

いる。

斜面上部の B3 地点では深度 5 m まで土層が分布した後、深度 6 m に亀裂のほとんどない層があるが、深度 17～21 m には比較的 RQD が低く、亀裂の多い層が存在しており、観測井掘削時にもこの深度に地下水が豊富に存在していることが確認されている。深度 22 m より深くには RQD が高く、亀裂の少ない層が分布している。図VIII-6 より斜面中部の深い深度 B2(20)での地下水位と斜面上部 B3(30), B3(30)での地下水位では、同じ標高帯に水位が存在するタイミングもあり、地下水のつながりがあると推定される。図VIII-8 には 1 年のなかでも水位が低い時期であったと考えられる 2020 年 3 月 6 日の水位を示すとともに、RQD のプロファイルから想定される、斜面内に地下水が貯留される場所は黄色で示した範囲であると考えられた。

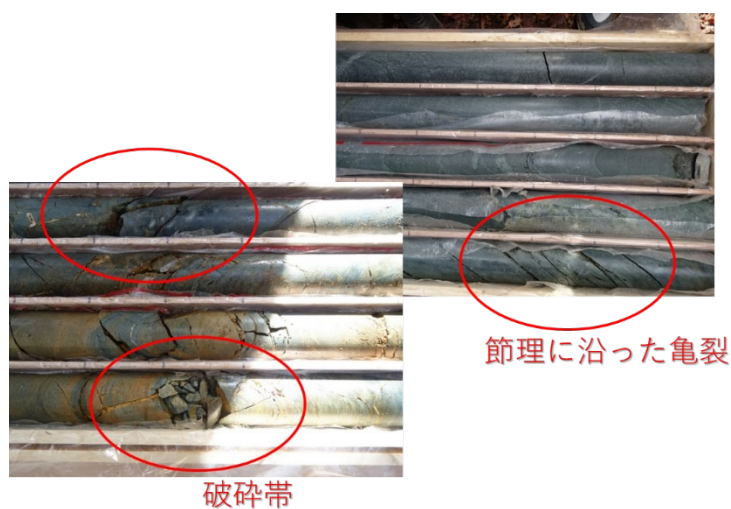


図 VIII-7 ボーリングコアの亀裂の様子

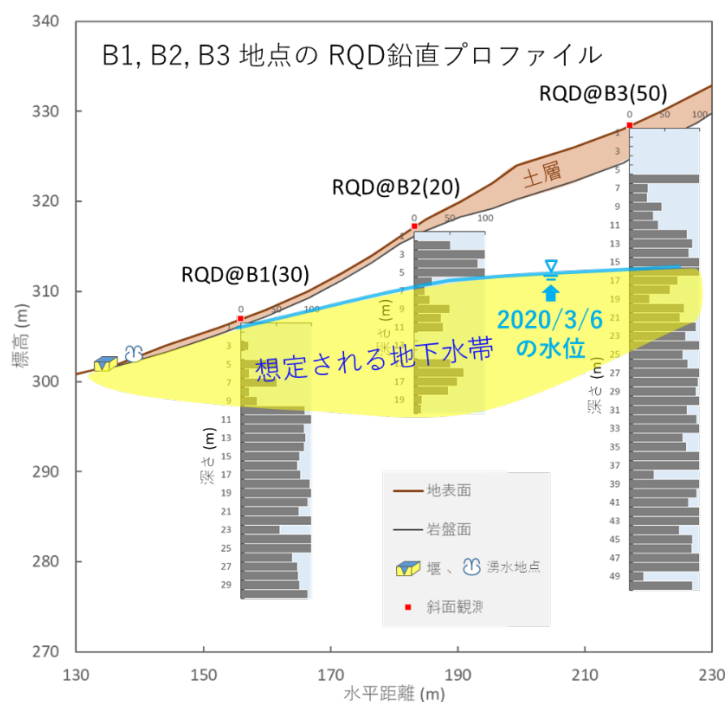


図 VIII-8 各地点における RQD 値の鉛直分布

3.3 地下水位応答の実態

地下水位の時系列変化（図VIII-6）から、例えば斜面上部の B3 地点では、B3(5), B3(15)での水位応答が、B3(30), B3(50)の水位に影響を及ぼしている様子が捉えられていると考えられる。ここでは地下水位の応答の実態をより明確にするために、先行降雨指数（API）と地下水位変動の波形の比較を行った。図VIII-9 は B1(3)における地下水位の時系列変化を API と重ねて示したものである。地下水位のピークは API のピークとタイミングがよく一致しており、見た目上の判断であるが波形も概ね合っている。こうした API と対応関係が良い応答は B3(30)と B3(50)以外のほとんどの観測井において見られた。地下水位の応答と API の対応関係が良いということは、それらの観測井に表れている地下水位が主に雨水の浸透のタイミングで応答しているということであり、雨水が浸透することによる圧力応答が基岩内まで伝わった結果として地下水位が応答していることを表している。

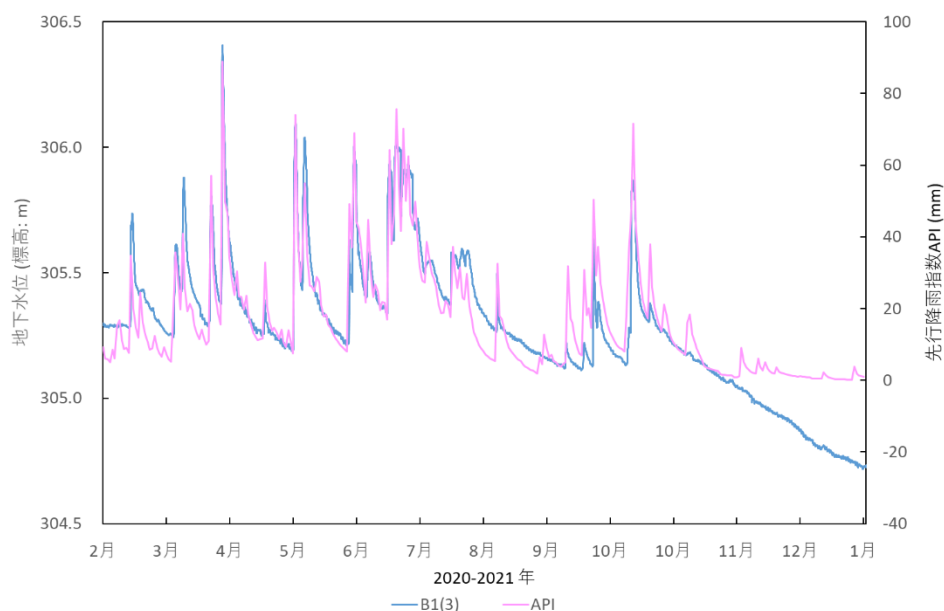


図 VIII-9 B1(3) における地下水位と API の時系列変化

図VIII-10 には B2(20)における地下水位の時系列変化を API と重ねて示した。これを見ると B2(20)における地下水位も B1(3)同様に API の時系列変化とよく対応した応答を示しているが、2020 年 7 月～9 月の期間では API の値が低下しても地下水位が高く保たれている期間が見受けられる。これは梅雨の時期から台風の時期にかけて浸透した雨水が斜面に地下水として蓄えられ、湿潤な状態にあるために浸透してきた雨水が排水されにくくなっている状態を示すと考えられる。一方図VIII-11 に示すように B3(30)では地下水位の変動が API の変動とは波形があまり対応していない。全く応答の傾向が一致しないわけではなく、API にみられる鋭いピークが深部へと伝播する間に遅れ、鈍化したピークとなって地下水位変動に表れている。また 4 月から 7 月にかけて、雨が降るごとに地下水位の基準面が上昇しており、浸透して到達した地下水が蓄えられていく様子を表していると考えられる。鉛直方向あるいは水平方向へと水が排水されるよりも供給される水の方が多いからであるが、深部では浅層に比べて水の流れ自体が遅いことが推察される。

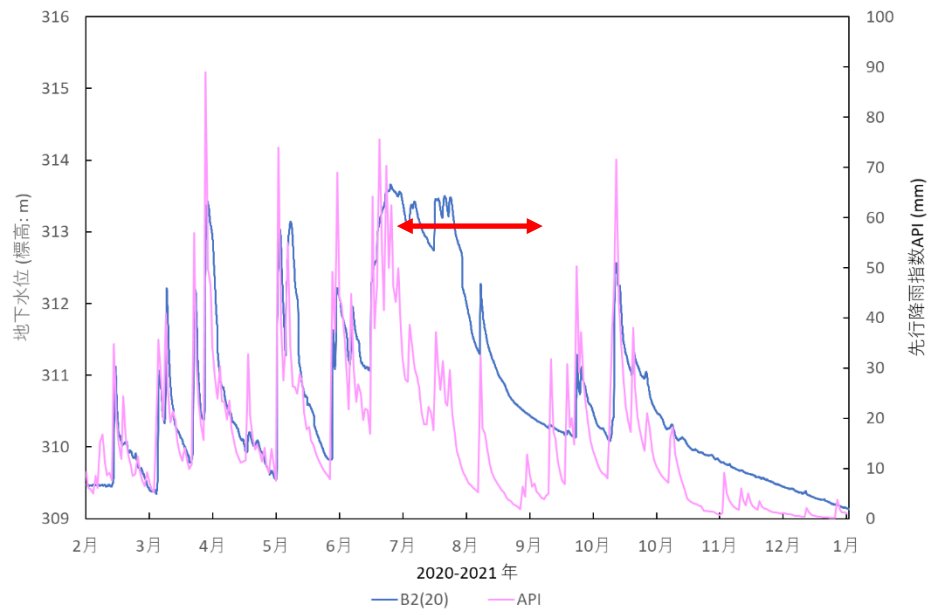


図 VIII-10 B2(20) における地下水位と API の時系列変化

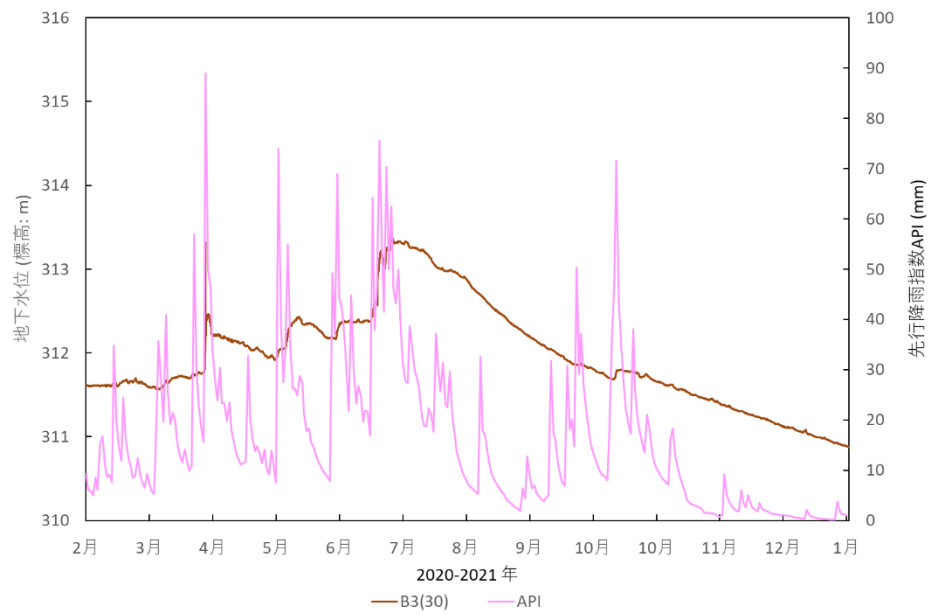


図 VIII-11 B3(30) における地下水位と API の時系列変化

3.4 地下水位と流出量の関係および水質測定結果

B1(3)における地下水位の時系列変化と流量観測地点における流量の時系列変化を重ねて図VIII-12に示す。B1(3)は斜面下部の一番浅い深度の地下水を捉えており、湧水地点の背後の地下水の挙動を示しているため、流量に一番直接的に関係があると考えられる。地下水位のピークのタイミングや通減速度等の波形が良く合っている。一方で地下水位よりも流出の方が鋭く、大きいピークを示すのは、地表流や土層内の選択的な経路を通った土壌水の寄与などの地下水以外の要因である表層から基岩までの間の水によって主に流出水が構成されていることを示す。

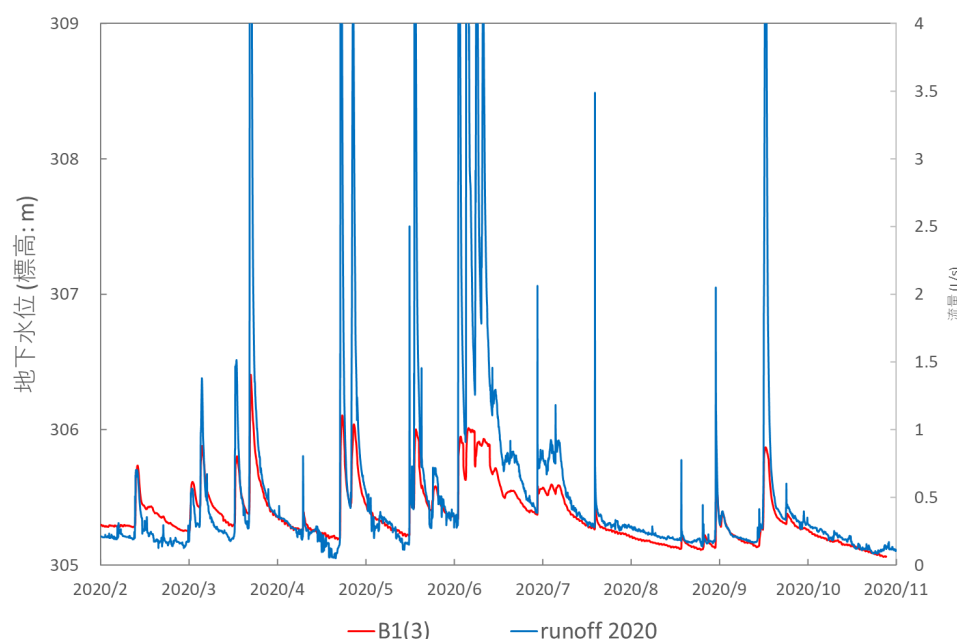


図 VIII-12 B1(3) における地下水位と流量の時系列変化

また、図VIII-13に地下水・湧水・溪流水および土壌の硝酸態窒素濃度の測定結果を示す。サンプリングは2020年9月18日と2020年11月30日に計2回行われた。(参考値として11月20日の実測水位を示す) B1(5)、B2(20)の2地点の地下水では硝酸態窒素濃度は約1 mg/Lで採水時期に関わらず値があまり変わらず、この値の地下水が湧水となって湧出していると考えられる。溪流水の硝酸態窒素濃度は0.46, 0.34 mg/Lと湧水の値よりも低く、逆にB3(30)では1.38, 1.23 mg/Lと湧水の値よりも少し高い値を示した。一般に硝酸態窒素は表層土壌での硝酸化成や降雨によって負荷され、植物の吸収や脱窒によって消費される。地下水中の硝酸態窒素の元となると考えられる表層土壌の硝酸態窒素濃度は30 mg/kgであった。長谷川・小葉竹(2006)は、土壌抽出水の硝酸態窒素濃度の深度方向の変化について、1) 深度による変化がほとんどなく1.0mg/L以下の低濃度を示すもの、2) 地表に近いほど高濃度を示して深度とともに濃度が低下するもの、3) 地上から10~15cm深で低下するが40cm以深で濃度が上昇するものと3タイプに区分した。常陸太田試験地における土壌の硝酸態窒素濃度の深度方向の変化は、2タイプのタイプである地表に近いほど高濃度で深度とともに低下する傾向を示し、表層の硝酸態窒素濃度は、B3付近においてB1付

近の約 7 倍の濃度を呈した（加藤ら，1995）。土壌下部ほど濃度が低下するため地下水は値が低いと考えられるが、B1 より B3 の地下水の硝酸態窒素濃度が高い値を示すのは、斜面の位置によって土壌の硝酸態窒素濃度が異なることが影響していると考えられた。また、湧水は地下水の値をもって湧出するが、湧水の硝酸態窒素濃度は、B1 の地下水の値より小さく B2 の地下水の値より大きい傾向を示すことから、基岩層内で両地点の地下水が混合して湧水として流出していることが示唆された。

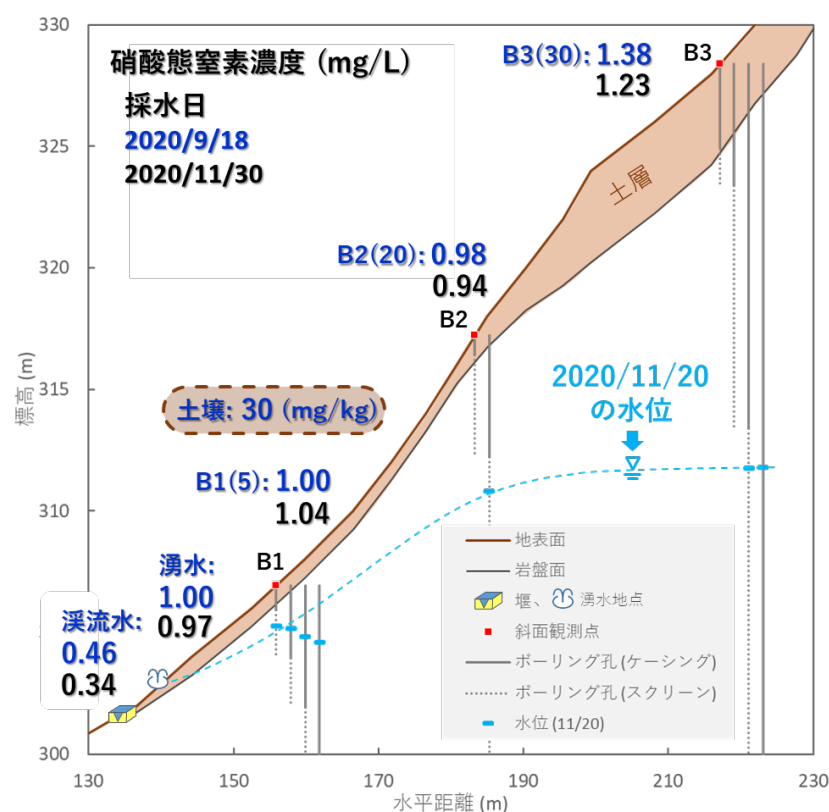


図 VIII-13 硝酸態窒素濃度測定結果

硝酸態窒素濃度が下がる要因である脱窒反応は、通常は嫌氣的条件下で細菌の作用によって起こる。湧水の硝酸態窒素濃度は地下水の値と同程度であり、湧水地点から流量観測地点まで 5 m 程度であるが、渓流水の硝酸態窒素濃度が著しく低下している。流量観測地点において、流量観測のための V ノッチ付きボックスが設置され、その直上は沈砂域となり堆積した土砂がグライ化した還元層となっている。この沈砂域で湧水が脱窒されるため、渓流水の硝酸態窒素濃度が低い値を示すと考えられた。

3.5 地下水位と流出量の関係および水質測定結果

斜面上部の B3 地点においては、浅い深度の B3(5), B3(15)では地下水位が降水（API）に対して反応よく応答するが、深い深度の B3(30), B3(50)では地下水位の応答が降水に対して遅れ、またピークが明瞭でなくなる様子が確認された（図VIII-6, 図VIII-11）。これらが深部浸透の様子を捉えていると仮定して、浅い深度の地下水位の応答と深い深度の地下水位の応答のタイムラグ（遅れ時間）と水の移動距離（水位の差）の関係から透水係数（K）の算出を試みた。図VIII-14 に 2020 年 6 月 23 日から 7 月 13 日までの B3(15)および B3(30)における地下水位のピークの関係を示した。4 つのピークについて、それぞれピークの時間と水位を示しており、水位の差を移動距離と見なしてタイムラグで除することで得られた係数は $10^{-2} \sim 10^{-1}$ (cm/s) のオーダーであった。常陸太田試験地の土壤層の飽和透水係数は $10^{-3} \sim 10^{-2}$ (cm/s) と報告されており (Noguchi et al., 1997)、透水係数は通常、深度が深くなるにつれて値が小さくなる。得られた値は亀裂中の水の動きが速いことを考えても大きすぎると考えられ、水が実際に移動している際の透水係数ではなく浸透する水の圧力の伝播速度を示す係数であると考えられた。また、図VIII-14 に示した期間中に B3(15)・B3(30)ともに降雨の度に地下水位のベースが上昇していく様子が見られ、斜面が湿潤になっていく様子を捉えていると考えられるが、斜面が湿潤になるに従って深い深度の地下水位のタイムラグも短くなってきており、伝播速度も速くなってきていることが分かる。土壤層でも不飽和透水係数と飽和透水係数では値が異なるように、岩盤中에서도湿潤な状態になるとともに伝播速度が変動するものと考えられた。得られた係数を透水係数と考えることができた場合には MODFLOW 等の地下水流動モデルにおいて有用である可能性があった。しかし深い観測井になるほど被圧帯水層の地下水を捉えており、井戸内に出現する水位が井戸近傍の地下水位そのものではなく、被圧帯水層における地下水の圧力を表す水位を示している。そのため容易に透水係数を得ることは出来ないことがうかがえた。

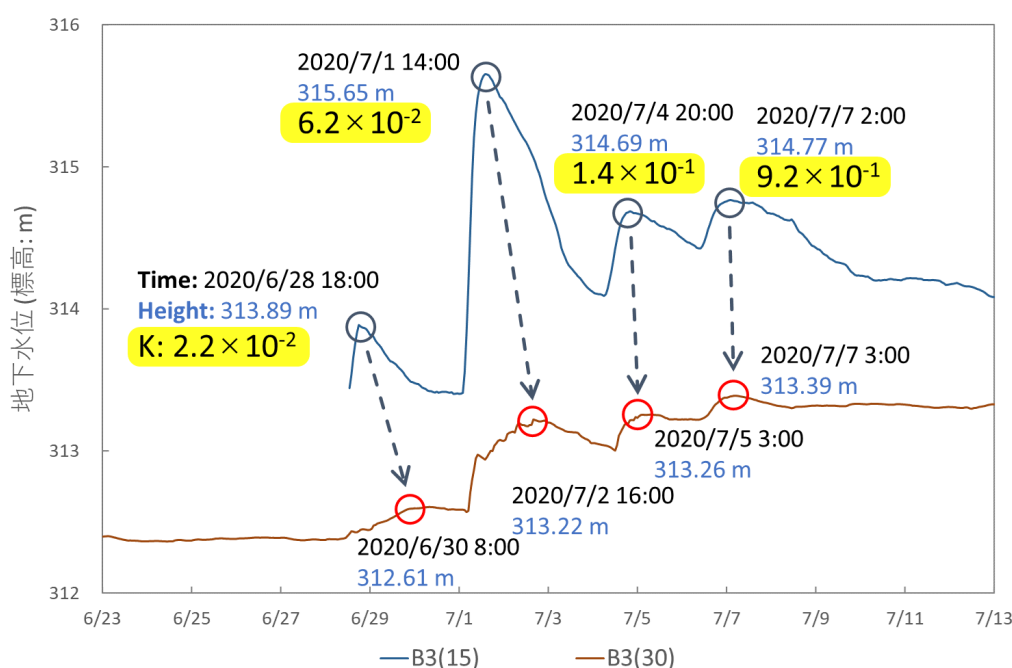


図 VIII-14 B3(15) および B3(30) における地下水位のピークの関係

今回の調査においては、通常なかなか得ることができない基岩層深部の地下水位変動について実測値を得ることができた。SWAT モデルにおける地下水に関するパラメータとしては、以下に示す5つのパラメータについて、観測井における地下水位データから評価することが可能であると考えられた。

DEEPST: 深部帯水層の初期水位

GW_DELAY: 地下水の遅れ時間

GWQMN: 復帰流（地表流）が起きるために必要条件となる地下水位

GWHT: 初期地下水位

ALPHA_BF_D: 地下水位の通減係数

また、SWAT モデルにおいては土壌層内の地中水を浅層地下水として扱っているため、土壌水の観測と併せて行うことで、さらに複数のパラメータについて評価することが可能となる。今回の調査においては地下水の窒素濃度やリン濃度について測定を行ったが、観測井があることでこうした地下水における栄養塩類に関するパラメータ（SHALLST_N: 浅層地下水の窒素濃度、GWSOLP: 地下水のリン濃度）も得ることができた。こうした地下水の水位変動や水質の実測値は観測井が無いと得ることが出来ない情報であり、実測値を得ることは大変有意義である。また調査地が異なると多くの場合、状況が大きく異なるが、参考値として有用である。

4. まとめ

- ・ 変成岩（緑色片麻岩）地域の常陸太田において、15 m より深い岩盤層内に地下水が存在していることが確認された。また先行降雨指数と同じような波形を示した比較的浅い深度（3, 5 m）の観測井においては地下水位の変動が雨水の浸透に応答しており、雨水が浸透することによる圧力応答が基岩内まで伝わった結果として地下水位が応答していると考えられた。
- ・ 先行降雨指数の変動に対応しない地下水位変動と、ボーリングコアから得られた亀裂の情報から、斜面の中で夏季の湿潤な時期に地下水が蓄えられる場所がおおよそ推定された。
- ・ 深度 3～5 m の浅い地下水と深度 15 m よりも深い地下水では地下水位の応答に遅れ時間があり、透水係数の算出を試みたものの、得られた係数は飽和透水係数と考えるには大き過ぎるもので、圧力伝播の速度を示す係数であると考えられた。
- ・ 観測井を設け地下水位変動の観測をすることにより、SWAT モデルのパラメータの内、地下水に関するパラメータを検証する材料を得られ、他地域の地下水のパラメータを検証するにあたって参考になると考えられた。
- ・ 硝酸態窒素濃度等の水質調査から、森林小流域における地下水の持つ水質の実測値が得られた。岩盤層まで浸透した地下水は脱窒作用を受けて渓流水として流下する水よりも高い硝酸態窒素濃度を有している場合があり、地下水として流動してより下流において湧出するまで硝酸態窒素をストック、あるいは運搬する役割を持つ可能性が示された。
- ・ 常陸太田試験地は変成岩（緑色片麻岩）の地域であり、崩壊が多発する地域ではない。しかし、日本に広く分布する変成岩の流域において、地下水がどのように浸透してどのように存在するのか、どのようなタイミングで流出するのか、といった知見は変成岩地域の災害の発生予測に資する知見である。

参考文献

- 逢坂興宏（1996）斜面土層構造の測定．恩田裕一ら編「水文地形学」古今書院，15-23.
- Noguchi, S., Tsuboyama, Y., Sidle, R.C, Hosoda, I. (1997) Spatially distributed morphological characteristics of macropores in forest soils of Hitachi Ohta Experimental Watershed, Japan. *Journal of Forest Research*. 2: 207-215.
- 加藤正樹・小野寺真一・小林政広（1995）源頭部森林小流域における土壌溶液湧水の硝酸態窒素の動態．日林誌 77：516-526.
- 長谷川香織・小葉竹重機（2006）関東平野北西部における森林からの渓流水中の硝酸態窒素濃度の地域分布特性．日林誌 88: 534-540.

5. SWAT-MODFLOW モデルによる地下水シミュレーション

5.1 SWAT-MODFLOW モデルの概要

(1) SWAT-MODFLOW モデルの構成

SWAT-MODFLOW は、SWAT モデルの地表～土壌層プロセスと MODFLOW モデルの地下水プロセスを組み合わせた統合的な水文モデル（図 VIII-1 エラー! 参照元が見つかりません。）で、SWAT モデルと同様、QGIS のプラグインとしてインストールし、インタフェースを用いてインタラクティブに操作することができる無償のツールである。

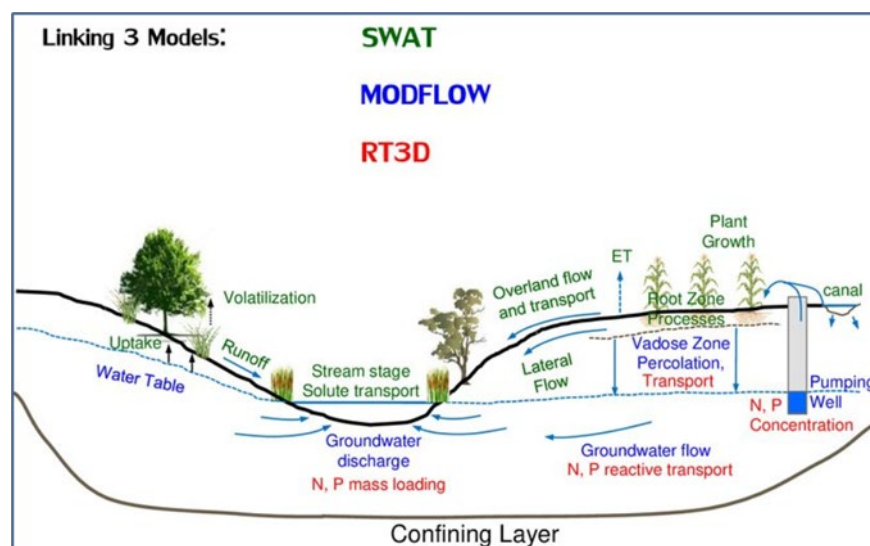


図 VIII-15 SWAT-MODFLOW において各モデルが扱うプロセスの概念図⁹

SWAT の HRU アウトプットのうち、土壌層への浸透量（soil percolation）が MODFLOW へのインプットとして用いられ、その後、MODFLOW モデル内の計算により、地下水流量や地下水位、涵養量といった項目がアウトプットされる。計算された地下水流量は、SWAT の河川シミュレーションに戻り、そのプロセスが日単位でループする仕組み（図 VIII-2）となっている。

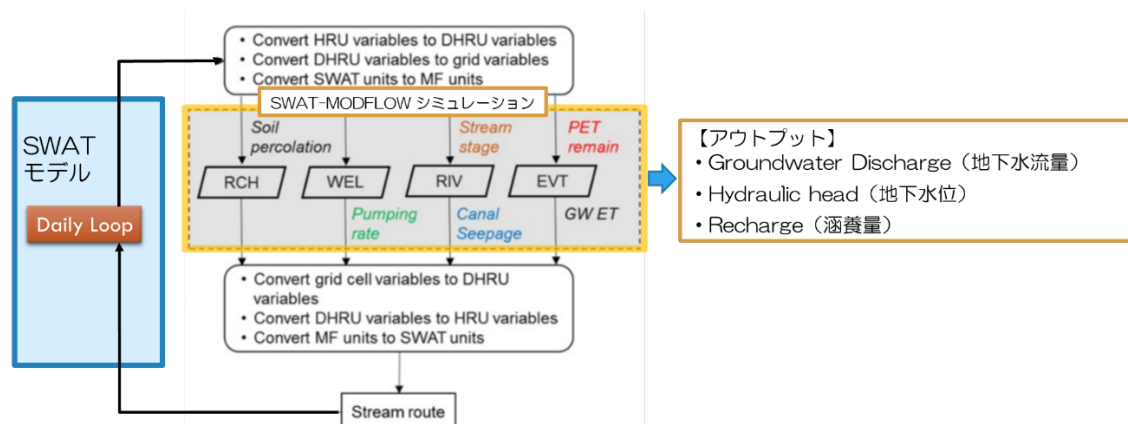


図 VIII-16 SWAT-MODFLOW におけるシミュレーションの流れ

SWAT モデルにおける水文計算は HRU 単位で行われるのに対し、MODFLOW では、ま

⁹ Colorado State University, Department of Civil & Environmental Engineering, SWAT-MODFLOW Tutorial -Documentation for preparing model simulations-, 2017