

プラグイン電気自動車の普及モデルにおける補助金施策の制御

○坂本憲昭 (法政大学), 新村隆英 (法政大学)
小沢和浩 (法政大学), 高森寛 (早稲田大学ファイナンス研究センター)

Sliding Mode Control of a Subsidy Policy for Plug-in Electric Vehicle

*Noriaki Sakamoto (Hosei Univ.), Takahide Niimura (Hosei Univ.),
Kazuhiro Ozawa (Hosei Univ.), Hiroshi Takamori (Waseda Univ.)

Abstract- This paper feedback-controls the subsidy policy for the purchase of the plug-in electric vehicle and the business model of the charge stations. The control logic is Sliding Mode Control which has robustness against the uncertainties of the infrastructure model. The controlled model has two characteristics: (1) A public institution builds the charge stations. (2) The break-even point is calculated by thinking about the maintenance cost and running cost.

Key Words : Subsidy Policy, Plug-in Electric Vehicle, Sliding Mode Control

1. はじめに

ヒートアイランド現象の要因のひとつである自動車からの排熱削減, 脱石油社会と低炭素社会の実現に向けて, 電気自動車 (Electric Vehicle, 本稿では以下 EV と略す) の普及が期待されているが, 消費者にとって燃費が良いガソリン車やハイブリッド車と比較して EV の本体価格が高いという概念と, 特に航続可能距離の短さに対して, 外出先の充電スタンド (以下スタンドと略す) の設置普及率の低さが購入意欲の大きな妨げになっている。

したがって, 普及が自発的に進む市場規模になるまでは, 消費者に対して EV 購入の補助とスタンド事業者に対する補助の両輪が同時進行で必要である。実際, 政府の施策としてエコカー減税終了後の現在においても, 日産リーフについては補助額を下げずに 78 万円の維持, スタンドの購入費および工事費の補助は 1/2 から 2/3 に増額をしている⁹⁾。さらに日産リーフは 2013 年 4 月に販売価格が約 30 万円値下げとなり, 航続可能距離も 14%伸びている¹⁰⁾。しかしながら, 過去の販売台数と比較して顕著な増加は見られない¹¹⁾ (Fig.1 参照)。

ところで著者らの先行研究^{2)~7)}では, 事業者によるスタンド設置について補助金と初期投資およびその回収を考慮した EV の普及インフラモデルを提案し, これまで研究を重ねてきたが, ランニングコストおよびメンテナンスコストについては具体的に考慮していなかった。これらのコストは収入に対して金額が大きく, さらに事業者にとって現在の補助額である購入費と工事費の 2/3 があっても, 普及している EV 台数の少なさからスタンド設置は収益・集客効果・宣伝効果のいずれにおいても魅力に乏しい。高速道路の SA や PA, 自動車販売店, 公共機関, 一部の大手スーパー以外では設置がすすん

でいないのが現実である。

そこで本研究では, 強制的にスタンドを設置することを提案する。具体的には, 補助ではなく公的機関が計画的に公設し⁸⁾, すなわち公的機関がスタンド設置の全額を負担し, 事業者は無償譲渡して設置後の運用・保守を事業者に委ねるものとする。この提案に先行研究で得られた知見や成果を適用し, かつ, ランニングコストおよびメンテナンスコストを反映することが本研究の目的である。提案内容を以下にまとめる。

- 消費者に対する EV 購入補助金は一定額ではなく, 四半期ごとに調整する。その調整は EV 普及モデルの不確かさを考慮して, ロバストなフィードバック制御によりおこなう。
- 制御の際には, スタンドの公設計画に対して EV 所有者の不満をさけると同時に, スタンド事業者が赤字経営にならないように EV 普及台数の目標値 (四半期ごとに変更する) を与える。目標値は 1 スタンド当たりの EV 台数で表現する。

時間経過に伴い変化する目標値を与えることは, エコカー減税のような単年度消費型の予算ではなく, 複数年度に渡る施策となる。この提案手法では以下の利点があげられる。

- 生産の立場では, 急な増産や設備投資過剰の懸念がなくなり, 計画的な生産体制となる
- 補助金施策の立場では, 資金計画の見通しが可能となる
- 販売の立場では, 購入検討者に対して長期に渡るフォローができる
- 消費者の立場では, 単年度の補助金のように早期終了を心配せずに, 1 スタンドあたりの EV 台数を鑑みて購入の意思決定をすることができ。EV 普及台数の把握については, エコカー減

税においてリアルタイムな申請進捗状況を誰でも Web サイトで確認することができており¹²⁾、問題は無い。

なお、さまざまな電気自動車が販売されているが、本研究では充電によってのみ走行可能なプラグイン電気自動車を対象とする。現在、該当する国内の乗用車は日産のリーフ¹³⁾と三菱自動車の i-MiEV であるが、より具体的な検討のために、日産リーフに限定して検討をおこなう。

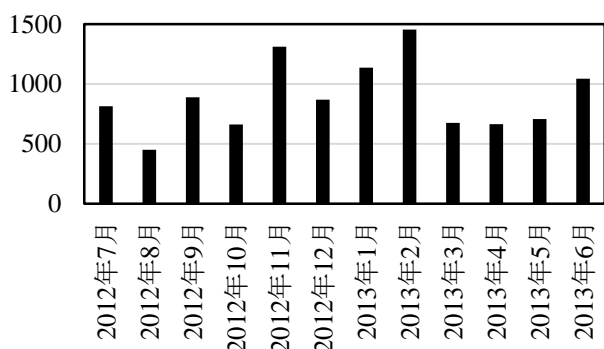


Fig.1 Sales of Nissan LEAF

2. インフラモデル

先行研究で著者らが提案している EV の普及モデルを示す^{2)~7)}。

$$\frac{dy}{dt} = k\beta[am - BU(t)^{-1}]u(t)y(t) \quad (1)$$

y	[台]	EV の普及台数
k	[year]	収束速度
β	[-]	U の値が小さくなると需要が増える弾性係数
a	$[\times 10^6 \text{円}]$	EV1 台の充電 1 回料金
m	[回]	EV1 台の年間充電回数
B	$[\times 10^6 \text{円}]$	損益分岐売上高
U	[台]	1 スタンドあたりの EV 台数 EV 台数累計 / スタンド数累計
u	[%]	操作量
t	[year]	時刻

EV の普及台数 (y) は、製造台数、販売台数、登録台数と等しいと仮定する。収束速度 (k) は、先行研究では EV が目標台数に達成するまでの所要年や、スタンド事業の初期投資額を回収するまでの期間として、2.5 や 5.0 に設定したが、ここでは操作量の調整係数に吸収することを考えて 1 とする。同じ理由から弾性係数 (β) も 1 とする。充電 1 回料金 (a) は、すでに設置されているスタンドを調べると無料と課金、会員なら無料などが混在している¹⁴⁾。このように利用者が 1 回ごとに料金を支払ったり、事業者ごとの会員カードを所有したりするよりも、カード 1 枚で済ませられる「チャデモチャージ機能付きおでかけ Card」¹⁵⁾ の利用が便利である。

これは月 1500 円 (税別, 入会金別) の定額料金である。さらに、前述したように充電料金は様々なので本研究の代表値とする。したがって、 $am = 0.0015 \times 12$ とする。その他のパラメータ U と β については次章にて説明する。なお、時刻 (t) は今後誤解を生じない限り省略する。

3. 必要なスタンド数と損益分岐売上高

必要なスタンド数とは、EV 所有者が外出した際に渋滞やエアコンの使用があっても継続的に走行が可能となる数であり、かつ、スタンド事業者が赤字経営にならないように普及している EV 台数に対して適正な数である。

この課題に対して、すでに現実の数値と悪化条件を考慮したスタンド数が発表されている¹⁾。領域面積約 2600km²、300 万人都市の EV2400 台を仮定して、必要なスタンド数は 17 か所である (この都市の面積や人口のイメージについては付録 1 参照)。

本研究では、このコミュニティ (都市) を対象として検討をおこなう。スタンド数 17 か所に対して EV2400 台ならば、 $U = 141 (= 2400/17)$ となる。すなわち、 U がこの値以下であれば所有者が不満をもたずに EV を利用できる。

$$U \leq 141 \quad (2)$$

次に、スタンド事業者における損益分岐売上高を検討する。スタンド事業にかかる費用の根拠として、日産製急速充電器設置検討者向け工事ガイドを参照する¹⁶⁾。

設置費用	購入費：76 万円～165 万円 工事費：約 218 万円～ + 数百万円
ランニングコスト	固定費：約 63 万円/年 変動費：260 円/充電 1 回
メンテナンスコスト	約 9 万円/年 (4 年パック契約)

税金や利子等の費用は省略して、1 スタンドあたりの EV 台数は U であるから、EV 1 台あたりの年間利用回数を 回数 と略記すると、前章の月額 1500 円より、

$$\text{収入} : 1500 \text{円} \times 12 \text{か月} \times U$$

$$\text{支出} : 260 \text{円} \times \text{回数} \times U + 720000 (=63 \text{万} + 9 \text{万})$$

収入 \geq 支出となるためには、回数 ≥ 0 より、

$$U \geq 40 \quad (3)$$

と求まる。この値がスタンド事業者にとって U の最小値である。

一方、式(2) $U = 141$ の時に 収入 \geq 支出 となるためには、回数 ≥ 49.6 であり、回数=49.6 のときの支

出金額は 2.538 (×10⁶円) であるから、

$$B = 2.538$$

とする。

以上をまとめると、EV 所有者にとっては式(2)を満足し、スタンド事業者にとっては式(3)を満足し、さらに収益確保のためには回数が 49.6 以上か U が 141 以上である必要がある。

4. スタンド公設と EV 目標値

本稿では必要なスタンド数 17 か所と設定した。公設によるこの建設を 3 か年で達成する計画とする。3 か年の理由は、EV 購入の補助金には 4 年間の保有義務があるため⁹⁾、1 年間の余裕期間をもって 3 か年とした。スタンドの初期値を 1 か所とし、最初の 1 年間は四半期ごとに 2 か所建設し、その後は四半期ごとに 1 か所建設する。3 年間で累計 17 か所のスタンドとなる。

EV も同様に 3 か年で累計 2400 台となるように四半期ごとの目標値 (y_{sv} とおく) を設定する。初期値を 100 台とし、生産台数が比例関数で増産するように設定する。

以上の時間履歴を Fig.2, Fig.3 に示す。なお、以下の図で横軸はすべて年、縦軸は基本的に EV の台数である。比較のしやすさとレイアウトの関係から図の一部は番号順に並べていないことに注意していただきたい。

5. フィードバック制御

5.1 モデルによる理想的な操作量

式(1)の U , u は時間変数であるが、

$$\dot{y} = Ay, A \equiv k\beta[am - BU^{-1}]u \quad (4)$$

とおいて、 y_0 を初期値としてこれを解くと、

$$y = y_0 e^{At} \quad (5)$$

上式を u について解き、

$$u = \frac{\ln(y/y_0)}{k\beta[am - BU^{-1}]t} \quad (6)$$

が得られる。この u をモデルによる理想的な操作量として用いる。適用の際には調整係数 (λ_1) を導入し、 y は目標値 (y_{sv}) であるときの操作量であるから、

$$u = \lambda_1 \frac{\ln(y_{sv}/y_0)}{k\beta[am - BU^{-1}]t} \quad (7)$$

とする。さらに U の与え方は、Fig.2 に示した目標値 (y_{sv}) から求める値と、観測される状態量 (y) から求める値の 2 種類がある。区別するために前者を u_n (この場合の U を U_n とおく)、後者を u_c とする。

5.2 不確かさに対するロバスト制御

式(1)のモデルのパラメータ変動や誤差、EV の普及が計画通りに進まないことは自明である。そこで式(1)における不確かさを以下で表現する。

$$\dot{y} = k(\beta + \Delta\beta)[am - BU^{-1}]uy + \Delta d \quad (8)$$

$$\Delta\beta = |0.3 \sin(5t)| \quad (9)$$

$$\Delta d = 0.2 y \sin(5t) \quad (10)$$

これらの不確かさに打ち勝つためにロバストな制御則の適用を考える。ロバスト制御則は数多く提案されているが先行研究の成果^{5),6),8)} から、本研究でもスライディングモード制御 (以下 SMC: Sliding Mode Control) を適用する。この制御則は、次式に示すように状態量が目標値に追従しているときの等価操作量 u_{eq} と、目標値から離れたときに作用する切り替え操作量 u_{sw} からなる。

$$u_{smc} = u_{eq} + u_{sw} \quad (11)$$

u_{eq} は状態量が目標値と等しいときにその状態を維持する操作量である。そこで u_{eq} = 式(7)とし、 U_n と U の選択については、シミュレーション結果を比較して誤差が小さい方の U_n を用いる。

u_{sw} は目標値からの偏差 e ($= y_{sv} - y$) とその微分値 de/dt を用いて次式から求める。

$$u_{sw} = e + \dot{e} \quad (12)$$

$\lambda_1 = 1$ として新たに調整係数 λ_2 を導入し、以上をまとめると、

$$u_{smc} = -\lambda_2(|u_{eq}| + |u_{sw}|) \quad (13)$$

5.3 比較のための PID 制御

比較のために一般的な PID 制御を適用する。

$$u_{pid} = Ke + (1/T)\sum e + D\dot{e} \quad (14)$$

K は比例ゲイン、 T は積分時間、 D は微分時間である。

5.4 シミュレーション結果

これまで示した 4 種類の制御則によるシミュレーション結果を Fig.4 ~ Fig.11 に示す。制御則に対応するシミュレーション結果の図の番号と、調整係数の値を Tabel 1 に示す。各 λ の値は試行錯誤の結果である。

各制御則の優劣を評価するために、3 年間のシミュレーション結果における偏差 e の平均二乗誤差 (RMSE: Root Mean Square Error) を Table 2 に示す。

Fig.4 ~ Fig.11 と Table 2 より、不確かさがない場合でも SMC の追従性が良好で、不確かさに対して SMC のロバスト性が発揮されていることがわかる。なお、表中の $u_{smc} \leq 50$ については次章で詳細を述べる。

Table 1 Control parameter and simulation results.

control logic	eq.	without uncertainty	with uncertainty
$u_n(U_n)$	(7)	Fig.4	Fig.8
	$\lambda_1 = 0.713$		
u_c	(7)	Fig.5	Fig.9
	$\lambda_1 = 0.712$		
u_{smc}	(13)	Fig.6	Fig.10
	$\lambda_2 = 0.3$		
u_{pid}	(14)	Fig.7	Fig.11
	$K = 0.5 \quad (1/T) = 0.15 \quad D = 0.1$		

Table 2 RMSE of each control logic.

control logic	without uncertainty	with uncertainty
$u_n(U_n)$	23.8	27.5
u_c	35.1	29.9
u_{smc}	10.9	15.3
$u_{smc} \leq 50$	14.6	14.6
u_{pid}	15.4	25.2

6. 助成金総額の評価

従来の施策による補助金総額 (C_A とする) と、本研究による補助金総額 (C_B とする) の比較をおこなう。2章より設置費用 (購入費+工事費) を一式 500 万円とし、従来の施策による補助金は 2/3, EV 購入補助金は 78 万円である。一方、本研究のコミュニティでは EV2400 台、スタンド 17 か所であるが、EV の台数はシミュレーション結果により異なるので、Fig.11 の結果を用いる。

$$C_A : (\text{購入費} + \text{工事費}) \times 17 \times 2/3 + 2400 \times 78 \\ \approx 19.3 \text{ 億円}$$

$$C_B : (\text{購入費} + \text{工事費}) \times 17 + P \sum X \\ \approx 22.8 \text{ 億円}$$

P は EV 価格 (300 万円), X はシミュレーション結果 (u) による補助率である。u の履歴を Fig.12 に示す。縦軸はパーセント表示であり、たとえば 50% なら補助金は EV 価格の 50% を意味する。問題は、2.5 年後から 60% 以上を要求していることである。u が上昇するのは、Fig.13 に示した U の上昇傾向が EV 購入検討者に対してマイナス要因に働くため、補助金を増やす施策になるためである。一方、事業者にとっては 1.25 年経過しないと式(3)を満足しないので想定された利益はこれ以後となる。

検討のために操作量の上限を 50% としシミュレーションをおこなう。上限がない Fig.6, Fig.10 に対する結果が Fig.14, Fig.15 である。誤差の評価を Table 2 にあわせて示す。上限があっても制御結果に顕著な劣化はみられない。この結果で C_B を計算すると 18.8 億円となり、 C_A よりも少ない金額とな

っている。

政府による 2012 年度補正予算の補助金は 1005 億円である (申請は 2014 年 2 月まで) ⁹⁾。日本の人口約 1 億 2780 万人 ¹⁷⁾ に対して、本コミュニティの 300 万人は 2.3% に相当する。1005 億円の 2.3% は 23 億円となり、本章で算出した約 19~23 億円は相応な金額であるといえよう。

7. おわりに

制御則の操作量を活用して、EV の台数が目標値に追従するようにロバストなフィードバック制御により補助金を調整する施策を提案した。

EV 購入者にとっては、スタンドの設置が増えるかどうかかわからない状況で 78 万円の補助金で EV を購入するか (現状の施策)、補助金は不定となるがスタンドの普及が公設により確定的な状況で EV を購入するか (提案手法) の違いがある。

スタンド事業者にとっては、損益分岐売上高を考慮した EV の普及台数目標値が示されており、かつ、公設により事業参入のハードルが低い施策である。本研究のコミュニティでは、最低でも 1.25 年までは黒字にはならない (式(3), $U \geq 40$) 知見も示した。

今後の課題を 2 点示す。(1) 補助金の増減により消費者の購入意欲がどの程度変化するか定量的なデータがない点である。参考資料として、付録 2 にトヨタ自動車プリウスの販売状況の変化を示す。本モデルでは、 β が U の値が小さくなると需要が増える係数であるが、今回はその影響をなくして u に吸収している。先行研究における u の詳細は「数が増えることで価格が下がり、価格が下がると需要が増える」係数である。本研究ではこの値を補助金の増減として読み換えている。したがって、実際の補助金の計算のために、たとえば 50% という数値ならば、EV 価格の 50% を補助金としたが、その結果が EV 購入検討者の購入につながる否かの定量的判断ができない点である。対応策として、補助金の規定値を設定して、操作量の変化に合わせて増減するという相対的な利用も考えられる。その場合の制御則としてモデル予測制御を検討している。(2) 補助金終了後の挙動である。このモデルで $u = 0$ は $\dot{y} = 0$ となり、消費者の購入意欲を別の観点から考慮してモデル構築から取り組む必要がある。(3) 充電器が 1 台の場合、充電に訪れた EV 所有者のスタンド待ち行列である。充電 1 回に 10~30 分必要であり、先行利用者がいた場合にはその利用者が車に戻ってくるまで待っている必要がある。この状況が広まれば EV 普及に悪影響を及ぼす。待ち行列理論等を考慮した必要なスタンド数の推測が必要である。

謝辞：本研究は科学研究費補助金 (課題番号：23530339) の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 日野, 岡野, 浅岡, 池谷: 充電インフラ検討用次世代自動車交通シミュレータの開発—電気自動車導入に向けた基本解析機能構築—, 電力中央研究所報告, 研究報告 L09009, (財) 電力中央研究所, No.6 (2010)
- 2) D.Yamashita, T.Niimura, H.Takamori, R.Yokoyama: A Dynamic Model of Plug-in Electric Vehicle Markets and Charging Infrastructure for The Evaluation of Effects of Policy Initiatives, IEEE, Power Systems Conference and Exposition, March (2011)
- 3) D.Yamashita, R.Yokoyama, T.Niimura, H.Takamori: A Model for Policy Assessment to Facilitate the Proliferation of Electric Vehicles: For Strategic Evaluations of Infrastructure Investment, Journal of Real Options and Strategy, Vol.4, No.2, pp.143/157 (2011)
- 4) 山下, 吉見, 高森, 横山, 新村: プラグイン電気自動車と充電インフラストラクチャの市場拡大予測モデルと政策効果, 電気学会全国大会, 4-231, 大阪大学 (2011)
- 5) 坂本, 新村, 高森, 小沢: プラグイン電気自動車のインフラモデルにおける助成金のスライディングモード制御, 電気学会産業応用部門大会, 千葉工業大学 (2012)
- 6) 坂本, 新村, 小沢, 高森: 離散時間スライディングモード制御によるプラグイン電気自動車に対する助成金の検討, 第 55 回自動制御連合講演会, 京都大学 (2012)
- 7) D.Yamashita, T.Niimura, H.Takamori, Ti Wang: Plug-in Electric Vehicle Markets and their Infrastructure Investment Policies under Fuel Economy Uncertainty, Int'l Journal of Real Options and Strategy, Vol.1 (2013)
- 8) 坂本, 新村, 小沢, 高森: フィードバック制御による燃料電池自動車の施策に関する検討, 計測自動制御学会論文集, 2014年3月号 (掲載予定)
- 9) 次世代自動車振興センター, 補助金情報コンテンツ一覧 <http://www.cev-pc.or.jp/hojo/index.html>
- 10) 日産リーフマイナーチェンジ http://www.nissan-global.com/JP/NEWS/2012/_STORY/121120-01-j.html
- 11) 電気自動車販売台数 <http://house-to-house.car.coocan.jp/data01.html>
- 12) 次世代自動車振興センター, 補助金申請進捗確認システム <http://eco.cev-pc.or.jp/>
- 13) 日産リーフ <http://ev.nissan.co.jp/LEAF/>
- 14) たとえば, 神奈川県 Web サイト, 充電インフラ情報では県内 156 か所の料金等の詳細が公開されている <http://www.pref.kanagawa.jp/cnt/f4259/pl172221.html>
- 15) チャデモチャージ機能付きおでかけ Card <https://www.eco-odekake.com/>
- 16) 日産電気自動車用急速充電器 <http://ev.nissan.co.jp/QC/>
日産充電設備の実施およびご利用ガイド <http://ev.nissan.co.jp/CHARGE/GUIDE/>
その他参考情報: CHAdEMO 協議会 急速充電器設置・運用に関する手引書 <http://www.chademo.com/wp/japan/>
- 17) 総務省統計局, 統計データ <http://www.stat.go.jp/data/nenkan/01.htm>

付録 1

	人口 ^{A)}	面積 ^{B)}	人口密度 ^{C)}
本稿	300	2,600	1,154
茨城県	300	6,096	492
神奈川県	908	2,417	3,757
千葉県	620	5,082	1,220

A) 人口[万人]: 各県のホームページから

B) 面積[Km²]: 総務省統計局, 統計データ

<http://www.stat.go.jp/data/nenkan/01.htm>

C) 人口密度 (人口[人]/面積[Km²]): 表より著者が計算

付録 2 (著者作成)

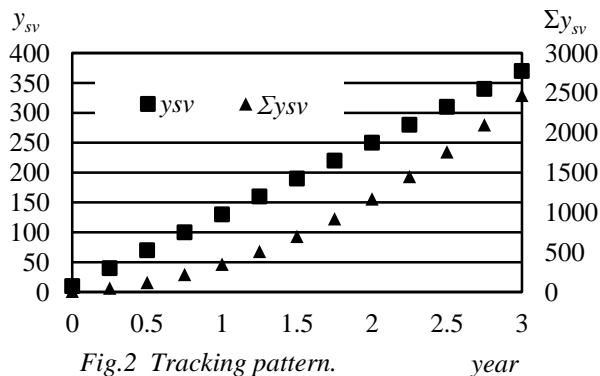
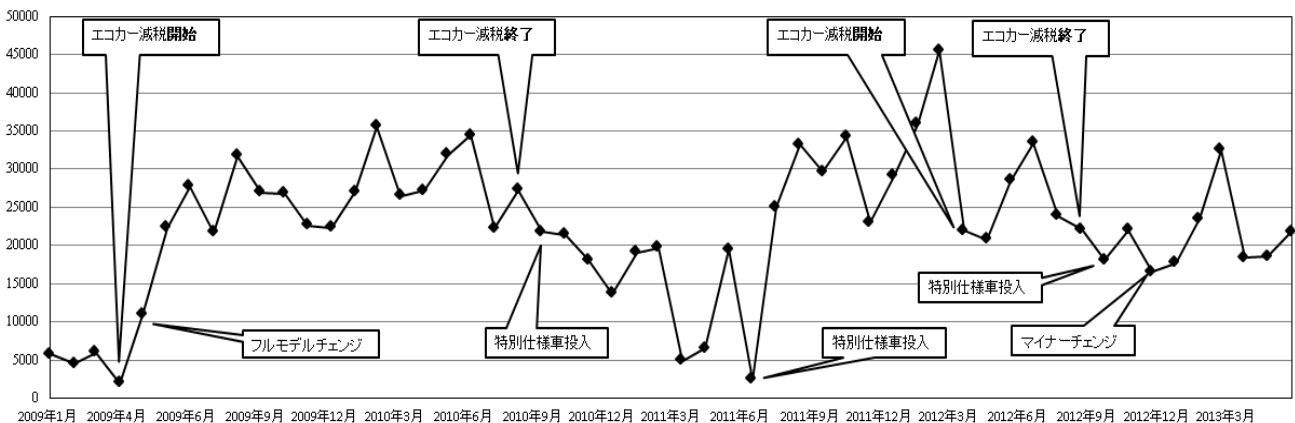


Fig.2 Tracking pattern.

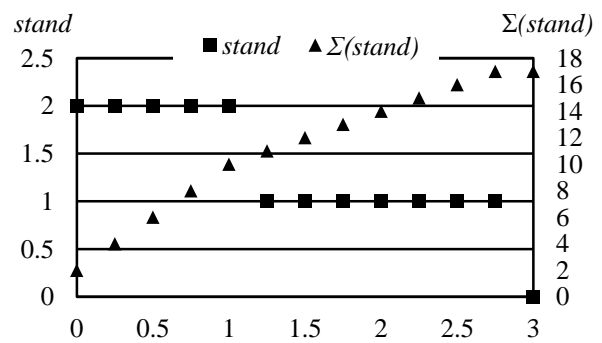


Fig.3 The number of the public facilities of the stand.

