

味噌川ダム初期湛水時の浸透流挙動
－水質調査による基礎岩盤透水性の評価－

Groundwater flow around Misogawa Dam at the initial filling ;
evaluation of permeability of bed rock by investigation of water quality

小野寺 直*、大前智敬**、則松秀晴***、羽野聡志****、
塩崎 功*****、猪狩哲夫*****、今井 久*****

By Naoshi ONODERA, Satoyuki OOMAE, Hideharu NORIMATSU, Satoshi HANO,
Isao SHIOZAKI, Tetsuo IGARI and Hisashi IMAI

To evaluate the permeability of bedrock of Misogawa Dam, water quality of seepage water was measured at the initial filling of the reservoir. The variation of ion concentration showed that the reservoir water has not yet arrived at the collecting weirs. The travel time to the collecting weir of PW3 for river bed seepage estimated from the variation of ion concentration is more than 3 years. This travel time is longer than the travel time of 8 months obtained from the unsteady seepage analysis using particle tracking method. So, we can conclude that the foundation bedrock of Misogawa Dam was grouted sufficiently.

Keywords : dam, seepage water, water quality, seepage analysis, permeability

1. はじめに

我が国の水需要は年々増加し、毎年のように水不足が懸念されているが、その水不足を解消する手段のひとつとして大規模ダムの建設がある。しかし、近年、ダムの立地に適した地点は限定されつつあり、今後はダム基礎岩盤としての透水性（しゃ水性）を確保する上で克服すべき技術的課題が多い地点にダムを建設せざるを得ないことも予想される。従来、ダム基礎岩盤の透水性（しゃ水性）は、ダム建設時の地質調査、透水試験結果、ダム湛水後の浸透量、間隙水圧、地下水位のデータ等から評価されているが、今後はより高精度にダム基礎岩盤の透水性（しゃ水性）を評価することが必要になると考えられる。

本研究は、従来のダム基礎岩盤の透水性（しゃ水性）を評価する上であまり着目されていなかった水質データを利用して貯水池水の流動速度を評価する手法を大規模ロックフィルダムに適用し、さらに粒子追跡法による非定常浸透流解析結果と比較することによりマクロなダム基礎岩盤の透水性を評価したものである。

2. 調査地点の概要

調査対象とした味噌川ダムは、長野県木曽郡木祖村に建設された中央土質しゃ水壁型ロックフィルダムである。ダムの上下流方向の断面図を図－1に示し、ダムおよび貯水池の諸元を表－1に示す。

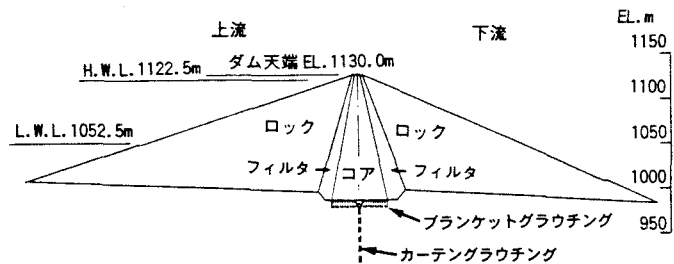
ダムサイトの地質は、中生代三畳紀～ジュラ紀の味噌川層、その下位の藪原層に分類され、砂岩、粘板岩およびそれらの互層からなっている。ダムサイトの地質構成を表－2に示す。

表－1 ダムおよび貯水池の諸元

ダ ム	形 式	中央土質しゃ水壁型 ロックフィルダム
	堤 高	140.0 m
	堤 頂 長	446.9 m
貯 水 池	堤 体 積	8,900,000 m ³
	流 域 面 積	55.1 km ²
	総 貯 水 容 量	61,000,000 m ³
	常 時 満 水 位	EL.1122.5 m
	サ-チャ-ジ' 水 位	EL.1122.5 m
	洪水期制限水位	EL.1113.0 m
	最 低 水 位	EL.1052.5 m

* 工修 水資源開発公団味噌川ダム建設所管理課長 (〒399-62 長野県木曽郡木祖村大字小木曽2058-22)
** 正会員 工修 水資源開発公団味噌川ダム建設所管理課第二係長 (〒399-62 長野県木曽郡木祖村大字小木曽2058-22)
*** (財)水資源協会開発研究部次長 (〒107 東京都港区赤坂6-2-8)
**** 日本技研コンサルト(株)土木設計部係長 (〒107 東京都港区南青山3-8-27)
***** 正会員 工修 (株)間組技術研究所技術研究部主任研究員 (〒305 茨城県つくば市荻間字西向515-1)
***** 正会員 (株)間組土木本部技術設計部係長 (〒107 東京都港区北青山2-5-8)

ダムサイトの岩級区分は、上流ロック数はCL級を主体とし、下流ロック数は河床付近は概ねCM級で縞状にCH級が出現し、左右岸アバット部はCL級である。カーテングラウチングは改良目標値3ルジオンで施工されている。



図－1 ダム標準断面図

3. 初期湛水状況

味噌川ダムは 1993 年 12 月 10 日から初期湛水を開始し、1994 年 5 月に EL.1081.9m に達した。その後は洪水期を迎えるために貯水位を下げ、同年 6 月～7 月は EL.1061.6m で水位を保持した。さらに同年の木曾川の渇水に対処するため、8 月上旬から中旬にかけて緊急放流を行い、最低水位まで貯水位を下げた。非洪水期の 10 月以降は徐々に水位を上昇させた。その後、1995 年秋以降、再び木曾川の渇水により水位の上昇速度は遅かったが、1996 年春先の融雪により貯水がすすみ、同年 4 月に満水位 EL.1122.5m を迎えている。

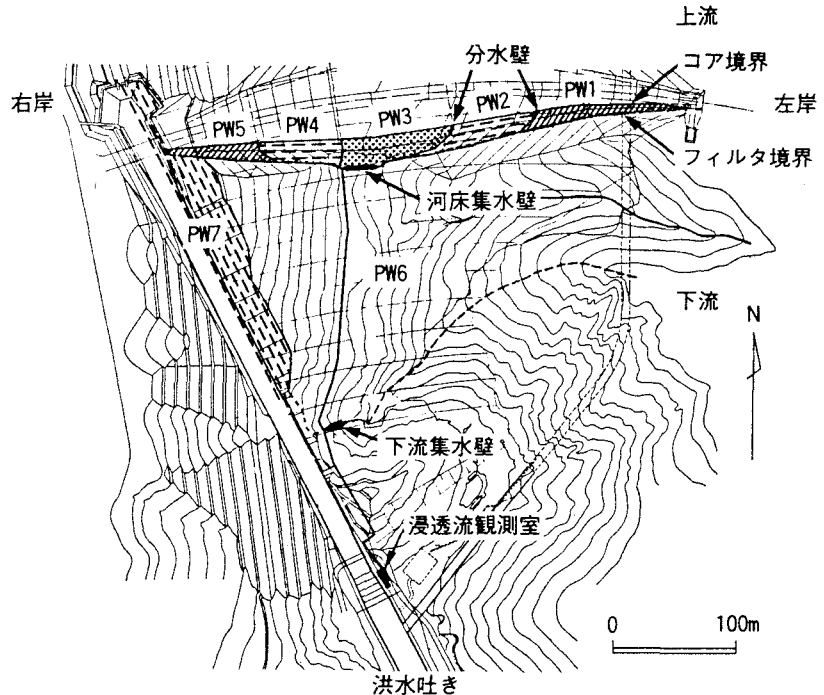
味噌川ダムの浸透量は、図－2 に示すように下流フィルタ敷に設置された左岸高標高部 (PW1)、左岸中標高部 (PW2)、河床部 (PW3)、右岸中標高部 (PW4)、右岸高標高部 (PW5) の 5 箇所の集水壁と下流ロック敷 (PW6)、洪水吐き導流部 (PW7) の 2 箇所の集水壁において集水され、これらの 7 箇所の浸透量が下流の浸透流観測室において計測されている。浸透量の時間変化を降水量、貯水位のデータとともに図－3 に示す。

味噌川ダムの浸透量は、図－2 に示すように下流フィルタ敷に設置された左岸高標高部 (PW1)、左岸中標高部 (PW2)、河床部 (PW3)、右岸中標高部 (PW4)、右岸高標高部 (PW5) の 5 箇所の集水壁と下流ロック敷 (PW6)、洪水吐き導流部 (PW7) の 2 箇所の集水壁において集水され、これらの 7 箇所の浸透量が下流の浸透流観測室において計測されている。浸透量の時間変化を降水量、貯水位のデータとともに図－3 に示す。

表－2 ダムサイトの地質構成

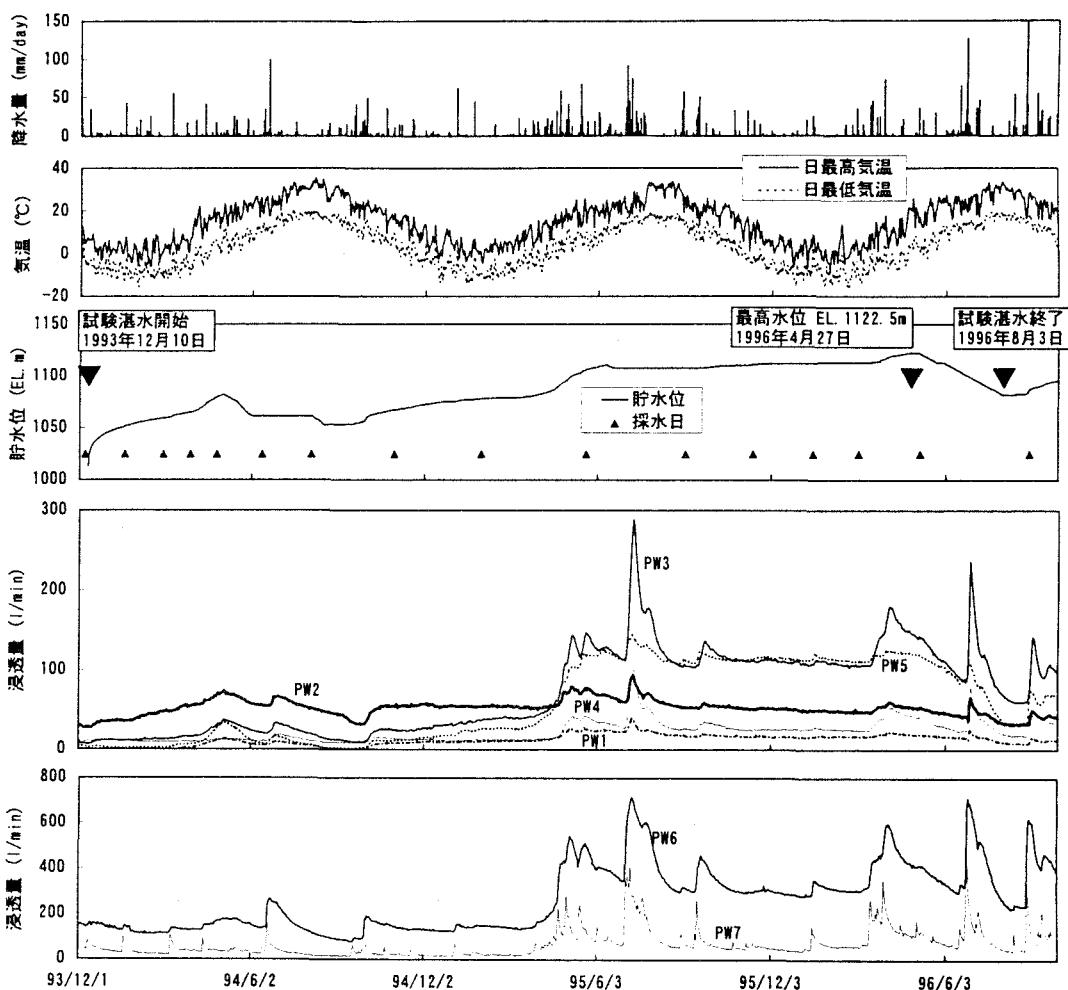
地 質 時 代	地 層	層 相	記 事
新 生 代	第 四 紀	現河床および扇状地堆積物	砂礫・土砂
		崖錐堆積物	砂混り土砂
	更 新 世	降下堆積物	火山灰質粘性土
		段丘堆積物	シルト・砂・礫
	新第三紀*	岩脈	両輝岩安山岩
中 生 代	ジュラ紀～三畳紀	味噌川帯	砂岩
			粘板岩
			チャート

* 岩脈の地質時代については確定されていない。



図－2 浸透量観測施設平面図

部 (PW7) の 2 箇所の集水壁において集水され、これらの 7 箇所の浸透量が下流の浸透流観測室において計測されている。浸透量の時間変化を降水量、貯水位のデータとともに図－3 に示す。



図－3 降水量、気温、貯水位、浸透量の時間変化

図－3より、以下のことが示される。

(1) コア・フィルタ数からの浸透量 (PW1～PW5)

コア・フィルタ数からの浸透量では、1995年春の貯水位の上昇（貯水位 EL.1075～1105m 間）に伴い PW3 と PW5 の浸透量が増加している。降水に対する応答は PW3 では敏感であるが、PW5 では鈍い。

PW1、PW4 は、絶対量は少ないものの貯水位とほぼ連動した変化を示している。

PW2 は、湛水初期には多かったが、1994年9月以降は、50～55l/min で貯水位の変動に無関係にほぼ一定の浸透量となっている。

(2) 下流ロック数と洪水吐き (PW6 と PW7)

PW7 は貯水位とはほとんど相関が認められず、降水による影響が大きい。

PW6 は、PW3、PW5 同様、1995年春からの貯水位の上昇に伴って浸透量が増加している。降水に対する応答も PW3 と同程度に敏感である。

4. 水質調査

ダムの初期湛水時に貯水池からの浸透水が下流側に到達すれば、下流で集水される浸透水中のイオン濃度は大きく変化する。したがって、ダム湛水前後での継続的な水質調査を実施することにより、その時間変化から湛水による影響が早期に現れる地点を検出することが可能となる。

4.1 調査項目と分析方法

調査項目は、水温、pH、電気伝導度、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SiO_2 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 NO_3^- および環境中の放射性同位体であるラドン (^{222}Rn) である。水温以外は現地で採水した試料を直ちに実験室に送付した後、すべて室内にて測定した。 HCO_3^- 以外のイオン濃度はイオンクロマトグラフ法 (DIONEX, 2020i-3)、 HCO_3^- はJIS K 0101、 SiO_2 は吸光光度法により分析した。ラドン濃度は、試料 500ml とシンチレータ入りのトルエン 40ml を、空気と混合しないように専用のラドン抽出器に入れて攪はんした後、上澄みのトルエン約 20ml を採取し、低バックグラウンド液体シンチレーションカウンター (Aloka LSC-LB I) を用いて測定した。

ラドン (^{222}Rn) は、岩石に含まれる親核種のラジウム (^{226}Ra) が放射性崩壊して地下水中に供給される放射性同位体である。半減期は 3.8 日と短く、揮発性の物質であるために、貯水池水中の濃度はほとんどゼロとみなすことができ、ダム初期湛水時に発生する可能性のある数日～10 数日オーダーでの早い流速変化を検知するための指標として利用されている¹⁾。

Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SiO_2 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 NO_3^- は、天然地下水に含まれる主要イオンである。このうち、 Cl^- は主として人間活動による汚染、 NO_3^- も主として肥料等の人為起源のイオンである。他のイオンは、地下水が流下する過程で接触する岩石から溶出したものであり、その濃度は岩種や風化の程度、岩石との接触時間等により異なる。したがって、ダム下流で採水された浸透水のイオン濃度からその流路に存在する岩質や浸透速度に関する情報を抽出することができる。

4.2 調査時期

本ダムにおける水質調査は、初期湛水前の 1993 年 12 月 7 日から開始され、1996 年 8 月まで定期的を実施された。採水間隔は湛水開始直後は約 1 ヶ月とし、徐々にその間隔を長くした。図-3 に採水時期を併記する。

4.3 調査結果

水温、電気伝導度、ラドン濃度の時間変化を図-4 に、主要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-5 に、塩素イオン濃度、硝酸イオン濃度の時間変化を図-6 に示す。

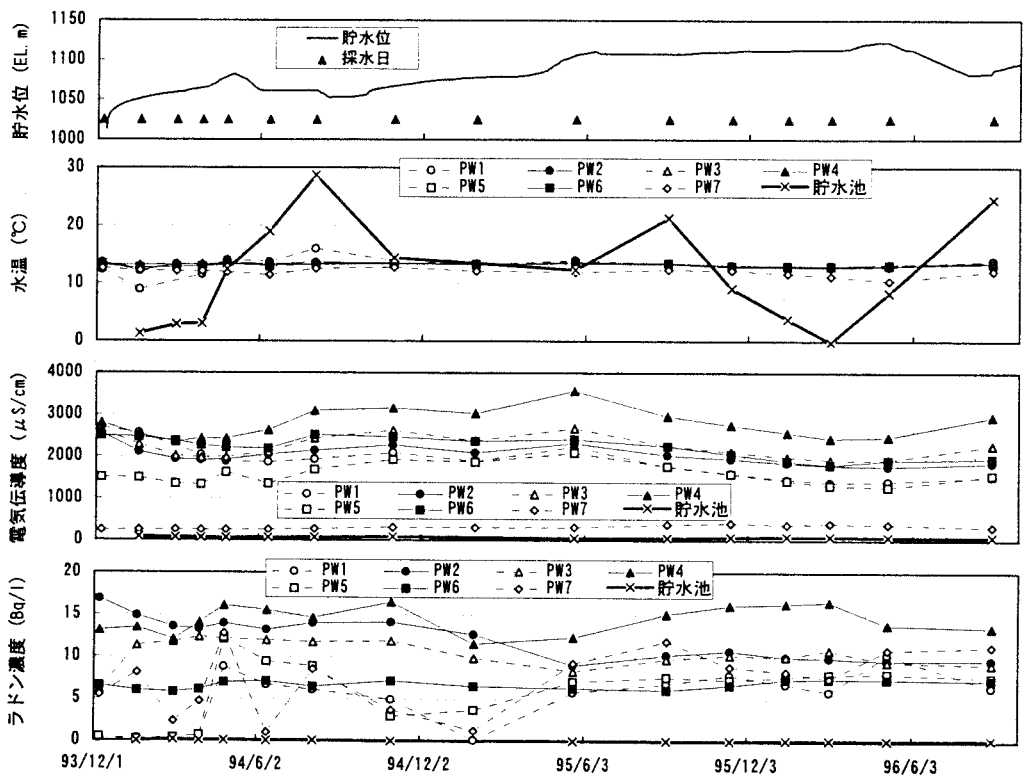


図-4 水温、電気伝導度、ラドン濃度の時間変化

これらのデータより以下のことが示される。

(a) 水温

図-4に示す本地点の浸透水の水温の時間変化を見ると、貯水池表層水の水温が季節的に大きく変化しているのに対し、基礎岩盤を通過してきた浸透水の水温はほとんど一定である。これは、浸透水の起源が温度変化の小さな貯水池底部の貯水池水であり、また仮に貯水池側で温度変化があったとしても浸透速度が遅いためにその流動過程で温度変化が消散し、地下水の恒温層（地下水の温度は、ある深さに達すると1年中ほとんど変化しなくなりこの層が恒温層と呼ばれる。）の温度に近くなっているものと考えられる。

ただし、PW1だけは、湛水初期に気温の変化に追隨した変化が見られる。これは、PW1の浸透量が湛水初期にはゼロあるいは極微少であったために、浸透量測定室内の気温変動に影響されたためである。

(b) 電気伝導度

電気伝導度は、イオン濃度の総量を示す指標である。本地点の浸透水の電気伝導度は、地表水を主体とするPW7を除けば1000～3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ と地下水としては高い部類に属する。一般に、地下水の電気伝導度は温泉地帯

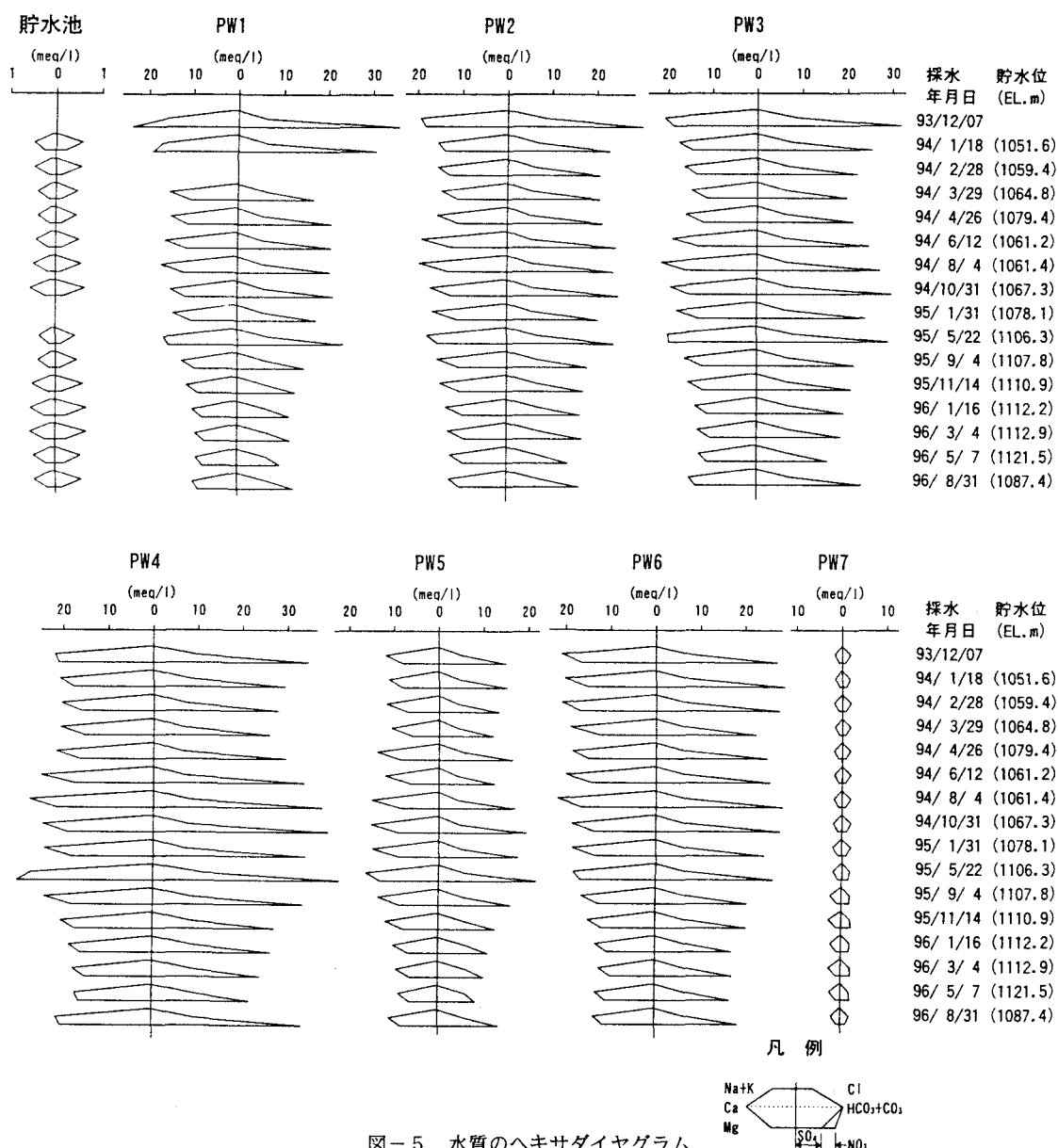
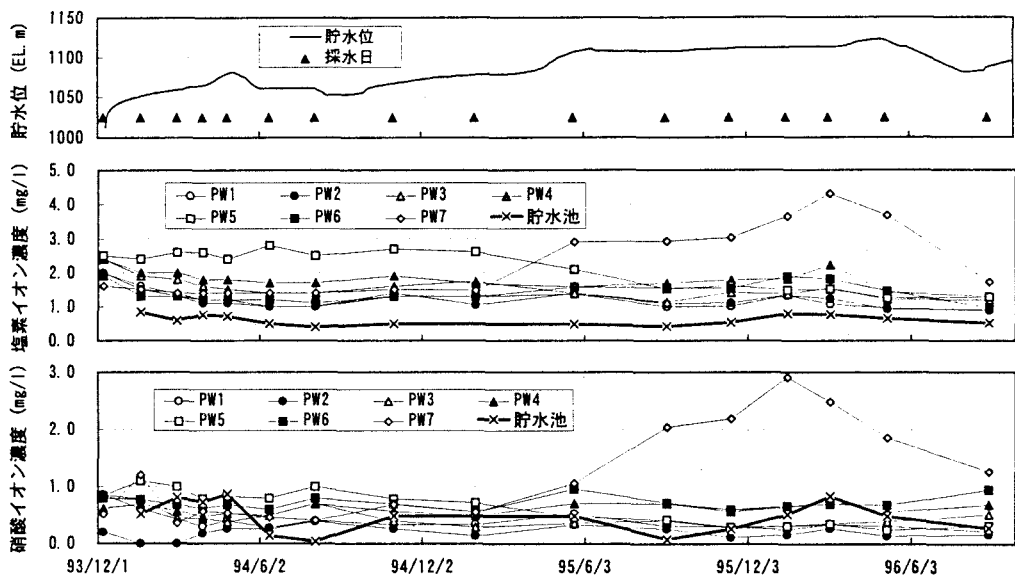


図-5 水質のヘキサダイアグラム



図－6 塩素イオン、硝酸イオン濃度の時間変化

等の特殊な地質環境を除けば数 $100 \mu \text{ S/cm}$ 以下である。例えば、本地点と同様な中生代の砂岩・粘板岩地帯のトンネル湧水の電気伝導度は $500 \mu \text{ S/cm}$ 以下となっている²⁾。これは、本地点の岩盤が過去に熱水変質を受けたことによる影響と推定されるが、その原因は明らかではない。

図－4より、電気伝導度は、時間変化は小さいものの湛水初期に電気伝導度が若干低下した後増加し、その後再び低下する傾向にあることが分かる。湛水初期の電気伝導度の低下とその後の増加は、湛水によって岩盤内の地下水が流動し始めたことを示すものと考えられる。

貯水池水の到達による影響と考えられる電気伝導度の低下は、1995年夏頃から徐々に示されるが、1996年夏の貯水位の低下による浸透量の減少により、電気伝導度は再度増加傾向に転じている。

(c) ラドン濃度

図－4のラドン濃度の時間変化を見ると、PW1、PW5では、湛水初期に低かったラドン濃度が、滞留地下水の押し出しによると考えられる濃度増加を示した後、1994年夏から1995年冬にかけて低下している。これらの採水地点では、湛水初期に浸透量が微小であったので、湛水初期の低いラドン濃度は、低流量によって空中への揮発量が増加したことによるものと考えられる。

高標高部の浸透水を集水するPW1、PW5では、1994年夏から1995年冬にかけてラドン濃度が低下している。ラドン濃度の低下は通常貯水池水の浸入に起因するが、電気伝導度を含めイオン濃度は減少していないことやその後再びラドン濃度が増加していることを考え併せると、貯水位の上昇によって貯水池水が浸入したとは考えられず、その原因は明らかではない。

他の採水地点では、現在のところラドン濃度の急減は認められておらず、ラドンで検出できるような早い流速は生じていないと言える。

PW7におけるラドン濃度の時間変動は、降水の流入による影響と思われる。

(d) イオン濃度

水質の時間変化を図－5のようにヘキサダイアグラムで表示することによって、それぞれのイオン濃度の時間変化を一目で把握することができる。本調査期間中での浸透水中イオン濃度の時間変化は小さく、貯水池水の混入による影響が徐々に現れ始めている段階であるといえる。PW1～PW6の浸透水のイオン濃度は、カルシウムイオン、マグネシウムイオン、硫酸イオン濃度が特に高いために、上記の電気伝導度とほぼ同じ変化傾向を示している。

図－6 に示すように、湛水初期の PW5 の塩素イオン濃度は他の浸透水よりも高く、貯水位が上昇し PW5 の浸透量が増加した時期である 1995 年春よりその濃度が低下している。これは、PW5 では、湛水初期に右岸地山から塩素イオン濃度の高い地表水が混入しており、その後湛水により塩素イオン濃度の低い浸透水の混入量が多くなったことを示している。また、PW5 は図－5 に示すように、他の浸透水に比べてイオン濃度が約 1 / 2 と低く、湛水前からイオン濃度の低い地表水の混入があったと推定される。

図－6 より、PW7 では 1995 年の春から塩素イオン、硝酸イオンの濃度が増加した後、1996 年に入って低下していることがわかる。塩素イオンは、水道水の混入、凍結防止剤の混入等、硝酸イオンは、農薬・肥料や地表付近の有機物による影響が考えられ、いずれも地表付近の水の混入によって増加するものである。したがって、この時期に PW7 に地表水の混入があったといえる。

5. 粒子追跡法を併用した非定常浸透流解析

通常、貯水池水はその浸透過程において岩石からの溶出作用によりイオン濃度が増加する。したがって、貯水池水が下流側に到達した場合でもそのイオン濃度は貯水池水よりも高くなる。しかし、元々の地山に湛水前から滞留していた地下水の方が貯水池からの浸透水よりも岩盤中での滞留時間が長いために、地山地下水の方がイオン濃度が高いのが一般的である³⁾⁴⁾。このような場合、滞留地下水に貯水池水を起源とするイオン濃度の低い地下水が混入することにより、浸透水中のイオン濃度は時間とともに低下する。味噌川ダムでは、図－5 に示すように 1995 年から 1996 年にかけて貯水池水の混入によると考えられるイオン濃度の低下傾向が観察されるものの、湛水開始後約3年を経過してもいづれの浸透水の水質も貯水池水の水質とは大きく異なり、貯水池水の到達を示す明瞭な濃度低下は認められない。これは、本ダムでは岩石からのカルシウムイ

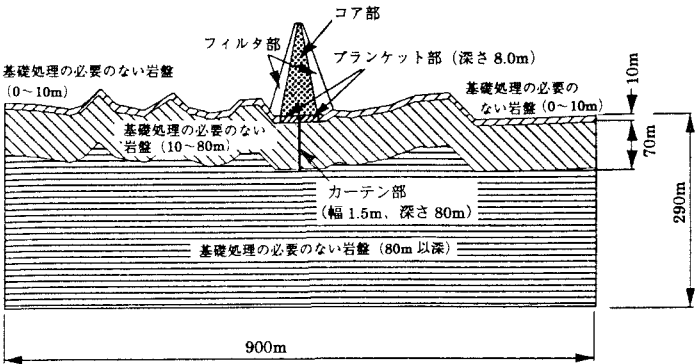
オン、マグネシウムイオン、硫酸イオン等の溶出量が多いために、貯水池水の混入による影響が下流浸透水のイオン濃度の低下として現れにくいことが一つの要因であるが、実際に貯水池水の浸透速度が遅いことも大きな要因であると考えられる。

そこで、ダム初期湛水時における貯水池水の平均的な浸透速度の目安を得るために、ダム基礎岩盤の透水係数、間隙率等のデータを使って粒子追跡法を併用した非定常浸透流解析を実施した。解析に使用した物性を表－3 に示す。透水係数は実測値の平均値を用いた。間隙率と比貯留係数は実測値がないので、間隙率は小鯛⁵⁾の整理した砂岩・頁岩のデータを参考にし、比貯留係数については Domenico and Mifflin⁶⁾のデータを参考にして設定した。解析モデルは、図－7 に示すようにダムの上下流方向の標準断面とし、上流側の水位条件には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線および貯水池側の流入点から下流の流出点までの流下時間を図－8 に示す。

ダム河床部の浸透水である PW3 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－8 に示す流線のうち最短経路の浸透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到達時間は 233 日（約 8 ヶ月）となる。

表－3 浸透流解析に使用した物性

区分	透水係数 (cm/sec)	間隙率	比貯留係数 (m ⁻¹)
基礎岩盤 (0～10m)	2.6×10 ⁻⁴	0.15	10 ⁻⁵
基礎岩盤 (10～80m)	1.3×10 ⁻⁴	0.10	10 ⁻⁵
基礎岩盤 (80m 以深)	1.3×10 ⁻⁵	0.05	10 ⁻⁵
カーテン部	1.1×10 ⁻⁵	0.05	10 ⁻⁵
ブランケット部	4.4×10 ⁻⁵	0.05	10 ⁻⁵
コア部	1.1×10 ⁻⁶	0.30	10 ⁻⁵
フィルタ部	1.6×10 ⁻³	0.30	10 ⁻⁵



図－7 非定常浸透流解析モデル

図-5に示すPW3のイオン濃度は、貯水位の上下に伴う浸透速度の変化に起因すると考えられる濃度変化を示している。しかし、貯水池水の濃度とは大きな差があり、湛水開始後3年を経過した後も貯水池水の到達を示す濃度低下は示されていない。上記の浸透流解析は、あくまでも平均的な物性を用いた概算に過ぎないが、現状のイオン濃度の時間変化からはこの計算結果よりもはるかに長い時間をかけて貯水池水が浸透していることが示唆されている。これは、言い換えれば本地点の基礎岩盤部が所定の透水性（しゃ水性）を十分確保できるように改良されていることを裏付けるものであると言えよう。

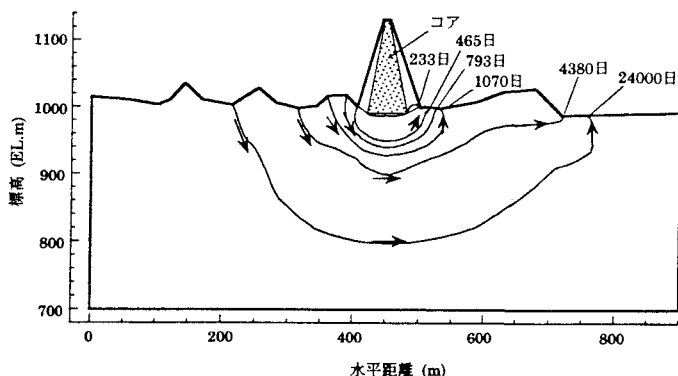


図-8 粒子追跡法による浸透経路

6. まとめ

味噌川ダム初期湛水時における水質調査および粒子追跡法を併用した浸透流解析より、以下の事項が示された。

- ①本地点の浸透水のイオン濃度は、地下水としては非常に高い部類に属し、カルシウムイオン、マグネシウムイオン、硫酸イオン、重炭酸イオン濃度が高いという特徴を有している。
- ②本調査期間中での浸透水中イオン濃度の時間変化は小さく、貯水池水の混入による影響が徐々に現れ始めている段階である。
- ③PW5では湛水初期に塩素イオン濃度が高く、右岸地山から塩素イオン濃度の高い地表水が混入していたことが示唆される。
- ④粒子追跡法を併用した非定常浸透流解析により貯水池水の平均的な浸透時間を計算した結果、河床部の浸透水であるPW3への貯水池水の到達時間は約8ヶ月となった。
- ⑤イオン濃度の変化からは、湛水開始後3年を経過した後も貯水池水の到達を示す明瞭な濃度低下は示されず、上記の解析結果との比較から本地点の基礎岩盤部が所定の透水性（しゃ水性）を十分確保できるように改良されていることが確認された。

本地点の水質は、一般の地下水よりイオン濃度が高く、地下水の水質としては特殊な部類に属する。このような水質が、ダムの湛水により長期的にどのように変化していくかは、興味のあるところであり、今後さらにデータを蓄積しながらダムの長期的な安定性を監視していく予定である。

本調査に御協力頂いた間組・飛島建設・不動建設共同企業体の関係者の方々に心から感謝の意を表する。イオン濃度およびラドン濃度の分析は(株)構造計測六川氏によるものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 木村重彦、小前隆美：ダムの老朽度と漏水機構の簡便な実証的解析法、農土試技報、A14、pp.17-26、1971。
- 2) 塩崎功、向上拡美、高木不折、松林宇一郎、林好克：砂岩・粘板岩互層における赤石沢トンネル湧水の水質について、水工学論文集、第39巻、pp.317-324、1995。
- 3) 鈴木英也、谷口博幸、川上康博、塩崎功：奥美濃川浦ダム・鞍部ダム・上大須ダム試験湛水時の地下水調査、土木学会年次学術講演会講演概要集VI、pp.268-269、1995。
- 4) 塩崎功、高木不折、松林宇一郎、向上拡美：ダム周辺の長期的地下水位および水質変動に関する一考察、水工学論文集、第40巻、pp.93-100、1996。
- 5) 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。
- 6) Domenico, P. A. and M. D. Mifflin : Water from low permeability sediments and land subsidence. Water Resources Research, Vol.1, 1965。