

広域評価の不確実性と可能性

木村園子ドロテア¹

Uncertainty and possibility of Regional assessment

Sonoko Dorothea KIMURA¹

1. 広域評価の目的

環境問題の多くは、発生源ならびに影響範囲が面的な広がりを有するという特徴を持つ。温室効果ガスについて考えてみると明らかのように、温室効果ガスの影響は、そのガスが発生した地点のみに影響するのではなく、地球全体の気候変動の要因となりうる。特に、農業生産活動に深くかかわる窒素は、酸化数がアンモニア (NH₃) の状態では-3、五酸化二窒素 (N₂O₅) の状態では+5と変化し、様々な分子として存在するため、生態系内で様々なバイオジオケミカルなプロセスに関わり、形態を変えながら広い範囲に影響を及ぼす (Galloway and Cowling, 2002)。農業生産現場では、窒素肥料として施用したものが、施用した形態で施用した地点に残る割合は未だに多くの場合 30%程度と非常に小さく、空气中、地下、横へと広がっていく (Deng et al., 2012)。面を対象とした2次元的な広がりに加え、このような3次元的な動きがどれぐらいの時間で生じているかを把握することも必要となってくる。したがって、物質循環に関する環境問題を扱う際、物質の動きを時空間的な広がりを持って解析することが不可欠である。物質循環の時空間的な広がりへの把握、それがすなわち広域評価である。

近年、広域評価という概念が一般的に使われるようになった。発生源を解明し、発生量低減策を講じることが環境問題の解決につながるとして、広域評価への期待が高まっている。また、現状における環境問題の解析のみではなく、将来における影響を予測することにより、環境負荷を最小にする成長シナリオを提案することも広域評価に求められていることである。しかし、期待が高まる一方、広域評価において得られた結果がどのような前提において算出され、どの程度の一般性を有するか、またどの程度の不確実性を有するか等の特徴および問題点に関する検討および議論は未だ少ないように思われる。本報では、特に物質循環に関する広域評価の不確実性に焦点を合わせて考察をしていく。

2. 測定手法による制約

物質循環における広域評価の最大の目的が、時空間的な広がりにおける物質循環の把握であるとする、その最大の課題は、対象をいかに正確に測定するかということに尽きよう。現代は科学分析が躍進しており、様々な測定手法が開発されている。たとえば、純生態系生産物 (NEP: Net Ecosystem Production) は、衛星画像の3次元解析によって、炭素の蓄積量の変化から測定することができる (Patenaude et al., 2005)。この方法の利点としては、ある面的な広がりを外挿することなしに把握することができることであり、土地利用や植生の空間分布を捉える上では最も有効な方法であるといえる。それに対して、この方法の欠点は、対象地の上をめぐる衛星の周期に影響されるため、高精度の画像を頻繁に得ることが難しいことがあげられる。解析結果はある時点におけるスナップショットであり、土地利用等の変化は数か月から数年単位の粗い時間軸でしか追うことができない。時間軸の問題は、航空画像等を使うことによりある程度解決することができるが、コスト面から考えるとまだ制約されている。

フラックスタワーでは、ボーエン比法、緩和渦集積法や渦相関法により二酸化炭素のフラックスを測定することにより、NEPを非常に細かい時間軸で測定することが可能である (Baldocchi et al., 2001)。時間の解像度は数ナノ秒にまでおよぶ。いずれの手法にせよ、測定地点は、植生の2倍以上の高さにあることが望ましいとされており、通常、森林では数十メートルの高さに、草地や農耕地では1~数メートルの高さに設置されている。測定地点の周辺は、平らであり、均一な植生があることが測定結果の正しい解釈の前提となっている。必要とされる平らで均一な植生は、測定地点の高さにより100m~数kmに及ぶ (Baldocchi, 2003)。測定地点の二酸化炭素濃度は、周辺の植生の上空の二酸化炭素濃度の平均である。そのため、面としての平均値として扱えられる利点を有すると同時に、微小な土壌条件の違いや植物の生育条件の不均一性等による空間変動を捉えることはできないという欠点を有する。

NEPに土壌条件を直接反映できる測定方法は、クロードチャンバーやダイナミックチャンバー等を用いる測定手法で、生態学的手法と呼ばれる (Nakano et al.,

¹Tokyo University of Agriculture and Technology, Tokyo 183-8509, Japan.

Corresponding author: 木村園子ドロテア, ¹東京農工大学大学院農学研究院

2012年12月10日受稿, 2013年1月25日受理

土壌の物理性 123号, 125-128 (2013)

2004). チャンバーに植生を含めた測定では、NEPが直接測定できるが、土壌呼吸のみを測定し、純一次生産物(NPP: Net Primary Production)は、植物のバイオマス量の変化より求め、バイオマス炭素量から土壌呼吸量を差し引いてNEPとする例もよく見かけられる(Hu et al., 2004). より直接的な値が得られるため、解釈がしやすい手法であると言えるが、この手法の問題点は、空間変動に強く影響されすぎることである。空間変動を加味してある測定地点の代表性を確保するには、数多くの反復が必要であることが空間解析の研究により度々指摘されてきた。たとえば北海道の草地では亜酸化窒素の放出量の場合、測定値が母集団の平均の $\pm 20\%$ 以内に95%の確率で入るためには6月では480点、8月には710点のサンプル数が必要となる(Katayanagi and Hatano, 2005). この数は現実的ではなく、3~5反復で終わってしまうのが一般である。またチャンバーの新たな設置による土壌のかく乱、チャンバーを設置し続けたために生じるチャンバー内の土壌環境の変化等により、測定地点の土壌条件も変化してくる危険が避けられないという欠点も有する。

対象とする時空間スケールにより、方法だけでなく、対象となるみかけの要因も変化する。たとえば、微生物レベルでは、脱窒は酵素の活性を左右する酸素、基質となる硝酸態窒素、エネルギー源となる炭水化物の有無によって左右される(Lark et al., 2004). 圃場レベルとなると、酸素の有無は土壌水分状態に、硝酸態窒素量は窒素の供給源としての施肥に、炭水化物は残さの管理法や有機質資材の施用による炭素の供給量によって説明することができる(Toma and Hatano, 2007). 同一の土地利用条件下の複数の圃場を含む中小域レベルでは、土壌水分状態は土壌タイプによって影響され、窒素や炭水化物の供給量は、土壌条件の違いによる代謝分解過程によって決まる(Mu et al., 2008). 広域レベルとなると、土壌タイプ、窒素や炭素の代謝分解過程は、地理条件、土地利用や管理法、生物相、気候条件等の違いによって変わってくる(Tian et al., 2010). 微生物レベルでも、広域レベルでも、脱窒プロセスを左右する基本メカニズムは同一であるが、それを決定づける要因は異なる因子によって説明することができるのである。

このように、同じプロセスであっても、対象とするスケールにより、測定手法が異なり、測定される時空間的な広がり、その解像度、解析される要因が異なってくる。広域レベルでは、すべての現象や要因を測定することは不可能である。対象とするスケールの下位レベルで行われた測定結果をスケールアップに使用する際、この点に特に注意する必要がある。

3. 不確実性の要因

広域レベルの物質循環の定量的な把握には、様々な質のデータを使用しなければならない。前述のとおり、測定手法による違い、測定における誤差、時空間の変動、使用するデータの代表性といった要因が推定結果の信

びよう性を左右する(Kroeze et al., 2003). データが不足している場合も多く、広域の対象全てを測定することができないという制約も多くの場合存在する。また、一番データの蓄積があるのが圃場レベルなのに対して、必要とされているのは広域レベルにおける推定であるため、圃場データを用いて広域を推定せざるを得ないことが、広域評価の結果を不確実性としている主な要因であると指摘されている(Williams et al., 2001). 圃場レベルのデータを広域レベルに使用するには、なんらかのモデルを使用する必要がある。対象とする物質フローによっては、抜け落ちているプロセスがある可能性があるためである。このような不確実性を反映して評価を行うことが、近年、ますます重要になっている。

不確実性の定量化には、まず、パラメータの不確実性解析(parameter uncertainty analysis)がある(IAEA, 1989). これは、インプットデータを変化させて、評価結果の変動幅を調べる方法で、感度分析(Sensitivity Analysis)ともいえる。モデルで使われている係数や構造の不確実性を扱うものではなく、使用するデータの不確実性について評価するものである(Heywood et al., 2006). 感度分析は不確実性の評価にしばしば使われるが、モデルの構造に依存するため、評価結果はモデルの不確実性の評価であることを加味する必要がある。

モデルを広域で使用する際に注意しなければいけないのは、モデルで使用されているプロセス式が、スケールに依存していないか、という点である(Finke et al., 1999). 前述のとおり、対象とするプロセスは、時空間スケールによって測定手法も抽出されるパラメータも変化するためである。たとえば、DNDC-Forestを異なるスケールで評価した結果、モデルはスケールに依存せず、ユーカリの生育を評価できることが示された(Miehle et al., 2006). その一方、流域レベルの水分状態の変動はスケールにより直線状に変化するわけではないため、水分状態の解像度により、結果が大きく影響されることが示された(Heuvelink, 1998). 使用するデータの空間変動の精度が、広域評価結果の精度に最も影響するということは、他の研究例でも指摘されており(Heuvelink, 1998; Williams et al., 2001; Baginska et al., 2003), データベースの精度が非常に重要であることがわかる。

4. 不確実性が示す広域評価の可能性

不確実性は、誤差伝搬の法則(Freibauer, 2003), 可能な最大値・最小値の範囲(Tonitto et al., 2007) また、モンテカルロシミュレーション(De Vries et al., 2003; Kimura et al., 2007)などの方法により定量的に把握することができる。しかし、不確実性を定量化した結果は、まだうまく生かされていないように思われる。たとえば、DNDC-Regionモデルで広域評価をおこなった場合、最大値と最小値を得ることができる。しかし、図示されるものは、一般的に平均値でしかなく、最大値・最小値、変動幅のデータはおもてに出ることが少ない。IPCCで求められる各国の温室効果ガス排出量の推定値

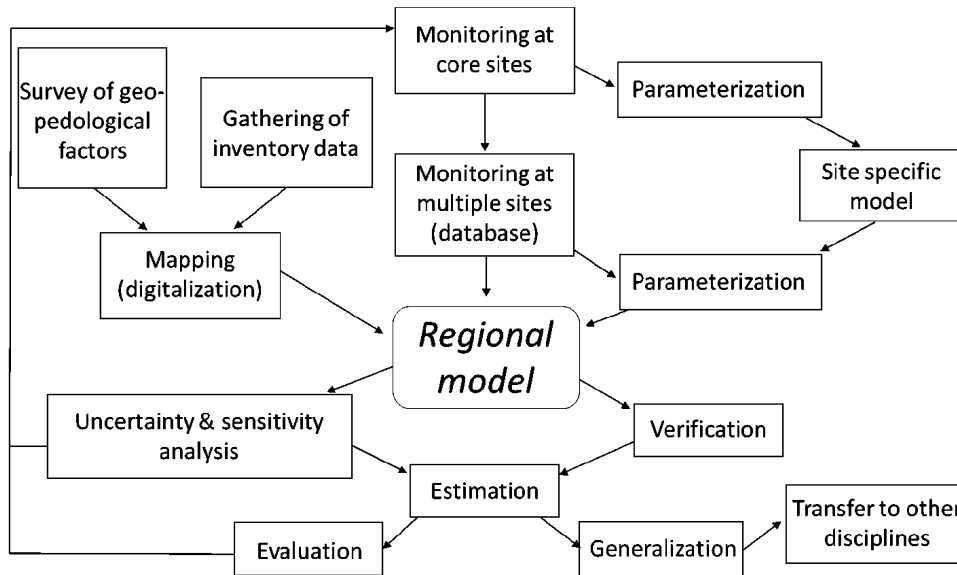


Fig. 1 広域評価をめぐる研究分野のネットワーク (Kimura et al. 2009 より改変).

も、標準誤差を付けることが義務付けられているが (IPCC, 2006), 削減策の解析には変動誤差を含んだ議論はわずかしかない (Yan et al., 2009). 変動幅を出すことは、データを収集するうえでも、解析をおこなううえでも、非常に労力を必要とするが、それに対して得られる成果がそれ相応に使われないという事実も不確実性の把握に二の足を踏ませているようである。

変動幅には、平均値だけでは得られない情報が多く含まれている。たとえば、閾値を定めた場合、その閾値を上回る確率を求めることができる。イギリスで酸性化をもたらす窒素沈着を推定した結果では、48%の地点では、酸性化の閾値を上回るか下回るか不明であったのに対して、窒素負荷の閾値については98%の地点が閾値を上回る確率が95%以上と示され、窒素負荷の軽減が緊急課題であることが示された (Heywood et al., 2006)。また、広域評価モデルの結果より、モニタリングで必要とされるプロセス、測定が必要な項目を抽出することも可能である。

誤差範囲として示される結果の変動幅は、観測作業自体・サンプル保管状態や分析機器の感度といったものに影響を受けている可能性もあるが、解析段階では見落とししている何らかの要因によって影響されている可能性もある。前者の場合には観測～分析の手続きを精緻化したり、分析機器の測定精度を上げることが求められ、後者の場合は、さらなる調査によりその要因を明らかにしていくことが求められる。変動幅を含む結果は、今後どのような研究が必要であるかを暗示しているのである。広域評価は、様々な研究分野のネットワークによって成立する (Fig. 1)。広域評価の必要性が増している今、研究分野間の連携を深め、結果の解釈方法、使用方法に不確実性を定量的に含め、解析に反映していくことが、広域評価の結果の精緻化、ならびに、モニタリング手法の改善、新たな研究対象の発掘につながる研究リンクのカギ

となるのではないかと考えている。

引用文献

Baginska, B., Pritchard, T. and Krogh, M. (2003) : Roles of land use resolution and unit-area load rates in assessment of diffuse nutrient emissions. *Journal of Environmental Management*, 69 : 39-46.

Baldocchi, D., Falge, E., Gu, L., Olson, R., Hollinger, D., Running, S., Anthoni, P., Bernhofer, C., Davis, K., Evans, R., Fuentes, J., Goldstein, A., Katul, G., Law, B., Lee, X., Malhi, Y., Meyers, T., Munger, W., Oechel, W., Paw U, K. T., Pilegaard, K., Schmid, H. P., Valentini, R., Verma, S., Vesala, T., Wilson, K. and Wofsy, S. (2001) : FLUXNET : A New Tool to Study the Temporal and Spatial Variability of Ecosystem-Scale Carbon Dioxide, Water Vapor, and Energy Flux Densities. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 82 : 2415-2434.

Baldocchi, D. D. (2003) : Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems : past, present and future. *Global Change Biology* 9, 479-492

De Vries, W., Kros, J., Oenema, O. and de Klein, J. (2003) : Uncertainties in the fate of nitrogen II : A quantitative assessment of the uncertainties in major nitrogen fluxes in the Netherlands. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 66 : 71-102.

Deng, M., Shi, X. J., Tian, Y. H., Yin, B., Zhang, S. L., Zhu, Z. L. and Kimura, S. D. (2012) : The optimum rate of nitrogen application for rice in Thaihu lake region, China. *Pedosphere*, 22 : 48-57.

Finke, P. A., Wladis, D., Kros, J., Pebesma, E. J. and Reinds, G. J. (1999) : Quantification and simulation of errors in categorical data for uncertainty analysis of soil acidification modeling. *Geoderma*, 93 : 177-194.

Freibauer, A. (2003) : Regionalised inventory of biogenic greenhouse gas emissions from European agriculture. *Europ. J. Agron.*, 19 : 135-160.

Galloway, J. N. and Cowling, E. B. (2002) : Reactive Nitrogen and The World : 200 Years of Change. *A Journal of the Human Environment*, 31 : 64-71.

Heuvelink, G. B. M. (1998) : Uncertainty analysis in environmental modelling under a change of spatial scale. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 50 : 255-264.

Heywood, L., Hall J. and Smith, R. (2006) : Uncertainty in mass balance critical loads and exceedance : Application

- to a UK national data set. *Atmospheric Environment* 40, 6146-6153.
- Hu R, Hatano R, Kusa K, Sawamoto T (2004) : Soil respiration and net ecosystem production in an onion field in Central Hokkaido. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 50, 27-33.
- International Atomic Energy Agency (IAEA) (1989) : Evaluating the Reliability of Predictions Made Using Environmental Transfer Models. IAEA Safety Series 100, Vienna, Austria.
- International Panel on Climate Change (2006) : 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Chapter 3 : Uncertainties
- Katayanagi, N. and Hatano, R. (2005) : Spatial variability of greenhouse gas fluxes from soils of various land uses on a livestock farm in Southern Hokkaido, Japan. *Phyton*, 45 : 309-318.
- Kimura, S.D., Mu, Z.-J., Toma, Y. and Hatano, R. (2007) : An Eco-Balance Analysis of Global Warming Potential, Farmland Surplus Nitrogen and Yield of Six Agricultural Land Uses in the Ikushunbetsu Watershed. *Soil Sci. Plant Nutr.* 53 : 373-386.
- Kimura S.D., Hatano R. and Okazaki M. (2009) Characteristics and issues related to regional-scale modeling of nitrogen flows. *Soil Science Plant Nutrition*, 55 : 1-12.
- Kroeze, C., Aerts, R., van Breemen, N., van Dam, D., van der Hoek, K., Hofschröder, P., Hoosbeek, M., de Klein, J., Kros, H., van Oene, H., Oenema, O., Tietema, A., van der Veeren, R. and de Vries W. (2003) : Uncertainties in the fate of nitrogen I : An overview of sources of uncertainty illustrated with a Dutch case study. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 66 : 43-69.
- Lark, R.M., Milne, A.E., Addiscott, T., M. Goulding, K.W.T., Webster, C.P., and O'Flaherty, S. (2004) : Scale- and location-dependent correlation of nitrous oxide emissions with soil properties: an analysis using wavelets. *Europ. J. Soil Sci.*, 55, 611-627.
- Miehle, P., Liesley, S. J., Li, C., Feikema, P. M. (2006) Quantifying uncertainty from large-scale model prediction of forest carbon dynamics. *Global Change Biology*, 12 : 1421-1434
- Mu, Z. J., Kimura, S. D. and Hatano, R. (2008) : Nitrous oxide fluxes from upland soils in central Hokkaido, Japan. *Journal of Environmental Sciences*, 20 : 1312-1322.
- Nakano, T., Sawamoto, T., Morishita, T., Inoue, G. and Hatano, R. (2004) : A comparison of regression methods for estimating soil-atmosphere diffusion gas fluxes by a closed-chamber technique. *Soil Biology & Biochemistry* 36 : 107-113.
- Patenaude, G., Milne, R. and Dawson, T. P. (2005) : Synthesis of remotesensing approaches for forest carbon estimation : reporting to the Kyoto Protocol. *Environmental Science & Policy*, 8 : 161-178.
- Tian, H., Xu, X., Liu, M., Ren, W., Zhang, C., Chen, G. and Lu, C. (2010) : Spatial and temporal patterns of CH₄ and N₂O fluxes in terrestrial ecosystems of North America during 1979-2008 : application of a global biogeochemistry model. *Biogeosciences*, 7 : 2673-2694.
- Toma, Y. and Hatano, R. (2007) : Effect of crop residue C : N ratio on N₂O emissions from Gray Lowland soil in Mikasa, Hokkaido, Japan. *Soil Science and Plant Nutrition* 53 : 198-205.
- Tonitto, C., David M. B., Drinkwater, L. E., Li C. S. (2007) : Application of the DNDC model to tile-drained Illinois agroecosystems : Model calibration, validation, and uncertainty analysis. *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, 78 : 51-63.
- Williams, M., Rastetter, E. B., Shaver, G. R., Hobbie, J. E., Carpino, E. and Kwiatkowski, B. L. (2001) : Primary production of an arctic watershed An uncertainty analysis. *Ecological Applications*, 11 : 1800-1816.
- Yan, X., Akiyama, H., Yagi, K. and Akimoto, H., (2009) Global estimations of the inventory and mitigation potential of methane emissions from rice cultivation conducted using the 2006 Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines. *Global Biogeochemical Cycles*, 23 : GB2002

要 旨

物質循環に関する環境問題を扱う際、物質の動きを時空間的な広がりを持って解析することが不可欠であり、物質循環の時空間的な広がりの把握、すなわち広域評価が求められている。

広域評価では、まず、測定手法による制約が存在する。測定手法は、それぞれの手法特有の利点および欠点を有し、対象とする時空間スケールが限定される。どのスケールを目的とするかによって、手法を選ぶことが求められる。対象とする時空間スケールにより、測定手法だけでなく対象となるみかけの要因も変化する。広域レベルでは、すべての現象や要因を測定することは不可能であるため、対象とするスケールの下位レベルで行われた測定結果をスケールアップに使用する際、この点に特に注意する必要がある。測定手法による違い、測定における誤差、時空間の変動、使用するデータの代表性といった要因は、広域評価の推定結果の信ぴょう性を左右する。その結果、生じる不確実性については、誤差伝搬の法則、可能な最大値・最小値の範囲、モンテカルロシミュレーションなどによって定量化をすることが可能である。変動幅には、平均値だけでは得られない情報が多く含まれており、今後の研究の発展へ結びつく可能性がある。広域評価の必要性が増している今、研究分野間の連携を深め、結果の解釈方法、使用方法に不確実性を定量的に含め、解析に反映していくことが、広域評価の結果の精緻化、ならびに、モニタリング手法の改善、新たな研究対象の発掘につながる研究リンクのカギとなるのではないかと考えられる。

キーワード：不確実性、広域評価、窒素循環、炭素循環