

岐阜県東白川村国有林のヒノキ人工林における水源涵養機能改善に向けた調査研究

○ サントリー 主任研究員 かわさきまさとし 川崎雅俊
サントリー 研究員 あべゆたか 安部豊
筑波大学 教授 おんだゆういち 恩田裕一

要旨

水源涵養機能を高度に発揮できる施業方法を検討する為、近年、林学等の研究分野で提案されている従来の間伐よりも強度に立木を伐採する方法を、岐阜県東白川村にある越原国有林内のヒノキ人工林を対象として実施し、林内雨量、地表流量、流出量に対する影響を調査しました。調査は2つの小流域を設定し、1つを対照区、もう1つを強間伐区とし、それぞれ林内雨量、地表流量、河川流量の測定を行いました。2012年4月から観測を開始し、2012年12月に本数ベースで60%の間伐を実施、その後2013年11月まで観測を行いました。その結果、林内雨量、基底流出量は強間伐区で対照区の年々変動以上に増加しましたが、地表流量、洪水流出量は、強間伐の影響は対照区の年々変動より小さいという結果になりました。強間伐前後で流況曲線を比較すると、平水時から渇水時にかけて流量は増加しており、豊水時の変動は僅かでした。平水時から渇水期にかけて河川流量が増加した原因として、流域内貯留量、特に渇水時にも安定的に水を供給する岩盤中の地下水の増加が推測されました。そこで、岩盤地下水の地下水位とのよく相関する先行降雨指数（API）を用いて解析を行った結果、強間伐実施後、特に夏期の降雨シーズン後において、同じ先行降雨指数でも河川流量が増加する傾向が見られました。この結果は、夏期の降雨シーズンに多くなる強間伐による林内雨量の増分が、貯留量、特に岩盤中の地下水貯留量の増加に遅れて寄与したことを示していると考えられます。

先行降雨指数に対する岩盤地下水位や流出の応答特性は、地質によって異なることが知られています。本サイトで基底流出と良い相関がみられたAPIの積算期間（30日）は他の堆積岩サイトと比べて長く、この緩やかな降雨流出応答の特性によって、強間伐による林内雨量増が平水時から渇水時にかけての河川流量増をもたらした可能性が考えられます。今後は、地質の異なる他流域の観測結果との比較を行い、強間伐による流況の平準化に必要な要素について、検討を試みる予定です。

はじめに

サントリーでは、工場で汲み上げる量以上に、地下水を涵養する森林を確保することを、持続可能な事業活動に必須の課題と考えています。その為、工場で汲み上げる地下水の水源涵養エリアで「天然水の森」を設定しており（図1）、各森の立地環境に応じて、水源涵養機能を高度に発揮できる施業方法を検討しています。近年、林学等の研究分野では、水源涵養機能の発揮の為に、従来の間伐よりも強度に立木を伐採する方法が提案されています。この方法は、短期的には樹冠遮断量の減少による土壌への降水の供給量が増加し、中長期的には林床の光環境改善による下層植生の増加がホートン型地表流を減少させ、その結果、洪水流出量が減少することにより利用可能な水資源量が増加すると考えられています。しかし、実際の観測事例はあまり多くはありません。そこで、こ

の効果の検証と効果を定量的に評価する為に、岐阜県東白川村国有林のヒノキ人工林を対象として調査研究を行ったので、その結果を報告します。

方法

1 調査地

調査地は、岐阜県東白川村越原国有林 2178 林班の約 40 年生ヒノキ人工林です。最も近い気象観測点における年平均気温は 12°C（黒川, 1999~2009 年）、平均年降雨量は 2236 mm、最大時間雨量は 35.8 mm/h です（付知, 1983~2009 年）。地質は流紋岩溶結凝灰岩と砂岩・泥岩・凝灰岩及び礫岩が分布する領域が接する場所で、土壌型は褐色森林土です。林班内に 2 つの小流域を設定し、片方を対照区 (CO 区)、もう片方を強間伐区 (HT 区) としました。流域面積は、CO 区が 0.16ha、HT 区が 0.31ha

です。強間伐実施前の立木密度は約 2500 本/ha です。観測は、2012 年 4 月から事前評価を開始、2012 年 12 月に HT 区で本数ベースで約 60%の間伐を実施し、2013 年は強間伐実施後の評価を行いました。

2 観測システム

(1) 林外雨量

調査地の小流域近傍の空き地に、DAVIS 転倒降雨量計を設置し観測を行いました（図 3）。

(2) 林内雨量

7m×7m のプロットを、CO 区、HT 区にそれぞれ 1 つずつ設定し、DAVIS 転倒降雨量計を 20 個設置し観測を行いました（図 4）。

(3) 地表流量

幅 3m、長さ 5m のプロットを、CO 区、HT 区にそれぞれ 1 つずつ設置しました。両プロットと



図 1. 全国の「天然水の森」

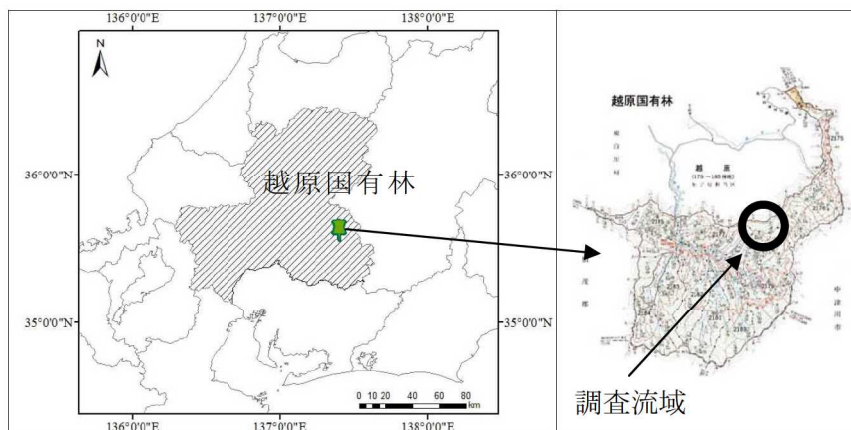


図 2. 調査地の場所

もに、斜度約 30 度です。プロットは、上端と両端に高さ 25cm 程度の波板を土壌中に約 5cm 程度差し込み、プロット以外からの流入および流出を防ぎました。プロット下端には斜面方向に水平にトレーを設置することで地表流を集水できるようにしました。集水された表面流は、タンクへ導水し、タンク内に設置した自記式水位計で地表流量の増分を観測しました（図 5）。

（4）河川流量

各流域末端部に三角堰を設置し、自記式水位計を用いて越流水深を連続観測することで、流量を算出しました（図 6）。なお、水位と流量の関係式は、実測値から作成しました。



図 3. 林外雨観測用 DAVIS 転倒升雨量計



図 4. 林内雨量計



図 6. 河川流量観測機器（三角堰）



図 5. 地表流観測プロット. 左下の写真は、発生した表面流を貯留するタンク

3 観測データの整理・解析方法

得られた観測データは、月積算値に換算し解析データとしました。洪水流出量と基底流出量の分離は、ハイドログラフの形状による分離方法(Hewlett and Hibbert, 1967)によって行いました。強間伐による水文過程への影響は、CO区、HT区の月別積算値の差が、HT区の強間伐実施前後で異なっているかどうかを、t検定によって評価を行いました。

結果

観測結果

表1に観測結果、解析結果を示します。降水量は、2012年は1168 mm (6.6mm/d)に対し2013年は1509 mm (7.1 mm/d)でした。2013年の方が、2012年よりも観測期間が長かった為、若干降水量が多くなっていますが、日平均換算すると大きな差は見られませんでした。林内雨量は、HT区では、2012年(間伐前)は706.4 mm (4.0 mm/d)、2013年(間伐後)は1136.9 mm (5.3 mm/d)と大きく増加したのに対し、CO区では、2012年は653.1mm (3.7 mm/d)、2013年は767.3mm (3.6 mm/d)と、その変化量は僅かでした。林外雨量に対する林内雨量の比でみると、HT区では、2012年(間伐前)は60%、2013年(間伐後)は75%と大きく増加したのに対しCO区では、2012年は56%、2013年は51%と、ほとんど変化が見られませんでした。

表面流量は、HT区では、2012年(間伐前)は14.7 mm、2013年(間伐後)は11.1 mm、CO区では、2012年は40.4 mm、2013年は25 mmでした。HT区、CO区、共に、降水量と比べて、表面流量の発生量は僅かでした。

表1. 林外雨量、林内雨量、地表流量、流出量の観測結果

Catchment	Year	n	林外雨量 (mm)	林内雨量 (mm)	地表流量 (mm)	流出量 (mm)
HT	強間伐実施前					
	2012/5/1-2012/10/23	177	1168	706.4	14.7	765.3
	強間伐実施後					
	2013/5/1-2013/11/30	214	1509	1136.9	11.1	1327.3
Co	2012/5/1-2012/10/23	177	1168	653.1	40.4	894.3
	2013/5/1-2013/11/30	214	1509	767.3	25	1275.4
n: 観測日数						
Catchment	Year	n	林外雨量 (mm/d)	林内雨量 (mm/d)	地表流量 (mm/d)	流出量 (mm/d)
HT	強間伐実施前					
	2012/5/1-2012/10/23	177	6.6	4.0	0.08	4.3
	強間伐実施後					
	2013/5/1-2013/11/30	214	7.1	5.3	0.05	6.2
Co	2012/5/1-2012/10/23	177	6.6	3.7	0.23	5.1
	2013/5/1-2013/11/30	214	7.1	3.6	0.12	6.0
n: 観測日数						

河川流量（流出量）は、HT 区では、2012 年（間伐前）は 765.3 mm（4.3 mm/d）に対し、2013 年（間伐後）は 1327.3 mm（6.2 mm/d）と大きく増加しました。一方、CO 区では、2012 年は 894.3 mm（5.1 mm/d）に対し、2013 年は 1275.4 mm（6.0 mm/d）と、その増分は HT 区と比べて僅かでした。林外雨量に対する河川流量の比で見ると、HT 区では、2012 年（間伐前）は 65% に対し、2013 年（間伐後）は 88% と大きく増加しました。一方、CO 区では、2012 年は 77%、2013 年は 85% と、増加はしたものの HT 区と比べて多くはありませんでした。

表 2 に月積算値の林内雨量、地表流量、河川流量（総流出量）、直接流出量、基底流出量の結果を示します。各月の HT 区と CO 区の月積算値の差を、強間伐実施前後で比較した結果、林内雨量、基底流出量は、1%水準で有意差が生じていたのに対し、地表流量、洪水流出量は、有意差が生じていませんでした（ $p>0.1$ ）。

表 2. 林内雨量、地表流量、総流出量、直接流出量、基底流出量の月積算値

	HT (2012, pre-thinning)	HT (2013, post-thinning)	CO (2012)	CO (2013)	t-Test
林内雨量					
Mean	117.7	162.4	108.9	109.6	$p<0.01$
Max	171.7	320.5	163.3	213.8	
Min	46.4	72.3	40.9	51.2	
SD	45.4	80.2	46.5	52.2	
地表流量					
Mean	2.5	1.6	6.7	3.6	$p>0.1$
Max	3.3	2.6	10.4	12.7	
Min	1.1	1.2	0.5	0.9	
SD	0.8	0.5	4.0	4.1	
総流出量					
Mean	127.9	189.6	149.4	182.2	$p<0.05$
Max	309.7	359.2	329.6	395.4	
Min	47.0	78.3	77.7	69.2	
SD	94.4	86.9	93.1	106.2	
直接流出量					
Mean	39.9	59.4	37.9	61.7	$p>0.1$
Max	113.6	162.5	116.7	189.8	
Min	2.7	4.7	2.0	3.4	
SD	39.7	50.8	42.5	61.2	
基底流出量					
Mean	88.0	130.2	111.5	120.5	$p<0.01$
Max	196.1	196.7	212.9	205.7	
Min	44.3	73.6	61.9	65.8	
SD	55.7	43.3	52.7	51.0	

考察

図 7 に HT 区、CO 区の両年の流況曲線を示します。HT 区で強間伐を行った結果、河川流量が増加しましたが、その増分は渇水時に発生しており、豊水時の変動は僅かでした。HT 区の強間伐実施によって、林内雨量は大きく増加しました。同様の観測結果は、Amatya and Skaggs (2008) や Komatsu et al. (2008) 等、多くの結果が示されており、その理

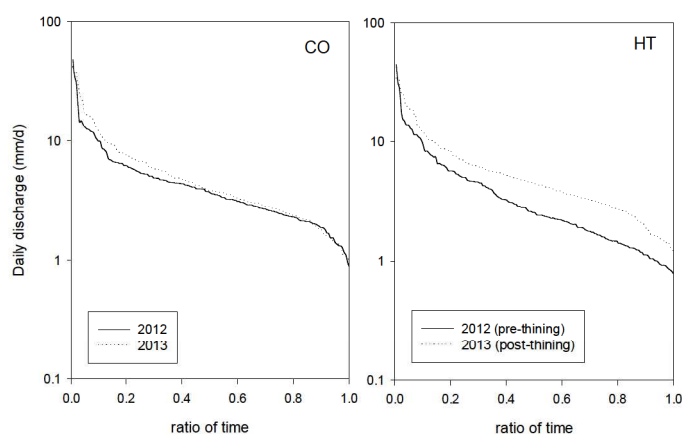


図 7. HT、CO 区の流況曲線

由として間伐による遮断蒸発量の減少が挙げられています。本研究で得られた結果も、同様のメカニズムが考えられ、河川流量の増加に寄与したと推定されます。

地表に到達した降水は、地下への浸透、もしくは表面流に分配されます。HT 区の強度間伐実施によって表面流量は大きな変化は見られませんでした。表面流は、速い流出成分として主に洪水流出時に流出に寄与すると考えられますが、強間伐実施によって表面流量に大きな差が生じなかった事は、強間伐実施前後で豊水時の変動が僅かであったという結果と調和的と考えられます。

地下に浸透した降水は、土壌から未風化基岩に至る透水性の異なる層が関与し、降雨波形が流出波形に変換されます(谷, 2012)。強間伐によって基底流出量の増加(表 2)や平水期から渇水期にかけて流量が増加した(図 7)結果から、特に渇水時に安定的に水を供給する岩盤中の地下水の増加が寄与した可能性が推測されます。そこで、岩盤地下水の地下水位変動とよく相関する先行降雨指数(API)を用いて解析を行いました(Uchida et al. 2003)。本研究では、間伐前の基底流出量と API の関係から、間伐後の基底流出量を、間伐後の HT 区が間伐されていなかった場合の推定値として計算し、実測値と比較します。

$$API = \sum_{i=1}^t P_i \quad (1)$$

ここで、 P_i は i 日前の日林内雨量、 t は積算期間です。積算期間を変化させることで、どの程度過去の降雨履歴の影響を受けているか評価できます。本研究では、積算期間を 5 日から 60 日まで変化させました。図 8 に HT 区におけるそれぞれの API と基底流量の時系列変化を示します。その結果、強間伐実施前の HT 区では、積算期間 30 日の変動が基底流量変動に最も近い変化傾向でしたので、両者の関係(図 9)より次式を導きました($R^2=0.71, p < 0.01, n=148$)。

$$Q = 0.8912e^{0.0096API} \quad (2)$$

ここで、 Q は基底流量、API は API30 日です。(2)式を HT 区強間伐実施後に適用した結果、及び CO 区でも同様の解析を行った結果を図 10 に示します。CO 区は、2012 年、2013 年共に API によって概ね良好に再現できたのに対し、HT 区の強間伐後は、夏の雨季以降、観測値が計算値を上回る結果となりました。HT 区の計算値は、強間伐を実施していない 2012 年のデータで回帰式を作成していますので、観測値が計算値を上回ったという事は、強間伐による影響と考える事ができます。強間伐実施後、地表

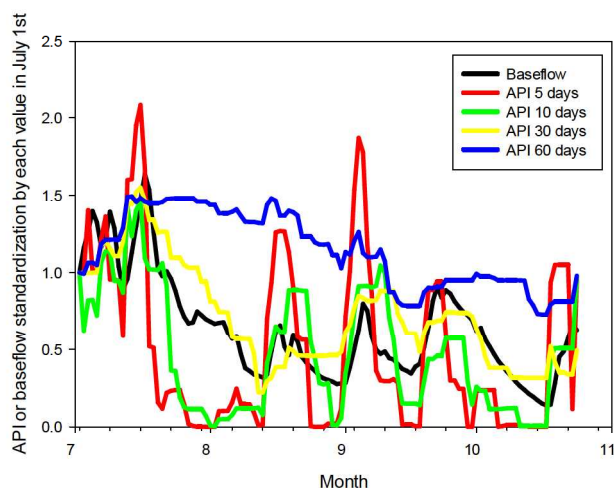


図 8. 基底流量変化と API による再現結果。基底流量、API による再現結果共に 7/1 の値を 1 として標準化しました

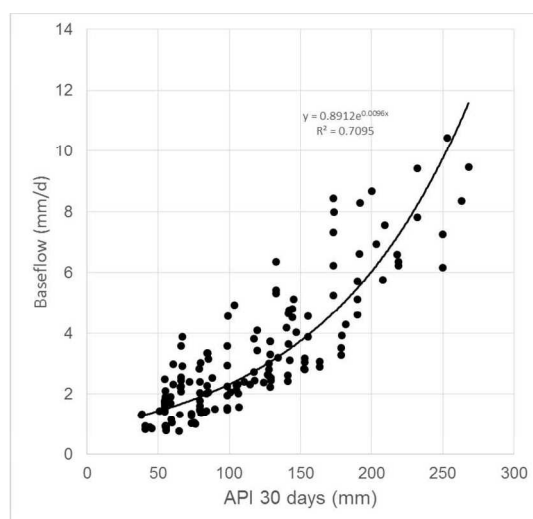


図 9. 基底流量と API30 日の関係

に到達する水量の増加は、2013年5月の観測開始時期より観測されました。一方、基底流出量の増加は、7-8月の豊水期を経た後に発生しました。水収支式を考慮すると、このタイムラグは、貯留量変化量によって説明できると考えられます。本観測地は、夏期に降水量が多いアジアモンスーン地域に属し、冬季の降水量は少ない場所です。その為、地中の貯留量は冬季に減少し、夏期の雨季に緩やかに上昇すると考えられます。一方、強間伐による

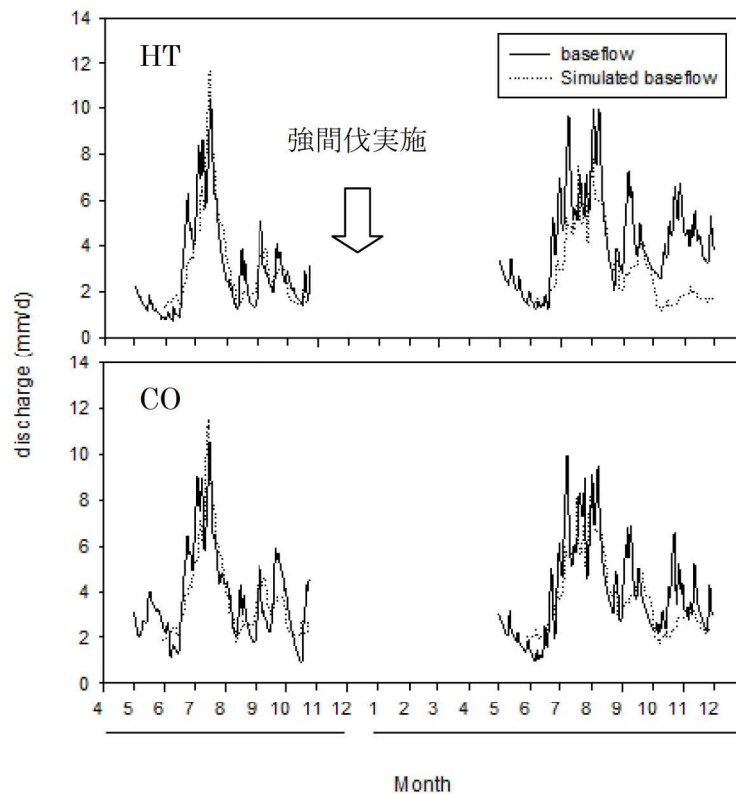


図 10. 基底流出量の経時変動と、API30日を用いた計算値

林内雨量の増分も、岩盤中の貯留量の回復に寄与したと推定されますが、この寄与は、夏の雨季に大きく働く為、強間伐による基底流出量の増加が、タイムラグを生じて秋以降に発生した可能性が考えられます。また、冬季は遮断蒸発の低下や蒸発散量の低下といった、岩盤地下水への浸透量を増加させる要因の影響が少なかったことも、基底流出量増にタイムラグが発生した要因の一つと推定されます。

おわりに

水源涵養機能を高度に発揮できる施業方法を検討する為、近年、林学等の研究分野で提案されている従来の間伐よりも強度に立木を伐採する方法を、岐阜県東白川村にある越原国有林内のヒノキ人工林を対象として実施し、林内雨量、表面流量、河川流量に対する影響を調査しました。その結果、以下の結果を得ることができました。

1. 強間伐によって、林内雨量、基底流出量の増加を観測できました。
2. 緩やかな降雨流出応答の特性によって、強間伐による林内雨量の増分が平水時から渇水時の河川流量増をもたらした可能性が考えられました。

APIに対する岩盤地下水位や流出の応答特性は、地質によって異なることが知られています。本サイトで基底流出と良い相関がみられたAPIの積算期間(30日)は、他の堆積岩サイトと比べて長く(Padilla et al. 2014)、地質条件が今回の流況変化をもたらした可能性が示唆されます。今後は、地質の異なる他流域の観測結果との比較を行い、強間伐による流況の平準化に必要な要素について、検討を試みる予定です。

また、今回の試みでは下層植生は十分回復しませんでした。下層植生は雨滴衝撃による土壌浸食を防止する役割がある一方、下層植生の蒸散等によって水のロスにもつながる可能性があります。

これらの機能の変化を、中長期的にかつ総合的に評価することが、水源涵養機能を始めとする森林の公益的機能の発揮に重要と考えられます。本研究は、強間伐前後2年間の短期的な水文過程の応答評価でしたが、今後は、植生変化と土壌浸食、そして水文素過程の変化を総合的に評価する研究に展開する予定です。

謝辞

岐阜森林管理署、東白川村役場、東白川村森林組合の皆様には、観測支援、間伐実施等大変お世話になりました。記して謝意を表します。

引用文献

- Amatya, D.M. and Skaggs, W.R. (2008) Effects of thinning on hydrology and water quality of drained pine forest in coastal North Carolina. *ASABE Publication*, Number 701P0208cd. doi: 10.13031/2013.24321
- Hewlett J.D. and Hibbert A.R. (1967) Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. In Sopper W.E. and Lull H.W. "International Symposium on Forest Hydrology" 275-290, Pergamon Press Oxford
- Komatsu, H., Shinohara, Y., Kume, T., Otsuki, K. (2008) Relationship between annual rainfall and interception ratio for forests across Japan. *Forest Ecology and Management* **256**: 1189–1197. doi: 10.1016/j.foreco.2008.06.036
- Uchida, T., Asano, Y., Ohte, N., Mizuyama, T. (2003) Seepage area and rate of bedrock groundwater discharge at a granitic unchanneled hillslope. *Water Resources Research*, 39. doi: 10.1029/2002WR001298.
- Padilla, C., Onda Y., Iida, T., Takahashi, S., Uchida, T. (2014) Characterization of the groundwater response to rainfall on a hillslope with fractured bedrock by creep deformation and its implication for the generation of deep-seated landslides on Mt. Wanitsuka, Kyushu Island. *Geomorphology*, 204. 444-458. doi: 10.1016/j.geomorph.2013.08.024
- 谷誠 (2013) 森林の保水力はなぜ大規模な豪雨時にも発揮されるのか? —その2 森林の取り扱いから考える—. *森林科学* 67, 26-31. doi: 10.11519/jjsk.67.0_26