特　集
太陽エネルギー利用技術と農林水産業の融合

日本の農業におけるバイオマスの利用技術

Biomass Utilization in Agriculture of Japan

薬師堂謙一 *

1．バイオマスのカスケード利用

バイオマス資源の利用に関しては，地球温暖化問題と絡めてエネルギー利用を中心にして論議されることが多いが，バイオマス資源は図１のように①医薬品，化粧品原料，②食品，③工業用原料，④飼料，⑤肥料，⑥エネルギー原料までの多用途に使用される．販売価格の高い物ほど需要は少なく，逆に，エネルギー利用の場合は，需要は多いが販売価格が低いという特徴がある．収集したバイオマス資源はこのように多段階に利用し，残さの出ないように使い尽くすことが重要である．バイオマスの収集を行う場合，エネルギー利用だけを対象にすると経費割れを起こしてしまう．そこで，バイオマスを収集する場合には，エネルギー利用する場合であっても，より付加価値の高い利用先を優先させ平均販売単価を上げる必要がある．なお，稲わらを収集する場合，飼料としての需要が多い地域では，購入単価の安いエネルギー用には原料が回らなくなる．これは，稲わら以外にも当てはまることで，バイオマス利用設備の設置にあたっては，バイオマス資源の賦存量だけでなく利用量も十分に把握しておく必要がある．また，石油価格が高騰すると各地で木チップの取り合いが始まり稼働率が落ちるなどの問題も発生しており，将来的な原料の安定確保の可能性も検討しておく必要がある．

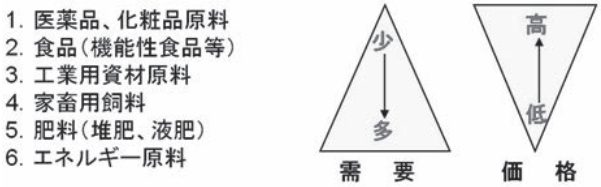

図１　バイオマス資源のカスケード利用の基本

2．バイオマスのエネルギー利用と利用可能なバイオマス

バイオマス資源のエネルギー利用の主な方式としては，①直接燃焼，②燃焼発電，③熱分解ガス化（発電を含む），④メタン発酵，⑤ガス化＋メタノール合成（エタノール，石油）及び，⑥バイオディーゼルが実用化されている．

また，エネルギー用に利用できるバイオマスの種類と購入価格を図２に示す．「逆有償」は建築廃材等の廃棄物系のバイオマスで，処理料金を払って処分してもらっているもので，利用することにより収益が得られるものである．「安価」は製材所の端材や，雑草や野草等のように，バイオマス自体のコストはタダで収集コストのみで利用できるもの，「高価」は林地残材のように収集のためのコストが高いものや，資源作物のように収集コストと栽培コストの両方がかかるものである．このため，「逆有償」と「安価」なバイオマス資源から利用され，「高価」な林地残材は電力の固定価格買取り制度（FIT）による

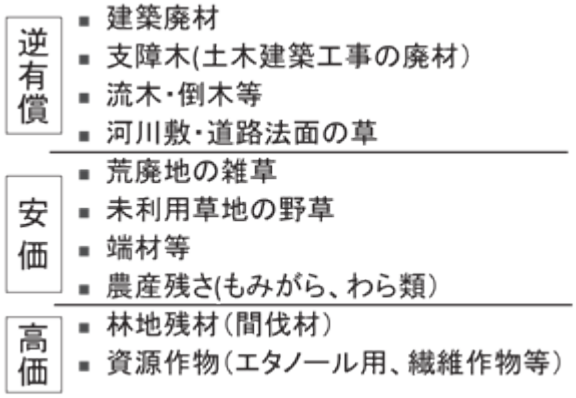

図２　バイオマスの種類と購入価格

* 国立研究開発法人　農業・食品産業技術総合研究機構

図3　エリアンサス

優遇制度で利用を進めるよう配慮されている．また，繊維系バイオマスでは，乾物収量が20～30t／haのジャイアントミスカンサスや，収量が30～40t／haのエリアンサス（図3）などが耕作放棄地の原野化防止対策として導入されており，この収穫物を燃料などに利用する形で普及が進められている．

3．農産系バイオマスの収集方法

農作物残さの特徴として，バイオマスとしての量は多いが広く薄く分布するという特徴があり，実際に利用しようとすると，収集や調製，貯蔵にコストと手間が多くかかるという問題がある．特に，農産系残さは発生時点では水分が多くそのままでは利用できない場合が多いため，圃場での乾燥や，収集後の乾燥処理が必要となる．残さ類が利用できるかどうかは，機械で収集できること，収集価格に見合った販売価格が得られるかどうかで決まる．したがって，低コストの収集態勢ができればエネルギーやバイオマスリファイナリー原料などへの利用拡大も可能となる．

水稲について見ると，稲わらは収穫時にコンバインにより圃場表面に畝状に残されるので，圃場で2～3回攪拌し乾燥させた後にロール状に梱包する（図4）．梱包した稲わらは，屋内貯蔵の場合はそのままトラックで搬送するが，屋外に貯蔵する場合には防水性のラップフィルムを3重に巻き，空き地等に2－3段積みにして保存する．ラップフィルムで巻いたものは1年以上貯蔵可能である．しかしながら，ラップフィルムで巻くためには3円／kg（乾物）の処理コストがかかり，廃フィルムの処理が必要となる．また，ラップフィルム自体が石油由来のものであるので，燃料化等の再利用が望ましい．

稲わらはこの様に収集に手間がかかるため，生産量が乾燥物として900万t／年あるにもかかわらず年々利用量が減少し，平成18年度は飼料用に93万t（10.3%），堆肥用に94万t（10.4%），加工用に6.5万t（0.7%）で，消極的利用である鋤込みが687万t（75.9%），焼却が24万t（2.7%）となっている（農林水産省ホームページ：国産稲わらの利用の促進について，http://www.maff.go.jp/j/chikusan/souti/lin/l_siryo/koudo/h200901/pdf/data04.pdf ）．利用量は25年間で約半分まで減少しており，稲作農家の規模拡大や兼業化の進展，高齢化による労力不足が主原因と考えられている．

稲わらは飼料として収集する場合，個別農家では数10t－100t程度の規模であり，大規模でも1,000t程度の収集規模である．バイオエタノール生産やバイオマスリファイナリーの場合には，遙かに大規模の収集形態をとる必要がある．現状での稲わらの収集・運搬・貯蔵コストは20円／kg（乾物）[1]以上かかっており，最大限に効率よく収集したとしても15円／kg（乾物）程度が限界値と試算[2)3)]された．内訳は圃場乾燥に3.1円／kg（乾物），集草・梱包・ラッピングに6.8円／kg（乾物），処理設備までの輸送コストが5.2円／kg（乾物）である．飼料利用の場合は，販売価格が40円／kg（乾物）以上のため，この収集コストでも問題ないが，エネルギーやリ

図4　稲わらの収集方式（東北研大谷）

ファイナリー用の原料として利用する場合は10円／kg（乾物）以下でないと事業化は困難であると判断される．そこで，収集コストを低減するため，稲わらの切断装置を改良した圧砕装置を開発し，圃場での稲わらの乾燥を促進して撹拌回数を削減することができた．また，貯蔵法についてはラップフィルムによる保管をやめ，別途コンクリート製のバンカーサイロを建設し，稲わらロールを3段積みにしてシートを掛けて保管する方式に変更して貯蔵コストの削減を検討した結果，乾燥稲わらの収集・貯蔵コストは，収集面積5,882haにおいて，収穫・収集に5.8円／kg（乾物），輸送に4.2円／kg（乾物），バンカーサイロ貯蔵に2.1円／kg（乾物）となり，合計12.1円／kg（乾物）と試算された．実際の稲わら収集においては，収益も維持しなければならないことから，収集した稲わらの1／3を飼料用として25円／kg（乾物）で出荷することとした．残りの2／3については，エタノールやリファイナリー用の発酵原料として，より低コストで収集できる水分30%程度の半乾燥稲わらで出荷することとし，収集用機械の整備費などを飼料用稲わらで経費負担してもらうとしてコスト試算を行った結果，収穫・収集に3.2円／kg(乾物)，輸送に1.7円／kg(乾物)，バンカーサイロ貯蔵に1.5円／kg(乾物)で合計6.44円／kg（乾物）でバイオマス原料用の稲わらが収集・貯蔵できるという試算結果が得られた．前述したように，バイオマス資源に対するエネルギー需要は大きいが，エネルギー用のみでは出荷単価が低く事業化が困難なため，より付加価値の高い飼料と併給することによりエネルギー等への利用が可能になると考えられる．

4．メタン発酵

メタン発酵は，家畜糞尿や生ごみ，食品残さなど高水分のバイオマス資源を，湿潤で酸素を遮断した嫌気状態で貯蔵することにより，有機物が分解し可燃性のメタンガスが得られる．発酵残さは，タンパク質が分解されるとアンモニアが生成されるため，即効性のアンモニア態窒素を多く含む液肥として利用できる．エネルギーの生産性は中程度であるが，高水分のバイオマスを利用できる点と，発酵残さを液肥として利用できる点が特徴である．逆に言うと，液肥の利用できない場所では，排水処理にコストがかさむことから採用できない処理方式である．

主に，北海道では乳牛糞尿ベースのメタン発酵システムが普及し，発酵残さは畑作や飼料作物用の液肥として活用されている．一方，九州地域では，特別栽培（窒素肥料の半分以上を有機系肥料で賄い，農薬使用量を慣行栽培の半分以下抑えた栽培法）の水稲栽培が普及している．特別栽培では油粕などを使用するため高コストとなっており，メタン発酵残さを水稲の元肥や追肥として使用する低コスト栽培のためメタン発酵システムが導入されたという経緯がある．特に，水稲はアンモニア態で窒素成分を吸収するため，アンモニア濃度が高まるメタン発酵と相性が良い．水稲に液肥を施用する場合は，前日に水田を落水しておき，40mm程度まで入水する間に3.5tの液肥を25分程度かけて施用する．なお，排水中に肥料成分が流れ出さないように施用後は水田の表面の水が一旦なくなるまで放置してから再度入水を開始するように配慮されている．

メタン発酵液肥の利用について，熊本県山鹿市バイオマスセンターでの生産コスト比較を表1に示

表1　メタン発酵液肥と活用した水稲・麦栽培のコスト比較

		バイオマス液肥	特別栽培（一発肥）	特別栽培（通常化成）
水稲	基肥	3.5t×900円（リン酸強化）	3袋×3,150円（新高有機中一発28）	2袋×2,230円（PKセーブ400） 1袋×1,180円（粒状ナタネ粕）
	追肥	1.5t×500円	1袋×1,180円（粒状ナタネ粕）	1袋×2,110円（燐加安454）
合　計		3,900円	10,630円	7,750円
麦	基肥	3.5t×500円		2袋×2,630円（BB特464）
	追肥	1.5t×500円		1袋×2,110円（燐加安454）
合　計		2,500円		7,370円

水稲の苗箱施肥を含まず　**液肥代には散布料を含む（山鹿市バイオマスセンター）**

注：平成22年度の水稲生産における全国平均の肥料代は9,388円／10a

液肥利用による肥料代の削減効果(4千円／10a以上)

す．平成22年度の水稲生産費での全国平均の肥料代は9,388円／10aであるが，メタン発酵液肥を使用した場合の生産費は3,900円／10aであり5,500円／10aの低コスト化が可能となっている．現在，水稲の収益性が低くなっているため，バイオマスの資源循環とエネルギー生産を両立できる処理方式として今後メタン発酵の普及が望まれる．なお，畑の場合は幅4m程度の塩ビ多孔管で表面施用する．畑の場合の発酵残さの施用量は3～5t／10a程度である．

新しいメタン発酵方式として，乾式高温メタン発酵方式が取り上げられ，農研機構中央農業研究センターと栗田工業株式会社らで農林水産省の先端プロとして研究開発が進められている．稲わらや雑草類，紙類などの繊維分もガス化できる発酵方式（図5, 6）で，福島県内の東京電力福島第一原子力発電所事故の被災地域で，業務用野菜などの作物残さや，道路法面の雑草，放牧地の牧草，生ごみや食品残さ，乳牛糞尿などを原料にして50℃以上の温度でメタン発酵させるものである．発酵残さはスクリュープレス式の固液分離機で分離し，固形分は堆肥化，液分は水稲や野菜類への液肥として利用する計画である．雑草類は現在殆ど焼却処分されているが，雑草類をメタン発酵に入れることにより，ガスの発生量が増加し，同時に残さの窒素分も高まるので，今後このようなメタン発酵方式も普及していくと考えられる．

図5　水稲へのメタン発酵液肥の流し込み施用

5．バイオマスの燃焼利用

バイオマスの直接燃焼は石油価格の高騰と共に普及が伸びてきている．農業分野における熱利用先は，

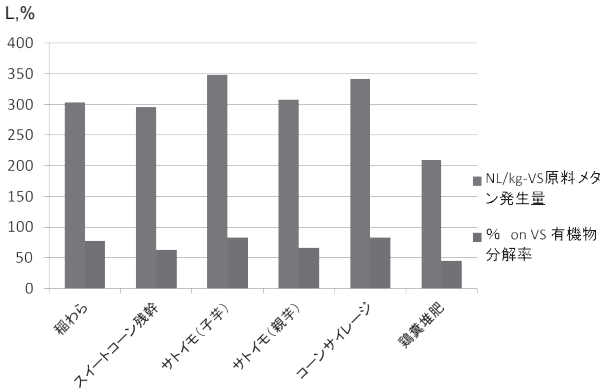

図7　乾式高温メタン発酵における材料別のガス発生量と有機物分解率

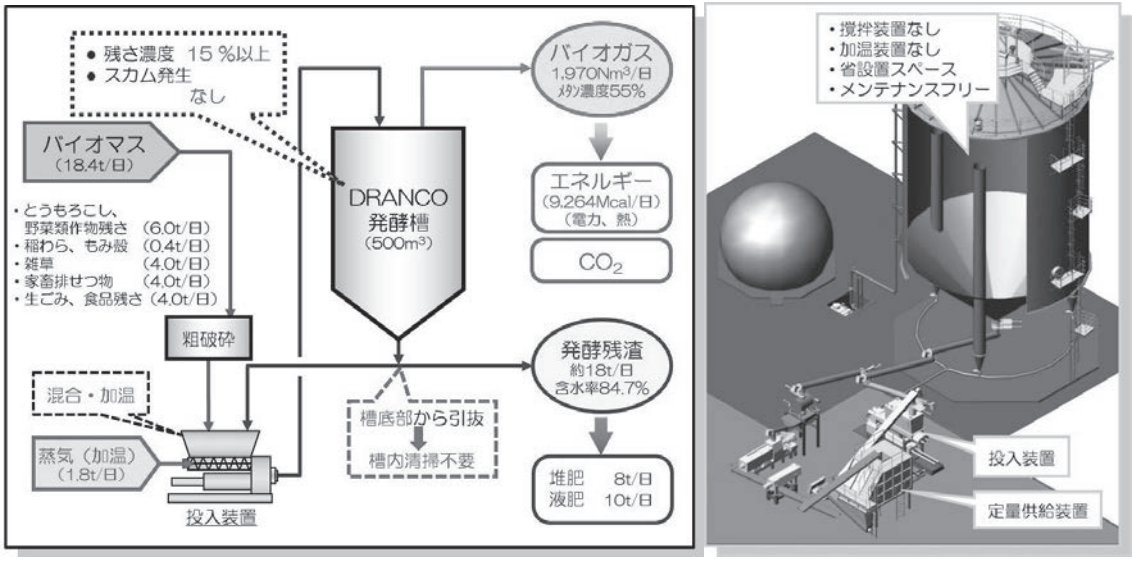

図6　乾式メタン発酵のシステムと材料のフロー図

①ハウス，畜舎等の暖房，②農作物の乾燥，③農作物の加工（加熱），④農作物の貯蔵（冷熱，吸収式冷凍機を利用）があるが，現状では多量の化石系エネルギーが使用されている．

ハウス用暖房機では木質ペレット用のものが実用化され普及している．また，薪を利用した安価なものも販売されている．市販されている木質ペレット暖房機は，新設する場合は熱出力116kWで暖房面積が10aと石油バーナーと同能力の設定となっている．石油暖房機の場合は，燃料タンクと温風暖房機の構成であるが，木質ペレット燃料の場合は，屋外貯蔵タンクとペレットの定量供給機，燃焼器及び熱交換器，灰ため装置，排気用サイクロン集塵機などと，組み合わせる機器が多くなり，構造も複雑となるため，一式で約600万円程度の設備費となる．このため，バイオマス燃料暖房機の燃料価格は，乾燥木材2kgで石油1Lと同熱量とした場合，石油価格に比べ20円／L程度安価でなければ導入メリットが発揮できないと考えられる．木質ペレットの農家への納入価格は現在70円程度であり，石油価格が90円／Lでないと新規導入は困難になってきている．

なお，木質ペレット暖房機は灰の少ない（灰分0.3～0.5%）木質燃料専用に設計されており，数日おきに人力で取り出すようになっている．繊維系バイオマスなどで灰の発生量が数％と木質の10倍以上になる原料を温室暖房に使用すると，灰ためが燃焼途中で満杯になってしまうため，自動の灰出し装置がついている機種でなければ使用できない．また，バイオマスを燃焼させる関係上，石油系燃料と異なり火力調整の幅が狭い，ON，OFFの急激な切り替えができないという問題点もある．

図8に木質ペレットの製造方式を示す．木質ペレットが一般に普及する前は，製材所のおがくずから製造していたため25円／kg程度と安価であったが，現在は切削チップを天日と火力により乾かした後に粉砕し，さらに成型処理をして生産されている．このため，乾燥した木質切削チップからペレットに加工するまでに10円／kg程度の加工費がかかり高コストになっている．乾燥した切削チップを燃料として利用できれば，木質燃料価格は石油換算で50円／Lとなるため，石油価格が70円／Lでも対抗できる代替燃料となりえる．切削チップではなくペレットを使う理由は，100kW級の小型の燃焼機で木質燃料の定量供給を行おうとする場合に，切削チップでは定量供給機のスクリューに詰まり燃焼が停止する危険性があるためであり，ペレットではこの詰まりが発生しないため利用されている．そこで，切削チップを篩分けし，詰まりの原因となる節や枝を取り除くとともに，詰まりにくい形状のスクリューフィーダーを開発した．さらに，より安価な原料を探索し，圧縮ボード原料用に廃棄物である木製パレットやコンクリート型枠用合板を荒く破砕したピンチップを，再度ハンマーミル式粉砕機で破砕する燃料化方式も明らかにした．

農研機構では，中央農研，九州沖縄農研，東北農研の3組織で116kW級のロータリーキルン式燃焼バーナー（図10）を導入し，木質バイオマスから，作物残さ，家畜糞堆肥，汚泥等の燃料化の試験を行っ

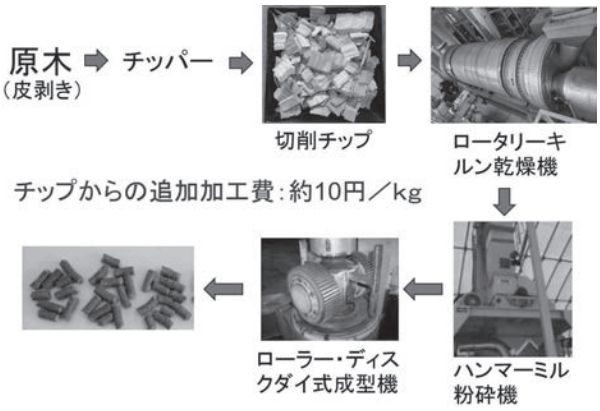

図8　木質ペレットの製造方法

図9　燃料用の木質チップ

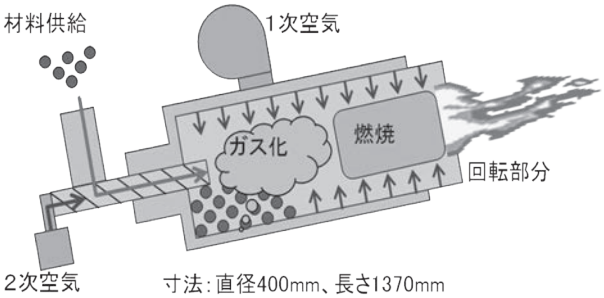

図10　ロータリーキルン式バーナーの構造

図 11　ロータリーキルン式バーナーによる温水暖房システム

ている．材料の供給量や送風量を適切に制御することにより，燃焼温度を調節することができ，800～900℃の燃焼温度で熔融するような家畜糞堆肥でも安定燃焼することができる．施設園芸ハウス用には，木質チップを燃料にし，温水熱交換器と貯湯タンクを接続し，ラジエーター式放熱器により温室暖房を行っている（図 11）．現在試験中であるが，複数の暖房条件に同時に対応することができ，貯湯タンクの蓄熱効果により暖房可能面積を増加させ設備費の低減化を図っている．

6．おわりに

バイオマスの利用は現状ではまだ低い水準にとどまっていると言わざるを得ない．今後，カスケード利用を進め，原料の産出側と処理利用側双方の技術革新により，バイオマスの利用拡大を図っていくことが重要になってきているといえる．木質バイオマスの利用に関しては，チップの静置式の通風乾燥設備の開発も行っているが，乾燥チップの供給業者を育成しなければ事業化につながらないという問題もあり，現在民間事業者等への働きかけも強めているところである．

参考文献

1）篠崎浩之, 1983．稲わらの圃場乾燥と収集作業．九州農業研究，45，189.
2）大谷隆二，2012．汎用コンバインを活用した稲わらの迅速乾燥・収集体系．農業機械学会誌，74（5），348-352.
3）加藤仁，金井源太，小林有一，竹倉憲弘，薬師堂謙一，2011．システムダイナミックス手法による稲わら回収モデルの研究．農作業研究，46（4），179-187.

略歴

薬師堂謙一（やくしどうけんいち）

国立研究開発法人　農業・食品産業技術総合研究機構
九州沖縄農業研究センター

（経歴）

昭和 53 年 4 月　農林省農事試験場に入省
平成 17 年 4 月　九州沖縄農業研究センターバイオマス利用研究チーム長
平成 20 年 4 月　中央農業研究センターバイオマス資源循環研究チーム長
平成 24 年 4 月　農研機構本部バイオマス研究統括コーディネーター
平成 29 年 4 月　現職