

中国の退耕還林植林地におけるバイオマス高度 利用とその低炭素化ポテンシャル - 河南省靈宝市のトチュウ植林の事例 -

町村 尚¹・佐田 忠行²・小林 昭雄³・中澤 慶久⁴・玉泉 幸一郎⁵
堤 雅史⁶・部谷 桂太朗⁷・津田 和俊⁸・蘇 印泉⁹

¹非会員 大阪大学准教授 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)
E-mail: mach@see.eng.osaka-u.ac.jp

²非会員 大阪大学特任研究員 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)
E-mail: ta-sada@frc.eng.osaka-u.ac.jp

³非会員 大阪大学教授 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)
E-mail: kobayashi@bio.eng.osaka-u.ac.jp

⁴非会員 大阪大学招聘准教授 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)
E-mail: nakazawa@bio.eng.osaka-u.ac.jp

⁵非会員 九州大学准教授 農学研究院 (〒福岡市東区箱崎6-10-1)
E-mail: gyokusen@agr.kyushu-u.ac.jp

⁶非会員 大阪大学特任研究員 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)
E-mail: tsutsumi_masafumi@bio.eng.osaka-u.ac.jp

⁷非会員 大阪大学大学院博士前期課程 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)
E-mail: keitarou.hidani@ge.see.eng.osaka-u.ac.jp

⁸非会員 大阪大学特任研究員 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)
E-mail: tsudakazutoshi@lee.mech.eng.osaka-u.ac.jp

⁹非会員 西北農林科技大学教授 林学院 (中国陝西省楊凌市)
E-mail: syq@nwsuaf.edu.cn

中国河南省の退耕還林トチュウ植林事業をモデルとして、黄土高原の退耕還林におけるバイオマス高度利用による低炭素化ポテンシャルを評価した。トチュウ植林からは多様なバイオマスを収穫し、薪、飼料化に加え、種子オイル(BDF原料)やトランスゴムなどの高次加工製品としての利用を想定した。対照として、退耕還林前のトウモロコシ栽培、退耕還林ハリエンジュ林と比較した。現地調査と文献調査によって、生態系炭素収支と収穫バイオマスの石油原燃料代替による炭素排出削減量を算定した。低炭素化ポテンシャルは、人為的炭素移動(収穫・施肥)を含む純生物圏生産(NBP)と炭素排出削減効果の合計で評価した。トチュウ植林は大きな低炭素化ポテンシャルを示し、バイオマス高度利用の有効性が示された。

Key Words : grain for green policy, *Eucommia* plantation, biomass utility, carbon reduction potential, Henan province

1. はじめに

BRICs諸国の筆頭として中国の経済成長は著しく、20世紀末以降、中国は「世界の工場」と呼ばれるまでに至り、経済的にグローバル化を果たした。しかし一方、社会および自然環境の両面で、いくつかの問題が生じてい

る。第一に、急激な経済成長に伴うエネルギー消費急増に対して省エネルギー・低炭素化への動きは緩慢で、エネルギー需給逼迫と二酸化炭素排出による地球環境への負荷増大をもたらしている。第二に、経済発展が東部沿海地域を中心とするものであったために、内陸地域との間に経済格差を生じ、特に西部の農村地域では経済停滞

と環境悪化の問題に直面している。西部地域の多くは大陸性季節風気候で、冬は寒冷で乾燥し夏季の雨季に降雨が集中してもたらされる乾燥・半乾燥地域であり、干ばつ、水害、土砂崩、土壌侵食などの災害にしばしばみられる。農業生産性は東部地域に比べて約半分程度と低いにもかかわらず、近年の人口増加を補うために急傾斜地への耕作拡大や過放牧がおこなわれ、結果として土地の被覆率が低下して激しい土壌侵食を招いている。このことがさらに農業生産を停滞させ、格差拡大を招くという悪循環に陥っている。これらの問題は内陸地域にとどまらず、黄河の流量減少や黄砂による被害といった形で東部海岸地域にも影響している。また開発や農業生産性低下の影響で土地を失ったり国家の経済発展に残された農民が増加し、「農民工」として都市部へ大量流入するなどの人口問題も生じている。このような中国内陸部農村地域の問題を解消するには、持続的な農業生産、農村の経済活性化と共に、生態環境の保全と回復にも注意しなければならない。

以上のような課題に対し、中国政府は2002年12月に退耕還林条例を發布した。退耕還林は、25度以上の急傾斜地や乾燥度の高い地域など、自然環境への負荷が大きい土地の農耕や放牧を放棄し、跡地に植林して劣化した生態環境を回復させようとする国家プロジェクトである。条例では自然環境を優先するものの、国土保全と農民の生活安定、農村振興の同時達成を共に目的としている。このため、耕作を放棄した農民には5年間にわたって作物収穫量に相当する食糧またはそれに相当する現金が支給され、同時に耕作に代替する森林管理の自発的な請負と管理費の保障をしている。すなわち退耕還林の当事者として農民を位置づけ、農民の自発性を基本としてその責任と受益確保を明確にするとともに、最終的に農村全体の活性化につながることを求めている。

中国内陸部に広く分布する黄土地帯（黄土高原）は、上記のような農村問題が典型的に現れている地域である。著者らは中国農村の社会・環境問題に取り組むパイロットモデル地域として、河南省靈宝市を研究対象にして調査をおこなっている。靈宝市は黄土高原の南東端に位置し、総面積3011 km²の49%を山地が占める。気候は典型的な大陸性季節風気候で、夏季に降雨が集中して豪雨となるため土壌流出が起きやすい。靈宝市が実施した退耕還林は7年間で44.8万畝（約3万ha）、投資金額13億元で、3.7万戸の農家に対して行われた（靈宝市林業局調べ）。主な退耕還林樹種は、生態林としてハリエンジュ、経済林としてクルミ、リンゴなどの果樹がある。

靈宝市では退耕還林の新たな試みとしてトチュウ（*Eucommia ulmoides*）の植林を推奨し、1996年以降約1400 haの土地に約120万株のトチュウが植林され、栽培

面積は現在も拡大している。トチュウは中国原産の落葉高木であり、樹皮は漢方薬、葉は茶として古来より利用されている。共著者らの研究によって、近年、トチュウの樹皮や果実に大量に含まれるグッタペルカ（*Gutta Percha*）と呼ばれる高分子量のトランス-1,4ポリイソプレンを、天然ゴム（トランスゴム）として利用することが可能となった。そこで雄花からの雄花茶生産、葉からの茶や飼料の生産などの従来からのトチュウバイオマス利用に加え、トランスゴムの生産が計画され、2009年には実証生産実験施設が現地に建設された。

退耕還林の目的は第一義として水土保全であるが、本研究は、東部沿海部に遅れて今後急激な温室効果ガス排出増加が予測される中国の農村部の速やかな低炭素社会への移行を企図し、退耕還林による炭素固定を低炭素化に利用するためのポテンシャル評価をおこなった。ここで退耕還林の低炭素化効果として、生態系への炭素固定と植林から収穫されるバイオマスの利用の両方を考えた。また退耕還林トチュウ植林の低炭素化ポテンシャルを代替案と比較するため、退耕還林前のトウモロコシ栽培、一般的な退耕還林樹種であるハリエンジュ植林の評価もおこなった。

2. 方法

(1) 研究対象地域

研究対象地域は、中国河南省靈宝市朱陽鎮である。この地域は黄土高原の南東端に位置し、FAO74による土壌種別はChromic Cambisolで、急傾斜地では侵食崖が発達し、土壌侵食が大きな環境問題となっている。朱陽鎮の南東約40 kmに位置する同市盧氏県における年平均気温は12.9℃、年降水量は650 mmで、半乾燥気候である。従来コムギ、トウモロコシなどの作物栽培がおこなわれていたが、退耕還林政策を利用したトチュウの栽培が広まり、最も古い林分は調査時点で植林後13年であった。

(2) バイオマス生産・利用ケースの設定

黄土高原における退耕還林植林およびそのバイオマス利用の低炭素化効果を評価するため、3つのバイオマス生産・利用ケースにおける炭素収支を算定し、相互比較した。第一のケースは退耕還林以前からの食用トウモロコシ栽培を継続する場合、第二のケースはハリエンジュ（*Robinia pseudacacia*）を植林する場合、第三のケースは、対象地域の新たな試みであるトチュウを植林する場合である。トウモロコシ栽培では子実を食用とするほか、茎・葉の一部を飼料および燃料とし、残りを作物残渣として圃場に還元することとした。ハリエンジュは乾燥に

強く、窒素固定能力を持ち、成長が速いことから、黄土高原で退耕還林樹種として広く植林されている。ハリエンジュ植林ではこの地域における一般的利用法にならない、30年間育成後に伐採して木材として利用することとした。トチュウ植林では現地ですべておこなわれている雄花からの茶の生産の他、果実からの種子オイル（バイオディーゼル燃料; BDFの原料）およびトランスゴム生産、葉からの飼料およびクロロゲン酸（サプリメント原料）生産をおこなうこととした。

(3) 生態系炭素収支の算定

自然生態系における炭素収支は、植物成長に伴うバイオマス炭素固定、リター生成（落葉や枯死）と土壌有機物の蓄積・分解の二つの過程から成る。農地や人工林生態系ではさらに、伐採、収穫、間伐、剪定、施肥などによる生態系外部との人為的炭素交換が加わる。設定した3つのバイオマス生産・利用ケースにおいて、バイオマス成長、土壌炭素動態、人為による生態系炭素収支を算定した。

a) バイオマス成長

単位面積あたり年間バイオマス成長量として、トウモロコシ栽培については生産量、ハリエンジュとトチュウについては木部年間成長量とリター（落葉）量を求めた。トウモロコシ栽培におけるバイオマス成長は、農業統計および既存研究から算定した。トウモロコシ子実生産量は朱陽鎮における2007年の実績とし、非食部（茎と葉）の重量は可食部（子実）との重量比（草穀比）¹⁾を元に計算した。

ハリエンジュ植林については対象地域におけるバイオマス成長に関する資料を得られなかったため、複数の文献からこれを推定した。Pengら²⁾による渭北黄土高原におけるハリエンジュ植林の年齢別（林齢1〜40年を5分類）平均樹高および材積を用い、Richardsの式にフィットさせて樹高および材積成長曲線を求めた。木部の乾燥密度を0.5 t dw m⁻³として、地上部材積を地上部バイオマス重量に換算した。バイオマス炭素密度はTatenoら³⁾が陝西省延安近郊のハリエンジュ林のリターおよび葉で測定した値（C:N値から算定）を平均し、0.45 tC t dw⁻¹とした。樹木のアロメトリー（器官間のサイズまたは重量比率）の一般式として、樹高 H と胸高直径 D を用いると、木部重量は $D^2 H$ に、葉重量は D^2 に比例することが知られている⁴⁾。これより、葉と木部の重量比は $1/H$ に比例し、若齢で高く成長に従って低下する。同定した樹高成長曲線から、林齢による $1/H$ の変化を求めた。Eigelら⁵⁾がケンタッキー州の13歳までのハリエンジュ植林で測定したデータから、10歳における葉と地上木部の重量比を0.13と仮定し、これより林齢ごとの葉重量を推定した。ハリエンジュ

は落葉樹なので毎年の葉がすべて落葉するとし、枝などの木質リターは考慮しなかった。また根の成長と枯死に関する情報が得られなかったため、これも考慮しなかった。

トチュウ植林については、対象地におけるトチュウ林分の調査によってバイオマス成長を算定した。2008年6月に、剪定をおこなっていない13歳林分において7本の立木を伐採して器官（幹、枝、葉、果実、根）別重量測定をおこない、これらを $D^2 H$ または D^2 から決定するアロメトリー式を求めた。また4つのコドラート（15 m×10 m）で実施した H と D の毎木調査結果から、個体の器官別重量を面積あたり重量に換算した。次に伐採木の樹幹解析をおこなって D と H の成長曲線を求め、さらに器官別重量の成長曲線をた。葉重量は D^2 に比例したので、ハリエンジュの場合と同様に $1/H$ をパラメータとして葉重量の成長曲線を推定した。また果実重量も D^2 に比例したので、果実重量の成長も同じパラメータを用いて推定した。最後に、測定したバイオマス炭素密度（0.45 tC t dw⁻¹）から、器官別重量を炭素量に換算した。生態系炭素収支の計算において、木質リターは考慮しなかった。またトチュウ植林では現地調査によって根バイオマスを測定したが、ハリエンジュ植林との比較のため、以下の計算ではこれを考慮しなかった。

b) 土壌炭素動態

土壌有機物蓄積・分解の計算には、土壌炭素動態モデルRothC (ColemanとJenkinson⁶⁾)を使用した。RothCは易分解性植物質 (DPM)、難分解性植物質 (RPM)、微生物バイオマス、腐植、無機炭素の5つのコンパートメントにおける炭素密度を1ヶ月インターバルで逐次計算するモデルで、各コンパートメントの分解速度の温度・土壌水分欠差・地表被覆依存性を考慮する。月気温および降水量には盧氏県における平年値を使用し、計器蒸発量にはKondohら⁷⁾のデータセットから、盧氏県におけるMorton法による湿面蒸発量の値を使用した。土壌の粘土含有率は、Batjes⁸⁾による土壌パラメータデータセットから対象地の土壌であるChromic Cambisolの平均値を引用し、50%とした。落葉および作物残渣のDPM/RPM比はColemanとJenkinson⁶⁾の推奨値を使用し、トウモロコシは1.44、ハリエンジュとトチュウは0.25とした。退耕還林前の状態であるトウモロコシ栽培については、同じ営農を継続したときの平衡土壌炭素量を求めるため、500年間の計算をおこなった。ハリエンジュとトチュウの植林については、トウモロコシ栽培で平衡に達した土壌に新規植林したときの土壌炭素動態を計算し、ハリエンジュ植林では伐期である30年間、トチュウ植林では現地調査をおこなった林齢までの13年間の計算をおこなった。

c) 人為的炭素移動

収穫、剪定、施肥などの施業によって、生態系と外部の間で人為的な炭素移動が生じる。トウモロコシ栽培では子実は食用として収穫をおこない、茎および葉の収穫のうち30%を飼料、同じく30%を燃料として利用し、残りの40%が作物残渣として圃場還元されると設定した。また朱楊鎮における統計から、有機肥料の投入量を算定した。ハリエンジュ植林ではこの地域の慣習に従って植林後の管理はおこなわず、30齢で伐採をおこなうこととした。材は農具、まくら木、杭などに使用されることが多く、品質向上のための間伐や枝打ちはおこなわれていない。トチュウ植林では雄花および果実のすべてと葉の40%を毎年収穫し、葉の60%は床下に落葉すると設定した。トチュウは再生力が非常に強く、葉を連年100%収穫しても翌年には再生することから、葉の収穫による成長障害は生じないと仮定した。現地における施業法に従って5齢以降毎年、木部バイオマスの5%の剪定をおこない、また毎年有機肥料の施肥をおこなうこととした。

3. 結果と考察

(1) バイオマス生産・利用ケースによる炭素収支の比較

退耕還林前（トウモロコシ栽培）および退耕還林後（ハリエンジュおよびトチュウ植林）における地上部バイオマスを表-1に、バイオマス生産・利用ケースによる生態系（バイオマスおよび土壌有機物）と収穫バイオマスの炭素フロー・ストック計算結果を、図-1に示す。

a) トウモロコシ栽培

退耕還林前のトウモロコシ畑（図-1A）では $6.8 \text{ t dw ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ の子実生産があり（朱楊鎮人民政府の統計による）、草穀比を2:1とすると茎・葉の生産量は $14 \text{ t dw ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 、合計 $21 \text{ t dw ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ のバイオマス生産があった。この植物成長によるバイオマス生産を純一次生産（NPP）といい、炭素量に換算すると $8.6 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ である。子実（ $2.9 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ ）は食品として消費された。日本エネルギー経済研究所⁹⁾による中国における作物バイオマスの用途分配比率を用いると、トウモロコシ茎・葉の60%である $3.4 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ は飼料および燃料として利用され、収穫バイオマスとして合計 $6.3 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ が利用された。茎・葉の残り $2.3 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ は、堆肥または鋤きこみによって圃場還元さ

れた。また朱楊鎮政府統計と農民からのヒアリング結果を文献¹⁾によって換算すると、有機肥料として $2.7 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ が圃場に投入された。肥料に含まれる炭素はバイオマス利用の炭素ストックからの持ち出しであるため、図-1では負数として表記し、差し引きのバイオマス利用量は $3.6 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ となった。

RothCによって計算されたこれらの圃場投入炭素と平衡する土壌有機物は 42 tC ha^{-1} で、土壌生物による有機物分解（従属栄養呼吸）は $5.0 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ であった。生物活動による生態系炭素収支である純生態系生産（NEP）はNPPと従属栄養呼吸の差であり、トウモロコシ畑では $3.6 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ の炭素が生物活動によって固定された。人為的移动を含む生態系炭素収支を純生物圏生産（NBP）という。NEPから収穫・施肥による炭素移動を差し引くとトウモロコシ畑のNBPは $\pm 0 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ となり、人為的移动を加えると生態系内の炭素増減はなかった。

b) ハリエンジュ植林

退耕還林後にハリエンジュを植林したケースの炭素フロー・ストックを、図-1Bに示す。ここでハリエンジュの伐期は30年であるが、後に示すトチュウ植林のケースが退耕還林後13年の調査結果であるため、比較のため13齢における収支を示す。なお13齢における個体サイズの推定値は樹高 $H=11 \text{ m}$ 、胸高直径 $D=9.7 \text{ cm}$ 、30齢における推定値は $H=18 \text{ m}$ 、 $D=16.4 \text{ cm}$ であった。13齢におけるバイオマス現存量は 35 t dw ha^{-1} で、年間成長量は $4.1 \text{ t dw ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ であった。これを炭素量に換算すると、純一次生産（NPP）は $2.8 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ であった。伐期が30年なので実際には13齢でバイオマス利用はおこなわれないが、他のケースとの比較のため、当年に成長した利用可能部（幹・枝の木部）をバイオマス利用量とみなした。後藤ら¹⁰⁾が日本国内でおこなった調査よりハリエンジュの幹と枝の重量比を $1.452:0.847$ と仮定すると、幹は丸太として $0.59 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 利用され、 $0.35 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ の枝はバイオマス製品残渣となることとした。バイオマス利用量の合計 $0.94 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ は、トウモロコシ畑のバイオマス製品の約半分であった。

ハリエンジュ植林では伐採まで管理をおこなわないため、土壌へ供給される炭素はハリエンジュの落葉のみである。落葉の炭素量は、13齢で $1.8 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ であった。一方土壌の炭素量は13齢で 36 tC ha^{-1} であり、退耕還林前のトウモロコシ畑より低下したが、年間 $0.20 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ の蓄積減少があった。土壌からの従属栄養呼吸は $2.1 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ で、トウモロコシ畑よりはるかに小さかった。これはトウモロコシ畑と比べてDPM/RPM比が小さいため植物遺体の分解が遅く、また分解が速い有機肥料の投入がないためである。13齢ハリエンジュ植林の純生態系生産（NEP）は $0.7 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ で、トウモロコシ畑より小さかつ

表-1 トウモロコシおよび退耕還林13年後のハリエンジュとトチュウの地上部バイオマス (tC ha^{-1})

	幹	枝	葉	果実/ 子実	全地上部
トウモロコシ		14		6.8	
ハリエンジュ	22	13	4.1		39
トチュウ	24	8.8	6.5	1.5	20.8

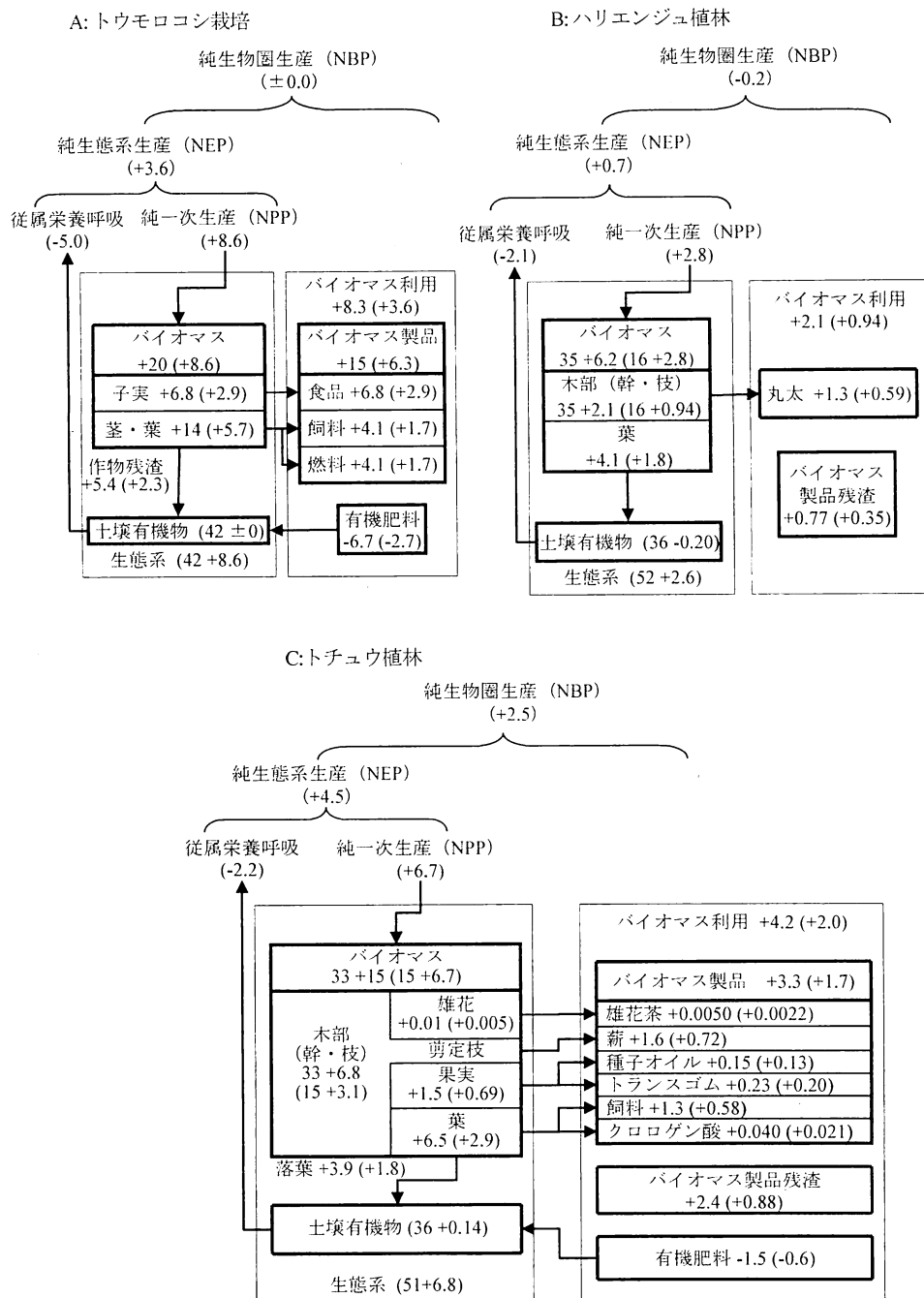


図-1 生態系およびバイオマス利用におけるバイオマス重量と炭素のフロー・ストック。退耕還林前のトウモロコシ栽培，退耕還林後13年のハリエンジュ植林，退耕還林後13年のトチュウ植林。符号付数値はフロー，符号なし数値はストックを表す。単位は，フローが $\pm \text{tdw ha}^{-1} \text{y}^{-1}$ ($\pm \text{tC ha}^{-1} \text{y}^{-1}$)，ストックが tdw ha^{-1} (tC ha^{-1})である。

た。人為的炭素移動を含む純生物圏生産 (NBP) は $-0.2 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ となり、将来の伐採によるバイオマス減少を考慮すると、当年の生態系内の炭素量増加はほぼゼロとなった。

c) トチュウ植林

退耕還林後にトチュウを植林したケースの炭素フロー・ストックを、図-1Cに示す。13齢におけるバイオマス現存量は 33 t dw ha^{-1} で、年間成長量は $15 \text{ t dw ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ であった。これを炭素量に換算すると、純一次生産 (NPP) は $6.7 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ で、トウモロコシ畑より成長速度は小さかったが、同林齢のハリエンジュ植林よりは大きかった。なお、現地で伐採した7個体のトチュウのバイオマス地上部/地下部比は、1.8~3.5 (平均2.8) であった。トチュウ植林からは、雄花、果実、葉の一部が収穫利用される。収穫物としては果実の炭素量が $0.69 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ と最も大きい。製品である種子オイル (種子からの抽出率20%) およびトランスゴム (果皮からの抽出率30%) 製造時の歩留まりが低いため、果実からの製品は合計 $0.33 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ で、残りは製品残渣となった。葉の収穫量の半分 ($0.58 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$) は飼料として利用し、残りからはサプリメント原料であるクロロゲン酸 (含有率3%) を抽出した。雄花のバイオマスは、わずかである。収穫物以外に、果実生産を増やすための枝の剪定がおこなわれ、 $0.72 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ が薪として利用される。以上を合計して、製品として利用されるバイオマスが $1.7 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 、バイオマス残渣が $0.88 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 生産された。これからトチュウ育成のために投入される有機肥料 ($0.6 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$) を差し引くと、トチュウ植林におけるバイオマス利用量は $2.0 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ となった。トチュウ植林のバイオマス利用では、バイオマス製品の二次加工に伴う製品残渣が発生することが特徴的である。

13齢トチュウ植林における土壌炭素量は 36 tC ha^{-1} で、毎年有機肥料を投入するにもかかわらず、同齢のハリエンジュ植林より小さかった。これは初期成長速度の差と、トチュウ植林では葉の40%を収穫利用するため土壌に供給される落葉リターが少ないためである。土壌炭素量の違いを反映し、13齢トチュウ植林における従属栄養呼吸は $2.2 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ と、トウモロコシ畑やハリエンジュ植林より小さかった。

13齢トチュウ植林の純生態系生産 (NEP) は $4.5 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ で、生物活動による炭素固定は3ケースで最も大きかった。これは13齢において、NPPがトウモロコシに次いで大きく、また土壌の炭素蓄積が最も小さいため従属栄養呼吸が小さかったことによる。今後成長速度の低下と土壌炭素蓄積の増加に伴い、他のケースとのNEPの差は小さくなると推定される。人為的炭素移動を差し引いた純生物圏生産 (NBP) は $2.5 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ となり、これも3ケ

ースで最大であった。

(2) 退耕還林前後の生態系炭素収支の経年変化

退耕還林前 (トウモロコシ栽培) および退耕還林によりハリエンジュ (30年後まで) およびトチュウ (13年後まで) を植林した後の生態系炭素収支の変化を、図-2に示す。退耕還林前のトウモロコシのバイオマスは 20 t dw ha^{-1} で、これは炭素密度 8.6 tC ha^{-1} に相当する (図-2A)。一方退耕還林後のバイオマス成長はハリエンジュがトチュウより大きく、30齢では 68 tC ha^{-1} に達した。トチュウのバイオマスは13齢で 22 tC ha^{-1} であった。

退耕還林前のトウモロコシ畑土壌では、有機肥料と収穫後の作物残渣のインプットと土壌有機物分解による従属栄養呼吸がバランスし、土壌炭素密度は 42 tC ha^{-1} で平衡状態にあった (図-2B)。退耕還林後初期の樹木のバイオマスが小さい間は落葉リターによる土壌への炭素供給が退耕還林前より小さいため、一時的に土壌炭素密度は減少した。トチュウ植林では10年目で土壌炭素は増加に転じたが、ハリエンジュ植林では30年まで土壌炭素の減少が持続した。

トウモロコシ畑の純一次生産 (NPP) は、 $8.6 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ であった (図-2C)。植林直後のNPPの増加速度はトチュウよりハリエンジュが大きく、初期成長が速いことを示している。トチュウの初期成長はハリエンジュより遅いが、NPPはその後急激に増加し、7齢以後はハリエンジュを上回った。

生物活動による生態系炭素固定量をあらわす純生態系生産 (NEP) は、トウモロコシ畑で $3.6 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ であった (図-2D)。退耕還林直後はNPPが低いことに加えて畑土壌に蓄積した有機物の分解による従属栄養呼吸が大きい。NEPは大きな負の値 (すなわち炭素放出) となった。樹木成長によるNPP増加に伴い、ハリエンジュ植林では3年後、トチュウ植林では7年後にNEPは正に復帰した。ハリエンジュ植林では6齢でNEPが最大値の $1.2 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ に達した後ゆるやかに減少したが、トチュウ植林では13齢でも増加傾向が継続した。

(3) バイオマス利用の低炭素化ポテンシャル

3つのケースで、バイオマス生産・利用による低炭素化ポテンシャルを比較した。ここで低炭素化ポテンシャルとは、生態系およびその人為的利用による潜在的炭素固定・炭素排出削減能力と定義する。前述のように、生物活動による生態系への炭素固定は、純生態系生産 (NEP) で表せる (図-1参照)。バイオマスの収穫、有機肥料の投入という人為的炭素移動がおこなわれる生態系における実際の炭素蓄積量の変化量は、NEPから炭素換算バイオマス利用量を差し引いた純生物圏生産

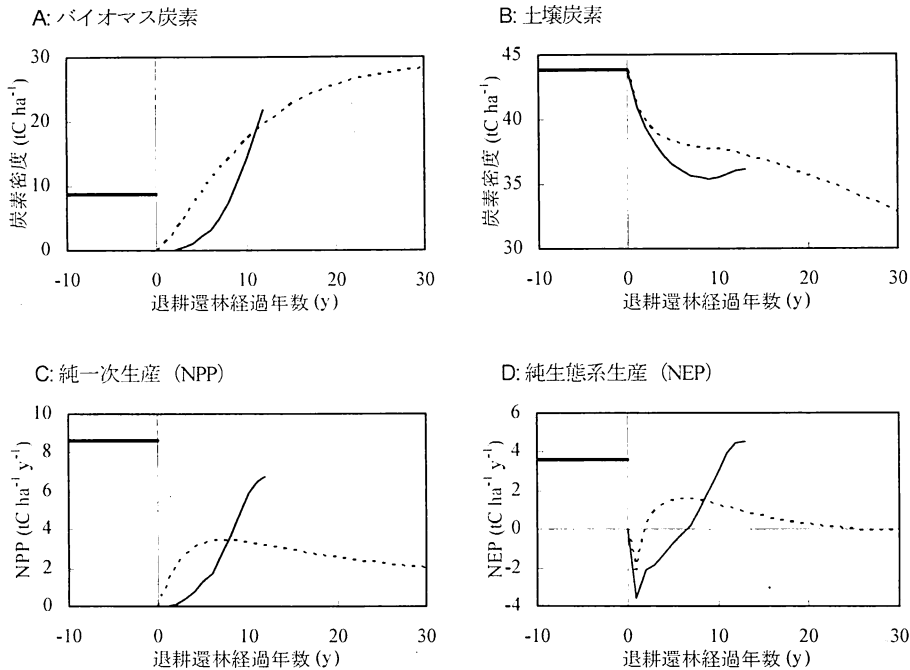


図-2 退耕還林前後の生態系炭素収支の経年変化。A: バイオマス炭素, B: 土壌炭素, C: 純一次生産 (NPP), D: 純生態系生産 (NEP)。太線: トウモロコシ栽培, 破線: ハリエンジュ植林, 実線: トチュウ植林。

(NBP) である。退耕還林前のトウモロコシ栽培では NEP と同値のバイオマス利用を継続するため、NBP はゼロであり、生態系内に炭素の増減はない。ハリエンジュ植林の伐期は30年であるので、13齢においては実際には人為的炭素移動はなく、 $\text{NBP} = \text{NEP} = 0.7 \text{ tC ha}^{-1} \text{y}^{-1}$ であるが、当年の成長量を将来利用されるバイオマス量として算入すると、NBP は土壌有機物の増減と等しく、 $-0.2 \text{ tC ha}^{-1} \text{y}^{-1}$ とみなせる。これに対し、トチュウ植林の樹木更新期は未定であるが、数10年ないし100年以上と考えられる。果実生産量が低下した場合は枝継ぎで延命するため、地球温暖化対策としての効果評価期間（長期目標でも2050年まで）内に伐採されることはない。このため、樹木更新時のバイオマス利用を考慮する必要は無い。結果として、13齢のトチュウ植林のNBP は $2.5 \text{ tC ha}^{-1} \text{y}^{-1}$ と大きく、3つのケースの中で生態系への炭素蓄積速度が最大となった。

次に、収穫したバイオマスの利用による炭素排出削減量を考える。トウモロコシ畑では、茎・葉のうち $1.7 \text{ tC ha}^{-1} \text{y}^{-1}$ を主として家庭における燃料として利用する。この場合、薪としてのバイオマス残渣と同発熱量の化石燃料の炭素負荷量を、炭素排出削減量とみなせる。中国における薪の発熱量（含水率10%の有効発熱量）を使用して石油換算すると、炭素排出削減量は $1.2 \text{ tC ha}^{-1} \text{y}^{-1}$ であっ

た。ハリエンジュ植林では伐採した幹を丸太として利用し、その他の木部はバイオマス残渣となる（図-1）。残渣には様々な用途が考えられるが、現地で最も一般的な利用法は、直接燃焼によるエネルギー利用である。トウモロコシ残渣と同様に石油換算すると、13齢ハリエンジュ植林のバイオマス製品残渣 $0.35 \text{ tC ha}^{-1} \text{y}^{-1}$ の炭素排出削減量は $0.25 \text{ tC ha}^{-1} \text{y}^{-1}$ であった。一方トチュウ植林では剪定枝を薪として利用するほか、果実からの種子オイルとトランスゴムを二次加工・抽出し、それらの工程でバイオマス残渣が発生する。剪定枝と残渣の合計 $1.6 \text{ tC ha}^{-1} \text{y}^{-1}$ を同様にエネルギー利用すると、炭素排出削減量は $1.4 \text{ tC ha}^{-1} \text{y}^{-1}$ となった。また $0.13 \text{ tC ha}^{-1} \text{y}^{-1}$ の種子オイルをアルカリ触媒法によってバイオディーゼル燃料 (BDF) に転換すると、同発熱量の石油ディーゼル燃料の炭素負荷から換算して、 $0.11 \text{ tC ha}^{-1} \text{y}^{-1}$ の削減効果となった。バイオマス起源のトランスゴムはカーボンニュートラルな原料とみなせるので、これを合成ゴムの代替原料として利用すると、製品の廃棄焼却時の発生炭素分を排出削減量とみなせる。これは $0.20 \text{ tC ha}^{-1} \text{y}^{-1}$ である。以上の合計として、13齢トチュウ植林のバイオマス利用による炭素排出削減量は、 $1.7 \text{ tC ha}^{-1} \text{y}^{-1}$ となった。

薪や残渣の直接燃焼によるエネルギー利用では、含水バイオマスの有効発熱量が低いため、バイオマスの炭素

含有量よりも小さい排出削減効果しかもたらさない。対して、トランスゴムなど石油代替原料の廃棄焼却時の炭素排出削減量は、原料の含有炭素量としてよい。したがって、石油代替高次加工製品へのバイオマス利用は、エネルギー利用よりも低炭素化ポテンシャルを高めるといえる。

以上のように、バイオマス生産・利用を通じた低炭素化ポテンシャルは、人為的移动を含む生態系炭素固定量であるNBPとバイオマス製品の石油原料代替効果の合計として評価できる。退耕還林前のトウモロコシ栽培では $1.2 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 、13齡ハリエンジュ植林ではバイオマス残渣のエネルギー利用を含む $0.23 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 、13齡トチュウ植林ではエネルギー利用と石油原料代替を含む $4.2 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ となり、バイオマスの高度利用をおこなうトチュウ植林で、最大の低炭素化ポテンシャルを得た。

最後に、本研究のバイオマス成長および土壌炭素収支の算定においておこなった仮定に起因する不確実性を検討する。バイオマス成長の算定において、ハリエンジュの地下部バイオマスに関する資料が得られなかったため、すべてのケースで地下部のバイオマスを評価しなかった。一般に乾燥地では地下部バイオマスの比率が高くなり、また全バイオマスの数%を占める細根はほぼ1年で更新するため、葉のリターと共に土壌への炭素源となる。トチュウ植林での伐採調査では全バイオマスの約1/4が地下部であったため、これを算入するとNPPを30%程度割り増すとともに、土壌炭素と従属栄養呼吸の増加、NEPの増加となる。また土壌炭素モデルRothCは様々な環境に対して適用性が検証されているが、精密な予測には実測に基づいてパラメータを補正する必要がある。本研究の結果にはこれらの不確実性が残されたが、炭素フロー・ストック（図-1）におけるこれらの影響は限定的であり、3つのケースにおけるNBPおよびバイオマス製品利用による低炭素化効果の大小関係が逆転するような影響は考えられない。

4. まとめ

中国河南省靈宝市朱陽鎮で実施されている退耕還林トチュウ植林事業をモデル地域として、黄土高原の退耕還林におけるバイオマスの高度利用による低炭素化ポテンシャルの評価をおこなった。トチュウ植林では、雄花、果実、葉、剪定枝などの多様なバイオマスを収穫し、薪としてのエネルギー利用、葉の飼料化という低次利用に加え、果実から採取される種子オイル（BDF原料）やトランスゴムなどの高次加工製品としての利用を想定した。対照として、退耕還林前のトウモロコシ栽培、黄土高原

の緑化によく使用されるハリエンジュ植林と比較した。現地調査と文献調査によって、バイオマスと土壌の炭素動態を含む生態系炭素収支と共に、収穫バイオマスのエネルギー利用および石油起源原料の代替としての利用による炭素排出削減量を算定した。バイオマス利用による低炭素化ポテンシャルは、人為的炭素移動（収穫・施肥）を含む純生物圏生産（NBP）と炭素排出削減効果の合計で評価した。トチュウ植林は、3つのケースで最大の低炭素化ポテンシャル（ $4.2 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ ）を示し、収穫されたバイオマスの高度利用が低炭素化に有効であることが示された。

謝辞：本研究は、環境省地球環境研究総合推進費受託研究「都市・農村の地域連携を基礎とした低炭素社会のエコデザイン」（課題番号Hc-084：代表 梅田 靖）によって実施した。中国河南省靈宝市および同市朱陽鎮人民政府ならびに天地生態有限公司には、調査地、供試木、統計情報の提供等によって多大な協力を賜った。また魯婷さんには翻訳・通訳・資料整理等にご尽力いただいた。ここに深く謝意を表する。

参考文献

- 1) 北京土木建築学会編：新農村建設生物資源利用。中国電力出版社、2008。
- 2) Peng, H., Stimm, B., El Kateb, H., and Mosandl, R.: Die Entwicklung von Robinien- und Kiefernauflösungen auf dem chinesischen Weibei-Lößplateau. In *Waldbau - weltweit* (Mosandl, R., El Kateb, H., and Stimm, B. eds.). Forstliche Forschungsberichte München, No. 192, Frank, Munich, pp. 210–228.
- 3) Tateno, R., Tokuchi, N., Yamanaka, N., Du, S., Otsuki, K., Shimamura, T., Xue, Z., Wang, S., and Hou, Q.: Comparison of litterfall production and leaf litter decomposition between an exotic black locust plantation and an indigenous oak forest near Yan'an on the Loess Plateau, China. *For. Ecol. Man.*, vol. 241, pp. 84–90, 2007.
- 4) 鍋嶋絵里, 石井弘明：樹高成長の制限とそのメカニズム。日林誌, Vol. 90, pp. 420–430, 2008.
- 5) Eigel, R. A., Witter, R. F., and Carpenter, S. B.: Biomass and nutrient accumulation in young black locust stands established by direct seeding on surface mines in eastern Kentucky. *Proceedings, Central Hardwood Forestry Conference* (Garrett, H. E., and Cox, G. S. eds.), 111, University of Missouri, Columbia, pp. 337–346, 1980.
- 6) Coleman, K. and Jenkinson, D. S.: *ROTHC-26.3 A model for the turnover of carbon in soil. Model description and windows user guide. November 1999 issue (modified i-April 2005)*. IACR, Rothamsted, Harpenden, Herts, AL5 2JQ, ISBN 0951445685.
- 7) Kondoh, A., Harto, A. B., and Runtunuwu, E.: Comparative study on the hydrological characteristics in Asia and the Pacific. *Proc. Fresh Perspectives on Hydrology and Water Resources in Southeast Asia and*

- the Pacific*, IHP-V Technical Document in Hydrology No.7, UNESCO Jakarta Office, pp. 247–254, 2000.
- 8) Batjes, N. H. : *Soil parameter estimates for the soil types of the world for use in the global and regional modeling (version 2.1)*. ISRIC Report 2002/02c, (available on-line at <http://www.isric.org>), International Food Policy Research Institute (IFPRI) and International Soil Reference and Information Centre (ISRIC), Wageningen, 2002.
- 9) (財)日本エネルギー経済研究所：中国における再生可能エネルギーの利用及び関連政策等の現状と今後の展望に関する調査. 平成 16 年度報告, pp. 294–319, 2005.
- 10) 後藤義明, 小南裕志, 深山貴文, 玉井幸治, 金澤洋一：京都府南部地方における広葉樹二次林の地上部現存量及び純生産量. 森林総合研究所研究報告, Vol. 2, pp. 115–147, 2003.

HIGH ORDER BIOMASS UTILITY OF GRAIN FOR GREEN PLANTATION IN CHINA AND ITS CARBON REDUCTION POTENTIAL: A CASE STUDY OF A EUCOMMIA PLANTATION IN HENAN PROVINCE

Takashi MACHIMURA, Tadayuki SADA, Akio KOBAYASHI,
Yoshihisa NAKAZAWA, Koichiro GYOKUSEN, Masafumi TSUTSUMI,
Keitaro HIDANI, Kazutoshi TSUDA and Yinquan SU

Carbon reduction potential of Grain for Green plantation in Loess plateau was evaluated at a pilot Eucommia plantation in Henan Province, China. The Eucommia plantation provides a variety of biomass products including fire wood, stock feed, and the higher order refined material of seed oil and rubber. A maize field and a black locust plantation were also studied for comparison. Carbon reduction potential is defined as net biome production (NBP) including human activities in the ecosystem carbon balance, and the emission reduction by biomass use substituting for fossil resources. The Eucommia plantation had the largest carbon reduction potential indicating the advantage of high order biomass utilization.