

図3・4-9 河口からの距離と河川水 Cl^- 濃度の関係
 (平常時流量での8割水深の位置の Cl^- 濃度)

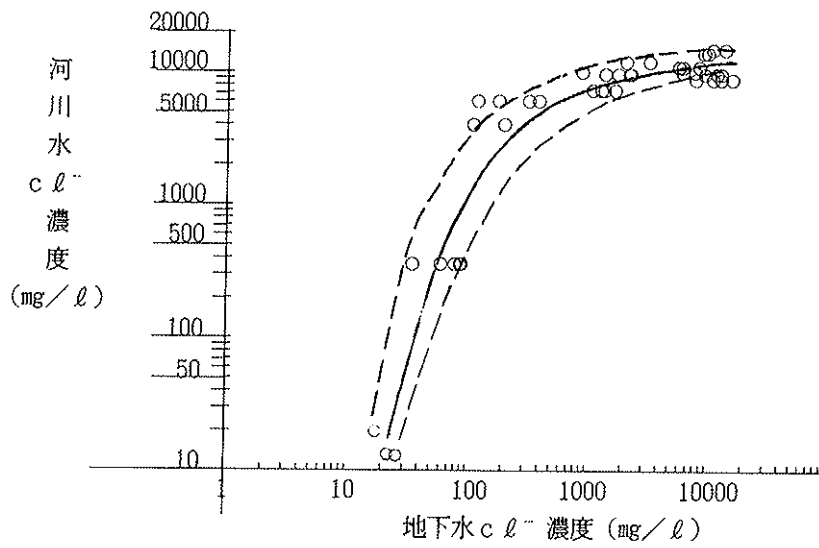


図3・4-10 河川水 Cl^- 濃度と地下水 Cl^- 濃度の関係

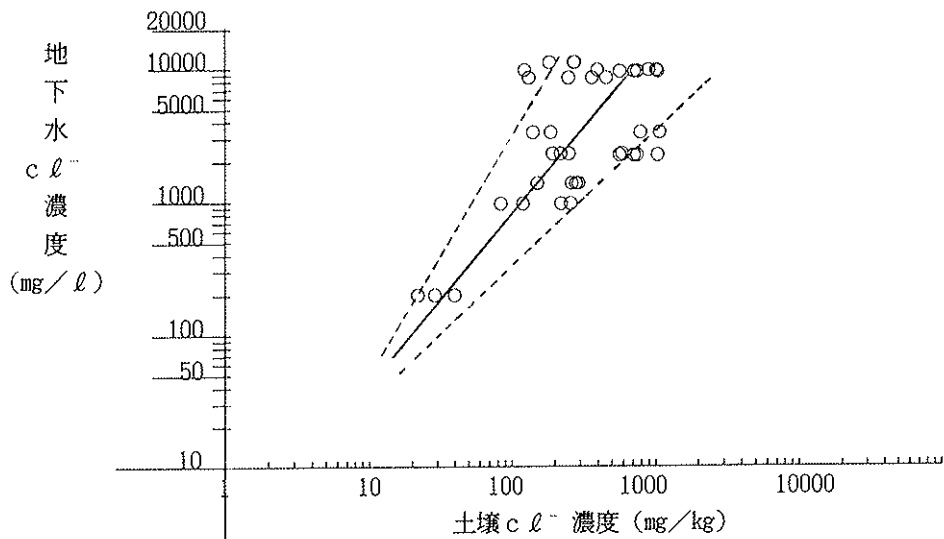


図3・4-11 地下水 Cl^- 濃度と土壌 Cl^- 濃度の関係

② 予測結果

長良川の浚渫を行った場合、平常時の流量における底層の位置の河川水の Cl^- 濃度は前述したように図3・4-12となる。

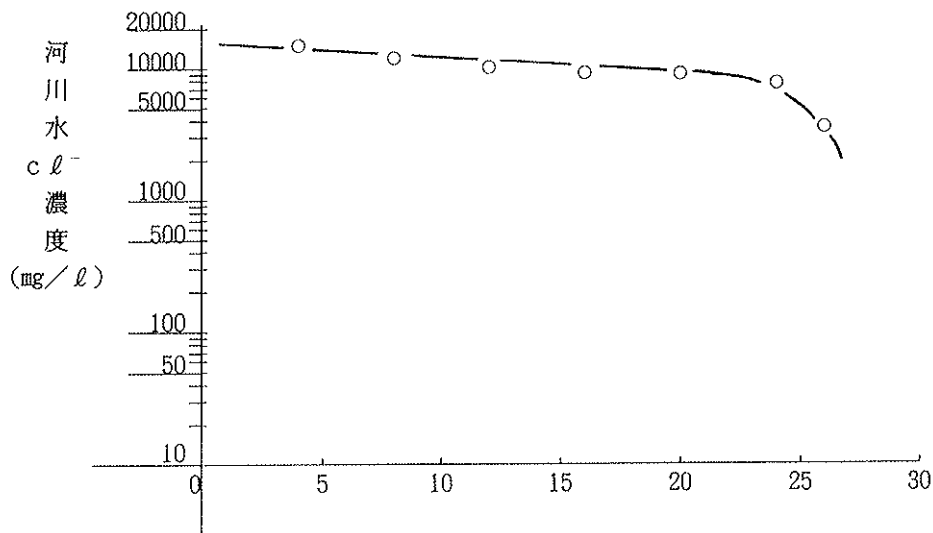


図3・4-12 浚渫後の河川水 Cl^- 濃度の予測結果
(平常時流量での8割水深の位置の Cl^- 濃度)

この浚渫後の河川水のCl⁻濃度と、図3・4-10の河川Cl⁻濃度と地下水のCl⁻濃度との関係から、高須輪中における浚渫後の地下水Cl⁻濃度を推定すると表3・4-4となる。また同様に図3・4-11の地下水Cl⁻濃度と土壌Cl⁻濃度の関係から高須輪中における浚渫後の土壌Cl⁻濃度を推定すると表3・4-4となる。

表3・4-4 浚渫後の地下水及び土壌のCl⁻濃度の予測
(相関による方法)

河口からの距離 km	地下水Cl ⁻ 濃度 mg/l	土壌Cl ⁻ 濃度 mg/kg
15 km 付近	7,000 (1,000~10,000)	600 (150~2,000)
20 km 付近	5,000 (1,000~7,000)	500 (150~1,000)
25 km 付近	1,000 (200~1,500)	150 (50~300)

3) 数値解析による予測

① 基本条件

前述のように、高須輪中の地下水水面は25km付近から下流では、長良川水位より低い。従って、塩水化した河川水は堤内地盤に浸透し続け、輪中中央部の大江川に達するまで進み、その先で揖斐川から浸透してくる流れに対して塩水楔を形成して平衡に達する。このような地下水の塩水化は、ダルシー則に則った浸透流と塩分の移流分散を合わせた現象として取り扱われる。

高須輪中の帯水層の中には、旧河道、埋積河畔砂丘などの透水性の高い「みずみち」が数多く存在すると推定され、この「みずみち」を通して塩水は急速に浸透し、「みずみち」からさらにその周辺に塩水が浸透していくこととなる。なお、この「みずみち」は確認されたものだけで図3・2-11に示すとおりであり、この他に数多くの「みずみち」が存在すると推定される。

また、「みずみち」には、ボーリング、サウンディング等で把握できるものだけでなく、より細部構造のレベルでの「みずみち」が無数に存在しているものと考えられる。

② 基本式

地下水の塩水化過程の解析は、河野、西垣、田中が用いているように、地下水流の連続方程式、運動方程式及び塩分の移流分散方程式を連立させて解析することができる*4。

$$\frac{\partial \rho n S_w}{\partial t} + \frac{\partial \rho V_i}{\partial x_i} = 0 \quad (13)$$

$$V_i = -K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} = - \left(K_{ij} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} + K_{i3} \rho_r \right) \quad (14)$$

$$\underbrace{\left(\frac{\partial \theta c}{\partial t} + S_s \theta c \frac{\partial \phi}{\partial t} \right)}_{\text{塩分貯留項}} - \underbrace{\frac{\partial (\theta D_{ij} \partial c / \partial x_j)}{\partial x_i}}_{\text{分散項}} + \underbrace{\frac{\partial V_i c}{\partial x_i}}_{\text{移流項}} + \underbrace{\frac{\rho_a K_d}{n} \left(\frac{\partial \theta c}{\partial t} + S_s \theta c \frac{\partial \phi}{\partial t} \right)}_{\text{吸着項}} = 0 \quad (15)$$

ここで、 ρ : 流体の密度、 n : 間隙率、 S_w : 飽和度、 V_i : ダルシー流速、 t : 時間、 x_{ij} : 水平及び鉛直方向の座標、 K_{ij} : 透水係数のテンソル (K_{11} は水平方向、 K_{33} は鉛直方向の透水係数)、 h : 全水頭、 ϕ : 圧力水頭、 ρ_r : ρ / ρ_r 、 ρ_r : 淡水の密度、 ρ_a : 土の密度、 K_d : 飽和土の吸着係数 (本解析では 0 で無視)、 $\theta = n S_w$ 、 c : 溶解塩分濃度、 D_{ij} : 分散係数、 S_s : 比貯留係数である。

また、分散係数は、次式で表す。

$$\theta D_{ij} = a_T |V| \delta_{ij} + (a_L - a_T) V_i V_j / |V| + a_m \tau \delta_{ij} \quad (16)$$

ここで、 a_T : 横分散長、 a_L : 縦分散長、 a_m : 分子拡散係数、 τ : 屈折率、 δ_{ij} : クロネッカーの δ ($i = j$ で 1、 $i \neq j$ で 0) である。

③ 定数、境界条件の設定

(13)~(16)式を用いた解析における定数としては、流体密度： ρ 、間隙率： n 、透水係数： K_{ij} 、分散係数： D_{ij} 、分子拡散係数： a_m 等がある。

また、境界条件としては、長良川、大江川の水位、長良川の Cl^- 濃度等がある。

高須輪中の地下水塩水化の予測計算における諸定数は、現地調査データ及び既往の文献により表3・4-5のように設定し、また境界条件は、河川水位については浚渫後の平均水位、河川水 Cl^- 濃度は前節で予測した値、大江川水位は強制排水

による計画値により表3・4-6 のように設定した。

表3・4-5 浚渫後の地下水塩水化の数値解析に用いた諸定数

<土質定数>

土質 項目	ケース	平均透水係数の場合		粗粒の透水係数の場合	
		透水係数 k cm/s	間隙率 n_0	透水係数 k cm/s	間隙率 n_0
盛土・堤防 (B)		1×10^{-3}	0.2	1×10^{-3}	0.2
表土・耕作土 (F)		1×10^{-5}	0.1	1×10^{-5}	0.1
旧河道堆積物 (rd)		3×10^{-2}	0.2	6.8×10^{-2}	0.2
最上部砂層 (A_{s1})		5×10^{-3}	0.2	2.3×10^{-2}	0.2
最上部粘性土層 (A_{c1})		1×10^{-5}	0.1	1×10^{-5}	0.1
上部砂層 (A_{s2})		8×10^{-3}	0.2	2.5×10^{-2}	0.2
下部粘性土層 (A_{c2})		1×10^{-6}	0.1	1×10^{-6}	0.1
みずみち (R_d)		3×10^{-2}	0.2	6.8×10^{-2}	0.2

<分散・拡散の係数>

土質 項目	縦分散長 a_L m	横分散長 a_T m	分子拡散係数 a_m cm ² /s
盛土・堤防 (B)	100	10	1×10^{-6}
表土・耕作土 (F)	10	1	1×10^{-6}
旧河道堆積物 (rd)	1,000	100	1×10^{-6}
最上部砂層 (A_{s1})	100	10	1×10^{-6}
最上部粘性土層 (A_{c1})	10	1	1×10^{-6}
上部砂層 (A_{s2})	1,000	100	1×10^{-6}
下部粘性土層 (A_{c2})	10	1	1×10^{-6}
みずみち (R_d)	1,000	100	1×10^{-6}

表3・4-6 浚渫後の地下水塩水化の数値解析に用いた境界条件

項目	距離標	16 km	20 km	24 km
河川水位 (TP, m)		0.20	0.21	0.21
河川水 Cl^- 濃度 (mg/l)		5,500	4,000	2,000
大江川水位 (TP, m)		-0.8	-0.8	-0.8
地下水初期 Cl^- 濃度 (mg/l)		10	10	10
地下水面 (田面下 cm)		20	20	20

④ 予測の結果

(13)～(16)式を有限要素法で数値解析した結果によれば、確認された「みずみち」だけを考慮した場合、最終的に塩水化すると予測される約1,600haの地域の約半分が、およそ10年以内に塩水の影響を受けることとなる。

また、未確認の旧河道跡やより細部構造の「みずみち」が存在することを考慮するため、観測結果から推定できる透水係数の幅の中から粗粒のものの透水係数を推定すると表3・4-6となる。これを用いて予測を行うと、最終的に塩水化すると予測される約1,600haの地域の内、約6割の地域のどこかで、およそ10年以内に塩水の影響を受ける恐れがあることとなる。(図3・4-13)

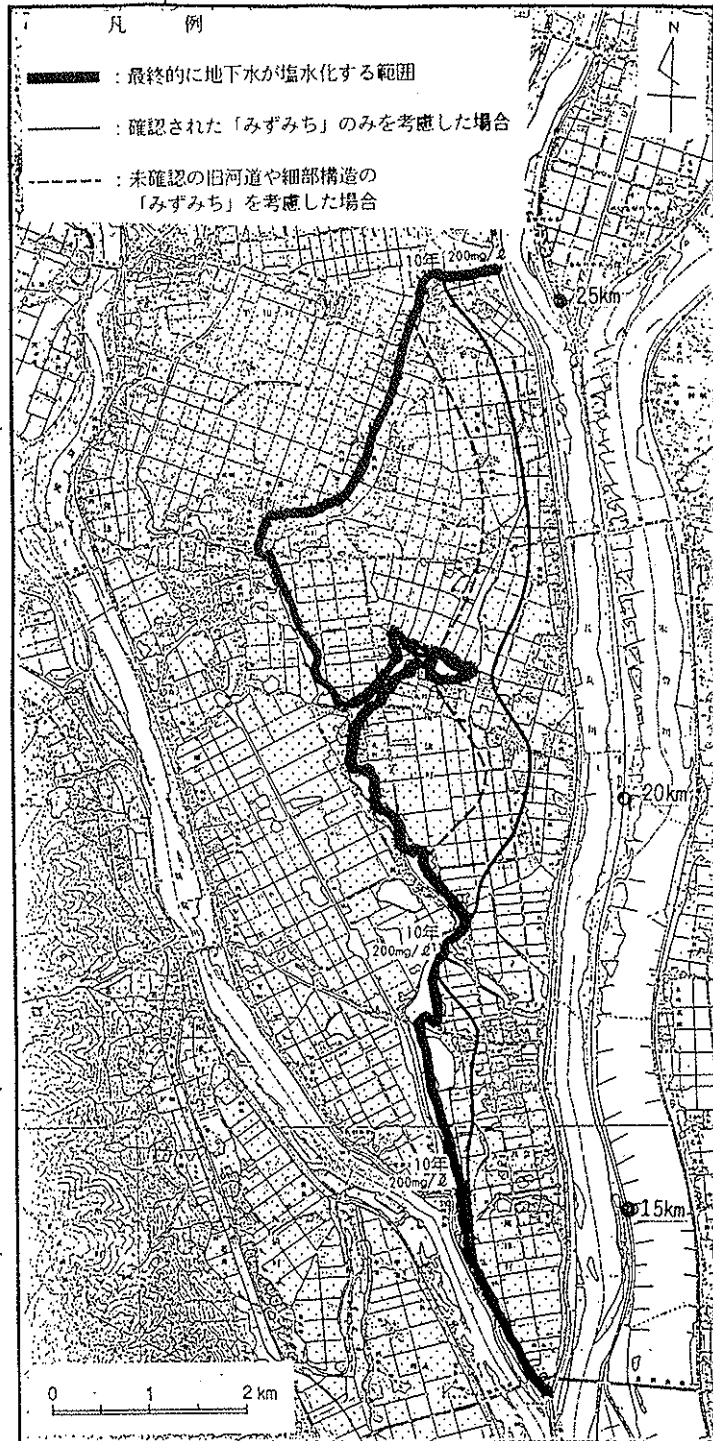


図3・4-13a 浚渫後10年経過時の地下水の塩水化状況
(C1-濃度 200mg/l以上の到達範囲)

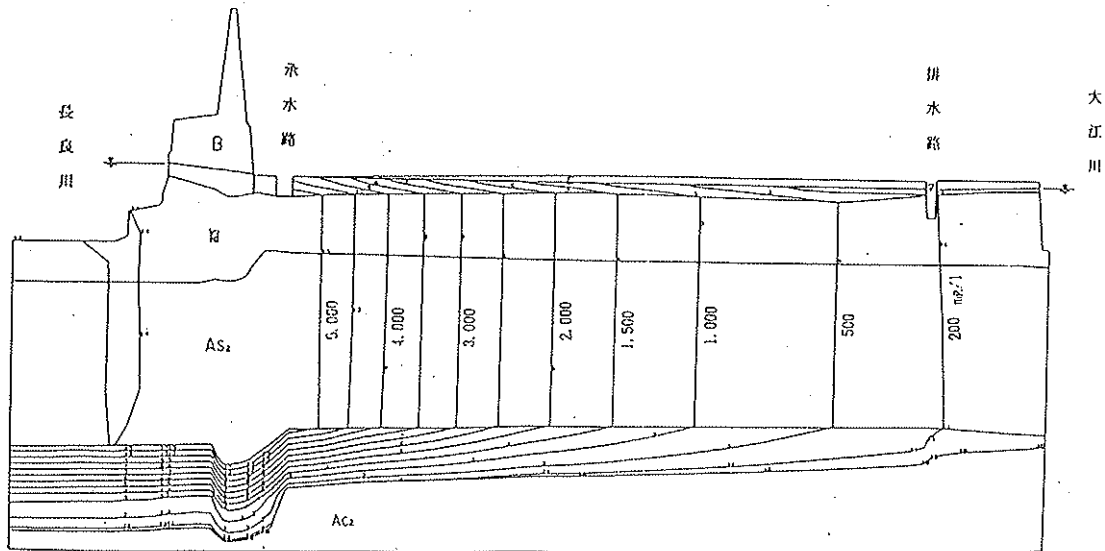


図3・4-13b 地下水の塩水化の数値解析結果
 (16km付近における浚渫後10年経過時の $C l^{-}$ 濃度)
 確認された「水みち」のみを考慮した場合

4. 塩水遡上による影響

2、3の解析をもとに何ら対策を行わずに長良川を浚渫した場合に予測される塩水による影響は次のとおりである。

1) 取水障害

北伊勢工業用水が取水できなくなり、約60社、約70工場に影響がでて、広く経済活動に影響が生じるとともに、数万人の従業員の生活に影響を与える。

長良川用水が取水できなくなり、約3,000ha、約2,600戸の農業に影響を与える。

2) 地下水の利用困難

高須輪中の大江川より東の約1,600haの地域の地下水が塩分で汚染され、多数の井戸に塩水が侵入し、使用不能となる。

3) 農業被害

長良川用水の取水が困難になるとともに、地下水及び土壌の塩分化により、農地としての使用に影響がでる。

4) 土地利用の制約

土壌の塩分濃度が増加して、土地利用等に支障を与え、将来の地域の発展の可能性を大幅に制約することにつながる。

5) 浚渫により塩害が発生した先例

利根川では昭和22年のカスリン台風を始めとして、昭和20年代前半にたて続けに大きな洪水に見舞われた。このため、利根川下流部においては河道の断面積を拡大させるために昭和20年代後半から大規模な浚渫が行われた。この結果、洪水に対する安全性は増したものの昭和33年に甚大な塩害が発生することとなった。利根川下流部における聞き取りによれば、水稻の苗の消失、河川水が高塩分化したことから取水をできなくなったための干害、塩害により約30,000haの水田に被害が発生、また歯科医における医療機器の錆、豆腐屋で豆腐が固まらないための生産の支障、水道水の異味（特に茶、コーヒーなど）、住民の高血圧の心配等が報告されており、また、住民が早急に塩害対策を強く求める等、極めて重大な社会問題となった。このため、その対策として、利根川下流に利根川河口堰が建設されている。

〔参考文献〕

1. 「河川工学」吉川秀夫 昭和41年 朝倉書店
2. 「A MATHEMATICAL MODEL FOR THE PREDICTION OF UNSTEADY SALINITY INTRUSION IN ESTUARIES」M. L. THATCHER, D. R. F. HARLEMAN M. I. T. No. 144 1972・2
3. 「塩水くさびに関する大型水路実験による二・三の考察」須賀、高橋
土木学会第26回年次学術講演会
4. 「非定常浸透流における塩分拡散の有限要素解析」河野、西垣、田中
第17回土質工学研究発表会講演集 昭和57年

第5章 対策の比較

1. 河口堰の建設

この案は、長良川の河口部に潮止めのための堰を建設する案である（図3・5-1）。

河口堰を建設し、塩水遡上を防止することによって、大規模浚渫が可能となり、洪水疎通能力が増大する。なお、塩水遡上の恐れのない洪水時は、ゲートを全開する。

また、河口堰を建設することにより、河口堰上流域は淡水となり、本地域の発展の基となる水資源の開発が可能となる。

なお、このような潮止め機能を有する施設は全国109の1級水系において、すでに53ヶ所に建設されている。

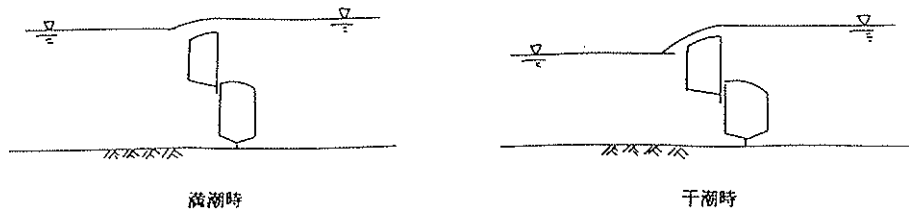


図3・5-1 河口堰案

2. マウンドを残す案

この案は、現在の塩水の遡上がマウンドでほぼ止まっていることから、このマウンド部分を残そうという案である（図3・5-2）。

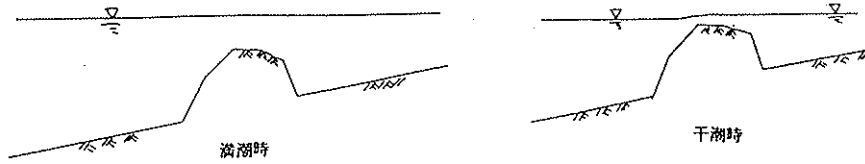


図3・5-2 マウンドを残す案

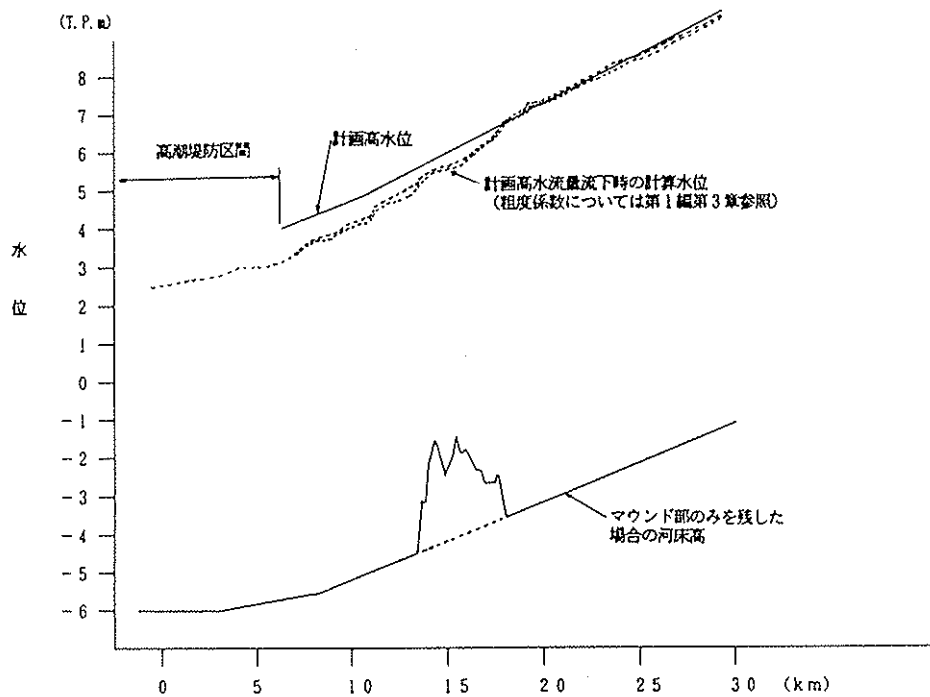


図3・5-3 マウンドを残した場合の水位縦断面図（7,500 m^3/s 流下時）

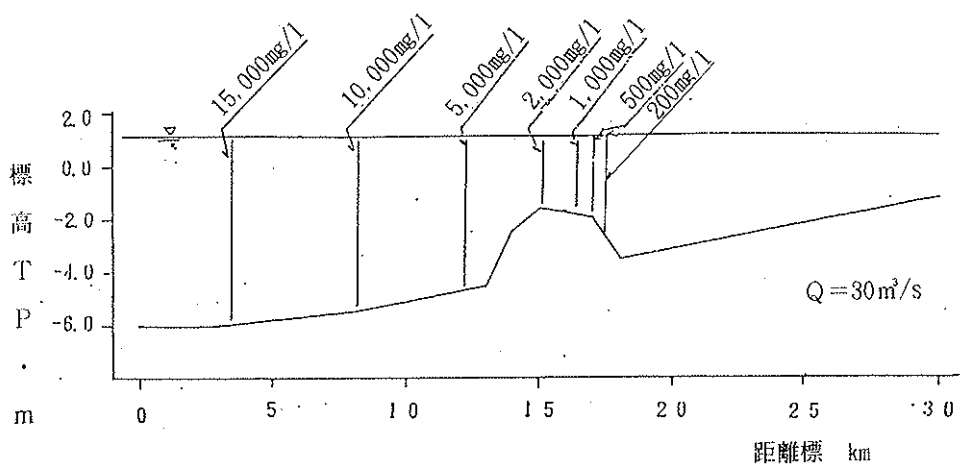


図3-5-4 マウンドを残す案における強混合時の塩水遡上予測

この案は、マウンドのない場合に比べて洪水時の水位が上昇し、計画高水位を越える箇所が出現すると考えられ計画高水流量を流下させることは困難である（図3-5-3）。また、流れが乱れて堤防に負担をかけ危険となる。このようにマウンド前後が治水上の弱点となるため採用できない。

また、マウンドの構成材料がルーズな細砂及び中砂から成っているため、仮にマウンドだけを残しても、流水の浸食作用によってマウンドは変形し、河床高を維持することは難しいと推定され、将来にわたっての安定維持が困難である。さらに、浚渫によりマウンド下流の水深が深くなるために、強混合時の場合には、 Cl^- 濃度200mg/l でみると 18km 付近まで塩水が遡上する。従って、マウンドを残しても塩水の遡上を防止できない（図3-5-4）。また、マウンドの上流に遡上した塩水が、マウンドの上流側で底層に蓄積され、底層部分が嫌気性となり水質環境が悪化する恐れがある。

なお、この案では河口堰の建設により開発する計画の新規利水の確保ができない。

3. 潜り堰（転倒堰等）を建設する案

この案は、現在の塩水の遡上がマウンドでほぼ止まっていることから、このマウンドの高さ程度の潜り堰（転倒堰等）をマウンドのある位置に建設しようとする案である（図3-5-5）。

潜り堰は、干潮時にも常に越流の状態で堰下流へ水が流れる必要があるが、このためには潜り堰の天端高は大潮時の干潮位程度のTP、 -1m としなければならない。この場合、強混合時には Cl^- 濃度200mg/l でみると、20km付近まで塩水が遡上する（図3-5-6）。従って、潜り堰（転倒堰等）では塩水の遡上を防止できず、塩水の遡上を完全に止めるには、天端高は水面以上（朔望平均満潮位+余裕高）の堰が必要となる。すなわち、これは実質的に河口堰を建設することと同じ事となる。

なお、この案では河口堰の建設により開発する計画の新規利水の確保ができない。

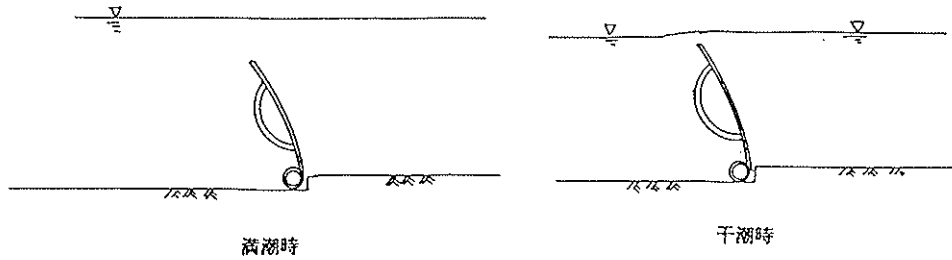


図3-5-5 潜り堰（転倒堰等）案

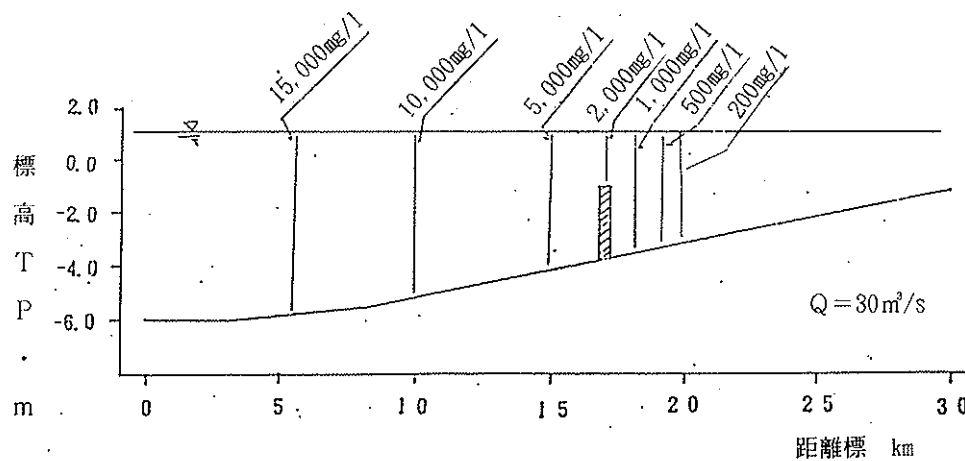


図3-5-6 潜り堰（転倒堰等）案における強混合時の塩水遡上予測

4. 取水施設を上流に移設する案

この案は、浚渫による塩水遡上域の増大によって取水できなくなる取水口を上流に移設しようとするものである。

長良川の下流部には、既設の取水口として合計約 $13 \text{ m}^3/\text{s}$ の水利権がある。これらの取水を塩水が遡上しない上流に移設するには、最小流量時でかつ塩水が最も上流まで遡上する小潮満潮位の場合でも塩水の影響がない位置に取水施設を設ける必要があり、 35 km より上流に移さなければならない。この付近の河道状況を見ると平常時の水深は 50 cm 程度しかなく、安定して取水するためには木曾川大堰と同等の取水堰の建設が必要となる。さらに、既存の施設へ結ぶ導水路の建設が必要である。

これらに必要な費用は、取水堰の建設費と新たな取水口から既設導水路までの導水路の建設費のみでも、現在の長良川河口堰の事業費を上回る。

さらに、浚渫及び取水堰から下流での流量の減少による塩水遡上域の増大の結果、高須輪中の約 1,600haの地域の地下水が塩水化する等、長良川及びその周辺の陸水環境は悪化する。これを潮止め堰によらずに抑えるためには、大量の河川流量が必要となるが、長良川の流況ではこのような水量を確保することはできない。地下水は、一旦塩水により汚染されるとその影響を脱するのに極めて長年月を必要とする。地下水は後世に引き継ぐべき貴重な資源であり、これを人為的に塩分で汚染することは避けなければならない。

これら陸水環境の悪化のうち、仮に、水田等の耕作をなんとか成り立たせるために必要な除塩用水や現在使用されている井戸の代替水源を確保するだけでも、ダム等水資源開発施設を建設して、水供給しなければならない。これを確保するためには、上流に大規模なダムを建設して流量を調整する必要があるが、現在のところ、治水用のダムの建設についても具体化していない長良川では、早期にこれを具体化することは困難であり、また、仮にダム等水資源開発施設の建設が可能であったとしても、その費用は膨大となり現実的ではない。

また、堤内地への塩水侵入を、矢板等を不透水層（下部粘性土層）まで打ち込むことによって防止することは、堤内地の地下水流動を遮断することとなり、陸水環境を悪化させるため、25kmにも及ぶ長大な区間では採用できない。

なお、この案では河口堰の建設により開発する計画の新規の水資源開発はできない。

5. 淡水（アオ）取水による案

かつて長良川下流部では、地先取水が淡水（アオ）取水等により行われていたが、地盤沈下等による河川水の Cl^- 濃度の増大に伴い取水が困難となり、一部は深層地下水に水源転換され、これによりさらに地盤沈下が進行し、多大な費用と労苦をかけて河川上流部の塩水の影響を受けない水源に転換を余儀なくされた経過がある。

淡水取水は満潮時に塩水によって押し上げられた表層の淡水（アオ）を取水する方法であり、1日に2回の満潮時の限定された時間内に必要な水量を取水しなくてはならないので、取水時間に制約のある取水である。従って、限られた時間の間に必要な量の水を取水するため、取水流量は通常に比べ数倍になる。また、取水時間も自由にならないため、夜間の取水となることがあるなど労苦の多い取水である。このため、近年の農業水利の合理化の対象となっており、淡水取水で有名な筑後川下流域でも上流に建設された筑後大堰からの取水に転換されつつある。

また、長良川における塩水遡上は弱混合時でも表層まで塩水が混じっており、限られた深さで限られた時間しか、塩分濃度の低い水（アオ）を取水することができない。

なお、長良川では福原輪中で現在も淡水取水が実施されているが、水田面積が 3ha しかなく、水利権量は普通期最大 $0.065\text{m}^3/\text{s}$ の時間取水で非常に少量である。実際の取水は 5 ～ 7 日間隔に 2 ～ 4 時間に集中して行われている。

淡水取水を長良川の既得用水で実施しようとしても、高須輪中の長良川用水は取水量が約 $10\text{ m}^3/\text{s}$ 近くにも及ぶため、仮に潮位の高い時の 1 日に 8 時間取水できたと仮定しても、8 時間で 1 日分を取水するためには取水流量は 3 倍となり長良川の濁水流量（約 $30\text{ m}^3/\text{s}$ ）と同程度になる。淡水取水はすぐ近くにある塩水を混入しないように細心の注意を払いながら行う取水であり、もともと河川流量に比べて取水量が少ない時にのみ可能な方法である。取水量が河川流量全量に相当する場合には、必ず高塩分濃度の塩水を混入して取水することとなり、このような取水は不可能である。

また、仮に取水ができたとしても、取水した水を一時的に貯留しておくために、貴重な農地を潰して貯留施設を設けるが必要になる。さらに、この取水管理に必要な人的体制を確保することは、昼夜を分かたず満潮時間に取水施設を操作する必要があるので、農民にこれまで必要なかった多大な負担を新たに強いることとなり、極めて現実的でない。

他方、工業用水は許容塩分濃度が小さいため淡水取水は不可能であり、また、連続して取水することを前提として施設が設計されており、仮に、淡水取水をするとして設計すると、大規模な貯留施設が必要になる。

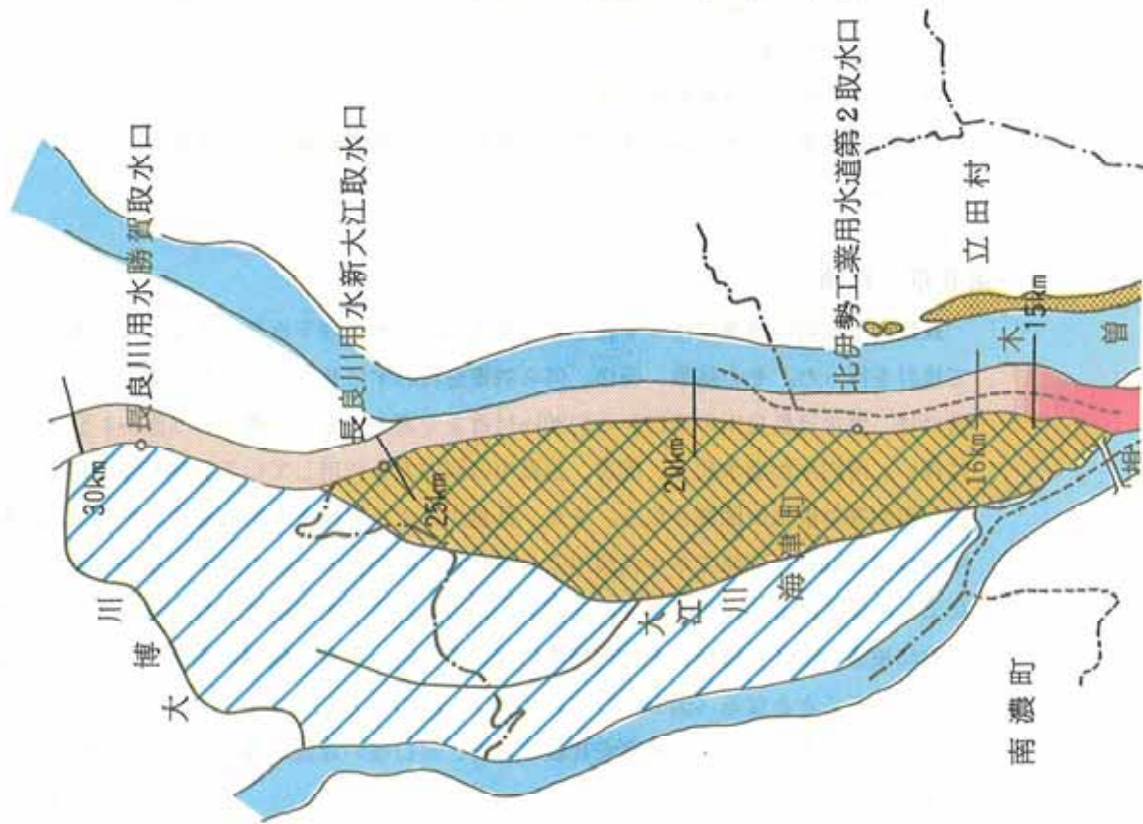
以上のことから、淡水取水は極めて現実的でない。

なお、この案では河口堰の建設により開発する計画の新規利水の確保ができない。

第 6 章 結論

長良川下流部の浚渫に伴って発生する塩水の河川水、地下水及び土壌への影響について検討を行った。その結果、仮に、何ら対策を行わずに長良川下流部の浚渫を行った場合には、塩水は長良川の河口から約 30km 付近まで遡上すると予測され（図 3・4-5）、これに伴い、河川水が塩水化し、現在、長良川の河川水を利用している北伊勢工業用水、長良川用水等の取水が困難となる。また、長良川によって地下水が涵養されている高須輪中のほぼ 25km より下流でかつ大江川より東の約 1,600ha の地域の地下水及び土壌が塩分により汚染されることが予測され（図 3・4-13a）、地下水が利用できなくなるとともに農作物に被害が生じるほか、土地利用等に支障を与え、将来の地域の発展の可能性を大幅に制約することとなる（図 3・6-1）。

また、塩水遡上の防止対策案を比較すると、河口堰の建設が最も効果的、合理的かつ現実的な方法である。



凡 例

- 長良川において現在塩水が遡上している区間
- 長良川において浚渫によって新たに塩水が遡上する区間
- 農作物被害が発生したことのある区域
- 長良川用水の受益地 (約 3,000ha)
- 浚渫により新たに地下水が塩水化する可能性のある地域 (約 1,600ha)

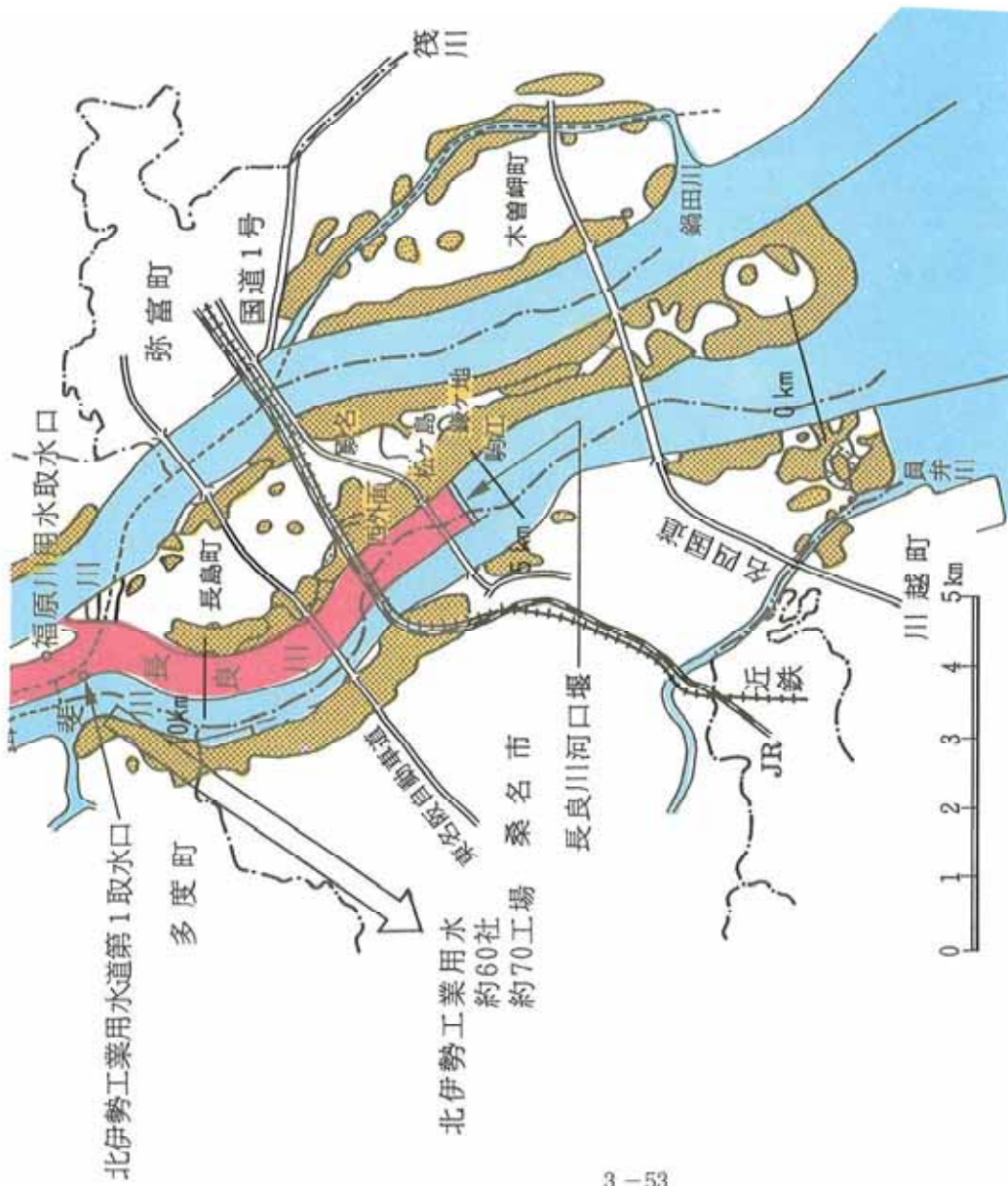


図3・6-1 長良川及びその周辺地域における浚渫による塩水の影響