

ベクトル場作成による二酸化炭素排出量の国家群分析

Global projections of energy use and carbon emissions by vector field

古藤 浩
KOTO, Hiroshi

The amount of "Energy use" is now an essential indicator and is closely relevant for climate change problem, because the use of energy brings carbon dioxide emissions. Of course the amount of "carbon dioxide emissions" is also valuable. For considering these indices, we consider these matters by indices such as "per capita" and "per 1\$ GDP". Using the data, we make vector field of two indexes on the scatter diagram. This idea makes two points of support for understanding the data, one is visual support and the other is support for constructing mathematical models. For constructing the vector field, we apply Kernel density estimation and Geographically Weighted Regression.

We show vector fields of energy use and carbon emissions, and using our diagram, we examine of the global flow of indexes. Moreover, we discuss the method and the result of forecast amounts of indexes using the vector field. In the result of data analysis, we show vector field of these indices by 120 countries during period of 1990 and 2005.

Keywords: Energy Use (エネルギー利用量), Carbon Emissions (炭素排出量), Scatter Graph (散布図), Vector Field(ベクトル場), Adaptive Spatial Kernel (適合的空間カーネル)

1. はじめに

炭素排出に関する問題は、たいへん重要な世界経済の問題となっている (Bailey I. et al. 2009, Boyed. E. (2009))。世界的な炭素排出状況について、様々な方法による研究が進んでおり、排出量の長期予測に関する研究 (Tschang and Downlatatabidi 1995)、国家間の相違についての研究がいくつかの方法でされている (Akimoto K et al. 2004, Fujii, Y et al. 1998, Warwick, J. et al. 2007)。

世界的な排出量削減の動きがあり、また国家間でも排出枠の取引をしているので、各国家がどのような状況にあるかを知るのは価値があるだろう。

CO₂排出量は、エネルギー利用量と密接な関係があり、またエネルギー利用量は経済的な成長状況と密接な関係がある。CO₂排出削減や、エネルギー革新の技術的な研究は重要であるが、これらの指標に関する環境の国家間の状況の差異を把握することも重要である。

国家のエネルギー利用の状況は各国家のおかれる様々な条件によって決まり (Sala-i-Martin (1992))、エネルギーの種類別での世界のエネルギー利用傾向の分析は Akimoto, K et.al.(2004), Kotoh, H & Yanai, H (2009)などで研究されている。エネルギーに関する環境と変化傾向は先進国と発展途上国で大きく異なり、国家体制によっても相違は大きい。エネルギー利用量での国家間の関連性について、同じ条件ならば発展途上国の成長がより早い可能性が Barro and Sala-i-Martin (1992) によって指摘されている。一方、Brock and Taylor (2005) , MacKibbin and Stegman (2005)

ではエネルギー利用量とその一人あたりの値やGDPあたりの値について、関係と収束傾向を考察し、予測を試みている。また、排出量に関する増加傾向や収束については経済的な成長との関連に注目した分析としてBagnoli, P. et.al.(1996)を挙げることができる。経済問題においてもQuah, D. T.(1996)によってGDP成長の収束条件や問題について詳しい分析がなされている。

本論文ではCO₂排出量およびエネルギー利用量の両方に注目する。そして、それらの指標の「一人あたり」と「GDP1\$あたり」の二種類の指標の分析をおこなう。地球温暖化の問題は排出量総量によるものであるのは明らかである。しかし、その問題を解決するために犠牲にする・制限する・効率性を上げる対象は私たちの生活や経済性であり、それは一人あたりやGDP1\$あたりといった指標で考えるのが適切である。分析では視覚的な理解のしやすさと数理的な分析への接続性を重視するため、指標間のベクトル場作成をおこなう。「一人あたり」と「GDP1\$あたり」の二つの指標だけで議論することは影にある重要な指標を見落としている可能性もあるが、増加傾向や収束状況は国家の状況と国家間の相対的な関係を把握するのに有効だろう。

なお、ベクトル場作成においてはカーネル密度推定(Silverman, 1996)とGWR (Geographically Weighted Regression, Fotheringham, 2002)の考え方を応用した。

炭素排出はエネルギー利用の結果として起こると考えられるので、議論の順序はまず、エネルギーの利用量、その後でCO₂排出量とする。以上をふまえた論文の構成は、2章でデータのアウトラインを説明し、3章で散布図上でのデータの状況を、4章で散布図上での変化傾向を分析する。ここで議論する散布図面はベクトル場を作る対象空間となる。そして、5章でベクトル場の定義と作成結果の吟味をおこない、6章でまとめる。

分析するデータは世界の主要120ヶ国の1992年から2005年までの13年間のデータであり、その出典は国際連合のデータベース (United Nations, 2009) である。なお、1992年以前はソ連邦の消滅などの問題で多くの国のCO₂排出量データの欠落がある。

2. データの概要

(1) エネルギー利用量データの概要

国際連合によって整理されたエネルギー利用量(石油換算量)データの定義は次の式のようにになる:

$$[\text{生産}] + [\text{輸入}] - [\text{輸出}] - [\text{輸送中の消費}] \pm [\text{在庫}]$$

本研究では1992年から2005年のエネルギー利用量とCO₂排出量の両方のデータが揃う120ヶ国を分析対象とする。対象国家リストは表1のようになり、国連のデータベースで人口統計がある234国家・地域の2005年人口の93.8%をカバーする。なお、表1の地域名は3節の分析での地域分割区分を示している。

エネルギー利用量のデータは1990年から得ることができる。そして、1990年から2005年への対象国家合計でのエネルギー関連の主要指標値の変化は次の通りである。エネルギー消費量は1.86倍に、GDPは2.28倍に、人口は1.34倍になり、従ってエネルギー利用傾向としてみれば、世界全体での「一人あたりエネルギー利用量」は1.39倍に、「GDP1\$あたりエネルギー利用量」は0.82倍に変化した。一人あたりの場合を含み利用量は増加傾向にある。

次に、特徴的な国家の2005年エネルギー利用量を表2・表3に示す。表2に示す使用量最大の中国と(リトル)コンゴでは消費量に5千倍以上の差がある。表2からわかるとおり、エネルギー消費量は国家間で大きな相違があるが、それは国家規模の影響が大きい。そこで、国家規模の影響を除くため「一人あたりエネルギー利用量」、「GDP1\$あたりエネルギー利用量」という二種類の基準化をした上でデータを吟味する。

なお、GDP1\$当たり利用量での「\$(ドル)」は2005年のPPP (Purchasing Power Parity, 購買力平価) ドルである。国家間比較でのPPPドル利用の合理性はDowrick, S.(2001) や Castles & Henderson(2003)で議論されている。そこでは市場レートは経済的なウェイトが大きな部門の相違からのバイアスがかかり不安定であることが指摘され、PPPドルの利用の方が適切に分析できると結論づけられている。

「一人あたり年間エネルギー利用量」は国家の平均的な生活レベル、「GDP1\$あたりエネルギー利用量」は効率性の指標と考えることができる。表3では基準指標値が上位/下位の各3国家を示す。一人あたりでエ

表1 分析対象国家とその2005年人口

国名	地域	2005年人口 (千人)	国名	地域	2005年人口 (千人)	国名	地域	2005年人口 (千人)	国名	地域	2005年人口 (千人)
Albania	ヨーロッパ	3111	Azerbaijan	旧ソ連邦諸国	8453	Yemen	**	21024	Singapore	南・東アジア	4267
Austria		8232	Belarus		9816	Angola	サハラ以南アフリカ	16618	South Korea		47566
Belgium		10415	Estonia		1347	Benin		7868	Sri Lanka		19531
Bulgaria		7739	Georgia		4465	Botswana		1839	Thailand		65946
Croatia		4443	Kazakhstan		15194	Cameroon		17823	Viet Nam		84074
Czech R.		10195	Kyrgyzstan		5221	Congo		3417	Australia		20395
Denmark		5417	Latvia		2292	Cote d'Ivoire		19245	New Zealand		4111
Finland		5244	Lithuania		3416	D.R. Congo		59077	Argentina	38732	
France		61013	Moldova		3759	Gabon		1369	Bolivia	9182	
Germany		82409	Russia		143170	Ghana		21915	Brazil	186075	
Greece		11064	Tajikistan		6536	Kenya		35817	Canada	32307	
Hungary		10078	Ukraine		46936	Mozambique		20834	Chile	16297	
Iceland		296	Uzbekistan		26320	Namibia		2009	Colombia	43049	
Ireland		4187	Algeria		32855	Nigeria		140879	Costa Rica	4328	
Italy		58645	Bahrain	728	Senegal	11281		Dominican R.	9533		
Luxembourg		464	Cyprus	836	South Africa	48073	Ecuador	13063			
Macedonia		2035	Egypt	77154	Sudan	38698	El Salvador	6059			
Malta		403	Ethiopia	74661	Tanzania	39007	Guatemala	12710			
Netherlands		16316	Iran	70765	Togo	5992	Haiti	9410			
Norway		4635	Israel	6692	Zambia	11738	Honduras	6893			
Poland		38198	Jordan	5566	Bangladesh	153122	Jamaica	2668			
Portugal		10547	Kuwait	2700	China	1312253	Mexico	105330			
Romania		21635	Lebanon	4082	Hong Kong	6883	Nicaragua	5455			
Slovakia		5386	Morocco	30495	India	1130618	Panama	3232			
Slovenia		2001	Oman	2618	Indonesia	219210	Paraguay	5904			
Spain		43060	Saudi Arabia	23613	Japan	127449	Peru	27836			
Sweden		9066	Syria	19121	Malaysia	25633	Trinidad and Tobago	1318			
Switzerland		7441	Tunisia	9878	Nepal	27222	U.S.A.	302741			
United Kingdom		60261	Turkey	71169	Pakistan	165816	Uruguay	3325			
Armenia		*	United Arab Emirates	4089	Philippines	85496	Venezuela	26726			

* 旧ソ連邦国家 ** 西アジアの国家

表2 エネルギー利用量の多い・少ない5国家 (2005)

多い5国家	キロトン	少ない5国家	キロトン
China	2998468	Albania	2343
U.S.A.	2521349	Botswana	2051
India	930236	Gabon	1018
Russia	574274	Malta	936
Japan	540491	R. Congo(リトルコンゴ)	607

表3 一人あたり・GDP1\$あたりエネルギー利用量の多い・少ない3国家 (2005)

	一人あたり年間 エネルギー利用量(t)	GDP1\$あたり エネルギー利用量(kg)
Iceland	13.49	0.345
United Arab Emirates	12.16	0.342
Luxembourg	10.05	0.150
Senegal	0.37	0.168
R. Congo(リトルコンゴ)	0.18	0.102
Yemen	0.16	0.146
D.R. Congo(旧ザイール)	0.88	1.080
Uzbekistan	1.96	0.895
Mozambique	1.01	0.734
Uruguay	0.99	0.094
Peru	0.51	0.078
Hong Kong	2.70	0.074

表4 CO₂排出量の多い・少ない5国家 (2005)

多い5国家	キロトン	少ない5国家	キロトン
U.S.A.	5897697	Gabon	1984
China	5622452	Mozambique	1883
Russia	1507268	Haiti	1789
India	1419092	R. Congo(リトルコンゴ)	1520
Japan	1295634	Togo	1285

※斜体はエネルギー利用量でも多い/少ない5国家に入った国家。

表5 一人あたり・GDP1\$あたりCO₂排出量の多い・少ない3国家 (2005)

	一人あたり年間 CO ₂ 排出量 (t)	GDP1\$あたり CO ₂ 排出量 (kg)
Kuwait	33.29	0.814
United Arab Emirates	33.06	0.677
Bahrain	27.16	0.967
Mozambique	0.09	0.133
Ethiopia	0.07	0.116
D.R. Congo(旧ザイール)	0.04	0.137
Uzbekistan	4.23	2.150
Kazakhstan	11.65	1.345
Ukraine	6.97	1.244
Cameroon	0.21	0.107
Gabon	1.45	0.105

※斜体はエネルギー利用量でも多い/少ない3国家に入った国家。

エネルギーを最も使っているのはアイスランド、最も少ないのはイエメンで、その差は84倍にもなる。またGDP1\$あたりで最もエネルギーを使っているのはD.R.Congo、最も使っていないのは香港で、その差は14倍となる。気候が激しい国は一人あたりでのエネルギーを必要とする、先進国ほどGDP1\$あたりのエネルギーは少なく効率がよいといったことが考えられるが、いずれにしても基準化しても数十倍の国家格差がある。

(2) 二酸化炭素排出量データの概要

CO₂排出量のデータもエネルギー排出量同様に国連のデータベースから得ることができる。それは、米国エネルギー省の管轄組織である二酸化炭素情報分析センター（The Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC)）で調査された値である。CDIACのデータベースでははじめから「一人あたりCO₂排出量(トン)」と「GDP1\$あたりCO₂排出量(kg)」という指標で整理されて供用されている。特徴的な国家の2005年CO₂排出量を表4・表5に示す。

表4に示すCO₂排出量最大のアメリカ合衆国とトゴでは消費量に4500倍の差があり、エネルギー利用量同様の傾向が見える。エネルギー利用量が多い国家のCO₂排出量も多く、順位こそ相違があるが上位五ヶ国は共通である。エネルギー利用量同様に「一人あたりCO₂排出量」、「GDP1\$あたりCO₂排出量」という二種類の基準化の基で、上位/下位の各3国家を示したのが表5である。

一人あたりCO₂排出量が最も多いのはKuwait、最も少ないのはD.R.Congoであり、その差は911倍もある。一人あたりCO₂排出量は中東など資源産出国で大変多い傾向にある。またGDP1\$あたりで最もCO₂排出量が多いのはウズベキスタン、最も少ないガボンで、その差は20倍となった。基準化しても数十倍～数百倍の国家差がある。

世界の排出総量ならば1990年から得られるので調べれば、CO₂排出量は2005年までの15年間に1.31倍になった。その比はエネルギー利用量の増加よりも少なく、人口増加にほぼ比例している。

3. 両対数平面散布図による分析

次の四指標値の値と変化の相互関係に注目する。

EUC: 一人あたりエネルギー利用量 (Energy Use per Capita)

EUG: GDP 1\$あたりエネルギー利用量 (Energy Use per GDP 1\$)

CEC: 一人あたりCO₂排出量 (Carbon Emission per Capita)

CEG: GDP 1\$あたりCO₂排出量 (Carbon Emission per GDP 1\$)

最初の分析として、2005年での散布図でデータの様子を概観する。ここでは、さらに国家の位置、一人あたりGDP、首都の年平均気温の情報も加えて分析する。すると、4つのデータに関する各国家位置はその置かれた状況・条件と密接な関係があることがわかる。

まず、EUCとEUGの散布図で、地域ごとに記号を変えて示すと図1のようになる。アフリカや中東、旧ソ連邦の国家に大きなEUGの値が見られるが、原点近くに多くの国家が集中しており、詳細がわかりにくい。そこで、図1のデータを両対数平面で見れば図2のようになる。この場合、原点は一人当たり1t/年(横軸)、GDP1\$当たり1kg(縦軸)の利用量の位置となる。すると、ヨーロッパの国家はEUCが多くEUGが少ない位置に、アメリカの国家はEUCが中位でEUGが少ない位置に、サハラ以南のアフリカは一人あたりが少ない位置に東及び南アジアはEUGが中位にあることがわかる。二つの指標値のオーダーが似るように単位を決めたが、対数値なので単位変換しても定数項だけに変化し、データの位置関係は変化しない。例えば一人あたり利用量の単位をkgにするならば図2の横軸の値に3を足せばよいし、一日あたりにするならば2.56(= $\log_{10}365$)引けばよい。図2での各国家の位置を詳細に調べると、大まかな傾向として、日本や多くの西ヨーロッパ諸国は右下に、旧ソ連邦諸国は右上に、中南アフリカ諸国は左上に、中南米諸国は主に左下に位置しているとわかる。

次に、図2の散布図のマークを気温に変えると図3になる。平均気温が10度以下の国は一人あたりが多いこと、25度以上の国は一人あたりが少ないか、または多いかのいずれかに分かれることがわかる。さらに、

図2の散布図のマークを一人あたりGDPにすれば図4になり、一人あたりGDPが多いほど、EUGもEUCも小さいという傾向をはっきり見ることが出来る。ただし、一人あたりGDPが多くない国家ではそれほどはっきりした傾向とも言えない。

CO₂排出量についても見てみよう。CECとCEGの散

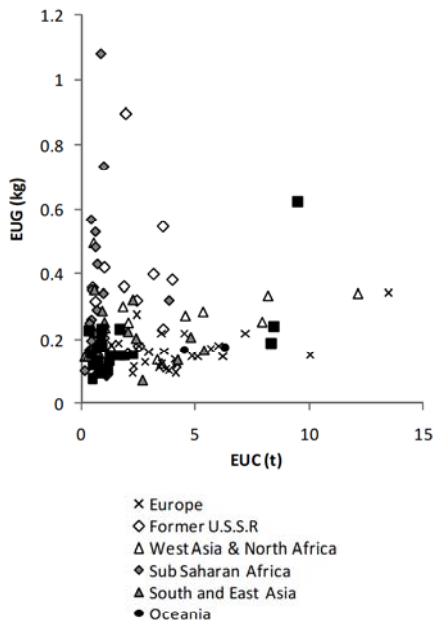


図1 地域区分によるEUCとEUG

布図で、地域ごとにマークを変えれば図5のようになり、図1と似たような傾向を得る。両対数平面でCECとCEG一人あたりGDPの大きさに応じてマークを変えれば図8を得、一人あたりGDPに強く依存した中でCECとCEGが比例する傾向がわかる。

EUCとCECの関係は図6のようになり相関係数も

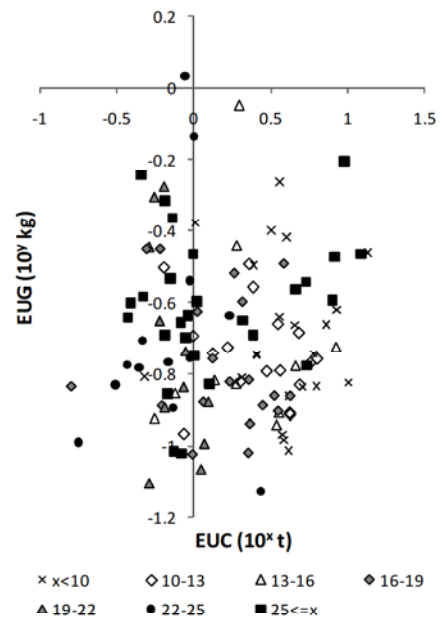


図3 国家平均気温区分でのEUCとEUG (両対数平面)

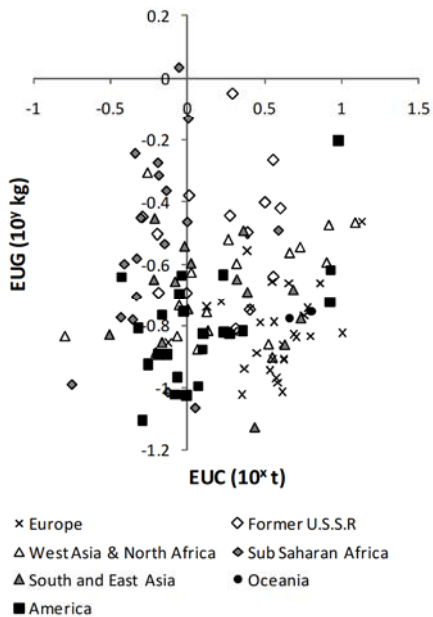


図2 地域区分によるEUCとEUG (両対数平面)

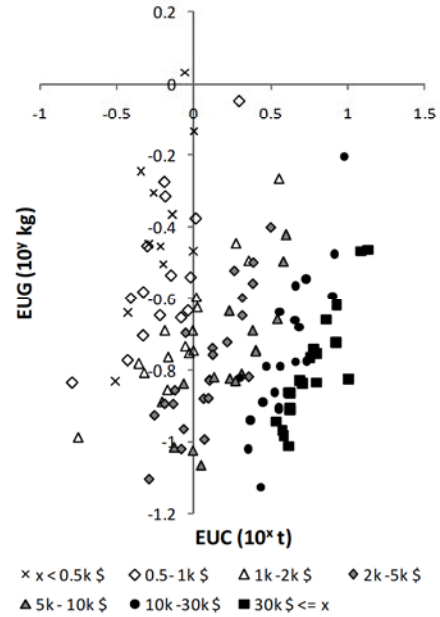


図4 一人あたりGDP区分によるEUCとEUG (両対数平面)

0.87と高い。しかし、アイスランドのように大きくずれがある国家もある。EUGとCEGの関係は図7で示され相関係数は0.44とそれほど高くなく、CO₂排出量はエネルギーの利用量と必ずしも似た傾向にはない。1\$あたりGDPが少ないサハラ以南アフリカの国家で、一人あたりCO₂排出量が少ないのは共通でも、一人あた

りエネルギー利用量に大きな国家差がある。これらの相違の理由には利用エネルギーの種別によって、CO₂の排出量が異なる（原子力は少ない、石炭は多い）ことの影響が考えられる。また、エネルギー利用とは別に、工業プロセス（ex.セメント製造工程など）、廃棄物の処理でCO₂が排出されることの影響も考えられる。

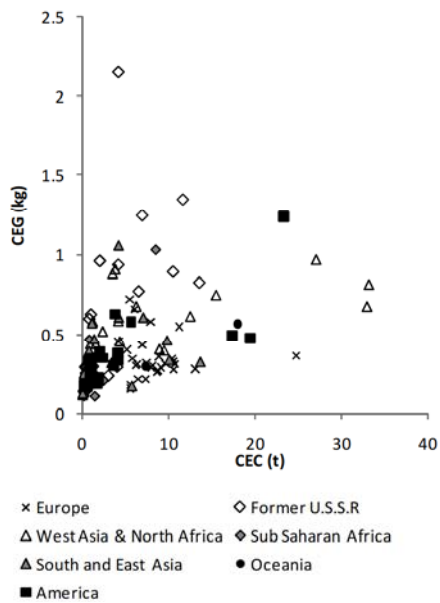


図5 地域区分によるCECとCEG

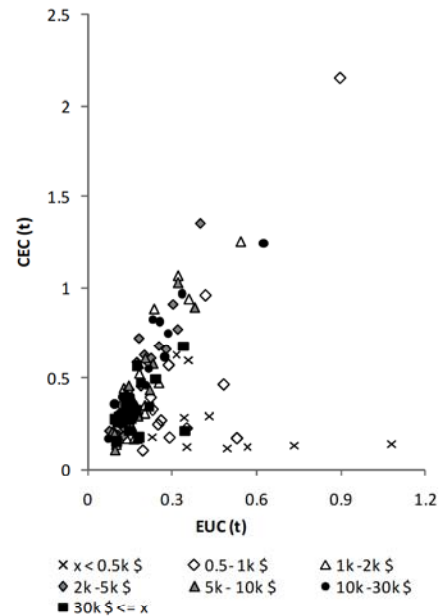


図7 一人あたりGDP区分によるEUGとCEG

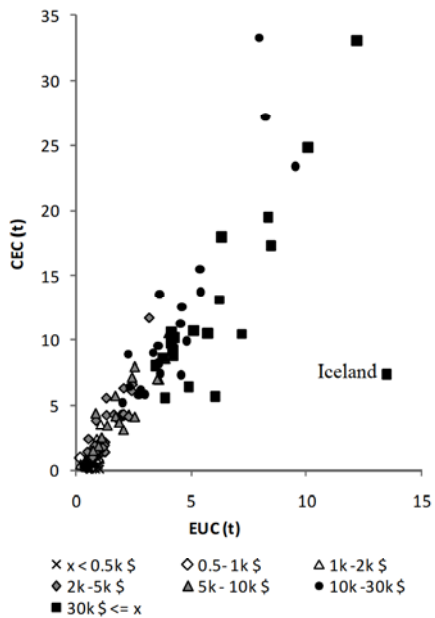


図6 一人あたりGDP区分によるEUCとCEC

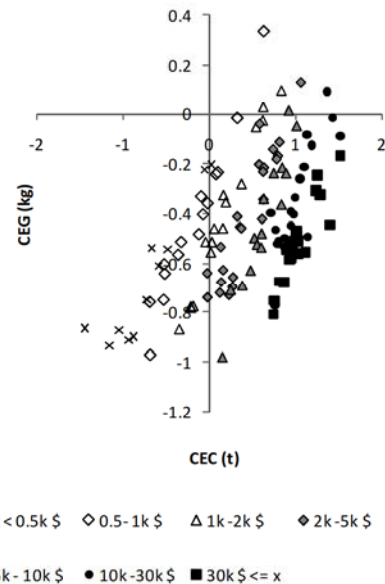


図8 一人あたりGDP区分によるCECとCEG (両対数軸)

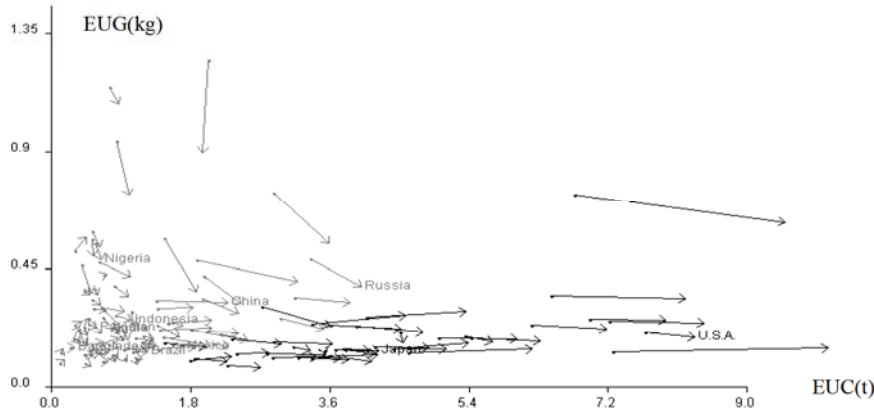


図9 EUCとEUGの散布図上での2000年から2005年への変化

図1～図8で見たように、国家単位のエネルギーや炭素排出に関するこれら散布図は、各国家の特性・状況を大まかに表している。「GDP1\$あたりエネルギー利用量」はエネルギー利用の効率性のバロメータと考えられる。この値が大きければ経済活動での効率性が低いことが考えられる。例えば、多くの旧ソ連邦国家のこの値は大きい。寒冷な気候のため、暖房などのためエネルギーを多く使っていることも考えられるが、それは居住効率のよくない場所に居住しているためとも言える。

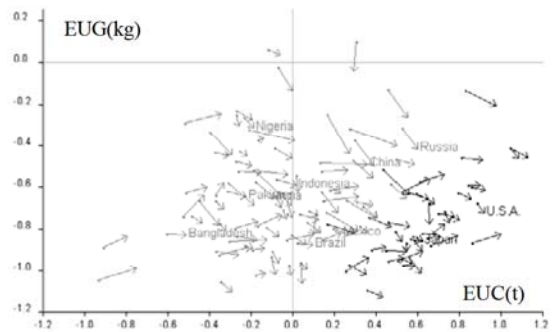


図10 EUCとEUGの対数散布図上での2000年から2005年への変化

4. 両対数軸散布図で見るデータ変化傾向

散布図で示したような国家の位置は、これまでの図で見たように国家の状況と関係しているのでエネルギーや炭素排出の変化傾向にも関係していると考えられる。そこで、2000年から2005年へのEUCとEUGの変化を散布図に表すと図9になる。図9では世界の人口が多い10ヶ国のみ国名を書き、また一人あたりGDPが多い40ヶ国（10k\$以上）は黒く、他は灰色で書いた。全般的に「一人当たりの増加」と「GDP1\$あたりの減少」の二つの傾向が見える。また一人あたりが少ない国家の右上への変化傾向、GDP 1\$あたりが多い国家の激しい減少傾向も見える。原点近くに多くの国家が集中して判別困難なので、両対数軸の上で表示すれば図10になる。

値が小さな国家も全体としては同様の、EUGを減らしながらEUCを増やす傾向にあることがわかる。図

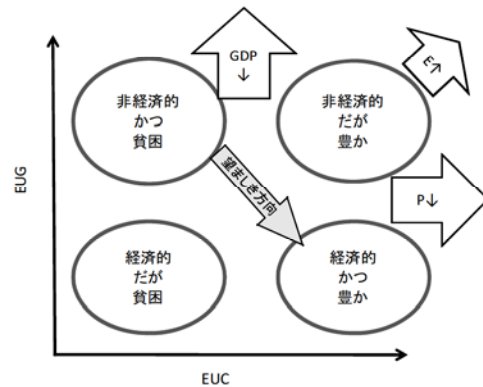


図11 散布図での位置・変化と解釈・可能性

9・図10の考察・解釈は図11のように整理できよう。図11では散布図上での位置から得る国家の状態を示す。そして、望ましい変化方向と、指標値の変化による変化方向を示す。ここで、P、E は [人口]、[エネルギー利用量] を示し、GDPを含め、↑、↓はそれらの増加・減少と、それによる散布図上でのエネルギー利用

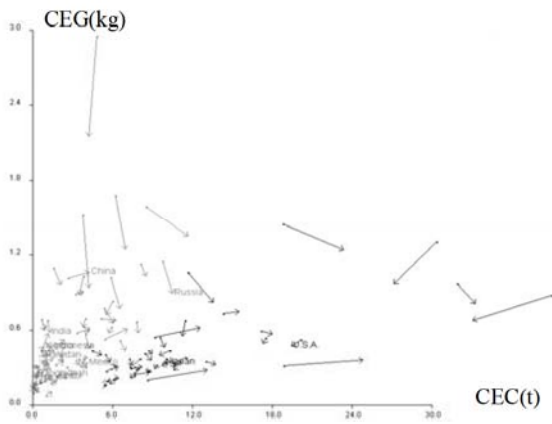


図12 CECとCEGの対数散布図上での2000年から2005年への変化

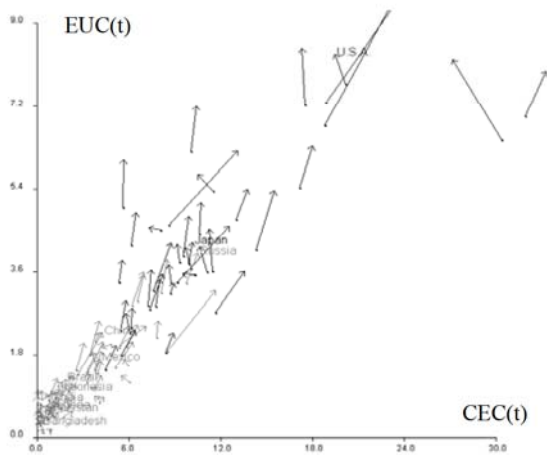


図13 EUCとCECの対数散布図上での2000年から2005年への変化

状況の変化方向を示す。まず、EUC（一人あたりエネルギー利用量）は平均的な生活レベルと考えられる。この値が大きければ、豊かな生活を送っている可能性が高い。実際、この値が相対的に大きい位置には日本や西ヨーロッパ諸国などいわゆる先進国が多い。次にEUG（GDP1\$あたりエネルギー利用量）は効率性を示すと考えられる。

右下（一人あたり↑、GDP1\$あたり↓）方向の変化の場合、二種類の変化の可能性がある。一つは豊かさや効率性の上昇で、もう一つは、エネルギーはそのままに人口減少とGDPの増加である。どの方向の変化でも複数の解釈が考えられるので、それらの可能性を検討する必要がある。

エネルギー危機への対応、豊かな生活の達成を目指

すならば右下への変化が望ましい。右下に位置する多くの先進国での、動きがあまり無いのは十分豊かな状態なので変化の必要性が少ないためと理解できる。なお、一人あたりが多すぎる水準ならば左下方向がより望ましいかもしれない。

同様の考え方は、CECとCEGの関係でもできる。CECとCEGの関係に関する2000年から2005年への変化は図12に示される。図12での望ましい変化方向は左下と考えられよう。図12からGDP1\$あたりの排出量の減少傾向が顕著であるとわかる。さらには図13、EUCとCECの散布図でも変化を考えることができ、そこでも左下が望ましい方向と言えよう。なぜなら左方向はエネルギー危機に対応する視点、下方向は地球温暖化問題を解決する方向と言えるからである。しかし完全に右上方向の趨勢にあるとわかる。

5. エネルギーとCO₂のベクトル場

(1) ベクトル場作成法について

図9、図10、図12、図13で見たような傾向は散布図上で位置に近い国家間に相関があるように見える。これらの図表から変化の流れが想定される、そのようなグローバルな流れを仮定し私たちは「ベクトル場」の形でそれを示す新しい方法を提案する。この方法はカーネル密度推定法の考え方を応用し、EUCとEUGの散布図上で、変化傾向を全体の中での流れとして把握できるようなベクトル場を作る。その上で他の指標間のベクトル場も示す。

具体的には、図9のデータからその背景にあると考えられる図14のようなベクトル場を作成する。ベクトル場の作成によって、ここからエネルギー利用量の変化の全体のメカニズムを説明する微分方程式を考察するが可能となるだろう。また、ベクトルの長さは、各位置に国家のデータがあった場合の変化方向を示すので、予測にも活用できる。エネルギー利用量の場合を第一の対象として、ベクトル場作成の考え方を説明する。これはカーネル密度推定とGWRの考え方を応用したものである。まず、用語を次のように定義する。

x_{ij} : i 国の j 年の一人当たりエネルギー利用量

$$(i=1,2,\dots,n)$$

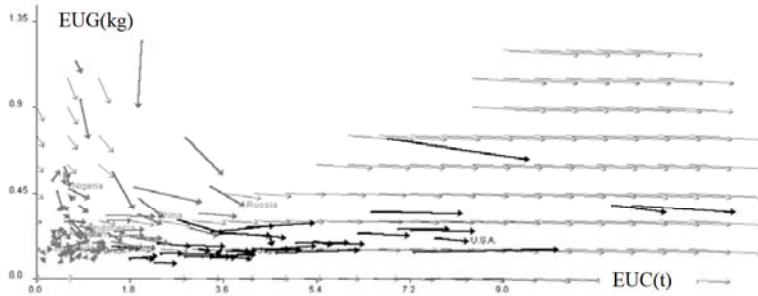


図14 EUC と EUG による2000年から2005年へのベクトル場

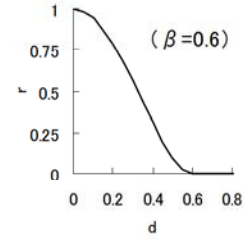


図15 式(3)のウェイト関数の数値例

y_{ij} : i 国の j 年の1\$当たりエネルギー利用量
 k : エネルギー利用量のベクトルを作るための間隔年数指標値の k 年間の変分を

$$\Delta \mathbf{x}_{ijk} = x_{i(j+k)} - x_{ij}, \quad \Delta \mathbf{y}_{ijk} = y_{i(j+k)} - y_{ij}$$

とする。更に全ての国家の変分をベクトル

$$\Delta \mathbf{x}_{jk} = [\Delta x_{1jk}, \Delta x_{2jk}, \dots, \Delta x_{nk}]$$

$$\Delta \mathbf{y}_{jk} = [\Delta y_{1jk}, \Delta y_{2jk}, \dots, \Delta y_{nk}]$$

と書く。次に散布図上の位置 $\mathbf{z} = (x_z, y_z)$ の j 年を基点として k 年間の変分を推定する。変分推定のためのウェイトをベクトル \mathbf{w} :

$$\mathbf{w}_{zk} = [w_{z1k}, w_{z2k}, \dots, w_{znk}]$$

と書く。すると位置 \mathbf{z} の j 年を基点とする k 年間ベクトルの x 成分、 y 成分の推定値 $\Delta \tilde{x}_{zj}^k, \Delta \tilde{y}_{zj}^k$ を次のように与える。

$$\begin{cases} \Delta \tilde{x}_{zjk} = \mathbf{w}_{zk} \Delta \mathbf{x}_{jk}^T, \\ \Delta \tilde{y}_{zjk} = \mathbf{w}_{zk} \Delta \mathbf{y}_{jk}^T, \end{cases} \text{ s.t. } \sum_i w_{zik} = 1 \quad (1)$$

制約式は不偏性を保つためのもので、 x 成分、 y 成分のそれぞれ共通の重みとする。

ウェイトの設定にはGWRの考え方を応用する。まず位置 \mathbf{z} と国家 i の j 年の位置との散布図上の距離を

$$d_{zij} = \sqrt{(x_z - x_{ij})^2 + p^2 (y_z - y_{ij})^2} \quad (2)$$

とおく。ここで p はEUCに対するEUGの重みである。次に、ウェイト関数の準備関数 r_{zjk} を次に定義する。

$$r_{zij} = \begin{cases} \left(1 - (d_{zij} / \beta_{zj}(m))\right)^2 & \text{if } d_{zij} < \beta_{zj}(m), \\ \text{else } 0 \end{cases} \quad (3)$$

ここで $\beta_{zj}(m)$ は位置 \mathbf{z} 、 j 年における m 番目に近いデータまでの距離とする。この関数は図15のような形状をしている、Fotheringham (2002) によって提案された正規分布型の関数である。ウェイト w_{zjk} は準備関数 r_{zjk} を使い、式(1)の制約を満たすように

$$w_{zjk} = r_{zjk} / \sum_i r_{zij} \quad (4)$$

と定義する。ここで問題となるのは、有効データの最遠距離 β 及びEUCに対するEUGの比 p をどう与えるかである。そこで適合的空間カーネル (adaptive spatial kernel) の考え方と交差妥当化の考え方によって β と p を与える。

(2) ベクトル場作成におけるパラメータ β と p の決定

ここでの交差妥当化とは各国それぞれのデータを他の国々のデータから最も適切に決めることができるように β, p を求めようという考え方である。ただ、 β の値は適合的空間カーネルの考え方に従い、位置によって異なるように与える。その理由は以下の通りである。図9で見るとデータの密度は散布図上の位置によってまちまちである。そのため β を固定するとある位置ではたくさんのデータによって決められ、また別なある位置ではほんの少しの個数のデータによって決められることになる。データの密度はデータの値に関係していると考えられるので、固定した β の利用は適切とは考えられない。そこで、近い方からの順番で、

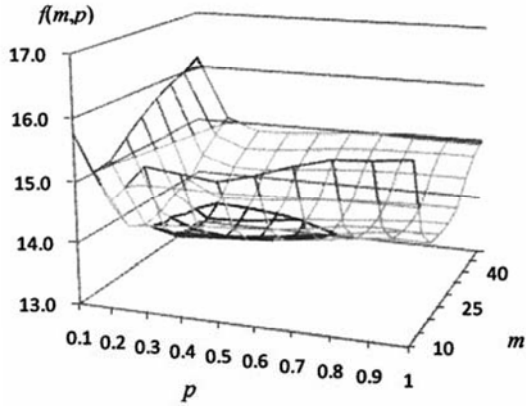


図16 パラメータ p, m と目的関数値

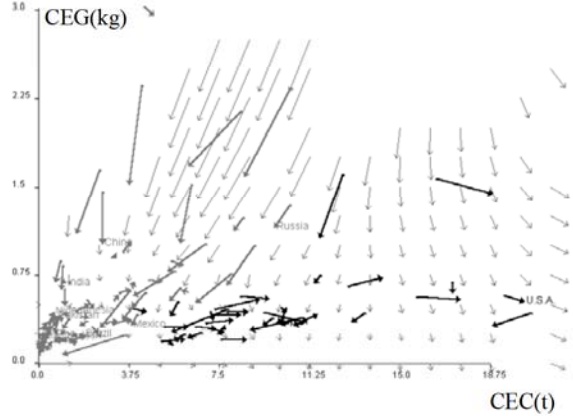


図19 CECとCEGによる1995年から2000年へのベクトル場

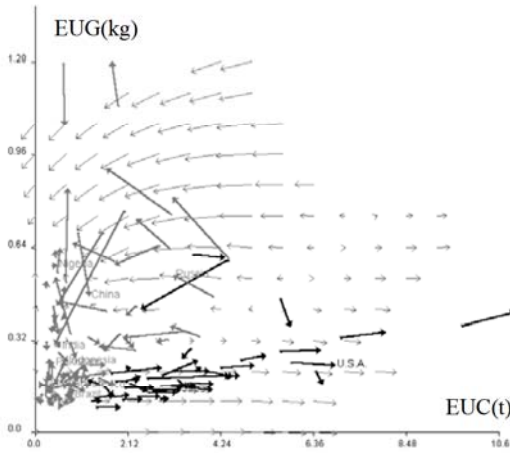


図17 EUCとEUGによる1990年から1995年へのベクトル場

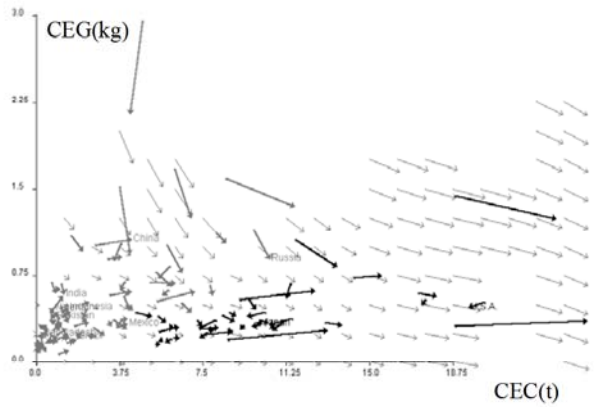


図20 CECとCEGによる2000年から2005年へのベクトル場

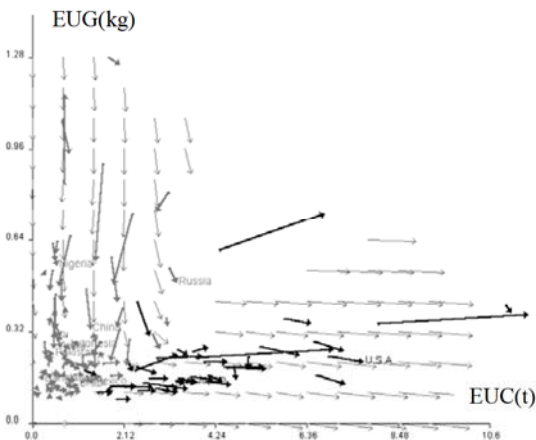


図18 EUCとEUGによる1995年から2000年へのベクトル場

一定順位 m のデータへの距離によって β を決める。これが適格的空間カーネルの考え方である。

適格的空間カーネルのための重み係数ベクトル \mathbf{w}_{ijk}^* を次の様に定義する。

$$\mathbf{w}_{ijk}^* = [w_{1,jk}, w_{2,jk}, \dots, w_{(i-1),jk}, 0, w_{(i+1),jk}, \dots, w_{nj,k}] \quad (5)$$

各成分の値は、式(3)、(4)によって与える。次に、 i 国のエネルギー利用量の変分の推定値を式(6)のように与える。

$$\begin{cases} \Delta \hat{x}_{ijk}^* = \mathbf{w}_{ijk}^* \Delta \mathbf{x}_{jk}^T, \\ \Delta \hat{y}_{ijk}^* = \mathbf{w}_{ijk}^* \Delta \mathbf{y}_{jk}^T, \end{cases} \text{ s.t. } \sum_i w_{z,ik} = 1 \quad (6)$$

式(5)では各国データを自国データ以外で決める方程式となっている。式(6)を用い、誤差二乗和 $f(m, p)$

の最小化の式(7)によって m, p を決める。

$$\min f(m, p) = \sum_i ((\Delta x_{ijk} - \mathbf{w}_{ijk}^* \Delta \mathbf{x}_{jk}^T)^2 + (\Delta y_{ijk} - \mathbf{w}_{ijk}^* \Delta \mathbf{y}_{jk}^T)^2) \quad (7)$$

国 i に近い位置にある国家のデータは国 i と似た値が期待されるので、小さな m が期待される。しかし、あまり小さな m では少なすぎるデータによって値を決めることになり、推定値の誤差分散が大きくなり、結果として式(7)の値は大きくなる。そのためある程度の数のデータで推定するが、少なすぎない数のデータが最適と求められることになる。

$j=2000, k=5$ の場合、関数 $f(m, p)$ は図16のようになり、最小二乗関数になっていることにより、唯一の最適値を得ることができる。この場合は $m=25, p=0.4$ となった。以上によって得たのが図14である。この図から微分方程式を想定しながらメカニズムを研究するなど、散布図を使つての新しいタイプの研究が可能となろう。

(3) ベクトル場の分析結果

図14は2000年から2005年へのエネルギー利用量の変化であった。ここで1990年から1995年、1995年から2000年へのエネルギー利用量のベクトル場を作成すれば、図17、図18のようになる。すなわち、ソ連邦崩壊の影響とそこからの回復など。世界のエネルギー利用のメカニズムの変化を世界全体の流れとしての図としてみることができる。

式における「エネルギー利用量」を「CO₂排出量」に置き換え、CO₂排出量について同様の図を1995年から2000年を図19に、2000年から2005年を図20に作れば、エネルギー排出とある程度似ている傾向はあるものの、排出量は近年、世界的に止まる傾向にあることがわかる。GDP1\$あたりでの減少傾向は、エネルギー利用量とCO₂排出量に共通する傾向である。一方、一人あたりのエネルギー利用量は全体に増加傾向にあったが、CO₂排出量では一人あたり排出量の大きい国家ではほとんど増加していないことがわかる。つまり、エネルギー利用から見れば、豊かな国はますます豊かになっているが、CO₂排出量での増分は大変小さいとわかる。

(4) 両対数軸上でのベクトル場の作成

図14、図17から図20では原点近くの小さな国家の様

子がわかりにくい。また、そこにはたくさんの国家が位置している。そこで、ベクトル場を両対数図の上で作成する。この場合、そのメカニズムの解釈には難しいものがある。しかし、両対数図の利点として、比が問題となるので、縦軸・横軸のプロポーション（係数 p ）を考える必要は無くなる。すなわち、“位置 z から何倍の範囲のデータか”という基準で m の値のみを考えればよいことになる。

式(1)での「エネルギー利用量」を全て対数値に置き換え、式(2)で定義したデータ間距離は

$$d_{-ij} = \sqrt{(x_z - x_{ij})^2 + (y_z - y_{ij})^2} \quad (2')$$

と置き換える。式(3)～式(6)はそのまま使い、 m を求めるための目的関数は式(7)と同様で変数を減らした式(7')となる。

$$\min f(m) = \sum_i ((\Delta x_{ijk} - \mathbf{w}_{ijk}^* \Delta \mathbf{x}_{jk}^T)^2 + (\Delta y_{ijk} - \mathbf{w}_{ijk}^* \Delta \mathbf{y}_{jk}^T)^2) \quad (7')$$

エネルギー利用量の2000年～2005年の場合は $m=30$ で最適となり、またそれによる1995年～2005年の5年単位でのエネルギー利用量、CO₂排出量のベクトル場は図21～図24のようになった。

エネルギー利用量に関する両対数平面でのベクトル場の図21、図22を見ると、一人あたり、GDP1\$あたりの利用量の値が小さい国家では10年間を通して一人あたり利用量の増加が著しいことがわかる。またGDP1\$あたり利用量が元々多い国家では減少傾向が見える。その傾向は一人あたり利用量が多い国家も少ない国家も同様の傾向とわかった。

一方、CO₂排出量に関する両対数平面でのベクトル場の図23、図24を見ると、一人あたり排出量が少ない国家の一人あたり排出量ははっきりとした増加傾向にあり、なかなか世界全体で排出総量が減る傾向にはないようである。また、GDP1\$あたり排出量については一貫した減少傾向が見えるが、一人あたり排出量に関しては、減少傾向は一切見られなかった。むしろ、増加速度が上がる傾向にあり。GDP1\$あたりの傾向に見るように効率性は上がっているが、世界の排出総量は全体として一貫して増えているといえよう。

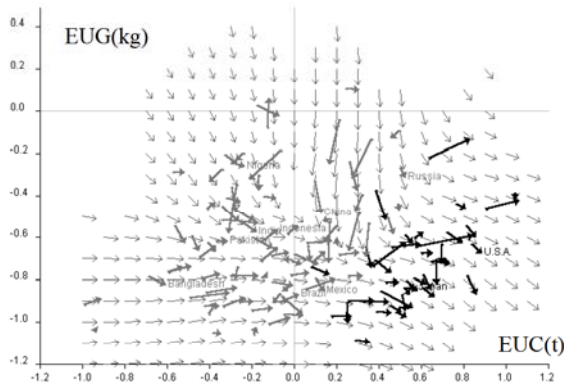


図21 両対数軸上でのEUC と EUG、1995年から2000年へのベクトル場

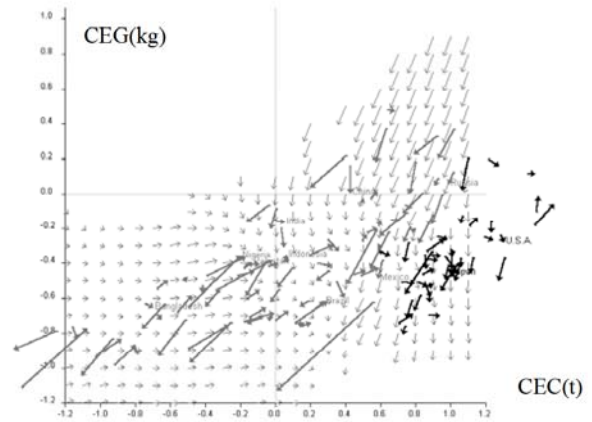


図23 両対数軸上でのCECとCEG、1995年から2000年へのベクトル場

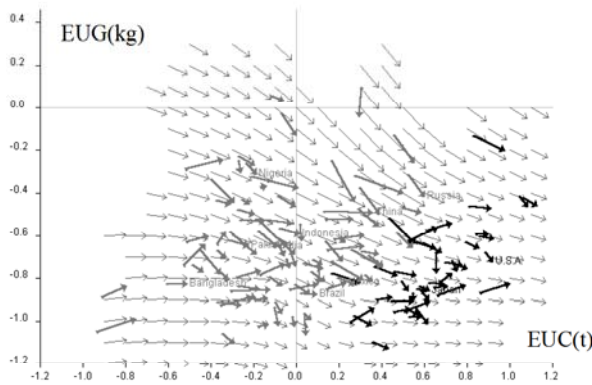


図22 両対数軸上でのEUC と EUG、2000年から2005年へのベクトル場

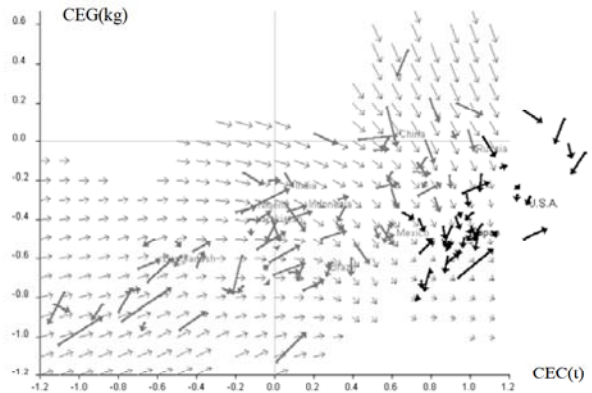


図24 両対数軸上でのCEC とCEG、2000年から2005年へのベクトル場

6. おわりに

本研究では、一人あたりとGDP1ドルあたりのエネルギー利用量およびCO₂排出量に注目し、その世界的な変化傾向を視覚化して吟味する新しい方法を示した。変化のメカニズムを微分方程式で記述できればベクトル場は微分方程式での相平面として分析できるので、方程式の妥当性の検討に役立てることも可能だろう。

予測でも単純なトレンド予測より効果的であることを示したが、予測は他の手法でより正確にできる可能性がある。ゆえに、むしろ視覚化したベクトル場を重視して、どのように指標を選んでベクトル場を作れば最も効果的かなど、さらに考えていきたい。

参考文献・資料

- Akimoto, K., Tomoda, T., Fujii, Y., & Yamaji, K.(2004) :
"Assessment of global warming mitigation options
with integrated assessment model DNE21", *Energy
Economics*, 26(4), 635-653.
- Bailey, I. Wilson, G. A. (2009): "Theorising transitional
pathways in response to climate change:
technocentrism, ecocentrism, and the carbon
economy", *Environment and planning A*, 41, 2324-2341.
- Robert J. Barro and Xavier Sala-i-Martin (1992) :
"Convergence", *Journal of Political Economy* 100 (no.
2), 223-251.
- Bagnoli, P., McKibbin, W. J. and Wilcoxon, P. J. (1996)
"Future Projections and Structural Change". in
Nakicenovic, N., Nordhaus, W. D., Richels, R. and
Toth, F. L. (eds) *Climate Change: Integrating Science,
Economics, and Policy*. CP 96-1. Austria. International
Institute for Applied Systems Analysis.
- Bowman, A. W. (1984): "An alternative method for cross-
validation for the smoothing of density estimates",
Biometrika, 71, 353-360.
- Boyd E. (2009) "Governing the Clean Development
Mechanism: global rhetoric versus local realities in
carbon sequestration projects", *Environment and
planning A*, 41, 2380-2395
- Brock, W. A. and Taylor, M. S. (2005) "Economic Growth
and the Environment: A Review of Theory and
Empirics", *Handbook of Economic Growth* Elsevier.
- Castles, I., and Henderson, D.(2003) "Economics,
Emissions Scenarios and the Work of the IPCC",
Energy & Environment 14 4, pp. 415-435.
- Dowrick, S.(2001) "True International Income Com-
parisons", Paper presented at the 30th Economic
Measurement Group Workshop, University of New
South Wales, [http://www.cbe.anu.edu.au/staff/info/
dowrick/sbwp.pdf](http://www.cbe.anu.edu.au/staff/info/dowrick/sbwp.pdf).
- Fotheringham, et al. : *Geographically Weighted Regression*,
Wiley, 2002.
- Fujii Y. and Yamaji K. (1998) "Assessment of
technological options in the global energy system for
limiting the atmospheric CO2 concentration",
Environmental Economics and Policy Studies, 1, 113-139.
- Kotoh, K., & Yanai, H. (2009) "Analysis of Energy
Consumption in 159 Countries by Triangular
Pyramid Diagram", *Lecture Notes in Operations
Research* 10, pp.198-205.
- McKibbin, W. J. and Stegman, A. (2005) "Convergence and
per capita carbon emissions", CAMA working paper
series, 10.
- National Astronomical Observatory of Japan (2010)
Chronological Scientific Tables 2010, Maruzen.
- Quah, D. T. (1996) "Empirics for Economic Growth and
Convergence", *European Economic Review*, 40 1353-
1375.
- Silverman, B.W. (1998) "Density Estimation", *Monographs
on Statistics and Applied Probability*, CRC Press.
- Xavier Sala-i-Martin (1996) "The Classical Approach to
Convergence Analysis", *The Economic Journal*,
Vol.106 (437), 1996, 1019-1036.
- Tschanga, F. T. and Dowlatabadi, H.(1995) "A Bayesian
technique for refining the uncertainty in global
energy model forecasts", *International J. of forecasting*,
11(1), March, 43-61.
- United Nations (2009) "United Nations site for the
Millennium Development Goals(MDG) Indicators",
[http://mdgs.un.org /unsd/mdg/Default.aspx](http://mdgs.un.org/unsd/mdg/Default.aspx).
- Warwick, J., David, P. & Alison, S.(2007) "Long term
projections of carbon emissions", *International J. of
forecasting*, 23(4), 637-653.
- 環境省 (2008) :「二酸化炭素排出量の排出区分(部門)の
内訳」,
<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/kubun.pdf>

執筆者

古藤 浩
KOTO, Hiroshi
デザイン工学部メディア・コンテンツデザイン学科
School of Design/Department of Media Content Design
准教授
Associate Professor

