

経済性と環境負荷のトレードオフ評価のための多目的解析ソフト開発

ー生産・流通システムを対象としてー

Software Development of Multi-objective Analysis for Evaluating Trade-off between Economy and Environment

- Concerns with Production and Logistic Systems -

清水 良明

Yoshiaki SHIMIZU

Optimization Engineering Laboratory, y, Emeritus Professor of Toyohashi University of Technology

4-10-90, Fuseya-cho, Izumi-city, Osaka, JAPAN

Abstract

This report describes about a software development of multi-objective analysis for evaluating trade-off between economy and environment. We focused on a logistic system cooperated with multiple production manners that respectively take different features regarding production cost as an economy issue and CO₂ emission as an environmental one. To cope with the problem practically, we extended our foregoing approach referring to hybrid of graph algorithm for minimum cost flow problem and our original classical and recent meta-heuristic methods. The former derives an optimal scheme of total solution such as allocations of production and paths of location. On the other hand, the latter deal with a sub-problem known as vehicle routing problem. Then, viewing trading cost of CO₂ emission as a weight between cost and economy, we have developed a procedure of multi-objective analysis in terms of weighting method. Finally, a case study and bench mark with practical problem size have been solved successfully by the developed software.

Key words : Software development, Multi-objective analysis, Hybrid of graph algorithm and evolutionary method, Trade-off between economy and environment, Logistic system cooperated with production manners.

1. はじめに

経済性を議論するときの近年のキーワードの一つとなるグローバル化と共に、生産・流通システムの構築においても地球環境問題と関わるグリーン化や低炭素化という視点が求められるようになってきている。さらに核化社会や高齢化社会でのサービスイノベーションに向けたビジネス革新が過酷な競争を制する要因の一つとして競われている。また現代の産業では、「品質、価格、迅速供給」が各企業の生き残りのためのモットーとなっている。すなわちいわゆる QCD が重要（Q: Quality; C: Cost; D: Delivery）といわれている。近年のサプライチェーンでは、このうち Q を Service や環境配慮に置き替えた考察が求められるようになってきている。さらに近年の SDGs（Sustainable Development Goals）標語の広まりと相まって、生産者側だけでなく消費者側にとっても製品選択における環境配慮が強く意識されるようになってきている。こうした認識の下での生産・流通システムの構築は、上述のような世情の背景にある社会インフラと関わる幾つかの問題解決に向けた枠組を与えることができる。このため現実的な条件に対応可能で柔軟で汎用性の高い解法の開発が重要となる（Shimizu, Sakaguchi and Shimada, 2015, Shimizu, 2014）。以下では、上述のごとき観点から低炭素型の生産・流通システム構築のための支援システム開発に繋がる多目的解析アプリの開発結果を報告する。

2. 問題解決のアプローチ

生産拠点（工場: DC）—収集拠点（卸業: RS）—顧客（小売業: RE）から構成される生産・流通システムの構築問題を取り上げる。具体的には、Fig.1 に示すような、複数の生産方法を持つ生産拠点から収集拠点を經由して、顧客へ巡回配送する計画問題を考える。この際の目的として費用と CO2 排出量の最小化を取り上げ、これらのトレードオフ解析を可能とするソフトの開発を行う。このような生産計画（生産方法の選択とその量の決定）と連携して流通システムについて多目的下で考察するような研究例は、筆者の知る限り極めて少ない（Reimann, M., Neto, R. T. and Bogendorfe, E., 2014）。

この各々の問題は生産拠点とそこでの生産方法の決定および収集拠点の選択に加え、各収集拠点を起点とした顧客への車両の巡回経路を決めるものである。これは、共に NP ハードとなる組合せ最適化問題が多重化したものとなり、現実規模の問題に対して求解は極めて困難となる。そこで一挙に最終解を求めることは不可能なため、本来の問題をサブ問題に分割した上で反復的な手順に従って近似度を上げながら最終解に近づく方法を採用する。

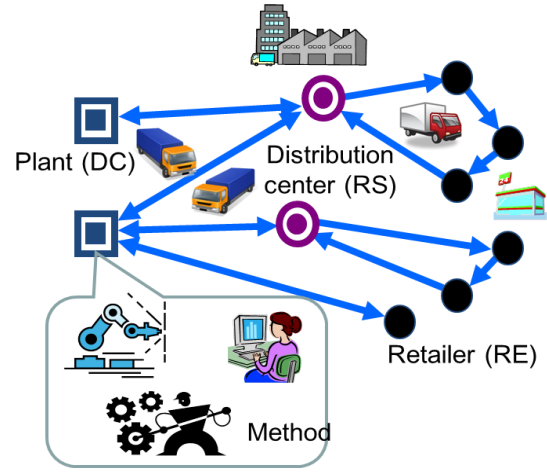


Fig.1 対象とする問題のイメージ図

3. モデルの定式化

以下で対象とするモデルは、コスト $f_1(\mathbf{x})$ を目的としてこれを最小とする生産拠点（DC）、収集拠点（RS）および顧客間（RE）の配送（配置, 配分）と生産拠点での生産方法を決定するものである。この問題は以下のような混合整数計画問題として定式化される。

(p.1) Minimize $f_1(\mathbf{x}) =$

$$\begin{aligned} & \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} TcL_{ij} (f2_{ij} + q1_v) + \sum_{i \in I} \sum_{i' \in I'} Hp_{ii'} f1_{ii'} + \sum_{i \in I} Ship1_i (\sum_{j \in J} f2_{ij}) + \sum_{j \in J} Ship2_j (\sum_{i \in I} f2_{ij}) \\ & + \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} \sum_{p' \in P} c_v d_{pp'} (g_{pp'v} + q2_v) z_{pp'v} + \sum_{v \in V} F_v y_v + \sum_{i \in I} \sum_{i' \in I'} Fc_{ii'} x_{ii'} \end{aligned}$$

subject to

$$\sum_{p \in P} z_{kp v} \leq 1, \quad \forall k \in K; \forall v \in V \quad (1)$$

$$\sum_{p' \in P} z_{pp'v} - \sum_{p' \in P} z_{p'pv} = 0, \quad \forall p \in P; \forall v \in V \quad (2)$$

$$g_{pp'v} \leq W_v z_{pp'v}, \quad \forall p \in P; \forall p' \in P; \forall v \in V \quad (3)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{p' \in P} z_{pp'v} \leq M y_v, \quad \forall v \in V \quad (4)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} z_{jk v} = y_v, \quad \forall v \in V \quad (5)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} z_{kj v} = y_v, \quad \forall v \in V \quad (6)$$

$$\sum_{k \in K} g_{kj v} = 0, \quad \forall j \in J; \forall v \in V \quad (7)$$

$$\sum_{v \in V} \sum_{p \in P} g_{pkv} - \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} g_{kp v} = D_k, \quad \forall k \in K \quad (8)$$

$$\sum_{p \in P} (g_{pkv} - D_k z_{pkv}) = \sum_{p \in P} g_{kp v}, \quad \forall k \in K, \forall v \in V \quad (9)$$

$$\sum_{j \in J} f2_{ij} = \sum_{i' \in I'} f1_{ii'}, \quad \forall i \in I \quad (10)$$

$$\sum_{i \in I} f2_{ij} = \sum_{v \in V} \sum_{k \in K} g_{jkv}, \quad \forall j \in J \quad (11)$$

$$\sum_{i \in I} f2_{ij} \leq U_j, \quad \forall j \in J \quad (12)$$

$$f1_{ii'} \leq S_{ii'}^{\max} x_{ii'}, \quad \forall i \in I, \forall i' \in I' \quad (13)$$

$$P_i^{\min} t_i \leq \sum_{j \in J} f2_{ij} \leq P_i^{\max} t_i, \quad \forall i \in I \quad (14)$$

$$x_{ii'} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, \forall i' \in I'; y_v \in \{0, 1\}, \quad \forall v \in V; t_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I;$$

$$z_{pp'v} \in \{0, 1\}, \quad \forall p \in P; \forall p' \in P; \forall v \in V$$

$$f1_{ii'} \geq 0, \quad \forall i \in I; \forall i' \in I'; f2_{ij} \geq 0, \quad \forall i \in I; \quad \forall j \in J; g_{pp'v} \geq 0, \quad \forall p \in P; \forall p' \in P; \forall v \in V$$

決定変数

t_i : 生産拠点 i と契約する時 1, しない時 0

$x_{ii'}$: 生産拠点 i で生産方法 i' を採る時 1, そうでない時 0

y_v : 車輦 v を使用する時 1, しない時 0

$z_{pp'v}$: 車輦 v が $p \in P$ 、 $p' \in P$ 間の経路を通るなら 1、通らないなら 0

$f1_{ii'}$: 生産拠点 i の生産方法 i' の生産量

$f2_{ij}$: 生産拠点 i から収集拠点 j への出荷量

$g_{pp'v}$: 車輦 v の $p \in P$ 、 $p' \in P$ 間の積載量

パラメータ

Tc : 生産拠点 - 収集拠点の単位輸送費用

L_{ij} : 生産拠点 i と収集拠点 j の往復距離

c_v : 車輦 v の単位輸送費用

D_k : 顧客 k の需要量

$d_{pp'}$: 施設 $p \in P$ 、 $p' \in P$ 間の距離

$Fc_{ii'}$: 生産拠点 i の生産方法 i' の固定費用

F_v : 車輦 v の固定費用

$Hp_{ii'}$: 生産拠点 i の生産方法 i' の単位生産費用

$Ship1_i$: 生産拠点 i の単位出荷費用

$Ship2_j$: 収集拠点 j の単位出荷費用

M : 大数

P_i^{\max} : 生産拠点 i の最大生産量

P_i^{\min} : 生産拠点 i の最低生産量

$S_{ii'}^{\max}$: 生産拠点 i の生産方法 i' の最大生産量

U_j : 収集拠点 j の最大取扱容量

W_v : 車輦 v の最大積載量

$q1_v, q2_v$: それぞれ生産拠点と拠点を出発するトラックの自重

集合

I : DC; J : RS; K : RE; I' : Method

ここで目的関数の各項は、生産拠点から収集拠点までの輸送コスト、生産コスト、収集拠点から各顧客への巡回配送コスト、車両固定コストおよび生産固定コストを表わす。また各制約式は次のことを表わす。

- (1)式：顧客への配送は一ヶ所のみから行われる。
- (2)式：顧客に到着した車両はそこから出発しなければならない。
- (3)式：全ての経路において車両の最大積載量を越えない。
- (4)式：車両を使う場合、経路は存在しなければならない。
- (5)式：車両を使う場合、生産拠点を出て行く経路は一つなければならない。
- (6)式：車両を使う場合、収集拠点に戻る経路は一つなければならない。
- (7)式：収集拠点に戻ってくる車両の積載量は 0 でなければならない。
- (8)式：顧客の需要を満たさなければならない。
- (9)式：配送毎に積載量は需要分ずつ減少する。
- (10)式：生産拠点において入出量が一致しなければならない。
- (11)式：収集拠点において入出量が一致しなければならない。
- (12)式：収集拠点において最大取扱容量以下でなければならない。
- (13)式：各生産方法には上限がある。
- (14)式：生産拠点の生産量は最小量以上、最大量以下でなければならない。

上記のモデルの目的関数において、コスト原単位 [¥/トンキロ] に関するパラメータを CO2 排出原単位 [Kg-CO2/トンキロ] のものに置き換えることで、CO2 排出量の最小化問題が定式化される。さらに、この時の目的関数を $f_2(\mathbf{x})$ で表すとすれば、これらを同時に勘案する 2 目的問題は、排出換算係数 [¥/Kg-CO2] (便宜的に重み係数 w とみなせる) を導入することでコストによって評価される目的関数 $f_3(\mathbf{x}) = f_1(\mathbf{x}) + w f_2(\mathbf{x})$ の下での単一目的のモデルとして定式化される。そしてこの重み係数 w を種々変化させた最適化によって、両者間のトレードオフのバランスを調整した意思決定を支援することが可能となる。

4. 階層的ハイブリッドメタ解法

既述のように、この現実規模の問題の厳密解を求めることは一般に不可能となる。このため、以下では複数のメタ解法と数理計画法を階層的にハイブリッド化した Fig.2 に示すような手順を与える (Shimizu, 2014)。

4.1 生産拠点の生産方法の決定

同一生産拠点であっても異なる生産方法を採用場合は区別して取り扱うことにより便宜的に生産拠点毎に生産方法の選択も行なえるようになる。

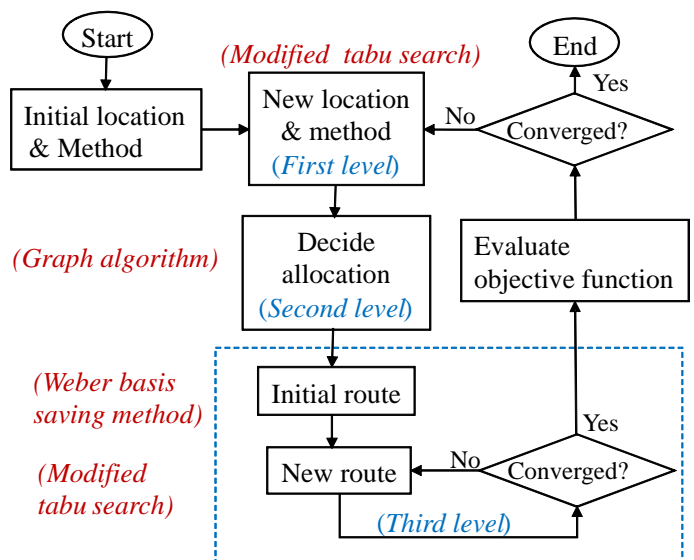


Fig.2 ハイブリッドメタ解法の手順

ここでの決定には、同一生産拠点内でのある生産方法の採用、撤退、交換と生産拠点間での交換とする近傍操作の下で修正タブーサーチを用いる。具体的には、生産拠点数×生産方法数の論理列を用意し、ある生産拠点である生産方法を採用するときは T（真）を不採用の時は F（偽）で表し、この論理列の真偽を決めればよい。ここで修正タブーサーチは改悪解もその劣化度に応じて一定の確率で受理する方法で、この時の受理確率 p は SA (Simulated Annealing) と同様 Maxwell-Boltzmann 式によって決められる。

4.2 グラフアルゴリズムによる巡回を伴わない配送計画問題の解法

生産拠点での生産方法が決まれば、生産拠点から顧客までの巡回を伴わないツリー状の配送計画問題は Table 1 と Fig.3 で与えられる最小費用流（MCF）問題を用いて求解できる。これは、先に定式化した数理計画モデルにおいて、巡回配送に関する表現と条件を除外したものに相当する。これより、生産拠点から収集拠点への輸送経路および収集拠点毎のクライアント顧客が決められる。なお、ここでの MCF 問題の解法には RELAX4 (URL0) を用いる。

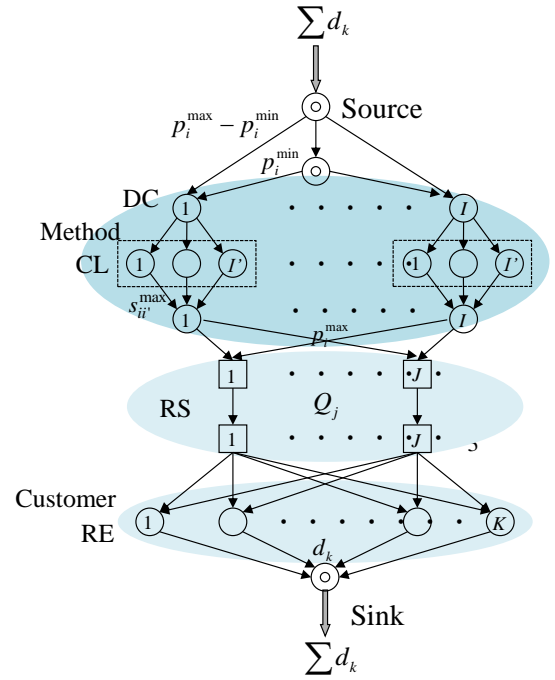


Fig.3 全体モデルでの MCF グラフ

Table 1 Labeling on the edge for MCF graph

Edge (from to)	Cost	Capacity
Source - \sum (Dummy)	$-M$	$\sum_{i \in I} P_i^{\min}$
Source - DC i	0	$P_i^{\max} - P_i^{\min}$
\sum - DC i	0	P_i^{\min}
DC i - CL ii'	$Hp_{ii'}$	$S_{ii'}^{\max}$
CL ii' - DCO i	0	$S_{ii'}^{\max}$
DCO i - RS j	$TcLij + Ship1_i$	P_i^{\max}
Between double nodes of RS j	$Ship2_j$	Q_j
RS j - RE k	$c_v d_{jk}$	D_j
RE k - Sink	0	D_k

4.3 ウェーバースセービング法と修正タブーサーチによる巡回配送の近似最適化

上での結果に基づいて、次に収集拠点毎に顧客への巡回配送の最適化を行なう。生産拠点から収集拠点への配送計画は、トンキロベースで行われているためウェーバースセービング法を用いることで全体的に統一した評価を行うことができる。このセービング法は、従来法では輸送コストは配送距離だけに基いて決められるのに対して、現実には重量にも依存することに鑑みて積載量と車輛の自重を考慮した新しい巡回路の生成法である。また車輛の固定費も併せて算定する。

しかしウェーバースセービング法は近似解であるため、そこで得られた解を初期解として、先と同様、修正タブーサーチを用いて解の改善を図る。ここでの近傍解は、同一ループ内での挿入、交換、および 2-opt を、異なるループ間での移動、交換、および Cross によって発生させる (Shimizu, 2011)。

5. 求解例

5.1 ケーススタディの結果

ここでは独立行政法人 科学技術振興機構の委託援助を受けて取り上げた農産物生産システムに適用した結果（清水，バトレス，阪口，2013）について述べる。名古屋地区の3つの中央市場を収集拠点とし、17のスーパーマーケットチェーンを顧客（小売）とみなしトマトの生産拠点として知られている3地方の農協（生産拠点）から仕入れを行う場合を想定して適用した。なお、各生産拠点では、露地栽培とハウス栽培の2種類の生産方法があるとする。

そして、前節で述べた手法を用いて、サプライチェーン全体の

1. 総コストを目的としたもの： f_1
2. 総CO₂排出量を目的としたもの： f_2
3. 上記の2目的関数を重み付けしたもの： $f_1 + w f_2$

の3種類の最小化問題を与えた。これらをそれぞれ求解した結果を Table 2 に示す。

Table 2 最適化結果のまとめ

最小化問題		コスト： f_1	CO ₂ 排出量： f_2
評価値	コスト [¥]	1220485.54	1489324.43
	CO ₂ 排出量 [kg-co2]	7748.36	5309.69
生産拠点から市場へ供給		(熊本) - (岐阜, 露地) → (本場, 北部) (愛知, 露地) → (本場)	(熊本, 露地) → (南部) (岐阜, 露地) → (本場) (愛知, 施設) → (本場, 南部)
市場から小売 への巡回路	本場から	V1: 5→16 V2: 14→8→17→7→12→13 V3: 2→1→11	V1: 11→6→3→9→4
	北部から	V1: 15→3→9→4→10→6→11	-
	南部から	-	V1: 2→1 V2: 5→14→12→13→10→15 V3: 17→8→7→16
最小化問題： $f_1 + w f_2$		$w=100$ (グループ B in Fig.6)	$w=500$ (グループ D in Fig.6)
評価値	コスト [¥]	1233882.23	1473955.99
	CO ₂ 排出量 [kg-co2]	5898.48	5313.76
生産拠点から市場へ供給		(熊本, 露地) → (本場) (岐阜, 露地) → (本場, 北部) (愛知) -	(熊本, 露地) → (本場, 南部) (岐阜, 露地) → (本場) (愛知, 施設) → (南部)
市場から小売 への巡回路	本場から	V1: 2→1→11 V2: 5→14 V3: 8→17→16→7→12→13	V1: 2→1→11 V2: 4→9→10→3→6→15 V3: 14→12
	北部から	V1: 15→3→9→4→10→6→11	-
	南部から	-	V1: 5→8→17→16→7→13→1

f_1 と f_2 の目的関数値間にはトレードオフ関係がみられ、 f_3 で重み係数 w のパラメトリックな取り扱いによりこの様子を観察できる。どのような目的関数の下で最適化するかによって供給元や巡回路が明らかに異なる結果となっている。そして各最適解と併せて、探索過程で見つかった実行可能解を図示することで、最適解の周辺の実行可能解の分布やその密度について知ることができる。Fig.4 は、両目的と、 $w=100, 500$ とした重み付け問題において示したもので、 f_1 と $w=100$ での実行可能解はごく少数しか存在しないのに対して、 f_2 と $w=500$ ではかなり広く分布しているものの、解はまばらなことがわかる。ただし、上述のように探索過程

で見つけたもので、できるだけ多くなるようにと系統立てて探したものではない。実態を正確に反映しているとは言えないが、問題の特性の概要を捉えることができるといえる。

また、Fig.5 に示す解の収束状況 ($w=500$) からは、探索初期に大きな改善がみられるものの、その後は緩やかの変化となっていることが知れる。他の場合もほぼ同様の傾向となる。

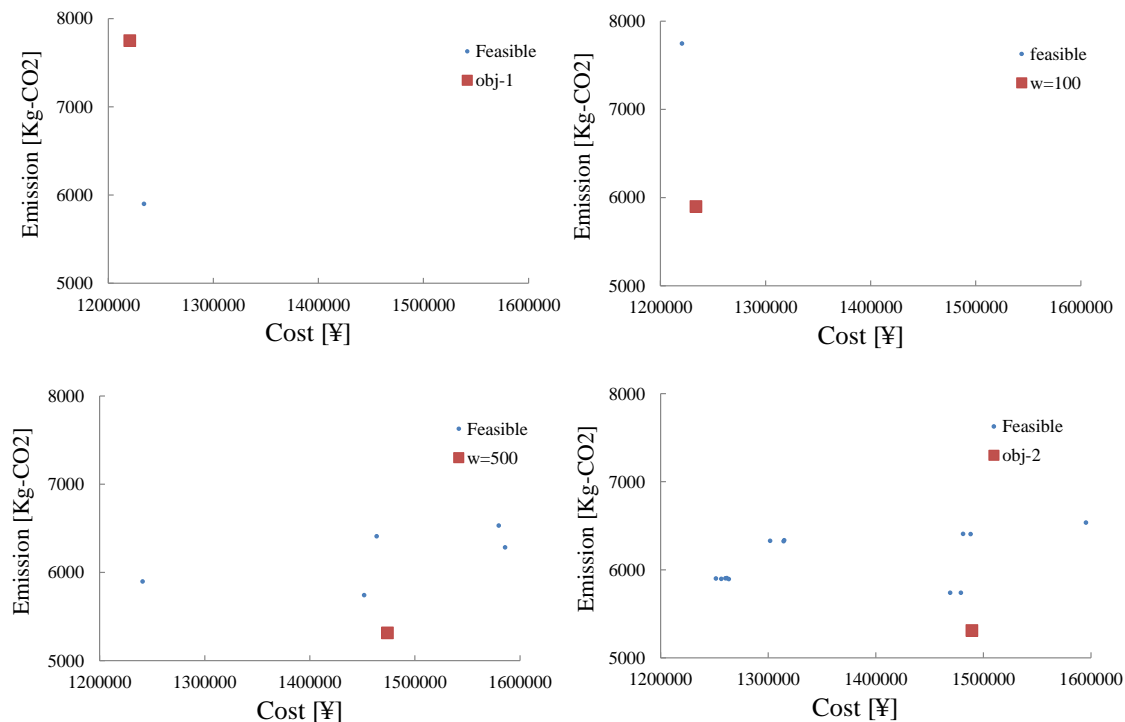


Fig. 4 解分布やその密度 ($f_1, w=100, f_2, w=500$)

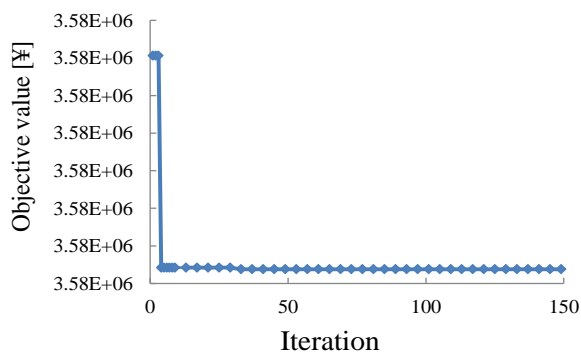


Fig. 5 解の収束状況 ($w=500$)

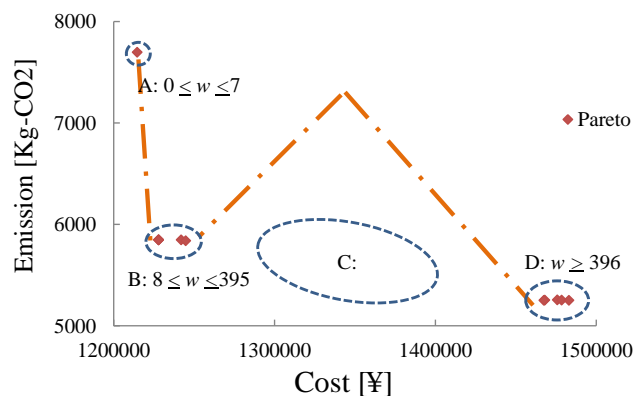


Fig. 6 コストと排出 CO2 量間のパレート解集合

さらに、 f_1 と f_2 の最適解および f_3 で重みを種々変えて得られた複数の最適解から Fig.6 に示すようなパレート解集合を描くことで、コストと排出 CO2 量間のトレードオフ分析が可能となる。当初、重みの少しの変化（境界値 7 を超える）で排出量を大きく減らすことができるものの、その後、重みをかなり大きくしても解（グループ B）はほとんど変化しない。重みがそこでの境界値（395）を超えれば、大幅なコスト増にも拘らず、排出量の減少はわずかとなる別のグループ D が得られる。このようにパレート解の分布は、y 軸部分や x 軸部分に偏在し、中間領域（グループ C）には解が存在しないことがわかる。重み付け評価関数値 $f_1 + w f_2$

は重みの大きさに直接的に影響されるので、今の場合、B グループの最も y 軸より ($w=8$) の解を採用するのが妥当といえる。

5.2 プログラムで自動的に作成した問題の結果

問題をプログラムで自動的に作成させる場合では、実用規模の問題を扱うことができる。一例として問題規模を、工場数、卸業数、小売業数、および生産法をそれぞれ 5, 10, 1000, 3 とし、目的ごとの最適化と重みを 8 とした時の結果を以下に示す。

1. 目的 1 の結果

Graph size(Node, Edge) 1048 11101
of DC, RS, RE, Method= 5 10 1000 3

=== Parameters for available vehicle ===

Type, Own weight, Payload, Fixed cost, Fuel cost, Emission

1	1000	2000	2000	12.66000	0.2210644
2	2000	4000	3000	10.15500	0.1773230
3	3000	6000	5000	6.612500	0.1506067
4	5000	10000	8000	5.796000	0.1320100
5	8000	15000	10000	4.841500	0.1102703

MAX ITERATION & Fail limit= 290 290

===== Done ! =====

ITERATION & Fail count= 291 3
TOTAL SOLUTION TIME = 709.6133 SECS.

Optimal COST [¥] = 5571717.91413672 attained at 95 cycle as Obj- 1

TOTAL EXPENSE [¥] = 5571717.91413672

TOTAL CO2 [Kg-CO2] = 232712.676000000

===== OPTIMAL Production =====

DC- 1: T T T DC- 2: T T T DC- 3: T F T DC- 4: T T T DC- 5: F F T

2. 目的 2 の結果 (上と共通部分は略)

===== Done ! =====

ITERATION & Fail count= 291 3

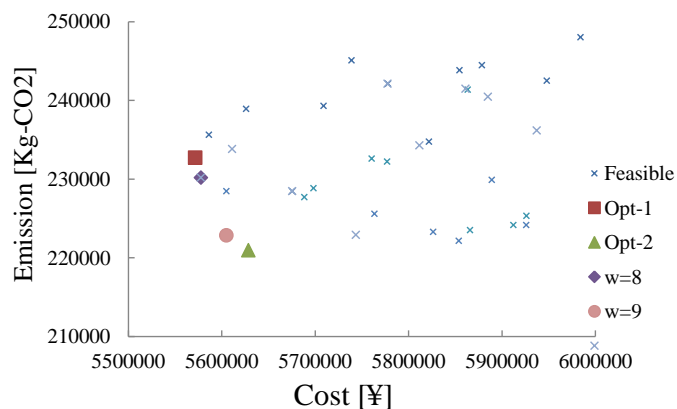


Fig. 7 パレート解と実行可能解の集合

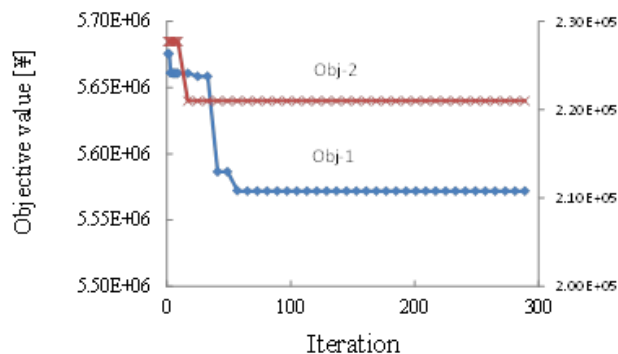


Fig.8 各目的の収束状況

TOTAL SOLUTION TIME = 817.9180 SECS.

Optimal CO2[Kg-CO2]= 220971.906000000

attained at 10 cycle as Obj- 2

TOTAL EXPENSE [¥] = 5628648.35132422

TOTAL CO2 [Kg-CO2] = 220971.906000000

===== OPTIMAL Production =====

DC- 1: T T T DC- 2: T T T DC- 3: T T F DC- 4: T T T DC- 5: T T T

3. 重みを 8 とした時の結果（上と共通部分は略）

===== Done ! =====

ITERATION & Fail count= 291 12

TOTAL SOLUTION TIME = 532.7656 SECS.

Opt. augmented COST[¥]= 7419402.51017578

By rate 8 attained at 17 cycle as Obj- 3

TOTAL EXPENSE [¥] = 5577813.67817578

TOTAL CO2 [Kg-CO2] = 230198.604000000

===== OPTIMAL Production =====

DC- 1: T T T DC- 2: T T T DC- 3: T F T DC- 4: T T T DC- 5: T F T

また、Fig.7 はこれらの結果に重みを 9 の時のものを加えて、パレート解と実行可能解を図示したものである。ここでのパレート解集合は、重み 8 と 9 の極わずかな違いで、目的関数 1 寄りになるか目的関数 2 寄りになるかという特徴をもつ。なお、ここでの実行可能解は広く分散して分布している。

さらに、Fig.8 に各目的の最適化における収束状況を示す。先と同様、どちらを目的とした場合も探索の初期に大きな改善がみられるものの、後は緩やかな変化となっている。

6. アプリの利用方法と実行例

本アプリ MOALOGIPRO (Multi-objective Analysis for Logistics cooperated with PROduction manners) は、フォートラン言語を用いてプログラムされている。そして生産コストと CO2 排出の原単位の異なる複数の生産方法を持つ工場と卸業及び小売業で構成される生産システムにおいてその生産・物流計画の立案を支援するために利用できる。具体的には、コストまたは CO2 排出量の最小化のための生産方法と物流の最適化を提供できる。さらに 2 目的重み付け問題における排出量・コスト変換係数（重み係数）を介して両者のトレードオフ解析も可能とするものである。

起動は、MOALOGIPRO.EXE をダブルクリックして行う。ユーザー独自あるいはサンプルデータを使う場合は、これらが MOALOGIPRO.EXE と同じフォルダーにある必要がある。起動後のスクリーンを Fig.9 に示す。まず、対象とする目的関数の種類と計算結果印字の詳しさを規定するパラメータの入力が求められる。同図においては（以下赤字は、同図に対応する入力例）、

ステップ①で、2 目的の同時最適化（3）と過程ごとの要約の印字（0）が指定されている。

ステップ②で、2 目的の同時最適化の場合に、目的関数 2 に与える重み係数を **500** と与えている。ステップ①で目的関数 1（コスト）または目的関数 2（CO2 排出量）を選択したときは、このステップはスキップされる。

ステップ③で、使用するデータについて聞かれる。プログラムでランダムに作成されたもの（0）、用意されているサンプルデータ（1）およびユーザーが独自に用意したもの（2）のいずれかを指定する。ランダム（0）を選んだ場合は、引き続いて問題規模（工場数：DC#、卸業数：RS#、小売業数 RE#：及び生産方法の数：CL#）の入力が求められる。例では、ユーザーの独自データ（2）と指定している。

ステップ④で、上記でのユーザー独自指定に応じてデータ名の入力が要求される。これに対して、**'tomato.dat'**と入力している。③のステップで、ランダムデータ、またはサンプルデータと答えた場合には、このステップはスキップされる。ここで改行キーの入力により、計算が開始される。

```

=====
MOALOGIPRO: Multi-Objective Analysis on LOGistic systems
cooperated with production manners
using original, sample or randomly generated data

Case 1: Min f1(x) = cost [¥]
Case 2: Min f2(x) = CO2 emission [Kg-CO2]
Case 3: Min f1(x) + w * f2(x) [¥]
where w weight or trading cost of CO2 [¥/Kg-CO2]

FILE: result.txt-> Process along printing control
(-1: only final result, 0: summary of each process,
1: detailed result of each process)
FILE: conv.txt -> Profile of convergence
FILE: data.txt -> All problem data for small problem
=====

INPUT case (1: obj1=cost/ 2: obj2=CO2/ 3: bi-obj) &
print control(-1: final/ 0: each/ 1: detail/ ..)
3 0
INPUT weight for obj-2
500
How to generate data (0: randomly, 1:sample, 2:original)
2
Input dataname e.g., tomato.dat
'tomato.dat'

```

① 3: bi-obj, 0: eachを選択
 ② 500と入力
 ③ 2: originalを選択
 ④ 'tomato.dat'と入力

Fig.9 起動後のスクリーン

スクリーンには指定された印字パラメータに応じた結果が表示されていき、今（印字指定 0）の場合、最終的に Fig.10 に示すようなスクリーンとなる。そこでの、==== Done ! =====以降の各行にはそれぞれ以下の値が示される、

1. 反復回数とその反復時での連続失敗回数、
2. 計算時間、
3. 最適目的関数値とそれが得られた時の反復回数および重み係数（2 目的同時最適化の場合のみ）
4. 最適解のコスト、
5. 最適解の CO2 排出量

また、吹き出しに示すように、工場で採用される方法は、長さが方法数*工場数の論理記号列で示される。T(true)が採用で、F(false)は不採用を意味している。次行は、探索過程で見つかった実行可能解が計 7 個であることを示す。

また、収納用ファイルに記録された結果を利用して様々な考察が可能となる。まず要約印字を指定（①のステップでの二番目のパラメータを 0）した時の RESULT.TXT の内容を以下に示す。そこでの最初の 2 行は、

それぞれ最小費用流（MCF）グラフのサイズ（ノード数とアーク数）と問題規模を示す。次いで、Parameters for available vehicle 項で選択可能な車両タイプ（1 から 5）の諸元（自重 [Kg]、最大積載量 [Kg]、固定費[¥/台]、運搬係数 [¥/トンキロ]、および排出係数 [Kg-CO2/トンキロ]）が示される。さらに、最大反復数と許容連続失敗回数に続いて、すでに Fig.10 に示した最終結果が示される。

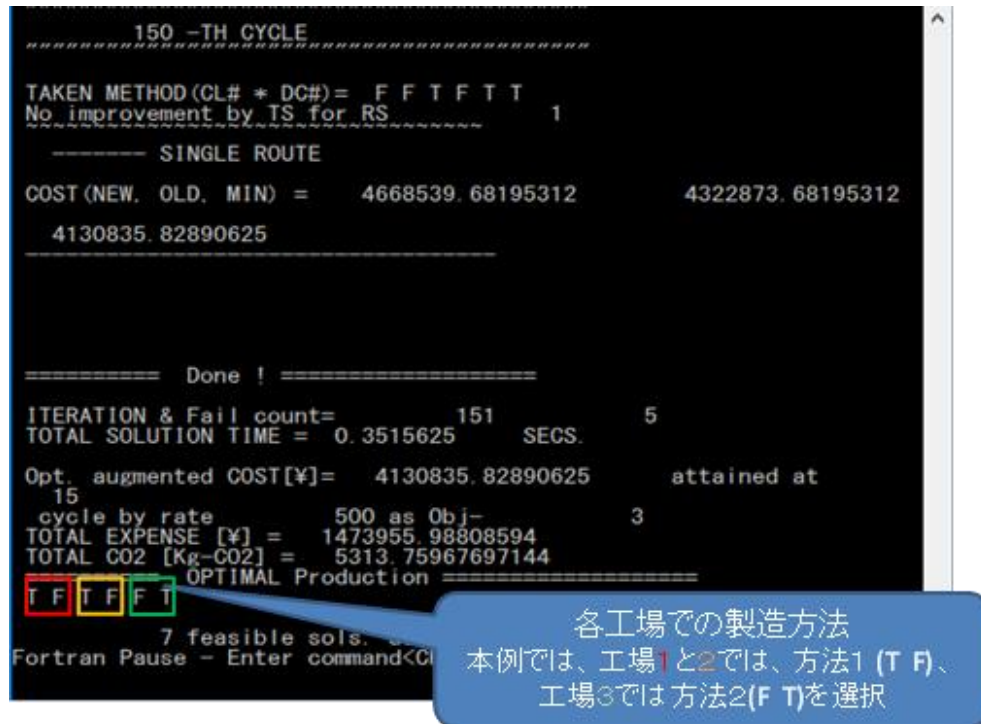


Fig.10 終了時のスクリーン

加えて、OPTIMAL Production 項では、最適な生産形態が示される。本例では、工場 1 と工場 2 では生産法 1（T F）が、そして工場 3 では生産法 2（F T）が選択されている。一方、OPTIMAL FLOW 項には各施設からの物流情報が出力される。

Graph size(Node, Edge)	38	99		
# of DC, RS, RE, Method=	3	3	17	2

==== Parameters for available vehicle ====

Type, Own weight, Payload, Fixed cost, Fuel cost, Emission					
1	1000	2000	2000	12.66000	0.2210644
2	2000	4000	3000	10.15500	0.1773230
3	3000	6000	5000	6.612500	0.1506067
4	5000	10000	8000	5.796000	0.1320100
5	8000	15000	10000	4.841500	0.1102703

MAX ITERATION & Fail limit=	150	64
-----------------------------	-----	----

==== Done ! =====

ITERATION & Fail count=	151	5
TOTAL SOLUTION TIME =	0.4414063	SECS.

Opt. augmented COST[¥]=	4130835.82890625	by rate	500 attained at
15 cycle as Obj-	3		

TOTAL EXPENSE [¥] = 1473955.98808594
TOTAL CO2 [Kg-CO2] = 5313.75967697144

@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@
Get opt.route by referring to this cycle -> 15

@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@

===== OPTIMAL Production =====
DC- 1: T F DC- 2: T F DC- 3: F T

===== OPTIMAL FLOW =====

総需要

10490

SOURCE - SIGMA (工場での最小生産量合計)

5500

SIGMA-DC (工場での最小生産量)

2500 1000 2000

SOURCE - DC (工場での超最小生産量)

2500 990 1500

SOURCE-DC + SIGMA-DC (工場での生産量)

5000 1990 3500

DCI-CL

CL-DCO (工場での生産方法の内訳)

5000 0

1990 0

0 3500

DCO-RSI (工場から卸業へ)

4540 0 460

1990 0 0

0 0 3500

RSI-RSO (卸業毎の出荷量)

6530 0 3960

Print only when NA:ARCS# 99 < 1000

RSO-RE (卸業から小売りへ)

570 540 750 560 0 570

0 0 540 740 600 500

0 530 630 0 0 0

0 0 0 0 0 0

0 0 0 0 0 0

0 0 0 0 0 0

30 0 0 0 660 0

300 770 0 0 0 0

580 0 0 910 710

RE-SINK (小売り需要)

600 540 750 560 660 570

300 770 540 740 600 500

580 530 630 910 710

7 feasible sols.: OBJ, COST[¥] & CO2[Kg] as Obj- 3

4190056.8289063	1240926.9880859	5898.2596770
4131302.2019531	1474003.9153320	5314.5965681

以下略

ところで、印字を最も詳しく指定（①のステップでの二番目のパラメータを 1）したとき、このファイルの最適解が得られた時の反復回数（15）での出力（以下に示す）を参照することで、卸業から小売業への巡回配送状況を知ることができる。ちなみに本例では配送に関して、卸業 1（RS1）からは 3 ルートあり、車両 1 によって、小売業 2, 1, 1 1 の順に、車両 2 によって、小売業 4, 9, 1 0, 3, 6, 1 5 の順にそして車両 3 によって、小売業 1 4, 1 2 の順に配送される。一方、卸業 2（RS2）からの配送はなく、卸業 3（RS3）からの配送は 1 ルートのみで、小売業 5, 8, 1 7, 1 6, 7, 1 3, 1 の順となる。なお、ルート番号のコンマの後の数字は配送量である。例えば、2, 540 は、小売業 2 へ 540Kg のように読む。

```
*****
*****          15-CYCLE          *****
*****
```

TAKEN METHOD(CL# * DC#)= T F T F F T

^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^

ROUTE FROM RS- 1

^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^

No improvement by TS for RS

1

No. of routes = 3 Iteration at TS= 1441

Opt. value after Saving & TS update 276165090 276165090

Vehicle-	1	TOTAL cost	58567110		
2,	540	1,	570	11,	600
Vehicle-	2	TOTAL cost	155703160		
4,	560	9,	540	10,	740
3,	750	6,	570	15,	630
Vehicle-	3	TOTAL cost	61894820		
14,	530	12,	500		

^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^

ROUTE FROM RS- 2

^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^

= No CUSTOMER RETRAILER =

^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^

ROUTE FROM RS- 3

^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^

----- SINGLE ROUTE

Improved rate by TS= 7.3339440E-02

No. of routes = 1 Iteration at TS= 641

Opt. value after Saving & TS update 206911050 191736310

Vehicle-	1	TOTAL cost	191736310		
5,	660	8,	770	17,	710
16,	910	7,	300	13,	580
1,	30				

COST(NEW, MIN) = 4130835.82890625 4131302.20195312

なお、解の収束状況は CONV.TXT から知れ、DATA.TXT では使用したデータが確認できる。実際、サンプルデータ tomato.dat の内容は以下の通りである。ユーザー独自の問題では、これと同等のデータセットを用意する必要がある。

'DC# = IDC, RS# = IRS, RE# = IRE, CL# = ICL '

3 3 17 2

'Distance Between DC and RS (IDC, IRS) [M]'

794611 805731 793797

38213 29151 46967

91335 103736 88141

'Distance Between RS and RE (IRS, IRE) [M]'

6879 2947 12389 12920 4772 11565 12709 8870 13411 14270 6056 12275 12095 5594 14896
13270 10821

20828 16896 7182 10630 17582 4825 23901 21286 8831 8405 11219 20241 18429 15609 3228
26075 22246

10048 7192 20950 21481 6086 20126 13534 8630 21972 22831 15089 16855 14714 10305 23457 10940
8657

'Distance Between RE and RS (IRE, IRS) [M] (Symmetry)'

'Distance Between RE and RE (IRE, IRE) [M] (Asymmetry)'

0 4403 19580 20111 7725 18756 19347 14443 20602 21461 8539 18889 18709 10661 22087 16784 14471
4202 0 15203 15734 3375 14379 11765 7926 16225 17084 9164 12919 12739 6283 17710 13538 11226
18414 14482 0 3925 15168 3318 18716 15965 2271 2232 10477 15056 10313 11277 5690 23692 16925
18967 15035 4035 0 13715 5553 15277 14226 2097 3115 11037 11617 9805 10274 9730 20253 15186
7942 3434 15238 14842 0 14414 9545 5706 14224 17119 11903 10699 10519 4219 17745 9988 6686
18025 14093 3307 5819 14779 0 19713 18483 4735 4191 8415 16183 15394 12806 3617 23272 19443
19841 11796 18657 15263 11764 20635 0 6041 16521 16785 22199 5863 6750 8331 21673 7331 4855
13015 7985 15964 14224 6631 18280 5449 0 15003 17664 15159 7223 7043 4520 22552 6576 1257
19070 15138 2271 2097 15824 4799 16538 15004 0 2386 11133 12878 11066 11054 9000 21514 15964
20304 16372 2232 3115 17058 4210 17281 16239 2545 0 12367 13621 11809 12289 6207 22257 17199
8659 9415 11017 11548 12161 8170 19254 15415 12039 12898 0 15860 15071 12138 10941 22259 17366
19017 12900 14785 11391 10609 16763 5364 7145 12649 12913 15597 0 3453 7365 17801 10340 7367
18598 12481 10637 9939 10190 14874 7294 6726 11198 11462 14569 3782 0 6946 16350 12270 7686
12244 6220 12409 10346 3930 12741 7902 4063 11125 12360 11865 8158 7978 0 16072 9703 5023
20674 16742 4974 9778 17428 4671 21723 21132 6963 6222 11954 18063 16251 15455 0 25921 22092
17079 12369 21342 20252 9108 20534 7140 6576 21510 21774 19543 10461 11739 11311 26662 0 6090
13861 9919 16924 17245 6658 18085 4879 1257 15963 18767 17094 7454 8003 5480 23655 6095 0

'TRUCK TYPE AT DC & RS'

5

4

4

2

'MAX PRODUCTION AT DC (IDC) [kg]'

65300 73700 86700

'MIN PRODUCTION AT DC (IDC) [kg]'

2500 1000 2000

'Production cost at DC (IDC, ICL) [¥/ton]'

65370 103890

63000 123000

58000 98000

'Shipping cost from DC (IDC) [¥/ton]'

21000 26000 27000

'fixed charge for culture (IDC *ICL) [¥/ton]'

45950	103890	63000	77240	58000	98000										
'Upper of Available culture (IDC * ICL) [kg]'															
5000	1500	5500	1800	5000	3500										
'EMISSION FROM DC (PRODUCTION) (IDC, ICL) [kg-co2/ton]'															
354	640														
572	872														
790	408														
'EMISSION FROM DC (SHIPPING) (IDC) [kg-co2/ton]'															
20	40	30													
'Maximum capacity at RS (IRS) [kg]'															
6530	7370	8670													
'Shipping cost at RS (IRS) [¥/ton]'															
12100	16000	17000													
'Handring COST AR RS (IRS) [¥/ton]'															
2000	4000	3760													
'EMISSION AT RS (SHIPPING) (IRS) [kg-co2/ton]'															
12	15	10													
'Demand of RE (IRE) [kg]'															
600	540	750	560	660	570	300	770	540	740	600	500	580	530		
630	910	710													

7. おわりに

本テクニカルレポートでは、生産・流通の多様化と高度化が進む中、生産・流通システムにおいて経済性と環境負荷のトレードオフ評価のための多目的解析ソフトの開発について述べた。開発に当たっては、現実の種々の状況に応じて柔軟に適用可能とすることを心掛けた。また、実用規模の問題も扱えるように、厳密な最適性を追求することは避けた近似手法に基づくものとした。具体的には、最小費用流問題とメタ解法を連携させた階層型ハイブリッド手法を採用した。

本ソフトの有効性は、現実データを含むケーススタディやベンチマーク問題における数値実験を通じて示した。これにより従来のメタ解法では取り扱われていないような規模の問題に対しても適用可能性を有しており、現実的な手法として期待が持てる。

補遺 サンプルデータの補足説明

計算に用いたデータの補足説明を Table A-1 ~ A-4 に示す。施設間距離は Google Map API を利用して求めた実際の値である。一方、他のパラメータは文献など (URL1 ~ 6) を参考として決めたもので、一部は実際のものとは異なる想定値となっている。このため入力データについての信頼性については不均一といえる。しかし、現時点では手法の有効性評価をここでの主目的とするため特に問題としないことにする。Table A-1 に示す農林水産省「品目別経営統計」より夏秋トマト分を露地、冬春分を施設のものとし、内訳を固定費と運用費に分類して計上した。JA 熊本分をこの算出値とし、他の JA については適当に変動させた値を表 4 のように与えた。また出荷量の上限は、名古屋市中心卸売市場への各県からの同年入荷量を毎週入荷するものとして 1/50 した概算値とし、下限は上限の 1/2 とした。出荷時 CO₂ 排出量は名古屋環境試験所レポートの野菜別の輸送段階の排出係数に準拠して決めた (Nakajima et al., 2011)。出荷コストについては特に根拠はない。生産方法毎の生産量の上限は露地と施設と併せて出荷量の上限の 1/10 程度となるよう、また割合も露地分を 1.5~3 倍程度で決めた。生産時排出係数は味の素グループ版「食品関連材料 CO₂ 排出係数データベース」の平均値と標準偏差値から決めた。

一方、卸市場での取り扱い上限は JA 出荷の 1/10 としたが、他の諸元についての根拠は特にない。小売需要についても同様である。

さらに使用トラックは Table A-4 示すように 5 種とし、2,4t のガソリン車は市場 - 顧客の巡回配送に大型のディーゼル車は生産拠点 - 市場の輸送に利用されたとした。排出係数は経済産業省・国土交通省「物流分野の CO₂ 排出量に関する算定方法ガイドライン」より引用した。

Table A-1 生産条件による生産コスト (千円/t)

生産コスト	内訳	露地	施設
固定費	種苗・苗木	10.68	8.85
	農機具	4.31	12.94
	農用建物	14.46	23.84
	賃借料・料金	16.50	31.61
計		45.95	77.24
運用費	肥料	12.62	13.27
	農業薬剤	7.55	8.20
	諸材料	8.41	8.74
	光熱動力	11.22	34.74
	その他	25.57	38.94
計		65.37	103.89

出典：農林水産省「品目別経営統計」

Table A-2 生産拠点一卸市場間距離と出荷条件

	中央卸市場	JA 熊本		JA 岐阜		JA 愛知	
距離 [km]	本場	794		805		793	
	北部	38		29		46	
	南部	91		103		88	
出荷量 [kg]	上限	65300		73007		86700	
	下限	2500		1000		2000	
出荷コスト [¥/t]		21000		26000		27000	
出荷排出量 [kg-co2/t]		20		40		30	
生産方法		露地	施設	露地	施設	露地	施設
生産運用コスト [¥/t]		65370	103890	63000	123000	58000	98000
生産固定コスト [¥/t]		45950	103890	63000	77240	58000	98000
生産量上限 [kg]		5000	1500	5500	1800	5000	3500
生産時排出量 [kg-co2/t]		354	640	572	872	790	408

Table A-3 卸市場諸元

中央卸市場	取り扱い上限 [kg]	出荷コスト[¥/t]	取り扱いコスト[¥/t]	排出量[kg-co2/t]
本場	6530	12100	2000	12
北部	7370	16000	4000	15
南部	8670	17000	3760	10

Table A-4 輸送車両の諸元

トラック容量 [t]	2	4	6	10	15
トラック自重 [t]	1	2	3	5	8
固定費 [¥]	2000	3000	5000	8000	10000
排出係数 [l/t/km]	0.0844	0.0677	0.0575	0.0504	0.021
適合車	ガソリン車		ディーゼル車		
燃料単価 [¥/l]	150		115		

各施設の住所は以下の通りである。

生産拠点拠点 (3 箇所)

DC1: 熊本農協宇城	熊本県宇城市松橋町松橋 357-1
DC2: 茨城 JA 旭村	茨城県鉾田市造谷 1071
DC3: JA 愛知みなみ	愛知県田原市赤羽根町諏訪 4-1

卸市場 (3 箇所)

RS1: 名古屋市中央卸売市場 本場	名古屋市熱田区川並町 2 番 22 号
RS2: 名古屋市中央卸売市場 北部市場	西春日井郡豊山町大字豊場字八反 107 番地
RS3: 名古屋市中央卸売市場 南部市場	名古屋市港区船見町 1 番地の 39

小売 (17 店)

RE1 : スパーA 港店	名古屋市港区当知二丁目 1501 番地
RE2 : スパーA 東海通店	名古屋市港区港明一丁目 10 番 28 号
RE3 : スパーA 新守山店	名古屋市守山区新守山 2830 番地
RE4 : スパーA 千代田橋店	名古屋市千種区千代田橋二丁目 1 番 1
RE5 : スパーA 名古屋南店	名古屋市南区豊田四丁目 9 番 47 号
RE6 : スパーA 名古屋北店	名古屋市北区辻町九丁目 1 番地
RE7 : スパーA 緑店	名古屋市緑区徳重二丁目 201 番地
RE8 : スパーA 鳴海店	名古屋市緑区鳴海町字伝治山 3 番地 9
RE9 : スパーAP 守山店	名古屋市守山区東山町 12 番 26 号
RE10 : スパーAP 西城店	名古屋市守山区村合町 175 番地
RE11 : スパーAP 中村店	名古屋市中村区大門町 27 番地
RE12 : スパーAP 平針店	名古屋市天白区平針二丁目 1201 番地
RE13 : スパーAP 植田店	名古屋市天白区元植田一丁目 302 番地
RE14 : スパーAP アラタマ店	名古屋市南区駈上一丁目 1 番 31 号
RE15 : スパーAP 味鋤店	名古屋市北区楠三丁目 606 番地
RE16 : スパーAP 清水山店	名古屋市緑区清水山一丁目 501 番地
RE17 : スパーAP 鹿山店	名古屋市緑区鹿山一丁目 48 番地

参考文献

- [1] Shimizu, Y., "Incorporating Green into Production and Consumption Behaviours toward Sustainable Logistics Optimization in Process Systems". 24th European Symposium on Computer Aided Process Engineering, Budapest, Hungary (15-18 June, 2014).
- [2] Shimizu, Y., Sakaguchi, T. and Shimada, H., "Multi-objective optimization for creating a low-carbon logistics system through community-based action", Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol.9, No.5, pp.1-12, 2015.
- [3] Reimann, M., Neto, R. T. and Bogendorfe, E., "Joint Optimization of Production Planning and Vehicle Routing Problems: A Review of Existing Strategies", Pesquisa Operacional, Vol. 34, No.2, pp.189-214, 2014.
- [4] Shimizu, Y., "A Meta-heuristic Approach for Variants of VRP in Terms of Generalized Saving Method". Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers, Vol.24, No.12, pp.287-295, 2011 (in Japanese).
- [5] 清水 良明, バトレス ラファエル, 阪口 龍彦, "野菜ロジスティックスのCO₂削減に向けた最適化とシナリオ解析", 平成23年度科学技術振興機構研究成果報告書, pp.1-32, 2013.
- [6] Nakajima, H., Ohno, T., Ikemori, F., Takagi, K., "Estimate by LCA technique of CO₂ exhaust according to vegetables and fruits consumption of Nagoya City". Annual Report of Nagoya City Environmental Science Research Institute, No.41, pp.15-19, 2011 (in Japanese).
- URL0, Massachusetts Institute of Technology, Lab. for Information and Decision Systems. Available from <http://mit.edu/dimitrib/www/home.html> (accessed 2013-5-31)
- URL1, Statics of production states for vegetables and fruits, Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries (online), available from <<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001061833>>, (accessed on 27 October, 2015).
- URL2, Report on cost accounting for food logistics, Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries (online), available from <<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001112277>>, (accessed on 27 October, 2015).
- URL3, Guideline to compute CO₂ emission in logistics, Ministry of Economy, Trade and Industry • Minister of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (online), available from <<http://www.enecho.meti.go.jp/policy/images/060518pamph.pdf>>, (accessed on 14 April, 2015).
- URL4, Database of CO₂ emission rate on food materials, Environmental report of Ajinomoto Inc. (online), available from <<http://www.ajinomoto.com/jp/activity/environment/pdf/2010/lcco2.pdf>>, (accessed on 27 October, 2015).
- URL5, White Paper on the environment of Tokyo Metropolitan Central Wholesale Market (online), available from <<http://www.shijou.metro.tokyo.jp/gyosei/04/04.html>>, (accessed on 27 October, 2015).
- URL6, Report on the fair of business transportation in Osaka city (online), available from <<http://www.city.osaka.lg.jp/port/cmsfiles/contents/0000002/2591/12.pdf>>, (accessed on 14 April, 2015).