



表層部における水収支の調査研究

中野 勝志 中島 誠 柳澤 孝一

中部事業所

資料番号：78-5

A Study on Groundwater Recharge from The Subsurface to the Rock Mass.

Katsushi Nakano Makoto Nakajima Koichi Yanagisawa
(Chubu Works)

地下水流動を研究するためには表層部から下層の岩盤層への地下水浸透量を推定することが必要である。気象条件、河川への流出量、自由地下水位、土壤水分などの変動量の測定は、浸透量の推定にとって重要である。丘陵の斜面の水理変動量の測定方法を開発し、これらの変動量を測定することにより、水収支が成立していることが判った。表層部から下層の岩盤層への地下水浸透量は年間当たり207.5ミリ（1日当たり0.57ミリ）と推定された。本報では測定方法の詳細および浸透量の推定方法について記述した。

1. はじめに

地下水流動特性を把握する調査は、調査の対象となる範囲が広く深いこと、調査する期間が長くなるなどの特徴があり、帯水層の連続性や透水性あるいは涵養機構の把握は難しく、また時々刻々変化する地下水流動特性についても降雨特性、地形、水理地質状況、河川や湖沼などの分布特性によって変動することが予想される。そのため地下水流動特性を把握するには、対象流域内の地下水の流れの全体的な特性が失われないよう配慮しながら地形、水理地質構造、降雨量、河川流出量等の場の条件を地形判読、地表踏査、試錐調査、気象観測などの調査結果を基に単純化、モデル化することが必要である。こうしてモデル化した水理地質構造および初期条件、各種境界条件を基に地下水浸透流解析（現在動燃事業団ではFEMによる三次元飽和不飽和非定常浸透流解析を実施、使用コードTAGSAC）を行い、岩盤の間隙水圧や自由地下水面などの長期観測、地表水や地下水の水質・同位体組成による地下水の循環機構の推定などとあわせて領域全体の検証を実施し、水理地質構造モデルをより現実性の高いものに築きあげ、調査対象領域の地表水および地下水の流れを明らかにするものである。

地下水浸透流解析においては、特に上部境界条件

として、表層部未固結層から深部岩盤への地下水流動量を定量的に把握することが必要であり、このためには調査解析対象領域の表層部の水収支に係わるデータを長期間に亘り精度良く測定して行かねばならない。

動燃事業団では、中部事業所東濃鉱山周辺部に上記目的のために、気象観測、河川流出量、自由地下水位、土壤水分等のデータを長期間連続計測し、観測したデータを包括的に管理・処理可能な表層水理定数測定システムを製作・設置した。現在、すでに12ヵ月以上の観測実績が上がっており、本報告では同システムの概要と測定例および一部その解析結果について述べる。

2. 表層水理定数測定システムの概要

表層水理定数測定システムの概念を図1に、測定項目を表1に示す。またすべてのデータは10分毎で測定・記録されている。

2.1 各測定機器の概要

(1) 気象観測装置

気象観測装置の構成の一例を図2に示す。また、この装置により得られたデータはA-D変換されパーソナルコンピュータで連続表示・記録でき

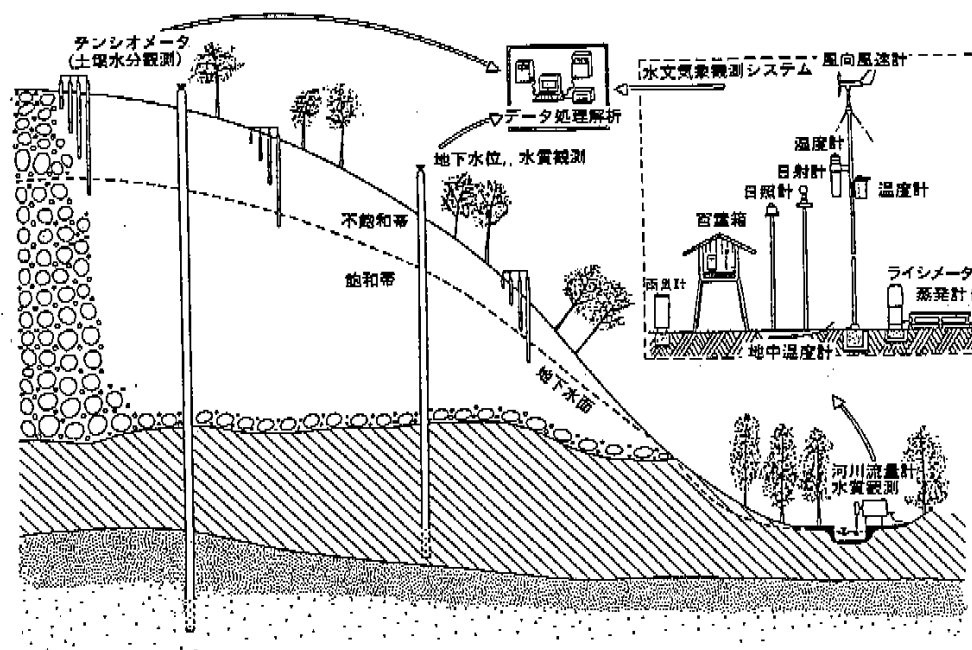


図1 表層水理定数測定システムの概念

る構造となっている。さらに各測定機器の性能等を表2に示す。

(2)河川流量計

河川の流量は降雨量が季節毎に異なるために、その流量も変化する。また、測定箇所上流部より流出してくる水量はその河川への流出域が異なるために、対象河川に適した測定容量の機器を選択する必要がある。このため、本システムでは測定容量の異なる4台のフロート式流量計を用意し、測定範囲を拡大するために上述した流量計の中から大小2台の流量計を1組として各計測箇所へ設置した。また、このデータはデジタル変換し、10分毎にメモリー

カードに記録できる構造になっている。本装置の概略を図3に、性能を表3に示す。

(3)地下水位計

本機器は試錐孔を利用して水圧式の水圧検出器

表2 各測定機器の性能

項目	精度	測定範囲 0~10mV	出力要素
微風用 風向	±5°	16万位	瞬間風向 10分平均
微風用 風速	5m/sマデ±0.3m/s 5m/sカラ±5%	0~10m/s	瞬間風速 10分平均
気温	±0.5°C	-50~50°C	気温
湿度	±5% F.S.	0~100%	湿度
温度1	±0.5°C	-15~35°C	温度1
温度差	±5% F.S.	-5~5°C	温度差 3-1
雨量	±0.5% F.S.	0~100mm	積算雨量
日照	±0.5% F.S.	0~10h	積算日照
直射	±0.5% F.S.	0~5MJ/m ² 0~2KW/m ²	積算直射 瞬間直射
放射	±0.5% F.S.	0~5MJ/m ² 0~1.6KW/m ²	積算放射 瞬間放射
蒸発	±0.5% F.S.	0~100mm	蒸発水位
強風用 風向	±5°	16万位	瞬間風向 10分平均
強風用 風速	10m/sマデ±0.5m/s 10m/sカラ±5%	0~60m/s	瞬間風速 10分平均
気圧	±0.2mb	800~1050mb 100mbスパン	現地気圧

表1 測定項目の一覧

項目	単位	項目	単位
気象観測		地下水位	l / 100 m
平均風向	16万位	表層水位	l / 100 m
平均風速	l / 10m/s	河川流量	l/min
平均気温	l / 10°C	土壌水分 (GL-20cm)	cm/H ₂ O
平均湿度	l / 10%	土壌水分 (GL-40cm)	cm/H ₂ O
日降水量	l / 10mm	土壌水分 (GL-60cm)	cm/H ₂ O
日日照量	l / 10hour	土壌水分 (GL-150cm)	cm/H ₂ O
日直射量	l / 100MJ/m ²	土壌水分 (GL-200cm)	cm/H ₂ O
日全放射量	l / 100MJ/m ²	土壌水分 (GL-300cm)	cm/H ₂ O
日蒸発量	l / 10mm	土壌水分 (GL-500cm)	cm/H ₂ O
平均気圧	l / 10mb		

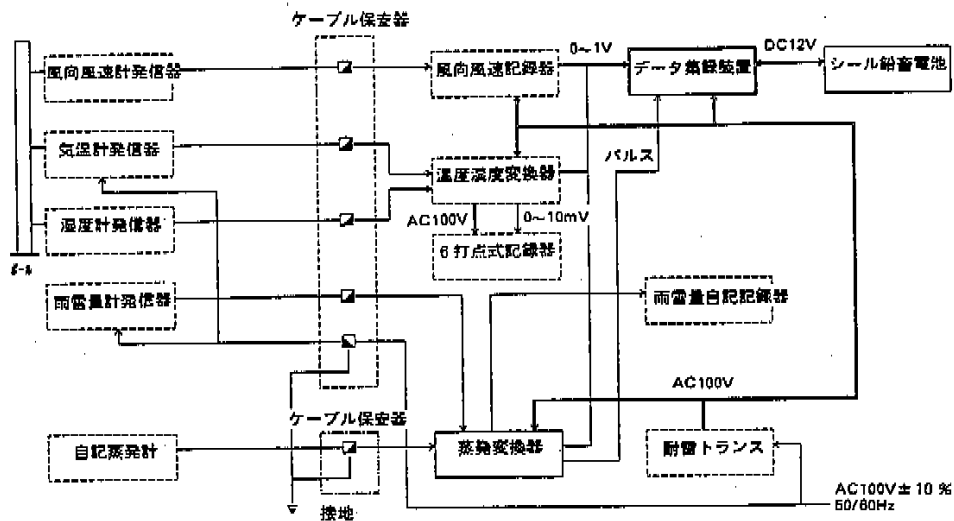


図2 気象観測装置の構成

を任意の深度に設定し、その信号を地上部に設置した記録計で収集できる構造になっている。また、収集したデータはメモリーカードに10分毎に記録でき、同データはRS-232Cを介してパーソナルコンピュータに転送できる。また取得データをより信頼性の高いものとするために、水位検出器の測定範

囲を10mとしている（取得データの測定精度と測定範囲は反比例関係にあり、計測機器のFSが測定仕様を満たせない場合、測定範囲を許容範囲内で最小限に止めることにより、取得データの精度は向上できる）。本機器の概念を図4に、性能を表4に示す。

(4) 土壌水分計

本機器は多孔質カップ（ポーラスカップ）を使用した土壌水分感圧センサーで、土壌水分に平衡な圧力（正圧）および張力（負圧）を検知し、水理水頭値（ $\text{cm H}_2\text{O}$ ）として地上部の計測装置で連続記録する。またこのデータはデジタル変換し、10分毎にデータロガーへ入力されパーソナルコンピュータで収集できる。

さらに本機器は1計測地点につき8深度（基本的に20, 40, 60, 100, 150, 200, 300, 500cm深度）に多孔質カップが設置されている。本機器の概略を図5に、土壌水分感圧センサーの性能を表5に示す。

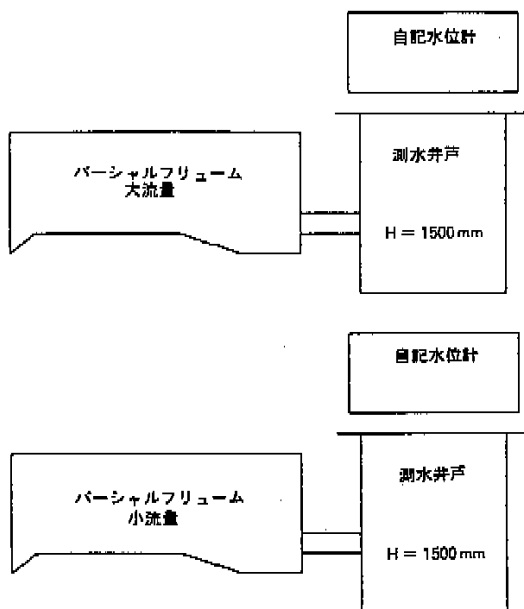


図3 河川流量計の概略

表3 河川流量計の性能

タイプ	測定範囲
1時パーシャルフリューム	8~200l/min
2時パーシャルフリューム	23~500l/min
9時パーシャルフリューム	150~15000l/min
1.5時パーシャルフリューム	290~40000l/min

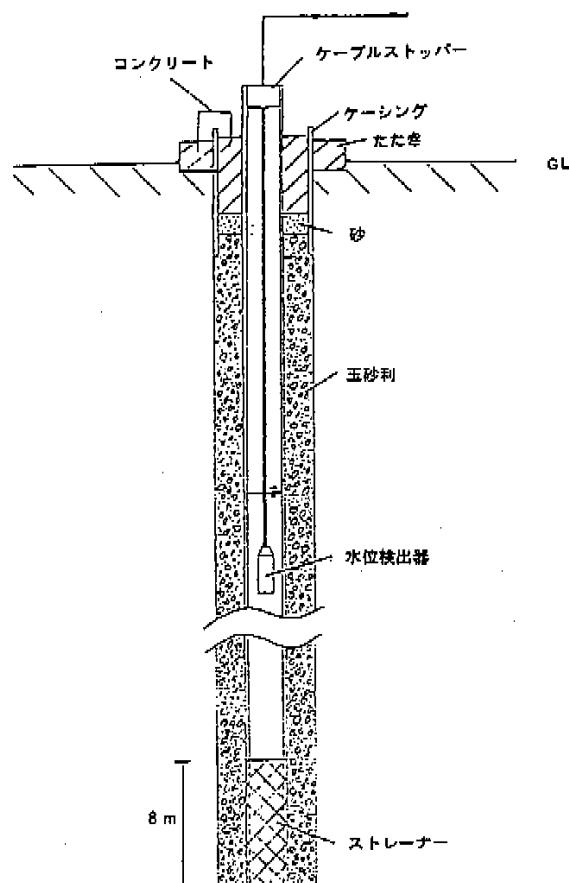


図4 地下水位計の概念

(5) 計算機

本システムでは上述したデータの収集と確認、および処理・解析用として2台のパーソナルコンピュータを使用している(表6参照)。

上述した各計測機器より得られたデータはフロッピーディスク、メモリーカードを介して処理・解析用の計算機へ入力される。このデータは確認・変更した後、表1に示した項目すべてが10分毎に1ヵ月分にまとめられ1枚のフロッピーディスクで管理される(統合ファイル)。また、統合ファイル化した

表4 地下水位計の性能

測定機器名	測定範囲	測定精度	その他
地下水位計	0~10m	FS 0.1% (1cm)	温度 0~40°C

表5 土壌水分感圧センサーの性能

測定機器名	測定範囲	測定精度	その他
土壌水分感圧センサー	0~±1000cm H ₂ O	FS 0.5%	ポーラスカップ方式

データは必要に応じて、一定期間のデータを再処理・解析し、浸透流解析等の境界条件設定のために用いられる。

2.2 設置箇所

本システムは現在、動力炉・核燃料開発事業団中部事業所で実施している広域地下水流動調査および立坑掘削に伴う水理学的影響調査における表層部の水収支観測に利用されず、12ヵ月以上の長期観測実績が上げられている。ここでは参考までに本システムの各機器の設置箇所を図6に示す。また、測定地点数の一覧を表7に示す。

3. 測定例

ここでは動力炉・核燃料開発事業団中部事業所東濃鉱山周辺に設置した本システムの測定例を紹介する。

はじめに気象観測装置で得られた1日分の統合ファイルデータを図7に示す。このデータは現場においてもパーソナルコンピュータで連続的に表示されており、異状の有無の確認または、同データを他の用途へ利用することもできる。

次に、統合ファイルデータより1ヵ月分の降雨と河川流量の変動の経過について処理した結果を図8に、降雨と地下水位の変動の経過について1年分を処理した結果を図9に示す。

表6 計算機の一覧

計算機名	タイプ	用途
PC9801E5	デスクトップ型	現場でのデータ収集と確認
PC9801note	ラックトップ型	取得データの処理・解析

表7 計測地点数の一覧

計測項目	地点数	計測項目	地点数
正馬様気象観測	1点	鉱山気象観測	1点
正馬様河川流量	2点	鉱山河川流量	1点
正馬様土壌水分	3点	鉱山表層水位	9点
股河地下水位	5点	鉱山土壌水分	9点
合 計			31点

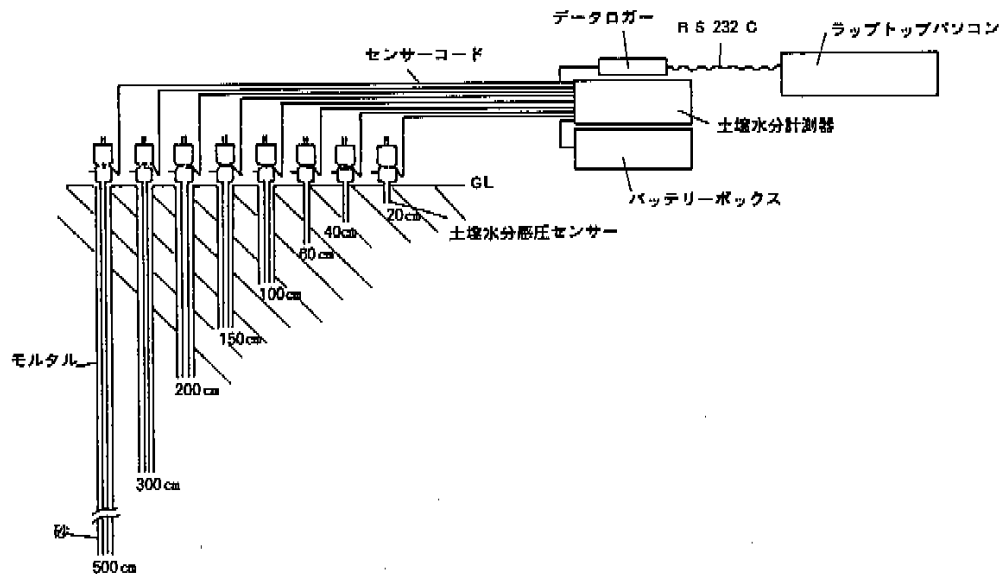


図5 土壌水分計測装置の概略

4. 東濃鉱山周辺における表層部の水収支の解析結果

4.1 流域における水収支

流域における水収支は次の式で表される。

$$P = E + Q + \Delta W + \Delta S + G \cdots \cdots (1)$$

P : 降水量 (mm)

E : 蒸発散量 (mm)

Q : 河川流出量 (mm)

ΔW : 土壌水分貯留変化量 (mm)

ΔS : 地下水貯留変化量 (mm)

G : 下層への地下水浸透量 (mm)

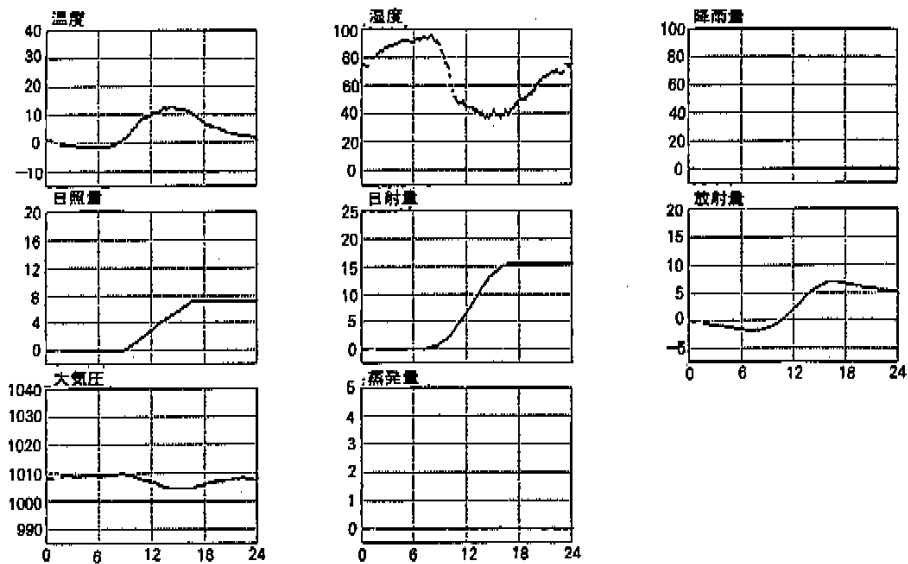


図7 統合ファイル中の気象観測データ例

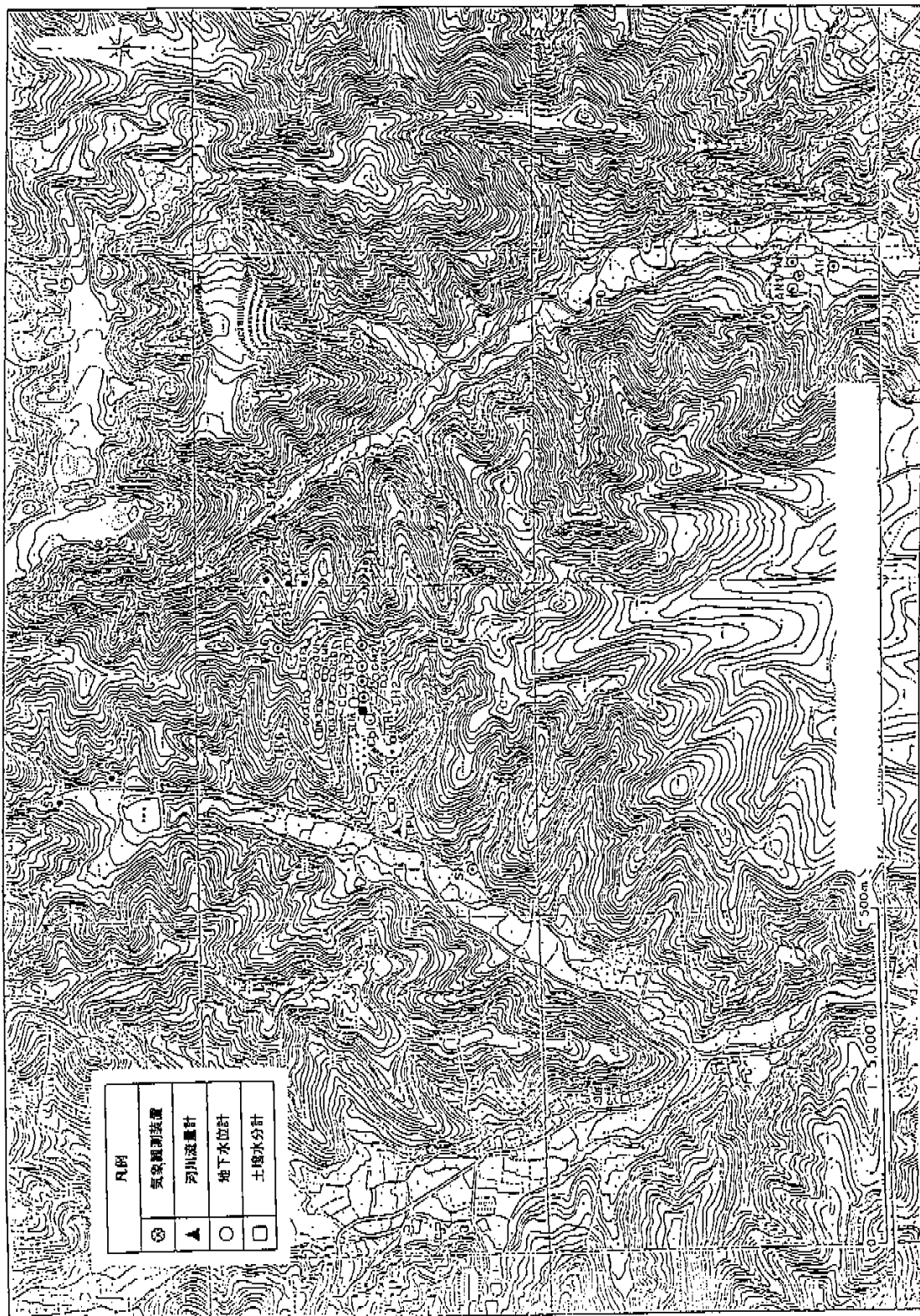


図6 表層水理定数測定システムの設置箇所

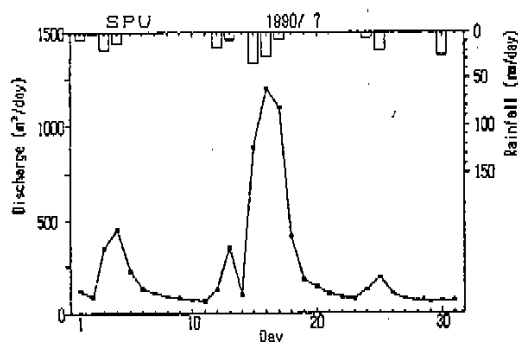


図8 降雨と河川流量の変動 (1990.7)

(1)式において、一般に水文期間を1年にとれば、その流域の貯留量の変化 ($\Delta W + \Delta S$) はゼロとして処理されることが多い。

したがって、1年間で水収支を考える場合には、次式が成り立つと考えられる。

$$P = E + Q + G \dots\dots\dots(2)$$

4.2 東濃鉱山周辺における水収支の検討

東濃鉱山周辺にて行われている表層水理観測結果を表8に示す。

中川 (1979) では、Penmanの可能蒸発散量に0.7を乗じたものを短草被面可能蒸発散量と定義し、自然植生下の実蒸発散量に近い値を示していると考えられると報告されている。そこで本研究においては、Penmanの可能蒸発散量に0.7を乗じたものを実蒸発散量として、水収支の検討を行った。

表8 表層水理観測結果

年	月	降水量 (mm)	Penmanの 可能蒸発散量 (mm)	SPD 河川流量 (mm)
'89	5	168.5	66.2	117.8
	6	243.5	71.0	150.7
	7	180.5	70.9	139.0
	8	101.0	86.4	40.3
	9	646.0	52.1	343.5
	10	70.5	59.1	45.1
	11	55.5	27.8	38.2
	12	34.5	21.8	31.8
'90	1	42.5	20.0	45.1
	2	144.5	30.3	121.5
	3	110.0	53.0	92.3
	4	147.0	72.2	129.6
計		1944.0	630.8	1294.9

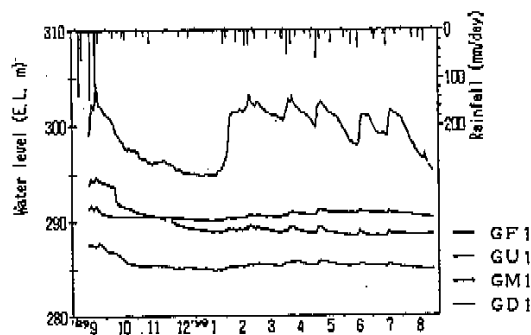


図9 降雨と地下水位の変動 (1989.9~1990.8)

表8に示した観測結果より、正馬様河川流量観測地点 (SPD) の流域についての年間水収支を考えると、以下のようになる。

$$\begin{aligned}
 G &= P - E - Q \\
 &= 1944.0 - (0.7 \times 630.8) - 1294.9 \\
 &= 1944.0 - 441.6 - 1294.9 \\
 &= 207.5 \text{ [mm/year] } (=0.57 \text{ mm/day})
 \end{aligned}$$

以上の結果から、東濃鉱山周辺における表層部 (土壌層および瀬戸層群) から下層への浸透量として、207.5mm/year (0.57mm/day) という結果が得られた。

((補足説明))

Penman法

可能蒸発散量 (Potential evapotranspiration)

「植物で完全に覆われた地表面に十分に水が供給された場合に失われる蒸発散量」日単位の蒸発散量について考察するため、熱収支式において地中熱フラックス G ($\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) を無視すると、

$$\begin{aligned}
 E_{\text{pp}} &= E_{\text{R}} + E_{\text{V}} \\
 &= \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \left(\frac{R_{\text{a}}}{L} \right) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f(u) \{ \text{esat}(\theta) - e_{\text{a}} \} &\dots\dots\dots(3) \\
 E_{\text{pp}} &: \text{可能蒸発散量 (mm, d}^{-1}\text{)} \\
 E_{\text{R}} &: \text{放射収支項 (mm, d}^{-1}\text{)} \\
 E_{\text{V}} &: \text{空気力学項 (mm, d}^{-1}\text{)} \\
 e_{\text{a}} &: \text{大気の水蒸気圧 (mb)} \\
 \text{esat}(\theta) &: \text{温度 } \theta \text{ における飽和水蒸気圧 (mb)} \\
 R_{\text{a}} &: \text{純放射量 (J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}\text{)} \\
 L &: \text{蒸発潜熱 (kJ} \cdot \text{m}^{-2}\text{)} \\
 &= 4187.6(597 - 0.6\theta) \\
 u_2 &: \text{風速 (m, s}^{-1}\text{)} \\
 f(u) &: \text{風速関数 (mm, d}^{-1} \cdot \text{mb}^{-1}\text{)} \\
 \gamma &: \text{乾湿計定数 (mb, }^{\circ}\text{C}^{-1}\text{)} = 0.66 \\
 \theta &: \text{気温 (}^{\circ}\text{C)}
 \end{aligned}$$

表9 fの値

季 節	f
11～2月	0.6
3～4月, 9～10月	0.7
5～8月	0.8
年 平 均	0.75

$$f(u) = 0.26 (1.0 + 0.537 u_2) \quad \text{.....Penman (1948)(4)}$$

$$f(u) = 0.26 (0.5 + 0.537 u_2) \quad \text{.....Penman (1963)(5)}$$

u_2 : 地上2mの風速 (m, s^{-1})

実蒸発散量ET

$$ET = f \cdot E_{pp} \quad \text{.....(6)}$$

f: 蒸発散係数

表9のfの値は、地点によって若干異なってくる。(表9はイギリスのRothamstedとHarrogateの実験による経験値)

ペンマン式で計算するための各要素の計算式

$$esat(\theta_a) = 6.1078 \exp\left(\frac{17.2693882\theta_a}{\theta_a + 237.3}\right) \quad \text{.....(7)}$$

.....Murrayの式(Murray, 1967)

$$\Delta = \frac{25029.9221}{(\theta_a + 237.30)^2} \exp\left(\frac{17.2694\theta_a}{\theta_a + 237.30}\right) \quad \text{.....(8)}$$

.....Murrayの式を θ_a について微分した式

(Burman et al., 1983)

$$e_a = \frac{RH \times esat(\theta_a)}{100}$$

RH: 相対湿度 (%)

5. おわりに

本報では、製作した表層水理定数測定システムの概要および測定解析について述べた。

本システムは他の用途にも広く用いられている機器の中から、最も適する機器を選択して構成されている。このため、個々の機器の性能に関しては十分に当初の目的を満たしている。しかし、システムとしての完成度としては十分なものではなく、機器が正常に機能するための周辺環境の整備、メンテナンスの合理化、効率化、ならびにデータ処理の合理化等残された問題点も幾つかある。また、設置した機器が測定対象地域に対して十分であるか等、今後検討し抽出された問題点の改善を計る必要がある。

参考文献

- 1) 岡崎一郎: 土壌水の水収支。気象研究ノート, 167, 91-112. (1989)
- 2) 中川清隆: 輪島における熱収支・水収支の気候学的推定。金沢大学教育学部紀要, 27, 15-25. (1979)
- 3) Penman, H.L.: Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. Roy. Soc., London, A, 193, 120-145. (1948)
- 4) Penman, H.L.: Vegetation and Hydrology. Tech. Commun. No.53, Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, England. 124 p (1963)
- 5) 中島誠: 岩盤透過流解析の崩壊量の算定について。第22回岩盤力学に関するシンポジウム, 土木学会. (1991)