

水質・水温を利用した上大須ダム 初期湛水時地下水流動調査

塩崎 功¹・村上晃生²・谷口博幸²・川上康博³・今井 久⁴

¹正会員 工博 財団法人電力中央研究所 我孫子研究所(間組より出向中)(〒270-11 千葉県我孫子市我孫子 1646)

²中部電力株式会社 土木建築部 揚水調査グループ(〒461-91 名古屋市東区東新町1番地)

³正会員 中部電力株式会社 土木建築部 水力開発グループ(〒461-91 名古屋市東区東新町1番地)

⁴正会員 工修 株式会社間組 技術研究所(〒305 茨城県つくば市荻間字西向 515-1)

上大須ダム基礎岩盤の透水性を評価するために、初期湛水時に漏水の水質・水温調査を実施した。イオン濃度の時間変化から推定される漏水観測堰や監査廊内湧水への調整池水の流下時間は2~20ヶ月となった。イオン濃度の時間変化、および水温の実測データと熱の移流拡散解析から求めた河床漏水への調整池水の流下時間は、いずれも4~9ヶ月であり、設計値を入力データとした非定常浸透流解析により計算された河床漏水への流下時間2~10ヶ月にほぼ一致した。本調査の結果、地下水の温度変化から流動速度を推定する方法は、計測が簡便であり、漏水の評価手法のひとつとして活用できることが示された。

Key Words: dam, rock, grouting, seepage water, water quality, water temperature, travel time

1. はじめに

一般に、フィルダムは天然の土質・岩石材料を用いて建設されるため、堤体材料の物理特性のばらつきはコンクリート材料に比べて大きい。また、フィルダムが建設される基礎岩盤はコンクリートダムに比べて強度が低いことが多く、ダムの遮水機能を確保するために入念な基礎処理およびダム完成後の十分な計測・監視が必要とされる。

本報告では、ロックフィルダムである上大須ダムの初期湛水時に基礎岩盤の健全性評価に資することを目的として実施した漏水の水質・水温の調査結果について述べる。さらに、それらのデータを非定常浸透流解析および熱の移流拡散解析結果と比較することにより、ダム基礎岩盤のマクロな透水性を評価したものである。

2. 調査地域の概要

奥美濃水力発電所は、岐阜県の西部、福井県との県境近く、岐阜市の北方約40kmにおいて建設された出力150万kwの純揚水式発電所である。上部調整池は、木曾川水系板取川の最上流、西ヶ洞谷川に建設されたドーム型アーチ式コンクリートダムの川浦(かおれ)ダムおよび重力式コンクリートダムである鞍部ダム、下部調整池は、根尾東谷川の最上流部に建設されたソ

表-1 ダムおよび調整池の諸元

ダム		上大須ダム
形	式	中央遮水型ロックフィルダム
堤	高	98.0m
堤	頂長	294.5m
堤	体積	3,150,000 m ³
調 整 池	流 域 面 積	12.0 km ²
	総 貯 水 容 量	14,500,000 m ³
	常 時 滴 水 位	EL. 516.0 m
	低 水 位	EL. 493.0 m
	利 用 水 深	23.0 m

ーン型ロックフィルダムの上大須(かみおおす)ダムから構成される。上部調整池における調査については塩崎ほか¹⁾が報告している。

本報告で対象とする上大須ダムの諸元および地質概要を表-1に示し、標準断面図を図-1に示す。

上大須ダム周辺の基礎岩盤は美濃帯に属する中生代ジュラ紀の左門岳累層であり、砂岩、頁岩およびその互層より構成される。ダムサイトの地質構造の特徴を以下に述べる²⁾。

①ほぼダム軸に平行する方向の軸を持つ波長数10mの褶曲と方向はやや異なる波長数 m の小褶曲をもつ褶曲構造である。

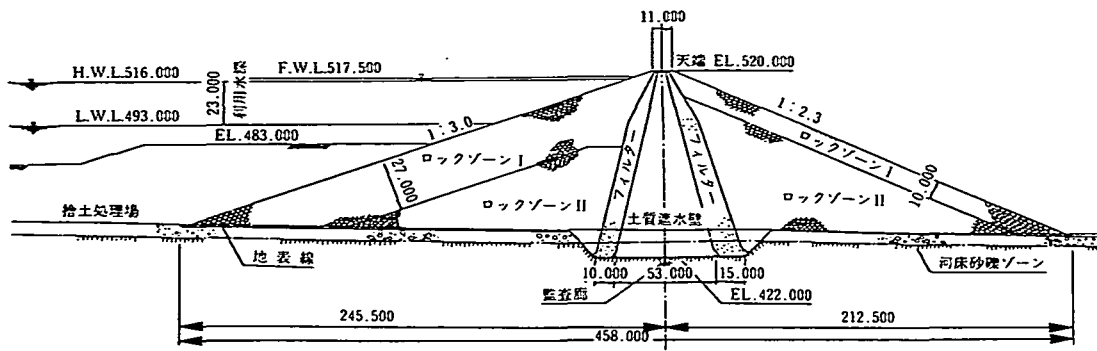


図-1 上大須ダム標準断面図

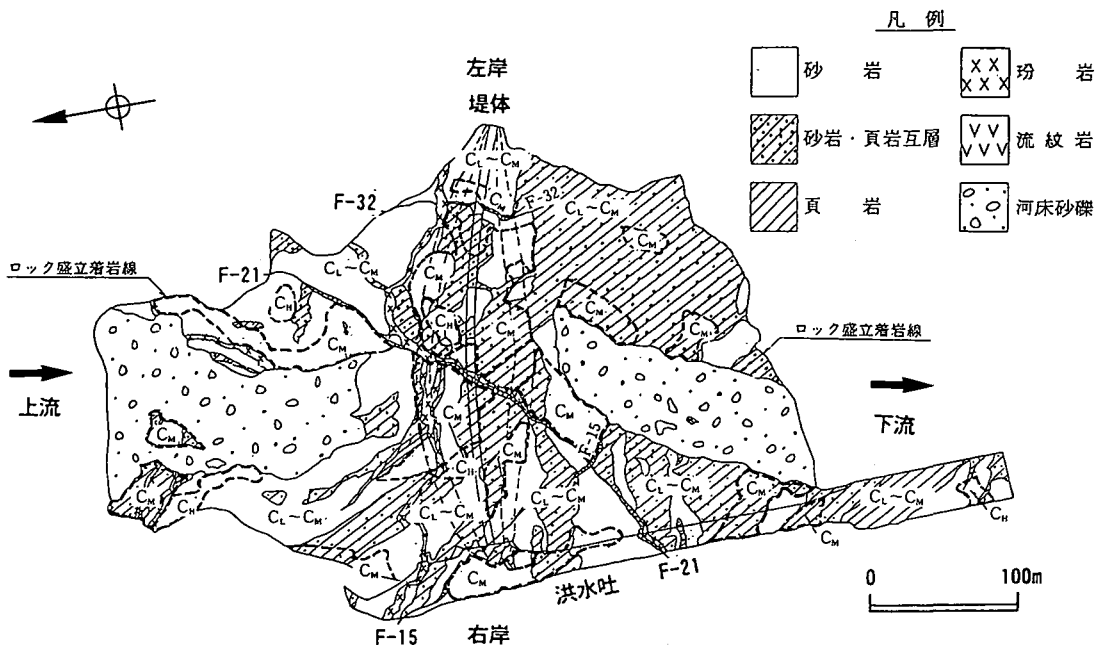


図-2 ダムサイトの地質および岩盤等級分類平面図

②この褶曲構造を切るダム軸には3つの顕著な破碎帯 (F-15, F-21, F-32) が存在する。F-15は右岸洪水吐越流部に、F-21は河床部に、F-32は左岸の標高485m 付近で現れる。

③上下流方向に貫入する流紋岩とダム軸方向に貫入するヒン岩の2種類の岩脈がある。

④ダム軸付近を構成する岩石は、主として塊状の砂岩よりなるが、砂岩・頁岩の互層は右岸側で洪水吐越流部、河床部、左岸側では EL.490m 付近から低い標高部にダム軸に沿うように分布している。

岩盤等級は、コア基礎部では CM 級を主体として一部 CL 級から CM 級があり、深部に至るほど新鮮堅硬

となり、破碎帯、シーム箇所を除けば大部分が CH 級以上である。ダムサイトの地質および岩盤等級分類平面図を図-2に示す。

3. 水質調査

(1) 調査場所

水質調査は、上大須調整池水、調整池内への流入河川水、ダム周辺沢水、溺堤 (基礎岩盤上に設置された漏水の集水堰: 河床部 EL.452m, 右岸 EL.455m, 右岸 EL.493m, 左岸 EL.452m, 左岸 EL.493m, F-15断層, F-21断層)、監査廊内水量水圧計からの湧水 (河床部:

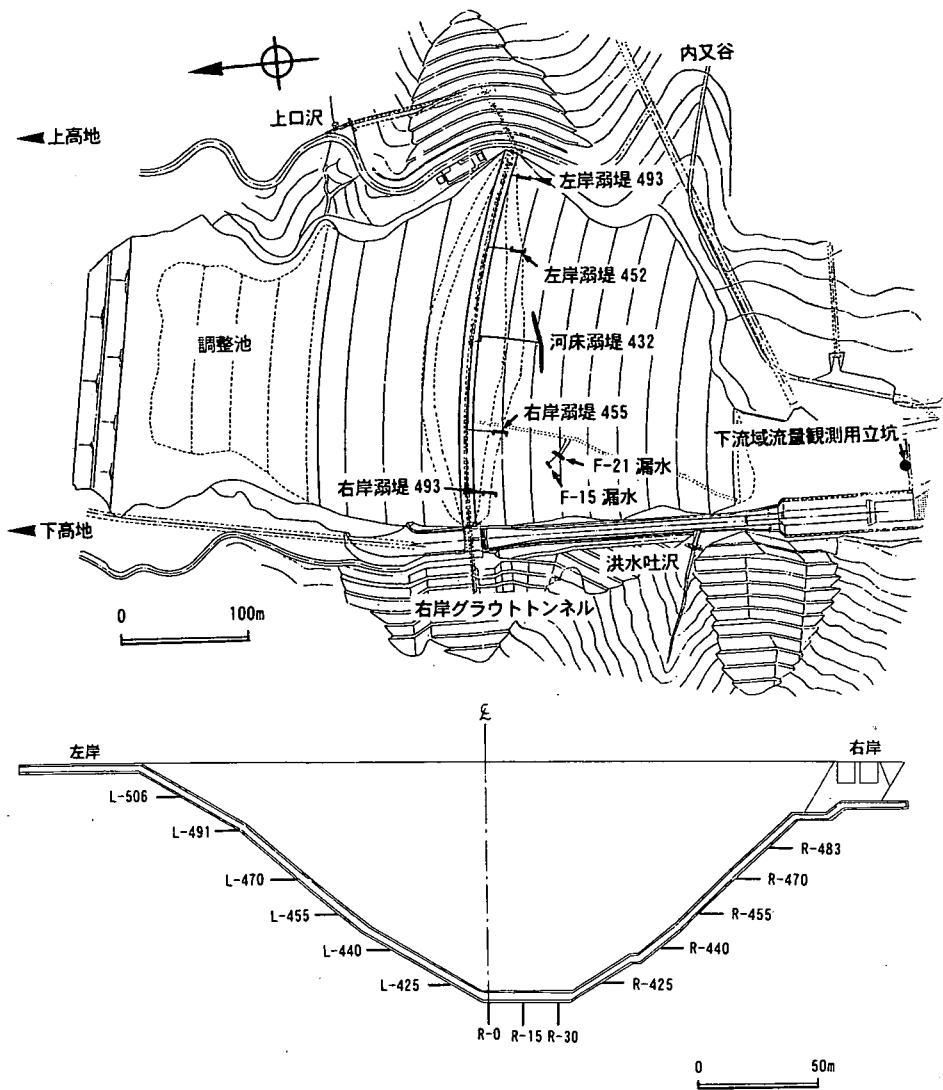


図-3 上大須ダム採水地点位置図

R-0, R-15, 右岸部：R-425, R-440, R-455, R-470, R-483, 左岸部：L-425, L-440, L-470, L-491), 下流立坑, および上大須ダム管理所において1ヶ月毎に採水された降水を対象とした。採水地点を図-3に示す。

(2) 調査項目

調査項目は、pH、電気伝導度、水温、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、 NO_3^- 、ラドン、トリチウム、酸素-18 (^{18}O)、重水素である。

(3) 調査期間

上大須ダムは、1993年10月1日に試験湛水を開始し、1994年10月に満水位を迎えている。水質調査は、湛水

前の1993年8月から開始され、1995年10月までの約2年間実施された。

4. 調査結果

調査期間中における降水量、貯水位、気温、漏水温度、漏水量の時間変化を図-4に示す。また、ラドン濃度、pH、電気伝導度、硝酸イオン濃度の時間変化をそれぞれ図-5～図-8に示し、主な採水地点のイオン濃度の時間変化をヘキサダイアグラムで表示したものを図-9に示す。図-4～図-9より、本ダム周辺の地下水流動に関して以下の事項が示される。

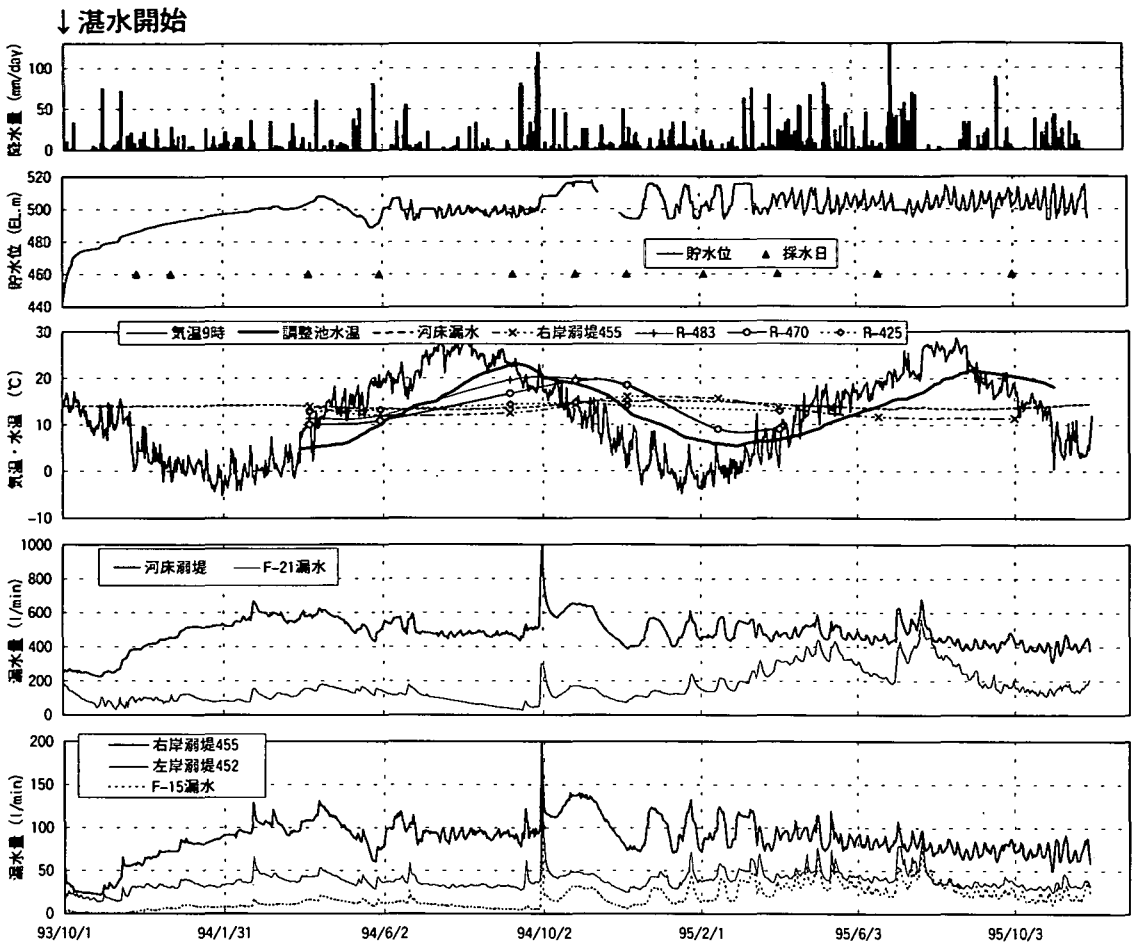


図-4 降水量，貯水位，気温，漏水温度，漏水量の時間変化

(1) 漏水量

図-4に示すように、漏水量は河床漏堤が最も多く、500 l/min 前後で推移している。ロックフィルダムで良く見られるように、漏水量は降水や融雪の影響を受けて増減する。図-3に示す EL.493m の漏堤は高標高部に位置するため、降雨の後で毎分数リットル程度の湧水が一時的に認められる程度で湛水による影響は見られない。

(2) ラドン濃度

図-5に示すラドン濃度の時間変化を見ると、上大須ダム周辺の地下水のラドン濃度は数10Bq/l であり、川浦ダム周辺のラドン濃度¹⁾(概ね50~100Bq/l)よりは濃度が低い。砂岩・頁岩からなる鞍部ダム下流ボーリング孔地下水のラドン濃度は上大須ダムと同レベルであり、このラドン濃度の場所的な差は、流紋岩と砂岩・頁岩のラドン放出率の差が原因であると考えられる。

上大須ダムにおいてもラドン濃度の急減は認められず、ラドンで検出可能なレベルでの流速の増加は生じていないと考えられる。

(3) 水温

川浦ダムでは、取水口より下に温度躍層が形成され、河床部の水温が年間を通じて約7~8℃と低くかつ一定温度を保っている。上大須ダムは、放水口(EL.479.0m)より河床(EL.473m)までの深度が浅いために温度躍層は形成されず、図-4に示すように調整池水温は気温変動から一定の時間遅れを持って変化する。さらに、下流漏水の温度も調整池水温変動からさらに時間遅れを持って変化する。

(4) pH

pHは、図-6に示すように、調整池水、河川水で概ね6~8の間にある。監査廊内湧水のpHは7~11の

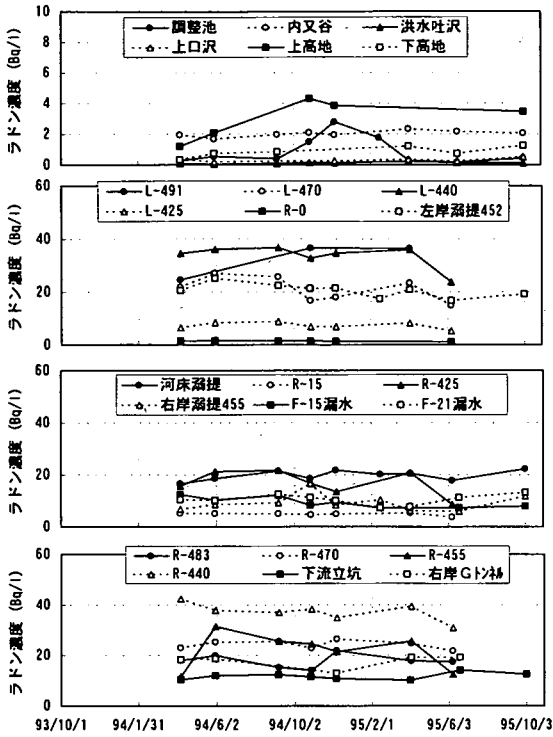


図-5 ラドン濃度の時間変化

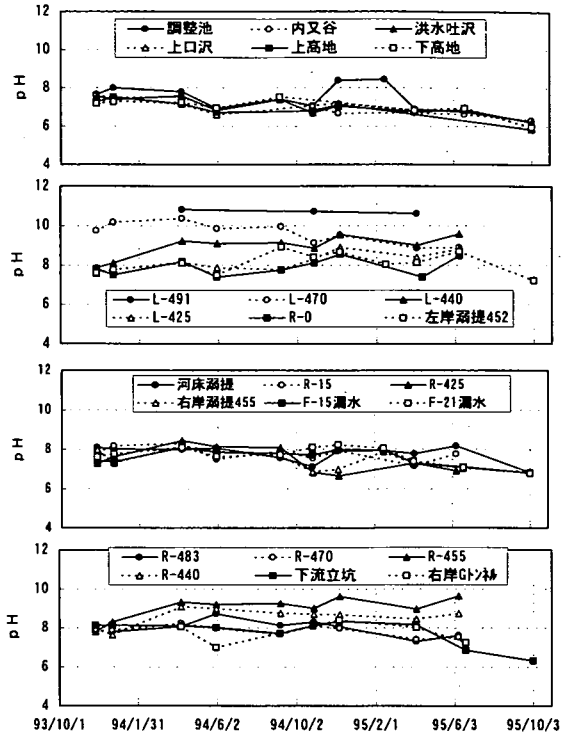


図-6 pHの時間変化

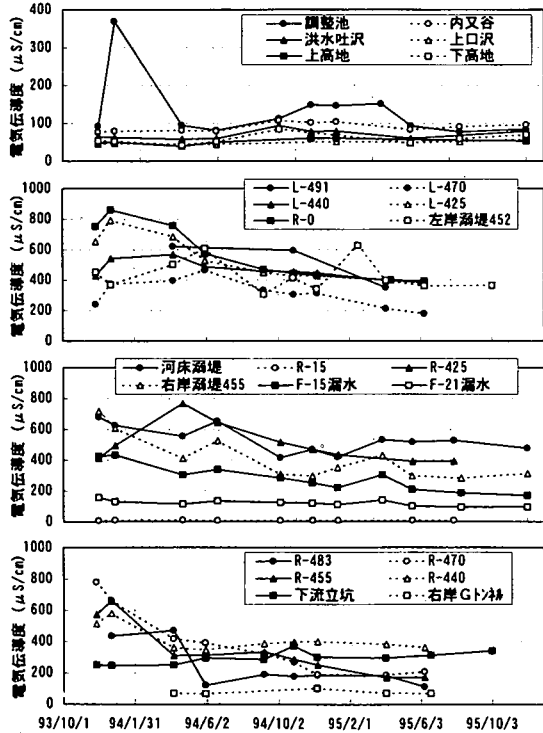


図-7 電気伝導度の時間変化

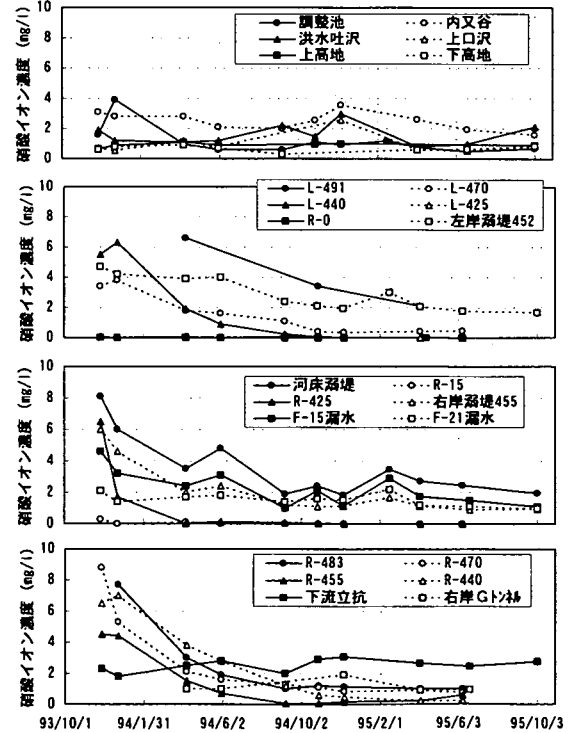


図-8 硝酸イオン濃度の時間変化

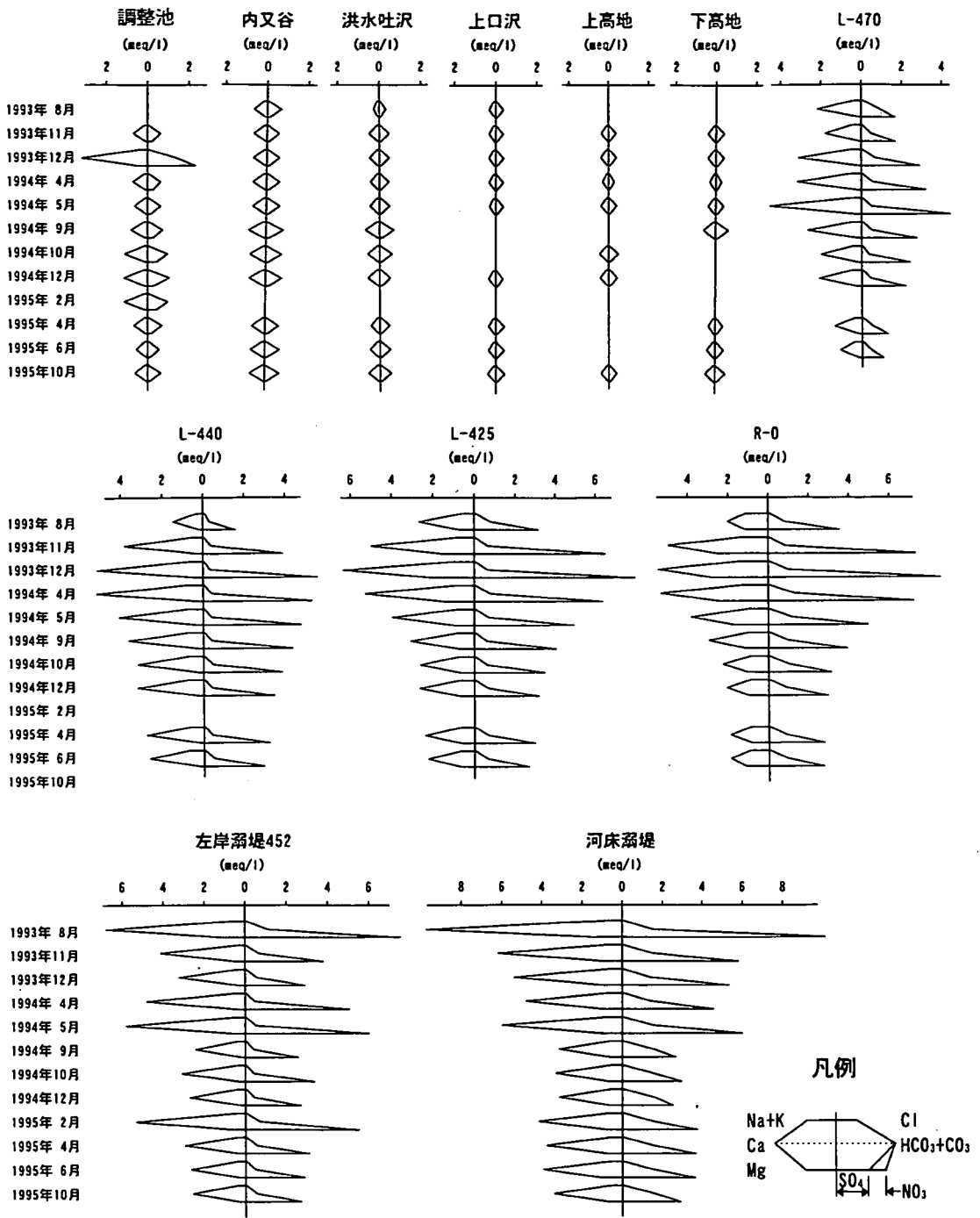


図-9(1) イオン濃度のヘキサダイアグラム

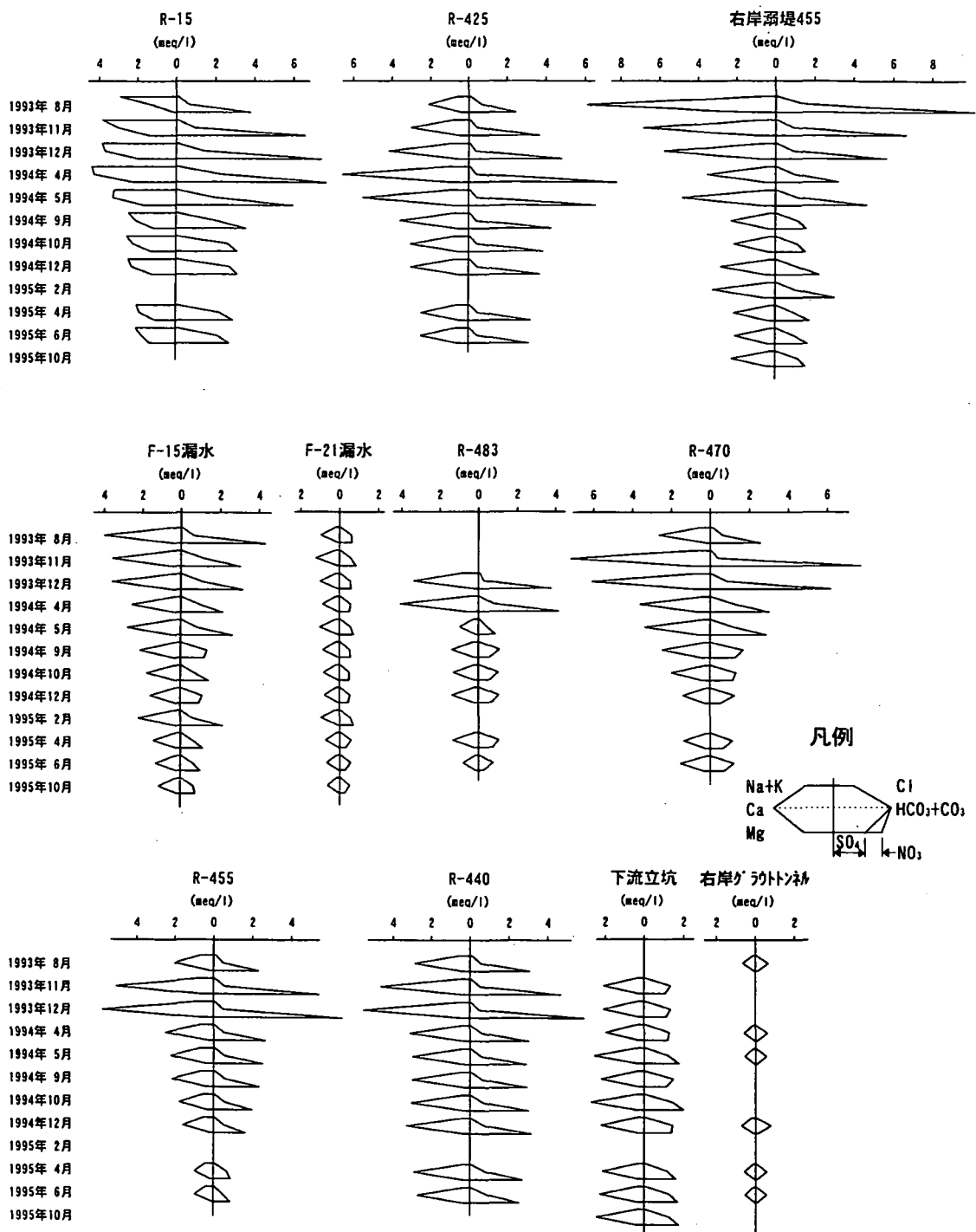
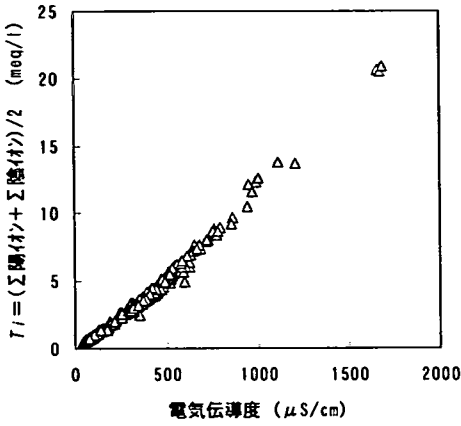
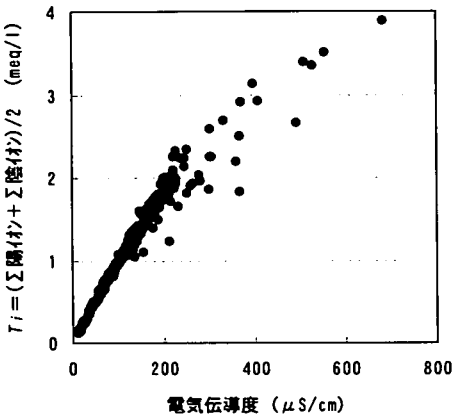


図-9(2) イオン濃度のヘキサダイアグラム



(a) 上大須ダム



(b) 川浦ダム

図-10 イオン濃度の当量と電気伝導度の関係

範囲にあり、川浦ダムよりは高アルカリの湧水が少ない。これは、上大須ダム基礎岩盤を通過する浸透流量が川浦ダムよりも多いために、グラウチングによる影響が早期に消散したことを示している。

(5) 電気伝導度

図-7に示す電気伝導度の時間変化を見ると、監査廊内湧水の電気伝導度が低下している。これは、湛水により電気伝導度の低い調整池水が混入したことが原因である。

図-10は、上大須ダムおよび川浦ダムの電気伝導度 EC と $Ti = (\text{陽イオン当量} + \text{陰イオン当量}) / 2$ (単位: meq/l) との関係を示したものである。川浦ダム監査廊内湧水は、グラウチングの影響を受けた高アルカリの水が多く、炭酸物質に占める CO_3^{2-} の割合が大きいために、 HCO_3^- と CO_3^{2-} の当量伝導度 (イオン濃度 1 meq/l 当たりの電気伝導度) の差によって図-10(b) のようなばらつきが生じていると考えられる¹⁾。しか

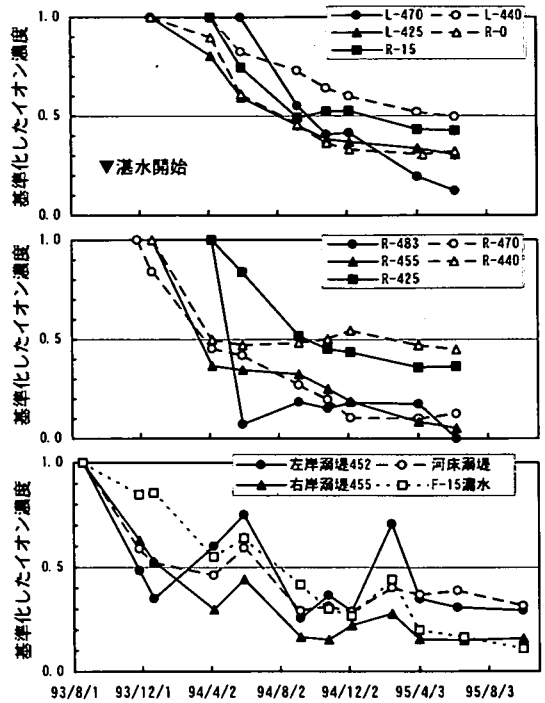


図-11 標準化したイオン濃度の時間変化

し、図-10(a)に示すように上大須ダムでは高濃度領域まで相関性が高い。これは、上大須ダム漏水のpHが川浦ダムよりは中性に近いために、炭酸物質に占める当量伝導度の大きな CO_3^{2-} の割合が少ないことが原因であると推察される。

(6) イオン濃度

図-8示す硝酸イオン濃度の時間変化、および図-9に示すヘキサダイアグラムより、湛水時の地下水流動について以下の事項が示される。

a) 上大須調整池

湛水開始初期に一時的に高濃度のイオンが検出されたが、1994年春よりイオン濃度はほぼ一定になり、川浦調整池同様炭酸カルシウム型の水質となっている。また、調整池内の硝酸イオン濃度の変化も川浦ダムと同じで、湛水初期に高濃度の NO_3^- が検出されたが、湛水による希釈効果により時間とともに減少している。

b) 監査廊内水量水圧計湧水

上大須ダムにおいても、川浦ダムと同様な手法²⁾を用いて調整池水の流下時間を試算した。その手順を以下に示す。

①それぞれの観測地点のイオン濃度を、 $Ti = [(\text{陽イオン当量} + \text{陰イオン当量}) / 2]$ (単位: meq/l) に換算する。

表-2 イオン濃度の変化から推定された調整池水の
流下時間

観測地点	観測地点の標高 (EL.m)	貯水位が観測地点の標高に達した時期	平均的な調整池水の流下時間(month)	HWL時の 監査廊内湧水量 (l/min)
左岸溺堤 452	452	93/10/3	2~10	43
河床溺堤 432	432	93/10/1	4~9	570
右岸溺堤 455	455	93/10/4	2	120
L-470	470	93/10/10	12	11
L-440	440	93/10/1	20	5.2
L-425	425	93/10/1	10	17
R-0	419	93/10/1	10	16
R-15	419	93/10/1	11~15	21
R-425	425	93/10/1	12	18
R-440	440	93/10/1	6~16	23
R-455	455	93/10/4	6	1.8
R-470	470	93/10/10	6	120
R-483	483	93/11/15	7	366
F-15漏水	458	93/10/4	10	30

②イオン濃度の最大値が1, 調整池の濃度が0となるように基準化したイオン濃度 $C_i = (T_i - T_{iR}) / (T_{imax} - T_{iR})$ を求める。ここで, T_{imax} : 監査廊内湧水のイオン濃度 T_i の最大値 (meq/l), T_{iR} : 調整池水のイオン濃度 T_i の平均値 (meq/l) である。

この結果, 図-11に示すような基準化したイオン濃度の時間変化が求められる。グラウチングにより処理された岩盤を多孔体として取り扱うことができると仮定すれば, 貯水位が採水地点の標高より高くなった時から基準化したイオン濃度が0.5となるまでの時間を, 平均的な調整池水の流下時間を表す1つの指標とみなすことができる。このようにして求められた各観測地点での平均的な流下時間を表-2に示す。

表-2より, 上大須ダム下流への調整池水の流下時間は2~20ヶ月であることが示される。川浦ダムでは, アーチダムであるために調整池から湧水地点までの流動距離が短いにもかかわらず流下時間は7~20ヶ月であった。上大須ダムでは流動距離が長いにもかかわらずそれより若干短い流下時間となっている。

これは, 基礎岩盤の透水性の差およびグラウチング工の改良目標値の差によるものと言える。例えば, カーテングラウチングの改良目標ルジオン値は, 川浦ダムでは85%非超過確率で1ルジオン, 上大須ダムでは5ルジオンとなっている。なお, ルジオン値は, ダム基礎岩盤の透水性を示す指標として広く使用されているもので, ルジオン値 (Lu) は注水圧力10kgf/cm²のもとの試験孔長1m 当たりの毎分の注水量 (l/min) を表したものである。

図-9に示す水質の変化傾向は2つのグループに分類される。

①グループI:

河床溺堤や右岸溺堤455のように, 湛水後調整池水の混入によってイオン濃度が単調に減少している地点。

②グループII

監査廊内水量水圧計湧水に多く見られる傾向であるが, 湛水後高濃度のイオンを含む滞留地下水が押し出されることによりイオン濃度が増加した後, 調整池水の混入によって濃度が低下する地点。

グループIでは, 湛水前から地山湧水からの浸透水が侵入しているために, グループIIで起きている高濃度の地下水の押し出しがすでに終了している可能性がある。

c) 硝酸イオン濃度の変化

川浦ダムでは, 監査廊内湧水の硝酸イオン濃度の時間変化から, 湛水による段階的な地下水の押し出しを伴う流動現象が捉えられた。図-8に示す上大須ダムにおける監査廊内湧水の硝酸イオン濃度は単調に減少しており, 川浦ダムとは異なる濃度変化を示している。これは, 上大須ダムは川浦ダムに比べて基礎岩盤の亀裂が多いために, 流路における分散が大きく, 調整池水に含まれる硝酸イオンが浸透過程で分散してしまったものと考えられる。

R-0, R-15, R-425, L-425は, 河床部付近の低標高部の湧水であり, 硝酸イオンはほとんど検出されていない。これらの湧水は, イオン濃度の時間変化から示される調整池水の流下時間はいずれも10ヶ月以上と長く, 調整池内の硝酸イオンが浸透過程で岩盤への吸着あるいはイオン交換等の化学的な反応によって消滅したものと推定される。

5. 水温データを用いた調整池水の流下時間の計算

地下水の水温データから地下水の流速を求める方法は, Stallman⁹⁾によって示され, 我が国でもその基本式を基にして地下水の流速を求めるための Type Curve の導出⁹⁾や河川周辺での地下水流速の推定⁹⁾が試みられている。しかし, ダム漏水の水温データを用いて地下水の流動速度を評価した例はない。

ダム湛水時には一般の地下水の流動環境に比べて非常に大きな動水勾配が発生し, 地下水の流動速度も大きくなる。したがって, 供給側である調整池水の温度変動が下流側に伝達される可能性も高い。この場合, 水温の伝達速度と減衰率から, 調整池水の流下時間が推定可能となる。以下にその手順を示す。

表-3 水および国内湿潤岩石の密度, 比熱, 熱伝導率, 熱拡散率 (佐藤, 佐々木のデータを整理)

名称	比熱 c $\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}}$	密度 ρ $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	熱伝導率 k $\frac{\text{cal}}{\text{cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}}$	熱拡散率 $\alpha = k/c\rho$ $\frac{\text{cm}^2}{\text{sec}}$
水	1.0	1.0	0.00144	0.00144
花崗岩	0.19~0.22	2.55~2.64	0.0038~0.0059	0.0069~0.0118
玄武岩	0.22	2.44~2.49	0.0041~0.0053	0.0075~0.0100
砂岩	0.27~0.37	2.05~2.21	0.0022~0.0048	0.0033~0.0081
頁岩	0.20~0.23	2.74~2.80	0.0064~0.0075	0.0117~0.0119
凝灰岩	0.23~0.35	1.75~2.27	0.0019~0.0047	0.0033~0.0089
安山岩	0.21~0.22	2.33~2.37	0.0034~0.0052	0.0066~0.0100

水・熱輸送に関する水平一次元熱移流拡散方程式は次式で示される⁹⁾。

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \nu c_0 \rho_0 \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

ここで, $c\rho$ は地盤とその間隙に含まれる水を含めた地層の熱容量, $c_0\rho_0$ は水の熱容量, c は比熱, ρ は密度, k は地盤とその間隙に含まれる水を含めた地層の熱伝導率, ν は水平方向移流フラックス (ダルシー流速) を表す。

$x = 0$ における境界条件を正弦関数 (周期 τ , 振幅 ΔT_0) で与え, 正弦関数によって与えられる温度の平均値を T_A とすると, $x = 0$ から距離 x の地点における任意の時間 t の水温は次式で示される⁹⁾。

$$T = T_A + \Delta T_0 e^{-ax} \sin\left(\frac{2\pi t}{\tau} - bx\right) \quad (2)$$

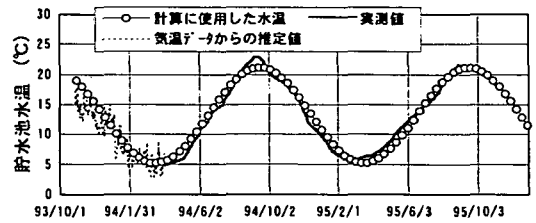
ここで,

$$a = \left\{ \left(K^2 + \frac{V^4}{4} \right)^{1/2} + \frac{V^2}{2} \right\}^{1/2} - V \quad (3)$$

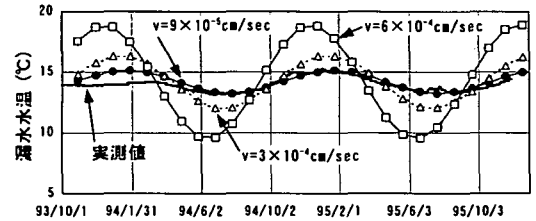
$$b = \left\{ \left(K^2 + \frac{V^4}{4} \right)^{1/2} - \frac{V^2}{2} \right\}^{1/2} \quad (4)$$

$$K = \frac{\pi c \rho}{k \tau} \quad (5)$$

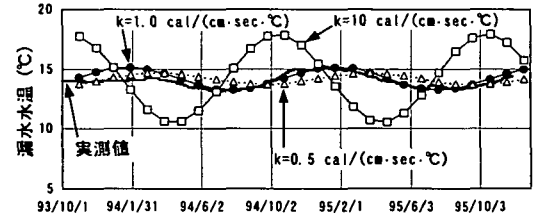
$$V = \frac{\nu c_0 \rho_0}{2k} \quad (6)$$



(a) 調整池水温の実測値と正弦関数による近似値



(b) 流速を変化させた場合 ($k = 1.0 \text{ cal}/(\text{cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C})$)



(c) 熱伝導率を変化させた場合 ($\nu = 9.0 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$)

図-12 河床溺堤を対象にした熱の移流拡散解析結果

式(2)を用いて河床溺堤の水温データをサンプルデータとした計算を行った。計算に必要な水および地層の比熱 c , 密度 ρ の値は, 表-3に示す佐藤・佐々木の実験データを参考にして砂岩および頁岩の平均的な値 ($c = 0.27 \text{ cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$, $\rho = 2.45 \text{ g}/\text{cm}^3$) とした。

調整池からの流路長は, 次章の図-15に示す非常浸透流解析による浸透経路のうち, 河床溺堤で集水される漏水の平均的な流下距離を用いれば約100m となる。以上のデータを用い, ダルシー流速 ν と熱伝導率 k の値を様々に変化させて計算した結果を図-12に示

す。

図-12(a)には、 $x=0$ すなわち調整池における境界条件である周期関数のパラメータ（周期 τ 、振幅 ΔT_0 ）を求めるために、実測値の調整池水温にフィッティングさせた結果を示す。調整池水の基準水温は1994年9月1日から1年間の実測値の平均値（13.2℃）を用い、変動幅8℃、周期365日の正弦関数でほぼ近似できる。

図-12(b)および図-12(c)は、河床溺堤の水温変動を再現するためのパラメータを求めた結果である。ダルシー流速 v が 9.0×10^{-5} cm/sec、熱伝導率 k が1.0 cal/(cm \cdot sec \cdot ℃)の時に河床溺堤の水温変動が再現できている。このとき、河床溺堤の漏水の基準温度は調整池同様1994年9月1日からの1年間の平均値（14.2℃）を用いた。

なお、式(1)は、1次元の熱の移流拡散方程式であり、その解析解をダム浸透現象に適用する際にはモデルの簡略化による誤差を考慮することが必要である。例えば、現象が完全に1次元モデルで再現できるのであれば、河床溺堤の年平均水温は、調整池水の年平均水温に一致するはずである。しかし実際には河床溺堤の年平均水温は調整池水の年平均水温よりも1℃高い。これは、地表面あるいは地下深部からの熱の移流拡散を無視していることに起因する誤差、あるいは計測誤差と考えられる。本論の目的は水温の絶対値を求めることではなく、水温変動から調整池水の流下時間を推定することにあり、この程度の誤差に関する詳細な議論は行わない。

調整池からの流下時間を求めるには、熱的な物性以外に岩盤の間隙率 n 、流下距離 X のデータが必要である。グラウチング施工前の本ダム基礎岩盤の透水係数は、概ね10~20ルジオンであることから、砂岩の透水係数と間隙率との関係を整理したデータ⁹⁾を基に0.10~0.20と設定した。流下距離 X を100mとすると、間隙率が0.10のとき調整池水の流下時間は4.3ヶ月、間隙率が0.20のときは8.6ヶ月となる。これは、イオン濃度の時間変化から求めた流下時間4~9ヶ月にほぼ一致する。

もう一方のパラメータである熱伝導率 k の値は、表-3に示した湿潤岩石の熱伝導率に比べて2オーダー程度大きな値である。通常、岩盤の間隙率は小さいので、地下水の流動が無い場合には表-3に示す岩石の熱伝導率に近い値で熱の拡散現象が記述できる。しかし、今回のように移流が卓越する場合には、式(1)の k は熱伝導だけでなく移流による熱の分散効果も含めた熱伝導率となるために、岩石試料を用いて測定された熱伝導率とは大きく異なる値になる。

物質の移流拡散現象では図-13に示すような分散現象のスケール効果⁹⁾が存在することが知られており、

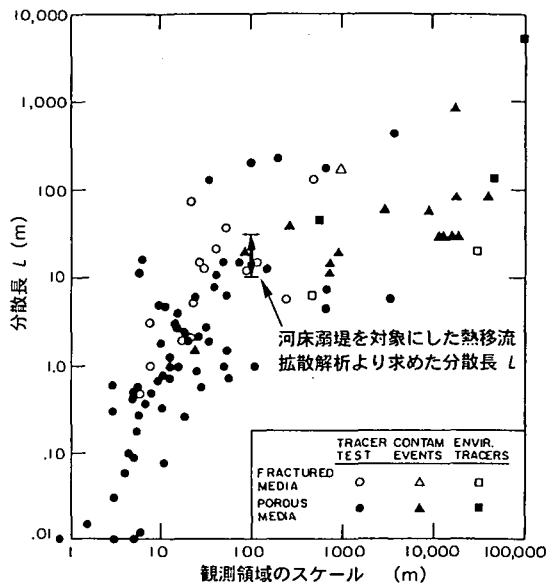


図-13 分散長のスケール効果⁹⁾および本解析から得られる分散長

熱の移流拡散現象においても同様な効果が存在すると考えられる。今回の計算で求められた熱拡散率 α ($\alpha = k / (\rho c)$) と実流速 u ($u = vn$) から分散長 L ($L = \alpha / u$) を計算すると8~33mとなる。これを流下距離の100mに対して図-13にプロットすると、既往のトレーサ試験や地下水汚染実例から求められた実測データの中に包含される。

熱の移流拡散問題は、多くの場合熱伝導が卓越する現象を対象にすることが多く、100m規模の領域を対象にして、水の移流が卓越する場における熱の移流拡散現象を取り扱った例は少ない。通常のダムの漏水監視では、漏水の水温データは調整池水からの浸透水か周辺地山からの浸透水かを判別するための指標として位置付けられているが¹⁰⁾、地下水の流動速度を定量的に把握するために利用された例は筆者らが知る限りは皆無である。今回示した方法は、測定が非常に簡単な水温データを利用するものであり、調整池水温が季節変化を有するダムにおける漏水の評価手法のひとつとして、活用できる。

6. 非定常浸透流解析による調整池水の流下時間の計算

上記のイオン濃度および水温の時間変化から示された調整池水の流下時間と、設計値を使って計算される地下水の流動速度を比較するために、粒子追跡法を併用した非定常浸透流解析を実施した。解析に使用した

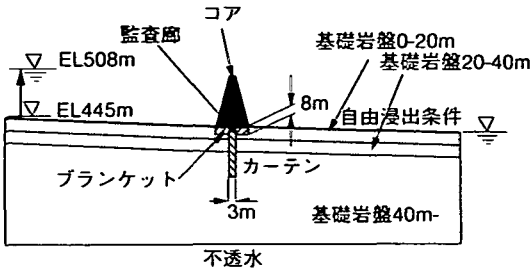


図-14 非定常浸透流解析モデル

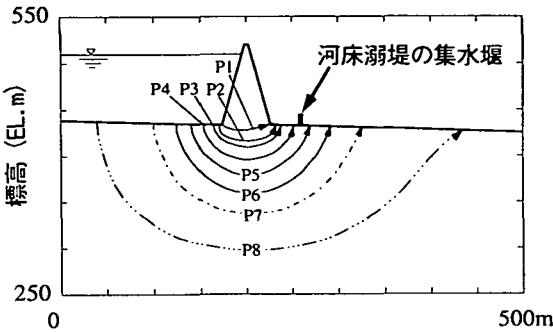


図-15 粒子追跡法による調整池水の浸透経路

水理定数を表-4に示す。透水係数は、奥田ほか¹¹⁾がパイピングに対する安全性ならびにダム漏水量を計算する際に設定した値(ダム建設時の設計値およびボーリング調査による透水試験結果)を採用した。また、基礎岩盤の間隙率は小鯛⁹⁾が整理した砂岩のデータを参考にし、比貯留係数はDomenico and Mifflin¹²⁾を参考にして設定した。解析モデルは、図-14示すようにダムの上流方向の標準断面とし、非定常計算の初期条件には、定常計算により湛水前の地下水分布を再現し、その値を非定常計算の初期値とした。非定常計算では上流側の水位条件に実測の貯水位の時間変化を与えた。

解析の結果得られた地下水の流跡線を図-15に示し、調整池側の流入点から下流流出点までの流下時間を表-5に示す。

河床溺堤の集水堰は、ダムのフィルタ部直下流に設置されており、図-15に示す流線のうちP1~P4の経路を浸透する漏水が集水されていると考えられる。この経路を流れる浸透水の流下時間は表-5より2~10ヶ月となる。

イオン濃度の変化から推定される河床溺堤への調整池水の流下時間、および調整池と漏水の水温データを用いた熱の移流拡散解析結果から求めた流下時間はいずれも4~9ヶ月であり、上記の計算結果にほぼ一致す

表-4 浸透流解析に使用した水理定数

区分	透水係数 (cm/sec)	間隙率	比貯留係数 (m^{-1})
基礎岩盤(0-20m)	2.0×10^{-4}	0.20	1×10^{-5}
基礎岩盤(20-40m)	1.5×10^{-4}	0.10	1×10^{-5}
基礎岩盤(40m以深)	1.0×10^{-4}	0.02	1×10^{-5}
監査席部	1.0×10^{-8}	0.02	1×10^{-5}
ブランケット部	1.0×10^{-4}	0.05	1×10^{-5}
カーテン部	5.0×10^{-5}	0.05	1×10^{-5}
コア部	1.0×10^{-5}	0.50	1×10^{-5}

表-5 調整池から下流流出端までの流下時間

流線	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
流下時間 (month)	1.7	4.9	6.0	9.9	13	20	32	186

る。したがって、本地点の基礎処理は設計値を概ね満足するように施工されていることがわかる。

7. まとめ

本研究によるイオン濃度、水温の調査結果および非定常浸透流解析、熱の移流拡散解析から、以下の事項が示された。

- (1) 上大須ダム調整池水温は、気温変動から一定の時間遅れを持って変化し、下流漏水温度も調整池水温変動からさらに時間遅れを持って変化する。
- (2) 上記水温の時間遅れは、1次元の熱移流拡散モデルで近似でき、漏水温度の実測値と比較することにより調整池水の流下時間を求めることができる。
- (3) 調整池水温の季節変動と漏水の温度変化から流動速度を推定する方法は、計測が簡便であり、調整池水温が季節変化を有するダムにおける漏水の評価手法のひとつとして活用できる。
- (4) 漏水の水質は、高濃度の硫酸カルシウム型であり、調整池水との濃度差が大きいことからイオン濃度により調整池水の浸入を検出しやすい。
- (5) イオン濃度の変化から推定される下流への調整池水の流下時間は、上大須ダム全体では2~20ヶ月であり、川浦ダムの7~20ヶ月より短い。これは基礎岩盤の透水性の差およびグラウチングの改良目標値の差によるものと考えられる。
- (6) 設計値を入力データとした粒子追跡法を併用した非定常浸透流解析による河床溺堤への調整池水の流下時間は2~10ヶ月であり、イオン濃度の時間変化から求めた4~9ヶ月、調整池および漏水の水温データを用いた熱の移流拡散解析結果から求めた4~9ヶ月にほぼ一致し、本地点の基礎処理は概ね設計値を満足するように施工されているといえる。

本研究では、イオン濃度を用いた調査結果に加え、従来測定の間便さから多くのダムにおいて測定されているにもかかわらず、必ずしも有効に活用されているとは言い難い水温データを用い、調整池からの浸透速度を定量的に推定する手法を示した。

今回、奥美濃水力発電所川浦ダム、鞍部ダム、上大須ダムにおいてイオン濃度、環境中の同位体、水温に着目した調査を行ったが、これらすべての項目がダム湛水時の計測項目として必要な訳ではない。ダムの計測においてはむやみに多くのデータを取得することは得策ではなく、ダムの規模、地質条件等により最も有効な計測項目を取捨選択し、計測計画を立案することが必要である。

謝辞：本調査に御協力頂いた中部電力奥美濃水力建設所、間組・清水建設ほか共同企業体の関係者の方々に心から感謝の意を表す。本調査計画立案時には、(財)電力中央研究所本島勲博士に御意見を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 塩崎功, 村上晃生, 谷口博幸, 川上康博, 今井久, 稲葉秀雄: 水質・同位体を利用した川浦ダム・川浦鞍部ダム初期湛水時地下水流動調査, 土木学会論文集, No.579/II-41, pp. 163-176, 1997.
- 2) 宮口友延, 吉田明: 上大須ダムの施工について, ダム日本, No.590, pp.43-69, 1993.
- 3) Stallman, R. W. : Computation of groundwater velocity from temperature data, U.S. Geol. Surv. Water Supply Pap., 1544-H, pp.36-46, 1963.
- 4) 佐倉保夫: 帯水層の温度分布から地下水流速を推定する試みについて, 筑波大学水理実験センター報告, No.1, pp.67-76, 1977.
- 5) 谷口真人: 長野平野における地下水の形成機構, 地理学評論, Vol.60, No.11, pp.725-738, 1987.
- 6) Stallman, R. W. : Steady one-dimensional fluid flow in a semi-infinite porous medium with sinusoidal surface temperature, *Journal of Geophysical Research*, Vol.70, No.12, pp.2821-2827, 1965.
- 7) 佐藤邦明, 佐々木康夫: 岩の伝熱および熱水浸透による熱拡散係数の実験的研究, 土木学会論文集, 第351号/II-2, pp.127-135, 1984.
- 8) 小鯛桂一: 岩盤透水性のグラフ表示, 地質調査所月報, 第35巻, 第9号, pp.419-435, 1984.
- 9) Gelhar, L. W., Mantoglou, A., Welty, C. and Rehfeldt, K. R. : A review of field-scale physical solute transport processes in saturated and unsaturated porous media, EPRI EA-4190, Project 2485-5, Final Report, 1985.
- 10) 平山修一, 黒田重徳: 維持管理, 改訂新版最新フィルダム工学, 山海堂, p.685, 1981.
- 11) 奥田宏明, 藍田正和, 西野健三: 上大須ダムのプランケットグラウチングについて, ダム工学, No.10, pp.29-40, 1993.
- 12) Domenico, P. A. and Mifflin, M. D. : Water from low permeability sediments and land subsidence, *Water Resources Research*, Vol.1, 1965.

(1996. 11. 14 受付)

INVESTIGATION ON THE FLOW OF GROUNDWATER AROUND KAMIOOSU DAM AT THE TIME OF INITIAL FILLING BY USING WATER QUALITY AND WATER TEMPERATURE

Isao SHIOZAKI, Akio MURAKAMI, Hiroyuki TANIGUCHI, Yasuhiro KAWAKAMI and Hisashi IMAI

In order to evaluate the permeability of bedrock in the area of Kamioosu Dam, the quality and temperature of leakage water were investigated at the time of initial filling. The travel time for water to flow from the reservoir to observation weirs of the leakage water and boreholes in the inspection gallery, estimated from the change of ion concentration by time, were 2 to 20 months. The travel times of leakage water collected at the riverbed, obtained from the change of ion concentration and the heat transfer/diffusion analysis, were 4 to 9 months. These results mostly agreed with the travel time of 2 to 10 months obtained from the unsteady seepage analysis using design values as input data.