

水土保持機能強化総合モデル事業地における森林の変遷と流出特性 —水源涵養機能を向上させる森林整備の方向性—

山本 哲也・池田作太郎

山本哲也・池田作太郎：水土保持機能強化総合モデル事業地における森林の変遷と流出特性；水源涵養機能を向上させる森林整備の方向性，広島県林技セ研報37：15～33，2005。広島県の太田川源流域（山県郡安芸太田町）に設置された80haの水土保持機能強化総合モデル流域において，約18年間収集された雨量，河川流量，土壌，森林整備等に関するデータを解析し，森林の水源涵養機能と森林整備の関係を考察した。モデル流域は4つの小流域に区分され，実施された施業種によって単木択伐区，帯状択伐区，モザイク状択伐区，未施業区と命名された。主な林相は，単木択伐区，帯状択伐区，未施業区ではスギ・ヒノキ人工林，モザイク状択伐区では落葉広葉樹林であった。森林整備が終了し台風被害を受けた1991年頃から，モザイク状択伐区を除いた単木択伐区，帯状択伐区において年流出率，流況安定化率等の水源涵養機能に関する指標が向上する傾向が見られ，それらの傾向は単木択伐区において顕著であった。また，単木択伐区では土壌粗孔隙率及び粗大孔隙率の増加傾向が認められた。これらのことから，森林整備，台風被害による立木密度の低下によって蒸発散量が減少したことや，単木択伐施業によって土壌の保水機能が増大したことが示唆された。またモザイク状択伐区ではこれらの指標に大きな変化が見られなかったことから，針葉樹林と比べて落葉広葉樹林では水源涵養機能に対する施業効果が現れ難いことが示唆された。

【キーワード】

森林整備，水源涵養機能，択伐施業，流出特性

1 はじめに

森林には木材生産機能のみならず，洪水や渇水の緩和等，流出を平準化する水源涵養機能等の多面的機能がある。本県は県土848千haの72%が森林であり，その67%（567千ha）を民有林が占める。広島県は平成12年3月「広島県新農林水産業・農山漁村活性化行動計画」において民有林の42%に当たる239千haを水源涵養型森林に位置づけたが，この数値は森林法改正を踏まえたゾーニングにより平成14年10月の「多様な森林整備の推進について」の中では316千haに上方修正されている。このような背景のもと，本県においても近年，森林の水源涵養機能の重要性に関して，県民意識が醸成されるようになってきており，安定した機能を確保するための森林整備技術開発に対して，従前以上に強い要望が生じている。

しかしながら，水源涵養機能に関しては限定された地点での土壌学的評価等の蓄積はあるものの，広範囲な森林流域から得られた水文データに基づいた解析事例は現時点でも少なく，さらに機能の向上を目的とした森林整備技術に関する研究は極めて少ない。この原因は量水堰等研究施設整備に多額の予算を要し，データ収集にも長

期間を要し，さらに森林整備が水循環に与える影響は単純ではなく，地形，地質，気象，植生，土壌等様々な要因が関与すること等によるものと考えられる。

幸い本県には山県郡安芸太田町（旧筒賀村）上筒賀において昭和58（1983）年度から実施された水土保持機能強化総合モデル事業があり，そのモデル流域では水源涵養機能を定量的に評価するための施設設置と森林整備がなされた。本報は，そこで継続的に調査されてきた雨量，河川の流量，森林整備等に関するデータのうち主に1986～2002年分を解析し，水源涵養機能を向上させるための森林整備技術について検討を行ったものである。

2 調査地の概要

調査地としたモデル流域は広島県西部を南北に流れる太田川支流である筒賀川の最上流部の奥ノ原川上流域（山県郡安芸太田町（旧筒賀村））に位置する（図1）。モデル流域の総面積は80.12haで，森林整備等の流域単位での効果判定のため，4つの試験小流域が設定され，それぞれA，B，C，Dと名づけられ（森林整備等の内容については後述），A，B流域は，C，D流域よりも大

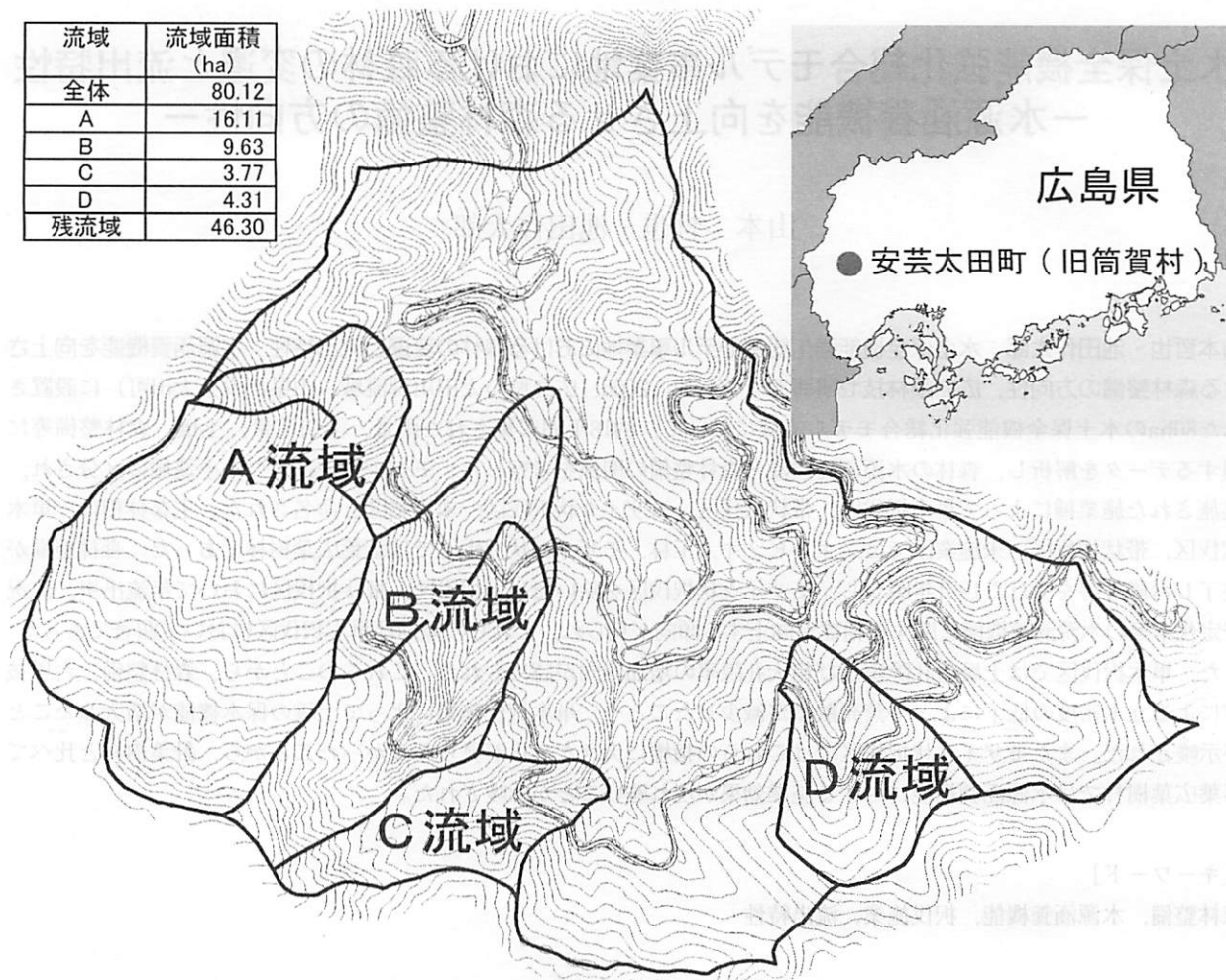


図1 モデル流域の位置図及び水文観測流域区分

表1 モデル流域内の流域別事業実績表

流域	面積 (ha)	昭和58年度	昭和59年度	昭和60年度	昭和61年度	昭和62年度
		1983	1984	1985	1986	1987
A	16.11		雨量計、量水堰			
B	9.63		雨量計、量水堰			床固め工
C	3.77		雨量計、量水堰		埋設土留め工	床固め工、埋設土留め工
D	4.31		雨量計、量水堰		床固め工、埋設土留め工	トレンチ工
残流域	46.30	雨量計、量水堰 床固め工		床固め工	床固め工、埋設土留め工	埋設土留め工

残流域はモデル流域内でA～D流域以外の流域

大きく設定されている。各小流域の面積はA：16.11ha、B：9.63ha、C：3.77ha、D：4.31haであり、いずれの流域にも属さない残流域として46.30haがある。

2.1 モデル流域の立地条件¹⁾

小流域ごとの平均傾斜はいずれも25度以上の急傾斜であった。

地質は広島県中～北部地方の太田川上流域に分布する北帯の非～弱変成古生層に相当し、大部分が黒色頁岩ホ

ルンフェルスで、一部が黒雲母花崗岩、ヒン岩、粘板岩等から構成される。

土壌は適潤性褐色森林土(偏乾亜型)B_{De1}が約60%以上を占め、それ以外に適潤性黒色土B_{1b}、適潤性褐色森林土B₀等が分布する。

気候は年間を通し冷涼で、年平均気温8.9℃(1994～1999年)と低く、年平均降水量2,205mm(1990～1999年)と多い。県内でも有数の積雪地帯にあたり、積雪標柱による最大積雪深の1984～1987年の平均観測値は84.7cmで

あり、積雪期間は2～3ヶ月に渡る。

2.2 施設整備の内容(雨量、流量観測施設等)(表1)

施設整備の内容は以下のとおりで、事業当初の1983、1984年に各区の雨量、流量観測施設が整備され、その後、その他の治山施設等が整備された。

雨量、流量観測施設(図2)

モデル流域内の3箇所R1, R2, R3に転倒マス式雨量計が設置され雨量観測が行われている。

量水堰についてはモデル流域の全流量を観測するNo.1の他、それに包括されるA, B, C, Dの4小流域の最下流部とA, B流域の中流部にそれぞれ1箇所、計7箇所

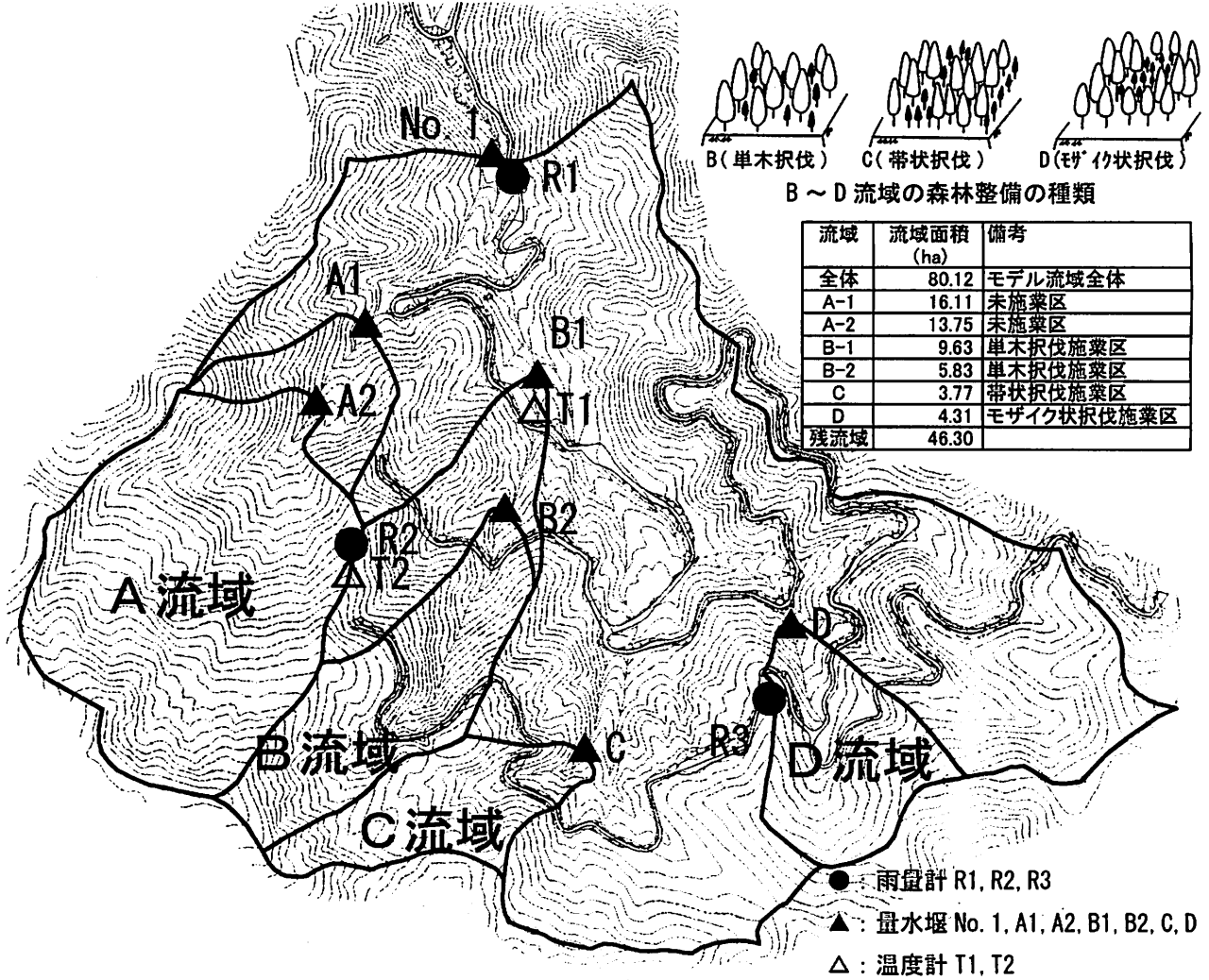


図2 モデル流域の水文観測流域区分及び水文観測施設位置図

表2 各流域の森林整備前の林相(1984年)

流域	林相								合計 面積(ha)
	スギおよびヒノキ林				落葉広葉樹林		裸地他		
	5齢級以下		6齢級以上						
面積(ha)	比率(%)	面積(ha)	比率(%)	面積(ha)	比率(%)	面積(ha)	比率(%)	面積(ha)	
A	0.63	3.9	9.11	56.6	6.37	39.5	0.00	0.0	16.11
B	0.00	0.0	4.95	51.4	4.62	48.0	0.06	0.6	9.63
C	0.00	0.0	2.95	78.2	0.82	21.8	0.00	0.0	3.77
D	0.00	0.0	0.91	21.1	3.04	70.5	0.36	8.4	4.31
残流域	13.45	29.1	16.21	35.0	13.20	28.5	3.44	7.4	46.30
合計	14.08		34.13		28.05		3.86		80.12

*比率は各流域の全面積に対する各林相面積の比率を表す。

所に設置され水位流量観測が行われている。各施設の位置を図2に示したが、A、B流域に設置された量水堰については最下流部のものをA-1、及びB-1、中流部のものをA-2、及びB-2と呼ぶこととし、それぞれの集水域をA-1流域、B-1流域、A-2流域、B-2流域と呼ぶこととした。

その他治山施設等

溪流及び林内における地表流水並びに比較的浅い地層にある中間流を浸透させるため、山腹斜面の安全性を考慮しながら、床固工17基、埋設土留工25基、トレンチ工2箇所が設置され、地形に適應する路面排水林内拡散工法を採用し林道及び作業道が高密度(64m/ha)に配置されている。

3 モデル流域の森林の変遷

森林の状況変化が各区の流出特性に与える影響を把握するため林相の変遷を整理した。特に大きなイベントとしては1987年度と1990年度の森林整備、1991年の台風19号の被害が挙げられる。

3.1 森林整備前の林相(1984年)

森林整備前の林相は表2のように、A、B、Cの3流域ではスギ、ヒノキの人工林、特に6齡級以上が50%以上を占めていたが、D流域では落葉広葉樹林(以下、広葉樹林という)が70%以上を占め、他の3流域と比べ異なっていた。

3.2 森林整備の実施と調査区の設定(1987年以降)

1987年以降、B、C、Dの各小流域では3種類の択伐施業が実施された。実施された施業種に応じて、B流域には単木択伐施業区(以下、単木区という)、C流域には帯状択伐施業区(以下、帯状区という)、D流域にはモザイク状択伐施業区(以下、モザイク区という)がそれぞれ設定された。A流域には対照区として未施業区が設定された。また、残流域では主に単木択伐施業が実施

された。1987年度にモザイク区及び残流域が、1990年度に単木区、帯状区及び残流域の一部が整備され、1991年春に森林整備が完了した(表3、図2)。帯状択伐の伐採幅は40~50m、モザイク状択伐の伐採幅も1辺40~50mで設定された。3種類の択伐施業の本数伐採率は53~58%であった。

なお、これらに加えて6齡級以上の人工林では枝落としと下層木植栽(主にスギ、ヒノキ)が、5齡級以下の人工林では枝落としが、広葉樹林では下層木植栽がそれぞれ実施されている。

3.3 1991年台風19号による被災状況(1991年秋)

1991年9月27日に中国地方を通過した台風19号によって本モデル流域も一部、風倒害を被った。被災直後に撮影された空中写真からモデル流域内の風倒害被害区域を判読した結果を図3に示す。モデル流域内の被害総面積は11.33ha(流域面積の14.1%)で、小流域毎に見ると未施業区:微害、単木区:2.25ha(流域面積の23.4%)、帯状区:0.32ha(流域面積の8.5%)、モザイク区:0.97ha(流域面積の22.5%)で、単木区の被害が最も大きかった。

3.4 森林の生長(標準地調査結果)

森林の生長と各区の流出特性の関係を把握するために標準地を設定し、調査結果を経時的に比較した。上層木と林内相対照度、下層木、林床植生のそれぞれの関係を把握することを試みた。

3.4.1 調査方法

モデル流域とその周辺に標準地を合計30個設定し以下の項目の調査を行った(表4、図4)。1標準地の規模は32×32mの方形区としたが、1998、2002年の毎木調査は既存の方形区内に20×20mの方形区を設定し調査を行った。また、1991年の台風19号により甚大な風害を受けた標準地の代替として5箇所の標準地を新たに設定した。

表3 モデル流域内の流域別森林整備実績と台風被害

流域	面積	1987年度	1988年度	1989年度	1990年度	1991年度
A	16.11					全域で台風19号被害(9月)
B	9.63				単木択伐施業	
C	3.77				帯状択伐施業	
D	4.31	モザイク状択伐施業			帯状択伐施業	
残流域	46.30	単木択伐施業 (33.81ha)			帯状択伐施業 (1.51ha)	

注) 各施業は9月~3月末に実施

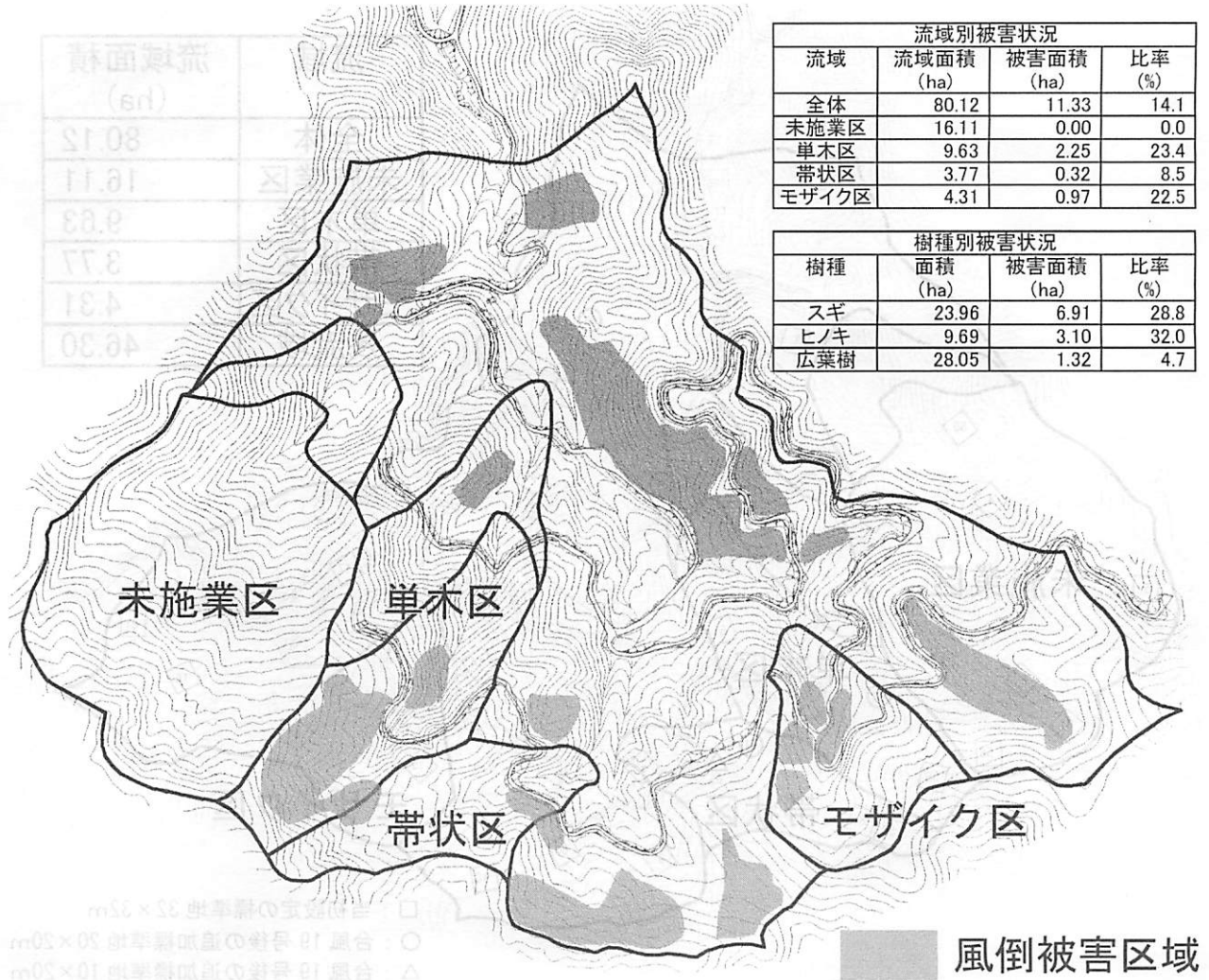


図3 台風19号による風倒被害状況

表4 標準地における各調査項目の実施時期

調査項目	調査年	1984	1985	1986	1988	1990	1996	1997	1998	2002
毎木調査(上層木)		○	○	-	-	-	-	○	○	○
毎木調査(下層木)		-	-	-	○	○	○	○	○	○
相対照度		○	-	○	○	○	○	○	-	-
林床植生調査		○	-	-	-	○	○	○	-	-

○：実施年度

毎木調査

標準地内のすべての上層木及び下層木（植栽木）について種名，樹高，胸高直径，地際直径（下層木のみ）等を記録した。調査は表4に示すように1984～2002年の春期から秋期に，上層木は計5回，下層木は計6回行った。

相対照度

標準地の林内外で積算照度計（ミノルタ製デジタル照度計T-1）により同時3分間測定した。調査は表4に示すように1984～1997年の春期から秋期に計6回行った。

林床植生調査

標準地内に2.0×2.0mの方形枠を3もしくは1箇所設置し出現種名を記載後，刈り取り，乾燥現存量を求めた。方形枠は，標準地を9分割し中央の縦3列の区画の中心に1箇所ずつ計3箇所設置，もしくは標準地内に任意に1箇所設置した。調査は表4に示すように1984～1997年の春期から秋期に計4回行った。なお，1984年は方形枠を3箇所，1990，1996，1997年は1箇所設置した。

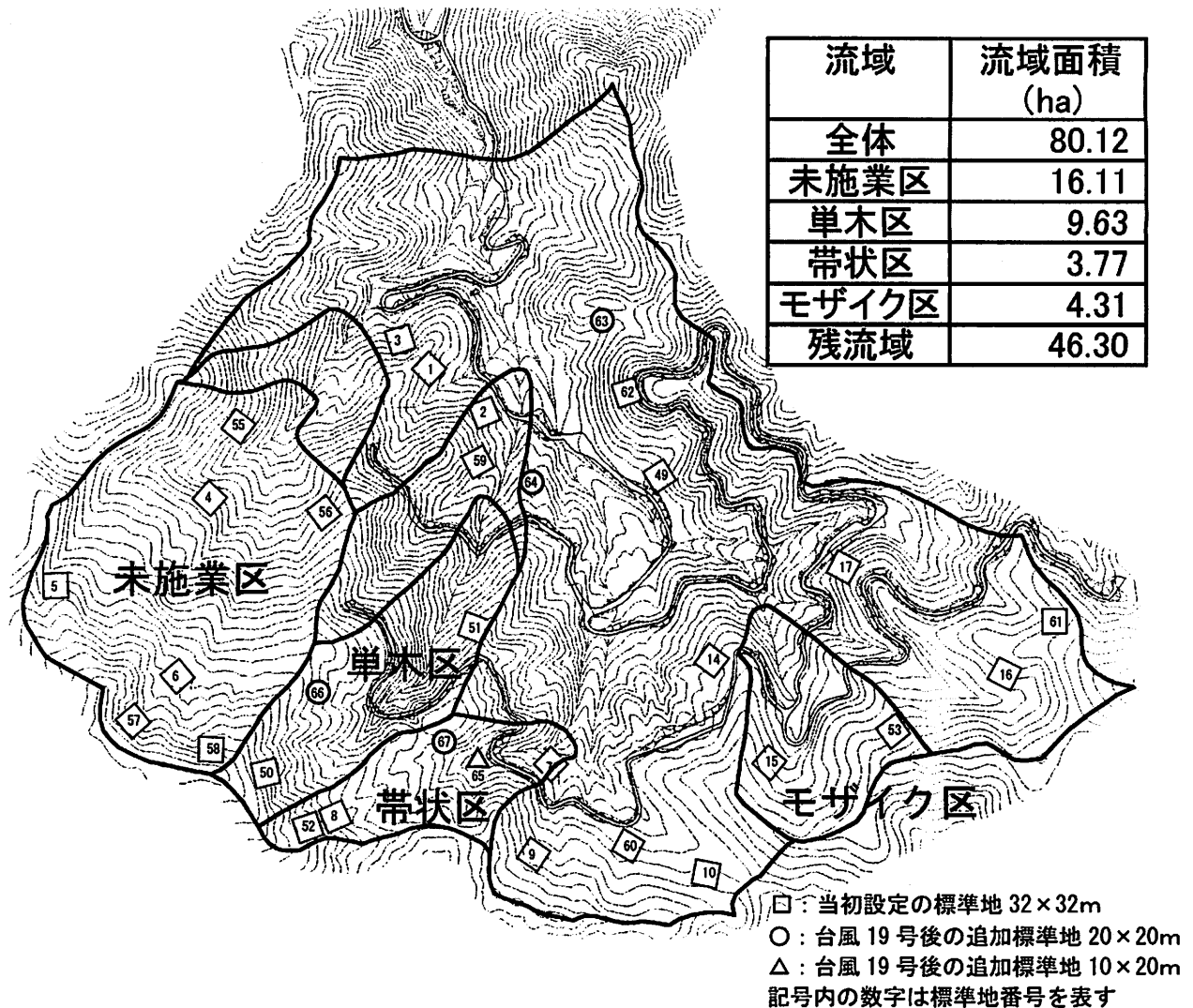


図4 標準地設定状況

3. 4. 2 結果と考察

3. 4. 2. 1 毎木調査 (上層木)

図5に未施業区, 単木区の上層木の立木密度, 樹高, 胸高直径の推移を表す。

両区ともそれぞれ針葉樹林, 広葉樹林が含まれており, 解析対象とした標準地は以下のとおりである。

未施業区: 針葉樹林1箇所(No.4), 広葉樹林2箇所

単木区 : 針葉樹林2箇所 (内1箇所は台風被害地, 残り1箇所は台風被害が軽微で以下「無被害地」という), 広葉樹林1箇所。

未施業区針葉樹林においては, 森林整備前に平均的な値を示したNo.4のみを選択した。未施業区広葉樹林は2箇所の平均値を表す。

带状区とモザイク区については, データ欠損が多いため解析対象とはしなかった。

台風の影響

図5aから図5cに示した単木区針葉樹林の台風被害地と無被害地の比較から, 台風が上層木に与えた影響を考察する。

立木密度は, 森林整備直後の本数は無被害地とくらべて台風被害地の方が多かったが, 台風通過後には台風被害地が低くなり, 台風被害地では, 単木択伐に加えて台風による密度の低下が認められた。しかしながら, 両区の樹高, 胸高直径は1998年までほとんど差がなく(図5b, 図5c), これらのことから台風は立木密度には大きな影響を与えたものの, その後の生長には, さほどの影響を与えなかったものと判断された。

生長の比較

針葉樹林:

立木密度は当初, 単木区の方が未施業区よりも高かったが, 途中で逆転した(図5a)。この傾向は台風被害地

において著しかった。この原因は森林整備、台風被害等で単木区の本数が大きく減少したためと考えられた。

樹高は両区とも1997, 1998年までは、ほぼ同程度の増加率であり、森林整備の影響は当初は明瞭でなかった(図5b)。しかしながら1998年から2002年にかけては未施業区では増加率が低下したのに対し、単木区は増加率はあまり低下しなかった(図5b)。このことは単木択伐施業による生長促進効果が現れたものと考えられた。

胸高直径は単木区の増大傾向が顕著であった(図5c)。これは単木択伐施業により立木の肥大生長が促進されたためと思われた。

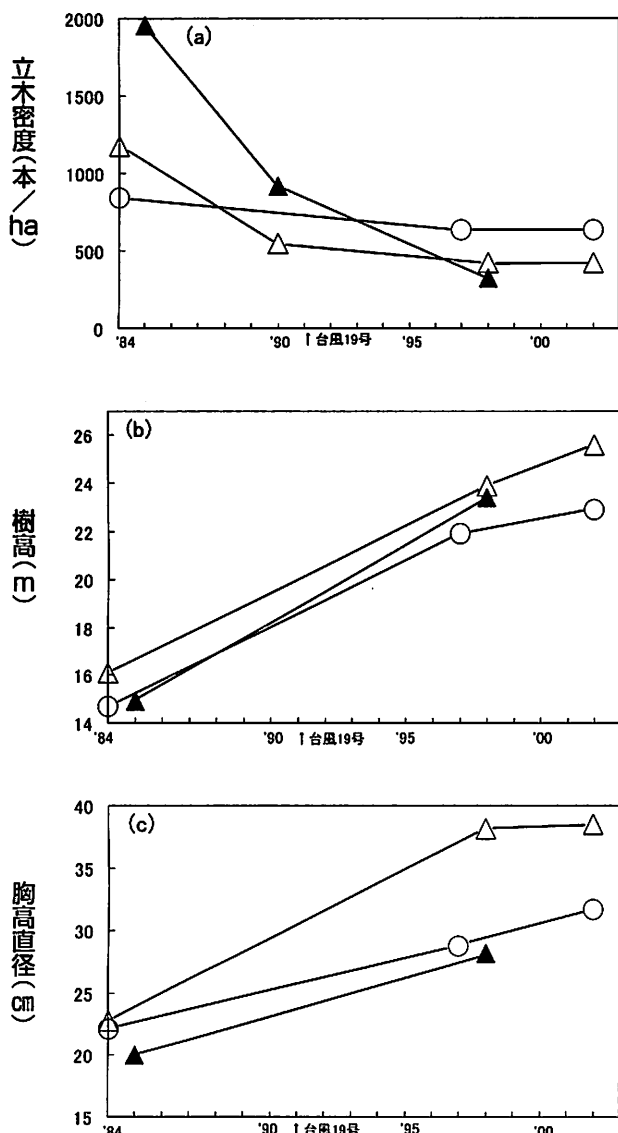
表5に森林整備前後の林分密度管理図における収量比数(R_y)を表す¹⁾。

森林整備前は、両区とも0.7前後であったが、未施業区は1997, 1998年時点で0.8程度であり収量の面からも過密状態に近いことが伺えた。一方、単木区は0.6程度で過密には至っていないが、これは立木の生長を加味しても単木択伐施業の影響が持続しているためと考えられた。

広葉樹林：

立木密度は単木区の減少が顕著であったが(図5d),

針葉樹林



広葉樹林

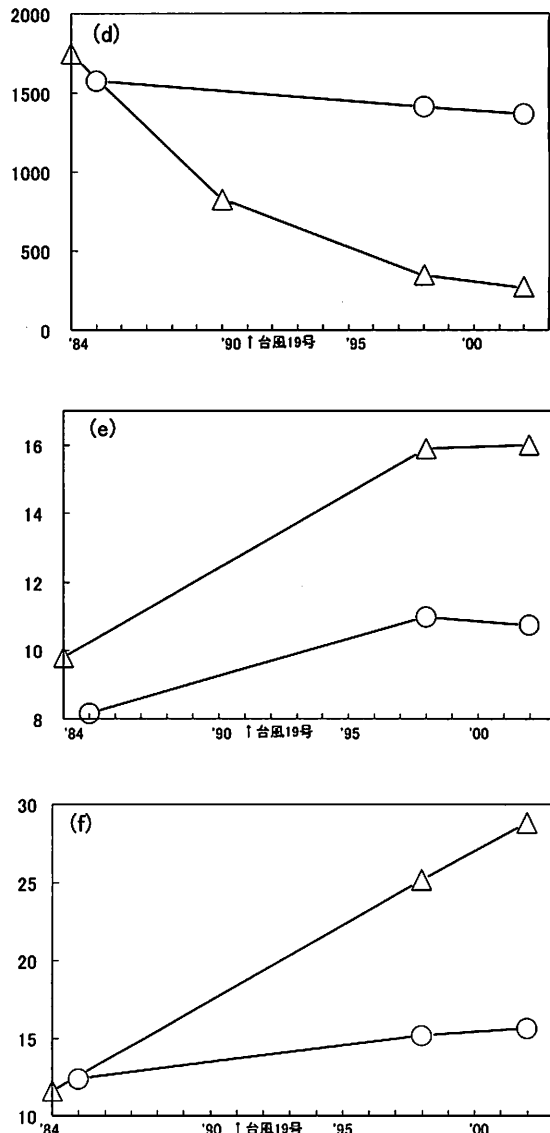


図5 未施業区と単木区における上層木毎木調査結果

○：未施業区、△：単木区(無被害地)、▲：単木区(台風被害地)
未施業区広葉樹林は2箇所の平均値を表す。
単木区1990年の立木密度は伐採率を53%とした推定値。

表5 未施業区と単木区の収量比数の推移¹⁾

流域	標準地 (No.)	上層木	森林整備前		森林整備後		備考
			1984	1985	1997	1998	
未施業区	4	スギ・ヒノキ	0.68	-	0.79	-	
単木区	2	スギ	0.73	-	-	0.53	
	59	ヒノキ	-	0.76	-	0.60	台風被害地

針葉樹林と同様に森林整備、台風被害等で本数が大きく減少したためと考えられた。

樹高は、未施業区では1984年が8.2m、1998年が11.0m(1984年の134%)で、単木区の1985年が9.8m、1998年が15.9m(1985年の162%)であった。このような単木区の増大傾向は(図5e)、針葉樹林と同様に単木択伐施業による生長促進効果が現れたものと考えられた。

胸高直径は、単木区の増大が顕著であった(図5f)。針葉樹林と同様に単木択伐施業により立木の肥大生長が促進されたためと思われる。

3.4.2.2 相対照度

図6に各年8~9月に継続して測定されている未施業区と単木区(ただし残流域の標準地)の測定値を示した。また、樹種が同じ針葉樹であった未施業区の2つの標準地における測定値を平均値で表した。

未施業区では1984年時点で1%程度であり、その後、立木密度の減少(図5a)に依るとされる微増があるものの、全体的には低い数値で推移した。これに対して単木区では森林整備前は3~4%程度であったものが森林整備後の1988年には20~30%程度まで増大し、その後も大幅な減少は見られない。一方、台風19号によって風倒木の発生した2つの標準地では被害程度に応じて相対照度の増大が認められ、その影響は1996年時点でも続いていると思われる。これら相対照度の増大傾向が択伐施

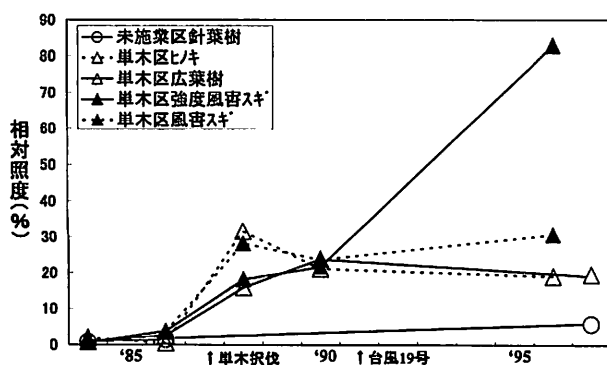


図6 相対照度の推移

凡例は森林整備と上層木の種類を表す。未施業区針葉樹は2つの標準地の平均値、単木区は残流域の標準地であり、風害は1991年台風19号被害を指す。

業あるいは上層木の風倒による影響であることは明らかである。

3.4.2.3 毎木調査(下層木)

図7に未施業区を除く各施業区の下層に樹下植栽されたスギ・ヒノキの立木密度、樹高、地際直径の推移を示す。

調査対象とした標準地の設置数は以下のとおりで、単木区とモザイク区の針葉樹林は1991年に台風被害を受けている。

- 単木区 : 針葉樹林2箇所(内1箇所は上層木台風被害地、残り1箇所は上層木の台風被害が軽微で以下「上層木無被害地」という)、広葉樹林1箇所
- 带状区 : 針葉樹林1箇所
- モザイク区: 針葉樹林1箇所(台風被害地)、広葉樹林1箇所

台風の影響

図7から下層木に対する台風の影響を考察する。

針葉樹林では単木区、带状区ともに立木密度の減少傾向は見られなかったが、モザイク区では極端な密度減少傾向が見られた(図7a)。モザイク区では広葉樹林においても単木区では見られなかった台風被害後の密度減少傾向が明らかであった(図7d)。このことから、モザイク区では単木区や带状区と比べて樹下植栽木の台風被害が発生し易かったことが示唆された。

生長の比較

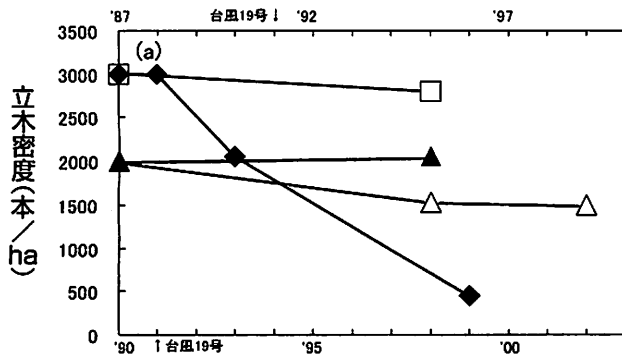
樹高: 針葉樹林では単木区より带状区やモザイク区において増大傾向がより顕著であった(図7b)。

広葉樹林においても単木区よりモザイク区の増大傾向が顕著であった(図7e)。

地際直径: 樹高と同様、針葉樹林では単木区より带状区やモザイク区の方が(図7c)、広葉樹林においても単木区よりモザイク区の増大傾向が顕著であった(図7f)。

これらのことは、植栽木の生長に影響を与える照度の

針葉樹林



広葉樹林

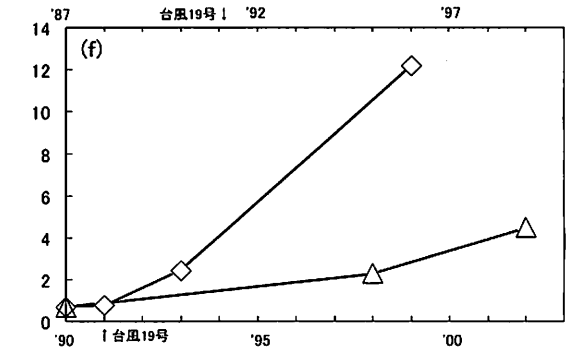
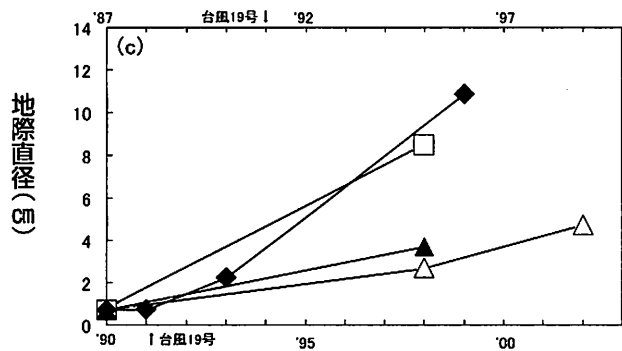
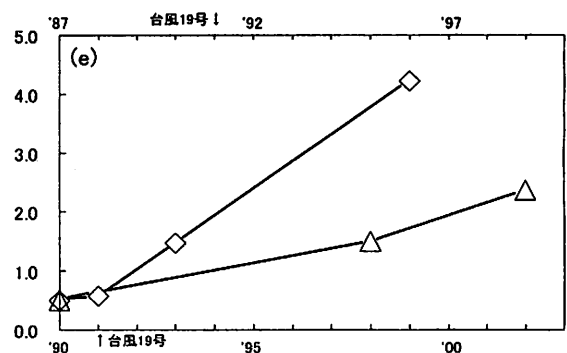
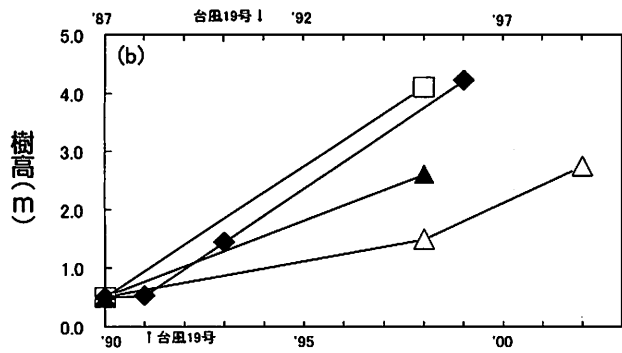
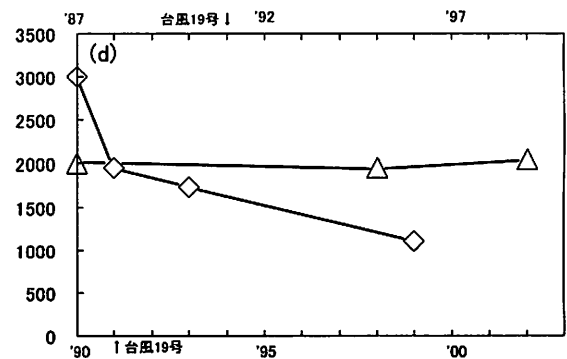


図7 上層木の樹種別の下層木毎木調査結果

各図の上横軸はモザイク区、下横軸は単木区、带状区の調査年に対応。

△：単木区(上層木無被害地)、□：带状区、◇：モザイク区(上層木無被害地)、

▲：単木区(上層木台風被害地)、◆：モザイク区(上層木台風被害地)

植栽時の'87年(モザイク区)、'90年(単木区、带状区)の樹高は0.5m、地際直径は0.7cmとした。

確保に関しては、面的な伐採方法である带状択伐やモザイク状択伐の方が単木択伐より有効であったことを示唆する。

3.4.2.4 林床植生調査

林床に出現した主な種はカンスゲ、コアジサイ、クロモジ、ムラサキシキブ、ナガバモミジイチゴ、マルバフユイチゴ、ガマズミ等であった。

林床植生の乾燥現存量の推移を図8に示す。

未施業区は2つの標準地の平均値を表し、単木区は残流域の標準地で、モザイク区は上層木伐採区域の標準地である。

未施業区では森林整備前の1984年、さらに13年経過後の1997年とも他の施業区と比べ低い値で推移した。一方、単木区とモザイク区ともに、ほとんどの標準地で1984年と比べ森林整備後の1990年に増加し、さらに台風後の1996、1997年にかけて増加する標準地が多く見られた。また、単木区よりも面的な伐採のモザイク区の方が増加

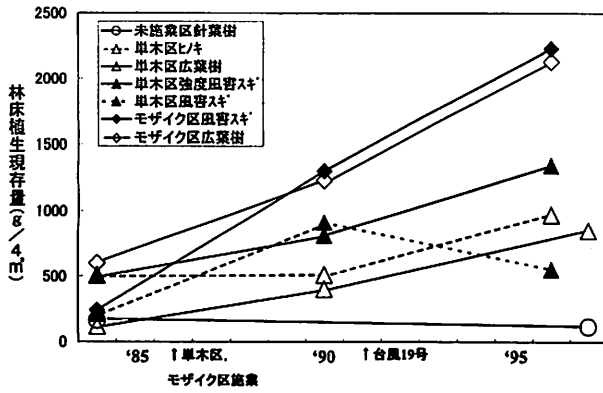


図8 林床植生現存量の推移

凡例は森林整備と上層木の種類を表す。未施業区針葉樹は2つの標準地の平均値、単木区は残流域の標準地であり、風害は1991年台風19号被害を指す。

が顕著であった。「3. 4. 2. 2 相対照度」において未施業区と比べ森林整備により上層木の密度が低くなった単木区で林内相対照度が高い値を示したが、この林床植生調査から相対照度が高い単木区で林床植生現存量の増加も多いことが確認された。モザイク区が単木区より、さらに林床植生の増加量が多い原因として、同程度の本数率の伐採であっても面的な伐採のため相対照度がより高く確保されたことが推測された。

森林整備以降（1990、1996、1997年）の未施業区と単木区（残流域）における相対照度と林床植生の乾燥現存量との関係を図9に表した。概して林内相対照度が大きいほど林床植生の現存量が大きい傾向が見受けられ、相対照度を高く維持することが林床植生の繁茂に繋がることが、この図9からも確認された。

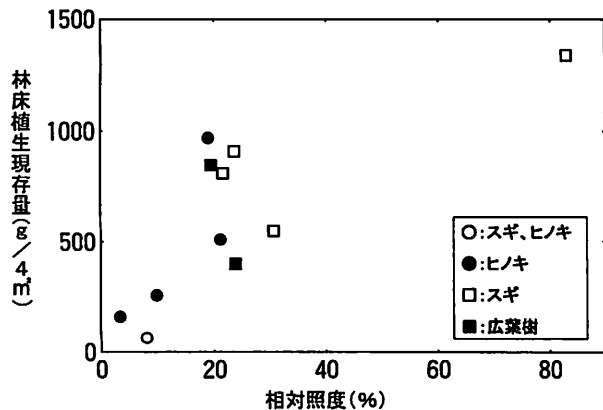


図9 森林整備以降（1990、1996、1997年）の相対照度と林床植生現存量

未施業区と単木区（残流域）の標準地の結果を表し、同一標準地で複数時期のデータを有するものを含む。凡例は上層木の樹種を表す。

4 森林の変遷に伴う土壌の変化

各区の流出特性には土壌条件が影響を与えることが想定されるが、土壌条件は森林の状態によって変化するはずである。そこで、森林の変遷に伴って各区の土壌条件がどのように変化するか把握するため、森林整備形態が大きく異なるが面積的にほぼ同等な、未施業区のA-2流域と単木区のB-1流域を対象とした土壌調査を2001、2002年にかけて行った。調査地点は各区内で均等になるように配置した。

また、1985年にも同様な土壌調査が行われており、その結果と比較した。

4.1 調査方法

土壌層位

各調査地点に縦2m×横1m×深さ1mの試孔を掘削し、土壌層位を記載した（表6）。調査は秋期から冬期にかけて行った。

浸透能

土壌断面調査の試孔の近隣で、A層、B層それぞれ直径200mmの試験用円筒によりマスグリーブ式に準じた冠水型浸透計により測定した（表6）。調査は秋期から冬期にかけて行った。

表層土壌の深度

土研式簡易貫入土壌硬度計により土壌の貫入抵抗値のNc値*を深さ1.5～2m程度まで測定した（表6）。各年の調査地点約100箇所のうち30箇所ずつを土壌断面の試孔の近隣で行い、土壌断面調査での観察結果と照合し土層厚を推定した。調査は秋期から冬期にかけて行った。

*Nc値は簡易貫入土壌硬度計の5kgの重りを50cmの高さから落下させ、先端角60°の円錐コーンを地中に貫入させ、コーンが10cm貫入するのに要した重りの落下回数に換算してもとめるもので、次式のように算出する²⁾。

$$Nc値 = 10 \times \text{落下回数(回)} / \text{貫入量(cm)}$$

土壌孔隙率(粗孔隙率及び粗大孔隙率)

土壌断面調査の試孔からA層、B層に分け、層厚1/2の深度で400ml採土円筒を使用して採取し持ち帰り、粗孔隙率及び粗大孔隙率の孔隙組成を調査した（表6）。調査は秋期から冬期にかけて行った。

4.2 結果と考察

4.2.1 土壌層位、浸透能、表層土壌の深度

土壌層位：

表6 土壌調査項目及び調査地点数

調査項目	流域	未施業区			単木区		
		1985	2001	2002	1985	2001	2002
土壌層位	調査年	7	17	18	4	13	12
浸透能		7	17	—	4	13	—
土壌孔隙率		7	17	18	4	13	12
表層土壌深度		—	60	60	—	42	40

A0層(有機物層)の厚さの平均値は未施業区、単木区ともに時間の経過に伴い若干減少し、2001、2002年は両区ともに3cm程度であった(図10a)。

A層の厚さの平均値は両区とも時間が経過しても、ほぼ30cm程度であった(図10b)。

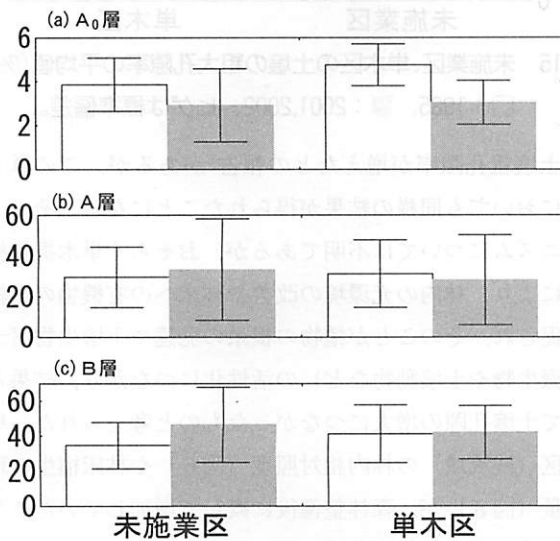


図10 未施業区、単木区の土壌の厚さの平均値 (cm)
□: 1985、■: 2001,2002、ヒゲは標準偏差。

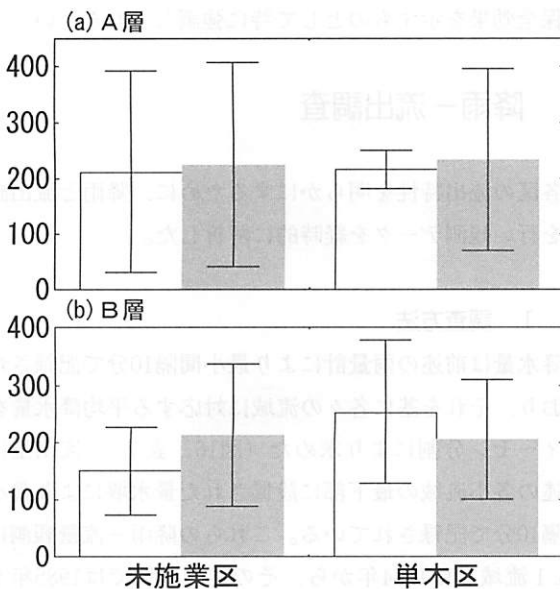


図11 未施業区、単木区の土壌(最終)浸透能の平均値(mm/h)
□: 1985、■: 2001、ヒゲは標準偏差。

B層の厚さの平均値は未施業区では35から41cmへ若干増大したが、単木区は40cm程度で変化は見られなかった(図10c)。

浸透能:

A層の最終浸透能の平均値は、1985年は両区ともに200mm/h強であり、2001年は単木区の、一般的な林地の値から大き

く外れた値1146mm/hを除くると両区ともに200mm/h強であり、あまり変化が見られなかった(図11a)。

B層の最終浸透能の平均値は、1985年は未施業区が150mm/h、単木区が250mm/h程度であり、2001年は両区ともに200mm/h程度であった(図11b)。

表層土壌の深度:

Nc値が5を示す深度はB層とC層の境界深度と有意な相関があり(図12)、A層及びB層までの表層土壌の分布深度を容易に広域的に把握できることが確認された。

Nc値5深度から推定された表土の平均深度は両区とも、ほぼ0.8m程度であり有意な差はなかった(図13)。

以上述べたとおり、結果として未施業区と単木区の土壌層位や浸透能や表層土壌深度に差は認められなかった。土壌表層の、いわば境界面での浸透能は両区とも部分

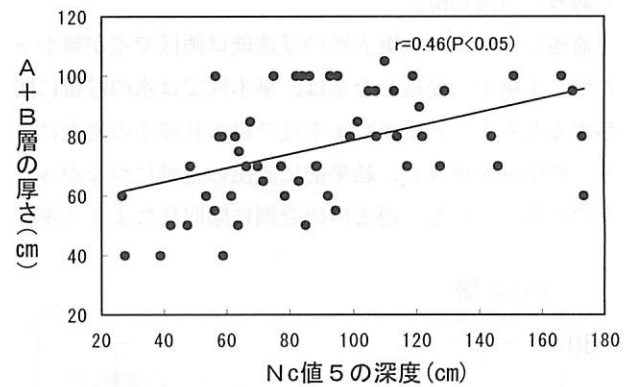


図12 Nc値5の深度とA+B層の厚さの関係

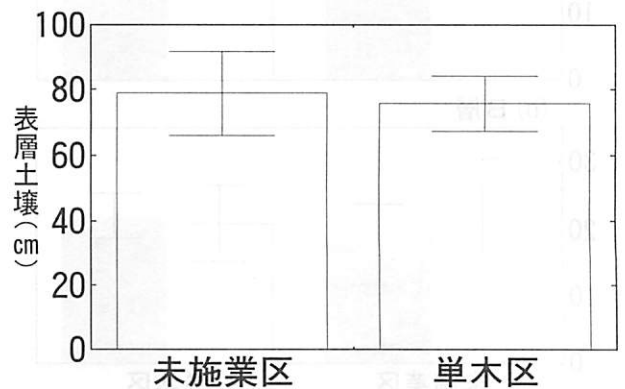


図13 未施業区、単木区の表層土壌の厚さの推定値
ヒゲは標準偏差。

的には低い値を示す箇所があるが、全体的には過去の研究例⁹⁾での林地平均258mm/hと概ね同程度であり、単木区においても林内雨は未施業区と同様に土壤中に浸透していくことが推測された。皆伐により有機物層やA層の厚さが減少し、それに伴い粗孔隙が減少し細孔隙が増加し、結果的にA層土壌の透水性が悪化したとの報告があるが⁹⁾、それと比べて単木択伐施業は林床の有機物層や土壌表層の流亡阻止に効果があったものと推測された。

4. 2. 2 土壌孔隙率(粗孔隙率及び粗大孔隙率)

粗孔隙率：

A層は未施業区では時間が経過しても20%程度で、あまり変化が見られないが、単木区では2001、2002年では25%と増加傾向が見られた(図14a)。

B層は未施業区では減少したが、単木区では若干増加する傾向が見られた(図14b)。

粗大孔隙率：

A層は1985年は単木区の他と比べ大きく外れた値28.3%を除外すると両区ともに5%程度であった。両区とも増加したが、その傾向は単木区で顕著であった(図15a)。

B層は両区ともに増加したが、単木区の方がより顕著であった(図15b)。

前述したように土壌表層の浸透能は両区で差が無かったが、土壤中に浸透した水は、単木区では水の貯留に関与すると考えられる粗孔隙率及び粗大孔隙率の増大により、貯留分が増大し、結果的に流出の遅延につながったものと考えられた。過去の研究例に除間伐によりスギ林

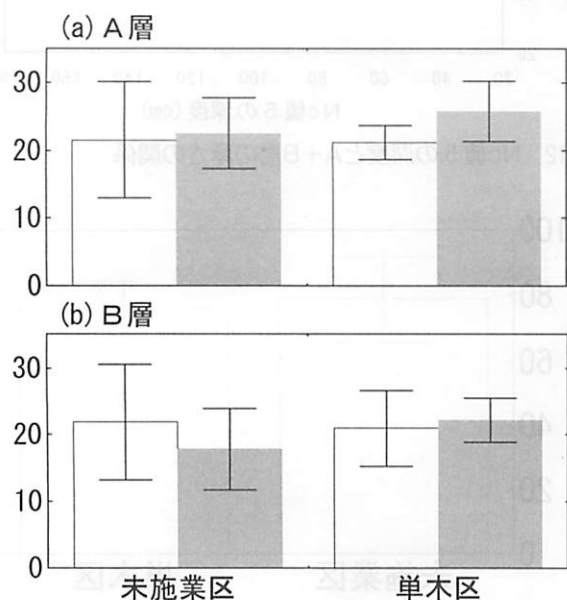
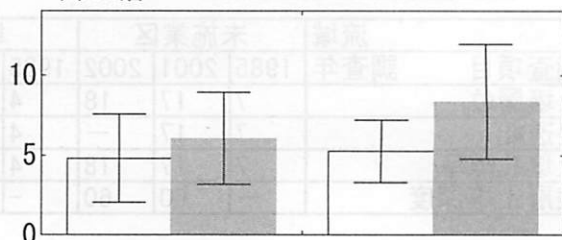


図14 未施業区、単木区の土壌の粗孔隙率の平均値(%)
□：1985、■：2001,2002、ヒゲは標準偏差。

(a) A層



(b) B層

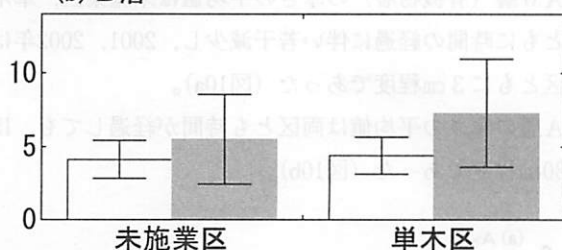


図15 未施業区、単木区の土壌の粗大孔隙率の平均値(%)
□：1985、■：2001,2002、ヒゲは標準偏差。

の土壌粗孔隙率が増えたとの報告⁹⁾があるが、この単木区においても同様の結果が得られたことになる。そのメカニズムについては不明であるが、おそらく単木択伐施業により、林内の光環境の改善や林床への有機物の供給が促され、そのことが植物の根系の発達や土壌生物(土壌微生物や土壌動物など)の活性化につながり、結果として土壌孔隙の増大につながったものと考えられた。単木区(残流域)の林内相対照度(図6)や林床植生の現存量(図8)が、森林整備後に概して増加していたことは前述したとおりである。

以上のように、単木区では粗孔隙率及び粗大孔隙率の増加傾向が見られた。このことは単木択伐施業の森林土壌保全効果を示すものとして特に強調しておきたい。

5 降雨-流出調査

各区の流出特性を明らかにするために、降雨と流出調査を行い観測データを経時的に解析した。

5. 1 調査方法

降水量は前述の雨量計により最小間隔10分で記録されており、それを基に各々の流域に対応する平均降水量をティーセン分割により求めた(図16, 表7)。流出量は前述の各小流域の最下部に設置された量水堰により最小間隔10分で記録されている。これらの降雨-流量観測はNo. 1流域では1984年から、その他の流域では1985年9月から開始されている。本報では1月1日から12月31日を1水年とした。量水堰が流域ごとに2箇所ある未施業

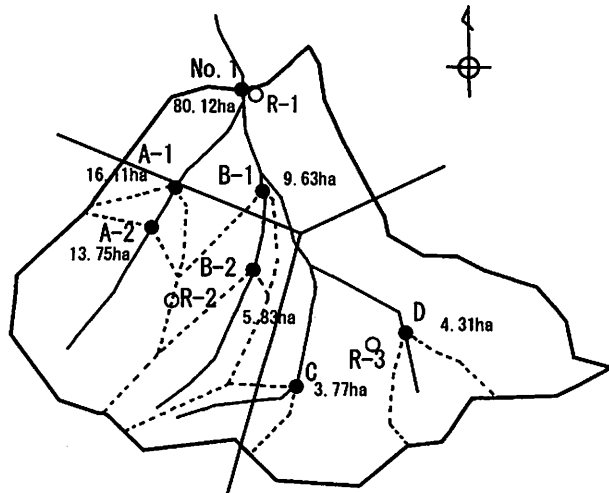


図16 モデル流域のティーセン分割図

表7 ティーセン分割諸元一覧表

流域	ティーセン雨量計No.	実測雨量計No.		
		R-1	R-2	R-3
No.1	RN1	15.4	43.0	41.6
A-1	R-2	0.0	100.0	0.0
A-2	R-2	0.0	100.0	0.0
B-1	RB1	0.2	99.8	0.0
B-2	R-2	0.0	100.0	0.0
C	RC	0.0	75.9	24.1
D	R-3	0.0	0.0	100.0

区, 単木区については, それぞれ下流側の量水堰A-1, B-1による流量を代表値とした。

5. 2 結果

5. 2. 1 年単位の指標 (年降水量, 年流出量, 年消失量, 年流出率)

流出土砂による, 量水堰A-1 (及びA-2) での1993~1996年の流量欠測等, 長期間の欠測がある年は検討から除外した。

年降水量はおよそ1300~3000mmで, 渇水年であった1994年以外は1800mm以上の降水があり, 年によって各区の間で最大300mm程度の差がみられたが, 概ね各区とも同程度の年降水量であった (図17)。

年流出量はおよそ1000~3000mmであった(図18)。当初の数期間は各区ともほぼ同様に推移したが, 単木区, 带状区は, 特に森林整備が終了し台風19号の被害があった1991年以降において, 未施業区と比べ高い値を示す傾向が見られた。モザイク区は森林整備 (1987年度) 前において他区よりも低い値を示す傾向が見られ, 森林整備後においても高い値を示さず未施業区と同様な変動を示した。

年消失量は, 年降水量と年流出量の差で, およそ0~

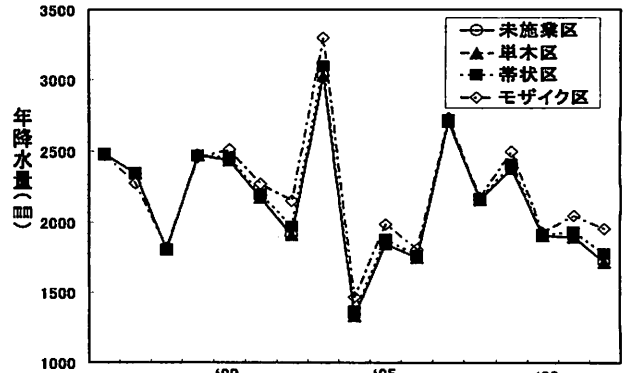


図17 各区の年降水量の推移

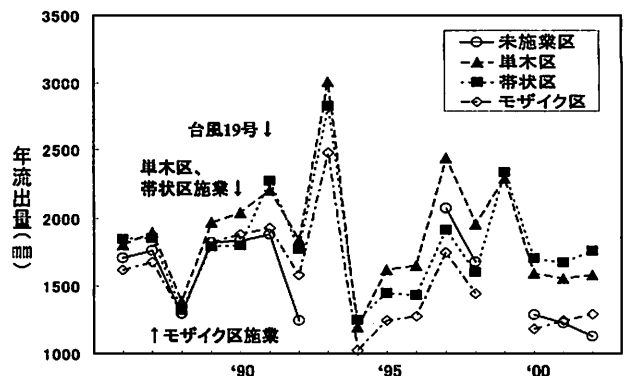


図18 各区の年流出量の推移

'93~'96, '99の未施業区と'99のモザイク区は長期間の欠測あり。

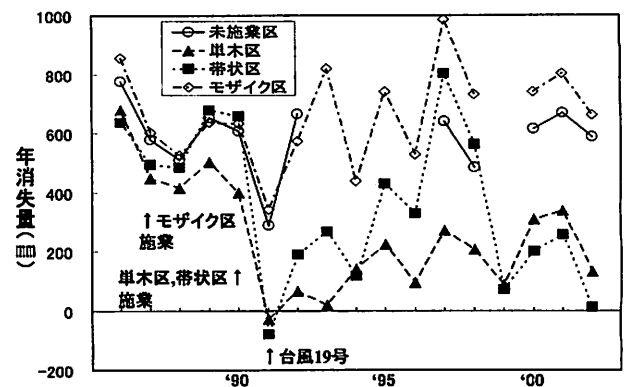


図19 各区の年消失量の推移

'93~'96, '99の未施業区と'99のモザイク区は長期間の欠測あり。

1000mmであった。当初の数期間は各区ともほぼ同様に推移したが, 単木区, 带状区は年流出量 (図18) とは逆に, 特に森林整備が終了し台風19号の被害があった1991年以降において, 未施業区と比べ低い値を示す傾向 (特に単木区) が見られた (図19)。モザイク区は森林整備 (1987年度) 前において他区よりも高い値を示す傾向が見られ, 森林整備後においても低い値を示さず未施業区と同様な変動を示した。また, 各区において1991年以降, 漸増傾

向が伺えた。

年流出率は年降水量に対する年流出量の比を表したもので、当初の数期間は各区ともほぼ同様に推移したが、単木区、带状区は森林整備が終了し台風19号の被害があった1991年以降、未施業区と比べ高い値を示す傾向（特に単木区）が見られ、モザイク区は森林整備（1987年度）前において他区よりも低い値を示す傾向が見られ、森林整備後においても高い値を示さず未施業区と同様な変動を示した（図20）。また、各区において1991年以降、漸減傾向が伺えた。

5. 2. 2 渇水流量

渇水流量は、1年間の日流出量を最大値から最小値まで順に整理した流況曲線（図21：2001年の例）の流況特性値の1つで、最大側から数えて355番目の日流出量であり、1年のうち355日は利用できる水の量に相当し、渇水期に使用できる水量の目安となるものである。単木区、带状区は当初の数期間は未施業区と比べ低い値を示したが、森林整備が終了し、台風の被害があった1991年以降、高い値を示すようになった（特に単木区：図22）。

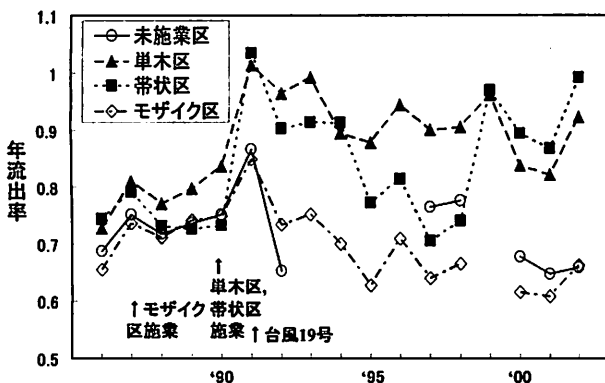


図20 各区の年流出率の推移

'93~'96、'99の未施業区と'99のモザイク区は長期間の欠測あり。

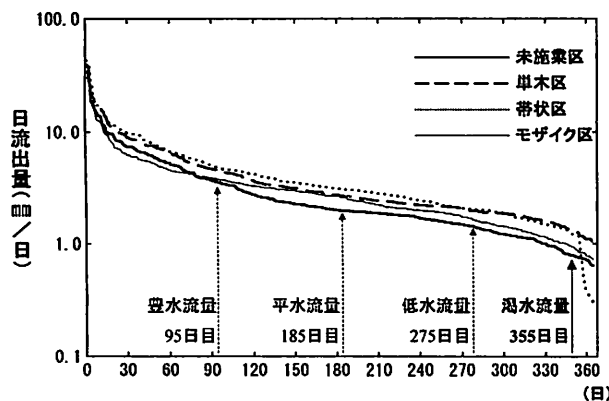


図21 各区の流況曲線の例(2001年)

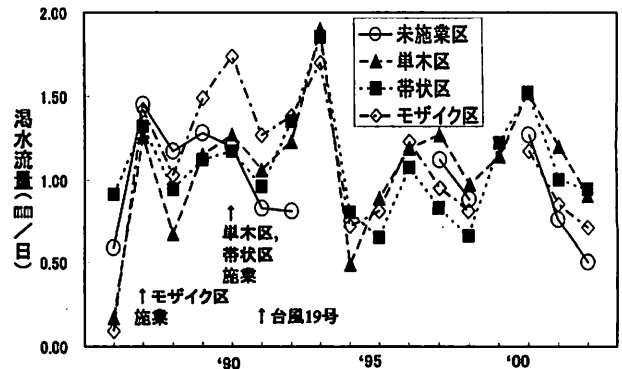


図22 各区の渇水流量の推移

'93~'96、'99の未施業区と'99のモザイク区は長期間の欠測あり。

一方、モザイク区は1987年度の森林整備後の数年間は他の区より高い値を示す傾向があったが、次第に他の施業区と比べ相対的に低減し、1997年以降は、未施業区と同様な変動を示した。

5. 2. 3 流況安定化率

前述の流況曲線と、日雨量を最大日雨量から最小日雨量まで順に整理した日雨量曲線を比較することによって安定化積算流量を求め、さらにそれを年降水量で除して流況安定化率を求めた（図23）。この指数は流出の平準化機能を表すもので大きいほど平準化機能が高いことを示す。

この流況安定化率（図24）は、当初の数期間は各区とも同様に推移したが、単木区、带状区は森林整備が終了し台風19号の被害があった1991年以降、未施業区と比べ概して高い値を示し、かつ増大傾向があった（特に単木区）。一方、モザイク区は未施業区と同様な変動を示し当初の数年間と同程度で推移した。

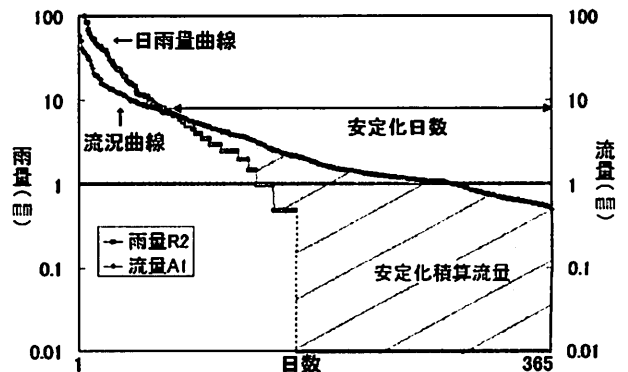


図23 流況安定化率の求め方

$$\text{流況安定化率} = \text{安定化積算流量} / \text{年降水量}$$

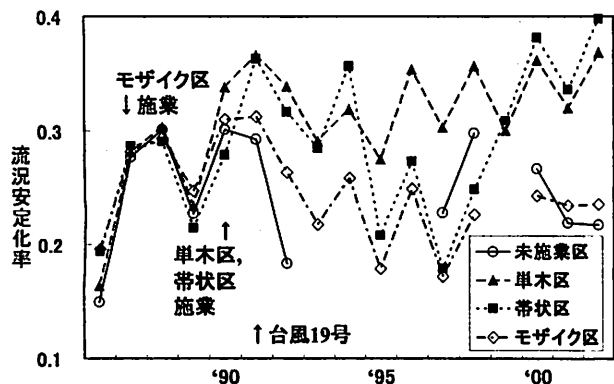


図24 各区の流況安定化率の推移

'93~'96、'99の未施業区と'99のモザイク区は長期間の欠測あり。

5. 2. 4 蒸発散量

森林における蒸発散量は消失量として算定され、水源涵養機能の評価のためには正確な評価が必要とされる。蒸発散量の推定には様々な方法があるが、簡単で多くの事例で用いられている短期水収支法によって推定することとした。短期水収支法による日蒸発散量の解析手順は鈴木(1985)⁶⁾を参考にし、貯留量が等しいとみなせる時点を定めるには以下のように行った。

- ①先行する2日間に降雨がなく、当日も無降雨である日を水収支の起日、終日の候補とする。
- ②この候補となる起日と終日の組から、日流出量の差が日流出量の2%以内であるものを選び出し、起日、終日をそれぞれ t_1 、 t_2 とする。

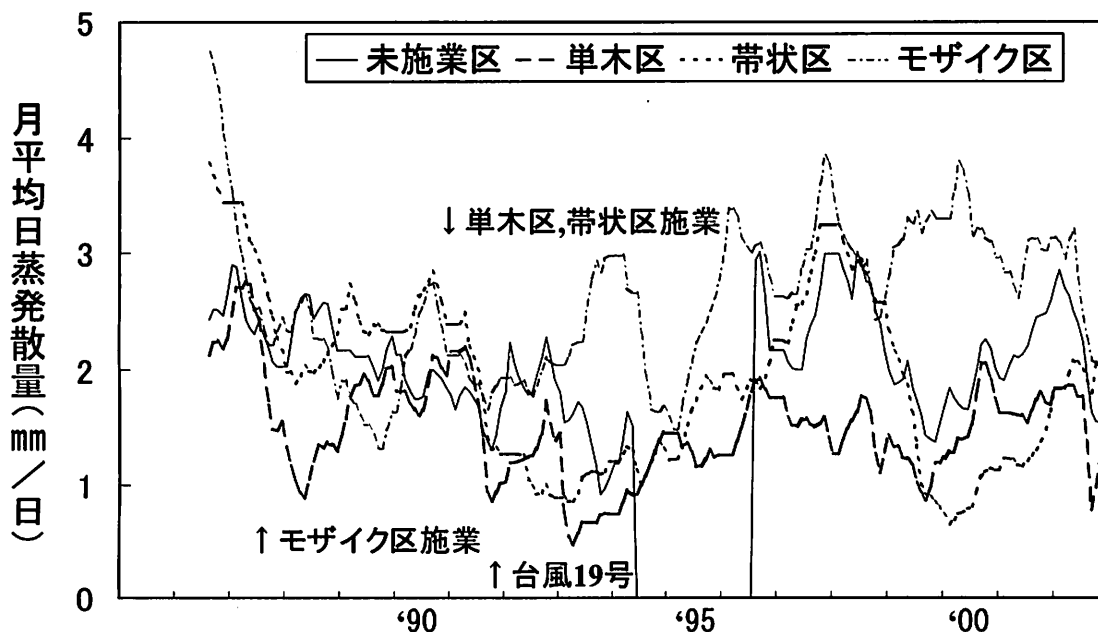


図25 各区の月平均日蒸発散量の推移

蒸発散量の推定は短期水収支法により、1年間の移動平均を表す。
'93~'96、'99の未施業区と'99のモザイク区は長期間の欠測あり。

③この組のうち、期間が8日以内のもの、60日以上のものを除外する。

④①~③で選んだ水収支期間のうち、起日、終日からさかのぼって、3日間の平均減水勾配が負になるものは除外する。次に、集計方法は t_1 、 t_2 で囲まれる期間の降水量から流出量を差し引き、期間日数で割って平均蒸発散量推定値を求め、この日蒸発散量の推定値を月ごとに平均して、月平均日蒸発散量とした。

この月平均日蒸発散量の移動平均による周期変動を図25に示す。移動平均期間は1年とした。当初の数期間は各区ともほぼ同様に推移したが、森林整備が終了し台風被害があった1991年以降、単木区、带状区は未施業区と比べ概して低い値を示し、モザイク区は未施業区と同様に高い値を示した。これは年消失量(図19)の推移と同様な傾向であり、年流出量(図18)と年流出率(図20)とは逆の傾向であった。また、1991年以降は年消失量(図19)と同様に各区において漸増傾向が伺えた。

5. 3 考察

年降雨量は調査期間中、各区ほぼ同程度で大きな差がないまま推移し(図17)、森林の水源涵養機能に關与する要因の1つである、降雨については各区ほぼ同様であると確認された。

単木区、带状区においては、森林整備が終了し台風被害があった1991年以降、年流出量(図18)、年流出率(図20)は未施業区と比べ高い値を、逆に年消失量(図

19)は低い値を示すようになった。モザイク区においては、森林整備後においても、いずれも未施業区と同様な変動を示した。

過去の研究例で間伐により林分蒸散量は低減するとの報告⁷⁾があるように、単木区、帯状区におけるこれらの現象は、1991年に終了した森林整備、及び同年の台風被害により立木密度が減少し、それに伴い上層木の葉量が減少したことによる蒸発散量の低減(図25)によるものと考えられた。単木区、帯状区で、その後見られた年消失量(図19)の漸増傾向は、上層木密度が大きく減少するイベントがなく次第に葉量が回復し始めたことによる蒸発散量の増大(図25)に起因するものと思われた。

一方、森林整備がなされ、台風被害を受けたモザイク区の値が、未施業区と同様な変動を示したのは、事業前の林相の広葉樹林の比率が70%と高かったことが一因と考えられた。森林伐採による植生の減少率と流出量の変動に関して世界の森林水文試験地の資料を整理した結果、広葉樹林は針葉樹林と比べ伐採後の流出量の増加が小さいという報告がある⁸⁾。また、アメリカのCoweeta試験地の例では広葉樹林は針葉樹林と比べ伐採後の流出量の増加が小さく、早期に元の状況に回復するという報告がある⁹⁾。この報告では、その原因として広葉樹林は針葉樹林よりも葉量が少なく蒸発散の期間が短く、特に樹木の活動休止期に降雨の遮断蒸発量等や蒸散量が少ないことなどが影響していると考察されている。わが国においても落葉広葉樹は一般的に針葉樹よりも葉面積指数(LAI)や葉乾重が小さいことが報告されている¹⁰⁾。これらのことから、元々広葉樹林の比率が高かったモザイク区では、他区と比べ森林整備、台風被害後の流出量の増加割合が小さく、早期に元の状況に回復したものと推察された。ただし、モザイク区の森林整備前の低流出率については、前述のように広葉樹は針葉樹よりも蒸発散量が少なく高流出率をもたらすと考えられるため、森林整備前の林相が原因とは考えがたい。モザイク区の年降水量や地質は他区と同様であり、斜面方向も大きくいえば各区とも北向きである。従って、この低流出率の原因については、その他の地形要因等、更に詳細な検討を要する。年消失量(図19)、蒸発散量(図25)の漸増傾向については、森林整備の際、植栽した下層木のスギ、ヒノキ等の生長(図7)が影響したものと推測された。

未施業区の年消失量(図19)、蒸発散量(図25)が調査期間中、変動しつつも、概して当初の数年間の値とあまり変わらなかったことは、葉量があまり変わらなかったためと思われた。すなわち、図5に示すように調査期

間中の未施業区の立木密度の低下は軽微であり、それに伴う葉量の減少も軽微であったと推測された。このことは林内相対照度(図6)が1984年時点で1%程度と低く、1997年時点でも5%程度と低く樹冠がかなり閉鎖されていることから示唆された。

流況安定化率(図24)についても、単木区、帯状区は概して1991年から未施業区と比べ高い値を示し、かつ増大傾向があったが、モザイク区は未施業区と同様な変動を示し当初の数年間の値と同程度であった。流出の平準化の程度を表す流況安定化率の増大傾向が、単木区同様、帯状区においても観察されたことは、単木区において確認された土壌孔隙率の増大(図14、図15)が、帯状区においても起きていた可能性を示唆している。このことから、これら両区と未施業区の間に見られた流況安定化率の違いは、森林土壌の物理性の違いによる流出速度の差が現れたものと思われた。すなわち、森林整備、台風被害等による立木密度の低下が林内の光条件の改善、ひいては土壌条件の改善につながったことが単木区、帯状区における流況安定化率の向上となって現れたものと推察された。流況安定化率は計算上、年降雨量が大きくなれば減少し、年流出量が増加すれば増加するという関係があるので評価の際に留意する必要があるという¹¹⁾。このような視点から図20をみると年降雨量と年流出量の比である年流出率は単木区、帯状区では、未施業区と比べ1991年から高い値を示しており(図20)、それが流況安定化率の大きさ(図24)に影響した可能性も否定はできない。しかしながら、単木区、帯状区では1991年以降、流況安定化率は増大傾向であったが(図24)、年流出率は漸減傾向を示している(図20)、このことから流出の変動に伴う見かけ上の傾向ではないことが推察された。一方、モザイク区では流況安定化率が未施業区と同様に変動しつつも当初の数年間の値と同程度であった。このことについては、1987年度の森林整備によって得られた土壌の物理性の改善による流出の遅延と、1991年の台風による林床の攪乱が相殺されたものと考えたい。また、未施業区の流況安定化率が、変動しつつも当初の数年間の値と同程度であったことは、土壌の粗孔隙率および粗大孔隙率(図14、図15)ともに大きな変化はなかったことが一因と考えられた。

湧水流量(図22)は、単木区、帯状区では当初の数年間は未施業区と比べ低い値を示していたが、森林整備が終了し、台風の被害があった1991年以降、高い値を示すようになった(特に単木区)。これには、森林整備等により生じた単木区、帯状区における蒸発散量の減少に加

え、土壌物理性の違いによる流出速度の差も関与していると推測された。一方、モザイク区の湧水流量は1987年度の森林整備後の数年間は他の区より高い値を示す傾向があったが、その後、単木区、帯状区と比べ相対的に低減し、1997年以降は未施業区と同様な変動を示した。1991、1992年では未施業区と比べ高い値を示していることから、森林整備の影響がなくなったのではなく、単木区、帯状区における数値の上昇によって相対的に高い値を示さなくなったものと考えられる。

6 総合考察

森林の水源涵養機能に関しては、諸条件が似かよった2つの流域での対照流域試験等で、皆伐による流出特性への影響、すなわち森林の有無による流出特性の違いは大まかには把握されつつある¹²⁾。また、間伐等の森林整備による土壌等への影響も把握されつつある⁹⁾。しかしながら、森林整備による流出特性への影響については、マツ林における除伐・間伐等の森林整備による流出特性への影響がわずかに認められた例¹³⁾があるものの未だに調査例は少ない。森林整備が水循環に与える影響は単純ではなく、地形、地質、気象、植生、土壌等様々な要因が関与するためである。

ここで、一般的に森林の状態と水流出の関係について、これまでに明らかにされたことを整理すると概ね以下のとおりである。

- ①樹冠における遮断蒸発、立木からの蒸散、地面からの蒸発等の蒸発散により水の損失があるが、森林の状態によって蒸発散量は異なる¹⁴⁾。
 - ②土壌表層の状態によって浸透能は異なり、例えば伐採跡地や裸地は林地と比べ浸透能が低く土壌表層から下層に水は浸透しにくい³⁾。
 - ③土壌に浸透した水は土壌中の孔隙によって一時的に保水され遅延して流出するが、この孔隙組成によっても遅延の度合いが異なる¹⁵⁾。
 - ④広葉樹林は針葉樹林と比べ、伐採後の流出量の増加が小さい^{6) 9)}。
- 一方、本報で明らかになったことは以下のとおりである。
- ①単木区、帯状区では立木密度及び葉量の減少によると思われる蒸発散量の減少が観察された(図25)。
 - ②単木区における土壌表層の状態は森林整備後も変わらず(図10)、浸透能も変わらなかった(図11)。
 - ③単木区では土壌孔隙率等の土壌条件の向上(図14、図

15) によるとと思われる流出の遅延現象が観察された(図24)。

- ④森林整備前に広葉樹の比率が高かったモザイク区では、立木密度及び葉量の減少の割には蒸発現象に変化が生じなかった。

これらの結果は、これまで言われている森林の状態と水流出の関係^{3) 9) 14) 15)}の、より詳細な説明を可能にしたものと考えられる。

また、単木区では森林整備後においても土壌層位、浸透能等が未施業区と同様に維持され、さらに粗孔隙率や粗大孔隙率が向上したことから、単木択伐施業は皆伐施業と比べ、土壌保全、ひいては水源涵養機能の発揮の面で良好な施業方法であることが確認された。

以上の結果から本モデル流域では、一連の択伐施業による森林の水源涵養機能の向上が一定程度図られたものと結論づけたい。

7 おわりに

本報では、単木区、帯状区で年流出率の増大等、森林の水源涵養機能の向上傾向(特に単木区)が示されたが、モザイク区のような広葉樹林を多く含む森林では、森林整備による効果があまり顕著でなく継続しにくいと考えられた。このことから、水源涵養機能を向上させるための森林整備を実施する際は、個々の地形、地質等の要因に充分留意する必要があるが、樹種の面では広葉樹林(落葉広葉樹林)よりスギ、ヒノキ林において森林整備を優先的に行うことが効果的であると推測された。また、単木択伐と帯状択伐の比較で言えば、本報のモデル流域のように林道、作業道等路網が高密度で整備されている林分では単木択伐施業が適しているものの、路網密度が低く地形等から制約を受ける林分では帯状択伐施業が作業効率の面で妥当ではないかと考えられた。モザイク区では森林整備の効果が明瞭には確認できず低流出率の原因も明らかにできなかった。森林整備の効果については元の林相がスギ、ヒノキ林であれば、もう少し継続して把握されたものと予想されたが、低流出率の要因については今後解明すべき課題となった。また、本報の中では森林整備や台風の影響と治山施設の影響を分離して評価することができなかった。これらの問題を解明していくには、質の高いデータ観測を継続し、さらなる降雨一流出の解析を進めていく必要がある。

最後に、解析方法に関し御指導頂いた九州大学小川滋教授に、また、調査に際して御支援・御協力頂いた林野

庁水源地治山対策室，広島県庁治山室，広島県芸北地域事務所，安芸太田町役場，国土防災技術株式会社の皆様に厚く御礼申し上げます。

8 引用文献

- 1)広島県(1984～2002)水土保全機能強化総合モデル事業効果調査報告書(森林機能効果調査業務報告書)。
- 2)逢坂興宏(1996)斜面土層構造の測定，水文地形学，古今書院，15-23。
- 3)村井宏・岩崎勇作(1975)林地の水および土壌保全機能に関する研究(第1報)，林試研報，274，23-84。
- 4)小林繁男*(1982)森林の皆伐に伴う土壌の変化，ペドロジスト，26，150-163。
- 5)近藤次雄(1996)土壌粗孔隙量に対する除間伐の効果，森の研究，日本林業調査会，128-131。
- 6)鈴木雅一(1985)短期水収支法による森林流域からの蒸発散量の推定，日林誌，67(4)115-125。
- 7)森川靖(1993)間伐と林分蒸散量，水利科学，215，58-66。
- 8) Bosch, J.M. and Hewlett, J. D. (1982) A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration, J. Hydro., 55, 3-23.
- 9) Swank, W. T., and Crossley, Jr. D. A. (1988) Forest hydrology and ecology at Coweeta, 469pp, Springer-Verlag.
- 10) 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(11)416-423。
- 11) 小川滋(1996)日本の水資源供給に貢献する森林，山林，49-61。
- 12) 蔵治光一郎(2003)森林の緑のダム機能(水源涵養機能)とその強化に向けて，76pp, (社)日本治山治水協会。
- 13) 村井宏・熊谷直敏(1989)山地小流域における森林への理水的施業の効果に関する研究(Ⅲ)—除伐・間伐による林地の水文循環と溪川における水土流出への影響—，静大演報，13，1-25。
- 14) (財)水利科学研究所編(2002)地球環境時代の水と森，222pp, 日本林業調査会。
- 15) 有光一登編著(1987)森林土壌の保水のしくみ，199pp, 創文。

*は直接参照できなかった文献

Relationship between changes of the forests and runoff property in soil and water
conservation function reinforcement synthesis model basin
-Direction of forest management for improving of water conservation function-

Tetsuya Yamamoto Sakutaro Ikeda

Summary

Relationship among rainfall, runoff, soil pore and forest management investigated about 18 years in four forest zones in each small basins were analyzed. Forest zones were classified in relation to their management as single tree cutting, strip cutting, mosaic selection cutting, and control zones. Main vegetation of single tree cutting, strip cutting, control zone was conifer plantation (Japanese cedar and cypress), while that of mosaic selection cutting zone was natural deciduous broad-leaf trees. These investigation basins occupied 80ha and were established in headwaters of Ota-river in Hiroshima Prefecture to inspect the water conservation function of forest. Runoff and flow stability ratio tended to improve in single tree and strip cutting zones except mosaic selection cutting zone since 1991 soon after cuttings were finished. This tendency was remarkable in single tree cutting zone in particular. Additionally the zones were disturbed heavily by a typhoon in 1991. The soil large pore porosity in single tree cutting zone increased after the management. It was suggested that the reduction of tree density by cutting (and/or typhoon) decreased the evapotranspiration of forest and the growth of soil large pore porosity by single tree cutting increased the water-holding capacity of soil. On the contrary, steady state of runoff and flow stability ratio observed in mosaic selection cutting zone showed that effect of management on water conservation function in deciduous broad-leaf forest was not as obvious as in conifer plantation.

[Key words]

forest management, runoff property, selection cutting, water conservation function