

中国の30省市を対象とした二酸化炭素排出の要因分析及びその類型化

白 金鶴¹・松本 亨²

¹学生会員 北九州市立大学大学院 国際環境工学研究科 (〒808-0135 北九州市若松区ひびきの1-1)

E-mail:m10c0701@hibikino.ne.jp

²正会員 北九州市立大学教授 国際環境工学部環境生命工学科 (〒808-0135 北九州市若松区ひびきの1-1)

E-mail:matsumoto-t@kitakyu-u.ac.jp

温室効果ガス排出量の増大が深刻になる一方で、中国やインドも、温室効果ガス（主に二酸化炭素）の削減目標を掲げるようになり、これらの国の二酸化炭素排出緩和策に関する研究の重要性は益々高まっている。本論文では、1995年から2008年にかけての中国の30省・市・自治区の二酸化炭素排出構造について、中間媒介項を用いた恒等式に基づき、LMDI (Logarithmic Mean Divisia Index) 法を用いて二酸化炭素排出に関する要因分析を行った。その上で、クラスター分析を行い、類型化されたクラスターごとに特徴を考察し、それぞれに相応しい対策を検討した。

Key Words : Carbon dioxide emission, Kaya decomposition, LMDI, Multivariate analysis

1. はじめに

国際エネルギー機関(IEA)は2010年の世界の二酸化炭素排出量が前年比5.9%増加し、過去最高になったと発表した¹⁾。中国は、近年の目覚ましい経済発展に加え、金融危機により世界経済が低迷する中でいち早い景気回復を達成したことで、2010年に日本を抜いて世界第2位の経済規模を誇る経済大国になった。しかしその一方で、中国は世界最大の二酸化炭素排出国になったということで、国連気候変動枠組み条約第16回締約国会議(COP16)では、2013年以降の「ポスト京都」において、中国を含む新たな国際ルールを創設するかが大きな焦点として議論された。これに先立ち、中国政府は2020年までに国内総生産(GDP)単位当たりの二酸化炭素排出量を2005年比で40～45%削減する目標を打ち出し、二酸化炭素削減の取り組みを行うことに決めた。

中国の二酸化炭素排出に関する既往研究としては、中国全国の二酸化炭素排出量についての要因分析、二酸化炭素排出と影響因子の関係、セクター別の分析などの研究がある。このうち要因分析に関する研究では、徐国泉ら²⁾は、中国の1人当たりの二酸化炭素排出要因分解モデルを構築し、1995～2004年のデータを用い、二酸化炭素排出に対するエネルギー構造、エネルギー効率と経済発展要因の影響を明らかにした。宋徳勇ら³⁾は、two-stage

Divisia decomposition methodを用いて、中国の1990～2005年までの二酸化炭素排出の推移に関し、その特徴を分析した。彼らは二酸化炭素排出増加要因における経済規模と削減要因におけるエネルギー効率要因を変数として、中国の経済発展とCO₂排出の関係を4つの時期に分けて考察した。彼らによると、4つの経済発展時期ごとに異なる経済発展構造がCO₂排出変化へ影響する主な原因になった。したがって二酸化炭素排出を削減させるために、経済発展構造を転換することが必要であると結論づけている。査冬蘭ら⁴⁾は、中国の28省区について、1995～2005年において各省区のエネルギー効率の差とCO₂排出の差の関係を考察した。彼らは、各省区のエネルギー効率が同一になる傾向があるなどの結論を得た。このようにいくつかの要因分析が組み込まれているが、最新のデータを用い、さらに要因分析とクラスター分析を組み合わせることで要因の類型化に取り組んだ研究は見あたらない。

本論文では、1995年から2008年にかけて中国全国及びその30省、市、自治区の二酸化炭素排出について、中間媒介項を用いた恒等式に基づき、LMDI法を用いて二酸化炭素排出に関する要因分析を行い、各要因の寄与度、寄与率について考察する。さらに、要因分析の結果に基づいてクラスター分析を行うことで、28省・市・自治区(海南省、重慶市を除く)の類型化を行い、分類されたク

ラスターごとに特徴を抽出し、それぞれの地域に相応しい対策を検討することを目的とする。

2. 要因分析

(1) 分析モデル

本研究では、茅恒等式⁵⁾と呼ばれる二酸化炭素の要因分解式を用いて、中国の二酸化炭素の排出要因を炭素集約度、エネルギー構造、エネルギー強度、経済規模、人口の5つの要因に分解した。要因分解式は、式(1)のとおりである。

$$C = \sum_i C_i = \sum_i \frac{C_i}{E_i} \times \frac{E}{E} \times \frac{E}{Y} \times \frac{Y}{P} \times P = \sum_i F_i S_i I R P \quad (1)$$

C: 二酸化炭素の排出量

E: エネルギーの消費量

Y: 国内(省、市、自治区)総生産GDP

P: 人口

i: 燃料の種類を示す

$F_i = \frac{C_i}{E_i}$: i種のエネルギーの二酸化炭素排出係数

$S_i = \frac{E_i}{E}$: 総エネルギー消費量に対する

i種のエネルギーの消費量;

エネルギー構造を示す

$I = \frac{E}{Y}$: 単位GDPあたりのエネルギー消費量;

エネルギー強度を示す

$R = \frac{Y}{P}$: 1人あたりのGDP; 経済規模を示す

(2) 分析方法

二酸化炭素排出の要因分析において、LMDI法は二酸化炭素排出量の変化が既知の影響要因により引き起こされることを前提として、残差が生じないため、近年よく使用されている⁶⁾。また、この方法では、データが存在しない場合、限りなくゼロに近い値を代用して計算することが可能である。LMDI法には加法式(式(2))乗法式(式(3))の2つの計算式がある。

$$C^t - C^0 = \Delta C = \Delta C_F + \Delta C_S + \Delta C_I + \Delta C_R + \Delta C_P \quad (2)$$

$$\frac{C^t}{C^0} = D = D_F D_S D_I D_R D_P \quad (3)$$

C^0 は基準年(1990年)の二酸化炭素の排出量、 C^t はt年の二酸化炭素排出量を示す。式(2)の中の $\Delta C_F, \Delta C_S, \Delta C_I, \Delta C_R, \Delta C_P$ は、二酸化炭素排出量に対する各要因の変化の寄与度を示す。よってこれらは、単位を持つ。一方の式(3)については、 D_F, D_S, D_I, D_R, D_P は二酸化炭素排出量に対する各要因の貢献率を示す。両式は式(4)のような関係である。

$$\frac{\Delta C}{\ln D} = \frac{\Delta C_F}{\ln D_F} = \frac{\Delta C_S}{\ln D_S} = \frac{\Delta C_I}{\ln D_I} = \frac{\Delta C_R}{\ln D_R} = \frac{\Delta C_P}{\ln D_P} \quad (4)$$

この方法による各要因の分解結果は以下の通りである。

$$\Delta C_F = \sum_i W_i \ln \frac{F_i^t}{F_i^0}; \Delta C_S = \sum_i W_i \ln \frac{S_i^T}{S_i^0}$$

$$\Delta C_I = \sum_i W_i \ln \frac{I^T}{I^0}; \Delta C_R = \sum_i W_i \ln \frac{R^T}{R^0}$$

$$\Delta C_P = \sum_i W_i \ln \left(\frac{P^t}{P^0} \right);$$

$$\text{ここには、} W_i = \frac{C_i^T - C_i^0}{\ln C_i^T - \ln C_i^0}$$

$$D_F = \exp \left[\sum_i W_i' \ln \left(\frac{F_i^t}{F_i^0} \right) \right]; D_S = \exp \left[\sum_i W_i' \ln \left(\frac{S_i^T}{S_i^0} \right) \right]$$

$$D_I = \exp \left[\sum_i W_i' \ln \left(\frac{I^t}{I^0} \right) \right]; D_R = \exp \left[\sum_i W_i' \ln \left(\frac{R^t}{R^0} \right) \right]$$

$$D_P = \exp \left[\sum_i W_i' \ln \left(\frac{P^t}{P^0} \right) \right];$$

$$\text{ここには、} W_i' = \frac{\frac{C_i^t - C_i^0}{\ln C_i^t - \ln C_i^0}}{\frac{C^t - C^0}{\ln C^t - \ln C^0}}$$

(3)分析データ

1990年を基準年とし、1995年から2008年にかけて中国の国レベルと30省・市・自治区のデータを対象として分析した。燃料消費量は中国能源統計年鑑⁷⁾、GDPと人口データは全国あるいは各省・市・自治区の統計年鑑(各年版)から得た。原子力、水力などの非化石エネルギーは燃焼時に二酸化炭素を出さないため、化石燃料のみを対象とし、燃料種を石炭、石油、天然ガスの3つの種類に分けて分析した。

二酸化炭素の計算方法はIPCCの方法に従い、式(5)に基づいて計算した。

$$C = \sum_i E \times \frac{E_i}{E} \times \frac{C_i}{E_i} = \sum_i E \cdot S_i \cdot F_i \quad (5)$$

ここで、 E は一次エネルギーの総消費量、 S_i は各エネルギー種が総消費量に占める比率、 F_i は各エネルギー種の炭素排出係数を示す。炭素排出係数はIPCCが公開しているデータ⁸⁾を用いた(表-1)。

データの入手困難性から、海南省と寧夏回族自治区は2001年と2002年のデータを含んでいない。また、重慶市

表-1 各エネルギー種の炭素排出係数 (単位:t-C/TCE)

エネルギー種	石炭	石油	天然ガス
排出係数	0.7559	0.5857	0.4483

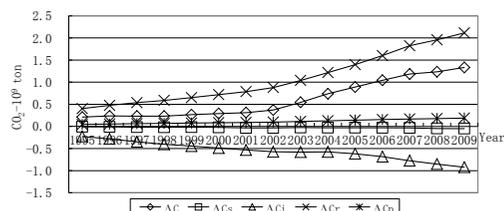


図-1 二酸化炭素排出に対する各要因の寄与度(中国全体)

(4) 分析結果

本論文では、 F_i は表-1のとおり一定として計算したため、 $\Delta C_F = 0, \Delta D_F = 1$ となった。従って、二酸化炭素排出に影響を与える因子はエネルギー構造、エネルギー強度、経済規模と人口である。中国全体を対象とし

表-2 二酸化炭素排出に対する各要因の寄与度と寄与率(中国全体)

年別	基準年に対するCO2の増加量と増加倍率		エネルギー構造		エネルギー強度		経済規模		人口	
	ΔC	D	ΔC_s	D_s	ΔC_i	D_i	ΔC_p	D_p	ΔC_p	D_p
1995	2.110	1.313	-0.093	0.988	-2.276	0.745	4.032	1.683	0.447	1.059
1996	2.363	1.351	-0.109	0.986	-2.822	0.698	4.759	1.832	0.535	1.070
1997	2.331	1.346	-0.177	0.978	-3.471	0.643	5.366	1.982	0.613	1.081
1998	2.330	1.346	-0.193	0.976	-4.045	0.597	5.884	2.117	0.684	1.091
1999	2.660	1.395	-0.163	0.980	-4.454	0.573	6.515	2.259	0.762	1.100
2000	2.910	1.432	-0.231	0.972	-4.889	0.547	7.197	2.430	0.834	1.108
2001	3.110	1.462	-0.336	0.960	-5.325	0.522	7.871	2.613	0.900	1.116
2002	3.711	1.551	-0.337	0.961	-5.736	0.508	8.801	2.831	0.983	1.123
2003	5.447	1.808	-0.261	0.972	-5.812	0.531	10.396	3.098	1.124	1.130
2004	7.378	2.095	-0.306	0.970	-5.772	0.561	12.178	3.390	1.278	1.137
2005	8.904	2.322	-0.305	0.972	-6.192	0.557	13.983	3.753	1.418	1.144
2006	10.425	2.547	-0.310	0.973	-6.838	0.542	16.019	4.207	1.554	1.150
2007	11.842	2.757	-0.343	0.971	-7.760	0.514	18.257	4.777	1.688	1.156
2008	12.357	2.834	-0.475	0.961	-8.520	0.488	19.578	5.209	1.775	1.161

注: $\Delta C, \Delta C_s, \Delta C_i, \Delta C_r, \Delta C_p$ の単位は億トンである。

については1996年以前は四川省に含まれるため、1997年のデータから計算した。

た、この4つの要因の計算結果を表-2と図-1に示す。

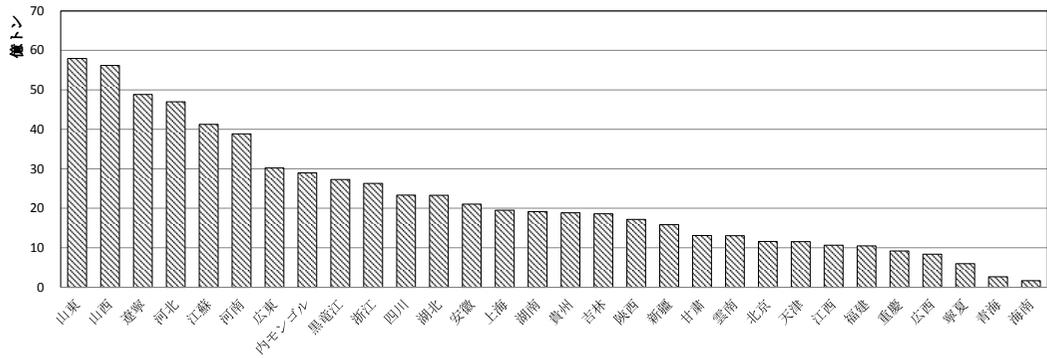


図-2 CO₂排出量の累計（1995～2008年）

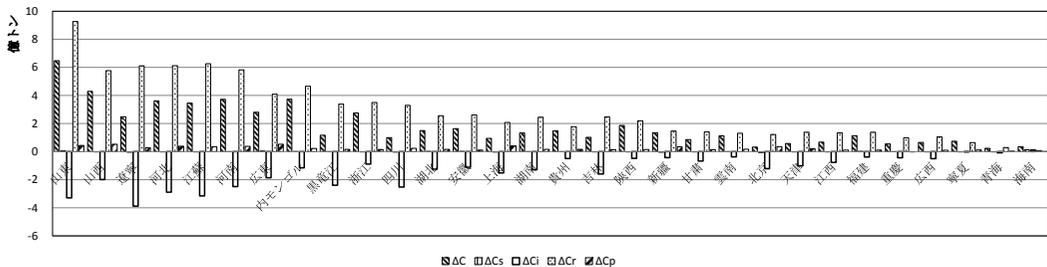


図-3 各省の要因別寄与度（2008年）

注： ΔC は基準年に対する 2008 年の CO₂ 排出量を、 ΔC_s はエネルギー構造要因を、 ΔC_1 はエネルギー強度要因を、 ΔC_r は経済規模要因を、 ΔC_p は人口要因を示す。

図-1によると、中国の二酸化炭素排出は2000年から大幅に増加し始め、2002年には、対前年比6.1%増加したが、2003年、2004年にはそれぞれ16.6%、15.8%増加した。近年になり増加率が10%以下になり、若干増加率の緩和傾向も見られる。表-2のデータを見てわかるように、エネルギー構造要因とエネルギー強度要因がCO₂排出削減に寄与したが、経済規模要因と人口要因が増加要因となったことがわかる。増加要因の中では、経済発展要因が最も強く、CO₂排出量の推移の形を決めていることがわかる。特に、2003年からは毎年10億トン以上増加させてきた。人口要因もCO₂排出の増加要因であるが、その寄与度が小さい。削減要因として、エネルギー構造とエネルギー強度が働いているが、エネルギー構造があまり変化していないため、削減への寄与が小さい。中国の石炭を中心とするエネルギー構造が転換しなければ、エネルギー構造要因のCO₂削減への寄与は大きくならないと考えられる。表-2によると、この14年間にエネルギー強度は削減寄与度の増加率は大きいですが、まだまだ10億トン未満で、その寄与度は経済成長の寄与度を打ち消すほどではない。

次に、省市別に考察する。図-2には各省市の1995～2008年のCO₂排出量の累計を示している。CO₂排出総量

で全国上位5位までの省市は山東省、山西省、遼寧省、河北省と江蘇省の順番である。上位10位までの省市では、第2次産業が集中している都市が多い。主な石炭の供給地である山西省と内モンゴル自治区も、排出量が上位10位に入っている。経済発展が遅れている中部と西部の省は、CO₂排出量も相対的に少ない。一方、北京市、上海市、天津市など、第3次産業やエネルギー消費量の少ない軽工業が中心である大都市も排出量が少ないことがわかる。

図-3には、2008年における各省市の要因別寄与度の比較を示している。各省市においても経済要因がCO₂排出増加に大きく寄与し、エネルギー効率が削減に寄与していることがわかる。排出量が全国上位である省市では、エネルギー強度要因による削減量は数字から見れば大きいですが、経済要因による増加量に比べると少ない。例えば、排出量トップの山東省、2位の山西省では、エネルギー強度要因によるCO₂排出削減量は経済要因による増加量の36%、34%に過ぎない。一方、エネルギー効率の一番高い北京市では、エネルギー強度要因による削減量は経済要因による増加量の98%を打ち消した。

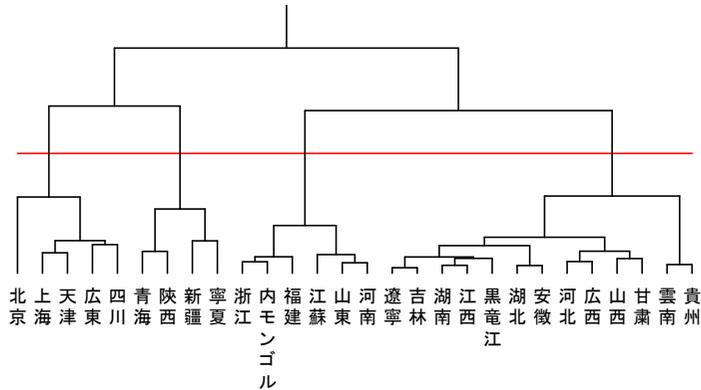


図-4 階層型クラスター分析によるデンドログラム

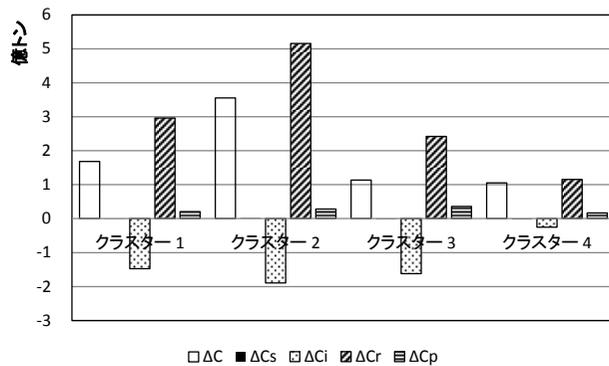


図-5 各クラスターのCO₂の排出増加への寄与度(2008年)

注：ΔCは基準年に対する2008年のCO₂排出量を、ΔCsはエネルギー構造要因を、ΔCiはエネルギー強度要因を、ΔCrは経済規模要因を、ΔCpは人口要因を示す。

3. クラスター分析による類型化

(1) 分析対象

2章で分析した中国28の省・市・自治区を対象とした二酸化炭素排出に関する要因分析の結果を用い、本章では、類型化を行った。海南省はデータ未入手のため、分析対象外とした。直轄市である重慶市は1997年以前に四川省に含まれていたため、重慶市の2008年のデータを四川省に加えた。

(2) 分析方法

本論文では、1990年に対する2008年の排出係数、エネルギー効率、1人当たりのGDP、人口の4つの要因の変化量を変数として、クラスター分析を行った。クラスター分析には、階層型と非階層型(K-平均法)という2つの

方法があるが、本論文では、階層型を用い、変数間距離の計算はユークリッド距離、クラスターの連結法にはウォード法を適用した。

(3) 分析結果

クラスター分析の樹形図(デンドログラム)を図4に示す。

これを基に4つのクラスターに分類し、それぞれのクラスターの特徴を理解するために、エネルギー構造要因、エネルギー効率要因、経済発展要因、人口要因の4つの要因を変数として、クラスターごとに2008年までのCO₂排出変化に対する寄与度の平均値を求めた(図5)。

クラスター1には、遼寧省、河北省、湖南省、湖北省、江西省、安徽省、吉林省、黒龍江省、山西省、雲南省、甘粛省、広西自治区、貴州省の13の省が含まれる。このクラスターは石炭を主な燃料とするエネルギー構造がほとんど変化しておらず、エネルギー効率が1990年の44%

となり、CO₂削減要因として働いていた。また、経済成長率が大きく、CO₂増加の93.5%が経済要因より生じた。以上より、このクラスターの特徴は、エネルギー効率改善と経済成長が大きいといえるが、他のクラスターと比較すると改善率、成長率はいずれも相対的にそれほど大きくない。

クラスター2には、浙江省、江蘇省、福建省、山東省、河南省、内モンゴル自治区の6つの省が含まれる。このクラスターは、工業団地の集中する地域が多いため、石炭を中心としたエネルギー消費量が多いため、1990年に対する2008年のCO₂の排出増加量が最も多く、エネルギー構造要因がCO₂排出削減にほとんど貢献していない。エネルギー効率の改善がCO₂削減に大いに寄与したが、経済成長が著しいため、経済成長要因によるCO₂排出増加量が相殺できないほど大きい。

クラスター3には、北京市、上海市、天津市、広東省、四川省の5つの省市が含まれる。このクラスターの特徴は、エネルギー効率の改善が著しく、2008年の単位GDPあたりエネルギー消費量が1990年の28%まで減少した。エネルギー効率要因による削減量が経済要因による増加量の67%を打ち消した。また、大都市への人口集中の影響で、このクラスターではCO₂排出増加に対する人口要因の貢献度が大きいという特徴がある。

クラスター4には、青海省、陝西省、新疆自治区、寧夏自治区の4つの省が含まれる。このクラスターは、経済発展が遅れている西部の省で構成される。経済要因の寄与度が相対的に小さく、エネルギー効率は悪い。ただし、西部地域は天然ガスが豊富なため、天然ガスの利用率が他の地域に比べて高い。例えば、青海省と新疆自治区の総エネルギー消費に占める天然ガス消費量の割合はそれぞれ22%、12%である(2008年)。このクラスターは、エネルギー構造要因の寄与度が相対的に大きい。

4. まとめ

本研究では、中国の二酸化炭素排出削減対策を検討するために、中国の30省・市・自治区に対して1995～2008年の排出量の要因分析を行った。さらに、その結果に基づいてクラスター分析を行い、クラスターごとに特徴を分析した。主な結論は下記の通りである。

二酸化炭素排出に対して、経済要因と人口要因が増加要因、エネルギー構造要因とエネルギー効率要因が削減要因である。近年は人口増加が鈍化しているため、二酸化炭素の増加に対する人口要因の寄与度があまり大きくない。一方、エネルギー構造要因の削減への寄与度が大きくないが、これについては、化石燃料を中心となるという現状に変化がない限り、この要因の寄与度が大きく

なることは期待できない。結局、寄与度として大きいのは、増加に対する経済要因と減少に対するエネルギー効率要因であり、前者の寄与の方が勝っているのが現状といえる。

クラスター分析を用い、二酸化炭素排出量の変化の要因に基づき、中国28の省市を4つの類型に分類した。クラスターごとの特徴を考察することで、二酸化炭素の削減対策の重点が異なることを示した。すなわち、クラスター1、2、4は、エネルギー効率をより改善すべきだと考えられる。一方、クラスター3は、すでにエネルギー効率が高く、経済成長の寄与度も相対的に小さいが、人口要因が相対的に大きい地域であるため、今後民生部門の対策が求められる。

以上のように、中国のように面積が広大で、地域特性の多様性の大きい国の場合、地域(省・市・自治区)によって二酸化炭素排出の変化要因の差も大きいことがわかる。そのため、地域の特性を考慮した対策を検討することが効率的であるといえる。中国では、近年、低炭素社会形成に向けて、循環経済産業園區、環境モデル都市、低炭素生態都市などの建設が進められている。現状ではあくまでモデル事業としての位置づけであり中国全体に与える影響はまだ微々たるものであるが、地域特性に応じた対策という意味では大きな意味を持つ。よって、その展開効果を推計することは有用であると思われる。一方で、地域の最適解と国全体の最適解が必ずしも整合しないは論を俟たないであろう。それらを同時に検討していくことも必要である。

参考文献

- 1) ロイター記事, 2011年6月14日
http://jp.reuters.com/article/3rd_ip_jiji_EnvNews/idJPjiji2011061400353
- 2) Xu Guo-quan, LIU Ze-yuan, JIANG Zhao-hua: Decomposition Model and Empirical Study of Carbon Emissions for China, 1995-2004, China Population, Resources and Environment, Vol.16, No.6, 2006, pp.158-161 (In Chinese)
- 3) SONG De-yong, LU Zhong-bao: The Factor Decomposition and Periodic Fluctuations of Carbon Emission in China, China Population, Resources and Environment, Vol.19, No.3, 2009, pp.18-24 (In Chinese)
- 4) ZHA Dong-lan, ZHOU De-qun: The Inequality about Provincial Energy Efficiency and Its Related CO₂ Emission: Decomposition Based on Kaya, Systems Engineering, Vol.25, No.11, 2007, pp.65-71 (In Chinese)
- 5) 張坤民, 吉田文和: 低炭素世界に向けた中国の位置、挑戦と戦略, 年報・公共政策学, Vol2, pp.109-124
- 6) Ang, B.W.: The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide. Energy Policy 33, 2005, pp. 867-871
- 7) 中国国家统计局能源統計司: 中国能源統計年鑑, 1996～2009各年版

- 8) IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories 2006 2007, pp.683-691
- 9) 中国国家統計局: 中国統計年鑑, 1996~2009各年版 13) 白 金鶴, 松本 亨: 中国巨大都市の二酸化炭素排出に関する要因分析, 平成22年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, 2011
- 10) TAN Dan, HUANG Xian-jin: Correlation Analysis and Comparison of the Economic Development and Carbon Emission in the Eastern, Central and Western Part of China, China Population, Resources and Environment, Vol.18, No.3, 2008, pp.54-57 (In Chinese)
- 11) Dabo Guan, Klaus Hubacek, Christopher L. Weber et al.: The drivers of Chinese CO₂ emissions from 1980 to 2030, Global Environmental Change 18, 2008, pp.626-634
- 12) Ying Fan, Lan-Cui Liu, Gang Wu et al: Changes in carbon intensity in China: Empirical findings from 1980-2003, Ecological Economics 62,

ANALYSIS ON FACTOR OF CARBON EMISSION AND CLASSIFICATION OF REGIONAL CHARACTERISTIC IN CHINA

Jinge BAI and Toru MATSUMOTO

Under the background of the dramatic increase of the green-house gases, China and India are also at the beginning of limiting the emission of green-house gases (mainly the emission of carbon dioxide). It is considered more and more important to study on what those countries do to mitigate the emission of carbon dioxide. In this paper, based on the Kaya decomposition equation, we used LMDI (Logarithmic Mean Divisia Index) method to find out those impacts to the emission of carbon dioxide in China and its 30 provinces during the period from 1995 to 2008. Then, we took a multivariate analysis and discussed the appropriate policies according to the features of each groups.