

## E-0804 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

## (2) 農工連携による自然資本を生かした低炭素化産業の創出 (業結合モデル)

## 大阪大学

大学院工学研究科	環境・エネルギー工学専攻	准教授	町村尚
大学院工学研究科	附属サステナビリティ・デザイン・オンサイト研究センター	特任教授	小林昭雄

## &lt;研究協力者&gt;

大阪大学大学院工学研究科	特任研究員	佐田忠行
大学院工学研究科	招聘准教授	中澤慶久
大学院工学研究科	特任研究員	堤雅史
九州大学	農学研究員 准教授	玉泉幸一郎
中華人民共和国	西北農林科技大学 教授	蘇印泉
中華人民共和国	西北農林科技大学 教授	張景群 (平成21~22年度)

平成20~22年度合計予算額 23,584千円

(うち、平成21年度予算額 7,672千円)

上記の予算額には、間接経費を含む。

[要旨] 本研究では、アジア発展途上国の農村地域において農工連携によるバイオマスの高付加価値化利用を企図した新産業を創出し、それによって低炭素型地域経済発展モデルを構築することを目的とする。中国河南省靈宝市におけるトチュウ (*Eucommia ulmoides*) バイオマス栽培・利用事業を、パイロットモデル事業とした。この事業はトチュウを原料として天然ゴム、雄花茶、BDF、副産物の飼料、薪などを産出し、退耕植林による土壌保全、生態系炭素固定とバイオマス製品による化石資源代替による低炭素効果、高機能バイオマス製品の産出、事業による農村部の雇用創出と経済活性化などの多様な便益を同時達成する「一石五鳥」モデルと位置づけられる。パイロットモデルをケーススタディとし、(1)農工連携バイオマス産業の生産・加工プロセスのデザイン、(2)農工連携バイオマス産業による多様な便益の分析、(3)農工連携農村産業に適用可能なバイオマス樹種探索と土地利用最適化試案をおこなった。(1)では環境調和型プロセスのデザインに加え、スチュワードシップに基づく環境保全活動・製品への対価支払いの仕組みを提案した。(2)では生態系炭素収支と製造プロセスのライフサイクル評価により、低炭素化効果を定量評価した。また様々なバイオマス産業を想定し、環境保全効果(水土保全と低炭素化)の経済便益と社会経済的効果(事業収支、雇用創出、農民収入増加、経済波及効果)を評価・比較した。(3)では中国におけるバイオマス産業適応種を探索し、パイロットモデル地域において事業収支と環境便益を最大化する土地利用計画を提示した。

[キーワード] 農工連携バイオマス産業、中国黄土高原、環境改善効果、社会経済効果

## 1. はじめに

気候変動の低減、緩和は地球社会全体の喫緊の課題であり、先進国、発展途上国を問わずあらゆる国とセクターの低炭素脱温暖化への努力が求められている。気候変動の影響として、異常気象のみならず、数億人規模の水不足、災害の激化、感染症の拡大、海岸浸食、生態系の劣化などが懸念されている。しかし、わが国を含む温室効果ガス（GHG）排出削減に直接的義務を負う先進国の状況を俯瞰すると、高効率技術開発、原燃料転換、カスケード利用、リサイクルなどによる産業セクターの低炭素化が図られているものの、高コスト、高度な技術の導入の必要性、業種を超えたマネジメントの必要などの障壁により、進捗は緩慢であると言わざるを得ない。また先進国の農業セクターでは、生産性向上のための重機械化、化学肥料・農薬・水の多投入、それらに伴うエネルギー消費増によって、炭素負荷の増大が指摘されている。一方、発展途上国では経済成長への希求に対し低炭素社会への取り組みは低調で、今後予想されるGHG排出増の多くは途上国からである。中でも中国では近年の急激な経済発展によってエネルギー消費が急増し、世界最大の排出国となった。先進国である日本は、積極的な知識と技術移転により、アジア環境共同体のリーダーとして先導的な立場を取っていく必要がある。

気候変動問題の現在の国際枠組みにおいて、GHG削減義務を直接に負わない途上国において削減活動を推進するために、先進国による途上国でのGHG削減活動にクレジットを与えるクリーン開発メカニズム（CDM）が制度化されている。CDMではエネルギー利用高効率化などによる排出源対策と植林などによる吸収源対策が認証されるが、近年は森林伐採と生態系劣化によるGHG排出を削減する活動（REDD）などの議論も始まっている。これらはいずれも、先進国と途上国の連携によって高い低炭素化コストパフォーマンスを得るしくみである。一方、今後のポスト京都メカニズムの議論の中で、途上国のGHG削減目標設定や、新興国の自助努力によるGHG削減または義務化が求められる。ここでは、途上国内の社会経済枠組みの中でGHG削減をおこなうため、新たな社会システムのデザインと構築が必要となる。

## 2. 研究目的

以上のような背景をふまえ、サブテーマ2はアジア発展途上国の農村部において、新たなバイオマス産業を立地させることで農工が連携し、産業セクター境界を越えた再生可能資源の地域社会への流通によって、大幅な低炭素化を企図するパイロットモデルを構築することを目的とする。図2-1に、農工連携バイオマス産業のコンセプトを示す。中国各地の農村部で見られる従来型の産業移転では、安価な労働力の確保が農村部への産業立地の最大の意義である。原料や製品は遠隔地にある市場との間で長距離輸送され、また廃棄物の発生など、環境負荷は高い。生産手段と技術は都市部の資本に帰属しているため、農村および農民への経済的便益は法人税と賃収入のみである。一方、地域のバイオマス資源を活用する新しい農工連携バイオマス産業は、農工のシステムがお互いに緊密に連携することにより低炭素化とともに様々な便益を提供することができる。「農」は「工」に雇用されるだけでなく、生産したバイオマス資源を「工」に対して供給するため、市場における製品販売益は「農」へも循環する。また、「工」から排出される主として有機性廃棄物は「農」が有機肥料として利用できるため、資源循環の輪を閉じることができる。「工」が使用する原材料はローカルで確保するため輸送に伴う環境負荷は小さく、またエネルギーをも「農」から調達できる。農工連携による農村バイオマス産業は、低炭素低環境負荷であり、さらに経済利益を

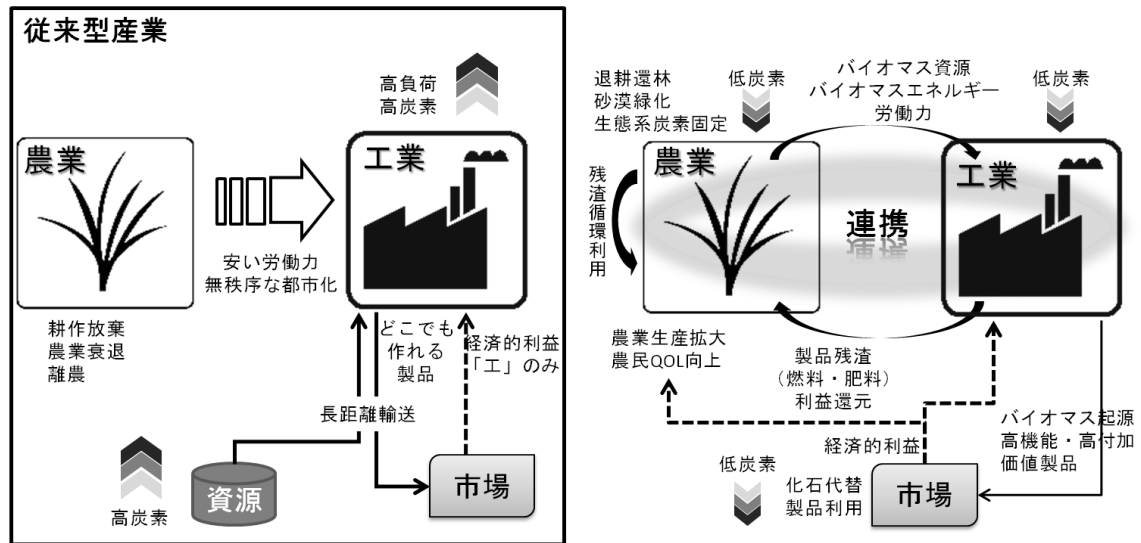


図2-1 農工連携バイオマス産業のコンセプト



図2-2 パイロットモデル地域（中国河南省靈宝市）の位置図

農工で分かち合う循環共生産業である。

農工連携バイオマス産業のモデル地域として、中国河南省靈宝市を選定した（図2-2）。この地域では退耕還林・還草政策（砂漠化が深刻な地域などにおいて、耕地を森もしくは草地に戻す中国の政策）を活用してトチュウ植林が実施されているが、分担者らの関連プロジェクト研究によってトチュウ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になり<sup>1) 2)</sup>、現地において研究・生産施設が開設されるに至った。

トチュウ（杜仲、*Eucommia ulmoides*）は中国の四川省周辺が原産の落葉高木であり、トチュウ科トチュウ属トチュウという1科1属1種の珍しい木本植物種である<sup>3)</sup>。トチュウの樹皮や葉は古来より生薬として用いられ、その効能は利尿、降圧、強壮であるとされている。その他に葉からの杜仲茶を含め、雄花から雄花茶、種子からバイオディーゼル燃料（BDF）など多岐にわたる製品利

用が可能である。サブテーマ2は、霊宝におけるトチュウ植林・製品化事業をパイロットモデル事業として取り上げる。霊宝パイロットモデルは、多様なバイオマス製品の生産性、植林による生態系炭素固定とトランスゴムやBDFなどの化石資源代替製品による化石資源代替効果、水土保持、バイオマス製品出荷による事業収支、新規市場開拓及び農村雇用創出と農民収入増加による地域経済活性化といった、環境・社会・経済効果を同時に達成するコベネフィット追及「一石五鳥」モデルと位置づけられる。

本研究は霊宝パイロットモデル事業をケーススタディとして、農工連携バイオマス事業の展開による低炭素化を含む多様な環境便益とそれを持続可能とする社会経済便益の評価を目的とする。そのため、(1)農工連携バイオマス産業の生産・加工プロセスのデザイン、(2)農工連携バイオマス産業による多様な便益の分析、(3)農工連携農村産業に適用可能なバイオマス樹種探索と土地利用最適化試案の作成をおこなった。

### 3. 研究方法

#### (1) 農工連携バイオマス産業の生産・加工プロセスのデザイン

初めに、種々の文献やデータベースを基に、中国霊宝パイロットモデル地域の自然環境、社会、経済産業、環境問題の現状を把握した。また霊宝市朱揚鎮に建設されたトチュウゴム工場をモデルケースとして農工連携バイオマス産業の低炭素化効果およびその他の環境保全、社会経済的効果の評価するため、システムのバウンダリーを設定した。次に、このパイロットモデルにおいて実施されているトチュウ栽培、バイオマス製品の加工工程を調査し、評価対象とする現地生産プロセス（バイオマス資源、加工工程、製品）の設定をおこなった。さらに地域のバイオマス資源利用による低炭素化事業を持続可能にする社会経済的な仕組みとして、スチュワードシップに基づき、環境改善効果の保証とそれに対する対価交換を担保する社会システムを提案した。

#### (2) 農工連携バイオマス産業による多様な便益の分析

##### 1) バイオマス生産・利用ケースの設定

パイロットモデル地域における退耕還林を利用した多目的バイオマス生産・利用による環境改善および社会経済効果を比較評価するため、4つのケースを設定した。第一のケースはバイオマスの多目的利用が可能なトチュウを植林する場合、第二のケースは経済林としてリンゴを栽培する



図2-3 トチュウ林における土壌侵食量測定プロット（左）と土壌流出量実測の様子（右）

場合、第三のケースは環境林であるハリエンジュを植林する場合、そして第四のケースは退耕還林以前の食用トウモロコシ栽培を継続する場合である。トチュウ林では雄花から雄花茶、果皮からトランスゴム、種子からBDFを加工利用するものとし、リンゴ園では果実を生食用として販売するケースと濃縮果汁に加工するケースを設定した。トチュウとリンゴの剪定枝は燃料利用するものとした。ハリエンジュ林では現地の施業・利用法に従い30年間育成後に伐採し丸太として利用し、伐採時の残材と木屑は燃料利用することとした。トウモロコシ畑では子実を食用として利用し、茎葉残渣はすき込みを行わず収穫し、有機肥料とした。

## 2) 水土保全効果の評価

4つのケースにおける水土保全効果は、Universal Soil Loss Equation (USLE)<sup>4)</sup>により年間土壌流出量を推定し、植林後の土壌流出軽減量を評価した。USLE式は降雨によって1ヘクタール(ha)あたり1年間の総土壌流出量を予測する式である。土地に降り注ぐ雨の浸食エネルギーを降雨強度(降雨係数)として求め、これと土壌特性による侵食性(土壌係数)、基準斜面(斜面長20m, 勾配5度)に対する流亡比率(地形係数)、裸地状態を基準とし、植物の被覆や根域の状況により変化する比率(作物係数)、平畝や上下耕を基準とし、畝立て方向や等高線栽培などの保全的耕作を行った場合の減少比率(保全係数)の積で推定するものである。

降雨係数を決定するため、朱楊鎮に雨量計(オンセット社, S-RGB-M002)を設置し、降雨強度を1年間連続観測した。土壌係数、作物係数(トチュウ林以外)、保全係数は文献から決定し、斜面は同条件で比較した。トチュウ林の作物係数は、朱楊鎮のトチュウ林内に設置した測定プロットにおける1年間の土壌侵食量の実測値から計算した(図2-3)。

水土保全効果を明確化するため金銭換算による評価を行った。水土保全効果の経済便益は、Li<sup>5)</sup>による河南省における水土保持効益の算出方法にならい、ダムや河川に堆積した流出土砂回収にかかる工事費と、土砂流出によって損なわれる栄養素(窒素、リン、カリウム)損失被害額の軽減として評価した。

## 3) 低炭素化効果の評価

低炭素化効果として、生態系における炭素固定とバイオマス利用による化石資源代替効果を評価した。生態系炭素固定は、バイオマス成長と土壌炭素蓄積、そして人為的炭素移動から成る。バイオマス成長は光合成によって大気中の二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)が取り込まれ固定された炭素量である。土壌炭素は落葉・落枝や有機肥料等の有機物質の投入により土壌中に蓄積した炭素量と、有機物が土壌中で分解されたことにより大気中へ放出されるCO<sub>2</sub>(従属栄養呼吸)分の炭素量を差し引くことによって求められる。人為的炭素移動は収穫、剪定、施肥などの施業によって、生態系と外部の間で生じる人為的な炭素の入出量を表している(図2-4)。

生態系炭素固定量の推計方法はプランテーション更新期間を考慮してトチュウ林は100年間、ハリエンジュ林は30年間、リンゴ園は20年間の平均年間固定量を計算した。バイオマス成長量はRichards成長関数式<sup>6)</sup>により樹齢毎の樹高と胸高直径を計算して幹材積を求め、これにバイオマス拡大係数、容積密度、地下部率を乗じて算出した。さらに炭素含有率をIPCC(気候変動に関する政府間パネル)<sup>7)</sup>のガイドラインに定められているデフォルト値0.5を乗じることにより、炭素固定量を求めた。トチュウはモデル地域のトチュウ林で実施した毎木調査の測定データに基づき、



図2-4 生態系炭素固定の概念図

一方ハリエンジュとリンゴは文献<sup>8)9)</sup>から各係数を算出した。土壌炭素蓄積は落葉と有機肥料投入量を考慮し、土壌炭素蓄積モデルR0TH-C<sup>10)</sup>による計算から求めた。

バイオマス利用による低炭素化効果は、バイオマス製品および残渣利用による化石資源代替効果からバイオマス生産と製品加工時に排出するCO<sub>2</sub>を差し引いて求めた。化石資源を代替する製品は、トチュウから生産するトランスゴム（石油合成ゴム代替）およびバイオディーゼル燃料（軽油代替）であり、また残渣ではトチュウおよびリンゴの剪定枝とハリエンジュの残材・木屑（いずれも練炭代替）である。低炭素化効果の経済便益は、京都議定書に規定される認証排出削減量（CER）クレジットを適用し、市場価格から評価した。

#### 4) バイオマス事業の事業収支と雇用、農民収入の算出

退耕還林事業を利用した環境改善が持続的に行われるためには、事業が農民および地域経済に利することが重要である。バイオマス生産・利用ケースの事業収支を算定し、農民への利益分配を評価した。生食用リンゴ、ハリエンジュ、トウモロコシの粗収入は収穫物の販売、経費は栽培管理とハリエンジュの伐採である。販売価格と管理費用は、河南省における収穫物、化学肥料、農薬、エネルギーの市場価格を元に計算した。一方、トチュウ製品加工とリンゴ濃縮果汁生産には工場、設備などの初期投資が必要であり、経費には経常経費の他、設備減価償却と金利、法人税が加わる。減価償却は、取得価額から残存価格（取得原価の10%）を差し引き法定耐用年数で割った値とした。建築物の法定耐用年数に従い20年とした。法人税は中国では地方法人所得税3%と企業所得税30%の合計33%が課せられる。バイオマス製品の販売価格は、河南省における市場価格とした。トチュウ事業の経費は現地における聞き取り、リンゴ濃縮果汁事業の経費は実際の事業計画<sup>11)</sup>を参考に決定した。

農民収入は、土地を提供しバイオマス産業の事業主として得られる事業利益による収入と、バイオマス産業への労働雇用による賃金に分けられる。トウモロコシ畑の場合は収穫物の販売利益のみである。退耕還林政策により土地利用転換したハリエンジュ林および生食用リンゴ園は、丸太、果実の販売利益に加え退耕還林補償金が加算される。トチュウ林または果汁用リンゴ園に転

換した場合は、バイオマス製品販売による事業収支と退耕還林補償金が土地提供した農民の収入となり、事業創出により生じる雇用者には栽培管理および加工工場における賃金が農民収入となる。

#### 5) トチュウバイオマス事業による地域経済波及効果予測

新規バイオマス事業の展開による地域経済への波及効果を定量的に把握することによって、事業と他産業部門との関係性が明確になり、今後の当該事業への投資や新たなバイオマス事業の起業・投資のインセンティブとなる。トチュウバイオマス事業の展開によってもたらされる省内への経済波及効果を算出するため、2007年度の河南省における42部門別投入産出表<sup>12)</sup>を使用して産業連関分析をおこなった。経済波及効果は生産額、粗付加価値額、雇用者所得額によって求められる。生産額とは、最終需要を賄うために直接・間接に必要な省内生産の額である。粗付加価値額とは、生産活動によって新たに付け加えられた価値で、雇用者所得、営業余剰、資本減耗引当などからなる。雇用者所得とは、労働によって支払われる現金、現物の一切の所得を表している。

パイロットモデル地域でのトチュウ植林面積は、朱揚鎮政府への聞き取り調査に従い2008年度時点での総面積を適用した。トチュウバイオマス事業による産出品目は飼料、雄花茶、トランスゴム、BDFの4品目であり、それぞれが投入される産業部門は農林牧漁業、食品製造及びタバコ加工業、化学工業、石油燃料加工業に分類される。トチュウバイオマス事業による生産額、粗付加価値額、雇用者所得は、平成21年度に算出した社会経済効果のトチュウ林のプランテーション期間100年の平均値をもとに計算した。この結果がトチュウバイオマス事業創出による直接効果となる。直接効果により増加した生産額の中には、他の産業から購入した原材料の他に人件費（雇用者所得）や企業の利潤などが含まれ、その総額が第一次波及効果である。しかし、トチュウバイオマス事業と他産業部門との関係性が不明であったため、第一次波及効果については算出できないものとし、これを除外した。生産の誘発によって新たに生み出された雇用者所得は、家計の消費支出の増加となって再び省内の生産を誘発する。この家計消費による生産誘発額を第二次波及効果と言い、第二次までの経済波及効果を算定した。

#### (3) 農工連携農村産業に適用可能なバイオマス樹種探索と土地利用最適化試案

本研究では、農工連携農村産業の1つのモデルとして、多目的利用可能なバイオマス樹種であるトチュウを選定した。バイオマス資源としてのトチュウの特徴は、中国中南部の幅広い気候・土壌環境において育成可能であり、また様々なバイオマス原料を提供可能なことである。中国における農工連携バイオマス産業として適用性があるバイオマス種を、油糧樹種を中心に探索した。トチュウに加え、霊宝パイロットモデルに適用可能なバイオマス樹種による事業を想定し、事業の経済収支、環境保全効果（低炭素および水土保全）の観点からパイロットモデル地域における最適な土地利用を試案した。

土地利用の最適化には、地理情報システム（GIS: Geographic Information System）を利用し、霊宝市を1kmメッシュに分割し、メッシュ毎の属性（現土地利用、傾斜、気温、土壌pH、集落位置など）に基づいて解析を行った。植林対象となる土地利用区分を草地及び耕作地とし、以下のような制約条件を設定した。第一に、植林による土壌流出の削減率を目標値として設定し、年間土

壤流出量が最も多いメッシュから優先的に植林を行い、削減目標値に達するまでの植林対象メッシュを選択した。第二に、霊宝市において食糧自給率100%維持できる耕作面積と霊宝市の家畜頭数の放牧に必要な草地面積を確保するため、それらの合計面積分を土壤流出量が少ないメッシュから順に植林対象から除外した。第三に、樹種ごとの生育可能条件として年平均気温、土壤pHで分類し、土壤流出削減目標値に従った樹種毎の植林可能範囲と面積を求めた。最後に、農村からの距離と傾斜による作業効率の低下を係数化することで、土地特性に依存した事業利益変化を算出した。以上の制約条件からパイロットモデル地域全体で事業利益、環境便益、および、環境便益と事業利益の合計が最大となる3つの最適化ケースとして土地利用をマッピングし、比較検証した。

#### 4. 結果・考察

##### (1) 農工連携バイオマス産業の生産・加工プロセスのデザイン

##### 1) 霊宝パイロットモデル地域の現況

退耕還林によるトチュウ植林の状況を把握するため、朱揚鎮政府と農村民に聞き取り調査を行った(図2-5)。既存資料および霊宝市政府へのヒアリングによると、モデル地域である中国河南省霊宝市は黄土高原の東南端に位置しており、総面積の約50%が山地であり、丘陵地は約40%を占めている。2006年度の霊宝市における年間平均気温は14.5℃、年降水量606.5mmで暖温帯大陸性半湿潤モンスーン型気候に属している。一部急傾斜地では侵食崖が発達しており土壤侵食による被害が大きな問題となっている。総人口は73万8,400人で、そのうち約70%の49万6,400人が農村部に暮らし、大半が第一次産業に従事している。2008年度の霊宝市の産業総生産額は188億1,697万元であるが、第一次産業生産額は17億6,678万元で総生産額の約7%程度しかない。したがって、第一次産業の就労人口が最も多いにもかかわらず、生産額は最も低いため、1人あたりの生産額は5,544元となり、第二次産業の1人あたりの生産額30.7万元と比較すると60倍もの差があった。この差は農村民の家計にも反映されており、年平均収入は5,690元で、都市民の平均年収12,164元の約半分しかない<sup>13)</sup>。以上のように都市と農村の経済格差、土壤侵食被害など中国が抱える農村問題の典型例となっている<sup>14)</sup>。

霊宝市の耕地面積は約51,000haで、主要な作物はコムギやトウモロコシである。穀物以外では



図2-5 農村民への聞き取り(左)と朱揚鎮政府での意見交換(右)



リンゴの栽培が盛んで、栽培面積22,000 ha、生産量48万 tと河南省で第1位であり、中国でも有数の産地となっている。このリンゴを利用した濃縮果汁生産がおこなわれ、世界各地へと輸出されている。

退耕還林還草政策は2002年に発布され、25度以上の急傾斜値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。自然環境の改善を優先させつつも、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。退耕還林政策の当事者は農民として位置づけられており、政策の実施は農民の自発性を基本としている。そのため耕作放棄後は、食糧や現金支給による補償が与えられるものの、その後の維持管理は全て農民に一任される。この責任と受益確保の明確化が最終的に農村全体の活性化につながることを求められている。

靈宝市では、退耕還林還草政策に従って、7年間に渡り44.8万 畝（約3万 ha）に植林・還草を実施してきた。投資金額は1.3億元になり、3.7万戸の農家に対して行われてきた。植林樹種としては、環境林のハリエンジュやポプラ、経済林ではクルミやモモ、カキなどである。靈宝市におけるリンゴ栽培も退耕還林によるところが大きく、結果として市全体の特産品までになった活性化の成功例の1つである。しかしリンゴ栽培には灌漑が必要であるため、栽培地には黄河やその支流から導水可能な靈宝市北部に限られている。そのため南部の山間地では、過酷な土地条件で天水によるトウモロコシ栽培と草地での放牧を行うしかなく、農村民の生活改善が進んでいなかった。これに対して靈宝市の南部中央に位置する朱陽鎮では、近年退耕還林の新たな試みとして、栽培管理が容易であるトチュウの植林を推奨し、2008年度の総植林面積は2,670 haとなり、栽培面積は現在も拡大している。

農民へのヒアリングによると、農民は土地を提供しただけであるため退耕還林の補助金として1畝（1/15 ha）あたり年額90元の支給しかなく、大半は収入が約5%減少しており不満を持っていることが分かった。一方で、植林によって黄砂の減少を実感しているといった環境面での改善効果も見受けられた。退耕還林政策のみでは、農村活性化にはつながりにくい。農村民のバイオマス事業への積極的な参加と、事業利益だけでなく環境改善効果に対する正当な利益に対する還元システムの構築が必要である。

## 2) パイロットモデルのシステムバウンダリーの設定

モデル地域である中国河南省靈宝市の朱陽鎮において、日本のエンジニアリング企業と現地法人の合弁事業としてトチュウゴム抽出工場が建設され、2009年春に操業を開始した。本研究はこの事業をモデルとし、ケーススタディのバウンダリーを設定した。トチュウバイオマス事業システムの範囲は、耕作地から転換した植林地とトチュウゴム抽出工場とした。対象としたトチュウ植林地の総面積は2,000 haで、120万本のトチュウが植林されている。植林地はすべて退耕還林事業を利用して耕地から転換され、転換前の作物はトウモロコシであったと仮定した。農民1人当たり経営面積は、靈宝市の平均である0.52 haとした。これよりモデル地域内の農民は、3,846人とした。

## 3) トチュウバイオマス生産・加工システム

トチュウゴム抽出工場における実際のシステムを調査し、バイオマス生産から加工までのシス

テムをデザインした（図2-6）。トチュウの栽培過程では、苗木の移植、施肥、防除、剪定、収穫の作業をおこなう。トチュウから収穫されるバイオマス原料は雄花、果実、葉であり、また副産物として剪定枝が収穫される。次に、バイオマス加工工程と製品を見る。雄花は2度の焙煎過程を経て、雄花茶になる。果実は種子と果皮に分離し、種子は搾油してBDFを生産、果皮からは下記に述べる工程を経てトチュウゴムを抽出する。葉は飼料、剪定枝は薪炭材となる。

果皮からトチュウゴムを抽出する工程では、新たに開発された環境配慮型の抽出技術を採用した。従来の技術では有機溶剤によって果皮を分解していたが、この方法は有害物質排出やエネルギー消費が大きく、環境負荷が高い。新しい技術では工場周辺の森林から採取した木材腐朽菌によって果皮を分解し、高圧水でゴムを分離後、脱水乾燥させる。エネルギー投入は少なく、また有機性廃液は沈殿槽で固液分離後、有機肥料やかんがい水に再利用するため、完全循環型である。

#### 4) スチュワードシップに基づくバイオマス事業の環境保全効果保証と対価交換の仕組み

「スチュワードシップ（受託責任：Stewardship）」とはある一定の責任をもつ世話役を務めることを意味し、環境政策における狭義としては、製品や経済活動の環境性能を中立的立場から保証することによりそれらの普及を図る仕組みを指す。製品の環境性能保証制度はプロダクト・スチュワードシップと呼ばれ、製品製造段階だけでなく原料生産、流通、使用、廃棄を含む製品のライフサイクルを通じた環境負荷削減を目的とする。例えば情報機器における有害物質管理（鉛はんだの使用制限など）、省エネ性能認証、リサイクル認証などが該当する。商品のカーボンフットプリントの表示も、プロダクト・スチュワードシップの範疇である。経済活動の環境性能保証は環境スチュワードシップと呼ばれ、例えばイングランドにおける生物多様性、景観、自然資源、遺伝資源、洪水防止などに配慮した農牧業への補助金制度が代表的である。持続可能な林業経営から生産される木材の保証である森林認証制度も、環境スチュワードシップの範疇である。

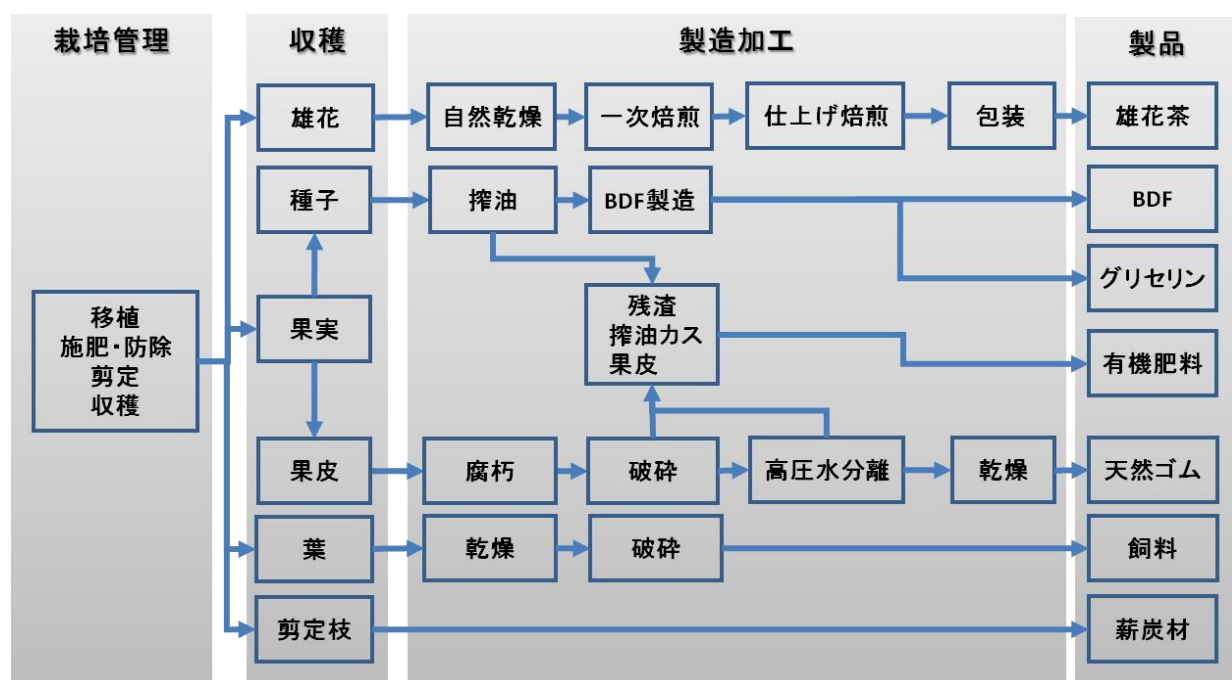


図2-6 トチュウバイオマス生産加工システム

スチュワードシップに基づく環境改善の推進において、環境負荷削減や環境保全活動に必要な追加的コストを補填し、利益を増加させる経済的な仕組みが重要である。これには大別して、2つの方法がある。第一に、環境性能の認証・表示によって商品やサービスの市場における競争力向上を図る方法であり、前述の例ではカーボンフットプリントの表示や森林認証が該当する。市場における選択機会が多いエンドユーザ向けの商品やサービスが、このような市場の選好を通じた経済的仕組みに適する。第二に、補助金などの財政支出または受益者による補償によって環境保全活動の実施者に直接利益を提供する方法であり、前述の例ではイングランドの環境配慮型農牧業への補助制度が該当する。環境保全活動への補助の財源として、活動がオフセットする環境負荷の排出者や環境改善効果の受益者とそれらの受ける便益が特定可能な場合、例えば炭素税や水源税のような目的税あるいは直接支払が適用可能である。一方、生物多様性対応のように現在の環境政策の枠組みでの受益者や便益が特定できない活動については、一般財源や基金からの支出となる。

中国政府による退耕還林還草政策は、財政からの直接支出によって農民の植林活動を補助し、水土保持を図るという意味で、政策的な環境スチュワードシップといえる。しかし保全効果の評価と便益に応じた還元システムの不備が、退耕還林政策の効果があまり上がらなかった問題点の1つとして指摘されており<sup>15)</sup>、また樹木の成熟よりも短い期間を限った補償制度も、政策効果の持続性を欠いた理由のひとつである。そこで、パイロットモデルとした霊宝のトチュウバイオマス事業を例として、スチュワードシップに基づく環境保全効果の保証と対価支払いの仕組みについて、試案を示す(図2-7)。

霊宝パイロットモデルでは次節で詳述するように、生態系炭素固定とバイオマス製品の多目的利用による低炭素化効果が期待できる。また急傾斜の耕作地への植林によって、水土保持効果が期待できる。新規植林による生態系炭素固定については、京都議定書に定められた植林CDMの方

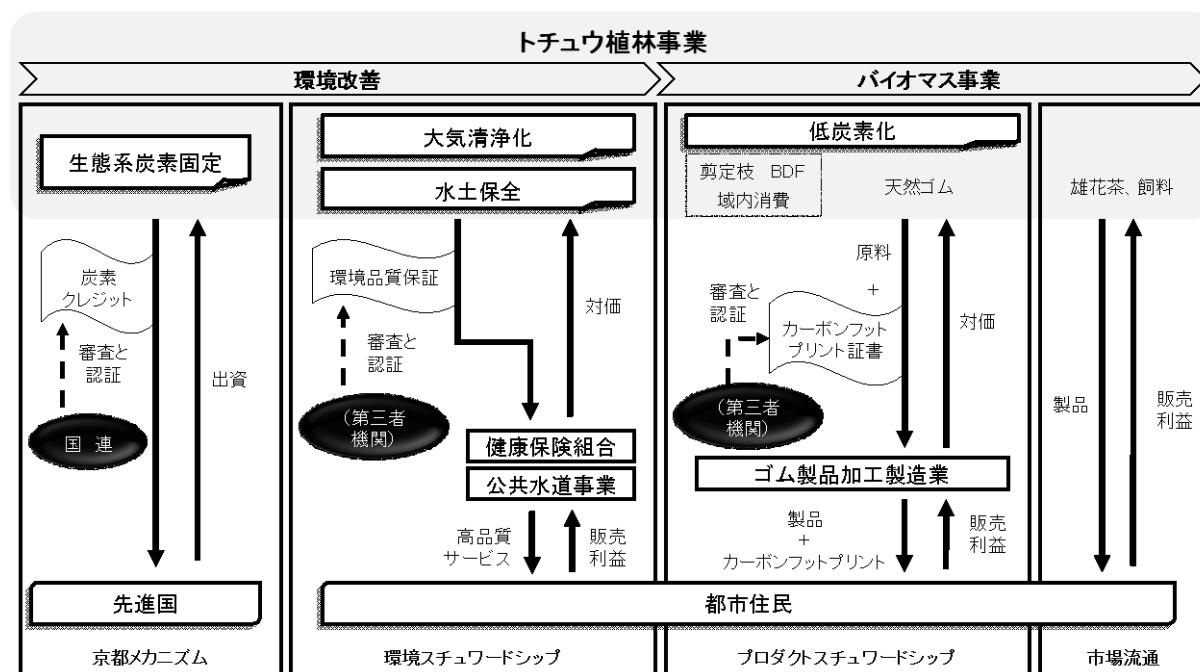


図2-7 トチュウ植林事業をモデルとするバイオマス事業のスチュワードシップ試案

法論がルール化されており、先進国からの出資による植林事業実施が期待できる。一方、パイロットモデル事業で生産されるトチュウバイオマス製品の利用形態のうち、BDFと剪定枝の薪は農村内部での利用が主である。事業から出荷される商品の中で、雄花茶は嗜好品であり、低炭素化効果の認証が市場での競争力に直結するとは考えられない。また果皮から抽出される天然ゴムは石油起源の合成ゴムと比較してライフサイクルでの低炭素化効果を有するが、商品区分では工業原料であるため、前述のようにエンドユーザ市場における選好に訴えることはできない。このためプロダクト・スチュワードシップによる低炭素化効果の推進には、トチュウ天然ゴムを原料としてエンドユーザ向け商品を生産する企業に対して、原料のカーボンフットプリントを証する仕組みが有効と考えられる。一方トチュウ植林による水土保持効果は、農村周辺に立地する都市地域における環境便益も提供する。すなわち、土壌侵食防止によって都市水道の水源であるダムの堆砂を軽減し、また冬季の砂塵発生を低減することで呼吸器疾患など都市住民の健康被害を防止する効果を有する。都市住民を受益者と考えると、環境スチュワードシップに基づく公共水道事業者や健康保険組合からの対価支払いを検討する価値がある。

スチュワードシップに基づいて環境保全便益への対価を求める前提として、植林CDMにおける事後モニタリングのように、環境改善活動とその効果の継続性を公正に認証しなければならない。補償期間の満了とともに林地管理が放棄されているという退耕還林政策の問題から考えるに、林地の管理主体である農民に対して、持続的に林地管理への対価が支払われる仕組みが必要である。このため、土地を提供した農民を事業で雇用するだけでなく、戸別のバイオマス収穫量管理によって植林地の健全な管理をモニタリングし、その管理成果に応じて対価が分配される仕組みが望ましい。

## (2) 農工連携バイオマス産業による多様な便益の分析

### 1) 水土保持効果の評価

水土保持効果の評価として、トウモロコシ畑から退耕還林によって3種の樹林地に転換した場合の年間土壌流出量を比較した。2008年の雨量観測に基づいて算出した降雨係数は、 $543.58 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ であった。Menら<sup>16)</sup>による河北省の土壌係数表から、対象地の土壌係数(褐土)を $0.32 \text{ t h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ とした。傾斜25度、斜面長は基準斜面長20 m(斜面長係数=1.0)とすると、傾斜係数は14.25となった。作物係数および保全係数はXuら<sup>17)</sup>を参照し、トウモロコシ畑、ハリエンジュ林、リンゴ園の作物係数をそれぞれ0.1、0.006、0.035とした。トチュウ林の作物係数は、現地の土壌流出量実測から0.0028と計算された。トチュウ林の作物係数はハリエンジュ林より小さかったが、これはハリエンジュの根が水平根系であるのに対し、トチュウは垂直根系で土壌深く根を張るため土壌保持力が高くなったと考えられる。ハリエンジュ林、トチュウ林共に土壌流出に対する保全対策は行われていないため、保全係数を1.0とした。トウモロコシやリンゴの傾斜地栽培では一般的に等高線栽培が用いられるため、トウモロコシ畑は0.35、リンゴ園は0.4とした。

以上の係数を全て乗じることにより年間土壌流出量を求めると、トウモロコシ畑が $86.8 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ と最も大きく、以下リンゴ園が $28.5 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 、ハリエンジュ林が $17.0 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 、トチュウ林が $6.9 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ であった。以上より、トチュウ林の土壌保全効果が最も高いと予測される。リンゴ園は20年、ハリエンジュ林は30年で更新・伐採を行うため、再植林後の数年間は土壌保全効果が低下するが、トチュウは接枝によって長期間(100年程度以上)伐採を行わないため、

表2-1 バイオマス生産・利用による低炭素化効果 (t-CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>)

	トチュウ			リンゴ		ハリエンジュ	トウモロコシ
	薪	BDF	トランスゴム	生食	濃縮果汁		
生態系炭素固定		5.39		6.85		2.92	0.00
化石資源代替効果	0.34	0.19	1.51	薪 12.40		薪 1.47	-
		2.04					
生産・製品加工プロセス		-1.31		-14.79	-18.82	0.00	- 1.63
低炭素化効果合計		6.12		4.47	0.44	4.39	- 1.63

更新直後の危険期を短縮する効果も期待できる。

## 2) 低炭素化効果の評価

バイオマス生産・利用による低炭素化効果を比較した（表2-1）。生態系炭素固定量はリンゴ園が6.85 t-CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>と最も大きく、次いでトチュウ林、ハリエンジュ林の順であった。トチュウ林は比較的成長が速く50年生では樹高14 m、胸高直径15 cmになる。その後成長は頭打ちになるが、葉の生産量が大きいいため落葉による土壌への炭素供給が大きくなっていた。一方、リンゴ園では収穫作業を容易にするため強度に剪定を行い、樹高を4 m程度に維持する。それゆえ、バイオマス成長量としては他の樹種と比べると最も少ない。しかし、大量の肥料が毎年投入されるため、土壌への炭素蓄積量が最も高くなっており、総合的に生態系炭素固定量は最大となった。トウモロコシ栽培では、すき込みを行わず成長バイオマスをすべて収穫し、また長期間の耕作によって土壌炭素は定常に達しているため、生態系炭素固定量は0とした。

化石資源代替効果を比較すると、リンゴ園が12.40 t-CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>と最も大きく、トチュウ林が2.04 t-CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>、ハリエンジュ林は1.47 t-CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>と小さかった。リンゴ園では樹形維持のため年2回の剪定を行うことにより剪定枝の量が多く、燃料利用による代替効果が大きかった（12.40 t-CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>）。ハリエンジュ林は伐採時に生じる残材の燃料利用だけであるため、産出量が多いものの年平均あたりの代替効果は小さくなっていた（1.47 t-CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>）。トチュウの代替効果を製品別にみると、トランスゴムによる合成ゴム代替（1.51 t-CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>）が最も大きく、剪定枝の燃料利用（0.34 t-CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>）と収量が少ないBDFの寄与は小さかった（0.19 t-CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>）。通常、石油合成ゴムの抽出過程では加熱を要するのに対し、トチュウからは非加熱で高純度ゴムを抽出する技術を開発したため、低炭素化効果が大きい。一方でトチュウの成長が50年生ではほぼ頭打ちになることが成長式より推算されるため、後年は剪定をあまり必要としなくなり、年平均あたりの剪定枝量が少なく見積もられた。リンゴやハリエンジュのように残材や剪定枝は、直接燃焼による利用であるため代替効果が得やすいが、汎用性がなく輸送にも適さないため、現地での利用のみに限られる。今後は中国農村の発展と共にエネルギー利用形態も変化していくことが予想され、利用しやすい木質ペレットへの加工を考慮する必要がある。対して化石資源代替製品は製造過程でエネルギーを使用するため、その代替効果は小さくな

るが、製品としての価値や利用範囲の広さが魅力である。

バイオマス生産・加工プロセスのCO<sub>2</sub>排出量を比較すると、リンゴ園では大量の水と肥料を使用し、濃縮果汁工場においても大量のエネルギー消費によりCO<sub>2</sub>が排出される。したがって、生態系炭素固定・化石資源代替効果が相殺され合計では生食リンゴが4.47 t-CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>、リンゴ濃縮果汁は0.44 t-CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>で最も小さくなった。総合的に低炭素化効果が最も大きかったのは、トチュウ林の6.12 t-CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>であった。

### 3) バイオマス利用事業の事業収支及び雇用創出、農民収入増加の評価

バイオマス生産・利用事業における経済収支を土地面積あたりで評価した結果を表2-2に示す。粗収入は河南省の市場流通価格から計算したが、トチュウのトランスゴムは市場形成されていないため、石油合成ゴムの市場価格で代用した。ハリエンジュは30年間育林後に伐採し、丸太として販売するため、割引率（金利）を5%として割引現在価値の30年平均を算出することにより、粗収入を販売価格の51%とした。面積あたりの粗収入は、トチュウ、ハリエンジュ、リンゴ濃縮果汁、生食リンゴ、トウモロコシの順に大きく、中でもトチュウの販売額は他の収穫物・製品より高かった。販売管理費は栽培管理費、減価償却費、人件費、製品加工費とした。なお減価償却費には固定資産への貸出金利5.94%を含めた。設備取得原価と製品加工費については、トチュウ工場はモデル地域での聞き取り、濃縮リンゴ果汁工場は甘粛省慶城県における実例<sup>11)</sup>の情報を使用した。販売管理費は、リンゴ濃縮果汁製造が最も高く、設備投資とエネルギー消費の大きさ、人件費の高さによるところが大きかった。生食用リンゴでは特に多量の肥料、水、農薬を投入するため、栽培管理費の高さが顕著に表れていた。一方、トチュウは栽培管理が比較的粗放的であり、生産時のエネルギー消費が少なかったが、4種のバイオマス製品製造のため人件費への割り当てが高くなっていた。純利益は粗収入と販売管理費の差としたが、トチュウおよび濃縮果汁は事業であるため、地方法人所得税と企業所得税による33%の法人税が課され、税引き後利益が事業収支となる。事業収支はトチュウ、ハリエンジュ、生食用リンゴ、リンゴ濃縮果汁、トウモロコシの順に大きく、バイオマス製品加工事業であるトチュウが最も良い収支となった。製品加工をおこなうトチュウとリンゴ濃縮果汁を比較すると、面積あたりの利益はトチュウの方が大きく、栽培管理や製品加工のコストが低く抑えられていることが明確な差となって表れていた。労働分配率とは、事業の付加価値に対してどれだけの人件費があったかを表し、経営体質を測る上での指標の1つである。労働分配率が高いと人件費が企業の粗利益を圧迫していることとなり、経営が悪化しているとされる。一般に40%未満であれば、適正水準であり、どちらの事業も38%で経営体質は普通である。一方利益率をみると、トチュウが18%高く、コスト削減と高付加価値製品の販売という企業努力によるところが大きいとと言える。

次に、各バイオマス生産・利用ケースの雇用創出と農民収入を比較した（表2-3）。2008年の朱揚鎮統計データによると、農民1人あたりの平均耕地面積は0.52 haである。土地を所要する農民1人を事業主とした場合、生食用リンゴ園はトウモロコシ畑からの土地利用転換であるため、雇用創出は生じない。ハリエンジュ林は栽培管理が不要であるため、農村における雇用創出としては余剰労働力を生じることとなりマイナス評価である。トチュウ事業およびリンゴ濃縮果汁事業は、栽培管理および製品加工工場での労働力を要し、労働者は1年雇用契約の長期労働者と1ヶ月雇用契約の短期労働者に分けられる。トチュウ事業では土地提供者である事業主1人に対して長期労働

表2-2 バイオマス生産・利用による土地面積あたり事業収支 (元 ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>)

	トチュウ				リンゴ			ハリエンジュ	トウモロコシ
	雄花茶	飼料	スゴム	BDF	生食	濃縮果汁	濃縮果汁		
粗収入	12,400	4,900	16,500	600	26,000	40,000	2,500	13,000	10,200
	34,400					42,500			
販売管理費		16,200			17,000	31,800		900	2,100
栽培管理		640			17,000	17,000		400	2,100
減価償却		60			-	300		-	-
人件費		14,000			-	6,600		-	-
製品加工		1,500			-	7,900		500	-
純利益		18,200			9,000	10,700		12,100	8,100
税引き後利益		12,200			-	7,200		-	-
利益率		35%			-	17%		-	-
労働分配率*		38%			-	38%		-	-

\*人件費÷付加価値（粗収入－製品加工－栽培管理）

表2-3 バイオマス生産・利用による農民収入 (元 人<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>)

		トチュウ	リンゴ		ハリエンジュ	トウモロコシ
			生食	濃縮果汁		
土地提供者	退耕還林補償金	702	702	702	702	-
(事業主)	販売純利益	6,400	4,600	3,700	6,300	4,200
	合計	7,102	5,302	4,402	7,002	4200
被雇用者	長期雇用賃金	3,400	-	6,300	-	-
( )は人数		(0.36)		(0.01)		
	短期雇用賃金	300 (9)	-	140 (12)	-	-

者0.36人、短期労働者9人で、濃縮果汁事業では同じく事業主1人に対して長期労働者0.02人、短期労働者12人の雇用が生じる。したがって、退耕還林前のトウモロコシ栽培からバイオマス事業への土地利用転換によって新たな雇用を創出することができる。退耕還林政策からの補償金は、1畝(1/15 ha)あたり90元であるので、平均耕地面積を有する農民1人あたりに支給される額は702元となる。企業経営であるトチュウとリンゴ濃縮果汁からの農民収入は、土地提供者は事業収支と退耕還林補償金であり、雇用者は賃金である。退耕還林による農民収入の変化を評価すると、トチュウ事業が7,102元と最も農民収入が高く、次いでハリエンジュ、生食リンゴであり、リンゴ濃縮果汁事業は退耕還林前のトウモロコシ畑と同程度となった。ハリエンジュの農民収入は大きい、30年後の伐採時による収入見込みであるため、年間の収入はなく、また管理を行わないため余剰労働力を長期に生じてしまう。結局のところ都市への出稼ぎを生み農村からの人的資源の流出となり負の効果となることが懸念される。しかし、ハリエンジュの環境改善効果の高さと管理不要であることを考慮すると、人手が入りにくい急斜面や山奥に植林し、生じた余剰労働力分は他のバイオマス事業での雇用に当てるよう地域に適した植林計画を行えば、環境改善と地域社会経済活性の双方を満たすことができると考えられる。

表2-4 河南省におけるトチュウ事業の経済波及効果（千元）

	直接効果	第二次波及効果	合計（総合効果）
生産誘発額	136,993	52,348	189,341
粗付加価値誘発額	86,345	21,930	108,275
雇用者所得誘発額	39,631	9,854	49,485

リンゴ濃縮果汁事業とトチュウ事業は加工設備を要することから農民の自家経営ではなく企業経営が前提となる。よって、退耕還林のために土地を提供する農民が主体的に事業に経営参加できるしくみが必要である。これには、生産者組合などの形態をとり、工場経営や資本参加する方法が考えられる。トチュウ事業は初期設備投資が1,170万元と、リンゴ果汁事業（5,900万元）と比較して設備規模が小さいため、農民の事業参加が比較的容易である。

#### 4) トチュウバイオマス事業展開による地域経済波及効果

朱揚鎮政府からの聞き取り調査から、2008年度におけるトチュウ植林面積は2,670 haであった。河南省を対象としたトチュウ植林2,670 haのトチュウバイオマス事業展開による経済波及効果を表2-4に示す。トチュウ事業による生産額は雄花茶5,048万元、飼料2,027万元、BDF263万元、トランスゴム6,362万元で総額1億3,700万元であった。経済波及効果はトチュウ事業による直接効果と家計消費の増加から誘発される生産（第二次波及効果）を算定した。総生産額は1億8,934万元で波及効果倍率（総生産額÷トチュウ事業生産額）は1.4倍だった。粗付加価値ベースで見ると、誘発された粗付加価値の合計増分は1億828万元で、これは2007年度の河南省の域内総生産1兆5,012億元のわずか0.007%であった。市レベルでも、靈宝市の域内総生産は233.1億元で0.46%程度であった。産業連関表で求まる経済効果は複数年の効果の合計であるため、単年度のフロー値である粗付加価値額と同列で比較できないとはいえ、2,670 haのトチュウバイオマス事業では地域経済への影響は決して大きいとは言えない。しかしながら、同面積のトウモロコシ畑による経済波及効果は総生産額が8,425万元でトチュウ事業の約1/2程度であることを考慮すると、バイオマス製品を算出する本事業は、通常の第一次産業よりも経済効果は大きいと言える。

部門別の生産誘発額をみると、雄花茶やトランスゴム、飼料の生産によりこれらに相当する産業部門への経済効果が大きくなった（表2-5）。次いで、不動産業、石油燃料加工業、紡績服飾加工業部門への経済効果が大きく、トチュウバイオマス事業の製品製造にかかるエネルギーや製品輸送、そして販売など間接的な部門に対しての波及効果と地域住民の日常生活品への消費拡大であると考えられる。

河南省におけるトチュウ事業の雇用誘発効果は、直接効果が6,292人、第二次波及効果は1,003人で、誘発された雇用者数の合計は7,295人となった。雇用誘発効果はトチュウ事業による雇用者数が総合計の約9割を占めた。第二次波及効果の雇用誘発者数の大半が化学工業と食品製造及びタバコ加工業、農業牧漁業で、わずかに商業、交通運輸業、サービス業に対して波及効果がみられた（表2-6）。



表2-5 河南省におけるトチュウ事業の部門別生産誘発額（千元）

1	化学工業	66,702
2	食品製造及びタバコ加工業	59,646
3	農林牧漁業	30,238
4	不動産業	3,006
5	石油燃料加工業	2,956
6	紡績・服飾加工業	2,810
7	宿泊・外食産業	2,587
8	電力・熱力生産供給業	2,271
9	交通運輸業	1,762
10	商業	1,563

表2-6 河南省におけるトチュウ事業の部門別雇用誘発効果（人）

1	化学工業	2,822
2	食品製造及びタバコ加工業	2,372
3	農業牧漁業	1,705
4	石油燃料加工業	155
5	住民・その他サービス業	70
6	商業	50
7	宿泊・外食産業	30
8	交通運輸業	19
9	教育	17
10	社会保障・社会福祉業	12

## 5) 環境改善便益の経済評価

水土保全と低炭素化の環境改善効果を金銭換算して環境改善便益とし、事業収支との比較を表2-7に示す。水土保全効果の便益は退耕還林前のトウモロコシ栽培を基準とし、植林による土壌流出量の軽減により削減された被害額として算出した。ダムや河川に堆積した流出土砂の回収費と、栄養分損失の被害額の合計は、土壌流出量1 tあたりは154.21元となった。低炭素化効果の経済便益には認証排出削減量（CER）クレジットを適用し、為替換算すると<sup>18)</sup> 93.9元 t-CO<sub>2</sub><sup>-1</sup>であった。ハリエンジュ林は伐採時に大量の残材を生じ、加工にエネルギーを伴わない直接燃焼による代替効果であるため、低炭素化効果を得やすいが、1年あたりの平均ではそれほど大きくなかった。生食リンゴ園やリンゴ濃縮果汁でも同様に、強度の剪定により大量の薪炭材を生じるため低炭素化効果は大きい、栽培管理や製品製造において大量のエネルギーを消費するため、正味として低炭素効果は低くなった。トチュウでは、栽培管理や製造時の投入エネルギーが少なく、薪炭材、天然ゴム、BDFなど複数のバイオマス製品からの化石資源代替効果を得ることができるが、生産量がそれほど多くないため、低炭素化便益は他の樹種と比較しても大差はなかった。一方で、化石資源代替を行わないトウモロコシ畑の低炭素化便益はゼロであった。水土保全便益と低炭素化便益を比較すると、水土保全便益が圧倒的に大きく、合計の環境改善便益は水土保全効果に大きく依存した。ポスト京都メカニズムの先行きが不透明な中で炭素クレジット市場も停滞傾向にあり、炭素価値も低迷しているのが現状である。

以上の推計結果を元に、退耕還林を利用したバイオマス生産・利用事業の有用性について考察する。生食用リンゴ園は、トウモロコシからの土地利用転換であるため、直接的に農民収入の増加につながり、また環境便益も高く、退耕還林事業として優れた選択肢であるといえる。しかし

表2-7 バイオマス生産・利用による事業収支と環境改善便益の経済評価（元 ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>）

	トチュウ	リンゴ		ハリエンジュ	トウモロコシ
		生食	濃縮果汁		
事業利益	12,200	9,000	7,200	12,100	8,100
環境改善便益	12,900	9,400	9,040	11,100	0
水土保全便益	12,300	9,000	9,000	10,700	0
低炭素化便益	600	400	40	400	0
合計便益	25,100	18,400	16,240	23,200	8,100

リンゴ栽培には水源の確保、栽培技術水準、栽培管理労力が必要であり、農地からリンゴ園への転換は限られている。リンゴ濃縮果汁事業は設備および加工コストの分、事業利益が小さくなり、またエネルギー消費によって環境改善効果も相殺されるため、生食用リンゴよりも評価は低くなる。ハリエンジュ事業では環境保全便益と事業利益は高いものの、余剰労働力を生み出してしまいうため、単独では持続的ではない。他のバイオマス樹種を栽培しにくい悪条件地や遠隔地への植林に限ることで、他の事業と組み合わせて余剰労働力を補償するならば、その効果は非常に大きなものとなる。トチュウ事業は環境改善効果、事業利益が共に最大であり、退耕還林事業としては合目的である。トチュウは栽培管理が容易で、天水による栽培が可能であるため適用範囲も広い。また、初期設備投資コストが低く、農民の事業参加が比較的容易であることは特筆すべき点と言える。さらに今後、トチュウ事業の主製品であるトチュウゴムの利用として医療品などの高付加価値製品原料となれば、高い市場価格を得ることができ、事業利益の向上を期待することができる。

### (3) 農工連携農村産業に適用可能なバイオマス種探索と土地利用最適化試案

#### 1) 多目的利用バイオマス種の探索と事業収支および環境便益評価

トチュウは事業利益、環境改善効果が高く、また耐寒・耐乾燥性に優れ、栽培管理もしやすく、パイロットモデル地域のバイオマス産業に最適な樹種である。しかし経済的便益のみを追求すると、熱帯パラゴムやアブラヤシの大規模商業プランテーションのように、モノカルチャー化の弊害が懸念される。すなわち、生物多様性の損失、食糧生産との競合、農民の無産化、地域内経済・生活格差、農村文化とコミュニティの衰退などである。またモノカルチャーは気候変動、病虫害、市場変動による影響を受けやすく、持続可能性を欠く。こうした危険性の回避のために、多様なバイオマス種候補を探索し、農民・農村の生計と文化を維持するために必要な従来の土地利用を保全した上で、それらを組み合わせて栽培・利用することが望ましい。そこで、農工連携産業に適用性があるバイオマス種候補を探索した。探索条件を、①低炭素化に寄与する油糧植物、②食糧と競合せず、土壌保全効果が高い木本植物、③中国内の広域で栽培可能な種とした（表2-8）。この中から、霊宝パイロットモデル地域で栽培可能で、トチュウと同様に油脂だけでなく多目的のバイオマス製品の原料を提供できる種として、ブンカンカ (*Xanthoceras sorbifolia*) およびヤトロファ (*Jatropha curcas*) の2種を選択し、トチュウと同様の基準で環境および経済便益を評価した。

ブンカンカ（文冠果）は中国北方原産の落葉喬木であり、耐寒性、耐乾燥性に優れており、根が地下深く張ることができるため緑化樹種として利用されている。種子からは良質の木本油を採取することができ薬用、食用、工業用に利用することができる。また花色や葉形、樹形が美しいため観賞用としての価値も高く、葉は茶に、果皮は活性炭に加工可能であり、多面的価値が注目されている<sup>19)</sup>。バイオマス生産製品として葉から茶、種子油からBDF、搾油カスから飼料、果皮から活性炭に利用するものとした。

表2-8 中国で栽培可能な主な油糧樹種の生育条件と分布域

樹種	生育条件			中国における分布域 (省)	備考
	年平均 気温 (°C)	年降水量 (mm)	土壌 (pH)		
ブンカンカ <i>Xanthoceras sorbifolia</i>	6 - 13	500 - 800		内モンゴ、陝西、山西、 河北、甘肅など	耐寒性、乾燥・瘦 せた土壌に強い
ヤトロファ <i>Jatropha curcas</i>	18 - 29	700 - 1600	5 - 6	福建、広東、広西、 海南、四川、貴州、 雲南	河谷の荒れ山・荒 れた傾斜地に生 育可
ランシンボク <i>Pistacia chinensis</i>	> 6	>300		河北省以南	乾燥、瘦せた土壌 に強い
ハゼノキ <i>Rhus succedanea</i>	16 - 19	1000 - 1500	5 - 8	長江流域及びそれ以 南	弱アルカリ土も 可
センダン <i>Melia azedarach</i>	17 - 26	> 350		華北～華南	
カシグルミ <i>Juglans regia</i>	7 - 21	310 - 1500	4.5 - 8		
アブラツバキ <i>Camellia oleifera</i>	最低気 温 > - 5		5 - 7	長江流域及びそれ以 南	

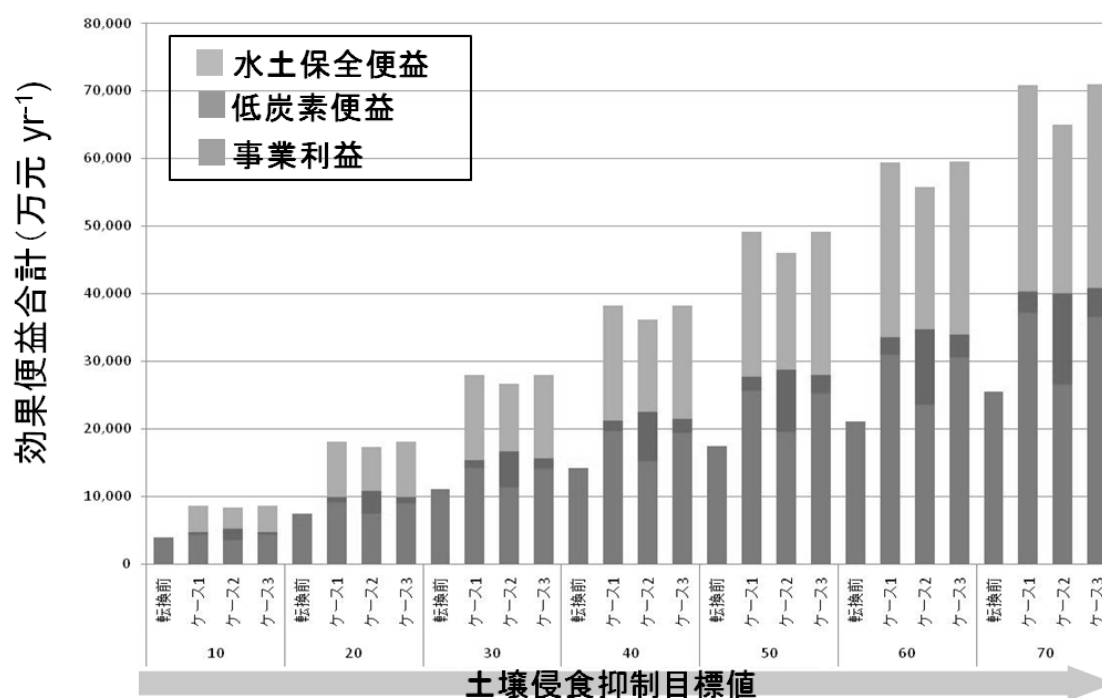


図2-8 転換前と転換後の各ケースにおける事業利益、低炭素便益、環境便益の合計

ヤトロファ（南洋油桐）は種子に大量の油を含み、BDFの原料として早い時期から注目されている。1 haあたりの栽植密度が高く、2年目以降から収穫可能で栽培管理も容易である。また、通常食用作物の栽培には適せない酸性土壌でも育つため、食糧との競合がない。種子油の利用の他に、葉には消炎抗菌成分を含み薬剤としての利用が可能である。バイオマス製品として葉から薬剤成

分、種子油からBDF、搾油カス、果皮からはペレット型燃料に利用するものとした。ヤトロファは栽培に比較的大量の水を必要とするが、パイロットモデル地域の大半は山地が占めており、水源の確保の困難さを考慮して、無施肥かつ灌水をほぼ行わない簡易栽培モデルを適用した<sup>20)</sup>。

表2-9にブンカンカとヤトロファの多目的バイオマス産業の事業収支および環境便益評価を示す。ブンカンカは収穫量が多く、活性炭や高タンパク質飼料といった高付加価値のバイオマス製品を製造できるため、事業利益が高くなった。また大量の種子油からのBDF生産により化石資源代替効果を得やすく、環境改善便益も高くなった。一方ヤトロファは簡易栽培モデルであるため収穫量が少なく、事業利益は低くなった。しかしながら、ヤトロファの成長の速さと栽植密度の高さから、固定されるCO<sub>2</sub>量は多く、水土保持効果も高いため、環境改善便益が非常に大きくなった。土壌侵食の厳しい土地において、水土保持の速効性を期待する場合にヤトロファ栽培は適していると言える。

## 2) パイロットモデル地域における多目的バイオマス産業のための土地利用最適化

霊宝パイロットモデル地域において、多目的利用可能なバイオマス種であるトチュウ、ブンカンカ、ヤトロファに、ハリエンジュを加えた4樹種を組み合わせる栽培し、高い環境便益と経済便益を得るような土地利用配置案を最適化した。最適化目標として3つのケースを設定し、異なる目的関数を使用して比較した。第一に事業利益を最大にする場合（ケース1）、第二に低炭素効果を最大にする場合（ケース2）、第三に事業利益と環境保全便益（低炭素および水土保持効果）の合計を最大にする場合（ケース3）とした。食糧自給率100%となる耕作地および放牧地面積を確保しつつ、残りの耕作地および草地をすべて多目的バイオマス樹種に転換した場合、USLE式により土壌流出量の差を算出すると、最大で約70%の土壌流出量を削減することが可能となる。

図2-8に、転換前のトウモロコシ栽培と3つの最適化ケースの事業利益、低炭素便益、水土保持便益の比較を示す。土壌流出削減率の目標値が大きくなると、植林対象面積が増大することにより、すべての便益も共に増大した。3つの最適化目標を比較すると、低炭素化効果を最大化するケース2は事業利益が小さく、低炭素化効果の面積あたり経済便益が小さいことから合計便益も最低となった。ケース1と3の事業収支および環境便益には大きな差は見られず、合計便益はともに転換前の2倍以上となった。

表2-9 ヤトロファとブンカンカによる事業収支と環境改善便益の経済評価(元 ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>)

	ヤトロファ			ブンカンカ			
	薬剤	BDF	固形燃料	茶	BDF	飼料	活性炭
粗収入	1,600	4,000	500	1,600	34,300	11,400	1,000
		6,100			57,300		
販売管理費		-4,100			-38,800		
事業利益		2,000			18,500		
環境改善便益		14,900			12,900		
水土保持便益		13,400			10,300		
低炭素化便益		1,500			2,600		
合計便益		16,900			31,400		

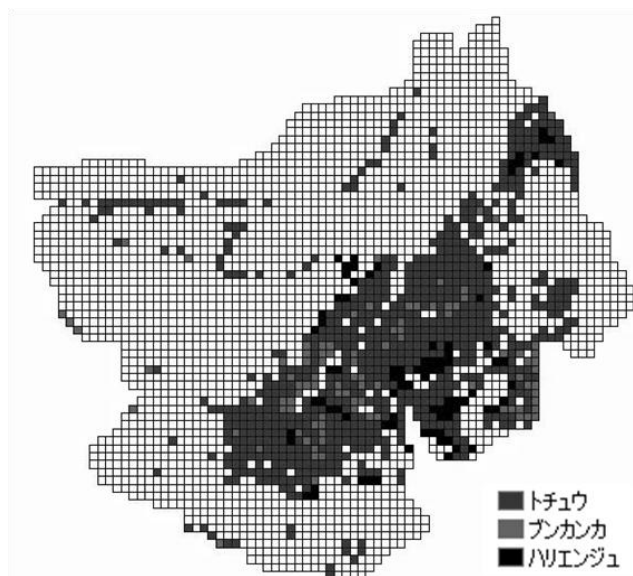


図2-9 土壌流出削減率を70%とする転換対象地において事業利益と環境便益の合計を最大化する土地利用（ケース3）

土壌流出削減率70%とした場合のケース3による最適土地利用を、図2-9に示す。植林対象地域は主に霊宝市の南東部に集中しているが、この地域は大半が丘陵地で傾斜が急である。植林面積の大半がトチュウとなったが、トチュウは生育環境の適応が広く、栽培管理が容易であるため、土地利用条件による影響を受けにくく、環境改善、事業利益がともに高い効果を得られるところが利点である。ブンカンカは事業利益、環境改善効果がトチュウより大きいものの、植林面積はわずかであった。これはブンカンカの栽培・収穫に多くの労働力を要するため、農村集落の周辺でなければ事業収支が悪化するためである。農村集落から離れた地域と急傾斜地には、管理を必要としないハリエンジュが選択された。ヤトロファは、植林対象に選択されなかった。ヤトロファは中国においてエネルギー作物として広く栽培されているが、南部温暖地域が主栽培地である。パイロットモデル地域の気候はヤトロファの栽培温度条件の下限に近く、植林可能地域は平野部に限定される。平野部は土壌流出が比較的少ないので食糧生産用地として残されたため、結果的にヤトロファの栽培は適さないことになった。

以上のように、霊宝パイロットモデル地区において、バイオマス産業利用植林によって食糧自給率100%を維持しながら土壌流亡量を70%削減し、低炭素効果を図る土地利用を提案した。単位面積あたりの環境改善効果や事業利益が高い樹種でも、栽培管理や土地利用の条件によって植林・利用に適さない場合があった。今回の試案の空間単位は1 kmメッシュであったが、実際の施業にはメッシュ内すべてに植林するのではなく、集落や既存農地の配置や状況に応じた詳細な植林計画を要することは言うまでもない。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

本研究は、農村地域におけるバイオマス資源を高度利用した産業化によってもたらされる環境改善効果（低炭素化と水土保持）と地域社会経済的効果（雇用創出と農民収入増加、地域経済波

及効果)に関し、生態学、システム工学、社会経済学から多面的にアプローチし、バイオマス事業の効果と持続可能性を評価した。科学的な意義として、①バイオマス成長と土壌炭素動態の考慮による低炭素効果評価の高度化、②非エネルギーバイオマス製品の低炭素効果評価方法の提示、③バイオマス事業収支と環境改善効果の経済価値の直接比較が挙げられる。

## (2) 環境政策への貢献

本研究は脱温暖化シナリオに対応可能な政策のヒントとして、農村におけるバイオマス産業の具体例を提示し、その推進のための農業・工業・地域連携の有効性を示した。また日中環境保護協力協定に対応した政策のヒントとして、日本の技術を導入した中国農村部における国際連携バイオマス産業創出モデルを提示した。従来のバイオマス利用による低炭素化推進施策において見られなかった、バイオマスの多目的利用という視点を導入することによって、本研究はバイオマス事業の最大の障壁である経済性を改善しうることを示した。またバイオマス産業を持続可能とする仕組みとして、低炭素だけでなく多様な環境保全効果の評価も有望であることを示した。環境と社会経済の多様な便益を同時達成する「一石五鳥」モデルが、環境の持続的改善に寄与することを示した。

バイオマス生産を担う農民の事業参画推進は、いわゆる三農(農村、農業、農民)問題の解消に向けた地域社会の持続可能施策として望ましい。ケーススタディを実施した中国とは農村や環境問題の特性は異なるが、我が国の農山村でも放棄農地・放棄林、人口減少、経済・生活格差などの複合問題によって、炭素固定をはじめとする生態系機能が劣化している。農村部において地域の自然資本を活用した環境調和産業を興し、地域住民が事業参加するモデルは、我が国においても適用可能であると期待される。

## 6. 引用文献

- 1) S. Takeno, T. Bamba, Y. Nakazawa, E. Fukusaki, A. Okazawa and A. Kobayashi: J. Biosci. Bioeng., Vol.105, pp.355-359 (2008)  
 “Quantification of Trans-1,4-Polyisoprene in *Eucommia Ulmoides* by Fourier Transform Infrared Spectroscopy and Pyrolysis-Gas Chromatography/Mass Spectrometry”
- 2) X. Zhang, C. Cheng, M. Zhang, X. Lan, Q. Wang and S. Han: J. Agric Food Chem., Vol.56, pp.8936-8943 (2008)  
 “Effect of Alkali and Enzymatic Pretreatments of *Eucommia Ulmoides* Leaves and Barks on the Extraction of Gutta Percha”
- 3) 朝日新聞社: pp.170-171 (1997)  
 「朝日百科植物の世界8 種子植物双子葉類8」
- 4) W. H. Wischmeier and D. D. Smith: Agriculture Handbook 537, USDA Agricultural Research Service, Washington DC (1978)  
 “Predicting Rainfall Erosion Losses”
- 5) G. Y. Li: J. Anhui Agric. Sci., Vol.36, No.2, pp.541-542 (2008)  
 “Evaluation of Forestry Ecological Benefit in Henan Province”
- 6) F. J. Richards: J. Exp Botany, Vol.10, pp.290-300 (1959)

- “A Flexible Growth Function for Empirical Use”
- 7) J. Penman, M. Gytarsky, T. Hiraishi, T. Krug and D. Kruger: IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme (2004)
- “Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry”
- 8) H. Peng, B. Stimm, H. El Kateb and R. Mosandi: Forstliche Forschungsberichte München, Vol.192, pp.210-228 (2003)
- “Die Entwicklung von Robinien- und Kiefernauaufforstungen auf dem chinesischen Weibei-Lößplateau”
- 9) 伊藤大雄, 杉浦俊彦, 黒田博之: 果樹誌報, Vol. 34, pp.81-94 (2000)
- 「わが国の温暖地落葉果樹園における年間炭素収支の推定」
- 10) K. Coleman and D. S. Jenkinson: IACR, Rothamsted, Harpenden, Herts, AL5 2JQ
- “ROTHC-26.3 A Model for the Turnover of Carbon in Soil: Model Description and Windows User Guide 1999 Issue (Modified 2005)”
- 11) 慶城公衆情報ネット: 「慶城県濃縮リンゴ果汁生産プロジェクト」 (2006)
- 12) 河南省統計局編纂: 河南統計年鑑2009, 中国統計 (2009)
- 13) 中華人民共和國農業部編: 中国農業統計資料, 農業出版社 (2007)
- 14) 中国総覧編集委員会: 中国総覧2007~2008年版, ぎょうせい (2008)
- 15) 大澤正治: 愛知大学ICCS人口生態環境問題研究会中間報告書, 愛知大学国際中国学研究センター (2005)
- 「退耕還林・還草政策について」
- 16) M. X. Men, T. K. Zhao, Z. P. Peng and Z. R. Yu: Sci. Agric. Sinica, Vol.37, No.11, pp.1647-1653 (2004)
- “Study on the Soil Erodibility Based on the Soil Particle-size Distribution in Hebei Province”
- 17) Y. L. Xu, H. E. Li, Y. M. Ni and F. Yang: J. Northwest Sci-Tech Univ. Agric. For., Vol. 34, pp.138-142 (2006)
- “Estimate on Pollution Loadings of Nitrogen and Phosphorus Based on USLE in Heihe River Watershed”
- 18) The World Bank: State and Trends of the Carbon Market 2009 (2009)
- 19) Yan, D. J.: J. Shaanxi Agric. Sci., Vol.35, No.3, pp.15-17 (2007)
- “Study on Xanthoceras Sorborifolia Resources and Its Development Utilization in China”
- 20) T. Kawaguchi, E. Nakama, Y. Osumi, S. Tejowuran, B. Zainal, Hartina, A. N. Gintings and Y. Morikawa,: Waseda-bridgestone Initiative for Development of Global Entertainment Report (2010)
- “W-BRIDGE Model Reforestation Model of Degraded Land for Benefits to Local People in Lombok Island, Indonesia”

## 7. 国際共同研究等の状況

なし

## 8. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) 町村尚, 佐田忠行, 小林昭雄, 中澤慶久, 玉泉幸一郎, 堤雅史, 部谷桂太朗, 津田和俊, 蘇印泉: 環境システム研究, Vol. 37, pp. 467-475 (2009)  
「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ー河南省靈宝市のトチュウ植林の事例ー」
- 2) 佐田忠行, 町村尚, 田中大士, 蘇印泉, 張景群, 小林昭雄: 環境技術, Vol. 39, No. 9, pp. 549-556 (2010)  
「多目的バイオマス利用による環境改善および社会経済的効果ー中国黄土高原におけるポテンシャル評価ー」

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 町村尚, 佐田忠行, 小林昭雄: 環境技術, Vol. 39, No. 9, pp. 524-529 (2010)  
「農工連携による農村低炭素化産業の創出」
- 2) 梅田靖ら編: 都市・農村連携と低炭素社会のエコデザイン, 技法堂出版, pp. 51-76 (2011)  
「第Ⅱ部 1. 農村産業: 新しい仕組みと挑戦（執筆担当: 町村尚, 小林昭雄, 中澤慶久, 堤雅史, 佐田忠行, 福島龍太郎）」

### (2) 口頭発表（学会）

- 1) 町村尚, 玉泉幸一郎, 小林昭雄, 佐田忠行, 中澤慶久, 堤雅史, 部谷桂太朗, 馬場健史, 蘇印泉: 日本農業気象学会2009年度全国大会, 福島, 2009年3月25-27日  
「中国河南省における退耕還林トチュウ植林地の炭素固定量推定」
- 2) 小林昭雄, 中澤慶久, 馬場健史, 町村尚, 佐田忠行: 日本杜仲研究会第4回定期大会, 大阪, 2009年8月1日  
「トチュウ (*Eucommia ulmoides*) 活用は、一石何鳥を可能にするか？」
- 3) 町村尚, 佐田忠行, 小林昭雄, 中澤慶久, 玉泉幸一郎, 堤雅史, 部谷桂太朗, 津田和俊, 蘇印泉: 第37回環境システム研究論文発表会, 東京, 2009年10月24-25日  
「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ー河南省靈宝市のトチュウ植林の事例ー」
- 4) T. Machimura, T. Sada, M. Tsutsumi, Y. Nakazawa, T. Bamba and A. Kobayashi: Ecodesign 2009, Sapporo, Japan, 7-9 December 2009  
“A Deciduous Wood Plant, *Eucommia ulmoides* is One of the Most Valuable Plants for Harmonized Economic Development and Environmental Improvement of the Rural China”
- 5) T. Sada, T. Machimura, K. Hidani, A. Kobayashi, Y. Nakazawa, K. Gyokusen, M. Tsutsumi, K. Tsuda and Y. Su: Ecodesign 2009, Sapporo, Japan, 7-9 December 2009  
“Accounting Carbon Reduction Effect of Grain for Green *Eucommia* Plantation and its



High Order Biomass Utility in Henan Province, China”

- 6) 津田和俊, 佐田忠行, 町村尚, 蘇印泉, 内山茂久: 第51回大気環境学会年会, 大阪, 2010年9月8-10日

「中国河南省における杜仲植林地および周辺市街地の大気環境測定」

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

- 1) ワークショップ” Multiple benefits and perspectives of *Eucommia* biomass industry -Practice at Lingbao, China- “ (2009年11月7日、中国西北農林科技大学、観客30名)

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし

(6) その他

なし