

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 3 月 26 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2012

課題番号：21560611

研究課題名（和文） アジア型中核都市を対象とした都市エネルギーのシステムダイナミクスモデルの開発

研究課題名（英文） A System Dynamics Model of Urban Energy Flow in Asian Core Cities

研究代表者

松本 博（MATSUMOTO HIROSHI）

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：90125659

研究成果の概要（和文）：

持続可能なアジア型都市・建築システムの基盤となる都市エネルギー需給システムを構築するための戦略的なシナリオを提案することを最終目標として、アジア型中核都市をケーススタディとして都市エネルギーフローをシミュレートするシステムダイナミクス（SD）モデルを開発し、各種シナリオ（ポリシー）に基づく都市エネルギー消費量及び CO₂ 排出量の将来予測を詳細に検討した。

研究成果の概要（英文）：

To present a strategic scenario to build a sustainable architecture-urban system in Asian core cities, a system dynamics model to simulate the urban energy flow of demand/supply energy system in Asian core cities has been developed and the energy consumption and CO₂ emission in the cities were investigated under the different scenarios.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2010 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学

キーワード：都市エネルギー，省エネルギー，東南アジア，システムダイナミクス，室内熱環境制御，環境共生技術

1. 研究開始当初の背景

アジアの巨大都市では、歴史的・現代的二重構造の下で空間形成がなされた結果、都市インフラが未整備のまま高密度化、スプロール

化した市街地が急速に肥大化してきた背景があり、欧米型の都市空間管理モデルのような伝統的な都市計画パラダイムを適用することは困難であり、新しいパラダイムによる

空間整備システムの構築が急務である。

2. 研究の目的

持続可能なアジア型都市・建築システムの基盤となる都市エネルギーフローシステムを構築するための戦略的なシナリオ（エネルギー需給システム，土地利用，交通ネットワークなど都市活動・発展の施策・計画）を提案することを最終目標として，都市のエネルギーフローシステムの中核をなすサブモデルとなる地域計量経済モデル，ライフサイクルマトリクス（LCM）を考慮したコーホート要因法に基づく世帯推計モデルおよび交通ネットワークモデルの開発・統合を行い，アジア地域の中核都市をケーススタディとして持続可能な未来社会における都市・建築のエネルギー需給システムの SD モデルを開発することを目的とする。

3. 研究の方法

都市・建築に関連したエネルギー消費量のライフサイクル・インベントリ（LCI）分析と消費エネルギーの空間的分布の推計及び都市におけるエネルギー需給システムのシステムダイナミクス（SD）モデルの開発という2つの研究アプローチにより，持続可能なアジア型都市・建築システムを実現するための都市・建築におけるエネルギー需給システムの将来予測可能な SD モデル開発する。

4. 研究成果

(1) アジア型中核都市における各種建物のエネルギー消費原単位

都市における民生，商業，工業，輸送部門別エネルギー消費量の空間分布を算出するために，産業連関表等の経済統計データまたは積み上げ法により建物種別エネルギー消費原単位を算出・整備し，そのデータベースシステムを構築するために，図1に示すよう

な各種統計資料が整備されている愛知県における産業連関表を用いた建物種別のエネルギー消費原単位算出法を開発した。

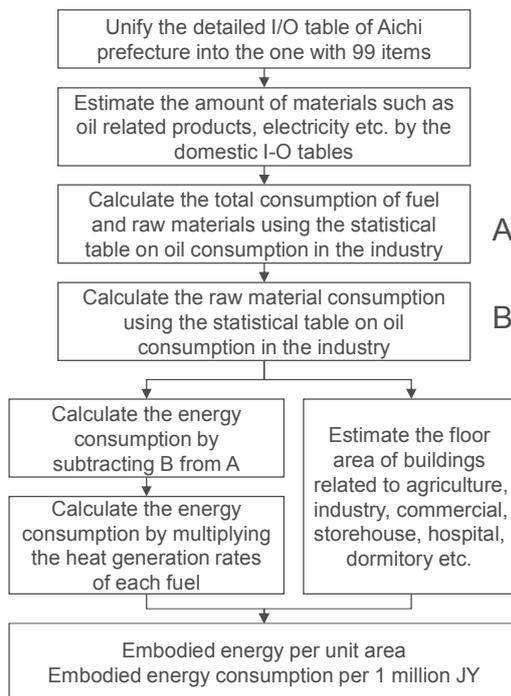


図1 産業連関表を用いた建物種別エネルギー消費原単位の算出法

表1 商業施設のエネルギー消費原単位
(GJ/100m²)

	Department store	Supermarket	Convenience store
I-O Tables (1995) (Matsumoto et al.)	390.95	220.13	351.45
I-O Tables (2000) (Matsumoto et al.)	544.29	252.65	563.59
The Institute of Energy Economics, Japan (IEE)	150.69	147.34	424.87
Ojima et al.	153.16	147.05	-

表2 教育施設のエネルギー消費原単位
(GJ/100m²)

	Elementary school	Junior high school	High school	University	Hospital
I-O Tables (1995) (Matsumoto et al.)	28.16	25.52	26.22	19.63	143.45
I-O Tables (2000) (Matsumoto et al.)	52.59	48.12	47.96	38.34	196.47
IEE	-	-	-	-	179.16
Ojima et al.	41.92	41.92	25.94	43.38	200.45

商業施設では百貨店が一番高く，コンビニエンス・ストアがその次に多くのエネルギー

を消費する事が分かった。コンビニエンス・ストアは日中でも照明をつけており、24 時間営業の店舗がほとんどであるからエネルギー消費が多いと考えられる(表 1)。学校建築では生徒・学生の年齢が上がるにつれエネルギー原単位が小さくなる傾向にあることが分かった(表 2)。施設規模は大きくなると廊下などの付帯的な空間が多く設計され、そのような空間ではエネルギー消費が少なくなる。また規模の大きな施設ではすべての部屋が同時に使われることも少ないため、平均的に面積当たりのエネルギー消費が少なくなる。よって大学の面積当たりのエネルギー原単位は少なくなったと考えられる。

一方、マレーシア・ジョホールバル及びインドネシア・パダンにおいても本手法の適用が可能であることを確認した。産業連関表については必要なデータが得られたが、その他の統計データについては必要なデータが不足しており、今後の調査で補って算出を行う予定である。

(2) アジア型中核都市におけるエネルギーシステムの SD モデルと消費エネルギーの将来予測

アジア中核都市における都市エネルギーフローのシステムダイナミクスモデルの作成にあたって、研究期間中にマレーシア・ジョホールバル及びインドネシア・パダンを訪問し、SD モデルに必要な統計資料等を調査・収集した。その結果、豊橋 SD モデルを構築する際に必要な資料が整備されていないために、本研究で開発する SD モデルは図 2 に示すような簡易 SD を基本とすることとした。このモデルは都市構造を住宅、工業、商業および交通の 4 部門でモデル化し、各種セクター、人、情報等のパラメーターをコネクタで結合して動的なシステムを構築した。各セ

クターの詳細については省略するが、図 3 に商業セクター内の因果ループの概要を示す。シミュレーションツールには Stella を使用した。

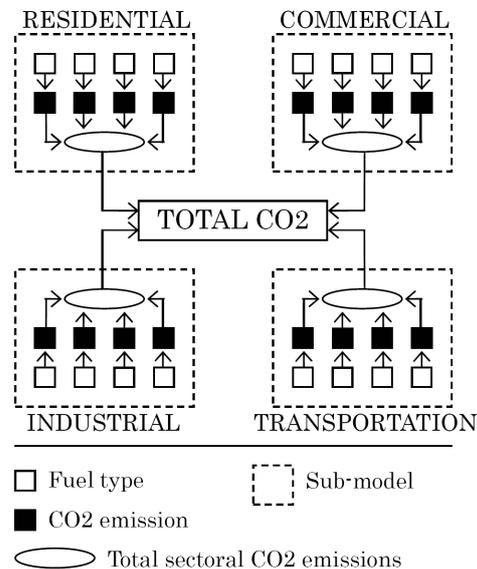


図 2 SD モデルの基本構造

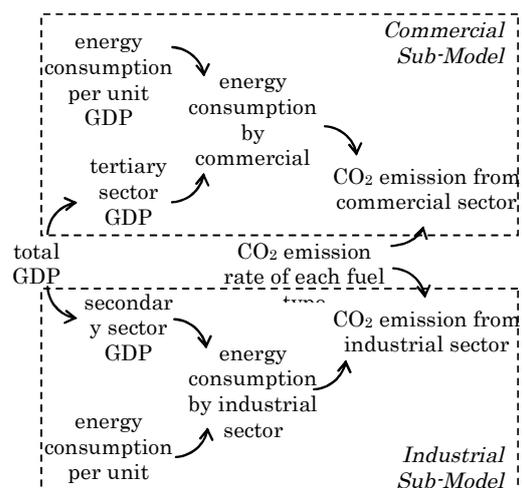


図 3 商業セクターの因果ループ

マレーシア・ジョホールバル市の都市エネルギーシステムの SD モデルを作成するにあたり、前述したプロトタイプ型 SD モデルを基に新たに農業セクターを追加した FML-SD モデルを作成した。表 3 にエネルギー消費及び CO₂ 排出量算出の予測式を示す。

表 4 に FML-SD モデルによる IDR (イスカンダル地域) とマレーシア全体における 2006 年のエネルギー消費量算出結果を

示す。IDR のエネルギー消費はマレーシア全体に比べて、住宅セクターで少なく工業セクターで多い結果となった。

表3 エネルギー消費及びCO₂排出量予測式

Model/ Sub-models	Equations
Full Model	
System Dynamics Model ^a	$CO_{2, IDR} = [CO_{2, Res} + CO_{2, Com} + CO_{2, Ind} + CO_{2, Tran} + CO_{2, Agr}] - [CO_{2, CS}]$ (1)
Sub-model	
Residential Sub-model ^b	$CO_{2, Res} = H \times \sum_{i=1}^n (CnR \times EmR)_i$ (2)
Commercial Sub-model ^b	$E_{Com} = GDP_{total} \times S.GDP_{Com} \times ECR_{Com}$ (3)
	$CO_{2, Com} = E_{Com} \times \sum_{i=1}^n (SE_{Com} \times EmR)_i$ (4)
Industrial Sub-model ^b	$E_{Ind} = GDP_{total} \times S.GDP_{Ind} \times ECR_{Ind}$ (5)
	$CO_{2, Ind} = E_{Ind} \times \sum_{i=1}^n (SE_{Ind} \times EmR)_i$ (6)
Transportation Sub-model ^c	$CO_{2, Tran} = [V \times D \times \sum_{i=1}^n (CnR \times EmR)_i]_{M,C,B,F}$ (7)
Agriculture Sub-model ^d	$E_{Agr} = GDP_{total} \times S.GDP_{Agr} \times ECR_{Agr}$ (8)
	$CO_{2, Agr} = E_{Agr} \times \sum_{i=1}^n (SE_{Agr} \times EmR)_i$ (9)
Carbon Sequestration Sub-model ^e	$CO_{2, CS} = [AL \times CSR_{AL}] + [FL \times CSR_{FL}] + [BL \times CSR_{BL}]$ (10)

Where:

IDR : Iskandar Development Region	S.GDP : Share of Sectoral GDP against the Total GDP
Res : Residential Sector	ECR : Energy Consumption Rate per Unit of GDP
Com : Commercial Sector	SE : Share of Each Fuel Type against the Total Sectoral Energy Consumption
Ind : Industrial Sector	V : Total Number of Each Type of Vehicles
Tran : Transportation Sector	D : Travel Distance of Each Vehicle
Agr : Agriculture Sector	M,C,B,F: Motorcycles, Cars, Buses, Freight Vehicles
CS : CO ₂ Sequestration	SCR : Carbon Sequestration Rate
CO ₂ : CO ₂ Emissions	AL : Agricultural Land Use
EmR : CO ₂ Emission Rate	FL : Forest Land Use
H : Total Number of Household	BL : Bushes, Parks and other Green Areas
CnR : Energy Consumption Rate	
E : Sectoral Energy Consumptions	
CnR : Energy Consumption Rate	
fl...fn : Fuel Types	
GDP _{total} : Total GDP	

Source: ^aFong et al., 2008b; ^bFong et al., 2007a, 2007b; ^cFong et al., 2008b

表4 FML-SD モデルによる IDR 及びマレーシアにおけるエネルギー消費量算出結果

Sectors	IDR		Malaysia ^a	
	PJ	%	PJ	%
Residential	1.4	1.6	213.0	14.1
Commercial	7.1	8.4		
Industrial	43.6	51.2	630.7	41.7
Transportation	33.0	38.7	661.3	43.7
Agriculture	0.1	0.1	8.0 ^b	0.5
Total	85.2	100.0	1,505.0	100.0

^a Source: EPU, 2006. Note: Separate figures for residential and commercial sectors are not available.

^b Including forestry sector

パダン市における SD モデルとその予測については、必要なデータを収集済みで、SD モデルのプロトタイプは出来上がっており、現

在、テストランを含めた SD モデルの検証を行っている。

(3) 各種シナリオに基づくアジア中核都市におけるエネルギー消費の推計・評価

各種シナリオに基づくアジア中核都市における CO₂ 排出量(エネルギー消費とリンク)の推計・評価するために、図4に示す改良型 FML-SD モデルを作成した。CO₂ 排出量の算出は表3に示した予測式を用いて算出した。

表5に検討したシナリオを示す。検討したシナリオ(ポリシー)以下の通りである。

- ① エネルギー効率
- ② エネルギー源の構成
- ③ 交通システム
- ④ 経済構造
- ⑤ 人口対策
- ⑥ 緑化エリア

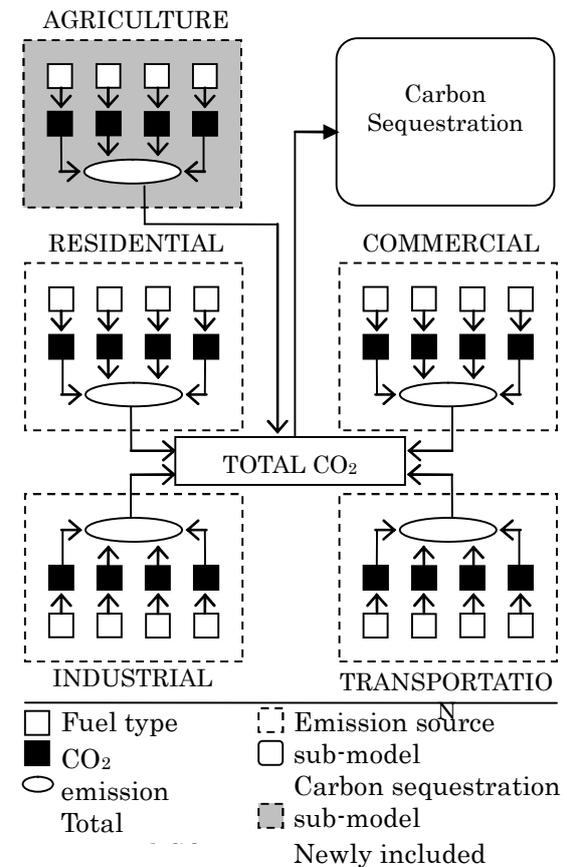


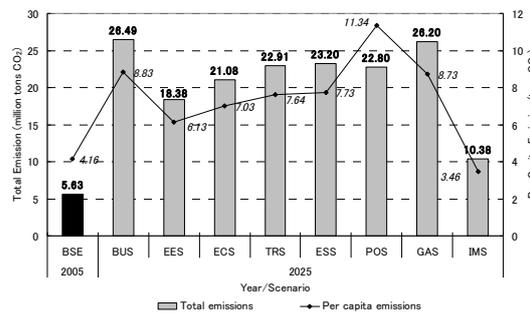
図4 改良型 FML モデルの概要

表 5 シナリオ (ポリシー)

Aspects of urban policies	Cases of urban policies	
	Carbon Intensive (CI) Policies	Low Carbon Oriented (LC) Policies
Energy Efficiency (EE)	No particular effort on energy efficiency improvement	Promote energy efficiency improvement via mechanical measures in all sectors (assuming 30% reduction in energy consumption)
Energy Composition (EC)	Emphasis on fossil fuels in all sectors	Promote renewable energy in all sectors (assuming 20% share of renewable energy)
Transportation (TR)	Favor private transportation	Promote mass transit public transportation (assuming 50% share of public transportation)
Economic Structure (ES)	Emphasis on energy intensive heavy industries	Emphasis on high-tech light industries and service industries (assuming 20% share of energy intensive manufacturing industry)
Population (PO)	Favor rural-urban migration	Controlled urban population growth (assuming 2.0% p.a. growth rate)
Green areas (GA) (open spaces, plantations, forests, wetlands)	Favor conversion of green areas for development	Protection of green areas (conservation of the existing forests)

図 5 にシミュレーション結果を示す。

BSE (2005 年の実績で 5.63Mt CO₂) に比べて、何ら政策の変更がない場合 (BUS), 2025 年に CO₂ 排出量は約 5 倍の 26.49 Mt CO₂ になる。個別のシナリオの中で単独で最も効果的なものは、EES エネルギー効率の改善であり、BUS に比べて約 8Mt CO₂ 削減 (約 30%減) の効果が見られた。また、検討したシナリオの中で最も削減効果が見られたのは IMS (上記 6 つのポリシーをすべて導入した場合) で 10.38 Mt CO₂ となり、BUS に比べ約 60%減となった。



BSE: Baseline Emission in 2005

Simulation scenarios:

BUS: Business as Usual Scenario
 EES: Energy Efficiency Scenario
 ECS: Energy Composition Scenario
 ESS: Economic Structure Scenario
 GAS: Green Area Scenario
 TRS: Transportation Scenario
 POS: Population Scenario
 IMS: Integrated Measure Scenario

図 5 シミュレーション結果

(4) 省エネルギーに関する要素技術の開発

本研究に関連して、アジア中核都市で導入可能な省エネルギーに関する要素技術の開発も併せて行った。これらの環境制御技術は都市エネルギーの需給システムの設計・制御方法に深く関わる要素技術であり、将来的には本研究で開発した SD モデルに統合した詳細な SD モデルの構築が期待できる。そのベースとして、自然エネルギーを利用した電気を使わない換気システム及びハイブリッド型床冷暖房システムに対して、模型実験及び CFD シミュレーションでその性能を評価した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① Lusi Susanti, H. Homma, H. Matsumoto and Y. Suzuki and M. Shimizu: A Naturally Ventilated Cavity Roof as Potential Benefits for Improving Thermal Environment and Cooling Load of a Factory Building, Energy and Buildings, 査読有, Vol. 43, Issue 1, 211-218, 2011
- ② 宋城基, 松本博: 住宅用タービンベンチレーターの自然換気性能に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 査読有, Vol.75, No.648, 2010, 157-164
- ③ Lusi Susanti, H. Homma, H. Matsumoto, Y. Suzuki and M. Shimizu: Numerical Simulation of Natural Ventilation of a Factory Roof Cavity, Energy and Buildings, 査読有, Vol. 42, No.8, 2010, 1337-1343
- ④ Fong, W.K., Lun, Y.F. and Matsumoto, H.: Stabilization of Global Greenhouse Gas Concentrations by Planning Carbon and Energy Budgets at City Level: Case Study of the Iskandar Development Region, Malaysia, Hong Kong Institute of Engineers Transactions, 査読有, Vol.17, No.3, 2010, 8-14
- ⑤ Ho Cing Siong, H. Matsumoto, Case study on the design of a long-term environmental vision for sustainable urban and building in local city area, 査読無, 2009, 66-80
- ⑥ H. Matsumoto, Ho Chin Siong, Developing

the urban infrastructure, Group Report of Developing of a Long-term Environmental Planning for Local Government, 査読無, 2009, 35-49

- ⑦ Fong, W.K., Lun, Y.F. and Matsumoto, H.: Predictions of carbon dioxide emissions for rapid growing city of developing country, Hong Kong Institute of Engineers Transactions, 査読有, Vol.16, No.2, 2009, 1-8
- ⑧ Yoshinori Fujita, Hiroshi Matsumoto and Ho Chin Siong, Assessment of CO2 emissions and resource sustainability for housing construction in Malaysia, International Journal of Low-Carbon Technologies, 査読有, No.4, 2009, 16-26

〔学会発表〕(計4件)

- ① Satoru Ikeo and Hiroshi Matsumoto: Thermal Performance of a Floor Heating and Cooling System with Air Heat Source by CFD Simulation, Proceedings of SET2011, 査読有, Paper No.174, 2011.9.5, 1-4, トルコ・イスタンブール・Marine Prenses Artemis Hotel
- ② 松本 博, アジア地域の中核都市を対象とした都市エネルギー需給システムのモデリングに関する研究 その1 関連文献のレビュー, 日本建築学会学術講演梗概集, 査読無, 2011.8.25, 823-824, 東京・早稲田大学
- ③ Hiroshi Matsumoto and Satoshi Ikeo: Experimental Study on the Thermal Performance of a Hybrid Floor Heating and Cooling System with Radiant Floor Panels Heated or Cooled by Air, Proceedings of the 8th ISAIA, 査読有, 2010.11.11, 940-943, 北九州市・北九州国際会議場
- ④ 池尾 怜, 松本 博: 実大居室を用いた空気式床冷暖房システムの熱的性能評価実験, 日本建築学会学術講演梗概集, 査読無, 2010.9.10, 1075-1076, 富山市・富山大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松本 博 (MATSUMOTO HIROSHI)
豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：90125659

(3) 連携研究者

宋 城基 (SON SONKI)
元豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・講師 (現在 広島工業大学・環境デザイン学科・准教授)