研究論文

下水汚泥と稲わらの混合嫌気性消化によるバイオガス 生産に向けた稲わら収集・運搬体系の検討 —新潟県長岡地域における事例—

渋川 洋・井上明大・姫野修司・小松俊哉
長岡技術科学大学 環境・建設系

Examination of Rice Straw Collection and Transportation Systems for
the Production of Biogas by Co-digestion with Sewage Sludge :
A Case Study of the Nagaoka Region in Niigata Prefecture

Hiroshi SHIBUKAWA, Akihiro INOUE, Shuji HIMENO and Toshiya KOMATSU
Dept. of Civil and Environmental Engineering, Nagaoka University of Technology

要旨

長岡浄化センターでの下水汚泥稲わら混合嫌気性消化によるバイオガス生産に必要な稲わらを、センター周辺水田から供給する収集・運搬体系を確立することを目的に、現地調査および現地試験を行った。その結果、稲わら収集可能な時期は9~10月で、収集可能回数は概ね6~8回であった。また、収穫後の降雨の影響により、稲わら収量は大きく異なった。収穫後に多量の降雨暴露を経た水田の稲わら収量は、水稻収穫直後の68%であった。これは主として、収穫後の降雨により一部の稲わらが地面と密着し、反転できなかったことによる。収集・運搬の最小単位は作業員3名で構成できた。収集日数2日間では、最大収集体系（梱包作業時間を最大にする体系）の収集量が最も多く、最小単位当たり23~24Mg/回（水分20%換算）であった。一方、収集日数3日間以上では、最少農機体系（最小単位の持つ農機各1台の体系）の稲わら収集量が最も多く、収集日数3

日間で39.2Mg/回、同4日間で58.8Mg/回であった。これは、最少農機体系では集草、梱包作業と次の収集箇所の反転作業を同時に行えたことによる。収集日数2日間、収集回数7回（9月3回、10月4回）を仮定した場合、1916Mg（水分20%換算）の稲わら収集・運搬に必要な延べ作業員数および延べ農機数は、最少農機体系では、42人、14~15台、最大収集体系では36人、レーキは24台、その他の農機は12~13台、反転2回体系では57人、19~20台と予測された。

キーワード

稲わら、下水汚泥、混合嫌気性消化、収集・運搬体系、バイオガス

1. 緒言

下水道分野では、下水汚泥の嫌気性消化槽に他のバイオマスも投入して消化ガス（バイオガス）生成量の増大を図る混合嫌気性消化法が注目されている（野池 2004）。混合嫌気消化法の採用は、既存インフラの有効活用により全体でのコスト増加を抑えられる等の種々のメリットを有する。日本有数の稲作地帯である新潟県の稲わら産出量は、年間約650Ggにも及んでおり、（新潟県農林水産部 2004）、当地域における混合嫌気性消化に有望な未利用バイオマス資源として注目されている。

平成 25 年 7 月 6 日受付
平成 26 年 4 月 26 日受理
Corresponding author
小松俊哉 Toshiya KOMATSU
〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1
1603-1, Kamitomiokamachi, Nagaoka, Niigata, 940-2188, Japan
E-mail : koma@nagaokaut.ac.jp

る。本研究グループでは、信濃川下流流域下水道長岡浄化センター（以下、浄化センターと略記）を想定したパイロットスケールでの稲わらと下水汚泥の混合嫌気性消化試験（下水汚泥と稲わらの固形分混合比 2:1）を行ってきた（高松ら 2012, 井上ら 2012, 2013, 小松ら 2013）。その結果、固形分基準で下水汚泥の 50% の稲わらを下水汚泥に添加した場合、稲わら 1 Mg から 239 Nm³ のバイオガス（メタングス 132 Nm³ 含有）生産が可能なこと、浄化センターでの常時混合嫌気性消化には、乾物換算で 1 日 4.2 Mg, 年間で 1533 Mg の稲わらが必要であること等を明らかにした（井上ら 2012, 小松ら 2013）。浄化センターでは、消化残渣（脱水ケーキ）を乾燥、固形化し、セメント原料やコンポストとして処理している。また、浄化センターは乾燥設備を有することから、消化残渣の乾燥汚泥燃料利用も期待されている。浄化センターは水田地帯に囲まれており、稲わらの収集・運搬に適した立地条件にある。しかし、当地域における水稻収穫から降雪までの期間は短く、かつ、秋季の降雨も多いため、稲わら収集・運搬が可能な期間は他地域に比べてかなり短い（気象庁 2013, 加藤ら 2011）。このため、短期間に 1533 Mg（乾物換算）の稲わらを収集・運搬し、メタングス生産に供するには、浄化センター周辺水田での稲わら収集、および浄化センターへの稲わら運搬からなる一貫体系の検討が必要である。また、浄化センター周辺の稲わら収集者（以下、周辺収集者と略記）による本体系の検証が不可欠である。

そこで、本研究では、浄化センター周辺の水田、および周辺収集者を対象とし、2012 年 9 月に稲わら収集の実態把握（以下、現地調査と略記）を行い、現場レベルの作業能率や作業時間を把握した。さらに、現地調査の結果を基に、同年 10 月に浄化センターへの運搬を組み込んだ稲わら収集・運搬現地試験（以下、現地試験と略記）、および異なる

収集時期の稲わら有機物含量の測定を行った。

これらの調査および試験から当地域におけるバイオガス生産に適した稲わら収集・運搬体系を検証した結果、いくつかの知見を得たので報告する。

2. 調査および試験方法

1) 浄化センター周辺における稲わら収集の実状把握および現地調査

(1) 稲わら収集の実状把握

農林統計および市農政課への聴き取りから、浄化センター周辺における 1533 Mg（乾物換算）の稲わら収集に必要な水田面積を推定した。また、気象統計（気象庁 2013）から、稲わら収集可能な期間および回数を推定した。

(2) 稲わら収集現地調査

2012 年 9 月に、毎年稲わら収集を行っている周辺収集者 2 名（以下、周辺収集者 X）の全収集日に調査を行い、反転、集草および梱包作業の作業能率および稲わら収集面積を計測した。収集に使用した農業機械を表 1 に示す。周辺収集者 X の稲わら収集は 2 人（以下、作業 A、B）で、作業 A は反転と集草を、作業 B は梱包に従事した。稲わら水分が比較的少ない場合は、午前中に反転作業、午後から集草および梱包作業を行い 1 日で収集の全工程は完了した。稲わら水分が多い場合は、1 日目に反転作業を行い、2 日目に 2 回目の反転作業および集草、梱包作業を行った。また、稲わらロール（以下、ロールと略記）は水田にてロール購入者に直接引き取られるため、運搬プロセスは含まなかった。また、自脱コンバインによる水稻収穫時に、稲わらを約 10 cm に切断し水田に排出した。稲わら収量は水田毎のロール数と面積から求め、1 ロール重量はランダムに選択した 4 ロールの平均値から算出した。

表 1 実態調査に使用した農業機械の概要

名称	型式	アタッチメント			トラクタ		作業	作業者
		作業幅 (m)	作業速度 (km/h)	梱包サイズ (直径 m × 高さ m)	種別	馬力 (kW)		
テッダ	STAR 社 MGT5510 (4 ロータ)	5.5	6~10	—	ホイール型	22.1 (30PS)	反転	A
レーキ	STAR 社 MGR2630 (1 ロータ)	2.6	4~8	—	ホイール型	22.6 (32PS)	集草	A
ロールベアラ	STAR 社 TRB2210 (トワイン梱包)	1.7	4~8	1.0 × 1.0	セミクローラ型	22.1 (30PS)	梱包	B

2) 稲わら収集・運搬現地試験

前述の現地調査は運搬プロセスを含まなかったため、収集・運搬の適正な作業数と農業機械数の最小単位（以下、最小単位と略記）について十分検討できなかった。そこで、2012年10月11日から12日に長岡市福道町および福戸町の水田にて、運搬プロセスを含めた現地試験を実施した。稲わらの品種はコシヒカリで、水稻収穫時に自脱コンバインでわら長約10cmに切断した。試験面積は5.0ha、筆数は17筆とした。1筆面積は平均29.6aで、16筆は25～35aであった。水田は1本の畦道を挟んだ両脇に位置し、水田と浄化センターとの距離は4.9kmであった。現地試験に使用した農業機械を表2に示す。稲わらの収集・運搬は、周辺収集者Xから3人（作業者A, B, C）、別の周辺収集者Y（作業者D）および4tトラック運転手の計5人が従事した。1日目は全水田の反転作業と一部水田の集草作業を行い（作業者A）、2日目は残り水田の集草作業（作業者A）および全水田の梱包作業（作業者B）を同時に開始した。4tトラックはロール20個積載（作業者D）後、水田を出発し、浄化センターの貯蔵予定地でロールを積降ろした（作業者C）。試験当日に翌日の天候不良が予想されたため、露天の貯蔵予定地への全ロール運搬は困難であった。そこで、水田―浄化センター間の運搬および積出の所要時間の計測は1回にとどめ、この所要時間を2回目以降の運搬・積出所要時間に用いた。各作業の労働時間は開始終了時刻から、作業時間は労働時間から水田間の移動時間を差し引いてそれぞれ求めた。作業者、運転手とも12時から30分間休憩した。稲わら収量は現地調査と同様の方法で算出した。

3) 異なる収集時期の稲わら有機物含量の検討

2012年9月17日、10月11日および10月30日に現地試験水田から稲わら（以下、直後わら、3週後わら、6週後わらと略記）を採取し、風乾後、長さ3～6cmに裁断、調製した稲わら約2gを100℃で24時間乾燥し、TS（Total Solid 全固形分）を測定した。TS測定後の試料を600℃で1時間加熱し灰分を測定し、TSから灰分を差し引いてVS（Volatile Solid 強熱減量）を算出した。

3. 結果および考察

1) 浄化センター周辺における稲わら収集の実状把握および現地調査

(1) 稲わら収集の実状把握

① 必要水田面積

本県の年間稲わら生産量650Gg（新潟県農林水産部2004）と年間水稲作付面積12万ha（北陸農政局2004）から、稲わら収量は5.4Mg/ha（水分20%と仮定）と推計され、混合嫌気性消化に必要な1916Mg（水分20%、乾物換算1533Mg）の稲わら確保には、355haの水田面積が必要であった。また、市農政課への聴き取りから、浄化センターを中心とする半径2km円内の水田面積はおおよそ400haであり、この区域内で必要稲わら量は十分確保できた。

また、浄化センターには空間の余裕があるため、ロールを三段積み（高さ3m）にし、貯蔵場所を数ヶ所に分散させれば、1年分のロールは浄化センター内で貯蔵可能であった。ロールの貯蔵には、簡易な倉庫、ブルーシート、ラップフィルム等の利用が考えられる。これらの貯蔵方法には、コスト、労力、長期のロール品質保持能力等の点で一長一短であるため、今後は最適な貯蔵方法の

表2 現地試験に使用した農業機械の概要

名称	型式	アタッチメント			トラクタ		作業	作業者
		作業幅 (m)	作業速度 (km/h)	梱包サイズ (直径m×高さm)	種別	馬力 (kW)		
テッダ	STAR MGT5510 (4ロータ)	5.5	6～10	—	ホイール型	22.1 (30PS)	反転	A
レーキ	STAR MGR2630 (1ロータ)	2.6	4～8	—	ホイール型	22.6 (32PS)	集草	A
ロールベアラ	STAR TRB2210 (トワイン梱包)	1.7	4～8	1.0×1.0	セミクローラ型	22.1 (30PS)	梱包	B
ロールクラブ	STAR MGB1020	—	—	—	ホイール型	42.1 (56PS)	積込	D
ロールクラブ	クボタ RG1517	—	—	—	セミクローラ型	20.1 (28PS)	積出	C

検討が必要である。

② 稲わら収集可能な期間および回数

浄化センター周辺では、稲刈りは9月上旬から、降雪は11月末(気象庁2013)からそれぞれ始まるため、稲わら収集可能な時期は9月中旬から11月迄とみられた。また、風乾が不十分なロールは腐敗しやすく、家畜用の飼料や敷料としての利用が難しい。このため、稲わら収集の前日は無降雨または少量の降雨、かつ収集日数2日間は殆ど無降雨の条件下で、収集可能になると考える。そこで、収集前日降水量2mm/d以下、かつ収集日数2日間は無降雨となる回数を稲わら収集可能回数(以下、収集可能回数と略記)とし、これを直近10年間(2003～2012年)の気象統計の降水量から推定した。9月および10月は収集可能回数3～4回の年が大半を占めたのに対し、11月は1回以下の年が殆どであったことから、現実的に稲わら収集が可能な時期は9～10月と判断した(気象庁2013)。直近10年では、収集可能回数6～8回の年が7年を占めた。

(2) 稲わら収集現地調査

表3に現地調査における周辺収集者X(2名)の稲わら収量および各作業能率の平均値を示す。現地調査の収集回数は、水稻早生品種こしいぶき1回、水稻中生品種コシヒカリ4回の計5回で、その総水田筆数は31、平均1筆面積は32.1a(最大77a、最小14a)であった。また25筆は25～35aで1筆面積は概ね揃っていた。水田2～3筆の集草作業終了後に梱包作業を開始した。最後あるいは最後から2番目の収集水田では、同一水田内で集草作業と梱包作業が同時進行したものの、梱包作業の待機時間は殆ど生じなかった。ロールは直径1m、高さ1mで、重量は平均170kg(水分20.0%)であった。稲わら収量はコシヒカリがこしいぶきを上回った。これは、こしいぶきはコシヒカリに比べて稈長が短く(星ら2002)、わらが少ないことによった。また、こしいぶきにおける集草と梱

包の作業能率は、コシヒカリに比べて高かった。これは主として、ロールベアに最適な集草列の幅と高さがあり、稲わら収量が多くなるほど水田1筆の集草列は長くなったためと考える。一方、反転作業では、稲わら分布の厚薄にかかわらず一定の走行速度で作業を行えたと考える。

新潟県の稲刈り最盛期は9月23～24日(農林水産省2012)で、本県的水稻主力品種コシヒカリの作付率は74%、早生品種こしいぶきの作付率は17%である(新潟県2012)。このため、浄化センター周辺では9月後半に多量の稲わらが発生する。こしいぶきはコシヒカリよりも成熟期が7～9日早く(星ら2002)、9月前半の稲わら収量増加に大きく貢献できる。また、稲刈り前は水稻の吸水により、降雨後比較的速やかに地耐力が回復するのに対し、水稻収穫後では、暗渠および地下浸透による排水のみとなり、地耐力の回復は遅くなる。このことは収集回数の減少に繋がるため、更なる水稻収穫時期の分散は稲わら収量向上に効果的と考える。

2) 稲わら収集・運搬現地試験

表4に現地試験における作業面積、労働・作業時間、作業能率および収量を示す。作業面積5haの場合、稲わら収集・運搬は1.5日で完了した。収集した稲わらは17.7Mg(水分20%換算、乾物換算14.2Mg)、平均ロール重量は170kg(水分19.7%)、収量は3.51Mg/haであった。全水田において、稲わらの一部は地面に張り付き、反転、集草できなかった。これは、稲刈り後、稲わらが多量の降雨に暴露されたためで、試験4週間前から試験当日までの長岡地域の降水量は134mmと多かった(気象庁2013)。1日目の作業は13時32分から日没直前の17時31分まで行った。このため1日目の集草面積は3筆0.9haに留まった。2日目の作業は9時過ぎから集草作業と梱包作業をほぼ同時に開始し、積込作業は10時15分に開始した。現

表3 現地調査における稲わら収量および各作業能率の平均値

品種	収集回数	収集面積 (ha)	収量 (Mg/ha)	作業能率 (h/ha)			水田筆数	平均1筆面積 (a)
				反転	集草	梱包		
こしいぶき	1	2.86	4.46	0.35	1.63	1.64	31	32.1
コシヒカリ	4	7.10	5.14 (0.40)	0.33 (0.02)	1.81 (0.22)	1.70 (0.18)		

注) 表中の括弧内の数値は標準偏差を表す

表 4 現地試験における作業面積、労働・作業時間、作業効率および収量

作業日	作業	作業者	作業面積 (ha)	開始時刻	終了時刻	労働時間 (h)	作業時間 (h)	作業効率 (h/ha)	収量 (Mg/ha)	収分量 (Mg)
1日目	反転	A	5.0	13:23	15:26	2.05	1.67	0.33	3.51	17.7
	集草	A	0.9	16:07	17:31	1.40	1.25	1.36		
2日目	集草	A	4.1	9:12	15:10	5.97	5.15	1.26		
	梱包	B	5.0	9:05	15:27	6.37	4.87	0.97		
	積込	D	—	10:15	15:46	5.02	2.58	—		
	運搬往	運転手	—	11:03	15:56	4.88	0.83	—		
	積降	C	—	11:13	16:07	4.90	0.92	—		
	運搬復	運転手	—	11:24	16:17	—	0.83	—		

注 1) 斜字体の時刻は予測時刻を表す。

注 2) 運搬往復は 1 人の運転手が行ったため、運搬往に合算した。

注 3) 2 日目は 0.5 h の休憩を考慮した。

注 4) 積込の労働時間は休憩時間を差し引いた時間を表す。

地調査の結果から、梱包作業に待機時間が生じないよう、可能な限り集草作業を先行させたが、集草作業の作業効率は梱包作業に比べて約 0.3 h/ha 低く、16、17 筆の水田にて梱包作業は集草作業に追いつき、0.55 時間の待機時間が生じた。また、積込作業では 2.44 時間、運搬では 3.22 時間、積降作業では 3.98 時間の待機時間がそれぞれ生じた。積込、運搬および積降は同時に行われないこと、および 3 作業の作業時間の合計は 5.16 時間であることから、運搬プロセスは 1 人で担えることがわかった。従って、最小単位は、作業者 3 人、農業機械はテッタ、レーキ、ロールベアラ、ロールグラブおよび 4 t トラックが各 1 台、加えて浄化センターに常駐する積降用ロールグラブ 1 台となった。

3) 稲わら収集時期による稲わら収量および作業効率の比較

図 1 に現地調査および現地試験における水田毎の稲わら収量分布を示す。現地調査（コシヒカリ）と現地試験との収量比は 1.46 であった（表 3、4）。現地試験、現地調査とも水田毎の稲わら収量の変異は大きかったものの、両者の第 1 四分点から第 3 四分点の範囲には明らかな差を認めた。また、現地調査（コシヒカリ）、現地試験とも同一水稻品種であり、両者の面積当たり稲わら量の差は小さかったと考える。このことから、水稻収穫から稲わら収集までの、降雨暴露による稲わらと地表の密着が、現地試験の稲わら収量を相対的に低くしたことが示唆された。図 2 に現地調査（コシヒカリ）および現地試験における水田毎の反転・集草・

図 1 現地調査（コシヒカリ）および現地試験における水田毎の稲わら収量分布

図 2 現地調査（コシヒカリ）および現地試験における水田毎の反転・集草・梱包の作業効率

梱包の作業効率を示す。現地調査と現地試験における反転の作業効率は同等であったが、集草および梱包の作業効率は、現地試験の方が高かった。これは、主として 9 月に比べて 10 月の稲わら収量は低く、集草列の長さが相対的に短くなった影

響と考える。

以上のことから、水稻収穫から稲わら収集までの降水が、稲わら収量および収集の作業能率に大きく影響することが明らかになり、収集時期別の収集・運搬体系を検討する必要性が示唆された。

4) 稲わら収集時期別の収集・運搬体系

現地試験から、梱包作業が集草作業に追いつかず、梱包作業時間を長く確保することが、稲わら収量/回の増加に重要なことが示された。また前項から、収集時期による稲わら収量および収集作業効率の違いが明らかになった。そこで、最大収集体系、最少農機体系および反転2回体系の3体系について検討した。表5に3体系の概要を示す。最大収集体系はレーキ2台で集草作業を先行させることにより、梱包作業時間を最大にして、収量/回を最大にする体系である。最少農機体系は、必要農業機械数/最小単位を最少にし、農業機械コストを最小に抑える体系である。また、反転2回体系は、降雨による稲わらの濡れが著しく、2回の反転作業が必要な水田に対処する体系である。この3体系の労働時間/回および稲わら収量/回等を、次の方法により収集時期別に予測した。9月の予測には現地調査（コシヒカリ）の稲わら収量および作業能率を、10月は現地試験のそれを用いた（表3、4）。1日目は13時、2日目は9時に作業開始する設定とした。1筆の水田面積は、現地試験の中央値29.3aとし、かつ隣接し合う設定とした。水田間の移動時間は1分、作業終了時刻は、9月は18時、10月は17時30分までに梱包作業が終了する時刻とした。運搬プロセスは現地試験に準じた。水田―浄化センター間の距離は2km、片道所要時間は5分とした。10月の単位面積当たり積込作業時間は現地試験の結果を用い、これに現地試験（10月）と現地調査（9月）の

わら収量比1.46を乗じて9月の単位面積当たり積込作業時間とした。また、各作業に待機時間が生じた場合は、その作業の開始時刻を遅らせて待機時間を無くした。

表6～8に最大収集体系、最少農機体系および反転2回体系における最小単位の1回の収集あたり作業面積、労働・作業時間および収量を示す。最大収集体系における最小単位の9、10月の稲わら収量は22.6および23.7Mg/回（水分20%換算、乾物換算19.0Mg）で、これに対する最少農機体系の収量割合は87および88%、反転2回体系のそれらは67および62%であった。運搬プロセスに関しては、3体系とも午後開始で全ロール運搬が可能であった（表6～8）。また、最大収集体系および最少農機体系における、10月の収量/回は9月に比べ多く、反転2回体系では9月が10月に比べ多かった。このことから、前者2体系において9月の梱包作業時間が6時間以上確保可能な場合は、稲わら収量を敢えて減らし収量面積/回を広げる方が、収量/回は更に多くなる可能性を認めた（表6、7）。逆に、梱包作業時間が5時間を切る場合は、稲わら収量の多少が収量/回に影響することが明らかになった（表8）。

以上のことから、梱包作業時間の長短に応じた、単位面積当たり稲わら収量と収量面積/回の適正なバランスを検証する必要性が示唆された。

各体系における作業者の労働時間から、最少農機体系では、作業者が複数の作業を担当できる可能性があった（表7）。運搬プロセス開始は午後のため、運搬プロセス作業者は午前中に時間的余裕がある。このため、最少農機体系では、作業者Aは午前中に次の収集箇所の反転作業を行える。表9に収集日数4日間の最大収集体系および最少農機体系を、図3に両体系の最小単位における収集日数別の稲わら収量をそれぞれ示す。収集日数

表5 最大収集、最少農機および反転2回体系の概要

最大収集体系				最少農機体系			反転2回体系		
作業日	作業	作業者	農業機械・車両	作業	作業者	農業機械・車両	作業	作業者	農業機械・車両
1日目	反転	A	テッダ	反転	A	テッダ	反転	A	テッダ
2日目	集草	A	レーキ	集草	B	レーキ	反転	A	テッダ
	集草	B	レーキ	梱包	C	ロールベアラ	集草	B	レーキ
	梱包	C	ロールベアラ	積込	A	ロールクラブ	梱包	C	ロールベアラ
	積込	B	ロールクラブ	運搬	A	4tトラック	積込	A	ロールクラブ
	運搬	B	4tトラック	積出	A	ロールクラブ	運搬	A	4tトラック
	積出	B	ロールクラブ				積出	A	ロールクラブ

表 6 最大収集体系における 1 収集回あたりの作業面積、労働・作業時間および収分量

時期	作業日	作業	作業者	作業面積 (ha)	開始時刻	終了時刻	労働時間 (h)	作業時間 (h)	作業能率 (h/ha)	収量 (Mg/ha)	収分量 (Mg)
9 月	1 日目	反転	A	4.4	13:00	14:41	1.70	1.46	0.33	5.14	22.6
	2 日目	集草	A	3.5	9:00	16:01	6.53	5.84	1.81		
		梱包	B	0.9	9:00	10:37	1.62	1.59	1.70		
		運搬プロセス	C	4.4	9:31	17:42	7.67	7.47	—		
			B	—	12:40	18:46	6.11	5.77	—		
10 月	1 日目	反転	A	6.7	13:00	15:35	2.60	2.23	0.33	3.51	23.7
	2 日目	集草	A	5.5	9:00	16:43	7.22	6.94	1.25		
		梱包	B	1.2	9:00	10:30	1.51	1.46	1.06		
		運搬プロセス	C	6.7	9:21	17:22	7.52	7.17	—		
			B	—	12:30	19:06	6.61	6.13	—		

注 1) 運搬往復数は 9, 10 月とも 7 往復

注 2) 2 日目は 0.5h の休憩時間を考慮した。

表 7 最少農機体系における 1 収集回あたりの作業面積、労働・作業時間および収分量

時期	作業日	作業	作業者	作業面積 (ha)	開始時刻	終了時刻	労働時間 (h)	作業時間 (h)	作業能率 (h/ha)	収量 (Mg/ha)	収分量 (Mg)
9 月	1 日目	反転	A	3.8	13:00	14:28	1.47	1.27	0.33	5.14	19.6
	2 日目	集草	B	3.8	9:00	16:53	7.39	6.90	1.81		
		梱包	C	3.8	10:30	17:39	6.66	6.48	1.70		
		運搬プロセス	A	—	13:00	18:16	5.28	4.98	—		
10 月	1 日目	反転	A	5.8	13:00	15:15	2.26	1.94	0.33	3.51	20.8
	2 日目	集草	B	5.8	9:00	17:06	7.60	7.30	1.25		
		梱包	C	5.8	10:30	17:32	6.53	6.23	1.06		
		運搬プロセス	A	—	12:40	18:12	5.54	5.13	—		

注 1) 運搬往復数は 9, 10 月とも 6 往復

注 2) 2 日目は 0.5h の休憩時間を考慮した。

表 8 反転 2 回体系における 1 収集回あたりの作業面積、労働・作業時間および収分量

時期	作業日	作業	作業者	作業面積 (ha)	開始時刻	終了時刻	労働時間 (h)	作業時間 (h)	作業能率 (h/ha)	収量 (Mg/ha)	収分量 (Mg)
9 月	1 日目	反転	A	2.9	13:00	14:07	1.13	0.98	0.33	5.14	15.1
	2 日目	反転	A	2.9	9:00	10:07	1.13	0.98	0.33		
		集草	B	2.9	11:00	17:05	5.59	5.31	1.81		
		梱包	C	2.9	12:30	17:37	5.13	4.98	1.70		
		運搬プロセス	A	—	14:15	18:26	4.20	3.97	—		
10 月	1 日目	反転	A	4.4	13:00	14:34	1.58	1.36	0.33	3.51	14.6
	2 日目	反転	A	4.4	9:00	10:34	1.58	1.36	0.33		
		集草	B	4.4	11:15	17:03	5.81	5.11	1.25		
		梱包	C	4.4	12:55	17:29	4.58	4.36	1.06		
		運搬プロセス	A	—	14:05	18:15	4.17	5.13	—		

注 1) 運搬往復数は 9, 10 月とも 5 往復

注 2) 2 日目は 0.5h の休憩時間を考慮した。

表 9 収集日数 4 日間における最大収集体系および最少農機体系

作業日	作業者	最大収集		最少農機		
		収集 1 回目	収集 2 回目	収集 1 回目	収集 2 回目	収集 3 回目
1 日目	A	反転（午後）		反転（午後）		
2 日目	A	集草 集草/運搬 梱包		運搬（午後） 集草 梱包	反転（午前）	
	B					
	C					
3 日目	A	反転（午前）		運搬（午後） 集草 梱包	反転（午前）	
	B					
	C					
4 日目	A	集草 集草/運搬 梱包		運搬（午後） 集草 梱包		
	B					
	C

図 3 最大収集体系および最少農機体系の最小単位における収集日数別の稲わら収分量 (わら水分 20%)

が 3 日間以上になると、最少農機体系の収集回は 1 回多くなり、その収分量は最大収集体系を 15～18Mg/回 (水分 20%換算) 上回った。

このことから、連続 3 日以上収集日数が確保可能な場合は、最少農機体系の収分量が最も多く、最大収集体系の収分量が最も多くなるのは、収集日数 2 日間に限られることが明らかになった。

稲わら収集・運搬に関する既往文献では、日本海側寒冷地における稲わら収集可能時期は 9～10 月で、その日数は 26 日としている (加藤ら 2011)。これは太平洋側寒冷地の 38 日、同温暖地の 61 日に比べてかなり少なく、1,000Mg/年の稲わら収集に必要な農業機械数は他地域に比べて多いと指摘している (加藤ら 2011)。また、稲わら収集に必要な連続無降雨日数が短い体系ほど、収集可能日数は増加し、総稲わら収集面積も増加するという報告もある (加茂ら 1985)。浄化センターが位置する北日本日本海側は、他地域に比べて稲わら

収集可能な期間が短く、その期間の降雨確率は 41～50%と高いため (加藤ら 2011)、1 回の収集にかかる日数の短縮は、稲わら収分量の増加に不可欠と考える。実際の収集現場では、週間天気予報等を参考に臨機応変に収集するため、連続無降雨日数に応じた収集体系の選択は重要である。

5) 浄化センターでの混合嫌気性消化に必要な最小単位数の検討

前項において 3 つの稲わら収集・運搬体系の検討を行い、収集日数 2 日間 (連続無降雨日 3 日) では最大収集体系が、収集日数 3 日間 (連続無降雨日 4 日) 以上では最少農機体系が最大の収分量をあげることが明らかになった。

表 10 に、浄化センターでの混合嫌気性消化に供する稲わらの収集・運搬に必要な各体系の最小単位数を示す。9、10 月の連続無降雨日 3 日の回数を 7 回、必要稲わら量 1916 Mg (水分 20%換算、乾物換算 1533 Mg) と仮定した。1 回の収集に必要な最小単位数は最大収集体系、最少農機体系、反転 2 回体系の順に少なかった。また、最大収集体系と最少農機体系に必要な総農機数はほぼ同数であり、最少農機体系の方がコスト面で有利とは言い切れなかった。しかし、収集日数 3 日間以上の収集回があれば、最少農機体系の必要最小単位数は減るため、総合的に最少農機体系は最大収集体系に優れると判断する。本研究において検討した 3 体系は 2 日目の作業開始時刻を 9 時としたが、夜露の蒸発程度によっては 10 時開始となる場合もありうる。1 筆 30a 程度の収集水田であれば、9 時開始に比べ、10 時開始の収集面積および

表 10 浄化センターの混合嫌気性消化に必要な最小単位数，必要作業数および農機・車両数

体系	最小単位 収集量 (Mg)	必要最小 単位数	必要 作業者数	農機・車両				
				テッパ	レーキ	ロール ベアラ	ロール クラブ	4t トラック
最大収集	163	12	36	12	24	12	13	12
最少農機	142	14	42	14	14	14	15	14
反転 2 回	104	19	57	19	19	19	20	19

注 1) 作業日数 2 日 (連続無降雨日 3 日)，9 月 3 回，10 月 4 回収集と仮定

注 2) 浄化センターに常駐する積降用ペールグラブ 1 台を含む

収集量は 60～90a/回，約 3 Mg/回少なくなると見込める。今後の課題としては，浄化センター周辺水田における降雨後地耐力回復の遅速を考慮した精度の高い収集・運搬体系の検討が重要である。

6) 異なる収集時期の稲わら有機物含量の検討

直後から，3 週後からおよび 6 週後からの VS/TS は，それぞれ 0.80，0.84，0.81 で，乾重当たり有機物含量は同等であった。稲わらの収集時期の違いや長期保存による稲わらの VS あたりメタン転換率の変動は非常に小さいことから (井上ら 2012, 2013, 小松ら 2013)，9，10 月に収集した稲わらのメタンガス生産力は，1 年間程度であればほぼ一定である可能性が高いと考える。今後は，1 年以上保存した稲わらのメタン転換率から限界保存期間を検討することも必要である。

謝辞

本研究は，農林水産省平成 22～24 年度新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業「未利用稲わらと汚泥の一括バイオガス化技術を核とした稲わらの階層的エネルギー利用システムの実装」の補助を受け行われた。ここに記して謝意を表す。

また，本研究の遂行にあたり，長岡市農政課および関係農業生産者には，現地調査と現地試験において多大な協力，支援を頂いた。ここに記して謝意を表す。

引用文献

北陸農政局 (2004)：平成 14～15 農林水産統計年報，新潟県。
星豊一・阿部聖一・石崎和彦・重山博信・小林和幸・平尾賢一・松井崇晃・東聡志・樋口恭子・田村隆夫・浅井善広・中嶋健一・原田惇・小

関幹夫・佐々木行雄・阿部徳文・近藤敬・金山洋 (2002)：水稲早生新品種「こしいぶき」，新潟県農業総合研究所研報 5：21-33。

井上明大・小松俊哉・姫野修司・石川進・澤原大道 (2012)：稲わらのエネルギー利用に向けた下水汚泥との混合嫌気性消化の実証実験，第 30 回土木学会関東支部新潟会研究調査発表論文集：474-475。

井上明大・小松俊哉・姫野修司・石川進・澤原大道 (2013)：下水汚泥との混合消化実証実験における稲わらの前処理方法および混合比の影響，第 47 回日本水環境学会年会講演集：60。
加茂幹男・中川西弘之 (1985)：稲わらのアンモニア処理法に関する研究 II，半乾燥稲わらアンモニア処理の導入効果，草地試研報 33：70-84。

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。

気象庁 (2013)：気象統計情報 <http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html> (2013 年 6 月 30 日閲覧)

小松俊哉・高松量・姫野修司・澤原大道・石川進 (2013)：下水汚泥と稲わらの混合嫌気性消化技術の実用化に向けたパイロットスケール実験，下水道協会誌 50 (604)：109-117。

新潟県 (2012)：第 122 回 新潟県統計年鑑 2011，第 6 章 農林水産業。

新潟県農林水産部農業総務課政策室 (2004)：バイオマスにいがた構想，p3。

野池達也 (2004)：バイオマス・ニッポン総合戦略の推進における嫌気性消化法的重要性，第 41 回下水道研究発表会特別講演，p6。

農林水産省 (2012)：平成 22 年度産作物統計 (普

通作物, 飼料作物, 工芸作物)。
高松量・小松俊哉・姫野修司・井上明大・石川進・
澤原大道 (2012) : 下水汚泥と稲わらの混合嫌
気性消化のパイロットスケール連続実験, 第
49 回下水道研究発表会講演集 ; 568-570.

Abstract

In this study, we focused on the rice straw collection systems for co-digestion with sewage sludge at the Nagaoka Wastewater Treatment Plant. The collection period for rice straw in this area was between September and October, and rice straw was collected usually 6 to 8 times in that period. The amount of collectable rice straw in October was 68% of that in September, because the rice straw in October was stuck to the surface of paddy. In addition, the collection unit was generally composed of 3 participants. If the collection period was 2 days, then the amount of maximum collectable rice straw for the unit was about 24 Mg (water content, 20%), and the collection was accomplished using the “maximum col-

lection system”. However, if the period was more than 2 days, the amount was 39.2 Mg (3 days) or 58.8 Mg (4 days), and the collection was accomplished using the “minimum farm machines system”. The reason was that collection at the first cite and turning over at the second cite were performed at same time in “minimum farm machines system”. At Nagaoka Wastewater Treatment Plant, 1916 Mg of rice straw (water content, 20%) is required for co-digestion with sewage sludge. The number of participants and farm machines for the collection of 1916 Mg of rice straw was as follows : 42 participants and 14-15 farm machines for the “minimum farm machines system” ; 36 participants, 14-15 farm machines, and 24 rakes for the “maximum collection system” ; and 57 participants and 19-20 farm machines for the “twice turning over system”.

Key Words

biogas, co-digestion, collection and transportation system, rice straw, sewage sludge