

問 03-1	間伐の実施は水源涵養機能の発揮にどのような影響を与えるか	
答	<p>良好に実施された間伐により、降水遮断量が減少し森林の貯水量が増加するなど当該森林の水源涵養機能の発揮に対して良い影響をあたえるという調査結果が多数報告されている。</p> <p>間伐の実施による水源涵養機能への影響は、間伐前の林分および林内環境の状態に関連している。とくに植栽後に保育施業の実施を行っていないスギやヒノキの人工林では、立木密度が高く、林内の光環境が十分ではなく、林床植生がほとんどみられない状況となる。立木密度が高い場合には、樹冠遮断量も多くなることから、降雨によってもたされた水は、遮断され、土壌への供給量は減少する。間伐を実施することにより、樹冠遮断量の減少、および林分としての蒸発散量の減少を通じて、土壌への水供給量の増加が期待できる（根拠①）。流域全体として蒸発散量の減少していることも確認されている（根拠②）また、間伐により、林床の光環境が改善される場合、土壌の浸透能が増加し、土壌中への水移動量が増加する（根拠③）。</p> <p>このような間伐による林分の水移動過程の変化は、流域の水流出量の変化をもたらす。伐採率 50%の間伐を実施した場合、土壌の攪乱を最小限に抑制すると、基底流の増加が確認された事例がある（資料④）。</p> <p>一方で、林道や作業道などの設置を行うと、洪水流出の増加をもたらす可能性がある（根拠⑤）。また、酸素の安定同位体による水の貯留時間の解析結果から、間伐を行った流域の水は、土壌中に長く貯留される傾向があることが示されている（根拠⑥）。</p> <p>国内と海外における間伐が水流出量におよぼす影響をとりまとめた結果によると、間伐率の増加より、水流出量の増加が大きくなることが確認された（根拠④）。ただし、間伐による水流出量の増加は、皆伐によるものや部分的な皆伐（群状伐採）などよりも小さい傾向がある。</p> <p>間伐による、水源涵養機能の影響は、間伐前の林分状態により異なる事が予想されること、また、影響の継続時間は、間伐後の森林状態によることなどが考えられるが、これらの点については、情報が整理されていない。</p>	
根拠 (文献番号)	知見	データ等
① (51)	<p>立木密度と遮断率の間に正の相関を見出した。</p> <p>発表年：2007／著者：小松光／掲載誌：日本森林学会／タイトル：日本の針葉樹人工林における立木密度と遮断率の関係 10113</p>	図- 1
② (76)	<p>短期水収支法の解析により、間伐前より蒸発散量は約 17%減少した</p> <p>発表年：2013／著者：久保田ほか／掲載誌：日本森林学会／タイトル：常陸太田試験地における間伐による蒸発散量の変化</p>	図- 2

③ (3460)	ヒノキ人工林斜面における浸透能試験の結果、林床植生の量と浸透能に有意な関係が見いだされた。	図-2 林床植生と浸透能の関係
	発表年：2013／著者：平岡真合乃／掲載誌：／タイトル：ヒノキ人工林における浸透能に対する下層植生の影響	
④ (3461)	伐採や施業面積と年水流出量の変化をとりまとめた一覧図がある。	図8（各地の施業面積と水流出量のとりまとめ図）
	発表年：2013／著者：Dung ほか／掲載誌：Journal of Hydrology／タイトル：Runoff responses to forest thinning at plot and catchment scales in a headwater catchment draining Japanese cypress forest	
⑤ (3462)	強度列状間伐により水流出観測の結果、施業後にピーク流出が増加したことが確認された	図4 施業前後のピーク流出量の変化
	発表年：2015／著者：Dung ほか／掲載誌：Journal of Hydrological Processes／タイトル：Peak flow responses to strip thinning in a nested, forested headwater catchment	
⑥ (3463)	安定同位体による解析結果から、間伐を行った流域では、土壌中の水貯留量が大きいことが確認された	図10 林床植生被覆による新しい水比の変化
	発表年：2010／著者：五味高志 ほか／掲載誌：Journal of Hydrological Processes／タイトル：Evaluation of storm runoff pathway in steep nested catchments draining a Japanese cypress forest in central Japan: A hydrometric, geochemical, and isotopic approaches	

問 03-2	枝打ちの実施は水源涵養機能の発揮にどのような影響を与えるか	
答	<p>枝打ちは樹冠構造を変化させることから、林冠の貯留量や遮断蒸発量に変化をもたらす可能性はあるが、枝での貯留量の変化が土壌中への浸透に影響するかについては、研究事例が乏しく、今回調査した範囲において根拠とする有力な論文は見当たらなかった。</p> <p>なお、実験的な大竹らの(2007)の研究(根拠①)において、スギとヒノキを対象とした実験が行われており、枝下までの距離が増加することによって、樹冠への貯留量が増加することが示されている。とくに、スギ林ではヒノキ林より20%程度、貯留量の効果が大きいことが示されている。</p> <p>また、従来の研究では、樹冠遮断の量は立木密度(根拠②)や樹冠の面積(根拠③)などと関連しているとの報告もあるが、枝下高が及ぼす影響についての実測事例はない。</p>	
根拠 (文献番号)	知見	データ等
① (6)	<p>枝下までの距離が増加することによって、樹冠への貯留量が増加する。</p> <p>スギ林ではヒノキ林より樹冠貯留の効果が大きい。</p>	<p>図4 枝貯留量と枝長との関係</p>
<p>発表年：2007／著者：大竹奈津子他2名／掲載誌：水文水資源学会誌／タイトル：樹形モデルを用いたスギ・ヒノキの枝貯留容量の推定</p>		
② (51)	<p>立木密度と遮断率の間に正の相関を見出した。</p>	<p>図-1</p>
<p>発表年：2007／著者：小松／掲載誌：森林学会誌／タイトル：日本の針葉樹人工林における立木密度と遮断率の関係</p>		
③ (3459)	<p>林冠の面積が遮断量に影響している</p>	<p>図5</p>
<p>発表年：2008／著者：鳥羽ほか／掲載誌：Hydrological Processes／タイトル：Factors affecting rainfall interception determined by a forest simulator and numerical model</p>		

問 03-3	皆伐の実施は水源涵養機能の発揮にどのような影響を与えるか	
答	<p>皆伐後の水源涵養機能の変化は、短期的な水流出量の増加として報告されているが、長期的には皆伐前後で水流出量の変化はないという結果が示されている。</p> <p>皆伐が水源涵養機能におよぼす影響の評価では、短期的な影響と長期的な影響が考えられる。</p> <p>短期的な影響では、皆伐による樹冠遮断水量の減少と蒸発散量の減少は、土壌中への水貯留量の増加をもたらす。これらの増加分が流量の増加として観測されている事例もある（根拠⑤）。例えば、皆伐により31%の年流出量が増加した事例が報告されている（根拠①）。ただし、皆伐後の水流出量の増加については、増加する場合と増加しない場合、また増加量が事例によって異なる等の結果が取りまとめられている。特に、流域全体の皆伐のみならず、部分的に伐採等する施業面積の増加が、年流出量の増加をもたらす事例が確認されており、伐採等の施業面積が大きいほど増加量が大きくなる傾向が示されている（根拠②）。</p> <p>一方で、皆伐が与える水源涵養機能への影響は、伐採後の林床面からの蒸発量の増加や、林床植生の蒸散量の増加等の影響も考えられるが、これらの研究事例や成果については十分なものがない。</p> <p>また、皆伐による樹冠遮断量の変化は、降雨のみならず、積雪地域においては、積雪量の増加をもたらす。積雪寒冷地域においては、積雪量が、渇水期の流量に影響を及ぼしている。皆伐後の積雪量の増加にともなって、渇水流量の増加の事例は海外では根拠③、国内では、志水（1990：文献10323）が報告している。また、積雪量の増加は、融雪期間の降雨による洪水流出量の増加をもたらす可能性があり、水源涵養機能へのプラスとマイナスの効果がある。</p> <p>皆伐の影響が、長期的な水源涵養機能に及ぼす影響については、伐採後30年後の調査では、水流出量には伐採の影響は確認されなかった（皆伐前の状況と同じであった）と報告されている（根拠④）。</p>	
根拠 (文献番号)	知見	データ等
① (3469)	<p>オレゴン州の Needle Branch における観測結果から、皆伐後の年流出量を確認した。ただし部分伐採では、6%の増加であった。</p> <p>発表年：2008／著者：Stendnick J.／掲載誌：Hydrological and biological responses to forest practices／タイトル：of timber harvesting on streamflow in Alsea Watershed Study</p>	<p>図2. 6</p>
② (3461)	<p>伐採や施業面積と年水流出量の変化をとりまとめた一覧図がある。</p> <p>発表年：2003／著者：Dung ほか／掲載誌：Journal of Hydrology／タイトル：Runoff responses to forest thinning at plot and catchment scales in a headwater catchment draining Japanese cypress forest</p>	<p>図8（各地の施業面積と水流出量のとりまとめ図）</p>

③ (3458)	林分の胸高断面積が積雪量に及ぼす影響の評価から、流出量への影響を検討した。	図 7 や図 8
	発表年：1987／著者：Troendle CA／掲載誌：USDA FS Reseach Paper RM-274／タイトル：The potential effect of partial cutting and thinning on streamflow from the subalpine forest	
④ (3470)	30 年後の対照流域法による解析結果から、流出特性は、皆伐前の状態と同じであった。	図 9.4 など
	発表年：2008／著者：Stendnick J.／掲載誌：Hydrological and biological responses to forest practices／タイトル：Long-term streamflow changes following timber harvesting	
⑤ (18)	伐採後の年流出量は増加 伐採によって基底流出量が増加	図 - 7
	発表年：2005／著者：真坂英一／掲載誌：森林学会誌／タイトル：新第三紀層流域における 70 年生スギ・ヒノキ林伐採による年流出量の変化	

問 03-4	皆伐跡地への植栽の実施は水源涵養機能の発揮にどのような影響を与えるか	
答	<p>皆伐跡地への植栽が水源涵養機能の発揮に及ぼす影響に関する根拠資料は存在しない。</p> <p>植栽木も小さく、樹冠遮断、蒸発散量などが小さいことは予想される。ただし、水源涵養機能の発揮で重要となる、林床植生の生育がある場合は、土壌の浸透能は十分であると考えられる。</p> <p>一方で、植栽に伴って、かきおこしなどを行った場合は、浸透能を含めた土壌特性などの変化も考えられる。</p> <p>また、植栽の実施による水源涵養機能の発揮への影響は、対象とする時間的スケールによっても異なる(根拠①)。植栽がもたらす立木密度の変化、樹種構成の変化、林床植生量などは、水源環境機能の評価では重要になるものの、「植栽そのもの実施」がもたらす影響ではなく、「植栽後の植生変化」がもたらす影響として評価されるべきである。</p>	
根拠 (文献番号)	知見	データ等
① (3470)	<p>30年後の対照流域法による解析結果から、流出特性は、皆伐前の状態と同じであった。</p> <p>発表年:2008/著者:Stendnick J./掲載誌:Hydrological and biological responses to forest practices/タイトル:Long-term streamflow changes following timber harvesti</p>	図 9.4 など

問 03-5	人工林化は水源涵養機能の発揮にどのような影響を与えるか	
答	<p>人工林化された場合、伐採直後の基底流量の増加などが見れるが、育林保育過程の作業により影響が異なっており、長期的な観測が必要である。</p> <p>皆伐や間伐により年流出量が増加するとなどの事例は、確認されており、それらは、施業面積が大きいほど、増加量が大きくなる傾向があることが示されている（根拠①）。その後、伐採後に基底流出量が増加するなどの報告もある（根拠⑥）。一般的に、このような施業後の植生変化については、伐採後3から5年で、流量変化が伐採前の状態になることが報告されている（根拠②）。このことから、水源涵養機能そのものは、施業後とその後の林分変化により、一時的に流量増加などの変化をもたらす。</p> <p>ただし、人工林化などを含めて、施業による、林道や作業道は浸透能が低く（根拠③）の設置により浮遊土砂の流出（根拠④）し、数年間の濁水の増加、洪水流量の増加なども確認される事例（根拠⑤）もあり、このような育林や保育などの森林基盤整備状況により、人工林化に伴う水源涵養機能への影響は異なる。また、これらの影響については、人工林化にともなう時間経過などにもよるが、長期的な観測事例はない。</p>	
根拠 (文献番号)	知見	データ等
① (3461)	<p>間伐による年流出量への影響は皆伐よりも小さい。</p> <p>伐採や施業面積と年水流出量の変化をとりまとめた一覧図がある。</p> <p>発表年：2013／著者：Dung 他／掲載誌：Journal of Hydrology／タイトル：Runoff responses to forest thinning at plot and catchment scales in a headwater catchment draining Japanese cypress forest</p>	<p>図4 図8（各地の施業面積と水流出量のとりまとめ図）</p>
② (3467)	<p>アメリカ東海岸における森林管理後の植栽が、水流出におよぼす長期変化を観測</p> <p>発表年：1965／著者：Hebbert／掲載誌：森林学会誌／タイトル：Forest treatment effect for water y</p>	<p>図4や5</p>
③ (3468)	<p>林道プロットの路面地表流流出率は14～21%であり、林道からの総流出量に対して85～89%寄与していた</p> <p>発表年：2014／著者：長塚ほか／掲載誌：Water Resources Research 39, 1168. doi: 10.1029/2001 WR001227, 2003／タイトル：林道路面の浸透能と水流出特性</p>	<p>図4</p>
④ (3464)	<p>新設作業道や作業道の再稼働により、濁水の流出が、流域の浮遊土砂流出に影響を及ぼす。</p> <p>発表年：2016／著者：Nam ほか／掲載誌：Landscape and Ecological Engineering／タイトル：Suspended-sediment responses after strip thinning in headwater catchments</p>	<p>図3 浮遊土砂流出量変化</p>

⑤ (3462)	強度列状間伐により水流出観測の結果、施業後にピーク流出が増加したことが確認された	図4 施業前後のピーク流出量の変化
	発表年：2015／著者：Dung ほか／掲載誌：Hydrological Processes／タイトル：Peak flow responses to strip thinning in a nested, forested headwater catchment	
⑥ (76)	短期水収支法の解析により、間伐前より蒸発散量は約17%減少した	図-2
	発表年：2013／著者：久保田ほか／掲載誌：日本森林学会／タイトル：常陸太田試験地における間伐による蒸発散量の変化	

問 03-6	複層林化は水源涵養機能の発揮にどのような影響を与えるか	
答	<p>複層林化が水源涵養機能に及ぼす影響については、根拠資料が得られていない。</p> <p>複層林化することにより、樹冠構造が変化し、遮断量が変化することが予想される。蒸発散量への変化も予想されるが、複層林における蒸発散量の推定は行われていない。</p> <p>また、除伐などを行うことで、林床植生の回復が期待できるという報告はあるが、これは施業後の一過的な状況であり、複層林化に伴う林分の変化、林床植生状況の継続的な調査を行った事例はない。特に、複層林化への導入樹種により、それらの効果は異なると予想される。いずれにしても、推定の範囲であり、根拠はない。</p> <p>単層林からの複層林への課程での施業が水源涵養機能に及ぼす影響の評価などでは、林床が裸地化した林分では、浸透能が低いことから、施業により浸透能などの増加、洪水流出などの減少などが期待できる。</p> <p>また、これらの林分の変化と水源涵養機能の評価を行うためには、流域観測が重要である。しかし、流域全体が複層林である森林や、複層林化を行う流域の観測などの流域試験による実証データがない。</p> <p>当該分野の研究事例は乏しく、論文は見当たらない。今後、複層林施業の効果検証のための体系的な観測が必要不可欠である。</p>	
根拠 (文献番号)	知見	データ等
—	—	—

問 03-7	高齢級化は水源涵養機能の発揮にどのような影響を与えるか	
答	<p>森林の高齢級化が水源涵養機能の発揮にどのような影響を与えるかについては、直接的な知見は得られていなが、高齢級化した林分構造や林床植生状態などから機能が増進するという推測が可能である。</p> <p>高齢級を 10 級以上と定義すると、多くの研究は、40 年生までの植栽林を対象としており、高齢級林分を対象とした研究はみられない。しかし、高齢級化することにより、樹冠構成や林内日射量が変化して林床に十分な植生が見られる場合、林床植生などに浸透能の保持などは期待できる。高齢級化した林分構造や林床植生状態などから推測することは可能（根拠①）であるものの、直接的な根拠とはならない。</p> <p>高齢級化というテーマでの解析ではないものの、69 年といった長期的なデータを用いて、マツ林から広葉樹林化した流域における蒸発散量の観測結果はある（根拠②）。これらの研究では、蒸発散量の変化を示しているものの、長期データにおける気候変動（温暖化）などの影響の大きさが示されている。すなわち、高齢級化などの長期的な林分変化の観測結果には、気候変動による影響も内在しており、これらを含みながら解析するためには、対照流域法が必要不可欠である。</p>	
根拠 (文献番号)	知見	データ等
① (3466)	<p>構成する樹木の個体のサイズや材積が大きくなるのみではなく、群集組成や林分構造に大きな違いが起ころうる。</p> <p>発表年：2005／著者：鈴木和次郎ほか／掲載誌：森林学会誌／タイトル：高齢級化に伴う人工林の発達様式</p>	図 2 や図 3
② (3465)	<p>放置されて広葉樹林が成長してきた流域では、年蒸発散量は、平均気温によって増減。 植生成長によって増加する傾向あり。</p> <p>発表年：2012／著者：谷・細田／掲載誌：水文水資源学会誌／タイトル：長期にわたる森林放置と植生変化が年蒸発散量に及ぼす影響</p>	図 3

<p>問 04</p>	<p>水源涵養機能が高度に発揮される森林とはどのようなものか</p>	
<p>答</p>	<p>水源涵養機能が高度に発揮される森林は、根系の発達が良好であり、下層植生の発達が十分であり、落葉・落枝などの有機物の供給が豊富な森林である。</p> <p>森林の水源涵養機能は、洪水緩和機能（大雨が降った時の急激な増水を抑え森林の役割）、水資源貯留機能（しばらく雨が降らなくても流出が途絶えないようにする役割）、水質浄化機能（雨水に含まれる窒素化合物などを浄化する役割）からなる。より広い意味では、水質浄化を含む(根拠①)。</p> <p>これらの機能は、森林の保水力が大きく、浸透した雨水が土壤中に長く貯留されると高まる。森林の保水力は、土壌・地質などの立地環境と樹種・樹齢などの森林状態によって大きな影響を受ける。</p> <p>水源かん養機能を高める望ましい森林の条件は、①土壌の崩壊を防ぎ孔隙の増加を促すことから、根系の発達が良好であること、②土壌の流出を防止して浸透を高めることから、下層植生の発達が十分であること（根拠4）、③土壌動物や土壌微生物の活動を盛んにすることから、落葉・落枝などの有機物の供給が豊富であること、などが挙げられる(根拠②)。</p> <p>多様な根系の発達には、深根性（アカマツ、スギ、クヌギ、コナラなど）と浅根性（ヒノキ、カラマツ、ブナ、シラカシなど）の樹種から森林が構成されることが重要である。間伐などの森林施業を適切に行えば、落葉・落枝が供給され下層植生が発達するため土壌が保全される。とくに過密になっている人工林では、日光が入らないため下層植生の発達が悪いので、除・間伐や枝打ちを行い、林内へ光を入れることが非常に重要である。このことは、森林の蒸発散にも密接に関連するが、林地保全の点からも必要である(根拠②)。</p>	
<p>根拠 (文献番号)</p>	<p>知見</p>	<p>データ等</p>
<p>① (5488)</p>	<p>・森林の水源涵養機能は、洪水緩和、水資源貯留、水質浄化からなる。</p>	<p>全文</p>
<p>発表年：2011／著者：森林総合研究所／掲載誌：森林総研 HP 森林の水の謎を解く／タイトル：Q1-6 森林の水源かん養機能とはどのようなことですか（水源かん養）</p>		
<p>② (5489)</p>	<p>・下層植生と発達、落葉・落枝の供給、根系の発達の三点が大切</p>	<p>図1 水源かん養機能を高める森林の概念図など</p>
<p>発表年：2011／著者：森林総合研究所／掲載誌：森林総研 HP 森林の水の謎を解く／タイトル：タイトルQ4-6 水源かん養機能はどのようにして高めるのですか（望ましい森林）</p>		

問 05-1	地種（裸・草・森）の違いは水資源貯留機能の発揮にどのような影響を与えるか	
答	<p>森林における水資源貯留は雨水が土壌に浸透して孔隙に一時的に貯留される水文現象であり、それは浸透能と保水能を指標に定量評価されている。その結果、森林の水資源貯留機能は草地や裸地より高いことが示されている。</p> <p>浸透能は散水型浸透計により野外測定し、保水能は土壌試料の孔隙解析により推定したものである。しかし、それらの結果は林分を単位とした評価で、必ずしも森林流域試験の結果と一致しない場合もある。</p> <p>森林土壌に一時的に貯留された雨水（土壌水分）は、鉛直浸透して地下水涵養や基底流出量として流出する水分と、樹木根系より吸収されて蒸散する水分とがある。土壌水分を $p F$（土壌中の水が毛管力により引き付けられる強さの程度を示す数値で、$p F 2.0$ は水柱 100 cm に相当する吸引力）により重力水と毛管水に区分して、森林土壌の保水性・透水性を静的に評価する研究事例が多い。近年、飽和・不飽和浸透理論に基づいて、土壌の保水性・透水性ならびに降雨強度影響を動的に評価する方法も提案されている（根拠①）。ここでは既存の静的評価を中心に記述する。</p> <p>森林・草地・裸地といった地種の相違が水資源貯留機能に及ぼす影響は、①土壌構造の相違、②蒸発散の相違、という視点から検討する必要がある。</p> <p>①については、森林は A0 層・A 層・B 層・C 層と土壌構造が発達して透水性が高い。草地では表層（0-10 cm）が緻密で透水性は低いが、次・下層（10-40 cm）の透水性は高い（根拠②）。裸地（例えば運動場）では雨滴によって表層土壌が破壊されてクラスト（土膜）が形成されるので、透水性は低く窪地貯留（水溜り）が発生する。土壌の透水性は植被量に依存し、森林>草地>裸地の順となる。</p> <p>②については、蒸発散量（遮断蒸発量・蒸散量）は植物の葉量（バイオマス）に依存し、森林>草地>裸地の順となる。したがって、森林は土壌層への浸透量は多いが、蒸発散による水消費が多くなる。世界各地の森林流域試験の結果によれば、森林は蒸発散による水消費が多いため流出量は少なくなるとされる（根拠③）。</p> <p>森林に期待される役割は、水資源貯留の場である森林土壌の保全である（根拠④）。健全な森林土壌の存在により水資源貯留機能が発揮されるので、年間降水量の多いわが国では森林が最も効率的な土地利用と考えられる。</p>	
根拠 (文献番号)	知見	データ等
① (10)	<p>S の値は、土層の長さ、降雨強度ならびに土壌の水分特性によって決まり、不飽和浸透過程を特徴づける土壌の水分拡散係数と良い対応関係を持っている。</p> <p>発表年：1999／著者：小杉賢一朗／掲載誌：日本林学会誌 81 (3)、226-235 ／タイトル：森林土壌の雨水貯留能を評価するための新たな指標の検討</p>	図-1.貯留量指標 S の定義

② (5471)	<p>草地では表層 (0-10 cm) が緻密で透水性は低い、次・下層 (10-40 cm) の透水性は高い。</p>	<p>表-2.四国・北条の風化花崗岩土の物理特性</p>
	<p>発表年：1993／著者：佐藤幸一／掲載誌：日草誌 39 (3)、349-358 / タイトル：草地土壌の孔隙構造に関する研究</p>	
③ (5472)	<p>森林で覆われた流域は、背丈の低い農作物や草地の流域より蒸散量が多く、その結果として流出量が少なくなる。</p>	<p>.第2章 森林と水の「森林は流出量を増加させるか? (41-43 頁)」に記載された本文より引用</p>
	<p>発表年：2005／著者：イアン・カルダー／掲載誌：「水の革命」(蔵治光一郎・林裕美子監訳)、築地書館、269 頁／タイトル：森林は流出量を増加させるか?</p>	
④ (5473)	<p>水源涵養機能は森林土壌 (A₀層を含む) の存在により成立するものである。水源林は森林土壌を保全することによって、水源涵養機能の発揮を期待するものである。</p>	<p>「2.水源林の機能」の本文から引用</p>
	<p>発表年：2015／著者：藤枝基久／掲載誌：山林 1575、2-10 第 904 号／タイトル：水源林を考える</p>	

問 05-2	優占樹種の違いは水資源貯留機能の発揮にどのような影響を与えるか	
答	<p>優占樹種の相違が水資源貯留機能に及ぼす影響は、保水能が同じであれば蒸発散量の大小に依存する。</p> <p>保水能は土壌構造・土壌深などの土壌条件（土地の持っているポテンシャル）に依存するので、樹種・林齢などの森林条件の影響は小さい。しかし、ヒノキ人工林では樹冠が閉鎖した後、下層植生がほとんど消滅して裸地化し、土壌侵食が発生する場合もある。土壌侵食によるA0層およびA層上部の欠落は透水性・保水性の低下を招くので、その結果として水資源貯留機能は低下する。三重県内のヒノキ林地の浸透能測定から、下層植生の消失は浸透能の低下をもたらすことが実証された（根拠①）。広葉樹林と針葉樹林の雨水貯留量（S）が、飽和・不飽和浸透理論に基づいて動的に評価された。渇水地域上流森林整備指針査定調査モデル流域の土壌データを用いた結果では、広葉樹林（常緑広葉樹・落葉広葉樹）のSは針葉樹林（スギ・ヒノキ複層林・ヒノキ林）より大きい傾向を示した。なお、Sは降雨強度の増加に伴い増加する飽和曲線を描くこと、地質の影響を強く受けるとされる（根拠②）。</p> <p>以上の結果は林分を単位とした機能評価で、その結果が流域からの流出量にどのような影響を及ぼすかは明らかにされていない。</p> <p>樹冠遮断試験の結果を総括すると、針葉樹林の樹冠遮断量は広葉樹林より大きいとされる。落葉広葉樹林の樹冠遮断量は落葉期の降水遮断（降雪遮断を含む）は少ないので常緑広葉樹より小さい。近年のフラックス計測の発達により、森林の蒸発散量は遮断蒸発量と蒸散量に分離して評価することが可能となった。その結果、①蒸発散量に占める蒸散量の割合は遮断蒸発量より大きい、②暖候期の蒸散量が大きな割合を占め、その蒸散量は落葉広葉樹林>常緑広葉樹林>針葉樹林の順である、ことが指摘された（根拠③）。しかし、既存の森林流域試験の結果では、針葉樹林流域の年蒸発散量が広葉樹林流域より大きいようである（根拠④、⑤）。</p> <p>林分規模で得た最新の知見をどのようにして、流域規模の水文現象へ反映するかという「スケールアップ」の課題が残されている。</p>	
根拠 (文献番号)	知見	データ等
① (5474)	<p>最終浸透能の平均値は、下層植生ありが 353.0 mm/h で、下層植生なしが 218.5 mm/h であった。</p> <p>発表年：1995／筆著者：湯川典子ほか／掲載誌：日林誌 77 (3)、224-231／タイトル：ヒノキ林地において下層植生が土壌の浸透能に及ぼす影響(1) 散水型浸透計による野外実験</p>	表-2. 散水型浸透計による最終浸透能
② (59)	<p>Sによる評価の結果、いずれの調査地でも広葉樹林の雨水貯留量が針葉樹林よりも大きくなる傾向が認められた。</p> <p>発表年：2001／著者：服部重昭ほか（分担者：小杉賢一朗）／掲載誌：水利科学 45 (4)、48-74／タイトル：森林の水源かん養機能に関する研究の現状と機能の維持・工場のための森林整備のあり方（Ⅱ）渇水地域上流森</p>	図IV-5 降雨強度Pと土壌の雨水貯留指標Sの関係

	林整備指針策定調査報告	
③ (32)	① 蒸発散量に占める蒸散量の割合は遮断蒸発量より大きい。 ② 暖候期の蒸散量が大きな割合を占める。	図-4.広葉樹林、針葉樹林の暖候期の α の値によるデータの相対頻度分布
	発表年：2005／著者：小松 光／掲載誌：日本森林学会誌 87 (2)、170-185 ／タイトル：森林の特性と蒸発散量の関係	
④ (46)	1969-79年のクロマツ幼齢林は、1992-2001年の常緑樹を高木層とする広葉樹林に比べて、冬の遮断蒸発量が大きく、夏の蒸散量が大きいため、1年中にわたって月流出量を小さくする。	図-9.南谷がクロマツ幼齢林の場合と広葉樹林の場合における月流出の北谷と南谷の比較
	発表年：2012／著者：谷 誠ほか／掲載誌：水文・水資源学会誌 25 (2)、71-88／タイトル：長期にわたる森林放置と植生変化が年蒸発散量に及ぼす影響	
⑤ (2)	① 2008年の流出量は広葉樹林流域 1434.9 mm、針葉樹林流域 1187.3 mmであった。 ② 2009年の流出量は広葉樹林流域 2415.2 mm、針葉樹林流域 2050.9 mmであった。	図-2.2008年および2009年の水収支
	発表年：2011／著者：久田重太ほか／掲載誌：農業農村工学会論文集 271、1-7／タイトル：落葉広葉樹林流域と常緑針葉樹林流域における水収支特性の比較	

問 05-3	林相構造（単・複）の違いは水資源貯留機能の発揮にどのような影響を与えるか	
答	<p>林相構造の相違が水資源貯留機能の発揮に及ぼす影響は年蒸発散量の相違として検出できるが、それを実証する水文データは見られない。実証するためには、流域全体を単層林と複層林とする対照流域法により森林流域試験を行う必要がある。</p> <p>林分を単位とした皆伐が表層土壌に及ぼす影響を報告する文献は多い。スギ・ヒノキ人工林における土壌調査の結果では、皆伐後は表層土壌の攪乱により透水性が大きく低下した（根拠①）。ヒノキ林の皆伐後に、A層では堅果状構造が出現し、団粒破壊による小団化が進んで透水性は低下した。B層では堅果状構造は出現するが、透水性の変化は見られない。A層で団粒破壊が起こるのは、伐採後に土壌の表層部で乾燥化が進むために、スレーキング（乾燥・湿潤を繰り返し与えると細粒化してボロボロになる現象）が発生するためと推測された（根拠②）。</p> <p>一方で、複層林施業が表層土壌に及ぼす影響を記載した文献は少ない。ヒノキ林を対象に、皆伐後に植栽した「新植林」、「複層林（上木 75 年生、下木 11 年生）」、複層林の上木を伐採した「下木林」の 3 林分で土壌孔隙を比較した。その結果、①凸地形の全孔隙量は、複層林＞下木林＞新植林の順であった。②凹地形の全孔隙量は、複層林＝下木林＞新植林の順であった。これより、皆伐地以外は表層土壌への攪乱の影響は軽微とした。76 年生ヒノキ林「対照区」、その皆伐跡地「皆伐区」、50%間伐して樹下植栽した複層林「複層林区」の 3 林分で土壌孔隙を比較した。その結果、①凸地形の孔隙率は、対照区＞複層林区＞皆伐区の順であった。②凹地形の孔隙率は、対照区＞複層林区＞皆伐区の順であった。複層林施業が表層土壌に及ぼす影響は小さいとした。ただし、施業が土壌に及ぼす影響の度合いは地形により異なり、凸地形では施業の影響が明瞭に出るが、傾斜の緩い林地では施業に伴う土壌孔隙の劣化は起こり難いとした（根拠③）。なお、この調査結果は、林分を対象に表層土壌の物理性の変化を記載したもので、具体的に保水能にどのような影響を及ぼすかを定量評価したものではない。</p> <p>以上のように表層土壌の物理性の変化についての調査事例はあるが、蒸発散についての文献は見られなかった。</p>	
根拠 (文献番号)	知見	データ等
① (31)	<p>スギ・ヒノキ人工林における土壌調査の結果では、皆伐後は表層土壌の攪乱により透水性が大きく低下する。</p> <p>発表年：1982／筆著者：小林繁男／掲載誌：ペドロジスト 26 (2)、150-163 ／タイトル：森林の皆伐に伴う土壌の変化</p>	<p>図 12. 皆伐前後における A 層の透水性の変化</p>
② (3)	<p>① A層では堅果状構造が出現し、団粒破壊による小団化が進んで団粒構造が消失して透水性は低下した。B層では堅果状構造は出現するが、透水性の変化は見られない。</p> <p>② A層で団粒破壊が起こるのは、伐採後には土壌の表層部で乾燥が進むので、スレーキングが発生するためと推測した。</p>	<p>博士論文の要旨から引用</p>

	発表年：2014／著者：小野 裕／掲載誌：信州大学博士論文（乙第14号） ／タイトル：森林伐採後の団粒破壊に伴う土壌物理性変化に関する研究	
③ (5475)	① 凸地形の全孔隙量は、複層林＞下木林＞新植林の順であった。凹地形の全孔隙量は、複層林≒下木林＞新植林の順であった。 ② 凸地形の孔隙率は、対照区＞複層林区＞皆伐区の順であった。凹地形の孔隙率は、対照区＞複層林区＞皆伐区であった。	図IV-8 施業の異なるヒノキ林の土壌孔隙組成、 図IV-9 天岳良ヒノキ林の土壌孔隙組成
	発表年：2001／著者：服部重昭ほか（分担者：荒木 誠）／掲載誌：水利科学 45（3）、1-40／タイトル：森林の水源かん養機能に関する研究の現状と機能の維持・工場のための森林整備のあり方（I）渇水地域上流森林整備指針策定調査報告	

問 05-4	<p>齢級の違いは水資源貯留機能の発揮にどのような影響を与えるか</p>	
<p>答</p>	<p>林齢（又は齢級）が水資源貯留機能に及ぼす影響の要因は、年蒸発散量の大小であり、年蒸発散量は植栽後 25 年頃に最大値を示し、それ以降は緩やかに減少することが知られている（根拠①）。</p> <p>森林の蒸発散量は、遮断蒸発量・蒸散量・林床蒸発量から成り、その量は蒸散量>遮断蒸発量>林床蒸発量の順とされる。森林流域試験では流域水収支により蒸発散量として求められる。一方、林地では蒸散量と遮断蒸発量を個別に求めることができる。蒸散量は観測塔に気象測器を設置して、林内と樹冠上部の飽差（ある温度と湿度において、水蒸気が飽和するまでにどの程度の水蒸気が必要であるか）から推定する。遮断蒸発量は林外雨量と林内雨量の差から求める。しかし、林分で測定された蒸散量と遮断蒸発量の和は、必ずしも森林流域試験の蒸発散量と一致するものではない。</p> <p>蒸発散量は林齢に依存することが海外の研究事例で指摘される。その代表例に「Kuczera 曲線」がある。オーストラリア南部のユーカリ林流域において、山火事後の森林再生が年流出量に及ぼす影響が検討された。その結果、年流出量は山火事後の森林の成長に伴って減少し、樹齢 25 年頃に最小値を示した後、林齢の増加に伴って緩やかに増加した。これは成長の旺盛な若齢林では蒸発散量は増加するが、高齢林では樹木の本数が少なくなつて蒸発散量が減少するためとされた。同様な傾向は、南アフリカのマツ林とユーカリ林でも指摘されている（根拠①）。わが国では、スギ・ヒノキ人工林を対象に葉面積指数（LAI）および LAI に関わる林分構造と蒸発散量との関係を林齢を基軸に検討された。すなわち、林齢 10-300 年の 15 林分について、プラント・キャノピー・アナライザーを用いて LAI を測定し、LAI を主要なパラメータとする蒸発散モデルで年蒸発散量を算出した。その結果、LAI の測定値と年蒸発散量の計算値とはいずれも林齢 10-20 年で最大値を示し、その後は緩やかに減少した（根拠①）。しかし、LAI から年蒸発量の推定が可能であっても、それが年流出量の予測にどのように反映できるかは明らかにされていない。</p> <p>林齢が年蒸発散量に及ぼす影響は前述のようであるが、保水能に及ぼす影響は明らかにされていない。森林総合研究所釜淵試験地の長期水文観測（1939-2001 年）の結果では、地下水流出量に相当する渴水流出量（276-355 番目の積算値）の経年変化は 1 号沢では増加傾向を、2 号沢では減少傾向を示した。1 号沢（3.06 ha）は広葉樹主体の針広混交林で、2 号沢（2.48 ha）はスギ人工林を主体の針広混交林の近接する小流域である（根拠②）。この結果は、樹種・林齢の相違による蒸発散量の大小という森林条件によるものか、地形・土壌深の相違という土壌条件によるものは明らかにされていない。</p>	
<p>根拠 (文献番号)</p>	<p>知見</p>	<p>データ等</p>
<p>① (34)</p>	<p>① 蒸発散量は林齢に依存することが指摘されている。その代表例は Kuczera 曲線である。 ② LAI の測定値と蒸発散量の計算値は林齢 10-20 年で大きな値を示し、その後は緩やかに減少した。</p>	<p>図 8.ユーカリ林流域の流出量の林齢依存性 図 13. LAI の林齢依存性</p>
<p>発表年：2003／著者：村上茂樹／掲載誌：水利科学 46 (6)、1-28／タイト</p>		

	ル：森林からの蒸発散と林齢・葉量・林分構造との関係	
② (5476)	<p> 渇水流出量（276-355 番目の積算値）の経年変化は 1 号沢では増加傾向を、2 号沢では減少傾向を示した。 </p>	<p> 図-4.1-3 号沢における流況値の変動傾向 </p>
	<p> 発表年：2005／著者：細田育弘ほか／掲載誌：第 6 回水資源シンポジウム論文集、241-546／タイトル：釜淵森林理水試験地 60 年間の水流出年々変動 </p>	

問 05-5	地種（裸・草・森）の違いは蒸発散の発揮にどのような影響を与えるか	
答	<p>森林の蒸発散は遮断蒸発・蒸散・林床蒸発からなる。森林は葉量（バイオマス）が多いので、草地・裸地より年蒸発散量は多くなる。</p> <p>森林流域への降水（林外雨）の一部は、樹木の葉・枝・幹に付着する（降雨遮断）。そのため、森林内では地表面に到達する雨水（林内雨）は林外雨より少ない。林内雨は樹冠通過雨と樹幹流の和である。ここで、樹冠通過雨とは樹冠の隙間を通過して地表面に直接届く雨水のことであり、樹幹流とは枝葉によって遮断された雨水が樹木の幹を伝わって地表面に届くものである。樹冠や幹に貯留された雨水は、地表面に届かず大気中に蒸発する（遮断蒸発）。森林は樹木の光合成により気孔から水蒸気を大気中に放出している（蒸散）。そのため、森林で覆われた流域は、背丈の低い農作物や草地の流域より年蒸発散量が多く、その結果として年流出量が少なくなるとされる（根拠①）。</p> <p>森林土壌から水分が蒸発（林床蒸発）するが、林地がリター層で被覆されていれば蒸発は抑制されて少ない（根拠②）。</p> <p>森林流域試験では蒸発散の 3 成分を分離して測定することはできない。そのため、森林流域試験では流域水収支により年蒸発散量を推定している。水収支式は、「年降水量＝年流出量＋年蒸発散量±流域貯留量の変化」である。ここで、流域貯留量の変化が小さい流域（他流域への漏水や深部浸透が軽微な流域）では、年蒸発散量は年降水量と年流出量の差として求められる。水収支式の適用に際しては、基底流出量の変動の最も少ない時期を水年の境とする必要がある（根拠③）。森林流域試験では、森林を伐採して（流域処理）、伐採前後の流域水収支の差から森林の年蒸発散量を推定する。同様に、草地・裸地の年蒸発散量は水文観測の結果から水収支式で推定する。</p> <p>地種別の年蒸発散量は、森林＞草地＞裸地の順で、その理由は遮断蒸発量と蒸散量の相違から説明できる。</p>	
根拠 (文献番号)	知見	データ等
① (5473)	<p>森林で覆われた流域は、背丈の低い農作物や草地の流域より蒸散量が多く、その結果として流出量が少なくなる。</p> <p>発表年：2005／著者：イアン・カルダー／掲載誌：「水の革命」（蔵治光一郎・林裕美子監訳）、築地書館、269 頁／タイトル：森林は流出量を増加させるか？</p>	<p>第 2 章 森林と水の「森林は流出量を増加させるか？(41-43 頁)」に記載された本文より引用</p>
② (29)	<p>鉦質土壌からの蒸発量は、リター堆積量の増加につれて減少する。リター層被覆の影響は、蒸発開始時のリター層内の水分条件により異なる。</p> <p>発表年：1999／著者：佐藤嘉展ほか／掲載誌：日本林学会誌 81 (3)、250-253／タイトル：リター層による雨水遮断と土壌蒸発抑制</p>	<p>図-4. 林床面からの蒸発</p>

<p>③ (46)</p>	<p>年末年始の降水量が少なく水年を暦年と一致させることに問題がない。</p>	<p>「6.貯留量変動を考慮した年蒸発散量の推定方法」の本文より引用</p>
	<p>発表年：2012／著者：谷 誠ほか／掲載誌：水文・水資源学会誌 25 (2)、71-88／タイトル：長期にわたる森林放置と植生変化が年蒸発散量に及ぼす影響</p>	

問 05-6	優占樹種の違いは蒸発散にどのような影響を与えるか	
答	<p>優占樹種が針葉樹林である流域の年蒸発散量は広葉樹林である流域より多い（根拠①）。</p> <p>森林総合研究所竜の口山試験地の 69 年（1937-2005 年）の水文データを用いて、森林放置と植生変化が年蒸発散量に及ぼす影響を検討した。その結果から、クロマツ人工林は常・落混交広葉樹林よりも年蒸発散量、冬季の遮断蒸発量および夏季の蒸散量が大きいとされた（根拠②）。近年のフラックス計測の発達に伴い、森林の蒸発散量は蒸散量と遮断蒸発量に分けて検討することが可能となった。その結果、年蒸発散量に対して、①蒸散量が遮断蒸発量より大きな割合を占めること、②暖候期の蒸散量が大きな割合を占めること、が指摘された。すなわち、飽和した地表面からの蒸発量を $E_t = \alpha E_e q$ とモデル化し、広葉樹林と針葉樹林の温暖期の蒸散量を求めると、広葉樹林 > 針葉樹林となった。ここで、E_t は蒸散量、$E_e q$ は平衡蒸発量（広大で均質な湿潤面からの蒸発散量をいう）で、係数 α が 1 に近いほど平衡蒸発量に近い蒸散量となる。</p> <p>同様に、常緑広葉樹林と落葉広葉樹林の蒸散量を求めると、落葉広葉樹林 > 常緑落葉樹林となった。針葉樹林は樹高が高いほど α が小さくなる（蒸散量が少なくなる）とした（根拠③）。</p> <p>したがって、係数 α を指標とした温暖期の蒸散量は、落葉広葉樹林 > 常緑広葉樹林 > 針葉樹林の順となる。</p> <p>一方、遮断蒸発量は林内雨量の観測により求まる。樹冠遮断量（I）と林外雨量（P）の関係は直線回帰式（$I = aP + b$）で表され、広葉樹林の傾き（a）は針葉樹林より大きいので、広葉樹林の遮断蒸発量は多いとした。また、降水量 100 mm 以上の大雨（7 回）を含む 60 回の観測結果では、ブナ・ミズナラ天然林がヒノキ人工林より遮断蒸発量が大きかった。その理由は、落葉広葉樹林は下木が多く多段構造になっているためとした（根拠④）。</p> <p>しかしながら、前述の林分単位から得られた蒸散量・遮断蒸発量についての知見は、必ずしも森林流域試験から得られた年蒸発散量の結果と一致するものでない。</p>	
根拠 (文献番号)	知見	データ等
① (5477)	<p>植生が減少するとともに年流出量が増加していく。その順位は針葉樹 > 落葉または常落混交の広葉樹 > 低木類である。</p> <p>発表年：2002 / 著者：大田猛彦・服部重昭監修 / 掲載誌：地球環境時代の水と森、日本林業調査会、221 頁 / タイトル：長期流出と森林のかかわり</p>	<p>図 2-19 植生の減少にともなう年流出量の増加</p>
② (46)	<p>1969-79 年のクロマツ幼齢林は、1992-2001 年の常緑樹を高木層とする広葉樹林に比べて、冬の遮断蒸発量が大きく、夏の蒸散量が大きいために、1 年中にわたって月流出量を小さくする。</p> <p>発表年：2012 / 著者：谷 誠ほか / 掲載誌：水文・水資源学会誌 25 (2)、71-88 / タイトル：長期にわたる森林放置と植生変化が年蒸発散量に及ぼす</p>	<p>図-9.南谷がクロマツ幼齢林の場合と広葉樹林の場合における月流出の北谷と南谷の比較</p>

	影響	
③ (32)	<p>① 蒸発散量に占める蒸散量の割合は遮断蒸発量より大きい。</p> <p>② 暖候期の蒸散量が大きな割合を占める。広葉樹林 $\alpha = 0.82$、針葉樹林 $\alpha = 0.65$ であった。また、常緑落葉樹林 $\alpha = 0.80$、落葉広葉樹林 $\alpha = 0.87$ であった。</p>	<p>図-4.広葉樹林、針葉樹林の暖候期の α の値によるデータの相対頻度分布</p>
	<p>発表年：2005／著者：小松 光／掲載誌：日本森林学会誌 87 (2)、170-185 ／タイトル：森林の特性と蒸発散量の関係</p>	
④ (33)	<p>① 樹冠遮断量 (I) と林外雨量 (P) の関係は、$I = aP + b$ で、広葉樹林の平均値は $a = 0.165$、$b = 1.043$ で、針葉樹林は $a = 0.120$、$b = 1.339$ である</p> <p>② ブナ・ミズナラの天然林がヒノキ人工林より遮断蒸発量が大きかった。</p>	<p>表 1.樹種別の遮断損失雨量の回帰式の常数</p> <p>図 3.降雨 100 mm以上の大雨時の遮断損失率</p>
	<p>発表年：1993／著者：村井 宏／掲載誌：水利科学 271、1-40／タイトル：広葉樹林地、針葉樹林地および草生地の水文特性の比較</p>	

問 05-7	林相構造（単・複）の違いは蒸発散にどのような影響を与えるか	
答	<p>流域規模で単層林と複層林の年蒸発散量を比較検討した研究は無いので、林相構造の相違が蒸発散に及ぼす影響は不明である。</p> <p>概念的には、一斉人工林（幼齡林期と壯齡林期では蒸発散量が異なる）と複層林（壯齡林と幼齡林からなる）の年蒸発散量の差となるが、どの森林段階で試験するかにより結果が異なると推察される。</p> <p>複層林のデータが無いので、天然林に置き換えて記述する。天然林は多様な樹種・林齢により樹冠が複層構造となるが、一斉人工林は樹冠がほぼ単層構造である。降水に対して、複層構造の森林は単層構造より降水を貯留する表面積が大きいので、樹冠遮断量が多くなると考えられる。例えば、降水量 100 mm 以上を含む降雨イベント時の遮断損失率（樹冠遮断量/降雨量）は、ブナ・ミズナラ天然林 15%、ヒノキ壯齡林 10%、ヒノキ幼齡林 9%であった。ヒノキ幼齡林以外は高木層の樹冠がほぼ閉鎖状態にあった。落葉広葉樹林の遮断損失率の高いのは、下木が多く複層構造であるためとされる（根拠①）。</p> <p>林相の相違が流域水収支に及ぼす影響を評価するため、近接する落葉広葉樹林流域（730 ha）と針葉樹林流域（600 ha）で水文観測を行った。針葉樹林流域は 40-50 年生のヒノキ林が流域面積の 75% を占め、残りはブナなどの広葉樹林である。落葉広葉樹林流域はブナ・ミズナラなどの広葉樹林が 77% を占め、残りはスギなどの人工針葉樹林である。短期水収支法による非積雪期（5-10 月）の蒸発散量は、針葉樹林流域 713 mm、広葉樹林流域 557 mm であった。同期間の遮断蒸発量は、針葉樹林流域 365 mm、広葉樹林流域 255 mm であった。この森林流域試験結果では、針葉樹林流域の蒸発散量は広葉樹林流域より多い（根拠②）。</p> <p>このように、林分単位での観測結果と森林流域試験の結果とは、必ずしも一致するものではない。</p> <p>年蒸発散量は林齢に依存して変化するので（詳細は問 05-8 に記載）、その変化量は複層林より単層林が大きいともの推定される。しかし、それを実証する文献は見られなかった。</p> <p>基本的には、全体が単層林の流域と複層林の流域で対照流域法による長期水文観測を行うことである。蒸発散量は葉量に依存するとされるので、定期的に単層林流域と複層林流域で葉量調査を行うことも重要である。</p>	
根拠 (文献番号)	知見	データ等
① (33)	<p>① 樹冠遮断量（I）と林外雨量（P）の関係は、$I = aP + b$ で、広葉樹林の平均値は $a=0.165$、$b=1.043$ で、針葉樹林は $a=0.120$、$b=1.339$ である。</p> <p>② ブナ・ミズナラの天然林がヒノキ人工林より遮断蒸発量が大きかった。</p>	<p>表 1 . 樹種別の遮断損失雨量の回帰式の常数</p> <p>図 3. 降雨 100 mm 以上の大雨時の遮断損失率</p> <p>発表年：1993 / 著者：村井 宏 / 掲載誌：水利科学 271、1-40 / タイトル：広葉樹林地、針葉樹林地および草生地の水文特性の比較</p>

② (2)	① 2008年の降水量は1967.0 mm、流出量は広葉樹林流域1434.9 mm、針葉樹林流域1187.3 mmである。 ② 2009年の降水量は3153.5 mm、流出量は広葉樹林流域2415.2 mm、針葉樹林流域2050.9 mmである。	図-2.2008年および2009年の水収支
	発表年：2011／著者：久田重太ほか／掲載誌：農業農村工学会論文集271、1-7／タイトル：落葉広葉樹林流域と常緑針葉樹林流域における水収支特性の比較	

問 05-8	<p>齢級の違いは蒸発散にどのような影響を与えるか</p>	
答	<p>蒸発散は林齢（又は齢級）により異なり、幼齢林は壮齢林より年蒸発散量が多いとされる。それを検証する方法には、①森林流域試験の長期水文データと植生変化の関係より蒸発散量の変化を推定する、②林齢の異なる林分で蒸発散量の相違を推定する、ものがある。</p> <p>森林総合研究所竜の口山試験地で、植生変化が年蒸発散量に及ぼす影響が検討された。北谷流域（17.27 ha）ではアカマツ伐採後の自然放置 12 年目に、南谷流域（22.61 ha）では山火事後（クロマツを植栽）9 年目とクロマツ枯損後 15 年目に年蒸発散量に急激な増加が認められた。また、南谷ではクロマツ枯損後に常緑広葉樹を主体とした混交林の成長に伴う年蒸発散量の増加が認められた（根拠①）。</p> <p>林齢により年蒸発散量が増えることは海外の森林流域試験からも指摘されている。例えば、南アフリカのユーカリ林では 7-8 年、マツ林では 15-23 年程度で年蒸発散量が最大値を示す。オーストラリアのユーカリ林では約 25 年で最大値を示し、その後の高齢林化に伴って年蒸発散量は緩やかに減少することが指摘された（(Kuczera 曲線：問 05-4 に記載））。</p> <p>わが国では、スギ・ヒノキ人工林の葉面積指数（LAI）および LAI に関わる林分構造と年蒸発散量との関係が林齢を基軸に検討された。すなわち、林齢 10-300 年の異なる地域の 15 林分を対象に、プラント・キャノピー・アナライザーを用いて LAI を測定し、LAI を主要なパラメータとする蒸発散モデルを用いて年蒸発散量を求めた。その結果、LAI の測定値と年蒸発散量の計算値とはいずれも林齢 10-20 年で大きな値を示し、その後は緩やかに減少した。この結果は既存の文献に記載された年蒸発散量とほぼ同じ範囲に分布した（根拠②）。この結果は林齢を異にする林分から得られたものであるが、前述の竜の口山試験地の森林流域試験の結果および Kuczera 曲線とほぼ一致する。</p> <p>また、針葉樹では樹高が高いほど（林齢が高い）、温暖期の蒸散量が少なくなるとの指摘もある（根拠③）。</p> <p>以上の知見から、林齢（又は齢級）は蒸発散に影響を及ぼすと言える。</p>	
根拠 (文献番号)	知見	データ等
① (46)	<p>1969-79 年のクロマツ幼齢林は、1992-2001 年の常緑樹を高木層とする広葉樹林に比べて、冬の遮断蒸発量が大きく、夏の蒸散量が大きいため、1 年間にわたって月流出量を小さくする。</p>	<p>図-9.南谷がクロマツ幼齢林の場合と広葉樹林の場合における月流出の北谷と南谷の比較</p>
<p>発表年：2012／著者：谷誠ほか／掲載誌：水文・水資源学会誌 25 (2)、71-88 ／タイトル：長期にわたる森林放置と植生変化が年蒸発散量に及ぼす影響</p>		
② (35)	<p>① LAI の測定値と蒸発散量の計算値とはいずれも林齢 10-20 年で大きな値を示し、その後は緩やかに減少した。</p> <p>② この結果は文献に記載された蒸発散量とほぼ同じ範囲に分布した。</p>	<p>図-3 蒸発散量と樹冠遮断量の林齢依存性 図-4.文献値による LAI の林齢依存性</p>
<p>発表年：2002／著者：村上茂樹／掲載誌：水文・水資源学会誌 15 (5)、461-471 ／タイトル：スギ・ヒノキ人工林における LAI と蒸発散の林齢依存性お</p>		

	よびその水源林管理への応用の可能性	
③ (32)	針葉樹林における樹高 h と暖候期の α の関係で、樹高が大きいと α が小さいという関係が見られた。	図-5.針葉樹林における樹高 h と暖候期の α の関係
	発表年：2005／著者：小松 光／掲載誌：日本森林学会誌 87 (2)、170-185 ／タイトル：森林の特性と蒸発散量の関係	

問 05-9	地種（裸・草・森）の違いは浸透能にどのような影響を与えるのか	
答	<p>森林の浸透能は草地・裸地より高い（根拠①）。</p> <p>浸透能とは地表に供給された水その土地が継続的に吸収する水量の最大値で、単位時間当たりの水深（mm/h）で表示したものである。浸透能は降水の初期に大きく（初期浸透能:f0）時間の経過に伴い減少し、最終的には一定の値（最終浸透能:f c）となる。この過程を示したものを浸透能曲線といい、$f=f_0+(f_0-f c)\exp(-kP)$で近似される。ここで、f は時間 t における浸透能、k は土壌により異なる定数である。通常、浸透能とは最終浸透をいう。</p> <p>浸透能の測定には次の 3 つの方法がある。①散水装置による供給量と流出量の差から浸透能を求める（散水型浸透計）。②円筒の内部に湛水して、給水タンクの減水量から浸透能を求める（冠水型浸透計）。③流域の降水量と流出量の差から浸透能を求める（流域平均浸透能とする）。森林では①の方法が多いが、一部では②の方法が用いられる。</p> <p>浸透能は測定方法により値が異なり、冠水型浸透計>散水型浸透計>流域平均浸透能の順で、流域平均浸透能は①および②の方法と比較して、1-2 オーダー小さな数値を示す（問 05-18 に記載）。</p> <p>散水型浸透計の代表的な測定例に、森林 260 mm/h>草地 128 mm/h>裸地 79 mm/h がある（根拠①）。この時の散水強度は森林が 400 mm/h、草地・裸地が 200 mm/h であった。浸透能測定の結果から、森林の浸透能は高いのでホールトン型地表流（降雨強度が浸透能より大きい場合に、土壌に浸透しない余剰な雨水は地表流として流下する）の発生は少なく、降水の大部分は森林土壌に浸透する。一方で、浸透能の低い草地や裸地では窪地貯留（水溜り）やホールトン型地表流が発生するので土壌侵食が発生する。</p> <p>しかし、測定された浸透能と流域規模で生起する水文現象の間には大きな乖離がある（問 05-18 に記載）。それは、浸透計で得られた測定結果は定量的というより定性的な比較に価値があり、浸透能から土地利用や流域特性が変化した時の相対的効果を求めることはできるが、流域の流出量の変化を推定することはできないと説明される（根拠②）。</p> <p>収集した文献からは、散水型浸透計により測定された浸透能と流域からの流出量との関係を議論した知見は得られなかった。</p>	
根拠 (文献番号)	知見	データ等
① (5478)	<p>平均浸透能は針葉樹人工林 260.6 mm/h、広葉樹天然林 271.6 mm/h、草地 127.7 mm/h、裸地 79.2 mm/h であった。</p> <p>発表年:1975/著者:村井 宏ほか/掲載誌:林業試験場研究報告 274、23-84 /タイトル:林地の水および土壌保全機能に関する研究(1) -森林状態の差異が地表流下および侵食に及ぼす影響-</p>	表-5. 地被区分別の浸透能
② (5479)	<p>浸透計で得られた測定結果は定量的というより定性的な比較に価値があり、浸透能から土地利用や流域特性が変化した時の相対的効果を求めることはできるが、流域の流出量の変化を推定することはできない。</p>	第 5 章 侵入と土壌水分 「人工散水型侵入計 (88-90 頁)」に記載された本文から引用

発表年：1973／著者：C・O・ウイスラー、E・F・ブレーター／掲載誌：
水文学入門（五十嵐政次訳）、彰国社／タイトル：人工散水型侵入計

問 05-10	優占樹種の違いは浸透能にどのような影響を与えるか	
答	<p>間伐遅れのヒノキ林以外は、地表面の攪乱がなければ優占樹種の相違が浸透能に及ぼす影響はない（または軽微）。</p> <p>1980-1982年に全国規模（9県が参画）で、森林の浸透能測定が行われた（林野庁調査事業）。本調査では、各種林況が浸透能に及ぼす影響を評価するため、針葉樹林地・広葉樹林地および伐採跡地を対象に散水強度 400 mm/h で行われた。全測定地の平均値は、スギ林地 325.8 mm/h > 広葉樹林 316.6 mm/h > 伐採跡地 312.3 mm/h > マツ林地 295.4 mm/h > ヒノキ林地 283.7 mm/h であった。これより、①浸透能は針葉樹林と広葉樹林で差は無いが、ヒノキ林地では浸透能の低い場合がある、②森林を伐採しても地表面の攪乱が軽微であれば、伐採前の浸透能は維持される、ことが明らかにされた。</p> <p>ヒノキ林地では、①A0層が浅くてA層上層（0-4 cm）の透水性が低く大型土壌動物の現存量が少ない、②林齢が高くて地被物が少なくなると浸透能が低下する、ことが指摘された（根拠①）。</p> <p>その後、三重県で行われたヒノキ林の浸透能測定では、下層植生のある林地（平均 354.8 mm/h）は無い林地（平均 213.9 mm/h）の約 1.5 倍であった。この調査結果から、下層植生の失われたヒノキ林では雨滴の衝撃により土壌構造が破壊されて、浸透能が低下することが指摘された（根拠②）。</p> <p>2000年以降の浸透能測定は、間伐遅れで荒廃したヒノキ林地を対象としたものである。振動ノズル型浸透計によるヒノキ林地の浸透能測定は、散水強度 168-340 mm/h で行われ、その時の浸透能は 5-253 mm/h であった。この調査より、浸透能は地表面の被覆物との関連性が高いことが指摘された。すなわち、浸透能の平均値は被覆率 50%以下で 27.3 mm/h、60%以上で 162.5 mm/h、100%で 101-322 mm/h であった（根拠③）。</p> <p>散水型浸透計による浸透能（絶対値としての浸透能）は散水方法・散水強度・散水面積（測定面積）により異なるが、根拠③のような下層植生の有無・地表攪乱の有無などが浸透能に及ぼす影響を相対評価する手法として有効であると考えられる。</p>	
根拠 (文献番号)	知見	データ等
① (5480)	<p>全調査地点の平均浸透能は、スギ林地（231地点）325.8 mm/h、ヒノキ林地（同 143）283.7 mm/h、マツ林地（同 41）295.4 mm/h、広葉樹林（同 150）316.6 mm/h、伐採跡地（同 58）312.3 mm/h であった。</p> <p>発表年：2012／著者：藤枝基久／掲載誌：山林、67-73／タイトル：林地の浸透能</p>	<p>表 2. 散水型山地浸透計による浸透能</p>
② (5481)	<p>三重県鈴鹿山地のヒノキ林地の浸透能測定では、浸透能の平均値は、下層植生ありが 353.0 mm/h で、下層植生なしが 218.5 mm/h であった。</p> <p>発表年：1995／著者：湯川典子ほか／掲載誌：日林誌 77 (3)、224-231／タイトル：ヒノキ林地において下層植生が土壌の浸透能に及ぼす影響 (1) 散水型浸透計による野外実験</p>	<p>表-2. 散水型浸透計による最終浸透能</p>

<p>③ (5482)</p>	<p>① 振動ノズル型浸透計によるヒノキ林地の浸透能は、散水強度 168-340 mm/h で、浸透能は 5-253 mm/h であった。</p> <p>② 地表面の被覆物が、被覆率 50%以下では浸透能の平均値が 27.3 mm/h、60%以上では 162.5 mm/h、100%では 101-322 mm/h であった。</p>	<p>表-2.各プロットの降雨強度、最終浸透能と理論式から算出した最大最終浸透能 図-2.最終浸透能と地表の被覆物の関係</p>
	<p>発表年：2010／著者：平岡真合乃ほか／掲載誌：日林誌 92、 145-150／ タイトル：ヒノキ人工林における浸透能に対する下層植生の影響</p>	

問 05-11	林相構造（単・複）の違いは浸透能にどのような影響を与えるか	
答	<p>常に森林状態が維持される複層林は、皆伐・植栽を繰り返す単層林より浸透能低下のリスクは低いものと類推される。</p> <p>過密なヒノキ単層林では、地表面が裸地化するため浸透能の低下が指摘されるが（根拠①）、ヒノキ複層林と比較したデータはなかった。</p> <p>当該分野の研究事例は乏しく、今回調査した範囲において根拠とする有力な論文は見当たらなかった。</p>	
根拠 (文献番号)	知見	データ等
① (5481)	<p>三重県鈴鹿山地のヒノキ林地の浸透能測定では、浸透能の平均値は、下層植生ありが 353.0 mm/h で、下層植生なしが 218.5 mm/h であった。</p> <p>発表年：1995／著者：湯川典子ほか／掲載誌：日林誌 77 (3)、224-231／タイトル：ヒノキ林地において下層植生が土壌の浸透能に及ぼす影響(1) 散水型浸透計による野外実験</p>	<p>表-2. 散水型浸透計による最終浸透能</p>

問 05-12	<p>齢級の違いは浸透能にどのような影響を与えるか</p>	
<p>答</p>	<p>ヒノキ人工林を除いて、齢級（又は林齢）の相違が浸透能に及ぼす影響はない（又は軽微）。</p> <p>吉野地方のスギ人工林（林齢 50－250 年）と尾鷲地方のヒノキ人工林（林齢 19－31 年）において浸透能測定（散水強度は 400 mm/h）が行われた。その結果、ヒノキ林では林齢と浸透能の間に関連性が見られたが、スギ林では認められなかった。すなわち、ヒノキ林の林齢は 18・19・23・25・31 年生で、その平均浸透能は 205.0 mm/h、264.0 mm/h、244.0 mm/h、327.7 mm/h、300.3 mm/h であった。</p> <p>ヒノキ人工林施業は超密植・短伐期皆伐という特徴を有し、植栽後の林分閉鎖は早い、10 数年から 20 年の閉鎖中は下層植生のほとんどが消滅する。本調査地では、25 年生林までの下層植生はシダ類が散見される程度で、地表面は裸地状態であった。しかし、25 年生以降の林分では、シダ類が地表を被覆して常緑の灌木が見られた（根拠①）。下層植生のない期間の浸透能は 200-260 mm/h であるのに対し、下層植生が回復した期間は 300-350 mm/h で、浸透能が約 100 mm/h 向上した。これは、林分閉鎖による下層植生の変化（林齢の指標とする）が、浸透能に及ぼす影響と考えることができる。</p> <p>ヒノキ林以外では、林齢の影響は浸透能より浸透した雨水の透水性（鉛直浸透）に大きく影響する。林野土壌調査の結果より、成長の衰えない林分の土壌は深くまで浸透性が良好で、少なくとも 50 cm くらいの深さまでは堅密で不透水の土層が存在しない。一方、植栽後 20-30 年後に成長の衰える林分の土壌は、深さ 20-30 cm 以下に堅密で不透水の土層が存在するとされる（根拠②）。</p> <p>前述のように均質な土層の透水性は土層構造に依存するが、樹木根系の発達した不均質な土層の透水性は根系の影響が大きいものと推察される。砂質片麻岩流域と風化花崗岩流域の山腹斜面にトレンチを掘削して、土層断面からの流出量を測定した。その結果、表層土層内の透水性が鉛直方向に急激に低下する難透水層の境界面が明瞭な砂質片岩地域では、境界面付近の樹木根系周辺部からの流出量がマトリクス（soil matrix）部からの流出量より多かった。また、深層部まで高い透水性を有する風化花崗岩地域では、すべての深度において樹木根系周辺部からの流出量が卓越した。なかでも根系流出に果たす腐朽根の役割が大きいと指摘される（根拠③）。この結果は、林齢の増加に伴う樹木根系の発達（腐朽根も含む）は、浸透した雨水の透水性に大きく影響を及ぼすことを実証している。</p>	
<p>根拠 (文献番号)</p>	<p>知見</p>	<p>データ等</p>
<p>① (5484)</p>	<p>① 25 年生林までの下層植生はシダ類が散見される程度で、地表面は裸地状態であった。25 年生以降の林分では、シダ類が地表を被覆して常緑の灌木が見られた。</p> <p>② ヒノキ林地の浸透能は林床状態との関連性が高いが、スギ林地では認められなかった。</p>	<p>表-1. 調査林地の概況 表-2. 散水型浸透計による浸透能の測定結果</p>
<p>発表年：1945／著者：岸岡 孝ほか／掲載誌：昭和 50 年度林業試験場関西支場年報, 59-63／タイトル：吉野地方スギ人工林と尾鷲地方ヒノキ人工林</p>		

における林地浸透能曲線の調査例		
② (42)	<p>① 成長の衰えない林分の土壌は深くまで浸透性が良好で、少なくとも 50 cm くらいの深さまでは堅密で不透水の土層が存在しない。</p> <p>② 植栽後 20-30 年後に成長の衰える林分の土壌は、深さ 20-30 cm 以下に堅密で不透水の土層が存在する。</p>	<p>摘要「11. スギの成長過程に及ぼす下層土、介在層土の不透水の影響」に記載された本文を引用</p>
	<p>発表年：2005 / 著者：真下育久 / 掲載誌：林野土壌調査報告 11、1-182 / タイトル：森林土壌の理学的性質とスギヒノキの成長に関する研究</p>	
③ (53)	<p>土層断面からの総流出量は、根系流出量がマトリックス流出量より多い。なかでも腐朽根流出量の割合が高い。</p>	<p>図 6. 採水された樹木根系周辺部から流出 図 7. 上宿野谷試験地での腐朽根流量の経時変化 (Period. 25)</p>
	<p>発表年：2013 / 著者：宮前 崇ほか / 掲載誌：信州大学農学部紀要 49、20-42 / タイトル：地質の差異による斜面土層内の雨水挙動に及ぼす樹木根系の影響</p>	

問 05-13	地種（裸・草・森）の違いは保水能にどのような影響を与えるか	
答	<p>森林土壌は団粒構造が発達して大小の孔隙からなるので、草地・裸地より保水能が大きい。</p> <p>保水とは降水が流出または蒸散する過程で土壌や表層地質に一時的に貯留される現象をいい、その最大値が保水能である。保水能（SS:mm）は次のように定義される。$\theta_i = \theta_{0.6} - \theta_{2.7}$、$SS = (\sum \theta_i \cdot H_i) / N$ ここで、$\theta_{0.6} - \theta_{2.7}$ は p F0.6 から p F2.7（p Fの説明は問 05-01 に記載）までの孔隙量、H_i(mm)は土壌の厚さである。土壌の孔隙には毛管力が弱く水の移動が速い孔隙（非毛管孔隙）と毛管力が強く水の移動が遅い小さな孔隙（毛管孔隙）がある。非毛管孔隙と毛管孔隙の境界は p F1.8（圃場含水量）である。植物の生育に有効な土壌水分は、p F1.8 から p F3.0（生長阻害水分点）であるが、水資源として有効な水分は毛管孔隙での水の移動が困難となる p F2.7（毛管連絡切断含水量）までである。一方、p F0.0 から p F0.6 までの大きな孔隙は飽和しても重力により直ちに排水するので保水能には含めない。</p> <p>既存の森林土壌調査では土壌の厚さを 1m と仮定し、林分単位の保水能を求めた。その結果を整理すると、①保水能は土壌の母材（表層地質）の影響を強く受け、花崗岩・火山灰地域の保水能は堆積岩・火山岩地域のそれより大きい、②森林の保水能は、概ね 150—250 mm の範囲にある、ことなどが知られている（根拠①）。</p> <p>森林総合研究所宝川試験地の初沢 1 号（6.48 ha）および 2 号沢（4.42 ha）では、流域単位の保水能が求められた。すなわち、精密な土壌調査により流域全体の土壌の厚さ分布図を作成し、その結果に基づいて保水能分布図を求めた。土壌の厚さは 1 号沢 45-250（平均 144）cm、2 号沢 17-185（平均 95）cm で、その保水能は 200 mm、127 mm であった（根拠②）。土壌の厚い 1 号沢の保水能は薄い 2 号沢より大きかった。2 号沢の保水能（127 mm）は、土壌の厚さ 1m として求めた既存の第三紀堆積岩の保水能とほぼ一致した。草地と裸地に関する保水能の情報は乏しいが、牧草地とゴルフ場（草地とする）の保留量曲線は類似し、運動場（裸地とする）より大きいとされる（根拠③）。保留量曲線から求めた牧草地の保留量には窪地貯留量も含まれるので、草地土壌の保水能はより小さい値となる。</p> <p>草地の透水性（問 05-01 に記載）は森林より小さいので、保水能は森林 > 草地 > 裸地の順となる。</p>	
根拠 (文献番号)	知見	データ等
① (15)	<p>土壌の厚さを 1 m とした、母材別の平均保水容量は、第三紀堆積岩 145 mm、中・古生層堆積岩 191 mm、花崗岩類 216 mm、火山岩 183 mm、火山灰 215 mm であった。</p> <p>発表年：2007／著者：藤枝基久／掲載誌：森林総合研究所研究報告 403、101-110／タイトル：森林流域の保水容量と流域貯留量</p>	2.2 土壌の厚さ 1 m の保水容量に記載された本文より引用（102 頁）

<p>② (19)</p>	<p>① 土壌の厚さは、1号沢が 45-250 (平均 144) cm、2号沢が 17-185 (平均 95) cmであった。 ② 保水能は 1号沢 200 mm、2号沢 127 mmとなった。</p>	<p>表-2. 土壌型グループ・土壌深階級別の保水容量と流域保水容量 図-5. 1号沢および 2号沢の保水容量分布図</p>
<p>発表年：1995／著者：有光一登ほか／掲載誌：森林立地学会誌 森林立地 37 (2), 1995, pp.49～58／タイトル：宝川森林理水試験地における土壌孔隙量をもとにした保水容量の推定：初沢小試験流域 1号沢および 2号沢の比較</p>		
<p>③ (5484)</p>	<p>① 雨水保留量は林地＞畑地＞ゴルフ場＞運動場の順であった。 ② ゴルフ場と牧草地の雨水保留量に大差はない。</p>	<p>図-2. 林草地・ゴルフ場・運動場の雨水保留量 図-3 ゴルフ場、牧草地の雨水保留量</p>
<p>発表年：1988／著者：角屋 睦／掲載誌：農業土木学会誌 56(11)、1061-1065 ／タイトル：土地利用変化に伴う流出特性の変化</p>		

問 05-14	優占樹種の違いは保水能にどのような影響を与えるか	
答	<p>保水能は土壌型・表層地質（土壌の母材）などの要因に依存するが、広葉樹林の保水能は針葉樹林より大きい傾向がある。</p> <p>「森林の公益的機能定量化基礎報告書」の公表後、自治体独自で保水能調査が行われた。その中から大分県の調査結果を示す。県内の 246 林分を対象に 905 個の円筒試料（400 c c）を採取し、土壌の厚さを 1m として粗孔隙保水容量（p F0.0-2.7）、小・中孔隙保水容量（p F0.6-2.7）および大孔隙保水容量（p F0.0-0.6）を求めた。小・中孔隙保水容量は先に定義した保水能と同義である（問 05-13 に記載）。大孔隙保水容量は重力による排水機能を果たす。平均値は粗孔隙保水容量 339.6(±75.9) mm、小・中孔隙保水容量 243.6(±56.9) mm、大孔隙保水容量 96.9(±75.9) mm であった。各保水容量を目的変数として、林種・林齢・土壌の母材などを要因として、数量化 I 類による要因解析を行った。その結果、林種別の小・中孔隙保水容量のスコアは、落葉広葉樹林>常緑広葉樹林>原野（草地）>スギ林>ヒノキ林の順であった。大孔隙保水容量のスコアは、常緑広葉樹林>落葉広葉樹林>ヒノキ林>スギ林>原野の順であった。スコアレンジは小・中孔隙保水容量 23.3 mm、大孔隙保水容量 38.2 mm で、保水容量の 9.6%、39.4% に相当し保水能への寄与は小さかった（根拠①）。この結果より、広葉樹林は針葉樹林より保水能が高く、排水機能が優れていると推察される。</p> <p>北上山地の同様な調査結果では、保水能に影響の大きい要因は地質・土壌型などの地況条件で、植生・林齢などの森林条件の影響は小さいとした（根拠②）。</p> <p>以上の結果は林分を対象としたものであるが、秋田県の長坂試験地（40 年生スギ人工林）では、流域の保水能が検討された。試験地は上の沢(6.55 ha)、中の沢(7.52 ha)、下の沢（6.50 ha）からなる第三紀凝灰岩の小流域で、平均土壌深はそれぞれ 68.8 cm、85.1 cm、79.8 cm であった。各流域の保水能は 103.6 mm、132.4 mm、121.8 mm と算出された。3 流域の平均土壌深は約 78 cm で、土壌の厚さ 1m の保水能に換算すると 155 mm となり、第三紀堆積岩の平均保水能とほぼ一致した（根拠③）。</p> <p>保水能は樹種・林齢などの森林条件より孔隙組成・土壌深などの土壌特性に依存するので、既存の森林土壌調査報告書に記載された項目（孔隙組成・土壌深など）から流域の保水能を推定することが可能と考えられる。</p>	
根拠 (文献番号)	知見	データ等
① (13)	<p>① 小・中孔隙保水容量のスコアは、落葉広葉樹林>常緑広葉樹林>原野>スギ林>ヒノキ林の順であった。</p> <p>② 大孔隙保水容量のスコアは、常緑広葉樹>落葉広葉樹>ヒノキ林>スギ林>原野の順であった。</p> <p>③ スコアレンジは小・中孔隙保水容量 23.3 mm、大孔隙保水容量 38.2 mm であった。</p>	<p>表-1.各保水容量に対する要因効果</p> <p>表-2 内部相関行列</p>
発表年：2002／著者：諫本信義／掲載誌：森林立地 44 (2)、31-36／タイト		

	ル：土壌孔隙組成を用いた森林の保水容量の推定とその要因解析	
② (33)	<p>① スコアの順位は標高>土壌>地質>地形>植生>林齢であった。</p> <p>② 樹種別ではブナ>スギの順であった。</p>	<p>図 12.土壌の貯水能推定の要因群スコア；北上川流域（岩手県）</p>
	<p>発表年：1933／著者：村井 宏／掲載誌：水利科学 271、1-40／タイトル：広葉樹林地、針葉樹林地および草生地の水文特性の比較</p>	
③ (56)	<p>① 保水能は 103.6 mm、132.4 mm、121.8 mmであった。</p> <p>② 3 流域の平均土壌深は約 78 cmで、土壌深 1mの保水能に換算すると 155 mmとなり既存の第三紀層の平均保水能とほぼ一致した。</p>	<p>Ⅲ結果の 3) 流域貯留量に記載された本文から引用</p>
	<p>発表年：2010／著者：金子智紀ほか／掲載誌：日本森林学会誌 92 (4)、208-216／タイトル：積雪地帯の近接したスギ人工林 3 小流域における流出特性の比較</p>	

問 05-15	林相構造（単・複）の違いは保水能にどのような影響を与えるか	
答	<p>常に森林状態が維持される複層林は、皆伐・植栽を繰り返す単層林より保水能低下のリスクは低いものと類推される。</p> <p>すなわち、単層林では皆伐により表層土壌（A0層と上部A層）の攪乱に伴い透水性が低下するが、B層以下での変化はない（根拠①）。そのため、作業道の開設などによる表層土壌の欠落がない限り、森林土壌の保水能低下は考え難い。</p> <p>攪乱を最小限にした架線集材による皆伐を行った森林流域試験の結果では、皆伐後に年流出量が平均で 295.9 mm増加した。また、伐採後には基底流出量が増加した（根拠②）。この結果では、森林伐採に伴う年流出量の増加は蒸発散量の減少に起因し、保水能への影響は軽微であると類推される。</p> <p>一方、複層林は表層土壌の攪乱が少ないので森林土壌の保全に有効な施業法と考えられるが、流域全体を複層林とした森林流域試験は見当たらないので（実証データがない）、複層林が保水能に及ぼす影響は不明である。</p> <p>現在のところ、当該分野の研究事例は乏しく、今回調査した範囲において根拠とする有力な論文は見当たらなかった。</p>	
根拠 (文献番号)	知見	データ等
① (3)	<p>① A層では堅果状構造が出現し、団粒破壊による小団化が進んで団粒構造が消失して透水性は低下した。B層では堅果状構造が出現するが、透水性の変化は見られない。</p> <p>② A層で団粒破壊が起こるのは、伐採後には土壌の表層部で乾燥が進むので、スレーキングが発生するためである。</p>	博士論文の要旨から引用
② (18)	<p>① 森林伐採により年流出量が平均 295.9 mm/年増加した。</p> <p>② 伐採後に基底流出量が増加した（VIIまとめから引用）</p>	<p>図-5. 伐採後の年流出量の増加量図表等掲載)</p> <p>発表年：2005／著者：真板英一ほか／掲載誌：日本森林学会誌 87 (2)、124-132／タイトル：新第三紀層流域における 70 年生スギ・ヒノキ林伐採による年流出量の変化</p>

問 05-16	<p>齢級の違いは保水能にどのような影響を与えるか</p>	
<p>答</p>	<p>齢級（又は林齢）の相違が保水能に及ぼす影響は軽微で、樹種の相違が及ぼす影響の 1/2 程度と推察される。</p> <p>大分県内の 246 林分で、土壌の厚さを 1m として小・中孔隙保水容量（p F0.6-2.7）および大孔隙保水容量（p F0.0-0.6）を求めた。ここで、小・中孔隙容水量は先に定義した保水能と同義である。大孔隙保水容量は重力による排水機能を果たす。各保水量を目的変数として、林齢・林種・土壌の母材などの要因を用いて、数量化 I 類による要因解析を行った。その結果、林齢別の小・中孔隙保水容量のスコアは、老齢林（71 年生以上）> 壮齢林（31-70 年生）> 若齢林（30 年生以下）の順であった。また、大孔隙保水容量のスコアも、老齢林> 壮齢林> 若齢林の順であった。スコアレンジは小・中孔隙量は 12.2 mm、大孔隙量は 15.7 mm で、保水容量の 5.0%、16.2% と樹種の寄与の 1/2 程度と小さかった（根拠①）。</p> <p>北上山地における同様調査でも、林齢の保水能への寄与は林種より小さかった（根拠②）。林齢の影響が大きいのは大孔隙容水量である。すなわち、根系の成長により大きな孔隙が発達し、それが浸透した雨水の排水機能を果たしていると推察される。根系が流出に及ぼす影響を評価するため、疑似根系を用いた鉛直浸透実験が行われた。その結果、①疑似根系の存在が地下水流出開始時間を短縮し、地下水流出量を増大させるなど水の移動に影響を及ぼす、②その影響は疑似根系の円周長と降水強度を用いて近似することができる、ことが明らかになった（根拠③）。</p> <p>実験結果を実証する流域規模の水文データは見られないが、自然斜面での根系の分布域は土壌層であるので、林齢の増加に伴う根系の発達は土壌中の水の移動（早い中間流出）に寄与するものと考えられる。林齢（又は齢級）が森林土壌に及ぼす影響は、保水性より透水性（特に排水機能）にある。</p>	
<p>根拠 (文献番号)</p>	<p>知見</p>	<p>データ等</p>
<p>① (13)</p>	<p>① 小・中孔隙保水容量のスコアは、老齢林（71 年生以上）> 壮齢林（31-70 年生）> 若齢林（30 年生以下）の順であった。</p> <p>② 大孔隙保水容量のスコアは、老齢林> 壮齢林> 若齢林の順であった。</p>	<p>表-1.各保水容量に対する要因効果 表-2 内部相関行列</p>
<p>発表年：2002／著者：諫本信義／掲載誌：森林立地 44 (2)、31-36／タイトル：土壌孔隙組成を用いた森林の保水容量の推定とその要因解析</p>		
<p>② (33)</p>	<p>① スコアの順位は、標高> 土壌> 地質> 地形> 植生> 林齢であった。</p>	<p>図 12.土壌の貯水能推定の要因群スコア；北上川流域（岩手県）</p>
<p>発表年：1993／著者：村井 宏／掲載誌：水利科学 271、1-40／タイトル：広葉樹林地、針葉樹林地および草生地水文特性の比較</p>		
<p>③ (39)</p>	<p>① 疑似根系の存在が地下水流出開始時間を短縮し、地下水流出量を増大させる。</p> <p>② その影響は疑似根系の円周長と降水強度を用い</p>	<p>「要約」に記載された本文より引用</p>

	て近似する	
	発表年：2003／著者：佐伯響一／掲載誌：信州大学農学部紀要 45（1・2）、11・20／タイトル：雨水の鉛直浸透過程に及ぼす樹木根茎の影響に関する実験的研究	

<p>問 05-17</p>	<p>地種（裸・草・森）の違いは洪水緩和機能の発揮にどのような影響を与えるか</p>	
<p>答</p>	<p>森林は草地・裸地より流域貯留量が大きいため洪水緩和機能は高い。森林の洪水緩和機能は樹冠層・地表面および土壌層にける貯留量の大小に依存する（流域貯留量とする）。すなわち、「流域貯留量＝遮断貯留量＋窪地貯留量＋土壌水分貯留量」である。</p> <p>遮断貯留量は植物の枝葉によって降水が貯留され、地表面に到達しないで蒸発する。その水量は葉量（バイオマス）に依存し、森林＞草地＞裸地の順となる。</p> <p>窪地貯留量は地表面の窪地や攪乱地（例えば林道）に発生する水溜りで、その大部分は土壌に浸透しないで蒸発する。山地流域は大部分が斜面なので、窪地貯留量は森林・草地・裸地で大差はないと考えられる。</p> <p>土壌水分貯留量は浸透した雨水が土壌孔隙に一時的に貯留されるもので、植物の根系から吸収されて蒸散する水分と重力の作用によって土壌中を移動して溪流に流出する水分および地下水を涵養する水分がある。土壌水分貯留量は、森林＞草地＞裸地の順に多い。土壌水分貯留量は保水能と同義（問 05-13 で定義）で、森林の洪水緩和機能は土壌水分貯留量の大小に依存する。</p> <p>洪水緩和機能を定量評価する指標のひとつに保留量曲線がある。保留量曲線は降水量（P）と損失雨量（L）の関係を表したもので、$L=SB[1-\exp(-KP)]$と近似できる。ここで、SBは流域貯留量（mm）、Kは流域により決まる定数である。保留量曲線は農業土木分野等で土地利用別の保留量（保水能と同義）の指標として広く用いられている。本指標は流域雨量の推定精度に依存する欠点があるが、流域規模で森林の洪水緩和機能の評価する指標として実用的である。</p> <p>森林流域の流域貯留量は流域地質と土壌の厚さなどにより異なるが、概ね 50～250 mmの範囲にある（根拠①）。土地利用別の保留量曲線を比較すると、保留量は森林＞畑地＞市街地（非舗装）の順となる。また、五条吉野地区における山林流域と農地造成流域の比較では、農地造成流域の保留量は降雨量 200 mmで約 50 mm（図-1 から読取った数値）山林地流域より少なかった。これは、農地造成により、粘土分の多い下層土が表土に混じり透水性が低下して、保留量が低下したためとされる（根拠②）。</p> <p>この結果から、森林植生による森林土壌の保全が、洪水緩和機能（土地の持っているポテンシャル）の維持に貢献することが分かる。</p>	
<p>根拠 (文献番号)</p>	<p>知見</p>	<p>データ等</p>
<p>① (15)</p>	<p>52 流域の流域貯留量の計算結果を記載してある。流域貯留量は堆積岩・火山岩流域 50-150 mm、変成岩流域 130-200 mm、花崗岩・火山岩流域 150-250 mmの範囲にあった。</p> <p>発表年：2007／著者：藤枝基久／掲載誌：森林総合研究所研究報告 405、101-110／タイトル：森林流域の保水容量と流域貯留量</p>	<p>表 1.対象流域の流域特性と計算結果</p>

<p>② (5485)</p>	<p>① 土地利用別の保留量曲線を比較すると、森林＞畑地＞市街地の順に保留量が大きい。 ② 五条吉野地区における山林流域と農地造成流域の比較では、山林流域の保留量は農地造成流域より大きい。</p>	<p>図-1.農地造成地の雨水貯留量 図-2. 山林、畑、市街地非舗道の雨水貯留量</p>
	<p>発表年:1988／著者:角屋 睦／掲載誌:農業土木学会誌 56(11)、1061-1065 ／タイトル:土地利用変化に伴う流出特性の変化</p>	

問 05-18	優占樹種の違いは洪水緩和機能の発揮にどのような影響を与えるか	
答	<p>健全な森林では、優占樹種の相違が洪水緩和機能に及ぼす影響はない（又は軽微）。</p> <p>洪水緩和機能の評価方法には、対照流域法による森林流域試験である。近接する広葉樹林流域（1.28 ha）と針葉樹人工林（1.29 ha）で水文観測を行い、流出特性を比較検討した。その結果、①表層土壌の孔隙特性に基づく雨水の貯留特性（保水能と同義）は両流域での相違がなかった。②針葉樹人工林流域では根系層の発達により広葉樹林流域よりも速やかに溪流に雨水を流出させると推察した。これより、広葉樹林流域は針葉樹人工林流域より洪水緩和機能が高い判断した。しかし、流域平均浸透能を指標に定量評価を行うと、広葉樹林流域 10.0 mm/h、針葉樹人工林流域 10.5 mm/h となった（根拠①）。流域平均浸透能は、降雨イベント時の全浸透量（損失雨量と同義）を降雨継続時間で除した値で、その数値が大きいほど増水量が少なく洪水緩和機能が高いことを意味する。定量評価の結果では、広葉樹林流域は針葉樹人工林流域より洪水緩和機能が高いという根拠は認められない。</p> <p>流域平均浸透能は流域貯留量（定義は問 05-17 に記載）を反映した指標で、根拠①の結果は土壌の孔隙解析（保水性・透水性）だけでは、洪水緩和機能の評価することは困難であることを示唆するものである。</p> <p>流域平均浸透能は、森林流域の洪水緩和機能を定量評価する指標として有効である。その調査事例に、次のようなものがある。森林総合研究所宝川試験地の初沢 2 号沢（4.42 ha）のブナ天然林の流域平均浸透能は、伐採前 2.15 mm/h で、伐採後 1.50 mm/h であった。同釜淵試験地の 2 号沢（2.48 ha）の針広混交林の流域平均浸透能は、伐採前 2.10 mm/h で、伐採後 1.81 mm/h であった（根拠②）。両試験地とも森林伐採に伴い流域平均浸透能は低下した（洪水軽減機能は低下した）。伐採に伴う地表面の攪乱が軽微であった（保水能の低下が極めて小さい）と仮定すれば、流域平均浸透能の低下は遮断貯留量の減少に起因する流域貯留量の減少である。</p> <p>優占樹種の相違が洪水緩和機能に及ぼす影響を定量評価するには、その要因である遮断貯留量と土壤水分貯留量の両面から検討する必要がある（根拠①の結果より）。最も実用的な検出方法は、対照流域法による直接流出量の比較検討である。</p>	
根拠 (文献番号)	知見	データ等
① (72)	<p>① 針葉樹人工林流域では根系層の発達により広葉樹林流域よりも速やかに溪流に雨水を流出させる。</p> <p>② 流域平均浸透能は広葉樹林流域 10.0 mm/h、葉樹人工林流域 10.5 mm/h であった。</p>	<p>図 4-23 成木川最上流域の 1 次谷森林斜面における降雨流出機構の概念モデル</p> <p>図 4-24 流域平均浸透能の定量化の考え方</p>
<p>発表年：2010／著者：斎藤泰久／掲載誌：千葉大学博士論文／タイトル：針葉樹人工林の生育がもたらす森林の水源涵養機能への影響</p>		

<p>② (5486)</p>	<p>① 宝川試験地初沢 2 号沢のブナ天然林では、流域平均浸透能が伐採前 2.15 mm/h で、伐採後 1.50 mm/h であった。 ② 釜淵試験地 2 号沢の針広混交林では、流域平均浸透能が伐採前 2.10 mm/h で、伐採後 1.81 mm/h であった</p>	<p>第VI 総括 2) 山地小流域の有効雨量に及ぼす森林伐採の影響を検討した。(82 頁) の本文から引用</p>
<p>発表年：1987／著者：近嵐広栄／掲載誌：林業試験場研究報告 346、1-92 ／タイトル：山地流域における増水曲線の推定に関する基礎的研究</p>		

問 05-19	林相構造（単・複）の違いは洪水緩和機能の発揮にどのような影響を与えるか	
答	<p>流域全体が複層林である森林流域試験の水文データがないので、林相構造の相違が洪水緩和機能に及ぼす影響は不明である。</p> <p>単層林の幼齢林段階（植栽直後）では、壮齢林段階と比較して洪水緩和機能が小さい（根拠①）。植栽直後から壮齢林までの成長過程は洪水緩和機能（土地の持っているポテンシャル）の回復過程と考えられる。</p> <p>一方、複層林は森林状態が常に維持されているので、施業に伴う洪水緩和機能の変動（流域貯留量の変化として評価）は単層林施業より小さいものと類推される。</p> <p>すなわち、森林の洪水緩和機能は林相構造（単層林・複層林）の影響を受ける可能性がある。</p> <p>しかし、現在のところ、当該分野の研究事例は乏しく、今回調査した範囲において根拠とする有力な論文は見当たらなかった。複層林施業の効果を検証するためには、流域全体が複層林の流域と単層林の流域による対照流域法を実施する必要がある。</p>	
根拠 (文献番号)	知見	データ等
① (17)	<p>森林伐採によりN日目流量は全体的に増加した。その増加量は高水側ほど大きかった。ただし1日目から11日目までは伐採の影響は必ずしも明瞭ではなかった。</p> <p>発表年：2008／著者：真板英一ほか／掲載誌：日林誌 90 (1)、36-45／タイトル：森林植生の伐採が山地小流域の劉教曲線に与える影響 — 流況の流域間変動に対する植生要因の大きさの検討 —</p>	<p>図-4. A流域とB流域の流況流量の関係表-2. 袋山沢流域の流況流量 (mm/day)</p>

問 05-20	<p>齢級の違いは洪水緩和機能の発揮にどのような影響を与えるか</p>	
<p>答</p>	<p>林齢の増加に伴い洪水緩和機能は増大すると考えられるが、その要因である遮断貯留量と土壌水分貯留量がどのように機能に寄与するかは明らかではない。</p> <p>齢級（又は林齢）が洪水緩和機能に及ぼす影響を定量評価する方法には、年流出量の経年変化を検討するものがある。山地森林流域（300 ha）で、24年間の水文データを用いて森林の成長に伴う流出特性の変化をタンクモデルで定量評価した。モデル係数の経年変化より（側方流出孔の係数が減少傾向を示した）、森林の成長に伴い洪水時のピーク流出量が抑制されることを明らかにした。すなわち、直接流出量に相当する第1段タンクの側方流出孔（a1,a2）は、1984-1987年を期首、2003-2007年を期末とすると、a1は0.900から0.653に、a2は0.425から0.224に減少した。これらの係数の減少は直接流出量の減少を意味する（洪水緩和機能の増大）。基底流出量に相当する第2段以下の側方流出孔と地下水涵養に相当する浸透孔は、期首と期末で変化がないものと仮定した。計算の結果、森林の成長に伴う側方流出特性の変化だけで、地下水涵養量も増加することが分かった。この期間の植生量の経年変化は、NDVI(Normalized Differential Vegetation Index)で算出し、植生量は増加することを確認した（根拠①）。</p> <p>長期水文観測に基づく経年変化を記載したものとしては次のようなものがある。東京大学愛知演習林の穴の宮流域（13.9 ha）における長期水文観測（1935-2011年）から、はげ山に砂防植栽をして森林再生した期間（前期：1935-1946年）と森林に被覆されて土壌の回復過程にある期間（後期：2000-2011年）で、直接流出量を指標に検討した。その結果、後期の直接流出量は減少したが（洪水緩和機能が増大）、その効果は初期水分条件が乾燥の場合と最大降雨強度が大きい場合に明瞭に確認された。しかし、土壌が湿潤な場合や最大降雨強度の小さい場合は両期間の差は小さかった（根拠②）。</p> <p>森林総合研究所釜淵試験地の2号沢（2.48 ha）は、1960年にスギを植栽したが生育不良で針広混交林となっている。1961-2001年（40水年）の豊水流出量（1番から95番目までの積算値）の経年変化は減少傾向を示し、その減少率は0.44%/水年であった（根拠③）。豊水流出量の減少傾向は高水部（≒直接流出量）の低下を意味し、林齢の増加に伴う洪水水緩和機能の増大を示唆するものである。</p>	
<p>根拠 (文献番号)</p>	<p>知見</p>	<p>データ等</p>
<p>① (37)</p>	<p>① 直接流出量に相当する第1段タンクの側方流出孔（a1,a2）は、1984-1987年を期首、2003-2007年を期末とすると、a1は0.900から0.653に減少し、a2は0.425から0.224に減少した。</p> <p>② 森林の成長に伴う側方流出特性の変化だけで、地下水涵養量も増加することが分かった。</p>	<p>表-2 同定された各期間のタンクモデル係数 図-9 森林の成長に伴う流出特性の変化の模式図</p> <p>発表年：2013／著者：児島利治ほか／掲載誌：土木学会誌 65（5） I_137-I_144／タイトル：タンクモデルと長期水文観測データを用いた森林小集水域における緑のダム機能の評価</p>

<p>② (2)</p>	<p>①後期の直接流出量は減少したが、その効果は初期水分条件が乾燥の場合と最大降雨強度が大きい場合に明瞭に確認された。 ②土壌が湿潤な場合や最大降雨強度の小さい場合は両期間の差は小さかった。</p> <p>発表年：2012／著者：五名美江ほか／掲載誌：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／タイトル：日本森林学会誌 94 (5) 214-222</p>	<p>図-4、図-5、図-6.前期（1935-1946）と後期（200-2011）における降水量と直接流出量の関係</p>
<p>③ (5487)</p>	<p>1961-2001年（40水年）の豊水流出量（1番-95番目までの積算値）の経年変化は減少傾向を示し、その減少率は0.44%/水年であった。</p> <p>発表年：2002／著者：細田育弘ほか／掲載誌：第6回水資源に関するシンポジウム論文集、241-246／タイトル：釜淵森林理水試験地60年間の水流出年々変動</p>	<p>図-4.1～3号沢における流況値の変動傾向 表-2.釜淵1～3沢流域における流況流出率（年降水量に対する流況値の割合）と増減傾向</p>

問 05-21	地種（裸・草・森）の違いは水質浄化機能の発揮にどのような影響をあたえるか	
答	<p>水質浄化機能は、林地＞草地＞裸地の順に大きいと考えられる。</p> <p>前提として、溪流流出水の水質は物質循環のバランスにおいて決定し、水質浄化機能もその中で発揮される。雨水が植物根のある土層を浸透する間には、養分等の物質が分解・無機化のよって溶出したり植物根に吸収されたりする（根拠①～⑥）。植物根の分布より下層に浸透した土壌水は、鉱物の風化作用をもたらしながら中性に近くミネラルの多い安定した水質となる（根拠①、⑦～⑭）。また、火山灰土壌では流出しやすい硝酸態窒素の濃度に応じて硝酸を吸脱着し、流出濃度のピークを低く抑える効果があることも報告されている（根拠⑮～⑰）。このように、溪流流出水の水質形成は、雨水が浸透する土層条件と地質に大きく影響をうける（根拠⑱～㉓）。</p> <p>裸地に関しては、森林集水域の全体を皆伐し一時的に裸地とすると、森林生態系の内部を循環させて保持していた窒素等の養分の著しい流出がある（根拠㉔～㉗）。皆伐後に植生が回復するに従い、溪流への養分流出が減少する（根拠㉔～㉘）。したがって、気候的に植生が繁茂しない裸地の場合は、雨水が浸透する土層の発達も乏しく、水質浄化機能はほとんど発揮されないと考えられる。</p> <p>草地に関しては、林地とくらべて畑草地や畜産草地では、流出水への養分等の混入が多い（根拠㉙～㉛）。これは、草地管理のための施肥等の人為的影響が大きい（根拠㉛③④）。施肥の影響がない草地では林地と変わらないという調査もあるが（根拠㉙）、日本には自然草地は少ないため明確ではない。森林とくらべて草地は一次生産力や植物体現存量が小さいことから（根拠㉛）、水質浄化機能も小さいと考えられる。</p> <p>草地の汚濁水は河畔林があることによって窒素等の流出が減ることがある。これは、河畔林による吸収と湿性環境における脱窒の影響による（根拠㉜⑥～⑩）。逆に、溪流沿いに草地が隣接していたり、溪流沿いの森林を伐採したりすると窒素等の流出が増大する（根拠㉜⑪）。したがって、水質浄化機能を考えると、草地などの土地利用や森林施業で一時的な裸地を作出する場合、溪流沿いの取り扱いは留意する必要がある。</p> <p>また、大雨や融雪期の出水時は、表面流や表層付近の土壌水の流入があり、一時的に窒素等の流出が高まることもある（根拠㉜⑫⑬）。林地よりも土壌の透水性が乏しい草地や裸地では（根拠㉜⑭）、出水時の溪流への物質流出が激しく、水質浄化機能が発揮しにくいと考えられる。</p>	
根拠 (文献番号)	知見	データ等
① (3417)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 深さ別の土壌水、湧水および溪流水のイオン濃度から、森林土壌では表層で有機物の無機化が盛んなため、土壌水中の NO₃-濃度が最も高い。土壌水中の養分は樹木に吸収されるため、下層に行くにしたがって濃度は低下する。 ・ 酸性物質の流入や硝化作用によって生じた H⁺は、土壌コロイドに吸着している塩基性イオンと交換され、土壌水中に Ca²⁺や Mg²⁺などが溶出される。これらのイオンも、樹木に吸収されたり沈殿したりすることで次第に濃度を低下させて溪流水となる。 	図-13 土壌から溪流にかけての水質変化

	<ul style="list-style-type: none"> ・ 土壌水の Na^+、HCO_3^- や SiO_2 は下層へ行くほど濃度を高め、渓流水に移行する。これは、石英の化学的風化を受けるためである。したがって、土壌中での滞留時間が長く、深い層を通過してくる流出水は、pH が中性に近く、これらのイオン濃度が高くなる。なお、石灰岩地帯では Na^+ にかわり Ca^{2+} 濃度が高まる。 	
	発表年：2000／著者：生原喜久雄／掲載誌：土壌の物理性 85／タイトル：森林土壌生態系での無機成分の動態	
② (3418)	<ul style="list-style-type: none"> ・ NH_4^+ について、同じ集水域における年平均濃度の変動は降水、渓流水ともに小さく、含有量は降水量、流出水量に支配される。流出水の NH_4^+ 量は降水に比べて著しく少なく、衛生的に有害な降水中の NH_4^+ の除去という点で、森林は浄化機能をもっている。 	図-2.8 降水と森林流出水に含まれる年平均溶存物質の比較
	発表年：1990／著者：岩坪五郎／掲載誌：宗宮功ほか著「自然の浄化機能」技報堂出版：39-61／タイトル：2. 森林における自然浄化機能	
③ (3419)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 落葉落枝で林床に供給された有機態 N は、分解・無機化され NH_4^+ となり、さらに硝化菌によって NO_3^- に変化する。NH_4^+ や NO_3^- といった無機態 N は植物根が吸収して樹体を構成し、再び落葉落枝で林床に供給される。吸収されなかった N は溪流へ流出するがほとんどが土壌に吸着しにくい NO_3^- である。 	図 1 森林生態系における水と窒素の循環
	発表年：2012／著者：戸田浩人／掲載誌：「丹沢の自然再生」J-FIC／タイトル：第4章 水源林の水質形成機能	
④ (3420)	<ul style="list-style-type: none"> ・ NO_3^- 濃度や DOC 濃度は林内雨から表層土壌水にかけて高まり、深くなるにつれて急速に低下し、溪流流出水は土壌表層に比べて著しく低濃度である。これは、土壌層における有機物の分解・無機化と植生による吸収を表している。 	図-4 降雨から渓流水にかけての年平均の pH , DIN , DOC および DOC 濃度
	発表年：2002／著者：小柳信宏ほか／掲載誌：森林立地 44：11-20／タイトル：スギ・ヒノキ壮齡人工林小流域における降雨の移動に伴う溶存有機態窒素および溶存有機態炭素の動態	
⑤ (81)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 渓流水の溶存物質濃度は、ミネラル類については降水より高く、蒸発散による濃縮と土壌からの溶脱が示唆された。窒素成分は渓流水で濃度が低下し、土壌への吸着と植物による吸収が考えられた。 	図-2 降水と渓流水濃度の関係
	発表年：1991／著者：徳地直子ほか／掲載誌：京都大学農学部演習林報告 63：60-68：39-61／タイトル：山地小流域における降水と流出水の水質	
⑥ (108)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 表層の土壌水では、多くの溶存物質の濃度変化に対して、土壌水分量、土壌有機物の無機化および硝化、陰イオン交換容量、あるいは樹冠通過雨の水質などが影響していると推察された。 ・ 深層の土壌水での Na、HCO_3^-、SiO_2 濃度と pH の変化に対して、土壌呼吸起源の CO_2 の増加によ 	表-1～5 図-3～7

	<p>る鉱物風化が影響していると推察された。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 溪流水の NO₃ 濃度の変化には、流出水量とともに深層の土壌水での NO₃ 濃度の変化が影響を及ぼしていた。 	
	<p>発表年:1995/著者:大類清和ほか/掲載誌:水文・水資源学会誌8:367-381 /タイトル:森林小集水域での水質変化の過程</p>	
⑦ (3418)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 土壌の化学的風化は水分のある状態で、母材が酸や酸化物質と反応し、鉱物の構成元素がイオンとして溶出することである。したがって、水が土壌を通過することによって起こる、質的な変化も化学的風化の過程とみなすことができる。森林生態系において、Ca や Mg などの塩基の 80%は風化による生成である。 ・ 土壌の風化速度は H⁺が生態内に供給・生成される量と溪流から流出する陽イオン両や HCO₃⁻量によって評価される。また、世界のほとんどの報告で、森林の集水域での降雨と溪流水のとの塩基の収支がマイナスなのは、生態系にインプットされる塩基量よりもインプットされる H⁺と生態系内で生成される H⁺との和が多いからである。 ・ 土壌での風化を支配する H⁺イオンの供給において、外部からは主に降雨で供給される酸で、この量の推定は容易である。内部で生成される H⁺は、A0 層や鉱物土層でおきている種々の生物的、化学的な過程（硝化作用、炭酸塩化作用、酸化）で生成され、陽イオンが溶出する。 	<p>図-8 H⁺の生物地球科学的循環</p>
	<p>発表年:1994/著者:生原喜久雄/掲載誌:水文・水資源学会誌7(4):325-331:39-61/タイトル:溪流水の水質形成に及ぼすプロトン(H⁺)の影響</p>	
⑧ (3419)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 土壌コロイドは負に帯電しており、Ca などの陽イオンを吸着する。酸性化によって H⁺が増えると、陽イオンが H⁺と交換し土壌水に放出される。Ca などは植生が吸収し落葉落枝として還元され、再び土壌コロイドに吸着することで酸緩衝能を保っている。 	<p>図2 土壌コロイドの陽イオン吸着と酸緩衝能</p>
	<p>発表年:2012/著者:戸田浩人/掲載誌:「丹沢の自然再生」J-FIC/タイトル:第4章 水源林の水質形成機能</p>	
⑨ (3422)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 平水時であれば溪流水質の季節変化は小さく、採水地点ごとの差異が年間の水質の変動を上回った。 	<p>図2 中津川流域の採水地点ごとの Ca²⁺および NO₃⁻濃度</p>
	<p>発表年:2007/著者:戸田浩人ほか/掲載誌:丹沢大山総合調査学術報告書, 丹沢大山総合調査団編:410-415:39-61/タイトル:丹沢山地の溪流水質</p>	

<p>⑩ (3423)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・平水時であれば渓流水質の季節変化は小さく、採水地点ごとの差異が年間の水質の変動を上回った。 	<p>図-2 各小集水域の渓流水の溶存物質濃度の平均値と標準偏差</p>
<p>発表年：1994／著者：大類清和ほか／掲載誌：日本林学会誌 76：383-392 ／タイトル：森林小流域における渓流水質に及ぼす諸要因の影響</p>		
<p>⑪ 3424</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・島部を除いた EC は、pH、陽イオンの当量合計およびアルカリ度（主に HCO₃⁻）と正の相関が認められた。これは、炭酸風化による陽イオンの溶出の多い溪流では EC が大きく、H⁺を消費するため pH も高いことを示唆している。 ・イオン濃度は海からの距離に影響を受けており、また、寒冷で湿潤な地域のイオン濃度は低い傾向にあった。 	<p>図-2 各溪流における pH および EC 図-3 各溪流における陽イオンおよび陰イオン濃度"</p>
<p>発表年：2000／著者：戸田浩人ほか／掲載誌：日本林学会誌 82：308-312：39-61／タイトル：全国大学演習林における渓流水質</p>		
<p>⑫ (92)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・本調査地で NO₃ 濃度が有意に高かった 1～9 年生の渓流水において主要カチオン総和との間に正の相関があり、皆伐による土壌での硝化作用の活性化が NO₃ と塩基性カチオンの流出を引き起こしたと考えられる。 ・図-7 に正の相関がみられ、林齢を問わず母岩である堆積岩中の鉱物が風化を起し、土壌中にカチオンが豊富に供給されることで、土壌の緩衝機能が高く維持されていることを示している。 	<p>図-6 全集水域における主要カチオン濃度の総和と硝酸濃度の関係 図-7 全集水域における Ca+nss-Na と HCO₃ 濃度との関係</p>
<p>発表年：2008／著者：福島慶太郎ほか／掲載誌：日本森林学会誌 90：6-16 ／タイトル：皆伐・再造林施業が渓流水質に与える影響—集水域単位で林齢の異なるスギ人工林を用いて—</p>		
<p>⑬ (119)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・pH4.8 以上では SiO₂ 濃度は HCO₃ 濃度および pH と正の相関がみられ、特に渓流水ではこれらの値が高く、母材風化による影響が強く受けていることが示唆された。pH4.8 未満では、逆に SiO₂ 濃度は pH と負の相関がみられ、また H⁺濃度は NO₃ 濃度と正の相関があり、硝化作用などによる H⁺の著しい増加で粘土鉱物の破壊の促進が示唆された。 	<p>図-9、10、11</p>
<p>発表年：1993／著者：大類清和ほか／掲載誌：日本林学会誌 75：389-397：39-61／タイトル：森林集水域での土壌から溪流への水質変化</p>		
<p>⑭ (3425)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・植生の発達に伴い、表層土壌では有機物分解などの H⁺生成過程が現れ、H⁺消費を上回った結果、余剰の H⁺が下層土壌にもたらされた。 ・また、生成された H⁺を化学的風化によって消費するのに十分な土壌層が存在するため、渓流水の pH を決定しているのは土層厚の増加による土壌層深部の CO₂ の増大であった。 	<p>図-7 土壌浸透過程における指標物質濃度の変化と各水文過程における指標物質の変化量 図-8 各観測井戸の深さによる溶存 pCO₂ の年間平均値</p>
<p>発表年：1999／著者：浅野友子ほか／掲載誌：日本林学会誌 81：178-186</p>		

	／タイトル：森林の成立に伴う流域内酸中和機構の変化—植生と土層厚が酸中和機構に与える影響—	
⑮ (96)	<ul style="list-style-type: none"> ・ B 層土壌は添加溶液 (KNO₃) の濃度上昇に伴い NO₃ 吸着量が増加し、変異荷電によるイオン吸着の特徴がみられた。A 層の NO₃ 吸着量は B 層に比べて非常に少なかった。 ・ 現地土壌水の伐採前後の NO₃ 濃度変動および B 層厚より、伐採後に林床で分解無機化された多量の N を一時的に保持し、溪流の NO₃ 濃度の急激な上昇を抑制していると考えられた。 ・ B 層に吸着した NO₃ は脱イオン水の透過ですべて脱着することから、現地伐採流域における溪流への NO₃ 流出増加量は少ないが、流出増加は長期に渡ると予測された。 	<p>図-3 調査地の土壌の NO₃ 吸着等温線 図-6 カラム実験による流出溶液の NO₃ 濃度の変化 図-9 伐採値の土壌水中の主要陰イオン量の経時変化</p>
発表年：2007／著者：浦川梨恵子ほか／掲載誌：日本森林学会誌 89：190-199／タイトル：高齢化したスギ・ヒノキ人工林小流域における下層土の NO ₃ 吸着による窒素流出の遅延効果		
⑯ (91)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 土壌水の NO₃ 濃度変動は速やかで、伐採直後の植生による養分吸収の減少、表層土壌での窒素無機化の促進や、その後の植栽木の養分吸収の増加など、伐採後の窒素循環の変化を直接的に反映していた。一方、渓流水の NO₃ 濃度変動は緩慢で、伐採 6 年目でも伐採前より高い傾向が継続していた。 ・ 土壌中の水・溶質移動モデルで土壌中の NO₃ 濃度変動を NO₃ の土壌吸着の有無で予測した結果、吸着がある場合で実測値と季節変動や長期変動パターンが一致した。このことから、火山灰土壌特有の陰イオン吸着が NO₃ 流出に影響することが示唆された。 	<p>図-3 土壌水・渓流水の NO₃ 濃度および流出水量の伐採前後の経時変化 図-5 下層土および渓流水中の NO₃ 濃度の変動</p>
発表年：2009／著者：浦川梨恵子ほか／掲載誌：日本森林学会誌 91：184-191：39-61／タイトル：スギ・ヒノキ伐採流域における火山灰土壌の陰イオン吸着特性が NO ₃ の長期流出に及ぼす影響		
⑰ (3426)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 溪流への N 流出量は高齢人工林が優占する流域で多かった。 ・ 土壌の N 供給と植生の N 吸収から N 流出を予測するモデルの値は、予測値で実際の値より高く、高齢人工林流域でその差が最も大きかった。 ・ 下層土による NO₃ 吸着能は、火山灰に含まれるアロフェン量が多いほど多く、高齢人工林流域で最も多かった。このことから、モデルの予測値と実測値との誤差に影響していると考えられた。 	<p>図 4、5、6、7</p>
発表年：2013／著者：戸田浩人ほか／掲載誌：神奈川県自然環境保全センター報告 10：91-99／タイトル：神奈川県貝沢対照流域法試験地試験流域における窒素動態特性		

<p>⑱ (3422)</p>	<p>・ Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, HCO₃⁻の濃度が高いとともに元素間で正の相関がみられ、炭酸塩鉱物や斜長石の化学的風化の影響が著しいと考えられる。K⁺濃度が低く、丹沢深成岩帯がカリ長石に乏しいトータル岩であることを反映していた。母材風化由来の元素は、地質の影響が大きい。</p>	<p>図3 丹沢山地上流域の採水地点ごとの溶存イオン濃度 表1 丹沢山地上流域における渓流水の溶存イオン濃度間の相関係数</p>
<p>発表年：2007／著者：戸田浩人ほか／掲載誌：丹沢大山総合調査学術報告書，丹沢大山総合調査団編：410-41：39-61／タイトル：丹沢山地の渓流水質</p>		
<p>⑲ (3423)</p>	<p>・ NO₃ 濃度や DOC 濃度は林内雨から表層土壌水にかけて高まり、深くなるにつれて急速に低下し、溪流流出水は土壌表層に比べて著しく低濃度である。これは、土壌層における有機物の分解・無機化と植生による吸収を表している。</p>	<p>表-3,4,5,6 渓流水の溶存物質濃度についての数量化I類による解析結果</p>
<p>発表年：1994／著者：大類清和ほか／掲載誌：日本林学会誌 76：383-392／タイトル：森林小流域における渓流水質に及ぼす諸要因の影響</p>		
<p>⑳ (82)</p>	<p>・ 安山岩、流紋岩を主とする流域および凝灰岩を主とする流域に比べ、堆積岩を主とする流域は Ca 濃度が高い傾向が認められた。堆積岩を主とする流域は、白井川流域のみに存在したことから調査流域間の Ca 濃度平均値の差は流域内の地質の違いが原因であると考えられる。</p>	<p>図-3 流域の主な地質と Ca 濃度</p>
<p>発表年：2009／著者：相澤州平ほか／掲載誌：日本森林学会北海道支部論文集 57：135-137／タイトル：小樽内川および白井川の支流における流域間の渓流水質の差異</p>		
<p>㉑ (79)</p>	<p>・ 全国の山地流域 119 地点における水質の解析で、標高の高い甲信地方で EC が小さく気温と生物活性や化学的風化速度の相関が示唆された。 ・ 深成岩や変成岩が分布する流域でイオン濃度が低く、鉱物の反応速度やマサ化した花崗岩のように保水性の低さが、固液接触時間を短くして溶出が小さいことが考えられた。 ・ 植生では落葉針葉樹が卓越する流域でイオン濃度が低かった。これは、カラマツが高標高地域に分布しており、植生の影響というより気温と生物活性や化学的風化速度の相関が大きいと感ぜられる。</p>	<p>要旨全体</p>
<p>発表年：2012／著者：池田英史ほか／掲載誌：日本地球化学会年会要旨集 59：235／タイトル：山地森林流域における渓流水質の全国分布とその環境因子の評価</p>		
<p>㉒ (113)</p>	<p>・ 東京大学の5演習林を8流域の渓流水質を調査し、Cl は概ね海洋期限で海からの距離で決定された。流域の地質で硫黄化合物を期限とする SO₄ が多い流域は、カウンターとなる塩基性イオン濃度が高くなるものの pH は低くなる場合があった。</p>	<p>表-1 対象流域 表-3 2003年8月から2006年3月までの水質の平均値と標準偏差</p>

	発表年：2007／著者：五名美江ほか／掲載誌：東京大学農学部演習林報告 118：65-83／タイトル：東京大学 5 演習林 8 試験流域における渓流水質の特性	
⑳ (3427)	<ul style="list-style-type: none"> ・土壌通過水を源とする渓流水の水質はCaとHCO₃が多く、重炭酸カルシウム型の傾向で地質に依存していた。 ・NO₃は、温度による影響、石灰岩が及ぼす間接的な土壌の肥沃化が考えられ、特定の地質による濃度増加効果が示唆された。植生の相違では、高標高に分布するカラマツで低濃度となり、植生そのものよりも植生の立地条件の影響が大きいことが予測された。 	<p>図-3 水質からみた各地質の比較</p> <p>図-6 林種とNO₃の関係</p>
	発表年：2005／著者：牧野育代ほか／掲載誌：水文・水資源学会誌 18：424-434／タイトル：関東山地の水道水源林における渓流水の水質—渓流水の水質形成に及ぼす諸要因の検討—	
㉑ (3425)	<ul style="list-style-type: none"> ・対照流域法を用い、森林施業を実施した流域から流出する年間の窒素および渓流水量を、隣接したスギ・ヒノキ壮齡人工林を対照として比率を算出した。伐採後の窒素流出は対照流域の数倍に及び著しいが、その後の枝打ち・間伐といった保育作業の影響は小さく短期間に収束している。 	<p>図 4 森林施業による小流域からの窒素および渓流水の流出比率</p>
	発表年：2012／著者：戸田浩人／掲載誌：宗宮功ほか著「自然の浄化機能」技報堂出版：39-61／タイトル：第4章 水源林の水質形成機能	
㉒ (92)	<ul style="list-style-type: none"> ・皆伐から9年生まで渓流のNO₃濃度が高い、13～20年生で中庸、20～40年生で低い、87年生は1点のみで20～40年生と同程度。 	<p>表-3 各集水域のNO₃, SO₄, Cl, HCO₃, Na, K, Ca, Mg濃度の算術平均</p>
	発表年：2008／著者：福島慶太郎ほか／掲載誌：日本森林学会誌 90：6-16／タイトル：皆伐・再造林施業が渓流水質に与える影響—集水域単位で林齡の異なるスギ人工林を用いて—	
㉓ (95)	<ul style="list-style-type: none"> ・高齢化したスギ・ヒノキ人工林小流域の斜面下部伐採によって、溪流からの流出水量は年間100mm増加した。 ・表層土壌水のNO₃およびカチオン濃度は伐採1, 2年目の夏季に上昇したが、3年目には伐採前の水準に戻った。渓流水でも夏季にこれらの濃度が上昇した。 ・伐採後にNO₃流出量は増加したが、土壌水中の増加量に比較すると少ないことから、土壌中で生成した無機態窒素がすべて溪流に流出するわけではなく、土壌中での窒素の生物学的および化学的作用による流出の減少と遅延が示唆された。 	<p>表-1 図-3、8、9</p>
	発表年：2005／著者：浦川梨恵子ほか／掲載誌：日本森林学会誌 87：471-478／タイトル：高齢化したスギ・ヒノキ人工林小流域の斜面下部伐採が土壌および溪流の水質に及ぼす影響	

<p>②⑦ (3428)</p>	<p>・北米の落葉広葉樹林で皆伐を実施して除草剤で植生回復を抑制させた場合、非皆伐地での NO₃-濃度と流出料が数十倍にも増加し、植生の回復で減少したと報告している。</p>	<p>図 V-12 ハーバードブルーク集水域の伐採地と対照区から河川に流出した養分量と有機物粒子の変化</p>
<p>発表年：1996／著者：岩坪五郎編／掲載誌：「森林生態学」文永堂：189-293／タイトル：V. 各種の森林生態系の物質生産と養分循環</p>		
<p>②⑧ (3429)</p>	<p>・森林流域では裸地流域とは異なる風化過程が存在し、その相違は森林の成立で土壤中に卓越する NO₃ 等の生成に伴う H⁺であるであることが示唆された。CO₂ はわずかに植生が侵入した裸地でも森林流域に近い濃度で存在し、裸地と森林流域間の風化過程の相違は CO₂ 条件ではない。以上のように、生物化学的要因と地球化学的要因は森林の発達につれて水質への影響の仕方が変化することが示唆された。</p>	<p>図 9 生物化学的、地球化学的要因に着目した3流域における水質項目の変化</p>
<p>発表年：1996／著者：浅野友子ほか／掲載誌：京都大学農学部演習林報告 68：25-42／タイトル：森林の成立過程における水質形成機構の変化—植生の発達段階の異なる流域における水質・水文観測—</p>		
<p>②⑨ (3430)</p>	<p>・林地からの流出水の水質は牧草地に比較して含有成分量が少なく、その時期的な変動が小さい。牧草地の流出水は鶏ふん施用に大きく影響を受け、施肥の影響がない時期でも COD や NH₄ は林地で小さかった。</p>	<p>表-6 井戸水・溪流水の水質分析結果</p>
<p>発表年：1984／著者：遠藤治郎ほか／掲載誌：新潟大学農学部演習林報告 17：89-97／タイトル：低木性広葉樹林および牧草地の流出と水質</p>		
<p>③⑩ (3431)</p>	<p>・北海道の林地や畑草地の集水域 70 地点で調査し、畑草地面積率が大きくなると NO₃ 濃度が上昇することを明らかにした。また、堆肥・液肥化が十分に行われている養豚上では素掘貯留に比べて低濃度であった。畑草地では施肥や排水の管理が集水域の NO₃ 濃度上昇に影響しており、それに比べて森林地帯で NO₃ 濃度は極めて低濃度であった。</p>	<p>Table 2 土地利用別 NO₃-N 濃度</p>
<p>発表年：1995／著者：田淵俊雄ほか／掲載誌：農業土木学会論文集 178：129-135／タイトル：農林地からの流出水の硝酸態窒素濃度と土地利用との関係</p>		
<p>③⑪ (3432)</p>	<p>・平水時の河川水質濃度は、[林野流域・自然河川] << [酪農流域・自然河川] < [酪農流域・改修河川] の傾向を示した。酪農地域では T-N のうち NO₃ が 80%以上を占め、単位草地面積当たりの家畜飼育頭数が多いほど濃度も増大するなど NO₃ の溶脱が認められた。 ・飼育頭数密度が類似する酪農流域間の比較では、[自然河川] < [改修河川] の傾向を示し、河畔の林野・湿地などが緩衝域として浄化機能を発揮していた。</p>	<p>図-4～10</p>

	発表年:1995/著者:長澤徹明ほか/掲載誌:水文・水資源学会誌 8:267-274 /タイトル:北海道東部の大規模酪農地域における河川の水質環境	
③② (3433)	・全窒素と NO3 について、流域の草地率、流域面積あたりの飼育頭数、河川改修率、河川が草地に接している割合、が高い場合に濃度と比負荷量が大きくなる傾向であった。	Fig.2~15
	発表年:1999/著者:井上京ほか/掲載誌:農業土木学会論文集 200:85-92 /タイトル:北海道東部浜中地区における流域の土地利用と河川水質	
③③ (3434)	・調査流域における T-N 濃度は、[林野流域河川] < [面源小集水域] < [酪農流域河川] の傾向であり、[酪農流域河川] が高いのは点汚染のみならず土地利用の違いと考えられ、[面源小集水域] がやや高いのは草地に散布されたふん尿や肥料の流出によると考えられた。	図-7 酪農流域河川と面源集水域(明渠排水路)の窒素濃度 図-8 酪農流域河川と面源集水域(沢筋)の窒素濃度
	発表年:2000/著者:宗岡寿美ほか/掲載誌:農業土木学会誌 68:217-220 /タイトル:北海道の酪農流域河川における窒素流出と水質保全	
③④ (3435)	・18の農林地流域河川において秋期に水質調査を行い、NO3濃度と畑草地率との間に強い関係が認められ、農地の余剰窒素の影響が推察された。	Fig.6 畑草地率と T-N、NO3-N 濃度の関係
	発表年:2006/著者:岡沢宏ほか/掲載誌:農業土木学会論文集 240:63-70 /タイトル:網走川水系における農業的土地利用と河川の窒素・リン濃度の関係	
③⑤ (3436)	・世界の森林の一次生産力と生物体現存量は、サバンナや温帯草原に比べ、同じ気候帯であればはるかに大きいことが示されている。	表 18.1 世界のさまざまな群集における年間の純一次生産力と生物体現存量の推定値
	発表年:2003/著者: Begon ほか/掲載誌:「生態学—個体・個体群・群集の科学」京都大学学術出版会:1034pp/タイトル:第18章 群集内でのエネルギーの流れ	
③⑥ (89)	・北海道の集水域の水文地形構造や河畔帯の有無で渓流水 NO3濃度の集水域間での変動パターンが有意に説明でき、地形が急峻な集水域は土壌表層からの NO3 流入の影響が強いため濃度が高く、緩やかな集水域では河畔林の養分吸収や脱窒によって低くなると考えられた。	図 13 北海道北部の森林集水域における斜面、河畔部、河畔湿地でも土壌水に含まれる硝酸イオン濃度と溶存有機炭素の分布 図 14 北海道北部の森林集水域における複数集水域の渓流水硝酸イオン濃度と地形構造との相関関係
	発表年:2010/著者:柴田英昭ほか/掲載誌:地球環境 15:133-143/タイトル:森林流域における窒素の生物地球化学過程と渓流水質の形成	

<p>③⑦ (3437)</p>	<p>・中国の海南島および広東省、群馬県みどり市、東京都八王子市の森林流域において、森林小流域からの脱窒による N 流出割合が大きいことを、安定同位体の実験手法で示した。</p> <p>発表年：2015／著者：Fang ほか／掲載誌：Proceedings of the National Academy of Sciences 112: 1470-1474 / タイトル：Microbial denitrification dominates nitrate losses from forest ecosystems.</p>	<p>Table 1 Site information and NO3 budget for the six study forests</p>
<p>③⑧ (3438)</p>	<p>・森林流域の末端部に生じる飽和地下水帯で、NO₃-が少なからず脱窒され N₂に戻っていること、さらにそのプロセスが地下水位の条件に左右されることを示している。</p> <p>発表年：2002／著者：大手信人ほか／掲載誌：日本生態学会誌 52: 131-137 / タイトル：森林生態系の物質循環を理解するための流域研究に向けて一流出窒素の動態が示唆すること一</p>	<p>図 2 森林流域のライパリアンゾーンにおける土壤水中の NO₃-濃度 (Cl-濃度で基準化) と δ 15N との関係</p>
<p>③⑨ (114)</p>	<p>・土壤水の水溶性 NO₃-/Cl-比が高くなるほど、渓流水のそれも高くなる傾向がある。渓流近傍の土壤の 50~60cm の深さでは、生理活性の高い根はきわめて少ない。このことから、渓流水の NO₃-には、根系外への NO₃-流亡の程度が強く影響する。</p> <p>・土壤 50~60cm 深の水溶性 NO₃-/Cl-比は、その標準偏差の最低値は渓流水のそれと同程度であるが、平均値としては渓流水のそれよりも大きい。還元状態の地下水帯において脱窒菌による NO₃-の還元が予測される。</p> <p>発表年：1991／著者：大類清和ほか／掲載誌：日本林学会誌 76: 383-392 / タイトル：森林小流域における渓流水質に及ぼす諸要因の影響</p>	<p>図-6 土壤 (50 あるいは 60cm 深) の水溶性 NO₃-/Cl-比と渓流水の NO₃-/Cl-比との関係</p>
<p>④⑩ (114)</p>	<p>・飽和帯型井戸の水質は、渓流水の水質に対応しており、飽和地下水帯の上流部、下流部を問わず一様な水質を示した。</p> <p>・各イオン濃度の変化傾向は 2 パターンに大別され、Na、Cl、SO₄ は流域内部で飽和帯まで移動する間に濃度上昇して流出し、NO₃ と Na 以外のカチオンは斜面直下型井戸では高濃度が現れるものの飽和帯型井戸まで移動する間に濃度が低下して流出する。後者は脱窒の寄与が示唆される。</p> <p>発表年：1991／著者：大手信人ほか／掲載誌：・京都大学農学部演習林報告 63: 69-81 / タイトル：森林流域内の水移動にともなう地中水・渓流水の水質変化</p>	<p>図-7 EC、pH、8 種のイオン濃度と観測井戸の深さの関係 図-8 EC、pH、アニオン濃度の時間変化</p>
<p>④⑪ (124)</p>	<p>・溪流の NO₃/Cl 比は、ほぼ 1.5 の一定の値をとったが、丘陵地の脱窒が起こる流域では 0.5 以下となっており、脱窒の影響が顕著である。</p> <p>発表年：2004／著者：楊宗興ほか／掲載誌：地球環境 9: 29-40 / タイトル：渓流水の NO₃ 濃度と森林の窒素飽和</p>	<p>図 11 多摩川水系の渓流水における NO₃/Cl 比の分布</p>

<p>④② (3439)</p>	<p>・一降雨が 100mm を超える流出時には、K, Ca, Mg, NO₃, SO₄ 濃度および EC は流量の増加とともに増加し、その後の流量逡減時において低下した。・NO₃ 濃度は直接流出割合の増加にともない増加し、Ca 濃度なども同様である。これらは土壌から直接流出してくる水の影響が大きいと考えられる。その反対の傾向を Na 濃度（および HCO₃ 濃度など）は示し、土壌深層を通過した地下水の基底流出の影響が大きいといえる。</p>	<p>図-2 一降雨イベント 188.5mm での溪流水の溶存物質濃度の変化 図-12 流量に占める直接流出量の割合と流出水の NO₃-N および Na 濃度との関係</p>
<p>発表年：1992／著者：大類清和ほか／掲載誌：日本林学会誌 74：203-212 ／タイトル：降雨イベントでの溪流水の溶存物質の流出特性と流出成分の分離</p>		
<p>④③ (3440)</p>	<p>・両流域で融雪の初期の出水時は低流量であるものの、河川水質が一時的に高濃度を示すファーストフラッシュ現象が確認された。 ・農業流域では森林流域の 1.6 倍の NO₃、1.7 倍の T-N の負荷が融雪期に流出していた。</p>	<p>Fig.3,4 融雪期の水質水文状況（森林流域）（農業流域） Fig.7 融雪期における流出高、NO₃-N、T-N 比負荷</p>
<p>発表年：2006／著者：岡沢宏ほか／掲載誌：農業土木学会論文集 237：57-65 ／タイトル：森林流域と農業流域における融雪流出時の汚濁負荷流出特性</p>		
<p>④④ (3441)</p>	<p>・草地畜産流域における年間窒素比負荷量は、森林流域の 1.8 倍に達し、特に降雨流出時に高濃度で多量の窒素が流出しており、雨滴による地表面攪乱が懸濁性の窒素を流出させていると考えられた。</p>	<p>Fig.4 水文条件と T-N 比負荷</p>
<p>発表年：2006／著者：岡沢宏ほか／掲載誌：農業土木学会論文集 240：63-70 ／タイトル：北海道西部の草地畜産流域における河川水文と汚濁負荷流出特性</p>		
<p>④⑤ (3442)</p>	<p>・森林土壌は放棄畑とくらべて、深い層まで粗孔隙・細孔隙がバランスよく豊富であり、透水性もよいため豪雨時の表面流出が減る。</p>	<p>図 3.4 放棄畑とそれに隣接した森林における同じタイプの土壌の毛管間隙量の違い 図 3.13 森林土壌とそれに隣接した同じ土壌型の放棄畑での浸透速度の比較</p>
<p>発表年：1986／著者：Kramaer／掲載誌：「水環境と植物」養賢堂：506pp ／タイトル：第 3 章 土壌と水</p>		

問 05-22	優占樹種の違いは水質浄化機能の発揮にどのような影響を与えるか	
答	<p>水質浄化機能は、樹種によって著しい違いは生じないと考えられる。</p> <p>樹冠にもたらされた降雨は、一部はそのまま遮断蒸発し、一部が枝葉から雨滴となって落ちる林内雨、一部が樹幹を伝い流下する樹幹流となって林床に到達する。林内雨や樹幹流は、無降雨時に付着したエアロゾルを洗脱したり、樹体から物質が溶脱着したりするため水質が変化する。このような森林内を移動する雨水の水質は樹種によって異なり、例えば針葉樹で酸性側に、広葉樹では中性側に変化するなどの報告がある（根拠①～⑥）。</p> <p>林床に到達した雨水は、土壌に浸透する際に有機物分解で生じた無機態窒素などの養分が含まれる。沢部に代表される肥沃な土壌では、土壌窒素の無機化や硝化速度が大きいいため、土壌水とともに流出しやすい硝酸態窒素が尾根部より多い（根拠⑦～⑪）。スギの落葉が土壌をより肥沃にすることや、尾根部のモミや広葉樹の落葉等に硝化抑制作用があり流出しにくいアンモニア態窒素で留まるという報告がある（根拠⑧⑫⑬）。</p> <p>土壌表層で生じた無機態窒素などの養分は植物根に土壌水とともに吸収されるため、深い層になるにしたがい濃度が低下する（根拠①⑭）。樹種による差異はなく、むしろ斜面位置などの土壌肥沃度による成長量の差異を反映している（根拠⑮⑯）。</p> <p>下層に浸透した土壌水は、鉱物の風化作用を受け地質に応じた安定した水質となるため、渓流水質は広域比較すると地質や風化速度に影響を及ぼす温度条件（緯度・標高など）をよく反映している（根拠②～④⑰～⑳）。カラマツが優占する流域が他の樹種より、溪流流出水の溶存物質濃度が低いと報告されている（根拠⑱㉑）これはカラマツが高標高地の分布が多いことによると考えられる。</p> <p>以上のように、森林生態系内の水質は樹種による違いみられるものの、渓流水質は土壌肥沃度による有機物分解速度など生物化学的要因と風化速度など地質による地球化学的要因に大きな影響を受け（根拠⑭⑱㉒～㉔）、樹種による差異はなくなると考えられる。</p> <p>なお、関東山地の一部では大気からの窒素沈着の増大により、森林生態系で取り込みきれない窒素が流出し、溪流の硝酸態窒素濃度が高い現象が報告されている（根拠㉕）。これらの流域は優占樹種が様々であり、樹種による過剰な窒素沈着へ差異はみられない（根拠㉖㉗～㉙）</p>	
根拠 (文献番号)	知見	データ等
① (3420)	<ul style="list-style-type: none"> ・ NO₃ 濃度や DOC 濃度は林内雨から表層土壌水にかけて高まり、深くなるにつれて急速に低下し、溪流流出水は土壌表層に比べて著しく低濃度である。これは、土壌層における有機物の分解・無機化と植生による吸収を表している。 <p>発表年：2002／著者：小柳信宏ほか／掲載誌：森林立地 44：11-20／タイトル：スギ・ヒノキ壮齡人工林小流域における降雨の移動に伴う溶存有機態窒素および溶存有機態炭素の動態</p>	<p>図-4 降雨から渓流水にかけての年平均の pH,DIN,DOC および DOC 濃度</p>

<p>② (112)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・岐阜の3流域で林外雨、林内雨、樹幹流および渓流水を調査し、酸性の雨水を針葉樹は酸性側に広葉樹は中性側に变化する既往の報告と同様の傾向となった。ECは林外雨<林内雨<樹幹流の順に増大し、樹体からの先脱と溶出が示唆された。 ・渓流水はpH、ECともに大きな変化はなく、酸性雨が流域に入っても中性よりの安定した値を示した。ヒノキ人工林を主とした流域で天然生林よりも若干ECが低い傾向があるものの顕著な差はみられてない。 	<p>図-3 林外雨とスルーフォール、樹幹流、渓流水のpH 図-4 林外雨とスルーフォール、樹幹流、渓流水のpHとECの関係 図-5 各採水試料におけるECとカチオンの溶存量</p>
<p>発表年：1999／著者：市橋弘美ほか／掲載誌：岐阜大学農学部研究報告64：1-11／タイトル：位山演習林における天然水の水質</p>		
<p>③ (117)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ブナは樹体が塩基類に富み、酸性雨に対して高い中和機能を示した。一方、ヒノキからの塩基成分の雨水中への溶出はブナに比べて小さかった。 ・土壌浸透水のNO₃濃度は土壌全体で低く、樹木根により吸収されていると考えられた。また、塩基類に富む玄武岩質火山灰土壌のもつ高い緩衝能のため、土壌浸透水のpHはほぼ中性で、樹種や土壌層位による水質の違いはあまり認められなかった。 	<p>第4表 ブナ林およびヒノキ壮齡林における林内雨と樹幹流の水質 第2図 ブナ林、ヒノキ林における雨水および土壌浸透水の水質 第5表 ブナ林およびヒノキ壮齡林における土壌浸透水の水質</p>
<p>発表年：1993／著者：井上克弘ほか／掲載誌：日本土壤肥料学会誌64：265-274／タイトル：富士山麓におけるブナ林、ヒノキ林の雨水および土壌浸透水の水質とブナの酸性雨中和機能</p>		
<p>④ (99)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・林外雨のpH5.4のとき、スギ・コナラ・モウソウチクの林内雨は中性を示したが、スギ樹幹流は強い酸性を示し、コナラ・モウソウチクでは酸性・弱酸性であった。これらのpHの変化は、イオンの溶脱や吸着によって引き起こされていた。 ・3種の樹幹流を土壌に透過させると、pH4~6の一定の値に収束した。これは土壌の粘土鉱物のイオン交換能を示唆していた。 	<p>第1表 林外雨、林内雨および樹幹流の水質測定結果 第6表 土壌透過実験前後の水質測定およびED-XRF分析結果</p>
<p>発表年：2004／著者：田崎和江ほか／掲載誌：地球科学58：389-405／タイトル：森林樹木と土壌間における雨水の挙動—現地測定と浸出・透過実験</p>		
<p>⑤ (116)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・スギ林では鉍質土層の全C、Nおよび交換性塩基がヒノキ林よりも多く、特にCaが著しかった。 ・スギ林内雨はヒノキ林内雨よりもK、Ca、Mg量が多かった。 ・ヒノキ林の土壌水ではNO₃がほとんどなく、Ca、Mg濃度もスギ林と比べて著しく低かった。 	<p>表-2 試験地のA0層および鉍質土層の元素含有量 図-1 林外雨、林内雨中の溶存元素濃度と林外雨量の経時変化 図-4 土壌水中の溶存元素濃度の経時</p>

		変化
	発表年：1996／著者：高橋輝昌ほか／掲載誌：日本林学会誌 78：127-133 ／タイトル：スギおよびヒノキ壮齡人工林における元素の垂直的な移動特性	
⑥ (105)	・イオンの溶脱量は、A0層からはCa、NO ₃ 、A層からはCa、NO ₃ 、K、Clで多く、NO ₃ を除きスギ林の方がコナラを主とする落葉広葉樹林より多かった。	表2 A0層およびA層からのイオン溶脱量
	発表年：2001／著者：片桐成夫ほか／掲載誌：森林応用研究 10-2：11-18 ／タイトル：落葉広葉樹林およびスギ林におけるA0層・表層土壌通過水の水質変化について	
⑦ (109)	・幼齡林より壯齡林、斜面上部より下部、土壌下層より表層といった、土壌有機物の多い場所で無機態窒素供給量・速度が大で、温度変動に安定的であった。	表-2 森林土壌窒素無機化の特性値
	発表年：1994／著者：戸田浩人ほか／掲載誌：日本林学会誌 76：144-151 ／タイトル：森林土壌中における窒素無機化の反応速度論的解析(1) 林齡・斜面位置・深さ別の窒素無機化特性	
⑧ (3443)	・斜面下部のスギから山腹のヒノキと隣接した広葉樹林のA0層の窒素無機化特性を調べ、斜面下部ほど微生物の活性が高く、窒素無機化・有機化の進行が速いことを明らかにした。 ・斜面下部ほど硝化が著しく、同じ斜面上部でもヒノキより広葉樹で硝化率が低く、広葉樹や混交するモミのリターの硝化阻害物質の存在が考えられた。	表-3 A0層(F2～F3画分)における窒素無機化・有機化曲線の特性値 図-2 無機態窒素中のNO ₃ -N割合の変化
	発表年：1998／著者：戸田浩人ほか／掲載誌：日本林学会誌 80：112-119 ／タイトル：森林のA0層における窒素無機化・有機化の反応速度論的解析	
⑨ (93)	・脚部および中腹部のスギ林は、尾根部のヒノキ林に比べて土壌中のNO ₃ 生成速度が大きく、水溶性NO ₃ 濃度および水溶性Ca濃度が高かった。	図-5 水溶性NO ₃ 生成速度と水溶性陽イオン生成速度の関係
	発表年：2007／著者：浦川梨恵子ほか／掲載誌：日本森林学会誌 89：151-159／タイトル：高齢化したスギ・ヒノキ人工林小流域の斜面位置別土壌中の水溶性イオンの動態	
⑩ (317)	・スギ林で交換性CaおよびMg量が、ヒノキ、イチイガシ、ケヤキ、クヌギの人工林や広葉樹天然林に比べて高かった。広葉樹天然林は一部を除いて土壌化学性は貧弱であった。	表-10 土壌化学性の要因解析
	発表年：2002／著者：諫本信義ほか／掲載誌：大分県林試研報 14：1-204 ／タイトル：大分県の貴重な天然林及び代表的な人工林の総合調査	

<p>⑪ (3444)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・土壌の無機態窒素は斜面下部で NO₃、上部で NH₄ として存在し、土壌溶液の無機態窒素組成を反映していた。 ・土壌微生物バイオマスは斜面の上部でやや大きく、斜面上の異なる位置で可給態窒素のプール、フラックスの異なる循環機構の存在が推察された。 <p>発表年：1996／著者：徳地直子／掲載誌：京都大学農学部演習林報告 68：9-24／タイトル：竜王山森林試験地の斜面上の異なる位置における窒素循環機構</p>	<p>図 12 斜面上の異なる位置における物質循環機構の概念図</p>
<p>⑫ (106)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・N 無機化量は F3 画分で最大となった。ミズナラでは硝化活性が著しく低かった。適潤性土壌のケヤキとスギでは、他の試験区より高い C/N で純 N 無機化が生じた。 <p>発表年：2002／著者：小柳信宏ほか／掲載誌：日本土壌肥料学会誌 73：363-372／タイトル：分解程度の異なる樹種別リターの炭素および窒素無機化特性</p>	<p>図 2 30 日間の N 無機化量</p>
<p>⑬ (3445)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・スギ林でヒノキ林よりも A0 層や鈹質土層の Ca 濃度が高く、スギでは林齢が高いほど Ca や N 濃度が高くなった。 <p>発表年：1993／著者：澤田智志ほか／掲載誌：日本土壌肥料学雑誌 第 64 巻第 3 号／タイトル：スギおよびヒノキ林下の土壌における塩基の蓄積要因</p>	<p>第 2 図 A0 層における養分量と林齢の関係 第 3 図 土壌の全カルシウム量と林齢の関係</p>
<p>⑭ (3417)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・深さ別の土壌水、湧水および渓流水のイオン濃度から、森林土壌では表層で有機物の無機化が盛んなため、土壌水中の NO₃-濃度が最も高い。土壌水中の養分は樹木に吸収されるため、下層に行くにしたがって濃度は低下する。 ・酸性物質の流入や硝化作用によって生じた H⁺は、土壌コロイドに吸着している塩基性イオンと交換され、土壌水中に Ca²⁺や Mg²⁺などが溶出される。これらのイオンも、樹木に吸収されたり沈殿したりすることで次第に濃度を低下させて渓流水となる。 ・土壌水の Na⁺、HCO₃⁻や SiO₂ は下層へ行くほど濃度を高め、渓流水に移行する。これは、石英の化学的風化を受けるためである。したがって、土壌中での滞留時間が長く、深い層を通過してくる流出水は、pH が中性に近く、これらのイオン濃度が高くなる。なお、石灰岩地帯では Na⁺にかわり Ca²⁺濃度が高まる。 <p>発表年：2000／著者：生原喜久雄／掲載誌：土壌の物理性 85／タイトル：森林土壌生態系での無機成分の動態</p>	<p>図-13 土壌から溪流にかけての水質変化</p>

<p>⑮ (3446)</p>	<ul style="list-style-type: none"> 年養分吸収量の違いは、樹種よりも成長量すなわち年乾物生産量の相違を反映している。 	<p>表 12-6 わが国の森林の年養分吸収量</p>
<p>発表年：1989／著者：河田弘／掲載誌：「森林土壌学概論」博友社：399pp ／タイトル：第 12 章 森林生態系における養分の現存量および年養分吸収量</p>		
<p>⑯ (3428)</p>	<ul style="list-style-type: none"> 年養分吸収量の違いは、樹種よりも斜面位置など立地条件による成長量の相違を反映している。 	<p>表 V-12 森林の養分吸収量および還元量／吸収量の比</p>
<p>発表年：1998／著者：岩坪五郎編／掲載誌：「森林生態学」文永堂：189-293 ／タイトル：V. 各種の森林生態系の物質生産と養分循環</p>		
<p>⑰ (3422)</p>	<ul style="list-style-type: none"> 母材風化由来が主な溶存物質濃度は、採水点の標高と負の相関がみられ、水温による風化速度への影響が示唆された。 全流域を対象として、すべてのイオン濃度に対して重回帰で選択された説明変数は標高であり、ついで流域面積と崩壊地割合が多く選択された。樹種にかかわる針葉樹割合は選択されないか、選択されても偏相関係数が低く、水質に及ぼす樹種の影響は小さかった。 全調査流域を対象とするよりも表層地質が異なる流域ごとに重回帰分析をすると寄与率が高まる。地質による影響が大きいため、水質への影響要因は表層地質別に行うべきである。 	<p>表 3 丹沢山地上流域における渓流水の溶存イオン濃度と流域特性との相関係数 表 4 丹沢山地上流域における渓流水の溶存イオン濃度と流域特性による重回帰分析</p>
<p>発表年：2007／著者：戸田浩人ほか／掲載誌：丹沢大山総合調査学術報告書、丹沢大山総合調査団編：410-415／タイトル：丹沢山地の渓流水質</p>		
<p>⑱ (3423)</p>	<ul style="list-style-type: none"> 施肥前歴が多くの溶存物質の濃度に影響し、硝化作用とそれともなうイオン交換や鉱物の風化促進があることが示唆された。 Ca と SiO₂ は、施肥前歴以外に採水点の標高の影響を受け、標高が高いほど濃度は低かった。 NO₃ 濃度は施肥前歴の影響がとくに大きかったが、施肥前歴のない小集水域では、林齢が比較的大きく影響し、20 年生まで濃度に正の偏相関係数が極端に高い。このことから、NO₃ 濃度は皆伐後まだ林分が未閉鎖であると高く、閉鎖後はより低い状態で安定するものといえる。 樹種の違いについて、広葉樹と針葉樹との違いが NO₃-濃度を含め渓流水質に大きな影響を及ぼしているとは言えなかった。 	<p>表 -3,4,5,6 渓流水の溶存物質濃度についての数量化 I 類による解析結果</p>
<p>発表年：1994／著者：大類清和ほか／掲載誌：日本林学会誌 76：383-392 ／タイトル：森林小流域における渓流水質に及ぼす諸要因の影響</p>		

<p>①⑨ (79)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・全国の山地流域 119 地点における水質の解析で、標高の高い甲信地方で EC が小さく気温と生物活性や化学的風化速度の相関が示唆された。 ・深成岩や変成岩が分布する流域でイオン濃度が低く、鉱物の反応速度やマサ化した花崗岩のように保水性の低さが、固液接触時間を短くして溶出が小さいことが考えられた。 ・植生では落葉針葉樹が卓越する流域でイオン濃度が低かった。これは、カラマツが高標高地域に分布しており、植生の影響というより気温と生物活性や化学的風化速度の相関が大きいと考えられる。 <p>発表年：2012／著者：池田英史ほか／掲載誌：日本地球化学会年会要旨集 59：235／タイトル：山地森林流域における渓流水質の全国分布とその環境因子の評価</p>	<p>要旨全体</p>
<p>②⑩ (124)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・関東周辺域の渓流の NO₃ 濃度は、標高が高いほど低かった。 ・渓流 NO₃ 濃度の低い森林では、窒素無機化が盛んな表層で土壌溶液 NO₃ 濃度が高かった。一方、渓流濃度の高い森林では、深部でも土壌溶液 NO₃ 濃度が減少せずに高く、むしろ上昇していた。渓流 NO₃ 濃度は、その集水域の窒素循環特性に関する情報を包含する有用なパラメータといえる。 <p>発表年：2004／著者：楊宗興ほか／掲載誌：地球環境 9：29-40／タイトル：渓流水の NO₃ 濃度と森林の窒素飽和</p>	<p>図 4 標高に対する渓流水の NO₃ 濃度の変化 図 5 森林土壌深部の土壌溶液中 NO₃ 濃度の分布</p>
<p>②⑪ (3427)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・土壌通過水を源とする渓流水の水質は Ca と HCO₃ が多く、重碳酸カルシウム型の傾向で地質に依存していた。 ・NO₃ は、温度による影響、石灰岩が及ぼす間接的な土壌の肥沃化が考えられ、特定の地質による濃度増加効果が示唆された。植生の相違では、高標高に分布するカラマツで低濃度となり、植生そのものよりも植生の立地条件の影響が大きいことが予測された。 <p>発表年：2005／著者：牧野育代ほか／掲載誌：水文・水資源学会誌 18：424-434／タイトル：関東山地の水道水源林における渓流水の水質—渓流水の水質形成に及ぼす諸要因の検討—</p>	<p>図-3 水質からみた各地質の比較 図-6 林種と NO₃ の関係</p>
<p>②⑫ (3421)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・土壌の化学的風化は水分のある状態で、母材が酸や酸化物質と反応し、鉱物の構成元素がイオンとして溶出することである。したがって、水が土壌を通過することによって起こる、質的な変化も化学的風化の過程とみなすことができる。森林生態系において、Ca や Mg などの塩基の 80%は風化による生成である。 ・土壌の風化速度は H⁺が生態内に供給・生成される量と溪流から流出する陽イオン両や HCO₃⁻量に 	<p>図-8 H⁺の生物地球科学的循環</p>

	<p>よって評価される。また、世界のほとんどの報告で、森林の集水域での降雨と渓流水のとの塩基の収支がマイナスなのは、生態系にインプットされる塩基量よりもインプットされる H^+ と生態系内で生成される H^+ との和が多いからである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 土壌での風化を支配する H^+ イオンの供給において、外部からは主に降雨で供給される酸で、この量の推定は容易である。内部で生成される H^+ は、A0 層や鉱物土層でおきている種々の生物学的、化学的な過程（硝化作用、炭酸塩化作用、酸化）で生成され、陽イオンが溶出する。 	
	<p>発表年：1994／著者：生原喜久雄／掲載誌：水文・水資源学会誌 7(4)：325-331 ／タイトル：渓流水の水質形成に及ぼすプロトン (H^+) の影響</p>	
<p>⑳ (3419)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 土壌コロイドは負に帯電しており、Ca などの陽イオンを吸着する。酸性化によって H^+ が増えると、陽イオンが H^+ と交換し土壌水に放出される。Ca などは植生が吸収し落葉落枝として還元され、再び土壌コロイドに吸着することで酸緩衝能を保っている。 	<p>図 2 土壌コロイドの陽イオン吸着と酸緩衝能</p>
	<p>発表年：2012／著者：戸田浩人／掲載誌：「丹沢の自然再生」J-FIC／タイトル：第 4 章 水源林の水質形成機能</p>	
<p>㉑ (82)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 安山岩、流紋岩を主とする流域および凝灰岩を主とする流域に比べ、堆積岩を主とする流域は Ca 濃度が高い傾向が認められた。堆積岩を主とする流域は、白井川流域のみに存在したことから調査流域間の Ca 濃度平均値の差は流域内の地質の違いが原因であると考えられる。 	<p>図-3 流域の主な地質と Ca 濃度</p>
	<p>発表年：2009／著者：相澤州平ほか／掲載誌：日本森林学会北海道支部論文集 57：135-137／タイトル：小樽内川および白井川の支流における流域間の渓流水質の差異</p>	
<p>㉒ (113)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 東京大学の 5 演習林を 8 流域の渓流水質を調査し、Cl は概ね海洋期限で海からの距離で決定された。流域の地質で硫黄化合物を期限とする SO_4 が多い流域は、カウンターとなる塩基性イオン濃度が高くなるものの pH は低くなる場合があった。 	<p>表-1 対象流域 表-3 2003 年 8 月から 2006 年 3 月までの水質の平均値と標準偏差</p>
	<p>発表年：2007／著者：五名美江ほか／掲載誌：東京大学農学部演習林報告 118：65-83／タイトル：東京大学 5 演習林 8 試験流域における渓流水質の特性</p>	
<p>㉓ (3429)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 森林流域では裸地流域とは異なる風化過程が存在し、その相違は森林の成立で土壌中に卓越する NO_3 等の生成に伴う H^+ であるであることが示唆された。CO_2 はわずかに植生が侵入した裸地でも森林流域に近い濃度で存在し、裸地と森林流域間の風化過程の相違は CO_2 条件ではない。以上のように、生物化学的要因と地球化学的要因は森林の 	<p>図 9 生物化学的、地球化学的要因に着目した 3 流域における水質項目の変化</p>

	<p>発達につれて水質への影響の仕方が変化することが示唆された。</p>	
	<p>発表年：1990／著者：浅野友子ほか／掲載誌：京都大学農学部演習林報告 68：25-42／タイトル：森林の成立過程における水質形成機構の変化—植生の発達段階の異なる流域における水質・水文観測—</p>	
<p>②⑦ (180)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・表層の土壌水では、多くの溶存物質の濃度変化に対して、土壌水分量、土壌有機物の無機化および硝化、陰イオン交換容量、あるいは樹冠通過雨の水質などが影響していると推察された。 ・深層の土壌水での Na、HCO₃、SiO₂ 濃度と pH の変化に対して、土壌呼吸起源の CO₂ の増加による鉱物風化が影響していると推察された。 ・渓流水の NO₃ 濃度の変化には、流出水量とともに深層の土壌水での NO₃ 濃度の変化が影響を及ぼしていた。 	<p>表-1～5 図-3～7</p>
	<p>発表年：1995／著者：大類清和ほか／掲載誌：水文・水資源学会誌 8：367-381／タイトル：森林小集水域での水質変化の過程</p>	
<p>②⑧ (3447)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・群馬県の高齢化したスギ・ヒノキ人工林小流域において、降水（バルク）による窒素沈着が近年高まっており、渓流水の NO₃ 濃度が他の地域の森林より高く、その流出量が降水による供給量を上回っていること、随伴する塩基性陽イオンの流出増大がみられた。 	<p>図 3 老齡人工林小流域における年降水量および渓流水量とその含有養分量 表 2 老齡人工林小流域における硝化による純 H⁺増加と渓流水のカチオン純増との関係</p>
	<p>発表年：2000／著者：戸田浩人／掲載誌：資源環境対策 38：1067-1072／タイトル：陸上生態系の物質循環からみた窒素飽和による汚染の構図</p>	
<p>②⑨ (3448)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・都心からの距離の増加にともない、渓流水の NO₃-濃度が低下する傾向がみられた。これは、東京近郊から移入する窒素化合物の乾性沈着の影響が渓流水に現れている可能性が高い。 	<p>図-4 朝日峠、桂における林外降水ならびに樹冠通過降水による年無機態窒素流入負荷量 図-6 調査地域における渓流水の NO₃-濃度の分布</p>
	<p>発表年：2012／著者：吉永秀一郎ほか／掲載誌：日本森林学会誌 94：84-91／タイトル：関東平野北東部の森林流域における渓流水の NO₃-濃度分布と東京都心からの距離との関係</p>	
<p>③⑩ (3424)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・NO₃-濃度は関東山地の調査流域で高かった。群馬県の調査流域では、NO₃-と Ca²⁺濃度の高い相関がみられ、土壌の表層において硝化作用で生成した H⁺による交換性 Ca²⁺の溶出が示唆された。 	<p>図-3 各溪流における陽イオンおよび陰イオン濃度 図-4 渓流水におけるイオン濃度間の関係</p>
	<p>発表年：2000／著者：戸田浩人ほか／掲載誌：日本林学会誌 82：308-312</p>	

	／タイトル：全国大学演習林における渓流水質	
③① (89)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 関東北部など大気窒素沈着が多い地域では渓流水に含まれる NO₃ 濃度が高い。一方、北海道北部など大気窒素沈着が比較的少ない地域では、森林生態系内に窒素が正味保持され、渓流水の NO₃ 濃度は低く保たれている。 ・ 土壌表層での窒素無機化・硝化過程は窒素循環の要として、生態系全体の窒素の生物地球化学過程や渓流水質の地理的な変動パターンを説明する指標となり得る可能性がある。 	<p>図 5 レジンコア法を用いた土壌の現地培養実験における大気窒素沈着の影響</p> <p>図 6 森林渓流水に含まれる硝酸イオン濃度の全国比較</p>
	発表年：2010／著者：柴田英昭ほか／掲載誌：地球環境 15：133-143／タイトル：森林流域における窒素の生物地球化学過程と渓流水質の形成	

問 5-23	林相構造（単・複）の違いは水質浄化機能の発揮にどのような影響を与えるか	
答	<p>単相林、複層林といった林相構造による水質浄化機能への影響は少ないと考えられる。</p> <p>水質浄化機能の主体は森林土壌であり、森林土壌とそこに成立している森林が健全な物質循環をしていることが重要である（根拠①-③）。この条件が成立した林分という前提にたてば、林相構造にかかわらず水質浄化機能は十分に発揮される。</p> <p>単相林で間伐等の保育作業が不十分な場合、林内が暗く下層の林床植生が衰退した状態となりやすい。特にヒノキ林では落葉が鱗片化することもあり、スギや落葉広葉樹などの落葉層がある林床と比べ、雨滴の浸食や表面流が起きやすくなる。このような状態では、水質浄化機能を発揮する土壌層への浸透力が弱くなり、結果として水質浄化機能が低下する（根拠④）。複層林を成立させるためには、単相林以上に間伐や高木の枝打ちによって林床への光管理を行う必要がある（根拠⑤）。下木が健全な複層林であれば、単相林で下層植生が生育した状態と同様に、雨滴浸食の抑止と落葉堆積の効果が期待され、土壌浸透能も維持されると考えられる。また、常時複層林として管理されれば、皆伐による一時的な裸地化による溪流からの窒素流出（根拠⑥、⑦）が避けられることから、水質浄化機能の維持に役立つといえる。</p> <p>なお、単相のヒノキ林でも適切な管理の実施で土壌養分が維持されることや、タケや広葉樹が混交してタケや広葉樹落葉が林床にはいることで土壌肥沃度が向上することという報告がある（根拠⑧-⑩）。</p> <p>近年、シカの過剰な採食圧により天然生落葉広葉樹二次林の下層植生が衰退し、管理不足のヒノキ林と同様に落葉の流亡、土壌浸透能の低下による雨滴浸食や表面流の発生が報告されている（根拠⑪）。防鹿柵の設置で下層植生が回復することで、森林に窒素等の養分が保持され、溪流流出が低下した（根拠⑫-⑬）。林相構造にかかわらず、下層植生と落葉による地表の被覆効果が重要であるといえる。</p> <p>また、下層植生の分布は土壌肥沃度に対応しており、例えば沢部のスギ林下で硝化が盛んな立地では、流出しやすい硝酸態窒素を吸収・利用する硝酸還元酵素の活性の高いコアジサイが分布している（根拠⑭-⑮）。単相林であっても生態的に適した下層植生の維持が、水質浄化機能に一定の役割を果たすと考えられる。</p>	
根拠 (文献番号)	知見	データ等
① (3417)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 深さ別の土壌水、湧水および溪流水のイオン濃度から、森林土壌では表層で有機物の無機化が盛んなため、土壌水中の NO₃-濃度が最も高い。土壌水中の養分は樹木に吸収されるため、下層に行くにしたがって濃度は低下する。 ・ 酸性物質の流入や硝化作用によって生じた H⁺は、土壌コロイドに吸着している塩基性イオンと交換され、土壌水中に Ca²⁺や Mg²⁺などが溶出される。これらのイオンも、樹木に吸収されたり沈殿したりすることで次第に濃度を低下させて溪流水となる。 	図-13

	<ul style="list-style-type: none"> ・土壌水の Na⁺、HCO₃⁻や SiO₂ は下層へ行くほど濃度を高め、渓流水に移行する。これは、石英の化学的風化を受けるためである。したがって、土壌中での滞留時間が長く、深い層を通過してくる流出水は、pH が中性に近く、これらのイオン濃度が高くなる。なお、石灰岩地帯では Na⁺にかわり Ca²⁺濃度が高まる。 	
	発表年：2000／著者：生原喜久雄／掲載誌：土壌の物理性 85／タイトル：森林土壌生態系での無機成分の動態	
② (3419)	<ul style="list-style-type: none"> ・落葉落枝で林床に供給された有機態 N は、分解・無機化され NH₄⁺となり、さらに硝化菌によって NO₃⁻に変化する。NH₄⁺や NO₃⁻といった無機態 N は植物根が吸収して樹体を構成し、再び落葉落枝で林床に供給される。吸収されなかった N は溪流へ流出するがほとんどが土壌に吸着しにくい NO₃⁻である。 	図 1
	発表年：2012／著者：戸田浩人／掲載誌：書籍／タイトル：「丹沢の自然再生」第 4 章 水源林の水質形成機能	
③ (93)	<ul style="list-style-type: none"> ・尾根部では林木への養分供給量と樹体の養分吸収量が同程度であったが、脚部および中腹部では供給量が吸収量より多かった。脚部のような溪流沿いの場所で植栽木の高齢化により養分吸収量が低下すると、NO₃⁻ と随伴陽イオンが流亡しやすくなる可能性が示された。 	表-2、図-8
	発表年：2007／著者：浦川梨恵子ほか／掲載誌：日本森林学会誌 89：151-159／タイトル：高齢化したスギ・ヒノキ人工林小流域の斜面位置別土壌中の水溶性イオンの動態	
④ (33)	<ul style="list-style-type: none"> ・林床植生の乏しい荒廃ヒノキ人工林では、広葉樹林などの落葉層のある斜面と比べ、降水が浸透しにくく、表面流が斜面を迅速に連続的に流れ、土壌侵食も起こりやすい。林床植生の被度は、土壌浸透能を高める指標として有効である。 	図 3.2.6、 表 4.4.1、 図 4.4.2
	発表年：2008／著者：恩田裕一編／掲載誌：書籍／タイトル：人工林荒廃と水・土砂流出の実態	
⑤ (34)	<ul style="list-style-type: none"> ・複層林施業では、上木の密度管理により下木の耐陰性に合わせて林内の光環境を適度に調節する必要があり、間伐や枝打ちで光環境を改善しても上木の成長に伴い林内の照度は年々低下する。 	図 7.17
	発表年：1994／著者：安藤貴／掲載誌：書籍／タイトル：「造林学—基礎の理論と実践技術」7.2 複層林施業の密度管理	

<p>⑥ (92)</p>	<p>・皆伐から9年生まで溪流のNO₃濃度が高い、13～20年生で中庸、20～40年生で低い、87年生は1点のみで20～40年生と同程度。</p>	<p>表-3</p>
<p>発表年：2008／著者：福島慶太郎ほか／掲載誌：日本森林学会誌 90：6-16 ／タイトル：皆伐・再造林施業が溪流水質に与える影響—集水域単位で林齢の異なるスギ人工林を用いて—</p>		
<p>⑦ (3428)</p>	<p>・北米の落葉広葉樹林で皆伐を実施して除草剤で植生回復を抑制させた場合、非皆伐地でのNO₃-濃度と流出料が数十倍にも増加し、植生の回復で減少したと報告している。</p>	<p>図 V-12</p>
<p>発表年：1996／著者：岩坪五郎編／掲載誌：書籍／タイトル：「森林生態学」V. 各種の森林生態系の物質生産と養分循環</p>		
<p>⑧ (107)</p>	<p>・ヒノキ林への広葉樹の混交により、A0層量やA0層中の養分含有量は混交0%区で最も少なかったが、鉱質土層の全C、N量などには混交率によって違いがなかった。混交率が高まると交換性塩基が高まり、pHが高くなった。また、混交率が高い区では、窒素無機化量が多く、硝化率が低かった。</p>	<p>表-2、図-4、5、6</p>
<p>発表年：1996／著者：高橋輝昌ほか／掲載誌：日本林学会誌 78：244-249 ／タイトル：ヒノキ林への広葉樹の混交が土壌の化学的性質に及ぼす影響</p>		
<p>⑨ (36)</p>	<p>・ヒノキ林は樹幹付近のpHの低下、分館率の減少が確認されたが、養分含有率の有意な減少はみられなかった。さらに、80年生ヒノキ林では、樹幹近くに有機物や塩基が蓄積される傾向がみられた。したがって、傾斜地のヒノキ林においても林床の侵食が低減されるような適切な管理が実施されることにより、土壌養分が維持されることを示唆されている。</p>	<p>表-8</p>
<p>発表年：2012／著者：中島剛ほか／掲載誌：日本森林学会誌 94：112-119 ／タイトル：落葉広葉樹林へのヒノキ植栽が土壌の生物化学的性質に与える影響</p>		
<p>⑩ (16)</p>	<p>・土壌pH、交換性塩基濃度については、放置竹林、侵入竹林でヒノキ林より高い傾向を示し、タケの侵入によってこれらの成分は比較的短期間で変化すると考えられた。</p>	<p>図-10、図-11</p>
<p>発表年：2012／著者：佐々木重行／掲載誌：福岡県森林研報 13：37-44／タイトル：放置竹林、侵入竹林およびヒノキ林の土壌特性</p>		

<p>⑪ (35)</p>	<p>・林床植生の被度が小さいほどリター堆積量も少なく、土壌浸食深が増加し、一雨の浸透量が少なくなっている。林床植生の繁茂は、浸透量が増加し、土壌侵食も抑える。</p>	<p>図-8、図-10</p>
<p>発表年：2012／著者：石川芳治／掲載誌：書籍／タイトル：丹沢の自然再生第3章 水源林の防災・国土保全機能</p>		
<p>⑫ (36)</p>	<p>・シカ採食圧で林床植生が衰退した落葉広葉二次林で防鹿柵を設置して2年目で、ミヤコザサが回復することによりササが保持する窒素量、ササ葉リターの窒素還元量が増加し、土壌浸透水の窒素移動量が減少した。下層植生の回復が窒素保持能を高めたといえる。</p>	<p>図-6、図-7、図-8</p>
<p>発表年：2014／著者：岩月良介ほか／掲載誌：日本緑化工学会誌 39：353-359／タイトル：北関東でのシカ採食圧排除によるミヤコザサの窒素保持・循環の回復</p>		
<p>⑬ (37)</p>	<p>・シカ採食圧で林床植生が衰退した落葉広葉二次林の小流域全体を防鹿柵で囲い、2年経過後から下層植生の回復によって渓流水のNO₃濃度が防鹿柵をしていない対照流域に対して年々低下した。下層植生による窒素吸収が、集水域の窒素保持に重要な役割を持っているといえる。</p>	<p>図-2、図-3</p>
<p>発表年：2014／著者：福島慶太郎ほか／掲載誌：日本緑化工学会誌 39：360-367／タイトル：シカによる下層植生の過採食が森林の土壌窒素動態に与える影響</p>		
<p>⑭ (38)</p>	<p>・NO₃供給量の増加に伴って植物の硝酸還元酵素NRの活性は上昇するが、種によってNO₃に対する反応性に差がある。また、NO₃供給量が一定以上になるとNR活性は飽和に達し、その最大値も種間差が大きい。</p>	<p>図4</p>
<p>発表年：2004／著者：小山里奈／掲載誌：地球環境 9：11-18／タイトル：樹木-土壌系の窒素循環 一樹木による土壌中の窒素の吸収と同化一</p>		
<p>⑮ (3455)</p>	<p>・スギ人工林下層植生の硝酸還元酵素NR活性を調べ、コアジサイはシロモジよりNO₃への依存性とNO₃供給量変化への反応性が高い。自然条件下でコアジサイはNO₃の多い立地に生育し、シロモジはNO₃の多少にかかわらず存在する。立地に適応した下層植生がNO₃をよく吸収する可能性が示唆された。</p>	<p>Figure 3</p>
<p>発表年：2003／著者 Koyama ほか／掲載誌：Tree Physiology 23：281-288／タイトル：Effects of NO₃ availability on NO₃ use in seedlings of three woody shrub species</p>		

問 5-24	<p>齢級の違いは水質浄化機能の発揮にどのような影響を与えるか</p>	
答	<p>幼齢林では更新前の伐採の影響で、老齢林では養分吸収量の減退によって、水質浄化機能が劣ると考えられる。</p> <p>森林皆伐により窒素等の養分が渓流水へ多量に流出することは、多くの調査によって明らかである。皆伐で伐採枝条が多量に供給された地表件に直射日光があたり、温度上昇によって急激な有機物分解が生じるにもかかわらず、更新木は幼齢で養水分の吸収量が少ないため余剰な物質は溪流へ流出する。更新木の成長に伴い吸収が盛んになり、徐々に流出水量と流出物質濃度が低下し、林分が閉鎖するころには水質浄化機能が回復する（根拠①-⑥）。</p> <p>こうした皆伐の渓流水質への影響は大きく数年から十年に及ぶが、人工林の閉鎖後に行われる枝打ち・間伐といった保育作業の影響は小さく短期間で収束する（根拠①）。</p> <p>皆伐の影響がなくなった若齢林～壮齢林と老齢林の渓流水質を比較すると、硝酸態窒素等の濃度が老齢林で高いという報告が多い（根拠⑦-⑩）。これは、良好な立地の老齢林の土壌は肥沃であり硝化が起りやすいのに対し、成長速度が衰えているために養分吸収量が小さいためである。</p> <p>夏季の森林土壌での窒素無機化・硝化が盛んで、樹木の生理的活性も高いため窒素が吸収されれば溪流に流出しないが、夏雨型の気候である日本では土壌水の移動（水文過程）で夏季にも一部が流出する（根拠③、⑦、⑪-⑭）。この夏季の窒素流出の高まりは、流域の余剰窒素の指標となり（根拠⑦、⑮、⑯）、スギ・ヒノキ人工林の幼齢林と老齢林で高いという報告がある（根拠⑦）。ただし、多雨地域において老齢林で必ずしも溪流の硝酸濃度が高くはないという報告もあり、老齢化のみで流域の余剰窒素が顕著に増加し、水質浄化機能が低下するとは断言できない（根拠②、⑰）。</p> <p>全流域の皆伐更新に対して流域の沢部のみを皆伐更新したとき、硝酸態窒素の溪流流出量は伐採の面積比よりも大きい（根拠③）。沢部の肥沃な土壌の場所での皆伐更新は渓流水質への影響が大きく（根拠⑱-⑳）、沢部の皆伐で一斉の幼齢林化を避けることで著しい水質浄化機能の低下を防ぐことができると考えられる。</p>	
<p>根拠 (文献番号)</p>	<p>知見</p>	<p>データ等</p>
<p>① (3419)</p>	<p>・ 対照流域法を用い、森林施業を実施した流域から流出する年間の窒素および渓流水量を、隣接したスギ・ヒノキ壮齢人工林を対照として比率を算出した。伐採後の窒素流出は対照流域の数倍に及び著しいが、その後の枝打ち・間伐といった保育作業の影響は小さく短期間に収束している。</p> <p>発表年：2012／著者：戸田浩人／掲載誌：書籍／タイトル：丹沢の自然再生第4章 水源林の水質形成機能</p>	<p>図 4</p>
<p>② (92)</p>	<p>・ 皆伐から9年生まで溪流のN03濃度が高い、13～20年生で中庸、20～40年生で低い、87年生は1点のみで20～40年生と同程度。</p>	<p>表-3</p>

	発表年：2008／著者：福島慶太郎ほか／掲載誌：日本森林学会誌 90：6-16 ／タイトル：皆伐・再造林施業が渓流水質に与える影響—集水域単位で林 齢の異なるスギ人工林を用いて—	
③ (95)	<ul style="list-style-type: none"> ・高齡化したスギ・ヒノキ人工林小流域の斜面下部伐採によって、渓流からの流出水量は年間 100mm 増加した。 ・表層土壌水の NO3 およびカチオン濃度は伐採 1, 2 年目の夏季に上昇したが、3 年目には伐採前の水準に戻った。渓流水でも夏季にこれらの濃度が上昇した。 ・伐採後に NO3 流出量は増加したが、土壌水中の増加量と比較すると少ないことから、土壌中で生成した無機態窒素がすべて渓流に流出するわけではなく、土壌中での窒素の生物学的および化学的作用による流出の減少と遅延が示唆された。 	表-1 図-3、8、9
	発表年：2005／著者：浦川梨恵子ほか／掲載誌：日本森林学会誌 87：471-478 ／タイトル：高齡化したスギ・ヒノキ人工林小流域の斜面下部伐採が土壌 および渓流の水質に及ぼす影響	
④ (91)	<ul style="list-style-type: none"> ・土壌水の NO3 濃度変動は速やかで、伐採直後の植生による養分吸収の減少、表層土壌での窒素無機化の促進や、その後の植栽木の養分吸収の増加など、伐採後の窒素循環の変化を直接的に反映していた。一方、渓流水の NO3 濃度変動は緩慢で、伐採 6 年目でも伐採前より高い傾向が継続していた。 ・土壌中の水・溶質移動モデルで土壌中の NO3 濃度変動を NO3 の土壌吸着の有無で予測した結果、吸着がある場合で実測値と季節変動や長期変動パターンが一致した。このことから、火山灰土壌特有の陰イオン吸着が NO3 流出に影響することが示唆された。 	図-3、図-5
	発表年：2009／著者：浦川梨恵子ほか／掲載誌：日本森林学会誌 91：184-191 ／タイトル：スギ・ヒノキ伐採流域における火山灰土壌の陰イオン吸着特 性が NO3 の長期流出に及ぼす影響	
⑤ (3425)	<ul style="list-style-type: none"> ・植生の発達に伴い、表層土壌では有機物分解などの H+生成過程が現れ、H+消費を上回った結果、余剰の H+が下層土壌にもたらされた。 ・また、生成された H+を化学的風化によって消費するのに十分な土壌層が存在するため、渓流水の pH を決定しているのは土層厚の増加による土壌層深部の CO2 の増大であった。 	図-7、図-8
	発表年：1999／著者：浅野友子ほか／掲載誌：日本林学会誌 81：178-186 ／タイトル：森林の成立に伴う流域内酸中和機構の変化—植生と土層厚が 酸中和機構に与える影響—	
⑥ (3423)	<ul style="list-style-type: none"> ・NO3 濃度は施肥前歴の影響がとくに大きかったが、施肥前歴のない小集水域では、林齢が比較的大きく影響し、20 年生まで濃度に正の偏相関係数が極端に高い。このことから、NO3 濃度は皆伐後まだ林 	表-3, 4, 5, 6

	分が未閉鎖であると高く、閉鎖後はより低い状態で安定するものといえる。	
	発表年：1994／著者：大類清和ほか／掲載誌：日本林学会誌 76：383-392 ／タイトル：森林小流域における渓流水質に及ぼす諸要因の影響	
⑦ (3417)	<ul style="list-style-type: none"> ・温暖多雨の日本の森林では、夏季に雨が多い。したがって、夏季における森林土壌での有機態 N の無機化が盛んで、土壌水の無機態 N 濃度が高まる。樹木の生理的活性が高く、土壌水の無機態 N を樹木（植生）によって吸収されればよいが、吸収されなければ渓流水の NO₃-濃度は高まる。 ・50cm 深の土壌水の NO₃-濃度と渓流水の NO₃-濃度の関係には正の相関があり、林齢の高い林分や幼齢林で濃度が高く、成長旺盛な中齢林で低い。 	図-15
	発表年：2000／著者：生原喜久雄／掲載誌：土壌の物理性 85／タイトル：森林土壌生態系での無機成分の動態	
⑧ (3418)	<ul style="list-style-type: none"> ・若い森林からの流出水の NO₃-N 濃度は、成熟した森林または老齢林からの流出水に比べて低い傾向にあることを示している。成熟した森林の土壌は肥沃であることが多く、硝化が起りやすく、そのうえ植物による吸収量が小さい。一方、若い森林は、土壌がやせているうえに吸収量も大きいといったことが、この現象の起こる原因と考えられる。 	図-2.11
	発表年：1990／著者：岩坪五郎／掲載誌：書籍／タイトル：自然の浄化機能 2. 森林における自然浄化機能	
⑨ (3447)	<ul style="list-style-type: none"> ・群馬県の高齢化したスギ・ヒノキ人工林小流域において、降水（バルク）による窒素沈着が近年高まっており、渓流水の NO₃ 濃度が他の地域の森林より高く、その流出量が降水による供給量を上回っていること、随伴する塩基性陽イオンの流出増大がみられた。 	図 3、表 2
	発表年：2000／著者：戸田浩人／掲載誌：資源環境対策 38：1067-1072／タイトル：陸上生態系の物質循環からみた窒素飽和による汚染の構図	
⑩ (3426)	<ul style="list-style-type: none"> ・溪流への N 流出量は高齢人工林が優占する流域で多かった。 ・土壌の N 供給と植生の N 吸収から N 流出を予測するモデルの値は、予測値で実際の値より高く、高齢人工林流域でその差が最も大きかった。 ・下層土による NO₃ 吸着能は、火山灰に含まれるアロフェン量が多いほど多く、高齢人工林流域で最も多かった。このことから、モデルの予測値と実測値との誤差に影響していると考えられた。 	図 4、5、6、7
	発表年：2013／著者：戸田浩人ほか／掲載誌：神奈川県自然環境保全センター報告 10：91-99／タイトル：神奈川県貝沢対照流域法試験地試験流域に	

	おける窒素動態特性	
⑪ (3418)	<ul style="list-style-type: none"> ・ NO3 について、成長期に高く、成長休止期に低いという傾向を示した。これは、NH 州 Hubbard Brook での結果は明瞭に逆で、成長期の濃度低下は植生の吸収、冬期の積雪下でも硝化が衰えず流出する 	図-2.9
	発表年：1990／著者：岩坪五郎／掲載誌：書籍／タイトル：自然の浄化機能 2. 森林における自然浄化機能	
⑫ (3456)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 流出水中の濃度は夏季にはやや低く、これは生物の成長期に K や NO3 が集中的に利用されるためである。また、流出水中の NO3 は生物の活性が低下する秋になると上昇し始め、冬や早春にピークを示す。この NO3 の増加は、冬季を通じた硝化の増加による。 	表-15、表-16
	発表年：1997／著者：Likens & Bormann／掲載誌：書籍／タイトル：森林生態系の生物地球化学	
⑬ (3438)	<ul style="list-style-type: none"> ・ NO3-濃度は夏に高く、冬に大きな谷になる明瞭な季節変動を示す。日本の多くの地域でも同様である。これは、夏雨型の溪流流量の季節性が影響し、NO3-濃度の季節性が植物の吸収や土壌有機物の分解の季節変動よりも、水文過程による強く制御されていることを示唆している。 	図 4
	発表年：2002／著者：大手信人ほか／掲載誌：日本生態学会誌 52：131-137／タイトル：森林生態系の物質循環を理解するための流域研究に向けて—流出窒素の動態が示唆すること—	
⑭ (3457)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 北米が冬雨型で融雪期に溪流流量が多く NO3-濃度が高いことに対し、夏雨型の日本の多くの地域は NO3-濃度は夏に高く、冬に大きな谷になる明瞭な季節変動を示す。これは、NO3-濃度の季節性が植物の吸収や土壌有機物の分解の季節変動よりも、水文過程による強く制御されていることを示唆している。 	Figure 1、Figure 2
	発表年：2001／著者：Ohte, N. ほか／掲載誌：Water Air and Soil Pollution 130：649-654／タイトル：Comparative evaluation on nitrogen saturation of forest catchments in Japan and Northeastern United States	
⑮ (124)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 関東周辺域の溪流の NO3 濃度は、標高が高いほど低かった。 ・ 溪流 NO3 濃度の低い森林では、窒素無機化が盛んな表層で土壌溶液 NO3 濃度が高かった。一方、溪流濃度の高い森林では、深部でも土壌溶液 NO3 濃度が減少せずに高く、むしろ上昇していた。溪流 NO3 濃度は、その集水域の窒素循環特性に関する情報を包含する有用なパラメータといえる。 	図 5、図 6
	発表年：2004／著者：楊宗興ほか／掲載誌：地球環境 9：29-40／タイトル：渓流水の NO3 濃度と森林の窒素飽和	

<p>⑬ (89)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・関東周辺域の溪流の NO3 濃度は、標高が高いほど低かった。 ・溪流 NO3 濃度の低い森林では、窒素無機化が盛んな表層で土壌溶液 NO3 濃度が高かった。一方、溪流濃度の高い森林では、深部でも土壌溶液 NO3 濃度が減少せずに高く、むしろ上昇していた。溪流 NO3 濃度は、その集水域の窒素循環特性に関する情報を包含する有用なパラメータといえる。 	<p>図 5、図 6</p>
<p>発表年：2010／著者：柴田英昭ほか／掲載誌：地球環境 15：133-143／タイトル：森林流域における窒素の生物地球化学過程と溪流水質の形成</p>		
<p>⑭ (125)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・高齢のモミ・ツガ天然林流域において大雨時に NO3 濃度の顕著な低下を示し、溪流から遠い斜面部や深層の NO3 濃度の低い地中水が寄与していると考えられた。また、大雨が年間の NO3 流出量の増大に寄与していないことを明らかにした。 	<p>Fig. 5、Fig. 9</p>
<p>発表年：2014／著者：篠宮佳樹ほか／掲載誌：水環境学会誌 37：91-101／タイトル：四万十川源流部の森林における硝酸態窒素の年間流出負荷量とその流出機構</p>		
<p>⑮ (109)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・幼齢林より壮齢林、斜面上部より下部、土壌下層より表層といった、土壌有機物の多い場所で無機態窒素供給量・速度が大で、温度変動に安定的であった。 	<p>表-2</p>
<p>発表年：1994／著者：戸田浩人ほか／掲載誌：日本林学会誌 76：144-151／タイトル：森林土壌中における窒素無機化の反応速度論的解析 (1) 林齢・斜面位置・深さ別の窒素無機化特性</p>		
<p>⑯ (93)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・尾根部では林木への養分供給量と樹体の養分吸収量が同程度であったが、脚部および中腹部では供給量が吸収量より多かった。脚部のような溪流沿いの場所で植栽木の高齢化により養分吸収量が低下すると、NO3 と随伴陽イオンが流亡しやすくなる可能性が示された。 	<p>表-2、図-8</p>
<p>発表年：2007／著者：浦川梨恵子ほか／掲載誌：日本森林学会誌 89：151-159／タイトル：高齢化したスギ・ヒノキ人工林小流域の斜面位置別土壌中の水溶性イオンの動態</p>		
<p>⑰ (3444)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・土壌の無機態窒素は斜面下部で NO3、上部で NH4 として存在し、土壌溶液の無機態窒素組成を反映していた。 ・土壌微生物バイオマスは斜面の上部でやや大きく、斜面上の異なる位置で可給態窒素のプール、フラックスの異なる循環機構の存在が推察された。 	<p>図 12</p>
<p>発表年：1996／著者：徳地直子／掲載誌：京都大学農学部演習林報告 68：9-24／タイトル：竜王山森林試験地の斜面上の異なる位置における窒素循環機構</p>		