2025/11/28 木材会館7階大ホール

多様な主体による森林づくり活動と
水源涵養機能に関するセミナー
～新たな定量化手法～

新たな定量化手法の学術的背景：蒸発散を中心に

篠原　慶規
宮崎大学農学部

水資源涵養量の定義

解説資料P35-36

水資源涵養量 ＝ 降水量－(直接流出量＋蒸発散量)

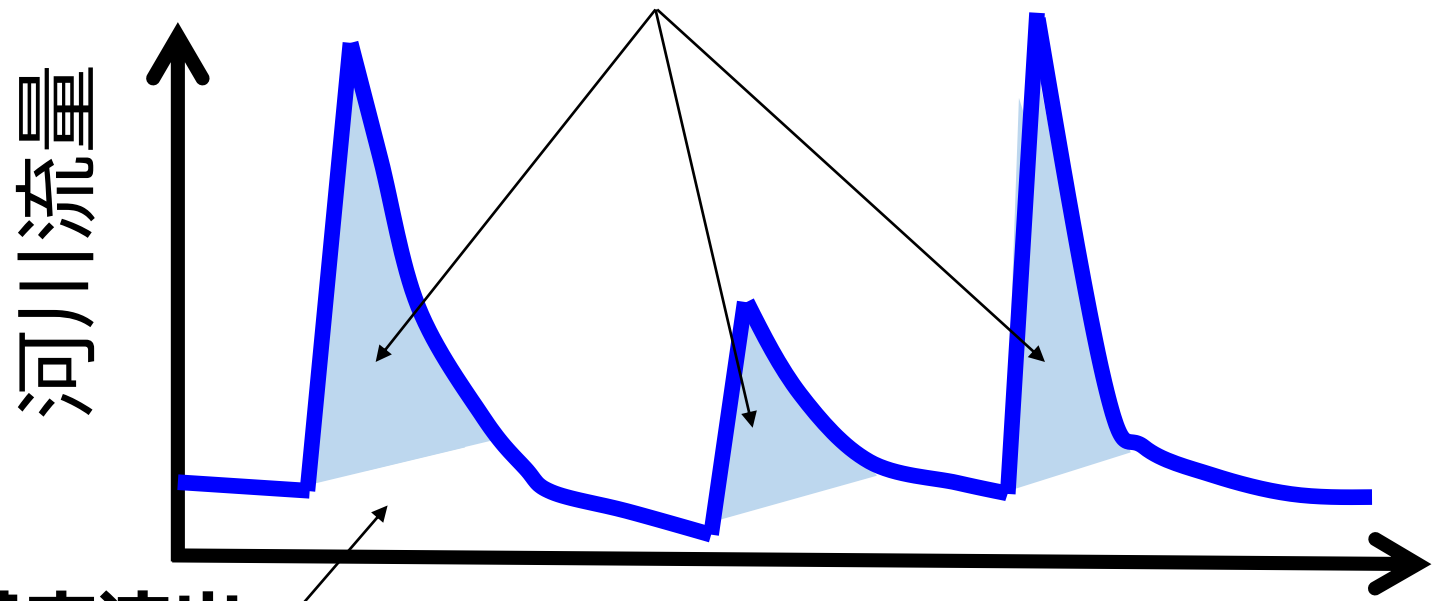
＝基底流出量

↓

利用**しやすい**水

↓ 利用**しにくい**水

↓ 利用**できない**水



水資源涵養量の算出方法

コンセプト：科学的に かつ 簡易に利用できるように

水資源涵養量 ＝ 降水量－(直接流出量＋蒸発散量)

カーブナンバー法　　**蒸発散モデル**

気象データ　月降水量　月平均気温

アメダス（気象庁）の
データを利用可能

地質

シームレス地質図
（産総研）から入手可能
解説資料P53-55参照

森林情報
樹種、密度、直径、樹高

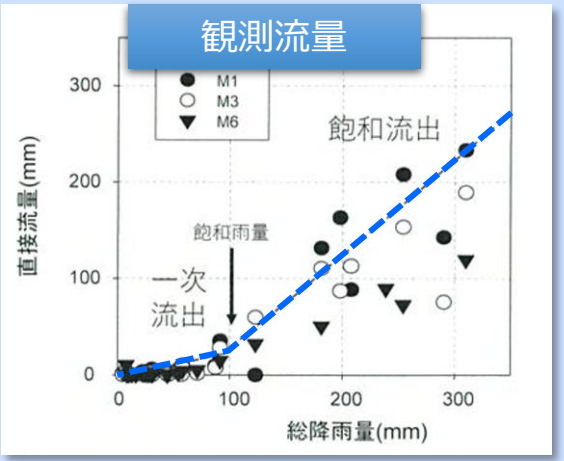
評価したい人が用意

管理計画・自ら計測・外注
解説資料P89-91参照

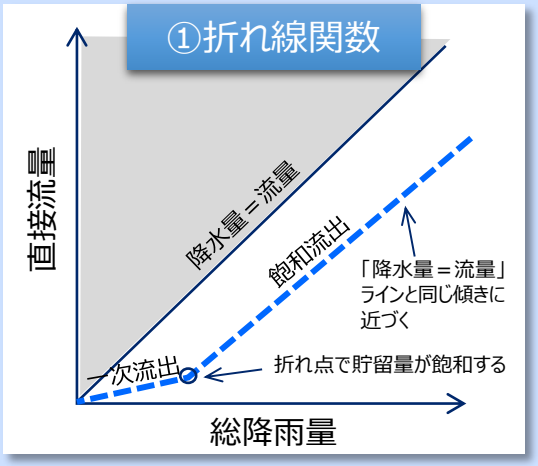
直接流出量の推定

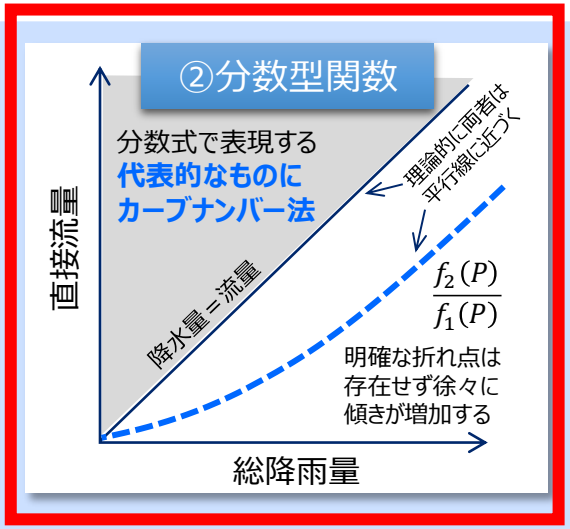
解説資料P46

カーブナンバー法：アメリカ農務省土壌保全局(USDA Soil Conservation Service)により開発・VWB(Volumetric Water Benefit)でも用いられている

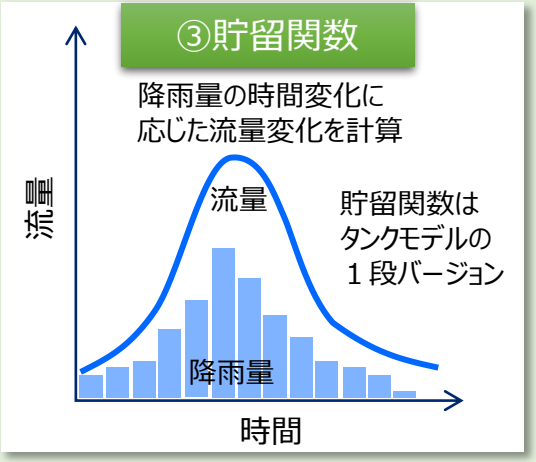


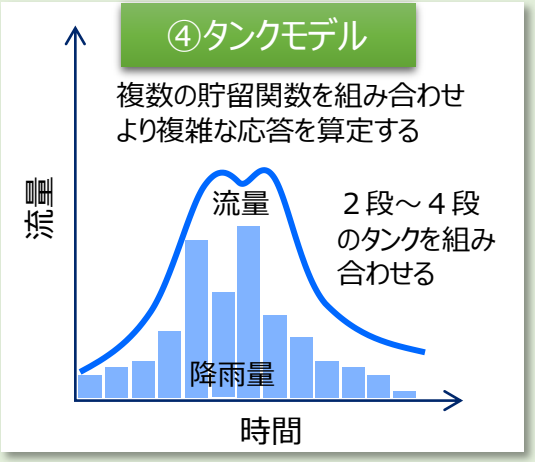
森林水文学入門（2022）p.148 より引用

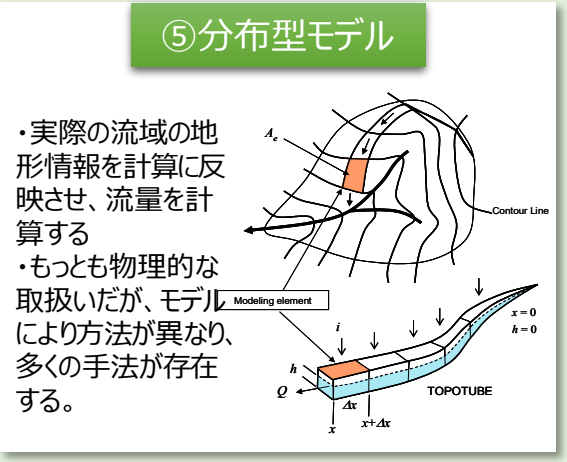




ピーク流量または総流出量を求める手法





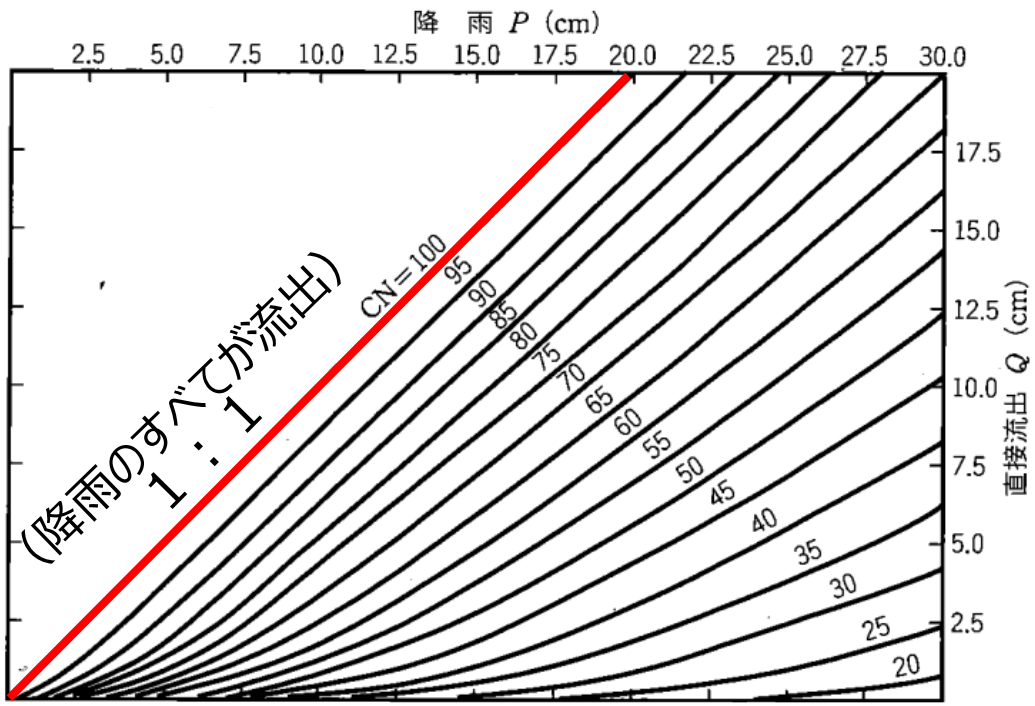


流量の時間変化を求める手法

カーブナンバー（CN）法

CNを決定できれば，**降水量**から**直接流出量**を推定可能

1 降水イベント



水村（1998）を改変

CN**大**：直接流出**大**
CN**小**：直接流出**小**

アメリカ農務省

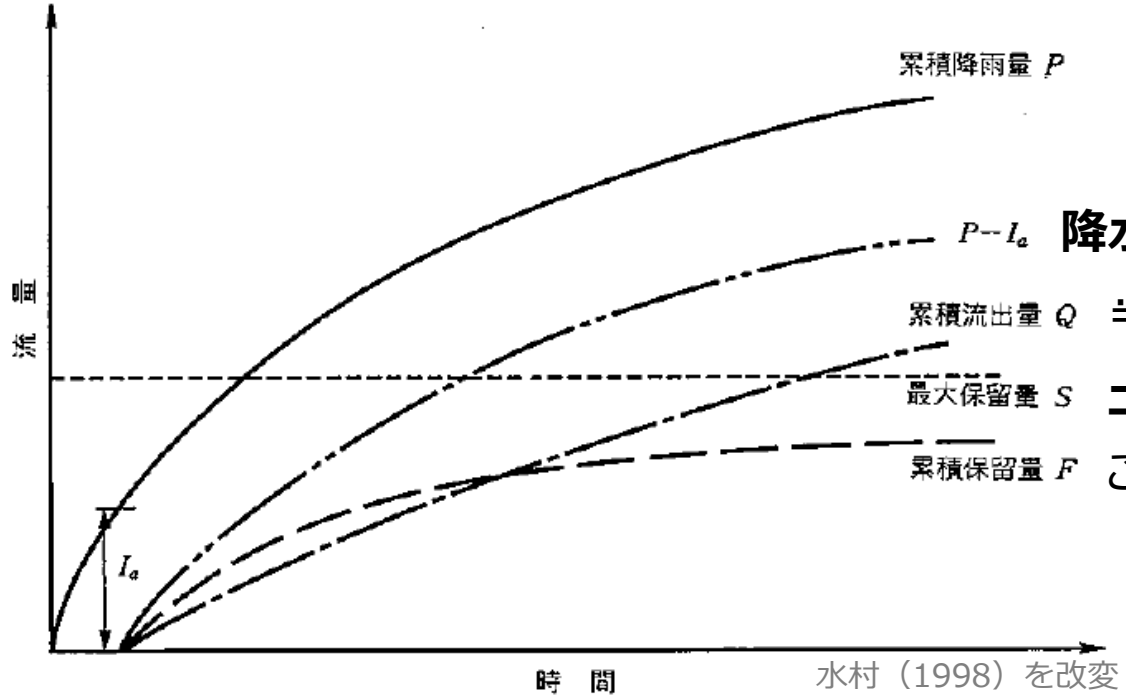
植生	林床被覆	カーブナンバー CN			
		A	B	C	D
裸　地		77	86	91	94
森林	一部	45	66	77	83
	概ね	36	60	73	79
	全体	30	55	70	77

A～Dは土壌分類

日本版CNを作る！

カーブナンバー（CN）法の概要

解説資料P47



水村（1998）を改変

流出には寄与しない

降水量－初期損失量

≒直接流出量

土壌に貯留できる水の最大量

この降雨イベントで**土壌に<u>貯留された</u>量**（浸透した）

連続の式

$$P = Q + F + I_a$$

仮定

$$\frac{Q}{P - I_a} = \frac{F}{S}$$

$$I_a = 0.2S$$

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S}$$

$$S = \frac{25400}{\mathrm{CN}} - 254$$

降水イベント単位で計算

Qは***P***と**CN**から決定可能

カーブナンバー（CN）を決定する手順

解説資料P49

手順１：国内の**19流域**で観測された**165年分**のデータ**（日降水量、流量）**を収集

流域面積：<100ha

本手法の適用範囲

森林総合研究所・理水試験地15流域のデータ

試験地名	地質	観測地点 降水量	観測地点 流量	集計期間
定山渓	石英斑岩（第三紀層）	気象露場	時雨1の沢 時雨2の沢	2008～2017
釜淵	凝灰岩・頁岩質凝灰岩（第三紀層）	基地露場	1号沢 2号沢 3号沢	2007～2016
竜ノ口山	主に古生層堆積岩、一部火成岩	露場	南谷 北谷	2006～2015
去川	頁岩優勢で砂岩、石灰岩、礫岩を含む（中生層）	気象観測露場	1号沢 2号沢 3号沢	1996～2005
小川ブナ保護林	主に変成岩（中生層）一部花崗岩	気象露場	小川	2001～2005
常陸太田	緑色片岩（中生層）	基地露場	HA HV	2006～2012
筑波	黒雲母片麻岩（中・古生層）一部花崗岩	A地点	流域末端	1979～1987
鹿北	結晶片岩（中生層）	雨量計	WS2	2000～2008

森林総合研究所の長期理水試験地

文献公開されている４流域のデータ

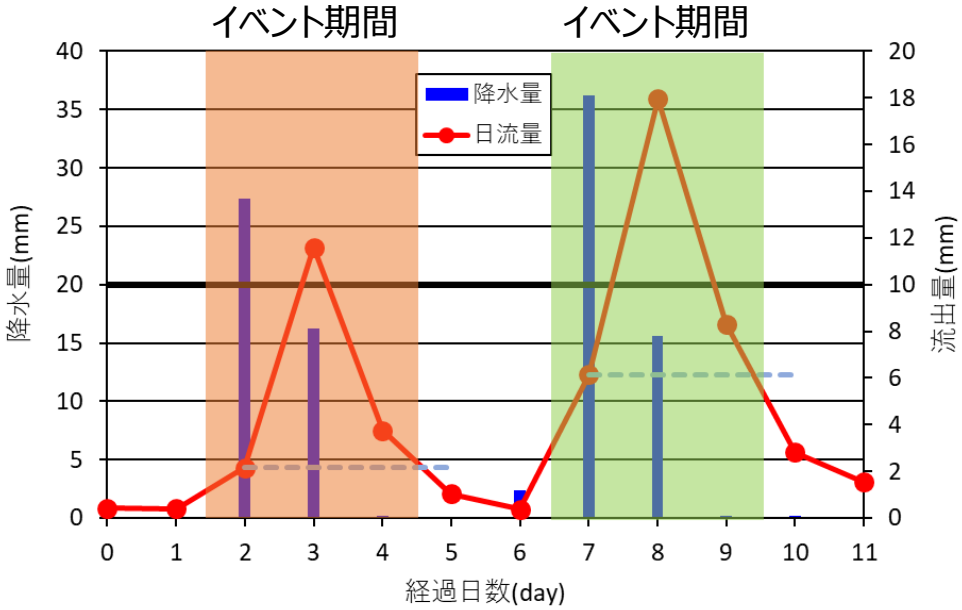
著者名	流域名	地質	観測地点 降水量	観測地点 流量	集計期間
篠原ら	御手洗水	緑色片岩、蛇紋岩（中生層）	東尾根	流域末端	2003～2007
東大演習林	穴の宮	花崗岩	気象観測露場	流域末端	2007～2016
	白坂	花崗岩	気象観測露場	白坂本谷	2012～2021
	丸山沢	凝灰岩（第四紀層）	東郷ダム	流域末端	2004～2007

網掛けの色の違いは地質の違い

カーブナンバー（CN）を決定する手順

解説資料P50-51

手順２：日データから直接流出発生が予想される**降水イベント**を抽出する



開始日：
日降水量20mm以上となった日

終了日：
開始日流量を下回った日の前日

イベント開始日～終了日までの
降水量および流量をそれぞれ積算

19流域･165年分：
3499イベント

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S}$$

$$S = \frac{25400}{\mathrm{CN}} - 254$$

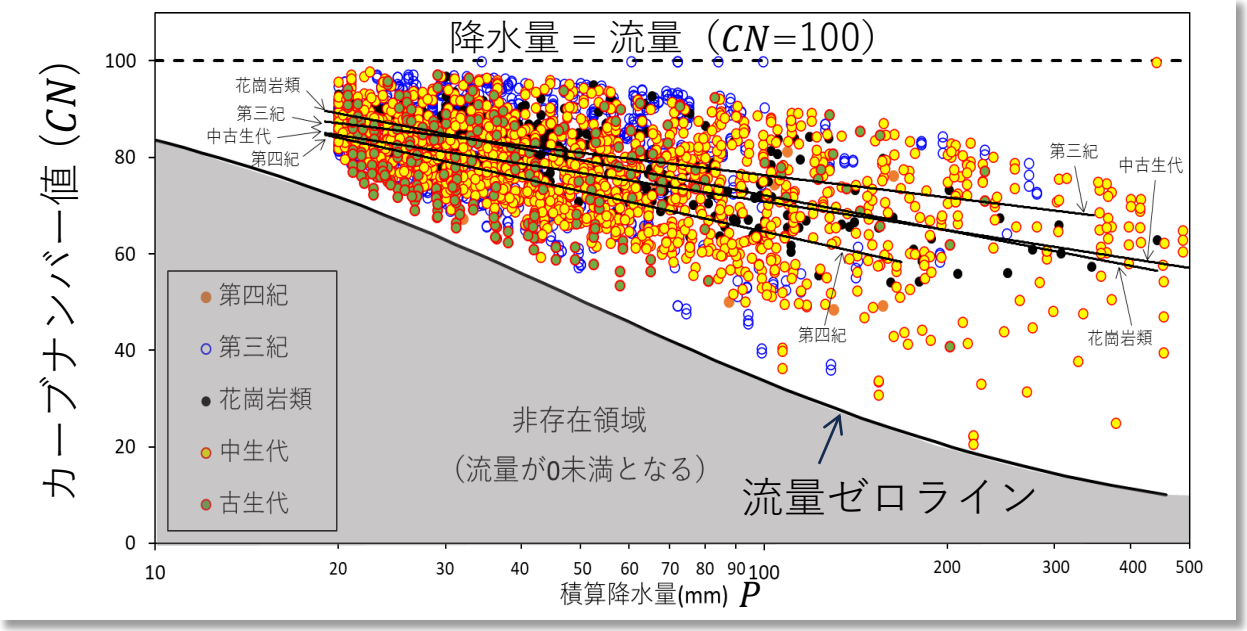
$$\mathrm{CN} = \frac{1000}{10 + 0.1969P + 0.3937Q - 0.3937\sqrt{Q^2 + 1.25PQ}}$$

適用条件：
$S > 0$ かつ $S \geq P - Q$

3166イベント

地質毎のCNの決定

解説資料P52



3166イベント

中古生代：1765
第三紀：889
第四紀：42
花崗岩類：470

対数式によるCN 回帰式

中古生代	$CN = -19.70 \log_{10} P + 110.24$
第三紀	$CN = -15.42 \log_{10} P + 107.15$
第四紀	$CN = -27.84 \log_{10} P + 120.27$
花崗岩類	$CN = -24.27 \log_{10} P + 120.71$

CNの大きさ（P =30-90mm）
（直接流出量）

第四紀 → 中古生代 → 花崗岩類 → 第三紀

小 → **大**

イベント降水量・地質 → イベント直接流出量

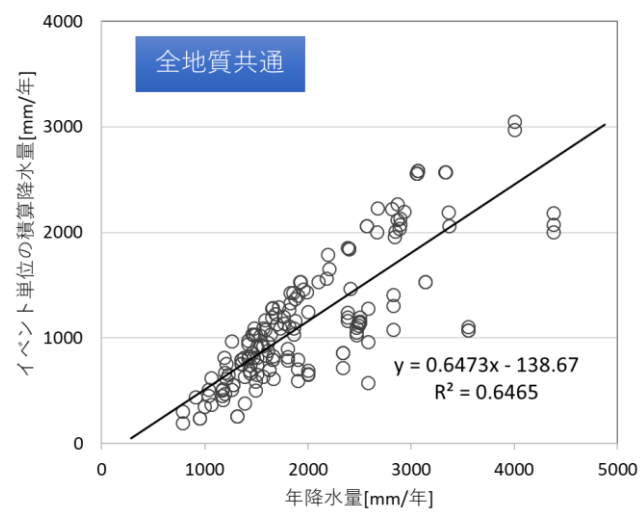
直接流出量の積算値の推定

解説資料P62

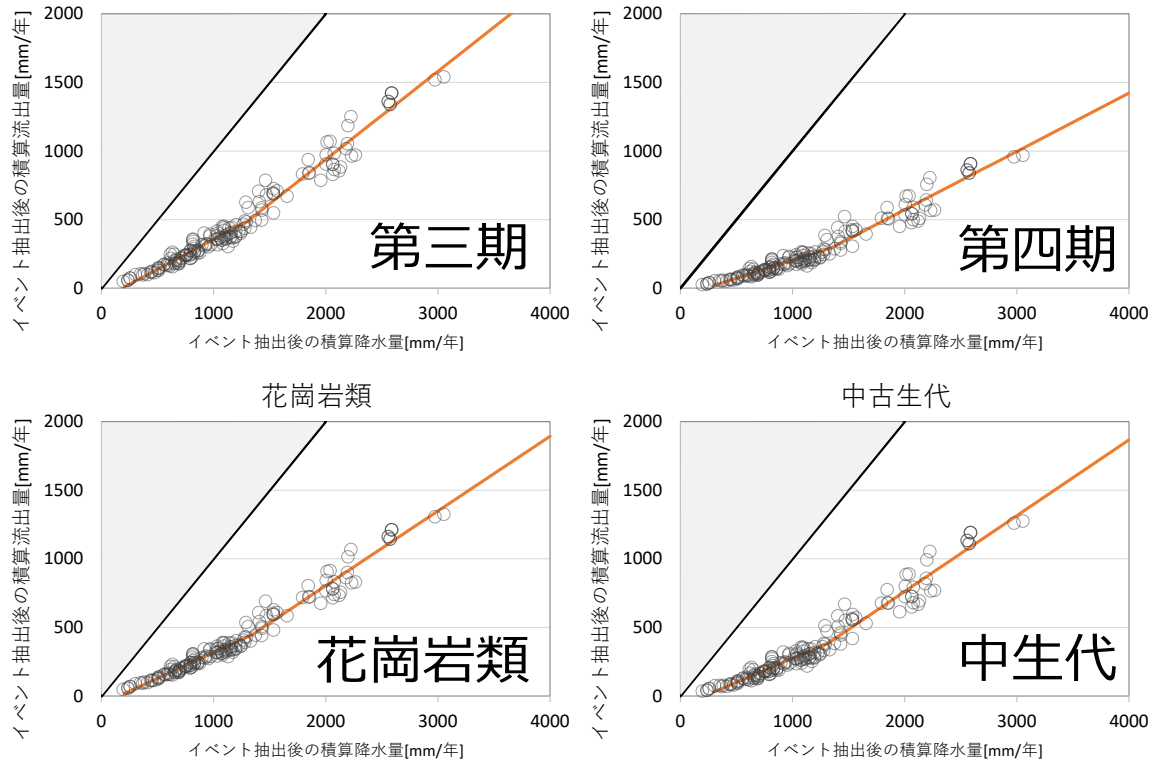
年降水量

19流域・165年分

全降水イベント(P > 20 mm)**の積算降水量**



地質毎のCN
19流域・165年分



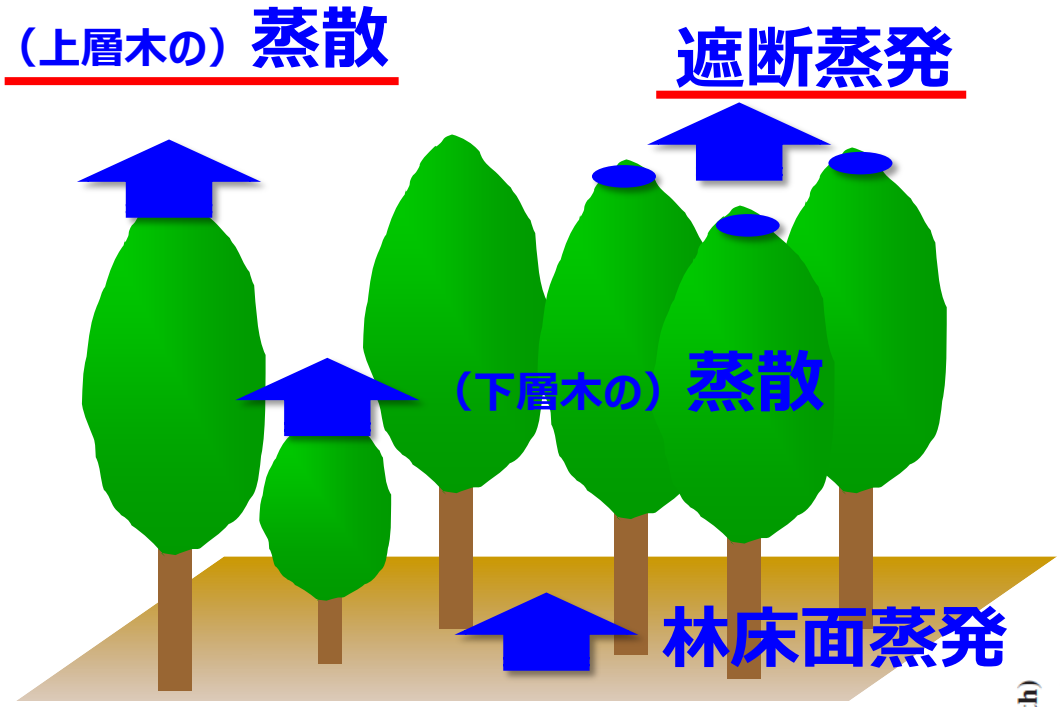
全降水イベントの積算流出量（年直接流出量）

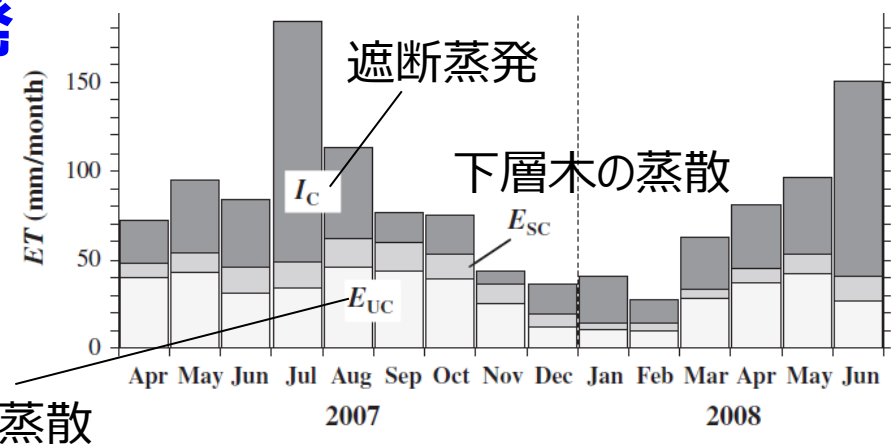
蒸発散量の評価

水資源涵養量 ＝ 降水量 － （直接流出量 ＋ 蒸発散量）

蒸散・遮断蒸発

（林床面蒸発等を考慮していない）

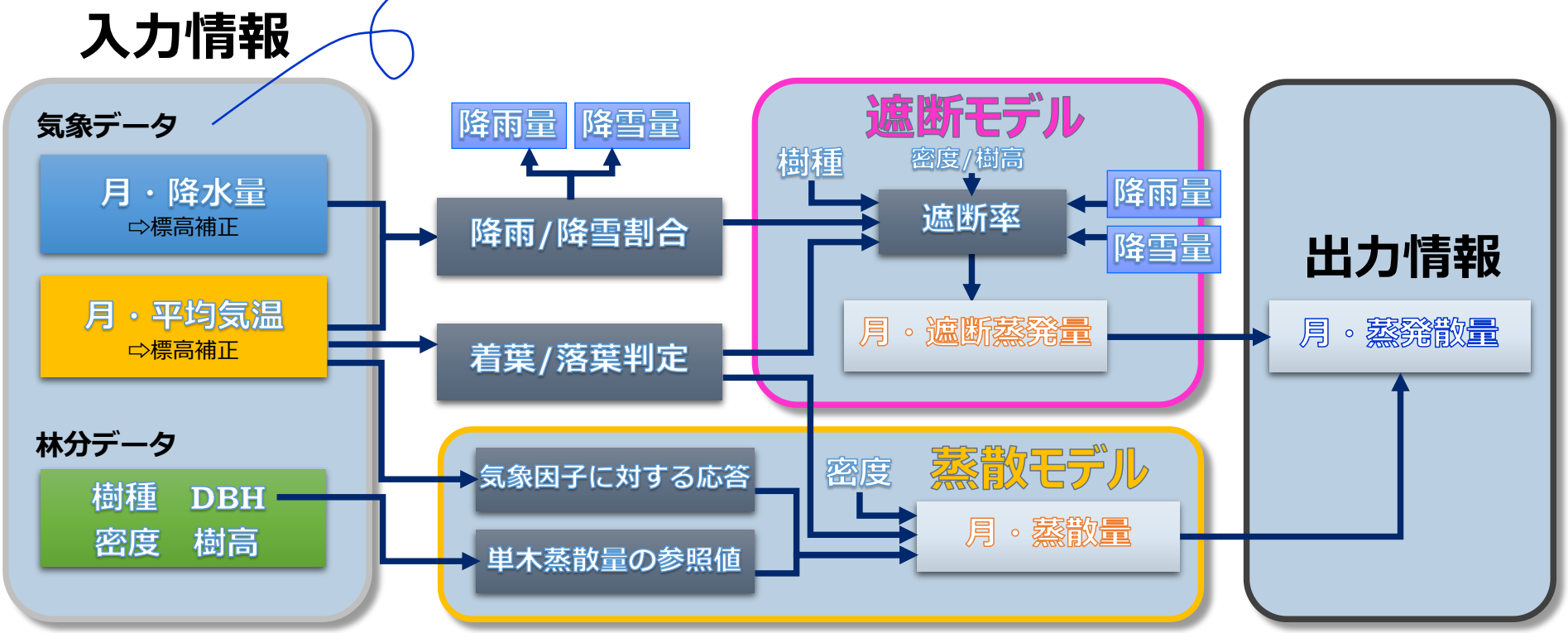




Kumagai *et al*. (2014) *Journal of Hydrology*

詳細モード / 簡易モード

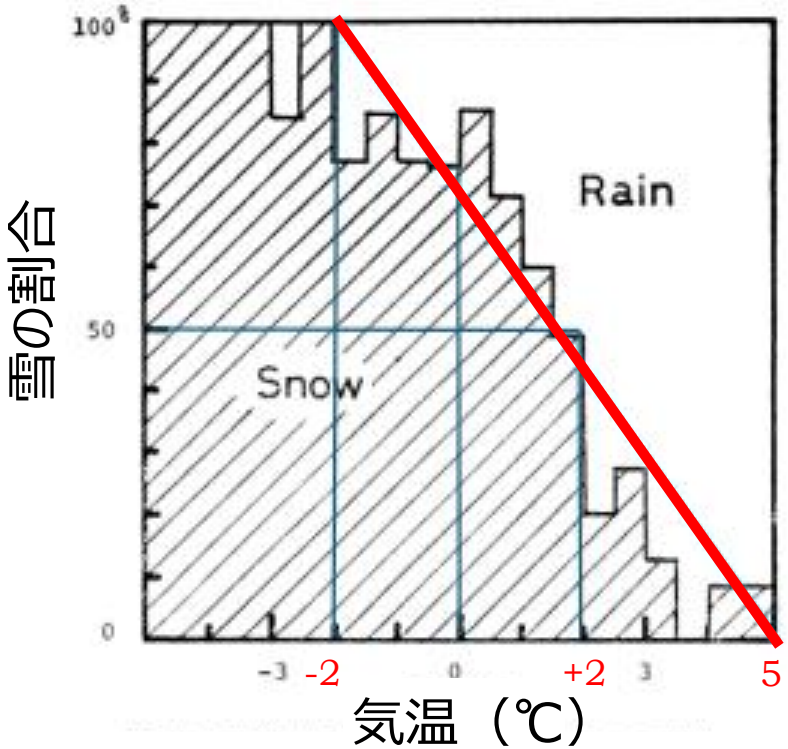
気象観測地点が離れている場合：
標高補正
（標高と共に雨は増加、気温は低下）



降雨/降雪の区分

月平均気温から降雨/降雪の割合を推定

気温	雨/雪
＋5℃以上	すべて雨
－2～＋5℃	雨と雪が混在する 降雨/降雪割合は右の 赤ラインで決定する
－2℃以下	すべて雪



気温(°C)	降雪割合(%)
5	0
4	14
3	29
2	43
1	57
0	71
-1	86
-2	100

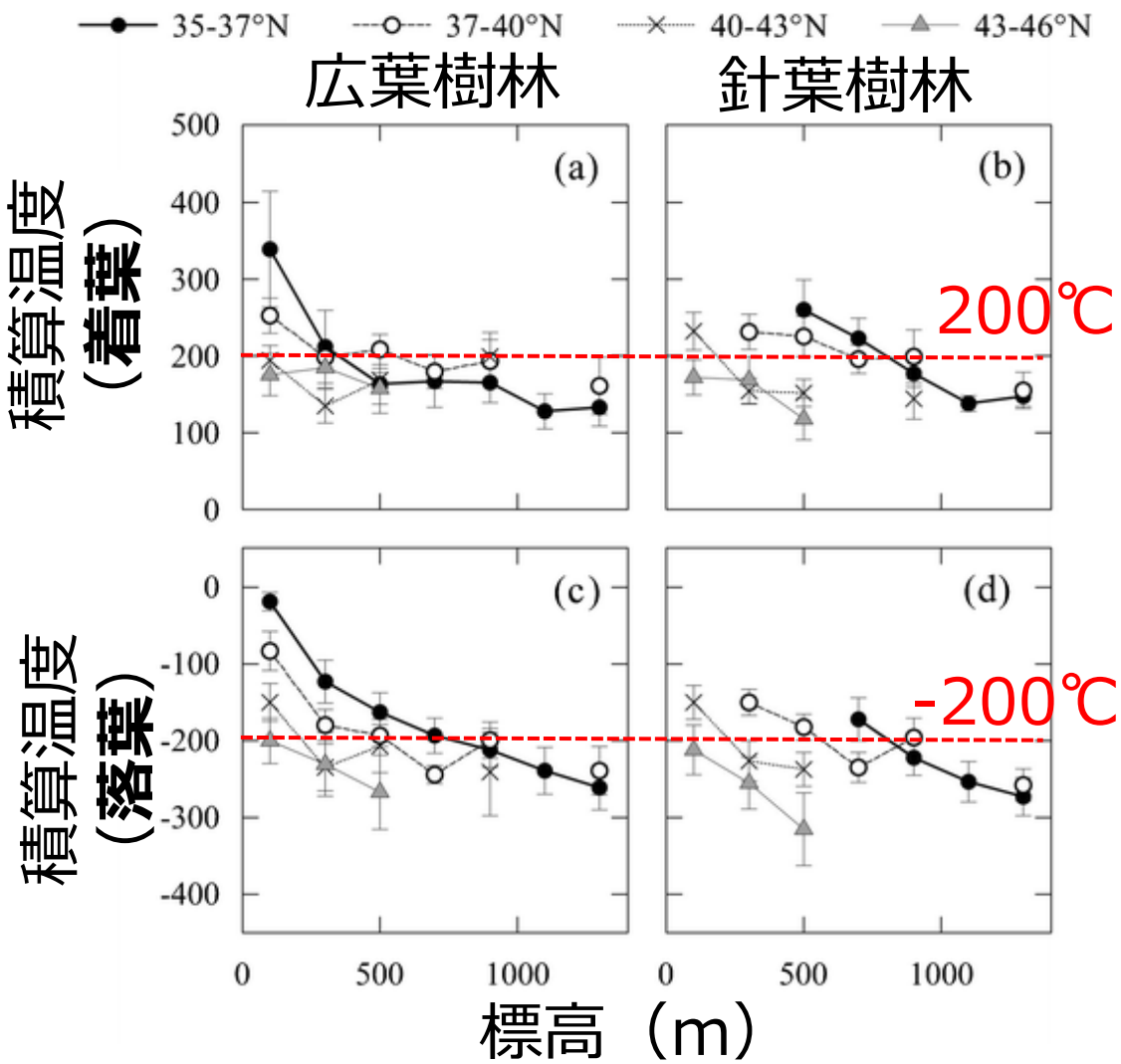
太田(1989)を改変

落葉/着葉の判定

解説資料P72

積算温度（着葉）
開始日：1/1
T > 2℃の日
T－2℃を積算

積算温度（落葉）
開始日：9/1
T < 18℃の日
T－18℃を積算



標高・緯度による違いは考えない

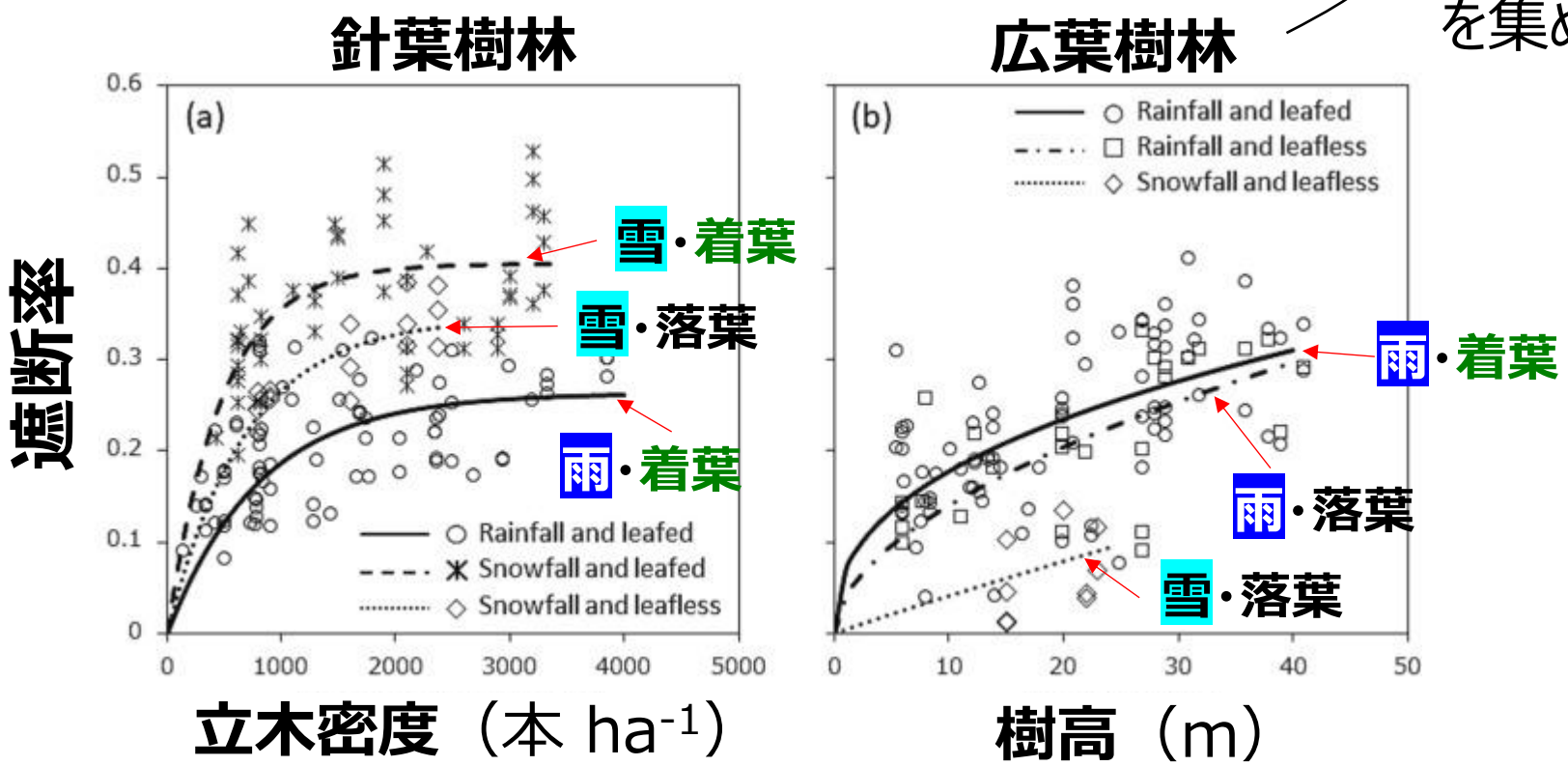
T：日平均気温（℃）

Nagai *et al*. (2014) *International Journal of Biometeorology*

Inokoshi *et al*. (2023) *Forest Ecology and Management*

月遮断蒸発量 ＝ 月降水量 × 月**遮断率**

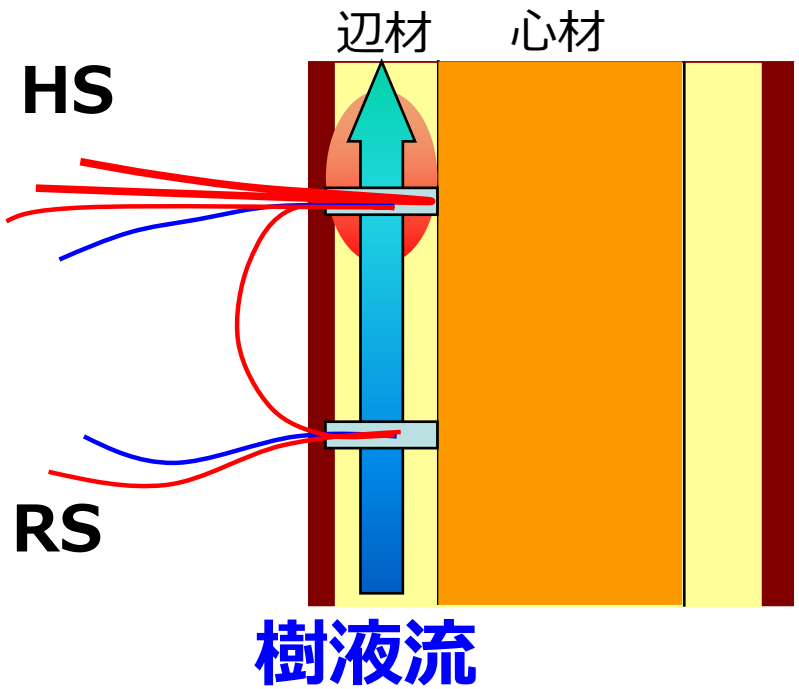
世界中のデータを集めてきた



針葉樹の雨・**落葉**は、雪・**落葉**と同じとした。広葉樹の雪・**着葉**は、雨・**着葉**と同じとした。

蒸散モデル（樹液流計測法）

蒸散量 ＝ 樹液流速 × 辺材面積



樹液流速が**遅い**：
　HSとRSの温度差は**大きい**

樹液流速が**速い**：
　HSとRSの温度差は**小さい**

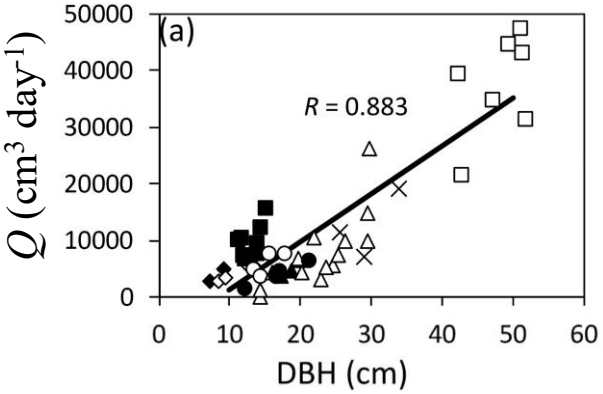
HS: ヒーターセンサー
RS: リファレンスセンサー

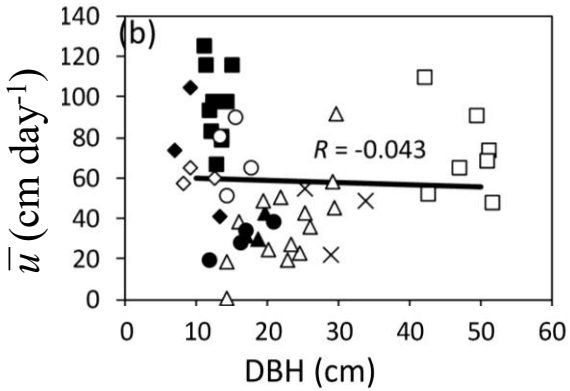
蒸散モデル

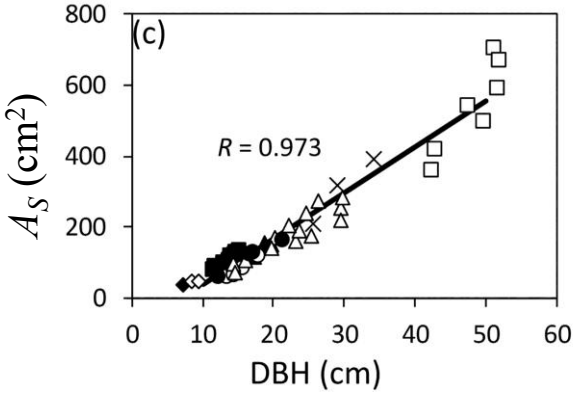
解説資料P73

Tsuruta *et al*. (2019) *Ecohydrology*

単木蒸散量 ＝ 樹液流速 × 辺材面積







理想的な気象条件　飽差*D*1kPa・十分な日射(R_s)があるとき（>400 W m^{-2}）

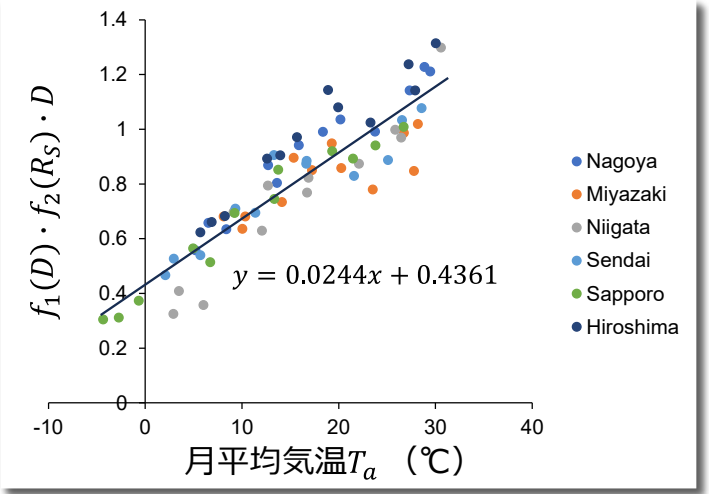
樹木　気象

$$Q_t = Q_{tref} \cdot f_1(D) \cdot f_2(R_S) \cdot D$$

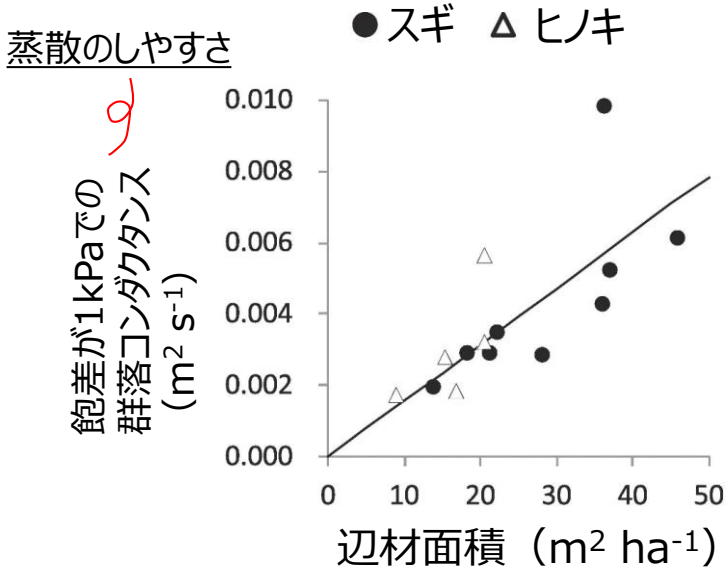
× 立木密度

林分あたりの蒸散量

月平均気温から推定



ヒノキ林で構築されたモデルを全森林に適用した

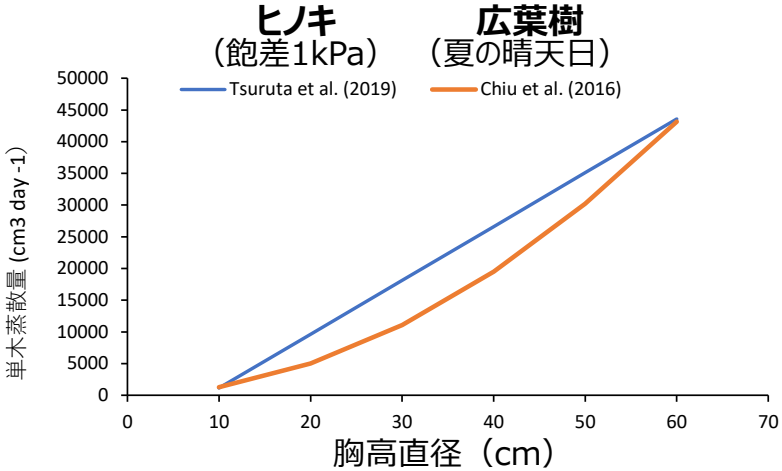


ヒノキとスギで大きな違いはない

辺材面積⇔蒸散のしやすさ（理想的な気象条件）

スギ：石川、福岡、熊本、台湾
ヒノキ：福岡

Komatsu *et al*. (2014)　*Forest Ecology and Management*



広葉樹とヒノキで大きな違いはない

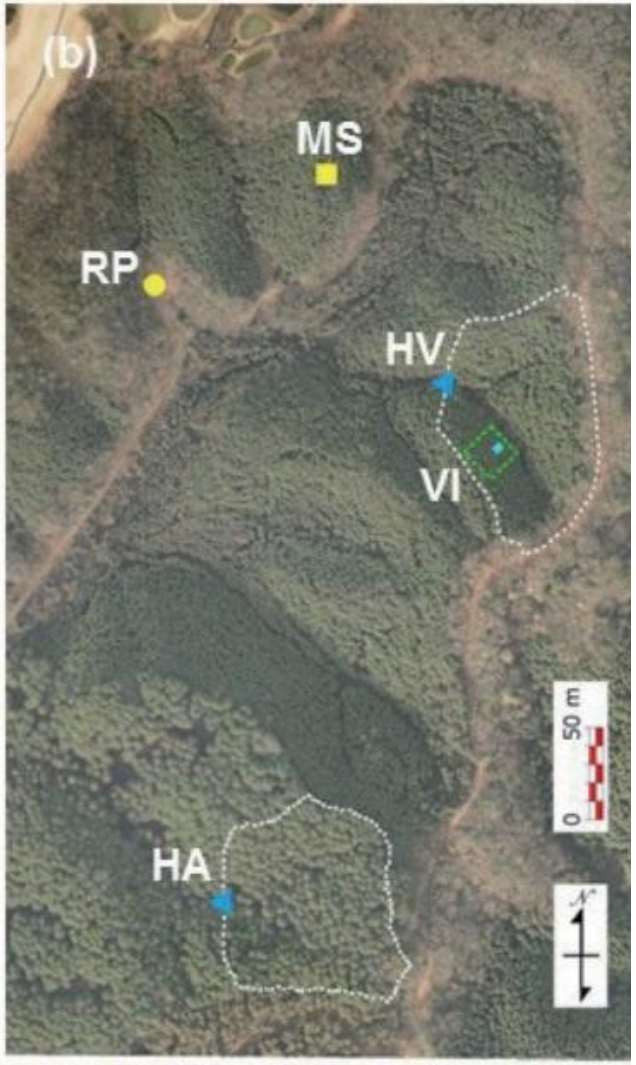
胸高直径⇔単木蒸散量（理想的な気象条件）

福岡県の広葉樹

常緑：クスノキ, ヒサカキ, カゴノキ, ネズミモチ, ヤマモモ, タブノキ, シロダモ, クロキ

落葉：ムクノキ, コナラ, ハゼノキ, カラスザンショウ

Tsuruta *et al*. (2019) *Ecohydrology*
Chiu *et al*. (2016) *Journal of Forest Research*



森林総合研究所

常陸太田試験地（茨城県北部）

場所：茨城県北部、久慈川水系支流（茂宮川）
植生：**ヒノキ林**（河岸のみスギあり）

期間：**2006～2012年**
対象流域：**HA流域**　（HV流域では伐採履歴があるため除外）

流域面積 (ha)	15.7
標高 (m)	290～390
地質	中古生層（黒雲母片麻岩）
土壌	褐色森林土
平均気温 (°C)	12.4
年降水量 (mm)	1,685

気象露場

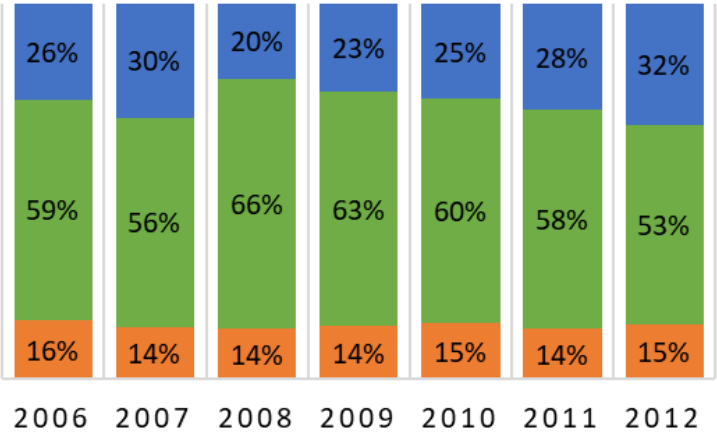
末端堰

水資源涵養量の検証

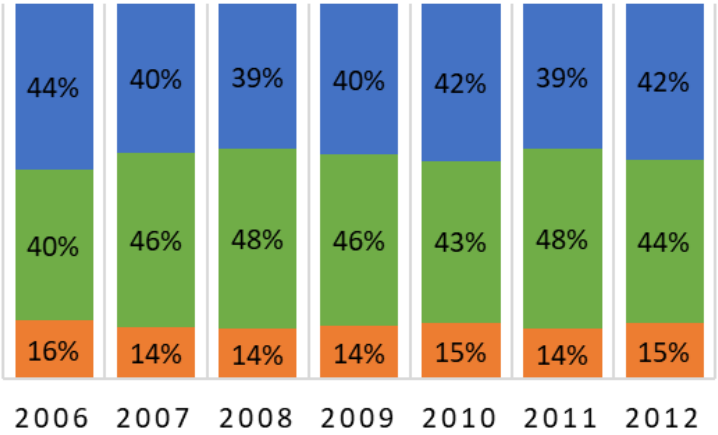
解説資料P85

年	降水量 mm	直接流出量（CN法）mm	蒸発散量	水資源涵養量 mm	直接流出率	蒸発散率	水資源涵養率
2006	1814	288	722	805	16%	40%	44%
2007	1418	198	657	563	14%	46%	40%
2008	1353	183	644	526	14%	48%	39%
2009	1456	206	664	585	14%	46%	40%
2010	1609	241	693	675	15%	43%	42%
2011	1354	183	646	524	14%	48%	39%
2012	1565	231	683	651	15%	44%	42%

蒸発散（実測）



蒸発散（モデル・詳細）



水資源涵養

蒸発散

直接流出

蒸発散量を過小評価 → **水資源涵養量を過大評価**

（樹液流計測法の過小評価、林床面蒸発を考慮していない）

水資源涵養量の最大値程度

オプション1（簡易モード）

解説資料P76

水資源涵養量 ＝ 降水量－(直接流出量＋蒸発散量)

気象データ　月降水量　月平均気温

アメダス（気象庁）の
データを利用可能

地質

シームレス地質図
（産総研）から入手可能

~~**森林情報**~~
~~樹種、密度、直径、樹高~~

評価したい人が用意

地方を選択する → 想定される最高の蒸発散量（最低の水資源涵養量）が計算される

北海道、東北、関東甲信、東海、
北陸、近畿、中国、四国、
九州北部、九州南部・奄美、沖縄

オプション1（簡易モード）

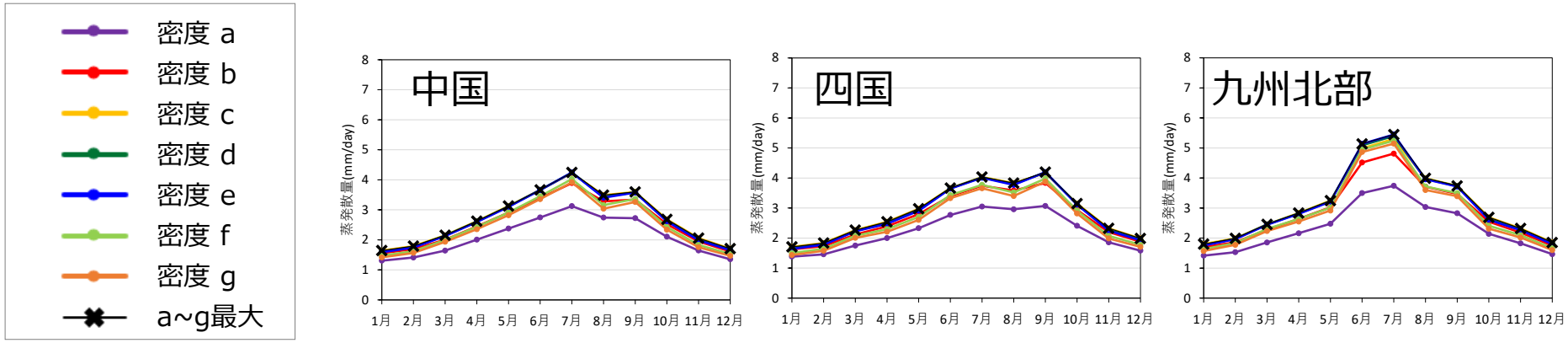
解説資料P77-79

1991-2020年の平均

気象庁観測所		標高 (m)	年降水量 (mm)	年平均気温 (℃)
北海道	旭川	119.8	1104.5	7.2
東北	米沢	245.0	1437.7	11.4
関東	青梅	155.0	1563.4	14.3
東海	関ヶ原	130.0	2181.9	14.5
北陸	八尾	124.0	2577.3	13.6
近畿	奈良	102.1	1365.2	15.7
中国	津山	145.7	1413.5	14.0
四国	四国中央	75.0	1444.5	16.4
九州北部	日田	82.9	1876.3	15.8
九州南部・奄美	大口	175.0	2799.8	15.6
沖縄	糸数	186.0	2028.9	21.5

パターン	立木密度 (本/ha)	胸高直径 (cm)
a	500	58
b	1000	36
c	1500	27
d	2000	22
e	2500	19
f	3000	16
g	3500	15

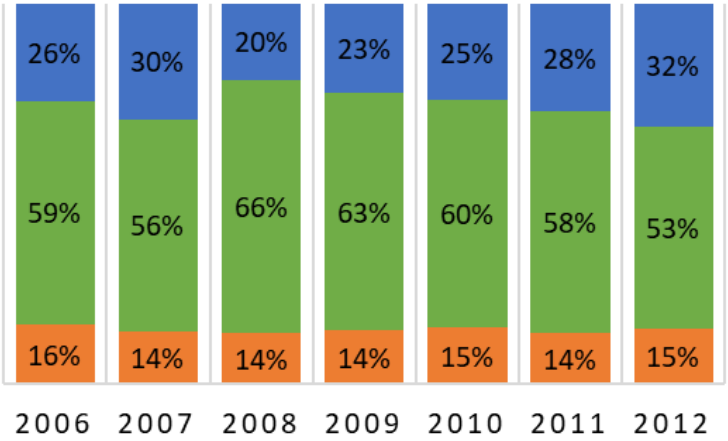
針葉樹林・収量比数0.9を想定



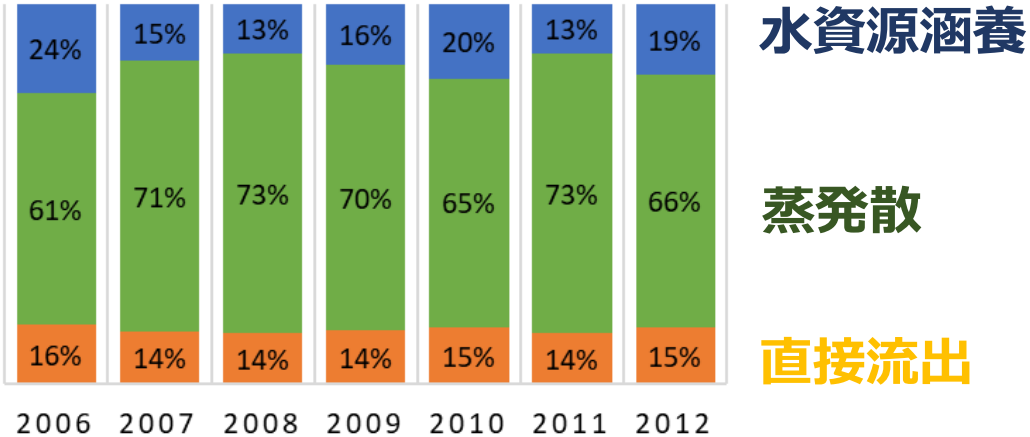
計算結果（常陸太田試験地）

年	降水量 mm	直接流出量（CN法） mm	蒸発散量 mm	水資源涵養量 mm	直接流出率	蒸発散率	水資源涵養率
2006	1814	288	1099	427	16%	61%	24%
2007	1418	198	1006	214	14%	71%	15%
2008	1353	183	991	179	14%	73%	13%
2009	1456	206	1015	234	14%	70%	16%
2010	1609	241	1051	317	15%	65%	20%
2011	1354	183	991	179	14%	73%	13%
2012	1565	231	1041	293	15%	66%	19%

蒸発散（実測）



蒸発散（モデル・簡易）



蒸発散量を過大評価　→ **水資源涵養量を過小評価**

オプション2（直接流出量の裸地との比較）

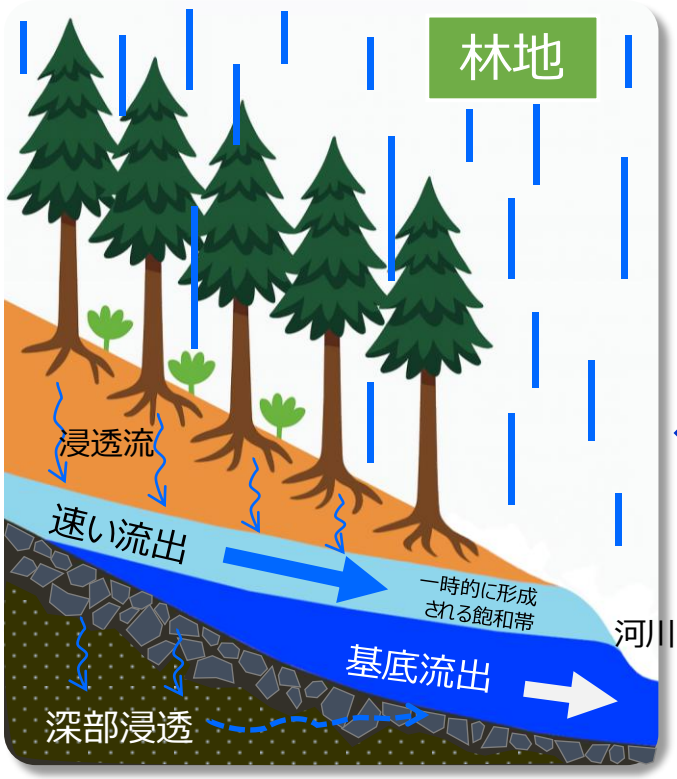
解説資料P59-60

水資源涵養量 ＝ 降水量－(**直接流出量**＋蒸発散量)

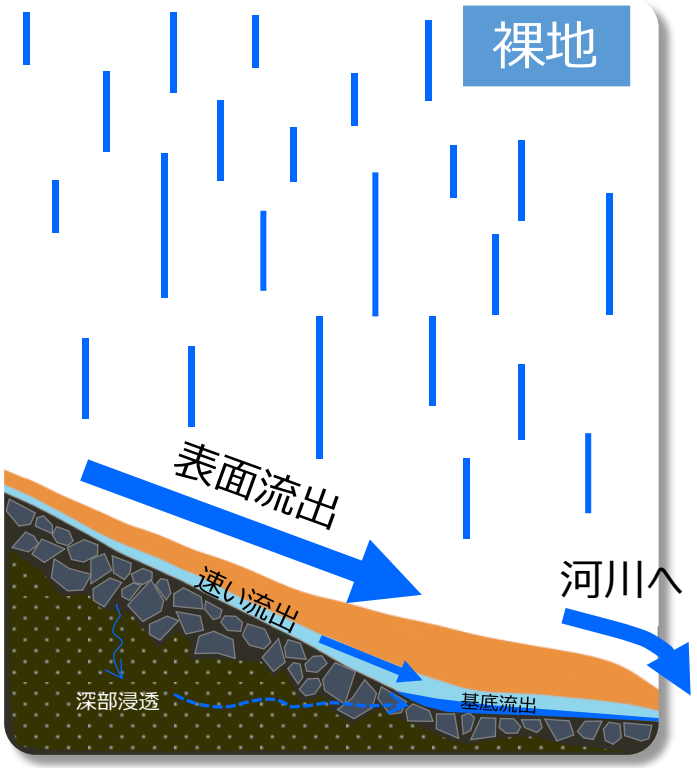
＝基底流出量

＝ 表面流出 or 地中の速い流出

濁水の発生要因



直接流出量
の差



林地の濁水抑制効果
（水質浄化機能）

年降水量×0.5

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関する調査研究報告書

計算結果（常陸太田試験地）

1-2. 地質区分 | 中古生代

直接流出量は「**地質区分**」と「**年降水量**」を指定すれば計算できる。

流出率0.5　CN法　裸地－林地

年	年降水量 [mm/年]	積算降水量 [mm/年]	直接流出量 [mm/年] 裸地	直接流出量 [mm/年] 林地	差分 [mm/年]	年降水量比
2006	1,814	1,036	907	288	620	34.1 %
2007	1,418	779	709	198	511	36.1 %
2008	1,353	737	677	183	493	36.5 %
2009	1,456	804	728	206	521	35.8 %
2010	1,609	903	804	241	563	35.0 %
2011	1,354	738	677	183	494	36.5 %
2012	1,565	874	783	231	551	35.2 %

表面流出の低減量

今後の展望：研究者目線

1．使ってもらうための工夫

・論文として出版する

→ R8.3 日本森林学会で発表予定

・より簡易的な森林情報の取得法を提示する

（できれば詳細モードを使ってもらいたい）

・水資源涵養量のマッピングなど

2．モデルの精緻化（科学的データの蓄積）

・**広葉樹林での検証**

・樹液流計測法の精度検証（蒸散モデル）

・林床面蒸発の考慮

・はげ山との比較（オプション2）