



# 草原－森林植生遷移が黒ボク土腐植酸の諸特性に及ぼす影響に関する研究

飯村, 康夫

---

(Degree)

博士 (農学)

(Date of Degree)

2011-03-07

(Date of Publication)

2011-10-11

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙3145

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2003145>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏 名 飯村 康夫  
博士の専攻分野の名称 博士（農学）  
学 位 記 番 号 博ろ第 3145 号  
学位授与の要件 学位規則第 5 条第 2 項該当  
学位授与の日付 平成 23 年 3 月 7 日

【 学位論文題目 】

草原－森林植生遷移が黒ボク土腐植酸の諸特性に及ぼす影響に関する研究

審 査 委 員

主 査 教 授 藤 嶽 暢 英  
教 授 水 野 雅  
教 授 芦 田 均

## 論文内容の要旨

氏 名 飯村 康夫

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

草原—森林植生遷移が黒ボク土腐植酸の諸特性に及ぼす影響に関する研究

第1章の諸論では、植生と黒ボク土の関係に関する研究の歴史的背景、黒ボク土における腐植酸の質的特性の重要性ならびに研究意義、特に化学構造特性や安定性など多角的な質的特性と植生との関係について把握することの重要性について論述している。

典型的な黒ボク土は、厚い黒色のA層によって特徴づけられ、多量の黒色腐植酸を含有しているが、その生成機構については現在も十分に理解されていない。古くからススキなどのイネ科草本植生が給源植生として重要であることが示唆されており、数多くの研究がなされてきた。しかし、それらの大部分は土壌断面の形態的特性や腐植量のみから解釈したものであり、質的特性、特に化学構造特性や安定性による解釈は絶対的に不足している。また、実際のフィールドでは、たとえ母材が同じであり、現在の植生が草原や森林であったとしても、一方の地形や気候といった土壌生成環境が異なっている場合や、過去の土地利用履歴や植生履歴が異なっている場合が圧倒的に多く、単純に現植生の影響として比較することは通常困難である。本論文では、土壌の生成環境もしくは土地利用履歴が互いにほぼ同じである黒ボク土を用い、且つ、草原や森林といった植生の影響をより正確に評価するために極めて有効な“植生遷移”に着目することで、植生の違いが黒ボク土腐植酸の諸特性に及ぼす影響を明らかにしている。すなわち、ススキ草原として維持管理されてきた黒ボク土の一部を段階的に放棄し、現在は草原—森林の異なる遷移段階が同時に存在する黒ボク土を用いて、遷移の進行に伴う黒ボク土腐植酸の量および質的特性を詳細に解析し比較している。また、腐植酸は多分散性で非常に複雑な高分子混合物的特性を有しているため、その物理化学構造特性をより詳細に分析するには、できるだけ多分散性を減少させ、分子量などの物理化学的特性と官能基および元素組成などの化学構造情報を明らかにし、これらの構造特性値を相補的に解釈する研究を行うことが重要である。そこで、各腐植酸を分子サイズに基づき細分画し、得られた分子サイズ別画分の化学構造特性や安定性についてその詳細を明らかにしている。さらに草原および森林植生下での黒ボク土腐植酸の生成メカニズムを言及した研究は皆無に等しいため、腐植酸ならびにそれらの分子サイズ別画分の炭素・窒素安定同位体比および放射性炭素濃度を測定し、草原からの林地化に伴う腐植酸の生成メカニズムについても言及している。

第2章では、同一環境下で生成した黒ボク土でも、草地から森林へと植生が変化した場合、表層(0—20cm)の炭素量や腐植組成、腐植酸の物理化学構造特性および安定性が規則的に変化することを明らかにした。ススキ草地では、より多くの炭素を主に腐植酸として蓄積しているが、アカマツ林地や落葉広葉樹林地では森林環境の継続期間が長いほど蓄積している炭素量や腐植酸割合は低く、逆にヒューミン割合が高くなる傾向を示した。アカマツ林地や落葉広葉樹林地では腐植酸に対する可動性の高いフルボ酸の相対量がより高く、土壌もより酸性であった。よって、無機物と結合し安定していた腐植酸やヒューミンの一部が溶解し、微生物分解作用もしくは溶脱等を受けやすくなることが、土壌有機物、特に腐植酸量が低くなった原因の一つであろうと考察した。また、針葉の化学組成がより脂肪族成分に富むことや、ススキに比べミズナラやシラカンバなどの落葉広葉樹林リターの分解残渣がより脂肪族性に富むことから、これらは腐植組成の違いに関係していると考えた。ススキ草地の腐植酸の物理化学構造特性や安定性は、より低分子サイズであり、縮合芳香環に富み、安定性は高いことが明確であった。一方、アカマツ林地や落葉広葉樹林地の腐植酸の物理化学構造特性は互いに類似性が高く、ススキ草地の腐植酸に比べより高分子サイズであり、炭水化物炭素や脂肪族炭素割合が高く、安定性はより低い特性を有することが明らかとなった。また、森林植生の継続期間がより長い落葉広葉樹林地ほど、より高分

(氏名：飯村 康夫 NO. 2)

子サイズで、脂肪族炭素割合が高い傾向を示した。さらに、ススキ草地下黒ボク土における森林地化は、縮合芳香環の消失および相対的な脂肪族炭素割合の増大を促進する可能性が見出された。

第3章では、黒ボク土腐植酸の化学構造特性や安定性に草原-森林植生遷移がどのような影響を及ぼすのかをより詳細に解析することを目的として、第2章で用いた各黒ボク土腐植酸を分子サイズ別に細分画し、分子サイズ別画分の物理化学構造特性や安定性をHPSEC分析、元素分析、 $^{13}\text{C}$  NMRスペクトル分析および過酸化水素水による酸化分解褪色実験から評価した。各腐植酸のサイズ別画分のHPSEC分析結果からは、ススキ草地に比べ、アカマツ林地や落葉広葉樹林地といった森林植生下の腐植酸のほうが分散度は高く、高分子サイズ画分をより多く含むこと、また、いずれの腐植酸も低分子画分の分子サイズはそれほど大きな差異はなく2000~3000Da程度(PSSNa換算)であることが示された。元素分析では特にH/C-O/Hダイアグラムで各腐植酸の分子サイズ別画分の明確な特徴づけが可能であり、森林植生が長期間継続するほどH/C比がより高く、O/H比が低い、飽和の炭化水素割合が比較的高い腐植酸画分が卓越してくることが強く示唆された。またススキ草地腐植酸の大部分は典型的な黒ボク土タイプの領域に分布し、逆に落葉広葉樹林地腐植酸はそれ以外のタイプ領域に分布した。アカマツ林地腐植酸の低分子サイズ領域はススキ草地により近い領域に、中~高分子サイズ画分は落葉広葉樹林地により近い領域に分布したことから、両者に特有の腐植酸が混在していることが強く示唆された。液体 $^{13}\text{C}$  NMRスペクトル分析からは、ススキ草地腐植酸が高分子サイズ画分を除き極めて芳香族性が高い、いわゆるブラックカーボンに類似した化学構造特性を有することが示唆され、低分子サイズ画分ほどこのような傾向が強かった。また、これらは過酸化水素水による酸化分解実験からもより安定性が高いことも示された。しかし、落葉広葉樹林地腐植酸のサイズ別画分は大サイズ画分を除きいずれの画分もススキ草地に比べ芳香族性は低く、炭水化物炭素や脂肪族炭素に富む化学構造特性を有すること、また、安定性もより低いことが示された。アカマツ林地腐植酸も全体的に落葉広葉樹林地腐植酸の化学構造特性や安定性に類似した結果が得られたが、低分子サイズ画分ほどよりススキ草地に類似した性質を示すことも明らかとなった。元素分析や分解抵抗性の結果も合わせて考察すると、第2章で示唆されたように、黒ボク土において、ススキ草地下と針葉樹林や落葉広葉樹林などの森林地下で生成される腐植酸は根本的にその特性は異なっており、森林植生環境下ではH/C比が低く、O/H比が高く、かつ芳香族性に富む典型的な黒ボク土タイプに類似した腐植酸は生成されていない可能性がより強く裏付けられた。また、アカマツ林や落葉広葉樹林は植生遷移に伴い森林地化が進行したことを考慮すると、森林地下で新たに生成した腐植酸は草地下で生成されている腐植酸とは特徴が大きく異なり、森林環境がより長く続くほど、比較的高分子でO/H比が低く、H/C比が高く、脂肪族性が高く、安定性が低い腐植酸がより多く混合してくることが強く示唆された。

第4章では、第2章、第3章の各腐植酸およびサイズ別画分の炭素・窒素安定同位体比( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ )、放射性炭素濃度( $\delta^{14}\text{C}$ )を測定することで、草原-森林植生遷移に伴う黒ボク土腐植酸の生成メカニズムについて言及した。ススキ草地では腐植酸および分子サイズ別画分ともに給源植生としての $\text{C}_4$ 植物の寄与率はより高く、芳香族性や安定性の高さにススキが給源植生として果たす役割はより大きいと推察した。一方、草原から遷移に伴い森林が進入すると腐植酸はより分解されやすい脂肪族性に富む特性へと変化することが前章までに強く示唆されたが、これらの変化メカニズムは大きく二つの経路が推察された。一つ目は既存の腐植酸が微生物分解作用に伴い分解・消失する経路であり、これらは森林(針

(氏名：飯村 康夫 NO. 3)

葉樹)が進入してから比較的初期段階(30年程度)で主に生じていると推察した。二つ目は森林リターを起源とした腐植化の進行経路であり、主に森林が侵入してから少なくとも30年以上経過した段階で生じていると推察した。また、一つ目の経路は植生の窒素利用に深く関係する可能性が見出された。さらに、二つ目の経路で生成される腐植酸はそれらの性質がクライマックスの状態でもススキ起源の腐植酸と比較すると本質的に異なっており、より高分子で脂肪族性が高く、分解されやすい特性を有することが推察された。

以上の研究結果から、黒ボク土における黒色腐植酸の生成もしくは維持には森林植生に比べススキ草原植生のほうがよりポジティブな影響を及ぼすと結論づけられる。すなわち、針葉樹林や落葉広葉樹林に比べ、ススキ草地は給源植生として直接的に関与するだけでなく、初生腐植物質からより安定性の高い黒色腐植酸の合成を効果的に促す土壌環境を形成しやすいと考えられる。一方、森林植生環境は、黒色腐植酸の合成を抑制する土壌環境を形成しやすく、クライマックスの状態でも比較的分解されやすい、脂肪族性の高い腐植酸の合成に留まっているものと推察される。さらに森林地化に伴う腐植酸の特性変化は主に既存の腐植酸が微生物分解作用に伴い分解・消失する経路と、森林植生を起源とした腐植化の進行経路の二つが推定され、森林が長期間継続するほど後者の経路が卓越してくることが推察された。

氏名	飯村 康夫		
論文題目	草原-森林植生遷移が黒ボク土腐植酸の諸特性に及ぼす影響に関する研究		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	藤嶽 暢英
	副査	教授	水野 雅史
	副査	教授	芦田 均
	副査		
			印
要 旨			
<p>日本に広く分布する黒ボク土は、厚い黒色のA層によって特徴づけられ、多量の炭素をブラックカーボン様の腐植酸として安定的に保持している。そのため、黒ボク土は世界的に見ても極めて高い炭素隔離機能を有している土壌の一つであるといえる。その核となる腐植酸の生成機構の解明は重要な研究課題であるが、現在も十分には理解されていない。これまで、黒ボク土腐植酸の主な生成要因の一つとしてススキなどのイネ科草本植生が給源植生として重要であることが示唆されてきた。しかし、研究の大部分は現植生下の土壌断面形態の特性や腐植酸量の比較のみから解釈したものであり、腐植酸の質的特性、特に化学構造特性や安定性による解釈は絶対的に不足している。また、実際のフィールドでは、たとえ母材が同じであり、現植生が草原や森林であっても、一方の地形や気候といった土壌生成環境が異なる場合や、過去の土地利用履歴や植生履歴が互いに大きく異なる場合が圧倒的に多い。そのため、草原や森林植生が黒ボク土腐植酸生成に果たす役割を実際のフィールド研究から検証することは通常難しい。</p> <p>本研究では、土壌の生成環境もしくは土地利用履歴が互いにほぼ同じである黒ボク土を用い、且つ、草原や森林といった植生の影響をより正確に評価するために極めて有効な“植生遷移”に着目することで、植生の違いが黒ボク土腐植酸の諸特性に及ぼす影響を明らかにしている。すなわち、ススキ草原として維持管理されてきた黒ボク土の一部を段階的に放棄し、現在は草原-森林の異なる遷移段階が同時に存在する黒ボク土を用いて、遷移の進行に伴う黒ボク土腐植酸の量および質的特性を詳細に解析し比較している。また、草原および森林植生の違いによる黒ボク土腐植酸の生成メカニズムを科学的に明らかにした研究は皆無に等しい。本研究では、各遷移段階の黒ボク土腐植酸ならびにそれらの分子サイズ別画分の炭素・窒素安定同位体比および放射性炭素濃度を測定することで、草原-森林植生遷移に伴う腐植酸の変化メカニズムについても言及している。</p> <p>第1章の諸論では、植生と黒ボク土の関係に関する研究の歴史的背景、黒ボク土における腐植酸の質的特性の重要性ならびに研究意義、特に化学構造特性や安定性など多角的な質的特性と植生との関係について把握することの重要性について論述している。</p> <p>第2章では、同一環境下で生成した黒ボク土でも、遷移により草地から森林へと植生が変化した場合、表層(0-20cm)の炭素量や腐植組成、腐植酸の物理化学構造特性および安定性が規則的に変化することを明らかにしている。ススキ草地では、より多くの炭素を主に腐植酸として蓄積しているが、アカマツ林地や落葉広葉樹林地では森林環境の継続期間が長いほど蓄積している炭素量や腐植酸割合は低く、逆にヒューミン割合が高くなる傾向を見出している。ススキ草地の腐植酸の物理化学構造特性や安定性は、より低分子サイズであり、縮合芳香環に富み、安定性が高いことを示している。一方、アカマツ林地や落葉広葉樹林地のそれは互いに類似性が高く、ススキ草地の腐植酸に比べより高分子サイズであり、炭水化物炭素や脂肪族炭素割合が高く、安定性はより低い特性を有することを示している。また、森林植生の継続期間がより長い落葉広葉樹林地ほど、より高分子サイズで脂肪族炭素割合が高い傾向を示すことを見出している。さらに、ススキ草地下黒ボク土における林地化は、縮合芳香環の消失および相対的な脂肪族炭素割合の増大を促進する可能性を見出している。</p>			

氏名	飯村 康夫		
<p>第3章では、黒ボク土腐植酸の化学構造特性や安定性に対する草原-森林植生遷移の影響をより詳細に解析することを目的として、第2章で用いた各黒ボク土腐植酸を分子サイズ別に細分画し、分子サイズ別画分の物理化学構造特性や安定性をHPSEC分析、元素分析、<sup>13</sup>C NMRスペクトル分析および過酸化水素水による酸化分解褪色実験から評価している。各腐植酸のサイズ別画分のHPSEC分析では、ススキ草地に比べ、アカマツ林地や落葉広葉樹林地といった森林植生下の腐植酸のほうが高分散度で高分子サイズ画分をより多く含むこと、また、いずれの腐植酸でも低分子画分の分子サイズはそれほど大差なく、2000~3000Da程度(PSSNa換算)であることを示している。元素分析では特に、H/C-O/Hダイアグラムによる特徴づけが可能であり、森林植生が長期間継続するほど高H/C比で低O/H比である飽和炭化水素割合の高い腐植酸画分が卓越する傾向にあることを強く示唆している。また、ススキ草地腐植酸の大部分は典型的な黒ボク土タイプの領域に分布するが、落葉広葉樹林地腐植酸ではそれ以外の領域に分布すること、アカマツ林地腐植酸については低分子サイズ画分がススキ草地により近い領域に、中~高分子サイズ画分が落葉広葉樹林地により近い領域に分布することを示している。このことから、アカマツ林地腐植酸はススキ草地腐植酸と落葉広葉樹林地腐植酸の両者に特有の腐植酸が混在していることを強く示唆している。<sup>13</sup>C NMRスペクトル分析からは、ススキ草地腐植酸が高分子サイズ画分を除いて極めて芳香族性が高い、いわゆるブラックカーボンに類似した化学構造特性を有することを見出し、低分子サイズ画分ほどこのような傾向が強いことを、また、それらの画分は過酸化水素水による酸化分解実験からより安定性の高いことを示している。しかし、落葉広葉樹林地腐植酸のサイズ別画分は大サイズ画分を除いて、いずれの画分もススキ草地に比べて芳香族性は低く、炭水化物炭素や脂肪族炭素に富む化学構造特性を有すること、また、安定性もより低いことを示している。アカマツ林地腐植酸も全体的に落葉広葉樹林地腐植酸の化学構造特性や安定性に類似した結果が得られたが、低分子サイズ画分ほどススキ草地腐植酸に類似した性質を示すことも明らかにしている。第2章で示唆した、ススキ草地下と針葉樹林地や落葉広葉樹林地などの森林地下で生成される黒ボク土腐植酸は根本的に特性が異なり、森林植生環境下では典型的な黒ボク土腐植酸は生成されない可能性のあることが、より強く裏付けられた。また、アカマツ林地や落葉広葉樹林地が植生遷移に伴う森林地化の進行であることを考慮すると、森林地下で新たに生成あるいは変質した腐植酸は草地下で生成あるいは維持されている腐植酸とは特徴が大きく異なり、森林環境が長く続くほど、比較的高分子でO/H比が低く、H/C比が高く、脂肪族性が高く、安定性が低い腐植酸が多く混合することを強く示唆している。</p> <p>第4章では、第2章、第3章の各腐植酸およびサイズ別画分の炭素・窒素安定同位体比(<sup>6</sup><sup>13</sup>C, <sup>6</sup><sup>15</sup>N)、放射性炭素濃度(<sup>6</sup><sup>14</sup>C)を測定し、草原-森林植生遷移に伴う黒ボク土腐植酸の生成メカニズムについて言及している。ススキ草地では腐植酸およびそれらの分子サイズ別画分ともに、給源植生としてのC<sub>4</sub>植物寄与率がより高く、芳香族性や安定性の高さに給源植生としてススキが果たす役割は重要であることを推察している。一方、草原から遷移に伴い森林化すると、腐植酸はより分解されやすい脂肪族性に富む特性へと変化する可能性が前章までに示されたが、これらの変化メカニズムは大きく二つの経路をたどる可能性を推察している。すなわち、既存の腐植酸が微生物分解作用に伴って分解・消失する経路であり、これらは森林(針葉樹)が進入してから比較的初期段階(30年程度)で主に生じていると推察している。もう一方は森林リターを起源とした腐植化の進行経路であり、主に森林が侵入してから少なくとも30年以上経過した段階で生じると推察している。また、前者の経路は植生の窒素利用に深く関係する可能性を見出している。</p> <p>本研究は、草原や森林植生が黒ボク土腐植酸の生成もしくは維持に及ぼす影響を、草原-森林植生遷移に伴う腐植酸の量や質的特性および生成メカニズム面から多角的に実証した初めての研究であり、黒色腐植酸の生成・維持について重要な知見を得たものである。</p> <p>以上の結果は、農学はもとより、生態学や環境科学などの広範囲にわたる分野について重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。よって、学位申請者の飯村康夫は、博士(農学)の学位を得る資格があると認める。</p>			