1F1-2

複数供給源からの分散協調型エネルギー供給量決定プロトコル

Distributed Cooperative Protocol for Determining Energy Supply from Multiple Supply Sources

谷口賀則　　平山勝敏
Yoshinori TANIGUCHI　　Katsutoshi HIRAYAMA

神戸大学大学院海事科学研究科
Graduate School of Maritime Sciences, Kobe University

We provide a distributed problem to determine energy supply from multiple supply sources. This problem can be modeled as a variant of the facility location problem. To solve this model, we also present a distributed cooperative protocol that is based on Lagrangian decomposition and sub-gradient optimization. We demonstrate the feasibility of this protocol through experiments on benchmark instances.

1. まえがき

次世代電力網として，スマートグリッドと呼ばれる電力網が注目されている．スマートグリッドとは火力・原子力などの発電設備と太陽光・風力など分散して存在する発電設備をネットワークで結び，IT 技術を利用して効率的に管理・運用することを目指した電力網である．これまで電力網は，集中型のエネルギー管理システムが採用されてきた．しかしスマートグリッドの目指す電力網では分散された発電設備が存在することから，集中型の管理システムでは対応できない．そこで次世代電力網の実現に向けて分散型のエネルギー管理システムが必要とされている．その基礎的な技術として供給源が分散した環境でも利用できる最適化の解法が必要になる．本研究では，そうした供給源と需要地が分散した状態で，供給源同士が協調して最適な「エネルギー」の供給量を決定する問題を考える．

この問題を施設配置問題をモデルに定式化し，ラグランジュ緩和・分解と劣勾配最適化を利用した分散型の解法を提案する．施設配置問題の分散型の解法を提案したものにはセンサーネットワークの構造化問題を対象にしたもの [Frank 07] がある．また，分散最適化の分野ではサプライチェーンマネジメントの問題を扱ったもの [西 04] もあるが，エネルギー供給量の決定を対象とした全体最適化のための分散型の解法は筆者の知る限りあまり存在しない．

以下，本論文は次のように構成される．2. 節ではエネルギー供給量決定の問題を施設配置問題をモデルに定式化する．次に 3. 節ではラグランジュ緩和問題を導入し，それを解く分散型解法の詳細を述べる．4. 節では今回行った実験結果を報告し，5. 節で本論文のまとめと今後の課題を示す．

2. 問題の定式化

本研究では，エネルギー供給量を決定する問題を次のように定義する．(1) 複数の供給源と複数の需要地が存在し，(2) 供給量の総和と需要量の総和は一致し，(3) 供給源の稼動コストと輸送コストの総和を最小化するような，(4) 供給源から需要地への供給量を決定する．このとき (5) 中央管理者は存在しない．

連絡先: 谷口賀則，神戸大学大学院海事科学研究科，〒 658-0022 神戸市東灘区深江南町 5-1-1, yoshinori.taniguchi04@gmail.com

2.1 施設配置問題

この問題を解くために，まず供給源の建設コストと輸送コストの総和を最小化し，各需要地の需要を満たすような制約を持つ施設配置問題を考える．これは次のように定式化される．

$$\text{min.} \quad \sum_{i\in I} f_i y_i + \sum_{i\in I}\sum_{j\in J} t_{ij}x_{ij} \tag{1}$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{j\in J} x_{ij} \le p_i y_i, \ \forall i \in I, \tag{2}$$

$$\sum_{i\in I} x_{ij} = d_j, \ \forall j \in J, \tag{3}$$

$$y_i \in \{0, 1\}, x_{ij} \ge 0, \forall i \in I, \forall j \in J. \tag{4}$$

ここで，$I = \{1,\ldots, m\}$ は供給源の集合，$J = \{1,\ldots, n\}$ は需要地の集合，f_i は供給源 i の建設コスト，t_{ij} は供給源 i から需要地 j への輸送コスト，p_i は供給源 i を建設した場合の生産量，d_j は需要地 j の需要量，x_{ij} は供給源 i から需要地 j への供給量である．また，y_i は供給源 i が建設される場合は 1，そうでない場合は 0 に設定される決定変数である．以降，式 (2) を供給制約，式 (3) を需要制約と呼ぶ．

このとき，式 (4) の 0-1 変数 y_i を連続変数，または多値の離散変数として定式化すると，y_i は稼動レベル，$f_i y_i$ は稼動レベルに応じた稼動コスト，$p_i y_i$ は稼動レベルに応じた生産量と見なすことができる．以下，この稼動レベルが連続値をとる場合 (連続値定式化) と離散値をとる場合 (離散値定式化) の 2 通りの定式化を考える．

2.2 連続値定式化

式 (2) では，需要地への供給量が生産量以下であることが求められたが，連続値定式化では需要と供給が一致するものとして， 次のように定式化する．

$$\text{min.} \quad \sum_{i\in I} c_i y_i + \sum_{i\in I}\sum_{j\in J} t_{ij}x_{ij} \tag{5}$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{j\in J} x_{ij} = s_i y_i, \ \forall i \in I, \tag{6}$$

$$\sum_{i\in I} x_{ij} = d_j, \ \forall j \in J, \tag{7}$$

$$0 \le y_i \le 10, x_{ij} \ge 0, \forall i \in I, \forall j \in J. \tag{8}$$

ここで，c_i は供給源 i の 1 レベルあたりの稼動コスト，s_i は供給源 i の 1 レベルあたりの生産量である．この問題はすべての決定変数が連続値になるので線形計画問題である．

2.3 離散値定式化

稼動レベルを生産停止 (レベル 0) から最大生産 (レベル 10) までの 11 段階の離散値をとるとする．このとき，生産量が離散値をとるので，供給量と需要量を一致させようとすると，生産したが供給されずに無駄になるエネルギーが出てくる．これを解消するために，仮想的な需要地として，各供給源に蓄電池 (storage battery) を導入する．生産されたエネルギーはすべて需要地か蓄電池に供給されるとして需給が一致したとする．このように離散値の稼動レベルを考えた場合は次のように定式化できる．

$$\text{min.} \quad \sum_{i\in I} c_i y_i + \sum_{i\in I}\sum_{j\in J} t_{ij}x_{ij} \tag{9}$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{j\in J\cup\{b_i\}} x_{ij} = s_i y_i,\ \forall i\in I, \tag{10}$$

$$\sum_{i\in I} x_{ij} = d_j,\ \forall j\in J, \tag{11}$$

$$0\le y_i\le 10,\, y_i\in Integer,$$

$$x_{ij}\ge 0,\, \forall i\in I, \forall j\in J\cup B. \tag{12}$$

ここで，c_i は供給源 i の 1 レベルあたりの稼動コスト，s_i は供給源 i の 1 レベルあたりの生産量，$B=\{b_1,\ldots, b_m\}$ は蓄電池の集合である．この問題は整数値をとる変数 y_i を含むので混合整数計画問題である．

3. 解法

系全体を 2. 節のように定式化した後，ラグランジュ乗数を導入し，ラグランジュ緩和・分解と劣勾配最適化を利用した解法を提案する．

3.1 緩和問題と双対問題

3.1.1 連続値定式化

式 (5)-(8) に対し，式 (7) を緩和すると，系全体のラグランジュ緩和問題は次のようになる．

$$L(\mu) = \text{min.} \quad \sum_{i\in I} c_i y_i + \sum_{i\in I}\sum_{j\in J} t_{ij}x_{ij} + \sum_{j\in J}\mu_j\left(d_j - \sum_{i\in I}x_{ij}\right), \tag{13}$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{j\in J} x_{ij} = s_i y_i,\ \forall i\in I, \tag{14}$$

$$0\le y_i\le 10,\, x_{ij}\ge 0,\, \forall i\in I, \forall j\in J. \tag{15}$$

ここで，μ_j は需要地 j に対するラグランジュ乗数であり，式 (13)-(15) の最適値と最適解は，$\mu=(\mu_1,\ldots,\mu_n)$ の値に依存する．この問題の最適値は，任意の μ の値のもとで原問題である式 (5)-(8) の最適値の下界となる．よってその下界値を最大にする μ の値を求める必要がある．

式 (13)-(15) について，各供給源 i に関する変数に着目すると，供給源 i に関する問題

$$L_i(\mu) = \text{min.} \quad c_i y_i + \sum_{j\in J}(t_{ij}-\mu_j)x_{ij}$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{j\in J} x_{ij} = s_i y_i,$$

$$0\le y_i\le 10,\, x_{ij}\ge 0,\, \forall j\in J,$$

および，ラグランジュ乗数と需要量からなる項

$$L_{const}(\mu) \quad = \quad \sum_{j\in J}\mu_j d_j,$$

に分解することができる．従ってもっともよい下界値を与える μ の値を求めるラグランジュ双対問題は

$$\text{max.} \quad \sum_{i\in I} L_i(\mu) + L_{const}(\mu)$$

となる．提案する解法では，各供給源が 3.2 節で説明するプロトコルでこのラグランジュ双対問題を解く．

3.1.2 離散値定式化

離散値定式化の緩和問題と双対問題も連続値定式化同様に求めることができる．式 (9)-(12) に対し，式 (11) を緩和すると，系全体のラグランジュ緩和問題は次のようになる．

$$L'(\mu) = \text{min.} \quad \sum_{i\in I} c_i y_i + \sum_{i\in I}\sum_{j\in J} t_{ij}x_{ij} + \sum_{j\in J}\mu_j\left(d_j - \sum_{i\in I}x_{ij}\right), \tag{16}$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{j\in J\cup\{b_i\}} x_{ij} = s_i y_i,\ \forall i\in I, \tag{17}$$

$$0\le y_i\le 10,\, y_i\in Integer,$$

$$x_{ij}\ge 0,\, \forall i\in I, \forall j\in J\cup B. \tag{18}$$

連続値定式化と同様に，μ_j は需要地 j に対するラグランジュ乗数であり，式 (16)-(18) の最適値と最適解は，$\mu=(\mu_1,\ldots,\mu_n)$ の値に依存する．この問題の最適値は，任意の μ の値のもとで原問題である式 (9)-(12) の最適値の下界となる．よってその下界値を最大にする μ の値を求める必要がある．

式 (16)-(18) について，各供給源 i に関する変数に着目すると，供給源 i に関する問題

$$L'_i(\mu) = \text{min.} \quad c_i y_i + \sum_{j\in J}(t_{ij}-\mu_j)x_{ij} \tag{19}$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{j\in J\cup\{b_i\}} x_{ij} = s_i y_i, \tag{20}$$

$$0\le y_i\le 10,\, y_i\in Integer,$$

$$x_{ij}\ge 0,\, \forall j\in J\cup\{b_i\} \tag{21}$$

および，ラグランジュ乗数と需要量からなる項

$$L'_{const}(\mu) \quad = \quad \sum_{j\in J}\mu_j d_j,$$

に分解することができる．従ってもっともよい下界値を与える μ の値を求めるラグランジュ双対問題は

$$\text{max.} \quad \sum_{i\in I} L'_i(\mu) + L'_{const}(\mu)$$

となる．

3.2 プロトコル

本解法の基本手続きは以下の通りである．なお，連続値定式化と離散値定式化の手続きは基本的に同じなので，ここでは連続値定式化について述べる．

(Step 1) 全供給源がラグランジュ乗数ベクトル μ の値を 0 で初期化する．

(Step 2) 現在の μ の値のもとで，各供給源 i はそれぞれのラグランジュ緩和問題を解いて $L_i(\mu)$ を求める．それぞれの問題を解いて得た結果を，各需要地へ送信する．

(Step 3) 各需要地は原問題の式 (7) の需要制約がすべて満たされているか調べる．満たされていれば true，満たされていなければ false を各供給源へ送信する．また，同時に，自身の劣勾配と全供給源の最適値の総和を送信する．

(Step 4) 各供給源は受け取ったメッセージがすべて true であれば，最適解が得られているため終了する．

(Step 5) 各供給源は上界値と下界値を求める．また，これまでに得られた最小の上界値 $BestUB$ と最大の下界値 $BestLB$ を求め，両者が一致すれば最適解が得られているため終了する．

(Step 6) 各供給源は各需要地 j に対するラグランジュ乗数 μ_j を劣勾配法 [Reeves 97] を用いて更新し，Step 2 へ戻る．

この手続きでは，Step 1 で初期化したのち Step 2 から Step 6 の手順を繰り返す．以下，このラグランジュ乗数 μ を更新するまでの繰り返しを，μ 更新ラウンドと呼ぶ．

Step 5 の上界値は，Step 2 で各供給源が求めた最適解から原問題 (5)-(8) の実行可能解を構成することにより計算できる．実行可能解の生成方法の詳細は 3.3 節で述べる．一方，下界値は $L(\mu)$ であり，Step 2 で各供給源が求めた最適値と $L_{const}(\mu)$ の和から計算できる．

Step 6 において，ラグランジュ乗数 μ_j を更新する際には劣勾配法を用いる．劣勾配法では，Step 3 で各需要地が求めた μ 更新ラウンド t における需要地 j の劣勾配

$$g_j^{(t)} \leftarrow d_j - \sum_{i \in I} x_{ij}$$

を用いて，次の更新規則により，ラグランジュ乗数 μ_j を更新する．

$$\mu_j^{(t+1)} \leftarrow \mu_j^{(t)} - \frac{\pi^{(t)}(BestUB^{(t)} - BestLB^{(t)})g_j^{(t)}}{\sum_{j \in J}(g_j^{(t)})^2}$$

ここで，$BestUB^{(t)}$ とは μ 更新ラウンド t における最小の上界値で，$BestLB^{(t)}$ とは μ 更新ラウンド t における最大の下界値である．また，π は制御パラメータであり，初期値は 2 で，$BestUB$ と $BestLB$ の両方が 30 ラウンド連続して更新されなければ半減される．

3.3 実行可能解の生成

各供給源が解く問題はラグランジュ緩和・分解後の問題であるので，緩和した式の制約を一般には満たしていない．そのため上界値を計算するためには，緩和した制約を満たすように解を変更し，実行可能解を生成しなくてはならない．

本研究では，需要地が各供給源から送られてきた供給量をもとに，過不足があれば，それを解消するリクエストを供給源に送信し，そのリクエストを受け取った供給源がそれを満たすように生産量と各需要地への供給量を変更するという手続きを繰り返し行うことで実行可能解を生成する．

3.3.1 連続値定式化

実行可能解の生成手続きは以下の通りである．

(Step 5.1) 各供給源の現在の供給量と増産可能量を各需要地に送信する．

(Step 5.2) 各需要地は自身の需要量と供給量の差分を調べ、その差分を供給源にリクエストとして送信する．

(Step 5.3) 各供給源は受け取ったリクエストがすべて 0 であれば，Step 5.5 へ．

(Step 5.4) 各供給源は需要地から送られてきたリクエストをもとに再度供給量を決め，Step 5.1 に戻る．

(Step 5.5) 各供給源は Step 5.1 から Step 5.4 によって決めた供給量から自身の稼動レベルを求める．

Step 5.2 で需要量が満たされなかった場合は，輸送コストが小さい順番に追加の供給量である増産リクエストする．このとき増産可能量を上回る場合は，次に輸送コストの小さい供給源にリクエストを送信する．逆に，需要量以上の供給量があれば，輸送コストが大きい順番に，供給をやめるように減産リクエストをする．一つの供給源で減産がまかなわれない場合は，次に大きい輸送コストの供給源に減産リクエストを行う．

Step 5.4 で各供給源は需要地から送られてきたリクエストを元に再度供給量を決めるが，この時の供給量は今までの供給量を元にリクエストに満たすように供給量を決める．増産リクエストのあった需要地には，輸送コストが小さい順番に，リクエスト分の供給量を割り振っていく．このとき全供給量は最大生産量を超えない．逆に，減産リクエストがあった重要地は，輸送コストが大きい順番に，供給をとりやめる．このとき現在の供給量を超えるような減産はできない．

また，このような各需要地から各供給源へメッセージ送信は毎回同期しなくてはならず，問題によっては何度もメッセージのやり取りをしなくてはならない．一方から他方への 1 回のメッセージ送信をコミュニケーションラウンドと呼び，一つの処理の単位とする．

Step 5.1 から Step 5.4 によって，需要地主導で各供給源の供給量が決められた．Step 5.5 ではこの需要地主導で決められた供給量を賄うように，各供給源の稼働レベルを決定する．それは次の式によって表わされる．

$$y_i = \frac{\sum_{j \in J} x_{ij}}{s_i}, \ \forall i \in I$$

以上のような Step 5.1 から Step 5.5 の手続きで実行可能解を生成することができる．

3.3.2 離散値定式化

離散値定式化の実行可能解の生成方法も，基本的には連続値定式化と同様である．Step 5.1 から Step 5.4 は連続値定式化と同様の処理を行う．相違点は Step 5.5 の稼動レベルの求め方であるが，離散値定式化では

$$y_i = \frac{\sum_{j \in J \cup b_i} x_{ij}}{s_i}, \ \forall i \in I$$

となる y_i を求める．

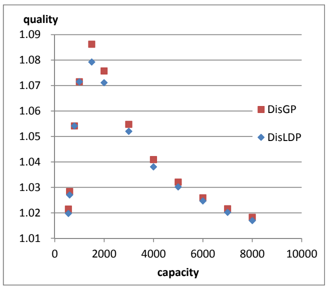

図 1: 連続値定式化(capb:供給源 100, 需要地 1000)

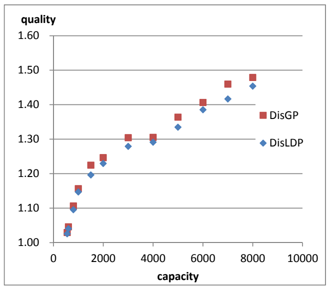

図 2: 離散値定式化(capb:供給源 100, 需要地 1000)

4. 実験

3. 節で述べた解法を実装して実験を行った．目的は，本解法で最適値に関して有益な情報が得られるかどうか，また得られた場合どの程度の解の質 (quality) であるかを確認することである．

実験に使う問題は，OR-Library に掲載されている容量制約付き倉庫配置問題 (capacitated warehouse location) のベンチマーク問題 [Beasley 88] で供給源 100，需要地 1000 の問題例 capa，capb，capc をそれぞれの定式化に合うように加工して，使用した．容量 (capacity) は 550 から 14000 の値をとった．

分解された問題を各供給源が解く時に使用するソルバーは CPLEX を用いた．CPLEX は IBM 社の提供する汎用ソルバーである．2 つの定式化を実装するにあたって，プログラム言語は JAVA 使用し，CPLEX も JAVA の API を使用した．また，実験環境には，デスクトップ PC(Core i7-960 3.20GHz, 4 コア 8 スレッド，メモリ 12GB，Windows7 Professional) を用いた．

作成した問題は capa9 以外の問題は事前に集中型解法で最適値を得ている．実験で得られた実行可能解を，最適値で割ったもの解の質とした．最適値が分かっていない capa9 は今回提案する解法で得られた *BestLB* で割ったものを解の質としている．

ここでは本解法を DisLDP (Distributed Lagrangian Decomposition Protocol) と呼ぶ．本解法と直接比較可能な既存手法は存在しないので，3.3 節の方法に従い，Step 5.1 で各供給源は供給量を 0 として初期化し，算出した実行可能解を参考値とした．これを DisGP (Distributed Greedy Protocol) と呼ぶ．

また，DisLDP は最適値が算出できない場合，1000 コミュニケーションラウンドを超えて，実行可能解が出たところで終了した．DisGP は実行可能解が算出できるまで実行した．

図 1 は問題例 capb の連続値定式化の実験結果である．この問題例に限らず，いずれの問題例も既定のコミュニケーションラウンドでは最適値は得られなかった．DisLDP の解の質は 1.01 から 1.12 の範囲にある．DisGP と比べた場合，DisGP と解の質が同じ値である問題例が 6 問あり，残りの問題例は DisGP よりも良い値である．しかし，その差は小さい．DisGP と DisLDP の解の質の差は目的関数値の改善率とみなすことができる．その差の平均は 0.002 であり，目的関数値は平均 0.2 %改善されている．連続値定式化では，いずれの問題例でも図 1 のようなグラフの形をしていて，容量 1000 から 2000 のあたりにピークがあり，解の質の改善はここでみられる．

図 2 は問題例 capb の離散値定式化の実験結果である．この問題例に限らず，いずれの問題例も既定のコミュニケーションラウンドでは最適値は得られなかった．DisLDP の解の質は 1.05 から 2.5 の範囲にある．DisGP と比べた場合，DisGP と解の質が同じ値の問題例は 1 問であり，ほとんどの問題例で改善がみられた．改善率は 0.024 であり，目的関数値は平均 2.4 %改善されている．離散値定式化では，いずれの問題例でも図 2 のようなグラフの形をしていて，容量が増加するにつれ解の質が悪くなる．

一方，*bestLB* は良くない．これは需要制約を緩和して問題を分割するため，分解された問題同士の関係が希薄になり，原問題との乖離が大きくなるためだと考えられる．そこで，分解された問題の関係を密にすることで，*bestLB* が良くなる可能性がある．例えば，電力設備毎に分解した問題を，ある大きさに統合し一つの地域とみたて，その地域同士が協調して問題を解く方法が考えられる．

5. まとめと今後の課題

本研究は，分散環境下で最適なエネルギーの供給量を決定する問題考え，ラグランジュ緩和・分解と劣勾配最適化に基づく解法を提案した．提案した手法は最適値に関して有益な情報が得られることがわかった．

しかし，単純なプロトコルの解の質を少し改善した程度であった．その理由として，実験に用いた問題が簡単であったということが考えられる．さらに，実験した問題例も少なく，今後さらなる実験が必要である．

また，解法で得られる下界値が良くないことがわかった．問題の分割サイズを変更することで改善する可能性があり，今後検討したい．

今回は, 電力網の一時点だけを考えた. 時系列を考慮した問題や, 分散型電力の出力変化に対応できるような柔軟なプロトコルを考えることも課題である.

参考文献

[Beasley 88] J. E. Beasley, An algorithm for solving large capacitated warehouse location problems, European Journal of Operational Research, vol.33, pp.314-325 (1988).

[Frank 07] C. Frank, K. Römer, Distributed Facility Location Algorithms for Flexible Configuration of Wireless Sensor Networks, Proc. of DCOSS’07, pp.124-141 (2007).

[西 04] 西 竜志: サプライチェーンにおける分散協調型最適化技術，人工知能学会誌， Vol.19, No.5,pp.571-578 (2004).

[Reeves 97] C. R. Reeves 編， モダンヒューリスティクス—組み合わせ最適化の先端手法—， 日刊工業新聞社 (1997).