

短伐期林業を想定したヤナギの栽培・収穫・利用システムの経済性 および温室効果ガス排出量分析

Cost and greenhouse gas emission analysis of a growing, harvesting, and utilizing system
for willow trees aimed at short rotation forestry

吉岡拓如^{*1}・井上公基^{*1}・Bruce HARTSOUGH^{*2}

Takuyuki YOSHIOKA^{*1}, Koki INOUE^{*1} and Bruce HARTSOUGH^{*2}

*1 日本大学生物資源科学部

Coll. of Biore. Sci., Nihon Univ., 1866 Kameino, Fujisawa 252-0880, Japan

*2 カリフォルニア大学デイビス校生物・農業工学科

Dept. of Biol. and Agric. Eng., Univ. of California, Davis, One Shields Ave., Davis, CA 95616, USA

要旨：北海道のような寒冷地でもごく短期に熱帯早生樹に匹敵するバイオマス蓄積を確保でき、再生力が強いことから粗放な栽培が可能なヤナギの栽培・収穫・利用システムについて、ライフサイクルアセスメント（LCA）の視点から経済性と温室効果ガス排出量の分析を行った。200 ha の耕作放棄地を造成し栽培したヤナギを、沖縄県でサトウキビの収穫に用いられているケーンハーベスターを購入して収穫し、粉碎した後にバイオマスボイラで直接燃焼熱利用するシステムを想定した。分析の結果、コストは18,064 円／全乾トンと算出され、林地残材や未利用間伐材よりも高額となったものの、熱量あたりの単価ではA重油よりも安くなかった。また温室効果ガス排出量はCO₂換算で6.633 kg/GJとなり、この値はA重油の10分の1以下であった。したがって重油ボイラに代えて、想定したシステムで栽培・収穫されたヤナギチップを熱利用することにより、経済性が改善し、地域の温室効果ガス排出量の削減に寄与できる可能性があることが示された。

キーワード：経済性、温室効果ガス排出量分析、栽培・収穫・利用システム、短伐期林業、ヤナギ

Abstract: A growing, harvesting, and utilizing system for willow trees aimed at short rotation forestry (SRF) was constructed in northern Japan, and the system was evaluated from viewpoints of cost economy and greenhouse gas (GHG) emission based on a life cycle assessment (LCA) method. Willow was assumed to be grown intensively in 200 ha of idle land in the test area, harvested using a sugarcane harvester, and utilized as heat energy by burning wood chips directly in a biomass boiler. As a result, the cost of willow was 180.64 US\$/dry-t, which was more expensive than that of forest biomass such as logging residues and thinned trees, while willow chips was less expensive than heavy oil in the price per calorific value. On the other hand, the GHG emission of willow was 6.633 kgCO₂eq/GJ, less than one tenth of that of heavy oil. Therefore, it has been suggested that substituting heavy oil for heating fuel with willow chips could be economical and contribute to reduce the regional GHG emissions.

Keywords: cost and greenhouse gas emission analysis; growing, harvesting, and utilizing system; Japan; short rotation forestry; willow

I はじめに

ユーカリやポプラ、ヤナギといった早生樹を挿し木で植栽し、株立ちで成長した木質部を数年の短いサイクルでくり返し収穫する短伐期林業は、これまで主にパルプチップ生産を目的として行われてきたほか、近年では新たな用途としての木質バイオマス利用に注目が集まっている。スウェーデンでは、1980年代に商業的なバイオエネルギー利用を目的としたヤナギの植栽がはじまり、2000年までに16,000 ha のヤナギ林が造成された（5）。

またその他のヨーロッパや北米においても、短伐期林業を想定した、各種農林業機械を用いた収穫実験が行われている（7～10）。わが国の場合も、『バイオマスニッポン総合戦略』の中で、短伐期林業で得られる木質バイオマスが、林地残材などの「未利用バイオマス」に次ぐ「資源作物」であることが明確に示されている（1）。

前報（14）において筆者らは、「北海道に適した新たなバイオマス資源の導入促進事業」の一環で行われたヤナギの栽培・収穫実験を報告した。収穫実験は、沖縄・奄

美地方でサトウキビの収穫に用いられるケーンハーベスターの農閑期を活用する形で実施した。栽培実験では、年間 10 全乾トン/ha を超える木質バイオマス生産量を確保できる可能性があることが示された。また収穫実験(図-1)では、機械による収穫のためには、圃場の整備方法として機械の旋回スペースの確保、ヤナギの植栽方法として一条植、3 年の収穫サイクル、枝葉や梢端部除去のための風選ファンの稼動が、それぞれ必要であると考えられた。またある程度成長したヤナギを刈り取る限りにおいては、機械収穫がヤナギの萌芽再生におよぼす影響は小さいものと考えられた。北海道の殖民区画を参考にしたモデル圃場における収穫・収集システムの生産性が $22.4 \text{ m}^3/\text{時}$ と試算されたことから、ヤナギチップを低成本で供給できる可能性が示唆された。



図-1. ケーンハーベスターによるヤナギの収穫実験

Fig. 1 Experiment on harvesting willow trees using a sugarcane harvester

本研究では、プロジェクトにおける次の検討事項として、短伐期林業を想定したヤナギの栽培・収穫・利用システムを構築し、その経済性と温室効果ガス (GHG) 排出量を、ライフサイクルアセスメント (LCA) 手法の考え方にもとづいて評価した。LCA 手法による木質系バイオマスのエネルギー利用に関する研究例としては、田原らが海外での短伐期林業について排出権取引を目的とした分析を行った (11) ほか、筆者らが国内の素材生産とともに発生する林地残材を利用した発電システムに 対して検討したもの (15) がある。

II 材料と方法

1. システムの枠組み モデル地域においては木質バイオマスの利用が推進され、チップボイラの導入も進んでいる。安定的な原料確保が課題となっているため、栽培・収穫したヤナギが利用される可能性は高い。栽培にあたっては、地域内の市街地から 20 km 程度離れた場所に集中的に存在する遊休地およそ 200 ha を候補地として考えている。そこで本研究では、直接燃焼プラントから

20 km にある 200 ha の土地でのヤナギの栽培、収穫、粉碎、そしてチップのボイラ利用を対象に評価を行った。システムのフローを図-2 に示す。前報にならい、栽培のサイクルを 3 年、収穫時には 30 全乾トン/ha を収穫し、20 年サイクルで圃場を更新するものとした。また、前報ではヤナギの収穫機械として、沖縄県でサトウキビの収穫に用いられるケーンハーベスターの農閑期を活用して輸送して使用することを想定したが、本研究では新たに購入するものとした。

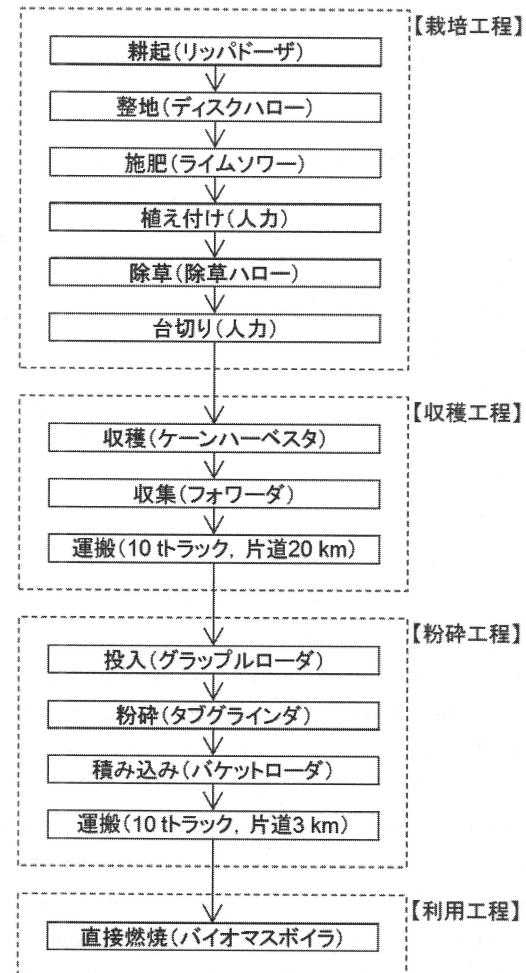


図-2. 栽培・収穫・利用システムのフロー

Fig. 2 Process diagram of a growing, harvesting and utilizing system

2. 栽培・収穫・粉碎コスト コスト計算に関し、インシャルコストについては圃場の更新サイクルを 20 年に設定したため、耕起、整地、植え付け、除草、台切りは 20 年に 1 回実施するものとし、20 年で 200 ha と考え 1 年あたり 10 ha 分を計上した。一方ランニングコストについては、収穫サイクルを 3 年に設定したため、施肥と収穫、収集は 3 年に 1 回実施するものとし、3 年で 200 ha と考え 1 年あたり 66.7 ha 分を計上した。また、機械の固

定費については、耕起、整地、除草、施肥は土木用機械を用いて実施するものとし、これらに係る機械経費は、ヤナギの圃場整備のために単独使用するものとはせず、他の土木工事と共に使用するものとし、固定費として減価償却費を計上するのではなく、時間あたり損料率をもとに算出した。一方、収穫と粉碎の両プロセスで使用する機械はすべて購入するものとしたことから、年あたり減価償却費を求め、変動費（燃料・油脂費と人件費）は別途算出した。

3. 温室効果ガス (GHG) 排出量 農業の持続可能性の視点からは、トータルシステムに対する LCA 評価が重要となる（12）。LCA 評価に関しては、燃料チップの原料となるヤナギの栽培から、チップをバイオマスボイラで直接燃焼するまでを評価の対象とした。また比較対象としては、A 重油の原料採取～分留～石油精製～燃焼を範囲としたインベントリデータとした。

GHG 排出量に関し、栽培・収穫・粉碎工程における機械の使用に伴うエネルギー使用量はコスト計算において算出し、原単位（4）を用いて GHG 排出量に換算した。また収穫物の運搬に関する GHG 排出量はトンキロ法（4）により算出した。なお、機械や建造物などの固定資産に係る GHG 排出量は評価の対象外とした（6）。一方、直接燃焼プロセスについては、既設のバイオマスボイラにおける電力使用量の実績値であるチップ 1 全乾トンあたり 32.4 kWh（2）を用い、原単位により GHG 排出量に換算した。資材投入量については、栽培プロセスの施肥で投入される肥料の GHG 排出量を計上した。さらに、燃焼プロセスで発生するメタン（CH₄）と一酸化二窒素（N₂O）について、温暖化係数（GWP）（3）を考慮することで GHG 排出量を算出した。

III 結果と考察

チップとしてボイラへ供給するまでのコストは 18,064 円／全乾トンと算出され（図-3）、林地残材や未利用間伐材の収穫・輸送・粉碎コスト（13, 16）よりも高額となったものの、熱量あたりの単価 1,084 円／GJ は、A 重油の 1,918 円／GJ（75 円／L（2010 年 2 月～2011 年 1 月の月次価格の平均値（税込））と 39.1 MJ／L（4）より算出）よりも安くなる結果が得られた。

ただし本研究で想定したシステムを現実のものとするためには、総コストを低減する必要があり、以下の点について検討が求められよう。

- 総コストに占める施肥の割合が 10% を超えたことから、単価の安い肥料やリサイクル堆肥を導入する。
- 植え付けと台切りの工程は人力中心であり、両工程

の合計コストが総コストの 3 割以上を占めてしまったため、これらの工程を機械化する。

- ヤナギの運搬費用が総コストの約 4 分の 1 を占めてしまったことから、たとえばストックヤードをプラントに隣接する場所に建設するなど、サプライチェーンを改善する。

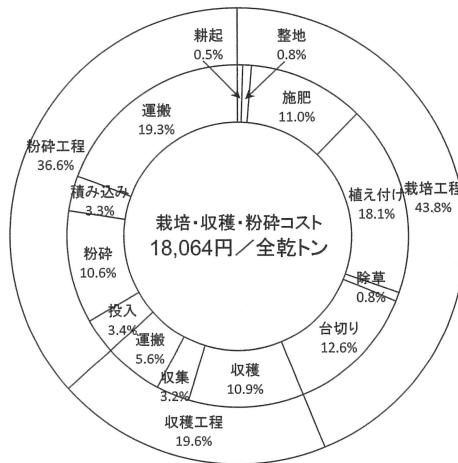


図-3. 栽培・収穫・粉碎コストの内訳

Fig. 3 Breakdown in each process for the total cost

一方、温室効果ガス排出量は CO₂換算で 6.633 kg/GJ と算出され（図-4），この値は A 重油 74.7 kgCO₂/GJ (2.92 kgCO₂/L (4) と 39.1 MJ/L より算出) の 10 分の 1 以下となる結果が得られた。

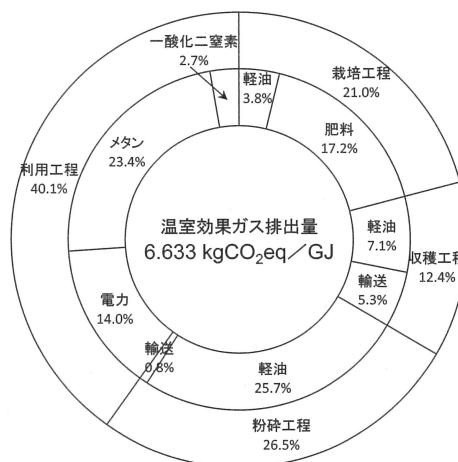


図-4. 温室効果ガス排出量の内訳

Fig. 4 Breakdown in each process for the GHG emission

したがって重油ボイラに代えて、想定したシステムで栽培・収穫・粉碎されたヤナギチップをバイオマスボイラで熱利用することにより、経済性が改善し、地域の温

室効果ガス排出量の削減に寄与できる可能性があることが示された。

IV おわりに

本研究で想定したシステムは、暖房等に使用される化石燃料を代替することで経済性が確保され、温室効果ガス排出量削減に寄与できると評価されたが、その一方で分析のために種々の条件を設定している。システムを現実のものとするために、たとえば以下に示す点についてさらに検討を深めていかなければならない。

- 対象としたモデル地域では、木質バイオマスの燃料利用の基盤が整備されていたため、経済性の評価にあたっては、バイオマスボイラを所与のものとして減価償却を考慮していない。
- ヤナギ栽培の「農業」あるいは「栽培林業」としての社会的位置づけを確立するとともに、地域の土地利用制度に適合させる必要がある。
- トータルシステムに対する LCA 評価という視点からは、ヤナギチップの焼却灰の処理やリサイクルを考慮する必要がある。

本研究は、平成 20 年度より 3 年間にわたり国土交通省北海道開発局が実施した開発計画調査「北海道に適した新たなバイオマス資源の導入促進事業」の一部が含まれており、実験データの使用にあたっては、同局ならびに日本データーサービス株式会社に便宜を図っていただいた。また、平成 24 年度日本大学海外派遣研究員（長期）「在来型林業および短伐期林業における森林バイオマス資源生産・収穫モデルの構築」の一環として行われたものである。ここに記して、謝意を表する。

引用文献

- (1) Anonymous (2005) Biomass-Nippon Strategy (provisional translation): Decided at the Cabinet Meeting, Government of Japan, December 27, 2002. *Biomass Bioenergy* **29**: 375-398
- (2) 北海道開発局開発調査課 (2011) 平成 22 年度北海道に適した新たなバイオマス資源の導入促進事業報告書. 394 pp
- (3) 環境省・経済産業省 (2010) 温室効果ガス算定・報告マニュアル Ver. 3.1
- (4) 経済産業省 (2010) カーボンフットプリント共通原単位データベース（暫定版）ver. 2.01
- (5) MOLA-YUDEGO, B. (2011) Trends and productivity improvements from commercial willow plantations in Sweden during the period 1986-2000. *Biomass Bioenergy* **35**: 446-453
- (6) 農業環境技術研究所 (2003) LCA 手法を用いた農作物栽培の環境影響評価実施マニュアル. 農業環境技術研究所, つくば: 51 pp
- (7) SPINELLI, R. and HARTSOUGH, B. (2001) Extracting whole short rotation trees with a skidder and a front-end loader. *Biomass Bioenergy* **21**: 425-431
- (8) SPINELLI, R. and HARTSOUGH, B. (2006) Harvesting SRF poplar for pulpwood: Experience in the Pacific Northwest. *Biomass Bioenergy* **30**: 439-445
- (9) SPINELLI, R., CUCHET, E., and ROUX, P. (2007) A new feller-buncher for harvesting energy wood: Results from a European test programme. *Biomass Bioenergy* **31**: 205-210
- (10) SPINELLI, R., NATI, C., and MAGAGNOTTI, N. (2009) Using modified foragers to harvest short-rotation poplar plantations. *Biomass Bioenergy* **33**: 817-821
- (11) 田原聖隆・小島紀徳・稻葉敦・小木知子・横山伸也 (1998) 持続的な植林によるバイオマス発電の CO₂ 排出削減量の評価—LCA 的検討—. *日エネ誌* **77**: 403-409
- (12) YOSHIOKA, T. and MATSUMURA, Y. (2012) Feasibility of bioenergy utilization for sustainable agriculture: A case study on biomethanation and ethanol production in Thailand. *J. Jpn. Inst. Energy* **91**: 923-930
- (13) YOSHIOKA, T. and SAKAI, H. (2005) Amount and availability of forest biomass as an energy resource in a mountainous region in Japan: A GIS-based analysis. *Croat. J. For. Eng.* **26**: 59-70
- (14) YOSHIOKA, T., SUGIURA, K., and INOUE, K. (2012) Application of a sugarcane harvester for harvesting of willow trees aimed at short rotation forestry: An experimental case study in Japan. *Croat. J. For. Eng.* **33**: 5-14
- (15) YOSHIOKA, T., ARUGA, K., NITAMI, T., KOBAYASHI, H., and SAKAI, H. (2005) Energy and carbon dioxide (CO₂) balance of logging residues as alternative energy resources: System analysis based on the method of a life cycle inventory (LCI) analysis. *J. For. Res.* **10**: 125-134
- (16) YOSHIOKA, T., SAKURAI, R., ARUGA, K., SAKAI, H., KOBAYASHI, H., and INOUE, K. (2011) A GIS-based analysis on the relationship between the annual available amount and the procurement cost of forest biomass in a mountainous region in Japan. *Biomass Bioenergy* **35**: 4530-4537