

トドマツの年輪幅変動に及ぼす土壤乾燥の影響

薄井五郎*

The effect of soil drought on annual ring growth of
Abies sachalinensis Masters

Goro.USUI*

要 旨

丘陵地帯の若いトドマツ林から 15 本の優勢木をとり、1976～1988 年における各年の年輪生長幅の変動について、まず生長期各月の降水量、日照時間、平均気温などの気候因子との関係を検討した。その結果、年輪幅の平年値からの変動量は 7 月の降水量 ($r = 0.72$, 1%水準で有意) と、前年の 9 月・10 月の平均日照時間 ($r = 0.61$, 5%水準で有意) との間に正の関係が認められ、この 2 因子と年輪幅の変動量との重相関係数は 0.764 であった。次に、土壤毛管水が欠乏する日数を、月別に降水量および推定蒸発散量から求めたところ、土壤乾燥の起こる季節およびその影響の現れ方について、次のことが推測された。

土壤が乾燥状態になるのは 6 月以後である。

6 月から 7 月中旬の土壤水分不足日数はその年の直径生長量と無関係である。

7 月中旬から 8 月下旬までの土壤水分不足日数はその年の直径生長量と負の関係 ($r = -0.84$, 1%水準で有意) にある。

前項の土壤水分不足日数と前年 9 月・10 月の平均日照時間とを組み合わせた場合、年輪幅との重相関係数は 0.856 であり、変動量の 73% を説明した。

前年の土壤乾燥は翌年の直径生長量と無関係である。

は じ め に

林木の生長は地形、土壤などの立地要因によって支配され、その関係の解析は数多く行われている。また林木の生長は年々の気候条件によっても大きな影響を受ける。しかし、同一地域内における気候と生長を論じた報告としては、亜高山帯のような寒冷気候下における気温の対応 (SANO, 1977) や、米国南西部のような降水量の少ない地方における土壤乾燥との対応 (FRITTS, 1976) など、気候が生長の制限因子となる場所や地域のものが多い。わが国では、気候特に土壤乾燥の年変動と年輪幅との関係についてはほとんど知られていない。

本論文では、北海道の若いトドマツ林において、1976～1988 年における各年の年輪生長幅の変動の程度を調べ、その変動量についてまず生長期各月の気候因子との関係を、次に降水量および推定蒸発散量から求めた土壤毛管水の不足日数との関係をそれぞれ検討した。

* 北海道立林業試験場 Hokkaido forestry Research Institute, Bibai, Hokkaido 079 - 01

〔北海道林業試験場研究報告 第 27 号 平成元年 11 月, Bulletin of the Hokkaido Forestry Research Institute . No.27 . November, 1989〕

調査地および調査方法

調査地は美唄市光珠内の北海道立林業試験場実験林にある 1965 年 5 月植栽のトドマツ林である。調査箇所は丘陵の頂部平坦面と、そこから 50m 離れた南東向き傾斜 20 度の斜面上にある同一林分である。標高は 180 ~ 200 m で、土壌は適潤性褐色森林土 (BD 型) である。美唄における年降水量は 1,300mm で、このうちの半分は 5 ~ 10 月に降る。最深積雪は約 1.2m である。

調査木は優勢木 15 本で、7 本は頂部平坦面から、8 本は南東向き斜面からとった。直径生長が終了した 1988 年 9 月 27 日に伐採を行い胸高位置で円盤を採取し、1976 ~ 1988 年の年輪幅を 8 方位について、0.1mm 目盛りつきルーペを用い読みとった。

結 果

1 年輪幅の測定結果と年輪幅変化量の基準化

図 - 1 に、頂部平坦面と南東斜面における調査木の年輪幅の推移を示す。年輪幅の年次変動が両地点でともに認められ、またその変動に特定の傾向があるように見える。年輪幅が大きい年次は明瞭ではないが、相対的に小さい値を示す 1976, 1984, 1988 年が目立っている。年輪幅の減少は頂部平坦面と南東斜面の双方にみられる。なお、これらいずれの年にも夏期に乾燥し、1984 年 8 月には隣接した採草地の牧草が枯死した。

これらの年輪幅の変動を比較するために、次の基準化を行った。年輪幅の年次推移は、図 - 1 から 1976 ~ 1988 年の気候が同じならば直径の増大に伴い直線的に減少するものとみなし、各木について各年次の年輪幅 $D(i)$ を直線回帰した値 $E(i)$ からの隔たり率で示した。すなわち i 年次の偏差率は、

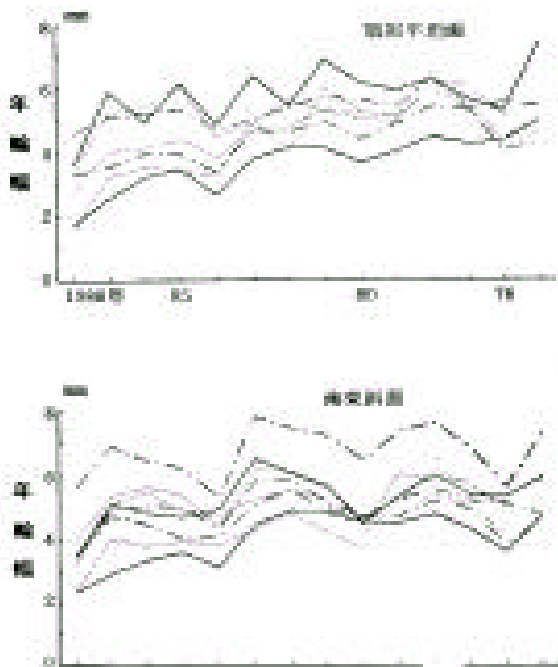


図 - 1 年輪幅の年次推移

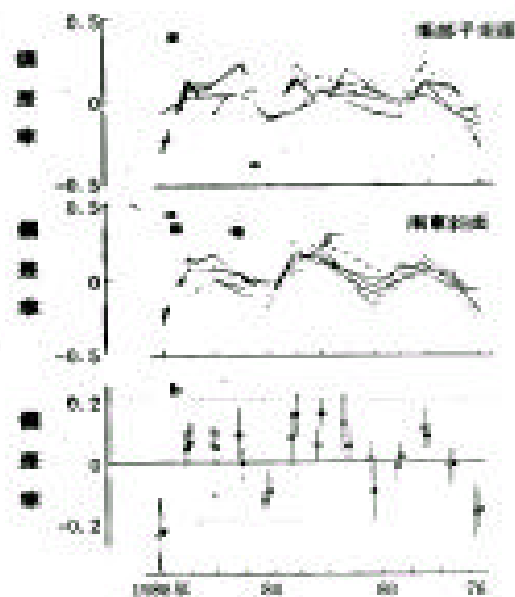


図 - 2 年輪幅偏差率の年次推移

白点：頂部平坦面，黒点：南東斜面

$V(i) = (E(i) - D(i)) / E(i)$ である。

図 - 2 a に各年次別の基準化された平均偏差率の変動を示し、図 - 2 b に斜面別の平均偏差率を標準偏差とともに示す。両図から、1976, 1984, 1988 年には、年輪幅の平均偏差率には斜面上の位置の違いによる差異が少なくかつ平年より 0.1 以上の落込みがみられ、生長の減退が大きかったことがわかる。このほかに、図 - 2 b から、1980 年の南東斜面における生長の低下と、1977, 1979 年における生長の相対的な低下がみられる。1980 年には斜面上の位置の違いによる生長の差異が比較的大きく、先の 3 年の事例とは異なっている。一方、年輪幅平均偏差率が約 0.1 以上の年次については、地形上の位置の違いによる差異の小さい 1978 年のほか、その差異がやや大きい 1981 ~ 1983 年があげられる。しかし、これらの位置の違いによる偏差率の差異には一定の傾向がみられないので、以下では両者を区別せず平均して論議する。

2 気候因子と年輪幅変動の関係

各月の気候因子と年輪幅偏差率との単相関を表 - 1 に示す。表から、対象とした期間中の月平均気温および各月の中旬間の降水量と年輪幅偏差率との間に有意な相関関係は認められない。しかし 7 月の降水量ならびに前年の 9 月・10 月の日照時間の 2 因子との間に有意な正の相関関係が認められた(表 - 1, 図 - 3, 図 - 4)。なお、この 2 因子と年輪幅偏差率との重相関係数は 0.764 であり、変動の 58% を説明した。

表 - 1 気候因子と年輪幅偏差率の単相関表 : 5%水準 : 1%水準で有意

項目	5月	6月	7月	8月	9月	前年 9+10月	同 10月	同 9.5 - 10.14
平均気温	-0.429	0.019	0.066	0.037	-0.288	-0.253	-0.026	-
日照時間	-0.196	0.133	-0.3	-0.036	0.433	0.612	0.433	-
降水量	0.217	-0.355	**0.724	0.063	0.346	-0.121	0.248	-
同上中旬間	0.072	0.385	0.542	-0.192	0.225	-	-	-0.333

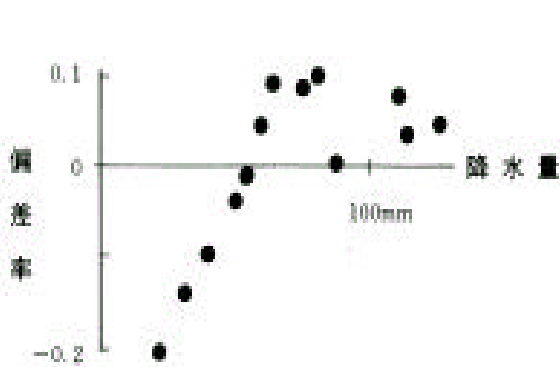


図 - 3 7月の降水量と年輪幅偏差率の関係

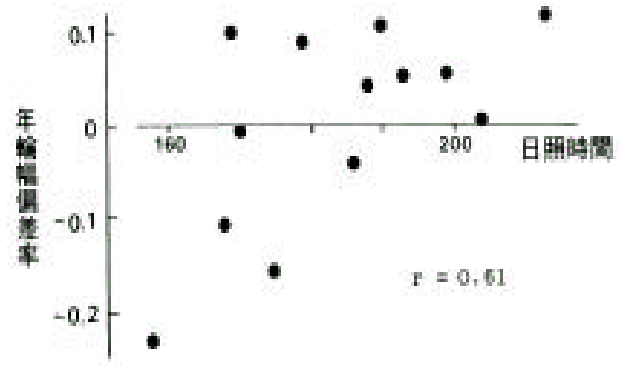


図 - 4 前年 9 月・10 月の平均日照時間と年輪幅偏差率の関係

また 7 月の降水量と年輪幅偏差率との関係から (図 - 4), 7 月の降水量が 60mm 以下の年には直径生長量が平年値を下回るようである。一方、表 - 1 下欄に示す各月 15 日から翌月 14 日までの 1 ヶ月集計による場合には有意な相関がみられず、1 ヶ月降水量と年輪幅偏差率との相関関係は不安定であると推測される。

3 日降水量データによる月別土壤水分不足日数の概算

上に述べた年輪幅の年次変動の多くの部分が、土壤水分の変動によって起こるとする作業仮説をたてた。すなわち、ある月の年輪幅の生長減退量は土壤水分の不足日数に比例するとみなし、これを求める

表 - 2 土壌水分不足日数の推定プログラム

```

20      DEP = 600 : 'soil depth in mm
40      WC = .33 : 'pF2.7 土壌水分容積%
50      W ( 1 ) = 45 : '5 月 1 日 pF 1 の土壌水分容積%
110     FOR T=1 TO 184 : '5 月 1 日からの日数
115     READ Q(T) : IF Q ( T ) >0 THEN R ( T ) = 1.39*Q ( T ) +2.47 : ' 調査地降水量に変換
120     RR ( T ) = R ( T ) - 5 : IF RR ( T ) <0 THEN RR ( T ) = 0 : ' RR = 有効降雨
130     IF T>61 AND T<124 THEN A=5 ELSE A=4 : ' 月別蒸発散量
131     IF T<31 OR T>153 THEN A=3: ' 5月・10月=3mm,6月・9月=4mm,7月・8月=5mm
132     EV=A
140     IF R ( T ) >5 THEN CUT=5 ELSE CUT=R(T) : ' 樹冠上の水量
145     IF R ( T ) >0 THEN EV = EV-CUT ELSE EV=EV : ' ev = 土からの蒸発散量
146     IF EV<0 THEN K(T+1)=EV ELSE K(T+1)=0:IF EV<0 THEN EV=0:
        ' 樹冠上の持越水分を翌日に配分
160     W(T+1)=W ( T ) - ( EV - RR ( T ) +K ( T )) /DEP : IF W ( T+1 ) >.45 THEN W ( T+1 ) = .45 :
        ' 含水率の計算と最大水分の設定
180     IF W ( T+1 ) <WC THEN Q = 1 : QQ = Q+QQ : IF W ( T+1 ) <WC THEN W ( T+1 ) = WC :
        ' 水分不足日数計測と乾燥限界
190     IF T= 30 OR T= 45 OR T=60 OR T=75 OR T=91 OR T=106 OR T= 122 OR T=138
        OR T=152 OR T= 167 OR T=183 THEN PRINT USING "###"; T+1 ; : PRINT W ( T+1 )
        , QQ , : ' Print.out
191     NEXT T
    
```

ために月別の不足日数を次により概算した(表 - 2)。

土壌水分の容量：隣接するトドマツ林における土壌孔隙分析結果から、60 cm までの土壌層の pF 1 - 2.7 の孔隙量は 72 mm である。pF1 より大きい孔隙中の水分は動きが非常に速いとして無視した。

調査地における降水量の推定：図 - 5 に 1987, 1988 年に調査地付近で測定した降水量 P と美唄におけるアメダスデータ Am との関係を示す。Am > 0 のとき、 $P = 1.39 \times Am + 2.5$ の関係から、1976 ~ 1986 年の調査現地の降水量、ならびに 1987, 1988 年の欠測量を補完した。

日蒸発散量：5月の平均蒸発散量を 3 mm、6月・9月を 4 mm、7月・8月を 5 mm とおく。

降水の遮断量：トドマツの閉鎖林冠による降水一回の遮断量の上限を 5 mm とおく。遮断量は蒸発散に使われる。雪解け日：5月1日とおき、この時の土壌水分を pF1 (45 容積%) とする。土壌下層および斜面上部からの水分の補給は無いものとした。

土壌が乾燥してくると、水分の減少速度が遅くなり、またその状態で降水により補給された水分は、移動しにくい水になる部分もあるが、ここでは優先的に蒸発散に使われると考えて、土壌水分の減少範囲を pF2.7、容積率 33% までとした。

土壌水分不足日数：以上の仮定により、表 - 2 のプログラムを組み、融雪時点の土壌水分から開始して、日々の 60 cm 深までの平均土壌水分を求め、土壌毛管水の移動がほぼ停止する pF 2.7 より乾燥した日数を土壌水分不足日として月別に集計した(表 - 3)。付近の尾根型緩斜面上部の深さ 60 cm において 1987, 1988 年に測定した pF 2.7 より乾燥した日数と上の推定値との関係は図 - 6 となり、上の仮定による近似が可能であるとみなした。なお、表から土壌の乾燥は5月中には起きず、6月に入って起

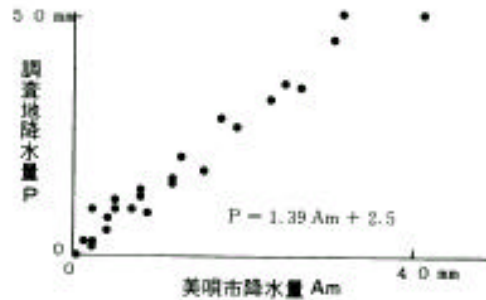


図 - 5 調査地における降水量の推定

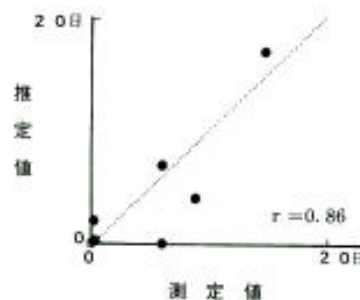


図 - 6 土壌水分不足日数の推定値と測定値の関係

きること，また7月・8月に乾燥が起きやすいことがわかる。

表 - 3 土壌水分不足日数の推定値

年次							'88, '87年は実測値			
	5月	6月	7月	8月	9月	10月	5/15-6/14	6/15-7/14	7/15-8/14	8/15-9/14
1988	0	0	11	13	0	0	0	0	15	9
1987	0	5	1	0	6	0	0	6	0	0
1986	0	3	10	6	3	0	0	12	6	4
1985	0	12	3	11	0	0	0	15	3	8
1984	0	3	14	23	10	0	3	4	24	16
1983	0	0	0	4	0	0	0	0	0	4
1982	0	0	12	9	0	0	0	12	9	0
1981	0	0	0	2	0	0	0	0	2	0
1980	0	0	3	14	0	0	0	0	17	0
1979	0	0	2	10	0	0	0	0	2	10
1978	0	0	1	3	0	0	0	0	4	0
1977	0	8	13	1	3	0	0	10	13	3
1976	0	0	15	10	8	0	0	5	16	12
1975	0	0	8	0	0	0	0	8	0	0

4 年輪幅の年変動と土壌水分不足日数の関係

各月の土壌水分不足日数と年輪幅偏差率との単相関を表 - 4 に示す。7月半ばまでの土壌乾燥は相関が低く，また，9月以後は影響しないようである。これらには含まれた7月中旬から8月下旬までの土壌水分不足日数と年輪偏差率の関係は明らかで $r = -0.84$ を示し，変動の 71% を説明した。この関係を図 - 7 に示す。両者には，直線関係がみられ，不足日数と生長減退量が比例するとした作業仮説を検証できた。また，表 - 4 下欄に示すように，前年各時期の土壌水分不足日数は，年輪幅偏差率との間に有意な相関を示さなかった。

7月15日～8月31日の不足日数と，先に示した前年9月・10月の平均日照時間とを組み合わせた重相関係数は0.856を示し，変動の73%を説明した。

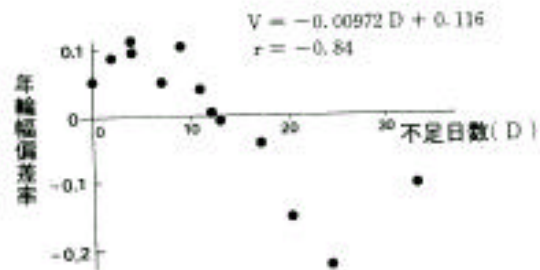


図 - 7 7月15日～8月31日の土壌水分不足日数と年輪幅偏差率の関係

表 - 4 土壌水分不足日数と年輪幅偏差率の単相関表

項 目								
	6月	7月	8月	9月	7+8月	8+9月	7+8+9月	7/15-9/14
当 年 月 別	0.096	*-0.605	*-0.606	-0.418	** -0.712	*-0.651	*-0.67	-
同 上 中 旬 間	0.203	** -0.748		*-0.676		-	-	** -0.822
前 年 月 別	0.115	0.323	0.398	-0.132	0.455	0.25	0.25	-
同 上 中 旬 間	0.169	0.516	0.083	-0.544	-	-	-	0.387

*は5%水準で，**は1%水準で有意

考 察

林木の生長は生育期の全期間およびその前年の気候の影響を何らかの形で受けるはずである。また、種子の豊作や、食葉性昆虫の大発生など生物的条件によっても肥大生長が減退するが、本林分はこれらの影響を受けてこなかった。

FRIEND and HAFLEY (1989) は、温帯適潤の気候下で生長の盛んな時期に制限的条件が起きにくい所では、生長初期および後期の気候条件によって生長が影響されやすいと述べている。初めに得た前年9月・10月の平均日照時間との正の相関関係は、彼らの説に一致する。この時期の日照は翌年の生長の初期に使われる貯蔵物質の生産に関連するとみられ、妥当な結果となっている。しかし彼らがみた春期の平均気温との関連はみられなかった。また、生長の最盛期の7月の降水量の不足は生長の減退と関連深いことが示され、調査地の気候変動の大きなことが示された。生長に関する降水量の本質的意義は土壌水分の補給にあると考えられるが、月降水量だけではその月の土壌水分の状況を的確に示しえず、生長段階との関連を論議し難い。ここでは土壌水分が不足する日数を時期別に推定して検討した。

根系は深さとともに漸減し、また個体および微地形で根系の発達する深さは異なると予想されるので、林木の生長に影響を与える土壌水分の状況を特定するのは困難であると思われる。ここで用いた土壌水分不足日数は、土壌乾燥状態を少なくとも相対値として示していると考えられるので、北海道においても乾燥気候の年には年輪生長の減退がみられると結論づけられる。土壌乾燥の起こる季節とその影響の現れ方について次のことが推測された。1) 土壌が乾燥状態になるのは6月以後である。2) 6月から7月中旬の土壌水分の不足日数はその年の直径生長量と無関係である。3) 7月中旬から8月下旬までの土壌乾燥は、その年の直径生長量を減退させる。4) 前年の土壌乾燥は翌年の直径生長量と無関係である。

これらの季節経過と、直径生長段階および新梢主軸の伸長段階との対応を図-8に示す。この図は、年輪幅を調べた個体に設置したアルミバンドデンドロメータにより測定した直径生長の経過と、各木の頂部に固定尺をとりつけて測定した上長生長の経過とを示し、上記の単相関の結果を併記したものである。図から、その年の直径生長に影響を与えない7月中旬までの間に、直径生長の約半分が終わっている

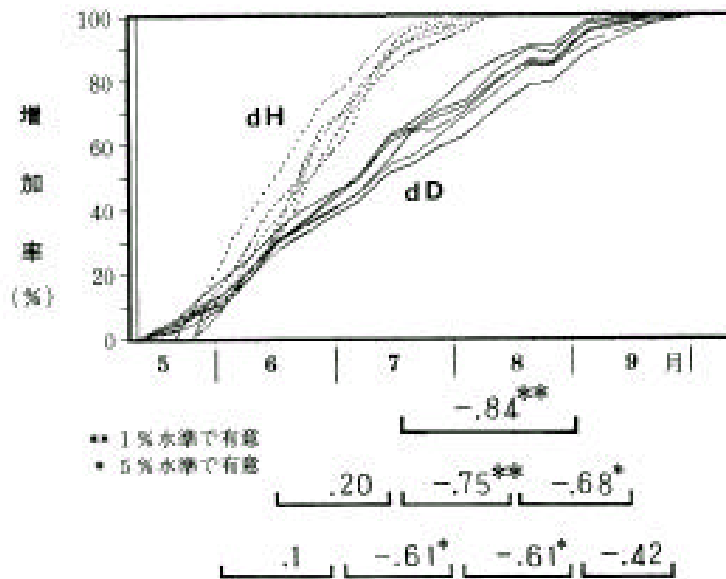


図-8 直径 (dD) および上長生長 (dH) の季節経過、ならびに土壌水分不足日数と年輪幅偏差率の相関係数

る。土壌水分不足日数が1%有意水準で相関が認められた7月中旬以後は、直径生長の後半期に当たっており、土壌乾燥は直径生長の後半に影響を与えていることがわかる。7月中旬以前の土壌乾燥が生長を減退させなかったことについての確認を、ポット試験等により行う必要がある。

この現象の理由としては、次の可能性が考えられる。マツ属では生長期の前半には前年の貯蔵物質に依存しているといわれる(大島ほか, 1977)が、トドマツにおいても同様であるとすれば、この時期の直径生長は当年の光合成生産物量の影響を受け難いのかも知れない。また、島地(1979)は、*Pinus resinosa* を用いた LARSON の研究を紹介し、枝条の展開が活発に行われている時期には生長ホルモンである IAA が盛んに合成され、その結果直径の大きい仮導管細胞が造られ、また光合成産物量の影響は少ないと述べている。図-8に示すように、7月中旬には主軸の伸長は急速に減退しており、体内の IAA の量がこの時期を境に減少する結果、土壌乾燥の影響を受けるようになると思われる。

わが国における生長期間の気候は湿潤であり、土壌乾燥による生長への影響についての研究は、異なる立地間の地形あるいは地形と関係深い土壌型の観点から行われてきた。その結果、多くの樹種についてやや乾いた土壌よりも適潤性で生長量が大きいことが知られてきた。

土壌乾燥と直径生長との関係を検討する場合、土壌水分データがなく、降水量が代用されることが多い。しかし、土壌が降雨により飽和すれば、その後少なくとも数週間は無降水でも土壌乾燥は起こらない。また、降水量の月計では、降水の頻度と量を把握できないため、月間の降水量が多くても土壌乾燥がある期間起きている可能性があり、解析手段として大きな欠陥がある。しかしこの方法によって数例の検討が行われてきた。野田ほか(1986)は関西地方のスギ、ヒノキを用いて月別降水量と年輪幅の重相関により、前年6月から当年4月には正の寄与があること、当年6~9月には負の寄与があること、さらに前年の影響は有意ではないと報告したが、生物的な意味についてはふれていない。また、鈴木(1987)は神奈川県下のスギの年輪幅の年次変化と月別降水量および異常乾燥年との対応をみたが、明瞭な関係を得なかった。本報告で得たような、1か月間の降水量あるいは土壌水分不足日数が年輪幅の変動の過半を説明した例は、わが国ではおそらく初めてであり、これは北海道の気候が本州以南と異なることによるのであろう。

一方、海外においては多数の報告があり、古くはレオナルド・ダ・ビンチが乾燥気候下にあるイタリアにおいて降水量との相関をみたといわれる(末田, 1986)。近年においても、米国には林木の年次的生長変動と気候との関連について数多くの報告がある。

FRITTS(1976)は、季節的に乾燥する米国アリゾナ州南部において *Pinus ponderosa* の年輪幅が隣接する年次で45%減少した例を示した。このほか、いくつかの樹種の年輪幅変化と気候因子の関連を統計的に検討し、年輪幅が前年および前前年の土壌乾燥の影響を受け、特に *Fagus grandifolia* では前年の影響が生長当年と同程度であったと述べている。

BASSETT(1964)は、米国南部アーカンソー(年平均降水量1,300mm)の *Pinus taeda* と *Pinus echinata* の混交林における断面積合計の増加が、表層土壌水分の乾燥日数および $1 - P \cdot T$ (ただし、P:蒸発散能(インチ), T:土壌水分(atm))で表された生長当年の growth day unit との間に、極めて高い直線関係をみだし、生長変動の97%が説明される例を示した。また乾燥が続いたある3年間の生長量が他の1/3に低下したと述べた。

ZAHNER(1967)は、ミシガン州の21年生 *Pinus resinosa* の造林地で、髓から2年目の年輪幅の年変動が30%以上に及ぶこと、またその変動が生長当年の6月1日~9月30日の土壌水分不足日数と直線関係にあり、 $r = -0.83$ を示すこと、さらに、前年の6~9月の土壌乾燥の年輪生長への寄与が生長当年のその1/5と小さく、前年の気候が当年生長に及ぼす影響は一般に少ないと述べている。

ZAHNER (1963) はまた、土壌の乾燥が形成層の細胞分裂、細胞の肥大を抑制すること、夏材の形成期の長雨は春材に似た細胞を長い期間つくり年輪幅を広くすること、またこれらが土壌乾燥による生長ホルモンの変化によって起こると述べている。

これらに比べると、今回のトドマツ造林地の例では、年輪幅が平年と比べて10~20%減少する程度であった。また頻度も13年に3回であり、乾燥気候による生長減少は小さいと推察された。

一方、年輪幅に与える影響が本報告よりも小さい例として、FRIEND and HAFLEY (1989) は、平均気温15℃で年降水量1200mmが均等に降るノースカロライナにおいては、生長の中期における気候の影響は小さいが、生長の前期、後期に影響を受け、それらが年輪幅変動の20~40%を説明したと述べている。彼らは *Pinus taeda* および *P. echinata* の50年間の年輪幅変動を調べ、9~11月の降水日数がマイナスの寄与を、3~5月の積算気温および9月の推定土壌水分が正の寄与をすることをみた。

本報告の結果は、以上の諸報告と矛盾するものではない。本調査は比較的乾燥しやすい頂部平坦面および南東斜面で行われ、一般の地形上では乾燥気候の影響はこれよりもやや少ないと考えられる。

しかし、土壌乾燥に敏感な樹種、あるいはさらに排水性の良い土性または地形の場合には、その影響が大きくなると考えられる。今後も水分環境の異なる地形、地域におけるいろいろな樹種について調査する必要がある。

文 献

- BASSET, J, R. 1964 Tree growth as affected by soil moisture availability. Soil sci. soc. proc. 28 : 436 - 438
- FRIEND L.A. and HAFLEY L. W. 1989 Climatic limitations to growth in loblolly and shortleaf pine : A dendroclimatological approach. For. Ecol. Manage. 26: 113 - 122
- ERITTS H. C., 1976 Tree rings and climate. Academic press 567p
- 大島誠一・田中弘之・藤本博次・中井 勇1977 マツ属の肥大生長の季節変化. 京大演報 49 : 20 - 29
- 野田真人・東村武信・島地 謙1986 大気汚染の指標としての林木の肥大生長変動に関する研究. 第1回環境科学シンポジウム講演報告集 258 - 259
- SAND, Y., MATAND, T. and UJIHARA, A. 1977 Growth of *Pinus pumila* and climate fluctuation in Japan. Nature 266 (10): 159 - 161
- 島地 謙 1979 樹木の形成層活動. 木材研究資料 13 : 35 - 46
- 末田達彦 1986 年輪年代学. 北海道の自然 26 : 41 - 47
- 鈴木 清・尾岸諒一 1987 大気汚染と樹木衰退に関する研究(1) スギの樹勢推移と年輪幅の変動. 神奈川林試研報 14 : 15 - 25
- ZAHNER, R. 1963 Internal moisture stress and wood formation in conifers. Forest Product Journal 240 - 247
- and DONNELLY, J.R. 1967 Refining correlations of water deficits and radial growth in young Red Pine. Ecology 48(4):525 - 530