

重金属汚染と樹木の生長 I

— 過剰Cu処理された当年生クロマツ苗の光合成及び呼吸 —

安 藤 信

Heavy metal pollution and tree growth I

— Photosynthesis and respiration of excessive Cu treated
one-year-old *Pinus Thunbergii* seedlings —

Makoto ANDO

要 旨

過剰 Cu 処理された当年生クロマツ苗の光合成、及び呼吸速度を調べた。土壤に処理された溶液 (CuCl_2) の濃度は 0, 40, 120, 260, 430ppm であった。その結果の概要は

1) 光合成速度は、定数 b , b/a で決定される $P = \frac{bI}{1+aI}$, あるいは $\frac{1}{P} = \frac{1}{bI} + \frac{a}{b}$ であらわされる。定数 b , b/a は、季節とともに変化するが、Cu 処理濃度によっても異なる。

2) 定数 b は時間の経過とともにその値が小さくなる。このことは、弱光域での光-光合成曲線の傾きが、生育初期で高いことを示している。全期間を通じて、高濃度処理と低濃度あるいは無処理の b の値はほとんどかわらないが、中濃度処理のものは低い値を示すように思われる。(図 5)

3) 定数 b/a は一般に季節を追うに従って小さくなる傾向がみられる。光合成による CO_2 吸収は、発芽直後最も高い。処理濃度が高くなれば、 b/a の値は小さくなる。処理間の差は時とともによりはっきりしてくる。(図 6)

4) 呼吸速度は発芽直後最も高い値を示す。すべての処理で、呼吸速度は10月迄徐々に低下していくが、11月はやや高い値を示す。高濃度処理区の呼吸速度は他の処理区のものより高い値を示す。

5) 葉量そして葉の生長は図 7 に示すように処理間で明らかな差が認められる。

1. は じ め に

植物の生長に及ぼす過剰重金属の影響について取り扱った研究は今までも数多いが¹⁾、特に生長を農作物の収量の減少として扱った研究¹⁾、重金属あるいはその影響による養水分の植物体内での分布²⁾に言及した研究が多い。その中で茅野³⁾⁴⁾⁵⁾は、重金属誘導鉄クロロシスの発現に着目し、さらに重金属による生育阻害を1)重金属誘導鉄クロロシスの発生が主因となって生育阻害を起こすもの、2)クロロシスの発生とは無関係に過剰元素が直接植物の体内代謝を攪乱して生育阻害を起こすもの、3)その両者が同時に生じて生育阻害を起こすものの3つに分類している。重金属障害の一因として鉄をはじめ葉緑体の重要な成分が欠乏されるとするならば⁷⁾、光合成あるいは呼吸のいずれか、又は両者への影響が考えられるわけで、重金属と光合成、呼吸との関係を

取り扱った研究も進められてきた⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾。しかし、重金属の種類、濃度、植物の種類あるいは測定の時期などによって光合成及び呼吸に及ぼす影響のしかたは異なるようで、結果はさまざまである。

本研究では生育期間の長い樹木の場合に重金属による生育阻害がどのように発現するか、光合成、呼吸にはどのような影響があらわれるかを明らかにし、既報のイネ、ムギ、マメなどの一年生草本における場合と異なるかどうか検討しようとしたものである。本報告では、過剰 Cu を施した土壤中で発芽させた当年生クロマツ稚苗の光合成、呼吸の季節的な変化を考察した。

本研究を実施するにあたり、京都大学農学部 堤 利夫教授、荻野 和彦助教授には、研究計画全般にわたって御指導いただいた。森林生態研究室各位には実験を行なう際、いろいろ御協力をいただいた。農学部附属演習林 吉川 勝好講師には、実験場所として苗畑の一部を提供していただいた。記して深く感謝の意を表したい。

2. 試料及び光合成、呼吸測定法

樹木の光合成、呼吸測定法として立木のまま測定する方法と切断した試料で測定する方法があるが¹³⁾、立木法では使用する同化箱の大きさ、構造及び温度等の環境条件に制約があり、切断法では、切断に伴う光合成、呼吸への影響あるいは給水等、それぞれ問題点を抱えている。本実験では、2, 3 測定法に検討を加え、当年生クロマツ稚苗を立木のまま、実験室内で測定することを試みた。

1) 土壌の銅処理、試料及び前処理

実験は1975年4月から11月にかけて、京都大学農学部附属演習林本部苗畑（京都市左京区北白川追分町）で行なった。1/5000 a のワグナーポットを用意し、鹿沼土とバーミキュライトを体積比で1:1に混ぜあわせ、生重にして約1.7kgずつ各ポットに入れた。4月14日、1ℓの塩化第二銅溶液を用いて5段階のCu処理を行なった。処理液の濃度は、処理1（無処理）—0ppm、処理2—40ppm、処理3—120ppm、処理4—260ppm、処理5—430ppmである。2日後に処理液をポット下部から排出させ、充分水洗攪拌した。大きめの粒をそろえたクロマツ種子は、2日間流水に浸し、5月2日にポットあたり40粒播種した。発芽率はすべての処理区で75%を越えたが、高濃度処理区では、発芽直後根の発達が悪く、転倒乾燥し枯死するものが目立った。測定に用いた苗は、この時期を過ぎて生育し続けたものである。ポットにより、混み合うものは適宜間引きを行なった。光合成、呼吸の測定は、6月4日～6日、7月2日～4日、8月1日～4日、9月2日～5日、10月2日～4日及び9日、10月29日～11月1日の6回、約1カ月間隔で行なった。それぞれ6, 7, 8, 9, 10, 11月測定と以下の議論のなかでよぶ。光合成、呼吸測定に際し苗畑より実験室に運んだ試料は、根を洗浄し損傷のない健全なものを選びだした。1回の測定時にひとつの同化箱内に封入する苗の本数は各時期の苗の大きさを考慮して、同化箱内での相互被陰をできるだけ避け、通気中のCO₂濃度及び分析器の検出能力などから総合的に判断して決めた。6月に5本、7, 8, 9月に3本、10, 11月に2本であった。測定苗総本数は、同化苗内本数、光段階、繰返し、処理数から、6月に150本、7, 8, 9月120本、10, 11月80本であった。選んだ試料は、根を湿ったさらしで覆い、10℃前後の冷蔵庫に入れ測定前の呼吸消費を少なくした。測定後、試料は各部分に分け、80℃、48時間の風乾を行ない乾重を測定した。枯葉は樹体に付いていたものだけを測定したが、10, 11月頃には、処理2, 3, 4を中心に落葉があり過少評価となっている。

2) 測定装置

測定にあたり冷蔵庫より取り出した試料は地際下の根の部分をつんでくるみ、切り込みを入れたゴム栓(A)にはさみ、水のいった試験管(B)に植え込んだ。試験管には植え込み時の水压を調節するためのビニールパイプ(C)が付いている。苗を植えた試験管は、各時期同化箱内に入れる本数分輪ゴムで束ね、支持台(D)をはさみ、同化箱内(E)に入れ測定に供した。以上の構造から通気ガスとガス交換が可能な苗の部分は地上部のみであるから、測定結果は地上部についてのものを示している。同化箱は透明アクリル筒(厚さ3mm、外径100mm)、透明塩化ビニール板(厚さ2mm)、板ゴム(F)(厚さ3mm)、塩化ビニールパイプ(厚さ1mm、外径8mm及び厚さ3mm、外径26mm)、ダブルクリップ(G)を用いて製作したもので、同化箱内には高さ調節用の台(H)を置いている。板ゴムと塩化ビニール板の間はラノリンで密閉した。(図1)

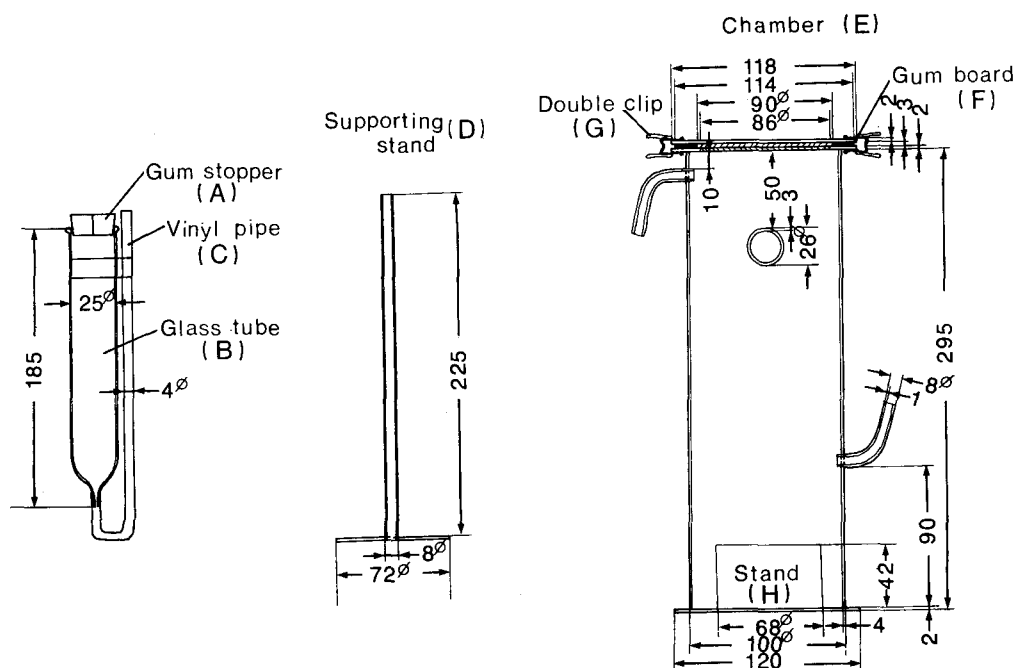


Fig. 1. Specification of assimilation chamber(mm)

同化箱の構造については、主に根岸の同化箱¹⁴⁾を参考にしている。

3) 測定条件

(A) 温度及び湿度

全期間を通じ常緑針葉樹の春～秋の最適温度範囲に入る25℃¹⁵⁾に測定温度を設定した。湿度は加湿状態で測定した。

空気袋(約2.0m³)に溜めた外気はビニールパイプのまま恒温室(25℃, 60%)内の水槽の中を通し、25℃に近づけ、さらに加湿装置で加湿した。同化箱はおもし(N)をつけ恒温水槽(I)に入れ、光の増減に伴う温度変化をクールニックス(ヤマトCTR-120, CTE-120)と磁力設定式温度調節器(J)(新日本計測 JW-MS-09)を用いて調節した。温度測定はサーミスタ端子(K)を同化箱内に入れ測定した。(エイワサーミスター式温度記録装置, 横河6打点記録計)(図1, 2)

(B) 照度

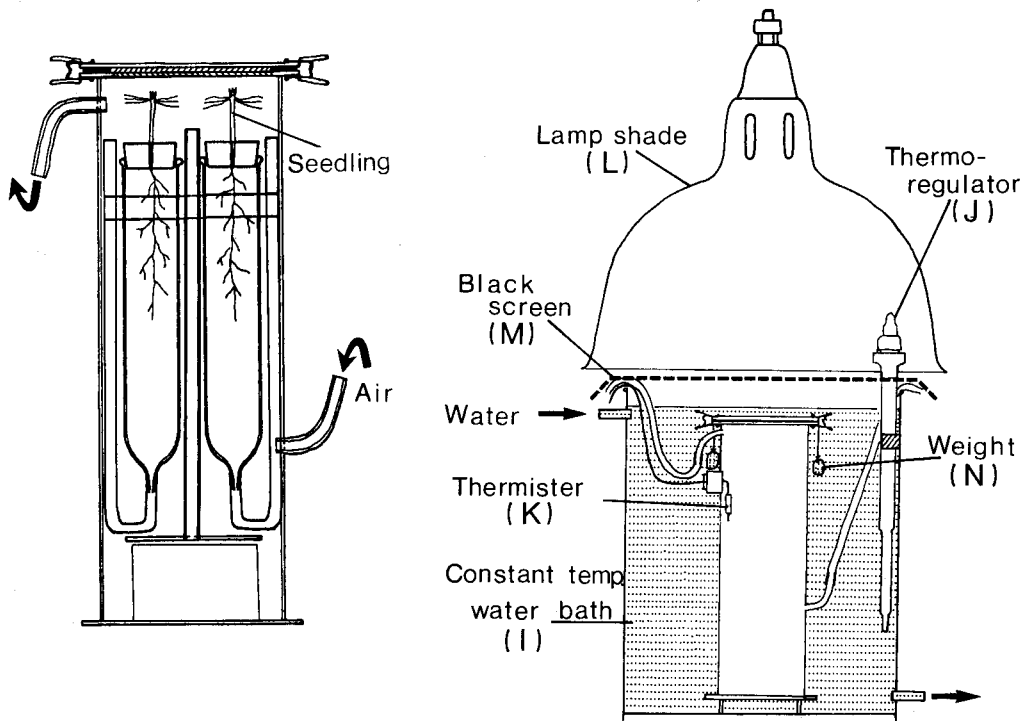


Fig. 2. Structure of assimilation chamber

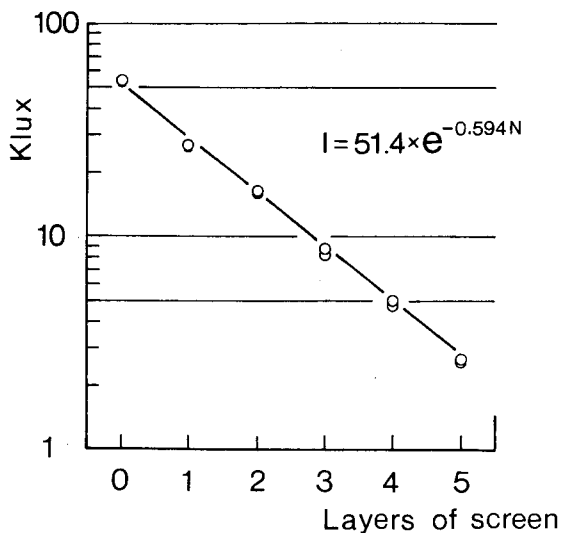


Fig. 3. The relation between illuminance and the layers of screen I: Illuminance, N: Number of layer of screen

光は人工光を用いた。水槽上に陽光ランプ（東芝陽光ランプ D400，東芝高天井用反射笠 SN-40(L) 14 P，東芝メタルハライド灯安定器 4 MT-103H-B）をセットし，黒い寒冷紗(M)を用いて6段階の光条件を設定した。（図2）同化箱内の試料は各光段階毎に交換した。重ねる寒冷紗の枚数と照度（東芝光電池照度計 SPI-5）の関係は片対数グラフで直線となり，(1)式が得られた。（図3）

$$I = 51.4e^{-0.594N} \quad (1)$$

I = 照度 (Klux)

N = 寒冷紗枚数 (枚)

それぞれの光条件の照度は I_0 (full light) - 51.4Klux, I_1 (寒冷紗1枚) - 28.4Klux, I_2 (2枚) - 15.7Klux, I_3 (3枚) - 8.65Klux, I_4 (5枚) - 2.63Klux, I_5 (暗) - 0Kluxであった。7月測定からは光条件を4段階とし, I_0, I_1, I_3, I_4 を用い繰り返しを2回とした。

(c)CO₂ 濃度及び流量

使用水気の CO₂濃度は 6 月～11 月で 324～390ppm の範囲にあった。各月毎にみると、6 月 342～350ppm, 7 月 324～333ppm, 8 月 334～346ppm, 9 月 343～350ppm, 10 月 349～357ppm, 11 月 332～390ppm であった。外気はポンプで空気袋に入れ、測定時の CO₂濃度変化をおさえた。また測定前の同化箱内の試料には、別回路で外気を流し、測定時との CO₂濃度差を少なくした。CO₂濃度の測定には日立一堀場赤外線分析計 EIA-1A 形を使用した。流量は 30 l/hr としたが、これは分析器の検出能力及び同化箱内の CO₂濃度と外気 CO₂の濃度差が、外気 CO₂濃度の 20% 以内に入ることを目安に決定したものである。

光合成、呼吸測定装置については、村田¹⁶⁾17)らを参考にしている。

3. 結果および考察

(1)光合成速度

6 月から 11 月の測定値によって光—光合成曲線を描いた。一般に光—光合成曲線は次の式であらわされるとされる¹⁸⁾。

$$P = \frac{bI}{1 + aI} \quad (2)$$

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{bI} + \frac{a}{b} \quad (2')$$

ここで P は単位葉量（葉面積又は葉重量）あたり、単位時間あたりの総光合成速度、I は照射された光エネルギー量、例えば照度であらわされ、a, b は定数である。(2)あるいは(2)'式は $P = bI$ 及び、 $P = b/a$ を漸近線とする双曲線である。b は $I \rightarrow 0$ における曲線の形を、b/a は $I \rightarrow \infty$ における曲線の形を決める。P—I 曲線をノーマルグラフに描くと b は $I \rightarrow 0$ における曲線のたちあがりの勾配を、b/a は光飽和における P の飽和値を示す。両対数グラフに描くと $I \rightarrow 0$ における漸近線の勾配は常に 1 であって曲線の形は b, b/a の大小にかかわらず変化しない、いわゆる C—D 曲線であらわされる。篠崎の C—D 定規を利用すると定数 b, b/a は C—D 曲線上の B ポイントを読みとることで容易に求めることができる¹⁹⁾。B ポイントは二つの漸近線の交点から横軸におろした垂線と P—I 曲線の交点である。B ポイントを (I_B, P_B) とすれば $I_B = 1/a$, $P_B = b/2a$ である。つまり a は光飽和における P の飽和値の 1/2 の点における I の逆数をあらわすわけである。曲線の形と定数 a, b の関係は以上のとおりである。

測定結果を両対数グラフにプロットし、C—D 定規によって定数 b, b/a を決め、a を求めた。図 4 はその一例で 6 月の処理 1 の結果である。白丸の数だけ同化箱内の試料を交換して測定した。6 月から 11 月まで、各処理毎に、計 30 枚のグラフを描き a, b, b/a を求めた。

当年生クロマツ稚苗では、定数 a, b, b/a は発芽間もない 6 月に高い値を示すが、

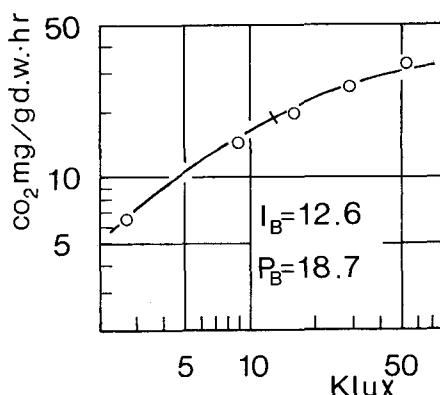


Fig. 4 Light-photosynthesis curve by log/log, June, treatment 1

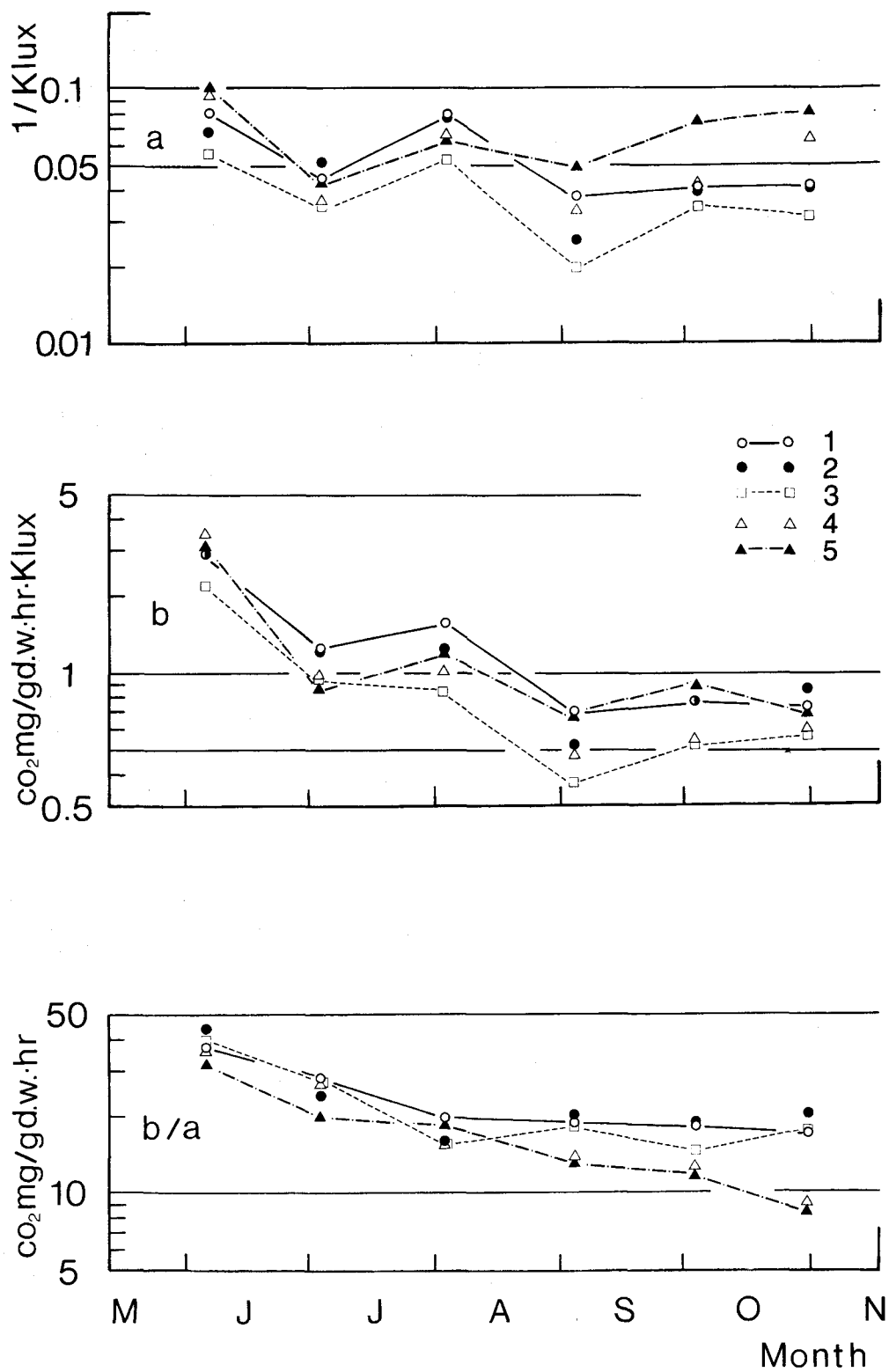


Fig. 5. Seasonal change of coefficients a, b, b/a

徐々に低下し、 a , b , b/a 共 9 月頃からは横這いとなってほぼ一定の傾向を示すのがみられた。すなわち発芽当初の光—光合成曲線は、弱光での立ちあがりの勾配が急で、低い照度で光飽和に達し、飽和時の光合成速度は高い。しかしその後、徐々に立ちあがりの勾配は緩やかになり、光飽和に達する照度は上がり、飽和時の光合成速度は低下していく。(図 5)

Cu 処理による影響は、処理 3 を中心とする中濃度処理苗の b/a の値は 8 月までは無処理とほとんど変わらないけれども、9 月以降にはやや差が認められるようである。 b は終始最も小さい値をとったが、中濃度処理の葉が最も陽葉的であるということであろうか。

高濃度処理苗の b/a については無処理、中濃度処理苗に較らべ、早い時期に既に明らかに低

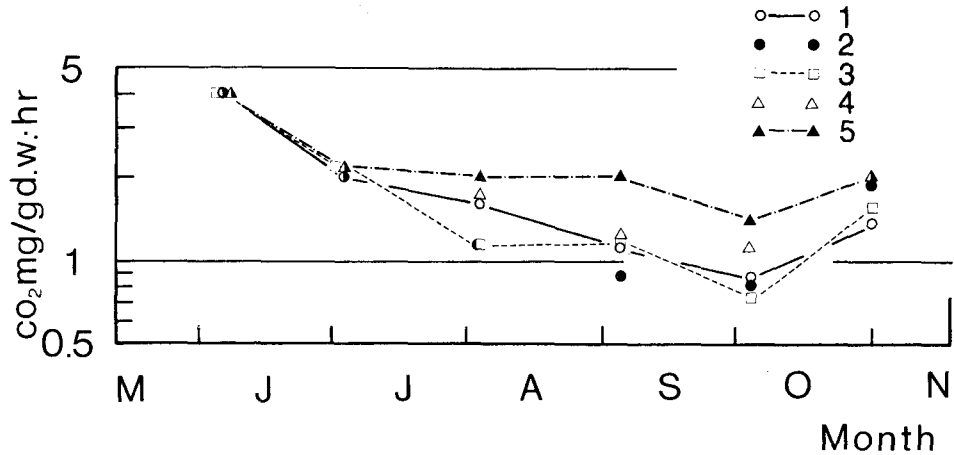


Fig. 6. Seasonal change of respiration

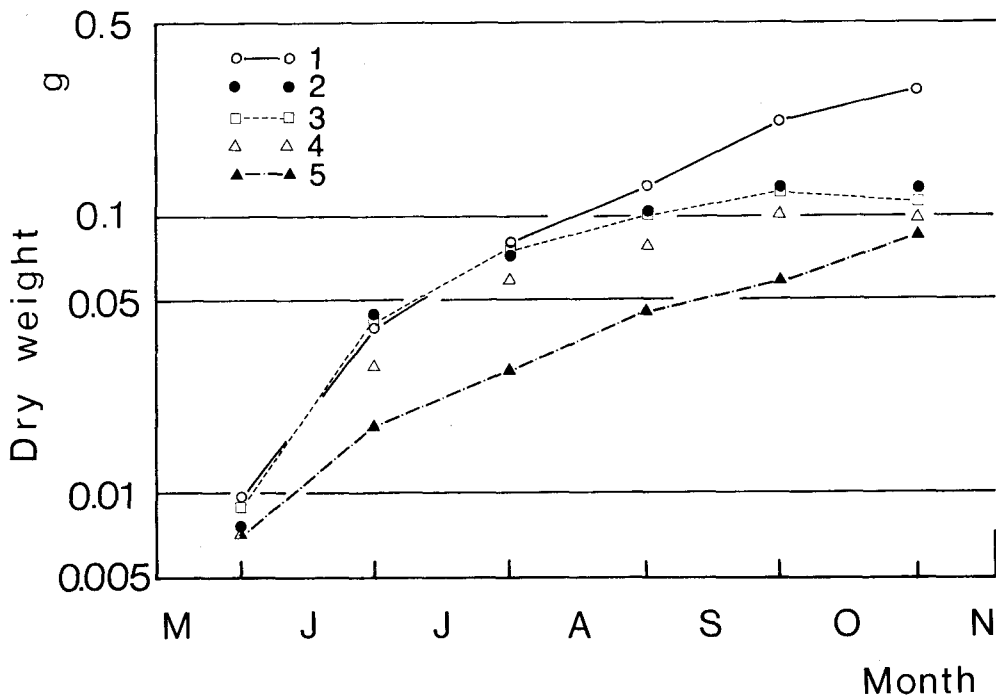


Fig. 7. Growth of leaves in dry weight (g/plant)

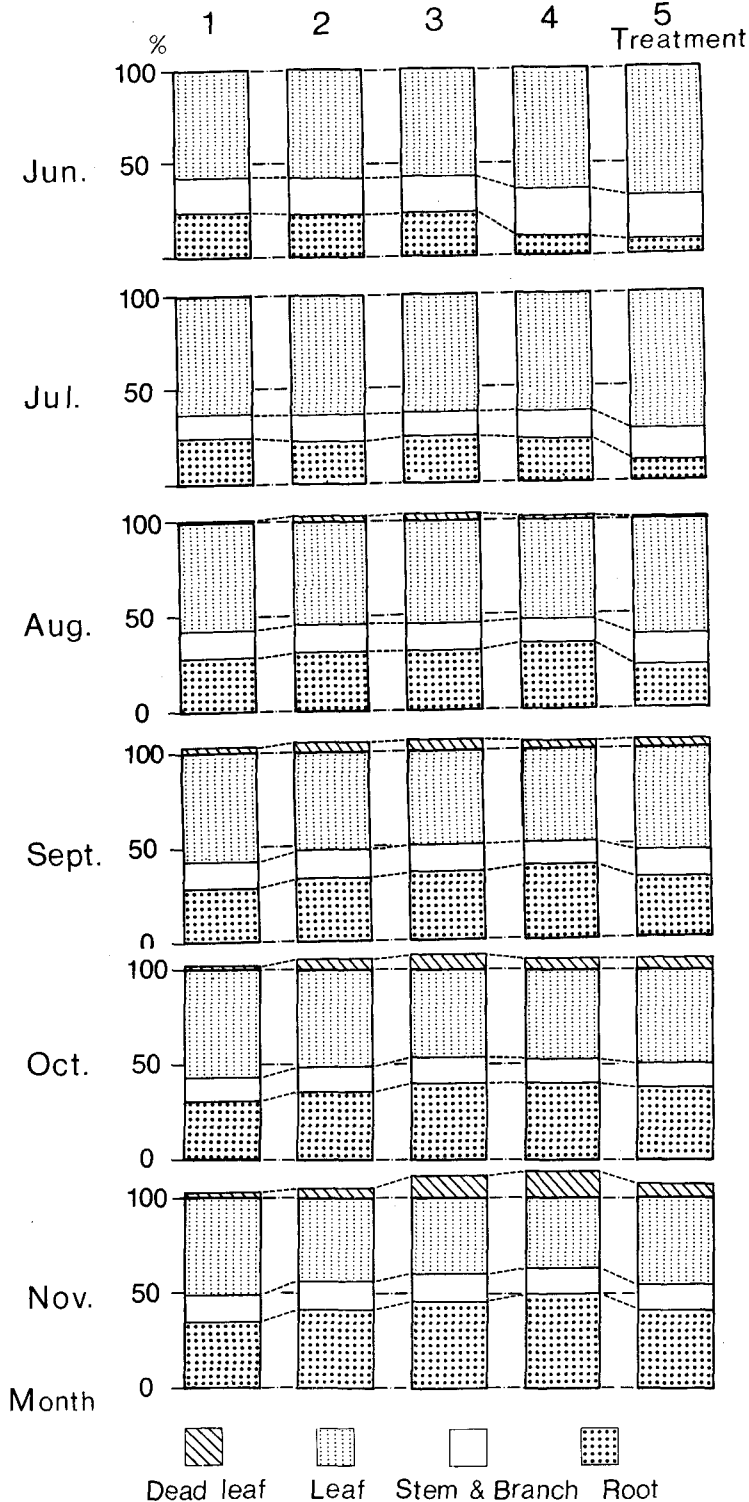


Fig. 8. Ratio of dry matter distribution

くなる傾向が認められた。bの値は中濃度処理のものに較らべかなり高い値をとり弱光域での光—光合成曲線の立ちあがり急で、低い照度で光飽和に達する。

(2)呼吸速度

暗黒下、 I_d における苗の CO_2 放出量を呼吸量とみなして測定結果を検討してみよう。図6に示すようにいずれの処理においても発芽直後の6月にはかなり高い値を示すが、その後、徐々に低下し11月に再びやや高くなるのがみられる。

Cu 処理については、6、7両月には処理濃度による違いはまったく認められず、いずれの処理においてもほとんど同じ値をとった。8月以降高濃度処理区である処理5が他の処理に較らべ顕著に高い値をとる。処理4、3が処理5に次いで高いとは認められない。10月にいたって、はじめて処理4が処理5に次ぐ値を示すようになる。他の低、中濃度処理区のもの、全期間に通じて無処理区との差は認められるにいたらなかった。高濃度処理区が、無処理、

又は中濃度処理区のものに較らば呼吸速度が高いことは、生育ステージが遅れることとも関連があるものように思われる。

(3)植物体の各部乾重

若い植物体の生長量は、光合成によるいわゆる乾物生産量と呼吸による消費量の収支の結果とみなすことができる。とすれば前述の光合成速度、呼吸速度の推移とならんで、植物体の各部乾重の変化は生長量の動向に重要な意味を持ってくる。図7は葉量の増加する様子を示す。光合成器官としての葉量はいずれの処理区においても季節とともに増加する傾向をもつが、処理濃度に応じて葉量は早い時期から顕著な差が認められる。無処理のものは、高濃度処理区のものよりいずれの時期においても葉量は大きく、その差は時期とともにだんだん開いていく傾向にある。低中濃度処理区の処理2, 3は季節の早い頃から8月迄無処理区のものとはほとんど変わらないが、その後、葉量増加は鈍り、11月には、処理5に近いところまで落ち込んでくる。これは多分に処理2, 3, 4を中心とする枯葉量の増加の影響と思われる。

植物体各部重の全重量に対する割合が季節とともにどのように変化するかを示したのが図8である。高濃度処理区では、発芽直後の6月には根の生長が著しく阻害されるようで根の占める割合は小さい。処理1, 2, 3に対し、処理4, 5にこの傾向がはっきり認められる。7月には、処理4で根の割合が回復し、処理1, 2, 3と同じ程度になるのに対し、処理5の根の割合が回復するのは遅れる。しかし、高濃度処理では一時的に根の生長は阻害されるが、中濃度のCu処理区ではCu処理により根の割合はかえって増加されるものと思われる。

過剰Cuを施した当年生クロマツの光合成、呼吸速度あるいは各部乾重について考察してきたが、既往の研究との相異を検討してみよう。光合成速度については、茅野によるMnと水稻を用いた実験では影響が認められず⁸⁾、イタリアポプラとCdを用いた実験では⁹⁾¹⁰⁾、低濃度で促進、高濃度で抑制効果が認められるなど、重金属と光合成の関係はまだはっきりしないことが多い。当年生クロマツとCuを用いた本実験では、低、中濃度の光飽和時の光合成速度でははっきりとした差は認められなかったが、高濃度では明らかな抑制が認められた。呼吸速度についてはさらに明らかでない。茅野⁹⁾では呼吸速度の増大が認められ、丹下¹⁰⁾では、影響は認められず、本間¹²⁾らによるイネ、トウモロコシとCd, Zn, Pbを用いた実験では、Cdは低濃度で増加、高濃度ではCd, Zn, Pbいずれによっても呼吸速度は低下している。本実験では、高濃度処理で呼吸速度は高い値を示した。低、中濃度処理の場合の影響はあきらかでなかった。茅野は、Mn処理によって葉面積が減少すると報告したが⁸⁾、本実験でもCu処理によって葉の形成の遅延、抑制さらに枯葉量の増加による葉量の減少が認められた。

当年生クロマツ苗に過剰Cuを施した場合、この光合成速度の低下、呼吸速度の増加、葉量の減少あるいは非同化部分である根の割合の増加が、クロマツの生育阻害を惹き起こしたものと考えられる。

引用文献

- 1) 平田 照：農耕地の重金属汚染による農作物の被害について、日本の科学者 **9** (4) 123～126, 1974
- 2) 例えば丹下 勲・増田富永：イタリアポプラ苗木の栄養塩吸収に及ぼすCd, Cuの影響 日林講 **84**回 419～420 1973
- 3) 茅野充男・三井進午：重金属元素過剰の際の水稻による鉄の吸収、移行および体内分布 土肥誌 **38** (7) 249～254, 1967
- 4) 茅野充男・三井進午：水稻地上部の鉄濃度に及ぼす重金属元素処理の影響 土肥誌 **38** (7)255～259, 1967
- 5) 茅野充男・三井進午：アルファルファにおける重金属誘導クロロシスの発生と⁵⁹Fe, ⁶⁰Coおよび⁵⁴Mnの分布 土肥誌 **38** (8) 280～286, 1967

- 6) 茅野充男：重金属元素の植物に対する害作用特に重金属誘導鉄クロロシスの発生機構に関する研究 茨城大，農学術報告 15 105～164, 1967
- 7) 堤 道雄：微量元素を巡る諸問題 土肥誌 39 (3) 179～186, 1968
- 8) 茅野充男・三井進午：マンガンの過剰処理が水稻登熟期の炭酸ガス固定に及ぼす影響 土肥誌 39 (6) 320, 1968
- 9) 丹下 勲・山田光一：イタリアポプラ苗木のCdの吸収，蓄積とその光合成に及ぼす影響 日林講 84回 418～419, 1973
- 10) 丹下 勲：イタリアポプラ苗木のカドミウム吸収とその生理的機能に及ぼす影響(1) 文部省特定研究報告 植物群落の物質代謝による環境保全に関する基礎的研究 113～125, 1977
- 11) 武長 宏・小玉昌子：高等植物の光合成作用に及ぼす汚染重金属元素の影響 文部省特定研究報告 土壌～植物系における汚染重金属等の挙動とその指標植生に関する基礎的研究 10～11, 1976
- 12) 本間 慎・久野勝治・服田春子：重金属がイネ科植物の根の生理と形態におよぼす影響 文部省特定研究 植物群落の物質代謝による環境保全に関する基礎的研究 132～150, 1976
- 13) 根岸賢一郎：樹木の非同化器官の呼吸—森林の物質収支と関連して— 日林誌 52 (11) 331～345, 1970
- 14) 根岸賢一郎：ナエの同化量をはかるためのかんたんな同化箱 日林誌 43 (7) 261～262, 1961
- 15) Negisi K., Photosynthesis, Respiration and Growth in 1-year-old Seedlings of *Pinus densiflora*, *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* Bull. Tokyo Univ. Forests 62 1～115, 1966
- 16) 村田吉男・襲聖浩・李鍾烈：非切断葉の光合成測定のための使いやすい装置とそれによる測定例 日作紀 37 692～693, 1968
- 17) 戸刈義次：作物の光合成と物質生産 1971
- 18) Tamiya H., Same theoretical notes on the Kinetics of algal growth, Bot. Mag. Tokyo, 64 759-760 167～173, 1951
- 19) 篠崎吉郎：植物生長の Logistic 理論 学位論文(京都大学) 1961

Résumé

The photosynthetic and respiratory activities of one-year-old Japanese black pine (*Pinus Thunbergii* P.) seedlings treated with excessively applied copper (CuCl_2) solution were investigated. The concentrations of copper solution applied to the soil were 0, 40, 120, 260, and 430 ppm. The results are summarized as follows:

1) The photosynthetic activity expressed as $1/p = 1/bI + a/b$ can be determined with the constants b and b/a . Both of the constants b and b/a change with the advance of the seasons and vary between the seedlings with different level of copper concentration treatments.

2) Constant b decreases with the course of time, which means the gradient of light-photosynthetic curve in the lower light condition is greater in the early part of the season. In all seasons, the b values of high and low or non treated seedlings show little differences but that of medium treated seems to be less than the others (Fig. 5).

3) Constant b/a shows the general trend to decrease with the advance of season. The CO_2 uptake due to photosynthetic activities is the highest in the measurements made just after germination. The higher the treatment concentration, the less the values of b/a become. The difference between the treatments becomes clearer with the course of time (Fig. 5).

4) The respiration rates are the highest in those measurements made just after germination. In all the treatments the respiration rates show the gentle downward trend until October, then abrupt increase in November. The respiration of the samples of high concentration treatments is higher than the others (Fig. 6).

5) The amount and the growth of the leaves vary remarkably between the treatments as illustrated in Fig. 7.