

スギ人工林の窒素循環に関する生態系サービスの評価

稲垣善之・平井敬三（森林総研）

要旨：森林の生態系サービスを窒素循環に着目して経済的な視点から評価した。木材生産による利益と、花粉症などによる医療コストを文献より求め、これらを窒素負荷量の異なる茨城県のスギ人工林（筑波、桂）にあてはめた。木材生産による利益は筑波と桂でほぼ同じであった。窒素負荷量の多い筑波では大気中の窒素を捕捉することによる、医療コストの低減効果が大きかった。また、渓流水の硝酸態窒素に対する医療コストは比較的小さかった。筑波では、花粉生産による医療コストが大きかった。以上の結果より、窒素循環に関するコストを指標とすることによって、窒素負荷量の異なるスギ人工林における各生態系サービスの相対的な重要性を明らかにすることができた。

キーワード：窒素循環、スギ林、木材生産、花粉症、医療コスト

Abstract: Ecosystem services related to the nitrogen dynamics of forest ecosystems were evaluated from an economic perspective. The benefits of wood production and medical costs were obtained from published studies and applied for Japanese cedar plantations in Ibaraki prefecture with high and low nitrogen deposition. Similar wood production benefits emerged between both sites. In the Tsukuba area with high nitrogen deposition, medical costs were greatly reduced due to the removal of nitrogen from the atmosphere, while the medical cost of nitrates in stream water was relatively low in both areas. The Tsukuba area also featured very high male cone production, which incurred high medical costs for pollen allergy. These results suggest that analysis of economic values in relation to forest nitrogen dynamics can provide valuable insights into the relative importance of ecosystem services.

Key words: nitrogen cycling, Japanese cedar forest, wood production, pollen allergy, medical cost

I はじめに

人間活動によって大気中に放出された窒素は森林生態系に負荷される。また、土壌中の硝酸態窒素一部は渓流水から流出する。森林生態系内では、樹木は窒素を吸収し、葉、幹、繁殖器官へ分配する。したがって、森林の窒素循環様式は、木材の生産機能、良質な飲料水、花粉生産の防止などの生態系サービスに深くかかわっている(4)。近年、人間活動によって森林生態系に負荷される窒素が増大しており、森林の衰退、土壌の酸性化などの悪影響が顕在化している(1, 5)。また、窒素負荷の増大によって繁殖器官の生産量が増加し(3)、花粉症による医療コストの増大も指摘される。日本においても関東近郊のスギ人工林で窒素流出が大きい傾向があり、窒素飽和の状態であると考えられている(11, 14, 19)。したがって、窒素負荷が生態系の様々な生態系サービスに及ぼす影響を総合的に評価することが求められている。Compton et al (4)は、窒素循環に関する生態系サービスを経済学的な視点から評価した。つまり、対流圏のオゾン生成、亜酸化窒素による温室効果、酸性化、富栄養化、飲料水質の悪化について窒素 1 kg あたりのコ

ストを明らかにした。これらの情報がある森林生態系の窒素循環に当てはめることによって、経済的な影響を評価することが可能になる。本研究では、茨城県の窒素負荷量の異なる2つのスギ人工林を主体とする森林流域において、窒素循環に着目して、生態系サービスを経済的に評価した。

II 調査方法

1. 調査地

本研究では茨城県の二つのスギ林流域（筑波、桂）を対象とした。筑波試験地は関東平野の周辺の山地であり、東京都心から約 60km の距離に位置する。年平均気温は 13.1℃、年降水量は 1400mm である。桂試験地は東京都心から約 110km の距離にある。年平均気温は 12.5℃、年降水量は 1340mm であった。2つの森林は窒素の負荷量が異なり、林内雨による窒素負荷量は筑波で 20.0kg/ha/yr、桂で 8.8kg/ha/yr であった(19)。渓流水からの硝酸態窒素の流亡は筑波で 11.0 kg/ha/yr、桂で 1.9kg/ha/yr であった(9)。筑波は窒素の負荷量が大きく、窒素の流出も他の森林と比べて大きい(14)、窒素飽和状態の森林であると考

えられた。

筑波、桂流域にはそれぞれ 1953 年、1965 年に植栽されたスギ人工林が分布している。幹の純成長量およびリターフォールは、筑波では 2007-2011 年、桂では 2003-2008 年に測定された (8,10)。幹とリターフォールの窒素濃度を NC アナライザーで測定し (8, 稲垣ら未発表), 部位別の窒素量を推定した。

2. 経済的評価法

本研究では、木材生産による利益と医療コスト (大気中の窒素, 流出水の窒素, 花粉の窒素) に限定して評価した。これらの経済的影響を文献情報から推定し, 茨城県の窒素負荷量の異なる筑波試験地と桂試験地における年間窒素循環量にあてはめた (8-10)。なお, 経済的影響については利益を正の値, コストについては負の値で金額を示す。

木材生産

木材の価値は山元価格によって評価した (17)。この値は、丸太の販売価格から搬出価格を差し引いた値であり、森林の売買などに利用される。スギ材の山元価格の全国平均は 1980 年以降減少している。本研究では 2007-2011 年のスギ全国山元価格の平均値 2915 円/m³ を用いた。木材生産に利用された窒素量を、葉、枝、幹の窒素量の増加分として算出した。葉と幹の生産量はリターフォールによる観測値、幹の成長は樹高と直径を計測し材積を算出した (8, 10)。

大気と渓流水の窒素の医療コスト

大気中の NO_x や NH_y は、気管支ぜんそくなどの健康被害をもたらす。一方、飲料水の硝酸態窒素は、メトヘモグロビン血症やニトロソ化合物の生成によるがんのリスクがある (4)。アメリカでは、これらの医療コストは、大気 NO_x, 大気 NH_y, 飲料水の硝酸態窒素でそれぞれ 23, 1.3-8.6, 0.14-3.38US ドル/kg N と推定されている (2, 4)。日本における医療コストの情報は入手できないため、アメリカの値を医療コストとし 1 ドル 80 円として求めた。また、推定値に幅があるものは最大値と最小値の平均値を用いて医療コストを計算した。森林には大気中の NO_x や NH_y が負荷される。この時、大気中の NO_x や NH_y は除去され、これらの物質による医療コストを軽減していると考えた (窒素捕捉)。林内雨による NO₃⁻-N と NH₄⁺-N の負荷量の値 (19) を窒素捕捉量とした。一方、渓流水の硝酸態窒素はそのまま飲料水として利用されるため、医療コストを生じると考えた (窒素流亡)。

花粉の医療コスト

表-1. 筑波と桂におけるスギのバイオマス生産量と窒素分配量

Table 1. Biomass production and nitrogen allocation of Japanese cedar forests in Tsukuba and Katsura.

	バイオマス		窒素分配量	
	Biomass production		Nitrogen allocation	
	(Mg/ha/yr)		(kg/ha/yr)	
	筑波	桂	筑波	桂*
	Tsukuba	Katsura	Tsukuba	Katsura
幹 Stem	7.1	7.8	11.4	4.1
枝 Branch	0.5	0.4	1.9	1.1
針葉 Leaves	4.4	3.5	36.6	22.2
球果 Seed cones	0.6	0.5	5.9	3.8
雄花 Male cones	1.6	0.3	16.9	2.7
合計 Total	14.2	12.6	72.7	33.9

文献 8, 10 より, *未発表データ

スギによって生産された花粉が原因で、多くの人がアレルギー性の花粉症を引き起こす。スギ花粉症による直接の医療費などの直接費用は、2260 億円、間接影響を含めると 2850 億円と推定されている (12)。スギ花粉症の有病率と花粉量には有意な正の相関関係が認められており (13,15), 花粉量が多くなるほど医療コストが増大すると考えられる。日本全国のスギ・ヒノキの人工林面積は 710 万ヘクタールである。したがって、直接費 2260 億円を面積で割ると面積あたりの医療費が 31,810 円/ha と算出される。なお、面積あたりのスギとヒノキの医療費には差がないと仮定している。

日本のスギ人工林の雄花生産量については、3 年間以上にわたって茨城、千葉、京都、兵庫、鳥取の 22 林分で観測されている (6, 7, 8, 10, 18, 20)。スギ 22 林分の雄花生産量の平均値は 0.71Mg/ha/年であった。前述の医療費を雄花生産量で割ると雄花 1 Mg あたりの医療費が 44800 円/Mg と推定できる。この値を対象とするスギ林分の雄花生産量にかけて花粉による医療費とした。また、医療費を雄花に含まれる窒素量で割って、窒素 1 kg あたり医療費を算出した。

III 結果と考察

1. バイオマス生産量と窒素量

筑波、桂におけるバイオマス生産量と窒素分配量の結果を表-1 に示す。スギの地上部生産量の合計は筑波で 14.2 Mg/ha/年、桂で 12.6 Mg/ha/年であった。窒素飽和状態の

表一. 筑波・桂スギ林における経済的影響の評価

Table 2. Economic effects of Japanese cedar forests in Tsukuba and Katsura.

	窒素移動量 N flux (kgN/ha/yr)	窒素あたりの 経済効果 Economic effect/N (yen/kg N)	面積あたりの 経済効果 Economic effect/area (yen/ha/yr)
筑波 Tsukuba			
材生産 a	47.8	1,371	65,588
窒素捕捉 b	20.0	1,173	23,485
窒素流亡 c	11.0	-141	-1,549
花粉生産 d	16.9	-4,757	-80,494
桂 Katsura			
材生産 a	27.4	2,732	74,788
窒素捕捉 b	8.8	1,280	11,199
窒素流亡 c	1.9	-141	-268
花粉生産 d	2.8	-5,531	-15,231

a), wood production, b), removal of nitrogen from the atmosphere, c), nitrogen loss from stream water, d), pollen production

筑波の方が地上部生産量は大きく、林分あたりの成長からは衰退の兆候は認められなかった。筑波は幹の生産量が桂よりも小さく、地上部生産を幹に分配する割合が小さかった。筑波の雄花生産量は 1.6 Mg/ha/yr であり、桂の約 5 倍の値を示した。また、これまでに報告されているスギ雄花生産量の平均値 (0.71Mg/ha/年) と比較しても(6, 7, 8, 10, 18, 20), 大きい値を示した。ヒノキでは土壌の窒素資源が多い条件で雄花の生産が大きい傾向が報告されている(16)。したがって、筑波のスギ林では窒素負荷が多いために雄花生産が多くなった可能性がある。林齢の異なる 2 地点の比較では明確な影響は評価できないため、今後より多くの地点で窒素資源と雄花生産の関係を明らかにすることが必要である。

スギによる窒素の吸収量は筑波で 72.7kg/ha/年、桂で 33.9kg/ha/年であった。また、筑波においては雄花に分配される窒素量は 16.9kg/ha/年と大きかった。雄花重量の 50%は花粉であるため、花粉がすべて系外に放出されると 8.4 kg/ha/年の窒素損失となる。この窒素損失は渓流水からの損失量(11.0kg/ha/年)(9)と同様に生態系の窒素循環において重要な割合を占めている。

2. 経済的な影響の評価

筑波、桂の森林流域における経済的影響を表一に示す。

幹生産による面積あたりの利益は、筑波、桂でそれぞれ 65,588, 74,788 円/ha/年であった。木材を生産するためにスギが吸収した窒素(幹、枝、葉の窒素分配を合計したもの)は筑波と桂でそれぞれ 47.8, 27.4kgN/ha/年であり筑波で大きかった。単位窒素あたりの利益を算出すると、筑波、桂でそれぞれ 1,371 円, 2,732 円となり、筑波で小さかった。したがって、窒素負荷の多い筑波では、窒素の吸収が大きい割には木材生産量が小さく、窒素利用効率が高いと考えられた。

大気中の NO₃⁻と NH₄⁺は林内雨によって森林に捕捉されるが、これらによる窒素量は筑波と桂でそれぞれ 20.0, 8.8 kgN/ha/年であった。この捕捉によって筑波と桂でそれぞれ 23,485, 11,199 円/ha 医療費を削減する効果があると推定された。一方、渓流水の窒素流亡は飲料水の硝酸態窒素による医療コストを生じるが、筑波と桂でそれぞれ -1549, -268 円/ha/年と推定された。窒素捕捉による医療費の削減効果は、渓流水硝酸による医療コストよりも大きかった。これは、窒素 1 kg あたりの大気中の NO_x, NH_y の医療コストが飲料水中の硝酸態窒素の医療コストよりもかなり大きいことが影響している(4)。筑波における窒素流出量は日本の森林生態系のなかでも高い水準にあるが、渓流水硝酸による医療コストは他の要因の経済的な影響と比較しても小さかった。したがって、一般に、渓流水硝酸の医療コストは森林生態系では小さいと考えることができる。

花粉による医療コストは、筑波と桂でそれぞれ -80,494, -15,231 円/ha/年であった。筑波における医療コストは、木材生産や窒素捕捉による利益と比較しても大きな影響を及ぼしていると判断された。筑波の雄花生産量はこれまでの研究と比較しても非常に多いため(表一), 医療コストもスギ林の中でも大きいと考えられる。この林分では樹高の高い個体の葉量が低下する傾向が認められ、衰退の兆候を示している(8)。衰退した条件で雄花の生産量が急激に増加している可能性がある。局所的に雄花生産の大きい林分がある場合には、花粉生産の少ない品種に植え替えることが重要な対策の一つとなる。

以上の結果より、窒素負荷の異なるスギ人工林における経済的影響から次のことが明らかになった。木材生産機能は、2つの地域で差は認められなかった。窒素負荷の高い筑波で、窒素捕捉による医療コストの低減効果が認められた。スギ林は常緑で葉量も多いため、大気中の窒素化合物を効率的に捕捉する優れたフィルターの働きをすることが示唆された。一方で、筑波では花粉生産による医療コストが大きかった。窒素負荷の多い都市近郊林では、窒素捕捉によるフィルター効果を高度に発揮しながら花粉によ

る医療費コストの大きい林分を優先的に植え替えることが重要であると考えられた。

窒素循環に着目して生態系サービスを評価することによって、様々な機能の相対的な重要性を、経済学的に評価することができた。これらの情報は、森林管理や森林政策の方針を決定するうえで重要な科学的知見となる。医療コストについてはアメリカの研究成果を利用したが不確実性も大きい。日本においても同様の解析を他分野の研究者と連携しながら進めることが重要である。また、生態系サービスに関する医療コスト以外の要因、例えば、亜酸化窒素による温暖化、下流域の生物多様性、富栄養化などの影響についても本研究同様の手法で経済的な影響を評価することが期待される。

謝辞

本研究の一部は環境省地球環境保全等試験研究費「大都市圏の森林における窒素飽和による硝酸態窒素流出に関する研究」、科学研究費補助金 22580167, 23580205 の補助を受けて実施した。

引用文献

- (1) ABER JD, NADELHOFFER KJ, STEUDLER P, MELILLO JM (1989) Nitrogen saturation in northern forest ecosystems. *BioScience* **39**: 378-386
- (2) BIRCH MBL, GRAMIG BM, MOOMAW WR, DOERING OC, III, REELING CJ (2011) Why Metrics Matter: Evaluating Policy Choices for Reactive Nitrogen in the Chesapeake Bay Watershed. *Environ Sci Technol* **45**: 168-174
- (3) CALLAHAN H, DEL FIERRO K, PATTERSON A, ZAFAR H (2008) Impacts of elevated nitrogen inputs on oak reproductive and seed ecology. *Glob Change Biol* **14**: 285-293
- (4) COMPTON JE, HARRISON JA, DENNIS RL, GREAVER TL, HILL BH, JORDAN SJ, WALKER H, CAMPBELL HV (2011) Ecosystem services altered by human changes in the nitrogen cycle: a new perspective for US decision making. *Ecol Lett* **14**: 804-815
- (5) FUJIMAKI R, SAKAI A, KANEKO N (2009) Ecological risks in anthropogenic disturbance of nitrogen cycles in natural terrestrial ecosystems. *Ecol Res* **24**: 955-964
- (6) 福島茂樹・小平哲夫・遠藤良太 (1995) スギ花粉抑制に有効なサンプスギ林の雄花生産特性. *日林関東支論* **47**: 35-36
- (7) 橋詰隼人, 索志立 (1996) スギ林における雄花生産量の年変化および着花量と気象要素との関係について. *日林関西支論* **5**: 71-72
- (8) INAGAKI Y, INAGAKI M, HASHIMOTO T, KOBAYASHI M, ITOH Y, SHINOMIYA Y, FUJII K, KANEKO S, YOSHINAGA S (2012) Aboveground production and nitrogen utilization in nitrogen-saturated coniferous plantation forests on the periphery of the Kanto Plain. *Bull Forestry Forest Prod Res Inst* **11**: 161-173
- (9) 稲垣善之・稲垣昌宏・三浦覚・小林政広・伊藤優子・吉永秀一郎・戸田浩人・福島慶太郎・館野隆之輔・徳地直子 (2012) 針葉樹人工林流域における窒素負荷と窒素流亡の関係. *関東森林研究* **63(2)**: 97-100
- (10) 稲垣善之・野口享太郎・金子真司・橋本徹・三浦覚 (2011) 立木密度の異なるスギ人工林における葉, 幹, 繁殖器官の分配率. *森林立地* **53**: 23-29
- (11) 伊藤優子・三浦覚・加藤正樹・吉永秀一郎 (2004) 関東・中部地方の森林流域における渓流水中の NO₃-濃度の分布. *日林誌* **86**: 275-278
- (12) 川口毅 (2000) 医療経済に関する研究. 科技庁研究開発局 (編) スギ花粉克服に向けた総合研究 (第一期平成 9-11 年度) 成果報告書, pp. 136-150
- (13) 清野嘉之 (2010) スギ花粉発生源対策のための森林管理指針. *日林誌* **92**: 310-315
- (14) MITCHELL MJ, IWATSUBO G, OHRUI K, NAKAGAWA Y (1997) Nitrogen saturation in Japanese forests: an evaluation. *For Ecol Manage* **97**: 39-51
- (15) 村山貢司・馬場廣太郎・大久保公裕 (2010) スギ花粉症有病率の地域差について. *アレルギー* **59**: 47-54
- (16) 中西麻美・稲垣善之・深田英久・柴田昌三・大澤直哉 (2008) ヒノキの雄花生産量に土壌条件と強度間伐が及ぼす影響. *森林立地* **50**: 167-173
- (17) 林野庁 (2012) 森林・林業白書 (平成 24 年版) .
- (18) 斎藤秀樹・竹岡政治 (1987) 裏日本系スギ林の生殖器官生産量および花粉と種子生産の関係. *日生態誌* **37**: 183-195
- (19) 吉永秀一郎・伊藤優子・相澤州平・釣田竜也 (2012) 関東平野北東部の森林流域における渓流水の NO₃-濃度分布と東京都心からの距離の関係. *日林誌* **94**: 84-91.
- (20) 吉野豊・前田雅量 (1999) 兵庫県内のスギ人工林における花粉生産量の変動と関与する要因. *兵庫県森林技術センター研報* **47**: 1-7