

ベクトル場構築による エネルギー利用量の国家群分析

古藤 浩

世界の主要 120 カ国の国家別エネルギー利用量（石油換算量）の 15 年間のデータを「一人あたり」と「GDP 1\$あたり」の二種類の基準化のもとで分析した結果を議論する。具体的には、GWR（地理的重み付き最適化法）を応用して、エネルギー利用量の変化傾向の国家比較を可能とするベクトル場を作成し、時代による変化を吟味する。すると、エネルギー利用量の変化傾向や国際情勢の変化の影響などの世界的な流れを新たな視点で理解することが可能となる。さらに、ベクトル場作成の考え方を応用することでエネルギー利用量の将来予測も単純なトレンド予測より効果的にできることも示す。

キーワード：地理的重み付き最適化，国家別エネルギー利用量，ベクトル場

1. はじめに

新たなインフラストラクチャーの導入・普及の前提条件のひとつとして、エネルギー（燃料等）確保のための環境が十分整備されていることが挙げられる。エネルギー革新の技術的な研究はもちろん、エネルギーに関する環境の地域的な差異を把握することも重要である。エネルギーに関する環境は先進国と発展途上国で大きく異なるし、国家体制によっても相違は大きい。また、変化傾向も国家によって大きく異なる。

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文献[1][2]などで研究されている。これらをふまえ、本研究ではエネルギーの国別総利用量に注目し、人口やGNPといった基礎指標と組み合わせて分析を行う。

分析するデータは世界の主要 120 カ国の国家別エネルギー利用量（石油換算量）の 1990 年から 2005 年までの 15 年間の値を「一人あたり」と「GDP 1\$あたり」の二種類に基準化したものとする。そして、GWR (Geographically Weighted Regression, 地理的重み付き最適化)[3]の手法を応用し、エネルギー利用量の変化傾向の世界的全体像を把握するためのベクトル場を作成し時代による変化を吟味する。さらに、ベクトル場作成の考え方を応用してエネルギー利用量の将来予測を試みた結果も議論する。

ことう ひろし

東北芸術工科大学 デザイン工学部
〒990-9530 山形市上桜田 3-4-5

なお、国別のエネルギー利用量、人口、GDP のデータの出典は国際連合のデータベース[4]である。

2. エネルギー利用量データと解釈

2.1 エネルギー利用量データの概要

国連の“Energy Use”データ[4]から得られるエネルギー利用量の定義は次の式ようになる：

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

エネルギー利用量の概要を表 1, 2 に示す。エネルギー利用量は国家間で大きな相違があり、国家比較の

表 1 エネルギー利用量が上位/下位の各 5 国家 (2005 年)

Max 5 nations	k ton	Min 5 nations	k ton
China	2839340	Jamaica	2290
United States	2343798	Botswana	1843
India	834965	Malta	889
Russian Federation	591334	Gabon	879
Japan	538274	Congo	514

表 2 指標値が[上/下]位 3 位以内の国家 (2005 年)

	一人あたり年平均 利用量(t)	GDP1\$あたり 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
Congo (旧仏領コンゴ)	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

ためには何らかの基準化が必要である。例えば表1に示す利用量最大の中国と(旧仏領)コンゴでは利用量に5千倍以上の差がある。そこで本研究では‘基準指標’として「一人あたりエネルギー利用量」と「GDP1\$あたりエネルギー利用量」に注目する。なお、GDP1\$あたり利用量での「\$(ドル)」は2005年のPPP(Purchasing Power Parity, 購買力平価)ドルである。「一人あたりエネルギー利用量」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られよう。表2では基準指標値が上位/下位の各3国家を示すが、基準化しても数十倍の国家差がある。

世界全体のエネルギー利用傾向の変化の概要は次の通りである。1990年から2005年の間に世界でのエネルギー利用量は1.86倍に、GDPは2.28倍に、人口は1.34倍になった。したがって、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倍に変化してきた。

2.2 指標の両対数平面での考察

基準化した指標でも国家間の差が大きいため、(常用)対数をとって考察する。例えば2000年から2005年への変化を両対数平面に示せば図1になる。原点は一人あたり1t/年(横軸)、GDP1\$当たり1kg(縦軸)の利用量の位置となる。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が変化し、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1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(=log₁₀ 365)を引けばよい。

図1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、

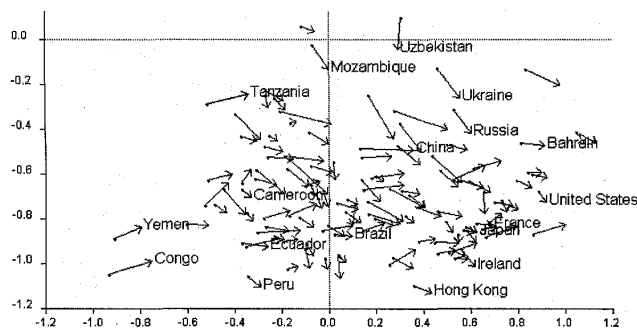


図1 両(常用)対数平面でのエネルギー利用量の2000→2005年の変化[横軸：一人当たり利用量，縦軸：GDP1ドル当たり利用量]

中南米諸国は主に左下に位置していることがわかる。また、変化では全般的に「一人あたりの増加」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、GDP1\$あたりが多い国家の激しい減少傾向も見える。

この図の考察・解釈は次のようにできよう。まず「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(図2)。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「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、暖房などに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解釈できよう。図1では多くの中南アフリカ諸国は貧困かつ効率性が低い状況、一部の西アジア諸国は効率性が低いことなどが見いだせる。

変化についても図2のように解釈できる。例えば右下(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、右上への変化の場合では、「豊かさの上昇と効率性の低下」、「人口とGDPの減少」、「エネルギー総利用量の増加」の三つの可能性がある。これらは独立するものでもないがいくつかの可

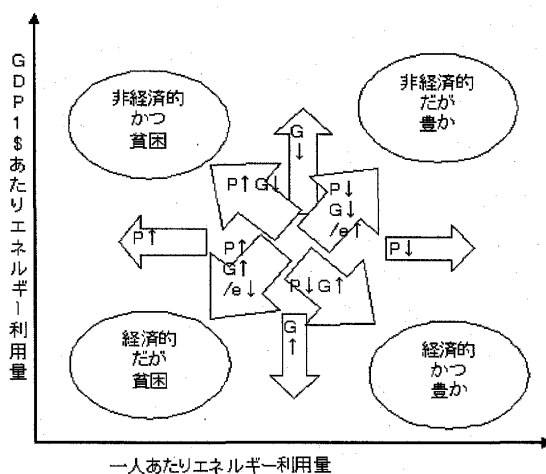


図2 両対数平面での位置・変化と解釈・可能性 P, G, e はそれぞれ[人口], [GDP], [エネルギー利用量]を示し↑, ↓はそれらの増加・減少を意味する。

能性を頭に置いて解釈する必要がある。

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方向といえよう。実際，右下に位置する多くの国家は先進国で，動きも安定しており，変化の必要性が少ないことが伺える。なお，一人あたりが十分過ぎるならば左下方向がより望ましいかもしれない。

2.3 指標間の関係性の検討

図1は国家群としての一般的变化方向や，各国家の望ましい変化方向を示唆するように見える。一方，これら指標の値を決める因子・変化因子は次のように他にもいくつか考えることができる。

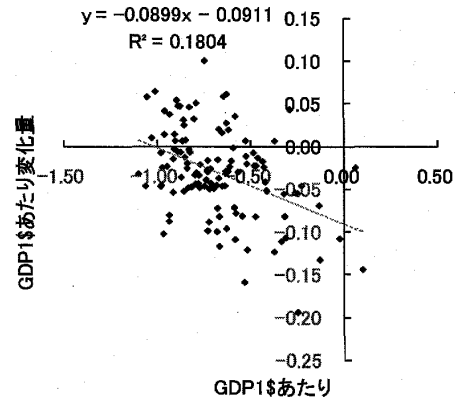
- ◇ 現状の一人あたり・GDP1\$あたりの量：そこから変化することが望ましい方向（政策誘導方向）がある。
- ◆ 気温：極端に寒い/暑い地域の国家は暖房・冷房でエネルギーを多く利用する傾向にあるかもしれない。また温暖化等，近年の環境変化の影響も大きいだろう。
- ◆ 面積：狭い国家はコンパクトにまとまっているので効率的かもしれない。また広い国家の場合，自前でのエネルギー資源の開発が容易なため，エネルギー利用量の急激な変化の可能性もあるかもしれない。
- ◆ 人口・GDP：人口（GDP）が多いほど大量のエネルギーを使っているのだから，慣性が大きく，方向が変化しにくく，かつ変化速度が遅いだろう。
- ◆ 国家の位置：同じような状況の国家が集まっている傾向があるようだ。気候も似る¹。
- ◆ 政体：不安定かどうか，革新的かどうかによって変化速度は異なるだろう¹。

以上の因子の2000年の値（ x とする）と2005年までの5年間変化量（ y とする）の関係を図3のような散布図と回帰係数の検定で吟味する。断らない限り対数値である。気温は首都または首都に最も近い位置の都市の年平均気温（文献[5]），面積は国際連合のデータベース[4]から得た。

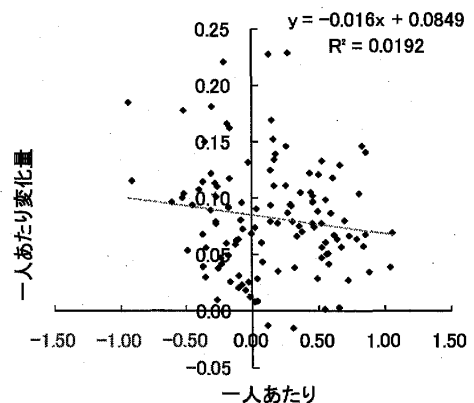
必ず線形の関係があると断言できないが，先に述べたようにある程度の線形関係を仮説とし，回帰係数について「傾き0」を帰無仮説として両側 t 検定をした（基準は $t(0.01, 118)=2.618$ ， $t(0.05, 118)=1.980$ ）。その結果，「GDP1\$あたり利用量と

GDP1\$あたり変化量」が有意水準1%で，「平均気温とGDP1\$あたり変化量」が有意水準5%で“線形関係がない”という帰無仮説が棄却された。図3では比較的關係が見られる3種類の場合を示し，他は表3に数値のみ示した。なお，決定係数ではどれも大きな値とはならない。

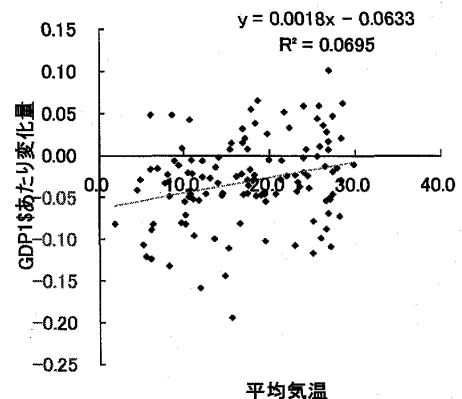
以上から，エネルギー利用量の変化傾向は大変複雑であるが，GDP1\$あたり利用量は，その変化を説明



(a) GDP1\$あたり利用量と変化量 ($t=-5.098$)



(b) 一人あたり利用量と変化量 ($t=-0.416$)



(c) 平均気温（対数値ではない）とGDP1\$あたり変化量 ($t=2.362$)

図3 エネルギー利用量の変化と変化因子の関係

¹ 本稿では検討しない。

表3 関係性が見いだされなかった組み合わせ

	R ²	t値
面積とGDP1\$あたりエネルギー利用量の変化	0.0048	-0.754
GDP総額とGDP1\$あたりエネルギー利用量の変化	0.0084	-0.425
人口とGDP1\$あたりエネルギー利用量の変化	0.0001	-0.127

する上で重要な要因ということが確認できた。一方、一人あたりの値の変化量への線形回帰での説明力は足りないが、政策の吟味・国家比較の局面では重要な指標だろう。以上から、次節では図1の平面上の位置による変化量の整理・視覚化を試みる。

なお、国家の位置関係や政体も重要と思われるが、今後の考察対象としたい。

3. エネルギー利用量のベクトル場

一人あたり・GDP1\$あたり利用量の二つの指標による変化の整理・視覚化をベクトル場の作成によって示す。用語を次のように定義する。

$x_{i,j}$: i 国の j 年の一人あたりエネルギー利用量 (対数値)

$y_{i,j}$: i 国の j 年の1\$あたりエネルギー利用量 (対数値)

k : 変化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

$$\Delta x_{i,j}^k = x_{i,j+k} - x_{i,j}, \quad \Delta y_{i,j}^k = y_{i,j+k} - y_{i,j}$$

と定義し、 p 国の j 年の k 年間ベクトルの x 成分の推定値 $\Delta \tilde{x}_{p,j}^k$ を次のように与える。

$$\Delta \tilde{x}_{p,j}^k = \sum_k w_{pk} \Delta x_{p,k}^k, \quad s.t. \sum_k w_{pk} = 1 \quad (1)$$

ここで w_{pk} は p 国への k 番目のデータの重み係数である。制約式は不偏性を保つためのもので、ベクトルは 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(地理的重み付き最適化、文献[3])の考え方を応用する。まず国家 p, i 間のデータ間距離を

$$d_{pi} = \sqrt{(x_{p,j} - x_{i,j})^2 + (y_{p,j} - y_{i,j})^2}$$

とおき、距離によるウェイト関数 r_{pi} を、

$$r_{pi} = (1 - (d_{pi}/\beta)^2)^2 \text{ if } d_{pi} < \beta, \text{ else } 0 \quad (2)$$

とする(図4)。この関数は文献[3]によって提唱された正規分布型の関数である。ウェイト w_{pk} は式(1)の制約を満たすように

$$w_{pk} = r_{pi} / \sum_k r_{pk} \quad (3)$$

と定義する。このとき、有効データの最遠距離 β の

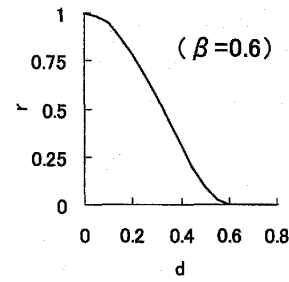


図4 ウェイト関数(式(2))

値をどう与えるかが問題となり、ここでは交差妥当化[6]という方法で与える。それは自分自身のデータを除いたときに最もよくデータを推定できるように β を誤差二乗和最小化

$$\min S(\beta) = \sum_j ((\Delta x_j - w_j^* \Delta x)^2 + (\Delta y_j - w_j^* \Delta y)^2)$$

ただし、 $w_j^* = [w_{j1}, w_{j2}, \dots, w_{jj-1}, 0, w_{jj+1}, \dots, w_{jn}]$,

$$\Delta x, \Delta y \text{ は } \Delta x_j, \Delta y_j \text{ の列ベクトル} \quad (4)$$

で決める。式(4)では x, y 両方向の交差妥当化の式を足して目的関数とした。

式(4)から対象データでの当てはまりを調べると年数が短い(例えば1年)と β は安定しない。あまり短い期間の変化は短期的な政治的变化の影響が大きいためと思われる。そして、 k が3年以上では $\beta=0.5 \sim 0.7$ の範囲で最適となる場合が多いとわかった。ある程度長い期間で分析するため $k=5$ (年) と決めた。年別、 $k=5$ での式(4)の β の値と目的関数の関係は図5に示され、ここから $\beta=0.6$ と決めた。両常用対数平面なので、ある位置のベクトルの成分は(a)、(b)の両指標が $[0.25(=10^{-0.5}), 3.98(=10^{0.5})]$ 倍の範囲にあるデータから決定されることとなる。

式(1)~(3)を用い、 $\beta=0.6, k=5$ (年) として得るベクトル場が図6, 7, 9である。なお、位置 p とデータの位置が一致した場合のウェイトは r_{pi} の値で1となる(式(2)のような0ではない、図4参照)。データが少ない位置のベクトルは信頼性が低いので、正值のウェイトを持つデータ数が1つのベクトルは最も薄い色で、データ数が2~5の場合は薄い色でベクトルを描いた。

ベクトル場は15年間の情勢に応じて変化してきた。図6に見る1990→1995年のベクトル場ではGDP1\$あたり利用量が多い位置で一人あたり利用量の減少が見られる。これはソ連邦崩壊による混乱のためと考えられる。また、GDP1\$あたり利用量が少ない位置では、経済性はそのままに一人あたり利用量が増え

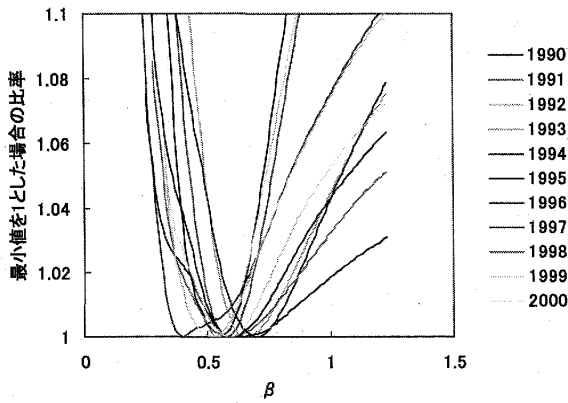


図5 目的関数(式(4)の結果, $k=5$ (年)の場合)

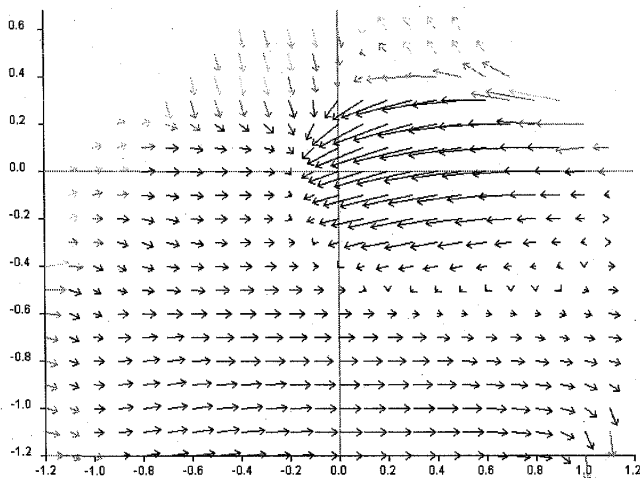


図6 1990→1995年のベクトル場 [横軸:一人当たり, 縦軸:GDP 1ドル当たり利用量, 以下同]

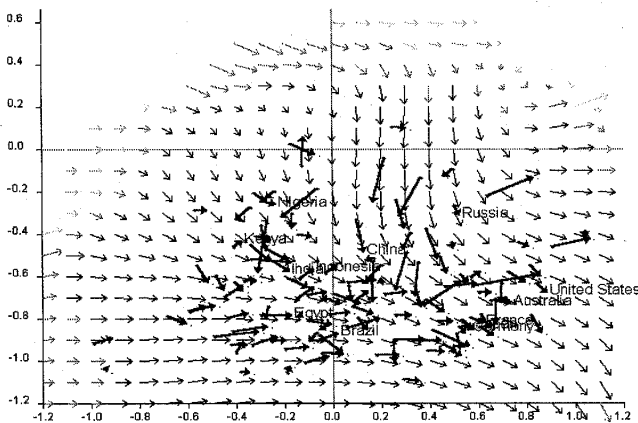


図7 1995→2000年のベクトル場

る傾向が見える。ただし、その傾向は一人あたり利用量が少ない位置では動きが鈍い。国家間格差が大きくなっていることが考えられる。

図7に見る1995→2000年のベクトル場ではGDP

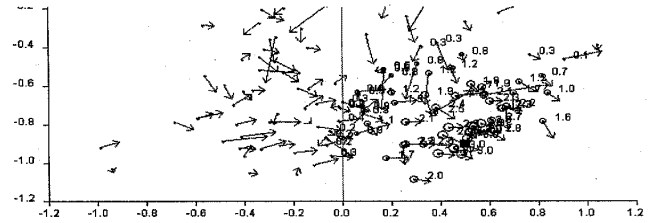


図8 1995→2000年のベクトル場での日本付近のウェイトの値(図内の数値をすべて足すと100となる)

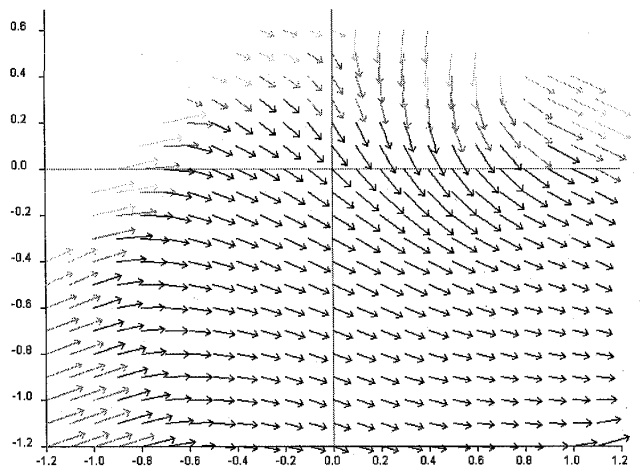


図9 2000→2005年のベクトル場

1\$あたり利用量が多い位置での一人あたり利用量の減少が止まると同時に、経済効率の上昇がみられる。また、全体に経済性を上げながら一人あたり利用量を増やす、望ましいと思われる方向への変化傾向が見られる。図7では参考のためベクトル場の上に元となる各国家のデータを載せた。日本の位置はAustraliaの左下、France、Germanyとほとんど重なった位置にある。表示している日本に最も近い位置のベクトルを決定するためのウェイト w_{pi} は%表示で図8のように示される。近い位置の多くのデータが同じようなウェイトとなった。

図9にみる2000→2005年のベクトル場ではGDP 1\$あたり利用量が多い位置でも経済的効率の上昇が見られる。また変化が速くなってきているように見える。変化速度の上昇は左下の貧困と思われる位置でも同様で、世界的に望ましい方向に進んでいるように見える。好況のためかもしれない。

4. GWRによる予測

GWRのウェイト関数を用い、一人あたり・GDP 1\$あたりの2005年のエネルギー利用量を予測した結果を説明する。対象国 i の一人あたりエネルギー利用

量変化の推定値は式(5)によって与える。それは、各国の1995年から2000年への変化量からのGWRによるウェイト(式(2), (3))を重みとして利用する。

$$\Delta \hat{x}_{i,2000}^5 = \sum_k w_{ik} \sqrt{(\Delta x_{k,1995}^5)^2 + (\Delta y_{k,1995}^5)^2} \cdot \frac{\sum_k w_{1k} \Delta x_{i,1995}^5}{\sqrt{(\sum_k w_{ik} \Delta x_{i,1995}^5)^2 + \sum_k w_{ik} \Delta y_{i,1995}^5}},$$

s.t. $\sum_k w_{ik} = 1$ (5)

式(5)の1行目でベクトル長を決め、2行目で単位ベクトルとしての方向を求める。GDP1\$あたり利用量yの予測式も式(5)同様となる。

なお、各国のデータの位置は5年間に移動するので、最大ウェイトは自国家のデータとは限らない。例えば日本の値の予測で2000年の日本のデータの位置は1995年でのイギリスの位置に最も近いため、日本の値の予測での最大ウェイトはイギリスのデータになる。

真の値と推定値による決定係数が最も大きくなる値に係数βを与え、それは0.15となった。ある国家の推定値に影響するデータの範囲は値が0.71(10^{-0.15})倍～1.41(10^{0.15})倍の範囲の位置にある国家データとなり、図8の場合よりずっと狭い範囲のデータによることとなった。

式(5)によって2005年へのベクトルを求め、2005年の一人あたり利用量・GDP1\$あたり利用量を推定した結果が表4である。表4では1995年から2000年までの5時点データから2005年の値を国家別トレンド予測で求めた結果も合わせて示した。トレンド予測は国家個別の予測であり、これに対し複数国家のデータを併用した予測が式(5)のGWR応用予測である。トレンド予測に比べ標準誤差を32%小さくすることができ、その予測力の差は図10のようにも示される。

5. おわりに

本研究では、一人あたりとGDP1\$あたりのエネルギー利用量に注目し、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。

表4 2005年の指標値の推定結果

(n=240)	決定係数	標準誤差
GWR応用予測	0.9879	0.0636
国家別トレンド予測	0.9754	0.0930

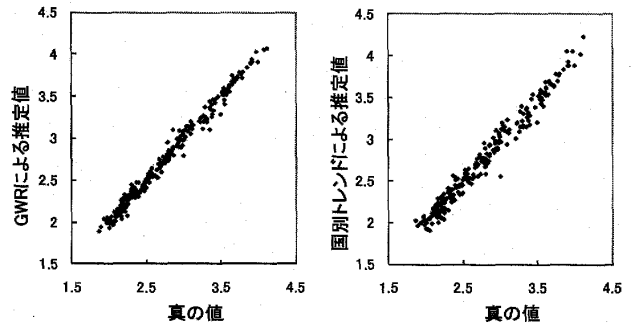


図10 2005年の二つの指標値の推定結果の比較

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

- [1] K. Akimoto, T. Tomoda, Y. Fujii and K. Yamaji: "Assessment of global warming mitigation options with integrated assessment model DNE 21," *Energy Economics*, Vol. 26, No. 4, pp. 635-653, 2004.
- [2] H. Kotoh and H. Yanai: "Analysis of Energy Consumption in 159 Countries by Triangular Pyramid Diagram," *Lecture Notes in Operations Research* 10, pp. 198-205, 2009.
- [3] A. S. Fotheringham, et al.: *Geographically Weighted Regression*, Wiley, 2002.
- [4] United Nations: United Nations site for the Millennium Development Goals (MDG) Indicators, <http://mdgs.un.org/unsd/mdg/Default.aspx>, 2009.
- [5] 国立天文台編: 理科年表, 丸善, 2010.
- [6] A. W. Bowman: "An alternative method of cross-validation for the smoothing of density estimates," *Biometrika*, Vol. 71, pp. 353-360, 1984.