

山地溪流河川の落葉の滞留特性

大久保 博・北野実紀

1. はじめに

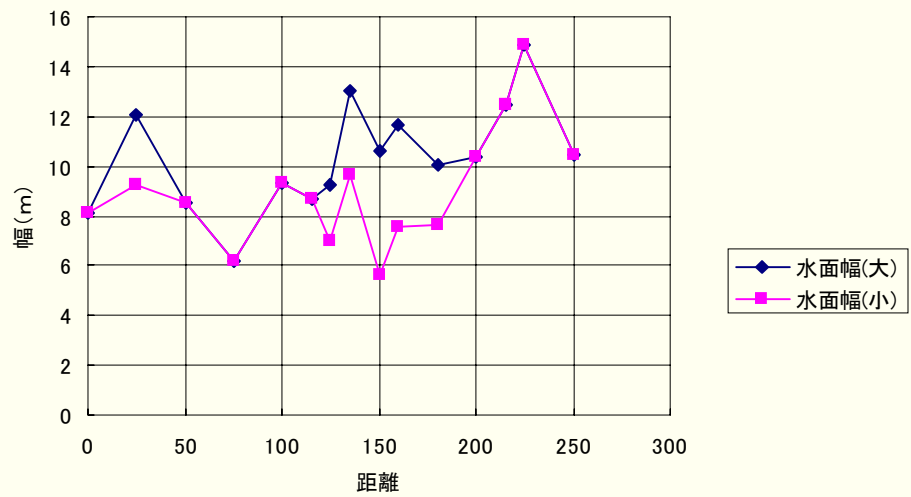
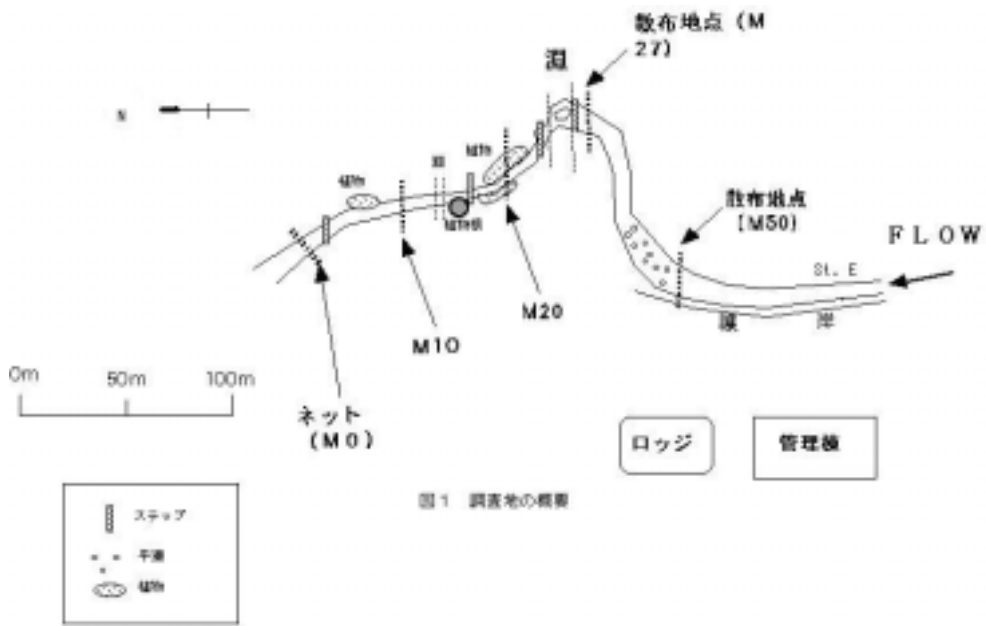
溪流生態学の分野では外来性有機物の研究は盛んに行われている。外来性有機物には落下昆虫などもあるが、主には落葉および落枝である。これらの有機物はサイズによって、粗粒状有機物 CPOM (Coarse particulate organic matter > 1 mm)、細粒状有機物 FPOM (1mm > fine particulate organic matter > 0.45 μm)、溶存態有機物 DOM (dissolved organic matter < 0.45 μm) に分類されている。

溪流に流入した落葉は河川に一部は滞留 (retention) し下流へと流下する。滞留している間に落葉は水生昆虫の餌として利用される。滞留 (retention) は二つのプロセスを表す言葉として定義されている。そのプロセスとは堆積作用 (deposition) と捕捉作用 (trapping) である。いわゆる淵では堆積作用が卓越し、瀬では捕捉作用が卓越するといわれている。

本研究は、短期間の滞留の特徴について、実際に河床に滞留する落葉量を調査するとともに流下試験を行い検討した。特に、瀬の捕捉作用について考察をする。また、滞留箇所と滞留量の分布状況から河道の滞留特性を把握することを目的とする。

2. 調査地の概要

調査は山形県赤川水系の梵字川支流である早田川 (図 1 参照) で行った。流域面積は 13.66km²、流路長は 10.37km、標高は 991 ~ 260m となっている。縮尺五万分の一の山形県現存植生図 (1988 (昭和 63 年) 発行) によると、その植生は流域面積の 76.8% がブナやミズナラ等の広葉樹群落に覆われている。地質は縮尺二十万分の一の山形県地質図によると、流域面積の 70.3% が安山岩類、29.7% が花崗岩類という比率になっている。調査地は早田川上流に位置する山形大学上名川演習林管理棟前より下流約 50m からの 250m 区間とした。調査地内は、図 1 に示すように、調査区間は 2 つの淵および 3 つの瀬の区間から構成されている。文献によれば、調査区間の長さは、後に述べる流下試験の場合、川幅の 10 倍程度、また 3 次河川では 100 m 程度が適当とされているから、これらの条件も加味して決定した。滞留落葉の採取は、5m ごとの小区間 (M0 ~ M50) に区分して行ったが、流下試験では捕捉・堆積されているヶ所 (トラップ: obstacles) ごとに採取し記録した。区間の縦横断は図 2 の通りである。



水面幅 (m)

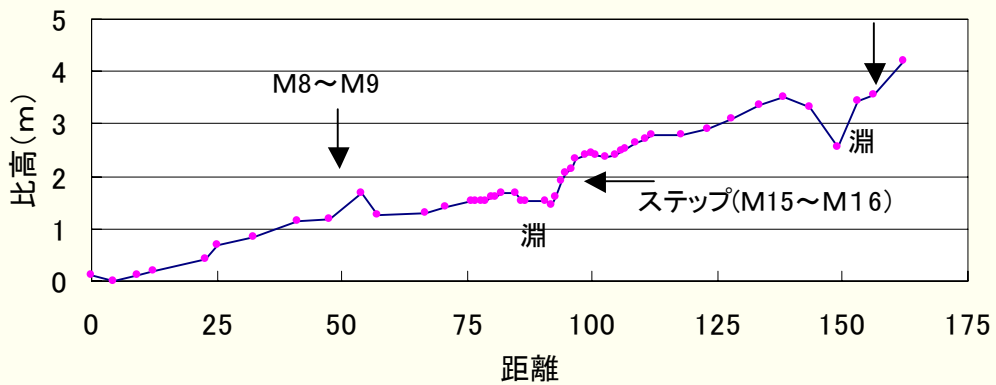


図2 M0~M27の縦断図および水面幅

3 調査方法

3.1 停滞量調査

停滞量調査は落葉期に2種類の調査を実施した。一番目は、実際の停留量の調査である。実際に河床に滞留する落葉量を調べるために2日にわたって調査を行った。まず初日に区間内から落葉をすべて採取した。調査前に大きな降雨はないので、初日の落葉量は完全にはフラッシュされることなくある程度長い時間保持可能な滞留量(安定滞留量と仮称)を示していると考えられる。また、2日目の滞留量は、1日に滞留した落葉を示すと共に、上述の安定滞留量に対して、一日の間で流出と滞留との収支のバランスの結果滞留した量(日停留量と仮称)を示している。

他の調査は流下試験である。自然に滞留している落葉を採取した上述の調査の前に、両日とも上流よりマーキングした落葉を流下させて、区間の最下流端で流出してくる落葉を採取した。従って、両流下試験の直前の河床への滞留量(初期堆積量)には違いがある。仮に、河床のある箇所の滞留量には、河床が保持し得る最大値があるとするならば、両流下試験の結果にはなんらかの違いがでるはずである。なお、最下流端における流出量は試験開始から60分までは5分ごとに、60分以降は5分あるいは10分ごとに、落葉の滞留枚数の調査およびその場所の記録が終了するまで採取した。また、落葉の採取は60分経過後に、流出の仕方がほぼ一定になってから開始した。採取に要した時間は表1の通りである。同時に、滞留の仕方(滞留様式;後述)について調査を行った。なお流下試験の諸元も表1に示した。2回の流下試験(初日のものをCase-1014、2日目のものをCase-1015と日付を付して呼称)と、次項で述べる非落葉期の流下試験(Case-0822a,Case-0822b,Case-0811)も併せて示している。

3.2 非落葉期の流下試験

落葉期の上記の流下試験とは別に、大きなサイズの落葉が堆積していない時期つまり初期堆積量がない、非落葉期の8月に流下試験を実施した。流下試験に用いる葉は発見しやすいことが大きな条件で、銀杏の葉を用いた例もある。ここでは、上記の流下試験と落葉期の流下試験とも使用した葉は水際に棲息するミヤマカワラハンノキである。識別できるように葉の両面をマーキングしたものを用いた。また、上記のCase-1014およびCase-1015の試験でも8月に採取した葉を保存して用いた。8月に行った試験の諸元についても表1に併せて表記した。

流下試験の結果、堆積・捕捉された滞留量は、数時間(採取開始-採取終了まで)は保持されていた滞留量(時間滞留量)である。

表1 流下試験諸元および結果一覧

ケース	試験実施日	流下距離	平均流量	投入枚数	流出枚数	収集時間(分)	滞留収集枚数	滞留枚数(ヶ所数)						不明滞留枚数
								石の上	石の間	河床	倒木	植物	よどみ	
Case-0822a	8月22日	75	0.260	1000	265	155	437 (165)	172 (67)	181 (80)	6 (5)	48 (10)	30 (3)	0 (0)	298
Case-0822b	8月22日	135	0.188	1000	26	165	504 (97)	315 (111)	79 (46)	10 (4)	59 (19)	28 (13)	13 (4)	470
Case-0811	8月11日	250	0.137	4000	15	165	2549 (409)	1131 (155)	797 (194)	31 (12)	121 (16)	469 (32)	0 (0)	1436
Case-1014	10月14日	135	0.484	1000	523	235	290 (145)	92 (54)	119 (58)	37 (12)	2 (2)	36 (16)	4 (3)	187
Case-1015	10月15日	135	0.427	1000	374	230	385 (159)	86 (51)	191 (97)	30 (11)	4 (2)	68 (13)	6 (5)	241

3.3 滞留様式

滞留の状況を左右する条件は一般に、落葉に対する限界掃流力の程度(critical velocity required to transport a particle)、トラップの捕捉効率(entrainment efficiency by channel obstacles)、トラップの密度(obstacle density)といわれている。

そこで、試験時の流量、落葉が堆積している箇所(右岸,左岸,中央),河川形状(瀬,淵等)および滞留している場所の特徴を、

- (1) 石の表面に付着するように停留しているもの(「石の上」と標記)
 - (2) 石と石の間隙に捕捉されたもの(「石の間」と標記) なおこの中には小さな枝がまず大礫の間隙に捕捉され、それに落葉が捕捉されたものも含む。
 - (3) 流れが弱く捕捉というよりは堆積作用がまさると考えられるもので河床に堆積しているもの(「河床」と標記) さらに
 - (4) 直径1~3cm程度の比較的大きな枝が河床あるいは石の間から突き出て、それに巻きつくように捕捉されるもの(「倒木」と標記)
 - (5) 水辺の笹、つる性植物などの植物が水面に倒れて、それに捕捉されたもの(「植物」と標記、これには、水際の樹木の根が水中に露出して、それに捕捉されたものも含まれる。)そして
 - (6) 水際や中州周辺の水深の浅いところで、流れがほとんどなく石に囲まれるように捕捉されたもの(「よどみ」と標記)に分けて調査した。
- (2)(4)(5)(6)は捕捉作用の内容を示すものであり、(3)は堆積作用、(1)は両方の作用の影響をうける滞留現象であると考えられる。図3に簡単なイメージを示したが、これらの分類は必ずしも明確に分けられない面もあるので、調査時にはあらかじめ調査スタッフ全員に対して十分な説明を行い、実施した。

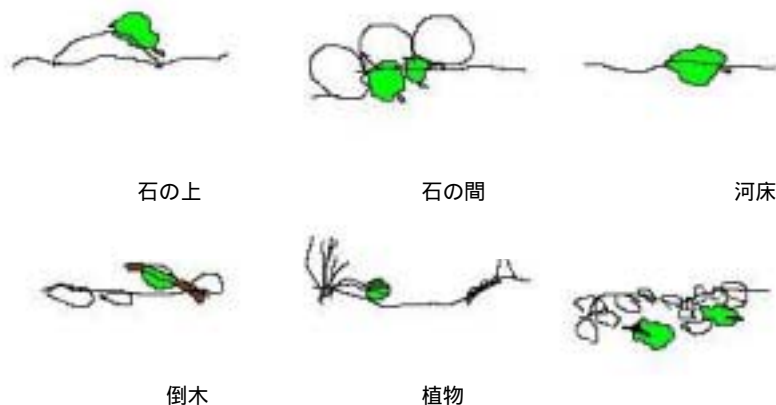


図3 滞留様式

4 結果と考察

4.1 滞留量の特徴と安定滞留量・日滞留量

図5、図6は10月14日、15日に河床から採取した滞留量(乾燥重量g)で、区間ごと(区間1,区間2は区間長50m、区間3は40m)および5m毎の量である。全区間(135m)の滞留落葉量は、1日目が2976g、2日目が1600gであった。図4は、調査期間中の降雨および水深(St-E)を現したものである。調査日の10月14日以前の洪水は、10月12日に生起し降雨量10mm程度のものである。仮にその時に河床滞留量の全量がフラッシュしたと考えれば、初日の滞留量の2976gはおおよそ1日の滞留量1600g(日滞留量)の1.9日分に相当し洪水後に滞留したものとしても矛盾はない。しかし、非落葉期になって落葉の供給が断たれた後の流入の無い区間でも落葉の流出があることから、10mm程度の洪水では滞留量の全量がフラッシュされたとは考えられない。とすれば、初日の滞留量は上流より充分に供給される落葉期に河床が保持し得る最大量に近い値(限界滞留量)であり、滞留と流出とのバランスがとれた滞留量(安定滞留量)という状態を表しているのではないかと思われる。なお、採取は全量を採取することを目指したが、100%の採取率であったかは不明である。後述するように流下試験によって採取率を求めたが、ここではその値による修正は行っていない。よって滞留量の値自体を問題にするときには、採取率などによる修正が必要になる。さて、図5によると、日滞留量の安定滞留量(10/14

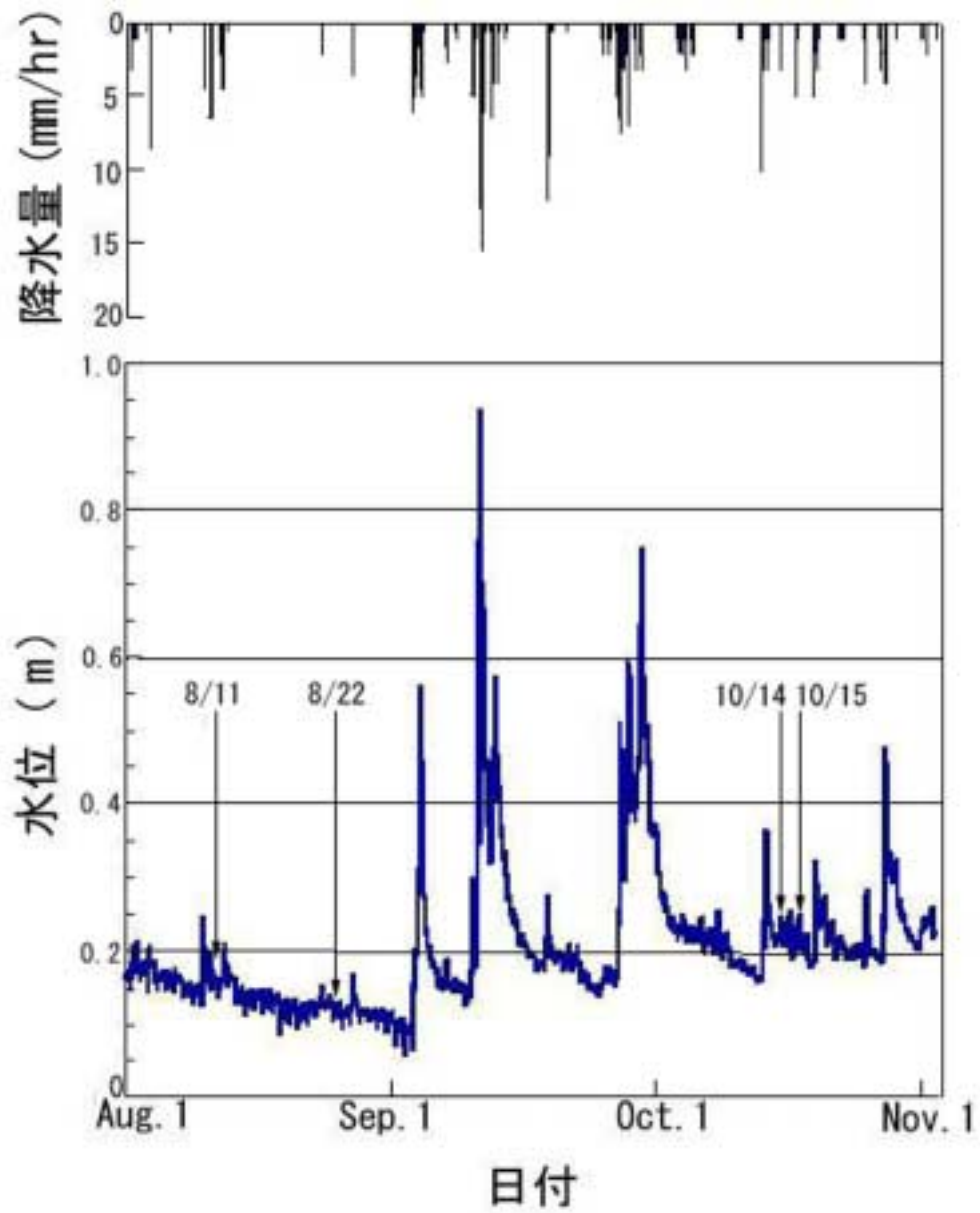


図4 調査地区の水文条件（早田川）

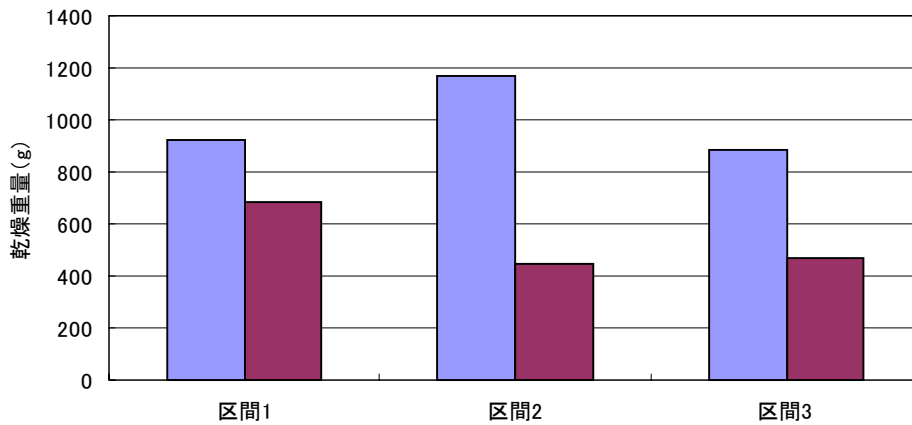


図5 滞留落葉量の比較

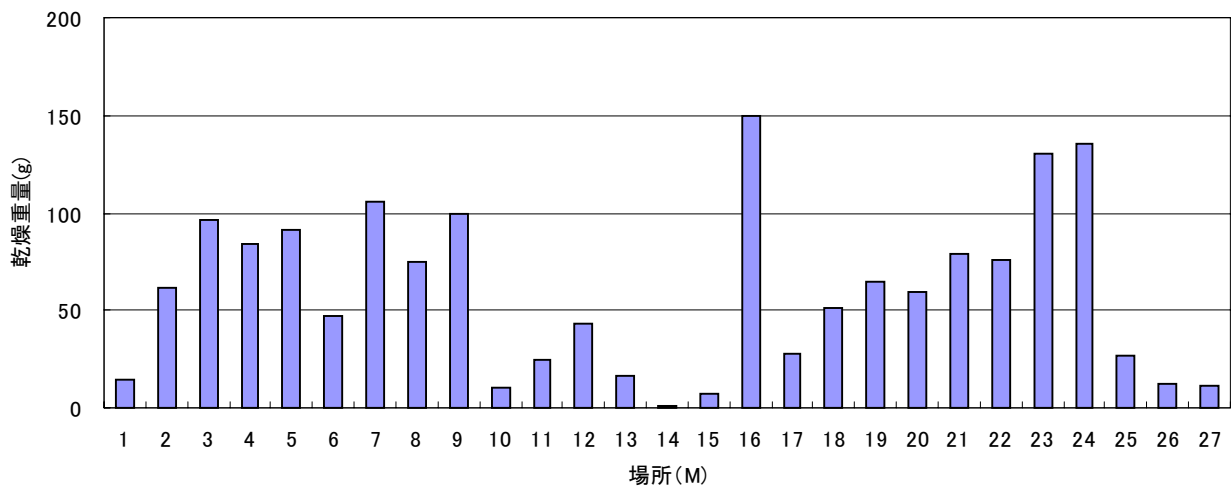


図6 日滞留落葉量(10月15日)

採取分)に対する割合は各区間で異なり、区間2では38.1%と低い値である。このことは区間2が滞留はしにくいが保持できる量は多いことを示し、滞留の効率という観点以外に、保持の期間について今後検討が必要であることが示唆される。

図6は日滞留量を5m毎に表示したものである。瀬に較べると2ヶ所の淵(M13-15, M25-27)での滞留量は少ない。また淵でもここ数年の土砂堆積によって深瀬に近くなった下流の淵(M13-15)は上流の典型的なM型の淵(M25-27)よりもさらに滞留量は少なくなっている。つまり淵で卓越するとされる堆積作用は、本地区の淵ではあまり見られず、また淵内には大礫などのトラップもないことから捕捉もされなかったということである。

M16では最も多くの落葉が滞留している。これは、左岸側が侵食され水辺の樹木の根が水中に没しており、それが多くの落葉を捕捉した結果である。またこの付近は淵の頭のステップにあたり、大礫が多く分布することからそれに捕

捉された結果でもある。

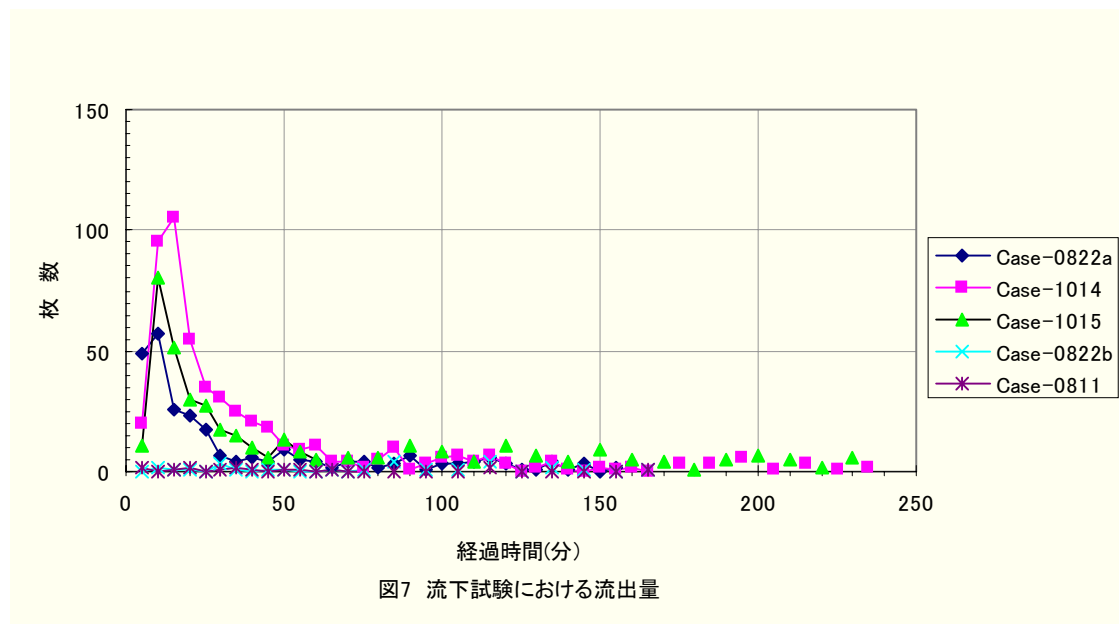
以上のように、本調査地では落葉は瀬において多くが滞留する結果になっている。

4.2 流出の特徴について

流下試験の結果から流出の特徴について考察する。

(1) 流出率と流量について

図7に示したように、5分以内に到達し、15分前後でピークがみられる。



その後は減少し、60分以降はやや変動はあるものの収束傾向となっている。流下距離135m、流下時間5分で計算すると、流下速度は約0.5m/s、また、15分では0.16m/sで、区間内の最大流速は1m/s前後と考えられるから、15分前後までは、河床に滞留することなく流出したと考えられる。ピークから65分くらいまでの間に流出してくる落葉は、滞留・流出を繰り返しながら流出してきたものと推察される。図8は流出比（150分間の流出枚数 /

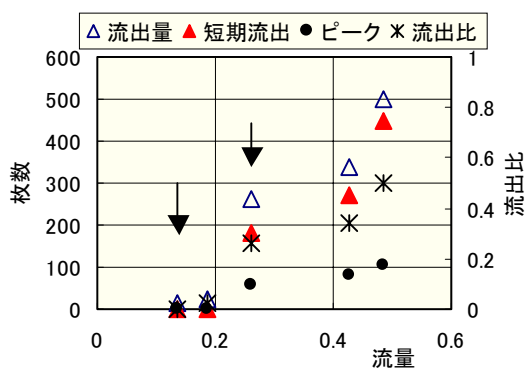


図8 流量と落葉流出

投入枚数) と流量との関係である。短期流出とは落葉流出にピークがみられた際のひと山の流出枚数の総量である。先述したように、滞留はそこでの摩擦速度とも大きな関係が有ると思われる。摩擦速度は径深と勾配に関

係するから同一地点では、流量が増えれば水深は増大するから当然摩擦速度は増加する。それだけ、落葉に対する掃流力は増えるわけであるから、堆積作用による滞留は減少し流出比は増えると考えられる。捕捉作用も当然減少することになるが、その詳細は、後述の滞留特性のところでも触れることになる。

(2) 初期堆積量と流出率について

河床が保持しうる落葉量には限界があると思われるが、それが日滞留量にくらべてどの程度の大きさかによって、流出への影響が左右される。よって、流下試験で注目したことの一つは、初期堆積量と流出比との関係である。非落葉期には落葉期のようにサイズの大きな落葉の堆積はないと考えられるから初期堆積量をゼロとした。また、落葉期の2回の流下試験では、実際の堆積量は初日で2976g、そして翌日には1600gであったから、それらを横軸にとってプロット(略)した。しかし前項にのべたように、流出比は流量とも明らかな比例関係にあるから、初期堆積量と流出比の関係は単回帰では判断しにくい。そこで、従属変数として流出量を取り流量、初期堆積量を独立変数として重回帰分析を行うと、初期堆積量の係数はマイナス値となり、初期堆積量が多いほど流出率は小さいつまり滞留が増える結果になっている。この結果は常識と反する結果であり、河床が保持し得る量が投入量に比較して大きいのではないかと考えられる。さらに詳細な検討は今後追加試験を行った後考察すべきであると思われる。

回帰統計	
重相関 R	0.9588074
重決定 R ²	0.9193117
補正 R ²	0.8386233
標準誤差	0.0851389
観測数	5

分散分析表

	自由度	変動	分散	観測された分散比	有意 F
回帰	2	0.165172545	0.0825863	11.39337	0.0807
残差	2	0.014497255	0.0072486		
合計	4	0.1796698			

	係数	標準誤差	t	P-値	下限 95%	上限 95%
切片	-0.208592	0.165667497	-1.259101	0.33504	-0.921	0.50422
初期堆積量	-2.01E-05	8.72235E-05	-0.230118	0.839395	-4E-04	0.00036
流量	1.5149124	0.778700037	1.9454376	0.191135	-1.836	4.86539

(3) 長期流出について

流出の状況は図7に示したように、およそ60分程度で、水文学でいう基底流出となる。どの場合もおよそリリース量の0.2-0.3%（5分当り）、滞留量の0.3-0.6%、平均0.48%（5分当り）である。これらの落葉は一旦河床に滞留したものが、流速等の変動により再び浮上して流下してきたものと考えられる。仮に流速の変動が平均流速の大きさに比例するとすれば、流量が増える、つまり流速が大きい時には、滞留の時間は短いと考えられるが、試験の結果ではそれほど大きな差は認められない。つまり、捕捉のされ方により必ずしも流量には関係しない場合があるということである。

また、流量が小さい場合には短期的な流出のピークはなく（Case-0822b、Case-0811）、当初より基底的な流出がみとめられる。両ケースとも流量が0.200m³/s未満の場合であり、下流端に至る前に多くが滞留した結果である。

（4）遅れ時間

図7によると、遅れ時間は流量が大きいほど長い。落葉は水に輸送されるから、区間の流れの平均流速に反比例する、つまり流量が増えるほど遅れ時間が短いという普通の考えの逆の現象である。流出率が小さい場合には、流下する際に多くが捕捉されることによってピークが結果的に早くなるのではないかと思われるが、今後さらに検討する必要がある。また、Case-0822aとCase-1015は流下距離が75mおよび135mと倍近い違いがあるが、流量が1.6倍程度の差があり、そのためにピークの時刻はほぼ同じになったと考えられる。

4.3 トラップの特性

図9は、流量と各形態毎のトラップの数を比較した図である。図の中で

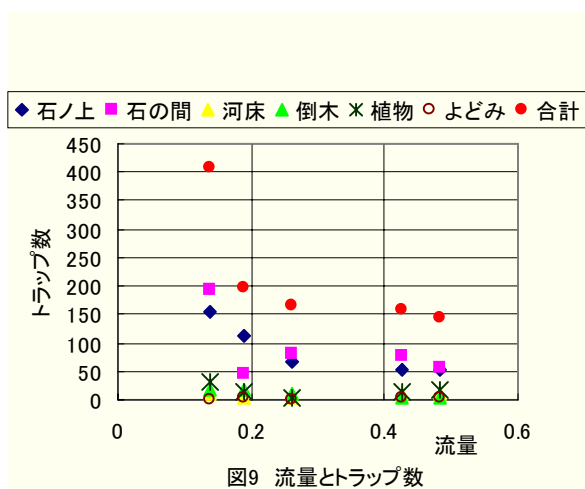


図9 流量とトラップ数

Case-0822a および Case-0811 は流下距離が異なることに留意しなければならないが、トラップの形態のうち、「河床」「植物」「倒木」「よどみ」の数は流量との間に明確な関係は見られない。流量と関係すると思われるのは、「石の上」および「石の

間」である。全体的には流量が増えるとトラップ数は減少傾向にある。以下では、さらにトラップについての特徴を列記する。

(1) トラップ密度

先に述べたように流下距離の異なる結果を比較するために、距離で除して密

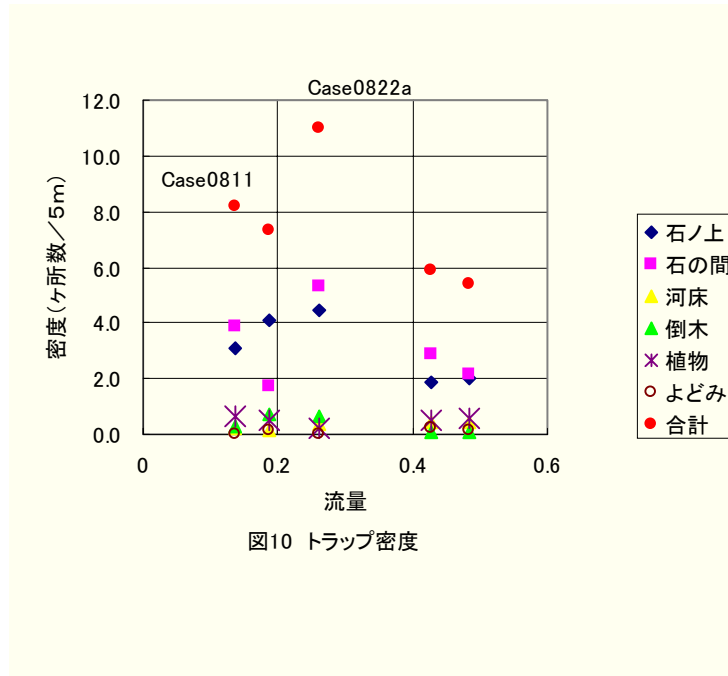


図10 トラップ密度

度を求めた。図10は流量とトラップ密度との関係である。およそ5m当り11~6ヶ所程度である。先述のように流量に対して大きく変化するのは、「石の上」および「石の間」である。同図で、Case-0822aはCase-0811およびCase-0822bよりもトラップ密度は大きい。しかも、流出比も大きくなっている。このことから、1ヶ所当りの捕捉枚数(捕捉効率と呼称する)を考えねばならないことがわかる。

(2) 捕捉効率

図11は、流量と捕捉効率の関係である。「河床」を除けば、捕捉効率はどの

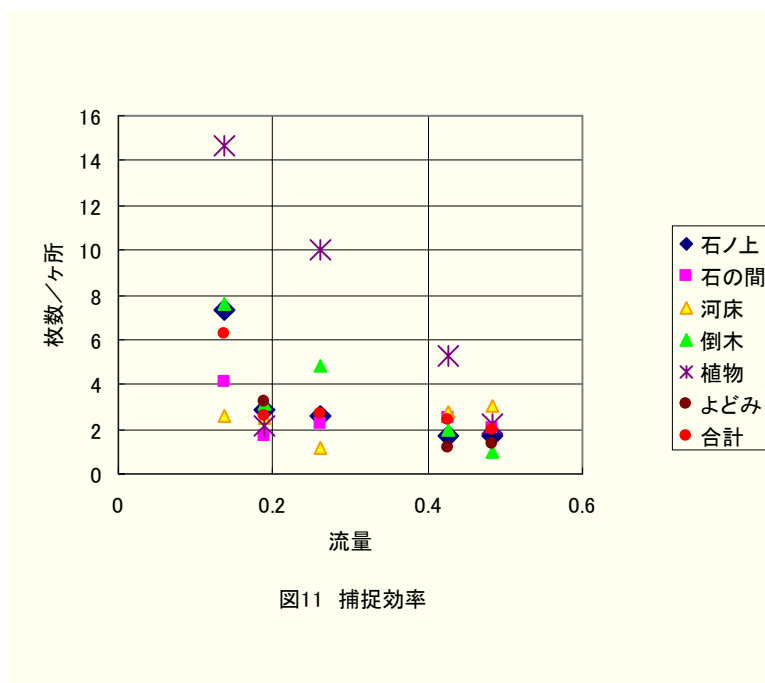


図11 捕捉効率

形態も、トラップ密度以上に流量との関係が明確であり、流量が増えると捕捉効率は低下する。「植物」「倒木」といった流量とトラップ密度の関係がみられなかった形態が、捕捉効率では

流量と最も関係がある結果となっている。

4.4 採取率について

散布した葉はすべて採取することを目指したが、結果的に採取できた落葉量は表2に示した通りである。流出量以外のものはすべて滞留していると考え、実際に採取した滞留量との比を採取率とすると、最も低い場合は50%で高い場合が73%、全試験での平均は60%であった。この結果はほぼ形のそろった落葉を流下した場合であるから、実際の落葉の採取ではさらに採取率は低下すると考えられる。しかし、その値は把握が困難であるから、現状では流下試験の結果をもって採取率とするほかないと思われる。従って、河床に滞留する実際の量は、採取した結果と流下試験で求められた採取率で修正して推測せざるをえない。

4.5 滞留率と湧き出し率について

河川区間に上流より流入してくる落葉は、その区間のトラップ密度と捕捉効率によって一部が滞留し、残りは次の区間に輸送される。トラップ密度は河床の状況、河道形態、河道の横断形など川の物理的な条件と水辺の植生など川の周辺の植物環境および流量に関係すると考えられる。また、今回の流下試験では目的としなかった区間からの湧き出し量が上記の輸送量に加わって次の区間への流入量となる。湧き出し量はその区間での堆積量に比例すると考えると湧き出し率の把握が今後の課題となろう。ここでは、今回の結果から滞留率について推定しようと思う。

前項で、流下試験の際に未採取の落葉があったことについて述べた。流出量については、下流端に河川を横断してネットを設置して採取したので、不明な量は流下全区間に滞留しているものの中に入れて考えることができる。そこで、実際に各区間(5m)から採取された滞留量に比例配分して不明量を各区間の滞留量に加えた。その結果を用いて、各区間上流からの流入量から修正された滞留量を差し引くことにより次の区間への流入量が計算できる。このようにして流入量に対する滞留量の比率を求めた(図12 - 図16参照)。

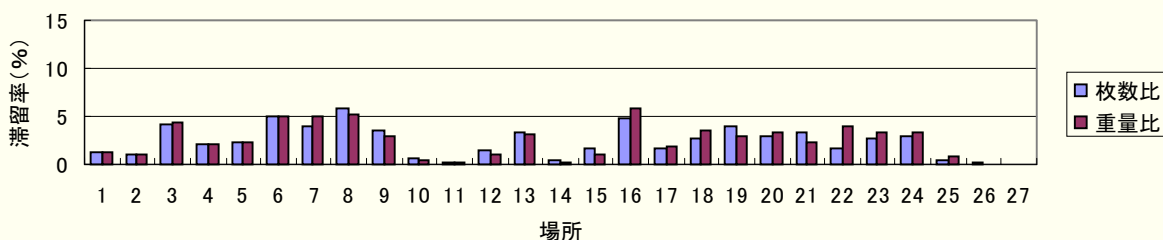


図12 各5m区間における滞留率(Case-1014)

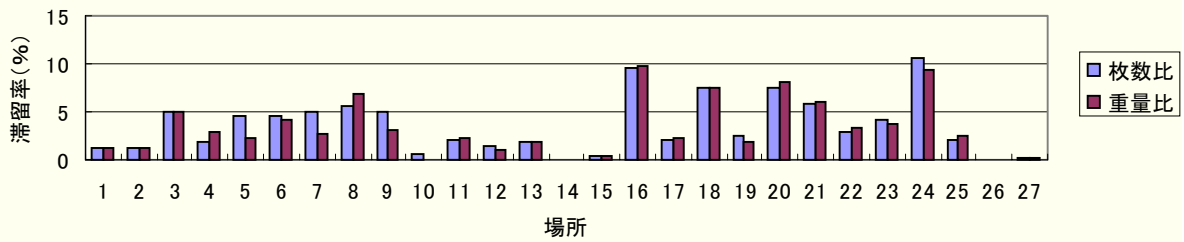


図13 各5m区間における滞留率(Case-1015)

図12および図13には、不明分を枚数により比例配分したものと、採取した落葉の一枚当りの乾燥重量によって比例配分したものを示したが大過ないので以下は枚数比によるもののみを示した。落葉期には夏の渇水期に比べ無降雨時でも流量は大きい。このような場合には大きくても10%程度の滞留率となっている。

夏の渇水期には、流量は0.2m³/s前後で、初期堆積量も無いから(初期堆積量の滞留量との関係は今後検討する必要があるが)滞留率も20%前後の大きな値を示している(図14, 15)。

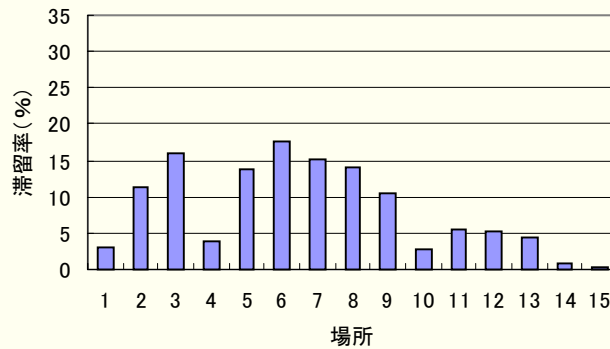


図14 各5m区間における滞留率(Case-0822a)

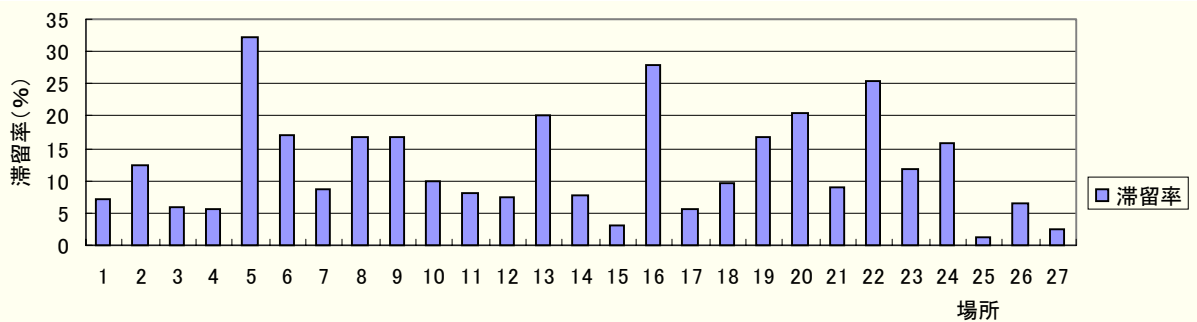


図15 各5m区間における滞留率(Case-0822b)

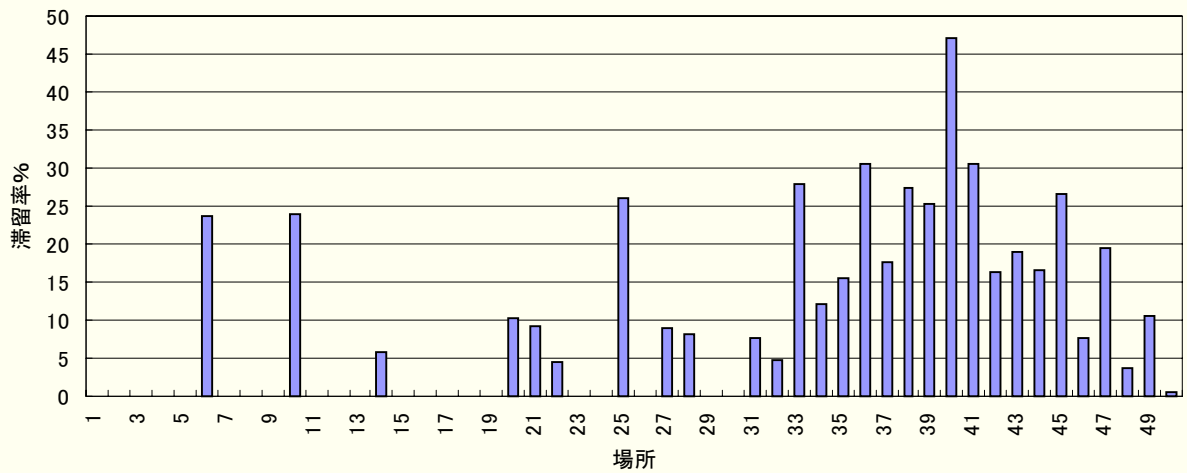
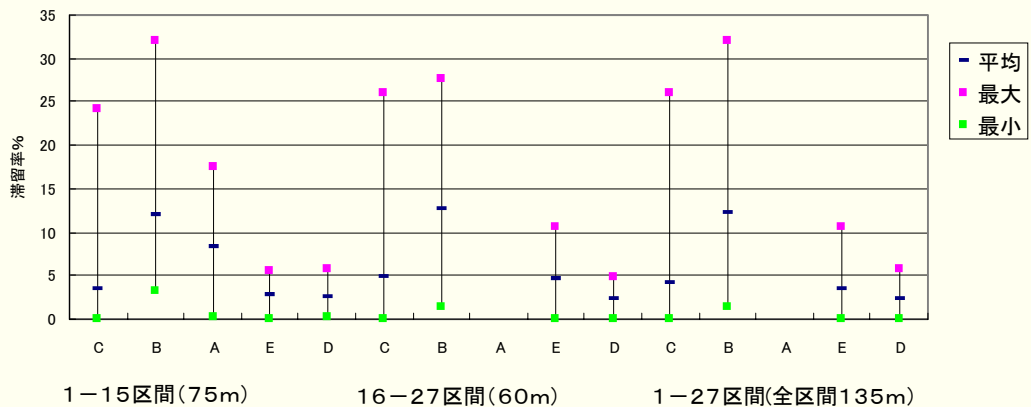


図16 各5m区間における滞留率(Case-0811)



1-15区間(75m) 16-27区間(60m) 1-27区間(全区間135m)
 注) 図中の、アルファベット文字は、A; Case-0822a、B; Case-0822b、C; Case-0811
 D; Case-1014、E; Case-1015 を表す。
 C、B、A、E、Dは流量の昇順。

図17 各ケース区間毎の滞留率%

図16は、河川上流部の平瀬から4000枚をリリースした試験である。流量が少なく一部蛇籠が設置された平瀬であることから水深が数センチのところが多く分布して、大部分が100m程度流下するうちに滞留してしまった。このような個所は、小さな礫であってもトラップとして捕捉作用を発揮したり、堆積作用が勝る区間でもある。従って、流量の変動に敏感に反応する区間といってよいだろう。

5 今後の課題について

(1) 滞留時間と湧き出しについて

流下試験と実際に堆積した落葉の滞留地点数を比較すると、上流では下流に比べて流下試験で滞留した地点数が多くなっていた。これは流下試験で滞留した落葉は、短期で流出してしまうことを示唆している。これらの現象を対象にして例えばブロッキングにより上流からの流入量を遮断した後に下流端で流出量を計測するなどの試みを行う必要がある。滞留時間を見方を変えればトラップ数（密度）の変化や捕捉効率の変化でもあるから、今回の試験で明らかとなった形態を参考にしながら試験・調査を行うべきである。

(2) 河床の滞留特性について

本研究が最終的に目指すところは、河床や河道形態などと滞留特性との関係を明らかにすることである。今回の調査研究で、本地区は、淵の堆積作用は小さく主に瀬の捕捉作用が滞留特性に寄与していることが判明した。しかし、同じ瀬でも、上流部の人工的平瀬とは滞留特性が異なることも推定されたが、データの分析はまだ未完状態である。これをさらに詳細に検討して、モデルを作成することが必要になる。

最後に本研究を進めるにあたり、研究室の大学院生の松田・後藤両君および岩手連大博士過程渡辺一哉君ならびに専攻生の方々に、調査協力をいただいた。また、フィールドの設定や調査時には山形大学演習林管理事務所に便宜を図っていただいた。ここに記して謝意を表する次第である。

<引用/参考文献>

Gary A Lamberti and Stanley V. Gregory (1996). Transport and Retention of CPOM. In *Stream Ecology* (ed. F. Richard Hauer Gary A.Lamberti) ,pp.217-229,.Academic Press