廃棄果実バイオエタノール製造における原料バイオマス量平準化コストの考察

—山形・福島と奈良・和歌山地域を事例として—

冬木 啓子 (畿央大学健康科学部)

The Cost of Production-Leveling in Producing Bio-ethanol from Discarded Fruit: A Case Study of the Nara-Wakayama and Yamagata-Fukushima Areas

Keiko Fuyuki (Faculty of Health Science, Kio University)

Although discarded fruit has proved to be an effective raw material in the production of bio-ethanol, the problem of seasonal variance in quantities of discards remains an influential factor. This study compares the economic efficiencies of two production approaches: production within facilities sufficiently equipped to produce amounts as required, and production that relies on an inventory of raw material to produce a leveled average. The two cas-

es used in this comparison are the Nara-Wakayama area, where fruit is discarded throughout the year, and the Yamagata-Fukushima area, where the retrieval of discarded fruit is periodic throughout the year. Results of the analysis of the cost factors of leveling and the initial and running costs of conversion lead to the conclusion that the former approach offers superior (i.e., lower) total production costs.

1. はじめに

廃棄果実は、エタノール発酵源である糖の含有率が高く、生産コストはゼロカウントであるため、バイオエタノールの原料に適している。

しかしながら廃棄果実発生量にも季節変動があり青果物由来バイオエタノールを製造する場合、原料バイオマス (以後、原料) 入手量平準化 (以後、平準化) の必要性が指摘されてきた¹⁾。

本稿では廃棄果実を原料とするバイオエタノール (以後、廃棄果実系) 製造において、平準化する場合としない場合のコストを比較し、平準化が製造コストに有利に作用するか否かを検討する。

廃棄果実系の製造コストは原料収穫コスト (以後、収穫コスト)、原料運搬コスト (以後、運搬コスト)、平準化コスト、バイオエタノール製造プラント (以後、製造プラント) でのバイオマス変換コスト (以後、変換コスト)、残渣処理コストに分けられる。この内収穫コスト、運搬コスト、残渣処理コストは原料単位当たりに対してほぼ一定値発生するが、平準化コストと変換コストは平準化作業の有無により変動するため、平準化コストと変換コストに関してまず検討する。

2. 廃棄果実発生量の国内分布

品目毎・市町村毎に発生する果実廃棄量を加算し、各市町村の廃棄果実発生合計量を求め、図 1 に示した。青森県・岩手県北部、山形県中南部・福島県、奈良県中西部・和歌山県北中部、愛媛県全域、有明海周辺部の 5 地域では廃棄果実発生量が多い市町村が凝集している。5 地域内での製造プラント運営に

図 1. 廃棄果実発生量の国内分布

資料：参考文献 [6] により作成。

は運搬コストと規模の経済が働く変換コストを同時に低くできる利点がある。

これら5地域は①廃棄果実が年中発生し年間を対象とする平準化が必要な地域と②殆ど廃棄果実が発生しない期間が存在し平準化対象期間が短い地域に分かれる。奈良・和歌山地域は①に、山形・福島地域は②に該当するため、この2地域を事例として①、②における平準化コストと変換コストを考察する。

3. 冷凍保管庫電力コスト

平準化には原料を保管する冷凍施設建設費、冷凍機器稼働電気料金などが必要となる。

表1は冷凍保管庫の電力コストを示したものである。冷凍庫の冷凍機やユニットは庫内温度を一旦 -22°C まで下げ停止し、室温が -20°C に上がれば再び稼働して庫内温度を -22°C まで下げる作業を繰り返す。小容量の冷凍庫を複数用意し必要数庫を使用し、他の冷凍庫の冷凍機・ユニットは停止させる方法が大容量の冷凍庫を用意し、庫内温度を常に -20°C 以下に保つより効率的である。

後述する廃棄果実発生量と発生時期から廃棄果実を $6\text{m}\times 6\text{m}$ の底辺を1区切とし、1区切内に50t入れ、1庫内に通路を挟んで左右5区切合計10区切、500t収納の冷凍庫が効率的であるとされた。その場合に必要な冷凍庫容量/庫は幅:15m、奥行き:32m、高さ:5 m^2 と試算される。この容量の冷凍庫の消費電力を計算する。

機種・季節により消費電力/hや稼働時間が異なる。上記冷凍庫の場合7～9月の消費電力/hは1470kwhで稼働時間は15h、4～6月と10～11月は1106.4kwhで稼働時間は12h、12～翌3月には消費電力/hは647.2kwhで稼働時間は8hとなる。

7～9月夏季電気料金とその他期間電気料金は異なる。東京電力の夏季料金は15.05円/kwでその他期

間料金は14.08円/kw、関西電力の夏季料金は10.74円/kwでその他期間料金は9.84/kwである。

これから、東京電力管内で上記の冷凍庫を使用した場合、電気料金/庫は7～9月は22,124円/日で、4～6月と10～11月には16,375円/日、12～翌3月には9,579円/日となる。

関西電力管内で上記の冷凍庫を使用した場合、電気料金/庫は7～9月は15,788円/日で、4～6月と10～11月には10,887円/日で、12～翌3月には6,369円/日となる。

4. 地域別平準化コスト

(1) 奈良・和歌山平準化コスト

1) 冷凍保管電力コスト

表2に奈良・和歌山地域で製造される廃棄果実系月別製造見込量(以後、製造量)、平均値以下・以上廃棄果実系量、原料冷凍保管量、電気料金を示す。

廃棄果実量は主に①未使用量(収穫量-出荷量)、②圃場廃棄量(収穫量の20%)³⁾、③放任園結果量からなる。雑草等で放任園へは入場が困難なため、本研究では①と②を対象とする。

表2. 冷凍保管電力コスト(奈良・和歌山)

和歌山・奈良	2県合計(L)	平均との差(L)	特冷凍月別発生量(t)	ミカン冷凍月別発生量(t)	特・ミカン月別発生量(t)	特・ミカン種算冷凍庫(月平均)	必要保管冷凍庫(月平均)	電気料金/日	電気料金/月
9月	591	37	422		422	422	1	7894	236820
10月	797	244	2754		2754	3175	4	43548	1349888
11月	650	97	1091		1091	4268	8	87096	2612880
12月	790	237	2282	556	2838	7105	12	76428	2389268
1月	708	155	781	1376	2156	9261	17	108273	3356463
2月	529	-25		-398	-398	8862	19	117827	3299142
3月	579	25		404	404	9267	19	117827	3652622
4月	423	-130	-107	-1938	-2045	7222	17	185079	5552370
5月	209	-345	-3895		-3895	3327	11	119757	3712467
6月	436	-118	-1330		-1330	1997	6	59879	1796355
7月	494	-60	-673		-673	1324	4	55258	1712998
8月	436	-117	-1324		-1324	0	2	23682	734142
	6642								30385515

稼働時間:7～9月:15時間、4～6月:10～11月:12時間、12～3月:8時間
東京電力法人契約高圧(500kw以上)料金:7～9月:10.74円/wh、その他:9.84円/wh
年間バイオエタノール製造合計量:6641.6kL
年間平均製造量:553.47kL

資料:参考文献[1][2][6]～[8]より作成

表3. 冷凍保管電力コスト(山形・福島)

福島・山形	2県合計 (L)	9～12月 平均値との 差(L)	りんご冷凍 月別発生 重量(t)	りんご種 算冷凍庫 (t)	必要保管 冷凍庫	必要保管 冷凍庫 (月平均)	電気料金／ 日	電気料金／ 月
1月	68							
2月	5							
3月	5							
4月	5							
5月	89							
6月	240							
7月	677							
8月	1057	96	1282	1282	3	2	33186	1028756
9月	1175	213	2852	4134	9	6	199114	5973421
10月	1061	99	1330	5463	11	10	155781	4829225
11月	827	-134	-1798	3666	8	10	147992	4439772
12月	688	-274	-3666	0	1	5	41052	1272617
	5896							17543790

稼働時間:7～9月:15時間、4～6月:10～11月:12時間、12～3月:8時間
東京電力法人契約高圧(500kw以上)料金:7～9月:15.05円/wh、その他:14.08円/wh
7～12月バイオエタノール製造合計量:5725kL
8～12月平均製造量:961.6kL

資料:参考文献[1][2][6][7]より作成

表1. 冷凍保管庫電力コスト/庫・日

稼働時間(h)	消費電力(kwh)	山形・福島		奈良・和歌山	
		電気料金単価(円/kw)	電気料金(円)	電気料金単価(円/kw)	電気料金(円)
15	1422	15.05	21,401	10.74	15,272
15	48	15.05	723	10.74	516
12	1068	14.8	15,806	9.84	10,509
12	38.4	14.8	569	9.84	378
8	621.6	14.8	9,200	9.84	6,117
8	25.6	14.8	379	9.84	252

資料:参考文献[1]より作成

生産者は圃場での結果実は産地・品目を問わず基本的には全量収穫する。その内、生食用・加工用に適するもの(収穫量)を持ち出し、それ以外を圃場に放置し、後日処理する。しかし、奈良・和歌山地域では果樹生産農家の約 20%⁴⁾が圃場廃棄物を収穫せずに果樹に残しておく(圃場未収穫廃棄量)。これらは生食用収穫期終了次月に原料として別途収穫するものとする。

廃棄果実系月別製造量は、ミカン・ナツミカン・ハッサク・イヨカン・ネーブルオレンジ・その他柑橘類・リンゴ・日本ナシ・西洋ナシ・柿・ビワ・モモ・スモモ・オウトウ・ブドウ・キウイフルーツ・スイカ・イチゴ・メロンの其々に関して廃棄果実系年間製造量を求め、圃場未収穫廃棄量から得られるバイオエタノールは収穫期終了次月の製造量とし、それ以外を品目毎の収穫期間に割り振り、品目毎の収穫期間内の月平均製造量を算出し、12ヶ月それぞれの月毎の19品目・59品種を原料とするバイオエタノールの製造可能量を加算して、月別バイオエタノール製造合計量を求めた。

図2に奈良・和歌山地域の廃棄果実系月別製造量と平均値を示した。

奈良・和歌山地域の廃棄果実系製造量は合計6641.6 kLで、平均値は553.47 kLである。この平均値と各月の製造量を比較すると、前年9月～3月(2月除く)は平均値を上回り、4月～8月は下回る。平均値上回量に相当する原料を冷凍保管し平均値に満たない期間の不足量を補充する方法で原料量の平準化を図ると、9月～翌年3月(2月除く)が保管量増加期間で、翌年4～8月に保管量を使用することとなる。

奈良・和歌山地域で廃棄量が大量発生する果実は柿とミカンである。糖分が15.5%と高く、単位重量当たりから得られるエタノール量が多いため冷凍保管重量が比較的少なく電力コストを節約できる柿で原料量の調整を行う。その場合柿のみでは翌年4～8月に平均値に満たない量を十分に補充できず、柿のみでの調整不足量はミカンを使用する。柿11.3tからバイオエタノール1kL⁵⁾がえられ、糖分10.9%のミカン16.1tからバイオエタノール1kL⁶⁾がえられることからバイオエタノール量を原料重量に換算し、平均値より多い月には平均値超え原料相当の柿、ミカンで冷凍保管し、冷凍柿・ミカンの毎月の発生

図2. 奈良・和歌山月別廃棄果実系製造量

資料：参考文献 [2] [6] - [8] より作成

図3. 山形・福島月別廃棄果実系製造量

資料：参考文献 [2] [6] [7] より作成

重量を積算し、平均値より少ない月には平均に満たない量を積算量から減じることで、各月の冷凍保管量を求めた。

各月の月初と月末の冷凍廃棄果実積算量の平均値を保管量500t/庫で除して各月の平均使用冷凍庫数/日を求めた。その冷凍庫数に各月毎の関西電力電気料金/日・庫を掛け冷凍電気料金/日を求め、さらに月内日数を掛けて冷凍電気料金/月を求め、その上で月別の冷凍電気料金/月を合計することで、合計冷凍電気料金/年を求めた。年間合計冷凍電気料金を廃棄果実系製造量で除して、冷凍電気コスト/Lを求めた。

その結果奈良・和歌山地域の冷凍電力コストは4.51円/Lとなった。

2) 冷凍保管庫減価却費

23.91 m³の冷凍庫の価格1,737,900円(ホシザキ電機資料, ユニット価格除く)を基準に、容量2,400 m³の上記冷凍庫の価格をバイオエタノール建設費のスケールファクター0.7⁶⁾を用いて求めると43,767,495円/庫となる。この地域での必要冷凍庫は19庫で廃棄果実系製造量は6642 kLであるため、冷

凍保管庫減価償却費（建設費×0.2）は25円/Lとなる。

平準化コストとして、冷凍電力コスト4.51円/Lと冷凍保管庫減価償却費25円/Lの合計値29.51円/Lは少なくとも必要である。

(2) 山形・福島地域平準化コスト

1) 冷凍電力コスト

表3は山形・福島県で製造される廃棄果実系製造量、平均値以下・以上廃棄果実系量、原料冷凍保管量、電気料金を示している。

山形・福島地域では果実はほぼ全量収穫されるため、リンゴ・日本ナシ・西洋ナシ・柿・モモ・スモモ・オウトウ・ブドウ・キウイフルーツ・イチゴ・メロン・スイカの其々に関して圃場未収穫量を考慮せずに、廃棄果実系月別製造量を求め図3に示した。

山形・福島地域では1～5月は廃棄果実発生量が極端に少なく原料入手が困難であるため、製造プラントを閉鎖し、6～12月のみの稼働とする。山形・福島地域年間廃棄果実系製造量合計5896kLの内6～12月には5725kLが製造される。6、7月の果実廃棄量は少ないが廃棄量が激増する8月以前で補充用冷凍量がないため、平準化の対象にはならず、8～12月が平準化対象期間となる。

8～12月の合計製造量（4807.8kL）の月平均値は961.6kLとなる。平均値と各月の製造量を比較すると、8～10月に平均値を上回り、11、12月には下回る。8～10月の冷凍保管量で11、12月の不足量を補充することになる。

山形・福島地域で廃棄量が多量発生するりんごで原料量の調整を行う。糖分13.1%のりんご13.374tからバイオエタノール1kLが製造できることを基準にバイオエタノール量を原料重量に換算し、奈良・和歌山地域と同方法で東京電力電気料金を使用して、8～12月の合計電気料金を算出し、6～12月のバイオエタノール製造量5725kLで除して冷凍電力コスト/Lを求めた。

その結果山形・福島地域の冷凍電力コストは3.03円/Lとなった。

2) 冷凍保管庫減価償却費

山形・福島地域では11庫の冷凍庫が必要で廃棄果実系製造量は5725kLであるので、冷凍保管庫減価償却費は16.82円/Lとなる。

平準化コストとして、冷凍電力コスト3.03円/L

と冷凍保管庫減価償却費16.82円/Lの合計値19.85円/Lは少なくとも必要である。

5. バイオマス変換コスト

原料を平準化しない場合には原料を保管せず入手次第バイオエタノールに変換することになる。

平準化する場合には平均値を年間製造する規模の製造プラントを、平準化しない場合には入手原料量最大値期間に対応可能な規模の製造プラントを建設し運営することになる。

奈良・和歌山地域で平準化する場合としない場合、山形・福島地域で平準化する場合としない場合に関して変換コストを検討する。

(1) 奈良・和歌山地域変換コスト

1) 平準化する場合

平準化する場合には6642kL/年製造プラントとなる。

廃棄果実系10万kL/年製造を基準として6642kL/年製造の変換コストをみる。

廃棄果実系10万kL/年製造の変換コストは、設備償却費：5.3円/L、蒸気・電力費：0.44円/L、人件費：1.0円/Lである⁷⁾。

・6642kL/年製造の設備償却費：バイオエタノール製造の場合、建設費のスケールファクターは0.7である。設備償却費は建設費より算出されるため、11.96円/Lとなる。

・6642kL/年製造の蒸気・電力費：バイオエタノール製造の蒸気・電力費/Lは規模の経済をあまり受けないので10万kL/年規模と同じ0.44円/Lとした⁸⁾。

・6642kL/年製造の人件費：人件費のスケールファクターは0.27⁹⁾なので、7.24円/Lとなる。

以上、廃棄果実系6642kL/年製造の変換コストは19.64円/Lとなる。

2) 平準化しない場合

平準化しない場合には最高値10月の797.2kL/月製造に対応できる9566kL/年製造の製造プラントを建設し、運営することになる。

しかし、製造する廃棄果実系は6642kL/年であるため、

設備償却費：10.78円/L（9566kL/年製造の設備償却費）×9566÷6642=15.44円/L

人件費：5.55円/L（9566kL/年製造の人権費）

$\times 9566 \div 6642 = 7.99$ 円/L となる。

(2) 山形・福島地域変換コスト

1) 平準化する場合

山形・福島地域で原料を平準化する場合、8～12月の平均値 961.6 kL/月製造すなわち 11,539 kL/年製造の製造プラントを建設し 961.6 kL/月製造に対応できる人件費も必要となる。しかしこの地域の製造プラントの稼働は6～12月の7ヶ月であるので雇用条件で通年人件費の7/12とする。

設備償却費：10.13 円/L (11,539 kL/年製造の設備償却費) $\times 11,539 \div 5725 = 20.42$ 円/L

人件費：4.84 円/L (11,539 kL/年製造の人権費) $\times 11,539 \times 7/12 \div 5725 = 5.69$ 円/L となる。

2) 平準化しない場合

平準化しない場合、原料最大値9月の1174.8 kL/月に対応できる 14,097 kL/年製造の製造プラントを建設し、それに対応できる人件費も必要になる。

設備償却費：9.54 円/L (14,097 kL/年製造の設備償却費合計) $\times 14,097 \div 5725 = 23.15$ 円/L

人件費：4.18 円/L (14,097 kL/年製造の人権費合計) $\times 14,097 \times 7/12 \div 5725 = 6.00$ 円/L となる。

表4は奈良・和歌山地域と山形・福島地域で原料量を平準化する場合としない場合其々の平準化コストと変換コストの合計値を示している。

廃棄果実系製造においては平準化期間の長短にかかわらず、平準化が製造コストに有利に作用しないことが分かった。

図4. 月製造量対応規模プラントにおける変換コスト（奈良・和歌山の場合）

資料：参考文献 [2] - [8] より作成

表4. 平準化および変換コスト

平準化	奈良・和歌山		福島・山形	
	する	しない	する	しない
平準化コスト	29.5	0.0	19.9	0.0
変換コスト	19.6	23.9	26.5	29.9
合計	49.2	23.9	46.4	29.9

資料：参考文献 [1] - [8] より作成

6. 最適製造規模

平準化しない場合の奈良・和歌山地域と山形・福島地域での廃棄果実系最適製造規模を検討する。

(1) 奈良・和歌山地域最適製造規模

図4は奈良・和歌山地域における月別製造量最小値5月の208.8 kL/月から最大値10月の797.2 kL/月の間で10 kL/月刻みで月製造量を設定し設定月製造量 $\times 12$ /年製造の製造プラントを想定し、各月で設定月製造量を上回る量は原料としない前提で計算した変換コストを示している。

最大製造量/月を580 kLと設定した場合には6960 kL/年製造の製造プラントを建設し、廃棄果実系製造量が6005.5 kLとなる。この場合に交換コストが22.21 円/Lと最も低くなることが分かった。

(2) 山形・福島地域最適製造規模

図5は山形・福島地域における6月～12月の月別製造量最小値6月の240.4 kL/月から最大値9月の1174.8 kL/月の間で奈良・和歌山地域と同様の方法で計算した変換コストを示している。

図5. 月製造量対応規模プラントにおける変換コスト（山形・福島の場合）

資料：図4と同じ

最大製造量/月を830 kLと設定した場合には9960 kL/年製造の製造プラントを建設し、6月～12月の廃棄果実系製造量が4921.9 kLとなる。この場合に変換コストが28.22 円/Lと最も低くなることが分かった。

(3) 製造コスト合計

奈良・和歌山地域を事例として、最適規模の製造プラントを運営した場合の製造コストを検討する。

糖分50%の糖蜜からバイオエタノールを製造する場合の残渣処理コストは2.9 円/Lと試算されている¹⁰⁾。同量のバイオエタノールを糖分13.2%（柿糖分+ミカン糖分/2）の原料から製造するには糖蜜から製造する場合の50/13.2倍の原料が必要となる。そのため、奈良・和歌山地域での残渣処理コスト/Lは、 $2.9 \times 50 / 13.2 = 11$ 円/Lとなる。

以上、製造コスト合計値は、①収穫コスト：9.27 円/L ②運搬コスト：16.79 円/L¹¹⁾ ③平準化コスト：0 円/L ④変換コスト：22.21 円/L ⑤残渣処理コスト：11 円/L の計59.27 円/Lとなる。

7. まとめ

本研究の内容を以下にまとめる。

- ① 廃棄果実発生量の多い市町村が凝集している地域内に製造プラントを設置することで、変換コストと運搬コストを同時に低くできる。
- ② 廃棄果実系において平準化は平準化期間の長短にかかわらず、製造コストに有利に作用しない。
- ③ 奈良・和歌山、山形・福島両地域での廃棄果実系最適製造規模は、両地域とも域内での廃棄果実系製造可能最大規模ではない。
- ④ 廃棄果実系は現在のバイオエタノール目標製造コストの100 円/Lで製造できる可能性がある。ことを明らかにした。

注 1) 樺沢雅之他「大規模畑地帯におけるバイオエタノールシステムの検討事例」農業土木学会全国大会講演要旨集, 2005, pp. 470-471.

2) 参考文献 [1]

- 3) 群馬県農政部聞き取り
- 4) 現地生産者聞き取り
- 5) 参考文献 [2], pp. 248-271. 参考文献 [3], p. 123. 果実の糖分含有量に関しては諸見解があるためそれらのほぼ中間値にあたる四訂食品成分表の糖質含有量を糖分含有量として代用した。糖分12%のサトウキビ14.6 tからエタノール1 kLを製造できることを基準とした。
- 6) 参考文献 [4], p. 522.
- 7) 冬木啓子他「奈良県産廃棄柿バイオエタノールの製造・流通」農業市場研究18巻2号, 2009, pp. 46-53, p. 50.
- 8) 参考文献 [4], p. 534.
- 9) 参考文献 [5], p. 9.
- 10) 小原聡「高バイオマス量サトウキビを用いた砂糖・エタノール複合生産プロセス」特産種苗第12号, p. 137.
- 11) 冬木啓子「廃棄果実バイオエタノール製造の経済評価」地域農林経済学会2011大会個別報告資料, pp. 2-5.

参考文献

- [1] 萬世電気株式会社資料
- [2] 香川綾編『四訂日本食品成分表』女子栄養大学出版社, 1996.
- [3] 大聖康弘『バイオエタノール最前線』工業調査会, 2007.
- [4] 日本エネルギー財団『バイオマス技術ハンドブック』オーム社, 2008.
- [5] 朝野賢司・美野輪智朗「日本におけるバイオエタノールの生産コストとCO₂削減コスト分析」『日本エネルギー学会誌』86巻12号, pp. 1-14.
- [6] 農林水産省統計部『果樹生産出荷統計平成16年』農林統計協会, 2004年, pp. 121-182.
- [7] 農林水産省統計部『野菜生産出荷統計平成16年』農林統計協会, 2004年, pp. 114-116.
- [8] 農林水産省統計部『特定果樹生産動態など調査平成16年』農林統計協会, 2004年.

(受理日：2013年3月11日)