

自由エネルギー原理に基づく災害予測精度を 考慮した避難判断シミュレーション

藤見 俊夫¹

¹正会員 京都大学准教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: fujimi.toshio.7x@kyoto-u.ac.jp

本研究では、自由エネルギー原理に基づく避難判断シミュレーションを実施することにより、災害情報の精度と情報取得、避難選択の関係、それに個人の心理・環境要因が及ぼす影響について検討した。その結果、災害情報の精度には許容範囲があり、その範囲を超えると情報取得率が急落することが示された。また、災害の主観確率には、情報取得と避難の行動パターンを大きく変える変化点があることが明らかになった。さらに、災害の主観確率が変化点より大きい場合は情報提供しないほうがよいこと、全体的にみると誤報率の低減より見逃し率の低減を重視したほうがよいことが示唆された。

Key Words: free energy principle, times, active inference, evacuation, disaster forecast

1. はじめに

災害の発生を確実に予測できる状況は稀であり、人々の避難を求めるときに不確実な予測情報しか提供できないケースは多い。このとき予測情報には、危険なのに誤って安全と伝える「見逃し」と、安全なのに誤って危険と伝える「誤報」の二種類の誤りが含まれる。人々が災害の予測情報を活用するために、これらの見逃し率と誤報率をどれほど低く抑えるべきか明らかにすることは適用範囲の広い重要な課題である。例えば、災害予測と避難だけでなく、耐震診断と耐震補強、ガン検診と手術、財務格付け情報と株式売買、合格予想と大学選択なども同じ構造を有している。本研究では、この問題に取り組むため、自由エネルギー原理に基づく避難判断シミュレーションを行う。それにより、災害の予測精度（見逃し率、誤報率）と個人の情報取得、避難判断の関係を明らかにするとともに、その関係に個人の心理・環境要因が及ぼす影響について検討する。

2. 自由エネルギー原理

(1) 自由エネルギーの概説

本研究では、見逃し率と誤報率が避難判断に及ぼす影響を、カール・フリストンが 2006 年に提唱した自由エネルギー原理に基づくシミュレーション分析によって明

らかにする。自由エネルギー原理は、脳の知覚を説明する原理として提唱されて以来大きな発展を遂げ、今ではあらゆる生命・適応システムを貫く統一原理とみなされている。この原理は様々な観点から解釈可能であるが、本研究の目的に即して理解すると、「生物が変化する環境内で生きつづけるには、生存が危くなる状況にいる確率（サプライザル）を減少させつづける必要がある。しかし、サプライザルを直接評価することは難しいため、サプライザルの上限となる自由エネルギーを知覚と行為を通じて減少させつづける」という原理になる。自由エネルギー原理の解説は Par et al. (2022)¹⁾に詳しい。

(2) 能動的推論

自由エネルギー原理に基づく意思決定理論は「能動的推論」と呼ばれている。簡単な例として、ある現実世界の対象についての脳内の一連の表象を状態 s 、その対象に関する一連の行為を行動方策 π 、そこで得られる一連の観察データを o と表記する。能動的推論では、人は現実世界の対象に関する脳内モデルを事前分布 $p(s, o, \pi)$ としてもっていると考えられる。そして、過去の行為と観察データをもとに状態を変分ベイズ推論することを「知覚」とみなす。このとき、下記の変分自由エネルギー F_{π} が最小化される。

$$F_{\pi} \equiv -E_{q(s|\pi)} \left[\ln \frac{p(o, s|\pi)}{q(s|\pi)} \right]$$

また、人は結果（観察データ） o に対する選好を事前選好分布 $p(o|C)$ として持っている。行動方策ごとに将来の観察データ、状態、行為の事後分布を変分ベイズ推論し、事前選好分布と事後分布が最も近くなるように行動方策を選択することを「行為」とみなす。このとき下記の期待自由エネルギー G_{π} が最小化される。

$$G_{\pi} \equiv -E_{q(o, s|\pi)} \left[\ln \frac{p(o, s|\pi)}{q(s|\pi)} \right]$$

また、期待自由エネルギーは下記のように式変形できる。

$$G_{\pi} \approx -E_{q(o, s|\pi)} [\ln q(s|o, \pi) - \ln q(s|\pi)] - E_{q(o|\pi)} [\ln p(o|C)]$$

ここで、第1項は認知的価値（epistemic value）、第2項は実利的価値（pragmatic value）を示している。認知的価値は期待された観察データで条件づけられたときの状態に関する期待情報利得である。第2項は期待効用モデルと実質的に同じものである。この式から、期待自由エネルギーを最小化することは、認知的価値と実利的価値の合計の最大化することと同値であることがわかる。それにより、期待効用の最大化だけでなく、置かれた状況を正確に把握することの価値も考慮した意思決定を扱うことができる。

3. 避難判断モデル

(1) 避難判断問題

本研究では、災害予測精度が個人の避難判断に及ぼす影響を検討するため、以下の単純化された避難判断問題を対象とする。災害の危険性がある状況下において、ある個人が災害情報を取得して避難するかどうかを意思決定する場面を想定する。世界の状態は災害と平常の二種類である。また、災害情報の内容も「災害」か「平常」のどちらかであり、誤っている可能性もある。ここでは、世界の状態は災害なのに「平常」と伝える見逃し、平常なのに「災害」と伝える誤報の二つに着目する。

対象期間は3時点であり、第1時点には個人は自宅にいる。第1時点から第2時点の間に、個人は災害情報を取得するか、災害情報を無視して避難するか、災害情報を無視して自宅待機するかを決めて実行する。第2時点において災害情報が「災害」か「平常」か判明するので、災害情報を取得した人は、その情報をもとに第2時点から第3時点の間に避難するか自宅待機するかを決める。

第3時点で実際に災害か平常かが判明する。第3時点で生じる結果はつぎの4つである。災害時に避難していれば「避難成功」、自宅待機していれば「被災」、平常時に避難していれば「避難素振り」、自宅待機すれば「自宅平常」である。以上の問題構造を図-1に示す。

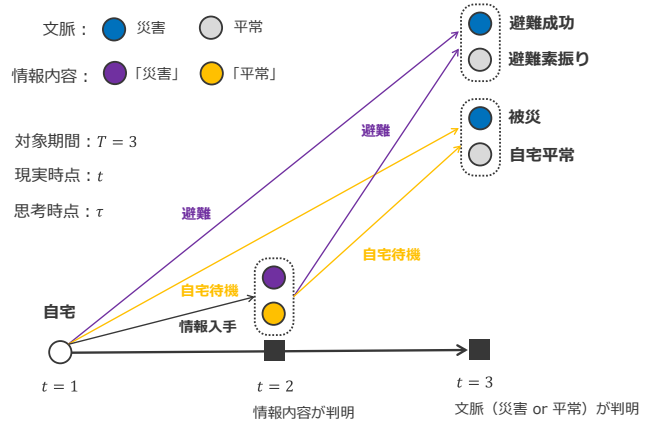


図-1 避難判断問題

(2) 避難判断モデル

上記の問題に対する個人の避難判断を、部分観測マルコフ決定過程でモデル化する²³⁾。このモデルでは、将来時点や状態や観察データを予想し、過去時点のそれらを振り返って意思決定する必要があるため、実時点 t と個人の信念上での思考時点 τ とを区別して表記する。状態要因は外部環境 s_t^1 と減災行動 s_t^2 の二種類である。

外部状態は災害 ($s_t^1 = 1$) と平常 ($s_t^1 = 2$) の二つの値をとる。行為状態はスタート ($s_t^2 = 1$)、情報取得 ($s_t^2 = 2$)、避難 ($s_t^2 = 3$)、自宅待機 ($s_t^2 = 4$) の4つの値をとる。結果様式は情報内容 o_t^1 、行為結果 o_t^2 、最終結果 o_t^3 の三種類である。情報内容はなし ($o_t^1 = 1$)、災害 ($o_t^1 = 2$)、平常 ($o_t^1 = 3$) の3つの値をとる。行為状態はスタート ($o_t^2 = 1$)、情報取得 ($o_t^2 = 2$)、避難 ($o_t^2 = 3$)、自宅待機 ($o_t^2 = 4$) の4つの値をとる。最終結果は自宅平常 ($o_t^3 = 1$)、避難成功 ($o_t^3 = 2$)、避難素振り ($o_t^3 = 3$)、被災 ($o_t^3 = 4$) の4つの値をとる。行動方策 π に含まれる行為はスタート ($u_t = 1$)、情報取得 ($u_t = 2$)、避難 ($u_t = 3$)、自宅待機 ($u_t = 4$) であり、下記の6つの行動方策のいずれかを個人は選択するものとする。上の行は第1-2時点で選択する行為、下の行は第2-3時点で選択する行為である。

$$[\pi_1 \ \pi_2 \ \pi_3 \ \pi_4 \ \pi_5 \ \pi_6] = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 1 & 2 & 4 \\ 3 & 3 & 3 & 4 & 4 & 4 \end{bmatrix}$$

事前信念 $p(s_{\tau=1})$ を行列 D 、推移確率 $p(s_{\tau+1}|s_{\tau}, \pi)$ をテンソル B 、尤度 $p(o|s_{\tau})$ をテンソル A 、事前選好分布 $p(o|C)$

状態要因

文脈 s^1 : 災害 $s^1 = 1$ 平常 $s^1 = 2$

行為状態 s^2 : スタート $s^2 = 1$ 、情報取得 $s^2 = 2$ 、避難 $s^2 = 3$ 、自宅待機 $s^2 = 4$

結果様式

情報内容 o^1 : 情報なし $o^1 = 1$ 、「災害」 $o^1 = 2$ 、「平常」 $o^1 = 3$

行為結果 o^2 : スタート $o^2 = 1$ 、情報取得 $o^2 = 2$ 、避難 $o^2 = 3$ 、自宅待機 $o^2 = 4$

最終結果 o^3 : 自宅平常 $o^3 = 1$ 、避難成功 $o^3 = 2$ 、避難素振り $o^3 = 3$ 、被災 $o^3 = 4$

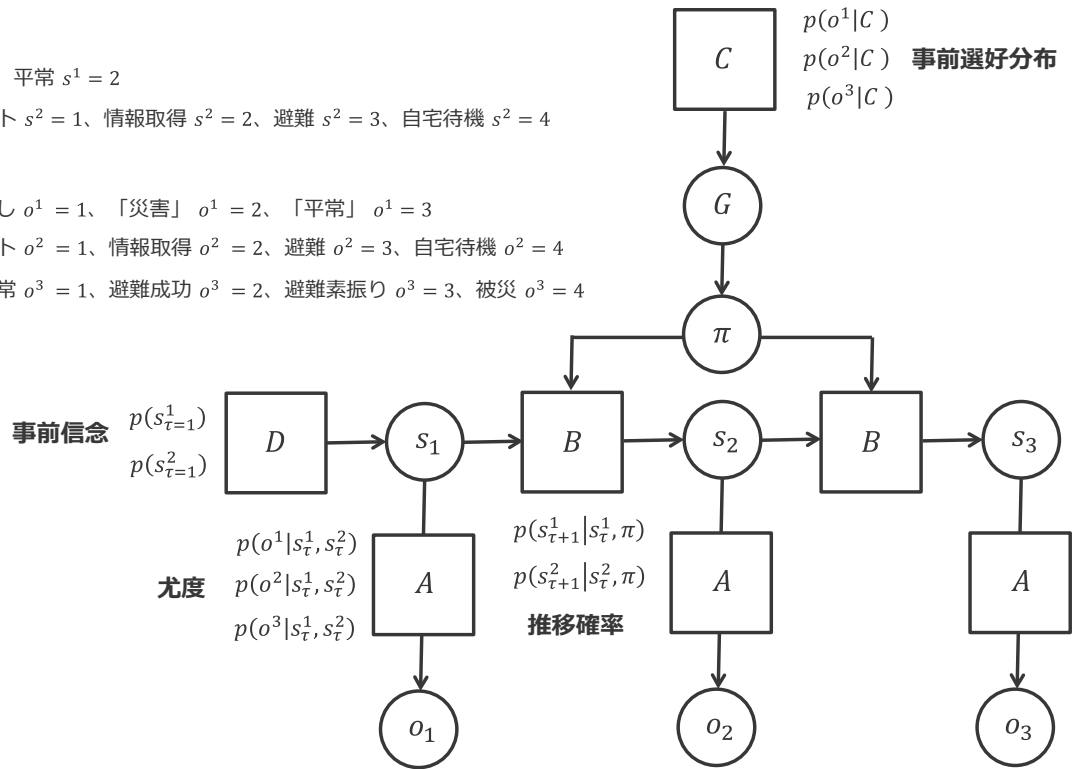


図-2 避難判断モデルのベイジアン・ネットワークグラフ

をテンソル C で表記し、ベイジアン・ネットワークグラフ形式で避難判断モデルを表すと図-2になる。このモデルに基づき算出される下記の変分自由エネルギー F_{π} と期待自由エネルギー G_{π} を最小化することで、状態、結果（観察データ）、行動方策の近似事後分布を求める。

$$F_{\pi} = \sum_{\tau} s_{\pi, \tau} \cdot \left(\ln s_{\pi, \tau} - \frac{1}{2} (\ln(B_{\pi, \tau-1} s_{\pi, \tau-1}) + \ln(B_{\pi, \tau}^{\dagger} s_{\pi, \tau+1})) - \ln A^T o_{\tau} \right)$$

$$G_{\pi} = \sum_{\tau} (A s_{\pi, \tau} \cdot (\ln(A s_{\pi, \tau}) - \ln C_{\tau}) - \text{diag}(A^T \ln A) \cdot s_{\pi, \tau})$$

(3) パラメータ

上記で構築した避難判断モデルにおいて含まれるパラメータを表1に示す。災害の主観確率と情報精度（見逃し率、誤報率）との関係を調べるのが研究の主目的である。各種の費用と心理的要因に関するパラメータについて、基準ケースとして表-1に示すように設定した。費用に関して、自宅平常の状態を基準として0とした。避難成功しても避難所に滞在する負担があるので-1とした。避難素振りは、避難所滞在の負担に加えて、避難する必要がなかったことによる心理的負荷も加えて-2とした。被災はそれらと比べて大きな損失であると考えられるので-5とした。

表-1 パラメータの定義の基準ケースでの設定値

種類	パラメータ	定義	基準ケース設定値
信念	災害の主観確率	災害発生の主観確率	-
情報精度	見逃し率	災害時なのに「平常」と伝える確率	-
	誤報率	平常時なのに「災害」と伝える確率	-
費用	自宅平常コスト	平常時に時点3で自宅にいることのコスト	0
	避難成功コスト	災害時に時点3で避難所にいることのコスト	-1
	不要避難コスト	平常時に時点3で避難所にいることのコスト	-2
	被災コスト	災害時に時点3で自宅にいることのコスト	-5
	避難コスト	避難行動にかかるコスト	-1
	情報取得コスト	災害情報の取得にかかるコスト	0
PMT	自己効力感	避難選択すれば実際に避難できる確率	1
	対処効力感	災害時の避難選択が避難成功につながる確率	1

4. シミュレーション結果

(1) 基準ケースでの個人レベルの分析例

前節で構築した生成モデルを用いて避難判断シミュレーションを行う。真の状態は「災害」、災害の主観確率

を 0.5, 情報精度は見逃し率を 0, 誤報率を 0.1 として, 避難判断シミュレーションを行った結果, 第 3 期から振り返ったときの状態の事後確率を図-3 に, 行動方策の事後確率を図-4 に示す. 濃い灰色ほど高い事後確率を表し, 白は 0, 黒は 1 である. 青色の点は, 事後確率に沿ってランダムに選択された実現値であることを示している. このケースでは, 第 3 時点から振り返ったとき, 状態は正しく認識されていることがわかる. どの政策を選ぶかについては, 第 1 時点は不確実であったか, 第 2 時点では行動方策 π_2 (情報取得→避難) を選ぶことをほぼ確信している.

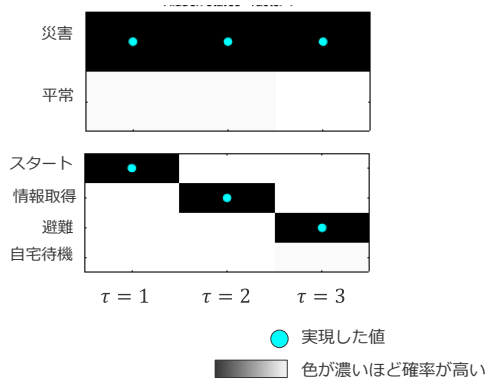


図-3 状態の事後分布と実現値

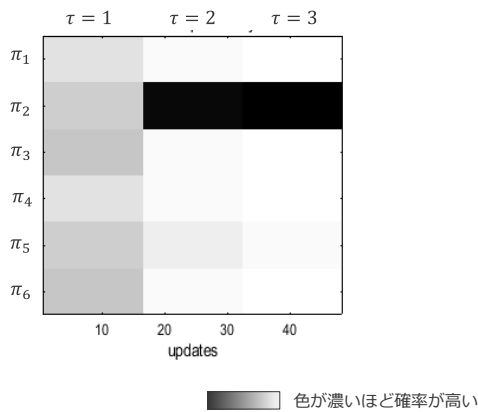


図-4 行動方策の事後分布

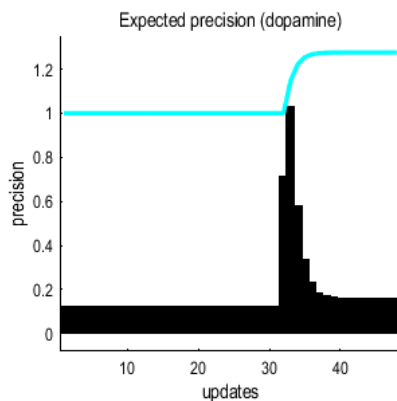


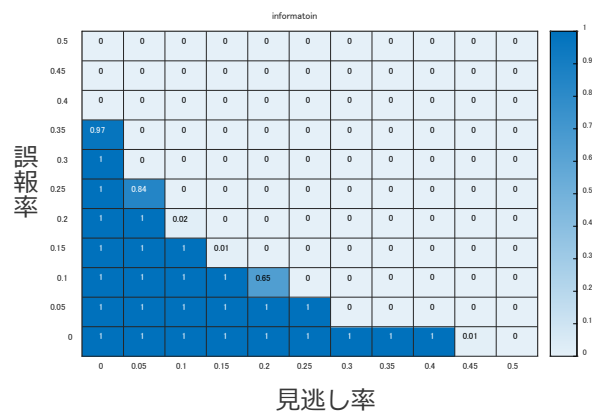
図-5 ドーパミンの放出量

図-5 は, 個人の脳内神経活動におけるドーパミンの放出量 (黒棒) とその累積量 (青線) を示している. この図から, 災害情報の内容が判明する第 2 時点の終わりにドーパミンが急増していることがわかる.

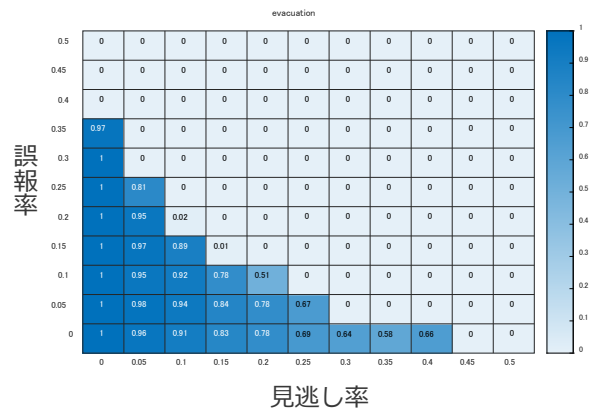
ここで注意が必要なのは, 前の時点での結果が実現したかによって, 今の時点の事後確率が変化し, その結果の実現確率も変化する点である. よって, 全てのパラメータが同じでも, 避難判断シミュレーションを実施するたびに結果が変化しうる. この問題を回避するため, 以降では避難判断シミュレーションを 100 回繰り返して算出した避難選択率と災害情報の取得率に着目する.

(2) 基準ケースの分析結果

真の状態を「災害」とし, 災害の主観確率が 0.3 の場合について, 災害情報の精度ごとに災害情報の取得率と避難選択率のシミュレーションを行った. その結果を, 横軸を見逃し率, 縦軸を誤報率として図-6 に示す. この図の上が災害情報の取得率, 下が避難選択率である.



a. 情報取得率



b. 避難判断率

図-6 情報精度と情報取得率, 避難判断率の関係

この図から, 情報取得と避難選択する情報精度 (見逃し率, 誤報率) の許容範囲はほぼ同じであり, 情報精度がある閾値をこえて悪化すると, 情報取得率も避難選択

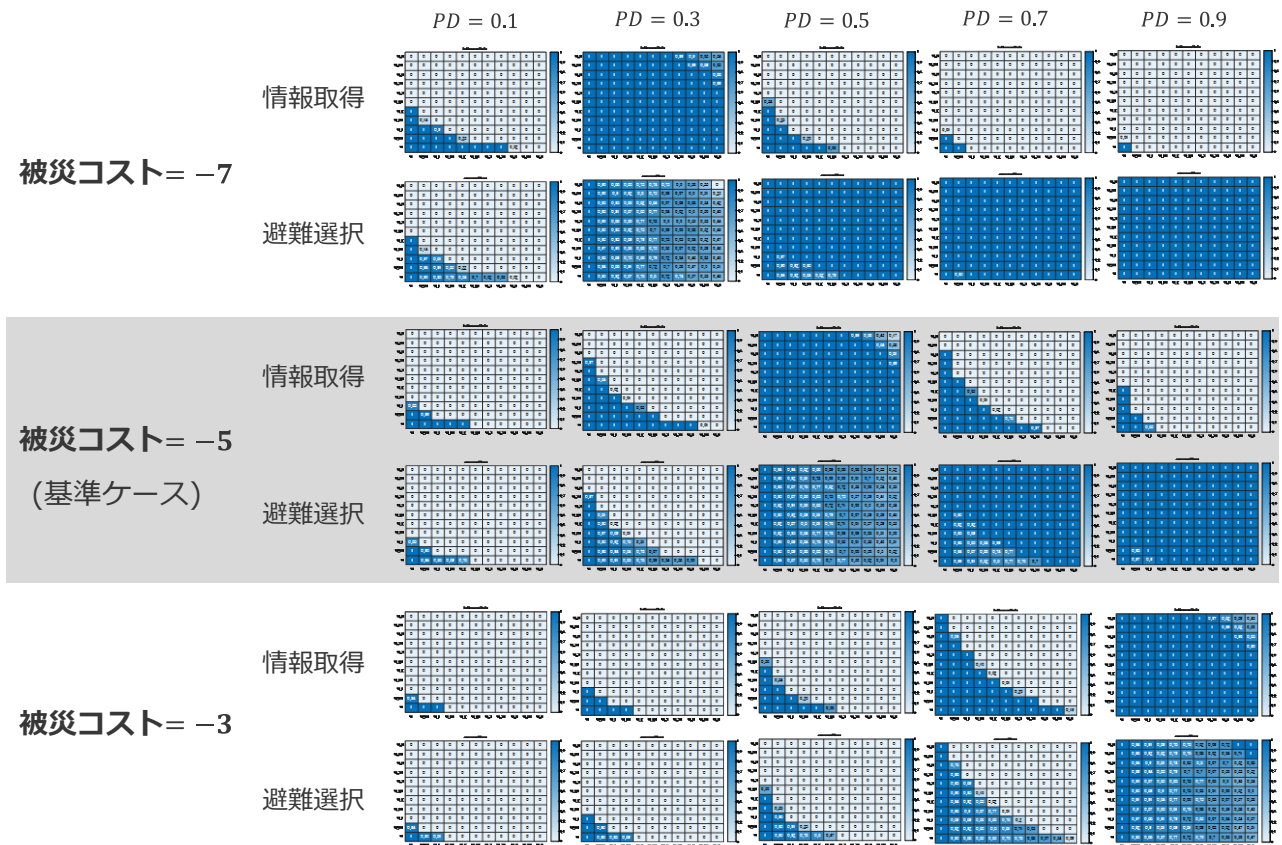


図-6 被災コスト、災害の主観確率と情報取得率、避難判断率の関係

率も 0 に急落することがわかる。また、避難選択率が正の範囲では、見逃し率を固定すると、誤報率によらず避難選択率ほぼ同じである。他方、避難選択率が正の範囲では、誤報率を固定すると、見逃し率とほぼ同じだけ避難選択率は減っていく。また、情報取得率が正の範囲では、境界の一部を除いて情報取得率はほぼ 1 であることが示されている。

(3) 被災コストごとの結果

真の状態を「災害」とし、災害の主観確率が 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 のそれぞれの場合について、災害情報の精度ごとに災害情報の取得率と避難選択率のシミュレーションを行った。その結果を図-7 に示す。この図から、災害の主観確率に、構造が大きく変わる変化点（災害の主観確率が 0.5）が存在することがわかる。災害の主観確率が変化点より小さいときには情報取得しなければ避難しないが、災害の主観確率が変化点より大きいときは情報取得しなくても避難する傾向が示されている。後者の場合、情報精度がある閾値をこえて悪化すると情報取得率は 0 に急落するが、情報精度（見逃し率、誤報率）に関わらず避難選択している。また、報取得率が正の範囲では見逃し率とほぼ同じだけ避難選択率は減っており、情報取得したとき見逃しの「平常」情報であれば逆に避難しなくなることが示唆される。

被災コスト（の絶対値）が大きくなると、情報取得と避難の行動パターンが全体的に左にシフトし、災害の主観確率の変化点も左にシフトしている。このことから、変化点前は情報精度が悪くても情報を入手し、変化点後は情報取得せずに避難する傾向が強くなることが示唆される。

5. まとめ

本研究では、自由エネルギー原理に基づく避難判断シミュレーションを実施することにより、災害情報の精度と情報取得、避難選択の関係、それに個人の心理・環境要因が及ぼす影響について検討した。その結果、災害情報の精度には許容範囲があり、その範囲を超えると情報取得率が急落することが示された。また、災害の主観確率には、情報取得と避難の行動パターンを大きく変える変化点があることが明らかになった。さらに、災害の主観確率が変化点より大きい場合は情報提供しないほうがいいこと、全体的にみると誤報率の低減より見逃し率の低減を重視したほうがよいことが示唆された。

本研究は、個人レベルでの結果であり、社会に対する政策提言にはそのまま使えないことに注意が必要である。集団レベルで見た場合は集団間でのパラメータの分布に依存すると考えられる。また、1 回限りの（繰り返しの

学習効果は検討していない) ケースである。そのため、気象予報ではなく、耐震診断などのほうが事例として適している。最後に、本研究では避難行動コストや情報取得コスト、自己効力感、対処効力感の影響も検討しているが紙面の制約のため省略している。これらの結果は講演時に紹介する。

REFERENCES

- 1) Friston, K. J., Kilner, J. and Harrison, L.: A free energy principle for the brain. *Journal of Physiology*, Paris 100(1–3):70–87, 2006.
- 2) Friston, K. J.: The free-energy principle: A unified brain theory? *Nature Reviews Neuroscience*, Vol.11(2), pp.127–38, 2010.
- 3) Parr, T., Pezzulo G, and Friston. K. J.: *Active Inference: The Free Energy Principle in Mind, Brain, and Behavior*, The MIT Press, 2022.
- 4) Smith R, Friston K. J, and Whyte C. J.: A step-by-step tutorial on active inference and its application to empirical data. *Journal of Mathematical Psychology*, Vol.107:102632, 2022.

EVACUATION DECISION SIMULATIONS CONSIDERING DISASTE PREDICTION ACCURACY BASED ON THE FREE ENERGY PRINCIPLE

Toshio FUJIMI

This study examined the relationship between the accuracy of disaster information, information acquisition, and evacuation choices, as well as the effects of individual psychological and environmental factors, by conducting an evacuation decision simulation based on the free energy principle. The results showed that there is an acceptable range of accuracy of disaster information, and that the rate of information acquisition plummets when the range is exceeded. It was also revealed that there is a change point in the subjective probability of disaster that significantly alters the behavioral pattern of information acquisition and evacuation. Furthermore, it was suggested that information should not be provided when the subjective probability of disaster is greater than the change point, and that, overall, it is better to focus on reducing the miss rate than on reducing the false alarm rate.