

平成 30 年 6 月 16 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K01237

研究課題名(和文) 産業事故発生メカニズムの解明と事故抑止のための生産システムの実験的検証

研究課題名(英文) Experimental verification of production systems to clarify the mechanism and prevention methods of industrial accidents

研究代表者

牧野 良次 (Makino, Ryoji)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エネルギー・環境領域・研究グループ付

研究者番号：90415745

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は1) Hausken (2002) が示したゲーム理論と確率的リスク分析の統合モデルをベースとして、それを現実の企業現場における生産システムや人的資源の配置が反映されるように拡張すること、2) 拡張されたモデルに基づいて事故リスク情報の開示などの安全対策の効果を経済実験によって検証することである。経済実験の結果、リスク情報の開示は人々の行動を調整し、その結果として安全対策に要するコストの低下と安全性向上を同時に達成する効果があるなどの、理論的分析では予測されなかった効果があることが発見した。

研究成果の概要(英文)：In this study, on the basis of the integrated model of game theory and probabilistic risk analysis presented by Hausken (2002), we extended it to reflect actual production systems and human resources at real company sites. We conducted economic experiments based on the extended model to examine the effects of safety enhancement measures such as risk information disclosure. Our experimental results show that risk probability disclosure has a positive effect. Subjects succeeded in improving the reliability of their production system while cutting back on efforts to reduce the risk of their system when the risk probability was disclosed.

研究分野：経済学、リスク評価、産業保安

キーワード：産業事故 リスク評価 経済実験 ゲーム理論

1. 研究開始当初の背景

2011年以降主に化学産業において重大事故の発生が多発している。産業事故の抑止は持続的な企業経営ひいては持続的な経済を維持する上で喫緊の課題である(石油コンビナート等災害防止3省連絡会議, 2014)。その理由は、産業事故による被害が従業員や周辺住民の死傷・周辺環境の汚染にとどまらず、設備破損や信用失墜に起因する企業価値の低下、サプライチェーンを通じた関連産業への影響拡大など、国民生活への波及効果が甚大であるからにほかならない。中央省庁による報告書や各社事故報告書において指摘されているとおり、本質安全設計や安全装置の導入といったハードウェアの改善による安全対策からは既に一定の効果を得ているとの理解のもとに、事故原因として人間によるエラーや不安全行動の発生(さらにはその背後要因としての安全文化)に着目しその発生メカニズムの解明にチャレンジしているというのが学術・産業界の現状である。人間によるエラーや不安全行動の発生については「ヒューマンファクター」をキーワードとして心理学や人間工学の分野で研究が蓄積されてきた。例えば「行動形成因子」が人間のエラー率に影響するといったモデルが開発されており Kirwan(1994)等の成書がある。しかしながら、杉本(2014)が強調するように、ヒューマンファクター研究は機械の側から人間を見る視点に立脚して機械に接する人間の要素(インターフェース)に関心を集中させた結果、物理的生産システムと人間関係に囲まれた環境で意思決定する存在として人間を捉えていない点に問題が残っていた。

この問題を解決するための萌芽的分析を行ったのが Hausken(2002)である。確率論的リスク評価と戦略的相互依存関係下での人間の意思決定を分析するゲーム理論とを融合した簡単な数理モデルを用いて、直列生産システムや並列生産システムといった物理的生産システムの特性的相違が共同作業している人間の意思決定に影響を及ぼし、ひいては生産システム全体の信頼性を低下させる場合があることを示した。これに対し、申請者は Hausken が理論分析の対象とした状況を実験室において再現し、理論分析の結果が定性的に妥当であること、さらにリスク開示が安全行動に正の影響を与えることを経済実験から示した。しかし、Hausken のモデルは萌芽的で極めてシンプルなものであるため、事故抑止のための制度設計のためには、生産現場における種々のプレイヤーのインタラクションを考慮したモデルの拡張が課題として残された。

2. 研究の目的

以上を踏まえて、本研究では、Hausken が示したモデルをベースに、それを現実の企業

現場における生産システムや人的資源の配置が反映されるように拡張し、人間によるエラーや不安全行動の発生メカニズムを解析するための基本理論モデルを構築する。基本理論モデルを利用して事故リスク情報の開示や損害保険制度の見直し等の事故抑止制度を設計し、その効果を理論・経済実験の相互フィードバックから検証する。

3. 研究の方法

本研究では3つのサブテーマに取り組む。第1テーマは「人間によるエラーや不安全行動の発生メカニズムの理論的解明」である。ここでは確率論的リスク評価とゲーム理論の統合をモデル構築の基本戦略とする。物理的生産システムをモデルに組み込んだ上で、上司-部下に代表される命令系統・同僚間の協力関係・労働組合の存在・生産ノルマの存在など企業活動において現実に見られる諸要素が工場の従業員や管理職等の構成員の安全に関する意思決定および生産システム全体の信頼性に与える影響を理論的に調べる。第2テーマは「事故抑止のための制度設計とその経済実験による検証」である。第1テーマで構築したモデルを基礎に、賞罰等のインセンティブ・リスク情報の労働者への開示非開示・リスク情報の一般への公開の有無・労災保険や事故損害保険の仕組みの変更といった制度的仕組みのパフォーマンスを理論的に予測する。予測結果は経済実験で検証し、理論と実験の相互フィードバックにより提案する事故抑止制度の精緻化を図る。第3テーマは「提案した事故抑止制度のフィールドでの実証」である。制度は理論と実験室実験の成果に基づいて設計するが、現実の企業現場でそれが期待どおりに機能するためには、実験者にとっては想定外のかく乱に対して頑健でなければならない。かく乱因子を同定し、制度の頑健さをテストするためにフィールドでの実証を行う。

本研究の特色・独創的な点の第1は、安全工学と経済学の方法の融合により新しい知見の獲得を目指す点にある。安全工学には人間行動に戦略的相互依存関係が存在するという視点が少なく、経済学には生産システムの特異性に関する視点が少ない点を省みて、相互を補うモデルとして確率論的リスク評価とゲーム理論の統合モデルを開発する点で、安全工学としても経済学としても萌芽的である。

第2は安全に関する研究を実施するために実験経済学的手法を応用する点にある。直列生産システムと並行生産システムの信頼性については長年の議論があった。Hausken は従業員の努力投入度が事故リスクに影響するという設定で同時手番のゲーム理論モデルとして定式化し、並列生産システムにおけるナッシュ均衡では共同作業の相手へのフ

リーライドが生じ、直列生産システムよりも信頼度が低下することを発見した。従来の経済学におけるフリーライド検証実験では確率的不確実性が存在しないため、本研究は安全工学的観点から経済実験を拡張し、新たな実験の方法論を提供する新規的研究である。

第3は企業活動における「安全」のみならず「生産」にも目を向ける点にある。安全に関する研究は関心が安全に偏る傾向にあるが、企業が従業員の雇用を守り、安全向上のための投資を行うためには利益の獲得が不可欠である。この事実を直視し、安易に「安全第一」と言うのではなく生産と安全のバランスを考えた実行性のある事故抑止制度の提案を目指す点で独創的である。

4. 研究成果

経済実験：事故リスク情報の開示の有効性を検討することが目的である。生産システムとして2つのユニットからなる直列システムと並列システムを実験室に構築した。第1ユニットの信頼性（故障しない確率）を p_1 、第2ユニットの信頼性を p_2 とすれば、直列システム全体の信頼性（事故が起きない確率）は $p_1 \times p_2$ 、並列システム全体の信頼性は $1 - (1 - p_1)(1 - p_2)$ と表現できる。被験者は生産システムで働く従業員として各ユニットの保守を担当していると想定し2人1組で作業した。被験者が保守するために投入する努力の量に比例して各担当ユニットの信頼性が向上すると仮定した。すなわち、ユニット信頼性 = $f(\text{努力量})$ であり、 $f' > 0$ である。

この経済実験は60ラウンドで構成される。前半30ラウンドでは、被験者は $f' > 0$ であることを知っているが $f(\text{努力量})$ の具体的な関数形は知らない状態で意志決定した。被験者は第1ラウンドが始まる前に実験実施者から一定量の仮想の金銭を受け取った。これを初期保有と呼ぶ。被験者は初期保有から自分が担当するユニットの保守に投入する金額（=努力量）を決めた。このとき、生産システムで働いている2人の従業員はお互いの支払金額を知ることなく自分の支払金額を決めるものとした。各支払金額に応じて各ユニットの信頼性が決まり、ひいてはシステム全体の信頼性が決まる。そのシステム信頼性に基づいて、システムで事故が発生するかどうかを乱数発生によりシミュレートした。事故が発生した場合は各被験者が得る第1ラウンドの報酬はゼロであり、事故が発生しなかった場合は「初期保有 - 保守のための支払金額 + 成功報酬」とした。これで第1ラウンドが終了である。第2ラウンドでは改めて初期保有を配分し、第1ラウンドと同じことを繰り返した。これを30ラウンドまで続けた。前半30ラウンド全体の報酬は、第1ラウンドから第30ラウンドまでの各ラウンドでの報酬の和である。

後半30ラウンドでは、被験者は $f(\text{努力量})$ の具体的な関数形を知っている状態で意志決定した（前半と後半で $f(\text{努力量})$ の形は同一である）。第31ラウンドから第60ラウンドまでの進行は、被験者が $f(\text{努力量})$ の具体的な関数形を知っていること以外、前半30ラウンドと同じとした。後半30ラウンド全体の報酬は、第31ラウンドから第60ラウンドまでの各ラウンドでの報酬の和である。

各被験者に支払う経済実験への参加報酬は、各被験者の前半30ラウンド全体の報酬と後半30ラウンド全体の報酬のいずれかを確率50%でランダムに選択することによって決定した。

この経済実験の目的は事故リスク情報の開示の有効性を検討することである。よって、直列システムと並列システムのそれぞれについて、前半30ラウンドでの結果と後半30ラウンドでの結果を比較した。両システムともに、リスク情報を開示した場合、開示しなかった場合と比較して、被験者が担当ユニットの保守に投入する金額の平均値が低下し、かつシステム信頼性が向上した。リスク情報を開示することによって、より少ない努力量でより高いシステム信頼性を達成することができたということである。リスク情報が開示されていない場合、被験者は試行錯誤によって保守のための支払金額を決定しなければならない。一方リスク情報が開示されている場合、全被験者は $f(\text{努力量})$ を参照することができる。被験者は相手の支払金額を知らない状態で自分の支払金額を決めるが、 $f(\text{努力量})$ を参照することを通じて結果として被験者の意志決定が「調整」され、システム全体としてはより少ない努力量でより高い信頼性を獲得することができた。この経済実験では、リスク開示が人々の行動を調整する機能をもつという新たな結果を得ることができた（学会発表）。

経済実験：経済実験では、前半30ラウンドと後半30ラウンドを同じ被験者によって実験した。すなわち、ある被験者は前半30ラウンドでリスク情報開示なしの意志決定を行い、その実験を経験した状態で、後半30ラウンドに臨んだ。この場合、後半30ラウンドでシステム信頼性が改善した（かつ努力量が減少した）のは被験者が前半30ラウンドで意志決定の方法を学んだからであるという可能性を否定することができない（=学習効果）。そこで経済実験では、各被験者がリスク情報開示ありか、なしか、どちらか一方の実験にしか参加しないものとした。それ以外の設定は経済実験と同じである。

経済実験は平成29年度の後半に実施した。結論を得るには今後の詳細なデータ解析が

必要であるが、簡易なデータ解析の段階では経済実験と同様の定性的結果が得られている。

経済実験：企業経営者は労働現場の安全性向上のための投資をすることに消極的になることがあると言われている。安全性向上が企業業績に直接的には結びつかないと考えられていることが原因であると思われる。そこで企業経営者が安全な(しかしながら労働生産性の低い)現場環境を整備したときに企業業績がどのような影響を受けるかを経済実験によって検証した(学会発表)。

この経済実験では被験者を企業経営者と従業員に分けた。企業経営者の選択肢はコストを負担して労働現場を安全にするか、安全にしない代わりにコストを節約するかのどちらかである。従業員の選択肢は労働のためにどれだけ努力するかである。

経済実験では、企業経営者がコストをかけて安全な職場環境を構築した場合、従業員は理論的予測よりも多く労働するという結果が得られた。これは職場環境を改善した経営者に対する従業員からの「返礼」と解釈することもできる。また定量的には、従業員の労働量が増加したことによる企業業績の向上が、職場を安全にするために企業経営者が支払ったコストを上回っていた。これは、経済実験において出現した状況では、理論的な予測と比較して社会全体(この場合は企業経営者と従業員からなる社会)の経済的厚生が向上していたことを意味する。

経済実験によって理論的分析だけでは明らかにできなかったリスク評価やリスク開示、労働現場の安全性向上の社会的効果を発見することができたことが本研究の成果である。これらの成果は国際学会で口頭発表、国内紙で誌上発表されており、国際学術誌にも論文を投稿している。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計1件)

牧野良次, ゲーム理論と確率論的リスク分析の統合, 化学工学 81, pp.693-696 (2017)

[学会発表](計3件)

Ryoji Makino, Kenju Akai, Jun-ichi Takeshita, Achievement of a good balance between the enhancements of risk reduction and production - An economic experiment approach, Society of Risk Analysis 2015 Annual Meeting, 12/7/2015, Arlington.

Kenju Akai, Ryoji Makino, Jun-ichi Takeshita, An economic lab experiment

to compare the risk and productivity between parallel and series production systems, Society of Risk Analysis 2016 Annual Meeting, 12/12/2016, San-Diego

Kenju Akai, Ryoji Makino, Jun-ichi Takeshita, Takanori Kudo, Keiko Aoki, Effect of Risk Probability Disclosure on System Reliability: An Economic Experiment, Society of Risk Analysis 2017 Annual Meeting, 12/11/2017, Arlington

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

[その他]

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

牧野 良次(MAKINO, Ryoji)

国立研究開発法人産業技術総合研究所 安全科学研究部門・主任研究員

研究者番号: 90415745

(2)研究分担者

赤井 研樹(AKAI, Kenju)

国立大学法人島根大学 戦略的研究推進センター・助教

研究者番号: 20583214

竹下 潤一(TAKESHITA, Jun-ichi)

国立研究開発法人産業技術総合研究所 安全科学研究部門・主任研究員

研究者番号: 60574390

(3)連携研究者 なし

(4)研究協力者 なし