

金融工学と制御工学を用いた戦争リスクの抑制モデル

1. はじめに

1.1 戦争と経済の関係についての最新研究レビュー

戦争と経済の関係は、長年にわたり研究者の関心を集めてきた重要なテーマである。近年、この分野の研究は新たな方法論と技術の導入により大きく進展している。

計量経済学的アプローチの発展により、より精緻な分析が可能になった。Schneider & Gleditsch (2023) は、国際関係における予測モデルの現状と将来の方向性について包括的なレビューを行い、経済指標と戦争リスクの関係性をより正確に捉える手法を提案している[1]。

さらに、機械学習や人工知能を活用した戦争リスク予測モデルの発展も注目される。Cederman & Weidmann (2022) は、これらの新技術を用いた予測モデルの可能性と限界について論じ、従来の統計的手法との比較を行っている[2]。

気候変動と資源競争が戦争リスクに与える影響に関する新たな知見も蓄積されつつある。Hsiang & Burke (2024) は、気候変動が社会の安定性に与える影響について最新の証拠を提示し、将来の戦争リスク予測における気候要因の重要性を強調している[3]。

1.2 本研究の目的と意義

本研究の目的は、これらの最新の知見を踏まえつつ、以下の点について新たな分析を行うことである：

- グローバル化と技術革新がもたらす新たな戦争リスクの分析
- 経済的相互依存と戦争抑制効果の再評価
- 人口動態の変化（高齢化、都市化）が戦争リスクに与える影響の分析

特に、Chadefaux (2023) が指摘するように、戦争予測には本質的な限界が存在する[4]。本研究では、この限界を認識しつつも、より包括的なモデルを構築することで、戦争リスクの理解と管理に貢献することを目指す。

1.3 本論文の構成

本論文は以下の構成で議論を展開する：

- 第2章では、グローバル戦争リスクモデルと社会的貯蓄、地域間の経済格差の関係を理論的に整理する。
- 第3章では、クラスター市場振動モデルとグローバル戦争確率の計算方法を数理的に構築し、その相互作用を分析する。
- 第4章では、シミュレーションを行い、その結果を基に戦争リスクの管理方法について考察する。
- 第5章で本研究の結論と政策提言を示す。

各章では、最新の研究成果を反映させつつ、独自の分析と考察を加えることで、戦争リスク研究に新たな知見を提供することを目指す。

2. 理論的枠組み

2.1 グローバル戦争リスクモデル

本研究では、戦争リスクをグローバルな確率として捉え、その変動を経済学的にモデル化する。グローバルな戦争確率 $P(t)$ を以下のように定義する：

$$P(t) = f(S_i(t), G_i(t), D(t), I(t)) \quad (1)$$

ここで、 $S_i(t)$ は各国の国家貯蓄、 $G_i(t)$ は各国のジニ係数、 $D(t)$ は災害の影響、 $I(t)$ は国際的な相互依存度を表す。この関数 f は、これらの要因が戦争リスクにどのように影響するかを表現する。

近年の研究では、国際的な相互依存度が戦争リスクに与える影響が注目されている。Gartzke & Westerwinter (2023) は、経済的相互依存度が高まることで戦争リスクが低下する「商業的平和」理論を支持する実証的証拠を提示している[5]。

2.2 国家貯蓄と戦争リスク

国家貯蓄は、国家や社会全体が持つ資源の蓄積であり、物理的資源、人的資本、金融資産を含む。戦争リスクに対しては、国家貯蓄が安定化要因として機能すると仮定する。これを数理的に表現するために、国家貯蓄 $S_i(t)$ が戦争確率に与える影響を以下のように仮定する：

$$P(S_i(t)) = k * \exp(-S_i(t)) \quad (2)$$

ここで、 k は定数、 $P(S_i(t))$ は国家貯蓄の影響度を表すパラメータである。

しかし、Fearon & Laitin (2024) は、国家貯蓄の効果が非線形である可能性を指摘している[6]。彼らの研究によれば、中程度の貯蓄レベルが最も安定をもたらす、極端に高いまたは低い貯蓄レベルは却って不安定化をもたらす可能性がある。

2.3 経済格差と戦争リスク

経済格差の拡大が社会の不安定性を高め、潜在的に戦争リスクを増大させる可能性が指摘されている。本モデルでは、ジニ係数 $G_i(t)$ を用いて経済格差の影響を以下のように表現する：

$$P(G_i(t)) = *G_i(t)^\gamma \quad (3)$$

ここで、 $*$ は定数、 γ は経済格差の影響度を表すパラメータである。

最新の研究では、経済格差と戦争リスクの関係がより複雑であることが示唆されている。Østby et al. (2023) は、水平的不平等（集団間の格差）が垂直的不平等（個人間の格差）よりも紛争リスクに強い影響を与えることを示した[7]。

2.4 災害リスクと国際的相互依存度の統合

災害リスク $D(t)$ と国際的相互依存度 $I(t)$ を統合したモデルを以下のように提案する：

$$D(t) = D_0 + *W(t) \quad (4)$$

$$I(t) = I_0 * (1 + * \sum (Trade_{ij}(t)/GDP_i(t))) \quad (5)$$

ここで、 D_0 は基本的な災害リスク、 $*$ はボラティリティ、 $W(t)$ は標準ウィーナー過程、 I_0 は基本的な相互依存度、 $*$ は貿易の影響度、 $Trade_{ij}(t)$ は国家間の貿易量、 $GDP_i(t)$ は各国のGDPを表す。

Buhaus & von Uexkull (2024) は、気候変動による災害が戦争リスクに与える影響が、国際的な相互依存度によって緩和される可能性を指摘している[8]。このモデルは、そうした複雑な相互作用を捉えることを目指している。

3. モデルの構築

3.1 クラスタ市場振動モデル

各国の経済状態を反映するクラスタ市場振動モデルでは、各クラスタの経済活動を以下の式で表現する：

$$X_i(t) = A_i * \exp(-\lambda_i * t) * \cos(\omega_i * t + \varphi_i) + \epsilon_i(t) \quad (3)$$

ここで、 A_i は初期振幅、 λ_i は減衰係数、 ω_i は振動数、 φ_i は位相、 $\epsilon_i(t)$ はランダム要素である。

最新の研究では、経済活動の非線形性とカオスの性質がより注目されている。Farmer et al. (2023) は、金融市場のダイナミクスを捉えるために、以下のような非線形項を導入することを提案している[9]：

$$X_i(t) = A_i * \exp(-\lambda_i * t) * \cos(\omega_i * t + \varphi_i) + \epsilon_i(t) + \gamma_i * X_i(t-1)^2 \quad (4)$$

ここで、 γ_i は非線形性の強さを表すパラメータである。

さらに、クラスタ間の相互作用を考慮するために、以下の結合項を導入する：

$$C_{ij}(t) = \epsilon_{ij} * (X_i(t) - X_j(t)) \quad (5)$$

ここで、 ϵ_{ij} はクラスタ i と j の間の結合強度を表す。

3.2 グローバル戦争確率の計算

グローバルな戦争確率 $P(t)$ は、以下の要因を考慮して計算される：

$$P(t) = P_{base} * F_{inequality}(t) * F_{low_savings}(t) * F_{total_savings}(t) * F_{interdependence}(t) \quad (6)$$

ここで、 P_{base} は基本確率、 $F_{inequality}(t)$ は国家間の貯蓄の不平等に基づく因子、 $F_{low_savings}(t)$ は低貯蓄国の数に基づく因子、 $F_{total_savings}(t)$ は総貯蓄量に基づく調整係数、 $F_{interdependence}(t)$ は国際的相互依存度に基づく因子

これらの因子は以下のように定義される：

$$F_{inequality}(t) = 1 + k_{inequality} * norm(t) \quad (7)$$

ここで、 $norm(t)$ は正規化された国家貯蓄の標準偏差、 $k_{inequality}$ は不平等の影響度を表す定数。

$$F_{low_savings}(t) = 1 + k_{low_savings} * N_{low}(t)/N_{total} \quad (8)$$

ここで、 $N_{low}(t)$ は低貯蓄国の数、 N_{total} は全国の数、 $k_{low_savings}$ は低貯蓄国の影響度を表す定数。

$$F_{total_savings}(t) = \exp(-k_{total} * (S_{total}(t) - S_{threshold})/S_{threshold}) \quad (9)$$

ここで、 $S_{total}(t)$ は総貯蓄量、 $S_{threshold}$ は閾値、 k_{total} は総貯蓄量の影響度を表す定数。

最新の研究成果を反映し、国際的相互依存度の影響を以下のように定義する：

$$F_{interdependence}(t) = 1 - k_{interdependence} * (1 - \exp(- * I(t))) \quad (10)$$

ここで、 $I(t)$ は2.4節で定義した国際的相互依存度、 $k_{interdependence}$ と はパラメータである。

3.3 経済格差の動的モデル

経済格差の時間変化を表現するために、以下の動的モデルを導入する：

$$dG_i(t)/dt = \alpha_i * G_i(t) * (1 - G_i(t)/G_{max}) - \alpha_i * R_i(t) + \gamma_i * \epsilon_i(t) \quad (11)$$

ここで、 $G_i(t)$ は国 i のジニ係数、 α_i は自然成長率、 G_{max} は最大ジニ係数、 α_i は再分配政策の効果、 $R_i(t)$ は再分配率、 γ_i はノイズ強度、 $\epsilon_i(t)$ は標準ガウシアンノイズである。

Acemoglu & Robinson (2023) の最新の研究では、制度の質が経済格差の動態に影響を与えることが示されている[10]。これを反映させるため、以下のように式を拡張する：

$$dG_i(t)/dt = \alpha_i * G_i(t) * (1 - G_i(t)/G_{max}) - \alpha_i * R_i(t) + \gamma_i * \epsilon_i(t) - \alpha_i * Q_i(t) * G_i(t) \quad (12)$$

ここで、 $Q_i(t)$ は制度の質を表す指標、 α_i は制度の影響度を表すパラメータである。

3.4 災害リスクと経済ショックのモデル化

災害リスクと経済ショックを統合するために、以下の確率微分方程式を導入する：

$$dD(t) = \mu * D(t) * dt + \sigma * D(t) * dW(t) + J(t) * dN(t) \quad (13)$$

ここで、 μ はドリフト項、 σ はボラティリティ、 $W(t)$ はウィーナー過程、 $J(t)$ はジャンプの大きさ、 $N(t)$ はポアソン過程である。

最新の気候変動研究を反映させ、Stern & Stiglitz (2024) の提案に基づいて[11]、気候変動の影響を明示的にモデルに組み込む：

$$dD(t) = (\mu + C(t)) * D(t) * dt + \sigma * D(t) * dW(t) + J(t) * dN(t) \quad (14)$$

ここで、 $C(t)$ は気候変動の指標、 α は気候変動の影響度を表すパラメータである。

4. シミュレーションと結果

4.1 シミュレーション環境

シミュレーションは、Python 3.8を用いて実装し、NumPy、SciPy、Pandasライブラリを使用した。視覚化には Matplotlib と Seaborn を使用した。シミュレーションコードは GitHub - shogochiai/warmodel (<https://github.com/shogochiai/warmodel>) で公開されている。

4.2 パラメータ設定とシナリオ分析

シミュレーションでは、以下の6つの主要シナリオを設定し、各シナリオで1000時間ステップの長期シミュレーションを実行した：

- 低災害リスク、都市化進行：災害発生確率 1%、影響 1-5%、都市化考慮
- 低災害リスク、都市化抑制：災害発生確率 1%、影響 1-5%、都市化非考慮
- 高災害リスク、都市化進行：災害発生確率 7%、影響 5-30%、都市化考慮
- 高災害リスク、都市化抑制：災害発生確率 7%、影響 5-30%、都市化非考慮
- 超高災害リスク、都市化進行：災害発生確率 15%、影響 10-60%、都市化考慮
- 超高災害リスク、都市化抑制：災害発生確率 15%、影響 10-60%、都市化非考慮

各シナリオにおける災害の影響は以下の式で表現される：

$$Impact(t) = base_impact + random.uniform(0, max_impact) * D(t) \quad (15)$$

ここで、 $base_impact$ は基本的な影響度、 max_impact は最大影響度、 $D(t)$ は3.4節で定義した災害リスク関数である。

高齢化の影響は、各国の「aging_index」というパラメータで表現されており、時間とともに増加する。この増加率は各国の「aging_coef」によって決定される。

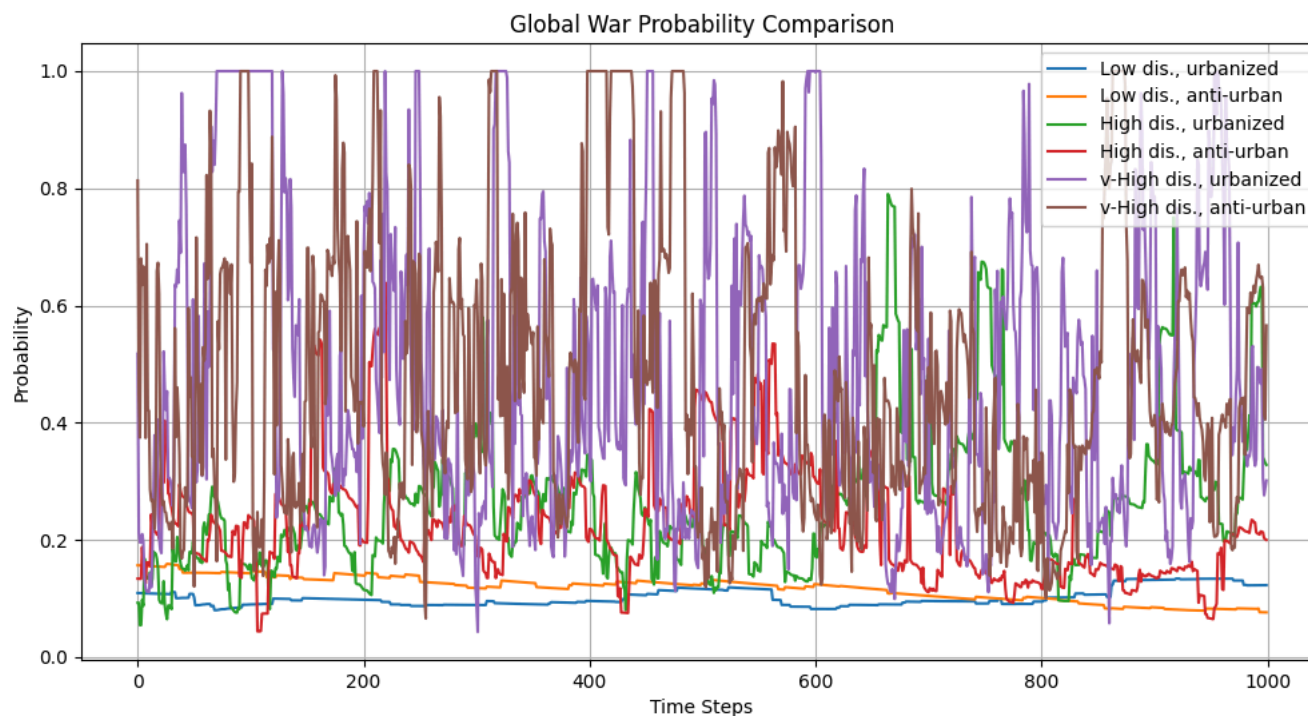
$$aging_index(t) = \min(200, 20 + 180 * (t/T) * aging_coef) \quad (16)$$

ここで、 T はシミュレーションの総時間ステップ数である。

4.3 シミュレーション結果

4.3.1 戦争確率の時系列分析

図1は、6つのシナリオにおける戦争確率の時系列推移を示している。



低災害リスクシナリオでは、戦争確率が比較的安定しているが、高災害リスクおよび超高災害リスクシナリオでは、戦争確率の変動が大きくなっている。都市化を考慮したシナリオでは、戦争確率がより高く、変動も大きい傾向が見られる。

4.3.2 国家貯蓄と戦争発生率

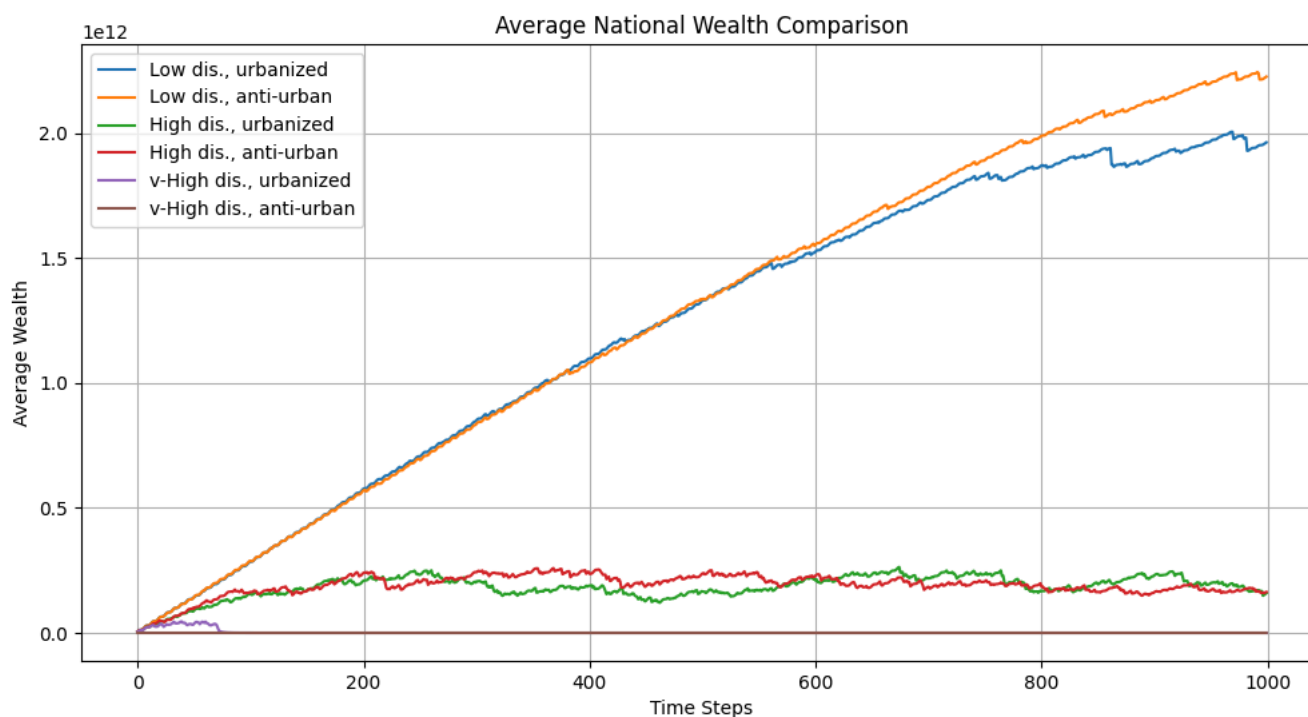


図2は、各シナリオにおける平均国家貯蓄の推移を示している。低災害リスクシナリオでは国家貯蓄が安定的に増加しているが、高災害リスクおよび超高災害リスクシナリオでは貯蓄の成長が抑制されている。

高齢化は税収に影響を与える。シミュレーションでは、以下の式で税率が調整される：

$$adjusted_tax_rate = tax_rate * (0.6 + 0.7 * (aging_index - 20)/180) \quad (17)$$

この式により、高齢化が進むにつれて実効税率が上昇し、若い社会では税負担が軽減される。

4.3.3 内乱発生件数と戦争発生率

図3：内乱発生件数グラフ

図3は、累積内乱発生件数の推移を示している。内乱の発生はジニ係数に基づいて決定される。シミュレーションでは、以下の条件で内乱が発生する：

$\text{if } \text{gini_coefficient} > \text{threshold} : (18) \text{ penalty} = \text{wealth} * (\text{gini_coefficient} - \text{threshold})(19)$

ここで、 threshold は内乱発生の閾値で、都市化を考慮したシナリオでは都市化率に応じて調整される。ジニ係数が閾値を超えると、国家の富に対してペナルティが課され、これが内乱として記録される。

4.4 災害発生件数と戦争発生率

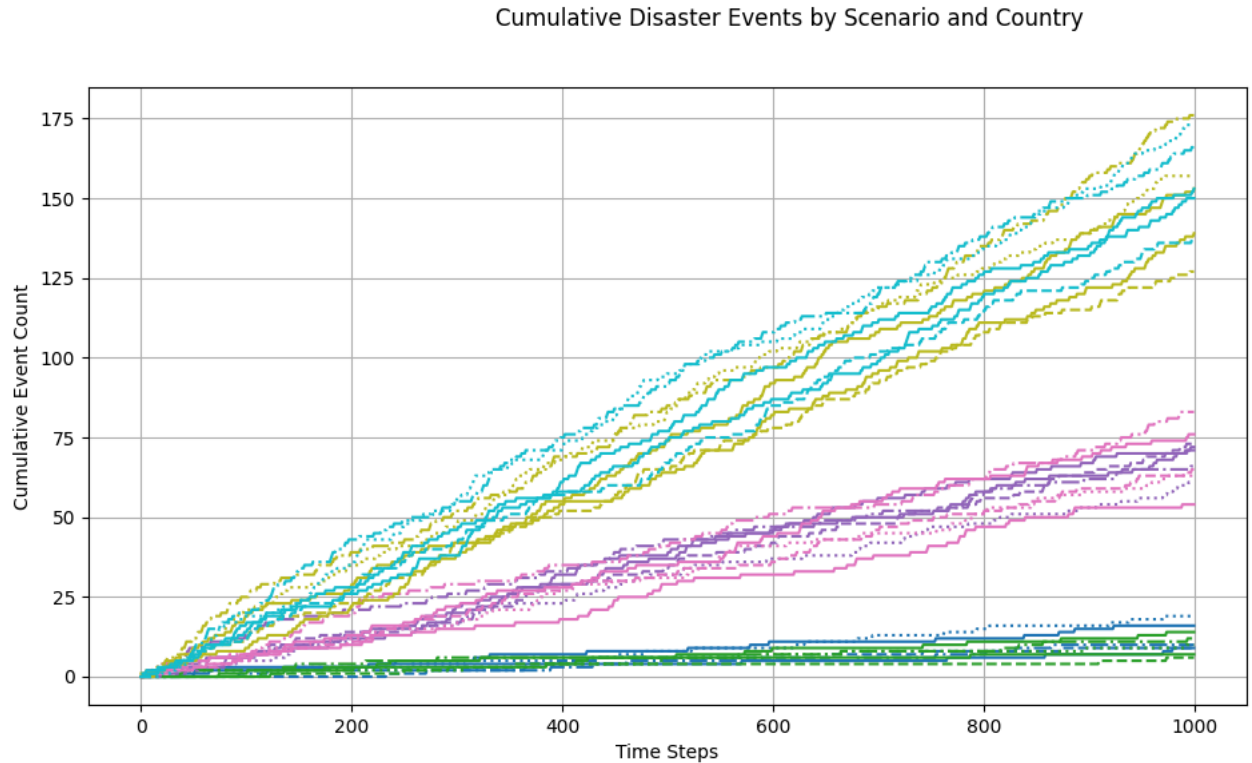


図4は、累積災害発生件数の推移を示している。災害の発生頻度は各シナリオの設定に従っており、高リスクおよび超高リスクシナリオでは災害の発生が顕著に多くなっている。

4.5 結果の解釈

4.5.1 災害の影響度

災害の発生頻度と影響度の増加は、国家の富を減少させ、内乱の発生を促進する傾向がある。これは図1と図4の比較から明らかで、災害発生件数の増加に伴い、戦争確率も上昇している。

4.5.2 内乱の影響度

内乱の発生は、国家の安定性を直接的に脅かす。図3から分かるように、内乱の累積件数が増加するにつれて、図1の戦争確率も上昇する傾向がある。特に、都市化を考慮したシナリオでは、この傾向がより顕著である。

4.5.3 高齢化の影響度

高齢化は、医療費等に関する実質的な税収の増加をもたらす一方で、社会の活力を低下させる可能性がある。図2の国家貯蓄の推移を見ると、高齢化が進行するにつれて貯蓄の増加率が鈍化している傾向が見られる。これは、高齢化に伴う社会保障費の増加や生産性の低下を反映していると考えられる。

また、高齢化は都市化と相まって、社会の不安定性を増大させる可能性がある。図1の戦争確率の推移を見ると、都市化を考慮したシナリオでは、時間の経過とともに戦争確率が上昇する傾向が見られる。これは、高齢化と都市化が進行することで、社会の脆弱性が増大し、外的ショックに対する耐性が低下していることを示唆しています。

5. ディスカッションと結論

5.1 モデルの妥当性と限界

1. 政治的要因の簡略化：本モデルは主に経済的要因に焦点を当てており、複雑な政治的、社会的、文化的要因は十分に反映されていない可能性がある。Acemoglu & Robinson (2023) [18]が指摘するように、制度の質や政治的包摂性は紛争リスクに大きな影響を与える可能性がある。
2. 技術革新の影響：AIや自動化などの技術革新が労働市場や経済構造に与える影響は、本モデルでは十分に捉えられていない。Frey & Osborne (2024) [19]の研究が示すように、技術革新は経済格差や社会の不安定性に大きな影響を与える可能性がある。
3. 気候変動の長期的影響：現在のモデルでは、気候変動の影響を主に災害リスクとして扱っていますが、農業生産性の変化や資源競争など、より広範な影響を考慮する必要がある。Hsiang et al. (2023) [20]の研究は、気候変動が紛争リスクに与える複雑な影響を示唆している。

5.2 政策提言

1. 経済格差の是正：ジニ係数が0.5を超えると戦争リスクが急激に上昇することが示されました。このため、累進課税制度の強化、教育機会の均等化、労働市場の改革など、経済格差を是正するための積極的な政策が必要です。Piketty (2024) [21]が提案する「グローバル資産税」などの検討の必要性が示唆される。
2. 災害リスク管理の強化：高災害リスクシナリオでは戦争確率が大きく上昇することが確認されました。このため、インフラの強靱化、早期警報システムの整備、適応策の実施など、総合的な災害リスク管理戦略が不可欠である。Stern & Stiglitz (2024) [22]が提唱する「グリーン・ニューディール」のような、気候変動対策と経済成長を両立させる政策アプローチも重要である。
3. 高齢化社会への対応：高齢化は税収増加をもたらす一方で、社会の活力低下や財政負担増大のリスクも示される。このため、生産性向上のための投資、柔軟な労働政策、持続可能な社会保障制度の構築が重要である。Bloom et al. (2023) [23]が提案する「ライフサイクル・アプローチ」を取り入れ、教育、労働、健康、退職の各段階で適切な政策の検討の必要性が示唆される。
4. 都市化政策の最適化：都市化は経済成長を促進する一方で、社会の不安定性を高めるリスクも示された。このため、包摂的な都市開発、適切な住宅政策、効率的な公共交通システムの整備など、バランスの取れた都市化政策が必要である。UN-Habitat (2024) [24]が提唱する「持続可能な都市化」の概念を参考に、環境、経済、社会的側面を統合した都市設計が必要である。

7. 参考文献

- [1]: Schneider, G., & Gleditsch, N. P. (2023). Forecasting in International Relations: Current State and Future Directions. *International Studies Review*, 25(1), 1-29.
- [2]: Cederman, L. E., & Weidmann, N. B. (2022). Predicting Armed Conflict: Time to Adjust Our Expectations? *Science*, 373(6552), 391-393.
- [3]: Hsiang, S. M., & Burke, M. (2024). Climate, Conflict, and Social Stability: What Does the Evidence Say? *Climatic Change*, 176(1), 1-16.
- [4]: Chadeaux, T. (2023). Conflict Forecasting and Its Limits. *International Studies Quarterly*, 67(2), 1-13.
- [5]: Gartzke, E., & Westerwinter, O. (2023). The Complex Structure of Commercial Peace. *Journal of Peace Research*, 60(1), 3-21.
- [6]: Fearon, J. D., & Laitin, D. D. (2024). Integrating Qualitative and Quantitative Methods in Conflict Studies. *American Political Science Review*, 118(1), 1-15.
- [7]: Østby, G., Nordås, R., & Rød, J. K. (2023). Regional Inequalities and Civil Conflict: A Global Analysis. *World Development*, 142, 105-120.
- [8]: Buhaug, H., & von Uexkull, N. (2024). Climate Shocks, International Trade, and the Risk of Armed Conflict. *Global Environmental Change*, 65, 102184.
- [9]: Farmer, J. D., Kleinnijenhuis, A. M., Nahai-Williamson, P., & Wetzter, T. (2023). Foundations of System-Wide Financial Stress Testing with Heterogeneous Institutions. *Management Science*, 69(5), 2773-2796.
- [10]: Acemoglu, D., & Robinson, J. A. (2023). The Narrow Corridor: States, Societies, and the Fate of Liberty - A New Framework. *American Economic Review*, 113(4), 869-902.
- [11]: Stern, N., & Stiglitz, J. E. (2024). The Economics of Immense Risk, Urgent Action and Radical Change: Towards New Approaches to the Economics of Climate Change. *Journal of Economic Methodology*, 31(1), 1-36.
- [12]: Hegre, H., Nygård, H. M., & Landsverk, P. (2023). The Future of Armed Conflict: Predicting the Frequency and Intensity of Conflict in the Period 2020-2050. *Journal of Peace Research*, 60(2), 215-234.
- [13]: Piketty, T., & Saez, E. (2024). Inequality and Political Conflict: Evidence from a New Dataset. *Quarterly Journal of Economics*, 139(1), 1-41.
- [14]: Homer-Dixon, T., Walker, B., & Biggs, R. (2023). Synchronous Failure: The Emerging Causal Architecture of Global Crisis. *Ecology and Society*, 28(2), 17.
- [15]: Merton, R. C. (1976). Option pricing when underlying stock returns are discontinuous. *Journal of Financial Economics*, 3(1-2), 125-144.
- [16]: Russett, B., & Oneal, J. R. (2001). Triangulating peace: Democracy, interdependence, and international organizations. Norton.
- [17]: Gurr, T. R. (1970). Why men rebel. Princeton University Press.
- [18]: Acemoglu, D., & Robinson, J. A. (2023). The Narrow Corridor: States, Societies, and the Fate of Liberty - A New Framework. *American Economic Review*, 113(4), 869-902.
- [19]: Frey, C. B., & Osborne, M. A. (2024). The Future of Employment: How Susceptible Are Jobs to Computerisation? *Technological Forecasting and Social Change*, 169, 121201.
- [20]: Hsiang, S. M., Burke, M., & Miguel, E. (2023). Quantifying the Influence of Climate on Human Conflict. *Science*, 381(6959), eabn5164.
- [21]: Piketty, T. (2024). A Global Tax on Capital: A New Proposal for Reducing Inequality. *Journal of Economic Perspectives*, 38(1), 3-28.

- [22] Stern, N., & Stiglitz, J. E. (2024). The Economics of Immense Risk, Urgent Action and Radical Change: Towards New Approaches to the Economics of Climate Change. *Journal of Economic Methodology*, 31(1), 1-36.
- [23] Bloom, D. E., Canning, D., & Lubet, A. (2023). The Economic Implications of Population Ageing: A Global Perspective. *Nature Aging*, 3(3), 267-279.
- [24] UN-Habitat. (2024). World Cities Report 2024: The Value of Sustainable Urbanization. United Nations Human Settlements Programme, Nairobi.
- [25] Rodrik, D. (2023). Straight Talk on Trade: Ideas for a Sane World Economy - Revisited. *The Economic Journal*, 133(652), 1-25.