

平成 24 年度畜産関係学術研究委託調査報告書

コントラクターを起点とした自給飼料の
流通圏域計測モデルの構築

平成 25 年 3 月

森高 正博（九州大学大学院農学研究院）

コントラクターを起点とした自給粗飼料の流通圏域計測モデルの構築

森高正博（九州大学大学院農学研究院）

1. はじめに

近年の国際的な穀物価格の上昇と高止まりの中で、国産粗飼料の利用拡大が国家的な課題となっている。大家畜の畜産経営において、国産粗飼料生産・流通体制は、コントラクターあるいは自給粗飼料を用いた TMR センターを通して、各地域に定着しつつある。ただし、これらのほとんどは地域内での流通である。しかし、地域で需給がマッチするということは稀であり、供給過剰地域と供給過小地域を繋ぐ国内自給粗飼料の広域流通体制の構築は、さらなる自給粗飼料生産拡大を促すために必須の課題である。また、供給過剰地域において、流通圏域を拡大させることは、生産の大規模化と圃場の集約化を通して、より効率的な生産体制への移行を進めるためにも必要な課題となってくる。

こうした中で、ラップサイレージ体系の普及は、国産粗飼料の広域流通の可能性を広げるものといえる。特に、稲 WCS においては、耕種農家が従来の作業体系で栽培が可能であり、また、手厚い助成に支えられて急速にその生産が拡大した。稲 WCS は生産主体である耕種農家と利用主体である畜産農家が分離しているため、必然的に流通の必要性が生じるが、収穫作業を受託するコントラクターによって、近年は、県内だけにとどまらず、県域を越えた広域流通も行われるようになってきている。

しかし、広域流通する場合、ロールの生産費用と同等あるいはそれ以上に流通費用が掛かってくるため、いかに効率よい物流体系を築くかということが重要である。また、実際の物流体系の構築においては、所与の経済環境の下で、どこまで広域流通の可能性があるかを見極める必要も出てこよう。

本研究の目的は、コントラクターを起点とした流通圏域測定モデルの構築を行うことにある。このモデルが確立することで、広域流通のための生産・流通体制の条件を地域ごとに明らかにすることが可能となる。また、今後、輸入粗飼料等の価格変化、自給粗飼料生産・流通への助成金体系の変更などがあった場合に、自給粗飼料の流通圏域がどの程度変化するかを地域ごとに明らかにすることが可能となる。

2. 研究方法

国内粗飼料の生産・流通について、農業経済学の分野では、コントラクターおよび TMR センターの存立可能性、生産性、経営効率についての分析が多く行われてきている。しかし、広域流通については事例が限られるため、研究蓄積がなされていない。事例的に紹介

されたものが少数ある程度である^(註1)。

本研究では、稲 WCS を例にとり、その流通圏域測定モデルの構築のための基礎研究として、以下の通り調査・分析を行う。まず、稲 WCS の広域流通を行っている事例として、社団法人宮城県農業公社を取り上げ、そこでの広域流通への取り組み状況について整理する。そこから、効率的な物流システムの発見および流通圏域測定を進める上で、留意すべき事項を抽出する。

次に、流通圏域の分析方法であるが、商業学などにおいては、一般に小売商圈に関する Huff モデルなどが多く使用されるが、小売店舗に来店する無数の消費者を前提としたモデルである。一方、自給粗飼料の広域流通を検討する場合、需要する畜産農家が広域分散していることを念頭に置く必要があり、従来の商圈分析の手法は利用できない。また、自給粗飼料の流通圏域を左右する要素は、現時点では、需要側よりむしろ生産・流通体制、具体的には、機械体系・圃場集積状況、流通体制整備状況であろう。そのため、生産・流通体制の整備状況と流通圏の関係性を分析できるモデルが必要となる。

以上の要請に応えるため、本研究で提案する手法は、第 1 に、コントラクターによる地域内および地域外への出荷・配送について数理計画モデルによって最適化し、第 2 に、その情報を基礎とし、機械体系や圃場集積状況、流通体制の整備状況を与件としてパラメトリックに流通圏域および流通量を測定するという方法である。本研究は、事例調査から留意点を抽出し、モデル構築を行うものであるが、他事例でも利用可能なできる限り一般的なモデルを確立することを目的とする。

3. 調査事例における広域流通システム

1) 調査事例の概要

宮城県は平成 22 年の農業産出額 1679 億円のうち、米が 667 億円（約 40%）、畜産が 640 億円（約 38%）と、農業分野において米と畜産に特化した県である。そうした中で、稲 WCS の生産量・流通量の多い県である。稲 WCS は栽培までは耕種農家側で通常作業として行うことが可能であるが、収穫においてロール・ラップ体系を取るため、専用作業機械を必要とし、社団法人宮城県農業公社（以下、公社）は 2001 年度より稲 WCS の収穫作業受託を行ってきた。宮城県における収穫作業受託面積およびそこに占める公社の割合は図 1 の通りであり、公社のシェアはその他のコントラクターに比べて小さくなってきているものの、公社の受託面積自体も拡大してきており、シェアも依然大きなものである。

2) 広域流通の取り組み

生産された稲 WCS のロールは耕種農家から畜産農家へ直接販売あるいはバーター等で流通することも多いが、2005 年度からは公社による斡旋事業も開始されている。現在、斡

註1 例えば、福田晋編著・日本草地畜産種子協会著『コントラクター つくり方 活かし方』中央畜産会、2008 年における紹介事例である(南坂上芝園（当時）など。

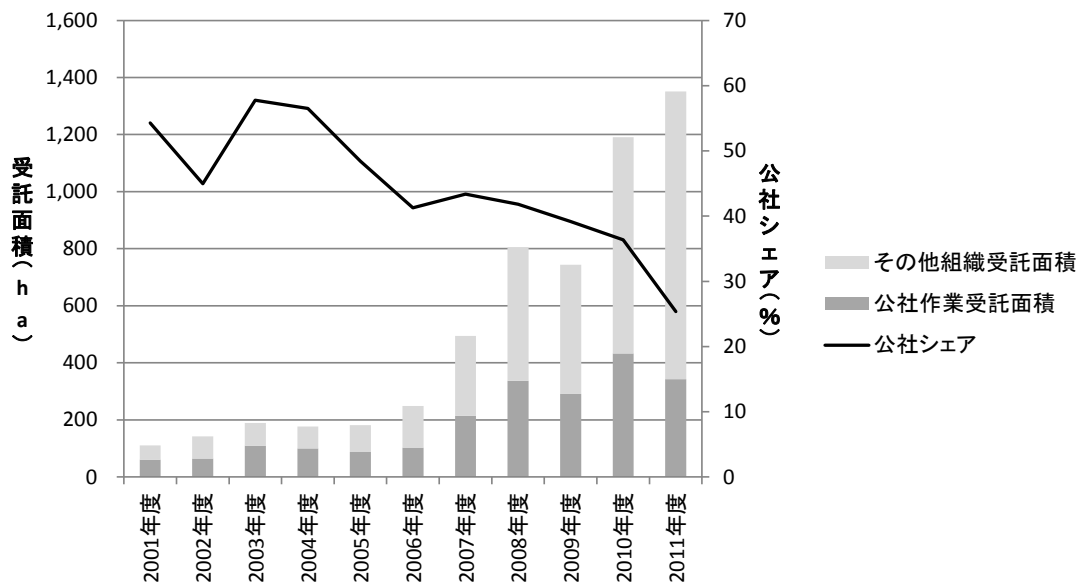


図1 宮城県における稲 WCS 収穫作業受託面積の推移

資料：宮城県農業公社資料より作成。

旋事業は、作業を委託した耕種農家から、公社が圃場渡しでロールを買い取り、畜産農家の畜舎渡しでロールを販売するというものである。その概要は図2の通りである。2011年度からの取引価格は、圃場でのロール購入価格が2,400円/ロール、県内畜産農家に対しては、通常のロールであれば圃場渡しで2,500円/ロール、畜産農家の庭先渡し（畜舎渡し）で4,000円/ロールで販売している。細断型ロールの場合は、それぞれ300円高い価格での販売となっている。また、県外の畜産農家に対してはその輸送費用が上乘せされ、配送距離と従来型・細断型の違いによって畜舎渡しで4,500円～6,200円/ロールで販売されている。

公社の収穫作業受託によって生産されたロール数について、委託農家から周辺畜産農家への直接販売（地産地消）と公社による斡旋ともに増加してきている。特に、斡旋によって広域流通するロール数はより急激な増加を示しており、その割合は年々高まってきている（図3）。また、その斡旋ロール数は県内仕向け、県外仕向けとも同様に伸びてきているが、県外ほど一件当たりの斡旋ロール数が大きいことが分かる（図4）。ただし、県外の斡旋先の畜産農家の規模が大きいという側面以外に、県外の斡旋先には、農家グループや農協など、複数の畜産農家をグループ化して1か所の窓口で購入しているケースがあり、そのため1件あたりロール数が大きいという面もある。

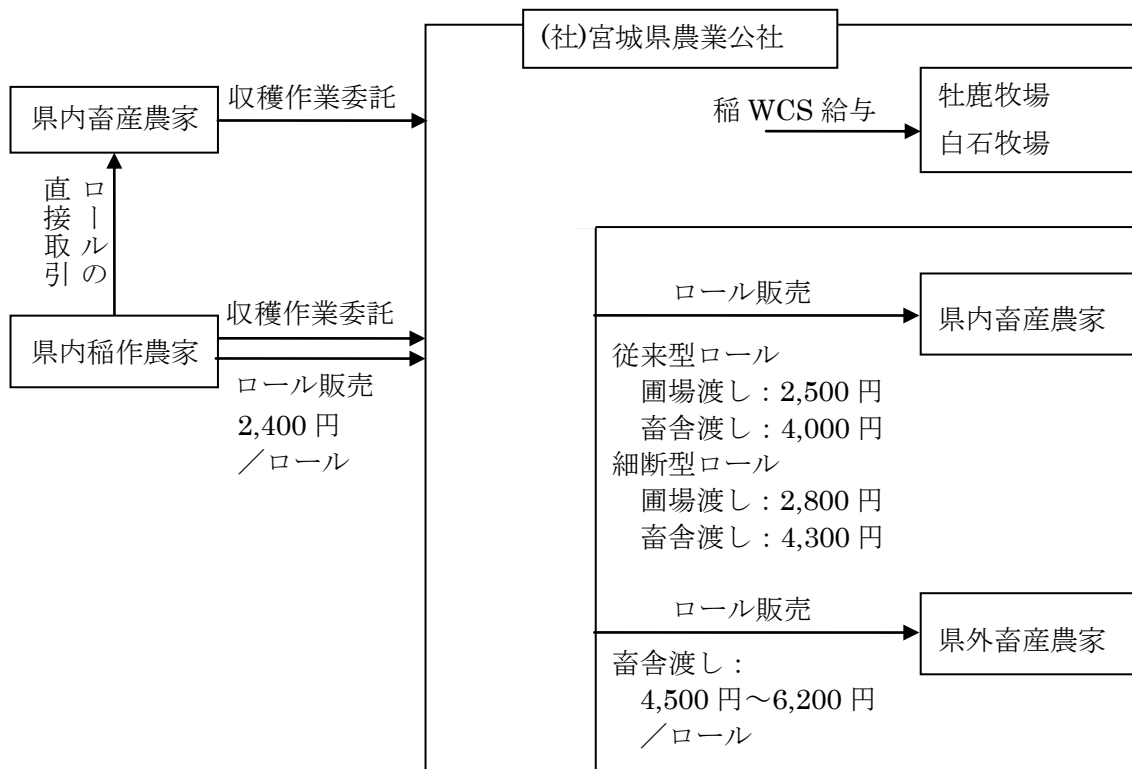


図2 稲 WCS の収穫作業受委託とロールの流通

資料:宮城県農業公社における H23 年度事業分に関するヒアリングにより作成.

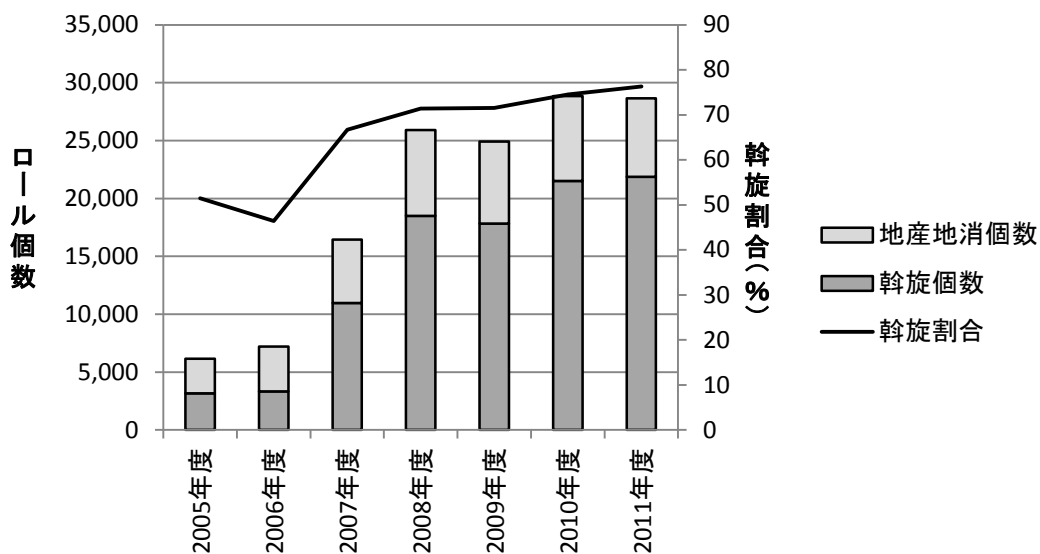


図3 宮城県農業公社における稲 WCS 収穫ロール数と流通状況

資料:宮城県農業公社資料より作成.

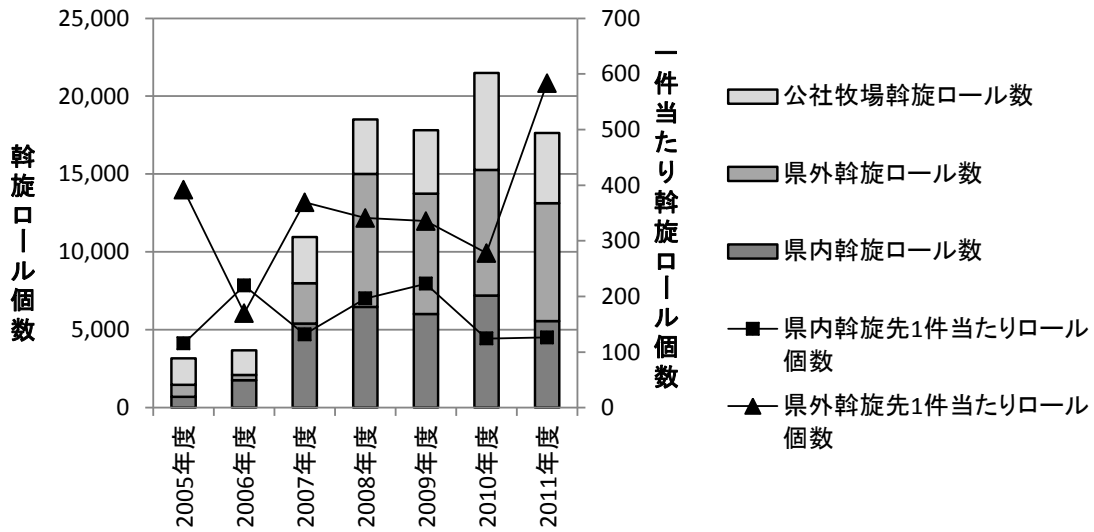


図4 宮城県農業公社における稲WCSの幹旋状況

資料:宮城県農業公社資料より作成。

3) スtockヤードへの搬入作業について

公社の幹旋事業において、分散して少量のロールを生産する各圃場から、年間を通して大量に利用する畜産農家までロールを配送するために、県内に7か所のストックヤード(一時保管場所)が設けられている。

写真1~4は、近隣30haの稲WCSを美里町小牛田地区のストックヤードへ搬入する作業中のものである。刈り入れが終わった後、熟成するまではロールを圃場から動かさないで、それを待つ、この日の作業となっている。作業は、圃場側での積み込みのためにローダー1台、ローダーが入りにくい所での積み込みのためにラッピングマシンが1台、ストックヤード側で積み下ろしのためのローダーが1台、圃場とストックヤードをピストン輸送する2tトラックが4台(1台あたり最大3ロールが積載される)、作業機械輸送のための10tトラック1台が導入される。人員は、各機械1台に1名、計7名で作業にあっている。作業期間中は、圃場に作業機械を残して作業を続けるため、日々の機械倉庫と圃場・ストックヤード間の移動は発生しない。なお、大型トラックは翌日から畜産農家への配送にも使われる。また、全てのロールに対して、ロール形成後にトレーサビリティ用のラベルが貼付される(写真3は2012年度に利用したラベル)。



写真1 圃場から2tトラックへのロール積み込みとストックヤードへの輸送



写真2 稲WCSをストックヤードへ搬入する作業（宮城県美里町小牛田地区）



写真3 平成24年度にロールへ貼付されたトレーサビリティ用ラベル



写真4 畜産農家の庭先へ搬送と作業機械輸送に利用される大型トラック

4) ロールの流通経費

圃場からストックヤードへの搬入，および畜産農家への配送は多くの場合，公社によって行われ，それはロールの売買差益によって賄われている。

上述の写真のケースでは，ストックヤード周辺に圃場が集積し，また道路条件がよいため，30ha に対して 1 週間ほどの期間で搬入作業が可能となっている。これに対して，近年，稲 WCS の作業委託面積の拡大に伴い，面積の小さな圃場や，大型作業機械の乗り入れや大型トラックの横付けなどができないなどの条件の良くない圃場も増えており，搬入作業にかかる物流上の費用も拡大していると考えられる。

宮城県農業公社が行った稲 WCS の幹旋事業に係る経費に関する試算結果を示すと表 1 の通りである。現在のロール当たり収入は 4,195 円となっているが，これに対して，ストックヤードを利用しない場合のロール当たり物流費用は，1,762 円，ロール購入金額は 2,400 円であり，ロール 1 個当たりの費用合計は 4,162 円となる。つまり，幹旋事業において，10 t トラックで圃場から畜舎へ効率よく直接配送できた場合には，物流に係る経費を賄える程度の収入であることが分かる。

しかし，先述のように，稲 WCS のロールについて，生産の拡大と流通の広域化が進むにしたがって，圃場条件や物流上の効率性の確保のために，直接流通からストックヤードを経由した流通体系へと切り替わってきた。ストックヤードを経由した場合，ストックヤードまでの運搬，ストックヤードでの積み込み・積み下ろしの追加的な作業が発生するため，物流費用の単純な試算結果は，表 1 に示すように 3,724 円／ロールへと増加する。ロール購入金額 2,400 円／ロールを加味すると，ロール 1 個当たりの費用合計は 6,124 円となり，現在の販売価格では流通経費を賄うことができないことになる。

表 1 の試算結果において，ストックヤードを経由する流通体系においては，ロール当たり費用に占める流通費用の割合は 60%を超えており，広域流通において流通費用削減が重要な課題となることが分かる。ストックヤードの利用は，ロール積み込み，荷卸しの作業

表 1 幹旋事業に関する宮城県農業公社による収支試算

収入		単位:円	
ロール当たり収入			4,195
経費			
費用項目	一時ストックなし	一時ストック有り	
一時ストックヤードまでの運搬	0		1,962
ロール積み込み	0		486
ロール運搬	0		990
ロール荷卸し	0		486
品質管理	276		276
大型トラック積み込み	486		486
大型トラックでの輸送	1,000		1,000
合計	1,762		3,724

資料：宮城県農業公社による 2011 年度実績を元にした試算結果より作成。

を増やす一方で、大型トラック利用による単位輸送費用を削減したり、巡回集荷による輸送費削減効果を期待できる。そのため、広域流通を担う公社において、効率的な物流計画の策定が経費削減と稲 WCS の生産・流通の拡大のために重要な作業となってくる。

4. 物流経費最小化モデル

1) 事例から得られる留意点

前節の事例調査からは、小規模な稲作農家、条件の悪い圃場が飼料稲生産に参入してきたことによるストックヤードの活用必要性、また、県内及び県外への流通の広域化といった理由から、稲 WCS の輸送にかかる費用が大きくなりつつあり、物流の最適化を図る必要が出てきていることが分かった。

物流に伴う費用は、大きくはロールや作業機械の輸送を行うためのトラックの稼働費用（減価償却費、オペレーターの人件費、燃料費、修理費など）、トラックへの積み込み・積み下ろしといった荷役を行う自走ローダーやラッピングマシン（ラッピング作業のためではなく、ローダーが入らない圃場における荷役のため）の工事費（減価償却費、オペレーターの人件費、燃料費、修理費）である。

本稿で検討する物流最適化モデルでは、圃場で生産されたロールを購入する畜舎へ過不足なく届ける上で、輸送や荷役作業をできるだけ最小の費用で行うよう、輸送・作業計画を立てるというものである。なお、輸送や荷役作業に伴う上述の費用の内、固定費部分である減価償却費、修理費は、作業計画に関わらず一定額が支払われることになるため、本モデルには明示的に考慮せず、モデルでシミュレートする費用は、変動費用部分とする。

前節を参考に、本モデルにおいて考慮される前提条件は以下の通りである。

① 内生変数としてのトラック走行および荷役作業の明示

物流最適化モデルにおいては、各地点間の流通量のみを決定するモデルを構築することが多い。しかし、稲 WCS の物流問題においては、圃場の立地によって大型トラックが隣接できない場合、あるいは、先述のトラックの積み替えによる物流の効率化が重要な課題となることから、輸送に用いられるトラックの積載量のタイプを明示的に取り扱う必要が出てくる。そこで、地点間のタイプ別のトラック走行数、輸送ロール数をそれぞれ別個に内生変数として定義する。なお、ロールの物流に用いる運搬車は 2t トラックと 10t トラックの 2 通りとする。

t_{ij}^2 : 地点 ij 間の 2 t トラック走行台数

t_{ij}^{10} : 地点 ij 間の 10 t トラック走行台数

x_{ij}^2 : 地点 ij 間の 2 t トラックによる輸送ロール数

x_{ij}^{10} : 地点 ij 間の 10 t トラックによる輸送ロール数

また、多くの物流経路の最適化を行うモデルでは荷役作業が内生変数として考慮されな

い. しかし, 稲 WCS の輸送問題においては, 圃場およびストックヤードにおける荷役作業の費用が, 全体の流通経費の内, 非常に大きな割合を占めている. スtockヤード, あるいはそれに代替する地点において 2 tトラックから 10 tトラックに積み替え (あるいは, 逆に 10 tトラックから 2 tトラックへの積み替え) もできる限り少なくし費用を抑えるよう計画されなければならない.

そこで, 地点 i において積み込み, 積み下ろしの荷役作業を行うロール数について, 次の通り表し, 内生的に決定する変数とする.

l_i^2 : 地点 i における 2 tトラックへのロールの積み込み数

l_i^{10} : 地点 i における 10 tトラックへのロールの積み込み数

u_i^2 : 地点 i における 2 tトラックからのロールの積み下ろし数

u_i^{10} : 地点 i における 10 tトラックからのロールの積み下ろし数

② 輸送における規模の経済性

各トラックサイズに応じて最大限積載できるロール数が変わるため, これを次の通り定義する.

r_2 : 2 tトラックの最大積載ロール数

r_{10} : 10 tトラックの最大積載ロール数

なお, 前節の事例において最も一般的な場合は, $r_2 = 3$, $r_{10} = 32$ である.

また, 輸送 1 時間当たりにかかる変動費用は次の通り定義する.

c_t^2 : 2 tトラックの走行 1 時間当たり変動費用

c_t^{10} : 10 tトラックの走行 1 時間当たり変動費用

その内訳は, ①ロール輸送トラックの運転手人件費, ②作業機械輸送 10 tトラックの運転手人件費, ③作業機械のオペレーター人件費, ④ロール輸送トラックの燃料費, ⑤作業機械輸送 10 tトラックの燃料費, の合計となる.

ここで, 変動費用に作業機械の輸送費用も含めたのは, 調査事例においてロールの輸送に伴って, ロールの荷役を行う作業機械の輸送も並行して行われているという事実によっているが, モデル設計上も次の理由で簡素化を図るためである. もし, ロールの一切の積み下ろしや積み込みがないような地点をトラックが経由する場合, 単純に移動費用がかさむことになり, モデルの解としてそのようなものは発生しえない. そこで, 前提として, 任意の区間でのロール輸送のためのトラック移動には, 必ず作業機械の輸送も伴っていると考えても差支えがなく, そうすることでモデルが簡素化されるためである (註2).

註2 なお, 上述の中で固定費としている輸送トラックや作業機械の減価償却費および常勤のオペレーターの給与について, コントラクター組織によっては, ロールの物流部門以外での稼

ここで、輸送における規模の経済性が発揮されているためには、次の条件が満たされている必要がある。この条件は、10tトラックはその稼働に伴う変動費用は大きいものの、もし、積載効率良く運用できた場合、1個のロール当たりの輸送費用は小さくすることができるということを意味している。前節の事例をもとにした表2の数事例はこれを満たしている。

表2 輸送に用いられるトラックの前提

トラックサイズ	最大積載ロール数	輸送1時間当たり変動費用	輸送1時間当たり変動費用の内訳 注)
2t車	$r_2=3$	C_t^2 (要計測)	①ロール輸送2tトラックの運転手人件費 ②作業機械輸送10tトラックの運転手人件費 ③作業機械のオペレーター人件費 ④ロール輸送2tトラックの燃料費 ⑤作業機械輸送10tトラックの燃料費
10t車	$r_{11}=32$	C_t^{10} (要計測)	①ロール輸送10tトラックの運転手人件費 ②作業機械輸送10tトラックの運転手人件費 ③作業機械のオペレーター人件費 ④ロール輸送10tトラックの燃料費 ⑤作業機械輸送10tトラックの燃料費

注) もし、ロールの一切の積み下ろしや積み込みがないような地点をトラックが経由する場合、単純に移動費用がかさむことになり、モデルの解としてそのようなものは発生しえない。そこで、前提として、任意の区間でのロール輸送のためのトラック移動には、必ず作業機械の輸送も伴っていると考えることで、モデルを簡素化する。

働・出役のある場合がある。この場合、固定費について当該部門と他部門との按分が必要になってくる。ところが、この按分が伴う場合、固定費といえども物流フローに応じて変動してしまうことになり、厳密にみればモデルを複雑化させる要因となる。例えば、本研究のモデルは、物流部門での変動費のみ最小化するものである。ここで、按分方法が稼働時間に従ったものである場合など、物流部門での変動費の縮小は、固定費の按分比率も小さくするため、物流部門における固定費も同様に縮小する。ただし、この効果は非線形で現れるため、モデル内で内生的に考慮しようとするとは非常に面倒なことになる。本研究では、部門横断的な固定費の存在については捨象することとする。

もちろん、物流経費最小化モデルを適切な料金設定や収益シミュレーションに活用する場合、この点への配慮が必要になる。一方、複数部門にまたがって経営全体を考えた場合は、結局、固定費の大きさは変わらないため、この問題は考慮しなくてよい。

また、本研究のモデルでは採用しないが、別の考え方として、所有機械・車両がある場合の固定費も、便宜的に変動費として取り扱えるようにするために、機械・車両は一括してリースするものとも考えることもできる。常勤の雇用者についても同様にすべて臨時雇用とみなしてモデルを設計するのである。こうすれば、固定費の問題から解放される。

$$c_t^2 < c_t^{10}$$

$$r_2 < r_{10}$$

$$\frac{c_t^2}{r_2} > \frac{c_t^{10}}{r_{10}}$$

ただし、低い積載率で走行する時間が長くなると、10 tトラックの運用による物流経費上のロスが大きくなる。従って、圃場が集積しているほど、10 tトラックを高い積載量で運用することができるようになり、輸送における規模の経済性が発揮しやすくなる。圃場の集積が進めば、また、それを促すような生産量と需要量の増加が進めば、物流経費の低減、ひいては流通粗飼料価格の低減につながり、流通圏域もより拡大されやすくなる。

③ 各地点におけるロールの生産量・消費量目標

地点としては、圃場、ストックヤード、畜舎の3通りを考える。圃場ではロールが生産される。ロールの生産後は、できる限りこれを迅速に運びだし、次の作付が可能な状態に戻す必要がある。つまり、初期の過剰なロール数を荷役作業と輸送を通して、モデルの解においては0にもっていかなければならない。畜舎については、ロールの需要量があり、これが初期において不足している状態である。モデルの解においては、輸送と荷役作業を通して、畜舎の不足を0にもっていかなければならない。

x_i : 地点*i*における初期のロール過不足量

ただし、地点*i*が圃場の場合 $x_i > 0$ 、ストックヤードの場合 $x_i = 0$ 、畜舎の場合 $x_i < 0$ である。

また、本研究のモデルにおいてストックヤードの役目は小規模な圃場から2 tトラックを用いて輸送したロールを、10 tトラックに積み替えて、大量に消費する畜舎へ配送するた

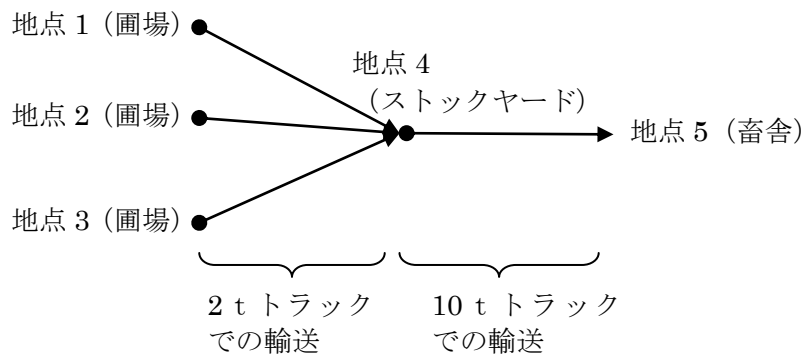


図5 輸送における規模の経済の活用例

めの、荷役作業の中継地点と考える。なお、分析の結果、圃場や畜舎が立地的にストックヤードの役目を果たすことがあっても良いとする。

2) 目的式及び制約式

(1) 目的関数

まず、生産されるロール数と利用されるロール数が同数であるという次の前提を置いた場合の目的関数について説明する。

$$\sum_i^n x_i = 0$$

なお、この前提条件は強すぎる前提であるため、次いで、これを緩和する。

モデルで分析される総地点数（圃場、畜舎およびストックヤードの地点数）を n とする。最小化すべき目的関数はこれらの地点間でトラック運用と積み込み・積み下ろしに伴う変動経費 VC であり、次の通りとなる。

$$VC = \sum_i^n \sum_j^n c_t^2 h_{ij} t_{ij}^2 + \sum_i^n \sum_j^n c_t^{10} h_{ij} t_{ij}^{10} + \sum_i^n c_l l_i^2 + \sum_i^n c_l l_i^{10} + \sum_i^n c_u u_i^2 + \sum_i^n c_u u_i^{10}$$

ただし、

h_{ij} : 地点 i を出て地点 j へ至る片道の輸送時間

c_l : ロール 1 つの積み込みにかかる費用

c_u : ロール 1 つの積み下ろしにかかる費用

である。なお、一意な解を得るための技術的な前提として、同地点間の走行時間は 0 ではなく、 ∞ とおく。

$$h_{ii} = \infty, \forall i$$

さて、実際のデータを用いた計測モデルにおいては、需要量よりも供給量が過剰な場合、つまり、在庫が発生してしまうことも発生する。そのため、過不足量について一般には次の前提の下で分析が行われる必要がある。

$$\sum_i^n x_i \geq 0$$

供給が超過する場合、この条件を修正する必要がある。そこで、 $n+1$ 番目の地点として、需要量の不足分に対応する仮想の畜舎を一つ、次の通り設ける。

$$x_{n+1} = - \sum_i^n x_i$$

また、各地点とこの仮想地点との移動時間については注意深く設定する必要がある。この仮想地点と各地点との移動がタイムレスに行えるものであれば、この仮想地点を経由することで、全ての地点間の移動もタイムレスに行える。しかし、一方で、仮想地点への余剰分の移動ができなければ解が得られない。そこで、 $n+1$ 番目の地点から他の地点への移動は行えないという前提条件を加える。これは、地点 $n+1$ を出て他の地点 i へ至る片道の走行時間に禁止的な時間がかかるとすればよい。

$$h_{n+1,i} = \infty, \forall i$$

以上の前提を置いたうえで目的関数は次の通り修正される。また、以下もこの前提を踏まえて議論を進める。

$$VC = \sum_i^{n+1} \sum_j^{n+1} c_t^2 h_{ij} t_{ij}^2 + \sum_i^{n+1} \sum_j^{n+1} c_t^{10} h_{ij} t_{ij}^{10} + \sum_i^{n+1} c_l l_i^2 + \sum_i^{n+1} c_l l_i^{10} + \sum_i^{n+1} c_u u_i^2 + \sum_i^{n+1} c_u u_i^{10}$$

(2) 制約条件：過不足のない配送

各地点における初期のロール数の過不足を x_i で表すことにしているため、圃場で生産されたロールが需要する畜舎へ過不足なく運送されたということは、全ての地点において、最終的なロール数の過不足がなくなることを意味する。従って、必要とされる制約条件の一つは次の通りである。

$$x_i + \sum_{j \neq i}^{n+1} x_{ji}^2 + \sum_{j \neq i}^{n+1} x_{ji}^{10} - \sum_{j \neq i}^{n+1} x_{ij}^2 - \sum_{j \neq i}^{n+1} x_{ij}^{10} = 0, \forall i$$

左辺第 2 項は地点 i への移入量であり、左辺第 3 項は地点 i からの移出量である。したがって、この制約条件は、圃場においては、生産量 $x_i > 0$ が純移出量 $-(\sum_{j \neq i}^{n+1} x_{ji}^2 + \sum_{j \neq i}^{n+1} x_{ji}^{10} - \sum_{j \neq i}^{n+1} x_{ij}^2 - \sum_{j \neq i}^{n+1} x_{ij}^{10})$ と一致することを課し、畜舎においては、需要量 $-x_i > 0$ が純移入量 $\sum_{j \neq i}^{n+1} x_{ji}^2 + \sum_{j \neq i}^{n+1} x_{ji}^{10} - \sum_{j \neq i}^{n+1} x_{ij}^2 - \sum_{j \neq i}^{n+1} x_{ij}^{10}$ と一致することを課すものである。また、生産も需要もないストックヤードにおいては、 $x_i = 0$ であるので、純移入量（純移出量）が 0 であることを課すものである。

(3) 制約条件：トラックの帰巢条件

1 台のトラックについては、2 地点間の輸送が単独で発生させることはできず、トラックの倉庫から出発して、どのような経路をたどろうと、最終的に出発した倉庫へ戻らなくてはならない。このことは、ピストン輸送における復路便が発生することを意味し、空便をなるべく少なくするための巡回輸送が必要となる背景である（図 6）。また、圃場や畜舎の集積が進めば、そうした巡回輸送の効率が上がるため、配送コストを抑えることにつなが

る。この帰巢条件は、次のように表す。

$$\sum_{j \neq i}^{n+1} t_{ij}^2 - \sum_{j \neq i}^{n+1} t_{ji}^2 = 0, \quad \forall i$$

$$\sum_{j \neq i}^{n+1} t_{ij}^{10} - \sum_{j \neq i}^{n+1} t_{ji}^{10} = 0, \quad \forall i$$

これはある地点 i について、そこに入ってくるトラックの数とそこから出ていくトラックの数が一致していなければならないということである。この条件が守られる場合、トラック倉庫はどの地点にあってもよいことになる。例えば、次の図 6 のような巡回経路が取られる場合、どこからスタートしても、巡回にかかる費用は等しく、効率性に影響を与えない。したがって、今回のモデルではトラック倉庫の場所については特定しないモデルを考える。

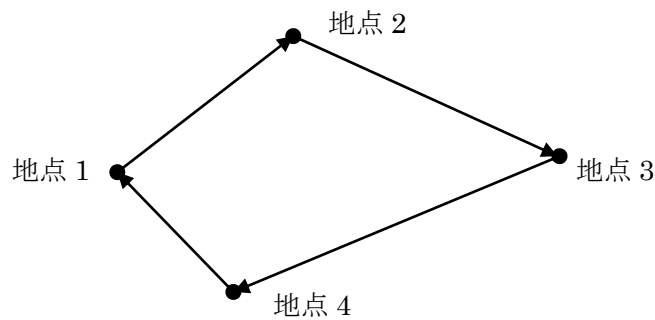


図 6 巡回集荷の 1 例

(4) 制約条件：地点間の最大輸送量条件

2 地点間を走行したトラックの回数と各トラックの最大積載量によって、その区間の最大輸送量が決定する。いずれの 2 地点間の輸送量もこの最大輸送量を超えることはできない。そこで、次の条件が課される。

$$r_2 t_{ij}^2 - x_{ij}^2 \geq 0, \quad \forall i, j$$

$$r_{10} t_{ij}^{10} - x_{ij}^{10} \geq 0, \quad \forall i, j$$

(5) 制約条件：積み込み・積み下ろしロール数の整合性

各地点における積み込みと積み下ろしの作業は、前節でみたように、流通経費におけるもう一つの大きな費用となっている。積み込み、積み下ろしが発生するのは次の場合である。

- ① 圃場で生産された（その地点で過剰となっている）ロールをトラックに積み込み移出する場合
- ② 畜舎で購入した（その地点で過小となっている）ロールをトラックから積み下ろす場合
- ③ スtockヤードでの積み替えに伴う積み下ろし・積み込みがある場合

なお、本モデルでは、ストックヤードに一時保管し、期間をおいて改めて畜産農家へ配送するような、いわゆるストックヤードでの保管機能はもたないものとする。したがって、生産された稲 WCS は、ストックヤードを経由するにせよ、圃場から直接畜舎へ搬入されるにせよ、生産後、すみやかに畜舎への搬入が行われる。もし、圃場からロールを積み込んだ 2t トラックがストックヤードを経由し、2t トラックで畜舎へ運び込まれた場合、圃場での積み込みと畜舎での積み下ろしは発生するが、ストックヤードでの積み込みと積み下ろしは発生しないものとする。この点は、前節事例の運用とは異なっていることに注意されたい。

トラックのタイプごとに上記①、②、③の荷役作業量が必要量行われ、また、均衡していることが要求される。

$$\sum_j^{n+1} x_{ji}^2 - u_i^2 + l_i^2 - \sum_i^{n+1} x_{ij}^2 = 0, \forall i$$

$$\sum_j^{n+1} x_{ji}^{10} - u_i^{10} + l_i^{10} - \sum_i^{n+1} x_{ij}^{10} = 0, \forall i$$

（6）物流経費最小化問題

分散した圃場で小規模に生産された稲 WCS を、より分散しているが、需要量が大きな畜産農家に配送するという問題を考えた場合、圃場間の巡回集荷とストックヤードへの集荷、大型トラックの利用による遠隔地畜舎への配送という物流モデルがイメージされる。

そのため、稲 WCS の広域流通を分析する場合、現場的な物流対策をモデルとして再現することが必要となってくる。本研究のモデルにおいて、ストックヤードの存在、トラックのサイズによる物流上の規模の経済性を反映できる物流最適化モデルを構築するため、上述の目的関数、制約条件から、基本的な物流費最小化問題は次の通り定式化される。

$$\begin{aligned}
\text{Min}_{t_{ij}^2, t_{ij}^{10}, x_{ij}^2, x_{ij}^{10}, l_i^2, l_i^{10}, u_i^2, u_i^{10}} \quad & VC = \sum_i^{n+1} \sum_j^{n+1} c_t^2 h_{ij} t_{ij}^2 + \sum_i^{n+1} \sum_j^{n+1} c_t^{10} h_{ij} t_{ij}^{10} \\
& + \sum_i^{n+1} c_l l_i^2 + \sum_i^{n+1} c_l l_i^{10} + \sum_i^{n+1} c_u u_i^2 + \sum_i^{n+1} c_u u_i^{10} \\
\text{s. t.} \quad & x_i + \sum_{j \neq i}^{n+1} x_{ji}^2 + \sum_{j \neq i}^{n+1} x_{ji}^{10} - \sum_{j \neq i}^{n+1} x_{ij}^2 - \sum_{j \neq i}^{n+1} x_{ij}^{10} = 0 \quad \forall i \\
& \sum_{j \neq i}^{n+1} t_{ij}^2 - \sum_{j \neq i}^{n+1} t_{ji}^2 = 0 \quad \forall i \\
& \sum_{j \neq i}^{n+1} t_{ij}^{10} - \sum_{j \neq i}^{n+1} t_{ji}^{10} = 0 \quad \forall i \\
& r_2 t_{ij}^2 - x_{ij}^2 \geq 0 \quad \forall i, j \\
& r_{10} t_{ij}^{10} - x_{ij}^{10} \geq 0 \quad \forall i, j \\
& \sum_j^{n+1} x_{ji}^2 - u_i^2 + l_i^2 - \sum_i^{n+1} x_{ij}^2 = 0 \quad \forall i \\
& \sum_j^{n+1} x_{ji}^{10} - u_i^{10} + l_i^{10} - \sum_i^{n+1} x_{ij}^{10} = 0 \quad \forall i \\
& t_{ij}^2 \geq 0, t_{ij}^{10} \geq 0, x_{ij}^2 \geq 0, x_{ij}^{10} \geq 0 \quad \forall i, j \\
& l_i^2 \geq 0, l_i^{10} \geq 0, u_i^2 \geq 0, u_i^{10} \geq 0 \quad \forall i
\end{aligned}$$

なお、変動費 VC に対して固定費を FC とおくと、ロール 1 個当たりの最小化された物流経費は次の通りとなる。

$$\frac{\text{argmin } VC + FC}{\sum_{i \in \{i | x_i > 0\}} x_i}$$

5. 流通圏域計測の手順

1) 本節の狙い

前節において構築した物流経費最小化問題は、あるロールの買取価格と販売価格、またそれに応じた生産量と需要量がすべて事前に与えられた上で解かれるモデルである。その意味で流通圏域は事前に与えられているということになる。

しかし、生産量と需要量が均衡するためには、適正な買取価格と販売価格が設定されなければならない。また同時に、最小化された物流経費は、その両者の差額以下となっていなければならない。そうした状況においては、供給や需要の増減によって、また、単位当たりにかかる物流経費の増減によって、流通圏域が変化することになる。

本節では、ロールの供給と需要、並びに物流に掛かる各種の費用単価が与えられた際の、最適な価格設定と物流活動を求める分析フローを示す。これによって、与件変化に対する

流通圏域の測定が可能となる。

なお、事例では県の農業公社が広域流通における中間流通主体として介在し、公益的な視点から価格設定が行われている。本節の分析モデルにおいては、より一般的な事例での分析が可能のように、この公益的視点について次の 2 つのケースに分けて分析フローを提示する。一つ目は、県外を含める流通圏域全体における公益性を重視して中間流通主体が買取価格と販売価格を設定する場合、二つ目は、地域内（県域）における公益性を重視して中間流通主体が買取価格と販売価格を設定する場合である。

2) 流通ロールの需給均衡

まず、地域内（県域）のみで稲 WCS の流通を行うケースから、その均衡点を整理しよう。図 7 には、地域内の耕種農家におけるロールの庭先供給関数 $q_s = S_1(p_w)$ 、これに中間流通主体が圃場から畜舎までロールを輸送することに要する物流経費を付加して得られる、中間流通主体におけるロールの供給関数 $q_s = S_2(p_w)$ 、地域内の畜産農家におけるロールの庭先需要関数 $q_d = D_1(p_r)$ を描いたものである。地域内でロールが流通する場合、その均衡は、図中の q^l 、 p_w^l 、 p_r^l となる。すなわち、中間流通主体がロールの庭先買取価格 p_w^l と販売価格 p_r^l を提示し、耕種農家が q^l を供給、畜産農家が q^l を需要するというものである。

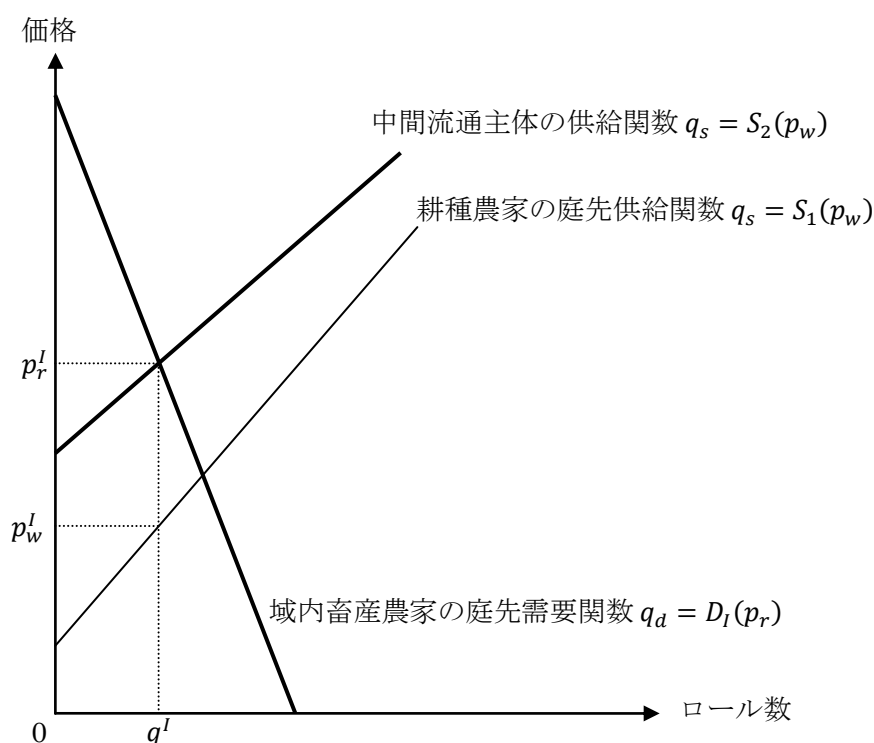


図 7 地域内のみで稲 WCS の流通が行われる時の需給均衡

以上を踏まえて、地域外への流通が行われるケースでの均衡点について検討を拡張しよう。まず、中間流通主体の公益性に対する視点として、県外を含める流通圏域全体における公益性を重視する場合を検討する。

図8には、地域外の畜産農家について、その庭先需要関数 $q_d = D_I(p_r)$ を描いている。例えば、畜舎の庭先価格 p_r^I に対しては、横に伸びた水平線の長さだけ地域外の畜産農家はロールを需要するという意味になる。この時、中間流通主体の直面する需要関数は、地域内の畜産農家の需要関数と地域外のそれを横軸方向に足し合わせて合成された需要関数となる。これは図9に示されるものであり、例えば、畜舎の庭先価格 p_r^I に対しては、地域内の畜産農家の需要量を起点として、そこに地域外の畜産農家の需要量が足しあわされているものとなっている。

従って、このケースの需給均衡は、畜産農家の合成された庭先需要関数 $q_d = D_I(p_r) + D_E(p_r)$ と中間流通主体の供給関数 $q_s = S_2(p_w)$ が交差する q^E, p_w^E, p_r^E となる。すなわち、中間流通主体がロールの庭先買取価格 p_w^E と販売価格 p_r^E を提示し、耕種農家が q^E を供給、畜産農家が $q^E = D_I(p_r^E) + D_E(p_r^E)$ を需要するというものである。この内、地域内の畜産農家の需要量は $D_I(p_r^E) < q^I$ となり、地域内のみで流通していた場合に比べて小さくなる。

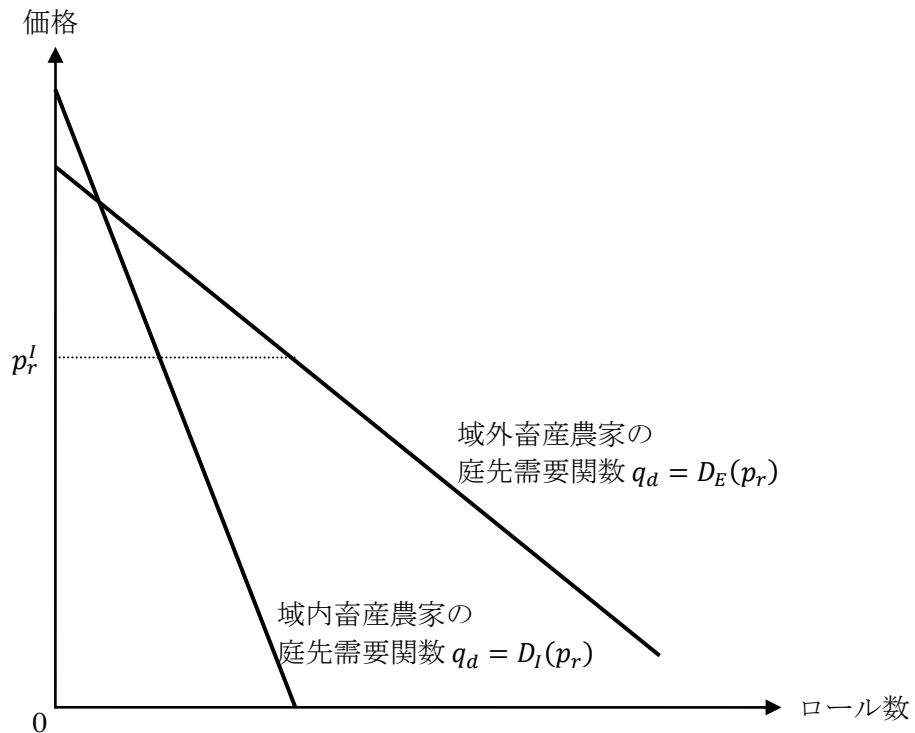


図8 地域内および地域外の畜産農家による庭先需要関数

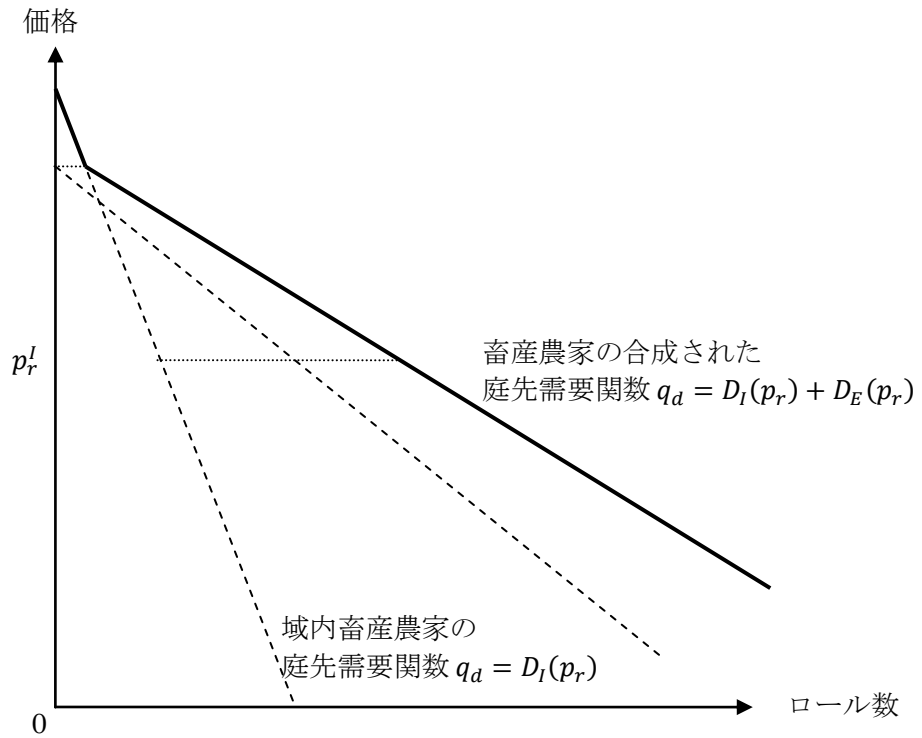


図9 地域内および地域外の畜産農家の合成された庭先需要関数

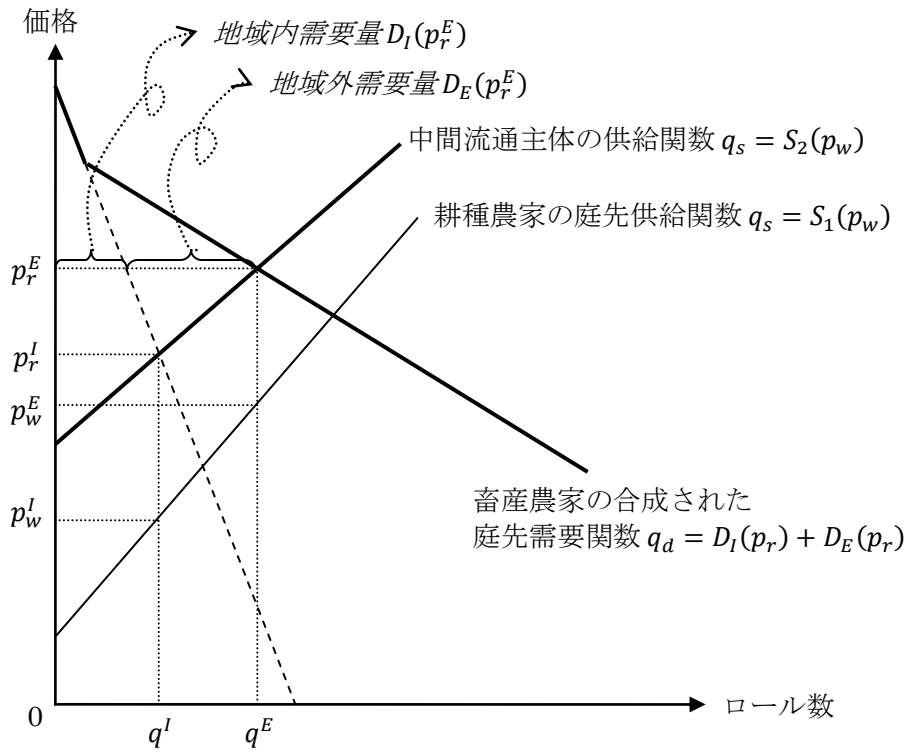


図10 流通圏域全体における公益性を重視する場合の需給均

次に、中間流通主体の公益性に対する視点として、地域内（県域）における公益性を重視する場合を検討する。地域内のみで稲 WCS を流通させた場合、図 7 より、 q^I, p_w^I, p_r^I の均衡が得られた。しかし、地域外にまで流通を拡大した図 10 では、地域内の畜産農家の需要量が減少することになった。そのため、中間流通主体が地域内（県域）における公益性を重視している場合、地域外への流通は必ずしも目的に合致しない結果を生むことになる。

そこで、ここでは、地域内の畜産農家の需要量を維持したまま、付加的に地域外への流通対応を考えるという方針を採る場合の均衡を求める。そのためには、地域内の畜産農家への販売価格を p_r^I に維持した上で、地域外の畜産農家へ、 $p_r^A > p_r^I$ となるような域外価格を設定する必要がある。図 11 は、まず、 q^I のロールは事前に域内用に確保された状態であり、そこから追加的に生産されるロールに対して、域外の需要を均衡させるという状況を描いている。域外の需要関数は q^I から引いた垂線を起点として、そこに需要量を追加する形で右下がりの太線のように描かれる。これは図 10 の合成された需要関数（図 11 の右下がりの点線）とは異なってくる。したがって、均衡は、 q^A, p_w^A, p_r^I, p_r^A となる。すなわち、中間流通主体が耕種農家に対して p_w^A の買取価格を提示し、耕種農家は q^A のロールを供給する。同時に中間流通主体は地域内畜産農家に対して販売価格 p_r^I を提示し、地域内畜産農家は q^I を購入する。また、地域外の畜産農家に対しては販売価格 p_r^A を提示し、地域外の畜産農家は $D_E(p_r^A)$ を購入する。ここで、流通圏域全体の公益性を重視した場合である

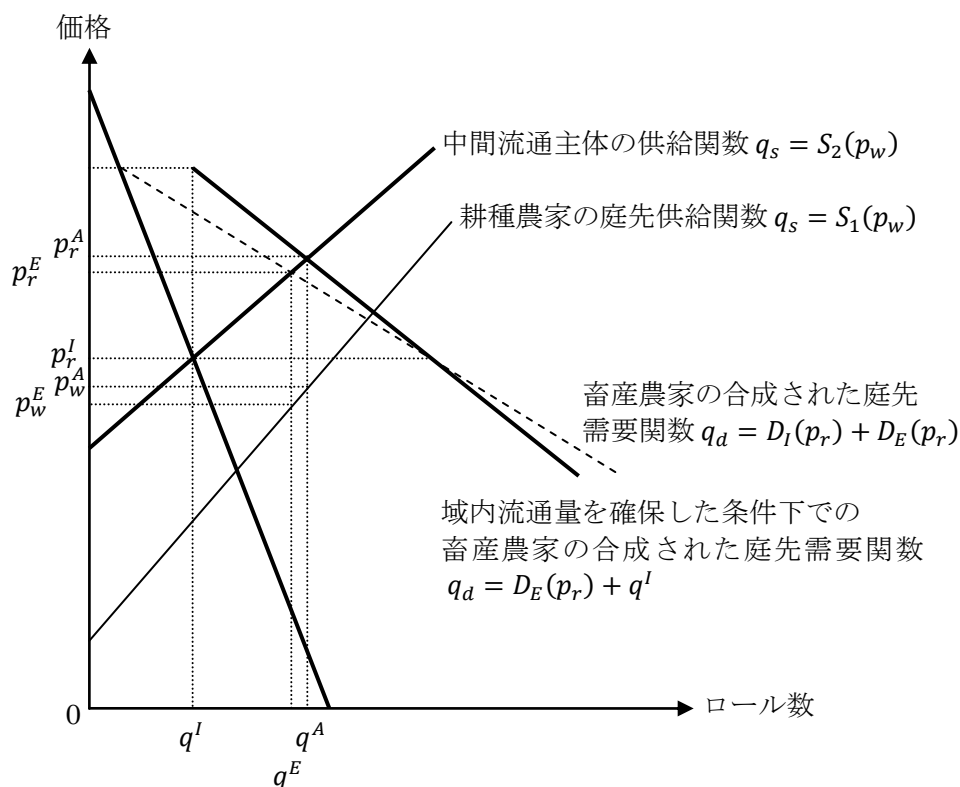


図 11 地域内（県域）における公益性を重視する場合の需給均衡

図 10 と比べると、地域内の畜産農家へはより低い価格が提示されることで ($p_r^l < p_r^E$)、ロールの購入量は拡大する ($q^l = D_l(p_r^l) > D_l(p_r^E)$)。一方、地域外の畜産農家については、より高い価格が提示されることで ($p_r^A > p_r^E$)、ロールの購入量は減少する ($D_E(p_r^A) < D_E(p_r^E)$)。全体としては稲 WCS の流通量は拡大することになる ($q^A = D_l(p_r^l) + D_E(p_r^A) > D_l(p_r^E) + D_E(p_r^E) = q^E$)。

ただし、ここでは、需要する畜舎が変更されることに伴う流通経費の変化はないものとして図示およびその結果を示したが、本来は、若干の流通経費の変化を伴うことに注意されたい。

なお、以上の議論は、中間流通主体として県の公益法人を念頭に行った。しかし、これが例えば、畜産農家を中心に構成されるコントラクター組織であっても、同様の議論が可能である。ラップサイレージの普及によって、牧草やコーンサイレージにおいても広域流通の可能性が高まってきている。その場合、組織内販売と組織外販売をどのようにバランスさせるかという問題を抱えることになる。その際、内部価格、外部価格の設定を通して、組織の目的を達成しやすくするという流通上の調整が必要となる。

3) 需給均衡の導出手順

耕種農家の庭先供給関数、畜産農家の庭先需要関数が与えられた場合、図 10 および図 11 の需給均衡は以下の逐次的な手順を通して求めることができる。

(1) 県外を含める流通圏域全体における公益性を重視する場合

まず、県外を含める流通圏域全体における公益性を重視する場合の需給均衡を求める手順は以下のステップの繰り返しとなる。

ステップ 1:

耕種農家の庭先供給関数より、ちょうど

$$q_s = S_1(p_w) = 0$$

となるような買取価格 \underline{p}_w を得る。

ステップ 2:

地域内及び地域外の畜産農家の合成された庭先需要関数より、ちょうど

$$q_d = D_l(p_r) + D_E(p_r) = 0$$

となるような販売価格 \overline{p}_r を得る。

ステップ 3:

買取価格を \underline{p}_w より 1 単位（単位は任意であるが、小さいほど分析精度が高くなり望ましい）上げて、

$$p_w = \underline{p}_w + 1$$

とし、その時の圃場別ロール供給量 $q_s = S_1(p_w)$ を得る。

ステップ 4:

販売価格を \overline{p}_r から一単位ずつ下げていき、需要量が供給量を超えない範囲、

$$S_1(p_w + 1) - (D_I(p_r) + D_E(p_r)) > 0$$

において、できるだけ多くのロールが購入されるような販売価格 \overline{p}_r を求め、その時の畜舎別購入量を得る。

ステップ 5:

ステップ 3 とステップ 4 で得られた圃場別ロール供給量と畜舎別ロール購入量を所与として、物流経費最小化モデルを解き、ロール当たりの物流経費

$$\frac{\text{argmin } VC + FC}{q_s}$$

を求める。

ステップ 6:

ロール当たりの買取価格と物流経費が、販売価格を下回っている場合、すなわち、

$$p_w + \frac{\text{argmin } VC + FC}{q_s} < p_r$$

の場合、買取価格 p_w をさらに 1 単位上げてステップ 3 以降を繰り返す。

ロール当たりの買取価格と物流経費が、販売価格と一致している場合、すなわち、

$$p_w + \frac{\text{argmin } VC + FC}{q_s} = p_r$$

の場合、流通圏域全体への公益性を重視する場合の最適な買取価格、販売価格および物流経費が、今回の一連のステップで利用した価格及び経費として得られる。

ロール当たりの買取価格と物流経費が、販売価格を上回った場合、すなわち、

$$p_w + \frac{\text{argmin } VC + FC}{q_s} > p_r$$

の場合、前回の一連のステップで利用した価格及び経費が、流通圏域全体への公益性を重視する場合の最適な買取価格 p_w^E ，販売価格 p_r^E および物流経費となる。

また、こうして求めた均衡において、需要量が正 ($x_i < 0$) である畜舎の地点が流通圏域を構成することになる。

(2) 地域内（県域）の公益性を重視する場合

次に、地域内（県域）の公益性を重視する場合の需給均衡を求める手順は以下のステップの繰り返しとなる。先の手順との違いは、最初に地域内に限定した需給均衡を求め、その際の均衡価格 p_r^I を維持したまま、地域外へのロール流通を行った場合の均衡を求めることにある。

ステップ 1-1 :

耕種農家の庭先供給関数より、ちょうど

$$q_s = S_1(p_w) = 0$$

となるような買取価格 \underline{p}_w を得る。

ステップ 1-2 :

地域内の畜産農家の庭先需要関数より、ちょうど

$$q_d = D_I(p_r) = 0$$

となるような販売価格 \overline{p}_r を得る。

ステップ 1-3 :

買取価格を \underline{p}_w より 1 単位（単位は任意であるが、小さいほど分析精度が高くなり望ましい）上げて、

$$p_w = \underline{p}_w + 1$$

とし、その時の圃場別ロール供給量 $q_s = S_1(p_w)$ を得る。

ステップ 1-4 :

販売価格を \overline{p}_r から一単位ずつ下げていき、需要量が供給量を超えない範囲、

$$S_1(p_w + 1) - D_I(p_r) > 0$$

において、できるだけ多くのロールが購入されるような販売価格 \overline{p}_r を求め、その時の畜舎別購入量を得る。

ステップ 1-5 :

ステップ 1-3 とステップ 1-4 で得られた圃場別ロール供給量と畜舎別ロール購入量を所与として、物流経費最小化モデルを解き、ロール当たりの物流経費

$$\frac{\mathit{argmin} VC + FC}{q_s}$$

を求める.

ステップ 1-6 :

ロール当たりの買取価格と物流経費が、販売価格を下回っている場合、すなわち、

$$p_w + \frac{\mathit{argmin} VC + FC}{q_s} < p_r$$

の場合、買取価格 p_w をさらに 1 単位上げてステップ 1-3 以降を繰り返す.

ロール当たりの買取価格と物流経費が、販売価格と一致している場合、すなわち、

$$p_w + \frac{\mathit{argmin} VC + FC}{q_s} = p_r$$

の場合、地域内でのみ流通させる場合の最適な販売価格 p_r^I 、域内需要量 q^I は、今回の一連のステップで利用した価格及び需要量として得られる。また、その際の買取価格を $\underline{p_w}$ とおく。

また、ロール当たりの買取価格と物流経費が、販売価格を上回った場合、すなわち、

$$p_w + \frac{\mathit{argmin} VC + FC}{q_s} > p_r$$

の場合、前回の一連のステップで利用した販売価格及び需要量が、地域内でのみ流通させる場合の最適な販売価格 p_r^I 及び域内需要量 q^I となる。また、その際の買取価格を $\underline{p_w}$ とおく。

ステップ 2-1 :

地域外の畜産農家の庭先需要関数より、ちょうど

$$D_E(p_r) = 0$$

となるような販売価格 \bar{p}_r を得る。

ステップ 2-2 :

ステップ 1-6 で得られた地域内の需給を均衡させる買取価格 p_w より 1 単位 (単位は任意であるが, 小さいほど分析精度が高くなり望ましい) だけ上げて, 買取価格を

$$p_w = \underline{p_w} + 1$$

とし, その時の圃場別ロール供給量 $q_s = S_1(p_w)$ を得る.

ステップ 2-3 :

販売価格を \bar{p}_r から一単位ずつ下げていき, 需要量が供給量を超えない範囲,

$$S_1(p_w + 1) - (q^I + D_E(p_r)) > 0$$

において, できるだけ多くのロールが購入されるような販売価格 \bar{p}_r を求め, その時の畜舎別購入量を得る.

ステップ 2-4 :

ステップ 1-6 で得られた地域内の畜舎別ロール購入量, ステップ 2-3 で得られた地域外の畜舎別ロール購入量, ステップ 2-2 で得られた圃場別ロール供給量を所与として, 物流経費最小化モデルを解き, ロール当たりの物流経費

$$\frac{\text{argmin } VC + FC}{q_s}$$

を求める.

ステップ 2-5 :

ロール当たりの買取価格と物流経費が, 地域外の畜産農家への販売価格を下回っている場合, すなわち,

$$p_w + \frac{\text{argmin } VC + FC}{q_s} < \bar{p}_r$$

の場合, 買取価格 p_w をさらに 1 単位上げてステップ 3 以降を繰り返す.

ロール当たりの買取価格と物流経費が, 地域外の畜産農家への販売価格と一致している場合, すなわち,

$$p_w + \frac{\text{argmin } VC + FC}{q_s} = \bar{p}_r$$

の場合, 最適な買取価格 p_w^A , 販売価格 \bar{p}_r^A および物流経費が, 今回の一連のステップで利

用した価格及び経費として得られる。

ロール当たりの買取価格と物流経費が、販売価格を上回った場合、すなわち、

$$p_w + \frac{\operatorname{argmin} VC + FC}{q_s} > p_r$$

の場合、前回の一連のステップで利用した価格及び経費が、最適な買取価格 p_w^A 、販売価格 p_r^A および物流経費となる。

また、こうして求めた均衡において、需要量が正 ($x_i < 0$) である畜舎の地点が流通圏域を構成することになる。

6. おわりに

本研究では、まず、宮城県農業公社における稲 WCS の広域流通の事例を調査した。事例では、ストックヤードを経由した流通体系が取られるようになってきている。この理由として、県内及び県外への流通の広域化してきただけでなく、小規模な稲作農家、条件の悪い圃場が飼料稲生産に参入してきたことによるストックヤードの活用の必要性という面も指摘できる。その中で、物流に伴う費用は、稲 WCS の生産費と同等あるいはそれ以上の費用となってくるものであることが示され、物流の最適化を図る重要性が高いことが明らかとなった。

物流費用の内訳に留意する場合、物流費用最小化問題を構築するためには、内生変数としてトラック走行および荷役作業を明示化することが重要である。また、物流における規模の経済性を明示的に分析するため、トラックサイズの違いも明示的にモデルに含めることが重要である。本研究では、これらを踏まえた物流費用最小化問題を構築した。そして、需要関数、供給関数と連動することで、流通圏域測定の手順を提示した。

最後に、本研究で提示した流通圏域測定モデルの実証的に活用する場合、必要とされるデータの整備について述べておく。必要とされるデータは主に次の 4 点である。第 1 に、輸送トラック及び荷役作業機械の運用経費である。これは、事例においては経理情報等から算定可能であった。

第 2 に、地点間の輸送時間行列である。これは、分析対象となる地点間の輸送車での走行時間を相互に確認できる行列表である。各地点の住所情報は通常コントラクターにおいて整備されている。そこで、 n 地点に対して厳密に計測するとなると、 $n(n-1)/2$ 区間の輸送時間を計測する必要がでてくるが、一次的なアプローチとして、地点間の移動時間をインターネット上のルート間の所要時間検索サービス等を利用することで、比較的容易に情報を整備することが可能であろう。もちろん、実際のトラック移動や作業機械の輸送はこの数値と誤差を伴うため、漸次、改訂していくことで、モデルの解析精度を高めることが可能である。

第 3 に、各畜産農家の需要関数である。これは、複数年を通しての補助金受給状況と購

入価格、購入量について各畜産農家別にデータを集積した上で計測する必要がある。同様に第 4 に、各圃場における供給関数である。これも、複数年を通しての補助金受給状況と供給量について各圃場別にデータを集積した上で計測する必要がある。これらデータの整備と実証は今後の課題である。