

バングラデシュを対象とした エコノミーワイド・マテリアルフロー指標と 都市ストックの推計

小松 孝裕¹・Mohammad Sujaudhin¹・村上 進亮¹・谷川 寛樹²

¹東京大学大学院 工学系研究科 システム創成学専攻 (〒113-8654 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail: 6914576296@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

²正会員 名古屋大学大学院 環境学研究科 都市環境学専攻 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

持続可能な資源利用を目指す上で、急激に増加する事が予想される途上国の資源利用の姿を包括的に可視化し評価すること、そしてそのためのデータ整備が急務である。本研究では、高人口密度・地質的特性に由来するセメントの輸入依存・労働集約的なレンガ産業の発達という特徴を持つバングラデシュをケーススタディとし、現地調査・統計情報等の活用により、そのマクロ的な資源利用の姿をエコノミーワイド・マテリアルフロー分析の観点から分析した。

結果として、レンガや船舶由来の鉄鋼の存在感が定量的に明らかになった。都市の物質ストックは経済の発展と共に急激に積み上がっている段階であるが、いずれ建物が寿命を迎えるにあたって建設廃棄物が多く排出されることが予想され、リサイクルも含めた物質の需給バランスを考える必要があるといえる。

Key Words : environmental policy, indicators, industrial ecology,
economy-wide material flow analysis, developing country

1. 序論

(1) 研究の背景

持続可能性の実現に対して、資源制約の発現が危惧される中、より効率的な資源利用が求められており、エコノミーワイド・マテリアルフロー分析 (Economy-Wide Material Flow Analysis, EW-MFA) と呼ばれる手法は政策目標の設定などの場面で大きな役割を果たしている。例えば日本の循環型社会形成推進基本計画に EW-MFA 指標やその数値目標が盛り込まれているように、多くの先進国において必要なデータベースは整備されつつあるが、途上国ではそこに取り込まれるべきデータの元データそのものについて十分な精度のものが存在しないことも多い。一方で今後の資源利用の変化は途上国の消費に大きく依存することが予想され、持続可能な資源利用を考える上でこうした国のデータ整備が急務である。

(2) 先行研究

先行研究として CSIRO^①のように、多数の国を対象として EW-MFA に利用すべく推計されたデータベースは存在する。しかしながら、これらは多国間比較を目的に国際機関による統計などを基本的なデータとして用いており、こうした統計等が正確に捕捉できない国のデータについては信頼性に不安がある。それぞれの国の産業構造とい

った特徴に即した推計方法が考慮されておらず、特殊なリサイクル産業を持つ場合などは、その妥当性は必ずしも担保されていない。

(3) バングラデシュの概要

バングラデシュ人民共和国は、南アジアの肥沃なデルタ地帯に位置するイスラム教徒主体の国である。図 1 に示す通り人口の増加、経済成長共に著しい。

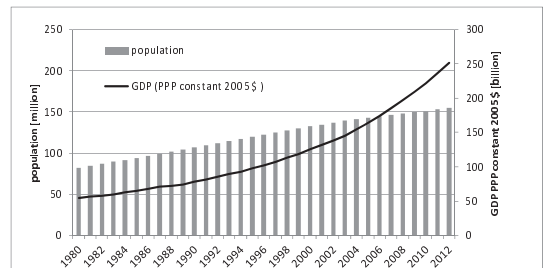


図 1 人口と国内総生産の時系列変化^②

同国の主要統計を表 1 に示す (比較のため日本の数値を併記)。人口は 2012 年時点で世界第 8 位、人口密度は世界第 1 位 (都市国家を除く) となっている。一方で一人あたり GDP や HDI (Human Development Index: GDP に

替わる豊かさの指標として、健康・教育・生活水準を評価している。³⁾ は世界的に見ても低く、アジア最貧国ともいわれる。豊富な労働力を活かせる衣料品・縫製品産業はその主要産業となっている。雨季には豪雨により洪水や水没が日常的に起き、その被害は少なくない。

表 1 バングラデシュの主要データ²⁾³⁾ (比較のため日本を併記)

	Bangladesh	Japan
Population [million] (2012)	150 (8th)	128
Population density [person/km2] (2005)	985 (1st)	343
GDP (PPP) [billion \$] (2012)	306 (42nd)	4,617
GDP (PPP) / capita [\$]	1,909 (155th)	34,748
HDI (Human Development Index)	0.515 (146th)	0.912 (10th)

(4) 研究目的

本研究では、途上国における EW-MFA のケーススタディとして、バングラデシュを対象とした EW-MFA 指標を推計し、現状把握のために資源利用を可視化する。加えて、推計した指標を既存研究における先進国、新興国のデータとの比較も含めて分析することで、経済成長・福祉水準向上を考慮しながらより効率的な物質利用の可能性を考える。

2. 研究手法

(1) エコノミーワイド・マテリアルフロー分析

経済圏への物質投入量・排出量を包括的に勘定する枠組みであり、国内経済と自然環境や他の経済圏との相互作用を物質（水と空気を除く）のフローの観点から定量的に描き出す事を意図している。この手法においては、図 2 のようにシステム境界（自然環境と経済圏の間）を超える流れの投入量と排出量のみ勘定され、経済圏の中での物質フローは考慮しない。フローは化石燃料、バイオマス、鉱石のように詳細に分類できる。⁴⁾

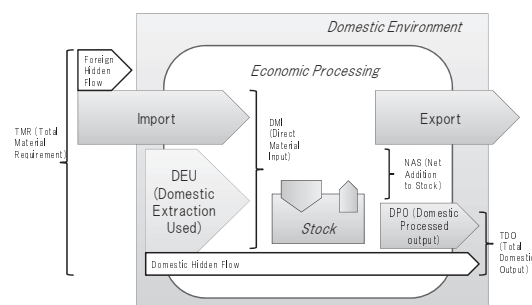


図 2 EW-MFA による資源循環のモデル⁵⁾

様々な指標が EW-MFA から導出され、代表的なものに国内物質消費量 (DMC, Domestic Material Consumption) がある。例えば GDP のような経済の規模を示す指標を DMC で割ることで資源生産性が求められる、というように物質フローそのものだけではなく、資源利用の効率性を評価することもできる。EW-MFA は資源利用における課題の抽出や政策目標の設定に大きな役割を果たす事が

期待されている手法である。物質収支の原則として以下のような指標間の関係が成り立つ。

$$DMC = DEU + Import - Export \quad (1a)$$

(2) 推計手法

現地調査および文献・統計情報等より、まず定性的な物質フローを把握した後、資源利用に関わる各種指標を定量的に推計した。用いた情報源は国際統計、国内統計、各種報告書・論文などの文献や現地調査である。EW-MFA 指標を推計する枠組みとしては、eurostat⁶⁾ のガイドラインを参照した。

物質ストックを推計するモデルとして、ボトムアップ的手法による推計がある。物質ストック MS を推計する式は以下の通りである。

$$MS_{i,a,b} = \sum (P_{a,b} * I_{i,a,b}) \quad (2a)$$

ここで P はとある財 a に対する種類 b の物理量（延べ床面積、総延長など）であり、 I は物質 i の単位あたり物質密度である。

また、物質ストック MS と物質フロー MF の間には以下の関係式が成り立つことからトップダウン的な系も可能である。⁶⁾

$$MS_t = MS_{t-1} + MF_t \quad (2b)$$

$$\text{where } MF = \text{inflow} - \text{outflow}$$

これらを相互補完的に用いながら推計していく。

既存研究¹⁾ からバイオマスと建設系材料が DMC の多くを占める事がわかっているが、一方で用いる統計情報によって数値は大きく異なる。そこで、トップダウン的・ボトムアップの手法を相互に補いながら、定性的なフローとの整合性を考慮して妥当性を検証しつつ指標の推計を行った。

3. 結果

(1) バングラデシュにおける資源利用

経済成長に伴って、建設需要が急速に伸びている。鉄筋コンクリート造の建物には十分な量の鉄筋は入っているものの、鉄骨は用いていないとされる。国内に高炉はなく、鉄鋼は輸入材料やスクラップの再加工（再圧延、電炉）によって供給している。また、セメントがほとんど国内で産出されず、コンクリートの骨材となる砂や採石も国内の一部でしか採取されないために十分な供給量でない。そのため、鉄筋コンクリート造であってもほとんど全ての建物で壁材料がレンガであるように、レンガが多用されている（図 3、図 4）。

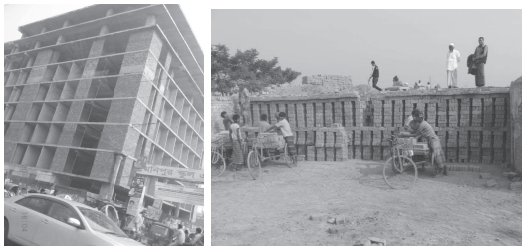


図 3 (左) 建設中の建物

図 4 (右) レンガ工場

バングラデシュは世界的に主要な船舶解体国である。遠浅の地形を活かした解体方式、労働集約的な作業に対する豊富で安価な労働量、鉄スクラップや中古機械などに対する大きな国内需要、といった特徴によって世界の船舶解体市場での立場を優位に保っている。一方で、アスベストや油漏れ等の環境インパクトに対して有害物質の適正処理の必要性、爆発事故や転倒事故といった労働者の安全に対する対策の必要性が指摘されている。⁷⁾

人口の7割以上が農村部に居住しているとされ、その多くではガス・電気・水道といったライフラインが通っていない。住居はプレハブ屋根、竹を骨組みとしたものや、レンガを積み上げただけの平屋が多く、都市部とは異なる物質組成となっている。煮炊きは竈でバイオマスを燃料としているが、薪炭材利用の森林の伐採は違法とされているため、利用状況がわかる公式な統計が存在しない。よって、少なくとも都市部と農村部では資源利用の姿が全く異なることが推測される。

(2) 各種指標の推計結果

1989 年から 2007 年までの、資源種別貿易量（重量）、貿易額（総額）を図 5 に示す。輸入量、輸出量ともに右肩上がりで推移しており、特に 2005 年以降の伸びが大きい。近年の輸入重量は 90 年台初頭の 4～5 倍にも登る。その中でも特に、輸入量の多くを占める農作物、建設鉱物、化石燃料の伸びが著しい。また、2006 年の輸入量は輸出量の 11 倍程度にものぼる。内訳としては、石油、セメント原料、鉄スクラップなどを輸入している一方で、輸出はジュートなど繊維用靱皮繊維や織物が主な品目である。

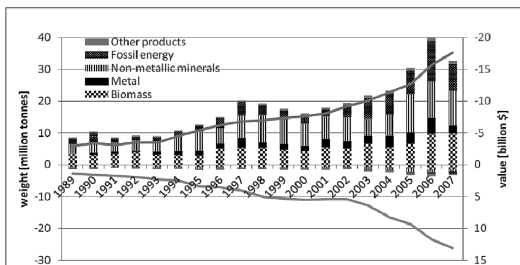


図 5 貿易量の推移⁸⁾ (左軸・棒グラフが重量、右軸・折れ線グラフが金額、下側が輸出)

国の経済圏を境界としたバングラデシュの EW-MFA 全

体像を図 6 に示す。それぞれのフローは EW-MFA の代表的な指標である。薪炭材用途のバイオマスやレンガ用途の粘土、採石は公式な統計が存在しないため、文献をもとに推計した。国内産出のうち最も多くを占めるのはバイオマス（農作物、木材など）であり、それ以外の物質の消費量は先進国に比べても圧倒的に少ない。鉄鋼または鉄を主とする製品の国内物質投入量は 329 万 t（2006 年）で、そのうち既存研究¹⁾のデータに含まれない船舶解体産業由来のものが 39%にのぼる。⁷⁾

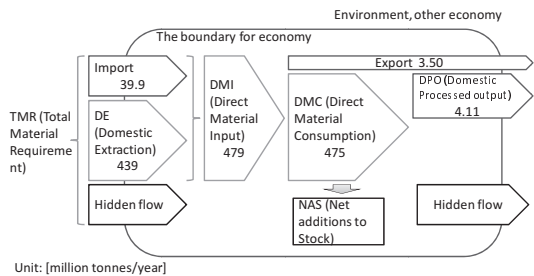


図 6 バングラデシュの EW-MFA 指標概要¹⁾⁹⁾¹⁰⁾(2006)

ここからはバングラデシュにおいて特徴的な結果の詳細をいくつか示す。まず、建設系鉱物フロー詳細の推計結果を図 7 に示す。石灰石は国内資源に乏しいため、輸入がほとんどを占める。そのため代替材料として安価なレンガ（すなわち粘土）が用いられており、レンガの割合が建設系鉱物投入量の 40%を占める。レンガ造りで 1-2 階建ての建物が多い他、鉄筋コンクリート造りの建物でも壁材としてレンガは多用されている。また、採石よりもレンガを砕いたもの（レンガ粉碎塊、図 8）の方が現地では安価であるため、コンクリートの骨材や路盤材としても多用されている。レンガの生産量の一部や解体した建設物に含まれるレンガが粉碎塊として骨材や路盤材に用いられていることから、重複するフローの領域が考えられ、推計における不確実性を高めている。

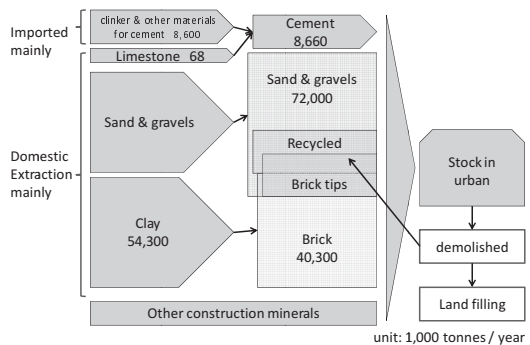


図 7 建設系鉱物のフロー(2006)



図 8 骨材用にレンガを破砕する現場

廃棄物のフローを図 9 に示す。都市部における一人あたり廃棄物排出量は、地域により 0.15~0.51kg/day とされる。約 7 割が食物由来で、その他は紙やプラスチック、繊維が多くを占め、焼却や減量はされず、そのまま最終処分場へと流れるため排出量に比して最終処分量は大きい。また、収集のカバー率は 5 割前後にとどまっており、収集されないものは不法投棄などによって環境悪化の原因となっている。NGO の支援によるコンポスティング処理を除いて、リサイクルはウェイストピッカーらによって、収集や最終処分場それぞれのフェーズにおいてインフォーマルに行われている。¹⁰⁾

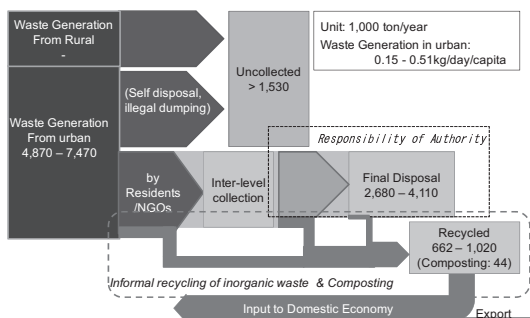


図 9 廃棄物のフロー¹⁰⁾

ここからはストックの推計について示す。セメントと鉄鋼に関しては、前述のように国内ではほとんど産出されておらず、かつ最終製品寿命を考えれば使用済みの発生量が少ないため、貿易（輸入）量を積み上げればそのまま国内の物質ストックになると考えられる。セメント（クリンカ、石膏などのセメント原料を含む）と鉄鋼（鉄スクラップ、鉄を主とする製品を含む）の輸入量から輸出量を差し引いた値を積み上げたデータ（セメントは 1989 年以降、鉄鋼は 1981 年以降で 1988 年以前は船舶解体由来のみ）を図 10 に示す。なお、建設物などが寿命を迎えた場合の排出はここでは考慮していない。推定骨材量（セメントの量に係数 6.09⁹⁾を掛けた値）を含めた推定コンクリートストックは 569 百万トンとなる。

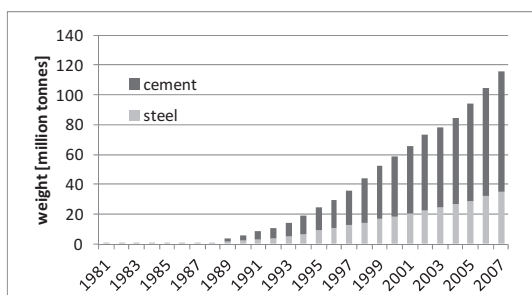


図 10 セメント、鉄鋼の累積投入量⁸⁾

また、道路総延長（Road and Highway Department, Local Government Engineering Department）と原単位⁴⁾（Ulbricht 2006; Steger et al. 2009）より道路用途の砂利ストック・フローを推計した。2012 年におけるストック量は 525 百万トン、メンテナンス・新規延長による 1 年間の投入フローは 35.3 百万トンであった。ここで建設廃棄物のリサイクルとして路盤材利用を念頭に置くと、現在のペースで道路建設が進んだと仮定したコンクリートストック量は道路用砂利の 16.1 年分である。一方で鉄筋コンクリート造の建物の寿命は欧米で 70 年以上いわれていることを考慮すると、建築廃棄物由来の路盤材は供給過多になることはなく、今後も天然資源由来の材料を投入し続ける事が予想される。バングラデシュ国内の道路は慢性的な渋滞が発生しており、今後も道路建設が続くと考えられるが、将来的に先進国のように新規のインフラ構築が終了して新規需要が減り交換需要が主となる事を考えると、ストックと寿命から予想される建設廃棄物と需要をモニタリングする必要はあるといえる。

一人あたりの EW-MFA 指標を日本と比較したものを図 11 に示す。全体としてバングラデシュ人の資源消費量は少ないが、輸入量の占める割合がとりわけ少ないことが伺える。また、再資源化可能なものはほとんどリサイクルされているといわれているが、絶対量はさほど多くない。労働集約的な衣料品・縫製品産業を主とする輸出量も極めて少ない。DPO では、日本の場合エネルギー消費や食料消費の分が勘定されているが、バングラデシュでは補足されていない事も一因となり、桁違いの数値となっている。

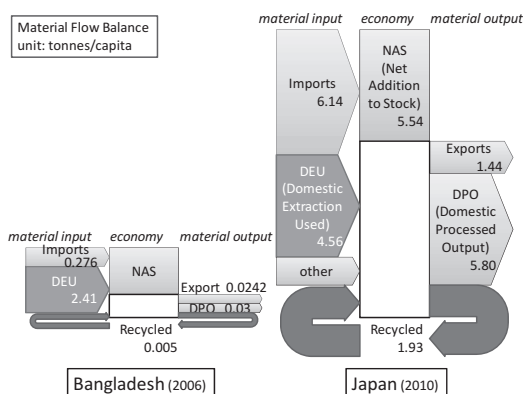


図 11 一人あたり物質フローの比較¹¹⁾

物質消費量の内訳（日本との比較）を図 12 に示す。バイオマス（食品、木材など）の消費量は日本と比べてやや多いのに対し、金属や化石燃料などその他の消費量は遥かに小さい。全体としては 24%程度となっている。

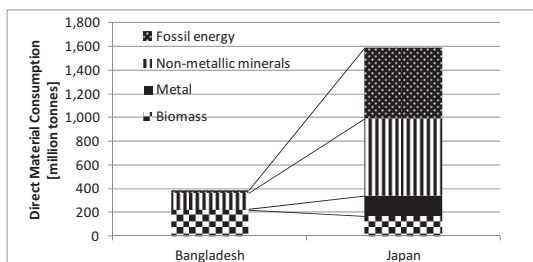


図 12 物質消費量（DMC）内訳の比較¹²⁾

物質消費量のうち、非金属鉱物（セメント、粘土、砂利・採石、無機肥料を含む）を一人あたり国内物質消費量/年とした値は 0.99t である（図 13）。この値は日本の 19%程度、中国の 56%程度となっている。また、セメントを含め多くの資源を輸入に頼っており、都市開発が著しいシンガポールの 6%程度であった。

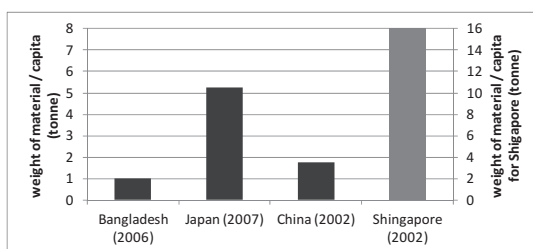


図 13 一人あたり非金属鉱物投入量^{13) 14)}

*シンガポールの値は右軸

4. 考察

DMC の中でも多くを占める建設系鉱物の中でもレンガの存在感が大きいことが定量的に確認された。レンガは

焼成過程による大気汚染物質の発生など大きな環境インパクトがあることが指摘されており、国際団体の主導で効率的な生産設備への移行が進んでいるものの、依然として古い生産設備も多い。一方で建造物において、壁材として保温効果等の観点から環境調和性を評価する情報もあり、環境影響に関して検討の余地があると考えられる。

多量のレンガが投入される都市の物質ストックは経済の発展とともに急激に積み上がっている段階であるが、今後建物が寿命を迎えるにあたって建設廃棄物が多く排出されることが予想される。そこで、物質ストックと物質フローの将来予測を行うとともに、特殊なマテリアル組成が建築物の寿命に与える影響を考慮し、都市計画に反映させる必要があるといえる。

廃棄物のフローに関しては、減量や排出時の分別の重要性が高く、この部分を改善することによる環境インパクトや最終処分場でのスカベンジャーの劣悪な労働環境の減少への貢献は大きいと考えられる。ただし、彼らの雇用機会の確保を実現する事も同時に考慮する必要がある。

今回の EW-MFA 指標の推計に関しては、国際的な統計を用いた画一的なデータソースだけではなく、国の産業構造、定性的な情報を考慮しつつ現地調査等もあわせて定量的な推定を行ったという意味で成果があったと考えられる。文献調査ではある時点でのデータしか無い場合も多いが、時系列や複数時点で比較・分析したい場合、他の指標と組み合わせて推計することがある程度有効であると考えられる。しかしながら複数の情報源において大きく値が異なる場合もあり、また、密輸や不法投棄などそもそも統計情報としては掲載されえない量もあるため、不確実性が大きい事も確かである。バングラデシュのような途上国において、統計情報の重要性が認識され、今後より一層整備される事が望まれる。

5. 結言

(1) まとめ

本研究では EW-MFA に関わる指標の推計およびその評価によって、バングラデシュという途上国の資源利用の可視化、現状把握を行った。結果としてセメントの輸入やレンガの多用などその特異な建設系材料のフローが明らかになったとともに、途上国の EW-MFA を推計するにあたっての、手法的な知見が得られたといえる。

(2) 今後の展望

今回推計した EW-MFA 指標に対して、より精度を向上させるために、使用する統計の検討や異なるアプローチで推計した数値によるバリデーションなどの改良が考えられる。また、EW-MFA の観点からの他の途上国との比較、都市における物質ストック・経済成長との関連の分析など、持続可能な発展と途上国の福祉水準の向上を踏まえた領域での研究の余地があると考えられる。

謝辞：

本研究は、環境省の環境研究総合推進費(S-6-4)により実施された。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) CSIRO and UNEP, Asia-Pacific Material Flow Database
- 2) World Bank, World Development Indicators
- 3) United Nations Development Programme, Human Development Report
- 4) eurostat, Economy-wide Material Flow Accounts (EW-MFA) Compilation Guide 2012
- 5) Matthews, E. *et al.*, 2000, The weight of nations: Material outflows from industrial economies, World Resources Institute
- 6) 村上進亮 *et al.*, 2010, 経済社会の物質ストックに関わる研究の意義と現状
- 7) Mohammad Sujaudhin, 2013, Contribution of ship breaking industry in Bangladesh: The material flow perspective, 7th International Society for Industrial Ecology Biennial Conference
- 8) United Nations Commodity Trade Statistics Database
- 9) FAOSTAT, Food And Agriculture Organization Of The United Nations
- 10) Waste Concern, 2005, Urban Solid Waste Management Scenario of Bangladesh: Problems and Prospects
- 11) 環境省, 平成 25 年版環境・循環型社会・生物多様性白書
- 12) 環境省, 「第二次循環型社会形成推進基本計画の進捗状況第 4 回点検結果(こについて)」
- 13) Ming XU *et al.*, 2007, Material Flows and Economic Growth in Developing China
- 14) Niels B. Schulz, 2007, The Direct Material Inputs into Singapore's Development

(2013. 7. 19 受付)

The Estimation of the Economy-Wide Material Flow Accounting and Stock in Bangladesh

Takahiro KOMATSU, Mohammad SUJAUDHIN, Shinsuke MURAKAMI
and Hiroki TANIKAWA

For the sustainable resource use, the visualization of the material use in the developing countries is necessary for the inclusive evaluation because their consumption is expected to increase rapidly. In this research, we analyzed the material use of Bangladesh as a case study of developing and non-resource producing country with economy-wide material flow analysis. Bangladesh has the highest population density. Unfortunately, it depends solely on importing for cement supply because of its geology, instead the labor intensive brick production is well developed. The compiled data includes field survey, public statistics, and other information such as academic papers and reports.

As a result, the significance of brick industry and the steel from ship breaking industry is confirmed in a quantitative way. The urban stock is rapidly being accumulated with its economic growth. However in the future, large flows of demolished buildings will come out after their life. Therefore, the material balance including the recycled need to be monitored.