1F1-4

資源供給ネットワークにおける 分散協調的な資源割り当て手法の検討

A Model for Distributed Cooperative Resource Supply Networks

松井 俊浩　松尾 啓志
Toshihiro Matsui　Hiroshi Matsuo

名古屋工業大学
Nagoya Institute of Technology

Resource allocation problems in supply networks are an important domain of distributed cooperative problem solving. Formalizations of distributed constraint optimization problems (DCOPs) can be applied to model these problems. In this paper, we propose a distributed cooperative model motivated by power supply networks that contain distributed power sources. Then the model is represented as a DCOP. The optimal solution of the DCOP represents the appropriate assignment of amounts of the resource that are consumed or supplied in each node of the network. Also, a conventional DCOP solver is modified to apply to the proposed model. The proposed model and the solver are experimentally evaluated.

1. はじめに

資源割り当て問題は，分散協調問題解決手法の応用が期待されるひとつの分野である．一般に，このような問題は専用の資源割り当ての表現と，そのための適切な解法を必要とするが，その設計は比較的複雑である．このような問題に対して，分散制約最適化問題 (DCOP) の適用が考えられる．DCOP [Petcu 05, Kumar 09] はマルチエージェントシステムの協調の基本的な枠組みとして研究されている．DCOP を用いて，エージェントの状態やそれらの関係が，制約最適化問題として形式化される．この問題は，分散処理化された探索アルゴリズムにより解決される．このような研究は，マルチエージェントシステムの協調処理のプロトコルに本質的に含まれる，最適化問題と分散処理としての探索アルゴリズムに注目している．電力網などの資源供給網におけるいくつかの問題も分散資源割り当て問題としてとらえることができる．文献 [Kumar 09] では，このような電力網における問題である，power supply restoration (PSR) 問題 [ThiAcbaux 01] のための DCOP の表現と，その解法が提案されている．その一方で，スマートグリッドのような分散電源を含むネットワーク上で，電力の需要と供給の最適化を行うことも重要な課題である．このような問題に対して，PSR のための従来手法を拡張することが考えられるが．それ以外にも，異なる問題の形式化を検討する余地があると考えられる．本研究では，分散電源を含む電力網に動機づけられた，分散協調システムのモデルを提案する．このモデルを DCOP として表現する．問題の最適解は，ネットワークの各ノードにおいて消費または供給される，資源の量の適切な割り当てを表す．また，この問題を表す DCOP のために，基本的な解法を拡張する．提案するモデルの挙動を実験的に評価する．

2. 資源供給網における割り当て問題

本研究では，電力網に動機づけされた例題について検討する．図 1(a) に示すように，配電網はソース，シンクの二種類のノード，および電力線からなる簡単なネットワークとして表現できる．このネットワークに対して，電力資源をシンクに供給するために，いくつかのフィーダツリーが選択される (図 1(b))．フィーダツリーはあるソースを根とする．本研究における目的は，各ノードにおける移入または移出する資源の量をどのように決定するかという点にある．そのため，フィーダツリーは事前に他の手法により構築されているものと仮定する．以降の形式化では，ネットワークは次の要素により構成される．

連絡先: 松井俊浩，名古屋工業大学，〒 466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町，matsui.t@nitech.ac.jp

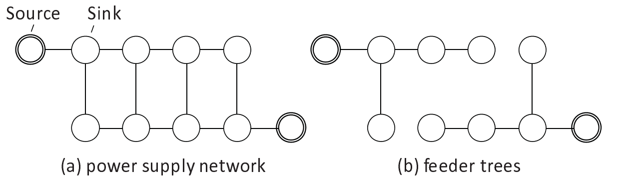


図 1: フィーダツリーの例

- ノード: 資源を消費する一般のノードであり，シンクに相当する．また，他のノードに供給可能な資源を持つ場合がある．
- ソースノード: 他のノードに供給される資源を持つ，特別な電源のノードである．
- リンク: ある量の資源を移送する経路である．

フィーダツリーには一つのソースノードが含まれる．基本的には，資源はソースノードから他のノードに供給される．さらに，幾つかのノードがある量の資源を持ち，その資源もリンクを介して供給できる．そのため，各ノードからネットワークに移入する資源の量を適切に決定する必要がある．

あるノードが自身の資源のある量を移出するとき，そのノードはある量の利得を得る．その一方で，ノードが，ある量の資源を移入するとき，そのノードはコストを支払う．さらに，利得やコストに影響する追加的な誘因を考慮する．

各リンクは，ある量の資源を二つのノードの間で移送する．ただし，移送できる資源の最大の量に制限がある．また，ある量の資源が移送されるとき，ある量の資源がリンクで消費される．以降では，問題の詳細について述べる．

2.1 ノードの形式化

ノード i の要求を表現するために，次のパラメタを用いる．

- P_i^{ch}: 最低限必要な消費の量．緩和不可能であるハードな

要求を表す．
- P_i^{cs}: 選択可能な消費の量．緩和可能であるソフトな要求を表す．
- P_i^g: 供給可能な資源の最大の量．

P_i^{ch} と P_i^{cs} は資源の需要についての要求を表す．P_i^{ch} は必ず満足されなければならないハードな要求であり，消費される資源の最低の量を表す．後述される問題の形式化では，資源の消費についてのハードな要求のための専用の制約を用いる代わりに，制約は他の式に暗黙的に含まれる．P_i^{ch} とは異なり，要求 P_i^{cs} は満足されなくてもよい．すなわち，P_i^{cs} は選択可能な資源の消費を表す．P_i^{cs} に対する消費の誘因を表現するために，負のコスト，すなわち利得が定義される．

P_i^g はノード i が供給可能な資源の量を示す．資源は，i 自身が部分的に消費するか，他のノードにリンクを経由して供給されるか，破棄される．資源を供給する誘引として，ある利得が定義される．

ノード i により消費される，または供給される資源の量は次の変数を用いて表現される．各変数は正の値を取る．

- p_i^c: 消費される量.
- p_i^{gi}: 自身に供給される量.
- p_i^{li}: 他ノードから供給される量.
- p_i^{lo}: 他ノードへ供給される量.
- p_i^{gw}: 使用されず破棄される量.

p_i^c は i に消費される量を表す．その値域は $[P_i^{ch}, P_i^{ch}+P_i^{cs}]$ のように定義される．上述のように，P_i^{ch} はハードな要求であるため，常に消費される．また，選択可能な消費の量 P_i^{cs} は分割することが可能であると仮定する．p_i^{gi} は ノード i から自身への供給の量を表す．p_i^{gi} は $[0, \min(P_i^g, P_i^{ch}+P_i^{cs})]$ の値を取る．p_i^{gi} は自身への供給の量であるため，コストは発生しないものとする．p_i^{li} と p_i^{lo} は移入または移出される資源の量を表す．資源の購入を表現するために，p_i^{li} に対するコストが定義される．同様に，資源の売却を表現するために，p_i^{lo} に対する利得が定義される p_i^{gw} は破棄される資源の量を表す．破棄される資源は，資源の移送の制限により生じうる．

これらの変数には，幾つかの依存関係がある．p_i^{li} と p_i^{lo} には同時に非零の値にならないものとする．すなわち $\neg(p_i^{li} > 0 \land p_i^{lo} > 0)$ であり，各ノードは資源の移入か移出のいずれかを行うことを表す．消費 p_i^c は i への供給の合計に等しい．これは $p_i^c = p_i^{gi} + p_i^{li}$ のように表される．供給される資源の量，および破棄される量の合計は，供給可能な資源の最大の量に等しい．これは $p_i^{gi} + p_i^{lo} + p_i^{gw} = P_i^g$ のように表される．上述のように，自身への供給の量 p_i^{gi} にはコストがかからない．したがって，自身の資源 P_i^g は，自身の要求 p_i^c に可能な限り充当される．これらの依存関係から，各変数値は P_i^g と p_i^c にもとづいて次のように分類される．

- $P_i^g > p_i^c$: $p_i^c = p_i^{gi}, p_i^{li} = 0, p_i^{lo} + p_i^{gw} = P_i^g - p_i^c$
- $P_i^g < p_i^c$: $p_i^c = P_i^g + p_i^{li}, p_i^{lo} = 0, p_i^{gw} = 0$
- $P_i^g = p_i^c$: $p_i^{li} = 0, p_i^{lo} = 0, p_i^{gw} = 0$

なお，上記の三番目の場合は，他の場合に一般化できる．

上記では，資源の量の表現と関係を示した．その一方で，本研究の最適化手法においては，資源の供給と消費は，資源のポテンシャルを通して，間接的に決定される．

ソースノードは，資源を供給または吸収する．本研究では，ソースノードは十分に大きな資源の容量を持つと仮定する．供給または吸収される資源の量は次のパラメータにより定義される．

- $P^{s\perp}, P^{s\top}$: 資源の量の最小および最大値.

$P^{s\perp}$ は負値をとりうる．そのとき，ソースノードは資源を吸収しうる．

2.2 資源の移送の形式化

資源の移送は，電力網を動機付けとする簡単なモデルとして表現される．このモデルでは次のパラメータと変数を用いる．

- p_i: ノード i からネットワークに移入する資源の量.
- v_i: ノード i における資源の移送のためのポテンシャル.
- $V_i^\perp, V_i^\top$: v_i の最小および最大値.
- $G_{i,j}$: ノード i と j の間のリンクを通して移送される資源の量を定義するパラメータ.
- $V_{i,j}^{dif\top}$: ノード i と j の間のリンクを通して移送される資源の量の最大値を定義するパラメータ.

p_i はノード i からネットワークに移入する資源の量を表現する．p_i は資源の消費を表す時，負値となる．ノード i の変数を用いて，p_i の値は $p_i = p_i^{lo} - p_i^{li}$ のように定義される．

v_i は資源の移送のためのポテンシャルを表す．v_i の値は $V_i^\perp$ および $V_i^\top$ を超えてはならない. ノード i からネットワークに移入する資源の流量は p_i/v_i により表わされる．

$G_{i,j}$ は，ノード i と j の間のリンクを通して移送される資源の量を定義する．j から i への資源の流量は，$G_{i,j} \cdot (v_j - v_i)$ により表される．全ての流入する資源の流量の合計は 0 である．

$V_{i,j}^{dif\top}$ はノード i と j の間のリンクを通して移送される資源の量の最大値を定義する．$|v_j - v_i|$ は $V_{i,j}^{dif\top}$ を超えてはならない．

2.3 コストと利得

ある量の資源が移入または移出されるとき，コストと利得が計算される．これらの値は資源の割り当てを評価するために用いられる．コストと利得のパラメータは次のようである．

- w_i^{inp} : ネットワークからノード i に移入される資源の単位量に対するコスト値.
- w_i^{exp} : ノード i からネットワークに移出される資源の単位量に対する利得値.
- w_i^{utl} : ノード i における選択可能な消費の P_i^{cs} の一部として，消費される資源の単位量に対する利得値.

これらのパラメータは対応する資源の量に乗じられ，さらにコスト値と利得値は結合される．

3. 分散制約最適化問題 (DCOP) による形式化

消費および供給される資源の量を決定するために，前述の問題を分散制約最適化問題 (DCOP) として形式化する．まず，基本的な分散制約最適化問題の定義を示す．問題はエージェントの集合 A，変数の集合 X，各変数の値域の集合 D，二項制約の集合 C，各制約に対応するコスト関数の集合 F により定義される．エージェント i は自身の変数 x_i を持つ．変数 x_i は離散有限集合 D_i として表される値域の値をとる．変数 x_i の値はエージェント i のみが決定できる．制約 $c_{i,j}$ は変数 x_i と x_j の関係を表す．割り当て $\{(x_i, d_i), (x_j, d_j)\}$ のコスト値は二項関数 $f_{i,j}(d_i, d_j)$ により定義される．問題の目的は，大域的なコストの合計 $\sum_{f_{i,j} \in F,\ \{(x_i,d_i),(x_j,d_j)\} \subseteq \mathcal{A}} f_{i,j}(d_i, d_j)$ を最小化する最適解 $\mathcal{A}$ を求めることである．エージェント i は初期状態において，変数 x_i に関係する制約とコスト関数を知る．最適解を求めるための探索処理は，エージェント間のメッセージ通信にもとづく分散アルゴリズムとして表される．上記の説明

ではコスト関数として二項関数が用いられているが，それらは単項関数を含む任意の arity の関数に一般化できる．

3.1 問題の形式化

提案手法では，資源のポテンシャル v_i を DCOP の変数として表す．また，資源の需要と供給は v_i から間接的に決定される．v_i の値は連続値であるが，本研究では初期の検討として離散値により表現した．したがって，DCOP の解は近似的な値を表す．v_i と x_i の関係を定義するために，次のパラメータを用いる．

- v_i^{unit}: v_i の量子化における単位量.
- $x_i^{\perp}, x_i^{\top}$: DCOP の変数値 x_i の最小および最大値.

上記のパラメータにより，v_i は $v_i = 1 + v_i^{unit} \cdot x_i$ のように表される．この式の右辺における値 1 は v_i の基準値を表す．x_i は $[x_i^{\perp}, x_i^{\top}]$ の値をとる．$x_i^{\perp}, x_i^{\top}$ は，v_i の値の許容範囲を考慮して決定される．解の精度を向上するためには，v_i^{unit} の値はできるだけ小さい方が良い．その一方で，v_i^{unit} の値が小さければ，x_i が取りうる離散値は多い．したがって，これらのトレードオフを考慮する必要がある．

ノード i の変数 x_i と i の近傍ノード j の変数 x_j の値により，対応するポテンシャルの値 v_i, v_j が計算される．変数 v_i および v_j の値により，ノード i 自身からの流入する量を除いた，ネットワークから i への資源の流量は，$c_i = \sum_{j \in \text{ neighborhood nodes of } i} G_{i,j} \cdot (v_j - v_i)$ のように計算される．

ノード i からネットワークに供給される資源の量 p_i は $-v_i \cdot c_i$ のように計算される. 上述の各変数の関係により，p_i^{lo} と p_i^{li} は p_i から計算される．p_i が正の値であれば，$p_i = p_i^{lo}$ である．そうでなければ $p_i = -p_i^{li}$ である．その一方で p_i は次のように表される．

$$p_i = P_i^g - p_i^c - p_i^{gw} = P_i^g - (P_i^{ch} + k_i^{cs} \cdot P_i^{cs}) - p_i^{gw} \quad (1)$$

ここで，k_i^{cs} は $[0, 1]$ の値をとる係数である．$P_i^g \leq p_i^c$ である場合は p_i^{gw} の値が 0 である．そうでなければ，p_i^{gw} は非ゼロの値となる．また，各ノードは自身の資源を，消費も移出もできないときのみ，破棄すると仮定する．この仮定により，式 1 は次の場合に分類される．

- $p_i \leq 0$: $p_i = P_i^g - (P_i^{ch} + k_i^{cs} \cdot P_i^{cs}), p_i^{gw} = 0$
- $p_i > 0$:
  - $p_i < P_i^g - (P_i^{ch} + P_i^{cs})$: $k_i^{cs} = 1, p_i^{gw} = P_i^g - (P_i^{ch} + P_i^{cs}) - p_i$
  - otherwise: $p_i = P_i^g - (P_i^{ch} + k_i^{cs} \cdot P_i^{cs}), p_i^{gw} = 0$

これらの場合分けに基づいて，p_i の値から $k_i^{cs} \cdot P_i^{cs}$ の値を決定する．

資源の量についてのコストと利得の値を用いて，ノード i のコスト関数 f_i^{cost} が定義される．f_i^{cost} はコストおよび利得を表す関数の結合として表わされる．資源の移入のコストおよび移出の利得はそれぞれ $f_i^{inp}(p_i^{li}) = w_i^{inp} \cdot p_i^{li}$ および $f_i^{exp}(p_i^{lo}) = -w_i^{exp} \cdot p_i^{lo}$ のように表される．

選択可能な消費 $k_i^{cs} \cdot P_i^{cs}$ を誘因する利得を次式のように表す．

$$\begin{aligned} & f_i^{utl}(k_i^{cs} \cdot P_i^{cs}) = \\ & \quad -w_i^{utl} \cdot (\lfloor k_i^{cs} \cdot P_i^{cs} / (P_i^{cs} / k^{csunit}) \rfloor \cdot (P_i^{cs} / k^{csunit})) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで，k^{csunit} は利得にステップを与えるパラメータである．この表現は，資源の要求量の単位を表すことを意図する．

さらに，二種類の制約がコスト関数として表現される．各リンクを介する資源の移送における，両端のポテンシャル v_i, v_j の差の制限は次のように定義される．

$$f_{i,j}^{vdif}(v_i, v_j) = \begin{cases} 0 & |v_i - v_j| \leq V_{i,j}^{dif\top} \\ \infty & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

資源の量 p_i の制限について，次の制約が定義される．

$$f_i^p(p_i) = \begin{cases} 0 & p_i \text{ satisfies the limitation} \\ \infty & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

ここで，p_i の値の制限は次のように分類される．

- $P_i^g - (P_i^{ch} + P_i^{cs}) > 0$: $0 \leq p_i \leq P_i^g - P_i^{ch}$
- otherwise: $P_i^g - (P_i^{ch} + P_i^{cs}) \leq p_i \leq P_i^g - P_i^{ch}$

本研究では，コスト関数 f_i^{cost} を $f_i^{inp}, f_i^{exp}, f_i^{utl}, f_{i,j}^{vdif}$ および f_i^p の合計として定義する．

最適解は，コストおよび利得を表す関数すべての合計を最小化する，各変数の割り当てとして定義される．

4. 解法の適用

上述の問題の解法として，動的計画法に基づく手法 [Petcu 05] を適用する．後述のように，資源の性質を扱うために従来手法の表現と計算を変更する．この解法は，制約網に対するグラフの構造である疑似木に基づく．疑似木は，制約網の生成木の一つにもとづく．疑似木により，変数の反順序が定義される．疑似木において，元の制約網の変は，木辺と後退辺に分類される．木辺は生成木の辺であり，後退辺は木辺以外の辺である．木辺は，二つの変数の順序関係を表す．疑似木は正確には木ではないが，以下の説明では，疑似木の木辺を，単に生成木の木の辺として扱う．また，ノード，変数，エージェントは厳密に区別せずに用いる．疑似木に関して，次の表現を用いる．

- $prnt_i$: x_i の親.
- $Chld_i$: x_i の子の変数の集合.
- Nbr_i^u: x_i の祖先の部分集合. Nbr_i^u に含まれる変数は x_i と制約で関係する.
- Nbr_i^l: x_i の子孫の部分集合. Nbr_i^l に含まれる変数は x_i と制約で関係する.
- $AncstSt_i$: x_i の祖先の部分集合. x_k を $AncstSt_i$ に含まれる変数とする．x_i を根とする部分木に含まれる，少なくとも一つの変数 x_j について，$x_k \in Nbr_j^u$ である．

疑似木の異なる部分木の間に後退辺はない．この性質により，探索処理を並行できる．前述のとおり，本研究ではフィーダツリーにおける最適化問題に注目する．この場合，疑似木はもっとも簡単な場合の木である．ただし，以下では一般性のために，閉路を含むフィーダに対する計算を示す．

4.1 疑似木に基づく解法

まず，疑似木に基づくコストの計算 [Petcu 05] の概要を示す．以下では簡単のために，各エージェントは計算に必要な変数値とコスト値を，他のエージェントからすでに受信しているものと仮定する．エージェント i の計算は $AncstSt_i$ についての部分解 s_i に基づく．s_i はコンテクストと呼ばれる．

コンテクスト s_i と変数 x_i の値 d についての局所コストは $\delta_i(s_i \cup \{(x_i, d)\}) = \sum_{(x_j, d_j) \in s_i,\, j \in Nbr_i^u} f_{i,j}(d, d_j)$ のように定義される．コンテクスト s_i と x_i を根とする部分木についての最適コスト $g^*(s_i)$ は次のように再帰的に定義される．

$$g_i^*(s_i) = \min_{d \in D_i} g_i(s_i \cup \{(x_i, d)\}) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} g_i(s_i \cup \{(x_i, d)\}) &= \delta_i(s_i \cup \{(x_i, d)\}) \\ &+ \sum_{j \in Chld_i} g_j^*(s_j) \quad \text{s.t.} \quad s_j \subseteq (s_i \cup \{(x_i, d)\}) \end{aligned} \quad (6)$$

上記において，二項のコスト関数 $f_{i,j}$ は，単項関数を含む，任意の arity のコスト関数に一般化できる．根の変数 x_r につ

いての，大域的に最適なコスト $g_r^*(\phi)$ が計算されたとき，ノード r は自身の変数の最適な割り当てを決定する．同様に，残りの問題の最適解はトップダウンに計算される．動的計画法に基づく解法 [Petcu 05] では，各エージェント i は $g^*(s_i)$ を $AncstSt_i$ に含まれる全ての割り当てについて同時に計算するため，動的計画法の表とメッセージのサイズは疑似木の誘導幅について指数関数的である．さらに，変数の値域のサイズによっても探索空間が増加する．本研究では，フィーダツリーにおける最適化問題に注目するため，疑似木の誘導幅の影響は深刻ではない．その一方で，変数の値域のサイズは $g^*(s_i)$ の表とメッセージのサイズに影響する．

4.2 コストの計算における変更点

従来の解法では，変数の優先順序は疑似木によって定義され，その優先順序にもとづいてコスト関数の値が合計される．ノード i でコスト関数が評価されるとき，$AncstSt_i$ と x_i のみが考慮される．3.1 節に示した形式化では，変数値は，ポテンシャル値に写像される．このポテンシャル値にもとづいて，さらに各関数の値が計算される．幾つかの関数の値は $AncstSt_i$ と x_i を用いて計算されるが，p_i を考慮することが必要な関数では，Nbr_i^l に含まれる近傍の変数の値が必要である．p_i は c_i に基づいて計算される．c_i はノード i の近傍ノードの変数値を用いて計算される．Nbr_i^l の値を伝搬するために，従来のコンテクストと異なる部分解 t_{i,s_j} が用いられる．この部分解を下位コンテクストと呼ぶ．t_{i,s_j} を定義するために，次の変数の集合が定義される．

- $ExtNbr_i$: i の子孫の変数の集合．$ExtNbr_i$ に含まれる変数は，i または i の祖先のノードの変数と制約で関係する．$ExtNbr_i$ に $Chld_i$ が含まれる．

疑似木が木である場合，$ExtNbr_i$ は $Chld_i$ に含まれる変数のみを含む．t_{i,s_j} は $ExtNbr_i$ の部分集合 $ExtNbr_{i,j}$ について定義される．$ExtNbr_{i,j}$ は i の子 j の変数を根とする部分木の変数のみを含む．t_{i,s_j} はまた，i の子 j のコンテクスト s_j に依存する．$ExtNbr_{prnt_i} \subseteq ExtNbr_i \cup \{x_i\}$ である．t_{prnt_i,s_i} は t_{prnt_i,s_i} と関係する各集合 t_{i,s_j} から計算される．この計算では，$ExtNbr_i \cup \{x_i\} \backslash ExtNbr_{prnt_i}$ に含まれる変数の値の割り当ては削除され，ある x_i の割り当てが追加される．動的計画法における $g_i^*(s_i)$ の表は，$(g_i^*(s_i,), t_{prnt_i,s_i})$ に一般化される．

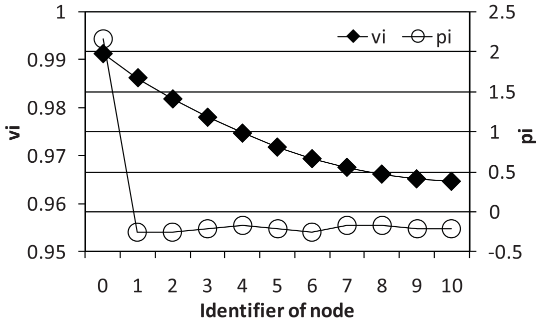
コンテクスト s_i と変数 x_i の値 d についての局所コストは $\delta_i(s_i \cup \{(x_i,d)\}) = f_i^{cost}(\ \{(x_i,d)\} \cup \bigcup_{(x_j,d_j)\in s_i,\ j\in Nbr_i^u} \{(x_j,d_j)\} \cup \bigcup_{(x_k,d_k)\in t_{i,s_h}, h\in Chld_i,\ k\in Nbr_i^l}\ \{(x_k,d_k)\}\ )$ のように変更される．

本研究で提案する形式化では，利得を負のコストとして表す．このような場合，探索を枝刈りする際にコストの結合における非単調性を考慮する必要がある．ここでは，枝刈りを用いない動的計画法を適用した．

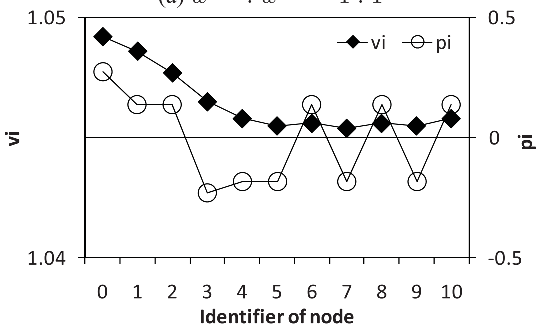
5. 評価

初期の結果として，提案モデルの挙動を実験により評価した．11 ノードからなる線形なネットワークの場合の結果を図 2 に示す．同図 (a) では，ソースノード以外に供給可能な資源が無く，識別子 0 のソースノードから v_i が単調に減少している．(b) では，ノード 1, 2, 6, 8, 10 から資源が供給され，v_i の変化は非単調である．消費量と供給量は，各コストと利得の比，および解法における偏りに影響される．

以上の議論では，最適化において大域的なコスト値の合計の最小化を用いたが，他の指標も考えられる．そこで，コスト値の加算の一部を，最大値の選択に置き換えた場合と比較した．この手法は，ノード単位に集計されたコストの最大値を，最小化することを意図する貪欲手法である．表 1 の結果は，上記の貪欲手法 (min-max) の方が合計コストの最小化 (min-sum) よりも最大のコスト値は若干小さいが大域的なコストの合計は増大する傾向を示している．いずれの指標も公平性は保証されないため，ノードの種別やコスト (利得) の統計量などのより高度な指標に基づく最適化の導入が必要であると考えられる．



(a) $w^{inp} : w^{utl} = 1 : 1$



(b) $w^{inp} : w^{utl} : w^{exp} = 1 : 1 : 1.5$

図 2: 資源割当て結果の例

表 1: 最適化における指標の比較 (合計および最大コスト値)

$w^{inp} : w^{utl} : w^{exp}$	min-sum		min-max	
	total	max.	total	max.
1 : 1 : 1.5	-339.08	149.25	1475.08	148.84
1 : 1.5 : 1.5	-732.75	77.14	708.98	76.92
1 : 1.5 : 2	-1046.61	77.09	679.01	76.77

6. おわりに

本研究では分散電源を含む電力網を動機付けとして，ネットワーク上の資源・経路割り当て問題のための DCOP に基づく表現と解法を検討した．公平性等を考慮した評価尺度の導入，精度向上と探索空間の規模削減のための手法の改良，および応用的な問題への適用が今後の課題である．

参考文献

[Kumar 09]Kumar, A., et al.: Distributed constraint optimization with structured resource constraints, in *AAMAS*, pp. 923–930 (2009)

[Petcu 05]Petcu, A., et al.: A Scalable Method for Multiagent Constraint Optimization, in *IJCAI*, pp. 266–271 (2005)

[ThiAcbaux 01]ThiAcbaux, S., et al.: Supply restoration in power distribution systems - a benchmark for planning under uncertainty, in *ECP-01*, pp. 525–532 (2001)