

(本原稿は 2009 年 5 月 28 日現在で投稿準備中のものであり、今後修正される可能性あります)

日本における工業製品の水に関わるライフサイクルアセスメントとウォーターフットプリント

Water Life Cycle Assessment of Industrial Products and water footprint in Japan

近藤 剛¹・沖 大幹²

Takeshi Kondo, Taikan Oki

1 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 修士課程

2 東京大学 生産技術研究所 教授

本研究は工業用水に着目し、工業製品に水に関するライフサイクルアセスメント(Water Life Cycle Assessment)を行うことで、工業製品の生産に必要な水資源量を明らかにすることを目的としている。本研究では産業連関分析を用いた工業用水分析モデルを使用することで、製品の素材や原材料の生産に投入された水資源量を考慮し、工業製品の製造が及ぼす影響について定量的に評価を行った。また、投入された水資源の総量だけでなく、水源や用途をも明らかにした。その結果、例えばビール 1L の生産には約 16L の、乗用車 1 台の生産には約 65m³ の工業用水がそれぞれ必要であることが分かった。また、H12 年に取水された約 134 億 m³ の工業用水は、工業製品の購入を介して約 41%が民間消費として、約 27%が輸出としてそれぞれ間接利用されていることが分かった。

Key Words: Virtual Water, Water Footprint, Life Cycle Assessment, Water Use, Industrial Water

1. はじめに

J. Anthony Allan によって生み出されたバーチャルウォーターの概念は、食料輸入を通じた水不足緩和の可能性を示すものであった。近年、世界的な人口増加に伴う水需要の増加を背景に、バーチャルウォーターに関する研究がいくつもなされてきた。

三宅らは、世界で初めてバーチャルウォーターに関する定量的評価を行った。三宅らは日本の食料の輸入に伴うバーチャルウォーター輸入量の算定を行い、日本が 640 億 m³/yr の仮想水を海外から輸入している「仮想水輸入大国」であることを示した。

佐藤らは、食料生産に必要な水資源の推定を行い、農作物だけでなく畜産物や加工食品においても詳細な分析をすることで、例えば牛丼一杯に 1.8m³、ハンバーガー一個に 1m³の水資源が使われていることを明らかにした。

犬塚らは、水資源の総量だけでなく、水の供給源にも着目したバーチャルウォーター貿易についての研究を行い、日本が食料輸入を通して輸入している仮想水のうち約 5%が持続不可能なブルーウォーターに依存していることを示した。

また、海外でもバーチャルウォーターに対する関心は高く、多くの研究がなされてきた。

A. K. Chapagain らは、コットンに着目し、綿花の栽培からコットン製品が出来上がるまでに、綿花の栽培地とコットン製品の生産地のそれぞれで必要となる水資源量を算定し、コットン製品の消費が各国の水資源に及ぼす影響評価を行った。

A. Y. Hoekstra らは、農畜産物や工業製品の生産に投入された水資源量を推定し、製品の輸出入を通じたウォーターフットプリントについての計算を行い、各国における水消費量の違いを明らかにした。

こうしたバーチャルウォーターに関する研究は、特に穀物や家畜など、農畜産物に含まれる仮想水についての定量的評価を詳細に行ってきた。しかし、工業製品に関するバーチャルウォーターの定量的評価に関しては、従来の研究では製品に投入された水資源のごく一部しか考慮されていなかった。

三宅らや Chapagain ら、Hoekstra らは、工業製品についてもバーチャルウォーター量の推定を行っているが、そのどちらも工業製品の年間生産額と年間取水量から水消費原単位を割り出し、輸入額（あるいは輸出額）に乗じることで、製品の生産に投入された水資源量を算出している。例えば、ある製造業において、A という商品を作るために年間 $W[m^3]$ の工業用水を使用し、年間 X [百万円] の生産をしたとする。このとき、商品 A を 1 単位(百万円分)生産するのに必要な水の量は、

$$\frac{W}{X} [m^3 / \text{百万円}]$$

としている。

しかし、厳密に言えば、これは「製造の最終プロセスにおいて必要となる水」である。なぜなら、単一素材をもとに単純加工された工業製品を除けば、ほとんどの工業製品は「複数の原材料をもとに多数の製造過程を経て」生産されているからである。自動車 1 台の製造にしても、組立工場において塗装や洗車のために水が必要であるが、自動車の素材である鉄鋼、アルミ、銅、プラスチック、ゴム、ガラスなどの製造や、エンジンや座席などの製造にも水が必要である。このように、一つの製品が完成するまでには、製造プロセスの各段階において水資源が投入されており、「製造の最終プロセス」だけを取り出して「製品の生産に必要な水」とすることは、製品が実質的に必要とした水資源量を過少評価してしまうことになる。工業製品の生産に使われた水資源量を定量的に評価するためには、工業製品に含まれる部品や原材料を考慮し、それらの生産に使われた水資源量までも明らかにする必要がある。

これと似た概念として、ライフサイクルアセスメント(LCA)が上げられるが、従来の LCA ではエネルギー消費量や CO2 排出量の算定に重点が置かれており、水資源に対する関心は低かった。

A. K. Hoekstra らによるコットン製品のバーチャルウォーターの推定では、LCA の概念を取り入れているが、コットン製品の製造に必要な染料といった、コットン以外の材料の生産に必要な水資源は考慮されておらず、また、水源についてはブルーウォーターとだけされていた。

Stephan Pfister らは、LCA を用いて淡水資源の消費が環境に及ぼす影響を評価しようとしているが、あくまでインパクトアセスメントの方法に着目しており、製品の水消費量の評価方法については言及していなかった。

そこで本研究は、工業用水に着目し、工業製品に水に関する Life Cycle Assessment(WLCA)を行うことで、工業製品の製造に必要な水資源を定量的に評価した。また、総量だけでなく、水源や用途も明らかにした。そして、工業製品を通じた間接的な水利用についても明らかにした。

2. 方法

(1) 産業連関分析

さまざまな製品について原材料の採取から製造までのプロセスを追跡し、そのすべての段階における水利用を把握しようとする場合、方法は大きく分けて 2 通りある。一つは「積み上げ法」によるボトムアップのアプローチ、もう一つは「産業連関分析」によるトップダウンのアプローチである。これらはライフサイクルアセスメント(LCA)の分野において一般的に用いられる手法である。本研究では、後者によるアプローチを採用している。産業連関分析法とは、産業相互間、産業と消費者間の取引についてマトリクス形式であらわされた産業連関表を用いて、製品の生産が及ぼす環境影響を評価する方法である。例えば、独立行政法人国立環境研究所では、「産業連関表による環境負荷原単位データブック」として、産業部門の生産活動によって排出される CO2、NOX、SOX、SPM に関する原単位を公開している。

(2) 工業用水分析

産業連関分析における「輸入を内生化した均衡生産量決定モデル」は、国内生産額を X 、消費を F_C 、投資を F_I 、輸出を E 、輸入係数を $\hat{M}$ とすると、

$$X = [I - (I - \hat{M})]^{-1} [(I - \hat{M})(F_C + F_I) + E]$$

としてあらわされる。このとき、 $[I - (I - \hat{M})A]^{-1}$ はレオンチェフ逆行列と呼ばれ、ある産業から 1 単位の生産を行うために最終的に必要となる原材料の構成比を表している。

ここで、各産業における年間工業用水取水量を各産業の国内生産額で除したものを対角成分に並べた取水量原単位行列を W^{wd} とする。

$$W^{wd} = \begin{bmatrix} w_1^{wd} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & w_2^{wd} & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & w_n^{wd} \end{bmatrix}$$
$$w_j^{wd} = \frac{j\text{産業の年間工業用水取水量}}{j\text{産業の国内生産額}}$$

均衡生産量決定モデルに取水量原単位行列を組み合わせることで、下記に示す工業用水分析モデルを得ることができる。

$$W = W^{wd} [I - (I - \hat{M})A]^{-1} (I - \hat{M})F$$

この工業用水分析モデルは、需要額 F を外生変数とし、需要額に応じた取水量を出力するモデルである。原単位行列を水源別や用途別にかえることで、目的に応じた出力を行うことができる。

(3) 最終投入水と中間投入水

最終投入水とは、最終製品を生産した工業部門において、直接使用された工業用水量をいう。これは、製造プロセスの最終段階に投入された工業用水量を意味し、例えば乗用車の生産では、乗用車の組み立て工場における工業用水使用量である。

一方、中間投入水とは最終製品の生産のために、他部門から購入した中間生産物（原料や部品）の生産のために、他部門で使用された工業用水量をいう。乗用車の例では、エンジンや車体といった部品の製造や、ガラスや合成樹脂といった素材の製造のために使用された工業用水である。

また、全体の工業用水量に占める中間投入水の割合を、中間投入比率という。この比率が高いほど、工業製品をつくるために、他部門からの部品や原材料の購入を通して、他部門で多くの工業用水を間接的に利用していることを示す。

3. 使用したデータ

(1) 産業連関表

産業連関表は「平成 12 年産業連関表基本表」の、生産者価格表を用いた。基本表は行 517 部門、列 405 部門で構成されているが、レオンチェフ逆行列を求めるために、部門統合による正方化を行い、行 399 部門、列 399 部門の正方行列を作成した。

(2) 工業用水データ

水源・用途に関する工業用水データは、「平成 12 年工業統計調査用地・用水編」を用いた。工業統計調査では、日本標準産業分類に掲げる「大分類 F－製造業」に属する従業員 30 人以上の事業所を対象として、取水源別（工業用水道、上水道、地表水・伏流水、井戸水、その他、回収水）、用途別（ボイラー用水、原料用水、製品処理水及び洗浄用水、冷却用水、温調用水、その他）にデータを集計、公表している。なお、

一部事業所データに関しては非公開であるため、事業所数をもとに補完を行った。また、従業員 4～29 人の小規模事業所における工業用水データを、国土交通省「日本の水資源」をもとに、工業統計調査への補完を行った。これにより、平成 12 年の工業用水取水量は約 134 億 m³/年となる。

(3) 水質データ

工業排水の水質データに関しては、「流域別下水道整備総合計画調査 指針と解説」より、平成 3～5 年度における環境庁調査による BOD, COD, SS の原水水質データを用いた。原水水質とは、工場内で発生した排水のうち、工場の排水処理施設にかける前の水質である。この原水に含まれる汚濁負荷量を、「発生負荷量」といい、工場内の排水処理施設で処理された排水に含まれる汚濁負荷量を「排出負荷量」という。工業製品の生産による環境影響については、工場外へ排出される水の水質が重要となるため、本研究では排出負荷量に着目した。排出負荷量は、産業分類ごとに「除去率」を設定し、

$$\text{排出負荷量} = \text{発生負荷量} \times \text{除去率}$$

によって求めた。除去率は、環境省調査「平成 12 年度水質汚濁物質排出量総合調査」における、「特定施設別排水量及び排水濃度集計結果」を用い、

$$\text{除去率} = \frac{\text{発生負荷量} - \text{排出負荷量}}{\text{発生負荷量}}$$

で求めた。例を表 2 に示す。なお、データ不足により除去率を設定できない産業については、全産業における平均除去率の値を使用した。発生負荷量は産業細分類のデータであるが、除去率については産業中分類程度のデータである。本研究では一番の目的である工業用水量が産業細分類程度の精度で得られるため、水質については参考程度とし、産業中分類の除去率を該当する細分類のデータに適用した。

(4) コンバータ

工業統計における産業分類は「事業所」単位であるのに対し、産業連関表は「アクティビティ・ベース」の分類となっている。工業統計による工業用水データを、アクティビティ・ベースの分類に変換するために、「平成 12 年産業連関表 計数編(2)」における「産業連関表(列)ー工業統計(産業)コード対応表」を用いた。これは産業連関表のアクティビティに対応する複数の工業統計産業部門を、金額ベースの比率で表したものである。例を表 1 に示す。本来ならば、産業細分類の事業所とアクティビティ部門のすべてについて、物量データに基づいた変換を行うべきであるが、そのような詳細な物量データが存在しないため、本研究ではこの変換比率を用いた。

4. 結果

(1) 工業製品の水消費原単位

工業用水分析モデルに各産業 1 単位(百万円)の需要を与え、出力された結果を最終投入水と中間投入水とに分けて示したものが図 1 である。これは各産業がそれぞれ生産者価格百万円の工業製品を生産するために、製造過程において取水された工業用水量の合計をあらわしている。化学製品やパルプ・紙・木製品は、その製造に自部門で多くの水資源(最終投入水)を使うだけでなく、製品の原料などを通して間接的にも多くの水を使用(中間投入水)していることがわかる。一方、輸送機械や電気機械などは、最終投入水と中間投入水の量は少ないが、中間投入水の占める割合が高いことが分かる。これは、一般に機械装置などは部品数が多く、他部門からの部品供給によって製造されているためだと考えられる。中間投入比率でみると、化学製品は 21%、パルプ・紙・木製品は 27%であるのに対し、輸送機械は 79%、電気機械は 71%である。

(2) 工業製品の WLCA

工業用水分析モデルでは、原単位行列を取水源や用途、水質に設定することで、工業製品の生産に使用された水資源の取水源や用途、水質についても明らかにすることができる。ここでは例として、図 1 で示した工業製品のうち、輸送機械に属する「乗用車」について WLCA を行い、乗用車の生産に使われる工業用水について評価を行った。図 2 は、乗用車 1 台の製造に使われる工業用水を、その量が多い部品ごとに並べたものである。乗用車 1 台の生産には取水量ベースで合計 64.67m³の淡水が必要となる。そのうち最終投入水は 6.38m³であり、中間投入水は 58.29m³である。回収水を含む使用量ベースでは、548.84m³の淡水が使われており、その約 88%が回収利用されている。また、海水が 81.74m³使われている。中間投入水のうち工業用水量の多いものは、自動車部品の 8.29m³、洋紙・和紙の 5.02m³、熱間圧延鋼材の 4.89m³、プラスチック製品の 4.28m³である。

図 2 では、乗用車が直接・間接的に使用した工業用水によって発生した BOD、COD、SS を、折れ線グラフで示している。乗用車 1 台の生産では、BOD が 1.05kg、COD が 1.68kg、SS が 0.81kg それぞれ発生するが、このうち、最終投入水によって生じる排出負荷量が最も多いことがわかる。

次に、図 2 で示された乗用車の構成部品の一部について、その取水源と用途を、図 3、図 4 にそれぞれ示す。乗用車 1 台では、工業用水道から 29.18m³、上水道から 5.98m³、地表水・伏流水から 10.29m³、井戸水から 18.11m³、その他から 1.10m³の淡水を取水している。なお、回収水として 484.17m³の淡水を再利用している。また、用途別(回収水含む)として、ボイラー用水に 3.36m³、製品処理・洗浄用水に 128.88m³、冷却用水に 332.53m³、温調用水に 62.08m³、その他に 21.79m³の淡水を使用している。乗用車の最終投入水は、製品処理・洗浄用水として用いられているものが多く、その結果、最終投入水における排出負荷量が高いことが考えられる。

また、表 3 に幾つかの工業製品について WLCA の結果をまとめた。表 3 をみると、工業製品によって中間投入比率に幅があることが分かる。ビールや清涼飲料の中間投入比率は、織物製衣服やパソコン等に比べて低い。この中間投入比率の違いは、水の面からみた工業製品の特徴をあらわす。ビールや清涼飲料は「自部門での努力によって水資源の使用量や排水水質の改善を行うことができる」製品で、織物製衣服やパソコンは「自部門では改善できないが、他部門から購入する部品や原材料を選択することで使用量や水質の改善を行うことができる」製品である。

(3) 需要者による工業用水の間接利用

工業製品の製造に使用される最終投入水と中間投入水を、「工業製品が仮想的に含んでいる水資源」と捉えた場合、工業製品を購入している一般消費者や企業、政府は、その製品に含まれている水資源を間接的に利用していると見なすことができる。工業用水分析モデルに、平成 12 年における最終需要額を与えた結果を表 4 にまとめた。平成 12 年に取水された約 134 億 m³の工業用水のうち、その約 4 割は民間消費によって間接利用されていることが分かる。次いで輸出、民間投資の順に工業用水を多く間接利用している。

工業製品の輸出入に伴う仮想的な水資源の貿易(Virtual water trade)の結果を図 5 に示す。ここでは、輸入製品を仮に日本国内で生産したという仮定のもとで、輸入に伴う仮想水の輸入量を計算している。図 5 は工業部門による取引について示しているが、サービス業などに誘発される需要を含めると、日本は 35.6 億 m³の仮想水を輸出し、21.7 億 m³の仮想水を輸入している。よって、平成 12 年では、日本は 13.9 億 m³の仮想水輸出超過であることが分かった。

(4) 国民一人あたりの間接利用

工業用水モデルに H12 年における国民一人あたり家計消費額を与え、家計が購入した工業製品のうち工業用水量が多いものを図 6 に示した。清涼飲料による利用量が $2.08\text{m}^3/\text{cap}/\text{yr}$ と最も多く、次いで織物製衣服の $1.69\text{m}^3/\text{cap}/\text{yr}$ 、菓子類の $1.49\text{m}^3/\text{cap}/\text{yr}$ である。国民一人あたりの工業用水使用量の合計は $43.2\text{m}^3/\text{cap}/\text{yr}$ であり、これを 1 日あたりに換算すると、 $118\text{L}/\text{cap}/\text{day}$ となる。旧式の水洗トイレの 1 フラッシュが約 13L であるので、国民一人あたり水洗トイレ約 9 フラッシュ分の淡水資源を、工業製品の購入を通じて利用していることになる。

5. まとめ

本研究では、工業用水に着目し、産業連関分析を基礎とした工業用水分析モデルを用いることで、工業製品の生産に必要な工業用水量を推計し、工業製品の購入を介した工業用水の間接利用について明らかにした。工業製品に WLCA を行うことで、最終投入水だけでなく中間投入水をも評価することができ、また、水源や用途、水質についても詳細に分析が可能であることを示した。工業用水の間接利用では、民間消費による工業製品の購入を通して、H12 年における工業用水取水量の約 41% を利用していることがわかった。工業製品の輸出に全取水量の約 27% が利用されているが、輸出入を通して日本は年間 13.9 億 m^3 の仮想水輸出超過国であることが分かった。さらに、国民一人当たりでは、118L の水を工業製品の購入によって間接利用していることが明らかになった。

今後の課題として、物量データや水質データをより充実させることで、WLCA の精度を向上させることが上げられる。また、本研究では分析対象を工業用水に限定しているが、工業製品には加工食品や飲料など、原料に農産物が含まれているものがあり、これら農業用水までを含めた WLCA を行うことも課題である。

参考文献

- Allan, J.A. 1993. Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible. In: Priorities for water resources allocation and management, ODA, London, pp 13-26.
- Allan, J.A. 1998. Virtual water: a strategic resource, global solutions to regional deficits. Groundwater 36(4), 545-546.
- Chapagain A.K., Hoekstra A.Y., Savenije H.H.G., Gautam R., 2006. The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries. Ecological economics 60, 176-203.
- Hoekstra A.Y., Chapagain A.K., 2007. Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern. Water resource manage 21, 35-48.
- 犬塚俊之 (2007) : 水の供給源に着目したバーチャルウォーター貿易の内訳, 東京大学修士論文.
- 環境省 (2000) : 水質汚濁物質排出量総合調査 (調査結果概要) .
- 経済産業省 (2000) : 工業統計調査 用地用水編.
- 国土交通省 土地・水資源局水資源部 (2003) : 日本の水資源.
- 三宅基文 (2002) : 日本を中心とした仮想水の輸出入, 東京大学卒業論文.

佐藤未希 (2003) : 食料生産に必要な水資源の推定, 東京大学修士論文.

社団法人産業環境管理協会 : JLCA-LCA データベース 2004 年度 2 版.

総務省 (2004) : 平成 12 年(2000 年)産業連関表 計数編(2).

総務省 (2004) : 平成 12 年(2000 年)産業連関表 取引基本表.

Stephan Pfister, Annette Koehler, Stefanie Hellweg, 2009. Assessing the Environmental impacts of Freshwater Consumption in LCA. Environ. Sci. Technol.

図表

表 1 コンバータの例

産業連関表		工業統計	比率
列部門コード	列部門名称	産業コード	(%)
119-02	レトルト食品	1221	2
		1224	1
		1231	2
		1244	2
		1249	2
		1297	2
		1298	1
		1299	5
		2092	1

表 2 除去率の例

産業	除去率		
	BOD	COD	SS
食料	0.99	0.91	0.95
繊維	0.89	0.88	0.93
化学	0.99	0.97	0.97

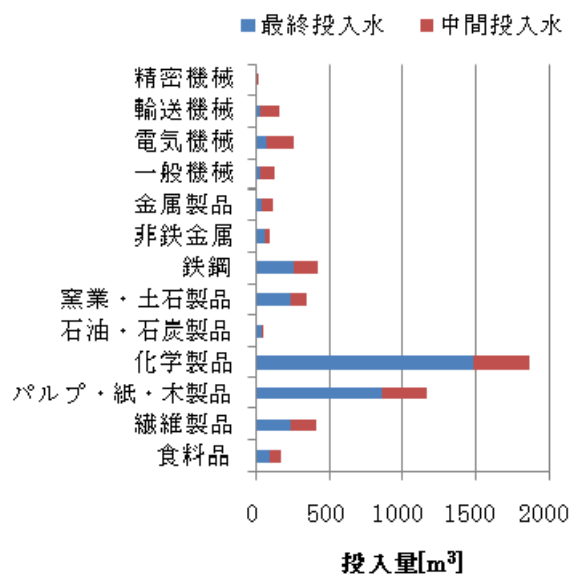


図 1 工業製品の水消費原単位

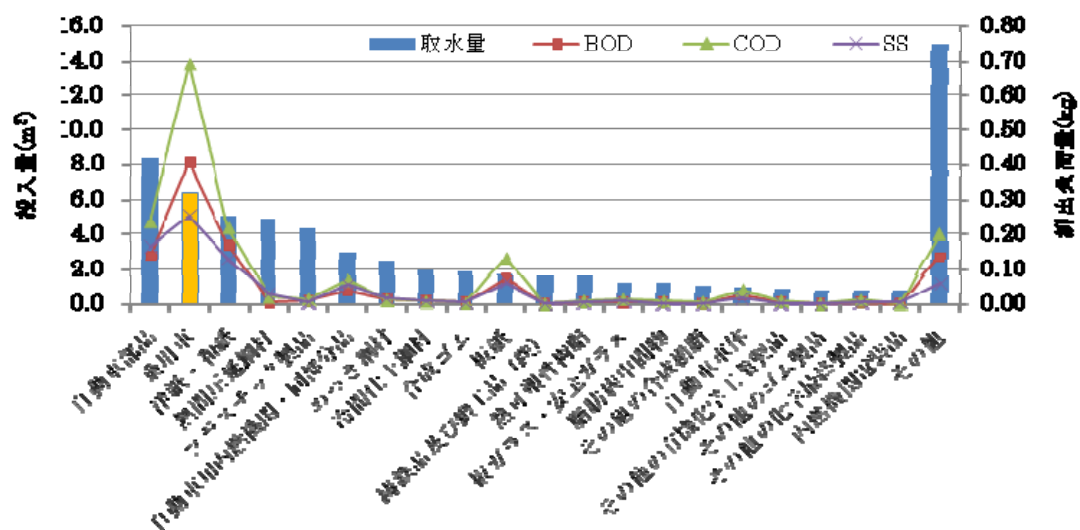


図 2 乗用車 1 台の WLCA

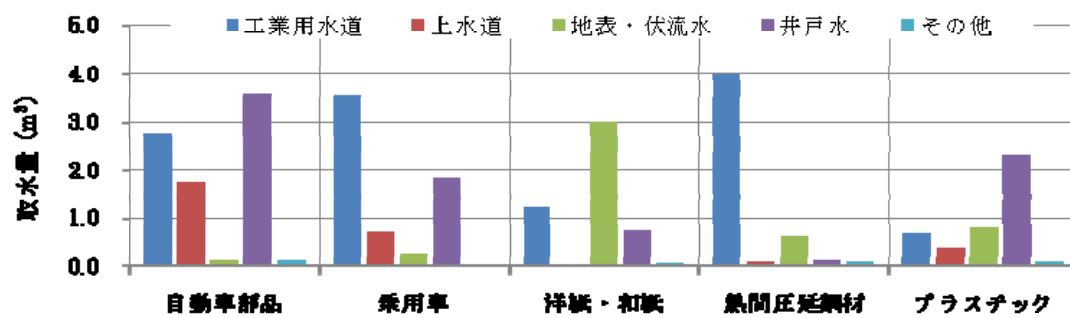


図 3 乗用車部品に投入された工業用水の取水源

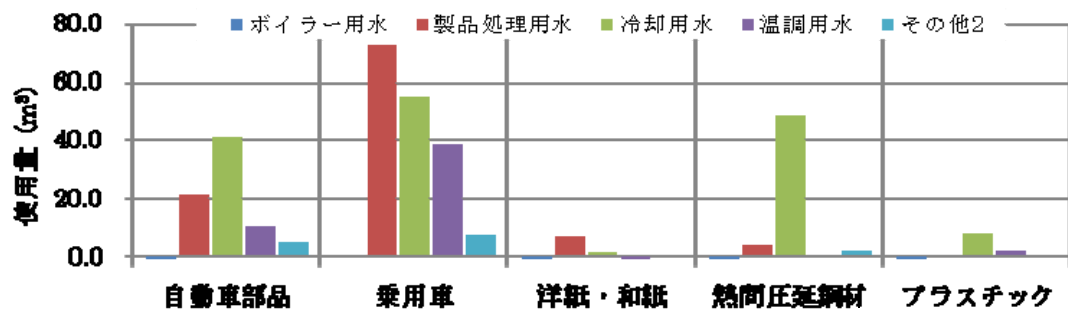


図 4 乗用車部品に投入された工業用水の用途

表 3 工業製品の WLCA 結果

製品	評価単位	取水量	中間投入 比率
ビール	1L	16.3L	0.34
清涼飲料	1L	17.3L	0.52
織物製衣服	1 着	1.27m ³	0.96
パソコン	1 台	4.03m ³	0.86
携帯電話	1 台	0.91m ³	0.95
乗用車	1 台	64.7m ³	0.90

表 4 需要部門別にみる工業用水の間接利用

需要部門	取水量 km ³	割合 %
家計外消費	0.46	3.4
民間消費	5.52	41.2
一般政府消費	0.89	6.6
公共投資	0.74	5.5
民間投資	2.26	16.9
輸出	3.56	26.5
計	13.41	100

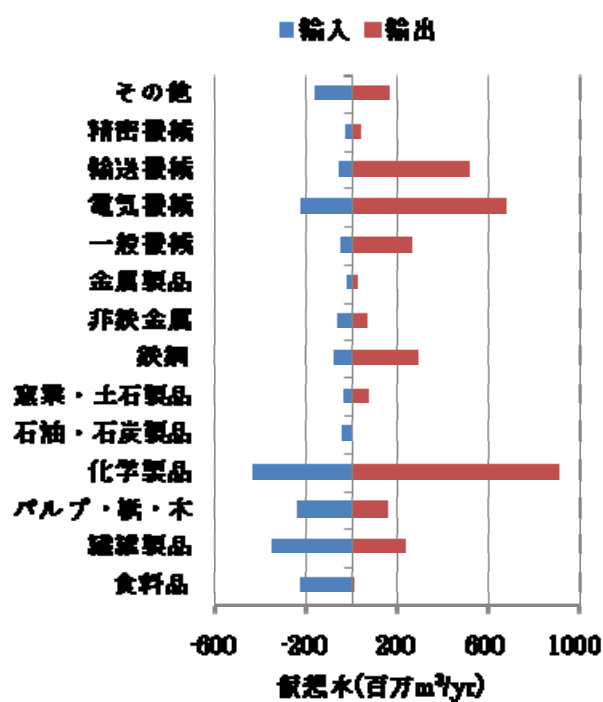


図 5 工業製品の輸出入に伴う仮想水貿易

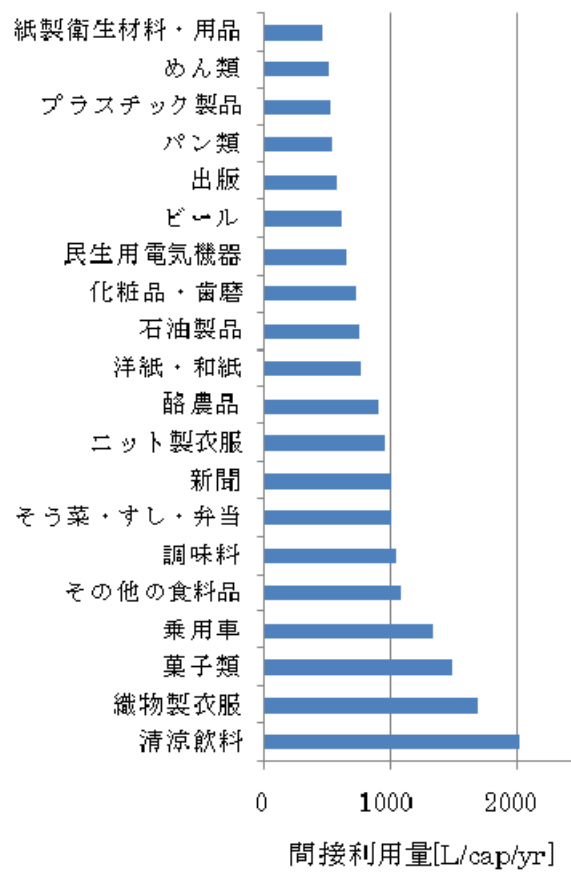


図 6 工業製品の購入に伴う国民一人あたりの工業用水の間接利用量