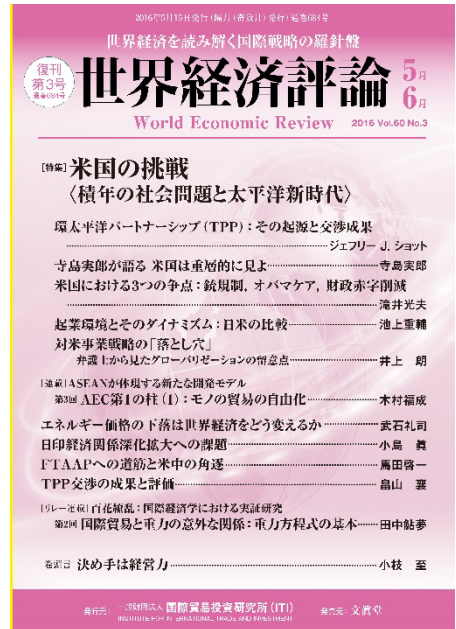


本論文は

# 世界経済評論 2016年5/6月号

(2016年5月発行)

掲載の記事です



## 世界経済評論 定期購読のご案内

年間購読料

1,320円×6冊=7,920円

6,600円

税込

17%

送料無料  
OFF



富士山マガジンサービス限定特典

※通巻682号以降

定期購読  
期間中

### デジタル版バックナンバー 読み放題!!



世界経済評論 定期購読



☎0120-223-223

[24時間・年中無休]

お支払い方法

Webでお申込みの場合はクレジットカード・銀行振込・コンビニ払いからお選びいただけます。  
お電話でお申込みの場合は銀行振込・コンビニ払いのみとなります。

Fujisan.co.jp  
雑誌のオンライン書店

## 国際貿易と重力の意外な関係： 重力方程式の基本

田中 鮎夢

中央大学商学部准教授

たなか あゆむ 2005年京都大学経済学部卒業、2010年同経済学研究科博士後期課程修了。博士（経済学）。専門分野は、国際経済学。独立行政法人経済産業研究所研究員を経て、現在、同研究所リサーチアソシエイト。

本稿は、近年の研究の発展を踏まえて、国際貿易における重力方程式（gravity equation）の基本を平易に概説する。重力方程式とは、国と国の間の貿易額の大小は何によって決まるのかを明らかにしようとするものである。重力方程式においては、「国と国の間の貿易額は、国と国の距離に反比例し、国の経済規模に比例する」と考えられてきた。この重力方程式の考えが国際貿易のデータに忠実に沿うことは、オランダの計量経済学者ヤン・ティンバーゲンによって初めて重力方程式が用いられて以来、半世紀以上にわたって繰り返されてきた。しかし、重力方程式の伝統的な推定方法の問題点が近年の研究によって指摘されている。そこで、本稿は、現代の重力方程式の研究の基礎となった Anderson and van Wincoop（2003）と Silva and Tenreyro（2006）の研究までを紹介する。これらの研究に基づいた重力方程式の推定は、統計分析ソフトによって容易に実行できる。本稿は、読者が実際に重力方程式を用いた分析を行えるように、国際経済学の分野で幅広く用いられている統計分析ソフト Stata のコマンドを適宜記載した。

### 1 貿易額は何によって決まるのか

2014年の日本の輸出相手国1位は、アメリカ（136,493億円）、2位は、中国（133,815億円）となっている。この2国に続くのが韓国（54,559億円）である。こうした数値を見たときに、どうして、アメリカや中国、韓国への輸出額は大きいのだろうかという素朴な疑問が出てくる。経済学者は、まさに「国から国への輸出額<sup>1)</sup>の大きさはこういった要因によって決まるのか」という素朴な疑問に取り組んでき

た。貿易データを用いて、この疑問に先駆的に取り組んだのが、世界最初のノーベル経済学賞受賞者であるオランダの計量経済学者ヤン・ティンバーゲンである。

ティンバーゲンは、物理学におけるニュートンの万有引力の法則の類推により、2国間の国際貿易を説明しようと試みた（Tinbergen, 1962）。ニュートンの万有引力の法則とは、「天体間の引力の大きさは、天体と天体の距離の2乗に反比例し、天体の質量に比例する」というものである。国際貿易にこの考えを大雑把に当てはめ、「国と国の間の貿易額は、国と国の距離に反比例し、国の経済規模に比例する」と考

えるものが、国際貿易の分野において重力モデル (gravity model) や重力方程式と呼ばれるものである。重力方程式は、貿易額の大きさを経済規模と距離のみでまずは説明しようとするものなのである。

以上の説明から明らかなように、Tinbergen (1962) の重力方程式には、経済学の理論的背景は何らなかった。そのため、重力方程式を軽視する経済学者は多かった。しかし、Tinbergen (1962) 以後の半世紀の間になされた無数の実証研究が、重力方程式が現実の貿易データを非常によく説明できることを繰り返し示してきた。同時に、この10年ほどの間に、重力方程式の理論的基礎がしっかりと構築され、国際貿易理論の重要な一部を成すようになった。

## 2 経済規模と距離の重要性

既に述べたように、重力方程式は、「国と国との間の貿易額は、国と国の距離に反比例し、国の経済規模に比例する」と考える。その後の理論研究によって、この重力方程式の考えが正しいことが裏付けられている。重力方程式の背後の論理は単純である。まず、第1に、経済規模が大きい輸入国の方が、財の消費に用いることができる所得が大きく、自国の財の消費量のみならず外国の財の消費額（つまり輸入額）も大きいはずである。その他の条件が一定であれば、経済規模が2倍であれば、財の消費額・輸入額も2倍になるだろう。第2に、経済規模が大きい輸出国の方が、生産額が大きいので、他国への輸出額も大きくなるだろう。先ほどと同様にして、他の条件が一定であれば、経済規模が2倍であれば、財の生産額・輸出額も2倍に

なるだろう。

第3に、2国間の財の輸送費（貿易障壁全般）が大きいほど、貿易額は小さくならざるを得ないだろう。2国間の距離は輸送費の1つの指標と見なすことができる。そうすると、2国間の距離が大きいほど、その2国の貿易額は小さくなるはずである。以上の考察から、2国間の貿易額は、2国間の距離と負の関係であり、2国の経済規模と正の関係であることが予想できる。

実際の貿易データとこの発想が整合的か確認してみよう。まずは、Head and Mayer (2014) にならない、日本から世界各国への輸出額と経済規模及び距離との関係を散布図によって確認する。なお、データは、カリフォルニア大学バークレー校のアンドリュー・ローズ教授のウェブサイト<sup>2)</sup>から無料で入手出来るものを用いた。用いたデータセットは、ローズの最近の研究、Glick and Rose (2015) で用いられた貿易データ<sup>3)</sup>であり、統計分析ソフト Stata により誰でも読み込める。

図1は、日本からの輸出額と輸出先の国162カ国の経済規模との関係を散布図にまとめたものである。経済規模の指標としては、慣例に従い、GDP（国内総生産）を用いている。また、縦軸の変数も横軸の変数も対数値にしている。

図1：貿易額と経済規模の正の関係（2013年）

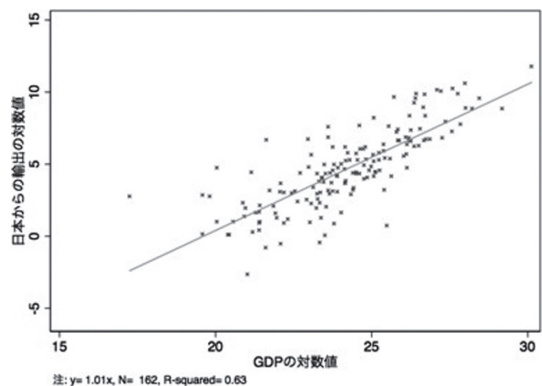


図2：貿易額と距離の負の関係（2013年）

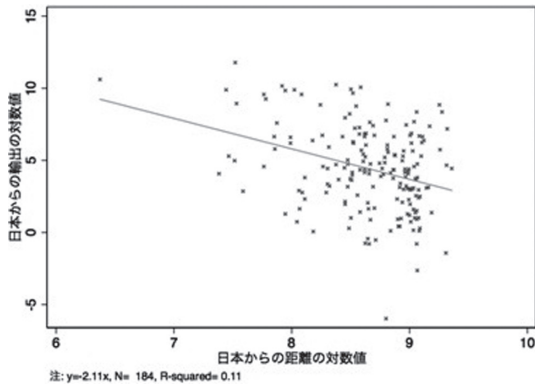


図1を一瞥すればわかるように、重力方程式の想定通り、日本からの輸出額と輸出先の国のGDPは正の関係にある。

一方、図2は、日本からの輸出額と輸出先の国184カ国への距離との関係を散布図にまとめたものである。図1と同様に、縦軸の変数も横軸の変数も対数値にしている。図2からは、回帰直線が右下がりであるので、重力方程式の想定通り、日本からの輸出額と輸出先の国への距離は負の関係にあることが見て取れる。

### 3 重力方程式の 伝統的な推定方法

重力方程式は、伝統的に以下のような式(1)で表現されてきた。

輸出額 =

$$\text{定数} \times \frac{\text{輸出国の GDP}^{\alpha} \times \text{輸入国の GDP}^{\beta}}{\text{輸出国と輸入国の間の距離}^{\gamma}} \quad (1)$$

ここで、小さな上添え字 ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) は、未知の係数である。この式はこのままでは掛け算部分があり、未知の係数の推定を最小2乗法で行うのは難しい。そこで、この式は、式(2)のよ

うに、対数をとって、線形にされてきた。

$$\begin{aligned} \ln \text{ 輸出額} &= \text{定数} + \alpha \ln \text{ 輸出国の GDP} \\ &+ \beta \ln \text{ 輸入国の GDP} \\ &- \gamma \ln \text{ 輸出国と輸入国の間の距離} \end{aligned} \quad (2)$$

この式(2)を用いれば、最小2乗法で未知の係数を簡単に推定することができる。このような対数線形化した重力方程式の最小2乗法による推定を「伝統的な推定方法」と呼ぶことにする。Stataであれば、

```
reg ltrade lgdp1 lgdp2 ldist, robust
```

というコマンドで推定できる。ここで、regは最小2乗法を実行するコマンド、ltradeは、輸出額の対数値、lgdp1は輸出国のGDPの対数値、lgdp2は輸入国のGDPの対数値、ldistは輸出国と輸入国の間の距離である。不均一分散と呼ばれる計量経済学の問題に対処するために、robustというオプションを付している。Glick and Rose (2015) の2013年の貿易データを用いた推定結果は、式(3)の通りである。なお、推定係数は全て5%水準で統計的に有意であった。

$$\begin{aligned} \ln \text{ 輸出額} &= -40.97 + 1.15 \ln \text{ 輸出国の GDP} \\ &+ 1.04 \ln \text{ 輸入国の GDP} \\ &- 1.53 \ln \text{ 輸出国と輸入国の間の} \\ &\quad \text{距離} + \text{残差} \end{aligned} \quad (3)$$

N = 11,304, 決定係数 = 0.66

対数をとっているため、推定係数は弾性値と呼ばれるものになっている。例えば、輸出国のGDPが1%大きければ、その国の輸出額は1.15%大きいということを示す。この推定結果においても、貿易額と経済規模の関係は正であ

り、貿易額と距離の関係は負であることが明らかになっている。

#### 4 言語が共通であれば、貿易額はどの程度大きくなるか

重力方程式に、言語の共通性や過去の植民地支配・被支配関係のように経済規模や距離以外の変数を加えて、分析を行うことも多い。ここでは、言語が共通であるとの程度、輸出額が大きくなるのか分析してみたい。式(2)に、輸出国と輸入国の間の言語が共通であるか否かに関するダミー変数（共通であれば1、共通でなければ0をとる変数）を加えた、以下の式(4)を推定すれば、言語の共通性と輸出額との関係がわかる。

$$\begin{aligned} \ln \text{輸出額} = & \text{定数} + \alpha \ln \text{輸出国の GDP} \\ & + \beta \ln \text{輸入国の GDP} \\ & - \gamma \ln \text{輸出国と輸入国の間の距離} \\ & + \delta \text{言語の共通性} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $\delta$ は、言語が共通である国の間で平均的にどの程度輸出額が大きくなるかを表す係数である。先ほどの貿易データで推定すると、以下の式(5)の推定結果が得られる。推定係数は全て5%水準で統計的に有意であった。

$$\begin{aligned} \ln \text{輸出額} = & -42.49 + 1.17 \ln \text{輸出国の GDP} \\ & + 1.06 \ln \text{輸入国の GDP} \\ & - 1.48 \ln \text{輸出国と輸入国の間の距離} \\ & + 1.23 \text{言語の共通性} + \text{残差} \end{aligned} \quad (5)$$

N=11,304, 決定係数=0.67

ここで、 $\delta$ の推定係数は、1.23となっており、言語が共通である国の間の輸出額は、言語が

共通ではない国の間の輸出額の平均的に約3.42倍となることがわかる。なお、3.42倍という数字は、 $e^{1.23} \approx 3.42$ という計算による。式(5)は、対数線形化された式であるため、指数をとって、計算し直している<sup>4)</sup>。なお、言語に関する変数も、ローズのデータに含まれているものを用いている。

#### 5 重力方程式の現代的な推定方法

実は、近年の研究の進展によって、重力方程式の伝統的な推定方法には、少なくとも2つの問題があることがわかってきた。第1の問題は、広い意味での物価が貿易額に及ぼす影響を考慮できていないことである。Anderson and van Wincoop (2003)は、貿易理論から重力方程式を導き出し、広い意味での物価が貿易額に影響を及ぼすことを理論的に示した。そして、この広い意味での物価を「多角的貿易抵抗変数」(multilateral resistance variable)と呼んだ。例えば、タイが日本に財を輸出するとき、日本とタイの経済規模のみならず、日本とタイの物価も、影響を及ぼす。日本の近くに中国のような国があり、日本の物価が低いとすれば、タイから日本への輸出はより困難になるので、輸出額は小さくならざるをえない。このように、貿易当事国以外の要因によって影響される日本の物価が、日本とタイの2国間貿易に影響を与える。この物価の影響を考慮するためには、輸出国のダミー変数と輸入国のダミー変数を重力方程式の推定式に加えることが必要となることが知られている (Feenstra 2015)。輸出国のダミー変数とは、例えば、日本であれば1をとり、そうでなければ0をとる変数である。

分析する貿易データに200カ国含まれていれば、200個の輸出国のダミー変数と、200個の輸入国のダミー変数が必要となる。式で書くと、式(6)のようになる。

$$\begin{aligned} \ln \text{輸出額} = & \text{定数} + \alpha \text{輸出国のダミー変数} \\ & + \beta \text{輸入国のダミー変数} \\ & - \gamma \ln \text{輸出国と輸入国の間の距離} \end{aligned} \quad (6)$$

例えば、日本であれば1をとり、そうでなければ0をとるダミー変数の項によって、日本のGDPは吸収されてしまう。そのため、輸出国のGDPと輸入国のGDPの項は消えている。輸出国のダミー変数の項は、「輸出国固定効果」、輸入国のダミー変数の項は、「輸入国固定効果」と呼ばれるため、式(6)の形で重力方程式を推定する方法は、「固定効果法」と呼ばれている。

また、式(2)においては、未知の係数 $(\alpha, \beta)$ は、各1つだけであった。一方、式(6)においては、未知の係数 $(\alpha, \beta)$ がそれぞれ国の数だけある。Stataでは、以下のコマンドで係数の推定を行える。

```
xi:reg ltrade i.cty1 i.cty2 ldist, robust
```

ここで、i.cty1とi.cty2は、輸出国のダミー変数と輸入国のダミー変数である。xi:は、ダミー変数を作成して回帰分析を行うためのコマンドである。2013年の貿易データで推定した結果は、以下のようになる。

$$\begin{aligned} \ln \text{輸出額} = & 25.92 + \hat{\alpha} \text{輸出国のダミー変数} \\ & + \hat{\beta} \ln \text{輸入国のダミー変数} \\ & - 1.84 \ln \text{輸出国と輸入国の間の} \\ & \text{距離} + \text{残差} \end{aligned} \quad (7)$$

$N=13,554$ , 決定係数=0.76

推定係数は全て5%水準で統計的に有意であった。実際には、116個程度の $(\alpha, \beta)$ の推定値が得られているが、 $\hat{\alpha}$ と $\hat{\beta}$ と省略して表記している。

伝統的な推定方法の第2の問題は、本来、式(1)のような掛け算の形の式を対数線形化していることである。実際に式(1)のような掛け算の形になることを理論的に示すのは本稿の水準を超えるので、Feenstra (2015)などを参照願いたい。Silva and Tenreyro (2006)は、この第2の問題を回避するために、対数を取る前の貿易額を従属変数として、最小2乗法ではなく、ポワソン疑似最尤推定法(Poisson pseudo-maximum-likelihood method: PPML法)によって、推定することを提唱した。Stataで固定効果法かつPPML法で推定するStataのコマンドは、以下のようになる。

```
xi:poisson trade i.cty1 i.cty2 ldist, robust
```

ここで、poissonがPPML法を実行するコマンドである。注意すべきは、従属変数である輸出額(輸入額)は対数を取らない値を用いる<sup>5)</sup>ことである。このPPML法による推定は、最小2乗法による推定に比べて、格段に時間を要する。先ほどと同じく2013年の貿易データで推定すると、距離の対数値の推定係数は-1.06となり、推定係数の絶対値は小さくなる。

Silva and Tenreyro (2006)以降、この固定効果法とPPML法を併用する手法が、推奨されるものとなっている。ただし、どのような手法を用いるかは、分析の目的によることは言うまでもない。また、固定効果法とPPML法を併用する手法は、計算時間が長くなるという欠点を有する。さらに、国の固定効果を説明変数

に用いることで、国固有の政策や性質を重力方程式に加えることができなくなる。こうした諸課題は、本稿の範囲を超えるので、Head and Mayer (2014) をご参照願いたい。

## 6 分析に用いるデータ

本稿は、ここまで、Glick and Rose (2015) で用いられたローズ教授の貿易データを用いて重力方程式の説明を行ってきた。このデータは、国際通貨基金 (IMF) の *Direction of Trade* から構築された 200 を超える国の 1948 - 2013 年の 2 国間貿易データと GDP や距離、地域貿易協定など主要な変数を網羅している便利なものである。

しかし、個々の財に着目して、2 国間貿易データの分析を行う必要が生じることもあるだろう。そうした場合は、まず、フランスの経済研究機関 CEPII が、国連の UN COMTRADE から構築している貿易データベース BACI を用いるのが良い。BACI は、200 以上の国の 1995 - 2010 年の貿易を財レベルで収録しており、CEPII のウェブサイト (<http://www.cepii.fr/CEPII/en/>) から入手できる。ただし、BACI の利用には、UN COMTRADE への登録 (有料) が必要である。

CEPII は、貿易データの他にも、2 国間の距離のデータや言語の共通性に関するデータなど重力方程式に用いられる多くの変数をウェブサイトにおいて無料で公開している。最後に、GDP は世界銀行のウェブサイトから無料で入手できる *World Development Indicators* から得るのが定石である。その他、データに関する詳細は、田中 (2015) をご覧頂きたい。

## 7 多分野への応用と今後の展望

近年、重力方程式は、財の国際取引ばかりではなく、国境を越えるサービス・人・資金の移動にも適用されるようになってきた。外国直接投資、ポートフォリオ投資、サービス貿易 (国際観光を含む)、移民といった現象に重力方程式が適用されている。ただし、そうした現象に重力方程式を用いる理論的基礎は必ずしも十分ではない場合もある。詳細は、Head and Mayer (2014) や田中 (2015) をご参照願いたい。

本稿は、重力方程式の基本を簡潔に概説し、現代の重力方程式の研究の基礎である Anderson and van Wincoop (2003) と Silva and Tenreyro (2006) の研究までを紹介した。しかし、その後、企業の異質性に焦点を当てた新々貿易理論の登場によって、重力方程式の研究はさらなる発展を遂げている。それらについては、重力方程式に関する包括的な解説論文である Head and Mayer (2014) や国際貿易論の大学院用の教科書 Feenstra (2015, chap 5, 6), より一般向けの解説書である田中 (2015, 第 6 章) などをご参照願いたい。本連載でも後に扱われる予定であるので、ぜひご覧頂きたい。

### [注]

- 1) 日本からアメリカへの輸出額は、アメリカにとっては日本からの輸入額である。このように、ある国にとっての輸出額は別の国にとっての輸入額である。そのため、本稿において、多くの場合、「輸出額」という言葉と輸出額・輸入額双方を含むより一般的な「貿易額」という言葉を交換可能な形で用いている。
- 2) <http://faculty.haas.berkeley.edu/arose>
- 3) 意欲的な読者は、ローズ教授のウェブサイトから、Glick2Data.zip という圧縮ファイルをダウンロードし、解凍して得られる dataa1.dta という Stata ファイルを得て頂ければ、以下で示す図を再現できる。用いたコマンドは、図 1 が、`twoway (scatter ltrade lgdp2, sort) (lfit`

ltrade lgdp2) if country1=="Japan"&year==2013, 図2  
が, twoway (scatter ltrade ldist, sort) (lfit ltrade ldist) if  
country1=="Japan"&year==2013 である。

4)  $\ln e = 1$  という性質に留意して, 輸出額 = 定数  $\times$  [(輸出  
国の GDP  $^{\alpha}$   $\times$  輸入国の GDP  $^{\beta}$ )  $\div$  (輸出国と輸入国の間の距  
離)  $^{\gamma}$ ]  $\times e^{(\delta \times \text{言語の共通性})}$  の対数をとった式が, 式(4)である。  
ここから, 輸出額は, 平均的に, 言語が共通ではない国の場  
合,

$e^{(\delta \times \text{言語の共通性})} = e^{(\delta \times 0)} = 1$  倍, 言語が共通である国の場  
合,  $e^{(\delta \times \text{言語の共通性})} = e^{(\delta \times 1)} = e^{\delta}$  倍となる。

5) 輸出額 (輸入額) の対数を取らない理由は, 重力方程式が  
掛け算の形になっていることによる。例えば, 輸出額 (対数  
取らない値) の条件付き期待値は, 以下のように表せる。

$E$  (輸出額 | 輸出国の GDP, 輸入国の GDP, 距離) = 定数  
 $\times$  輸出国の GDP  $^{\alpha}$   $\times$  輸入国の GDP  $^{\beta}$   $\times$  距離  $^{-\gamma} = \exp (\ln \text{定数}$   
 $+ \alpha \ln \text{輸出国の GDP} + \beta \ln \text{輸入国の GDP} - \gamma \ln \text{距離})$

指数 exp の内側が対数になっていることに留意して,  
Silva and Tenreyro (2006, pp. 643-645) を読むと, 輸出額  
(輸入額) の対数を取らない理由が理解出来る。

[参考文献]

Anderson, James E. and Eric van Wincoop. (2003) "Gravity

with Gravitas: A Solution to the Border Puzzle." *American  
Economic Review*, 93 (1): 170-192.

Feenstra, Robert. (2015) *Advanced International Trade:  
Theory and Evidence*. Princeton: Princeton University  
Press.

Glick, Reuven, and Andrew K. Rose. (2015) "Currency Unions  
and Trade: A Post-Emu Mea Culpa." *NBER Working  
Paper*, No. 21535.

Head, Keith, and Thierry Mayer, (2014), "Gravity Equations:  
Workhorse, Toolkit, and Cookbook." Chapter 3 in  
Gopinath, G, E. Helpman and K. Rogoff (eds), *Handbook of  
International Economics*, Vol. 4, Elsevier: 131-195.

Santos Silva, J. M. C. and Silvana Tenreyro (2006) "The Log  
of Gravity," *Review of Economics and Statistics*, 88 (4), 641-  
658.

Tinbergen, Jan. (1962) *Shaping the World Economy  
Suggestions for an International Economic Policy*. New  
York: Twentieth Century Fund.

田中鮎夢 (2015) 『新々貿易理論とは何か：企業の異質性と 21  
世紀の国際経済』 ミネルヴァ書房。

**J-Global Institute  
of Collaboration**

貴社の海外事業に100%満足でしょうか？  
海外企業とのミーティング、交渉、プレゼン、コレポンなど  
日本流で通していませんか？

在日25年の英国人コンサルタントが日本語で人材育成と  
海外ビジネス成功への心得と実践をお引き受けします

<p><b>Win-Win Negotiations</b> 双方が満足できる交渉</p>	<p><b>Motivating Meetings</b> やる気を引き出す会議</p>	<p><b>Persuasive Writing</b> 説得力のあるビジネスライティング</p>
---	--	---

[www.jglobalinstitute.org](http://www.jglobalinstitute.org)