

〔講演記録〕

地球気候システムにおける生物圏の役割
—ユーラシア大陸における気候・生態系相互作用を中心に—

名古屋大学地球水循環研究センター 教授 安成 哲三

1. はじめに

私は、気象学・気候学をベースに、地球環境の関係の研究を進めてまいりました。サブタイトルにもありますように、「ユーラシア大陸における気候・生態系相互作用を中心に」、特にアジアの気候であるアジアモンスーンの研究を長年やってまいりました。モンスーンというものは、陸、特に大陸と周りの海洋の間の、相互作用でできる大きな大気の循環、およびそれに伴う水の循環システムです。

大陸には、チベット高原や、大きなヒマラヤなどがあり、山岳にはさまざまな表面の状態があります。それからアジアには、どの地域に行きましても、いろいろな植生が生えています。森林は熱帯雨林から寒帯林、内陸に行きますとモンゴルの草原、さらに西には砂漠があります。このような陸上の生物圏は、気候に一方的に影響を受けて、いろいろな植生があるというだけではなく、いわば森林や草原など、植生そのものが、逆に大気あるいは気候に影響を与えているという側面が見えてきました。そこで、その側面もいろいろ研究しようではないかということで、最近十年から十数年、特に気候と植生、生態系の相互が密接に関係しているということを研究してまいりました。

2. 相互作用を通じた気候システム

まず初めに、大気圏・水圏・生命圏の相互作用についてお話したいと思います。図1は、大気圏・水圏・生命圏の相互作用を通じた気候システムの維持を示した図です。下から森林がある地表面があり、次に、非常に活発に水の循環や大気の循環がある対流圏があります。その上に、オゾン層のある非常に安定な成層圏があります。

このオゾン層は、太陽エネルギーの中でも生物にとって有害である非常に強い紫外線をフィルターカットしてくれます。オゾンは、酸素が紫外線を吸収してできた酸素原子が三つ引っ付いたものです。その素となる酸素は、対流圏、地表面において光合成で放出されたものです。そう考えますと、結局、生物圏そのものが自分たちを守るような形で、いわば一つのプロセスを作っているという見方ができます。

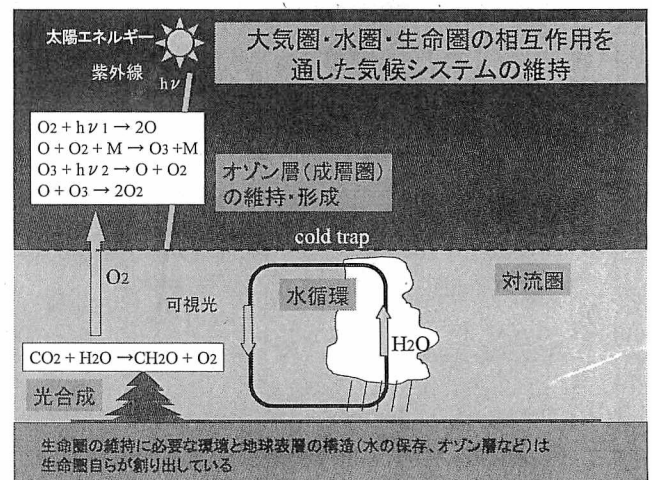


図1 大気圏・水圏・生命圏の相互作用を通じた気候システムの維持

もう一つ、われわれ生命にとって大事なものは、水です。水があることで光合成もでき、またわれわれ生物も生きることができます。その水は、地球の表層システムでは、ほとんど逃げていきません。

ところが、他の惑星、金星などはかつて水があったといわれていますが、それがほとんど今はありません。それはなぜかといいますと、水の H_2O 分子が、強い紫外線で分解されてしまい、軽い水素がどんどん宇宙へ逃げていってしまったと考えられているからです。しかし、地球は幸いにして、水の循環が繰り返されて

いて、蒸発し、凝結して雲になったものも、必ずまた雨で戻ってきます。これをまた生物が使います。このように、水循環によって、水が地球の表層大気からなくならならず維持されているということが非常に重要なのです。

さて、図2は、よく地図帳にあります地球上の気圧と風系の分布を示した地図で、中心辺りにアジア・ユーラシア大陸があります。上が冬で下が夏ですが、このユーラシア大陸の気圧は、夏と冬とで大きく反転しています。これが、アジアのモンスーンを示す気圧の変化です。夏は、インド洋から非常に湿った風が、インド洋、東南アジア、そして日本まで来ています。冬は、シベリアから非常に冷たい空気が東・東南アジアに吹き出します。これを大きくコントロールしているのは、大きな大陸の季節的な変化です。

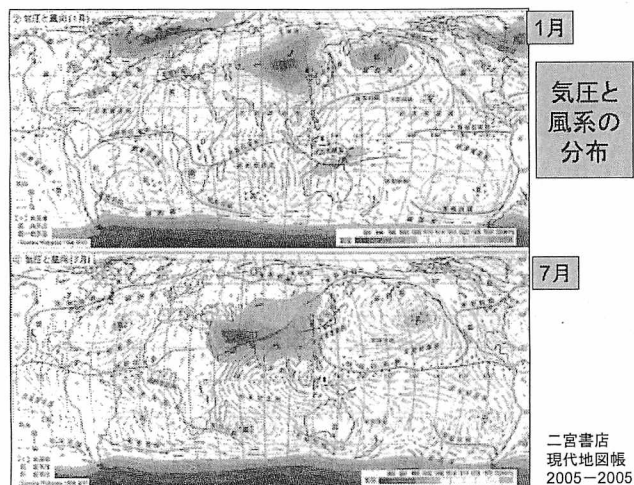


図2 気圧と風系の分布（1月・7月）

モンスーンという現象は、特にアジアで非常に顕著で、この地域にたくさんの雨をもたらします。それはもちろん植生にとっても好都合です。しかし、同時に、このアジアのモンスーンそのものが、ある意味で植生の影響を受けているという側面もあります。

図3は、ユーラシア大陸の植生分布を示した図です。これで見ても分かりますように、東南アジアからシベリアに至る所は植生がずっとつながっています。

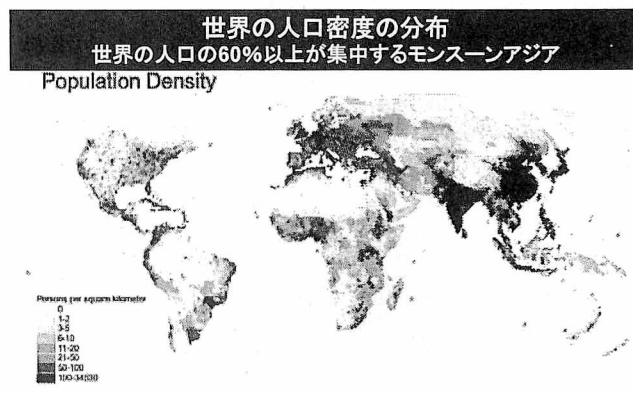
このアジア大陸の赤道からシベリアへ至る、連続して森林が分布した地域のことを Asian Green Belt、アジアの緑のベルトという言い方をしますが、実は地球上どこを見ても、熱帯・赤道から極の付近までずっ

と植生がつながっているのは、ここしかありません。



図3 モンスーン気候とアジアのグリーンベルト

図4は、人口の分布図です。アジアのグリーンベルト上のインドから中国、東南アジアにかけて、非常に人口が密集しています。意外と多くの人気がつかないのですが、世界人口の60%強が、実はこの地域に集中しており、地球環境問題の大部分は、ある意味でアジアの環境問題と考えてもいいのです。また、なぜこれだけたくさんの人口が養えているかといいますと、アジアグリーンベルトの存在、それに伴う生態系、水や空気などをうまく活用し、いわゆる水田農業を中心とする農業が成り立っているからです。



<http://www2.ttcn.ne.jp/honkawa/9050.html>

図4 人口の分布図

グリーンベルトでも現在のインド付近には、森林がありませんが、18世紀までは、全部森林でした。しかし、ヨーロッパの植民地支配が始まり、プランテーションや産業の広がりとともに、森林が全部破壊されてしまったのです。この森林破壊が気候に与えた影響に

については、後でのべます。

この森林は、地球上全体の陸地の30%、全球の面積からいっても10%程度です。全球の光合成活動の約90%が森林で行われています。そして炭素の現存量の50%はこのような森林に蓄積されています。

森林が活発な生産活動をやっているということは、葉っぱの気孔からCO₂を吸収すると同時に、水蒸気を外に出して、そこで葉っぱの温度をコントロールしています。いわゆる蒸散や蒸発散が活発に行われます。これが、大気への水蒸気の補給という視点で重要な役割をしています。

図5は、タイガ(北方林)という言い方をします広大なシベリアの寒帯地域の地図です。今日、最初にお話ししますこのシベリアの北方林(タイガ)は、非常に広大な森林で、図2に示すような大陸スケールの気候に影響を受けているという面もありますが、同時に、水・物質循環を通して気候をコントロールしながら形成されていることが分かってきました。

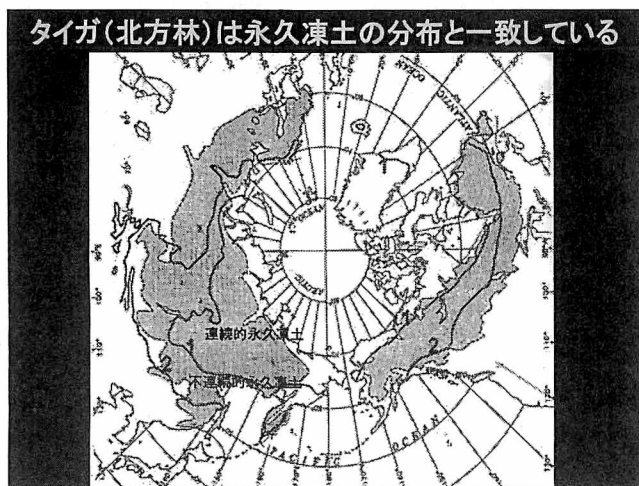


図5 タイガと永久凍土の分布

永久凍土が北半球のシベリアの北極周辺と、北米大陸の北極周辺に厚く存在しています。非常に厚いところは、数百mぐらいの凍土があります。

実はこのタイガは、永久凍土の上に生えているのです。この地域では数十センチから1mも掘らないうちに、下に凍土があります。北方林は、基本的には、カラマツ林です。冬には落葉し、夏だけ葉っぱがつかます。このカラマツ林ですが、根っこは永久凍土があるために非常に浅くて、せいぜい数十センチですが、背

丈は高いもの40mから50mくらいあります。

では、このシベリアのタイガであるカラマツ林は、どのようにして維持されているのか。これはなかなか難しかったです。永久凍土は氷を含んでいて、夏だけ表層が、数十センチだけ溶けます。溶けたときに、表層にたまった水を土壌として使っています。冬になり、再び凍ると、もちろんこの活動も止まってしまいます。要するに、凍土がないと、このような広大な森林はできず、全く違う植生になってしまう可能性もあります。

また、別のこともわかってきました。特に夏に、凍土の表面が溶けると同時に、葉っぱが開き、光合成を始めます。もちろん光合成には水が必要なので、根っこから水をどんどん吸い上げます。その間に、光合成と同時に、蒸発散で葉っぱから水蒸気を出します。夏のほんの短い数十日、最大でも2ヶ月から3ヶ月の間だけ、光合成をして蒸発散するのです。

この地域の夏の降水量は、200mmから250mm程度です。これは乾燥地域に近い状態です。しかし、その水をフルに利用しています。非常に短期間に効率よく、熱と水のやり取りを繰り返しながらタイガは生きています。

凍土は、数万年前の氷河期にできたといわれています。夏でもたかだか数十センチしか溶けず、現在でも存在しています。これがどんどん溶けてしまったら、表面が乾いてきます。乾いてくると、このような森林もできなくなります。つまり、森林の布団があるおかげで、凍土は何万年も溶けずにこれまで残ってきたのです。そのような意味で、タイガと凍土というものは、いわばお互いに持ちつ持たれつ、いわば「共生」の関係を保っているのです。

このシベリアは現在急速な温暖化が進行していますが、このまま温暖化が加速されたら、このタイガ・凍土の結合系はどうなるのでしょうか。図6は、気温条件を変更した場合のタイガの植生を予測したものです(Zhang et al., 2011)。「現在」条件から、夏の気温を1℃、2℃、4℃と上げていくと、「現在」、1℃ではカラマツが最も多く植生分布しているのですが、2℃以上になると、ほとんどなくなってしまいます。

気温が上がることによって、凍土の融解度が深くなり、水の表層に与えられる条件の効率が悪くなってしまいうという、簡単なメカニズムです。例えば4℃ぐらいになると、カラマツはほとんどなくなり、アカマツが増えますが、トータルの生産量も減ってしまいます。

つまり、温暖化が凍土にも影響を与え、森林そのものも変えることになってしまいます。

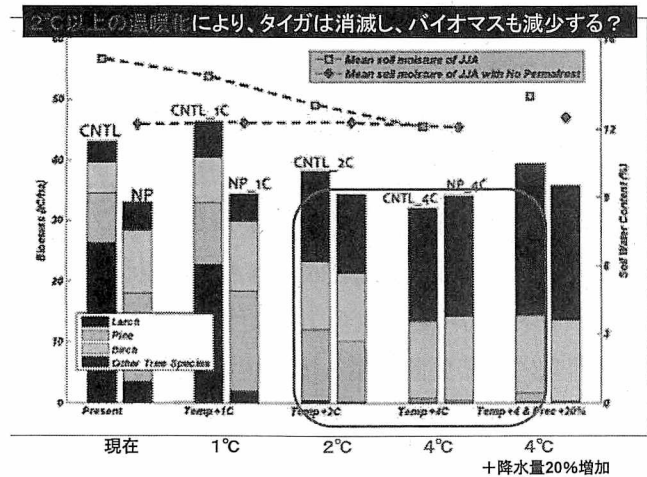


図6 温暖化による影響の予測可能性 (Zhang et al. 2011)

ここまですをいったん整理しますと、図7のようになります。つまり、大陸スケールの植生は、水・物質循環を通して気候と相互作用しつつ、存在しているのです。

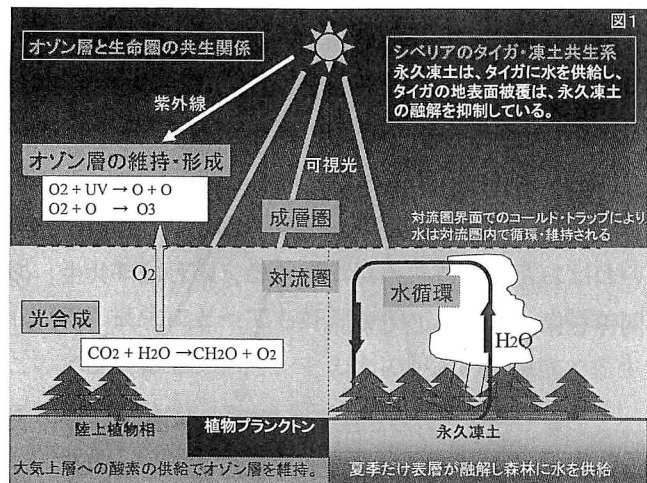
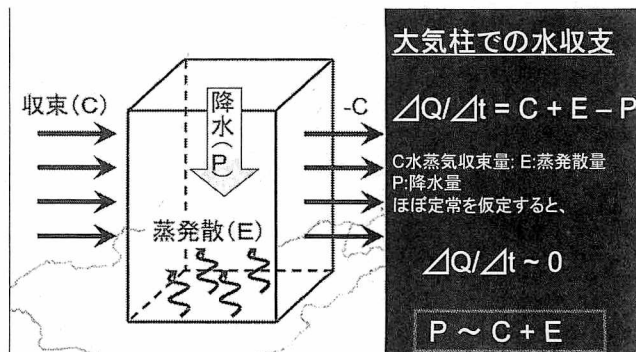


図7 大気圏・水圏・生命圏の相互作用を通じた気候システムの維持

3. 水循環と気候をコントロールする広域の植生次に、もう少し広域にみていきましょう。

図8中の大気のボックスを見てください。地表面が

一番下になりますが、植生があるとこの地表面から、蒸発散が起こり、そこに雨が降ります。図中のPは、雨、降水量(Precipitation)、Eは蒸発散(Evaporation、Evapotranspiration)です。同時に、広い広がりを持った中にボックスを置きますから、この箱の中にまわりから風に運ばれて水蒸気が入ってくるというプロセスにより、そのボックスに水蒸気を供給します。通り抜けていくものもありますが、入ってきた分が出ていく分よりも大きければ、ここに水蒸気が少し残ります。それを水蒸気収束量Cという言い方をしています。要するにCは、周りから実質的に入ってきた水蒸気量です。Eが一番下からの水の供給です。Pは降水で、このボックスから地表面を通して抜けていく水です。ある定常状態、例えばひと月平均や季節平均などを考えると、P~C+Eという関係になります。この状況が、大気中に存在しています。



ある場所(地域)での季節的な降水量(P)は、まわりからの水蒸気輸送の効果(C)と同じ場所(地域)からの蒸発散量(E)の合計で決まっている。蒸発散量(E)の割合が大きいほど、その場所(地域)での水の再循環が活発であることを示す。

図8 大気柱での水収支

これを地域別に見ていきましょう。

タイガの卓越している東シベリアでは、夏の降水量は、1日平均1.7mm、ひと月に直すとおよそ50mmで、非常に少ないです。そこにあれだけの森林が存在しているのです。このシベリアのタイガは、非常に少ない降水量で成り立っていますが、その降水量のほとんどが、タイガの木そのものが蒸発散で出している水蒸気です。つまり、降ってくるものと蒸発散するもののバランスがとれています。

図9の写真は、モンゴルの草原の生態系です。グラフ上の黒丸は、夏の降水量を示していますが、1日平均1mmから1.5mmと非常に少なく、ひと月にするとや

はり 50 mm ぐらいです。つまり、タイガと、このモンゴルの草原の降水量はほとんど同じです。一方で、グラフ上の降水量とほとんど重なる線は、蒸発散量です。この草原からの蒸発散自体が雨のもとになっているということがわかります。要するに、草原自らが水を再循環させているのです。

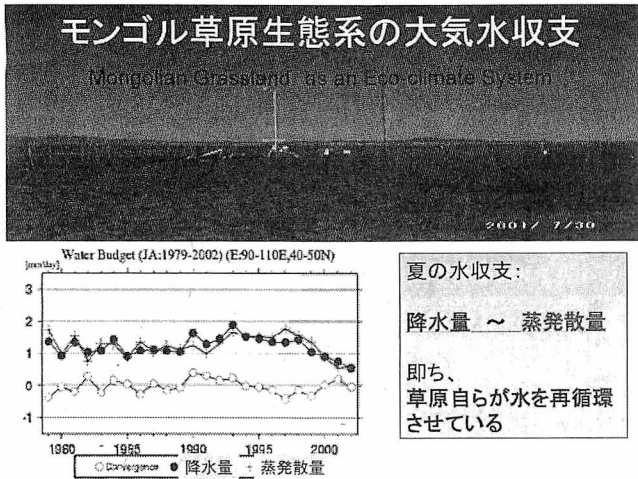


図9 モンゴル草原生態系の大気水収支

では、アジア・海洋大陸の熱帯はどうでしょう。

図10の地図で示しているのは、世界で最も雨の多い、東南アジアの海洋大陸です。雨が多いのは30℃を超える非常に暖かい海水のためで、この付近は、台風の発生の巣にもなっています。

98年に日本とNASAが合同で打ち上げた降雨観測衛星TRMMで、この地域の降水量を測定した結果、海洋よりも陸のほうが多いことがわかりました。基本的に陸地が多いのですが、スマトラの場合は沿岸部が多いのが特徴です。

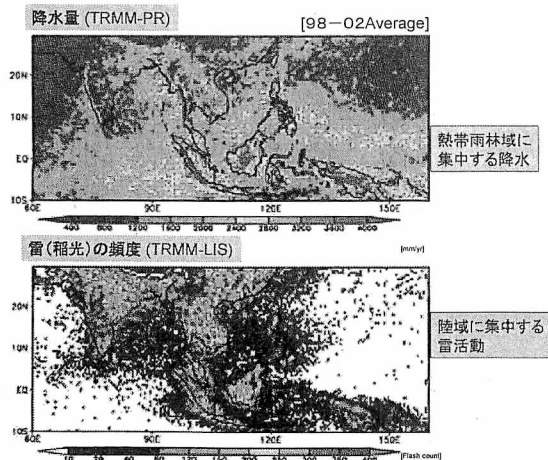


図10 TRMMの観測結果

また、下の地図は、同じ衛星が計測した雷活動を示したものです。稲光を人工衛星からカウントし、雷がどこに集中しているのかを調べています。面白いことに、稲光を起こすような雷の活動も、海洋よりも島や陸に集中しています。

熱帯雨林の繁茂しているボルネオはあまり季節変化がないというのが特徴です。降水量は、1日平均10mm程度で、シベリアやモンゴルの10倍くらいあります。年間に直すと大体3,000mmから4,000mmになります。

降水量のうちの80%はその表面からの蒸発散、すなわち熱帯雨林からの蒸発散であるということがわかりました。海洋の蒸発の割合は、陸よりも小さくて、ボルネオの周辺の海洋だけ取り出して計算すると、60%から65%くらいです。非常に暖かい海にもかかわらず、この程度だということがわかりました。

以上のことから、もし森林がなければ、気候そのものも、水循環を通して全く変わってしまう可能性があるということを知ることができるといえます。

図11は、アジアモンスーン地域の水循環と植生・土地利用の関係を表した模式図です。水循環を通して活発な降水活動が強化され、豊かな森林ができ、水田農業が盛んになります。水田農業は、ある意味で非常に持続可能な、アジアモンスーン域の気候、生態系の特性を活かした農業です。

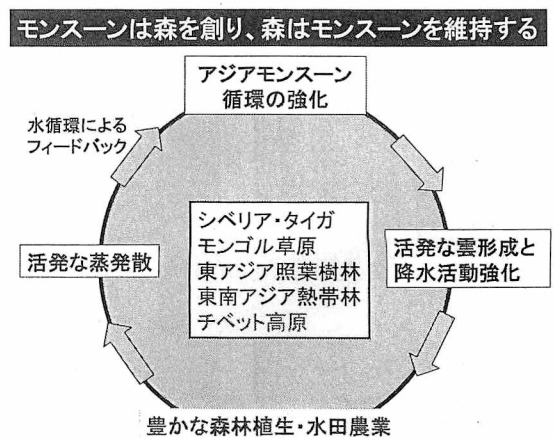


図11 アジアモンスーンに関わる水の循環

水田に水を張ることで、それだけたくさん水蒸気が供給されます。もちろんその水は、いろいろなところか

ら、少ないところでは灌漑（かんがい）などで引いてきますが、うまく、このような水循環の特性を利用して、アジアモンスーン地域でその農業法を維持しています。そして、活発な蒸発散が起こり、アジアモンスーンをさらに強化し、維持しているというプロセスが成り立っているのです。

したがって、森林がどんどん切られていく、あるいは水田農業がなくなり、都市化されてしまうというようになると、図 11 のループがおかしくなる可能性がでてきます。つまり、「モンスーンは森を創り、森はモンスーンを維持する」という、相互作用の関係をつくっているのです。

4. 人間活動のモンスーンアジアへの影響

18 世紀以降、インドで大規模な森林伐採が起こっているという話をしましたが、それがどのように、モンスーンの気候に影響しているのか、ということ、私たちは気候モデルを使ってシミュレーションしました。

図 12 は、アジアの植生改変を示した図です。左の地図は、18 世紀の初め、右の地図は、現在の様子を示しています。特にインドから中国付近まで色が大きく変わっているのは、元々の森林が耕地化されたという結果を表しており、18 世紀から、インドと中国は特に森林の破壊が行われたことがわかります。

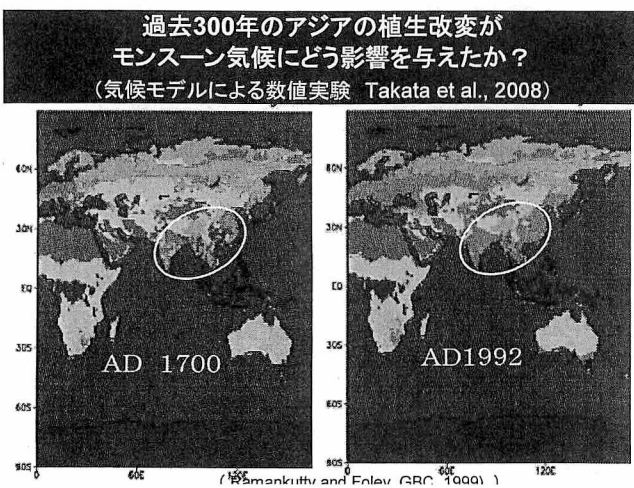


図 12 過去 300 年間のアジアの植生改変

図 13 は、インド亜大陸の 1700 年から現代までの土地利用変化を示したものです。農耕地は増え、一方で、森林は減っています。草地も若干減っていますが、基

本的には、森林を伐採して農耕地を増やしています。この変化が、20 世紀の中ごろまでに、大体済んでしまっています。ところが、東南アジア、インドシナ半島、タイやカンボジア、ラオスなどは、20 世紀の後半から森林破壊が始まっています。タイミングの違いはありますが、インドや中国は 18 世紀以降、ちょうど植民地化が進んでいく、その時期に対応しています。南アジア、東南アジアにおける森林破壊は、特にインドにおける降水量減少をもたらした可能性がシミュレーションにより明らかになりました (Takata et al. 2009)。

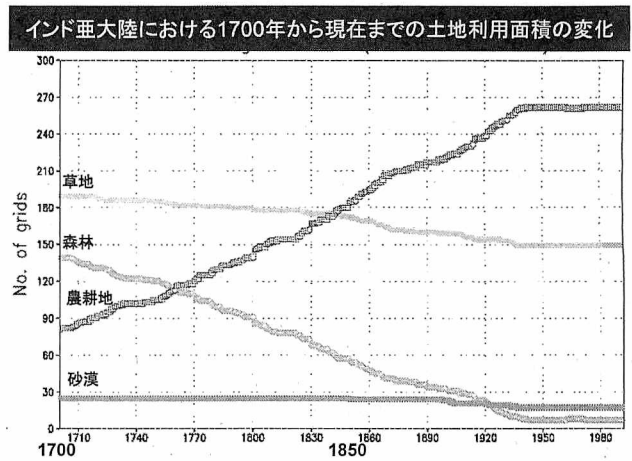


図 13 インド亜大陸における土地利用変化

図 14 は、なぜ降水量が減ったのかという一つのメカニズムを書いたものです。森林があるケースとないケースとで、蒸発散が大きく変化します。

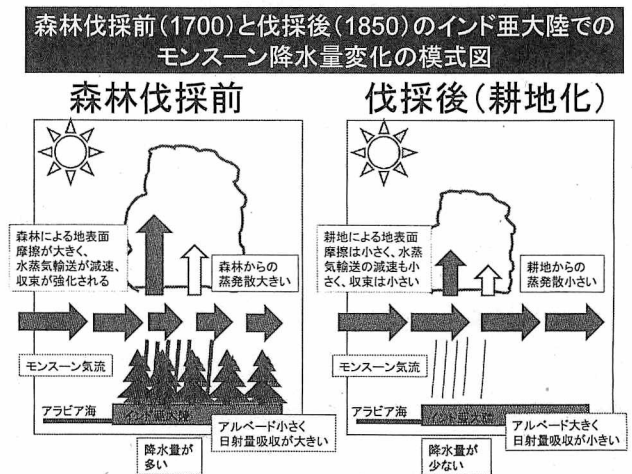


図 14 森林伐採前後の降水量の変化

また、森林は、効率よく太陽エネルギーを吸収し、蒸発散を増やします。蒸発散が増えると、大気中に水蒸

気が増えます。それが凝結して潜熱を解放します。つまり雲です。このプロセスが強化されます。

森林破壊に加え、われわれが最近注目していることがあります。それは、エアロゾルが気候影響変化に与える影響についてです。

エアロゾルには、硫酸化合物や窒素酸化物、硝酸化合物や、ブラックカーボン（すす）、それから土壌からのダストなど、いろいろな物質があります。そして、植生から出てくるのが、テルペンやイソプレンという植生起源 VOC といわれている揮発性の物質です。これらが、大気中の他の物質と反応して、一種のカーボン、第二次有機エアロゾルを作ります。これが結局、大気を直接跳ね返す、場合によっては雲の核になります。

実は、このようなプロセスは、まだ定量的にはきちんと解明されていないのですが、最近のさまざまな観測研究や理論研究を通して、このプロセスを見積もっています。それを現在、われわれが気候のモデルに入れ込んで調べているところですが、まだ完全な結果は出ていません。

人間活動による土地利用変化は、地域的にさまざまなかたちで、かつ広域に起こっています。もちろん今問題になっているのは、生物多様性にも影響していますが、一方で、例えば先ほどの VOC→エアロゾル過程などを変えるとというプロセスを含めて、地域的な気候や水循環に大きく影響します。

影響がローカルであるということは、小さいということだけではなく、例えば東南アジア地域に限って、そのような影響が強くあれば、東南アジアのモンスーンと水循環を変える可能性があるということです。例えば一部分だけ暖まって、他はあまり暖まっていないということになりますと、雲の分布や、それに伴う大気の流れが変わってきます。大気の流れが変わるということは、水蒸気の入ってき方も変わるなど、いろいろな影響が出てきます。モンスーンアジアでは、このような変化というものは、決して無視はできないだろうというように私たちは思っています。

人間活動はいろいろな側面、いわゆる CO₂ 等を直接

出しているだけではなくて、森林破壊やエアロゾルなども、大きな問題になっています。人間活動によるものとして、特にアジアでは、エアロゾルの影響は非常に大きいです。同時に、土地利用の変化や森林破壊など、このようなものは、それぞれのものが気候にも影響を与えています。

5. まとめ

最後に、本日の内容をまとめますと、まず大陸スケールの植生は、水・物質循環を通して気候と相互作用する系としても存在しています。だから、われわれは、普通の「気候」というより、「生態気候系」という概念のほうがいいのではないかと思います。

それから、ユーラシア・モンスーンアジアにおける植生は、モンスーン気候の維持・形成にも大きな役割を果たしています。現在のアジアの気候そのものの維持にも大きく役立っています。同時に、人間活動によって、このような植生に対する改変を行っているということは、モンスーン気候も改変している可能性があります。特に、世界人口の 60% が集中しているアジアモンスーン域の環境問題は、地球環境問題の中での、緊急かつ重要な課題と位置づけられます。

ただ、一方で、これだけ人口集中を可能にしているというのは、やはり水田稲作農業など、この地域の生態気候系とある意味で調和したような、持続可能なシステムというのがこれまであったからだといえます。したがって、今後の開発も、このような「伝統的な知」をいかに生かしながら進めるべきか、ということをよく考えてやっていく必要があるのではないかと思います。というのが、今回のメッセージになるかと思います。

どうも、ご清聴ありがとうございました。

著者プロフィール

安成 哲三 (やすなり てつぞう)

昭和 52 年、京都大学大学院理学研究科博士課程を修了。その後、京都大学助手、筑波大学講師・助教授を経て、平成 4 年、筑波大学地球科学系教授に就任。平成 14 年、名古屋大学地球水環境研究センター教授に就任。専門分野は気象学・気候学・地球環境学。2011 年 4 月より、当センター理事。