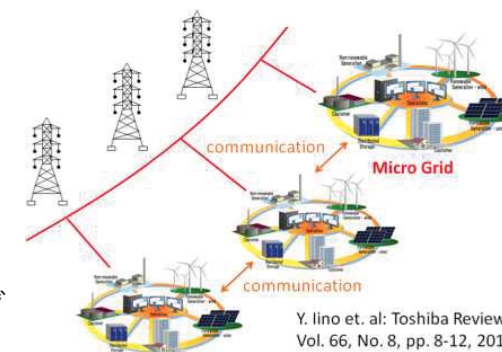


エネルギー需要・供給ネットワークにおける 分散化・統合化と制度設計

平田研二

長岡技術科学大学

- グリーンイノベーション
- 再生可能エネルギー
- スマートコミュニティ
- スマートグリッド
- クリーンエネルギー
- 低炭素化
- 太陽光発電
- 風力発電
- 分散電源
- 蓄電池
- スマートメーター
- 電気自動車
- リアルタイムプライシング
- 電力買取制度



Y. Iino et. al: Toshiba Review, Vol. 66, No. 8, pp. 8-12, 2011

Navigation icons: back, forward, search, etc.

Navigation icons: back, forward, search, etc.



社会基盤システムにおける分散意思決定のためのシステム制御
2012-13 年

エネルギー・環境システム制御技術
2010-11 年

Navigation icons: back, forward, search, etc.

社会基盤システムにおける分散意思決定のためのシステム制御

- SICE 制御部門 に設置 2012-13 年
- 主査: 平田 幹事: 小島千昭 東京大学, 佐々木智丈 富士通研究所
- 委員 36 名 企業 9 名 大学 27 名
- URL: SICE → 制御部門 → 調査研究会

- … 大規模な社会基盤システムに対して、社会システムの制度設計を含めた統合的運用システムの開発を可能とする …



調査研究会の活動にご参加ください

Navigation icons: back, forward, search, etc.

社会基盤システムにおける分散意思決定のためのシステム制御

- 第 3 回 運営委員会
- 2012 年 5 月 25 日 京都大学 吉田キャンパス 13:30-
- 講演 1: 周波数オークションにおける制度設計
松原繁夫先生 京都大学 大学院 情報学研究科 社会情報学専攻
- 講演 2: エネルギー需要・供給ネットワークにおける分散・統合化と制度設計
平田研二 長岡技術科学大学 機械系
- 第 4 回 運営委員会
- 2012 年 6 月 22 日 京都大学 品川キャンパス
- 講演 1: アクセンチュア 平さま
- 講演 2: 富士電機 川村さま

調査研究会の活動にご参加ください



CREST:

- 分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論及び基盤技術の創出と融合展開
 - 再生可能エネルギーをはじめとした多様なエネルギーの受給の最適化を可能とする, 分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論, 数理モデル及び基盤技術の創出



グリーンイノベーションと制御理論
計測と制御, No. 1, Vol, 51, 2012.



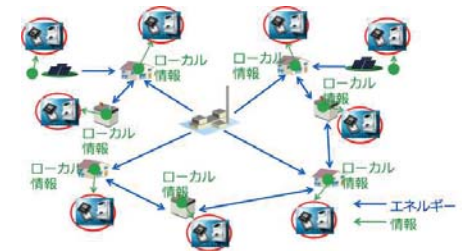
平田, 内田:
分散化と統合化の制御理論



分散化と統合化:

- 分散的な意思決定を公共の利得に結びつける
- 小規模多様な分散型電源を大量に導入する
- 周波数制御, 電圧制御, 電力の安定供給
- 集中型の情報処理 cf. 中央給電司令所 は困難

- 個々のエージェント G_i が利己的に自身の振る舞いを決定する
分散化 パラダイムシフト
- 公共の目的達成へと誘導する
ユーティリティ U
統合化 価格を提示



戦略的な振る舞いへの対応:

- 社会システムのデザイン
- 選好情報を引き出す

[Hatanaka and Fujita, jsice'12]



Outline

- 1 はじめに
- 2 エネルギー需要・供給ネットワーク
- 3 分散化と統合化
- 4 メカニズムデザインとは
- 5 動的メカニズムデザイン
- 6 おわりに

エネルギー需要・供給ネットワーク

- $i = 1, 2$ の 2 地域 供給者: n_1^g, n_2^g 台 需要家: n_1^d, n_2^d 台
- Average system frequency model [Berger and Schewepe, T-AC'89]

$$\begin{aligned}\dot{\theta}_i &= \omega_i \quad i = 1, 2 \\ H_1 \dot{\omega}_1 &= \sum_{j=1}^{n_1^g} q_{1j}^g - \sum_{j=1}^{n_1^d} q_{1j}^d + \frac{1}{X}(\theta_1 - \theta_2) \\ H_2 \dot{\omega}_2 &= \sum_{j=1}^{n_2^g} q_{2j}^g - \sum_{j=1}^{n_2^d} q_{2j}^d + \frac{1}{X}(\theta_2 - \theta_1)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{x}_{ij}^g &= A_{ij}^g x_{ij}^g + B_{ij}^g u_{ij}^g & q_{ij}^g &= C_{ij}^g x_{ij}^g & i = 1, 2 & j = 1, \dots, n_i^g \\ \dot{x}_{ij}^d &= A_{ij}^d x_{ij}^d + B_{ij}^d u_{ij}^d & q_{ij}^d &= C_{ij}^d x_{ij}^d & i = 1, 2 & j = 1, \dots, n_i^d\end{aligned}$$

エネルギー需要・供給ネットワーク

$$\begin{aligned}\dot{x}_{ij}^g &= A_{ij}^g x_{ij}^g + B_{ij}^g u_{ij}^g & q_{ij}^g &= C_{ij}^g x_{ij}^g & i = 1, 2 & j = 1, \dots, n_i^g \\ \dot{x}_{ij}^d &= A_{ij}^d x_{ij}^d + B_{ij}^d u_{ij}^d & q_{ij}^d &= C_{ij}^d x_{ij}^d & i = 1, 2 & j = 1, \dots, n_i^d\end{aligned}$$

供給者・需要家の特性

- $\dot{x}_i = f_i(x_i, u_i) \quad i \in N = \{1, \dots, n\}$
- n 人のエージェント G_i

エネルギー需要・供給ネットワーク

$$\begin{aligned}\dot{\theta}_i &= \omega_i \quad i = 1, 2 \\ H_1 \dot{\omega}_1 &= \sum_{j=1}^{n_1^g} q_{1j}^g - \sum_{j=1}^{n_1^d} q_{1j}^d + \frac{1}{X}(\theta_1 - \theta_2) \\ H_2 \dot{\omega}_2 &= \sum_{j=1}^{n_2^g} q_{2j}^g - \sum_{j=1}^{n_2^d} q_{2j}^d + \frac{1}{X}(\theta_2 - \theta_1)\end{aligned}$$

供給者・需要家の特性

- $\dot{x}_i = f_i(x_i, u_i) \quad i \in N = \{1, \dots, n\}$
- n 人のエージェント G_i

地域 1, 2 間の相互作用

- $\dot{x}_0 = f_0(x)$
- x_0 : θ_i や $\omega_i \quad x = (x_0, x_1, \dots, x_n)$

エネルギー需要・供給ネットワーク

- $i = 1, 2$ の 2 地域 供給者: n_1^g, n_2^g 台 需要家: n_1^d, n_2^d 台
- Average system frequency model [Berger and Schweppe, T-AC'89]

$$\begin{aligned} \dot{x}_0 &= f_0(x) & x &= (x_0, x_1, \dots, x_n) & \text{地域間の相互作用} \\ \dot{x}_i &= f_i(x_i, u_i) & i \in N &= \{1, \dots, n\} & \text{供給者・需要家の特性} \end{aligned}$$

- 動特性を考慮したモデル
- n 人のエージェント G_i

Outline

- ① はじめに
- ② エネルギー需要・供給ネットワーク
- ③ 分散化と統合化
- ④ メカニズムデザインとは
- ⑤ 動的メカニズムデザイン
- ⑥ おわりに

分散化と統合化

動的メカニズムデザインによる分散化と統合化

- n 人のエージェント G_i $N = \{1, \dots, n\}$

$$\begin{aligned} \dot{x}_0 &= f_0(x) & x &= (x_0, x_1, \dots, x_n) & \text{地域間の相互作用} \\ \dot{x}_i &= f_i(x_i, u_i) & i \in N &= \{1, \dots, n\} & \text{供給者・需要家の特性} \\ \dot{x} &= f(x, u) & & & f = (f_0, f_1, \dots, f_n) \\ & & & & u = (u_1, \dots, u_n) \end{aligned}$$

G_i の利得:

$$\min_{u_i} J_i(t, x_i) = \min_{u_i} \int_t^{t_f} \ell_i(x_i(\tau), u_i(\tau)) d\tau + \phi_i(x_i(t_f))$$

公共の利得:

集中処理 ×

$$\begin{aligned} \min_u J(t, x) &= \min_u [J_0(t, x) + \sum_{i \in N} J_i(t, x_i)] \\ J_0(t, x) &= \int_t^{t_f} \ell_0(x_0(\tau)) d\tau + \phi_0(x_0(t_f)) \end{aligned}$$

分散化と統合化

動的メカニズムデザインによる分散化と統合化

公共の利得:

$$\min_u J(t, x) \quad \text{subject to} \quad \dot{x}(\tau) = f(x(\tau), u(\tau))$$

最適制御問題:

$$\begin{aligned} H(x, p, u) &= H_0(x, p_0) + \sum_{i \in N} H_i(x_i, p_i, u_i) & p &= (p_0, p_1, \dots, p_n) \\ H_0(x, p_0) &= \ell_0(x_0) + p_0^T f_0(x) & H_i(x_i, p_i, u_i) &= \ell_i(x_i, u_i) + p_i^T f_i(x_i, u_i) \end{aligned}$$

- 2 点境界値問題 (最適性の必要条件)

$$\begin{aligned} \dot{p}(\tau) &= -\frac{\partial H}{\partial x}(x(\tau), p(\tau), u^*(x(\tau), p(\tau))) & p(t_f) &= \frac{\partial \phi}{\partial x}(x(t_f)) \\ \underline{u^*(x, p)} &= \arg \min_u H(x, p, u) \end{aligned}$$

分散化と統合化

動的メカニズムデザインによる分散化と統合化

最適入力:

$$u^*(x, p) = \begin{bmatrix} u_1^*(x, p) \\ \vdots \\ u_n^*(x, p) \end{bmatrix} = \arg \min_u H(x, p, u) = \begin{bmatrix} \arg \min_{u_1} H_1(x_1, p_1, u_1) \\ \vdots \\ \arg \min_{u_n} H_n(x_n, p_n, u_n) \end{bmatrix}$$

$$H(x, p, u) = H_0(x, p_0) + \sum_{i \in N} H_i(x_i, p_i, u_i)$$

G_i の利得: J_i が本来の利得, H_i は仮想的な利得

分散化: $u_i^b(x) = \arg \min_{u_i} H_i(x_i, p_i, u_i) \quad i \in N$

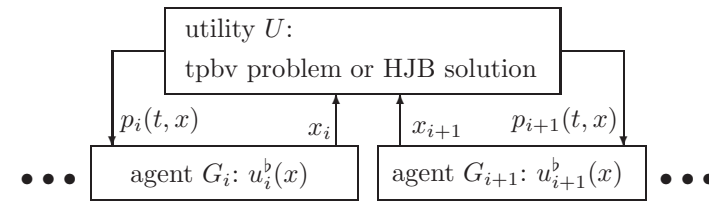
公共の利得:

統合化: p_i を (仮想的な) 価格として G_i に提示 $\implies u_i^* = u_i^b$
 x_i をメッセージとして G_i から受け取る

分散化と統合化

動的メカニズムデザインによる分散化と統合化

分散化 と 統合化:

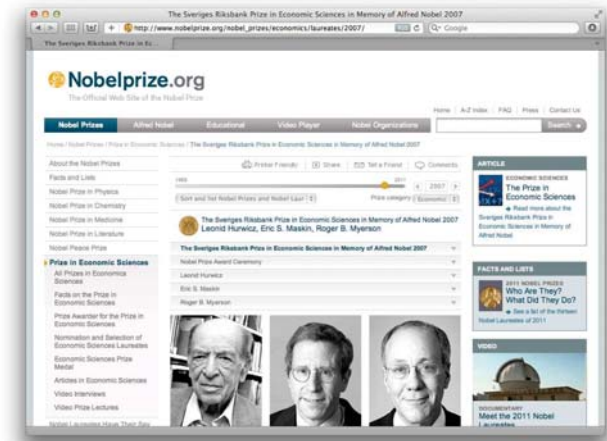


- p_i を (仮想的な) 価格として G_i に提示 $\implies u_i^* = u_i^b$
- x_i をメッセージとして G_i から受け取る
- 初期条件 (t, x) が与えられた時の時刻 t における p の値: $p(t, x)$
- MPC を解く計算時間を含めた検討が必要
- 戦略的な振る舞いにより, 社会としての決定が左右 される

Outline

- 1 はじめに
- 2 エネルギー需要・供給ネットワーク
- 3 分散化と統合化
- 4 メカニズムデザインとは
- 5 動的メカニズムデザイン
- 6 おわりに

メカニズムデザインとは



M. O, Jackson, Mechanism Theory, 2003.
 N. Nisan, Intro. to Mechanism Design, *Algorithmic Game Theory*, 2007.
 坂井 ほか, *メカニズムデザイン*, 2008.

メカニズムデザインとは

町に新しい公園をつくらう:

- ユーティリティー U (行政)
 $a \in A = \{0, 1\}$ 0: つくらない 1: つくる $c = -9$: コスト
- エージェント G_i (市民) $i = 1, 2, 3$
個人的な価値: $\theta_1 = 6$ $\theta_2 = 4$ $\theta_3 = 2$
- 戦略的な振る舞いにより, 社会としての決定が左右 される

U は, 新たな社会システムを検討する:

$$\begin{aligned} v_i(\theta_i, a) &= \theta_i \times a && G_i \text{ の個人利得} \\ w_i(\theta_i, a, t_i) &= v_i(\theta_i, a) + t_i && \text{新しい } G_i \text{ の個人利得} \\ t_i &: \text{移転コスト} && \underline{t_i < 0 \text{ 納税}} \quad \underline{t_i > 0 \text{ 助成}} \end{aligned}$$

- U は, レポート θ_i を受けて, $a(\theta)$ と $t_i(\theta)$ を決定したい
- 耐戦略性: ウソをつくことは得にならない
- 個人合理性: 社会への参加で損はしない

◀ ▶ ⏪ ⏩ ⏴ ⏵ ⏶ ⏷ ⏸ ⏹ ⏺ ⏻ ⏼ ⏽ ⏾ ⏿ 🔍 ↺

メカニズムデザインとは

U は, 新たな社会システムを検討する:

$$w_i(\theta_i, a, t_i) = v_i(\theta_i, a) + t_i$$

VCG メカニズム:

$$\begin{aligned} a(\theta) &\in \arg \max_{a \in A} [v_0(a) + \sum_{i \in N} v_i(\theta_i, a)] && v_0(a) = c \times a \\ t_i(\theta) &= v_0(a(\theta)) + \sum_{j \in N_{-i}} v_j(\theta_j, a(\theta)) + h_i \end{aligned}$$

pivot 関数 h_i :

$$h_i(\theta_{-i}) = - \max_{b \in A} [v_0(b) + \sum_{j \in N_{-i}} v_j(\theta_j, b)]$$

- U は, レポート θ_i を受けて, $a(\theta)$ と $t_i(\theta)$ を決定したい
- 耐戦略性: ウソをつくことは得にならない
- 個人合理性: 社会への参加で損はしない

◀ ▶ ⏪ ⏩ ⏴ ⏵ ⏶ ⏷ ⏸ ⏹ ⏺ ⏻ ⏼ ⏽ ⏾ ⏿ 🔍 ↺

メカニズムデザインとは

U は, 新たな社会システムを検討する:

$$w_i(\theta_i, a, t_i) = v_i(\theta_i, a) + t_i$$

VCG メカニズム:

$$\begin{aligned} a(\theta) &\in \arg \max_{a \in A} [v_0(a) + \sum_{i \in N} v_i(\theta_i, a)] && v_0(a) = c \times a \\ t_i(\theta) &= v_0(a(\theta)) + \sum_{j \in N_{-i}} v_j(\theta_j, a(\theta)) + h_i \end{aligned}$$

pivot 関数 h_i :

$$h_i(\theta_{-i}) = - \max_{b \in A} [v_0(b) + \sum_{j \in N_{-i}} v_j(\theta_j, b)]$$

- 戦略的な振る舞いにより, 社会としての決定が左右 される
とはならない 社会システムの制度設計 は可能

◀ ▶ ⏪ ⏩ ⏴ ⏵ ⏶ ⏷ ⏸ ⏹ ⏺ ⏻ ⏼ ⏽ ⏾ ⏿ 🔍 ↺

メカニズムデザインとは

VCG メカニズム + pivot 関数

- 真の値 $\theta = (\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ をレポート:

$$v_1(\theta_1, a(\theta)) + t_1 = 6 - 3 = 3$$

$$v_2(\theta_2, a(\theta)) + t_2 = 4 - 1 = 3$$

$$v_3(\theta_3, a(\theta)) + t_3 = 2 - 0 = 2$$

- G_2 がウソについて $\tilde{\theta}_2 = 0 \neq \theta_2$, $\tilde{\theta} = (\theta_1, \tilde{\theta}_2, \theta_3)$ がレポート
 $v(\theta_2, a(\tilde{\theta})) + t_2 = 0 + 0 = 0 < 3 = v(\theta_2, a(\theta)) + t_2$

- 戦略的な振る舞いにより, 社会としての決定が左右 される
とはならない 社会システムの制度設計 は可能

◀ ▶ ⏪ ⏩ ⏴ ⏵ ⏶ ⏷ ⏸ ⏹ ⏺ ⏻ ⏼ ⏽ ⏾ ⏿ 🔍 ↺

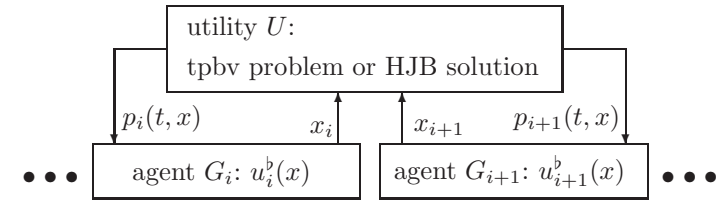
Outline

- 1 はじめに
- 2 エネルギー需要・供給ネットワーク
- 3 分散化と統合化
- 4 メカニズムデザインとは
- 5 動的メカニズムデザイン
- 6 おわりに

分散化と統合化 (再掲)

動的メカニズムデザインによる分散化と統合化

分散化 と 統合化:

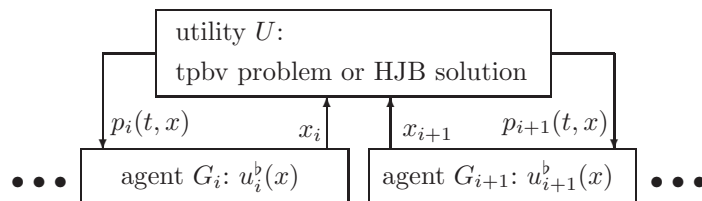


- p_i を (仮想的な) 価格として G_i に提示 $\implies u_i^* = u_i^b$
- x_i をメッセージとして G_i から受け取る
- 初期条件 (t, x) が与えられた時の時刻 t における p の値: $p(t, x)$
- MPC を解く計算時間を含めた検討が必要
- 戦略的な振る舞いにより, 社会としての決定が左右 される

動的メカニズムデザイン

動的メカニズムデザインによる分散化と統合化

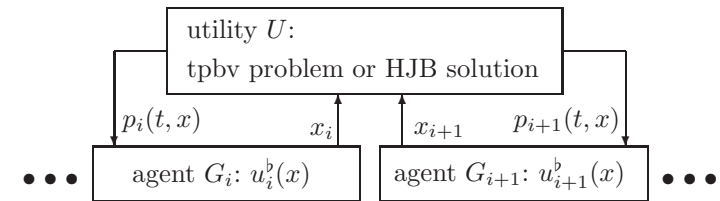
分散化 と 統合化:



- p_i を (仮想的な) 価格として G_i に提示 $\implies u_i^* = u_i^b$
- x_i をメッセージとして G_i から受け取る
- 初期条件 (t, x) が与えられた時の時刻 t における p の値: $p(t, x)$
- MPC を解く計算時間を含めた検討が必要
- 戦略的な振る舞いにより, 社会としての決定が左右 される

動的メカニズムデザイン

動的メカニズムデザインによる分散化と統合化



U は, 新たな社会システムを検討 する:

$$w_i(x_i, p_i, u_i, t_i) = H_i(x_i, p_i, u_i) + t_i$$

動的 VCG メカニズム: $u_i^b(x)$ と $p_i(t, x)$ および

$$t_i(t, x) = H_0(x, p_0(t, x)) + \sum_{j \in N-i} H_j(x_j, p_j(t, x), u_j^b(x_j)) + h_i$$

動的メカニズムデザイン

動的メカニズムデザインによる分散化と統合化

U は, 新たな社会システムを検討する:

$$w_i(x_i, p_i, u_i, t_i) = H_i(x_i, p_i, u_i) + t_i$$

動的 VCG メカニズム:

$$t_i(t, x) = H_0(x, p_0(t, x)) + \sum_{j \in N_{-i}} H_j(x_j, p_j(t, x), u_j^b(x_j)) + h_i$$

- 時刻 t での真の状態 x_i に対して, $\lim_{\tau \downarrow t} \sigma(x_i(\tau)) \neq x_i$ をレポート

$$w_i(x_i, p_i(t, x), u_i^b(x), t_i(t, x)) \leq w_i(x_i, p_i(t, x), u_i^b(\sigma(x)), t_i(t, x))$$

- 耐戦略性: ウソをつくことは得にならない

動的メカニズムデザイン

動的メカニズムデザインによる分散化と統合化

U は, 新たな社会システムを検討する:

$$w_i(x_i, p_i, u_i, t_i) = H_i(x_i, p_i, u_i) + t_i$$

$$t_i(t, x) = H_0(x, p_0(t, x)) + \sum_{j \in N_{-i}} H_j(x_j, p_j(t, x), u_j^b(x_j)) + h_i$$

動的 pivot 関数:

$$h_i(t, x) = -H(x, p(t, x), \bar{u}_i, u_{-i}^\dagger(t, x))$$

- \bar{u}_i : 任意の入力
- $u_{-i}^\dagger(t, x)$: 最適制御問題の解

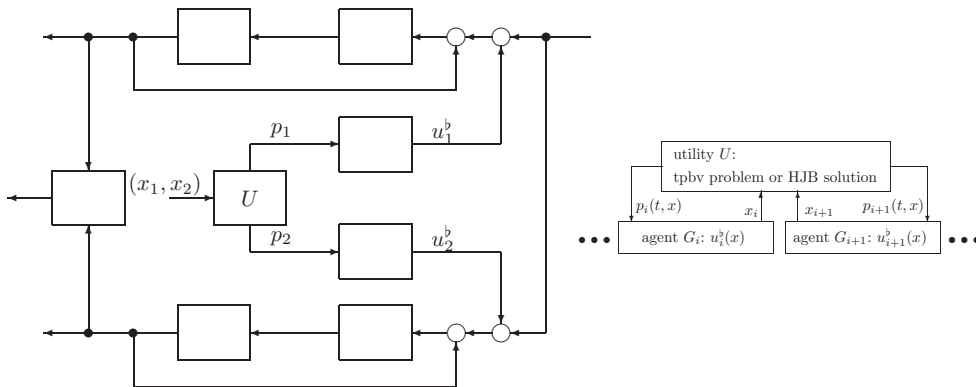
$$\min_{u_{-i}} [J_0(t, x) + \sum_{j \in N_{-i}} J_j(t, x_j)]$$

$$\text{subject to } \dot{x}(\tau) = f(x(\tau), u(\tau)) \quad \text{and} \quad u_i = \bar{u}_i$$

- 個人合理性: 社会への参加で損はしない

動的メカニズムデザインによる分散化と統合化

数値例:



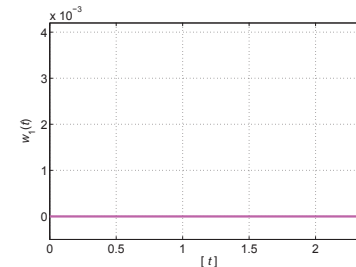
動的メカニズムデザインによる分散化と統合化

数値例:

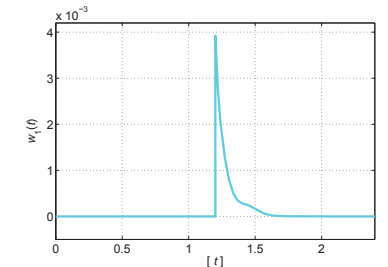
- 動的 VCG メカニズム + 動的 pivot 関数 $h_i = 0$

$$w_i(x_i, p_i, u_i, t_i) = H_i(x_i, p_i, u_i) + t_i$$

$$t_i(t, x) = H_0(x, p_0(t, x)) + \sum_{j \in N_{-i}} H_j(x_j, p_j(t, x), u_j^b(x_j)) + h_i$$



w_1 : x_1 をレポート



w_1 : $\sigma(x_1) = 0.8 \times x_1, t \geq 1.2$ をレポート

- 耐戦略性: ウソをつくことは得にならない

おわりに

分散化と統合化

- 分散的な意思決定を公共の利得に結びつける

社会システムのデザイン

- 戦略的な振る舞い (ウソをつく) への対応
- 選好情報を引き出す

動的メカニズムデザインによる分散化と統合化

- 場所 (エージェント) に関して分解, 時間に関して分解
- 移転コストを仮想的な利得 ($\neq J_i$) へ導入 (間接的)

本来の利得 J_i への (統合化) コストの導入 と Nash 均衡解の採用

- 均衡解を公共の利得に結びつける
- U への負荷を軽減

経済学分野における動的メカニズムデザイン理論の動向 