モウソウチク林の拡大が林地の公益的機能に与える影響 —総合的理解に向けて—

篠原慶規^{*.1}・久米朋宣²・市橋隆自³・小松 光^{4,5}・大槻恭一³

本研究では、既往の研究を整理することで、モウソウチク林拡大の実態、現存量を把握すると共に、モウソウチク林の拡大が、林地の水土保持に関する公益的機能を低下させる可能性について検証した。モウソウチク林の面積拡大は数多くの研究により報告されており、年間拡大率の平均は 1.03 ha/(ha year) であった。また、隣接する場所が開けている方が、開けていない場所と比較し、モウソウチク林の拡大速度が大きいことが示唆された。モウソウチク林の地上部現存量は、62.6–224.3 t/ha であり、その最大値はスギ林・ヒノキ林の最大値よりも小さいと予想された。一方、地下部現存量は研究例が少なく、今後のさらなる研究が必要である。林地の水土保持に関する公益的機能について既往の研究成果を取りまとめたところ、これまでの推察に反して、モウソウチク林は、他の森林タイプと比較し、洪水、渇水、表層崩壊、表面侵食のリスクが低いことが示唆された。しかし、この結論は十分な計測例に基づくものではない。今後、様々な林分条件、気象条件のモウソウチク林で数多くの計測が行われ、上記の結論を再検討することが望まれる。

キーワード：竹林拡大、バイオマス、表面流、蒸発散、水資源

Yoshinori Shinohara,^{*.1} Tomonori Kume,² Ryuji Ichihashi,³ Hikaru Komatsu,^{4,5} Kyoichi Otsuki³ (2014) Moso-bamboo Forests in Japan: What are the Effects of Their Area Expansion on Ecosystem Services? J Jpn For Soc 96: 351–361 Recently, moso-bamboo (*Phyllostachys pubescens*) forests have been expanding in Japan. Some studies have pointed out their expansion could decrease ecosystem services. This paper summarized expansion rates in areas in the last ca. 70 years and biomass of moso-bamboo forests. We verified whether the expansions could increase risks in flood, water shortage, shallow landslide, and soil erosion. Many papers have reported increases in areas of moso-bamboo forests, and the average expansion rate was 1.03 ha/ha year. The rate in the surrounding open spaces tends to be larger than that in the surrounding closed spaces. Aboveground biomass in moso-bamboo forests was between 62.6 and 224.3 t/ha. The maximum aboveground biomass in moso-bamboo forests would be smaller than those in Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) and Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa*) forests. However, only a few studies examined belowground biomass in moso-bamboo forests. As well, based on results in previous studies, we concluded that risks in flood, water shortage, shallow landslide, and soil erosion in moso-bamboo forests would not be higher than those in other types of forests. This conclusion is different from the speculation. On the other hand, this conclusion was based on only a few studies. Therefore, further studies are required to clarify various processes related to flood, water shortage, shallow landslide, and soil erosion in moso-bamboo forests with various canopy structures under various meteorological conditions.

Key words: expanding bamboo forests, biomass, surface flow, evapotranspiration, water resources

I. は じ め に

モウソウチク (*Phyllostachys pubescens*) は、イネ科マダケ属の大型のタケで、1700 年前後に中国から日本にもたらされ (内村 2005)、丸竹やタケノコとして利用されてきた。しかし、代替え製品の普及や輸入の増加によって、タケノコ・丸竹共に生産量が減少している。それに伴い、管理が十分に行われていないモウソウチク林が増加している (柴田 2003, 2010)。管理が十分に行われていないモウソウチク林は、隣接地に侵入し、その面積を拡大させている

(次章参照)。

森林は、水源涵養機能や土砂災害防止機能／土壤保全機能など数多くの公益的機能を有している (日本学術会議 2001)。近年、モウソウチク林が拡大することで、すなわち、他の森林タイプからモウソウチク林に置き換わることで、公益的機能が低下するのではないかと危惧する声がある (石賀ら 2001；日浦ら 2004；小泉・谷本 2008)。そのため、隣接地に拡大したモウソウチク林の伐採、モウソウチク林から他の森林タイプ (主に広葉樹林) への転換などが行われており、このような施業には、主に公益的機能の

*連絡先著者 (Corresponding author) E-mail: shinohara@agr.kyushu-u.ac.jp

¹九州大学大学院農学研究院 〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎 6-10-1 (Faculty of Agriculture, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki, Fukuoka, Fukuoka 812-8581, Japan)

²国立台湾大学森林環境資源学系 〒10617 台北市羅斯福路四段一號 (School of Forestry and Resource Conservation, National Taiwan University, 1, Sec. 4, Roosevelt Road, Taipei 10617, Taiwan)

³九州大学福岡演習林 〒811-2415 福岡県糟屋郡篠栗町津波黒 394 (Kasuya Research Forest, Kyushu University, 394 Tsubakuro, Sasaguri, Kasuya-gun, Fukuoka 811-2415, Japan)

⁴京都大学白眉センター 〒606-8501 京都府京都市左京区吉田牛ノ宮町 (The Hakubi Center for Advanced Research, Kyoto University, Kyoto, Kyoto 606-8501, Japan)

⁵京都大学大学院農学研究科 〒606-8502 京都府京都市左京区北白川追分町 (Graduate School of Agriculture, Kyoto University, Kyoto, Kyoto 606-8502, Japan)

(2014 年 5 月 12 日受付, 2014 年 8 月 27 日受理)

向上を目指して各県で導入が進んでいる森林環境税も用いられている（林野庁 2013）。

1980 年代以前は、モウソウチクに関する研究は、タケノコや竹材生産に主眼をおいて行われてきた（鈴木・成田 1975；森ら 1983）。モウソウチクの拡大が顕在化してきた 1990 年代以降、モウソウチク林の面積拡大の実態を把握しようとした研究や、モウソウチク林の拡大が公益的機能に与える影響を評価しようと試みた研究も行われるようになってきた。モウソウチク林の一般的特徴を明らかにするために、これらの研究成果を取りまとめた例として、「森林科学」の特集「拡がるタケの生態特性とその有効利用への道」（例えば、鳥居・奥田 2010）や「日本緑化工学会誌」の特集「里山保全再生の技術 モウソウチク」（例えば、柴田 2003）が挙げられる。しかしこれらは、執筆者の研究成果を中心にまとめたものであり、日本各所に存在するモウソウチク林についての研究を総覧し、それらを基に一般的事実を描き出そうとした例は、著者らの知る限り存在しない。Song *et al.* (2011) は中国全土の竹林の現状を整理報告しているが、そのようなサイト横断的な文献調査がわが国においても必要であろう。さらにいうと、森林環境税を用いた森林施業で特に機能の向上が期待されている水源涵養機能（今若・佐藤 2008）や土砂災害防止機能／土壤保全機能については、上記のような取りまとめすら行われていない。そのため、自治体などで行われている森林施業（モウソウチク林の伐採や他の森林タイプへの転換）に関して、科学的根拠に基づいた検証は十分には行われていない。

そこで本総説では、これまで国内において行われたモウソウチク林の拡大に関する研究を取りまとめた。II. 章では、モウソウチク林拡大の実態を把握するために、モウソウチク林の面積変化や隣接地への侵入速度を報告している研究を取りまとめた。III. 章では、竹林拡大に伴う林地の構造的変化を把握するために、モウソウチク林において計測された現存量の計測例を整理し、その他の森林タイプとの比較を行った。IV. 章では、モウソウチク林の拡大が公益的機能に与える影響を議論した。その際、これまで取りまとめられたことのない水源涵養機能、土砂災害防止機能／土壤保全機能を中心にまとめた。V. 章では、第 IV. 章の結果を踏まえ、モウソウチク林の拡大が公益的機能に与える影響を解明する上で、今後、どのような研究をより促進すべきか議論した。

II. モウソウチク林拡大の実態

これまで竹林面積の長期的な変化は、異なる時期の空中写真、地形図、植生図など比較することで調べられてきた。著者らが竹林面積の時系列変動を調べた研究を収集したところ、関東地方～九州地方の 31 地域のデータが取得できた。これらの解析期間は、5～93 年であった。これらは、竹林面積の上位 10 県の分布と概ね一致していたが、鳥根県が竹林面積の上位 10 県に含まれているにも関わら

図-1. 竹林面積の変化が報告されている地域

図中の数字は図-2 と対応している。色付きの県は 2007 年における竹林面積上位 10 県（林野庁 2014）を示している。

ず（林野庁 2014）、本研究で利用した 31 地域のデータに、日本海側で取得されたものは含まれていなかった（図-1）。

図-2 には、それぞれの解析対象地域の解析期間の最終年を 1 とした場合の面積変化を示している。解析対象地域が多かったため、九州・中国・四国地方（図-2(a)）、近畿地方（図-2(b)）、関東地方（図-2(c)）に分けて図示している。なお、この面積には、モウソウチク林以外の竹林も含まれているが、多くの研究では、これら竹林の大半はモウソウチク林であると明記してある。どの地方においても、多くの地域で竹林面積が増加している一方で、あまり増加がみられない地域や減少している地域もあった。これらのデータについて、下記の式を用いて年間拡大率 AER (ha/(ha year))（鳥居・井鷲 1997；鈴木 2008）を算出した（図-3）。

$$AER = (A_{\text{after}} / A_{\text{before}})^{1/Y}$$

ここで、 A_{after} 、解析終了年の竹林面積 (ha)； A_{before} 、解析開始年の竹林面積 (ha)； Y 、解析年数 (year) である。その結果、すべての地域、すべての期間の平均で 1.03 ha/(ha year)、最小は上原・重松 (2004) が報告している福岡県新宮町 (#7) の 1947 年～1974 年の 0.96 ha/(ha year)、最大は Isagi and Torii (1998) が報告している京都府田辺 (#17) の 1953 年～1975 年で 1.11 ha/(ha year) であった。

竹林面積が増加しなかった地域の一つに京都市西山がある。鳥居・井鷲 (1997) は、この地域で竹林面積が増加しなかった要因として、面積が増加した竹林がある一方で、市街化によって消失した竹林も多くあることを述べている。小林 (2010) も同地域において、消失した竹林が存在することを指摘している。Okutomi *et al.* (1996) が報告している東京都秋川でも、1961～1974 年まで年間拡大率が 1.07 だったものの、1974～1987 年は 1.00 と年間拡大率が減少していた。この地域でも、京都市西山と同様に竹林の

消失が報告されており、竹林が消失していないと仮定すると、1974～1987年の年間拡大率は1.02となる。このように、竹林面積の変化が小さい地域では、消失していない竹林の面積は増加傾向であるものの、市街化など人為的な要因を受け消失する竹林も存在するため、両者が拮抗していると考えられる。このような消失する竹林の存在は、面積が増加している地域でも報告されている（甲斐・辻井2004）。そのため、図-2に示されている他の地域でも、このような影響を排除した場合、年間拡大率はさらに大きくある可能性がある。

表-1には、各研究で算出された分布フロントの移動速度を示した。分布フロントは、竹林拡大部分の隣接土地被覆と接するエッジ部分を指し、分布フロントの移動速度 V (m/year) は、下記の式で表される（鳥居 1998；西川ら

2005）。

$$V = EA / WY$$

ここで、 EA 、拡大部分の面積 (m²)； W 、群落幅 (m) である（図-4）。表-1に取りまとめている地域の平均移動速度は0.5～2.6 m/year、最大移動速度は1.4～12.2 m/yearであった。現地調査で得られた結果の方が、空中写真に基づいて算出された結果よりも大きい傾向を示したが、対象地域による差は明確ではなかった。河合ら（2010）と

図-3. 既往の研究から算出した竹林面積の拡大率の頻度分布

図-2と同じデータを用い、それぞれの地域、解析期間で算出した。下矢印は平均値の位置を示している

表-1. 日本各地で報告されている平均侵入速度と最大侵入速度

地域名	県名	方法	開始年	終了年	平均侵入速度 (m/year)	最大侵入速度 (m/year)	引用文献
郡山	鹿児島	現地調査	1999	2004	2.1		片野田・井手 (2005)
篠栗	福岡	空中写真	1967	1988	1.2 ^{*1}	1.6 ^{*1}	西川ら (2005)
		空中写真	1988	1995	2.4 ^{*1}	4.6 ^{*1}	
立花	福岡	空中写真	1971	1981	1.6	2.3	西川ら (2005)
		空中写真	1981	1995	1.2	1.4	
宇部	山口	現地調査			2.5	12.2	鈴木ら (2006)
豊田	山口	空中写真	1982	2000	0.7	4.7	鈴木ら (2006)
北山	高地	空中写真	1962	1994	1.8 ^{*2}	3.5	三宅ら (2000)
八幡山	滋賀	空中写真	1975	1982	2.6 ^{*3}	4.5 ^{*3}	鳥居 (1998)
男山	京都	空中写真	1974	1987	2.0 ^{*3}	3.1 ^{*3}	鳥居 (1998)
田辺	京都	現地調査	1993		2.1	4.7	Isagi and Trii (1998)
千葉	千葉	空中写真	1974	2008	0.5		鬼東ら (2011)
山武	千葉	空中写真	1979	2003			
いすみ	千葉	空中写真	1974	2005			
富津	千葉	空中写真	1974	2006			
館山	千葉	空中写真	1974	2009			

^{*1} 土地被覆別に侵入速度が示されており、すべての土地被覆の平均値と、侵入速度が最大となった土地被覆の侵入速度を示している。^{*2} 対象地域を南部と北部に分けており、両者の平均値を示している。^{*3} 外れ値を除外した値を示している

図-2. 竹林面積の変化

(a) 九州・中国・四国地方、(b) 近畿地方、(c) 関東地方。それぞれの解析対象地域の解析期間の最終年を1とした場合の面積の変化を示している。これらの図は、甲斐・辻井 (2004) (#1, 2)、林・山田 (2008) (#3)、西川ら (2005) (#4, 5)、明石ら (2006) (#6)、上原・重松 (2004) (#7)、Manabe *et al.* (2003) (#8)、佐渡 (2003) (#9)、山本ら (2004) (#10)、Suzuki and Nakagoshi (2008) (#11, 32)、三宅ら (2000) (#12)、大野ら (1999) (#13)、大野ら (2004) (#14)、伊藤・山田 (2005) (#15)、小林 (2010) (#16)、Isagi and Trii (1998) (#17)、鳥居 (1998) (#18, 19)、鳥居・井鷲 (1997) (#20-23)、鬼東ら (2011) (#24-28)、鈴木・鈴木 (2009) (#29)、Okutomi *et al.* (1996) (#30)、鈴木 (2008) (#31) に基づいて作成した

図-4. 分布フロントの移動距離算出のために必要な群落幅のイメージ

伊藤・山田 (2005) は、別の方法を用いてモウソウチク林の拡大速度を算出している。河合ら (2010) は、岐阜県の1林分の10方向において林縁の拡大速度を計測し、0方向の24年間の平均値は1.35 m/yearであったと報告している。伊藤・山田 (2005) は、放置されたモウソウチク林が、隣接するスギ・ヒノキ林へ3年間で19.3 m侵入したと報告している。このように、モウソウチク林の1年当りの拡大速度は、平均すると0.5~2.6 m、最大では10 m以上になることがわかった。

図-2を作成した際に利用した研究のいくつかでは、隣接する場所の植生条件や地形条件が竹林の拡大に及ぼす影響を調べている。鳥居 (1998) は、地形条件による拡大速度の差は明確でなかったものの、隣接する植生による影響を受けており、拡大速度は閉鎖、中間、疎の順に大きくなると報告している。ここで閉鎖とは、樹冠疎密度が目視で概ね80%以上の森林で隣接する竹林と同程度の樹冠高を持つもの、疎とは、樹冠疎密度が目視で概ね30%以下の疎林・荒地地などのオープンな植生、中間とは、閉鎖と疎の中間や判断のつかないものである (鳥居 1998)。鬼東ら (2011) は、群落高の低いススキ-アズマネザサ群落への竹林の拡大が最も顕著であると報告している。河合ら (2010) は、周辺部の森林が伐採されたことで、モウソウチク林の拡大が促進されたと報告している。Okutomi *et al.* (1996) は、竹林が隣接地に侵入する速度は、隣接地が低木林や耕作放棄地である方が、落葉広葉樹よりも早いと報告している。このように、開けている場所の方が、森林など樹冠が閉じている場所よりも、竹林の侵入速度は早いと考えられる。

一方、地形条件についてみると、林・山田 (2008) は、谷や尾根よりは斜面で、急傾斜や緩傾斜よりは平地で有意に拡大速度が早くなることを指摘しているが、鳥居 (1998) や甲斐・辻井 (2004) は、地形条件の影響は不明確であると報告している。また、鬼東ら (2011) は、竹林の拡大は、地形条件よりも隣接する植生条件の影響を強く受けることを示している。このように、地形条件が竹林拡大に及ぼす影響は、隣接する植生条件よりは明確でないと考えられる。

以上をまとめると、関東地方~九州地方の31地域で竹林面積の拡大が報告され、それらのいくつかでは、分布フロントの移動速度も示されていた。これらに基づけば、研究対象とされていない地域においても、ある程度拡大を予測することは可能であろう。ただし下記の2点は注意が必要である。1) 解析対象地域は、研究者らが、予め竹林拡大を見込んでいる地域を対象としている可能性があるため、本研究で示した拡大速度は、竹林の平均的な拡大速度よりも大きい可能性がある。2) 染谷ら (2010) が暖かさの指数、年降水量、最深積雪量が竹林の拡大に影響を与えることを指摘しているように、本研究で取り扱った地域と気候条件が大きく異なる地域の拡大速度は、本研究で取りまとめた値と大きく異なる可能性がある。

また、隣接している場所が開けている方が、開けていない場所と比較して、拡大のリスクが高いと考えられるが、それ以上の分類は明確ではない。これまで主に行われている空中写真を使った分布拡大状況の把握の他に、例えば、Okutomi *et al.* (1996) が光の競争から、今治ら (2013) が水の競争からモウソウチクが隣接する植生を枯死させ、拡大するメカニズムを提示しているように、モウソウチクおよび周辺個体の生理生態特性の計測に基づき、モウソウチク林が拡大するメカニズムが明らかとなれば、場所ごとの侵入速度の違いが説明され、より高い精度でモウソウチク林の拡大を予測することが可能になるであろう。

III. モウソウチク林の現存量

表-2には、既往の研究で報告されているモウソウチク林の現存量を取りまとめた結果を示す。地上部現存量の平均は144.2 t/ha、最大は224.3 t/ha、最小は62.6 t/haであった。また、葉の現存量の平均は5.3 t/haで、只木 (1976) によって、様々な森林タイプで葉の現存量を取りまとめた結果と比較すると、落葉広葉樹林、カラマツ林よりは大きいものの、スギ林やヒノキ林をはじめとする常緑林よりは小さい傾向がみられた。奥田ら (2007) は、本研究で取りまとめた計測例とは別に、40カ所以上のモウソウチク林において地上部現存量を計測したところ、多くのモウソウチク林では150~200 t/haであったと報告している。奥田ら (2007) は、これらのデータに基づいて胸高断面積合計から地上部現存量を推定する式を提案している。

$$B_{\text{above}} = 3.4874 BA^{0.8816} \quad (1)$$

ここで、 B_{above} 、地上部現存量 (t/ha)； BA 、胸高断面積合計 (m^2/ha) である。図-5には、式 (1) と本研究で取りまとめられた地上部現存量を比較した結果を示す。本研究で取りまとめた地上部現存量は、式 (1) のほぼ線上にプロットされ、平均の二乗平均平方根誤差 (RMSE) は23.6 t/haであった。なお、この解析を行う際、一部の試験地では胸高断面積合計のデータが得られなかった。その場合、林分平均胸高直径と立竹密度から、全個体の胸高直径が林分平均胸高直径であると仮定して胸高断面積合計を推定した。胸高断面積合計が利用できる林分のデータを用いて、このように算出された胸高断面積合計 ($BA_{\text{estimated}}$) と実際の胸高断面積合計 (BA_{actual}) に大きな差がないことは確認している ($BA_{\text{estimated}} = 0.98 BA_{\text{actual}}$) ($R^2 = 0.99$)。

モウソウチク林の地上部現存量を、これまで数多くのデータが蓄積されているスギ林、ヒノキ林の地上部現存量と比較した (図-6)。スギ林、ヒノキ林の地上部現存量はそれぞれ81、28林分から収集した。その林分構造の概要は表-3に示した。なお、胸高断面積合計のデータが得られない林分は、モウソウチク林と同様に、林分平均胸高直径と立木密度から算出した。モウソウチク林と同様に胸高断面積合計と地上部現存量の関係を調べたところ、胸高断面積合計が大きくなるに従って地上部現存量が大きくなる

表-2. 日本各地のモウソウチク林における現存量

地域名	県名	立竹密度 (本/ha)	平均胸高直径 (cm)	胸高断面積合計 (m ² /ha)	平均樹高 (m)	現存量					引用文献
						稈 (t/ha)	枝 (t/ha)	葉 (t/ha)	地上部合計 (t/ha)	地下部 (t/ha)	
さつま	鹿児島	5130	11.7	59.1	16.3	72.3	13.0	3.0	88.2		村上ら (2006)
始良	鹿児島	5000	13.9	76.8	18.1	101.3	14.1	4.6	120.0		村上ら (2006)
さつま	鹿児島	5550	12.5	69.5	17.0	108.8			121.9		久米村ら (2009)
さつま	鹿児島	5200	12.8	67.4	17.5	104.5			121.1		久米村ら (2009)
始良	鹿児島	6130	12.9	83.0	17.9	129.6			146.6		久米村ら (2009)
知覧	鹿児島	5230	10.4	45.7	13.5	70.5			82.8		久米村ら (2009)
柳井	山口	8800	11.5	91.4 ^{*1}		159.7	21.8	7.1	188.5		佐渡・山田 (2007)
新南陽	山口	8100	13.1	109.2 ^{*1}		187.5	19.2	6.1	212.8		佐渡・山田 (2007)
豊田	山口	3978	14.0	61.2 ^{*1}		102.3	11.0	3.9	117.2		佐渡・山田 (2007)
京都	京都	7100	11.3	71.2 ^{*1}		116.5	15.5	5.9	137.9	44.6	Isagi <i>et al.</i> (1997)
松尾	京都	6045	13.5	86.5		161.7					渡辺 (1985)
松尾	京都	6014	11.5	63.3		113.0					渡辺 (1985)
松尾	京都	5488	13.2	76.1		139.6					渡辺 (1985)
松尾	京都	6611	12.8	86.2		118.3					渡辺 (1985)
松尾	京都	5751	12.3	70.4		132.7					渡辺 (1985)
御陵	京都	8536	8.3	49.3		80.1					渡辺 (1985)
御陵	京都	8617	12.9	113.9		218.0					渡辺 (1985)
御陵	京都	4803	10.0	39.5		67.0					渡辺 (1985)
中山	京都	5181	12.7	68.0		136.5					渡辺 (1985)
京都	京都	8800	9.2	58.5 ^{*1}	13.3	87.6	12.5	5.5	105.6		Suzuki (1987)
京都	京都	5100	9.3	34.6 ^{*1}	13.2	49.0	9.2	4.2	62.6		Suzuki (1987)
亀岡	京都	5400	8.0	27.1 ^{*1}					68.0		藤井・中川 (2010)
天王山	京都・大阪	8133	12.8 ^{*2}	104.7 ^{*1}		194.8	16.6	5.8	217.2		阿部・柴田 (2009)
天王山	京都・大阪	7967	12.7 ^{*2}	100.9 ^{*1}		195.2	16.2	5.9	217.2		阿部・柴田 (2009)
天王山	京都・大阪	8133	12.7 ^{*2}	103.0 ^{*1}		197.4	16.5	5.9	219.8		阿部・柴田 (2009)
天王山	京都・大阪	8300	12.7 ^{*2}	105.1 ^{*1}		201.4	16.9	6.1	224.3		阿部・柴田 (2009)

*1 立竹密度と平均胸高直径から推定された値。*2 当年生以外の個体の平均値。

図-5. 胸高断面積合計と地上部現存量、地下部現存量の関係

○, 地上部現存量; ●, 地下部現存量。この図は、表-2 のデータに基づいて作成した。直線は奥田ら (2007) によって示されている胸高断面積合計と地上部現存量の関係 ($y = 3.4874x^{0.8816}$)、点線は清野ら (2009) によって示されている胸高断面積合計と地下部現存量の関係 ($y = 12.444x^{0.4469}$)。また、陳ら (2011) によって台湾南投県で計測された地下部現存量も合わせて示した (x)。

傾向がみられ、スギ林とヒノキ林で明確な差がなかった。スギ林、ヒノキ林のデータとモウソウチク林で得られた関係式 (式(1)) を比較すると、同じ胸高断面積合計では、スギ林、ヒノキ林の方がモウソウチク林よりも地上部現存量が大きくなった。これは、モウソウチクの稈は中空であること、モウソウチク林の最大樹高はスギ林、ヒノキ林と比較して小さいこと (表-2, 3) が要因として考えられる。モウソウチク林の地上部現存量の最大値は 224.3 t/ha で、

図-6. 国内のスギ林、ヒノキ林における胸高断面積合計と地上部現存量の関係

○, スギ林; ●, ヒノキ林。実線は、モウソウチク林で得られた関係 (式(1)) を示している

スギ林よりも小さくなった。ヒノキ林に関しては、利用できるデータの胸高断面積合計の幅が小さいため、地上部現存量の最大値はモウソウチク林と同程度であるが、胸高断面積合計と地上部現存量の関係がスギ林と大きく変わらないことから、胸高断面積合計が大きいヒノキ林の地上部現存量はモウソウチク林よりも大きくなると予想される。このように、モウソウチク林の地上部現存量の最大値は、スギ林、ヒノキ林には及ばないと考えられる。これは、モウソウチクは、樹木とは異なり (タケノコとして地上部に出た直後を除き) 伸長成長・肥大成長を行わないため、密度

表-3. 地上部現存量のデータが利用可能な日本のスギ林 81 林分, ヒノキ林 28 林分の林分構造

樹種	林齡	立木密度 (本/ha)	平均胸 高直径 (cm)	胸高断面 積合計 (m ² /ha)	平均 樹高 (m)	地上部 現存量 (t/ha)	引用文献
スギ	中央値	30	2180	16.1	48.9	12	146.1
	最大値	92	100000	48.6	92.8	29	458.8
	最小値	5	319	2.0	14.0	3	20.9
蜂屋・安藤 (1964), 岩切・四手井 (1965), 只木ら (1965), Tadaki and Kawasaki (1966), 四大学合同調査班 (1966), 齊藤ら (1967), 只木ら (1967), 尾方ら (1973), 齊藤・四手井 (1973), 根岸ら (1988), 西村ら (1992 a,b), 渡邊・茂木 (2005), 渡邊・茂木 (2007), 丹下・小島 (2010)							
ヒノキ	中央値	42	1544	19.3	49.5	16	205.0
	最大値	62	4283	26.1	70.5	21	254.3
	最小値	14	1012	8.3	23.2	8	60.5
只木ら (1966), Morikawa (1971), 尾方ら (1973), 河原ら (1979), Satoo (1979), 宮本ら (1980), 渡邊・茂木 (2005)							

が高くなると、古い稈が新しい稈に入れかわるのみで、地上部現存量の増加が頭打ちになることなどが要因として考えられる。

一方、モウソウチク林における地下部現存量の計測例はほとんどない。唯一計測値を報告している Isagi *et al.* (1997) は、45 t/ha であったとしている。Isagi *et al.* (1997) の試験地における全体のバイオマスに占める地下部バイオマスの割合は 24.4% であり、Fukuda *et al.* (2003) が報告しているスギ林 (平均 20.4%) やヒノキ林 (平均 21.7%) よりも若干大きかった。清野ら (2009) は、21 地点で (おそらくモウソウチク林以外も含む) 竹林の地下部現存量を調べ、胸高断面積合計から地下部現存量を推定する式を提案している。

$$B_{\text{below}} = 12.444 BA^{0.449} \quad (2)$$

ここで、 B_{below} 、地下部現存量 (t/ha) である。この式と Isagi *et al.* (1997) の結果を比較したところ、Isagi *et al.* (1997) の結果は、この式よりも大きく下にプロットされた (図-5)。また、国内ではないものの陳ら (2011) が台湾南投県で計測した地下部現存量は、この式よりも大きく上にプロットされた (図-5)。清野ら (2009) は、この式の決定係数 R^2 は 0.34 と報告していることから、この式を作成した際のデータもばらつきが大きいことが推測される。このことから、地上部現存量を推定する式 (1) と比較すると、地下部現存量を推定する式 (2) は精度が低いと考えられる。そのため、モウソウチク林における現存量を把握するためには、今後、地下部現存量のデータを蓄積し、精度良く推定可能なアロメトリー式を作成することが望まれる。

IV. モウソウチク林の拡大が公益的機能に与える影響

水源涵養機能は、河川流量を平準化する機能と水質を浄化する機能に大別され (日本学術会議 2001)、河川流量を平準化する機能は、洪水時に河川流量を低減させる機能と、水資源量を供給する機能に分けられる。また、土砂災害防止機能とは森林が表層崩壊を防止する機能、土壌保全機能とは森林が表面侵食を防止する機能のことを指す。本章では、モウソウチク林は他の森林タイプと比較し、洪水、渇水、表層崩壊、表面侵食のリスクが高い可能性があ

るかどうかが明らかにするために、関連する既往の研究を整理した。

1. 洪水

近年、針葉樹人工林 (特にヒノキ人工林) では、管理が十分に行われない場合には、洪水発生を助長しているのではないかと危惧されている。その際、根拠とされるのが、管理が十分に行われていない針葉樹人工林は、浸透能が低く、通常、森林ではほとんど発生しないと考えられていたホートン型地表流が発生することである (恩田 2008; 小松ら 2013)。ホートン型地表流は、地表の浸透能よりも降雨強度が大きいために発生する地表流で、降雨時に土壌に浸透することなく速やかに河川に流出する成分 (早い流出成分) となるため、降雨ピーク時の流量を増大させる。Ide *et al.* (2010) は、モウソウチク林と隣接する広葉樹林で最終浸透能を比較し、モウソウチク林の方が広葉樹林よりも最終浸透能が大きい傾向にあることを報告している。Hiraoka and Onda (2012) は、山口県内のモウソウチク林 7 カ所における最大最終浸透能は 9 mm/h から 308 mm/h であったと報告している。この値を、同様の方法を用いてヒノキ人工林で最大最終浸透能を算出した平岡ら (2010) と比較したところ、林床植被率が大きいヒノキ人工林ではみられない小さな最大最終浸透能を計測した地点もあったものの、ホートン型地表流の発生が問題視されている林床植被率が小さいヒノキ人工林よりも概ね大きかった (図-7)。このように浸透能の計測結果から、モウソウチク林では、ホートン型地表流の発生は稀であると推察される。

藏本ら (2011) は、Ide *et al.* (2010) と同じモウソウチク林において地表流量を計測した結果、降水量に占める地表流量の割合である地表流率は 0.6~35.5% で、地表流の発生が問題となっているヒノキ人工林の計測値 (Miyata *et al.* 2007) よりも小さいことを報告している (表-4)。また、表-4 の No. 1 プロットについて、50 mm/h の降水強度に対して想定される地表流率 OF_{50} を計算し、宮田ら (2009) が報告している広葉樹林、スギ人工林、ヒノキ人工林の OF_{50} と比較したところ、No. 1 プロットの OF_{50} (=25.9 mm/h) は、ヒノキ人工林 7 プロットのうち 6 プロットよりは小さくなり、スギ人工林、広葉樹林と比較しても小さい部類であったと報告している。さらに、豊原ら (2005) や小倉・江崎 (2010) は、モウソウチク林において地表流

を計測し、地表流率は10%未満であったと報告している。

近年、ホートン型地表流の他に、早い流出成分として、バイオマットフローの存在が指摘されている (Sidle *et al.* 2007)。バイオマットフローとは、ごく浅い地中に存在する根系が緊縛してマット上になった箇所を流れる水のことであり、管理が十分に行われていないヒノキ人工林では主要な流出経路の一つとなると指摘されている (Sidle *et al.* 2007)。日浦ら (2004) は、竹林の根系を模した状態の0.2 m²の土槽を用いて、人工降雨試験を行った結果、竹林のバイオマットが主要な流出経路になると予想している。しかし藏本ら (2011) がモウソウチク林で実際にバイオマットフローを計測したところ、バイオマットフローは、ほとんど発生していなかった。バイオマットフローの発生機構は十分には明らかにされていないが、地下茎が存在するモウソウチク林の根系の発達様式は、ヒノキ林を含む樹木とは大きく異なる (荏住 1979)。このような根系の発達様式の違いが両者の違いを生み出しているのかもしれない。こ

図-7. Hiraoka and Onda (2012) によって報告されているモウソウチク林の最大最終浸透能の頻度分布 (a) と平岡ら (2010) によって報告されているヒノキ人工林の最大最終浸透能の頻度分布 (b, c)

ヒノキ人工林の最大最終浸透能は、林床植被率によって分類し、ブラウンブランケの被度指数で被度3以下のデータは (b) に、被度4以上のデータは (c) に記載した。

表-4. 藏本ら (2011) によってモウソウチク林で計測された地表流量と Miyata *et al.* (2007) によってヒノキ人工林で計測された地表流量

森林タイプ	プロット	斜面傾斜 (°)	降水量 (mm)	地表流量 (mm)	地表流率 (%)
モウソウチク	No. 1	47.0	540.5	139.2	25.8
モウソウチク	No. 2	24.8	388.5	131.5	33.8
モウソウチク	No. 3	11.1	388.5	9.9	2.5
モウソウチク	No. 4	16.3	388.5	8.3	2.1
モウソウチク	No. 5	13.5	388.5	5.9	1.5
モウソウチク	No. 6	14.4	388.5	2.2	0.6
ヒノキ	No. 1	40.7	369.1	413.2	111.9
ヒノキ	No. 2	43.3	369.1	266.9	72.3
ヒノキ	No. 3	39.9	369.1	139.9	37.9

のように、モウソウチク林の浸透能は比較的大きく、早い流出成分となる地表流、バイオマットフローの発生量も多くなることがわかった。このことから、モウソウチク林の方が、他の森林タイプと比較し、洪水を助長する可能性は高くないと推察される。

2. 渇水

森林の水資源量は、しばしば蒸発散量の大小で評価される。この理由は、蒸発散量の変化は、総流出量と渇水時の流出量に強く影響を与えるためである。期間を十分に長くとした場合 (例えば年単位)、総流出量は、降水量から蒸発散量を引くことで算出される。また、年流出量の変化と渇水時の流出量の変化に相関が高いことが報告されている (Farley *et al.* 2005)。

蒸発散量は主に、蒸散と遮断蒸発、林床面蒸発に分けられ、蒸散と遮断蒸発が大きな要素となる (小松ら 2005; Shinohara *et al.* 2009)。モウソウチク林では、他の森林タイプと比較して、土壌水分量が少ない傾向にあるという計測結果に基づいて、モウソウチク林の蒸散量は、他の森林タイプと比較して多いのではないかと推察されてきた (横尾ら 2005; 鳥居 2007)。

表-5 には、モウソウチク林における蒸発散量、遮断蒸発量の計測結果を示した。近年まで、モウソウチク林における蒸散量の実測データは存在しなかったが、小野澤ら (2009) と Kume *et al.* (2010) によって、蒸散量計測法の代表的な方法である樹液流計測法のモウソウチク林への適用性が確認され、1年間に渡る計測が行われた (Komatsu *et al.* 2010)。Komatsu *et al.* (2010) は、対象としたモウソウチク林の蒸散量は、同じ気象条件と仮定した場合の針葉樹林よりも200~300 mm程度大きくなったと報告している。また、Ichihashi *et al.* (2014) は Komatsu *et al.* (2010) よりも密度の高いモウソウチク林で計測を行い、Komatsu *et al.* (2010) よりも蒸散量が100 mm程度小さかったものの、近隣の針葉樹林と比較すると大きかったと報告している。なお Ichihashi *et al.* (2014) は、刈取り法に基づいて、Ichihashi *et al.* (2014) が計測した高密度のモウソウチク林の葉面積指数は13.7 ha/ha、Komatsu *et al.* (2010) が計測した低密度のモウソウチク林の葉面積指数は6.5 ha/haと報告している。このことは、モウソウチク林の蒸散量は、葉面積と強い正の相関は持たないことを示唆している。

表-5. モウソウチク林における蒸散量と遮断蒸発量の計測結果

県名	立竹密度 (本/ha)	平均胸高直径 (cm)	平均遮断樹高 (m)	遮断蒸発率 (%)	年蒸散量 (mm)	引用文献
カグヤ 福岡	4000	11.3	15	9.2	567	Komatsu <i>et al.</i> (2010), Shinohara <i>et al.</i> (2013)
宗像 福岡	6800	11.3	13	10.8		Onozawa <i>et al.</i> (2009)
篠栗 福岡	11000	10.9	15		455	Ichihashi <i>et al.</i> (2014)
島津 京都	7200	9.6	14	12.2		服部・阿部 (1989)

Komatsu *et al.* (2012) は、モウソウチク林の蒸散量が針葉樹林よりも多い理由として、モウソウチク林の群落コンダクタンスが針葉樹林と比較して大きいのではないかと推察している。今治ら (2013) は、日中と夜明け前のシュートの水ポテンシャルを比較することで、モウソウチクは日中に発生した水ストレスを解消するために、夜間に積極的に吸水を行っている可能性を提示している。Yang *et al.* (2012) は、モウソウチクではないものの、タケ類 (*Sinarundinaria nitida* (Mitford) Nakai) を用いて、夜間の高い根圧によって水を吸い上げることで、日中に発生したエンボリズムを解消していることを示している。Wang *et al.* (2011) や Cao *et al.* (2012) も、タケ類での高い根圧を報告している。このように、モウソウチク林は、夜間に積極的に水を吸い上げることで、日中の高い蒸散を維持している可能性がある。モウソウチクの蒸散量が大きい理由について解明するためには、個葉スケールの蒸散・光合成、植物体内の通水コンダクタンスなど生理生態特性を解明する必要もあるであろう。

一方、日本においてモウソウチク林における遮断蒸発量の計測結果は3例存在する。降水量に占める遮断蒸発量の割合である遮断蒸発率は、すべてのモウソウチク林で10%程度であった。この値は、他の森林タイプと比較して小さい値である。Onozawa *et al.* (2009) は、モウソウチク林の遮断蒸発量が小さい理由として、樹幹流量が多いからではないかと推察しているが、Shinohara *et al.* (2013) が対象としたモウソウチク林は、樹幹流量が少ないにも関わらず遮断蒸発量が小さかった。Shinohara *et al.* (2013) は、モウソウチク林の遮断蒸発率が他の森林タイプより小さかった理由として、モウソウチク林の樹冠貯留量（降雨時に枝や葉に保持できる水の量）は、他の森林タイプと比較して小さいからではないかと推察している。なお一般的に、葉面積指数が大きいほど、遮断蒸発量が大きくなる傾向が知られている (Park *et al.* 2000)。モウソウチク林で遮断蒸発量を計測した研究である服部・阿部 (1989) は、刈取り法に基づいて、彼らが計測したモウソウチク林の葉面積指数は11.9 ha/haであると報告しており、只木 (1976) が報告している他の森林タイプと比較して大きい。このことから、モウソウチク林の遮断蒸発量が小さい要因は、葉面積指数以外であると考えられる。

Komatsu *et al.* (2010) は、モウソウチク林は蒸散量が多い傾向にあるものの、遮断蒸発量が小さいため、両者を足した値は、針葉樹人工林と同程度であること示している (Komatsu *et al.* 2010)。そのため、モウソウチク林の方が、他の森林タイプと比較し、渇水を助長する可能性は高くないと考えられる。ただし、降水量が少ない地域（あるいは年）では、全蒸発散に占める蒸散の割合が多くなり、遮断蒸発の割合が小さくなる。そのような地域では、遮断蒸発量と蒸散量を足し合わせた値が、他の森林タイプよりも大きくなる可能性も考えられる。また、遮断蒸発の多寡は降水特性の影響も強く受ける (Calder 1996)。そのため、降

水量が少ない地域や異なる降水特性を持つ地域で上述の結論を検証することが望まれる。

3. 表層崩壊

山本ら (2004) は、山口県内で現地調査を行った竹林18地点中5地点で土石流跡が、10地点でがけ崩れ跡がみられたとしている。日浦ら (2004) は、平成10年9月の高知市の豪雨において、がけ崩れの地点の3分1は竹林で発生していると報告している。さらにその崩壊を三つのタイプに分類し、ルートマットに雨水が集中し、斜面方向へ流下することが、崩壊発生に大きく関わっている可能性を指摘している。しかし、これらの研究は、実際に崩壊の起こった竹林でそのメカニズムを推察したものであり、表層崩壊の発生確率を他の森林タイプと比較したものではない。なお日浦ら (2004) は、目視で、高知市北部の山麓の約50%は竹林に覆われていると示しており、これが災害の発生地域の竹林割合と同程度だとすれば、竹林の災害発生確率は、他の森林タイプと比較し小さくなる。河邑ら (2004) は、2000年の東海豪雨における土地被覆別の土砂崩壊割合を調べたところ、竹林は、人工林・天然林・未立木地よりも小さかったと報告している。土砂崩壊は、大きく表層崩壊と深層崩壊に分類され、崩壊深が大きい深層崩壊では、そもそも植生の影響は小さいとされているが (太田 2001)、東海豪雨における土砂崩壊は主に表層崩壊によってもたらされている (井口 2002)。このように、竹林とその他の森林タイプの表層崩壊発生確率を比較した研究は1例しかなく、この研究でも、竹林の方が、他の森林タイプと比較して、表層崩壊が起こりやすいというという結果は示されていない。

4. 表面侵食

モウソウチク林において表面侵食量を計測し、他の森林タイプと比較した例としては、小倉・江崎 (2010) と佐々木・茅島 (2012) がある。小倉・江崎 (2010) と佐々木・茅島 (2012) は、モウソウチク林の表面侵食量は、それぞれスギ林、ヒノキ林と比較し小さかったと報告している。一般的に、表面侵食量は、土壌表面の被覆率と負の相関がある (服部ら 1992; 岩崎ら 2013)。モウソウチク林では、下層植生は、あまりみられないものの、通常、リターによって林床が覆われている (永野・後藤 2012)。そのため、表面侵食量が小さくなったと考えられる。ただし、表面侵食量の計測は、空間的なばらつきを考慮するため、通常は複数プロットを設置して計測を行うが (Miura *et al.* 2003)、小倉・江崎 (2010)、佐々木・茅島 (2012) は、それぞれの森林タイプで1~2プロットのみしか計測していないので注意が必要である。このように、予報的な研究のみしか行われていないが、その結果に基づく限りでは、モウソウチク林は、他の森林タイプと比較し、表面侵食量が大きくはないと考えられる。

V. 今後の研究の必要性

現在までに得られている知見に基づく、モウソウチク

林の拡大によって、洪水、渇水、表層崩壊、表面侵食を助長させる可能性は低いという結論になる。しかし、この結論は、わずか数例程度の研究例から推測されたものであるため、今後の研究の蓄積によって変更されることも考えられる。特に、表層崩壊については、竹林とその他の森林タイプで発生確率を比較した研究は一例しかなく、その研究も竹林に焦点をあてたものではない。そのため、表層崩壊に関する研究が行われ上述の結論が検証されることが特に望まれる。

また、針葉樹人工林が、管理放棄されることで、公益的機能が大きく低下する可能性を指摘されていることからわかるように、公益的機能の多寡は、立竹密度や胸高直径などが異なるモウソウチク林間でも、大きく異なることが考えられる。さらに、渇水と大きく関わる蒸発散量は、気象条件によっても大きく異なることが知られている。例えば、先にも述べた通り、降水量が少ない地域では、蒸発散に占める遮断蒸発量の割合が小さくなることが予想されるため、遮断蒸発量と蒸散量を足し合わせた値も、他の森林タイプよりも大きくなる可能性がある。そのため、モウソウチク林の拡大が公益的機能に与える影響をより明確に評価するためには、様々な林分条件、気象条件のモウソウチク林で、計測例を積み重ね、他の森林タイプとの比較が行われることが望まれる。

本研究で取りまとめた（現地計測に基づく）蒸発散量や地表流量は、2~200 m² 程度の試験プロットで計測されたものである。一方、洪水や渇水を考える上で、実用的には、ダム流域における洪水流出や水資源量が重要になるであろう（小松 2010；小松ら 2013）。小松ら（2013）は、既往の研究を取りまとめることで、プロットスケールの計測結果と流域スケールの計測結果は必ずしも一致しないことを指摘している。そのため、本研究で取りまとめられたプロット試験の結果が、より大きいスケールでも適用可能か確かめることが望まれる。そのためには、これまで数多くの研究に利用されており、比較対象が数多く存在する3~10 ha 程度の試験流域を用いた研究が有用であろう。現在まで日本には数多くの試験流域が設定されているが（篠原ら 2008；浅野 2014）、モウソウチク林が優占する試験流域は著者らが知る限り存在しない。そのため、モウソウチク林で覆われた試験流域の設定、および試験研究の開始が望まれる。

本研究では、モウソウチク林の拡大が、水源涵養機能や土砂災害防止機能/土壌保全機能に与える影響を取りまとめた。一方、本研究で対象とした以外の公益的機能についても、他の森林タイプとモウソウチク林の比較が行われつつある。特に、生物多様性機能については多くの研究が行われており、モウソウチク林の拡大に伴う下層植生の多様性の低下（島田・谷 2005；鈴木 2010；阿久津ら 2012）、昆虫層への影響（Touyama *et al.* 1998；宮崎ら 2009；芳村・原田 2009；永野・後藤 2012）が指摘されている（これらには、モウソウチク林の方が、他の森林タイプと比較

し、生物多様性が高いという例も含まれる）。また国外では、地上部現存量の変動からモウソウチク林の炭素蓄積量の年々変動が推定されている（Chen *et al.* 2009；Yen and Lee 2011）。その一方で、気候変動予測の枠組みにおいて重要視される NEP（生態系純生産量＝総生産量－生態系呼吸量）については未だ明らかではない。これらの項目についても研究が執り行われ、サイト横断的に比較、整理されることが望まれる。そうすれば、モウソウチク林の拡大に対して、どう対峙するべきか、明快な回答を提示する上で重要な資料となるであろう。

本研究の一部は、住友財団・環境研究助成「日本及び台湾における竹林拡大が水循環に与える影響評価：樹液流計測に基づく検討（代表：久米朋宣）」及び科学研究費補助金「表層崩壊の危険性を評価する上で土壌水分の空間的不均一性は考慮する必要があるのか？（代表：篠原慶規）」の支援を受けました。2名の匿名査読者の方には有意義なコメントをいただきました。ここに記して感謝の意を示します。

引用文献

- 阿部佑平・柴田昌三（2009）天王山における放置モウソウチク林の林分構造と整理伐後3年間の動態。日緑工誌 35: 57-62
- 明石隆宏・伊東啓太郎・橋本大輔・池田朝二・真鍋 徹（2006）直方市新入地区における市民参加による竹林拡大抑制と里山再生に関する研究—3年代の航空写真の比較による竹林拡大プロセスについて—。九州森林研究 59: 52-55
- 阿久津瞳・逢沢峰昭・松英恵吾・大久保達弘（2012）栃木県那須烏山市におけるモウソウチク林の分布と周辺群落への侵入。宇大演報 48: 139-151
- 浅野友子（2014）日本の山地流域の降雨流出データ：収集データの概要と観測の課題。水文学会誌 27: 19-28
- Calder I（1996）Dependence of rainfall interception on drop size. 1. Development of the two-layer stochastic model. J Hydrol 185: 363-378
- Cao KF, Yang SJ, Zhang YJ, Brodrick TJ（2012）The maximum height of grasses is determined by roots. Ecol Lett 15: 666-672
- 陳 財輝・劉 瓊霜・鍾 欣芸（2011）南投縣鳳凰山孟宗竹產筍林分之生長與生物量。中華林學季刊 44: 19-28（繁体中国語・英語要旨併記）
- Chen X, Zhang X, Zhang Y, Booth T, He X（2009）Changes of carbon stocks in bamboo stands in China during 100 years. For Ecol Manage 258: 1489-1496
- Farley KA, Jobbagy EG, Jackson RB（2005）Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy. Global Change Biol 11: 1565-1576
- 藤井康代・中川真一（2010）放置竹林におけるモウソウチクの現存量。Bamboo J 27: 56-61
- Fukuda M, Iehara T, Matsumoto M（2003）Carbon stock estimates for sugi and hinoki forests in Japan. For Ecol Manage 184: 1-16
- 蜂屋欣二・安藤 貴（1964）スギ人工林の密度と成長（三俣植栽密度比較試験地の解析）。日林講 75: 340-342
- 服部重昭・阿部敏夫（1989）竹林における降雨遮断特性。水利科学 186: 34-53
- 服部重昭・阿部敏夫・小林忠一・玉井幸治（1992）林床被覆がヒノキ人工林の侵食防止に及ぼす影響。森林総研研報 362: 1-34
- 林加奈子・山田俊弘（2008）竹林の分布拡大は地形条件に影響されるのか？ 保全生態学研究 13: 55-64
- 平岡真合乃・恩田裕一・加藤弘亮・水垣 滋・五味高志・南光一樹（2010）ヒノキ人工林における浸透能に対する下層植生の影響。日林誌 92: 145-150
- Hiraoka M, Onda Y（2012）Factors affecting the infiltration capacity in bamboo groves. J For Res 17: 403-412
- 日浦啓全・有川 崇・ドウラドゥルガババトゥール（2004）都市周

- 辺山麓部の放置竹林の拡大にともなう土砂災害の危険性. 日本地すべり学誌 41: 1-12
- Ichihashi R, Komatsu H, Kume T, Onozawa Y, Shinohara Y, Tsuruta K, Otsuki K. (2014) Stand-scale transpiration of two Moso bamboo stands with different culm densities. *Ecophysiology*, in press doi: 10.1002/eco.1515
- Ide J, Shinohara Y, Higashi N, Komatsu H, Kuramoto K, Otsuki K (2010) A preliminary investigation of surface runoff and soil properties in a moso-bamboo (*Phyllostachys pubescens*) forest in western Japan. *Hydrol Res Lett* 4: 80-84
- 井口 隆 (2002) 2000 年 9 月東海豪雨による土砂災害の発生状況. 防災科学技術研究所主要災害調査 38: 177-195
- 今治安弥・上田正文・和口美明・田中正臣・上松明日香・糟谷信彦・池田武文 (2013) モウソウチク・マダケの侵入がスギ・ヒノキ人工林の水分生理状態に及ぼす影響. 日林誌 95: 141-146
- 今若慎太郎・佐藤宣子 (2008) 「森林環境税」による新たな森林整備に関する研究. 九大演報 89: 75-126
- Isagi Y, Kawahara T, Kamo K, Ito H (1997) Net production and carbon cycling in a bamboo *Phyllostachys pubescens* stand. *Plant Ecol* 130: 41-52
- Isagi Y, Torii A. (1998) Range expansion and its mechanisms on a naturalized bamboo species, *Phyllostachys pubescens*, in Japan. *J Sustain For* 6: 127-141
- 石賀裕明・道前香緒里・小寺洋導・坪藤幸太 (2001) 竹林侵入による土壌組成の変化と環境問題. 島根大学地球資源環境学研報 20: 83-86
- 伊藤孝美・山田倫章 (2005) モウソウチク林の侵入と繁殖特性. 大阪府立食とみどりの総合技七研報 41: 11-18
- 岩切靖次・四手井綱英 (1965) スギ林 (ヤブクグリ) の生産力について. 日林講 76: 157-160
- 岩崎貴大・篠原慶規・大谷壮平・久保田哲也 (2013) 森林表土を用いた緑化における表土採取場所による土壌侵食量の違い. 九大演報 94: 18-22
- 甲斐重貴・辻井美香 (2004) GIS を用いた九州南部地域の里山における竹林拡大の時系列的変化と要因の検討—宮崎県高岡町の事例—. 宮崎大農研報 50: 73-83
- 菊住 昇 (1979) 樹木根系図説. 誠文堂新光社
- 片野田逸朗・井手幸樹 (2005) 造林地に侵入したモウソウチクの繁殖過程とその継続的な皆伐による駆逐効果. 九州森林研究 58: 63-66
- 河原輝彦・只木良也・竹内郁雄・佐藤 明・樋口国雄・加茂皓一 (1979) ブナ天然林とヒノキ人工林の物質生産とその循環. 日生誌 29: 387-395
- 河合洋人・西條好迪・秋山 侃 (2010) 地上部および地下部の成長からみた竹林拡大の解析. 日林誌 92: 93-99
- 河邑 真・辻野和彦・辻子裕二 (2004) 高分解能衛星画像と森林 GIS を用いた 2000 年東海豪雨による土砂崩壊の特性分析. 自然災害科学 23: 245-258
- 清野嘉之・竹内 学・鳥居厚志・奥田史郎・野田 巖・金森匡彦 (2009) 日本の竹林のバイオマス炭素蓄積量, 吸収量の算定手法の開発. 森林総研平成 21 年度版研究成果選集, 4-5
- 小林勇介 (2010) GIS を用いた竹林の分布変化の研究—京都府西南部における事例—. 地理学論集 85: 42-50
- 小泉圭吾・谷本親伯 (2008) 竹林の表層地盤特性について. *Bamboo J* 25: 8-16
- 小松 光 (2010) 森林と水資源. 水利科学 314: 1-29
- 小松 光・澤野真治・久米朋宜・橋本昌司 (2005) 森林の特性と蒸発散量の関係. 日林誌 87: 170-185
- Komatsu H, Onozawa Y, Kume T, Tsuruta K, Kumagai T, Shinohara Y, Otsuki K. (2010) Stand-scale transpiration estimates in a Moso bamboo forest: (II) Comparison with coniferous forests. *For Ecol Manage* 260: 1295-1302
- Komatsu H, Onozawa Y, Kume T, Tsuruta K, Shinohara Y, Otsuki K. (2012) Canopy conductance for a Moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) forest in western Japan. *Agric For Meteorol* 156: 111-120
- 小松 光・篠原慶規・大槻恭一 (2013) 管理放棄人工林は洪水を助長するか. 水利科学 329: 68-90
- Kume T, Onozawa Y, Komatsu H, Tsuruta K, Shinohara Y, Umebayashi T, Otsuki K. (2010) Stand-scale transpiration estimates in a Moso bamboo forest: (I) Applicability of sap flux measurements. *For Ecol Manage* 260: 1287-1294
- 久米村明・寺岡行雄・竹内郁雄 (2009) 放置モウソウチク林の林分構造と地上部現存量. 鹿大演報 36: 1-8
- 藏本康平・篠原慶規・小松 光・井手淳一郎・大槻恭一 (2011) モウソウチク (*Phyllostachys pubescens*) 林における降雨流出過程の解明に向けて: 地表流とバイオマツフローの観測. 水文学会誌 24: 360-368
- Manabe T, Kashima H, Ito K. (2003) Stand structure of a fragmented evergreen broad-leaved forest at a shrine and changes of landscape structures surrounding a suburban forest, in northern Kyushu. *J Jpn Reveget Tech* 28: 438-447
- Miura S, Yoshinaga S, Yamada T (2003) Protective effect of floor cover against soil erosion on steep slopes forested with *Chamaecyparis obtusa* (hinoki) and other species. *J For Res* 8: 27-35
- 三宅 尚・川西基博・三宅山賀・石川慎吾 (2000) 高知市北山地域における竹林の分布拡大 I. 過去 30 年間の竹林面積の変化 *Hikobia* 13: 241-252
- Miyata S, Kosugi K, Gomi T, Onda Y, Mizuyama T (2007) Surface runoff as affected by soil water repellency in a Japanese cypress forest. *Hydrol Process* 21: 2365-2376
- 宮田秀介・恩田裕一・五味高志・水垣 滋・浅井宏紀・平野智章・福山泰治郎・小杉賢一朗・Side RC・寺嶋智巳・平松晋也 (2009) 森林斜面におけるホートン型表面流の発生に影響を与える要因—地質および降雨特性の異なる 3 サイトにおける観測結果の解析—. 日林誌 91: 398-407
- 宮本倫仁・谷本丈夫・安藤 貴 (1980) 四国地方におけるヒノキ人工林の成長解析. 林試研報 309: 89-107
- 宮崎祐子・染川知之・和口美明 (2009) 奈良県の里山林におけるオサムシ科甲虫相調査. 奈良県森林技七報 38: 65-68
- 森格良・宇都宮東吾・豊田信行 (1983) モウソウチク林の管理技術に関する研究. 愛媛県林試研報 8: 131-137
- Morikawa Y (1971) Daily transpiration of a 14-year-old *Chamaecyparis obtusa* stand. *J Jpn For Soc* 53: 337-339
- 村上桂太・竹内郁雄・寺岡行雄 (2006) 鹿児島県におけるモウソウチク林の地上部現存量. 九州森林研究 59: 121-124
- 永野昌博・後藤砂紀 (2012) 土壌動物を指標とした植生管理と生物多様性の関係—大分大学構内における土壌動物を用いた自然の豊かさ評価—. 大分大学教育福祉科学部研究紀要 34: 73-84
- 根岸賢一郎・鈴木 誠・佐倉詔夫・丹下 健・鈴木貞夫・斯波義宏 (1988) スギ幼齢林における地上部現存量の経年変化. 東大演報 78: 31-57
- 日本学術会議 (2001) 地球環境・人間生活にかかわる農業及び森林の多面的な機能の評価について (答申).
- 西川僚子・村上拓彦・吉田茂二郎・光田 靖・長島啓子・溝上展也 (2005) 隣接する土地被覆別にみた竹林分布変化の特徴. 日林誌 87: 402-409
- 西村武二・吉川 賢・池本彰夫・永森通雄 (1992 a) 高齢スギ人工林の現存量と成長過程. (1) 高知県本川村奥南川山国有林 80 年生スギ林の場合. 高知大演報 19: 73-81
- 西村武二・吉川 賢・池本彰夫・永森通雄 (1992 b) 高齢スギ人工林の現存量と成長過程. (2) 岩手大学滝沢演習林 89 年生スギ林の場合. 高知大演報 19: 83-97
- 尾形信夫・長友安男・上中作次郎・竹下慶子 (1973) ヒノキ林の物質生産におよぼす成木施肥, 地位の影響およびヒノキ林とスギ林の比較. 林試九州支年報 15: 21
- 小倉 晃・江崎功二郎 (2010) 放置竹林とスギ林における地表流の比較. 石川県林試研報 42: 4-5
- 奥田史郎・鳥居厚志・伊藤武治・上村 巧・佐々木達也・伊藤崇之・木村光男・豊田信行・佐渡靖紀・山田隆信・山田倫章・伊藤孝美・竹内郁雄 (2007) 森林総研平成 18 年度研究成果選集. 42-43
- Okutomi K, Shinoda S, Fukuda H (1996) Causal analysis of invasion of broad-leaved forest by bamboo in Japan. *J Veg Sci* 7: 723-728
- 鬼東大平・加藤 顕・小林達明 (2011) 千葉県におけるモウソウチ

- ク林群落拡大モデルに関する基礎的研究. 日緑工誌 37: 90-95
 恩田裕一編 (2008) 人工林の荒廃と水・土砂流出の実態. 岩波書店. 245
- Onozawa Y, Chiwa M, Komatsu H, Otsuki K (2009) Rainfall interception in a moso-bamboo (*Phyllostachys pubescens*) forest. J For Res 14: 111-116
- 小野澤郁佳・久米朋宣・小松 光・鶴田健二・大槻恭一 (2009) 樹液流計測のモウソウチクへの適用: 切り竹における吸水量と樹液流量の比較. 日林誌 91: 366-370
- 大野朋子・平井 潤・丸山 宏・前中久行 (1999) 地形図を用いた都市近郊林における竹林化の解析. ランドスケープ研究 62: 599-602
- 大野朋子・下村泰彦・前中久行・増田 昇 (2004) 竹林の動態変化とその拡大予測に関する研究. ランドスケープ研究 67: 567-572
- 太田猛彦 (2001) 日本の緑の変遷と緑化の評価. 砂防学会誌 54: 107-111
- Park HT, Hattori H, Kang HM (2000) Seasonal and inter-plot variations of stemflow, throughfall and interception loss in two deciduous broad-leaved forests. J Jpn Soc Hydrol Water Resour 13: 17-30
- 林野庁 (2013) 平成 24 年度森林・林業白書
- 林野庁 (2014) 特用林産物を巡る状況—竹関係資料. <http://www.rinya.maff.go.jp/j/tokuyou/tokusan/megurujoukyou/> (2014 年 4 月 23 日閲覧)
- 佐渡靖紀 (2003) 山口県におけるモウソウチク林の拡大状況—新南陽市和田地区周辺の調査事例—. 山口県林業指導センター 林業試験研究発表集
- 佐渡靖紀・山田隆信 (2007) 山口県におけるモウソウチク林の地上部現存量. 日本森林学会大会要旨集 118: P1e11
- 齊藤秀樹・山田 勇・四手井綱英 (1967) 小径木間伐に関する研究 (Ⅱ) 第 1 回間伐 1 年後の林況の変化について. 京大演報 39: 64-78
- 齊藤秀樹・四手井綱英 (1973) スギ幼齢林の一次生産力とその推定法の検討. 日林誌 55: 52-62
- 佐々木重行・茅島信行 (2012) 竹林からの土砂流出と地表面のための葉による被覆について. 九州森林研究 65: 100-103
- Satou T (1979) Standing crop and increment of bole in plantations of *Chamaecyparis obtusa* near an electric power plant in Owase, Mie. Jap J Ecol 29: 103-109
- 柴田昌三 (2003) モウソウチクと日本人. 日緑工誌 28: 406-411
- 柴田昌三 (2010) 竹資源の新たな有効利用のための竹林施業. 森林科学 58: 15-19
- 島田博匡・谷 秀司 (2005) 三重県の里山における主要群落の林分構造と種組成. 三重林研報 17: 19-44
- 篠原慶規・小松 光・大槻恭一 (2008) 御手洗水試験流域の気象特性について. 九大演報 89: 39-50
- Shinohara Y, Kumagai T, Otsuki K, Kume A, Wada N (2009) Impact of climate change on runoff from a mid-latitude mountainous catchment in central Japan. Hydrol Process 23: 1418-1429
- Shinohara Y, Komatsu H, Kuramoto K, Otsuki K (2013) Characteristics of canopy interception loss in Moso bamboo forests of Japan. Hydrol Process 27: 2041-2047
- Sidle RC, Hirano T, Gomi T, Terajima T (2007) Hortonian overland flow from Japanese forest plantations: an aberration, the real thing, or something in between? Hydrol Process 21: 3237-3247
- 染谷 貴・竹村紫苑・宮本 駿・鎌田磨人 (2010) 自然環境情報 GIS と国土数値情報を用いた日本全域の竹林分布と環境要因の推定. 景観生態学 15: 41-54
- Song X, Zhou G, Jiang H, Yu S, Fu J, Li W, Wang W, Ma Z, Peng C (2011) Carbon sequestration by Chinese bamboo forests and their ecological benefits: assessment of potential, problems, and future challenges. Environ Rev 19: 418-428
- Suzuki K (1987) Above ground biomass of bamboo stand. Bamboo J 4: 114-117
- 鈴木健敏・成田忠範 (1975) モウソウチク林の施業試験—林分の成長と収穫に対する密度と施肥の効果—. 林試研報 273: 75-93
- 鈴木素之・長谷川秀人・六信久美子・山本哲朗 (2006) 山口県における竹林の拡大とその生態. 土木学会論文集 G 62: 445-451
- 鈴木 亮・鈴木晃志郎 (2009) 竹林の拡大状況からみた大学緑地の環境保全と適正利用. 観光科学研究 2: 95-102
- 鈴木重雄 (2008) タケノコ生産地域における竹林の分布拡大過程—千葉県大多喜町の事例—. 植生学誌 25: 13-23
- 鈴木重雄 (2010) 竹林は植物の多様性が低いのか? 森林科学 58: 11-14
- Suzuki S, Nakagoshi N (2008) Expansion of bamboo forests caused by reduced bamboo-shoot harvest under different natural and artificial conditions Ecol Res 23: 641-647
- 只木良也 (1976) 森林の現存量—とくにわが国の森林の葉量について—. 日林誌 58: 416-423
- Tadaki Y, Kawasaki Y (1966) Studies on the production structure of forest IX. Primary productivity of a young *Cryptomeria* plantation with excessive high density. J Jpn For Soc 48: 55-61
- 只木良也・尾方信夫・長友安男 (1965) 九州スギ林の物質生産力. 林試験報 173: 45-66
- 只木良也・尾方信夫・長友安男・吉田武彦 (1966) 森林の生産構造に関する研究 (X) 無間伐の 45 年生ヒノキ林の生産力. 日林誌 48: 387-393
- 只木良也・尾方信夫・長友安男 (1967) 森林の生産構造に関する研究 XI サシキスギと実生スギの 28 年生造林地の物質生産力. 林試験報 199: 47-65
- 丹下 健・小島克己 (2010) 千葉演習林安野スギ成長測定試験地の地上部現存量. 演習林 (東大) 49: 1-6
- 鳥居厚志 (1998) 空中写真を用いた竹林の分布拡大速度の推定: 滋賀県八幡山および京都府男山における事例. 日生態誌 48: 37-47
- 鳥居厚志 (2007) 竹林の拡大が土壌保水力に及ぼす影響の解明. 環境情報科学 35: 80-81
- 鳥居厚志・井鷲裕司 (1997) 京都府南部地域における竹林の分布拡大. 日生態誌 47: 31-41
- 鳥居厚志・奥田史郎 (2010) タケは里山の厄介者か? 森林科学 58: 2-5
- Touyama Y, Yamamoto T, Nakagoshi N (1998) Myrmecofaunal change with bamboo invasion into broadleaf forests J For Res 3: 155-159
- 豊原裕子・土屋 智・逢坂興宏 (2005) 密度の異なる竹林試験区における地表流出と土壌侵食. 中森研 53: 213-216
- 上原三和・重松敏則 (2004) 都市近郊における農林地の変化とその保全・活用による自然循環型社会システムの可能性. ランドスケープ研究 67: 827-832
- 内村悦三 (2005) タケと竹を活かす—タケの生態・管理と竹の利用—. 全国林業改良普及協会
- 山本哲朗・楠木寛士・鈴木素之・島重 章 (2004) 現地調査と航空写真に基づく山口県内の竹林分布とその周辺環境への影響. 土木学会論文集 776: 107-112
- Yang SJ, Zhang YJ, Sun M, Goldstein G, Cao KF (2012) Recovery of diurnal depression of leaf hydraulic conductance in a subtropical woody bamboo species: embolism refilling by nocturnal root pressure. Tree Physiol 32: 414-422
- Yen TM, Lee JS (2011) Comparing aboveground carbon sequestration between moso bamboo (*Phyllostachys heterocycla*) and China fir (*Cunninghamia lanceolata*) forests based on the allometric model. For Ecol Manage 261: 995-1002
- 横尾謙一郎・酒井正治・今矢明宏 (2005) ヒノキ人工林に侵入した竹が林分構造と土壌に与える影響. 九州森林研究 58: 195-198
- 四大学合同調査班 (1966) 森林の生産力に関する研究 (Ⅲ) スギ人工林の物質生産について. 日林協
- 芳村 工・原田 洋 (2009) 横浜港北ニュータウンのモウソウチク林における大型土壌動物群集. 生態環境研究 16: 53-61
- Wang F, Tian X, Ding Y, Wan X, Tyree MT (2011) A survey of root pressure in 53 Asian species of bamboo. Ann For Sci 68: 783-791
- 渡邊仁志・茂木靖和 (2005) 壮齢スギ, ヒノキ人工林における林分の炭素蓄積量. 岐阜県森林研報 34: 11-16
- 渡邊仁志・茂木靖和 (2007) 92 年生スギ人工林における成長過程と現存量. 岐阜県森林研報 36: 1-7
- 渡辺政俊 (1985) 竹林の生態的特徴に関する研究 (Ⅱ) 放任モウソウチク林の林分構造. Bamboo J 3: 7-17