

筑波森林試験地における土壤水分・地下水変動に伴う水質変化について

Chemical Changes of Soilwater and Groundwater in the
Tsukuba Experimental Forested Basin

平田 健正*・唐 常源**・村岡 浩爾***

By Tatemasa HIRATA, Changyuan TANG and Kohji MURAOKA

The chemical changes of groundwater and springwater were observed in the Tsukuba experimental forested basin. The springwater holds a chemical feature that the concentration becomes lower in SiO_2 and larger in $\text{NO}_3\text{-N}$ than the groundwater. Rather the springwater seems to have the chemical feature close to the forest soilwater. The result proves that the springwater originates from the soilwater runoff as an interflow, and gives the full interpretation to the $\text{NO}_3\text{-N}$ runoff behavior during the storm events, i.e. the $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration in the streamwater during the recession limb overshoots the baseflow level prior to the runoff event. In addition, the soilwater suction was investigated, using newly devised tensiometer. The tensiometer detected upward water flux in soilwater, which raised the marked increase in the springwater discharge. Keywords: forest ecosystem, groundwater, springwater, interflow, chemical change

1. はじめに

森林域は洪水調節機能や水かん養機能に加えて、膨大な森林内物質循環量は土壤水質や渓流水質を調節する緩衝機能を併せ持っている。森林の発生と発達はその物質循環を通して物質を分別し、森林土壤の組成を変えると同時に森林域特有の土壤水質を作り、さらに、多様な物質を含む土壤水の流出は降雨時にも、季節的にも渓流水質に変動をもたらすことになる。こうした渓流水質の形成過程で水の移動は単に溶存物質を運搬するだけではなく、土壤水や地下水の水質形成と深く係わっている。

著者らはこれまで筑波森林試験地において、降雨から溪流に至るまでの水移動と水質変化を追跡してきた。森林生態系における物質循環の土壤水質や渓流水質に及ぼす影響として、例えば土壤水の硝酸性窒素濃度は表層で高まっていること、この表層土壤水の流出は渓流水濃度を上昇させること、などを報告してきた¹⁾。土壤水中の硝酸性窒素は、土壤に含まれる有機物の無機化に由来することから、温度の高い夏季に表層土壤水で濃度が上昇し、夏季の多量の降雨流出によって渓流水濃度を高めることになる。結果として、季節的に

* 正会員 工博 国立環境研究所主任研究員 地域環境研究グループ
(〒305 茨城県つくば市小野川16-2)

** 理博 中国中山大学助教授 地理系
(中国 廣州 510275)

*** 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科
(〒565 大阪府吹田市山田丘2-1)

みれば溪流量と渓流水の硝酸性窒素濃度は正の相関を持つことになる^{2)、3)}。ところが、冬季が雨期である地域においても、溪流量と硝酸性窒素濃度には正の相関が認められている⁴⁾。この現象は土壤水分量が水質形成に深く関連していることを示唆している。

土壤水分や地下水の挙動は、森林域からの水の流出過程そのものであるが、上に述べたように水質の形成機構にとっても重要な要因である。そこで、森林渓流水質の形成過程を水移動の側面から明らかにする目的で、筑波森林試験地において地下水や土壤水吸引圧を測定した。本論文は、地下水質や観測期間中に得られた湧水の水質とともに、森林地中水の挙動と溶存物質の流出挙動について報告する。

2. 地下水と土壤水吸引圧の観測

筑波森林試験地（流域面積87.5ha）は、スギ（流域面積の53%）、ヒノキ（18%）、アカマツ（14%）の植林地からなり、スギ林内で林内雨・樹幹流・土壤水などの森林内物質循環に係わる諸量を観測してきた⁵⁾。地下水や土壤水吸引圧についても、土壤水採取地点と同じスギプロット内の平均斜度18度の斜面で測定した。

地下水と土壤水吸引圧測定地点を図-1に示す。No.1地点は溪流水位（基準は1988年8月1日0940時）を基準にして2.49mの高度、水平距離で11.1mの位置にある。No.2地点はそれぞれ5.07、17.4m、No.3地点は8.85、27.2mの位置にある。土壤水吸引圧はボラスカップを埋設し、水銀マンオメータで読み取る。地下水位は、内径20mmの塩ビパイプを埋め込み、この観測井内で測定した。以後No.1、No.2、No.3地点の観測井をW1、W2、W3、テンシオメータをT1、T2、T3とし、それぞれの添数字は地表面からの観測井の深度とボラスカップの埋設深度（cm単位）を表すことにする。

地下水位と地下水の採取、及び土壤水吸引圧は1988年5月から1年間、隔週の定期調査に加え、降雨の多い時期には隔日に観測した。この観測では土壤水分及び地下水位とも手測定である。また1年間の総降水量は1927mmであり、筑波試験地での年平均降水量1587mmに比べて340mm多い多雨の年であった。

さらに土壤水吸引圧については、現地観測用に自記テンシオメータを開発し、T1-30、95、T2-30、100、T3-30、150の

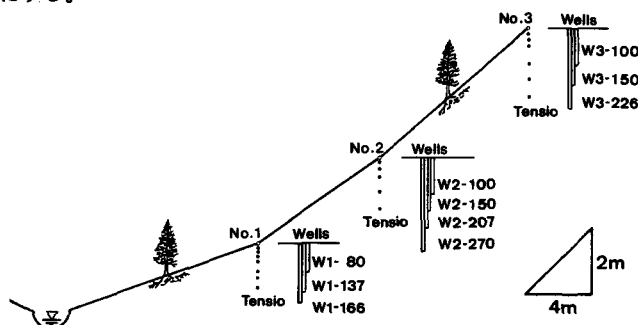


図-1 地下水位と土壤水吸引圧の測定地点

6地点で1988年9月から約半年間測定した。この自記テンシオメータは圧力検出部に半導体圧力センサーを用いており、土壤水分に対して2分程度で応答することができる。検出精度は1 cmH₂O、検出範囲は±1 kgであり、省エネルギータイプの集積回路を組み込むことにより、軽量のバッテリー（重量1.4kg）で6ヶ月程度の連続観測が可能である。また検出精度がよいことから、土壤空気圧測定センサーとしても利用することができる⁶⁾。

3. 地下水位と地下水質の季節変動

1988年5月から1年間の地下水位と水質の変化を日降水量（林外雨）とともに図-2に描いている。日降水量は流域出口で観測された10分間降水量から得られた値である。また地下水位の内、No.1とNo.2地点については観測期間を通して地下水の採取できた深度を選び、測定斜面の下部を流れる溪流水位（1988年8月1日）を基準に水理水頭の変化として示した。No.3地点は溪流水位から8.85mの高度にあることから、本研究で用いた浅い井戸では1年を通して地下水が観測されず、1988年8月から11月まで比較的長期間地下水位データの得られたW3-150とW3-226の2深度の経時変化を載せている。

観測期間中、降雨は7月から多くなり、月雨量にすると7月283.5mm、8月305.5mm、9月367.0mm、10月71.5mmであった。これらの降雨に対して、No.1地点では7月初旬から地下水位が上昇を始め、8月中旬にピークに達する。その後低下するが、9月中旬以降の降雨に対応して再度上昇している。また8月から11月にかけて、2cmH₂Oとごく僅かな差ではあるがw1-137はw1-80より水位が高く、地下水は上向き流れの状態にあることが分かる。また、地下水位がピークに達する8月中旬と9月下旬の地下水位は地表面下10cmまで上昇しており、No.1地点の土壤は湿潤状態にある。このため、1年を通して見ると地下水位は降雨に応答して変動しているが、個々の降雨に対しては穏やかな変化を描く。一方、No.2とNo.3地点の地下水位は8月と9月の降雨パターンに対して、極めて敏感に応答し、水位上昇もシャープで、遅減も早い。この傾向は、高度が増すほど顕著に現れている。

地下水質については溶存珪酸(SiO₂)と硝酸性窒素(NO₃-N)濃度の季節変化を図-2に描いている。その理由は、降雨時の渓流水質変化には2つのパターンの存在すること、すなわち降雨終了後に降雨前のベース値に戻る物質(Type I)とこれを上回る物質(Type II)のあることが明らかにされており⁷⁾、SiO₂はType Iの、NO₃-NはType IIの代表的な物質であるからである。さらに、SiO₂は森林内物質循環量の少ない物質で、表層土壤水濃度は深層土壤水や地下水濃度に比べて低い性質がある。これとは逆に、NO₃-Nは植物体の必須元素として循環量も多く、表層土壤水で濃度が高まっている。

まずSiO₂濃度について、w1-137では8月と9月に僅かに濃度上昇は認められるが、全体として季節的な変化は少ない。w2-270では8月から9月にかけて濃度は高まる傾向にあるが、季節的な変動パターンとしては、年間の濃度変動幅 3.1mg/l は年平均濃度 20.9mg/lの15%にすぎず、季節的な変化はあっても穏やかなものである。3地点の年平均濃度はNo.3からNo.1に向かって18.0、20.9、23.1mg/lとなり、水と土壌との接触時間の長くなる下流ほど濃度上昇が認められる。この結果は、珪素は重量で土壌の50%を構成する物質であり、SiO₂は土壌起源の物質であることと合致する。次に、NO₃-N濃度についてw1-137では地下水位の上昇とともに8月に濃度が高まり、その後遅減している。この傾向はw2-270でさらに顕著となる。8月と9月の地下水位上昇に対応してNO₃-N濃度は高まり、地下水位と同位相の濃度変動を描くことが分かる。地下水位上昇とともにNO₃-N濃度が高まることは、流出量の多い夏季の渓流水濃度のベース値を高めることになり、渓流水で観測されたNO₃-Nの季節変動と合致する。

4. 湧水の水量と水質変化

地下水観測地点No.1のごく近くから、1988年7月23日にパイプ流S-1の流出が確認された。7月10日にはパイプ流は見られなかったことから、この間に降雨の増加にとも

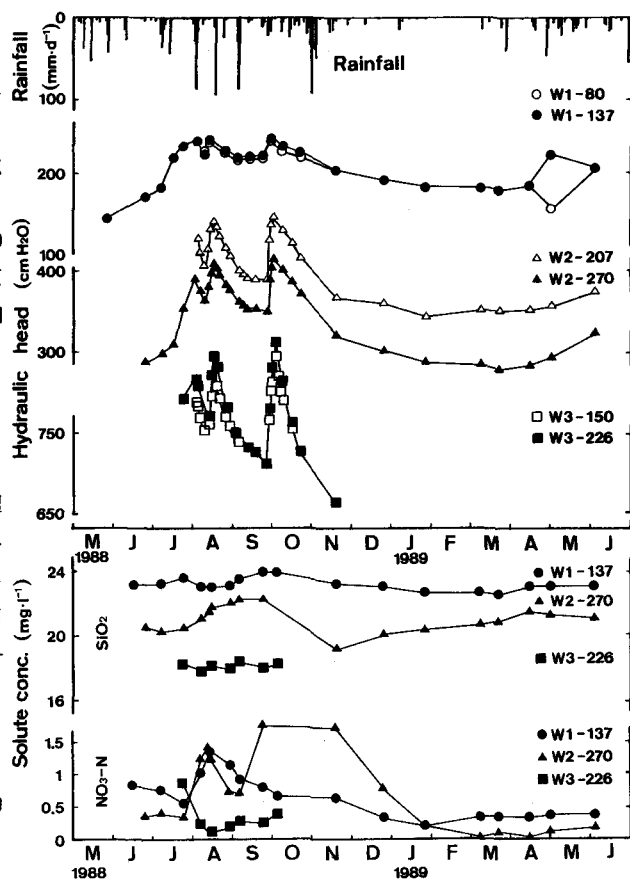


図-2 地下水位と水質の季節変化

なって流出し始めたと考えられる。パイプ流は口径にして約2 cmであり、11月中旬まで継続している。ここで言うパイプ流は、土壤中のパイプを集中的に流れる地中流である。さらに8月10日前後の降雨に対応するように、No.1とNo.2地点のほぼ中間に新たなパイプ流S-2が出現した。S-2については最大口径数mm程度のパイプが複数個確認された。パイプ流 S-2は途中と切れるが、9月末に再度湧出する。パイプ流出量については、ビニール袋に一定時間集水し、重量測定を行って求め、日降水量、S-1の SiO_2 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度とともに経時変化を図-3に描いた。

図-3に見るように、パイプ流s-1の流量は8月と9月の降雨パターンに敏感に応答して増減を繰り返す。また、S-1中の SiO_2 濃度はパイプ流量の増加とともに減少し流量とは逆位相の時系列を描く。に対して、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は流量と同期して変動することが明瞭に読み取ることができる。これらの観測値から、パイプ流S-1の SiO_2 及び $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度と流量の関係を図-4に整理した。 SiO_2 の場合、パイプ流量と濃度の時系列を反映して流量増加とともに直線的に減少する。一方、 $\text{NO}_3\text{-N}$ については両者に正の相関は認められるものの、ばらつきは大きい。

ここで、地下水やパイプ流の水質からパイプ流の起源について考えてみる。No.1地点の地下水は上向き流れの状態にあり、地下水が湧出したとも考えられる。そこで平均濃度を見ると、パイプ流で SiO_2 : 18.5、 $\text{NO}_3\text{-N}$: 1.12mg/l、w1-137の地下水で SiO_2 : 23.1、 $\text{NO}_3\text{-N}$: 0.68mg/lとなっており、 SiO_2 濃度では地下水、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度ではパイプ流が勝っている。この結果から判断して、地下水が湧出したとは考えられない。また、降水の SiO_2 濃度は0.32mg/l、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は0.29mg/lの値を取ることから、パイプ流は地下水でも、降水でもない中間流としての性質を帯びていることが予想される。さらに、パイプ流s-1のピーク流量時(9月30日)に採取された土壤水では、地表から30cm深までの平均値として SiO_2 : 15.1、 $\text{NO}_3\text{-N}$: 3.57mg/lの値が得られており、地下水濃度と比較すると SiO_2 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ いずれの物質もパイプ流と同じ性質を有している。以上の結果から、土壤水の流出がパイプ流として地表に現れたと推察される。

山地谷頭部の中間流出成分は、ほとんどがパイプ流で占められているとの報告もある⁹⁾。筑波森林試験地でのパイプ流の観測は高々1日1回の測

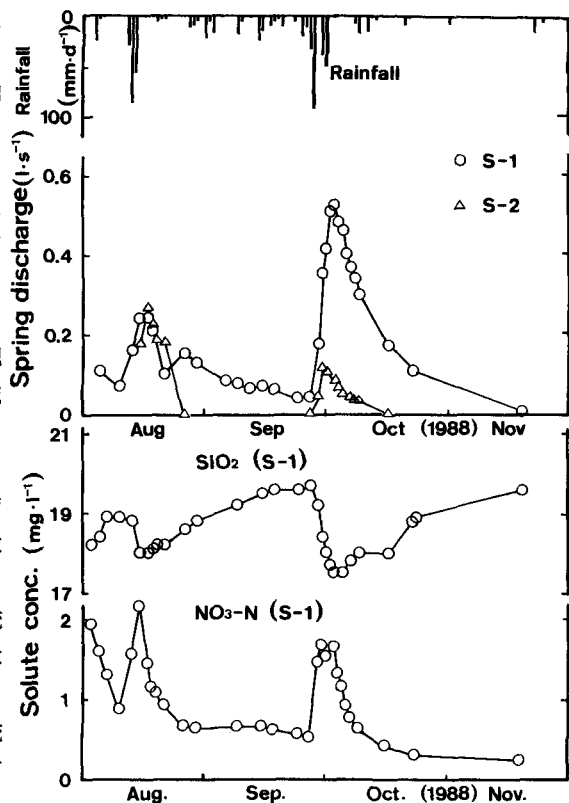


図-3 湧出水量と水質の経時変化

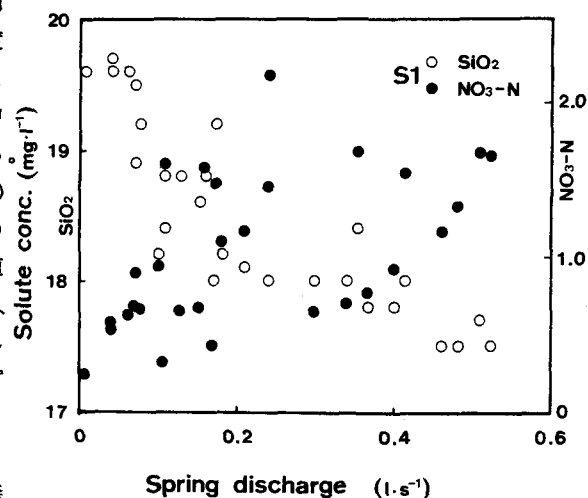


図-4 湧出水量と SiO_2 及び $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の関係

定であり、もちろん降雨パターンと対応させた時系列的な解析はできないし、パイプ流が中間流出成分をどの程度代表するのか、評価することも難しい。ただ、パイプ流の水質から判断して、土壤水が中間流として流出していることは事実である。さらに、パイプ流の水質特性、特に $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が地下水濃度より高まっている特性は、降雨流出時に観測されたTypeIIの流出パターン、すなわち流量逓減時に降雨前のベース濃度を上回る流出特性を無理なく説明することができる。

5. 土壤水分の変動

土壤水分は地中水の流出挙動を直接的に支配していることから、まず降水量やパイプ流出量の多い1988年9月15日以降の土壤水圧力水頭鉛直分布の変化を調べることにする。観測地点別の土壤水の水利水頭鉛直分布を図-5に示す。これも図-2と同様、8月1日0940時の渓流水位を基準に描いたものである。

No.1地点については、地中水が湧出していることから浸潤状態にあり、9月22日以降の降雨に対しても大きな変化は認められない。また深度100cmより浅い部分では上向きのフラックスの存在することが水利水頭鉛直分布にも現れている。No.2地点ではNo.1地点に比較して降雨に対する水利水頭の変動幅が大きく、この傾向はNo.3地点でさらに顕著となる。降雨が増加した9月24日以降のNo.2地点では、深度50cmより上部では下向き、下部では上向きのフラックスが存在し、深度50cm付近に何らかの排水機構があるように考えられる。

このように、土壤水の圧力水頭や地下水位の観測結果から、地下の平均的な流れの様子はある程度調べることができる。ところが、これらのデータは離散的であり、降雨に対する地中水の流出応答を知るには連続した時系列としての変動を捉える必要がある。そこで著者らの開発した自記テンシオメータをT1-30, 95、T2-30, 100、T3-30, 150に設置し、2分間隔で圧力水頭変化を検出した。図-6は9月16日から10月9日までの各地点の水利水頭変化を描いたものであり、図中上部には降雨の時間強度も示した。

No.1地点では先述したように、地中水の湧出(S-1)が続いており、T1-30とT1-95の水利水頭は逆転している。土壤も十分な浸潤状態にあるから、降雨に対する水利水頭にも目立った変化はない。一方、T2-30とT3-30については9月22、24、25日などに見られるように、降雨に対して明瞭な反応が認められる。さらにT2-100は9月25日17時頃より急激に増加し始め、翌26日3時にはT2-30の水利水頭と逆転する。こうした土壤水分における上向きフラックスの存在は、図-3に描いたパイプ流S-1の流出量の急増とS-2の再流出に反映されている。T3-150についても、No.2地点と比較して時間遅れはあるものの、9月29日0時にT3-30の水利水頭と逆転し、その後10月6日4時までこの状態が続いている。

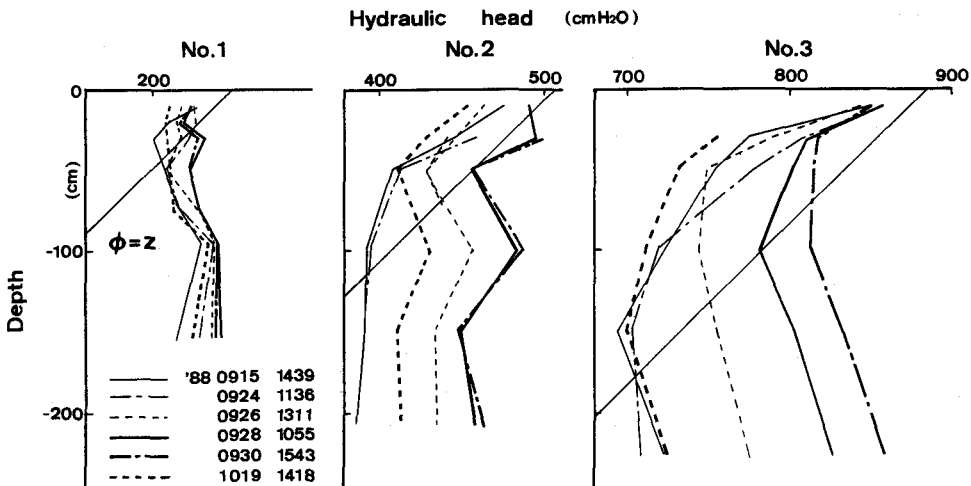


図-5 各地点の水利水頭鉛直分布の経時変化

6. おわりに

森林域はその物質循環を通して質・量の両面から降雨によるインパクトを和らげ、物質の溪流への流出を制御している。もちろん物質循環特性は土壤の組成や土壤水質に反映されることになるが、森林渓流水質の起源や水質変動機構を明らかにする目的で、著者らは、筑波森林試験地で鉛直水移動にともなう水質変化を継続的に調査してきた。これら一連の調査の中で、本研究では、森林内地下水、土壤水分や湧水を観測し、それらの水質を比較することによって、土壤水が中間流出成分として流出していることを実証した。中でも、土壤水の流出を反映している湧水では $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は地下水濃度より高まっており、この水質特性から降雨流出時の通減時に $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が降雨前のベース値を上回る現象を説明することができる。さらに、半導体圧力センサーを利用した自記テンシオメータを開発し、土壤水吸引圧を連続観測した結果、降雨パターンに対応した上向きのフラックスの存在が検出され、この上向きのフラックスは湧水の発生や湧水量の急激な増加をもたらすことも明らかにされた。

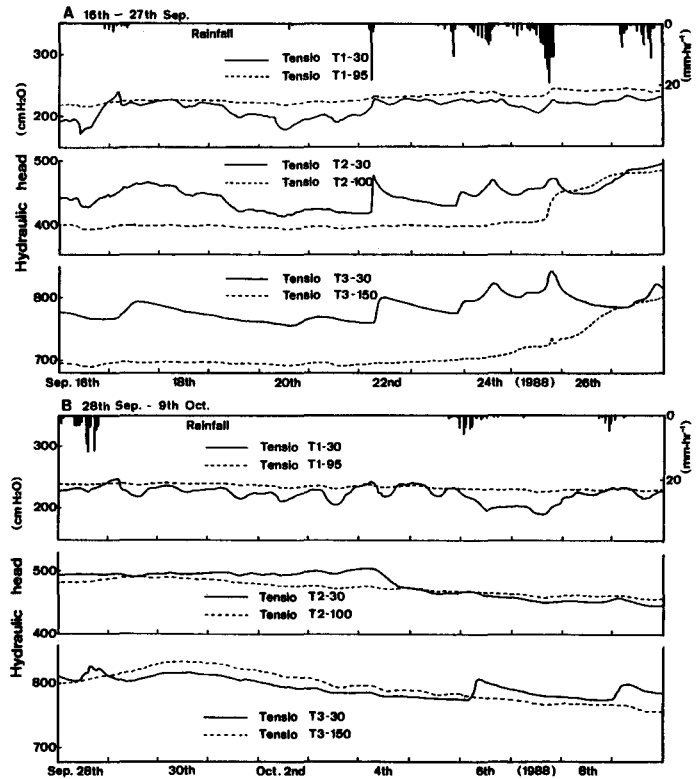


図-6 各地点の地中水水頭の水頭経時変化

参考文献

- 1) 平田健正・村岡浩爾：筑波森林試験地における土壤水質および溪流水質の季節変化について、水工学論文集、第35巻、pp.105-110、1991。
- 2) 平田健正・村岡浩爾：筑波森林試験地における水および物質の移動について、水工学論文集、第36巻、pp.579-585、1992。
- 3) 堤 利夫・福高義宏：森林の水収支と流出水質に与える影響、環境科学研究報告集、森林の環境調節作用 3、15-20、1983。
- 4) Webb, B.W. and Walling, D.E.: Nitrate behaviour in streamflow from a grassland catchment in Devon, U.K., Water Res., Vol.19, No.8, pp.1005-1016, 1985。
- 5) 村岡浩爾・平田健正：溪流水質から見た森林の浄化機能に関する研究（第1報）筑波山試験流域の概要と植生調査、国立公害研究所研究報告、第95号、21-35、1986。
- 6) 平田健正・村岡浩爾：半導体圧力センサーを用いたテンシオメータの試作と通気帯空気の測定、土木学会第44回年講、第2部、244-245、1989。
- 7) 平田健正・村岡浩爾：森林域における物質循環特性の溪流水質に及ぼす影響、土木学会論文集、第399号、pp.131-149、1988。
- 8) 新藤静夫編：谷頭部斜面に発生する崩壊と地中水の挙動、文部省科研費自然災害特別研究、p.94、1981。