Discussion Paper No.282

過酷事故が発生する可能性のあるプロジェクトにおけるリスク評価行動と意思決定メカニズム

鳥居　昭夫
中央大学経済学部教授

July 2017

INSTITUTE OF ECONOMIC RESEARCH
Chuo University
Tokyo, Japan

過酷事故が発生する可能性のあるプロジェクトにおけるリスク評価行動と意思決定メカニズム

鳥居昭夫 *

平成 29 年 7 月 26 日

概 要

原子力エネルギーの利用のように、事故が起きた場合には過酷事故に至る可能性のあるプロジェクトを推進するか否かという意思決定においては、事前にリスク評価を十分に行わなければならない。しかし、東京電力福島第一発電所事故の発生は、必要なリスク評価行動が十分に行われたのかについて、疑問を持つ必要があることを示している。本稿では、どのような要因によって不十分なリスク評価のまま意思決定がされ得るのかという命題を考察する。事業を運営する主体 (事業主体) が、リスク評価のために費用をかけて情報を獲得し、一方で事業の推進を決定する主体（意思決定主体）が、自らが信じる社会的費用と便益の比較から意思決定を行うというモデルを作成して、この課題を分析した。分析の結果、事業主体がリスクについて楽観的であること、事業に伴う私的利益が大きいこと、事業主体が抱いているリスクの大きさと社会が要求する判断基準との間に差があること、賠償責任が曖昧であること等が要因となる。一方、事業主体が意思決定主体を虜として実質的に自ら意思決定をできること、事業主体がリスクに関わる情報を秘匿できる状態にあることは要因とはならないことが示される。

Keyword: 過酷事故、リスク評価、情報取得行動、チープトーク、コミュニケーション・ゲーム、厳格責任損害賠償、情報の秘匿

* 中央大学経済学部

1　序: 過酷事故の回避可能性とリスク評価

２０１１年東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所の事故は、適切な対策がとられていれば防げたとする見解がある。たとえば、斉藤誠氏による「福島第一原発事故とは何だったのか」では、東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会（以下、政府事故調）の中間報告と最終報告が諸資料とともに詳細に検討され、「いずれにしても、今回の原発事故は、あらかじめ想定された範囲と程度のもので、事故の拡大を防ぐための手立てもあらかじめ合意されていた。法律用語を借りて表現をすれば、**福島第一原発事故には予見可能でも結果回避可能性も認められる。**(太字は原文, p.178)」と結論づけている。事故は回避できたのではないかとする見解は他にも多く表明されている。[1]さらに、政府事故調中間報告は、過酷事故に陥る可能性という類似の状況におかれた日本原子力発電株式会社東海第二発電所においては、2007 年に茨城県が作成した「茨城県津波浸水想定区域図」に基づいた対応がされたので、原子炉の冷却に必要な電源を確保することができたとしている。[2]　たしかに、高いリスクが存在していることを的確に評価し、起こりえるリスクに対する対策が検討され、また状況を的確にとらえてあらかじめ用意されていた手順に従った適切な措置がとられていれば事故は避けられたのではないか、ないしは事故による被害はずっと軽減できたのではないかという推論は、自然なものであろう。

それでは、なぜリスクを正しく評価することができなかったのだろう。事故前の国の基本的な原子力発電に対する姿勢は『総合資源エネルギー調査会電気事業分科会原子力部会報告書〜「原子力立国計画」〜』に示されている。そこでは、戦略的に原子力発電および原子力産業を振興することが提案されている一方で、原子力発電の推進に伴うリスクの存在についてはほとんど言及されていない。報告書では単に、報告書最後に「参考」として、運用等の安全規制の検討について簡単に触れられているのみである。リスクを評価して政策を策定しようという姿勢は全く示されていない。

国会事故調においては、「本事故の根源的原因は歴代の規制当局と東電との関係について、「規制する立場とされる立場が『逆転関係』となることによる原子力安全についての監視・監督機能の崩壊」が起きた点に求められると認識する。」としている。確かに、規制される事業者が、情報の優位性ないしは私的情報の存在を利用して、規制当局を虜にしてしまうというキャプチャー理論 (captured theory) は Stigler(1971) 以来多く示されている。[3]

しかし、もし規制当局が電気事業者の虜となっていたという仮説が事実を表していたとしても、それでは「電力事業者は、事業に伴うリスクが低いと認識していた、ないしはリ

[1]たとえば失敗学会報告書は、「福島原発において、少なくとも 2〜3 年前、早ければ約 10 年前に、巨大地震に伴う巨大津波を予測する資料が存在していた。巨大津波が事前に予測していた場合は、交流電源、直流電源、最終排熱系の 3 つが同時に喪失することは自明で、その対策は、上記の期間内で比較的容易に実施できるものである。」 と結論している。また、『国会事故調　東京電力福島原子力発電所事故調査委員会　報告書』（以下、国会事故調）においても、「われわれには福島原発事故を回避するチャンスは過去にいくらでもあった。あったが見逃してきた」 と結論づけている。

[2]政府事故調　中間報告では、「東海第二発電所での東北地方太平洋沖地震津波の波高は T.P.+5.4m と推定されており、側壁貫通部工事は完了していなかったため貫通部からポンプ室に海水が浸水して非常用 DG 1 台が停止したものの、側壁高を T.P.+4.91m から T.P.+6.11m に増設していたことにより、残り 2 台の発電機で原子炉の冷却に必要な電源を確保することができた。」(p.407) としている。なお、T.P. とは東京湾平均海面である。

[3]Stigler(1971) では規制当局は capture ではなく acquire されると表現している。 他に例えば Laffont and Tirole (1992) を参照せよ。

スク回避の傾向が弱かった、もしくはその両方だったため原子力事業を推進する上で必要な対策を、費用がかかる、ないしは利益機会を逸する可能性があるとして避けようとした。一方、規制当局は、リスクが高いと認識していたか、リスクを回避しようとする傾向が強かったため、費用が高くとも事故発生の可能性に対して対策をすすめようとしていた。しかし、電力事業者が規制当局に働きかけ、虜とすることに成功し、リスクを無視して対策を回避する行動を是認させた」 のであろうか。あるいは、「電力事業者は、事業に伴うリスクについて強い関心を持たず、特に根拠も持たないままに楽観的な予想を持っていた。事業に伴うリスクを評価するためには高い費用がかかるので、リスクを評価する行為自体を避けようとし、リスク評価しようとする規制当局を虜として黙認させた」ことによって、対策がとられなかったとするのであろうか。私的事業者が規制当局に比べてリスクを無視した行為を選択する傾向を持つと考えるのは仮説としては可能であっても、現実に検証されているわけではない。

一般に、大きな投資を必要とする事業を推進する際には、リスク評価が重要な経営判断となろう。むしろ日本では、経営者は一般にリスク回避的でありそのため投資が過小であるとする主張が多い。[4]伊東 (2014) は、もし政府が責任をとらないというのであれば私企業である電力会社は原子力という危険な事業に参入しなかったと主張している。 伊東氏は、さらに東京電力は資源エネルギー庁の強い規制の下で事業を行っていたので、リスクを無視した事業展開を進めてしまったとする見解を示している。私企業として本来はリスクを評価しながら意思決定をするところを規制によってリスクから隔離されると解してしまったために、リスク回避する性向を持ちながらもリスクのすこぶる高い事業に突き進んでしまったと考える仮説である。伊東 (2014) ではさらに、電力会社と規制庁との関係について「政府は責任をとらないという日本的慣例にそって、電力会社が認可を申請し、これを許可するという形をとっている。しかし、実質は資源エネルギー庁が基本方針をつくり、電力会社がそれにそった内容を認可申請するにすぎない」(p.102) としている。[5]

この他に、反対派と推進派が互いに一歩も引かずににらみ合ってきたという構図が原子力発電に伴うリスクそのものを増大させてきたとする見解もある。東京電力株式会社原子力改革特別タスクフォースによる「原子力改革の進め方」（２０１２年１０月１２日）には「過酷事故対策が不足した背後要因」の２番目の要因として、「過酷事故対策の必要性を認めると、訴訟上のリスクとなると懸念した。」３番目の要因として「過酷事故対策を採ることが、立地地域や国民の不安を掻き立てて、反対運動が勢いづくことを心配した。」としている。反対運動の存在により、もし反対運動がなければ措置されていた過酷事故対策をとることができなかったとするのである。この種の見解は多く、たとえば武田 (2011) は原子力利用を推進する側が反対派の強い反対運動のもとで原子力発電を続けた結果、リ

[4]John et al.(2008) Acharya et al.(2011) では企業のリスク・テイクの水準を総資産あたりの EBITDA(利払い、税引き、償却前利益) の標準偏差で測っているが、日本企業の極端なリスク・テイクの際だった低さが示されている。さらに、蟻川他 (2016) は日本企業の悲観的な傾向が積極的な投資を妨げている傾向を検証した研究を紹介している。また、内閣府 (2008)『平成 20 年度年次経済財政報告 (経済財政政策担当大臣報告) ―リスクに立ち向かう日本経済―』では日本企業のリスクテイクが十分ではなく、成長力を高める上で課題となっているとしている。これは、他でもなく、日本政府が企業をリスク回避的であるとみていることを示している。

[5]行政指導を手段として、事実上の強制を実現して官僚が広い裁量を持っているとする見解は「官僚規制論」とされ、山内 (1974)、行政管理研究センター (1981-2) 等の分析がある。建林 (1994) を参照せよ。山内は、非公式の抑制的措置が事実上の脅威となって、行政機関は権限の濫用をほのめかすことによって規制的指導への服従を強制できるとしている。

スクが拡大してしまったとしている。[6]反対運動の存在が実際に、リスクを拡大する効果をもっていたかどうかは検証を必要とする命題である。しかし、こうした危惧が社会の中にあったのは事実であろう。特定の反対運動がリスクを拡大する効果を持ったかどうかではなく、反対運動の存在に示される事業主体外部からの厳しいリスク水準の要求が、リスクを評価する上でどういう効果を持ったかは十分に検証に値する命題であろう。

本稿では、我が国の原子力発電における意思決定のメカニズムおよび背景と、リスクを的確に評価する行動が十分でなかったという問題との関連を考察するためモデル分析を行う。事業を実際に担い、また事業を担っているからこそリスク評価をできる立場にあった電気事業者と、フォーマルな意思決定の権限を持つ規制当局をプレーヤーとするモデルを作成する。そのモデルの上で、有効な意思決定が、事実上両者によってどのように分担されていたかが、リスクを評価する行動を抑制する原因となり得ただろうかという命題を分析する。たとえば、事業者が規制者を虜としてしまったために、意思決定の権限が規制者から事業者へ事実上移ることによってリスク評価が十分に行われなかったということが考えられるだろうかという命題を考察する。またたとえば、反対運動が激しいために、事業をすすめる意思決定を行う上で非常に厳しい基準が設定され、軽微な事故の兆候であっても兆候がある限り事業が停止するという環境の下で事業が行われていたために、事業会社がリスクをあえて軽視する行動を選択したのであろうかという命題を検討する。 さらに、作成したモデルを用いて事業運営に伴う私的利益の存在、賠償責任のあり方、さらに情報秘匿の可能性が、リスクを評価しようとする姿勢や努力水準にどのような影響を与えるのかを分析する。

モデルの基本的な設定は以下のとおりである。過酷な事故をもたらす可能性のある事業を営む事業主体と、事業を推進するかどうかを意思決定する主体が分離しているとする。この設定は、電力会社と資源エネルギー庁とを想定している。事業主体は、事業に伴うリスクの水準がどの程度なのかを、あらかじめコストをかけて探索することができる。この探索に努力を注げば、努力の水準に応じた確率で、事故発生の可能性についての情報を得ることができる。ただし、情報は必ず得られるとは限らない。また、努力水準を直接に観察し、規制することはできない。このモデルにおいて、努力水準の決定を分析する。事故発生のリスクに対する情報を誰もが観察できる場合と、誰もが観察できるわけではなく事業会社が選択的に公表できる場合とを別に考察する。さらに、情報の取得機会が 1 回に限られる場合と、1 回目の結果によって、さらにもう 1 度努力して情報を取得する機会が存在する場合とを考察する。このことによってリスクを継続的に評価しようとする傾向を分析することができる。

[6]武田 (2011) は、原子力利用を推進する側が反対派の強い反対運動のもとで原子力発電を続けるという構図の結果、「反対運動の妨害を受けて新規に原発用地を取得することができなくなった推進派は、既存の敷地内に原発を密集させることになる。これが福島原発のリスクをむしろ拡大させてしまった (p.31)」「実は日本でも、日本原子力研究所（JAERI) が 1993 年から JPSR など、PIUS 炉の延長上に受動的安全性を確保しつつ実用可能な炉型を探る研究に着手していた。だがその成果は殆ど報じられなかった。なぜか。より安全な炉があると認めれば、いま動いている原発に不足があると認めることになる。反原発運動のアピールで不安を感じている国民を安心させるべく、原発運転中の原発に関して『絶対安全』と繰り返し述べてきた以上、『より安全な原発』の存在は許容できず、選びようもないのだ。」としている。こうした反対運動の強さが実際にリスク拡大に寄与したかどうかは検証を必要とする。たとえば、1 つのサイトに発電施設を増設していく場合、建設時期の差や発電容量の差を考慮すると建設費は 1 号機が最も高いことが多いので，原子力発電が密集した理由には費用節減の要因があるかもしれない。また、新型炉の研究は日本でも推進されており、より安全機能が強化された第 3 世代の原子炉にはすでに運転中のものもある。（山地 (2009)）

情報を誰もが観察できる場合、その情報を用いて、誰もが自らの持っているリスクに対する予想を更新する。この予想の更新としては、ベイズの定理を用いた更新を考える。誰もが同じ情報を用いることができる場合を考え、予想の更新は社会構成員が共有すると仮定する。一方で、事故が発生した場合の損害値の予想、すなわち事故の深刻さについては、１回限りの過酷事故を考えて、客観的な損害値の分布等も存在せず、社会構成員はそれぞれ固有の予想値を持っていると仮定する。この予想値はそれぞれの構成員の信念であり、楽観的な主体や、悲観的な主体が存在すると考える。

モデル分析の主要な結論は以下のとおりである。第１に、事業主体が想定する事故損害額が大きいほど、また事業運営に伴う私的利益が小さいほど努力水準は高い。この命題により、リスク評価の努力水準が過小であったとすれば、もともとリスクに対して楽観的な主体が事業を担ってしまったこと、さらに私的利益の追求のために事業者がリスク評価に消極的となってしまったことによるという可能性が示される。事故損害額の予想値が大きいと、リスクを評価し起こりうる事故を回避しようとするインセンティブが強くなるのは当然である。また、リスクに対する情報が無い場合には事前的な予想により意思決定され、プロジェクトが遂行されるとする考えると、リスク評価によって事業が停止される可能性が生じるので、私的利益の拡大はインセンティブを損なう。

第２に、事業主体が予想する損害額を一定とすれば、事業主体に発生する私的利益の大きさに応じて事業主体より意思決定主体が多少楽観的なとき、努力水準は極大になる。すなわち、意思決定主体が厳しすぎる判断基準を示すと、事業主体はリスクを評価する姿勢が消極的になる。すなわち、外から与える安全基準が厳しすぎるものであると、リスク評価行動が消極的になる。意思決定主体と事業主体の判断基準が私的利益の存在に応じた水準以上に乖離すると、リスクに対する情報の価値がそれだけ低下してしまうので、リスクを評価しようとする努力インセンティブも低下するのである。この命題は、反対運動等、社会の事業に対する姿勢がより厳しい基準を求めてしまうと、かえってリスク評価がおろそかになるという帰結をうみだしてしまうことを示している。この命題から、事業主体が規制庁を虜にすることに成功して、自らのリスクに対する判断基準を押しつけることができるとき、私的利益が無い場合には、常にリスク評価の努力は高まるということが示唆される。私的利益が存在する場合にも、規制庁が事業者より悲観的な場合にはリスク評価の努力は虜にすることによって増大する。虜にすることによって努力水準が低下してしまうのは、私的利益の大きさに応じて軽度に規制庁が事業者より楽観的な場合だけであることになる。

第３に、事業主体が自ら意思決定をできる場合、事故損害額について悲観的な事業者であるほど、努力水準は高まる。この結論は上記第１第２の性質から導くことができる。事業者が自ら事業推進を判断できる立場にあったときには、よりリスクに対して悲観的な企業に任せた方が、リスク評価についてより高い努力を 期待できることが示される。

第４に、事業主体に厳格責任を課すと努力水準は高まる。ここでは、リスク評価についての努力水準が過小であったことを問題とする過失責任ではなく、事故の発生そのものを問題とする厳格責任を考えている。意思決定に当たって賠償責任が負の私的利益と同等な形で働くことを考えると、事業主体の事故損害予想値が賠償責任額の分だけ増大した場合と同等である。このことから、事業者を免責にすると努力を怠る可能性が示唆される。事業主体は事故が発生しても免責されると考えているとすれば、そのことがリスク評価を積

極的に行わなかった原因となるかもしれない。

一方で、第５に、意思決定者に厳格責任を課すと、意思決定主体が事業主体より楽観的なとき、賠償額が小さい限り、事業主体の努力水準は高まる。意思決定主体が事業主体より悲観的なとき、 事業主体の努力水準は低下する。これは、意思決定主体の事故損害予想値が、賠償責任額の分だけ増大した場合と同等な効果を持つことから導かれる。すなわち、意思決定主体が事業主体より悲観的であるとき、適度な賠償責任を規制側に課すことによって事業主体のリスク評価が積極的になることがある。しかし意思決定主体がより楽観的であるとき、意思決定主体への賠償請求は事業主体の努力を削ぐことになる。意思決定を行う資源エネルギー庁が責任をとるということが明確であったとき、資源エネルギー庁が電力会社より楽観的であった場合には、リスク評価を怠る原因となる。

第６に、情報を秘匿することができるとしたとき、事業が社会に事故損害額の期待値を超える便益をもたらすと考えられる限り、秘匿できることによって事業主体の努力水準は高くなるか、少なくとも同一である。情報を秘匿できることによって努力水準が低下する可能性があるのは情報が得られないとき意思決定者は事業を停止してしまう場合だけである。情報が得られない場合、意思決定主体は真に情報が得られなかったのか、それとも単に情報が秘匿されているのかを識別できない。この場合、事業が停止される均衡と事業が遂行される均衡とが可能である。無情報では事業が停止される場合には、さらに事業主体が事故損害額を意思決定主体より小さく見積もる場合と大きく見積もる場合がある。前者の場合、事業主体は事業停止を避けようとして情報を得るために努力水準を増大する。後者の場合、秘匿によって意思決定主体の意思決定を事業主体に近い形に変えられる場合があるため、事業主体にとっての事業価値が高まる。そのため、事業を実現しようとするインセンティブも高まり、あわせて情報の価値も高まるので努力水準を増やすことになる。無情報では事業が遂行される場合には、やはり事業主体が事故損害額を意思決定主体より小さく見積もる場合と大きく見積もる場合がある。前者の場合、秘匿によって意思決定主体の意思決定を事業主体に近い形に変えられる場合が生じる。上と同じ理由で、事業主体にとっての事業価値、あわせて情報の価値も高まるので努力水準を増やすことになる。後者の場合、秘匿しても事業は遂行されるので、秘匿を用いて意思決定を事業主体に近い方向に変えることはできない。そのため、秘匿できない場合と変わらない。このように、情報を秘匿できる環境にあるからといって、リスクに対する態度が甘くなるということはない。情報を秘匿できることによって事業主体がリスク評価の努力を怠ってしまうのは、情報が得られないとき、規制者が秘匿を疑いプロジェクトを停止し、かつ事業主体が事業を危険すぎて停止すべきだと考えるときに限られる。このとき、事業主体はあえて努力を怠って、事業を停止に導こうとする。これ以外では情報の秘匿がリスク評価を消極的にすることはない。すなわち、 事業主体と意思決定主体との間に隠蔽可能性というコミュニケーションの問題があったために、リスク評価の努力が小さくなってしまうことはない。

論文の構成は次のとおりである。第２節では、作成したモデルの既存文献との関連を説明する。第３節では、モデルの基本構成を説明する。第４節では、モデルにおいてリスクを評価する努力が１回に限り可能な場合を分析し、主要な命題を得る。第５節では、リスク評価の努力が２回可能な場合を考え、１回だけでなく、２回目のリスク評価の機会に努力を継続する条件を分析し、第４節の基本的な結論がこの設定でも変わらずに成立することを確認する。 第６節では、情報を秘匿できる場合を分析する。

2 関連する文献

本稿は、第1節で示したように、原子力エネルギーの推進にかかる意思決定のための情報収集行動を分析することを目的とした論文である。特に、意思決定主体と、事業を遂行しその過程でリスクを評価するための情報収集を期待されている主体とが存在し、2者の制度的な関係によって、リスクを評価する行動がどのように影響されるかを、モデルを用いて分析することを目指している。本稿のようにリスク評価を目的とするわけではないが、エージェントの情報に依存しながら最良の意思決定を行うという、類似した課題を分析する一連の理論研究がある。 専門知識を持つエキスパート (informed expert) と専門知識を持たない意思決定主体 (uninformed decision maker) とのコミュニケーションにかかるゲーム理論研究である。特にその中でも、エキスパートがコストを費やして情報を取得するインセンティブを分析する研究は、本稿が課題の課題と類似した課題に取り組んでいる。そのために、構築されるモデルも本稿のモデルに類似している。しかし、本稿のモデルはリスク評価に基づいた意思決定という目的のために、いくつかの点において、それらのモデルとは異なった形で構築されている。したがって、本稿におけるモデル分析は、それらのモデル分析を原子力エネルギーにかかる意思決定問題に単純に応用したものではない。逆に、従来のモデル分析が扱ってこなかった形で展開した部分もあり、理論的にも新しい貢献となっている。本節では、これらのモデルを簡単に紹介して、本稿のモデルをそれらの分析の中に位置づける。この位置づけにおいて、本稿のモデルがそれらのモデルと比べてユニークな点が明らかとなる。

2.1 内生的情報取得とチープ・トーク

専門知識を持つエキスパート (informed expert) と専門知識を持たない意思決定主体 (uninformed decision maker、以下では DM と略記する) との コミュニケーションにかかるゲームは、Crawford and Sobel (1982) から始まるチープ・トークと呼ばれる一連のモデル分析で対象とされている。チープ・トークのモデルでは、情報の非対称性があるときに生じる非効率性を克服するためのコミュニケーションを分析するために用いられる。[7]チープ・トークのモデルは、通常エキスパートは外生的に専門知識を持つと仮定する。Dur and Swank (2005) は、情報取得のインセンティブとコミュニケーションの内容との関連についての問題を分析するため、エキスパートは努力水準に応じて確率的に状況を示すシグナルを受けると仮定した。シグナルにはノイズがかかっているが、努力が高いほどノイズは小さくなる。このシグナルを受けてエキスパートはプロジェクトの是非を DM に助言する。DM は、必ずしもこの助言に従う必要はない。チープ・トークのモデルでは、エキスパートと DM とは、プロジェクトの遂行について、それぞれ異なった選好を持つと仮定する。 Dur and Swank はまず、最も努力するエキスパートはバイアスのない、すなわち、プロジェクトの遂行について選好を持たない中立的なエキスパートであることを示す。さらに、DM の立場から見た望ましいエキスパートについて分析する。DM がバイアスしている場合、バイアスしていない中立的なエキスパートを用いると、助言のもとになる情報はノイズの低いものであるが、選好が相違することによって助言が DM の利益と乖離した

[7]チープ・トーク・モデルの包括的なサーベイについては、たとえば Sobel(2013) を参照せよ。

ものになってしまう。一方、自らの選好と同様にバイアスしているエキスパートを用いると、助言はDMの利益と一致するものの、助言のもととなる情報はエキスパートの低い努力に応じたノイズの高いものとなってしまう。このトレード・オフによって、DMにとって自らと同じ方向にある程度バイアスしているエキスパートを用いることが最適であるとした。さらに、Dur and Swankは情報がハード・エビデンスとして公開される場合も分析している。この場合には、助言がDMの利益と乖離することによる問題は生じない。エキスパートの努力水準だけが問題となる。DMがバイアスしている方向と異なる方向にバイアスするエキスパートが最も努力することが示される。DMがバイアスしているので、情報を獲得することによりDMの見解を正すことができるとエキスパートは期待する。DMと逆方向にバイアスしているエキスパートほど、自らに有利な情報を獲得できた場合の利益が大きいと期待し、努力のインセンティブが大きくなるのである。このようにDMと異なる方向にバイアスした選好を持つエキスパートほど情報獲得の努力を熱心に行うことが示される。

Van den Steen(2010) においても同様に情報取得努力の決定が分析される。従業員であるエージェントが努力することにより、2項確率分布をなすプロジェクトの成功確率について、1つのサンプルが与えられる。このサンプルを用いて、エージェントと経営者であるDMがベータ分布をなす成功確率の事前分布を更新する。このとき、エージェントとDMの事前分布のパラメータが異なっているほど、エージェントが新サンプルを得るインセンティブが増大する傾向があることが示される。この効果は説得効果と名付けられた。信念（belief）が異なっているほど相手を説得しようというインセンティブが強く現れる傾向を示すものとして、説得効果と表現している。このメカニズムが働くのは、事前分布のパラメータが異なっているほど、成功ないしは失敗というサンプルが、事前分布を更新する上で、異なる効果を持つことによる。相手が極端なパラメータを持っていると考える主体ほど、新サンプルによって相手が更新するパラメータの幅は大きいと期待する。この効果により、サンプルの持つ情報によって得られる期待利益の増大分が大きくなる。

ただし、Van den Steenで説得効果が示される節では、同時にコミュニケーションの問題がとりあげられているわけではなく、見解の相違がコミュニケーションと情報収集に与える効果のトレード・オフが明示的に分析されているわけでもない。 Che and Kartik (2009) は、コミュニケーションを明示的に分析するチープ・トークのモデルを用いて情報収集の問題を分析し、情報収集のインセンティブとして、説得効果の他に偏見回避効果を考慮しなければならないことを示している。 Che and Kartik のモデルではエージェントの努力に依存した確率で 経済環境の状態 (state of the world) を示すシグナルを得る。シグナルを示すことによって、経済環境の状態についての事前分布の更新を促す説得効果を持つ。エージェントの事前分布が偏っているほど、説得効果は大きな更新の効果を持つので、情報取得のインセンティブも大きくなる。ここで、エージェントは得たシグナルをその存在を含めて秘匿することができると仮定される。この情報秘匿によりコミュニケーションのロスが発生する。その対処としてDMは、情報が報じられない場合にエージェントを罰するために、より極端な行動を選択する。エージェントは、これを避けようとして情報取得のための努力を増大する。これが偏見回避効果である。 Che and Kartik では更に選好においてバイアスがある場合、このバイアスと事前分布パラメータの相違とが相乗的に働くことを示している。すなわち、事前分布の相違と選好の相違とが同じ方向のとき、説得効

果は強められる。逆方向のときには、弱められることが示されている。

Dur and Swank においてバイアスしているエキスパートほど努力する効果が生じるメカニズムは、説得効果と類似しているが異なっている。 Van den Steen および Che and Kartik においてバイアスしているエージェントとは、環境の状態について偏った事前分布を持っている主体のことを指す。説得効果は、DM の事前分布に対して情報が加わったときに、事前分布と異なる情報を得たときほど大きく分布が更新されるという技術的なメカニズムによって生じる。 一方、Dur and Swank においては、バイアスしているエキスパートとは、DM の事前的な選好と異なる意思決定がされた場合に、より高い利益を得るエキスパートを指している。そのために、意思決定を覆す情報を取得する大きいインセンティブを持つのである。

本稿前半部分においては、すべての情報は検証可能で公開されると仮定している。さらにリスクの程度に関して、全ての主体の事前分布は無情報事前分布として同一であると仮定している。事故が起きた場合の損害額は各主体が確信しており所与と考えている。そのために Che and Kartik 型の説得効果は生じない。それでも事故損害額の予想値が大きいエージェントほど努力するという結果が示される。これは Dur and Swank と同様に、意思決定が覆った場合の利益がそれだけ大きいという効果が表れているものである。 Dur and Swank ではバイアスしていないエージェントほど努力するという結論も導き出されているが、この結論は情報を検証できないという仮定に依存している。情報が検証でき、公開される場合にはこの性質は保たれない。この効果が生じるのは、情報の意思決定の変更に与える価値が極大になることによる。本稿での結論は、この命題を DM からみてバイアスしていないエージェントほど努力するという形で、公開情報の下でも成立していることを示している。この効果が生じるのは情報の意思決定の変更に与える価値が極大になるからである。まさしく Dur and Swank が 主張したのと同様の効果によることが示されている。

これまでの、専門知識を持つエキスパートと専門知識を持たない DM とのコミュニケーション・ゲームはチープ・トークのモデルの伝統を引き継いでいる。そのために、必要な知識は 1 次元のスカラー数で表され、知識によって生じる便益は真の値について対称である。すなわち、真の値を大きく見積もっても小さく見積もっても同様に損失ないしは不効用が生じる。そのために、エキスパートのバイアスの効果も対称となっている。一方、本稿で対象としている環境の状態とは事故発生のリスクである。事故発生のリスクは必然的に、事故が発生する確率と事故が起きた場合の損害額という 2 次元の要素を持つ。本稿では、事故が発生する確率についての情報は共有され、全員が同じ事前分布を持ち、得られた情報によって同じ形で事前分布が更新されると仮定する。一方、事故が起きた場合の損害額については、各主体固有の予想額を信念として持つと仮定している。この損害額については、 1 回限りの過酷事故を想定しており、必ずしも真の値が存在するとは仮定していない。事故損害額の予想は楽観的か悲観的かが重要であり、非対称なものである。バイアスも、絶対的な概念としてはとらえない。主体間の信念の相対的な差異をバイアスと考える。こう考えると、Dur and Swank の型の公開情報のときにはバイアスしたエージェントほど努力するという効果も、チープ・トーク・コミュニケーションの下ではバイアスしないエージェントほど努力するという効果も改めて確認できる。特に後者の効果については、チープ・トーク・コミュニケーションの設定に依存せず発生するということが示され

ている。事故損害額の予想は 1 次元で単調であり、どこかに真の値が存在して、真の値の予想を過つと対称的に問題が発生すると仮定しているわけではない。それでもエージェントの予想値を中心として、DM の予想値が大きくとも小さくとも対称な効果が現れるという類似した結果が得られている。

本稿後半では、情報が秘匿できる場合を扱っている。この場合、全体で 4 つのケースに分かれてそれぞれプール均衡ないしは分離均衡が存在することを示している。こうしたことにより多様な状態を分析することが可能になっている。これは、情報が 2 次元であることにより、モデルがより多様な状況を表現しているということによるところが大きい。

以上で検討した他に、チープ・トークの伝統の下で情報取得行動を分析したものに、Argenziano *et al.* (2016) および　Gerardi and Yariv (2008) がある。Aregenziano *et al.* は情報を複数回得る場合を、情報を得た回数が DM に分かる場合とそうでない場合に分けて分析している。その結果、エキスパートがバイアスしていても、DM はエキスパートの情報を用いて、より正確な行動を取ることができることを示している。それは、DM が情報を無視するバブリングと呼ばれる行動をとることによってエキスパートを罰することができることによる。DMがエキスパートにより多くの情報を得ることを強いることが可能であると示される。この性質のため、情報収集と意思決定という課業が 2 つの主体に別れることによってコミュニケーションロスが発生したとしても、あえて分離することに合理性があることを示している。本稿においても、情報収集と意思決定の分離と統合の是非が分析される。統合とは具体的には、意思決定が事業遂行主体に委託される（delegate）ことを示す。本稿のモデルにおいては、DM がエージェントを罰して努力を促すという行動が分析されることはない。しかし、 2 つの課業が統合された場合の効果が分析されている。このとき、努力水準が高まるかどうかは、 2 つの主体の事故損害額の予想値の相対的な関係に依存する。やはりリスクを 2 次元でとらえたことにより、より多様な状況に対する分析を可能としている。

Gerardi and Yariv においては複数のエキスパートを用いた場合が分析されている。複数のエキスパートを用いることで、情報取得を促すだけでなく情報をできるだけ有効に使って DM の意思決定に役立てることができる。また、DM の選好に近いエキスパートを採用することによって、正確な情報を得ることによる利益を増大させて情報取得のインセンティブにつなげることと、DM の選好に遠いエキスパートを採用することによって、決定を間違えた場合の不利益を増大させて情報取得につなげることのトレード・オフの問題に対処するという課題が分析されている。 2 つの選択肢があるときに、どちらの方向への誤りがより深刻かという見方において、DM と最も異なっている 2 人のエキスパートを選択する。この 2 人を逐次的に用いることによって、最も望ましい状態に至ることが示される。単に 2 人のエキスパートを併せて用いるだけでなく、逐次的な意思決定をデザインすることによって努力が最大限に引き出され、より正確な意思決定が可能になることが示される。本稿においても、逐次的な情報取得の問題が分析されている。ただし、異なる主体によるものではなく、同一主体による繰り返しの情報取得が分析されている。 1 回限りの調査活動の場合と、基本的な特性に大きな変化はないことが確認される。さらに、逐次的な調査活動に伴う固有の問題が分析されている。

2.1.1 代弁システム (advocacy)

チープ・トーク型のモデルにおいては、DM とエキスパートとのコミュニケーションに発生するロスが常に重要な論点となる。そのために、伝えられる情報はエキスパートが取得した情報そのものではなく、情報を下にエキスパートが行う助言であったり (Dur and Swank (2005))、情報の秘匿が可能であったり (Che and Kartik (2009)) する。本稿においては、原子力固有の問題としてリスクにかかる情報が秘匿される場合も扱うが、情報は基本的に検証可能で誰もがアクセスできるものと仮定している。チープ・トーク型のモデル分析でもモデルのバリエーションとして検証可能な公開情報を扱っている場合が多いが、主な分析の対象となっているわけではない。

専門知識を持たない DM が専門知識を持つエキスパートに情報取得を委託するモデルにおいて、情報秘匿できる場合も扱うが、基本的に情報を検証可能とし、コミュニケーション以外の論点を考察した分析に代弁者の機能を扱った論文がある。 代表的な論文は Dewatripont and Tirole (1999) である。 Dewatripont and Tirole は、現状 (Status Quo) から 2 つの対立する 状態のどちらかへ移行を計る意思決定のために、情報取得を委託する DM にとっての問題を分析している。エージェントが所定のコストを支払って努力すると、一定の確率で情報を取得できる。情報の取得を 1 人のエージェントに委託することも可能であるが、エージェントへの報酬を立証の難しい情報取得の内容に対してではなく、立証可能な意思決定の結果に即して行うと仮定しているので、1 人のエージェントに委託して最大限に情報を獲得してもらうためには、エージェントにレントを支払わなければならない。どちらかに有利な情報を得た場合、それに反する情報を同時に獲得してしまうと DM は現状維持を選択することになるから報酬が低下してしまう。このために生じるインセンティブの低下を補うために、どちらかに有利な情報を得た場合の報酬を高めねばならない。これがレントを生むのである。 2 人のエージェントに別々の方向に情報取得を委託をすることによってこの問題が解決される。この意味で、対立する 2 人のエージェントに情報収集を委託することは効率的であることが示される。これが代弁のシステムと呼ばれる。

対立する 2 つのオプションに対して、それぞれ異なるエージェントに情報収集を委託することの効率性を説明しているので、対立が問題となる原子力エネルギーの議論にも示唆を多く与える分析である。しかしながら、この分析における効率性はあくまでエージェントに与える報酬を最小化できるという意味における効率性である。原子力エネルギーの議論においては、リスクが現実のものとなったとき巨額の損害の発生が予想されるので、情報収集に要するコストの効率性は情報の持つ便益に比べて重要ではない。あくまでエージェントにいかに情報取得のための努力をひきだすためのインセンティブを与えるかが課題となる。Dewatripont and Tirole においては、チープ・トーク・モデルでの情報獲得行動のように、努力の水準に応じて情報獲得の確率が連続的に変化するわけではなく、努力の費用も固定されている。そのため、分析も 2 つのオプションに対してそれぞれ情報収集をするためのインセンティブ合理性 (Incentive Compatibility) を満たす報酬体系を求めるという形をとっている。インセンティブ合理性を満たす最も低価格な報酬体系が分析される。本稿では、報酬体系のデザインには興味を持たず、情報獲得が成功する確率はエージェントの努力水準によって連続的に変化すると仮定してモデルを構成していく。

Dewatripont and Tirole においてはさらに、情報取得の確率がエージェントの能力を表す指標と考えられるときにキャリア・コンサーンの要因が入ってくる場合、情報の秘匿が

可能な場合、自己代弁の場合等様々なケースが分析されている。

さらに、Beniers *et al.* (2002) では２人のエージェントの情報収集過程が２段階で逐次的な場合を分析している。２期目の調査が遂行されるためにはそれまでに得られた情報を否定する方向の情報の獲得をも報いなければならない。そのためにたとえ現状維持が選択されたとしても報酬を支払う必要がある。こうすると、１期目に調査を行うインセンティブが失われてしまうためにレントを支払わなければならないことが示されている。こうした問題を克服するため、Kim (2014) では DM の意思決定に基づいてエージェントに報酬を与えるのではなく、情報に応じて報酬を与えることができる場合を分析している。Kim は情報を収集できる確率が十分低いときには、いずれかの方向の決定について私的利益を持つエージェントを用いることによって報酬を節約できると論じている。エージェントが１人だとやはり情報収集のレントが高くなるが、２人のエージェントを用いることによってこの問題を回避できると説明している。

また、Kim(2013) は、１人のエージェントに２つの方向について情報収集を委託する場合を法廷システムにおける判事による審問型として、一方、２人の代弁者に別々の方向に情報収集を委託する場合を検事と被告との対立型として、それぞれを判決の誤りの大きさを基準として評価している。このときに、情報を獲得する確率は、それぞれ判事、被告、検事の努力に応じて連続的に与えられると仮定している。 Kim は判断の誤りは対立システムでより低いと結論している。それは判事が情報収集をする場合、証拠によって自らの有罪無罪についての判断にどれだけ寄与するかということがインセンティブを形成する一方で、検事等が情報収集をする場合、自らの確信を強めるためではなく、裁判に勝つためにとにかく証拠を集めることが重要視される。前者のインセンティブは新たな情報による確率の増分に比例するが、後者のインセンティブは新たな情報を含めた確率に比例するので、後者が勝る。そのために対立システムでより大きな努力を引き出すことができ、誤りも低下するのである。

特に Kim (2013) の判断基準である誤りの可能性を最小にするためにどれだけ努力を引き出すことができるかという視点は原子力エネルギーの問題を考察する上で参考になるところが大きい。原子力を推進すべきか停止すべきかという判断を過たないことが最大の課題であるからである。ただし、裁判のモデルと本稿の課題とが大きく異なるのは、情報へのアクセスが極めて非対称的であるということである。原子力エネルギーに伴うリスクを評価するためには、高い専門技術を必要とするだけでなく、実際に業務に携わることによって得られる知識を必要とする。すなわち、専門的能力が偏在している。原子力エネルギーの危険性を高く予想する反対派が、自らの主張にしたがう情報を収集することは、推進派の情報収集に比べて極めて難しいだろう。このときに、たとえ同じ程度の情報が両方向に発生したとしても原子力推進に反する情報が開示される可能性は低いだろう。Dewatripont and Tirole においても代弁システムにおいて情報が秘匿される問題として分析されている。

さらにこの型のモデルの場合、DM は２つのオプションに対しての情報を比較衡量して社会的正義を実現することを目指す主体として設定される。 本稿の目的の１つは意思決定を実質的に行う規制当局と被規制主体であり、業務を遂行する事業会社との関係のあり方がリスク評価を十分に行うインセンティブにどのような影響をもたらしたかを論じることである。この目的において、中立的な DM と対立する２方向についての代弁者というモデルの構成は、チープ・トークの幾つかのモデルで分析されているようにたとえ DM に

意見の偏りがあると変更したとしても、適切ではないかもしれない。 そのため本稿では、DM と業務を遂行し情報を収集する事業会社の関係にフォーカスする形の構成を採用し、対立する代弁者を明示的に導入することはしない。対立する意見の強さは、世論として規制者である DM の判断に影響するという形で、間接的に捉えるモデルを構成する。しかし、Kim(2013) の構図は意見の対立する問題について誤りの少ない意思決定をするためのメカニズムをデザインするという目的において非常に重要であるのは明らかである。望ましいシステムの条件を考察する上ではこのモデルをより細かく分析する必要がある。次のステップにおける課題としたい。[8]

3　モデル

3.1　危険のあるプロジェクト

一つの社会において、特定のプロジェクトを停止するか、推進するかという意思決定を考える。この社会は十分に多数の異なる個人から構成される。その内の 1 個人は Decision Maker (以下では DM と略す) と呼ばれ、プロジェクトを停止するか、または稼働するかの意思決定を行う権限を持つ。プロジェクトの遂行は社会を構成する主体の一部であるエージェントに委託される。

このプロジェクトは 2 期にわたって施行される。第 1 期にはプロジェクトに関する調査が行われ、第 2 期にはプロジェクトを稼働させることができる。第 1 期の終わりに、Decision Maker は第 2 期にプロジェクトを稼働させるか否かを決定する。もし第 1 期の終わりにプロジェクトを稼働させると決定した場合、第 2 期の中途で停止することはできない。このプロジェクトが稼働した場合、第 2 期において社会に一定の便益 B ($B \in \mathbb{R}_{++}$) が発生する。第 1 期の調査からは何の便益も発生しない。第 2 期に発生する便益 B は公共財であり、社会構成員に等しくもたらされるものとする。第 1 期において、すべての社会構成員が第 2 期にプロジェクトが遂行された場合に発生する便益 B の値を正しく予想するものとする。さらに、プロジェクトの実施主体であるエージェントには、プロジェクトの遂行により固定的な値の私的利益 R ($R \in \mathbb{R}_{+}$) が発生する。この値についても、すべての社会構成員がその存在を知っており、R の値を正しく予想するものとする。

このプロジェクトを第 2 期において稼働すると事故が発生する可能性がある。すべての社会構成員は事故の可能性があることを知っている。第 1 期の調査においては、後に説明する調査試行により前兆と呼ばれる事象が発生するが、事故は発生しない。第 2 期に事故が発生すると、損害が生じる。この損害は、便益と同じく公共財として、社会の構成員全体に等しく影響を及ぼす。事故の発生が社会にもたらす損害を実数値 D ($D \in \mathbb{R}_{++}$) で表す。D の値は社会構成員の誰も第 1 期において正確に知ることはない。この社会をシステム外部から客観的に観察したとしても、D の値が特定の確率分布にしたがうかどうかも分からない。しかし、社会構成員はそれぞれ自らの D の予想値を持ち、その値を確信しているとする。任意の構成員の 1 人の予想値が、事故の実際の損害額に一致する確率は測度

[8] また、裁判システムと本稿の課題とが異なるのは真実の存在を仮定していることである。Kim の結論は被告が有罪か無罪かの真実を知っており、それに応じて証拠を収集できる確率が異なるという仮定に依存する。本稿においては、過酷事故は 1 度限りの現象であり、真の値の分布が存在するかどうかは重要ではないと考えている。

0 である。特に DM の事故損害額の予想値を D_0 とする。また、事故の発生はプロジェクトの便益の発生に影響しない。すなわち、第 2 期にプロジェクトが遂行され、事故が発生した場合、便益 B が発生し、同時に損害 D が発生するものとする。

事故が発生した場合の損害額については、以上のように確率事象として決定されるメカニズムも知られていない。一方で、事故の発生メカニズムについては、次のことが知られている。

仮定 1.

1. 事故発生には確率空間 $(\Omega, \mathcal{F}, P)$ 内に定義された確率変数 $X : \Omega \to [0, 1]$ が関与している。

2. 確率変数 X は連続一様分布 $U(0, \theta)$ に従うことが分かっている。確率分布の母数 θ の値はプロジェクトに固有であり、$\theta \in (0, 1]$ である。

3. 第 1 期のプロジェクト調査において、調査試行を行った場合、エージェントの努力水準 e $(e \in \mathbb{R}_+)$ に応じて $\pi(e)$ の確率で事故の前兆である事象が発生する。この前兆である事象は、エージェントが調査試行を行った場合、その努力の水準に応じて確率的に集合 Ω の元 ω に対応する確率変数 X の値が 1 つ観測されるという形で発生する。エージェントは第 1 期内に調査試行を 2 回まで行うことができる。1 回めの調査試行から前兆を得ることもあるし、得ることができないこともあるが、いずれの場合にも、第 1 期内に調査試行をさらに 1 回だけ繰り返すことができる。エージェントの調査試行は、前兆を得られるか得られないかにかかわらず、1 回につきエージェントに努力の水準に応じて $c(e)$ だけの費用をもたらす。エージェントが調査試行を行ったか否かを他の社会構成員が観測することはできない。

4. 確率変数 X の母数 θ が $\theta > \tau$ を満たすとき、プロジェクトが第 2 期に遂行されると、第 2 期内に確率 1 で事故が発生する。$\theta \leq \tau$ のとき、第 2 期に事故は発生しない。ただし、τ は $\tau \in (0, 1)$ である。

ここでは、確率変数 X の母数 θ の値により、第 2 期に確率 1 ないしは確率 0 で事故が発生すると設定している。このことは、プロジェクトの遂行にともなって第 2 期に確率変数 X が継続して発生し、$X > \tau$ となると事故が発生すると考えてもよい。この場合、第 2 期は非常に長期であり、しかもプロジェクトは第 2 期に入ると中途で停止はできないので、$\theta > \tau$ であると、確率 1 で $X > \tau$ となる事象 $\omega \in \Omega$ が発生すると解釈できる。これは、いわゆる「マーフィーの法則」を仮定しているに等しい。ないしは、チャールス・ペローの「ノーマル・アクシデント」として事故が発生すると考えている。一方、$\theta \leq \tau$ であると、$X > \tau$ となる事象が発生することは無いので、事故は発生しない。

また、調査試行は 2 回まで可能であり、前兆である事象として、確率変数 X の観測値を最大 2 つ得ることができるとしている。この前兆としての確率変数 X の観測値のベクトルを、得られた観測値が 1 つの場合 $\boldsymbol{x}_1$、2 つの場合 $\boldsymbol{x}_2$ とおく。以下本稿では、「前兆としての確率変数 X の観測値」を単に「前兆」と記す。x_1、x_2 をそれぞれ 1 番目、2 番目の観測値として、$\boldsymbol{x}_1 = (x_1)^t$、$\boldsymbol{x}_2 = (x_1, x_2)^t$ である。観測値はそれぞれ確率変数 X の値であるから $\Sigma^1 \equiv [0, 1]$、$\Sigma^2 \equiv [0, 1] \times [0, 1]$ として $\boldsymbol{x}_1 \in \Sigma^1$、$\boldsymbol{x}_2 \in \Sigma^2$ である。観測値

が 1 つも得られない場合も、その実現値のベクトルを $\boldsymbol{x}_0$ と便宜上表記する。$\boldsymbol{x}_0$ は 0 次元のベクトルである。また、$\boldsymbol{x}$ は、観測値の個数を特定しない観測値のベクトルを示すものとする。さらに、Σ^0 を、0 次元ベクトルの集合とする。ここでは、存在しない観測値の集合を示しているから空集合と考える。、空集合に要素は存在しないが、以下では便宜上 $\boldsymbol{x}_0 \in \Sigma^0$ と表すことがある。また、観測値の個数を特定しない観測値の全事象 Σ^0, Σ^1, Σ^2 を単に Σ で表す。さらに、$\mathcal{F}^0$、$\mathcal{F}^1$、および $\mathcal{F}^2$ を、それぞれ Σ^0、Σ^1、Σ^2 のボレル集合族とおく。これらについても、同様に観測値の個数を特定しない場合、単に $\mathcal{F}$ で表す。

この社会の既に定義した以外の情報構造は以下のとおりである。すべての社会構成員は当該プロジェクト固有の確率変数 X のパラメータ θ の値を知らない。一方、実数定数 τ の値は、すべての社会構成員がその値を正確に知っている。また、DM の事故損害額の予想値 D_0 も公開され、社会構成員の皆がその値を知っていると仮定する。また、すべての社会構成員が、調査試行によって得た前兆の実現値を観測することができる。論文の後半では、この設定は変更され、第 1 期にプロジェクトを調査試行するエージェントのみが観測でき、その値を秘匿できる場合を考える。また、前兆は調査試行に対して確率的にしか発生しない。したがって、エージェント以外の社会構成員は、前兆として確率変数 X の値が得られたときにはエージェントが調査試行を行ったことを知るが、第 1 期に確率変数 X が得られないとき、調査試行が行われなかったのか、それとも行われても前兆が得られなかったのかを区別できない。さらに、エージェント以外の社会構成員はエージェントの努力水準 e を直接観測することはできない。

3.2 DM の意思決定 (1)

DM の意思決定を考える。プロジェクトを遂行しない時に代替的に措置される行為、すなわちアウトサイド・オプションによって社会にもたらされる便益は 0 であるとする。DM はプロジェクトによる便益が損害の期待値を下回らない限りプロジェクトを遂行すべきであると考えていると仮定する。プロジェクトを遂行した場合に得られる便益は B と確定している。仮定 1 に設定したように、DM は事故損害額を D_0 と予測し、確信している。しかし、確率変数 X の母数 θ は DM にも分からない。したがって、当該プロジェクトを第 2 期に遂行した時、確率 1 で事故が起きる $(\theta > \tau)$ のか、または事故が起きる確率は 0 なのか $(\theta \leq \tau)$ を識別できない。そのために、このままでは期待値を推計できない。

ここで、第 1 期にプロジェクト調査において、調査試行が実施され、その結果、前兆として確率変数 X の値を観測できれば、観測された値を情報として母数 θ を一定の範囲内に限定、ないしは推定することができる。発生する確率変数 X の値を複数観測することができると、より正確な推定が可能となる。DM は、このように第 1 期において、調査試行の結果得られた、前兆の値という情報を用いて、社会にとって最適な意思決定を行おうとする。

この DM の意思決定について以下の仮定をおく。

仮定 2 (**DM のコミットメント不能**).

DM は、前兆として得られた観測値 X の値のみに基づいて意思決定を行う。

仮定 2 は、DM の意思決定の局面では、意思決定の方法について拘束する契約などを含めた観測値以外の要因は考慮されないとしている。後に示すように、DM による意思決定の

方法は、エージェントの調査活動における努力水準に影響を与える。したがって、DM が意思決定の方法に契約等でコミットできる場合には、当然こうした影響の効果を考えて最適な意思決定ルールを求めることになる。この場合、DM とプロジェクトを遂行するエージェントとからなる制度の問題というより、最適意思決定問題の解が主な対象となるので、本稿の目的とは離れてしまう。

確率変数 X の観測値に基づいて行う DM の意思決定は、ベイズ推定の考え方を用いて考察するのが適切である。DM は調査試行の前に、確率変数 X の母数 θ について、一定の事前分布を持っている。試行の結果、前兆として X の観測値が与えられると、その観測値に基づいて母数 θ の確率分布を事後分布として改定する。このように、母数 θ は確率変数の試行の結果得られた値によって更新される確率分布を持つ。観測値 $\boldsymbol{x}$ によって得られる母数 θ の事後確率密度関数から導かれる確率を $p(\cdot|\boldsymbol{x})$ と表す。たとえば確率 $p(\theta > \tau|\boldsymbol{x})$ は、観測値 $\boldsymbol{x}$ に条件付けられた、母数 θ の値が領域 $(\tau, 1]$ 内に存在する確率である。この確率は主観確率と呼ばれる。また、以下では、観測値 $\boldsymbol{x}$ に基づく母数 θ の事後分布関数を $F(\theta|\boldsymbol{x})$、事後密度関数を $f(\theta|\boldsymbol{x})$ と表す。

主観確率を用いて、DM はプロジェクトを遂行した場合の便益と損害額の差の期待値を得られた観測値に条件付けて

$$B - p(\theta > \tau|\boldsymbol{x}) \cdot D_0 \tag{1}$$

と予想する。DM は式 (1) で示される値が非負の時だけプロジェクトの遂行を決定する。DM のこの選択は以下で示される、集合 Σ 上の観測値 $\boldsymbol{x}$ について定義された関数 $W(\boldsymbol{x}; \sigma, B, D) : \Sigma \to \mathbb{R}$ の値を、各 $\boldsymbol{x}$ についてポイントワイズに最大化するよう、集合 Σ の部分集合 σ を選択する行動と考えることができる。

定義 1 (**DM のプロジェクト価値関数**)**.**

$$W(\boldsymbol{x}; \sigma, B, D_0, \tau) \equiv H_\sigma(\boldsymbol{x}) \cdot (B - p(\theta > \tau|\boldsymbol{x}) \cdot D_0) \tag{2}$$

ここで、$H_\sigma(\boldsymbol{x})$ は定義関数

$$H_\sigma(\boldsymbol{x}) \equiv \begin{cases} 1 & \text{when} \quad \boldsymbol{x} \in \sigma \\ 0 & \text{when} \quad \boldsymbol{x} \notin \sigma \end{cases}$$

である。特に本稿では、表記の都合上、以下の場合を特定化しておく。

$$H_\varnothing(\boldsymbol{x}_0) \equiv 1$$

空集合に要素は存在しないが、後に説明するように、表記を整合化するためにこの設定をおく。また、各 $\boldsymbol{x}$ についてポイントワイズに最大化するという表現は、最大化問題

$$\max_{\sigma \subset \Sigma} W(\boldsymbol{x}; \sigma, B, D, \tau) \quad \forall \boldsymbol{x} \in \Sigma$$

を指すこととする。この最大化は、それぞれの観測値 $\boldsymbol{x}$ について $B - p(\theta > \tau|\boldsymbol{x}) \cdot D_0 \geq 0$ となるとき $\boldsymbol{x} \in \sigma$ となるように σ を選択することによって達成されるのは明らかである。

σ が DM がプロジェクトを遂行するために設定する条件を示している。利用できる情報はここでは前兆による観測値ベクトル $\boldsymbol{x}$ のみであるから、DM がプロジェクトの遂行の可

否を設定する条件は、観測値の集合 Σ の部分集合によって示される。すなわち、DM は観測値ベクトルが設定した部分集合 σ の要素であるときに限って、プロジェクトの遂行を決定する。観測される事象の数を特定するとき、条件 σ を σ_i $(i = 0, 1, 2)$ と表記することとする。

以下本稿では、定義 1 において定義された関数 (2) をプロジェクト価値と呼ぶ。なお、プロジェクト価値 W のパラメータ D_0 は、プロジェクト価値を評価する主体が確信する、事故が発生した場合の事故損害額の予想値である。ここでは、DM におけるプロジェクト価値を評価しているので、損害予想値は D_0 である。後に、定義 1 のプロジェクト価値関数を拡張して DM 以外の他の主体においてもプロジェクト価値を定義するが、その場合には、必ずしも D_0 に限る必要はない。また、同じくパラメータ B は、プロジェクト遂行によってもたらされる便益である。この値は、すべての社会構成員に共通であると仮定しているが、やはり後に、拡張してプロジェクトを遂行するエージェントの私的利益 R をも考慮する場合を考えるため、ここではパラメータとしている。

また、部分集合 σ^* $(\sigma^* \subset \Sigma)$ が関数 $W(\boldsymbol{x})$ の値を各 $\boldsymbol{x}$ についてポイントワイズに最大化しているとき、条件 σ^* が最適であると呼ぶ。特に (2) においては、DM にとっての価値関数を表現しているので、条件 σ^* は DM において最適であると呼ぶ。

定義 2 (DM が設定する最適条件)**.**

$$\sigma^* = \left\{\sigma | \sigma \subset \Sigma, W(\boldsymbol{x}; \sigma, B, D_0, \tau) \geq W(\boldsymbol{x}; \sigma', B, D_0, \tau) \ , \forall \boldsymbol{x}, \ \boldsymbol{x} \in \Sigma, \ \forall \sigma', \sigma' \subset \Sigma\right\}$$

$$\sigma_i^* = \left\{\sigma_i | \sigma_i \subset \Sigma^i, W(\boldsymbol{x}; \sigma_i, B, D_0, \tau) \geq W(\boldsymbol{x}; \sigma_i', B, D_0, \tau) \ , \forall \boldsymbol{x}, \ \boldsymbol{x} \in \Sigma^i, \ \forall \sigma_i', \sigma_i' \subset \Sigma^i\right\}$$

観測値の個数 i $(i = 0, 1, 2)$ が特定されるとき、最適条件は部分集合 σ_i^* と表している。

3.3 無情報のもとでの DM の意思決定

調査試行によって前兆が得られる前の、もしくは前兆を得ることのない場合の母数 θ の事前分布 $F(\theta|\boldsymbol{x}_0)$ を無情報事前分布と呼ぶ。無情報事前分布としては、通常仮定される連続一様分布を選択する。

仮定 3 (無情報事前分布)**.**

$$F(\theta|\boldsymbol{x}_0) = \begin{cases} 0 & \text{for } \theta \leq 0 \\ \theta & \text{for } 0 < \theta \leq 1 \\ 1 & \text{for } 1 < \theta \end{cases} \tag{3}$$

この分布の確率密度関数を $f(\theta|\boldsymbol{x}_0)$ とおく。

無情報事前分布の下で事故発生の主観確率は、

$$p(\theta > \tau|\boldsymbol{x}_0) = 1 - F(\tau|\boldsymbol{x}_0) = 1 - \tau \tag{4}$$

である。無情報事前分布の下で、定義 1 のプロジェクト価値関数の値は

$$H_\sigma(\boldsymbol{x}_0) \cdot (B - (1 - \tau)D_0)$$

である。この関数をポイントワイズに最大化する最適な意思決定 σ_0^* を考える。

本稿では、プロジェクトの試行を通じて得た情報を下に、プロジェクトの停止をいかに決定するかの意思決定に興味を持ち、主な分析の対象とする。この目的のために、DM は無情報事前分布の下では Status Quo として、プロジェクトの遂行を決定するものと仮定する。すなわち、

仮定 4 (Status Quo).

$$B - p(\theta > \tau|\boldsymbol{x}_0) \cdot D_0 = B - (1-\tau)D_0 > 0, \quad D_0 > B$$

をおく。ここでは、仮定 4 の前半が意味を持つために、後半の仮定 $(D_0 > B)$ をおいている。$B \geq D_0$ であると仮定の前半は常に成り立ち、プロジェクトの遂行が常に望ましいということになるので、分析の意味がなくなってしまう。

集合 Σ^0 は空集合であり、その部分集合も空集合のみとなる。前に特定化したように、$\sigma_0^* = \varnothing$ とすると、$H_\varnothing(\boldsymbol{x}_0) = 1$ であるから、仮定 4 により、最適な意思決定がプロジェクトの遂行を選択する決定となることと整合的である。

3.4 前兆の観測による母数 θ の確率分布の更新

第 1 期における調査試行によって得られた前兆、すなわち確率変数 X の観測値による、母数 θ の確率分布の更新を考える。母数 θ の確率分布の更新は、ベイズの定理により得る。以下では、観測値が 2 つ得られた場合の最大値を $y_2 \equiv \max(x_1, x_2)$ とおく。表記の便宜上 $y_1 \equiv x_1$ と表すこともある。

補題 1 (前兆による事前分布の更新と事後分布による事故発生の主観確率)**.** 無情報事前分布 $F(\theta|\boldsymbol{x}_0)$ を事前分布としたとき、n 個の観測値が得られたとすれば、母数 θ の事後分布は、$n = 1$ のとき

$$F(\theta|\boldsymbol{x}_1) = \begin{cases} 0 & \text{for } \theta \leq x_1 \\ -\dfrac{\log(\theta/x_1)}{\log(x_1)} & \text{for } x_1 < \theta \leq 1 \\ 1 & \text{for } 1 < \theta \end{cases} \tag{5}$$

である。また、$n = 2$ のとき、

$$F(\theta|\boldsymbol{x}_2) = \begin{cases} 0 & \text{for } \theta \leq y_2 \\ \dfrac{(y_2)^{-1} - \theta^{-1}}{(y_2)^{-1} - 1} & \text{for } y_2 < \theta \leq 1 \\ 1 & \text{for } 1 < \theta \end{cases} \tag{6}$$

である。

この事後分布に基づく事故発生の主観確率は、$n = 1$ のとき、

$$p(\theta > \tau|\boldsymbol{x}_1) = \begin{cases} \dfrac{\log(\tau)}{\log(x_1)} & \text{for } 0 < x_1 \leq \tau \\ 1 & \text{for } \tau < x_1 \leq 1 \end{cases}$$

である。$n=2$ のとき、

$$p(\theta > \tau|\boldsymbol{x}_2) = \begin{cases} \dfrac{\tau^{-1}-1}{(y_2)^{-1}-1} & \text{for } 0 \leq y_2 \leq \tau \\ \\ 1 & \text{for } \tau < y_2 \leq 1 \end{cases}$$

である。

3.5　DM の意思決定（２）

再び DM の意思決定を考える。n 個 $(n=1,2)$ の前兆が得られた場合、DM がこの情報を下に意思決定すると考えると、プロジェクトの遂行の条件は

定義 3.

$$x_n^* \equiv \begin{cases} \tau^{D_0/B} & \text{for } n=1 \\ \tau\delta & \text{for } n=2 \end{cases}, \quad \delta \equiv \left(\tau + \frac{D_0}{B}(1-\tau)\right)^{-1}$$

として、補題 2 に示される。

補題 2 (前兆による意思決定). n 個の前兆が得られた場合 $(n=1,2)$、定義 *1* におけるプロジェクト価値 (2) を $\boldsymbol{x}_n$ についてポイントワイズに最適化する DM の最適な意思決定 σ_n^* は、

$$\sigma_n^* = \{\boldsymbol{x}_n | y_n \in [0, x_n^*]\}$$

である。また x_n^* について、$x_1^* < x_2^* < \tau$ である。さらに、$D_0 > 0$ について

$$\frac{\partial x_n^*}{\partial D_0} < 0$$

である。

仮定 4 において、前兆による情報がない場合には Status Quo としてプロジェクトは遂行されると考えた。前兆として観測値が 1 つ得られることによって、この決定が覆り、プロジェクトが停止されることがある。すなわち、$x_1^* \leq x_1$ となる x_1 をもたらす θ が存在する。さらにもう 1 つ観測値が得られることによって、再度覆り、プロジェクトが遂行されることがある。すなわち、$x_1^* < x_1 \leq y_2 < x_2^*$ となる x_1 および x_2 をもたらす θ が存在する。ないしは、前兆による観測値が 1 つの場合には覆らなくとも、もう 1 つ観測値が得られることによって覆ることがある。すなわち、$x_1 < x_1^* < x_2^* < x_2$ となる x_1 および x_2 をもたらす θ が存在する。いずれも、補題 2 より $x_1^* < x_2^* < \tau$ であることにより導かれる。

また、DM の課す条件 σ が最適である場合、前兆によって得られた観測値において、プロジェクト価値が正である場合にのみプロジェクトが遂行される。このとき、$\boldsymbol{x}_n$ についての条件 $B - p(\theta > \tau|\boldsymbol{x}_n) \cdot D_0 \geq 0$ は、DM における主観確率の許容範囲を示す条件としてもとらえることができる。すなわち、DM は前兆の観測値により推定される事故発生の主観確率が B/D_0 未満の場合にのみ、プロジェクトの遂行を判断する。DM にとって許容される最大のリスクを、確率 B/D_0 と要求することが最適な意思決定であると解釈することができる。

3.6 意思決定の誤り

DM は不完全な情報を下に意思決定しなければならない。そのために、常に誤った選択をする可能性がある。この誤りは、２通り考えられる。第 1 に、プロジェクトを遂行すべきであったのに、停止を決定する場合があり、第 2 に、プロジェクトを停止すべきであったのに、遂行を決定する場合がある。DM が補題 2 で示される形で意思決定を行う場合、前者は $x_n^* < y_n \le \theta \le \tau$ であるときに生じ、後者は $y_n \le x_n^* < \tau < \theta$ であるときに生じる。ここでは検定における過誤の概念にならい、前者を第 1 種の誤り、後者を第 2 種の誤りと名付ける。すなわち、第 1 種の誤りを犯す確率を γ_n 第 2 種の誤りを犯す確率を β_n と表記すると、

定義 4 (誤りを犯す確率)**.**

$$\gamma_n \equiv p(y_n > x_n^* | \theta \le \tau, \boldsymbol{x}_0), \qquad \beta_n \equiv p(y_n \le x_n^* | \theta > \tau, \boldsymbol{x}_0), \quad (n = 1, 2)$$

それぞれの誤りを犯す確率は、補題 3 に示される。

補題 3 (誤りを犯す確率)**.** DM が補題 2 に示される形で意思決定を行った場合、$\theta \le \tau$ であるのにプロジェクトを停止する、すなわち第 1 種の誤りを犯す確率 γ_n は、

$$\gamma_n = \begin{cases} 1 - \tau^{\frac{D_0}{B} - 1} \left\{ 1 - \left(\dfrac{D_0}{B} - 1 \right) \log(\tau) \right\} & \text{for } n = 1 \\ \\ \dfrac{(1-\delta)^2}{\tau} & \text{for } n = 2 \end{cases}$$

であり、$\theta > \tau$ であるのにプロジェクトを遂行する、すなわち第 2 種の誤りを犯す確率 β_n は、

$$\beta_n = \begin{cases} -\dfrac{\log(\tau)\tau^{D_0/B}}{1-\tau} & \text{for } n = 1 \\ \\ \tau\delta^2 & \text{for } n = 2 \end{cases}$$

である。

$B/D_0 = 0.05$ のときの、τ の値に応じた、誤りの大きさを図 1〜4 に示す。さらに $\tau = 0.95$ のときの、D_0/B の値に応じた、誤りの大きさを図 5〜6 に示す。これらのグラフは次の系に示される性質を表している。

系 1 (誤りの大きさ)**.**

$$\lim_{\tau \to 1} \gamma_n = 0, \qquad \lim_{D_0 \to \infty} \gamma_n = 1, \qquad \lim_{\tau \to 1} \beta_n = 1, \qquad \lim_{D_0 \to \infty} \beta_n = 0$$

系 1 に示されるように、補題 2 に示される意思決定の方法によると、リスク発生の確率がすこぶる小さいとき ($\tau \to 1$)、リスクを回避するあまり、プロジェクトを必要もなく停止してしまう確率は小さい一方で ($\gamma_n \to 0$)、停止すべきプロジェクトを遂行する確率がとても大きくなる ($\beta_n \to 1$)。さらに、リスクを高く見積り、そのためできるだけ回避し

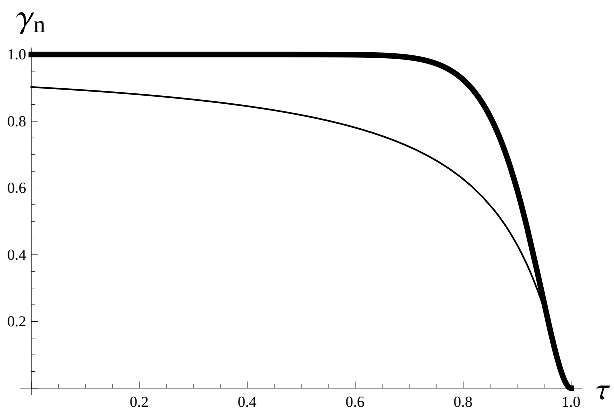

図 1: 第 1 種の誤りの大きさ 1（$B/D_0 = 0.05$）　bold: γ_1　thin: γ_2

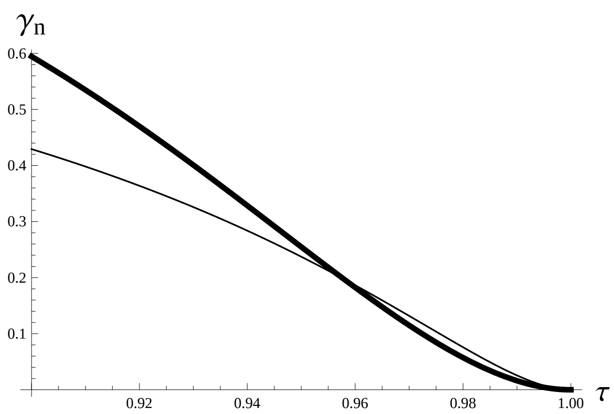

図 2: 第 1 種の誤りの大きさ 2（$B/D_0 = 0.05$）　bold: γ_1　thin: γ_2

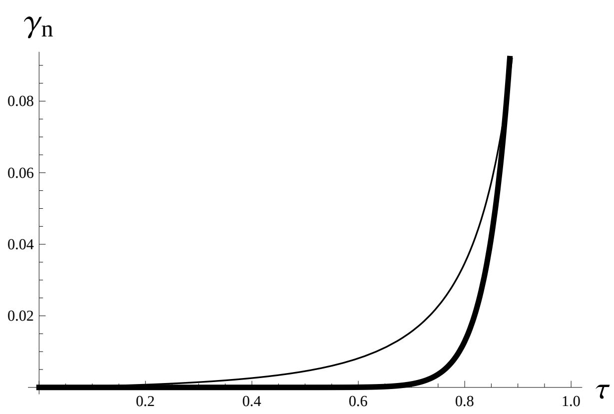

図 3: 第 2 種の誤りの大きさ 1（$B/D_0 = 0.05$）　bold: γ_1　thin: γ_2

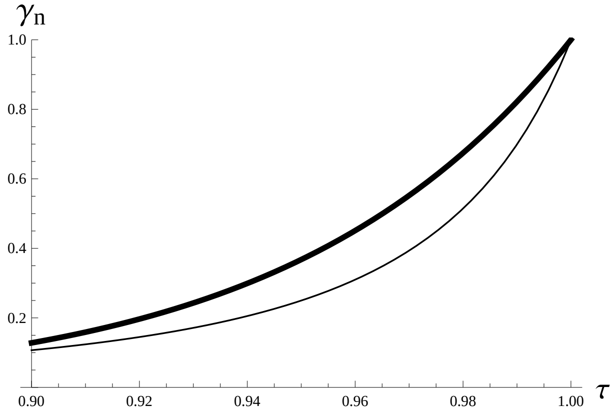

図 4: 第 2 種の誤りの大きさ 2（$B/D_0 = 0.05$）　bold: γ_1　thin: γ_2

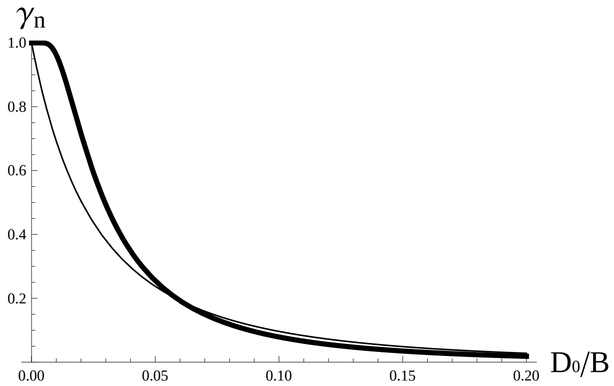

図 5: 第 1 種の誤りの大きさ 3（$\tau = 0.95$)　bold: γ_1　thin: γ_2

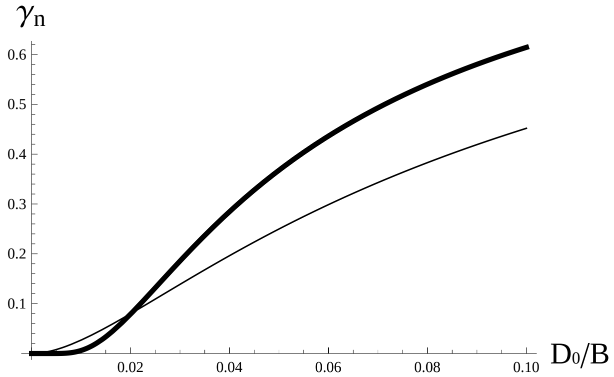

図 6: 第 2 種の誤りの大きさ 3（$\tau = 0.95$）　bold: γ_1　thin: γ_2

ようとすると ($D_0 \to \infty$)、プロジェクトを必要もなく停止してしまう確率は大きくなり ($\gamma_n \to 1$)、停止すべきプロジェクトを遂行する確率はほとんど無くなる ($\beta_n \to 0$)。

また、補題 2 の意思決定のもとでは、前兆によって得られる観測値の数が大きくなったとき、必ずしも第 1 種の誤りが小さくなるわけでもなく、第 2 種の誤りが小さくなるわけでもないことに注意しなければならない。

ところで、補題 2 に規定されている DM の意思決定は、前兆により与えられる観測値を母集団から得られる標本と見た場合、$\theta = \tau$ を帰無仮説とし、$\tau < \theta$ を対立仮説とする検定とみなすことが可能である。$\sigma_n^{*c} = \{\boldsymbol{x}_n | y_n \notin [0, x_n^*]\}$ が帰無仮説の棄却域となる。この場合、ここで名付けた第 1 種の誤り、第 2 種の誤りは、そのまま当該する検定の第 1 種の誤り、第 2 種の誤りに対応する。DM の意思決定をこのように検定とみなすと、この検定は第 1 種の誤りが一定の条件のもとで、複合仮説である対立仮説に対して、第 2 種の誤りをもっとも小さくする検定、すなわち一様最有力検定である。

系 2. 補題 2 の意思決定を $\theta = \tau$ を帰無仮説とし、$\tau < \theta$ を対立仮説とする検定とみなすと、一様最有力検定である。

4 前兆を獲得するインセンティブの大きさ

本節では、エージェントがプロジェクト試行を行う際に、努力により前兆という情報を得て、DM の意思決定に資することを目指すインセンティブについて分析する。特に、前兆の獲得のための調査試行が 1 回に限られる場合を考える。複数回の試行が許される場合には、既に行った試行の結果得られた観測値の値が後の意思決定に影響する。そのために、試行にどの程度の努力を行うかという意思決定の際して、結果によっては中途で試行を取り止める等の可能性を考慮しなければならない。このことが、試行における努力のインセンティブの大きさに影響する。さらに、1 回だけの試行の場合には、その試行によって得られた情報によってプロジェクト価値がどれだけ変化すると見込めるかという効果の大きさがインセンティブを決めるが、複数回の試行では、情報収集による効果の相対的な大きさが、試行を継続するかどうかを決定するので、異なる特性が生じる。こうした複数回に渡る試行の分析は次節で行う。本節では、単純に 1 回だけ試行が許される場合を分析する。

この目的のために、本節では、試行による前兆として確率変数 X を獲得する上での、努力の効果について次の仮定を置く。

仮定 5 (1 回だけの試行).

$\pi(0) = 0$、$0 \leq \pi(e) < 1$、$\pi'(e) \geq 0$、$\pi'(0) = \infty$, $\pi''(e) \leq 0$、for $e > 0$

$c(0) = 0$、$0 \leq c'(e)$、$c'(0) = 0$, $0 < c''(e)$, for $e > 0$

$\exists\ \bar{e} > 0$, $c(\bar{e}) < \bar{c} < B$, $\forall e \geq \bar{e}$, $\pi'(e) = 0$

エージェントはコストをかけた努力の大きさに応じて、前兆を得られる確率を高めることができる。仮定 5 のもとで、エージェントは努力水準 $e = 0$ を選択することによって、前兆を全く得ようとしないという選択をすることができる。これは、調査試行を行わないことに等しい。調査試行の有無をエージェント以外の社会構成員は観察できないと仮定していないので、この区別にはもともと意味が無い。また、$\bar{e}$ についての仮定は努力の水準に実質的な上限を設定している。このことによって努力のための費用にも上限 $\bar{c}$ が生じる。

そして費用の上限値はプロジェクトの便益 B 以下であると仮定する。いずれも分析に簡明さをもたらすための仮定である。

4.1 エージェントにおけるプロジェクト価値とペイオフ

プロジェクトを調査試行するエージェントによる、事故発生時の損害額の予想値を D_A とおく。エージェントは、この社会の構成員である 1 主体として、プロジェクトの便益および事故の際の損害を同様に受ける。他に、私的利益 R が発生する。この私的利益について次の仮定を置く。

仮定 6 (私的利益)**.** $B > R > \bar{c}$

私的利益は努力のための費用をまかなえる固定額である。そのために、調査費用に大きさ故に調査を回避する選択がない場合に限定して分析を行っている。このエージェントにおけるプロジェクト価値を、DM について定義 1 で想定した関数 (2) と同様に、事故発生の主観確率を下に以下のとおり定義する。

定義 5 (エージェントにおけるプロジェクト価値)**.**

$$W(\boldsymbol{x};\sigma,B+R,D_A,\tau) = H_\sigma(\boldsymbol{x})\cdot(B+R-p(\theta>\tau|\boldsymbol{x})\cdot D_A) \tag{7}$$

エージェントにおいても、DM がプロジェクトの遂行を決定した場合、事業便益 B および事故が発生した場合の損害 D_A を、公共財として他の社会構成員と同様に受ける。たとえエージェントにとってのプロジェクト価値が負の値をとったとしても、エージェントは自らの判断で事業を停止することはできない。言い換えると、社会に属しているかぎり、あまねくプロジェクトの影響を受けるので、その効果から逃れることはできない。エージェントにおいて参加制約に関わるのは、私的利益と努力費用のみである。仮定 6 の下では、この意味で参加制約は常に満たされている。

また、エージェントも DM と無情報事前分布 (仮定 3) を共有すると考える。そのため、主観確率の更新を含めて、事故パラメータである母数 θ の事後分布も同一である。

ここで、追加的情報がない場合を考える。このとき、無情報事前分布による事故発生の主観確率 (4) に基づいたエージェントにおけるプロジェクト価値を W_0^A とおくと、プロジェクトの遂行を前提として、

定義 6 (W_0^A, W_0^*)**.**

$$\begin{aligned} W_0^A &\equiv W_0^A(R,D_A,\tau) \equiv W(\boldsymbol{x}_0;\sigma_0^*,B+R,D_A) = B+R-(1-\tau)D_A \\ W_0^* &\equiv W_0^*(D_0,\tau) \equiv W(\boldsymbol{x}_0;\sigma_0^*,B,D_0) = B-(1-\tau)D_0 \end{aligned}$$

である。後に用いるために、同じ無情報事前分布における主観確率に基づいた DM におけるプロジェクト価値 W_0^* もあわせて定義している。また、表記の煩雑性を避けるために $W_0^A(R,D_A,\tau)$, $W_0^*(D_0,\tau)$ を単に W_0^A, W_0^* と表記する。

エージェントは試行により、努力の水準 e に応じて $\pi(e)$ の確率で前兆を 1 つ得る ($\boldsymbol{x}_1$)。前兆が得られた場合、DM は母数 θ の事後分布 $F(\theta|\boldsymbol{x}_1)$ と、事故発生の予想確率 $p(\theta>\tau|\boldsymbol{x}_1)$

を得て、プロジェクトの推進・停止を決定する。エージェントはDMの意思決定スキームを補題1、補題2に示される形 σ_1^* として知り、自らのプロジェクト価値を形成する。この1つの前兆の観測値 $\boldsymbol{x}_1$ に基づいたエージェントにおけるプロジェクト価値を

定義 7 ($W_1^a(x_1)$)**.**

$$W_1^a(x_1) \equiv W_1^a(x_1; R, D_A, \tau) \equiv W(\boldsymbol{x}_1; \sigma_1^*, B+R, D_A)$$

とおく。(R, D_A, τ) はパラメータであるが、表記の煩雑性を避けるため単に $W_1^a(x_1)$ と表記する。前兆を得るために試行における努力水準は、エージェント自らのプロジェクト価値の期待値を最大化すべく決定される。調査試行を行う前の時点でとらえた、前兆を1つだけ得られた場合の、プロジェクト価値の主観確率による期待値を

定義 8 (W_1^A)**.**

$$W_1^A \equiv W_1^A(R, D_0, D_A, \tau) \equiv E_{\boldsymbol{x}_1}(W_1^a(x_1)|\boldsymbol{x}_0) = E_{\boldsymbol{x}_1}(W(\boldsymbol{x}_1; \sigma_1^*, B+R, D_A)|\boldsymbol{x}_0)$$

と定義する。他と同様に、パラメータに依存するが W_1^A と簡略化して表記する。ここでは、期待値オペレータは主観確率 $F(\theta|\boldsymbol{x}_0)$ に基づいた $\boldsymbol{x}_1$ の確率分布についての期待値であることを示している。$W_1^a(x_1)$ および W_1^A の値は補題4に示される。

補題 4 (**1つの観測値に基づいたエージェントにおけるプロジェクト価値**)**.**

$$\begin{aligned} W_1^a(x_1) &= \begin{cases} B+R-D_A\dfrac{\log(\tau)}{\log(x_1)} & \text{for } 0 \le x_1 \le x_1^* \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\ W_1^A &= \tau^{D_0/B}\left(B+R-(D_0-D_A)\log(\tau)\right) \end{aligned}$$

DMの事故損害予想額がプロジェクトの便益に対して十分大きいとき、エージェントの事故損害予想額 D_A がDMの予想額 D_0 より大きいか、もしくは小さくともそれほど大きく違わないとき、試行による前兆を得ることによって、エージェントにおいてのプロジェクト価値は増大する。すなわち、

定義 9 (τ^*, D_0^*)**.**

$$\tau^* \equiv \frac{1}{2}, \quad D_0^* \equiv B\left(1-\frac{\log(2)}{\log(\tau)}\right)$$

とすると、

補題 5 (**前兆獲得によるプロジェクト価値の増大**)**.**
仮定1,2, 3, 4, 6を置く。$\tau > \tau^*$ のとき、
$\forall D_0 > D_0^*,\ \exists D_A^* < D_0$、$D_A^* < D_A$ なら $W_1^A > W_0^A$。

が成り立つ。すなわち、事故発生の確率が十分に低いとき、エージェントは自らの事故損害予想額がDMのそれを大きく下回らないかぎり、前兆を得るべく試行において努力するインセンティブを持つ ($W_1^A > W_0^A$)。以下の便のために補題5で存在が証明された $W_1^A > W_0^A$ が保証される (D_0, D_A) の領域を特定するために $D_A^*(D_0)$ を以下のとおり定義しておく。

定義 10 (D_A^*)**.**

$$D_A^*(D_0) \equiv D_A^*(D_0; R, \tau) \equiv \inf\{D_A | W_1^A > W_0^A,\ \text{for } D_0 > D_0^*\} < D_0$$

特に断らないかぎり、$D_A^*(D_0; R, \tau)$ は $D_A^*(D_0)$ と略記される。

一方、エージェントの私的利益 R が正の値をとるかぎり、かならずエージェントが努力するインセンティブを全く持たなくなる ($W_1^A < W_0^A$) 領域が存在する。この領域は R の値とともに拡大する。すなわち、

補題 6 (私的利益によるエージェントのインセンティブ喪失)**.**
仮定 1,2, 3, 4, 6 を置く。$\Psi \equiv \mathbb{R}_+ \times \mathbb{R}_+ \times [0, 1]$ とする。$\forall R > 0,\ \exists (D_0, D_A, \tau) \in \Psi,\ \ D_0 > B$ かつ $W_1^A < W_0^A$。$\psi(R) \equiv \{(D_0, D_A, \tau) | (D_0, D_A, \tau) \in \Psi,\ W_1^A < W_0^A\}$ とする。$R_2 > R_1 > 0$ なら $\psi(R_1) \subset \psi(R_2)$ である。

を得る。

4.2 エージェントによる情報獲得のための努力水準の決定

以上の準備の下に、エージェントにおける努力水準の決定を分析する。エージェントがコスト $c(e)$ で努力 e を費やしたとき、前兆を $\pi(e)$ の確率で得ることができる。観測値の有無に基づいて、エージェントにとってのプロジェクト価値が W_1^A ないしは W_0^A と確率的に与えられる。プロジェクト価値は、エージェントにおける、事故発生の主観確率に基づく純便益の期待値である。このプロジェクト価値自体が、観測値の有無によって確率的に与えられるので、努力水準 e に依存した確率変数と考えられる。この確率変数であるプロジェクト価値の期待値をとり、ここから試行にあたっての努力費用を控除したものがエージェントのペイオフである。ただし、ペイオフと言っても、エージェントが自ら確信している事故損害予想額に基づくペイオフであるので、この値もあくまで主観的な値であると考えねばならない。しかし、エージェントはペイオフを最大化すべく、自らの努力水準を決定する。この努力水準は、前兆の発生確率を決定するのであるから、社会的に重要な値である。主観的なペイオフではあるが、この意味で分析の重要な対象である。

このペイオフは、

$$\pi(e) \cdot W_1^A + (1 - \pi(e)) \cdot W_0^A - c(e) \tag{8}$$

と表すことができる。エージェントがペイオフを最大化する際に選択される努力水準を e^* とおく。

定義 11 (選択される努力水準)**.**

$$e^* \equiv \underset{e}{\operatorname{argmax}} \{\pi(e) \cdot W_1^A + (1 - \pi(e)) \cdot W_0^A - c(e)\}$$

明らかに e^* は、$W_1^A - W_0^A > 0$ のとき、1 次条件

$$\pi'(e^*) \cdot \left(W_1^A - W_0^A\right) - c'(e^*) = 0 \tag{9}$$

を満たし、$W_1^A - W_0^A \leq 0$ のとき、$e^* = 0$ である。

この条件より、エージェントの努力水準について次の命題を得る。

命題 1. 仮定 1, 2, 3, 4, 5, 6 をおく。

$$\bar{e} > e^* > 0, \quad \frac{\partial e^*}{\partial D_A} > 0, \ \frac{\partial e^*}{\partial R} < 0$$

$\forall(\tau, D_0, D_A), \ \tau > \tau^*, \ D_0 > D_0^*, D_A > D_A^*(D_0)$

$D_0 > D_A^*(D_0)$ であるから、試行を担当するエージェント自身の損害予想値 D_A が D_0 に十分近いとき、ないしは $D_A > D_0$ のとき、エージェントの努力水準は D_A が大きいほど大きく、私的利益 R が小さいほど大きい。プロジェクトの遂行を担当するエージェントのペイオフがプロジェクト価値の期待値によって定義され、事故発生時の損害額を考慮しているのであるから、事故損害額の予想値が大きいほど、前兆を得て事故を回避しようとするインセンティブが強くなるのは当然である。また、ここでの仮定のもとでは、観測値がない場合にはプロジェクトは遂行され、観測値を得ると必ずプロジェクトが停止される可能性が生じるので、私的利益の拡大はインセンティブを損なう。

ここで、エージェントの事故損害額の予想値 D_A が固定されている場合に、DM における予想値 D_0 が変化すると考えるときには、エージェントの努力水準は以下の命題に示される形で影響される。

命題 2. 仮定 1, 2, 3,4,5, 6 をおく。$D_A > D_0^*$ かつ $\tau > \tau^*$ であるとする。エージェントの事故損害予想値 D_A が一定であるとすると、エージェントが選択する調査試行における努力水準 e^* は、$D_0 = D_A + R/\log(\tau) < D_A$ において極大となる。

命題が示すように、プロジェクトの遂行を担うエージェントが固定され、その事故損害予想額が与えられていると考えられる場合、事故損害額の DM における予想値が高いほど、エージェントの調査試行における努力インセンティブが高まるというわけではない。エージェントの事故損害額予想値よりも高い水準に極大となる点があり、DM の予想値がその極大点より低い場合には、DM の予想値が高ければ高いほどエージェントの調査試行における努力インセンティブは高まるが、DM の予想値がその極大点より高い場合には、DM の予想値が高ければ高いほどエージェントの調査試行における努力インセンティブはかえって阻害されるのである。エージェントの判断基準は、私的利益の分だけ DM の判断基準とずれることになる。もしそのずれが無い場合、すなわち私的利益 $R = 0$ である場合には、DM の事故損害予想額がエージェントの事故損害予想額に等しいときに、2 主体の判断基準が一致する。判断基準が一致したとき、エージェントの調査試行によって得られた情報の価値は最大化される。なぜなら、判断基準に差があると、ある情報の追加によってエージェントが意思決定を変えるべきと考える場合にも、DM は意思決定を変えない場合が生じる。このとき、この追加的情報の役割が低下している。このように、DM とエージェントの判断基準が乖離すると、前兆の意思決定のための情報としての価値が低下するので、前兆獲得のための努力インセンティブも低下するのである。したがって、両者の判断基準が一致したときエージェントの調査試行によって得られた情報の価値は最大化される。

私的利益が存在する場合には、たとえ事故損害予想値が一致していたとしても、両者の判断基準が私的利益によりずれてしまう。正の私的利益がある場合には、DM がエージェントより私的利益に相当する分だけ事故損害額予想値が低いとき、実質的に判断基準が等しくなる。このときに、エージェントが努力によって得る前兆の情報としての価値が極大

になるので、努力インセンティブも極大となる。この値を超えて DM の事故損害予想値が大きくなると、情報としての価値が低下し、したがってエージェントの努力インセンティブも低下するのである。

この構図は以下のように解釈することも可能である。補題 2 の解釈において、DM の意思決定は、許容される事故発生確率としてリスク水準を B/D_0 と設定し、プロジェクトの遂行のためにはこの許容リスク水準未満であることを要求していると理解することができると説明した。ここでは、プロジェクトを実行するのはエージェントであり、このエージェントは独自の事業価値の期待値と事故損害予想値によるペイオフを持っていることについては同じ状況を想定する。ただし、エージェントはプロジェクトの遂行について意思決定する責任をも負っていると考える。しかしながら、判断基準となる許容されるリスクの水準 B/D_0 は、外部から規制として与えられると考える。プロジェクトの調査試行、遂行共に専門性が高く、他の社会構成員も前兆を観測できるのだが、解釈し判断するのはエージェントに任される場合である。このとき、上の命題は、自らの事故損害予想値に基づいて導出される許容可能なリスクの水準よりも、低く厳しい判断基準を外部から要求されると、エージェントが情報を獲得しリスクの水準を見極めようとする努力インセンティブはかえって低下してしまうということを示唆している。エージェント以外の主体が、事故を非常に甚大な被害をもたらすと予想し、そのために判断基準を厳しく設定すると、前兆を得るための努力水準は低くなり、前兆を得る可能性も低下し、結果として、プロジェクトが遂行される確率は高くなってしまう。

さらに、DM が自らエージェントとなり、自らプロジェクトを実行し意思決定も行う場合には、なるべく事故損害額の期待値が高い主体が DM となったほうが、リスク獲得のための努力水準が高くなることがわかる。すなわち、

命題 3. 仮定 1, 2, 3, 4, 5, 6 をおく。DM と遂行主体であるエージェントが同一であるとき、$\tau > \tau^*$ かつ $D_0 = D_A > D_0^*$ であるかぎり e^* は $D_0 = D_A$ の値と共に増大する。

DM とエージェントが一体で、プロジェクトに関する意思決定も遂行もおこなう主体があるとき、この主体の事故損害額の予想値が D_0^* を下回らないかぎり、できるだけ高い事故損害額の期待値を持つ主体がその責を担ったほうが、費やされる努力水準は高い。この命題が成り立つという意味において、様々な主体が、自ら意思決定し実行することが可能なとき、できるだけ事故が発生した場合の損害額に対し悲観的な主体にプロジェクトを委ねるべきである。

4.3 社会的最適性

ここでは 1 つのプロジェクトにつき過酷な事故が 1 回限り発生すると想定している。事故が発生した場合の損害額については発生確率の分布も知られていないと考えている。こういった場合にも損害額の分布について、存在しているものとして何らかの仮定をおくことは可能であるが、その仮定した分布を用いて通常のミクロ経済学における余剰分析の形で社会的最適性をこのモデルで分析することは適当ではない。ここでは、事故による損害の程度について、社会的合意が存在せず、社会構成員のそれぞれが異なる損害予想値を確信している場合という、現実に過大となる状況を想定して、意思決定の問題を考えている。

分布を仮定すると、当然、何らかの仮定の下で、事故損害額の適切な想定の仕方を考えることができる。そのため、DM ないしはエージェントが過度に損害額を高く予想している場合、または過度に低く予想している場合等の帰結を分析することになる。しかし、 1 回限りの過酷事故の問題を考えるときに、そのような分析に大きな意味があるとは考えられない。

そこで、これまで情報探査のための試行に費やされる努力水準を比較してきた。損害額の分布が知られていないからこそ、損害の発生確率についてより深く調査することが重要であると考えるからである。しかし、余剰分析と形は異なるが、社会的最適性についてもいくつかの命題を得ることができる。

DM を含めた社会構成員が、エージェントと同様にプロジェクト価値を評価すると考える。これらの社会構成員は、プロジェクトから公共財として等しく便益と事故による損害を受ける主体であるからである。ある社会構成員が固有の事故損害額予想値 D を持っているとすれば、そうした社会構成員におけるプロジェクト価値は、エージェントについてのプロジェクト価値 W_0^A, W_1^A において $D_A = D$ とおいた場合の価値に等しい。この値を事故損害額予想値 D の関数としてそれぞれ $W_0(D)$, $W_1(D)$ とおくと、

定義 12 (一般社会構成員についてのプロジェクト価値)**.**

$$\begin{aligned} W_0(D) &\equiv W_0(D; B, \tau) \equiv W(\boldsymbol{x}_0; \sigma_0^*, B, D, \tau) = B - (1-\tau)D, \qquad (10) \\ W_1(D) &\equiv W_1(D; B, D_0, \tau) \equiv E_{\boldsymbol{x}_1}(W(\boldsymbol{x}_1; \sigma_1^*, B, D)|\boldsymbol{x}_0) \\ &= \tau^{D_0/B}\{B - (D_0 - D)\log(\tau)\} \qquad (11) \end{aligned}$$

である。この変数についても、$W_1(D)$、$W_0(D)$ と略記する。エージェントの場合と同様に、プロジェクト価値は試行の結果発生する前兆としての観測値の有無による確率変数となる。この確率変数の期待値を、これら社会構成員のペイオフと考えることができる。ただし、エージェントのペイオフを定義したときに説明したとおり、やはり個々の社会的構成員が主観的に確信していると想定した事故損害予想額に基づくペイオフであり、主観的な値である。このペイオフの水準を $Y(D, e^*)$ と表すと、

定義 13 (一般社会構成員のペイオフ)**.**

$$Y(D, e^*) \equiv \pi(e^*)W_1(D) + (1 - \pi(e^*))\, W_0(D) \qquad (12)$$

である。

補題 5 より、$\tau > \tau^*$ かつ $D_0 > D_0^*$ であり、さらに当該社会構成員の事故損害額予想値 D が DM のそれ D_0 と大きく異ならないかもしくは大きい限り ($D > D_A^*(D_0)$)、前兆による観測値を得ることによって DM の意思決定が更新されたとき、その社会構成員におけるプロジェクト価値は増大する ($W_0(D) < W_1(D)$)。したがって、それら社会構成員のペイオフを定義 13 で定義するかぎり、$D > D_A^*(D_0)$ を満たす任意の D の値について、それらペイオフはエージェントの努力水準とともに増大する。すなわち、

$$\frac{\partial}{\partial e^*}Y(D, e^*) = \pi'(e^*) \cdot (W_1(D) - W_0(D)) > 0$$

である。このことから、次の系を得る。

系 3 (一般の社会構成員のペイオフ). 事故損害予想額 D を持つ社会構成員のペイオフが定義 13 で定義されると考える。$\tau > \tau^*$、$D_0 > D_0^*$ かつ $D_A > D_A^*(D_0)$ かつ $D > D_A^*(D_0)$ のとき、このペイオフは D_A の増加関数である。また、D_A の値が一定であるとき、D_0 の値が $D_0 = D_A + R/\log(\tau)$ となるとき、ペイオフは極大化される。さらに、DM がエージェントと同一主体のとき、損害額予想値が大きい主体がこの責を担ったほうがペイオフは大きくなる。

この系 3 の特殊な状況として、系における一般の社会構成員を DM であると考えると、DM はより高い D_A を持ち事故損害額を高く見積もるエージェントにプロジェクトの試行を委ねることによって、自らのペイオフを増大させることができる。逆に、楽観的で事故損害額を低く見積もるエージェントにプロジェクトを委ねると、自らのペイオフを低下させてしまう。

4.4 賠償責任

次に、DM ないしはエージェントに対して、事故が発生した場合の賠償責任を課すことの効果を考える。事故が発生した場合甚大な被害が発生するので、その責任を社会として賠償責任の形で問うことの効果である。

賠償責任には過失責任と厳格責任があるが、本稿では、厳格責任ルールの設定の効果を考える。分析しているモデルにおいてはエージェントの努力水準 e は観測できないと仮定しているので、エージェントの努力が不十分であったとして過失責任を問うことはできない。また、DM においても、前兆としての確率変数 X の値はすべての主体が観測でき、DM 自身の事故損害額予想値も公開された情報と仮定しているので、DM の判断の適否は、事故を待つまでもなくすぐに評価され、修正される。ここで考えるのは、事故が発生した場合に、エージェントの努力の水準および DM の判断の適否によらずに、賠償責任を課す厳格責任ルールの場合である。

一般に、事故に加害者と被害者があり、両方が注意という努力を払うことによって事故の発生を回避できる場合には、双方に最適な水準の努力を促す過失責任ルールが望ましいとされる。[9]そのような場合に注意の水準によらずに、一方的に加害者か被害者に責任を課す厳格責任ルールを適用すると、双方とも注意コストを節約しようとするモラル・ハザードが発生する。一方、経済主体の何らかの経済活動が事故を引き起こすと考える場合には、事故による損害を経済活動の外部費用としてとらえ、その内部化が可能である厳格責任ルールが望ましいとされる。[10]内部化を行うことによって、事故による損害期待値と注意のための費用の合計が最小化される。経済活動に起因する事故に過失責任ルールを適用しようとすると、具体的には注意義務水準を設定し、この水準以上の注意を払った場合には賠償責任が免除されるという形をとる。この責任制度の下では注意水準を望ましい水準に維持することはできるが、問題となる経済活動の事故によって発生する外部効果が内部化されるわけではない。そのために、経済活動水準が過大になると指摘される。

ここでは甚大な損害を社会に与える事故を考えているので、賠償責任を課すといっても、特定の主体が損害額すべてを賠償できるわけではない。事故による損害が発生した場合に

[9] Baird et al. [1994] を参照せよ。
[10] Segerson [1995] を参照せよ。

は、損害額の一部を DM またはエージェントに課すことになる。そのために、賠償責任を課すことによってプロジェクトの事故による外部効果を内部化する効果も限定的である。しかし、賠償責任の設定はエージェントが前兆を得るために努力する水準に影響を与える。本稿では、この努力水準に与える影響を重要と考えて、分析の対象とする。

まず、エージェントに厳格責任を課す場合を考える。第 2 期にプロジェクトが遂行されて事故が発生した場合、エージェントが第 1 期に行った調査試行の如何によらず、あらかじめ定められた一定額の賠償がエージェントに課される。定義 5 において、エージェントにおけるプロジェクト価値を式 (7) として定義した。そこでは、エージェントの私的利益は、意思決定にあたってプロジェクト利益と同等であると考え、$B + R$ と合計して事故損害額の主観的期待値と比較されている。厳格責任ルールによって賠償責任を負う場合にも、意思決定に当たって賠償責任が負の私的利益と同等な形で働くと考えると、賠償責任額が事故損害額に上乗せされる状態と考えるのが適当である。したがって、賠償責任が課される場合は、エージェントの事故損害予想値 D_A が賠償責任額の分だけ増大した場合と同等である。この効果は命題 1 ですでに分析されている。命題 1 は、エージェントの均衡努力水準 e^* が D_A の増加関数であるとしている。したがって、次の系が成り立つ。

系 4 (エージェントに対する厳格賠償責任). 仮定 1, 2, 3, 4, 5, 6 の下で、$\tau > \tau^*$ かつ $D_0 > D_0^*$ かつ $D_A > D_A^*(D_0)$ であるとき、エージェントに厳格賠償責任を課すと、エージェントの選択する努力水準 e^* は増大する。

DM に厳格賠償責任を課す場合はもう少し複雑である。エージェントに厳格賠償責任を課す場合と同様に、DM はプロジェクトの遂行について意思決定をするにあたって、自らのプロジェクト価値の正負を評価する際に、賠償責任をその事故損害予想値に加算して評価すると考えられるとする。もし、DM の意思決定を社会構成員が観察して、賠償責任額を事故損害予想値の増大として判断することが不当であるとする場合には、意思決定を変えることはできず、モデルの動きに何らの変化もない。賠償責任によるプロジェクト遂行についての意思決定の変化が受け入れられる場合には、（他の社会構成員も観察する）意思決定が、事故損害予想値の賠償責任分だけの増大という形で変化する。命題 2 は、エージェントの事故損害予想値が一定と考えられる場合に、DM の事故損害予想値 D_0 が変化すると考えると、$D_0 = D_A + R/\log(\tau)$ においてエージェントの努力水準が極大になるとしている。したがって、DM がエージェントより楽観的である ($D_0 < D_A$) 場合、DM に厳格賠償責任を課すと、エージェントの努力水準が増大することがある。しかし、賠償責任額が大きいとかえって努力インセンティブを損なってしまうかもしれない。一方、DM がエージェントより悲観的である ($D_0 > D_A$) とき、DM に厳格賠償責任を課すと、エージェントの努力インセンティブが損なわれる。すなわち、次の系が成り立つ。

系 5 (DM に対する厳格賠償責任). 仮定 1, 2, 3, 4, 5, 6 の下で、DM に厳格賠償責任を課すとする。DM は、プロジェクトの遂行の意思決定にあたって、自らの事故損害額予想値を賠償責任額だけ増大させて判断するとすれば、エージェントの選択する努力水準 e^* は $D_0 < D_A$ であるとき、賠償責任額が十分小さいとき増大し、$D_0 \geq D_A$ であるとき、減少する。

さらに、DM とエージェントが同一主体であるとき、命題 3 により、厳格賠償責任を課すことによってその主体の努力インセンティブは高まる。すなわち、

系 6 (DM に対する厳格賠償責任). 仮定 1, 2, 3, 4, 5, 6 をおく。DM と遂行主体であるエージェントが同一であり、その主体に厳格賠償責任を課すとする。その主体が、プロジェクトの遂行意思決定および調査活動において、自らの事故損害額予想値を賠償責任額だけ増大させて判断するとすれば、努力水準 e^* は $\tau > \tau^*$ かつ $D_0 = D_A > D_0^*$ であるかぎり厳格賠償責任を課すことによって増大する。

5 試行を継続するインセンティブの大きさ

本節では、前節に引き続いて、第 1 期に DM が意思決定するに際して、エージェントがプロジェクト試行を委ねられ、前兆という情報を得ようと努力するインセンティブの大きさを分析する。ここでは、試行による前兆の獲得は 2 回まで可能であるとする。1 回の試行結果が出ている場合に 2 回めの試行を継続するかどうかは、既に得られた前兆に依存する。1 回めの試行による前兆の値によっては、2 回めの試行が可能であっても努力をまったく払わず、追加的な前兆を求めないことを選択する可能性がある。情報が試行によってある程度得られている場合に、さらに努力してリスクに対する情報を得ようとするかどうかのインセンティブは、4 節で分析の対象としたような試行によって得られる情報の価値の大きさによって決定されるインセンティブとは異なる側面を持つ。

試行の継続を分析するため、本節では、試行による前兆獲得におけるエージェントの努力の効果について次の仮定を置く。すなわち、λ および $\bar{e}$, $\bar{c}$ を定数として、

仮定 7 (2 回の試行).

$0 < c(e)$、$0 \le c'(e)$、$0 < c''(e)$, for $e > 0$, $\lambda\bar{c} = c(\bar{e})$, $1 > \lambda > 0$,

$$\pi(e) = \begin{cases} 0 & \text{for } 0 \le e < \bar{e} \\ \lambda & \text{for } e \ge \bar{e} \end{cases}$$

この仮定の下では、エージェントは試行に際して努力することを選択する場合には、$\lambda\bar{x}$ だけのコストをかけて $\bar{e}$ だけの努力を行うことになる。$e < \bar{e}$ の努力水準よりは $e = 0$ の方が望ましく、$e > \bar{e}$ であれば $\bar{e}$ の方が望ましいからである。$\bar{e}$ の努力を行えば、一定の確率 λ で前兆として観測値を得ることができる。

この設定においても、試行に際してエージェントが実際に努力してリスクについての情報を得ようとしたかどうかは、努力の結果である前兆の出現が不確実なために他の社会構成員は観測できない。本節ではこの仮定 7 の下で、エージェントによる情報獲得活動の継続の有無について分析する。

5.1 2 回目の試行におけるインセンティブ

2 回めの試行を行う際のインセンティブの大きさは、1 回めの試行で得られた前兆の有無に依存するため、問題をバックワードに解いていく。最初に、1 つめの観測値が得られていることを前提して 2 回めの試行を行う際の努力インセンティブを分析する。その結果として、1 回目に与えられた前兆である確率変数 X の実現値を条件としたプロジェクト価値が決定される。その期待値が、1 つめの前兆を得るための努力インセンティブを決定する。

すでに 1 回めの試行において $\boldsymbol{x}_1$ という観測値を得ている状況を考える。ここで、この 1 つの観測値を得たのみでエージェントが試行を停止した場合を考え、試行の継続についての意思決定のベンチマークとする。観測値が 1 つのみであるから、この 1 つの観測値を手がかりに、DM は補題 2 で示された形でプロジェクトの実行についての意思決定を行う。すなわち、$x_1 \leq x_1^*$ であれば遂行し、$x_1 > x_1^*$ であれば停止する。この意思決定のあり方に対応して、エージェントにとってのプロジェクト価値が決定される。このプロジェクト価値が $W_1^a(x_1)$ である。1 回目の前兆を得る前の時点で、$\boldsymbol{x}_1$ の無情報事前分布について期待値をとったものが W_1^A であった。

次に、エージェントが 2 回めの試行において努力を継続する場合のプロジェクト価値の変化を考える。もし 1 つめの観測値の値 $\boldsymbol{x}_1$ において $x_1 > x_2^*$ であったとすれば、2 つめの観測値の有無、値によらず、DM はこのプロジェクトの実行を許可することはないとわかっている。したがって、エージェントにとってこのプロジェクトの価値は 0 である。したがって、試行における努力が継続され、観測値が求められることはない。一方、$x_1 \leq x_2^*$ であれば、2 つめの観測値の値に応じてプロジェクトが遂行される可能性がある。2 つめの観測値を求めて試行を行う前の時点でとった、2 つめの観測値が得られたとした場合のプロジェクト価値の期待値を、$\boldsymbol{x}_1$ の関数として $W_2^a(x_1)$ とおく。

定義 14 (W_2^a)**.**

$$W_2^a(x_1) \equiv W_2^a(x_1; R, D_0, D_A, \tau) \equiv E_{\boldsymbol{x}_2}(W(\boldsymbol{x}_2; \sigma_2^*, B+R, D_A)|\boldsymbol{x}_1)$$

特に断らないかぎり、$W_2^a(x_1; R, D_0, D_A, \tau)$ は $W_2^a(x_1)$ と略記される。

この $W_2^a(x_1)$ の値について補題 7 を得る。

補題 7.

$$W_2^a(x_1) = \begin{cases} (B+R)\left(1 - \dfrac{\log(\delta\tau)}{\log(x_1)}\right) - \dfrac{\left(D_0 - D_A + \dfrac{RD_0}{B}\right)\delta(1-\tau)}{\log(x_1)} & x_1 \in (0, x_2^*] \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

定義 15 の下で、$W_1^a(x_1)$ と $W_2^a(x_1)$ との間には補題 8 を確認できる。なお、τ^+ の値は約 0.6953 である。

定義 15 (τ^+)**.**

$$\frac{1}{1+\tau^+} + 2\log\left(\frac{\tau^+}{1+\tau^+}\right) - \frac{\log(\tau^+)}{1-\tau^+} = 0$$

補題 8.
仮定 1, 2, 4, 6 を置く。$\exists D_0^+ > B$、$\forall D_0 > D_0^+$, $\exists D_A^+ < D_0$、$D_A^+ < D_A$ なら $\boldsymbol{x}_1 \in \{(x)|x \in (0, x_1^*]\}$、$\tau > \tau^+$ において、

$$W_2^a(x_1) - W_1^a(x_1) > 0, \ \lim_{x_1 \to 0}\{W_2^a(x_1) - W_1^a(x_1)\} = 0, \ \frac{dW_2^a(x_1)}{dx_1} - \frac{dW_1^a(x_1)}{dx_1} > 0.$$

すなわち、D_0 が B に比べて十分に大きく、かつ、D_A が D_0 に十分近いか、もしくは $D_A > D_0$ であると、エージェントは、コスト $\lambda\bar{c}$ をかけて努力することにより、確率 λ で前兆として２つめの観測値を得て、プロジェクト価値を $W_1^a(x_1)$ から $W_2^a(x_1)$ へ変化させようとする可能性がある。

前節におけるのと同様に、以下の便のために補題8で存在が証明された $W_2^a(x_1) > W_1^a(x_1)$ が保証される (D_0, D_A) の領域を特定するために D_0^+ および $D_A^+(D_0)$ を定義しておく。

定義 16 $(D_0^+,\ D_A^+)$**.**

$$\begin{aligned} D_0^+ &\equiv \sup\left\{ D_0 \;\middle|\; \begin{array}{l} B\log(\tau\delta) - D_0\log(\tau) + R(1-\delta\tau+\log(\delta\tau)) = 0, \\ \delta\left(\tau + \frac{D_0}{B}(1-\tau)\right) = 1, D_0 \in (B, B/(1-\tau)) \end{array} \right\} \\ D_A^+(D_0) &\equiv \inf\{D_A | W_2^a(x_1) > W_0^a(x_1)\},\ \text{for } D_0 > D_0^+ \end{aligned}$$

補題 8 の証明の課程で示されるように、$D_A^+(D_0)$ の値は $\boldsymbol{x}_1$ に依存しない。

２回めの試行による観測値の有無によって、確率的に与えられるプロジェクト価値が前節と同じく確率変数となる。こうして得たプロジェクト価値の増大の期待値から努力の費用を控除した値が、２回めの試行に際して、エージェントが努力することに対するペイオフとなる。このペイオフも他におけるのと同じく、エージェントの主観的な損害額予想値に基づくペイオフである。このエージェントのペイオフを $Y_2^a(\boldsymbol{x}_1)$ とおくと、

定義 17 $(Y_2^a(\boldsymbol{x}_1))$**.**

$$Y_2^a(\boldsymbol{x}_1) \equiv \pi(e)\cdot W_2^a(x_1) + (1-\pi(e))\cdot W_1^a(x_1) - c(e)$$

である。仮定 7 の下では、エージェントは

$$W_2^a(x_1) - W_1^a(x_1) \geq \bar{c} \tag{13}$$

が成立するときにかぎり２つめの観測値を目指して努力 $\bar{e}$ を行う。すなわち、現在得られている前兆を考慮して、試行を行うことにより、プロジェクト価値が $\bar{c}$ 以上増加すると見込める場合にのみ追加的な試行を行う。

エージェントが２つめの前兆を目指して努力する x_1 の領域は、定義 18 の下で、補題 9 に示される。

定義 18 $(\chi_1, \chi_2, D_A^1, D_A^2)$**.**
十分に小さな $\bar{c}$ の値に対して、χ_1 は

$$W_2^a(x_1) - \bar{c} = W_1^a(x_1), \quad 0 < x_1 < x_1^*$$

を満たす x_1 の値である。また χ_2 は、

$$W_2^a(x_1) - \bar{c} = 0, \quad x_1^* < x_1 < x_2^*.$$

を満たす x_1 の値である。さらに、

$$D_1^A \equiv \frac{B+R}{B}D_0 > D_0, \quad D_A^2 \equiv (B+R)\left\{ \frac{D_0}{B} + \frac{\log\left(\frac{\delta}{\tau^{\frac{D_0}{B}-1}}\right)}{\delta(1-\tau)} \right\} > D_A^1$$

とする。

補題 9. 仮定 1, 2, 3, 4, 6, 7 を置く。また、$D_0 > D_0^+$、かつ $D_A > D_A^+(D_0)$、かつ $\tau > \tau^+$ であるとする。$\bar{c}$ が B に比べて十分に小さいとき、エージェントが 2 つめの前兆を目指して努力する条件 (13) を満たす $\boldsymbol{x}_1$ の領域は、$D_A \in (D_A^+(D_0), D_A^1)$ のとき、$[\chi_1, x_2^*]$、$D_A \in [D_A^1, D_A^2)$ のとき、$[\chi_1, \chi_2]$、$D_A \in [D_A^2, \infty)$ のとき、$[\chi_1, x_1^*]$ である。

補題 9 により、エージェントによる第 1 回目の調査の結果、観測される確率変数 X の値が D_A の値に依存した一定の領域内にあるとき、エージェントは、引き続いて 2 回めの調査を行おうとする。エージェントにおいて、1 回めの調査を行う時点で、すなわち無情報事前分布の下で、2 回目まで継続して試行する主観確率は補題 10 で表される。

補題 10.
仮定 1, 2, 3, 4, 6, 7 を置く。$D_0 > D_0^+$、かつ $\tau > \tau^+$、かつ $\bar{c}$ が B に比べて十分に小さいとき、

$$p(W_2^a(x_1) - W_1^a(x_1) \geq \bar{c}|\boldsymbol{x}_0) = \begin{cases} = -\displaystyle\int_{\chi_1}^{x_2^*} \log(x)\,dx & \text{when } D_A \in (D_A^+(D_0), D_A^1) \\ = -\displaystyle\int_{\chi_1}^{\chi_2} \log(x)\,dx & \text{when } D_A \in [D_A^1, D_A^2) \\ = -\displaystyle\int_{\chi_1}^{x_1^*} \log(x)\,dx & \text{when } D_A \in [D_A^2, \infty) \end{cases} \tag{14}$$

である。

この 2 回めまで前兆を得るため継続して努力する主観確率について、次の命題 4 が成立する。

命題 4.
仮定 1,2,3,4,6 7 をおく。$\forall D_0 > D_0^+,\ D_A > D_A^+(D_0) > 0,\ \tau > \tau^+$ なら

$$\frac{d\chi_1}{dD_A} < 0, \quad \lim_{\bar{c}\to 0} \chi_1 = 0$$

である。さらに、$D_A \in (D_A^+(D_0), D_A^1) \cup [D_A^2, \infty)$ において

$$\frac{d}{dD_A} p(W_2^a(x_1) - W_1^a(x_1) \geq \bar{c}|\boldsymbol{x}_0) > 0$$

である。

χ_1 の値は観測値 x_1 が小さいとき、この値より小さければ再度調査試行をして、2 つめの観測値を得る必要がないと考えられる下限の値である。命題 4 によると、エージェントの事故損害額予想値が大きくなると、この下限が低下し、より小さい前兆の値でも再度調査しようとする。この意味で、調査しようとするインセンティブが高まる。$\bar{c}$ が十分に小さいとき、この下限が 0 に収束するという、命題は、前兆を得るための努力の費用が十分に小さいときには、エージェントにおいて試行における努力を 1 回に留めておくインセン

ティブはないことを示している。これらの命題はエージェントの事故損害額予想値 D_A が D_0 と大きく離れないか、ないしは $D_A > D_0$ であるかぎり成立する。すなわち、たとえ、エージェントが楽観的であり事故損害額を低く見積もっていたとしても、それだけでは試行のコストが十分に安いかぎり、前兆を求める努力を 1 回のみに留めておく動機にはならないのである。

また、命題 4 の後半は、事故損害額予想値 D_A の高いエージェントが試行を担うことによって、エージェントが継続して 2 つめの前兆を得るために努力する確率が高くなることを示している。この傾向は、まず、$D_A \in (D_A^+(D_0), D_A^1)$ で確認される。$D_A^+(D_0) < D_0 < D_A^1$ であるから、エージェントの事故損害予想額が DM のそれと大きく離れないときである。このときには、エージェントの事故損害予想額が大きくなると、事故を避けるべくより小さい観測値 x_1 であっても 2 回目の調査を行なって確認しようとし、一方で、観測値が x_2^* までは常に再確認しようとして、プロジェクトの遂行の可能性を探るからである。他に、$D_A \in [D_A^2, \infty)$ でも確認される。このときには、エージェントの事故損害予想額が非常に大きく、事故を避けるべくより小さい観測値 x_1 であっても 2 回目の調査を行なって確認しようとする傾向は同じだが、観測値が x_1^* 超えない限り再調査を行なって確認しようとする。x_1^* を超える場合には、2 度目の調査試行の結果を待たず、プロジェクトを放棄する。

前節において確認した、事故損害額予想値が高いエージェントほど、（1 回限りの）前兆を得るための努力水準が高くなることと同じ傾向が、試行における努力の継続においても確認できることを示している。[11]

5.2 1 回目の試行におけるインセンティブ

5.1 における分析において、1 回目の試行の結果、確率変数 X について x_1 という観測値が得られた場合のプロジェクト価値が与えられている。1 回目の試行に際して努力を実行するのは、2 回めの試行に際して努力を実行するのかどうかの判断の場合と同様に、前兆を得ることによりプロジェクト価値の期待値が、前兆を得るための確率等価なコスト $\bar{c}$ 以上増加する場合のみである。

1 回めの試行を行う時点で、$\bar{e}$ の努力を費やすことによるペイオフを考える。プロジェクト価値は、試行の結果得られた前兆が $\boldsymbol{x}_1$ であった場合のそれぞれのプロジェクト価値を、$\boldsymbol{x}_1$ の事前分布によって期待値をとることにより得ることができる。前兆が得られた場合、その 1 回だけで試行における努力を停止するのなら、この期待値は W_1^A で表された。しかし、2 回めの試行で努力を継続することが可能なので、エージェントは 1 回めの試行を行い、前兆となる $\boldsymbol{x}_1$ の値を得ることができた時点で、その $\boldsymbol{x}_1$ の値に応じて、試行の継続を停止して、$\boldsymbol{x}_1$ の値だけをもとに DM の意思決定を待つか、ないしはコスト $\lambda\bar{c}$ を

[11] D_A の値が中間の領域にあるとき、すなわち $D_A \in [D_A^1, D_A^2)$ のときにも、エージェントの事故損害予想額が大きくなると、事故を避けるべくより小さい観測値 x_1 であっても 2 回目の調査を行なって確認しようとする傾向は変わらない。しかし、同時に、再調査しないと DM はプロジェクトを放棄するが、再調査によってプロジェクト遂行の可能性がある場合に事故損害額予想値が大きくなると、より小さい 1 回めの観測値であっても、あえて再調査をせずに DM にプロジェクトを放棄させようとする傾向が生じる。そのために、再調査を行う観測値の領域は縮小する可能性もある。一般に、前者の効果の方が強いので、他の領域と同様に、事故損害予想額が大きいエージェントの方が再調査に努力する傾向がある。しかし、たとえば、調査の努力費用が非常に小さいときには、再調査を行う観測値の下限はほぼ 0 に張り付いてしまい変化がないので、後者の効果のみが生じ、事故損害額が大きいエージェントほど再調査を行う傾向が低下する可能性が残る。

費やして努力を継続し、もう 1 つ前兆を得ることを期待するかを決定することができる。5.1 の分析において、この意思決定は、試行における努力を停止した場合のプロジェクト価値 $W_1^a(x_1)$ と努力を継続した場合の期待値 $W_1^a(x_1) + \lambda(W_2^a(x_1) - W_1^a(x_1) - \bar{c})$ の比較に表され、エージェントは $W_2^a(x_2) - W_1^a(x_1) - \bar{c} \geq 0$ の場合に、後者を選択することになるとされた。確率的に得られる前兆の値に応じて定まるプロジェクト価値は確率変数となり、その期待値から与えられるペイオフを $Y_1^a(\bar{e})$ とおくと、この値は補題 11 に示されるように W_1^A の値を下回ることはない。

定義 19 ($Y_1^a(\bar{e})$)**.**

$$Y_1^a(\bar{e}) \equiv E_{\boldsymbol{x}_1}\left(\max(W_1^a(x_1), W_1^a(x_1) + \lambda\left\{W_2^a(x_1) - W_1^a(x_1) - \bar{c}\right\})|\boldsymbol{x}_0\right)$$

補題 11.

$$Y_1^a(\bar{e}) \geq W_1^A$$

一方、1 回めの試行機会を用いなかった場合には、プロジェクトの状態は、1 回だけ試行が許される場合と同じになる。もし 2 回めの前兆を得る機会も使わず、前兆を得ることなしにプロジェクトを遂行する場合には、プロジェクト価値は W_0^A である。また、もし残り 1 回の前兆を得る機会を求めて試行の際に努力 $\bar{e}$ を行った場合には、プロジェクト価値の期待値は $W_0^A + \lambda\left(W_1^A - W_0^A - \bar{c}\right)$ である。このことから次の補題が成立する。

補題 12.
エージェントが、1 回めの調査試行の機会において、$\bar{e}$ の努力を払って前兆を得ようとするかどうかを決定する時点で、調査試行による前兆獲得を目指さず $e = 0$ とすることを選択するにもかかわらず、その後 2 回目の調査試行の機会が与えられたときには $\bar{e}$ の努力を払って前兆の獲得を目指す場合、$W_1^A - \bar{c} \geq W_0^A$ が成立していなければならない。

以上の準備を下に、1 回めの試行に際して前兆を獲得するために正の努力を払うかどうかについてのエージェントの意思決定は、次の命題 5 に示すことができる。

命題 5. 仮定 1,2, 3,4,6, 7 をおく。エージェントが 1 回めの試行に際して、前兆を得ようと努力を $\bar{e}$ の水準で行うための必要十分条件は、$D_0 > D_0^+, D_A > D_A^+(D_0), \tau > \tau^+$ の下で、$Y_1^a(\bar{e}) - W_0^A \geq \bar{c}$ である。この条件を満たす $\bar{c} > 0$ の領域は D_A とともに拡大する。

この命題により、試行を担うエージェントの事故損害予想額が大きければ大きいほど、より高い努力費用の水準まで、このエージェントは前兆獲得を目指して努力 $\bar{e}$ を行うことが分かる。この意味で、エージェントにおける調査試行のインセンティブは、より悲観的なエージェントほど大きいことが確認される。

6 観測値の秘匿が可能である場合

本節では、前節までと異なり、第 1 期の調査試行によって確率的に発生する確率変数 X の値を、遂行を担当するエージェントが秘匿できる場合を考える。前節までは、前兆として観測される X の値は公開された情報として総ての社会構成員が観測できると仮定して

分析していた。この仮定を緩和して、X の値はエージェントのみが私的情報として調査活動に伴って観測し、この値を DM および他の社会構成員に報告するかどうかをエージェントが決定することができる場合を考えるのである。ただし、情報の秘匿は可能であるが、情報の内容を操作する捏造はできないものとする。

プロジェクトの調査・遂行を委託されるエージェントと DM とは異なる事故損害予想額を確信している。そのため、プロジェクトの運営に伴う私的利益の存在を除外したとしても、さらに前兆による観測値を共有し、したがって事故発生の確率について意見の相違がなかったとしても、プロジェクトを遂行すべきか否かについての判断は異なる。私的利益の存在も、エージェントにとってのプロジェクト価値を最適化する判断を乖離させる要因とある。

それぞれのプロジェクト価値関数は、DM において定義 1 で示され、エージェントにおいて定義 5 として示されている。それぞれの関数の観測値 $\boldsymbol{x}$ に関するポイントワイズ最適化も異なる。DM の場合には、

$$B - p(\theta > \tau|\boldsymbol{x}) \cdot D_0 \geq 0$$

が、プロジェクト遂行の条件となる一方で、エージェントにとっては

$$B + R - p(\theta > \tau|\boldsymbol{x}) \cdot D_A \geq 0$$

であるときプロジェクト価値は最適化される。

こうした意見の相違がある場合、エージェントには自ら確信している事故損害額に基づいて、調査試行によって得た前兆を観測できなかったものと偽り、情報を秘匿しようと判断するインセンティブが生じる。本節では第 4 節、第 5 節の分析の拡張として、仮定 5 に基づき、調査試行が 1 回だけ許される場合の情報秘匿の効果を分析する。

6.1 情報秘匿が生じる場合

調査試行は 1 回のみ許される。もし、正の努力を行ったとしても結果観測値が得られない場合には、秘匿する対象もないので、第 4 節の分析と変わるところはない。選択する努力水準 e^* はもともと観測できない。努力の結果、1 つの観測値 $\boldsymbol{x}_1$ が得られた場合を考える。エージェントにとってのプロジェクト価値を観測値 $\boldsymbol{x}_1$ についてポイントワイズに最適化する判断を σ_1^A とおく。第 3.5 節で説明した DM の判断は σ^* で示される。ここでは、エージェントがもし自分で判断できたとしたら、自らにとってのプロジェクト価値を最適化するために選択する判断を考えている。この判断は補題 13 に示される。

定義 20 (エージェントにとっての最適条件)**.**

$$\begin{aligned}\sigma_1^A \quad \equiv \quad & \big\{\sigma|\sigma \subset \Sigma_1, W(\boldsymbol{x};\sigma, B+R, D_A) \geq W(\boldsymbol{x};\sigma', B+R, D_A), \\ & \forall\boldsymbol{x},\ \boldsymbol{x} \in \Sigma_1,\ \text{and}\ \ \forall\sigma', \sigma' \subset \Sigma_1\big\}\end{aligned}$$

定義 21 (x_1^A)**.**

$$x_1^A \equiv \tau^{\frac{D_A}{B+R}}$$

補題 13 (エージェントにとっての最適判断)**.**

$$\sigma_1^A = \{\boldsymbol{x}_1 | x_1 \in [0, x_1^A]\}$$

エージェントが観測値の秘匿を行うのは、σ_1^* と σ_1^A とが相違する場合に限られる。相違しなければ、特定の観測値が得られた場合、DM におけるプロジェクト推進・停止の判断とエージェントにおけるプロジェクト価値最適化のための判断とが一致し、観測値を秘匿する理由がないからである。σ_1^* と σ_1^A との食い違いは、補題 14 に示される形で生じる。

補題 14.

$$\begin{cases} \sigma_1^A \subset \sigma_1^*, & \text{when } \dfrac{D_A}{B+R} > \dfrac{D_0}{B} \\ \\ \sigma_1^A \supseteq \sigma_1^*, \quad \sigma_1^A \cap \sigma_1^{*c} = \{\boldsymbol{x}_1 | x_1 \in [\tau^{D_0/B}, \tau^{D_A/(B+R)})\}, & \text{when } \dfrac{D_A}{B+R} \leq \dfrac{D_0}{B} \end{cases}$$

第 1 に、$x_1 \in \sigma_1^A \cap \sigma_1^{*c}$ にあり、エージェントは遂行すべきであると考えるが DM は停止すべきであると考える場合であり、第 2 に、$x_1 \in \sigma_1^{A^c} \cap \sigma_1^*$ にあり、エージェントは停止すべきであると考えるが DM は遂行すべきであると考える場合である。

エージェントが得た観測値が秘匿された場合、実際に前兆として何も観測されなかったのか、それとも秘匿が行われたのかを区別できない。このとき、DM の意思決定には、それぞれ 2 つの可能性がある。第 1 に、エージェントから観測値の情報が得られない場合に DM はプロジェクトの遂行を決定する場合であり、第 2 に、情報が得られない場合に遂行停止の決定をする場合である。以下では、2 通りの判断の相違と 2 通りの意思決定による、以下の 4 つのケースがそれぞれ均衡となる可能性があることを説明する。

ケース 1 $\sigma_1^A \supset \sigma_1^*$、$H_{\sigma_0^*}(\boldsymbol{x}_0) = 0$

ケース 2 $\sigma_1^A \subset \sigma_1^*$、$H_{\sigma_0^*}(\boldsymbol{x}_0) = 1$

ケース 3 $\sigma_1^A \supset \sigma_1^*$、$H_{\sigma_0^*}(\boldsymbol{x}_0) = 1$

ケース 4 $\sigma_1^A \subset \sigma_1^*$、$H_{\sigma_0^*}(\boldsymbol{x}_0) = 0$

前節までの分析においては、無情報事前分布のもとではプロジェクトの遂行を決定するという仮定 4 と整合的とするため、無情報の場合の最適意思決定 σ_0^* について定義関数を $H_{\sigma_0^*}(\boldsymbol{x}_0) = 1$ と定義してプロジェクト価値関数を表現していた。本節では、無情報の意思決定として、$H_{\sigma_0^*}(\boldsymbol{x}_0) = 0$、すなわちプロジェクトの停止を決定する場合も考えている。無情報であるときにプロジェクト遂行を停止することが、エージェントに情報の開示を促すインセンティブとして働くからである。

6.2 4 つのケースにおけるプロジェクト価値の期待値

分析に先立って 4 つのケースにおける、DM およびエージェントにとってのプロジェクト価値の期待値を最初に計算しておく。そのため、以下のとおり表記する。

定義 22.

$$\rho \equiv \begin{cases} \sigma_1^* \cup \sigma_1^A & \text{when } H_{\sigma_0^*}(\boldsymbol{x}_0) = 1 \\ \\ \sigma_1^* \cap \sigma_1^A & \text{when } H_{\sigma_0^*}(\boldsymbol{x}_0) = 0 \end{cases}$$

$H_{\sigma_0^*}(\boldsymbol{x}_0) = 1$ の場合、すなわち無情報のときには DM がプロジェクトの遂行を決定する場合、エージェントが情報を秘匿するとプロジェクトは実行される。したがって、σ_1^A と σ_1^* との包含関係によらず、常に σ_1^A と σ_1^* との和集合までプロジェクトが遂行される範囲は拡大される。$\sigma_1^* \subset \sigma_1^A$ の場合には、確率変数 X の値が $\sigma_1^A - \sigma_1^*$ の範囲に入った場合、秘匿することによってプロジェクトを遂行できるし、一方、$\sigma_1^* \supset \sigma_1^A$ の場合には、確率変数 X の値が $\sigma_1^* - \sigma_1^A$ の範囲に入った場合、秘匿してもしなくてもプロジェクトは遂行される。

逆に、$H_{\sigma_0^*}(\boldsymbol{x}_0) = 0$ の場合、すなわち無情報のときには DM がプロジェクトの停止を決定する場合、エージェントが情報を秘匿するとプロジェクトは停止される。したがって、この場合も σ_1^A と σ_1^* との包含関係によらず、常に σ_1^A と σ_1^* との積集合までプロジェクトが遂行される範囲は縮小される。$\sigma_1^* \subset \sigma_1^A$ の場合には、確率変数 X の値が $\sigma_1^A - \sigma_1^*$ の範囲に入った場合、観測値を秘匿してもしなくてもプロジェクトは停止される。一方、$\sigma_1^* \supset \sigma_1^A$ の場合には、確率変数 X の値が $\sigma_1^* - \sigma_1^A$ の範囲に入った場合、秘匿することによってプロジェクトを停止できる。

このように、ここで定義された意思決定 ρ は、観測値の秘匿が可能なとき各ケースにおいて実質的にプロジェクトの遂行が意思決定される範囲を規定している。この意思決定に基づいて、DM とエージェントとにおける、プロジェクト価値の期待値を各ケースについて次のとおり表記する。

定義 23 (V_i^A、V_i^D)**.**
それぞれのケース i について

$$\begin{aligned} V_i^A &\equiv (1-\pi(e)) \cdot W(\boldsymbol{x}_0; \sigma_0^*, B+R, D_A) + \pi(e) \cdot E_{\boldsymbol{x}_1}(\boldsymbol{x}_1; \rho, B+R, D_A | \boldsymbol{x}_0) \\ V_i^* &\equiv (1-\pi(e)) \cdot W(\boldsymbol{x}_0; \sigma_0^*, B, D_0) + \pi(e) \cdot E_{\boldsymbol{x}_1}(\boldsymbol{x}_1; \rho, B, D_0 | \boldsymbol{x}_0) \end{aligned}$$

各ケースにおける、エージェントと DM のそれぞれのプロジェクト価値の期待値は以下の補題 15 に示される。ただし、表記の簡略化のため次の関数を用いている。

定義 24.

$$\Phi(B', D', \sigma') \equiv \int_0^1 \int_{\sigma'} \left\{ B' - p(\theta > \tau | \boldsymbol{x}_1) \cdot D' \right\} \frac{dx_1}{\theta} dF(\theta | \boldsymbol{x}_0)$$

補題 15 (各ケースにおけるプロジェクト価値の期待値)**.**

ケース 1

$$V_1^A = \pi(e) \cdot \Phi(B+R, D_A, \sigma_1^*) = \pi(e) \cdot W_1^A$$
$$V_1^* = \pi(e) \cdot \Phi(B, D_0, \sigma_1^*)$$

ケース 2

$$\begin{aligned} V_2^A &= (1-\pi(e)) \cdot W_0^A + \pi(e) \cdot \Phi(B+R, D_A, \sigma_1^*) \\ &= (1-\pi(e)) \cdot W_0^A + \pi(e) \cdot W_1^A \end{aligned}$$
$$V_2^* = (1-\pi(e)) \cdot W_0^* + \pi(e) \cdot \Phi(B, D_0, \sigma_1^*)$$

ケース 3
$$V_3^A = (1-\pi(e))\cdot W_0^A + \pi(e)\cdot\Phi(B+R, D_A, \sigma_1^A)$$
$$V_3^* = (1-\pi(e))\cdot W_0^* + \pi(e)\cdot\Phi(B, D_0, \sigma_1^A)$$

ケース 4
$$V_4^A = \pi(e)\cdot\Phi(B+R, D_A, \sigma_1^A)$$
$$V_4^* = \pi(e)\cdot\Phi(B, D_0, \sigma_1^A)$$

なお、定義 24 で定義される関数 $\Phi(B', D', \sigma')$ には、次の性質がある。

補題 16.

$$\begin{aligned}\Phi(B+R, D_A, \sigma_1^A) &= (B+R)\tau^{\frac{B+R}{D_A}} \geq \Phi(B+R, D_A, \sigma_1), \quad \forall\sigma_1 \in \Sigma_1 \\ \Phi(B, D_0, \sigma_1^*) &= B\tau^{\frac{D_0}{B}} \geq \Phi(B, D_0, \sigma_1), \quad \forall\sigma_1 \in \Sigma_1\end{aligned}$$

それぞれのケースについて、エージェントの努力水準 e はエージェントのペイオフを最大にするように選択される。選択される努力水準をケース i について e_i とおく。

定義 25 (e_i)**.**
$$e_i \equiv \operatorname*{argmax}_e V_i^A - c(e)$$
観測した確率変数 X の値を秘匿できない第 4 節の場合、努力水準は 1 次条件 (9) により与えられる e^* の値である。観測値を秘匿できる本節の場合、選択される努力水準 e_i は、e^* と比べ等しいかないしは大きい。すなわち、次の命題 6 を得る。

命題 6 (**情報を秘匿できる場合の努力水準**)**.**
仮定 1, 2, 3, 4, 5, 6 をおく。$\tau > \tau^*$、$D_0 > D_0^*$、$D_A > D_A^*(D_0)$ とすると、$W_0^A \geq 0$ のとき、$e_i \geq e^*$ である。$e_i < e^*$ となる可能性があるのは、ケース 1 とケース 4 に限られる。このうち、ケース 1 の場合には、$W_0^A < 0$ のとき、必ず $e_1 < e^*$ となる。

$W_0^A \geq 0$ と考えられる場合には、ケース 2 のときだけ、観測値の秘匿ができない場合と秘匿ができる場合とで、エージェントの努力水準は同一になる。それ以外は、秘匿ができる場合の方が努力水準は高くなる。

ケース 1 の場合、エージェントは DM に比べて事故確率が高いところまでプロジェクトの遂行は許容されると考えている ($x_1^* < x_1^A$)。DM は観測値が得られない場合にはプロジェクトを停止する。前兆となる観測値が得られた場合、もし $x_1 \in [0, x_1^*]$ であると、観測値を示して DM にプロジェクトの遂行を促す。しかし、もし $x_1 \in (x_1^*, x_1^A]$ となる観測値が得られた場合には、秘匿によって DM の意思決定をエージェントの意思に沿うように変えることができない。その一方、観測値を得られない場合にはプロジェクトが停止されてしまう。そのため、努力によってできるだけ観測値を得て、プロジェクトの遂行を図ろうとする。

ケース 2 の場合、エージェントは DM に比べて事故確率が低いところまでしかプロジェクトの遂行は許容されるべきでないと考えている ($x_1^* > x_1^A$)。DM は観測値が得られない場合にはプロジェクトを遂行してしまう。前兆となる観測値が得られた場合、$x_1 \in [0, x_1^A]$ であれば観測値を示してプロジェクトの遂行を促す。しかし、$x_1 \in (x_1^A, x_1^*)$ となる観測値を得た場合には、ケース 1 の場合と同じく、秘匿によって DM の意思決定を変えることができない。その一方、観測値を得られない場合にはプロジェクトは遂行される。これは、

秘匿できない場合と変わらない。したがって、努力のためのインセンティブも秘匿できない場合と変わらない。

ケース 3 の場合、エージェントは DM に比べて事故確率が高いところまでプロジェクトの遂行は許容されると考えている ($x_1^* < x_1^A$)。DM は観測値が得られない場合プロジェクトを遂行する。$x_1 \in [0, x_1^*]$ であれば観測値を示してプロジェクトの遂行を促すが、もし $x_1 \in (x_1^*, x_1^A)$ となる観測値が得られた場合には、そのまま DM に観測値を示せばプロジェクトは停止されるが、情報を秘匿することによって DM の意思決定をエージェントが望ましいと考えるプロジェクトの遂行に変えることができる。このことによって、エージェントにとってのプロジェクト価値は高まる。一方、観測値を得られない場合にはプロジェクトは遂行されるが、これは秘匿できない場合と変わらない。したがって、努力のためのインセンティブは秘匿できない場合より大きくなる。

ケース 4 の場合、エージェントは DM に比べて事故確率が低いところまでしかプロジェクトの遂行は許容されるべきでないと考えている ($x_1^* > x_1^A$)。DM は観測値が得られない場合プロジェクトを停止する。$x_1 \in [0, x_1^A]$ であれば観測値を示してプロジェクトの遂行を促すが、$x_1 \in (x_1^A, x_1^*]$ となる観測値が得られた場合、そのまま DM に観測値を示せばプロジェクトは遂行されるが、情報を秘匿することによって DM の意思決定をエージェントが望ましいと考えるプロジェクトの停止に変えることができる。このことによって、エージェントにとってのプロジェクト価値は高まる。一方、観測値を得られない場合にはプロジェクトは遂行されないので、できるだけ観測値を得て、プロジェクトの遂行を図ろうとするインセンティブがさらに増大する。したがって、努力のためのインセンティブは秘匿できない場合より大きくなる。

以上のように、情報が得られないと DM がプロジェクトの停止を決定する場合には、これを避けようとしてエージェントは観測値を得ようと努力水準を増大する。また、秘匿によって DM の意思決定が変えられると考える場合には、自らのプロジェクト価値は情報の秘匿可能性によってより高まる。そのため、プロジェクト実現のインセンティブも高まるので、やはりより努力水準を増やすことになる。この場合には、情報の価値が高まるので、これを得ようとするインセンティブも高まるのである。一方、秘匿が可能であることによって、観測値を得るインセンティブが低下するのは、観測値が伝えられないと DM がプロジェクトの停止を決定する場合に限られる。インセンティブが低下するのは、無情報のもとではプロジェクトはあまりに危険だとエージェントが考えて、プロジェクトを停止すべきだと考えている場合である。このとき、エージェントはあえて努力を怠って、プロジェクトの停止に導こうとするインセンティブを持つ。

6.3 楽観的なエージェントの場合

ここでは、ケース 1 とケース 3 がそれぞれ均衡となる場合があること、あわせてそれぞれの均衡の性質を説明する。ケース 1 及びケース 3 は DM とエージェントの事故損害予想額において、

$$D_A \leq \frac{B+R}{B} \cdot D_0$$

の関係があることについて共通している。すなわち、私的利益を含めたプロジェクトの便益あたりの事故損害予想額がエージェントにおいて DM よりも低い場合である。それだけ

エージェントが楽観的な場合である。これらの均衡が存在するとき、努力水準はケース 1 の均衡においてケース 3 の均衡におけるよりも高くなる。すなわち、補題 17 が成立する。

補題 17.

$$D_A \in \left(B+R, \frac{B+R}{B}D_0\right] \quad \text{のとき} \quad e_1 > e_3 > 0$$
$$D_A \in (0, B+R] \quad \text{のとき} \quad e_1 > e_3 = 0$$

次の命題 7 はそれぞれのケースが均衡となるパラメータの値が存在することを示している。

命題 7 (楽観的なエージェントの下での分離均衡とプール均衡)**.**
仮定 1, 2, 3, 4, 5, 6 をおく。$\tau \to 1 - B/D_0 + 0$ においてケース 1 が均衡となる。また、$\tau \to 1 - 0$ においてケース 3 が均衡となる。

ケース 1 およびケース 3 の場合、エージェントは DM に比べて事故確率が高いところまでプロジェクトの遂行は許容されるべきであると考えている ($x_1^* < x_1^A$)。ケース 1 では DM は観測値が得られない場合プロジェクトを停止するので、秘匿によって DM の意思決定を変えることができない。このケースにおける均衡は分離均衡である。このモデルにおいては、固定的な私的利益の他には、明示的にエージェントに報酬は支払われない。そのため、通常のエージェンシーモデルのように、報酬構造を最適化して分離均衡を形成することができない。報酬に相当するのは DM の意思決定のみである。この DM の意思決定を「情報が無いときにはプロジェクトを停止する」とすることによって、エージェントの秘匿という戦略を無効化している。

一方、ケース 3 の場合には、DM は観測値が得られない場合プロジェクトを遂行する。DM は実際に観測値が得られなかったのか、それとも秘匿されているのかを識別できない。それでも、このときプロジェクトの遂行を決定することによって DM にとって相対的により高いプロジェクト価値を期待できる。この均衡は「プール均衡」である。実際、$\tau \to 1$ の場合には、事故の生じる確率は非常に小さいものであるが、前兆が得られない場合、ケース 1 を選択すると、一定の確率でプロジェクトが停止される。このことによる損失が、エージェントの観測値秘匿による損失を上回るとき、ケース 3 が選択されるのである。

それぞれの均衡において、エージェントの努力水準 $e_i \ (i = 1, 3)$ は、エージェントの事故損害予想額 D_A および私的利益の大きさ R に以下の命題が示すとおり影響される。

命題 8 (楽観的なエージェントの努力インセンティブ)**.**

$$\frac{de_1}{dD_A} < 0, \ \frac{de_1}{dR} > 0, \ \frac{de_3}{dD_A} > 0, \ \frac{de_3}{dR} < 0$$

このように、分離均衡（ケース 1 ）においては、より楽観的なエージェントほど努力する一方、私的利益は努力インセンティブを刺激する。一方、プール均衡（ケース 3 ）においては、より楽観的なエージェントほど努力を怠り、私的利益の存在は努力インセンティブを削ぐ方向に働く。

分離均衡においては、エージェントは観測値が得られないとプロジェクトが停止してしまうので、観測値を得る確率を高めるため努力する。事故損害予想額が小さいエージェン

トほど、遂行された場合のプロジェクト価値は高いと考えているのでより努力をする。私的利益が大きい場合も、同様にエージェントにとってのプロジェクト価値を高めるので同じ効果が期待できる。

プール均衡 (ケース 3) においては、観測値を得られない場合にもプロジェクトの遂行は保証されている。より楽観的で事故損害額予想値が小さいエージェントほど、情報が得られなかった場合と情報が得られた場合のプロジェクト価値の差が小さく、それだけより正確な情報の価値が低い。一方、私的利益が大きいほど、より正確な情報を求める上で歪みが生じている。そのため、歪みの大きさを決める私的利益の存在が、努力のインセンティブを阻害する。

6.4 悲観的なエージェントの場合

本節では、ケース 2 とケース 4 がそれぞれ均衡となる場合があること、あわせてそれぞれの均衡の性質を説明する。ケース 2 及びケース 4 は DM とエージェントの事故損害予想額において、

$$D_A > \frac{B+R}{B} \cdot D_0$$

の関係があることについて共通している。私的利益を含めたプロジェクトの便益あたりの事故損害予想額がエージェントにおいて DM よりも高い場合である。それだけエージェントが悲観的な場合に相当する。

これらの均衡が存在するときの、エージェントの努力水準について補題 18 が成立する。

補題 18.

$$D_A \to \frac{B+R}{B} D_0 + 0 \text{ のとき } e_4 > e_2, \quad D_A \to \infty \text{ のとき } e_4 < e_2,$$
$$D_A > \frac{B+R}{B} D_0 \text{ かつ } W_0^A > 0 \text{ のとき } e_4 > e_2$$

次の命題 9 はやはりケース 2 およびケース 4 が均衡となる場合が存在することを証明している。

命題 9 (悲観的なエージェントにおける分離均衡とプール均衡).
仮定 1, 2, 3, 4, 5, 6 をおく。$\tau \to 1-0$ においてケース 1 が均衡となる。$\tau \to 1-B/D_0+0$ かつ $D_A \to \dfrac{B+R}{B} D_0$ においてケース 4 が均衡となる。

ケース 2 およびケース 4 の場合、エージェントは DM に比べて事故確率が低いところまでしかプロジェクトの遂行は許容されるべきでないと考えている ($x_1^* > x_1^A$)。ケース 2 の場合、DM は観測値が得られないとプロジェクトを遂行してしまうので、もし観測値が得られた場合でも、秘匿によって DM の意思決定を変えることができない。したがって、このケースにおける均衡はケース 1 におけるのと同じ分離均衡である。ケース 1 の場合と同様に、DM の意思決定を「情報が無いときにはプロジェクトを遂行する」とおくことによって、エージェントの秘匿という戦略を無効化している。

一方、ケース 4 の場合、DM は観測値が得られない場合プロジェクトを停止する。DM は実際に観測値が得られなかったのか、それとも秘匿されているのかを識別できない。そ

れでもやはり、プロジェクトの停止を決定することによってDMにとって相対的により高いプロジェクト価値を期待できる。この均衡は「プール均衡」である。$\tau \to 1 - B/D_0$ の場合には、事故の生じる確率は大きく、損害額の期待値はプロジェクトの便益に近いものである。前兆が得られない場合、ケース４を選択すると、少なからぬ確率で、DMに許容できない観測値がエージェントに秘匿されてしまう。このことによる損失が、もともと小さいプロジェクトの便益を上回るとき、ケース４が選択される。

それぞれの均衡において、エージェントの努力水準 e_i $(i = 1, 3)$ は、エージェントの事故損害予想額 D_A および私的利益の大きさ R に以下の命題が示すとおり影響される。

命題 10.

$$\frac{de_2}{dD_A} > 0,\ \frac{de_2}{dR} < 0,\ \frac{de_4}{dD_A} < 0,\ \frac{de_4}{dR} > 0$$

分離均衡（ケース２）においては、より悲観的なエージェントほど努力する一方、私的利益は努力インセンティブを削いでしまう。プール均衡（ケース４）においては、より悲観的なエージェントほど努力を怠る一方、私的利益の存在は努力インセンティブを刺激する方向に働く。

分離均衡においては、観測値が得られなくともプロジェクトは遂行される。このときより悲観的なエージェントにとっては、事故による損害の期待値が大きくなってしまう。これを避けるために観測値を得る確率を高めるため努力する。私的利益が大きい場合、この事故による損害額をエージェントにおいては私的利益が補うので努力を阻害する方向に働く。

プール均衡においては、観測値を得られない場合にはプロジェクトが停止される。より悲観的で事故損害額が大きいエージェントほど、観測値が得られてプロジェクトが遂行されてしまう可能性を避けようとする。そのために努力を避ける傾向がある。一方、私的利益の存在はプロジェクトが遂行された場合のエージェントにとってのプロジェクト価値を高めるので、上の効果が緩和されてしまう。

7　終わりに

冒頭で示したように、本稿は原子力エネルギーの利用を推進するという意思決定において、十分に事業に伴うリスクが評価されないまま、事業が推進されていたという理解がもし正しいとしたとき、どのような要因によって不十分なリスク評価のまま意思決定がされ得たのかという命題を考察した。事業を運営する主体がリスク評価のために費用を費やして情報を獲得し、事業の推進を決定する主体は自らが信じる社会的費用と便益の比較から意思決定を行うというモデルを作成してこの課題を分析した。分析に用いたのは単純なモデルであるが、多くの要因について分析を行った。分析の結果確認された、要因として考えられる主な項目をあげると、事業会社がリスクについて楽観的だったこと、事業に伴う私的利益が大きかったこと、事業会社が抱いていたリスクの大きさと社会が要求する判断基準との間に差があったこと、事業会社と意思決定主体の間にリスクの予想についての大きな差があったこと、賠償責任が曖昧であったことである。一方、逆に要因として考えられないのは、事業会社が意思決定主体を虜として実質的に自ら意思決定をできたこと、事業会社がリスクに関わる情報を秘匿できる状態にあったことである。

本稿で作成したモデルでは、専門知識を持たない意思決定主体が、エキスパートに情報の収集を委託する。特にコミュニケーションの問題を考察するために、この構図の下で構成されたモデルは数多い。しかし、リスク評価という特殊な設定の下で分析されたものはこれまでに存在せず、そのためにそれら従来のモデルと異なったモデルとなっている。それにもかかわらず、これまでそうしたコミュニケーション・モデルで検討された命題を確認することができた。たとえば、獲得された情報が公開され誰もが確認できるときにも、バイアスしていないエージェントほど努力に費用をかける性向があるということを確認している。

本稿が十分に扱っていない問題は多い。技術が完成していない場合に、試行錯誤によってプロジェクトを推進していく場合には、逐次的なリスク評価とプロジェクト推進の意思決定を行う必要がある。本稿第5節では、情報獲得の機会が2回ある場合を分析したが、より一般的な場合を考察するべきである。また、事業遂行とリスク評価が同時に行われなければならない場合には異なる問題が発生する。中途でプロジェクトを中止することは、あらかじめリスクを評価して遂行を決める場合よりもはるかに難しい。この問題は、不十分であるが稿を別にして扱っている。さらに、このモデルは実際に情報収集の努力が十分でなかったという仮説を前提にして、その要因を考えるため、望ましい意思決定ないしは事業遂行ののあり方を分析するには適当ではない。この点に関しては、第2節でふれた、複数のエキスパートを用いるチープ・トークの分析や、代弁者の機能を分析した論文のアプローチが参考になる。たとえば、事業遂行会社が複数存在した場合の意思決定のあり方等を分析することによって面白い示唆をえることが期待できるのではないかと予想される。

Reference

- 蟻川靖浩・井上光太郎・斉藤卓爾・長尾耀平 (2016) 「日本企業の低パフォーマンスの要因：国際比較による検証」, pp.397-427. 宮島英昭（編著）『企業統治と成長戦略』第 12 章、東洋経済新報社

- 行政管理センター (1981-2) 「行政指導に関する調査報告研究 (1)-(3)」、『季刊行政管理研究』 No.15, pp.36-54, No.18, pp.38-51, No.20, pp.37-48.

- 伊東光晴 (2013)『原子力発電の政治経済学』岩波書店

- 国会事故調　東京電力福島原子力発電所事故調査委員会　報告書」(2012) http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/3856371/naiic.go.jp/

- 建林正彦 (1994) 西尾・村松編『講座行政学　第 3 巻政策と行政』第 3 章「産業政策と行政」

- 「東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会　中間報告」(2011) http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/icanps/post-1.html

- 「東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会　最終報告」(2012) http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/icanps/post-2.html

- 山地憲治 (2009)『原子力の過去・現在・未来』コロナ社
- 山内一夫 (1974) 「行政指導と法治主義」『ジュリスト』No.506, pp.14-19.
- Acharya, V. V., Amihud, Y., & Litov, L. (2011). Creditor rights and corporate risk-taking. Journal of Financial Economics, 102(1), 150-166.
- Argenziano, Rossella, Sergei Severinov, and Francesco Squintani (2016) Strategic information acquisition and transmission, *American Economic Journal: Microeconomics* Vol.8, No.3, pp.119-155.
- Baird D. G., R. H. Gertner, and R. C. Picker [1994], *Game Theory and the Law*, Harvard University Press, Cambridge: Massachusetts, and London: England.
- Beniers, Klaas J., Robert Dur, and Otto H. Swank (2002), Sequential Advocacy, Tinbergen Institute Discussion Papers, number 02-016/1.
- Che, Yeon-Koo, and Navin Kartik (2009), Opinions as incentives, *Journal of Political Economy* Vol.117, No.5 pp.815-860.
- Crawford, Vincent P. and Sobel, Joel (1982), Strategic information transmission. *Econometrica*, Vol.50, No.6, pp.1431-1451.
- Dewatripont, Mathias, and Jean Tirole,(1999) Advocates,. *Journal of political economy,* Vol,107, No.1,pp.1-39.
- Dur, Robert and Swank, Otto H. (2005), Producing and Manipulating Information, *Economic Journal*, No.115, pp.185-199.
- Gerardi, Dino, and Leeat Yariv, Costly expertise, *The American Economic Review,* Vol.98, No.2, pp.187-193.
- John, K., Litov, L., & Yeung, B. (2008). Corporate governance and risk- taking. The Journal of Finance, 63(4), 1679-1728.
- Kim, Chulyoung (2013), Adversarial and inquisitorial procedures with information acquisition, *The Journal of Law, Economics, & Organization*, Vol.30, No.4, pp.767-803.
- Kim, Chulyoung (2014), Partisan advocates, *Bulletin of Economic Research,* Vol.66, No.4, pp.313-332.
- Segerson, K. [1995], Liability and Penalty Structures in Policy Design, in D. W. Bromley ed. *Handbook of Environmental Economics*, Basil Blackwell Ltd, Oxford : United Kindom and Cambridge: Massachusetts.
- Sobel, Joel (2013), Giving and receiving advice, Acemoglu, Daron, Arellano, Manuel and Dekel, Eddie ed. *Econometric Society 10th World Congress. 2010*, Cambridge University Press, pp. 305-341.

- Van den Steen, Eric. (2010), Culture clash: The costs and benefits of homogeneity, *Management Science*, Vol.56, No.10, pp.1718-1738.

- Stigler, George J. (1971) The Theory of Economic Regulation The Bell Journal of Economics and Management Science Vol. 2, No. 1, pp. 3-21, DOI: 10.2307/3003160

付録：命題・補題の証明

補題 1 の証明. 連続一様分布において母数が θ のとき、確率変数 X の観測値 $\boldsymbol{x}_n$ の n 個の値すべてにおいて y^* 以下となる確率は、$0 \leq y^* \leq \theta$ のとき、$(y^*/\theta)^n$ である。この確率は、そのまま n 個の観測値の最大値 y_n の分布関数である。これから、y_n の確率密度関数を $g(y_n|\theta)$ とおくと、

$$g(y_n|\theta) = \begin{cases} \dfrac{d}{dy_n}\left(\dfrac{y_n}{\theta}\right)^n = \dfrac{n(y_n)^{n-1}}{\theta^n} & \text{for } 0 \leq y_n \leq \theta \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

である。ベイズの定理により、$n = 1$ のとき、

$$f(\theta|\boldsymbol{x}_1) = \frac{g(y_1|\theta)f(\theta|\boldsymbol{x}_0)}{\displaystyle\int g(y_1|\theta')f(\theta'|\boldsymbol{x}_0)d\theta'} = \begin{cases} -\dfrac{1}{\theta\log(x_1)} & \text{for } x_1 \leq \theta \leq 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

を得る。また、$n = 2$ のとき、

$$f(\theta|\boldsymbol{x}_2) = \frac{g(y_2|\theta)f(\theta|\boldsymbol{x}_0)}{\displaystyle\int g(y_2|\theta')f(\theta'|\boldsymbol{x}_0)d\theta'} = \begin{cases} \dfrac{1}{\theta^2\left((y_2)^{-1} - 1\right)} & \text{for } y_2 \leq \theta \leq 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

である。これらの確率密度関数を積分することにより分布関数を得る。

こうして得られた事後確率分布より、事故発生の主観確率は $n = 1$ のとき、

$$p(\theta > \tau|\boldsymbol{x}_1) = 1 - F(\tau|\boldsymbol{x}_1) = \begin{cases} \dfrac{\log(\tau)}{\log(x_1)} & \text{for } 0 \leq x_1 \leq \tau \\ 1 & \text{for } \tau < x_1 \leq 1 \end{cases}$$

となり、$n = 2$ のとき、

$$p(\theta > \tau|\boldsymbol{x}_2) = 1 - F(\tau|\boldsymbol{x}_2) = \begin{cases} \dfrac{\tau^{-1} - 1}{(y_2)^{-1} - 1} & \text{for } 0 \leq y_2 \leq \tau \\ 1 & \text{for } \tau < y_2 \leq 1 \end{cases}$$

となる。 □

補題 2 の証明. DM にとってのプロジェクト価値関数 (2) を、得られた観測値ベクトル $\boldsymbol{x}_n$ ごとにポイントワイズに最大化する解 σ_n^* は

$$\sigma_n^* = \{\boldsymbol{x}_n | B - p(\theta > \tau | \boldsymbol{x}_n) \cdot D_0 \geq 0\}$$

と表される。さらに条件 $B - p(\theta > \tau|\boldsymbol{x}_n) \cdot D_0 \geq 0$ は、補題 1 より、$p(\theta > \tau|\boldsymbol{x}_n)$ を得て、$y_1 = x_1$ ないしは y_2 についての条件式 $y_n \leq x_n^*$ $(n = 1, 2)$ と書き換えることができる。ここで、x_n^* は補題 1 より、x についての方程式 $h_n(x) = B/D_0$ の解である。ただし、

$$h_n(x) \equiv \begin{cases} \dfrac{\log(\tau)}{\log(x)} & \text{for } n = 1 \\ \\ \dfrac{\tau^{-1} - 1}{x^{-1} - 1} & \text{for } n = 2 \end{cases}$$

と置いている。$0 \leq x \leq \tau < 1$ について

$$h_1'(x) = -\frac{\log(\tau)}{x\left(\log(x)\right)^2} > 0, \ \lim_{x \to 0} h_1(x) < 0 < B/D_0, \ h_1(\tau) = 1 > B/D_0$$

$$h_2'(x) = x^2 \frac{\tau^{-1} - 1}{(x^{-1} - 1)^2} > 0, \quad \lim_{x \to 0} h_2(x) = 0 < B/D_0, \quad h_2(\tau) = 1 > B/D_0,$$

であるから、$x_n^* < \tau$ を得る。$t \equiv \tau^{-1}$ とおくと、$0 < x < \tau$ であるすべての x について、

$$h_1(x) - h_2(x) = \frac{\log(t)}{\log(u)} - \frac{t - 1}{u - 1}$$

である。ただし、$u \equiv x^{-1}$ と置いている。ここで、関数 $\log(u)$ および関数 $u - 1$ はともに、$u = 1$ において値 0 をとる。一方で、関数 $\log(u)$ は凹関数であり、関数 $u - 1$ は直線であるから、$u > t > 1$ について右辺は常に正の値をとる。したがって、関数 $h_2(x)$ は、関数 $h_1(x)$ よりも下方に位置する。このため、$h_2(x) = B/D_0$ の解は $h_1(x) = B/D_0$ の解よりも大となる。

また、

$$\begin{aligned} \frac{\partial x_1^*}{\partial D_0} &= \tau^{D_0/B} \frac{\log(\tau)}{B} < 0, \\ \frac{\partial x_2^*}{\partial D_0} &= -\tau\delta^2 \frac{1 - \tau}{B} < 0. \end{aligned}$$

□

補題 3 の証明.

$$\gamma_n = p(y_n > x_n^* | \theta \leq \tau, \boldsymbol{x}_0) = \frac{p\left((y_n > x_n^*) \wedge (\theta \leq \tau) | \boldsymbol{x}_0\right)}{p(\theta \leq \tau | \boldsymbol{x}_0)} = \frac{1}{\tau} \int_{x_n^*}^{\tau} \left(1 - \left(\frac{x_n^*}{\theta}\right)^n\right) d\theta \quad \text{for } n = 1,\ 2$$

である。補題 2 により得た x_n^* の値を代入し命題前半を得る。同様に、

$$\beta_n = p(y_n \leq x_n^* | \theta > \tau, \boldsymbol{x}_0) = \frac{p\left((y_n \leq x_n^*) \wedge (\theta > \tau) | \boldsymbol{x}_0\right)}{p(\theta > \tau | \boldsymbol{x}_0)} = \frac{1}{1 - \tau} \int_{\tau}^{1} \left(\frac{x_n^*}{\theta}\right)^n d\theta \quad \text{for } n = 1,\ 2$$

より、命題後半を得る。 □

系 1 の証明. 簡明につき略 □

系 2 の証明. $\theta_1 \in (\tau, 1]$ である任意の θ_1 の値を考える。尤度比 $L(\boldsymbol{x}_n|\theta_1)/L(\boldsymbol{x}_n|\tau)$ は、$0 \leq y_n \leq \tau$ のとき $(\theta_1/\tau)^n$、$\tau < y_n \leq \theta_1$ のとき ∞ である。また、$\theta_1 \leq y_n \leq 1$ では、$L(\boldsymbol{x}_n|\theta_1) = L(\boldsymbol{x}_n|\tau) = 0$ である。補題 2 の意思決定は、$\boldsymbol{x}_n$ が、領域 $\{\boldsymbol{x}_n|y_n \in (\tau, \theta_1]\}$ および領域 $\{\boldsymbol{x}_n|y_n \in [0, \tau]\}$ の一部にあるとき、帰無仮説を棄却するものである。さらに、$p(\boldsymbol{x}_n|y_n \notin [0, x_n^*]) = B/D_0$ である。このように、任意の $\theta_1 \in (\tau, 1]$ について Neyman-Pearson の補題の条件を満たしている。 □

補題 4 の証明. 補題 2 により $\sigma_1^* = \{\boldsymbol{x}_1|x_1 \in [0, x_1^*]\}$ であるから、$x_1 \in [0, x_1^*]$ にかぎり $H_{\sigma_1^*}(\boldsymbol{x}_1) = 1$ であり、その他の領域では 0 をとる。また、補題 1 により、$p(\theta > \tau|\boldsymbol{x}_1)$ を得て、$W_1^a(x_1)$ が与えられる。

前兆を得る前の時点でプロジェクト価値の期待値をとるのであるから、無情報事前分布 $F(\theta|\boldsymbol{x}_0)$ に基づいた母数の主観確率から得られる観測値の分布を得て、期待値をとる。

$$\begin{aligned}
E_{\boldsymbol{x}_1}(W_1^a(x_1)|\boldsymbol{x}_0) &= \int_0^1 \int_0^{\max(\theta, x_1^*)} \left(B + R - D_A \frac{\log(\tau)}{\log(x_1)}\right) \frac{dx_1}{\theta} dF(\theta|\boldsymbol{x}_0) \\
&= \int_0^{x_1^*} \int_{x_1}^1 \left(B + R - D_A \frac{\log(\tau)}{\log(x_1)}\right) \frac{d\theta}{\theta} dx_1 \\
&= \int_0^{x_1^*} \left(-(B + R)\log(x_1) - D_A \log(\tau)\right) dx_1 \\
&= -(B + R)(x_1^*(\log(x_1^*) - 1) + D_A x_1^*
\end{aligned}$$

となる。補題 2 により、$x_1^* = \tau^{(D_0/B)}$ を得て整理し、補題を得る。 □

補題 5 の証明. $W_1^A(R, D_0, D_A, \tau) - W_0^A(R, D_A, \tau)$ を τ の関数とみなし、$k^0(\tau; R, D_0, D_A)$ とおく。

$$\frac{d}{d\tau} k^0(\tau; R, D_0, D_A) = -\tau^{\frac{D_0}{B}-1} \log(\tau) \frac{D_0}{B}(D_0 - D_A) + \left(\tau^{\frac{D_0}{B}-1} - 1\right) D_A + \frac{D_0 R}{B} \tau^{\frac{D_0}{B}-1}$$

である。さらに、この式の右辺を所与の (τ, R, D_0) の値に対し D_A の関数とみなし、$k^1(D_A)$ とおく。

$$\begin{aligned}
k^0(1; R, D_0, D_A) &= 0 \\
k^1(0) &= -\frac{D_0^2}{B} \tau^{\frac{D_0}{B}-1} \log(\tau) + \frac{D_0 R}{B} \tau^{\frac{D_0}{B}-1} > 0 \\
k^1(D_0) &= \left(\tau^{\frac{D_0}{B}-1} - 1\right) D_0 + \frac{D_0 R}{B} \tau^{\frac{D_0}{B}-1} \\
&< \left(\tau^{\frac{D_0}{B}-1} - 1\right) D_0 + D_0 \tau^{\frac{D_0}{B}-1} \\
&= \left(\tau^{\frac{D_0}{B}-1} - \frac{1}{2}\right) 2D_0 \\
\frac{dk^1(D_A)}{dD_A} &= \frac{D_0}{B} \tau^{\frac{D_0}{B}-1} \log(\tau) + \tau^{\frac{D_0}{B}-1} - 1 = \tau^{\frac{D_0}{B}-1} \left(\frac{D_0}{B} \log(\tau) + 1\right) - 1 \\
&< \tau^{\frac{D_0}{B}-1} - 1 < 0
\end{aligned}$$

である。$D_0 > D_0^*$ であれば $\tau^{\frac{D_0}{B}-1} - 1/2 < 0$ である。$\tau > \tau^*$ であると

$$\frac{B}{1-\tau} > B\left(1 - \frac{\log(2)}{\log(\tau)}\right) = D_0^*$$

であるから、仮定 4 を満たす $D_0 < B/(1-\tau)$ について必ず $D_0 > D_0^*$ となる D_0 が存在する。このとき $k^1(D_0) < 0$ となるので、$dk^1/dD_A < 0$ より、ある D_A^* $(0 < D_A^* < D_0)$ が存在し、$D_A > D_A^*$ では $k^1(D_A) < 0$ となる。このとき、$0 < \tau < 1$ について $dk^0/d\tau < 0$ かつ $k^0(1) = 0$ であるから、$W_1^A > W_0^A$ である。 □

補題 6 の証明. 補題 5 の証明における $k^1(D_0)$ を考える。

$$D_0^{**} \equiv B \cdot (1 - \log(1 + R/B)/\log(\tau)) > B$$

とおく。$D_0 \in (B, D_0^{**})$ のとき、$k^1(D_0) > 0$ である。したがって、$D_A = D_0 < D_0^{**}$ のとき、$dk^0(\tau; R, D_0, D_0)/d\tau > 0$ である。$k^0(1; R, D_0, D_A) = 0$ であるから、$\tau < 1$ において、$k^0(\tau; R, D_0, D_0) < 0$ である。このとき、$W_1^A < W_0^A$ である。$\tau \in (0, 1)$ について

$$\frac{\partial}{\partial R} k^0(\tau; R, D_0, D_A) = \tau^{\frac{D_0}{B}-1} - 1 < 0$$

であるから、R の増大により関数が下にシフトする。したがって、$k^0(\tau; R, D_0, D_A) < 0$ となる (D_0, D_A, τ) の領域も R の増大とともに拡大する。 □

命題 1 の証明. 仮定により $\tau > \tau^*$, $D_0 > D_0^*$ かつ $D_A > D_A^*(D_0)$ であるから補題 5 より $W_1^A > W_0^A$ である。$e \in [0, \bar{e}]$ において $l(e) \equiv c'(e)/\pi'(e)$ とおくと、$l(0) = 0$、$\lim_{e \to \bar{e}} \to \infty$ $l'(e) = (c''(e)\pi'(e) - c'(e)\pi''(e))/(\pi'(e))^2 > 0$ であるから、$l(e) = W_1^A - W_0^A$ を満たす $e \in [0, \bar{e})$ が一意に与えられる。補題 5 の証明において定義した $k^0(\tau; R, D_0, D_A) \equiv W_1^A - W_0^A$ について、

$$\frac{\partial}{\partial D_A} k^0(\tau; R, D_0, D_A) = \tau^{\frac{D_0}{B}} \log(\tau) + 1 - \tau > \tau \log(\tau) + 1 - \tau > 0, \forall \tau \in (0, 1)$$

である。e^* が満たす条件 (9) より、

$$\frac{\partial e^*}{\partial D_A} = -\frac{\pi'(e^*) \cdot \dfrac{\partial k^0(\tau; R, D_0, D_A)}{\partial D_A}}{\pi''(e^*) \cdot k^0(\tau; R, D_0, D_A) - c''(e^*)} > 0.$$

同様に、

$$\frac{\partial}{\partial R} k^0(\tau; R, D_0, D_A) = \tau^{\frac{D_0}{B}} - 1 < 0, \forall \tau \in (0, 1)$$

であるので、$\partial e^*/\partial R < 0$ を得る。 □

命題 2 の証明. 仮定により $D_0^* < D_A$ であるから、$D_0 = D_A$ とすると、$D_A^*(D_0) < D_A$ である。したがって、D_0 が D_A の近傍にあるかぎり、$D_0^* < D_0$ かつ $D_A^*(D_0) < D_A$ が満たされ補題 5 より、$W_1^A > W_0^A$ を得る。さらに命題 1 より $e^* > 0$ である。このとき、補題 5 の証明において定義した $k^0(\tau; R, D_0, D_A)$ について、

$$\frac{\partial}{\partial D_0} k^0(\tau; R, D_0, D_A) = \frac{\tau^{D_0/B} \log(\tau)}{B} \{R - (D_0 - D_A) \log(\tau)\}$$

条件 (9) より、$k^0(\tau; R, D_0, D_A) > 0$ となる D_0 の値につき、

$$\frac{\partial e^*}{\partial D_0} = -\frac{\pi'(e^*) \cdot \dfrac{\partial k^0(\tau; R, D_0, D_A)}{\partial D_0}}{\pi''(e^*) \cdot k^0(\tau; R, D_0, D_A) - c''(e^*)}$$

を得る。$D_0 < D_A + R/\log(\tau)$ について、$\partial e^*/\partial D_0 > 0$、$D_0 = D_A + R/\log(\tau)$ について、$\partial e^*/\partial D_0 = 0$、$D_A + R/\log(\tau) < D_0$ について、$\partial e^*/\partial D_0 < 0$ であるから、e^* は $D_0 = D_A + R/\log(\tau)$ において極大値をとる。 □

命題 3 の証明. 補題 5 の証明における関数 $k^0(\tau; R, D_0, D_A)$ について、

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial}{\partial D_0} k^0(\tau; R, D, D) + \frac{\partial}{\partial D_A} k^0(\tau; R, D, D) \\
= \quad & \frac{B+R}{B} \tau^{\frac{D}{B}} \log(\tau) + (1-\tau) \\
> \quad & \frac{B+R}{B} \frac{\tau}{2} \log(\tau) + (1-\tau) \quad (\because D > D_0^* \text{より} \quad \tau^{D/B} < \tau/2) \\
> \quad & 2\frac{\tau}{2} \log(\tau) + (1-\tau) > 0 \;\; (\because B > R, \;\; \tau \in (0.1))
\end{aligned}$$

□

補題 7 の証明. プロジェクトは補題 2 より $y_2 \leq x_2^*$ のとき遂行され $y_2 > x_2^*$ で停止される。母数 θ の値により、プロジェクトが推進される確率は、$\theta \leq x_2^*$ のとき 1 であり、$\theta > x_2^*$ のとき、x_2^*/θ である。したがって、

$$E_{\boldsymbol{x}_2}(H_{\sigma_2^*}(\boldsymbol{x}_2)|\boldsymbol{x}_1) = \int_{x_1}^{x_2^*} dF(\theta|\boldsymbol{x}_1) + \int_{x_2^*}^{1} \frac{x_2^*}{\theta} dF(\theta|\boldsymbol{x}_1) = -\frac{1}{\log(x_1)}\left(\log\left(\frac{x_2^*}{x_1}\right) + 1 - x_2^*\right)$$

である。また、プロジェクトが推進され、かつ事故が発生する確率は $\theta > \tau$ のとき 1 であるから、

$$E_{\boldsymbol{x}_2}(H_{\sigma_2^*}(\boldsymbol{x}_2) \cdot p(\theta > \tau|\boldsymbol{x}_2)|\boldsymbol{x}_1) = \int_{\tau}^{1} \frac{x_2^*}{\theta} dF(\theta|\boldsymbol{x}_1) = -\frac{x_2^*}{\log(x_1)} \cdot \frac{1-\tau}{\tau}$$

である。したがって、プロジェクト価値は

$$\begin{aligned}
& E_{\boldsymbol{x}_2}(H_{\sigma_2^*}(\boldsymbol{x}_2) \cdot (B + R - p(\theta > \tau|\boldsymbol{x}_2) \cdot D_A)\,|\boldsymbol{x}_1) \\
= \quad & (B+R) E_{\boldsymbol{x}_2}(H_{\sigma_2^*}(\boldsymbol{x}_2)|\boldsymbol{x}_1) - D_A E_{\boldsymbol{x}_2}(H_{\sigma_2^*}(\boldsymbol{x}_2) \cdot p(\theta > \tau|\boldsymbol{x}_2)|\boldsymbol{x}_1) \\
= \quad & -\frac{1}{\log(x_1)}\left\{(B+R) \cdot \left(\log\left(\frac{x_2^*}{x_1}\right) + 1 - x_2^*\right) - D_A \cdot x_2^* \cdot \frac{1-\tau}{\tau}\right\}
\end{aligned}$$

となる。補題 2 により $x_2^* = \delta\tau$ および $(1-\delta\tau)B = \delta(1-\tau)D_0$ という関係を用いて補題を得る。 □

補題 8 の証明. $x_1 \in (0, \min(x_1^*, x_2^*) = x_1^*)$ のとき、

$$W_2^a(x_1) - W_1^a(x_1) = \frac{\mu_1(D_0, D_A; R, \tau)}{-\log(x_1)} \tag{15}$$

である。ただし、

$$\mu_1(D_0, D_A; R, \tau) \equiv (B+R)(1-\delta\tau+\log(\delta\tau)) - D_A(\delta(1-\tau)+\log(\tau))$$

とする。$\mu_1(D_0, D_A; R, \tau)$ は $\mu_1(D_0, D_A)$ と略記する。$D_0\delta(1-\tau) = B(1-\delta\tau)$ という関係を用いて変形している。μ_1 は分析のために D_0 および D_A の関数とみなしている。さらに、

$$\mu_2(D; R, \tau) \equiv \mu_1(D, D; R, \tau)$$

とおく。$\mu_2(D; R, \tau)$ は $\mu_2(D)$ と略記する。この、$\mu_2(\cdot)$ について、$D_0 = B$ のときには、$\delta = 1$ となることを利用すると、

$$\begin{aligned}
\mu_2(B) &= B\log(\tau\delta) - B\log(\tau) + R(1-\delta\tau+\log(\delta\tau)) \\
&= B\log(\delta) + R(1-\delta\tau+\log(\delta\tau)) \\
&= (B+R)(1-\tau+\log(\tau)) - B(1-\tau+\log(\tau)) \\
&= R(1-\tau+\log(\tau)) < 0 \quad (\because\ \tau \in (0,1))
\end{aligned}$$

である。さらに、

$$D_0 = \frac{B}{1-\tau} \Leftrightarrow \delta = \frac{1}{1+\tau},\quad \frac{1}{1+\tau} + \log\left(\frac{\tau}{1+\tau}\right) < 0,\ \text{for } \tau \in (0,1)$$

であることを用いると、

$$\begin{aligned}
\mu_2\left(\frac{B}{1-\tau}\right) &= (B+R)\left(\frac{1}{1+\tau} + \log\left(\frac{\tau}{1+\tau}\right)\right) - \frac{B}{1-\tau}\left(\frac{1-\tau}{1+\tau} + \log(\tau)\right) \\
&= R\left(\frac{1}{1+\tau} + \log\left(\frac{\tau}{1+\tau}\right)\right) + B\left(\log\left(\frac{\tau}{1+\tau}\right) - \frac{\log(\tau)}{1-\tau}\right) \\
&> B\left(\frac{1}{1+\tau} + \log\left(\frac{\tau}{1+\tau}\right)\right) + B\left(\log\left(\frac{\tau}{1+\tau}\right) - \frac{\log(\tau)}{1-\tau}\right) \\
&= B\left(\frac{1}{1+\tau} + 2\log\left(\frac{\tau}{1+\tau}\right) - \frac{\log(\tau)}{1-\tau}\right) \qquad (16)
\end{aligned}$$

式 (16) の括弧内は、$\tau > \tau^+$ について正の値をとる。

また、

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dD}\mu_2(D) &= \left\{(B+R)\left(-\tau + \frac{1}{\delta}\right) - D(1-\tau)\right\}\frac{\partial\delta}{\partial D_0} - (\log(\tau) + \delta(1-\tau)) \\
&= -RD\left(\frac{(1-\tau)\delta}{B}\right)^2 - (\log(\tau) + \delta(1-\tau)) \\
\frac{d^2}{dD^2}\mu_2(D) &= \frac{\delta^2(1-\tau)^2}{B^2}\left\{B - R + \frac{2RD\delta(1-\tau)}{B}\right\} > 0
\end{aligned}$$

したがって、$\tau > \tau^+$ のとき、ある $D_0^+ \in (B, B/(1-\tau))$ が存在し、$D_0^+ \leq D$ となる D について $\mu_2(D) = \mu_1(D, D) \geq 0$ とすることができる。

また、関数 $\mu_1(D_0, D_A)$ について、

$$\begin{aligned}\frac{\partial \mu_1(D_0, D_A)}{\partial D_A} &= -\log(\tau) - \delta(1-\tau) > 1 - \tau - \delta(1-\tau) = (1-\delta)(1-\tau) > 0 \\ \mu_1(D_0, B) &= B(1 - \delta + \log(\delta)) + R(1 - \delta\tau + \log(\delta\tau)) < 0\end{aligned}$$

を得る。

以上のことから、$\tau > \tau^+$ のとき、$D_0 > D_0^+$ について $\forall D_A > D_A^+$, $\mu_1(D_0, D_A) \geq 0$ となる $D_A^+ \in (B, D_0)$ が存在することが分かる。すなわち $\tau > \tau^+$ かつ $D_0 > D_0^+$、かつそれに対応して $D_A > D_A^+$ のとき、式 (15) 右辺分子が正の値をとる。$\mu_1(D_0, D_A)$ の値は x_1 の値に依存しないから、$x_1 \to 0$ のとき、右辺分母の絶対値は無限大となり、右辺の値も 0 に収束する。さらに、式 (15) の右辺分子が正の値をとるかぎり、同式が x_1 の増加関数であるのは明らかである。 □

補題 9 の証明. $D_A = D_A^1$ のとき、$\tau > \tau^+$, $D_0 > D_0^+$, $D_A = D_A^1 > D_0 > D_A^+(D_0)$ であるから補題 8 より、

$$\begin{aligned}W_2^a(x_1^*) &> W_1^a(x_1^*) = B + R - \frac{(B+R)D_0}{B}\frac{\log(\tau)}{\log(\tau^{D_0/B})} = 0, \\ W_2^a(x_2^*) &= B + R - (B+R)\frac{\log(\delta\tau)}{\log(\delta\tau)} = 0\end{aligned}$$

である。また、$x_1 \in (0, x_1^*]$ について、

$$\frac{\partial W_1^a(x_1)}{\partial D_A} = -\frac{\log(\tau)}{\log(x_1)} < 0,$$

であり、$x_1 \in (0, x_2^*]$ について

$$\frac{\partial W_2^a(x_1)}{\partial D_A} = \frac{\delta(1-\tau)}{\log(x_1)} < 0$$

である。そのため、$x_1 \in (0, x_1^*]$ について、

$$\frac{\partial W_2^a(x_1)}{\partial D_A} - \frac{\partial W_1^a(x_1)}{\partial D_A} = \frac{\delta(1-\tau) + \log(\tau)}{\log(x_1)} > 0$$

である。さらに、$D_A = D_A^2$ のとき、

$$W_2^a(x_1^*) = 0$$

である。したがって $D_A \geq D_A^1$ のとき $W_1^a(x_1^*) \leq 0$、$W_2^a(x_2^*) \leq 0$ であり、$D_A < D_A^1$ のとき $W_1^a(x_1^*) > 0$、$W_2^a(x_2^*) > 0$ である。さらに、$D_A \geq D_A^2$ のとき $W_2^a(x_1^*) \leq 0$、$D_A < D_A^2$ のとき $W_2^a(x_1^*) > 0$ である。また、$x_1 \in (0, x_2^*]$ において、

$$\begin{aligned}\frac{dW_2^a(x_1)}{dx_1} &= \frac{1}{x_1\left(\log(x_1)\right)^2}\left((B+R)\log(\delta\tau) + \left(\frac{B+R}{B}D_0 - D_A\right)\delta(1-\tau)\right) \\ &< \frac{1}{x_1\left(\log(x_1)\right)^2}\left((B+R)\log(\delta\tau) + \frac{B+R}{B}D_0\delta(1-\tau)\right) \\ &= \frac{B+R}{x_1\left(\log(x_1)\right)^2}\left(\log(\delta\tau) + 1 - \delta\tau\right) < 0\end{aligned}$$

である。以下の利用のために、$\nu_1(x) \equiv W_2^a(x) - W_1^a(x) - \bar{c}$、$\nu_2(x) \equiv W_2^a(x) - \bar{c}$ とおく。条件 (13) が満たされるのは $x \in (0, x_1^*]$ において $\nu_1(x) \geq 0$ の領域であり、$x \in (x_1^*, x_2^*]$ において $\nu_2(x) \geq 0$ の領域である。

最初に、$D_A \in (D_A^+(D_0), D_A^1)$ の場合を考える。補題 8 より $D_A^+(D_0) < D_0$ であり、$D_0 < D_A^1$ であるからこの領域は存在する。このとき、$W_2^a(x_1^*) - W_1^a(x_1^*) > 0$、$W_2^a(x_2^*) > 0$ である。$\bar{c} < \min(W_2^a(x_1^*) - W_1^a(x_1^*), W_2^a(x_2^*))$ とおくと、$x_1 \in (0, x_1^*]$ について、

$$\nu_1{}'(x) > 0,\ \lim_{x \to +0} \nu_1(x) = -\bar{c} < 0,\ \nu_1(x_1^*) = W_2^a(x_1^*) - W_1^a(x_1^*) - \bar{c} > 0,$$

であり、$x \in (0, x_2^*]$ について、

$$\nu_2{}'(x) < 0, \nu_2(x_1^*) = W_2^a(x_1^*) - \bar{c} > W_2^a(x_2^*) - \bar{c} = \nu_2(x_2^*) > 0$$

である。以上により、$\chi_1 \in (0, x_1^*)$ が存在し、$x_1 \in [\chi_1, x_1^*)$ において $\nu_1(x_1) \geq 0$ であり、$x_1 \in [x_1^*, x_2^*]$ において $\nu_2(x_1) \geq 0$ である。

次に、$D_A \in [D_A^1, D_A^2)$ の場合を考える。$\bar{c} < W_2^a(x_1^*)$ とおくと、$x_1 \in (0, x_1^*]$ について、

$$\nu_1{}'(x) > 0,\ \lim_{x \to +0} \nu_1(x) = -\bar{c} < 0,\ \nu_1(x_1^*) = W_2^a(x_1^*) - W_1^a(x_1^*) - \bar{c} > W_2^a(x_1^*) - \bar{c} > 0,$$

であり、$x \in (0, x_2^*]$ について、

$$\nu_2{}'(x) < 0, \nu_2(x_1^*) = W_2^a(x_1^*) - \bar{c} > 0,\ \nu_2(x_2^*) = W_2^a(x_2^*) - \bar{c} < -\bar{c} < 0,$$

である。以上により、$\chi_1 \in (0, x_1^*)$ および $\chi_2 \in (x_1^*, x_2^*)$ が存在し、$x_1 \in [\chi_1, x_1^*)$ において $\nu_1(x_1) \geq 0$ であり、また、$x_1 \in [x_1^*, \chi_2]$ において $\nu_2(x_1) \geq 0$ である。

最後に、$D_A \in [D_A^2, \infty)$ の場合を考える。$\bar{c} < W_2^a(x_1^*) - W_1^a(x_1^*)$ とおくと、$x_1 \in (0, x_1^*]$ について、

$$\nu_1{}'(x) > 0,\ \lim_{x \to +0} \nu_1(x) = -\bar{c} < 0,\ \nu_1(x_1^*) = W_2^a(x_1^*) - W_1^a(x_1^*) - \bar{c} > 0,$$

であり、$x \in (0, x_2^*]$ について、

$$\nu_2{}'(x) < 0, \nu_2(x_1^*) = W_2^a(x_1^*) - \bar{c} < -\bar{c} < 0$$

である。以上により、$\chi_1 \in (0, x_1^*]$ が存在し、$x_1 \in [\chi_1, x_1^*]$ において $\nu_1(x_1) \geq 0$ であり、また、$x_1 \in (x_1^*, x_2^*]$ において常に $\nu_2(x_1) < 0$ である。 □

補題 10 の証明. ある観測値 x_1 $(x_1 \in [0, 1])$ の値について、そのような観測値の値をもたらす確率分布の母数 θ は、$\{\theta | \theta \in [x_1, 1]\}$ に限られる。したがって、無情報事前分布 $f(\theta|\boldsymbol{x}_0)$ に基づく x_1 の確率密度は

$$\int_{x_1}^1 P(x_1|\theta) dF(\theta|\varnothing) = \int_{x_1}^1 \frac{1}{\theta} dF(\theta|\boldsymbol{x}_0) = -\log(x_1)$$

である。補題 9 と併せて補題を得る。 □

命題 4 の証明. 定義 18 および式 (15) より、χ_1 は、方程式

$$W_2^a(\chi_1) - W_1^a(\chi_1) = -\frac{K}{\log(\chi_1)} = \bar{c} > 0$$

の解である。ただし、

$$K \equiv B\log(\delta\tau) - D_A\log(\tau) + \delta(1-\tau)(D_0 - D_A) + R(1 - \delta\tau + \log(\delta\tau))$$

である。補題 8 で証明したとおり、$D_0 > D_0^+,\ D_A > D_A^+(D_0),\ \tau > \tau^+$ において、上式における K は正の値をとる。したがって、$\bar{c} \to +0$ のとき、$\chi_1 \to 0$ は明らかである。さらに、同方程式を D_A で微分することにより、

$$\frac{d\chi_1}{dD_A} = \frac{\chi_1}{\bar{c}}\left\{\delta(1-\tau) + \log(\tau)\right\} < \frac{\chi_1}{\bar{c}}\left\{\delta(1-\tau) + (\tau - 1)\right\} = \frac{\chi_1}{\bar{c}}\left\{(\delta - 1)(1-\tau)\right\} < 0$$

を得る。

$D_A \in (D_A^+(D_0), D_A^1)$ および $D_A \in [D_A^2, \infty)$ において、補題 10 の結果とこれらの微分係数を用いて、

$$\frac{d}{dD_A}p(W_2^a(x_1) - W_1^a(x_1) \geq \bar{c}|\boldsymbol{x}_0) = \log(\chi_1)\frac{d\chi_1}{dD_A} > 0$$

を得る。 □

補題 11 の証明.

$$\begin{aligned} Y_1^a(\bar{e}) &= E_{\boldsymbol{x}_1}\left(\max(W_1^a(x_1), W_1^a(x_1) + \lambda\left\{W_2^a(x_1) - W_1^a(x_1) - c\right\})|\boldsymbol{x}_0\right) \\ &= W_1^A + \lambda E_{\boldsymbol{x}_0}\left(\max\left(0, W_2^a(x_1) - W_1^a(x_1) - c\right)|\boldsymbol{x}_0\right) \geq W_1^A \end{aligned}$$

□

命題 5 の証明. 最初に、$Y_1^a(\bar{e}) - \bar{c} \geq W_0^A$ を仮定する。この帰結を $W_1^A - \bar{c} \geq W_0^A$ の場合と $W_1^A - \bar{c} < W_0^A$ の場合に分けて考える。もし、$W_1^A - \bar{c} \geq W_0^A$ であった場合、1 回めの試行を行わなかった場合、エージェントは 2 回目の機会には努力して前兆を得ようとするから、プロジェクト価値は $W_1^A - \bar{c}$ となる。また、1 回めの試行で努力した場合のプロジェクト価値は $Y_1^a(\bar{e})$ である。この場合、努力に対するペイオフは $W_1^A - \bar{c} + \lambda\left(Y_1^a(\bar{e}) - (W_1^A - \bar{c}) - \bar{c}\right)$ である。この値は補題 11 より $Y_1^a(\bar{e}) \geq W_1^A$ であることから必ず $W_1^A - \bar{c}$ 以上である。したがって、1 回めの試行機会にあたって努力して前兆を得ようとする。

次に、$W_1^A - \bar{c} < W_0^A$ であった場合、同様に、1 回目の試行にあたって努力を $\bar{e}$ の水準で行う際の意思決定は W_0^A と $W_0^A + \lambda\left(Y_1^a(\bar{e}) - W_0^A - \bar{c}\right)$ との比較という形をとる。この場合も 1 回めの機会に努力をして前兆を得ようとする。このように、どちらの場合も、1 回めの機会に努力 $\bar{e}$ を行う。

逆に、エージェントは 1 回めの機会に必ず努力を $\bar{e}$ の水準で行い、前兆を得ようとしたとする。この場合も、同様に $W_1^A - \bar{c} \geq W_0^A$ の場合と $W_1^A - \bar{c} < W_0^A$ の場合に分けて考える。まず、$W_1^A - \bar{c} \geq W_0^A$ の場合には、補題 11 により、$Y_1^a(\bar{e}) - \bar{c} \geq W_1^A - \bar{c} \geq W_0^A$ である。一方、$W_1^A - \bar{c} < W_0^A$ の場合、補題 12 により 1 回目の努力機会を回避した場合には、必ず 2 回めも回避する。したがって、1 回めの機会で努力を選択する場合には、$Y_1^a(\bar{e}) - W_0^A \geq \bar{c}$

でなければならない。以上から、1 回目の試行に際して前兆獲得の努力を行うための必要十分条件は $Y_1^a(\bar{e}) - \bar{c} \geq W_0^A$ となる。

$D_A \in (D_0^+, D_A^1)$ のとき、

$$
\begin{aligned}
&\frac{d}{dD_A}\left(Y_1^a(\bar{e}) - W_0^A\right) \\
= \quad & \frac{d}{dD_A}E_{\boldsymbol{x}_1}\left(\max\left(W_1^a(x_1), W_1^a(x_1) + \lambda\left(W_2^a(x_1) - W_1^a(x_1) - \bar{c}\right)\right)|\boldsymbol{x}_0\right) - \frac{dW_0^A}{dD_A} \\
= \quad & (1-\tau) - \int_0^{\chi_1}\frac{\partial W_1^a(x_1)}{\partial D_A}\log(x_1)dx_1 \\
& - \int_{\chi_1}^{x_1^*}\left(\lambda\frac{\partial W_2^a(x_1)}{\partial D_A} + (1-\lambda)\frac{\partial W_1^a(x_1)}{\partial D_A}\right)\log(x_1)dx_1 \\
& - \int_{x_1^*}^{x_2^*}\lambda\frac{\partial W_2^a(x_1)}{\partial D_A}\log(x_1)dx_1 \\
= \quad & (1-\tau) - \int_0^{x_1^*}\frac{\partial W_1^a(x_1)}{\partial D_A}\log(x_1)dx_1 - \lambda\int_{x_1^*}^{x_2^*}\frac{\partial W_2^a(x_1)}{\partial D_A}\log(x_1)dx_1 \\
& -\lambda\int_{\chi_1}^{x_1^*}\left(\frac{\partial W_2^a(x_1)}{\partial D_A} - \frac{\partial W_1^a(x_1)}{\partial D_A}\right)\log(x_1)dx_1 \\
> \quad & (1-\tau) + \int_0^{\tau^{D_0/B}}\frac{\log(\tau)}{\log(x_1)}\log(x_1)dx_1 - \lambda\int_{\tau^{D_0/B}}^{\delta\tau}\frac{\delta(1-\tau)}{\log(x_1)}\log(x_1)dx_1 \\
& \left(\because \quad \frac{\partial W_1^a(x_1)}{\partial D_A} = -\frac{\log(\tau)}{\log(x_1)} < \frac{\delta(1-\tau)}{\log(x_1)} = \frac{\partial W_2^a(x_1)}{\partial D_A} < 0, \quad \text{for } x_1 \in (0, x_1^*)\right) \\
= \quad & (1-\tau) + \log(\tau)\tau^{D_0/B} - \lambda\delta(1-\tau)(\delta\tau - \tau^{D0/B}) \\
> \quad & (1-\tau) + \delta\tau\left(1 - \frac{1}{\tau}\right) - \delta(1-\tau)(\delta\tau - \tau^{D0/B}) \\
& \left(\because \quad \log(\tau) > 1 - \frac{1}{\tau}, \text{ for } x_1 \in (0,1), \text{ and } \delta\tau > \tau^{D0/B}\right) \\
= \quad & (1-\tau)\left(1 - \delta - \delta^2\tau + \delta\tau^{D0/B}\right) > 0 \\
& \Big(\because \quad \omega(D_0) \equiv 1 - \delta - \delta^2\tau + \delta\tau^{D0/B} \text{ とすると} \\
& \omega(B) = 0 \ (\because \delta = 1, \text{ for } D_0 = B), \\
& \omega'(D_0) = (1 + 2\delta\tau - \tau^{D_0/B})\delta^2(1-\tau)/B + \delta\tau^{D_0/B}\log(\tau)/B \\
& > \left\{\tau\delta(-\delta(1-\tau) + \log(\tau)) + (1+2\delta\tau)\delta(1-\tau)\right\}\delta/B \\
& \quad (\because \tau^{D_0/B} < \delta\tau) \\
& > \left\{\tau\delta(-\delta(1-\tau) + 1 - 1/\tau) + (1+2\delta\tau)\delta(1-\tau)\right\}\delta/B \\
& = \delta^3\tau(1-\tau)/B > 0\Big)
\end{aligned}
$$

同様に、$D_A \in [D_A^1, D_A^2)$ のとき、

$$
\begin{aligned}
&\frac{d}{dD_A}\left(Y_1^a(\bar{e}) - W_0^A\right)\\
=\ & (1-\tau) - \int_0^{\chi_1} \frac{\partial W_1^a(x_1)}{\partial D_A}\log(x_1)dx_1 - \int_{x_1^*}^{\chi_2} \lambda\frac{\partial W_2^a(x_1)}{\partial D_A}\log(x_1)dx_1\\
& -\int_{\chi_1}^{x_1^*}\left(\lambda\frac{\partial W_2^a(x_1)}{\partial D_A} + (1-\lambda)\frac{\partial W_1^a(x_1)}{\partial D_A}\right)\log(x_1)dx_1\\
=\ & (1-\tau) - \int_0^{x_1^*} \frac{\partial W_1^a(x_1)}{\partial D_A}\log(x_1)dx_1 - \lambda\int_{x_1^*}^{\chi_2} \frac{\partial W_2^a(x_1)}{\partial D_A}\log(x_1)dx_1\\
& -\lambda\int_{\chi_1}^{x_1^*}\left(\frac{\partial W_2^a(x_1)}{\partial D_A} - \frac{\partial W_1^a(x_1)}{\partial D_A}\right)\log(x_1)dx_1\\
>\ & (1-\tau) + \int_0^{\tau^{D_0/B}} \frac{\log(\tau)}{\log(x_1)}\log(x_1)dx_1 - \lambda\int_{\tau^{D_0/B}}^{\delta\tau} \frac{\delta(1-\tau)}{\log(x_1)}\log(x_1)dx_1 > 0\\
& (\because\ \ \chi_2 < x_2^*)
\end{aligned}
$$

さらに同様に、$D_A \in [D_A^2, \infty)$ のとき、

$$
\begin{aligned}
&\frac{d}{dD_A}\left(Y_1^a(\bar{e}) - W_0^A\right)\\
=\ & (1-\tau) - \int_0^{\chi_1} \frac{\partial W_1^a(x_1)}{\partial D_A}\log(x_1)dx_1\\
& -\int_{\chi_1}^{x_1^*}\left(\lambda\frac{\partial W_2^a(x_1)}{\partial D_A} + (1-\lambda)\frac{\partial W_1^a(x_1)}{\partial D_A}\right)\log(x_1)dx_1\\
=\ & (1-\tau) - \int_0^{x_1^*} \frac{\partial W_1^a(x_1)}{\partial D_A}\log(x_1)dx_1\\
& -\lambda\int_{\chi_1}^{x_1^*}\left(\frac{\partial W_2^a(x_1)}{\partial D_A} - \frac{\partial W_1^a(x_1)}{\partial D_A}\right)\log(x_1)dx_1\\
>\ & (1-\tau) + \int_0^{\tau^{D_0/B}} \frac{\log(\tau)}{\log(x_1)}\log(x_1)dx_1\\
=\ & 1-\tau+\tau^{D_0/B}\log(\tau) > 1-\tau+\delta\tau\left(1-\frac{1}{\tau}\right) = (1-\delta)(1-\tau) > 0
\end{aligned}
$$

□

補題 13 の証明.
1 つの観測値 x_1 が得られた場合の事故発生確率 $p(\theta > \tau|\boldsymbol{x}_1)$ の値は、補題 1 で明らかにした DM における事後確率 $\log(\tau)/\log(x_1)$ と共通である。エージェントにおけるプロジェクト価値は $\boldsymbol{x}_1$ についてポイントワイズに、$B + R - D_A \log(\tau)/\log(x_1)$ が非負であるときのみプロジェクトが遂行されるとき最適化される。 □

補題 14 の証明.
簡明につき略 □

補題 15 の証明.
ケース 1 とケース 4 においては、$H_{\sigma_0^*}(\boldsymbol{x}_0) = 0$ であるから意思決定 σ_0^* においてプロジェクトは実行されず、$W(\boldsymbol{x}_0; \sigma_0^*, B', D') = 0, \forall B', \forall D'$ である。ケース 2 とケース 3 においては、$H_{\sigma_0^*}(\boldsymbol{x}_0) = 1$ であるから意思決定 σ_0^* においてプロジェクトは実行され、損害予想額と私的利益に応じて $W(\boldsymbol{x}_0; \sigma_0^*, B, D_0) = W_0^*$、$W(\boldsymbol{x}_0; \sigma_0^*, B+R, D_A) = W_0^A$ である。

また、ケース 1 とケース 4 においては、$H_{\sigma_0^*}(\boldsymbol{x}_0) = 0$ であるから $\rho = \sigma_1^* \cap \sigma_1^A$ であり、ケース 1 においては $\rho = \sigma_1^*$、ケース 4 については $\rho = \sigma_1^A$ である。また、ケース 2 とケース 3 においては、$H_{\sigma_0^*}(\boldsymbol{x}_0) = 1$ であるから $\rho = \sigma_1^* \cup \sigma_1^A$ であり、ケース 2 においては $\rho = \sigma_1^*$、ケース 3 については $\rho = \sigma_1^A$ である。 □

補題 16 の証明.

$$\operatorname*{argmax}_{\sigma_1} \Phi(B+R, D_A, \sigma_1) = \operatorname*{argmax}_{\sigma_1} \int_{\sigma_1} \left\{ (B+R) - D_A \frac{\log(\tau)}{\log(x)} \right\} (-\log(x)) dx = \sigma_1^A$$

である。積分値を最大化するためには、被積分関数が非負の値をとるときに積分区間 σ_1 を限定すればよいことは明らかである。被積分関数が非負の値をとる場合とは、被積分関数に $H_{\sigma_1}(\boldsymbol{x}_1)$ を乗じた関数をポイントワイズに最大化する選択と一致する。さらに、

$$\begin{aligned} & \int_{\sigma_1^A} \left\{ (B+R) - D_A \frac{\log(\tau)}{\log(x)} \right\} (-\log(x)) dx \\ = & \int_0^{\tau^{\frac{D_A}{B+R}}} \{ -(B+R)\log(x) + D_A \log(\tau) \} dx = (B+R)\tau^{\frac{D_A}{B+R}} \end{aligned}$$

$\Phi(B, D_0, \sigma_0^*)$ についても同様である。 □

命題 6 の証明.
$\tau > \tau^*$、$D_0 > D_0^*$、$D_A > D_A^*(D_0)$ であるから、補題 5 より、$W_1^A - W_0^A > 0$ であり、命題 1 により、$e^* \in (0, \bar{e})$ が存在する。

e^* が満たすべき 1 次条件 (9) より

$$W_1^A - W_0^A = \frac{c'(e^*)}{\pi'(e^*)}$$

を得る。この等式の右辺を e で微分すると、

$$\frac{d}{de} \frac{c'(e)}{\pi'(e)} = \frac{c''(e)\pi'(e) - c'(e)\pi''(e)}{\{\pi'(e)\}^2} > 0$$

である。

一方、それぞれのケース $i \quad (i = 1 \cdots 4)$ について、e_i は定義 25 より 1 次条件

$$\frac{d}{de} V_i^A - c'(e) = 0$$

を満たす。これらの 1 次条件は、$W_0^A > 0$ の場合には、

$$\frac{c'(e)}{\pi'(e)} = \begin{cases} \Phi(B+R, D_A, \sigma_1^*) = W_1^A > W_1^A - W_0^A & \text{ケース 1} \\ \Phi(B+R, D_A, \sigma_1^*) - W_0^A = W_1^A - W_0^A & \text{ケース 2} \\ \Phi(B+R, D_A, \sigma_1^A) - W_0^A \geq W_1^A - W_0^A & \text{ケース 3} \\ \Phi(B+R, D_A, \sigma_1^A) \geq W_1^A > W_1^A - W_0^A & \text{ケース 4} \end{cases}$$

となることを示している。どのケースについても

$$\frac{c'(e_i)}{\pi'(e_i)} \geq \frac{c'(e^*)}{\pi'(e^*)}$$

となる。$W_0^A < 0$ となることによって不等式関係が影響を受けるのは、ケース 1 とケース 4 に限られる。特に、ケース 1 の場合に $W_0^A < 0$ であると、$\Phi(B+R, D_A, \sigma_1^*) = W_1^A < W_1^A - W_0^A$ となる。 □

補題 17 の証明.
ケース 1 およびケース 3 において、努力水準を決める 1 次条件は命題 6 の証明過程に示されるとおり、それぞれ

$$\begin{aligned} &\Phi(B+R, D_A, \sigma_1^*) \\ &= \tau^{\frac{D_0}{B}} \left\{ B + R - \left(\frac{B+R}{B} D_0 - D_A \right) \log(\tau) \right\} = \frac{c'(e_1)}{\pi'(e_1)} \end{aligned} \tag{17}$$

$$\begin{aligned} &\Phi(B+R, D_A, \sigma_1^A) - W_0^A \\ &= (B+R)\tau^{\frac{D_A}{B+R}} - \{(B+R) - (1-\tau)D_A\} = \frac{c'(e_3)}{\pi'(e_3)} \end{aligned} \tag{18}$$

である。$D_A < (B+R)D_0/B$ では式 (17) の左辺の値は正である。したがって、$e_1 > 0$ である。一方、$D_A \leq B+R$ のとき、式 (18) の左辺の値は非正である。したがって、$e_3 = 0$ である。また、$D_A \in (B+R, (B+R)D_0/B]$ のとき正である。したがって、$e_3 > 0$ である。ゆえに、$D_A \leq B+R$ のとき、$0 = e_3 < e_1$ である。

$D_A \in (B+R, (B+R)D_0/B]$ のとき、$\Phi(B+R, D_A, \sigma^*1) - (\Phi(B+R, D_A, \sigma_1^A) - W_0^A)$ を D_A の関数とみなし $\phi(D_A)$ とおく。すると、

$$\begin{aligned} \phi\left(\frac{B+R}{B} D_0\right) &= \frac{B+R}{B}(B - (1-\tau)D_0) > 0 \\ \phi'(D_A) &= \tau^{\frac{D_0}{B}} \log(\tau) - \left\{ \tau^{\frac{D_A}{B+R}} \log(\tau) + (1-\tau) \right\} \\ &< \tau^{\frac{D_0}{B}} \log(\tau) - \{\tau \log(\tau) + (1-\tau)\} < \tau^{\frac{D_0}{B}} \log(\tau) < 0 \end{aligned}$$

であるから $D_A < (B+R)D_0/B$ において $\phi(D_A) > 0$ である。したがって式 (17) の値は式 (18) の値より大きく、$e_1 > e_3$ をえる。 □

命題 7 の証明.

$$\lim_{\tau \to 1 - \frac{B}{D_0} + 0} V_1^* = \pi(e_1) \cdot B\tau_0^{\frac{D_0}{B}} \tag{19}$$

$$\lim_{\tau \to 1 - \frac{B}{D_0} + 0} V_3^* = \pi(e_3) \cdot \tau_0^{\frac{D_A}{B+R}} \left\{ B - \left(\frac{B}{B+R} D_A - D_0 \right) \log(\tau_0) \right\} \tag{20}$$

ただし、$\tau_0 \equiv 1 - B/D_0$ である。まず $D_A \in (B+R, (B+R)D_0/B]$ の場合を考える。補題 17 より、$e_1 > 0$ であるから、であるから、式 (19) の値は正である。さらに、$e_3 > 0$ で

あり、かつ

$$\begin{aligned} & B-\left(\frac{B}{B+R}D_A-D_0\right)\log(\tau_0) \\ > \quad & B-(B-D_0)\log(\tau_0) \\ = \quad & B\left(1-\left(1-\frac{D_0}{B}\right)\log\left(1-\frac{B}{D_0}\right)\right)>0 \quad \text{for } D_0>B \end{aligned}$$

であるから、式 (20) の値も正である。このとき、式 (19) の値の式 (20) の値に対する比をとると、

$$\frac{\pi(e_3)\cdot\tau_0^{\frac{D_A}{B+R}}\left\{B-\left(\frac{B}{B+R}D_A-D_0\right)\log(\tau_0)\right\}}{\pi(e_1)\cdot B\tau_0^{\frac{D_0}{B}}}=\frac{\pi(e_3)}{\pi(e_1)}\cdot\frac{\tau_0^{\frac{D_A}{B+R}}}{\tau_0^{\frac{D_0}{B}}}\left(1-\log\left(\frac{\tau_0^{\frac{D_A}{B+R}}}{\tau_0^{\frac{D_0}{B}}}\right)\right)$$

である。補題17により $e_1>e_3$ であるから、$1>\pi(e_3)/\pi(e_1)$ である。さらに、$1-\log(t)>0$ であるとき、$t\in\mathbb{R}^{++}$ で $t(1-\log(t))\leq 1$ であることを考えると、比の値は 1 未満の値をとることが分かる。したがって、DM はケース 1 すなわち $H_{\sigma_0^*}(\boldsymbol{x}_0)=0$ を選択する。次に $D_A\in(0,B+R]$ の場合を考える。補題 17 よりこの場合には、$e_1>e_3=0$ であるから、式 (19) の値は正であり、式 (20) の値は 0 である。したがって、やはり DM はケース 1 を選択する。

同様に、

$$\lim_{\tau\to1-0}V_1^*=\pi(e_1)\cdot B<B=\pi(e_3)\cdot B+(1-\pi(e_3))\cdot B=\lim_{\tau\to1-0}V_3^*$$

であるから、DM はケース 3 すなわち $H_{\sigma_0^*}(\boldsymbol{x}_0)=1$ を選択する。 □

命題 8 の証明. e_1 は 1 次条件 (17) を満たす。陰関数定理より

$$\mathrm{sign}\left(\frac{de_1}{dD_A}\right)=\mathrm{sign}\left(\frac{1}{\frac{\partial\phi_1}{\partial D_A}}\left(\frac{c''\pi'-c'\pi''}{(\pi')^2}\right)\right)=\mathrm{sign}\left(\frac{\partial\phi_1}{\partial D_A}\right)=\mathrm{sign}\left(\tau^{\frac{D_0}{B}}\log(\tau)\right)=-1$$

である。ただし、式 (17) 左辺の値を ϕ_1 としている。同様に

$$\begin{aligned} \mathrm{sign}\left(\frac{de_1}{dR}\right) &= \mathrm{sign}\left(\frac{\partial\phi_1}{\partial R}\right)=\mathrm{sign}\left(\tau^{\frac{D_0}{B}}\left(1-\frac{D_0}{B}\log(\tau)\right)\right)=+1 \\ \mathrm{sign}\left(\frac{de_3}{dD_A}\right) &= \mathrm{sign}\left(\frac{\partial\phi_3}{\partial D_A}\right)=\mathrm{sign}\left(\tau^{\frac{D_A}{B+R}}\log(\tau)+1-\tau\right) \\ &\geq \mathrm{sign}\left(\tau\log(\tau)+1-\tau\right)=+1 \\ \mathrm{sign}\left(\frac{de_3}{dR}\right) &= \mathrm{sign}\left(\frac{\partial\phi_3}{\partial R}\right)=\mathrm{sign}\left(\tau^{\frac{D_A}{B+R}}-1-\tau^{\frac{D_A}{B+R}}\log\left(\tau^{\frac{D_A}{B+R}}\right)\right)=-1 \end{aligned}$$

なぜなら、$\forall t\in\mathbb{R}^{++},\ t\neq1,\ \ t-1-t\log(t)<0$ だからである。ここで、式 (18) 左辺の値を ϕ_3 としている。 □

補題 18 の証明. ケース 2 およびケース 4 において、努力水準を決める 1 次条件は命題 6 の証明過程に示されるとおり、それぞれ

$$\begin{aligned}
&\Phi(B+R, D_A, \sigma_1^*) - W_0^A \\
&= \tau^{\frac{D_0}{B}} \left\{ B+R - \left(\frac{B+R}{B} D_0 - D_A \right) \log(\tau) \right\} - (B+R-(1-\tau)D_A) \\
&= (B+R)\left(\tau^{\frac{D_0}{B}} - 1 - \tau^{\frac{D_0}{B}} \log(\tau^{\frac{D_0}{B}})\right) + D_A(1-\tau+\tau^{\frac{D_0}{B}}\log(\tau)) \\
&= \frac{c'(e_2)}{\pi'(e_2)} \qquad (21)
\end{aligned}$$

$$\Phi(B+R, D_A, \sigma_1^A) = (B+R)\tau^{\frac{D_A}{B+R}} = \frac{c'(e_4)}{\pi'(e_4)} \qquad (22)$$

である。ここで、式 (21) の左辺の値は、$D_A > (B+R)D_0/B$ において、

$$\begin{aligned}
&(B+R)\left(\tau^{\frac{D_0}{B}} - 1 - \tau^{\frac{D_0}{B}} \log(\tau^{\frac{D_0}{B}})\right) + D_A(1-\tau+\tau^{\frac{D_0}{B}}\log(\tau)) \\
&> \frac{BD_A}{D_0}\left(\tau^{\frac{D_0}{B}} - 1 - \tau^{\frac{D_0}{B}} \log(\tau^{\frac{D_0}{B}})\right) + D_A(1-\tau+\tau^{\frac{D_0}{B}}\log(\tau)) \\
&\quad (\because t - 1 - t * \log(t) < 0, \text{ for } t \in (0,1)) \\
&= D_A\left(1-\tau+\frac{B}{D_0}\left(\tau^{\frac{D_0}{B}} - 1\right)\right) > 0 \\
&\quad (\because 1 - t + (t^x - 1)/x > 0, \text{ for } x > 1 \text{ and } t \in (0,1))
\end{aligned}$$

であるから正の値をとる。したがって、$e_2 > 0$ である。さらに式 (22) の左辺の値も明らかに正であるから $e_4 > 0$ である。さらに、両式の差 $(\Phi(B+R, D_A, \sigma_1^*) - W_0^A) - \Phi(B+R, D_A, \sigma_1^A)$ を D_A の関数とみなし $\bar{\phi}(D_A)$ とおく。すると、

$$\begin{aligned}
\bar{\phi}\left(\frac{B+R}{B}D_0\right) &= -\frac{B+R}{B}(B-(1-\tau)D_0) < 0 \\
\bar{\phi}\left(\frac{B+R}{1-\tau}\right) &= (B+R)\cdot\frac{B-(1-\tau)D_0}{B(1-\tau)}\log(\tau) < 0 \\
\bar{\phi}'(D_A) &= \left(\tau^{\frac{D_0}{B}} - \tau^{\frac{D_A}{B+R}}\right)\log(\tau) + (1-\tau) \\
&> \tau^{\frac{D_0}{B}}\log(\tau) + (1-\tau) > \tau\log(\tau) + 1 - \tau > 0
\end{aligned}$$

であるから $D_A \in (D_0(B+R)/B, (B+R)/(1-\tau))$ において $\bar{\phi}(D_A) < 0$ である。これは $\phi_2 < \phi_4$ を意味するから、$e_2 < e_4$ となる。また、

$$W_0^A = B + R - (1-\tau)D_A > 0 \Leftrightarrow D_A < \frac{B+R}{1-\tau}$$

である。

$$\frac{B+R}{1-\tau} - \frac{B+R}{B}D_0 = \frac{B+R}{B(1-\tau)}(B-(1-\tau)D_0) > 0$$

であるから、このような D_A の区間は空集合ではない。

さらに、

$$\lim_{D_A\to\infty}\frac{\bar{\phi}(D_A)}{D_A}=\tau^{\frac{D_0}{B}}\log(\tau)+1-\tau>0$$

であるから、$\exists\bar{D_A},\ \ \bar{\phi}(D_A)\le 0,\ \ \forall D_A\le\bar{D_A},\ \ \bar{\phi}(D_A)\ge 0,\ \ \forall D_A\ge\bar{D_A}$ □

命題 9 の証明. $\pi(e_4)<1$ であるから、

$$\lim_{\tau\to 1-0}V_4^*=\pi(e_4)\cdot B<B=\pi(e_2)\cdot B+(1-\pi(e_2))\cdot B=\lim_{\tau\to 1-0}V_2^*$$

となり、$\tau\to 1$ のとき DM はケース 2 すなわち $H_{\sigma_0^*}(\boldsymbol{x}_0)=1$ を選択する。

また、

$$\begin{aligned}\lim_{\substack{\tau\to 1-\frac{B}{D_0}+0\\ D_A\to\frac{B+R}{B}D_0}}V_2^* &= \pi(e_2)\cdot B\tau^{\frac{D_0}{B}}\\ \lim_{\substack{\tau\to 1-\frac{B}{D_0}+0\\ D_A\to\frac{B+R}{B}D_0}}V_4^* &= \pi(e_4)\cdot B\tau^{\frac{D_0}{B}}\end{aligned}$$

である。補題 18 により $D_A\to D_0(B+R)/B+0$ のとき $e_2<e_4$ であるから、$\pi(e_2)<\pi(e_4)$ である。したがって、$\tau\to 1-\frac{B}{D_0}+0$ かつ $D_A\to\frac{B+R}{B}D_0$ のとき、DM はケース 4 すなわち $H_{\sigma_0^*}(\boldsymbol{x}_0)=0$ を選択する。 □

命題 10 の証明.

式 (21) 左辺の値を ϕ_2、式 (22) 左辺の値を ϕ_4 とおく。命題 8 の証明におけるのと同様、

$$\mathrm{sign}\left(\frac{de_i}{dD_A}\right)=\mathrm{sign}\left(\frac{\partial\phi_i}{\partial D_A}\right),\ \mathrm{sign}\left(\frac{de_i}{dR}\right)=\mathrm{sign}\left(\frac{\partial\phi_i}{\partial R}\right),\quad \text{for } i=2,4$$

である。これから、

$$\begin{aligned}\mathrm{sign}\left(\frac{de_2}{dD_A}\right) &= \mathrm{sign}\left(\tau^{\frac{D_0}{B}}\log(\tau)+1-\tau\right)\\ &\ge \mathrm{sign}\left(\tau\log(\tau)+1-\tau\right)=+1\\ \mathrm{sign}\left(\frac{de_2}{dR}\right) &= \mathrm{sign}\left(\tau^{\frac{D_0}{B}}\left(1-\frac{D_0}{B}\log(\tau)\right)-1\right)\\ &= \mathrm{sign}\left(\tau^{\frac{D_0}{B}}\left(1-\log(\tau^{\frac{D_0}{B}})\right)-1\right)=-1\\ &\quad \text{as } t(1-\log(t))-1<0,\ \text{for } t\in(0,1)\\ \mathrm{sign}\left(\frac{de_4}{dD_A}\right) &= \mathrm{sign}\left(\tau^{\frac{D_A}{B+R}}\log(\tau)\right)=-1\\ \mathrm{sign}\left(\frac{de_4}{dR}\right) &= \mathrm{sign}\left(\tau^{\frac{D_A}{B+R}}\left(1-\log\left(\tau^{\frac{D_A}{B+R}}\right)\right)\right)=+1\end{aligned}$$

□