

点の年降水量)について整理し、各流域における豊水年および渇水年を割り出した(図VII-2)。

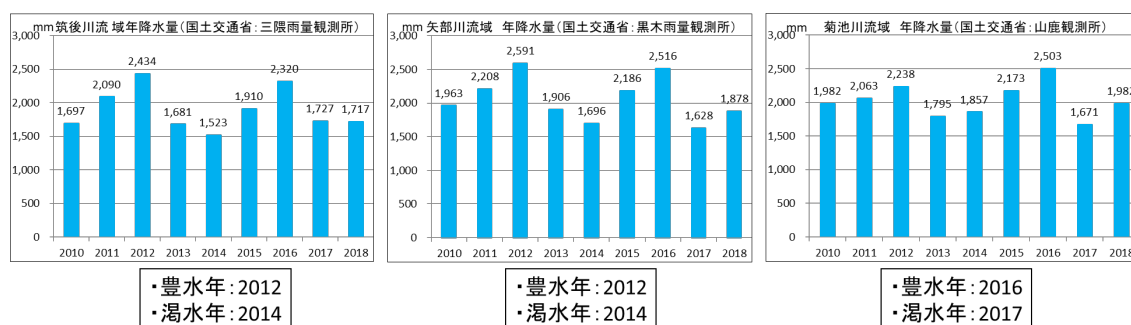


図 VII-2 シミュレーション期間中の流域別年降水量と抽出された豊水年および渇水年

この結果、豊水年および渇水年として、筑後川および矢部川流域では 2012 年と 2014 年、菊池川流域では 2016 年と 2017 年をそれぞれ抽出した。

図 VII-3 には、各流域について、上記において抽出した豊水年、渇水年における土地利用別水収支構成割合を示す。

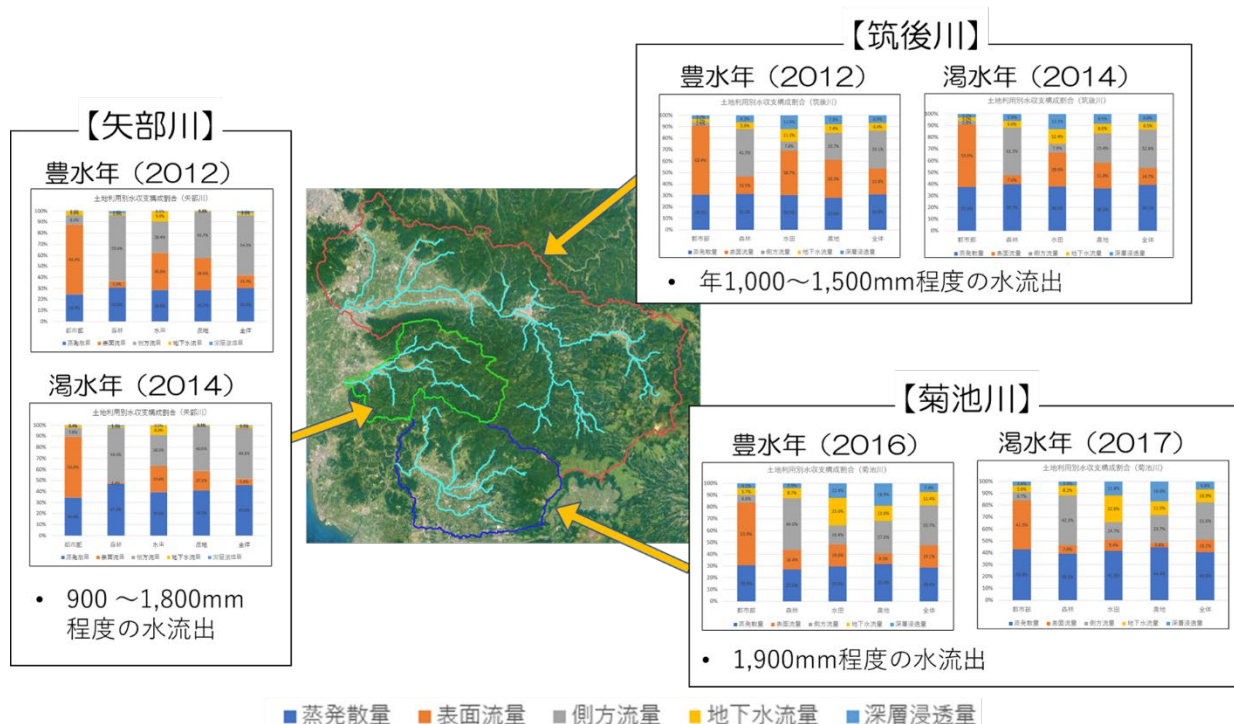


図 VII-3 豊水年、渇水年別土地利用別水収支構成割合

いずれの流域モデルにおいても、評価指標による河川流量の再現精度は概ね VeryGood が得られている一方、水収支には課題が残っているため、図 VII-3 は暫定的な結果であることに留意したい。特に、筑後川や菊池川では、森林地における側方流の割合が過大気味であり、矢部川流域においては、いずれの土地利用においても側方流の割合が多く、地下水量や深層浸透量がほとんど算出されていない傾向となっていることから、全体的に水収支の見直し、改善が必要といえる。

豊水年と渇水年の違いでみると、豊水年は渇水年に比べ、表面流量の割合が大きく、蒸発散量の割合が小さいことがグラフより読み取れるが、これについても、水収支の改善を図ってから再検証することが望ましい。

2. 今年度のモデル構築成果まとめ

今年度の評価モデル構築の成果として、以下の事項が挙げられる。

- 筑後川および矢部川流域モデルを新規に構築し、一定程度の再現精度が得られた。
- 菊池川モデルを、筑後川、矢部川モデルと同一のバージョンにバージョンアップし、3モデル間の整合を取った。
- 3モデル共通の条件で感度分析を行うことにより、SWATモデルを用いて、日本の広域的な流域シミュレーションを実施する際に考慮すべきパラメータやそれらの設定値の妥当な範囲に関する知見が追加された。
- 筑後川、矢部川モデルのパラメータ初期値として、菊池川モデルのパラメータ値を適用した結果、筑後川モデル構築直後の精度は低めであったものの、現地実測データを反映させると、実測値と同程度のオーダーで流出量を推計するなど、精度がやや向上し、キャリブレーション実施後により高い精度が得られる結果となった。また、矢部川モデルでは、菊池川モデルのパラメータを適用した直後から高い精度が得られた。これにより、菊池川モデルのパラメータの汎用性が一定程度認められた。

3. 残存課題及び今後の評価モデルの精緻化に係る計画

今年度のモデル構築においては、上記のような成果が得られた一方、いくつかの課題も残った。ここでは、各流域における残存課題と今後のモデル精緻化計画について示す。

(1) 筑後川モデル

【水収支】

1) 流量分析

- 農地や市街地の影響を除き、森林の影響を確認するために、より上流での流量分析を行うことが望ましい。筑後川流域中腹（森林流域の最下流点の位置づけ）にある小洲観測地点の水流量と三隈大橋観測地点の土砂・栄養塩量についても実測データを整理したため、流域最下流点である瀬ノ下のみではなく、当該データをキャリブレーションに活用する。

2) 流量パターン

- 出水時のピーク流量が、実測値に比べ推定値でやや低めの傾向を示す。
- ピーク流量の発生時期が実測値と推定値で若干のずれを生じている箇所がある。
- 低水時の流量が、実測値に比べ推定値でやや低めに算出される。

3) 水収支

- 全体量、各界への移送量：蒸発散量や地下浸透量等について、既存資料と再度比較・検討することが望ましい。
- 構成比率：地下浸透量と表面流出量はやや少なく、側方流が多めに算定されている可能性がある。

4) パラメータ

- キャリブレーション時の調整が十分でなかったことから、マンニングの粗度係数（OV_N）、表面流の流出遅延度合い（SURLAG）等、一部のパラメータ値について既存文献や菊池川モデルの値との整合が取れていない。設定幅を調整し直して、再度、キャリブレーションを実施する必要がある。

5) 水流出量の空間分布

- 上記1)～4)の課題を見直した後に、改めて空間分布図を作成し、地域間の特性を分析する必要がある。

【土砂】

1) 流出量の見直し

- 森林からの土砂量が過剰。パラメータの見直しが必要。

【栄養塩】

1) 流出量の見直し

- 農地を平地・傾斜地に分けた後に、菊池川モデルでの残存課題（リン・窒素の流出量の絶対量や相対関係）についても検討可能と考えられる。

(2) 矢部川モデル

【水収支】

1) 流量分析

- 農地や市街地の影響を除き、森林の影響を確認するために、より上流での流量分析を行うことが望ましい。

2) 流量パターン

- 出水時のピーク流量が、実測値に比べ推定値でやや低めの傾向を示す。
- ピーク流量の発生時期が実測値と推定値で若干のずれを生じている箇所がある。
- 低水時の流量が、実測値に比べ推定値でやや低めに算出される。

3) 水収支

- 全体量、各界への移送量：蒸発散量や地下浸透量等について、既存資料と再度比較・検討することが望ましい。
- 構成比率：地下浸透量と表面流出量はやや少なく、側方流が多めに算定されている可能性がある。

4) パラメータ

- キャリブレーション時の調整が十分でなかったことから、マンニングの粗度係数（OV_N）、表面流の流出遅延度合い（SURLAG）等、一部のパラメータ値について既存文献や菊池川モデルの値との整合が取れていない。設定幅を調整し直して、再度、キャリブレーションを実施する必要がある。

【土砂】

1) 流出量の見直し

- 森林からの土砂量が過剰。パラメータの見直しが必要。

【栄養塩】

1) 流出量の見直し

- 農地を平地・傾斜地に分けた後に、菊池川モデルでの残存課題（リン・窒素の流出量の絶対量や相対関係）についても検討可能と考えられる。

（3） 菊池川モデル

【水収支】

1) 流量パターン

- 低水時の流量が過少傾向。
- 旧バージョン（菊池川 2019 モデル）に比べ、流出量が全体的に増加している。
 - キャリブレーションに用いる評価指標を、ピークを合わせる指標（NSE, RNR 等）ではなく、全体のバランスを評価する指標（PBIAS）に替え、低水時流量の調整を試みる。
 - 新バージョン（菊池川 2019 新モデル、菊池川 2020 モデル）であらためてキャリブレーションによるベストパラメータ値を探る。

2) 水収支

- 森林地における側方流が多く、深層浸透量が少ない。
 - 当該地域の水収支に関する既存文献などと比較して、水収支の妥当性を確認しながらパラメータの再調整を図る。

【土砂・栄養塩】

- 旧バージョン（菊池川 2019 モデル）に比べ、土砂、リン、窒素すべての流出量が増加している。
 - 新バージョン（菊池川 2019 新モデル、菊池川 2020 モデル）であらためてキャリブレーションによるベストパラメータ値を探る。
- 水田からのリン流出量が、農地からのリン流出量より依然として多く、水田と農地におけるリン流出量の大小が既往の知見と異なっている。
 - 検証の結果、リン流出量以前に、農地（平地）からの「水流出量」が他の土地利用に比べて小さく算出されていることが原因の1つとして考えられた。このため、農地（平地）の水流出量を中心に水に関するパラメータ調整を行ったところ、水流出量の変化に応じてリン・窒素流出量が増減することが確認されたため、引き続き、水流出量と併せて、土砂・栄養塩流出量の見直しを図る。
 - 本年度の追加調査において、農地面積割合が大きい支流域の河川にて栄養塩濃度の採取・分析を行ったため、これらの実測データをキャリブレーションに活用して栄養塩収支の再調整を行う。

VIII. 山体地下水調査

1. 概要

令和元年度の調査において森林から流出する雨水や物質が海域に与える影響についての調査の一環として、茨城県常陸太田市においてボーリング調査が実施され、深さ 3～50 m の観測井が計 10 本設置された。「森林の海域に果たすポジティブな役割を科学的に明らかにする」ことを基本方針とし、以下 2 点に着目して森林の機能を明らかにすることを目的とした。

- ①：森林のストック機能：栄養塩類、有機物がどのように貯留され、「いつ」「どのように」、下流に供給されるかを明らかにする。
- ②：流出モデルへの応用性検討として、本事業で構築している SWAT モデルのパラメータ値を設定する上で参考となる地下水関連データを取得する。

こうしたことを明らかにするためには、地下水の存在の有無をはじめ、基盤岩内のどの深さに地下水が存在しているのか、そして一年を通して地下水位がどのように変動するのか、さらには深部への浸透が起きているのか、といった地下水の存在状態の実態を把握する必要がある。そこで、本年度の調査では各観測井に水位計を設置し、地下水位の連続観測を行った。また一部の観測井では採水を行い、栄養塩類の測定を行った。

2. 調査地と観測井の概要

観測井の位置は、茨城県常陸太田市高貫町字堂平国有林 118 林班り小班である。調査地の位置と観測井の設置地点を図VIII-1 に示す。観測井は森林総合研究所の常陸太田試験地内にある小流域（HA 流域）で流域の傾斜角は $26.8^{\circ} \pm 9.9^{\circ}$ 、土壌は褐色森林土、谷沿いでは土層が 1 m 程度と薄く、基盤岩は緑色片麻岩である。年降水量と年平均気温は 1672 mm および 12.4°C である。流量観測地点において V ノッチ三角堰を用いて流出量を観測している。流域面積は 0.84 ha、標高は 303—341 m であり、植生は 1924 年に植栽されたヒノキとスギの人工林である。図VIII-2 に観測井の配置と構成を示す。観測井は斜面下部の B1 地点に 4 本（B1(3)、B1(5)、B1(10)、B1(30)：()内の数字は深度を表す）、斜面中部の B2 地点に 2 本（B2(5)、B2(20)：()内の数字は深度を表す）、斜面上部の B3 地点に 4 本（B3(5)、B3(15)、B3(30)、B3(50)：()内の数字は深度を表す）である。湧水地点の標高よりも深い深度における地下水位の存在とその変動、そこに至る地下水の鉛直方向のつながりを明らかにするために同一地点に複数深度ずつ、さらに斜面の水平方向の地下水のつながりを明らかにするために斜面下部（湧水地点近傍）・中部・上部（尾根部近傍）に観測井を配置した。観測井は浅いもので深度 3 m であるが土層厚が 1 m 程度であるため、得られた地下水位は基本的に基岩内に位置していると考えられ、本報告において地下水と述べるのは基岩中に存在する地下水＝基盤岩地下水である。さらに深度 30 m、50 m の観測井においては山体深くへと浸透し地形的な流域界を超えて系外へと移行していく深い地下水＝山体地下水についてその動態を明らかにすることを目的としたものである。観測井の地上部の様子と設置したセンサを図VIII-3 に示す。センサは Onset 社製のロガー一体型圧力式水位計 HOBO U20L-01 を用い、ステンレスワイヤーで観測井孔内に設置した。地下水位を求める際には大気圧、

あるいは孔内圧を用いて補正を行った。観測期間は2020年2月20日～2021年1月18日である。(欠測期間：B3(50): 2020年2月20日～2020年7月22日)

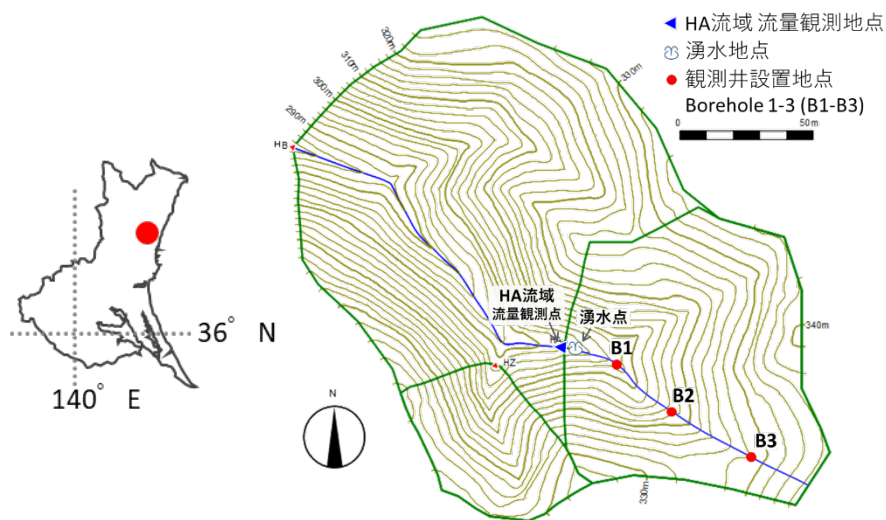


図 VIII-1 観測井の位置

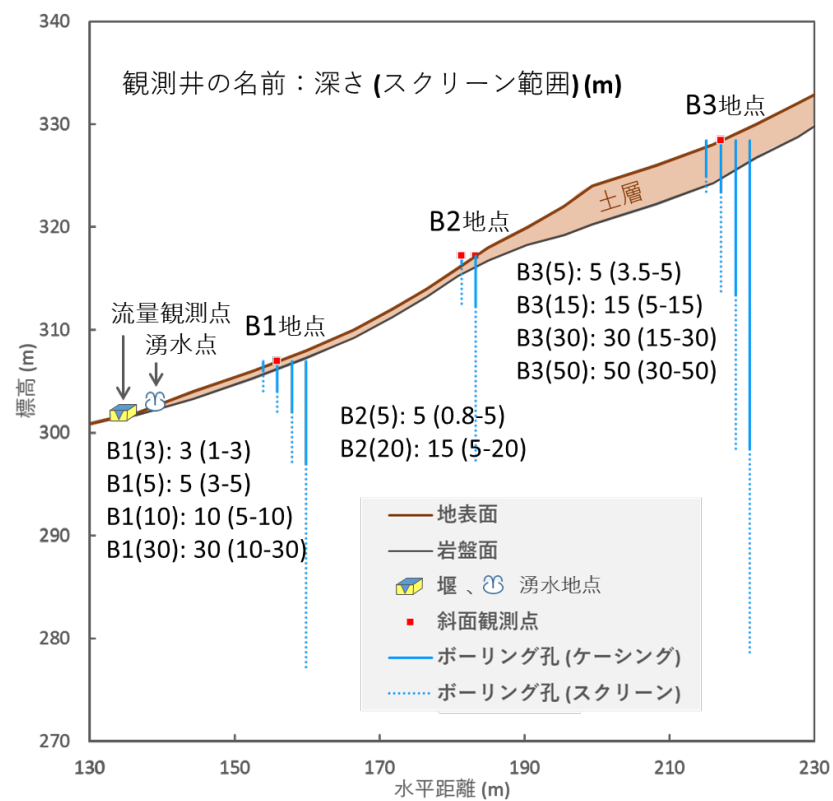


図 VIII-2 観測井の配置と構成



図 VIII-3 (左) 観測井の地上部の様子と (右) 水位センサ

3. 結果

3.1 地文特性

林地斜面の土層構造の測定のため、斜面調査用簡易貫入試験機による調査が広く行われている。この機器は、先端に円錐のコーンをつけたロッドと 5kg の錘を用い、錘を 50cm の高さから落下させ、その打撃で円錐コーンを地中に貫入させる回数から土層の硬さ（貫入抵抗）を求めるものである。円錐コーンが地中に 10cm 貫入するのに要した打撃回数を N_c 値とする。常陸太田試験地の井戸近傍で測定した N_c 値の鉛直プロファイルを図 4 に示す。B1 と B3 については観測井近傍の観察から得られた土壌断面層位の区分も併せて示している。B1 と B2 では深度 65 cm と 85 cm で N_c 値が大きく増加し、B3 では 250 cm 以深から N_c 値が 5 を超える層が現れ、深度 325 cm から漸増して深度 395 cm で N_c 値が 50 を超えた。 N_c 値による土層区分は基盤地質によって異なる傾向を示すが（逢坂，1995）、土壌断面およびボーリングコアのデータを参照すると、 $N_c \leq 5$ の層は表土層（A 層と B 層）、 $5 < N_c \leq 50$ の層は風化層（C 層）に相当すると考えられた。

土壌の飽和透水係数（ K_s ）は、雨水の土壌の浸透しやすさの指標の一つとして用いられるとともに流出モデルのパラメータ値として利用されている。図 5 に B1 と B3 近傍において 400 cc 採土円筒で採取したサンプルを用いて定水位法により測定した K_s の結果を示す。B1 と B3 において深度が増加するとともに K_s の値は小さくなる傾向を示した。深度 10 cm の幾何平均値は 3.90×10^{-2} (cm/s) で、深度 80 cm の幾何平均値は 1.40×10^{-3} (cm/s) であった。これらの値は既報（Noguchi et al., 1997）の結果（ $2.94 \times 10^{-3} \sim 7.37 \times 10^{-2}$ (cm/s)）と同様な値であった。流出モデルに土壌の透水特性を反映するために様々な関数式が提案されている。ここでは、 K_s と土壌深度（ d ）について、以下の関係を示した。

$$K_s = 0.05544e^{-0.04637d}, R^2 = 0.982 \dots (1)$$

$$K_s = 0.07704 - 0.041275 \log(d), R^2 = 0.952 \dots (2)$$

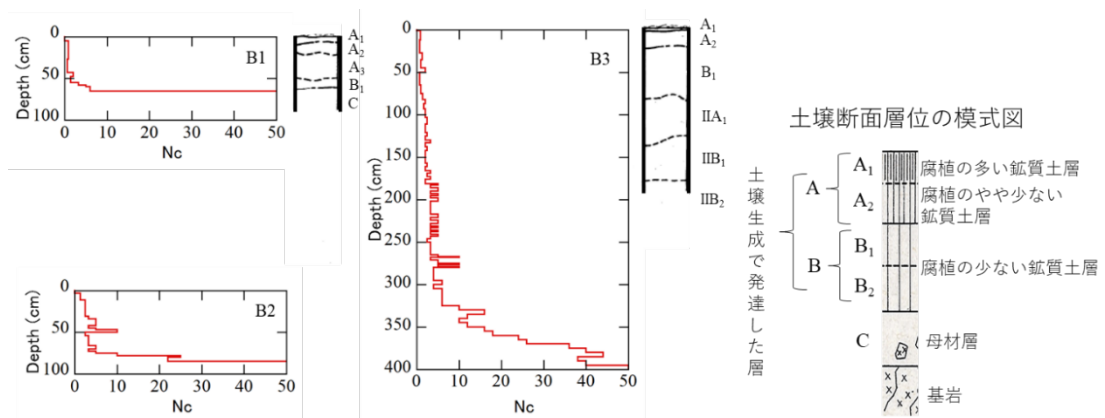


図 VIII-4 簡易貫入試験機による土壌貫入抵抗値 (N_c) の鉛直プロファイルと土壌断面
(土壌断面図は加藤ら (1995) を改変)

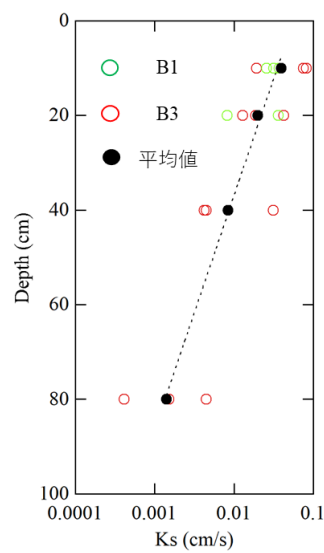


図 VIII-5 土壌の飽和透水係数 (K_s) の測定結果

3.2 地文特性

地下水データが得られた期間の全ての観測井における地下水位変動を日降雨量・先行降雨指数とともに図VIII-6に示す。地下水位は標高 (m) で示したものである。降った雨が土層を通り、基岩内まで浸透して地下水となるには時間がかかると考えられる。そのため地下水位変動を、その日に降った雨の降雨量と比較するのは雨と地下水位変動の関係を吟味するためには不十分であると考えられる。ある時点の斜面の湿潤状態を評価するにあたって、過去に降った雨を加味する方法の1つとして先行降雨指数(API: Antecedent Precipitation Index)を算出した。APIは、ここでは30日分の日降水量について、x日前的日降水量をxで除した値を積算した値とし、3式で表される。

$$API = \sum_{i=1}^x (P_i / i) \cdots (3)$$

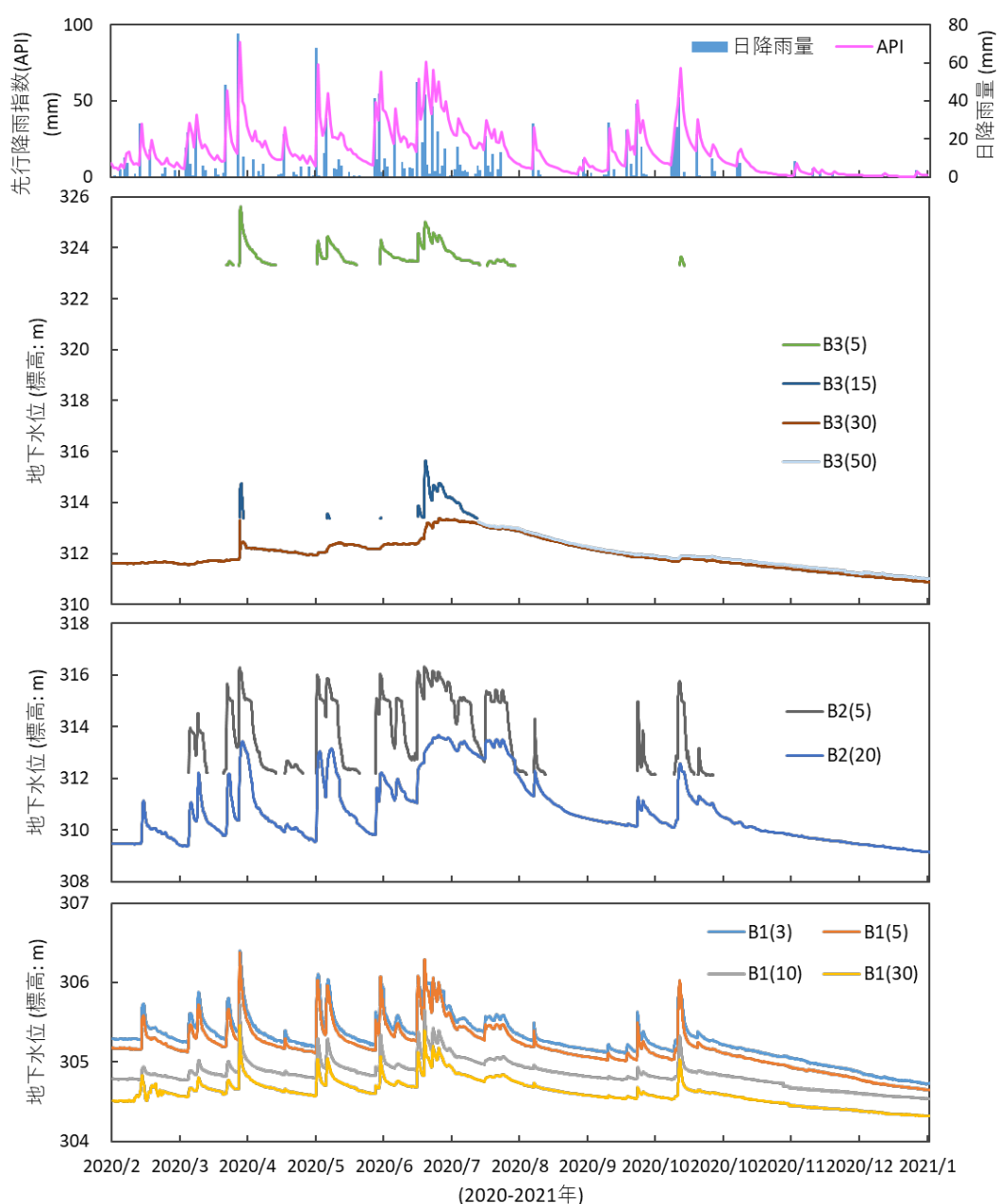


図 VIII-6 得られた期間の日降雨量・先行降雨指数と地下水位変動

この計算によって得られる API は過去 30 日間の雨が斜面の湿潤状態に効いていることを加味しており、API の波形と地下水位の波形が似通っていれば地下水位が雨の影響を受けていることを示していると考えられる。今回の調査地は源流域にあたるため、基本的に地下水の元となる水は流域に降った雨であると考えられる。しかし一般的に多くの土地では地下水の元が、その流域に降った雨であるとは限らず、隣接する外の地域から地下を通じて流入している可能性が考えられる。API と地下水位の波形の比較によって波形が似ていることが確かめられれば、観測している地下水位の元となる水が他地域からの流入ではなく、雨水が浸透した結果として地下水となっていると考えることができる。(尚、さらに厳密に流域内に降った雨が地下水へと至っているかどうかを確認するためには安定同位体比等をトレーサーとして水質の面からも検証する必要がある)

斜面下部の B1 地点では 4 本の観測井全てにおいて観測期間を通して地下水位が確認され、観測井の設置深度は 3~30 m の幅があるにもかかわらず 4 本の観測井における地下水位は、ほとんどの期間で約 1 m の範囲にあり、深い深度の B1(30)においても高い水位を示していることから深い深度の地下水が高い圧力(水理水頭)を有しており、湧水地点近傍の特徴を示している。斜面中部の B2 地点では、深い深度の B2(20)においては観測期間を通じて地下水位が観測されたが、浅い B2(5)では 3 月から 8 月の比較的湿潤な期間と台風の影響がある 9 月から 10 月の期間に断続的に水位が出現する様子が見られる。斜面上部の B3 地点でもやはり、深い深度の B3(30), B3(50)では観測期間を通じて地下水位が認められたが、深度が浅い B3(5)では B2(5)よりもさらに限られた期間の 4 月から 8 月にかけて水位が出現し、B3(15)では、6 月から 7 月にかけての最も湿潤な期間以外ほとんど水位が出現していない。このことは、湿潤な期間には斜面の岩盤内において浸透してきた降水がさらに深部あるいは側方へと浸透(排水)する速度よりも供給される水の量の方が多いために、一時的に浅い深度に溜まる様子が捉えられているが、恒常的な水位は標高 311~313 m 付近に存在しており、そこに向かって雨水が浸透していく過程が捉えられていると考えられる。

風化の度合いが少ないフレッシュな岩盤中には間隙や亀裂が少なく、多孔質媒体中の水のように地下水が存在あるいは移動することはできない。しかし図VIII-7 に示すように岩盤内には節理に沿った割れ目や破碎帯のように水道(みずみち)となり得る箇所があり、そういった場所に地下水が存在している、あるいはそういった場所を通して地下水が流動(または浸透)していくと考えられる。さらにボーリングコアから得られた RQD (Rock Quality Designation : 100cm のコアに対する 10cm 以上の長さのコアの累計長の割合(%)) の鉛直プロファイルを斜面下部 B1(30), 斜面中部 B2(20), 斜面上部 B3(50)で得られた 3 つのコアについて斜面断面図とスケールを合わせて示したのが図VIII-8 である(B1, B2, B3 それぞれの地点の一番長いコアを用いて各地点の鉛直プロファイルを示した)。RQD は値が高いほど連続性が高く、亀裂が少ない岩盤であることを示す。岩盤の割れ目の度合いを示す指標であるが、地上に近い RQD=0 の範囲は土層を示す。これによると斜面下部の B1 地点では、土層は深度 2 m までであるが、深度 9 m 程度まで RQD が低く、亀裂の多い層が分布しており、一方で深度 10 m より深い場所には亀裂の少ない層が分布していることが分かる。斜面中部の B2 地点では、深度 1 m までが土層で、深度 3~5 m に亀裂がほとんど存在しない層があるが、深度 6 m より深い場所には RQD が低く、亀裂の多い層が分布して