

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760551

研究課題名(和文) 東南アジアの途上国への適用を目的とした住宅のライフサイクルアセスメント指針の開発

研究課題名(英文) Development of LCA guidelines for residential buildings in developing Southeast Asian countries

研究代表者

久保田 徹 (KUBOTA, TETSU)

広島大学・国際協力研究科・准教授

研究者番号：80549741

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、インドネシアのジャカルタとバンドンを主な対象としたケーススタディを通じて途上国においても適用可能な汎用性の高い住宅のLCA指針を提案することにある。ケーススタディでは、合計494世帯の一般住宅を対象に現地調査を実施し、(a)建築資材のインベントリと(b)運用時のエネルギー消費量に関するデータベースを構築した。両都市の住宅の世帯当たりの建築資材のマテリアルフローを明らかにし、さらに住宅内の年間のエネルギー消費量を算出し、その影響要因をパス解析によって分析した。これらの調査結果を基に、世帯当たりのライフサイクルエネルギーとCO2排出量を推計した。

研究成果の概要(英文)：This study aims to propose a versatile LCA guideline that can be applied for residential buildings in developing countries through the case studies conducted in the cities of Jakarta and Bandung. A total of 494 households were surveyed in the case studies and the following databases were constructed: (a) building material inventory data, and (b) operational energy consumption data. The material flow was revealed in both of the cities respectively and the annual household energy consumption was estimated based on the results of the surveys. The causal structure on the household energy consumption was investigated through a path analysis. Then, the household life cycle energy and CO2 emissions were estimated in both of the cities.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築環境・設備

キーワード：地球・都市環境 開発途上国 LCA 省エネルギー 東南アジア

1. 研究開始当初の背景

従来の建築分野では、建物の運用段階におけるエネルギー消費や環境負荷に焦点を当てた研究が殆どであったが、97年のISO14000シリーズの発行を受け、特に先進諸国では建築分野においてもLCAを用いた調査研究が急速に進んだ。

しかし、東南アジアを含めた開発途上国においてLCAの実施例は少ない。これは、途上国では地球温暖化対策に対する関心が比較的低いことが第一の理由に挙げられるが、これに加え、建物内のエネルギー消費量等のLCAに必要なデータが途上国では十分に整備されていないことが重要な要因である。また、このような状況にあっては、精度の高いデータを必要とする先進国のLCA手法をそのまま途上国に適用することは難しい。

2. 研究の目的

インドネシアのジャカルタ(人口:約960万人)とバンドン(人口:約330万人)を主な対象としたケーススタディを通じて、LCAに必要なデータベースを構築し、途上国においても適用可能な汎用性の高い住宅のLCA指針を提案する。

3. 研究の方法

(1) ケーススタディの概要

インドネシア主要都市は、不法入居者や都市スプロールによって無計画に形成された戸建住宅地が殆どを占める。インドネシア政府の統計によれば、こうした‘unplanned house’(いわゆる‘Kampungs’)は、ジャカルタでは約74%で、バンドンでは約89%を占める。これらのunplanned houseは建設コストと敷地規模によって、さらに、(a) Simple house、(b) Medium house、(c) Luxurious houseの3種に分類される(図1)。これら3分類で建物の大きさや使用する材料の質は異なるが、煉瓦壁を用いた戸建住宅であるという点で共通している。

LCAには、主に(a)建築資材のインベントリと(b)運用時のエネルギー消費量に関するデータが必要となるが、上記のunplanned houseでは建築図面さえない場合が殆どであり、自らの手によって建物計測と使用資材の積算を行う必要があった。そこで本研究では、ジャカルタ(2012年)とバンドン(2011年)

においてそれぞれ現地調査を実施し、合計494世帯の住宅のインベントリデータと住宅内のエネルギー消費量データを収集した。

(2) 建築資材のマテリアルフロー

建築分野のLCAでは、通常、(a)設計、(b)製造、(c)建設、(d)運用、(e)維持管理、(f)解体の6つのフェーズを考えるが、インドネシアの都市住宅の場合には、一部の高所得者層向けの住宅を除き、建築現場は手作業で行われているのが現状であるため、設計、建設及び解体の3フェーズを考察対象から除いた。

両都市におけるケーススタディでは、対象住宅1棟1棟を訪問し、実測によって詳細な建物図面を作成した。面積や容積単位で得た各資材の使用量を単位面積当たりの重さ(kg/m²)に換算し、インベントリ・データとして整備した。

(3) 住宅内のエネルギー消費

建築資材に関する調査と同様の住宅を対象に、住宅内で使われる家電の所有台数、使用時間をアンケート票を用いて聞くとともに、小型電力計(MWC01, OSAKI)を用いて各家電の消費電力を実測した。一方で、各世帯の各月の電力料金を調べ、これらによって

表1 回答世帯の属性

	Jakarta	Bandung
Sample size	297	247
House category (%)		
Simple	42.1	48.6
Medium	38.7	40.1
Luxurious	19.2	11.3
Gender (%)		
Male	50.5	39.3
Female	49.5	60.7
Age (%)		
< 40 (years old)	21.9	17.0
40-49	33.7	27.9
50-60	32.3	32.0
> 60	12.1	23.1
Household size (persons)	4.5	4.8
Monthly household income (%)		
< 90 (US\$)	3.0	4.5
90-450	58.9	61.5
450-900	26.6	28.7
> 900	11.5	5.3
Total floor area (%)		
< 50 (m ²)	33.7	25.9
50-99	28.3	32.4
100-300	34.0	37.7
> 300	4.0	4.0



図1 調査対象住宅 (a) Simple house; (b) Medium house; (c) Luxurious house.

表2 建築資材のマテリアルインベントリ

Materials	Density (kg/m ³)	Simple houses		Medium houses		Luxurious houses		Whole sample	
		Mass (kg/m ²)		Mass (kg/m ²)		Mass (kg/m ²)		Mass (kg/m ²)	
		Jakarta	Bandung	Jakarta	Bandung	Jakarta	Bandung	Jakarta	Bandung
1. Stone	1450	729.8	623.1	696.5	682.6	529.0	603.9	678.4	644.7
2. Clay brick	950	494.9	371.7	309.2	414.0	413.3	451.2	407.4	397.7
3. Concrete brick	2300	0.0	7.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.6
4. Cement	1506	142.9	118.8	175.7	185.0	187.4	227.2	164.1	157.6
5. Sand	1400	717.5	561.0	623.1	674.4	583.8	740.2	655.3	626.8
6. Steel	7750	16.7	17.3	36.6	37.7	30.5	34.0	27.0	27.4
7. Ceramic tile	2500	30.8	15.5	33.9	34.2	59.5	77.4	37.5	30.0
8. Clear glass	2579	0.8	1.2	0.8	1.3	1.3	6.1	0.9	1.8
9. Wood	705	105.0	143.2	131.0	161.5	159.8	43.2	125.6	139.2
10. Gypsum	1100	0.0	0.3	7.0	1.3	23.0	24.4	7.1	3.4
11. Paint	700	2.0	1.7	5.4	4.4	10.0	12.4	4.9	4.0
12. Clay roof	2300	16.6	20.7	40.9	30.2	0.0	0.0	22.8	22.2
13. Concrete roof	2500	0.0	0.0	0.0	0.0	49.9	39.2	9.6	4.4
14. Asbestos roof	2200	5.6	0.6	2.1	0.3	0.25	0.0	3.2	0.4
15. Zinc roof	3330	1.2	0.8	0.1	0.1	0.0	0.0	0.5	0.4
Total		2,263.7	1,883.2	2,062.3	2,227.0	2,047.8	2,259.3	2,144.3	2,063.6

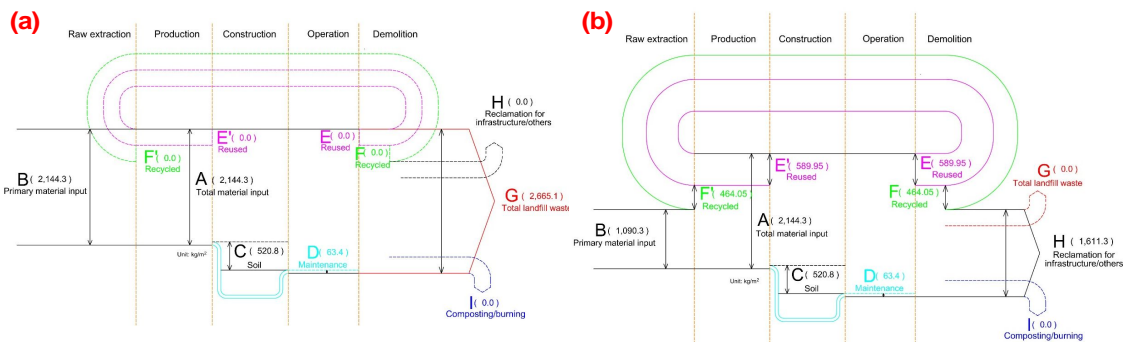


図2 住宅あたりの建物資材のマテリアルフロー（ジャカルタ）(a)リサイクル・リユース率を0とした場合; (b)各部材のリサイクル・リユース率を最大にした場合。

月当たりの電力消費量を算出した。さらに、ガス（LPG：液化石油ガス）と水道の伝票から月平均の消費量を求め、以上により月平均の世帯エネルギー消費量を算出した。なお、電力消費量は1次エネルギー換算を行った。

(4) I-O 分析

建築資材の内包エネルギー（Embodied Energy）及びCO₂排出量を算定する方法には、主に、(a)プロセス分析、(b)I-O表（産業連関表）を用いた分析、さらにそれらを統合した(c)ハイブリッド分析があるが、本研究ではデータの制約からI-O分析を採用した。インドネシアのI-O表は、国レベル、地域レベル、都市レベルの3段階で整備されているが、比較分析の結果、地域レベルや都市レベルのI-O表は対象セクター数が少なく、ある1つの部材の内包エネルギーが複数のセクターで過剰に見積もられてしまうことが分かった。そこで、本研究では国レベルのI-O表(175セクター)を用いた分析が最も妥当であると判断した。具体的分析方法は発表文献を参照のこと。

4. 研究成果

(1) 回答世帯の属性

表1のとおり、本ケーススタディにおけるSimple, Medium, Luxuriousの割合は、ジャカ

ルタで約42%, 38%, 20%であり、バンドンで約48%, 40%, 12%であった。これらの割合は、各都市の全世帯の住宅に占める割合を参考に決定した。平均世帯人数は両都市で概ね等しく4.5-5.0人であり、Luxurious houseの世帯人数は相対的に僅かに高く、平均で5.5人であった。世帯収入の各住宅分類ごとの割合は両都市でほぼ等しいものの、ジャカルタの平均世帯収入はバンドンよりも少し高かった。概して、世帯収入は、住宅分類が安価なSimpleからLuxuriousになるほど増加する傾向が見られた。

(2) 建築資材のマテリアルフロー

建築資材のインベントリ・データは、上述の住宅3分類ごとに単位面積あたりの重量として整備した(表2)。表2のとおり、単位面積あたりの資材使用量は両都市と住宅3分類ごとでそれほど大きな違いはなく、全体として1,800~2,300kg/m²に分布した。住宅3分類間の違いは屋根材と床材にのみ顕著に表れている。全サンプルの平均で、部材別にデータを比較すると、最も重量が大きいのは、両都市ともStoneで、Sand, Clay brick, Cement, Woodと続いた。

ジャカルタを例に、上記データを基に住宅1棟あたりの平均のマテリアルフローを描くと図2のとおりで、建物基礎の建設時に使用

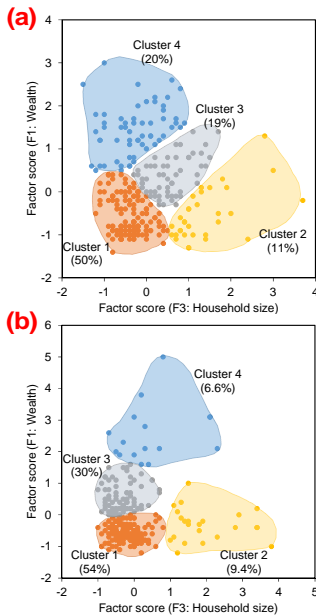


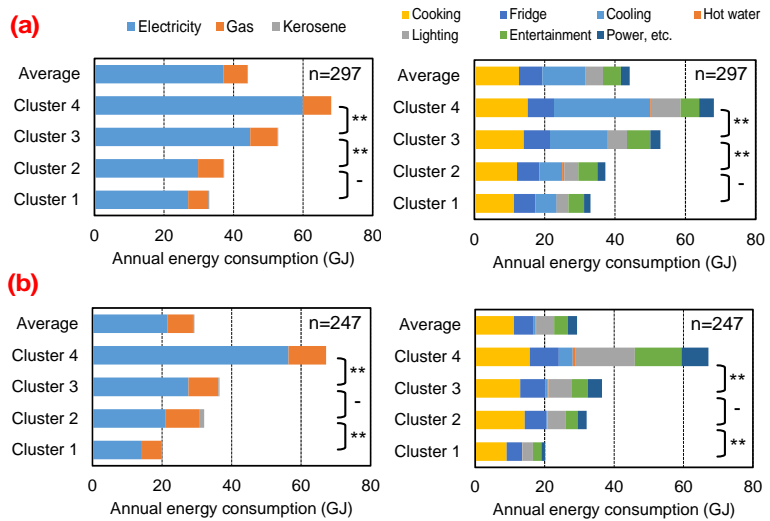
図3 抽出因子を用いたクラスター分析結果 (a)ジャカルタ; (b)バンドン

する砂を含めた廃棄物の最終処分量は 2,665.1 kg/m² に達する (図 2 a)。次に、資材のリサイクル・リユース率を各資材ごとに最大の割合まで高めた場合のフローを試算したところ、最終処分量は現状より 4 割減の 1,611.3 kg/m² となることが分かった (図 2 b)。これは、建築資材のリサイクル・リユースの推進によって、資材使用量と最終処分量の大幅な削減が可能であることを明確に示す結果といえる。

(3) 運用時エネルギー消費

回答世帯の社会・経済的屬性に関する変数に関して因子分析を行ったところ、住宅分類や世帯収入、延べ床面積などを含む因子 1 ‘Wealth’ と、築年数などを含む因子 2 ‘Building age’ と因子 3 ‘Household size’ が抽出された。これらの抽出因子の因子得点を用いてクラスター分析を行った結果、両都市において、全サンプルをそれぞれ 4 つのクラスターに分類できることが分かった (図 3)。図 3 のとおり、因子 1 ‘Wealth’ のスコアはクラスター 1、2 の平均がほぼ等しく、そこからクラスター 3、4 になるにつれて高くなる。クラスター 1 と 2 の違いは、因子 3 ‘Household size’ に表れており、両都市とも、クラスター 2 の方が 1 よりも世帯人数が平均して多い。

世帯当たりの年間エネルギー消費量を図 4 に示す。左図はエネルギー種別の結果であり、右図は用途別の割合を示す。全サンプルの平均で見ると、ジャカルタは一次エネルギー換算で年間約 44.2GJ の消費量となり、これはバンドンの平均よりも約 14.9GJ 大きい。この違いは主にエアコン使用頻度の差に起因する。ジャカルタの月平均気温は 27.1 ~ 28.9 で変動するのに対し、バンドンは比較的標高の高い地点 (700-800m 程度) に立地するため、平均気温は 22.9 ~ 23.9 とかなり低い値で変動する。本調査においても、エアコ



Note: *=5% significance; **=1% significance; - = insignificant.

図4 各クラスターの世帯当たりの年間エネルギー消費量 (a)ジャカルタ; (b)バンドン

ンの所有率は、ジャカルタでは住宅分類に応じて 6 ~ 81%であったのに対し、バンドンでは 0 ~ 25%と低かった。

図 4 のとおり、ジャカルタでは冷房用エネルギー消費量の割合が高く、平均で全体の 27.8% を占めた (バンドンでは僅かに 1.8%)。つまり、ジャカルタでは、クラスターごとのエネルギー消費量の多寡の殆どはエアコンの使用頻度によって決まっていることが分かる。これに対して、バンドンでは、料理用、照明用、余暇・娯楽用のエネルギー消費量がクラスターごとのエネルギー消費量の多寡に影響している。

次に、こうした住宅内のエネルギー消費量の影響要因の違いをパス解析によって分析した (図 5)。その結果、両都市ともに、まず世帯収入と住宅分類が強く相関しており、これらの要因が増加することによって、ジャカルタでは、延べ床面積などの住宅の広さが大きくなり、それらが特に冷房用の家電の所有率や使用頻度に影響を与え、結果としてエネルギー消費量が大きくなる構造であることが明らかとなった (図 5 a)。一方のバンドンでは、世帯収入の増加が、ジャカルタと同様に延べ床面積の増大に影響しており、それと同時に、収入の増加が電気とガスの消費の増加に直接的に影響を与える構造であることが分かった (図 5 b)。

つまり、両都市ともに、世帯収入の増加に伴って、住宅の広さが大きくなり、また世帯人数も増えるため、総じて家電の所有率と使用頻度が増大し、結果として、世帯当たりのエネルギー消費量を大きく増加させていることが明らかとなった。

(4) ライフサイクルエネルギー・CO₂排出量

前節で分類したクラスターごとに内包エネルギーと運用時エネルギー消費量を足し合わせ、世帯当たりのライフサイクルエネルギーを算出した (図 6)。なお、住宅の耐用

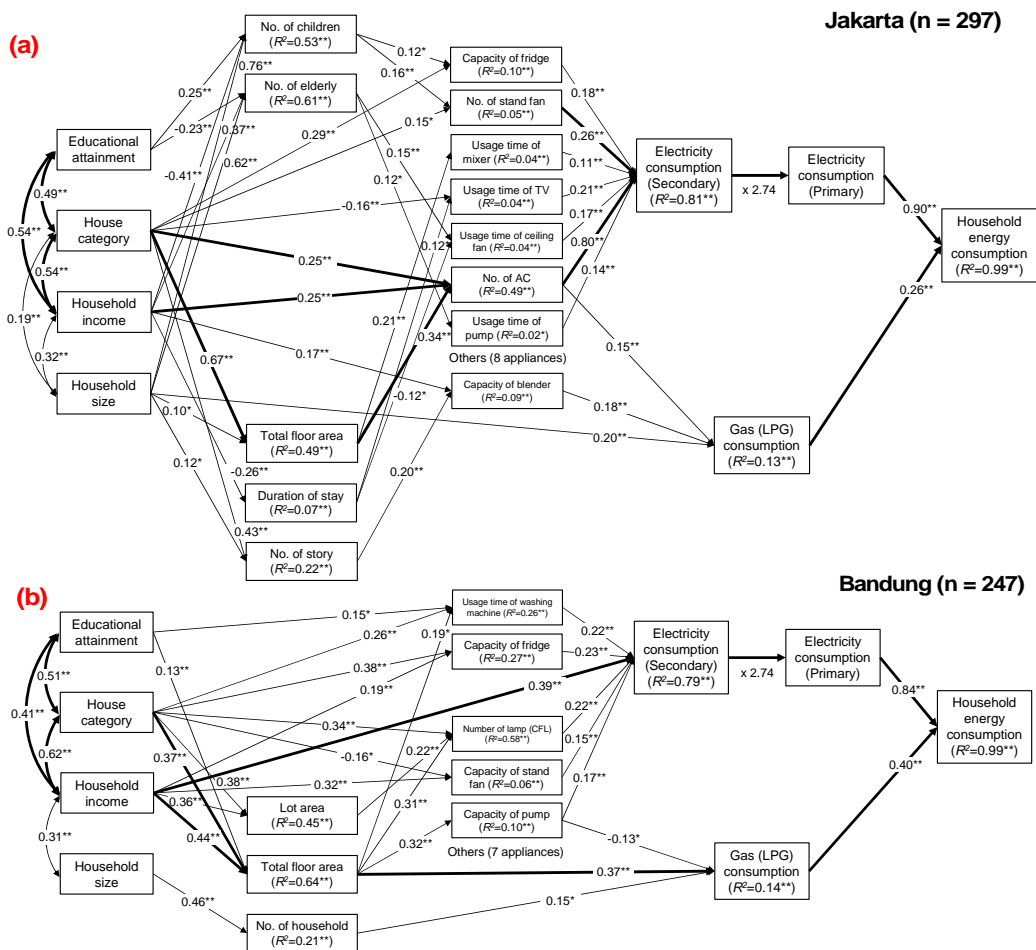


図5 世帯当たりの運用時エネルギー消費量の増大に影響する要因 (a)ジャカルタ; (b)バンドン

年数は、インドネシア政府研究機関の資料を基に、Simple: 20年、Medium: 35年、Luxurious: 50年と仮定した。

図6のとおり、ライフサイクルエネルギーの全体に占める運用時エネルギー消費量の割合は高く、全サンプルで見ると約8-9割を占める。バンドンのCluster 4では内包エネルギーの割合が高いが、これは延べ床面積がこのクラスターに限って非常に大きかったためである。ライフサイクルエネルギーの平均値は、クラスター1から4になるに伴って大きくなる。ジャカルタでは、クラスター1から4の平均値は、934, 1146, 2240, 3782 GJと増加し、バンドンでは、538, 1132, 1661, 4304 GJと増加した。前述のとおり、エアコンの使用頻度の高いジャカルタでは運用時エネルギー消費量が大きいので、全体の平均値を見ると、バンドンよりもライフサイクルエネルギーは大きい。

燃料種別ごとのエネルギー消費量にそれぞれのCO₂排出量原単位を乗じることによって、世帯当たりのライフサイクルCO₂排出量を算出した(図7)。図6と比べて、クラスター間の違いや、都市間の差異に大きな変化はないものの、排出量原単位が高いため、建築資材の使用による内包CO₂排出量よりも運用時の排出量の方が大きく増加した。

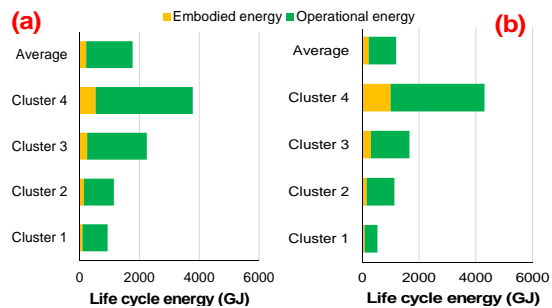


図6 各クラスターの世帯当たりのライフサイクルエネルギー (a)ジャカルタ; (b)バンドン

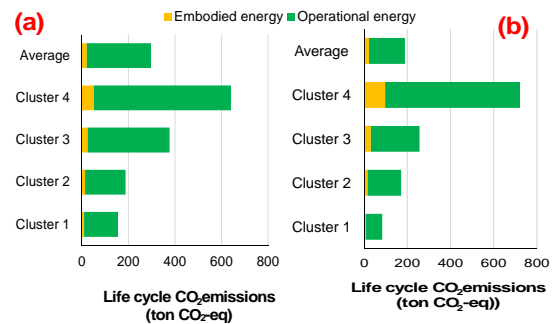


図7 各クラスターの世帯当たりのライフサイクルCO₂排出量 (a)ジャカルタ; (b)バンドン

まとめ

今後の経済成長によって見込まれる世帯収入の増大に伴い、特に運用時のエネルギー消費量が大きく増加するであろうことは前

節のとおりであるが、この増加を効率的に抑えることが住宅起因のCO₂排出量の増加を制御するうえで極めて重要である。

赤道付近に立地するインドネシア主要都市のなかで、比較的気温の低いバンドンは例外的都市といえる。ジャカルタの調査結果で見たように、今後の経済成長によって冷房の一層の普及が見込まれ、これによって冷房用エネルギーは運用時エネルギー消費量全体の4割程度にまで達する可能性がある。世帯収入の増加が冷房の使用の増加に結びつかないよう建築分野で十分な対策を講じることが特に重要である。

本研究室では、こうした結果を踏まえ、次なる課題として、インドネシアで急成長する中間層を対象とした集合住宅のパッシブクーリング手法の研究に取り組む予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

1. Kubota, T., Surahman, U. (2013) Balancing QOL and Energy Consumption in Major Cities of Indonesia, Journal of Asian Urbanism, No. 9, pp. 23-25. (<http://www.ishedweb.org/jau/>) 査読有
2. Surahman, U., Kubota, T. (2013) Life cycle energy and CO₂ emissions of residential buildings in Bandung, Indonesia, Advanced Materials Research, Vol. 689, pp.54-59. (10.4028/www.scientific.net/AMR.689.54) 査読有
3. Surahman, U., Kubota, T. (2012) Development of a simplified LCA model for residential buildings in Indonesia: a pilot survey in Bandung, AIJ Journal of Technology and Design, 18(40), pp.1003-1008. 査読有

〔学会発表〕(計13件)

1. Kubota, T., Surahman, U., Higashi, O. (2014) A comparative analysis of household energy consumption in Jakarta and Bandung, Proceedings of 30th International Conference on Passive and Low Energy Architecture (PLEA 2014), Ahmedabad, India, 16-18 Dec. 査読有
2. Surahman, U., Kubota, T., Higashi, O. (2014) Life cycle energy and CO₂ emissions of building materials for residential buildings in Jakarta and Bandung, Proceedings of 30th International Conference on Passive and Low Energy Architecture (PLEA 2014), Ahmedabad, India, 16-18 Dec. 査読有
3. Kubota, T., Matsunaga, K., Kusuma, H.E., Surahman, U., Nishina, D. (2013) Factors affecting quality of life of residents in major cities of Indonesia: A case study of Bandung, Proceedings of the 14th International Conference on Sustainable Environmental and Architecture (SENVAR), Aceh, Indonesia, 7-9 Nov. 査読有
4. Surahman, U., Kubota, T. (2012) Life cycle energy and CO₂ emissions in unplanned residential buildings of Indonesia, a case study in

Bandung, Proceedings of 28th International Conference on Passive and Low Energy Architecture (PLEA 2012), Lima, Peru, 7-9 Nov. 査読有

5. Surahman, U., Kubota, T. (2012) Development of a life cycle assessment model for residential buildings in Indonesia: a pilot survey in Bandung, Proceedings of 5th International Building Physics Conference (IBPC), Kyoto, 28-31 May. 査読有
6. Surahman, U., Kubota, T. (2014) Analysis of household energy consumption in major cities of Indonesia: Case studies of Jakarta and Bandung, Summary of Technical Papers of Annual Meeting, AIJ, Kobe, Japan, 12-14 Sep. 査読なし
7. Matsunaga, K., Kubota, T., Surahman, U., Nishina, D. (2014) Analysis of factors affecting quality of life of residents in Bandung, Indonesia, Summary of Technical Papers of Annual Meeting, AIJ, Kobe, Japan, 12-14 Sep. 査読なし
8. Matsunaga, K., Kubota, T., Kusuma, H.E., Surahman, U., Nishina, D. (2014) Analysis of factors affecting QOL of residents in Bandung: Towards balancing between QOL and household energy consumption, Proceedings of Grand Renewable Energy 2014, Tokyo, 27-31 July. 査読なし
9. Surahman, U., Kubota, T. (2014) Assessment of life cycle energy and CO₂ emissions for residential buildings in Indonesia: a case study in Jakarta, Proceedings of Annual Research Meeting, Chugoku Chapter, AIJ, Vol.37, pp.369-372, Hiroshima, 1-2 March. 査読なし
10. Kubota, T., Surahman, U., Ito, Y. (2013) Assessment of life cycle energy and CO₂ emissions for urban houses in Jakarta, Summary of Technical Papers of Annual Meeting, AIJ, Vol.D1, pp.989-990, Hokkaido, Japan, 30 Aug - 1 Sep. 査読なし

ほか3件

〔その他〕

ホームページ : <http://home.hiroshima-u.ac.jp/tetsu/research.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

久保田 徹 (KUBOTA TETSU)
広島大学・大学院国際協力研究科・准教授
研究者番号 : 8 0 5 4 9 7 4 1