

ハゲ山に森林を再生した小流域における10年平均流況曲線の長期変化

誌名	水利科学
ISSN	00394858
著者	蔵治, 光一郎 五名, 美江
巻/号	330号
掲載ページ	p. 117-127
発行年月	2013年4月

ハゲ山に森林を再生した小流域における 10年平均流況曲線の長期変化

蔵 治 光一郎
五 名 美 江

目 次

- I はじめに
- II 東京大学生態水文学研究所の試験流域における流況曲線の既往研究と省庁によるその異なった解釈の例
- III 穴の宮と白坂における1940年から2011年までの10年平均流況曲線
- IV おわりに

I はじめに

かつて日本の一部に存在していたハゲ山地帯では、明治30年の森林法、砂防法の制定等を契機として治山・砂防を目的とした工事、植栽等が行われ、その後長期間放置された結果、現在は一部を除いて森林に被覆された。このような「ハゲ山に森林を再生した」ことにより、かつてハゲ山であった流域からの流出特性がどのように変化したのかを知ることは、森林水文学にとって最も重要な課題の一つであると同時に、森林の洪水緩和機能や水資源涵養機能の定量的評価の基礎となる情報の一つでもある。

東京大学生態水文学研究所は、1922年に東京帝国大学愛知県演習林として愛知県瀬戸市と犬山市に設置され、1929年までに4つの試験流域において気象お

蔵治：東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林生態水文学研究所長・准教授
五名：東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林生態水文学研究所・特任研究員

表-1 穴の宮, 東山, 白坂の各試験流域の概要

名称	穴の宮	東山	白坂
測水所の緯度	35° 15' 23" N	35° 13' 21" N	35° 12' 54" N
測水所の経度	137° 06' 23" E	137° 08' 16" E	137° 10' 05" E
標高 (m)	140~217	347~617	295~629
流域面積 (ha)	13.9	106.5*	88.5
表層地質	白亜紀の深層まで風化した花崗岩質岩石	白亜紀の深層まで風化した花崗岩質岩石	白亜紀の深層まで風化した花崗岩質岩石
植生 (2012年現在) **	落葉広葉樹林, 一部針葉樹人工林 (ヒノキ0.11ha, テーダマツ0.02ha)	落葉広葉樹林	落葉広葉樹林, 一部針葉樹人工林 (スギ0.90ha, ヒノキ1.04ha)
1964年平均蓄積量 (m ³ ha ⁻¹) ***	22.8	87.0	136.8
2000年平均蓄積量 (m ³ ha ⁻¹) **	88.7	149.4	204.9
2010年平均蓄積量 (m ³ ha ⁻¹) ****	118.0	154.6	229.6

* これまでの量水観測結果報告 (I) ~ (VI) に記載されている106.7は誤り (東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林生態水文学研究所2013b)

** 東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林生態水文学研究所 (2013b)

*** 東京大学農学部附属演習林愛知演習林 (1993)

**** 生態水文学研究所第5期教育研究計画の策定に際して行われた森林現況調査結果 (東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林生態水文学研究所2012a) より算定

よび流量観測施設を次々と完成させ、観測を開始した (東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林生態水文学研究所2013a)。そのうち3試験流域 (白坂, 東山, 穴の宮。概要を表-1に示す) では現在も観測が継続されている。観測開始当時と現在の観測データを比較することで、ハゲ山に森林を再生した小流域における流出特性の長期変化を定量的に知ることができる数少ない試験流域である。

本稿では、ハゲ山に森林を再生した小流域における流出特性の長期変化を知るための研究の第一歩として、東京大学生態水文学研究所の試験流域において観測された流量データから描かれる流況曲線の長期変化について予備的に検討した結果を報告する。以下では、年間を通じて X 日間はこの値を下回らない

流量を X 日流量と略記する。豊水流量は95日流量，平水流量は185日流量，低水流量は275日流量，渇水流量は355日流量となる。

II 東京大学生態水文学研究所の試験流域における流況曲線の既往研究と省庁によるその異なった解釈の例

生態水文学研究所の長期水文観測データから得られる流況曲線はこれまで多くの研究者の研究対象となってきた。Suzuki ら（1994）は白坂と東山の1930～85年の56年間のデータを用いた解析を行い，6～220日流量に増加傾向が認められたが，221～365日流量には増加・減少傾向はいずれも認められなかったことを報告している。そしてこの間，年降水量も増加傾向にあり，221～365日流量に増加傾向が認められないのは蒸発散量の増加によると解釈している。

太田（1996）は白坂流域の10年平均流況曲線を1930年代，1940年代，1970年代，1980年代について示し，森林の成長に伴い30～275日流量は増加しているが，渇水流量付近ではその増加は定かではなく，かえって減少しているともできるとしている。そして「森林は主にその土壌の働きによって洪水を緩和し，低水流量以上で流況を改善させるが，蒸発散作用によって，特に渇水流量付近で流況を悪化させる可能性がある」としている。太田（2012）は最新の著書『森林飽和』の中でも太田（1996）と同じ図を示し，「森林が成長すると豊水流量や平水流量は増加するが，低水流量，とくに渇水流量は必ずしも増加しない。むしろ減少していることが明らかになった」としている。

これに対して蔵治（2000），蔵治・芝野（2002）は異なった解釈を示している。蔵治（2000）は，白坂には夏の渇水と冬の渇水があり，白坂の年最低流量は夏に観測される年と冬に観測される年があるため，年単位の流況曲線を用いた解析では，夏の渇水と冬の渇水が区別されずに混ざって解析されてしまうことに注目し，夏と冬の渇水を区別した解析を行った。その結果，白坂の1930～1990年の61年間の夏の最小流量は増加傾向，冬の最小流量は減少傾向であることを見出した。蔵治・芝野（2002）は，この結果が東山でも共通にみられることを見出した。これらの研究を踏まえ蔵治（2004）は，太田（1996）や太田ら（1997）が示した1980年代の渇水流量の減少は，森林の成長だけで単純に説明できるものではなく，夏の最小流量が増加し，冬の最小流量が減少している主要因は，夏の降水量が増加し，冬の降水量が減少していること，また，

1980年代の渇水流量の減少は、1980年代の冬の降水量が顕著に少なかったことが主原因であることを示した。

このように、生態水文学研究所の長期水文観測データから得られる流況曲線は、研究者の間でも異なった解釈がされてきたが、そのためもあってか、これらのデータは、省庁によって異なった解釈を付与されて公表されている。

たとえば、国土交通省は、同省ホームページの中で『『緑のダム』を整備すればダムは不要か』というページを公開しており (http://www.mlit.go.jp/river/dam/main/opinion/midori_dam/midori_dam_index.html)、その中で『『緑のダム』による利水機能の代替は可能か?』と題して、「森林の水源涵養機能については学説が定まっておらず、森林整備による効果の定量的な評価は困難ですが、森林の増加は樹木からの蒸発散量を増加させ、むしろ、渇水時には河川への流出量を減少させることが観測されています。従って、利水機能の代替を森林の整備に求めることは適切とは考えられません。」と述べている。同ホームページには、この記述の根拠として、東京大学生態水文学研究所白坂流域のデータをもとに作成した棒グラフが掲載されている。この棒グラフは、1930年代と1980年代の豊水流量、平水流量、低水流量、渇水流量を示したもので、豊水流量、平水流量は「森林小」の1930年代が「森林大」の1980年代よりも小さいが、平水流量、渇水流量は逆に「森林小」の1930年代が「森林大」の1980年代よりも大きいことが示されている。「森林が成長した場合、豊水や平水時の河川の流量は増加するものの、低水や渇水時には河川の流量はかえって減少する場合があります。これは、森林の樹冠部の蒸発散作用（根から吸い上げた水分や樹木に降った雨が枝や葉などから水蒸気として放出される作用）により、森林自身はかなりの水を消費するからです。」という説明が付されている。

一方、林野庁は、2003年に「モンテリオールプロセス第一回森林レポート国別レポート日本」を公表しているが、この中で太田（1996）と同じ図を示し、1980年代は1930年代、1940年代に比べ、低水流量以下で減少していることを指摘し、これは年降水量の影響と推測し、年降水量が少ない年は渇水流量が減少する可能性があるとしている。

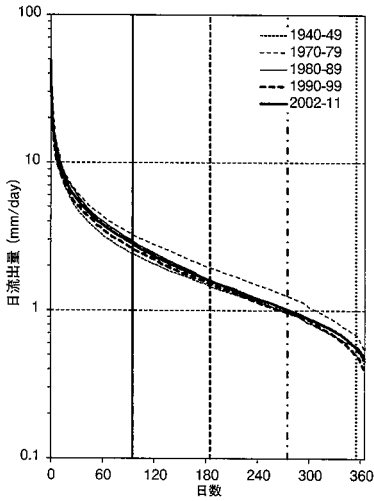
国土交通省が示している図の凡例では、1930年代と1980年代との違いは、あたかも「森林小」と「森林大」だけであるかのように描いてある。1930年代と1980年代は降水量も異なっているが、そのことは凡例に記載されていない。図の欄外には、10年間平均年降水量は1930年代よりも1980年代の方が多かったこ

とが記載されており、「1980年代は、1930年代に比べて、年降水量が大きいにもかかわらず、平水流量、渇水流量は小さい」ことも主張されている。しかし劉ら（1999）、蔵治（2000）、蔵治・芝野（2002）の研究成果を踏まえれば、白坂の渇水流量は年降水量には依存していない。従って、この図を「森林の影響」や「年降水量の影響」であると解釈するのは両方とも正しくなく、正しくは「1930年代よりも1980年代の方が、冬の渇水時の流量を決める冬の降水量が少なかったため、渇水流量が小さい」と解釈すべきものである。さらにその後の研究（蔵治・芝野2002、蔵治2004）により、1990年代のデータを加えた70年間のデータを解析したところ、1990年代の渇水流量が1980年代よりも増加しており、「森林の成長が渇水流量を減少させている」という単純な解釈では、1990年代に渇水流量が1980年代に比べて増加したことは説明できないことも明らかになっている。

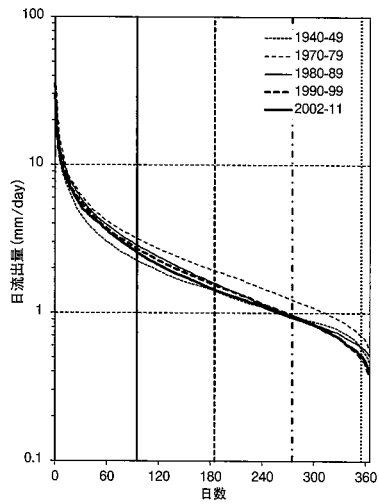
Ⅲ 穴の宮と白坂における1940年から2011年までの 10年平均流況曲線

図-1は、穴の宮および白坂の1940年から2011年までの10年平均流況曲線である。太田（2012）が示した図では、1930年代の10年平均流況曲線も描かれているが、1930年代については、穴の宮では1934年、白坂では1935年に流出口の幅や深さを変更する改修工事が行われており（東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林生態水文学研究所2013a）、これらの工事よりも前の流量データは工事後よりも精度が劣ると判断されたので、1930年代は図示しなかった。穴の宮では1950年代から60年代にかけて浸透実験が行われたことにより、流況が人為的に変化した期間がある。また白坂には2000年と2001年に流出量の欠測がある。また一つの図にたくさんの流況曲線を描くと見づらくなってしまう。そこで図-1には、1940年代、1970年代、1980年代、1990年代、2002～11年の5本の流況曲線を示した。このうち2001年以前の流量データは公開されている（愛知演習林・演習林研究部1976、1977、愛知演習林1981、1984、1987、1999、東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林生態水文学研究所2012b、2013b）が、今回の解析には公開データを用いずに、1分刻みの水位記録の原資料に立ち返り、再計算を行って作成したデータセットを用いた。これまで公開されているデータの最小単位は0.1mmであるが、本論文では流量計算に、

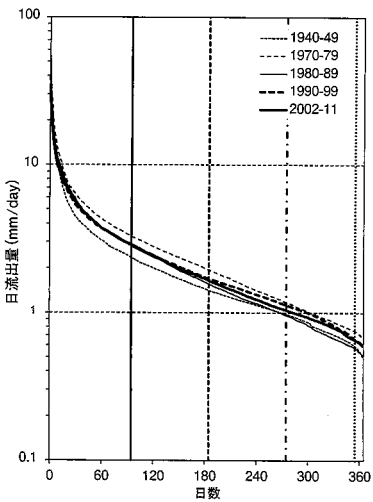
(a) 穴の宮流域 (暦年)



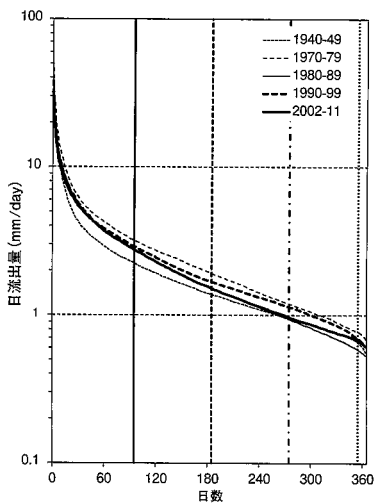
(b) 穴の宮流域 (5月界)



(c) 白坂流域 (暦年)



(d) 白坂流域 (5月界)



— 豊水流量 - - - 平水流量 - · - · 低水流量 ····· 渇水流量

図-1 穴の宮と白坂における流況曲線

- (a) 穴の宮, 年界を暦年とした場合 (b) 穴の宮, 年界を5月1日とした場合
 (c) 白坂, 年界を暦年とした場合 (d) 白坂, 年界を5月1日とした場合

これまでの方法よりも厳密な計算法である積分法（東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林生態水文学研究所2013b）を用い、日流出量を小数点以下15桁まで計算した。流況曲線を暦年で区切ることによって、冬の渇水が2つの水年にまたがってしまう問題点が蔵治（2000）や稲葉（2009）によりすでに指摘されていることを踏まえ、年界を暦年とした図（a, c）と、年界を5月1日とした図（b, d）を並列した。

まず暦年界と5月1日界の図を見比べると、低水流量から渇水流量、最小流量までの区間にはかなりの差が認められる。蔵治（2000）や稲葉（2009）により指摘されてきた「冬の渇水が2つの水年にまたがってしまう問題点」は、10年平均流況曲線においても、渇水流量を評価する際には無視できないことが明らかである。渇水流量の評価には5月1日界の流況曲線を使用した方が、より正確に議論できるので、以下では図-1（b, d）を用いて議論する。

図-1（b）と（d）の比較より、穴の宮と白坂の流況曲線は似ているが、渇水流量付近で穴の宮の流況曲線が白坂よりも急激に減少する傾向があることがわかる。そのため渇水流量は穴の宮が白坂よりも小さくなっている。これは穴の宮の方が年降水量、年流量ともに白坂よりも少ないことや、流域面積が小さく貯留可能水分量が小さいことが影響している可能性がある。

次に年々変動をみると、穴の宮、白坂とも、1970年代の流況曲線が最も上に来ていたことがわかる。1970年代は穴の宮、白坂とも、図-1に描かれた5本の流況曲線に対応した10年間のうち最も年降水量が多かったことがその主要原因であろう。逆に、穴の宮、白坂とも、1940年代の流況曲線が低水流量付近から最小流量までを除いて最も下に来ていた。1940年代は穴の宮、白坂とも、図-1に描かれた5本の流況曲線に対応した10年間のうち最も年降水量が少なかったことがその主要原因であろう。ただし低水流量付近から最小流量までの区間は、穴の宮、白坂ともに、1940年代は5本の流況曲線中最も下ではなくなっている。このことから、劉ら（1998）も指摘しているように、10年平均渇水流量の長期変動を単純に年降水量の関数として説明することは適切でないことがわかる。

図-2は、穴の宮の1940年から2011年までの10年平均豊水、平水、低水、渇水流量（5月1日年界）と10年平均年降水量との関係を示したものである。1950年代と1960年代は前述した浸透実験の影響により、流況が一時的、人為的に変化した期間があるため図には示していない。穴の宮では、1970年代はすべての流量が最大になっているが、1980年代、1990年代、2002～11年について

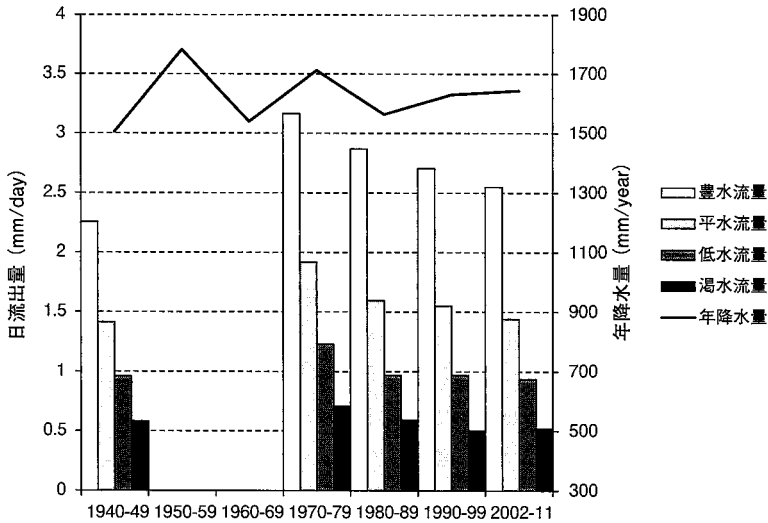


図-2 穴の宮における10年平均豊水流量，平水流量，低水流量，渇水流量，年降水量の長期変動

は、年降水量は1980年代が最も小さいにもかかわらず、豊水、平水、渇水流量はいずれも1980年代が最も大きくなっている。さらに2002～11年の年降水量は1990年代よりも大きい、渇水流量は逆に小さくなっている。このように、穴の宮の最近42年間の10年平均流況曲線の変動は、10年平均年降水量の変動だけで説明できるものではない。2002～11年の渇水流量が小さかったことは、夏または冬の少雨が影響した可能性に加えて、森林の再生に伴う蒸発散量の増大（五名・蔵治 2013）や直接流出量の減少（五名・蔵治 2012）の影響を受けている可能性がある。

図-3は白坂の1940年から2011年までの10年平均豊水、平水、低水、渇水流量（5月1日年界）と10年平均年降水量との関係を示したものである。穴の宮とは異なり、白坂では、10年平均豊水、平水、低水流量はほぼ10年平均の年降水量の変動と対応して変動している。両者の相関係数を計算したところ、豊水流量0.95、平水流量0.99、低水流量0.91であった。一方、10年平均渇水流量だけは必ずしも10年平均年降水量の変動に対応して変化していない。1980年代と2002～11年の年降水量はほぼ同じであるが、渇水流量は1980年代の方が小さい。このことだけを取り出せば、「森林が成長したために渇水流量が2002～11

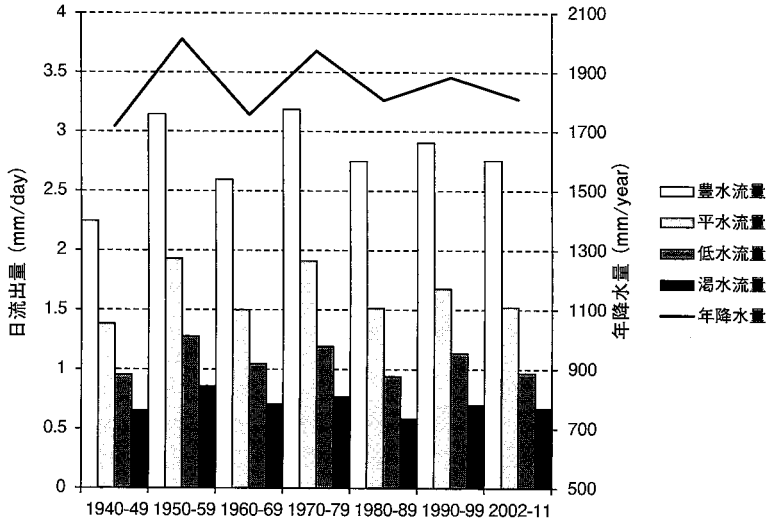


図-3 白坂における10年平均豊水流量，平水流量，低水流量，渇水流量，年降水量の長期変動

年に増加した」という，太田（2012）や国土交通省ホームページで示されている解釈と正反対の解釈もできる。

一方，蔵治（2000），蔵治・芝野（2002）の研究を踏まえれば，1980年代は冬の降水量が少なかったために，渇水流量が少なくなっていたが，2002～11年はそのような冬の少雨，さらには夏の少雨も起きなかったので，10年平均年降水量がほぼ同じであっても，1980年代のような渇水流量の低下は起きなかった可能性がある。この解釈に従えば，1940～2011年の72年間のうち1980年代だけが，冬の降水量が少なかった特殊な期間であったために，渇水流量が1980年代に限って低下していたと理解するのが正しいことになる。

IV おわりに

ハゲ山に森林を再生した流域において，長期にわたる流況曲線の変動は，森林の成長と降水量の変動の両方の影響を受ける。東京大学生態水文学研究所の白坂，東山，穴の宮の3流域では，ハゲ山に森林を再生し，長期間放置した流域からの流量を70年以上にわたり連続観測してきた。これまでの研究では，白

坂、東山を対象として、湧水流量の変動は冬や夏の降水量の変動によってコントロールされており、森林の成長による影響は相対的に小さいことが示されてきた。本研究では穴の宮と白坂を対象とし、2011年までの72年間のデータを用いて10年平均年降水量と流況曲線との関係を調べた。その結果、両者の長期的な関係は、特に湧水流量において、穴の宮と白坂とで異なっていることが判明した。穴の宮と白坂では植生の初期条件、その後の変化、および現在の状態が顕著に異なっており、表-1に示した森林蓄積の変化から、おおむね70年前の白坂の状態が現在の穴の宮の状態にほぼ対応していると考えられる。このような植生条件の違いが、穴の宮と白坂で10年平均年降水量と流況曲線との長期的な関係が異なっている理由の一つとして考えられる。

すでに蔵治（2000）、蔵治・芝野（2002）が示唆しているように、夏の湧水と冬の湧水では、降水量や蒸発散量の絶対値が異なり、また夏と冬で気温や地温が異なることによって、地中の水の粘性や流動速度が変わる可能性もあるため、湧水流量の長期変動を決めている要因として森林の成長と降水量の変動の影響を区別して解析するためには、夏の湧水と冬の湧水を区別して解析することが必須であると考えられる。これは今後の課題としたい。

謝辞

本稿で用いた流量データは、東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林生態水文学研究所歴代教職員の長年の努力によって蓄積されたものである。本稿のためのデータ整理作業には同研究所特任専門職員乙部みどり氏、五名美恵氏、各試験流域の蓄積計算には同研究所技術専門職員澤田晴雄氏の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

引用文献

- 愛知演習林（1981）愛知演習林量水観測結果報告（III）. 演習林（東大）22：84-191
 愛知演習林（1984）愛知演習林量水観測結果報告（IV）. 演習林（東大）23：57-88
 愛知演習林（1987）愛知演習林量水観測結果報告（V）. 演習林（東大）25：135-151
 愛知演習林（1999）愛知演習林量水観測結果報告（VI）. 演習林（東大）38：127-14
 愛知演習林・演習林研究部（1976）愛知演習林量水観測結果報告（I）. 演習林（東大）20：39-64
 愛知演習林・演習林研究部（1977）愛知演習林量水観測結果報告（II）. 演習林（東大）21：48-89

- 五名美江・蔵治光一郎（2012）ハゲ山に森林を再生した小流域における降雨量—直接流出量関係の長期変化. 日本森林学会誌94：214-222
- 五名美江・蔵治光一郎（2013）ハゲ山に森林を再生した小流域における年損失量と年蒸発散量の長期変化. 日本森林学会誌, 印刷中
- 稲葉誠博（2009）流況曲線に着目した短期水収支法の開発とその適用. 三重大学博士論文, 72pp.
- 蔵治光一郎（2000）森林流域における渇水時流出量の年々変動に関わる降水量指標の検討. 水工学論文集44：365-370
- 蔵治光一郎・芝野博文（2002）森林の成長が渇水時流出量に及ぼす影響—東京大学愛知演習林森林試験流域の例—. 第6回水資源に関するシンポジウム論文集：615-620
- 蔵治光一郎（2004）森林の機能論としての「緑のダム」論争. 蔵治光一郎・保屋野初子編『緑のダム 森林・河川・水循環・防災』：131-149
- 太田猛彦（1996）森林と水循環. 森林科学18：26-31
- 太田猛彦（2012）『森林飽和一国土の変貌を考える』NHK ブックス1193：260pp.
- 太田猛彦, 鈴木雅一, 芝野博文, 劉 若剛（1997）森林の成長が流況に与える影響—東京大学愛知演習林森林流域試験データの読み方. 第5回水資源に関するシンポジウム論文集：347-352
- Suzuki M, Liu RG, Nishio K & Ohta T (1994) Forest influences on discharge duration curve using a 56-year daily discharge rate in two small watersheds. Proc. Inter. Symp. For. Hydrol.: 611-617
- 劉 若剛, 鈴木雅一, 芝野博文, 太田猛彦（1998）山地流域の流況曲線に与える降水の年々変動の影響. 日本林学会誌80：184-188
- 東京大学農学部附属演習林愛知演習林（1993）愛知演習林第3期試験研究計画（自平成4年度至平成13年度）. 演習林（東大）30：1-57
- 東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林生態水文学研究所（2012a）生態水文学研究所第5期教育研究計画（2011（平成23）年度～2020（平成32）年度）. 演習林（東大）51：305-396
- 東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林生態水文学研究所（2012b）愛知演習林量水観測結果報告（VII）【修正版】. 演習林（東大）52：1-23
- 東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林生態水文学研究所（2013a）昭和30年に作成された穴の宮, 東山, 数成, 白坂の各水位観測所からの諸報告. 演習林（東大）53：129-152
- 東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林生態水文学研究所（2013b）生態水文学研究所日降水量・日流出量観測結果報告（VIII）. 演習林（東大）53：29-53

（原稿受付2013年1月7日, 原稿受理2013年1月22日）