

第2章 インドネシアの都市化と温室効果ガス* (中間報告)

橋口 善浩[†] 東方 孝之[‡]

要約：

本稿は「インドネシアの都市化の影響：企業の生産性と労働移動の分析」研究会の中間報告書である。本研究会は、インドネシアの最小の行政単位である Desa/Kelurahan（以下、行政村と呼ぶ）レベルの人口と面積データを用いて、都市の地理的な範囲、位置およびその強度を数値化・可視化するとともに、都市の拡大が企業の生産性、農村家計の所得、環境問題等に及ぼす影響を明らかにすることを目的としている。本稿はその中間報告として、行政村レベルの CO2 排出量データベースの構築作業の成果および都市化と環境負荷問題に関する暫定的な分析結果を報告する。今回の分析結果に従えば、都市の拡大は都市人口一人当たりの CO2 排出量を増大させる傾向にあった。

キーワード：都市圏, City Clustering Algorithm, CO2 排出量, 小地域データ, GIS

はじめに

都市化は温室効果ガス（二酸化炭素，CO2）の排出量削減に寄与しているのか。この問題に対してコンパクトシティ理論に従えば、都市化の進展により規模の経済が働き（たとえば、一人当たりのガソリンスタンドの数，電線の長さ，道路の面積などが減少），それによりエネルギーの利用効率は高まる（一人当たり CO2 排出量は減少する）と考えられ

* 本稿は「インドネシアの都市化の影響：企業の生産性と労働移動の分析」研究会の中間報告書である。また、本研究の一部は科研費 25871152（代表：東方孝之）の助成を受けている。

[†] アジア経済研究所 (IDE-JETRO): Yoshihiro_Hashiguchi@ide.go.jp

[‡] アジア経済研究所 (IDE-JETRO): Takayuki_Higashikata@ide.go.jp

ている。コンパクトシティが注目されている理由はそこにある。しかし、一方で都市の高密度化は深刻な交通渋滞を招き、それがコンパクトシティの経済効果を打ち消すほどの環境負荷を与える可能性もある。また、豊かな都市に住む人はより資源インテンシブな消費パターンをとる傾向にあるとすれば、そのような都市住民の消費行動も都市の CO2 排出量の増加に寄与すると考えられる⁽¹⁾。

都市化が CO2 排出量に与える影響については、1990 年代初頭から現在に至るまで多数の実証研究が蓄積されている。その多くは国別パネルデータを使って都市人口比率と CO2 排出量の関係を計量経済学的に分析したものである。分析結果はやや混在しているものの、概して言えば、都市人口比率の増加は CO2 排出量を増やすという結果が多い。一方、都市レベルのデータを使った研究では逆の結果を示すものもあり、使用するデータの種類や推定方法などによって結果が変わる可能性を示唆している。

既存研究の一つの問題は、都市の定義が各国ごとに異なるため国際比較が難しい都市人口のデータを使用していること、そして、(そのことが理由でもあるが)都市の定義変更が分析結果に及ぼす影響を分析していない点にある。この点について、Oliveira et al (2014) は国家統計の都市の定義に依らず、City Clustering Algorithm を使って都市の境界を定義している。彼らが採用した方法は、緯度 0.1 度×経度 0.1 度のグリッドセル単位の人口データを使用して、(1)一定の人口密度を越えるグリッドセルを抽出し、(2)そのグリッドセルの中で地理的に近接するものを一つの都市クラスターと定義するものである。小地域データから都市圏を算出するこの方法はボトムアップアプローチと呼ばれ、OECD (2012) も同様の方法を採用している。しかし、OECD (2012) の場合、ステップ (2) で地理的近接性からクラスターを検出した後、さらにステップ (3) として、そのクラスターが一定の人口規模以上の場合に、都市と定義する方法を採用している。

Oliveira et al (2014) はアメリカのデータを用いて都市部における CO2 総排出量と人口の関係を分析するとともに、都市の定義変更に対する分析結果の頑健性を確認している。具体的には、次の式

$$\log CO2_i = \alpha + \beta \log POP_i + \varepsilon_i \quad (1)$$

を推定し、パラメータ β が 1 を超えるかどうかの分析をしている。 $CO2_i$ と POP_i は都市 i の CO2 排出量と人口、 ε_i は誤差項である。推定の結果、 β は 1.38 程度であり、都市部における 1% の人口増加は 1.38% の CO2 排出量の増加をもたらすことを明らかにした。また、都市の定義を変えても結果は大きく変わらないことも確認している。

この中間報告書では、OECD (2012) と Oliveira et al (2014) を参考に、ボトムアップ型の方法でインドネシアの都市圏を算出し、都市の拡大が CO2 排出量に与える影響を分

⁽¹⁾ この分野の理論的なバックグラウンドや実証研究のサーベイについては、例えば、Martinez-Zarzoso and Maruotti (2011), Poumanyong and Kaneko (2010), Sadorsky (2014) や Zang et al (2017) を参照。

析する。具体的には、まず行政村レベルの人口データと地図情報を使って都市圏を算出し、その上で都市の人口規模と CO2 排出量の関係を (1) 式を使って分析する。次節でインドネシアの都市圏と CO2 排出量データベースの作成方法を説明した後、(1) 式の推定結果を報告する。

第 1 節 インドネシアの都市圏と CO2 排出量データ

使用するデータセットは 2 つある。1 つはインドネシアの都市圏データベースであり、これは 2000 年・2010 年の人口センサス (*Sensus Penduduk*) と行政村レベルの地図情報を用いて作成したものである。もう 1 つは FFDAS (Fossil Fuel Data Assimilation System) で公開されているインドネシアの CO2 排出量データである。以下、それぞれのデータについて説明する。

1 都市圏データ

OECD (2012) が提案した都市の定義を参考に、行政村レベルの人口と面積データを使って次の手順でインドネシアの都市圏を算出した。

1. 行政村レベルの単位面積当たり人口 (すなわち、人口密度) が一定値 (D^*) 以上の行政村を抽出。
2. D^* 以上の人口密度をもつ行政村で、一定の地理的範囲内 (l^*) で近接している行政村の集合は一つのクラスター (塊) とみなし、そこに含まれる行政村の人口および面積を集計する。
3. クラスター単位で集計された人口が 10 万を越える場合、そのクラスターを 1 つの都市圏とみなす。

人口データは 2000 年と 2010 年の人口センサスを使用し、行政村の面積は 2012 年版デジタル地図データベース (*Peta Digital*) を使って算出した⁽²⁾。表 1 と表 2 は上の方法で算出された 2000 年と 2010 年の都市の数 (Num), 都市人口 (Pop), 都市面積 (Area), 都市の CO2 排出量 (CO2) である。行政村別の CO2 排出量データの計算方法については次節で説明する。都市の大きさは 2 つのパラメータ (D^* と l^*) に依存するため、各パラメータに複数の値を与えて、それぞれの都市圏を算出することを試みた。具体的には、 $D^* \in \{1000/km^2, 1500/km^2, 2500/km^2, 3500/km^2\}$, $l^* \in \{Adj, 2km, 3km, 4km, 5km\}$ と定義した。 l^* が距離 (2km–5km) の場合、各行政村の中心点を結ぶ直線距離が

⁽²⁾ いくつかの行政村で 2000 年人口センサスデータが欠損しているため、その部分は 1999 年の行政村センサス (Podes) のデータで補った。

その距離以内であれば、それらを近接とみなすという定義である。 $l^* = Adj$ の場合は直線距離で近接関係を決めるのではなく、行政村が同じ境界線を共有している、すなわち、隣接関係にあるときにそれらを近接とみなすという定義である。たとえば、 $D^* = 1500/km^2$, $l^* = 3km$ のとき、都市圏の数は 76、都市人口は総人口の約 32%、都市面積は総面積の 0.8%、都市 CO2 排出量は 28% を占めている。

2 CO2 排出量データ

前節の方法で定義された都市圏に対して CO2 排出量を算出するには行政村別の CO2 排出量データが必要であるが、現時点でそのようなデータベースは公開されていない。そこで本稿は FFDAS が公開している CO2 排出量のグリッドセルデータを使用し、それを行政村レベルのデジタル地図データベース (*Peta Digital*) に統合することで、行政村別の CO2 排出量データベースを構築した。これにより CO2 排出量の詳細な地理分布が把握できるとともに、都市圏ごとの CO2 排出量の計算も可能となる⁽³⁾。

表 3 と図 1 は FFDAS から取得したインドネシアの CO2 排出量と世界銀行の World Development Indicators (WDI) のそれを比較したものである。二酸化炭素換算は CO2 排出量を二酸化炭素の重量で計測したものであり、炭素換算は炭素の重量で計測したものである⁽⁴⁾。一貫して FFDAS の値は小さいものの、2007 年までは WDI の数値とほぼ同様のトレンドを描いている。しかし、2008 年以降、両者は明らかに異なる動きを示している。FFDAS は CO2 排出量の国家統計、リモートセンシングによる夜間光、人口、発電所などのデータを用いてグリッドセル単位で CO2 排出量を計測しているが、なぜ 2008 年以降にこのようなトレンドの違いが生じるのか。さらなる調査が必要である。

図 2 と図 3 は行政村レベルのデジタル地図で CO2 排出量の分布を可視化したものである。ジャワ島の CO2 排出量は他と比較して突出しており、とくにジャカルタ周辺の濃度は高い。他島でも州都などの都市部とみられる地域を中心に CO2 排出量は高い。また、2000 年から 2010 年にかけて CO2 排出量の多い地域が全国レベルで拡大している。インドネシアにおける都市の拡大は CO2 排出量の削減に寄与しているのか。次節では、行政村レベルの都市人口および CO2 排出量データを使って都市化と CO2 排出量の関係を示す。

⁽³⁾ FFDAS は、アリゾナ州立大学の Kevin Robert Gurney と Salvi Asefi-Najafabady、メルボルン大学の Peter Rayner、そしてパデュー大学の Bedrich Benes が構築したデータベースであり、全世界の CO2 排出量データが公開されている。データは緯度 0.1 度 × 経度 0.1 度のグリッドセル単位であり、1997 年から 2011 年まで利用可能である。詳細は Asefi-Najafabady et al (2014) を参照。

⁽⁴⁾ 二酸化炭素 CO2 の分子量は 44 であり、その内訳は炭素 C が 12、酸素 O が 16 となっている。CO2 と C の分子量の比は 44/12 であるため、この比を炭素重量にかければ二酸化炭素換算の重量が得られる。

第 2 節 都市化と CO2 排出量の関係：推定結果

図 4 と図 5 は (1) 式の β の 95% 区間推定値をプロットしたものである。2000 年と 2010 年の 2 つのクロスセクションデータに分けた上で、都市の定義パラメータ (D^* , I^*) の値を変えながら最小二乗推定を行った。図の横軸は I^* 、縦軸は β の 95% 区間推定値であり、 D^* の値に応じて 4 つのプロット図を示している。一部で信頼区間に 1 を含むところもあるが、概ね β の推定値は統計的有意に 1 を越えている。図中の赤のラインは、各ボックス内にプロットされている 10 個の上限・下限推定値 (o) の平均を表している。赤のラインは、2000 年・2010 年の両方で人口密度の閾値 D^* が高くなるにつれて緩やかに上昇する傾向があり、これは高密度の都市ほど都市人口当たりの CO2 排出量が高い可能性を示唆している。この暫定的な分析結果に従えば、インドネシアにおける都市化はエネルギー利用の効率化に寄与しているとは言えず、むしろ大都市ほど資源を浪費し、温室効果ガスを過剰に排出している可能性がある。

おわりに

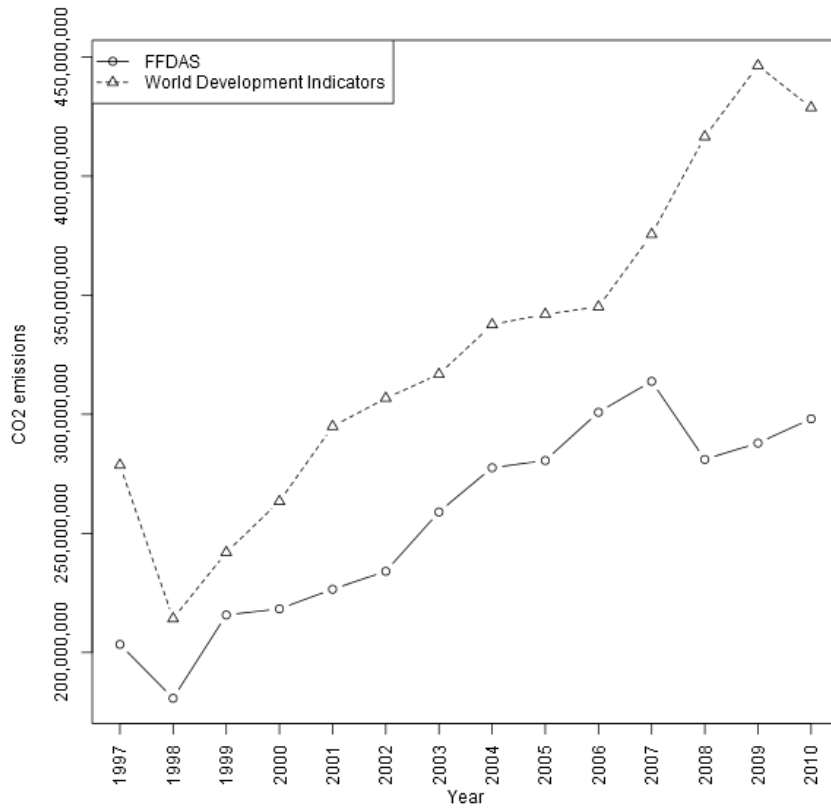
本稿は「インドネシアの都市化の影響：企業の生産性と労働移動の分析」研究会の中間報告として、インドネシアの行政村レベルの CO2 排出量データベースの構築作業および都市化と環境問題に関する暫定的な分析結果を報告した。今回の分析結果に従えば、インドネシアの都市化は必ずしも CO2 排出量の削減に寄与しているとは言えず、都市の拡大は都市人口一人当たりの CO2 排出量を増大させる傾向にあった。しかし、これはあくまで暫定的な結果であり、本稿で紹介したデータベースや計量分析の手法には解決すべき課題が残されている。今後はデータベースを拡充させることで、より精緻に都市化が環境に与える影響とそのメカニズムを明らかにしたい。

引用文献

- Asefi-Najafabady, S., P. J. Rayner, K. R. Gurney, A. McRobert, Y. Song, K. Coltin, J. Huang, C. Elvidge, and K. Baugh (2014) A multiyear, global gridded fossil fuel CO2 emission data product: Evaluation and analysis of results. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119: 10213-10231.
- Martinez-Zarzoso, I. and A. Maruotti (2011) The impact of urbanization on CO2 emissions: Evidence from developing countries. *Ecological Economics*, 70: 1344-1353.

- OECD (2012) *Redefining "Urban": A new way to measure metropolitan areas*. OECD Publishing , Paris.
- Oliveira, E. A., J. S. Andrade Jr. and H. A. Makse (2014) Large cities are less green. *Scientific Reports*, 4, Article number: 4235.
- Poumanyong, P. and S. Kaneko (2010) Does urbanization lead to less energy use and lower CO2 emissions? *Econlogical Economics*, 70: 434-444.
- Sadorsky, P. (2014) The effect of urbanization on CO2 emissions in emerging economies. *Energy Economics*, 41: 147-153.
- Zang, N., K. Yu and Z. Chen (2017) How does urbanization affect carbon dioxide emissions? A cross-country panel data analysis. *Energy Policy*, 107: 678-687.

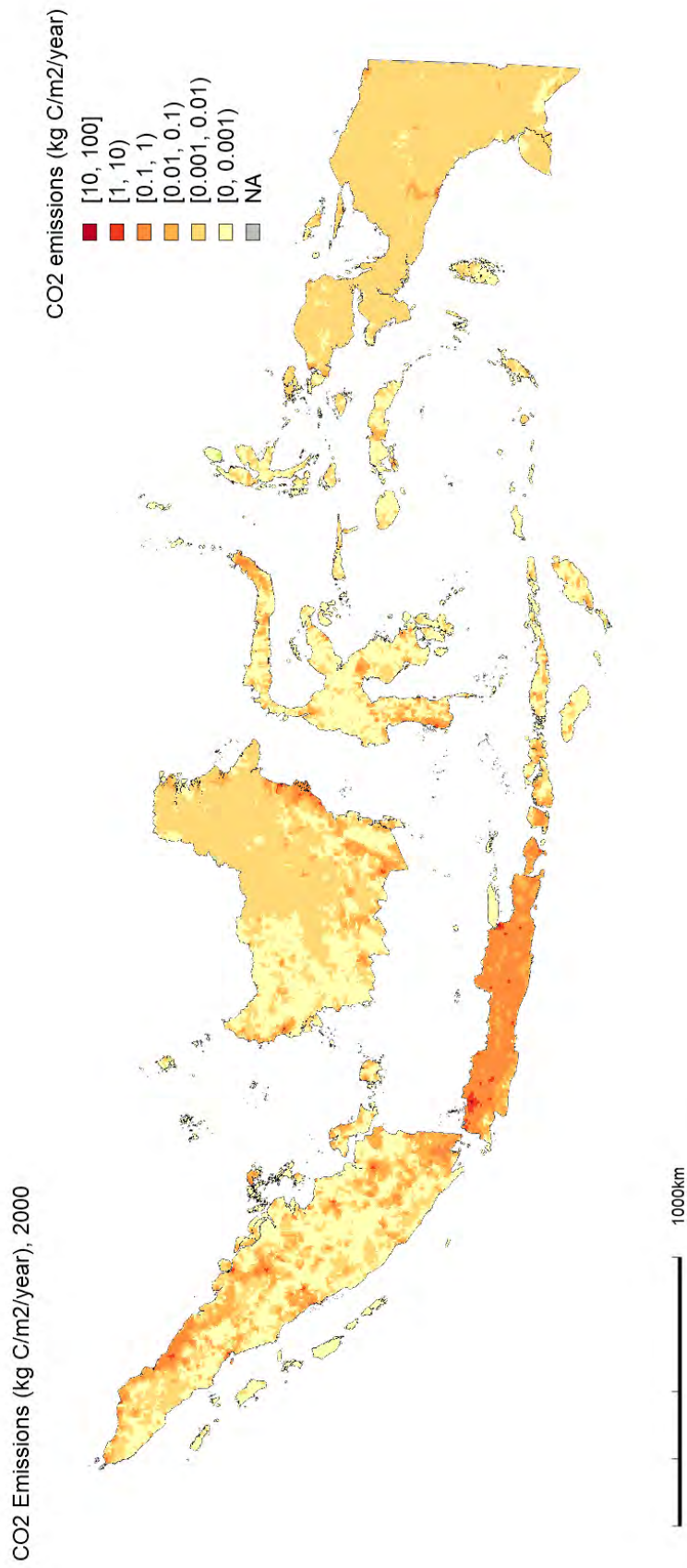
図1 CO2 排出量の比較



(出所) 筆者作成。

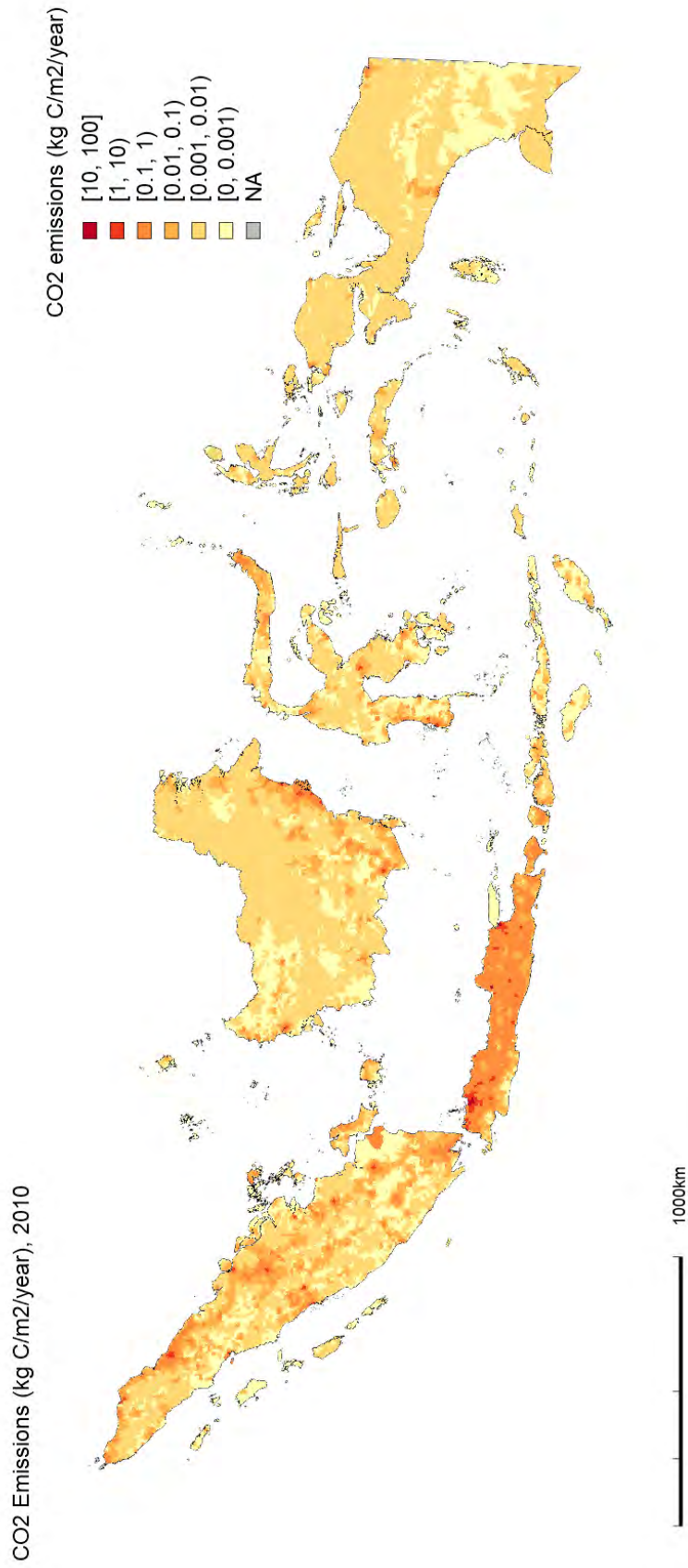
(注) 年間 CO2 排出量について、FFDAS(Fossil Fuel Data Assimilation System)と World Development Indicators の値を比較。単位は二酸化炭素換算 (1000kg CO2/year)。

図2 2000年のCO2排出量



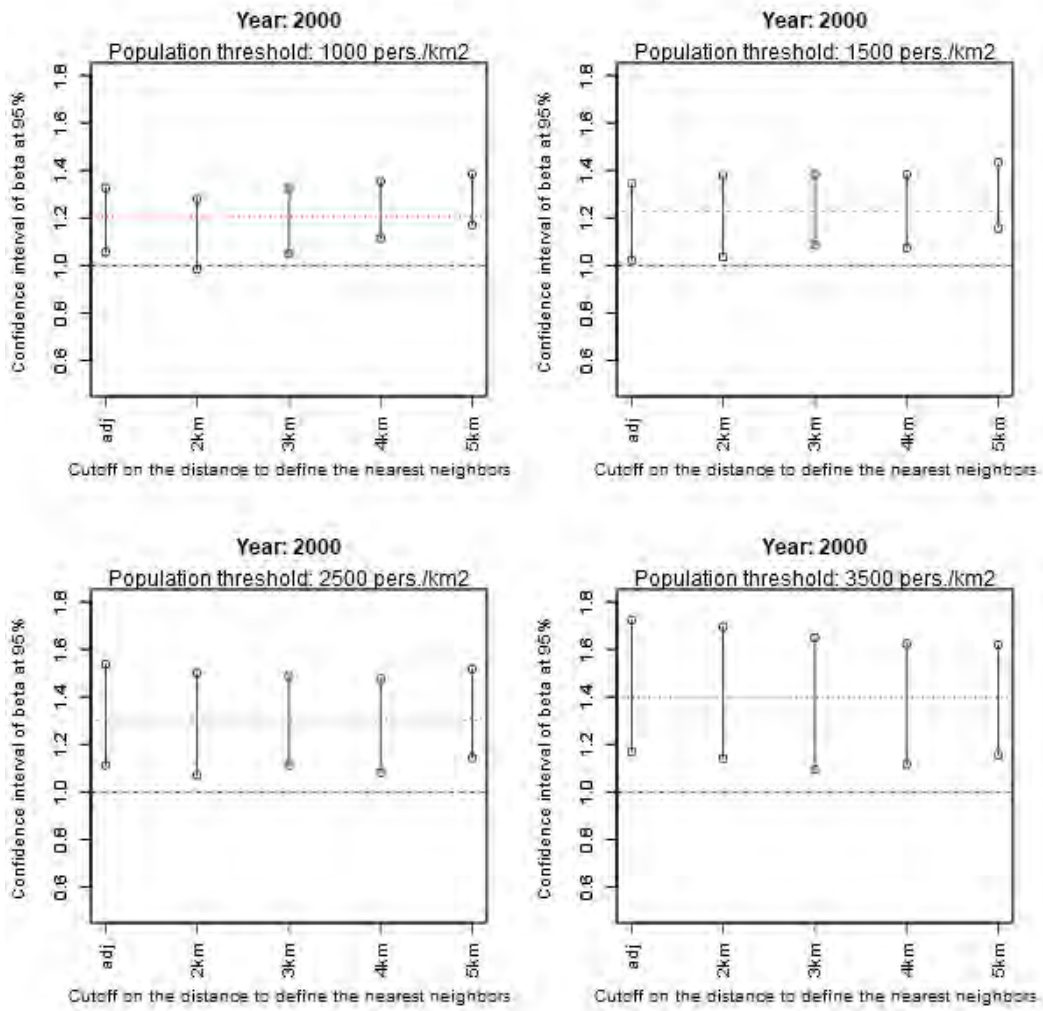
(出所) 筆者作成。(注) CO2 排出量データは FFDAS (Fossil Fuel Data Assimilation System) データベースから取得
(<http://hpcg.purdue.edu/FFDAS/map.php>)。単位は、炭素換算された1平方メートル当たりの年間CO2排出量である。

図3 2010年のCO2排出量



(出所) 筆者作成。(注) CO2 排出量データは FFDAS (Fossil Fuel Data Assimilation System) データベースから取得
(<http://hpcg.purdue.edu/FFDAS/map.php>)。単位は、炭素換算された1平方メートル当たりの年間CO2排出量である。

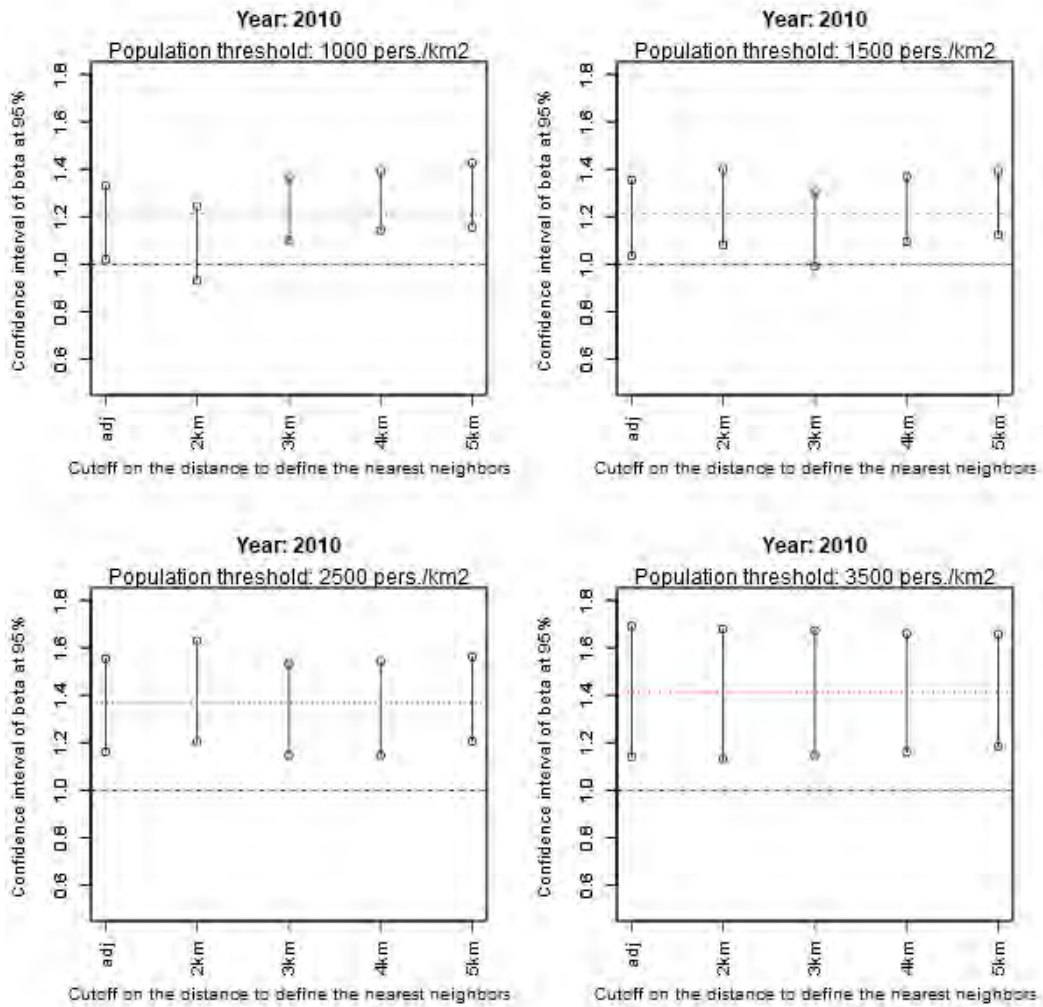
図4 CO2排出量の都市人口弾力性 (β): 2000年



(出所) 筆者作成。

(注) \circ は β の信頼区間推定値の上限値と下限値を表す。赤の点線は各ボックス内にプロットされた信頼区間推定値の平均である。

図5 CO2排出量の都市人口弾力性 (β): 2010年



(出所) 筆者作成。

(注) ○は β の信頼区間推定値の上限値と下限値を表す。赤の点線は各ボックス内にプロットされた信頼区間推定値の平均である。

表1 都市圏の数, 人口, 面積および CO2 排出量 (2000 年)

	l^*	D^* (Persons per km^2)				Share of total (%)			
		1000	1500	2500	3500	1000	1500	2500	3500
Num	Adj	74	74	63	50				
	2km	94	81	69	54				
	3km	76	76	65	53				
	4km	62	76	59	51				
	5km	59	68	56	51				
Pop	Adj	86,973,332	62,872,128	45,421,663	37,431,948	43.73	31.61	22.84	18.82
	2km	71,969,729	56,712,466	42,454,510	35,881,963	36.19	28.52	21.35	18.04
	3km	87,260,819	64,376,385	46,389,877	38,507,957	43.88	32.37	23.33	19.36
	4km	91,211,918	67,562,946	47,471,478	39,131,325	45.86	33.97	23.87	19.68
	5km	93,325,015	68,991,066	48,121,024	39,584,981	46.92	34.69	24.20	19.90
Area	Adj	31,567	14,535	6,506	4,101	1.721	0.792	0.355	0.224
	2km	21,984	11,863	5,733	3,827	1.198	0.647	0.312	0.209
	3km	31,633	15,126	6,752	4,302	1.724	0.824	0.368	0.234
	4km	34,239	16,537	7,067	4,436	1.866	0.901	0.385	0.242
	5km	35,635	17,202	7,232	4,521	1.942	0.938	0.394	0.246
CO2	Adj	22,784,396	16,725,192	12,555,401	10,668,598	38.27	28.09	21.09	17.92
	2km	18,600,500	14,796,286	11,745,268	10,281,165	31.24	24.85	19.73	17.27
	3km	22,694,265	16,834,001	12,661,652	10,822,708	38.12	28.28	21.27	18.18
	4km	23,390,389	17,324,608	12,782,703	10,893,911	39.29	29.10	21.47	18.30
	5km	23,636,956	17,476,455	12,832,452	10,922,553	39.70	29.36	21.56	18.35

(出所) 筆者作成。(注) Num, Pop, Area, CO2 はそれぞれ都市圏の数, 人口, 面積, CO2 排出量を示す。 D^* は人口密度の閾値 ($D^* \in \{1000, 1500, 2500, 3500\}$), l^* は地理的なクラスターを検出するため閾値である ($l^* \in \{Adj, 2km, 3km, 4km, 5km\}$)。たとえば, $l^* = 2km$ であれば, 人口密度が D^* 以上の行政村 i と j が半径 $2km$ 以内に存在すれば, それらを一つのクラスターと定義する。 Adj は距離ではなく, 行政村の境界線を互いに共有する場合にクラスターと定義する方法である。シェアは国全体の総和に対する割合を示している。

表2 都市圏の数, 人口, 面積および CO2 排出量 (2010 年)

	l^*	D^* (Persons per km^2)				Share of total (%)			
		1000	1500	2500	3500	1000	1500	2500	3500
Num	Adj	87	86	75	61				
	2km	104	98	81	66				
	3km	85	90	77	63				
	4km	73	83	72	61				
	5km	70	73	68	58				
Pop	Adj	108,009,820	82,591,607	61,519,444	51,713,857	46.48	35.54	26.48	22.26
	2km	86,710,156	71,625,046	55,534,143	47,464,761	37.32	30.83	23.90	20.43
	3km	107,494,519	83,877,002	62,855,417	52,388,462	46.26	36.10	27.05	22.55
	4km	112,380,331	87,279,395	64,705,876	53,381,403	48.36	37.56	27.85	22.97
	5km	114,329,647	88,874,665	65,476,045	53,744,081	49.20	38.25	28.18	23.13
Area	Adj	36,539	18,646	8,993	6,009	1.992	1.016	0.490	0.328
	2km	24,504	14,487	7,519	5,234	1.336	0.790	0.410	0.285
	3km	36,215	19,172	9,321	6,135	1.974	1.045	0.508	0.334
	4km	39,266	20,669	9,841	6,346	2.14	1.127	0.536	0.346
	5km	40,515	21,395	10,048	6,418	2.208	1.166	0.548	0.350
CO2	Adj	35,348,484	27,957,571	21,764,649	19,065,284	43.48	34.39	26.77	23.45
	2km	28,622,197	23,742,109	19,916,795	17,861,636	35.21	29.20	24.50	21.97
	3km	35,156,644	27,958,274	21,906,196	19,145,307	43.24	34.39	26.95	23.55
	4km	36,213,936	28,747,922	22,152,947	19,277,673	44.54	35.36	27.25	23.71
	5km	36,534,569	28,937,613	22,220,536	19,314,659	44.94	35.59	27.33	23.76

(出所) 筆者作成。(注) Num, Pop, Area, CO2 はそれぞれ都市圏の数, 人口, 面積, CO2 排出量を示す。 D^* は人口密度の閾値 ($D^* \in \{1000, 1500, 2500, 3500\}$), l^* は地理的なクラスターを検出するため閾値である ($l^* \in \{Adj, 2km, 3km, 4km, 5km\}$)。たとえば, $l^* = 2km$ であれば, 人口密度が D^* 以上の行政村 i と j が半径 $2km$ 以内に存在すれば, それらを一つのクラスターと定義する。 Adj は距離ではなく, 行政村の境界線を互いに共有する場合にクラスターと定義する方法である。シェアは国全体の総和に対する割合を示している。

表3 CO2 排出量の比較

	炭素換算 (FFDAS) ¹⁾ (1000kg C/year)	二酸化炭素換算 (FFDAS) ¹⁾ (1000kg CO ₂ /year)	二酸化炭素換算 (WDI) ²⁾ (1000kg CO ₂ /year)
1997	55,462,933	203,364,087	278,658,997
1998	49,294,084	180,744,973	214,200,471
1999	58,833,748	215,723,743	241,988,997
2000	59,533,691	218,290,200	263,418,945
2001	61,782,406	226,535,487	294,907,474
2002	63,837,461	234,070,691	306,737,216
2003	70,631,759	258,983,118	316,792,130
2004	75,700,476	277,568,412	337,635,358
2005	76,524,454	280,589,665	341,991,754
2006	82,047,497	300,840,821	345,119,705
2007	85,587,502	313,820,840	375,544,804
2008	76,648,818	281,045,667	416,560,199
2009	78,522,292	287,915,070	446,409,579
2010	81,300,254	298,100,930	428,760,308

(出所) 筆者作成。

¹⁾ FFDAS (Fossil Fuel Data Assimilation System)

²⁾ WDI (World Development Indicators)