

人間活動の影響を考慮した全球気候モデルの構築

Development of an Atmospheric General Circulation Model Including Human Impact Modules

北海道大学大学院工学院環境フィールド工学専攻

○学生員 山原康希 (Koki Yamahara)

北海道大学工学研究院環境フィールド工学部門 准教授

正員 山田朋人 (Tomohito Yamada)

Rutgers, The State University of New Jersey

Yadu Pokrel

1. はじめに

近年、多くの極端現象が世界各地を襲っている。2011年にはタイ国において大洪水が発生し、乾季に入ってもなお一部の地域で浸水状態が継続し、その経済的影響はタイ国のみならず我が国にも甚大な被害をもたらした¹⁾。また、2012年は北米大陸において大旱魃が発生した。米国海洋大気局によると米国においてこの旱魃は1956年以来最悪のものであり、1988年に同地域で発生した旱魃よりも深刻な被害となり、世界規模の小麦等農産物の需給バランスにも大きな影響を与えた²⁾。これらの極端現象とは統計的に極めて稀な気象現象であり、気象庁は30年に1回程度発生する現象を「異常気象」と定義しているが、極端現象は何年に1回という定義はなく、めったに起こらず災害につながる気象現象を示す。従って極端現象を早期に予測し、災害を縮小させることは喫緊の課題である。

現在まで世界各国における現地観測網の展開や人工衛星等の拡充によって使用可能な水文気象データは確実に増加しつつある。ここで大気陸面相互作用および全球規模の水文予測に関する研究を紹介する。Koster et al. (2004)は図-1で示すように複数の全球気候モデルによる結果として北米大陸中央部、インド、中国北東部、アフリカサヘルといった半乾燥地域の夏の降水活動が土壌水分偏差の影響を強く受けることを示した³⁾。また、ヨーロッパ全域を対象としたBart van den Hurk et al. (2010)では、平年値に対する土壌水分偏差は季節スケールの地表気温や降水の再現性に影響するとの結果が得られている⁴⁾。過去の現地観測や陸面過程モデルを用いた研究において土壌水分は大気と比較して長い初期値依存性を有することが指摘されている⁵⁾。Koster et al. (2010)は複数の全球気候モデルを用い、現実的な土壌水分初期情報は2週間以上先の気温の予報スキルを向上させるとの結果を示した⁶⁾。Yamada et al. (2009)は1988年の北米大陸における大旱魃を対象事例とし、全球気候モデルにおいて現実的な土壌水分初期情報は水文気象場の準季節スケールの予報精度に寄与する可能性を明示した⁷⁾。

ここ数十年間において世界中の陸面過程モデルは目覚ましい発展を遂げており、近年では陸面過程モデルに灌漑活動や深層地下水の汲み上げ効果といった人間活動の影響を考慮したモデルの提案が行われるようになった^{8),9)}。土壌水分は陸域の灌漑や地下水の汲み上げをはじめとする人間活動の影響によって大きく左右されるものと考えられる。しかし、上記研究を含む土壌水分に着目した水

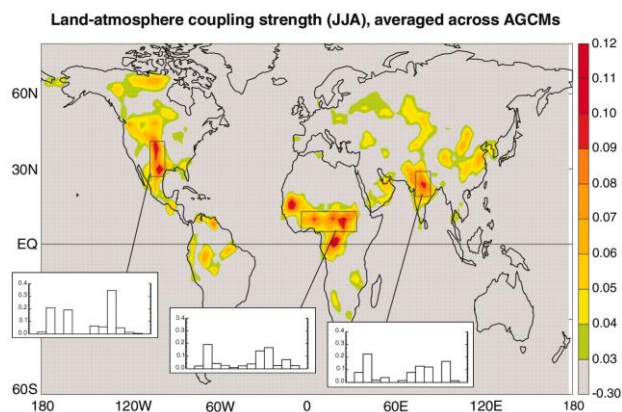


図-1 統計指標(Similarity Index)によって評価された大気陸面結合強度(Koster et al.2004)

文気象諸量の予報研究において人間活動の影響を考慮したものは存在しない。

既存の研究では人間活動の影響を考慮した陸面初期値を用い、全球気候モデルにより準季節スケールの数値予報実験を行ってきた。1988年の北米大陸における大旱魃を対象の極端現象として1か月先の予報精度を検討した。予報実験結果とGSWP2(Global Soil Wetness Project 2)¹⁰⁾との比較から地表付近の気温で見る1988年夏の北米の大旱魃は、現実的な土壌水分初期情報によって予報開始後1か月間程度期待でき、特に地表面気温(地上2m)の結果から夏季において人間活動の影響の考慮することにより、平年値(1986~1995年)に対してより大きな高温偏差を示していた。つまり人間活動の影響を考慮することで潜在的な予測可能性を有しているとも考えられる、という結果を得ることができた。しかしこれは予報実験を行う際に陸面初期値に人間活動の影響が考慮されているのみのため、明瞭な結果が得られたとは言い難い。全球気候モデルに動的な人間活動の効果が入らない限り、より現実的な水循環のサイクルを再現することは困難である。

そこで本研究では人間活動の影響を考慮した全球気候モデルを構築することでより現実的な水循環サイクルの再現を試みる。

2. 使用モデルの概要

(1) 陸面過程モデル (MATSIRO)

本研究において使用する陸面過程モデルは、MATSIRO(Minimal Advanced Treatment of the Surface Interaction and Runoff)である¹¹⁾。この陸面過程モデルに全球再解析値の大気データ及び人工衛星観測による降水データを与えることによって予報実験に使用される土壤水分データが得られる。MATSIRO が表現する水文過程は、気孔の開閉による蒸散の制御、植生群落内の放射過程と大気の渦運動による熱水輸送、植生による降水の遮断とその蒸発、植生上・地面上の積雪と融雪、特に積雪内の熱伝導と融雪水の再凍結、雪の変質による日射反射率の変化、斜面の勾配を考慮した地表流出と地中流出、土壤中の熱・水輸送、土壤水分の相変化(凍土過程)等である。

序章において紹介した人間活動を考慮した陸面過程モデルは Pokhrel et al. (2012)によって開発されたものであり⁸⁾、Hanasaki et al. (2008)¹¹⁾の H08 モデルの灌漑活動、ダム操作、環境用水に加え、深層地下水の汲み上げ効果等が考慮されたものである。これらの人間活動に起因するモデルの構造については上述の Pokhrel et al. (2012)を参考にされたい。

(2) 全球気候モデル (MIROC AGCM)

本研究において予報実験に使用した MIROC AGCM(Model for Interdisciplinary Research on Climate)は AORI(Atmosphere and Ocean Research Institute)、NIES(National Institute for Environmental Studies)、FRCGC(Frontier Research Center for Global Change)によって共同開発された大気大循環モデルであり、大気の運動方程式、熱力学の式、水蒸気の式、状態方程式、連続式を時々刻々計算する数値気候モデルである¹²⁾。

3. 陸面過程モデルによる人間活動有無の影響度の検討

図-2 は Pokhrel et al. (2012)による人間活動の影響を考慮した場合と人間活動の影響が考慮されていない従来の陸面過程モデル MATSIRO による 1986~1995 年(10 年間)の 8 月の地表付近(0~5cm 層)の土壤水分量の差を示す。同図から寒色の地域ほど人間活動の影響によって土壤水分量が増加していることがわかる。中でも北米中央部とインダス川流域といった半乾燥地域において顕著である。この地域分布は前述の Koster et al. (2004)³⁾において判明した降水活動に与える土壤水分偏差の影響が明瞭な地域(Hot spots)と概ね一致している。従ってこの結果は灌漑等の人間活動が地表面状態に影響を与え、最終的には降水を含む大気過程にまで変化が及ぼされることを示唆するものである。

4. 全球気候モデルによる人間活動有無の影響度の検討

まず、大気データは与え続けず、海水温データのみを与え続ける実験を全球気候実験と呼び、陸面過程モデルに大気データを与え続ける実験をオフライン実験と呼ぶことにする。図-3 は全球気候実験結果であり、人間活動の影響を考慮した計算結果(以降 ALTID 結果と示す)と既存の人間活動の影響が考慮されていない計算結果(以降 AL 結果と示す)の差を取ったものである。a)~d)の図は全て 1986~1995 年の 10 年間の 6~8 月(夏季)の三カ月平均

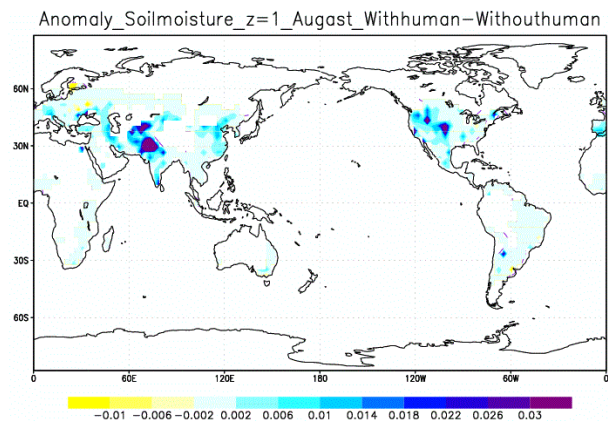


図-2 第一層(深さ 0~5cm)における土壤水分の 8 月平均について、人間活動を考慮した陸面モデル結果と人間活動を考慮しない陸面モデル結果との差(単位: m/m)

を示す。

図-1,2 から北米中央部は灌漑等の人間活動が地表面状態に影響を与え、最終的に降水過程まで影響を与える地域であることがわかる。よってここでは北米地域を対象として結果を検証することとする。a)~d)の結果よりまず蒸発散では 3mm/day 程度、降水量は 2~3mm/day 程度、比湿は 0.002kg/kg 程度灌漑活動を考慮した ALTID 結果が大きい。また 2m 気温の結果では ALTID 結果が AL 結果よりも 5~8℃程度低い。つまり、ALTID 結果は AL 結果に比べ、大きく湿潤状態が維持されていると言える。しかし、2m 気温では 5~8℃程度の差がある等、現段階の灌漑活動を考慮した MIROC-AGCM モデルは水収支に鋭敏に影響をもたらしていることがわかる。つまり本来の状態よりも湿潤状態であるという結果をもたらしている原因は架空の水の供給が存在していることに繋がる。よって次章にて MIROC-AGCM にどこから過大の水供給が行なわれているのかについて検討する。

5. 地下水汲み上げ量

現実場では地下水は無限に存在しているわけではない。ところが全球気候計算では有限である地下水を極度の乾燥状態時に無限であると誤認し、現実場で想定し得る量を超えた地下水量を汲み上げてしまっていることが考えられる。このことにより図-3 では灌漑活動の影響を考慮しない全球気候実験結果に対して灌漑活動の影響を考慮した全球気候実験結果が湿潤状態を示している、と考えられる。しかし、現在は地下水データは観測データが一部の先進地域以外に存在しない。そこで灌漑活動の影響を考慮した全球気候モデルにおいて、ある一定以上の地下水を汲み上げようとした場合に制限を設け、現実的な値に修正し、計算を行うことで、非現実的な地下水汲み上げ量を回避できる可能性がある。

図-4 a)は Pokhrel et al. (2012)による人間活動の影響を考慮した MATSIRO のオフライン実験結果であり、Water Table Depth の 1986~1995 年 10 年間の日変化を示している。図より大旱魃が発生した 1988 年の変化量は大きく、ここで多くの地下水汲み上げが行われていることが考え

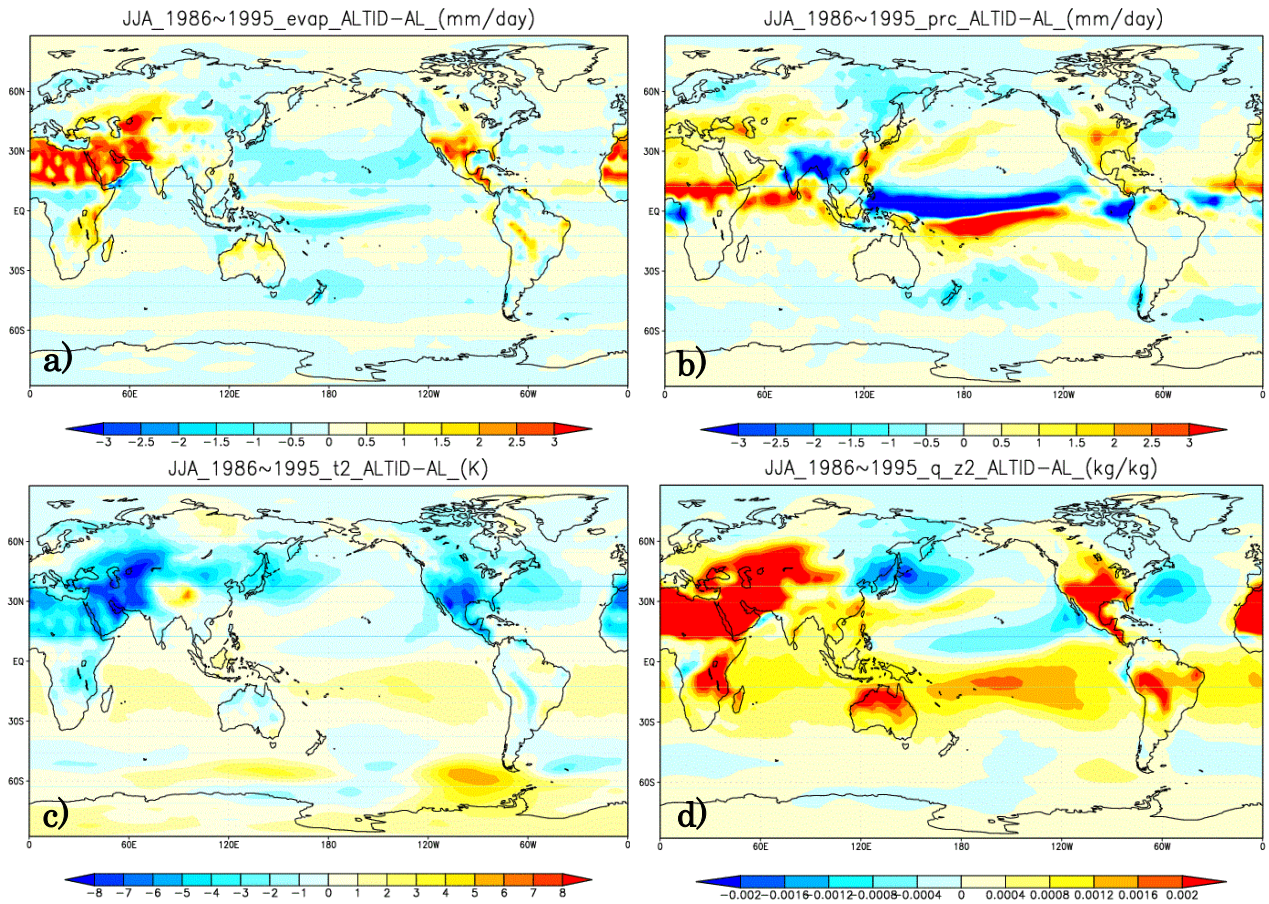


図-3 a)~d)は全球気候モデル(MIROC-AGCM)の実験結果であり、人間活動の影響を考慮した計算結果と既存の人間活動の影響が考慮されていない計算結果の差を取ったものである。結果は全て 1986~1995 年の 10 年間の 6~8 月(夏季)の三カ月平均を示す。a)蒸発散量(mm/day). b)降水量(mm/day). c)地表 2m 気温(Kelvin). d)地表 2m 比湿(kg/kg)

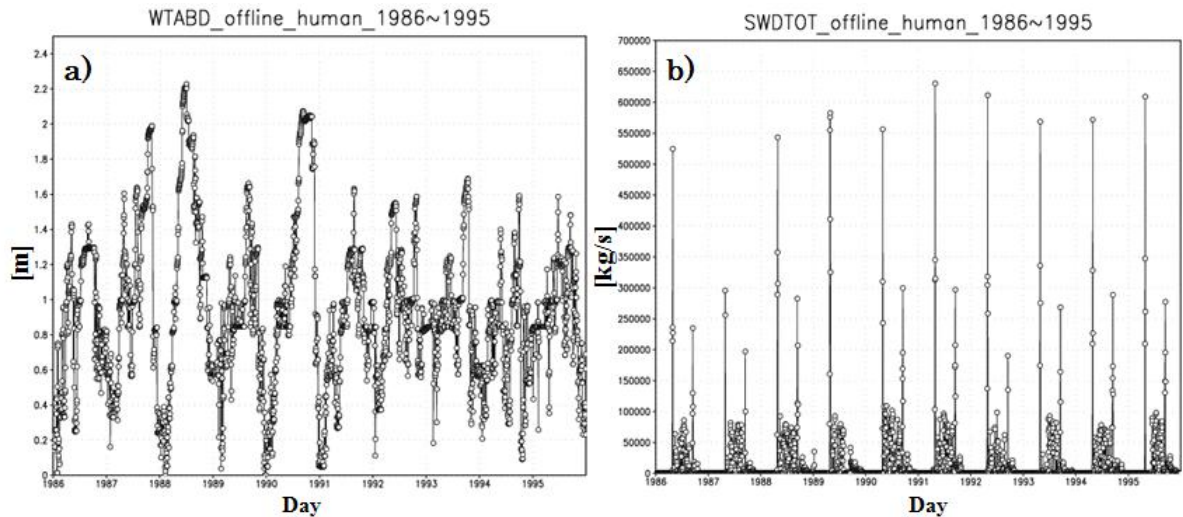


図-4 Pokhrel et al. (2012)による人間活動の影響を考慮した MATSIRO のオフライン実験結果である。図 a)は Water Table Depth の 1986~1995 年 10 年間の日変化(単位: m), 地点は西経 101°, 北緯 39°。図 b)は地表面水の不足量(Surface Water Deficit Total)の 1986~1995 年 10 年間の日変化(単位: kg/s), 地点は西経 101°, 北緯 39°。

られる。同じく 1990 年にも 1988 年よりも小規模ではあるが旱魃発生しており、1990 年においても多くの地下水汲み上げが行われていることが分かる。

次に SWDTOT というデータに注目する。SWDTOT と

は地表面水の不足量(Surface Water Deficit Total)であり、農業用、工業用、家庭用を全て合わせたものであり、この地表面水不足量が Pokhrel et al. (2012)による人間活動の影響を考慮した MATSIRO のオフライン実験結果の地表

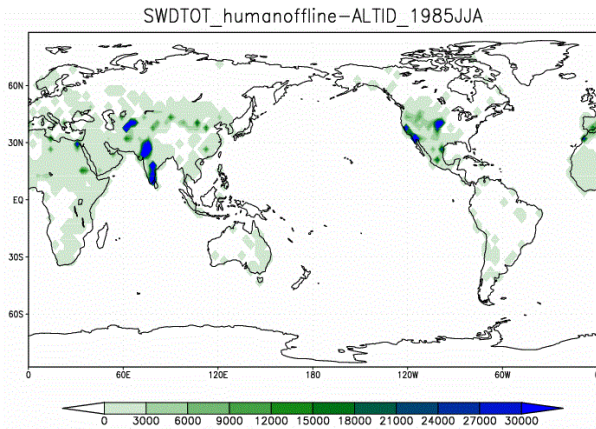


図-5 Pokhrel et al. (2012)による人間活動の影響を考慮した MATSIRO のオフライン実験結果と全球気候実験結果の差. 1985 年の 6~8 月の 3 か月平均の地表面水の不足量(Surface Water Deficit Total)を示す. (単位:kg/s)

面水不足量の最大量に対し、全球気候実験結果の地表面水不足量が上回った際は MATSIRO の同時間オフライン計算結果の地表面水不足量を適用することで地下水汲み上げ量の制限を行い、全球気候実験過程においてより現実場に近い地下水汲み上げ量に調整することが可能である。

図-4b は地表面水不足量における 1986~1995 年 10 年間の日変化を示す。単位は kg/s であり、地点は西経 101°、北緯 39° を示す。これは図-2 で示した人間活動の影響によって土壌水分量が増加している地域から地表面水量の変化が激しいであろう地点を選んだものである。夏季に灌漑活動がもっとも盛んになるため、5 月になると地表面水が不足し始め、6~8 月ではどの年も地表面水分不足量が増加する。

図-5 は SWDTOT の Pokhrel et al. (2012)による人間活動の影響を考慮した MATSIRO のオフライン実験結果と全球気候実験結果の差であり、1985 年の 6~8 月の 3 か月平均の地表面水の不足量を示している。北米中央部とインダス川流域といった灌漑活動が活発な地域において顕著に地表面水量が不足している。この地域分布は前述の Koster et al. (2004)³⁾において判明した降水活動に与える土壌水分偏差の影響が明瞭な地域(Hot spots)、また図-2 で示した人間活動の影響によって土壌水分量が増加している地域と概ね一致している。

6. まとめ

図-4b の結果から夏季に地表面水分量が不足していることが分かる。この不足分を河川等から補おうとするが、河川には生態系を維持するための環境用水を保つ必要があり、また、河川水量が無くなることも通常有り得ないため、供給量の限界値は存在する。つまり河川等から水を得ることができなくなった時に行き着くのは地下水である。地下水データは観測データが一部の先進地域以外に存在しないため、モデル内で補正・修正することはできない。これにより地表面水不足量が多すぎる場合、有限であるはずの地下水を無限に汲み上げることで補完し

ようとするため、水の供給量は満たされることにより、図-3 で示されていた灌漑活動の影響を考慮した結果が灌漑活動の影響を考慮していない従来のモデル計算結果よりも湿潤な状態を示す結果になったと考えられる。つまり、地下水汲み上げ量の最大値を全球気候モデル内で設定し、数値計算を行うことで、非現実的な地下水汲み上げ量を回避でき、灌漑活動を考慮した準季節予報実験のさらなる予報精度向上が期待できると言えるだろう。今後は地下水汲み上げ量の制限を設けた全球気候モデルを作成し、1988 年の北米大旱魃における準季節予報を行い、予報精度向上の可能性を検討していく。

謝辞：本研究は CREST 持続可能な水利用を実現する革新的な技術システム、地球規模課題対応国際科学技術協力事業・気候変動の適応又は緩和に資する研究、RECCA および JAXA PMM Mission の成果の一部である。

参考文献

- 1)小森大輔, 木口雅司, 中村晋一郎 : 2011 年タイ国チャオプラヤ川大洪水の実態及び課題と対策, 河川 2012-1 月号. pp18-25, 2011.
- 2)NOAA National Climatic Data Center, State of the Climate. : Drought for August 2012, published online September 2012.
- 3)Koster, R.D. and GLACE team. : Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation. Science, Vol. 305, pp. 1138-1140, 2004.
- 4)Bart van den Hurk et al. : Soil moisture effects on seasonal temperature and precipitation forecast scores in Europe. Springer, 8 December 2010.
- 5)Vinnikov, K. Y. and I. B. Yeserkepova. : Soil moisture, empirical data and model results. J. Climate, Vol. 4, pp.66-79, 1991.
- 6)Koster, R.D. et al., : Contribution of land surface initialization to sub-seasonal forecast skill: First results from a multi-model experiment. Geophysical Research letters, Vol.37, L02402, 2010.
- 7)Yamada, T.J. et al., : Hydrological Forecast Skill Associated with Land Surface Initializations. Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol.54, 2010.
- 8)Pokhrel, Y., et al. : Incorporating Anthropogenic Water Regulation Modules into a Land Surface Model, 2012.
- 9)Hanasaki, N. et al. : Description and input meteorological forcing, Hydrology and Earth System Sciences, 12, 1007-1025, 2008.
- 10)Dirmeyer, P. A. et al. : GSWP-2 multimodel analysis and implications for out perception of the land surface. Bull. Amer. Meteor. Soc., Vol. 87, pp. 1381-1397, 2006.
- 11)Takata, K., S. Emori, and T. Watanabe. : Development of the minimal advanced treatments of surface interaction and runoff (matsiro). Global Planetary Change. Vol. 38, pp. 209-222, 2003.
- 12)K-1 model developers. K-1 Coupled GCM (MIROC) Description. K-1 Technical Report No.1, September, 2004.