

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 16 日現在

機関番号：84201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25870361

研究課題名(和文)世界の脱物質化社会構築に向けた基礎物質ストック・フロー推計に関する研究

研究課題名(英文)Study on global material stock and flow for de-materialization society

研究代表者

河瀬 玲奈 (Kawase, Reina)

滋賀県琵琶湖環境科学研究センター・その他部局等・研究員

研究者番号：90378852

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：低炭素社会を構築するためには、鉄鋼のようなエネルギー集約型産業からのCO2排出量削減が不可欠である。本研究では、マテリアルストック・フローモデルを構築し、鉄鋼需要量やCO2排出量の削減ポテンシャルについて検討を行った。対象は35地域に分割した全世界、推計期間は2005年から2050年までである。

サービス需要の管理、財ストックの効率改善、技術進歩の対策を導入することにより、対策無しケースと比較して、2050年で鉄鋼需要量は33%削減した。また、鉄スクラップの供給と需要双方の制約を考慮し、生産工程にて電炉への転換を促進すると、CO2排出量の削減ポテンシャルが6%であることが示された。

研究成果の概要(英文)：To realize low carbon societies, it is essential to reduce CO2 emission from energy-intensive sector, such as a steel. This research develops a material stock and flow model and analyzes reduction potentials of steel demand and CO2 emission. Target region is a world which is divided into 35 regions and an estimation period is from 2005 to 2050.

By introduction of countermeasures (control of service demand, efficiency improvement of goods stock, technology progress), steel demand in 2050 is reduced 33% compared with that in a no-countermeasure case. When promoting production process shift to an electric arc furnace with considering constraints of the both supply side of iron scrap and demand side of goods-wise crude steel production, the CO2 emission reduction potential from 2005 is 6%.

研究分野：環境システム

キーワード：低炭素社会 エネルギー集約型素材 マテリアルストック・フローモデル

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化の抑制のためには、2050年までに世界全体で GHG 排出量を 1990 年比で半減することが求められている。産業部門からのエネルギー起源の CO₂ 排出量は、全体の約 40% であり、中でもエネルギー集約型産業である鉄鋼部門は、そのうち 29% を占める。

鉄鋼は社会に投入されたのち、社会資本や生産資本などの様々な形で社会に蓄積され、我々はこれらの財を利用することで財が供給するサービスを楽しんでいる。近年では、中国やインドなどの発展途上国の急激な経済成長と都市化の進展により、これらの財が供給するサービスに対する需要が増加し、財生産のための素材需要も急激に伸びてきた。発展途上国は依然として成長段階にあり、今後も素材需要が増加していくと考えられる。一方で、先進諸国については、ある程度、物的に飽和しており、その維持に関する需要が主な素材需要の要因となっている。

今後、供給するサービスの量・質を損なうことなく、素材需要を抑制することは大変重要な課題となる。とりわけ、CO₂ 排出量の削減が急務である低炭素社会を構築する上では、避けることができない課題である。

2. 研究の目的

本研究では、次の3点に焦点を置き、世界全域を対象に社会を構成するエネルギー集約型素材のストック・フローの定量的なモデル化とそれに基づいた脱物質化社会構築に向けた政策オプションの定量的な検討を目的とする。モデル化においては、社会における物質需要は、その物質を含む財ストックが生み出すサービスに対する需要に起因するとの概念に基づき、サービス需要の発生から素材需要まで一貫した推計を行う。

具体的には、

- (1) これまで整備してきた素材フロー、素材ストック勘定表をベースとして、社会構造の変化、及び、素材ストック量などと素材需要変化との係わりを定量的にモデル化する。
- (2) そのモデルを 35 地域に分割した世界全域に適用し、素材の需要・供給に関する各種指標と CO₂ 排出量の関連性を示す。
- (3) 社会・経済の発展とともに、物質利用に関する各種対策が、社会における素材ストック量、素材需要量や CO₂ 排出量に与える影響についてシナリオ解析を行い、世界各地域の脱物質化の方策とその効果を定量的に示す。

エネルギー集約型素材として、社会において幅広い財に利用され、かつ、蓄積性の高い鉄鋼を取り上げる。また、推計期間は 2005 年から 2050 年までとする。

3. 研究の方法

(1) モデルの概要

本研究では、サービス需要から鉄鋼需要、

及び、その生産に関わる CO₂ 排出量の推計を行うために、マテリアルストック・フローモデルを構築する。マテリアルストック・フローモデルは、次の3つのモジュールを内包し、社会経済指標の将来値および素材需要の削減を目的とする対策シナリオや素材生産の地域偏在を決定する生産分配シナリオなどを外生的に与えることにより、将来推計を行う。マテリアルストック・フローモデルは世界 35 地域別モデルであり、それらがまとめて全体として世界モデルとなる。

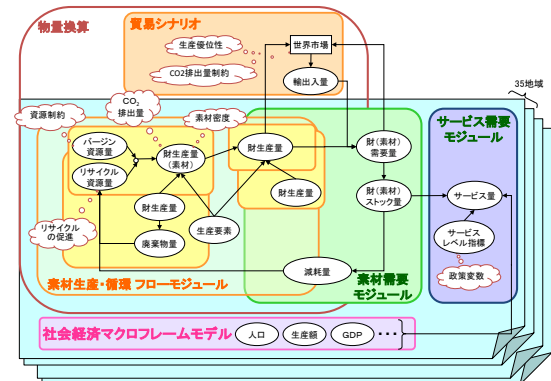


図 1 マテリアルストック・フローモデルの全体図

表 1 地域分類

コード	国・地域名	コード	国・地域名
アジア		ヨーロッパ (EU27)	
JPN	: 日本	XE15	: 初期EU所屬国
CHN	: 中国	XE10	: 中期EU所屬国
IND	: インド	XE2	: 後期EU所屬国
IDN	: インドネシア	北アメリカ	
KOR	: 韓国	USA	: アメリカ合衆国
THA	: タイ	CAN	: カナダ
MYS	: マレーシア	その他先進国	
VNM	: ベトナム	AUS	: オーストラリア
TWN	: 台湾	NZL	: ニュージーランド
SGP	: シンガポール	RUS	: ロシア
PHL	: フィリピン	XEWI	: 西欧附属書 I 国
XSE	: その他東南アジア	XEEI	: 東欧附属書 I 国
XSA	: その他南アジア	TUR	: トルコ
XEA	: その他東アジア	アフリカ	
XOC	: その他オセアニア	ZAF	: 南アフリカ
ラテンアメリカ		XAF	: その他アフリカ
MEX	: メキシコ	その他	
ARG	: アルゼンチン	XENI	: その他ヨーロッパ
BRA	: ブラジル	XCS	: その他中央アジア
XLM	: その他中南米	XME	: 中東諸国

サービス需要モジュール：鉄鋼を主要な成分とする財が提供するサービスと社会経済マクロ指標との係わりを記述する。サービスの種類は 11 種にて扱う。

素材需要モジュール：サービス需要（サービス需要モジュールの出力）をインプットとし、地域内のサービス需要を満たすために必要となる財ストック量と現存する財ストック量との関係から、財ストックの動態式により財需要量を算出し、その生産に要する鉄鋼需要量を推計する。財の種類は、

32 種である。

素材生産・循環フローモジュール：素材需要推計モジュールで推計された各地域における鉄鋼需要量から世界全体での鉄鋼生産量を算出し、その生産の地域偏在を分析する。鉄鋼や鉄鋼を含む財の輸出入、鉄鋼の生産技術進歩および鉄鋼生産量の決定因子に対しシナリオを設定し、各地域の製鋼法別鉄鋼生産量を推計する。

表2 地域分類

サービスの種類	財の種類
住居	住居(構造別)
その他工業製品	その他金属製品
産業生産	生産資本(機械), 業務用建築物
発電	発電設備(汽力, 水力)
旅客輸送	乗用車, バス, バイク, 自転車, 旅客車両, 飛行機, 道路, 鉄道, 空港
貨物輸送	トラック, 貨物車両, 船舶, 港湾, (再掲割愛)
農業用水	灌漑設備
工業用水	工業用水設備
生活用水	水供給設備(水道, その他水供給設備)
汚水処理	汚水処理設備(水洗, その他汚水処理設備)
その他インフラ	堤防・公園等

(2) モデルの定式化

各モジュール内の定式化を簡略して主要なものについてのみ示すと、次の方程式群で表される。

<サービス需要モジュール>

- 1) サービス需要量 = マクロ社会経済指標 × サービスレベル指標

<素材需要モジュール>

- 2) 財ストック量 = f (サービス需要量)
 3) 財需要量 = f (財ストック量)
 4) 素材需要量 = 財需要量 × 素材原単位
 5) 素材ストック量_t = 素材ストック量_{t-1} - 素材減耗量_t + 素材需要量_t

<素材生産・循環フローモジュール>

- 6) 財生産量 = 財需要量 + 財貿易量
 7) 素材消費量 = 財生産量 × 素材原単位
 8) 素材生産量 = 素材消費量 + 素材貿易量
 9) 製鋼法別素材生産量 = f (生産能力, 素材需給見通し, スクラップ需給見通し)

(3) 将来シナリオ

素材需要量の推計では、なりゆきケースの他に、対策導入率を変化させた4つの対策ケースを設定する。対策は大きく分けて、①サービス需要の管理（建築物の構造別シェアの変化、モーダルシフト、交通需要の削減、豊かな生活水準、適正なインフラ整備など）、②財ストックの効率改善（稼働率の向上、輸送機器の適正な積載率、長寿命化、財の高機能化など）、③技術進歩（高性能素材の導入、素材の代替、廃棄物発生率の削減、リサイクル率の向上など）の3つに分類される。

表3 素材需要モジュールのシナリオ設定

ケース	サービス需要の管理	財ストックの効率改善	技術進歩
なりゆき	なし	なし	なし
対策1	低い導入率	やや向上	やや導入
対策2	高い導入率	大幅に向上	なし
対策3	高い導入率	大幅に向上	やや導入
対策4	高い導入率	大幅に向上	大幅に導入

素材生産量の推計では、スクラップ回収率、財の貿易シナリオ、転炉鋼要求シナリオ（電炉での高品質鋼板生産に対する想定）、製鋼法選択シナリオを設定する。

財の貿易シナリオでは、貿易財の世界の生産シェアについて、

- ・GT1: 財ごとの各地域の生産シェアは2012年の値で一定とする。
- ・GT2: 財ごとの主要生産国は2012年の生産量を維持する。世界全体の増加分は2012年からの需要の増加量のシェアでその他の地域に按分する。
- ・GT3: 需要量=生産量になるよう収束する。の3通りを想定する。

製鋼法選択シナリオでは、鉄鋼生産量の決定に関する因子の組み合わせに対し、製鋼法（電炉、転炉）への生産分配を決定する。因子は5つあり、①鉄鋼消費量の見通し、②転炉鋼生産における生産地域の変化、③転炉鋼の地域内需給バランス考慮の有無（地域内の転炉鋼生産量と転炉鋼要求量の需給バランス）、④鉄鋼全量の需給バランス考慮の有無（鉄鋼消費量と鉄鋼生産量の需給バランス）⑤電炉鋼生産量決定の優先因子（鉄鋼消費量見通しか、スクラップ余剰量か）である。

4. 研究成果

(1) サービス需要量

世界全体でみると、サービス需要量の伸びはなりゆきケースであっても1.1~3.83倍の範囲内にある。しかしながら、地域別にみると、アジア諸国では人口や経済成長の伸びが大きいことから、比率が3.0以上になるサービスが多く、その他インフラやその他工業製品では、10~20倍になる地域もあった。アジア以外の途上国では、2~5倍の範囲に留まるものが多かった。

表4 2050年の世界のサービス需要量 (対2005年比)

サービス種	ケース		
	なりゆき	対策1	対策2-4
住居	2.02	2.02	1.95
産業生産	2.71	2.71	2.71
発電	3.27	3.27	3.27
旅客輸送	2.16	2.16	2.16
貨物輸送	2.39	2.14	2.05
農業用水	1.14	1.14	1.14
工業用水	3.83	3.44	3.29
生活用水	1.73	1.73	1.73
汚水処理	2.20	2.20	2.20
その他土木	1.35	1.35	1.35
その他工業製品	1.15	1.15	1.15

(2) 財ストック量、鉄鋼ストック量

サービス需要を満たすための財ストック量を鉄鋼重量換算（鉄鋼ストック量）にて示す。サービス需要量が増加するため、そのサービスの供給に必要な財ストックも増加する。対 2005 年比で、なりゆきケースでは 2.3 倍、対策 4 ケースでは 1.8 倍となる。財別のシェアは推計期間の 2005～2050 年において大きな変化はないが、絶対量では機械類や土木構造物にてそれぞれ 2.8 倍、2.43 倍の増加となり、伸びが大きい。対策 4 ケースでは、財ストックの効率改善とハイテンの導入による効果が大きい機械類、輸送機器での削減率が大きく、機械類、土木構造物ともに 1.94 および 1.96 倍の伸びに留まる。

世界の一人あたり鉄鋼ストック量は、2005 年の 2.7 トン/人から、なりゆきケースでは 4.4 トン/人に、対策 4 ケースでは 3.5 トン/人に増加する。なりゆきケースであっても、先進諸国の 6～12 トン/人より小さな値に留まった。

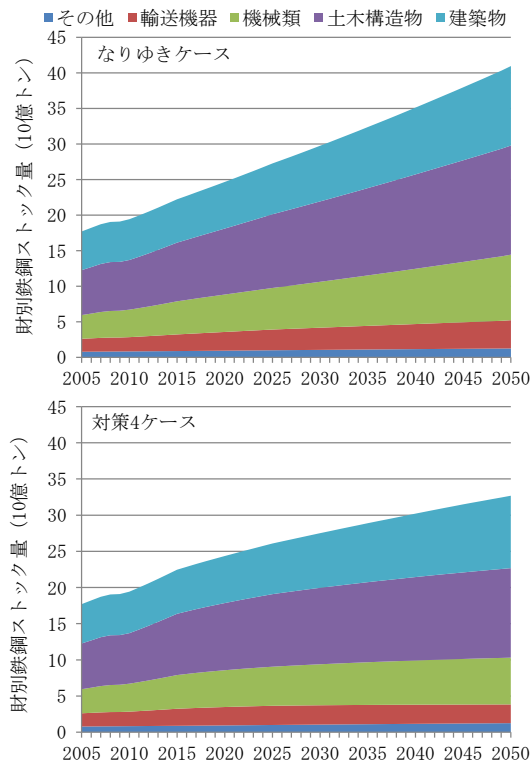


図 2 財別鉄鋼ストック量

地域別にみると、途上国地域の伸びが大きく、先進諸国全体で 1.8 倍なのに対し、途上国地域では 3.8 倍の増加となった。これに伴い、全体に占めるシェアは、途上国地域は、両ケースとも 44% から 55% 程度に増加する。途上国のなかでも伸び率が大きいのはインドであり 8 倍となる。次がアフリカの 4.6 倍、中国の 3.6 倍と続く。シェアとして大きいのは中国であり、2050 年で 21% を占めるまでになった。

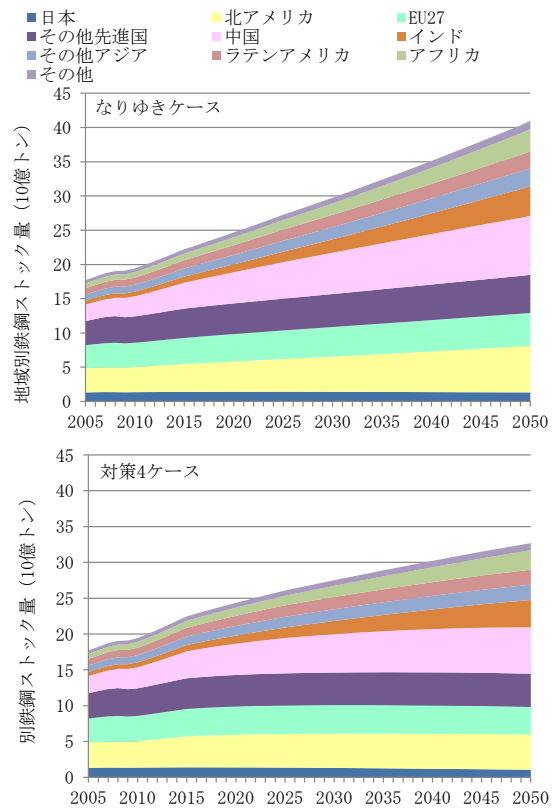


図 3 地域別鉄鋼ストック量

日本の鉄鋼ストック量を一人あたりで示すと、なりゆきケースでは増加し続け 2050 年で 12.2 トン/人に達する。一方で対策 4 ケースでは、9.7 トン/人となり、なりゆきケースと比較して、20% の削減となった。

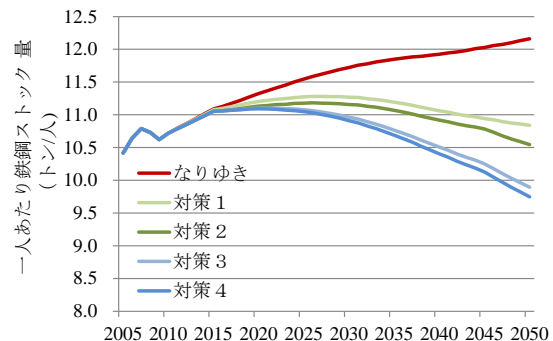


図 4 日本の一人あたり鉄鋼ストック量

(3) 鉄鋼需要量

4 章(2)項に示された鉄鋼ストック量を整備するために必要となる世界の鉄鋼需要量を、既往の文献値とともに図 5 に示す。

2050 年の鉄鋼需要量の範囲は 17.5～26 億トンとなり、なりゆきケースでは 2005 年レベルの 2.1 倍に増加するが、対策 4 ケースでは鉄鋼需要量は 2015 年以降、ほぼ横ばいとなり 17.5 億トンに留まる。財別の内訳では、土木構造物や建築物と比較して機械類の耐用年数が短いため、鉄鋼需要量においては機械類のシェアがストック量と比較して大き

く、なりゆきケースでは32%を占めた。対策4ケースでは、各種対策の効果により2015年以降、シェアはほとんど変化しなかった。

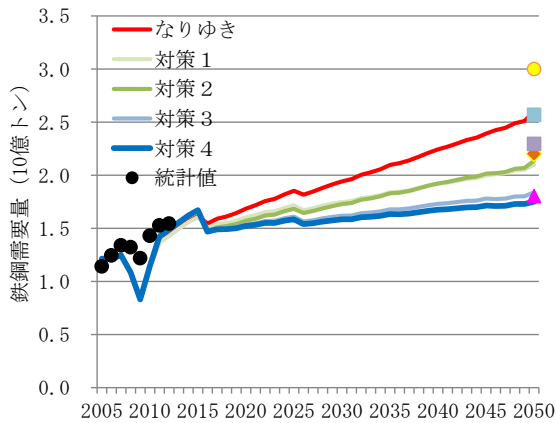


図5 世界の鉄鋼需要量

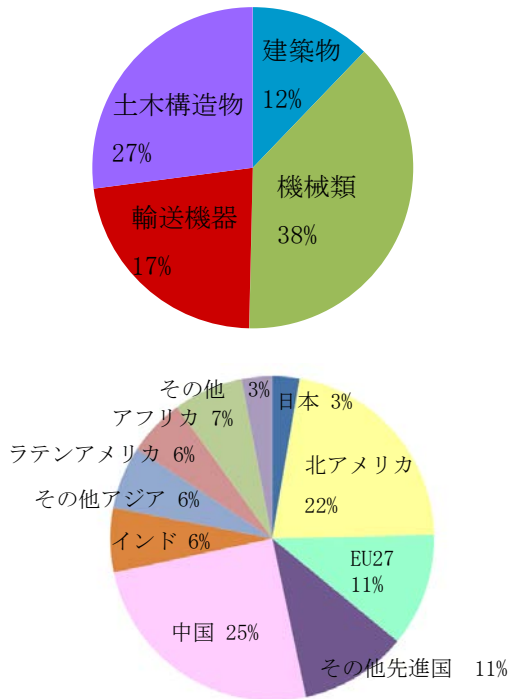


図6 鉄鋼需要削減への寄与率
(上：財別、下：地域別)

鉄鋼需要量において、なりゆきケースから対策4ケースまでの削減に対する財別寄与では、機械類が38%と大きな値となる。この削減は、財ストックの効率改善の効果が大きい。地域別では、中国と北アメリカの寄与が大きく合わせて47%と約半分を占める。

対策の寄与では、サービス需要の管理が-8%、財ストックの効率改善が62%、技術進歩が46%であった。サービス需要の管理がマイナス、つまり増加要因となっているのは、自動車から鉄道へのモーダルシフトを想定したため、これに伴い、鉄道軌道の建設が誘発されたことなどによる。しかしながら、その他の対策により全体としては図5に示される通り、33%の削減となる。

(4) CO₂ 排出量削減ポテンシャル

鉄鋼の生産工程において、電炉法は高炉転炉法と比較してCO₂ 排出量原単位が約1/3~1/4である。したがって、電炉の導入率を向上させることが鉄鋼部門からのCO₂ 排出量削減に有効であるが、電炉の原料は鉄スクラップであり、供給側からの量の制約と、需要側からの質の制約がある。電炉の導入限界について、鉄スクラップの質や発生量という供給側からの制約、及び、質を考慮した財別の鉄鋼需要量という需要側からの制約を考慮した上で、これらの制約下で最大限の転換を行うこととした場合のCO₂ 排出量削減ポテンシャルを推計した。なりゆきケースと対策3ケースの場合の結果を示す。

表5 CO₂ 排出量の比較 (2050年)

条件	なりゆき		対策3	
	MtCO ₂	tCO ₂ /tCS	MtCO ₂	tCO ₂ /tCS
2005	2,010	1.75		
2010	2,576	1.80		
	28%	3%		
100%	2,255	0.84	1,366	0.71
老廃スクラップ	12%	-52%	-32%	-59%
回収率	90%	2,575	0.96	1,644
	28%	-45%	-18%	-51%
需要側の制約	2,575	0.96	1,888	0.99
	28%	-45%	-6%	-44%

*tCS:粗鋼トン

*各下段の%は2005年からの変化率

2050年の粗鋼生産量は、両ケースとも2005年と比較して増加したが、CO₂ 排出量は、電炉比率の増加により最大28%の増加に留まった。2010年以降のCO₂ 排出量の増加は、電炉への転換の対策をとることで、増加を抑制できることになった。CO₂ 排出量の削減率が最大となるのは、対策3ケースで老廃スクラップの100%回収を想定した場合であり、32%を達成する。なりゆきケースと比較すると、対策ケースで15~39%の削減がみられ、財ストックの効率改善やハイテンの導入といった対策の効果が定量的に示された。需要側からの制約を考慮すると、対策3ケースであっても6%の削減となってしまう、大きな削減は見込めなかった。

本研究では、転炉から電炉への転換については、限界まで入れ替える想定をしているので、さらなる削減を行うには、鉄鋼需要をさらに削減するか、電炉、転炉それぞれでのCO₂ 排出量原単位を技術的に削減することが必要となる。

(5) まとめ

低炭素社会の構築に欠かせない脱物質化社会構築への検討を行った。得られた知見は以下の通りである。

- サービス需要の増加に伴い、社会における鉄鋼ストック量は最大2.3倍になるが、対策を取ることにより1.8倍にまで抑制

することが可能となる。

- この鉄鋼ストック量を整備するために必要となる鉄鋼需要量は、対策を最大限導入したケースであっても、現状と比較して増加し、その幅は、17.5～26億トンである。
- 鉄鋼需要量の削減に最も寄与する対策は財ストックの効率改善であり、削減量の62%を占める。財別では機械類、地域別では中国の寄与が大きい。
- 鉄鋼部門からのCO₂排出量削減ポテンシャルは、供給側、需要側の制約を考慮すると6%に留まり、大幅削減のためには、さらなる対策の検討が必要である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

- ① 河瀬 玲奈, 松岡 譲, 世界における生産分配を考慮した日本の鉄鋼生産量の推計、土木学会論文集 G(環境)、Vol. 71、No. 5、2015、I_383-I_391、査読有
https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jscejer/71/5/_contents/-char/ja/
- ② 河瀬 玲奈, 松岡 譲, 2050年における世界の鉄鋼部門からのCO₂排出量削減ポテンシャルの推計、土木学会論文集 G(環境)、Vol. 70、No. 6、2014、II_239-II_247、査読有
https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jscejer/70/6/_contents/-char/ja/
- ③ 河瀬玲奈, 松岡譲, 世界の財に含まれる鉄の蓄積量について、土木学会論文集 G(環境)、Vol. 69、No. 5、2013、I_19-I_26、査読有
https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jscejer/69/5/_contents/-char/ja/

〔学会発表〕(計 9 件)

- ① Reina Kawase, Estimation of World Steel Production by Process, 18th International Conference on Environmental Systems Science and Engineering, 2016.02.22, パリ (フランス)
- ② Reina Kawase, A Range of Steel Production in Japan towards 2050, 18th International Conference on Environmental and Ecological Engineering, 2016.01.21, パリ (フランス)
- ③ Reina Kawase, Yuzuru Matsuoka, What is the Effective Countermeasure to Reduce Material Stock and Demand? -A Case Study of Steel-, International Society of Industrial Ecology Conference 2015, 2015.07.09, ギルフォード (イギリス)
- ④ Reina Kawase, Global CO₂ emission reduction potential by scrap recycling,

The 3rd PC and the 10th Society for Social Management Systems International Conference, 2015.10.27, バンドン (インドネシア)

- ⑤ Reina Kawase, Feasibility of Iron Scrap Recycling with Considering Demand-Supply Balance, XIII International Conference on Environment, Energy and Waste Management, 2015.1.13, チューリッヒ (スイス)
- ⑥ Reina Kawase, Yuzuru Matsuoka, World Steel Stock and Demand towards 2050, The joint 11th International Society for Industrial Ecology Conference and the 4th ISIE Asia-Pacific conference, 2014.11.18, メルボルン (オーストラリア)
- ⑦ Reina Kawase, Shogo Higashi, Yuzuru Matsuoka, World Steel Demand Reduction Potential towards 2050, The 9th International Symposium on Social Management Systems, 2013.12.04, シドニー (オーストラリア)
- ⑧ Reina Kawase, Yuzuru Matsuoka, CO₂ Emission Reduction through Steel Demand Change toward 2050 in Japan, International Congress on Energy Efficiency and Energy Related Materials, 2013.10.10, アンタルヤ (トルコ)
- ⑨ Shogo Higashi, Reina Kawase, Yuzuru Matsuoka, A Study on World Steel Demand Considering Service Demand Change, International Congress on Energy Efficiency and Energy Related Materials, 2013.10.10, アンタルヤ (トルコ)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河瀬 玲奈 (KAWASE, Reina)
滋賀県琵琶湖環境科学研究センター・総合解析部門・研究員
研究者番号：90378852