

モバイル通話データによる異常検知:セネガルにおけるインフラ整備への示唆 Anomaly Detection with Mobile Communication Log in Senegal

濱岡 豊*, 赤松 直樹†, 竹内 亮介‡, 末野 正訓‡, 劉 蜀ミン‡, 蒲 英‡, 韓 貞烈‡, 邱 騰箴‡
Hamaoka, Yutaka*, Akamatsu, Naoki†, Ryosuke Takeuchi‡, Masanori Sueno‡, Shumin Liu‡, Ying Pu‡,
Zhenlie Han‡, and Tengchen Chiu‡

1. はじめに

Prahard[1]は、一日 2\$以下で生活する者が 40 億人に達することを指摘した。このように所得ピラミッドの底にいる人々のことを"Bottom of the Pyramid (BoP)"と表現し、市場としての規模の大きさを指摘した。このような、いわゆる発展途上国については、いかに経済発展を促進するかという観点から当該国や支援を行う政府の役割が重視されてきた。これに対して、Prahard [1]は、多国籍企業や NGO が、BoP 市場において成果を挙げていること、さらにそれを通じて、貧困などの問題解決に貢献できることを豊富な事例とともに紹介した。彼は BoP における消費者が携帯電話でつながっていることを指摘し、同書でもインドの農村にインターネットでつながれたパソコンを設置することによって、戦略的な農業生産、出荷を可能とする **e-Choupal** の事例が紹介されている[1] [2]。このように BoP における情報通信技術の導入は重要な課題である[3]。中でも携帯電話は、急速に普及し、2009 年時点では、2011 年に世界の 40 億人が利用すると予測されていた[2]。

フランスのテレコム会社 Orange 社は、2013 年にコートジボアールの発展に寄与する知見を得るために、同国における匿名化モバイル通話データを研究者に公開するという "Data for Development" を開催した。同社は2014 年には、セネガルに関して同様の試みを行った¹。本研究の目的は、このデータを用いて同国のインフラ整備の方向性を示すことである。

2. 関連研究と研究の方向性

2.1 関連研究

2012 年に行われた Data for Development (D4D) challenge では、コートジボアールにおけるモバイル通信データ(通話および SMS)が研究者に提供され、その結果が論文集に収録されている[4]。多様な論文が投稿されているが、社会と経済の開発、データ・マイニング、移動と交通、健康と疫学に分類されている。それらのうち、本研究と関連する研究については「地域の特性と通話データ[5] [6] [7] [8]」、災害、疫病、気温などの「イベントと通話データの関係[9] [10] [11]」などがある。

2.2 本研究の方向性

コートジボアールのモバイルデータは、地域的な要因、気候、各種の事件などによって影響を受けることが示されて

いる。さらに、その結果を同国の発展のために用いる可能性も示唆されている。

通信データからは様々な情報が得られるが、本研究ではイベント等との関連に注目する。異常検知は、セキュリティ、障害・故障診断、詐欺の検出といった実務的要請によって発展してきた[12]。これに対して本研究の対象となるのは、BoP 諸国であり、地域別の天候や農作物の価格といったデータの入手も極めて困難である。よって、本研究ではリアルタイムでの異常検知ではなく、1 年間のデータを分析し、その地理的、時間的な発生状況を把握する。これによって、インフラの整備の方向性に示唆を与えることを目的とする。

3. データとその概要

3.1 データ

分析に用いたのはセネガルにおける Orange 社の Call Detail Records (CDR)データである [13]。3 つのデータが提供されたが、本研究ではアンテナ間の交信量データを用いる。これは、2013 年 1 月から 12 月の間の 1 時間毎のアンテナ間の通話量を記録したものである。通話(call)と SMS について、アンテナからの出数 outgoing、入数 incoming に分けられているので 4 つの時系列データとなっている。なお、同社はセネガルにもっとも早く参入した通信会社であり、モバイル市場で 2012 年現在で 58.3%の市場シェアを有している[14]。このため、このデータによって同国のモバイル通信の動向をある程度把握できると考えられる。

このデータには 1666 のアンテナが含まれているが、そのうち 52 カ所については、通話量が記録されておらず、8 カ所については、70 時点以下しか通話が記録されていなかった。後述するように、本分析では 70 時点以上のデータが必要となるため、これらを分析から除外し、1614 のアンテナにおける通話および SMS の量を分析に用いた。

なお、データは交信のあった時点、アンテナしか含まれていないが、分析にあたっては、通話がない時間、アンテナ間について通話 0 というデータを発生させた。このため、データは 22.8 ギガレコードとなった。ただし、以下の分析ではアンテナ毎に入数 incoming、出数 outgoing を合計した値を用いる。

分析には、統計パッケージ R およびライブラリ bigmemory, biglm, vars を用いた[15]。

3.2 基本的な通話パターン

通話、SMS の 24 時間の変化パターンを示す(図 1)。時間帯毎に 1614 アンテナ×365 日分のデータが存在するので、箱ひげ図で示した。また、変動が大きいため縦軸は対数で示し

¹ D4D プロジェクトホームページ
<http://www.d4d.orange.com/en/home>

*慶應義塾大学商学部 Faculty of Business and Commerce, Keio University

†千葉商科大学 Chiba University of Commerce

‡慶應義塾大学大学院商学研究科 Graduate School of Business and Commerce, Keio University

た。これをみると、はずれ値はあるものの、概ね朝は少なく午後から夜にかけて多くなる傾向があることがわかる。通話については20時頃、SMSについては22時頃にもっとも活発に行われている。

一年間の通話、SMSの発信量(図2)および気候(図3:上段)をみると、通話よりもSMSの方が変動が大きいことがわかる。通話については10月以降が比較的多くなっているのに対してSMSは、雨期にあたる7月から9月にかけて多くなっている。この他、SMSについては年末年始の他、いくつかのスパイクがある。2013年における休日や主要な出来事についてもデータを収集した[14]。最大の電話発信量はムハマドの聖誕祭前夜(1月23日20時)に記録されていた。一方、SMSは3月16日に最大量が記録されたが、特別なイベント、事件はみあたらなかった。

天候については、NOAAによって同国内12カ所の気温、降水量、風速、風向が公開されている。それらのうち、雨量20mm/h、風速20m/s以上、気温40度以上の発生時点を示す(図3:上段)。前述のように乾期である4月前後には40度を超える日が多く、7月以降の雨期には20mmを超える雨量が観測されている。

4. 分析方法

通話やSMSには一日のうちに基本的なパターンがあることがわかった。本研究では、この基本的なパターンを時系列モデルで説明し、これからの乖離が大きい場合を「異常anomaly」と考えることとする。

本研究で用いるデータは4つの時系列データであるため、ベクトル自己回帰VAR(Vector Auto Regression)モデル[16]を適用する。

このモデルは次式で表される。

$$\log(1+Y_t) = \sum_{j=1}^l \beta \log(1+Y_{t-j}) + \gamma X$$

ここで Y_t は被説明変数行列であり、本研究では各アンテナの時点 t における通話、SMSの入り数、出数となる。これらは変動幅が大きく、0の場合もあるため推定の際には $\log(1+\text{通話量})$ を用いた。1はラグ変数であり、1から1時間前までの通話が t 時点の通話に影響することを意味する。本研究では24時間までとした。

X はこれらに影響を与える外生的な変数行列である。天候については、12地点でしか観測されておらず、13州のうち2州については観測されていなかった。また、2013年には顕著な疫病や大規模な事件なども発生していなかった。よって、本研究では、簡単に入手可能な時間帯、月、曜日、祝日ダミー変数(14の祝日のいずれかであれば1,そうでなければ0)のみを用いることとした¹。

前述のように24時間での通話パターンは比較的安定している。また一年間をみると年末年始のSMSの増加は祝日ダミー、雨期などは各月ダミーで吸収できると考えられる。さらに、BoP諸国では詳細なデータを入手することは困難

であり、入手容易な変数に限定することは、分析の実用性を高めるためにも重要な点である。

「異常」については、次式の相対残差の絶対値が2より大きいものとした。なお、 \hat{Y}_t はVARモデルでの推定値を用いて計算した内挿値である。

$$r_t = \frac{\log(1+Y_t) - \log(1+\hat{Y}_t)}{\log(1+Y_t)}$$

5. 分析結果

5.1 VARモデルの推定結果

VARモデルを1614のアンテナ毎に適用し、パラメータを推定した。用いた変数は限られているが、モデルのあてはまりは良好であり、平均の R^2 は、出通話数0.898、入通話数0.874、出SMS数0.716、入SMS数0.730となった。SMSの方が R^2 が低いのは、通話よりも変動が大きいためであろう。

比較的あてはまりのよかった、アンテナ9の推定結果を示す(表3)。休日ダミー(Holiday dummy)は通話については有意ではないが、SMSについては有意となっている。

曜日ダミー(Day of the week dummy)は日曜日を基準としているが、通話、SMSとも月曜、火曜のパラメータは負で有意であり、日曜日よりも少ないことがわかる。なお、土曜に関して、通話は日曜よりも少ないが、SMSについては多いようである。月ダミーについては8月が多いことを示している。

時間帯については、最も通話が少ない午前4時を基準としたが、通話については19-20時、SMSについてはこれよりも遅い時間帯にピークがあることがわかる。

5.2 異常値の分類

このようにして得られた推定値と観測値を用いて前述の相対残差を計算した。なお、以下では、もっとも敏感に変化するSMS(出数)に注目する。その結果、96,532の異常値が検出された。これらを観測値と内挿値の大小、同時帯で検出された異常値が100箇所(アンテナ)より多いか否かで全国、局地的に分類した(表1)。

まず、増加型の異常値は356件しかないのに対して、減少型の異常値は96,176件ある。これらの大部分は本来ならば通話がされているべき時間帯、場所であるはずなのに、実際はゼロになっているものであった。これは天候や回線の故障などによって通話が不可能となったものと考えられる。

このことを確認するために、12カ所での気象状況(図3上段)、各アンテナでの異常値の発生(図3下段)、発生した場所(図4)を図示した。図3の縦軸は観測ポスト、アンテナの緯度であり、横に見ることによって、各アンテナで異常が発生したタイミング、縦軸を見ることによって、異常が局地的なのか全国的なのかを視覚的に把握できる。

3月末の全国的異常値発生時について、図3上段の気象状況と比較すると、気温が40度を超える期間の直前に起きているように見える。また、7月-8月にも全国で異常値が発生しているが、この時期には雨が降っていることがわかる。なお、図3下段で中心あたりに水平に異常値が観測されているのは、同じアンテナが故障しているのではなく、

¹ VAR分析実行時点では気候データを入手できていなかった。入手できたのはD4Dプロジェクト終了後であり、規約によりCDRデータを破棄した後でありVAR分析に組み込むことはできなかった。

Dakar 近辺に多くのアンテナが設置され、それらに短期間で異常値が発生しているためである。

このように、異常の多くは局地的であるが、13,921 件は100 箇所以上のアンテナで同時に異常が検出されている。その殆どは減少型であり、大規模な回線故障だと推測される。一方で、全国的に増加した 30 件は、2013 年の 3 月 29 日 7:00 と 7 月 6 日 10:00 に集中していた。セネガルについての情報を収集したが[14]、その原因は不明であった。

各アンテナで観測された異常値の地理的分布を示した(図 4)。これをみるとセネガル南部地域で異常値が多く発生していることがわかる。世界銀行のデータベースによると、これら地域では火災リスクが高いとされている¹。異常が観測されたアンテナ上位をみると(表 2)、最も異常が多かったのは、Sedhiou 州 Bounkiling 地区のアンテナであり、1947 回観測され、うち 1940 回が減少型であった。二番目も同州の Goudomp 地区におけるアンテナであった。

この他、異常値が多く観測された Kedougou 州、Tambacounda 州、Kaolack 州、Kolda 州は、セネガルの国内でも比較的経済開発が遅れた地域である。このような地域が災害そのものや、それによる通信途絶によるリスクに直面しているわけである。これら地域のインフラ強化が必要である。

6. まとめと考察

本研究では、D4D プロジェクトで提供されたモバイルデータに対して、月、曜日、時間帯など入手しやすい説明変数を用いた VAR モデルを適用し、それからのはずれ値として異常値を検出した。

分析の結果得られた異常値を内挿値と比べた結果、減少型の異常値が大部分であり、災害などによる障害によると推測された。また、同時点に異常値が生じたアンテナ数の大小によって、地域的か局所的かを分類したところ、局所的なものが大部分だが、全国的に広がったものも見いだされた。これらを図示することによって、異常が経済発展の遅れた地域で発生していることを見いだした。

このように、通信データからの異常値検出によって、通信インフラが被害を受け、さらにその強化が必要な地域を明らかにすることができた。異常検出は先進国におけるリアルタイムでの適用が重視されてきたが、BoP 諸国における長期でのインフラ整備にも利用可能であろう。

なお、本研究ではすべてのデータを用いて推定したが、定常パターンが推定されているので、この結果を用いて数時間先の通話量の予測を行い、回線の太さを決定するといった利用も可能であろう。

本研究はモバイルデータの利用に新たな視点を導入し、社会的にも重要な知見が得られたと考えるが、残された課題もある。

一つ目は、多様なイベントとの関連づけである。地理的、時間的な分布および通信が途絶したという点から、多くの異常の原因は故障や天候などによる障害だと推測するが、この点については入手可能な地点だけでも、天候データと

比較する必要がある。また、増加型の異常値も存在した。これらも何らかのイベントによるものと考えられる。我々も、2013 年のセネガルにおける事件などの情報を収集したが、異常値に対応する事件などを見いだすことはできなかった。

ただし、入手しやすい変数のみを用いることは、情報の入手可能性が困難な BoP 諸国での、この手法の利点でもある。実際、異常が最も多く観測された Sedhiou 州では天候が観測されていない。

二点目は分析手法である。本研究ではアンテナ毎に VAR モデルを適用した。これは各アンテナの通話量が独立であると仮定していることになる。ただし、このデータはアンテナ間の交信量を記録したものであり、アンテナ間の通話量には相互依存性がある。空間的相互作用を取り入れた分析を行うことが必要である[17]。ただし、それを行うにはデータ量が大きく、時間方向に集計するなどの工夫が必要になる。

謝辞

This Data was made available by ORANGE / SONATEL within the framework of the D4D Challenge.

匿名の 2 名のレフリーおよびエディタからは有益なコメントを頂いたことにも感謝する。

参考文献

- [1] Prahalad, C. K. *The Fortune at the Bottom of the Pyramid: Eradicating Poverty Through Profits*. Wharton School Publishing (スカイライト コンサルティング (訳)『ネクスト・マーケット 「貧困層」を「顧客」に変える次世代ビジネス戦略』英治出版,2005 年), 2004.
- [2] Prahalad, C. K. *The Fortune at the Bottom of the Pyramid: Eradicating Poverty Through Profits, Revised and Updated 5th Anniversary Edition*. Wharton School Publishing (スカイライト コンサルティング (訳)『(増補改訂版)ネクスト・マーケット 「貧困層」を「顧客」に変える次世代ビジネス戦略』英治出版,2010 年), 2009.
- [3] Tarafdar, M., Anekal, P. and Singh, R. Market development at the bottom of the pyramid: examining the role of information and communication technologies. *Information Technology for Development*, 18, 4 (2012), 311-331.
- [4] Blondel, V. e. a. *Mobile Phone Data for Development*. NetMob 2013 <http://perso.uclouvain.be/vincent.blondel/netmob/2013/D4D-book.pdf>, 2013.
- [5] Andris, C. and Bettencourt, L. M. A. *Development, Information and Social Connectivity in Cote d'Ivoire*. City, 2013.
- [6] Morales, A. J., Creixell, W., Borondo, J., Losada, J. C. and Benito, R. M. *Understanding ethnical interactions on Ivory Coast*. City, 2013.
- [7] Hui, Y., Liu, M. and Hui, P. *Analysis of New Strategies for Resources Allocation and Infrastructure Development in Côte d'Ivoire by Mapping Telecommunication Densities*. City, 2013.
- [8] Wu, W., Cheu, E. Y., Feng, Y., Le, D. N., Yap, G. E. and Li, X. *Studying Intercity Travels and Traffic Using Cellular Network Data*. City, 2013.
- [9] Fajebi, A. and Brecke, P. *Impacts of External Shocks in Commodity-Dependent Low-Income Countries: Insights from mobile phone call detail records from Cote D'Ivoire*. City, 2013.
- [10] van den Elzen, S., Blaas, J., Holtén, D., Buenen, J.-K., van Wijk, J. J., Spousta, R., Miao, A., Sala, S. and Chan, S. *Exploration and Analysis of Massive Mobile Phone Data: A Layered Visual Analytics approach*. City, 2013.
- [11] Gavrić, K., Brdar, S., Čulibrk, D. and Crnojević, V. *Linking the Human Mobility and Connectivity Patterns with Spatial HIV distribution*. City, 2013.
- [12] 山西健司 データマイニングによる異常検知. 共立出版 2009.
- [13] de Montjoye, Y.-A., Smoreda, Z., Trinquart, R., Ziemlicki, C. and

¹ WorldBank Senegal Dashboard:Natural Hazard
http://sdwebx.worldbank.org/climateportalb/home.cfm?page=country_profile&CCCode=SEN&ThisTab=NaturalHazards

Blondel, V. D. D4D-Senegal: The Second Mobile Phone Data for Development Challenge. <http://arxiv.org/abs/1407.48852014>.
 [14] 赤松直樹, 邱騰箴, 韓貞烈, 劉蜀ミン, 蒲英, 末野正訓, 竹内亮介 and 濱岡豊 セネガルにおけるモバイルコミュニケーション:先行研究のサーベイとセネガル概観. 三田商学, 59, 1 (2015), 掲載予定.
 [15] R_Development_Core_Team R: A language and environment for

statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria., City, 2014.
 [16] 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.
 [17] Anselin, L., Gallo, J. L. and Jayet, H. SPATIAL PANEL ECONOMETRICS. Springer-Verlag, City, 2008.

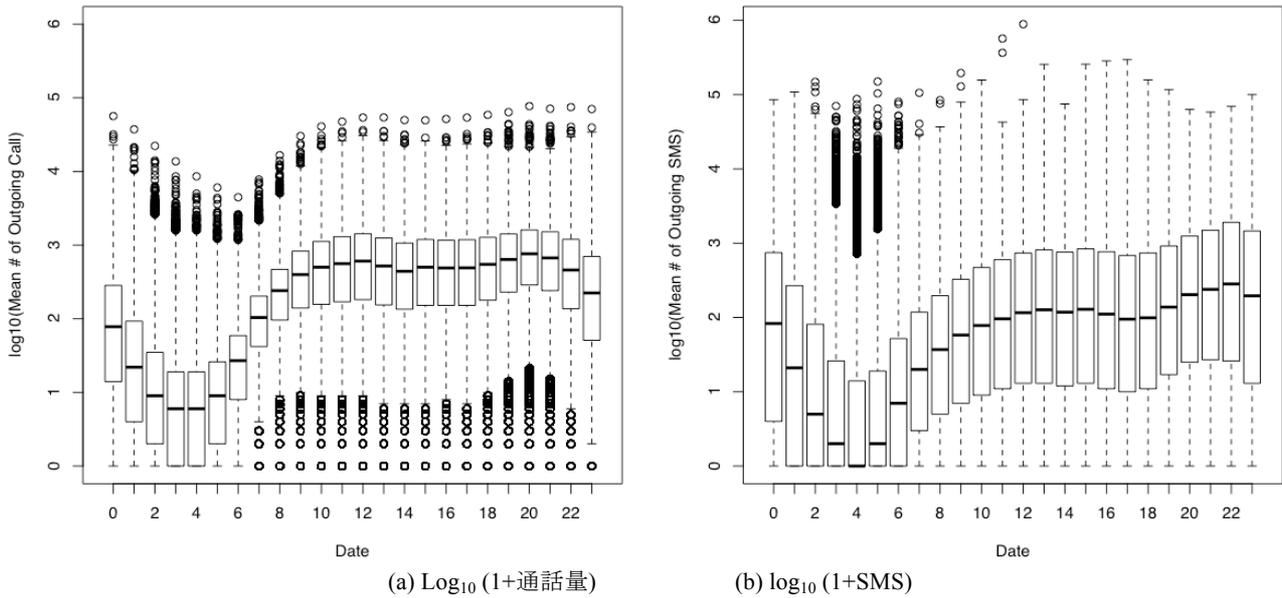


図 1 一日の時間帯毎の通話と SMS 送信量(箱ひげ図)

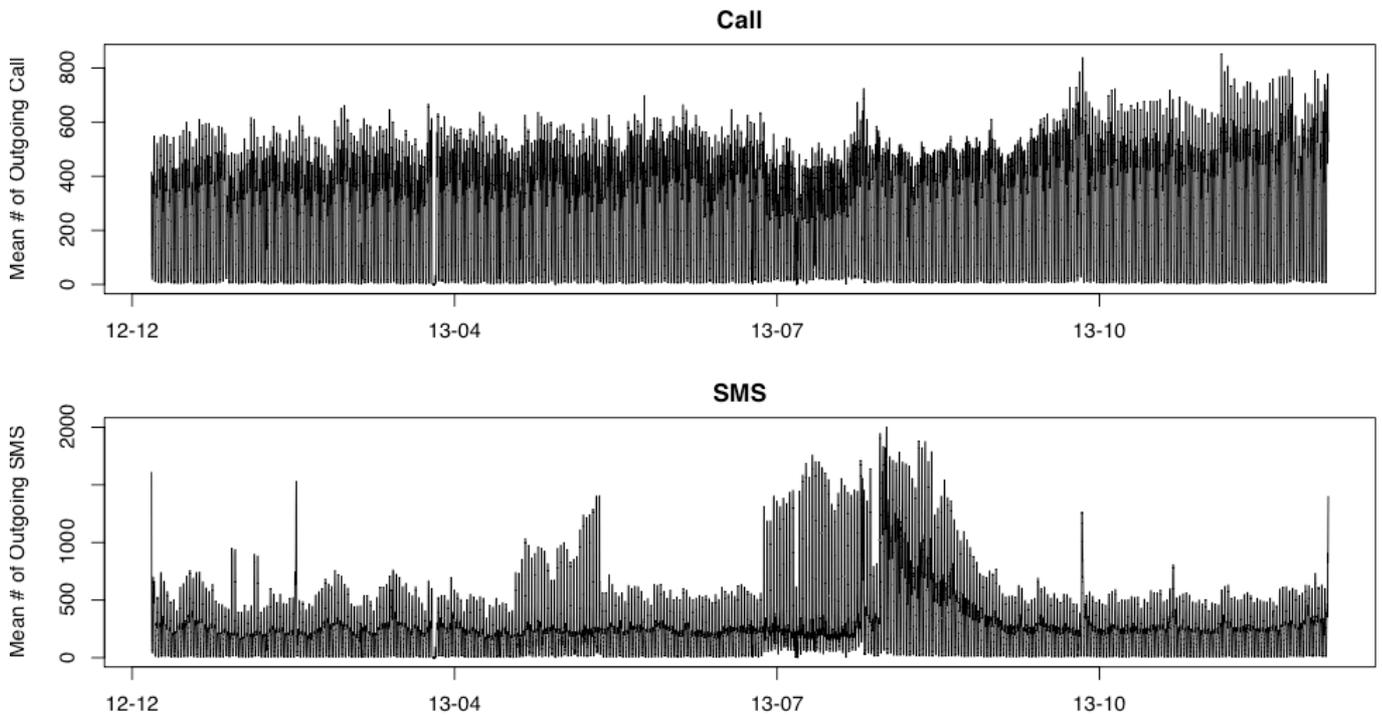
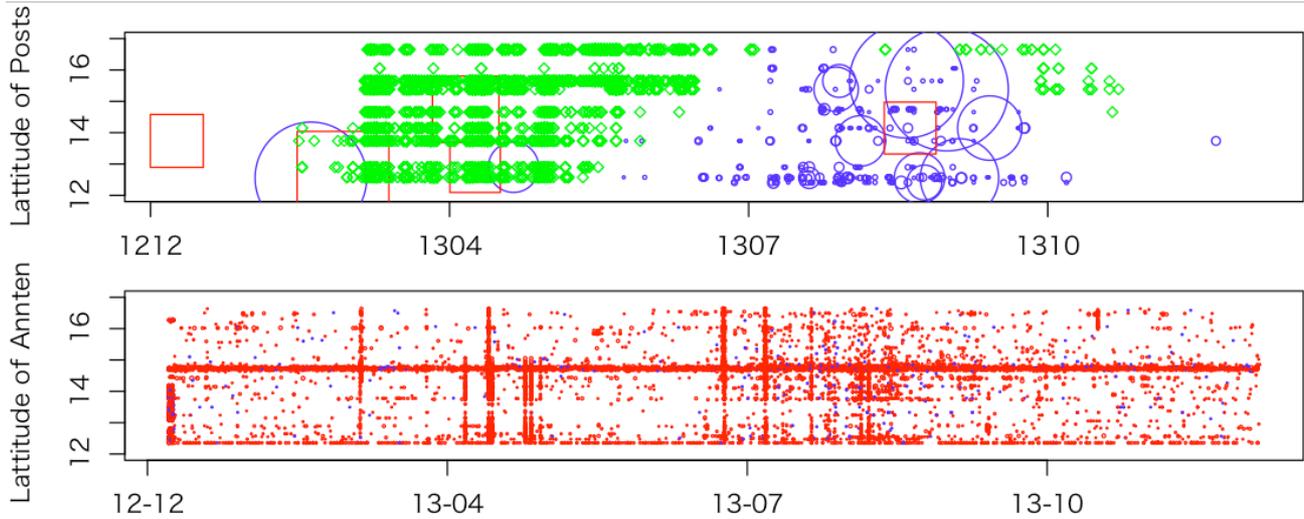


図 2 1 年間の全アンテナ平均通話量の変動(上段:通話、下段:SMS)

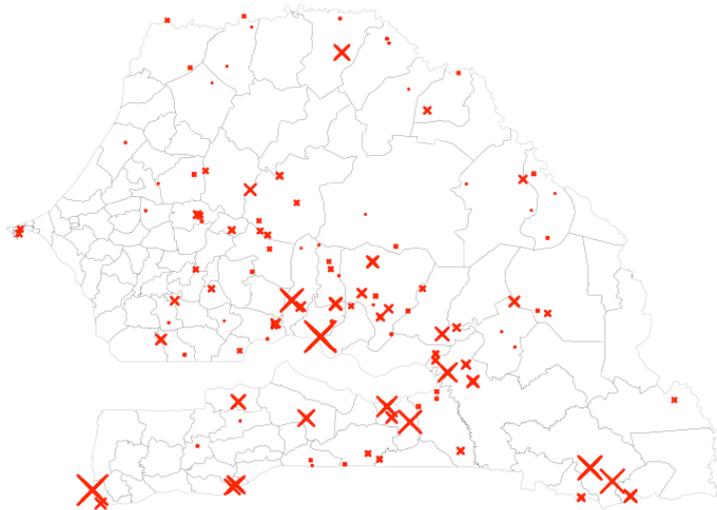


注)上段:気象について:縦軸は観測ポストの緯度。出所)http://www7.ncdc.noaa.gov/CDO より作成。

青○:雨量 20mm 以上、赤□:風速 20m/s 以上、緑◇:気温 40 度以上。図形の大きさは観測された気象の激しさに比例する。

下段:異常値: 赤:期待値<実測、青:期待値>実測。煩雑になるので相対誤差の絶対値>3 以上のみを示した。

図3 12の気象観測ポストでの極端な現象(上段)と各アンテナの異常値(SMS 出数)発生状況(下段)



注)(a) x の大きさは観測された異常値の大きさに比例する。

図4 異常値の地理分布

| | 減少型 (Observed < Fitted) | 増加型 (Observed > Fitted) | 合計 |
|-------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------|
| 局地的 (Local) | 82,285 | 326 | 82,611 |
| 全国的 (National) | 13,891 | 30 | 13,921 |
| 合計 | 96,176 | 356 | 96,532 |

表2 異常値が多く観測されたアンテナ

| Rank | Antenna No. | # of Anomalies | | | Region | Department | Arr |
|------|----------------|----------------------|----------------------|------|-------------|------------|------------|
| | | Observed < Fitted | Observed > Fitted | Sum | | | |
| 1 | 1174 | 1940 | 7 | 1947 | Sedhiou | Boukiling | Boghal |
| 2 | 1177 | 1733 | 2 | 1735 | Sedhiou | Goudomp | Djibanar |
| 3 | 1624 | 1651 | 4 | 1655 | Kedougou | Kedougou | Bandafassi |
| 4 | 1380 | 1384 | 0 | 1384 | Tambacounda | Koupendoum | Kouthiaba |
| 5 | 890 | 1381 | 1 | 1382 | Kaolack | Nioro | Wack |
| 6 | 1296 | 1374 | 2 | 1376 | Kolda | Medina | Yoro |

表3 アンテナ9での推定結果の例(Vector自己回帰モデル)

| | | Log (1+ incoming Call) | | | Log (1+ Outgoing Call) | | | Log (1+ incoming SMS) | | | Log (1+ Outgoing SMS) | | |
|--|------------------------------|------------------------|-----------|-------|------------------------|-----------|-------|-----------------------|----------|------|-----------------------|----------|------|
| | | Estimate | t-value | | Estimate | t-value | | Estimate | t-value | | Estimate | t-value | |
| Lagged variables | ln_call_o.l1 | 3.35E-01 | 11.10 | *** | 1.98E-01 | 6.62 | *** | 1.24E-01 | 2.90 | ** | 8.10E-02 | 1.98 | * |
| | ln_call_i.l1 | 4.15E-01 | 13.40 | *** | 5.46E-01 | 17.76 | *** | 2.99E-01 | 6.81 | *** | 3.46E-01 | 8.24 | *** |
| | ln_sms_o.l1 | 1.87E-02 | 1.28 | | 5.48E-03 | 0.38 | | 2.03E-01 | 9.81 | *** | 9.74E-02 | 4.91 | *** |
| | ln_sms_i.l1 | 9.80E-02 | 6.11 | *** | 1.14E-01 | 7.15 | *** | 2.62E-01 | 11.53 | *** | 3.70E-01 | 17.04 | *** |
| const | | 7.36E-01 | 9.02 | *** | 6.88E-01 | 8.51 | *** | 5.95E-01 | 5.15 | *** | 6.80E-01 | 6.14 | *** |
| trend | | -2.51E-05 | -1.33 | | -2.57E-05 | -1.37 | | 1.21E-05 | 0.45 | | -1.69E-05 | -0.66 | |
| Holiday dummy | fg.holiday | -3.76E-03 | -0.17 | | -4.78E-03 | -0.22 | | 7.87E-02 | 2.51 | * | 1.10E-01 | 3.64 | *** |
| Day of the week dummy (Base=Sunday) | fg.dwk_Mo | -4.68E-02 | -3.04 | ** | -4.25E-02 | -2.78 | ** | -1.09E-01 | -4.99 | *** | -1.12E-01 | -5.36 | *** |
| | fg.dwk_Tu | -5.93E-02 | -3.99 | *** | -5.44E-02 | -3.70 | *** | -7.12E-02 | -3.38 | *** | -6.89E-02 | -3.42 | *** |
| | fg.dwk_We | -3.33E-02 | -2.25 | * | -3.04E-02 | -2.08 | * | -1.21E-02 | -0.58 | | -2.49E-03 | -0.12 | |
| | fg.dwk_Th | -2.12E-02 | -1.44 | | -1.92E-02 | -1.31 | | -2.33E-02 | -1.12 | | -1.54E-02 | -0.77 | |
| | fg.dwk_Fr | -5.67E-02 | -3.85 | *** | -4.57E-02 | -3.13 | ** | -2.95E-02 | -1.41 | | -5.55E-03 | -0.28 | |
| | fg.dwk_Su | -3.78E-02 | -2.53 | * | -4.59E-02 | -3.10 | ** | 5.89E-02 | 2.79 | ** | 6.51E-02 | 3.22 | ** |
| Month dummy (Base=February) | fg.mn_Jan | -1.67E-02 | -0.71 | | -1.09E-02 | -0.46 | | 2.97E-02 | 0.88 | | 9.49E-03 | 0.30 | |
| | fg.mn_Mar | -1.42E-02 | -0.61 | | -1.09E-02 | -0.47 | | -2.91E-02 | -0.88 | | -2.52E-02 | -0.80 | |
| | fg.mn_Apr | 4.68E-02 | 1.37 | | 4.44E-02 | 1.31 | | -4.76E-02 | -0.99 | | -2.56E-04 | -0.01 | |
| | fg.mn_May | 7.53E-02 | 1.64 | | 7.17E-02 | 1.58 | | -1.80E-02 | -0.28 | | 4.51E-02 | 0.73 | |
| | fg.mn_Jun | 9.30E-02 | 1.59 | | 8.72E-02 | 1.50 | | -3.41E-02 | -0.41 | | 3.41E-02 | 0.43 | |
| | fg.mn_Jul | 1.06E-01 | 1.48 | | 1.05E-01 | 1.49 | | 2.40E-02 | 0.24 | | 1.15E-01 | 1.19 | |
| | fg.mn_Aug | 1.40E-01 | 1.64 | | 1.47E-01 | 1.73 | | 5.63E-02 | 0.46 | | 2.17E-01 | 1.87 | |
| | fg.mn_Sep | 1.37E-01 | 1.39 | | 1.39E-01 | 1.42 | | -5.57E-02 | -0.40 | | 1.17E-01 | 0.87 | |
| | fg.mn_Oct | 1.69E-01 | 1.49 | | 1.72E-01 | 1.54 | | -8.93E-02 | -0.56 | | 8.35E-02 | 0.55 | |
| | fg.mn_Nov | 1.82E-01 | 1.43 | | 1.79E-01 | 1.42 | | -1.32E-01 | -0.73 | | 7.33E-02 | 0.43 | |
| | fg.mn_Dec | 2.83E-01 | 1.82 | | 2.27E-01 | 1.47 | | -1.35E-01 | -0.61 | | 1.10E-01 | 0.52 | |
| | Hour dummy (Base=4:00:00) | fg.h_0 | -2.52E-02 | -0.59 | | -1.21E-02 | -0.29 | | 3.71E-01 | 6.14 | *** | 2.76E-01 | 4.77 |
| fg.h_1 | | 8.93E-02 | 2.21 | * | 1.26E-01 | 3.15 | ** | 4.54E-01 | 7.92 | *** | 3.62E-01 | 6.60 | *** |
| fg.h_2 | | 1.55E-01 | 4.20 | *** | 1.73E-01 | 4.72 | *** | 4.17E-01 | 7.94 | *** | 3.63E-01 | 7.23 | *** |
| fg.h_3 | | 1.59E-02 | 0.51 | | 2.21E-02 | 0.71 | | 2.47E-01 | 5.57 | *** | 2.23E-01 | 5.25 | *** |
| fg.h_5 | | -2.89E-01 | -9.30 | *** | -3.15E-01 | -10.22 | *** | -3.52E-01 | -7.97 | *** | -3.34E-01 | -7.90 | *** |
| fg.h_6 | | -4.39E-01 | -11.88 | *** | -4.25E-01 | -11.60 | *** | -1.34E-01 | -2.56 | * | -1.58E-01 | -3.16 | ** |
| fg.h_7 | | 4.48E-01 | 11.10 | *** | 3.51E-01 | 8.78 | *** | 4.07E-01 | 7.11 | *** | 4.26E-01 | 7.78 | *** |
| fg.h_8 | | 8.95E-01 | 21.38 | *** | 8.07E-01 | 19.45 | *** | 5.19E-01 | 8.75 | *** | 5.20E-01 | 9.15 | *** |
| fg.h_9 | | 8.23E-01 | 18.84 | *** | 7.53E-01 | 17.39 | *** | 4.62E-01 | 7.46 | *** | 4.63E-01 | 7.81 | *** |
| fg.h_10 | | 5.41E-01 | 11.97 | *** | 4.88E-01 | 10.87 | *** | 2.65E-01 | 4.14 | *** | 2.58E-01 | 4.21 | *** |
| fg.h_11 | | 3.83E-01 | 8.28 | *** | 3.50E-01 | 7.64 | *** | 2.43E-01 | 3.71 | *** | 1.96E-01 | 3.12 | ** |
| fg.h_12 | | 3.52E-01 | 7.42 | *** | 3.41E-01 | 7.23 | *** | 2.66E-01 | 3.95 | *** | 2.67E-01 | 4.14 | *** |
| fg.h_13 | | 3.19E-01 | 6.51 | *** | 2.96E-01 | 6.09 | *** | 3.64E-01 | 5.24 | *** | 3.33E-01 | 5.00 | *** |
| fg.h_14 | | 2.74E-01 | 5.51 | *** | 2.45E-01 | 4.97 | *** | 3.88E-01 | 5.50 | *** | 3.27E-01 | 4.84 | *** |
| fg.h_15 | | 4.24E-01 | 8.52 | *** | 4.00E-01 | 8.09 | *** | 4.65E-01 | 6.59 | *** | 4.51E-01 | 6.67 | *** |
| fg.h_16 | | 3.02E-01 | 6.02 | *** | 2.82E-01 | 5.68 | *** | 3.27E-01 | 4.61 | *** | 3.00E-01 | 4.42 | *** |
| fg.h_17 | | 3.20E-01 | 6.41 | *** | 2.94E-01 | 5.93 | *** | 3.30E-01 | 4.66 | *** | 2.95E-01 | 4.36 | *** |
| fg.h_18 | | 3.40E-01 | 6.81 | *** | 2.94E-01 | 5.94 | *** | 2.99E-01 | 4.23 | *** | 2.53E-01 | 3.73 | *** |
| fg.h_19 | | 3.59E-01 | 7.29 | *** | 3.11E-01 | 6.37 | *** | 4.13E-01 | 5.91 | *** | 3.88E-01 | 5.81 | *** |
| fg.h_20 | | 3.77E-01 | 7.88 | *** | 3.12E-01 | 6.59 | *** | 5.05E-01 | 7.45 | *** | 4.46E-01 | 6.88 | *** |
| fg.h_21 | | 2.33E-01 | 5.01 | *** | 1.51E-01 | 3.27 | ** | 4.21E-01 | 6.40 | *** | 3.74E-01 | 5.92 | *** |
| fg.h_22 | | 1.34E-01 | 2.96 | ** | 4.96E-02 | 1.11 | | 4.85E-01 | 7.56 | *** | 4.20E-01 | 6.84 | *** |
| fg.h_23 | | -2.55E-02 | -0.58 | | -7.10E-02 | -1.62 | | 3.54E-01 | 5.66 | *** | 2.89E-01 | 4.82 | *** |
| R2 | | | 0.880 | | 0.880 | | 0.792 | | 0.803 | | | | |
| adjR2 | | 0.878 | | 0.878 | | 0.788 | | 0.800 | | | | | |

注)24 時間分のラグ変数も導入したが、煩雑になるので表示していない。Log は自然対数。

***:1%水準で有意 ** :5%水準で有意 * :10%水準で有意