

第1章 化学肥料価格及び肥料補助金が 世界小麦市場に与える影響

—部分均衡需給予測モデルによる影響試算—

小泉 達治

1. はじめに

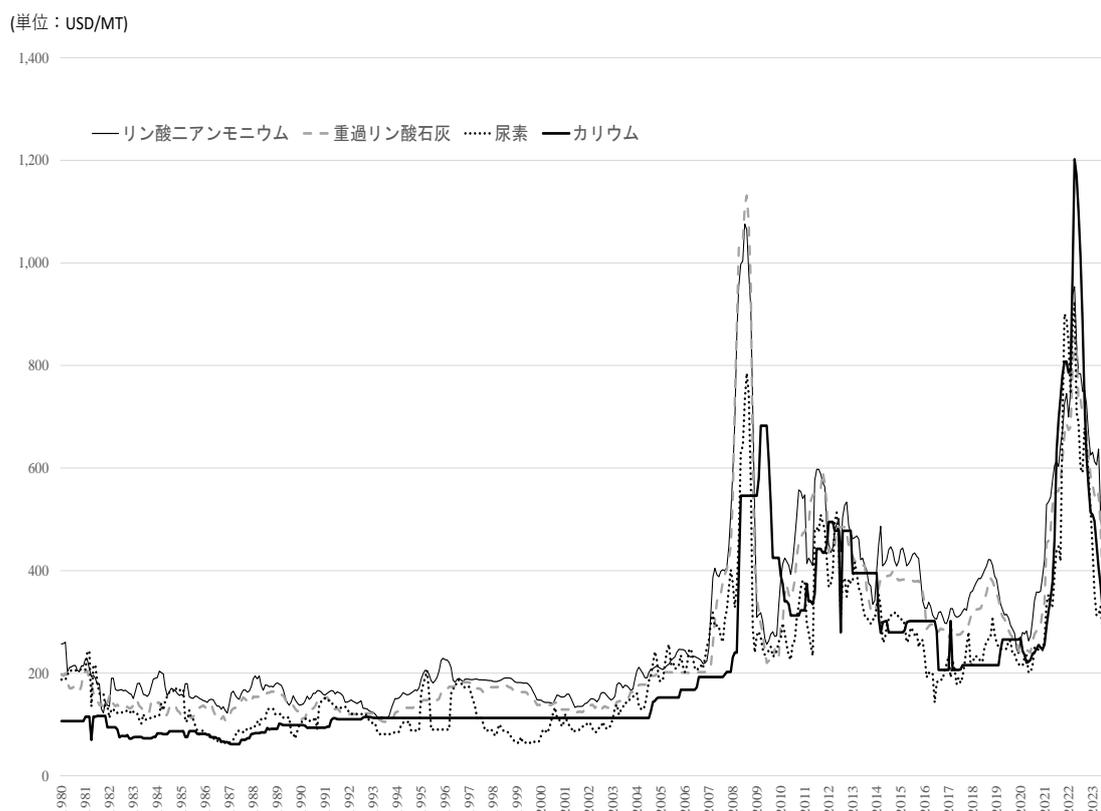
化学肥料は、農作物の栽培における重要な投入要素の一つであり、過去50年間の農作物の収穫量増加の約60%に寄与してきた(Stewart et al., 2005)。肥料の中でも、三大栄養素である窒素(N)、リン(P)、カリウム(K)の使用量は、世界食料生産量の増加を受けて、近年、増加傾向にある。第1図のように、リン酸二アンモニウム(DAP)、重過リン酸石灰(TSP)、尿素、カリウム⁽¹⁾の化学肥料価格は、エネルギー価格の高騰、COVID-19パンデミック後の農業生産の急速な回復、世界最大の化学肥料輸出国であるロシア等による輸出規制、サプライチェーンの混乱による化学肥料輸送の制約問題等により、2021年後半から高騰した。化学肥料価格は2022年4月をピークとし、それ以降、下落傾向にあるものの、COVID-19の世界的流行(パンデミック)発生前の水準を超えて推移している⁽²⁾。特に、天然ガスはアンモニア製造の原料及びエネルギー源として使用されており、アンモニア製造コストの70%~80%を占めている(Hebebrand and Laborde, 2022)。国際原油価格及び天然ガス価格は、COVID-19からの世界経済の急速な回復による石油製品の需要増加、これによる一部産油国の協調減産等により、2021年以降、上昇した。さらに、ロシアによるウクライナ侵攻の影響により、2022年3月以降、更にこれらのエネルギー価格が高騰した。このため、天然ガス価格の高騰は、窒素肥料の原料となるアンモニア生産コスト上昇要因となった。

化学肥料が農産物の生産に与える影響に関する研究では、Adams et al. (1977)が、化学肥料供給量が20%減少することにより、農業生産額が4%減少することを明らかにした。Burrell (1989)は、化学肥料価格の上昇が化学肥料使用量の減少となることを明らかにした。Brunelle et al. (2015)は、化学肥料価格が農産物の単収を低下させ、食料価格の上昇が農業生産量増加を通じて、化学肥料需要量の増加を誘発することを結論付けた。速水(1973)は、日本におけるコメ生産者価格に対する化学肥料価格の比率が下落することにより、化学肥料使用量とコメ単収が増加することを明らかにした。さらに、山口(1983)は農産物価格に対する化学肥料価格の比率が下落することにより、化学肥料使用量が増加し、日本の農業の発展に寄与した点を明らかにした。

以上の先行研究を踏まえ、本研究では、農産物生産者価格に対する化学肥料価格の比率

が上昇することにより、化学肥料使用量が減少する一方、農産物生産者価格の上昇は農産物生産量増加を促すことにより、化学肥料使用量が増加するという仮説を立てた。このように、化学肥料価格の上昇は農産物の生産を通じて農産物需給に影響を与えることが考えられる。

一方、国際小麦価格は不安定化する傾向にあり⁽³⁾、世界のフードセキュリティ⁽⁴⁾における「安定性」と「供給可能性」に負の影響を与えていると考える。また、小麦とトウモロコシ生産において、化学肥料価格が生産コスト全体の15%~20%を占めている（Heady and Fan, 2008）。このため、化学肥料価格の上昇は、農業生産コストを上昇させ、化学肥料価格上昇率が農産物生産者価格上昇率を上回る場合は、対象農産物の生産量を減少させることが見込まれる。このため、化学肥料価格の上昇を緩和する適切な政策的措置がなければ、多くの国でこうした化学肥料価格上昇が小麦の単収や生産量に悪影響を与えることが懸念される。Wijetunga and Saito（2017）は、スリランカを事例として、化学肥料補助金の削減がコメの生産性を低下させたことを結論付けている。以上のように、化学肥料価格上昇に対して、化学肥料補助金を適用することにより、農業生産への影響を緩和する効果が見込まれる。このため、本研究では化学肥料価格上昇に対して、化学肥料補助金が世界小麦需給に与える計量的な影響評価を行う。



第1図 化学肥料価格の推移

資料: World Bank (2023)より作成。

注: リン酸二アンモニウム: spot, fob US Gulf. カリウム: granular spot, CFR Brazil. 重過リン酸石灰: spot, import US Gulf. 尿素: prill spot f.o.b. Middle East.

これまで、気候変動適応策としての農業投資が世界小麦需給に与える影響については、Koizumi (2019) が、気候変動下における農業投資が国際小麦価格の変動に与える影響について計量モデルを使って試算した。しかし、化学肥料使用量・価格、その他の農業投入財価格についてはこのモデルの対象としていなかった。このため、本研究では、化学肥料価格等の変数をモデルに含めて、将来の気候変動の状況下、化学肥料価格の上昇が世界の小麦需給と国際小麦価格変動に与える影響を試算し、化学肥料補助金がこれらの世界小麦需給と国際小麦価格変動に与える影響の緩和効果について部分均衡需給予測モデルを用いて影響試算を行う。このため、本研究では、これまで開発した部分均衡需給予測モデルである「世界小麦経済気候変動 (WECC) モデル」に対して、化学肥料価格、小麦生産における化学肥料使用量、その他の農業投入財価格を同モデルに組み込んだ。

2. 予測手法

(1) WECC モデルの構造と説明変数推計用データ

WECC モデルは 10 か国 2 地域の主要小麦生産国 (EU, 中国, インド, 米国, ロシア, ウクライナ, カナダ, 豪州, アルゼンチン, インドネシア, エジプト, その他世界) を対象としている。基準年は 2019~2021 年 (2019~2021 年の 3 年平均値) であり、2040 年までの各国・地域における生産量 (単収・収穫面積), 消費量, 輸出量, 輸入量, 期末在庫量, 国際価格, 国内価格を予測する (第 2 図)。

本研究で使用する WECC モデルの単収関数では、新たに内生変数として小麦生産における化学肥料使用量のほか、農薬使用量, 農業雇用者数を外生変数として新たに加えた。また、小麦作付面積の関数として新たに外生変数として化学肥料価格, 農業雇用者数, 国内ディーゼル価格を新たに加えた。まず、各国・地域の小麦生産におけるリン酸塩使用量は、以下のように、国内小麦生産者価格に対する国内リン酸二アンモニウム価格比の変化率, 国内小麦生産者価格に対する国内重過リン酸石灰価格比の変化率, 国内小麦生産者価格の変化率, GDP の変化率で決定する。

$$\ln (PHOUW_{t,c} / PHOUW_{t-1,c}) = a1 \ln ((DAPP_{t,c} / DWP_{t,c}) / ((DAPP_{t-1,c} / DWP_{t-1,c}))) + a2 \ln ((TSPP_{t,c} / DWP_{t,c}) / ((TSPP_{t-1,c} / DWP_{t-1,c}))) + a3 \ln (DWP_{t,c} / DWP_{t-1,c}) + a4 \ln (GDP_{t,c} / GDP_{t-1,c})$$

なお、 $PHOUW$ は小麦生産におけるリン酸塩使用量, $DAPP$ は国内リン酸二アンモニウム価格, $TSPP$ は国内重過リン酸塩価格, DWP は国内の小麦生産者価格, GDP は国内総生産額 (実質), t は時間, c は国・地域, $a1 \sim 4$ はパラメータである⁽⁵⁾。

各国・地域の小麦生産における窒素使用量は、以下のように国内小麦生産者価格に対する国内尿素価格比の変化率, 小麦生産者価格の変化率, GDP の変化率で決定する。

$$\ln (NITUW_{t,c} / NITUW_{t-1,c}) = a5 \ln ((UREP_{t,c} / DWP_{t,c}) / ((UREP_{t-1,c} / DWP_{t-1,c}))) + a6 \ln (DWP_{t,c} / DWP_{t-1,c}) + a7 \ln (GDP_{t,c} / GDP_{t-1,c})$$

算出される。

$$DAPP_{t,c} = IDAPP_{t,c} - FESUBDAP_{t,c}$$

$$TSPP_{t,c} = ITSP_{t,c} - FESUBTSP_{t,c}$$

$$UREP_{t,c} = IUREP_{t,c} - FESUBUR_{t,c}$$

$$POTP_{t,c} = IPOTP_{t,c} - FESUBPO_{t,c}$$

なお、 $IDAPP$ は国際リン酸二アンモニウム価格⁽⁸⁾、 $FESUBDAP$ はリン酸二アンモニウム価格に対する補助金単価額である。 $ITSP$ は国際重過リン酸価格⁽⁹⁾であり、 $FESUBTSP$ は重過リン酸石灰価格に対する補助金単価額である。 $IUREP$ は国際尿素価格⁽¹⁰⁾、 $FESUBUR$ は尿素価格に対する補助金単価額である。 $IPOTP$ は国際カリウム価格⁽¹¹⁾、 $FESUBPO$ はカリウム価格に対する補助金単価額である。

各国・地域における小麦の単収は、開花期の年間平均気温、降水量、日射量、ラグ付きの農業投資額、化学肥料使用量、農業雇用者数、農薬使用量で決定する。

$$\begin{aligned} \ln(Y_{t,c}/Y_{t-1,c}) = & a11 \ln(TEMFLAV_{t,c}/TEMFLAV_{t-1,c}) + a12 \ln(PREFLAV_{t,c}/ \\ & PREFLAV_{t-1,c}) + a13 \ln(SORFLAV_{t,c}/SORFLAV_{t-1,c}) + a14 \ln(AGIS_{t-1,c}/AGIS_{t-2,c}) + \\ & a15 \ln(DMF_{t-1,c}/DMF_{t-2,c}) + a16 \ln(LD_{t-1,c}/LD_{t-2,c}) + a17 \ln(AME_{t-1,c}/AME_{t-2,c}) + a18 \\ & \ln(NITUW_{t,c}/NITUW_{t-1,c}) + a19 \ln(PHOUW_{t,c}/PHOUW_{t-1,c}) + a20 \ln(POTUW_{t,c}/ \\ & POTUW_{t-1,c}) + a21 \ln(PESTU_{t,c}/PESTU_{t-1,c}) + a22 \ln(AGL_{t,c}/AGL_{t-1,c}) \end{aligned}$$

なお、 Y は小麦収量、 $TEMFLAV$ は開花期の平均気温、 $PREFLAV$ は開花期の平均降水量、 $SORFLAV$ は開花期の平均日射量、 $AGIS$ は農業知識・イノベーションシステムの投資額、 DMF は農業インフラの整備・維持投資額、 LD は農地開発投資額、 AME は農業機械・設備投資額、 $NITUW$ は小麦生産における窒素使用量、 $PHOUW$ は小麦生産におけるリン酸塩使用量、 $POTUW$ は小麦生産におけるカリウム使用量、 $PESTU$ は農薬使用量、 AGL は農業雇用者数、 $a11\sim a22$ はパラメータである⁽¹²⁾。

各国・地域における小麦の作付面積は、以下のように、小麦の国内生産者価格、競合する国内農産物生産者価格、降水量、ラグ付きの農業投資額、国内化学肥料価格、農業雇用者数、国内ディーゼル価格によって決定する。

$$\begin{aligned} \ln(APW_{t,c}/APW_{t-1,c}) = & a23 \ln(DWP_{t,c}/DWP_{t-1,c}) + a24 \ln(PRCV_{t,c}/PRCAV_{t-1,c}) + a25 \\ & \ln(DMP_{t,c}/DMP_{t-1,c}) + a26 \ln(DSYP_{t,c}/DSYP_{t-1,c}) + a27 \ln(DCGP_{t,c}/DCGP_{t-1,c}) + a28 \ln \\ & (DVOP_{t,c}/DVOP_{t-1,c}) + a29 \ln(DSBP_{t,c}/DSBP_{t-1,c}) + a30 \ln(DRP_{t,c}/DRP_{t-1,c}) + a31 \ln \\ & (AGIS_{t-1,c}/AGIS_{t-2,c}) + a32 \ln(DMF_{t-1,c}/DMF_{t-2,c}) + a33 \ln(LD_{t-1,c}/LD_{t-2,c}) + a34 \ln \\ & (AME_{t-1,c}/AME_{t-2,c}) + a35 \ln(UREP_{t,c}/UREP_{t-1,c}) + a36 \ln(DAPP_{t,c}/DAPP_{t-1,c}) + a37 \\ & \ln(TSPP_{t,c}/TSPP_{t-1,c}) + a38 \ln(POTP_{t,c}/POTP_{t-1,c}) + a39 \ln(DIEDP_{t,c}/DIEDP_{t-1,c}) + \\ & a40 \ln(AGL_{t,c}/AGL_{t-1,c}) \end{aligned}$$

なお、 APW は小麦の作付面積、 $PRCAV$ は平均降水量、 DMP は国内トウモロコシ生産者価格、 $DSYP$ は国内大豆生産者価格、 $DCGP$ は国内粗粒穀物生産者価格、 $DVOP$ は国内植物油生産者価格、 $DSBP$ は国内白糖生産者価格、 DRP は国内コメ生産者価格、 $DIEDP$ は国内ディーゼル価格、 $a23-40$ はパラメータである⁽¹³⁾。

各国・地域における小麦の収穫面積は、以下のように作付面積と耕作放棄面積の差から求められる。また、小麦の生産量は、収穫面積と小麦の単収を乗じて求められる。

$$AHW_{t,c} = APW_{t,c} - ABD_{t,c}$$

$$QPW_{t,c} = AHW_{t,c} * Y_{t,c}$$

なお、 AHW は収穫面積、 ABD は耕作放棄面積、 QPW は小麦の生産量を表す。WECC モデルは、各予測年の生産量、消費量、輸出量、輸入量、期末在庫量を決定する。小麦の市場均衡価格は、Gauss-Seidel アルゴリズムを用いて、以下の均衡条件から求められる。国際小麦価格は、Wheat, No. 1 Hard Red Winter, ordinary protein, Kansas City を使用し、世界小麦需給を均衡させる価格である。

$$\sum IMW_{t,c} = \sum EXW_{t,c}$$

なお、 IMW は小麦の輸入量、 EXW は小麦の輸出量を表す。

小麦の単収、作付面積、収穫面積及び生産量実績データ⁽¹⁴⁾は、Production, Supply, and Distribution (PS&D) (USDA-FAS, 2022)を使用した。小麦の生産者価格と競争する農産物生産者価格は、FAOSTAT (FAO, 2022)を使用した。化学肥料使用量と農薬使用量のデータはFAOSTAT (FAO, 2022)、化学肥料価格はWorld Bank (2022)、国内ディーゼル価格はOECD-FAO (2022)のデータを使用した。これらの実績データは、以上の各説明変数のパラメータを計測するための時系列分析に用いた。

(2) ベースライン予測の前提条件及びシナリオ設定

ベースライン予測では、予測期間中(2019/21~2040)、現行の経済政策及び農業・貿易政策が全ての国・地域において継続し、農業技術変化率についてもこれまでの変化率が予測期間中も継続することを前提とした⁽¹⁵⁾。本研究に使用した一人当たりGDP成長率(実質)、人口、国際農産物価格の外生変数は、Koizumi (2024)における付属表A6-1と6-2を参照されたい⁽¹⁶⁾。

WECCモデル対象国・地域における化学肥料使用量(窒素、リン酸塩、カリウム)はFAOSTAT (FAO)を使用し、各国・地域の窒素、リン酸塩、カリウムの肥料使用量に対する小麦生産に使用した比率はInternational Fertilizer Association (IFA)のデータを使用した。本研究では、第1表のように、2018年における小麦生産における各化学肥料使用割合が予測期間である2022年から2040年まで一定であることを前提とした。また、本研究では、2022年から2035年までのベースライン予測に、世界銀行による国際化学肥料価格の予測値(2022~2035年)(World Bank, 2021)を使用し、2030年から2035年までの国際肥料価格の年平均変化率を2036年以降の予測値に適用した。

このため、ベースライン予測では、国際リン酸二アンモニウム価格、国際カリウム価格、国際尿素価格は2019/21年から2040年にかけてそれぞれ年平均1.2%、1.4%、1.3%下落し、国際重過リン酸石灰価格は年平均1.3%上昇する予測結果を使用する(第2表)。また、インドの窒素、リン酸塩、カリウムの補助金は2015年から2020年にかけてそれぞれ年平均で0.9%、2.3%、6.6%減少した(第3表)。本研究では、ベースライン予測の前提条件と

して、2015～2020年までの年平均変化率を予測期間である2022～2040年のインドの化学肥料補助金の変化率に適用した。そして、2022～2040年までの各国・地域における農薬使用量と国内ディーゼル価格は基準年の水準（2019～2021年平均値）で推移することを前提とした。さらに、本研究では、2006～2021年の農業投資である農業知識・イノベーションシステム、農業インフラ整備・維持投資額⁽¹⁷⁾の年平均変化率が、予測期間中も継続することを前提とした⁽¹⁸⁾。

第1表 小麦生産における窒素，リン酸塩，カリウム使用量の推移
(ベースライン予測)

(単位：トン)

		各肥料に占める 小麦の使用量割 合 (2018)	2019/21	2040	年平均変化率 (2019/21-2040)
アルゼンチン	窒素使用量	36.2%	484,991	684,387	2.0%
	リン酸塩 (P205) 使用量	27.1%	220,250	299,685	1.8%
	カリウム (K20) 使用量	-	-	-	-
豪州	窒素使用量	33.8%	452,339	618,000	1.9%
	リン酸塩 (P205) 使用量	28.3%	271,441	289,508	0.4%
	カリウム (K20) 使用量	14.0%	40,228	43,373	0.4%
カナダ	窒素使用量	33.0%	932,415	536,823	-3.2%
	リン酸塩 (P205) 使用量	28.0%	318,640	469,632	2.3%
	カリウム (K20) 使用量	19.0%	115,045	160,704	2.0%
中国	窒素使用量	15.9%	4,191,803	4,787,923	0.8%
	リン酸塩 (P205) 使用量	15.9%	1,597,736	1,775,887	0.6%
	カリウム (K20) 使用量	12.7%	1,280,087	1,708,228	1.7%
エジプト	窒素使用量	21.5%	267,304	293,370	0.5%
	リン酸塩 (P205) 使用量	13.8%	30,789	34,334	0.6%
	カリウム (K20) 使用量	18.3%	22,879	23,774	0.2%
フランス	窒素使用量	38.5%	790,116	996,927	1.4%
	リン酸塩 (P205) 使用量	23.3%	99,533	123,231	1.3%
	カリウム (K20) 使用量	18.7%	85,160	135,696	2.8%
ドイツ	窒素使用量	31.6%	416,076	348,887	-1.0%
	リン酸塩 (P205) 使用量	17.6%	38,755	38,428	0.0%
	カリウム (K20) 使用量	11.6%	50,083	45,164	-0.6%
その他EU	窒素使用量	18.7%	1,208,047	1,369,425	0.7%
	リン酸塩 (P205) 使用量	20.7%	418,399	469,559	0.7%
	カリウム (K20) 使用量	17.7%	361,406	483,050	1.7%
インド	窒素使用量	20.0%	3,936,127	3,662,843	-0.4%
	リン酸塩 (P205) 使用量	15.2%	1,250,245	2,727,293	4.7%
	カリウム (K20) 使用量	6.8%	196,042	233,832	1.0%
ロシア	窒素使用量	43.6%	795,270	859,960	0.5%
	リン酸塩 (P205) 使用量	35.2%	226,512	255,516	0.7%
	カリウム (K20) 使用量	21.7%	97,581	98,025	0.0%
ウクライナ	窒素使用量	34.0%	540,434	587,618	0.5%
	リン酸塩 (P205) 使用量	25.9%	103,700	198,803	3.9%
	カリウム (K20) 使用量	24.7%	79,833	180,805	4.9%
米国	窒素使用量	12.7%	1,482,928	1,670,965	0.7%
	リン酸塩 (P205) 使用量	11.2%	444,602	515,591	0.9%
	カリウム (K20) 使用量	2.5%	107,658	116,622	0.5%

資料：小麦の使用率は IFA (2022)，2019/21年のデータは FAOSTAT (FAO, 2022) による。

注：アルゼンチンのカリウム使用量のデータはない。

本研究では、以上のベースライン予測に対して、複数の代替シナリオを設定した。まず、シナリオ1では、化学肥料価格（リン酸二アンモニウム価格、重過リン酸石灰価格、カリウム価格、尿素価格）が上昇するケースを設定した。これらの価格予測は、World Bank による Commodity Price Forecast（2022年4月）の2022～2024年の予測値を用い、2025年以降はベースライン予測の年平均上昇率（World Bank, 2021）を適用した。このため、リン酸二アンモニウム価格、カリウム価格、重過リン酸石灰価格、尿素価格は2019/21年から2040年にかけてそれぞれ年平均1.7%、1.5%、3.9%、3.2%上昇する予測結果をシナリオ1として設定した（第2表）。

また、本研究では、その他の代替シナリオとしてインドの化学肥料補助金を適用した。WECCモデルの対象国・地域のうち、現在、化学肥料補助金制度が適用されているのはインドのみである。インドは世界最大の小麦生産国の一つであるが、単収が他の主要生産国に比べて低い状況にある⁽¹⁹⁾。インドでは、現在の化学肥料補助金水準を維持することにより、小麦単収が増加・安定し、世界の小麦供給量が増加・安定することが見込まれる。シナリオ2については、シナリオ1の化学肥料価格上昇予測値を適用し、2018/20年におけるインドの化学肥料補助金（窒素、リン酸塩、カリウム）が予測期間中（2022～2040年）一定で推移するシナリオを設定した。また、シナリオ3については、シナリオ1の化学肥料価格上昇予測を適用し、2012～2020年にかけてのインドにおける化学肥料補助金の年平均変化率（第3表）を予測期間の年平均変化率に適用した。

第2表 2019/21年から2040年までの化学肥料価格の推移（ベースライン予測）

		(単位：USD/mt)								年平均変化率 (2019/21～2040)
		2019/21	2022	2023	2024	2025	2030	2035	2040	
ベースライン予測	リン酸二アンモニウム	406.6	587.0	433.0	378.0	325.0	335.0	380.0	326.3	-1.2%
	カリウム	365.9	318.0	264.0	262.0	259.0	244.0	253.0	279.3	-1.4%
	重過リン酸石灰	227.8	509.0	385.0	340.0	297.0	302.0	337.0	289.4	1.3%
	尿素	319.2	367.0	288.0	260.0	259.0	256.0	278.0	251.3	-1.3%
シナリオ1予測	リン酸二アンモニウム	406.6	900.0	800.0	650.0	558.9	576.1	653.4	561.1	1.7%
	カリウム	365.9	520.0	470.0	453.0	447.8	421.9	437.4	483.0	1.5%
	重過リン酸石灰	227.8	750.0	650.0	550.0	480.4	488.5	545.1	468.1	3.9%
	尿素	319.2	850.0	750.0	600.0	597.7	590.8	641.5	579.9	3.2%

資料：2019/21年のデータは World Bank（2022）を使用した。

注：ベースライン予測における2022年以降の化学肥料価格は、World Bank（2021）による。また、シナリオ1の2022年から2024年までの化学肥料価格は World Bank（2022）から、シナリオ1の2025年以降の化学肥料価格は World Bank（2021）の年平均変化率を適用した。

第3表 インドの化学肥料補助金

		(単位：RP/kg)								年平均変化率 (2015～2020)	年平均変化率 (2012～2020)	
		2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020		
窒素		24.000	20.875	20.875	20.875	15.854	18.989	18.901	18.901	18.789	-0.9%	-3.3%
リン酸塩		21.804	18.679	18.679	18.679	13.241	11.997	15.216	15.216	14.888	-2.3%	-6.7%
カリウム		24.000	18.833	15.500	15.500	15.470	12.395	11.124	11.124	10.116	-6.6%	-9.9%

資料：Ministry of Chemical and Fertilizer in India（2022）

3. 結果

以上のようなベースライン予測の前提条件設定の結果、主要小麦生産国・地域における化学肥料使用量は、2019/21年から2040年にかけて年平均-3.2%~4.9%の範囲で変化することが予測された(第1表)。また、世界の小麦生産量及び消費量は、2019/2021年から2040年まで年平均1.0%増加し、同期間中、世界の小麦輸出量及び輸入量はそれぞれ年平均で1.3%、1.5%増加することが予測された(第4表)。そして、国際小麦価格は、2019/21年の249.5USD/トンから2040年には452.8USD/トンまで上昇することが予測された。さらに、2019/21年から2040年までの国際小麦価格の平均値は385.1603、標準偏差は153.1202、変動係数(CV)は0.3975となることが予測された。

第4表 世界小麦需給予測(ベースライン予測)

	単収(単位: MT/ha)			収穫面積(単位: 1,000 ha)			生産量(単位: 1,000 MT)		
	2019/21	2040(予測)	年平均変化率(2019/21-2040)	2019/21	2040(予測)	年平均変化率(2019/21-2040)	2019/21	2040(予測)	年平均変化率(2019/21-2040)
世界	-	-	-	219,512	248,394	0.7%	772,117	916,512	1.0%
アルゼンチン	3.0	3.0	-0.02%	6,558	6,630	0.1%	19,847	20,085	0.1%
豪州	2.3	2.2	-0.1%	11,921	13,755	0.8%	28,027	30,873	0.6%
カナダ	3.1	3.9	1.5%	9,640	10,131	0.3%	29,835	39,989	1.7%
中国	5.7	5.7	-0.001%	23,559	25,528	0.5%	134,932	146,188	0.5%
エジプト	6.4	7.1	0.6%	1,387	1,802	1.6%	8,890	12,763	2.2%
EU	-	-	-	23,856	22,012	-0.5%	134,637	131,053	-0.2%
フランス	7.2	7.4	0.2%	4,667	4,103	-0.8%	33,376	30,347	-0.6%
ドイツ	7.4	7.1	-0.3%	2,930	2,334	-1.3%	21,816	16,605	-1.6%
その他EU	4.9	5.4	0.6%	16,260	15,576	-0.3%	79,446	84,101	0.3%
インド	3.5	3.6	0.2%	30,600	34,765	0.8%	107,015	126,102	1.0%
ロシア	2.8	3.1	0.6%	27,875	31,702	0.8%	78,040	97,734	1.3%
ウクライナ	4.1	3.8	-0.4%	7,092	7,328	0.2%	29,199	27,976	-0.3%
米国	3.3	3.6	0.6%	15,020	17,645	1.0%	49,041	64,250	1.6%

	需要量(単位: 1,000 MT)			輸出量(単位: 1,000 MT)			輸入量(単位: 1,000 MT)		
	2019/21	2040(予測)	年平均変化率(2019/21-2040)	2019/21	2040(予測)	年平均変化率(2019/21-2040)	2019/21	2040(予測)	年平均変化率(2019/21-2040)
世界	767,218	908,181	1.0%	199,126	247,962	1.3%	193,412	247,962	1.5%
アルゼンチン	6,350	7,566	1.0%	13,605	12,491	-0.5%	5	17	7.6%
豪州	8,167	9,295	0.8%	20,161	21,597	0.4%	431	441	0.1%
カナダ	9,461	10,315	0.5%	21,857	29,553	1.8%	609	578	-0.3%
中国	141,333	153,609	0.5%	887	957	0.4%	8,565	10,923	1.4%
エジプト	20,467	25,169	1.2%	661	1,469	4.8%	12,153	13,998	0.8%
EU	107,250	100,721	-0.4%	33,009	34,786	0.3%	5,143	4,734	-0.5%
インド	101,844	114,615	0.7%	3,701	11,550	6.9%	21	19	-0.5%
インドネシア	10,400	12,652	1.2%	345	475	1.9%	10,745	13,136	1.2%
ロシア	41,417	43,010	0.2%	35,528	54,220	2.5%	342	168	-4.1%
ウクライナ	9,000	8,299	-0.5%	18,889	19,646	0.2%	119	64	-3.5%
米国	30,482	31,861	0.3%	25,080	32,666	1.6%	2,713	2,519	-0.4%

こうしたベースライン予測に対して、シナリオを設定して予測を行い、ベースライン予測との比較を行った。まず、シナリオ1では化学肥料価格上昇により、予測期間である2022~2040年にかけて、ベースライン予測に比べて、各国の小麦生産者価格に対する化学肥料価格の比率が上昇した。このため、全てのモデル対象国・地域の化学肥料使用量の平均値は、予測期間中、ベースライン予測の平均値に比べて0.04%~29.2%減少することが予測された(第5表)。このうち、ウクライナの小麦生産における窒素使用量の減少率(29.2%)は、他の国・地域よりも高い予測結果となった。また、2022~2040年のベースライン予測

の平均値と比較して、シナリオ1におけるウクライナの小麦単収の平均値は3.5%減少すると予測されたが、収穫面積の平均値は2.4%、生産量の平均値は1.9%それぞれ増加することが予測された⁽²⁰⁾（第6表）。また、同期間におけるインドの小麦生産における窒素、リン酸塩、カリウムの使用量の平均値はそれぞれ21.7%、9.4%、6.7%減少（第5表）、インドの小麦単収及び生産量の平均値は、それぞれ4.2%、9.5%減少することが予測された。このため、2022～2040年のベースライン予測の平均値に比べて、世界の小麦生産量・消費量の平均値は1.6%減少、世界の小麦輸出力・輸入量の平均値は0.7%減少し、国際小麦価格の平均値は114.2%上昇する予測結果となった（第7表）。

第5表 小麦生産における化学肥料使用量への影響（2022～2040年平均）

		変化率（シナリオ1/ ベースライン予測）	変化率（シナリオ2/ ベースライン予測）	変化率（シナリオ3/ ベースライン予測）
アルゼンチン	窒素使用量	-12.0%	-12.0%	-12.0%
	リン酸塩（P205）使用量	-1.1%	-1.0%	-1.1%
豪州	窒素使用量	-0.5%	-0.5%	-0.5%
	リン酸塩（P205）使用量	-0.8%	-0.8%	-0.8%
カナダ	カリウム（K20）使用量	-0.2%	-0.3%	-0.2%
	窒素使用量	-6.6%	-6.6%	-6.6%
	リン酸塩（P205）使用量	-1.8%	-1.9%	-1.7%
中国	カリウム（K20）使用量	-2.5%	-2.6%	-2.4%
	窒素使用量	-9.6%	-9.6%	-9.7%
	リン酸塩（P205）使用量	-0.7%	-0.8%	-0.7%
エジプト	カリウム（K20）使用量	-4.7%	-4.7%	-4.6%
	窒素使用量	-6.2%	-6.2%	-6.2%
	リン酸塩（P205）使用量	-2.9%	-3.0%	-2.9%
フランス	カリウム（K20）使用量	-1.8%	-1.9%	-1.8%
	窒素使用量	-4.7%	-4.8%	-4.7%
	リン酸塩（P205）使用量	-0.7%	-0.8%	-0.6%
ドイツ	カリウム（K20）使用量	-2.7%	-2.5%	-2.9%
	窒素使用量	-5.3%	-5.4%	-5.2%
	リン酸塩（P205）使用量	-1.5%	-1.6%	-1.5%
その他EU	カリウム（K20）使用量	-0.9%	-1.1%	-0.8%
	窒素使用量	-0.7%	-0.7%	-0.6%
	リン酸塩（P205）使用量	-0.2%	-0.2%	-0.2%
インド	カリウム（K20）使用量	-0.6%	-0.6%	-0.6%
	窒素使用量	-21.7%	-21.2%	-22.7%
	リン酸塩（P205）使用量	-9.4%	-8.2%	-10.8%
ロシア	カリウム（K20）使用量	-6.7%	-4.5%	-7.2%
	窒素使用量	-4.6%	-4.7%	-4.5%
	リン酸塩（P205）使用量	-1.2%	-1.3%	-1.2%
ウクライナ	カリウム（K20）使用量	-1.8%	-2.0%	-1.7%
	窒素使用量	-29.2%	-29.3%	-29.2%
	リン酸塩（P205）使用量	-1.7%	-1.7%	-1.6%
米国	カリウム（K20）使用量	-4.5%	-4.7%	-4.4%
	窒素使用量	-1.0%	-1.0%	-0.9%
	リン酸塩（P205）使用量	-0.2%	-0.2%	-0.2%
	カリウム（K20）使用量	-0.04%	-0.03%	-0.05%

シナリオ2では、2022～2040年の同予測期間のベースライン予測に対して、小麦生産者価格に対する肥料価格の割合が上昇し、インドにおける小麦生産における窒素、リン酸、カリウムの平均使用量は、同期中のベースライン予測の平均値に比べて、それぞれ21.2%、8.2%、4.5%減少することが予測され(第5表)、インドの小麦単収と生産量の平均値は、予測期間中のベースライン予測の平均値と比較して、それぞれ3.9%、8.4%減少することが予測された(第6表)。シナリオ2では、インドにおける化学肥料補助金の単価が予測期間中も維持されるため、化学肥料使用量、小麦の単収、生産量の減少率は、シナリオ1の減少率に比べて低い予測結果となった。このため、2022～2040年のベースライン予測平均値に比べて、世界の小麦生産量及び小麦消費量の平均値は1.6%減少、世界の小麦輸出量と小麦輸入量の平均値は0.5%減少し、国際小麦価格の平均値は109.0%上昇する予測結果となった(第7表)。

シナリオ3の設定により、インドの小麦生産における窒素、リン酸塩、カリウムの平均使用量は、予測期間におけるベースライン予測の平均値に比べて、それぞれ22.7%、10.8%、7.2%減少することが予測された(第5表)。このため、同期間におけるインドの小麦単収と生産量の平均値は、2022～2040年のベースライン予測平均値と比較して、それぞれ4.6%、10.2%減少することが予測された(第6表)。シナリオ3におけるインドの小麦生産における化学肥料使用量、小麦の単収、生産量の減少率は、シナリオ1及び2の予測結果よりも高い予測結果になった。このため、2022～2040年のベースライン予測平均値に比べて、世界の小麦生産量及び消費量の平均値は1.6%減少、世界の小麦の輸出量及び輸入量の平均値は0.9%減少し、国際小麦価格の平均値は117.7%上昇することが予測された(第7表)。

インドとウクライナにおける小麦単収を決定するカリウム使用量の説明変数の値は、ロシアとカナダの説明変数の値に比べて低いものの、インドとウクライナの小麦単収を決定する窒素使用量の説明変数の値は、他の国の説明変数の値に比べてはるかに高い。また、ウクライナの小麦単収を決定するリン酸塩使用量の説明変数の値も他の国の説明変数の値に比べて高い⁽²¹⁾。そして、小麦生産における各化学肥料使用量は、国内小麦生産者価格に対する国内各化学肥料価格比と負の相関がある⁽²²⁾。このため、シナリオ1を設定した結果、各国内の小麦生産者価格に対する尿素、リン酸二アンモニウム、重過リン酸石灰、カリウムの価格比は上昇すると予測され、これらの価格比の上昇は、ウクライナ及びインドにおける小麦生産における窒素、リン酸塩、カリウムの使用量を減少させることにつながる。本研究による3つのシナリオを設定した結果、インド及びウクライナの小麦生産における予測期間(2022～2040年)の各化学肥料使用量と単収の減少率は、他の国に比べて高い結果となった(第5表)。従って、インドとウクライナは、本研究で対象とした主要小麦生産国・地域のうち、国際化学肥料価格上昇の影響度が最も大きい小麦生産国であることが予測結果から得られた。

2019/21～2040年の国際小麦価格の変動係数(CV)は、各シナリオ予測結果がベースライン予測結果(0.3975)よりも高く、シナリオ1のCVは1.0931、シナリオ2のCVは1.0578、シナリオ3のCVは1.1156と算出された(第8表)。このように、シナリオ3のCVが全シナリオの中で最も高い予測結果となった。このため、シナリオ2のように、インドの化学

肥料補助金単価を現状の水準で維持することは、小麦の国際価格安定に寄与することが予測結果から得られた。

第6表 世界小麦生産量変化率（2022～2040年平均：シナリオ/ベースライン）

	シナリオ1 (2022-2040)	シナリオ2 (2022-2040)	シナリオ3 (2022-2040)
単収			
アルゼンチン	-0.2%	-0.2%	-0.2%
豪州	0.0%	0.0%	0.0%
カナダ	-1.9%	-1.9%	-1.9%
中国	-0.7%	-0.7%	-0.7%
エジプト	-0.9%	-0.9%	-0.9%
フランス	-0.4%	-0.4%	-0.3%
ドイツ	-0.5%	-0.5%	-0.4%
その他EU	-0.2%	-0.2%	-0.2%
インド	-4.2%	-3.9%	-4.6%
ロシア	-1.1%	-1.1%	-1.0%
ウクライナ	-3.5%	-3.5%	-3.5%
米国	0.0%	0.0%	0.0%
その他世界	0.8%	0.7%	0.8%
収穫面積			
アルゼンチン	53.5%	53.2%	53.7%
豪州	-1.4%	-1.5%	-1.3%
カナダ	-1.8%	-2.0%	-1.7%
中国	-1.1%	-1.2%	-1.0%
エジプト	-10.7%	-10.8%	-10.7%
フランス	3.5%	3.4%	3.6%
ドイツ	-0.6%	-0.8%	-0.5%
その他EU	-4.8%	-4.9%	-4.7%
インド	-5.5%	-4.7%	-5.9%
ロシア	-14.0%	-14.1%	-14.0%
ウクライナ	2.4%	2.2%	2.6%
米国	7.6%	7.4%	7.7%
その他世界	1.9%	1.8%	2.0%
生産量			
世界	-1.6%	-1.6%	-1.6%
アルゼンチン	53.2%	52.9%	53.4%
豪州	-1.4%	-1.5%	-1.3%
カナダ	-3.9%	-4.1%	-3.7%
中国	-1.7%	-1.8%	-1.6%
エジプト	-11.5%	-11.6%	-11.4%
EU	-2.4%	-2.5%	-2.3%
フランス	3.2%	3.1%	3.3%
ドイツ	-0.9%	-1.1%	-0.8%
その他EU	-5.0%	-5.1%	-4.9%
インド	-9.5%	-8.4%	-10.2%
ロシア	-14.8%	-15.0%	-14.7%
ウクライナ	1.9%	1.7%	2.1%
米国	7.6%	7.4%	7.7%
その他世界	2.9%	2.7%	3.0%

第7表 世界小麦需給市場の変化率 (2022~2040年平均：シナリオ/ベースライン)

	2022-2040年変化率 (シナリオ1/ベース ライン)	2022-2040年変化 率 (シナリオ2/ ベースライン)	2022-2040年変化 率 (シナリオ3/ ベースライン)
世界			
生産量	-1.6%	-1.6%	-1.6%
需要量	-1.6%	-1.6%	-1.6%
輸出量	-0.7%	-0.5%	-0.9%
輸入量	-0.7%	-0.5%	-0.9%
国際小麦価格	114.2%	109.0%	117.7%

第8表 ベースライン予測，各シナリオ予測による国際小麦価格への影響
(2019/21-2040)

シナリオ/ベースライン 予測	変動係数 (CV)	標準偏差	平均
ベースライン予測	0.3975	153.1202	385.1603
シナリオ1	1.0931	1,049.6084	960.2177
シナリオ2	1.0578	983.9689	930.1956
シナリオ3	1.1156	1,094.3354	980.9760

4. 結論

本研究では、化学肥料価格の上昇が世界の小麦需給及び価格への影響に加え、化学肥料価格が上昇する状況において、インドの化学肥料補助金が世界の小麦需給及び国際価格に与える影響について影響試算を行った。本研究では、化学肥料価格の上昇が各国における国内小麦生産者価格に対する化学肥料価格比の上昇を通じて、小麦生産における各化学肥料使用量の減少、そして小麦の単収を減少させることを明らかにし、化学肥料価格上昇が小麦生産の減少につながる予測結果となった。このような化学肥料価格の上昇は、小麦生産における化学肥料使用量、小麦単収、作付面積の変化を通じて世界小麦需給に影響を与えることが予測された。さらに、全てのシナリオで、化学肥料価格の上昇は国際小麦価格を上昇させ、価格が不安定化する予測結果が得られた。特に、シナリオ2のように、インドにおける化学肥料補助金の現状水準の維持は、化学肥料使用量、小麦単収、生産量、輸出量の減少を緩和することによって、国際小麦価格の変動緩和に寄与することが影響試算結果から得られた。一方、シナリオ3のケースのように、インドの化学肥料補助金が今後、更に低下する場合、国際小麦価格が更に変動する影響試算結果となった。以上の部分均衡需給予測モデルによる影響試算の結果、インドにおける化学肥料補助金の現行水準の維持は、化学肥料価格が上昇する状況下、中長期的に国際小麦価格の安定に寄与することを明らかにした。このように、化学肥料補助金制度は、化学肥料価格上昇による世界小麦需給

への影響を緩和するために効果的な政策であることが本研究によって改めて確認された。

また、全てのシナリオのうち、予測期間中のインド及びウクライナの小麦生産における化学肥料使用量と小麦単収の減少率は、他の国・地域の減少率を上回る結果となった。このように、インド及びウクライナは、本研究が対象とする主要小麦生産国・地域の中で、化学肥料価格上昇によって最も大きな影響を受ける生産国であることが結論として得られた。また、シナリオ2のように、予測期間中、インドの化学肥料補助金が現状の水準で維持される場合、ウクライナにおける小麦生産における窒素とカリウム使用量の減少率は、インドや他の国・地域の減少率を上回る予測結果となった。こうした化学肥料価格上昇による世界小麦需給への影響を緩和する政策的手法として、インドには化学肥料補助金制度が整備されているものの、ウクライナにはこうした制度が整備されていない状態にある。このため、ウクライナに対して、人道的支援に加えて、化学肥料価格上昇による国際小麦等の農産物価格の上昇及び変動を緩和するための政策支援や国際的協力が必要であると考える。

本研究では化学肥料価格上昇による世界小麦需給に与える影響試算を行ったが、今後の研究課題としては小麦以外の世界穀物等需給に与える影響試算を行うことが必要である。また、今回の影響試算により、各シナリオの変動係数と標準偏差は、ベースライン値よりもかなり高い値を示した。このため、今後の研究課題として、価格変動に関する他の分析方法を検討することも必要である。さらに、本研究では2018年における小麦生産における各化学肥料使用割合が予測期間中一定であることを前提としたが、今後の課題として、これらの割合についても内生変数とすることが必要である。

注 (1) 本研究では、World Bank (2023)による塩化カリウムの価格を使用しているが、本研究では全てカリウムに統一して使用する。

(2) 2024年4月現在。

(3) 小麦国際価格の変動係数 (CV) は、1985年から1995年まで0.1664、1996年から2005年まで0.2425、2006年から2015年まで0.2645、2016年1月から2022年7月まで0.3583であった。World Bank (2022)の月次小麦価格 (Wheat, No. 1 Hard Red Winter, ordinary protein, Kansas City)より算出。

(4) フードセキュリティの定義は、2009年のWorld Summit on Food Securityにおいて合意された「全ての人がいかなる時にも、彼らの活動的で健康的な生活を営むために必要な食生活のニーズと嗜好に合致した十分かつ安全で、栄養のある食料を物理的にも社会的にも経済的にも入手可能であるときに達成される」である (FAO, 2009)。

(5) 詳細については、Koizumi (2024) の付属表 A1-1, A1-2, A1-3 を参照されたい。

(6) 詳細については、Koizumi (2024) の付属表 A2-1, A2-2, A2-3 を参照されたい。

(7) 詳細については、Koizumi (2024) の付属表 A3-1, A3-2, A3-3 を参照されたい。

(8) DAP (diammonium phosphate), spot, f.o.b. US Gulf を使用。

(9) TSP (triple superphosphate), spot, import US Gulf を使用。

(10) Urea, (Ukraine), prill spot f.o.b. Middle East, beginning March 2022; previously, f.o.b. Black Sea を使用。

(11) Potassium chloride (muriate of potash), Brazil CFR granular spot price from January 2020; previously, f.o.b. Vancouver を使用。

(12) 詳細については、Koizumi (2024) の付属表 A4-1, A4-2, A4-3 を参照されたい。

- (13) 詳細については、Koizumi (2024) の付属表 A5-1, A5-2, A5-3 を参照されたい。
- (14) 単位根検定 (ADF 検定) の結果、本研究で用いた被説明変数と説明変数の時系列データは定常系列であることが確認された。
- (15) ベースライン予測及びシナリオの気候変数 (気温, 降水量, 日射量) は、RCP4.5 シナリオの地球気候モデルである MIROC (Model for Interdisciplinary Research on Climate) の気候変動予測に基づく。各国の平均された気候変数は、説明変数の推計のための回帰分析に用いられた過去の気候データと同様に計算されている。詳細な気候変数については、Koizumi (2019) を参照されたい。本研究では、予測期間を通じて全ての国・地域で耕作放棄地がゼロであることを前提とした。
- (16) 全ての国の人口データは、国連の「世界人口見通し 2022 年改訂版 (中位版)」(World Population Prospects, United Nations (2022)) から入手した。1 人当たり実質 GDP も外生変数として扱い World Economic Outlook 2022 (IMF, 2022) に基づく。これらの 1 人当たり GDP 成長率は 2027 年まで予測されているため、本研究では各国・地域の 2022 年から 2027 年までの平均 1 人当たり GDP 年平均成長率を、2028 年から 2040 年の年平均変化率に適用した。競合農産物価格は、OECD-FAO Agricultural Outlook 2022-2031 (OECD-FAO, 2022) のデータを使用した。
- (17) これらの農業投資データは OECD (2022) を使用した。
- (18) 詳細については、Koizumi (2024) の付属表 A6-3 を参照されたい。また、エジプトとパキスタン (その他の地域) における 1990 年から 2007 年までの農地開発投資と農業機械・設備投資の年平均成長率を予測期間中に適用した。これらの農業投資データは FAOSTAT (FAO, 2022) を使用した。
- (19) 2019/21 年におけるインド, フランス, ドイツ, 中国の小麦収量はそれぞれ 3.5, 7.2, 7.4, 5.7MT/ha であった (第 4 表)。
- (20) 国内小麦生産者価格上昇により 1 期後の小麦作付面積増加に寄与したことによるもの。
- (21) Koizumi (2024) の付属表 A4-2 and A4-3 を参照されたい。
- (22) Koizumi (2024) の付属表 A1-1, A1-2, A1-3, A2-1, A2-2, A2-3, A3-1, A3-2, A3-3 を参照されたい。

追記

本研究資料は、JARQ Vol.58.No.2 から刊行された Koizumi, T. "Impacts of fertilizer price and subsidy on the global wheat market" DOI: <https://doi.org/10.6090/jarq.58.93> を和文訳し、一部解説を加えたものである。

謝辞

世界各国の気候変動に関する実績及び予測データを提供いただいた国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構農業環境変動研究センターの西森基貴博士に感謝する。また、世界各国の化学肥料データ使用量データを提供いただき、貴重な技術的助言をいただいた国立研究開発法人国際農林水産業研究センター (JIRCAS) の吉橋忠博士, レオン愛博士, 南雲不二男博士, 古家淳博士, 草野栄一博士, 農林水産政策研究所の古橋元博士に感謝する。また, "Impacts of fertilizer price and subsidy on the global wheat market" 刊行に際して、匿名の査読者からいただいた重要かつ貴重なコメントにも感謝する。

[引用文献]

- Adams, R.M., A.Gordon., A. King., W.E. Johnston (1977) Effects of energy cost increases and regional allocation policies on agricultural production. *American Journal of Agricultural Economics* 76: 444-455.
- Brunelle, T., P.Dumas., F.Souty., B.Dorin., F.Nadaud (2015) Evaluating the impact of rising fertilizer prices on crop yields. *Agricultural Economics* 46:653-666.
- Burrell, A (1989) The demand for fertilizer in the United States. *Journal of Agricultural Economics* 40: 1-20.
- Food and Agricultural Organization (FAO) (2009) Declaration of the World Summit on Food Security, https://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/Summit/Docs/Final_Declaration/WSFS09_Declaration.pdf. (accessed on December 1 2023).
- Food and Agricultural Organization (FAO) (2022) FAOSTAT, <https://www.fao.org/faostat/en/#home> (accessed on 3 July, 2022).
- 速水佑次郎 (1973) 『日本農業の成長過程』 創文社.
- Headey, D. and S. Fan (2008) Anatomy of a crisis: the causes and consequences of surging food Prices, *Agricultural Economics* 39: 375-391.
- Hebebrand, C. and D. Laborde (2022) High fertilizer prices contribute to rising global food security concerns, <https://www.ifpri.org/blog/high-fertilizer-prices-contribute-rising-global-food-security-concerns> (accessed on 1 July 2022).
- International Fertilizer association (IFA) (2022) IFASTAT, <https://www.ifastat.org/> (accessed on 11 July 2022).
- International Monetary Fund (IMF) (2022) World Economic Outlook Database, <https://www.imf.org/en/Publications/WEO/weo-database/2024/April> (accessed on 3 July, 2022).
- Koizumi, T (2019) Impact of agricultural investments on world wheat market under climate change: effects of agricultural knowledge and innovation system, and development and maintenance of infrastructure. *Japan Agricultural Research Quarterly (JARQ)* 53:109-125. <https://doi.org/10.6090/jarq.53.109>
- Koizumi, T (2024) Impacts of fertilizer price and subsidy on the global wheat market. *Japan Agricultural Research Quarterly (JARQ)* 58(2): 93-111. <https://doi.org/10.6090/jarq.58.93>
- Ministry of Chemical and Fertilizer in India (2022) P and K fertilizers. <https://www.fert.nic.in/p-and-k-fertilizers> (accessed on 12 August 2022).
- Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) - Food and Agricultural Organization (FAO) (2022) OECD-FAO Agricultural Outlook 2022-2031, <https://www.fao.org/3/cc0308en/cc0308en.pdf> (accessed on 18 July, 2022).
- Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) (2022) General Service support estimates, <https://stats.oecd.org/glossary/detail.asp?ID=1100> (accessed on 2 July, 2022).
- Stewart, W.M., D.W. Dibb., A.E. Johnston., T.J. Smyth (2005) The contribution of commercial fertilizer nutrients to food production. *Agronomy Journal* 97: 1-6.
- United Nations (2022) World population prospects, 2022 revision, <https://population.un.org/wpp/> (accessed on 1 June, 2022).
- United States Department of Agriculture & Foreign Agricultural Service (USDA-FAS, 2022) PS&D, <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/home> (accessed on 8 July, 2022).
- Wijetunga, C.S. and K.Saito (2017) Evaluating the fertilizer subsidy reforms in the rice production sector in Sri Lanka: A simulation analysis. *Advances in Management and Applied Economics* 7: 31-51.
- World Bank (2021) Commodity markets outlook, urbanization and commodity demand. <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/36350/CMO-October-2021.pdf>.

(accessed on 20 June, 2022).

World Bank (2022) Commodity markets outlook, the impact of the war in Ukraine on commodity markets.

<https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/37223/CMO-April-2022.pdf>. (Accessed on 18 June, 2022).

World Bank (2023) World Bank Commodity Price Data.

<https://www.worldbank.org/en/research/commodity-markets>. (Accessed on 12 December, 2023).

山口三十四 (1983) 「農業発展と肥料投入」 『国民経済雑誌』 148(2): 72-91.

2024年6月21日更新