# 二次林と物質循環[1)]

堤　　利　夫[2)]

二次林を遷移の途中相だとすれば，それは素材が一旦破壊されたということを出発点として含んでいることになる。森林の破壊は，程度の問題は別として，土壌の変化をともなうものである。遷移というものは，ある段階の植生の下で土壌が発達し，その発達した土壌の影響によって植生やその生産力が変り，そのことによってまた土壌が発達する，といった土壌と植生との相互作用の下で究極的には極相に達して安定する。そういった過程といえる。この意味で，二次林は植生と土壌とが相互作用的に変化している状態にあるということができ，それ故に植生と土壌を結ぶものとして二次林の物質循環をとりあげてみる必要があろう。

## １．森林土壌と伐際の影響

そこでまず森林の下での土壌とはどのようなものであるかを，ごくおおまかにみておきたい。

土壌は岩石の風化産物に生物の直接，間接のはたらきが加ってできたものである。生物の作用としては動植物遺体（リター）の土壌生物による分解が重要である。リターが分解される過程で様々の分解段階の有機物が土壌に集積され，それが鉱質部分とともに様々の物理,化学,生物的な変化をうけて土壌として発達していく。森林の下でリターの生産が毎年行われ，土壌にこれらの分解産物が集積し，土壌が形成されていくことになる。そして毎年のリターの供給を土壌中での有機物の無機化が量的に釣合えば，みかけのうえで変化がなくなり定常状態に達したということになる。

従って，成熟した土壌は一般に図1に示したような層状構造をもつ。各層位の発達，いいかえると土壌の断面形態は気候，母材，植生，地形の影響をうけてそれぞれに違うが，わが国の暖温帯では褐色森林工が最も普通にみられ，主に地形による水分環境の違いによって乾性から湿性までの土壌型に分類されている。

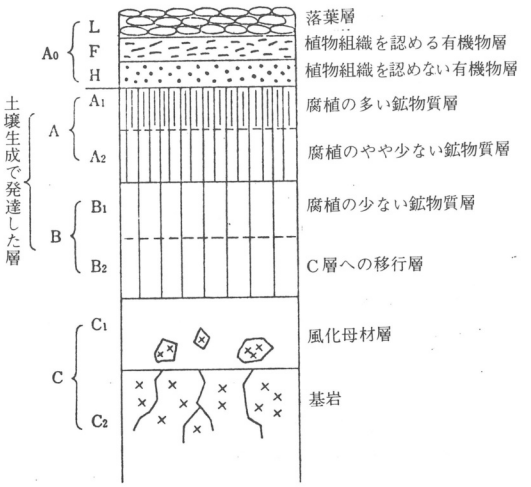



図１　断面層位の模式図（林野土壌とその調べ方より）.

いうまでもなく，森林土壌のこのような性質は毎年リターが林地に加えられ，土壌中では有機物が無機化しているという状態の下で維持されているのである。森林を伐採するとリターの生産が停止する。この影響は伐採跡地への植生の再生によって回復するが，わが国では急斜地が多く，降雨量とくに大雨が多いという事情から，伐採後の裸地では侵蝕がさかんとなり，A₀層やA層の流出がおこる。その流出の度合は条件によって様々であるが，森林の存故の下で保たれてきた土壌の層状構造が破壊され，成熟した状態から退行することになり，農用林などで行なわれてきた落葉の採取もまた同じような影響を与えてきたといってよいであろう。

伐採などにともなう土壌の変化は次代の森林が発達すると除々に回復していく。二次林はこうした過程にある。

---

1）関西自然保護機構業積第８号

2）京都大学農学部林学教室

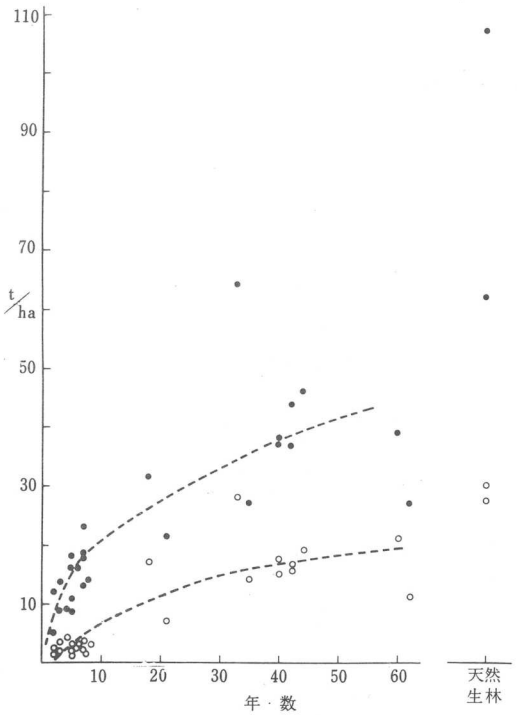



図２　土壌の有機物量の経年変化（滋賀県栗太，兵庫県六甲，岡山県玉野など）．
○AoP層
○AoP層と鉱質土P層の合計

## ２．炭素、窒素の循環

上述のような過程は土壌の層状構造の回復，炭素，窒素，無機養分の量的な変化としてあらわすことができる。その回復の速度は破壊の程度や気候，植生，土壌の性質など様々の原料によって違う。

瀬戸内沿岸の花崗岩を母材とするハゲ山では治山造林が成功した場所で，66年を経てもなお十分回復したとはいい難い（図２）。またアラスカでの例では土壌の有機物量が120−130年の間は増大しつづけていることを示している（図３）。

これらの例は完全に回復するまでには比較的長期間を必要とすることを示している。この間，森林には有機物あるいは炭素の集積がおこるから，二次林は大気から炭素をとりいれ樹体や土壌に集積していく過程にあるといえる。

窒素の集積量の変化は炭素とよく似た形を示す。炭素が植物による光合成によって大気からとりいれられるのに対し，窒素は主に微生物による空中窒素の固定と降水によって森林に入ってくる。森林での窒素固定についての研究は極めて不十分であるが，遷移の進行にともなって土壌への炭素の集積がおこると，それに平行して窒素量も増えていく傾向がある。降水による収入は量的に少ないから，窒素固定を含む何らかの経路での窒素のとりいれがおこっているとみてよい。

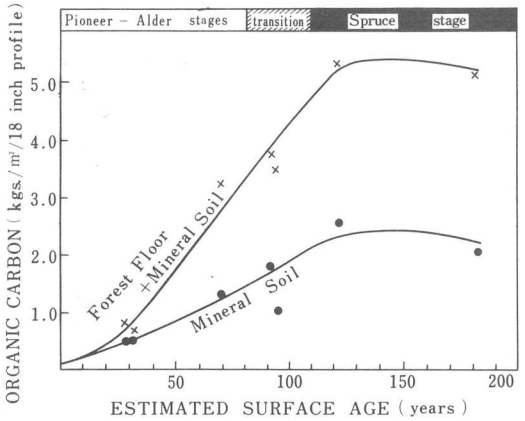



図３　植生の遷移と土壌の有機物集積の過程．
（北米，アラスカ，Crocker and Major, 1955. JEcol.43）

瀬戸内沿岸のハゲ山の場合，根粒をもつハンノキ類の造林後５～６年までの若い造林地では林木と林地の窒素の平均の増加量は年，100kg /ha程度であった。根粒菌による窒素固定については50～150kg /ha・yrという例がある。

樹種組成や林令，土壌などによってこの値は大巾に変ると予想されるが，その実態は明らかでない。窒素の収入や集積過程が二次林の発達に重要な意味をもっと思われるので，その究明が期待される。

## ３．無機養分の循環

炭素，窒素のこのような循環にともなってミネラルも循環する。土壌中で可給態となったミネラルは植物に吸収され，植物体を構成した後，その一部または大部分は溶脱し，リターフォールとして林地にかえり，それらはやがて再び無機化して林木に吸収される。生長しつつある森林では土壌中から吸収した養分のうち樹体の増分の中にとりこまれてしまう分があるから，それに相当した量は常に土壌中で補給されなければならない。これにはおそらく土壌中の岩石の風化が重要な意味をもっているものとみられる。

一方，ミネラルは降水に含まれて林地に到達し，森林を通る間に変化をうけて濃度が変り，やがて渓流へ流出していく。すなわち，降水としての収入と流出水としての支出がある。従って，森林では土壌と植生を結ぶ再循

環の経路と，外から流入して外へ流出していく，水を媒体とした流水とが結びついた形になっている。生長しつつある森林で炭素，窒素が集積されていく過程にある場合，樹体部分へのミネラルの集積は乾物現在量の増大につれて増大することは明らかであるが，土壌中でのミネラル量の変化は複雑である。

土壌への有機物の累積とともに土壌の層状構造が発達し，塩基交換容量が増大して土壌が養分をひきとめておく力は大となるが，それにともなって交換態の塩基の量が増えるとは必らずしもいえない。リターの分解にともなってできる有機酸によって塩基類の溶脱がおこる場合があるからである。土壌中での可給態養分の動きには土壌での養分の可給態化の速度，地表から下層に向って流れる水の流れによる溶脱，移動の速度，植物による吸収の速度などが関係し，条件によって違うと考えられる。わが国のように多雨でしかも夏季の気温の高い気候条件下では水の流れによる移動に注目する必要があろう。

### 4．降水と流出水による物質の動き

そこでつぎに，水の流れによる物質の動きについてみよう。

降水とそれに含まれる物質量は表・1，2，3に例と，し示した。およそ年間，haあたり数kgのオーダーにあり，平均濃度は1ppm以下である。

表 1　森林内外の降水の物質濃度（ppm，年間総量／年降水量）.

| | | 降水量 (mm) | Ca | Mg | K | Na | P | $NO_3$-N | $NH_4$-N | 有機態-N |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 滋賀・桐生（68年5月～69年4月） | O | 1,931 | 0.55 | 0.14 | 0.13 | 0.28 | 00.32 | 0.07 | 0.21 | — |
| アカマツ・ヒノキ林 | Tf | 1,455 | 1.76 | 0.40 | 1.44 | 0.67 | 00.74 | 0.15 | 0.16 | — |
| | Sf | 69 | 2.91 | 0.54 | 1.11 | 1.38 | 0.064 | 0.25 | 0.19 | — |
| 京都・上賀茂（63年6月～64年5月） | O | 1,693 | 0.62 | 0.07 | 0.27 | — | 0.014 | 0.09 | 0.09 | — |
| 広葉樹林 | Tf | 1,015 | 1.29 | 0.36 | 3.85 | — | 0.041 | 0.15 | 0.41 | — |
| | Sf | 418 | 1.09 | 0.27 | 2.23 | — | 0.014 | 0.08 | 0.30 | — |
| 滋賀・比叡山（75年10月～76年9月） | O | 2,595 | 0.20 | 0.09 | 0.30 | 0.46 | 0.073 | 0.09 | 0.08 | 0.30 |
| ヒノキ林　斜面下部 | Tf | 1,933 | 1.07 | 0.39 | 2.13 | 0.81 | 0.091 | 0.38 | 0.21 | 0.42 |
| 〃　斜面上部 | Tf | 1,955 | 0.73 | 0.27 | 1.44 | 0.66 | 0.076 | 0.28 | 0.17 | 0.39 |
| 京都・芦生（73年4月～73年12月） | O | 1,404 | 0.28 | 0.25 | 0.26 | — | 0.022 | 0.17 | 0.46 | — |
| 落葉広葉樹林 | Tf | 1,070 | 2.18 | 0.83 | 3.67 | — | 0.085 | 0.14 | 0.44 | — |

O：裸地（林外）の降水，Tf：樹冠通過雨，Sf：樹幹流

表 2　アカマツ・ヒノキ林における物質の集積と循環.

| | | N | P | K | Ca | Mg |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 集積量（kg/ha） | 林木地上部 | 270 | 16 | 131 | 525 | 59 |
| | Ao 層 | 190 | 11 | 23 | 180 | 21 |
| | 土壌（60cm） | 645 | 3 4 | 204 | 328 | 112 |
| | 合　計 | 1,105 | 30.4 | 358 | 1,033 | 192 |
| 循環量（kg/ha・yr） | リターフォール | 33.9 | 2.8 | 7.0 | 33.8 | 3.7 |
| | 樹冠通過雨 | 4.4 | 1.09 | 21.0 | 25.6 | 5.8 |
| | 樹幹流 | 0.3 | 0.05 | 0.8 | 2.0 | 0.4 |
| | 合　計 | 38.6 | 3.94 | 28.8 | 61.4 | 9.9 |
| | 降　水 | 5.4 | 0.63 | 2.6 | 10.7 | 2.6 |
| | 流　出 | 1.5 | 0.51 | 8.3 | 23.3 | 4.5 |

林冠に到達した降雨はそこで一部阻止され直接大気へ還っていく部分（樹冠遮断量）がある。その分だけ降水は濃縮されることになる。残りの降水は樹幹を流下する樹幹流と林冠から林地に降下するものにわかれて林地に到達する。これらのうち林冠。隙間を通って直接林地に到達するものを除けば，時間の長短はあっても，すべて葉や枝と接触したものである。接触の結果降水の物質濃度は変化する。それは一つには葉や枝の表面に付着した粉塵が洗いだされてくるからであり，２つには樹体からの溶出がおこるからである。それ故，林内面は林外面に比し養分物質の濃度が高いのが一般である。表１はその１例である。N，Pを除くと，樹冠遮断による濃縮以上の高濃度になっており，上述の２つの経路による物質の添加がおこっていることを示唆している。この両者の分離については今日，まだほとんど資料がないが，表２に例文した滋賀県桐生のアカマツ，ヒノキ林の場合，林内面の林外面に対する場合はそれぞれ年間kaあたりkgで，Ca16.9，Mg3.6，K19.2，P0.51で，降水そのものに含まれるものより多い傾向がある。

林内面の物質濃度が何故大きくなるかについての検討が必要であるが，林外面が降雨ごとに変動が大きいことの影響をうけて，林内面の濃度もまた降雨ごとに変動が大である。

従って林地は量や強度，物質濃度がそれぞれに大きく変動する降雨をうけることになる。水の流出はこのような降水の量や強度の影響をうけて大きく変り，降雨の度ごとに流出量は変化する。ところが流出水の中の養分物質の濃度は降水の物質濃度や流出量。変動に比較すると，ずっと安定した値を示すことが知られている。図４はその一例で，流量の変化に対して濃度の変化が少ないことが判る。地表に達した後，土壌を通って流出する間に濃度がほぼ一定になり，水質を安定させるような機構が作用しているといえる。その詳細は不明であるが，おそ

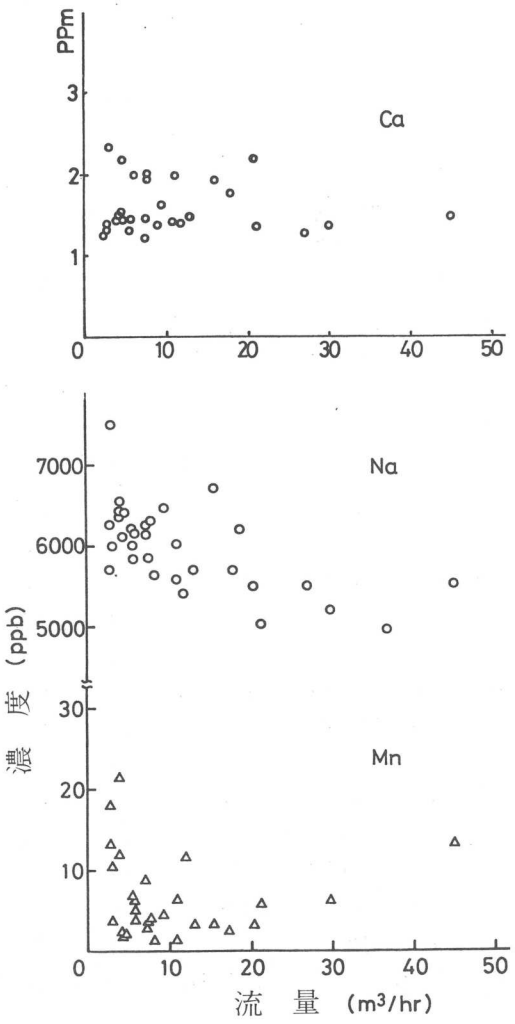



図４　流量と流出水の物質濃度.
（滋賀桐生試験地　1975・７～1976・10）

表３　森林内での物質収支（kg/ha・yr）.

| | Ca | | | Mg | | | K | | | Na | | | P | | | Inorg-N | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 収入 | 支出 | 差 | 収入 | 支出 | 差 | 収入 | 支出 | 差 | 収入 | 支出 | 差 | 収入 | 支出 | 差 | 収入 | 支出 | 差 |
| 滋賀・桐生　68. 5−69, 4 | 10.7 | 23.3 | (−12.6) | 2.64 | 4.5 | (−1.86) | 2.59 | 8.3 | (−5.71) | 5.42 | 60.8 | (−55.38) | 0.62 | 0.51 | (0.11) | 5.39 | 1.6 | (3.79) |
| 〃　〃　70. 10−71, 9 | 9.80 | 16.96 | (−7.16) | 1.91 | 4.80 | (−2.89) | 7.34 | 11.59 | (−4.25) | 10.82 | 63.6 | (−52.8) | 0.57 | 0.40 | (0.15) | − | − | − |
| 〃　〃　72. 4−73, 3 | 5.0 | 10.6 | (−5.6) | 1.9 | 3.3 | (−1.4) | 5.2 | 11.2 | (−6.0) | 4.7 | 62.5 | (−57.8) | 0.9 | 0.5 | (0.4) | − | − | − |
| 〃　〃　75. 11−76, 10 | 3.95 | 21.4 | (−17.45) | 1.14 | 5.99 | (−4.85) | − | − | − | 5.32 | 88.6 | (−83.3) | − | − | − | − | − | − |
| 京都・上賀茂 62. 5−63, 4 | 8.8 | 5.0 | (3.8) | 1.3 | 2.3 | (−1.0) | 2.7 | 2.3 | (−0.4) | − | − | − | 0.47 | 0.12 | (0.35) | 5.5 | 0.6 | (4.9) |

らく森林土壌が一般に高い透水性をもつこと，水は塩基交換能をもつ土壌と接触して流下すること，植物根や土壌生物によって水とともに可給態養分の吸収がおこること，などが考えられる。

### 5．森林での物質の保持

年間の降水量とそれに含まれる物質量，および流出水量とそれに含まれる物質量を測定すると森林での収支がえられる。その一例を表3に示した。このような測定例はまだそれほど多くはないが，降水による収入と流出による支出を比較してみると，およそN，Pでは収支ほぼ等しいか，または収入の方がやや多い場合が多いのに対し，塩基類は支出の方が多いという傾向が認められている。

森林への収入は降水のほかに粉塵などによるものがあって，表3にはこのことが考慮されていない。表2の場合について，仮に森林内での雨水中養分の増分をすべて粉塵付着によるものと仮定すると，Ca，Mgの場合でも収入の方が流出より大となる。収入，支出の測定の精度を高め，物質による収支の違いを検討するなど，この辺の事情はもっと詳しく調べる必要がある。しかしながら，森林に多量の水が流入し，流出していくのに対し，それにともなって動く物質量がそれほど多くはないということ，また収入に対して支出が著しい違いを示さないことを考慮すると，森林は物質の流出に対して極めて安定しており，物質をひきとめておく力にとんでいるということができるように思われる。

表2にみられるように，森林内部では植物による吸収，リターフォールによる林地への還元など，年間かなりの量の養分物質が循環している。土壌中では少なくともこれらに対応するだけの養分が無機化されているはずである。これらの量に対して流出する量は極めて少ない。樹体や土壌中に最も多くの量が存在しており，内部で再循環している量はそれに比してずっと少ない。さらに外界との収支の量は再循環より少ない，というのが一般である。

森林での養分物質の循環は土壌と植生の間をめぐる再循環と，外部との収支との2つの型の循環の複合であるが，量的には内部循環の方がずっと大きい。いいかえると，土壌中の可給態養分は相対的により多く植物に吸収され，再循環の経路に組みこまれ，外部へ流出する量は少ない。また，土壌には多量。養分物質が存在しているが，その大部分が水溶性ではない型で土壌に保持されていることも流出を抑えるのに役立っているものと思われる。

森林を皆伐し，除草剤で植生の再生を抑制した場合，物質の流出が著しく増大したという北米のHubbard Brookでの実験結果は有名である。植生がなくなったことによって植生による吸収が停止したことが流出を増大させる原因となっていると思われる。ただそれだけでは些か単純にすぎ，裸地化による土壌の物理，化学，生物的諸変化を考慮する必要があるにしても，植生の有否が森林の物質収支に直接，間接に大きな意味をもつことは明らかであろう。

二次林は生長しつつある森林である。樹体や土壌での有機物の蓄積は増加の過程にある。土壌から吸収された養分物質は，これらの増加する有機物の中にとりこまれていく。土壌での無機化速度に著しい違いがなければ，とりこまれる量が多いことは土壌からの流出を少なくする方向に作用する可能性がある。北米のCoweetaでの実験結果では，皆伐直後の流域では塩基の流出が多いが，若い二次林や造林地では成熟した天然林よりむしろ少ないという結果が示されている。ただしこの例だけから，若い二次林の方が成熟した森林よりミネラルの循環において閉鎖的であるというのにはまだ問題が多い。

一方，窒素の無機化についてみると，遷移の進行にともなって硝酸態の窒素の生成が減り，アンモニア態のものが多くなる傾向があるという報告がある。硝酸態窒素はそれ自体流出しやすいばかりでなく，アンモニア態から硝酸ができる際につくられる水素イオンの影響の下で，塩基類の流出が促進されるのではないか，という考えがある。このことは遷移の進行にともなって，土壌からの物質，とくに窒素の流出を少なくし，森林の中にひきとめておく作用が大きくなることを示唆している。

水質を一定に保ち，物質を内部にひきとめておく，このような森林の機能については，今日のところ，成熟した森林と二次林との間での違いがあるかどうかははっきりしない。詳細は今後の研究をまたねばならないが，若い二次林でも，この機能については，成熟した天然林に匹敵するものであることは間違いないことのようである。

### 6．人工林の問題

天然生の広葉樹林がスギやヒノキの人工林にかえられる面積はかなり多い。これらの人工林のほとんどは皆伐，同齢の単純林として育成される。これらの同齢，単純林と広葉樹の多数の種を混えた天然生の二次林の場合と，水質や物質循環面でどのように違うかについて，今日ほとんど資料がないが，興味ある課題であると考える。

前述したように，森林の物質をひきとめておく力の一つの作用として樹木による吸収がある。養分物質の吸収の量や季節，土層の深さなどは種によって異なるとすれば，多種の混交林の方が土壌からの養分の吸収が，季節的にも，土層的にも分散する可能性がある。融雪後，上層木の葉が展開して林冠が閉鎖するまでの短い期間に急速に生長する。いわゆる春草の類がある。これらの乾物生産量は極めて小さいものにすぎないが，早春，他の植物に先きがけて養分物質を吸収し，植物体に保持し，夏季に枯化，分解して放出するという機能をもち，養分の循環の面では決して無視しえないという。

スギやヒノキの一斉の単純林は，下層植生の十分な発達がない場合，多様性に欠け，養分の吸収，還元という面で単純化するおそれがあるが，その実態についてはすべて今後の研究をまたねばならない。