Technical Report

Long-term Field Storage Examination of Rice Straw for Bio-ethanol Production

Masato SHIMOYAMA^{*1}, Mai KANEKO^{*1}, Kouji YOSHIDA^{*1}, Kenji IMOU^{*2}, and Atsushi OSAKI^{*2}

(Received July 15, 2010)

バイオエタノール製造原料用稲わらの屋外長期保管試験に伴う形態変化について

下山真人^{*1}, 金子 舞^{*1}, 吉田浩爾^{*1}, 芋生憲司^{*2}, 大崎敦史^{*2}

Outdoor field storage of round-baled rice straw to suppress the cost of producing bio-ethanol from rice straw was investigated. Harvested rice straw was dried, collected, compressed and packed into round bales (rolls) by a round baler. Usually, the rolls are stored in a warehouse, or outdoors wrapped in a film coat. However, these storage costs push up the price of the bio-ethanol produced and reduce energy efficiency. To avoid this, outdoor field storage of rice straw rolls with or without film wrapping (wrapped rolls or non-wrapped rolls) was investigated in this study. The rolls were stored for about 9 months, from 19 December 2008 to 9 September 2009, taking into consideration the supply of rice straw for demonstrating a bio-ethanol pilot plant throughout the year. No significant increase of temperature in each roll was observed during the storage term, even though an increase was reported in previous studies. However, the straw should be stocked for other seasons, and it is important to grasp any problems during the storage period. In this study, no significant change was observed in the non-wrapped rolls throughout the term, suggesting that non-film wrapping round-baled rice straw can be stored in fields outdoors.

Key Words

Rice straw, Long-term storage, Bio-ethanol, Outdoor

1. 緒 言

輸送活動による化石燃料消費の増大により、温室効果ガス排出量は2004年に世界全体で63～64億トンに達して以降、増加し続けている¹⁾。また、資源の枯渇へ向けての価格高騰などから石油生産量は今後10年程度でピークを迎えることが予測されており²⁾、化石燃料は持続可能性という点において複数の問題を抱えている。再生可能資源であるバイオマスからの輸送用液体燃料生産は、上述の問題を解決する有効的な手段として、持続的な社会形成の観点から着目されている³⁾⁴⁾。一方、現在行われている糖質ならびにデンプン質系原料からのバイオエタノール生産は、2004年にアメリカでトウモロコシの総生産量のおよそ10%がバイオエタノールに使用されるなど、食料との競合の恐れが指摘されている⁵⁾⁶⁾。この競合を回避するため、近年では食料と競合しないセルロース系バイオマスからのエタノール生産が世界的に注目されており⁷⁾、わが

国においては主要作物である米の生産過程で副生産物的に発生する稲わらを用いて、バイオエタノールを生産する試みが各所で行われている⁸⁾。現在、国内で発生する稲わらの75%以上は鋤き込みなどで処分されており⁹⁾、余剰バイオマスとして有力な賦存量がある。この余剰の稲わらを用いて効率的にバイオエタノールを生産するためには、バイオエタノールへの変換技術もさることながら、原料確保に関する知見の集積が必要となる。特に連続的なバイオエタノール製造を行う上で、年間を通じた原料の安定供給は重要な課題である。このため、地域によっては年一度の収穫となる秋に集草した原料稲わらを、通年にわたり安価かつ低エネルギーで保管する技術の探索は大きな問題となっている。現在、バイオエタノール原料稲わらの集草・保管方法は、主に飼料用に開発された手法の応用が検討されている¹⁰⁾。飼料向けの稲わらは、ロールベアラーにて円筒形に集草された後、必要に応じてスト

* 1 The Japan Association of Rural Resource Recycling Solutions
5-34-4, shinbashi, minato-ku, Tokyo 105-0004, Japan

* 2 Graduate School of Agricultural and Life Sciences,
The University of Tokyo
1-1-1, Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657, Japan

* 1 (社)地域資源循環技術センター
〒105-0004 東京都港区新橋5丁目34番4号

* 2 東京大学大学院農学生命科学研究科
〒113-8657 東京都文京区弥生1-1-1

レッチフィルムが巻かれ、保管される。このストレッチフィルムによる梱包は、元来屋外にてサイレージ化を促す目的で行われ¹¹⁾、梱包を行わない場合は倉庫にて屋内保管とすることが主である。これは、飼料用には高品質の稲わらが求められることと、屋外に放置した場合、腐敗し発酵熱が生じる恐れがあること、また発熱に伴う火災の発生を恐れてのことである¹²⁾。屋外における保管に関しては、畜産飼料については検討がなされており、例えば、牧草（アルファルファ）における発酵熱の検討においては、18%（以下含水率の値は全て総量基準）の水分を含むもので50℃、含水率23%では90℃に上昇するという報告がある¹³⁾。一方、バイオエタノール原料などバイオマスとしての利用を目的とした集草・保管方法に関する研究はあまり行われていない。バイオエタノール原料用稲わらでは、畜産飼料で求められるような家畜の嗜好性を目的とした品質保持の必要がない一方で、大幅な保管コストの削減が求められる。倉庫保管は、倉庫使用に伴う保管コストの増大を招くことから、前述のような発酵熱による火災や極端な劣化の恐れがなければ屋外保管とすることが望ましい。以上のような経緯から、倉庫保管に代わるバイオエタノール原料の保管方法として、ストレッチフィルムを用いた屋外保管が近年着目されているが、ストレッチフィルム作業工程を挿入することで、稲わら1 kgあたり10円のコスト¹⁰⁾、および稲わら1 kgあたりおよそ5 gのCO₂排出が加算されるなどの報告もあり¹⁴⁾、議論の対象となっている。

そこで我々は、バイオエタノール原料向け稲わらの屋外保管に関する知見として、調査圃場乾燥後の稲わらをストレッチフィルムで密封する方法（以下ラッピングロールと呼ぶ）とストレッチフィルムを使用しない方法（以下ラップ無しロールと呼ぶ）の2通りに分け、各ロールバールについて屋外での保管試験を行ったのでここに報告する。

2. 保管試験の実施方法

2.1 稲わら及びロールバール保管条件

試験に供した稲わらは、茨城県下妻市の圃場で2008年9月に刈り取り後、およそ20 cmに裁断し、圃場にてテッダーレーキで2回反転し乾燥させ、10月に芯巻き式ロールベアラーにて集草し、ネットで結束してロールバールとしたものを用いた（Fig. 1）。ラッピングロールは、上記ロールバールにストレッチフィルム（昭和ボックス（株）製スノーベール®）を4重に巻いて、作製した。ラップ無しロールは、芯巻き方法にてロールバールを作製し、ポリエチレン製ネットで結束したものを用いた。稲わらロールは共に直径1.2 m、長さ1.5 m、重量約150 kgになるよう調整した。保管試験はラッピングロール、ラップ無しロール各3個、計6個について、下妻市に隣接した筑西市内協力農家の同一圃場内にて行った。試験圃場は裸地であったため、ロールバールは高さ20 cmの木製のパレットを敷き、その上に設置した（Fig. 1）。

2.2 測定

発酵熱の発生を観察するため、温度計測用データロガーと

Fig. 1 Outline of straw collection and storage process

(1) Rice straw was mixed twice to dry it and (2) gathered by tedder/rake on the paddy field after 10 days. (3) After drying, the straw was collected, compressed, and packed by a round baler. Each packed roll was banded with P.E. net. (4) Packed round bales were transferred to the test storage field. (5) Outdoor field storage was performed: six rolls were installed on wooden pallets; three of the rolls were film wrapped (3 white rolls to rear of photo) before placement, and the other three rolls were not wrapped (3 gray rolls to front of photo). The other rolls in the back of the photo were not used for this study

してサーモクロンSLタイプ（（株）KNラボラトリーズ）を各ロールバールの中心にセットした。また比較のため外気温の計測も行った。試験期間中、温度は2時間毎に計測した。

試験は、連続的なバイオエタノール製造のため、年間を通じて原料を供給し続けることを目的に、9月の稲刈り後、雨天が多かったため2ヶ月の圃場乾燥期間を設けたのち、2008年12月19日のロールバール作成から、翌年の稲刈り期に該当する2009年9月9日にかけて行った。保管試験終了後、ロールバールを解体し、内部の状態確認と温度計測データロガーの回収、稲わらの含水率測定を行った。含水率測定はステンレス製シャーレを用い、105℃に設定した三洋電機株式会社製MOV-212S乾熱減菌機を用いて恒量になるまで乾燥し、前後の重量測定をMettler Toledo（株）製XS-205DUで測定を行い、この際の重量減少より試料の湿重量あたりの含水率（総量基準）を算出する炉乾法にて実施した。

3. 試験結果

保管試験期間を通した外気温およびロールバールの中心温度について、1週間ごとの平均値の推移をFig. 2に示す。ロールバールの中心温度はほぼ外気温の平均と等しく、発酵による温度上昇は認められなかった。またラッピングロール、ラップ無しロールにおける温度変化の違いは認められなかった。保管試験終了時のロール中心部の含水率をTable 1に示す。ラッピングロール、ラップ無しロール共に、終了時の中心部分は含水率約12%であり、乾燥状態が保たれていた。ただし、ラッピングロールでは一部変色が認められ、この部分の含水率は18.0%とやや高かった。

3.1 ラップ無しロールの状態

ラップ無しロールでは、試験終了時、パレットに接地していたロール底部に変色が見られた（Fig. 3）。底部以外では、ロール外部及び内部ともに変色は認められなかった（Fig. 4）。このロール底部における変色は、パレットを敷くことにより地面との絶縁を図ったものの、地面からの水蒸気や降雨時の

Fig. 2 Change in temperature during storage. Solid line: inner temperature of wrapped roll, broken line: inner temperature of non-wrapped roll, dotted line: ambient temperature. No significant exothermic reactions were observed

Table 1 Water content (% wb) of stored round bales (rolls). Each roll was kept dry except the color changed part

Roll condition	Water content (% wb)
Wrapped roll	12.7%
Wrapped roll (color changed part)	18.0%
Non-wrapped roll	11.5%

Fig. 3 Color change was observed at the bottom of non-wrapped rolls

Fig. 4 A: Side part of non-wrapped roll, B: Unpacked non-wrapped roll. Color change was not observed

跳ね返りの影響が避けられなかったためと推測された。

3.2 ラッピングロールの状態

試験終了時のラッピングロールでは、側面に変色が見られ

Fig. 5 Color changed side of wrapped roll (after stripping the wrapping film). Some bryophyte (arrows in B) and fungi (arrow in C) was also observed

Fig. 6 Unpacked wrapped roll. Color change was not observed on the inner part of the wrapped roll

Fig. 7 Time course of glucose production from color changed rice straw (black cross), and control rice straw (white circle)

た (Fig. 5-A 上部)。また、一部コケ類の発生 (Fig. 5-B) や、ロール側面中心部付近の圧縮密度が低い部分におけるカビの発生 (Fig. 5-C) も確認された。しかし、ロール内部での変色やカビ等の発生は認められなかった (Fig. 6)。なお、変色等の見られた稲わらについて前処理後、糖化試験を実施した結果、変性が見られた部位からもグルコースが生成し、バイオエタノール原料として利用可能である事が示唆された (Fig. 7)。ラップサイレージでは開封後稲わらが空気と接触することにより、酵母や糸状菌などの好気性菌が増殖し、発熱を伴った二次発酵が稲わらの変敗を引き起こすことが知られている¹⁵⁾。本試験では、温度ロガーの挿入やサンプリングのための開口部を設けていたものの、外気との接触による変色などの影響はロール表面の限られた範囲のみで観察された。これは、ロール前に乾燥工程を設け、ラップサイレージに比べ稲わらの含

水率が低い状態でラッピングを行ったためと考えられる。

4. 結 論

本試験では、芯巻き方法によりロールペールを作製し、ラッピングロールおよびラップ無しロールについてそれぞれ屋外に長期間保管し、比較を行った。試験は年間を通じて原料を供給し続けることを目的に、9月の稲刈り後2ヶ月の圃場乾燥期間を設けたのち、平成20年12月19日から平成21年9月9日までの約9ヶ月間行った。

本試験において、当初予想していたような全体的な腐敗や、発酵による発熱などの問題は認められなかった。通常、ラップサイレージでは発酵による温度上昇が起こるが¹⁶⁾、今回用いた稲わらは、ロール調整時に含水率15%以下にまで乾燥していたことにより発酵が進まず、良好な保管状態が保たれたものと考えられる。なお、既往の研究では含水率13%においても短期間50℃まで上昇している¹³⁾。この温度上昇が本試験において観察されなかったのは、主に次の二点によるものと考えられる。第一に、既往の研究で用いられたロールペールのサイズは350 kg～624 kgであり、これと比して本試験で用いたロールペールは約150 kgと小型で、発酵熱の蓄積が抑制された点。第二に、稲わらの易可溶性有機物は11.4%であり、既往の研究で用いられた牧草（アルファルファ）の28.5～38.9%に比べ¹⁷⁾、発酵による発熱が起こりにくい状況にあった点である。

また、ラップ無しロールでは目視によるカビ、コケ類の発生は見られず、ラッピングロールに比べ、より良好な状態が保たれていたと考えられる。このことは、稲わら保管コスト及び化石資源依存度低減の観点からも有意義な結果であると言えよう。

調査した茨城県筑西市では、冬季に乾燥した季節風が吹くことから、稲わらロールペールの屋外保管にとって有利な条件であったといえる。

筑西市に隣接する気象庁下妻観測点の気象データより、本調査地域の降水量および日照時間は、ともに年間を通して大きな変化は見られなかった（Fig. 8）。一方で、本調査による外気温の変遷と（Fig. 2）、近隣に位置する水戸およびつくば気象台の湿度の変遷データより（Fig. 9）、6月1日から試験終

Fig. 8 Precipitation and hours of sunlight at Shimotsuma observation point during storage. Black bar indicates precipitation, and gray bar indicates hours of sunlight

Fig. 9 Change of relative humidity observed in Tsukuba(dotted line) and Mito(black line) local meteorological observatories during storage

了の9月9日までの夏季に該当する期間、気象庁が湿潤な空気と判断する湿度80%を超える日が調査日数の半数を超えたこと（試験日数101日あたり55日（水戸）、68日（つくば））、および同期間の外気温について、気象庁が夏日と定義する25℃以上の日数が半数を超えたことから（101日あたり51日¹⁸⁾、本調査地域における夏季は高温多湿な環境にあったと考えられる。ラップ無しロールにおいては、このような高温多湿環境下でも、屋外保管における大きな問題は認められなかった。

また、茨城・栃木県におけるバイオエタノール生産用稲わらの発生密度はそれぞれ37.8, 30.7 t/km²であり、収集半径を30 kmとするとおよそ年間2万kLのエタノールが製造可能とされている¹⁰⁾。よって、2万kLのエタノール生産に必要な稲わらをエタノール収率0.3 L/kgとして算出すると、重量にしておよそ6.6万tであり、この6.6万tの稲わらの保管には、稲わらロールの積み上げ高さを5 m、間隙率0.3、かさ密度150 kg/m³、乾物率0.85として算出すると、385 m×385 mでおよそ15 haの広大な面積が必要となる。このことから、考えられる稲わらロールの保管方法としては、保管面積の制約上、前述の試算のように密に詰め、数段に重ねることが予想されるが、本試験ではロールは50 cm～1 mほどの間隔をもって設置されており、また積み重ねはしていない。そのため、通風が確保され、重なり部分における雨水の残留などの問題が生じる事はなかった。今後、更にこうした実際の保管条件を反映させた屋外試験が望まれる。

謝 辞

この試験は、農林水産省 ソフトセルロース利活用推進事業の業務の一環として行われました。また、(有)倉持牧場 代表倉持秀男様には、保管場所の提供や農機を用いた作業など、多大なるご協力を賜りました。

文 献：References

- 1) Ribeiro, S. K., Kobayashi, S., IPCC AR4 Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, (Cambridge Univ. Press), Chapter 5, p. 333(2007)
- 2) Tsoskounoglou, M., Ayerides, G., Tritopoulou, E., *Energy Policy*,

- 36, 3797(2008)
- 3) 五十嵐泰夫, 斉木隆, 稲わら等バイオマスからのエタノール生産, ((社)地域資源循環技術センター), p. 2(2008): Igarashi, Y., Saiki, T., Inawara-tou Biomass Karano Ethanol Seisan, (JARUS), p. 2(2008)
 - 4) 横山伸也, 芋生憲司, バイオマスエネルギー, (森北出版), p. 89(2009): Yokoyama, S., Imou, K., Biomass Energy, (Morikita Shuppan), p. 89(2009)
 - 5) レスター・R・ブラウン, 福岡克也(訳), フードセキュリティ-誰が世界を養うのか-, (ワールドウォッチジャパン), p. 297(2006): Brown, L. R., Outgrowing The Earth: The Food Security Challenge in an Age of Falling Water Tables and Rising Temperatures, (W. W. Norton & Co. Inc.), p. 297(2004)
 - 6) 久保田宏, 松田智, 幻想のバイオ燃料, (日刊工業新聞社), p. 68(2009): Kubo, H., Matuda, S., Gensou no Bio-nenryou, (Nikkankougyou Sinbunsha), p. 68 (2009)
 - 7) Dipardo, J., Outlook for Biomass Ethanol Production and Demand, (Energy Information Administration), p. 1 (2004)
 - 8) 斉木隆, バイオエタノール通信, (地域資源循環技術センター), No. 2, p. 32(2009): Saiki, T., Bio-Ethanol Tsushin, (JARUS), No. 2, p. 32 (2009)
 - 9) 農林水産省, 飼料をめぐる情勢, (2008): Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, Shiryô Wo Meguru Jousei, (2008)
 - 10) 佐賀清崇, 芋生憲司, 横山伸也, 藤本真司, 柳田高志, 美濃輪智朗, エネルギー・資源学会論文誌, 29(6), 8(2008): Saga, K., Imou, K., Yokoyama, S., Fujimoto, S., Yanagida, T., Minowa, T., *Journal of Japan Society of Energy and Resources*, 29(6), 8(2008)
 - 11) 萬田富治, ラップサイレージの調整と利用, (酪農総合研究所), p. 29(1999): Manda, T., Wrap Silage No Chousei To Riyô, (Research & Development Center For Dairy Farming), p. 29(1999)
 - 12) Kennedy, M., *Australasian Biotechnology*, 7(2), 104(1997)
 - 13) Baxter, H. D., *J. Dairy. Sci.*, 69, 1847(1986)
 - 14) 昔農英夫, 芋生憲司, 横山伸也, 農業環境工学関連学会2009年合同大会講演要旨集, E42(2009): Sekino, H., Imou, K., Yokoyama, S., Joint Conference on Environmental Engineering in Agriculture 2009 Kouen-Youshi-shuu, E42(2009)
 - 15) 斉藤健一, 米本貞夫, 千葉畜産研報, 2, 9(2002): Saitou, K., Yonemoto, S., *Bulletin of the Chiba Prefectural Livestock Research Center*, 2, 9(2002)
 - 16) 糸川信弘, 本田善文, 小林亮英, 日草誌, 40(4), 478(1995): Itokawa, N., Honda, Y., Kobayashi, A., *Nihon Souchi Gakkai Shi*, 40(4), 478(1995)
 - 17) 阿部亮, 名久井忠, 日草誌, 25(3), 231(1979): Abe, A., Nakui, T., *Nihon Souchi Gakkai Shi*, 25(3), 231(1979)
 - 18) 気象庁が天気予報等で用いる予報用語, http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yougo_hp/mokuji.html (2010/9/24 参照): Meteorological term that the Meteorological Agency uses for the weather forecast
-