

ベクトル自己回帰モデルによるサイクルシェアリングサービス利用動態の時系列分析

長谷川裕修¹千田真吾²松田真宜³有村幹治⁴

¹正会員 秋田工業高等専門学校准教授 環境都市工学科 (〒 011-8511 秋田市飯島文京町 1-1)

E-mail: hasegawa@akita-nct.ac.jp

²正会員 JX エンジニアリング (株) (〒 231-0062 神奈川県横浜市中区桜木町一丁目 1 番地 8)

³正会員 (株) ドーコン 交通事業本部交通部 (〒 004-8585 札幌市厚別区厚別中央 1 条 5 丁目 4-1)

⁴正会員 室蘭工業大学准教授 大学院工学研究科くらし環境系領域 (〒 050-8585 室蘭市水元町 27-1)

E-mail: arimura@mmm.muroran-it.ac.jp

ワンウェイ型の自転車共同利用 (サイクルシェアリング, 以下 CS) サービスであるポロクルは, 都心部のスムーズな移動環境の形成とまちづくりを一体的に推進することを目的として平成 23 年に事業化された。平成 27 年には延べ利用回数が 50 万回を超え, 札幌市民・来街者の足として定着しつつある。CS サービスをより効率的に運用するためには, 正確な利用動態の把握が必要となる。利用動態に影響を与える要因としては, 通勤・通学など周期的な需要の変動, CS サービスの認知度向上による傾向変動, 降雨や気温といった気象要因など時間的に変動する要因の影響が考えられる。本研究ではポロクル利用動態の時系列的な変動を把握することを目的として, ポロクル利用履歴データと札幌市の気象データを用いてベクトル自己回帰モデルを構築した。分析の結果, ポロクルの貸出回数は日内変動, 隔日での変動, 週間変動による周期性を持ち, 気温の低さ, 降雨の有無, 営業年数が影響していることが明らかとなった。

Key Words : community cycle, time series analysis, vector autoregressive model, bicycle

1. はじめに

近年, 都市部を中心として, 自転車の共同利用事業 (サイクルシェアリング, 以下 CS) が展開されている。CS は配置されている専用の自転車貸出・返却場所となる駐輪ポート間であればどこでも自由に貸出・返却が可能な, ワンウェイ型の自転車共同利用事業である。CS の導入により, 都心モビリティの向上, 放置自転車の抑制, 自動車交通からの転換による CO₂ 排出の削減などの効果が期待されている。

海外と比較すると, 我が国における CS を巡る環境整備は十分ではない。欧州では, 都市部の景観規制を背景に, 街路設備を主とした広告事業と組み合わせた CS 事業が展開されている。また都市部における自転車交通が都市交通計画に位置づけられているため, 自転車走行空間も合わせて整備されている事例も多い。一方, 我が国では商環境の違いから, 欧州のビジネスモデルをそのまま踏襲することはできない。また自転車交通の法的な環境の違いから, 欧州に比べて手軽さや娯楽性, デザイン性等を高めることが難しい。CS の利用方法が市民に浸透していない現況では, 多くの市民やまちづくり主体の理解と, 既存公共交通を含め, 都市全体の計画との連携性を図る必要がある。

CS に係る技術は発展途上にあり, その中で我が国独

自の CS 導入の可能性や安定した運用方法について研究が必要とされている。導入後の安定した運用のためには当然その収益性の確保も重要になる。そのために CS の利用についての予測や, 効率的なポートの配置, 利用システムなど検討する必要がある。この検討が不十分な場合, CS と既存公共交通との相互補完性を確保できない問題や, 特定の貸出返却ポートに自転車が集中する空車・満車問題などが発生することが考えられる。安定した運用, 効率的運用のためにより正確に CS の利用動態を把握することが必要となる。以上を踏まえて本研究は, 札幌市の CS 「ポロクル」利用状況の時系列的な把握を目的として, 「ポロクル」の利用記録データおよび札幌市の気象データを用いて, ベクトル自己回帰モデル (以下 VAR モデル) を構築する。

2. 我が国における CS の現状

平成 20 年の名古屋市「名チャリ」導入以降, 徐々に CS 導入や社会実験を行う都市が増え, 平成 26 年 11 月 1 日時点では 72 都市が CS の本格導入をしている。その事業形態は対象となる都市が導入を行う公設公営, 公設民営, そして完全に民間主導の民設民営などに分かれ, 各都市で様々な方式がとられている。また, 平成 23 年からは毎年, 国土交通省において全国コミュニティサ

イクル担当者会議が開催され、各地の導入事例が報告されている¹⁾。

このように CS の導入が進む一方、CS に係る技術は発展途上にある。現在は多くのポートの管理方式が有人管理ではあるものの、無人化システムの導入が進んでいる。ある程度大規模な事業規模の CS の場合は、非接触式 IC カードや携帯端末等を用いた、個人認証と決済システムからなる ICT の適用がなされており、その利用履歴が蓄積されている。2012 年には、電子錠を直接自転車に取りつけることで管理を簡便化し、駐車用ラックを必要としないシェアリング方式を採用した CS 事業も登場しているほか、外国人観光客への対応として、英語や中国語などの外国語に対応した無人管理システム等も登場している。

一方、近年の交通分野においてはセンサー技術の発達とデータ保管費用の低下を背景に、自動的に記録される交通起因データの蓄積が進んでいる。プローブデータをはじめとして、公共交通機関の乗降履歴を記録する交通系 IC カードデータ等のデバイスにより、多様な交通現象の記録がなされている。前述のとおり、我が国における CS 事業においても、CS 利用者の利用記録が蓄積されている。これらの蓄積されたデータは CS 導入による影響の把握、その可能性の検討や安定した運用のために有用な情報を含むと考えられる。

CS に関する研究としては、高見らが海外の自転車共同利用システムの大規模な導入事例であるロンドンの Barclays Cycle Hire Scheme を対象に、各主体の役割、需要予測の手法、ステーション敷地の選定基準、開業初期時点における利用状況や課題などについて整理している²⁾。羽藤らは柏で実施されたスマートモビリティネットワークを下敷きに考案した常時利用可能な CS システムを対象に、Bowman&Ben-Akiva 型のアクティビティモデルを用いて、都市空間におけるアクティビティパターンの選択行動を分析し、都市構造とアクティビティパターン及びモビリティの特性の関係性を示している³⁾。原らは共同利用自転車システムおよびこれを包含するシェアリングモビリティを対象に、交通サービス利用権市場を構築したうえで、移動・活動データと取引の関連性を分析し、モビリティシェアリングサービスと料金設計の関係性を明示している^{4),5)}。

また、CS の利用記録を用いた研究としては、佐藤らが 2009 年に名古屋市にて実施されたサイクルシェアリングの社会実験を対象に、駐輪場ごとの潜在需要を含む貸出頻度モデルや返却場所選択モデルを構築し、どのような場所にステーションを配置すべきかを分析した⁶⁾。筆者らは札幌市の CS 「ポロクル」利用記録データから、利用プランや利用回数、支払額などのパターンをクラスタリングによって類型化し、複数の異なる利

用者層の存在を確認した。加えてポート間の需給ギャップの存在、平日・休日の利用ポートの違いや自転車の移動パターンの違いも確認している⁷⁾。

本研究はこれらの既存の研究と同様に CS 利用記録データから CS の利用動態の把握を試みるものである。しかし、利用記録データのみでなく気象データも用いた VAR モデルを構築し、利用状況の時系列的な変動の把握を試みたという点に新規性がある。

3. 分析対象

本研究では札幌市の CS 事業「ポロクル」を対象とする⁸⁾。ポロクルは 2009 年に株式会社ドーコンによって行われた社会実験から本格的な実施に至った CS 事業である。札幌市内に 40 か所以上のポートが存在し、200 台以上の自転車が配備されている。現在は札幌都心部を中心として展開しているが、徐々に広域にポートが展開されつつある(図-1)。ポロクルの利用は会員制で、IC カードまたは携帯端末等により個人認証と決済がなされ、各利用者の利用動向が記録される。2011・2012 年度において営業期間は冬期間を含まない 4 月～11 月、営業時間は 7:30～21:00 であった。

(1) データの前処理

本研究ではポロクルの 2011・2012 年度の利用履歴データから、個人を特定できる属性を消去し、貸出・返却の時間及びポートを含むデータセットを用意した。ポロクル利用履歴データ全 243568 レコードから、CS の利用状況を示すデータとして、1 時間ごとの全ポート合計での『貸出回数』データを集計した。一日当たりの『貸出回数』は 7 時台から 20 時台までの 14 個であり、2 年度分で計 6202 個のデータを分析に用いた。加えて、気象が貸出回数に与える影響を検討するために気象庁の気象統計情報より、札幌市の気象データとして 1 時間ごとの気温・降水量のデータを入手した⁹⁾。これらのデータから CS の利用状況の時系列的な変動の把握を試みた。

(2) 『貸出回数』の傾向

VAR モデルによる時系列分析に先立ち、『貸出回数』の時系列変動を確認した。図-2 および 3 はそれぞれ横軸を貸出日時、縦軸を 1 時間当たりの貸出回数として 2011 年・2012 年度の貸出回数の変動を時系列的に示したものである。各年度の貸出回数の変動に注目すると、どちらの年度も全体的に貸出回数は増加傾向にあると考えられる。ただし春先で気温の低い 4 月・5 月と、冬にかけて気温の下がる 11 月の貸出回数は減少している。

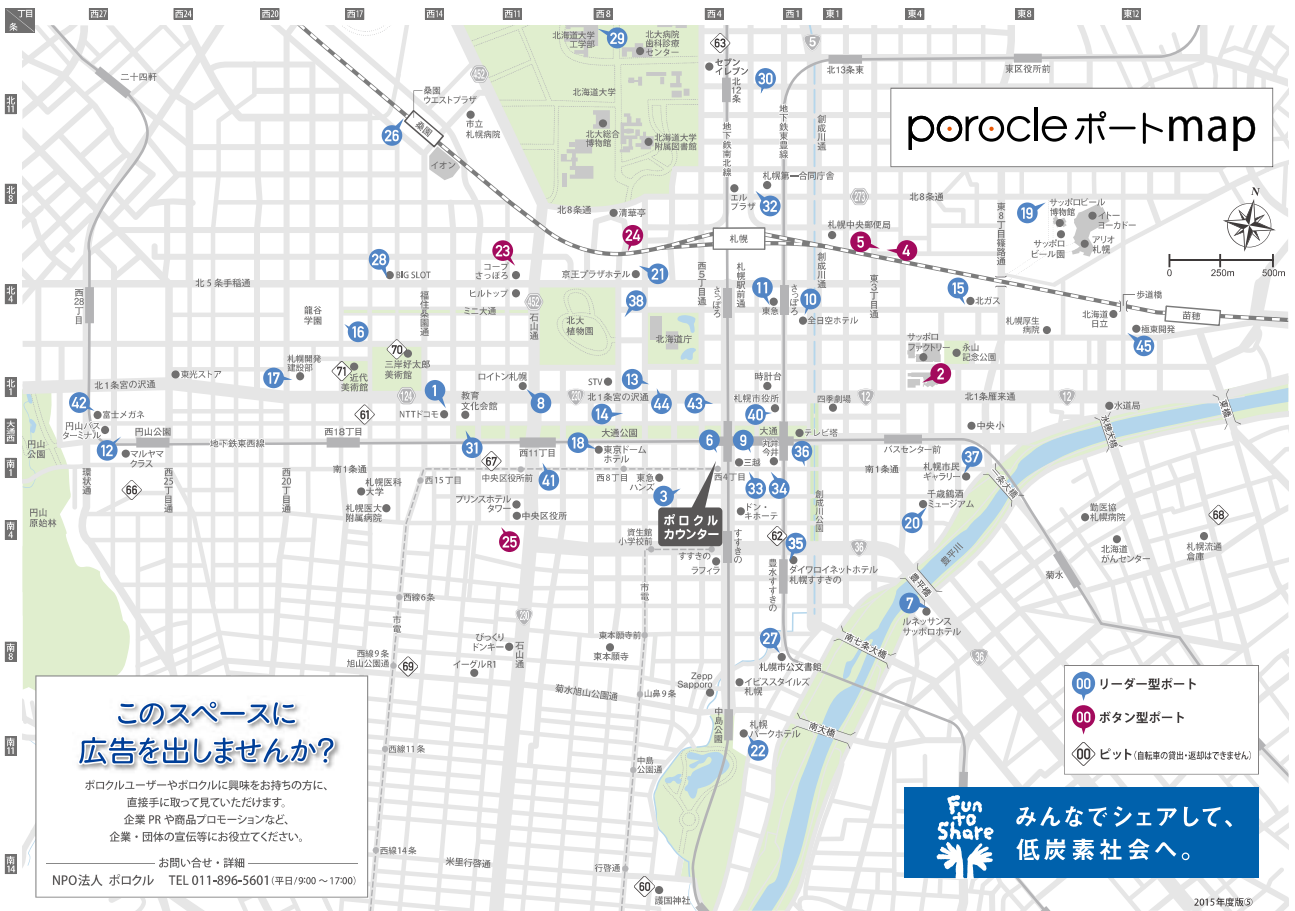


図-1 ポロクルポートマップ⁸⁾

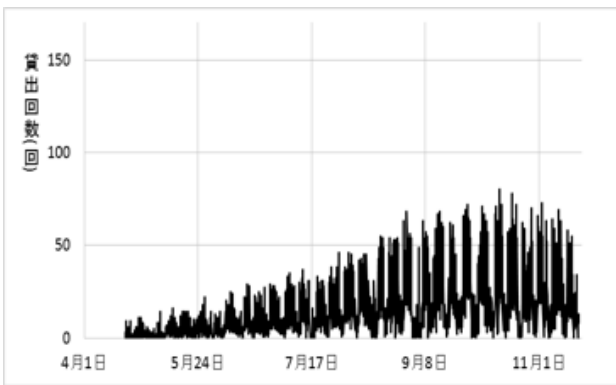


図-2 2011 年度貸出回数の時系列変動

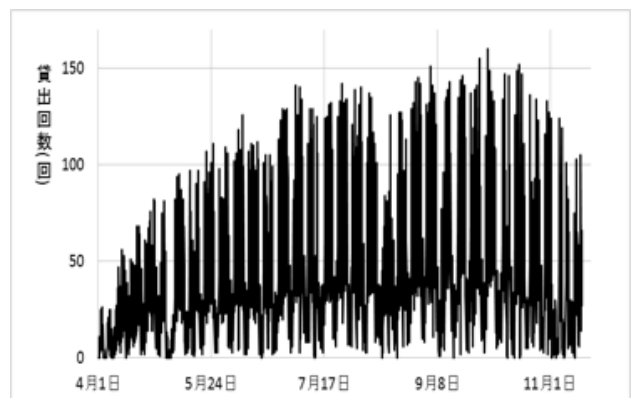


図-3 2012 年度貸出回数の時系列変動

貸出回数は激しく変動しているように見えるが、その変動は波のように上下し、何らかの周期性を持っていると考えられる。この周期性について、自己相関係数を調べることで確認した。自己相関とはある変数のある時点の値と過去の値との間に相関性があるということであり、自己相関係数はその大きさを表す。この自己相関係数が周期性を持っているということはその変数の変動が同じ周期性を有するということになる。10営業日である140期前までの周期性について図-4のよ

うに縦軸を自己相関係数、横軸を期ずれとして確認した。なお、期ずれとは何個前の値であるかを示すものであり、今回の場合1期とは1時間前のデータである。図5に注目すると、自己相関係数が正の値であることから貸出回数は正の相関を持つデータであることがわかる。また4・5期前との相関性、9・10期前の値との相関性が強いことから、日間変動に周期性を持っていること、続いて14期ごとに相関性が強くなっているこ

とから、隔日での変動における周期性、98 期前の値との相関性の高さから、週間変動にも周期性があると考えられる。これは通勤・通学時間や利用者の生活サイクルなどが影響していることが考えられる。

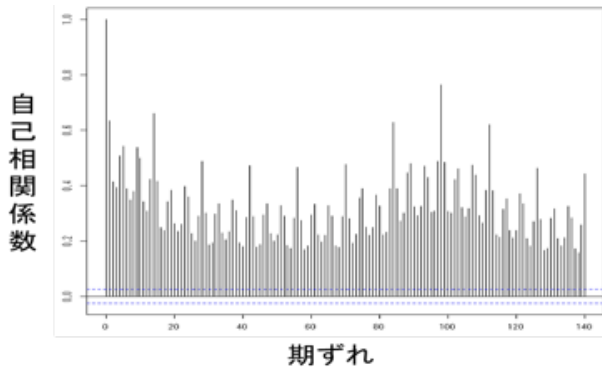


図-4 貸出回数の自己相関係数

(3) 変動要因の検討

以下のように『貸出回数』の時系列的な変動に影響を及ぼすと考えられる要素について3つの変数を選択した。2011年と2012年の貸出回数を比べると明らかに2012年の貸出回数が大きく、最大の貸出回数で比較すると2011年が80回であるのに対し2012年は2倍の160回の貸出回数である。年度が代わってから利用者が増え、貸出回数が増えている、つまり市場規模の拡大を示していると考えられる。『貸出回数』の経年的な増加を考慮するために『営業年数』を2011年度を1、2012年度を2として付値した。

同時点における『貸出回数』と気温・降水量との関係を散布図にて確認した。図-5および図-6は縦軸を貸出回数、横軸をそれぞれ気温・降水量とした散布図である。この散布図を確認すると、気温が5度以下になると、降雨が有るときに『貸出回数』が低下する傾向があることがわかった。この傾向が時系列的な変動にも影響を与えると考え、それぞれの影響を考慮するための変数を作成した。変数は『貸出回数』に負の影響を与える場合を1、それ以外を0として付値したダミー変数を作成し、それぞれを『気温ダミー』・『降水ダミー』とした。

4. ベクトル自己回帰モデルの構築

CSの利用状況を時系列的に把握するためにVARモデルを構築する。VARモデルとは過去の時系列データから未来の値を予測するのに用いるモデルの一つで、自己回帰モデルを多変量に拡張したものである。VARモデルは複数の時系列データを内生変数ベクトルとして

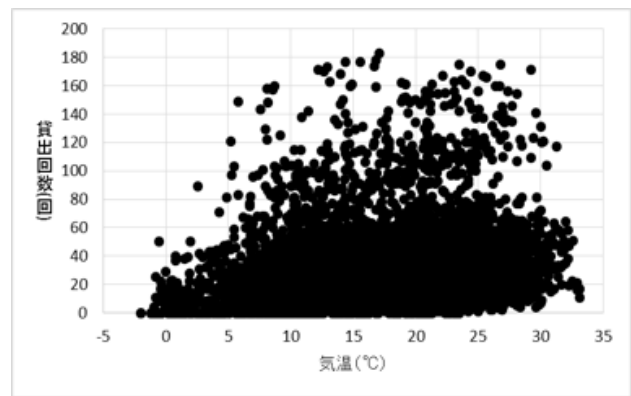


図-5 貸出回数と気温の関係

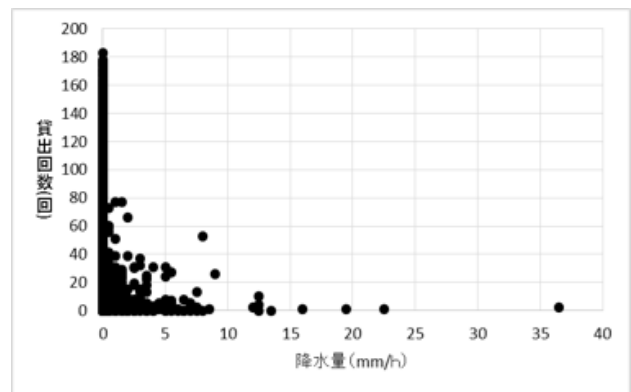


図-6 貸出回数と降水量の関係

用いることで、予測の精度を上げ、変数間の動的な関係を見るのに適したモデルである。(1)式はn変数の内生変数ベクトル y についてVARモデルを構築した式である。ある時間 t の内生変数ベクトル y_t が定数ベクトル c と自身の p 期の過去の値に回帰するモデルとなる。

$$y_t = c + \Phi_1 y_{t-1} + \dots + \Phi_p y_{t-p} + \varepsilon_t \quad (1)$$

ここで、 c は $n \times 1$ 定数ベクトル、 Φ_i は $m \times n$ 係数行列、 ε_t は分散共分散行列 Σ のベクトルホワイトノイズである。VARモデルについての詳細は沖本¹⁰⁾を参照されたい。

本研究ではCSの利用状況を表す『貸出回数』、気温・降雨の影響を考慮する『気温ダミー』・『降水ダミー』、そして『貸出回数』の経年増加を考慮する『営業年数』を用いた。これらの4変数を内生変数ベクトルとしてモデルを構築した。今回のモデルはトレンドという増加・減少などの変動傾向と、定数項で表現されるモデル全体のずれのどちらも考慮するモデルを選択した。何期前の値に回帰したモデルとするのかを決定する期数 p は10営業日である140期を上限として、AICが最小となる140を用いた。

5. モデルの評価

(1) Granger 因果性の検討

Granger 因果性は時系列分析のデータから変数間の因果性の有無を判断することのできる指標として考案されたものである。VAR モデルにおいてはある変数が他の変数へ Granger 因果性を持つか否か、つまり変数が時系列的に予測に有意であるか否かを検定するものである。構築した VAR モデルに対して、検定を行った結果を表-1 に示す。P 値が 5% 以下のとき、その変数は他の変数への因果性を持ち、モデルの予測に有意であることを表し、F 値が大きいくほど、その変数の影響が大きいくことを表す。

表-1 から 4 変数は全てモデルの予測に有意であり、その中でも『貸出回数』が最も影響が大きく、以下『降水ダミー』、『営業年数』、『気温ダミー』の順に影響があることがわかる。Granger 因果性の検定においては瞬時的な因果関係についても検定が行われる。これはその値が直後のモデルの変動に対して因果性を持っているかを検定するものである。瞬時的な因果性を有する変数の変動は直後の予測に影響する。表-1 の右にその検定結果を示す。P 値が 5% 以下のとき、その変数は他の変数への因果性を持つ。今回の検定では全ての変数が瞬時的に他の変数へと因果性を持っているとわかる。このことから変数の変動が短期的にモデル全体に影響しており、長期の予測を行うときには影響が大きくなり、長期の予測は誤差が大きくなると考えられる。

表-1 Granger 因果性の検定結果

	F 値	P 値	P 値 (瞬時的因果性)
貸出回数	11.6	2.2E-16	2.2E-16
気温ダミー	1.5	2.8E-09	2.2E-16
降水ダミー	4.1	2.2E-16	2.2E-16
営業年数	2.2	2.2E-16	2.2E-16

(2) インパルス応答関数の確認

Granger 因果性の検定はあくまでも 1 つの変数がその他全ての変数へと因果性を持つことがわかるのみであり、個別の変数に与える影響については検定できない。ある変数にショックを与えた時の他変数への影響を見る関数としてインパルス応答関数がある。インパルス応答関数は 1 標準偏差のショックをある変数に与えたときの影響をその正負も含めて確認できる関数である。インパルス応答関数を確認することで、その変数が『貸出回数』にどのように影響を与えているのかを

確認する。

図-7・8・9 および 10 はそれぞれ『貸出回数』、『気温ダミー』、『降水ダミー』、『営業年数』にショックを与えたときの『貸出回数』の変動を 20 期の期間においてインパルス応答関数で計算した結果をプロットしたものである。図-7 から、『貸出回数』へショックを与えると正の相関性を持ちながら、周期的に影響が収束することがわかる。これはモデルの中で『貸出回数』に自己相関性及び周期性があることを示している。図-8 および 10 に注目すると、『気温ダミー』や『営業年数』のショックに対し、『貸出回数』は上下に不規則に変動し、その変動が収束していない。このことから 2 変数が短期的にはあまり効果のある変数でないと考えられる。図-9 に注目すると、『降水ダミー』のショックに対し『貸出回数』は瞬時的に低化し、直ちに影響が収束している。このことから『降水ダミー』が直近の『貸出回数』に対して負の影響を持ち、短期的に効果のある変数であることがわかる。

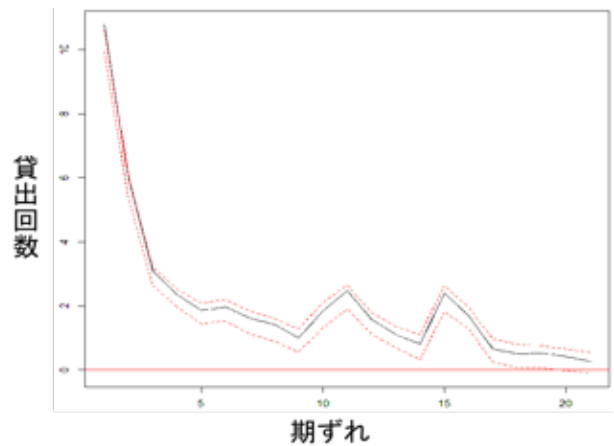


図-7 貸出回数から貸出回数への応答

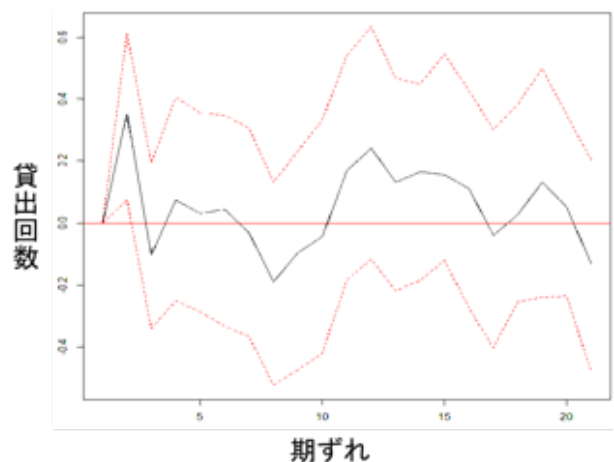


図-8 気温ダミーから貸出回数への応答

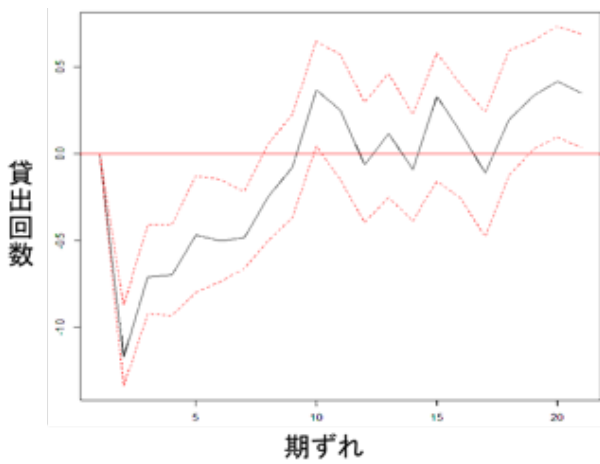


図-9 降水ダミーから貸出回数への応答

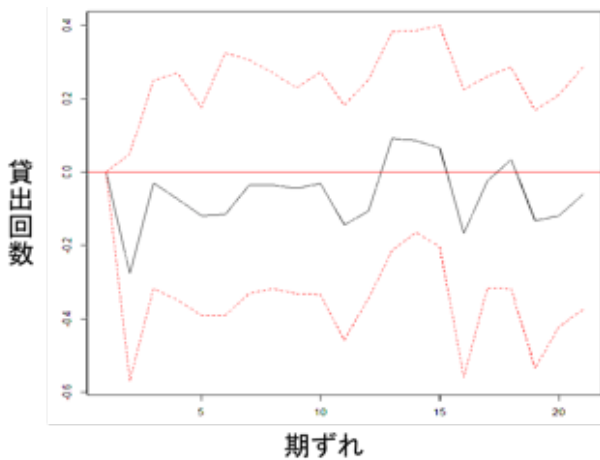


図-10 営業年数から貸出回数への応答

(3) AIC によるモデルの評価

赤池情報量規準 (Akaike's Information Criterion, 以下 AIC と記す) によるモデル選択を援用して, 各変数が予測に有効であることを確認する. AIC は統計モデルの予測の良さを重視するモデル選択基準であり, パラメータ数 k , 最大大数尤度 $\log L^*$ とすると, (2) 式で定義される.

$$AIC = -2 \log L^* + 2k \quad (2)$$

AIC が最小のモデルが予測に最適なモデルである. なお, AIC を含む情報量基準によるモデル選択についての詳細は, 例えば, 久保¹¹⁾などを参照されたい.

ここで, 4. で構築した全変数を用いた VAR モデルを VAR1, 『気温ダミー』『降水ダミー』『営業年数』をそれぞれ除いたモデルを順に VAR2, VAR3, VAR4 とする. また, 時系列分析によって利用状況の把握を試みるのが有効な手段であることを示す一つの判断材料として, 同じ変数データを用いた回帰モデルも比較対象

に加える. 比較に用いる回帰モデルは目的変数を『貸出回数』, 説明変数を『気温ダミー』, 『降水ダミー』, 『営業年数』とする線形回帰モデルである.

表-2 にそれぞれのモデルの AIC を示す. VAR1~4 と回帰モデルの AIC を比較すると VAR1~4の方が小さい. このことから, 回帰モデルよりも VAR モデルの方が『貸出回数』の変動を予測するのに適当であると判断できる.

また, VAR1~4 の AIC を比較すると, VAR1 が最も AIC が小さく, 『貸出回数』の変動を予測するのに適当である. 『降水ダミー』を除いた VAR3 の AIC が 2 番目に小さい. これより, Granger 因果性では比較的強い因果性を持つ『降水ダミー』であるが, 予測に与える影響は小さな変数であるといえる. 一方, VAR2, VAR4 の AIC は大きい. 『営業年数』, 『気温ダミー』は, Granger 因果性の検定結果では他変数への因果性が比較的弱い変数であるが, 長期的に影響を与える変数であり, 因果性としては弱くとも予測に与える影響は大きかったのではないかと考えられる.

表-2 各モデルの AIC

モデル名	AIC	使用変数
VAR1	-5399	『貸出回数』『気温ダミー』『降水ダミー』『営業年数』
VAR2	10874	『貸出回数』『降水ダミー』『営業年数』
VAR3	-3854	『貸出回数』『気温ダミー』『営業年数』
VAR4	31773	『貸出回数』『気温ダミー』『降水ダミー』
回帰モデル	57239	目的変数:『貸出回数』, 説明変数:『気温ダミー』『降水ダミー』『営業年数』

(4) 残差の確認

構築したモデルの予測値と実測値との差である残差に注目する. 『貸出回数』の残差に大きさや位置の偏りがある, あるいは残差が自己相関性を持つ場合には, 検討しきれていない要素が残差として析出されている可能性がある. 図-11 は貸出回数の残差の時系列変動を表し, 図中の横軸が日時を, 縦軸が残差の大きさを表している. 図-11 では 2011 年度に比べて 2012 年度の方が残差の変動が大きくなっている. これは年度ごとの利用者層の変化, 利用状況の変化によるものと考えられ, 『営業年数』では表現しきれていなかった

ことが考えられる。

続いて残差の自己相関性を検討する。図-12 は 140 期前までの貸出回数残差の自己相関係数を表し、図中の横軸は何期前つまりは何時間前のデータとの相関であるかを表し、縦軸は自己相関係数である。そして破線は自己相関が 0 であるという帰無仮説の有意水準 5% での棄却点である。図-12 をみるといくつかの値が破線を超えてしまっているため、自己相関は 0 とは言えない。特に大きく超えているのは 84 期前、98 期前、112 期前の付近である。これはおよそ 6 日前、7 日前、8 日前のデータである。このことから貸出回数の 1 週間ごとの周期性を考慮しきれなかったのではないかと考えられる。



図-11 貸出回数の残差

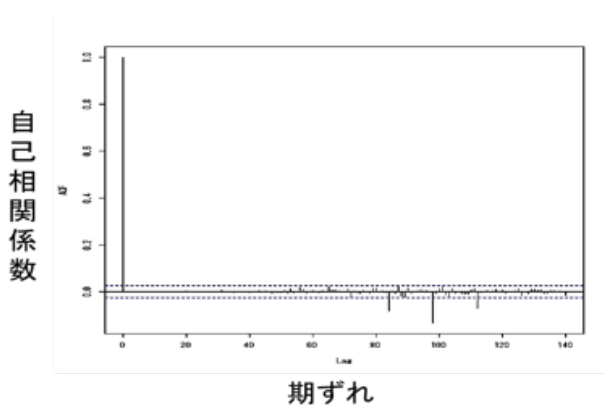


図-12 貸出回数の残差の自己相関係数

6. おわりに

本研究では札幌都心部で展開されている CS 事業「ポロクル」の利用記録及び気象庁の過去の気象データを用いてベクトル自己回帰モデルを構築し、利用状況の時系列的な変動の把握を試みた。結果、CS の貸出回数は日内変動、隔日での変動、週間変動による周期性を持ち、気温の低さ、降雨の有無、営業年数が影響していることが明らかとなった。このことから CS の利用が

気象条件や CS に対する認知度などに影響されているのではないかと考えられる。

今回構築したモデルの残差に注目すると、検討しきれなかった要素が残差の偏りや自己相関となって析出している可能性が残った。その特徴から検討しきれなかった要素は貸出回数の週間変動の周期性であると考えられる。その他、祝日や休日の利用状況の変化、突発的な事件・事故・災害などが考えられる。今後より正確な利用状況の把握を行うためにはこれらの要素にも検討が必要になる可能性がある。しかし、モデルが複雑になりすぎてしまえば意味がないため、その影響の大きさや発生頻度も考慮して、より最適なモデルの構築が求められる。

この結果は各ポートでの利用状況の分析やより発展したモデルの構築などに役立てることができると考えている。最終的に各ポートの利用状況の把握や短期的な予測などに展開することで、より効率的な CS 事業の運用に役立てることができると考えている。

謝辞： 本研究の一部は、(一財)日本建設情報総合センターの研究助成を受けて実施したものである。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省: 第 5 回全国コミュニティサイクル担当者会議, http://www.mlit.go.jp/toshi/toshi_gairo_fr_000018.html, 閲覧日: 2016-04-20.
- 2) 高見淳史, 大森宣暁, 青木英明: ロンドンの自転車共同利用システム「Barclays Cycle Hire Scheme」の計画と現状, 都市計画報告集, Vol. 10, pp. 55-60, 2011.
- 3) 羽藤英二, 藤井敬士, 原祐輔: 都市生活パターンに着目した自転車共同利用システムの評価, 土木計画学研究・講演集, Vol. 40, 2009.
- 4) 原祐輔, 羽藤英二: 自転車共同利用オークションサービスの実装とそのマイクロストラクチャーに関する研究, 土木計画学研究・講演集, Vol. 39, 2009.
- 5) 原祐輔, 羽藤英二: 共同利用型交通サービスにおけるネットワーク上での予約システムの提案, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 67, No. 5, pp. 509-519, 2011.
- 6) 佐藤仁美, 酒井良輔, 三輪富生, 森川高行: コミュニティサイクルシステムの利用実態とステーション配置に関する研究, 土木学会論文集 D3(土木計画学), Vol. 69, No. 5, pp. 563-570, 2013.
- 7) 丸山翔太, 松田真宜, 長谷川裕修, 有村幹治: データマイニングアプローチによるコミュニティサイクル利用動態の抽出, 土木学会論文集 D3(土木計画学), Vol. 70, No. 5, pp. 671-680, 2014.
- 8) 特定非営利活動法人 ポロクル: ポロクル, <http://porocle.jp/>, 閲覧日: 2016-04-20.
- 9) 国土交通省気象庁: 過去の気象データ検索, <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>, 閲覧日: 2016-04-20.
- 10) 沖本竜義: 経済・ファイナンスデータの計量時系列分析, 朝倉書店, 2010.
- 11) 久保拓弥: データ解析のための統計モデリング入門, 岩波書店, 2012.

(2016. 4. 22 受付)