

樹木の生長率と気候変動

—日本東北の部—

大内 正 夫

Masao ŌUTI : The Relation between the Growth Rate of Tree and Climatic
Changes in the North-eastern Section of Japan.

Received August 17, 1964

まえがき； 日本の気候変動の資料として、測器時代の観測記録だけを用いると、せいぜい過去90年の範囲に限られてしまう。将来の気候変動の予測の精度は過去の観測記録の期間が長い程、周期性と傾向の判定が容易になるので益々増大する。測器による気象資料より精度は劣るが、その観測資料のない過去数百年ないし数千年の気候変動を表わす良好な資料としては、樹木の生長率がある。それは特に、高緯度における気温、乾燥地域における降水量の良い指標となることが認められている。しかし中緯度における樹木の生長率と気候変動との関係は、かなり複雑であり、良い標本の選定と洗練された解析が要求されている。

さきに、速水・大内による⁽¹⁾「北太平洋亜熱帯高気圧の変動と北陸の降雪」なる論文において、山形県産の樹令約320年のケヤキの生長率は、極めて見事な100年の周期的変動を表わし、それが台湾太平洋産の紅松の生長率⁽²⁾⁽³⁾とは逆位相で変化していることを明らかにした。

今回はそのケヤキの生長率について、まず生長率そのものの特性を調べ、次にそれと山形の各種気象要素とを比較検討した。その結果、ケヤキの生長率は正規分布で表わされるような度数分布をもつこと、山形の気象要素の中で、最も生長率との対応の良いものは東京—山形の夏の平均気圧差で、その値が $0.1mb$ 増加する毎に年生長率は約 $0.5mm$ 減少することなどを見出した。またその気圧差の生長率に及ぼす効果は、気温、降水量を含むその他の気象要素の総合効果の約3倍と算定した。なお稲の生長の良否の目安となる東北六県の水の反当収量が山形の夏の平均気温と極めて良

い対応があるのに反し、ケヤキの生長率とその気温とは相当に長い期間にわたって負相関を示しているが、その理由も考察した。気候変動という見地から、このケヤキの生長率には、上述の100年周期の外、約20年の周期的変動も明瞭に現われている点などから考えると、この生長率の標本は、前述の紅松と同様、資料価値が十分あると思われる。それでその生長率と気候要素の外、北太平洋高気圧の動向、太陽黒点数および台湾の紅松の生長率などと、比較検討した結果についても詳述する。

I 山形県産ケヤキの生長率

用いた樹木の標本は前出の⁽¹⁾日本東北部にある山形県産のケヤキ (*Zelkova serrata* (Thunb.) Makino) である。その標本は樹令323年 (1629—1951 A. D.) で直径約 $120cm$ 、厚さ約 $10cm$ の輪切れのものである。この標本の生長度は極めて良好で **Plate** に示すように、その年輪は極めて明瞭である。生長率の測定は前述の太平洋産紅松の場合と同じ方法でコンパレーターを用いて行ない、矢張り最も生長率の良い方向を代表測線に選び、年輪巾は $0.05mm$ までの精度で測った。その測定値を **Appendix** に示す。またその生長率のグラフは Fig. 1 に示す通りで、この実測値曲線は紅松のように、経年的な減衰傾向を示さないで、生長率の補正⁽²⁾は行なわない。以下の考察の便宜上、前論文と同じ記号を用いる。即ち生長率の実測値を 0_g と名づけ、 0_g を5年で移動平均 (以下 RM と略す) したものを 1_g 、 1_g を11年でRMしたものを 2_g 、 2_g を25年でRMしたものを 3_g と名づけ、 0_g から 1_g を引いたものを

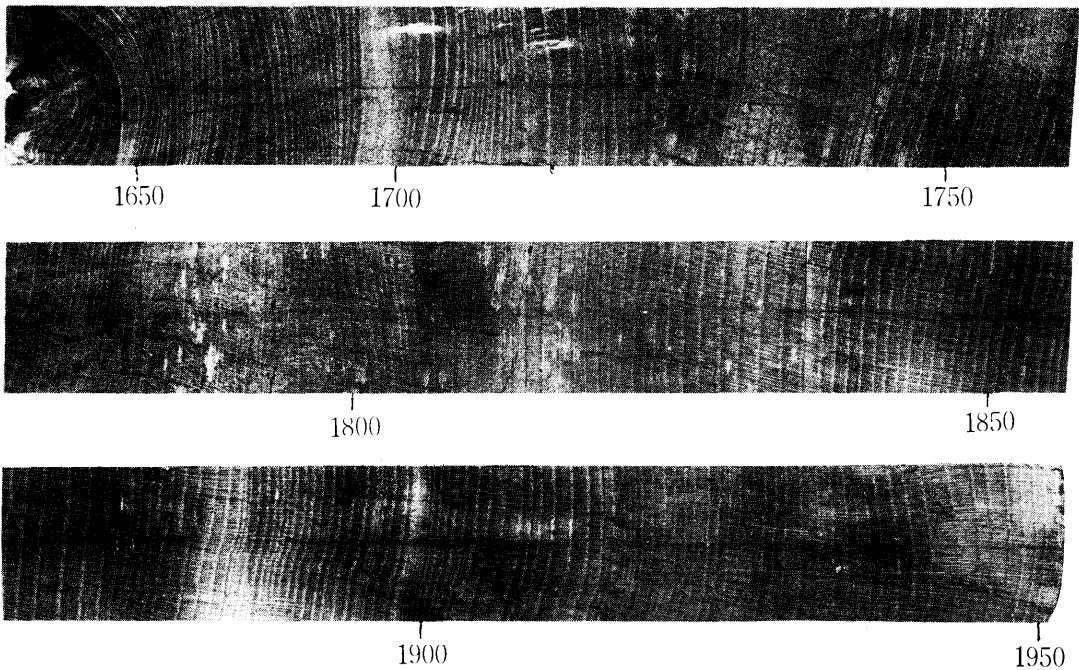


Plate. Photomicrograph of one complete set of tree rings of Yamagata-grown *Zelkova serrata*.

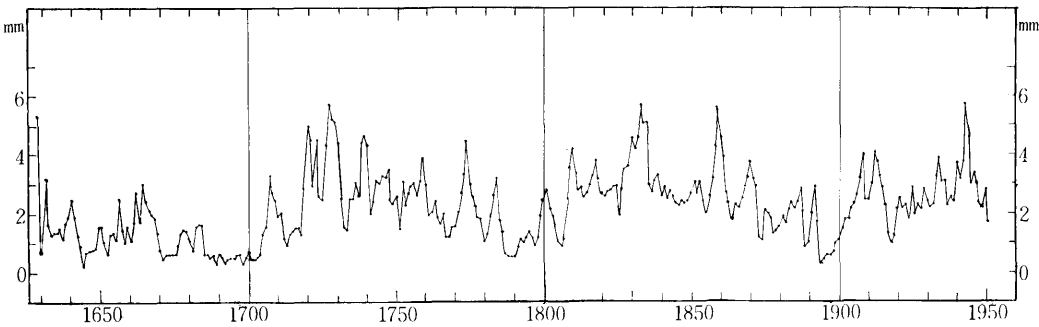


Fig. 1. Annual growth rate 0_j of Yamagata-grown *Zelkova serrata* measured for natural growth rate.

$[0_g-1_g]$, これを更に3年でRMしたものを $[0_g-1_g]^*$ とし, また $[1_g-2_g]$ および $[2_g-3_g]$ を求めた. これらのグラフは Fig. 2 および Fig. 3 に示す通りである.

これらのRMの意義と特性は前論文で述べたので省

略するが, 以上のグラフよりこのケヤキの生長率は, 実際に幾つかの明瞭な周期に分離されている. 即ち生長率 $[0_g-1_g]^*$, $[1_g-2_g]$, $[2_g-3_g]$ および 3_g の全生存期間の平均の周期は, その曲線の谷の方の間隔から求めると, それぞれ6.2年, 10.0年, 20.7年および100

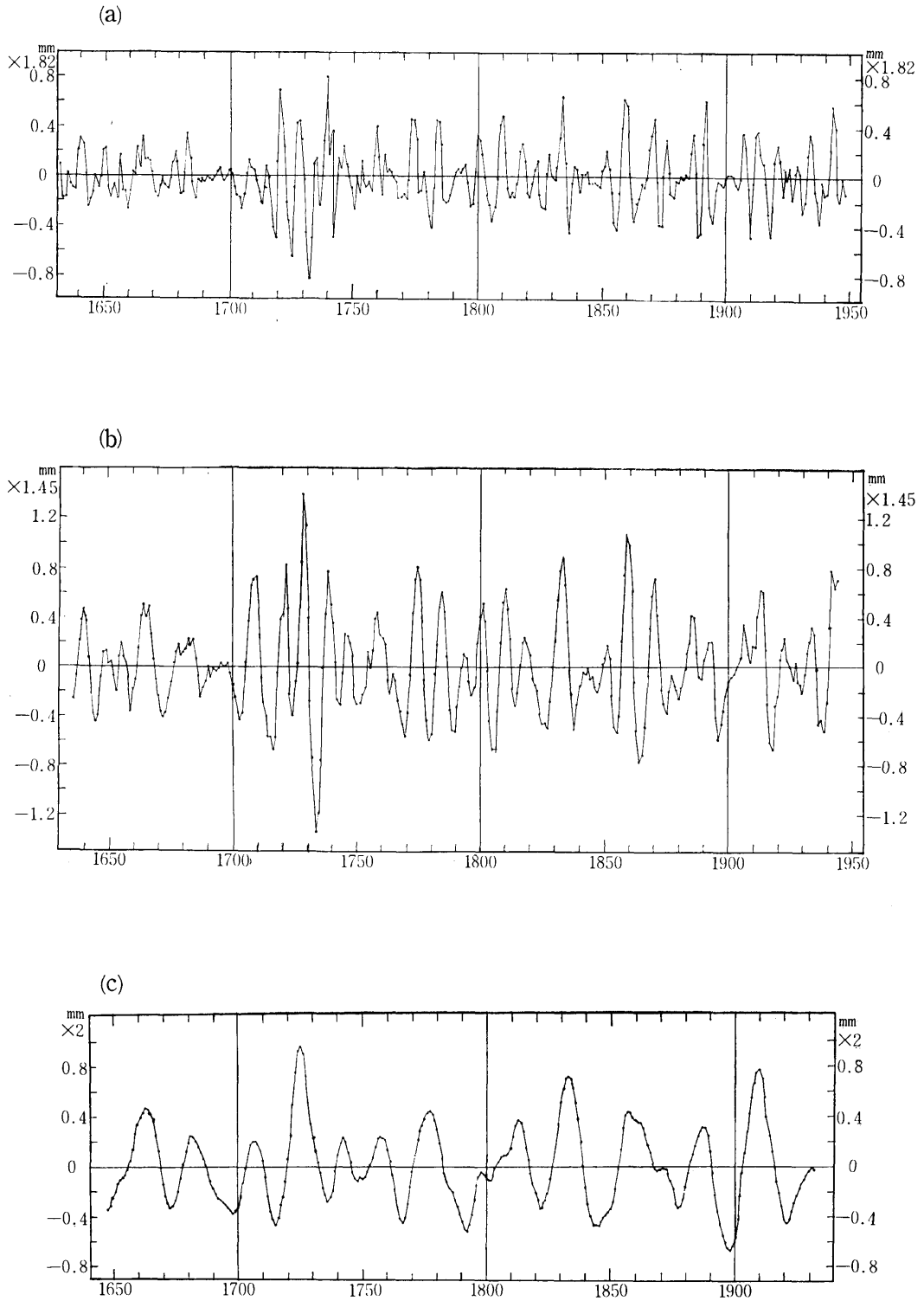


Fig. 2. Graph of growth rate : (a) $[0_g-1_g]^*$; (b) $[1_g-2_g]$; (c) $[2_g-3_g]$.

Note : Denotation of 1_g , 2_g , 3_g , is given in the illustration of Fig. 3. $[0_g-1_g]^*$ denotes 3 years' moving average of $[0_g-1_g]$. $[0_g-1_g]$ is 0_g minus 1_g . $[1_g-2_g]$ is 1_g minus 2_g , and so on.

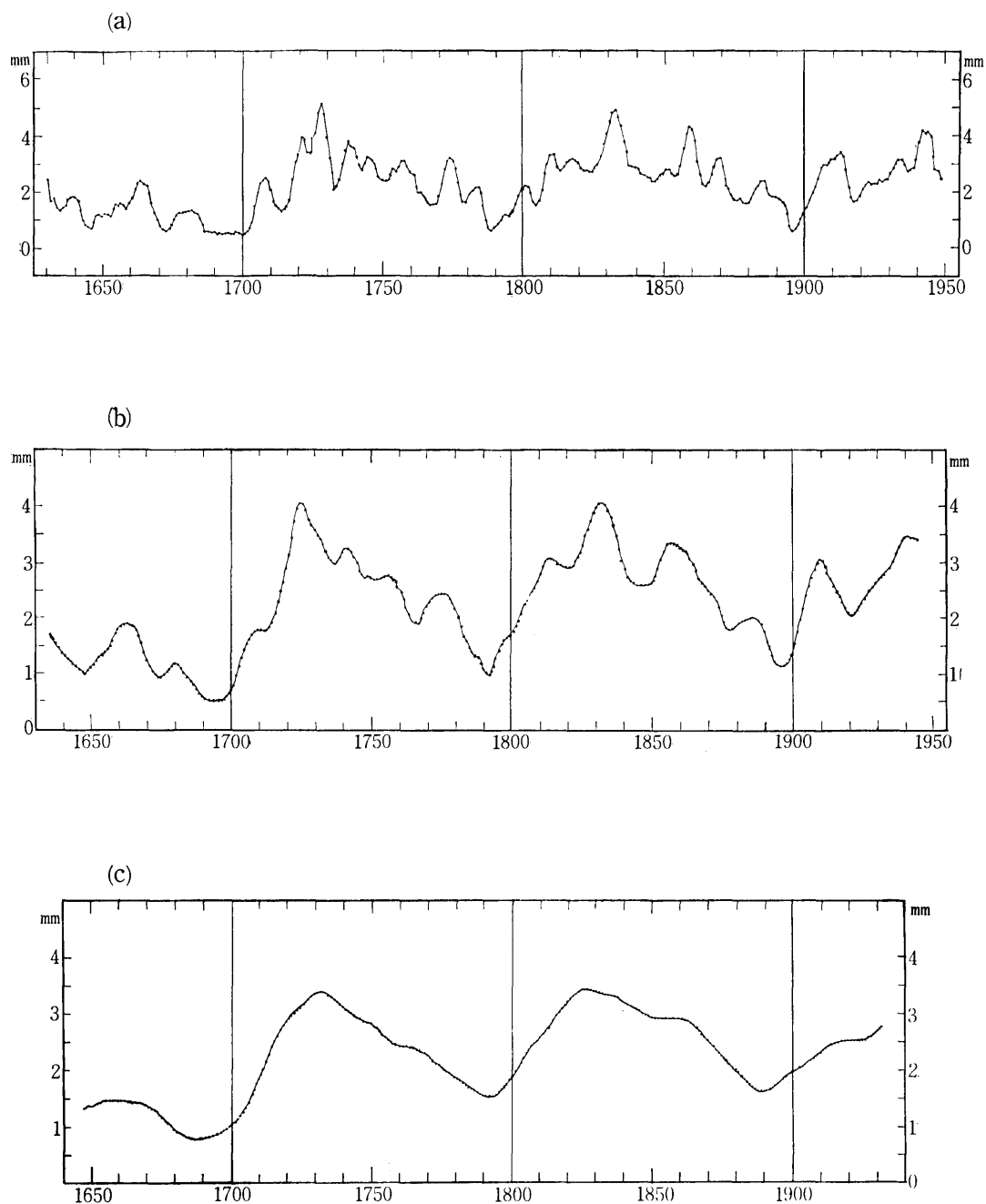


Fig. 3. Graph of growth rate : (a) 1_g (=5 years' moving average of 0_g) ;
(b) 2_g (=11 years' moving average of 1_g) ; (c) 3_g (=25 years' moving average of 2_g).

年である。

次にこのケヤキの生長率が全生存期間にどのような生長の仕方をしたかを統計的方法で調べた。即ち年生長率を 0.5mm 毎の階級に分けて、各々の度数 f_i を求

め、そのヒストグラムを図示すると Fig. 4 (a) の通りである。図中のほぼ中央の縦の破線は全生存期間 $N=323$ 年の平均値 $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k x_i f_i = 2.19\text{mm}$ である。また点線はその度数多角形である。これを見ると生長

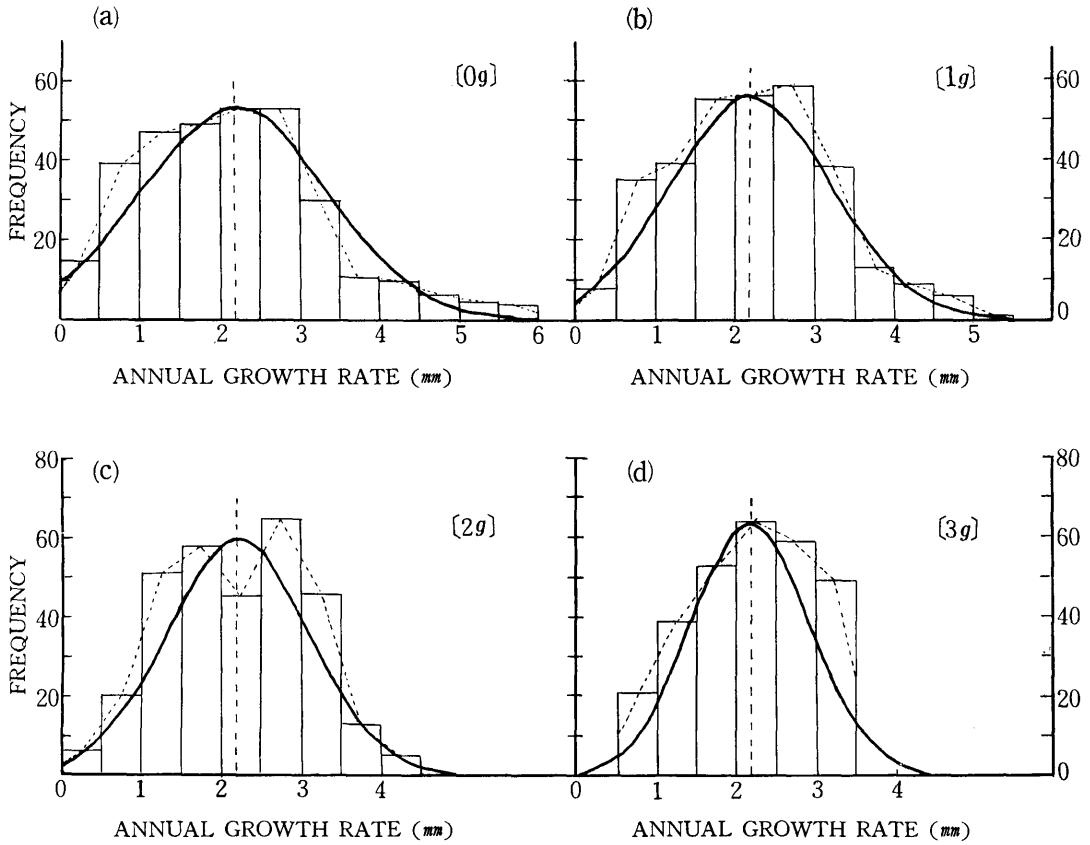
Fig. 4. Histogram of growth rate : (a) $0g$; (b) $1g$; (c) $2g$; (d) $3g$.

Table 1

Rank(mm)	Frequency				Relative frequency			
	$[0g]$	$[1g]$	$[2g]$	$[3g]$	$[0g]$	$[1g]$	$[2g]$	$[3g]$
0 ~ 0.5	15	8	6	0	0.046	0.025	0.019	0
0.51 ~ 1.0	39	35	20	21	0.121	0.110	0.065	0.074
1.01 ~ 1.5	47	39	51	39	0.146	0.122	0.165	0.137
1.51 ~ 2.0	49	55	58	53	0.152	0.172	0.188	0.186
2.01 ~ 2.5	53	56	45	64	0.164	0.176	0.146	0.224
2.51 ~ 3.0	53	59	65	59	0.164	0.185	0.210	0.207
3.01 ~ 3.5	30	38	46	49	0.093	0.119	0.149	0.172
3.51 ~ 4.0	11	13	13		0.034	0.041	0.042	
4.01 ~ 4.5	10	9	5		0.031	0.028	0.016	
4.51 ~ 5.0	7	6			0.022	0.019		
5.01 ~ 5.5	5	1			0.015	0.003		
5.51 ~ 6.0	4				0.012			
Total	323	319	309	285	1.000	1.000	1.000	1.000
Mean (mm)	2.19	2.21	2.20	2.19				
Standard deviation (mm)	1.18	1.01	0.89	0.75				
Variance (mm) ²	1.40	1.03	0.79	0.57				
Coefficient of variation(%)	54	46	40	34				

率はほぼ正規度数分布をしているように見えるので、 察する。

その標準偏差 $\sigma = \sqrt{-\frac{1}{N} \sum_i (x_i - \bar{x})^2 f_i} = 1.18 \text{ mm}$

を求めた。そして $\bar{x}$ と σ から正規分布曲線

$\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}$ を求めて図示すると同

図の太い曲線となり、生長率は近似的にこの曲線で表わされるように見える。

これは正規分布の定義式から $\bar{x} - \sigma = 1.01 \text{ mm}$ と、 $\bar{x} + \sigma = 3.37 \text{ mm}$ との区間に全測定値の68%が含まれていることを意味するが、他方実際に、Table 1 の相対度数から求めた同じ区間の確率もほぼ同じ値になることから、その適合度の大略が確かめられる。

また生長率の測定値が移動平均によってどのようにその度数分布が変わるかを 見るために、上述の 1_g , 2_g , 3_g についてそれを求めた。それらのヒストグラムは Fig. 4 (b), (c), (d) の通りである。なおそれらの数値は Table 1 に要約してある。これを見ると移動平均によって、その生長率の平均値は殆んど変わらず $2.19 \sim 2.21 \text{ mm}$ でその偏差は僅かに 0.01% である。またその分布型も殆んど変わらず、一般にほぼ正規度数分布で表わされる。しかし標準偏差と平均値の比、いわゆる変動係数 $V = \frac{\sigma}{\bar{x}}$ は、Table 1 に示すように、測定値 0_g は54%であるが、移動平均を行なう回数が多くなるにつれて次第に小さく、 3_g では34%になっている。なおケヤキの生長率に対する統計的な考え方と周期法による確定的な方法との得失については後節で考

II ケヤキの生長率と山形の気象要素

樹木の生長率が気候の影響を受けることは一般に認められているが、その効果は場所により、時によって極めて区々であるため一定の法則が見出されていない。それで気象要素として普通一般に観測されている気温、降水量、雲量（および日照時間）並びに気圧差と前述の山形産ケヤキの生長率を比較してみた。これらの気象要素の資料は、いずれも山形管区气象台（38. $15'N$, $140^\circ 21'E$, 海拔 151 m ）における1890年より1960年までの観測値の夏期（6, 7, 8月）3ヶ月の月平均値を用いた。以下各気象要素別に両者の比較について述べる。

(1) 気温； 樹木の年輪の形成が四季の寒暖によって初めて行なわれるものであり、暖候期にその生長率が大きいから、まず山形の夏期の気温と比較してみる。その気温の観測値を 0_t とし、これを5年でRMしたものを 1_t , 1_t を11年でRMしたものを 2_t とする。以下の気象要素の記号は前述の生長率で用いた様式と同じで、ただその添字のみを変える。かくして $[0_t - 1_t]^*$ およびその3年のRMの $[0_t - 1_t]^*$, $[1_t - 2_t]$ を求めてそれに対応するケヤキの生長率と比較すれば Fig. 5 の通りである。

さて、気象要素の観測開始以後のケヤキの生長率 $[0_g - 1_g]^*$, $[1_g - 2_g]$, $[2_g - 3_g]$ の各々の平均周期は、前

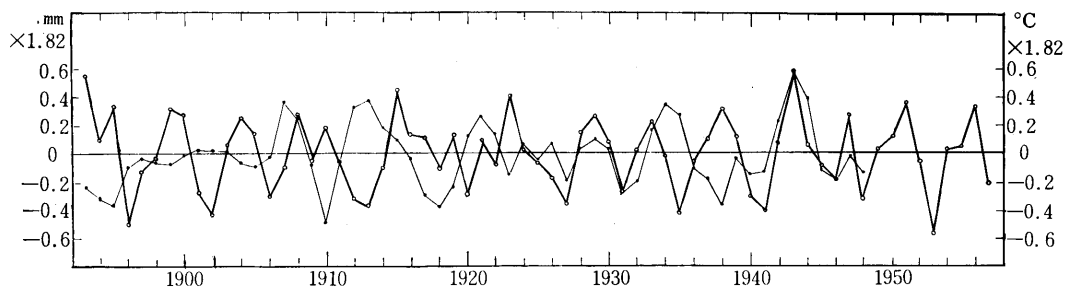


Fig. 5. (a) Thick line : Summer mean temperature $[0_t - 1_t]^*$ at Yamagata. Fine line : Growth rate $[0_g - 1_g]^*$.

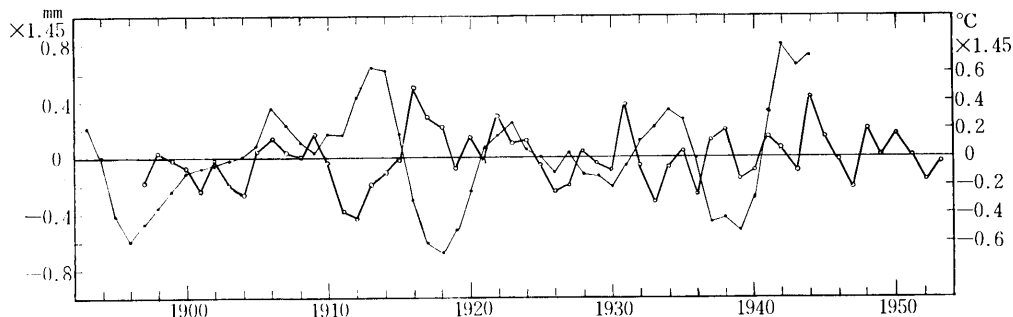


Fig. 5. (b) Thick line : Summer mean temperature $[1_t - 2_t]$ at Yamagata. Fine line : Growth rate $[1_g - 2_g]$.

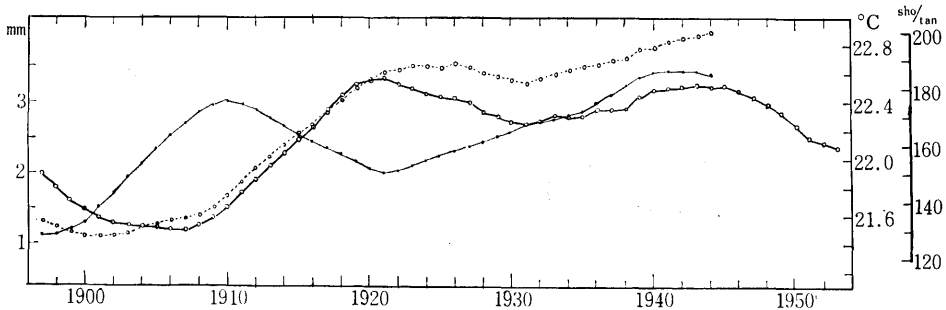


Fig. 5. (c) Thick line : Summer mean temperature $2t$ at Yamagata. Fine line : Growth rate $2g$. Dotted line : Mean yield of rice $2k$ (unit : $1.8 \ell / 10 a$) in 6 prefectures of the north-eastern section of Japan.

述のケヤキの全生存期間の平均周期とは多少異なり、それぞれ 5.0年, 10.7年, 20.3 年である。また $2g$ の周期は Fig. 3 (b) の谷と谷の間隔をとると 24年になる。

まず気温 $[0t-1t]^*$ と 5年周期の生長率 $[0g-1g]^*$ の比較であるが、これらは一見何等の関係がないように見える。しかしよく見ると 1921年, 1931年および 1941年と 10年毎に両者の位相の一致が認められる。気温 $[1t-2t]$ とこれに対応する約 10年周期の $[1g-2g]$ の比較のグラフから 1915年および 1935年を中心とする各々 10年間は、両者の対応は負相関のように見える。

次に $2t$ と前述の 24年周期の $2g$ との比較は Fig. 5 (c) に示すように、およそ 1940年以前の 40年以上の期間は気温が上昇すると、生長率は反対に減少する状況が極めて明らかである。しかしその後は気温と生長率とは共に上昇し、平行に変化している。

山形の夏期の気温には Fig. 5 (c) で明らかなように 24年の周期的変動があり、それが台湾の台北の夏期の平均気温に 7年おくれで全く平行に変動していることを先に報告したが、この山形の気温曲線の谷はケヤキの生長曲線より 10年おくれで平行に変化しているとも見ることが出来る。ただし 1940年以降は位相差は見えない。

なお山形の気温を春期、秋期、冬期および暖候期 (5月～10月) の各種の月平均気温をとって、それに対応するケヤキの生長率と比較したが、いずれも夏期の場合とはほぼ同様の結果が見られた (図は省略)。

また $2t$ と $2g$ の相関図を描けば Fig. 6 の通りで、これを見ると、経年的に両者の関係が変化しており、1900年頃から大体 10年毎に転換が行なわれているように見えるし、24年周期の存在が推定できる。また年生長率が約 3 mm 以下では負相関であるが、それ以上では正相関になっている。これは最も生長率の良好な時期には一般に気温が高いことを意味するのか、或いは 1940年頃以後は后述のような汎地球的な気候変動の転

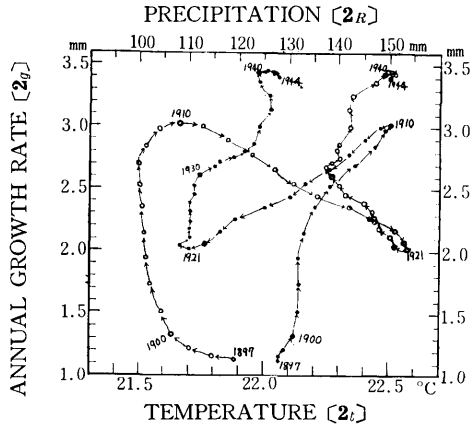


Fig. 6. Correlation between (a) summer mean temperature $2t$ at Yamagata and growth rate $2g$. (white spot), (b) summer mean monthly precipitation $2R$ at Yamagata and growth rate $2g$. (black spot).

換期の影響かは不明である。

次に興味あることは、荒川秀俊博士によって報告された東北六県の米の反当収量を Fig. 5 (c)に加えたが、これが山形の夏の平均気温とはほぼ平行に変動しているのに反し、山形のケヤキの生長率は前述の如く、1940年頃以降を除き、大部分は負相関になっていることである。これは各種気象要素が、后述のように独立に変動し、それらが一般に一年草の稲とニレ科の長寿を誇る (樹令 1000年以上のものもある) 落葉高木のケヤキの各々に与える影響に相違を来すことは当然と考えられる。元来稲は熱帯原産であり、その生長しうる最低水温は約 13°C である。従ってその北限地帯に近い東北六県の稲は、特に低い気温に対しては相当に鋭敏で大きな影響を受けることは容易に了解出来る。これに反してケヤキの方は気温よりも、后述の他の気象要素に強く支配されている。

(2) 降水量 ; 山形の降水量の夏期の月平均値を $0R$

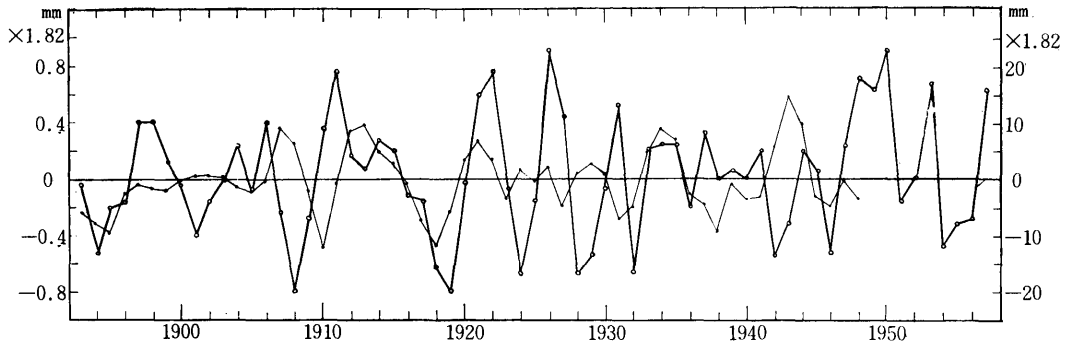


Fig. 7. (a) Thick line : Summer mean monthly precipitation $[0_R-1_R]^*$ at Yamagata.
Fine line : Growth rate $[0_g-1_g]^*$.

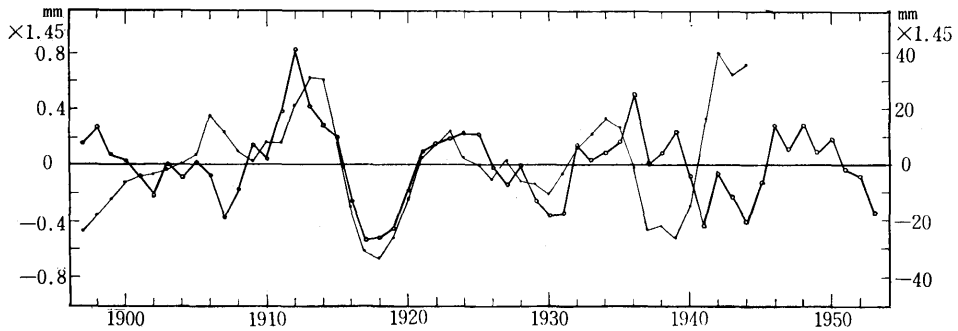


Fig. 7. (b) Thick line : Summer mean monthly precipitation $[1_R-2_R]$ at Yamagata.
Fine line : Growth rate $[1_g-2_g]$.

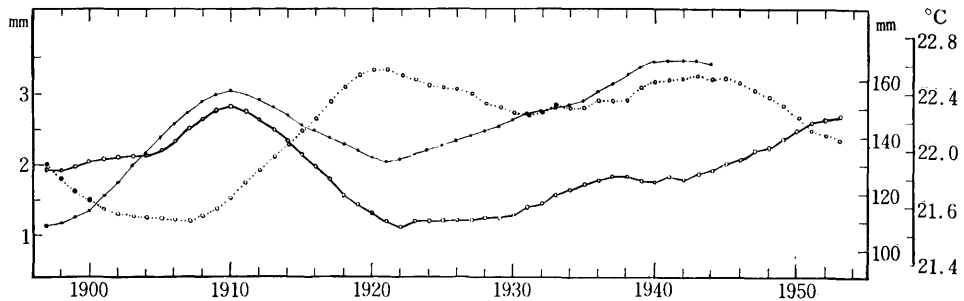


Fig. 7. (c) Thick line : Summer mean monthly precipitation 2_R at Yamagata.
Fine line : Growth rate 2_g . Dotted line : Summer mean temperature 2_t at Yamagata.

とし、前述と同じ手続きで、 1_R 、 2_R 、 $[0_R-1_R]^*$ 、 $[1_R-2_R]$ を求め、それらに対応するケヤキの生長率との比較を Fig. 7 に示す。同図から降水量 $[0_R-1_R]^*$ $[1_R-2_R]$ および 2_R のグラフの各々に対応するケヤキの生長曲線は、いずれもほぼ平行に変化し、降水量が多い時、生長率が大きくなっている。ただし約 5 年および 10 年周期の変動では 1900 年頃と 1940 年頃に両者の負相関が見られる。

また Fig. 7 (c) の 2_R と 2_g のグラフは両者は一般に正相関になっているが、1940 年頃以後だけが負相関になっている。しかもこの時期に生長率に対する気温 2_t の効果はそれ以前の負相関とは逆で正相関になってい

ることは既に述べた。

(6)
この 1940 年頃は Mitchel が示したように、過去 1 世紀間の世界の平均気温の上昇曲線の頂点から下降に向う転換期に当たっているのに注目し値する年代と思われる。なおこの図には前述の気温 2_t も加えてあるが、 2_R と 2_t とは殆んど全期間を通じて負相関になっている。従って生長率が大きい時に、降水量が多くて、気温が低く、また生長率が小さい時に、降水量が少なく気温が高くなっている。ただし 1940 年頃以後はこの対応は、資料不足で明らかでないが、反対の傾向を示すように見える。この関係は 2_R と 2_g の相関図 Fig. 6 から認められる。即ち同図から全般的には生長率と

降水量との関係は正であるが、それが経年的に変動しその転換の起点も気温と同じ年代で約10年毎にその相関度が不連続的に変っている。

なお Fig. 6 の相関図から、ある特殊の年代、例えば、1910、1920、1930、1940年というような年はいずれもケヤキの生長率の内因的な特殊の性質で、気温や降水量とは無関係な生長率の変化との解釈も起るかも知れない。

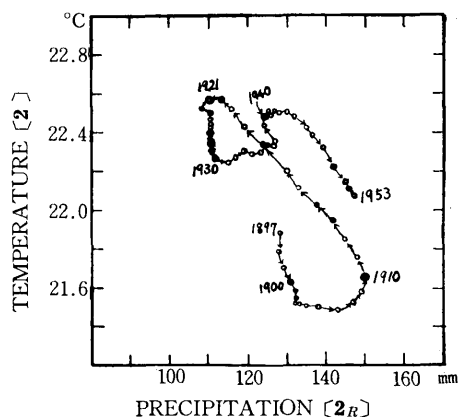


Fig. 8. (a) Correlation between summer mean temperature 2_t and precipitation 2_R at Yamagata.

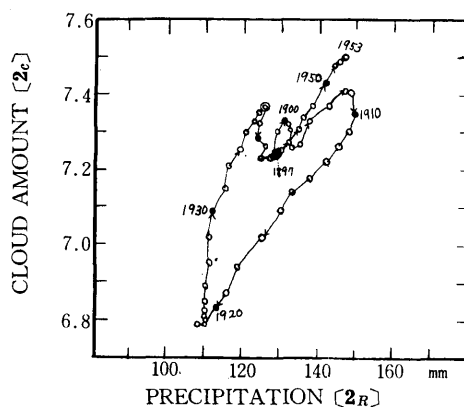


Fig. 8. (b) Correlation between summer mean cloud amount 2_c and precipitation 2_R at Yamagata.

それで生長率に無関係な気象要素だけの変化を見るために、気温 2_t と降水量 2_R の相関図を Fig. 8 (a) に示す。この図は極めて奇妙な形をしているが、気温—生長率、降水量—生長率の相関図と同様、矢張りそれらの特殊の変動をする起点の年が殆んどよく一致している。それ故ケヤキの生長率は明らかに気温および降水量のような気象要素に左右されて変動していることが了解出来る。

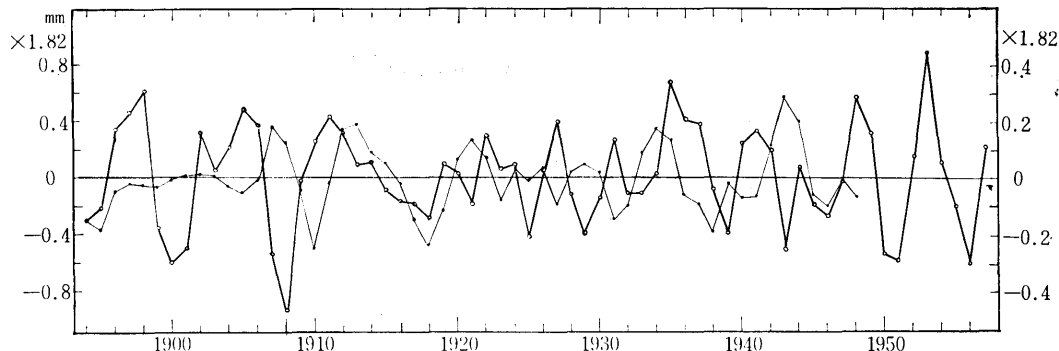


Fig. 9. (a) Thick line : Summer mean cloud amount $[0_c-1_c]^*$ at Yamagata.
Fine line : Growth rate $[0_g-1_g]^*$.

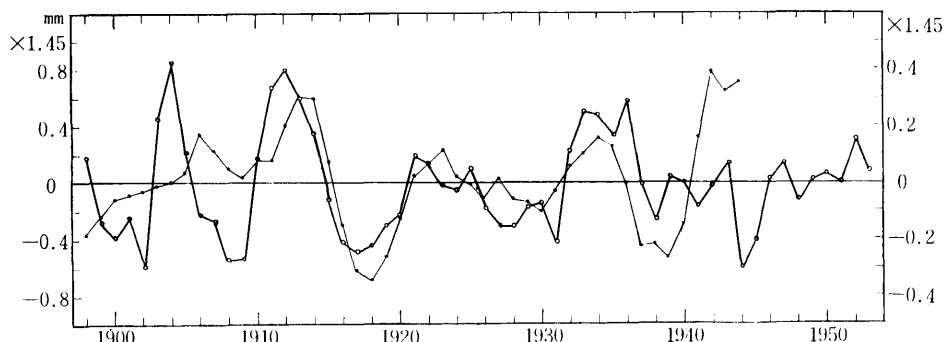


Fig. 9. (b) Thick line : Summer mean cloud amount $[1_c-2_c]$ at Yamagata.
Fine line : Growth rate $[1_g-2_g]$.

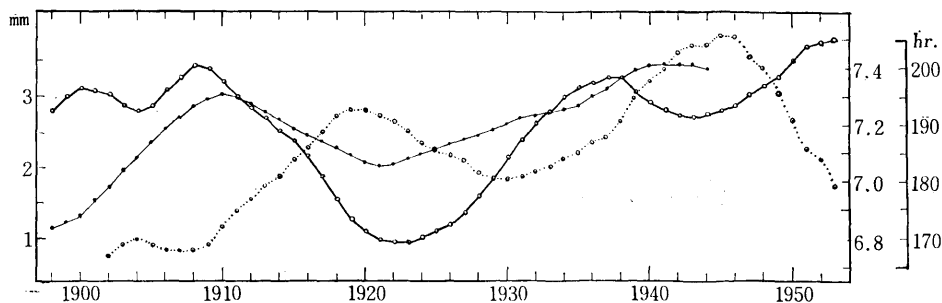


Fig. 9. (c) Thick line : Summer mean cloud amount 2_c at Yamagata. Fine line : Growth rate 2_g .
Dotted line : Summer mean monthly duration of sunshine 2_n at Yamagata.

(3) 雲量； 山形の夏期の月平均雲量を 0_c とし、これから前述の方法で $1_c, 2_c$ および $[0_c-1_c]^*$, $[1_c-2_c]$ を求め、これらに対応する生長率の比較を Fig. 9 に示す。まず $[0_c-1_c]^*$ とそれに対応する生長率 $[0_g-1_g]^*$ の約5年周期の変動は、ほぼ負相関をなし、雲量の多い時、生長率が悪い傾向が見える。しかし $[1_c-2_c]$ および 2_c とそれに対応する $[1_g-2_g]$ および 2_g の約10年および約20年周期の変動では1906年頃から以後約30年間は正相関で、その前後は負相関になっている。Fig. 9 (c)には山形の夏期の日照時間の月平均値 0_n から同様の方法で求めた日照時間 2_n を加えてあるが、 2_c と 2_n とは当然ではあるが、完全に負相関になっており、いずれも殆んど20年の周期的変動が良く現われている。

日照時間が多い時、或いは雲量が少ない時に、ケヤキの生長率が悪いということは、台湾の紅桧の場合やまた常識的に考えても甚だ奇妙である。この原因は不明であるが、降水量 2_R と雲量 2_c との間の変化曲線は平行に変化して極めて良く似ており、一方生長率と降水量とは、大部分正相関になっているので、結果的には雲量或いは日照時間よりも降水量の方が生長率に及ぼす影響が大きいと考えられる。これは Fig. 8 (b)の雲量 2_c - 降水量 2_R の相関図において、 2_c と 2_R は正相関になっていること、および Fig. 10 の雲量 2_c - 生

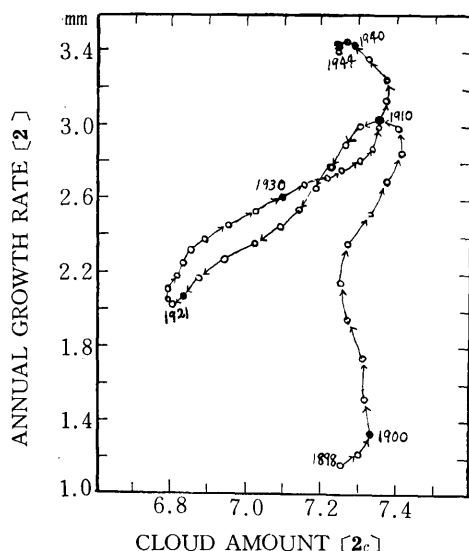


Fig. 10. Correlation between summer mean cloud amount 2_c at Yamagata and growth rate 2_g .

長率 2_g の相関図を見ると、降水量 2_R - 生長率 2_g の相関図にその変動の起点並びにその走行傾向が良く似ていることなどからも了解出来る。

(4) 気圧差； 樹木の生長に影響を及ぼす他の気象要素に風があるが、やや広い地域を代表する風としては、地衡風又は帯状風が考えられる。ここでは東京

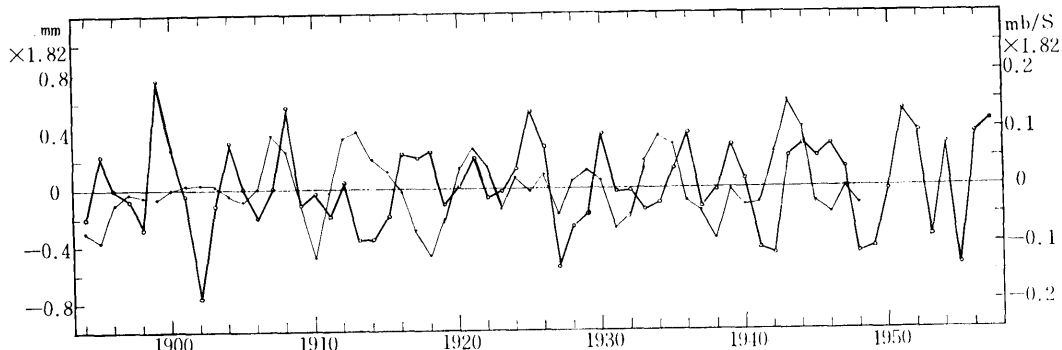


Fig. 11. (a) Thick line : Summer mean atmospheric sea level pressure difference $[0_p-1_p]^*$ between Tokyo and Yamagata. Fine line : Growth rate $[0_g-1_g]^*$.

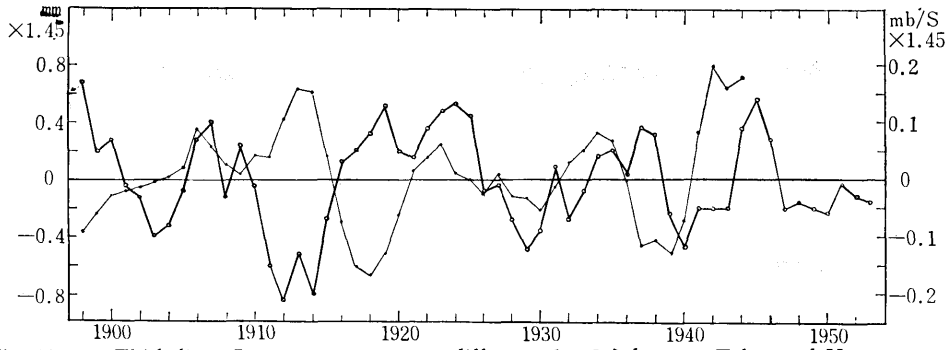


Fig. 11. (b) Thick line : Summer mean pressure difference $[1_p-2_p]$ between Tokyo and Yamagata.
Fine line : Growth rate $[1_g-2_g]$.

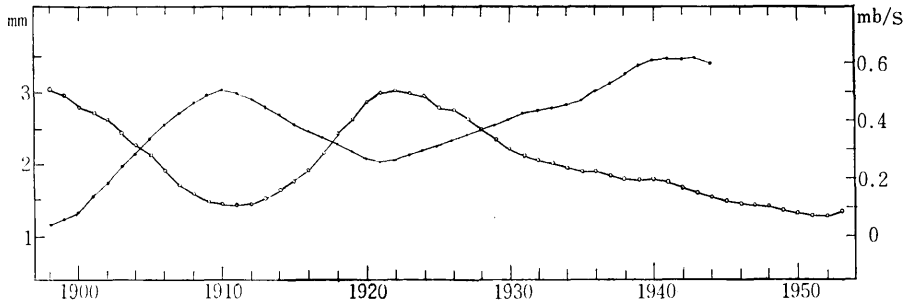


Fig. 11. (c) Thick line : Summer mean pressure difference 2_p between Tokyo and Yamagata.
Fine line : Growth rate 2_g .

($35^{\circ}41'N$, $139^{\circ}46'E$) と山形 ($38^{\circ}15'N$, $140^{\circ}21'E$) の夏期 3 ケ月の月平均海面気圧差を用いた。東京—山形間の距離 S は約 $290km$ で、その経度差は僅かに $51km$ であるから、山形は東京から真北より東へ 10° 足らず傾いているに過ぎないので、両者間の気圧差はほぼ帯状風の指標と見做しうる。いまその気圧差を 0_p と名づけ、前述同様の方法で 1_p , 2_p , 3_p , $[0_p-1_p]^*$, $[1_p-2_p]$, $[2_p-3_p]$ 等を求め、これに対応する生長率を比較すれば、Fig. 11, Fig. 13 に示す通りである。まず $[0_p-1_p]^*$ と $[0_g-1_g]^*$ の約 5 年周期の変動では、1911, 1921, 1931, 1941 年というように、10 年毎に、両者の位相が合っているのは気温の場合と殆んど同じであるが、その他の期間は異位相或いは負相関になっている。

しかし気圧差 $[1_p-2_p]$ とそれに対応する生長率 $[1_g-2_g]$ の約 10 年周期の変動では、両者はほぼ負相関になっており、特に気圧差 2_p と生長率 2_g とは全期間にわたって見事な負相関になっている。即ち気圧差の大きい時、或いは偏西風の強い時は、ケヤキの生長率は小さく、偏西風が弱い時は、生長率が大きい。そして生長率との相関度はこれまでの気象要素の中で最も高く、その相関図は Fig. 12 に示す通りである。またこれから明らかなように、 2_p と 2_g の相関図は他の気温や降水量と同じ傾向をもっており、その散布点は全

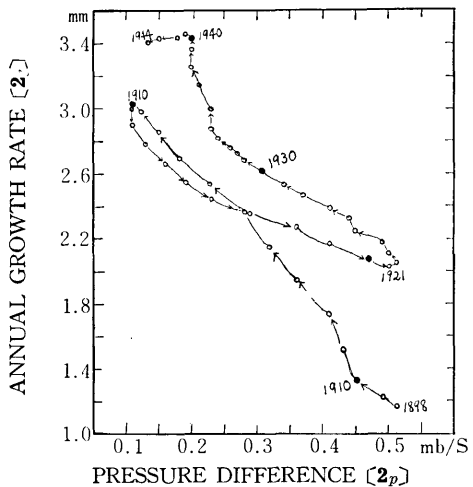


Fig. 12. Correlation between summer mean pressure difference 2_p between Tokyo and Yamagata, and Growth rate 2_g .

体として、経年的な変動を示し、その一定期間は一つの直線上に分布し、他のこれに続く期間はまた異なった直線上に分布し、一つの直線から他の直線へ移る年代も、気温や降水量の場合と殆んど同じ年代になっている。

次に $[2_p-3_p]$ とこれに対応する生長率 $[2_g-3_g]$ の比較を Fig. 13 に示す。同図から $[2_p-3_p]$ 曲線は 2_p

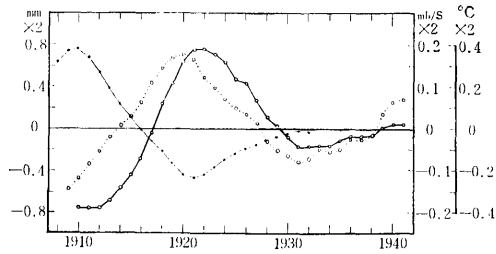


Fig. 13. Thick line : Summer mean pressure difference $[2p-3p]$ between Tokyo and Yamagata. Fine line : Growth rate $[2g-3g]$. Dotted line : Summer mean temperature $[2t-3t]$ at Yamagata.

の曲線では現れなかった谷が1932年頃に現われ、約20年の周期的変動を見せている。そうして $[2g-3g]$ の約20年周期と全く逆位相で変動している。同図には $[2t-3t]$ も加えてあるが、これも $[2p-3p]$ と殆んど同じ周期で平行に変化しており、従って生長率 $[2g-3g]$ とは負相関になっている。なお $[2t-3t]$ と $[2p-3p]$ の相関図は Fig. 14 の通りで、殆んど楕円に近い。そ

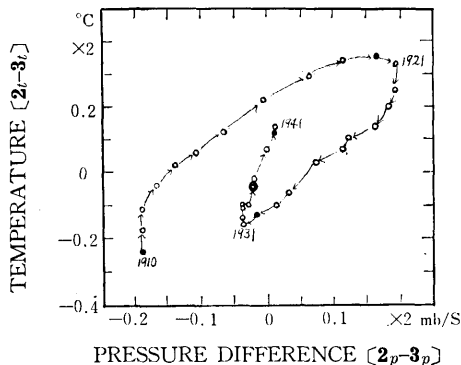


Fig. 14. Correlation between summer mean pressure difference $[2p-3p]$ between Tokyo and Yamagata, and summer mean temperature $[2t-3t]$.

の散布点が楕円であることを確認するためには、更に多くの資料が望まれるが、もし、そうなおればその期間中は、気温と気圧差とは2次元の正規分布即ち2変量正規分布をなしていることが推定出来るので、前述のケヤキの生長率の正規分布との対応が統計的にも意味づけられよう。

以上の気象要素の外、山形の夏期3ヶ月の月平均気圧、湿度、状態方程式から求めた地表空気密度等について、前述同様の操作によって求めた諸量と、それらの各々に対応するケヤキの生長率を比較したが、いずれもこれまで述べた気温、降水量、雲量、気圧差とはほぼ類似の対応関係が見出された(図は省略)。

しかしケヤキの生長率と最も相関度の高い気象要素

は風の強さの目安となる東京-山形の気圧差 $2p$ 或いは $[2p-3p]$ であった。

Ⅲ 北太平洋高気圧の動向とケヤキの生長率

山形の夏期の気候は北太平洋高気圧の影響を大きく受けているので、それと山形産ケヤキの生長率との比較を行なった。北太平洋高気圧の資料は前報告に用いたもの、即ち同海区の1921年から1947年までの夏期(6, 7, 8月)3ヶ月の月平均海面気圧を用い、それより気圧図を作って、その高気圧の中心示度 0_{hp} および中心位置の東西変化 $0_{h\lambda}$ 並びに南北変化 $0_{h\varphi}$ を求めた。更に前述と同様にして 1_{hp} , $1_{h\lambda}$, $1_{h\varphi}$ および $[0_{hp}-1_{hp}]^*$, $[0_{h\lambda}-1_{h\lambda}]^*$, $[0_{h\varphi}-1_{h\varphi}]^*$ を求めた。こ

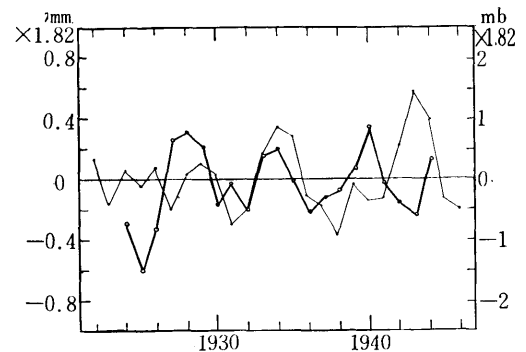


Fig. 15. (a) Thick line : Central Pressure of North Pacific high $[0_{hp}-1_{hp}]^*$. Fine line : Growth rate $[0g-1g]^*$.

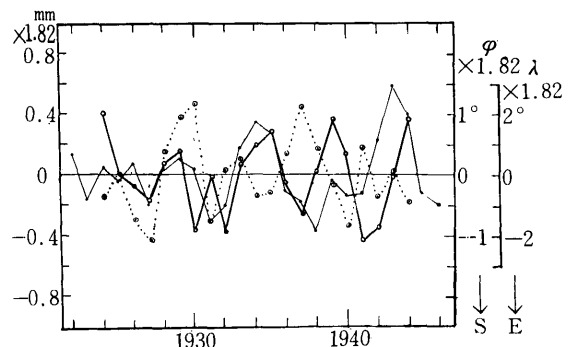


Fig. 15. (b) Thick line : Latitudinal variation of the central position of North Pacific high $[0_{h\varphi}-1_{h\varphi}]^*$. Fine line : Growth rate $[0g-1g]^*$. Dotted line : Longitudinal variation of the central position of North Pacific high $[0_{h\lambda}-1_{h\lambda}]^*$.

れらとそれに対応する生長率の比較を Fig. 15 に示す。これを見ると5年前後の周期のものでは、北太平洋高気圧の中心示度が高くなると、その中心位置は、東および北に移る。その時ケヤキの生長率は概ね良くなっている。また高気圧の中心示度が低い時は、中心位置は西に移り、また南偏する。この時は反対に生長

率は概して悪い。これは先に台湾の紅松の生長率で見出された関係と同じである。

次に前論文と同様、 0_{hp} , 0_{hl} , 0_{hp} を3年でRMし更にそれを5年でRMしたものをそれぞれ 1_{hp}^* , 1_{hl}^* , 1_{hp}^* とし、これらと生長率の比較を Fig. 16 に示す。これを見ると約10年周期の変化は高気圧の中心示度および中心位置の緯度変化のみに現われ、東西変化には現れない。高気圧の中心示度が高くなると、5年周期の場合とは異なり、中心位置は南偏する。その時ケヤキの生長率は余り明瞭ではないが、概して悪い。また中心示度が低くなるとこれらの関係は逆になり、生

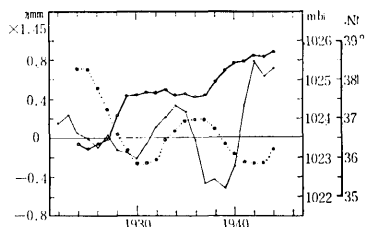


Fig. 16. (a) Thick line : Central Pressure of North Pacific high 1_{hp}^* . Fine line : Growth rate $[1_g-2_g]$. Dotted line : Latitudinal variation of the central position of North Pacific high 1_{hl}^* .

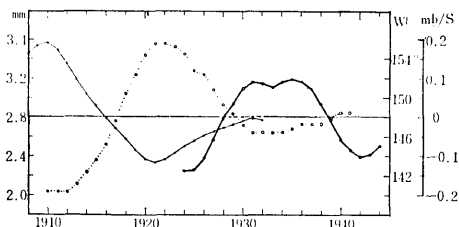


Fig. 16. (b) Thick line : Longitudinal variation of the central position of North Pacific high 1_{hl}^* . Fine line : Growth rate $[2_g-3_g]$. Dotted line : Summer mean pressure difference $[2_p-3_p]$ between Tokyo and Yamagata.

長率は良くなる。これは台湾の紅松の場合と同じ傾向を示している。

次に北太平洋高気圧の中心位置の東西変化は約20年周期に表われているが、ケヤキの生長率との比較は資料不足のため、良く解らないが $[2_g-3_g]$ の約20年周期の外挿によって、台湾の紅松の場合と同様、その中心示度が西へ移った時、ケヤキの生長率は良いと思われる。これはまた Fig. 16 (b)に東京-山形の気圧差 $[2_p-3_p]$ を加えてあるが、その気圧差が小さい時、高気圧の中心位置が西偏している。

既に気圧差と生長率の関係が解っているので、気圧差を媒介として、その中心位置が西偏する時、ケヤキの生長率が良く、中心位置が東に移る時、生長率が悪いという推定にはかなりの確信がもてる。

山形のケヤキの生長率の約20年周期はかなり安定性があるので、これの過去300年間の変動から北太平洋高気圧の中心位置の東西方向の変動が推定出来るとすれば、本資料は極めて貴重である。

IV ケヤキの生長率と太陽活動

樹木の生長率と太陽活動の指標と考えられている太陽黒点相対数との対応は、しばしば明瞭に現われることがあるので以下に両者の比較を行なった。その黒点数の資料としては、1749年の観測当初以来、現在まで約210年間の年平均値を用いた。その観測値を 0_s とし前述同様、 1_s , 2_s , 3_s , $[0_s-1_s]^*$, $[1_s-2_s]$, $[2_s-3_s]$ を求め、これに対応する生長率と比較した。まず $[1_s-2_s]$ と $[1_g-2_g]$ との比較は Fig. 17 に示す通りで、一見負相関のように見える。しかし乍ら両者を仔細に眺めると $[1_s-2_s]$ の周期は11.1年で、これと同期間の約200年間の $[1_g-2_g]$ の平均周期は9.4年(全期間の周期は10.0年)であり、完全な対応になっていない。

次に $[2_s-3_s]$ とその比較は17(b)に示す通りで、こ

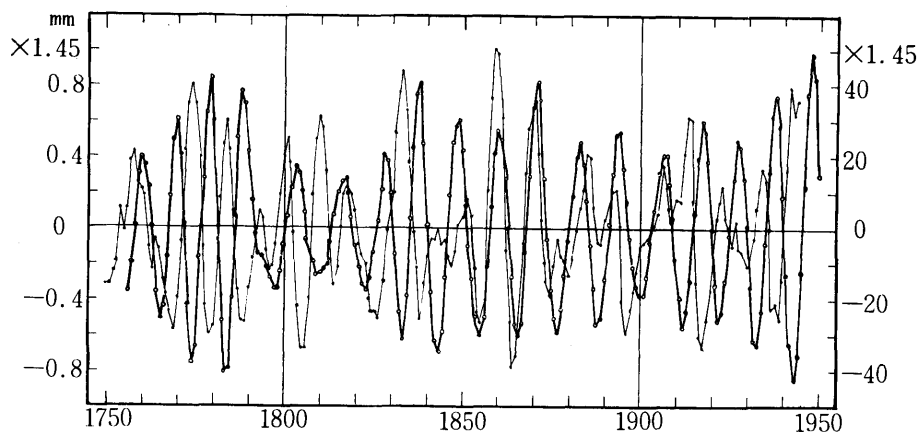


Fig. 17. (a) Thick line : Sunspot number $[1_s-2_s]$. Fine line : Growth rate $[1_g-2_g]$.

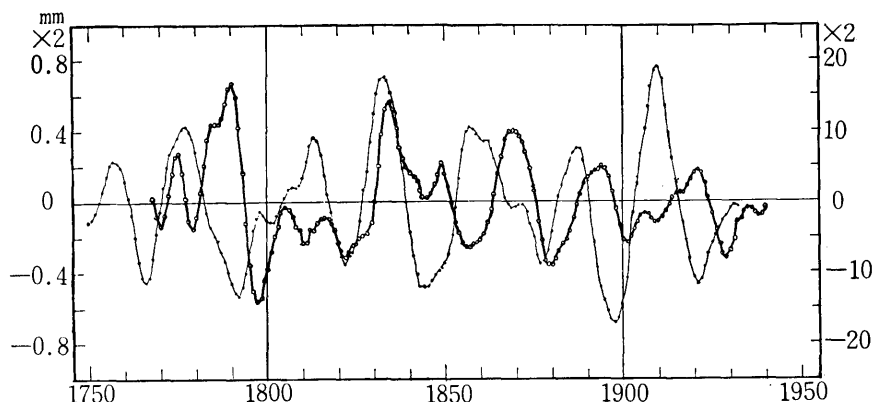


Fig. 17. (b) Thick line : Sunspot number $[2_s-3_s]$. Fine line : Growth rate $[2_g-3_g]$.

れも一般には負相関になっているように見えるが、余り良い対応ではない。しかし台湾の紅桧よりやや良好と思われる。なお同図の比較期間の $[2_g-3_g]$ の平均周期は22.1年であるから Hale の周期に関係のある変動と思われる。

また $[0_s-1_s]^*$ と $[0_g-1_g]^*$ との比較の図は、ここには示さないが前者の平均周期は約9年、後者のそれは約6年であるから、その対応は良くない。

最後に 3_s と 3_g の比較は前論文に示した通りであるから図は省略するが、 3_g の方は前述 Fig. 3(c)からその曲線の谷の方をとると極めて見事な100年周期を示している。他方これに対応する 3_s の方の谷を見ると大略100年周期に近い周期と見做せる。そして 3_g の方

の位相が 3_s より10数年先行しているように見える。

V 山形産ヒノキと太平洋産紅桧の各生長率の比較

樹木の生長状態が気候の変動に左右されることは、これまでの研究より明らかである。他方気候変動には局地的なものと汎地球的なものがある。それ故、遠く離れた2地点の樹木の生長率を比較することによって、局所的なものと、汎地球的なものとの分離の可能性も考えられる。こういう観点から、偏東風域にある台湾太平山の紅桧と、偏西風域にある山形産のケヤキの各々の生長率を比較してみた。まず両者の $[0_g-1_g]^*$, $[1_g-2_g]$, $[2_g-3_g]$, 3_g の周期を比較すると、Table 2 に示す通りである。

Table 2

Class	Taipingshan-grown Formosan Cypress	Yamagata-grown <i>Zelkova serrata</i>		
statistical period	whole period (513 years)	whole period (323 years)	initial 203 years of sunspot observation period	initial 62 years of meteorological observation period
$[0_g-1_g]^*$	5.5 (Year)	6.2 (Year)	6.1 (Year)	5.0 (Year)
$[1_g-2_g]$	10.4	10.0	9.4	10.7
$[2_g-3_g]$	20.7	20.7	22.1	23.0
3_g	100	100	100	—

さて統計期間が約300年あれば、以上のようにして得た100年以下の周期では、或る程度安定した信頼のある値を示すと思われるので、同表の第2、第3欄について比較してみる。

これで見ると約20年以上の周期では両者は全く一致し、周期の小さいもの程、局地的な気候に左右され易く、20年以上の長周期的な変動では汎地球的な気候変動を示すことを物語る。

$[0_g-1_g]^*$ の両者の生長率の比較図は、ここには示

さないが、周期が異なっているので、その変動の様式は本質的に異なるものと思われる。しかし $[1_g-2_g]$ では両者の平均の周期は殆んど同じであるが、各々の⁽³⁾生長率と黒点数の比較図 [Fig. 17 (a) および 前論文 Fig. 26] から、個々の波形や位相が異なっているのが容易に認められる。

次に両者の $[2_g-3_g]$ の比較は Fig. 18(a) に示す通りで、全体としてはかなり、きれいに平行して変化している。ただし1830年頃より1870年の約40年間だけが、

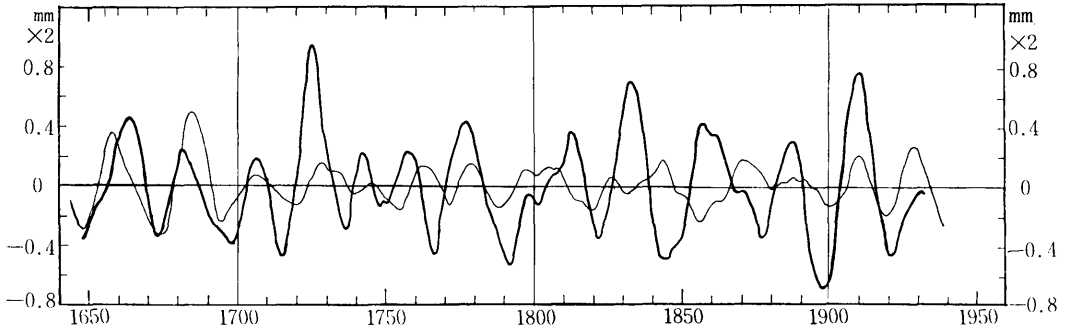


Fig. 18. (a) Thick line : Growth rate $[2g-3g]$ of Yamagata-grown *Zelkova serrata*. Fine line : Growth rate $[2g-3g]$ of Taipingshan-grown *Formosan Cypress*.

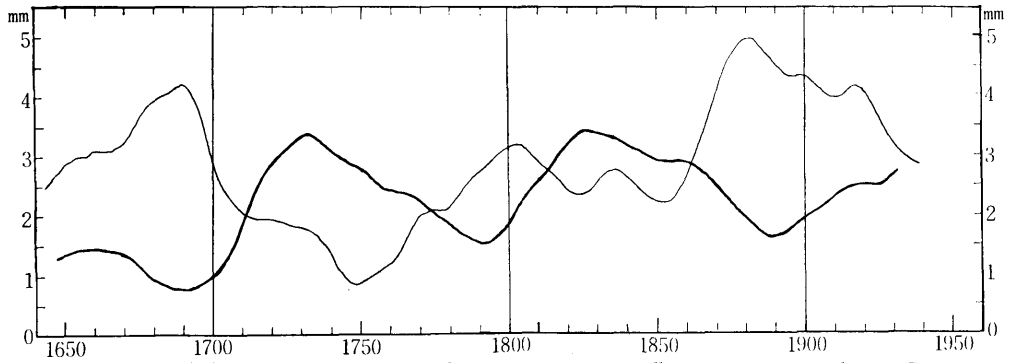


Fig. 18. (b) Thick line : Growth rate $3g$ of Yamagata-grown *Zelkova serrata*. Fine line : Growth rate $3g$ of Taipingshan-grown *Formosan Cypress*.

逆位相になっている。ここで興味あるのは、1880年頃から10数年に亘る期間であるが、この間の山形のケヤキの生長率は順調と思われるが、台湾の紅桧の生長率は甚だ悪い。その理由は、紅桧の生長率は、既述のように雲量に大きく左右されていたので、低緯度の日射をさえぎったので有名な、1883年のクラカトワ島の火山爆発の影響ではないかと思われる。

次に両者の $3g$ の比較は Fig. 18(b) に示す通りで最も興味がある。即ち両者はいずれも 100 年周期が明瞭に現われ、しかもその位相が逆である。特にケヤキの生長率はその曲線の谷の方をとると殆んど正確に 100 年間隔で周期的に変化し、谷から山までの期間が約 40 年山から谷までの期間が約 60 年になっている。

台湾と山形の樹木の生長率における 100 年周期の位相の完全な逆転の理由は不明であるが、その根源は、黒点活動の消長から推して、太陽にあり、それが下層大気の流れの相違による変容効果と思われる。もしこの周期においても生長率が帯状風の強弱の目安となるとすれば、偏西風と偏東風の強弱が各々 100 年毎に繰返されていることになる。

まず山形産のケヤキの生長率の統計的な処理と周期法による確定法との間の得失について考える。

ケヤキの生長率は、統計的には近似的に正規分布で表わされることは前述の通りであるが、いま χ^2 検定によって生長率 $0g$ の階級別の度数 0_i と理論的な度数 e_i の適合性を調べてみる。ここで χ^2 は Table 1 の資料を用い正規分布として e_i を計算し、これと同表の 0_i とから $\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(0_i - e_i)^2}{e_i}$ の式を用いて算出すると全区間では $\chi^2 = 69$ となり、この数字から勿論適合しているとはいえない。しかし年生長率が 1.0mm 以上 5.0mm までの区間、即ちその頻度が全体の 81% に当たる部分では $\chi^2 = 9.7$ である。一方正規分布にあてはめる時の自由度 $\nu = k - 3 = 5$ に対する危険率 5% の χ^2 の限界値 χ_0^2 は数表より 11.1 である。従って、 $\chi^2 < \chi_0^2$ であるから、これは正規分布を疑う理由は、対応する度数を比較する限りにおいては存在しない。それでその区間は生長率を正規分布にあてはめて考えることも許されよう。次に Table 1 の相対度数からケヤキの年生長率は 0.5mm 以下が 5% 以下で 5.51mm 以上は 2% 以下であることを示している。従って仮りに 5.6mm 以上の生長率があったとすれば、統計的には 100 年に 2 回という極めて稀な異常現象と見なければ

ばならぬことになる。しかもそれが生起する時期をすばりと指定することが出来ない理由も確率論の基礎理論から明らかである。

他方上述の現象は周期法の観点からは Fig. 1 および Fig. 3 から容易にわかるように、100 年周期の山の部分に当り、その年代頃は年生長率は大抵 5.6mm 以上に達する時期に来ており、決して偶然に起ったものではないことが了解出来る。すなわちこの周期曲線はかなり安定して各世紀の40年頃がその山に当たっている。もしもこのケヤキが今後も生存を続けるならば、恐らく将来もそのような周期的な変動を続けることが予想される。統計的には全く稀にしか起らず、しかも単にその確率だけしか解らぬ異常現象も周期法では、その起る時期さえも指定される。これが後者の利点であるが、実際には周期法でもある1つの周期が安定して何時までも乱れない上述のケヤキのような長周期的変動は、気象現象では稀で、実際にはかなり複雑であるから、ここにまた別の困難に遭遇する。これは恐らく各種の周期の重畳効果によるものであるから、それらの一つ一つ純粋な周期に分離する工夫が肝要と思われる。

最近電子計算機の使用によるパワースペクトラム解析の技術が向上し、自然現象の周期的な現象の究明に広く用いられるようになって来たが、樹木の生長率に^(m)応用したものに R. A. Bryson 等の研究がある。同著者等によれば、樹木の年輪の厚さに重要な周期は殆んど見出せぬと述べている。実際にその解析したグラフを見ると、樹令数百年の多数の樹木の生長率には2年から5年程度の短周期変動が認められるが、より長期の有意な変動を示す標本は極めて稀である。しかしそれは当然の結果と思われる。その理由は一定の樹木の生存期間に生起する頻度は長周期のもの程少くなり、遂に与えられた条件を満たすような精度を保ち得なくなるからである。それ故、前述の100年周期の例を見ても解かるように、頻度が少ないから極く稀に起った偶発的な現象と片付けてしまう事は危険である。近代統計的な処理方式で注意しなければならぬ点がここにあり、また今後の課題と思われる。

次に山形のケヤキの生長率が前述の如く気象要素の影響を受けていることは明らかになったが、それらの要素が各々独立に変動した場合、生長率がどんな法則に支配されるかを考えてみる。いまケヤキの生長率 G に作用する要因を気温 T 、降水量 R 、雲量 C 、気圧差 P およびその他の内因的な要素を S とする。しかしこの S の内容は不明であるから無視することにし、かつ T と C とは前述の如く G に対する効果は間接的と見做される。それで G は単に R と P の関数と考える。即ち

$$G = G(R, P) \quad (1)$$

従って生長率の増分を ΔG 、とすれば、

$$\Delta G = \frac{\partial G}{\partial R} \Delta R + \frac{\partial G}{\partial P} \Delta P \quad (2)$$

で表わされる。

しかるに山形の夏の気象状態は一般に降水量の多い時は、気温が低くて雲量が多く、反対に降水量が少ない時は気温が高く雲量が少なくなっていた。それは Fig. 8 の $2R-2t$ の相関図および $2R-2c$ の相関図からも読みとれる。それで R は T と C の関数と考える。即ち

$$R = R(T, C) \quad (3)$$

従って R の増分 ΔR は

$$\Delta R = \frac{\partial R}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial R}{\partial C} \Delta C \quad (4)$$

と書ける。また R と T は負相関であるから、 α 、 β を正として

$$-\frac{\partial R}{\partial T} = -\alpha, \quad -\frac{\partial R}{\partial C} = \beta \quad (5)$$

で表わすと、(2)~(5)より

$$\Delta G = (\beta \Delta C - \alpha \Delta T) \frac{\partial G}{\partial R} + \frac{\partial G}{\partial P} \Delta P \quad (6)$$

山形の降水量 $2R$ と気圧差 $2P$ との相関図は、ここには示さないが、両者の間には殆んど関数関係が存在しないか、存在しても $-\frac{\partial P}{\partial R}$ の値は極めて小さいことを認めた。それで(6)式が適用出来るものと考え、実際に山形のケヤキの生長率 $2g$ で上式の各項の大きさを推定してみる。まず

$$\beta \Delta C = \frac{\partial R}{\partial C} \Delta C \div 5.4 \text{ mm}, \quad \alpha \Delta T = -\frac{\partial R}{\partial T} \Delta T \div 4.0 \text{ mm}$$

$\frac{\partial G}{\partial R} \div 0.1$ であるから第1項は 0.14mm 程度である。第2項は後述の如く $\frac{\partial G}{\partial P} \Delta P = -0.4 \sim -0.5 \text{ mm}$ である。従って気圧差の生長率に及ぼす効果は、降水量、気温、雲量の和の効果の3倍になっている。

いま生長率 $2g$ と気圧差 $2P$ の実験式は次の2式に分けられる。即ち

$$G = 3.54 - 4.68 P \quad (1898 \sim 1917 \text{ 年に対して}) \quad \cdots \cdots (a)$$

$$= 3.96 - 3.97 P \quad (1918 \sim 1944 \text{ 年に対して}) \quad \cdots \cdots (b)$$

ただし G および P の単位は mm および 0.1mb である。また $2g-2P$ の相関図は Fig. 11 を少し書きかえて Fig. 18 に示す。同図中の直線 (a), (b) はそれぞれ上式の (a), (b) 式で表わされる。これらより東京—山形の気圧差が 0.1mb 増す毎にケヤキの生長率は 0.4 ~ 0.5mm づつ減少する。その気圧差 0.1mb に相当する風速は、地衡風を仮定すると約 30cm/sec である。従って風速が 1 m/sec 増す毎に年生長率は約 1.5mm 減少することになる。この風速は前述の如く常風と考えて良いから、ほぼ偏西風の大きさを表わすことになる。そして $[2g-3P]$ の 300 年に亘るケヤキの生長曲線から、その変動は極めて、奇麗な 20 年の周期で変動し

ているので、それが偏西風の強弱の動きを示している
と見る事が出来る。

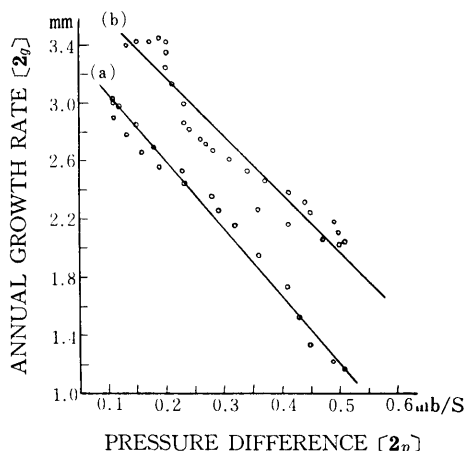


Fig. 19. Correlation between summer mean pressure difference 2_p between Tokyo and Yamagata, and growth rate of Yamagata-grown *Zelkova serrata* 2_g .
Line (a) is for 1898~1917 A. D.
Line (b) is for 1918~1944 A. D.

むすび； 上述の研究により、樹木の生長率を気候変動の指標として用いる場合、10年、20年という長周期の変動ほど、その指標としての精度が向上する。これはいわゆる Faegri の基本的な気候の法則⁽⁸⁾に適合するもので、樹木の生長率は、こういう点で極めて重要な価値をもっている。しかし実際の適用に当っては、その場所の気候状態をわきまえ、生長率がどの要素の指標となるかを検定することが大切である。単に観念的に樹木の生長率は気温の増加と共に増大すると考えるならば、山形のケヤキの例のように、数十年という短期間だけでは全く誤った推定を行なうことになる。樹木の種類により、また同じ種類でも場所によって、それが表わす指標の性質が異なると推定される。これまでの研究では、樹木の生長率は、低・中緯度では、風の大きさの目安となる気圧差をかなり良く表わすものと思われるので、今后更に調査検討したい。

謝辞； この種の研究に対して常に御指導を頂き、本資料の利用につき御厚意を給わった京都大学理学部長速水頌一郎博士に心から謝意を表します。また本研究に用いたケヤキの標本の入手者であった山形大学教授故齊藤孝蔵博士および有益な助言と便宜とを与えられた本学教授武貞良人博士に深謝いたします。

SUMMARY

The growth rate of tree-specimen of Yamagata-grown *Zelkova serrata* (Japanese : *Keyaki*) of 323 years is found to be valuable as a good indicator of climatic changes.

The characteristics of the growth rate of *Zelkova serrata* are studied, and then the relations between the growth rate and summer meteorological elements at Yamagata, North Pacific high, sunspot number, and the growth rate of Taipingshan-grown Formosan Cypress respectively are investigated.

The results of this study are as follows :

(1) About 5-year, 10-year, 20-year and 100-year periodic variations are appeared in the growth rate of Yamagata-grown *Zelkova serrata*. About 20-year and 100-year periodic variations are clearest.

(2) There is better correlation between the growth rate of *Zelkova serrata* and meteorological elements at Yamagata in the longer periodic variations, such as 20-year period, than in the shorter periodic variations such as less than 10-year period.

(3) The meteorological element which has the closest relation with the growth rate of *Zelkova serrata* is the sea level atmospheric pressure difference in summer between Tokyo and Yamagata, especially in some 20-year periodic variation, the correlation between them is remarkable and it shows negative. The effect of the pressure difference on the growth rate is three times of that of sum of all other meteorological elements (temperature, precipitation, cloud amount). If G and P signify the annual growth rate in mm and pressure difference in 0.1 mb unit, the experimental formulae are as follows :

$$G = 3.54 - 4.68P \quad (\text{for } 1898-1917 \text{ A. D.}) \\ = 3.96 - 3.97P \quad (\text{for } 1918-1944 \text{ A. D.})$$

So we find that if the pressure difference increases 0.1 mb, the annual growth rate will decrease 0.4~0.5mm. Using the geostrophic wind approximation, pressure difference of 0.1 mb corresponds to the wind velocity of 30 cm/sec, and from the positions of the two districts, it is westerlies. Accordingly, if the wind velocity of westerlies increases 1m/sec, the annual growth rate will decrease about 1.5mm. So that we can estimate the variations of westerlies for the last 300 years by the index of the growth rate of *Zelkova serrata*.

(4) In the relation between the growth rate of *Zelkova serrata* and the precipitation, the correlation

is positive in the longer periodic variations, that is when the precipitation is much, the growth rate is large. But their correlation is reverse after about 1940.

(5) It is complicated in the relation between the growth rate and air temperature in the shorter periodic variations. In the variations longer than 20-year period the correlation is negative for long term, but their correlation is reverse for the period when the growth rate is largest, and after about 1940.

The reason why the growth is small when the temperature is high is that in the climate of Yamagata, when the temperature is high, the precipitation is small in general, and the pressure difference between Tokyo and Yamagata is large, while growth rate is much affected by the pressure difference than any other meteorological element.

The effect of the temperature and precipitation on the growth rate reverses after about 1940. This may be related with the global climatic changes, as during this period the world mean temperature changes from warming to cooling.

(6) The correlation between the cloud amount and the growth rate is in general positive, but their correlation is reverse after about 1940. The reason why the growth rate is large when the cloud amount is rich is that the precipitation and the pressure difference affect the growth rate more than the cloud amount does.

(7) The close relation between the growth rate of Zelkova serrata and the variations of North Pacific high is as follows :

(a) In about 5-year periodic variations, when the central pressure of the Pacific high is high, its position moves north and east, when the growth rate increases.

(b) In about 10-year periodic variation, when the central pressure of the Pacific high is high, the position moves south, when the growth rate tends to decrease.

(c) In about 20-year periodic variations, when the position of the center of the Pacific high moves west, the pressure difference between Tokyo and

Yamagata is small, when the growth rate is expected to be large.

(8) The relation between the growth rate of Yamagata-grown Zelkova serrata and sunspot number is not clear in about 5-year, 10-year and 20-year periodic variations, but in 100-year period, the correlation between them is positive and has phase difference of some dozen years.

(9) The relation between the growth rate of Yamagata-grown Zelkova serrata and that of Taipingshan grown Formosan Cypress is not clear in shorter periodic variations such as less than 10-year period, but a clear correlation is got in about 20-year periodic variations exclusive of a short period. In the variations of 100-year period the correspondence of their variations is remarkable, but the phase is quite reverse.

REFERENCES

1. S. Hayami and M. Ōuti : On the Variations of the North Pacific Subtropical High and Snow-fall in Japan (in Japanese). Kyoto Univ. Ann. Disas. Prev. Res. Inst. 8. (1964)
2. M. Ōuti : Climatic Variations in the North Pacific Subtropical Zone and Solar Activity During the Past Ten Centuries (I). Bull. Kyoto Gakugei Univ. Ser. B. No. 19. (1961)
3. : — (II). No. 20. (1962)
4. — : On the Evidence and propagation Mechanism of the Surface Temperature Variations in the Period of Twenty-four Years (in Japanese). Bull. Kyoto Gakugei Univ. Ser. B. No. 24. (1964)
5. H. Arakawa : "Kikōhendō-ron" Kishogakukōza (1955).
6. J. M. Mitchel Jr. : Recent Secular Changes of Global Temperature. Ann. New York. Acad. Sci. vol. 95. Art. 1 (1961).
7. R. A. Bryson & J. A. Dutton : Some Aspects of the Variance Spectra of Tree Rings and Varves. Ann. New York. Acad. Sci. vol. 95. Art. 1 (1961).
8. R. W. Fairbridge : Mean Sea Level Related to Solar Radiation During the Last 20,000 years. Change of Climate. Proc. Rome. Symp. UNESCO & W. M. O. (1963).

Annual growth rate of Yamagata-grown *Zelkova serrata*, measured values for natural growth rate. unit : mm/year

[illegible]