首都直下地震の徒歩帰宅者のトイレに関するエージェント・シミュレーション

The Multi-Agent Simulation for Toilet Shortage when Earthquake directly hits Tokyo Area

大和田拓也*[1]　梅原英一*[1]
Takuya Ohwada　Eiichi Umehara
*[1] 東京都市大学　Tokyo City University

要旨: 首都直下型地震の際に、国道 246 号線を徒歩帰宅する避難者が多く発生する。その際に、トイレ不足が懸念されている。中央防災会議は地震発生後13時間に関する世田谷区内の国道246号でのトイレ不足を試算したが、個々の地域ごとの詳細な不足数は試算してない。そこで本研究では、中央防災会議の前提に従い駅、ファミレス、コンビニ、ガソリンスタンドのトイレを母点にしたボロノイ図を作成し、個々のトイレの利用状況をシミュレーションした。その結果、全地域でトイレ数が大幅に不足することが分かった。またトイレ待ち時間が 30 分以内となるように、コンビニの携帯トイレ備蓄量を試算した。

キーワード: 首都直下地震、避難シミュレーション、マルチ・エージェント・シミュレーション、ボロノイ図

Abstract: When an earthquake that directly hits Tokyo area occurs, there will be many evacuees to come back home on foot on the Route 246. In such cases, the government, are concerned about the toilet shortage. Central Disaster Management Council estimated the toilet shortage on Route 246 in the Setagaya Ward. However they did not estimate the detailed number of shortage on each individual region. Therefore, first, in accordance with the premise of Central Disaster Management Council, we developed a Voronoi diagram whose kernel points are toilets of stations, family restaurants, convenience stores and gas station and simulated usage of each toilet. As a result, we found that the number of toilets is insufficient significantly in all regions. Moreover, we estimated the portable toilet stockpiles in convenience stores, as toilet waiting time was within 30 minutes.

Keywords: Earthquake directly hitting Tokyo area, Evacuation Simulation, Multi-Agent Simulation, Voronoi diagram

1. はじめに

首都直下型地震の際に、国道 246 号線を徒歩帰宅する避難者が多く発生する。その際に、トイレ不足が懸念されている。中央防災会議は地震発生後 13 時間に関する世田谷区内の国道 246 号でのトイレ不足を試算したが、個々の地域ごとの詳細な不足数は試算してない。そこで本研究では、中央防災会議の前提に従い駅、ファミレス、コンビニ、ガソリンスタンドのトイレを母点にしたボロノイ図を作成し、個々のトイレの利用状況をシミュレーションした。その結果、全地域でトイレ数が大幅に不足することが分かった。そこで、トイレ待ち時間が 30 分以内となるように、コンビニと駅の携帯トイレ備蓄量を試算する。

2. 帰宅行動シミュレーションに基づくトイレ需給

中央防災会議「首都直下地震避難対策等専門調査会」[1]は、シミュレーション結果に基づき首都直下地震発生時の帰宅に関する問題点を指摘した。阪神・淡路大震災において被災した人々が最も困ったのは食料でも衣服でもなく、トイレ不足の問題であった。トイレの不備による問題は、生活環境が汚染されるだけでなく、衛生上の問題や健康問題といった二次災害にも発展する。首都直下地震では膨大な避難者・帰宅困難者等が発生すると試算しており、避難所において避難所生活者のみならず帰宅困難者等による休憩者で混雑することが予想される。

通過者によるトイレ需要回数のシミュレーション結果から、徒歩行動中は代謝が激しくなり、通常よりも排泄頻度および排出量が高まると仮定し、非睡眠時間中[16 時間／日]に平均 8 回［回/人/日］トイレに行くも

のとした。徒歩帰宅者等は既設トイレも利用すると考えられるので、既設トイレ数は次のように推計した。コンビニ･ガソリンスタンドのトイレの数については、コンビニ等各社のホームページから店舗数を把握し､1店舗当たりトイレ1基として算出した。主なコンビニ各社へのヒアリングによれば、都区部内のほとんどのコンビニでは、現状では1店舗当たりトイレ1基との回答があった。ファミリーレストラン棟は1店舗に4期（男女各2基）あるものとした。公衆便所は、主に公園系の便所（公園、児童遊園）とそれ以外の便所（街頭、駅前等）に分類される。様々な状況に応じるために、(A）避難所のトイレを使用しない場合、(B）避難所のトイレのうち使用可能なものの半数を使用した場合（C）避難所のトイレのうち使用可能なものすべてを使用した場合に分けて算出した。また、トイレの需給の試算上の前提条件として以下を挙げている。・既設トイレ以外は、発災直後にすぐには調達できない可能性があるが、中央防災会議では、災害後すぐに設置され、使用できるようになるものとする。ただし、携帯トイレ・簡易トイレの使用に際しては現実的に考えると個室などプライバシーを確保できる空間が必要となる。そこで、中央防災会議では、断水で使用できない避難所、公衆便所、コンビニ等のトイレの個室を利用して、携帯トイレ・簡易トイレを使用することによりプライバシーを確保するものとする。

①　東京23区全体でのトイレ需給バランス

帰宅行動シミュレーションの「基本ケース」を対象にして、発災後経過時間毎（1時間毎）に、供給可能回数とトイレ需要回数との比較により、トイレ需給バランスを求めた。トイレ需要に対しては、災害時に設置される災害用トイレ・帰宅支援ステーションのトイレ・避難所既設トイレ等で対応することになる。しかし、避難所においては避難所生活者によるトイレ需要があるため、トイレ需給を考える際には、徒歩帰宅者と避難所生活者の両方を考慮する必要がある。

①　東京23区全体での集計

東京23区全体でのトイレ需給バランスを見ると､避難所のトイレを使用できないとした場合では、多くの区で需要を満たすことができないことがわかった。

発災から6時間後までの需要、供給を集計すると、避難所のトイレが使用できない場合には、すべての区において、需給に対して供給が不足する。また、避難所のトイレが半数使える場合では、12区、避難所のトイレがすべて使える場合では8区で、需給に対して供給が不足する。

②　国道246号線のトイレ需給バランス

東京23区全体での集計は､需給を均して集計したものであり、実際の災害時には沿道付近に徒歩帰宅者の需要が集中する。このため、徒歩帰宅者の需給バランスの試算を行った。

世田谷区の国道246号線では、沿道から200m範囲内のトイレ供給量は区部全体の7割弱となる。この結果､区全体での集計に比べ､さらに不足量が拡大する。(A)避難所トイレを使用しない場合では､不足状態が発災から28時間継続する。また、避難所トイレをすべて使用できるケースでも15時間継続する。

結論として、徒歩帰宅者の集中により混雑が激しくなる国道246号線沿線ではさらにトイレ不足が拡大する可能性が高いことがわかった。このためには、徒歩帰宅者が多い地域を中心に災害用トイレの備蓄計画の立案が必要と考えられる。

3. ボロノイ図によるトイレを母点とした地域の算出

ボロノイ図を利用することで、トイレを母点とする地域を算出する。この結果を図1に示す。本シミュレーションでは、この地域単位にシミュレーションを行った。対象とするトイレは、中央防災会議[1]の前提に従い、駅、コンビニ、ガソリンスタンドとファミリーレストランとした。

中央防災会議では、駅のトイレは個数に含まれていない。しかし、世田谷区内の国道246号は東急田園都市線とほぼ同じ道のりを通っている。このため本研究では、世田谷区内の東急田園都市線の駅である二子玉川駅・用賀駅・桜新町駅・駒沢大学駅・三軒茶屋駅・池尻大橋駅の計6駅のトイレ個数を追加した。なお、駅のトイレの数は実際の個数とした。トイレの個数は実際の駅のトイレに行き確認した。

国道246号に面しているトイレは全部で39地域あることを、地図と実測で確認した。よって、この39ヶ所の地域を基準に考える。一方、国道246号に面していないが500m以内にあるトイレは53ヶ所あった。これらのトイレは、徒歩帰宅者が利用可能とした。

大規模集客施設や公的施設、オフィス等のトイレの利用も出来る可能性がある。しかしながら、ここの点を解決するためには施設の所有者との交渉が必要となる。本研究では、これらのトイレは利用不可能とした。ただし、行政は出来る限り施設の所有者と交渉を進めるべきであると考える。

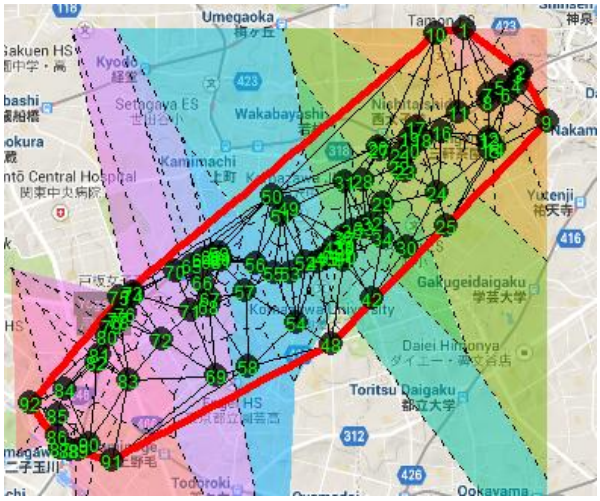

図１　国道 246 号半径 500m のボロノイ図

4. 分析の方法

本研究では artisoc を利用することにより、シミュレーションを行い震災が起きた際に、どのくらいの人たちがトイレを利用するのかを調べる。

4.1. 前提条件

表 1 に示した地域ごとに、池尻大橋から二子玉川までの国道 246 号線のトイレ需要数を池尻大橋駅から三軒茶屋駅間といった、駅から駅を一地域として 5 つの地域ごとにトイレ需要数を算出した。区間は、ボロノイ図を参考に開始駅に一番近いボロノイ領域を始点ノードに終了域に近い駅を目標ノードとした。

表１　シミュレーションの条件

地域	距離	歩行時間	1step 当たりの経過時間
池尻大橋―三軒茶屋	1.44km	約 18 分	約 18 秒
三軒茶屋―駒澤大学	1.2km	約 15 分	約 15 秒
駒澤大学―桜新町	1.7km	約 21 分	約 17 秒
桜新町―用賀	1.0km	約 12 分、	約 12 秒
用賀―二子玉川	2.1km	約 26 分	約 26 秒

中央防災会議[1]によると、トイレに行く頻度はより、歩行避難者は 2 時間に 1 回のペースでトイレに行くとなっている。また、中央防災会議[1]に従い、基本的に歩行速度は 1.3m/s とし、トイレにかかる時間は 1 回 3 分間とした。

シミュレーションは、2 時間相当の step 数を動かした。最初の 1 時間相当は、エージェントを作成し続けた。

（１）歩行エージェントの生成

シミュレーションが開始されると、歩行エージェントが始点ノードに作成される。歩行エージェントの属性としてトイレ経過時間を持つ。トイレ経過時間は 2 時間を秒に変換し、0 から 7200 の間でランダムに設定される。また、1step 毎に一定数の歩行エージェントを作成した。作成されるエージェント数は、以下の式である。

作成エージェント数＝人数(人)×歩行速度(m/s)×1step の時間(s)/ 距離(m)

（２）エージェントの歩行

歩行エージェントはノードとリンクで形成される道路ネットワーク上を目標ノードに向かって移動する。歩行経路はダイクストラ法を利用した。

（３）トイレエージェント

歩行エージェントは、トイレ経過時間が 7200 以上になりかつ、トイレ分岐ノードにいるエージェントはトイレに行く。これは、自身を削除し、トイレエージェントを生成する。トイレエージェントは、各分岐ノードで指定したトイレに行く。複数トイレがある場合は乱数によりトイレを決めた。トイレが済んだら来た道を戻り、国道 246 号線を最終目的地まで移動する。トイレエージェントは一度並んだら、途中で列を抜けることや、違うトイレには行かない。また、トイレへ行く経路は 1 つのトイレに 1 経路とした。

（４）同一地域ではトイレに二回行かない。

一地域では歩行に 2 時間はかからないので、再びトイレには行かない。

本研究は、2 つのケースを実行した。ケース A は既存のコンビニ、駅、ガソリンスタンドやファミレスのトイレである。ケース B は、既存のトイレに加えて、コンビニと駅で携帯トイレを販売する。

4.2. 不足トイレの計算

各地域で、道路上に万遍なく歩行エージェントが存在した時間から観測を開始する。

ケースＢでは、トイレ 1 基当たりの待ち行列が 10 人以下になるように、携帯トイレの販売箇所の数を増やす。これを必要な携帯トイレ備蓄数とする。携帯トイレの所要時間は 3 分間、トイレを待てる時間は 30 分と仮定した。1 基当たりのトイレで待ち行列が 10 人以下になるように携帯トイレ販売数を求める。

5. シミュレーション結果

中央防災会議[1]に従い、国道 246 号線上にいる徒歩帰宅者の 1 時間当たりの人数を 70,000 人、80,000 人、90,000 人、100,000 人、110,000 人と 120,000 人の 6 つのシミュレーションを各地域で行った。例として、1 時間当たり 70,000 人の池尻大橋から三軒茶屋の結果を図２に示す。

図２　池尻大橋から三軒茶屋間のシミュレーション

5.1. ケースＡ

図３に結果を示す。なお、見やすくするために、半数のトイレを図示した。横軸はステップ数、縦軸は各トイレの待ち行列である。各々先が各トイレの待ち行列である。矢印で示した数字は各トイレ番号である。①が観測開始時点で、②でエージェントの生成を終了させた。この結果、すべてのトイレで待ち行列が単調増加で増え続けていることが分かる。この結果、大幅にトイレが不足していることが分かった。

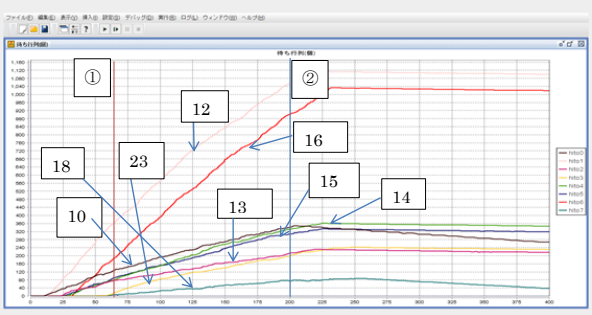

図３　70,000 人のトイレ毎の待ち行列

5.2. ケースＢ

図４に同一地区のトイレ増設後の結果を示す。②の時点ですべてのトイレの待ち行列数が増加傾向にないことが分かる。さらに、すべてのトイレの待ち行列が 1 基当たり 10 人以下に収まっていることが分かる。

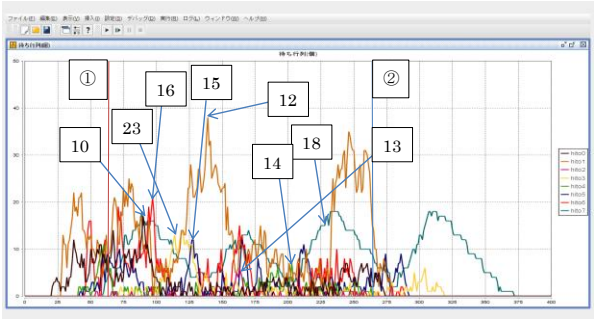

図４　70,000 人のトイレ増設後の待ち行列

表２が、この条件を達成した増設トイレ数である。これは、試行錯誤的に携帯トイレ販売窓口増加させて求めた。トイレ番号は、10 は東急田園都市線の池尻大橋駅のトイレである。増設後トイレ数は、携帯トイレ販売窓口＋既存トイレ数である。最大待ち行列は観測期間の各トイレの最大待ち行列である。余力は、増設後トイレ数から最大待ち行列を引いたものである。その結果 70,000 人のケースで、池尻大橋―三軒茶屋地域で 637 の携帯トイレ販売窓口が必要となった。

表２　1 時間 70,000 人の場合のトイレ増設の結果

トイレ番号	既存トイレ数	携帯トイレ販売窓口	増設後トイレ数	最大待ち行列	余力
10	5	30	35	25	10
12	1	82	83	41	42
13	1	20	21	6	15
23	1	19	20	11	9
14	1	28	29	7	22
15	1	29	30	11	19
16	1	71	72	26	46
18	4	0	4		
19	1	16	17	6	11
20	1	19	20	6	14
21	4	0	4		
25	1	17	18	6	12
29	1	77	78	20	58
30	1	78	79	30	49
22	1	110	111	35	76
24	1	20	21	7	14
33	1	21	22	5	17

6. 結論と今後の課題

6.1. 結論

（１）徒歩帰宅者数 1 時間当たり 70,000 人

すべてのコンビニと池尻大橋、駒沢大学駅に携帯トイレ販売窓口を合計で 1,830 設置する必要性があることが分かった。既存トイレ数が多い三軒茶屋、桜新町、用賀、二子玉川駅に関しては携帯トイレ販売窓口を設置しなくてもよい。

（２）徒歩帰宅者数 1 時間当たり 80,000 人

すべてのコンビニと池尻大橋、駒沢大学駅に携帯トイレ販売窓口を合計で 2,141 設置する必要性があることが分かった。

（３）徒歩帰宅者 1 時間当たり 90,000 人

すべてのコンビニと池尻大橋、駒沢大学駅に携帯トイレ販売窓口を合計 2,309 設置する必要性があることが分かった。トイレ販売窓口が 100 個以上必要を考えらえる地域も出てきた。最大は太子堂 2-17-9 のコンビニで 137 基であった。

（４）徒歩帰宅者 1 時間当たり 100,000 人

すべてのコンビニと池尻大橋、駒沢大学駅に携帯トイレ販売窓口を合計で 2,552 を設置する必要性があることが分かった。

（５）徒歩帰宅者 1 時間当たり 110,000 人

すべてのコンビニと池尻大橋、駒沢大学駅に携帯トイレ販売窓口を合計で 2,816 設置する必要性があることが分かった。

（６）徒歩帰宅者 1 時間当たり 120,000 人

すべてのコンビニと池尻大橋、駒沢大学駅に携帯トイレ販売窓口を合計で 3,055 設置する必要性があることが分かった。

表 3 に中央防災会議[1]より推定した地震発生後の経過時間と国道 246 号の池尻大橋駅から二子玉川駅の間にいる 1 時間当たりの徒歩帰宅者数を示す。本研究では、携帯トイレ販売窓口の処理能力は 1 つ当たり 3 分間としたので、20 個/1 時間の処理能力がある。これより地震発生から 2 時間から 15 時間までに必要な携帯トイレ数を試算した携帯トイレ備蓄数を表 4 に示す。この結果合計で、734,900 個の携帯トイレの備蓄が必要となった。

表３　地震発生後の 1 時間当たり徒歩帰宅者人数

経過時間	徒歩帰宅者	経過時間	徒歩帰宅者
2	8 万	9	12 万
3	7 万	10	12 万
4	8 万	11	12 万
5	9 万	12	12 万
6	10 万	13	10 万
7	10 万	14	11 万
8	11 万	15	11 万

6.2. 今後の課題

今回のシミュレーションは、70,000 人、80,000 人、90,000 人、100,000 人、110,000 人と 120,000 人で 1 時間ごとに区切ってシミュレーションを行った。今後は、中央防災会議が算出した徒歩避難者がピークになる 14 時間を連続してシミュレーションを行うことが課題である。また、本研究では、地域を区切ってシミュレーション行ったので、池尻大橋駅から二子玉川駅までを一地域として行うことも課題である。

本研究では、トイレ分岐ノードを設定してトイレに行く設定をした。そのために、トイレへの行き方が 1 通りしかなかった。今後は、国道 246 号線すべての地点でトイレに行けるような設定が必要である。

文　　献

[1] 中央防災会議、”帰宅行動シミュレーション結果に基づくトイレ需給等に関する試算について”、http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/shutohinan/pdf/sanko06.pdf、2008

[2] 山影進, 人工社会構築指南―artisoc によるマルチエージェント・シミュレーション入門 (人工社会の可能性) 、書籍工房早山,、2007.

表４　コンビニ及び駅での携帯トイレ備蓄数の試算

ﾄｲﾚ	住所	種類	備蓄数	ﾄｲﾚ	住所	種類	備蓄数
1	池尻 4-29-16	コンビニ	7900	47	駒沢 1-17-17	コンビニ	2580
2	池尻 3-1-3	コンビニ	8060	48	深沢 2-19-14	コンビニ	2580
3	池尻 3-2	池尻大橋駅	11020	49	弦巻 1-14-17	コンビニ	2580
4	池尻 2-31-10	コンビニ	33860	50	弦巻 1-17-6	コンビニ	2580
5	池尻 3-20-2	コンビニ	11160	51	弦巻 2-9-5	コンビニ	2580
6	池尻 2-34-1	コンビニ	8460	52	駒沢 2-17-19	コンビニ	2580
7	池尻 3-23-2	コンビニ	11580	53	駒沢 4-19-10	コンビニ	2580
8	池尻 2-37-16	コンビニ	28900	54	駒沢 5-21-6	コンビニ	16100
9	池尻 1-2-24	コンビニ	7560	55	新町 2-1-2	ガソスタ	0
10	代沢 3-12-21	コンビニ	8120	56	新町 3-1-1	コンビニ	39060
11	三宿 1-14-1	コンビニ	29540	57	新町 1-22-10	ガソスタ	0
12	池尻 1-9-10	コンビニ	7140	58	深沢 5-17-6	コンビニ	2680
13	池尻 1-9-5	ファミレス	0	59	新町 3-22-8	コンビニ	2680
14	池尻 1-7-16	コンビニ	7140	60	新町 3-22-1	コンビニ	27660
15	下馬 2-29-12	ファミレス	0	61	新町 2-37-14	ファミレス	0
16	太子堂 1-12-34	コンビニ	31220	62	桜新町 2-8	桜新町駅	0
17	太子堂 2-17-9	コンビニ	42620	63	桜新町 1-12-13	コンビニ	1040
18	太子堂 2-15	三軒茶屋駅	0	64	桜新町 2-10-1	コンビニ	1040
19	太子堂 4-22-6	コンビニ	4400	65	桜新町 1-18-14	コンビニ	1040
20	三軒茶屋 2-13-21	ファミレス	0	66	桜新町 1-15-23	コンビニ	1100
21	三軒茶屋 2-10-13	コンビニ	6700	67	桜新町 1-2-6	コンビニ	1820
22	三軒茶屋 2-11-26	コンビニ	8280	68	深沢 8-10-14	コンビニ	1880
23	三軒茶屋 1-23-10	コンビニ	8480	69	深沢 5-39-3	コンビニ	7320
24	野沢 1-35-9	コンビニ	5080	70	桜新町 1-40-7	コンビニ	1040
25	下馬 3-11-6	コンビニ	17460	71	桜新町 1-34-6	ファミレス	0
26	太子堂 4-7-1	コンビニ	6840	72	用賀 1-10-8	コンビニ	2220
27	三軒茶屋 2-19-18	コンビニ	6740	73	用賀 4-14-1	コンビニ	2220
28	上馬 2-31-9	コンビニ	5140	74	用賀 4-13-11	コンビニ	2220
29	上馬 1-15-1	ガソスタ	0	75	用賀 4-11-15	コンビニ	2220
30	野沢 2-12-3	コンビニ	26280	76	用賀 2-39	用賀駅	0
31	上馬 2‐38‐7	コンビニ	4940	77	用賀 4-5-3	コンビニ	16000
32	野沢 2-34-3	コンビニ	6920	78	用賀 2-41-9	コンビニ	16000
33	都上馬 3-6-9	コンビニ	6880	79	玉川台 2-22-20	ファミレス	0
34	野沢 4-18-8	ファミレス	0	80	玉川台 2-21-16	コンビニ	4020
35	上馬 4-2-9	コンビニ	29260	81	玉川台 2-1-16	コンビニ	29620
36	上馬 4-3	駒沢大学駅	8780	82	瀬田 4-24-12	コンビニ	4140
37	上馬 4-3-3	コンビニ	6880	83	瀬田 3-1-8	コンビニ	4180
38	上馬 3-18-11	ファミレス	0	84	瀬田 4-1-1	コンビニ	23680
39	上馬 3-18-14	コンビニ	11020	85	玉川 4-5-7	コンビニ	7020
40	上馬 3-17-7	ファミレス	0	86	玉川 3-11-7	コンビニ	10420
41	駒沢 1-2-25	コンビニ	2260	87	玉川 3-6-5	コンビニ	1880
42	駒沢 1-23-1	コンビニ	2160	88	玉川 2-22-13	二子玉川駅	0
43	駒沢 2-6-1	コンビニ	7880	89	玉川 2-21-1	コンビニ	7280
44	駒沢 1-4-21	コンビニ	10640	90	玉川 2-14-5	コンビニ	7200
45	駒沢 1-13-14	ガソスタ	0	91	玉川 2-7-1	コンビニ	7280
46	駒沢 1-13-12	コンビニ	15820	92	玉川 3-38-10	コンビニ	1660