

海

雲

地球水循環と バーチャルウォーター ～水の動きをどう見るか～

水文学

Apollo 17,
Dec. 1973

植物

沖 大幹

東京大学 生産技術研究所

雪氷

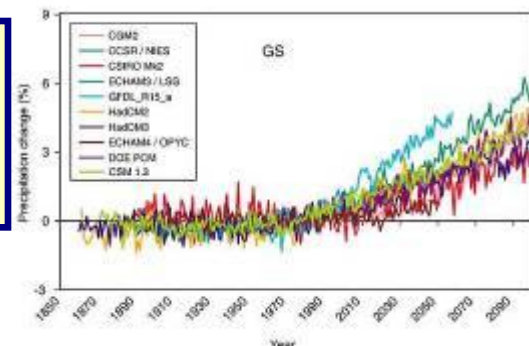
環境の世紀15、環境三四郎、東京大学、2009年4月15日

水文学の定義 (UNESCO, 1964)

- 💧 水文学(すいもんがく)が対象とするのは...
 - ✓ 地球上の水の発生、水の循環、水の分布
 - ✓ 水の物理的、化学的性質
 - ✓ 物理的、生物的環境と水との相互作用
 - ✓ 人間活動に対する水の応答
- 💧 “水文学(hydrology)は地球上の水の循環のすべてを対象とする学問分野である”



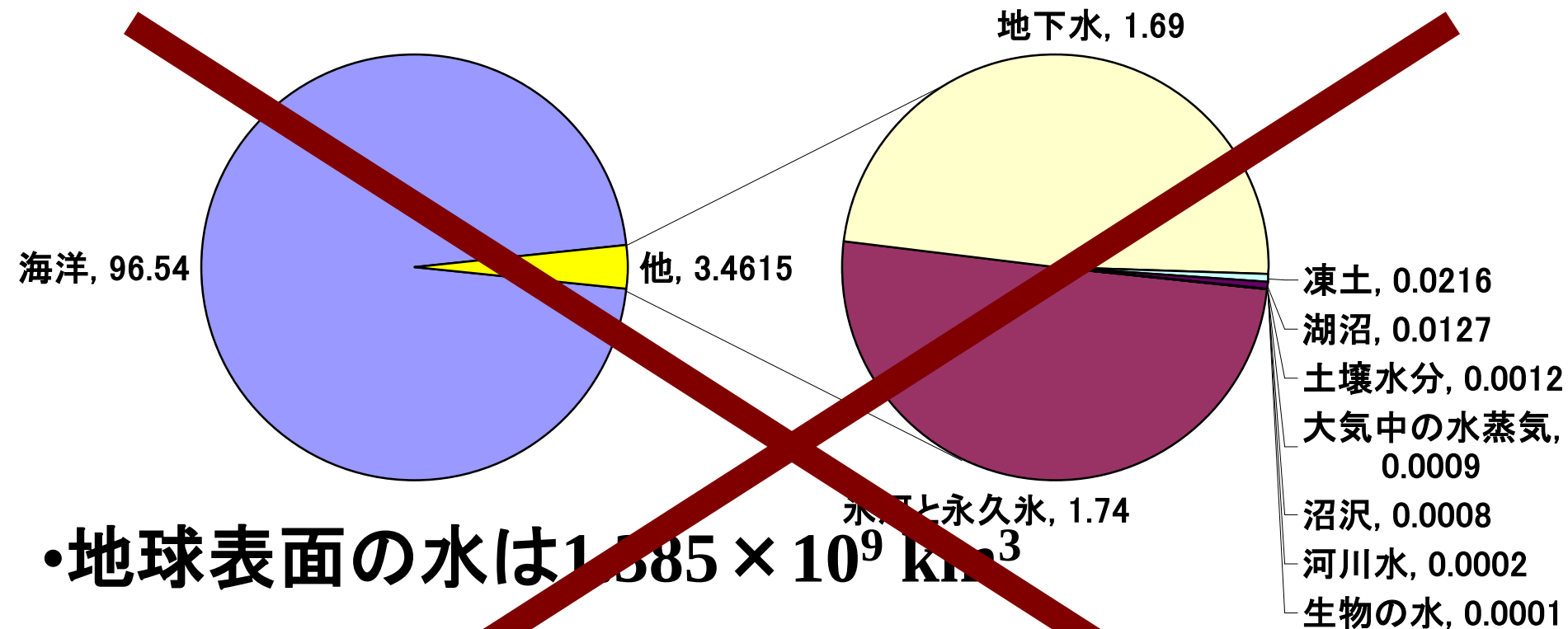
世界の水問題



- 💧 命の水 (indispensable water): 安全な飲み水
 - ✓ 世界人口の1/5が1km以内から20L/人/日確保不能
 - ❄️ ➔ 乳幼児の死亡200万人/年。
- 💧 農業生産、工業生産の水(profitable water)
 - ✓ 総取水量 $3,800\text{km}^3$ (1995) ➔ $4,300\text{--}5,200\text{km}^3$ (2025)
- 💧 人と生態系のための水(comfortable water)
 - ✓ 過大な取水による生態系へのダメージ
- 💧 地球温暖化 都市化進展 ➔ 洪水・渇水被害深刻化
- 💧 これらの問題が国際的な紛争の引き金に？



地球上の水の割り合い(%)

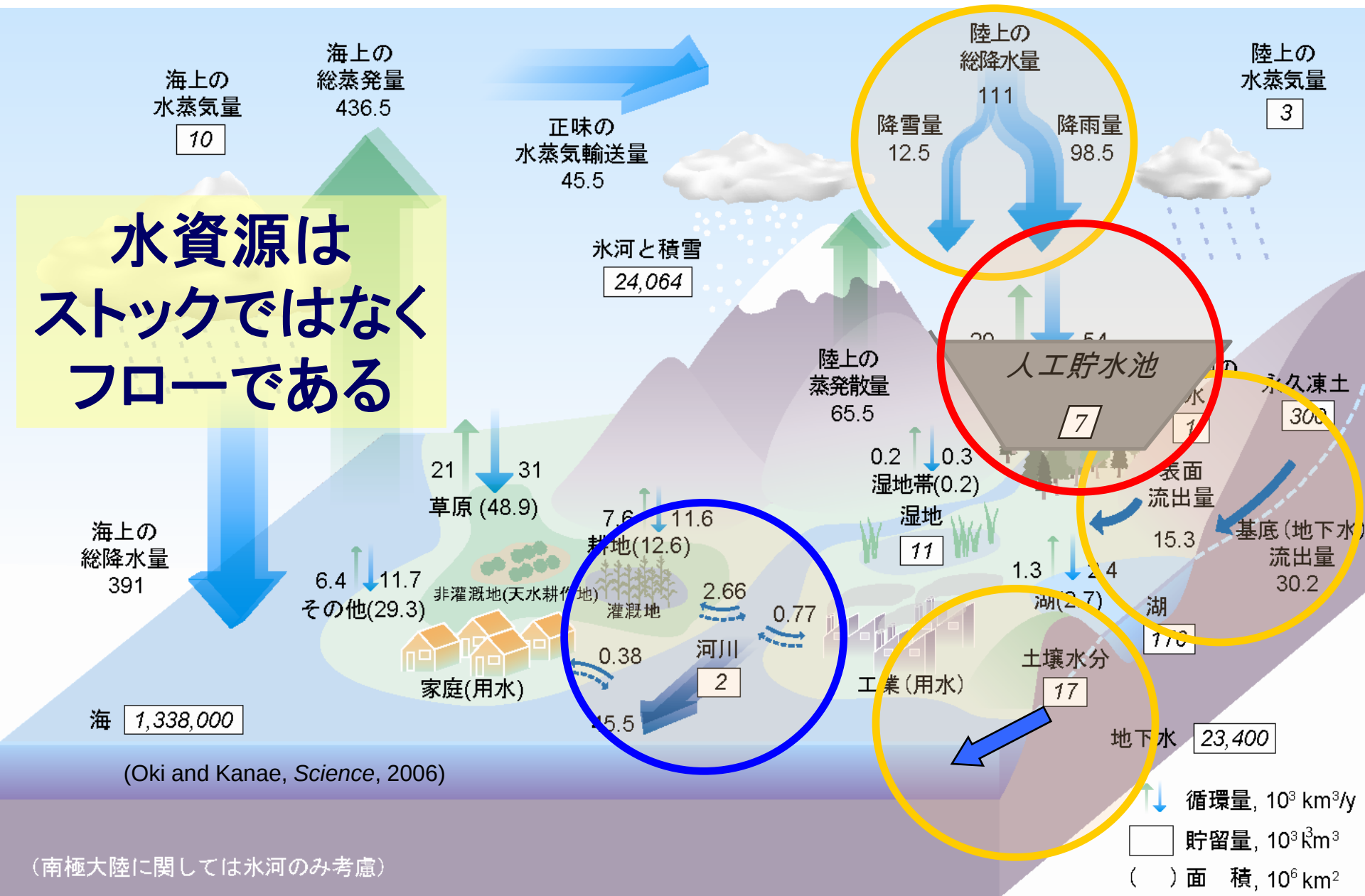


- 地球表面の水は $1.385 \times 10^9 \text{ km}^3$
- 地球全体の重さの0.02%
- 淡水は水全体の約2.5%
- 使いやすい淡水は0.01%?!

だから水資源は貴重???

地球上の水文循環量と貯留量

水資源は
ストックではなく
フローである

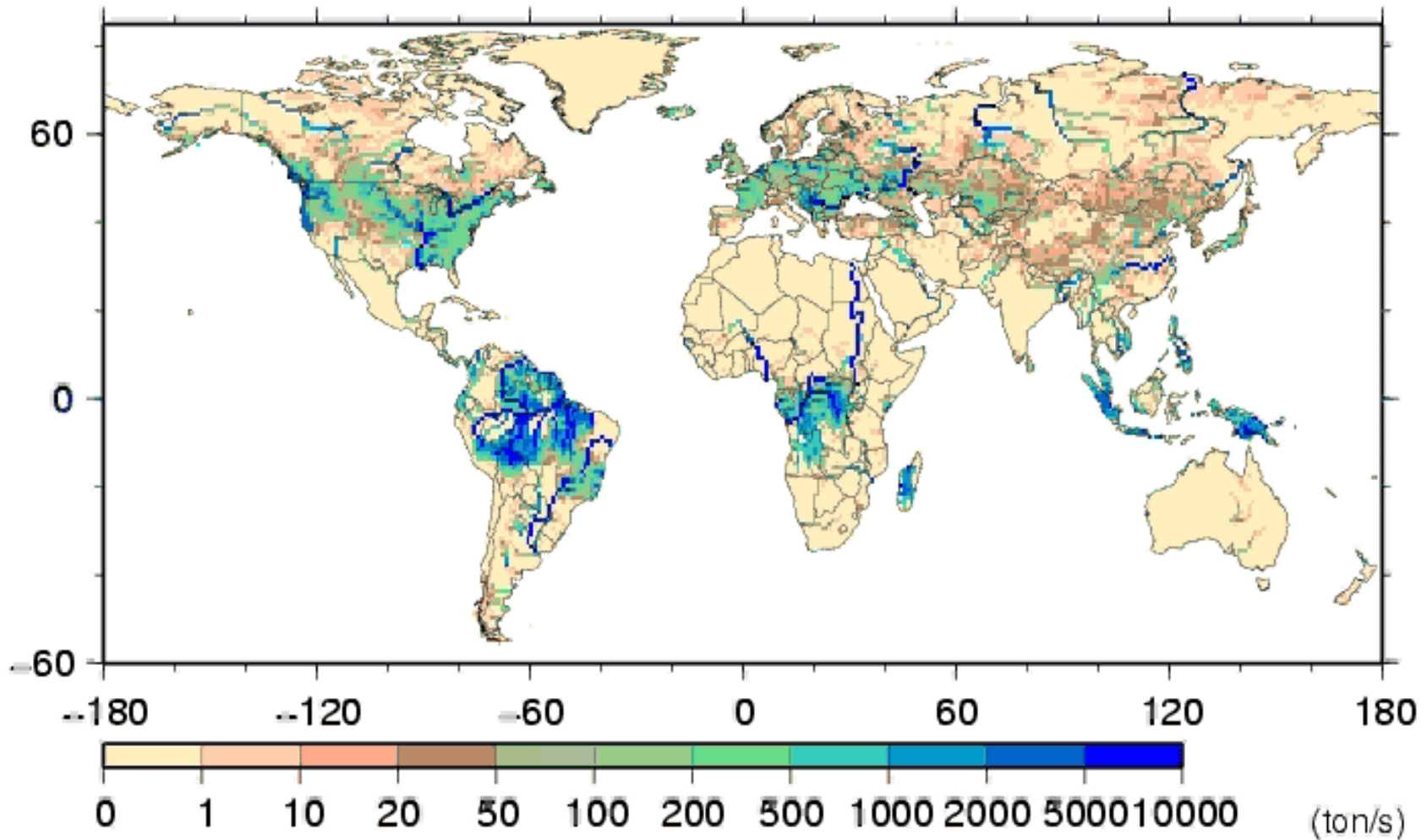


(Oki and Kanae, Science, 2006)

(南極大陸に関しては氷河のみ考慮)

数値モデルによる流量シミュレーション結果

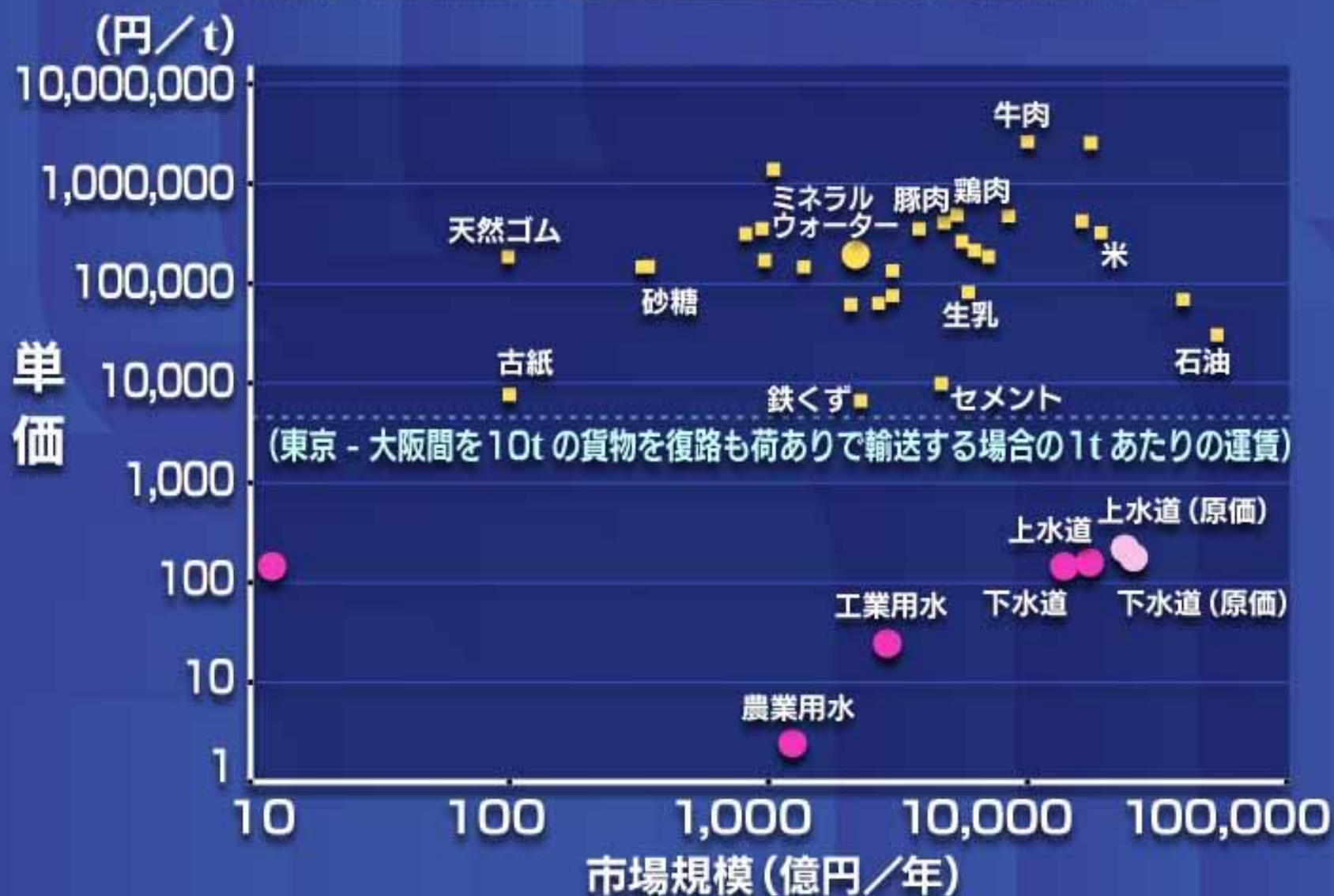
GPV=|soMAT=1°TRIP River Discharge, 2006/01/01 00:00



←川の流量が少ない

川の流量が多い→

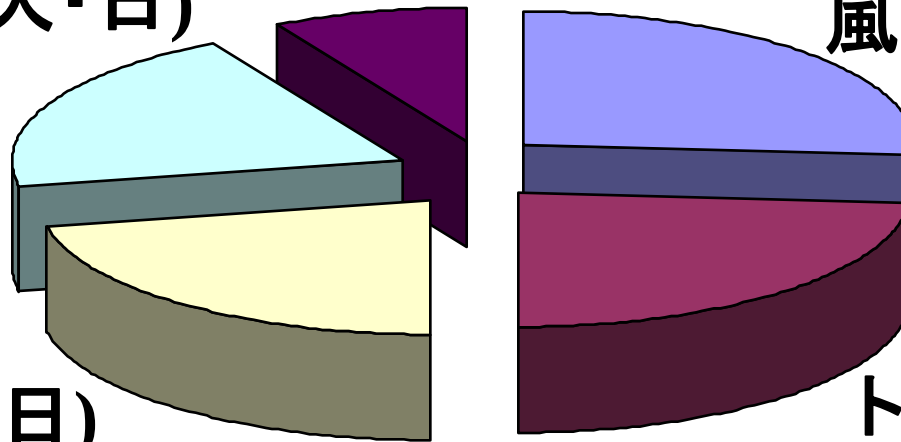
モノの単価と市場規模



日本ではどの位水を使ってる?

洗濯(50 l/人・日)

風呂(65 l/人・日)



炊事(55 l/人・日)

トイレ(60 l/人・日)

家庭での水利用 250 l/人・日(東京都平成10年度)

都会全体では約 320 l/人・日(散水、噴水、病院、...)

⇔ 飲み水は2~3 l/人・日

風呂、トイレ、炊事、洗濯 ← 全部洗淨用!!

「水を使うことは水に汚れを運んでもらうこと」



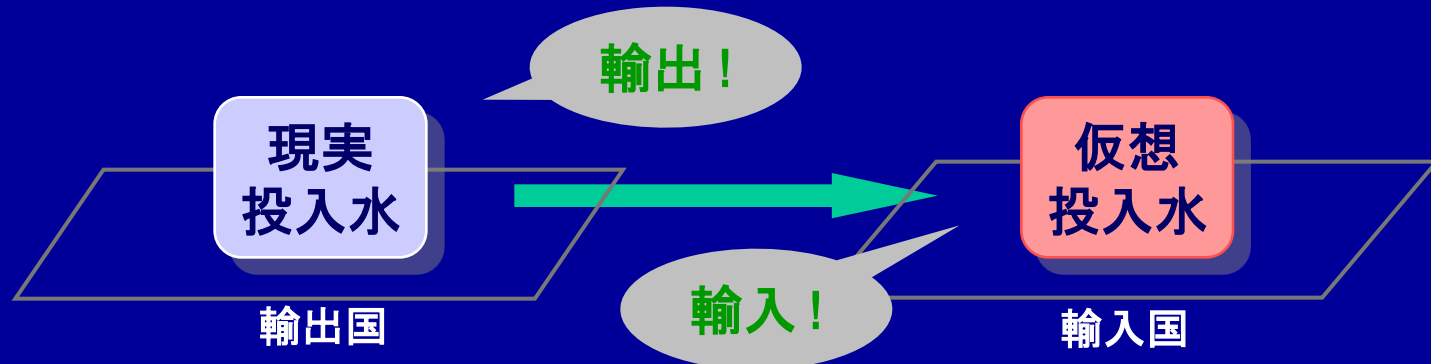
仮想/現実投入水量とは？

投入水量 : required water

農業畜産製品や工業製品を作る際に使用された水資源量。
Blue Water(河川水)とGreen Water(土壌水)の両者を含む。

国際交易を考えると, 2種類の投入水量が考えられる

- ・ **現実投入水量 (really required water)** 外部不経済
輸出国において使用された水資源量: waterfootprint
- ・ **仮想投入水量 (virtually required water)** 機会費用
もし輸入国が同量の製品を自国で生産するとしたら必要であったと考えられる量。この分だけ自国の水資源が輸入により節約されることになる。



ブルーウォーターとグリーンウォーター

💧ブルーウォーター

- ✓ 河川や地下水として流れる水。
- ✓ 世界中で約4万km³/年。
- ✓ 人間社会はその約10%を利用。

💧グリーンウォーター

- ✓ 蒸発散する水。狭義には作物からの蒸散量。
- ✓ 世界中で約6.6万km³/年。
- ✓ 人間社会はその約30%を利用。
- ✓ 世界の作物が使う水の約80%はGW

水消費原単位の算定—農作物—

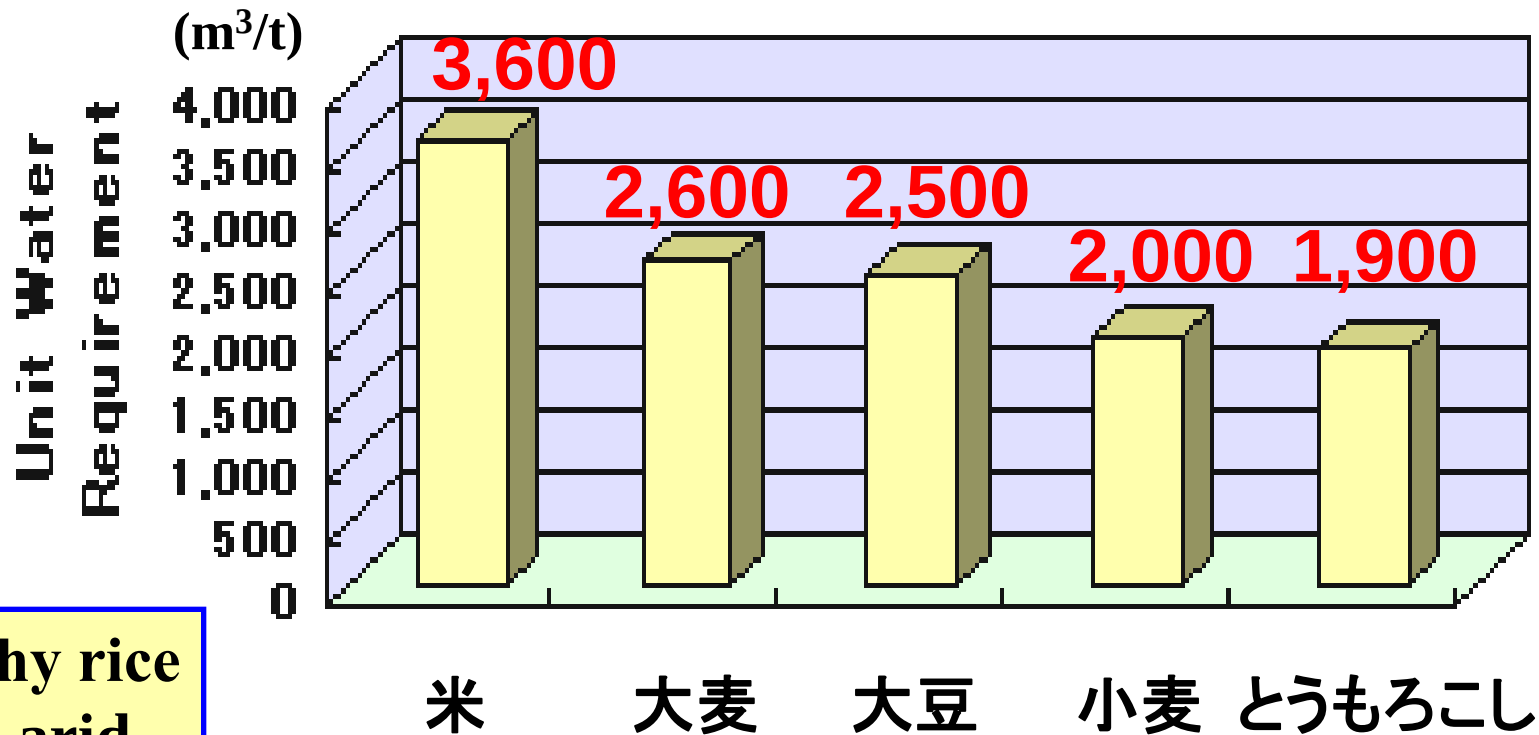
日減水深・日灌水量・灌漑期間・単位面積あたり収量・
精製ロス・廃棄率などの情報を調査収集し、
これらの**積み上げ**によって、農作物の

単位収量あたり灌漑水量が推定できる

	単収 (t/ha)	要水量 (mm/d)	生育期 間 (day)	投入 推量 (m ³ /t)	歩留ま り率 (%)	水消費 原単位 (m ³ /t)	Kcal /100g
米	6.46	15	100	2400	65	3600	356
小麦	3.48	4	135	1600	78	2000	368
大豆	1.73	4	110	2500	100	2500	417
とうもろこし	4.29	4	100	900	50	1900	350
大麦	3.61	4	110	1200	46	2600	340

※玄米： $r_e=72\%$ ，水消費原単位=3300(m³/t)

水消費原単位の算定—農作物—



“Why rice
in arid
area?”

主要穀物の水消費原単位

(日本の単位収量、FAO統計より1996-2000年の平均値)

水消費原単位の算定—畜産物—

- ◆ 肉1tを採るにはどの位の飼料を与えるのか？
⇒飼料中の穀物量が分かれば、
先の農作物の水消費原単位が使える。
- ◆ 飼料→牧草・青刈農作物・穀物・配合飼料等
 - ✓ 牧草・青刈農作物はgreen water分の水資源消費
 - ✓ 家畜1頭に与えた穀物・配合飼料の量を調査
 - ※ 配合飼料の組成は？どんな穀物？どの程度の割合？
- ◆ 家畜の体重、肉になる割合、飼育期間は？
- ◆ 母畜への投入水量も子供に配分する
- ◆ 副産物は価格費に応じて投入水量を配分

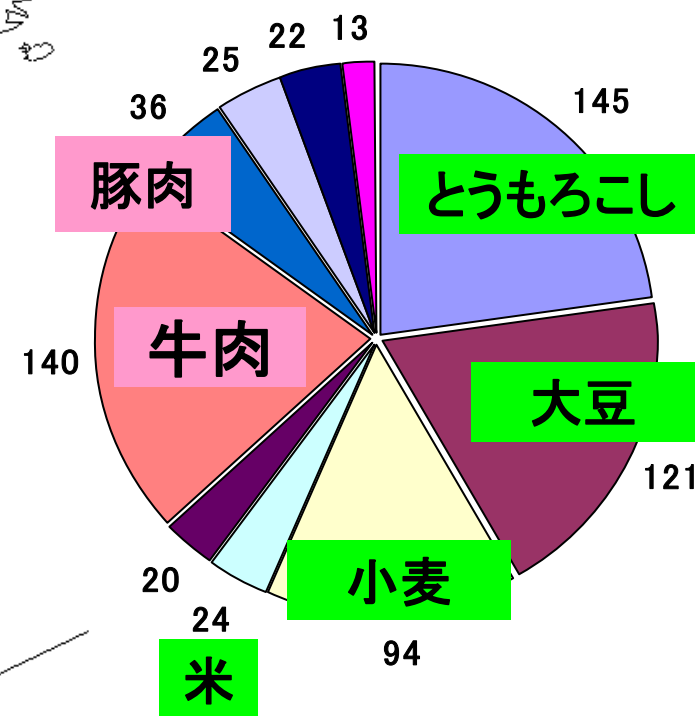
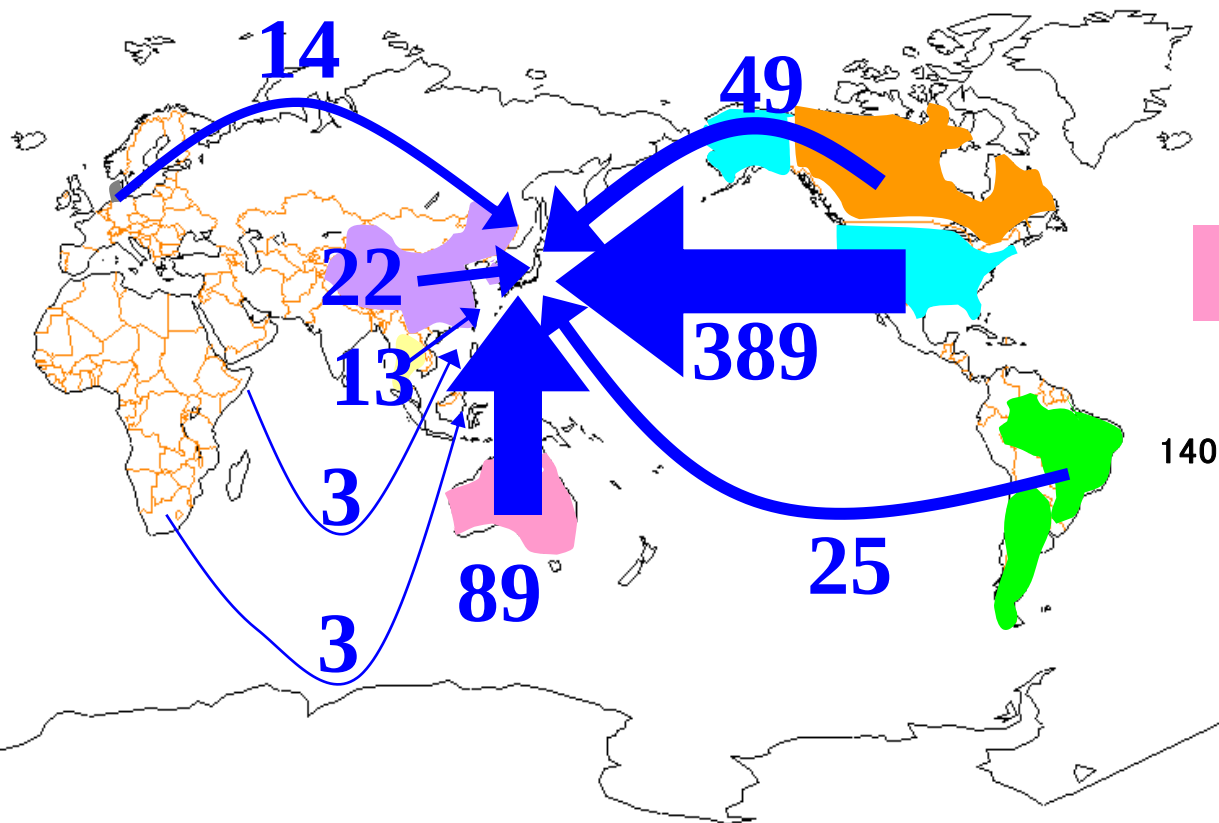
畜産物の水消費原単位



日本の仮想投入水総輸入量

その他:33

日本への品目別
仮想投入水量
(億m³/年)



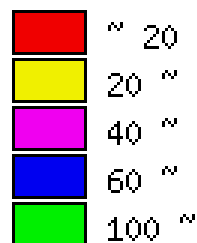
総輸入量: 640億m³/年

日本国内の年間灌漑用水使用量: 570億m³/年

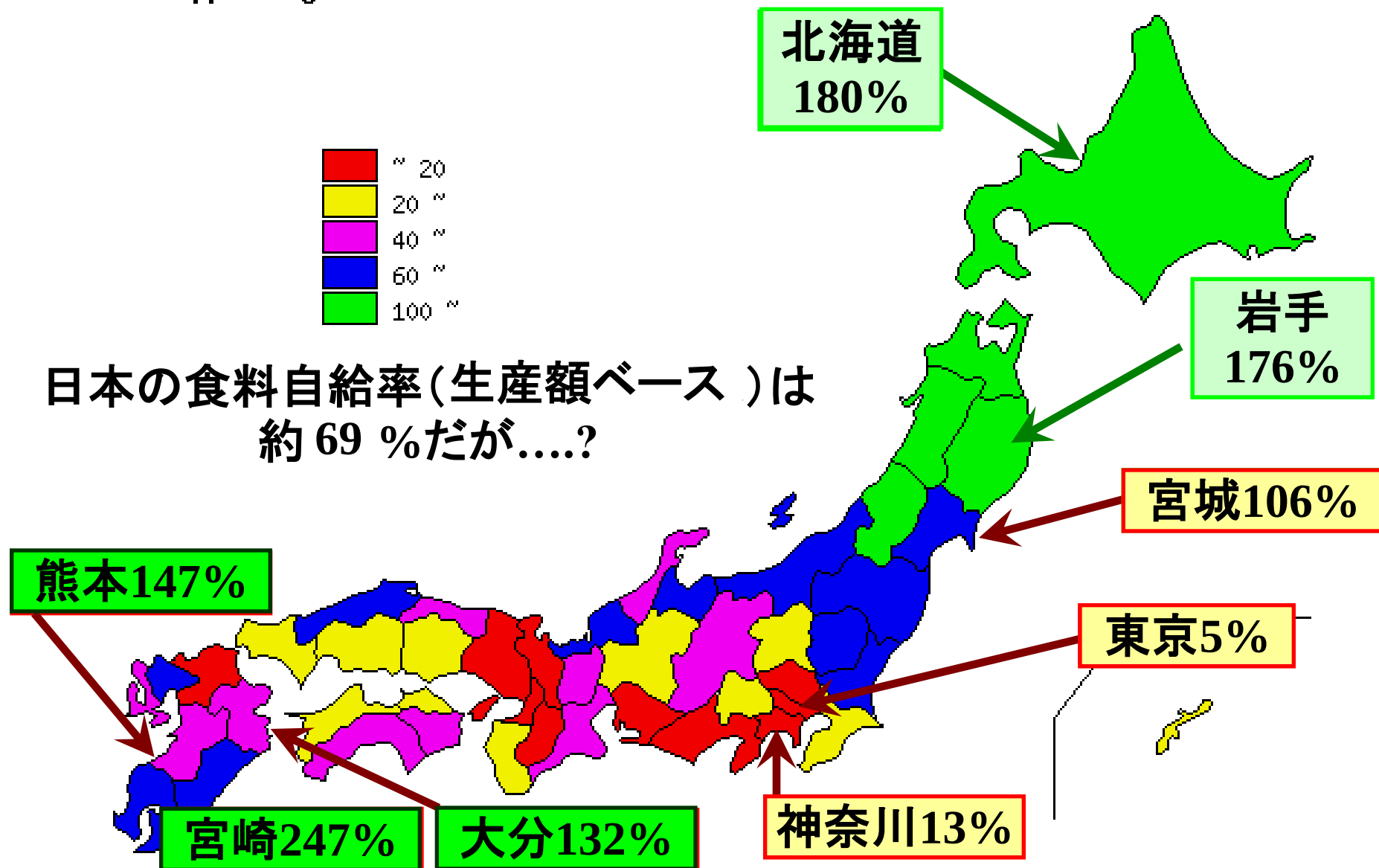
(日本の単位収量、2000年度に対する食糧需給表の統計値より)

都道府県別食料自給率(2004年度)

Food Self Supporting Ratio (FY2004)



日本の食料自給率(生産額ベース)は
約 69 %だが....?



Virtual Requied Water を考えると...

●日本人が1人あたり年間に使っている水量は...

- 飲む水: 約 $1\text{m}^3/\text{年}\cdot\text{人}$
- 家庭用水: 約 $130\text{m}^3/\text{年}\cdot\text{人}$
- 工業用水: 約 $110\text{m}^3/\text{年}\cdot\text{人}$
- 国内の農業用水: 約 $500\text{m}^3/\text{年}\cdot\text{人}$
- 海外の水資源: 約 $500\text{m}^3/\text{年}\cdot\text{人}$

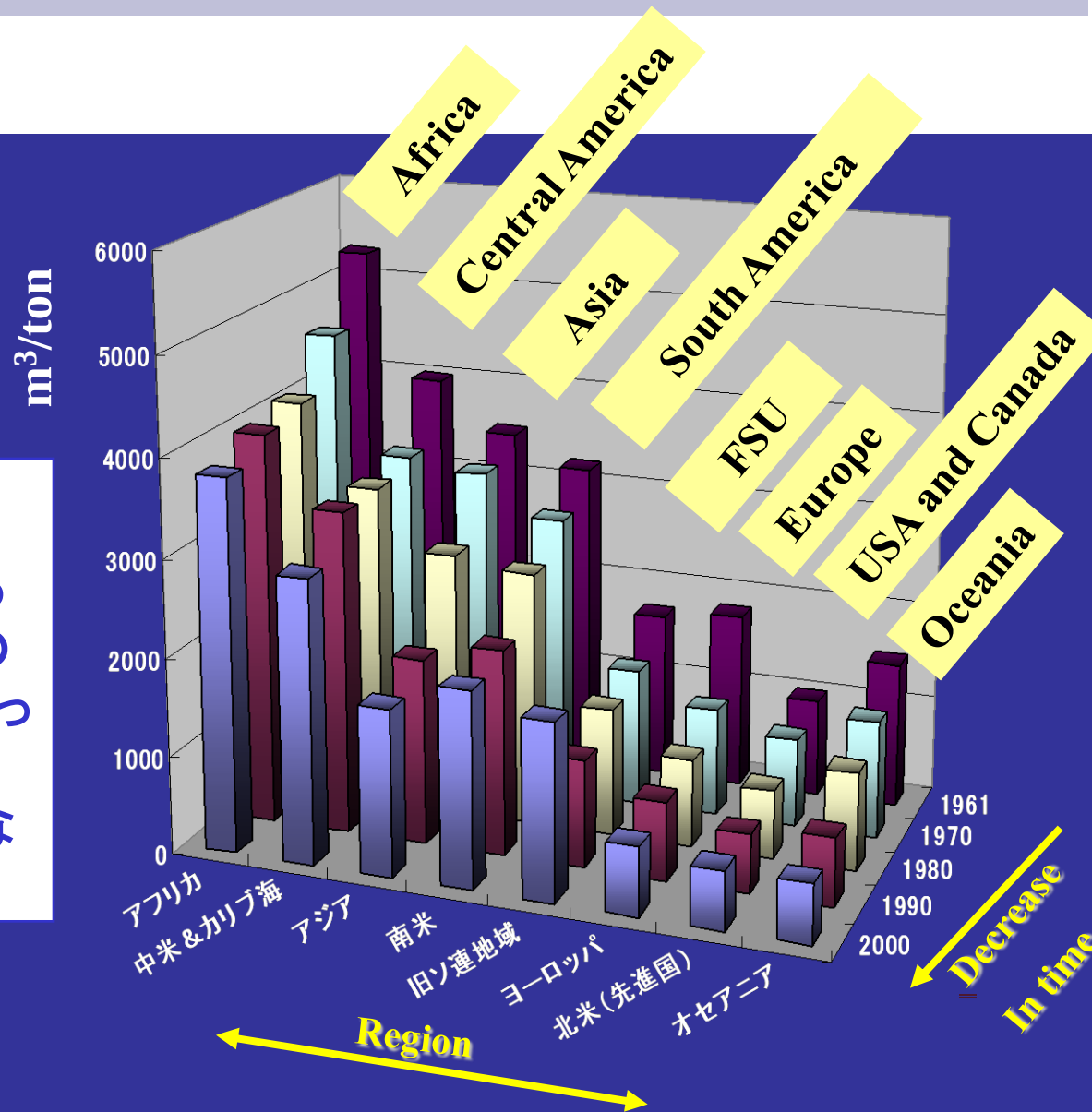
合計～約 $1,250\text{m}^3/\text{年}\cdot\text{人}$

→日本の水資源問題を考えるときには、
世界の水資源問題にも目を向ける必要あり。

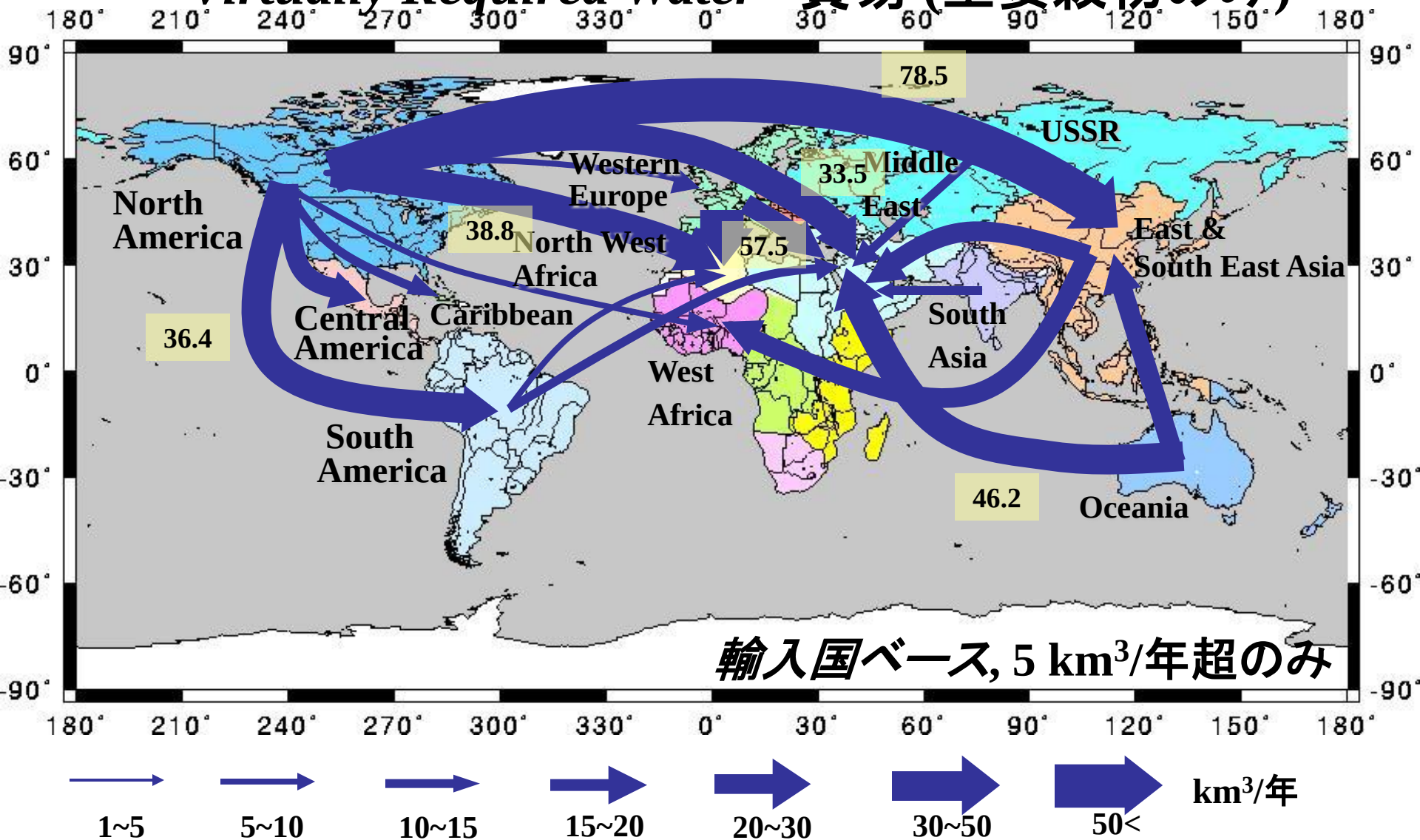
水消費原単位は普遍的な値ではない!!

例えば...

小麦1トンを作る
のに必要な水の
量は、地域によっ
て、また、年によ
って大きく異なる。



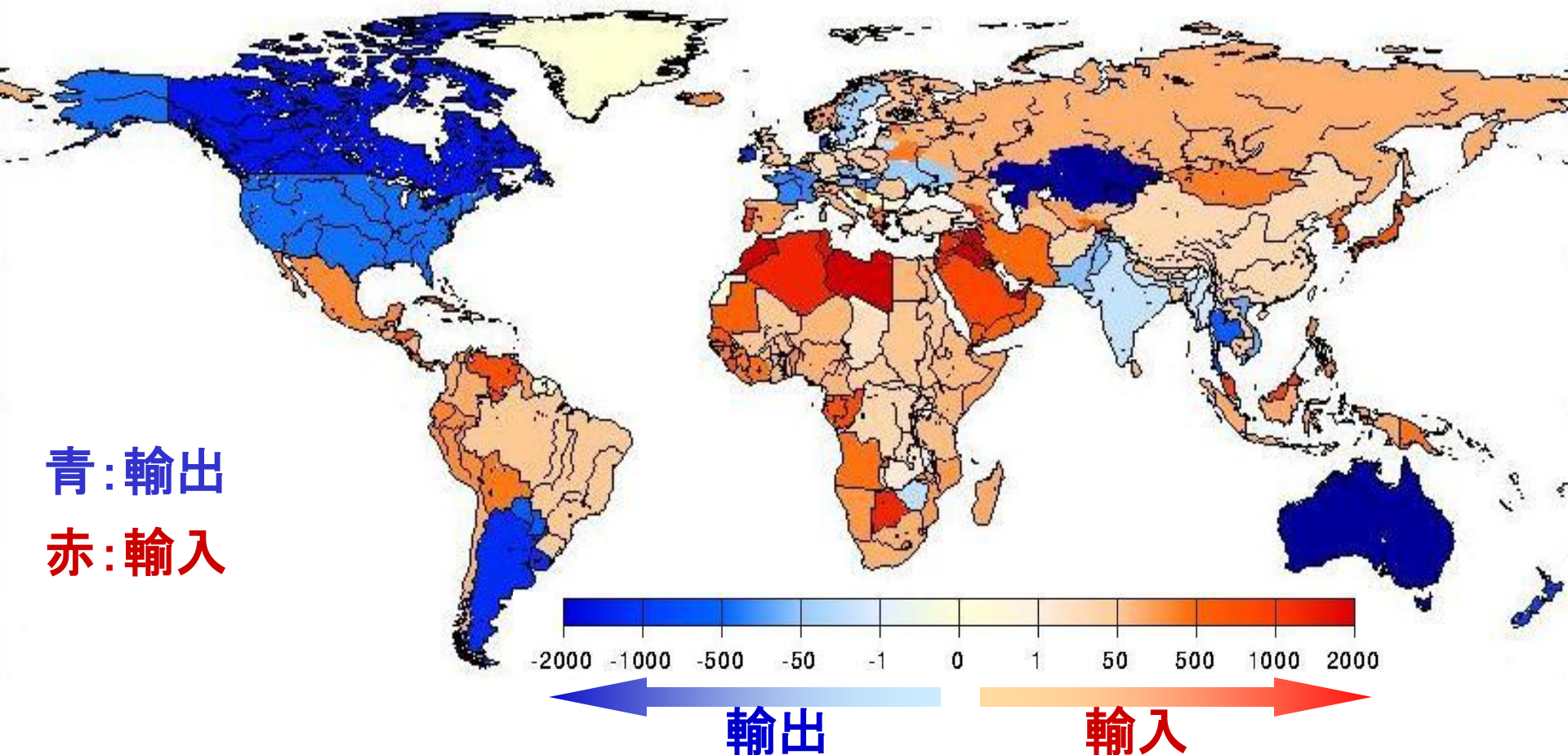
2000年における各地域間の “*Virtually Required Water*” 貿易 (主要穀物のみ)



(Oki, et. al, 2003)

(2000年に対する世界食料機構等の統計に基づく)

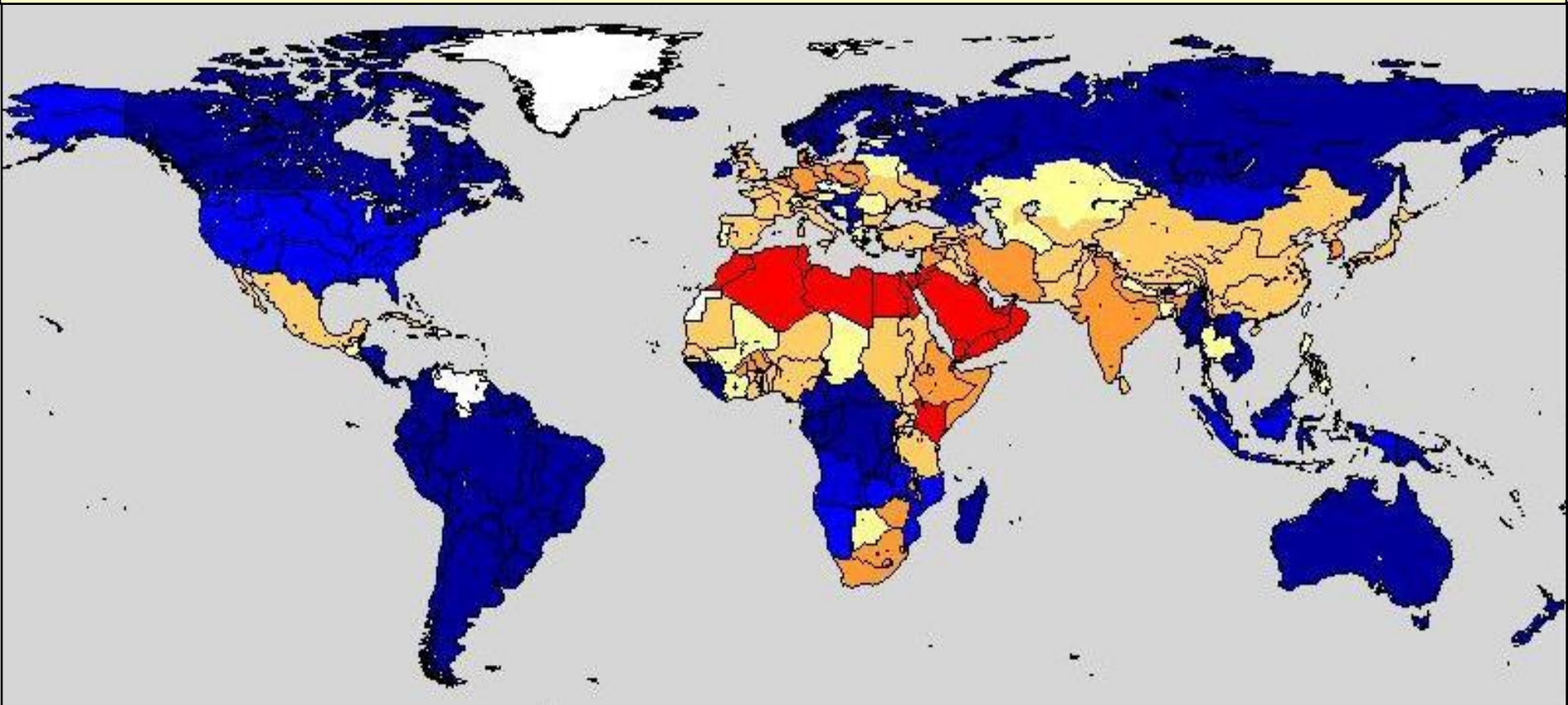
2000年における各国のVirtual Waterの収支(m³/人/年)



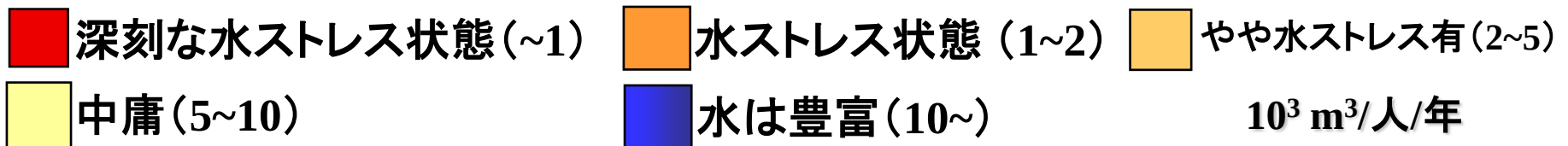
- 輸入国トップ10のうち7カ国が水資源の少ない国
- 輸出国トップ10のうち7カ国が水資源の豊かな国
- デンマーク(10位)とインド(18位)は水資源が少ないが正味で輸出。

従来型の水資源アセスメント

2000年における各国の一人当たり水資源賦存量

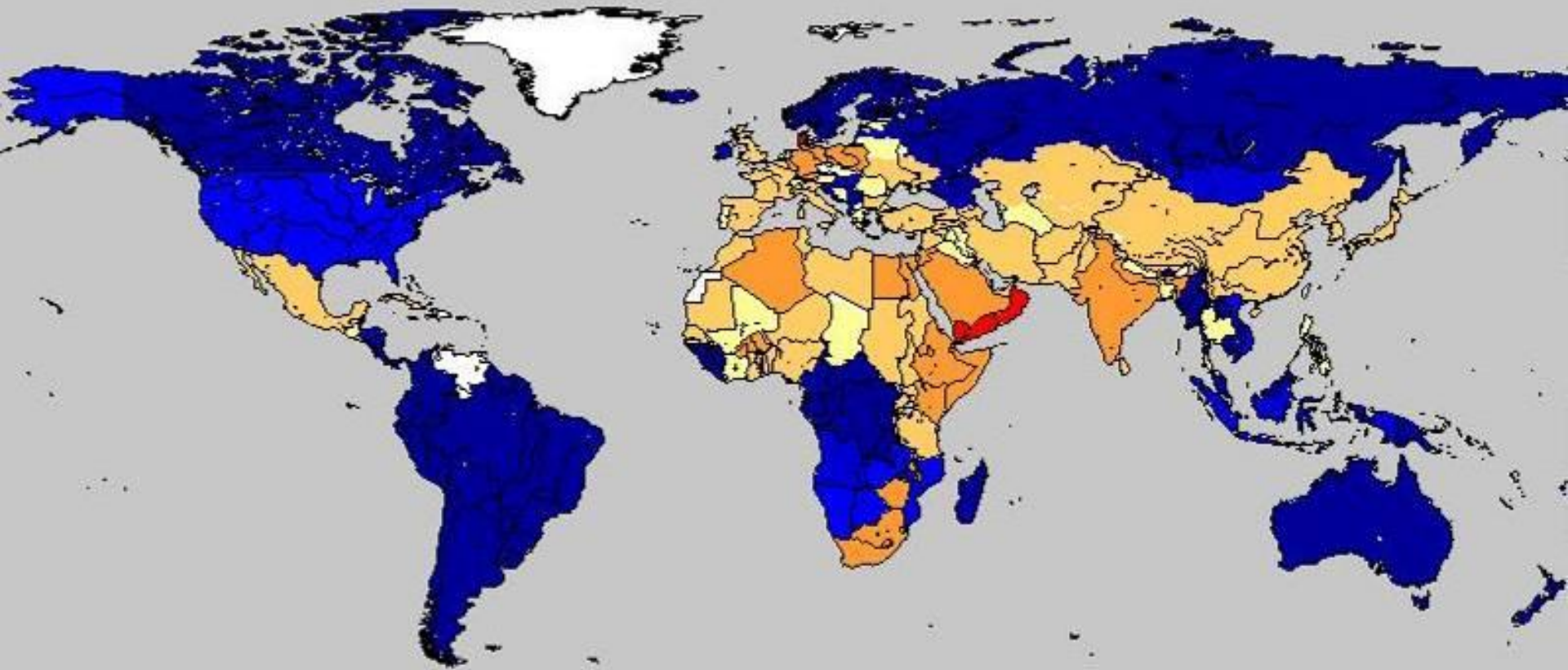


世界の水資源統計等から算出



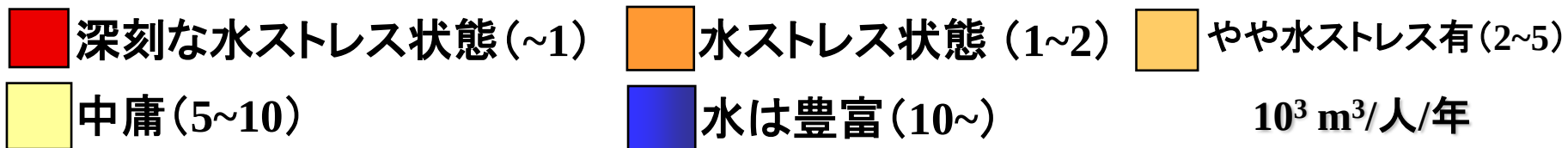
Virtual Waterを考慮した世界水資源アセスメント

2000年における各国の一人当たり水資源賦存量



世界の水資源統計等から算出

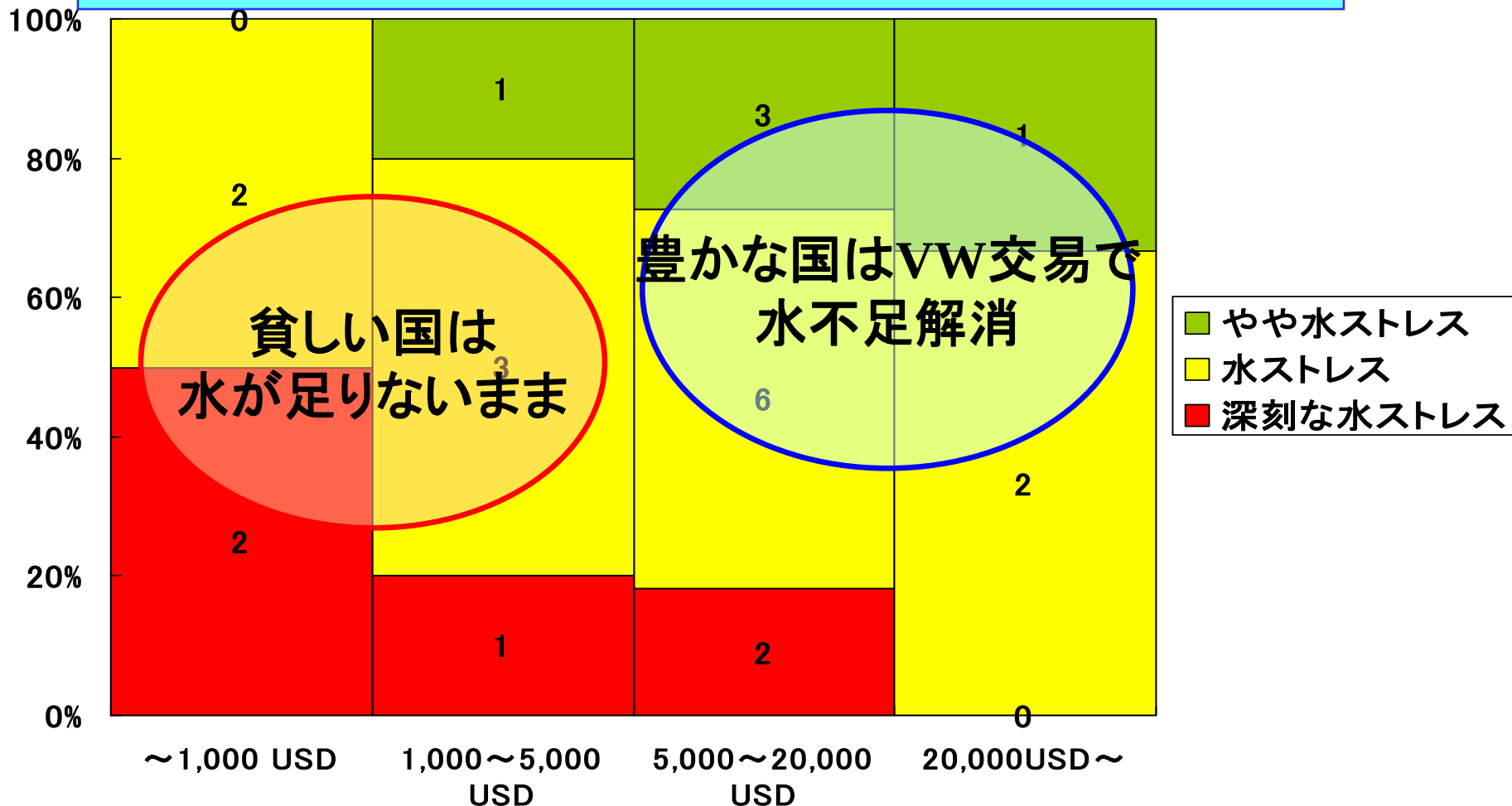
(Oki, et. al, 2004)



Virtual Water 交易を考慮した水資源アセスメント

2000年時点で、23カ国が“深刻な水ストレス”に分類される。

➔ +Virtual Water 輸入を考慮すると...



年間1人あたりGDP

Virtual Water貿易がいかにして世界の水を節約するのか？

1トンの大豆を作るのに必要な水の量の日米間の比較

1トンの大豆



USA



1,700m³

日本



2,500m³

1トンの大豆をUSAから日本へ輸出する

Real Water

USAで実際に
投入された水の量

USA

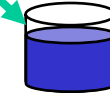


輸出 1,700m³

Virtual Water

日本で必要であった
と考えられる水の量

日本



輸入 2,500m³

貿易

1トンの大豆

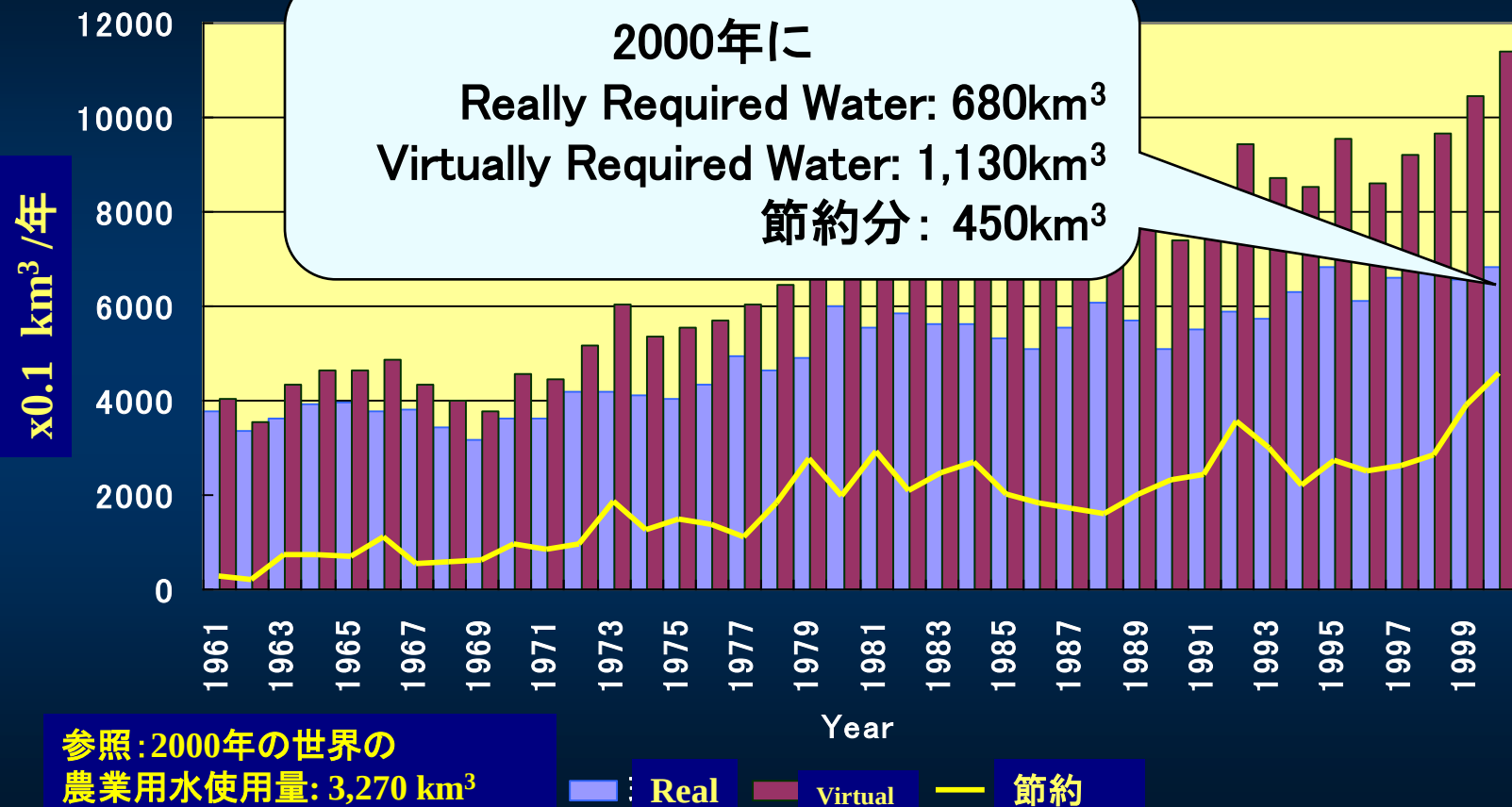
$$2,500 - 1,700 = 800\text{m}^3$$

VW貿易によって水資源が節約される?!

←水効率に関する比較優位の法則

仮想的に節約された世界の水資源量

RW and VW (穀物と肉類) 1961-2000



Virtually Required Water = 各国のVW 輸入量総計 ...①

Really Required Water = 各国のRW 輸出量総計 ...②

節約分 = ① - ②

Virtual Water Tradeの長所・短所

💧 長所

- ✓ より現実的な水資源アセスメント
- ✓ 将来の食料需給の推定
- ✓ 水消費プロセスの吟味
- ✓ 水資源問題への一般認識の増大

💧 短所：水の量しか考えていない

- ✓ 他の生産手段（土地、エネルギー等）の制約
- ✓ 地域の生産コミュニティ、環境への影響

- 💧 結局: Virtual Water Tradeは水資源配分を考えるtool。水資源が増えるわけではない。
➔ 有効に転用されなければならないのと同じ。

他品目への拡張—野菜・果物—

野菜の水消費原単位 40品目

算定方法

作物栽培カレンダー
の作成

畑作灌漑単位用水量
—「水資源便覧」
栽培期間
—「野菜の上手な作り方」

総投入水量算定 (露地・施設で区別)

単収(作付面積・出荷量より)
—「野菜出荷統計」

野菜の消費原単位

果物の水消費原単位 18品目

果樹は永年性→森林の年間蒸発散量を基に算定

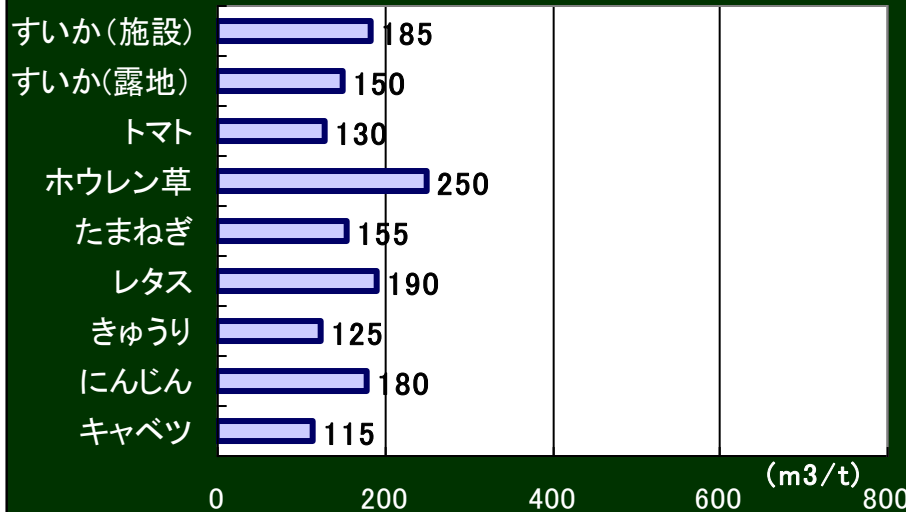
主産県の森林年間蒸発散量を調査
果実ごとの平均値を算出

—「森林における蒸発散量」(近藤,1992)

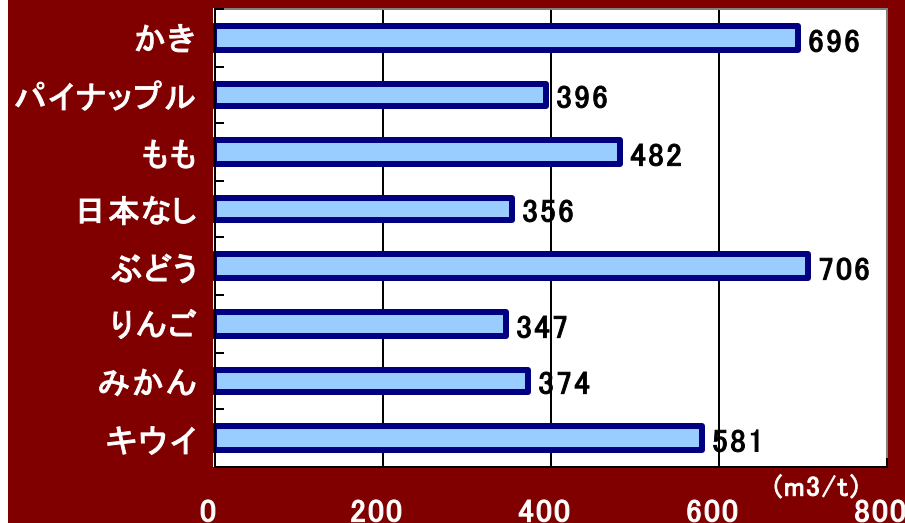
果実種別年間総投入水量

単収(作付面積・出荷量より)
—「果樹出荷統計」

果物の消費原単位



栽培期間に幅があるため、原単位も範囲を考慮
加工品には平均値を用いる (■数値は平均値)



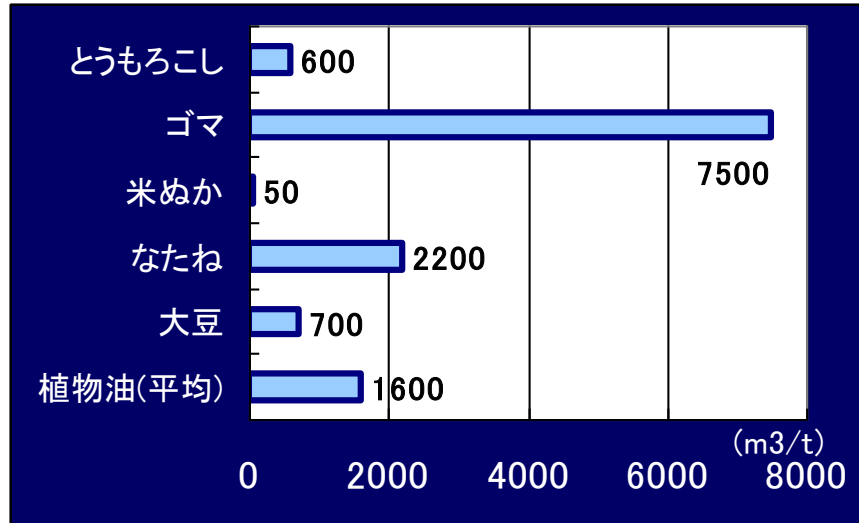
食べ物の生産に必要な水の量

$$\begin{array}{l} \text{仮想水量/} \\ \text{ウォーター} \\ \text{フットプリント} \\ \text{量 (l/kg)} \end{array} = \frac{\text{光合成に必要な水の量 (E)}}{[\text{乾燥重量 (D)} + \text{食品中の水の量 (W)}] \times \text{可食部割合 (r)}}$$

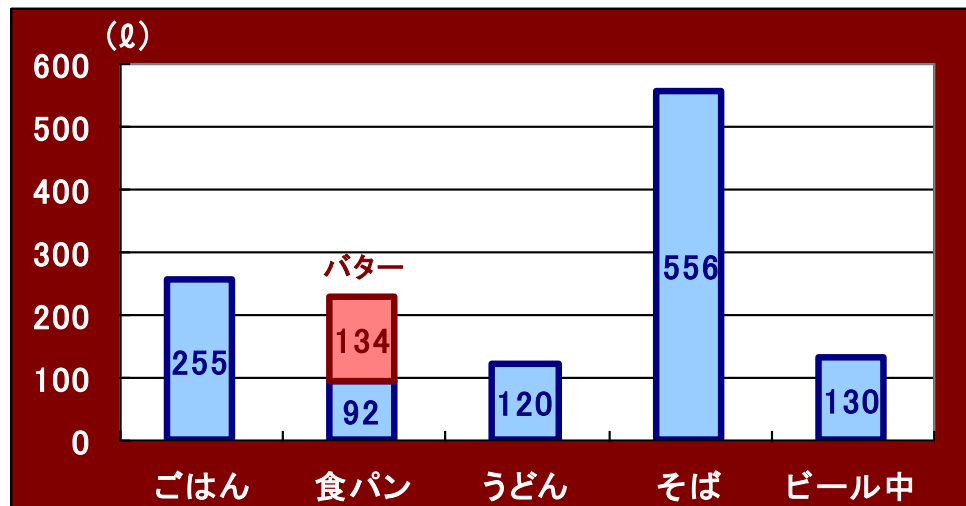
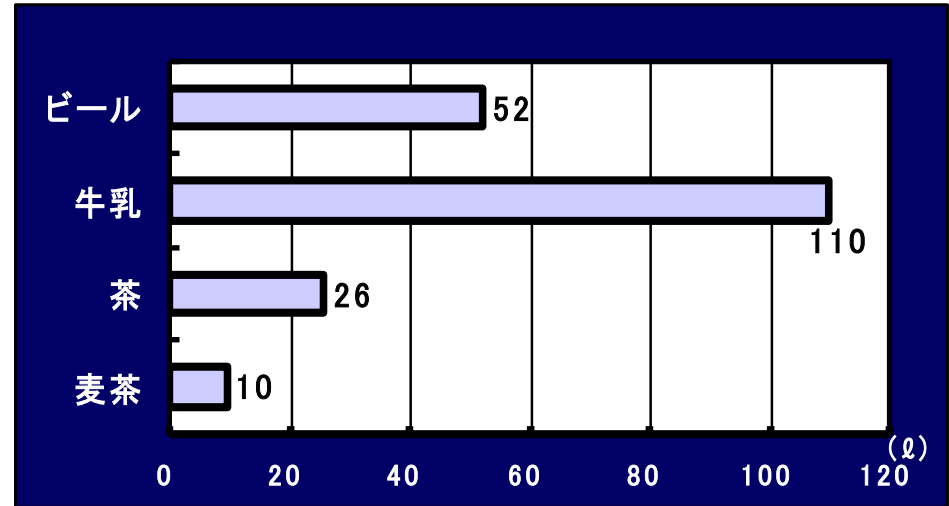
- 💧 光合成に必要な水の量 (E) は乾燥重量 (D) に比例し、例えば、とうもろこしでは約350倍、稲では約400倍。
 - ✓ (2g成分 + 98gの水) の果物 → $2 \times 400 + 98 \div 900$ gの水
 - ✓ (20g成分 + 80gの水) の食品 → $20 \times 400 + 80 \div 8100$ gの水
 - 新鮮で瑞々しい食物 ($D \ll W$) は必要な水が相対的に少ない
 - ✓ 小さな果実や種 ($r \ll 1$) だと、食べる部分以外の幹や葉や茎、皮や芯や根が育つのに必要な光合成の分の水が大量に必要 → 必要な水の量は相対的に多い
- 💧 非効率な灌漑をすると、さらに水が必要となる

加工食品の水消費原単位

植物油の原単位の比較



飲料コップ1杯当たりの投入水の比較

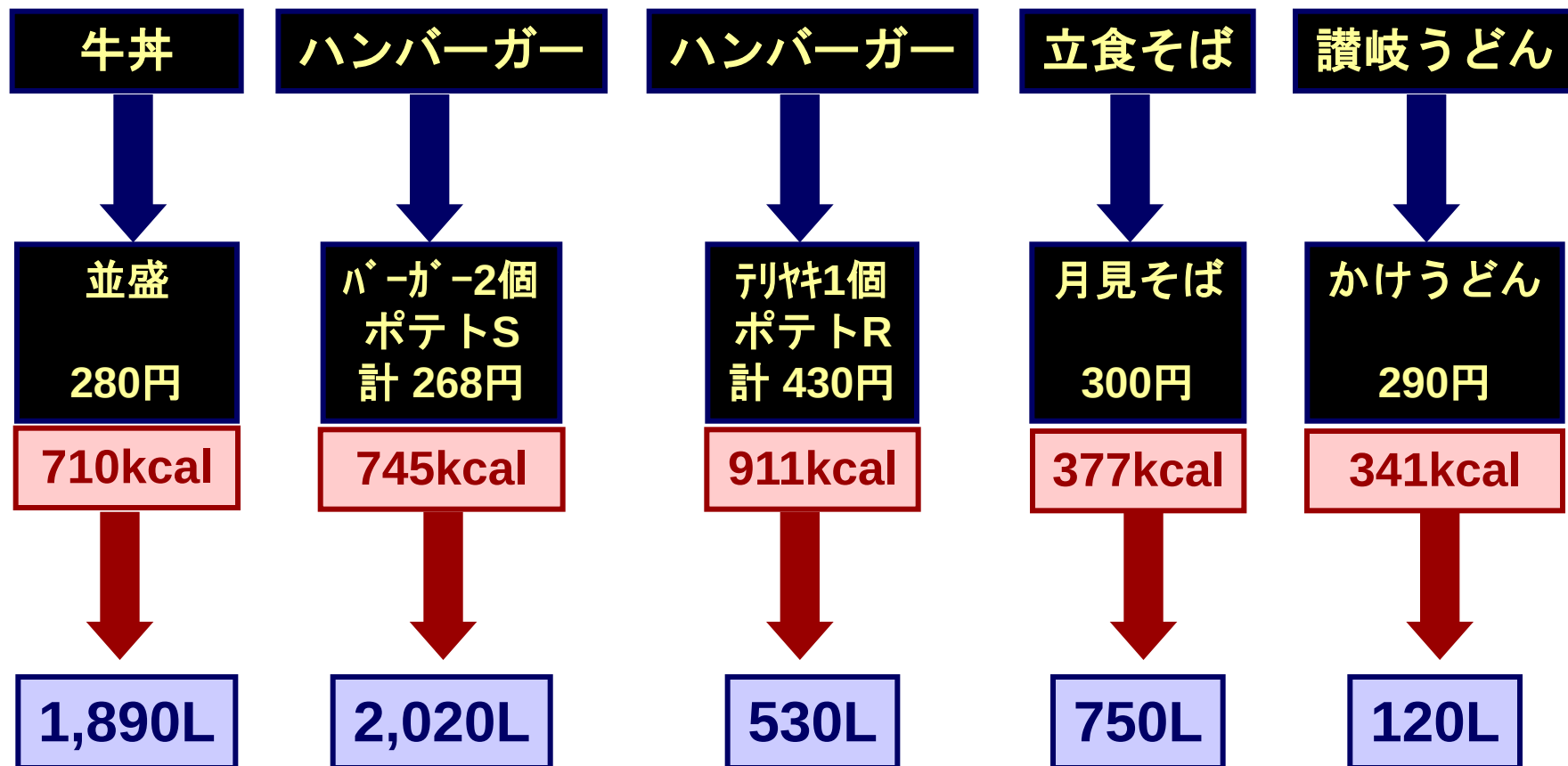


主食 1 食分の投入水比較

- ・ 小麦製品 < ごはん < そば
- ・ 食パンは投入水が少ないが、バターを塗るとご飯と同程度になる
- ・ ビール 2 杯でごはん 1 杯分

水消費原単位の利用 ーファーストフードー

早く安く食べたい！というときに重宝するファーストフード
あなたならどれを食べますか？



Virtual WaterとWater footprint

- 💧 本来のVirtual Water Tradeの概念は水資源需給への食料交易の影響推計←やや難しい
- 💧 A. Hoekstraらをはじめ、つい「食料生産に必要な水」で、目に見えないので“virtual”と解釈
 - ✓ VWの収支はとれるが、比較優位は計算不能
- 💧 Virtual water contentからwater footprintへ
 - ✓ Ecological footprint
 - ✓ Carbon footprint
 - ✓ Water footprintも環境負荷の「見える化」指標に？

水消費原単位推計値の比較

表1

バーチャルウォーター/ウォーターフットプリントに関連する
いくつかの研究グループによる水消費原単位の推計結果
食品の可食部重さあたり生産に必要な水の量で、単位は m^3/t あるいは ℓ/kg

	Hoekstra & Hung (2003)*	Chapagain & Hoekstra (2003)*	Zimmer and Renault (2003)**	Oki et al. (2003)***
小麦	1150		1160	2000
米	2656		1400	3600
とうもろこし	450		710	1900
じゃがいも	160		105	193
大豆	2300		2750	2500
牛肉		15977	13500	20700
豚肉		5906	4600	5900
鶏肉		2828	4100	4500
卵		4657	2700	3200
牛乳		865	790	560
チーズ		5288		4428

* 世界平均 ** 大豆はエジプトの値、それ以外はカリフォルニアに対する推計値

*** 日本に対する推計値。じゃがいもとチーズ（パルメザンチーズ）は佐藤（2003）の推計値

水消費原単位推計値の違い

💧 何を「水を使う」と考えるのか？

✓ 蒸発散分だけ？（UNESCO group）

❄ 戻る分もなくては灌漑できず

❄ 下流の水ユーザの存否次第

✓ 取水量？（IIS/UT）

❄ 還流分が下流で利用されればダブルカウントに

❄ 灌漑ロスも「使った水」と考えるのか？ ← 地下水涵養？

💧 「収穫量」あたりか、「可食部」あたりか

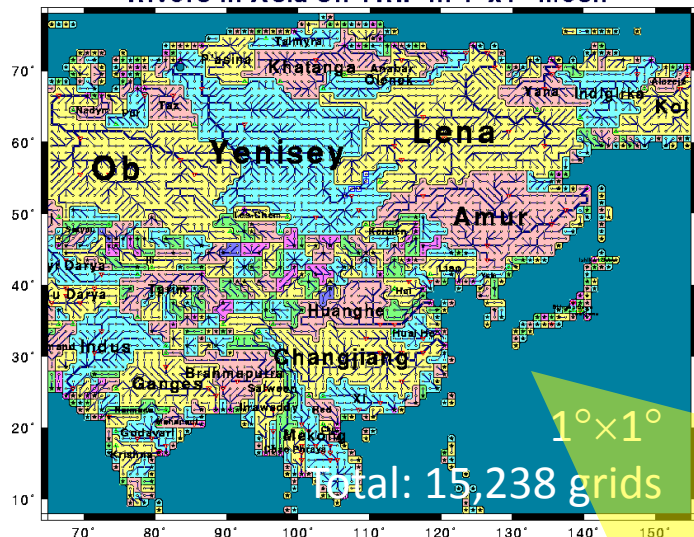
✓ 国際貿易統計は粗つきとかいろいろ。換算必要。

💧 そもそも、年、地域によって大きく変化する。

ウォーターフット
プリントはどの
くらいいい？

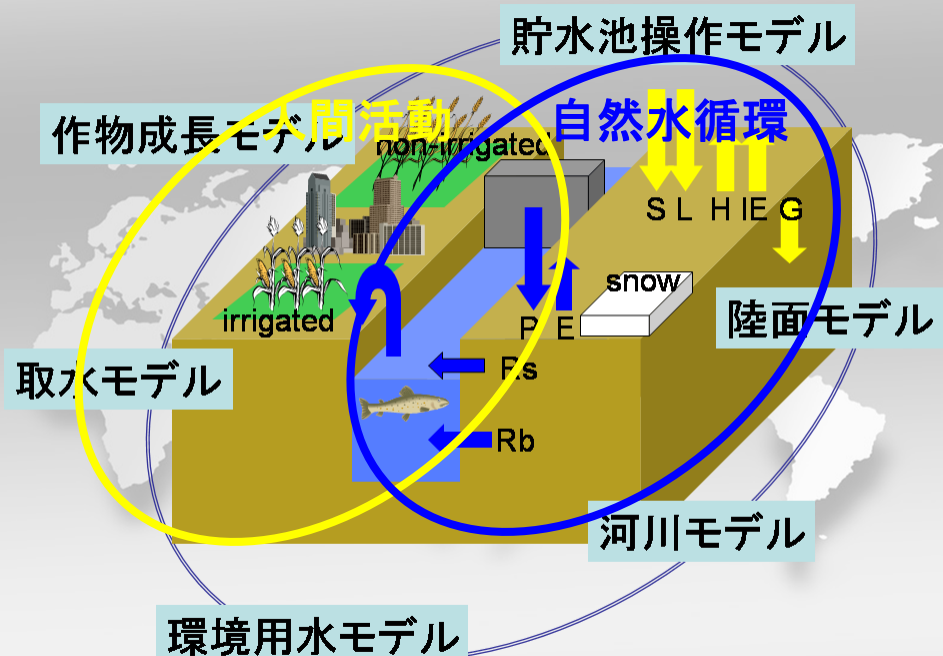
全球統合水資源モデルの開発

Rivers in Asia on TRIP in 1°x1° mesh



- ◆ 特徴1: 充実した人間活動サブモデル
 - ✓ 取水、灌漑、ダム操作、環境用水など
 - ✓ 人口推計では都市と農村を分離
- ◆ 特徴2: 高い時間解像度
 - ✓ 水資源量と水利用量を日単位で計算
- ◆ 特徴3: 高い要素間の整合性
 - ✓ 気象条件が全てのサブモデルを駆動
- ◆ 特徴4: 気候変動予測との親和性
 - ✓ IPCC SRESに沿う水需要の将来予測
 - ✓ 気候モデルの陸面過程部分の利用

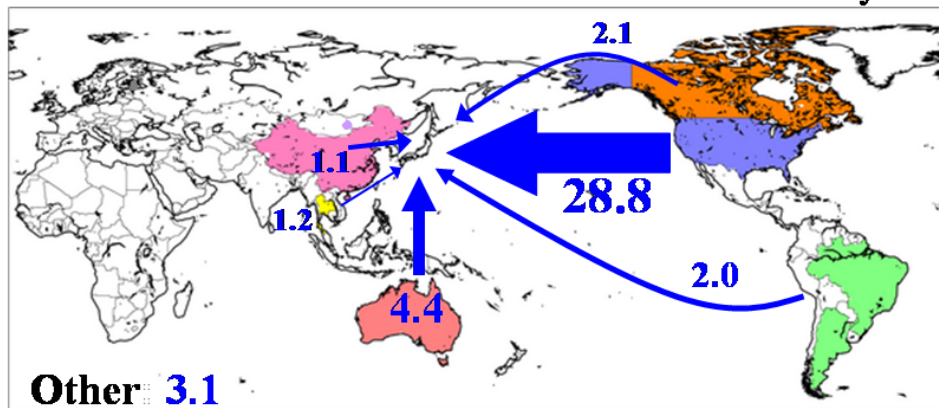
- ◆ 東京大学と国立環境研究所との共同開発
 - ✓ 河川モデル部分は欧米研究機関へ「輸出」
 - ✓ IPCC第4次報告書で23中6のモデル出力が利用
- ◆ 出力項目: 水資源量 + 水利用量
- ◆ 現状の解像度: 1° × 1° (緯度・経度)、日単位
- ◆ 窒素循環、動的地下水への拡張中。
- ◆ 実時間洪水リスク予測への応用実装中。



取水源別日本のウォーターフットプリント (生産にどの水がどのくらい使われたのか?)

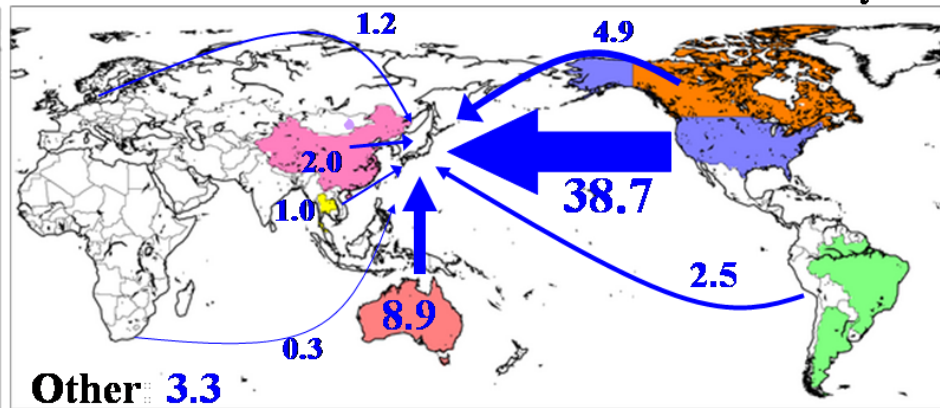
日本の総ウォーターフットプリント

Unit: km³/year

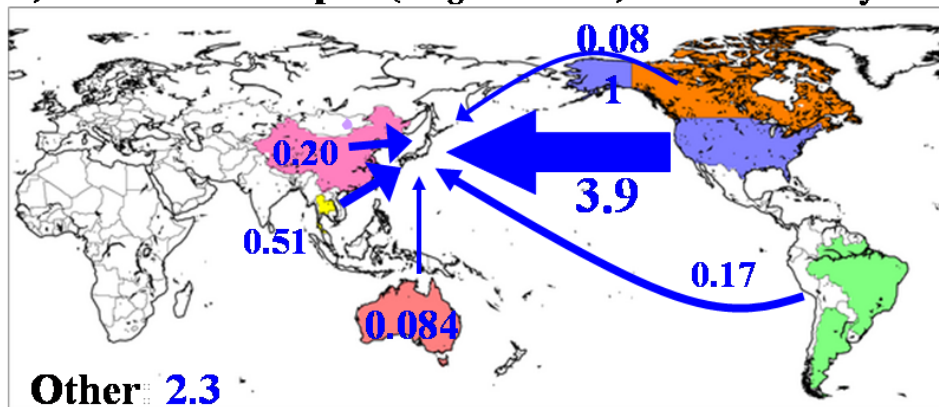


ヴァーチャルウォーター輸用量

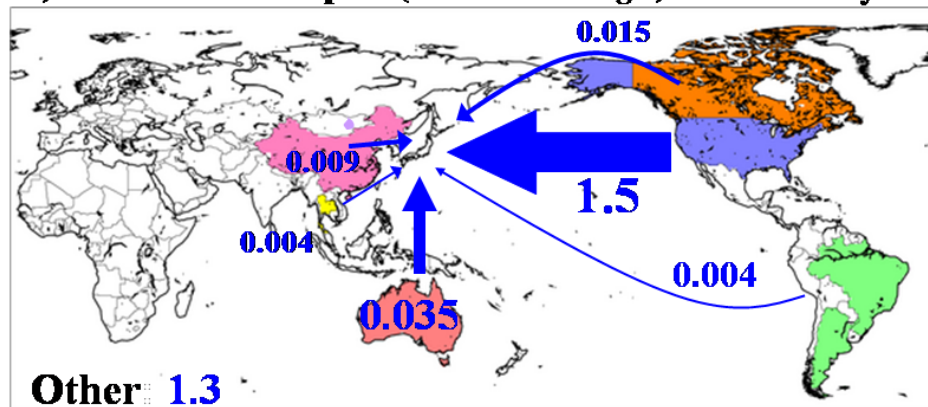
Unit: km³/year



日本のウォーターフットプリント(灌漑水)
Total: 42.7km³/year



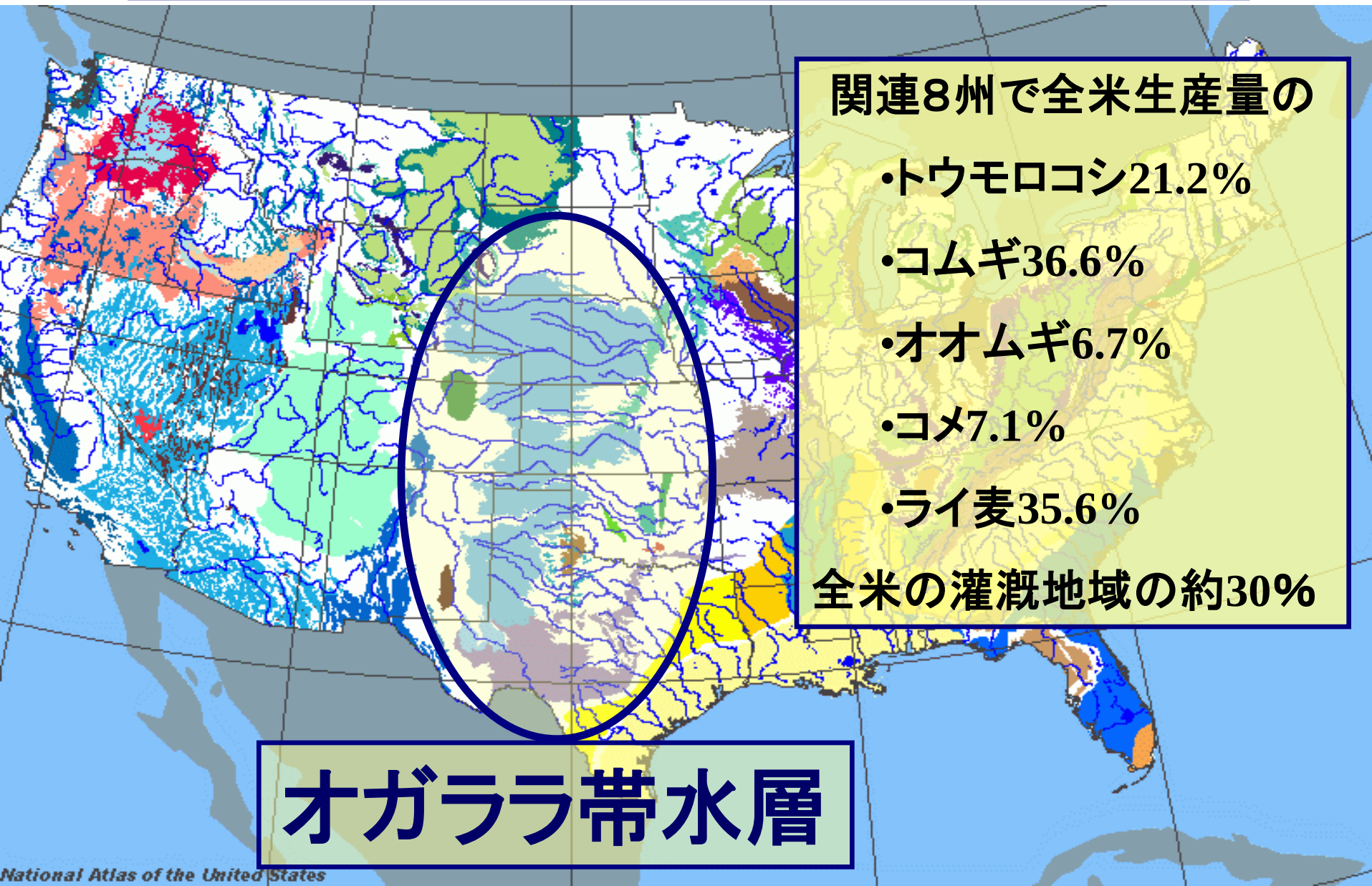
日本のウォーターフットプリント(地下水)
Total: 62.7km³/year
d) External water footprint (non-renewable gw) Unit: km³/year



Total: 7.3km³/year

Total: 2.9km³/year

米国の地下水脈の分布



Ogallala帯水層の 水位変化 開発前～2000年 (米地質調査所)

一番濃い赤は150feet以上低下。
濃い水色は50feet以上上昇。
領域平均では13.3feet≒4m低下。

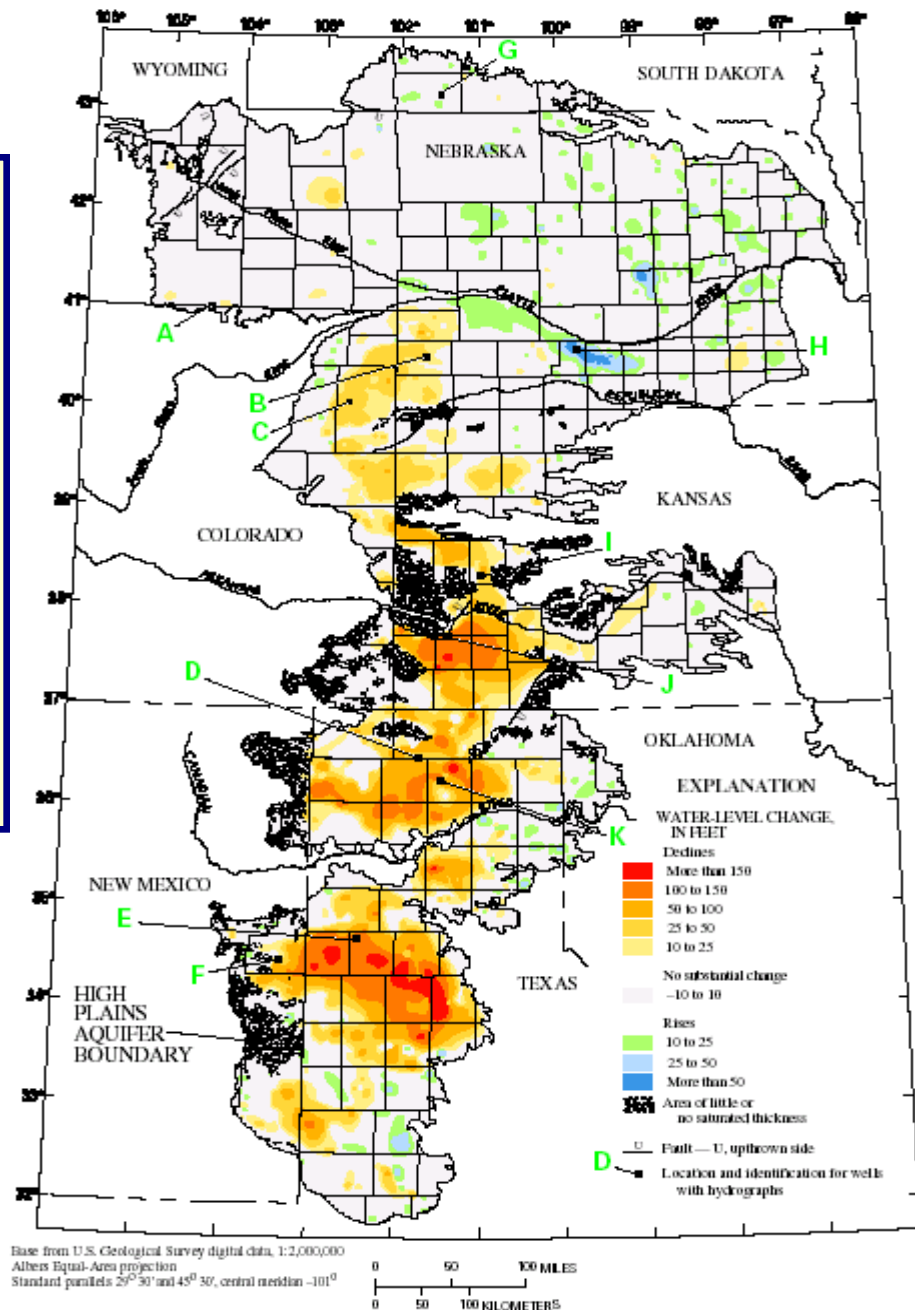


Figure 19. Water-level changes in the High Plains aquifer, predevelopment to 2000, and location of selected wells with hydrographs. See hydrographs in figure 20.



開講してしまった...

東京大学総括プロジェクト機構
「水の知」(サントリー)総括寄付講座
教養学部前期課程講義
全学自由研究ゼミナール
水の知最前線『**水で生きる**』
4月9日～7月10日(金)、15日(水)
毎週金曜日5限16:20～17:50
駒場キャンパス1号館113教室



『水と社会』

「川の本質と水辺のまちづくり」

大熊孝

(NPO法人新潟水辺の会代表、
新潟大学名誉教授)

「水と市民参加型社会」

小倉紀雄

(東京農工大学名誉教授)



『水と政治経済』

「水を巡る国家間の確執と協調」

中山幹康（東大新領域創成科学）

「今なぜ世界が水をめぐる
ビジネスに着目するのか？」

吉村和就（Global Water Japan）

「健全な水商売」

樋口直樹（サントリー水科学研究所）



『水と健康・衛生』

「MDGsと開発途上国の水と衛生」

滝沢 智（東大工学系都市工）

「トイレから世界を変える」

加藤 篤（日本トイレ研究所所長）

「飲み水の水質基準はどのように決めるのか？」

浅見 真理（国立保健医療科学院）

「マニラで水道を作る」

西村 弘（三菱商事）



『水と自然環境』

「水と生態系と地域社会」

清野聡子（東大総合文化研究科）

「農地は水のコントロールが命

ー農地情報リアルタイムモニタリングシステム」

溝口勝（東大情報学環）

「水と森と人」

蔵治光一郎（東大農学生命科学）

「地下水と人和社会」

徳永朋祥（東大新領域創成科学）

ご清聴ありがとうございました。



飲水思源

飲食思水