

外出活動の時間的集約性を考慮した 部門別エネルギー消費原単位に関する分析

ANALYSIS OF ENERGY CONSUMPTION CONSIDERING TEMPORAL CONCENTRATION OF OUT-HOME ACTIVITY

桑野 将司¹・塚井 誠人²

¹博士（工学） 鳥取大学大学院准教授 工学研究科 (E-mail:kuwano@sse.tottori-u.ac.jp)

²博士（工学） 広島大学大学院准教授 工学研究院 (E-mail:mtukai@hiroshima-u.ac.jp)

本研究では、過去4時点に渡って実施された都道府県単位の社会生活基本調査を用いて、外出活動特性と都市特性が、家庭・業務・乗用車の部門別エネルギー消費原単位に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。共分散構造分析を用いて、家庭・業務・乗用車の部門別エネルギー消費原単位に影響を及ぼす要因を分析したところ、業務エネルギー消費原単位と乗用車エネルギー消費原単位の低減のためには、外出活動の時間的集約性を高めることが有効だが、外出活動の時間的集約性と都市の空間的集約性はトレードオフの関係にあり、外出活動の時間的集約性を高めると1人当たりの県内総生産が低下する傾向がみられた。

キーワード：社会生活基本調査、コンパクトシティ、県内総生産、共分散構造モデル

1. はじめに

近年、少子高齢化、通信インフラの整備などを背景にして、働き方や生活パターンなどのライフスタイルの多様化が進行し、人々の外出活動の時間帯が分散する傾向にある。一方でサービスの供給側では小売店、飲食店、娯楽施設などの商業施設の店舗数が増加すると共に、営業時間は延長、もしくは24時間化される傾向がある。これらはいずれも、都市施設の運営に要するエネルギー消費量の増加をもたらす、1人当たりエネルギー効率の低下につながると考えられる。一方、家庭においては、生活水準の向上や、夜型のライフスタイルの浸透、さらに個食化などによって集約的なエネルギー消費が行われなくなり、1人当たりのエネルギー効率が低下している。交通に関しては、各自動車のエネルギー効率は改善しているものの、交通網整備や乗用車保有率の増加によって個別ニーズに対応した移動需要が容易となっており、後者が卓越すると、1人当たりエネルギー効率が低下する原因となりうる。

都市における1人当たりのエネルギー効率を上げるため、これまでに、主にコンパクトシティ政策による人口や土地利用の高密度化など都市の空間的集約性を高める政策が検討されてきた。しかし一方で、環境負荷の小さい都市を目指して都市の空間的集約性を高めれば、外出時間帯が多様になる、あるいはサービス供給が24時間化

するなどの効果も生じる。つまり、結果としてエネルギー消費量が増加、またはエネルギー効率が悪化する可能性がある。

個人あるいは世帯を分析単位とし、活動時間帯が世帯エネルギー消費量に及ぼす影響に着目した既往研究は多数存在する。しかし、個人あるいは世帯のライフスタイルが多様化することによって顕在化する都市全体としての活動時間帯の分散に着目した議論はほとんど行われておらず、活動時間帯の分散と1人当たりのエネルギー効率の関係は、著者らの知る限り未だ議論がなされていない。住民全体の活動時間帯の分散の程度、およびそれが都市の部門別エネルギー消費量に及ぼす影響を分析するためには、個人あるいは世帯を分析対象とするのではなく、都市を分析単位としたマクロ分析が必要となる。本研究では、都道府県を分析単位とし、住民の外出時間帯が集中している程度を「外出活動の時間的集約性」と定義する。

コンパクトシティ政策を着実にエネルギー消費量の低下や同効率の改善に結びつけるためには、自然環境や人口構成などの都市特性、および都市の空間的集約性と部門別エネルギー消費量に留まらず、外出活動の時間的集約性に着目した分析を行い、それらの総合的な効果に関して十分な検証を行う必要がある。なお以下では、1人当たりエネルギー効率を、エネルギー消費原単位と呼ぶ。

本研究では、総務省「社会生活基本調査」¹⁾を用いて、

時間帯別外出者割合から都道府県別、時点別の外出活動特性を算出する。そして、算出した外出活動特性と都道府県別の自然環境や施設立地状況、人口構成などの都市特性を用いて、業務・家庭・交通の各部門におけるエネルギー消費原単位への影響要因を明らかにする。

2. 既往研究の整理と本研究の位置づけ

都市の空間的な集約性と環境負荷低減効果に関しては、土地利用規制、後に主にコンパクトシティ論の観点から分析が行われてきた。代表的な研究として、Newman and Kenworthy²⁾は、世界主要都市の1人あたりガソリン消費量と都市の人口密度には負の相関関係があることを示し、省エネルギーのためには土地利用の高密度化と公共交通機関の整備が必要であることを提示した。この研究をきっかけに、コンパクトシティとエネルギー消費量の関係について盛んに議論されるようになった。

都市のコンパクト化と交通エネルギー消費量に注目した研究では、都市のコンパクト化によって1トリップ当たりの自動車トリップ長が短縮する傾向にあることが示されている³⁾。しかし、都市のコンパクト化によって自動車トリップ頻度が増加し、結果的に走行距離は変化しない、あるいは増加する可能性があること^{4),5)}や、土地利用の高密度化が公共交通の利用頻度や歩行機会の増加には影響しないという指摘^{6),7)}もなされている。一方、都市のコンパクト化と世帯エネルギー消費量に着目した研究もある。これら研究では、世帯エネルギー消費量に影響を及ぼす要因として、都市のコンパクト化の程度に加え、世帯のライフステージや収入、住居の面積なども考慮される。しかし、交通エネルギー消費量との関係と同様に、コンパクト化によって世帯エネルギー消費量が減少するという結果を示す研究⁸⁾もあれば、無関係という結果を示す研究⁹⁾もある。すなわち、都市のコンパクト化とエネルギー消費量の増減の関係は明らかになっていないのが現状である。

国内の研究事例に着目すると、林ら¹⁰⁾は1人当たりの交通エネルギー消費量および単位面積当たりの交通エネルギー消費量について、都市形態および都市交通手段に着目して都市間比較を行った。その結果、人口密度の上昇は1人当たりのエネルギー消費量を低下させる一方で、単位面積当たりの交通エネルギー消費量が増大し、局地的な環境負荷が悪化することを指摘した。すなわち、必ずしも人口密度の上昇が環境負荷の低減に繋がらないことを示唆している。小根山ら¹¹⁾は交通機関別のCO₂排出量を試算し、環境負荷と都市構造・交通体系の関係について検証を行った。その結果、都市面積が大きいと都市内における1トリップ当たりの移動距離が長くなるため、1

人当たりのCO₂排出量が大きくなることを示し、環境負荷の小さい都市構造を実現するには都市活動の集中、土地利用の適正配置に加えて、自動車交通から環境負荷の小さい交通機関への転換が重要であることを示した。また、中井ら¹²⁾は民生部門の電気消費量と運輸部門のエネルギー消費量をそれぞれ推計し、居住形態や家族形態の視点から、コンパクト化によるエネルギー消費量の低減効果を算出している。その結果、郊外の戸建住宅に住む単身・夫婦世帯を都心部の集合住宅に移住させ、核家族化を抑制することがエネルギー消費量の削減に有効なことを定量的に示した。

以上のように、既往研究では都市の空間的集約性がエネルギー消費量に及ぼす影響に着目した分析の蓄積は多い。しかしその多くは、ある特定の部門に着目しているか、複数部門のエネルギー消費量を対象としても、それらを独立に扱っており、部門間のトレードオフや各部門の消費効率に着目した研究は少ない。社会全体の環境負荷低減を考えるためには、民生部門、産業部門、運輸部門など複数部門を対象として、エネルギー消費にそれぞれどのように影響を及ぼし、どのようなトレードオフが見られるかを分析する必要がある。たとえば、都市のコンパクト化により、住民の移動距離が減少し、乗用車部門で1人当たりのエネルギー消費量が減少しても、他方で世帯内構成員の活動時間帯が分散することによって、家庭部門における1人当たりのエネルギー消費量が大幅に増加すれば、都市のコンパクト化は社会全体ではエネルギー効率に負の影響を与える。そこでエネルギー消費量に影響を与える要因を各部門同時に、かつ定量的に分析を行うことによって、エネルギー消費量に影響を与える要因と、それらの弾性値を明らかにすることが重要である。

また既往研究の多くは、主にコンパクトシティ政策など都市の空間的集約性を高める政策実施による影響を分析しており、それらの研究では、都市の空間的集約性の改善は、特に交通部門のエネルギー効率の改善に資することが示されている。しかし、都市のコンパクト化は公共交通網の発達や商業施設を都心部に集約させる必要があるため、多大なコストを要するばかりでなく、整備完了までに長期間を要し、実現が難しい。一方、各市町村の生活活動の時間的集約を行う政策は、サービスの提供時間に関する営業時間規制等によって実現できるため、施設整備は不要である。ただし同政策が社会的に受容されるためには、そもそも時間的集約性が1人当たりのエネルギー消費量の低減につながるか否かの検証が必要である。そこで本研究では、「都市活動の時間的集約性を高めるとエネルギー消費原単位が低下する」という研究仮説の検証を行う。

なお既往研究より、エネルギー消費原単位は都市の空

間的集約性や地域特性の影響を大きく受けることは明らかである。よって以下の分析では、データの入手可能性も考慮して、都道府県を単位とした全国の長期にわたるエネルギー消費に影響する要因を明らかにする。

分析手順の概略は以下の通りである。まず社会生活基本調査を用いて外出活動の時間集約性を算出する。次に、都市の空間集約性、及び自然環境や人口構成などの都市特性に関するデータを収集する。そして、これらと各部門のエネルギー消費原単位への影響要因を表現した統計モデルの推定を行う。なお本研究では、人々の生活活動に着目するため、民生部門、産業部門、運輸部門のうち、生活活動にエネルギー消費量が影響を受けると思われる、民生家計部門、民生業務他部門、家計乗用車部門のエネルギー消費量に着目する。

3. 外出活動の分析手順

本研究では、外出活動の時間集約性を表現する指標として、時間利用構造を用いる。時間利用構造の定義については、桑野らの先行研究¹³⁾で既に述べていて新規性は無い。また、時間利用構造の経年変化および都道府県比較についても桑野ら¹³⁾で詳しく分析されている。ここでは、本論文に關係する概要を示す。

3.1. 使用データの概要

社会生活基本調査の概要を Table 1 に示す。社会生活基本調査は全都道府県を対象に 5 年毎に行われ、昭和 51 年の第 1 回調査以来、平成 18 年まで累計 7 回実施されている。調査期間は、10 月中に設定される 9 日間のうち、連続する 2 日間である。すなわち、調査は必ずしも全国一斉に実施されるわけではなく、調査区ごとに実施期間は異なる。なお調査対象区域は、全国で約 6,700 区設定されている。調査対象世帯は、調査区別に無作為抽出され、その総数は全国で約 8~10 万世帯である。調査対象年齢は昭和 61 年、平成 3 年の調査では 15 歳以上、また平成 8 年、平成 13 年、平成 18 年の調査では 10 歳以上である。なお本調査では、サンプルの詳細な調査区に関する情報は平成 18 年を除いて秘匿されている。よって、所在地に関する分析は、都道府県単位で行う。なおサンプルは各都道府県の人口や性別比、年齢構成比と一致するように、補正係数を用いて拡大されている。

時間利用に関する調査方式は、昭和 51 年から平成 8 年の第 1~5 回調査までとそれ以降で、異なっている。1 日における 15 分毎の時間帯について回答欄を設け、調査票の回答欄に予め活動の分類を設けて質問する、調査 A が用いられていた。なお、調査 A の調査人数は 1 時点当たり約 20~25 万人である。上述の方式に加えて、平成 13 年から、

Table 1 社会生活基本調査の概要

調査名	社会生活基本調査
実施機関	総務省統計局
目的	国民の社会生活の実態に関する基礎資料を得ること
調査年	昭和 51, 56, 61 年 平成 3, 8, 13, 18 年
サンプル数	約 20~25 万人×連続した 2 日間
調査方法	訪問配布・訪問回収

Table 2 自宅内・自宅外の種類基準

A)自宅内	睡眠, 身の回りの用事, 家事, テレビ・ラジオ・新聞・雑誌
B)自宅外	通勤・通学, 買物, 移動 (通勤・通学を除く), スポーツ, ボランティア活動・社会参加活動
C)調査項目より判別	仕事, 介護
D)同時活動者より判別	食事, 学業, 学習・研究 (学業以外)
E)どちらにも分類できない	育児, 休養・くつろぎ, 趣味・娯楽, 交際・つきあい, 受診・療養, その他

活動の生活時間配分、およびその内容について詳細な結果を得るために、記入者自身が生活時間を日誌のように記入する調査 B が、新たに導入された。なお、調査 B は、各時点で約 1 万人のサンプルしか得られていないため、都道府県間比較ができない。そこで本研究では、調査時点数と調査人数が多い、調査 A の個票データを用いる。

3.2. 自宅内活動・自宅外活動の種類基準の設定

調査 A の調査事項には、時間帯別の活動内容は含まれているが、活動場所は含まれていない。すなわち各活動が自宅内、自宅外のどちらで行われたかについて、データは得られない。そこで、各時間帯の活動内容やその同時活動者から、各活動が外出活動か否かを判定する基準を設定し、時間帯別に活動場所を自宅内か自宅外かの情報を付加した。分類手順の概略を以下に示す。

<手順 1> Table 2 に従って、プリコードされた 20 種類の活動を A) 自宅内、B) 自宅外、C) 調査項目により判別、D) 同時活動者より判別、E) どちらにも分類できない、の 5 種類に分類する。なお、各分類の活動時間が 1 日に占める平均割合は、分類 A) が 56.2%、分類 B) が 7.5%、分類 C) が 12.4%、分類 D) が 9.5%、分類 E) が 14.5% であった。

<手順 2> 分類 C) について、「仕事」は通勤時間が 0 分なら自宅内、通勤時間が 0 分でない場合、同時活動者が家族であった場合は自宅内活動、それ以外は自宅外活動とした。なお介護のみ、自宅内・自宅外の区別を記入する欄が設定されている。ただし、この項目は両方同時に回答できるため、「自宅外」の項目のみ記入した人の「介護」を自宅外活動とみなし、それ以外の「介護」は自宅内活動とした。

<手順 3> 分類 D) については、同時活動者により判別を

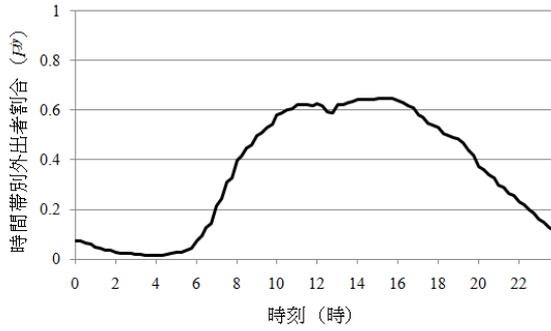


Fig. 1 時間利用構造 (平成 18 年, 東京)

行った. 具体的には一緒にいた人が学校・職場の人であれば自宅外活動, それ以外は分類E)とした.<手順4>分類E)については, 確定的な分類が難しいため, 0.5人が自宅内活動を行い, 0.5人が自宅外活動を行っているものとした.

3.3. 時間利用構造の定義

活動時間帯を t , 時点を y , 個人を i とする. 時点 y の都道府県 j_y における人口を N^{j_y} , サンプルに付与される観測可能な個人属性に基づいて, 各都道府県別に算出された拡大係数の総和によって得られる各時間帯の外出者数を $m_{it}^{j_y}$ とすると, 各時間帯における都道府県 j_y の外出者割合 $P_t^{j_y}$ は式(1)より算出される.

$$P_t^{j_y} = \sum_{i \in j_y} m_{it}^{j_y} / N^{j_y} \quad (1)$$

なお社会生活基本調査の時間帯 t の定義は, 0~24 時を 15 分単位で分割しており, $t = 1, \dots, 96$ である. 本研究では, 全時間帯にわたって連ねた $P_t^{j_y}$ を時間利用構造と呼ぶ. Fig. 1 に, 式 (1) で算出される時間利用構造を, 平成 18 年の東京を例に示す.

3.4. 時間利用特性の算出

式(1)で定義した時間利用構造は, 時点別, 都道府県別に 96 要素を含むベクトルであり, 情報量が多く扱いにくい. これに代わる外出活動特性を表す簡便な指標を得るため, 以下の分析では, 最小二乗法によって時間利用構造を台形近似する. 台形は, 下底のみ時間軸に接するという制約条件を設定する. この近似によって得られる台形の頂点や斜辺から, それぞれ 1 日の外出活動の外出活動開始時刻, 外出活動終了時刻, 外出開始時刻集中度, 外出終了時刻集中度, 日中平均外出者割合を算出して, 都道府県別の外出活動特性の縮約を試みる.

時間帯別外出者割合 $P_t^{j_y}$ の座標を $(x_t^{j_y}, y_t^{j_y})$ とする. なお, 以下簡単のため, 特に支障のない限り添字 t, y, j を省略する. 次に, Fig.2 に示す台形の頂点を, それぞれ

点 $A(x_a, y_a)$, 点 $B(x_b, y_b)$, 点 $C(x_c, y_c)$, 点 $D(x_d, y_d)$ とする.

$$\text{台形条件: } \begin{cases} y_a = y_d = 0 \\ y_b = y_c \end{cases} \quad (2)$$

を考慮すると, 台形の頂点はそれぞれ点 $A(x_a, 0)$, 点 $B(x_b, y_b)$, 点 $C(x_c, y_b)$, 点 $D(x_d, 0)$ となる. 線分 $D_1(AD)$, $L_1(AB)$, $D_2(BC)$, $L_2(CD)$ はそれぞれ式(3)~(6)で表される.

$$y = 0 \quad (x_d < x < x_a) \quad (3)$$

$$y = y_b(x - x_a)/(x_b - x_a) \quad (x_a \leq x < x_b) \quad (4)$$

$$y = y_b \quad (x_b \leq x < x_c) \quad (5)$$

$$y = y_b(x - x_d)/(x_d - x_c) \quad (x_c \leq x < x_d) \quad (6)$$

それぞれ条件に合う範囲の x_i を D_1, L_1, D_2, L_2 に代入したときの y の予測値を \hat{y}_i とする. さらに対象都道府県の近似台形の面積は時間帯別外出者割合 y_i の積分値に等しいとする. すなわち,

等面積条件:

$$\{(x_d - x_a) + (x_c - x_b)\} \frac{y_b}{2} = \sum_{i=1}^{96} y_i \quad (7)$$

を制約条件として加える. 以上より y_i と \hat{y}_i の誤差二乗和 $E = \sum_{i=1}^{96} (y_i - \hat{y}_i)^2$ が最小となる x_a, x_b, x_c, x_d, y_b を最小二乗法によって求める. 得られた台形情報 x_a, x_b, x_c, x_d, y_b を用いて, 外出活動開始時刻, 外出活動終了時刻, 外出開始時刻集中度, 外出終了時刻集中度, 日中平均外出者割合の 5 外出活動特性を, それぞれ以下に示す式(8)~(12)によって求める.

$$\text{外出活動開始時刻: } x_a \quad (8)$$

$$\text{外出活動終了時刻: } x_d \quad (9)$$

$$\text{外出開始時刻集中度: } y_b / (x_b - x_a) \quad (10)$$

$$\text{外出終了時刻集中度: } y_b / (x_d - x_c) \quad (11)$$

$$\text{日中平均外出者割合: } y_b \quad (12)$$

以上の 5 指標を時間利用特性と呼び, 時点 y , 都道府県 j 別に算出して, 時間利用構造を表す指標として用いる. なお, 1 日当たりの平均外出時間長は, 式(8)~(12)の 5 指標が定まれば, 台形の面積から算出できる. よって, 時間利用構造を表わす指標からは除外する.

3.5. 時間利用構造の基礎集計分析

(1) 時間利用構造の時点間比較

外出活動特性の時点間比較を行う. 時間利用構造の台形当てはめを行った結果を Fig. 3 に示し, 算出した時間

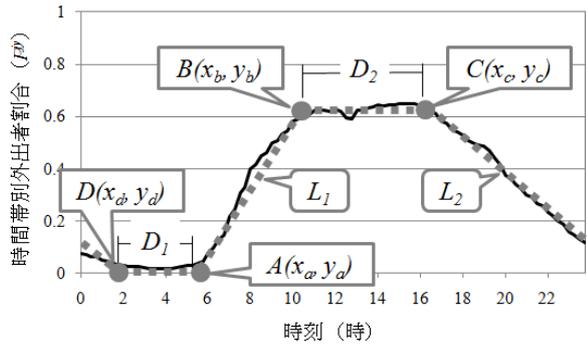


Fig. 2 時間利用構造の台形近似 (台形の頂点と線分の定義)

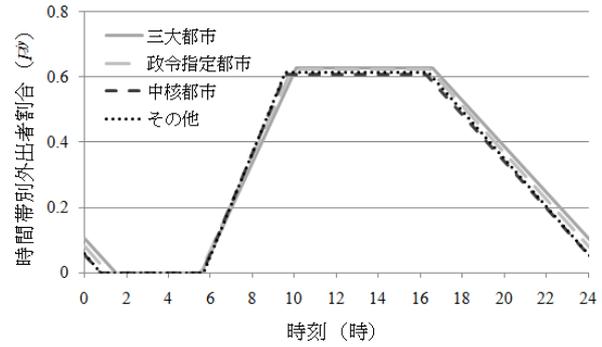


Fig. 4 人口規模別の時間利用構造の比較

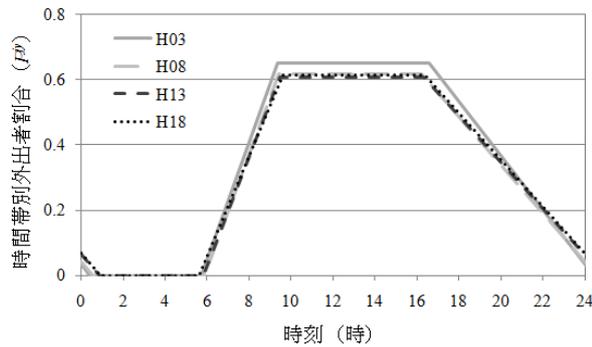


Fig. 3 時点別の時間利用構造の比較

Table 4 人口規模別の時間利用構造の比較

	三大都市 ^{a)}	政令指定都市 ^{b)}	中核市 ^{c)}	その他 ^{d)}
開始時刻	5:33	5:28	5:35	5:39
終了時刻	25:30	25:08	24:47	24:48
開始時刻集中度	0.139	0.142	0.154	0.158
終了時刻集中度	0.070	0.072	0.072	0.073
日中外出者割合	0.629	0.624	0.608	0.614
平均外出時間長	8:19	8:10	7:53	7:58

- a) 三大都市(東京都区部・大阪市・名古屋市)を含む都道府県
- b) 人口 50 万人を超える政令指定都市を含む都道府県
- c) 人口 30 万人を超える中核市を含む都道府県
- d) それ以外の都道府県

Table 3 時点別の時間利用特性の比較

	H03	H08	H13	H18
開始時刻	5:43	5:51	5:49	5:36
終了時刻	24:24	24:34	24:53	24:56
開始時刻集中度	0.178	0.174	0.167	0.153
終了時刻集中度	0.083	0.074	0.071	0.072
日中外出者割合	0.651	0.617	0.608	0.614
平均外出時間長	8:26	7:53	7:52	8:03

利用特性を Table 3 に示す. なお, Table 3 には, 5 種類の時間利用特性から算出される 1 日当たりの平均外出時間長も記している. なお点 A, D の定義, ならびに等面積条件 (式(7)) より, 外出活動開始・終了時刻は, それぞれ最も早い外出時刻と, 最も遅い帰宅時刻の都道府県平均値を表す点に注意を要する.

Table 3 より, 平成 8 年の外出開始時刻が最も遅く, それ以降は早まる傾向にあることが分かる. 一方, 外出終了時刻は平成 3 年以降, 経年的に遅くなる傾向がある. また, 外出開始時刻集中度は経年的に低下している. 外出終了時刻集中度, および日中外出者割合は, 平成 13 年から平成 18 年にかけてわずかに増加しているものの, ともに全体的に低下傾向が見られる. これらより, 人々の外出時間帯は経年的にばらつく傾向があり, 特に外出終了時刻は遅くなっていることがわかる.

(2) 時間利用構造の都道府県間比較

外出活動特性の都道府県間比較を行う. しかし, 都道府県は 47 あり, 紙幅の制約から全都道府県の比較は難しい. ここでは平成 18 年のみを対象に, 都道府県を人口規模別に分類して, その平均値を比較する. 分類は三大都市 (東京都区部・大阪市・名古屋市) を含む都道府県, 人口 50 万人を超える政令指定都市を含む都道府県, 人口 30 万人を超える中核市を含む都道府県, それ以外の都道府県に分類した. 人口規模別の時間利用構造を Fig. 4 に, 人口規模別の時間利用特性を Table 4 に示す.

Table 4 より, 外出開始時刻には人口規模による大きな差は見られない. しかし, 外出終了時刻と外出開始時刻集中度は, 人口規模が大きくなるほど低く, また外出活動終了時刻は遅い傾向が見られた. 人々の外出開始と終了の時間帯が分散していることから, 人口規模が大きいくほど夜型のライフスタイルを取る人が多いと考えられる.

4. 部門別エネルギー消費量の推移

4.1. 使用データの概要

本研究で用いるエネルギー消費量データは, 経済産業研究所が実施した都道府県別エネルギー消費統計¹⁴⁾である. このデータは 1990 年以降, 部門別エネルギー消費量

について毎年調査・分析されている。具体的な部門別エネルギー消費量の算出方法については、戒能¹⁴⁾を参照されたい。

本研究では、このうち民生家計部門、民生業務他部門、家計乗用車部門のエネルギー消費量を分析に用いる。なお本研究において各部門で消費されたエネルギー消費量を都道府県の人口で除した値を、それぞれ都道府県別の家庭エネルギー消費原単位、業務エネルギー消費原単位、乗用車エネルギー消費原単位と呼ぶ。

4.2. エネルギー消費原単位の時点間比較と都道府県間比較

各部門のエネルギー消費原単位の推移を、Fig. 5 に示す。各時点において、エネルギー消費原単位は、高い順に業務、家庭、乗用車の順であった。これらの値は平成3年から平成18年にかけて全部門で増加しており、各部門のエネルギー消費原単位の増加率は、それぞれ47%、27%、52%であった。家庭エネルギー消費原単位の増加率と比較すると、乗用車エネルギー消費原単位と業務エネルギー消費原単位の増加率が高い。

乗用車エネルギー消費量は、車輛エネルギー消費原単位と走行距離の積で算出される。車輛エネルギー消費原単位は、技術革新による燃費の向上効果や車のダウンサイズ傾向を考慮すると、減少傾向にある。したがって、乗用車エネルギー消費量の増加要因として、自動車走行距離の増加が考えられる。

一方の業務エネルギー消費原単位の増加要因の1つに、近年の活動の時間制約の緩和による商業施設などの営業時間の長時間化、および施設数の増加が考えられる。すなわち、利用人数の少ない時間帯での営業や、個人のみが使用する施設が増加するため施設運用効率性が低下し、その結果、都道府県全体の業務エネルギー消費原単位の増加につながっていると考えられる。

Fig. 6 に、平成18年の都道府県別エネルギー消費原単位を示す。1人当たりの業務エネルギー消費原単位は、

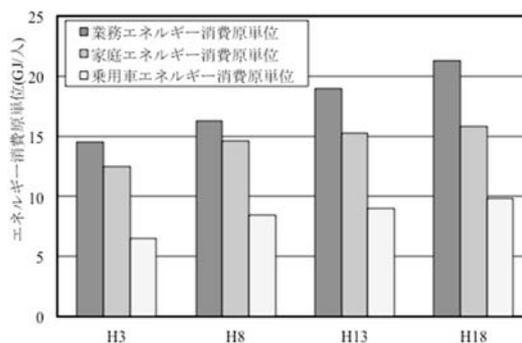


Fig. 5 部門別エネルギー消費原単位の推移

東京都で最も高く、茨城県や広島県など大都市圏以外で高くなっているのが特徴である。家庭エネルギー消費原単位に着目すると、関東や関西の大都市圏では、1人当たりの家庭エネルギー消費原単位が比較的低いことがわかる。また、北海道、東北、三陸地方で家庭エネルギー消費原単位は高く、九州、沖縄で低いことから、地理条件が家庭エネルギー消費原単位に影響していることが考えられる。乗用車エネルギー消費原単位は、東京都が最も低く、次いで京都府、大阪府、神奈川県と関東や関西の大都市圏では低い。一方、山口県、新潟県、富山県、石川県など地方部で乗用車エネルギー消費原単位が高いことがわかる。

5. 時間的・空間的集約性とエネルギー消費量

5.1. 共分散構造モデルの構築

本節では、外出活動特性と都道府県別の自然環境や施設立地状況、人口構成などの都市特性が、家庭・業務・乗用車の部門別エネルギー消費原単位に及ぼす影響を分析する。本研究では、外出特性と都市特性の双方向の因果関係の可能性や、複数の部門別エネルギー消費原単位への影響を分析することに主眼を置くため、説明変数間の独立性と、各説明変数と1つの目的変数間の一方向因

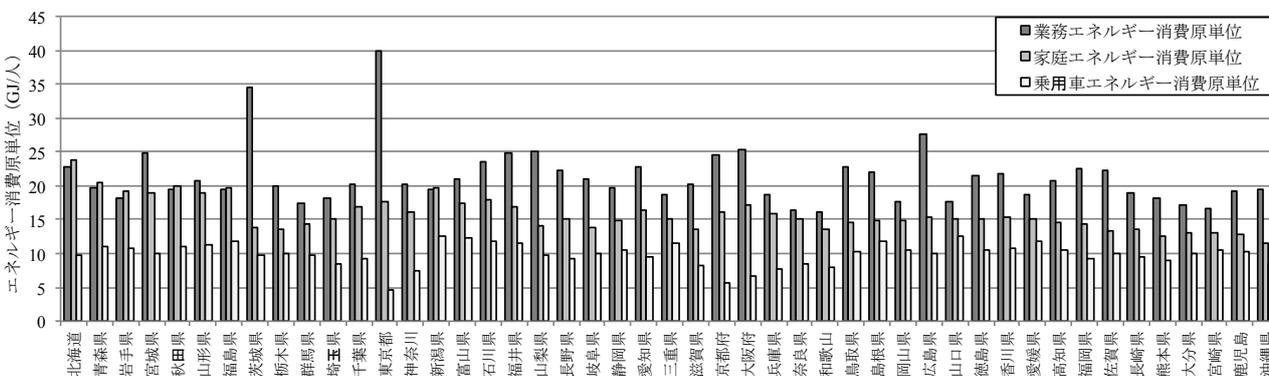


Fig. 6 都道府県別の1人当たりエネルギー消費原単位の比較 (平成18年)

果のみを仮定する重回帰分析は適切な分析方法ではない。そこで、複雑な構造を有する変数間の因果関係を表現できる共分散構造分析手法を用いて、部門別エネルギー消費原単位の因果構造モデルを構築する。

共分散構造モデルは、構造方程式と測定方程式から構成されている¹⁵⁾。構造方程式は観測されていない潜在変数間の因果関係を表現した式で、測定方程式は潜在変数から観測変数への影響を表す式である。

$$\eta = B\eta + \Gamma\xi + \zeta \quad (13)$$

$$x = \Lambda\xi + e \quad (14)$$

ここで、 η は内生潜在変数、 ξ は外生潜在変数、 x は観測変数、 ζ 、 e は誤差変数、 B 、 Γ 、 Λ は未知パラメータマトリクスである。

なお分析には、4 時点×47 都道府県の 188 サンプルを用いた。都道府県別、時点別の変数として、都市特性に関する変数と 3 章で算出した外出活動特性を入力側変数として、出力側に部門別エネルギー消費原単位パス構造を仮定したモデルを推定した。

都市特性データは、民力¹⁶⁾や総務省統計局地域別統計データベース¹⁷⁾を用いた。これらの都市特性データの一覧を Table 5 に示す。なお、社会生活基本調査の調査年 (H3, H8, H13, H18) と都市特性に関するデータの調査年が一致しない場合は、それぞれ直近年度の統計値を用いた。

Table 5 に示す都市特性データをモデルの説明変数として、様々なパス構造を仮定してパラメータ推定を行う、探索的推定法を試みた。ただし、説明変数の選定には、事前に変数間の相関を算出し、相関が高い変数は同時に用いないこととした。また、探索候補としたモデル間の比較は、モデル全体の適合度、およびパスの有意性の 2 つの観点から行うこととする。

5.2. モデルの推定結果

最も適合度が高く、有意なパスが得られたモデルの推定結果を Fig. 7 に示す。モデル適合度の指標である AGFI は 0.357 と低く、本モデルの現況再現性は必ずしも良好とは言えない。これは、建物の形状、建物設備の種類や性能、使用量、自動車の車種別エネルギー消費量などのエネルギー消費量を直接決定しているミクロな要因を考慮できていないため、と考えられる。しかし、これらの要因についてマクロレベルでのデータ入手は困難である。よって、結果の信頼性については一部留保しつつ、考察を行う。

Fig. 7 では、観測変数に影響を与える因子として潜在変数 (構成概念) が現れる。これらの潜在変数は観測変数とのパスの符号を考慮して以下のように名付けた。年少人口割合を低下させ、老年人口割合を増加させる潜在変数を「少子高齢化の程度」とする。年平均気温を増加、降水日数を低下させる潜在変数を「温暖少雨な自然環境」

Table 5 都市特性に関するデータ

人口	工場用地面積
人口密度	コンビニ数
年少人口 (15 歳未満)	飲食店数
生産年齢人口 (15~64 歳)	会社数
老年人口 (65 歳以上)	病院数
外国人人口	保育所数
昼間人口/夜間人口	第 1 次産業総生産割合
就業者総数	第 2 次産業総生産割合
第 1 次産業就業者数	第 3 次産業総生産割合
第 2 次産業就業者数	1 人当たりの県民所得
第 3 次産業就業者数	県内総生産 (総額)
世帯数	農業産出額
単身世帯率	漁獲総量
子供がいる世帯の割合	労働者平均給与
共働きの世帯数	平均貯蓄率 (勤労者世帯)
核家族率	高速自動車国道総延長
母子家庭・父子家庭の割合	年間輸送人員鉄道
総面積	年間輸送人員旅客バス
可住地面積	年間輸送人員航空
人口集中面積	道路舗装率
耕地面積	自動車保有台数
一般病院年間新入院患者数	快晴日数 (日/年)
通院者率	降水日数 (日/年)
平均寿命 (男)	雪日数 (日/年)
平均寿命 (女)	日照時間 (時間/年)
年平均気温 (°C)	降水量 (mm/年)

出典：民力 2008, 総務省統計局 地域別統計データベース

とする。可住地面積当たりの会社数、人口、コンビニ数を増加させる、つまり都市に業務、人口、商業施設を集約させる潜在変数を「都市の空間的集約性」とする。外出活動開始時刻を遅く、外出活動終了時刻を早く、外出開始時刻集中度を増加、外出終了時刻集中度を増加、日中平均外出者割合を増加させる、つまり人々の 1 日の外出時間帯が短く、かつ外出の開始と終了の時刻が集中して、さらに日中の外出者割合を高くする潜在変数を「外出活動の時間的集約性」とする。

Fig. 7 の推定結果から、各変数が他の変数に及ぼす影響を表わす標準化総合効果の算出を行った。その結果を Table 6 に示す。なお標準化総合効果は、標準化直接効果と標準化間接効果の和として定義される値である¹⁵⁾。標準化直接効果は変数間に直接パスがあるときの影響度を、標準化間接効果はいくつかの変数を経由して及ぼす影響度を、それぞれ表す。

Fig. 7 と Table 6 から、以下の知見が得られた。

少子高齢化の程度は外出活動の時間的集約性に負の影響を与える。この理由として、高齢者は時間帯が制約された活動が少ないために、高齢者の割合が高い都市は外出活動の時間的な集約性が低くなることが考えられる。また 15 歳以下の若年者の多くは通学者であり、時間帯が固定された活動があるため、外出活動の時間的な集約性が高くなると考えられる。温暖少雨な自然環境は家庭エネルギー消費原単位を大きく低下させ、業務エネルギー消費原単位を低下させる。これは寒い地域で暖房が使用されることで、エネルギー消費量が大きくなるためと考えられる。また雨や雪が多い都市は、1 人当たりの家庭

エネルギー消費量が大きい傾向が示された。一方、業務部門についてはその影響は小さい結果となった。これは天候に関係なく業務が行われるためと考えられる。また、乗用車部門に対して自然環境のパスの推定値は有意とならなかった。この結果は、乗用車の使用は、天候や気温とは無関係なことを示していると考えられる。

都市の空間的集約性は、業務エネルギー消費原単位を増加させ、乗用車エネルギー消費原単位を低下させ、1人当たり県内総生産を増加させる。家庭エネルギー消費原単位に対しては、直接パスの推定値が有意な値とならなかった。これは都市の空間的集約性が高まると、乗用車での移動距離が短縮される上、公共交通機関が発達するため、結果として乗用車エネルギー消費原単位が低下すると考えられる。また、都市機能が集約すると1人当たりの県内総生産が上昇し、同時に業務エネルギー消費原単位も増加する。都市の可住地面積が一定ならば、人口増加によって1人当たり県内総生産は増加する一方で、エネルギー消費原単位は減少する可能性も予想された。しかし上述の結果は、単位可住地面積当たりの商業施設数や会社数が増加することによってエネルギー消費原単位が増加し、結果的に都市の空間的集約性が1人当たりの業務エネルギー消費原単位を増加させたと考えられる。

さらに、Fig. 7より、空間的集約性が家庭・業務・乗用車部門のエネルギー消費原単位に及ぼす標準化総合効果は、それぞれ0.133, 0.455, -0.535となった。ただし、共分散構造モデルでは、モデルの説明変数の入力値、および推定パラメータは標準化された値である。そのため、各エネルギー部門のエネルギー消費量の増減が、3部門の合計エネルギー消費量の増加、あるいは減少に寄与するかを、標準化総合効果の値から直接判断することはできない。そこで、式(15)を用いて、3部門のエネルギー消費量の増減が、合計エネルギー消費原単位に及ぼす影響を簡便的に算出する。

$$\Delta E = \sum_i \gamma_i \sigma_i S_i \quad (15)$$

ただし、 ΔE は3部門の合計エネルギー消費量の増減量、 γ_i は都市の空間的集約性から部門*i* (*i*=家庭、業務、乗用車) への標準化総合効果、 σ_i は部門*i* のエネルギー消費量の標準偏差、 S_i は部門*i* のエネルギー消費量が合計エネルギー消費量に占める割合である。

式(15)を用いて、都市の空間的集約性が全体のエネルギー消費量に及ぼす影響を算出した結果、0.0503とわずかながら正の値が得られた。つまり社会全体では都市の空間的集約性は移動エネルギーの低下に資するものの、業務エネルギーや家庭エネルギーの増加によってその影響が相殺されるため、エネルギー消費原単位には、ほとんど影響を与えないか、やや上昇する傾向が明らかとなった。

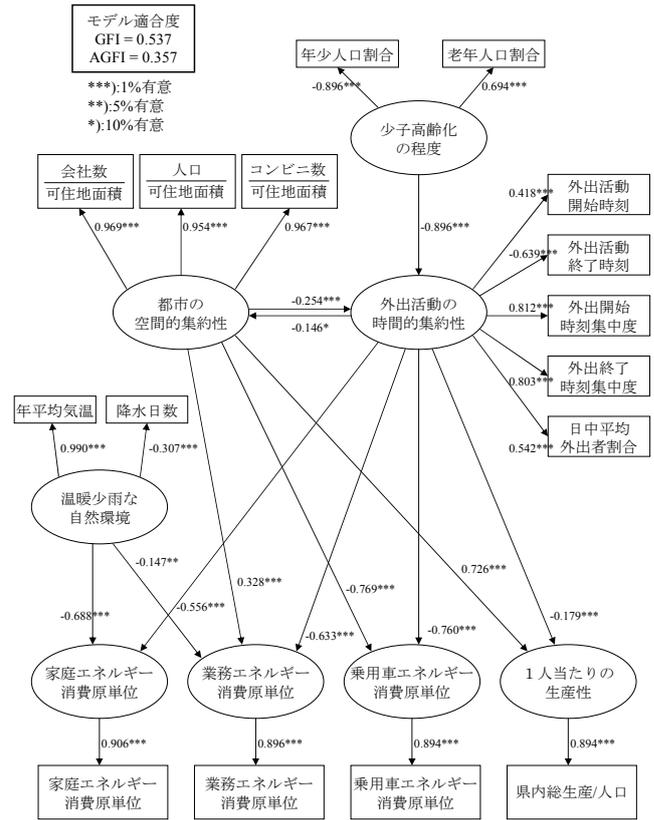


Fig. 7 因果構造モデルの推定結果

Table 6 標準化総合効果

	外出活動の時間的集約性	都市の空間的集約性	少子高齢化の程度	温暖少雨な自然環境
外出活動の時間的集約性	0.039	-0.264	-0.930	0
都市の空間的集約性	-0.152	0.039	0.136	0
家庭エネルギー消費原単位	-0.523	0.133	0.468	-0.623
業務エネルギー消費原単位	-0.634	0.455	0.568	-0.132
乗用車エネルギー消費原単位	-0.601	-0.535	0.538	0
県内総生産/人口	-0.265	0.716	0.237	0
日中平均外出者割合	0.563	-0.143	-0.504	0
外出終了時刻集中度	0.834	-0.212	-0.747	0
外出活動開始時刻	0.434	-0.110	-0.389	0
外出活動終了時刻	-0.663	0.169	0.594	0
外出開始時刻集中度	0.844	-0.214	-0.756	0
人口/可住地面積	-0.145	0.990	0.130	0
コンビニ数/可住地面積	-0.147	1.004	0.132	0
会社数/可住地面積	-0.147	1.006	0.132	0

外出活動の時間的集約性は全ての部門別エネルギー消費原単位を低下させ、1人当たりの県内総生産もわずかに低下させる。家庭において、家族が外出する時間帯が同一であれば、エアコンやテレビといった家電製品の使

用が共有されるため、家庭エネルギー消費原単位が低下すると考えられる。また乗用車に関しても、家族で乗用車を共同利用することによって、乗用車エネルギー消費原単位が低下すると考えられる。業務部門において、人々の外出活動の時間帯が集中すると、それに伴い、小売店、飲食店、娯楽施設などの商業施設の営業時間帯は集約され、施設運営に要するエネルギー消費量の低下をもたらす、1人当たりのエネルギー効率を増加させると考えられる。

都市の空間的集約性と外出活動の時間的集約性は、互いに負の影響を及ぼし合っている。これは空間的集約性が高い都市では、外出時の移動距離が小さい、あるいは外出先が多いなどの傾向によって、時間帯によらず外出できる可能性が高くなることによって、外出活動の時間的集約性が低い傾向を示していると考えられる。また、外出活動の時間的集約性が高い都市では、外出時の移動距離が長い、あるいは外出先が少ないなどのため、都市の空間的集約性が低い傾向があることが示された。

このほか、現在日本で進行している少子高齢化が今後も継続すると、外出活動の時間的集約性が低くなり、各部門のエネルギー消費原単位が増加する可能性があることが示された。以上より、都市の空間的集約性を高めることは、確実に乗用車エネルギー消費量の低下につながるものの、業務活動の活性化や外出活動の時間的な集約性が低下する副次的効果を生じることが明らかとなった。

最後に、都市活動の空間的・時間的集約性を高める政策について考察する。まず、前提として、共分散構造分析の結果は現実の各都道府県データに基づいており、現存する都市全体に共通する傾向を示している点に注意する必要がある。すなわち、特定の都市の空間的集約性を高めたからといって、直ちに外出活動が多様化して、その都市の時間的集約性が低下し、最終的にエネルギー消費原単位が増加するわけではない。そうではなく、空間的集約性を高めた都市でその傾向が実際に現れるまでには、タイムラグがある、と考えるべきだろう。

つまり、空間的集約性を高める政策を実施した都市が、その後、既に空間的集約性が高い状態の都市と類似の経緯を辿るなら、いずれエネルギー消費原単位が増加する。よって、時間的集約性の向上は、エネルギー消費原単位の増加を補償するための対抗策として、空間的集約性を高める政策の実施と並行して検討すべき、と考えられる。その際、都市活力の指標とみなされることの多い1人当たり県内総生産の低下を防ぐことが、最も重要である。

なお、空間的集約性を高める際に、ある地区から人口を完全に撤退させる空間的縮退政策をとる場合は、本モデルにとっては外挿的な状況となるため、本研究の知見をそのまま適用することはできない。得られたモデルの適合度が十分ではないことを踏まえると、空間的集約

性・時間的集約性がエネルギー消費原単位や総エネルギー消費量に及ぼす影響は、さらに検討する必要がある。

6. まとめ

本研究では、外出活動特性と都道府県別の自然環境や施設立地状況、人口構成などの都市特性が、家庭・業務・乗用車の部門別エネルギー消費原単位への影響要因の分析を行った。

社会生活基本調査データを用いて外出活動特性の時点間、および都道府県間の比較を行った結果、人々の外出時間帯は経年的にばらつく傾向があり、特に外出終了時刻は遅くなっていることが明らかとなった。また、都市の規模が大きくなるほど夜型の時間利用構造をとり、外出活動の時間帯が分散する傾向にあることが明らかとなった。1人当たりの部門別エネルギー消費量は経年的に増加する傾向がみられ、1人当たりの業務エネルギー消費量と乗用車エネルギー消費量の増加が顕著であった。

共分散構造分析を用いて、家庭・業務・乗用車の部門別エネルギー消費原単位に影響を及ぼす要因を分析したところ、家庭エネルギー消費原単位の低減には温暖少雨な自然環境の影響が大きく、業務エネルギー消費原単位と乗用車エネルギー消費原単位の低減には外出活動の時間的集約性の影響が大きいことが明らかとなった。モデル適合度が低い点については注意が必要であるが、分析結果は、「都市活動の時間的集約性を高めるとエネルギー消費原単位が低下する」可能性があることを示唆するものである。また、1人当たりの県内総生産の増加には都市の空間的集約性の影響が大きいことが明らかとなった。よって、部門別エネルギー消費原単位低減のためには、外出活動の時間的集約性を高めることが有効であるが、外出活動の時間的集約性と都市の空間的集約性はトレードオフの関係にあり、外出活動の時間的集約性を高めると1人当たりの県内総生産が低下することが明らかとなった。

以上のように、本研究ではマクロな観点から都市の空間的集約性と時間的集約性、およびエネルギー消費量の関係を明らかにしたが、残された課題も多い。以下に今後の課題をまとめる。

本研究では、都道府県レベルでは外出活動の時間的集約性がエネルギー消費原単位の低減に有意に働くことを明らかにしたが、モデル適合度が低くモデル精度の向上は重要な課題である。そのためには、エネルギー消費原単位に影響を及ぼすと考えられる指標についてのマクロレベルでのデータ整備、および市町村やそれよりも小地域での住民行動やエネルギー消費量に関するデータ整備が不可欠である。また、本研究では、標本数を補うため

に、複数時点のデータを同時に取り扱った。そのため、例えば、技術進歩によるエネルギー消費原単位の経年変化が考慮できておらず、モデル構造の改善が必要である。また化石燃料から二次エネルギーである電気等へのエネルギーの形態の転換効率を考慮していない。環境負荷低減を目指すためには部門別のエネルギー変換効率を考慮した分析を行う必要がある。さらに、都道府県を単位とした分析では、都市の内部構造を無視した平均密度を用いることになる。市町村レベルなど小地域で分析しても同様の問題が生じる。一方、分析単位を細分化すれば、エネルギー消費量に関するデータの質が低下する。都市構造の表現とエネルギー消費のデータの質のトレードオフを考慮した分析方法の開発は重要な課題である。また今後は、これらを踏まえて具体的な規制誘導策について、シミュレーション分析等を通じて検討する必要がある。

参考文献

- 1) 総務省 (1996~2006) 『社会生活基本調査』。
- 2) Newman, P.W.G., and Kenworthy, J.R. (1989). *Cities and Automobile Dependence, An International Source Book*, Gower.
- 3) McNally, M.G., and Ryan, S. (1993). Comparative assessment of travel characteristics for neotraditional designs, *Transportation Research Record*, 140, 67-77.
- 4) Crane, R. (1996). Cars and drivers in the new suburbs: Linking access to travel in neotraditional planning. *Journal of the American Planning Association*, 62(1), 51-65.
- 5) Kitamura, R., Mokhtarian, P.L., and Laidet, L. (1997). A micro-analysis of land use and travel in five neighborhoods in the San Francisco Bay area. *Transportation*, 24, 125-158.
- 6) Lee, Y., Wachington, S., and Frank, L.D. (2009). Examination of relationships between urban form, household activities, and time allocation in the Atlanta Metropolitan Region, *Transportation Research part A*, 43, 360-373.
- 7) Bhat, C.R., and Guo, J.Y. (2007). A comprehensive analysis of built environment characteristics on household residential choice and auto ownership levels. *Transportation Research Part B*, 41(5), 506-526.
- 8) Wilkinson, P., Smith, K.R., Beevers, S., Tonne, C., and Orescryn, T. (2007). Energy, energy efficiency, and the built environment, *Lancet*, 370(9539), 1175-1187.
- 9) Kaza, N. (2019). Understanding the spectrum of residential energy consumption: A quantile regression approach, *Energy Policy*, 28, 6574-6585.
- 10) 林良嗣, 富田安夫, 土井健司, スパラット・リチカ, 加藤博和 (1992) 「都市交通によるエネルギー消費およびその環境負荷への影響に関する比較」『土木計画学研究・講演集』15, 939-944.
- 11) 小根山裕之, 大西博文 (1997) 「環境負荷の小さい都市構造・交通体系に関する一考察」『土木計画学研究・講演集』20 (2), 129-132.
- 12) 中井秀信, 森本章倫 (2008) 「コンパクトシティ政策が民生・交通部門のエネルギー消費量に与える影響に関する研究」『土木学会論文集D』64(1), 1-10.
- 13) 桑野将司, 塚井誠人, 三田遼平, 高松由彦 (2011) 「個人の外出時間に基づく社会的時間利用構造に関する経年分析」『土木学会論文集D3』67(5), I_563-I_751.
- 14) 戒能一成 (2014) 「都道府県別エネルギー消費統計」『独立行政法人経済産業研究所』
<http://www.rieti.go.jp/users/kainou-kazunari/energy/index.html> [2014. January. 30].
- 15) 豊田秀樹 (2007) 『共分散構造分析 [理論編]』朝倉書店.
- 16) 朝日新聞出版 (2008) 『民力200』.
- 17) 総務省 (2014) 『地域別統計データベース』
<http://www.e-stat.go.jp/SG1/chiiki/CommunityProfileTopDispatc>
hAction.do?code=2 [2014. January. 30].

ANALYSIS OF ENERGY CONSUMPTION CONSIDERING TEMPORAL CONCENTRATION OF OUT-HOME ACTIVITY

Masashi KUWANO¹, Makoto TSUKAI²

¹Dr. Eng., Associate Professor, Tottori University, Graduate School of Engineering
(E-mail: kuwano@sse.tottori-u.ac.jp)

²Dr. Eng., Associate Professor, Hiroshima University, Graduate School of Engineering
(E-mail: mtukai@hiroshima-u.ac.jp)

In recent years, an individual duration of out-home activity is staggered due to the diversified lifestyle. On the other hand, the business or retail activities extends the business hours so that the energy consumption of those sectors

have been increased. The purpose of this study is to clarify the effect of temporal concentration of out-home activity on sector energy consumptions. This study uses the Survey on Time Use and Leisure Activities conducted by the Ministry of General Affairs in 1991, 1996, 2001, and 2006. The analysis of covariance structure showed that home sector energy consumption was significantly influenced by regional climate, and business and transport sector energy consumption was significantly influenced by the temporal concentration of out-home activity.

Key Words: *survey on time use and leisure activities, compact city, per-capita GRP, structural equation modeling*