

A lush green forest with a stream flowing through it. The scene is filled with various types of trees and dense foliage, creating a vibrant and natural setting. The stream is visible in the lower center, surrounded by rocks and more greenery.

# 森林と水

## 樹木の長生きの性質から考える

谷 誠  
元 京都大学

このスライドは、2022年4月24日、熊本市で行われた  
第4回アジア・太平洋水サミットにおける林野庁主催のサイドイベント  
「水インフラに寄与する森林の役割について」  
での講演を基にして修正を加えたものです

# 森林が災害を減らし、環境を守る機能は 多くの方々に期待されてきた



マレーシアPasoh森林保護区に環境省地球環境研究総合推進費によって設置された観測タワーで、現在も京都大学森林水文学研究室とマレーシア森林研究所 (FRIM) によって熱帯雨林からの蒸発散量と二酸化炭素の交換量が観測されている

しかし、多くの観測研究結果が得られているのに、  
機能の**普遍性**に関しては  
十分に評価できるに至っていない

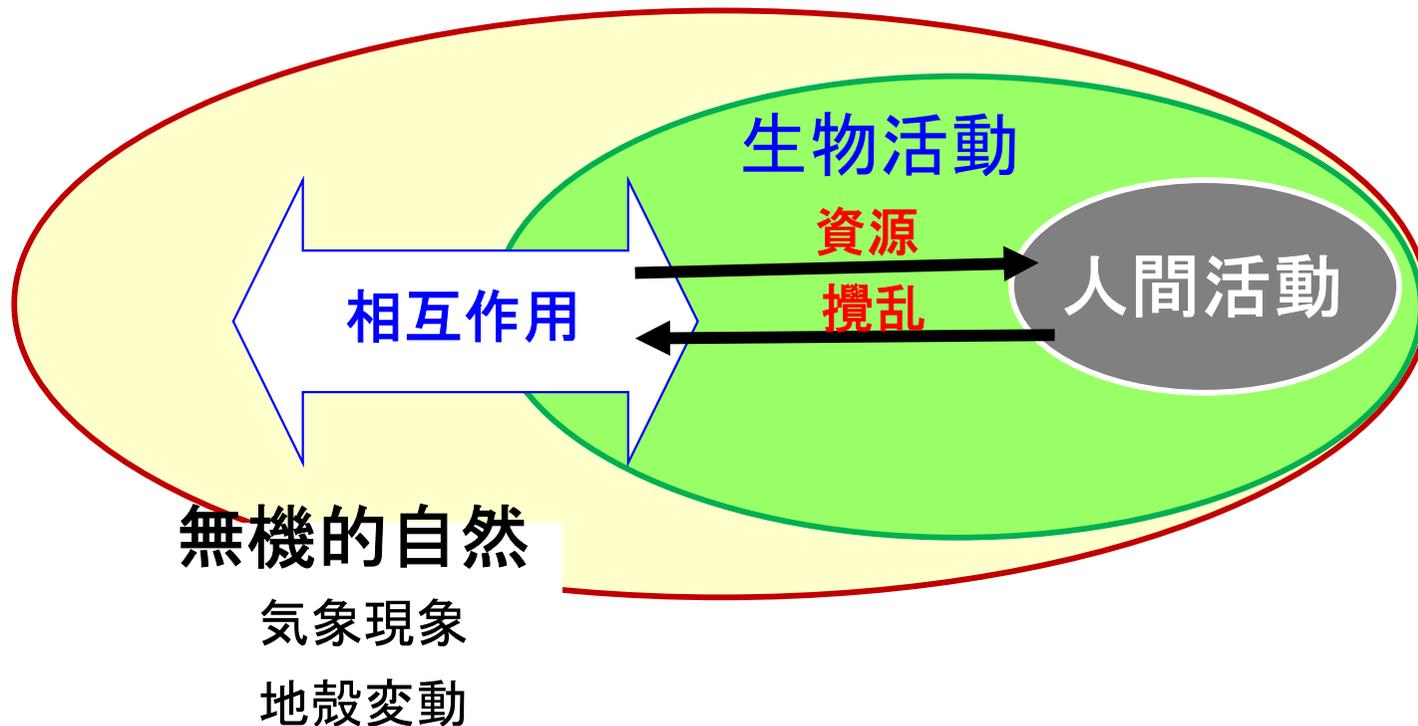


<https://corp.pasco.co.jp/disaster/.assets/B058.jpg> 佐賀県大町町六角川2021年8月15日

<https://corp.pasco.co.jp/disaster/.assets/212032-200708-01.jpg> 岐阜県高山市一之宮町2020年7月12日

## はじめに 3

人間活動は無機的自然と生物活動の間で  
交わされる**相互作用**によって支えられている



水と森林に関わる**普遍性**は  
この**相互作用**の観点から再評価可能

他の植物に比べて樹木の長生きの性質は、  
森林の水文学的機能において  
特に重要な役割を果たしている



発表内容

樹木の長生きの観点から2点考えてゆきたい

森林と水資源

森林と災害





# 森林と水資源

# 森林蒸発散は乾燥期間も大きい

樹木は**水ストレスに抗して**光合成・蒸発散を続ける

その乾燥期間における**恒常性の強さ**が観測によってわかってきた

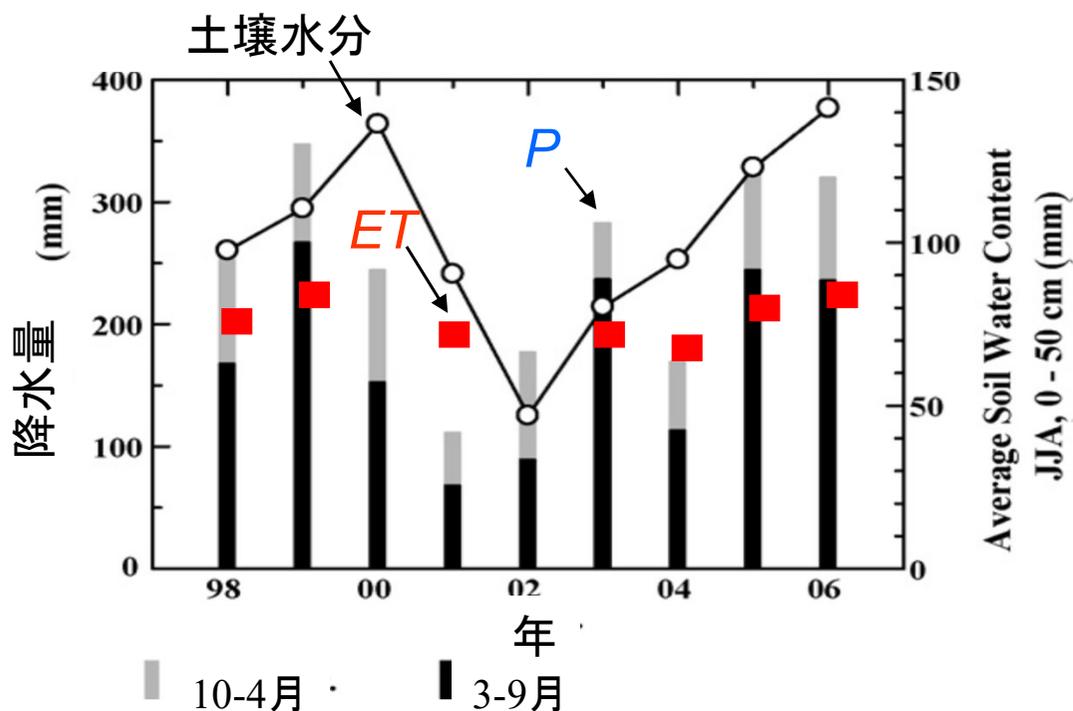
熱帯林でも (Tanaka et al., 2003; Kosugi et al., 2012)

温帯林でも (谷・細田、2012)

北方林でも (Ohta et al., 2008).

シベリア永久凍土地帯の北方林でのタワー観測から、

**乾燥年でも蒸発散量(ET)が減少せずに一定を保つことがわかった**(Ohta et al., 2008)



前年の雨水が冬季に凍結することで乾燥年のカラマツの光合成・蒸散が維持される



# 森林は乾燥期間の河川流量を減らす

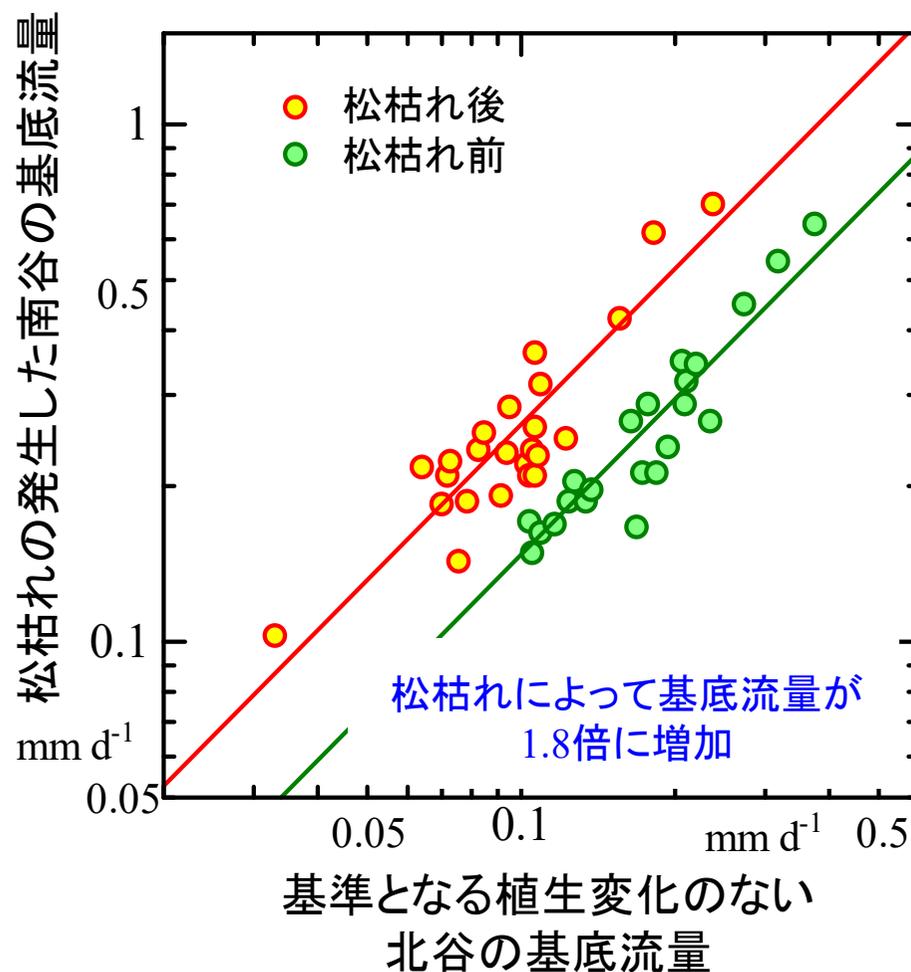
森林の蒸発散量が大きいので  
伐採することで流量が増加する

岡山での例を挙げる

森林総研の竜ノ口山森林理水試験地  
での対照流域法による解析により、  
南谷流域の70%の松枯れの結果、  
無降雨期間の流量が1.8倍に増加した  
(阿部・谷, 1985)

こうした森林消失による流量増加は、  
世界中で見出されてきた  
(Bosch and Hewlett, 1982)

蒸発散と流量とはトレードオフ関係となるため、  
水資源確保がまさに重要な乾燥期間に、  
森林流域では大きな割合で流量が減少する



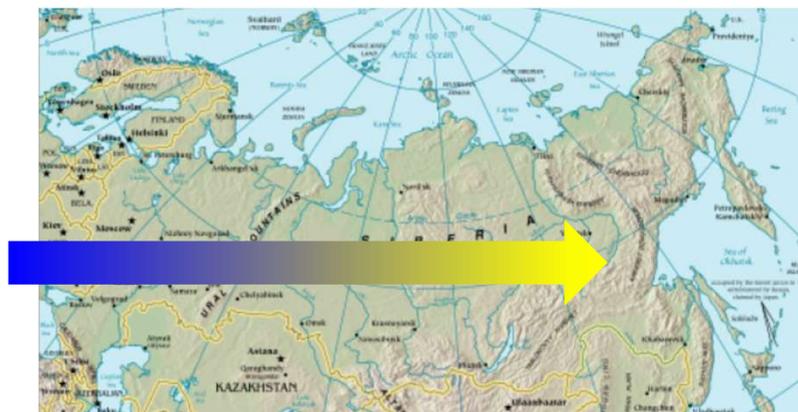
After Abe and Tani,  
J. Forestry, 1985

# 森林は内陸の雨を増やす

降水(雨と雪)はすべて海洋で蒸発した水蒸気が起源

ユーラシア大陸北方では、大西洋で蒸発した水蒸気が偏西風で運ばれてくる

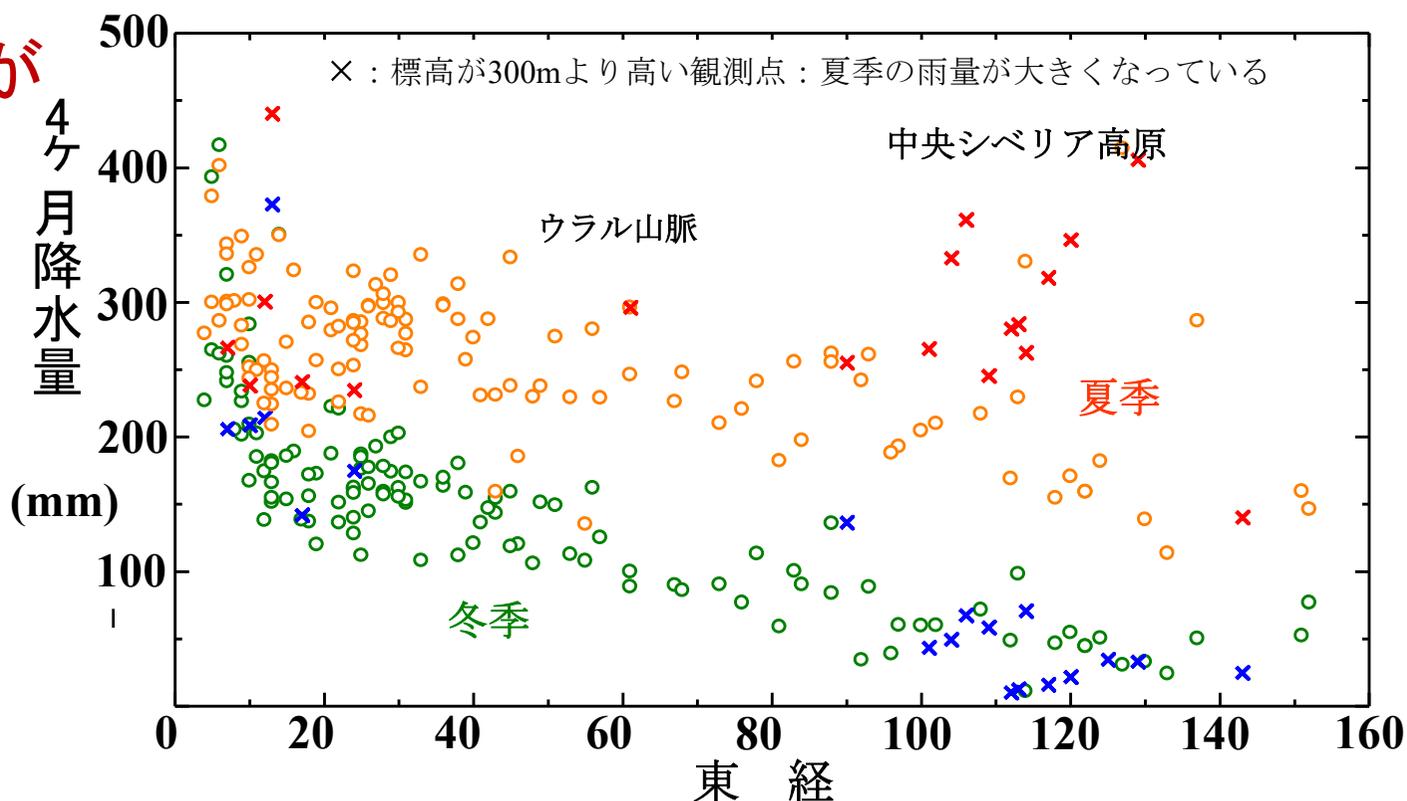
その移動過程で水蒸気は降水として消費され  
欧州から極東へと降水量が減ってゆく



冬季はそのとおりだが  
夏季は、減少の程度が  
ずっとゆるやか

**森林からの大量の蒸発散**  
が風下側の湿潤気候を  
支えている

広大なカラマツ林は  
そのおかげで生育可能



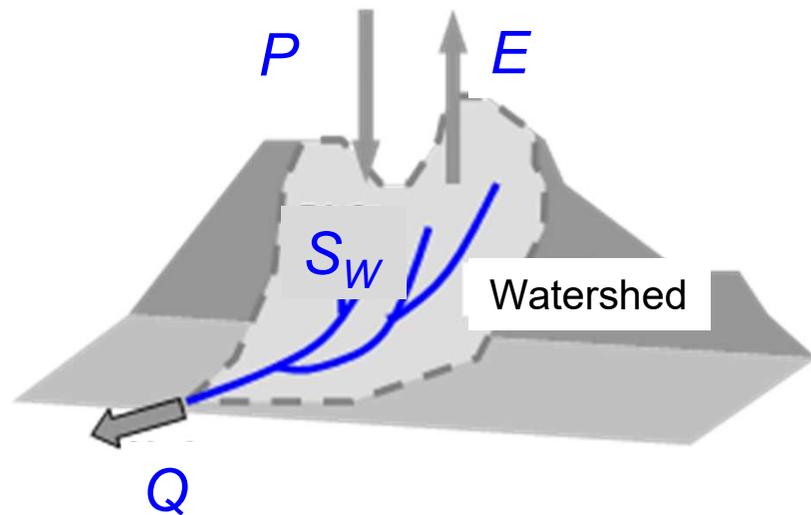
# 水収支によって整理する

## 流域水収支式を通じた 森林影響

$$\frac{dS_W}{dt} = P - E - Q$$

$S_W$ : 流域貯留、 $P$ : 降水量、  
 $E$ : 蒸発散、 $Q$ : 河川流量

蒸発散と流量のトレードオフによって  
河川流量を減少させる



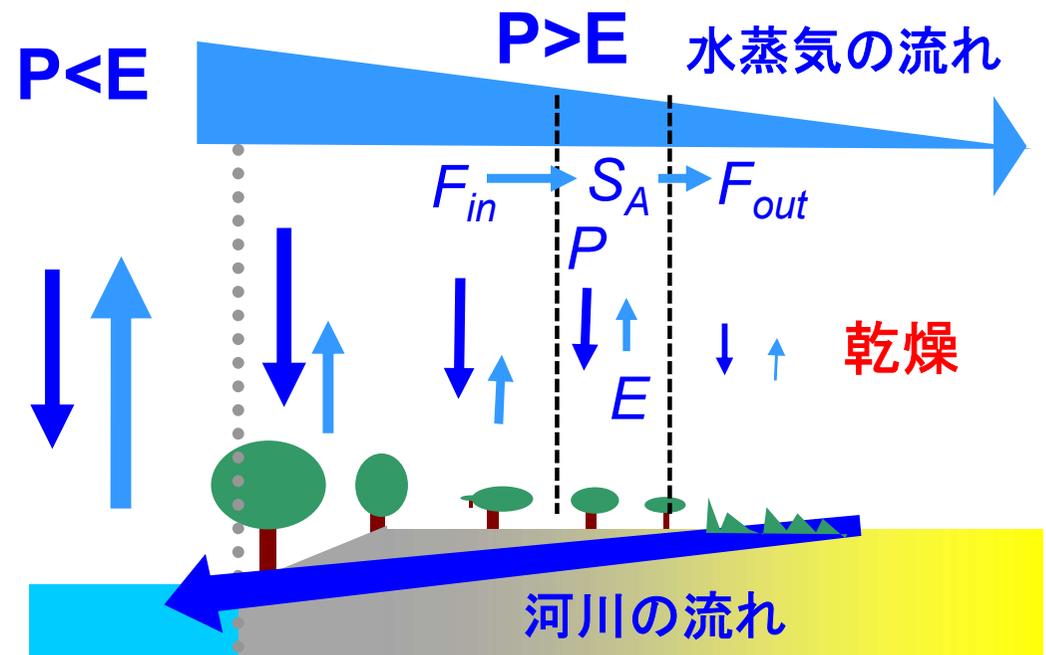
流域水収支

## 大気水収支式を通じた 森林影響

$$F_{out} = F_{in} - P + E - \frac{dS_A}{dt}$$

$S_A$ : 大気貯留(可降水量)、  
 $F_{in}$  and  $F_{out}$ : 流入、流出水量

水のリサイクルによって  
内陸の降水量を増加させる



大気水収支

# 森林と水資源 まとめ

森林の蒸発散は、一般に、乾燥期間でも大きく、減りにくい  
樹木が水とレスに抗して長く生き続ける普遍性がある

流域水収支における蒸発散と流量のトレードオフによって  
河川流量を減少させるから

**森林伐採が水資源を増加させる。**

大気水収支における水リサイクルによって  
内陸の降水量を増加させるから

**森林保全が水資源を増加させる。**

ダムは河川流量の絶対量を増加させるのではなく、  
河川流量を**なだらかに均す**人工構造物である

**島国での伐採をとまなう林業や里山利用**

**大陸での天然林を減少させない保全**

これらの地理的条件に見合った適切な森林管理は  
蒸発散を通じた水資源の絶対量確保のために  
不可欠で現実的な手法なのである

# 森林と災害

 PASCO  
Surveying the Earth to Create the Future

2018年7月10日（火） 撮影：株式会社ハスコ / 国際航業株式会社  
2018年7月 豪雨災害

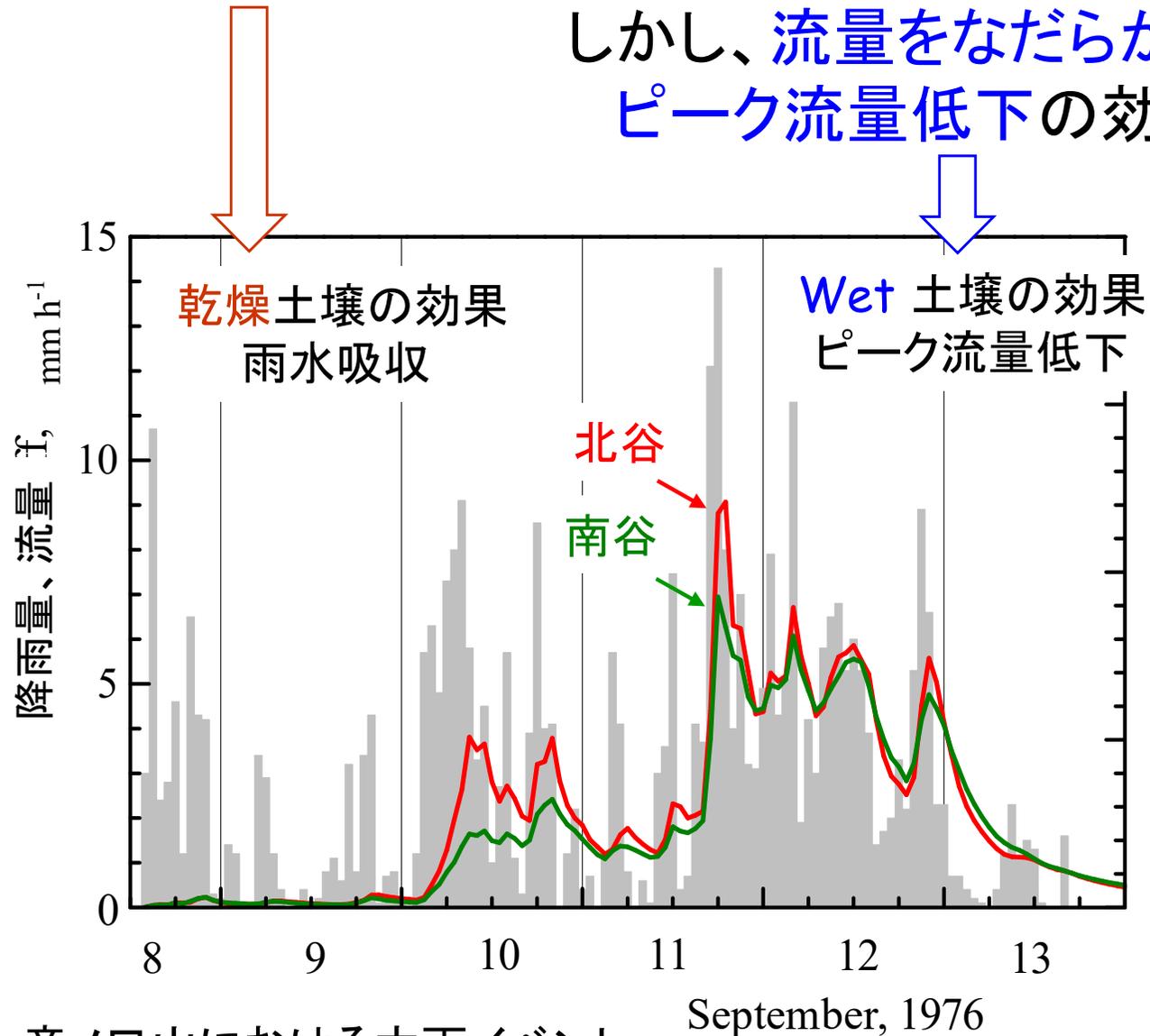
# 湿潤土壤によるピーク流量低下

竜ノ口山における規模の大きな降雨  
(総雨量 375 mm) への応答を示す

乾燥土壤は雨水を間隙に吸収する

この効果は土壤が湿潤になると劇的に減少する

しかし、流量をなだらかに均すことによる  
ピーク流量低下の効果は維持される



土壤層の厚い南谷の  
ピーク流量は北谷より低い

竜ノ口山における大雨イベント

(Modified from Tani, HESS, 2013)

# 水収支からみた貯留変動効果

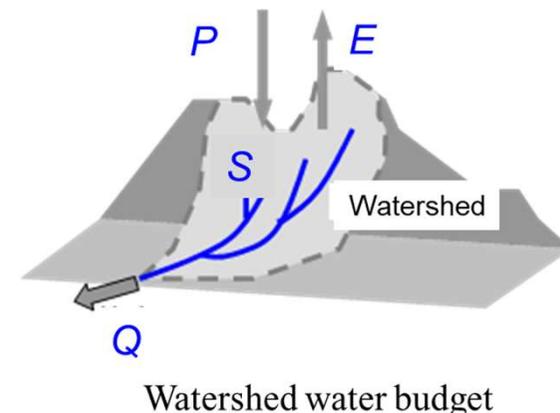
$$\frac{dS_W}{dt} = P - E - Q$$

## 流域水収支式

$S_W$ : 流域貯留、 $P$ : 降水量、  
 $E$ : 蒸発散、 $Q$ : 河川流量

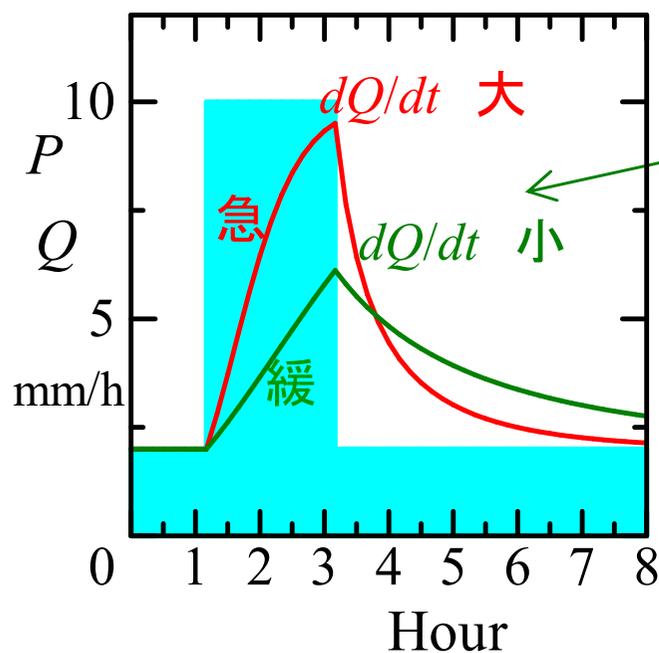
変形すると:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{P - E - Q}{dS_W/dQ}$$

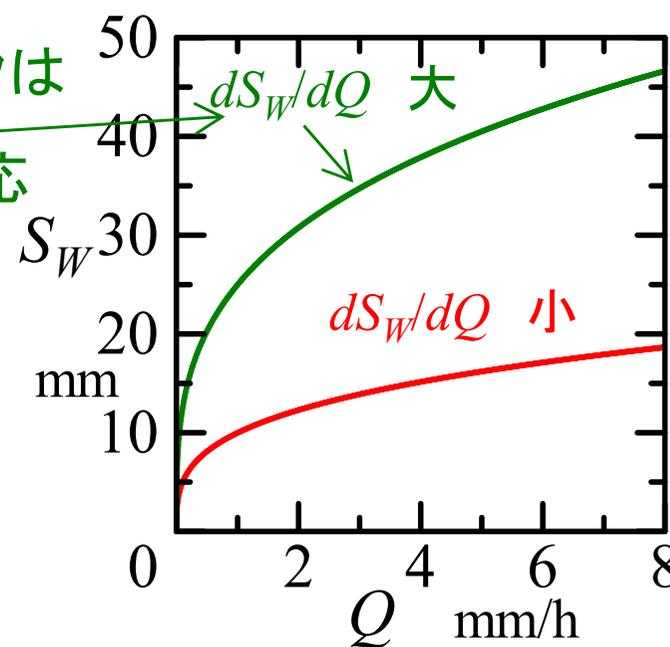


$dQ/dt$  は、**流量の増加・減少の速度**を表す

湿潤土壌は、総流量を減らすことはできないが、増減速度を遅くして  
**ピーク流量を低下させる貯留変動効果**をもっている



増減速度が遅く低いピークは  
 大きな  $dS_W/dQ$  の値に対応

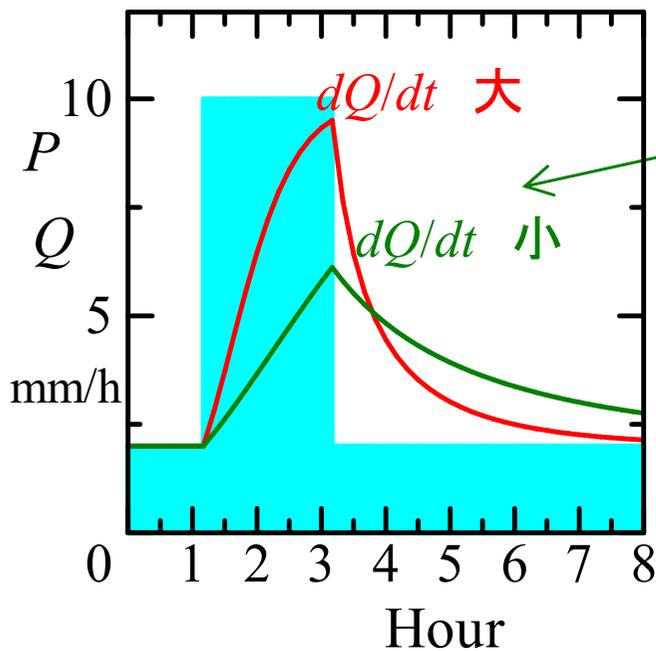
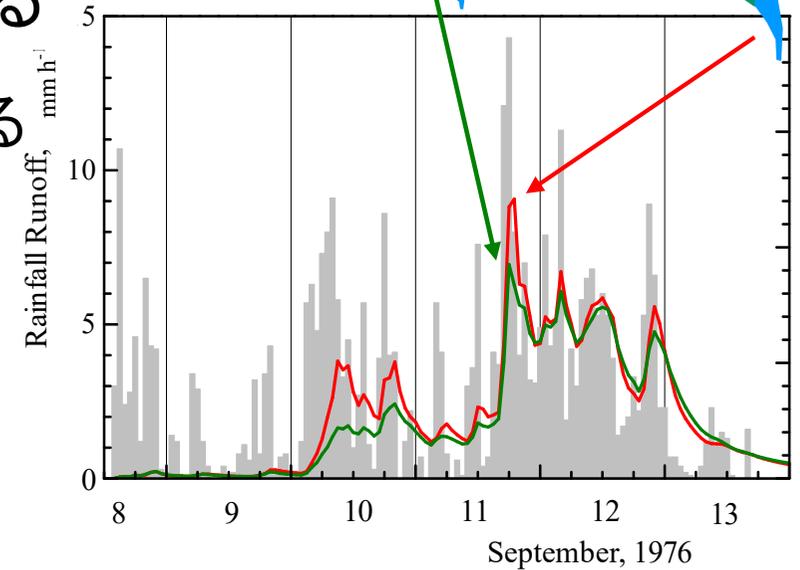
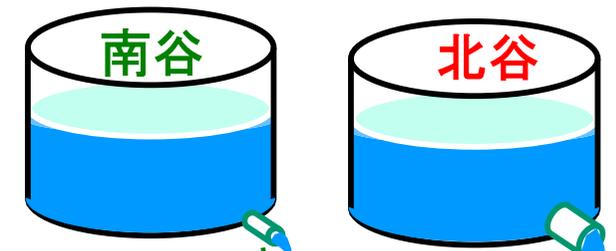


# 貯留変動効果と「ダム」

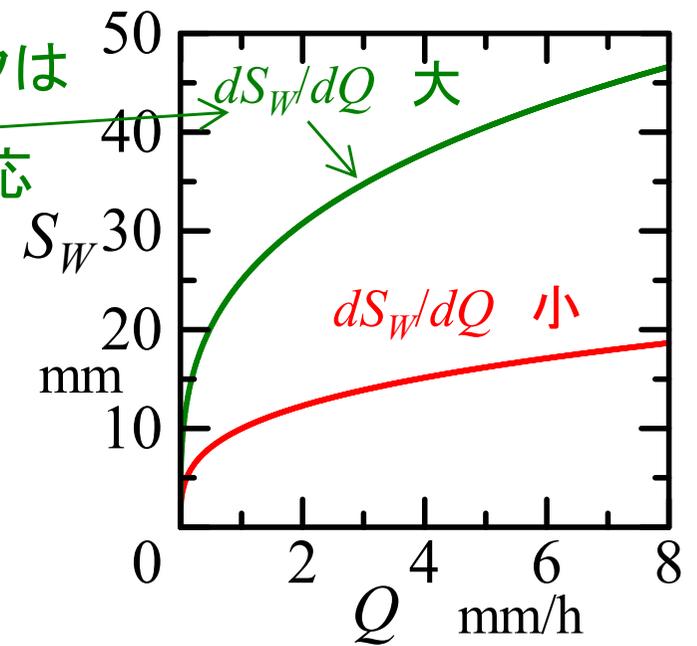
累加雨量が大きくなると、降雨と流量が同じ規模に  
 湿潤化した土壌でも貯留変動効果は残る

この効果は孔の開いたタンクによって表現できる  
 孔の小さいタンクからの流量は  
 なだらかで低いピークをもつ

## ダムも流量を平準化する 貯留変動効果に基づく



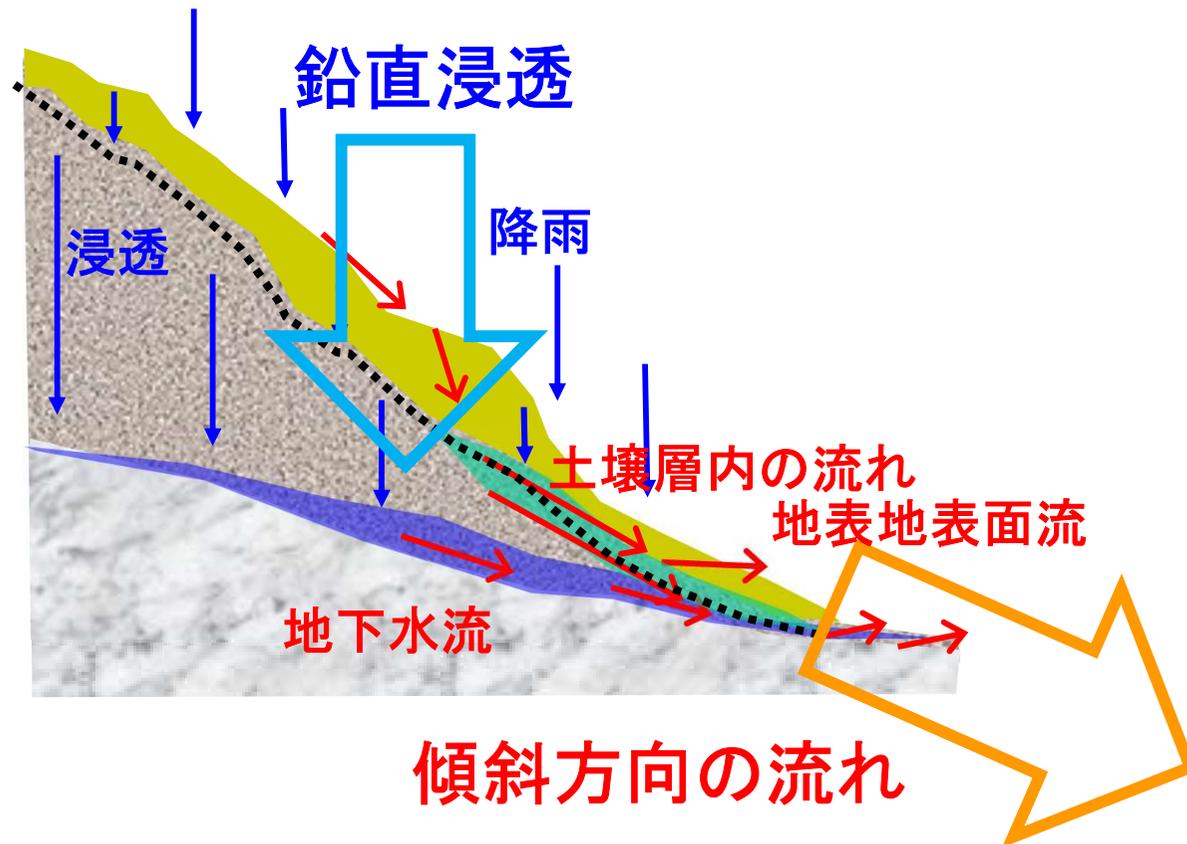
増減速度が遅く低いピークは  
 大きな  $dS_w/dQ$  の値に対応



Google earth

# 貯留変動効果は どのようなメカニズムで生じるのか

鉛直不飽和浸透がもたらす

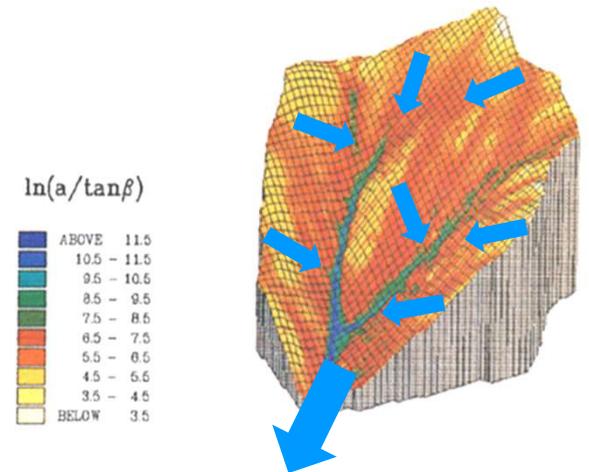
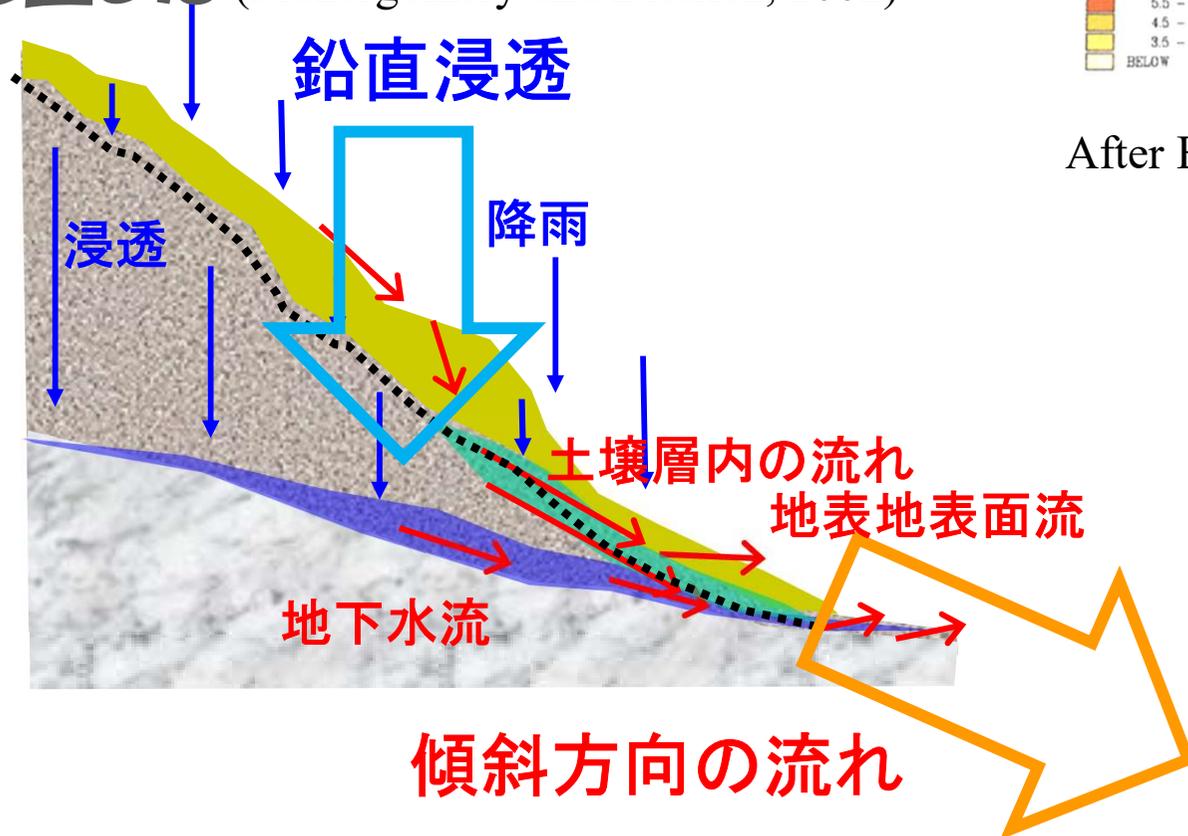


# 鉛直方向と傾斜方向の流れ

雨水はまず鉛直に浸透するが、やがて傾斜方向に向きを変える  
傾斜方向の流れの距離はずっと長い

したがって、傾斜方向の流れが降雨に対する  
流出応答を生み出すのだと考えられてきた

だが、観測研究のいくつかはこの考えに  
疑問を呈した (Montgomery and Dietrich, 2002)



After Beven et al., *HESS*, 2020

# 斜面における鉛直伝播過程

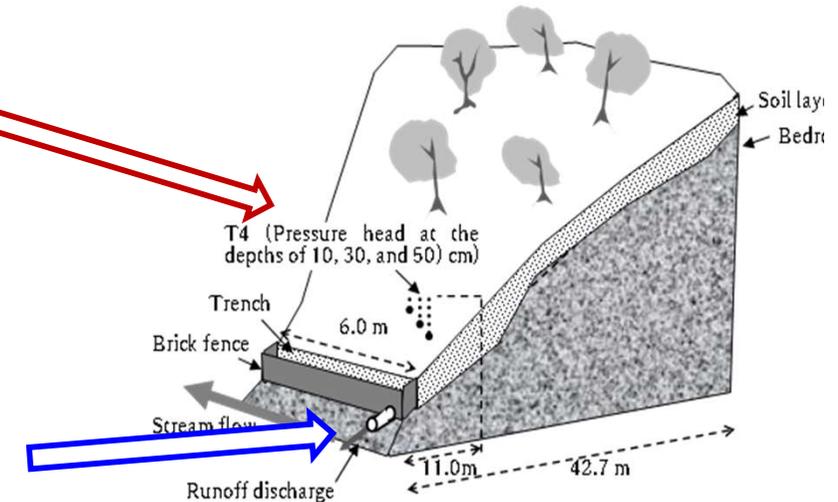
竜の口山の斜面(SL)での観測結果を調べてみよう (Tani et al., 2020)

圧力水頭の鉛直方向への伝播は速やか

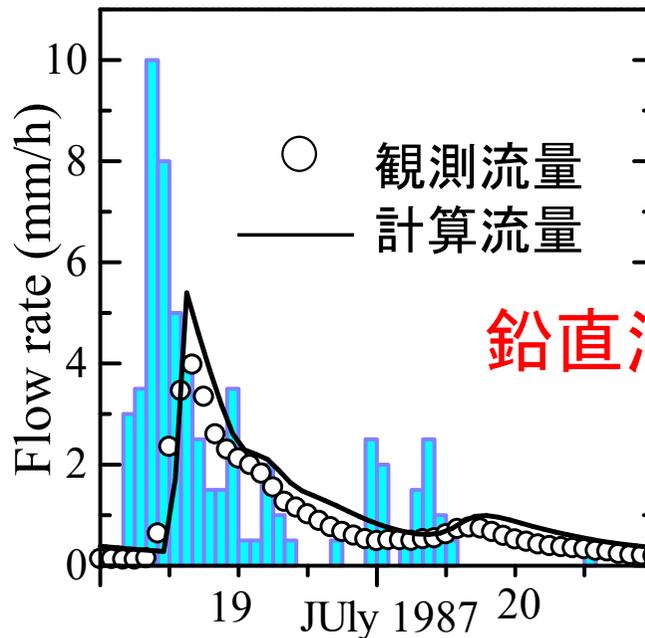
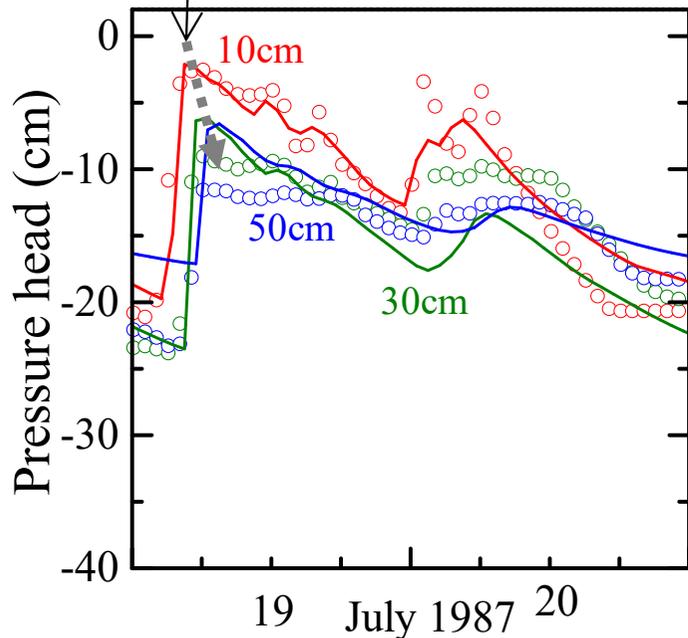
下記のリチャーズ式によって計算された  
70cmの土壌層からの流れは

$$C \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} - 1 \right) \right\}$$

観測された流量をよく再現している



竜の口山のSL

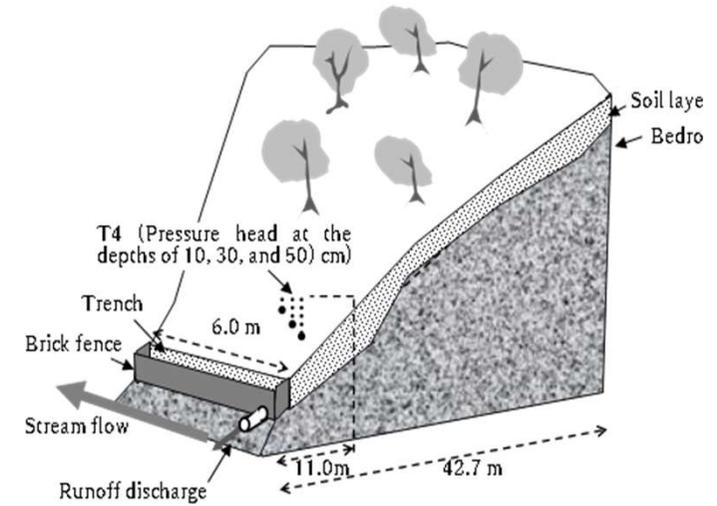


鉛直浸透が洪水流出応答を  
生み出している

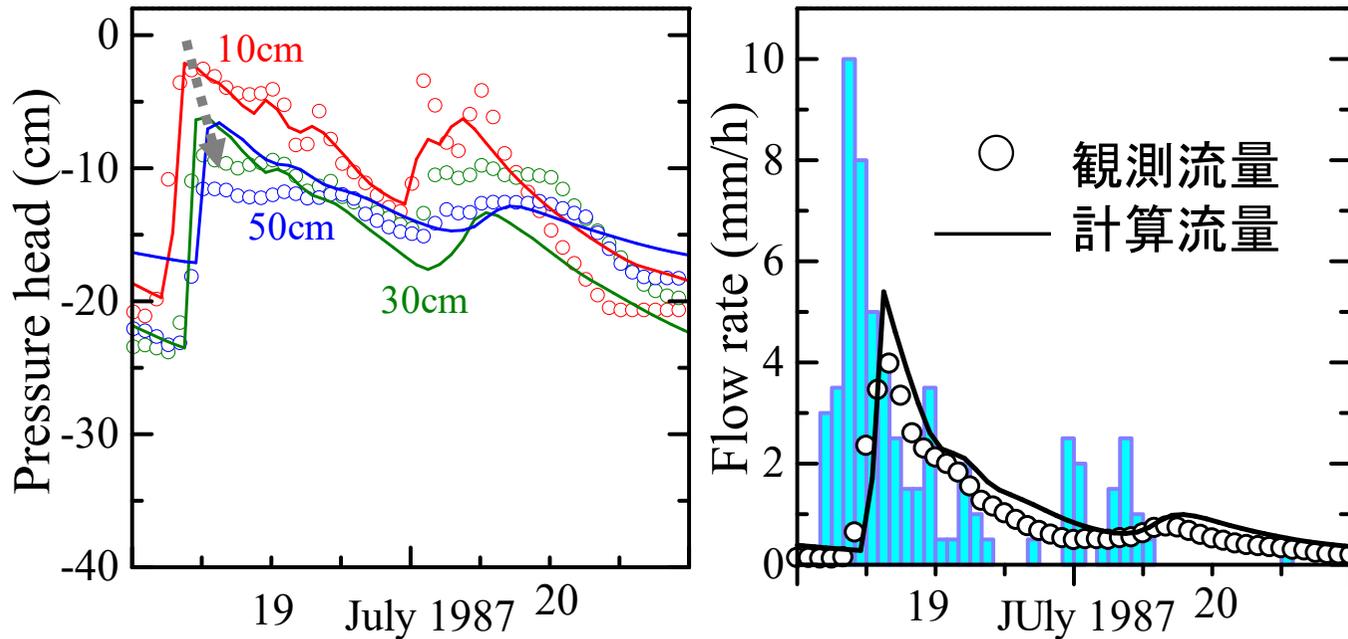
# 森林土壌はピーク流量を低くする

サイズの大きな間隙に富む森林土壌は  
粘土質土壌に比べて、高い貯留変動効果をもつ

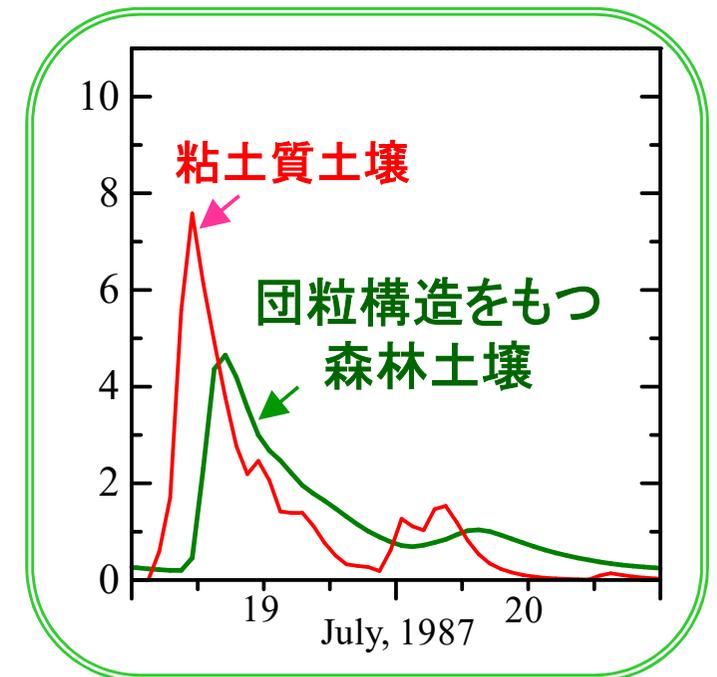
ただし、傾斜方向流の効果小さい  
その理由はよくわからない



SL in Tatsunokuchi-yama



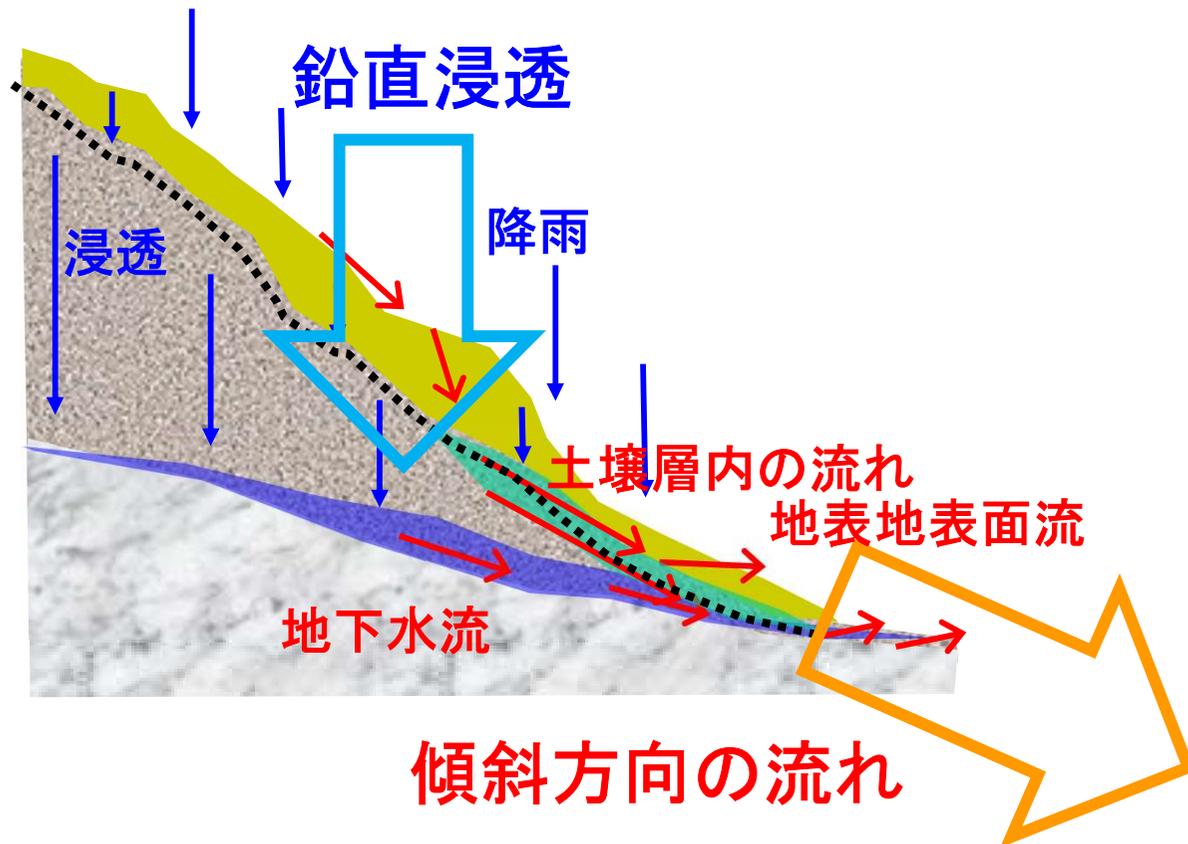
After Tani et al., J. Hydrol., 2020



(After Tani et al., J. Hydrol.2020)

# 傾斜方向の流れの役割は なぜ小さいのか

速やかな排水がキーポイント



# 飽和地表面流コンセプト

Freeze (1972) は、シミュレーションにより、**土壤層内の傾斜方向流はあまりにも遅いので、降雨洪水流出応答を生み出せない**と主張した

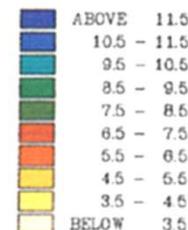
そこで、この**飽和地表面流コンセプト**はTOPMODELのような流出モデルの基礎となってきた

(Beven and Kirkby, 1979)

Saturation excess  
overland flow

Too slow

$\ln(a/\tan\beta)$



Topographic index in TOPMODEL  
After Beven et al., HESS, 2020

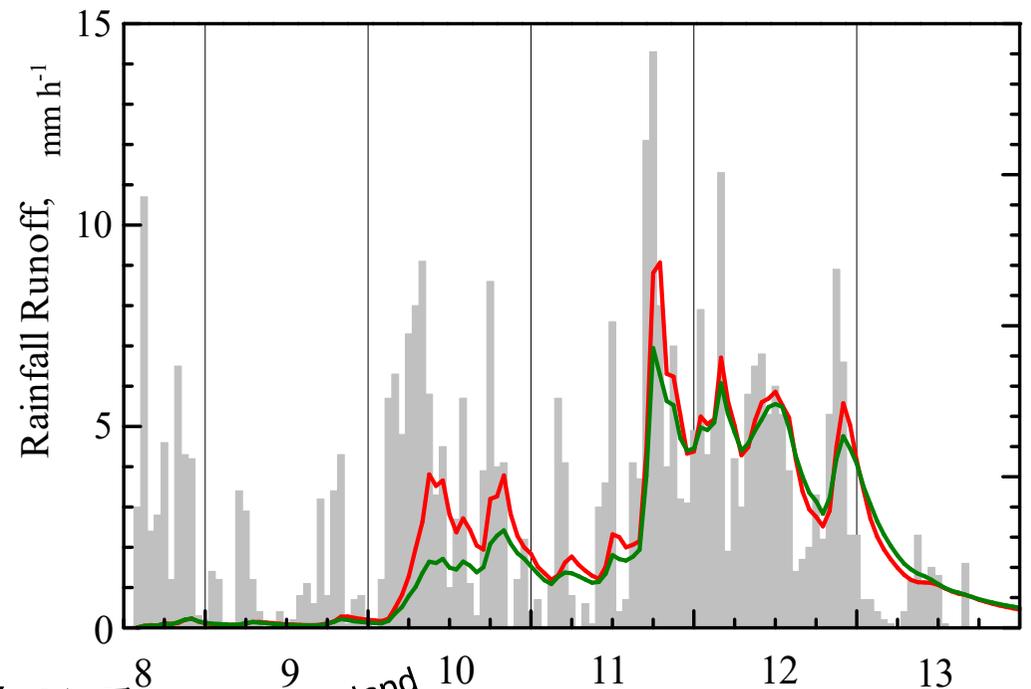
しかし、このコンセプトは、河川の流水の多くが、大雨でも**土壤に貯留されていた水で占められるとの観測結果と整合しなかった**

(Pearce et al., 1986; McDonnell, 1990)

# 崩壊発生指標

もし、飽和地表面流コンセプトが本当なら...

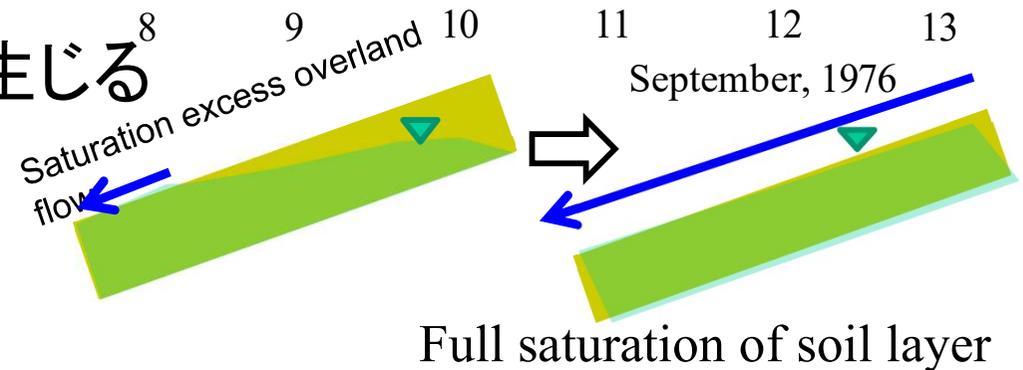
降雨と流量の規模が同じになるような大雨では、土壌層が完全に飽和していなければならない



## 崩壊発生に関して大きな問題が生じる

いかに樹木の根によって補強されていても、急斜面上で完全に飽和した土壌層は安定を保てない(崩壊する)

(Marui, 1981; Milledge et al., 2014)



**土壌層が数百年間安定を保つのか？**

# 排水構造の重要な役割

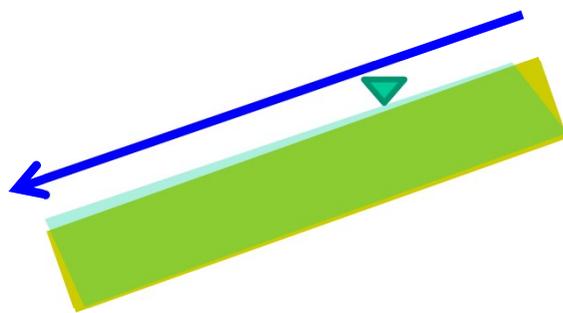
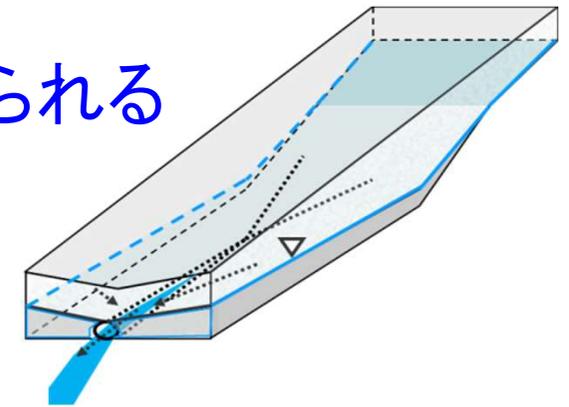
降雨と流量の規模が同じになるような大雨は、  
日本では毎年起こる



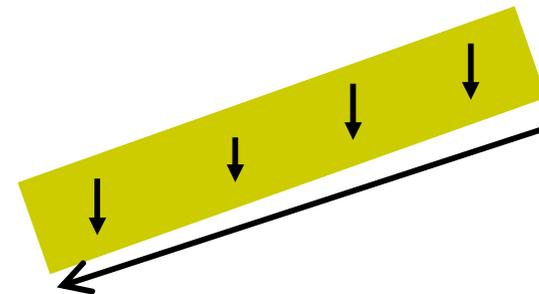
土壌層が**数百年間**安定を保つ理由は？

土壌内のパイプや基岩内の亀裂によって、  
地下水が速やかに排水され、浮力増加が抑えられる

結果的に、土壌層内に不飽和帯が維持され  
**累加雨量が大きくても  
鉛直不飽和浸透が続く**



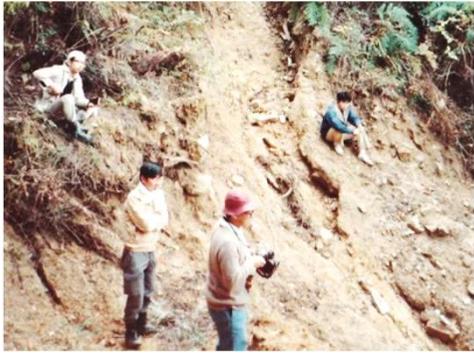
土壌層の完全飽和



速やかな排水による不飽和帯の維持

# 土壌・排水・森林の共進化仮説

花崗岩ゼロ次谷流域の崩壊直後(A)から38年後、**草本**が被覆(B)



A 1982年



B 2020年



C 2020年 吹き出し口跡

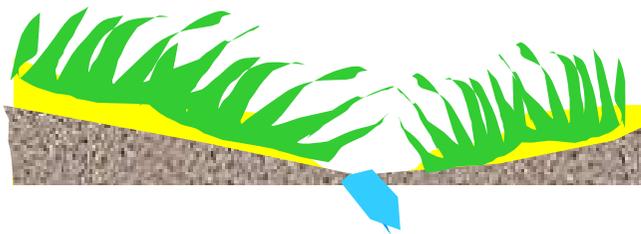


D 2020年 基岩裸出

鈴木雅一氏提供

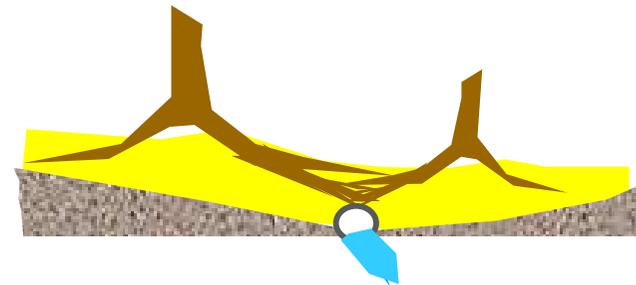
しかし、草本におおわれても、**パイプ吹き出し跡**(C)下側は**裸地**状態(D)

集水地形に沿って**侵食力が大きい**ので、草本では負ける  
**樹木根系**がつながってはじめて**土壌層が再生**



2020年の草本被覆

何十年かかる？



共進化仮説

**凹地に土壌層内の水みちでき、速やかな排水を担う**

# 森林と災害 まとめ

降雨と流量が同じ規模になる大雨でも、流量はなだらかに均され、  
ピークを低くする土壌層の貯留変動効果は発揮される

この効果は、傾斜方向への速やかな排水構造を必要とする

下記の仮説を提起した

急斜面上の土壌層の数百年以上にわたる安定は

土壌層と速やかな排水構造と樹木根系の共進化によるのではないか？

結果的に、地盤は長期間安定し

樹木は長生きが可能になり

貯留変動効果がもたらされる

災害を防ぐためには、土壌層を保全する森林管理が最も重要である

# 結論

森林は長生きの性質をもつ樹木を主とする生態系

長生きのためのレジリエンスの性質を普遍的に示す

乾燥に対して蒸発散を減らさない

河川流量を減らす、内陸降水量を増やす

侵食・崩壊に抗して根を張りめぐらす

地盤を安定させる、流量ピークを低下させる

人間への影響は、こうしたレジリエンスの二次的な効果に過ぎない

