

天明絵図に見られる黒部川氾濫原の離散的堤防群が今後の治水対策に与える示唆について

IMPLICATION FOR FUTURE FLOOD CONTROL MEASURES OF THE FRAGMENTARY LEVEE SYSTEM ON KUROBE ALLUVIAL FAN DRAWN ON TENMEI PICTORIAL MAP

妹尾 泰史¹・石川 忠晴²・田中 仁³
Hirosi SENOO, Tadaharu ISHIKAWA and Hitoshi TANAKA

¹正会員 工修 (株)東京建設コンサルタント(〒170-0004 東京都豊島区北大塚1丁目15番6号)
²フェロー会員 工博 東京工業大学 名誉教授(〒251-0035 神奈川県藤沢市片瀬海岸2丁目4番15号)
³フェロー会員 工博 東北大学大学院 教授(〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

During the Edo period, discontinuous levee systems were commonly used to control river flooding. In this study, the construction process and hydraulic function of the levee system developed in Kurobe Alluvial Fan was investigated based on old map analysis and numerical flow simulation. Using a pictorial map drawn in 1785 and a levee survey map in 1894, the layouts of the discontinuous levees in the late 18th century and the 19th century was determined. The numerical flow simulation showed that fragmentary levees to suppress the divergence of river flows constructed in the 18th century were integrated to a large-scale levee system completed in the 19th century which contained a series of levee openings for intentional restricted flood divergence to old river channels and flood convergence after the flood peak.

Key Words : *fragmentary levee system, early modern age, hydraulic function, old pictorial map analysis, numerical flow simulation*

1. はじめに

大規模な連続堤防を建設できなかった近世には不連続的な堤防システムが一般的であり、堤防開口部からの計画的溢水と氾濫流路の設計および土地利用をリンクさせた超過洪水(河道容量を超える出水)への対策が行われていた^{1),2),3)}。現代では強固な連続堤防が建設できるとはいえ、それらは計画高水以下の洪水に対するものであるから、超過洪水に対する備えは依然として必要である。特に気候変動により豪雨増大が予想される今日、計画的氾濫に関する近世土木技術が役立つ可能性がある。

もちろん現代では昔のように堤防開口部を設置することは行政上困難であり、現実には水害のたびに連続堤防化される傾向にある。しかし計画高水位を超える時点で特定の場所での越水氾濫を許容して河道内水位の上昇を抑制するとともに、氾濫水を堤内地で制御することはある程度可能と考えられる。そこで「計画的氾濫」に関する先人の知恵の分析・評価は今後の治水対策の選択肢を豊かにするうえで意味があると考えられる。

ところで、近世の不連続堤防の代表的パターンは霞堤と総称されているが、計画的氾濫は対象流域の地形に合わせた設計が基本であり、定型的な霞堤が存在していたわけではない⁴⁾。また当時は短期間での施工は容易でなく、部分的工事の効果を確認しながら段階的に完成形に近づけていったはずである。つまり、完成形だけでなく、中途段階の堤防システムの水理効果の評価も重要である。

そこで本研究では18世紀~19世紀に黒部扇状地に設置された不連続堤防群について、天明絵図⁵⁾に記載される中途段階と、明治中期の堤防測図⁶⁾に記載される完成された堤防システムの水理効果を流体数値シミュレーションで推測するとともに、当時の土木技術者の洪水制御戦略について考察した。

2. 研究対象領域の概要

黒部川は標高3,000 m級の立山連峰と後立山連峰を水源とし、約85kmの流路延長で日本海に流れ込む急流河川である。渓谷から流出する大量の土砂により沿海部に

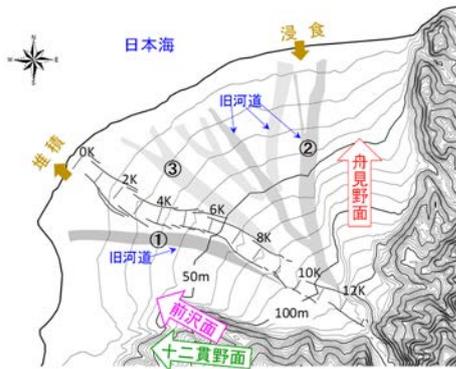


図-1 黒部扇状地の地形

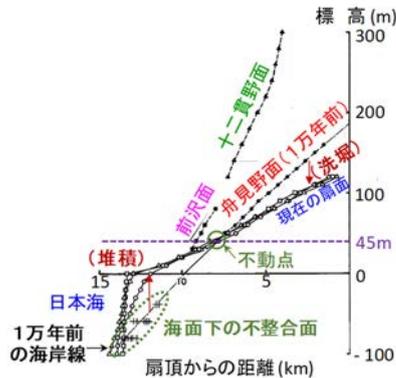


図-2 黒部扇状地の開析過程

は半径13 km, 平均勾配1/100, 頂角50°の広大な黒部扇状地が形成されている(図-1)。現在の扇状地面の両側には十二貫野面, 前沢面, 舟見野面と呼ばれる古い扇状地面が段丘として残っている。図-2は, 現在の扇頂を起点とした新旧扇状地面の半径方向断面図である⁷⁾。北アルプスの隆起と富山湾の沈降により地盤傾斜が進行していることから, 各面の年代は十二貫野面⇒前沢面⇒舟見野面の順であると考えられている。石川ら⁷⁾は, 海底地質不整合面位置, 長期の水準測量データおよび後氷期の海面変動に基づき舟見野面からの開析開始時期を1万年前とし, 舟見野面形状が一点鎖線のような形状であったと推測している。したがって不動点下流部では堆積が進行している。

黒部川は扇状地中央よりやや西側を流れているが, 往古は全体を移動して扇状地形を形成した。図-1に示す灰色の帯は旧河道であり⁸⁾, 扇頂部だけでなく, 扇状地中央でも分岐する傾向がある。これは図-2に示した不動点のやや上流にあたる。治水地形分類図によれば現河道南側の旧河道①が最も新しく, 次が扇頂から北に向う旧河道②で, 他はかなり古いものと推測されている。扇状地の等高線はほぼ同心円となっているが, 海岸線は北側で後退し西側で突出している。冬季波浪による沿岸流は北⇒西であることから, この海岸線の変形は, 黒部川河道が②ら①に変化して以降継続していると考えられる⁷⁾。

現河道に沿った短い黒い線は, 19世後半にJohannis de Rijkeの指導で測定された堤防法線図(1894年発行)⁶⁾をプロットした結果を示している。扇状地中央より下流では“重なり”をもった漏斗状を呈する霞堤形状となってい

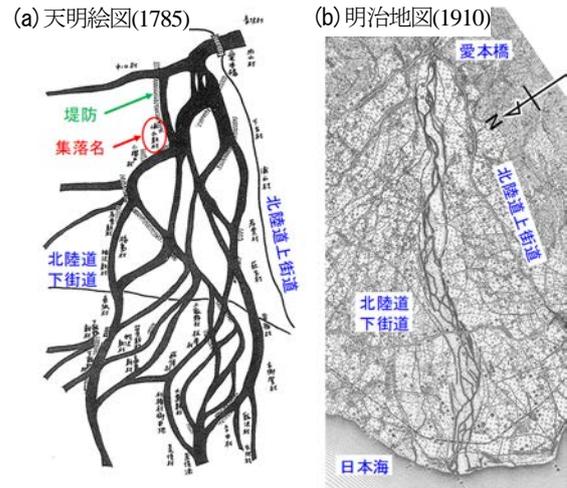


図-3 天明絵図と明治地図

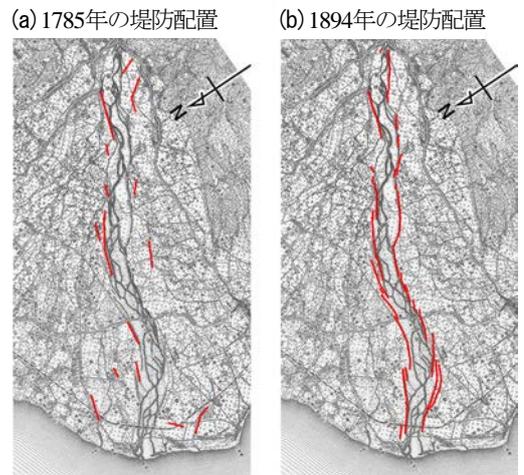


図-4 各時代の堤防配置

るが, 上流では重なりのない単純な不連続堤となっている。このような堤防形状の違いは, 当時の氾濫流制御の考え方に関係していると思われる⁹⁾。

3. 天明絵図の歪みの補正

図-3(a)に天明絵図(1785)⁵⁾を, 図-3(b)に明治地図(1910)¹⁰⁾を示す。天明絵図には当時の流路の他に, 多数の集落名, 北陸道上街道・下街道, および当時の堤防位置が描かれている。一方明治地図にもほぼ同じ集落名とその位置および2つの街道が記入されている。また1894年堤防法線図とほぼ同じ位置に堤防と思しき線が記入されている。また天明絵図の北陸道下街道より上流の比較的長い堤防の特徴は明治末期のそれらと類似している。そこで両図に共通する点を手掛かりに, TIN技法¹¹⁾を用いて天明絵図を幾何補正し, 堤防位置を明治地図上に記入した。その結果を図-4(a)に示す。図-4(b)は1894年の堤防位置である。以下では便宜的に前者を「18世紀堤防」, 後者を「19世紀堤防」という。

19世紀堤防に比較して18世紀堤防は断片的であり, 集落を氾濫水の直撃から守るように配置されたように見受

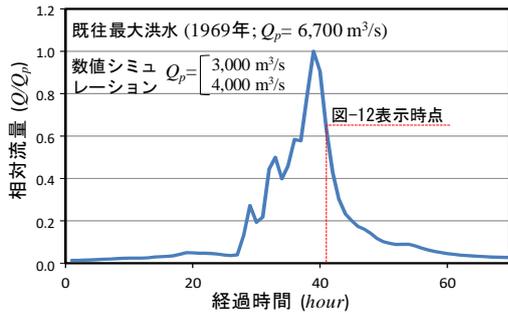


図-5 洪水ハイドログラフ

けられる。また右岸堤（図では左側）は比較的長く、河道に近接しているが、左岸堤は河道から離れている。これはおそらく、図-1で述べたように、左岸側に比較的最近の旧河道があり、集落がその外側に多いためと考えられる。また河道に接している比較的長い右岸堤は19世紀堤防の一部を構成したと考えられる。

4. 数値シミュレーション

(1) 数値シミュレーションモデル

三角形非構造格子で地形を表現するAkohらの浅水流モデル¹²⁾を用いた。このモデルでは堤防越水量を本間公式¹³⁾で考慮している。19世紀堤防の高さは文献⁶⁾に示されている。18世紀堤防については文献¹⁴⁾の記述をもとに一律2mとした。計算手法の詳細は文献¹²⁾を参照願いたい。

(2) 計算条件

a) 地形条件

黒部扇状地では、明治以降に大規模な地盤造成はないので、河道以外については国土地理院基盤地図情報の数値標高モデル(5mメッシュLPデータ)をほぼそのまま使用した。ただし道路および鉄道の盛土部分は、周囲の標高値からの補間によって削除した。一方、河道部分は1960年以降に上流峡谷に建設された大型発電ダムの影響で低下している。そこで昔の河床高に近づけるために、文献¹⁵⁾にある横断平均河道低下データを用いてLPデータを修正した。また黒部川河床は高さ1~2メートルの砂川の移動により変動性が高いことから、上記に加えて、上流部滞筋位置を変えた河床データも用意した。前者を「河道地形-1」、後者を「河道地形-2」という。「河道地形-2」を用意した理由については5 (3)で説明する。

b) 洪水波形

図-5に現在の河川改修事業に採用されている計画洪水ハイドログラフを示す。 Q_p はピーク流量である。この流量波形は1969年に観測された既往最大洪水のデータをもとに設定され、図-6に示す年最大流量の確率プロットから、年超過確率は1/100とされている。しかし江戸時代の堤防の評価のための洪水シミュレーションとしては過

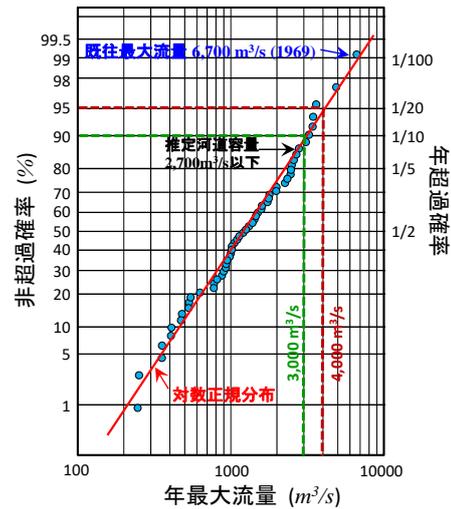


図-6 年最大流量の確率プロット

大であると思われるので、図-5における Q_p が $3,000 \text{ m}^3/\text{s}$ および $4,000 \text{ m}^3/\text{s}$ となるように縮小して用いることとした。図-6によると、それぞれの年超過確率は1/10と1/20と推定される。なお過去の洪水記録¹⁶⁾では、1828年から1895年までの68年間に川沿いの集落が水害を10回受けており、非超過確率は85%である。これをもとに河道容量を図-6から推定すると $2,700 \text{ m}^3/\text{s}$ 以下となる。

5. 数値シミュレーションの結果

(1) 水害ポテンシャルの評価指標

図-4(a)に示した天明絵図の堤防が“ある場合”と“ない場合”についての計算結果を比較し、18世紀の堤防システムの効果を評価した。評価指標としては次式で示される流体力を用いた。

$$HF = h \cdot U^2 \quad (1)$$

ここに HF は流体力 (Hydrodynamic Force), h は水深, U は流速である。佐藤ら¹⁷⁾が1986年8月の吉田川水害に関して検討した結果によれば流体力と木造住宅の損傷の間に概ね以下の関係がある。

$$\begin{array}{ll} HF \leq 1.5 & \text{被害僅少} \\ 1.5 < HF \leq 2.5 & \text{半壊} \\ 2.5 < HF & \text{全壊} \end{array} \quad (2)$$

ただし現在と江戸時代の木造家屋では耐流水強度に差があると思われる。したがって上記の流体力区分はあくまで目安として考えていただきたい。なお以下では、各ケースの計算時間の中での各地点の最大流体力を図化し、堤防配置による水害ポテンシャルの空間分布について時代的な特徴を議論する。

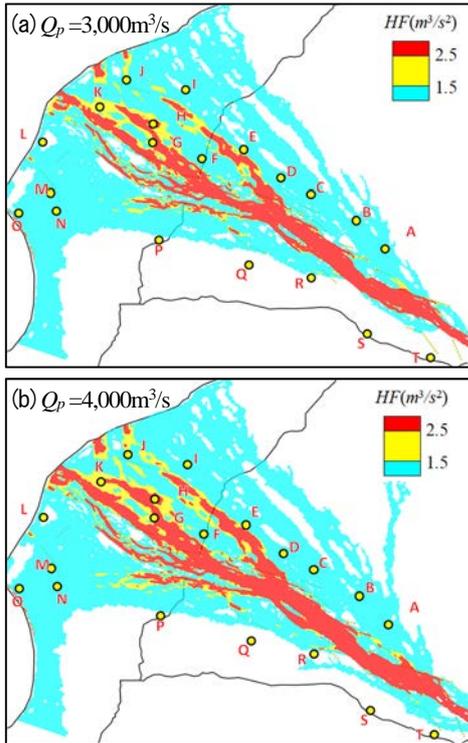


図-7 堤防がない場合の氾濫流の最大流体力の空間分布

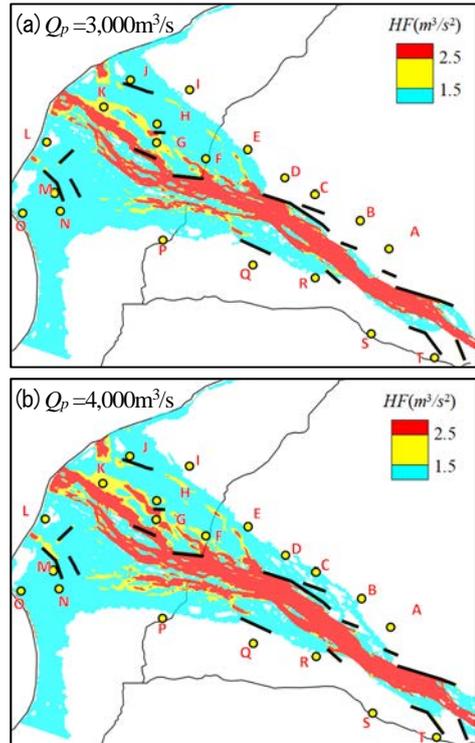


図-8 18世紀堤防での氾濫流の最大流体力の空間分布

(2) 18世紀の堤防群の水理効果

図-7の(a), (b)に「堤防なし」での計算結果を示す。河道地形条件は「河道地形-1」を用いている。黄色の丸印が集落中心位置を示し、カラーコンターが流体力分布を示している。ただし実際の家屋は集落中心から外に広がっているため、黄色丸印の位置が浸水していても集落の一部が被害を受けていることはあり得る。

扇頂付近から氾濫水が扇状に広がり、 $Q_p = 3,000 \text{ m}^3/\text{s}$ では右岸側の集落中心が浸水している。特に中流から右岸に分岐した強い流れが下流部の集落に向かっている。この流れの位置は旧河道③に一致している(図-1参照)。一方、左岸側の集落中心は海岸近くを除けば無被害となっている。 $Q_p = 4,000 \text{ m}^3/\text{s}$ では右岸の氾濫域がさらに広がり、旧河道②(図-1参照)への分岐が発生している。一方左岸側での氾濫域は旧河道①の範囲からあまり広がらないが、海岸付近の集落に向かう流れは強まっている。

図-8の(a), (b)に「18世紀堤防」での最大流体力分布を示す。 $Q_p = 3,000 \text{ m}^3/\text{s}$ では上流部および中流部の比較的長い堤防によって右岸への氾濫が抑制され、A-EおよびIの集落中心は浸水から免れている。また下流の集落は浸水するものの、強い流れの直撃は独立した短い堤防で軽減されているように見える。一方、左岸では堤防が離散的なため氾濫域は「堤防なし」の場合と大きな差異はない。

$Q_p = 4,000 \text{ m}^3/\text{s}$ では右岸中流域の堤防背後に氾濫水が回り込み、集落中心C, Dは浸水をかろうじて免れるものの、下流域の集落の危険度は増大している。一方左岸側では大きな流体力の領域が下流に伸びているが、集落中心の浸水状況は $Q_p = 3,000 \text{ m}^3/\text{s}$ の場合と大きな差異はない。以上から、18世紀堤防の設計戦略は、上流と中流の比較的

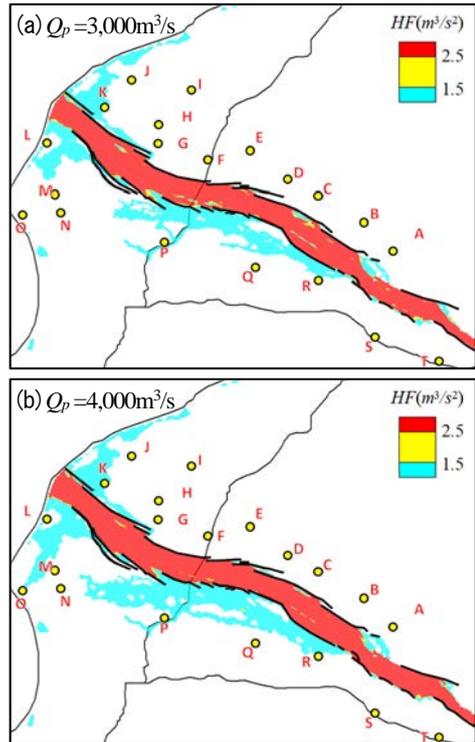


図-9 19世紀堤防での氾濫流の最大流体力の空間分布

長い右岸堤防により右岸側の過半の集落中心の浸水を防止し、他の集落に対しては断片的堤防で個別に氾濫水の直撃を防ぐものであったと考えられる。

(3) 19世紀の堤防システムの水理効果

図-9の(a), (b)に「19世紀堤防」での最大流体力分布を示す。河道地形条件は「河道地形-1」である。扇状地に分散的に築かれていた短い堤防は撤去され、河道兩岸を囲

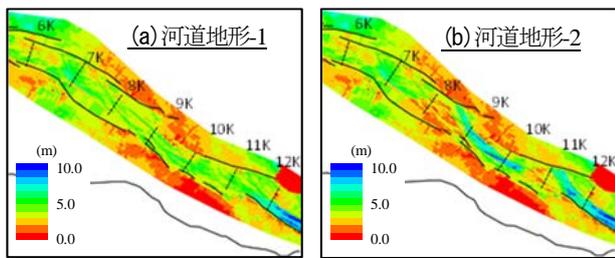


図-10 河床地形の修正(HWLと河床高の差分)

う不連続堤のシステムに集約されている。このため、 $Q_p = 3,000\text{m}^3/\text{s}$ 、 $Q_p = 4,000\text{m}^3/\text{s}$ とも右岸側ではほとんど氾濫が生じなくなっている。一方左岸側は集落Rの付近で氾濫が生じているが、旧河道①(図-1参照)からあまり広がらずに流下しており、ほとんどの集落中心が水害を受けなくなったと考えられる。

さて、以上のシミュレーションは、河道部LPデータ(2013)に1960年代以降の河床低下の影響¹⁵⁾を加えた地形(河道地形-1, 図-10(a))について行われた。したがって、滯筋や砂州の配置は2013年におけるものである。その結果、氾濫は主に左岸側で生じている。しかし砂州や滯筋は移動するから、それらの配置が変われば右岸側に溢水する場合もあると考えられる。そこで右岸側溢水による氾濫流の挙動を調べるために、試験的に右岸にも越水する河道地形(図-10(b))を作成し氾濫シミュレーションを実施した。河道地形作成の考え方を次に示す。

- ・左岸越水の要因であった9K付近右岸から中央の砂州を除去。
- ・除去分と同量の土砂を8K左岸へ堆積。

その結果、8Kにおける河積が減少したため通水能力が低下し右岸においても越水する状況を得た。

得られた流体力の分布を図-11の(a), (b)に示す。左岸側の氾濫流は図-9とほぼ同じだが、右岸側にも氾濫が生じ、概ね旧流路③(図-1参照)に沿って流下する。その結果、C, Dの集落は冠水するが、E, Fより下流では氾濫水は集落中心の間を通過する。これはおそらく偶然ではなく、集落が旧河道わきの微高地に形成されていたからだと考えられる。

さて、19世紀の堤防図によると、右岸側集落Dの付近と左岸側集落Pの付近に比較的長い堤防重複部が存在する。この重複部の機能を確認するため、減水時(図-5の $t = 41$ 時間)の流速ベクトルを図-12(a)および(b)に拡大して示す。各図の範囲は図-11に示している。これらの図より、氾濫水が減水時に堤防の間から河道に戻ることがわかる。つまり霞堤としての機能を有している。

6. 江戸時代における黒部川治水戦略の推測

江戸時代には“流量”という概念はなかった²⁾、現代のような流量配分に基づく治水計画は存在しなかった。しかし水準測量技術は発達しており、17世紀には水

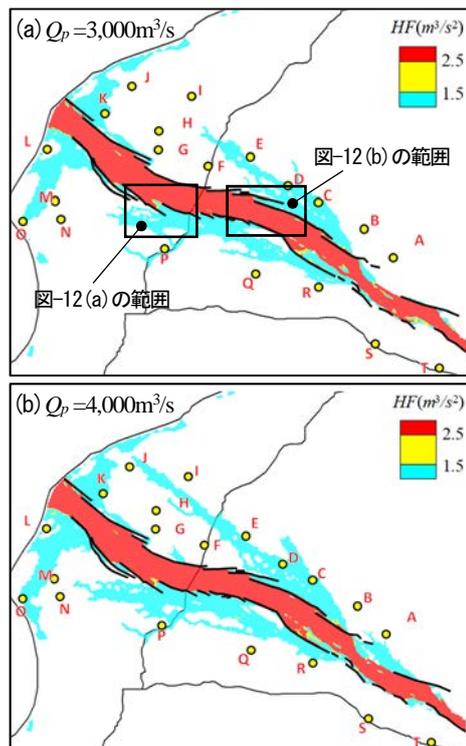


図-11 修正河道データでの氾濫流の最大流体力の空間分布

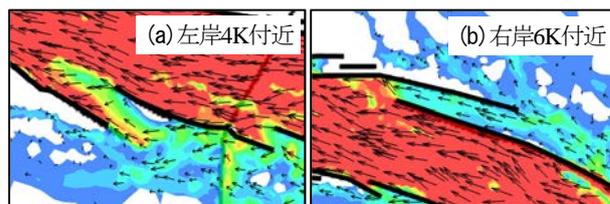


図-12 減水時における氾濫水の河道への回帰

位を基準として地形の高低差を利用した計画的氾濫および氾濫流制御が行われていた²³⁾。天明の絵図が描かれた1785年頃には、そのような“計画的氾濫技術”に関する情報は広まっていたと考えられる。以上を念頭に置けば、前出の数値シミュレーション結果から江戸時代の黒部川治水戦略が以下のように推測される。

図-4に示した2つの堤防配置図を比較すると、天明絵図に描かれた一見バラバラの断片的堤防配置が、江戸時代末期の堤防配置の青写真の上で定められていたのではないと思われる。すなわち、まず右岸側の広い範囲への氾濫水の拡散を抑えるために比較的長いいくつかの堤防が設置され、それらが19世紀の完成形においても重要なパーツとなっていた。図-1に示したように右岸側には相対的に古い時代の旧河道が多いが、18世紀にはそれらを利用した用水路網により水田が発達していたと考えられるからである。

ただし天明時代の堤防だけでは依然として広範囲に氾濫するので、各集落を氾濫水の直撃から守るために、断片的堤防が集落際に設置されたと思われる。それらの機能は沖積低地における輪中堤と類似しているが、急こう配の黒部扇状地では氾濫水が直線的に流れることから、集落を囲う必要がなかったと考えられる。なお、断片的

堤防は19世紀には見られなくなっており、堤防システムが完成するまでの一時的なものであったと思われる。

一方、天明時代には左岸側には長い堤防は存在せず、旧河道①への氾濫の頻度は高かったものと考えられる。実際、1934年出水では氾濫流が旧河道①を通して海岸部に到達している¹⁸⁾。このため集落中心位置は本流から離れており、断片的堤防のみでもある程度の防御が可能であったと思われる。

18世紀堤防から19世紀堤防に変化していったプロセスについては明確な資料がないが、上記の18世紀堤防の配置と機能から推測すると、氾濫および水害の状況を逐次確認し、必要に応じて青写真を修正しながら完成形に向けて工事を進めたと推測される。19世紀の完成形の堤防システムでは、 $Q_p=2,700 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度(7,8年に1回)で河道が満杯となる。それを超える出水では左岸10k付近の堤防開口部から計画的に溢水させ、旧河道①を臨時的放水路として利用したものと思われる。また黒部川の洪水継続時間は短いので、図-12に示したように、減水時に旧河道の氾濫流の一部を下流部の堤防重複部を通して本流に戻す計画であったと考えられる。

7. おわりに

本研究では、流体数値シミュレーションを用いて18世紀と19世紀の黒部川堤防システムの水理機能を推察し、当時の土木技術者の治水戦略を論じた。ただし数値シミュレーションのための江戸時代の数値データは存在しないので、地形条件と流量条件の設定は不確実性を含まざるを得ず、したがって前節に述べた当時の治水戦略はあくまで推測の域を出ない。しかし江戸時代の土木技術者も利用可能な知識と技術の範囲において最善の計画を立てていたはずであり、図-7～図-12に示した結果はある程度妥当であると思われる。飛行機も施工機械もなく測地技術も現代より劣っていた時代に、図-7の「無堤状態」から図-9の「19世紀堤防」まで治水システムを着実に完成させていった当時の土木技術者の計画性と実行力は驚嘆に値すると筆者らは考える。

序文で述べたように、長大な連続堤防を建設できず、河川氾濫の規模と頻度が大きかった江戸時代の治水の眼目は「計画的氾濫による水害の軽減」であった。つまり「超過洪水対策」である。当時に比べて治水安全度が遥かに高い現代においても超過洪水の可能性は常に存在する。しかし現行の治水計画は「河道計画」であり「氾濫制御計画」ではない点に注意する必要がある。治水対策は元来水害への対策であり、水害は氾濫によって生じる。この点において、氾濫流を如何に計画的に制御するかという江戸時代の治水戦略は的を射ていたと考えられる。

近年、毎年のように日本のどこかで大水害が発生して

おり、今まではあまり議論されてこなかった超過洪水対策の必要性が増している。この機会に、江戸時代の土木技術者の治水戦略を振り返り、そこから学ぶべき点を抽出すべきだと思うが、どうであろうか。

参考文献

- 1) 寺村淳, 大熊孝: 不連続堤の機能と分類に関する研究, 土木史研究論文集, Vol. 26, pp.73-83, 2007.
- 2) 石川忠晴, 赤穂良輔: 数値シミュレーションによる江戸期百間川放水路の洪水調節機能の評価, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.72, No.4, I_343-I_348, 2016.
- 3) 石川忠晴, 赤穂良輔, 小林裕貴: 数値シミュレーションによる日本堤システムの洪水調節機能の評価, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.73, No.4, I_1387-I_1392, 2017.
- 4) 大熊孝: 霞堤の機能と語源に関する考察, 第7回日本土木史研究発表会論文集, pp.259-266, 1987.
- 5) 建設省北陸地方建設局: 黒部川のあゆみ, p.122, 1977.
- 6) 富山県: 黒部川実測平面図, 富山県立図書館所蔵, 1894.
- 7) 石川忠晴, 山本浩之: 黒部扇状地の土砂動態に関する研究, 土木学会論文集 367/II-7, pp.35-43, 1987.
- 8) 建設省北陸地方建設局: 黒部川のあゆみ, p.121, 1977.
- 9) 妹尾泰史, 石川忠晴: 数値シミュレーションによる江戸時代後期の黒部川扇状地震堤システムの洪水調節機能の評価, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.74, No.4, I_1411-I_1416, 2018.
- 10) 大日本帝國陸地測量部: 5万分の1地形図, 1910.
- 11) 例えば, 清水英範, 布施孝志, 森地茂: 古地図の幾何補正に関する研究, 土木学会論文集 625/IV-44, pp.89-98, 1999.
- 12) Akoh, R. et al.: High-resolution modeling of tsunami run-up flooding: a case of flooding in Kamaishi city, Japan, induced by the 2011 Tohoku tsunami, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 17, pp.1871-1883, 2017.
- 13) 本間仁: 低溢流堰堤の越流係数, 土木学会誌, 第26巻, 9号, pp.849-862, 1940.
- 14) 建設省北陸地方建設局: 黒部川のあゆみ, p.123, 1977.
- 15) 国土交通省: 土砂管理に関する資料, 黒部川水系河川整備基本方針, 2006.
- 16) 建設省北陸地方建設局: 黒部川のあゆみ, pp.104-112, 1977.
- 17) 佐藤智, 今村文彦, 首藤伸夫: 洪水氾濫の数値計算および家屋被害について —8610号台風による吉田川の場合—, 第33回水理講演会論文集, pp.331-336, 1989.
- 18) 寺村淳, 大熊孝: 北陸扇状地河川における霞堤の変遷とその役割に関する研究, 土木史研究論文集, Vol.24, pp.161-171, 2005.

(2020. 4. 2受付)