

重金属汚染と樹木の生長 V

——過剰 Cu 処理が当年生クロマツ、スギ、ヒノキ苗の
生長と植物体内 Cu 濃度に及ぼす影響——

安 藤 信

Heavy metal pollution and tree growth V

——Effect of excessive Cu treatment on growth and Cu concentration in one-year-old seedlings of *Pinus Thunbergii*, *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa*——

Makoto ANDO

要 旨

過剰 Cu 処理を行なった当年生クロマツ、スギ、ヒノキ苗の植物体内 Cu 濃度変化と、それらの樹種の生長への影響の違いについて考察した。Cu の土壌処理は、Cu として 0, 40, 175, 400 ppm の濃度の塩化第二銅溶液をポットあたり 1ℓ 用いて行なった。結果の概要は次のとおりである。

- 1) 土壌 Cu 濃度は経時的に減少し、かつその傾きは時間の経過とともに小さくなる傾向が認められた。
- 2) Cu 処理を施していない植物体の各器官の Cu 濃度は発芽直後高く、以後低下する。当年生苗の Cu 濃度は葉の変動幅が大きく、3 樹種間ではヒノキの濃度が高かった。
- 3) 過剰 Cu の添加により、根>幹>葉の順の Cu 濃度上昇の違いがみられ、根においては発芽直後より Cu 処理による影響は明らかであった。クロマツの根あるいは地上部への濃度の上昇はスギ、ヒノキに比べ遅れた。
- 4) 当年生苗の生長に及ぼす Cu の影響はスギ>ヒノキ>クロマツの順に現われた。

1 は じ め に

重金属等の生長阻害物質の植物への影響について樹木を対象に行なわれた研究は比較的少ない¹⁻³⁾。筆者はこれまで重金属に対する耐性が大きいとされるクロマツ苗を用いて過剰 Cu に対する反応を考察してきた⁴⁻⁷⁾。今回は、本邦で林業上有用樹木種として多く苗木生産されているスギ、ヒノキ稚苗を用いてクロマツ苗との生育の違いについて考察を試みた。重金属汚染土壌でのこれらの樹種の生長の違いについては、すでに木暮^{2,3)}らが群馬県安中市の Cd, Zn, Pb 汚染土を用いて播種、植栽試験を行ない、マツ類に比較してヒノキ、さらにスギの生育阻害が著しいという結果を報告しているが、これらの結果を踏まえ、重金属元素の違いによる樹木種の反応の違いについても言及した。

本研究を実施するにあたり、京都大学農学部堤利夫教授、岩坪五郎助教授、愛媛大学農学部荻野和彦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、演習林教職員各位にはいろいろご協力いただいた。記して深く感謝の意を表する。

2 試料および分析法

京都大学農学部附属演習林苗畑（京都市左京区北白川追分町）において、1/5000a のワグナーポットを用いて、1977年5月から翌年の3月にかけて栽培した当年生クロマツ、スギ、ヒノキ稚苗を用いた。栽培土壌は、鹿沼土とパーミキュライトを体積比で1:1に混ぜ合わせ、生重にして約1.7 kg ずつポットに入れた。これまで一連の実験に使用した汚染土壌は、新規に準備した土壌に混ぜて使用した。1976年4月22日と1977年3月15日にそれぞれ塩化第二銅溶液を用いて4段階のCu処理を行なった。処理液の濃度は処理1（無処理）—0 ppm, 処理2—40 ppm, 処理3—175 ppm, 処理4—400 ppm で、それを各ポットあたり1ℓずつ加えた。前年に4種類のCu処理を施した土壌と1977年に処理を行なった計8種類の土壌を使って栽培実験を行なった。1977年5月17日、3樹種の種子を播き約1年間栽培した。栽培期間中、適宜通常水の灌水をしたが施肥は行っていない。

当年生稚苗は生育ステージにより各器官の生長、植物体内Cu濃度、ミネラル濃度は大きく変わるので^{5,7)}、過剰Cuの樹木稚苗に及ぼす影響をみるためには苗木試料採取時期を充分検討しなくてはならない。本報告では発芽間もない6月9日と生長停止期にあたる翌年3月13日に試料を採取し、地際直径、樹高、根長を測定し、各器官に分割し80~85℃で48時間風乾後乾重を測定し分析に供した。植物の各器官は樹種により形態が異なるが、3樹種間の比較を行なうため細分した各器官を根（Root）、幹（地上部非同化器官 Stem）、葉（同化器官 Leaf）にまとめて考察した。試料は乾重にして0.5 g 秤量し、硝酸：過塩素酸：硫酸=7:7:1の混酸で湿式灰化し原子吸光法によりCuを定量した。

土壌中のCu濃度変化をみるため、2カ月おきに、翌年3月までに計5回土壌を採取、分析した。植物体が入ったポットからの土壌採取は困難なため、あらかじめ土壌採取用に用意したブランクポットから乾重にして約25 gの土壌を採取した。このブランクポットの分析値を栽培土壌Cu濃度とした。当年生苗個体のCu吸収量は極めてわずかであった⁸⁾から、このブランクポットによるCu濃度の測定値は充分信頼しうるものと考えた。採取した土壌は80~85℃で48時間風乾後粉碎し、直径2 mmのメッシュを通る分だけ回収した。乾重にして5 g 秤量し、0.1 N 塩酸50 ccを用いて30℃、1時間の恒温振とう後抽出し、Cu含有率の分析は原子吸光法を用いた。分析法は植物体、土壌ともに常法⁹⁾を参考にしている。

3 結 果

1) 土壌Cu濃度の経時変化（表1）

0.1 N 塩酸可溶の土壌Cu濃度の経時変化は片対数グラフで直線の関係が得られ⁵⁾、各Cu処理区で土壌Cu濃度は経時的に低下し、濃度の高い処理区ほど低下率は大きかった。処理後1年間放置した1976年処理土壌に比べて、1977年処理土壌の方が濃度の低下は著しい傾向がみられた。無処理区のCu濃度は低くばらつきが大きい、徐々に濃度は上昇する傾向にあった。それぞれのCu処理区のCu濃度変化を $C=Ae^{BT}$ の指数関数で近似し、得られた実験式と植物体試料採取時迄の栽培期間の推定Cu濃度の変動と栽培期間の1/2の推定値を表に示した。ここで式のパラメータAは $T=0$ のy切片、すなわち播種時のCu濃度推定値（ppm）、BはCu濃

Table 1 Estimated values of copper concentration of soils

Treatment	Function	Copper concentration (ppm)	
		June 9, 1977 (range)	March 13, 1978 (range)
1976	1 $C_{11}=7.43e^{-0.000489T}$	7.43 (7.43—7.44)	7.48 (7.43—7.54)
	2 $C_{12}=39.6e^{-0.000377T}$	39.4 (39.6—39.3)	37.4 (39.6—35.4)
	3 $C_{13}=97.4e^{-0.000339T}$	97.0 (97.4—96.7)	92.6 (97.4—88.0)
	4 $C_{14}=192e^{-0.000498T}$	191 (192—190)	178 (192—165)
1977	1 $C_{21}=5.23e^{-0.000821T}$	5.28 (5.23—5.33)	5.91 (5.23—6.69)
	2 $C_{22}=43.4e^{-0.000452T}$	43.2 (43.4—43.0)	40.6 (43.4—37.9)
	3 $C_{23}=127e^{-0.000583T}$	126 (127—125)	117 (127—107)
	4 $C_{24}=260e^{-0.000550T}$	258 (260—257)	239 (260—220)

C: Copper concentration of soils (ppm)

T: Days since sowing (day)

度の経時変化の傾きを表わす。試料採取時の Cu 濃度は栽培期間の 1/2 の推定値をもって以下の議論の中で土壌 Cu 濃度として用いた。

2) 植物体への影響

イ) 形態的变化 (図 1, 5)

発芽直後, クロマツは高濃度処理区で樹高に少し生長の遅れがみられたが, 3 樹種ともに樹高, 地際直径への影響は少なかった。根長は, クロマツの高濃度処理区ですでに伸長は抑制されるが, 発芽あるいは初期生長の遅いスギ, ヒノキへの影響はほとんどみられない。1 年後には各樹種とも Cu 処理による形態的变化は明らかとなり, その影響は根長に最も顕著にあらわれた。スギは低濃度処理区から伸長は抑制されるのに対し, ヒノキ, クロマツでは影響は現われにくい, 3 樹種とも高濃度処理区では根の生長は阻害された。地際直径, 樹高についても同様の傾向はみられたが, 比較的樹高への影響の方が大きいようであった。

ロ) 各部乾重量の変化

発芽直後高濃度処理区でクロマツの根の重量の減少がみられ, スギ, ヒノキにもいくらかその傾向が認められたが, 3 樹種ともに地上部への影響はみられなかった。1 年後, 各器官で Cu の影響は顕著となり, 特にスギは低濃度処理区より影響はみられ, 高濃度処理区での重量減少は著しかった。ヒノキ, クロマツの場合, 低濃度処理区では無処理区よりむしろいくらか重量が増える傾向もみられたが, 高濃度処理区では重量減少は明らかで, ヒノキの方がクロマツより低い濃度からの重量減少傾向が現われた。(図 2)

T/R 比は, 3 樹種とも生育初期の高い値から, 生長するにつれ低下する経時変化を示した。過剰 Cu による植物の生長の遅れは T/R 比を高い値に保った。発芽直後, Cu 処理による影響は高濃度処理区で高い値となったが, これは高濃度処理区の生育ステージが遅れていることと, それ以上に根の生長が阻害されているためである。この高い T/R 比はクロマツに特に顕著にあらわれた。1 年後, クロマツ, スギの高濃度処理区でこの傾向はいくらか残るが, ヒノキの低濃度処理区から高濃度処理区にかけて, あるいはクロマツ, スギの低・中濃度処理区にみられるように T/R 比はむしろ低下した。T/R 比に及ぼす Cu の影響は, 特に高濃度処理区で一時的に T/R 比が増加することがあるが, 全体的には Cu の添加により低下し地上部に対する根の割合は増加するようである。(図 3)

ハ) 体内 Cu 濃度変化 (図 4)

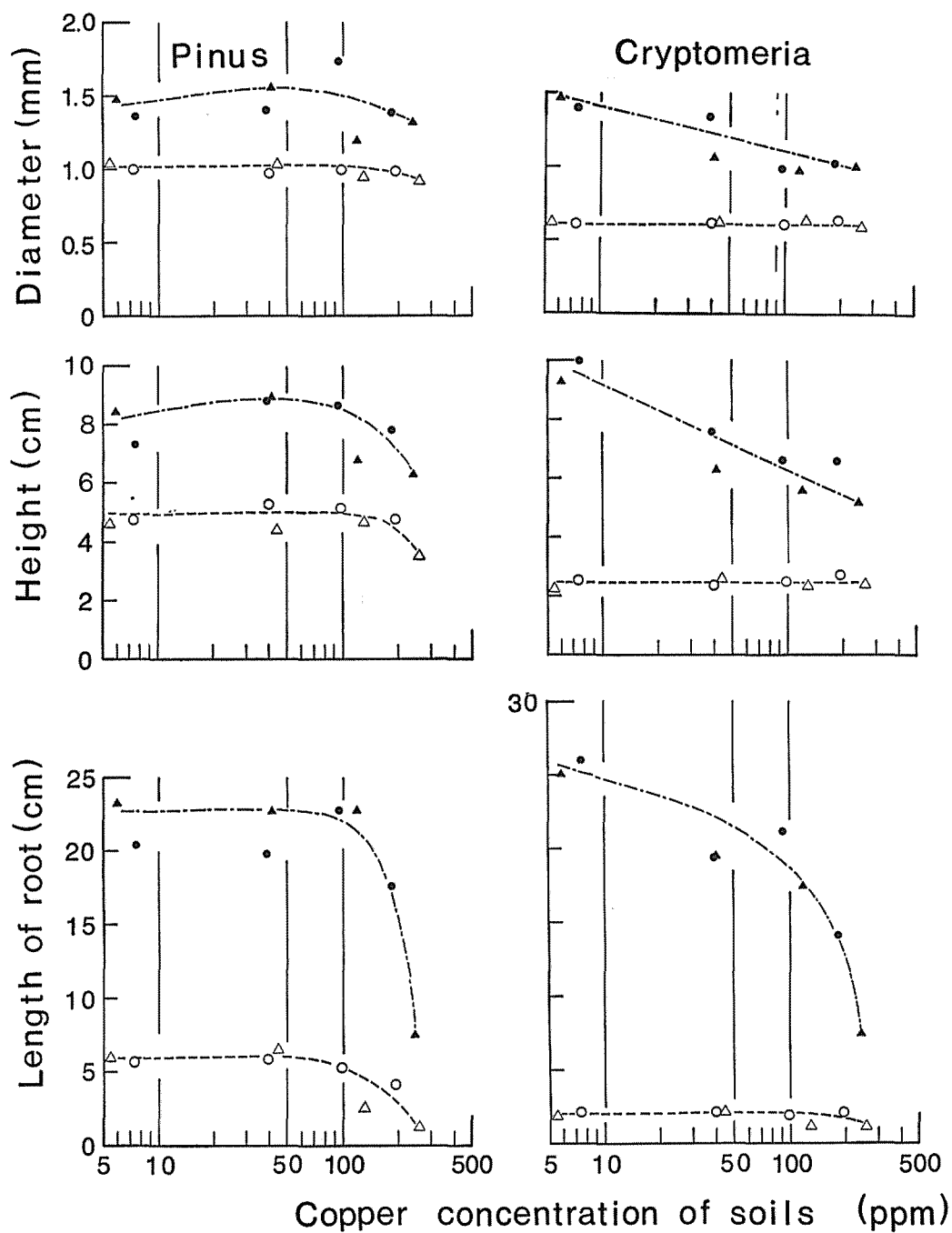
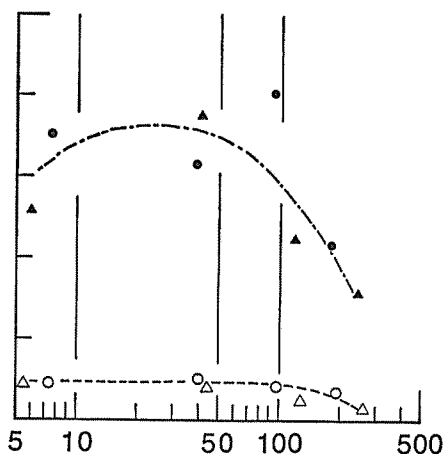
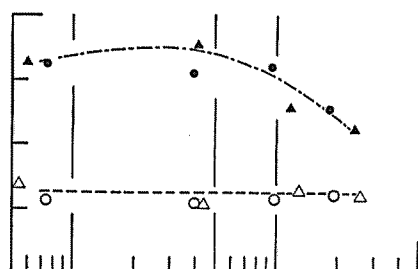


Fig. 1 Effect of excessively applied copper on external forms

Chamaecyparis

○ (1976 Tr.) --- △ (1977 Tr.) June 9, 1977

● (1976 Tr.) --- ▲ (1977 Tr.) March 13, 1978



当年生のクロマツ、スギ、ヒノキ稚苗の Cu 濃度季節変化（無処理苗）は、3 樹種ともに発芽直後高く、1 年後に低下する傾向がみられた。樹種、器官別にみると、全体としてはヒノキの Cu 濃度は高くその変動巾は小さく、また葉の Cu 濃度は低くその変動巾は大きいといった傾向がみられるが、樹種、器官により時期的にかなり異なった。Cu 処理による影響は、各樹種ともに発芽直後より各器官で濃度上昇がみられ、特に根に最もはっきりとあらわれ、葉への影響は小さかった。根の Cu 濃度はスギ、ヒノキが低濃度処理区より急勾配に上昇するのに対し、クロマツの濃度上昇はこれらに比べ緩く、高濃度処理区では Cu 濃度の上昇が鈍る傾向がみられた。地上部の Cu 濃度も、根ほど急激なものではないが、スギ、ヒノキで低濃度処理区から幹、葉に影響は現われるのに対し、クロマツの地上部特に葉への影響は現われにくかった。1 年後の Cu 濃度は、苗木自体の濃度の低下もあり、高濃度処理区でも各器官で Cu 濃度の低下がみられるところが多いが、地上部各器官での Cu 処理による影響はさらに判然とした。また、高濃度処理区のクロマツでは根の Cu 濃度はさらに上昇し、地上部においても低濃度処理区より濃度の上昇がみられるのに対し、ヒノキは本来当年生苗の各器官の Cu 濃度が高いため、低濃度処理区と無処理区の Cu 濃度差は発芽直後よりむしろ小さくなった。

4 考 察

土壌中の Cu 濃度（0.1 N 塩酸可溶）が経時的に低下し、高濃度の Cu 処理区ほどその傾きが急になることについては前報⁵⁾で述べたが、本実験結果からもほぼ同様の結果が得られた。1 年を経過した土壌は濃度低下の傾きが緩くなり、前年同様の実験に使用した土壌を半量混ぜて使用した結果、前報³⁾の土壌に比べ低下率は緩い値となった。このようなことから土壌中の Cu の残留期間は短期間の試験結果から予測される以上に長いこと、連

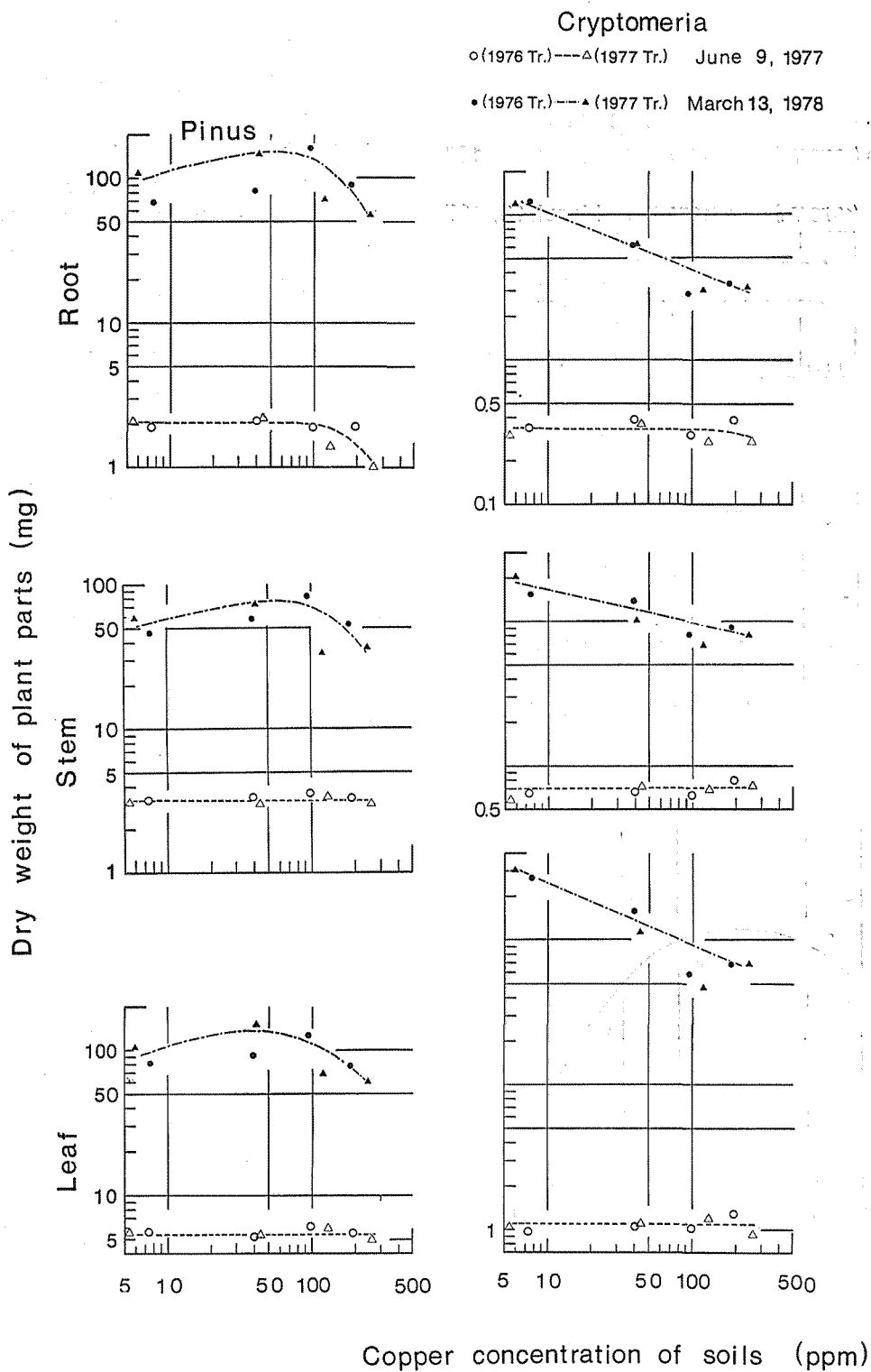
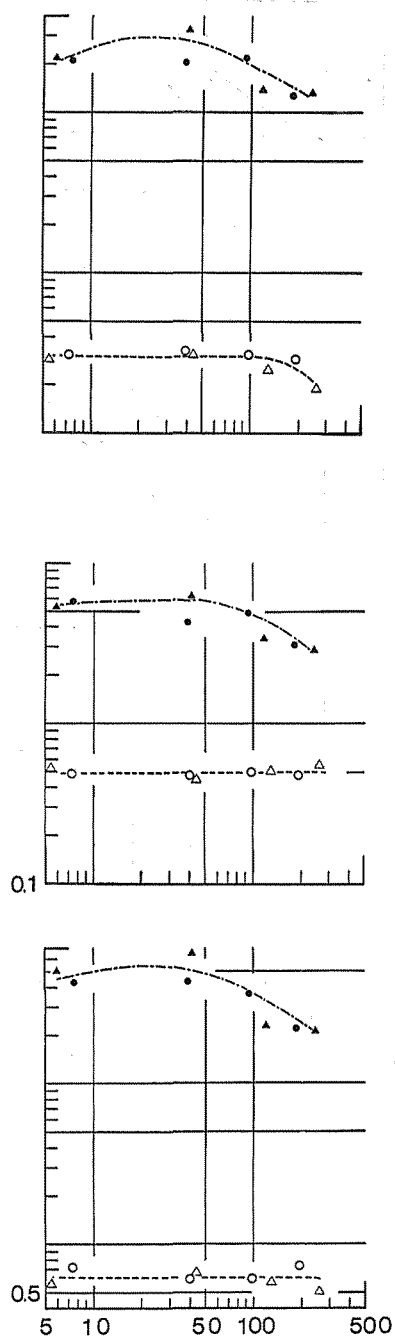


Fig. 2 Effect of excessively applied copper on dry weight of plant parts

Chamaecyparis



○ (1976 Tr.) —△ (1977 Tr.) June 9, 1977

● (1976 Tr.) —▲ (1977 Tr.) March 13, 1978

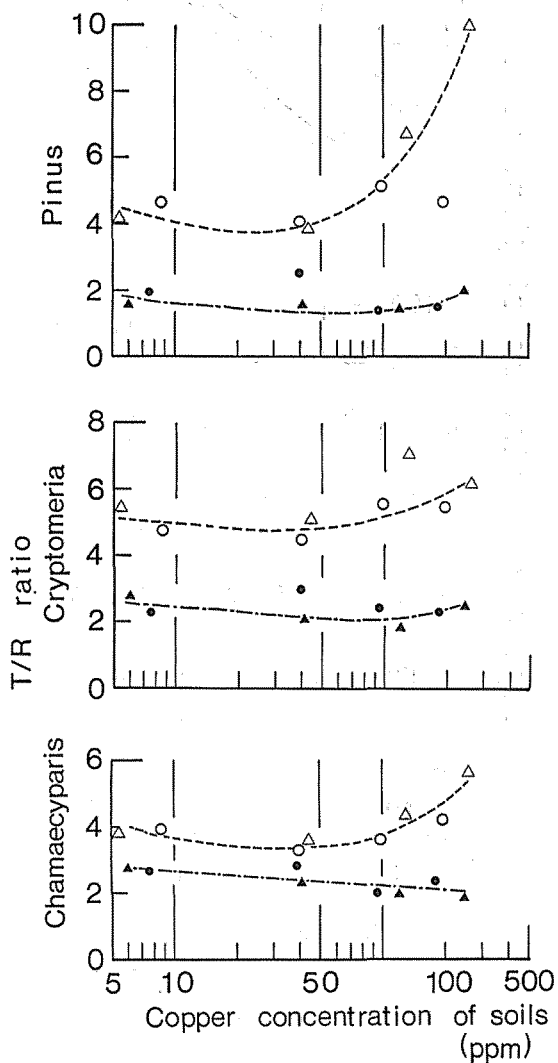


Fig. 3 Effect of excessively applied copper on T/R ratio (Top/Root dry weight)

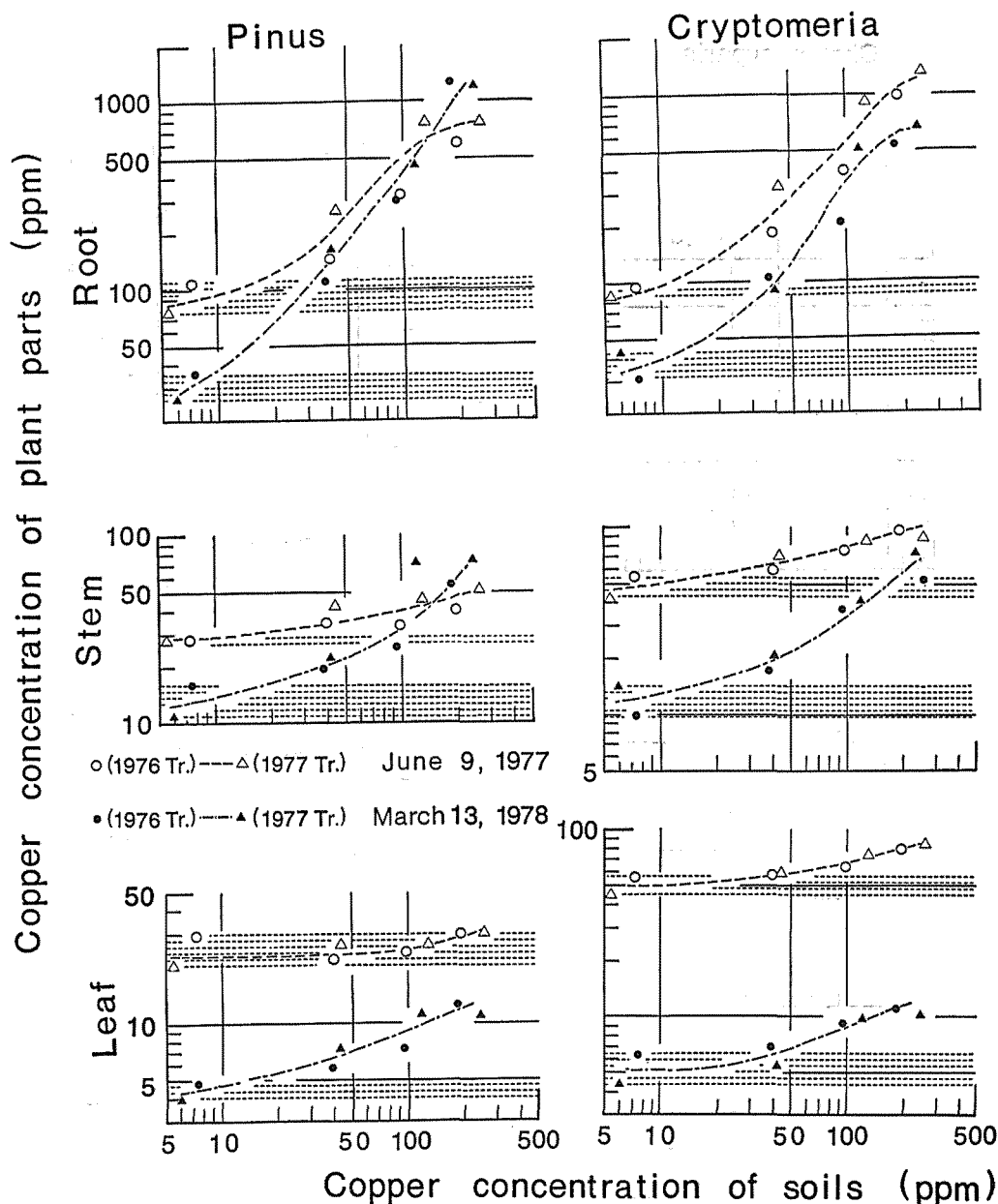
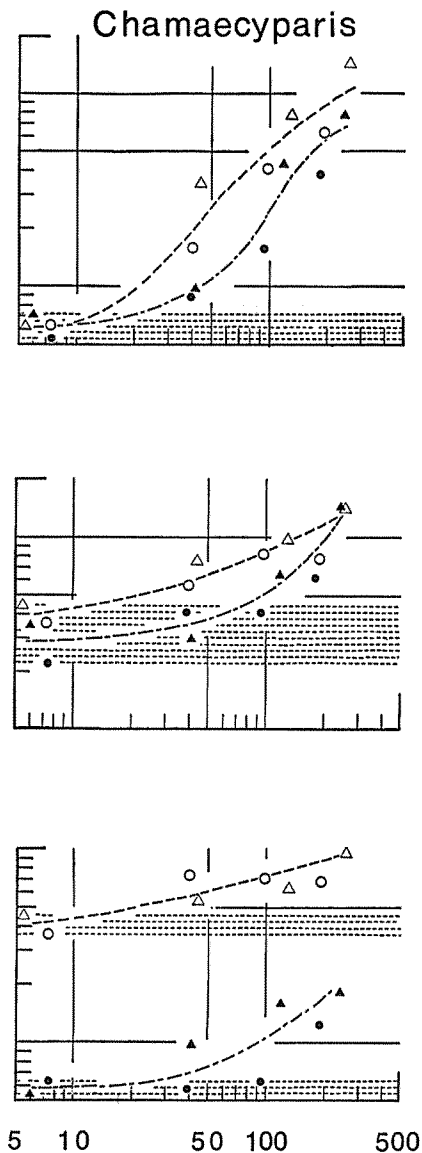


Fig. 4 Effect of excessively applied copper on copper concentration of plant parts

統的な Cu による土壤汚染は Cu の土壤への吸着を促し残留期間を伸ばすように思われるがこれらの点についてはさらに土壤中の Cu の経時的な形態変化について検討が必要であろう。無処理区の Cu 濃度は、測定時のばらつきが大きい、全体からみるとわずかではあるが上昇する傾向がみられた。これは実験中の土壤採取段階での Cu の混入が考えられるが、不定期に行なわれた灌水、雨水、粉塵、他の樹木の落葉落枝など栽培期間中、自然状態での Cu の混入もあるものと思われる。

重金属と樹木種間の反応の違いについての研究は極めて少ないが、その中で木暮^{2,3)}らは、群



馬県安中市の重金属汚染（主に Zn, Cd, Pb）地域で代替農作物として林業用種苗生産の可能性を実証する目的から、アカマツ、クロマツ、スギ、ヒノキの1年生苗の播種試験と植栽試験を行ない、スギ、ヒノキの生育阻害は大きく、特に重金属の植物体内濃度の上昇が著しく、地上部より地下部に多く蓄積するのに対し、マツ類は地上部の濃度がいくらか高いと報告している。重金属として Cu を用いた本実験結果から、3 樹種ともに特に高濃度の Cu 処理区では発芽直後より根の発達は抑制され、1 年後には地上部への影響も明らかとなり、重金属障害はスギ＞ヒノキ＞クロマツの順にあらわれ木暮らと同様の結果が得られた。しかし、体内 Cu 濃度は高濃度処理区で3 樹種ともに根では 1000 ppm 前後の高い値となり、地上部の幹・葉の濃度との違いは歴然とした。それに対し、高濃度処理区では3 樹種間の各器官の濃度差は小さく根と地上部の重金属濃度上昇の違いは、種の違いによるよりはむしろ重金属元素の違いによる方が大きいように思われる¹⁰⁾。重金属の植物体内への侵入は、そのほとんどが根から吸収され地上部へ転流されてゆく。植物体の侵入路である根の濃度上昇は予想されることであるが、その後の重金属の地上部への移動は根の吸収力と許容量、地上部の要求量と許容量など植物のもつ性質と重金属元素自体の特性により異なる。植物の生長は、葉の光合成生産と各器官の呼吸による消費のバランスの上に成り立っているため、まず生産部位である地上部特に葉への影響に注目し、その視点に立って過剰重金属によるきわだった反応を示す根の役割を考察し、さらに葉によって生産された物質がどの器官に配分され次の生長に影響を及ぼすか検討しなければならない。

過剰 Cu の添加によりクロマツ苗では発芽直後、根の Cu 濃度はスギ、ヒノキに比べて濃度上昇は遅れ地上部への影響も遅れるが、1 年後、根も高濃度に達し地上部への影響も明らかであるが生育し続け、過剰 Cu に対する許容量も大きいようであった。それに対し、スギ、ヒノキは濃度の上昇は早い時期よりおこり地上部への影響も現われるが、ヒノキは本来当年生苗の植物体内の Cu 濃度が高いため低濃度では無処理区との違いはあまりみられなかった。植物は体内の Cu 濃度の違いによって種間でその生理的作用の違いはみられるものと思われるが、3 樹種の各器官のこのような Cu 濃度分布の違いが、直接、間接的に作用して当年生苗の過剰 Cu に対する生育

の違いが樹種間で現われたものと思われる。

樹木は生育期間が長いので、短期間の試験結果から結論は出しにくい。これら3樹種についても低濃度のCu汚染区では今後クロマツよりヒノキの生長が優る可能性も有している。過剰重金属と植物の反応の違いについてはさらに汚染の程度と植物の吸収と許容濃度範囲、光合成、呼吸等の生理的作用への影響、生産物の配分などの違い、そして重金属元素間の比較などのデータの集積が必要である。

引用文献

- 1) Kozłowski, T. T., and Torrie, J. H.: Effect of soil incorporation of herbicides on seed germination and growth of pine seedlings Soil Sci. **100**(2) 139-146 1965
- 2) 木暮正平: 重金属土壌汚染畑における育苗試験 群林試験報 **11** 141~150 1973
- 3) 木暮正平・小柏一久: 重金属汚染畑における育苗試験(2) 群林試験報 **13** 135~149 1975
- 4) 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
- 5) 安藤信: 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 重金属汚染と樹木の生長 II 京大演報 **53** 24~32 1981
- 6) 安藤信: 過剰 Cu 処理された当年生クロマツ苗の発芽、伸長、肥大生長に及ぼす影響 重金属汚染と樹木の生長 III 京大演報 **54** 31~41 1982
- 7) 安藤信: 過剰 Cu 処理された当年生クロマツ苗の植物体内養分量および含水量 重金属汚染と樹木の生長 IV 京大演報 **55** 33~44 1983
- 8) 安藤信: 未発表
- 9) 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)(2)(3)(4) 土肥誌 **43**(7) 264~270 (8)305~311 (9)349~356 (10)390~395 1972
- 10) 土壌肥料学会編: 近代農業における土壌肥料の研究 第3集 73~80 1972 養賢堂

Résumé

Difference of effect of excessive Cu on growth and Cu concentration of one-year-old seedlings among Kuromatsu (*Pinus Thunbergii*), Sugi (*Cryptomeria japonica*) and Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) was investigated. Cu applied to the soils was treated by one liter of copper (CuCl_2) solution, whose concentration was 0, 40, 175, 400 ppm respectively. Treatment was carried out in Spring of examining year and of preceding year. The results are summarized as follows;

- 1) Cu concentration of soils treated with excessively applied Cu decreased and the gradient of decrease became more gentle with the course of time.
- 2) Cu concentration of plant parts of control group changed greatly with the advance of season. They were high immediately after germination and showed a tendency to decrease. The fluctuation of Cu concentration of leaf was wide and Cu concentration of one-year-old Hinoki seedlings was the highest in general among these three species.
- 3) The order of Cu concentration of plant parts treated excessive Cu was root>stem>leaf. Cu concentration of root increased from early growing season. The increase of Cu concentration of Kuromatsu seedlings was the slowest among these three species.
- 4) The order of the effect of excessive Cu on growth of one-year-old seedlings was Sugi>Hinoki>Kuromatsu among these three tree species.

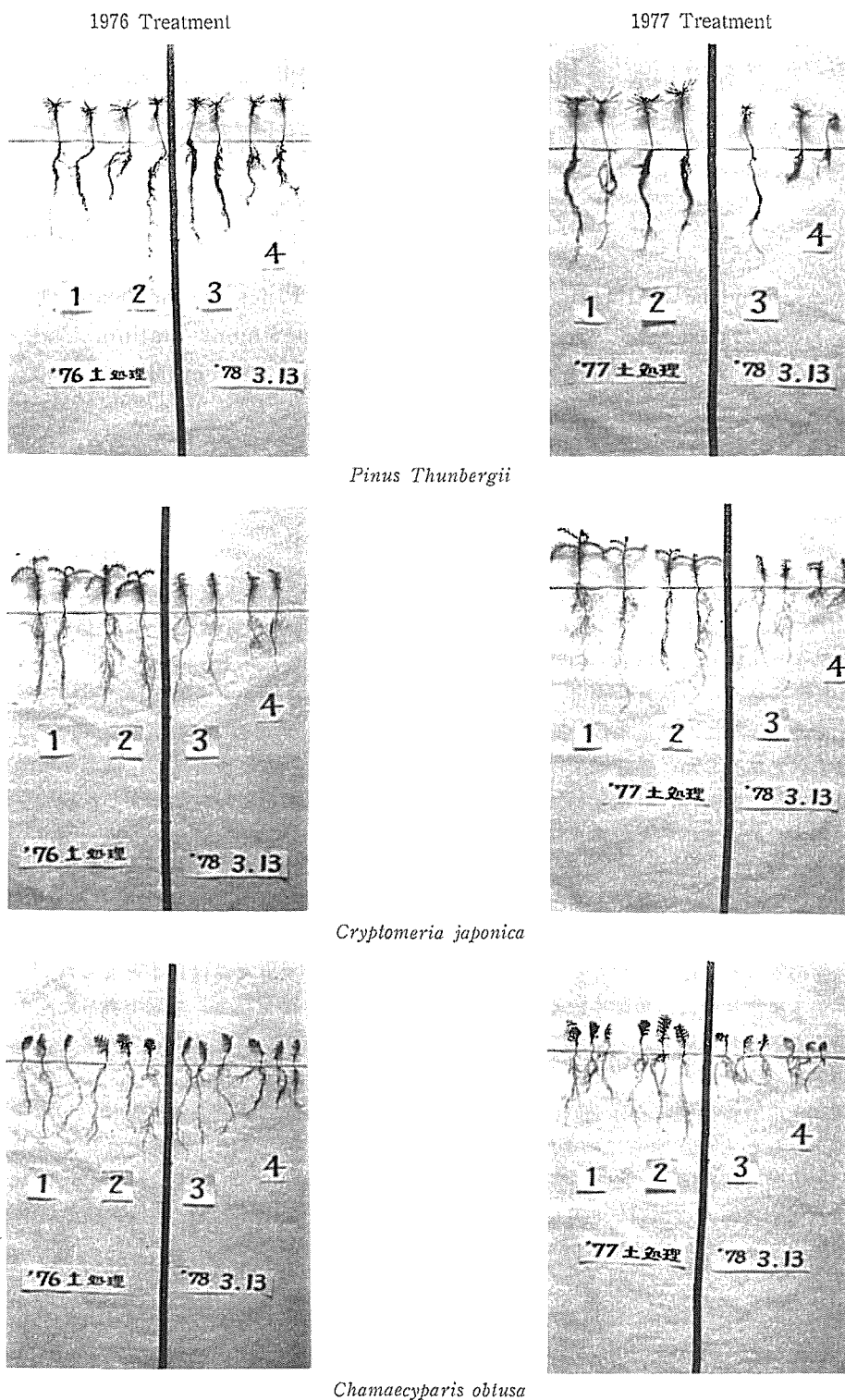


Fig. 5 Effect of excessively applied copper on plant growth of one-year-old *Pinus Thunbergii*, *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* seedlings