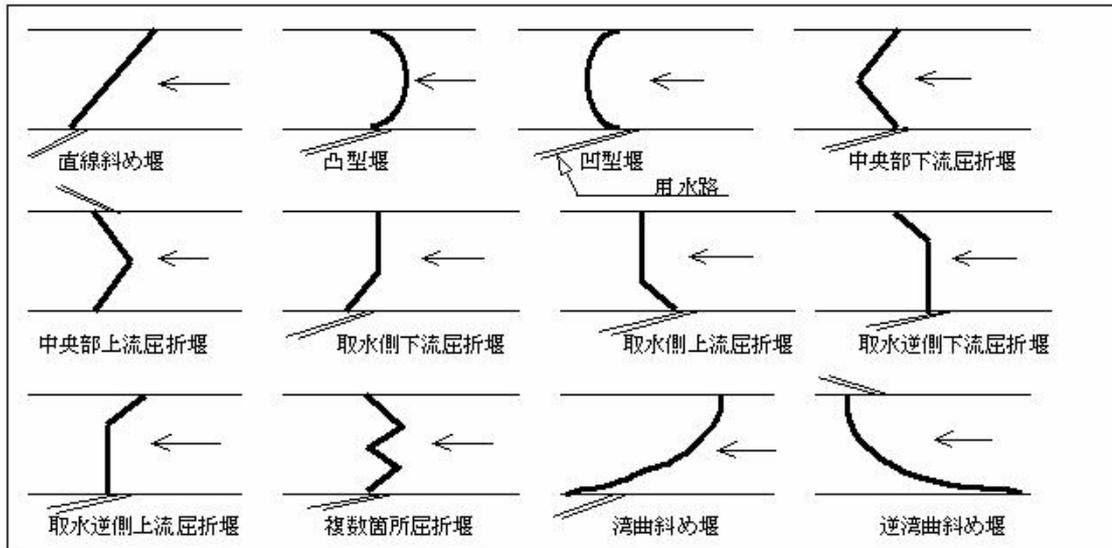


図 -18 国内の斜め堰（利水施設）の平面形状と類型²⁰⁾

うに、第十堰建設の特殊性、特異性に規定されるところが大きいと考えている。そして、国内の何処を探しても見付からない、という点で考えれば、第十堰は現存する唯一の例と見られる河川構造物である。

ところで、第十堰の堰長は前述したように上堰、下堰を併せて延べ1,800mある。国内に現存する斜め堰の場合、最長は緑川の「鵜の瀬堰」の662.5mである。「鵜の瀬堰」の堰長が600mを越えるかどうかは若干の疑義があるけれども、『甲佐町の文化財第一集』²¹⁾と『甲佐町の文化財第二集』²²⁾にはそう記されている。これ以外の斜め堰は長くても300m台で、これには多摩川の羽村堰、吉井川の吉井堰、旭川の草生堰、那賀川の南岸用水堰、筑後川の山田堰などがある。つまり、斜め堰という範疇で第十堰を見た場合、最長が第十堰ということになる。

一方、国内には多数の直角堰がある。直角堰とは斜め堰と対比して、河道を直角に横断する堰体のことである。こうした直角堰のなかで堰長が長いものと言えば、利根川河口堰835m、利根大堰691m、長良川河口堰661mなどがあるが、とても第十堰の堰長、1,800mには届かない。他方、放水路と関係する分流堰を見ると、信濃川大河津分水路の可動堰と固定堰の延べ延長が720m、新淀川の淀川大堰が330mなどであって、これらも第十堰を越える事例が無い。従って、第十堰は、国内で最長の横断堰ということになる。

4. 特記すべき第十堰の付帯構造物

第十堰の堰体内部や堰体の周辺を現地調査すると、これまで評価されることもなかった付帯構造物を確認することが出来る。それは、思いがけないような河川構造物である。

4.1 唯一、国内で現存する事例とみられる「喰い違い堰」

その一つは「喰い違い堰」である。「喰い違い堰」と言えば、江戸時代に薩摩藩が行った宝暦治水が有名である。すなわち 1753(宝暦 3)年に開始された木曾川の治水工事にあつて、難儀を極めた工事、つまり大樽川の洗堰と油島の締切である。宝暦治水の眼目は、木曾、長良、揖斐という木曾三川の水害防除にあり、そのためには、分合流を繰り返していた三川を切り離す必要があつた。いわゆる三川分離で、着工年は第十堰建設の翌年のことであつた。

三川を分離するには、三川の分合流点の締切が何よりも求められた。その一つが、長良川と揖斐川を結ぶ大樽川の制御と締切、その二が木曾川と揖斐川の分合流点の油島締切で、この二箇所こそが宝暦治水の焦眉であつた。

前者の大樽川にあつて、分岐点の長良川側の流頭部には 1751(寛延 4)年、農家の自普請によつて「喰い違い堰」が建設されたが、洪水制御に難があるため、宝暦治水の一環としてこれが洗堰へと改築された。大樽川洗堰である。他方、油島では舟運を考慮して、宝暦治水のなかで、締切堤防を上流また下流から分合流点に突き出す構造で完成した。つまり、宝暦治水では、油島の締切が不完全なかたちで残された。そして後の 1768(明和 5)年、長州、小浜、岩国各藩のお手伝い普請と公儀普請によつて、最後に残つた締切堤の開放部に洗堰と「喰い違い堰」が建設された。

「喰い違い堰」は、図 -19 に見るように、堤防を互い違いに出して、二つの堤防の間を開放部として残す構造である。堤防を互い違いに出し合つて分合点の流頭の川幅を狭窄し、そうすることによつて、木曾川から揖斐川へと落ちる洪水量を絞ることができる。しかも、「喰い違い堰」の開放部は、平時に平水が流れて水面が確保されるから、これが木曾川と揖斐川の間を航行路として利用できる。藩政時代における治水策、より具体的に言えば分合流点処理の一手法である。図 -20 は、木曾川下流改修前の油島の「喰い違い堰」の状況図である。油島の締切堤防は、このように互いに喰い違ふかたちで開放されていた。

しかし、油島の「喰い違い堰」は、1887(明治 20)年に開始された木曾川下流改修によつて完全に締め切られた。「喰い違い堰」の締切の結果、木曾川から揖斐川へと流れ込む洪水が遮断され、これによつて揖斐川沿川の治水安全度が向上した。そして、舟通しの機能は新たに建設された船頭平閘門に移された。従つて、「喰い違い堰」は、今や、図面や絵図の世界で確認するしか術が無いのである。ところが、この絵図の世界で確認するしか術が無かつた「喰い違い堰」が、実は第十堰に有る。先に建設された下堰には、吉野川の上下流を結ぶ航行路を維持するため、1754(宝暦 4)年、つまり第十堰建設の 2 年後に堰体を上流から下流へと一直線に抜ける船通しが設けられた。そして 1878(明治 11)年に建設された上堰上堰には、堰体の建設工事とあわせて、この「喰い違い堰」が建設されたのである。

上堰で建設された「喰い違い堰」の現状は、写真 -1 のとおり、喰い違いの開放部がコン

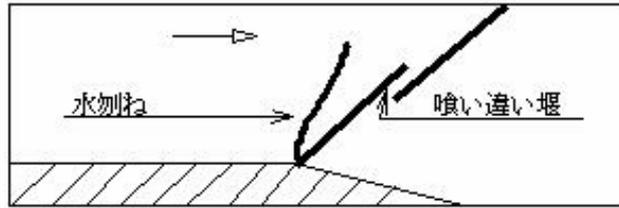


図 -19 第十堰上堰の「喰い違い堰」と右岸側水捌ねの概念図

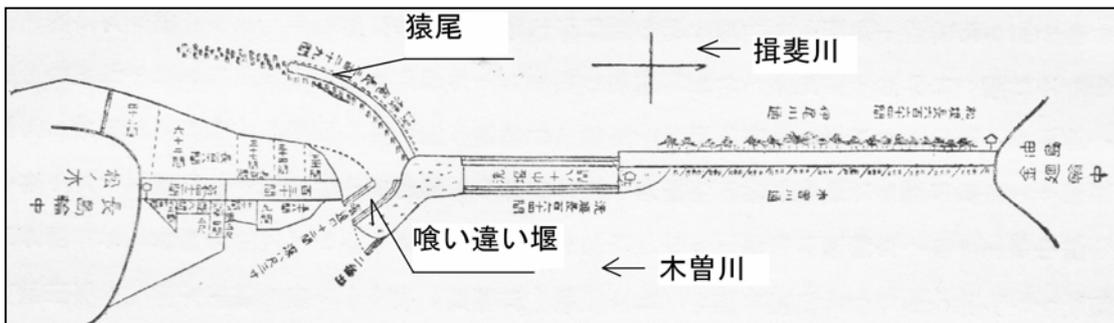


図 -20 木曾川油島の「喰い違い堰」

(『名井九翁記念録』²³⁾掲載図を修正、図化)



写真 -1 第十堰上堰に残る「喰い違い堰」



写真 -2 第十堰を構成する青石



写真 -3 第十堰上流右岸に残る水刴ねの現状

クリートで間詰め、充填されている（斜線部がコンクリートの間詰め箇所）。第十堰は、前述したように、写真 -2 に見るような青石を用いて構成された堰体であるから、こうしたコンクリートの間詰めは確かに違和感がある。しかし、喰い違いの開放部の改廃が、最も簡便なコンクリートの間詰め、という工法によって処理されたからこそ、第十堰の「喰い違い堰」は、今も現地で確認可能な状態となっている。第十堰の「喰い違い堰」は、国内で唯一現存するものと考えられ、絵図の世界で確認するしか術が無かった土木構造物が今なお残されているという点において、第十堰の「喰い違い堰」は土木史上の河川構造物として価値が認められる。

4.2 巨大な「水刴ね」

「喰い違い堰」以上に、土木史また河川開発史という視点から見て重要な構造物が巨大な「水刴ね」である。「水刴ね」は図 -19 に示すように、上堰の上流側、つまり前記の「喰い違い堰」の上流側にあつて、上堰から突出して「喰い違い堰」に被さるかたちで残り、延長 100m、幅は起点で 10m はある。前掲の図 -10 に見るように、明治 21 年の吉野川実測図にも当該「水刴ね」が図化されている。形状は写真 -3 に見るように、先端にいくほど細長くなっている。「水刴ね」の水面以上の部材は、第十堰と同様、写真 -2 のような青石が用いられて、これが空積みされている。

「水刴ね」の目的は、洪水流を河道中心部へと導く役割があると考えられ、これによって上堰に附属する「喰い違い堰」や右岸堤が洪水流の直撃から保護される。つまり水制である。そして、「水刴ね」は石材で構成されているから、これを分類すれば不透水制に属する「石積み水制」ということになる。

こうした「石積み水制」は、筑後川の荒籠、肱川のナゲ、白川・緑川の石刴、旭川右支川宇甘川の波止など、各河川で固有の名称が付され、現存しているが、各水制の延長は、長いものでも 10m を越えない。他方、前述した油島の「喰い違い堰」には、図 -20 に見るよう

に、揖斐川側に長大な「猿尾」が設けられた。「猿尾」とは、木曾三川にあって、「石積み水制」に付された固有名で、これが「喰い違い堰」に当たる洪水の直撃を防いでいたとみられ、中村康次の『名井九介翁記念録』²³⁾には延長が329間(598m)とある。しかし今日、これは現存しない。一方、現存する木曾川右岸の長大な石田猿尾などは、コンクリートなどによって修築されているので²⁴⁾、国内の諸河川を調査する限り、このように規模が大きな「石積み水制」は、断定は出来ないけれども他例が無いと考えられる。

ところで、第十堰の巨大な「水刴ね」は、図-19に見るように、「喰い違い堰」の上流右岸にある。記録によると、1752(宝暦2)年の第十堰建設1期工事の際、「堰上の竜蔵川吐出し(神宮入江合流点と同義。但し、現在の神宮入江合流点は下流に移設されている。)の上手の高畠村地先で幅10間(18m)、長さ160間(290m)の水刴を作ることが命ぜられ」³⁾、とあるから、この「水刴ね」は、第十堰の初期工事の時に建設されたものが現代まで残されて来たものかも知れない。

かつて「喰い違い堰」が存在した油島では、図-20に示すように、この「猿尾」と「喰い違い堰」が第十堰のそれと同じような位置関係にあり、しかも第十堰の「喰い違い堰」の建設時点、すなわち1878(明治11)年に、油島の「猿尾」と「喰い違い堰」は木曾川に現存していた。従って、第十堰の「喰い違い堰」は、油島の事例を参考にして、それ以前から現地に有った巨大な「水刴ね」の存在を前提に建設された可能性がある。換言すれば、第十堰の「喰い違い堰」の設計思想は、「水刴ね」と併せ考えて、初めて解明できるかも知れない。何れにしても、国内に巨大な「石積み水制」が今なお残されているという点において、第十堰の「水刴ね」は土木史の上で価値のある河川構造物である。

参考文献

- 1) 岩屋隆夫、『日本の放水路』、東京大学出版会、pp.11-32、396-405、2004.11.16.
- 2) 岩屋隆夫、「河川開発史を通して見た吉野川第十堰の特徴と土木史上の評価」、土木学会土木史研究(講演集)第26号、pp.119-126、2006.6.15.
- 3) とくしま地域政策研究所、『吉野川事典』、農山漁村文化協会、pp.146-148、176-179、1999.3.25.
- 4) 内務省大阪土木出張所、「吉野川改修工事概説」、pp.6-7、1926.5.8.
- 5) 建設省徳島工事事務所、『吉野川百年史』、pp.16-20、325-357、484、1993.6.30.
- 6) 徳島建設文化研究会、『阿波の絵図』、pp.60-61、1995.3.
- 7) 内務省土木局、「吉野川改修工事概要」、p.2、1927.
- 8) 徳島県史編纂委員会、『徳島県史第5巻』、徳島県、p.561、1966.9.30.
- 9) 国土庁、『土地分類調査・徳島県』、pp.34、89-90、1989.3.

- 10) 科学技術庁、「吉野川流域の水害地形と土地利用」、p.25、1963.12.20.
- 11) 小出博、『日本の河川研究』、東京大学出版会、pp.360-362、1972.3.31.
- 12) 三好昭一郎、『阿波藍史』、阿波銀行、pp.58-60、204、1997.6.21.
- 13) 大阪市史編纂委員会、『新修大阪市史第1巻』、大阪市、pp.93-97、958-964、1983.3.31.
- 14) 松浦茂樹、『国土の開発と河川』、鹿島出版会、pp.78-79、1989.6.20.
- 15) 松浦茂樹、「足尾鉍毒事件と渡良瀬遊水池」、アーカイブス利根川編集委員会編、『アーカイブス利根川』所蔵、信山社サイテック、p.89、2001.11.30.
- 16) 名西郡、『名西郡誌』、1916.5. 作成、p.24、臨川書店、1973.
- 17) 立石恵嗣、明治初期・名西郡「八ヶ村堰訴訟事件」覚書、『阿波・歴史と民衆』、徳島地方史研究会創立20周年記念論集刊行委員会、pp.232-238、1990.3.20.
- 18) 松茂町歴史民俗資料館、『笹木春日神社文書史料集』、pp.107-109、124-126、147-148、2005.3.
- 19) 吉野川資料研究会編、『工程師デ・レーケ 吉野川検査復命書』、建設省徳島工事事務所、pp.58-69、1996.8.1.
- 20) 岩屋隆夫、「斜め堰の実態とその類型」、土木学会土木史研究(講演集)第26号、pp.109-118、2006.6.15.
- 21) 甲佐町文化財保護委員会、『甲佐町の文化財第一集』、甲佐町、p.21、1991.3.31.
- 22) 甲佐町文化財保護委員会、『甲佐町の文化財第二集』、甲佐町、pp.37-41、1994.3.31.
- 23) 中村康次、『名井九介翁記念録』、名井博士記念事業会実行委員長・古藤猛哉、pp.64-65、1953.2.1.
- 24) 山本晃一、『日本の水制』、山海堂、pp.52-71、1996.1.20.

技術評価と提言

1 主要な結果

(1) 地球温暖化に伴う現象として、地域気候モデル(RCM20)によれば、吉野川を含む西日本太平洋側では、100年後には夏季の降水量の増加が予測されており、月降水量およびその標準偏差の増加、また降水日数の増加と降水強度の増加が示されている。従って、これまでの降雨記録の確率処理から得られているT年確率降雨量が、将来的にはT年以下となる事態が生じる可能性がある。

(2) 平成16年、17年には大型台風によって大洪水が発生した。既往最大2日雨量の578mm(S51)は現計画の中では異常値として棄却されているが、地球温暖化に伴い、すでに降雨特性が変化してきている可能性があり、棄却された578mmを考慮した統計解析を行うことも必要である。

(3) 流域特性を変化させた場合の検討も行っておく必要がある。洪水ピークを下げる対策として、流域内の林相や樹種を変化させ、洪水流出を抑制することも一つの選択肢と考えられるが、現状においては、そうした条件の違いによる流出量の変化を明確に推定するための観測資料が備わっているとは言い難い。このことから、通常の洪水時と治水計画に用いられるような豪雨群において、林相・樹種が異なる流域からの洪水流出、土砂流出、流木などの流出資料の収集や継続的観測を行う必要がある。

(4) 現堰が、計画規模の洪水はもとより、(1)で述べたような要因により将来予測される計画規模以上の大洪水や中規模の洪水を安全に流下させることができるかどうかは重要な課題である。計画規模あるいはそれ以上の洪水に対しては斜め堰の存在によって生じる可能性がある左岸側の迂回流、中規模程度の洪水に対しては右岸側への落ち込み流によって生じる堤防近傍の局所深掘れに注意が必要である。これらの流れは、堰のみならず下流堤防の破壊につながる可能性があることから、幅広い流量規模での検討が必要である。特に右岸側の深掘れが顕著に生じる流量規模についての検討が必要である。以上を踏まえて、流れの特性を数値実験や模型実験で十分把握しておかなければな

らない。

(5) 現堰は、沖積砂礫層の地盤の上に砂利を積み上げ、それを昔は石積みで、現在はコンクリートで被覆した構造となっている。このような構造のため、水の浸透力や水圧などにより、堰の基礎や堰本体は下流から序々に崩壊しており、(4) で述べた右岸側の深掘とあわせて抜本的対策を立てる必要がある。

(6) 堤体の土質や堰構造の不均質性が安全上問題であり、ボーリングの他に近年進歩が見られる探査技術を用いて堰内部の構造や堤防の不均一性・強度などを把握しておく必要がある。堰の安全性については、大洪水時のめくれ上がりなどによる破壊について検討が必要である。堤防の安全性については、従来の解析手法では浸透と変形の連成や変形および進行性破壊のメカニズムが考慮されておらず、安全性照査の高度化が必要である。地震時の液状化による堤防の安全性照査については、有限要素法による液状化解析法の適用が有効である。

(7) 流域からの土砂・栄養塩類の流出を把握しておくことは、第十堰が河川環境に与えている環境影響を検討する上でのインプットデータとして大切である。中央構造線に位置し、左岸と右岸では地形・地質条件や土地利用形態が異なっていることから、流出の形態の違いに注目する必要がある。また、社会的条件として森林の手入れ不足による林相・林床の変化と併せて土砂流出動態の変化を予測する必要がある。このためには、流域の GIS データを充実させ、最近国内外で開発が進んでいる水・物質循環モデルを用いた予測が望ましい。

(8) これまでの環境調査によって堰上下流の生物生息状況や水質・底質の変化などについては資料が蓄積されてきた。しかし、堰近傍環境の変化過程の把握には、最近の研究成果を反映した検討が必要である。各種測定装置の発達により、流れと物質のフラックスを把握することが可能となっており、これらの把握を踏まえて、流れの詳細な構造、土砂の輸送・洗掘・堆積、底質の物理的・化学的機構、溶存態・粒子態を区別した栄養塩類および有機物の流達・循環過程、生物の代謝作用や浄化機能、植生を含めたハビタートの構造、などを組み込んだモデル化の構築が望まれる。

(9) 多数の文献調査と現地調査によって第十堰の建設経緯の検証を行い、その構造について全体像を明らかにした。第十堰は、その建設の歴史的・社会的特殊性から上堰と下堰からなる“二線式斜め堰”とも呼ぶべき平面形状となっている。上堰と下堰はもともと食い違い堰となっており、上堰の上流側には上堰から突出して巨大な“水刎ね”が存在している。この水刎ねには、第十堰と同様空積みの青石が用いられている。これらの平面的特性や堰の構造は、わが国において現存する唯一の例と見られ、現在に至った変遷の経緯は土木史上の価値がある。

2 判断の価値基準とその方向性

以上の検討により、安全上の問題点、環境影響を判断する上での課題、歴史的価値、が示された。第十堰を今後どのように取り扱うかについての土木学会の判断基準は、1999年に制定された土木学会倫理規定がその拠り所となる。土木学会倫理規定は、全15条からなり、土木技術者にとっての価値の判断基準とその優先度が示されている。

その第1条は、「美しい国土、安全にして安心できる生活、豊かな社会をつくり、改善し、維持するためにその技術を活用し、品位と名誉を重んじ、知徳を持って社会に貢献する」ことがうたわれており、第2条には「自然を尊重し、現在および将来の人々の安全と福祉、健康に対する責任を最優先し、人類の持続的発展を目指して、自然および地球環境の保全と活用を図る」ことが述べられている。第11条には、「土木施設・構造物の機能、形態、および構造特性を理解し、その計画、設計、建設、維持、あるいは廃棄にあたって、先端技術のみならず伝統技術の活用を図り、生態系の維持および美の構成、ならびに歴史的遺産の保存に留意する」とある。

以上のように、人々の安全・福祉に対する責任が最優先されることは、倫理規定を有する工学系学会では現時点で共通の価値基準であり、土木学会もその例に漏れない。

第十堰を今後どのように取り扱うかについては、この報告書で提案したように水理学、水文学、河川工学、環境工学、土木史など、関連する学術・技術に基づいて精査し、上述の土木学会倫理規定に示されたような価値基準を考慮して総合的に判断すべきである。

吉野川第十堰技術評価特別委員会構成（敬称略、順不同）

- 委員長： 池田駿介（水工学委員会顧問、東工大）
幹事長： 清水康行（水工学委員会委員・前幹事長、北大）
相談役： 岡部健士（水工学委員会委員、徳島大）
- 流域流出・気候変動評価班： 砂田憲吾（班長、山梨大）、立川康人（京大）、
田村隆雄（徳島大）
- 堰・堤体安全性評価班： 清水康行（班長、北大）、角 哲也（京大）、
西垣 誠（岡山大）、岡二三生（京大）
池田駿介（東工大）
- 環境影響評価班： 藤田裕一郎（班長、岐阜大）、戸田祐嗣（名古屋大）、
中野 晋（徳島大）
- 流域物質収支班： 竹林洋史（班長、徳島大）、大澤和敏（東工大）
- 土木史評価班： 伊東 孝（班長、日大）、天野光一（景観担当、日大）、
岩屋隆夫（東京都）、知野泰明（日大）