

電気アナログ法について (第3報)

齋藤二郎
西林清茂

概要

前2報に引きつづき、三次元的電気アナログ解析法の実施例について紹介する。今回の実施例は地下伏流水の解析問題であって、地下伏流水を工業用水として利用する場合の取水設備の配置計画に関するものである。我が国は他の資源は別として水資源のみは豊富といわれてきた。しかし、戦後の急速な経済発達とともに、現在では豊富な水資源も開発し尽されたという感が深い。工業用水についても例外ではなく、以前は河川の水を直接取水することができたが、その後、法規制の強化や他の水資源利用との関係もあって、河床下の伏流水を利用する方向へと転換を余儀なくされている。多量の工業用水を河床下伏流水から取水する方法は、河川水を直接取水する場合と大いに異なり、取水設備の費用、維持管理などの経済的負担もさることながら、取水設備の配置計画においても非常に複雑な問題が多い。そこで、今回は従来の水理学的方法では解析困難なこのような河床下伏流水の問題を電気アナログ法で解析する方法について述べる。

1. まえがき

河川の水を直接取水する場合は通常の水理学的解析法によって集水設備設置計画を行なっても大きな誤差をまねくことは少ないようである。しかし、河床下も含んだ河川敷内の滞水地盤に複数の有孔ヒューム管あるいは鉄管を集水管として埋設して、地下伏流水を取水する場合の集水管設置計画については複雑な問題が多い。すなわち、滞水層となる地盤の状態、集水管配置状況、各集水管同志の相互干渉などによって伏流水が三次元に複雑な挙動を示すからである。特に相互干渉の問題は複雑で、取水量増加を目的とした集水管新設計画においては、既設集水管によって附近一帯の地下伏流水はすでにポテンシャル変化を受けていることが多く、新設集水管の取水量算定も水理学的計算では解析困難である。ましてや、相互干渉による各集水管の取水量減少程度を予測することは非常にむづかしい。

寒天を使用した電気アナログ解析法はこのような問題の解析に最適の方法であり、水理解析における境界条件を模型で表わし、電気計測を行なうことによって最も効率的な集水管配置を求めることができる。

著者らはこれまで3ヶ所の工業用水源地の集水設備拡張問題を手がけてきた。そのうち2ヶ所は取水量増加を目的として、新たな集水管を既設集水管群のなかに設ける場合の配置計画に関するものであり、他の1ヶ所は既設集水管の取水量増加方法検討である。

ここでは、まず、河床下伏流水の問題を電気アナログ法で解析する場合の一般的方法を述べ、ついで実施例を紹介しながら、河床下伏流水のポテンシャル分布解析、相互干渉問題、集水管取水量解析について述べる。

2. 一般的現地調査

電気アナログ法は一種の模型実験であるため、現地調査を十分に行なう必要がある。現地調査の精度がこの実験を左右するといっても過言ではない。この種の実験で必要とされる現地調査事項を以下に箇所書きにして述べる。

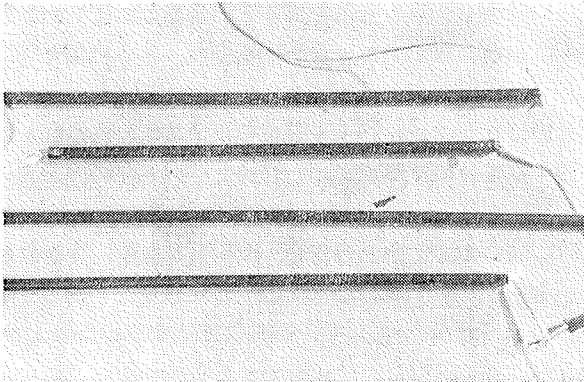
- ①地盤の土質性状……地盤の透水性を基準に対象地区一帯の地層構成、滞水層の層数、深さ、分布など。
- ②河床の状態……地下伏流水の供給源である河床の不透水性物質沈積状態、河床の断面形状。
- ③滞水地盤の透水性……現場透水試験、室内透水試験粒度分析試験の実施。
- ④地下水流入境界条件……地下水圧調査、地下水温度調査、地盤の透水性、地質調査。
- ⑤地下水位(水圧)分布状態(ポテンシャル分布)……模型と実際の相似関係を調べる手掛りとなるので、とくに慎重に行なう必要がある。既成の集水設備があればその影響を、なければ揚水試験の際に揚水井戸を利用して水位観測を実施する。
- ⑥既設集水設備の状況……集水設備の仕用、取水量。
- ⑦その他……河川水および地下水の季節的変動。

3. 実験装置と模型の作成

実験設備は実験装置と模型に分けられる。すなわち実験装置は実験槽、寒天作成槽などと電圧計、電流計、配線などの電気計測装置である。実験槽は模型縮尺に応じて大きさを決め、全体を非電導性とする。

模型は地下水位以下の地盤、集水構造物、河床形状、地下水流入流出源などである。地盤の模型はその透水

性に応じた比電導度の寒天 (不透水性地盤は比電導度の小さい寒天か非電導性物質, 空気などで表わす。) で, 集水構造物は銅線あるいは銅板の加工品, 河床形状は型枠を使用して作成し, 地下水流入流出境界は銅板, 銅棒などの電導物質で表わす。なお, 部分開口の集水管模型は非電導性物質のエポナイト棒に銅線を巻きつけることによって作成できる。



図一 集水管の模型

4. 実験方法

模型地盤, 模型構造物の作成, 電気配線が完了したならば計測実験に入る。この種の問題を解析するには次のような手順で行なう。

①第一段階…模型の境界条件 (おもに地下伏流水の流入源) を実際状態に適合させる実験である。3. の現地調査によって地下水流入境界条件, 河床の状態を調査したならば概略の境界条件を選定できる。そこでこの概略境界条件のもとに, 既設集水構造物のみによる滞水地盤内地下水ポテンシャル分布を求めて, 現地調査の地下水位分布と比較検討する。両者のポテンシャル分布状態に違いがあれば, 模型実験の境界条件設定が誤りであるから, 模型実験の境界条件を修正し, 再びポテンシャル分布を測定して実際のポテンシャル分布と比較検討する。このように, 模型実験のポテンシャル分布が実際のポテンシャル分布と一致するまで模型の境界条件を修正する。この操作は通常3~4回は必要とし, 複雑な境界条件の場合には10回近い修正になるが, この段階が最も重要である。

②第二段階…新設集水管の設置位置, 新設あるいは既設集水管の取水量算定, 既設集水管の取水量増加方法検討などの実験である。①の実験によって模型を実際の状態と相似させたので, つぎに集水管の新設などによる取水量増加方法を検討する。現地調査のポテンシャル分布は詳細ではないが, 第一段階の模型実験では全地区の詳細なポテンシャル分布が求められているので, 集水管のポテンシャル低下あるいは集水管同志

の相互干渉地区を判別することができる。集水管を新設する場合には, このような地区を避け, 又, 既設集水管の取水量増加を計るにはこの地区のポテンシャルを回復させる方法を検討すればよい。集水管の取水量 Q は, 測定電圧を V , 電流を I とすれば,

$$Q = \alpha \cdot \frac{k}{\chi} \cdot \frac{h}{V} \cdot I$$

で求められる。ここに α ; 模型縮尺, χ ; 寒天の比電導度, k ; 地盤の透水係数, h ; 水頭ポテンシャルである。集水管新設の場合には既設集水管の取水量減少が伴なう。又, 河床下滞水層内への集水管新設の場合には集水管が新設されたことによって河床部分で不透水性物質の堆積現象が発生し, 流入境界条件が変化すると考えねばならないので, 何らかの方法でその状態を推測し, 実験の中に組み入れる必要がある。

5. 実施例—1 既設集水管の取水量増加方法解析の例 (東洋紡績岩国工場水源地の例)

東洋紡績岩国工場では約 4,000m³/hour の工業用水を市内を流れる錦川から確保している。この水源地のすぐ上流には観光で有名な錦帯橋もあって水源地は制限され, 集水設備はすべて河床下の砂レキ層内に埋設されている。ここ数年の水源地区内の砂州の発達による取水量減少と工業用水の需要の増大とが重なって, 既設集水管の取水量増加方法の検討が行なわれた。取水量増加方法としては, 砂州部分に位置する集水管に取水能力を回復させるために砂州部分にクリーク状あるいは水田状の導水路を設けることが考えられ, 電気アナログ法によって詳細な解析を行なったわけである。

5.1. 現状解析 (ポテンシャル分布)

集水管は $\phi 1$, 200m/m の有孔ヒューム管である。総延長の約半分は河床下に, 残り半分が砂州部分に埋設されている。現地調査による砂州部分の地下水位分布状態 (ポテンシャル分布) を図一2に示す。この水位ポテンシャル分布は32点の水位観測管によって求めたものであり, 数字は最大水位低下量 (130cm) を 100 とした場合の水位低下量をパーセンテージで表示した。

つぎに図一3は電気アナログ法で求めたポテンシャル分布であるが, 現地調査結果とほぼ似かよった状態を示していることがわかる。このポテンシャル分布を得るまでに模型実験の地下水流入境界条件を4回修正した。この結果から, 地下水流入境界は図一3に示すように, 河川上下流の断面, および河床部分であることが判明する。ただし, 河岸附近のポテンシャル分布は現地調査結果と実験結果とで異なり, 現地調査結果では等ポテンシャル線が河川内にも及んでいる。これ

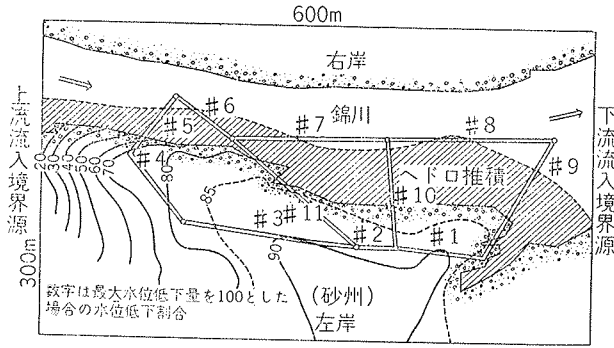


図-2 現地調査結果の地下水位分布状態

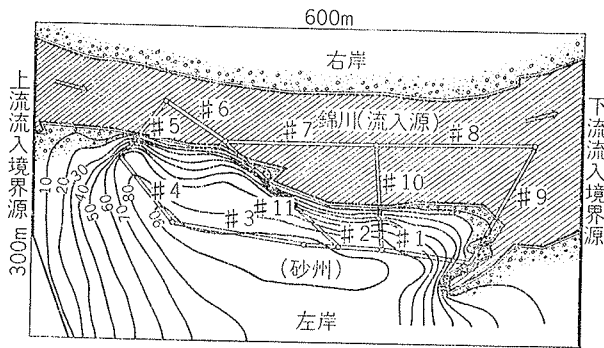


図-3 電気アナログ法による水位ポテンシャル分布

は実験の河川部分における地下水流入境界設定が不十分なため、図-2の河川内斜線部分を流入境界から除外すれば実際と一致したポテンシャル分布を得ることができる。

ポテンシャル分布および地下水流入境界から判断して、最大のポテンシャル低下を生じている地区は砂州内部であることが明白である。したがって、砂州部分にクリーク状の導水路を設け、既設集水管附近のポテンシャル回復を計れば、取水量を増加できると考えられる。

5.2. 導水路による取水量増加解析

集水管から約1m離れた位置に巾3m深さ1mの導水路を並行に設置した場合、たとえば集水管#3の取水量は当初1,240m³/hourであったものが約90%増加して2,300m³/hourとなった。なお砂州部分のすべての集水管の片側に導水路を設けた場合、全体の取水量は約60%増加して6,300m³/hourとなる。実験では、導水路と集水管との距離、導水路の巾員を変化させた検討も行なった。その結果によると、導水路の巾員が増減しても取水量に与える影響は少ない。しかし、集水管と導水路との距離の影響は大きく、1mから4~5mに離れば取水量の増加は半減する。ただし、実際に導水路設置を考える場合には、導水路河床部分へのヘドロ堆積あるいは洪水時の導水路崩壊などに対する種々の対策を行なわねばならず、集水管新設とくらべた場合の経済効果は一概に優れているとはいえない。

6. 実施例-2 新設管による取水量増加解析の例 (山陽パルプ岩国工場水源地の例)

この実施例では集水管同志のポテンシャル相互干渉を解析することによって最も効率の良い新設集水管設置位置選定方法について述べる。図-4は既設集水管のみの配置とポテンシャル分布を示したものである。このポテンシャル分布を見ると、各集水管附近の地下水はかなりポテンシャル低下を受け、とくに集水管#1, #2, #3付近では相互干渉が発生していることがわかる。このようなポテンシャル分布を示す地区に新設管を増設する場合には集水管#3と#4および#4と#5の間が適当と判断される。そこで新設集水管の設置予定位置を#A, #B, #Cの3ヶ所と仮定し、取水量を算定、比較検討してみる。まず既設集水管のみの取水量は実測値5,000~6,000m³/hourに対し、実験値は4,990m³/hourであった。この程度の差は満足できるものである。各集水管の取水量を表-1に示す。新設集水管#A, #Bを加えたときの全取水量は5,550m³/hourであって11.2%の増加であった。しかし、新設集水管#A, #Bが加わったことによって既設集水管の個々の取水量はいずれも低減している。とくに新設集水管#A, #Bに近接した既設集水管#4, #5はそれぞれ15%, 13.8%と低下した。さらに新設集水管#Cを加えた場合には全体の取水量が5,590m³/hourと12%増加しただけで新設集水管#Cの効果はわずか0.8%である。

そこで、新設集水管#A, #Bおよび#A, #B, #Cが加わった場合のポテンシャル分布を求め、取水量の変化とあわせて比較検討してみよう。

図-5は新設管#A, #Bを加えた場合のポテンシャル分布である。既設集水管のみの場合にはポテンシャル低下を受けていなかった位置でも、新設集水管#A, #Bが加わったために、新旧集水管同志の相互干渉が発生し水源地全体がポテンシャル低下している。とくに既設集水管#4付近は新設集水管#A, #Bの影響を最も強く受けポテンシャル低下が著しい。既設集水管#3の取水量低下も大であるが、付近のポテンシャル分布が大きく変化していることから理解できる。又、新設集水管#A, #Bから遠くはなれている既設集水管#1, #2も表-1のごとく取水量低下しているが、図-5のポテンシャル分布を見ると、この附近も相互干渉によるポテンシャル低下が発生していることがわかる。

つぎに新設管#Cを加えたときのポテンシャル分布を図-6に示す。新設管#Cの位置は図-5でわかるように集水管#4と#Bによってすでにかかなりのポテンシャル低下を受けていた。そこに新たな集水管#Cが加

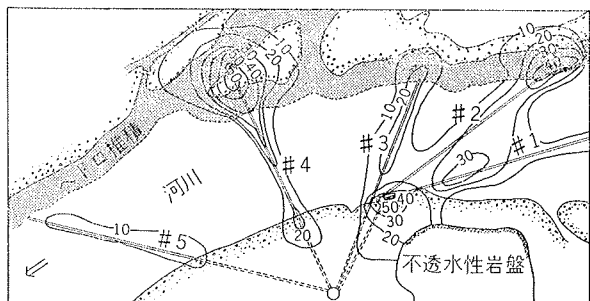


図-4 既設集水管のみの水位ポテンシャル分布

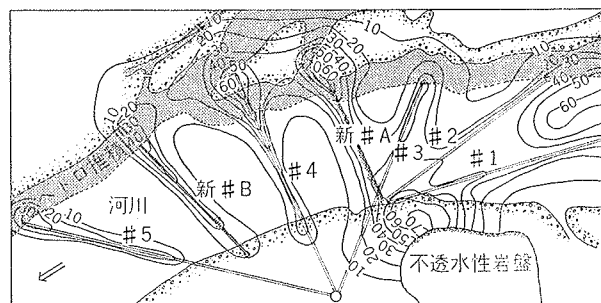


図-5 新設管#A, #Bを加えた場合の水位ポテンシャル分布

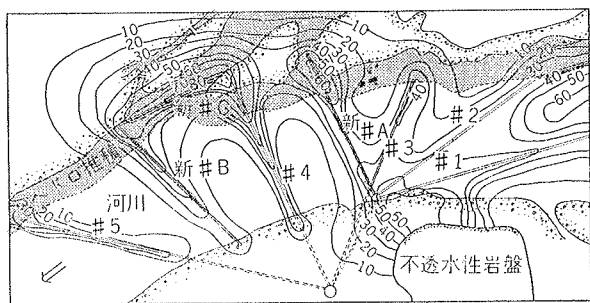


図-6 新設管#A, #B, #Cを加えた場合のポテンシャル分布

わると、この水源区内で最も大きなポテンシャル低下状態を示し、取水効率の悪い原因を裏付けている。

6.1. 導水管設置による取水量増加検討

新設管#Cのように河川内であっても河床部分に不透水性のヘドロ物質が推積している場合には取水効率が悪い。そこでこのような河床下に埋設されている集水管の効率を上げるために、集水管に近接させて導水管を設置する方法について検討した。すなわち、集水管埋設附近の滞水層内に穿孔鉄管を設置し、この導水管を通じて河川水を集水管が埋設されている滞水層に導水する方法である。電気アナログ法の実験装置を図-7に示す。実験では導水管の管径、ピッチ、集水管からの距離を変化させ、集水量の増減を検討した。図-8は集水管のみのときの取水量を1とした場合の導水管による取水量増加の効果を示したものである。図から判るように導水管のピッチ、集水管からの距離と

集水管区分	#1	#2	#3	#4	#5	新設管 #A	新設管 #B	全集水管 の湧水量
既設管のみ (m ³ /hour)	1,450	1,700	590	600	650	-	-	4,990
新設管増設 (m ³ /hour)	1,350	1,540	540	510	560	590	460	5,550
集水管増減率(%)	-6.9	-9.4	-8.5	-15.0	-13.8	-	-	+11.2

表-1 新設管増設による各集水管の取水量変化

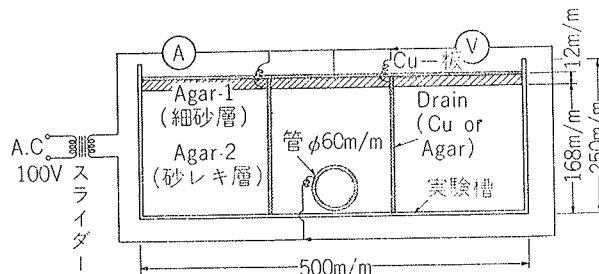


図-7 電気アナログ模型実験装置

も小の方が効果があり、管径も大の方が良い。しかし、実際には導水管の開口率の制約、目づまりなどがあるため、効果も控え目に考えておく必要がある。

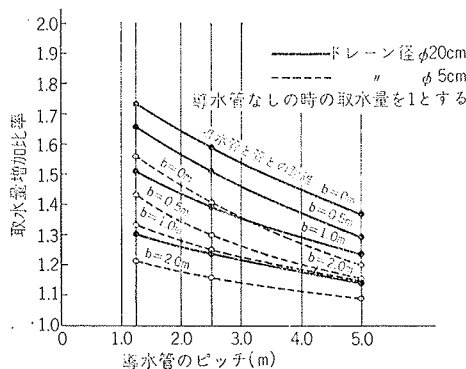


図-8 導水管設置の取水量増加

7. 実施例-3 新設管による取水量増加解析の例 将来(定常状態)の新設管取水量予測方法 (山陽パルプ江津工場水源地)

河床下に集水管を新設した場合、設置当初、取水量が大であっても時間が経過するにしたがって取水能力も低下する。これは集水管が新設されたために、いままでも河川水流入源であった河床部分に不透性物質が沈積し、河川水の供給が十分行なわれなくなるからである。したがって、新設管の取水量も流入源の変化を考慮した定常状態のときの値を推定する必要がある。ここではその推定法の1例を紹介する。

江津水源地は江川にあって、管径φ120cm、管長80~100mの6本の穿孔ヒューム管が河床下に埋設され、6,600m³/hourの取水量を確保している。計画では延長

80mの集水管を新設し、1,000m³/hourの取水量増加を期待している。現地調査の結果、集水管埋設地区の河床部分にはヘドロが堆積しており、滞水層(砂レキ層)への河川水供給源は、図-9に示すように、集水管埋設地区の上下流域であった。又、電気アナログ法による現状解析の結果によれば、河川内の流入域でも集水管に近い範囲は一部にヘドロが堆積した部分流入域となっていた。新設集水管の設置予定位置は既設集水管#6の延長上に3ヶ所仮定した。現状の流入境界条件のままであれば、新設集水管予定位置はヘドロの堆積も少なく、河川水流入源にも近いので、いづれの位置でも2,300~4,500m³/hourの取水量増加を見込める結果となった。しかし、この値は新設管設置直後の一時的なもので、時間が経過すれば、附近の河床にヘドロが堆積して河川水流入源も後退し、取水量も減少することが明らかである。そこで、将来、河川水流入源が定常状態になったときの新設管取水量を予測する実験を行った。

7.1. 河川水流入供給源の変化と新設管取水量の予測

集水管が新設された場合の附近の河川水流入供給源を予測する一定の方法はない。ここでは新設管が加わって附近の流入供給源が変化したとしても、その位置から最も遠く離れた既設集水管#2と#3の取水量は一定であると仮定し、流入供給源を除々に変化させて既設集水管#2、#3の取水量が減少し始めるときの流入供給源を求めることとした。その具体的方法は現在流入供給源となっている新設集水管周囲の流入域を図-10に示すように細分化し、次々に取りはずして、その時の既設集水管#2、#3の取水量を求める方法である。

図-11は各仮定流入源下における既設集水管#2、#3の取水量変化を示したものである。なお、この取水量の値は新設管の位置にかかわらず一定であった。これによると、既設集水管#2、#3の取水量は流入源をDまで取りはずしたときにはじめて減少している。したがって、新設集水管が設置されれば、附近の流入源は変化し、定常状態の流入源領域が図-10のA~Dの一部

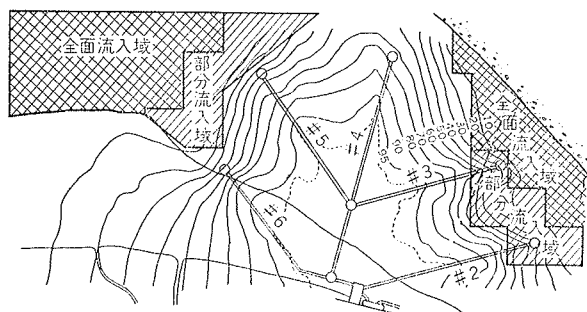


図-9 現状解析結果の流入境界条件と水位分布

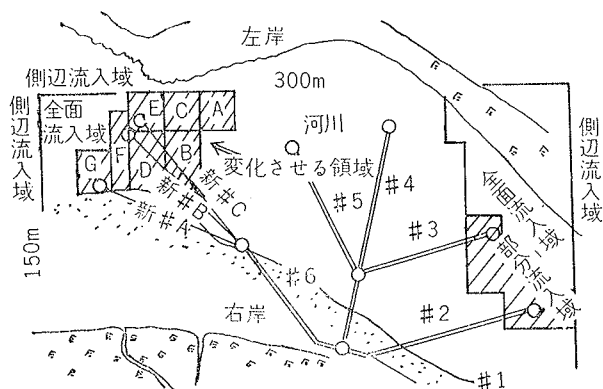


図-10 新設管が加わった場合の仮定流入境界条件

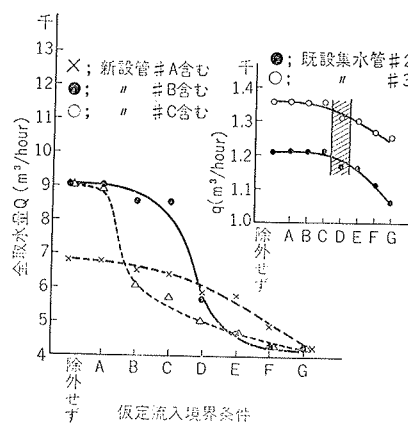


図-11 流入境界条件の変化による既設集水管#2、#3および全体の取水量変化

を除いた範囲であると予想される。又、新設管設置位置の違いによる全体の取水量は図-11のように変化しており、新設管#Aの位置が最も効果的である。このときの全体の取水量は7,900m³/hourとなって、新設管が加わったために1,300m³/hourの取水量増加を見込むことができる。

8. あとがき

以上、3つの実施例を紹介しながら、河床下に埋設する集水管の諸問題を電気アナログ法によって解析する方法について述べるとともに、河床下伏流水のポテンシャル分布、相互干渉問題についても論じた。このように通常の水理学的方法では解析困難な河床下伏流水の問題も、現地調査を十分かつ正確に行ないさえすれば、電気アナログ法によって三次元的に解析可能ながことが明らかである。