

影響感度関数：政策検討支援を企図した気候変化影響の簡易分析の工夫

国立環境研究所

高橋 潔

気候変動が水資源・農業・自然植生等の各分野に及ぼす影響の将来予測は、気候因子およびその他の因子（気候以外の環境条件や社会条件）を入力データとする対象分野の詳細な影響予測モデルを構築したうえで、当該モデルに将来の気候条件やその他因子の条件を「シナリオ」として与えたシミュレーションにより実施される場合が多い。この手順は「シナリオアプローチ」と呼ばれるが、気候及び非気候因子の諸条件について将来に起こりうる組み合わせを複数用意し、その各々を前提に影響予測を行うことで、将来に発生しうる各分野への影響を描き示すことが期待できる。しかし、シナリオアプローチにも短所はあり、その一つとして、多様な温室効果ガス排出の将来想定や気候予測情報の不確実性を考慮して影響予測を実施する場合の計算機負荷・作業負荷の大きさが挙げられ、それは場合によっては政策分析への応用の障壁にもなりうる。

「シナリオアプローチ」の短所を補うべく、「影響感度関数アプローチ」とよばれる手法が補完的に用いられることがある。「影響感度関数アプローチ」は、影響予測モデルに対して、そのシミュレーション出力への影響力の強い因子について摂動を与える感度分析を事前に多数回行い、その出力をデータベース化したうえで政策分析・応用分析に活用することで、多様な前提条件での影響分析を小さな計算機・作業負荷で実施できるようにすることを狙っている。発表では「影響感度関数アプローチ」について、具体事例にふれながら、その特徴を紹介する。

Impact response function approach: as a device for bridging gaps between climate change impact analyses and policy assessment

Kiyoshi Takahashi (National Institute for Environmental Studies)

For the analyses of climate change impacts, 'scenario approach' is frequently used. With the 'scenario approach', a limited number of plausible sets of future climate condition and non-climate condition are prepared and they are inputted into climate impact analyses models for projecting future plausible impacts. While 'scenario approach' is applied broadly in many impact analyses, it also has weak points. One of them is the relatively small number of scenario sets that can be examined, which often constrains utility of the results for the purpose of supporting policy assessment. For complementing the 'scenario approach', 'impact response function' approach has been applied in some studies. The 'impact response function approach' is a kind of sensitivity analyses with perturbing some important factors and archive the results of the analyses as a database, which could be utilized for further applied analyses. In the presentation, concepts and practical examples of 'impact response surface approach' are introduced.

Keywords: climate change, impact analyses, impact response function

影響感度関数：政策検討支援を企図した気候変化影響の簡易分析の工夫

国立環境研究所

高橋 潔

1. はじめに

気候変動の影響は様々な分野・地域で既に顕在化しつつあり、今後 21 世紀あるいはその先にわたり、影響・被害の増大が懸念されている。気候変動影響による被害を許容可能な水準に抑制するためには、緩和策（温室効果ガスの排出抑制・吸収促進によって大気中の温室効果ガス濃度を低下させて気候変動自体を小さく抑える）と適応策（気候変動により生ずる各種の環境変化に対して影響を被る側での調整・対処によりその被害の発生を回避・軽減する）を組み合わせる必要がある。

緩和策・適応策の検討にあたっては、現在までに顕在化している気候変動影響について検出するとともに、将来の温室効果ガスの排出経路の下で生じる気候変化ならびにその気候変化により引き起こされる各部門での影響について、対策検討に適合した空間・時間解像度や精度で予測することが求められる。

影響予測は、気候因子およびその他因子（気候以外の環境条件や社会条件）を入力データとする対象分野の影響予測モデル（以下では「詳細影響モデル」と呼ぶ）を構築したうえで、当該モデルに気候因子やその他因子の将来条件を「シナリオ」として与えるシミュレーション実験により実施される場合が多い。この手順は「シナリオアプローチ」と呼ばれるが、気候及び非気候因子の諸条件について将来に起こりうる組み合わせを複数用意し、その各々を前提に影響予測を行うことで、将来に発生しうる各分野への影響を描き示すことが期待できる。しかし、シナリオアプローチにも不得手な用途はあり、例えば多様な温室効果ガス排出の将来想定や気候予測情報の不確実性を考慮して影響予測を実施する場合の計算機負荷・作業負荷の大きさが挙げられる。それは時に政策分析への応用の障壁にもなりうる。

本発表では、政策検討支援の観点からシナリオアプローチによる影響予測の制限について論じたうえで、その補完・克服のために提案・利用されてきた気候影響の簡易分析手法について述べるとともに、特に「影響感度関数アプローチ」を中心に既存の適用事例の紹介を交えつつその有用性・有望性について論じる。

2. 気候政策の検討支援とシナリオアプローチによる気候変動影響予測

気候影響の予測には、様々な理由で誤差・不確実性が含まれる。まず、予測に用いられる影響モデル（例：作物収量モデル、水文モデル、生態系モデル等）自体に、メカニズム理解の不足等に由来する誤差が含まれる。また、影響予測の前提条件となる気候予測情報についても、その予測に用いられる炭素循環モデル・気候モデル等の不完全さに由来する誤差が含まれる。一方、気候・影響の予測手法の不完全さに由来する誤差以外にも、将来の社会経済条件の想定により、温室効果ガスの排出量・濃度には差が生じ、結果的に気候予測の不確実性幅も大きなものとなる。それ

以外にも、例えば大規模な火山噴火や太陽活動の強化・弱体化といった自然条件の変化は、気候変化の大小を左右するが、それらの自然現象の生起について精度良く将来を言い当てることは困難である。そのため、それらの不確実性の大きな因子の将来変化については、将来に生じうる幅の範囲で複数の想定（シナリオ）を置き、各シナリオを前提条件として気候・影響予測を実施し、影響の予測結果についても幅を伴う形で提示する「シナリオアプローチ」が良く用いられる。

シナリオアプローチによる影響予測では、各因子の将来状況について現時点では一点に絞り切れない場合でも、多様な条件下での影響を描出し、いずれの状況にも対処しうる頑健な（つぶしの効く）対策を検討・提案しうる。また、各種対策の実施の有無についてもそれをシナリオとして想定することで、対策効果の比較評価が出来る。さらに、科学的理解の深化等を通じて、あるいは複数因子間の整合性を考慮したりすることで、各因子のシナリオの幅を狭めたり各想定が生起について確率的に想定したり出来る場合には、影響予測の不確実性幅も制約され、予測情報の付加価値はより高まる。

以上のように、詳細影響モデルを用いたシナリオアプローチは政策検討支援の観点で有力な手法であり、それゆえに多くの影響予測研究で採用されている。しかし、予測実施の目的によってはシナリオアプローチが向かない場合も存在し、それゆえ補完的に他のアプローチの活用が必要になることもある。例えば、当初想定したシナリオでの影響予測を一通り実施した後に、当初想定したシナリオに不足が生じ、政策決定者が異なる社会経済等の将来想定に基づく影響予測を追加的に要求した場合、一般的に影響予測の実施には相応の専門的知識や予測実験の実行環境（計算機資源・ソフトウェア環境等）が必要になることから、追加実験のための時間・予算等を用意しなければならなくなる。より好ましくない状況では、例えば何らかの研究・請負業務プロジェクトにおいて当初の予測実験が実施された後、予算不足等の理由で影響予測に用いられたモデルやデータ等のメンテナンスが十分に行われず、追加実験が実施困難な場合も生じうる。

また、シナリオアプローチは様々な想定条件の帰結として生じる気候影響について探索的に検討する目的には向いているが、将来時点で達成すべき目標・状況を想定したうえでそれに至る道筋を推計しようとする場合、影響生起のメカニズムを正確に表現し推計精度を高めるための詳細影響モデルの複雑さゆえに1計算に要する計算時間・計算機資源が大きく、多数回計算により解を導き出す最適化計算等の枠組みにうまく適合しない場合が多い。

3. 気候変動影響の簡易分析手法

上述の詳細影響モデルを用いたシナリオアプローチによる影響予測を補完する形で、政策検討の目的や種類に応じた影響予測・適応評価を支援すべく、比較的簡便な手順による気候変動影響の推計手法が提案・利用されてきた。

例えば、DICE モデル（Nordhaus,1992）に代表される最適化型統合評価モデルでは、全球規模での緩和に要する費用と気候変化の被害費用の総和の時間積分を最小化する緩和策・炭素価格や温室効果ガス排出の経路を推計する最適化計算のために、全球平均気温上昇を説明変数とする二次関数のような、極めて簡略化した影響予測式を採用している。影響予測式の係数は、詳細影響モデルを用いた既存の影響予測研究の知見等に基づき推定される。全球1地域で影響部門を区別しない最も単純化された影響予測式から始まり、計算機能力向上、詳細影響モデルに基づく影

響予測知見の充実等を背景に、地域・影響の区分を増やした影響予測式の開発・活用も進められてきた。この種の影響予測式は、全球・地域の平均気温上昇の想定を与えるのみで気候変動影響量が簡便に計算されることから、その推計実施に際して専門家の関与を必須とせず、また多様な気候変化想定での影響予測を迅速に実施可能である。その結果、最適化型統合評価モデルに組み込むことも可能になる。一方で、過度の簡略化のためその予測精度の低さが用途によっては問題となる。説明変数は基本的に全球あるいは地域別の平均気温上昇のみであり、二酸化炭素濃度や人口・技術進歩等の社会経済因子の将来変化について明示的に考慮しない。また、気温以外の気候因子（降水量・日射等）についても気温上昇と独立した形で変化を想定できない。空間解像度としても、全球1地域あるいは全球を十数地域に区分する程度となる。その結果、最適化型統合評価モデルを用いた全球規模での気候目標や排出経路の検討にはこれまで活用されてきたが、国あるいはそれより小さなスケールでの影響予測・適応策検討の目的には適さない。また最適化型統合評価モデルでの利用についても、その予測精度の不足が問題視されることも多い。

詳細影響モデルをベースにして、空間・時間解像度を落としたり、重要度の低い変数やプロセスについてモデル式から省いたりといった工夫を加え、詳細影響モデルよりも計算機負荷の小さな簡略影響モデルを構築し、それを影響予測に用いる場合もある。この種の簡略モデルは、ある程度の予測精度・空間解像度を維持しつつ複数部門の影響を包括的に描出する目的で用いられたり、影響部門間の相互作用を考慮した分析に用いられたり、あるいは全球気候モデル（大循環モデル）と連結して地球システムモデルのモジュールとして用いられたりする。地球システムモデルに組み込まれた場合には、気候変化の帰結として自然生態系や人間社会に生じる気候影響の予測にとどまらず、その気候影響が逆に気候システムに及ぼすフィードバック効果についての把握も可能になる。予測実験時の計算能力への要求を軽減しつつ、一定の精度の維持が可能であるため、地域的な影響・適応評価にもその有用性が認められるものの、最新の詳細影響モデルであっても未考慮のプロセスや解像度不足によりその予測誤差が問題視される場合が多いことをふまえると、実際には目的に合致した精度・解像度を有する簡略モデルの追加構築は容易ではなく、また詳細影響モデルの高度化による予測性能の向上に研究の優先順位を置きがちな研究者の立場からも簡略モデルの構築に資源を割くことには困難さがある。また、簡略モデルとはいえ、その計算実行環境を整え、必要な入力データを事前に準備するには、相応の専門性が必要とされる問題も残る。さらに、最適化計算に組み込めるほどまでにはその計算機負荷は低減できない場合が多い。

以上のように、影響予測式や簡略影響モデルなど、用途に応じて簡便化された影響分析の手法が提案・活用されているものの、いずれも一長一短があり、新たなアプローチの提案の余地があるとの認識に立ち、発表者は特にそのうち「影響感度関数」に有望性を見出し、その開発・利用の取り組みを重ねてきた。科研費基盤研究(B)「季節予報に基づく作物・エネルギー・経済モデルによる世界食料価格の予測精度と限界」（課題代表者：國光洋二；2016～2018年）においても、発表者は農業部門の影響感度関数の改良・提供を研究課題として位置付けてきた。類似のアプローチの適用事例は諸外国の研究にも見ることが出来る。以下では、影響感度関数の考え方ならびにその開発・応用事例について整理・紹介する。

4. 影響感度関数の考え方ならびにその開発・応用事例

影響感度関数とは数表の集合体（データベース）であり、詳細影響評価を用いて、気温・降水量等の主要因子を感度解析的に変化させた多数回シミュレーションを行い、その出力を地域別に平均集計することで得られる。すなわち、詳細モデルの出力を近似的に得るための簡便な影響評価手法と考えることが出来る。影響関数の利点は、計算機負荷の小さな簡易気候モデルが出力する全球平均気温変化と、大循環モデルの出力を利用して事前に用意する気候変化の空間的差異に関する情報を組み合わせて計算される地域別気候因子変化量に応じて、データベースからの読み取りにより、影響量を迅速に計算できることである。この特徴は、多様な排出削減政策を前提とした影響量の検討を可能にする。一方、注意が必要な点としては、感度解析で変化させた因子のみ考慮可能であること、及び地域別集計するため地域内の因子変化の空間的差異を無視してしまうことが挙げられる。そのため、影響感度関数開発に際しては、上記の点に注意し、利用目的に適う近似精度を持つか評価することが重要である。

影響感度関数の考え方は決して新しくはない。発表者の知るところでは、1990年代後半に独国ポツダム気候影響研究所(PIK)の研究者チームが、気候政策分析のための統合評価モデル ICLIPS (Integrated assessment of CLimate Protection Strategies) の開発・応用の一環として、全球規模の陸域生態系モデル BIOME1、FAO の農業作物適域モデル、水文モデル WaterGAP を用いた感度実験を実施し、各部門の影響感度関数(彼らはこれを CIRF (Climate Impact Response Function ; 気候影響応答関数) と呼んだ)を作成し、「許容可能な気候の窓 (Tolerable Climate Window Approach)」分析に用いている(例: Fussel and Minnen (2001); Fussel (2005))。ここで「許容可能な気候の窓」とは、許容できない水準の気候影響量を最初に設定したうえで、その気候影響を回避できる気候変化経路について(単一の最適解の形ではなく)幅を伴う形で逆算的に示し、またその気候変化経路に対応した温室効果ガス排出経路についても同様に幅を伴い示すものである。

その後、国内では、環境研究総合推進費課題 S-4「温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究」(2006~2010年; 課題代表: 三村信男)における統合評価ツール AIM/Impact[Policy]の開発・応用の一環として、発表者を含む国立環境研究所の研究者チームが ICLIPS での CIRF と類似のものを「影響感度関数」あるいは「影響関数」と呼び、全球規模(国別)の水文関連指標(再生可能水資源量、水ストレス指標)について花崎ら(2007)が、全球規模(国別)の作物別農業収量(イネ、コムギ、トウモロコシ、ダイズ等、計14作物種)について田中ら(2014)が、全球規模(国別)の人間健康関連指標(熱ストレス超過死亡数、マラリア発症数)について高橋らが、国内(県別)の自然植生関連指標(ブナ適域面積率)について高橋ら(2008)が、それぞれ影響関数を開発した。いずれの部門の影響関数開発にあっても、(1)影響関数作成に用いる詳細モデルの選定、(2)既存の気候変化予測情報に基づく感度解析時の因子の上下限ならびに刻み幅の検討、(3)感度解析的シミュレーションの実行、(4)影響関数による詳細モデル再現性の把握、(5)作成した影響関数の特徴理解、の手順で開発している。以上の国内研究チームにより開発された影響関数については、上記 S-4 課題での利用、さらにその後の政策検討支援のために、VBA で記述された平易なユーザインターフェイスを持つ統合評価ツール AIM/Impact[Policy]に実装され、政策決定者を含む非専門家であっても比較的容易に多様な将来の社会経済シナリオならびに緩和政策(長期の温度・濃度安定化目標)の下での

影響の包括的評価ができる環境が構築された。

影響感度関数には、上述の ICLIPS や AIM/Impact[Policy]のような統合評価モデル・ツール中での地域影響の包括的予測の実現だけでなく、その他の利点もある。例えば、いずれの分野でも詳細影響評価モデルの精度には改善の余地があり、その結果、異なるモデルチームにより開発された詳細影響評価モデルによる影響予測結果には、同じ気候・社会経済シナリオを想定した場合であっても、大きな差異が生じることが多い。近年、詳細影響モデルの改良を目的としたモデル間比較評価の重要性が増している。通常、共通の気候・社会経済シナリオを設定し、その条件下での影響予測結果を集積・比較するアプローチがとられる。しかしより積極的には、影響感度関数をいずれの詳細影響モデルでも作成することで、各モデルの挙動の違いとその原因についてより踏み込んだ検討が可能になるものと予想できる。またその延長で、もし影響感度関数を作成しモデル仕様の技術資料の一部として公表することが詳細影響モデルの標準的な開発手順に組み込まれるようになれば、詳細影響モデルの挙動について専門家でなくとも平易に大掴みできるようになり、予測手法の透明性が確保されるとともにモデル改良の加速を後押しすると期待できる。

5. おわりに・今後に向けて

以上本稿で論じたように、影響感度関数の有用性については国内においても国外においても一定の認識がなされており、具体的な開発・応用事例も存在しているが、必ずしも広く普及している状況とはいえない。しかしその中であっても、影響感度関数の利点を理解し、その開発・改良・応用を現在も継続している研究チームも存在している。例えば、フィンランドの国立環境研究所（SYKE）の研究チームでは、生態系影響等について影響感度関数（彼らはこれを IRS（Impact Response Surface；影響応答曲面）と呼んでいる）を開発し、対象地域の気候予測についての確率密度分布と組み合わせ、気候予測の不確実性を考慮した気候変動影響の確率的予測を簡便に実施する手法を提案・応用し、活発な研究活動を続けている（例：Fronzek et al. (2011)・Pirttioja et al. (2015)）。気候変動問題をリスク管理問題として扱う IPCC 極端現象特別報告書（IPCC-SREX; IPCC(2012)）以降の潮流ともよく合致した取り組みといえる。

本稿では、詳細影響モデルを用いたシナリオアプローチを補完する簡便な影響評価手法として、特に影響感度関数に焦点を当てて、考え方や有用性等について論じた。しかし、気候リスクの効率的・効果的な管理に資する影響の予測・伝達の手法の工夫は、より幅広かつ柔軟に取り組んでいく必要がある。例えば、詳細影響モデルのモデル比較評価 ISI-MIP プロジェクト（Warszawski et al., 2014）では、シナリオアプローチに基づき実施された複数部門・複数モデルの影響予測出力のうち主要なものを、一元的に集約・配信しており、それを取得・活用した応用研究も増えている。外部記憶装置の価格低下やインターネットの高速化などの諸条件を考慮すると、例えば影響感度関数についても、地域平均を取らずにグリッド別の多数回の感度解析出力をそのまま集積・配信することが出来る可能性が十分にある。その場合、例えば統計分析や機械学習などにより、ユーザ側で地域平均よりも効率の良い簡便な影響分析・伝達手法の開発にも取り組める可能性がある。いずれの場合であっても、影響予測の手法、予測結果の伝達、データ共有等に関して、多様な専門分野の研究者の連携、政策決定者らの検討ニーズの適切な考慮ができるように、議論を後押しするための国内外での場を構築・維持していくことが求められよう。

引用文献

- Fronzek, S., Carter, T.R., Raisane, J., Ruokolaine, L., Luoto, M. (2010) Applying probabilistic projections of climate change with impact models: a case study for sub-arctic palsa mires in Fennoscandia. *Climatic Change*, **99**, 515-534.
- Fussel, H-M. and van Minnen, J-G. (2001) Climate impact response functions for terrestrial ecosystem. *Integrated Assessment*, **2**, 183-197.
- Fussel, H-M. (2005) The ICLIPS impacts tool: A graphical user interface to climate impact response functions for integrated assessments of climate change. *Integrated Assessment*, **4**, 116-125.
- Nordhaus, W.D. (1992) *The 'DICE' Model: Background and structure of a Dynamic Integrated Climate-Economy model of the economics of global warming*. Cowles Foundation Discussion Papers 1009, Cowles Foundation for Research in Economics, Yale University.
- Pirttioja, N., Carter, T.R., Fronzek, S., Bindi, M., Hoffmann, H., Palosuo, T., Ruiz-Ramos, M., Tao, F., Trnka, M., Acutis, M., Asseng, S., Baranowski, P., Basso, B., Bodin, P., Buis, S., Cammarano, D., Deligios, P., Destain, M.F., Dumont, B., Ewert, F., Ferrise, R., François, L., Gaiser, T., Hlavinka, P., Jacquemin, I., Kersebaum, K.C., Kollas, C., Krzyszczak, J., Lorite, I.J., Minet, J., Minguéz, M.I., Montesino, M., Moriondo, M., Müller, C., Nendel, C., Öztürk, I., Perego, A., Rodríguez, A., Ruane, A.C., Ruget, F., Sanna, M., Semenov, M.A., Slawinski, C., Stratonovitch, P., Supit, I., Waha, K., Wang, E., Wu, L., Zhao, Z., Rötter, R.P. (2015) Temperature and precipitation effects on wheat yield across a European transect: a crop model ensemble analysis using impact response surfaces. *Climate Research*, **65**, 87-105.
- Warszawski, L., Frieler, K., Huber, V., Piontek, F., Serdeczny, O. and Schewe, J. (2014) The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP): Project framework. *PNAS*, **111**, 3228-3232.
- 花崎直太, 増富祐司, 高橋潔, 肱岡靖明, 原沢英夫, 松岡譲 (2007) 温暖化政策支援モデルのための全球水資源影響関数の開発. *環境システム研究論文集*, **35**, 367-374.
- 田中朱美, 高橋潔, 増富祐司, 花崎直太, 肱岡靖明, SU Xuanming, 長谷川知子, 藤森真一郎, 増井利彦 (2014) 温暖化政策支援モデルのための全球作物収量影響関数の開発. *生物と気象*, **14**, 41-56.
- 高橋潔, 松井哲哉, 肱岡靖明, 田中信行, 原沢英夫 (2008) 温暖化政策支援モデルのための県別ブナ林影響関数の開発. *地球環境研究論文集*, **16**, 111-119.
- IPCC (2012) *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*, Cambridge University Press.