

吉野山五郎平茶屋地区の土壌化学性とその将来予測

篠原章宏^{*1)}・吉田麻美²⁾・山中勝次³⁾・森本幸裕⁴⁾・今西純一⁴⁾・小島玉雄⁵⁾・米田 稔¹⁾

- 1) 京都大学工学研究科
- 2) オムロン株式会社
- 3) 京都菌類研究所
- 4) 京都大学大学院地球環境学堂
- 5) サン・アクト株式会社

摘要：奈良県吉野山は桜の名所であるが、五郎平茶屋地区等のサクラ類は近年衰退傾向にあるとの報告がある。しかし、現在のところその衰退原因は特定されていない。サクラ類の衰退原因を検討する必要から、本研究では、五郎平茶屋地区において土壌化学性を調査した。その結果、調査地の土壌は、窒素飽和状態に陥っている可能性があり、今後の検討が必要であることが示唆された。また土壌環境評価モデルを用いて、調査地の土壌環境について予測を行った。その結果、窒素飽和状態や酸性雨の影響を仮定した場合、塩基飽和度が大幅に低下し、今後土壌化学性が悪化する可能性が示唆された。

キーワード：吉野山、サクラ類、土壌化学性

1. はじめに

奈良県吉野山は有数の桜の名所であるが、近年、五郎平茶屋地区などにおいてサクラ類の衰退が報告されている²⁾。森林が衰退する原因は様々であるが、現在のところ、その衰退原因の特定には至っていない。一般に、①酸性化説、②オゾン説、③マグネシウム欠乏説、④窒素増加説、⑤ストレス説などが、土壌化学性から見た植物の衰退原因であると知られている¹⁾。サクラ類衰退の原因を知るためにも土壌化学性を検討する必要がある。そこで本研究は、土壌化学性に注目して検討を行った。本研究の目的を以下に示す。

- ①吉野山五郎平茶屋地区における現在の土壌状態をフィールド調査から明らかにし、土壌化学性を評価する。
- ②土壌環境評価モデルを用いて、吉野山五郎平茶屋地区の土壌環境についての将来予測を行い、今後の土壌化学性の動向を予測する。

2. サクラ衰退地区における土壌化学性の評価

2.1 サンプル採取の方法

サクラ類衰退の報告のある五郎平茶屋地区の表層 5 ヶ所から 10～20 cm の深さの土壌サンプルを採取した。

2.2 測定項目及び方法

採取した土壌を約 1 週間室温で風乾後、2 mm の篩を通し、供試土壌として用いた。測定項目は以下の通りである。なお、陽イオン交換容量以外は土壌環境分析法⁴⁾に従った。

2.2.1 pH

風乾細土 10 g に純水 25 mL、または 1 MKCl 溶液 25 mL を加えて振とうし、1 時間以上放置した後、懸濁液を pH メーター (D-13, HORIBA 製) で測定した。

2.2.2 陽イオン交換容量 (CEC) 及び塩基飽和度

CEC は Schollenberger 酢酸アンモニウム変法により測定した。また、塩基飽和度は式 1 によって求めた。

$$\frac{(Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^{+} + K^{+})}{CEC} \quad (1)$$

2.2.3 可給態窒素

風乾細土 10 g に 1/15 mol リン酸緩衝液 (pH 7.0) 50 mL を加え、抽出温度 24 °C で 2 時間連続振とう後、抽出ろ液を 10 倍希釈して 280 nm における吸光度を吸光度計 (UV-1200, SHIMADZU 社製) で測定した。なお、検量線はウシ血清アルブミン (BSA) を用いて作成し、それを窒素量に換算した。

2.2.4 水溶性陽イオン及び硝酸イオン濃度

土壌と蒸留水を重量比で 1 : 5 の割合で混合した溶液を 1 時間振とう後、0.45 µm フィルターでろ過し、Al³⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Mn²⁺、Na⁺、K⁺は誘導結合プラズマ質量分析装置 ICP-MS (HP-4500, HEWLETT PACKARD 社製) で、NO₃⁻は富栄養計 (HC-1000, CENTRAL KAGAKU 社製) を用いて測定した。

2.3 結果及び考察

2.3.1 pH

* 連絡先著者: E-mail : shinohara@risk.env.kyoto-u.ac.jp 〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学 C1-3 468

一般的な日本の森林土壌の表層では pH (H₂O) 4.0~5.5 であり、五郎平茶屋付近の土壌 pH は日本の森林土壌の平均程度であった。⁹⁾

2.3.2 CEC, 塩基飽和度

CEC(表-1)は日本の褐色森林土壌の平均値(30.4meq/100g 供試土壌)¹⁴⁾と比較して低いことから、養分保持力が低い土壌であることがわかった。しかし塩基飽和度は、日本の褐色森林土壌の平均値(29.5%)よりも高かった。CECが低いため養分保持力は低いが、CECに対して保持している養分の割合は高いと言える。

2.3.3 可給態窒素

可給態窒素(表-1)は果樹園(約 5mg/100g 供試土壌)⁸⁾と同程度であり、肥沃度の高い土壌環境である。窒素量が多い理由としては、現地で鶏糞肥料が施肥されていることなどが考えられる。

2.3.4 水溶性陽イオン及び硝酸イオン濃度

水溶性陽イオンを測定した結果(表-2), 他のイオンに比べ Al³⁺が高い割合で溶出している。Al³⁺は 10⁻³~10⁻² meq/100g-soil の低濃度でも植物の根に伸長阻害を引き起こす¹³⁾が、採取したサンプルは全てこの濃度(10⁻³ meq/100g 供試土壌)を上回っており、サクラ類の樹勢衰退も Al³⁺の溶出の影響の可能性はある。

硝酸イオン濃度(表-1)は京都市(1.05~2.60 meq/100g)¹⁶⁾と比較し、同程度の数値を示した。しかし、それぞれの測定項目の相関を分析した結果(表-3), NO₃⁻と Mg²⁺, NO₃⁻と Ca²⁺に正の相関が見られた。馬場³⁾によると窒素飽和状態に達すると NO₃⁻は Ca²⁺や Mg²⁺とともに流出し土壌が酸性化するとの報告がある。この様に高い相関係数が出ており、調査地の土壌は窒素飽和状態にある可能性が示唆される。なお、窒素飽和状態とは、厳密な定義はないものの、「系への負荷量よりも、系からの窒素流出量が多い場合」に「窒素飽和」という言葉が用いられる。³⁾

3. 吉野山五郎平茶屋地区の土壌化学性の将来予測

3.1 モデルの概要

調査地の土壌環境の将来予測を行うために SMART (Simulation Model for Acidification's Regional Trends) モデル¹³⁾を用いた。本モデルは、機構説明型で、単純で非定常なモデルであり、扱いやすく、異なる土壌にも柔軟に対応でき、土壌酸性化の変化過程を追跡できる等といった長所がある。電気的中和則を基本とするモデルの中で、酸性カチオンと H⁺と Al³⁺の両イオンを考慮している唯一のモデルであり、さらにモデル中には酸性雨の影響解析で不可欠な Al³⁺など塩基性陽イオンの土壌との交換反応が含まれているという特徴を持つ。そのため今後懸念される酸性雨の影響を考慮した将来予測を行うことが出来ると考え、本モデルを使用した。また堀内⁷⁾はライミング(炭酸カルシウムの施用)効果を推定するために本モデルを用い、良好な結果を得ている。

表-1 項目と測定結果

項目	単位	
pH(H ₂ O)		5.27
pH(KCl)		3.97
CEC	meq/100g	14.70
塩基飽和度	%	43.08
可給態窒素	mg/100g	7.97
硝酸イオン濃度	mg/L	1.64

表-2 水溶性陽イオンの測定結果

項目	meq/100g-soil
Na ⁺	0.0113
Mg ²⁺	0.0317
Al ³⁺	0.1774
K ⁺	0.0945
Ca ²⁺	0.0791
Mn ²⁺	0.0014
イオン量合計	0.3955

表-3 pH, 水溶性陽イオン, 硝酸イオンの相関関係

		水溶性陽イオン							
		pH (H ₂ O)	Na ⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mn ²⁺	NO ₃ ⁻
水溶性陽イオン	pH (H ₂ O)		0.10	0.02	0.00	0.08	0.05	0.25	0.03
	Na ⁺	0.10		0.18	0.00	0.02	0.08	0.51	0.14
	Mg ²⁺	0.02	0.18		0.11	0.01	0.89	0.10	0.64
	Al ³⁺	0.00	0.00	0.11		0.19	0.20	0.07	0.25
	K ⁺	0.08	0.02	0.11	0.19		0.04	0.66	0.00
	Ca ²⁺	0.05	0.08	0.89	0.20	0.04		0.49	0.55
	Mn ²⁺	0.25	0.51	0.10	0.07	0.66	0.49		0.11
	NO ₃ ⁻	0.03	0.14	0.64	0.25	0.00	0.55	0.11	

※ ■ は相関係数0.5~0.8, ■ は相関係数0.8以上

3.2 モデルの基礎式

SMART モデルは Al³⁺や BC²⁺(2 価の塩基, 例えば Mg²⁺, Ca²⁺), NH₄⁺といったカチオンと, SO₄²⁻や NO₃⁻といった強酸性のアニオンの物質収支式(式 2), および土壌プロセスを記述する平衡反応式とで構成されている。また, H⁺は水の解離, HCO₃⁻は CO₂の溶解というソース・シンクを持つため, 陽的な物質収支関係を必要としない。これらの濃度は, 平衡式とその他のイオン濃度との次のような電気的中和式(式 3)により決定される。

$$\frac{d}{dt} X_{tot} = IN_x - PS[X] \quad (2)$$

$$[H^+] + 3[Al^{3+}] + 2[BC^{2+}] + [NH_4^+] = [NO_3^-] + 2[SO_4^{2-}] + [HCO_3^-] \quad (3)$$

X_{tot} : 土壌中でのイオン X のトータル量 (mol(+)/m²)

IN_x : 土壌へのイオン X のインプット (mol(+)/m²/yr)

$[X]$: 土壌溶液中のイオン X の平衡濃度 (mol(+)/m³)

PS : 有効降雨量 [降雨量-蒸発散量] (m/yr)

IN_xは以下の式(4)~(7)により決定される。

$$IN_{NO_3} = DEP_{NO_3} + f_{nit} DEP_{NH_4} + IMM_{NO_3} - UPT_N \frac{[NH_4^+]}{[NO_3^-] + [NH_4^+]} \quad (4)$$

$$IN_{NH_4} = (1 - f_{nit})DEP_{NH_4} + IMM_{NH_4} - UPT_X \frac{[NH_4^+]}{[NO_3^-] + [NH_4^+]} \quad (5)$$

$$IN_{BC} = DEP_{BC} + TW_{BC} - UPT_{BC} \quad (6)$$

$$IN_{Al} = TW_{Al} \quad (7)$$

DEP_X : 土壌への X の降下物量 ($mol(+)/m^2/yr$)

UPT_X : 植物の土壌からの X の取り込み ($mol(+)/m^2/yr$)

IMM_N : 窒素の無機化 ($mol(+)/m^2/yr$)

f_{nit} : 硝化係数 ($0 \leq f_{nit} \leq 1$)

W_X : 土壌中でのイオン X の風化量 ($mol(+)/m^2/yr$)

T : 土壌コンパートメントの厚さ (m)

K_{Carb} : 炭酸カルシウムの溶解定数 ($(mol/m^3)^3/atm$)

また SMART モデルは鉱物を主とする A 層を対象としているため、有機物を多く含む O 層にそのまま適用することは不可能である。本研究では、由井¹⁷⁾が O 層にも適用できるよう SMART モデル改良した 2 層モデルを使用した。2 層モデルでは、O 層のアウトプットである H^+ 、 BC^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ のうち、 H^+ は直接のインプットとはせず BC^{2+} の値に反映する。 BC^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ は降下物として A 層にインプットする。

3.3 モデルの基礎データとパラメータの設定

モデルシミュレーションに用いる外部からのインプットの BC^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ は、表-4 に示した奈良県において観測されている平均値¹¹⁾を使用した。さらに、窒素の無機化量はヤマザクラの分布も見られる落葉樹林帯で報告されている $26mmol/m^2/yr$ を採用した⁶⁾。また、文献値¹⁰⁾などを参考にして、今回のモデルにおいて硝酸化成率は 50%、有機酸の生成は $0.09mmol/L$ 、また窒素負荷の吸収率を O 層で 15 % に、A 層で 80 % に設定した。

モデルを調査地の土壌に適用するにあたって、様々なパラメータを設定する必要がある。表-5 の分類 A のパラメータは前章の土壌分析の結果や片岡¹²⁾からデータを得た。

また表-5 の分類 B のパラメータは、交換定数等の土壌に固有のパラメータであり実測するのが困難なため、パラメータフィッティングにより決定した。パラメータフィッティングの際、五郎平茶屋地区の家の床下の土壌 (O 層) を、50 年前の土壌サンプルと仮定した。家の床下は降雨や外部からのインプット等の影響を受けにくいと考え、50 年前の土壌とした。また O 層と仮定した理由は、塩基飽和度などが非常に高かったためである。塩基飽和度や水溶性塩基の実測値を用いてパラメータフィッティングを行い、パラメータを設定した。得られたパラメータを表-5 の分類 B に示した。

r は土壌種に固有の値を持つとされているが、調査地の土壌の値を特定するには至っていない。土壌を構成する主な鉱物の組成より、例えばクロライトで $r=0.4$ 、モンリロナイトで $r=5.0$ であり、これらの値から $r=1.5$ は現実的な値であると考えられる。

表-4 奈良県における降下物濃度¹¹⁾

SO_4^{2-}	NO_3^-	NH_4^+	BC_2^+
21.1	26.6	25.2	10.4

※単位は $mmol/m^2$

表-5 設定したパラメーター一覧

分類	記号	単位	O層	A層	
A	ρ	土壌の見かけの密度	kg/L	0.401	0.602
	θ	体積含水率	-	0.25	0.2
	CEC	陽イオン交換容量	mmol(+)/kg	31.4	14.7
	PS	有効降雨量	m	0.719	0.719
	fBC-0	初期の塩基飽和度	-	0.875	0.287
B	r	Al ³⁺ とBC ²⁺ の風化割合	-	-	1.5
	W _{BC}	BC ²⁺ の風化速度	mol/L	10 ^{-3.5}	10 ^{-3.5}
	Al _{ox}	初期のAl(OH) ₃ 量	mmol(+)/kg	-	18
	K _{gibb}	キブサイト溶解定数	(mol/L) ₋₂	-	2.5 × 10 ⁸
	K _{AL}	Al ³⁺ とBC ²⁺ に関する交換定数	mol/L	-	1.0 × 10 ²
	K _H	H ⁺ とBC ²⁺ に関する交換定数	L/mol	1.0 × 10 ^{2.5}	1.0 × 10 ³

A: 土壌の特性及び実験条件に関するパラメータ

B: パラメータフィッティングによって求めるパラメータ

表-6 シナリオ 1,2,3 の仮定

シナリオ	設定した仮定
シナリオ1	現在のままの降下物濃度が維持される。
シナリオ2	NH_4^+ 、 NO_3^- の降下物濃度が100年後に2倍になる。
シナリオ3	NH_4^+ と NO_3^- の降下物濃度が100年後に2倍になり、植物の土壌からの窒素吸収量が2010年の値から変化しない。

W_{BC} に関してはカラム実験を行うことにより特定できるが、本研究では行っていないため値を特定することはできなかった。パラメータフィッティングにより値を決定した。

K_{gibb} については天然のギブサイトに対する値 (2×10^8) と人工の $Al(OH)_3$ に対する値 (7.5×10^8) の範囲内であることから、妥当な値であると考えられた。

パラメータの値の中でも Al_{ox} 、 K_{AL} 、 K_H は土壌固有のものであり、様々な土壌に対して値を求める試みがなされている¹⁸⁾ものの、地域特性や気候などの違いにより、値を特定することは難しく、パラメータフィッティングにより決定した。

3.4 想定したシナリオ

本研究では表-6 に示した 3 つのシナリオを想定し、調査地の土壌環境の将来予測を行った。

シナリオ 2、3 では、毎年同量ずつ窒素分が増加し、100 年後には降下物の窒素が現在の 2 倍インプットされるように設定した。これは今後、中国などでの化石燃料消費量増加により、酸性降下物が急増した事態を想定している。さらに、シナリオ 3 では窒素飽和状態であることを仮定している。これはモデルにおいて、通常、植物は窒素濃度に比例した量の窒素を取り込むように設定しているが、窒素飽和状態の場合、植物による取り込み量が 2010 年の値から増加しないように設定した。また現在場所によっては管理として行われている施肥については考慮していない。

3.5 結果および考察

表層土壌の様々なシナリオに対する 2110 年までの A 層の将来予測を行った結果を図-1~2 に示した。グラフにおいて、pH、塩基飽和度はともに、開始年から 30 年間ほど増加し、以後減少するようになっている。これは O 層に蓄えられてい

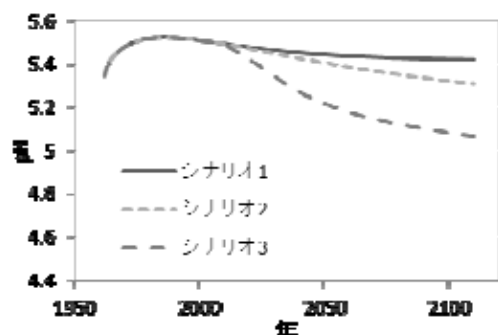


図-1 シミュレーション結果 (pH)

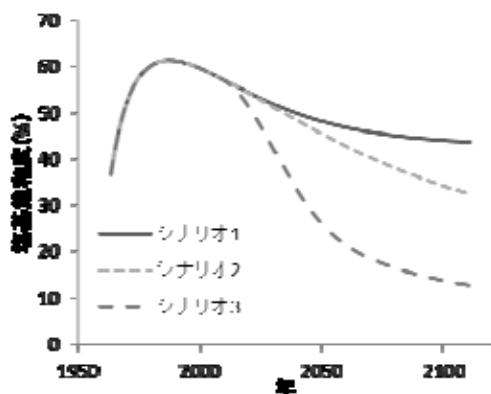


図-2 シミュレーション結果 (塩基飽和度)

た水溶性塩基が開始年から酸性雨の影響でA層へ大量に浸透し、その影響で最初はA層のpH、塩基飽和度が増加するが、O層で蓄えられていた水溶性塩基が減少しA層への浸透量も減少してくると、A層でも酸性雨の影響でpHや塩基飽和度が減少し始めるという現象を示している。

図-1より、pHは3シナリオとも2110年までの100年間微減し続けることが予想されるが、急激な変化は見られない。

図-2より、シナリオ2、3のように NH_4^+ 、 NO_3^- といった窒素降下物濃度が100年後2倍になるように仮定すると、塩基飽和度は大幅に低下し、土壌状態が悪化されることが予想された。また、シナリオ3のように窒素飽和状態に陥っていると仮定すると、これらの現象はさらに急激に進行することがわかる。よって、窒素負荷の増加と窒素飽和現象の発生は酸性化の進行を早めると考えられる。そのため、窒素降下物が増加していくのか、さらに吉野山五郎平茶屋地区の土壌が窒素飽和状態に陥っているか、今後の調査が必要である。

4. 結論

本研究で得られた結論を以下に示す。

1) 吉野山中千本の五郎平茶屋でのフィールド調査の結果、養分保持力が低い土壌であることや、窒素飽和状態の可能性が示唆された。五郎平茶屋地区で窒素飽和状態に陥っているか

どうか、検討を行う必要がある。

2) 窒素飽和状態や、降下物による窒素負荷量が100年後に2倍になることを仮定し、数値シミュレーションによって、将来予測を行った。結果、塩基飽和度は大幅に低下することが予想された。そのため、窒素降下物が増加していくのか、さらに吉野山五郎平茶屋地区の土壌が窒素飽和状態に陥っているか、今後の調査が必要である。

引用文献

- 1) 朝日新聞社 (1997) 植物の世界, 朝日新聞出版局.
- 2) 天野孝之 (1999) 吉野山桜活性化事業追跡調査, 樹木医学研究, 3 (2) : 85-92.
- 3) 馬場光久 (2007) 土壌の酸性化と窒素沈着, 化学と生物, 45 (3) : 197-202.
- 4) 土壌環境分析法編集委員会 (1997) 土壌環境分析法, 博友社.
- 5) G.L.Gains and H.C.Thomas (1953) Adsorption Studies on Clay Minerals. II. A Formation of The Thermodynamics of Exchange Adsorption, J.Chem.Phys., 21: 714-718.
- 6) 平井敬三・金子真司・高橋正通 (2007) 森林土壌における気候別窒素無機化—土壌理化学性, 気温, 土壌型による現地窒素無機化速度の推定—, 森林立地学会誌, 49 (2) : 123-131.
- 7) 堀内将人 (2000) わが国における樹木衰退と土壌酸性化との関連性の評価と対策に関する研究, 科研費基盤研究 (C)(2) 研究成果報告書.
- 8) 船山瑞樹・佐藤善政・佐々木美佐子 (2001) リンゴ園における土壌バイオマス窒素等からの可給態窒素の推定, 東北農業研究, 54 : 139-140.
- 9) 久馬一剛 (1997) 最新土壌学, 朝倉書店.
- 10) 井上克弘・横田紀雄・村井宏・熊谷直敏・望月純 (1993) 富士山麓におけるブナ林, ヒノキ林の雨水および土壌浸透水の水質とブナの酸性雨中和機能, 日本土壌肥料科学雑誌, 64 : 265-274.
- 11) 環境省 (2005) 第4次酸性雨全国調査報告書, 全国環境研究会誌, 30 (2) : 23-28.
- 12) 片岡利仁 (2010) 桜枯死の原因および桜活性化のための土壌改良方法の検討, 京都大学工学研究科都市環境工学専攻修士論文.
- 13) Kochian L. V. and Annu. Rev. (1995) CELLULAR MECHANISMS OF ALUMINUM TOXICITY AND RESISTANCE IN PLANTS, Plant Physiol. Plant Mol. Biol., 46 : 237-260.
- 14) 公害対策研究対策センター (1990) 第一次酸性雨対策調査結果, 環境庁.
- 15) W. Vries (1989) Simulation of The Long Term Soil Response to Acid Deposition in Various Buffer Ranges., Water Air, Soil Pollution, 48 : 349-390.
- 16) 山本暁人・松本正義・友膳幸典・三輪真理子・三原啓子 (2005) 京都市内における杉の生育とその周辺土壌の基礎調査, 京都市衛生公害研究所年報, 71 : 111-121.
- 17) 由井栄太郎 (1998) 有機物層を考慮した森林土壌酸性化の解析と将来予測, 京都大学工学研究科環境地球工学専攻修士論文.

(2011.7.11 受理)