

はじめに

扇状地では、高透水性の砂礫層を通じて扇頂で涵養した地下水が扇端へ流出する典型的な三次元地下水流動場が形成されることが知られる。しかしシミュレーション等で、実態の評価や再現をするためには、砂礫層の透水性分布や、河川水と地下水の交流現象などのモデル化が課題となる。本研究は、札幌市の基盤となる豊平川扇状地を対象に、その三次元地下水流動場の解明と定量化を目的としている。

豊平川扇状地は、地形的に東側の古い平岸面と、西側の新しい札幌面に分けられる。特に札幌面は良透水性の砂礫層への河川水の流量減少(地下水涵養)現象が生じている。

既往流量観測(2008)の結果、河川流量の減少は扇端 KP11.1~扇頂 KP18.2 において 1~3m³/s の範囲で、河川流量との正の相関(河川流量大→減少量大)が認められた。この相関性の要因は未だ明らかでないが、仮説的には、河床部の局所的な透水性、河床方向への河川流速ベクトル、地表水と地下水の温度差(密度流)などが想定される。

今回新たに可搬式 ADV(Acoustic Doppler Velocimeter)を導入し、精度の高い河川流量分布を把握できた。更にダルシー則と観測井の温度プロファイルから、水平方向と鉛直方向の地下水涵養の実態を概算したので、報告する。

調査解析手法

流量観測に用いたのは Sontek/YSI 社の可搬式 ADV「Flow Tracker」である。本製品は USGS との提携により室内での ADV を屋外調査用に開発され、2cm 程度の浅水深でも 0.1mm/s の分解能を確保する。また ISO 規格および USGS が提案する統計法による誤差評価も可能である。流量観測は、図-1 に示す豊平川の上流計 10 地点および 2 つの支川における同時観測(河川水位が安定した 2 日間の連続観測)を計 3 回(2010 年 9 月 14~15 日, 9 月 24~25 日, 10 月 8~9 日)実施した。調査に先立ち、浅水深用 ADCP(Acoustic Doppler Current Profilers)である「Stream Pro」を 2 地点(調査地点 2,9)で実施し、ADV との結果を比較した。また調査地点 2,10 においては、国交省で定期に実施する流量観測も同日に行い、その結果も比較した。

温度検層は、豊平川扇状地に設置した複数の地下水観測孔で新たに 2 回(6 月, 8 月)実施した。温度測定には白金抵抗温度計を使用し、地下水面下より測定間隔 0.5m ピッチ, 50m 以深 1m ピッチとした。この内、BW03 と BW05 の観測結果に対し、1 次元熱移流拡散モデル(有限差分法-陰解法, 2002 年 5 月 30 日~2010 年 8 月 19 日までの非定常計算)を用いた温度プロファイルの再現を試みた。

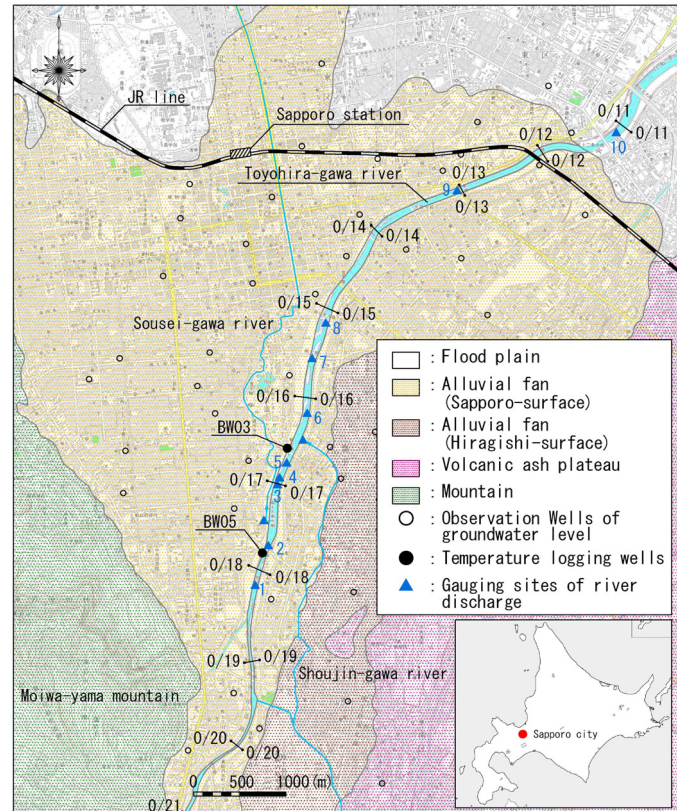


図-1 研究サイト(豊平川扇状地)

調査解析の結果

ADV と ADCP の観測値(Original)は平均流速は概ね一致するが、流量は粗礫が点在し中州もある上流地点 2 で大きく異なった。そこで、流速測定地点の水深を通常行う 1 点観測でなく、0.1m ピッチで直接測定した 0.5m 移動平均とした水深に置き換えると両者はほぼ一致した(ADCP の流量には ADV で測定した中州部分を加えた)。導入した ADV は、水深測定を密に行うよう留意すれば、豊平川のように、従来のプロペラ式流速計や ADCP では誤差が大きい、厳しい観測条件下でも流量精度を確保できる。

表-1 ADV と ADCP の観測結果の比較

No.9		7-Jul		
Velocity meter	Data	Q(m ³ /s)	Area(m ²)	Mean V(m/s)
ADV	Original	6.06	14.34	0.422
	Corrected	5.38	12.73	0.423
ADCP	Original	5.41	13.06	0.414
No.2		7-Jul		
Velocity meter	Data	Q(m ³ /s)	Area(m ²)	Mean V(m/s)
ADV	Original	6.49	15.17	0.428
	Corrected	5.61	12.34	0.455
ADCP	Original	4.74	10.15	0.467
	Corrected	5.42	13.10	0.413
San-ei (propeller)	Original	6.38	15.13	0.420

同時流量観測結果（河川流量の縦断分布）を図-2 に示す。ADCP は1回のみだが、特定の流量減少区間は認められない。特に上流側は中州や粗礫が分布し水深が浅いなど、ADCP の測定には適さなかった可能性が高い。

一方、ADV による観測結果では、一貫して同様な流量分布を示し、KP16.7~17.0 付近（観測地点3,4,5）の約0.3km が流量減少区間である。また流量の減少量 dQ （観測地点9もしくは10 流量一同3 流量）は、水位がほぼ同じ条件の9月の2回は0.5 m^3/s と等しく、水位の高い10月観測では1.0 m^3/s で、河川流量との正の相関が確認できた。

なお扇端部での観測地点9から10にかけての流量増加は、地下水の河川への湧出に起因しており、既往の地下水コンター図やシミュレーション結果から説明される。

考察

減少した河川流量は地下水の涵養源となって、その水は扇状地砂礫層中を水平方向・鉛直方向に流動する。

水平方向の流れは、既往の地下水面等高線図と推定透水係数分布（図-3）からダルシー則に基づき計算できる。KP16.7~17.0 に適用すると、河川からの地下水涵養量は、地下水面と河道との傾斜角（10~30°）により0.2~0.8 m^3/s と、オーダー的に流量観測値 dQ と整合する。

鉛直方向の地下水流は、恒温層（Isothermal layer）が深くなるなど、地温分布に変化をもたらす。熱移流拡散解析に用いる鉛直流速 $v(t, z)$ は、流体の密度 ρ や粘性 μ の温度依存（図-3 左）に加え、砂礫層の透水係数モデルから推測した透水係数分布（同右）も考慮しモデル化した。観測井 BW05 の温度プロファイルを再現する、河床（ $Z=0$ ）での鉛直流速は $v_0=0.1\sim 1m/d$ 程度と推測された（図-4）。この場合の鉛直方向の地下水涵養量は、せいぜい0.02 m^3/d 程度で、水平成分の試算に比べ1 オーダー以上低い。

以上より、豊平川扇状地の場合、河川から地下水への

涵養量（河川流量の減少量）は鉛直成分より水平成分が主体と推測される。また本解析結果からは河川流量と涵養量と相関に、温度効果をもたらす可能性は低いと言える。

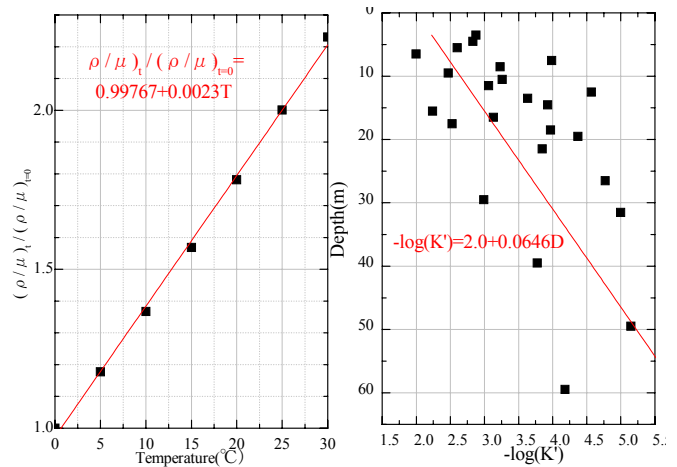


図-3 水の物性の温度依存(左)と、透水係数の推定深度分布(右)

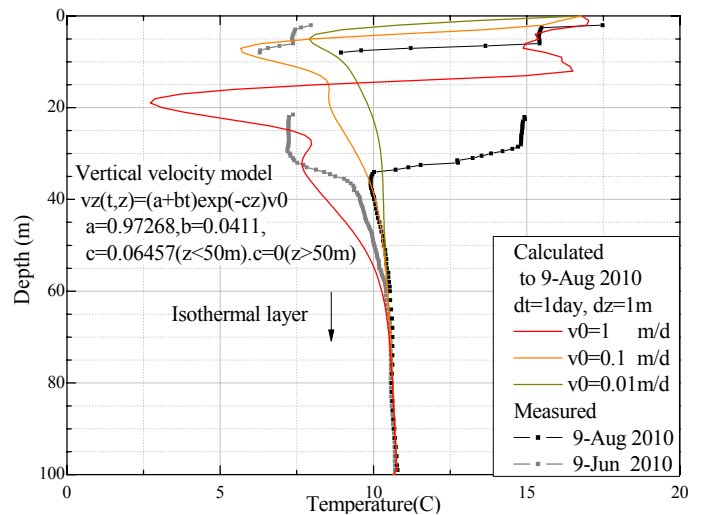


図-4 BW05 温度プロファイルの、熱移流拡散解析による再現

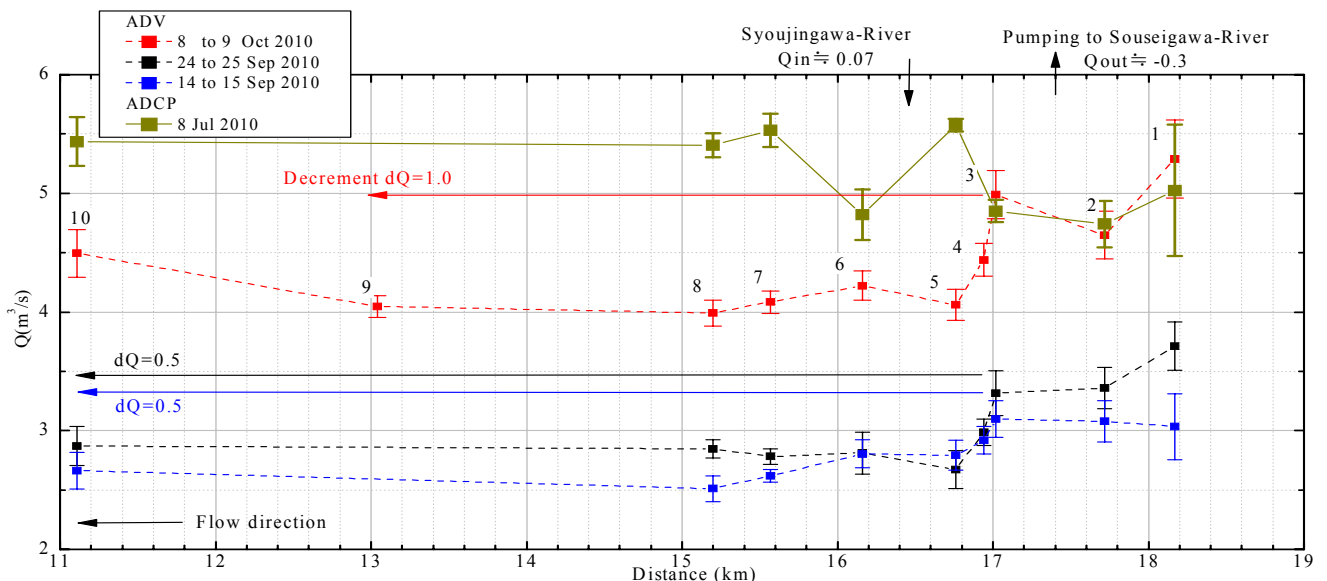


図-2 豊平川における可搬式ADVを用いた同時流量観測結果（流量分布）