

不確かな情報環境におけるエネルギー需要
ネットワークのメカニズムデザインを用いた
設計法に関する研究

Studies on Design Method of Energy Demand
Networks Using Mechanism Design under Uncertain
Information Environment

2016年2月

岡島 佑介
Yusuke OKAJIMA

不確かな情報環境におけるエネルギー需要
ネットワークのメカニズムデザインを用いた
設計法に関する研究

Studies on Design Method of Energy Demand
Networks Using Mechanism Design under Uncertain
Information Environment

2016年2月

早稲田大学大学院 先進理工学研究科
電気・情報生命専攻 インテリジェント制御研究

岡島 佑介
Yusuke OKAJIMA

目次

第1章 序論	1
1.1 研究背景と本論文の目的	1
1.2 論文構成	3
第2章 エネルギー需要ネットワークの最適化	6
2.1 エネルギー需要ネットワーク	6
2.2 エネルギー需要ネットワークの定式化	8
2.3 エネルギー需要ネットワークの分散型最適化	9
2.3.1 評価関数の定式化	9
2.3.2 制約付き分散型最適化	10
2.4 数値例	12
2.4.1 数値実験設定	12
2.4.2 数値実験結果	17
2.5 LQ問題における解析解	21
第3章 VCG型メカニズムによる統合	25
3.1 VCG型メカニズムの提案	25
3.1.1 誘因両立性	27
3.1.2 個人合理性	27
3.1.3 VCG型メカニズム	27
3.1.4 移転コストの設計	28
3.1.5 LQ問題における移転コスト	31
3.2 数値例	32
第4章 AGV型メカニズムによる統合	38
4.1 AGV型メカニズムの提案	38
4.1.1 ベイジアン誘因両立性	38
4.1.2 予算均衡性	39
4.1.3 AGV型メカニズム	39
4.1.4 移転コストの設計	40
4.1.5 LQ問題における移転コスト	44

4.2	数値例	44
第 5 章	結論	47
5.1	本論文の成果	47
5.2	今後の展望	47

目 次

2.1	Demand side of energy systems	6
2.2	Model of a consumer	7
2.3	PV output	14
2.4	Outside temperature	14
2.5	Price-inelastic demand	15
2.6	Demand for air conditioner of consumer1	18
2.7	Demand for PC of consumer1	18
2.8	Battery storage of consumer 1	18
2.9	Room temperature of consumer1	18
2.10	Energy consumption of consumer 1	19
2.11	Energy from the wholesale market	19
2.12	Price	19
2.13	Utility of air conditioner of consumer 1	19
2.14	Utility of PC of consumer 1	20
2.15	Utility of battery of consumer 1	20
2.16	Benefit of consumer 2	20
3.1	Model of information flow	26
3.2	Benefit of consumer 1.	33
3.3	Benefit of consumer1 in case of coalition	34
3.4	Benefit of consumer1 in case of coalition under VCG type mechanism	34
3.5	Benefit of consumer2 in case of coalition	35
3.6	Benefit of consumer2 in case of coalition under VCG type mechanism	35
3.7	Sum of benefit of consumer1 and 2 in case of coalition	36
3.8	Sum of benefit of consumer1 and 2 in case of coalition under VCG type mechanism	36
3.9	Computation time vs numbers of consumers	37
4.1	Expectation of benefit of consumer 1	45

第1章

序論

1.1 研究背景と本論文の目的

電力自由化は、欧米においては1990年代から進められた。すなわち、市場が整備されて電力供給および電力購入先の選択が自由化された [1]。電力事業に市場競争を導入することで経済的効率化を目指すことがその主な目的であるが、環境負荷を低減することやデマンドレスポンスによってピーク需要を抑制することが期待されている。日本においても1995年の電気事業法改正以降、発電部門の自由化が始まり、また将来に発送電分離が予定されていることもあり、近年電力自由化の議論が国内外で活発に進められている。

各国における電力自由化の議論に伴って、新たな分散協調型エネルギー管理システムのための理論が制御理論の分野においても広く議論されてきている [1]。入札をベースにした研究 [2] や電力配分の最適化をベースにした研究など様々なものがあるが、最適化ベースの研究では供給側の最適化の研究の他にも需要側の最適化の研究も進められている。特に、価格に対する需要の弾力性を利用することでネットワークの最適化を分散的に行うプライシングの手法が盛んに研究されている [3]–[5]。欧米においてエネルギー市場と呼ばれるものには前日市場またはスポット市場と呼ばれる、一日を分割して対象の日の前日に各時間帯の取引を決定する市場と、リアルタイム市場と呼ばれる、前日市場で決められた計画と当日の誤差を減らすための取引市場があるが、本論文ではスポット市場の最適化を扱った議論を行う。価格を用いた分散型の最適化手法は一般的に、市場参加者同士で正確な真実の情報を交換し、共有することで最適化につなげることを前提としているが、実際の自由化された市場においては情報交換の不確かさが発生することが考えられる。すなわち、需要側もしくは供給側が価格決定を行うための入札の過程で、自分以外の参加者の生産コストや効用関数などを正確に知ることは一般的に困難であり、そのため生産コストや効用関数などの情報を虚偽のパラメータを用いて入札することで、自らの利益を増やそうとする戦略が各市場参加者に生じてしまう。このような個々の戦略的な振る舞いが生じるとき社会全体の利益の最大化は必ずしも達成されず、これを考慮に入れた市場の設計が望ましい。

自由化された電力市場における情報交換の不確かさに対して、最近ではゲーム理論や経済学の分野で議論されているメカニズムデザインの理論 [6]–[13] を適用した研究 [14]–[20] が進められている。メカニズムデザインは市場の管理者が価格の他に移転コストと呼ばれるインセンティブを計算し各市場参加者に与えることで、真実の情報を交換するように促す理論である。資源配分を考えたとき、効率性や公平性などの社会的な価値基準が達成されるべき目標となるが、これは個々人の価値基準に基づくものであり、この情報を用いないと実現すべき真の資源配分を達成できない [11]。こういった問題意識の下で、メカニズムデザインは発展した。メカニズムデザインを電力ネットワークの制御に適用した研究として、電気料金の確率分布を仮定して、発電会社の静的な負荷配分問題に対してベイズ型メカニズムデザインを適用した研究 [14] や Vickrey-Clarke-Groves (VCG) メカニズム [7] を需要者側の静的な最適化問題に適用した研究 [15]、動的なリアルタイムプライシングに対して VCG メカニズムを適用した研究 [16]–[18][20] などがある。本論文においては電力スポット市場を対象としたメカニズムの設計を行うが、このような物理的制約、そしてダイナミクスを持つシステムにメカニズムデザインの理論を展開したことが本論文の主要な成果である。

本論文では需要者側の電力市場において、等式制約・不等式制約のもとで分散型最適化が達成される、メカニズムデザインを用いたネットワークの設計を行う。電力消費を伴う家電製品を所有し運用する複数の需要者と一つの公益事業体からなる需要側のネットワークを想定し、電力スポット市場において最適な価格、需要量を決定して社会全体の利益が最適化される状況を考える。この市場において各需要者は利己的・戦略的に振る舞い、自己の利益を最大化するように公益事業体への情報の報告を行う。メカニズムデザインの考え方をを用いて、各需要者の最適な戦略が真実の情報を公益事業体に報告することになるように設計を行う。すると、戦略的に振る舞う各需要者の最適化行動は社会全体の利益の最大化へと統合される。本論文では二種類のメカニズムについて提案し、検討する。一つ目は VCG 型メカニズムであり、嘘の報告を行っても利益を得ることがない誘因両立性という性質と、市場に参加することで移転コストを含んだ各需要者の利益が非負となる個人合理性という性質を保証する。二つ目は Arrow [8] and d'Aspremont and Gérard-Varet [9] (AGV) 型メカニズムであり、期待値の観点から嘘の報告を行っても利益を得ることがないベイジアン誘因両立性という性質と、公益事業体の利益が移転コストによる支出とつりあう予算均衡性という性質を保証する。それぞれのメカニズムについて保証する性質について検討し、数値例を用いてその有効性を示す。

1.2 論文構成

第2章ではメカニズムデザインを適用する対象となる電力市場をモデル化し、最適化する。本論文では電力スポット市場と呼ばれる、一日を分割して、対象日の前日に各時間帯の取引量を決定する市場を扱う。本論文で対象とするネットワークは系統に一個の公益事業体が接続され、複数の需要者が公益事業体を介して系統に接続されたものを考える。公益事業体は需要者が必要とするエネルギーを系統から購入し、各需要者に価格を付けて配分するものとする。各需要者は電力消費を行う家電製品、蓄電池、太陽光パネルなどの自家発電機を所有し運用するものとする。このような製品を運用する各需要者に対して線形離散時間系を考え、また電力消費によって得られる効用をモデル化し、評価関数とする。本論文で検討する電力スポット市場では、まず一日の初めに各需要者が個人の評価関数のパラメータを公益事業体に報告し、公益事業体はこの報告と系統から購入するコストをもとに一日にわたる各時間帯の最適な価格を計算して各需要者に送信する。その価格をもとに各需要者は個人の利益を最大化する最適な電力の消費を行うものとする。価格を設定することによって、各需要者の個人的な最適化を社会全体の利益の最大化に結び付けることができる。これを分散型の最適化という。本論文では系統からの購入コスト及び各需要者の効用関数をすべて上に凸であると仮定し、最適化を行う。なお、一般的に電力ネットワークには想定されるべき二種類の制約がある。一つ目は等式制約であり、たとえば公益事業体が系統から購入するエネルギーが各需要者に配分されるエネルギーの和と等しいという制約が考えられる。二つ目は不等式制約であり、現実の問題設定で送電容量などのために電力の取引量には上限があることが多いほか、蓄電池残量や空調に管理される室温に上下限を設定することが有効であることが多い。以上の等式制約及び不等式制約のもとで最適化を行う。第3章と第4章でこの電力スポット市場に対してメカニズムデザインを適用するが、メカニズムデザインにおいて等式制約及び不等式制約を陽に考慮して考察した点は本論文において新規に提案する部分である。

第3章ではこの電力スポット市場に対して設計する一つ目のメカニズムである VCG 型メカニズムについて述べる。上述の通り、各需要者が利己的・戦略的に振る舞う不確かな情報環境下では、各需要者は偽りの情報を公益事業体に報告することで個人の利益を増やすことが許され、その結果ネットワーク全体の利益が減少する可能性がある。そこで本論文では需要者の利己的・戦略的な最適化を社会全体の最適化に統合するメカニズムを設計する。メカニズムデザインでは取引における価格のほかに移転コストを導入し、各需要者に配分する。移転コストが負の値なら税金、正の値なら補助金となる。移転コストは公益事業体によって需要者から受け取った報告をも

とに計算され、配分される。合理的な需要者は移転コストを考慮に入れて自分の利益を最大化することを目標とし、報告を行うので公益事業体はこのことを利用して移転コストを設計することによって各需要者に真実のパラメータを報告することを促す。移転コストによって各需要者にとって個人の利益を最大化する戦略は真実のパラメータを公益事業体に報告することとなる。この性質を誘因両立性という。誘因両立性が満たされることで、利己的に振る舞う需要者の最善の戦略は真実の報告をすることになるので、結果的に需要者の戦略的な振る舞いは社会全体の利益の最大化に統合される。VCG型メカニズムにおいては、誘因両立性のほかに個人合理性という性質を保証することができる。移転コストは正の値なら各需要者にとって補助金となるが、負の値であると税金となり、各需要者の利益を減らすこととなる。したがって状況によってはある需要者にとって移転コストを含んだ利益が負になることも考えられ、この場合この需要者は市場に参加せず、エネルギーの取引を行わないほうが合理的である。したがってVCG型メカニズムではいかなる場合でも移転コストを含んだ需要者の利益が非負であることを個人合理性によって保証する。個人合理性は、ある需要者に配分される移転コストのうち、その需要者の報告に依存しない項によって計算され、したがって誘因両立性と独立に成立している。本論文では数値例を用いてある戦略的な需要者が、他の全需要者が真実の報告をした場合に虚偽の報告を用いて自身の利益を増やすことができないことを確認する。

第4章では本論文における二つ目のメカニズムであるAGV型メカニズムについて述べる。VCG型メカニズムでは誘因両立性及び個人合理性を保証するために移転コストが設計されたので、公益事業体の予算は一般的にはつりあわない。すなわち、公益事業体が取引を通じて得る利益と各需要者に配分する移転コストの総和はゼロになるとは限らない。これはネットワーク外部から不足分のコストを補填する、または余剰の利益が発生することを意味し、社会全体として完全に効率的な状態ではないことになる。AGV型メカニズムではこの問題に対して公益事業体の予算がつりあうように移転コストを設計する。これを予算均衡性という。予算均衡性を保証するメカニズムでは、上述の誘因両立性と個人合理性を保証することができず、代わりにベイジアン誘因両立性を保証することができる。ベイジアン誘因両立性は、自分以外の需要者が真実の報告をしていることを所与としたとき、その需要者にとって真実の報告が最も高い利益の期待値をもたらす性質である。このメカニズムでは各需要者の報告するパラメータの真の値の事前分布が既知であるとして、この事前分布及び報告された実際のパラメータをもとに公益事業体が移転コストを計算する。本論文では、AGV型メカニズムを需要側のネットワークに対して設計することでベイ

ジアン誘因両立性と予算均衡性を保証する。ベイジアン誘因両立性が成り立つことで、戦略的に振る舞う需要者の最善の戦略は期待値の観点から、真実の報告をすることになるのでVCG型メカニズムの結果と同様に、需要者の戦略的な振る舞いは社会全体の利益の最大化に統合されることになる。数値例を用いてある需要者が、他の全需要者が真実の報告をした場合に虚偽の報告を用いて自身の利益の期待値を増やすことができないことを確認する。

最後に、第5章で本論文の成果と今後の展望について述べる。

第2章

エネルギー需要ネットワークの最適化

2.1 エネルギー需要ネットワーク

本節では本論文で扱う需要者側の電力スポット市場の概略を記述する。

Fig. 2.1 に本論文で想定するエネルギー需要ネットワークの概略を示す。系統に公益事業体が接続され、 N 個の需要者は公益事業体を介して系統に接続されている。公益事業体は需要者が必要とするエネルギーを系統を通じて卸売市場から購入し、各需要者に価格をつけて配分するものとする。

対象とする電力スポット市場では、まず一日の初めに各需要者が個人の評価関数にかかわるパラメータを公益事業体に報告し、公益事業体はそれをもとに一日にわたる最適な価格を計算して各需要者に送信する。そして各需要者は受け取った最適価格をもとに個人の利益を最大化する最

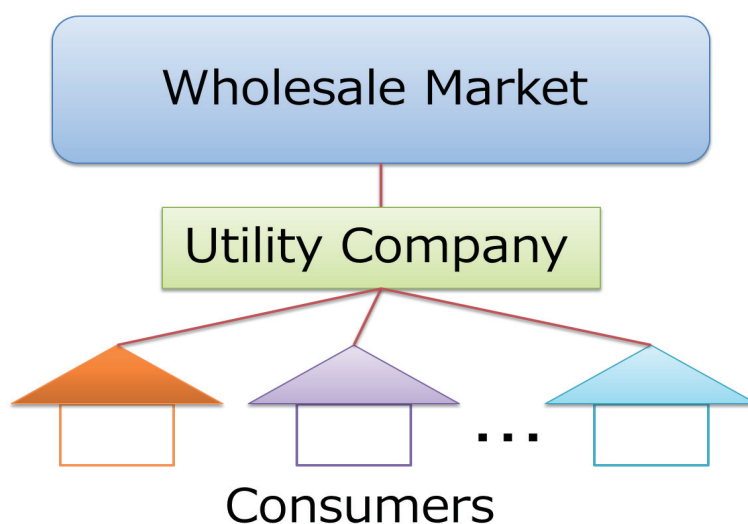


Fig. 2.1: Demand side of energy systems

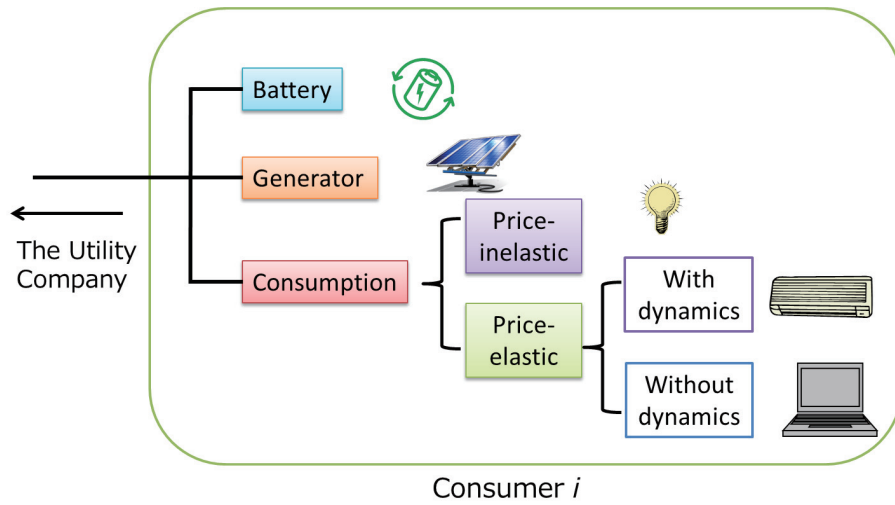


Fig. 2.2: Model of a consumer

適な電力の消費を行うものとする。なお、そのための通信インフラは整備されているものとしている。

Fig. 2.2 に各需要者のモデルを示す。ネットワークにおける各需要者はそれぞれ電力消費を行う家電製品、蓄電池、太陽光パネルなどの自家発電機を所有し運用するものとする。家電製品による消費は照明のような価格に依存しない消費と価格に依存する消費に分類され、価格に依存する消費はさらにダイナミクスを持つ消費、持たない消費に分類して考えられる。ダイナミクスとして、本論文では線形離散時間系で表現されるものを扱う。ダイナミクスを持つ消費として、たとえば空調がその代表として考えられる。一方ダイナミクスを持たない消費とは、1 離散時間前の状態や入力に影響を受けない消費であり、代表としてPCなどの機器が考えられる。

電力の消費に関して、現実の問題において等式及び不等式で表される線形制約が存在することが考えられる。すなわち、公益事業体が系統から購入する量が各需要者へ売却する量の合計と等しいという等式制約や、需要者全体の消費量、各需要者の消費量などに上下限が設けられる不等式制約が存在することが想定される。

2.2 エネルギー需要ネットワークの定式化

本節では前節で記述したエネルギー需要ネットワークを一般的な形で定式化し、議論を展開する。Fig. 2.2の需要者*i*に対して次の式で与えられる線形離散時間系を考える。

$$x_i[t+1] = A_i x_i[t] + B_i u_i[t] + D_i d_i[t] \quad (2.1)$$

$x_i[t]$ は状態変数, $u_i[t]$ は入力であり, $d_i[t]$ は外部入力である。離散時間系 (2.1) を全時刻分まとめて次のように表すこととする。

$$x_i = \Phi_i u_i + s_i \quad (2.2)$$

ただし

$$\begin{aligned} s_i &= \Psi_i x_i[1] + \Theta_i d_i, \\ x_i &= \begin{bmatrix} x_i[2] \\ \vdots \\ x_i[P+1] \end{bmatrix}, \quad u_i = \begin{bmatrix} u_i[1] \\ \vdots \\ u_i[P] \end{bmatrix}, \quad d_i = \begin{bmatrix} d_i[1] \\ \vdots \\ d_i[P] \end{bmatrix}, \\ \Psi_i &= \begin{bmatrix} A_i \\ A_i^2 \\ \vdots \\ A_i^P \end{bmatrix}, \quad \Phi_i = \begin{bmatrix} B_i & 0 & \cdots & 0 \\ A_i B_i & B_i & & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ A_i^{P-1} B_i & A_i^{P-2} B_i & \cdots & B_i \end{bmatrix}, \\ \Theta_i &= \begin{bmatrix} D_i & 0 & \cdots & 0 \\ A_i D_i & D_i & & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ A_i^{P-1} D_i & A_i^{P-2} D_i & \cdots & D_i \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.3)$$

である。ここで, P は電力使用計画を立てる一日の分割数であり, また, 定数項をまとめて s_i と表現している。

需要ネットワークに対して等式制約を考える。

$$h(u, q) = h_0(q) + \sum_{i=1}^N h_i(u_i) = 0 \quad (2.4)$$

ただし q は公益事業体が系統から購入する量であり,

$$q = \begin{bmatrix} q[1] \\ \vdots \\ q[P] \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

である.

不等式制約は以下の式によって定式化する.

$$g_0(q) \leq 0, \quad g_i(u_i) \leq 0, \quad i = 1, \dots, N \quad (2.6)$$

仮定 1

$g_0, g_i, i = 1, \dots, N$ はすべて凸関数であり, 式 (2.6) の実行可能領域は内点を持つ.

2.3 エネルギー需要ネットワークの分散型最適化

本論文では次章以降に不確かな情報環境下において, 戦略的な各需要者の個人的な利益を各自が最大化する振る舞いを利用して系統全体の利益を最大化するメカニズムを構築する. 本章ではその準備として, 需要者の評価関数やシステムモデルが互いに既知である場合の分散型最適化を行う. すなわち, 全需要者が公益事業体に真の情報を報告した場合における最適化を考える.

2.3.1 評価関数の定式化

各需要者は自己の利益を最大化するため, 離散時間系 (2.1) と制約 (2.4), (2.6) の範囲内で次の評価関数を最大化させることを目標とする.

$$J_i^\#(u_i) = \sum_{t=1}^P U_i(u_i[t], x_i[t+1]) \quad (2.7)$$

$U_i(u_i[t], x_i[t+1])$ は各時刻において蓄電池や電力を使用することにより需要者 i が得る効用であり, 上に凸な関数とする. 各需要者は入力 u_i を調節することにより, 各離散時間に得られる効用を全離散時間分合計したものを最大化しようとするものとする.

次に公益事業体の評価関数を定義する. 公益事業体が系統からエネルギーを購入するコストは購入する電力量 $q[t]$ に関する二次関数で表される [21]. このとき, 全離散時間分の効用関数の合

計は、各時刻ごとの効用関数を $U_0(q[t])$ として

$$J_0^\#(q) = \sum_{t=1}^P U_0(q[t]) \quad (2.8)$$

となる。調達コストは $-U_0(q[t])$ で表せ、 $U_0(q[t])$ は上に凸な関数とする。

公益事業体の目的は、自分自身が利益を上げるのではなくネットワーク全体の利益を最大化することであるため、 $u = [u_1^T, \dots, u_N^T]^T$ とすると、最大化すべき評価関数は以下のようなになる。

$$J^\#(u, q) = J_0^\#(q) + \sum_{i=1}^N J_i^\#(u_i) \quad (2.9)$$

これは各需要者の効用の和から系統からの調達コストを引いたものに相当する。公益事業体は制約 (2.4), (2.6) を満たしつつ、 $J^\#(u, q)$ を u, q に関して最大化する。

$$\begin{aligned} & \max_{u_1, \dots, u_N, q} J^\#(u, q) \\ & \text{subject to (2.4), (2.6)} \end{aligned} \quad (2.10)$$

この問題は凸最適化問題となるため、公益事業体は各需要者の評価関数のパラメータを集約すると、この問題に対する最適解 u^*, q^* を得ることができる。

仮定 2

最適化問題 (2.10) において、 $J^\#(u, q)$ は u, q に関して上に広義凸であり、さらに制約 (2.4), (2.6) による実行可能領域は凸集合である。

2.3.2 制約付き分散型最適化

問題 (2.10) を解くにあたり、双対問題 [22] を考え、それを分解することにより各需要者と公益事業体が協調的に最適解へ到達させる方法を用いる。各需要者は個別に各自の利益に関する最適化問題を解き、その解によってエネルギー使用を決定する。各需要者が単にそれぞれの効用 (2.7) を最大化するだけでは公益事業体の目指す最適化 (2.10) は達成されないため、公益事業体はネットワーク全体の利益を確保するために価格という信号を用いて各需要者の最適解を全体の最適解へと誘導する。

まず主問題 (2.10) に対して双対問題を次のように定式化する．すなわち式 (2.9) に対して

$$\begin{aligned}
 J(u, q, \lambda, \mu) = & J_0^\sharp(q) + \sum_{i=1}^N J_i^\sharp(u_i) \\
 & - \lambda^T \left(h_0(q) + \sum_{i=1}^N h_i(u_i) \right) \\
 & - \left(\mu_0^T g_0(q) + \sum_{i=1}^N \mu_i^T g_i(u_i) \right)
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

とすれば，主問題 (2.10) の双対問題は

$$\begin{aligned}
 \min_{\lambda, \mu} \max_{u_1, \dots, u_N, q} J(u, q, \lambda, \mu) \\
 \text{subject to } \mu \geq 0
 \end{aligned} \tag{2.12}$$

となる．仮定 1, 2 を満たすならばこの問題の最適解は元の主問題 (2.10) の解と一致する [22]．したがって，双対問題 (2.12) を解くことを考える．ただし $\mu = [\mu_0^T, \mu_1^T, \dots, \mu_N^T]^T$ とし，この問題における KKT 条件は

$$\frac{\partial J}{\partial q}(u^*, q^*, \lambda^*, \mu^*) = 0, \tag{2.13}$$

$$\frac{\partial J}{\partial u}(u^*, q^*, \lambda^*, \mu^*) = 0, \tag{2.14}$$

$$h(u^*, q^*) = 0, \tag{2.15}$$

$$g_0(q^*) \leq 0, \tag{2.16}$$

$$\mu_0^* \geq 0, \tag{2.17}$$

$$\mu_0^{*T} g_0(q^*) = 0, \tag{2.18}$$

$$g_i(u_i^*) \leq 0, \tag{2.19}$$

$$\mu_i^* \geq 0, \tag{2.20}$$

$$\mu_i^{*T} g_i(u_i^*) = 0, \quad i = 1, \dots, N \tag{2.21}$$

となる．双対問題 (2.12) は各需要者と公益事業者の関わる項に関して線形な関数であるために分解することができる．式 (2.11) を分解すると，公益事業者の最大化すべき評価関数は

$$J_0(q, \lambda, \mu_0) = J_0^\sharp(q) - \lambda^T h_0(q) - \mu_0^T g_0(q) \tag{2.22}$$

となり，需要者 i の最大化すべき評価関数は

$$J_i(u_i, \lambda, \mu_i) = J_i^\#(u_i) - \lambda^T h_i(u_i) - \mu_i^T g_i(u_i) \quad (2.23)$$

となる．式 (2.22)，(2.23) は式 (2.11) を分解したものであるために，明らかに

$$J(u, q, \lambda, \mu) = J_0(q, \lambda, \mu_0) + \sum_{i=1}^N J_i(u_i, \lambda, \mu_i) \quad (2.24)$$

である．ある λ, μ に対する分散型の最適化

$$\begin{aligned} \max_{u_i} \quad & J_i(u_i, \lambda, \mu_i) \\ \max_q \quad & J_0(q, \lambda, \mu_0) \end{aligned} \quad (2.25)$$

を行い，同時に問題 (2.25) を解いた最適解 $u_i^*(\lambda, \mu_i), q^*(\lambda, \mu_0)$ を用いた最適な λ, μ の決定

$$\begin{aligned} \min_{\lambda, \mu} \quad & J(u_i^*(\lambda, \mu_i), q^*(\lambda, \mu_0), \lambda, \mu) \\ \text{subject to} \quad & \mu \geq 0 \end{aligned} \quad (2.26)$$

を行うことで，双対問題 (2.12) の最適解を求めることができる．本論文におけるスポット市場の最適化においては，ラグランジュ乗数 μ を不等式制約に関するペナルティに，また λ を価格に対応させて考えることができる．特に価格 $\lambda = [\lambda[1], \dots, \lambda[P]]^T$ は時刻ごとのベクトルであり，時刻により価格が変動することを表現している．凸最適化問題であるため，最適化計算は公益事業者が単体で双対問題を解いて最適価格を求める方法のほかに，需要者が公益事業者と何度も通信を行い，射影勾配法 [23] などを用いて逐次的に最適な価格へ収束させる方法もある．

2.4 数値例

本章で議論した需要ネットワークの前日市場における等式制約及び不等式制約付き最適化の数値例を示す．

2.4.1 数値実験設定

需要者数 $N = 5$ とし，一日を $P = 24$ 等分した電力スポット市場を考える．一日のはじめに各需要者は保有する効用関数の情報をすべて公益事業者に報告し，この情報をもとに公益事業者

は凸最適化問題の最適解を求めることで、最適価格を計算し、各需要者に送信する。受け取った価格をもとに各需要者が各自の評価関数を最大化することで社会全体の利益が最大化され、かつ各需要者の個々の利益が最大化される需要パターンが計算される。このような市場の状況を設定し、数値計算を行う。

状態変数 $x_i[t]$ の要素として室温 $T_i[t]$ 、蓄電池の残量 $b_i[t]$ を考える。また制御入力 $u_i[t]$ の要素はダイナミクスを持つ需要 $u_{i,d}[t]$ 、持たない需要 $u_{i,s}[t]$ 、蓄電池の充電量 $p_{i,b}[t]$ 、価格に依存しない需要 $u_{i,c}[t]$ である。また外部入力 $d_i[t]$ の要素は外気温 $T^{out}[t]$ である。すなわち

$$x_i[t] = \begin{bmatrix} T_i[t] \\ b_i[t] \end{bmatrix}, u_i[t] = \begin{bmatrix} u_{i,d}[t] \\ u_{i,s}[t] \\ p_{i,b}[t] \\ u_{i,c}[t] \end{bmatrix}, d_i[t] = T^{out}[t] \quad (2.27)$$

となる。自家発電量 $y_i[t]$ は日射量に比例した太陽光発電とする。気温と日射量のデータはそれぞれ気象庁 [24] と日本気象協会 [25] による 2011 年 9 月 1 日の東京のものを使用した。各需要者の太陽光発電量と気温の推移をそれぞれ Figs. 2.3, 2.4 に示す。各需要者の発電量にはパネルの面積の差として、ランダムな個人差を設けた。これらの外部入力の前日市場の最適化の際に、予測値を用いることとする。また、最適化の際に、不等式制約として系統から購入する全取引量の上限 4500[W]、需要者 1 の購入する量の上限 850[W]、蓄電池容量 520[Wh]、室温の上限 27[°C] を設けた。

ダイナミクスを持つ需要

ダイナミクスを持つ需要として空調を考える。空調の出力は 1 離散時間前の室内気温に依存する。ダイナミクスは以下のモデルを用いる。

$$T_i[t+1] = T_i[t] + \alpha_i(T^{out}[t] - T_i[t]) + \beta_i u_{i,d}[t] \quad (2.28)$$

ここで $T_i[t]$ は室温とし、 $T^{out}[t]$ は室外気温とする。空調の時刻 t における消費は $u_{i,d}[t]$ である。係数 α_i は室内気温が外気温に受ける影響の大きさを表す 0 以上 1 以下の定数であり、建物の保温性能に依存する。 β_i は空調出力が室温に与える影響の大きさを表す係数であり、空調の性能に依存する。効用関数 $U_{i,d}[t]$ は以下のように設定する。

$$U_{i,d}[t] = c_{i,air} - b_{i,air}(T_i[t] - T_i^{comf})^2 \quad (2.29)$$

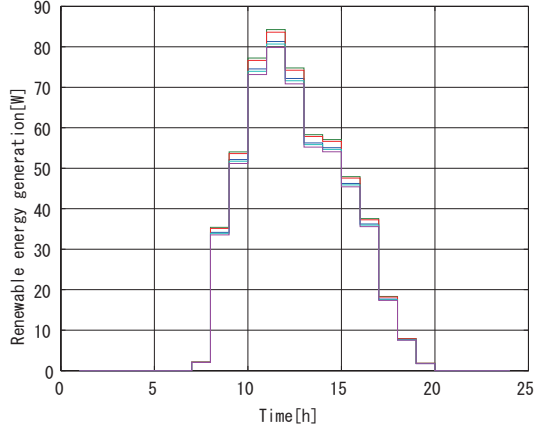


Fig. 2.3: PV output

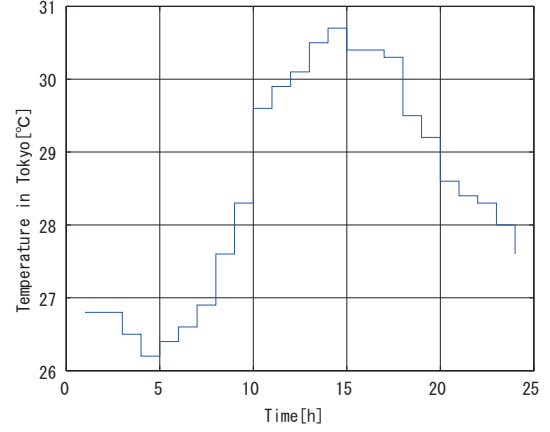


Fig. 2.4: Outside temperature

T_i^{comf} は最も快適な室温であり、25 °Cで固定している．効用関数は機器を使用する需要者が過去の経験から個人的な価値観に沿うパラメータ $b_{i,air}, c_{i,air}$ を同定し、把握しているものとする． $u_{i,s}$ が小さい時間帯は一時間のうちある割合の時間でPCの電源を切る、または複数台あるPCのうち一部のみを使用することになる．

ダイナミクスを持たない需要

ダイナミクスを持たない需要は以下のように、使用電力量 $u_{i,s}[t]$ に応じて効用 $U_{i,s}[t]$ が得られるとする．

$$U_{i,s}[t] = -a_{i,s}u_{i,s}^2[t] + b_{i,s}u_{i,s}[t] \quad (2.30)$$

電力価格に反応する需要で、かつダイナミクスを持たないものとしてPCに使われる電力を想定している．ここではある上に凸の関数を仮定し、二次形式で表せる関数を選んでいる．この関数におけるパラメータ $a_{i,s}, b_{i,s}$ に関しても、需要者が過去の経験によって個人的な価値観に沿うパラメータを把握しているものとする．

蓄電池

蓄電池の残量は充放電量と1離散時間前の残量に依存するという意味でダイナミクスを持つ．蓄電池のダイナミクスは以下ようになる．

$$b_i[t+1] = b_i[t] + k_{i,b}p_{i,b}[t] \quad (2.31)$$

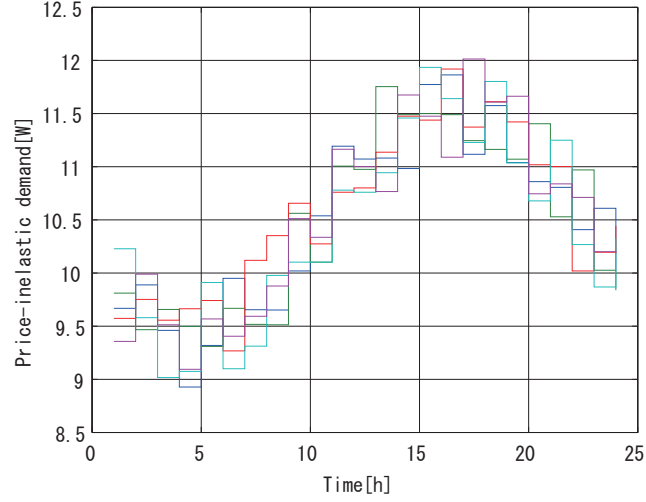


Fig. 2.5: Price-inelastic demand

$b_i[t]$, $k_{i,b}$, $p_{i,b}[t]$ はそれぞれ残量, インバータ効率の逆数, 充電量である.

蓄電池に関する効用は, 蓄電池を使用することによる蓄電池の消耗で評価する. 本研究では二次形式で表現するため次のような式で評価する.

$$U_{i,b}[t] = -\xi_{i,1}p_{i,b}^2[t] - \xi_{i,2}(b_i[t] - b_i^{comf})^2 \quad (2.32)$$

第1項は充放電による消耗, 第2項は蓄電目標値 b_i^{comf} から外れた量, すなわち過充電・過放電状態へのペナルティとして評価する. $\xi_{i,1}, \xi_{i,2}$ は蓄電池の性能で決まる定数である.

価格に依存しない需要

価格に依存しない需要 $u_{i,c}[t]$ は最適化の過程で定数として扱われる. 価格に依存しない需要として照明器具を想定している. Fig. 2.5 に示すように, 各需要者の価格に依存しない需要のパターンを設定する. ランダムな個人差を設けている.

以上の4つの家電製品によって, 本論文における数値例では4種類の特徴を持つ各家庭の電力消費を代表させている.

制約

等式制約を次の式で与える.

$$\sum_{i=1}^N \mathbf{1}^T u_i[t] - q[t] - \sum_{i=1}^N y_i[t] = 0, \quad t = 1, \dots, P \quad (2.33)$$

この式はネットワーク全体の電力需給のつりあいを表しており、 $y_i[t]$ は自家発電機による発電量、 $\mathbf{1}$ は全要素1の縦ベクトルである。発電機として太陽光パネルを想定している。

$$h_0(q) = -q, \quad h_i(u_i) = Ku_i - y_i \quad (2.34)$$

であり、

$$K = \begin{bmatrix} \mathbf{1}^T & 0 \\ & \ddots \\ 0 & \mathbf{1}^T \end{bmatrix}, \quad y_i = \begin{bmatrix} y_i[1] \\ \vdots \\ y_i[P] \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

とする。

また、総電力購入量、各需要者による消費量、および室温、蓄電池の残量に対する不等式制約はそれぞれ以下のように表現できる。

$$0 \leq q[t] \leq \bar{q}[t], \quad (2.36)$$

$$\underline{u}_i[t] \leq u_i[t] \leq \bar{u}_i[t], \quad (2.37)$$

$$0 \leq \mathbf{1}^T u_i[t] \leq \bar{m}_i[t], \quad (2.38)$$

$$\underline{x}_i[t] \leq x_i[t] \leq \bar{x}_i[t], \quad t = 1, \dots, P \quad (2.39)$$

ここで、 $\bar{q}[t]$ は総電力購入量の上限、 $\underline{u}_i[t]$, $\bar{u}_i[t]$ は需要者の各家電による消費量の下限と上限、 \bar{m}_i は需要者 i による総消費量の上限、 $\underline{x}_i[t]$, $\bar{x}_i[t]$ は室温および蓄電池の残量に許容される下限と上限を表している。公益事業体から系統に電力を売却することはできず、また各需要者から公益事業体に電力を売却することもできないものとし、 $q[t]$ および $\mathbf{1}^T u_i[t]$ の下限は0とする。 $u_i[t]$ に関する制約をまとめて

$$\underline{n}_i[t] \leq Su_i[t] \leq \bar{n}_i[t] \quad (2.40)$$

と表すことができる。ただし E を単位行列として $S = [\mathbf{1} \ E]^T$ とし、 $\underline{n}_i[t] = [0 \ \underline{u}_i^T[t]]^T$, $\bar{n}_i[t] = [\bar{m}_i[t] \ \bar{u}_i^T[t]]^T$ である。式(2.2)を使って x_i を消去し、全時刻分の制約をまとめることで、式(2.39)は式(2.6)で表したように記述できる。

$$g_0(q) \leq 0, \quad g_i(u_i) \leq 0, \quad i = 1, \dots, N \quad (2.41)$$

ただし

$$\begin{aligned}
 g_0(q) &= \begin{bmatrix} q - \bar{q} \\ -q \end{bmatrix}, \quad g_i(u_i) = \begin{bmatrix} Zu_i - \bar{n}_i \\ \underline{n}_i - Zu_i \\ \Phi_i u_i + s_i - \bar{x}_i \\ \underline{x}_i - \Phi_i u_i - s_i \end{bmatrix}, \\
 \bar{q} &= \begin{bmatrix} \bar{q}_i[1] \\ \vdots \\ \bar{q}_i[P] \end{bmatrix}, \quad \bar{x}_i = \begin{bmatrix} \bar{x}_i[1] \\ \vdots \\ \bar{x}_i[P] \end{bmatrix}, \quad \underline{x}_i = \begin{bmatrix} \underline{x}_i[1] \\ \vdots \\ \underline{x}_i[P] \end{bmatrix}, \\
 \underline{n}_i &= \begin{bmatrix} \underline{n}_i[1] \\ \vdots \\ \underline{n}_i[P] \end{bmatrix}, \quad \bar{n}_i = \begin{bmatrix} \bar{n}_i[1] \\ \vdots \\ \bar{n}_i[P] \end{bmatrix}, \quad Z = \begin{bmatrix} S & 0 \\ & \ddots \\ 0 & S \end{bmatrix} \quad (2.42)
 \end{aligned}$$

である。

2.4.2 数値実験結果

Figs. 2.6–2.12 に本章で定式化した需要ネットワークの不等式制約付き最適化の結果を示す。それぞれ需要者1が空調に使用する消費のパターン、PCに使用する消費、蓄電池残量、室温、需要者1の総消費量、全需要者が消費する総電力量、価格を表している。なお、Figs. 2.8–2.11における実線は本手法を用いた不等式制約を考慮した時の結果、また破線が等式制約のみを考慮した時の最適化の結果を表している。本手法による最適化の結果が点線で示した各値の上限値を超えていないことが分かる。最適化の結果は、Fig. 2.6から、外気温の高い昼間の時間帯に空調出力が大きくなっていることがわかる。これに伴いFig. 2.10及びFig. 2.11から昼間の時間帯における総電力消費量が大きくなっていることがわかる。したがってFig. 2.12からわかるとおりその時間帯の価格がピークになり、Fig. 2.7に示すとおりPCによる消費が昼間の時間帯に減少していることがわかる。また、Fig. 2.8からわかるとおりこの時間帯は蓄電池に充電された電力が積極的に使用されていることがわかる。

Figs. 2.13–2.15に需要者1の効用を構成要素ごとに示す。Fig. 2.13は空調により室温が快適に保たれることで得られる効用の各離散時間ごとの推移である。昼間の外気温が高い時間帯に室温も不等式制約の上限に達し、効用が大きく落ち込んでいることがわかる。Fig. 2.14はPCにより

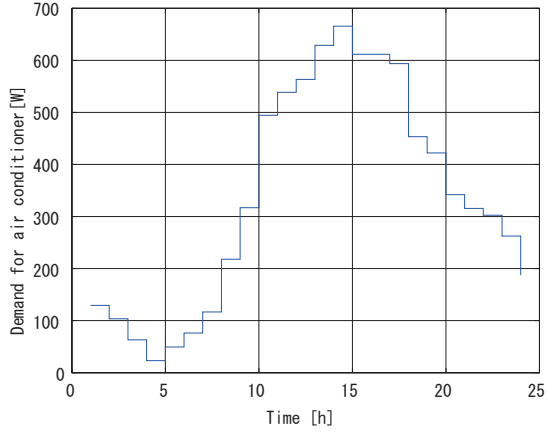


Fig. 2.6: Demand for air conditioner of consumer1

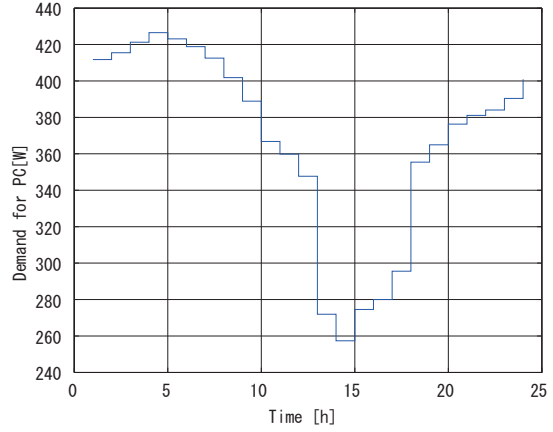


Fig. 2.7: Demand for PC of consumer1

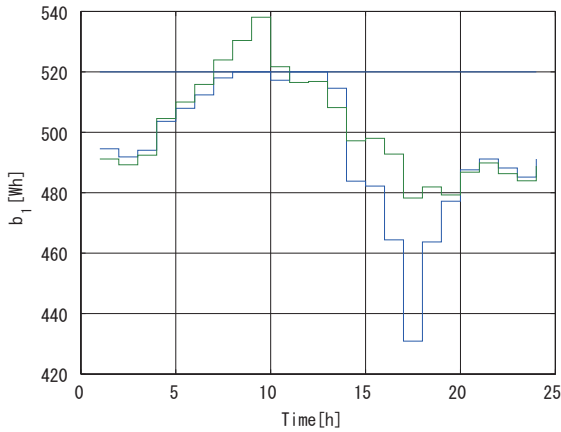


Fig. 2.8: Battery storage of consumer 1

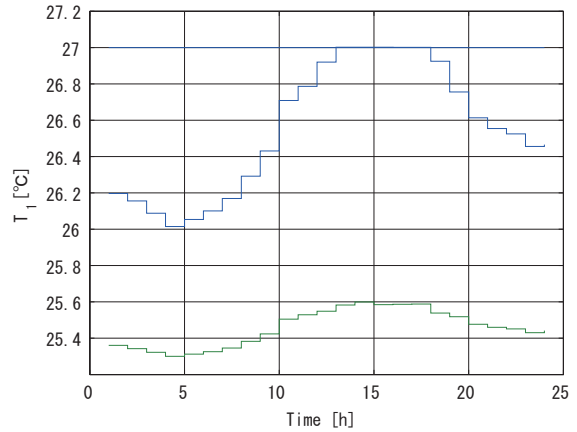


Fig. 2.9: Room temperature of consumer1

得られる効用である。外気温の高い時間帯に空調出力が大きくなり、電力価格が高くなることでPCに使用される電力も小さくなり、したがって昼間の時間帯はPCによって得られる効用も低くなっている様子が見られる。Fig. 2.15は蓄電池を使うことで蓄電池に与えられるダメージ、そして充電量の目標値から外れた分に対するペナルティからなる損失を評価した効用関数である。こちらは昼間の高温による消費が多い時間帯が終わって放電から充電に転ずるときにダメージを大きく受けていることがわかる。

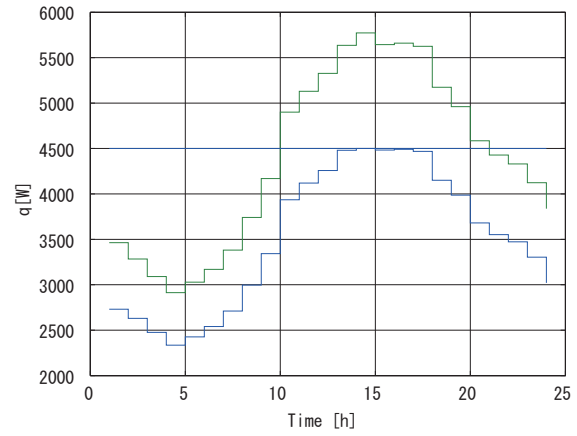
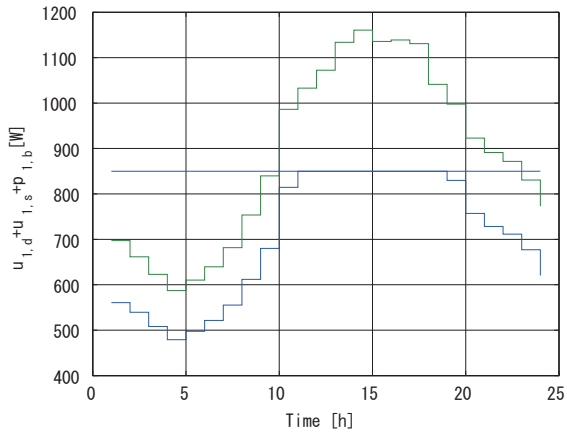


Fig. 2.10: Energy consumption of consumer 1

Fig. 2.11: Energy from the wholesale market

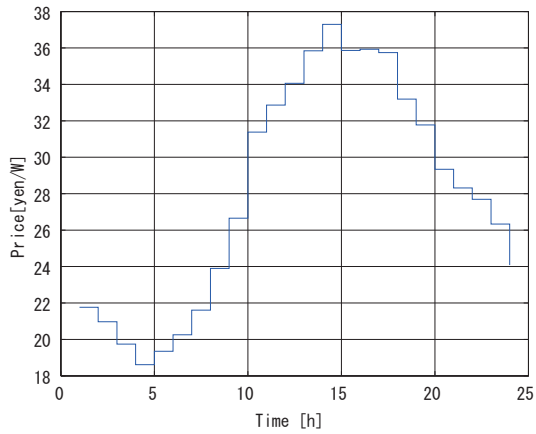


Fig. 2.12: Price

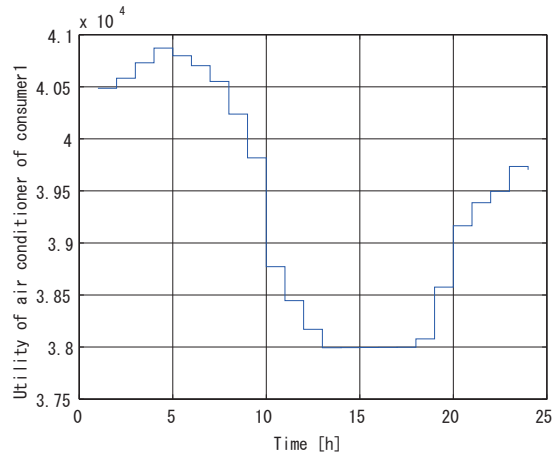


Fig. 2.13: Utility of air conditioner of consumer 1

最後に、この状況において、ある需要者の受ける他の需要者の評価関数のパラメータの変化による影響を考察する。Fig. 2.16 に需要者 1 のパラメータの変化に対する需要者 2 の利益の変化を示す。すなわち、需要者 1 の使用する空調に関して、効用関数のパラメータ $b_{1,air}$ が変化した時に需要者 2 の受け取る最適化された利益 $J_2(u_2^*)$ がどのように変化するかを表したものである。この場合、需要者 1 のパラメータ $b_{1,air}$ が小さければ小さいほど需要者 2 はより大きな利益を受け取っていることがわかる。式 (2.29) からわかるとおり、 $b_{1,air}$ は需要者 1 が室温の快適さにど

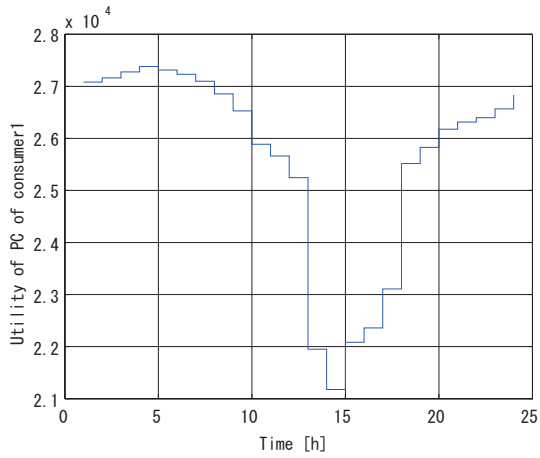


Fig. 2.14: Utility of PC of consumer 1

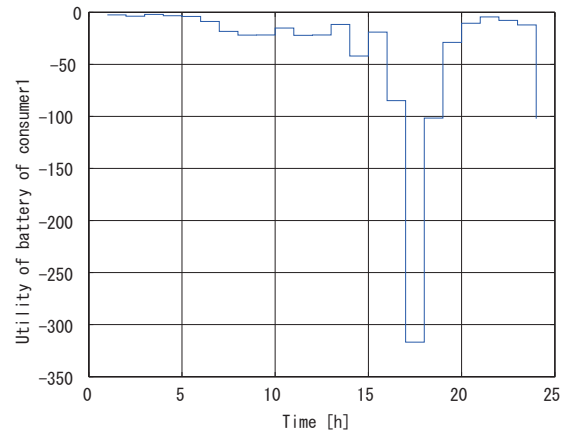


Fig. 2.15: Utility of battery of consumer 1

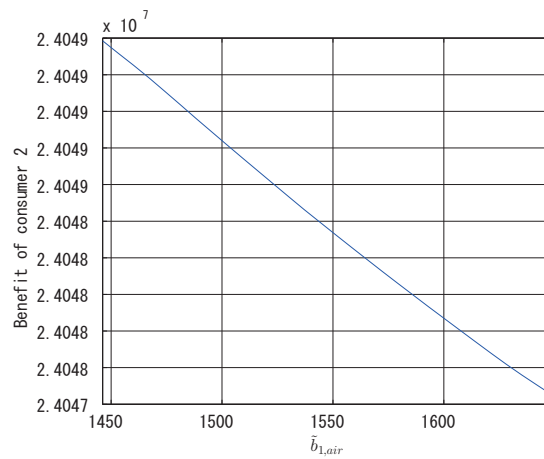


Fig. 2.16: Benefit of consumer 2

れほどの価値を感じるかを示すパラメータであり、これを小さくすると、外気温が上がり需要者全体の消費電力が上がる昼間の時間帯に需要者1の空調出力が小さくなる。すると価格が下がり、需要者2の使用する電力が増えて効用が上がったものと推測できる。

2.5 LQ問題における解析解

本論文を通して議論を行っている凸最適化問題の簡単なケースとして、二次形式の評価関数及び線形の制約式で表現される問題が考えられる。これを本論文ではLQ問題と呼ぶことにする。この時、不等式制約が存在しない場合においては、最適解を解析的に与えることができる。

評価関数が二次形式の場合、各需要者の効用関数は次のように表現することができる。

$$\begin{aligned} U_i(u_i[t], x_i[t]) = & -(u_i[t]^T Q_{1i} u_i[t] + R_{1i} u_i[t]) \\ & -(x_i[t]^T Q_{2i} x_i[t] + R_{2i} x_i[t]) + c_i \end{aligned} \quad (2.43)$$

ここで、 Q_{1i}, Q_{2i} は対角要素がすべて正の対角行列である。 R_{1i}, R_{2i} はベクトル、 c_i はスカラーである。この表現を用いると、各需要者の全時刻にわたる評価関数は次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} J_i^\#(u_i, x_i) &= -\sum_{t=1}^P (u_i[t]^T Q_{1i} u_i[t] + R_{1i} u_i[t]) \\ &\quad -\sum_{t=1}^P (x_i^T[t+1] Q_{2i} x_i[t+1] + R_{2i} x_i[t+1]) + c_i P \\ &= -u_i^T Q_{1Ti} u_i - R_{1Ti} u_i - x_i^T Q_{2Ti} x_i - R_{2Ti} x_i + c_i P \end{aligned} \quad (2.44)$$

ただし

$$\begin{aligned} Q_{1Ti} &= \text{blockdiag}[Q_{1i} \cdots Q_{1i}], \quad R_{1Ti} = [R_{1i} \cdots R_{1i}], \\ Q_{2Ti} &= \text{blockdiag}[Q_{2i} \cdots Q_{2i}], \quad R_{2Ti} = [R_{2i} \cdots R_{2i}] \end{aligned}$$

である。式(2.2)を代入して x_i を消去すると、各需要者の評価関数は次のように u_i による二次形式によって表せる。

$$J_i^\#(u_i) = u_i^T Q_i u_i + R_i u_i + C_i \quad (2.45)$$

ただし

$$\begin{aligned} Q_i &= -(Q_{1Ti} + \Phi_i^T Q_{2Ti} \Phi_i), \\ R_i &= -(R_{1Ti} + 2c_n^T Q_{2Ti} \Phi_i + R_{2Ti} \Phi_i), \\ C_i &= -c_i^T Q_{2Ti} c_n - R_{2Ti} c_n + c_i P, \\ c_n &= \Psi_i x_i[1] + \Theta_i d_i \end{aligned}$$

である。

次に公益事業体の評価関数を q に関する二次形式によって表現する。公益事業体の評価関数は前述のとおり系統から購入するコストによって表現され、これは購入量 q の二次形式で表現できる [21].

$$U_0(q[t]) = -(Q_{10}q[t]^2 + R_{10}q[t]) + c_{10} \quad (2.46)$$

したがって全時刻にわたる公益事業体の評価関数は

$$J_0^\#(q) = \sum_{t=1}^P U_0(q[t]) = q^T Q_0 q + R_0 q + C_0 \quad (2.47)$$

となる。ただし $Q_0 = -\text{diag}[Q_{10} \cdots Q_{10}]$, $R_0 = -[R_{10} \cdots R_{10}]$, $C_0 = c_{10}P$ である。 Q_{10} は正のスカラである。

以上により公益事業体、各需要者の評価関数が二次形式により表現されたので、社会全体の利益はこれらの合計となり、次のような二次形式で表される。

$$\begin{aligned} J^\#(u, q) &= \sum_{i=1}^N J_i^\#(u_i) + J_0^\#(q) \\ &= u^T Q u + R u + q^T Q_0 q + R_0 q + C \end{aligned} \quad (2.48)$$

ここで

$$\begin{aligned} Q &= \text{blockdiag}[Q_1 \cdots Q_N], \\ R &= [R_1 \cdots R_N], \quad C = \sum_{i=0}^N C_i \end{aligned}$$

である。 u_i, q に関して線形な等式制約 (2.4) の下で、 $J^\#(u, q)$ を u, q に関して最大化する。

$$\begin{aligned} &\max_{u, q} J^\#(u, q) \\ &\text{subject to (2.4)} \end{aligned} \quad (2.49)$$

不等式制約を省略して議論することによって、この問題は解析的に解を求めることができる。等式制約 (2.4) を用いて q を社会全体の利益から消去すると

$$J^\#(u) = u^T Q' u + R' u + C' \quad (2.50)$$

となる。ただし

$$K' = [K \cdots K], \quad I' = [E \cdots E]$$

として

$$\begin{aligned} Q' &= Q + K'^T Q_0 K', \\ R' &= R - 2y^T I'^T Q_0 K' + R_0 K', \\ C' &= y^T I'^T Q_0 I' y - R_0 I' y + C \end{aligned}$$

となる。従って最適解は Q' が正定対称行列であることを利用すれば

$$\frac{\partial J^\sharp(u^*)}{\partial u} = 2Q'u^* + R'^T = 0$$

より

$$u^* = -\frac{1}{2}Q'^{-1}R'^T \quad (2.51)$$

となる。すなわち評価関数の情報が全て二次形式で与えられ、等式制約が線形な問題においてはこのような解析解が得られる。

このとき、双対関数は

$$\begin{aligned} J(u, q, \lambda) &= \sum_{i=1}^N (u_i^T Q_i u_i + R_i u_i) + q^T Q_0 q + R_0 q + C \\ &\quad - \lambda^T \left(\sum_{i=1}^N K u_i - q - \sum_{i=1}^N y_i \right) \\ &= q^T Q_0 q + (R_0 + \lambda^T) q + C_0 \\ &\quad + \sum_{i=1}^N \{ u_i^T Q_i u_i + (R_i - \lambda^T K) u_i + C_i + \lambda^T y_i \} \end{aligned} \quad (2.52)$$

となり、これを公益事業体と各需要者の最大化する関数に分解すると、公益事業体の関数は

$$\begin{aligned} J_0(q, \lambda) &= J_0^\sharp(q) + \lambda^T q \\ &= q^T Q_0 q + (R_0 + \lambda^T) q + C_0 \end{aligned} \quad (2.53)$$

であり、需要者 i の最大化すべき評価関数は

$$\begin{aligned} J_i(u_i, \lambda) &= J_i^\sharp(u_i) - \lambda^T (K u_i - y_i) \\ &= u_i^T Q_i u_i + (R_i - \lambda^T K) u_i + C_i - \lambda^T y_i \end{aligned} \quad (2.54)$$

となる. LQ問題においては Q_i, Q_0 が正定行列であることを利用して次のように求めることができる.

$$\frac{\partial J_i(u_i, \lambda)}{\partial u_i} = 2Q_i u_i + R_i^T - K^T \lambda$$

を用いて

$$u_i^*(\lambda) = -\frac{1}{2}Q_i^{-1}(R_i^T - K^T \lambda) \quad (2.55)$$

また

$$\frac{\partial J_0(q, \lambda)}{\partial q} = 2Q_0 q + R_0^T + \lambda$$

より

$$q^*(\lambda) = -\frac{1}{2}Q_0^{-1}(R_0^T + \lambda) \quad (2.56)$$

となる. このようにして求められた最適解 (2.55), (2.56) を用いて λ の式に直し, 同様に導関数を求めることで価格 λ の最適解を

$$\lambda^* = (K'Q^{-1}K'^T + Q_0^{-1})^{-1}(K'Q^{-1}R^T - Q_0^{-1}R_0^T + 2I'y) \quad (2.57)$$

と求めることができる.

以上のように, LQ問題に対しては解析的に解を求めることができるが, 一般的な凸最適化問題は, 勾配法などの数値的な解法によらないと解を求めることはできない.

第3章

VCG型メカニズムによる統合

3.1 VCG型メカニズムの提案

前章の分散型最適化は、需要者が自分自身の評価関数やシステムをネットワーク全体の共通の情報とするという合意の成立を前提として、この共通の情報に基づいて公益事業体が最適な価格を決定することにより全体の最適化を図るという方法であった。すなわち、この手法に従うと、各需要者はそれぞれの評価関数 $J_i^\#$ に含まれるパラメータの全てを正直に公益事業体に報告する必要がある。ところが、本論文で想定する不確かな情報環境下では、各需要者は個人の評価関数やシステムの情報を戦略的に用いて（たとえば、偽りの情報を報告して）個人の利益を増やすことが許される。その結果、ネットワーク全体の利益が減少する可能性がある。そこで本論文では、経済学、ゲーム理論の分野で議論されているメカニズムデザイン [6]–[13] を用いて、不確かな情報環境における需要者の利己的・戦略的な最適化を全体の最適化に統合し、社会全体の利益を確保する方法を示す。本章では、経済学、ゲーム理論の分野で議論されている VCG メカニズム [7] をベースにしたメカニズムを設計し、不確かな情報環境における需要者の利己的・戦略的な最適化を全体の最適化に統合する方法を示す。

メカニズムデザインでは移転コストと呼ばれる補助金を導入し、各需要者に配分する。移転コストが負の値なら税金となる。合理的な需要者は移転コストを考慮に入れて自分の利益を最大化することを目標にする。公益事業体はこのことを利用して、各需要者から報告を受けたパラメータをもとに移転コストを設計して真実のパラメータを報告することを促す。

いま、パラメータベクトル r_i を需要者 i の評価関数やシステムに関する真のパラメータ、すなわち $J_i^\#$ に含まれるすべての情報の真値であるとする。また、 $r = [r_1^T, \dots, r_N^T]^T$ とする。以降、この表現を用いて、パラメータ r の報告によって得られた評価関数を $J(r, u, q, \lambda^*(r), \mu^*(r))$ のように表す。すると、前章で求めた完全情報環境下における最適化の解は

$$[u^*(r), q^*(r)] = \arg \max_{u, q} J(r, u, q, \lambda^*(r), \mu^*(r)) \quad (3.1)$$

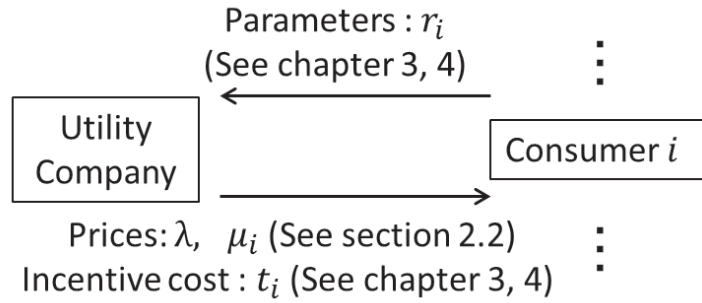


Fig. 3.1: Model of information flow

と表せる。ここで、

$$r_i = \{A_i, B_i, D_i, x_i[1], y_i, U_i\} \quad (3.2)$$

である。一方で、需要者 i が公益事業体に報告する個人情報を $\tilde{r}_i = \{\tilde{A}_i, \tilde{B}_i, \tilde{D}_i, \tilde{x}_i[1], \tilde{y}_i, \tilde{U}_i\}$ とすると、前章の最適化は \tilde{A}_i, \tilde{B}_i や初期状態 $\tilde{x}_i[1]$ などの報告されたパラメータを用いたシステム行列や評価関数に基づいて実際には行われることになる。具体的には、公益事業体が行う最適解の計算は、

$$[u^*(\tilde{r}), q^*(\tilde{r})] = \arg \max_{u, q} J(\tilde{r}, u, q, \lambda^*(\tilde{r}), \mu^*(\tilde{r})) \quad (3.3)$$

となる。ただし $\tilde{r} = [\tilde{r}_1^T, \dots, \tilde{r}_N^T]^T$, $u^*(\tilde{r}) = \{u_i^*(\tilde{r}), u_{-i}^*(\tilde{r})\}$, $u_{-i} = [u_1^T, \dots, u_{i-1}^T, u_{i+1}^T, \dots, u_N^T]^T$ である。また、以降では自身以外のパラメータを表現するため $r_{-i} = [r_1^T, \dots, r_{i-1}^T, r_{i+1}^T, \dots, r_N^T]^T$ といった表記を用いる。

公益事業体は各需要者に真の報告をさせる、つまり Fig. 3.1 に示すように $\tilde{r}_i = r_i$ とさせるために式 (3.3) の解を用いた移転コスト $t_i(\tilde{r})$ を各需要者に課すこととする。その場合、各需要者の移転コストを含む評価関数は次のように与えられる。

$$J_i^\dagger(r_i, u_i(\tilde{r}), \lambda(\tilde{r}), \mu_i(\tilde{r}), \tilde{r}) = J_i(r_i, u_i(\tilde{r}), \lambda(\tilde{r}), \mu_i(\tilde{r})) + t_i(\tilde{r}) \quad (3.4)$$

需要者が合理的である場合、式 (2.23) ではなく移転コストを含んだ式 (3.4) の評価関数を最大化することを試みるはずである。

3.1.1 誘因両立性

式の簡略化のために $\{\tilde{r}_i, r_{-i}\} = \tilde{r}_i^{\S}$ という表記を用いて各需要者 i に対する誘因両立性を次のように定義する。すなわち、任意の報告 \tilde{r}_i に対して

$$J_i^{\dagger}(r_i, u_i^*(r), \lambda^*(r), \mu_i^*(r), r) \geq J_i^{\dagger}(r_i, u_i^*(\tilde{r}_i^{\S}), \lambda^*(\tilde{r}_i^{\S}), \mu_i^*(\tilde{r}_i^{\S}), \tilde{r}_i^{\S}) \quad (3.5)$$

が成立するとき、需要者 i に対して誘因両立性が成立すると言う。つまり、他の需要者が真のパラメータを報告している場合、需要者 i は虚偽のパラメータを報告しても得をすることは無いという性質を表す。これは、真のパラメータ $r = [r_1^T, \dots, r_N^T]^T$ がパラメータ集合の中で Nash 均衡解となる性質と言い換えることもできる。

なお、真の報告をすることは Nash 均衡となるので、需要者が合理的であることを前提とすれば、全ての需要者が真の報告をすることになる。また、本論文では各需要者は競争的環境にあると仮定しており、共謀については考慮していない。

3.1.2 個人合理性

個人合理性とは、需要者がシステムに参加することで損をすることはないという性質である。本論文の定式化では、需要者 i が「システムに参加しない」とは、需要者 i のシステムモデル (2.1) において $u_i = 0$ であり、グローバル制約 (2.33) において $u_i = 0$ である場合に相当する。この時、需要者 i は電力料金および移転コストを負担する必要はなく、需要者 i の効用は $J_i^{\#}(r_i, 0)$ で表される。以上の前提のもとに、需要者 i に対する個人合理性を次のように定義する。すなわち、最適化された評価関数 J_i^{\dagger} に対して、

$$J_i^{\dagger}(r_i, u_i^*(r), \lambda^*(r), \mu_i^*(r), r) \geq J_i^{\#}(r_i, 0) \quad (3.6)$$

が成立するとき、個人合理性が成立すると言う。ここで、誘因両立性によって需要者 i は真のパラメータを公益事業体に報告することを前提としている。

3.1.3 VCG型メカニズム

本論文において、VCG型メカニズムを上記の誘因両立性・個人合理性を満たすメカニズムとして定義する。

3.1.4 移転コストの設計

本論文では VCG 型メカニズムの移転コストを次のように設計する。

$$t_i(u_{-i}^*(\tilde{r}), q^*(\tilde{r}), \lambda^*(\tilde{r}), \mu_{-i}^*(\tilde{r}), \tilde{r}) = \sum_{k \neq i} J_k(\tilde{r}_k, u_k^*(\tilde{r}), \lambda^*(\tilde{r}), \mu_k^*(\tilde{r})) + J_0(q^*(\tilde{r}), \lambda^*(\tilde{r}), \mu_0^*(\tilde{r})) - l_i(\tilde{r}_{-i}) \quad (3.7)$$

ただし

$$l_i(r_{-i}) = \sum_{k \neq i} J_k^\sharp(r_k, u_k^b(r_{-i}, 0)) + J_0^\sharp(q^b(r_{-i}, 0)) \quad (3.8)$$

であり, $u_{-i}^b(r_{-i}, 0), q^b(r_{-i}, 0)$ は需要者 i が市場に参加せず $u_i = 0$ に固定された時の解, すなわち

$$\begin{aligned} & \max_{u_{-i}, q} J(r, 0, u_{-i}, q), \\ & \text{subject to (2.4), (2.6)} \end{aligned} \quad (3.9)$$

の解である。この移転コストを用いるメカニズムに関して、次の定理が成立する。

定理 1

仮定 1, 仮定 2 を満たす需要ネットワークにおいて、各需要者の利益が式 (3.4) で与えられるとき、式 (3.7)–(3.9) で設計された移転コストを各需要者に課すメカニズムは、誘因両立性と個人合理性を満たす、すなわち VCG 型メカニズムである。

証明

まず、誘因両立性について証明する。需要者 i 以外の全需要者が真のパラメータを報告していると仮定する。このとき、需要者 i が戦略的にパラメータセット \tilde{r}_i を報告すると、需要者 i の得る利益は次の式で与えられる。

$$\begin{aligned} & J_i^\dagger(r_i, u_i^*(\tilde{r}_i^\S), \lambda^*(\tilde{r}_i^\S), \mu_i^*(\tilde{r}_i^\S), \tilde{r}_i^\S) \\ = & J_i(r_i, u_i^*(\tilde{r}_i^\S), \lambda^*(\tilde{r}_i^\S), \mu_i^*(\tilde{r}_i^\S)) \\ & + \sum_{k \neq i} J_k(r_k, u_k^*(\tilde{r}_i^\S), \lambda^*(\tilde{r}_i^\S), \mu_k^*(\tilde{r}_i^\S)) \\ & + J_0(q^*(\tilde{r}_i^\S), \lambda^*(\tilde{r}_i^\S), \mu_0^*(\tilde{r}_i^\S)) - l_i(r_{-i}) \\ = & J(r, u^*(\tilde{r}_i^\S), q^*(\tilde{r}_i^\S), \lambda^*(\tilde{r}_i^\S), \mu^*(\tilde{r}_i^\S)) \\ & - l_i(r_{-i}) \end{aligned} \quad (3.10)$$

同様に、需要者 i が真のパラメータ r_i を報告するとき、需要者 i の得る利益は次の式で表される。

$$\begin{aligned} & J_i^\dagger(r_i, u_i^*(r), \lambda^*(r), \mu_i^*(r), r) \\ = & J(r, u^*(r), q^*(r), \lambda^*(r), \mu^*(r)) - l_i(r_{-i}). \end{aligned} \quad (3.11)$$

ここで、 $u^*(r), q^*(r)$ の最適性すなわち

$$[u^*(r), q^*(r)] = \arg \max_{u, q} J(r, u, q, \lambda^*(r), \mu^*(r)) \quad (3.12)$$

を用いると、パラメータセット \tilde{r}_i^{\S} を用いて最適化された $u^*(\tilde{r}_i^{\S}), q^*(\tilde{r}_i^{\S})$ を $J(r, u, q, \lambda^*(r), \mu^*(r))$ に代入したものは $J(r, u^*(r), q^*(r), \lambda^*(r), \mu^*(r))$ 以下になるので、式 (3.11) の第一項は

$$\begin{aligned} & J(r, u^*(r), q^*(r), \lambda^*(r), \mu^*(r)) \\ & \geq J(r, u^*(\tilde{r}_i^{\S}), q^*(\tilde{r}_i^{\S}), \lambda^*(r), \mu^*(r)) \end{aligned} \quad (3.13)$$

のように書き直される。ここで、式 (2.13)–(2.21) で示した KKT 条件に \tilde{r}_i^{\S} を用いると、

$$\begin{aligned} & h(u^*(\tilde{r}_i^{\S}), q^*(\tilde{r}_i^{\S})) = 0, \quad \mu_0^{*T}(r) g_0(q^*(\tilde{r}_i^{\S})) \leq 0, \\ & \mu_i^{*T}(r) g_i(u_i^*(\tilde{r}_i^{\S})) \leq 0 \quad (i = 1 \cdots, N) \end{aligned} \quad (3.14)$$

である。なお、 $\mu_0^{*T}(\tilde{r}_i^{\S}) g_0(u_i^*(\tilde{r}_i^{\S})) = 0$ であるが、異なるパラメータによる最適化の結果は $\mu_0^{*T}(r) g_0(q^*(\tilde{r}_i^{\S})) \leq 0$ となる。したがって式 (3.13) の右辺は以下ようになる。

$$\begin{aligned} & J(r, u^*(\tilde{r}_i^{\S}), q^*(\tilde{r}_i^{\S}), \lambda^*(r), \mu^*(r)) \\ = & J^\sharp(r, u^*(\tilde{r}_i^{\S}), q^*(\tilde{r}_i^{\S})) \\ & - \lambda^{*T}(r) h(u^*(\tilde{r}_i^{\S}), q^*(\tilde{r}_i^{\S})) \\ & - \mu_0^{*T}(r) g_0(q^*(\tilde{r}_i^{\S})) - \sum_i \mu_i^{*T}(r) g_i(u_i^*(\tilde{r}_i^{\S})) \\ \geq & J^\sharp(r, u^*(\tilde{r}_i^{\S}), q^*(\tilde{r}_i^{\S})). \end{aligned} \quad (3.15)$$

ここで、再び式 (2.13)–(2.21) による KKT 条件を用いると

$$\begin{aligned} & \mu_0^{*T}(\tilde{r}_i^{\S}) g_0(q^*(\tilde{r}_i^{\S})) = 0, \\ & \mu_i^{*T}(\tilde{r}_i^{\S}) g_i(u_i^*(\tilde{r}_i^{\S})) = 0, \quad (i = 1 \cdots, N) \\ & h(u^*(\tilde{r}_i^{\S}), q^*(\tilde{r}_i^{\S})) = 0 \end{aligned} \quad (3.16)$$

である。したがって式 (3.15) の右辺は

$$\begin{aligned}
 & J^\sharp(r, u^*(\tilde{r}_i^\S), q^*(\tilde{r}_i^\S)) \\
 = & J^\sharp(r, u^*(\tilde{r}_i^\S), q^*(\tilde{r}_i^\S)) \\
 & - \lambda^{*T}(\tilde{r}_i^\S) h(u^*(\tilde{r}_i^\S), q^*(\tilde{r}_i^\S)) \\
 & - \mu_0^{*T}(\tilde{r}_i^\S) g_0(q^*(\tilde{r}_i^\S)) \\
 & - \sum_i \mu_i^{*T}(\tilde{r}_i^\S) g_i(u^*(\tilde{r}_i^\S)) \\
 = & J(r, u^*(\tilde{r}_i^\S), q^*(\tilde{r}_i^\S), \lambda^*(\tilde{r}_i^\S), \mu^*(\tilde{r}_i^\S)) \tag{3.17}
 \end{aligned}$$

となる。式 (3.13), (3.15), (3.17) を用いると

$$\begin{aligned}
 & J(r, u^*(r), q^*(r), \lambda^*(r), \mu^*(r)) \\
 \geq & J(r, u^*(\tilde{r}_i^\S), q^*(\tilde{r}_i^\S), \lambda^*(\tilde{r}_i^\S), \mu^*(\tilde{r}_i^\S)) \tag{3.18}
 \end{aligned}$$

であるから (3.10), (3.11), (3.18) より

$$\begin{aligned}
 & J_i^\dagger(r_i, u_i^*(r), \lambda^*(r), \mu^*(r), r) \\
 \geq & J_i^\dagger(r_i, u_i^*(\tilde{r}_i^\S), \lambda^*(\tilde{r}_i^\S), \mu^*(\tilde{r}_i^\S), \tilde{r}_i^\S) \tag{3.19}
 \end{aligned}$$

となるため誘因両立性が示された。

次に、個人合理性について証明する。誘因両立性が成り立つので、すべての需要者が真のパラメータを報告しているとすると、需要者 i の得る利益は次の式で表される。

$$\begin{aligned}
 & J_i^\dagger(r_i, u_i^*(r), \lambda^*(r), \mu^*(r), r) \\
 = & J(r, u^*(r), q^*(r), \lambda^*(r), \mu^*(r)) - l_i(r_{-i}) \\
 = & J(r, u^*(r), q^*(r), \lambda^*(r), \mu^*(r)) \\
 & - J_{-i}^\sharp(r_{-i}, u_{-i}^b(r_{-i}, 0)) - J_0^\sharp(q^b(r_{-i}, 0)) \\
 = & J(r, u^*(r), q^*(r), \lambda^*(r), \mu^*(r)) \\
 & - J(r, 0, u_{-i}^b(r_{-i}, 0), q_{-i}^b(r_{-i}, 0), \lambda_{-i}^b(r_{-i}, 0), \mu_{-i}^b(r_{-i}, 0)) + J_i^\sharp(r_i, 0) \tag{3.20}
 \end{aligned}$$

誘因両立性の証明と同様の議論を用いると、式 (3.20) は $J_i^\sharp(r_i, 0)$ 以上であり、したがって個人合理性は成立する。個人合理性は式 (3.7) の移転コストにおける関数 $l_i(\tilde{r}_{-i})$ によって保証される。

関数 $l_i(\tilde{r}_{-i})$ は需要者 i の報告するパラメータ \tilde{r}_i に依存しないので、誘因両立性と個人合理性の証明は互いに独立したものとなる。したがって、個人合理性の証明においては、誘因両立性はすでに成立して各需要者が真のパラメータを報告していることを前提にしている。

定理1では提案するVCG型メカニズムが本研究で対象とする需要ネットワークにおいて、誘因両立性と個人合理性を保証することを示した。メカニズムデザインの文献では現在のところ等式制約と不等式制約を陽に考慮した研究は見当たらないが、本定理では需要ネットワークにおいて考えられる等式制約及び不等式制約下においてVCG型メカニズムが誘因両立性と個人合理性を保つことを示した。

3.1.5 LQ問題における移転コスト

第2章において、凸最適化問題の簡単な解析解を与えることができる特別なケースとして、二次形式の評価関数及び線形の制約式で表現される、不等式制約を省略した問題を定式化した。また、この場合の最適化問題に対する解析解を与えた。本節ではこの問題に対する、VCG型メカニズムによる移転コストを解析的に与える。すなわち、需要者 i が受け取る移転コストは

$$\begin{aligned}
 t_i(u_{-i}^*(\tilde{r}), \lambda^*(\tilde{r}), q^*(\tilde{r}), \tilde{r}) = & -\sum_{k \neq i} \left[\frac{1}{4} \{ R_k(\tilde{r}_k) Q_k^{-1}(\tilde{r}_k) R_k(\tilde{r}_k)^T \right. \\
 & - 2\lambda^*(\tilde{r})^* K Q_k^{-1}(\tilde{r}_k) R_k(\tilde{r}_k)^T \\
 & \left. + \lambda^*(\tilde{r})^T K Q_k^{-1}(\tilde{r}_k) K^T \lambda^*(\tilde{r}) \right] \\
 & + C_k - \lambda^*(\tilde{r}) y_k \\
 & - \frac{1}{4} \{ R_0 Q_0^{-1} R_0^T + 2\lambda^*(\tilde{r})^T K Q_0^{-1} R_0^T \\
 & \left. + \lambda^*(\tilde{r})^T K Q_0^{-1} K^T \lambda^*(\tilde{r}) \right\} - C_0 - l_i(\tilde{r}_{-i}) \quad (3.21)
 \end{aligned}$$

ただし

$$l_i(r_{-i}) = -\frac{1}{4} R'_{-i} Q'^{-1}_{-i} R'^T_{-i} + C'_{-i} \quad (3.22)$$

であり

$$\begin{aligned}
 Q'_{-i} &= Q_{-i} + K'^T_{-i} Q_0 K'_{-i}, \\
 R'_{-i} &= R_{-i} - 2(y^T I'^T - \bar{u}_i^T K^T) Q_0 K'_{-i} + R_0 K'_{-i}, \\
 C'_{-i} &= (y^T I'^T - \bar{u}_i^T K^T) Q_0 (I'y - K\bar{u}_i) \\
 &\quad - R_0 (I'y - K\bar{u}_i) + C, \\
 K'_{-i} &= [K \cdots K]
 \end{aligned}$$

である。

3.2 数値例

第2章の数値例において最適化された需要ネットワークにおいて、ある需要者が戦略的に報告する場合について、VCG型メカニズムの有用性を確認する。

今回の数値実験では、需要者 i が公益事業体に報告するパラメータ r_i は下記となる。

$$\begin{aligned}
 r_i = \{ & \alpha_i, \beta_i, T_i[1], T_i^{comf}, c_{i,air}, b_{i,air}, a_{i,s}, b_{i,s}, \\
 & b_i[1], k_{i,b}, \xi_{i,1}, \xi_{i,2}, b_i^{comf} \} \quad (3.23)
 \end{aligned}$$

その中の一つである $b_{i,air}$ に注目し、これを戦略的に報告することで個人の利益を最大化することを試みる。簡単のため需要者1のみが真の値 $b_{i,air} = 1544.1$ の周りで虚偽の報告を行うとし、需要者1の利益が変化する様子を示す。

まず、誘因両立性について検証する。Fig. 3.2に需要者の利益を示す。

上図がVCG型メカニズムによる移転コストを課した場合、下図が課さない場合の需要者1の利益を表している。移転コストを課さないときは、真の値 $\tilde{b}_{1,a} = 1544.1$ よりも低い値を報告したほうが需要者1は自分の利益を増加させることができることがわかる。一方、本章で設計した移転コストを課した場合は、真実の値を報告した時に自分の利益を最大化できることがわかる。したがって、VCG型メカニズムによって、需要者の最善の戦略は真の値を報告することとなり、社会全体の利益の最大化に結び付いていることがわかる。

個人合理性について検証する。誘因両立性により、需要者1は真の値を報告したとすると、需要者1の得る利益は $J_i^\dagger(r_i, u_i^*(r), \lambda^*(r), \mu_i^*(r), r) - J_i^\dagger(r_i, 0) = 5.9227 \times 10^5 \geq 0$ となることから市

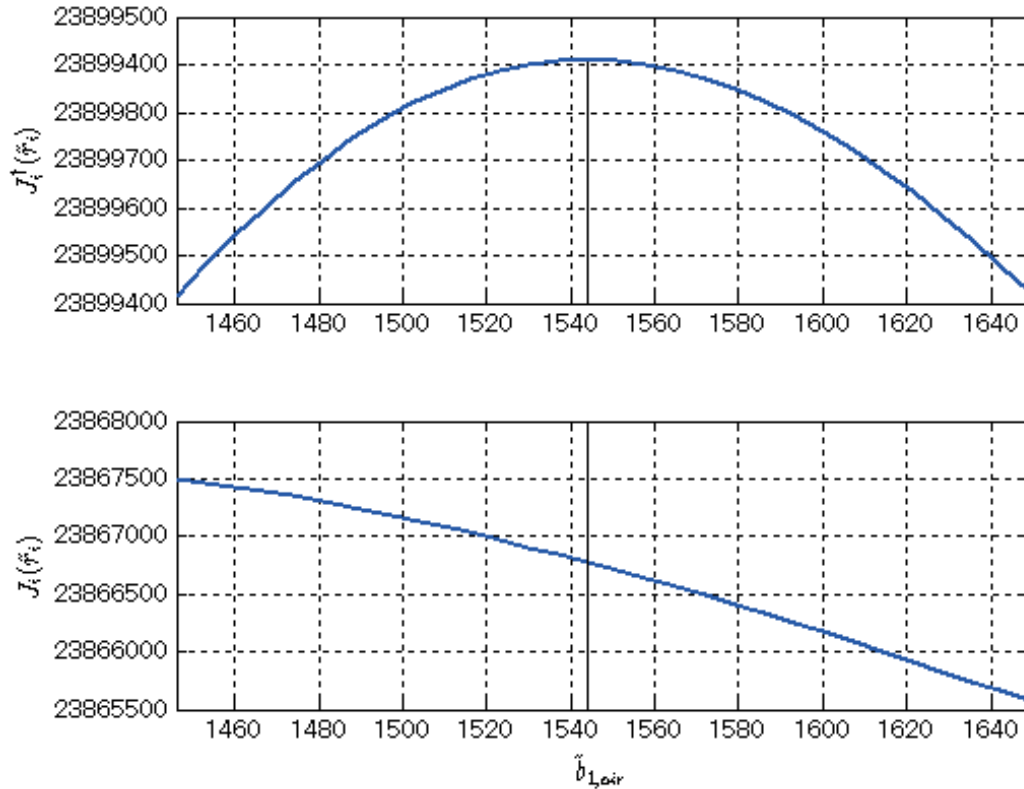


Fig. 3.2: Benefit of consumer 1.

場に参加しない場合よりも市場に参加した場合のほうが大きな利益を得ることができ、個人合理性が成り立っていることがわかる。

次に、複数の需要者が共謀して戦略的に振る舞うことで、VCG型メカニズムにおいても戦略的な虚偽の報告により自分たちのみの利益を追求することが可能であることを示す。VCG型メカニズムにおける誘因両立性は需要者同士が互いに競争的な関係にあることを前提としており、他の全需要者が真実の報告をしたときには自分も真実の報告をしたときに利益が最大化されるという Nash 均衡解を保証している。したがって需要者1の他に需要者2も虚偽のパラメータを公益事業体に報告した時は、それぞれの需要者にとって真実ではないパラメータを報告することが最適な戦略となることもあり得る。数値例によってこの状況を検証する。

需要者1および需要者2が $b_{i,air}$ を戦略的に真の値 $b_{1,air} = 1544.1$, $b_{2,air} = 1555.0$ の周辺で

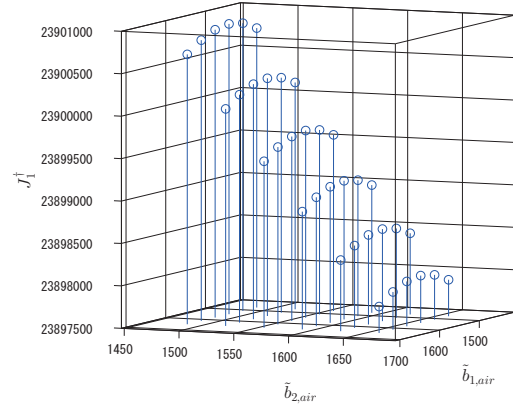
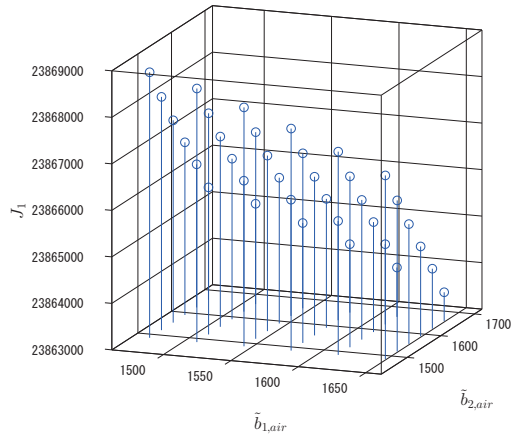


Fig. 3.3: Benefit of consumer1 in case of coalition Fig. 3.4: Benefit of consumer1 in case of coalition under VCG type mechanism

虚偽の報告を行う場合の需要者1, 需要者2の利益について考察する. Fig. 3.3にこの状況下における, 移転コストがない場合の需要者1の利益, Fig. 3.4に移転コストが配分された場合の需要者1の利益を示す. 移転コストがない場合は需要者1が単独で $b_{1,air}$ を真の値よりも小さな値を報告したほうがより大きな利益を得ることができるが, さらに需要者2が $b_{2,air}$ を真の値よりも小さな値を報告するとより大きな利益を得ることができる. VCG型メカニズムによる移転コストが配分されている場合には, 需要者1が単独で $b_{1,air}$ を変化させても大きな利益を得ることはできず, 真実の値を報告することが最大の利益を得る手段となっている. しかし, 需要者2が $b_{2,air}$ を小さく報告することで需要者1は大きな利益を得ることができる. このことから, 需要者1には単独で戦略的な虚偽の報告を行う誘因はないものの, 需要者2が需要者1の利益のために真の値とは異なる値を報告することは可能であることがわかる.

同様に, 需要者1と需要者2が同時に報告する値を変化させた場合の需要者2の得る利益について考察する. Fig. 3.5に移転コストがない場合の需要者2の利益, Fig. 3.6に移転コストが配分された場合の需要者2の利益を示す. 需要者1の結果と同様, 移転コストがない場合には需要者2は単独でも真の値よりも小さな値を報告することにより自身の利益を増加させることができ, さらに需要者1が真の値よりも小さな値を報告するとより大きな利益を得ることができる. 移転コストが課された場合は需要者2は単独では虚偽の報告により自身の利益を増やすことはできないが, 需要者1が小さな値を報告するとより大きな利益を得ることができることがわかる.

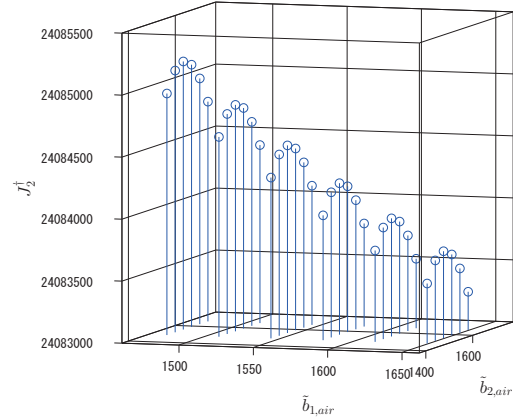
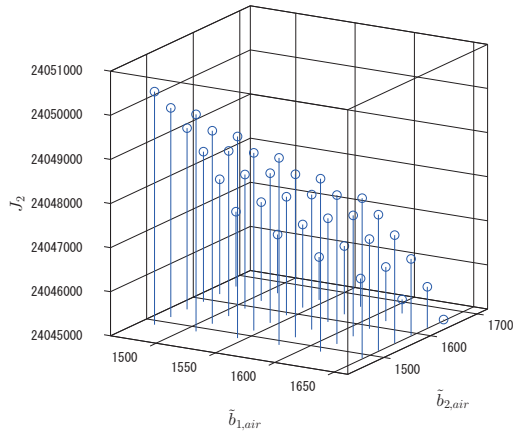


Fig. 3.5: Benefit of consumer2 in case of coalition Fig. 3.6: Benefit of consumer2 in case of coalition under VCG type mechanism

需要者1および需要者2の利益の変化から、互いに自分の利益を増加させるためには自分は真の値を報告することが最適な戦略となるが、真の値よりも小さな値を報告すると相手の利益を増加させることができることがわかる。なお、本数値例においては相手が真の値よりも小さな値を報告した場合においても、自分は真の値を報告することが自分のみの利益のためには最適な戦略であるように読み取れるが、一般的にはこの性質は保証されず、他人が報告を変えた場合には自身の利益を最大化する報告は真の値とは違う値になることもあり得る。

Fig. 3.7に移転コストがない場合の需要者1および需要者2の利益の合計、Fig. 3.8に移転コストが配分された場合の2需要者の利益の合計を示す。移転コストがある場合とない場合の両方で需要者1、需要者2がともに真の値よりも小さい値を報告することで利益の和を大きくすることができることがわかる。すなわち、VCG型メカニズムにおける移転コストが配分された条件においても、複数の需要者が利益を共有している場合には真実の値を報告することを促すことができないがわかる。

最後に需要者数と移転コストの計算時間について評価を行った。移転コストの計算時間の増加は需要者数の他に不等式制約の個数などの要因が考えられる。今回は2章で定義したLQ問題について評価を行った。すなわち、評価関数が二次形式、不等式制約は存在せず、等式制約は線形な関数で表される簡単な問題を考え、需要者の数を1から100まで増やしてかかる計算時間を測定した。計算機はIntel(R) Xeon(R) CPU E5-1603 0 2.80GHz、ソフトはMATLAB R2013b

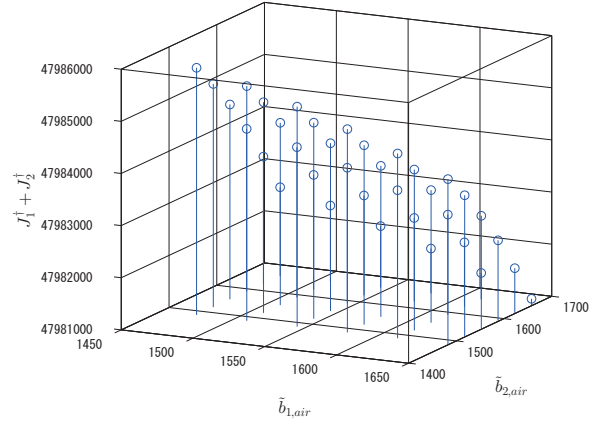
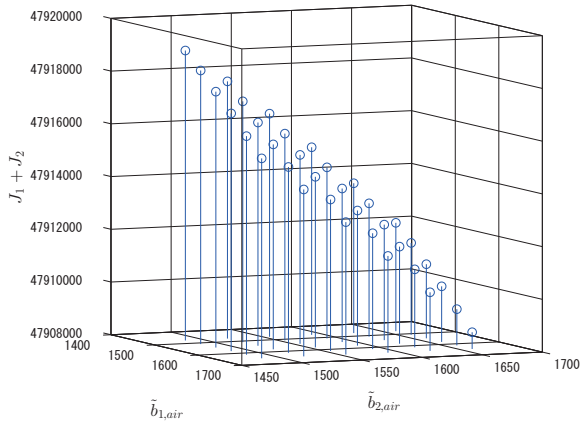


Fig. 3.7: Sum of benefit of consumer1 and 2 in case of coalition Fig. 3.8: Sum of benefit of consumer1 and 2 in case of coalition under VCG type mechanism

を用いた。Fig. 3.9 に需要者数と移転コスト計算時間の関係を示す。需要者数に比例する次元の行列の計算となるため、計算時間は需要者数に関して線形とはならず、下に凸の増加を示している。今回はLQ問題について評価したもので解析解を用いて計算を行うことができたので需要者数100で500秒程度の計算時間となっているが、一般的な凸最適化問題を勾配法などを用いて解く場合にはより長い計算時間を要することが見込まれる。このため、公益事業体は移転コストを計算する際に、計算可能な需要者数を評価する必要がある。

なお、各需要者の運用する家電製品の種類を増やした場合もこの場合と同様に行列の次元が増えるため、同様の計算量増加が見込まれる。

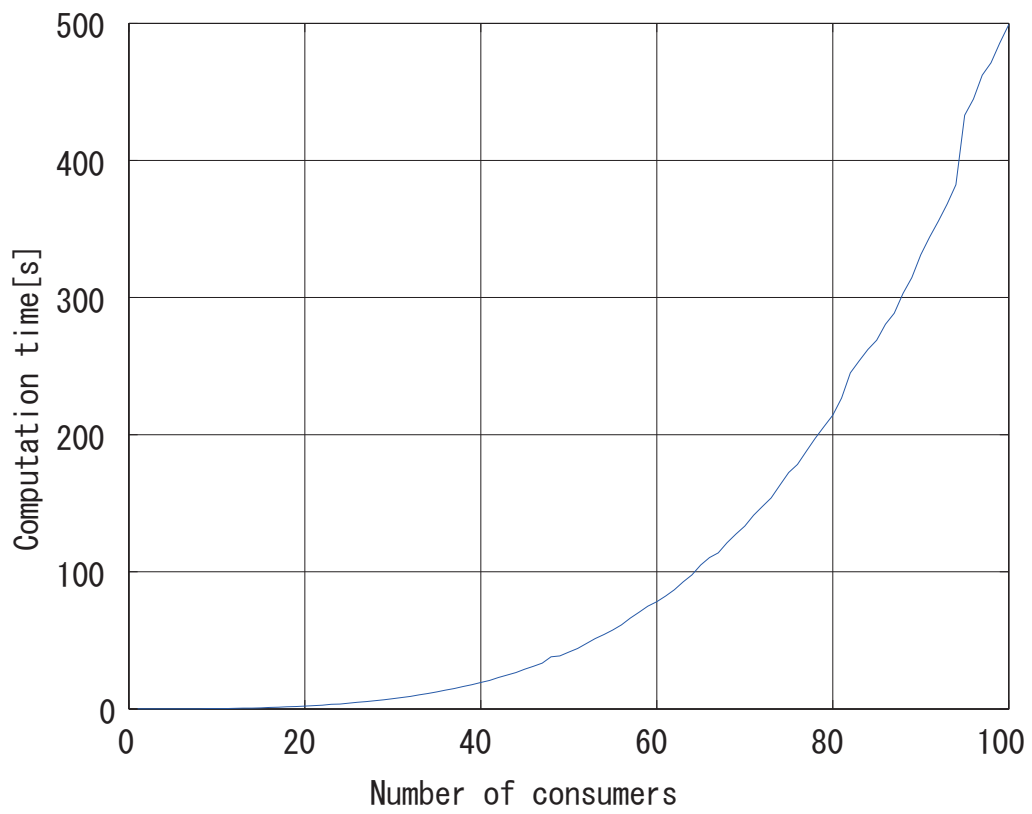


Fig. 3.9: Computation time vs numbers of consumers

第4章

AGV型メカニズムによる統合

4.1 AGV型メカニズムの提案

本節ではエネルギー需要ネットワークに対するAGVメカニズム [8][9] に基づく統合メカニズムを設計する。AGVメカニズムは文献 [26] では無線LANのネットワークにも適用されており、ベイジアン誘因両立性、予算均衡性の二つの性質を実現させることができる有用なメカニズムであることが知られている。本節ではエネルギー需要ネットワークに対して適用を試みるが、ここでは全需要者のパラメータ r の事前分布を共有し、これをもとに各需要者は他者のパラメータを確率変数として扱い、このパラメータに依存する値の期待値を計算できる環境を考える。この環境下においてベイジアン誘因両立性と予算均衡性を保証するメカニズムを設計する。

4.1.1 ベイジアン誘因両立性

自分以外の需要者が真実の報告をしていることを所与としたとき、その需要者にとって真実の報告が最も高い利益の期待値をもたらす性質、すなわちベイジアン誘因両立性を満たすメカニズムを考える。ここでは、需要者 i の評価関数の期待値を計算する際に、自身以外のパラメータ $r_{-i} = [r_1^T, \dots, r_{i-1}^T, r_{i+1}^T, \dots, r_N^T]^T$ は事前分布が与えられたランダム変数 \bar{r}_{-i} を用いる。すなわち各需要者間で全需要者のパラメータの事前分布を共有し、それに基づくランダム変数 $\bar{r} = [\bar{r}_1^T, \dots, \bar{r}_N^T]^T$ を得る。この各要素、すなわち任意の需要者 i と k に対して \bar{r}_i と \bar{r}_k は独立な事象であるとする。以下では、式の簡略化のために $\{r_i, \bar{r}_{-i}\} = r^i$ 、 $\{\tilde{r}_i, \bar{r}_{-i}\} = \tilde{r}^i$ と表記する。Table 4.1 にパラメータ r に関する表記の定義を示す。ベイジアン誘因両立性を期待値の表現を用いて次のように定義する。

$$\begin{aligned} & E_{\bar{r}_{-i}}[J_i^\dagger(r_i, u_i^*(r^i), \lambda^*(r^i), \mu^*(r^i), r^i)] \\ & \geq E_{\bar{r}_{-i}}[J_i^\dagger(r_i, u_i^*(\tilde{r}^i), \lambda^*(\tilde{r}^i), \mu^*(\tilde{r}^i), \tilde{r}^i)] \end{aligned} \quad (4.1)$$

ここで、 $E_{\bar{r}_{-i}}[\cdot]$ は \bar{r}_{-i} による期待値であり、以下 $E[\cdot]$ と略記する。

Table 4.1: Definition of parameter vectors

r_i	: true parameter of consumer i
r	: true parameter of all consumers
\tilde{r}_i	: reported parameter of consumer i
\tilde{r}	: reported parameter of all consumers
\bar{r}_i	: random parameter of consumer i chosen from known distribution
\bar{r}	: random parameter of all consumers chosen from known distribution
r^i	: parameter set $\{r_i, \bar{r}_{-i}\}$
\tilde{r}^i	: parameter set $\{\tilde{r}_i, \bar{r}_{-i}\}$

4.1.2 予算均衡性

予算均衡性とは、各需要者に課す移転コストの総和が公益事業体の利益、すなわち $J_0(q, \lambda, \mu_0)$ になることである。予算均衡性は次の式で定義される。

$$\sum_i t_i(\tilde{r}) = J_0(q^*(\tilde{r}), \lambda^*(\tilde{r}), \mu_0^*(\tilde{r})) \quad (4.2)$$

移転コストは公益事業体が各需要者に課す税金、または各需要者に供給する補助金と捉えることができるため、予算均衡性が成り立たないことはすなわちメカニズムの外部から金銭の出入りが発生するということである。これは、社会全体にとって完全に効率的なメカニズムではないことを意味しているために望ましい状況ではない [8]。

4.1.3 AGV型メカニズム

本論文において、AGV型メカニズムを上記のベイジアン誘因両立性・予算均衡性を満たすメカニズムとして定義する。

4.1.4 移転コストの設計

AGV型メカニズムの移転コストを次の式で設計する.

$$t_i(\tilde{r}) = \frac{1}{N} J_0(q^*(\tilde{r}), \lambda^*(\tilde{r}), \mu_0^*(\tilde{r})) + V_i(\tilde{r}_i) - \frac{1}{N-1} \sum_{k \neq i} V_k(\tilde{r}_k) \quad (4.3)$$

ただし

$$V_i(\tilde{r}_i) = E \left[\frac{N-1}{N} J_0(q^*(\tilde{r}^i), \lambda^*(\tilde{r}^i), \mu_0^*(\tilde{r}^i)) + \sum_{j \neq i} J_j(\tilde{r}_j, u_j^*(\tilde{r}^i), \lambda^*(\tilde{r}^i), \mu_j^*(\tilde{r}^i)) \right] \quad (4.4)$$

とする. 式(4.3)によって設計された移転コストに関して, 次の定理が成立する.

定理 2

仮定 1, 仮定 2 を満たす需要ネットワークにおいて, 各需要者の利益が式(3.4)によって与えられるとき, 式(4.3)で設計された移転コストを各需要者に課すメカニズムは, ベイジアン誘因両立性と予算均衡性を満たす, すなわち AGV 型メカニズムである.

証明

ベイジアン誘因両立性は以下のように示される.

期待値の計算において, 需要者 i は自分以外の全需要者が, 事前分布に従うパラメータ \tilde{r}_{-i} を報告するものとする

$$\sum_{k \neq i} V_k(\tilde{r}_k) = \sum_{k \neq i} V_k(\tilde{r}_{-i}) \quad (4.5)$$

となり, 事前分布のみに基づく関数となる. したがって, 需要者 i が真の報告をした場合に自身

の得る利益の期待値は式(2.24), (3.4), (4.3), (4.4)を用いて以下の式で表される.

$$\begin{aligned}
 & E[J_i^\dagger(r_i, u_i^*(r^i), \lambda^*(r^i), \mu^*(r^i), r^i)] \\
 = & E\left[J_i(r_i, u_i^*(r^i), \lambda^*(r^i), \mu_i^*(r^i))\right. \\
 & + \frac{1}{N}J_0(q^*(r^i), \lambda^*(r^i), \mu_0^*(r^i)) \\
 & + \frac{N-1}{N}J_0(q^*(r^i), \lambda^*(r^i), \mu_0^*(r^i)) \\
 & + \sum_{j \neq i} J_j(\bar{r}_j, u_j^*(r^i), \lambda^*(r^i), \mu_j^*(r^i)) \\
 & \left. - \frac{1}{N-1} \sum_{k \neq i} V_k(\bar{r}_k)\right] \\
 = & E[J(r^i, u^*(r^i), q^*(r^i), \lambda^*(r^i), \mu^*(r^i))] \\
 & - E\left[\frac{1}{N-1} \sum_{k \neq i} V_k(\bar{r}_k)\right] \tag{4.6}
 \end{aligned}$$

ここで, $\bar{r} = [\bar{r}_1^T, \dots, \bar{r}_N^T]^T$ であり, $\{r_i, \bar{r}_{-i}\} = r^i$, $\{\tilde{r}_i, \bar{r}_{-i}\} = \tilde{r}^i$ および $E[\cdot]$ は \bar{r}_{-i} による期待値であることを再度記しておく. 同様の式変形により, 需要者 i が \tilde{r}_i を報告した時は

$$\begin{aligned}
 & E[J_i^\dagger(r_i, u_i^*(\tilde{r}^i), \lambda^*(\tilde{r}^i), \mu^*(\tilde{r}^i), \tilde{r}^i)] \\
 = & E[J(r^i, u^*(\tilde{r}^i), q^*(\tilde{r}^i), \lambda^*(\tilde{r}^i), \mu^*(\tilde{r}^i))] \\
 & - E\left[\frac{1}{N-1} \sum_{k \neq i} V_k(\bar{r}_k)\right] \tag{4.7}
 \end{aligned}$$

となる. ここで, 式(4.6)の右辺第一項において, u^* , q^* の最適性

$$[u^*(r^i), q^*(r^i)] = \arg \max_{u, q} J(r^i, u, q, \lambda^*(r^i), \mu^*(r^i)) \tag{4.8}$$

より

$$\begin{aligned}
 & E[J(r^i, u^*(r^i), q^*(r^i), \lambda^*(r^i), \mu^*(r^i))] \\
 & \geq E[J(r^i, u^*(\tilde{r}^i), q^*(\tilde{r}^i), \lambda^*(r^i), \mu^*(r^i))] \tag{4.9}
 \end{aligned}$$

である. 式(2.13)–(2.21)で示したKKT条件より

$$\begin{aligned}
 & h(u^*(\tilde{r}^i), q^*(\tilde{r}^i)) = 0, \mu_0^{*T}(r^i)g_0(q^*(\tilde{r}^i)) \leq 0, \\
 & \mu_i^{*T}(r^i)g_i(u_i^*(\tilde{r}^i)) \leq 0 \quad (i = 1 \dots, N) \tag{4.10}
 \end{aligned}$$

である¹⁾から、これを使うと式(4.9)の右辺は式(2.9), (2.11)より

$$\begin{aligned}
 & E[J(r^i, u^*(\tilde{r}^i), q^*(\tilde{r}^i), \lambda^*(r^i), \mu^*(r^i))] \\
 = & E\left[J^\sharp(r^i, u^*(\tilde{r}^i), q^*(\tilde{r}^i)) - \lambda^{*T}(r^i)h(u^*(\tilde{r}^i), q^*(\tilde{r}^i)) \right. \\
 & \left. - \mu_0^{*T}(r^i)g_0(q^*(\tilde{r}^i)) - \sum_i \mu_i^{*T}(r^i)g_i(u^*(\tilde{r}^i))\right] \\
 \geq & E[J^\sharp(r^i, u^*(\tilde{r}^i), q^*(\tilde{r}^i))] \tag{4.11}
 \end{aligned}$$

となる。更に、KKT条件(2.13)–(2.21)より

$$\begin{aligned}
 \mu_0^{*T}(\tilde{r}^i)g_0(q^*(\tilde{r}^i)) &= 0, \\
 \mu_i^{*T}(\tilde{r}^i)g_i(u_i^*(\tilde{r}^i)) &= 0, \quad (i = 1 \cdots, N) \\
 h(u^*(\tilde{r}^i), q^*(\tilde{r}^i)) &= 0 \tag{4.12}
 \end{aligned}$$

を使うと

$$\begin{aligned}
 & E[J^\sharp(r^i, u^*(\tilde{r}^i), q^*(\tilde{r}^i))] \\
 = & E\left[J^\sharp(r^i, u^*(\tilde{r}^i), q^*(\tilde{r}^i)) - \lambda^{*T}(\tilde{r}^i)h(u^*(\tilde{r}^i), q^*(\tilde{r}^i)) \right. \\
 & \left. - \mu_0^{*T}(\tilde{r}^i)g_0(q^*(\tilde{r}^i)) - \sum_i \mu_i^{*T}(\tilde{r}^i)g_i(u^*(\tilde{r}^i))\right] \\
 = & E[J(r^i, u^*(\tilde{r}^i), q^*(\tilde{r}^i), \lambda^*(\tilde{r}^i), \mu^*(\tilde{r}^i))] \tag{4.13}
 \end{aligned}$$

である。式(4.11), (4.13)より

$$\begin{aligned}
 & E[J(r^i, u^*(r^i), q^*(r^i), \lambda^*(r^i), \mu^*(r^i))] \\
 \geq & E[J(r^i, u^*(\tilde{r}^i), q^*(\tilde{r}^i), \lambda^*(\tilde{r}^i), \mu^*(\tilde{r}^i))] \tag{4.14}
 \end{aligned}$$

であるから式(4.6), (4.7)より

$$\begin{aligned}
 & E[J_i^\dagger(r_i, u_i^*(r^i), \lambda^*(r^i), \mu^*(r^i), r^i)] \\
 \geq & E[J_i^\dagger(r_i, u_i^*(\tilde{r}^i), \lambda^*(\tilde{r}^i), \mu^*(\tilde{r}^i), \tilde{r}^i)] \tag{4.15}
 \end{aligned}$$

となるためベイジアン誘因両立性(4.1)が示される。

¹⁾ $\mu_0^{*T}(r^i)g_0(q^*(r^i)) = 0$ であるが、異なるパラメータによる最適化の結果は $\mu_0^{*T}(r^i)g_0(q^*(\tilde{r}^i)) \leq 0$ となる。

また、予算均衡性は式(4.3)を用いて以下のように示される。

$$\begin{aligned}
 \sum_{i=1}^N t_i(\tilde{r}) &= \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{1}{N} J_0(q^*(\tilde{r}), \lambda^*(\tilde{r}), \mu_0^*(\tilde{r})) \right. \\
 &\quad \left. + V_i(\tilde{r}_i) - \frac{1}{N-1} \sum_{k \neq i} V_k(\tilde{r}_k) \right\} \\
 &= J_0(q^*(\tilde{r}), \lambda^*(\tilde{r}), \mu_0^*(\tilde{r})) + \sum_{i=1}^N V_i(\tilde{r}_i) \\
 &\quad - \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \sum_{k \neq i} V_k(\tilde{r}_k) \\
 &= J_0(q^*(\tilde{r}), \lambda^*(\tilde{r}), \mu_0^*(\tilde{r})) \tag{4.16}
 \end{aligned}$$

本定理では不等式制約付きの最適化に対してベイジアン誘因両立性と予算均衡性の二つの性質を保証するメカニズムを、上述の移転コストを課すことによって設計できることを示した。本手法を用いると、不等式制約が存在するエネルギー需要ネットワークに対しても、この二つの性質を満たしつつ、分散的な最適化によって社会全体の利益を最大化することができる。

前章で述べたように、VCG型メカニズムは個人合理性を保証するが、予算均衡性は一般的には保証しない。したがって、その市場にとって個人合理性が望まれる時にはVCG型メカニズム、予算均衡性が望まれるときにはAGV型メカニズムを選択することになる。予算均衡性と個人合理性を同時に保証するメカニズムはまだ知られていない。

4.1.5 LQ問題における移転コスト

AGV型メカニズムにおいては期待値の表現が入るため、第2章で定義したLQ問題に対する移転コストは次のように表現される。

$$\begin{aligned}
 t_i(\tilde{r}) &= \frac{1}{N}J_0(\tilde{r}) + E\left[\frac{N-1}{N}J_0(\tilde{r}^i) + \sum_{j \neq i} J_j(\bar{r}_j, u_j^*(\tilde{r}^i), \lambda^*(\tilde{r}^i))\right] \\
 &\quad - \frac{1}{N-1} \sum_{k \neq i} E\left[\frac{N-1}{N}J_0(\tilde{r}^k) + \sum_{j \neq k} J_j(u_j^*(\tilde{r}^k), \lambda^*(\tilde{r}^k))\right] \\
 &= \frac{1}{N}(q^{*T}(\tilde{r})Q_0q^*(\tilde{r}) + (R_0 + \lambda^{*T}(\tilde{r}))q^*(\tilde{r}) + C_0) \\
 &\quad + E\left[\frac{N-1}{N}q^{*T}(\tilde{r}^i)Q_0q^*(\tilde{r}^i) + (R_0 + \lambda^{*T}(\tilde{r}^i))q^*(\tilde{r}^i) + C_0\right. \\
 &\quad + \sum_{j \neq i} (u_j^{*T}(\tilde{r}^i)Q_j(\bar{r}_j)u_j^*(\tilde{r}^i) + (R_j(\bar{r}_j) - \lambda^{*T}(\tilde{r}^i)K)u_j^*(\tilde{r}^i) \\
 &\quad \left. + C_j(\bar{r}_j) - \lambda^{*T}(\tilde{r}^i)y_j(\bar{r}_j))\right] \\
 &\quad - \frac{1}{N-1} \sum_{k \neq i} E\left[\frac{N-1}{N}q^{*T}(\tilde{r}^k)Q_0q^*(\tilde{r}^k) + (R_0 + \lambda^{*T}(\tilde{r}^k))q^*(\tilde{r}^k) + C_0\right. \\
 &\quad + \sum_{j \neq k} (u_j^{*T}(\tilde{r}^k)Q_j(\bar{r}_j)u_j^*(\tilde{r}^k) + (R_j(\bar{r}_j) - \lambda^{*T}(\tilde{r}^k)K)u_j^*(\tilde{r}^k) \\
 &\quad \left. + C_j(\bar{r}_j) - \lambda^{*T}(\tilde{r}^k)y_j(\bar{r}_j))\right]
 \end{aligned}$$

4.2 数値例

第2章の数値例において最適化された需要ネットワークにおいて、ある需要者が戦略的に報告する場合について、AGV型メカニズムの有用性を確認する。

第3章における数値例と同様、今回の数値実験では、需要者*i*が公益事業体に報告するパラメータ r_i は下記となる。

$$\begin{aligned}
 r_i = \{ & \alpha_i, \beta_i, T_i[1], T_i^{comf}, c_{i,air}, b_{i,air}, a_{i,s}, b_{i,s}, \\
 & b_i[1], k_{i,b}, \xi_{i,1}, \xi_{i,2}, b_i^{comf} \} \tag{4.17}
 \end{aligned}$$

その中の一つである $b_{i,air}$ に注目し、これを戦略的に報告することで個人の利益を最大化することを試みる。簡単のため需要者1のみが真の値 $b_{i,air} = 1544.1$ の周りで虚偽の報告を行うとし、

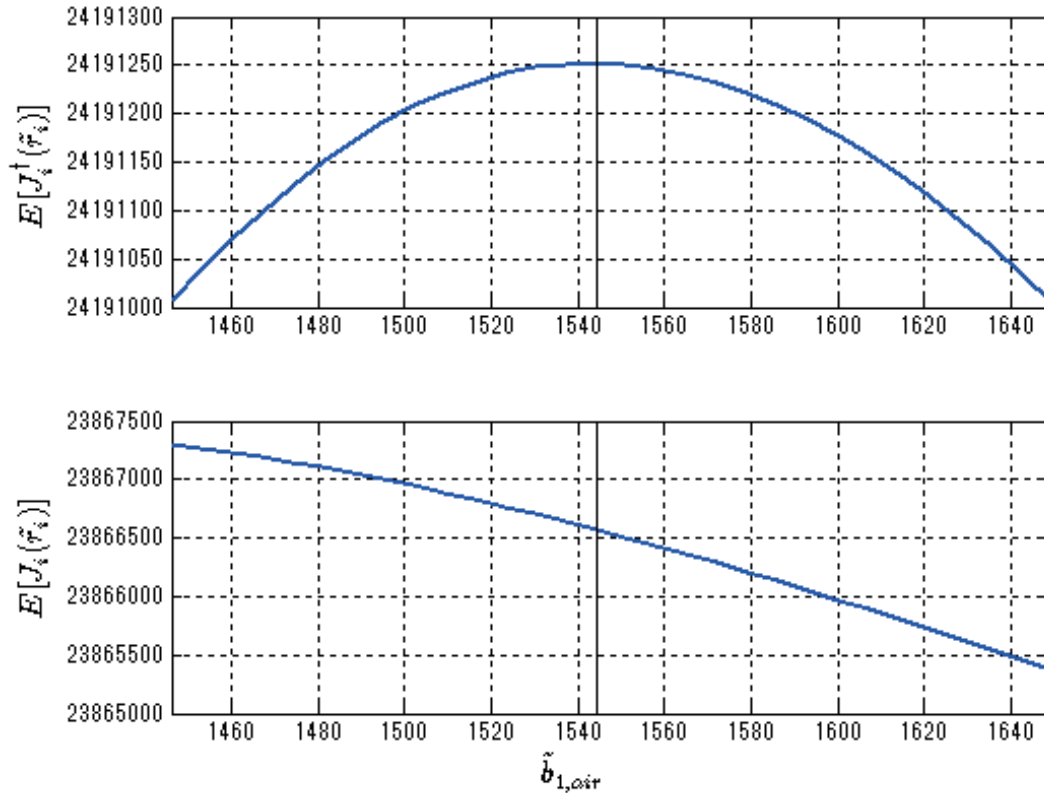


Fig. 4.1: Expectation of benefit of consumer 1

需要者1の利益が変化する様子を示す。また、 $b_{i,air}$ は1500と1650の間の一様分布に従うとし、このことを事前に共有しているものとする。

まず、ベイジアン誘因両立性について検証する。Fig. 4.1に需要者1の利益の期待値を示す。上図が移転コストを課した場合、下図が課さない場合を表している。Fig. 4.1より、移転コストを課さない時には、縦線を引いた真の値 $b_{1,air} = 1544.1$ よりも低い $\tilde{b}_{1,air}$ を報告したほうが自分の利益を増加させることができることがわかる。一方、提案した移転コストを課した場合は、真実の値を報告した時が、自分の利益を最大化できることがわかる。したがって、需要者が自分の利益を最大化しようとする戦略的振る舞いが社会全体の利益の最大化につながっていることが示されている。

最後に、予算均衡性について、本章で設計したAGV型メカニズムと、前章で設計したVCG

Table 4.2: Transfers and the benefit of the utility company in the case of the proposed AGV type mechanism

	Value
t_1	3.2468×10^5
t_2	1.8152×10^5
t_3	3.2709×10^5
t_4	3.1049×10^5
t_5	0.9065×10^5
J_0	1.2344×10^6

Table 4.3: Transfers in the case of the VCG type mechanism and the benefit of the utility company

	Value
t_1	3.2930×10^4
t_2	3.6119×10^4
t_3	3.5229×10^4
t_4	3.4300×10^4
t_5	3.6200×10^4
J_0	1.2344×10^6

型メカニズムとの比較検証を行う。Table 4.2, 4.3にAGV型メカニズムとVCG型メカニズムを適用した場合の各需要者に課される移転コスト t_i ならびに公益事業体の利益 J_0 をそれぞれ示す。AGV型メカニズムの場合において、各需要者の移転コストの総和、すなわち $\sum_{i=1}^5 t_i(\tilde{r}_i)$ を計算すると 1.2344×10^6 となり、公益事業体の利益と一致した。一方、VCG型メカニズムの場合には、移転コストの総和を計算すると 1.7478×10^5 となり、公益事業体の利益 1.2344×10^6 と一致しなかった。したがって予算均衡性に対して、AGV型メカニズムの有効性が確認できた。

第5章

結論

5.1 本論文の成果

エネルギー需要ネットワークをモデル化し、このネットワークを等式・不等式制約のもとで分散型の最適化を行った。最適化が行われる市場において、互いに競争的な各需要者の利己的・戦略的な振る舞いを社会全体の利益へ統合する二種類のメカニズムを提案した。一つは VCG 型メカニズムであり、このメカニズムによって誘因両立性と個人合理性が保証されることを示し、数値例によって有効性を確認した。もう一つは AGV 型メカニズムであり、これによってベイジアン誘因両立性と予算均衡性が保証されることを示し、数値例によってその有効性を確認した。メカニズムデザインの分野において、等式制約及び不等式制約を陽に考慮したことは本論文において新しく検討された部分である。

二つのメカニズムは異なる性質を持ち、双方の長所、すなわち誘因両立性、個人合理性、予算均衡性を全て満たすメカニズムはまだ知られていない。したがって、市場に望まれる性質によって使い分ける必要がある。市場が形成される初期の段階では市場への自発的な参加を促すために個人合理性を満たす VCG 型メカニズム、市場参加者が集まり、公益事業体の収支が重要になる段階からは予算均衡性を満たす AGV 型メカニズムを選択するなどの使い分けが一例として考えられる。

5.2 今後の展望

本論文の数値例では各需要者を同じモデルを用いて最適化計算を行い、メカニズムの有効性を評価した。一方で現実の問題では需要者の生活パターン、すなわち昼間の時間帯に自宅に不在のため電力消費を行わない需要者や、どの時間帯においても電力消費を行う需要者などによって大きく消費パターンが異なることが考えられる。このような需要者のタイプの違いを表現するために、効用関数のパラメータを設定して、時間帯ごとの重みを調整することが考えられる。

また、数値例において気温や自家発電量は予測値として用いられ、前日市場の最適化の中では定数として扱われる。このため、最適化後に予測が外れた場合には電力需給の最適化の結果も間違った予測の下で計算されたものになる。前日市場の最適化という枠組みの中ではこの問題に対処することはできず、当日に前日市場で決められた取引量と実際に取引される量との差を埋めるリアルタイム市場によって対処されることになる。

将来の電力市場をめぐる議論の一つに、公益事業体と需要者の間にアグリゲータと呼ばれる中間業者を設置することが検討されている。これによって、一般家庭などの個々の規模は小さくとも数が大規模になる需要者を束ねて市場に参加することで公益事業体の負担を軽減したり、需要者の交渉力を増やしたりすることが期待されている。アグリゲータの存在は市場の価格に影響力を及ぼすことが期待され、これを評価することが考えられる。また、アグリゲータの存在を考慮に入れたメカニズムの設計をすることが今後の議論の展開として考えられる。

参考文献

- [1] 内田: エネルギーマネジメントシステム: 環境, 社会・経済システム, 物理システムのインテグレーション; 計測と制御, Vol. 53, No. 1, pp. 2–5 (2014)
- [2] T. Li, M. Shahidehpour: Strategic Bidding of Transmission-Constrained GENCOs with Incomplete Information; *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.20, No. 1, pp. 437–447 (2005)
- [3] A. Papavasiliou, H. Hindi, and D. Greene: Market-Based Control Mechanisms for Electric Power Demand Response; *Proceedings of the 49th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 1891–1898 (2010)
- [4] P. Samadi, H. Mohsenian-Rad, R. Schober, V. W. S. Wong, and J. Jatskevich: Optimal Real-time Pricing Algorithm Based on Utility Maximization for Smart Grid; *Proceedings of the First IEEE International Conference on Smart Grid Communications*, pp. 415–420 (2010)
- [5] N. Li, L. Chen, and S. Low: Optimal Demand Response Based on Utility Maximization in Power Networks; *Proceedings of the 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting* (2011)
- [6] M. O. Jackson: Mechanism Theory, *Encyclopedia of Life Support Systems*, U. Derigs (Ed.), EOLSS Publishers, pp. 1–46 (2003)
- [7] N. Nisan: Introduction to mechanism design (for computer scientists), *Algorithmic Game Theory*, N. Nisan, T. Roughgarden, E. Tardos and V. Vazirani (Eds.), 209/241, Cambridge University Press (2007)

- [8] K. J. Arrow: The Property Rights Doctrine and Demand Revelation under Incomplete Information, *Economics and Human Welfare: Essays in Honor of Tibor Scitovsky*, M. Boskin (Ed.), Academic Press, pp. 23–39, (1979)
- [9] C. d’Aspremont and L.-A. Gérard-Varet: Incentives and Incomplete Information; *Journal of Public Economics*, Vol. 11, No. 1, pp. 25–45 (1979)
- [10] D. Bergemann and S. Morris: Robust Mechanism Design; *Econometrica*, Vol. 73, No. 6, pp. 1771–1813 (2005)
- [11] 坂井, 藤中, 若山: メカニズムデザイン–資源配分制度の設計とインセンティブ–, ミネルヴァ書房, pp. 59–70 (2008)
- [12] Y. Shoham and K. Leyton-Brown: *Multiagent Systems: Algorithmic, Game-Theoretic, and Logical Foundations*, Cambridge University Press (2009)
- [13] Y. Narahari, D. Garg, R. Narayanam, and H. Prakash: *Game Theoretic Problems in Network Economics and Mechanism Design Solutions*, Springer-Verlag (2009)
- [14] C. Silva, B. F. Wollenberg, and C. Z. Zheng: Application of Mechanism Design to Electric Power Markets (Republished); *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 16, No. 4, pp. 862–869 (2001)
- [15] P. Samadi, H. Mohsenian-Rad, R. Schober, and V. W. S. Won: Advanced Demand Side Management for the Future Smart Grid Using Mechanism Design; *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 3, No. 3, pp. 1170–1180 (2012)
- [16] T. Tanaka, A. Z. W. Cheng, and C. Langbort: A Dynamic Pivot Mechanism with Application to Real Time Pricing in Power Systems; *Proceedings of the 2012 American Control Conference*, pp. 3705–3711 (2012)
- [17] Y. Okajima, T. Murao, K. Hirata, and K. Uchida: Real Time Pricing and Pivot Mechanism for LQG Power Networks; *Proceedings of the 2013 IEEE Multi-Conference on Systems and Control*, pp. 495–500 (2013)

- [18] Y. Okajima, T. Murao, K. Hirata, and K. Uchida: A Dynamic Mechanism for LQG Power Networks with Random Type Parameters and Pricing Delay; *Proceedings of the 52nd IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 2384–2390 (2013)
- [19] 岡島, 平田, 内田: 分散型 LQ 需給ネットワークの Pivot メカニズムによる統合; 計測自動制御学会論文集, Vol. 49, No. 12, pp. 1186–1195 (2013)
- [20] T. Murao, Y. Okajima, K. Hirata, and K. Uchida: Dynamic Balanced Integration Mechanism for LQG Power Networks with Independent Types; *Proceedings of the 53rd IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 1395–1402 (2014)
- [21] C. E. Lin and G. L. Viviani: Hierarchical Economic Dispatch for Piecewise Quadratic Cost Functions; *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-103, No. 6, pp. 1170–1175 (1984)
- [22] D. P. Bertsekas: *Nonlinear Programming* (2nd ed.), Athena Scientific (2008)
- [23] D. G. Luenberger: *Linear and Nonlinear Programming*, Addison-Wesley Publishing Company, pp. 330–333 (1989)
- [24] 気象庁, [Online] <http://www.jma.go.jp/>
- [25] 日本気象協会, [Online] <http://www.jwa.or.jp/>
- [26] N. R. Suri, Y. Narahari: Broadcast in Ad hoc Wireless Networks with Selfish Nodes: A Bayesian Incentive Compatibility Approach; *Proceedings of the 2007 2nd International Conference on Communication System Software and Middleware and Workshops* (2007)

謝辞

内田研究室に配属されてから約6年半になります。この間内田健康先生には研究に関して多くのご指導をいただきました。まず、メカニズムデザインという興味深いテーマを提示して下さったことに感謝しております。またそれが経済学という制御理論ではなじみの薄い分野までリサーチしないと学べないことから、研究に必要な視野の広さを体感することができました。また、JST CRESTの活動を含め、国内外で多くの発表の機会を与えて下さったことにも感謝しております。様々な視点による外部からの多くのコメントによって、この研究に対する評価を知ることができました。研究活動以外にも、授業のTAや、助手としての活動の機会を与えて下さったことに感謝しております。学科のイベントの裏方として活動したことは貴重な経験になりました。

本論文の副査を担当して下さった井上先生、林先生、村田先生、渡邊先生には、予備審査会及び公聴会にて多くの重要なご指摘やコメントをいただけたことに感謝しております。特に渡邊先生には研究室の合同ゼミに於いて普段から有意義なコメントをいただきました。

長岡技術科学大学の平田研二先生、金沢工業大学の村尾俊幸先生には研究の具体的な内容のご指導に加えて、論文の書き方についても丁寧なご指導をいただきました。原稿や発表スライドに関して、的確なご指導をいただけたことに深く感謝しております。

最後に、研究室で一緒に研究をした先輩や後輩、特に博士生活の手本を示してくれた王明輝氏、Nguyen Gia Minh Thao氏、そして学生生活を支えてくれた家族に感謝致します。

業績一覧

論文

- (1) 岡島佑介, 村尾俊幸, 平田研二, 内田健康, 不確かな情報環境における制約付きエネルギー需要ネットワークの AGV メカニズムによる統合, システム制御情報学会論文誌, Vol. 28, No. 8, pp. 356-365, 2015 年 8 月
- (2) 岡島佑介, 平田研二, 内田健康, 不確かな情報環境における LQ エネルギー需要ネットワークの VCG メカニズムによる統合, 計測自動制御学会論文集, Vol. 49, No. 12, pp. 1186-1195, 2013 年 12 月

国際会議

- (1) Y. Okajima, T. Murao, K. Hirata and K. Uchida, Integration of Day-ahead Energy Market Using VCG Type Mechanism under Equality and Inequality Constraints, Proc. of 2015 IEEE Conference on Control Applications Part of IEEE Multi-conference on Systems and Control, pp.187-194, September, 2015
- (2) Y. Okajima, T. Murao, K. Hirata and K. Uchida, Integration Mechanisms for LQ Energy Day-ahead Market Based on Demand Response, Proc. of 2014 IEEE Conference on Control Applications Part of IEEE Multi-conference on Systems and Control, pp. 1-8, October, 2014

講演

- (1) 御山恵未, 岡島佑介, 村尾俊幸, 平田研二, 内田健康, LQ エネルギー需要ネットワークにおける戦略的 Bidding のための最適化手法, 第 2 回 制御部門マルチシンポジウム 資料, Paper Number 633-1, 2015 年 3 月

- (2) 御山恵未, 岡島佑介, 村尾俊幸, 平田研二, 内田健康, LQ エネルギー需要ネットワークにおける戦略的 Bidding, 第 57 回 自動制御連合講演会 予稿集, pp. 1853-1860, 2014 年 11 月
- (3) 岡島佑介, 村尾俊幸, 平田研二, 内田健康, 不確かな情報環境における LQ エネルギー需要ネットワークの Interim 誘因と Ex Post 誘因, 第 58 回システム制御情報学会研究発表講演会 予稿集, Paper ID 212-4, 2014 年 5 月
- (4) 岡島佑介, 村尾俊幸, 平田研二, 内田健康, 不確かな情報環境における LQ エネルギー需要ネットワークの予算均衡型メカニズムによる統合, 第 56 回 自動制御連合講演会 予稿集, pp. 925-930, 2013 年 11 月
- (5) 山下 望, 岡島佑介, 村尾俊幸, 内田健康, LQ エネルギー需要ネットワークに対する購入電力容量制限付きモデル予測型プライシング, 第 56 回 自動制御連合講演会 予稿集, pp. 919-924, 2013 年 11 月
- (6) 岡島佑介, 平田研二, 内田健康, 分散型 LQ 需給ネットワークの Pivot メカニズムによる統合, SICE 第 13 回制御部門大会 資料, Paper ID 6F4-1, 2013 年 3 月
- (7) 岡島佑介, 平田研二, 内田健康, エネルギー需要ネットワークの最適化と不確かな情報に基づく統合メカニズム, 第 55 回自動制御連合講演会 予稿集, pp. 1539-1544, 2012 年 11 月
- (8) 塚越達也, 岡島佑介, 内田健康, 電力需要者の効用最大化行動に基づくモデル予測型プライシング手法, SICE 第 12 回制御部門大会 資料, Paper ID 0000-P0011, 2012 年 3 月

その他

- (1) T. Murao, Y. Okajima, K. Hirata and K. Uchida, Dynamic Balanced Integration Mechanism for LQG Power Networks with Independent Types, Proc. Of 53rd IEEE Conference on Decision and Control, pp. 1395-1402, December, 2014
- (2) Y. Okajima, T. Murao, K. Hirata and K. Uchida, A Dynamic Mechanism for LQG Power Networks with Random Type Parameters and Pricing Delay, Proc. of 52nd IEEE Conference on Decision and Control, pp. 2384-2390, December, 2013

- (3) Y. Okajima, T. Murao, K. Hirata and K. Uchida, Real Time Pricing and Pivot Mechanism for LQG Power Networks, Proc. of 2013 IEEE Conference on Control Applications Part of IEEE Multi-conference on Systems and Control, pp. 495-500, August, 2013

