

能登半島九十九湾流域における常緑広葉樹生葉の分解過程

北原 隆志*¹ 柳井 清治*²

要 旨

常緑広葉樹林から生産される生葉の河川中、海中における分解過程と摂食生物を明らかにする実験を行った。実験地点は能登町九十九湾に流入する小河川内と岩礁海岸を選定した。研究材料はこの地域の代表的な常緑広葉樹であるタブノキ (*Machilus thunbergii*) とヤブツバキ (*Camellia japonica*) の生葉を用いた。この葉をメッシュサイズの異なる (粗、細) リターバッグに詰めて設置した結果、河川においては細メッシュより粗メッシュの分解率が有意に大きく、粗メッシュバック内に平均 50 個体のヨコエビ類が侵入しており、これらが分解者として重要な役割を果たしていた。一方、海中では粗メッシュと細メッシュの分解率の差が小さく、大型の破碎食者は見られなかった。また海中に設置したリター表面の細菌の個体数は河川中よりも多いことから、その分解には細菌が大きく寄与することが示唆された。

キーワード：能登半島／九十九湾／常緑樹／生葉／水中分解／物質供給

はじめに

古くから森林は水産資源を育む上で重要であると認識され、沿岸に生育する森林は魚附林として守られてきた (農林省森林局・水産局編, 1937)。そして近年、森・川・海のつながりに大きく関心が寄せられ、漁業者による全国的な植樹運動が展開されてきた (柳沼, 1993)。たとえば宮城県気仙沼市では、2009 年 5 月に NPO 法人「森は海の恋人」が設立され、水産資源の一つである牡蠣の生育と漁獲量向上を図るため、上流域で落葉広葉樹の植樹が行われている。また松永 (2010) は植樹の効果の根拠として、森林起源の腐植物質の一つであるフルボ酸が鉄と結合して河川や海へ鉄分供給することにより、海の植物プランクトンやコンブの成長に寄与していることを報告している。このように森林は、河川や海域の生物を育むために重要であることが広く認知されるようになってきた (若菜, 2015)。

森林から生産された落葉など粗粒有機物が海に至るプロセスとして、溪流・河川を経て海に至る場合と、森林から直接、海に供給される場合の 2 つの経路が想定される。河川を経る場合は、水中で様々な分解プロセスを経て細かい有機物

(FPOM) へと変化する。これに関する研究は、これまで北米を中心に多くの研究が報告されている (Allan and Castillo, 2007)。一般に溪流中における落葉の分解は、水流の侵食・研磨作用とともに、可溶性物質の溶脱、微生物のコロニゼーション、コンディショニング、大型無脊椎動物のうちの Shredder とよばれる機能群による摂食という順序で進行し、その過程は様々な物理的、生物的要因によって影響される (Petersen and Cummins, 1974)。我が国においても、山地小溪流中における落葉分解における分解過程についていくつかの報告がなされている (加賀谷, 1990; 柳井・寺澤, 1995; 河内, 2002; 阿部・布川, 2005)。しかし、これらは東～北日本の落葉広葉樹林帯で行われたものであり、西日本に広く分布する常緑広葉樹林帯で行われた例はほとんどない。

一方、海岸林の樹冠が海面にせり出している場所では、直接多量の葉や枝などが海中に供給されるが、その海へ供給された落葉の分解に関する知見は我が国では極めて乏しい。熱帯マングローブ林では供給された葉を、ベンケイガニ科の陸ガニ類が直接摂食することが報告されている (Robertson, 1988) が、温帯地域での知見はほとんどない。

* 石川県立大学大学院 環境科学専攻 平成 26 年度修了生

* 石川県立大学 生物資源環境学部 環境科学科

そこで本研究では溪流中、海中それぞれにおいて常緑広葉樹由来の葉の分解実験を行い、葉の分解速度、水中における葉からの化学成分溶出特性、細菌による葉分解への影響、及びシュレッターなどの大型水生無脊椎動物による葉の利用について塩分濃度の異なる条件下での比較、検証を行った。その上で、能登半島のように里山と里海が密接につながった地域における、海域への物質供給を考慮した流域管理について考察を行った。

1. 研究対象地

調査は石川県鳳珠郡能登町の九十九湾（北緯37° 18′、東経137° 14′）で行った（図1）。



図1 九十九湾と調査地位置

九十九湾は湾口の幅約200m、最大奥行き1,200m、水深25mの典型的な溺れ谷海岸である。湾内全域は国定公園、湾口は海中公園が指定されている。九十九湾を中心に富山湾に面した南北50kmに渡る海岸線は、砂浜・礫・岩礁地帯と変化に富む。調査地周辺の海岸植生はかつてアカマツ *Pinus densflora* を中心とする針葉樹であったが、近年は上層がコナラ *Quercus serrata* などの落葉広葉樹、下層にヤブツバキ *Camellia japonica* などの常緑樹が主体の二次林となり、海面に接する斜面ではスダジイ *Castanopsis sieboldii* やタブノキ *Machilus thunbergii* などが自生している。

野外実験地点は九十九湾に流入する小溪流（流域面積：1.7km²）の中流にSt.1、九十九湾に面した金沢大学環日本海域環境研究センター臨海実験施設敷地内斜面に接する岩礁海岸（海岸長：3.5km）の海中にSt.2を選定した。St.1は川幅が約3m、水深が約20～50cm、流速は20～50cm/sec、

底質は砂と大礫が占める。St.2は水深が約2mで底質は凝灰質の岩礁であった。実験期間中の水温はSt.1が13～23℃、St.2は16～26.7℃、また塩分濃度はSt.2では0.76～22.0‰の間を変動した。

2. 研究方法

本研究は野外調査としてリタートラップによる落葉生産量調査、リターバッグによる葉の分解率調査、室内実験としてリターからの溶出実験、葉の表面に繁茂したバクテリア測定などを行った。

1) 沿岸森林の生産量の測定

調査地周辺における年間のリターフォール量とその内訳を推定するために、リタートラップによる測定を行った。金沢大学臨海実験所構内の林内にリタートラップを5ヶ所設置した。リタートラップはポリエチレンチューブ（全長2.5m）を輪にした後に、受け口が0.5m²になるように寒冷紗を糸で縫い付け袋状にした。リタートラップの受け口が地上約1mになるように3本の支柱を用いて固定をした。実験は2013年6月21日から2013年11月29日および2014年6月14日から2014年11月28日まで行った。トラップした内容物は月一度の頻度で紙封筒に回収し、実験室において送風定温乾燥機を用いて乾燥（60℃、48時間）させた。乾燥後、枯葉、生葉、枝・樹皮に分類し、繁殖器官やFPOM（径1mm以下の細粒有機物）などは一括してその他とした。それぞれの乾燥重量を測定した。測定後、値を1m²当たりの乾燥重量に換算した。

2) リターバッグ実験

St.1とSt.2におけるリターの分解速度を測定するために、リターバッグ実験を行った。リターバッグ（20×15cm）は粗メッシュバッグ（目合10mm）と細メッシュバッグ（目合0.1mm）粗メッシュバッグ（目合10mm）を準備した。粗メッシュバッグは、水生昆虫などの大型無脊椎動物が封入したリターを摂食できるようにしたものである。一方、細メッシュバッグはバッグ内に大型無脊椎動物が侵入できないために、これら生物による分解の影響は無視できる。対象リターはヤブツバキとタブノキの生葉を選択した。この理由は、森から供給される落葉は枯葉のみならず、樹種特有の季節的な離葉（Kikuzawa, 1983）や陸生昆虫の摂食や自然現象による離葉（Risley and Crossley, 1988）など、枯葉のみではなく生葉の供給も生じることが多いためである。

湾の周囲に自生する樹木から高枝剪定バサミを

用いて剪定後、1 バッグ当たり 1 樹種ずつ葉が約 3～4g になるようにバッグの中に封入し、このバッグを金網に固定した。それぞれの実験場所に 2 種のバッグを各 5 反復ずつで 1 セットとして、現地の水中に紐と礫で固定し、St.1 では水深 20cm、St.2 では水深 2m 程度に沈めた (図 2)。実験期間は St.1 では 2014 年 8 月 25 日から 2014 年 10 月 24 日、St.2 では 2014 年 5 月 24 日から 2014 年 9 月 23 日まで行った。St.1 は 2 週間に一度、St.2 は月一度の頻度でそれぞれの実験場所に沈めた 1 セット分のバッグをポリエチレン袋に入れて回収した。回収と同時に、それぞれの実験場所における気温、水温、塩分濃度、St.1 における流速 (1 点法) を測定した。回収したリターバッグを実験室に持ち帰り、水道水を張ったバッドにバッグの中身を開け、葉を水洗した。水洗後に乾燥 (60℃、48 時間) し乾燥重量を測定後、t 日経過後の残存率を求めた。

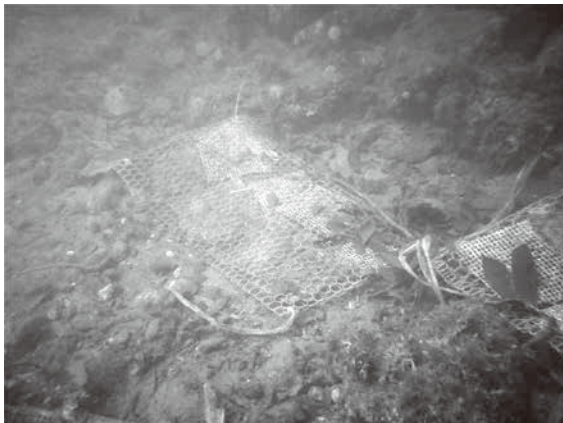


図 2 St.2 の海底に設置したリターバッグ

St.1 および St.2 において計量した生葉の初期乾燥重量 w_0 と t 日経過後に回収した乾燥重量 w_t を式①の指数分解モデルに代入し、分解速度 k (g/g/日) を算出した。重量の残存率は正規性を得るため、 $\log (X+1)$ に変換した。

$$w_t = w_0 \cdot e^{-kt} \quad \dots \text{①}$$

残存率と分解速度はメッシュサイズ、樹種、水質でリターバッグ設置日数を共変量に共分散分析より比較検定した。検定は統計フリーソフトウェア R 3.1.0 により行った。同時に、ヤブツバキとタブノキの生葉リターを洗浄したバッド内に出現した水生生物を 99.5% エタノールで固定保存し、可能な限りまで生物種の種同定、種別の個体数を計測し、乾燥 (60℃、48 時間) 後に現存量を測定した。また、St.1 より出現した水生大型無脊椎動物は Merritt and Cummins (1996)、布川・井

上 (1999) らを参考に摂食機能群を区分した。

3) 常緑広葉樹葉溶出実験

常緑広葉樹葉からの溶出特性について検証するために、実験室内において溶出実験を行った。2014 年 8 月 24 日にリターバッグ実験に用いた生葉を採取した同じ場所で、ヤブツバキとタブノキの生葉を採取した。それを実験室に持ち帰り、それぞれの生葉を 5 枚 1 組として乾燥 (60℃、48 時間) させ、重量を秤量した。次に 500mL ビーカーを準備し、蒸留水、河川水、海水を注ぎさらに 1 組の乾燥葉を入れ、室温 (20℃) に静置した。

実験は 2014 年 9 月 1 日から 2014 年 9 月 30 日まで行った。実験終了後、用いた葉を乾燥 (60℃、48 時間) させ、乾燥重量を秤量した。また、実験開始後 1 日経過後と 30 日経過後の各水溶液の T-N 濃度、T-P 濃度を水質分析装置 (QuAAtro TNTP) により測定した。T-N 濃度はアルカリペルオキシ二硫酸カリウムで加熱分解し、銅・カドミウムカラム還元法と吸光光度法により、T-P 濃度はペルオキシ二硫酸カリウムで加熱分解し、吸光光度法によりビーカーごと 3 回測定した。

4) 生葉表面細菌抽出・培養実験

毎月の細メッシュリターバッグ実験において、回収したヤブツバキ、タブノキそれぞれの生葉リター表面上の細菌抽出・培養実験を行った。リターを 5mm 片にハサミで切断後、リン酸緩衝生理食塩水 PBS 10mL に入れ、1 分間の攪拌後に 15 分間静置した。15 分経過後に、もう一度 1 分間攪拌させた。LB 寒天培地 (ポリペプトン 1g、イーストエキストラクト 0.5g、塩化ナトリウム 1g、寒天粉末 2g を蒸留水 100mL に溶解させる) を準備し、懸濁液 100 μ L を LB 培地に塗り、30℃ で 1 日培養させた。培養後、出現したコロニーを計測し、葉一枚単位面積 (0.25cm²) あたりの個体数とした。各サンプルを 3 反復ずつ測定した。

3. 結果

1) 年間リターフォール量とその形態

リタートラップ実験の結果を図 3 に示す。季節的に増減が認められ、ほぼ 2 か年同じ傾向が認められた。2013 年では初夏にかけて比較的多くの粗粒有機物が生産され、夏にかけて減少傾向があり 8 月に最低値を示した。9 月以降は増加に転じ、11 月に 150~170g/m² で最高値を示した。内訳は枯葉が 65%、生葉が 3%、枝・樹皮が 11%、その他が 21% であった。2014 年においても月別変化は似た傾向を示し、夏季が終わる頃までは年に

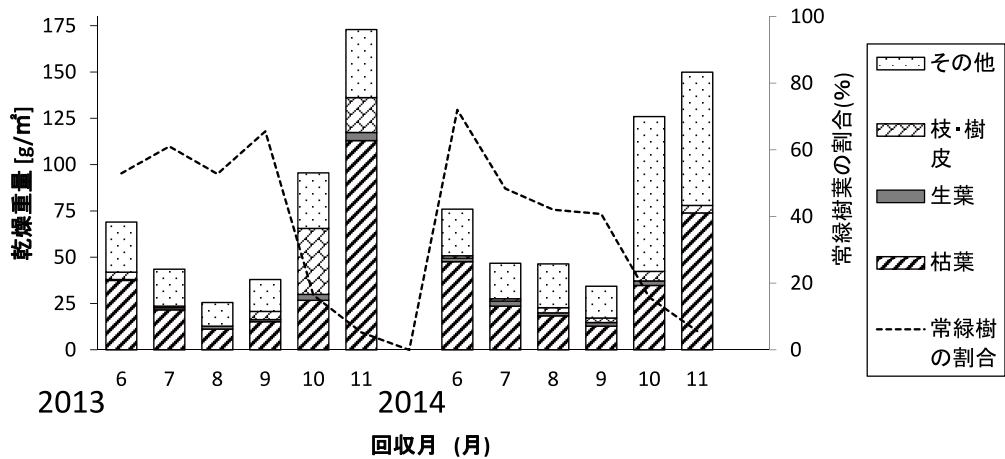


図3 リタートラップにより採集された部位別のリター量

よって差は認められなかった。秋季以降の内訳を比較すると、枝・樹皮は2013年（10月：37%、11月：11%）より2014年（10月：4%、11月：3%）の方が供給量は少なかった。一方、その他は2013年（10月：31%、11月：21%）より2014年（10月：66%、11月：48%）の方が供給量は多かった。月ごとの乾燥重量に対する常緑樹葉の割合を図3破線で示す。両年とも6～9月までは常緑樹由来の落葉が全体の40%以上で、落葉のほとんどを占める。これらの落葉は、落下直後は緑色をしているが、時間が経過するにつれて褐変する。しかし、常緑樹葉の割合は10月以降急激に低下し、20%以下となる。この時期、落

葉の殆どはコナラなどの落葉広葉樹によって占められる。

年間有機物生産量は平均450g/m²で、2013年は枯葉が225.3g/m²、生葉が12.1g/m²、枝・樹皮が63.6g/m²、その他が143.8g/m²であった。2014年では、枯葉と生葉は2013年と同様の結果であった。しかし、枝・樹皮（16.8g/m²）は少なく、その他（240.8g/m²）は多かった。常緑樹落葉は両年とも年間130g/m²前後で、全生産量の約1/3であった。

2) リターバッグによる分解実験と分解速度

河川と海水におけるリターバッグ設置後のリター葉重の変化を図4、5に示す。横軸はリター

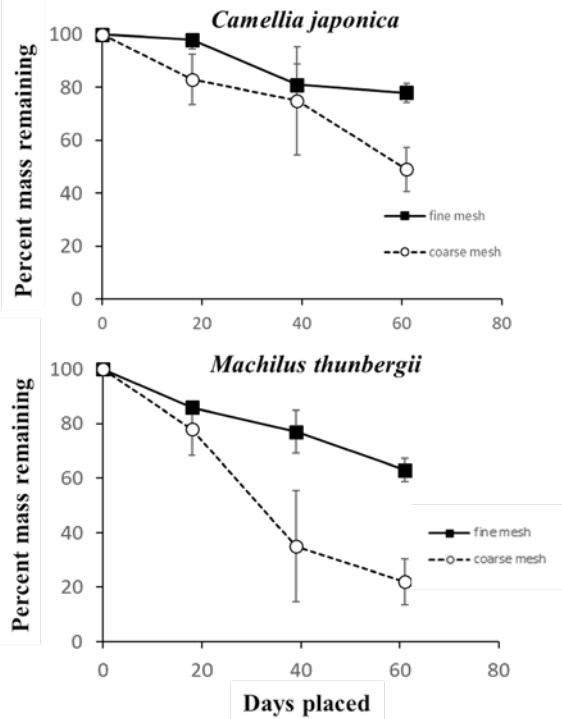


図4 河川 (St.1) におけるリターの分解過程

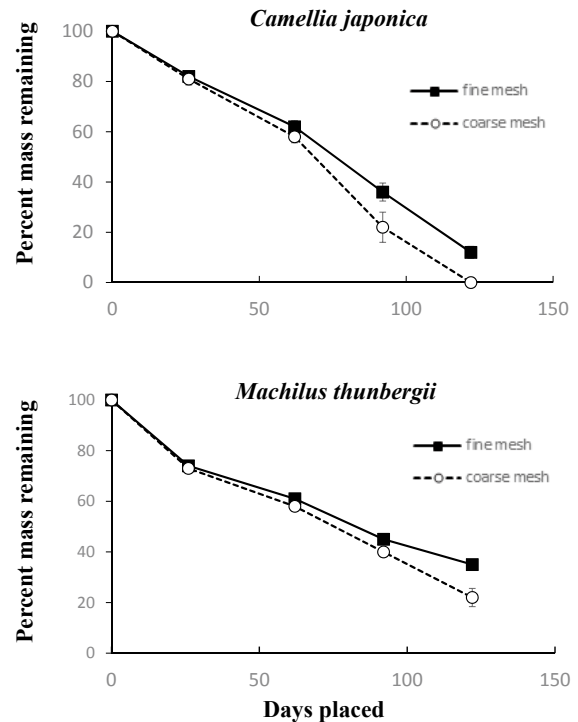


図5 海水 (St.2) におけるリターの分解過程

表1 場所・樹種・処理別の分解係数

樹種・メッシュサイズ	st.1			st.2		
	k	se	R ²	k	se	R ²
CC (<i>C. japonica</i> Coarse mesh)	0.0047	0.0073	0.7335	0.0057	0.0432	0.9535
CF (<i>C. japonica</i> Fine mesh)	0.0021	0.0059	0.5996	0.0047	0.0275	0.9634
MC (<i>M. thunbergii</i> Coarse mesh)	0.0089	0.0015	0.6855	0.0039	0.0103	0.9697
MF (<i>M. thunbergii</i> Fine mesh)	0.0033	0.0036	0.908	0.0031	0.0280	0.966

バッグ設置日数、縦軸は残存率、エラーバーは標準誤差を示す。St.1 (河川) における粗メッシュ葉の残存率は、ヤブツバキが39日経過するまで緩やかに減少し、最終的に49%の葉が残存した。タブノキ粗メッシュは39日経過後において35%まで減少し、2か月までは緩やかに減少した。細メッシュに関してはヤブツバキ、タブノキとも緩やかに減少し、3か月間で78、63%の残存率となり、粗メッシュと大きく異なる結果となった。

一方海水 (St.2) においては、ヤブツバキ粗メッシュが26日経過、62日経過では約20%ずつ減少し、92日経過後に大幅に減少し、最終的に残存率は0%となった。タブノキ粗メッシュは約1ヶ月ごとに20%ずつ減少し、122日で22%の残存率であった。細メッシュに関しては、122日後ヤブツバキ、タブノキでそれぞれ12、35%の残存率となった。

この減少過程を指数分解モデルにあてはめ、分解速度k (g/g/日) を算出した結果を表1に示す。メッシュサイズごとに比較をすると、粗メッシュの方が細メッシュよりもkの値が高い結果であった。粗メッシュの結果を樹種ごとに比較するとSt.1において、実験期間約2ヶ月でタブノキ、ヤブツバキの順にkが小さくなった。一方、St.2において実験期間約4ヶ月でヤブツバキ、タブノキの順にkが小さくなった。場所ごとみると、タブノキではSt.2よりSt.1のほうが分解速度は高く、ヤブツバキではその逆の結果となった。

残存率に関して共分散分析による検定をおこなったところ、リターバッグメッシュサイズでは、2樹種、河川・海水の組み合わせで細メッシュより粗メッシュの減少率は有意に高いと判断された ($p < 0.01$)。樹種ごとにメッシュによる違いを比較すると、St.1においてタブノキは有意 ($p < 0.05$)、ヤブツバキは有意ではないと判定された ($p > 0.05$)。一方St.2においては、タブノキは有意 ($p < 0.05$)、ヤブツバキでは有意でなかった ($p > 0.05$)。また2種間で分解速度を比較すると、St.1 および St.2 においてヤブツバキとタブノキ

の分解速度は有意に異なると判定された ($p < 0.01$)。実験地点ごとの比較は、ヤブツバキの粗メッシュを除いて河川と海水における残存率が有意に異なると判定された ($p < 0.05$)。

3) バッグ内に出現した大型水生無脊椎動物

リターバッグ内に出現した水生大型無脊椎動物の平均個体数を表2に示す。摂食機能群はShredder、Collector-Gatherer (CG)、Predatorの3つに分類された。またCC,CFなどは表1に示した樹種・メッシュを示す。特に平均個体数が多かったのは、St.1においては39日経過後における *Jesogammarus* sp. (CC: 44 個体、MC: 56.4 個体)、および *Lepidostoma* sp. (CC: 4.8 個体、MC: 8.6 個体) であった。一方、St.2においては26日経過後における多毛類 (CC: 9.0 個体、MC: 4.8 個体)、微小巻貝 sp.1 (CC: 4.8 個体、MC: 8.0 個体)、微小巻貝 sp.2 (CC: 38.0 個体、MC: 41.4 個体) であった。また、122日経過後には多毛類 (CC: 8.8 個体、MC: 11.8 個体) が多く出現した。

表2 リターバッグ内に出現した水生大型無脊椎動物類の密度 (カッコ内は標準誤差)

学名	和名	摂食機能群	日数	CC	CF	MC	MF
St.1							
<i>Trichoptera</i>							
	トビケラ目						
	<i>Goerodes</i>	コカクツツトビケラ属	SH	18	5 (1.1)	0 (0.0)	2.4 (1.2)
				39	4.8 (1.5)	0.2 (0.2)	8.6 (2.5)
				61	3.6 (1.4)	0 (0.0)	1.4 (0.2)
<i>Amphipoda</i>							
	端脚目						
	<i>Jesogammarus</i>	キタヨコエビ科sp.	SH	18	8.6 (2.2)	0 (0.0)	3.2 (1.2)
				39	44 (8.8)	0 (0.0)	56.4 (13.7)
				61	2.2 (1.4)	0 (0.0)	1.4 (1.2)
<i>Megaloptera</i>							
	広翅目						
	<i>Protohermes</i>	ヘビトンボ属	PR	18	0 (0.0)	0 (0.0)	0.2 (0.2)
				39	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)
				61	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)
<i>Diptera</i>							
	双翅目						
	<i>Chironomidae</i>	ユスリカ科	CG	18	2 (0.6)	0.8 (0.6)	1.2 (0.6)
				39	0.6 (0.6)	5 (1.6)	0.6 (0.6)
				61	0 (0.0)	1.8 (0.8)	0.2 (0.2)
St.2							
<i>Polychaeta</i>							
	多毛類						
				26	9.0 (0.5)	0.0 (0.0)	4.8 (1.2)
				62	2.0 (0.9)	0.0 (0.0)	0.6 (0.6)
				92	4.2 (1.2)	0.6 (0.0)	5.8 (0.8)
				122	8.8 (2.4)	2.0 (1.1)	11.8 (1.7)
<i>Amphipoda</i>							
	端脚目						
	<i>Gammaridea</i>	ヨコエビ亜目		26	4.6 (1.0)	0.0 (0.0)	9.4 (3.2)
				62	0.6 (0.4)	0.0 (0.0)	1.6 (0.6)
				92	1.4 (0.6)	0.0 (0.0)	0.8 (0.8)
				122	2.4 (1.7)	0.0 (0.0)	0.8 (0.5)
<i>Gastropoda</i>							
	腹足綱						
	微小巻貝 i			26	4.8 (2.2)	0.4 (0.4)	8.0 (1.9)
				62	1.8 (1.1)	0.4 (0.2)	2.4 (1.2)
				92	0.6 (0.4)	1.6 (0.7)	1.0 (0.5)
				122	0.0 (0.0)	0.8 (0.6)	0.0 (0.0)
	微小巻貝 ii			26	38.0 (5.4)	0.6 (0.4)	41.4 (1.7)
				62	2.8 (1.6)	20.4 (5.3)	3.6 (1.2)
				92	3.2 (2.2)	17.8 (1.9)	2.0 (0.8)
				122	0.4 (0.2)	29.8 (5.1)	1.2 (0.4)
<i>Bivalvia</i>							
	二枚貝綱						
	微小二枚貝			26	0.6 (0.4)	0.2 (0.2)	2.6 (1.2)
				62	1.0 (0.5)	0.4 (0.2)	1.8 (0.7)
				92	1.2 (0.4)	0.6 (0.4)	0.6 (0.4)
				122	3.4 (1.6)	9.8 (2.6)	7.0 (2.6)

4) リターからの化学成分溶出

ヤブツバキとタブノキを蒸留水、河川水、海水に漬けて変化を観察したところ、ヤブツバキの蒸留水では30日経過後すると、水溶液全体が黄色に変色した。それ以外の樹種と水溶液の組み合わせでは、色の大きな変化が認められなかった。実験開始および30日経過後の実験終了時点における、ヤブツバキとタブノキの乾燥重量と減少率を表3に示す。全ての樹種と水溶液の組み合わせにおいて、重量の減少が認められた。最大の重量減少率はタブノキの蒸留水における17%で、最小の重量減少は両樹種の海水における3%であった(表3)。

ヤブツバキ、タブノキそれぞれの生葉を蒸留水、河川水、海水にさらした水溶液の実験開始1日経過後と30日経過後の樹種から溶出したT-N、T-P濃度の値を表4に示す。T-N、T-P濃度は1日目と30日目の値を比較すると、全ての樹種×水溶液の組み合わせにおいて増加が認められた。T-N濃度に関して、ヤブツバキ・タブノキとも0.156~0.456mg/lで河川水と海水の大きな違いは見られなかった。しかしT-P濃度に関して、タブノキから1日目でもヤブツバキの10倍程度、30日後には27~80倍の高い濃度のリンが溶出し、とくに河川水につけたときの濃度が高かった。

5) リター表面細菌コロニー数

リターバッグ細メッシュ実験での、生葉リター1枚当たり付着細菌とその平均コロニー数の日変化を図6、7に示す。初期状態において細菌コロ

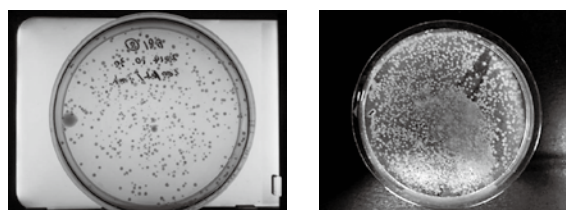


図6 設置後60日前後経過したタブノキに繁殖した細菌コロニー
(左: St.1 (河川)、右: St.2 (沿岸))

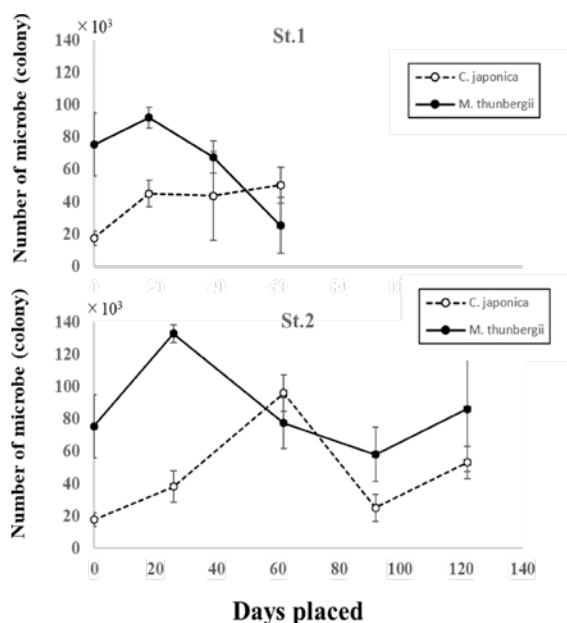


図7 樹種ごと地点ごとのリター表面細菌コロニー数

表3 常緑樹生葉の水溶液浸出後の重量変化

樹種	水溶液	初期乾燥重量(g)	終了時乾燥重量(g)	減少量(g)	減少率(%)
<i>C. japonica</i>	蒸留水	3.1	2.62	0.48	15.48
	河川水	2.24	2.01	0.23	10.27
	海水	3.28	3.17	0.11	3.35
<i>M. thunbergii</i>	蒸留水	1.84	1.53	0.31	16.85
	河川水	1.99	1.72	0.27	13.57
	海水	2.39	2.31	0.08	3.35

表4 常緑樹生葉から溶出したT-N, T-P濃度 [mg / ℓ]

樹種	水溶液	T-N			T-P		
		1日目	30日目	T-N _{30/1}	1日目	30日目	T-P _{30/1}
<i>C. japonica</i>	蒸留水	0.064	0.333	5.2	0.0042	0.0085	2.0
	河川水	0.186	0.296	1.6	0.0051	0.0091	1.8
	海水	0.085	0.261	3.1	0.0017	0.0031	1.8
<i>M. thunbergii</i>	蒸留水	0.168	0.232	1.4	0.0242	0.2308	9.5
	河川水	0.160	0.465	2.9	0.0298	0.3152	10.6
	海水	0.095	0.156	1.6	0.0167	0.2530	15.1

(n=3)

ニー数はヤブツバキ (17.7×10^3 コロニー数/葉、以下の数値:コロニー数/葉) よりタブノキ (75.4×10^3) の方が多かった。

St.1において、タブノキは18日経過後に 92.1×10^3 コロニーで最大値を示し、以降は減少傾向であった。61日経過後は 25.3×10^3 コロニーであり、ヤブツバキを下回った。ヤブツバキは大きな変動が認められず、最大値は61日経過後 (50.3×10^3 コロニー) であった。一方St.2において、実験期間中はヤブツバキよりタブノキの方が62日目を除き細菌数を上回った。タブノキは26日経過後に 132.8×10^3 コロニーで最大値を示し、以降は減少傾向であった。ヤブツバキはタブノキよりも約1ヶ月遅く、62日経過後に 96×10^3 コロニーで最大値を示した。

6) リター分解に対する各段階の重量減少率

リターバッグ実験、リターからの化学成分溶出実験、細菌個体数の結果をまとめ、総括的にリター分解過程を図8に示す。期間は河川のタブノキのリターがほぼ消失した約2か月間とした。溶出段階は溶出実験における葉重量差の値から算出した。細菌活動段階は、2か月後の細メッシュリターバッグの値から溶出割合を差し引いた。摂食段階は、2か月後のリターバッグ実験回収時における、粗メッシュバッグと細メッシュバッグのリター重量差から算出した。リター分解の段階ごとに比較をすると、溶出による重量減少は海中(3%)より河川中(10~14%)の方が大きかった。細菌活動などによる重量減少率は河川中(12~23%)より海中(35%)の方が大きかった。水生動物の摂食による重量減少率は河川中29~41%に対し、海中では3~4%と少なかった。

4. 考察

1) 常緑広葉樹生葉リターの分解速度の違い

これまでに落葉の分解速度に関する研究は国外・国内問わず多数行われており、Petersen and Cummins (1974) は河川における落葉の分解速度係数 k を3つのグループに分類している。これによると、トネリコ属などは「速い」($k > 0.010$)、ヤナギ属などは「中程度」($0.005 < k < 0.010$)、コナラ属などは「遅い」($k < 0.005$) としている。Short et al., (1980) はコロラド州の山地溪流において、ハンノキ属 ($k = 0.030$)、ヤナギ属 ($k = 0.008 \sim 0.0013$)、ハコヤナギ属 ($k = 0.005 \sim 0.008$)、針葉樹 ($k = 0.003$) と報告している。本実験における粗メッシュリターバッグ実験から得られた分解速度を Petersen らの分類にあてはめると、河川でのタブノキ ($k = 0.0089$) と海でのヤブツバキ ($k = 0.0057$) は「中程度」、河川でのヤブツバキ ($k = 0.0047$) と海でのタブノキ ($k = 0.0039$) は「遅い」分解である。

国内においては、冬期における実験では最も早いケヤマハンノキ ($k = 0.0129$)、中程度のシラカンバ、サワシバ、イタヤカエデ、ヤナギ属 ($k = 0.002 \sim 0.004$)、葉が厚く分解の遅いミズナラ、ホオノキ、ブナ、トチノキ ($k < 0.002$) という報告がある(柳井・寺澤, 1995)。分解速度に関するこれまでの報告や本実験の結果など、そして実施時期も考慮して比較すると、常緑広葉樹は落葉広葉樹に比べて分解速度係数 k が低い傾向にあり、常緑広葉樹は落葉広葉樹に比べて分解がされにくいことが明らかとなった。また、本実験における分解速度を樹種で比較すると河川中ではタブノキ生葉、海中ではヤブツバキ生葉がより速く分解された。これまでの研究より、溪流内において落葉の分解が樹種によって大きく異なることが

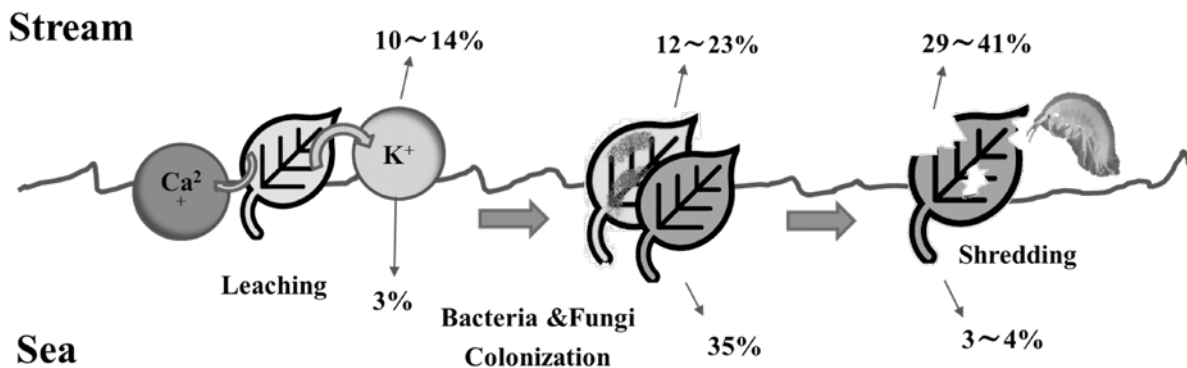


図8 実験期間中(2か月間)の河川・海水における常緑樹葉の分解過程

明らかにされているが、海中においても樹種により分解速度が異なることが明らかになった。

常緑広葉樹生葉の分解されにくさとして2つの要因が上げられる。第一の要因としてクチクラ層の厚さによるものが考えられる。一般的に常緑広葉樹は落葉広葉樹よりクチクラ層の発達した厚い葉を持つ。河川中や海中に堆積した生葉が水流による浸食や研磨作用を受けるときに、葉が厚いために作用が進まない可能性が考えられる。

第二の要因として生葉リターから溶出される化学成分の影響があると考えられる。一般に生葉には、窒素などの養分に富む反面、ポリフェノール成分、とくにタンニンが多く含まれており、これらがバクテリアの繁殖や動物による摂食を妨げることが知られている (Steinke et al., 1993)。今回タブノキに比べて分解が遅かったヤブツバキの葉に含まれるカテキン類は抗菌作用、サポニン類は殺菌や洗浄作用がある (永田, 1986)。また浜屋ら (1984) は、ヤブツバキにヤブツバキ葉抽出液からトリテルペノイド系サポニンである2つ化合物を単離精製している。これら化学成分が作用することによって、コロニゼーションやコンディショニングが阻害されている可能性がある。しかしこれらの有害成分は、大部分が1~2週間程度で流出する (Steinke et al., 1993)。その後図7に示すように、バクテリアの繁殖が盛んとなり、水生動物類の摂食へと進行してゆくと考えられる。

2) 常緑広葉樹リターから溶出する化学成分と微生物の繁殖

河川水と海水において、溶出する T-N 濃度と T-P 濃度に樹種間で差が認められた。河川水における T-N 濃度と T-P 濃度の実験では、ヤブツバキよりタブノキの方が多くの窒素成分とリン成分を溶出している。一方で、海水における実験では T-N 濃度はタブノキよりヤブツバキの方が濃度は高く、T-P 濃度に関してはヤブツバキよりタブノキの方が濃度は高くなった。生食連鎖において、生産者となる植物の生育に必要な元素は窒素、リン、カリウムである。Kitamura (2009) は同様な実験を常緑樹 10 種で行い、葉から溶出して放出される K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} が渓流水のイオン組成を規定する重要な因子となることを報告している。今回の実験結果から流域へ栄養塩を供給する上で、常緑広葉樹由来の生葉、特にタブノキの生葉は大きく寄与する可能性が示された。

落葉に微生物がコロニゼーションし、コンディ

ショニングを行うことは、河川中における落葉分解にとって重要であると多くの研究者が報告している (Ameria et al., 1996; Suberkropp, 1998)。しかし、落葉上の微生物量の定量や微生物、特に細菌による落葉分解の検証・評価の報告は数が少ない。本研究では河川中・海中から回収した常緑広葉樹生葉リター上の、細菌個体数の計測を試みた。

この結果、樹種による比較では、ピークにおいてヤブツバキよりもタブノキの方が約4倍と個体数は大きかった。これはヤブツバキの落葉に含まれる抗菌作用や殺菌作用をもつカテキン類やサポニン類が、細菌の繁殖を阻害したのと考えられる。ヤブツバキの生葉リターでも時間経過によって細菌個体数が増加したのは、河川中や海中においてリターから有害成分が溶出し、細菌繁殖の阻害要因が薄れたためであると考えられる。今回の研究により、リターは海中においても細菌が繁殖しやすく、これらが分解に寄与していることが明らかになった。

3) 大型無脊椎動物による摂食

リターバッグ実験における、細メッシュと粗メッシュのリター残存率と分解速度の結果を比較すると、樹種、場所によらず細メッシュよりも粗メッシュよりリターの分解が進んだ。これまでの研究で、河川中における大型水生無脊椎動物による摂食は落葉広葉樹由来落葉の分解を促進させることが報告されている (加賀谷, 1990; 柳井・寺沢, 1995; 河内, 2002)。本研究の結果から、常緑広葉樹生葉リターの分解においても、大型水生無脊椎動物、とくにヨコエビ類によって分解が促進されることが明かになった。同様に Kochi and Yanai (2006) は北海道の沿岸山地溪流においてリターバッグによる実験を行い、ヨコエビ類 (タキヨコエビ *Sternomoera Rhyaka*) が重要な分解者出ることを示した。さらに他地域で多く出現する Shredder である、コカクツツビケラ属 (Whiles, 1993) やヨコエビ亜目 (布川・井上, 1999) が樹種によらず出現した。これらの水生無脊椎動物が、リターの分解でも摂食機能群として分解に大きく寄与しているものと考えられる。しかし同じタブノキ葉の分解実験を行った台湾の例では、Shredder はオナシカワゲラが少数観察されるのみで、これらが分解に与える影響は小さいと考えられている (Shieh et al., 2007)。したがって必ずしも能登の事例が他地域・他国の同種の分解に当てはまるとは限らないようである。

一方、海中においても粗メッシュリターバッグ内に、多毛類など大型水生無脊椎動物は出現した。しかし、リターバッグの減少率や摂食痕の分布が少ないことから、これらの大型水生無脊椎動物が、リターの分解には大きくは寄与していないと考えられた。海域の塩分濃度が低い河口域においては、ヨコエビ類 (*Anisogammarus pugettensis*) が落葉を摂食し、分解に寄与していることが報告されている (Sakurai & Yanai, 2006; 河内ら, 2007)。しかし St.2 の塩分濃度は高く、これらのヨコエビ類は見られなかった。今後沿岸域に落下した陸上植物の葉が、どのような動物に利用されるかについて、さらに詳細な実験を行う必要がある。

4) 海域への物質供給と流域森林の管理

河川中、海中における常緑広葉樹リターの分解速度は落葉広葉樹リターよりも分解されにくいものの、ある程度時間が経過すると分解されやすい結果を得た。すなわち、河川中や海中において、常緑広葉樹リターも流域への養分供給に貢献できる可能性が示唆された。また、ヤブツバキとタブノキにおいて分解速度に差が認められたことから、植栽樹種を限定するのではなく速度の異なる複数の樹種を混交して植栽することによって、落葉分解による流域への養分供給を恒常的に行えると考えられる。能登半島では、高度経済成長期に在来の広葉樹林は大部分、成長が早く木材生産のためにスギやヒノキなどの常緑針葉樹に転換されてきているが、海への養分供給を考えた場合、在来種の価値を見直し、少なくとも河川沿いや沿岸には常緑広葉樹へと転換させることも重要である。

さらに、河川水中・海水中における窒素・リン成分濃度の測定より、とくにリン成分はタブノキ生葉からの溶出が大きいことが明らかになった。海に面した海岸林にはタブノキが多く生育しており、そこから大量の落ち葉が磯に供給されている場合がある。そこでは海域には乏しいリン成分が多く供給されているとみられる。

また、河川において落葉分解に大きな役割を果たす、大型水生無脊椎動物の生息条件は河川形態に大きく影響を受けることから、餌となるリターを河川内に保持できる多様な河川形態を維持できる河川管理を行うことが重要である。具体的には、淵などの流速が緩やかな地点を設けることで、落ち葉溜まりとそこに集まる大型水生無脊椎動物の生息環境が創造され、流域から細粒有機物が養分

として供給され、それが浮遊有機物を利用する Suspension Feeder などの餌になると考えられる。沿岸林のみならず、河川に沿った溪畔域を適正に管理することで、海域に生息する生物へ多様な形態の栄養分の供給が期待できる。

謝辞

本研究を進めるに当たり石川県立大学環境科学科水環境学研究室の高瀬恵次教授と神林美彩氏には T-N 濃度、T-P 濃度の測定についてご指導を頂いた。また石川県立大学生物資源工学研究所環境生物工学研究室三宅克英教授には、細菌の測定法についてご教示頂いた。環境科学科流域環境学研究室の大学院生および学生には現地調査を手伝って頂いた。以上の各位に深謝する。

引用文献

- Allan, J. D. and Catillo, M. M. 2007. Stream ecology: Structure and Function of Running Waters. 2nd Edition. Springer.
- Ameria, K. W. 1996. Heterotrophic Microorganisms. Methods in Stream Ecology. 233-268.
- 阿部俊夫・布川雅典. 2005. 春期の溪流における安定同位体を用いた食物網解析. 日本森林学会誌. 87(1): 13-19.
- 浜屋悦次・津志田藤二郎・永田忠博・西野親生・榎伸康・真部俊一. 1984. ツバキの抗菌性成分. 日本植物病理学会報. 50(5): 628-636.
- 布川雅典・井上幹生. 1999. 北海道北部の小河川における河畔植生と底生昆虫群集との対応様式. 陸水学雑誌. 60(3): 385-397.
- 加賀谷隆. 1990. 山地小溪流における落葉の分解過程と大型無脊椎動物のコロニゼーション. 東京大学農学部演習林報告. 82: 157-176.
- Kikuzawa, K. 1983. Leaf Survival of Woody Plants in Deciduous Broad-Leaved Forests Tall Trees. Canadian Journal of Botany 61. 2133-2139.
- Kitamura, H. 2009. Leaching characteristics of anions and cations from evergreen leaves supplied to the Stream bed and influences on Stream water composition in the Southern Kyusyu Mountains. 南九州大学研究報告 自然科学編. no. 39: 57-66.
- 河内香織. 2002. 溪流における生葉の分解過程とシュレッダーの定着. 日本生態学会誌. 52(3): 331-342.
- Kochi, K. and Yanai, S. 2006. Shredder colonization and decomposition of green and senescent leaves during summer in a headwater stream in northern

- Japan. Ecological Research, 21 : 544-550.
- 河内香織・櫻井泉・柳井清治. 2007. 河口域に流下した落葉が海産ヨコエビ *Anisogammarus pugettensis* に果たす役割. 水産海洋研究, 71: 255-62.
- Merritt, R.W. and Cummins, K. W. 1996. An Introduction to the Aquatic Insects of North America. Kendall/Hunt Pub. Co., Dubuque, Iowa.
- 松永勝彦. 2010. 森が消えれば海も死ぬ 第2版. BLUE BACKS. 講談社. 東京.
- 永田忠博. 1986. ツバキ属植物における葉中の茶有用成分に関する研究. 茶業試験場研究報告. no.21: 59-120.
- 農林省森林局・水産局. 1937. 魚附林の効果調.
- Petersen, R. C. and Cummins, K. W. 1974. Leaf Processing in a Woodland Stream. Freshwater Biology, 4: 343-368.
- Risley, L. S. and Crossley, D. A. 1988. Herbivore-caused greenfall in the Southern Appalachians. Ecology, 69: 1118-1127.
- Robertson, A.I. 1988. Decomposition of mangrove leaf litter in tropical Australia. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 116: 235-247.
- Sakurai, I., Yanai, S. 2006. Ecological significance of leaf litter that accumulates in a river mouth as a feeding spot for young crested flounder (*Pleuronectes schrenki*). Bull. Jpn. Soc. Fish. Oceanogr. 70: 105-13.
- Shieh, S., Hsu, C., Wang, C., Yang, P. 2007. Leaf Breakdown in a Subtropical Stream Riffle and Its Association with Macroinvertebrates. Zoological Studies, 13: 611-621.
- Steinke, T. D., Rajh, A., Holland, A. J. 1993. The feeding behaviour of the red mangrove crab *Sesarma meinerti* De Man, 1887 (Crustacea: Decapoda: Grapsidae) and its effect on the degradation of mangrove leaf litter: South African Journal of Marine Science, 13 : 151-160.
- Suberkropp, K. 1998. Microorganisms and organic matter decomposition. 120-137. In River Ecology and Management. Springer.
- Whiles, M. R. 1993. The Influence of *Lepidostoma* (Trichoptera : Lepidostomatidae) on recover of leaf-litter processing in disturbed headwater streams. Am. Midl. Nat. 130: 356-363.
- 柳沼武彦. 1993. 木を植えて魚を殖やす. 家の光協会.
- 柳井清治・寺沢和彦. 1995. 北海道南部沿岸山地流域における森林が河川および海域に及ぼす 影響 (II) : 山地溪流における広葉樹9種落葉の分解過程. 日本林学会誌, 77(6) : 563-572.
- 若菜博. 2015. 内陸森林と魚附林. 森林科学, 75:1-6.

Decomposition of evergreen leaves in a stream and coast along Tsukumo Bay, Noto Peninsula, Japan

Kitahara, Takashi (Division of Environmental Sciences,
Graduate School of Ishikawa Prefectural University, Graduated in fiscal 2016)

Yanai, Seiji (Department of Environmental Sciences, Ishikawa Prefectural University)

Abstract

In order to clarify the influence of evergreen broad-leaved trees on coastal ecosystem, a field experiment using a litter bag was conducted in Tsukumo Bay, Noto Peninsula. We clarified the elution of chemical components from fresh leaves in water, the effects on litter decomposition by bacteria, and the use of litter by aquatic macro-invertebrates. A small stream that flow into Tsukumo Bay, and slope facing directly the same bay were selected as the experimental points. The research materials were fresh leaves of Tabu (*Machilus thunbergii*) and Tsubaki (*Camellia japonica*), which are typical evergreen broad-leaved trees growing in this area. As a field experiment, a leaf litter decomposition experiment was conducted using litter bags with different mesh sizes (coarse and fine). As a result, the degradation rate of the coarse mesh was significantly larger than that of the fine mesh ($p < 0.01$). An average of 50 amphipods colonized inside the coarse mesh, and these played an important role as shredders in the stream. On the other hand, the difference between the coarse mesh and the fine mesh was slight in the sea, and there were no large shredders. Number of colonized bacteria in the sea is larger than that in stream, suggesting that bacteria contributed significantly to the decomposition of fallen leaves in the sea. Based on these results, it would be favorable for the litter to flow into the coastal waters after the litter was sufficiently decomposed in the stream.

Keywords: Noto Peninsula / evergreen fresh leaves / decomposition / seawater / watershed management.