

地下水と河川水の相互作用に基づく扇状地の水循環構造の分析

Analysis of Hydrologic Processes in Alluvial Fan Based on Interaction Between Groundwater and River Water

(株) 福田水文センター

○正会員 杉原幸樹 (Kouki Sugihara)

室蘭工業大学 大学院工学研究科

正会員 中津川誠 (Nakatsugawa Makoto)

1. はじめに

札幌市は豊平川扇状地に形成された、人口約190万人の都市である。かつて扇端部（現在の大通り近辺）の湧水を生活用水とし、街が形成されてきた歴史がある。

しかし1960年（昭和35年）には、ほぼ湧水が枯渇していた¹⁾。巖倉ら²⁾や古川ら³⁾は都市化による雨水浸透の阻害と地下水の過剰揚水によって地下水位が低下していると報告している。一方で地盤沈下などの影響が顕著になったことから、地下水揚水量の制限など地下水涵養の施策も行われている。

しかし豊平川扇状地においては湧水が回復することなく現在に至っている。また都市化が進むことにより、扇状地の地下水涵養は豊平川からの河川水浸透が大きな役割を担っていると推定されている⁴⁾が、河川と地下水との関係を考慮した、水循環構造には不明な点が多く、地下水保全や河川管理上の課題となっている。

そこで、本報告は現在の扇状地の水循環構造を明らかにすることを目的とした。特に河川と地下水の相互作用を考慮した水循環構造に注目した。

まず豊平川の観測データから河川内の水収支について検討を行った。次に表層水と地下水を統合したモデル（USGSの表流水—地下水統合ソフトGSFLOW）を利用して、河川水位、流量および地下水位の再現を試みた。

2. 対象流域

対象流域は図-1に示す豊平川扇状地とした。豊平川扇状地は豊平川中流を扇頂として広がっており、豊平川右岸側の平岸面と左岸側の札幌面の二つの地形面で構成されている。平岸面は新第三紀の火山岩や堆積岩、札幌面には更新世後期の軽石流堆積物が分布している⁵⁾。また札幌市の浅層地盤図⁶⁾から引用した図に一部加筆した図を図-2に示す。AB面における断面図から標高10m以上では4m程の砂層の下に硬い砂礫層（図中茶色）が50m以上堆積しており、標高10m以下では40m程度の砂層（図中黄色）、粘土層（図中水色）が堆積している。このことから50m以浅の地下水位観測井は不飽和層、50m以深は飽和層に対応すると考えられる。これより浅層地下水に注目し、図-1中白丸はスクリーン深度が50mより浅い地下水位観測井を示している。さらに図-1右の詳細河道図中赤丸は河川水位流量観測所を示しており、豊平川に流入する主要な支川をほぼ網羅している。

豊平川は大都市を貫流する急流河川であるため、治水や利水のため河川改修や流量調整が進められてきた。このような人為的改変に影響されてきたと考えられる湧水の枯渇により、水枯れしている小河川は市内に数多く存在している。これら湧水枯渇の原因を定量化することで、元来の豊富な湧水と河川流量のもとでの河川環境と治水・利水の安全度確保といった健全な水

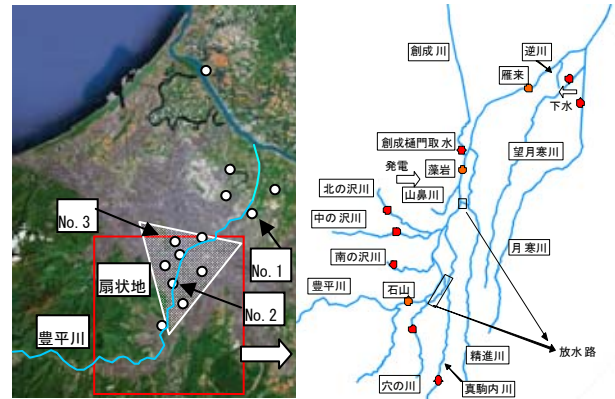


図-1 対象流域と詳細河道図

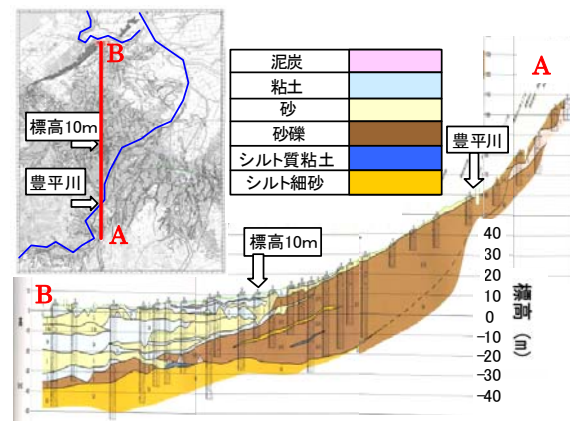


図-2 札幌地盤状況

循環系を再生する方策を提案することが可能となる。

3. 河川流量からの涵養量の推定

まず、河川からの涵養量を推定するため、豊平川を中心とした河川流量の整理を行った。豊平川本川の石山、藻岩、雁来観測所を中心に上流域（石山から藻岩間）と下流域（藻岩から雁来間）で時刻流量を基準に水収支を検討した。

ここで時刻流量のデータが最も揃う2008年を対象とした。また時刻データの無い山鼻川、精進川については一定値を与えた。山鼻川は濱原ら⁷⁾の報告より $9.73\text{m}^3/\text{s}$ 、精進川は過去の流量観測データ⁴⁾より $0.17\text{m}^3/\text{s}$ を与えた。また精進川は高水時には放水路により藻岩上流に放流されるが、本研究では藻岩下流に全て合流するとした。

次に到達時間を考慮して藻岩の流量に対する上流側各観測所の流量との直線回帰による相関係数および雁来の流量に対する藻岩流量の相関係数を表-1にまとめる。このとき石山、藻岩、雁来の流量観測時の流速が $0.3\sim 1.5\text{m/s}$ （流量で $0.8\sim 27\text{m}^3/\text{s}$ に対応）であり、到達時間は各区分で1時間～6時間程度と推定される。このことは年間を平均すると表-1に示す相関関係が得られ、渴

水期や豊水期など時期を限定すると異なる結果となることが示唆されるが、本研究は年間を通しての変動に注目した。

雁来を例にすると藻岩流量と1時間後の雁来流量が最も相関関係がよくなることを示している。これより最も相関関係が強い組合せで合成流量を見積もり、水収支推定式 (1)、(2) を設定した。ただし括弧内は時間差を表し、藻岩推定式では穴の川の5時間前の観測流量と南の沢川の4時間前の観測流量のように時間差を考慮して加えている。

$$\begin{aligned} \text{藻岩} = & \text{穴の川}[5] + \text{南の沢}[4] + \text{中の沢}[4] \\ & + \text{北の沢}[5] + \text{真駒内}[3] + \text{石山}[1] \\ & + \text{山鼻}[\text{定数}] + \text{降水} - \text{蒸発} + \text{残差} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{雁来} = & \text{藻岩}[1] + \text{精進川}[\text{定数}] - \text{創成取水} \\ & + \text{降水} - \text{蒸発} + \text{残差} \end{aligned} \quad (2)$$

式 (2) より下流域における残差を0とした場合の推定した流量と観測流量の相関図を図-3に示す。図中赤線は増減が無い場合の直線である。図-3の結果から雁来の観測流量が増加する場合に藻岩から雁来間の合成流量の方が流量が大きいこと、つまり地下へと浸透していることが示唆される。

観測流量と推定合成流量より各区間の残差を図-4, 5に示す。ここで蒸発散量および直接降水量は濱原ら⁷⁾の報告より豊平川流域の降水量2100mm/year, 蒸発散量542mm/yearを参考に川幅100m, 流路長10kmとすると、直接降水量は $0.067\text{m}^3/\text{s}$, 蒸発散量は $0.017\text{m}^3/\text{s}$ となり、各区間に一定値として加味した。図中の正の値は湧出や残流域の流出量, 負の値は浸透を表している。図-4に示すように上流域では融雪期 (3月～5月) や降雨にあわせ湧出し、渇水期 (7月～10月) には浸透する結果となった。しかし、山鼻川で設定した一定流量を省くと、年間を通して湧出傾向を示す。上流域での収支を取るためには山鼻川の時刻データを収集、整理することが今後の課題である。

一方、下流域では上流域とは逆の傾向を示し、融雪期や降雨時に浸透量が大きく、年間を通して浸透傾向が強いことが示された。このときの浸透量は $0 \sim 13.7\text{m}^3/\text{s}$ となり融雪期の浸透量が大きく約 $7\text{m}^3/\text{s}$ 程に達する。また年間の平均浸透量は $1.10\text{m}^3/\text{s}$ となった。田中ら⁸⁾は2008年に実施した縦断同時流量観測の結果から浸透量を $1 \sim 3\text{m}^3/\text{s}$ (5/30～12/4の計7回観測) と見積もっている。また過去 (昭和37年から平成7年にかけて18回) の縦断同時流量観測の結果⁹⁾からも浸透量は $0.27 \sim 2.33\text{m}^3/\text{s}$ となり、平均して $0.84\text{m}^3/\text{s}$ の浸透量と報告しており、本研究結果の浸透量とほぼ一致する。

4. 地下水位の変化

次に豊平川扇状地における地下水位の観測データを整理する。

図-1中No.1, No.2の年平均地下水位を図-6に示す。図中縦軸は地盤からの距離として表している。No.1ではほぼ一定で推移しているが、No.2では漸減傾向を示している。このとき札幌市全体の地下水揚水量は1980年以降 $10\text{m}^3/\text{day} \sim 14\text{m}^3/\text{day}$ であり年々減少している。巖倉ら²⁾は年間地下水涵養量を降水 1200万m^3 , 豊平川 3150万m^3 と推定し、揚水量を 4200万m^3 と報告している。降水量による涵養が変わらないとし、河川の涵養量を図-5より $1.1\text{m}^3/\text{s}$ とすると、現在の年間における涵養量は 4668万m^3

表-1 各観測所間の相関係数一覧

観測所名	藻岩						
	同時刻	1時間	2時間	3時間	4時間	5時間	6時間
穴の川	0.356	0.379	0.395	0.407	0.412	0.412	0.406
南の沢	0.375	0.387	0.396	0.402	0.403	0.399	0.393
中の沢	0.458	0.468	0.474	0.477	0.478	0.473	0.466
下北の沢	0.210	0.218	0.224	0.228	0.230	0.231	0.230
真駒内常盤	0.493	0.521	0.541	0.549	0.548	0.538	0.523
石山	0.570	0.571	0.552	0.519	0.479	0.436	0.392

観測所名	雁来						
	同時刻	1時間	2時間	3時間	4時間	5時間	6時間
藻岩	0.969	0.975	0.965	0.944	0.917	0.887	0.855

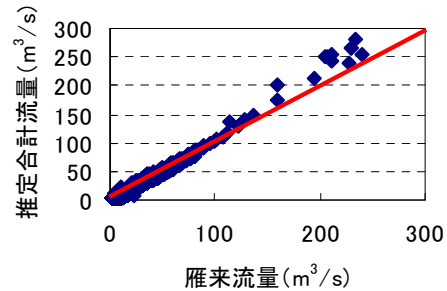


図-3 雁来流量に対する下流域の流量

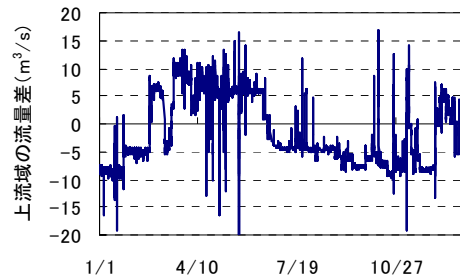


図-4 上流域の流量差

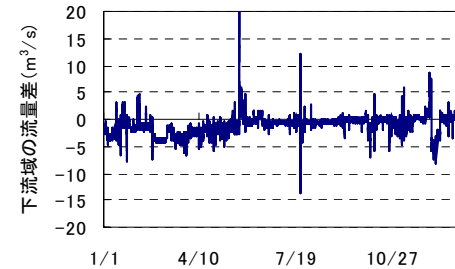


図-5 下流域の流量差

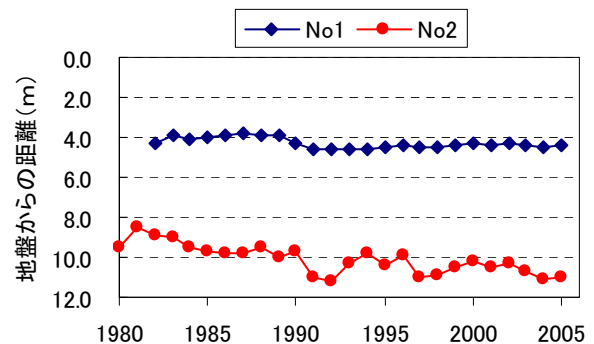


図-6 地下水位の推移

(降水 1200万m^3 +河川浸透 3468万m^3), 揚水量が 3650万m^3 となり、地下水位としては上昇傾向を示すはずである。しかし観測地下水位は減少傾向を示している。その他の水収支の要素とし

て蒸発散や深層への浸透などが考えられる。そこで蒸発散量を概算すると、豊平川扇状地面積が約28km²（図-1中白網）であり、濱原ら⁷の蒸発散量を用いると1517万m³となり、さらに深層地下水への流出量も考慮すると、現状の涵養量では浅層地下水を賄えないことを示唆している。ただし蒸発散量については都市部ではさらに小さくなることが考えられ、その詳細は今後、検討する必要がある。

湧水の回復や涵養量の不足などを検討するためには、計算モデルを用いるのが効果的であるが、豊平川扇状地においては河川からの涵養量の占める割合が大きく、河川水と地下水の交換を考慮できる総合的な水循環解析が必要となる。

5. 水循環モデル

水循環モデルはUSGSの公開ソフトである、GSFLOWを用いた。GSFLOWは降雨流出モデル（PRMS）と3次元地下水モデル（MODFLOW）を統合した水循環モデルである。モデルの詳細⁹については割愛するが、モデルのループは表流水を算出し、地下水計算に流量を受け渡した後、地下水を算出し、表流水と結合させる構造となっている。このため河川など地表水の水量の変化、および断面形状など水位の変化要因にも対応できるモデルである。

GSFLOWを豊平川扇状地に適用し、構築したモデルの概要を表-2にまとめる。計算領域は豊平川左岸地区を中心に海岸線までを考慮し、集水域の異なる新川流域を除外した。図-7に表層の透水係数分布図および表-3にその他係数を示す。図-7中矢印で示す位置に設定流量（表-2参照）を与え、地下鉄路線（図中心部白線）に該当するメッシュの透水係数は地下35mまでを均一に粘土と同様の値を設定した。各値は水平方向、鉛直方向、同一としてキャリブレーションによって決定した。また揚水については計算領域全体で10万m³/dayとして各メッシュに均一に分割して与えた。出力としては河川水位、流量、地下水位、蒸発散量、涵養量など表層水と地下水の水循環に関する算出値が得られる。

6. 再現計算

構築したモデルを用いて、2008年を対象として再現計算を行った。年平均地下水位の等高線図を図-8に示す。黒線は観測地下水位（観測地点は図-1参照）、赤線は計算地下水位を表す。分布形状はほぼ再現できていることが確認された。豊平川に沿った、地下水位が2.5～50mの範囲は観測井が多く、計算値と良く一致している。

さらに観測値と計算値の時系列の変化を比較した。図-9に雁来観測所の観測流量と計算流量を示す。さらに図-10にNo.3（図-1参照）における観測地下水位と計算地下水位を示す。河川を含めた表流水、涵養量を加味した地下水位のいずれも良い再現性を示している。降雪期や融雪期など、さらなる検討が必要な点もあるが、年間の平均的な取り扱いにおいては十分な精度を有していると考えられる。

7. 豊平川からの涵養量

次にモデル計算による河川からの涵養量について検討を行った。既往文献^{2,3,4,8}では豊平川からの地下水涵養はKP15.0～

表-2 モデル諸元

項目	対象	設定値
流域メッシュ	南北34km東西17km	250mメッシュ、136×68
標高	流域	数値地図250m標高
鉛直層分割	地下50mまで	3層、札幌地盤図 ⁶ より読み取り
境界	海岸線、茨戸川	定水頭 0m
	石狩川	石狩川水位
	その他	標高-1mの定水頭
河川境界	豊平川	川幅×高さ3mの矩形断面
流入	上流端	石山流量
	厚別川、月寒川、発電放流	下水、発電放流を想定し、各4m ³ /s、2m ³ /s、9.7m ³ /sで一定
流出	創成川合流点	取水流量1.5m ³ /s一定
地下鉄	路線相当メッシュ	地下35mまで粘土として設定
水路	発寒川、創成川、雁来新川	標高値を0.5m低下させて設定
気象	最高気温、最低気温、降水量	札幌管区気象台観測データ

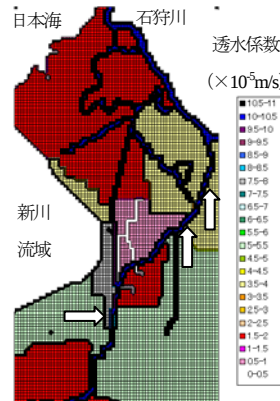


図-7 表層透水係数分布図

表-3 モデル係数

層番号	性状	透水係数 (m/s)
1層	砂	図参照
2層	粘土	1.0×10^{-6}
3層	密な砂礫	4.0×10^{-7}
河床	砂岩	1.0×10^{-4}
層番号	性状	比貯留係数 (m ⁻¹)
1層	砂	2.5×10^{-3}
2層	粘土	2.5×10^{-3}
3層	密な砂礫	2.5×10^{-3}
河床	砂岩	1.0×10^{-4}

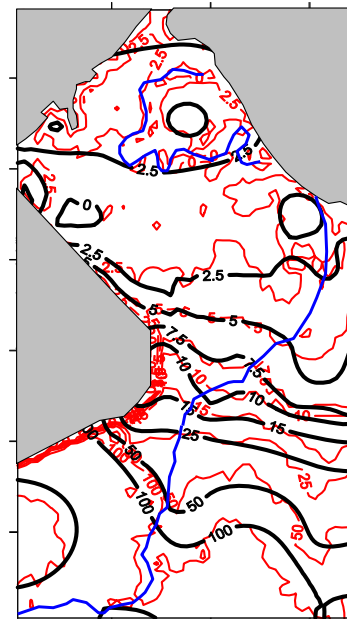


図-8 2008年平均地下水位の再現結果

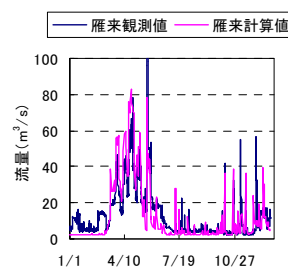


図-9 河川流量再現

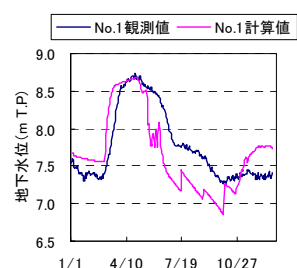


図-10 地下水位再現

KP18.5の区間で起り、特にKP15.5～KP16.5の区間において卓越し、その涵養量は $0.2 \sim 7.9 \text{ m}^3/\text{s}$ と報告されている。そこでモデル計算により得られた、河川からの涵養量を整理した。流量観測データとの比較を行うため、藻岩から雁来までの区間を対象とした。河川からの涵養量の計算値から年平均値を求め、1km毎に集計した結果を図-11に示す。

この結果から涵養はKP14～KP15の $0.31 \text{ m}^3/\text{s}$ をピークに山型の分布となった。涵養位置としては既往の報告と比べると、やや下流側に涵養域がずれているが、おおむね一致している。モデル上は河床の透水係数は同一値を与えているため、地盤構造(層の厚さ)や河川水位が反映された結果と考えられる。このことは地形的に涵養しやすい地点がKP15kmであり、水循環を考慮するうえでは重要な地点であることがわかる。一方でモデルの更なる精度向上のためには河床の透水係数を詳細に設定する必要があることを示唆している。

次に量的な比較を行う。既往報告では藻岩から雁来の区間全体で涵養量の推定をおこなっているため、同様に図-11の全区間を合計した場合、藻岩から雁来間の涵養量は $1.28 \text{ m}^3/\text{s}$ となった。観測流量データからの推定(3章参照)では年平均涵養量は $1.10 \text{ m}^3/\text{s}$ であり、ほぼ一致する。

年間の変動を確認するため時系列の出力値を区間で積算し、図-5より推定した涵養量と比較した結果を図-12に示す。この結果、観測値とモデルのいずれも、融雪期や降雨時にあわせて涵養量が増加する挙動を示し、量的にもおおよそ一致することが確認された。このときモデルによる区間集計値の変動幅は $0.71 \sim 3.46 \text{ m}^3/\text{s}$ となり、既往報告と比べても妥当な値であるといえる。

これらの結果から構築した水循環モデルは豊平川からの涵養現象が十分に反映され、河川流量や地下水位、河川と地下水との交換量など、現状をほぼ再現できることが示された。一方で、図-12の結果から時間単位の変動においては降雪期間(12月～3月)の過小評価、渇水時(9月～10月)の過大評価などの問題もあり、今後の課題である。しかし年平均涵養量は流量データからの推定で $1.10 \text{ m}^3/\text{s}$ 、モデルによる解析から $1.28 \text{ m}^3/\text{s}$ と大局的な現象をよく再現していることが確認された。

8. まとめ

本研究により得られた知見としては次の通りである。

- ① 流量観測データより藻岩～雁来の地下水涵養量は $0 \sim 13.7 \text{ m}^3/\text{s}$ となり、年平均涵養量は $1.10 \text{ m}^3/\text{s}$ となる。
- ② 概算の豊平川扇状地における地下水水収支は涵養 4668 万 m^3 、揚水 3650 万 m^3 、蒸発散 1517 万 m^3 となる。このため流出傾向を示し、地下水位は低下傾向を示す。
- ③ GSFLOWを用いて、豊平川扇状地における水循環モデルを構築し、よい再現性を示した。
- ④ モデルによる結果から豊平川からの地下水涵養地点はKP14～15kmが卓越する。
- ⑤ モデルによる結果から藻岩から雁来間の地下水涵養量は $0.71 \sim 3.46 \text{ m}^3/\text{s}$ で、融雪期や降雨時に涵養量が増加する。年間平均涵養量は $1.28 \text{ m}^3/\text{s}$ となる。

参考文献

- 1)「豊平川上流ダム環境会議」編集委員会：都市と水－豊平川

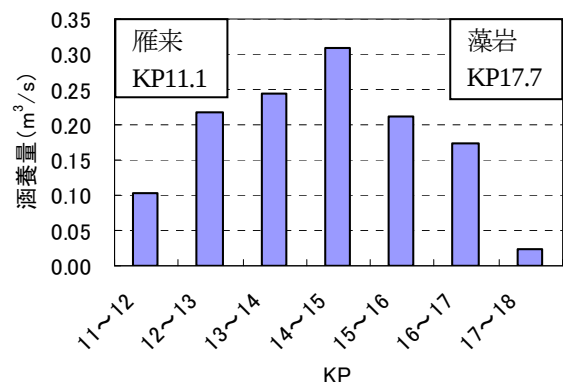


図-11 計算値による豊平川区間涵養量

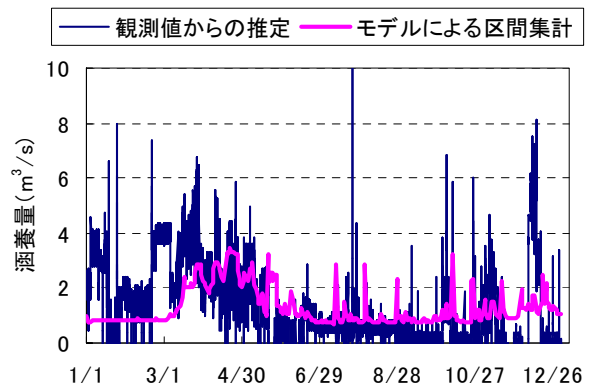


図-12 観測値と計算値の涵養量変化

の開発と環境保全一, 1992.

- 2) 巖倉哲子, 柳屋圭吾, 山本正毅: 札幌近郊に於ける地下水の現状と展望について, 第38回 北海道開発局技術研究発表会, 河-8, 1995.
- 3) 古川治彦, 黒木幹男, 板倉忠興: 豊平川扇状地の地下水涵養機構について, 土木学会北海道支部 論文報告集, No. 53(B), pp. 202-205, 1997.
- 4) 北海道開発局石狩川開発建設部: 地下水循環保全検討業務報告書, 1996.
- 5) 長岡大輔, 小西弘将, 向井和行: 扇状地研究その1. 豊平川扇状地の地質と水理地質構造, 日本応用地質学会 平成18年度講演論文集, pp. 131-134, 2006.
- 6) 北海道土質コンサルタンツ: 札幌地盤図, 北海道土質コンサルタント発行, 2006.
- 7) 濱原能成, 中津川誠: 豊平川流域を中心とした水環境の実態と評価, 土木学会北海道支部 論文報告集, No. 59, pp. 912-915, 2002.
- 8) 田中雅基, 吉田晃啓, 西村弘之: 豊平川の低水管理に向けた伏没現象解明への取り組み－扇状地における地表水と地下水の交流について－, 第52回 北海道開発技術研究発表会, GT-1, 技4, 2008.
- 9) Steven L. Markstrom, Richard G. Niswonger, R. Steven Regan, David E. Prudic, Paul M. Barlow: GSFLOW-Coupled Ground-Water and Surface-Water Flow Model Based on the Integration of the Precipitation-Runoff Modeling System (PRMS) and the Modular Ground-Water Flow Model (MODFLOW-2005), U. S. Department of the Interior, U. S. Geological Survey, Techniques and Methods 6-D1, 2008.