

## — 2. 解説 —

## 土地被覆改変と気候

北海道大学大学院地球環境科学研究院 佐藤 友徳

## 1. はじめに

陸域は大気にとっての下部境界であり、大気と陸面の間では熱や水のエネルギー交換だけでなく近年注目される炭素などの物質交換が行われています。したがって、地球の気候システムを考えるうえで、大気や海洋と同様に陸域圏は非常に重要な役割を果たしているということは、私が述べるまでもなく、読者の皆さんもよくご存知かと思えます。地球本来の自然植生は、気温や降水量などの気候特性によって地域ごとに大きく異なります。このことから、陸上植生は地球上の各地域における地理的あるいは気候的特徴を説明するのによく用いられます。旅行のガイドブックを見ると、必ず現地の気候や自然環境について触れられているはずです（最近のガイドブックは食に関する内容が非常に多いですが、これもまた気象条件と無関係ではないでしょう）。さらに、植生は地球気候の安定化という面でも極めて重要な役割を果たしていることが知られています。Shukla and Mintz (1982)は大気大循環モデルを用いた数値実験により、湿った陸面からの蒸発散がある場合と、蒸発散が全くない場合の2通りの計算を行い、植生がなく蒸発散のない”仮想的な地球”では、実際の地球に比べて陸上の降水量が少なく気温も高くなるという結果を示しました（図1）。この結果からも、陸上植生の存在が気候システムあるいは水循環において重要なコンポーネントであることが分かります。

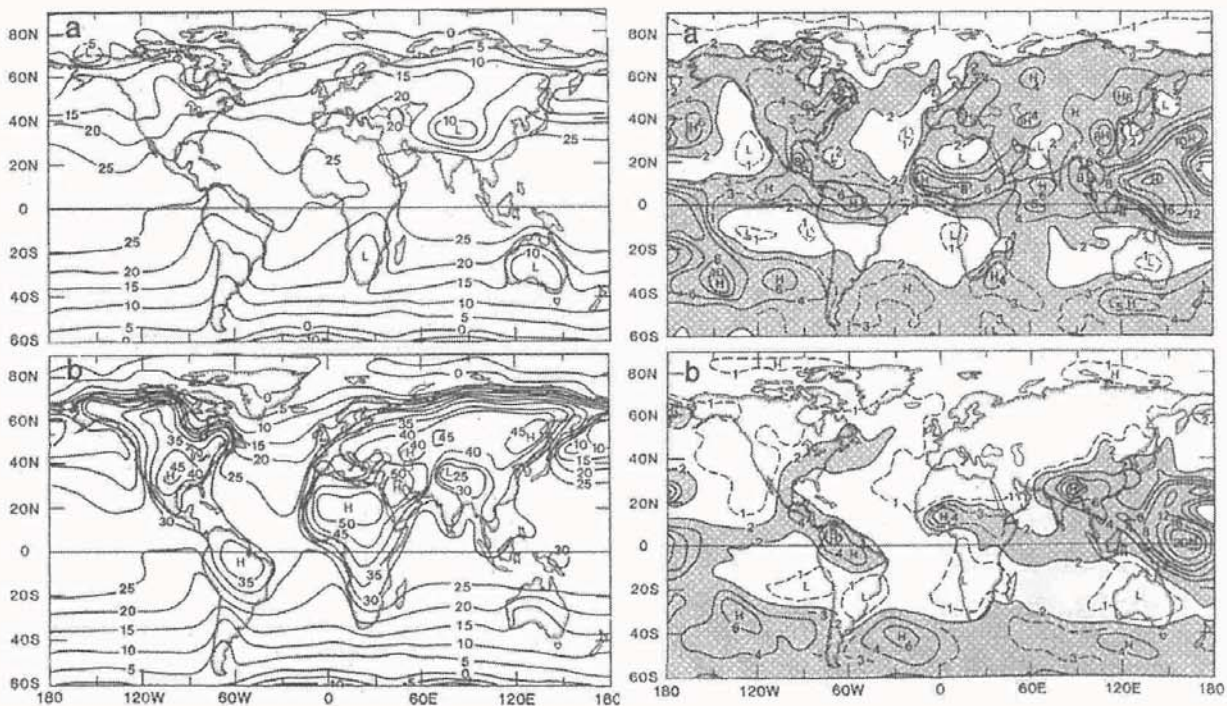


図1 陸上からの蒸発散がある場合(上)とない場合(下)の、7月の気温(左)と降水量(右)。Shukla and Mintz (1982)より。

陸域圏が持つ別の特徴を考えてみましょう。われわれ人類は、海や空ではなく陸上に住んでいます。陸域は人類の生活圏であり、人間がさまざまな活動を営む場所です。したがって、陸域圏は気象と人間をつなぐインターフェースの一つであると言っても過言ではないでしょう。たとえば、土



地の開拓や農耕など人類の存続に欠くことのできない行動を行うだけでも、何らかの陸地の変化が大気-陸面間の相互作用を通じて大なり小なり気候に変化を生じさせる可能性があるといえます。海面水温の分布や時間変化が気候に大きな影響を持つことはよく知られていますが、それと同様にここでは陸域の変化と気候との関係を幾つかの例を挙げながら述べることにします。陸上の土地利用や土地被覆（英語では Land use, Land cover；以降はこれらを特に区別せず土地被覆とします）が変化すると、大気に様々な変化を生じることが知られています。陸上植生は様々な人為的あるいは自然要因によって変化しますが、ここでは特に人間活動と関連した土地被覆の変化について焦点を当てたいと思います。

さて、われわれ人類は現在までの発展の過程において、実に様々な方法で自然本来の地表面状態を変化させてきたといえます。以下にパッと思いつく限りを列挙してみます。

- ・ 森林伐採、農耕、植林（植物被覆のコントロール）
- ・ 灌漑・スプリンクラー（河川水、地下水の散布など水循環のコントロール）
- ・ 放牧（動物のコントロール）
- ・ 都市開発、港湾埋め立て（人工物の建設）

これらの土地被覆の改変は次節以降で述べるように、気候や地域スケールの水循環にさまざまな影響をもたらすと考えられます。いずれも人間の生活の質や価値判断、経済活動と密接に関連している点が興味深いですが、ここではそれらの善し悪しは議論しないことにします。

## 2. 土地被覆変化に関わる大気-陸面相互作用

前節でも述べましたが、土地被覆の変化によって大気は様々な影響をうけています。はじめに、地表面のエネルギー収支の視点から考えてみましょう。

森林伐採により森林が消失する、あるいは都市化により人工物が建築されると、地表面の粗度が大きく変化します。粗度が大きくなるほど環境の風は減速されるため、大気の循環場が変化し収束・発散のパターンや鉛直シアを生じます。また、陸面状態の変化はアルベドの変化をもたらすことが多く、その場合は地表面の放射収支も同時に変化することになります。例えば、森林から裸地へ転換された場所では、宇宙から見ると色が薄くなって見える（アルベドが大きくなる）ため地表面が吸収する正味の短波放射が減少することになります。Charney (1975)はサハラ砂漠のアルベドに着目した考察の結果、草が減少することで地表面が露出すると、アルベドが増加し降水量は減少することで草原の縮小をさらに促進するというフィードバックを提唱しました（このような植生減少におけるアルベド増加の効果はチャーニー効果とも呼ばれます）。さらに、陸面改変による地表面熱収支への影響としてボーエン比の変化があげられます。ボーエン比は潜熱に対する顕熱の比で定義される値で、地表面の性質によって値が異なります。森林伐採の例で考えると、土地被覆変化により蒸発散量（潜熱）が減少し、相対的に顕熱の割合が増加すると考えられます。従って、ボーエン比は大きくなります。このようなボーエン比の変化は森林伐採に限らず、大気-陸面間の水循環に関わる過程、つまり、上で挙げた全ての例で起こりうる変化であるといえるでしょう。

ここで、草原から裸地への転換を例にして、ボーエン比の変化が大気に与える影響について局地的な水循環という視点から考えてみることにします。まず蒸発散（潜熱）が減少する、つまり地表面から大気へ供給される水蒸気量が減少することになります。このことは、（1）蒸発散した水蒸気が雲を形成し、（2）再び降水として大地を潤し、（3）その水がまた蒸発散する、という水の再循環が不活発になると解釈することもできます。水の再循環が不活発、あるいは蒸発散量が減少、となると平均的な降水量は減少するという印象を持たれる方が多いと思います。実際に、多くの気候モデル実験からも、森林伐採や砂漠化による降水量の減少が示されています(Xue, 1996; Shukla et al., 1990 など)。さて、ボーエン比を左右するもうひとつの要素、顕熱はどのような役割をも



っているのでしょうか？ 簡単のために土地被覆変化の前後で正味放射の変化が小さく、顕熱と潜熱の和はあまり変わらないと仮定します。すると、裸地化によって潜熱が減少する分、顕熱は増加することになります。これまでは地表面の熱収支を中心に考えてきましたが、顕熱の増加は気温の上昇だけでなく、混合層高度の上昇など大気鉛直構造にも直接的な変化をもたらします。例えば、Inoue and Kimura (2004)は、都市の上空に特徴的な積雲が高い頻度で現れることを衛星観測データの統計解析により示し、その原因として都市の上空では周囲に比べて混合層高度が高いことを指摘しました。

次に、水平方向の熱収支の不均一性について考えてみることにしましょう。土地被覆変化が無限の広さで起こらない限りは、何らかの形で被覆変化のある場所と変化のない場所の境界が存在することになります。この境界付近では地表面温度や大気境界層の構造が横方向に不均一となり、水平コントラストが生まれるでしょう。すると、海陸風と同じような原理で日中に気温の低い草原から、気温の高い裸地や砂漠へと吹きだす局地循環が大気下層で見られ、これは植生風とも呼ばれています。図2は黄河の流域をとらえた衛星画像です。黄河はチベット高原を源流とし、中国北部の乾燥地域を下り渤海に流出する大河川です。図は中国とモンゴルの国境付近を拡大したもので、黄河流域の中で最も降水量の少ない地域です。河道に沿って、色が濃く見えていることから分かるように、黄河の周辺では植物が多く、それ以外では植物が極端に少ない砂漠に対応します。このような植生分布は衛星による正規化植生指数 (NDVI) でも明瞭にとらえることができます(図略)。さらに、河套灌区と呼ばれる場所(図中の丸印)では、黄河の水を利用した灌漑が整備されており、小麦やトウモロコシを収穫しているとのこと。 (極端かもしれませんが、この灌漑システムは砂漠の真ん中で常に打ち水をやっていると捉えてもいいのかもしれませんが。) さて、このような植生コントラストの結果として、地表面温度(図2右)は黄河や灌区で低く、砂漠で高いという明瞭な水平コントラストを生じています。上で述べたように、ここでは河套灌区から砂漠へ向かう植生風循環が下層で生じていると推測されます。その証拠が雲の発生場所です。灌区と砂漠の境界付近では植生風の収束により大気下層で上昇流が生じます。逆に灌区では下層風が発散するため上空では補償下降流になっていると考えられます。実際に灌区の上空には雲が存在していませんので、植生風循環による収束・発散とも整合します。図3は植生風循環と雲の発生を模式的に表した図です。

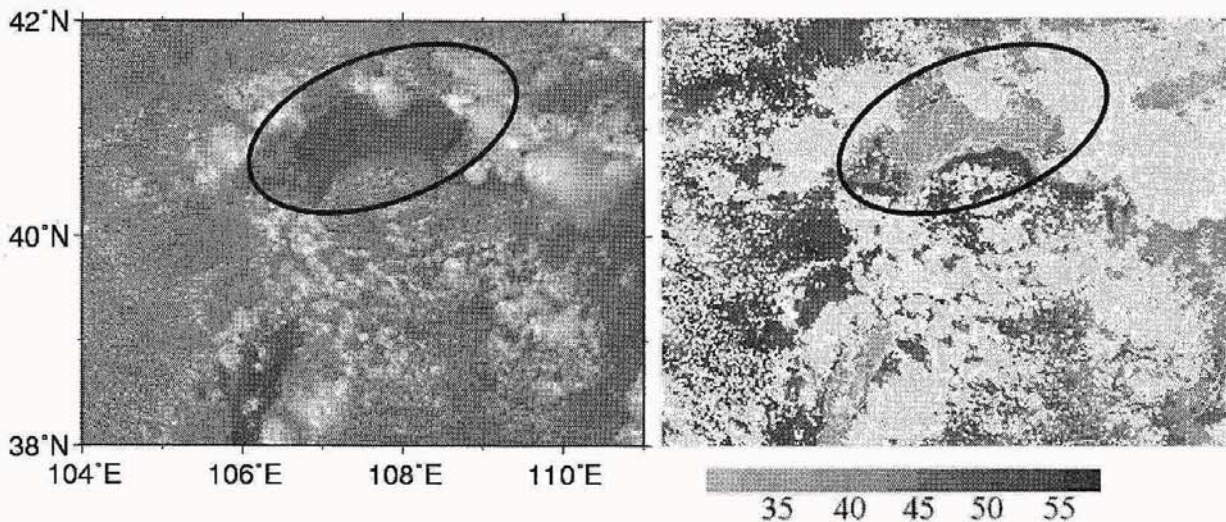


図2 衛星 Aqua による黄河流域の可視画像(左)と地表面温度(右)の分布(2005年8月4日現地時刻14時10分)。左図で色の濃い場所が黄河の河道周辺、それ以外の場所は砂漠に相当する。白く見える部分は雲である。右図において、雲に覆われて地表面温度が観測できない場所は白く塗りつぶしてある。Sato et al. (2007)を修正。



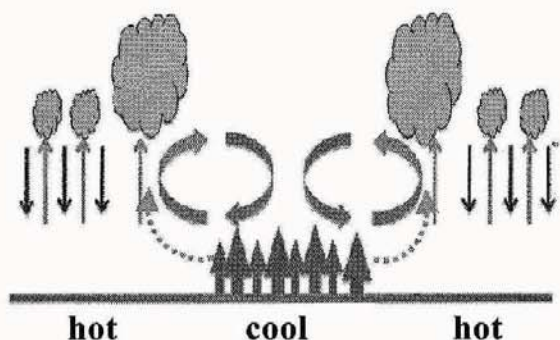


図3 植生風循環の模式図。  
図は縦方向に引き伸ばして強調してある。

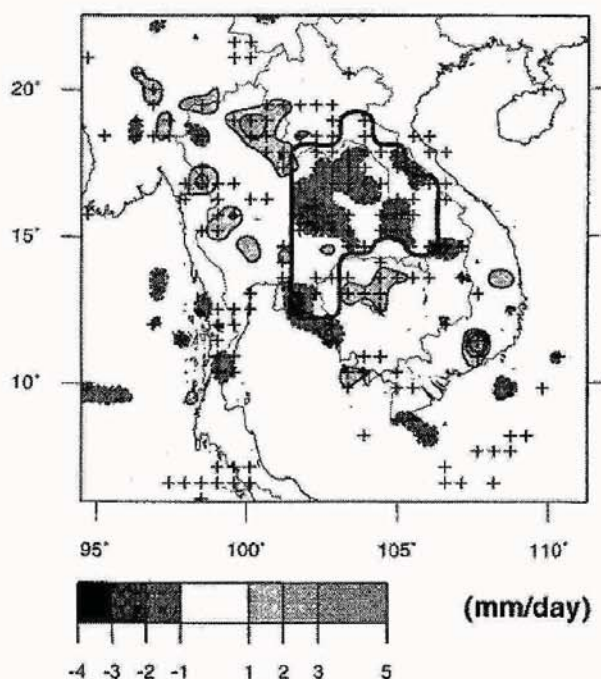


図4 インドシナ半島における森林伐採による  
9月降水量の変化。Kanae et al. (2001)  
より。

数値モデルを用いた土地被覆改変のインパクトスタディも盛んに行われています。Kanae et al. (2001)は1951年から1994年のタイの雨量計データを解析し、9月のみに明瞭な降水の減少傾向が現れることを示しました。その原因がタイ北部で行われた森林伐採であるとして、領域気候モデルを用いた数値実験による検証を行っています。この研究以前は、季節平均や長期平均の変化を対象とする数値実験が多かったのですが、タイの例では、9月にのみ顕著なトレンドが見えるという点が非常に興味深いところです。彼らの結果によると、一般的に9月のタイは夏のモンスーンと冬のモンスーンの入れ替わりの時期に対応します。そのため、環境場の風速が小さく局地的な土地被覆変化の影響が現れやすい特徴があり、それが9月にのみ明瞭な降水の減少トレンドが観測された理由であると述べています。余談ですが、南シナ海を西進してタイに接近する台風の数が増加したことを、降水量減少の理由として主張する研究が近年発表されました (Takahashi et al., 2009)。彼らは、土地被覆変化のデータを与えないモデル実験においても、降水量の減少トレンドが再現されたと主張しています。確かに降水量の長期トレンドは様々な要因が関連した結果として実際に観測されたものです。地域ごとの事例にもよりますが、土地被覆変化は気候に変化をもたらす様々な要因のうちの一つであるの其自然です。そのような様々なプロセスの中で、土地被覆変化はどの程度のインパクトを

もっているのかという総合的な視点が必要であると考えられます。また、地道な観測データの取得・解析や数値モデルを用いた実験とともに、対象地域周辺を含む大規模な循環場の特徴とその変化も同時に検討する必要があることはいまでもありません。

森林伐採や都市開発では、陸面の幾何学的な構造が大きく変化することになり、大気の運動を加速・減速する効果も持ちます。これに関連して、もう一つ興味深い例を挙げましょう。澤田、高橋(2007)は東京周辺で発生する強い降水に着目し、東京湾周辺のビル群による粗度の効果を考察しています。この結果によると、ビル群に対して環境風の風下側で強い降水が観測される傾向にあることが雨量データを元に示されており、都心部の粗度の分布と矛盾しない結果です。ただし、東京の都市と強雨の因果関係についてはビル群による粗度のほか、海陸による粗度の違いや都市が持つ熱的な効果など様々な要因も絡んでいる可能性があるため、引き続き解析の必要があると考えられます。



### 3. 全球気候へのフィードバック

前節まででは、土地被覆変化に伴う熱収支の変化や力学的な影響を概説しました。ここでは、土地被覆の変化と関連する別の効果について簡単に触れておくことにします。

ひとつめは物質循環を介した気候への影響です。野焼きや森林火災など、植生の消失と関連して大気中に大量のエアロゾルが放出されています。このエアロゾルは太陽放射を遮る効果を持つため、遠隔地の気候にも影響するといわれています。実際にシベリアの森林火災と日本の気温についての報告もあります(気象庁, 2009)。また、過放牧や農耕地の放棄により裸地化した地域からは、強風時に鉱物ダストが放出されます。地球規模の気候に影響を与えるような鉱物ダストは、大規模な砂漠が主な発生源であるため、ここで取り上げているような人為的な影響は小さいかもしれません。ただし、放棄農地の近傍などでは、局地的には視程の悪化を生じ、様々な障害をもたらします。また長期的にみれば、植生分布の急激な変化は、地域規模の陸域物質循環の仕組みも大きく変えることになるでしょう。

最後に炭素循環について少しだけ触れます。地球温暖化で注目されているように、森林は光合成により大気中の二酸化炭素を吸収し、自らが成長することで大気中の炭素を陸域に固定します。森林伐採や森林火災によって森林の面積が減少すれば、炭素の固定量も減少するといわれているため、植林や森林保護の必要性が指摘されています。また、森林が消滅した跡地では、土壌からの温室効果ガス放出が活発になるなど、結果としてももとは二酸化炭素の吸収源であった場所が、土地被覆変化によって吸収が無くなるばかりか、一気に温室効果ガスの放出源となる可能性があります。このように、ある地域で起こる大規模な土地被覆の変化が地球規模の気候に影響を与える可能性も重要となります。

### 4. むすび

これまでの話で人為的な土地利用・土地被覆の改変が地域や地球規模の気候を考えるうえで重要なプロセスであることを感じていただけたでしょうか。現在活発に研究が行われている地球温暖化予測においても、ここで述べたような理由により土地被覆変化による気候への影響を重要視するべきという議論があります(Pielke, 2005; Feddema et al., 2005)。また、温暖化予測は主に産業革命以後を対象としています。それ以前にも農地開拓によって人類が地球規模の気候を変えてきたという研究も発表されています(Takata et al., 2009)。しかし、将来人類がどのように土地被覆を改変するかは、将来の経済活動や世界のあり方にも強く依存します。また、改変の水平スケールもさまざまであるため、地球温暖化予測において将来の土地被覆変化を含めることは決して容易ではありません。ここで述べたような、改変あり・なしの数値実験など、幾つかの基礎的な感度実験を行うことで、温暖化した条件下でどのような変化が起こりうるかを検討することは、土地被覆変化も含めた将来予測を行ううえでも重要な材料となるでしょう。それと平行して、土地被覆に関係する生物・化学プロセスを気候モデルに取り入れることも重要なアプローチです。

数値モデルを用いた植生-大気相互作用の研究は、本報の引用文献にもあるように、比較的古くから行われている研究テーマです。しかしながら、近年においても様々な地域を対象に多くの研究が行われているため、古くて新しい研究テーマともいえるでしょう。その背景には、(1)経済活動と関連して新たな土地被覆改変が現在も行われていること、(2)土地被覆変化による気候への影響が検出できるだけの観測データが蓄積されてきていること、(3)数値モデルの陸面過程が高度化していること、などが考えられ、今後もこれらの動機を軸として、人為起源の土地被覆改変と気候影響の研究が進められると期待されます。

参考文献

- Charney, J., P. H. Stone, and W. J. Quirk, 1975: Drought in the Sahara: A biogeophysical feedback mechanism. *Science*, 187, 434-435.
- Feddema, J. J., K. W. Oleson, G. B. Bonan, L. O. Mearns, L. E. Buja, G. A. Meehl, and W. M. Washington, 2005: The importance of land-cover change in simulating future climates. *Science*, 310, 1674 -1678, DOI: 10.1126/science.1118160.
- Inoue, T. and F. Kimura, 2004: Urban effects on low-level clouds around the Tokyo metropolitan area on clear summer days, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L05103, doi:10.1029/2003GL018908.
- Kanae, S., T. Oki, and K. Musiake, 2001: Impact of deforestation on regional precipitation over the Indochina Peninsula. *J. Hydrometeor.*, 2, 51-70.
- Pielke, R. A., 2005: Land use and climate change. *Science*, 310, 1625-1626.
- Sato, T., F. Kimura, and A. S. Hasegawa, 2007: Vegetation and topographic control of cloud activity over arid/semiarid Asia. *J. Geophys. Res. Atmospheres*, 112, D24109, doi:10.1029/2006JD008129.
- Shukla, J., and Y. Mintz, 1982: Influence of land-surface evapotranspiration on the earth's climate. *Science*, 215, 1498-1501.
- Shukla, J., C. Nobre, and P. Sellers, 1990: Amazon deforestation and climate change. *Science*, 247, 1322-1325.
- Takahashi, H. G., T. Yoshikane, M. Hara, and T. Yasunari, 2009: High-resolution regional climate simulations of the long-term decrease in September rainfall over Indochina. *Atmos. Sci. Lett.*, 10, 14-18. DOI: 10.1002/asl.203.
- Takata, K., K. Saito and T. Yasunari, 2009: Changes in the Asian monsoon climate during 1700-1850 induced by pre-industrial cultivation. *Proc. Nat. Acad. Sci*, doi:10.1073/pnas.0807346106
- Xue, Y., 1996: The impact of desertification in the Mongolian and the Inner Mongolian grassland on the regional climate, *J. Climate*, 9, 2173-2189.
- 気象庁, 2009: 大気・海洋環境観測報告第9号.
- 澤田康徳, 高橋日出男, 2007: 夏季の都心部における降水強度と気温場および地上風系場. *地理学評論*, 80, 70-86.