

重金属汚染と樹木の生長 II

——過剰 Cu 処理された当年生クロマツ苗の植物体内 Cu 濃度変化——

安 藤 信

Heavy metal pollution and tree growth II

——Cu concentration of plants 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植物体各部の Cu 濃度経時変化、ならびに、使用ポット内 0.1N HCl 可溶の可給態土壌 Cu 濃度経時変化を調べた。土壌に処理された CuCl_2 溶液の濃度は 0, 40, 120, 260, 430ppm であった。その結果の概要は、

1) 土壌 Cu 濃度の経時変化は、片対数グラフで直線となる指数関係であらわされ、高濃度処理の土壌程、濃度低下の傾きが急である。

2) Cu 処理を施していない植物体（処理 1）各部位の Cu 濃度は、季節によってかなりの変動を示すが、一般的には、生育初期あるいは形成期に高く、生育の盛んな時期に低下し、生育後期に再びいくらか高くなる傾向がみられる。各部位別の濃度は、それぞれが生育期間を通じて一定の濃度変動幅をもっているが、冬芽>根>胚軸>上胚軸・葉の順の濃度傾向がみられる。枯葉は上胚軸及び葉より明らかに高い値を示すが、濃度変動が激しい。

3) 過剰 Cu の添加により、高濃度処理区では、根>冬芽>上胚軸>胚軸>枯葉>葉の順に濃度が高くなる。すなわち、植物体にとって Cu の取り入れ口である根、それに地上部では非同化部分の新生部位である冬芽、上胚軸は低濃度処理でも処理差は歴然としている。それに対し、胚軸、枯葉、葉は根の Cu 濃度が 300 ppm を越えた高濃度処理で Cu 処理の影響が顕在化する。

4) 葉の Cu 濃度に対し枯葉の Cu 濃度がいくらか高いが、これは生育初期の Cu 濃度の高い子葉および初生葉が枯れた結果と思われる。また、Cu の添加による葉の Cu 濃度の上昇は少なく、せいぜい 30ppm 程度であるが、枯葉は 100ppm を越えることもある。葉の過剰 Cu に対する反応として高濃度 Cu を含む葉を落葉という形で体内から離脱させ、Cu を排泄させる作用が考えられる。

5) 冬芽、上胚軸では、低濃度処理から、濃度の上昇がみられたが、このような部位における濃度上昇は次年度の生長低下を予測させる。

1. は じ め に

過剰に施された重金属が植物体内でどのように分布していくか、重金属の体内での挙動につい

て我国でも農作物を中心に多くの研究が行なわれてきた^{1),2),3),4)}。その中で Cu については、石塚らによって根に多量に蓄積されることが明らかにされ、またそのために養分吸収が阻害されることも報告された^{5),6)}。その後茅野らによる数種の重金属元素間の比較試験より、Cu のような電気陰性度が大きい元素は低濃度でも毒性が強く、体内での移行性が低いために根への蓄積が大きく、地上部への転流が抑えられることも報告されている^{7),8)}。一般的にはこのような傾向を示すとしても吸収のパターンは植物種によって異なるであろうし^{9),10),11)}、実際田崎らは植物の側から重金属を吸収しにくいいため比較的良好に生育するもの、重金属をよく吸収し生育低下が著しいもの、重金属を吸収するが障害は現われにくいものの三つのタイプに分類している¹²⁾。本研究は比較的研究の遅れている樹木を対象に栽培実験を行ない、過剰重金属に対する植物の反応を植物体内濃度変化を中心に考察したものである。今回の報告では過剰 Cu を施した土壌で発芽させた当年生クロマツ苗の部位別、経時的 Cu 濃度変化を考察し、既報の草本等の結果との検討を行なうとともに、栽培が行なわれた土壌の Cu 濃度変化についても検討を行なっている。

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全般にわたりご指導いただいた。森林生態学研究室各位にはいろいろご協力いただいた。実験場所として苗畑の一部の使用を認められた農学部附属演習林、特に吉川勝好講師には実験実施においていろいろお世話になった。植物体各部の名称については、農学部応用植物学研究室、中村信一博士に貴重など助言をいただいた。記して深く感謝の意を表したい。

2. 試料および分析法

1) 栽培法

試料は、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）において、1/5000 a のワグナーポットを用いて、1975年5月から11月にかけて栽培した当年生クロマツ稚苗である。鹿沼土とバーミキュライトを体積比で1:1に混ぜ合わせたものを、生重にして約1.7kg ポットに入れ、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日後に処理液を抜き、充分水洗攪拌し、5月2日クロマツ種子を播いた。播種種子数は各ポット40粒であるが、栽培期間を通じて混み合うものは適宜間引きを行なった。また使用した土壌は極めて肥料分が少ないため、本実験に影響の出ない程度の施肥、灌水を行なった。

肥料は1000倍ハイポネックス溶液 100~250cc を用い4月30日より6, 7, 8月を中心に12回行なっている。

2) 試料の採取

(2-1) 植物体

5月2日に採種した後、6月1日、7月1日、7月31日、8月30日、9月30日、10月28日と約30日毎に6回試料を採取した。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。試料は光合成、呼吸測定苗（前報）¹³⁾に生長量測定苗を加え、各処理6月80本、7月64本、8, 9月54本、10, 11月46本採取したが、さらに分析に必要な量を確保するために予備苗を用意した。試料は各部分に分け、80°C、48時間の風乾を行ない分析に供した。植物体は根（root）、幹（stem）、葉（leaf）、冬芽（winter bud）、枯葉（dead leaf）に分けたが、幹についてはさらに胚軸（hypocotyl）、上胚軸（epicotyl）に分け、枝（branch）の生じた場合（無処理）は上胚軸に入れた。ここで用いた胚軸、上胚軸とはそれぞれ子葉より下部、上部の茎的部分をさしている。葉は当年生マツの場合子葉（cotyledon）、初生葉（juvenile leaf）、普通葉（foliage leaf）に分かれ

るが、葉として合わせて分析した。枯葉は樹体についているものののみ分析に供した。また本実験では普通葉の枯葉はみられなかった。

(2-2) 土 壤

処理直後の4月18日と、植物体試料採取時と同時に土壌（鹿沼土とバーミキュライトの混合物培地、以下土壌とよぶ）の採取を行なった。植物体が入ったポットからの採取は困難なため、あらかじめ土壌採取用に用意した各処理4つのブランクポットより、隔月毎2ポットずつ土壌をとることにした。土壌はポットの土をあげ充分攪拌し、乾重にして約25g程度採取した。この攪拌の影響か、植物体の存在の影響か、植物体が入ったポットの方が、ブランクポットよりいくらかミネラル濃度が高い傾向もみられたが、ブランクポットの分析値を栽培土壌条件の目安とした。また野外での調査結果では、重金属の地表面への集積が報告されているが^{2),14)}、短期間の実験であり、処理後土壌を攪拌していること、ポット栽培のため土壌深度がないためか、地表面へのCuの集積はみられなかった。採取した土は80°C、48時間風乾し、粉碎、直径2mmのメッシュに通る分だけ回収した。

3) 分析法

(3-1) 植物体

試料は0.5gを分析に供したが、試料の多いものは試料の攪拌、また分解を容易にするために細かくし、さらに80～85°C、48時間風乾後秤量した。試料の少ないものは全量を分解に用いた。分解は硝酸：過塩素酸：硫酸＝7：7：1の混酸で湿式灰化し、灰化後1：1塩酸約5ccで洗い落とし純水で50ccとした。重量の少ないものは25ccとしている。分析は原子吸光法を用いた。

(3-2) 土 壤

粉碎した試料は80～85°Cで48時間風乾後5g秤量し0.1N HCl 50ccを用いて30°C、1時間の恒温振とう後抽出した。分析は原子吸光法を用いた。原子吸光法はHITACHI ATOMIC ABSORPTION SPECTROPHOTOMETERを用い、土壌については181-50型、植物体は207型を使用した。分析は常法を参考にした¹⁵⁾。植物体は部位により試料が少ないため、それぞれの試料について絶乾率を測定していない。少数の試料について同様に調整、乾燥した植物、土壌試料を105°C、24時間乾燥したところ、絶乾率は99%を超えていることがわかった。したがって、個々の試料についても絶乾率はほぼ100%に近い値を示しているとみなした。

3. 結 果

1) 土壌 Cu 濃度の経時変化

0.1N HCl 可溶の土壌 Cu 濃度変化を示したのが図1である。一般にミネラル量の経時変化は片対数グラフで直線の関係がみられるが、本実験でもその傾向がみられた。処理直後のいくらか高い4月18日の値を省いて、栽培が行なわれた5月から11月のデータを用いて近似してみると

$$C_1 = 3.26e^{0.00108T}$$

$$C_2 = 32.4e^{-0.000473T}$$

$$C_3 = 90.3e^{-0.000926T}$$

$$C_4 = 186e^{-0.00251T}$$

$$C_5 = 279e^{-0.00279T}$$

C＝処理別土壌 Cu 濃度 (ppm)

T＝播種後日数 (日)

の関係が得られた。T＝0のときのy切片は、播種時の各処理のCu濃度の推定値(ppm)を表わす。無処理(処理1)ではいくらかCu濃度の上昇がみられ、処理2では濃度差は少ないが低下、処理3～5では処理濃度が高くなるにつれ勾配も大きくなった。無処理の濃度上昇は施肥の

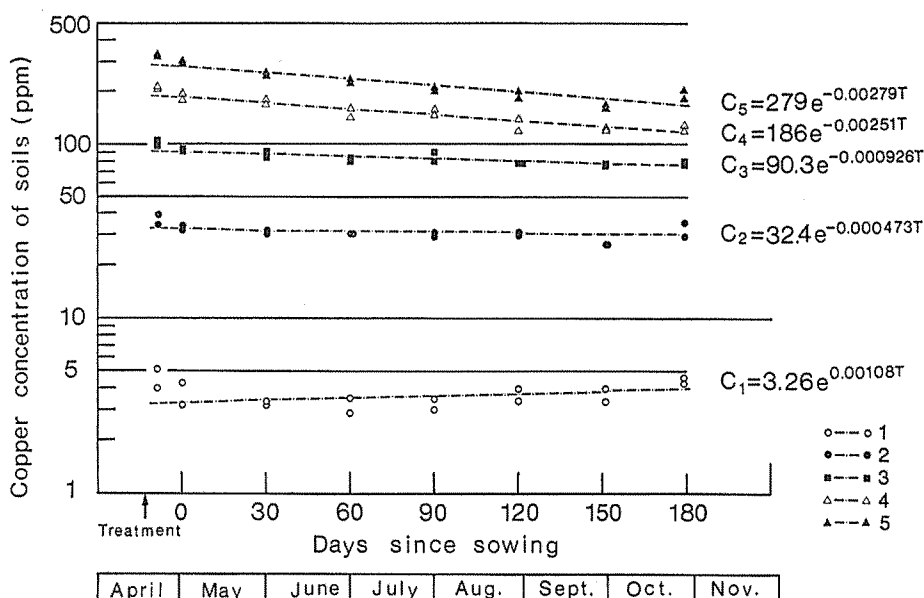


Fig. 1 Seasonal change of copper concentration in soils (0.1 N HCl extractable)
 C: Copper concentration of soils (ppm)
 T: Days since sowing (day)

影響かと思われるが、上昇は少なく、本実験への施肥の影響はないものとみなした。推定値で見ると栽培期間内で処理1で3.26→3.97ppm、処理2で32.4→29.7ppm、処理3で90.3→76.5ppm、処理4で186→118ppm、処理5で279→169ppmの濃度変化があり、処理4と5ではいくらか濃度幅に重なりがみられたが、処理間の差は歴然としていた。栽培期間約180日の1/2にあたる90日の推定値、すなわち処理1—3.60ppm、処理2—31.6ppm、処理3—81.1ppm、処理4—148ppm、処理5—217ppmを土壌濃度として以下の議論の中で用いている。

2) 当年生クロマツ苗の各部 Cu 濃度 (無処理)

無処理の各部位別 Cu 濃度は生育期間を通じかなりの変動を示すが、根20~50ppm、胚軸20~40ppm、上胚軸15~20ppm、冬芽50~70ppm、葉7~20ppm、枯葉15~30ppm、そして地上部としては10~20ppmの範囲内にあり、30日毎の測定より部位別に Cu 濃度順位を集計してみると当年生クロマツでは冬芽>根>胚軸>上胚軸・葉の順の濃度傾向がみられた。枯葉は常に上胚軸及び葉より Cu 濃度は高かったが、形成初期のものの濃度が高く、他の部位との順位が激しかった。上胚軸と葉では上胚軸形成後しばらくは上胚軸の Cu 濃度が高く、生育期後半には葉の Cu 濃度の方が高まった。一般に地上部各部でみられるように Cu 濃度は生育初期あるいは形成期に高く、生長の盛んな時期には濃度は低下し、再び生育期後半にいくらか高くなるようである。枯葉の Cu 濃度が形成初期高いのも、当年生苗の場合、主に生育初期の Cu 濃度の高い子葉及び初生葉を中心に枯れるためと思われる。根については、10, 11月の Cu 濃度が低くなっているが、T/R 比の経時変化(図3)でも明らかなように根の生長が比較的生育期後半に集中するためと考えられる。

3) 過剰 Cu 処理された苗の Cu 濃度

Cu 添加により根では低濃度処理の処理2, 3ですでに明らかな処理の影響がみられた。播種30日後の Cu 濃度は60日後の濃度の60%前後で60日以降は変動もみられるがほぼ一定となった。高濃度処理の処理4, 5でもそれぞれの土壌濃度に応じて根の Cu 濃度は上昇し、処理5では生

育後期には 1000ppm を超える値を示した。しかし処理 5 の濃度変化は、低濃度処理あるいは処理 4 と異なり 6 月から 7 月にかけて一度濃度の低下がみられ、7、8 月の値はかえって処理 4 より低い値を示した。このような高濃度処理苗の濃度変化は、その時の根の生長とのかかわりが大きいように思われる。すなわち図 3 でも明らかに高濃度処理苗の T/R 比は発芽直後極めて高く根の生長阻害が著しかった。6 月の処理 5 の苗は、根量が著しく小さいが、7 月には T/R 比はいくらか回復し、その後他の Cu 処理苗同様かえって根の割合が無処理のものより増加する傾向がみられた。根の増加に伴ない Cu を多量に蓄積するといわれる細根の発達^{2), 6)}もあり、濃度上昇が続き、8 月以降は処理 4 より高い濃度に達したものと考えられる。また処理 5 におけるこのような Cu 濃度変化、そしてすでに処理 5 の苗が発芽時に根の発達不良等で転倒し枯死が生じている点を考慮すると、当年生クロマツ苗の場合、土壌濃度にして 200ppm 前後に生育可能な限界濃度があるように思われる。

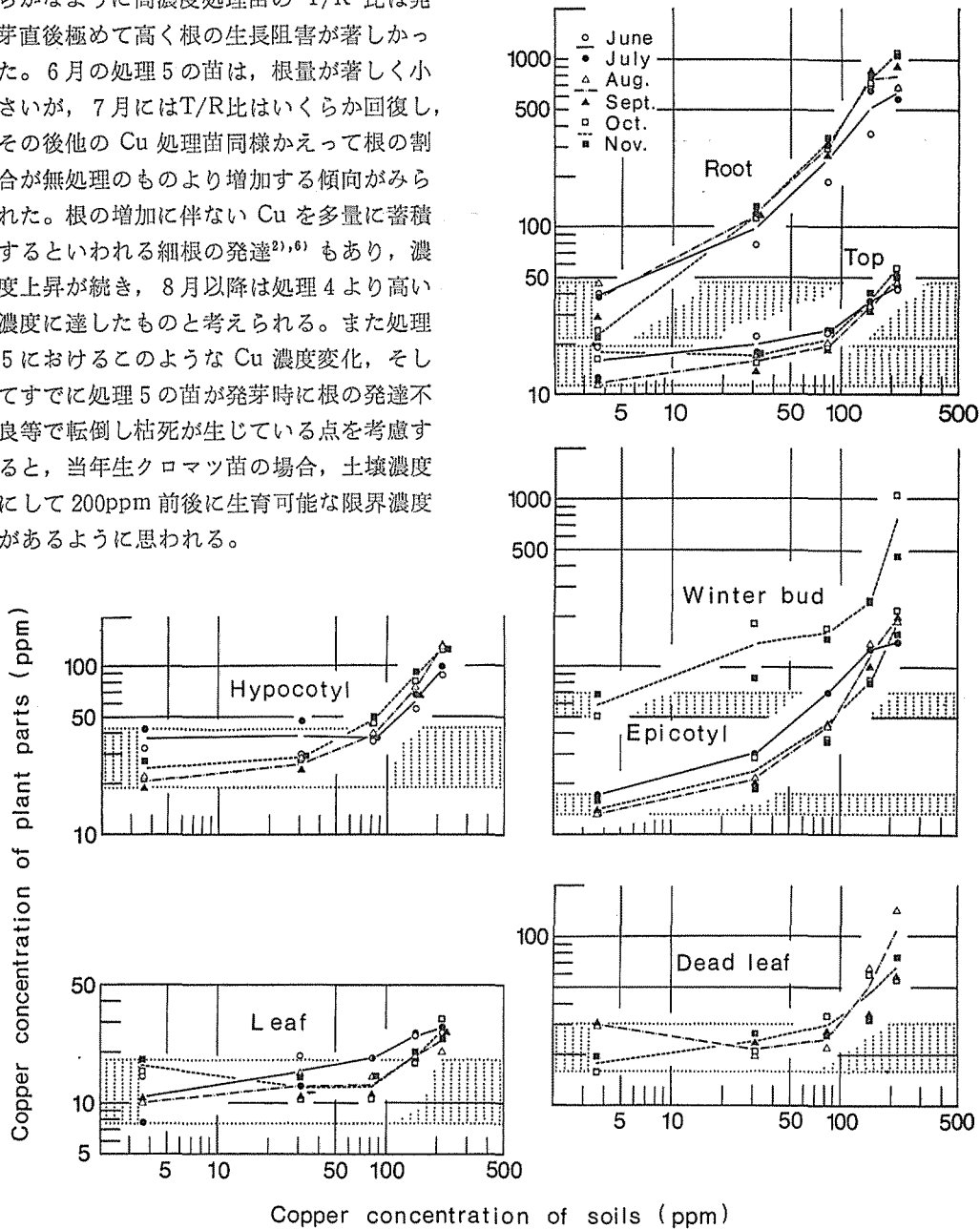


Fig. 2 Effect of excessively applied copper on copper concentration of plant parts of one-year-old Japanese black pine. The fluctuations of copper concentration of plant parts are respectively within the limits of spots (Control). Copper concentrations of soils are estimated values taken 90 days after sowing. (Fig. 1)

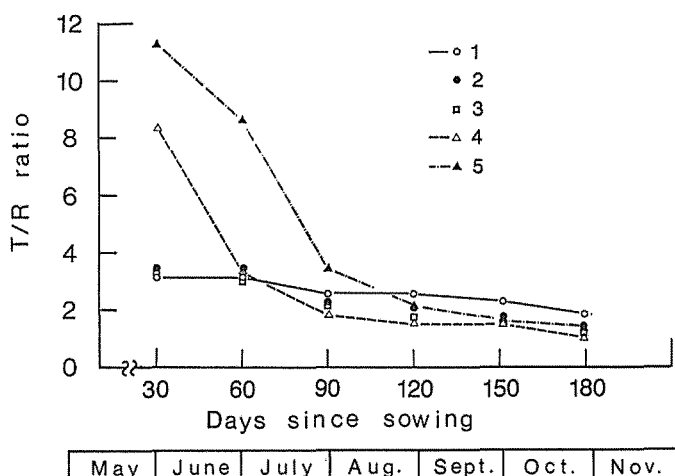


Fig. 3 Seasonal change of T/R ratio (Top/Root dry weight)

根の Cu 濃度が処理濃度に応じて明らかな添加の影響を受けるのに対し、地上部ではその影響は比較的少ない。地上部全体としては、土壌濃度80ppm、根の濃度にして300ppm 前後より Cu 濃度上昇がみられた。各部を非同化部分と同化部分に分けてみると、まず非同化部分の中では新生部位である冬芽、上胚軸は、地上部における他の部位と異なり、低濃度処理より Cu 添加の影響がみられた。特に冬芽は植物体各部位の中で本来高い Cu 濃度を示すものであるが、処理5では根の濃度に近い1000ppm に及ぶ値となった。胚軸は処理の影響が比較的現われにくい、低濃度処理の処理3で濃度上昇の傾向がみられ、処理4、5では濃度上昇は明らかとなった。

同化部分の中で葉の Cu 濃度は Cu 処理の影響を最も受けにくく、低濃度処理のものは完全に無処理の濃度範囲内（7～20ppm）にあった。高濃度処理では濃度の上昇が認められるが、処理5においても30ppm 前後で無処理との差は小さかった。枯葉は全体的に葉より Cu 濃度が高いが、葉同様低濃度処理のものは無処理のもの（15～30ppm）との差は認められなかった。しかし高濃度処理のものは処理の影響は明らかで、処理5では100ppm を超える値を示した。

4. 考 察

土壌 Cu 濃度（0.1N HCl 可溶）の経時変化は指数関数にあてはめられ、栽培期間内でもそれぞれの処理区で濃度変動幅がみられ、高濃度処理程濃度低下の傾きが急であった。濃度低下の原因についてはポットが無栓のため雨水による流亡、土壌中 Cu の時間経過に伴う不溶化等も考えられるが明らかでない。この点については、土壌中 Cu 全量の測定も必要となろう。本報告では、土壌 Cu 濃度の値を栽培期間の1/2にあたる7月31日の推定値で代用した。土壌を培地に栽培実験を行なう場合植物が土壌に含まれた可給態養分を吸収するため、土壌条件の表示は添加量より土壌濃度で表わすのが適当と思われるが、栽培期間内に濃度変化があるためどの時期の濃度で表わすのが適当か問題が残る。長期の栽培実験では栽培初期あるいは各掘り取り時の値だけでは、期間内の土壌条件を表示しきれないし、掘り取り時迄の濃度平均あるいは変動幅では土壌条件の表示として優れているが、土壌の上に生育する植物が、それぞれの時期にそれぞれの土壌濃度条件のもとに生育してきているため最も優れた表示方法とは考えられない。報告の中では栽培期間の1/2、当地におけるクロマツ生育期間のほぼ1/2にあたる7月31日の推定値を用いてこの時

期に土壌 Cu 濃度がそれぞれの値になるような処理土壌で栽培を行なったと考えると共に、その変動幅を記載することにした。

植物体各部の Cu 濃度を総括してみると、前述したように当年生クロマツの本来の Cu 濃度順位は冬芽>根>胚軸>上胚軸・葉の順に高く、枯葉は上胚軸・葉より高いが順位変動が大きかった。それに対し高濃度処理された処理 4, 5 の 10, 11 月の測定値では、根>冬芽>上胚軸>胚軸>枯葉>葉の順となり、各種草本について調べられた結果^{4), 6), 7)}同様、Cu の根への集積が、きわめて大きかった。根は Cu にとって土壌から植物体への入口であるが、植物体にとっては、各種養分、水分の取り入れ口であり、植物の支持組織としても重要な役割を果している。このような部位が Cu を多量に集積し、根量比をも増加させて¹³⁾、Cu の地上部への転流を防いでいることは興味深いことである。しかし見方をかえて地上部側から見れば Cu のイオンとしての移行性が低い^{4), 7)}ことを考慮しても、根の濃度がある程度に達するまで地上部への転流を抑える選択性が植物体自身に備わっているように思われる。実際各部位別にみると、地上部でも新生部位で非同化器官である冬芽、上胚軸では、根と同様、低濃度処理のものから濃度上昇は明らかで、冬芽ではかなりの高濃度に達するが、根から地上部への転流の入口となっている胚軸、同化器官である葉、あるいは枯葉などは根の濃度が一定の値に達するまでは処理の影響は少なく、葉では高濃度処理を行なっても無処理のものとの濃度差は極めて小さかった。このような結果から Cu のイオンとしての移行性だけでは解決できない各部位固有の時期的な要求量、そして許容量があり、それに準じて各部位が選択的に Cu を蓄積しているように思われる。

ここで最も Cu 添加による影響の大きかった根の Cu 濃度を基準にして過剰に Cu 処理された当年生クロマツ苗の体内 Cu 濃度を中心とした植物の反応を 3 段階に分類してみた。まず第一段階として低濃度、すなわち根の濃度にして 300ppm に到るまでは、過剰 Cu はそのほとんどが根に蓄積され、地上部への影響は少ない。しかし地上部では、冬芽、上胚軸といった新生部位で濃度上昇がみられ、葉においては、生理的に不活性なものあるいは Cu 濃度の高いものの落葉が起こり¹³⁾活性な新しい葉との交換が行なわれる。第二段階として根の濃度が 300~1000ppm 前後に到るもので、根から地上部への転流は活発となり、冬芽、上胚軸の濃度上昇勾配はさらに急に、胚軸、葉、枯葉でも濃度の上昇は顕在化する。樹体に葉を再成する能力があるものは落葉が盛んとなり、そのため残った葉と枯葉の濃度差は大きくなる。しかし葉を再成できない程衰弱したものは葉の Cu 濃度は上昇し、枯葉が生じた場合の Cu 濃度はかなり高くなる。そしてこのような葉の Cu 濃度の高い個体は、葉あるいは植物体全体の生理作用への影響が大きくなり¹³⁾いずれ樹体の生長は著しく低下していくものと思われる。また第一段階でも明らかであった冬芽、上胚軸の Cu 濃度の上昇は、当年生苗において重量の減少をもたらした。このような部位は量的には植物体内で占める割合が低い、次年度の生長を支えるだけに、たとえ低濃度であろうと、樹木にとって経年的な生長の低下を予測させる。そして第三段階は根の濃度が 1000ppm を超える場合である。土壌濃度が 200ppm を超える場合は根の濃度が 1000ppm に到らずとも、発芽直後より根の重量減少は著しく、養分、水分の吸収は不可能となり、地上部を支持することができず、苗は転倒し枯死に導かれるものと思われる。

引用 参考文献

- 1) 土壤肥料学会編：近代農業における土壌肥料の研究 第 3 集 62~92 1972 養賢堂
- 2) 農林水産技術会議事務局：農用地土壌の特定有害物質による汚染の解析に関する研究 研究成果 92 1~200 1976
- 3) 小林 隆：土壌中微量重金属の天然賦存量および毒性等について 公害と対策 11 (11) 1300~1312 1975

- 4) 石塚喜明・田中 明・藤田 収：水稻の要素代謝に関する研究（第6報）土肥誌 **32**(3) 97~100 1961
- 5) 石塚喜明：植物に対する銅イオン有害作用の起因に就て（第1報）土肥誌 **14**(4) 248~262 1940
- 6) 石塚喜明：植物に対する銅イオン有害作用の起因に就て（第2報）土肥誌 **16**(2) 43~45 1942
- 7) 茅野充男・北岸確三：重金属元素の過剰による水稻の被害に関する研究（第1報）土肥誌 **37**(6) 342~347 1965
- 8) 茅野充男・北岸確三：重金属元素の過剰による水稻の被害に関する研究（第2報）土肥誌 **37**(7) 372~377 1966
- 9) 土山和英・斎尾健二・中村 隆：銅および亜鉛の土壤汚染に関する調査研究 大阪府農林技術センター研究報告 第13号 55~62 1976
- 10) Antonovics J. A. D. Bradshaw R. G. Turner: Heavy Metal Tolerance in Plants Advance in Ecological Research **7** 1~85 Academic Press London and New York
- 11) 田中 明・但野利秋・三浦 周：重金属適応性の作物種間差（第4報）土肥誌 **49**(5) 361~366 1978
- 12) 田崎忠良・牛島忠広：土壤重金属汚染地帯における植物の生育・重金属吸収反応に対する種特異性 生物科学 **26**(1) 15~23 1974
- 13) 安藤 信：過剰 Cu 処理された当年生クロマツ苗の光合成及び呼吸 重金属汚染と樹木の生長 I 京大演報 **52** 1~10 1980
- 14) Williams D. E. J. Vlamis A. H. Pukite and J. E. Corey: Trace element accumulation, movement, and distribution in the soil profile from massive applications of sewage sludge Soil Sci. **129** (2) 119~132 1980
- 15) 農林水産技術会議事務局：土壌および作物体中の重金属の分析法 (1) (3) (4) 土肥誌 **43**(7) 264~270 (9) 349~356 (10) 390~395 1972

Résumé

The copper concentrations of plant parts of one-year-old Japanese black pine (*Pinus Thunbergii* p.) seedlings treated with excessively applied copper (CuCl_2) solution and the copper concentrations of soils (0.1 N HCl extractable) in pots used were investigated. The concentrations of copper solution applied to the soils were 0, 40, 120, 260, 430 ppm.

The results are summarized as follows:

- 1) The copper concentrations of soils treated with excessively applied copper decrease with the course of time and these decreasing curves are expressed by exponential functions. The higher the treatment concentration, the greater the gradient of decrease becomes.
- 2) The copper concentrations of plant parts of control group change with the advance of the seasons. It seems that they are high in the early growing season or the formative season and show a tendency to decrease and become slightly high in the late growing season again. The order of concentrations of plant parts is winter bud > root > hypocotyl > epicotyl · leaf in all seasons though they have respectively the width of fluctuation. ("epicotyl" refers to the stem part above the cotyledon.) Dead leaf is higher than epicotyl and leaf, but the fluctuation is sharp.
- 3) The order of concentration of plant parts is root > winter bud > epicotyl > hypocotyl > dead leaf > leaf (High concentration treatments). The concentrations of root, winter bud and epicotyl increase from low concentration treatments but that of hypocotyl, dead leaf and leaf begin to increase in high concentration treatments. (over 300 ppm-root concentration)
- 4) The concentration of dead leaf is higher than that of leaf because dead leaf is made of cotyledon and juvenile leaf in the early growing season whose concentrations are high.

The concentration of leaf scarcely increase and is 30 ppm at the utmost in high concentration treatments but that of dead leaf increases over 100 ppm. It seems that plant drifts leaves whose copper concentrations are high and it excretes copper.

5) It is prospected that increase of copper concentration in winter bud and epicotyl from low concentration treatments prevents plant from growing in next year.