

中国江蘇省里下河地区における過湿地でのイケスギ(*Taxodium ascendens* Brongn.)人工林の成長および養分特性

誌名	日本林學會誌 = Journal of the Japanese Forestry Society
ISSN	0021485X
著者名	唐,羅忠 黄,宝龍 孫,羊林 生原,喜久雄 戸田,浩人 峰松,浩彦
発行元	日本林學會
巻/号	85巻2号
巻号補足	
掲載ページ	p. 127-134
発行年月	2003年5月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター

Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



論 文

中国江蘇省里下河地区における過湿地でのイケスギ (*Taxodium ascendens* Brongn.) 人工林の成長および養分特性*唐 羅 忠^{**1}・黄 宝 龍²・孫 羊 林³・生原喜久雄⁴・戸田 浩 人⁴・峰松 浩 彦⁴

唐 羅忠・黄 宝龍・孫 羊林・生原喜久雄・戸田浩人・峰松浩彦：中国江蘇省里下河地区における過湿地でのイケスギ (*Taxodium ascendens* Brongn.) 人工林の成長および養分特性 日林誌 85: 127~134, 2003 過湿地において健全なイケスギ人工林を育成するための基礎的研究として、中国江蘇省里下河地区における地下水位の異なる3地点（高水位、中水位、低水位）の17年生人工林を用いて、地下水位の違いがイケスギの成長および養分特性に及ぼす影響について調査した。高水位では1年のうち約6カ月、中水位では約1カ月湛水し、低水位では湛水しなかった。年平均地下水位はそれぞれ -2 ± 12 , -15 ± 13 および -37 ± 12 cm であった。高、中、低水位でのイケスギの幹材積はそれぞれ 45 ± 8 , 142 ± 16 および 187 ± 24 m³ ha⁻¹、地上部の乾物量は 33, 73, 114 Mg ha⁻¹ であり、地上部乾重と地下部乾重の比 (T/R) は水位が高くなるにつれて、2.7 から 1.5 に減少した。年平均地下水位が -10 cm 以上あるいは年間1カ月半以上の湛水になると、イケスギの成長は急激に低下した。中・低水位と比べて、高水位の土壌 pH は 0.5 から 1.1 高く、全 C と全 N 濃度は 30% 低かった。土壌の全 Fe、交換性 K、Ca、Mg、Na 濃度は高水位で最も低く、低水位で最も高かった。湛水する場所では、土壌中の NO₃-N 濃度は検出されなかった。Mn を除いて、地下水位別にイケスギの葉の各養分濃度は大きな違いがなかったが、根の N および Ca 濃度は低水位で高く、Fe、Mn、Na 濃度は低かった。

キーワード：イケスギ、過湿林地、成長、地下水位、養分特性

Tang, L., Huang, B., Sun, Y., Haibara, K., Toda, H., and Minematsu, H.: **Growth and Nutrient Properties of Pond Cypress (*Taxodium ascendens* Brongn.) Wetland Plantation in Lixiahe Region, Jiangsu Province, China.** J. Jpn. For. Soc. 85: 127~134, 2003 In order to raise a healthy pond cypress forest under wetland conditions, a study on tree growth and nutrient properties in different water table sites was performed in a 17-year-old pond cypress wetland plantation which was located in the Lixiahe region of the Jiangsu province in China. Based on the investigation of the water table, the study sites were divided into three groups: high, middle, and low. The sites were flooded for about 6, 1, and 0 months per year, respectively. The depth of the mean water tables for one year was -2 ± 12 , -15 ± 13 , and -37 ± 12 cm, respectively. The stem volume of the pond cypress located in the high, middle and low water tables was 45 ± 8 , 142 ± 16 , and 187 ± 24 m³ ha⁻¹, respectively, and the above-ground biomass was 33, 73, and 114 Mg ha⁻¹, respectively. The ratios of the above-ground and below-ground biomass decreased from 2.7 to 1.5 with the increase in the water table. The growth of the pond cypress was seriously inhibited when the depth of the mean water table was higher than -10 cm, or the flooding period was longer than 1.5 months in one year. Compared to the middle and low water table sites, the soil pH in the high water table site increased by 0.5 to 1.1 units, but the total C and the total N contents decreased by 30%. The concentrations of exchangeable K, Ca, Mg, Na and total Fe in the soil were the lowest in the high water table site and the highest in the low water table site. The concentrations of NO₃-N in the soil were not detected when the sites were flooded. Nutrient concentrations in leaves were not significantly influenced by the differences in the water table conditions except for an increase of Mn in the high water table. In the case of roots, N and Ca concentrations were higher, and Fe, Mn and Na concentrations were lower in the low water table site than in the other water table sites.

Key words: growth, nutrient property, pond cypress, water table, wetland plantation

I. はじめに

中国の森林面積は1.6億haで、国土の16.6%をしめ、森林蓄積量は112.7億m³である（中華人民共和国林業局、2000）。国民一人当たりの森林面積は0.12ha、蓄積量は8.7m³で、世界の平均値の1/5と少ない。中国では人口の増加および経済の発展に伴って、木質系資源の不足

および環境の悪化が大きな問題となっている。現在、木質系資源不足の緩和および環境保全のため、人工林の育成および天然林の保護などのプロジェクトが推進されている。しかし、中国は多くの人口をかかえているため、土地の多くを食糧生産の農耕地として利用する必要がある。

一方、中国には約6,300万haという広大な湿地があり（陳、1995；王ら、2000）、その一部を木質系資源の生産と

* 本研究の一部は第111回日本林学会で口頭発表した。

** 連絡・別刷請求先 (Corresponding author) E-mail: Tanglz@cc.tuat.ac.jp

¹ 東京農工大学大学院連合農学研究科 (183-8509 府中市幸町 3-5-8)

The United Graduate School of Agricultural Science, Tokyo University of Agriculture and Technology, 3-5-8 Saiwai-cho, Fuchu 183-8509, Japan.

² 南京林業大学

Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, P. R. China.

³ 中国江蘇省高郵市林業試験場

Gaoyou County Forestry Experimental Station, Jiangsu Province 225600, P. R. China.

⁴ 東京農工大学農学部 (183-8509 府中市幸町 3-5-8)

Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology, 3-5-8 Saiwai-cho, Fuchu 183-8509, Japan.

して利用することが可能である。アメリカ、カナダ、フィンランド、スウェーデンなどでは昔から湿地での森林の育成および利用の研究が進んでいる（たとえば、Brink, 1954; Clark and Benforado, 1980; Trettin *et al.*, 1997; Messina and Conner, 1998）。特に湛水条件下で苗木の生長や生理学的特性についての基礎的な研究が多く行われてきた（Hook *et al.*, 1970; Kozłowski, 1984; Pezeshki and Chambers, 1985; Lewty, 1990; Pezeshki *et al.*, 1999）。これらの研究によって、樹種別の耐水性の強さ（生存率や成長量）が明らかになってきた。また、耐水性の強い樹種では湛水状態で不定根や膝根の形成、通気組織の発達および地上部における気孔伝導度の調節などの積極的な形態および生理学的対応を行っていることがわかってきた（Kozłowski, 1984; Pezeshki *et al.*, 1999）。しかし、過湿林地の場合、地下水位と樹種別の成長の関係がまだ明確ではなく、特に地下部の乾物量および養分特性についての研究は少なく、不明の点が多い（Moore *et al.*, 2002）。

イクスギ（*Taxodium ascendens* Brongn.）は1917年に北米の東南部から中国へ導入された落葉針葉樹であり（中国樹木誌編集委員会, 1981）、耐水性が強いため（McKnight *et al.*, 1980; Brown, 1981）、60年代以後、長江中下流域の河川の沿岸や湖の周辺など、地下水位が高い地域で植栽されている（中国樹木誌編集委員会, 1981）。イクスギは深根性で、樹冠幅が狭く、病虫害も少ないため、農耕地の防風林やアグロフォレストリーとして利用されている（黄, 1998）。また、中国においてイクスギは建築用材、車両や船や家具などの用材としても有用な造林樹種である。木質資源不足の緩和およびアグロフォレストリーのため、過湿地でのイクスギなど耐水性の強い樹種を利用した人工林育成法の確立が急がれる。

本研究は、過湿地における健全なイクスギ林の育成法を確立するための基礎的研究として、中国江蘇省里下河地区の湿地において、地下水位の違いがイクスギの成長および養分特性に及ぼす影響について調査した。

II. 調査地の概況

調査地は中国長江河口域の江蘇省里下河地区の高郵市（北緯32°20′，東経119°40′）である（図-1）。里下河地区を中心とした地域には約150万haの湿地が広がっており（黄・黄, 1991a）、長江および黄河の泥砂を海水の運搬によって堆積した古湖のため（川瀬・菅野, 1983; 黄・黄, 1991a）、平均海拔高2mで、長期間の湛水あるいは季節的湛水がみられる。土壌型は黄褐色土の青泥田（Eutric gleyed paddy soils, 中国土壌分類法）である（川瀬・菅野, 1983）。年平均気温は14~15°C、年平均降水量は1,000~1,200mmで、排水が悪く、自然状態ではほとんどがアシの繁茂した地帯になっている。このような湿地では、住血吸虫による人間への被害など深刻な問題もある。昔から、地域住民によって、農地などへの小規模の転換を図られてきたが、生産性は低く、湿地資源の有効利用が大

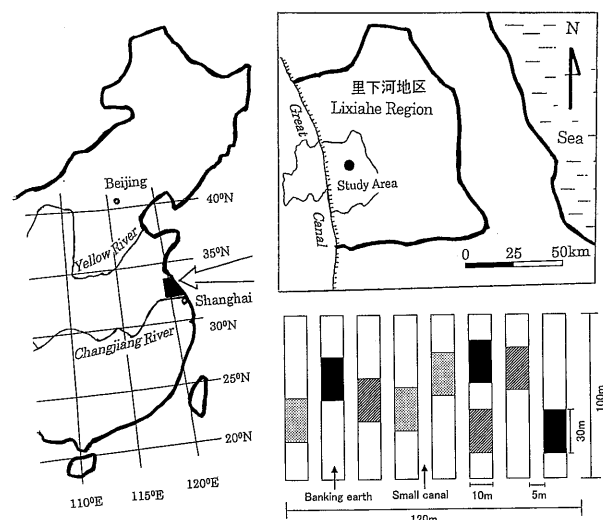


図-1. 調査地の概況

Topography of the study sites.

■, High water table site; ▨, Middle water table site; ▩, Low water table site.

きな課題となっている。

1982年から中国南京林業大学と江蘇省の林業試験場の共同研究で、湿地に小運河を掘り、その土を盛り上げて、水面より高くする造成方法が実施され、林業、農業および漁業によるアグロフォレストリーに関する研究がなされてきた（黄・黄, 1991a; 黄・黄, 1991b; Huang, 1998; Huang and Xu, 1999）。これまでの研究によって、当地域のイクスギの樹高が約6m以下の場合、林木、農作物および漁業の間に有効な生態関係が維持され、経済的効果も高いことが明らかになっている。しかし、樹木が大きくなるにつれて、林床および小運河への光量および温度の不足で、農作物と漁業の生産性が低下したため、アグロフォレストリーは中止した（黄・黄, 1991a; 黄・黄, 1991b; Huang, 1998; Huang and Xu, 1999）。

本調査地は1983年の冬に、人力で南北に小運河（一つの小運河の幅5m、長さ100m、深さ2m）を掘り、列状に、盛土（一つの盛土の幅10m、長さ100m、水面からの高さおよそ0.5m）を行った造成地である。調査地は平坦である。小運河は他の小運河とつながっており、開放系になっている。翌春、盛土した造成地に苗高約50cmの1年生イクスギを植栽した。植栽間隔は2×3mである。植栽後約5年間はアブラナ（*Brassica napus* L.）を栽培し、また、小運河では魚の養殖を行った。1988年以後、アグロフォレストリーとしての利用はなされていない。植栽した1984年から2000年までのイクスギの枯死率は5%以下と低かった。

III. 調査方法

造成のとき、盛土の表面は水面より0.5m高くする予定であったが、列によって、水面からの高さが異なってい

表-1. 地下水位別のイケスギの成長量

Growth of pond cypress in different water table sites.

Water table	Stand age (yr)	Density (Stems ha ⁻¹)	Height (m)	DBH (cm)	Crown diameter (m)	Basal area (m ² ha ⁻¹)	Stem volume (m ³ ha ⁻¹)
Mean±SD							
High	17	1600	8.6±0.2 ^a	10.5±0.4 ^a	1.7±0.1 ^a	13.8±1.4 ^a	45.0±7.8 ^a
Middle	17	1633	11.4±0.2 ^b	15.8±0.7 ^b	1.9±0.1 ^b	32.2±2.4 ^b	142.3±15.8 ^b
Low	17	1589	12.7±0.7 ^c	18.7±1.2 ^c	2.1±0.2 ^b	43.5±4.2 ^c	187.3±24.3 ^c

DBH, diameter at breast height (1.3 m); SD, standard deviation. Different letters indicate significant differences within water table sites at the 5% level ($n=3$).

表-2. 伐倒供試木の大きさ

Characteristics of the sample trees used to determine the stand biomass.

Water table	Height (m)	DBH (1.3 m) (cm)	Dry matter (kg tree ⁻¹)						
			Stem wood	Leaves	Branches	Bark	Cones	Roots	Total
High	8.4	10.5	13.6	2.3	1.8	2.4	0.5	13.6	34.2
Middle	11.5	15.8	31.4	4.9	3.5	4.4	0.7	18.8	63.7
Low	12.2	18.7	47.5	7.2	9.4	6.9	0.8	27.0	98.8

るため、地下水位の違いが生じた。1999年9月に、16年生イケスギ林分内の120×70 mの範囲に、地下水位別(高水位、中水位および低水位)の300 m² (10×30 m) 調査地をそれぞれ3カ所設置した(図-1)。地下水位の季節変化を調査するために、内径11 cm、長さ2 m、側面に4 mmの穴を多数開けた塩ビ管パイプをそれぞれの調査地の中心部に埋設し、1999年9月から2000年9月まで月1回地下水位を測定した。

2000年9月に各調査地において毎木調査を行った。表-1に示したように、イケスギの樹冠幅は2 m前後と小さく、成長の良い林分でもまだ閉鎖していない。毎木調査後、地下水位別にそれぞれ1本の平均木(表-2)を伐倒し、層別刈り取り法で、葉、枝、球果、幹の重量を測定した。土地面積当りの重量の推定は平均木の値に土地面積当りの立木本数を乗じて求めた。地下水位別のイケスギの成長経過を明らかにするため、伐倒木の樹幹解析も行った。また、伐倒木の根を掘り取り、細根(2 mm以下)、小根(2~5 mm)、中根(5~10 mm)、太根(10 mm以上)に分けて、重量を測定した。ただし、各調査地の樹高および胸高直径は正規分布で、標準偏差も小さかったので、平均木法により、植栽木の乾物量および養分量を推定しても大きな誤差は生じないと考えた(馮ら, 1999)。葉および根の養分濃度は幹や枝より、樹木の個体差が大きいのと考えられるため、本調査ではさらに、地下水位別にそれぞれ2本の平均木を選んで、樹冠の上、中、下部の4方位(東、南、西、北)から葉を採取して、層別に伐倒木の葉と等量比で混合し、その一部を用いて養分分析した。また、上記の2本の平均木の樹幹から4方位でそれぞれ0.4×0.6×0.5 m(幅×長さ×深さ)の体積の土を掘り、その中の根を太さ別に分けて、伐倒木の太さ別の根と等量比で混合し、その一部を用いて養分分析を行った。

地下水位とイケスギの成長の関係を明らかにするため、2000年9月に、各調査地の毎木調査の資料を用いて、下

記の数式(熊ら, 1994)から、幹材積を求めた。

$$V = 5.19 \times 10^{-5} (D^2 H)^{0.9502}$$

ここで、 V : 幹材積 (m³)、 D : 胸高直径 (cm)、 H : 樹高 (m) である。

2000年9月に、各調査地で三つの土壌断面から、深さ0~10、10~20、20~50 cmの土壌を採取し、地下水位別に同じ深さの9カ所の土壌を混合して、化学性の分析に用いた。

土壌および植物の化学性はすべて日本に試料を持ち帰って分析した。T-C (Total C) と T-N は CN コーダ (柳本 MT-500) を用いて測定した。NH₄-N および NO₃-N は生土を用いて、2 M-KCl 溶液 (土: KCl 溶液=1:5) で抽出した後、それぞれインドフェノール青法およびフェノールジスルホン酸法でフローインジェクション (日本分光 FIU-300 N) より測定した。T-K, T-Na, T-Ca, T-Mg, T-Mn, T-Fe は湿式灰化 (HClO₄+HNO₃) の後、Sr を 1,000 mg L⁻¹ になるように添加し、原子吸光法 (日立 170-10) で測定した。T-P は湿式灰化の後、モリブデンブルーによる比色法 (島津 UV-120-01) で測定した。土壌の交換性 K, Ca, Mg, Na は 1 M-CH₃COONH₄ (pH 7.0) による抽出液に、Sr が 1,000 mg L⁻¹ になるように添加し、原子吸光法により分析した。土壌の pH (H₂O) (土: CO₂ 不水=1:2.5) はガラス電極法 (TOA, HM-7 E) で測定した。土壌容積重は 100 cm³ の採土円筒で求めた。

IV. 結果および考察

1. 地下水位の月別変化

1年間の地下水位の月別変化を図-2に示す。各調査地とも地下水位はほぼ同じ変化パターンを示し、雨季の9月から10月で最も高く、乾季の3月から4月に最も低かった。高水位では1年のうち約6カ月、中水位では約1カ月湛水し、低水位では湛水しなかった。高、中および低水位の年平均地下水位はそれぞれ-2±12、-15±13および

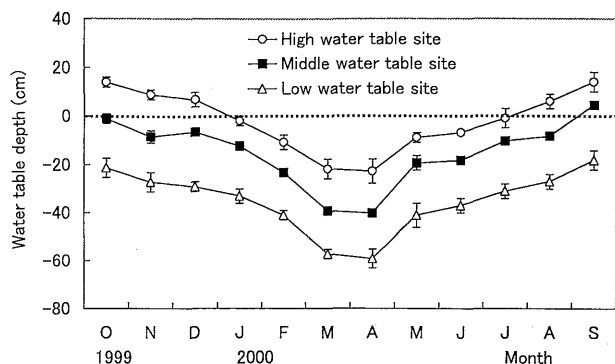


図-2. 調査地の地下水位の月別変化

Monthly changes of water table in the study sites.

Vertical bars indicate the SD of water table in three replicate sites. Broken line indicates the surface of soil.

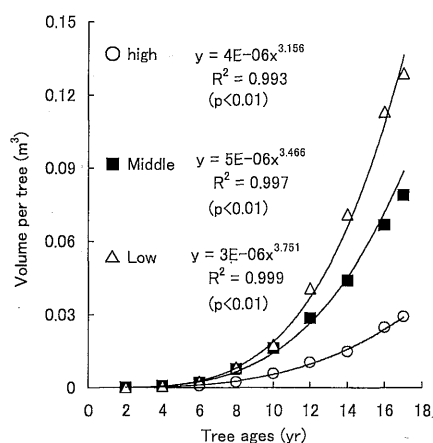


図-3. 地下水位別の年幹材積成長

Stem volume growth curves of pond cypress in different water table sites.

−37±12 cm で、成長期（6～9月）の平均地下水位は高、中および低水位でそれぞれ +4±8, −9±7 および −30±7 cm であった。

2. 地下水位別のイケスギの成長

17 年生イケスギの平均樹高、平均胸高直径、胸高断面積合計および材積は地下水位別に有意な差 ($p < 0.05$) がみられた (表-1)。特に、高水位の成長は中・低水位より明らかに悪かった。

樹幹解析で求めた幹材積成長量を図-3 に示す。水位によって、幹材積成長量に違いが生じ、17 年生時の高、中および低水位の幹材積はそれぞれ 0.029, 0.078 および 0.129 m³ 本⁻¹ であった。林齢と幹材積成長量の間にはいずれの水位でも有意な指数関数的な関係が認められ、6 年生頃から水位による成長差が大きくなった。一般に、林木の材積成長は林齢の増加に伴いロジスチック曲線に従うことが知られている (岩坪, 1996)。本調査地の場合、イケスギの林齢が 17 年と若いため、指数関数的な関係がみられたものと思われる。

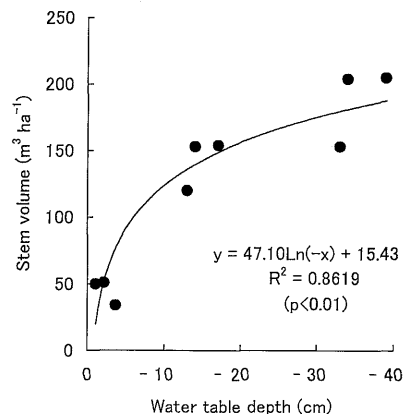


図-4. 年平均地下水位と 17 年生イケスギの幹材積との関係

Relationship between mean depth of water table and stem volume of pond cypress at 17-year-old stands.

年平均地下水位と土地面積当りの幹材積の関係を図-4 に示す。両者の関係は対数で近似され ($p < 0.01$)、イケスギ林分の幹材積は地下水位の低下に伴い増加するが頭打ちの傾向を示し、年平均地下水位がおよそ −10 cm より上昇すると、材積が急激に低下した。

イケスギの乾物量を表-3 に示す。水位によって地上部の乾物量に違いがみられ、高、中および低水位で、それぞれ 33, 73, 114 Mg ha⁻¹ であった。年平均乾物増加量は高、中および低水位でそれぞれ 1.9, 4.3, 6.7 Mg ha⁻¹ yr⁻¹ であった。これらの値は同地域にある 16 年生の *Metasequoia glyptostroboides* 人工林 (年平均地下水位 −50 cm 以下) における地上部の年平均乾物増加量 5.9 Mg ha⁻¹ yr⁻¹ (方ら, 1995) より、低水位のイケスギで多かった。また、アメリカ東南部の 48～160 年生のイケスギ湿地林 (1 年中の湛水期間は 0～9 カ月) における地上部の年平均乾物増加量 1.9～4.9 Mg ha⁻¹ yr⁻¹ (Schlesinger, 1978; Brown, 1981) よりも、本調査地の低水位の乾物増加量は大きかった。

イケスギ地下部の乾物量は高、中および低水位でそれぞれ 22, 31, 43 Mg ha⁻¹ であった。地上部重 (T) と地下部重 (R) の比 (T/R) は地下水位が高くなるにつれて、2.7 から 1.5 に減少した。すなわち、地下水位が高くなると、地下部の乾物量は減少したが、地上部に対する重量割合は増加した。このことは *Fraxinus pennsylvanica*, *Quercus macrocarpa* および *Betula* 属などの苗木における湛水実験の結果 (Sena Gomes and Kozlowski, 1980; Tang and Kozlowski, 1982) と異なるが、*Melaleuca quinquenervia* 苗木の実験結果 (Kozlowski, 1984) と一致している。*Melaleuca quinquenervia* では湛水状態で、大量の不定根を形成するためである。本調査地では高水位の場合、高さ 20 cm 以上の気根を樹幹に沿って、多く形成すること、また中水位の場合、地面から高さ 5～15 cm

表-3. イケスギの乾物量および養分量

Amounts of accumulated dry matter and nutrient in each part of pond cypress.

Water table		Dry matter (Mg ha ⁻¹)	N	K	Ca	Mg	P	Fe	Mn	Na
			(kg ha ⁻¹)							
High	Leaves	3.6	71.2	30.3	124.3	16.2	3.6	3.5	0.29	1.0
	Branches	2.9	17.3	5.8	52.7	2.3	0.8	1.5	0.04	0.3
	Stem wood	21.8	24.1	30.4	23.9	6.5	2.0	8.0	0.17	3.1
	Others*	4.6	51.3	21.0	134.6	7.3	2.9	3.3	0.09	0.8
	Above ground	32.9 (60)	163.8 (81)	87.5 (71)	335.6 (88)	32.4 (68)	9.3 (71)	16.2 (24)	0.59 (21)	5.1 (18)
	Below ground	21.8 (40)	37.9 (19)	36.1 (29)	46.5 (12)	15.3 (32)	3.8 (29)	52.3 (76)	2.15 (79)	23.5 (82)
	Total	54.7 (100)	201.7 (100)	123.6 (100)	382.1 (100)	47.7 (100)	13.1 (100)	68.5 (100)	2.74 (100)	28.6 (100)
Middle	Leaves	8.0	143.3	76.1	183.4	32.1	6.5	8.8	0.41	2.5
	Branches	5.7	32.0	13.1	113.1	6.3	1.9	3.0	0.11	0.9
	Stem wood	51.3	53.4	61.6	61.6	15.4	3.3	16.5	0.35	5.1
	Others*	8.2	88.7	36.9	187.4	14.5	3.8	7.3	0.19	2.4
	Above ground	73.2 (70)	317.4 (82)	187.6 (76)	545.5 (89)	68.2 (72)	15.5 (75)	35.6 (38)	1.06 (37)	10.8 (31)
	Below ground	30.7 (30)	71.7 (18)	59.0 (24)	70.1 (11)	26.3 (28)	5.2 (25)	56.9 (62)	1.77 (63)	23.9 (69)
	Total	103.9 (100)	389.1 (100)	246.6 (100)	615.6 (100)	94.5 (100)	20.7 (100)	92.5 (100)	2.83 (100)	34.7 (100)
Low	Leaves	11.4	258.6	84.8	350.5	43.5	9.6	9.1	0.52	3.5
	Branches	15.0	77.7	38.8	225.7	9.0	3.4	8.1	0.18	1.2
	Stem wood	75.5	107.1	98.1	113.3	15.1	2.6	22.0	0.39	6.1
	Others*	12.3	126.7	32.2	141.4	6.5	4.2	5.8	0.19	1.9
	Above ground	114.3 (73)	570.1 (83)	254.0 (80)	830.9 (88)	74.0 (76)	19.8 (75)	45.0 (47)	1.28 (54)	12.8 (32)
	Below ground	42.9 (27)	116.7 (17)	65.3 (20)	109.7 (12)	22.9 (24)	6.7 (25)	51.1 (53)	1.07 (46)	27.2 (68)
	Total	157.2 (100)	686.8 (100)	319.3 (100)	940.6 (100)	96.9 (100)	26.5 (100)	96.1 (100)	2.35 (100)	40.0 (100)

* Included cones and bark. Values in parentheses represent the percentage to total.

の膝根を形成することが観察され、低水位の場合、気根は少なかった。水位の高い場合、呼吸のため広範囲に根を分布させており、積極的な根の形態対応 (Brown, 1981; Kozlowski, 1984) を通して、耐水性を強めているためと考えられる。

3. 地下水位別の土壌の化学的性質

盛土造成時の土壌は調査しなかったため、造成に伴って生じた土壌理化学的性質の空間的変異については不明であり、その影響については評価できないものの、本研究では施業後17年での調査結果のみをもとにして、地下水位の違いが土壌理化学的性質に及ぼす影響について以下のように考察した。

地下水位別の土壌の化学的性質を図-5に示す。0~10 cmのT-CおよびT-N濃度は、高水位で11.0 g kg⁻¹、1.0 g kg⁻¹、中水位で19.8 g kg⁻¹、1.7 g kg⁻¹、低水位で24.6 g kg⁻¹、2.1 g kg⁻¹であった。高水位土壌では深さ別に大きな違いがみられず、低・中水位では0~10 cmが10 cm以深より高かった。同地域の農耕地において、20 cm深の耕土層のT-CおよびT-N濃度がそれぞれ9~18 g kg⁻¹、0.9~1.6 g kg⁻¹である (川瀬・菅野, 1983) のに対して、本調査地の中・低水位のT-CおよびT-N濃度はやや高かったが、高水位は低かった。したがって、本調査地では、地下水位が高く、湛水期間が長いと、表層土壌の有機物量は少ない。

0~10 cmのNH₄-N濃度は中水位で高かったが、10 cm以深では、水位による一定の傾向がみられなかった。一方、NO₃-N濃度は低水位の0~10 cmで34.4 mg kg⁻¹、10 cm以深で5.0 mg kg⁻¹であったのに対して、高・中水位のNO₃-N濃度はどの層位でも非常に低かった。したがって、本調査地の高・中水位では一定期間の湛水で、土壌中のNO₃-N濃度は明らかに低下する。このことは、湛水によるNO₃-Nの流亡や脱窒 (川口, 1978) するためと推察される。

T-P濃度では地下水位別に明らかな傾向がみられず、深さ別の傾向も明らかでなかった。湛水した条件下で可溶性Pの増加する報告が多い (たとえば、劉, 1996; 若月, 1997)。本調査地においても可溶性Pの測定が必要である。

土壌のT-Mn濃度は地下水位別および深さ別に関係なく0.18~0.32 g kg⁻¹であった。一方、T-Fe濃度は、どの地下水位でも深くなるにつれ、高くなる傾向がみられた。今後、過湿地でのFeとMnの特徴を明らかにするために、FeとMnの各形態、特に還元状態で多いFe²⁺とMn²⁺濃度の調査が必要である。

地下水位別の交換性塩基濃度は、どの深さも高水位が中・低水位より低い傾向がみられた。一般に、森林土壌の交換性塩基濃度は深くなるにつれて減少し、指数関数的な関係がみられる (吉良, 1976) が、本調査地では深さ別に

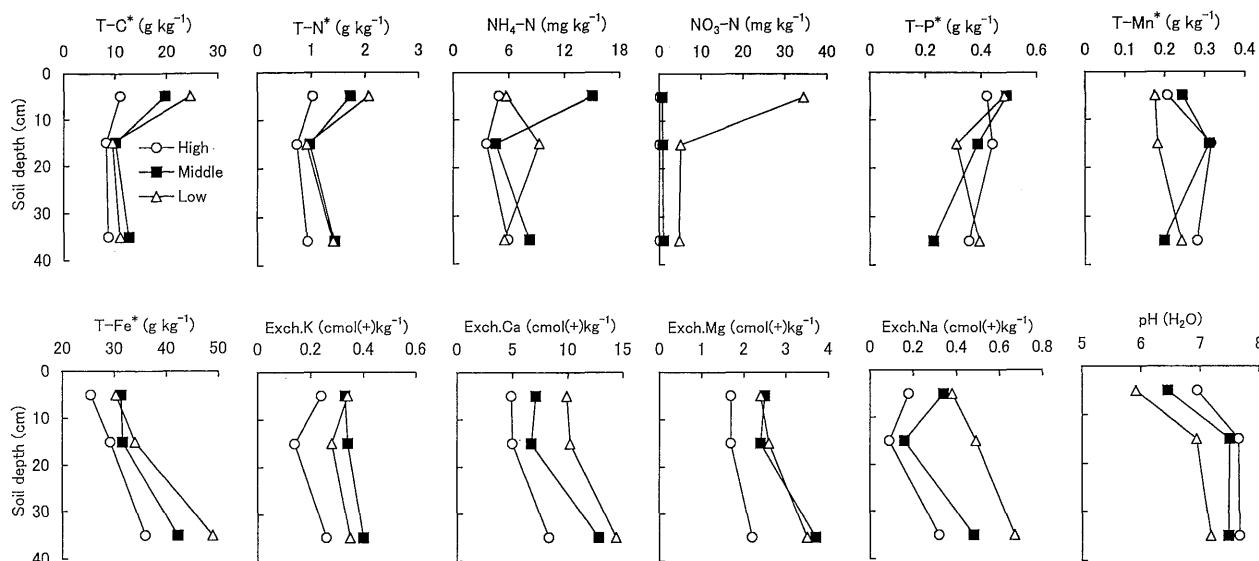


図-5. 地下水位別の土壌の化学的性質
Chemical properties of soil in different water table sites.

* Total amounts of elements in soil.

表-4. 地下水位別の鉱物土壌層の養分量
Nutrient amounts of soil in different water table sites.

Water table	Soil depth (cm)	Bulk density* (g ml ⁻¹)	T-C** (Mg ha ⁻¹)	T-Fe** (Mg ha ⁻¹)	T-N** (Mg ha ⁻¹)	NH ₄ -N (mg kg ⁻¹)	NO ₃ -N (mg kg ⁻¹)	T-P** (kg ha ⁻¹)	T-Mn** (kg ha ⁻¹)	Exch. K (cmol(+)kg ⁻¹)	Exch. Ca (cmol(+)kg ⁻¹)	Exch. Mg (cmol(+)kg ⁻¹)	Exch. Na (cmol(+)kg ⁻¹)
High	0~10	1.05±0.08	11.5	27	1071	5	tr.	441	217	97	2048	434	43
	10~20	1.27±0.10	10.5	38	927	5	tr.	560	401	67	2540	525	27
	20~50	1.18±0.06	30.6	126	3292	21	tr.	1258	995	360	11728	1892	264
	0~50	1.17±0.05	52.6	191	5290	31	tr.	2259	1613	524	16316	2851	334
Middle	0~10	1.26±0.11	24.8	39	2167	19	tr.	617	307	162	3578	765	100
	10~20	1.29±0.03	13.0	41	1251	6	tr.	499	401	170	3457	752	47
	20~50	1.00±0.05	38.1	126	4290	25	0.9	687	597	474	15360	2697	330
	0~50	1.11±0.03	75.9	207	7708	50	0.9	1803	1305	806	22395	4214	477
Low	0~10	1.21±0.01	29.8	37	2493	7	42	583	212	159	4792	706	105
	10~20	1.27±0.01	12.1	43	1156	12	6	395	231	139	5182	802	143
	20~50	1.00±0.11	33.0	147	4207	17	14	1179	726	414	17380	2552	462
	0~50	1.10±0.05	74.9	227	7856	36	62	2157	1169	712	27354	4060	710

* Mean±SD of three replications. ** Total amounts of the elements in soil.

明らかな傾向がみられなかった。これらのことから本調査地では湛水によって、表層の塩基が溶出・移動し、下層で集積していると推察され (川口, 1978; 日本土壌肥料学会, 1979; 張・龔, 1993), 高水位ではさらに流亡していることも考えられる。

pH は 0~10 cm が 5.9~7.0, 10~20 cm および 20~50 cm が 6.9~7.7 と 0~10 cm で低かった。また, 0~10 cm の pH は高水位で 7.0, 中水位で 6.5, 低水位で 5.9 であった。湛水した土壌は還元状態になり, 無機態 N は NH₄⁺ 形態で存在する割合が高い。また, 土壌中の Fe³⁺, Mn⁴⁺ の一部は Fe²⁺, Mn²⁺ に還元され, SO₄²⁻ も H₂S に変化する (川口, 1978; 張・龔, 1993; 若尾, 1994)。

Fe²⁺, Mn²⁺, NH₄⁺ および H₂S は Fe³⁺, Mn⁴⁺, NO₃⁻ および SO₄²⁻ に比べて, 塩基性が高いので湛水した土壌の pH は高くなる。また, 低水位林分の表層土壌は湛水しないので, 有機態窒素の分解に伴う硝酸態窒素の生成が土壌の pH を低下させることも無視できない (河田, 1989)。

水位別の土壌養分量を表-4 に示す。50 cm 深までの高水位土壌の T-C と T-N 量は中・低水位より約 30% 低かった。また, これらの T-C と T-N 量は日本のスギおよびヒノキ人工林土壌 (河田, 1989; 戸田ら, 1991; 高橋ら, 1996) の半分以下であった。交換性塩基量はいずれの土壌層も, Ca>Mg>K≥Na の順であった。50 cm 深までの交換性 Ca 量は高, 中および低水位でそれぞれ 16,

表-5. イケスギの葉および根の養分濃度

Nutrient concentrations in leaves and roots of pond cypress.

	Water table	N	K	Ca	Mg	P	Fe	Mn	Na
		(mg g ⁻¹)							
Leaves	High	19.3	8.2	33.7	4.4	1.00	1.0	0.08	0.26
	Middle	17.9	9.5	32.9	4.0	0.80	1.1	0.05	0.31
	Low	17.3	7.4	30.6	3.8	0.85	0.8	0.05	0.25
Fine roots (0~2 mm)	High	9.5	2.4	5.5	1.6	0.65	19.1	0.21	1.88
	Middle	9.7	2.3	9.2	2.4	0.77	23.9	1.25	1.81
	Low	12.9	2.3	10.8	2.2	0.73	1.7	0.11	1.33
Mixed roots (Over 2 mm)	High	1.7	1.7	2.1	0.7	0.18	2.4	0.10	1.08
	Middle	2.3	1.9	2.3	0.8	0.17	1.9	0.06	0.78
	Low	2.7	1.5	2.6	0.5	0.16	1.2	0.03	0.63

22, 27 Mg ha⁻¹ で、交換性 Mg 量はそれぞれ 2.9, 4.2, 4.1 Mg ha⁻¹ であり、高水位で Ca 量および Mg 量は少なかった。しかし、日本のスギおよびヒノキ人工林土壌 (河田, 1989; 戸田ら, 1991; 高橋ら, 1996) と比べ、高水位でも交換性 Ca 量は 15 倍以上, Mg 量は 20 倍以上であった。したがって、本調査地は日本の森林土壌と比べて、交換性 Ca および Mg 量が豊富で、有機物量が少ない土壌といえる。

以上のことから、地下水位別のイケスギ成長量の違いは、湛水によって土壌中の酸素の欠乏など物理的な影響 (Kozlowski, 1984) とともに、有機物量の減少、特に N 源としての NO₃-N 量の低下が影響していると考えられる。

4. 地下水位別のイケスギの養分量

地下水位別の葉および根の養分濃度を表-5 に示す。葉の養分濃度は高水位で高い元素 (N, Ca, Mg, P, Mn) が多かった。細根 (直径 0~2 mm) の N および Ca 濃度は低水位 > 中水位 > 高水位の順であった。Fe, Mn および Na 濃度では高・中水位が低水位より高かった。特に高・中水位の Fe 濃度および中水位の Mn 濃度は低水位の 10 倍以上であった。細根の K, Mg および P 濃度には水位別に一定の傾向がみられなかった。直径 2 mm 以上の根の各養分濃度は細根より低かったが、Fe および Mn を除けば、地下水位別の傾向は細根とほぼ同じであった。このように、地下水位別の養分濃度の違いは葉よりも根で大きい傾向がみられた。

湛水した土壌では、可溶性の Fe²⁺, Mn²⁺ イオンが多く (川口, 1978; 張・龔, 1993; 若月, 1997), 林木に吸収されやすい。ドイツの 25 年生の *Abies grandis* では湿地で根の Mn 濃度が高くなると報告されている (Xu *et al.*, 1997)。本調査地のイケスギでは高・中水位で低水位より細根中の Fe および Mn 濃度が高く、年間 1 カ月程度の短期間の湛水でもイケスギの Fe および Mn の吸収に影響している。Fe および Mn は葉緑体の合成に重要で、過酸化酵素やチトクローム酸化酵素などのような呼吸酵素系およびスーパーオキシドディスムターゼ (SOD) などの酵素と密接な関係がある (堤, 1984)。湛水した環境下では、

樹体特に細根中の Fe や Mn 濃度が高まることは細胞活性の維持のため重要である (Macrae and Yoder, 1987)。Na の生理作用については不明な点が多いが、吸収量が大量である場合、細胞浸透圧の調節と膨圧の維持において K と類似の機能を果している (但野, 1984)。本調査地域は長江および黄河の泥砂が海水の運搬によって堆積しており、運河水の Na 濃度が高い (およそ 1.0 me L⁻¹, 未発表) ため、湛水した高・中水位の細根の Na 吸収量が多い可能性がある。

ほぼ同じ林齢の日本のスギ、ヒノキ、カラマツ (河田, 1989) と比べて、イケスギの葉の Ca および Mg 濃度は 2~6 倍であった。また、アメリカ東南部のイケスギ湿地林 (Schlesinger, 1978) よりも本調査の葉の Ca および Mg 濃度はおよそ 2 倍と高かった。このことは本調査地土壌の交換性 Ca と交換性 Mg 量が多い (表-4) ことと関連していると考えられる。

イケスギ林木の養分総量は表-3 に示す。N, K, Ca, Mg および P では高、中および低水位間の養分比は乾物量の比とほぼ同じで、1:2:3 であったが、Fe, Mn および Na は水位別の比がほぼ 1:1:1 になった。このことは水位が高いと、根の割合および根の Fe, Mn および Na 濃度が高い (表-3, 5) ためである。

地上部と地下部の養分量の比をみると、N, K, Ca, Mg および P は地下水位と関係なく、地上部がほぼ 70% 以上を占めた。一方、Fe, Mn および Na は (低水位の Mn を除き) すべての水位で、地下部に占めた割合が 50% 以上で、地上部より高かった。そして、水位が高くなるにつれて、地下部に占めるこれらの 3 元素の割合は高くなった。

V. お わ り に

地下水位が高いイケスギ湿地林では、水位の低い湿地林に比較して、土壌の pH は高く、有機物量、無機態 N 量および交換性塩基量が少なかった。イケスギは耐水性の強い樹種といわれているが、年平均地下水位が -10 cm 以上あるいは年間 1 カ月半以上の湛水になると、成長は急激に低下する。過湿地での健全なイケスギ人工林を育成する

ための盛土造林を行う場合、地下水位が -10 cm 以上にならないように注意する必要がある。地下水位が高くなるにつれて、イケスギの地下部乾重の割合は高くなり、細根は1ヵ月程度の湛水でFeやMn濃度が高まった。このことは、イケスギが過湿に対し形態的および生理的な対応をしていると考えられる。今後は、過湿林の造成による地下水位の違いが土壌からの脱窒やメタンの放出、また土壌水質に及ぼす影響について明らかにする必要がある。

本研究の一部は文部省科学研究費 (No. 10045061) によって行った。

引用文献

- Brink, V. C. (1954) Survival of plants under flood in the lower Fraser River Valley, B. C. Ecology 35: 94-95.
- Brown, S. (1981) A comparison of the structure, primary productivity, and transpiration of cypress ecosystem in Florida. Ecol. Monogr. 51: 403-427.
- 陳 宜楡 (1995) 中国湿地研究. 178 pp, 吉林科学技術出版社, 長春.
- Clark, J. R. and Benforado, J. (1980) Wetlands of bottomland hardwood forests. 404 pp, Elsevier, Inc., North-Holland.
- 方 升佐・徐 錫増・唐 羅忠 (1995) 水杉人工林樹冠結構及生物生産力の研究. 応用生態学報 6: 225-230.
- 馮 宗緯・王 効科・吳 剛 (1999) 中国森林生態系統的生物量と生産力. 241 pp, 科学出版社, 北京.
- Hook, D. D., Langdon, O. G., Stubbs, J., and Brown, C. L. (1970) Effects of water regimes on the survival, growth and morphology of tupelo seedlings. Forest Sci. 16: 304-311.
- 黄 宝龍・黄 文丁 (1991 a) 立体林業. 118 pp, 江蘇科学技術出版社, 南京.
- 黄 宝龍・黄 文丁 (1991 b) 林農複合経営生態体系の研究. 生態学雑誌 10: 27-32.
- 黄 宝龍 (1998) 江蘇森林. 307 pp, 江蘇科学技術出版社, 南京.
- Huang, W. D. (1998) Modelling the coexistence gain and interactions of populations in *Taxodium ascendens* intercrop systems. Ecol. Modd. 107: 189-212.
- Huang, W. D. and Xu, Q. F. (1999) Overyield of *Taxodium ascendens* intercrop systems. For. Ecol. Manage. 116: 33-38.
- 岩坪五郎 (1996) 森林生態学. 306 pp, 文永堂, 東京.
- 河田 弘 (1989) 森林土壌学概論. 399 pp, 博友社, 東京.
- 川口桂三郎 (1978) 水田土壌学. 581 pp, 講談社, 東京.
- 川瀬金次郎・菅野一郎訳 (1983) 中国土壌—改良利用・性質・肥沃度・生成分類—. 中国科学院南京土壌研究所主編, 1011 pp, 博友社, 東京.
- 吉良竜夫 (1976) 陸上生態学概論. 116 pp, 共立出版社, 東京.
- Kozlowski, T. T. (1984) Flooding and plant growth. 318 pp, Academic Press Inc., Orlando.
- Lewty, M. J. (1990) Effects of waterlogging on the growth and water relations of three *Pinus* taxa. For. Ecol. Manage. 30: 189-201.
- 劉 厚田 (1996) 湿地生態環境. 生態学雑誌 15: 75-78.
- Macrae, W. D. and Yoder, O. C. (1987) Iron specifically protects corn protoplasts from T-toxin of *Cochliobolus heterostrophus*. Plant Physiol. 84: 1257-1264.
- Mcknight, J. S., Hook, D. D., Langdon, O. G., and Johnson, R. L. (1980) Flood tolerance and related characteristics of trees of the bottomland forests of the southern United States. In Wetlands of bottomland hardwood forests. Clark, J. R. and Benforado, J. (eds.), 404 pp, Elsevier, Inc., North-Holland.
- Messina, M. G. and Conner, W. H. (1998) Southern forested wetlands ecology and management. 616 pp, CRC Press, Inc., Boca Raton.
- Moore, T. R., Bubier, J. L., Frolking, S. E., Lafleur, P. M., and Roulet, N. T. (2002) Plant biomass and production and CO₂ exchange in an ombrotrophic bog. J. Ecol. 90: 25-36.
- 日本土壌肥料学会 (1979) 水田転作—田畑の高度利用. 152 pp, 博友社, 東京.
- Pezeshki, S. R. and Chambers, J. L. (1985) Response of cherrybark oak seedlings to short-term flooding. Forest Sci. 31: 760-771.
- Pezeshki, S. R., Delaune, R. D., and Anderson, P. H. (1999) Effect of flooding on elemental uptake and biomass allocation in seedlings of three bottomland tree species. J. Plant Nutr. 22: 1481-1494.
- Schlesinger, W. H. (1978) Community structure, dynamics and nutrient cycling in the Okefenokee cypress swamp-forest. Ecol. Monogr. 48: 43-65.
- Sena Gomes, A. R. and Kozlowski, T. T. (1980) Growth responses and adaptations of *Fraxinus pennsylvanica* seedlings to flooding. Plant Physiol. 66: 267-271.
- 高橋輝昌・添谷 稔・戸田浩人 (1996) スギおよびヒノキ壮齡林における元素の垂直的移動特性. 日林誌 78: 127-133.
- 但野利秋 (1984) 元素の生理作用, アルカリ金属. (水とイオン. 熊沢喜久雄編, 245 pp, 朝倉書店, 東京). 170-179.
- Tang, Z. C. and Kozlowski, T. T. (1982) Some physiological and morphological responses of *Quercus macrocarpa* seedlings to flooding. Can. J. For. Res. 10: 308-311.
- 戸田浩人・生原喜久雄・新井雅夫 (1991) スギおよびヒノキ壮齡林小流域の養分循環. 東農工大演報 28: 1-22.
- Trettin, C. C., Jurgensen, M. F., Grigal, D. F., Gale, M. R., and Jeglum, J. K. (1997) Northern forested wetlands ecology and management. 486 pp, CRC Press, Inc., Boca Raton.
- 堤 道雄 (1984) 元素の生理作用, 重金属. (水とイオン. 熊沢喜久雄編, 245 pp, 朝倉書店, 東京). 189-201.
- 若尾紀夫 (1994) 土壌におけるリン・イオウ・鉄の形態変化. (土壌生化学. 木村真人・仁王以智夫・丸本卓哉・金沢晋二郎・筒木潔・犬伏和之・植田 徹・松口龍彦・若尾紀夫・齋藤雅典・宮下清貴・山本広基・松本 聡著, 231 pp, 朝倉書店, 東京). 139-148.
- 若月利之 (1997) 水田土壌. (最新土壌学. 久馬一剛編, 216 pp, 朝倉書店, 東京). 157-178.
- 王 瑞山・王 毅勇・楊 青・楊 桂謙・張 光・劉 濱華 (2000) 我国湿地資源現状, 問題及对策. 資源科学 22: 9-13.
- 熊 文愈・姜 志林・黄 宝龍・竺 肇華 (1994) 中国農林複合経営研究と実践. 375 pp, 江蘇科学技術出版社, 南京.
- Xu, Y. J., Rohrig, E., and Folster, H. (1997) Reaction of root systems of grand fir (*Abies grandis* Lindl.) and Norway spruce (*Picea abies* Karst.) to seasonal waterlogging. For. Ecol. Manage. 93: 9-19.
- 張 甘霖・龔 子同 (1993) 湛水条件下土壌中元素遷移の地球化学特性. 土壌学報 30: 355-365.
- 中国樹木誌編集委員会 (1981) 中国主要樹種造林技術. 496 pp, 中国林業出版社, 北京.
- 中華人民共和國林業局 (2000) 全国森林資源統計. 295 pp, 中国林業出版社, 北京.

(2002年8月6日受付; 2003年3月20日受理)