

比抵抗探査法を用いた広葉樹林床土壌における 樹幹流の影響把握と地下水涵養効果の評価

嶋田 純*・大角京子**・大場和彦***・丸山篤志***

Influence Area of Stem Flow on a Soil of Deciduous Forest Floor by Electric Resistivity Survey and the Evaluation of Groundwater Recharge through Stem Flow

Jun SHIMADA*, Kyoko OHSUMI**, Kazuhiko OHBA*** and Atsushi MARUYAMA***

* Graduate school of Science and Technology, Kumamoto Univ., Kumamoto, 860-8555, Japan

** Ashisuto, Co. Ltd. Tokyo, 102-8109, Japan

*** Agricultural Meteorology laboratory, National Agricultural Research Center
for Kyushu- Okinawa region, Kumamoto, 861-1192, Japan

Abstract

The stem flow is volumetrically much less than through fall and it was believed to be less wet around a tree stem than the other part of the forest floor because of rainfall resistance of a tree canopy and little contribution of stem flow. In the present study, the continuous resistivity survey was conducted at the experimental deciduous forest along the one selected line for about 1.5 years' intervals to observe the seasonal change of soil water content under the tree canopy. The observation results were applied to evaluate the effect of the stem flow on the shallow soil water content around the selected trees. The results clearly show that the downward soil water flux under the tree canopy is 2.2 times larger than that of the no tree area in the study forest. By using this downward flux data with tree density in the study forest, the groundwater recharge rate was calculated. The groundwater recharge through the stem flow is nearly 39.1% in the total groundwater recharge in the study forest, which is completely larger than the tree density of the study forest ($0.115\text{ m}^2/\text{m}^2$ (1.15%)). This result clearly supports the effect of stem flow on the groundwater recharge in the forested area.

Key words : stem flow, soil water content, groundwater recharge, resistivity survey

1. はじめに

人口70万人を有する熊本市は豊富な地下水に恵まれていることで有名であるが、近年都市域の拡大による涵養域の減少が要因になり、地下水資源の低減と地下水位の低下が地域全体の問題となっている。主要な涵養域となっている火砕流台地に残された熊本市周辺の里山森林における地下水涵養機能の把握は、地域の地下水資源の持続的活用にとって重要な研究課題である。従来の森林

水文学の研究では、水収支的に見ると樹幹流は林内雨に比べて量的に少なく(森林水文学編集委員会, 2007), 同じ森林域内でも樹幹周辺は樹冠(キャノピー)投影域外側よりも地表面に達する降水量は少ない, つまり木の下は一般に降水量は少ないと考えられてきた。本研究では、同一断面側線上の土壌水分量変化を非破壊で繰り返し測定することの出来る比抵抗探査(島他, 1995 参照)を用い、落葉広葉樹であるクスギ林がある台地上の試験林内で、樹幹流が浅層土壌水分分布に及ぼす影響を評価

*熊本大学大学院自然科学研究科 〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1

キーワード: 樹幹流, 土壌水分量, 地下水涵養, 比抵抗探査

し、地下水涵養に対する効果の把握を試みた。

2. 研究地域・観測方法と観測期間

熊本県合志市にある(独)九州沖縄農業研究センター内のクヌギ試験林において、図-1に示すような観測エリアを設定し、2003年6月28日~2004年12月31日の約1年半の期間にわたり、図中に示した電気探査観測ラインにおいて、比抵抗の繰り返し測定を行った。試験対象林には、平均樹高13mのブナ科コナラ属クヌギ(落葉広葉樹)が樹幹密度(3.5本/a)で繁茂している。図-1に試験林内の樹木分布と観測測器の配置を示す。

電気探査に用いた装置は、(株)興和製NEXT-400RSで、電極間隔は0.5mで96本の電極を配置することにより全長48mの測線を構成している。測定はWenner-4極法(島他, 1995参照)を用い原則6時間毎に1回の測定(約40分を要する)を実施したが、解析には1日1回の代表的な結果を用いた。比抵抗探査によって測定された見掛け比抵抗分布は、(株)Tera製の逆解析ソフト『RES2DINV. ver. 3.49』を用いて、真の比抵抗分布を推定し、この値を後述するように土壌のpF値として換算した。

試験対象森林における深度別土壌サンプリングは、2002年6月12日と6月26日に、0.1m, 0.3m, 0.5m, 0.7m, 1.0m, 1.5m, 1.8mの7深度で採取し、土壌分類を行うと共に実験室にて土壌の透水性を把握した。また、観

測の全期間に渡り、クヌギ木の樹幹流量及び、林内雨量、深度別土壌の圧力水頭も合わせて継続観測した。

3. 結果と考察

3.1 樹幹流の季節変化と樹幹流化率

観測期間中定期的に、魚眼レンズで撮影した天空画像から樹冠密度を算出した。その結果を基に1-3月を落葉期、4-12月を着葉期と定義し、落葉期と着葉期の樹幹流量の特性を見るため、林外雨量に対する樹幹流下率(F(%))(Herwitz(1986))の関係求めた。

ここで樹幹流下率(F:%)は1つの降水イベントに対して、樹幹流量(V:mm³/event)、林外雨量(P:mm/event)、樹冠(キャノピー)投影面積(B:mm²)から以下のように定義される。

$$F = 100VB^{-1}P^{-1} \quad (1)$$

その結果、冬季は0-20mmの範囲の林外雨量に対して0-15%の範囲で樹幹流下率が增大する線形性が認められた。一方夏季には、0-140mmにおよぶ広範囲の林外雨量変化に対し、40mm以上で7%の樹幹流下率に収束してしまう傾向が認められた。広葉樹であるクヌギ木の特徴として、樹幹流量は、降水量が相対的に少ないものの樹冠密度の低い落葉期である冬季に樹幹流下率を高めていることになる。

これは、夏季着葉期にクヌギの樹冠(キャノピー)が

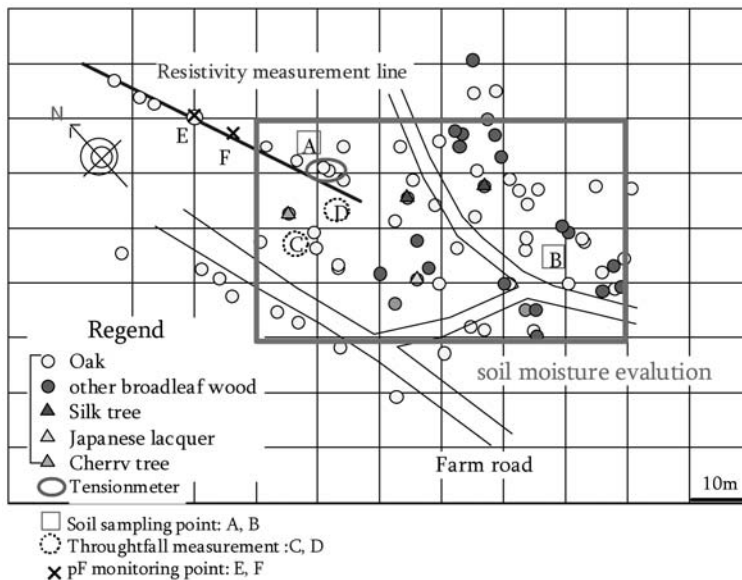


図-1 試験林内の樹木分布と観測測器配置

Fig. 1 Layout of observation system in the study Oak forest.

持つ広葉樹に特徴的な葉や枝幹の構成状態が遮断を増大させ、結果として高い降水量にもかかわらず樹幹流下率を低下させたと考えられる。一方冬季落葉期には、落葉後の樹枝による降雨の捕捉が高まり、結果的に樹幹流下率を高めたものと考えられる。

3.2 2次元比抵抗探査に基づく林床内土壌水分の季節変化

クヌギ林内に設けた48mの比抵抗測線(図-1参照)で、2003年6月から2004年12月の期間、原則6時間の測定間隔で繰り返し比抵抗の測定を行った。また、観測期間中同時に、異なる深度においてテンシオメータにより土壌水分の圧力水頭の測定を行い、比抵抗探査から得られた対応する深度での比抵抗値とテンシオメータで実測した圧力水頭(pF表示)の係数式を0.5m, 1.0m, 1.5mの3深度の土層について実験的に決定した。比抵抗探査結果から逆解析して得られた比抵抗の断面2次元分布を上記の比抵抗-pF係数式を基に3深度の土層毎に換算を行い、2次元pF断面を作成した。各月を代表する2次元pF断面を図-2(a)~(d)に示す。これらの図から、前述したような季節変化に伴う樹幹流変化が表層土壌水分(pF分布図)に与える影響を見ることができる。ここでpFは土壌の吸引圧の絶対値の対数であり、土壌の水分状態を把握する指標である。

降雨後に相当するpF断面の中で、特に落葉期(1~3月)の降雨イベント(図-2(c))に対しては、初期土壌水分量が少なく且つ高い樹幹流下率をもつため、降雨後、pF断面には樹幹直下で明白な樹幹流浸透貢献域が確認でき、少雨であっても樹幹流が発生していることが確認できた。一方着葉期(4~12月、図-2(a), (b), (d))では、初期水分量が多く短期に集中した降雨イベントの場合には、降雨の直後に深部に至る樹幹流浸透が起こっていた。その後時間の経過とともに樹幹の存在していない林床領域での浸透も盛んになるため、全体としては均質な降雨浸透となっている様子が示されている。また、任意に選出した2地点(樹幹直下林床領域と樹幹の存在していない林床領域、それぞれ図-1中のEとFに相当)での0.5mと1.5m間の土壌水分フラックス(ここで土壌水分フラックスは、比抵抗測定結果から推定されたpF値から換算した水頭値と土壌の飽和透水係数から水分量に応じて算定した不飽和透水係数を用いて算出した)を比較した結果(図-3参照)、樹幹直下林床領域は年間を通して下向きのフラックスが存在しており、相対的に湿潤な環境にあった。これは、樹冠(キャノピー)による日射の遮断と樹幹流による局所的な降雨インプットの存在の双方に起因するものと考えられる。

一方、図-2や図-3に示される様に、夏季の無降雨期間

中の土壌面蒸発による表層土壌の乾燥に伴う上昇フラックスの存在は、樹幹の存在していない林床領域において特に顕著であることも示された。これは地表面への直達日射による裸地面蒸発が、樹幹の存在していない林床領域(特に樹冠(キャノピー)投影域の外側)において特に卓越することを示しており、樹幹流による降雨時の集中的インプットが存在していないことも加わり、結果的に樹幹の存在していない林床領域を相対的に乾燥した状態にさせたものと思われる。

図-4は、観測期間中の月別林外雨量(図-4(a))に対する、前述と同様の樹幹直下の林床領域(図-1中のE地点)と樹幹の存在していない林床領域(図-1中のF地点)での土壌水分フラックス月別変化(図-4(b))を示している。樹幹直下の林床領域では期間中常に下向きの定常的なフラックスが卓越しており、期間中の年間下向き土壌水分フラックスは601.3mm/yとなるのに対し、蒸発に伴う上向き土壌水分フラックスは0mm/yである。一方樹幹の存在していない林床領域では、蒸発に伴う上向きフラックスと降雨に伴う下向きのフラックスが補完的な季節変化を示しており、期間中の年間下向き土壌水分フラックスは274.1mm/yであるのに対し、蒸発に伴う上向き土壌水分フラックスは865.0mm/yであり、結果的に樹幹の存在していない林床領域では、蒸発過多で下向き土壌水分降下は殆ど期待できないことが分かる。

3.3 クヌギ林内での樹幹流による地下水涵養量評価

前述の図-2に示した比抵抗測線断面沿いのpF分布の連続モニタリングデータを用いて、降雨イベント後、林床において樹幹流によって影響される土壌水分増加域を検出し、「樹幹流浸透領域(INFA: 樹幹を中心とする直径(m)で表示)」と定義した。研究対象期間内の複数の降雨イベント後に検出された樹幹流浸透領域(INFA)とそれを発生させた樹幹の胸高直径(BDH(m))との間には、(2)式のような線形関係が認められた。

$$\text{INFA} = 6.88\text{BDH} + 0.36 \quad (2)$$

一方研究対象としたクヌギ林内に図-1に示すような地下水涵養評価領域(60m×40m, 2,400m²)を設定し、この領域内にある全ての樹木(クヌギが主体であるが一部他種の広葉樹木も含む)の樹幹直径とその分布密度から得られた立木密度は0.115m²/m²となった。また、これらの樹幹直径を基に上述の(2)式から樹幹流浸透領域を推定して図-5に分布図として示した。図より評価領域内の樹幹流浸透領域累計面積は546.7m²で、地下水涵養評価領域面積の22.8%に相当する。残りの1,853.3m²は樹幹の存在していない裸地に相当し、その面積割合は全体

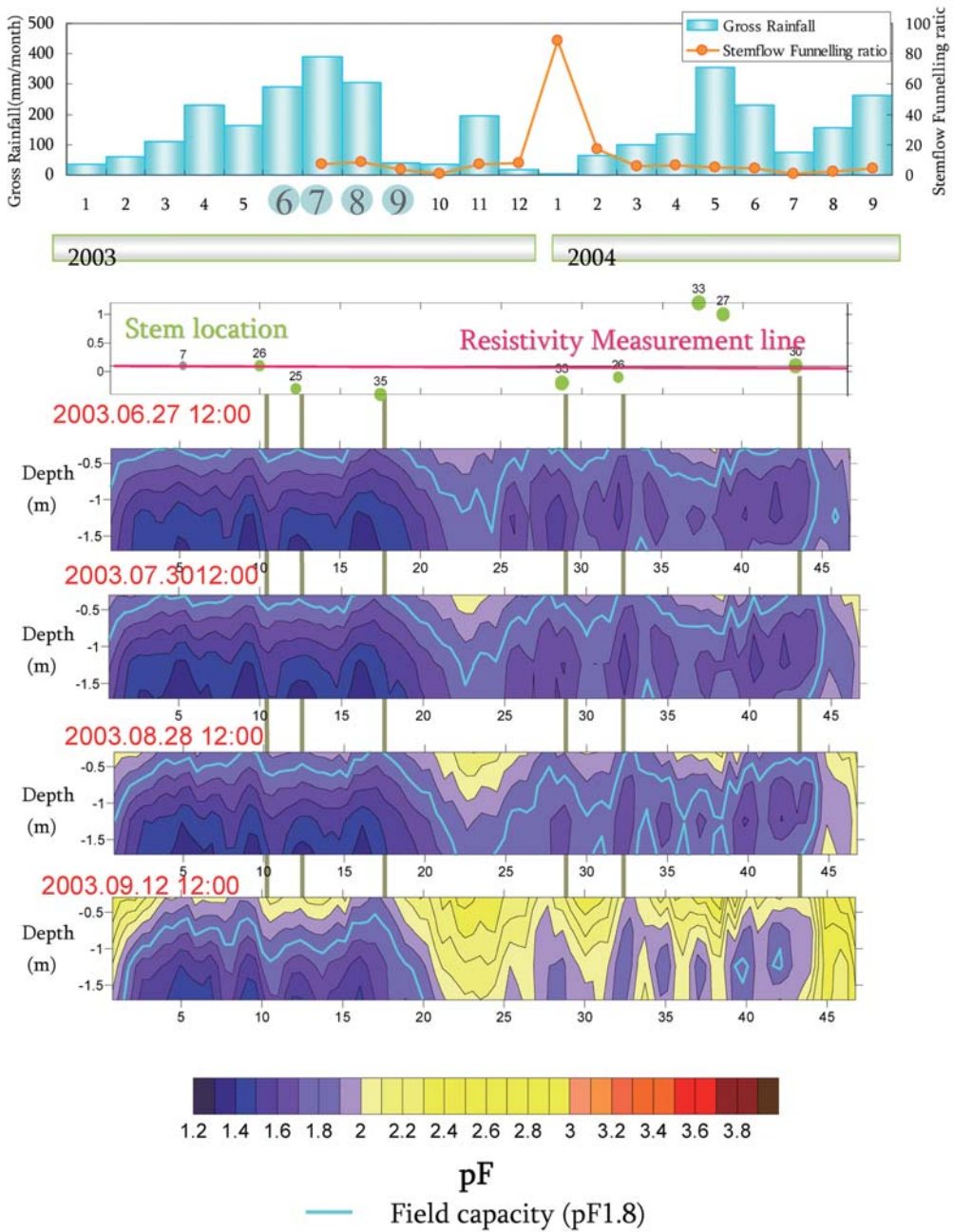


図-2 (a) 2003 年着葉期の土壤水分 pF 表示断面分布図
 Fig. 2 (a) Two dimensional of pF soil moisture distribution on leafed season in 2003.

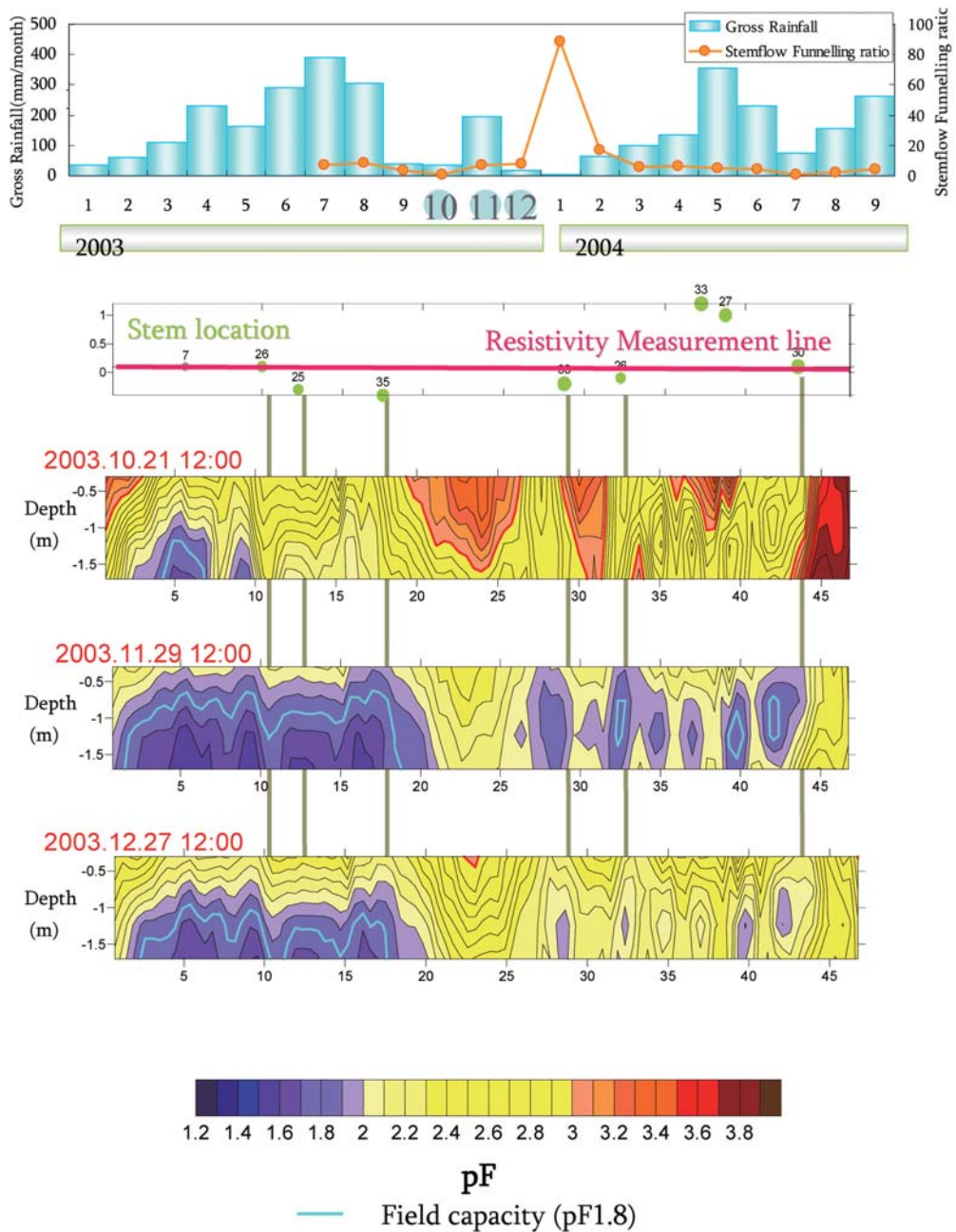


図-2 (b) 2003 年着葉期の土壌水分 pF 表示断面分布図 (続)

Fig. 2 (b) Two dimensional of pF soil moisture distribution on leafed season in 2003 (continued).

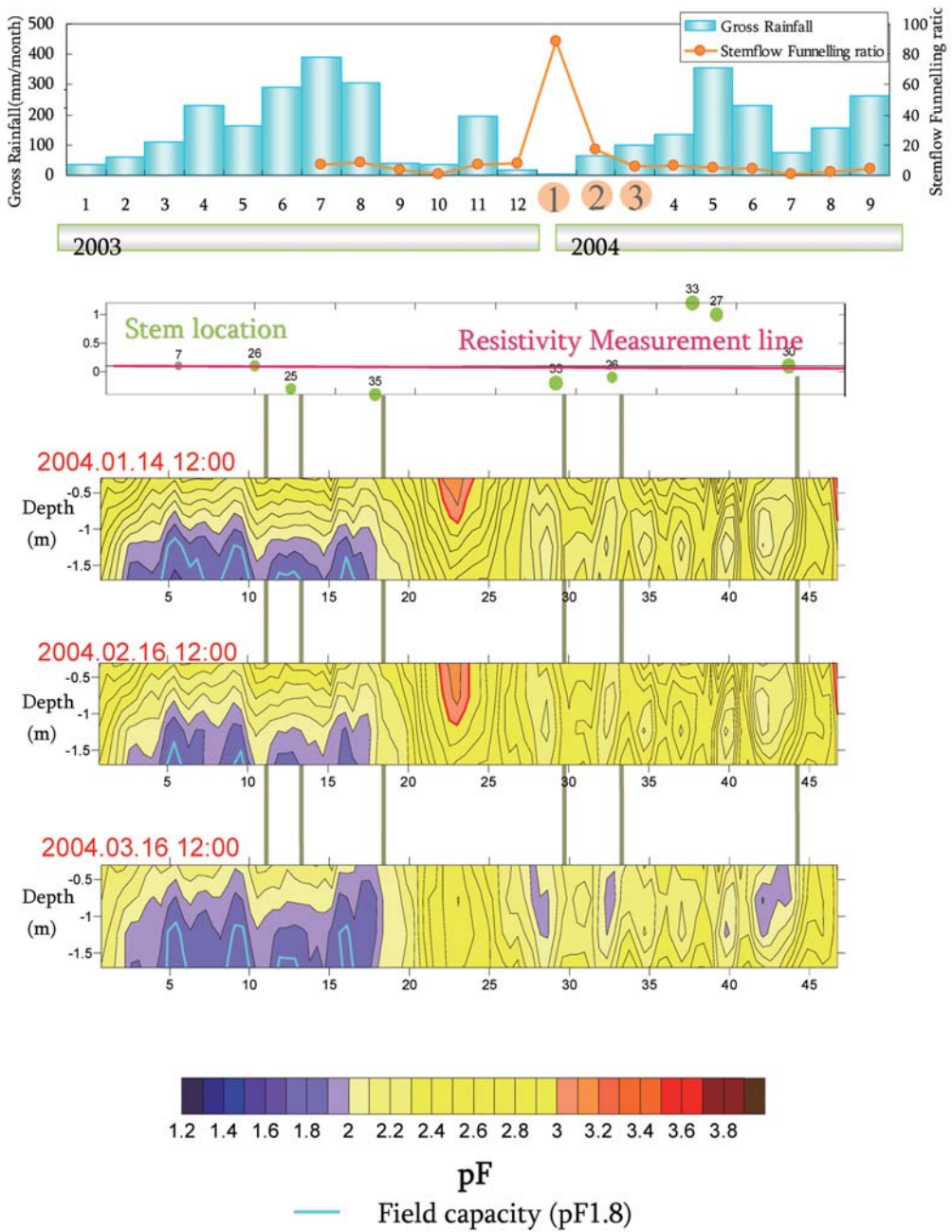


図-2 (c) 2004年落葉期の土壤水分 pF 表示断面分布図

Fig. 2 (c) Two dimensional of pF soil moisture distribution on leafless season in 2004.

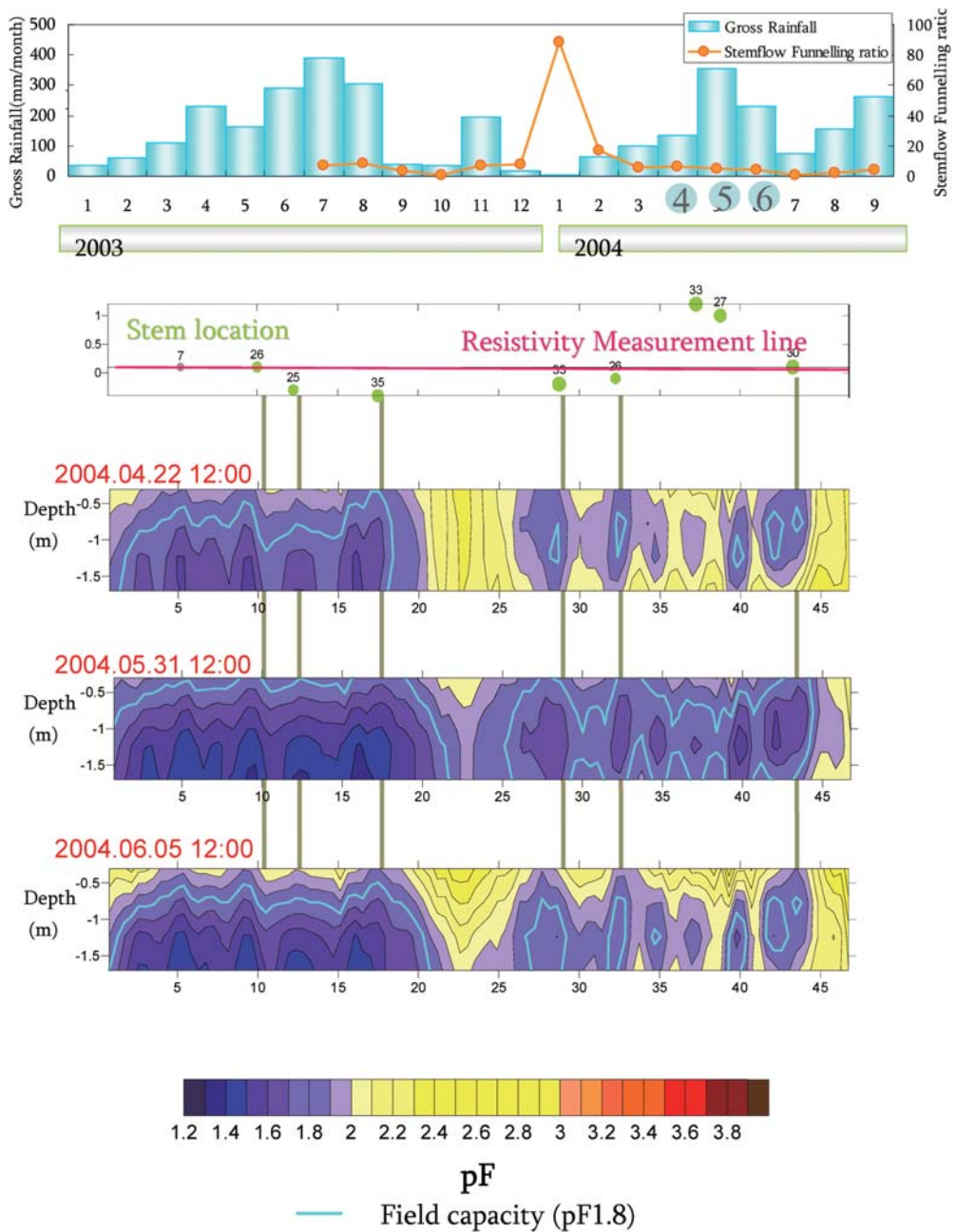


図-2 (d) 2004 年着葉期の土壌水分 pF 表示断面分布図

Fig. 2 (d) Two dimensional of pF soil moisture distribution on leafed season in 2004.

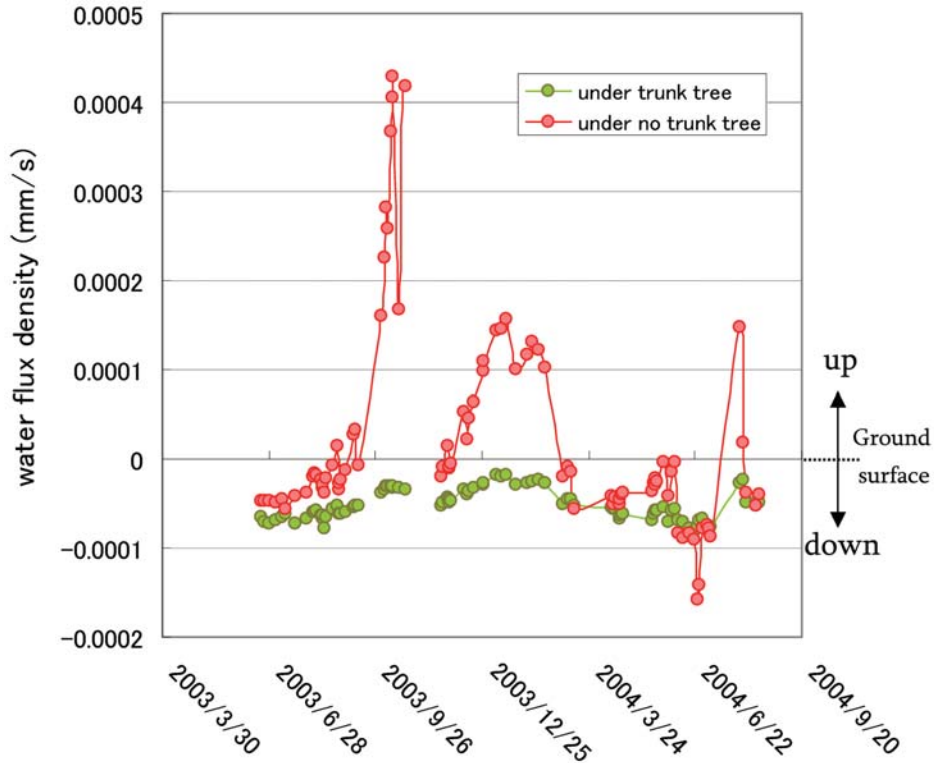


図-3 樹幹直下と樹幹の無い林床領域における0.5mと1.5m間の土壌水分フラックスの季節変化の比較

Fig. 3 Seasonal fluctuation of soil water flux between 0.5m and 1.5m depths for under-trunk tree forest floor area and for under-no-trunk tree forest floor area.

の77.2%に相当している。今ここで、この二つの領域に対して3.2節で算定した樹幹直下林床領域での下向き土壌水分フラックス(601.3 mm/y)と、樹幹の存在していない林床領域での下向き土壌水分フラックス(274.1 mm/y)を当てはめ、土壌水の年間下方浸透量(地下水涵養量に相当)を算定すると、樹幹直下林床領域では328.7 m³/y(評価領域における総地下水涵養量の39.1%に相当)と求まった。一方、樹幹の存在していない林床領域では511.2 m³/y(評価領域の総地下水涵養量の60.9%に相当)となる。両者を基に、樹幹流浸透領域とそれ以外の樹幹の存在していない林床領域とをそれぞれ面積加重平均して評価領域全体の平均涵養量を算定すると398.2 mm/yr(0.95 mm/day)となった。これは、当該地域の土壌水中のトリチウム濃度鉛直プロファイルから推定された阿蘇火砕流台地上の畑地における年平均地下水涵養量2.3 mm/day(Teramoto *et al.*, 2003)を下回るものであり、相対的に蒸発散の大きな林地における地下水涵養特性を反映している可能性が示唆された。

研究対象のクヌギ林の立木密度は0.115 m²/m²で評価

領域面積の1.15%に過ぎない。しかしながら、樹幹流浸透領域は評価領域面積の22.8%相当に拡大し、更に樹幹流浸透領域経由の地下水涵養量としては、領域全体の涵養量に対して39.1%という高い割合となり、樹幹流の存在が地下水涵養に極めて高い効果のあることが示された。

4. おわりに

研究対象としたクヌギ林では、クヌギ類の立木密度は0.115 m²/m²で評価領域面積の1.15%に過ぎない。しかしながら、本研究の結果が示すように、樹幹流浸透領域は評価領域面積の22.8%相当に拡大し、更に地下水涵養に対しては、樹幹流経由の涵養量は領域全体の涵養量に対して39.1%という高い涵養効果があることが示された。樹幹流は、遮断によって捕捉された大気中のドライフォールアウトを洗い流すことによって林床に相当量の溶存化学成分を補給していることが指摘されている(酒井, 2005)。樹幹流経由の土壌水浸透の定量的評価を試みた本研究による結果は、森林流域における樹幹流経由の

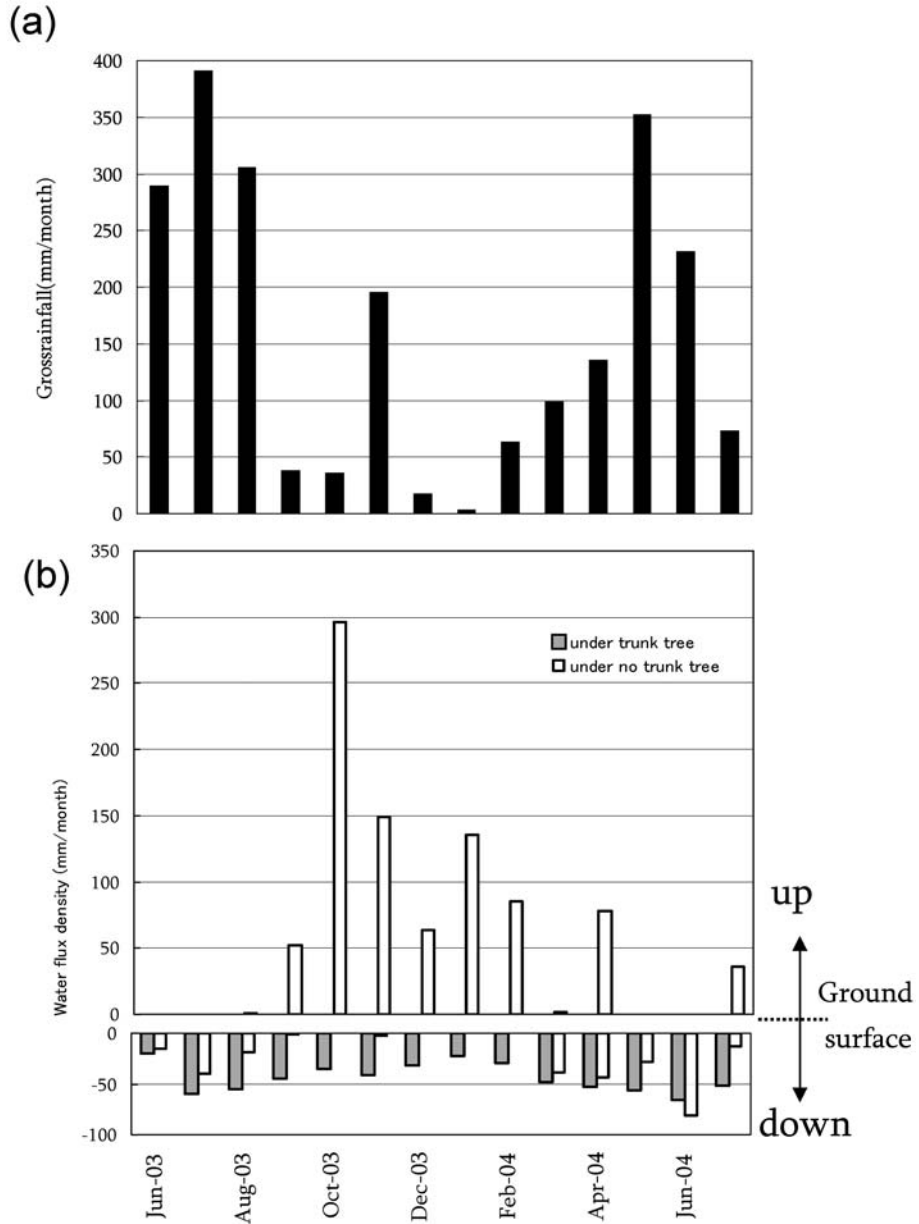


図-4 観測期間中の林外雨量 (a) に対する樹幹直下林床領域と樹幹の無い林床領域における土壌水分フラックス月別変化 (b).

Fig. 4 Seasonal variation of Gross rainfall (a), and monthly total upward and downward soil water flux (b) for under trunk tree forest floor area and under no trunk tree forest floor area.

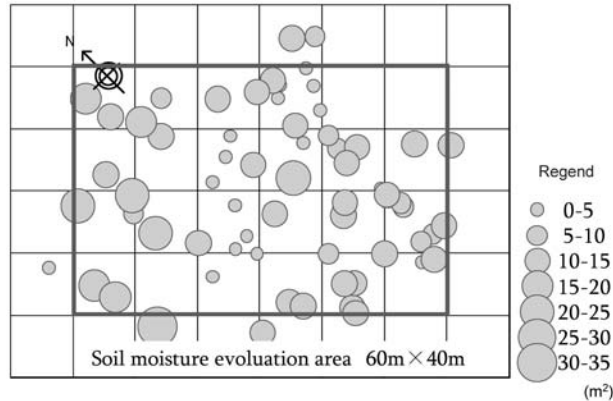


図-5 研究林内の地下水涵養評価領域内における推定樹幹流浸透領域

Fig. 5 Groundwater recharge evaluation area in the study forest and the estimated distribution of representative stemflow infiltration contribution area.

栄養塩負荷の定量的評価の必要性を強く認識させるものである。

引用文献

- 酒井正治 (2005) : 簡易分取装置を使ったコジイ樹幹流の化学性—初期樹幹流と後期樹幹流の把握—. 九州森林研, **58** : 212-215.
- 島 裕雅・梶間和彦・神谷英樹編 (1995) : 比抵抗影象法. 206p. 古今書院, 東京.
- 森林水文学編集委員会 (2007) : 森林水文学. p. 18, 森北

出版, 東京.

- Herwitz, S.R. (1986) : Episodic stemflow inputs of magnesium and potassium to a tropical forest floor during heavy rainfall events, *Oecologia*, **70** (3) : 423-425.
- Teramoto, M., Yonesaka, T. and Shimada, J. (2003) : Infiltration process and groundwater recharge rate in the pyroclastic flow deposits revealed by environmental tritium and stable isotopes. *Proc. of IUGG/IAHS Sapporo 2003*. A45

要 旨

森林内では林内雨に比べて量的に少ない樹幹流は多くの場合無視され、同じ森林域内でも樹幹周辺は樹冠（キャノピー）投影域外側よりも地表面に達する降水量は少ないため、木の下は相対的に乾燥していて地下水に対する涵養効果は低いものと考えられてきた。本研究では、同一断面側線上の土壤水分量変化を非破壊で繰り返し測定することの出来る比抵抗探査法を利用し、落葉広葉樹のクヌギ林がある台地上の試験林において樹幹流が浅層土壤水分分布に及ぼす影響を評価し、地下水涵養に対する効果の把握を試みた。測定結果に基づき樹幹直下林床領域と樹幹の存在していない林床領域の土壤水分フラックスを比較した結果、樹幹直下林床領域は年間を通して下向きのフラックスが存在しており、相対的に湿潤な環境にあったが、樹幹の存在していない林床領域では相対的に蒸発過多で下向き土壤水分降下は殆ど期待できないことが示された。比抵抗継続測定結果をもとに樹幹流浸透領域を定義して地下水涵養における樹幹流浸透効果を評価した結果、対象領域に占める樹幹の割合は面積的にはわずか1%程度にすぎないが、樹幹を経由した降水が領域全体の涵養量に占める割合は40%にもなり、高い涵養効果があることが示された。

受稿年月日：2007年12月2日
受理年月日：2008年2月13日