

# 森と水と土

環境保全と資源利用のバランスを考える

京都大学大学院農学研究科

谷 誠

## 森林と水に関して知りたいこと

例: 日照りに水を利用するには、どんな森林にすればいい?

森林種類(広葉樹か針葉樹かなど)や伐採方法など  
選定技術を訊いている

しかし、水源の森林の役割は、木材供給・土砂害防止・・・  
日照り対応だけではない

「森林の役割」とは、**地域で包括的にみるべきもので、  
特定の欲求(ここでは日照り対策)を超えたものではないのか**

技術は、特定の欲求に対応するのが得意  
(りんごの皮をむく道具のように)  
森林はそうではないのに、特定の欲求  
(渇水・洪水・土砂害・・・)を問われやすい



りんご皮むき器

<http://www.ringodaigaku.com/eat/goods/peel.html>

## はじめに

環境問題と森林、きっかけとして

## 象徴的な「緑のダム」という表現

追加スライド

人間は、人工物を基準に自然をみる傾向がある

自然科学そのものは、人工物を作る技術だけでなく、  
生物進化のような、再現できないプロセスの重要性を提供してきたはず  
しかし、それは社会に応用しにくい。これが環境問題の深刻さにつながる

緑のダムは、ダムを基準に自然を想像する典型

治水ダムは降雨の一部を貯めるために作った人工物  
治水効果があるのはあたりまえ  
(りんご皮むき器でりんごの皮がむけるのと同じ)



森林をダムと同じ機能のある道具にみてしまう

奥利根 矢木沢ダム

国土強靱化のためになんぼでも金を使え! と叫ぶのはおかしい・・・が  
豪雨がきたとき、治水効果がゼロとはいえないので、批判しにくい  
「りんごの皮がむけない皮むき器」のような、明確な欠陥瑕疵がないと・・・

ダムの是非とは別に、根本から自然認識の修正が必要では?

## ほんとに省エネ？

白熱電球からLED照明に変えると、電気エネルギーの消費が十分の一程度に

しかし、余る電気は、より生活が豊かになることに使用され、必ずしも、電気消費量減少に反映されにくい



**技術は短期的な欲求に応える傾向があり、自然科学知見が選択採用されるようだ**

「長期的な環境問題」は、重要性必要性がわかっても捨て置かれる

森林など50年もかかって成長するので、

長期的欲求と環境の両方の時間が近づく

メリット？ デメリット？



中部森林管理局ホームページから

## 本発表の課題

短期欲求に比べて長期欲求は、技術発展の対象になりにくいし、環境は、健康に比べて間接的なので、

**環境問題への真摯な問題取り組みはきわめて難しい**

森林への特定の欲求(経済性・環境性)は、役割の過小評価の原因になる

きょうは、生態系(主に森林)と天体としての無機質な地球の相互作用の自然科学的知見を紹介してゆく

**相互作用、動的平衡、恒常性維持作用をキーワードとして、環境問題への取り組みを考えなおしたい**

**人工物の色眼鏡で自然を見ることなく  
環境問題を身近にする必要条件(縮小社会で必須)として  
論争余地の少ない、自然科学的な事実の共有可能性を探る**

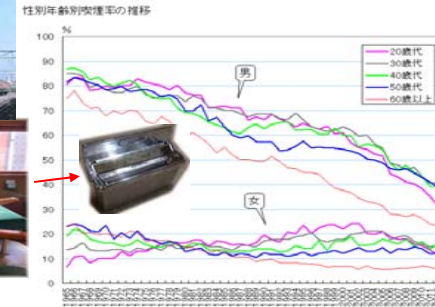
## 健康の直接性と環境の間接性

たばこを吸いたいという短期欲求に対して、健康という長期欲求は、環境問題と違って、直接的

**環境問題は、より長期のうえに間接的**



50年前には、国鉄の快速電車(米原-大阪-上郡-播州赤穂)に灰皿があり、禁煙車はなかった



(資料)厚生労働省HP「最新たばこ情報(日本専売公社、日本たばこ産業株式会社による調査)」  
<http://www.health-net.or.jp/tobacco/menus/02.html>

## 具体的な発表内容

追加スライド

### 理解したい内容

海と大陸と島に区別される地球の無機的な活動

森林等の生態系との相互作用による環境の成立  
大陸の水循環  
変動帯の地盤

生物資源かつ排出物浄化に関する、人間の生態系依存  
自然に、あるいは、人間活動による相互作用の変化  
(洪水緩和を例として)

### 考えたい内容

相互作用は、環境変化、個体一生で同質だが、意識的には環境が間接的自然科学知見は、「よりよく」の欲求にそって利用される傾向、時間変化など「不可能さ」の知見の社会へフィードバック不足

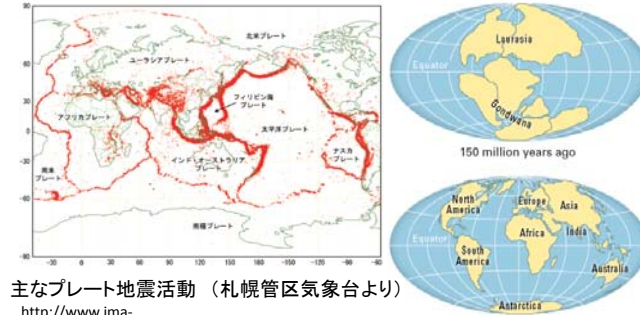
自然科学知見の統合的な理解共有が、環境を引き寄せるうえで必要

# 地球システム

2つの典型的な地理条件を分ける

## プレートテクトニクスと地殻変動

プレートは地球のマントルの対流により移動している(年数センチ)、その境界で  
潜り込みや衝突の部分に、地震・火山が集中している  
安定大陸は地殻活動が少なく、地形平坦で、ただ静かに動いているだけ



主なプレート地震活動 (札幌管区気象台より)  
[http://www.jma-net.go.jp/sapporo/bousaikyouiku/mamechishiki/jikazanknowledge/jikazanknowledge1\\_1.html](http://www.jma-net.go.jp/sapporo/bousaikyouiku/mamechishiki/jikazanknowledge/jikazanknowledge1_1.html)

プレート移動に伴う大陸の移動 (Britanica Kids|こよる)  
<http://kids.britannica.com/elementary/art-170985>

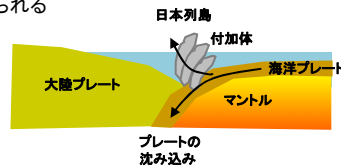
## プレート移動と土の循環

地殻変動帯では、山くずれや土石流が起こる

重力によって、土が水とともに落下し、海に落ちてゆくためには、  
重力に逆らって、土を山の上に押し上げないといけない

日本では、プレート沈み込みの際、堆積物がはぎ取られる付加体となって  
上向きに押され、山ができる  
または、火山噴火によって噴き上げられる  
岩が冷えて山になる

これが風化して、岩が土になり、  
雨水によって浸食され  
重力により海に帰る



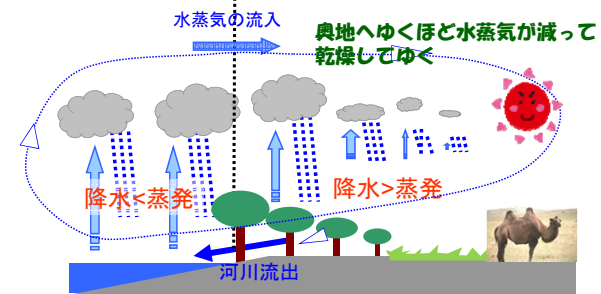
**地熱によって土は循環する**

安定大陸では、こうした土の循環移動はみられない

## 安定大陸： 海洋との水の循環

陸の水は重力によって海へ移動するが、重力に逆らう上向きの移動があるはず

海水は日射により気化熱を得て水蒸気に、重力で降水として落ちる  
余った水蒸気が陸で降水となる。一部は蒸発するが、  
あまりが河川流出となって海へ戻る



**太陽によって水は循環する**

## 地殻変動帯では 隆起と雨水侵食の競争

土の隆起が速ければ山岳となり、水の侵食も速ければ川の形が保存（三日月湖は隆起消滅する）土の隆起が遅ければ平原のまま



Google Earth 現在平坦な地形のため 進行中の釧路湿原の蛇行

### 隆起と侵食の速度競争で 複雑な地形が生じる



かつての平坦な準平原が隆起したなごりを示す紀伊半島北山川の蛇行

## 安定大陸における水循環 生態系相互作用による動的平衡の典型例

ここで、動的平衡とは、外力変動に対し変動が起こっても時間平均的には定常状態が保たれるシステムの状態をいうことにします

(物理的には、入出力があっても互いに逆向きの過程が同じ速度で進行するため、平衡が保たれる状態をいうようですが)

## 地球システム まとめ

2つの典型的な地理条件を分ける

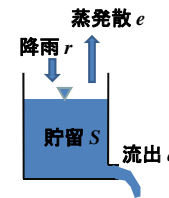
安定大陸と地殻変動帯は 地理的条件が全く異なる

奥ほど乾く安定大陸  
土が水とともに動く地殻変動帯

## 蒸発散の基礎: 森林を伐採すると流出は増加する

水収支の原理により、貯留変動少ない年単位では、流出量と蒸発散は競争関係

$$\text{降水量} = \text{流出} + \text{蒸発散} + \text{流域貯留増加}$$



森林の蒸発散が多いのは 2つの理由による

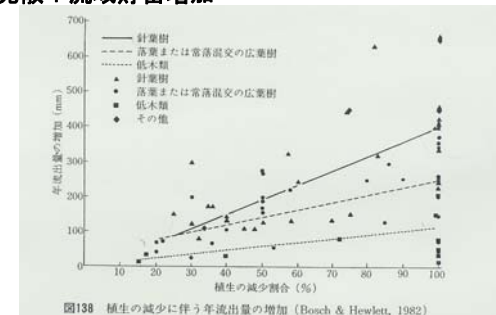


図138 植生の減少に伴う年流出量の増加 (Bosch & Hewlett, 1982)

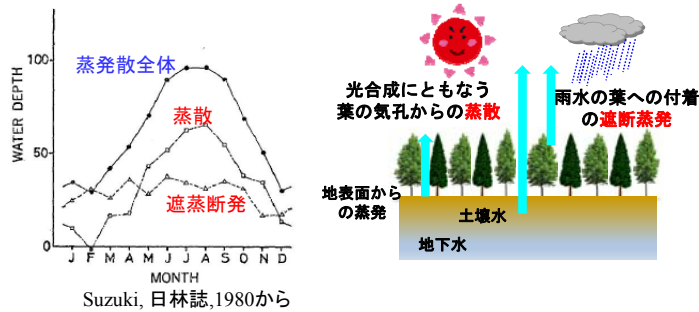
多数の流域試験から、森林伐採直後、年流量が増加することが示された結果 (Bosch & Hewlett, j.Hydrol.1982より)

## 森林からの水蒸気は、蒸散と遮断蒸発が大きい

日射が大きい、風が乾いて強いときに蒸発しやすい  
砂漠のように水そのものがなければ抑制される

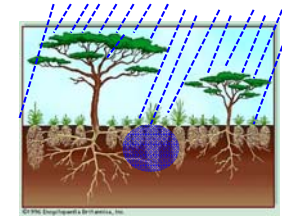
**蒸散**は、光合成に伴い、葉の裏の気候開閉によって自分の生き残りに有利なように制御している

**遮断蒸発**は、枝葉に付着した雨水の蒸発

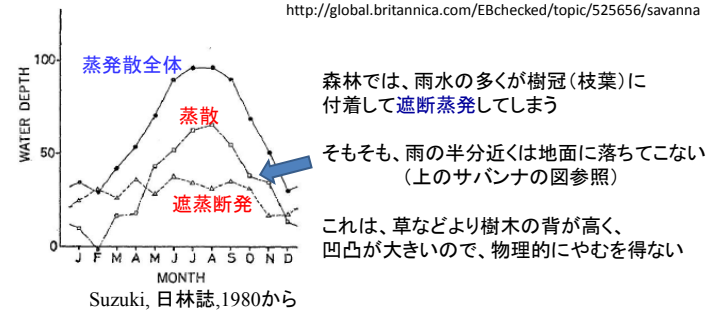


## 森林は遮断蒸発量が大きい

雨が少ないと、サバンナのように、根を樹冠のない周りに伸ばして水を横取りして蒸散に使い、光合成を維持する



<http://global.britannica.com/EBchecked/topic/525656/savanna>



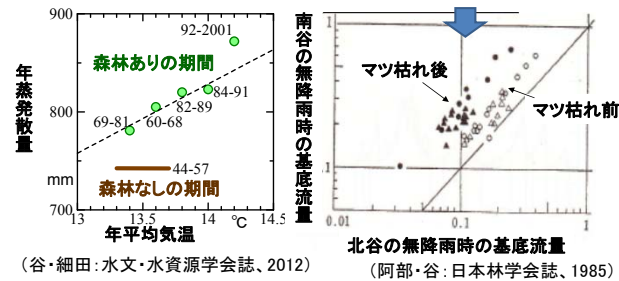
## 森林は蒸散が大きいわけではないが、乾燥時に減りにくい

蒸散は光合成にともない、草も大きい  
草は乾燥で蒸散を減らす  
根を深く伸ばした樹木は、しぶとく蒸散を維持する

**樹木は、しぶとく長く生きる戦略**



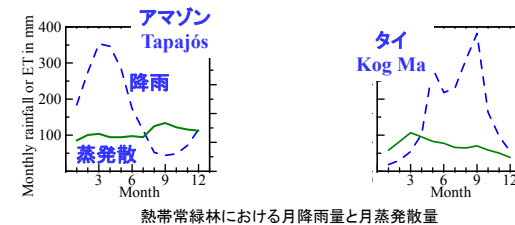
渇水時、森林は蒸散が減りにくいので、**溪流流量は森林がある方が少なくなる**



## 森林は蒸散が大きいわけではないが、乾燥時に減りにくい

熱帯では、年中気温が高く、光合成が可能なので、  
常緑林は、雨の少ない乾季に蒸発散が大きくなる

ただし、あまり無降雨期間が長い地域は落葉林(乾季に落葉)となる



da Rocha et al., Ecol. Appl. 2004

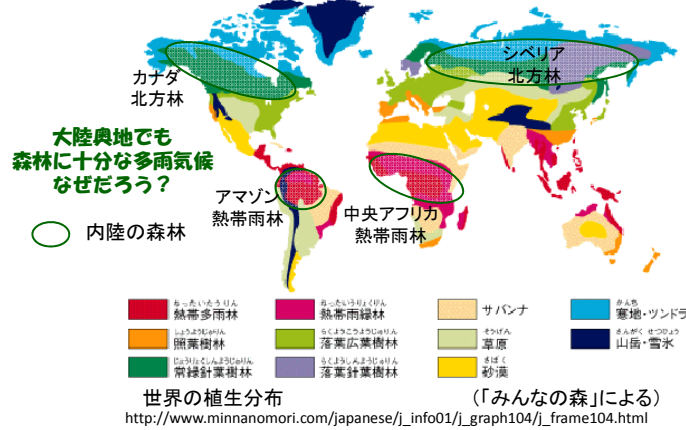
Tanaka K. et al., JGR, 2003

Tanaka N. et al., Agr. For. Met., 2008

**とにかく、森林は蒸発散が多く、かつ、乾燥期間にも減りにくい  
樹木が長生きだからです。よく理解ください**

## 大陸の奥地：砂漠ではなく森林の広がっている場合も

森林は蒸発散が多いのに、乾燥するはずの海から遠い大陸奥地にも広がっている



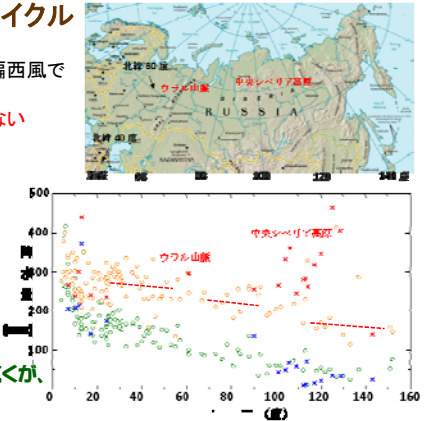
## 安定大陸での水のリサイクル

大西洋から蒸発した水蒸気が偏西風で運ばれる 冬は雪が減少、夏はあまり雨が減ってゆかない

標高の高くなる中央シベリア高原では、夏に雨が增加

よくみると、標高の高い東側(風下)は、雨が階段状に減る

地形が高いと雨が多くない風が乾くが、平らだと奥まで減りにくい

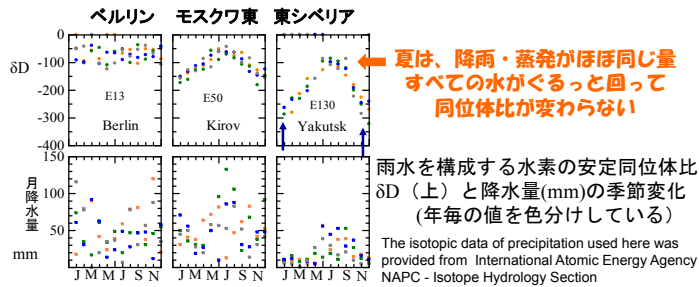


ユーラシア大陸北方(北緯50度から70度)における夏季(○、6-9月)、冬季(○、12-3月)の降水量の東経に対する関係  
なお、○は夏季、×は冬季の、いずれも標高300mを超える地点を示す。(気象庁のデータによる)  
<http://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/monitor/nrmlst/CountryList.php?rcode=06>

## 水の安定同位体比は蒸発・凝結の歴史を表す

水素・酸素の元素には、中性子の多い同位体が混じっていて、蒸発は、軽い(中性子数の少ない)分子を持つ水から先に、凝結は、反対に重い水から先に起こる

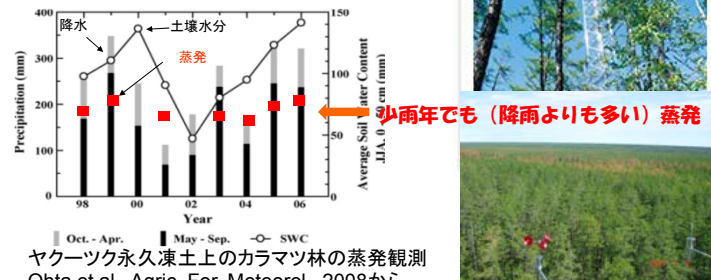
冬は、大西洋の水蒸気は重いものから雪になり、東にゆくほど軽くなる  
夏は蒸発が盛んなため、水のリサイクルによって軽くならない



## 森林の光合成・蒸散は少雨年でも減らない

名大の太田岳史らによる東シベリアのカラマツ林でのタワー観測

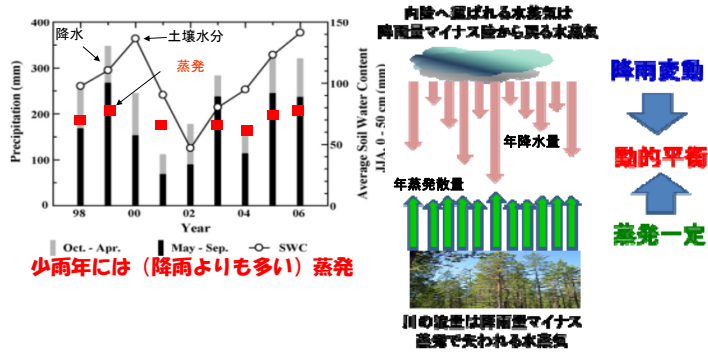
渦関法という手法が開発され、こうしたフラックス観測が地球環境研究の実証部分を支えている



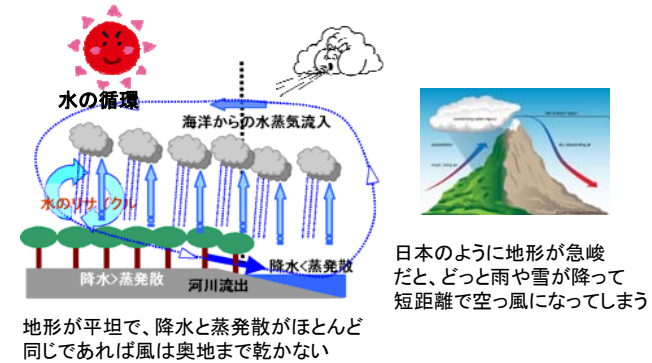
なお、こういうタワーでの水循環や二酸化炭素やメタンの輸送は、森林水文学や農業気象学の研究者が手法開発し、学生らの観測に任されている  
日本やロシア政府は、その100年規模の長期変動を、気象観測や河川観測とは違い、業務測定すべき重要性を認識していない

## 相互作用による動的平衡、その移行(シフト)

少雨年も含み毎年蒸発が同じなのは、カラマツ个体が年々光合成して成長するから。人間と同じで、生命は活動を休むと枯れてしまう(他の種に負ける)



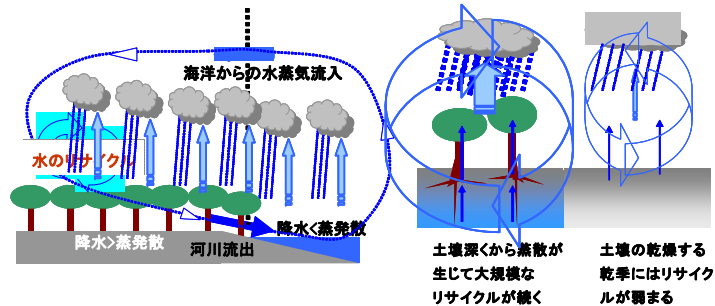
## 水リサイクルは、地形平坦・蒸発散安定が条件



## 水のリサイクルの動的平衡は森林伐採でシフトする

広大な面積の森林を伐採すると、蒸発散は減り、とくに少雨年は極端に減り、水のリサイクルの動的平衡は崩れてゆく。最終的には乾燥気候の動的平衡に落ち込み、ユーラシア大陸東方(シベリア、モンゴル、中国内陸)の気候が乾燥化する

森林のある湿潤気候の動的平衡から  
森林のない乾燥気候の動的平衡にシフトする



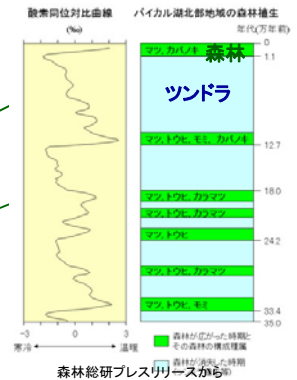
## 長期気候変動における動的平衡とシフト

バイカル湖の湖底堆積物の花粉分析を行ったShichi et al. (Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2007)によると、

森林におおわれていた時代は1万年程度  
ツンドラであった時代がより長い  
気候変動にもなって森林が拡大縮小する

現在の暖かい気候で動的平衡は1万年以下の期間にすぎない

気温の変動(右が高い)を表している



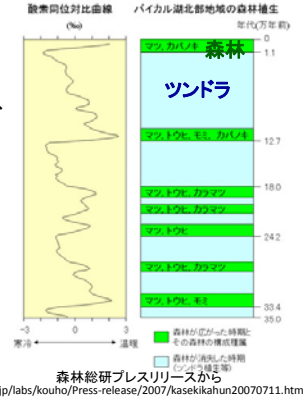
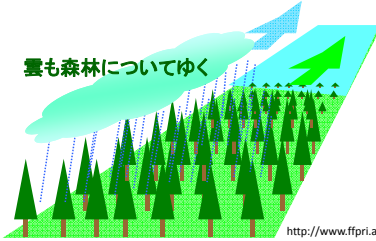
<http://www.ffpri.affrc.go.jp/labs/kouho/Press-release/2007/kasekikahun20070711.htm>

## 長期気候変動における動的平衡とシフト

暖かな現在の気候は、**平年気温のまわりを変動している（動的平衡）**  
 しかし、より長い期間には、徐々に、**植生とともに変化している**

森林におおわれていた時代は1万年程度  
 ツンドラであった時代がより長い  
 気候変動にともなって森林が拡大縮小する

温暖化で北方向へ森林が拡大した期間には、  
 蒸発散と降水の水リサイクルも運動して、  
 北方向に千キロの規模で拡大したのだから



気候変動にともなう生態系変動の移動

## 地殻変動帯における水と土の移動

侵食外力との相互作用による動的平衡

## 安定大陸における水循環

生態系相互作用による動的平衡の典型例

まとめ

森林は蒸発散が多く、かつ、乾燥期間に減りにくい  
 なので、雨が同じなら、森林がない方が溪流流量は多くなる

安定大陸奥地では、雨が同じの前提がなく、  
 蒸発散が多く安定していることで  
 水リサイクルが維持され、湿潤気候が保たれている

気候によって植生分布決まる方向だけが正しいのではない

現在気候の動的平衡(変動しながら平均値は一定)は  
 生態系との相互作用を通じて形成されたものである

人間による森林利用は、この気候の動的平衡を崩し、  
 乾燥気候での動的平衡へシフトさせるかもしれない

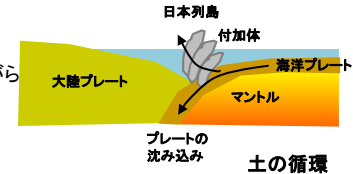
**森林は水を消費するので水資源を減らすとの見解は、皮相的である**

## 地殻変動帯では、水の重力移動は土をとともう

プレート移動によって、重力に逆らって「付加体」として押し上げられた  
 岩盤は山岳となる

岩盤は、地震によって亀裂がゆき、溶解物質を含む雨水によって化学変化  
 を受けて、ぼろぼろに風化してゆき、財布雨滴に土粒子になる  
 (岩盤は形が崩れないが、土粒子はバラバラ)

土粒子は雨水によって侵食されて、  
 川に流れ、浸食堆積を繰り返しながら  
 海に帰る(すべて重力の仕事)



**変動帯では、山を押し上げる力、水の侵食力が競争している**

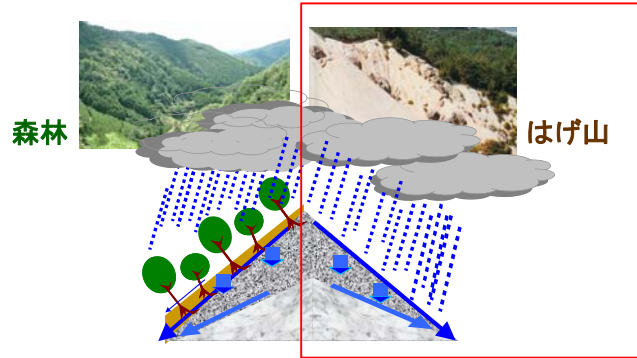
土の重力による移動は、水の流れよりずっと遅いが、水に遅れて動いてゆく



## 森林の役割を考えるため、森林のない場合を調べる

大陸の森林広域伐採とは違い、森林のない場合の水・土移動は、  
**きちんとした観測例(福嶋義宏・鈴木雅一[当時京大])がちゃんとある!**

はげ山を調べると、森林の役割がよくわかる



## はげ山は土壌がない山、土壌のある山とは異なる

はげ山は、風化した基盤岩が露出している  
 これは、風化花崗岩を主とし、地質に限られている

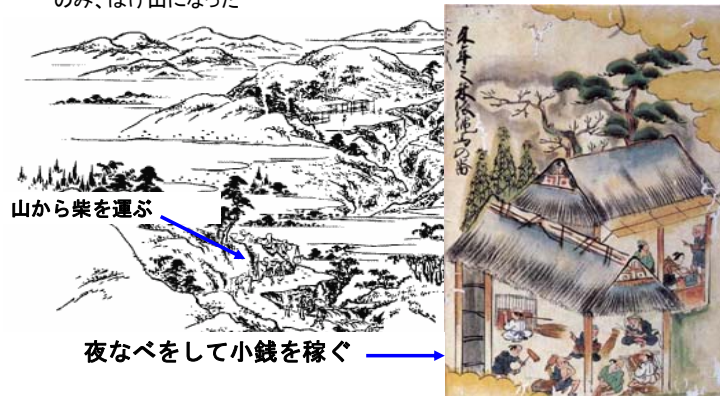
風化によって土粒子が形成されるのに、土壌になってとどまらないのが特徴




土壌のない、はげ山 (溪流は土砂が堆積)      木は貧弱だが土壌のある山  
山部工務店の写真提供  
 大正頃の滋賀県南部田上山の花崗岩のはげ山      昭和初期の比叡山ケーブル  
 付近、堆積岩の貧弱な森林  
 写真は「全国植樹祭60周年記念写真集」(2009)による

## はげ山は人間の森林利用によって成立

1960頃の燃料革命までは、生活・農業は、森林の採取利用によって支えられた  
 原生林、コナラ等落葉樹林、アカマツ林と変化し、土壌が残らなかった場合  
 のみ、はげ山になった



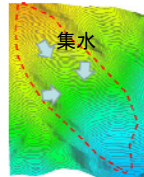
## 日本の森林の変化概要

	興山	原山(花崗岩以外)	原山(花崗岩)
太古から 1950年代まで	わずかな森林利用のみ 森林・土壌ほぼ不変 樹齢ほぼ不変	森林の強い生活利用により、マツ・コナラ・ 車輪へ変化 土壌劣化・厚さ減少 樹齢低下	森林の強い生活利用により、土壌劣化 はげ山へ 樹齢低下
1960年代	戦後木材需要による 拡大造林、 樹齢中や低下	燃料革命により不利用 人工林化もしくは放棄	樹山緑化工業により 樹齢の劇的増加 燃料革命により放棄
1960年代以降	原生林は樹齢 ほぼ不変	高度成長の木材需要は海外天然林伐採輸入国 内の樹齢低下は免れる	放棄林は森林不利用によって成長 樹齢の長期回復開始
			
			人工林は間伐遅れ伐採後の間伐等での樹齢増加化により樹齢を中低下

谷: 水利科学, 2011より

## ゼロ次谷

このように、真ん中が凹地形で水が集まりやすい斜面を「ゼロ次谷」といい、そこで起こっている水と土の移動を考えよう



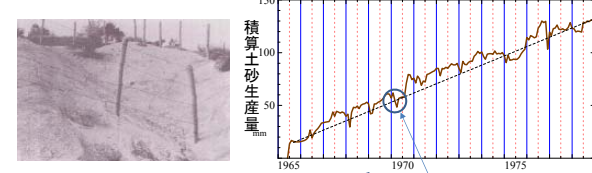
ゼロ次谷の地形図の例



森林でおおわれたゼロ次谷 はげ山のゼロ次谷

## はげ山での土の移動: 斜面では

建設省琵琶湖工事事務所は、滋賀県田上山花崗岩はげ山で詳細な土砂流出量観測を長期に行って、緑化工事の効果を調べた(福嶋義宏・鈴木雅一の研究)



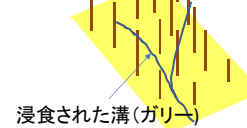
(鈴木・福嶋、水利科学, 1989)

測定方法

鉄製杭

故北川益三郎氏が正確に測定し続けた結果

春先には、霜柱が融けて、浮き上がりむしろ土が増えたように見える(上向き)



斜面全体から、毎年ほぼ同じ速度で土が侵食されて失われていった

豪雨のある年も、ない年もあるのに、同じように侵食されるのは、春先の土粒子が毎年等量、岩盤からはがれてゆくため

## はげ山での土の移動: 斜面から溪流に出て



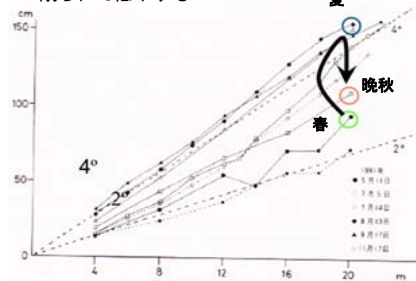
夏の溪流



晩秋の溪流



下图のように、溪流の地表面は、春から夏にかけて土砂がたまって上昇し、晩秋になると削られて低下する



(鈴木・福嶋、水利科学, 1989)

## はげ山での土の移動: 斜面から溪流に出て



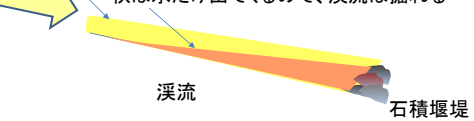
はげ山斜面から流れ出した土は溪流にたまるが……

夏は斜面から土砂が出てくるので、溪流に貯まる  
秋は水だけ出てくるので、溪流は掘れる

夏の溪流



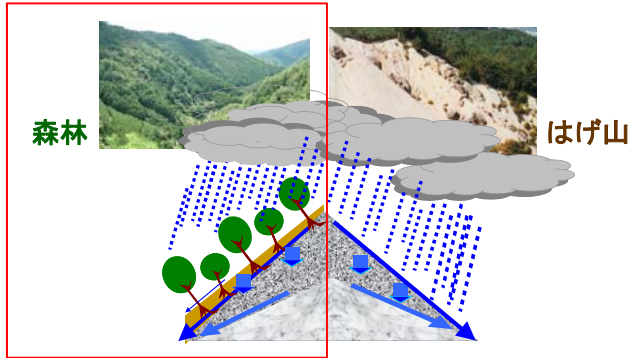
晩秋の溪流



土は、斜面でも深流でも、ひと所に数ヶ月しかとどまらず1年単位で、海へ向かって運ばれてゆく

森林が再生するいとまがなく地盤が安定しない結果に注意!

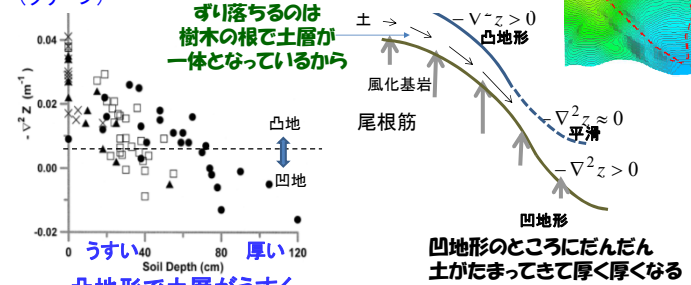
## 森林のある場合はどうか



## 湿潤変動帯ゼロ次谷での土の移動

宇宙線核種を用いた調査により、風化基岩からの土粒子生産とその移動が実証されてきた Heimsathや松四雄騎(京大防災研)

はげ山よりゆっくりだが、風化により岩盤から土が造られる  
侵食されずに、土層全体が立木とともに尾根からずってくる  
(クリープ)



Hemsath et al., Geomorphology, 1999

## 湿潤変動帯ゼロ次谷での土の移動

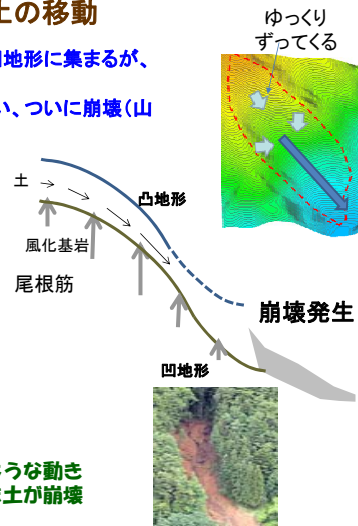
尾根の方からずってきた土は、凹地形に集まるが、  
どこまでも厚くはなれず、  
豪雨時に斜面定のバランスを失い、ついに崩壊(山くずれ)を起こす



(塚本良則、砂防学会誌、1978)

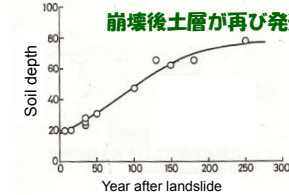
そのため、表層崩壊は凹地部に  
多いことが、すでにわかっている

ゼロ次谷では尾根は土がずるような動き  
凹地谷地形のところに集積した土が崩壊



## 崩壊後、周りからの土集積で土層が復活

下川悦郎(鹿児島大)は、年輪調査等で、土壌年齢を推定



(Shimokawa, Proceeding of Symposium on Effects of Forest Land Use on Erosion and Slope Stability, 1984)

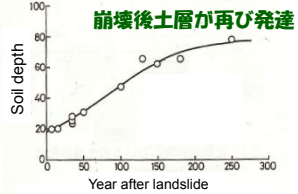
北原曜(信州大農)は、強度試験から、根系の3次元的な補強が重要とした  
(北原、水利科学、2010)、

尾根から土層がゆっくりずってくるときは、樹木は土とともに移動  
凹地形部の崩壊は、根が切断されて発生

ゼロ次谷でのこの組み合わせで、土が徐々に運ばれる  
これは、森林の根の補強があって初めて生じる  
はげ山が1年土層がもたないの異なり、100年単位で土層が保持される  
土層の崩壊・発達の繰り返しにより、土は(はげ山と比べ) ゆっくり海へ移動

## 森林は土層を100年単位で安定化する

下川悦郎(鹿児島大)は、年輪調査等で、土壌年齢を推定



1年単位での土移動

(Shimokawa, Proceeding of Symposium on Effects of Forest Land Use on Erosion and Slope Stability, 1984)

隆起・侵食を地球変動条件として、重力で土は海へ運ばれる

森林のある場合、相互作用による土層の発達維持がある  
そのため、長く安定を保ちつつ、ごく遅い速度で土が移動する  
土層が崩壊しない長期間は、森林と土壌が動的平衡を保つ

森林のないはげ山は、相互作用がないので、  
1年単位の高速で土が移動する(結局、森林が再生しない)

## 生態系の恒常性維持作用

資源利用と環境保全の基盤

## 地殻変動帯における水と土の移動

侵食外力との相互作用による動的平衡

### まとめ

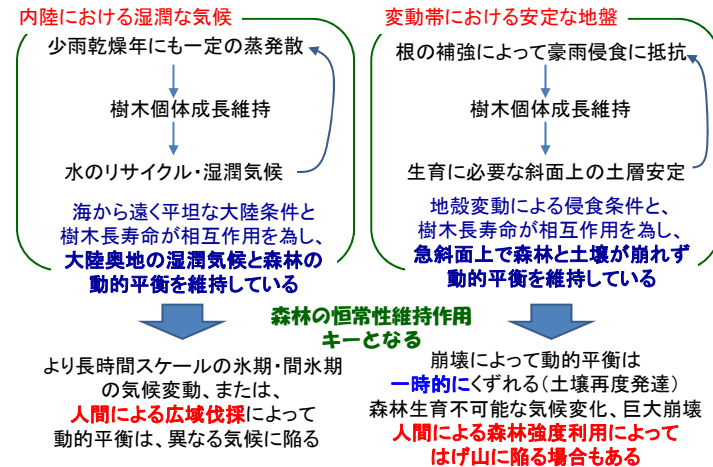
地殻変動帯においては、重力によって土と水がともに移動させられるのは必然的(森林の有無にかかわらず)

森林がないと風化で生成した土はただちに移動  
森林があると、長期に安定を保つ

森林存在と土層発達・地盤の安定は相互作用を為す

土がずっとあって、木が生えたり枯れたりするのではない  
木が生えることで土ができてくるので、ずっと森が続くのです

## 相互作用・動的平衡の大陸・変動帯の対比(資料から修正あり)



## 森林は他に代えがたい生物資源でもある

林業等、森林利用は、生態系の一部の持ち出し、根の腐朽による土壌補強の劣化などをともなう

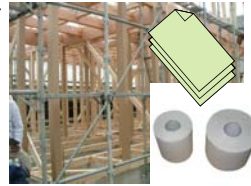
間伐が水土保全に効果との見解もあるが、伐採収穫の林業体系の一ステップにすぎない

**人間は森林利用は避けることができない**

環境破壊は伐採を必然とする林業にはない、森林再生の失敗をいうべき

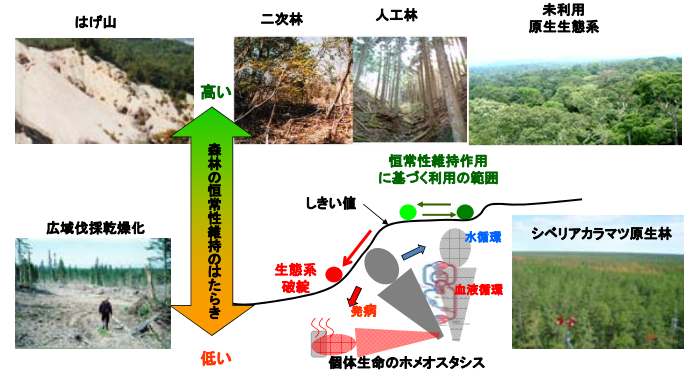


中部森林管理局のホームページから



## 相互作用・動的平衡は生態系の恒常性維持作用による

樹木を主とする森林生態系（多様な個体集団）の恒常性維持のはたらきは、人間による森林利用によって、長期気候変動に匹敵するほど、衰える恒常性維持作用が崩れない範囲での利用が重要  
はげ山は過去の破綻例として貴重



## 木材輸送は環境劣化をバーチャルに逆輸送する

木材等森林利用は、何らかのレジリエンスの低下による環境劣化を引き起こすので、ローカルな森林伐採利用と木材輸送には、グローバルな視点での環境保全・災害防止の配慮が必要



Virtual water  
Virtual soil  
Virtual environment

## 生態系の恒常性維持作用 資源利用と環境保全の基盤

まとめ

天体としての非生物的な地球条件と生態系との相互作用が動的平衡を為して、安定した自然環境を創造している

森林では、主体となる樹木が環境変動のストレスに耐えて長寿命を保つ恒常性維持作用があり、動的平衡を支える

人間利用は、動的平衡を破壊する可能性があり、恒常性維持作用の範囲での利用が重要

戦争や植民地を避ける理想は、生物資源貿易のあり方と密接に関係

# 人為排出物浄化についての洞察

## 恒常性維持作用・相互作用・動的平衡の視点から-1

### 人間排出物浄化に関する生態系の役割

生態系の恒常性維持の基幹にある二酸化炭素CO<sub>2</sub>を例にとる

現在気候の動的平衡を前提にすると、CO<sub>2</sub>は地球の海陸生態系で、光合成吸収と呼吸放出が等しく、動的平衡になり、大気中濃度がほぼ一定

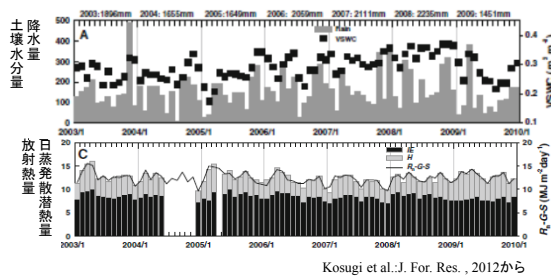
人間活動で放出するCO<sub>2</sub>のうち、生態系の恒常性維持作用で吸収しきれない分が、大気濃度を上げて、動的平衡を崩している

シベリア(太田岳史:既述)と同様のタワー観測を  
小杉緑子(京大農・森林水文学)のグループの  
半島マレーシアPasoh熱帯雨林での観測に見よう



Pasoh試験地 タワー上のCO<sub>2</sub>輸送量計測器 根の炭素量の調査

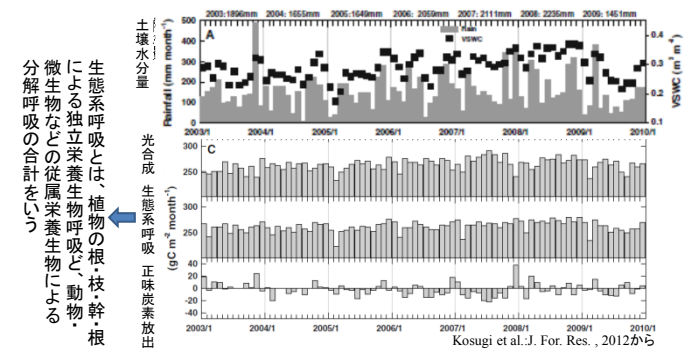
### 降水・蒸発散の変化



Kosugi et al. J. For. Res., 2012から

降雨変化は小さいが、11~12月頃雨季になり、放射(ほぼ日射)低くなる傾向  
蒸発散量はほとんど一定

### 大きな光合成・生態系呼吸に比し、正味吸収はわずか



生態系呼吸とは、植物の根・枝・幹・根  
による独立栄養生物呼吸と動物・  
微生物などの従属栄養生物による  
分解呼吸の合計をいう

Kosugi et al. J. For. Res., 2012から

光合成によるCO<sub>2</sub>吸収と生態系呼吸はともに大きい、ほぼ同じ量である  
その差の正味放出量(マイナス側が吸収量)はわずかで、吸収が多いが  
雨の多い時期には放出傾向がみえる  
分解呼吸を担う微生物は、長寿の樹木と反対に、雨季に急に元気になる

## 人間排出物浄化に関する生態系の役割

熱帯雨林は炭素を吸収するという俗な表現は不適當  
**動的平衡の維持に貢献している**  
 気象や大気CO<sub>2</sub>濃度の変動、人間利用に対する複雑な応答は  
 研究によって調べるべき課題

**人間排出物は、生態系の恒常性維持作用の範囲での動的平衡の範囲内  
 であれば問題が起こらないが・・・範囲外を超える場合  
 ・・・(温暖化、公害・・・)**

ただし、放射性廃棄物だけは、もともと動的平衡と無関係



Pasoh試験地 タワー上のCO<sub>2</sub>輸送量計測器 根の炭素量の調査

## 洪水流出緩和についての洞察

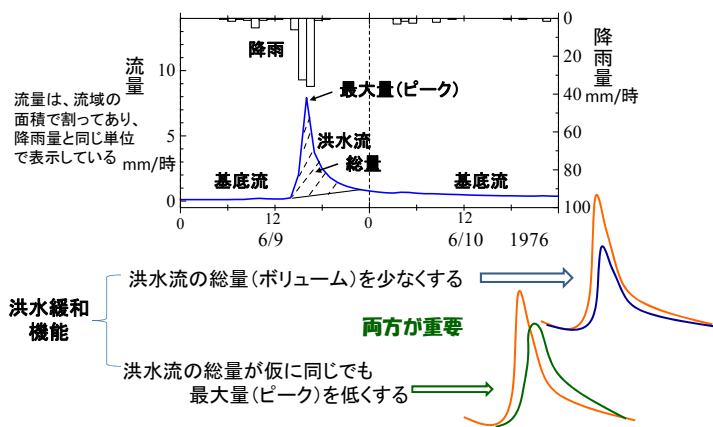
恒常性維持作用・相互作用・動的平衡の視点から-2

これは、自分の専門ですが、最も説明が難しいです  
 国交省等の工学の常識、林野庁等の林学の常識、いずれも  
 一種の勘違いがあり、土壌物理学の理論や斜面水文学の  
 観測結果を総合して初めて、洞察ができてきます  
 時間が無いので、ここでは簡単な説明にトライしてみます

## 降雨に対する流出応答と洪水緩和機能の基礎

日本のような地殻変動帯の洪水流について調べる

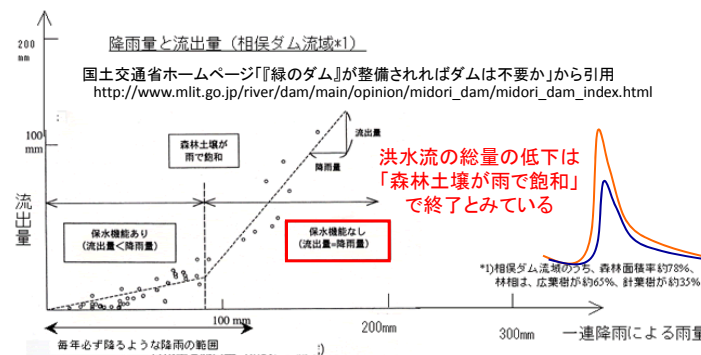
雨に伴って急増加急低下する洪水流と変化の小さい基底流から成る



## 洪水総量の低下に限定する森林評価

国交省の主張

降雨が続いた後、新たに降った雨はすべて洪水流になる場合がある  
 こうした場合、降雨総量と洪水総量が一致してしまい、保水機能がない



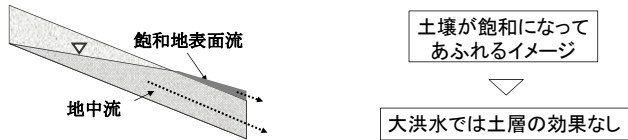
## 学術会議の2001年答申はあふれるイメージ

### 国交省の主張

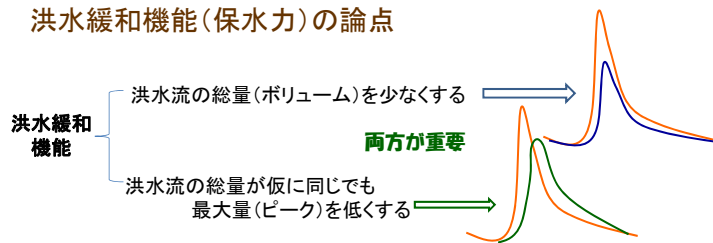
降雨が続いた後、新たに降った雨はすべて洪水流になる場合がある  
 こうした場合、降雨総量と洪水総量が一致してしまい、保水機能がない

日本学術会議答申「地球環境・人間生活にかかわる農業及び森林の多面的な機能の評価について」(2001年)における表現をみる

治水上問題となる大雨のときには、洪水のピークを迎える以前に流域は流出に関して飽和状態となり、降った雨のほとんどが河川に流出するような状況となることから、降雨量が大きくなると、低減する効果は大きくは期待できない。このように、森林は中小洪水においては洪水緩和機能を発揮するが、大洪水においては顕著な効果は期待できない。



## 洪水緩和機能(保水力)の論点



森林は、中小出水で洪水流総量を減らすことは国交省も認知

洪水総量が降雨総量と同じになるような大出水でも、ピークは変わるようだ

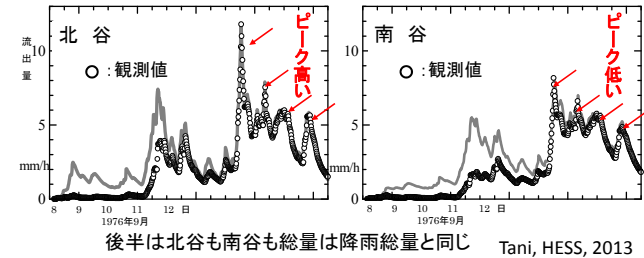
国交省は、これは、土層からあふれたのだから、森林と無関係とみる

論点：ピークを低下させるメカニズムは？森林との関係は？

## 学術会議の2011年回答はピークの低下

日本学術会議河川流出モデル・基本高水評価検討等分科会(委員長:小池俊雄東大工学研究科教授)の国土交通省水管理・国土保全局長(旧河川局長)あて回答(2011年9月)「利根川水系の河川流出モデル・基本高水の評価と検討」における表現

森林の保水力は、岩盤上の土壌層全体における雨水の貯留変動によるものであり、降雨がすべて洪水になるような規模の大きい出水であっても、流出波形を緩やかにする(ピーク低下)機能は維持され、保水力として評価できる。

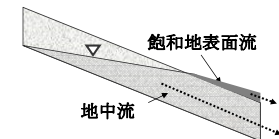


## 洪水流は土壌からあふれた流れ？

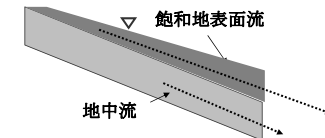
降雨量が多くなると、土層が飽和してあふれた飽和地表面流が主に洪水流になる

土層は洪水総量を小さくするのに効果を発揮しかし、ピークを低くするかどうかは、地表面流が速いか遅いか

例えば、斜面が長い、斜面が緩い、地面に凹凸がある、落葉や下草が生えている、などがピークを低下させる



大規模洪水時には、全面的に地表面流が発生



この一見常識に見える見解は、はたして本当？



## 森林とはげ山の洪水流の比較

俗説 **はげ山も森林も、洪水流の主体は地表面流である  
森林は下草・落葉のせいで流れが遅くなる**

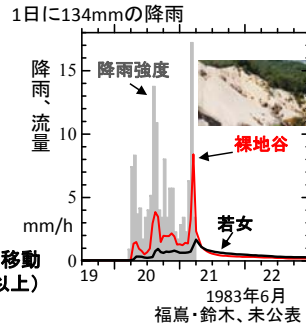
ここに大きな勘違い

滋賀県田上山のはげ山(若女裸地谷)と隣接森林流域(若女)の洪水時の観測結果

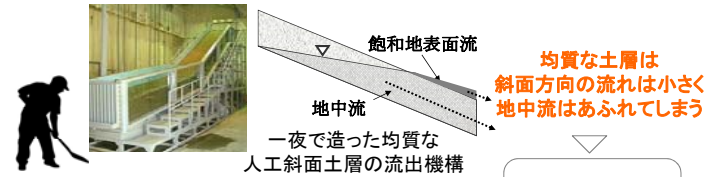
降雨外力に対し、はげ山は、**土層がない状態で動的平衡**

森林は、**土層を発達・維持させる状態で動的平衡を保つ**

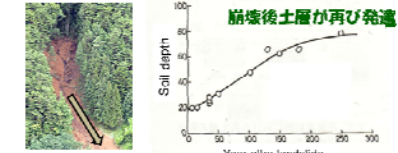
地殻変動帯における土をとまう水の重力移動の動的平衡(はげ山は1年、森林は100年以上)に対応する水流出機構が存在する



## 人工斜面土層は地表面流、自然斜面は地中流



崩壊後、周りからの土集積で土層が復活  
下川祝郎(鹿児島大)は、年輪調査等で、土壌年齢を推定



パイプ状の排水路が形成  
地下水面上昇が抑制  
崩壊せずに土層発達

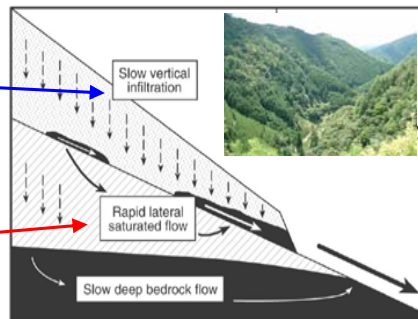
(Kobayashi, Proceedings of Symposium on Effects of Forest Land Use on Earthquake Slope Stability, 1994)  
北藤理(信州大農)は、強度試験から、根糸の3次元的な補強が重要とした  
(北藤、水科科学, 2010)、

## 斜面観測結果(米国急斜面)もパイプ排水を示す

米国西海岸の地殻変動帯の急斜面(CB1)で、Montgomery、Dietrichのグループは、ゼロ次谷で、人工降雨を含む詳細な観測を実施

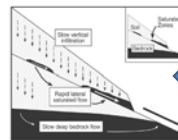
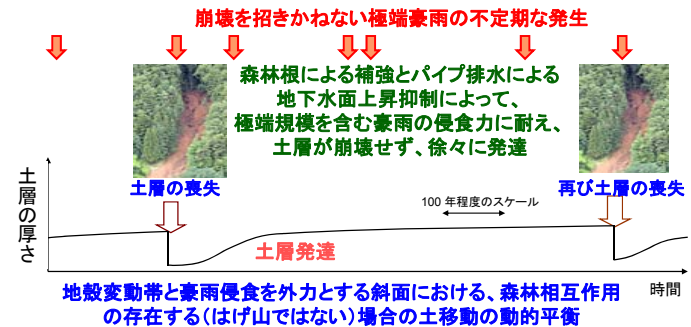
鉛直浸透の速度は遅いがピストンのように水を押し出すので意外に素早く雨の信号が伝わる

斜面方向へはパイプ状の孔がつながっていて高速に排水される



Montgomery and Dietrich, Wat. Resour. Res. 2002  
数百年の森林・土壌の相互作用の結果である不均質な自然斜面の流出機構 67

## 洪水緩和に関する生態系の役割



崩壊に接まれた期間は、結果的に崩れないことから、降雨入力に対して流出を出力応答し、土層内の水貯留・流出機構が動的平衡を維持土層安定に寄与(崩壊させない)

## ひとまず、まとめ

追加スライド

### 恒常性維持作用・相互作用・動的平衡

安定大陸奥地の湿潤気候は、地球水循環(無機的地球変動)と森林蒸発散の相互作用による動的平衡を示している  
しかし、地球長期変動によって変化する

地殻変動帯の地盤(土層)安定は、山岳隆起と豪雨頻発気候(無機的地球変動)と森林根による補強の相互作用による動的平衡を示す  
しかし、地盤(土層)は地球変動隆起に抗して発達して崩壊、を繰り返す

人間排出物による環境問題は、無機的地球と生態系の相互作用による動的平衡を超えるところで発生する

大陸奥地湿潤気候や地殻変動帯の土層発達維持という動的平衡も、人間による恒常性維持作用を超えた森林生態系利用で破綻可能性がある

森林の洪水緩和機能は、土層が豪雨時に動的平衡を保ち侵食崩壊しないで発達するための必要条件である  
(つまり、機能は土層崩壊時点で崩壊するが、崩壊しなければ維持される)

## 今後の社会に対する考察

### 自然科学の視点から

## ひとまず、まとめ

### 恒常性維持作用・相互作用・動的平衡

下記のテーマについて考察した  
安定大陸における水循環  
地殻変動帯における水と土の移動  
人為排出物浄化  
洪水流出緩和

いずれも、降雨などの気象変動、山岳隆起などの地殻変動に対して森林等の生態系が生命の恒常性維持作用に基づき相互作用を為すことで、ある期間(より長期のシフトインパクトがあるまで)、動的平衡を維持している

その環境を前提に人間社会が存在できるが、人間の生物資源利用は、動的平衡をくずす可能性があり、その範囲内での利用が重要である

より良い技術を求めても、自然は壊れないと人間は思い込んでいる  
自然のうち、無機的な地球はたしかに持続的だが  
生態系との相互作用は、過去にも例があるように壊れる  
地質年代的には宿命だが、人間社会の延命は工夫次第

### 個体の健康衛生と動的平衡への意識差

人間は、治癒が個体死への延命対策だと意識しており、他の生物と異なり、現前の欲求を我慢できる

環境問題は「未来の他人事」であるから、現前欲求を我慢できない、

「後は野となれ山となれ」にみえる

### 医療との対比にこだわって考察してみる

動的平衡破綻は、個体とのかかわりがうすく欲求選択の材料とはならない



## さまざまな動的平衡

さまざまな動的平衡が生じている

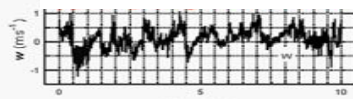
**短い:** 10分スケールで観測された風速の鉛直方向成分  
(飛行機が気流の悪いところで上下する、あのいやなゆれです  
機体が動的平衡を保つから安心して乗っていられます)



**長い:** 地上気温は、大気中の二酸化炭素濃度減少により、  
500万年スケールで低下

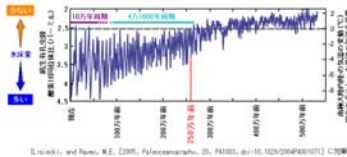
<http://www.stoptptdierichten.at/2013/02/21/fpo-no-anhaltende-turbulenzen/>

動的平衡は、瞬間的な変動にもみられる  
下記は、空気乱流渦による鉛直方向の風速



弘前大学理工学部月刊ホームページによる  
[http://www.st.hirosaki-u.ac.jp/~earth\\_atmhyd/monthly/turbulence.html](http://www.st.hirosaki-u.ac.jp/~earth_atmhyd/monthly/turbulence.html)

過去500万年間の深海底生有孔虫化石の酸素同位体比変動曲線



大鹿村中央構造線博物館ホームページによる  
<http://mtwebmuseub.web.fc2.com/t10021quaternary.htm>

## 動的平衡の時間入れ子構造

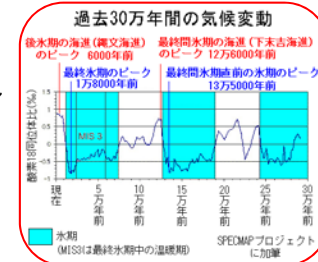
地球の気候変動は、異なる時間スケールをもった動的平衡の、入れ子人形的な重なり合いを示している



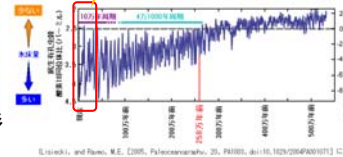
マトリョーシカとルーツとなった箱根人形

ロシアのセルギエフボサド玩具博物館蔵

<http://lipimir.ru/index.php?id=articles&tit=1300442809&lang=en>



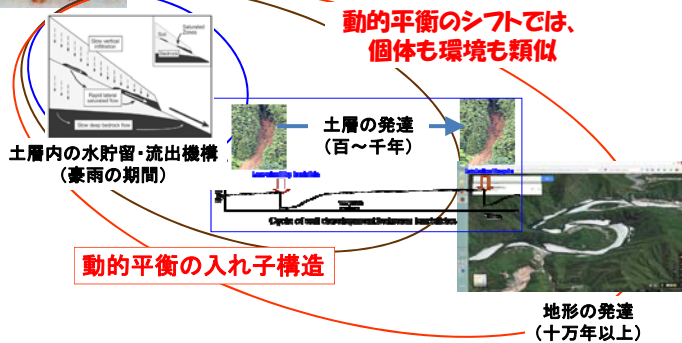
過去500万年間の深海底生有孔虫化石の酸素同位体比変動曲線



大鹿村中央構造線博物館ホームページによる  
<http://mtwebmuseub.web.fc2.com/t10021quaternary.htm>

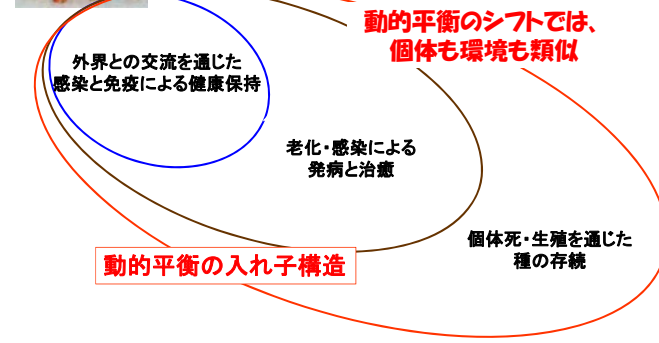
## 地球・生態系の相互作用による動的平衡の入れ子

生態系(集団としての生命)の地球活動との相互作用による動的平衡は、  
より長い時間スケールの地球活動の動的平衡(大きな入れ子)に呑み込まれる



## 生物個体の相互作用による動的平衡の入れ子

個体は、微生物を始め外界との相互作用を経て、  
ホメオスタシスによる動的平衡を維持できず、死に至る



## 地球・生態系相互作用と個体生命との相違

生物個体生命の場合、ホメオスタシスが基盤で、その上に、  
 医薬学で説明される因果関係を基にした治療技術が位置づけられる  
 この治療技術には、ホメオスタシス破綻(個体死)による限界が明瞭に存在

地球・生態系相互作用の場合、恒常性維持作用が基盤で、その上に  
 さまざまな環境・防災対策が位置づけられる  
 しかし、動的平衡の入れ子構造が「死」のような明確な区切りを含まないので、  
 環境・防災対策の限界性が見えにくく、生物恒常性維持の優位性も見過ごされる

動的構造の入れ子構造の基盤の上に対策が可能になることは同じなのに、  
 地球・生態系相互作用とは独立に、環境・防災対策が可能であるような  
 見解(誤解?)が存在する

地球変動に含まれる降雨の極端事象と山地災害の関係を例に考えよう

## 極端現象による災害の工学的対策の不可能性

ある時点で極端現象に対する対策をする場合、人間欲求を満たすためには、  
 現在より高い**設計外力**(降雨規模)を仮定し対策を計画することになる  
 しかし、起こりえる最大規模は不明だし、予算がとて不足する

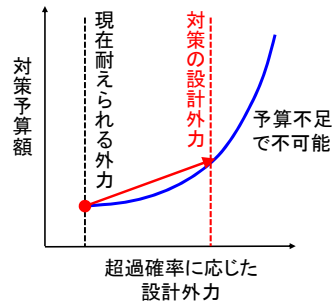
そこで、どの規模を設計外力にするかを工学専門家が検討する

**設計外力をどのように決定しても、自然科学的には、  
 根拠不十分にならざるを得ない**

なぜなら、自然科学は、設計外力に  
 対して起こること(降雨に対する流量など)  
 の因果関係を与えると同時に、  
 いつ、どの程度の規模の極端現象  
 が発生するかを知ることは不可能だ  
 ということも教えているから

生命保険では保険料を決めるのは、  
 専門家(医者)ではなく、本人の判断

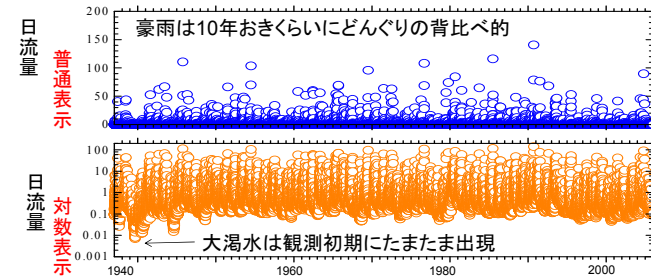
同様に、決定権は、工学専門家ではなく、  
 利害関係者になければならない



## 動的平衡における極端事象

例として、山地溪流の日流量を70年分(約2万5千日)並べると動的平衡を示す  
 小さいものは、極端に少ない年(1939)が70年間に、ただ1回だけ起こっている  
 大きい方は、10年おきくらいにあるようだが、さらに極端なもの起こりえるだろう

**災害につながる極端現象は、いつどの規模で発生するかわからない  
 また、より長期の動的平衡現象(崩壊と土壌発達の繰り返し)への  
 「呑み込まれ」が起こりつつあることを示唆している**



森林総合研究所森林理水試験地データベース(竜ノ口山北谷)による

## 生態系相互作用による動的平衡の共有必要性

生態系の恒常性維持作用に基づく非生物地球変動(気候・地殻変動)  
 との相互作用によって成り立つ動的平衡が維持される範囲で、生物  
 資源を利用することが、動的平衡の破綻防止・延命の根幹

それ以外の対策方針(山地災害の場合、裸地の緑化や砂防ダム設置  
 等)は、枝葉的・従属的に決めることとなる

設計外力をこうした順序とは独立に  
 決めようとするれば、  
 防災設備があっても人の住まない  
**強靭な過疎地を産みかねない**

工学的技術に偏らない  
 バックグラウンドとなる  
**自然科学知見の共有が重要**



## 予測のドグマを社会にフィードバック

追加スライド

複雑な地球システムを、地球を網羅する観測とその膨大なデータを使ったモデル計算で、将来変動を予測する研究がさかんである

しかし、時間的変化過程なので予測は将来に実証するしかない

モデルという人工物は、生態系との相互作用、その人間利用のインパクト評価の表現において限界があり、計算した予測は、人工物を基準にした想像を超えない

環境科学は「予測のドグマ」  
に陥っているのではないか

予測は、生態系相互作用を人間利用改善  
などの社会計画にフィードバックされ、  
将来検証を含む枠組み(右図)があって、  
はじめて意味がある



## 環境変化の時間を身近に引き寄せる：自然科学と社会の融合化

## おわりに

未来の地球が人間活動によって地質年代的に変わるAnthropoceneが、国際的に言われ、環境問題が深刻化している(日本学術会議会長の2013年頭挨拶<http://www.scj.go.jp/ja/head/pdf/130100.pdf>参照)

しかし、人間が生物に「食」その他生活全般を依存していること、さらに存立基盤を地球との相互作用による動的平衡に依存していることこれは、自然科学的事実であるにもかかわらず、より上を欲する人間にとって聞こえの良い工学的技術に比べて軽視・無視されてきた

自然科学の活動からは、理学的発見と工学的利用が生産されてきたが、理学的発見は、「工学的技術で創る輝かしい未来」の裏にある、人間の力で対処不可能なこと(時間的な変化・発達・進化は実験で再現できないので、その典型)を示してきたはずである

理学はこの点で社会延命に貢献できるが、古典的な真理探究に徹する傾向こそが、環境を心配する若者の理系ばなれのむしろ原因ではないか

今後の社会には、対処不可能なことの理学的認識を社会で共有することが基盤として重要ではないだろうか

## 今後の社会に対する考察 まとめ

個人の健康と異なり、社会における環境問題へのかかわりは難しい

人間は、動物と異なり、医者にゆくのは、个体死と延命に意識的

それは、自然科学としての医学と臨床技術への信頼があるから

まず、環境問題も、个体健康も、より長い時間スケールの動的平衡に呑み込まれる点では、自然科学的同質

この「呑み込まれ」を意識することは、動的平衡の延命の具体策において重要になる

無機的地球変動と生態系との恒常性維持作用に基づく相互作用が動的平衡を保つことを根幹とする、自然科学認識の確立が必要

環境の維持と現前の欲求が分別されないことをめざすべき

## ありがとうございました

詳細は、谷誠ホームページをご覧ください  
<https://sites.google.com/site/guchenghomuzejitanimakoto/>

森林の洪水緩和機能に関しては、「森林科学66, 2012, 67, 2013」  
長期森林変化の流出影響に関しては、「水文・水資源学会誌25, 2012」  
山地災害対策の歴史に関しては、「水利科学322, 2011」

がいつでもダウンロードできます

分担執筆した本発表関連書物を記します

蔵治光一郎・保屋野初子編「緑のダム科学 — 減災・森林・水循環 —」所収, 築地書館, 2014.  
及川武久・山本晋編「陸域生態系の炭素動態 — 地球環境へのシステムアプローチ —」所収, 京大出版, 215-229, 2013.  
柳澤雅之・河野泰之・甲山治・神崎護編「地球圏・生命圏の潜在力 — 熱帯地域社会の生存基盤 —」所収, 京大出版, 69-105, 2012.  
太田誠一編「森林の再発見」所収, 京大出版, 133-183, 2007.