

## 酸性沈着の影響下にある広葉樹林,針葉樹林生態系における 硫黄の分布と循環(2)

誌名	日本土壌肥料学雑誌 = Journal of the science of soil and manure, Japan
ISSN	00290610
著者	佐久間, 敏雄 富田, 充子 柴田, 英昭 田中, 夕美子
巻/号	65巻6号
掲載ページ	p. 684-691
発行年月	1994年12月

# 酸性沈着の影響下にある広葉樹林、針葉樹林生態系における 硫黄の分布と循環Ⅱ：沈着・排出および系内の循環\*

佐久間敏雄\*\*・富田充子\*\*・柴田英昭\*\*・田中夕美子\*\*\*

キーワード 森林生態系, 物質循環, 硫黄, 酸性降下物

## 1. はじめに

森林生態系の物質収支または循環は系を構成する生物群集-土壌と両者の相互作用によってある程度自律的に調節され、安定に維持されていると考えられる。系外から供給される物質のうち、レスや海塩由来の風送塩などのようにこれまでも森林生態系の成立と変遷にかかわってきた要因は極端な高濃度にならないかぎり系の構成と機能を大きく変化させることはない。これに対して、酸性物質などの人工的降下物は比較的低い濃度でも深刻な影響を及ぼすおそれがある。

硫黄(S)は酸性沈着の主成分で<sup>5,6,16~18,21~23)</sup>、大気からの沈着速度は大きい例では  $80\sim 90 \text{ kg S ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  に達する<sup>6,8,15,21,24)</sup>。森林植生の集積速度、植生から土壌への還元速度はいずれも  $20 \text{ kg S ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  程度とされる<sup>8)</sup>から、工業地域の森林の多くは過剰なSを供給されている。Sを過剰に供給された植物は葉に  $\text{SO}_4^{2-}$  を蓄積したり<sup>4,14)</sup>、葉から  $\text{H}_2\text{S}$  を揮散したりする<sup>3,10)</sup>。また、降雨直後の葉は酸性沈着に対して多量の  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$  などを放出する<sup>16)</sup>。これらの現象は過剰なSが森林生態系の物質循環を擾乱し<sup>8)</sup>、その自律性、再生可能性を損なう危険性をもつことを示唆している。

前報<sup>19)</sup>では、酸性沈着の影響下にある苫小牧市北西の広葉樹林と針葉樹林を対比してSの蓄積と分布を明らかにした。これらの森林生態系におけるSの最大のプールは鉱質土層で、両林とも約  $600 \text{ kg S ha}^{-1}$  (0~50 cm) の蓄積を有する。これに対して上層木は30~80、堆積腐植(O層)は  $5\sim 20 \text{ kg S ha}^{-1}$  の蓄積をもち、林分によって大きく異なっていた。すなわち、対象とした森林生態系はSに関して三つの大きなプールをもち、系内のSはそれらを結ぶ多数の経路によって循環していると考

えられる。上層木やO層のSプールは量的には鉱質土層のそれに比べて小さかったが、それらは系のもっとも活動的な部分を担うもので、森林の安定性に大きな影響を及ぼしていると思われる<sup>19,25)</sup>。

この研究の目的は前報<sup>19)</sup>の結果を踏まえて、広葉樹林および針葉樹林におけるSの収支とプール間のフラックスを明らかにし、森林生態系に対する酸性沈着の影響について考察することである。

## 2. 調査地および調査方法

### 1) 調査地

北海道大学農学部附属苫小牧地方演習林(苫小牧市宇高丘)の115林班(針葉樹林:ストロブマツを主とし、チョウセンゴヨウマツを交えた植林地)、129林班(広葉樹林:ミズナラ主体の二次林)<sup>19)</sup>において1990年6月から1991年5月のSフラックス(第1図)を測定した。ただし、今回の研究では、樹木および林床からの揮散  $EM_f$ 、 $EM_j$ 、林床への乾性沈着  $DD_f$  などは測定できなかった。!

### 2) 大気からの沈着速度(D)

雨(雪)水による湿性沈着  $DW$  とガスやエアロゾルによる乾性沈着  $DD$  からなる。

(1) 湿性沈着:各調査林近傍の気象観測露場において雨(雪)水を採取・分析<sup>21)</sup>し、湿性沈着速度  $DW$  を求めた。

(2) 乾性沈着:長期観測において、雨量が多く、継続時間の長い降雨のさいに、1~3時間おきに露地雨、林内雨を採取・分析し<sup>21)</sup>、はじめの2回の正味の流出S量(林内雨-露地雨)を葉外面からの流出  $LE$  とし、3回目以降に測定されるそれを葉内部からの溶出  $LI$  とした<sup>16)</sup>。 $LE$  をその降雨に先立つ無降雨期間の乾性沈着量と考え、これを無降雨期間の日数で除して乾性沈着速度  $DD$  を算出した。なお、露地雨、林内雨のS濃度は既報<sup>21,22)</sup>の値を用いた。

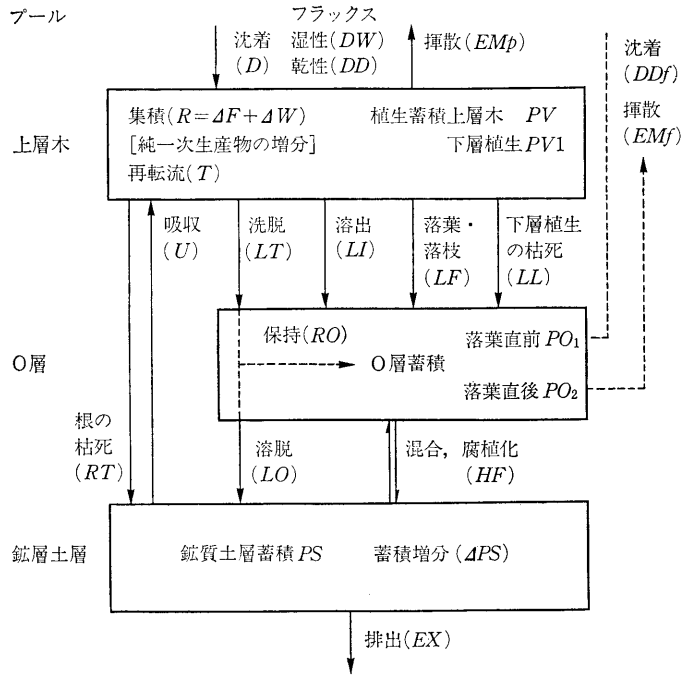
\* 研究費の一部は文部省科学研究費によった。

\*\* 北海道大学農学部 (060 札幌市北区北9条西9丁目)

\*\*\* 同上附属苫小牧地方演習林 (053 苫小牧市宇高丘)

1994年5月30日受理

日本土壤肥科学雑誌 第65巻 第6号 p.684~691 (1994)



第1図 森林生態系における物質のプールとフラックスの相互関係(模式図)  
コンパートメントは主なプール、矢印はフラックスの方向を示す。フラックス  
または状態変化を示す記号には ( ) を付して区別した。

3) 洗脱 (LT)

雨水により植生表面から洗い流されて地表に到達する S フラックスを洗脱速度  $LT$  とする。林内雨+樹幹流による S 供給速度<sup>21)</sup>から溶出速度  $LI$  を差し引いて算出した。

4) O層からの溶脱 (LO) および鋳質土層からの排出 (EX)

既報<sup>23)</sup>の観測結果により、O層および2C層から排出される  $SO_4^{2-}$  の水量による加重平均濃度を求め、これに排水速度を乗じてO層からの溶脱速度  $LO$  と生態系からの排出速度  $EX$  を求めた。 $LO$  はO層からの実測全流出速度であるので林床への乾性沈着速度  $DDf$  および林床からの揮散速度  $EMf$  の影響を含んでいる。なお、2C層からの排水速度は次のようにして推定した。

① 実測月全天日射量から CHANG の式<sup>2)</sup>によって月純放射量を求め、② ペンマンの組み合わせ法<sup>9)</sup>によって月蒸発量を推定し、③ これを月降水量から差し引いて毎月の排水量とした。

5) 落葉・落枝 (LF)

上面の直径約 1 m の寒冷紗製リッタートラップ<sup>11)</sup>を各林内に3反覆で設置し、1990年8月以降落葉・落枝等を採集している。トラップされた有機物はおおむね1

ヶ月ごとに回収して乾物重を測定後、粉碎してS含有率を分析し、落葉・落枝等によるフラックス  $LF$  を求めた。

6) 上層木のS収支

(1) 純一次生産量 (NPP) : まず、毎木調査<sup>19)</sup>の結果を  $i$  クラスに分け、各クラスを代表する標準木を選定した。次に標準木  $i$  から採取した樹幹の円盤試料について調査年 ( $j$ ) から  $j-1, \dots, j-4$  番目の年輪半径を4方向について計測・平均し、樹皮の厚さを補正して  $j, j-1, \dots, j-4$  年の胸高直径を求めた。これより標準木の最近5年間の平均胸高断面積 ( $g_{ij}, m^2$ ) と同平均成長率 ( $\delta_{ij} = g_{ij}/g_{ij-1}$ ) を算出した。クラス  $i$  に属する上層木の単位土地面積当たり全胸高断面積を  $G_{ij} (m^2 ha^{-1})$ 、標準木  $i$  の全乾物重を  $w_{ij} (Mg)$  とすれば、標準木に換算した立木密度  $N_i$  は  $G_{ij}/g_{ij}$  (本  $ha^{-1}$ ) であるから、上層木の  $j$  年の乾物現存量  $W_j$  は、

$$W_j = \sum N_i \cdot w_{ij} (Mg ha^{-1}) \quad (1)$$

である<sup>19)</sup>。次に  $\delta_{ij} = G_{ij}/G_{ij-1}$  を仮定して  $W_{j-1}, \dots$  を順次計算し、 $j$  年の純一次生産量  $NPP_j (Mg ha^{-1})$  を

$$NPP_j = W_j - W_{j-1} \quad (2)$$

として求めた。なお、上層木の部位別  $NPP_j$  は先に求めた全  $NPP_j$  に標準木の部位別乾物比率<sup>19)</sup>を乗じて求

めた。ただし、葉については、広葉樹林では落葉期直前の現存量を、また針葉樹林については年間落葉量と落葉期直後の現存量から推定した  $NPP$  の合計を純一次生産量とした。

(2) 上層木の S 循環：上層木が純一次生産を達成するために年間に集積する S 量（以下集積速度と呼び  $R$  で示す）を更新の早い葉とそれ以外の部分に分けて考える。すなわち、

$$R = \Delta F + \Delta W \quad (3)$$

である。ただし、 $\Delta F = (\text{葉の } NPP \cdot \text{同 S 含有率})$ 、 $\Delta W = (\text{葉以外の部分の } NPP \cdot \text{同 S 含有率})$  である。

生葉とリッタートラップに捕捉された落葉の S 量との差を  $T$  とすれば、 $\Delta F$  は落葉・落枝によるフラックス  $LF$ 、溶出フラックス  $LI$  および  $T$  によって次のように表せる。

$$\Delta F = \lambda \cdot LF + LI + T \quad (4)$$

トラップ集積中の損失を無視できれば、 $T$  は上層木内の転流による S 量の変化（再転流速度）を示す。なお、広葉樹林の葉はすべて 1 年で更新されるので  $\lambda = 1$  であるが、針葉樹林については越冬葉があるので  $\lambda > 1$  となる。

さらに、 $\Delta W$  のうち細根の一部は枯死し、その S は直接土壌に還元される。これを  $RT$  とすれば、葉以外の部分の正味の S 集積速度  $\Delta W_n$  は、

$$\Delta W_n = \Delta W - RT \quad (5)$$

である。したがって、上層木が O 層を含む土壌から年間に吸収すべき S 量  $U$  (吸収速度) は

$$U = R - T = \Delta W_n + RT + \lambda \cdot LF + LI \quad (6)$$

と表せる。なお、今回は  $RT$  を直接測定できなかったため、小根の  $NPP$  が毎年更新されるものと仮定して計算した。

### (3) 下層植生による S 循環 ( $LL$ )

地上部乾物現存量を純一次生産量と考え、それが毎年更新されるものと仮定して吸収、還元速度を求めた。

## 3. 結果および考察

### 1) 生態系全体としての S 収支

森林生態系全体の S 収支は沈着  $D$ 、揮散  $EM$ 、排出  $EX$  によって表せる。 $EM$  の寄与については後に論議する。

全沈着速度  $D$  は広葉樹林：17、針葉樹林：25  $\text{kg S ha}^{-1} \text{y}^{-1}$  (第 1 表) で、北ドイツのブナ林とトウヒ林<sup>15)</sup> の 48 ならびに 85  $\text{kg S ha}^{-1} \text{y}^{-1}$ 、米国北東部の広葉樹林<sup>9)</sup> の 26  $\text{kg S ha}^{-1} \text{y}^{-1}$  などに比べて小さかった。しかし、1991 年以降の観測によれば、この地域においても 1990 年の

第 1 表 沈着速度  $D$  と排出速度  $EX$

フラックス	記号	広葉樹林 ( $\text{kg S ha}^{-1} \text{y}^{-1}$ )	針葉樹林 ( $\text{kg S ha}^{-1} \text{y}^{-1}$ )
湿性沈着	( $DW$ )	11.9	10.1
乾性沈着	( $DD$ )	5.1	15.3
全沈着	( $D$ )	17.0	25.4
排出	( $EX$ )	17.9	19.6

第 2 表 リッタートラップ法によって測定した落葉・落枝および S の還元速度

林分	有機物の種別	乾物重 ( $\text{Mg ha}^{-1}$ )	S 含有率 ( $\mu\text{g S g}^{-1}$ )	S 還元速度 ( $\text{kg S ha}^{-1} \text{y}^{-1}$ )
広葉樹林	葉	2.5	1096	2.7
	枝	0.2	557	0.1
	子実ほか	0.2	1571	0.3
	合計 ( $LF$ )	2.9		3.1
針葉樹林	葉	3.6	869	3.1
	きゅうり果	0.0	359	0.0
	合計 ( $LF$ )	3.6		3.1

第 3 表 洗脱 ( $LT$ ) および溶出 ( $LI$ ) による S 還元速度

フラックス	記号	広葉樹林 ( $\text{kg S ha}^{-1} \text{y}^{-1}$ )	針葉樹林 ( $\text{kg S ha}^{-1} \text{y}^{-1}$ )
洗脱	( $LT$ )	17.0	25.0
溶出	( $LI$ )	1.1	2.2

2 倍近い湿性沈着速度が観測されている<sup>21)</sup>ので、長期的にみれば米国東北部と同程度の沈着速度になるであろう。

一方、排出速度  $EX$  は両林とも 20  $\text{kg S ha}^{-1} \text{y}^{-1}$  弱と推定され、地点間差は小さかった。排出/沈着の比は 0.8 (広葉樹林)~1.1 (針葉樹林) となり、沈着にほぼ匹敵する排出が認められた。鉍質土層の小さな S 保持力を反映する結果である。

湿性沈着速度は広葉樹林=針葉樹林であったので、全沈着速度の地点間差は主として乾性沈着速度の違いに由来し、その広葉樹林：針葉樹林比はほぼ 1:3 であった。この比は洗浄法<sup>16)</sup>による測定結果とほぼ一致し、両林の乾性降下物に対する捕捉効率の差を示すと考えられる。

### 2) 上層木から林床への S フラックス

(1) 有機質遺体としての還元速度 ( $LF, LL$ )：上層木からの落葉・落枝等による S 還元速度  $LF$  は両林とも約 3  $\text{kg S ha}^{-1} \text{y}^{-1}$  であり (第 2 表)、既往の報告<sup>8,15)</sup> に比べてやや小さかった。大気からの沈着速度、葉への S 集積量の違いによるものであろう。なお、下層植生からの S 還元速度  $LL$  は 1  $\text{kg S ha}^{-1} \text{y}^{-1}$  程度にとどまった。

(2) 林内雨、樹幹流による還元速度 ( $LT, LI$ )：林

内雨と樹幹流による S の還元は洗脱  $LT$  と溶出  $LI$  からなる (第 3 表).  $LT$  が全体の約 90% を占め,  $LI/LT$  は洗浄法による測定結果<sup>16)</sup>と同程度の低い値になった. しかし, 溶出速度  $LI$  の  $1\sim 2\text{ kg S ha}^{-1}\text{ y}^{-1}$  という値自体は既往の調査例<sup>8,15)</sup>よりやや大きかった. また, この項でも針葉樹林が広葉樹林の約 2 倍の値を示した.

3) 上層木の集積, 吸収および再転流速度

上層木の S 集積速度  $R$  は両林とも  $10\text{ kg S ha}^{-1}\text{ y}^{-1}$  強

第 4 表 上層木の純一次生産 ( $NPP$ ) および S 吸収速度<sup>1)</sup>

部位別	広葉樹林		針葉樹林	
	$NPP$	S 吸収速度	$NPP$	S 吸収速度
幹木部	4.1	0.3	2.7	0.1
樹皮	0.6	0.3	0.8	0.3
枝小	0.2	0.1	1.9	0.8
中	0.3	0.0	—	—
大	0.6	0.1	1.7	0.3
葉	4.8	9.7	6.1	7.1
地上部計	10.6	10.5	13.2	8.6
根根株	0.6	0.2	1.0	0.0
小	0.6	0.5	1.0	1.0
中	0.5	0.4	0.1	0.2
大	0.9	0.5	1.8	0.6
根部計	2.6	1.6	3.9	1.8
合計	13.2	12.1	17.1	10.4

<sup>1)</sup>  $NPP$ : 年間純一次生産量; 単位,  $NPP$ :  $\text{Mg ha}^{-1}\text{ y}^{-1}$ , S 吸収速度:  $\text{kg S ha}^{-1}\text{ y}^{-1}$ .

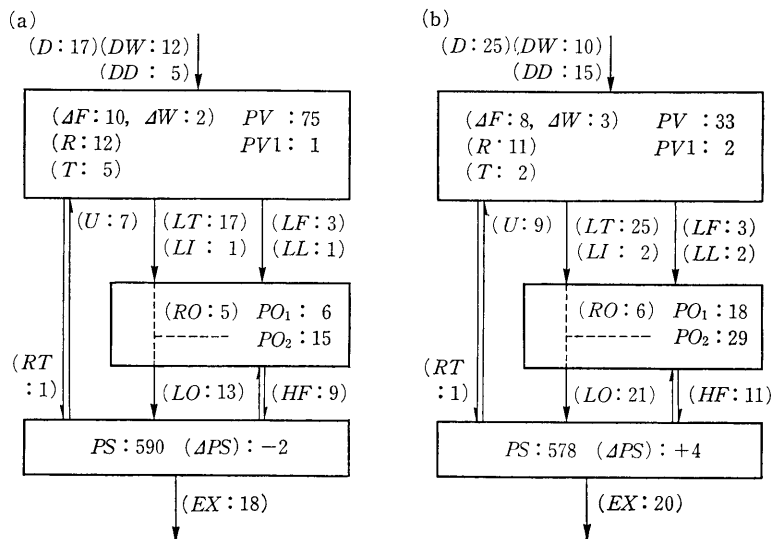
(第 4 表) で, 既報<sup>8,15)</sup>に比べて小さく, 林分による差はなかった. また, これに応じて吸収速度  $U$  および再転流速度  $T$ , 枯死根による還元速度  $RT$  など (第 5 表) も小さい値を示した.

広葉樹林と針葉樹林の違いは葉 ( $\Delta F$ ) とそれ以外の部分 ( $\Delta W$ ) の純一次生産に要する S 量の比や再転流速度  $T$  に認められた.  $\Delta F:\Delta W$  は前者では  $1:0.3$  であったが, 後者では  $1:0.5$  であった. これは, 主として小枝と根の純一次生産量  $NPP$  が針葉樹林で大きかったことによるものである. 逆に, 集積:再転流 ( $R:T$ ) は広葉樹林では約  $1:0.5$  であったのに対して, 針葉樹林では約  $1:0.2$  にすぎなかった. 落葉に先立つ養分の再分配が  $T$  の主体をなすので, 越年葉の多い針葉樹林で

第 5 表 上層木の S 集積, 吸収, 再転流速度の内訳

フラックス	記号	広葉樹林 ( $\text{kg S ha}^{-1}\text{ y}^{-1}$ )	針葉樹林 ( $\text{kg S ha}^{-1}\text{ y}^{-1}$ )
集積速度	葉 ( $\Delta F$ )	9.7	7.2
	葉以外 ( $\Delta W$ )	2.4	3.3
	合計 ( $R$ )	12.1	10.5
落葉・落枝による還元速度 ( $LF$ )		3.1	3.1
溶脱による還元速度 ( $LI$ )		1.1	2.2
根の枯死による還元速度 ( $RT$ ) <sup>1)</sup>		0.5	1.0
吸収速度 ( $U$ )		6.6	8.6
再転流速度 ( $T$ )		5.5	1.8

<sup>1)</sup>  $RT$  は  $\Delta W$  の内数. したがって,  $U=\Delta W+LF+LI$  である.



第 2 図 広葉樹林 (a) および針葉樹林 (b) 生態系における S のプールとフラックスの相互関係  
記号の意味は第 1 図, 作図の約束は第 1 図の註による. 単位は集・蓄積量については  $\text{kg S ha}^{-1}$ ,  
フラックスについては  $\text{kg S ha}^{-1}\text{ y}^{-1}$  である. 針葉樹林の  $\Delta F$  には端数切り上げによる補正 1 が  
加えられている. 測定, 推定できなかった項目については表示しなかった.

そのシェアが低くなったものである。

#### 4) 林床、鉍質土層におけるSのフラックス

林床への全S還元速度(第2図)は明らかに広葉樹林<針葉樹林であった。また、林内雨+樹幹流として還元されるSの70~80%はLOとして溶脱された。残り20~30%はなんらかの形でO層に一時保持(RO)された後、有機物を経由したS(HF)として鉍質土層に移行する。これらを合計した鉍質土層への全S供給速度 $LO+RT+HF$ は明らかに広葉樹林<針葉樹林であった。針葉樹林ではその分鉍質土層に蓄積されたSの増加分 $\Delta PS$ が大きくなっていった。

#### 5) Sの集・蓄積量とフラックスの関係

##### (1) 沈着速度と上層木のS集積

全沈着速度と上層木のS集積量の比( $PV/D$ )は広葉樹林では4.4y、針葉樹林では1.3yであった。すなわち、広葉樹林は年間全沈着量の4~5年分のSプールをもっているのに対して、針葉樹林のそれは1年分強にすぎなかった。一方、全沈着速度と集積速度の比( $D/R$ )は1.4および2.4、同じく吸収速度との比( $D/U$ )は2.6および3.0であった。針葉樹林の全沈着速度 $D$ は広葉樹林のその約1.5倍に達し、上層木の集積、吸収速度が小さいことと相まって $D/R$ または $D/U$ を高めている。

##### (2) 上層木におけるS循環

上層木に集積された全S量 $PV$ と年間集積速度 $R$ の比( $PV/R$ )は広葉樹林:6y、針葉樹林:3yであった。したがって、針葉樹林の上層木に蓄積されたSが一替わりするのに必要な時間(以下平均滞留時間という)は、広葉樹林のその約半分ということになる。

広葉樹林、針葉樹林上層木の葉以外へのS集積速度 $\Delta W$ はそれぞれ2.4および3.3(第5表)、同じく集積量はそれぞれ65および23 $\text{kg S ha}^{-1}$ <sup>19)</sup>であったから、この部分におけるSの年増加率は広葉樹林で4%、針葉樹林では14%であった。葉以外の部分の乾物現存量増加率は広葉樹林で6%、針葉樹林では14%であった<sup>19)</sup>から、広葉樹林では葉以外の部分の平均S濃度が成長に伴ってわずかに低下したのに対し、針葉樹林ではほとんど変化しなかったことになる。樹木の葉以外の部分については、乾物現存量の増加はS含有率の低い幹木部の増加によるものであるから、その平均S濃度は成長に伴って低下するのが自然である。針葉樹のそれが変化しなかったことは樹皮、小枝などのS含有率が上昇しつつあることを示唆している。

さらに、落葉・落枝としての還元 $LF$ 、溶出 $LI$ および枯死根としての還元 $RT$ などによる上層木からのS選

元速度は両林とも5~6 $\text{kg S ha}^{-1} \text{y}^{-1}$ であった。この速度は広葉樹林については上層木集積量 $PV$ の約10%にすぎなかったが、針葉樹林では20%近い値になった。針葉樹林では集積量に比べて速いSのフラックスによって上層木、とくに小枝、葉へのSの蓄積が進みつつある。

##### (3) 林床への供給とO層のSプールとしての重要性

落葉期直前のO層のS蓄積量 $PO_1$ は広葉樹林では6、針葉樹林では18 $\text{kg S ha}^{-1}$ であった<sup>19)</sup>。有機質遺体としての全S還元速度 $LF+LL$ は両林とも4~5、浸透水からの取り込み速度は5~6 $\text{kg S ha}^{-1} \text{y}^{-1}$ であった。したがって、O層Sの最大蓄積量 $PO_2$ は広葉樹林では15、針葉樹林では29 $\text{kg S ha}^{-1}$ になると推定される。この値は年間の全沈着速度にほぼ匹敵し、その年変動部分( $PO_2-PO_1$ )だけでも吸収速度 $U$ を越えている。また、 $PO_2$ が毎年の還元流( $LF+LL+RO$ )によって更新されるものと考えれば、O層Sの平均滞留時間は広葉樹林では1.7y、針葉樹林については2.6yとなる。

したがって、O層は系内の中継的なSプールとして十分な大きさをもっており、その季節変動部分だけでも上層木が1年間に吸収するS量をまかなえる。さらに、O層有機物中のSは長い平均滞留時間によって林内雨等によるS濃度の急変を緩衝する役割を果たしていると考えられる。

##### (4) 鉍質土層のS蓄積量(PS)と移送速度

鉍質土層の蓄積S量 $PS$ は両林とも約600 $\text{kg S ha}^{-1}$ で、これまでの報告に比べて小さかったが<sup>19)</sup>、 $PV$ に対しては十分大きいといえた。また、 $PS$ の吸収速度 $U$ に対する倍率は両林とも50以上、同じくO層からのSフラックス $LO+HF$ に対する倍率は15以上であったから、フラックス成分に比べても十分大きかった。さらに、鉍質土層の正味のS蓄積速度 $\Delta PS(=LO+HF+RT-EX-U)$ は広葉樹林では-2、針葉樹林では+4 $\text{kg S ha}^{-1} \text{y}^{-1}$ であったので、広葉樹林の $PS$ は平衡~微減の状態にあるが、針葉樹林のそれは増加傾向にある。しかし、増減率 $\Delta PS/PS$ は両林ともに±1%以下であったので、 $PS$ は短期的にはほとんど変化しないといえてよい。

##### 6) 酸性沈着によるSの植生に対する影響

前項の論議から明らかなように、調査林は年間の純一次生産に必要な量の約1.4倍(広葉樹林)から2.4倍(針葉樹林)のSを供給されている。しかし、この余剰なSの上層木、とくに広葉樹林のそれに対する影響は判然としない。これには次のような条件が関与していると推察される。

(i) 広葉樹林は着葉期間が短く、酸性沈着の影響を受けにくいだけでなく、酸性降下物に対する捕捉効率も低いために余剰のSを集積しにくい。

(ii) 多量要素の欠乏が上層木生長の主な制限因子になっており<sup>17,19)</sup>、S過不足の影響が発現しにくい。

(iii) 鉱質土層のS含有率が著しく低く<sup>19)</sup>、S欠乏を起しやすいた状態にある。大気から供給されるSはこれを補う形になっている。

(iv) 堆積年代が新しい火山灰からなる鉱質土層の塩基プールが大きく、林冠やO層の酸緩衝能が大きい<sup>22,23)</sup>。したがって、土壌溶液や地下水のH<sup>+</sup>やAl<sup>3+</sup>濃度が高まることはない。

(v) 土壌のS保持能が小さいため、沈着量とはほぼ同量のSが速やかに深層に排出され、生態系内部に蓄積しにくい。

(vi) O層を含む土壌Sの平均滞留時間が長く、これが森林生態系におけるS濃度の安定化に寄与している。

これらのうち、(i)を除く各項は針葉樹林にも共通する条件である。しかし、この地域のストロブマツ植林地では以前から異常落葉や葉の褐斑発生が観察されており、酸性霧の影響を指摘した報告もある<sup>29)</sup>。本研究でも、針葉樹(ストロブマツ)については小枝や葉へのS集積が進みつつあり、越年葉の枯損や褐斑形成も著しかった。また、1991年10~11月には前年の約1.5倍、葉の現存量の50%強に達する落葉が観察された。しかし、(i)混在するチョウセンゴヨウマツには越年葉の枯損や褐斑形成が少なく活性も高い。(ii)1991年秋の多量落葉の直接原因は台風による強風と推定され、「異常」落葉とは考えにくい。(iii)針葉樹林の全沈着速度は世界の高濃度汚染地域の半分程度にすぎないなどの理由から、現段階では、これらの現象を酸性沈着の直接的影響と断定することには、無理があると思われる。ただし、それらが感受性の高い樹種に対する間接的・累積的な影響の表れとする見方も否定はできない。経過を慎重に観察する必要がある。

## 7) 循環速度測定上の問題点

(1) ガス状Sの揮散と沈着：樹木のS揮散は多くの研究で認められている<sup>1,8,10)</sup>が、森林からの揮散速度 $EMp$ については信頼できる報告がほとんどない。緑葉中の揮発性S濃度は高温・強光下でSO<sub>2</sub>ガスの供給が多いときに上昇し<sup>1)</sup>、そうでないときには葉中Sの大部分はSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>として蓄積される<sup>8,10)</sup>。このため、高緯度地域の森林については $EMp$ を0.1 kg S ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>程度以下とした報告が多く<sup>1)</sup>、S収支を概算する際には無視できることが多い<sup>5,7,8,10,15,24)</sup>。

一方、SO<sub>2</sub>ガスの沈着 $DDg$ は乾性沈着の主成分として重視され、大気中のSO<sub>2</sub>濃度 $SO_2atm$ と平均沈着速度 $Va$ から乾性沈着 $DD$ を算出しようとする試みもある<sup>12)</sup>。すなわち、

$$DD \doteq DDg = SO_2atm \cdot Va \quad (\mu\text{g S cm}^{-2} \text{ s}^{-1}) \quad (7)$$

である。調査林における大気中のSO<sub>2</sub>濃度モニタ結果(苫小牧市環境センター未発表)を用い、 $Va$ を米国の事例<sup>12)</sup>にならって広葉樹林については0.5(緑葉展開期)~0.2(落葉期)、針葉樹林については0.5 cm s<sup>-1</sup>(通年)と仮定して式(7)により $DDg$ を試算した。結果は広葉樹林:6、針葉樹林:10 kg S ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>であった。第1表の結果と比べると、広葉樹林については $DD \doteq DDg$ であったが、針葉樹林については $DD > DDg$ であった。沈着物の性質や樹冠の状態によって変化する沈着速度 $Va$ を平均値として扱うことに無理があると思われる。

さらに、 $SO_2atm$ と $DD$ の間に式(7)のような単純な関係が成り立たないこと<sup>21)</sup>にも注意する必要がある。当面は、乾性沈着の測定例を蓄積するとともに、これと $SO_2atm$ の関係をいろいろなケースについて分析することが重要である。

(2) 上層木のS収支：この推定の精度は上層木の $NPP$ をどう見積もるかによるところが大きい。年輪解析による $G_{ij-1}$ と $G_{ij}$ の関係は広葉樹: $G_{ij-1}=0.97 \cdot G_{ij}$ 、針葉樹: $G_{ij-1}=0.86 \cdot G_{ij}$ で線形近似され、相関係数は両者ともに0.999以上であった。また、この関係は円盤試料のサンプリング位置にかかわらずほぼ一定であった。それゆえ、胸高断面積成長率の推定誤差は小さく、標準木が適切であれば $NPP$ の推定値にはよい精度を期待できるであろう。

地上部 $NPP$ の推定結果は広葉樹林は11、針葉樹林では13 Mg ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>(第4表)であったから、地上部乾物現存量<sup>19)</sup>に対する成長率は6および22%と推算される。前者はシラカンバ、ウダイカンバなどに関するこれまでの調査結果<sup>20,26,27)</sup>とはほぼ一致したが、後者はトドマツやトウヒ<sup>18,20)</sup>についての報告14~18%よりかなり高かった。樹種、樹齢の違いによるものかもしれないが、針葉樹林の地上部乾物現存量が過小に見積もられている可能性もある。一斉林型の森林であっても、複数クラスによるHARTIG法<sup>11)</sup>を適用するのが安全であろう。

(3) その他の未測定フラックス：枯死根による還元速度 $RT$ 、O層から鉱質土層への移動速度 $HF$ なども今回の研究では直接測定できなかった。安定同位体の利用などを含めて、それぞれに適した方法を早急に検討する必要がある。

## 4. 要 約

北海道大学農学部附属苫小牧地方演習林(苫小牧市宇高丘)の広葉樹林と針葉樹林を対比してSの沈着, 排出および生態系内のフラックスを測定し, 次の結果を得た.

1) 大気からの全沈着速度 $D$ と上層木の集積速度 $R$ の比は, 広葉樹林では約1.4倍, 針葉樹林では約2.4倍に達し, この地域の森林, とくに針葉樹林は過剰なSの供給を受けている. 両林の違いは主として乾性沈着速度にあり, その広葉樹林:針葉樹林比はおおむね1:3であった.

2) 両林とも沈着にほぼ匹敵する深層への排出が認められ, 生態系内部への蓄積は少なかった.

3) 上層木からの落葉・落枝による還元速度 $LF$ は両林とも約 $3\text{ kg S ha}^{-1}\text{ y}^{-1}$ であったが, 経年的変動が大きかった.

4) O層は林内のSフラックスを緩衝する中継的なSプールとして十分な大きさをもっており, それに保持されるSは長い平均滞留時間をもつことによって鉍質土層の急激なS濃度変化を緩和する役割を果たしている.

5) 両林とも鉍質土層の蓄積S量は集積・吸収速度あるいはO層から鉍質土層へのSフラックスに比べて十分大きく, 鉍質土層の年間S増減率は $\pm 1\%$ 以下であった. 鉍質土層のSプールが森林生態系のS循環を緩衝する役割を果たしていることは明らかである.

6) 針葉樹林(ストロブマツ)では, 小枝・葉へのSの蓄積が進行しており, 越年葉の枯損, 褐斑形成もみられる. これらを酸性沈着による過剰なSの直接的影響と断定することは難しいが, 経過を慎重に観察する必要がある.

謝 辞 この研究は北海道大学農学部附属苫小牧地方演習林の全面的な協力のもとに実施された. 同林林長石城謙吉教授ならびに関係各位に厚くお礼申し上げる. 大気の $\text{SO}_2$ 濃度については, 苫小牧市環境監視センターに観測資料の提供をいただいた. 記して謝意を表する次第である.

## 文 献

- ANDREAE, M. O. and JAESCHKE, W. A.: Exchange of sulphur between biosphere and atmosphere over temperate and tropical regions, ed., R. W. HOWARTH, J. W. B. STEWART and M. V. IVANOV, Sulphur cycling on the continents: Wetlands, terrestrial ecosystems and associated water bodies, p.27~61, John Wiley & Sons, Chichester (1992)
- CHANG, J.: Global distribution of net radiation according to a new formula. *Ann. Assn. Am. Geogr.*, 60, 340~351 (1970)
- GARTEN, C. T., Jr.: Fate and distribution of sulfur-35 in yellow poplar and red maple trees. *Oecologia*, 76, 43~50 (1988)
- HALLGREN, J. E. and FREDERICKSON, S. A.: Emission of hydrogen sulfide from sulfur dioxide-fumigated pine trees. *Plant Physiol.*, 70, 456~459 (1982)
- JACKS, G., KNUTSSON, G., MAXE, L. and FYLKNER, A.: Effect of acid rain on soil and ground water in Sweden, ed. B. YARON et al., Pollutants in porous media, p.94~114, Springer-Verlag, Berlin (1984)
- JAPAN ENVIRONMENTAL AGENCY (環境庁): Acid precipitation in Japan—The report of phase I survey, p.41, 環境庁, 東京 (1990)
- JOHNSON, D. W. and HENDERSON, G. S.: Terrestrial nutrient cycling; in Analysis of biogeochemical cycling processes in Walker Branch Watershed, ed. D. W. JOHNSON and R. van Hook, Springer-Verlag, New York (1989)
- JOHNSON, D. W., HENDERSON, G. S., HUFF, D. D., LINDBERG, S. E., RICHTER, D. D., SHRINER, D. S., TODD, D. E. and TURNER, J.: Cycling of organic and inorganic sulfur in a chestnut oak forest. *Oecologia*, 54, 141~148 (1982)
- 榎根 勇: 水の循環, 230 pp., 共立出版, 東京 (1973)
- KELLY, J. and LAMBERT, M. J.: The relationship between sulphur and nitrogen in the foliage of *Pinus radiata*. *Plant Soil*, 47, 89~102 (1972)
- 木村 允: 陸上植物群落の生産力測定法, 生態学講座 8, 112 pp., 共立出版, 東京 (1978)
- LINDBERG, S. E., LOVETT, M., RICHTER, D. D. and JOHNSON, D. W.: Atmospheric deposition and canopy interactions of major ions in a forest. *Science*, 231, 141~145 (1986)
- 真鍋逸平・竹内典之・川那辺三郎: 密に植栽された若いトドマツとヨーロッパトウヒ林分の現存量と生長量, 京大演報, 53, 43~51 (1981)
- MALCOLM, D. C. and GARFORTH, M. F.: The sulphur: nitrogen ratio of conifer foliage in relation to atmospheric pollution with sulphur dioxide. *Plant Soil*, 47, 89~102 (1977)
- MEIWES, K. J., and KHANNA, P. K.: Distribution and cycling of sulphur in the vegetation of two forest ecosystems in an acid rain environment. *ibid.*, 60, 369~375 (1981)
- 佐久間敏雄・堂本弘之・佐藤冬樹・小林 信・田中夕美子: 鉢植えた若木を用いた乾性沈着の測定, 土肥誌, 65, 378~384 (1994)
- 佐久間敏雄・佐藤冬樹: 広葉樹林下の土壌中における無機元素の動態 (第1報), 北演研報, 44, 537~552 (1987)
- 佐久間敏雄・佐藤冬樹: 広葉樹林下の土壌中における無機元素の動態 (第2報), 同上, 44, 553~565 (1987)
- 佐久間敏雄・富田充子・柴田英昭・田中夕美子: 酸性沈着の影響下にある広葉樹林, 針葉樹林生態系における硫黄の分布と循環 I: 乾物現存量と硫黄の分布, 土肥誌, 65, 677~683 (1994)
- 佐藤大七郎: 北海道のウダイカンパ天然林の物質生産—林分生長量資料 9, 東大演報, 66, 109~117 (1974)
- 柴田英昭・佐久間敏雄: 苫小牧北西の森林地帯における



- 酸性降下物, 土肥誌, 65, 313~320 (1994)
- 22) 柴田英昭・佐久間敏雄：酸物質の流入に対する土壌-植物系内部の反応—広葉樹林, 針葉樹林における林冠通過時の化学性変化—, 物質の地球化学的循環に対する農林地生態系の調節機能, 佐久間敏雄編, p. 35~47, 北海道大学農学部, 札幌 (1993)
- 23) 柴田英昭・佐久間敏雄：酸物質の流入に対する森林土壌の緩衝能Ⅲ, 同上, p. 82~102, 北海道大学農学部, 札幌 (1993)
- 24) SHRINER, D. S. and HENDERSON, G. S.: Sulfur distribution and cycling in a deciduous forest watershed. *J. Environ. Qual.*, 7, 392~397 (1978)
- 25) SWITZER, G. L. and NELSON, L. E.: Nutrient accumulation and cycling in Loblolly Pine (*Pinus taeda* L.). *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 36, 143~147 (1972)
- 26) 只木良也・四手井綱英・酒瀬川武五郎・荻野和彦：森林の生産構造に関する研究 (Ⅱ), シラカンバ幼令林における現存量の推定と生産力についての若干の解析, 日林誌, 43, 19~25 (1961)
- 27) 高橋幸男・浅井達弘・菊沢喜八郎：名寄のシラカンバ林の現存量について, 北林試報, 12, 29~37 (1974)
- 28) 吉武 孝・増田久夫：苫小牧地域におけるストロープマツ等の異常落葉に関する研究, 林試研報, 337, 1~28 (1986)

**Distribution and Cycling of Sulfur in Deciduous and Coniferous Forest Ecosystems as Influenced by Acidic Deposition II: Input, Cycling, and Output of Sulfur**

Toshio SAKUMA, Atsuko TOMITA, Hideaki SHIBATA, and Yumiko TANAKA  
(*Fac. Agric., Hokkaido Univ.*)

The rates of input, output, and cycling of sulfur in deciduous (Df) and coniferous (Cf) forests in a college experiment forest at Tomakomai were estimated.

Because of the higher efficiency of conifers as the collector of dry deposition, the rate of atmospheric sulfur input ( $D$ ) to the Cf-forest amounted to about 1.5 times that to the Df-forest. The larger  $D$  resulted in a higher ratio of cycling sulfur to accumulated or required sulfur of forest vegetation. For example, the  $D/R$  ( $R$ : required sulfur by forest vegetation) ratio of Df-forest was estimated at 1.4 but that of Cf-forest was 2.4. It is certain that the forest ecosystems in this area are accepting atmospheric sulfur input of far greater than that required to keep the reasonable net photosynthetic production. However, the direct influences of this excess sulfur input on trees and soils are, so far, not obvious. This may be due to the larger buffering capacity of big pools of upper story trees and soil horizons. However, cycling and leaching of basic elements are forced to accelerate under such a high rate of sulfur input. Especially in Cf-forests, the amounts of sulfur accumulated in upper story trees and soil organic horizons are increasing rapidly and abnormal defoliation is often reported. It is feared that degrading influences on upper story trees may be actualized if the excess sulfur input at present level is continued for a long time. We have to watch carefully changes of the biological activities of vegetation and material cycling in the forest ecosystems.

*Key words* acidic deposition, forest ecosystem, material cycling, sulfur

(Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr., 65, 684-691, 1994)