

全球河川流路網モデルを用いた
世界水資源評価

Global Water Resource Assessment using
Total Runoff Integrating Pathways

ID.96030

猿橋 崇央

東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤工学専攻

2001年2月

論文要旨

20世紀は、人間活動が大きく拡大する世紀であった。人口増加、工業発展及び国際政治経済活動は、地球規模で環境を変化させ、かつその影響が自らの社会に打撃を加えるまでに至った。世界各地で生じている、水不足及びそれに関連した環境破壊は、その一例である。その現状は、今後の更なる人口拡大及び社会経済活動の拡大により、逼迫することが危惧される。そして、水不足はまた、国際紛争の火種ともなり得て、特に国際河川における将来の国家間対立が懸念されている。そのような、水資源に関する重要性及び将来の危険性を背景として、近年になって、グローバルな水資源評価が行なわれるようになってきている。しかしながら、水資源として重要なものである河川流量に関する情報は極めて乏しいものであり、グローバルな水資源評価は非常に困難である。また、将来国家間紛争が危惧される国際河川における、流域内諸国に対する比較研究はなされていない。

そうした状況をふまえて、本研究では、まず、数値気候モデルによる出力から直接グローバルな河川流量が算定可能な全球河川流路網モデル (TRIP) を用いて、全球グリッド化した水資源賦存量を推計した。続いて、水需要側としては、国別の取水統計データ、及び各種グリッド化されたグローバルデータセットを用いることにより、水需要量の分布を推計した。さらに、水需給バランス、及びそれに国毎の経済指標を算入した水資源評価を行なった。その様な評価を、グローバル、国毎、流域毎の各スケールを対象として行なう。対象を複数選定することで、潜在的な水危機が顕在化すると考えた。そして、最後に起こり得べきシナリオを複数適用して、将来に対する水資源評価を行なった。上記のような水資源評価をするにあたって、幾つかの問題点が存在した。まず、各グローバルデータセット間におけるデータのずれである。その問題点に関しては、本研究では、幾つか用いたデータセットのうちの一つである国境データにそろえることにした。また、その国境データには、現在目まぐるしく変遷する国家情勢の中、そのデジタルデータと比較して、現実には既に変化して異なる国境線が引かれることになっているケースがあった。それに対しては、最新の印刷地図を参照しながら手作業による修正を加えた。さらに、水需要量推計の基とした国別の取水量統計データに関しても各国間データ年次が異なる、といった問題点が生じた。それに関しては、過去の研究成果を参照しながら補正した。

以上のような過程を経て、水資源評価の結果として、次のような知見が得られた。まず、グローバルな分布を求めたところ、水資源及びそれに対する水需要の地域遍在は極めて大きく、各地域間で水資源に対する逼迫度は大きく異なる。特に、灌漑農地で水資源の逼迫度は厳しく、また、灌漑農地における取水量の占める割合が大きく、農業用水が水資源に関して重要な要素であることが言える。そして、水需給バランスに経済指標を加えることで、各地域における水資源に対する真の意味での危険度を、第一段階とはいえ、示すことができた。さらに、将来推計では、地域毎に今後の動向が大きく異なり、これは人口増加が最も大きな要因であると考えられる。

本研究における水資源評価は、数値気候モデルとの連携を図って将来予測をすることができ、かつ、評価対象も複数選定し、将来水資源を巡る状況の悪化の想定される国際河川についても流域国間での比較検討が可能であることから、本研究のような水資源評価方法は極めて有意義なものであると考えられる。

目次

1	序章	1
1.1	背景	1
1.1.1	水資源に関する背景	1
1.1.2	社会的背景	2
1.1.3	研究の背景	4
1.2	目的	5
1.3	本論文の構成	6
2	水資源賦存量の推計	7
2.1	水資源賦存量推計に用いるデータ	7
2.2	水資源賦存量の推計	8
2.2.1	月毎河川流出量のグローバル分布	8
2.2.2	年間河川流量の算定	13
3	取水量の推計	16
3.1	取水量推計の方法	16
3.2	国別単位当り取水量の推計	17
3.2.1	国別単位当り取水量推計に用いるデータ	17
3.2.2	国別単位当り取水量の推計	18
3.3	取水量分布の推計	20
3.3.1	取水量分布推計に用いるデータ	20
3.3.2	取水量分布の推計	26
4	水資源評価	34
4.1	水資源評価の概要	34
4.2	1人当り水資源賦存量のみによる評価	35
4.3	水需給バランス評価	37
4.3.1	渇水比率	37
4.3.2	水需給バランス評価と水の再利用に関する問題点	37
4.3.3	水需給バランス評価(2)～河川流域毎の評価～	40
4.3.4	水需給バランス評価結果の考察	41
4.4	経済指標を考慮に入れた水資源評価	42
4.5	水資源評価のまとめ	45
4.5.1	大陸毎評価	45

4.5.2	国毎評価	45
4.5.3	河川流域毎評価	50
4.6	国際河川に対する評価	53
5	将来水資源予測	55
5.1	推計方法と将来シナリオ	55
5.2	将来水資源予測	59
5.3	河川流域間シナリオ毎の比較	68
5.4	国際河川における評価	70
5.5	本章におけるまとめ	70
6	終章	71
6.1	結論	71
6.2	データに関する問題点と本研究における対処について	72
6.3	今後の課題	72

目次

1.1	1950年に対する人口、及び取水量の変化:1950年を1とする (Siklomanov,1999を基に作成)	4
2.1	TRIP月毎河川流量(1~3月)[$10^6\text{m}^3/0.5^\circ\text{grid}/\text{month}$]	9
2.2	TRIP月毎河川流量(4~6月)[$10^6\text{m}^3/0.5^\circ\text{grid}/\text{month}$]	10
2.3	TRIP月毎河川流量(7~9月)[$10^6\text{m}^3/0.5^\circ\text{grid}/\text{month}$]	11
2.4	TRIP月毎河川流量(10~12月)[$10^6\text{m}^3/0.5^\circ\text{grid}/\text{month}$]	12
2.5	TRIP年間河川流量	13
2.6	GSWP LSM 平均年間流出量	14
3.1	水需要量推計の流れ	16
3.2	年間総取水量の変化(概念図)	19
3.3	ESRIデータに基づいた国面積とFAO値との比較	21
3.4	1990年における世界の人口分布	23
3.5	CIESIN人口分布データに基づく国毎人口と国連の国別値との比較	23
3.6	人口、灌漑農地、農地面積の変化(1961年を1とする)	25
3.7	灌漑農地面積分布	25
3.8	Kassel Univ. 灌漑農地面積分布データに基づいた国毎灌漑面積とFAO国別値との比較	26
3.9	1990年における生活用水取水量分布の推計結果	28
3.10	1990年における工業用水取水量分布の推計結果	28
3.11	農業用水取水量分布の推計結果	29
3.12	年間総取水量分布の推計結果	29
3.13	農地面積分布	31
3.14	SAGE農地面積分布に基づいた国毎農地面積とFAO国別値の比較	31
3.15	農業用水取水量分布の推計結果~農地面積分布より推計~	32
3.16	農地面積分布より求めた農業用水取水量と灌漑農地面積分布より求めた農業用水取水量の相違	32
3.17	年間総取水量分布の推計結果 ~農地面積分布より推計~	33
4.1	水資源評価の流れ	34
4.2	1人当り年間水資源賦存量(1990年) 上図:グリッド毎評価, 下図:流域毎評価	36
4.3	渇水比率の分布	38
4.4	全取水量に対する農業用水取水量の占める割合	39
4.5	流域毎の渇水比率の分布	40

4.6	水不足に対する深刻度が高いと推測される地域の分布 (グリッド毎評価)	43
4.7	水不足に対する深刻度が高いと推測される地域の分布 (流域毎評価)	44
5.1	1990 年に対する 2050 年の人口増加率 (出典 : WRI)	58
5.2	現状に対する二酸化炭素倍増時の年間河川流量変化量	58
5.3	2050 年の渇水比率 (上図) と 1990 年からの変化率 (下図) : シナリオ 1	60
5.4	2050 年の渇水比率 (上図) と 1990 年からの変化率 (下図) : シナリオ 2	61
5.5	2050 年の渇水比率 (上図) と 1990 年からの変化率 (下図) : シナリオ 3	62
5.6	2050 年の渇水比率 (上図) と 1990 年からの変化率 (下図) : シナリオ 4	63
5.7	2050 年の渇水比率 (上図) と 1990 年からの変化率 (下図) : シナリオ 1 [流域毎評価]	64
5.8	2050 年の渇水比率 (上図) と 1990 年からの変化率 (下図) : シナリオ 2 [流域毎評価]	65
5.9	2050 年の渇水比率 (上図) と 1990 年からの変化率 (下図) : シナリオ 3 [流域毎評価]	66
5.10	2050 年の渇水比率 (上図) と 1990 年からの変化率 (下図) : シナリオ 4 [流域毎評価]	67
5.11	シナリオ毎の各流域の渇水比率変化	69
5.12	インダス川流域各国の渇水比率変化	69

表 目 次

1.1	水資源の地域遍在	3
2.1	大陸毎水資源賦存量 (km ³ /year)	14
2.2	国毎年間水資源賦存量 (km ³ /year)	15
2.3	河川流域毎水資源賦存量 (km ³ /year)	15
3.1	取水量推計に用いた国別統計データ (WRI CD-ROM より)	17
3.2	取水量分布の推計に用いたグローバルデータ	17
3.3	大陸毎総取水量の変化 [km ³ /year]	19
3.4	農業用水需要量推計に用いなかったデータ	30
4.1	渇水比率レベル毎の人口～評価方法毎の比較、及び他研究との比較～	41
4.2	大陸毎評価	45
4.3	国毎評価 (人口の多い国) [km ³ /year]	46
4.4	国毎評価 (生活用水取水量の多い国) [km ³ /year]	46
4.5	国毎評価 (工業用水取水量の多い国) [km ³ /year]	47
4.6	国毎評価 (農業用水取水量の多い国) [km ³ /year]	47
4.7	国毎評価 (総取水量の多い国) [km ³ /year]	48
4.8	国毎評価 (渇水比率の高い国) [km ³ /year]	48
4.9	国毎評価 (1人当り GDP 国の低い国) [km ³ /year]	49
4.10	国毎評価 (1人当り GDP 国の高い国) [km ³ /year]	49
4.11	流域評価 (人口の多い流域) [km ³ /year]	50
4.12	流域毎評価 (生活用水取水量の多い流域) [km ³ /year]	50
4.13	流域毎評価 (工業用水取水量の多い流域) [km ³ /year]	51
4.14	流域毎評価 (農業用水取水量の多い流域) [km ³ /year]	51
4.15	流域毎評価 (総取水量の多い流域) [km ³ /year]	52
4.16	流域毎評価 (渇水比率の高い流域) [km ³ /year]	52
4.17	国際河川に対する評価 [km ³ /year]	54
5.1	将来シナリオ	55
5.2	2025年,2050年における生活部門の1人当り水利用変化と工業部門の水利用効率改善係数 (1990年を1とする)	56
5.3	地域毎の GDP 推定値 (Billions US \$1990)	57

論文要旨

20世紀は、人間活動が大きく拡大する世紀であった。人口増加、工業発展及び国際政治経済活動は、地球規模で環境を変化させ、かつその影響が自らの社会に打撃を加えるまでに至った。世界各地で生じている、水不足及びそれに関連した環境破壊は、その一例である。その現状は、今後の更なる人口拡大及び社会経済活動の拡大により、逼迫することが危惧される。そして、水不足はまた、国際紛争の火種ともなり得て、特に国際河川における将来の国家間対立が懸念されている。そのような、水資源に関する重要性及び将来の危険性を背景として、近年になって、グローバルな水資源評価が行なわれるようになってきている。しかしながら、水資源として重要なものである河川流量に関する情報は極めて乏しいものであり、グローバルな水資源評価は非常に困難である。また、将来国家間紛争が危惧される国際河川における、流域内諸国に対する比較研究はなされていない。

そうした状況をふまえて、本研究では、まず、数値気候モデルによる出力から直接グローバルな河川流量が算定可能な全球河川流路網モデル (TRIP) を用いて、全球グリッド化した水資源賦存量を推計した。続いて、水需要側としては、国別の取水統計データ、及び各種グリッド化されたグローバルデータセットを用いることにより、水需要量の分布を推計した。さらに、水需給バランス、及びそれに国毎の経済指標を算入した水資源評価を行なった。その様な評価を、グローバル、国毎、流域毎の各スケールを対象として行なう。対象を複数選定することで、潜在的な水危機が顕在化すると考えた。そして、最後に起こり得べきシナリオを複数適用して、将来に対する水資源評価を行なった。上記のような水資源評価をするにあたって、幾つかの問題点が存在した。まず、各グローバルデータセット間におけるデータのずれである。その問題点に関しては、本研究では、幾つか用いたデータセットのうちの一つである国境データにそろえることにした。また、その国境データには、現在目まぐるしく変遷する国家情勢の中、そのデジタルデータと比較して、現実には既に変化して異なる国境線が引かれることになっているケースがあった。それに対しては、最新の印刷地図を参照しながら手作業による修正を加えた。さらに、水需要量推計の基とした国別の取水量統計データに関して各国間データ年次が異なる、といった問題点が生じた。それに関しては、過去の研究成果を参照しながら補正した。

以上のような過程を経て、水資源評価の結果として、次のような知見が得られた。まず、グローバルな分布を求めたところ、水資源及びそれに対する水需要の地域遍在は極めて大きく、各地域間で水資源に対する逼迫度は大きく異なる。特に、灌漑農地で水資源の逼迫度は厳しく、また、灌漑農地における取水量の占める割合が大きく、農業用水が水資源に関して重要な要素であることが言える。そして、水需給バランスに経済指標を加えることで、各地域における水資源に対する真の意味での危険度を、第一段階とはいえ、示すことができた。さらに、将来推計では、地域毎に今後の動向が大きく異なり、これは人口増加が最も大きな要因であると考えられる。

本研究における水資源評価は、数値気候モデルとの連携を図って将来予測をすることができ、かつ、評価対象も複数選定し、将来水資源を巡る状況の悪化の想定される国際河川についても流域国間での比較検討が可能であることから、本研究のような水資源評価方法は極めて有意義なものであると考えられる。

Chapter 1

序章

1.1 背景

1.1.1 水資源に関する背景

「水を語らずして、人類の文明史を語ることはできない。」サンドラ・ポステルは、著書「水不足が世界を脅かす」(ポステル (2000)) の冒頭で述べている。定住農業の始まり、都市の発展は、より居住可能な土地を得るための水との戦いの歴史である、というのである。確かに、水の存在なくして地球生命の存在はあり得ない。水は、人間の社会・経済的な活動を支える重要な要素である。そして、生命維持に不可欠な物質であると同時に、地球環境を構成する重要な要素である。その水に関連して、今世紀、人類は“水危機”に瀕する、との危惧がされている。本節では、地球上に存在する水の性質、及び資源としての水の特徴を述べ、水資源全般に関して俯瞰する。

(1) 地球環境と水循環

地球上生命は、地球大気の常に変動する気温と気圧によって輸送される水のおかげで、その存在が可能になっているといわれている (トーマス E, ポール J (1997))。地球環境の中で、地球気候システムは、太陽からのエネルギーの収支、分配、輸送により形成されているが、そのいずれも水の介入なしでは成り立ち得ない。すなわち地球上の水循環は、地球環境の形成、維持、変動において重要な役割を果たしていると言える。

(2) 地球資源の中の水資源

人間活動を支える地球資源には、石油・石炭・天然ガスなどの化石資源、そして放射性物質、太陽熱・太陽光、水(水力)、風(風力)、バイオマスなどのエネルギー資源、金属(鉄、銅、亜鉛、金、銀)及び非金属(土石資源等)を含む鉱物資源、食糧(農作物、畜産物、水産物)及び森林等の生物資源、土壌資源、そして水資源と、大きく分類することができる(岩波講座(1996))。その中で水資源は、地球上に常時循環している再生資源であり、他の資源に対して密接に影響を及ぼしているだけでなく、それ自身が極めて重要な資源である。

(3) 水資源

地球上に存在する水の量は、およそ 14 億 km^3 であるといわれている。そのうちの約 97.5 % が

海水であり、淡水は約 2.5 % である。さらに、その淡水の大部分は南北両極の氷として蓄積されており、比較的利用が容易な河川水や湖沼水として存在する水の量は、全淡水の約 0.3 %、1 万 km³にも満たないとされている (Shiklomanov (1999))。

一方で、再生可能な資源としての水は、地球上の水循環により絶えず使われ、そして再生されている。前出の Shiklomanov らの研究によれば、年間 577,000 km³ の水が地球上を循環しているとされる。その内訳は、陸地から 74,200 km³、海洋から 502,800 km³ の蒸発、及び、陸地へ 119,000 km³、海洋から 458,000 km³ の降水である。そして、地球上の全河川流量は、降水量から蒸発量及び河川へ流れ込むことなしに直接海洋へ流入する地下水量 2,200 km³ を除いた、119,000 - 74,200 - 2,200 = 42,600 km³ である。すなわち、約 4.3 万 km³ の水が毎年水の循環により利用可能になると言える。これは、水の循環により、一時点で河川水として存在する水 (約 1 万 km³) よりも多くの水を利用することができることを示しており、他の資源と比較した場合の、水資源の大きな特徴である。

現在地球は温暖化傾向にあるといわれている。人間活動により排出された二酸化炭素等の温室効果ガスが大気中に蓄積され、直接・間接的に地球気候システムに影響を及ぼすというのである。気候の変動は、降雨の時間的空間的分布を変化させるだけでなく、降水後の流出形態も変化させる。例えば、降雨が増えれば河川流量も増え、その地域は潤うことが考えられるが、その逆も考えられる。また、地球温暖化により、集中的な降雨が現在よりも多発するという予測もされており、気候の変化が水資源に与える影響も大きいと考えられる (Gleick (1998))。このように水資源は、気候の変化により状況が変化すると考えられ、人間の活動により、直接的だけではなく間接的にも影響を受けるといった特徴もある。

1.1.2 社会的背景

(1) 水危機の可能性

現在、世界人口の約 3 分の 1 が、水に関する何らかのストレスを受ける環境下で生活しているとされている。そして、現在のまま進行すれば、2050 年には、その人口が 50% にまで拡大すると言われている (Raskin et al. (1998))。もし、水不足に起因する紛争が勃発するようになったならば、その数字はさらに跳ね上がるだろうことが危惧される。そして、それは、紛争当事国において水資源が逼迫して人々が苦境に立たされるのみならず、周辺地域や、紛争当事国からの農産物の輸入に頼っている国々にも大きな打撃を与えることが考えられる。

(2) 水資源と水需要

世界資源研究所 (WRI:World Resources Institute) において集計されている統計データによれば、全世界の現在の年間総取水量は、約 3240 km³ であるとされている (WRI et al. (1998))。このことから、地球全体で見れば、需要に対する水の供給は十分にあると言える。しかし、その配分は決して公平なものではない。まず、水資源は地域的に遍在しており、また、人口分布に大きな偏りがあることから、水需要も極めて地域的遍在がある (表 1.1)。

水資源賦存量は現状のまま大きく変わることはないが、水需要量の方は、人口増加及び生活水準の向上により、20 世紀初頭から急激に増加しており、1 人当たり利用可能な水資源量は確実に減少の傾向にあるといわれている。図 1.1 は、Shiklomanov (1999) のデータを基に作成した、1950 年から 1995 年の全世界の取水用量の変化を表したグラフである。近年になって特に、人口の増加が著しい

表 1.1: 水資源の地域遍在

大陸	人口 百万人	河川水等 1000 m ³ /year	単位面積当り河川水 1000 m ³ /year	1人当り河川水 1000 m ³ /year
欧州	685	2900	277	4.2
北米	453	7890	324	17.4
アフリカ	708	4050	134	5.7
アジア	3445	13510	311	3.9
南米	315	12030	672	38.2
豪州, オセアニア	29	2404	269	83.7

(出典：Siklomanov,1999)

ことが見れとれるが、総取水量は、これを上回るペースで増加している。絶対量として最も多い農業用取水量の増加は人口とほぼ同じであるが、全取水量において農業用取水の占める割合は年々減少の傾向にある。一方で、生活・工業取水量の増加は極めて著しい。工業用取水量の爆発的増加は、1980年を境に頭打ちとなった感があるが、生活用取水量増加は、今後もさらに加速することが見込まれる。全世界で見てもこのような傾向があり、水資源及び水需要の地域遍在を考慮すると、地域的には非常に逼迫した事態に直面することが想定される。今後も人口増加は、特に発展途上国において続き、さらに経済発展に付随する生活水準の向上とも相俟って水需要量は大きく増大すると見られ、今世紀中には、水危機が訪れるのではないかという危惧が高まっている。そして、現実には、水の需要と供給のバランスが崩れて、それが社会問題、環境問題となっている地域が既に存在する。

中国黄河では、近年、年間 100 日以上河口まで水が届かない断流現象が起きている。これは、河川による水供給量に対して、取水量がそれを上回ったことが大きな原因である。同様の現象は、インドからバングラデシュへ流れるガンジス川、エジプトのナイル川河口部、そして米国のコロラド川においても発生している。これは、河川からの取水による農業に大きな打撃を与えるだけでなく、さらに周辺地域の地下水涵養にも大きな影響を与え、川からの取水、及び地下水利用をしている人々、そして下流から河口とその周辺の生態系に大きな影響を与える。(高橋, 河田 (1998))

このような水資源に関連した環境破壊は世界各地で起きているが、その中でも中央アジアのアラル海は極めて壮絶な様相を呈している。アラル海はかつては世界第 4 位を誇る豊かな湖であった。1950 年代よりアラル海に注ぎ込むアムダリア川、シルダリア川流域において大灌漑事業が始められた。その結果、一時は米国カリフォルニアを凌ぐ大灌漑農地が形成され、ソ連にとって最も重要な農産物供給基地となり、この集水域にあるカザフスタン、ウズベキスタン、キルギスタン、タジキスタン、及びトルクメニスタンの 5 つの共和国では所得も上昇した。この事業は社会主義のみが成功させることができた事業であり、「自然大改造計画」名付けられ、その成功は ”社会主義の勝利” と喧伝された。

しかし、その成功は長続きはしなかった。水源がほとんど枯渇し、過去 30 年でアラル海の水量は 3 分の 1 に減少、塩分濃度の上昇により魚類は死滅、生態系は崩壊し、かつては重要な産業であった漁業も途絶した。また、塩類の集積により灌漑農地も被害を受けるようになり、収量も減少している。地域の灌漑農業が崩壊すれば、数百万の人々の職がなくなり、社会的・経済的混乱が広がることが危惧される。(水文水資源学会編 (1995); レスター R (1995); レスター R (1999); ポステル (2000))

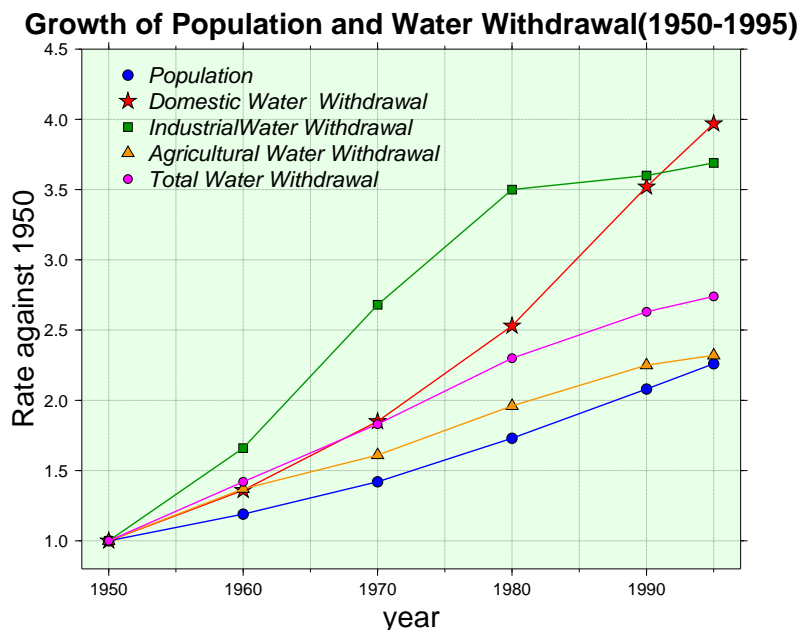


図 1.1: 1950 年に対する人口、及び取水量の変化:1950 年を 1 とする (Siklomanov,1999 を基に作成)

このように、水需給バランスを崩壊させることは、環境の悪化をもたらし、地域経済への打撃を与え、紛争の種ともなりうる。そして、それはその地域に限られた問題ではなく、周辺地域及びその地域の農産物に依存する国々にも影響が及ぶものである。

特に、日本は、戦後の急速な工業化の進展に伴って、鉱物資源のみならず農産物の大半を海外からの輸入に依存しており、こうした世界各地における危機には大きな影響を受ける恐れがある。社会・経済的な活動がグローバル化している中、一国のみの繁栄はありえない。したがって、現在のところ経済的に成功を収めている日本も、それは東の間の繁栄に終わる危険性も秘めており、グローバルな視点で資源問題、社会・経済問題を論じることが迫られているといえる。

1.1.3 研究の背景

以上のような社会的背景の中、これまで国内あるいは一部の地域に限られていた水資源評価は、近年になって精力的に地球規模を対象として行なわれるようになってきた。

前出の Shiklomanov は、国毎統計データを用いて、国毎及び大陸や経済によりそれより大きな地域に分割して水資源評価を行なっている。ここでは国及び河川流域を考慮して世界を大きく 26 に分割して約 2,500 の地点の流量観測データを基に水資源賦存量を推計し、国毎取水量及び消費量データを用いて、国毎あるいはそれよりも大きなスケールの、大陸区分、及び社会経済的区分毎に、過去から現在、そして将来に対する水資源評価を行なっている (Shiklomanov (1999); Shiklomanov (2000))。

カッセル大学の環境システム研究センターにおいては、流域毎の河川流量を数値モデルを用いて算定し、それと国毎の取水量データを用い、さらに水需要変化について複数の将来水需要シナリオを適用して、国毎及び集水域毎の水資源評価を行なっている (Alcamo et al. (2000))。

また、ストックホルム環境研究所 (SEI:Stockholm Environmental Institute) では、国毎統計データ及び、世界を経済区分から 10 地域に分類した地域毎に取水量変化のシナリオを適用し、各国毎の水需給バランス、国際河川による隣国からの河川流入量の有無、経済力、水資源施設の充実度、降水のばらつき等を考慮に入れた総合的な指標に基づいて、国毎に現状及び将来の水資源評価を行なっている (Raskin et al. (1995); Raskin (1997))。

さらに、ニューハンプシャー大学の Vörösmarty らは、水収支モデルを用いてグリッド毎に河川流量を算定して水供給量とし、国別取水量統計データ及びグリッドデータからグリッド毎の水需要量を推計して、 0.5° グリッド毎および河川流域毎に水需給バランスにより水資源評価を行っている。ここでは、気候変化の有無及び人口増加の有無を考慮に入れた 3 つのシナリオを用いて将来予測を行なっている (Vörösmarty et al. (2000))。

また、日本の国立環境研究所においては、複数の数値気候モデルの出力からバケツモデルを用いて現状及び気候変化時に対する 0.5° グリッド毎の流出を算定し、国別統計データおよびグリッドデータ、そして前出のストックホルム環境研究所の水需要変化シナリオを用いて、グリッド毎の水需要量を推計して、河川流域毎に水需給バランスから水資源評価を行なっている (高橋ほか (2000))。

上記のように、世界でグローバルな水資源評価は活発に行なわれている。しかし、その区分が国毎かそれ以上に大きく地域間の隔たりが反映されずに、その区分内において水不足が相殺されてしまっている場合や、グリッド毎に行ない地域毎の隔たりが表現されてもそれがその地域の国家情勢を反映しない場合もある。特に、国際河川では、流域内国家間の緊張が非常に高く、水資源に関して一触即発の状況にある地域もある。そうした状況を考慮に入れるためにも、各スケールに対する評価が必要であると考えられる。

その様な視点では、上記の研究例の中で、Vörösmarty らによる研究において唯一グリッドベースの評価が行なわれているが、利用可能な水資源としては、水収支モデルに基づいて観測値との比較検討による補正を加えたものを用いており、また、流量観測のない地点に関しては不明、という扱いをしている点で問題がある。

そこで、本研究では、河川流量については、数値気候モデル用いられている地表面モデルからの出力に基づいて、全球河川流路網モデル (TRIP:Total Runoff Integrating Pathways) を用いて算定し、将来の気候変動下での河川流量も算定できる方法をとった。数値気候モデルに利用されている陸面モデルによって出力される流量は、近年精度が上がってきている。したがって、TRIP を用いることにより、より信頼性の高い利用可能な水資源賦存量の推計が可能であると考えている。そして、各スケール毎に水資源評価を行ない、グローバルな水資源の現況、及び国際河川流域における流域内の国家毎の相違を考慮した水資源評価を目指す。

1.2 目的

以上のような研究背景から、以下を本論文の目的とする。

- 全球河川流路網モデル (TRIP) 及び、各種グリッド情報を用いることにより、グローバルを対象として、グリッド毎・流域毎・国毎の各対象において水需給バランスを評価し、また国毎経済データを用いることにより水不足の深刻さを測る総合的な水資源評価を行なう。
- 各種推計データを用い、上記方法を適用することにより、将来水資源予測を行なう。特に、水資源に対する緊張の高まっている国際河川に注目する。

水需給バランス評価においてグリッド毎、流域毎、国毎といった、複数の対象を選定して評価を行なうことにより、それぞれの評価毎における潜在的な水不足が顕在化するものと考えた。また、その水需給バランスの評価、及び社会経済的要素を考慮に入れた水資源評価により、将来懸念される水危機への対応が効率的に行なえるよう、地域的なパターンを分析することが可能であると考えた。また、TRIPを用いることにより、数値気候モデルに直結した、将来水資源予測も可能になると考えた。

1.3 本論文の構成

第1章は、序論であり、水資源問題に関する背景を述べた。第2章は、本研究で用いた水資源賦存量の方法と、その結果について示す。また、水需要側として本研究では取水量を用いるが、第3章では、その取水量の推計方法及びその結果について示す。そして、第4章では、水需給バランスを基にした水資源評価を行なった結果を示す。さらに、第5章では、2～4章の手順を将来推計に適用し、複数のシナリオによる将来水資源予測を行なう。最後に、第6章では、本研究のまとめと、今後の課題について述べる。

Chapter 2

水資源賦存量の推計

2.1 水資源賦存量推計に用いるデータ

水資源賦損量としては、年間の河川流量を用いた。本研究では、持続可能な水資源量を対象とするので、降水による涵養のほとんどない化石帯水層の水資源は考慮に入れない。河川流量の算定には、全球河川流路網 (TRIP: Total Runoff Integrating Pathways) (岡田 (2000); Oki and Sud (1998)) を用いた。TRIP は、数値標高モデル (DEM: Digital Elevation Model) に基づいて流下方向、を定め、印刷地図や河道ベクトルデータ等の地理情報を参照して現実を反映するように設計された、解像度 0.5° のグローバル擬似河川網である。

上記 TRIP は、さらにモデル内部に流下モデルを組み込むことにより、各グリッドに対する河川流量、及び、河川流域及び集水域レベルの河川流量を算定することができる。この流下モデルには、地下水タンクが組み込まれており、地下水流出が設定された地下水タンクの時定数に従い、降水によって涵養された地下水が、一定の時間差を経て河道へ流れ込む仕組みとなっており、本研究における水需給バランス評価の際に、地下水による取水に対する評価も考慮に入れることができると考えている。TRIP 河川流路網の作成方法と河道流下モデルの詳細、及びその検証については、岡田 (2000)、Oki et al. (1999) を参照。

河川流量算定の際の、河道流下モデルに対する入力としては、GSWP(Global Soil Wetness Project: 全球土壌水分プロジェクト) のデータセットを用い、オフラインで河川流量を計算した。オフラインに対して、オンラインとは、数値気候モデル (GCM: General Circulation Model) からの出力を直接流下モデルの入力として相互作用を考慮しながら計算する方法である。将来的には、オンラインでの河川流量計算が望まれるが、現存する数値気候モデル (GCM) 及びそれに連結される地表面過程モデル (LSM: Land Surface Model) には、世界各モデル間で大きな結果の相違があり、信頼性に欠けるという点から、現在のところ、河道流下モデルに対する入力値として GSWP データセットを用いた、オフラインの計算方法を適用している。

GSWP は、GCM、LSM の検証、及び気候に大きな影響を与えるといわれるグローバルな土壌水分分布の推定を目的として、ISLSCP(International Satellite Land Surface Climatology Project: 衛星による地表面気候値推定の国際計画) において計画・運営されている国際計画である。ISLSCP は、グローバルな気候システムとそのエネルギー・水循環過程解明を目的とする GEWEX(Global

Energy and Water Cycle Experiment) における、データセット供給の役割を担っている。その ISLSCP データセット、ISLSCP Initiative-1 CD-ROM (Messon et al. (1995)) を外力データとして用いて、GSWP では、日本、米国、豪州、フランス、カナダの約 10 のモデリングチームが参加してそれぞれ土壌水分、蒸発散や流出等の地表面水収支要素を緯度経度 1 度グリッドについて 10 日単位でグローバルに算定している。これらのデータは Web サイト (<http://www.tkl.iis.u-tokyo.ac.jp:8080/DV/gswp/index.html>) からダウンロードすることができる。

また、Entin et al. (1999)、Koster et al. (1999) のように、各モデルによる計算結果に対する評価も行なわれている。このように、GSWP データは、数値モデルによる出力ではあるが、検証を伴っており、現時点では最も信頼性の高い唯一のグローバルデータセットである、ということができる。

本研究では、この GSWP データのうちの全流出量 (Total Runoff) 及び表面流出データ (Surface Runoff) を使い、全流出量に関しては、10 モデルによる出力の平均値、そして、表面流出量に関しては、全流出と分けて提供されている東京大学気候システムセンター (CCSR:Center for Climate System Research) 及び気象庁の 2 モデルによる出力の平均値を用いた。

計算前の準備として、岡田 (2000) 同様に、以下のような設定を行なった。まず、全球 1° の GSWP 流出量データを TRIP の解像度 0.5° に合わせる必要があった。これについては、GSWP 流出量データは [mm/day] で与えられているので、1° グリッドを 0.5° グリッドにした時に TRIP において重なる 4 グリッドに同じデータの値を与えた。また、データの値は 10 日平均であるので、日数をかけてグリッド面積で割ることにより、[kg/s] に変換して計算を行なった。さらに、初期値としては次のようなものを与えた。まず、グリッド内貯留量の地表における初期値としては、年間流量流れるときの水深と川幅を用いて算出した値を用いた。また、地下水タンクの初期値としては各グリッドにおける年平均流量を時定数 (30 日とする) で割った値を用いた。

2.2 水資源賦存量の推計

2.2.1 月毎河川流出量のグローバル分布

図 2.1~2.4 は、上記設定により 1987 年 1 月から 1988 年 12 月までの 2 年間計算を行なった結果のうち、1988 年についての月毎河川流量のグローバル分布である。南極及びグリーンランドは計算を発生させる原因となった (岡田 (2000)) ことから、計算範囲から除外している。図のように、季節毎、月毎の分布の変化を見ることができる。例えば、ユーラシア大陸に着目すると、冬期はごくわずかの河川流量しか見られないが、4、5、6 月と季節が進行するにしたがって、凍土が溶け、それにしたがって河川流量が増大していることが確認できる。また、インド半島やインドシナ半島における雨期と乾期もはっきりと区別することができる。しかし、本研究においては、この月毎の河川流量は用いず、次節に示す、年間河川流量で水資源賦存量として、水資源評価を行なった。

そのようなことから、今後の課題としては、月毎、あるいは少なくとも季節毎に、取水量 (あるいは水需要量) を求めて、ここで示されたような、月毎あるいは季節毎の河川流量と比較することによる、水資源評価を行なうことが必要であると考えられる。水需要は、季節毎に大きく異なると考えられ、それに対する、河川流量は上記のように算定することができるので、より綿密な水資源評価へとつながると考えられる。

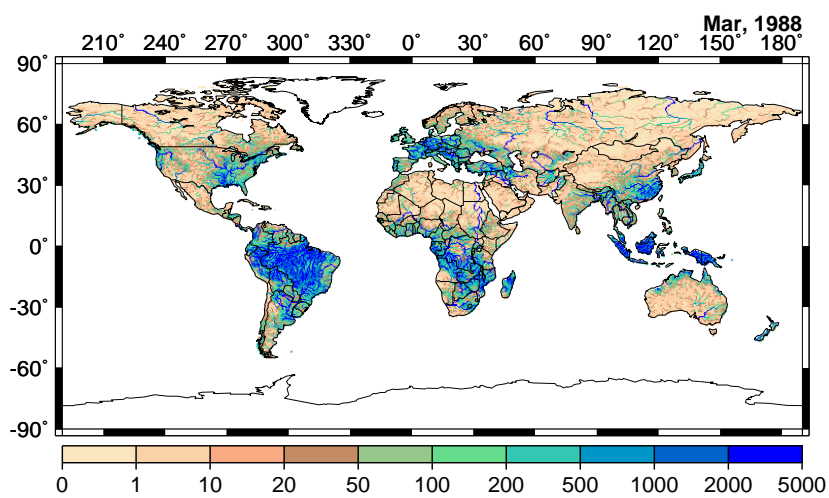
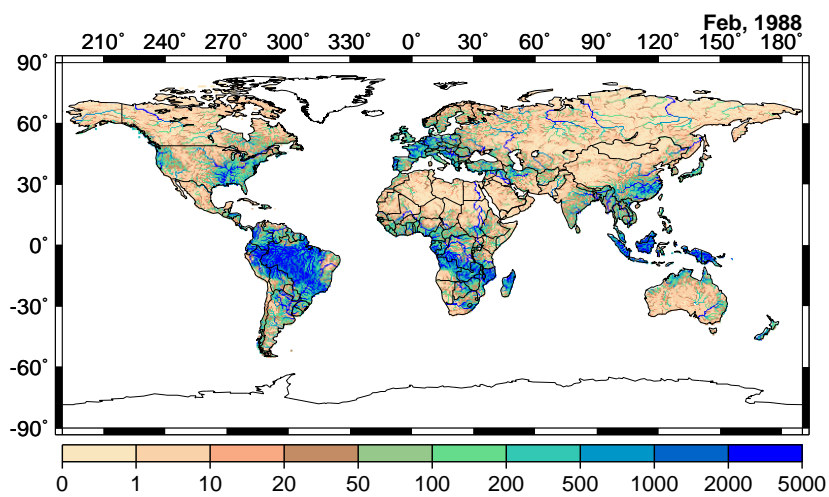
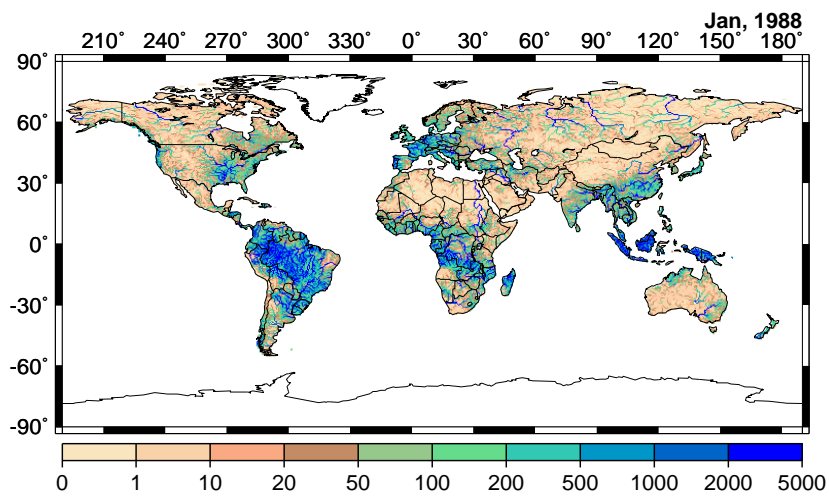


图 2.1: TRIP 月每河川流量 (1~3 月)[$10^6\text{m}^3/0.5^\circ\text{grid}/\text{month}$]

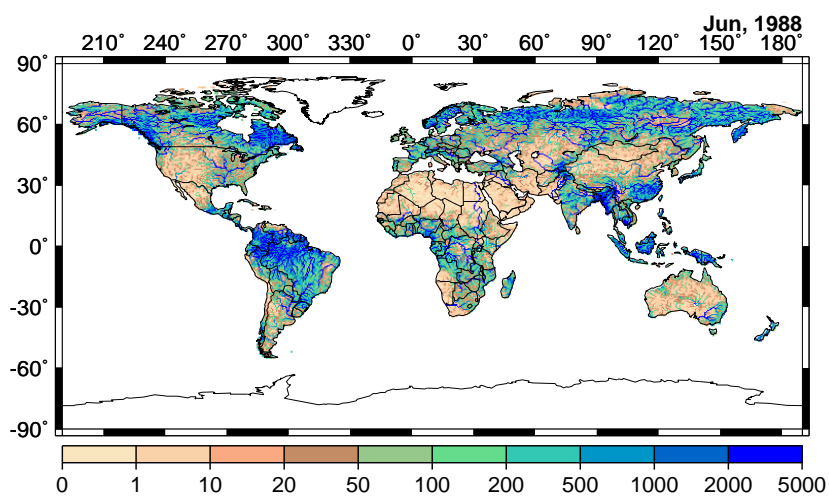
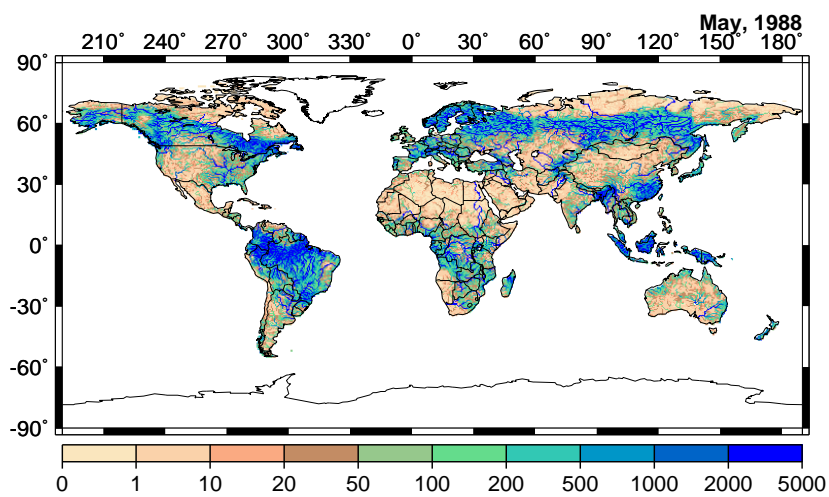
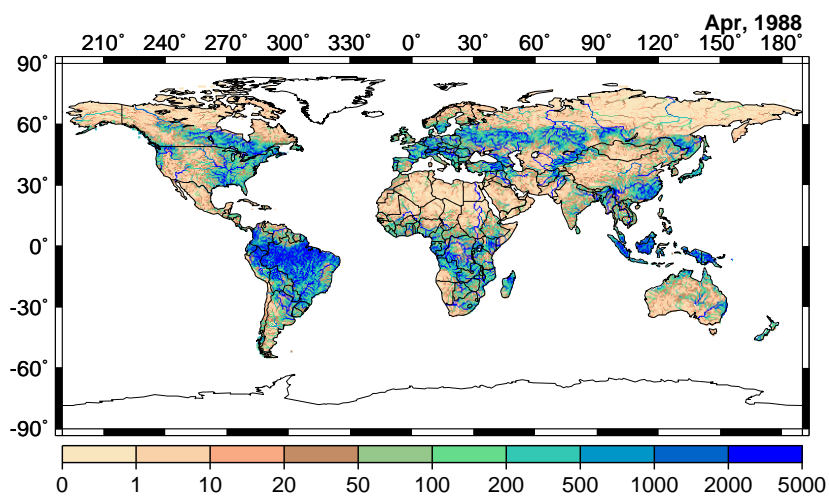


图 2.2: TRIP 月每河川流量 (4~6 月)[$10^6\text{m}^3/0.5^\circ\text{grid/month}$]

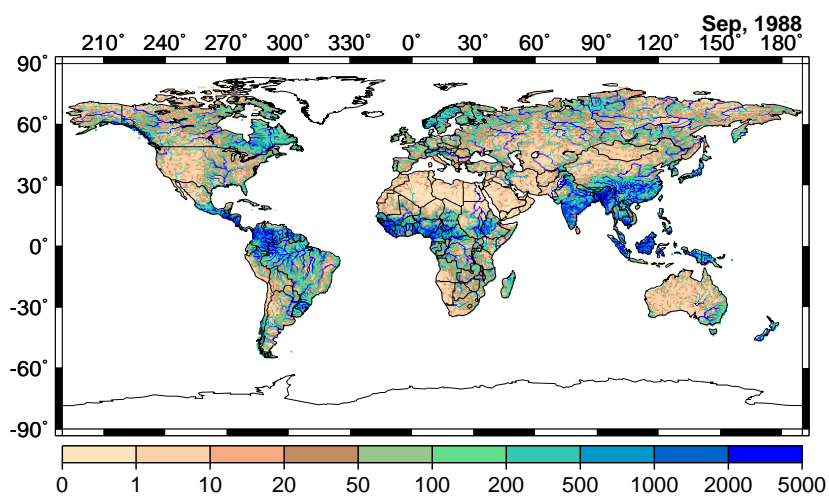
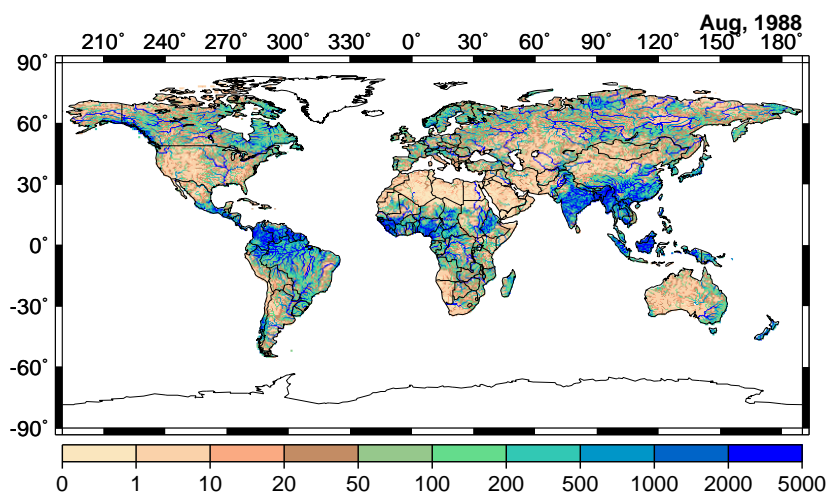
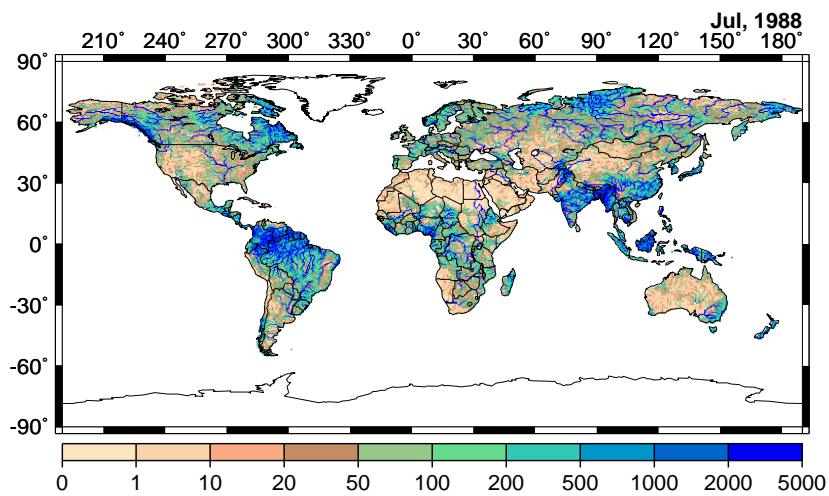


图 2.3: TRIP 月每河川流量 (7~9 月)[$10^6\text{m}^3/0.5^\circ\text{grid}/\text{month}$]

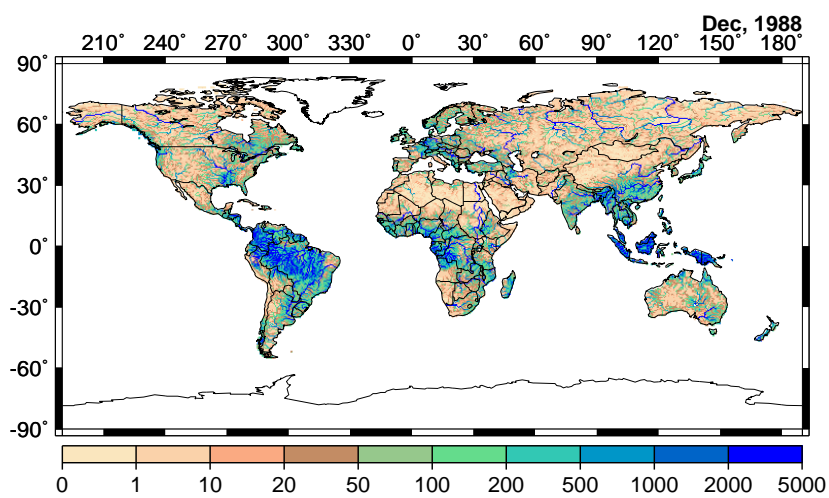
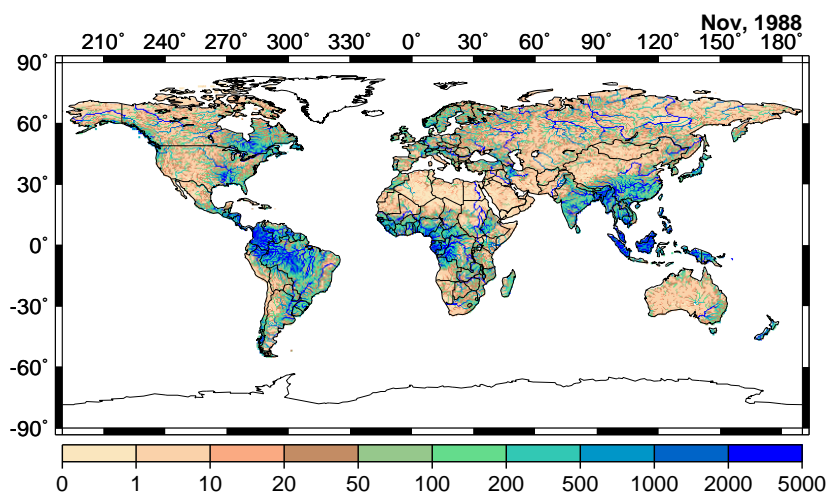
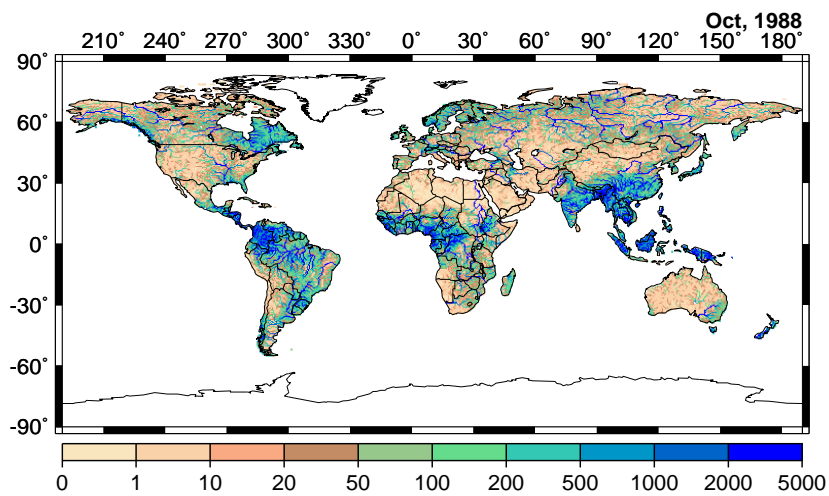


图 2.4: TRIP 月每河川流量 (10~12 月)[$10^6\text{m}^3/0.5^\circ\text{grid}/\text{month}$]

2.2.2 年間河川流量の算定

(1) 水資源賦存量グローバル分布

図 2.5は、1987、88 年平均の年平均河川流量を表した図である。本研究の以下の章における、水需給バランスの評価における、年間の水供給量としては、この分布を用いた。図より、大河川流域及び熱帯地域の降水量が多い地域において年間河川流量が大きいことが示されている。それに対して、中東から北アフリカにかけての乾燥・半乾燥地域においては、年間河川流量は小さいことが示されている。

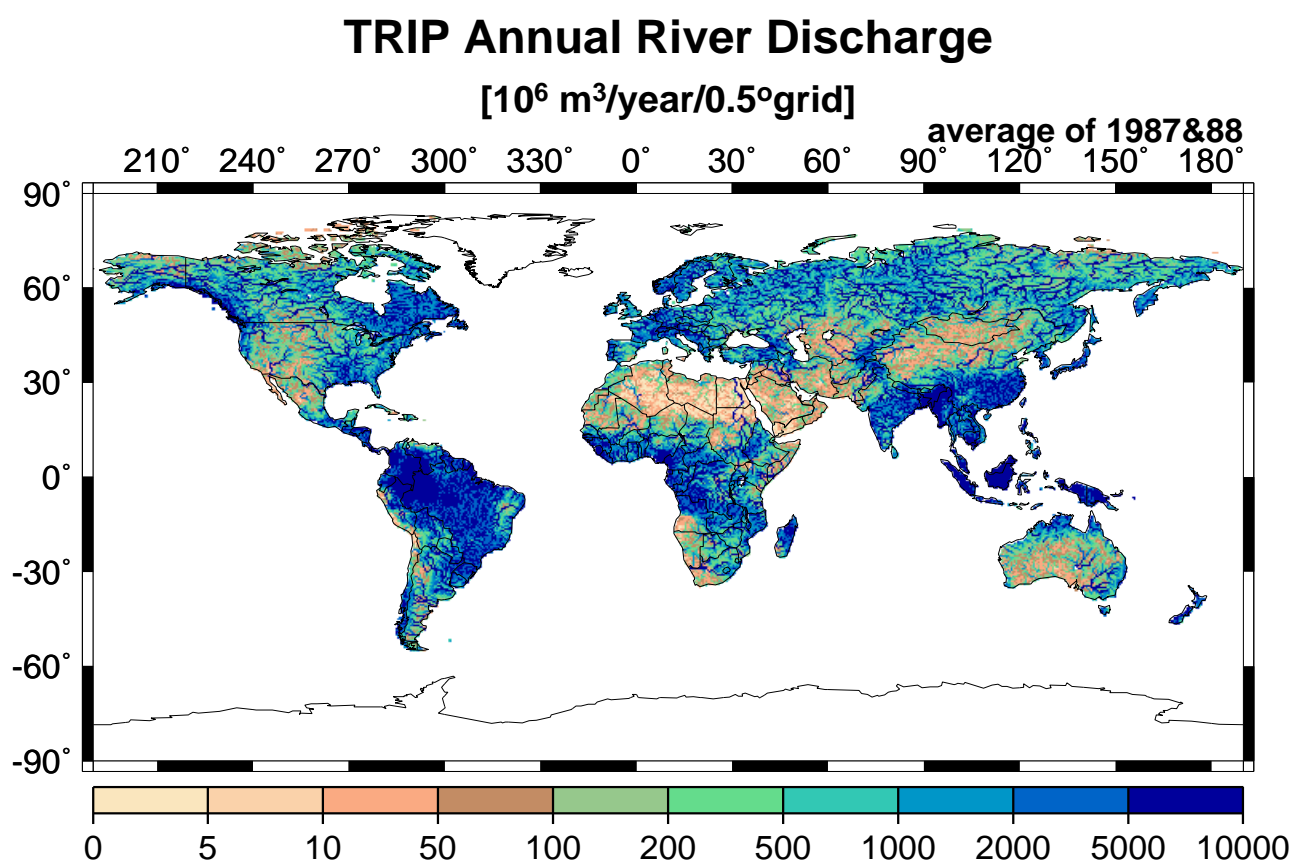


図 2.5: TRIP 年間河川流量

(2) 大陸毎水資源賦存量

大陸毎の水資源賦存量は、表 2.1 のようになる。ここで、比較のため、Vörösmarty et al. (2000) の数値、及び Shiklomanov (1999) の数値も並列して表示している。この中で、本研究の数値は、

TRIPで流量を流す際の、入力として用いた、GSWPによる全流量(図2.6)である。これら、3者を比べると、それぞればらつきがあるが、その原因としては、大陸区分の仕方が最も大きな要因であると考えられる。しかし、それを差し引いたとしても、欧州における、本研究での数値は過大であると言え、地表面モデルによる計算の誤差も含まれていることが考えられる。

表 2.1: 大陸毎水資源賦存量 (km³/year)

Region	This study(※)	Shiklomanov	Vörösmarty
AFRICA	5815	4050	4520
ASIA	13014	13510	13700
EUROPE	6286	2900	2770
OCEANIA	1912	2404	714
NORTH AMERICA	5345	7890	5890
SOUTH AMERICA	14906	12030	11700

※: GSWP 平均全流出量より算出

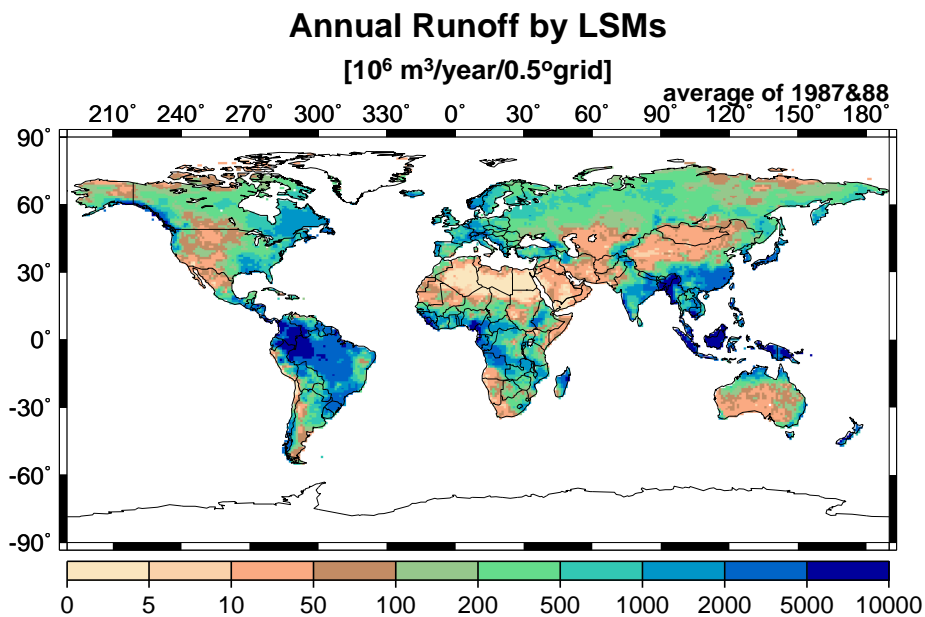


図 2.6: GSWP LSM 平均年間流出量

(3) 国毎水資源賦存量

国毎の水資源賦存量は、表 2.2 のようになる。ここでは、上位 10 国について示す。表に示された数値は、上記の大陸毎の場合と同様、TRIPで流量を流す際の、入力として用いた、GSWPによる全流量(図2.6)である。すなわち、他国からの河川による流入は考慮していないことになる。

表 2.2: 国毎年間水資源賦存量 (km³/year)

	Country Name	This Study(※ 1)	Shiklomanov(※ 2)	Shiklomanov(※ 3)
1	Brazil	8279	6220	8120
2	Russian Federation	3896	4053	4068
3	Indonesia	3605	---	---
4	Canada	3450	3287	3417
5	China	2617	2701	3910
6	Colombia	2248	---	---
7	India	1890	1456	2037
8	United States	1889	2930	3192
9	Myanmar	1000	---	---
10	Peru	811	1100	1244

※ 1: GSWP 平均全流出量より算出

※ 2: 国内の流量 (国外からの流入は含まない)

※ 3: 国内における (国内での流量+他国からの流入量) 平均的な水資源賦存量

(4) 河川流域毎水資源賦存量

河川流域毎の水資源賦存量は、表 2.3 のようになる。上記の国毎の場合と同様、河川流量の多い上位 10 河川流域について示す。この数値は、GSWP の流出をもとにして、TRIP で河川流量を求めた結果である。河川流域の年間河川流量は、河口での流量で代表した。これは、上流から河口まで至る過程において、取水等や排水による流量の変化は考慮に入れない、自然流量として表せられる。

表 2.3: 河川流域毎水資源賦存量 (km³/year)

	River Name	TRIP	Shiklomanov(1999)
1	Amazon	8156	6923
2	Parana(La Plata with Uruguay)	1706	811
3	Congo (Zaire)	1581	1320
4	Changjiang (Yangtze)	1291	1006
5	Orinoco	1253	1007
6	Lena	1195	539
7	Brahmaputra	1097	---
8	Tocantins (Araguaia)	1077	---
9	Irrawaddy	802	---
10	Yenisey (Jenisej)	757	618

※: TRIP 算定値

Chapter 3

取水量の推計

3.1 取水量推計の方法

取水量分布の推計には、まず、国別の統計データから国毎に単位当り取水量を求め、各種グローバル分布データセットを用いて、空間分布を指定した。その手順は、図 3.1に示す通りである。表 3.1は、取水量推計の際に、基にした国別統計データをまとめたものであり、表 3.2は、それらのデータから、解像度 0.5 度のグローバルな取水量分布を推計するために用いたデータの一覧である。また、以下の節に、取水量分布推計に用いるデータの概要及び、グローバル分布図を示す。

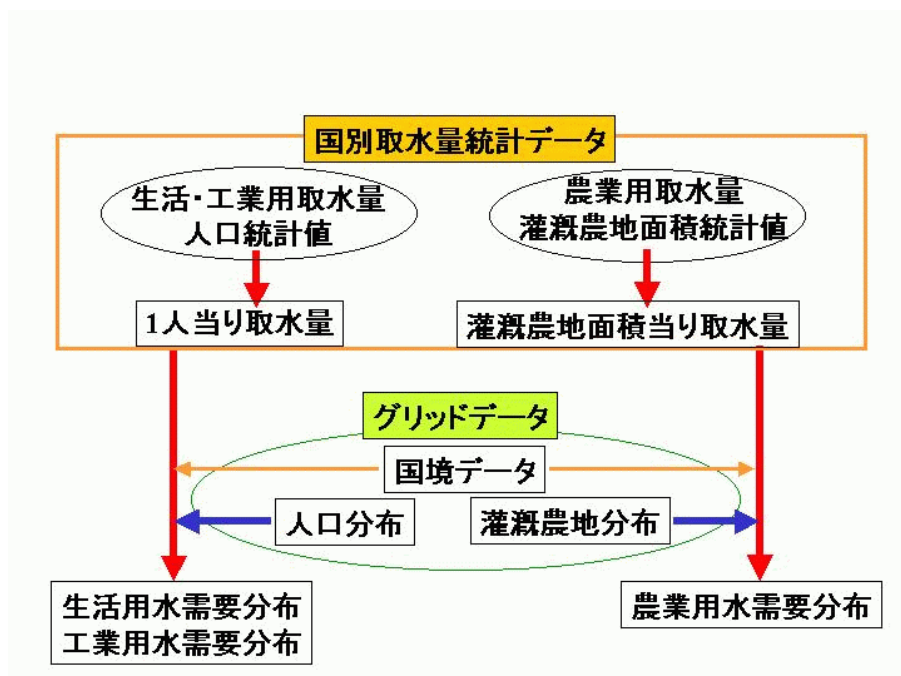


図 3.1: 水需要量推計の流れ

表 3.1: 取水量推計に用いた国別統計データ (WRI CD-ROM より)

データの種類	表記の単位	データ年次	出典
年間取水量	km ³	1970～1995年 (国毎異なる)	各種
部門別取水量	%	同上あるいは1987年	UN
脱塩処理水生産量	100万 m ³	1990年	FAO
人口	1000人	1950～2050年	UN
灌漑農地面積	1000ha	1961～1994年	FAO
1人当り GDP	US \$1995	1970～1995年	世界銀行

表 3.2: 取水量分布の推計に用いたグローバルデータ

データの種類	解像度	データ年次	諸元
国境線データ	/	1992年	ESRI
人口分布データ [person/grid]	2.5分	1990年及び1995年	CIESIN
灌漑農地面積分布データ [km ² /grid]	30分	1995年	Kassel Univ.

3.2 国別単位当り取水量の推計

3.2.1 国別単位当り取水量推計に用いるデータ

(1) 年間取水量データ

国別年間取水データは、再生不可能な地下水資源、他国からの河川流入量、及び淡水化プラントが水源としてかなりの割合を占めている国々ではそれらプラントからの水量も含む。取水データの出典は多岐にわたり、国連 (UN: United Nation) や FAO (Food and Agriculture Organization) 等の国際機関、各国機関、及び専門家による報告書等の出版物に基いている。また、灌漑農地面積、家畜数、降雨量などの他のデータを用いたモデルによる資源と消費の見積もりからまとめているものもある。データ年次は、各国毎に異なるが、可能な場合は、各国の報告書により更新あるいは確認がされている。例えば、エジプト、モロッコ、南アフリカ、韓国、ベトナム、ホンジュラス、ブラジル、ガイアナ、日本については、1992年にブラジルのリオデジャネイロで開催された「環境と開発に関する国連会議」のために各国が用意した報告書に基いている。この年間取水量データは、アフリカのフランス領レユニオンやスペイン領西サハラ、そして南米のフランス領ギアナ等の自治を確立していない国々、及び旧ユーゴスラビア諸国ではデータ欠損となっている。

(2) 部門別取水量データ

部門別取水量は、生活用 (飲料水、家庭、営利目的の施設、病院等の公共サービス、自治体などによる利用)、工業用 (火力発電所等プラントの冷却水を含む国と含まない国がある)、農業用 (灌漑と畜産) に分類されている。データ年次は、(1) の取水量データと同年、または1987年である。

(3) 脱塩処理水生産量

脱塩処理水生産量の出典は、FAOによる。脱塩処理水は、逆浸透法等種々の技術を利用して塩水（一般に海水）から塩を除去することにより生産された水である。脱塩処理水は、ほとんどが生活用に利用されている。データ年次は、1990年。脱塩処理水生産量のデータのある国は、西アジア及びアフリカの、計23カ国に限られている。

(4) 人口

収録されている人口データは、年央の人口である。ほとんどのデータは、国勢調査やその他の調査に基づく推計値である。将来の予測人口については、全て国連による中位シナリオを前提としている。

(5) 灌漑農地面積

灌漑農地面積の出典は、FAO、FAOSTAT Statistical Databaseによる。ここで灌漑農地とは、農業を目的として水の供給を受けている土地を指す。作物生産や放牧地の改良等のために河川から水を引いて田畑に利用している土地が含まれているが、その土地に1年に1回あるいは数回水を流すかといった灌漑の程度については問わない。

(6) 1人当たりGDP

世界銀行、及び国連のデータに基いて、WRIが計算している。1993年以前のデータについては、米国によるデフレーターを使って1995年の米ドルに換算してある。

3.2.2 国別単位当り取水量の推計

前節で述べた国別の取水量データについて、重要な問題が存在した。それは、3.2.1節の国別取水量データは国毎にデータ年次が異なることである。データ年次は、国毎に1970年から1995年と大きなばらつきがあり、この相違は国毎の総取水量の多寡に大きな影響を及ぼすと考えられるので、補正を行なうことにした。

補正の方法は、Shiklomanov (1999)による過去40年の大陸毎総取水量評価結果(表3.3)を用いて、その大陸に所属する国に関しては、全てその大陸毎の総取水量の変化をすと仮定して、線形に1990年に補正した。まず、表3.3から、大陸毎に図3.2のようなグラフを描く。次に、1970年～95年を直線で近似し、かつ1990年と各データ年次の値と1990年の値との比率を求めることにより、各国毎データ年次の異なるWRIデータを1990年の総取水量に統一した。

ただし、上記の作業は、総取水量に対して行ない、生活・工業・農業の3部門それぞれに対する特別な配慮は施していない。つまり、3部門の配分は国毎にWRIデータ年次のまま変化しないと仮定した。これは、産業構造が急変した国については、問題があると考えられるが、これに代わるデータがなく、現状ではこれが最良の方法であると考えられる。

生活・工業用水取水量の推計については、上記方法で求められた総取水量のうちの生活・工業用水取水量を、それぞれ各国毎1990年の人口で除することにより、1人当たり取水量とした。また、農業用水取水量は、各国毎農業用水取水量を、各国毎の灌漑農地面積で除することにより、単位灌漑農地面積当り農業用水取水量を求めた。

ここで、旧ソビエト連邦諸国のデータは、国別の取水量に関しては、独立後のデータが存在するのでこれを用い、上記の補正を行なったが、1990年における灌漑農地面積データは欠損となっていたので、1990年以降の独立年次におけるデータを用いることにした。また、人口については、1990年当時独立していない国についても個別にデータが存在したのでそのまま用いた。

表 3.3: 大陸毎総取水量の変化 [km³/year]

地域	1970	1980	1990	1995
欧州	325	449	482	455
北米	555	676	653	686
アフリカ	123	166	203	219
アジア	1417	1742	2114	2231
南米	87	117	152	167
豪州・オセアニア	20	23	29	30

出典：Shiklomanov,1999

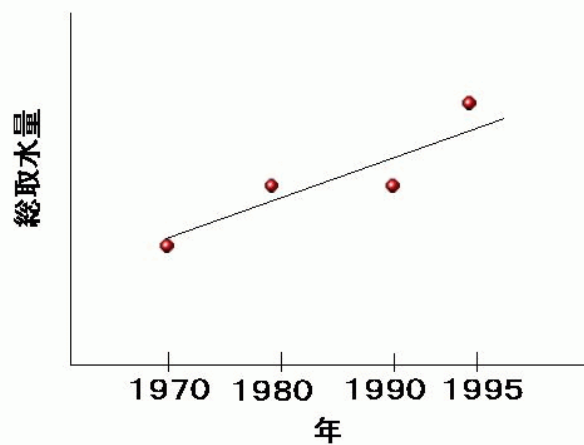


図 3.2: 年間総取水量の変化 (概念図)

3.3 取水量分布の推計

3.3.1 取水量分布推計に用いるデータ

(1) 国境データ

国境データは、ESRI(Environmental Systems Research Institute)によって作成された、DCW(Digital Chart of the World)である。これは、豪州、カナダ、英国及び米国において作成されたDMA(United States Defense Mapping Agency)向けのONC(Operational Navigation Chart)に基いて、ESRIが作成した、1:1,000,000のベクトルベースマップである。詳細は、ESRIのWebページ(※1)を参照。これを、ARC/Infoの機能によりグリッドサイズ0.5度にラスター変換してデータを用いた。この0.5度ラスターデータは、国毎にその国内の各グリッドがWRI CD-ROMにおける国番号に対応した番号で表記されるようにしたので、以下ではこれを「国番号データ」と呼ぶことにする。

この国番号データをグローバルに図化した結果、国境データの対象とする年次においては分離・独立していない国が、WRI CD-ROMに収録されるまでには分離・独立を果たし、新たに国境線が生じている部分があることが判明した。そこで、この国番号データをテキスト表示して、印刷地図を参照しながら国境を定め、CD-ROMに対応した国番号を挿入するといった手作業による修正を加えることにした。例えば、元データにおいては、チェコ共和国とスロバキア共和国一括のチェコ＝スロバキア連邦で表記されているのに対し、CD-ROMでは取水量データは、分裂前の91年となっているがそれぞれの共和国に対して独立したデータが存在するので、両者が区分されるよう、それぞれに対応した国番号を挿入することにより修正した。

図3.3は、修正後のこの国番号データに基いて国毎の国土面積を求めた値と、CD-ROMに収録されている国土面積データ(出典:FAO、データ年:1994年)との比較を行なった図である。これによると、両者がほぼ一致し、また、全世界合計の陸地面積で比較したところ、誤差は0.5%にとどまり、上記の国番号分布データを用いることは、適切であると考えられる。ここで、WRI CD-ROM国別統計データとのグリッド毎の国番号ファイルに基いて国土面積を求める際に、0.5度グリッドセル当りの面積を求める必要があった。グリッドセル当りの面積は、緯度帯毎に異なるので、沖、鼎(1997)に示された式を用いて各0.5度グリッド当り面積を算定した。

(※1) ESRI Home Page [<http://gisstore.esri.com/>]

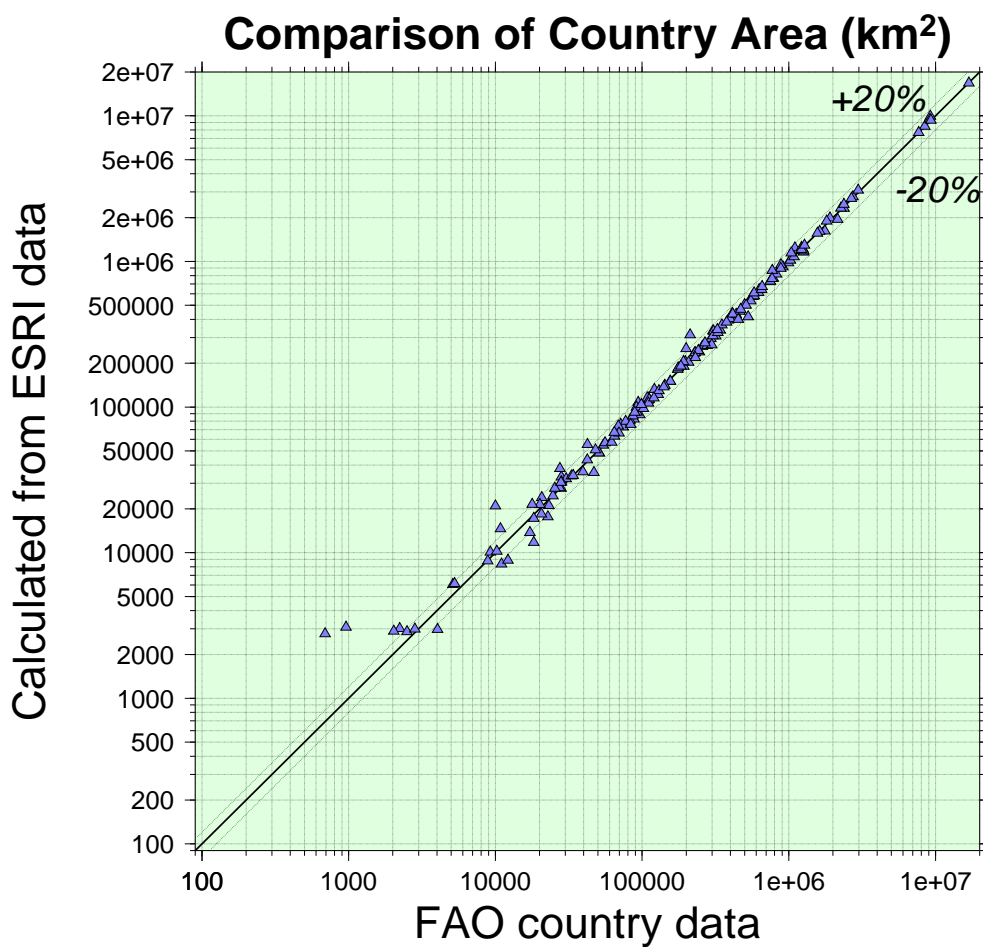


図 3.3: ESRI データに基づいた国面積と FAO 値との比較

(2) 人口分布データ

人口分布データは、CIESIN(Center for International Earth Science Information Network)により作成された2.5分グリッド分布データを用いる。データは、CIESINのWebページ(※2)から入手することができる。このデータは、世界の行政単位毎に集計された人口データを、2.5分毎に内挿し、国連の人口データと合うように補正されたものである。

このCIESIN人口分布データを用いて、(1)の国番号データにおいて海洋と認識されるグリッドに属する人口を求めた結果、全球合計で2~3億人の人口が算出された。つまり、この結果から、CIESIN人口分布データと(1)の国番号データの海陸分布は、それぞれ異なり、CIESINデータの方が陸地と認識されるグリッドが多い、ということが推測される。本研究では、1人当たり取水量の国毎統計データをその国全体に一樣に分布させ、CIESIN人口分布を用いて重み付けをすることにより取水量分布を求める、といった方法を適用したという性質上、国内の海岸線沿いの人口が海洋グリッドと認識されてデータ欠損扱いとなることは、不適切であると考えられるので、これを修正することにした。具体的には、国番号データにおいて海洋と認識されているグリッドにおいてCIESIN人口分布では人口が存在する場合、そこから最も近接する国のグリッドへ加えることによって修正した。

同様の問題はTRIPによる流域番号データに対しても、第4章で紹介する河川流域毎の水需給バランス評価の際、河川流域毎の人口を求めた時点で発覚したので、上記と同様の方法で最も近隣の河川流域に加えることにした。この2通りの修正を行なうことにより、国番号データに合わせた人口分布データと、TRIPによる流域番号データに合わせた人口分布データの2種類の人口分布データを作成し、用いることになってしまい、今後へ課題を残す結果となった。ただし、流域に合わせた人口分布データを用いるのは、流域毎水資源評価の場合に限られており、本研究においては大きな問題はないと判断した。

国番号ファイルとの比較により上記修正を加えた人口分布は、図3.4のようになる。また、それを国別に集計して国毎の人口を求めて、WRI CD-ROM収録の国別人口データ(出典: UN)と比較すると、図3.5のようになり、また、全世界人口を国連データと比較したところ、1%以内の誤差にとどまり、比較的良好に一致しているといえることができる。(ただし、国境線沿いに人口が集中し、かつ国土面積が小さく国境線の誤差が比較的大きなコンゴ共和国、及びバーレーン、イスラエルにおいては誤差が大きかった。)CIESIN人口分布データは、元々国連の人口データと合致するように補正されているので誤差が小さいのは当然とも言える結果ではあるが、上記の補正及び、(1)の国番号データの検証にもなると考えられる。

(※2) CIESIN Home Page [<http://http://www.ciesin.org/>]

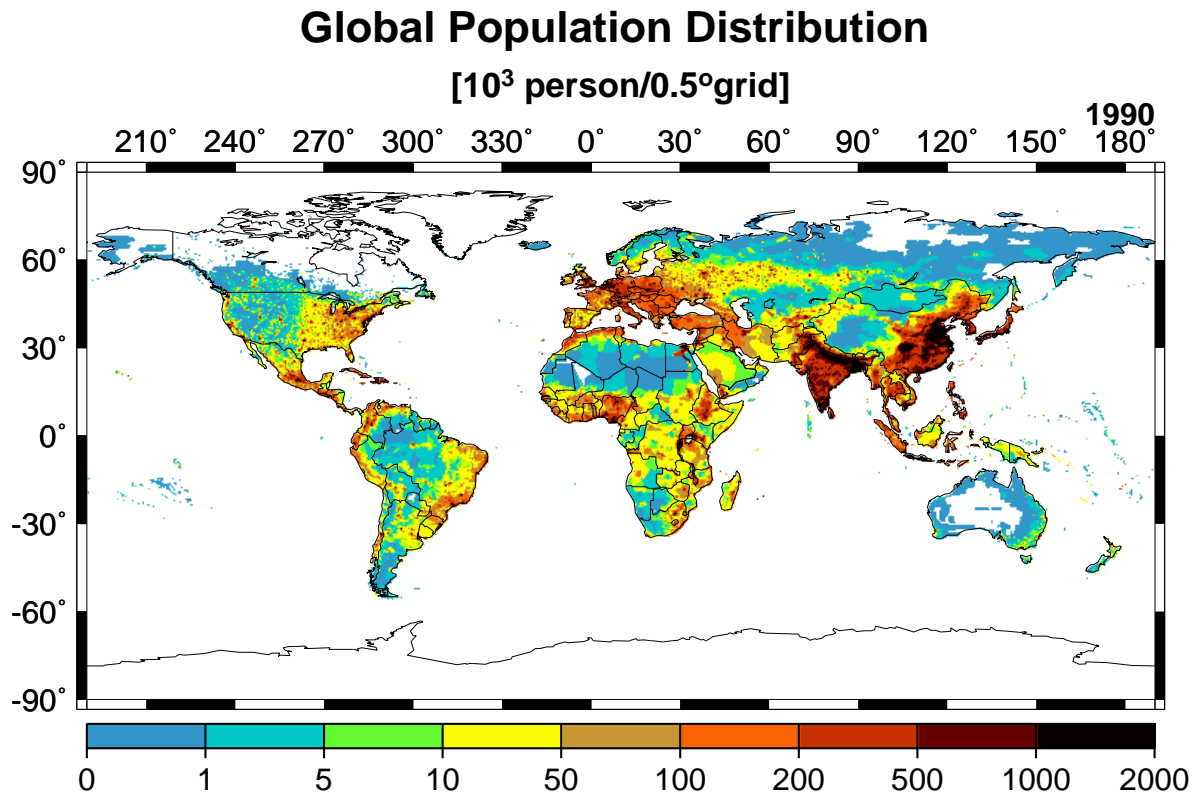


図 3.4: 1990 年における世界の人口分布

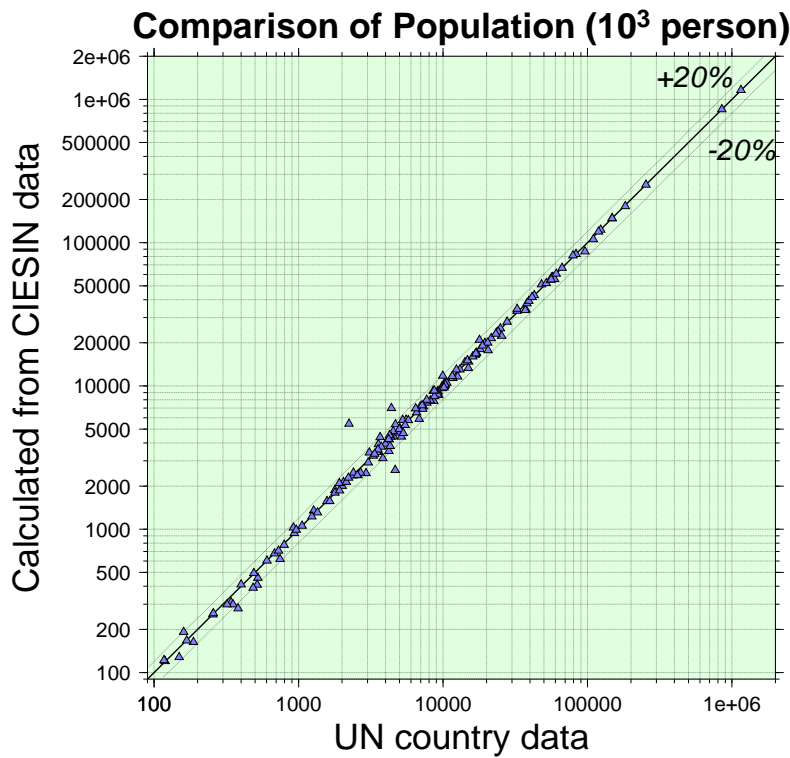


図 3.5: CIESIN 人口分布データに基づく国毎人口と国連の国別値との比較

(3) 灌漑農地面積分布データ

灌漑農地面積分布データは、Döll and Siebert (1999) によって求められた、 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ の 1995 年に対する、グリッド毎灌漑農地面積の割合を示したものである。データは、各グリッドにおける灌漑農地面積のパーセンテージ (%/grid) 及び面積 (km^2/grid) の 2通りが提供されている。データは、カッセル大学の Web ページ (※ 3) に示されているように、データ作成者である、P. Doll 氏に直接問い合わせて入手することができる。このデータは FAO の国別データ、及び FAOSTAT のデータベースから求められている。インド、中国、米国は、世界で最も重要な灌漑国であると考えられ、3 国合計で世界の灌漑農地面積の 47% を占めているが、これらの国に対しては、より細かい精度でデータが提供されている。例えば、インドは州単位、中国及び米国は郡単位での灌漑地分布データに基いて作成されており、他にパキスタン及びタイも行政単位毎データが提供されている。

次に、このデータセットは 1995 年のものであるのに対し、本研究では、1990 年を対象として水資源評価を行なうと設定した点から、1990 年の灌漑農地面積分布データが必要であった。

そこで、本研究では、上記の 1995 年における灌漑農地面積分布データを、各国毎の人口統計データ (WRI CD-ROM) に基いて 1990 年灌漑農地面積分布を求めることにした。まず、図 3.6 は、1961 年の全世界の人口、農地面積、及び灌漑農地面積を 1 として、1961 年から 1994 年までの変化をまとめたグラフである。この図から、灌漑農地面積と人口はほぼ比例して増加していることがわかる。同様の図を大陸毎に作成した結果、これらについても概ね同様のことがいえた。したがって、国毎の灌漑農地面積は、人口増加に比例して増加すると仮定し、国毎に人口と灌漑農地面積は 1 対 1 に比例するとして、1995 年灌漑農地面積分布から 1990 年灌漑農地面積分布を求めた。この方法は、将来水資源評価において 2025 年及び 2050 年の灌漑農地面積分布を求める際にも適用した。

上記手順において求められた 1990 年の灌漑農地面積分布は図 3.7 のようになる。また、(1) の国番号ファイルに基いて国毎に集計し、WRI CD-ROM 収録の FAO による国別灌漑農地面積統計データと比較した図が、図 3.8 である。図から、大方の国については極めてよく一致していることが分かる。ただし、全世界の灌漑農地面積について、FAO の全世界合計と比較した際の誤差は約 12% 過小であった。この理由としては、Döll and Siebert (1999) にあるように、データ作成過程で 5 分グリッドセルのうちで灌漑面積率が 50% に満たない場合は、灌漑されていないものとして扱っているためにデータに記載されない灌漑農地があることが考えられる。また、図において誤差が大きく示されている国は、アフリカ諸国に集中しており、面積としては現在のところ小さいものの、今後拡大する可能性もあり、十分な統計データの収集による統計データの構築が必要であると考えられる。

さらに、この灌漑農地面積分布データの問題点として、灌漑分布データのない国では、国内一様に分布しているかあるいは大河川付近に分布していると仮定している、という点もある (Döll and Siebert (1999))。

(※ 3) Kassel University Home Page [<http://www.uni-kassel.de/>]

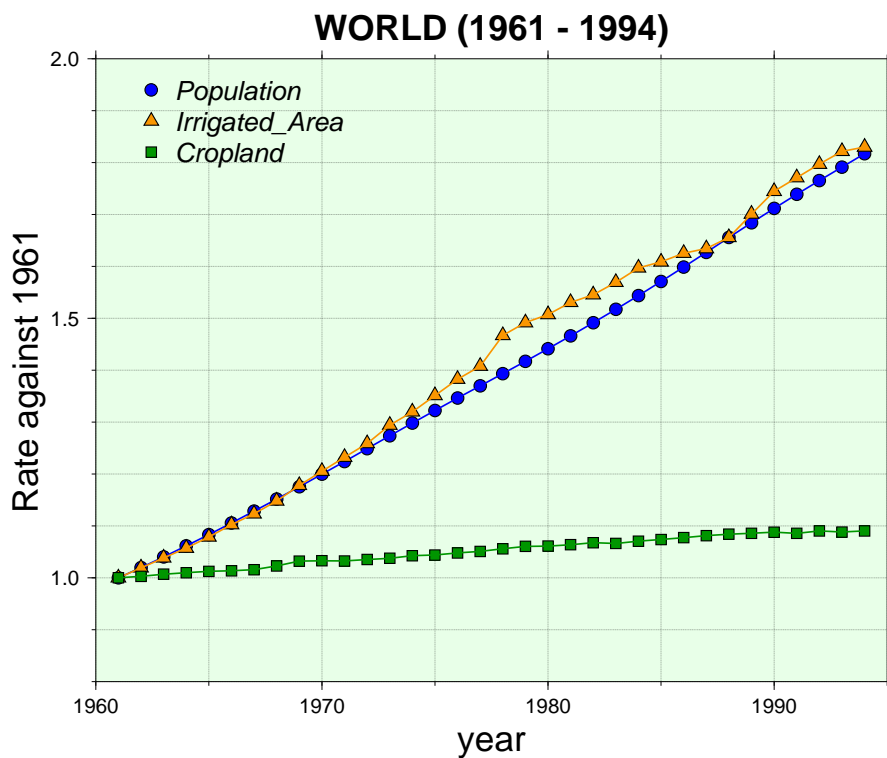


図 3.6: 人口、灌漑農地、農地面積の変化 (1961年を1とする)

Global Irrigation Distribution [km²/0.5° grid]

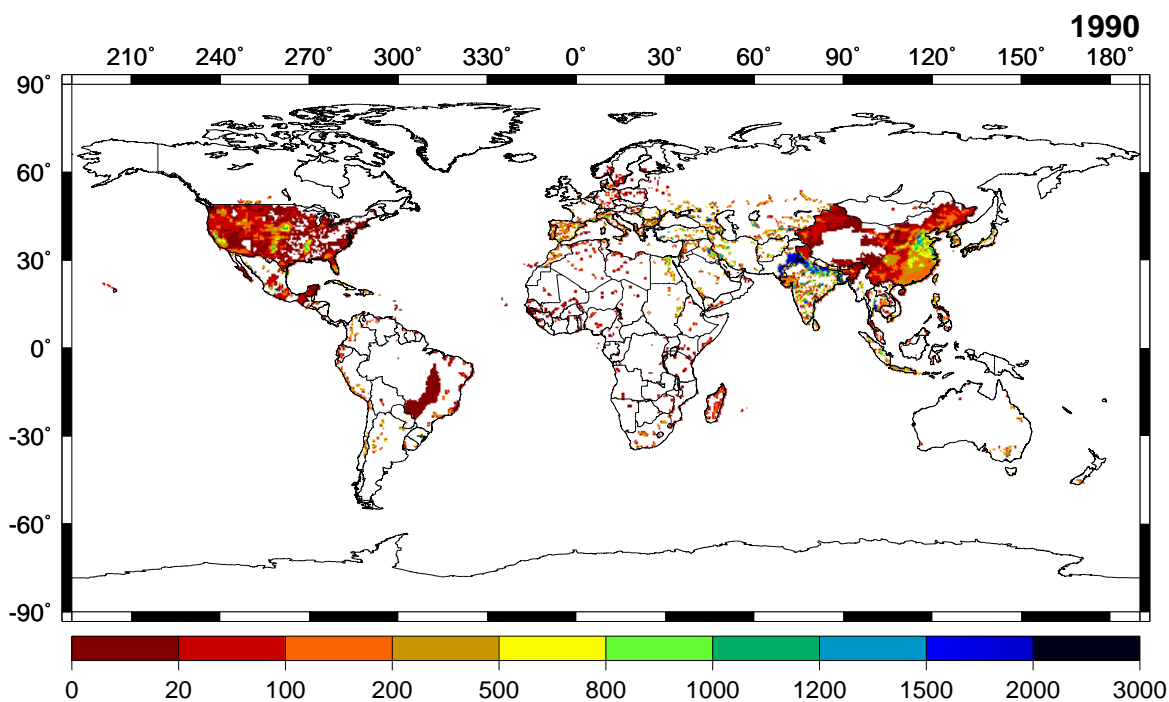


図 3.7: 灌漑農地面積分布

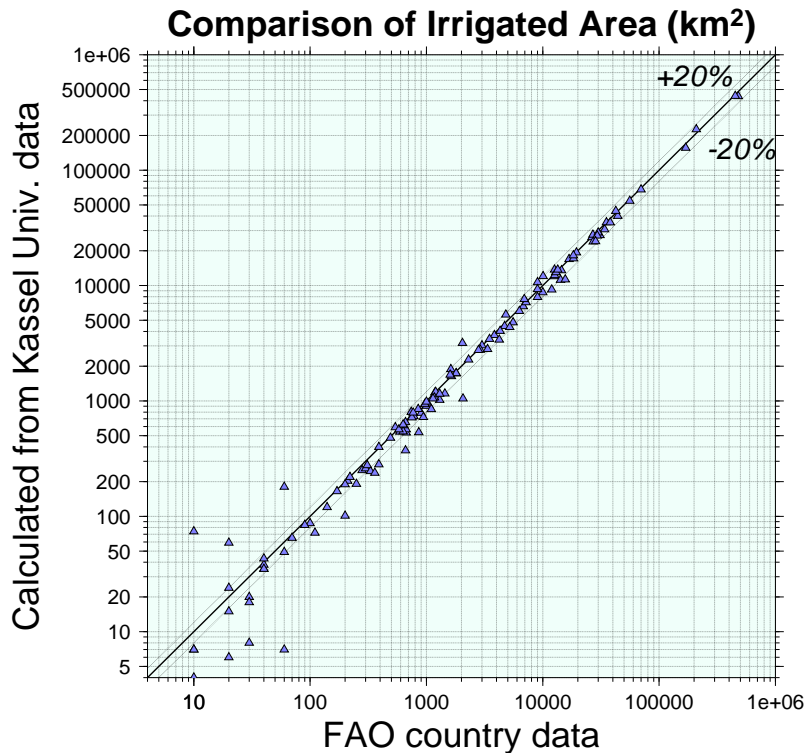


図 3.8: Kassel Univ. 灌漑農地面積分布データに基づいた国毎灌漑面積と FAO 国別値との比較

3.3.2 取水量分布の推計

次に、3.2節で求められた、1人当り生活・工業用水取水量、及び単位灌漑農地面積当りの農業用水取水量を基に、各種グローバルデータを用いて、生活・工業・農業用水取水量それぞれについてのグローバルな分布を求めた。

以下に、生活・工業・農業の部門別の水取水量分布推計の方法及びその結果、そして、それを大陸毎、国毎、河川流域毎の各スケールに対して集計した結果を示す。生活・工業用水取水量分布の方法は同一方法を用いたので一括して示す。そして、次に農業用水取水量分布推計の方法を示し、さらに、本章以降における考察には用いないが、農業用水取水量分布推計の過程において試算した、その他の方法とそれを用いなかった理由について述べる。

生活・工業用水取水量

生活・工業用水取水量の分布は、3.2節で求めた国別、1人当り取水量に、人口分布により重み付けをすることにより、求めた。具体的には、国別1人当り取水量 ($m^3/capita$) を、ESRI 国境データから求めた国番号データを用いて 0.5° グリッド毎に国内一様に分布させ、それに 0.5° グリッド毎に変換した CIESIN 人口分布データ (person/grid) を乗じることにより、グリッド毎に生活・工業用水取水量 (m^3) を算定することにより、取水量の分布を求めた。それぞれに対する取水量分布を表したのが、図 3.9及び図 3.10である。

国別統計データが欠損の国または、人口分布において人口がないとされている地域には、取水量が0の白色で示されている。図には、人口密度の高い地域において取水量は大きいことが示されている。上記のように生活・工業用水取水量の分布を求める際に人口分布データを用いること

は、生活用水取水量が人口の密集した地域(都市域)に集中していること、及び工業が集中していることを示しており、妥当な方法であると考え。特に、工業化が進展し、全取水における工業部門への配分の多い欧州諸国、米国、韓国、日本等の工業国では人口密集域(都市域)における工業用水取水量の集中が顕著である。一方で、中国やインド、アフリカなどの人口分布は大きいものの、全取水に対する生活・工業用水への配分の小さい国においては、人口の密集度の割には生活・工業用水取水量は小さいことが示されている。

農業用水取水量

農業用水取水量の分布は、3.2.2節で求めた国別単位灌漑農地面積当り農業用水取水量から、灌漑農地面積分布データにより重み付けをすることにより求めた。具体的には、国別に灌漑農地面積当り農業用水取水量(m^3)を、ESRI国境データから求めた国番号データを用いて 0.5° グリッド毎に国内一様に分布させ、それに上記の灌漑農地面積分布データ($km^2/grid$)を乗じて 0.5° グリッド毎に農業用水取水量(m^3)を求めることによりその分布を求めた。この図に示されたように、農業用水取水は、図3.7の分布にしたがって、灌漑農地面積率の高い地域においては取水量も多いことが示されている。

ただ、この分布は、灌漑農地面積データの精度に極めて強く依存しており、インド、中国、米国及び主要な農業国については、より精度の高い分布を示しているが、国別の国内における灌漑農地面積分布データのない地域においては灌漑農地面積の分布の精度が落ち、したがって、農業用水取水量分布の精度も落ちるといえる点の問題ではある。しかし、現段階での主要な農業国における分布の精度が高いことから、上記の問題点はそれほど重要ではないと考えられる。ただし、アフリカにおける灌漑農地面積データの精度が問題となっていたが、今後の農地の拡大の可能性を考えると将来重要になってくると考えられる。特にアフリカでは将来の人口の増加が極めて大きいと想定され(5章 図3.6参照)、それに伴う農業生産を目的とした灌漑農地の拡大が想定され、今後重要性は増すものと見られる。

総取水量

以上の、生活・工業・農業用水取水量の総和を求めることにより、年間総取水量を求めると、図3.12のようになる。

工業国においては前述のように都市の人口密集域に取水が集中しており、また、中国やインドでは人口密集域と灌漑農地密集域はほぼ同一の地域である(図3.7及び図3.4参照)ことから、人口密集域において極めて取水が集中している。そして、米国では中西部の農作地帯における取水も大きい、東海岸及び五大湖周辺の人口密集域における取水も多く、全体に取水量が大きいことが示されている。また、アフリカでは、人口密度の高い地域はあるものの、1人当り取水量が小さく、また灌漑農地面積も小さいため、総取水量も小さいと推計される。

いずれにしても、取水量の地域的な格差は極めて大きい。以下の章では、このようにして求められた年間総取水量と年間河川流量とを比較することにより水需給バランス評価を行なう。

Annual Domestic Water Withdrawal

[10^6 m³/year/0.5°grid]

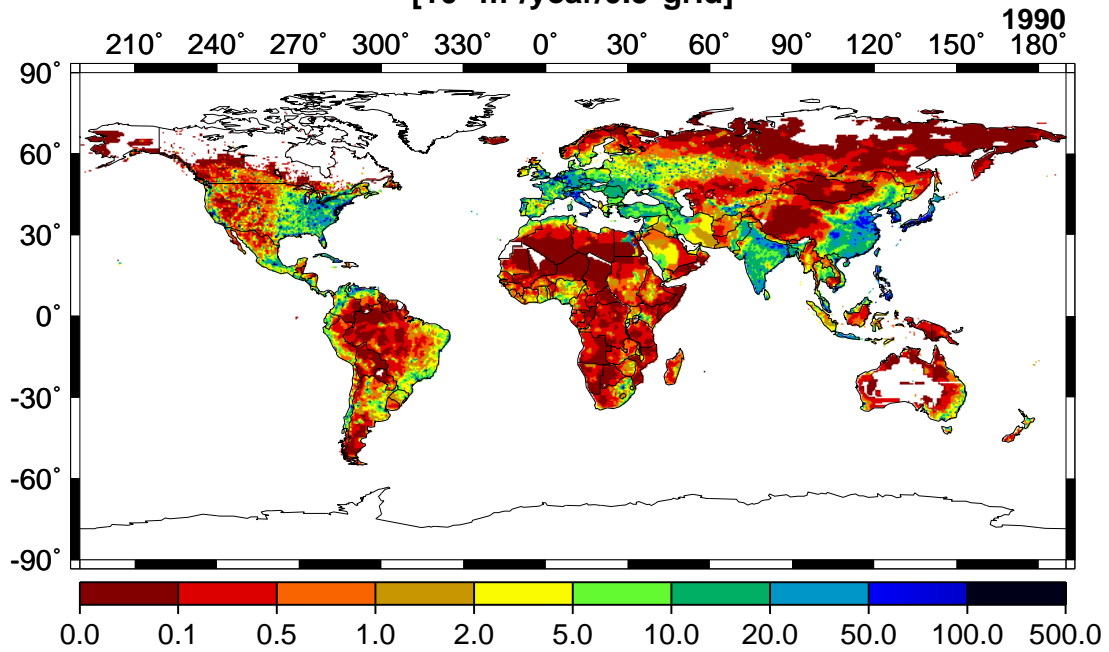


図 3.9: 1990 年における生活用水取水量分布の推計結果

Annual Industrial Water Withdrawal

[10^6 m³/year/0.5°grid]

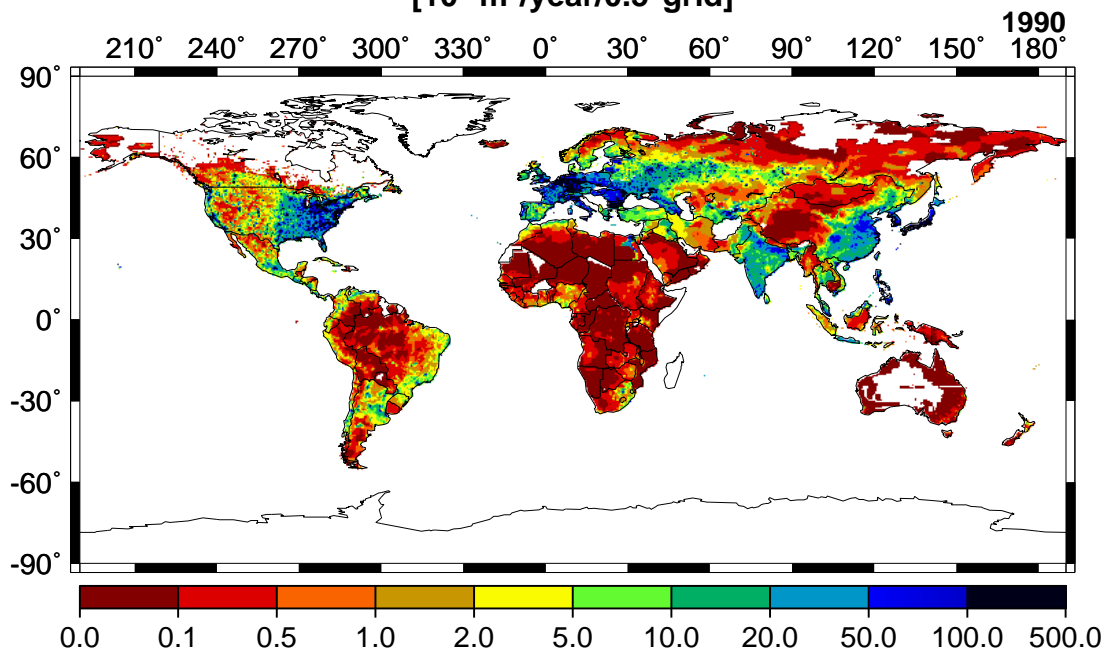


図 3.10: 1990 年における工業用水取水量分布の推計結果

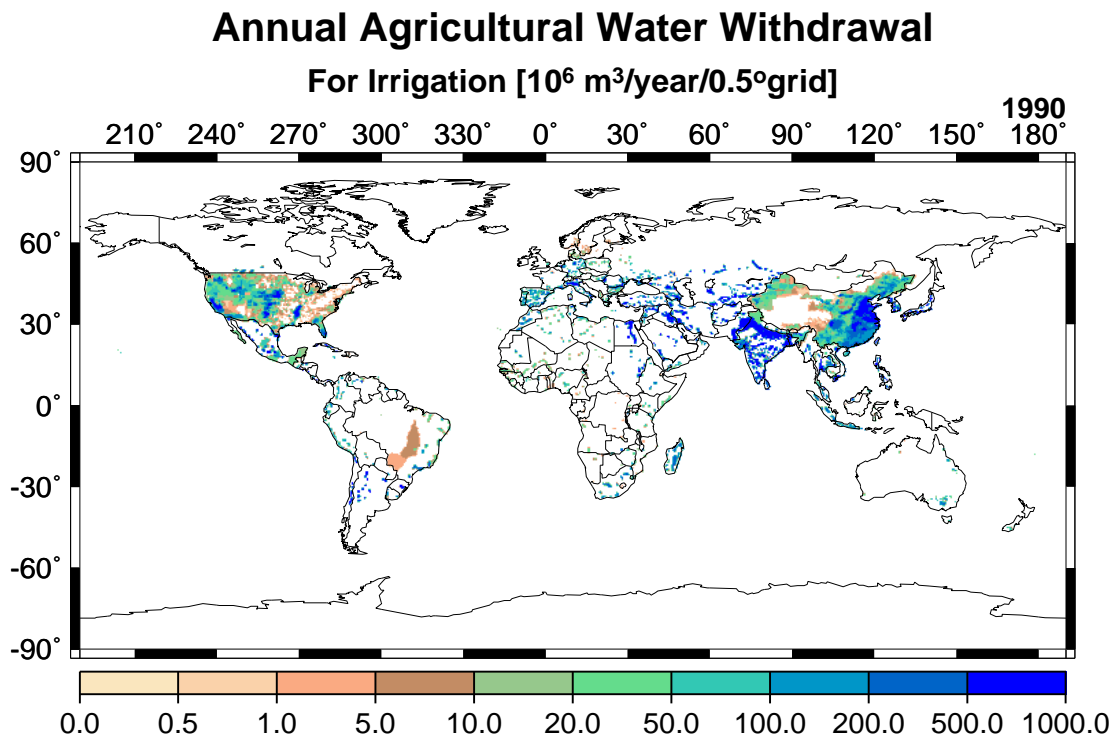


図 3.11: 農業用水取水量分布の推計結果

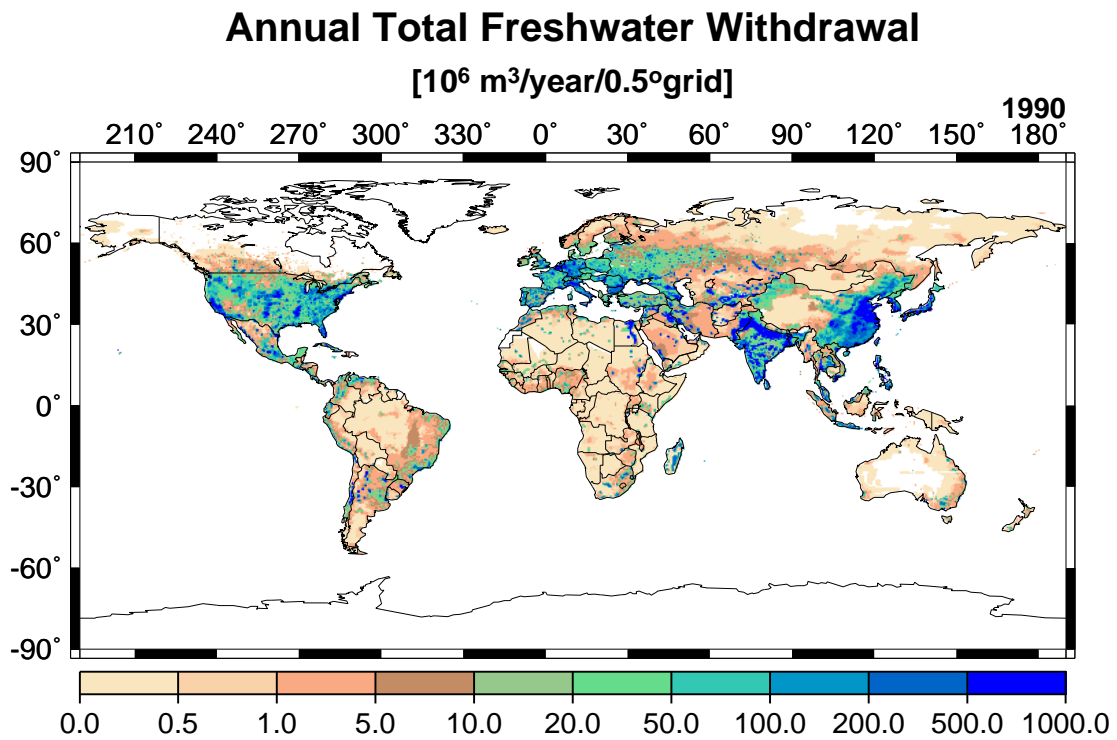


図 3.12: 年間総取水量分布の推計結果

農業用水取水量分布推計の別法

本研究では、前節に示したように、国別灌漑農地面積当り農業用水取水量から、灌漑農地面積分布によって重み付けをして求めた農業用水取水量分布を適用したが、それを適用するに至った過程において、もうひとつの方法、国別農地面積当り農業用水取水量を農地面積分布を用いて農業用水取水量分布を求める方法も試算している。以下では、この方法の概要と、これを用いなかった理由について述べる。まず、表 3.4 データの諸元及びその概要である。

表 3.4: 農業用水需要量推計に用いなかったデータ

データの種類	解像度	データ年次	諸元
農地面積統計データ [1000 ha]	国毎	1961～1994 年	FAO
農地面積分布データ [%/grid]	0.5 度	1700～1992 年	SAGE

SAGE(Center for Sustainability and Global Environment) 農地面積分布データは、グリッド当り農地の占める割合で表示されているので、国毎の国土面積を求めたときと同様、緯度帯による面積の相違を考慮したグリッド当り面積を用いて、グリッド毎の農地面積 (km^2/grid) を算定した。それに、WRI CD-ROM 収録の農業用水取水量データ及び FAO による国別農地面積データを用いた国別単位農地面積当り農業用水取水量 (m^3/grid) を乗じることにより、農業用水取水量の分布を求めた。SAGE による 1990 年の農地面積分布は、図 3.13 のようになっている。これを、国番号データを用いて国毎に集計して、WRI CD-ROM の FAO 国別データと比較したところ、図 3.14 のように、かなりのばらつきが見られた。

さらに、このデータを用いて農業用水取水量の分布を推計すると、図 3.15 のようになる。この農業用水取水量分布を、前節で求めたものと比較すると、次のようなことが確認される。灌漑農地に比べて、全農地面積の方が当然分布が広いので、上記の全農地分布データによる取水量推計結果は、灌漑農地面積分布により求めた前節の農業用水取水量に比べて地域に分布が集中することになっている。

これは、図 3.16 において中国・インドにおいて農地面積分布から求めた農業用水取水量がより大きな地域が広く分布する一方で、灌漑農地の分布する地域においては、灌漑農地面積分布から求めた農業用水取水量が極端に大きいことを示していることから推測することができる。また、米国においては、灌漑農地面積分布の分布と農地面積の分布が極めて異なり、大農作地帯が大灌漑農作地域を指しているわけではなく、灌漑農地は、中西部に限られていることを示している。そのようなことから、米国における農業用水取水量の分布が、上記 2 者の算定方法間で大きな相違があることがわかる。

また、この方法により農業用水取水量を求めた場合の年間総取水量分布は、図 3.17 のようになっている。上記の農業用水取水量の分布の違いを反映して、取水量の大きな地域が広く分布していること、そして、米国における分布が、図??とは極めて異なることが示されている。

このように、灌漑農地面積分布より求めた農業用水取水量の分布は、灌漑農地グリッドに極端に集中して算出されるという事が言えるが、本研究における水資源評価は年間の河川(及び地下水の流出量との合計)に対する取水量の関係に基づいて評価を行なうといった目的から、農業用水取水量としては、天水により農業用水を得ている場合を除く必要があり、したがって、本研究の目的においては灌漑農地面積データを用いる方が適切であると判断した。

Global Cropland Distribution

[km²/0.5°grid]

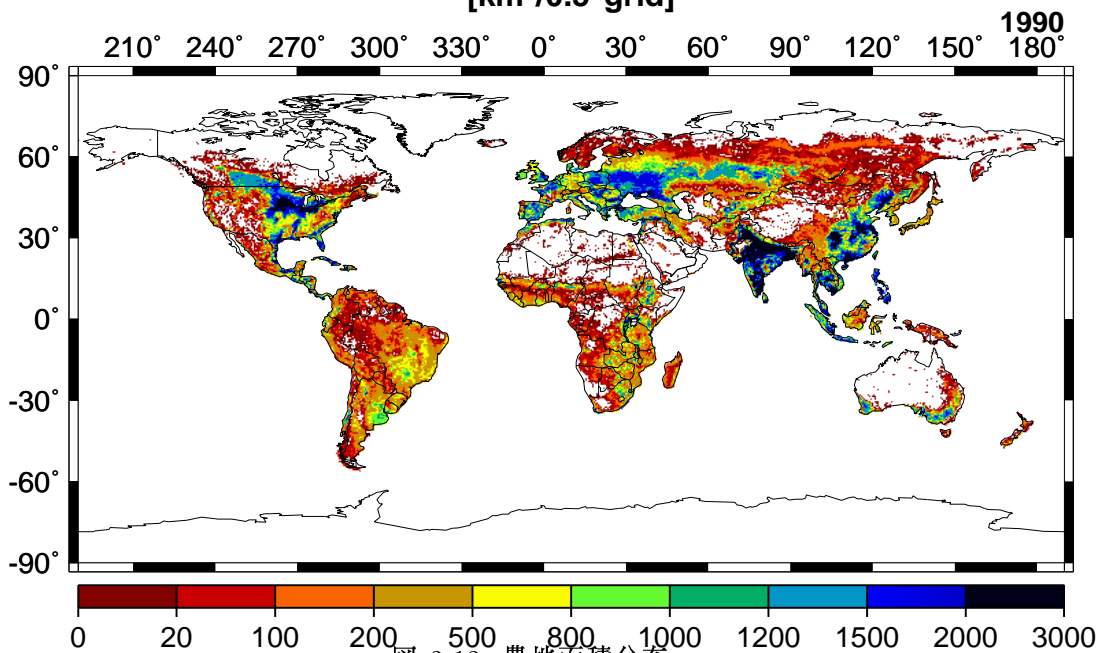


図 3.13: 農地面積分布

Comparison of Cropland Area (km²)

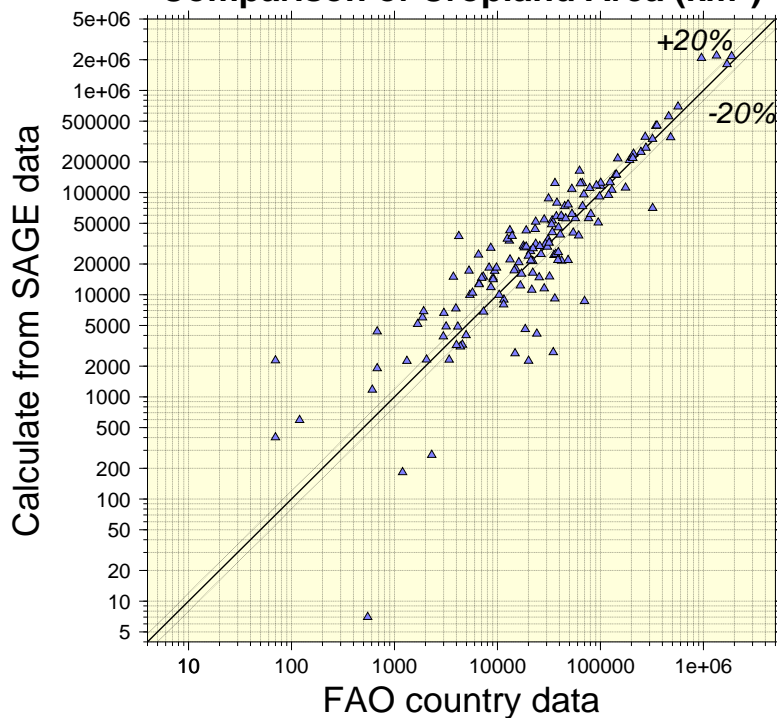


図 3.14: SAGE 農地面積分布に基づいた国毎農地面積と FAO 国別値の比較

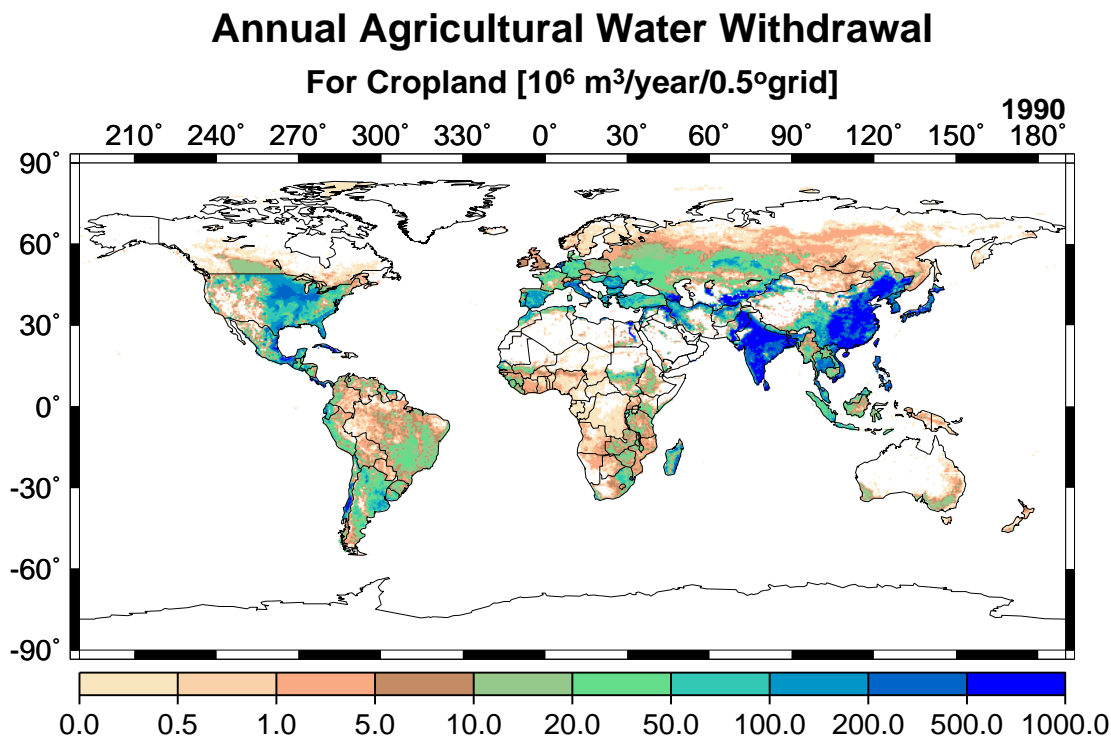


図 3.15: 農業用水取水量分布の推計結果～農地面積分布より推計～

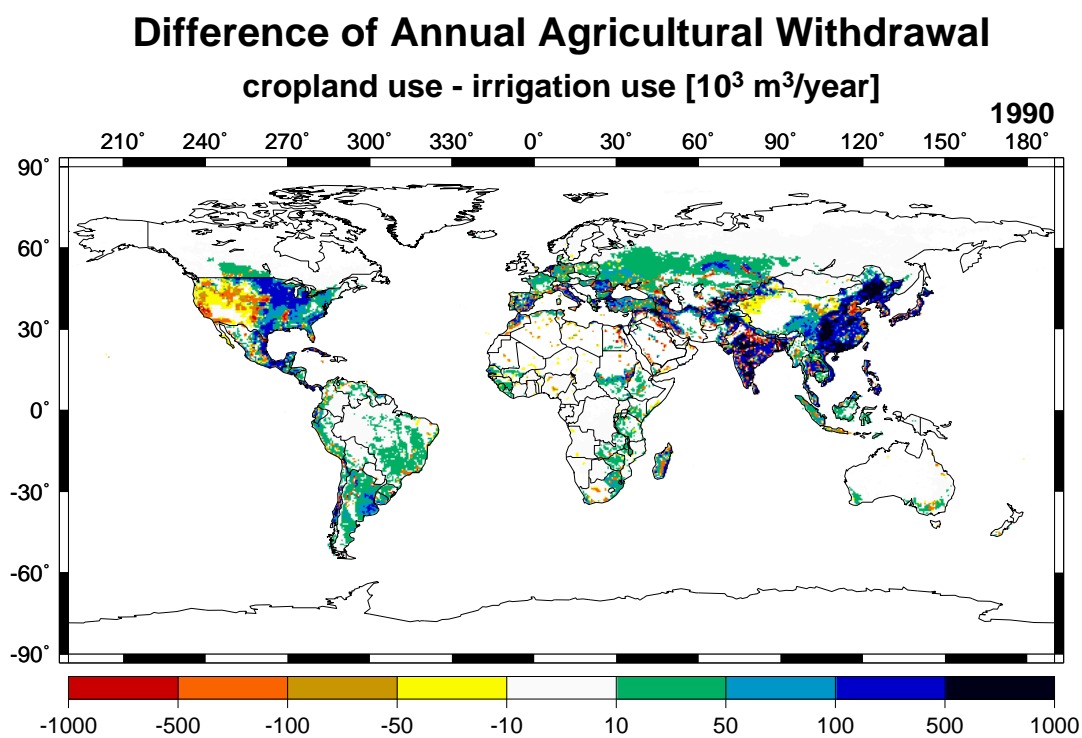


図 3.16: 農地面積分布より求めた農業用水取水量と灌漑農地面積分布より求めた農業用水取水量の相違

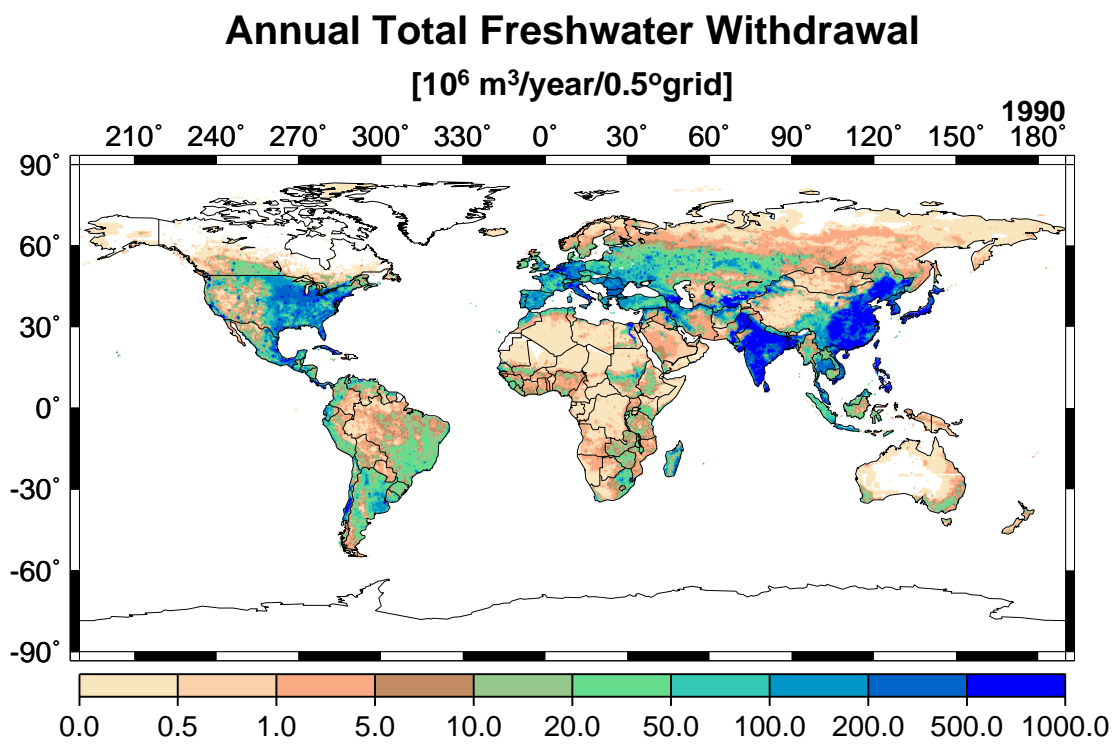


図 3.17: 年間総取水量分布の推計結果 ～農地面積分布より推計～

Chapter 4

水資源評価

4.1 水資源評価の概要

図 4.1は、本研究で行なう水資源評価の概要である。2、3章において、推計された水資源賦存量及び取水量の推計結果から、水資源評価を行なう。基本的には水需給バランスから評価を行い、さらに、国別の経済データを用いて、その水需給バランスに対する、より実際的な逼迫度合いを評価する。まず、次節 4.2節では、水需給バランスを評価する前に、1人当たり利用可能な水資源賦存量を算定し、それによる評価を行なう。4.3節では、それを参考にしながら水需給バランスを評価する。そして、その結果の考察をして、4.4節において経済データも考慮にいった水資源評価を試みる。さらに、それらの結果をまとめ、最後に現在重要な問題が生じている、または、今後水資源に関わる紛争等が生じることが危惧されている国際河川に注目して評価を行なう。

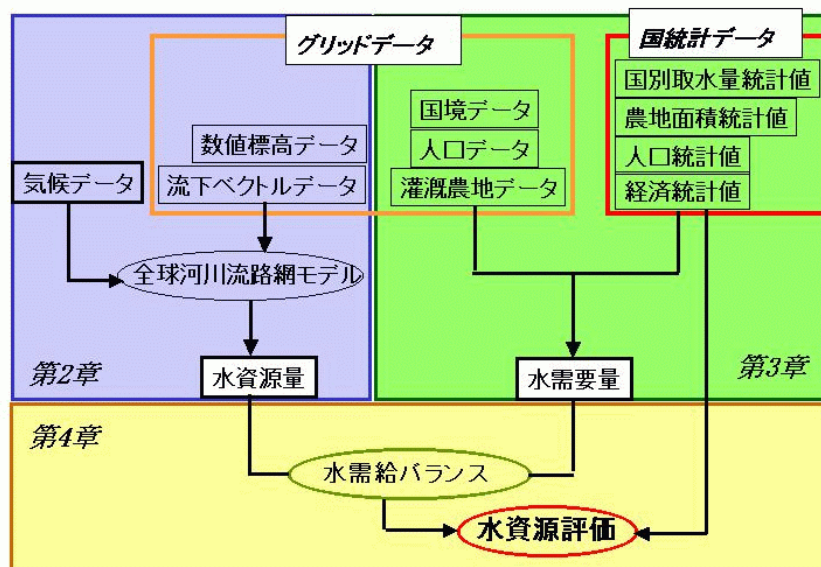


図 4.1: 水資源評価の流れ

4.2 1人当り水資源賦存量のみによる評価

まず、本節においては、1人当り水資源賦存量によって大雑把な評価を行なう。Shiklomanov (1999) において、以下の指標が用いられている。本節における評価も、その指標 (単位:[1000 m³/year/capita]) に基づいて行なう。

$Q_{per-capita} \leq 1$: 壊滅的な水不足
$1 < Q_{per-capita} \leq 2$: 深刻な水不足
$2 < Q_{per-capita} \leq 5$: 水不足
$5 < Q_{per-capita} \leq 10$: 平均的
$10 < Q_{per-capita} \leq 20$: 豊富
$20 < Q_{per-capita}$: 非常に豊富

この指標に基づいて、世界の1人当り水資源賦存量の分布を求めると図4.2のようになる。具体的な方法としては、グリッド毎評価の方は、第2章の図2.5に示されている年間河川流量を、第3章の図3.4に示されている人口によって除したものである。これによって、グリッド毎に1人当り水資源賦存量を求めた。

また、流域毎評価の方は、年間河川流量を流域毎に集計、ここでは、上流から河口までの過程において流域外からの流入による河川流量の増加及び途中における取水による流量の減少がないものとして河口における流量をその河川流域での流量であるとした。そして、人口については、河川流域内の人口を合計して河川流域毎の人口を算出し、年間の河川流域毎に河川流量を人口で除することにより、1人当り水資源賦存量を求めた。

図において、この値の小さい赤色で示された地域ほど、1人当り利用可能な水資源が少なく、逼迫している状況であると判断することができ、大まかな傾向をみることができる。図より、中国黄河、インダス川流域、及びアラビア半島において特に逼迫していると判断することができる。

ただし、この評価方法においては、国毎・地域毎の水需要量の多寡は、一切反映されておらず、実際には、地域毎の水需要量によって大きく評価は変わると考えられるので、以下の節では、水需給バランスによる評価を行なう。

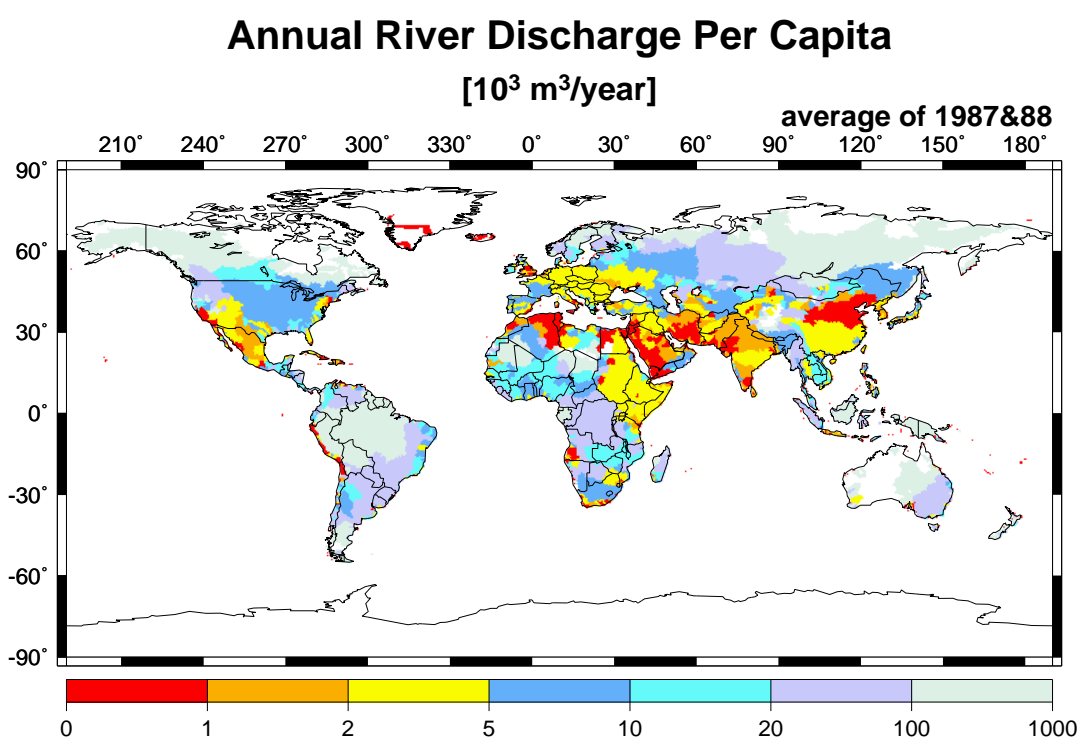
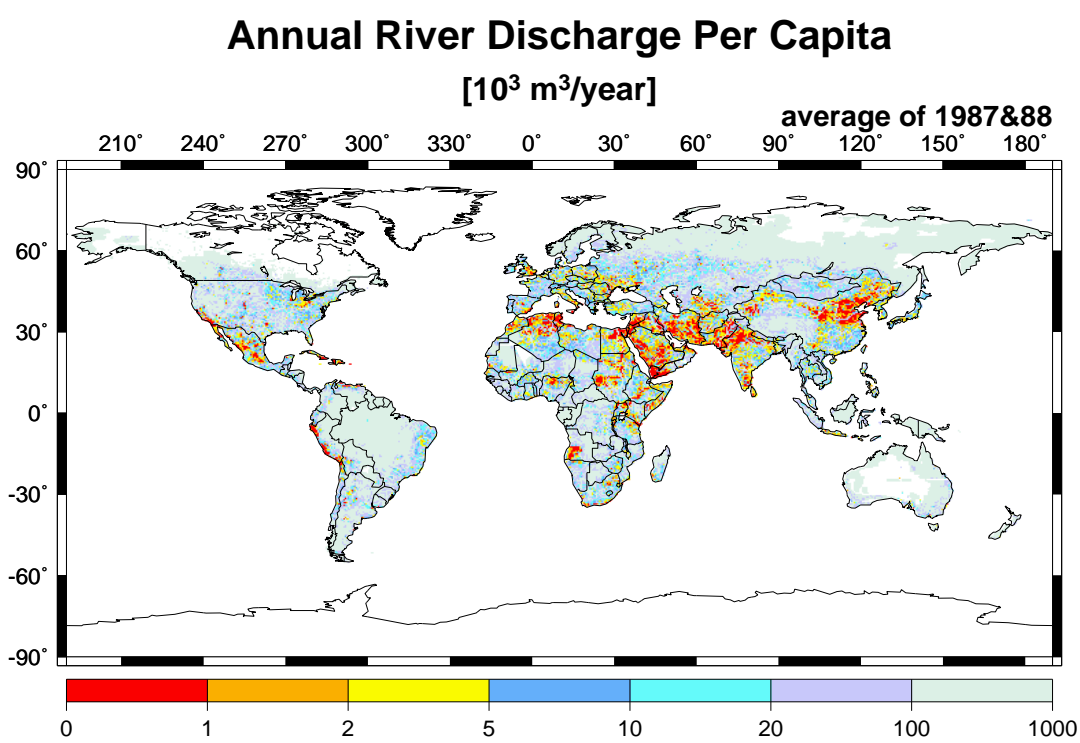


図 4.2: 1人当り年間水資源賦存量 (1990年) 上図: グリッド毎評価, 下図: 流域毎評価

4.3 水需給バランス評価

4.3.1 渇水比率

水需給バランス評価は、総取水量 (図 3.12) と、第 2 章において求められた年間河川流量との比較により行なう。年間河川流量と年間総取水量の比率 (DIA/Q) を、渇水比率と呼び、以下ではこの渇水比率に基づいて水需給バランスを評価する。

まず、年間河川流量を (Q) を、人間が利用することのできる持続可能な水資源賦存量とする。また、それに対する取水量は、生活用水取水量 (D: Domestic water withdrawal)、工業用取水量 (I: Industrial water withdrawal)、及び農業用取水量 (A: Agricultural water withdrawal) の 3 部門に分けてそれぞれ個別に求め、さらにそれらを総計して年間総取水量 (DIA: D+I+A) を求める。

そして、水資源賦損量 (Q) と年間総取水量 (DIA) の比率 (DIA/Q) により、水需給バランスを評価する。評価の指標として、次のような数値が広く用いられており (Vörösmarty et al. (2000) 等)、本研究の水需給バランスの評価でもこの DIA/Q を用いることにする。この比率が高いほど、水供給量に対する水需要が大きく、水資源は逼迫していると考えられる。以下に、その評価の基準を示す。

$$\begin{aligned} \text{DIA/Q} < 0.1 & : \text{渇水ストレスなし} \\ 0.1 \leq \text{DIA/Q} < 0.2 & : \text{渇水ストレス低い} \\ 0.2 \leq \text{DIA/Q} < 0.4 & : \text{渇水ストレスやや高め} \\ 0.4 < \text{DIA/Q} & : \text{渇水ストレス高い (水不足)} \end{aligned}$$

以上のような指標を基本として、水需給バランスの評価を行なう。また、脱塩処理水の生産量のある国に対しては、DIA/Q の渇水比率として正確には、以下の式に示すような指標 (Heap et al. (1998)) に基づいて、に基づいて評価した。この指標については簡単のため、脱塩処理水の含む地域含まない地域の双方に対して、一括して渇水比率 (DIA/Q) と呼ぶことにする。

$$\text{渇水比率} = \frac{(\text{総取水量}) - (\text{脱塩処理水生産量})}{\text{年間河川流量}}$$

4.3.2 水需給バランス評価と水の再利用に関する問題点

4.3.1 節の定義に基づく渇水比率 (DIA/Q) の分布を示したのが、図 4.3 である。これは、グリッド毎に水需給バランスを評価することにより、地域毎にどの程度渇水に対するストレスが高いかを示している。この渇水比率が 0.4 以上となると、水不足の状態にあるということを示しているが、そうした地域は、中国黄河流域、インダス川及びガンジス川流域、中央アジアのアムダリア川流域、及び米国中西部等の農業地帯に分布していることがわかる。

図 4.4 は、各グリッドにおける総取水量のうち農業用水取水量の占める割合を表示したものである。上記の渇水ストレスの高い地域は、圧倒的に農業用水取水量が多いことがわかる。

ここで、このグリッド毎の水需給バランスによる評価における問題点は、供給側の河川流量としては自然流量を用いており、上流から下流に至る途中における取水による水量の減少については一切考慮に入られていない。したがって、河川下流域における水不足が示されない結果となった可能性がある。

この方法による評価では、一度河川から取水された水が利用後河川に戻され、100%再利用率が可能であるということになる。しかしながら、実際には、一度取水された水の多くは河川

Annual Freshwater Withdrawal

Use-to-Resource Ratio

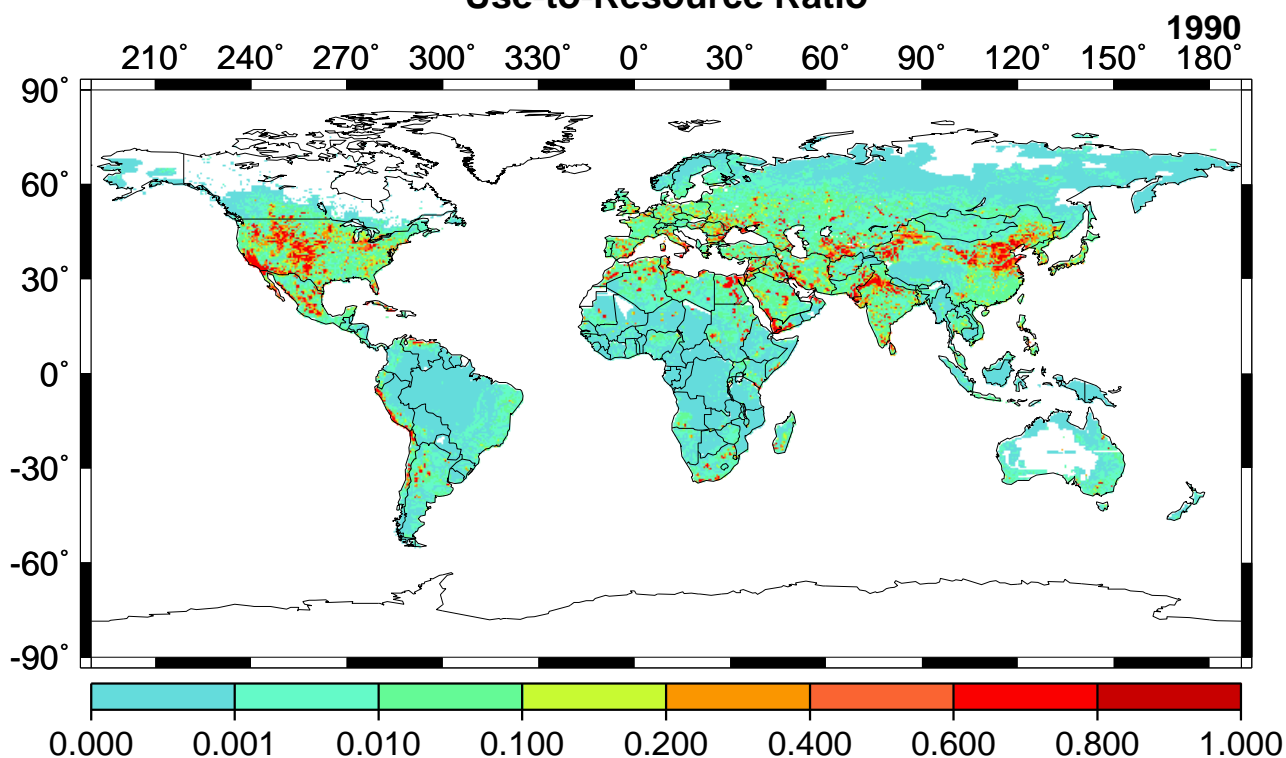


図 4.3: 渇水比率の分布

へは戻されない場合があり、また、たとえ戻されたとしても、水質が悪化し資源として利用できる水はより少なくなっていることが考えられる。

取水後河川へ戻される水は、人間活動によって大きく異なるが、およそ農業用水の 25%、工業用水の 86%、そして生活用水の 60%であるとされている (ジョエル E (1998))。また、全世界における取水は、およそ農業用水 69%、工業用水 23%、そして生活用水の 8%であるとされている (WRI et al. (1998))。したがって、再び水資源として河川に戻される水は、大雑把に 0.69×0.25 (農業用) + 0.23×0.86 (工業用) + 0.08×0.60 (生活用) = 0.4183、すなわち約 42%であるとする事ができる (ジョエル E (1998))。

この値は、実際には利用効率により部門毎及び国毎に大きく異なると考えられるが、一度取水されると約 6 割は河川へは戻らないと言うことを示しており、100%再利用可能とした上記の水需給バランスは、水不足を過小評価することになると考えられる。したがって、グリッド毎水需給バランス評価にあたっての今後の課題としては、取水による河川流量の減少、及び水質の汚染による水資源としての利用価値の低下を考慮に入れる必要があると考えられる。

グリッド毎評価に対する上記の課題点に関しては以後の研究に委ねるとして、こうした水の 100%再利用という仮定による水不足の過小評価を改善するために、本研究では、次に述べるような河川流域毎の評価を行なった。

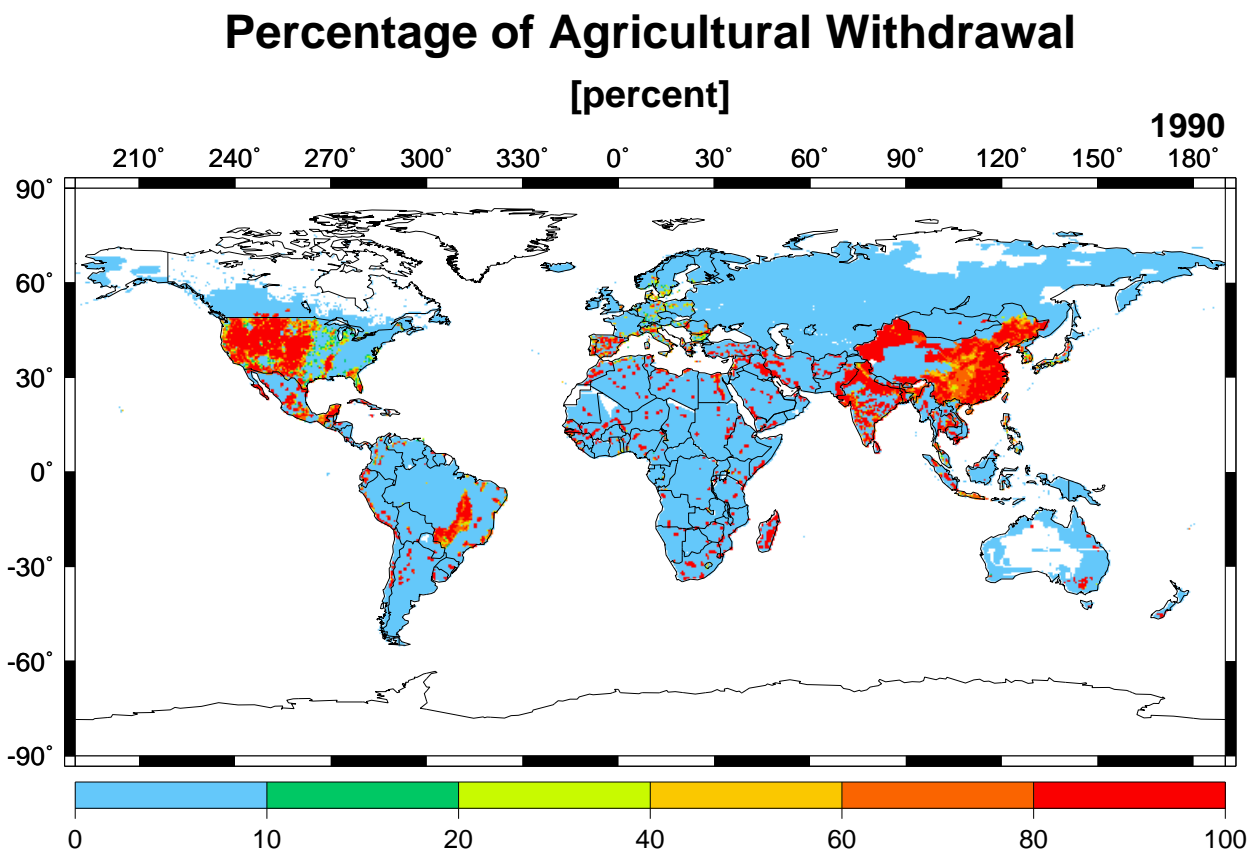


図 4.4: 全取水量に対する農業用水取水量の占める割合

4.3.3 水需給バランス評価 (2)～河川流域毎の評価～

流域毎評価の方法は、前章の 3.3.2 節においてグローバルに分布を求められた生活・工業・農業用取水量を、それぞれ部門別に TRIP 河川流域に従って河川流域毎に集計し、その流域毎の総取水量と流域全体の河川流量を比較することにより行なった。ここで、流域全体の河川流量としては、河口における流量(自然流量)で代表した。そして、年間河川流量との比較による水需給バランス評価の結果、図 4.5 のようになる。この図より、例えば、中国の黄河、インダス川、中央アジアのアムダリア川流域において渇水比率 (DIA/Q) の高い赤色で示されていることが確認できる。このように、取水量の分布を河川流域毎に集計することにより、水需給バランスの結果が明確になる。

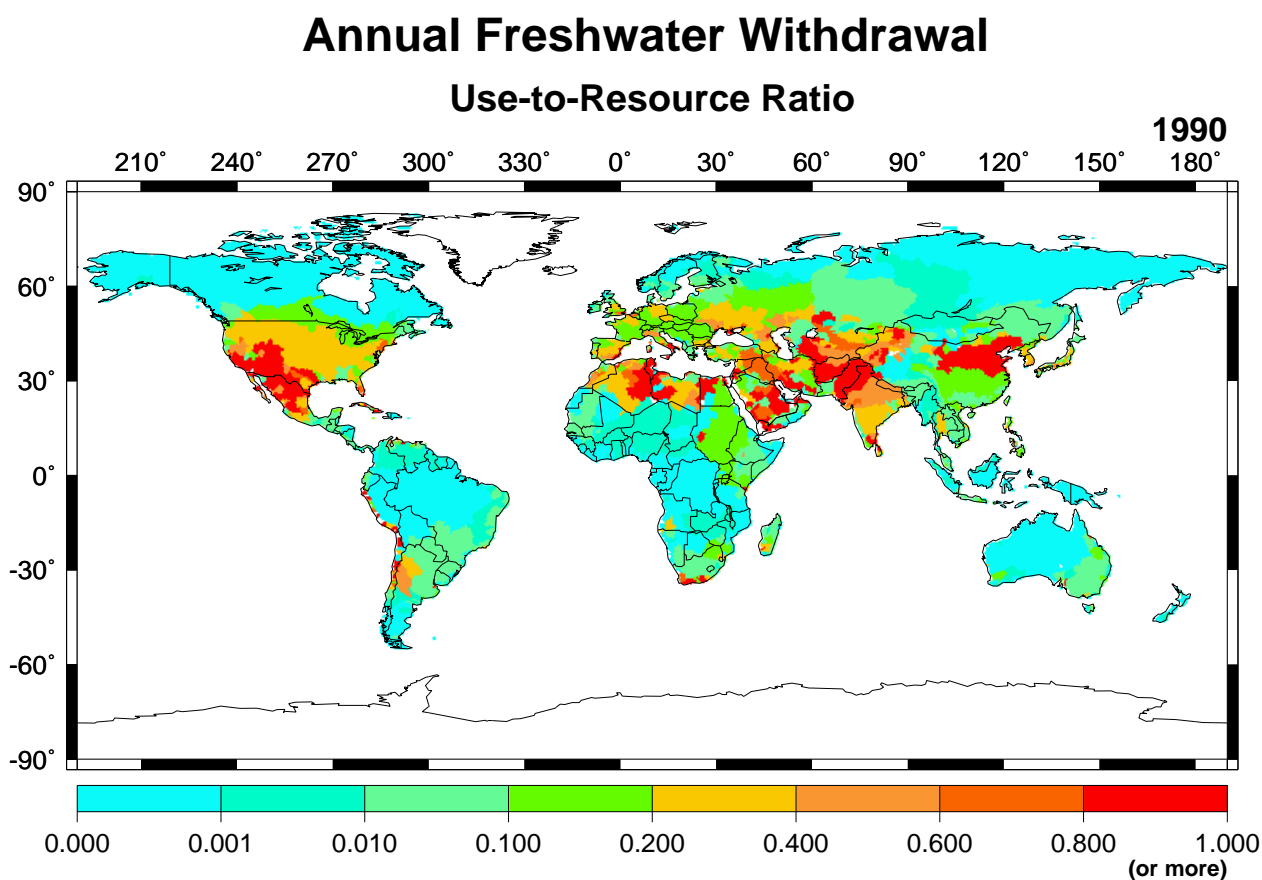


図 4.5: 流域毎の渇水比率の分布

4.3.4 水需給バランス評価結果の考察

以上の結果に、さらに同様に国毎に集計した結果を加えて、まとめたのが表 4.1である。この表では、同時に他研究との比較をするために、1995年の人口に基づいた、渇水比率レベル毎の人口を算出している。

表 4.1: 渇水比率レベル毎の人口～評価方法毎の比較、及び他研究との比較～

渇水比率	国毎	国毎	国毎	グリッド毎	グリッド毎	流域毎
	本研究	UNH	UN	本研究	UNH	本研究
$DIA/Q < 0.1$	16	20	17	32	32	18
$0.1 \leq DIA/Q < 0.2$	4	17	21	6	4	12
$0.2 \leq DIA/Q < 0.4$	29	15	14	5	4	8
$0.4 \leq DIA/Q$	7	5	5	13	18	18

UNH : University of New Hampshire

UN : United Nation

表 4.1は、国毎評価においては、国内の水需給バランスが国内の地域間の格差が相殺されてしまうことによって、グリッド毎評価及び流域毎評価に比べて水不足が過小評価されることを示している。また、グリッド毎評価において UNH と本研究において、概ね一致した結果が得られていることが示されている。これは、本研究は UNH とほぼ同一の方法による評価であるためであり、ここでの相違は、UNH は 1985 年の取水量を基にして 1995 年に対する人口を求めたのに対し、本研究では 1990 年の取水量を基に評価したこと、及び脱塩処理水に関する考慮を入れたことによると考えられる。

本研究の国毎評価において、UNH 及び UN の結果と比べて、渇水ストレスの高い人口が大幅に多くなっているが、これは、本研究における国毎評価では、その国内の水供給量として、TRIP 河川流量ではなく、第 2 章の図 2.6 に示した流出量に基づくため、水資源を国際河川に依存する国などにおいて、他国からの河川による流入量が全く考慮に入れられていないためであると考えられる。それにもかかわらず、グリッド毎評価に比べて国毎評価では水不足が過小評価となっていることは注目に値する。

また、他研究では行なわれてはいないが、流域毎評価の渇水比率レベル毎の人口をまとめると、表のようになり、グリッド毎評価に比べて水不足が厳しいことが示されている。これは、グリッド毎の評価は一度取水された河川水は全て河川に戻され利用することができるとの仮定（これについては UNH も同様の仮定）をしているのに対し、河川流域毎の評価では、一切の河川水の再利用がないとしているため、評価が厳しくなったものであると考えられる。

実際には、グリッド毎評価と流域毎評価の中間程度の水資源逼迫度合いであると考えられ、今後は、一度取水された河川水の再利用についての考慮を入れた水需給バランスの評価が必要であると考えられる。

ここで、 W を利用可能な水資源、 R をその領域における流出量、そして D を周囲の領域から流入する河川流量とすると、

$$W = R + c \times \sum D, \quad c: \text{周囲の領域からの流入する割合}$$

と表すことができるが、本研究におけるグリッド毎評価では、 $c = 1.0$ 、また、流域毎評価では、 $c = 0$ 、という係数をかけて領域内の水資源賦存量を推計していることになる。一方で、Shiklo-

manov(1999,2000)では、対象とする領域は流域スケールあるいはそれよりも大きい、その式に基づく、 $c = 0.5$ として領域内の水資源賦存量を推計している。

係数 c は、選定する領域 (グリッド、流域、国) 毎に考慮する必要があるが、このような係数を考慮した推計をすることは、重要であると考えられる。

4.4 経済指標を考慮に入れた水資源評価

以上においては、グリッド毎及び河川流域毎に水需給バランスを評価し、それによって渇水ストレスの高低を診断してきた。しかし、その水需給バランス評価の結果が、その地域の水資源に対する真の評価を表している、すなわち水に対する安全保障を診断しているものであるとは言い難い。

例えば、米国においては農業用水取水量が膨大でかつ、生活・工業用水取水量も大きいために、中西部においては水需給バランス評価によると水不足との結果が示されている。一方で、そういった状況にありながら、その地域に住む人々が水不足により生命を脅かされるような状況であると考えるのは難しい。

そういった真の意味での水不足は、その国、地域における水資源施設の充実度、及び経済レベルに大きく左右されるものであると考えられる。例えば、経済的に豊かな国において十分な水資源がない場合には、自国における農業を放棄し、他国からの農産物の輸入に依存することができる。ただし、現実には、日本以外の先進国においては農産物の自給率は高い。日本は、水資源の不足が原因ではなく、工業化・都市化の急速な進展が大きな原因ではある (その是非はここでは問わないことにする) が、農産物の大半は他国からの輸入に頼っている。これは、農産物を通じた大量の水を輸入していることになる。1トンの穀物生産には約1000トンの水が必要であるとされている (レスター R (2000); ポステル (2000))。そして、日本は約3000万トンの穀物を輸入しており、そうすると約300億トンの水を輸入していること相当する (ポステル (2000))。その数値の確かさについては、今後検討することが重要ではあるが、いずれにせよ、経済力がある国ならば、農産物や工業製品を通じた水の間接的な輸入が可能であると考えられる。

また、一定段階まで経済発展を既に遂げた国においては、水の有効利用や節水に対する技術が投入され、それにより少ない水資源に対しても安全かつ快適な生活が保証されていると考えられる。

以上のようなことから、以下では、真の意味での水資源評価を行なうため、国毎の経済指標を考慮に入れることにした。経済指標としては、国毎の1人当たりGDPを用い、この1人当たりGDPの値によって、前節まで用いた渇水比率 (DIA/Q) に対して重み付けをすることにした。具体的には、渇水比率 (DIA/Q) を、国番号データを用いて国毎に一様分布させた1人当たりGDPの値で除することにより、 $(DIA/Q)/(GDP_{per-capita})$ を求め、それに対して、その値の最大値が、もともとの DIA/Q の最大値と等しくなるように係数 $(\frac{MAX[DIA/Q]}{MAX[(DIA/Q)/(GDP_{per-capita})]})$ を乗じることによって補正し、その値の分布を求めた。その結果は、図4.6(グリッド毎評価)及び、図4.7(流域毎評価)のようになる。

この方法により、経済レベルの高い国における水不足の深刻さは低く、そして、経済レベルの低い国における水不足の深刻さは高く診断されるものと考えられ、より現実的な水資源評価に近づいたと考えられる。それは、例えば、水需給バランス評価のみにおいて水資源が逼迫していると診断された米国中西部が、この指標により、安全側へ移行したことが挙げられる。また、流域毎評価によるとより顕著であるが、欧州における水資源に対する逼迫度は、軒並安全側へ移行し

ていることも挙げられる。それに対して、中国及びインドでは更に水資源が逼迫していくことが示されている。

これは、米国や欧州における水不足によって生命の危機が脅かされていることは現在報道されていないことを勘案すると、より妥当な水資源評価の指標であると考えられる。

ただし、上記の算定方法は、単純な乗除のみに基づいているので、今後の課題として、より合理的な評価方法を開発することが必要であると考えられる。例えば、国毎の経済レベルのみではなく、さらに貯水池などの水資源施設の充実度及び更なる投資の可能性、月毎季節毎の降水量・河川流量の増減等、を考慮することが望まれる。そういった意味で、今回は用いることのなかった、第2章で月毎に算定された河川流量分布(その検証も重要ではあるが)が、今後有効に利用されることを期待する。

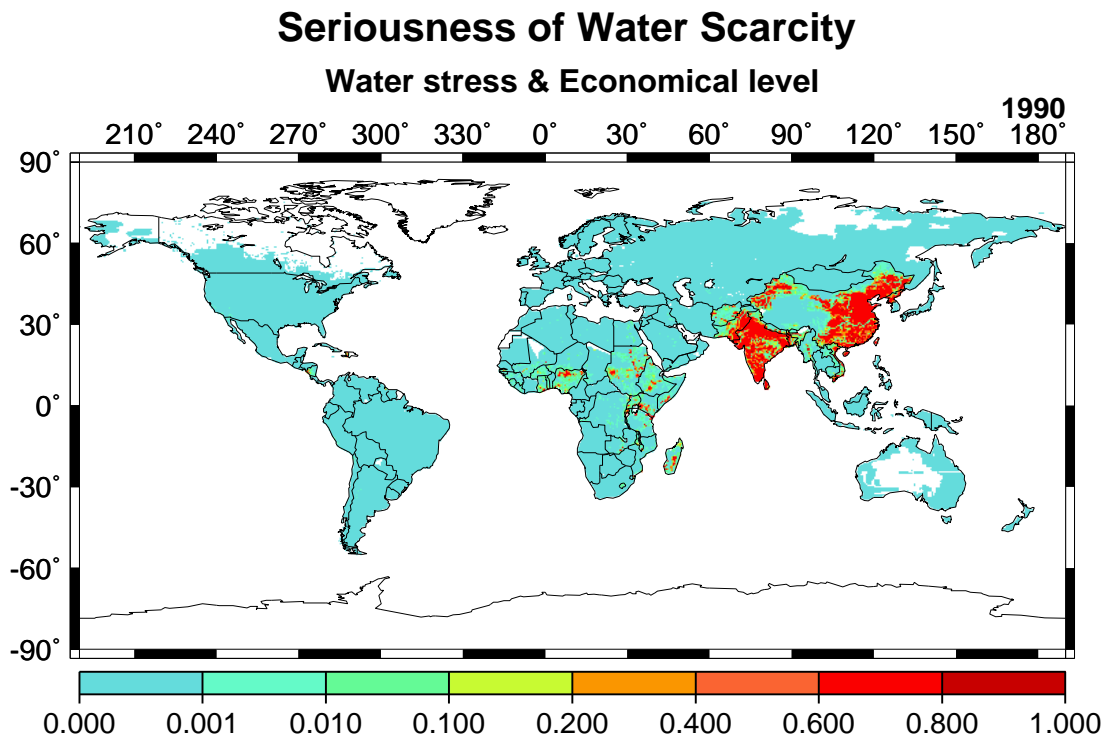


図 4.6: 水不足に対する深刻度が高いと推測される地域の分布 (グリッド毎評価)

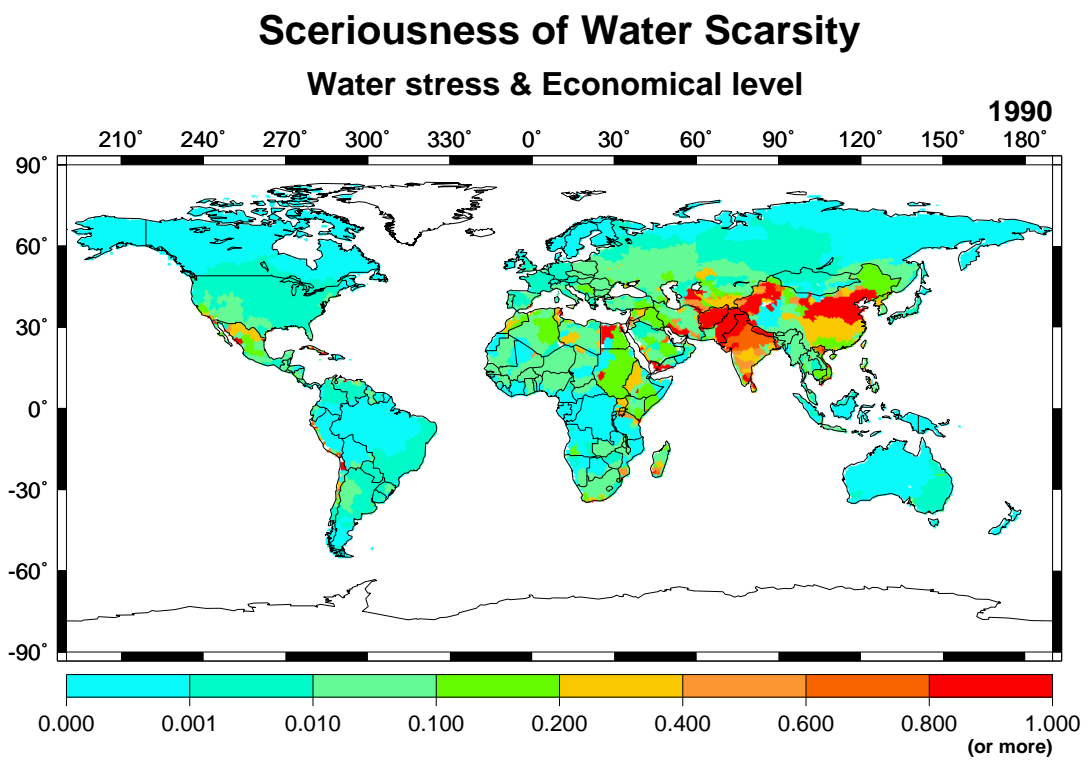


図 4.7: 水不足に対する深刻度が高いと推測される地域の分布 (流域毎評価)

4.5 水資源評価のまとめ

本章では、1人当り水資源賦存量、水需給バランス、さらにそれに各国毎の経済指標を算入した水資源評価を行なった。本節では、それらを大陸毎、国毎、及び流域毎に集計し、本章のまとめとする。

4.5.1 大陸毎評価

表は、大陸毎の人口、水資源賦存量、そして取水量及び渇水比率を表したものである。水資源賦存量としては、第3章で述べたように領域内、ここでは大陸内における流出であり、他の領域からの流入はないものとしている。表からわかるように、水資源賦存量と取水量のバランスは、大陸毎に極めて異なる。例えば、アジアでは水資源賦存量は多いものの、人口及び取水量が膨大であり、アジア全体としての渇水比率は、他を圧倒して高い値となっている。それに対して、オセアニアでは、水資源賦存量は少ないものの、人口及び取水量は小さく、したがって、渇水比率は小さくなっている、ということが示されている。

表 4.2: 大陸毎評価

地域	人口 (1000人)	水資源	生活 用水	工業 用水	農業 用水	総取 水量	渇水 比率
AFRICA	609332	5815.9	12.9	8.4	123.8	145.1	0.03
ASIA	3176848	13014.9	127.8	174.0	1539.1	1840.9	0.14
EUROPE	721378	6286.6	64.4	250.0	130.2	444.7	0.07
OCEANIA	24343	1912.6	11.5	0.5	6.6	18.6	0.01
NORTH AMERICA	290427	5345.8	69.0	242.1	209.7	520.7	0.10
SOUTH AMERICA	429573	14906.9	32.5	29.8	167.9	230.2	0.01

4.5.2 国毎評価

次に、国毎に、以下のように、人口、部門別取水量の多い国、渇水比率の高い国、及び1人当りGDPの高い国あるいは低い国という区分に従って、それぞれに対して上位10ヶ国を選出し、その国における人口、水資源賦存量、取水量、及び渇水比率の表を作成した。

それら、表より、人口の多い国々に対する水需給バランス及び各部門の配分、各部門毎に取水量の多くにに対する水需給バランス及び各部門の配分、また、渇水比率の高い国々、及び1人当りGDPの上位下位の国々についても同様に各部門毎に取水量の多くにに対する水需給バランス及び各部門の配分が示されている。

これらの表における顕著な点としては、以下のようなことが挙げられる。

米国や中国では、人口が多く、生活・工業用水取水量も多く、かつ農業用水取水量が多いが、国全体としての渇水比率は高くない。

農業用水取水量の多い国は、総取水量の多さとほぼ対応している。したがって、総取水量の多い国は農業国がほとんどである。

それに対して、渇水比率の高い国としては、決して総取水量の多い国と言うわけではなく、中東諸国のような乾燥・半乾燥地域において取水量は大きくないとしても利用できる水資源の少なさが効き、渇水比率が高くなる傾向がある。

また、GDPに関しては、1人当たりGDPの低い国々では、取水量は小さく、結果として渇水比率は低い傾向にある。

(1) 人口の多い国

表 4.3: 国毎評価 (人口の多い国) [km³/year]

国	人口 (1000人)	水資源	生活 用水	工業 用水	農業 用水	総取 水量	渇水 比率
China	1158318	2617.1	38.2	44.5	425.7	508.4	0.19
India	851186	1890.0	20.6	27.4	463.0	511.1	0.27
United States	251946	1889.3	60.9	210.8	204.7	476.4	0.25
Indonesia	179191	3605.4	2.3	2.0	11.6	15.9	0.00
Brazil	146124	8279.7	8.0	6.8	22.7	37.5	0.00
Russian Federation	144174	3896.9	19.6	69.1	23.6	112.2	0.03
Japan	122993	348.0	15.4	30.2	36.4	82.0	0.24
Pakistan	119024	86.9	3.0	3.0	121.6	127.5	1.47
Bangladesh	105540	307.7	0.7	0.2	21.9	22.9	0.07
Nigeria	86532	565.0	1.2	0.6	1.8	3.5	0.01

(2) 生活用水取水量の多い国

表 4.4: 国毎評価 (生活用水取水量の多い国) [km³/year]

国	人口 (1000人)	水資源	生活 用水	工業 用水	農業 用水	総取 水量	渇水 比率
United States	251946	1889.3	60.9	210.8	204.7	476.4	0.25
China	1158318	2617.1	38.2	44.5	425.7	508.4	0.19
India	851186	1890.0	20.6	27.4	463.0	511.1	0.27
Russian Federation	144174	3896.9	19.6	69.1	23.6	112.2	0.03
Japan	122993	348.0	15.4	30.2	36.4	82.0	0.24
Australia	16301	771.2	11.1	0.3	5.9	17.3	0.02
Philippines	60598	151.1	9.8	11.5	15.6	36.9	0.24
Canada	27277	3450.1	8.0	31.2	5.0	44.3	0.01
Brazil	146124	8279.7	8.0	6.8	22.7	37.5	0.00
Italy	57087	126.4	7.9	15.2	29.4	52.5	0.42

(3) 工業用水取水量が多い国

表 4.5: 国毎評価 (工業用水取水量が多い国) [km³/year]

国	人口 (1000 人)	水資源	生活 用水	工業 用水	農業 用水	総取 水量	渇水 比率
United States	251946	1889.3	60.9	210.8	204.7	476.4	0.25
Russian Federation	144174	3896.9	19.6	69.1	23.6	112.2	0.03
China	1158318	2617.1	38.2	44.5	425.7	508.4	0.19
Germany	81212	219.5	5.1	32.5	10.0	47.6	0.22
Canada	27277	3450.1	8.0	31.2	5.0	44.3	0.01
Japan	122993	348.0	15.4	30.2	36.4	82.0	0.24
India	851186	1890.0	20.6	27.4	463.0	511.1	0.27
France	55826	259.0	6.0	25.7	6.4	38.0	0.15
Ukraine	52049	69.9	5.7	19.1	10.5	35.3	0.51
Italy	57087	126.4	7.9	15.2	29.4	52.5	0.42

(4) 農業用水取水量が多い国

表 4.6: 国毎評価 (農業用水取水量が多い国) [km³/year]

国	人口 (1000 人)	水資源	生活 用水	工業 用水	農業 用水	総取 水量	渇水 比率
India	851186	1890.0	20.6	27.4	463.0	511.1	0.27
China	1158318	2617.1	38.2	44.5	425.7	508.4	0.19
United States	251946	1889.3	60.9	210.8	204.7	476.4	0.25
Pakistan	119024	86.9	3.0	3.0	121.6	127.5	1.47
Mexico	82783	224.5	4.5	6.0	62.5	72.9	0.32
Uzbekistan Rep	17650	17.6	3.0	8.9	57.9	69.7	3.95
Iran Islamic Rep	55246	120.7	3.4	1.1	54.1	58.7	0.49
Egypt	56806	2.0	2.9	4.0	49.8	56.7	28.77
Kazakstan Rep	15974	169.1	1.5	6.5	48.0	56.1	0.33
Japan	122993	348.0	15.4	30.2	36.4	82.0	0.24

(5) 総取水量の多い国

表 4.7: 国毎評価 (総取水量の多い国) [km³/year]

国	人口 (1000人)	水資源	生活 用水	工業 用水	農業 用水	総取 水量	渇水 比率
India	851186	1890.0	20.6	27.4	463.0	511.1	0.27
China	1158318	2617.1	38.2	44.5	425.7	508.4	0.19
United States	251946	1889.3	60.9	210.8	204.7	476.4	0.25
Pakistan	119024	86.9	3.0	3.0	121.6	127.5	1.47
Russian Federation	144174	3896.9	19.6	69.1	23.6	112.2	0.03
Japan	122993	348.0	15.4	30.2	36.4	82.0	0.24
Mexico	82783	224.5	4.5	6.0	62.5	72.9	0.32
Uzbekistan Rep	17650	17.6	3.0	8.9	57.9	69.7	3.95
Iran Islamic Rep	55246	120.7	3.4	1.1	54.1	58.7	0.49
Egypt	56806	2.0	2.9	4.0	49.8	56.7	28.77

(6) 渇水比率の高い国

表 4.8: 国毎評価 (渇水比率の高い国) [km³/year]

国	人口 (1000人)	水資源	生活 用水	工業 用水	農業 用水	総取 水量	渇水 比率
Egypt	56806	2.0	2.9	4.0	49.8	56.7	28.77
Uzbekistan Rep	17650	17.6	3.0	8.9	57.9	69.7	3.95
Turkmenistan Rep	4288	8.1	0.3	2.3	23.7	26.3	3.26
Iraq	17958	15.8	1.3	2.1	35.5	38.9	2.46
Yemen	11654	1.5	0.2	0.0	2.9	3.1	2.05
Tunisia	7875	1.8	0.2	0.1	3.0	3.3	1.87
Kuwait	2137	0.2	0.2	0.0	0.4	0.6	1.75
Saudi Arabia	15706	14.7	1.4	0.2	22.1	23.7	1.57
Israel	2582	0.5	0.2	0.1	0.6	0.8	1.56
Pakistan	119024	86.9	3.0	3.0	121.6	127.5	1.47

(7) 1人当り GDP 国の低い国

表 4.9: 国毎評価 (1人当り GDP 国の低い国) [km³/year]

国	人口 (1000人)	水資源	生活 用水	工業 用水	農業 用水	総取 水量	渇水 比率
Vietnam	66486	184.7	3.5	2.4	20.0	25.9	0.14
Mozambique	14422	208.4	0.1	0.0	0.4	0.4	0.00
Somalia	7751	9.8	0.0	0.0	0.8	0.8	0.09
Cambodia	9261	319.7	0.0	0.0	0.5	0.6	0.00
Bhutan	1561	15.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
Ethiopia	50886	289.8	0.3	0.1	2.3	2.7	0.01
Nepal	19066	92.2	0.1	0.0	2.7	2.9	0.03
Malawi	8602	30.3	0.1	0.0	1.0	1.1	0.04
Bangladesh	105540	307.7	0.7	0.2	21.9	22.9	0.07
Lao People's Dem Rep	4214	82.3	0.1	0.1	0.8	1.0	0.01

(8) 1人当り GDP 国の高い国

表 4.10: 国毎評価 (1人当り GDP 国の高い国) [km³/year]

国	人口 (1000人)	水資源	生活 用水	工業 用水	農業 用水	総取 水量	渇水 比率
Switzerland	5869	44.4	0.2	0.7	0.0	1.0	0.02
Norway	4119	335.2	0.4	1.6	0.2	2.2	0.01
Luxembourg	280	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
Finland	4860	122.5	0.3	1.8	0.1	2.2	0.02
Sweden	9080	230.2	1.1	1.7	0.2	3.1	0.01
Denmark	4413	13.6	0.3	0.3	0.5	1.1	0.08
Iceland	229	88.0	0.1	0.1	0.0	0.1	0.00
Japan	122993	348.0	15.4	30.2	36.4	82.0	0.24
United States	251946	1889.3	60.9	210.8	204.7	476.4	0.25
France	55826	259.5	6.0	25.7	6.4	38.0	0.15

4.5.3 河川流域毎評価

(1) 人口の多い流域

表 4.11: 流域評価 (人口の多い流域) [km^3/year]

流域	人口 (1000人)	水資源	生活 用水	工業 用水	農業 用水	総取 水量	渇水 比率
Changjiang (Yangtze)	394633	1291.1	13.0	15.2	133.6	161.7	0.13
Ganges	330247	471.1	7.3	9.5	182.3	199.1	0.44
Indus	152962	205.8	3.8	4.0	184.9	192.8	1.15
Huai He (Hwai Ho)	144727	75.7	4.8	5.6	62.7	73.0	1.00
Brahmaputra	113100	1097.5	1.5	1.6	16.8	19.9	0.02
Nile	101743	445.3	2.5	2.4	49.8	54.7	0.14
Huanghe(Hwang Ho Yellow)	101232	61.7	3.3	3.9	41.4	48.6	0.81
Xi (Hsi Pearl)	85882	386.2	2.8	3.3	24.9	31.0	0.08
Danube	84105	320.3	4.8	23.1	19.9	47.9	0.16
Mississippi	71950	560.7	17.4	60.4	95.1	172.9	0.34

(2) 生活用水取水量の多い流域

表 4.12: 流域毎評価 (生活用水取水量の多い流域) [km^3/year]

流域	人口 (1000人)	水資源	生活 用水	工業 用水	農業 用水	総取 水量	渇水 比率
Mississippi	71950	560.7	17.4	60.4	95.1	172.9	0.34
Changjiang (Yangtze)	394633	1291.1	13.0	15.2	133.6	161.7	0.13
St.Lawrence	39439	343.7	10.3	37.6	2.7	50.6	0.17
Volga	61272	401.4	8.2	28.8	2.2	39.2	0.13
Ganges	330247	471.1	7.3	9.5	182.3	199.1	0.44
Parana(La Plata with Uruguay)	65782	1706.4	5.0	7.1	18.5	30.6	0.02
Danube	84105	320.3	4.8	23.1	19.9	47.9	0.16
Huai He (Hwai Ho)	144727	75.7	4.8	5.6	62.7	73.0	1.00
Rhein (Rhine)	57862	203.1	3.8	22.6	6.0	32.4	0.17
Indus	152962	205.8	3.8	4.0	184.9	192.8	1.15

(3) 工業用水取水量が多い流域

表 4.13: 流域毎評価 (工業用水取水量が多い流域) [km³/year]

流域	人口 (1000人)	水資源	生活 用水	工業 用水	農業 用水	総取 水量	渇水 比率
Mississippi	71950	560.7	17.4	60.4	95.1	172.9	0.34
St.Lawrence	39439	343.7	10.3	37.6	2.7	50.6	0.17
Volga	61272	401.4	8.2	28.8	2.2	39.2	0.13
Danube	84105	320.3	4.8	23.1	19.9	47.9	0.16
Rhein (Rhine)	57862	203.1	3.8	22.6	6.0	32.4	0.17
Changjiang (Yangtze)	394633	1291.1	13.0	15.2	133.6	161.7	0.13
Ob	27499	720.2	3.5	12.6	18.2	34.2	0.07
Dniepr (Dnepr)	33710	103.4	3.6	11.4	4.8	19.7	0.22
Ganges	330247	471.1	7.3	9.5	182.3	199.1	0.44
Elbe	24658	61.4	1.8	8.4	3.1	13.3	0.23

(4) 農業用水取水量が多い流域

表 4.14: 流域毎評価 (農業用水取水量が多い流域) [km³/year]

流域	人口 (1000人)	水資源	生活 用水	工業 用水	農業 用水	総取 水量	渇水 比率
Indus	152962	205.8	3.8	4.0	184.9	192.8	1.15
Ganges	330247	471.1	7.3	9.5	182.3	199.1	0.44
Changjiang (Yangtze)	394633	1291.1	13.0	15.2	133.6	161.7	0.13
Mississippi	71950	560.7	17.4	60.4	95.1	172.9	0.34
Euphrates(Shatt-al-Arab)	37421	130.4	2.6	2.7	66.5	71.8	0.61
Huai He (Hwai Ho)	144727	75.7	4.8	5.6	62.7	73.0	1.00
Nile	101743	445.4	2.5	2.4	49.8	54.7	0.14
Amu Darya	16460	139.4	2.0	5.1	49.1	56.2	0.52
Syr Darya	16680	94.3	2.0	5.7	41.8	49.5	0.69
Huanghe(Hwang Ho Yellow)	101232	61.7	3.3	3.9	41.4	48.6	0.81

(5) 総取水量の多い流域

表 4.15: 流域毎評価 (総取水量の多い流域) [km³/year]

流域	人口 (1000 人)	水資源	生活 用水	工業 用水	農業 用水	総取 水量	渇水 比率
Ganges	330247	471.1	7.3	9.5	182.3	199.1	0.44
Indus	152962	205.1	3.8	4.0	184.9	192.8	1.15
Mississippi	71950	560.7	17.4	60.4	95.1	172.9	0.34
Changjiang (Yangtze)	394633	1291.1	13.0	15.2	133.6	161.7	0.13
Huai He (Hwai Ho)	144727	75.7	4.8	5.6	62.7	73.0	1.00
Euphrates(Shatt-al-Arab)	37421	130.4	2.6	2.7	66.5	71.8	0.61
Amu Darya	16460	139.4	2.0	5.1	49.1	56.2	0.52
Nile	101743	445.3	2.5	2.4	49.8	54.7	0.14
St.Lawrence	39439	343.7	10.3	37.6	2.7	50.6	0.17
Syr Darya	16680	94.3	2.0	5.7	41.8	49.5	0.69

(6) 渇水比率の高い流域

表 4.16: 流域毎評価 (渇水比率の高い流域) [km³/year]

流域	人口 (1000 人)	水資源	生活 用水	工業 用水	農業 用水	総取 水量	渇水 比率
San Joaquin	5315	3.2	1.3	4.4	16.1	21.8	7.51
Tedzen (Harirud)	1669	2.6	0.1	0.2	7.7	8.0	3.85
Hai	63085	14.5	2.1	2.4	33.6	38.1	2.80
Turgaj	252	6.2	0.0	0.1	6.9	7.0	1.50
Rio Grande(Bravo del Norte)	9072	14.4	1.0	2.6	13.6	17.2	1.34
Indus	152962	205.8	3.8	4.0	184.9	192.8	1.15
Huai He (Hwai Ho)	144727	75.7	4.8	5.6	62.7	73.0	1.00
Colorado(Arizona)	5320	24.3	1.3	4.4	11.4	17.1	0.97
Brazos	2705	11.3	0.7	2.3	6.2	9.1	0.85
Santiago	12604	15.1	0.7	0.9	10.5	12.1	0.83

4.6 国際河川に対する評価

21世紀には水資源を原因とする戦争が起き得ると言われている。世界で約214、全陸域面積の約47%を占める国際河川における係争が「水資源をめぐる紛争」を引き起こし得る、というのである(中山(1998))。その21世紀に突入した現在、そうした背景において、国際河川に対する評価をすることは極めて重要であると考えられる。

本節では、国際河川のうち、アジアのインダス川及びメコン川、そして欧州において重要な国際河川であるドナウ川について取り上げ、流域毎及びその流域内の国について水需給バランスを評価する。

本研究においては、水需給バランスによる評価のみ行なうが、今後は、国毎の政治・経済情勢等を考慮に入れた総合的な評価が行なわれることを期待したい。

表4.17は、インダス川、メコン川、及びドナウ川流域の流域全体、及びその流域内の国毎の領域について、水資源賦存量及び取水量を示したものである。ここで示された国毎の水資源賦存量は、河川流域内のその国の領域における河川流量の最大値である。これは、河川流域内のその国の領域における自然流量を表しており、上流の国における取水による流量の減少はないと仮定している。そして、その流域内国毎に、水資源賦存量に対する取水量で水需給バランス評価を行なう。例えば、この表では、パキスタンにおけるインダス川流域では、インダス川から年間205.8km³の供給があり、それに対して各部門合わせて年間113.7km³取水しているということが示されている。

この表によると、メコン川及びドナウ川では、利用可能な水資源に対する取水量は小さく、流域内の全ての国の領域内で渇水比率が低いことが示されている。一方で、インダス川では、流域全体の渇水比率が高いだけでなく、流域内のパキスタン、インドでも渇水ストレスが高いことが示されている。特にインドでは、インダス川による水供給量に比べて2倍以上の取水があることが示されており、ここでは持続不可能な地下水資源による灌漑が行なわれている可能性が高い。

表 4.17: 国際河川に対する評価 [km³/year]

流域	国	水資源	生活用水	工業用水	農業用水	総取水量	渇水比率
Indus	total	205.8	3.8	4.0	184.9	192.8	1.15
	Pakistan	205.8	2.5	2.5	108.6	113.7	0.55
	India	32.8	1.1	1.5	73.2	75.8	2.31
	Afghanistan Islamic State	25.3	0.1	0.0	3.1	3.2	0.13
Mekong	total	604.2	1.4	1.5	15.3	18.2	0.03
	Vietnam	568.1	0.6	0.4	4.1	5.1	0.009
	Cambodia	553.9	0.0	0.0	0.4	0.5	0.001
	Lao People's Dem Rep	281.9	0.1	0.1	0.8	0.9	0.003
	Thailand	214.0	0.5	0.8	8.6	9.9	0.046
	China	80.3	0.2	0.2	1.5	1.8	0.023
Danube	total	320.3	4.8	23.1	19.9	47.9	0.16
	Romania	320.3	2.0	8.2	13.1	23.3	0.073
	Ukraine	320.1	0.2	0.8	0.1	1.1	0.004
	Bulgaria	287.9	0.1	4.0	1.3	5.4	0.019
	Hungary	133.5	0.6	3.7	4.0	8.3	0.062
	Austria	112.8	0.8	1.3	0.1	2.2	0.020
	Germany	85.6	0.6	3.6	0.3	4.4	0.052
	Czech Rep	12.4	0.4	0.5	0.0	0.9	0.070
	Moldova Rep	4.9	0.1	0.6	0.4	1.1	0.230
	Italy	3.2	0.1	0.2	0.5	0.8	0.252
	Poland Rep	2.3	0.0	0.2	0.0	0.3	0.114
	Switzerland	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.005

Chapter 5

将来水資源予測

前世紀、20世紀中は、破竹の勢いで世界は肥大化し、100年の間に人口は3倍強、そして水利用量の増加はそれを遥かに上回り、約10倍に達した。今後、更なる人口の増加が見込まれており、更に、途上国を中心とした経済発展や工業化の進展を考慮すると、より一層水需要は増すものと考えられる。従って、今後、世界における水需給バランスがどのように変化するのか、予測を行なうことは非常に重要で有意義なことであると言える。

本章では、各種将来推計値を用いた、2025年及び2050年に対する水需給バランスによる水資源評価を行なう。まず、5.1節において、本研究適用する将来シナリオ及びシナリオ策定に用いたデータを示す。そして、5.2節において、それらのシナリオに基づく水資源予測を行なう。

本研究では、将来水資源予測を行なう対象として2025年及び2050年を選定した。その理由は、その2年に対しての研究例が存在する (Raskin (1997); Shiklomanov (2000); Alcamo et al. (2000); Vörösmarty et al. (2000); 高橋ほか (2000)) こと、及び、その中で用いられている将来水利用変化シナリオを本研究の将来予測に適用することができる考えたためである。

5.1 推計方法と将来シナリオ

表5.1は、本研究において適用したシナリオである。水供給側に関わるの気候変化に関して変化の有無について2ケース、及び水需要側に関して原単位の変化の有無について2ケースである。ここで、気候変化とは、温暖化を指し、また、原単位変化とは、1人当りの取水量の変化はない、とする。全シナリオを通じて共通している仮定は、人口は国連の中位推計に従って増加すること、及び農業用水取水量はそれに従って増加することである。

表 5.1: 将来シナリオ

	シナリオ	原単位変化	気候変化
1	人口変化	×	×
2	人口・気候変化	×	○
3	人口・原単位変化	○	×
4	人口・原単位・気候変化	○	○

過去の灌漑面積の増加は、第3章の図3.6に示すように人口増加に比例していることから、将来

においても、人口増加に比例して灌漑面積も増大すると仮定した。また、単位灌漑農地面積当りの農業用水取水量は現状のまま変化しないと仮定した。このため、農業用水取水量の増加は純粹に灌漑農地面積の増加に比例することになり、結局、人口増加に比例して農業用水取水量が増加することになる。ここで、国毎の人口の増加率は、図 5.1 のようになる。

(1) 水需要原単位変化について

ここで、将来水需要変化シナリオとしては、表 5.2 を適用した。これは、Raskin et al. (1995) に基づき高橋ほか (2000) により作成された表と数値を用いて作成した。高橋ほか (2000) においては、1990 年に対する 2050 年の水需要変化についてのみであったが、本研究では、1990 年から 2050 年まで線形に変化するものと仮定して、2025 年についても同様の数値を求めた。これは、水需要変化のシナリオとしては 2050 年のみの推定しかないが、以下に示すように、GDP に関しては 2025 年及び 2050 年の双方が利用可能であったことから、水需要変化も 2025 年についても仮定したものである。以下に 1 人当り生活用水取水量及び工業用水取水量の推計方法を述べる。国毎に 1 人当り取水量を求めてからの、グローバルな分布を推計する方法は、第 3 章における現状に対する水需要量分布の推計方法と同じである。

まず、1 人当り生活用水取水量は、現状の国別の値に、表 5.2 にある生活部門のところにある値を乗じて、2025 年及び 2050 年の 1 人当り生活用水取水量を求めた。

次に、1 人当り工業用水取水量は、GDP 成長率に比例し、かつ水利用効率改善シナリオに従い割り引かれることとした。具体的には、現状の国別 1 人当り工業用水取水量に、表 5.3 に示された 1990 年に対する 2025 年または 2050 年の GDP の比率を乗じ、さらに、表 5.2 にある各年に対応した工業部門における水利用効率改善係数を乗じることにより、1 人当り工業用水取水量を推計した。

表 5.2: 2025 年, 2050 年における生活部門の 1 人当り水利用変化と工業部門の水利用効率改善係数 (1990 年を 1 とする)

地域	2025 生活部門	2025 工業部門	2050 生活部門	2050 工業部門
北米	0.882	0.774	0.798	0.613
西欧	1.000	0.886	1.000	0.934
OECD 太平洋諸国	1.006	0.701	1.010	0.487
旧ソビエト連邦	1.136	0.823	1.233	0.696
東欧	1.225	0.830	1.385	0.709
アフリカ	1.292	0.954	1.500	0.921
ラテンアメリカ	1.373	0.826	1.640	0.701
中東	1.555	0.964	1.951	0.938
中国およびアジア社会主義国	1.389	0.824	1.667	0.699
南・東南アジア	1.746	0.862	2.278	0.763

出典: 高橋ほか (2000)

表 5.3: 地域毎の GDP 推定値 (Billions US \$1990)

地域	1990 年	2025 年	2050 年
北米	6,040	14,884	21,063
西欧	7,171	15,917	23,660
OECD 太平洋諸国	8,100	8,100	11,748
旧ソビエト連邦	1,898	1,898	2,756
東欧	210	467	679
アフリカ	401	1,657	4,245
ラテンアメリカ	994	3,018	6,038
中東	541	2,237	5,071
中国およびアジア社会主義国	451	2,698	6,391
南・東南アジア	1,034	4,943	12,631

出典: Raskin et al. (1995)

(2) 気候変化について

また、気候変化シナリオについては、東京大学気候システムセンター (CCSR:Center for Climate System Research) による二酸化炭素濃度倍増時の温暖化実験の結果を用いた。この実験は、二酸化炭素が現状の 2 倍となった下で 1 年間シミュレーションしたものである。

現在、二酸化炭素濃度は年 1% のペースで増加しており、現在のまま進行すると、70 年後には、現在の 2 倍の二酸化炭素濃度になると推測されている (気象庁編 (1996))。したがって、本研究では、上記の CCSR によるシミュレーション結果を、70 年後のものと仮定した。

ここで、二酸化炭素が現状より徐々に増加して 70 年後に濃度が 2 倍となるような 70 年間に對するシミュレーション結果を用いずに、二酸化炭素倍増時の 1 年間のみシミュレーション結果を用いたのは、以下の理由による。現在のところ、二酸化炭素が徐々に増加するという仮定の下での長期間にわたる二酸化炭素漸増実験は、行なわれてはいるが、それは極めて粗い解像度である。それに対して、本研究で用いたシミュレーション結果は、温暖化時の 1 年だけを対象にした計算結果ではあるが、地域間の相違を考慮する目的で用いる本研究の意図に相応しいと考えた。

本研究では、東京大学気候システムセンター (CCSR) による上記温暖化実験の結果と、現状に對する結果より、TRIP によって、現状及び二酸化炭素倍増の 70 年後のそれぞれに對する年間河川流出量を求め、両者の差をとることで、まず、70 年後と現在との年間河川流量の変化量を求めた (図 5.2)。

そして、その河川流量の変化量に、現状の年間河川流量として用いた (図 2.5) との和を求めることにより、70 年後の年間河川流量であるとした。さらに、現状 (1990 年) から、その 70 年後の年間河川流量に至るまでは直線的に変化するものと仮定して、2025 年、及び 2050 年に対する年間河川流量を求めた。

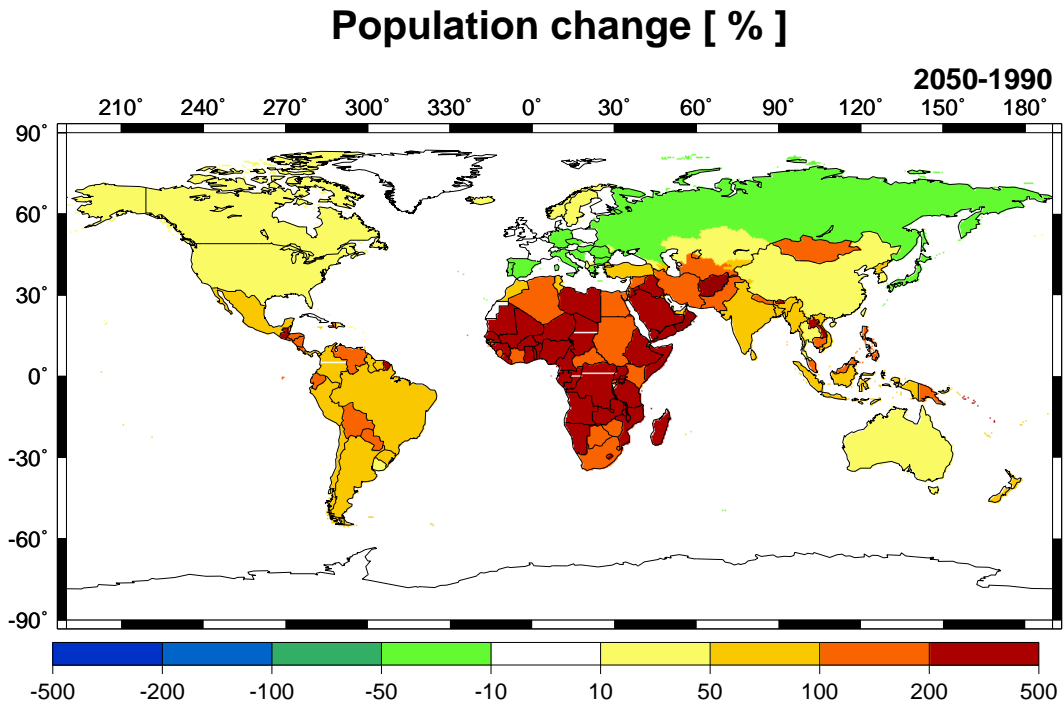


図 5.1: 1990 年に対する 2050 年の人口増加率 (出典 : WRI)

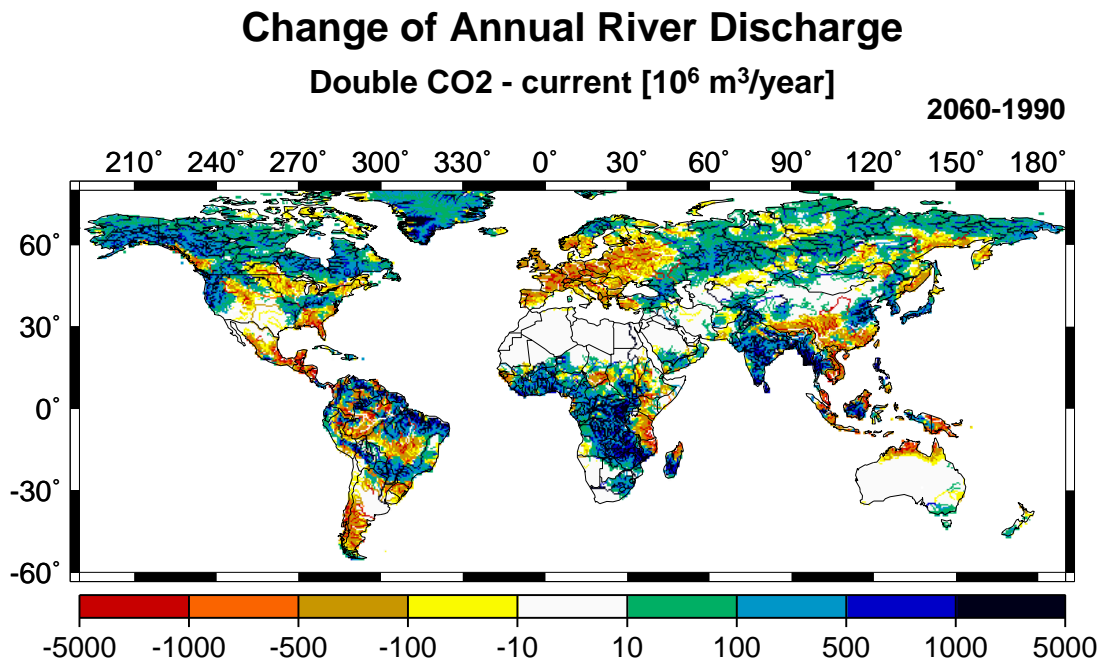


図 5.2: 現状に対する二酸化炭素倍増時の年間河川流量変化量

5.2 将来水資源予測

図 5.3～5.10は、前節の過程を踏まえた水資源評価に、上記のようなシナリオを適用しシナリオ毎の 2050 年における渇水比率の分布図及び 1990 年からの増加率を表したものである。(図 5.3～5.6はグリッド毎評価、図 5.7～5.10は流域毎評価) まず、4 シナリオ共通した傾向として、アジアからアフリカ、そして南米の広い範囲にわたって渇水比率が増加するという傾向である。まず、シナリオ 1 と 2 を比較すると、気候変化により、欧州の一部において、水資源が逼迫する方向へ作用しているものの(渇水比率の値自体は小さいが)、ユーラシア大陸の広い地域にわたって、また中国黄河において渇水比率が低減する方向へ作用していることがわかる。そして、インドにおいてもわずかながら、低減への作用をしている。

また、シナリオ 1 と 3 とを比較すると、アジアからアフリカ、そして南米の傾向は変わりはないが、ロシアや欧米、及び日本において渇水比率は低減されることが示されている。すなわち、水需要の原単位変化は、先進国において渇水比率低減への顕著な傾向が示されている。一方で、途上国における変化は、人口増加による渇水比率の高まりに勝るものではない。ただし、更に気候変化を加えたシナリオ 4 では、シナリオ 1 同様、渇水比率は低減の効果を示している。そして、欧州の一部、フランス周辺では、原単位変化よりも気候変化による影響の方が大きく、渇水比率は高まる傾向がある。ただし、上述のように、渇水比率の値自体は決して深刻なものではない。また、上記のような傾向は、グリッド毎評価に比べて、流域毎評価において極めて顕著に現れている。

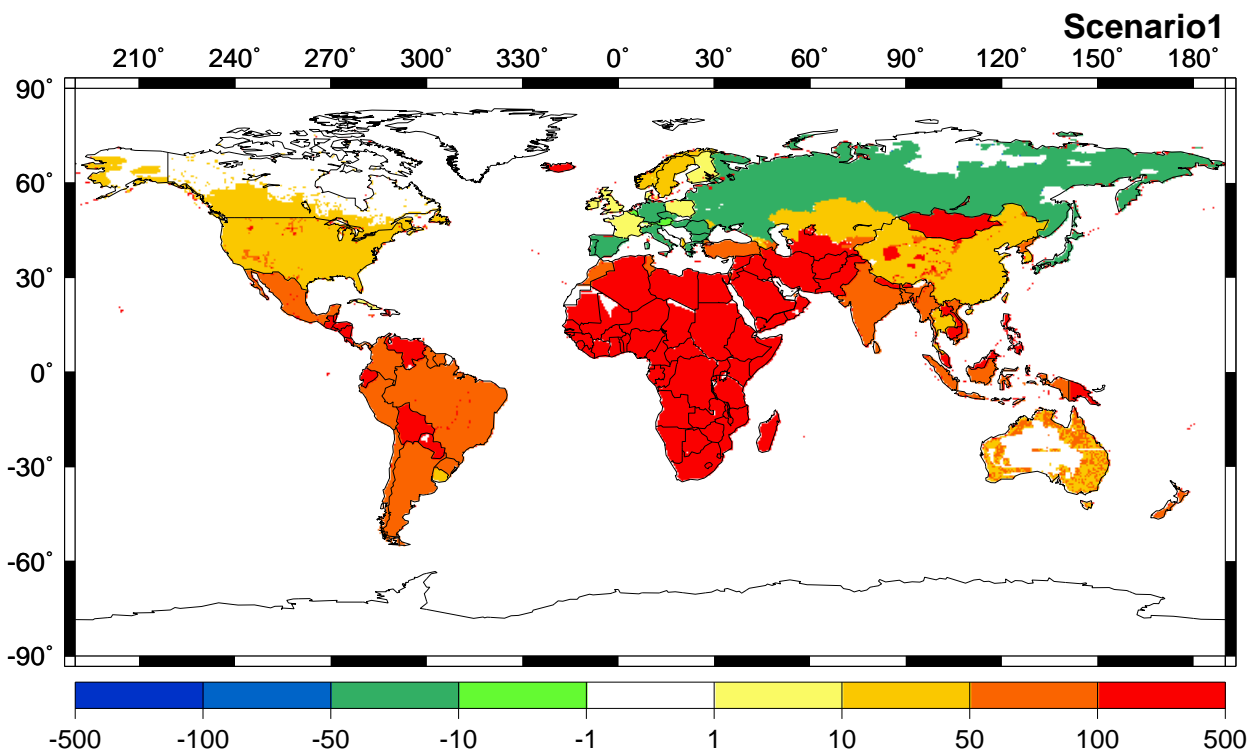
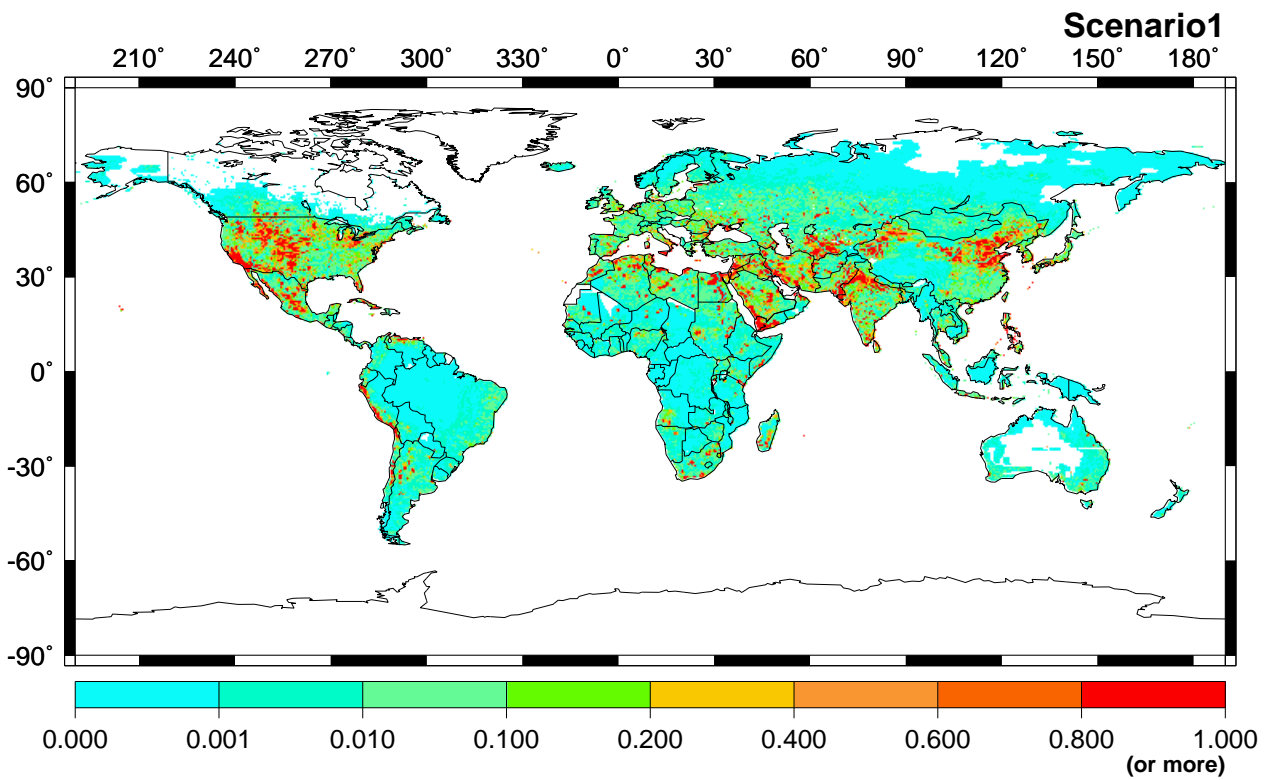


図 5.3: 2050 年の渇水比率 (上図) と 1990 年からの変化率 (下図) : シナリオ 1

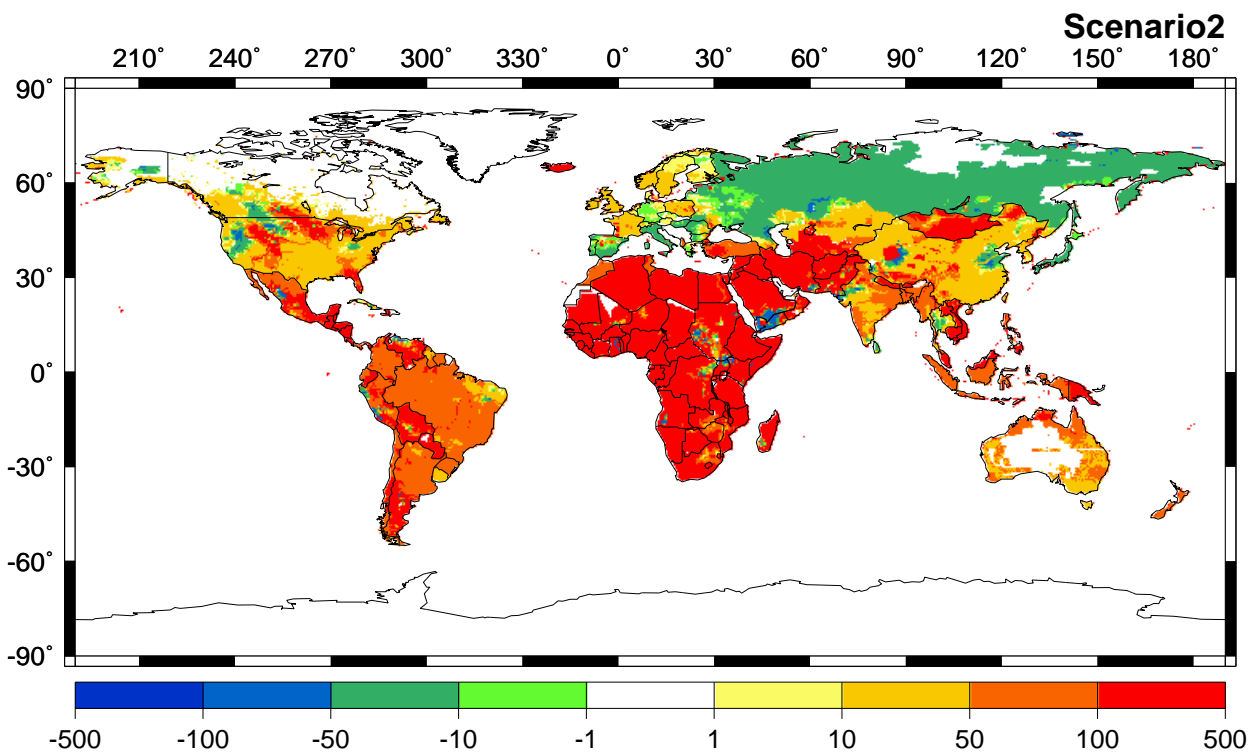
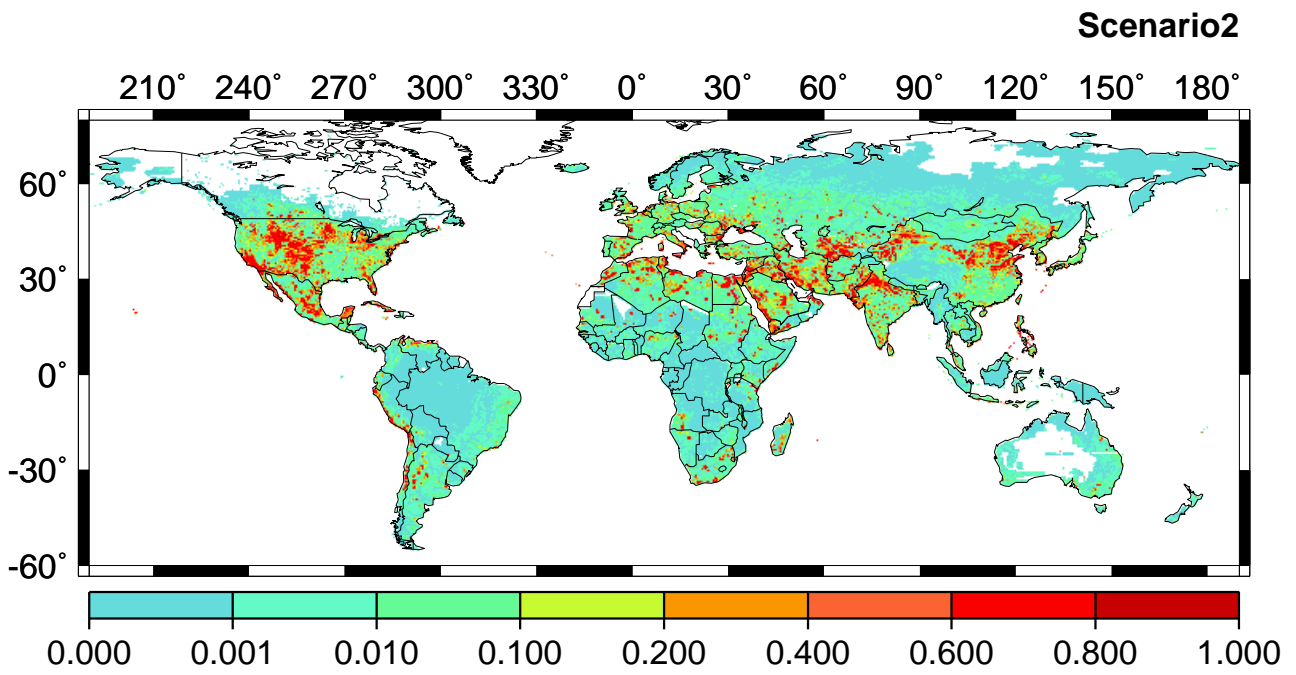


図 5.4: 2050 年の渇水比率 (上図) と 1990 年からの変化率 (下図) : シナリオ 2

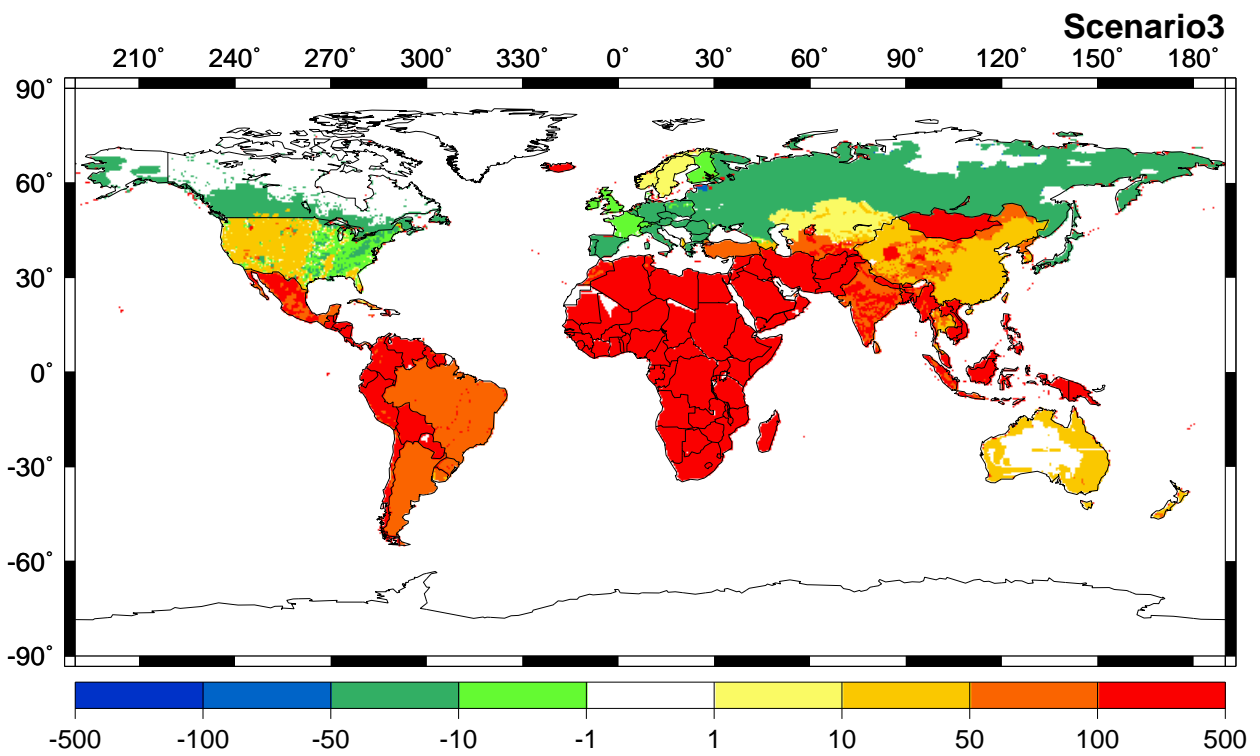
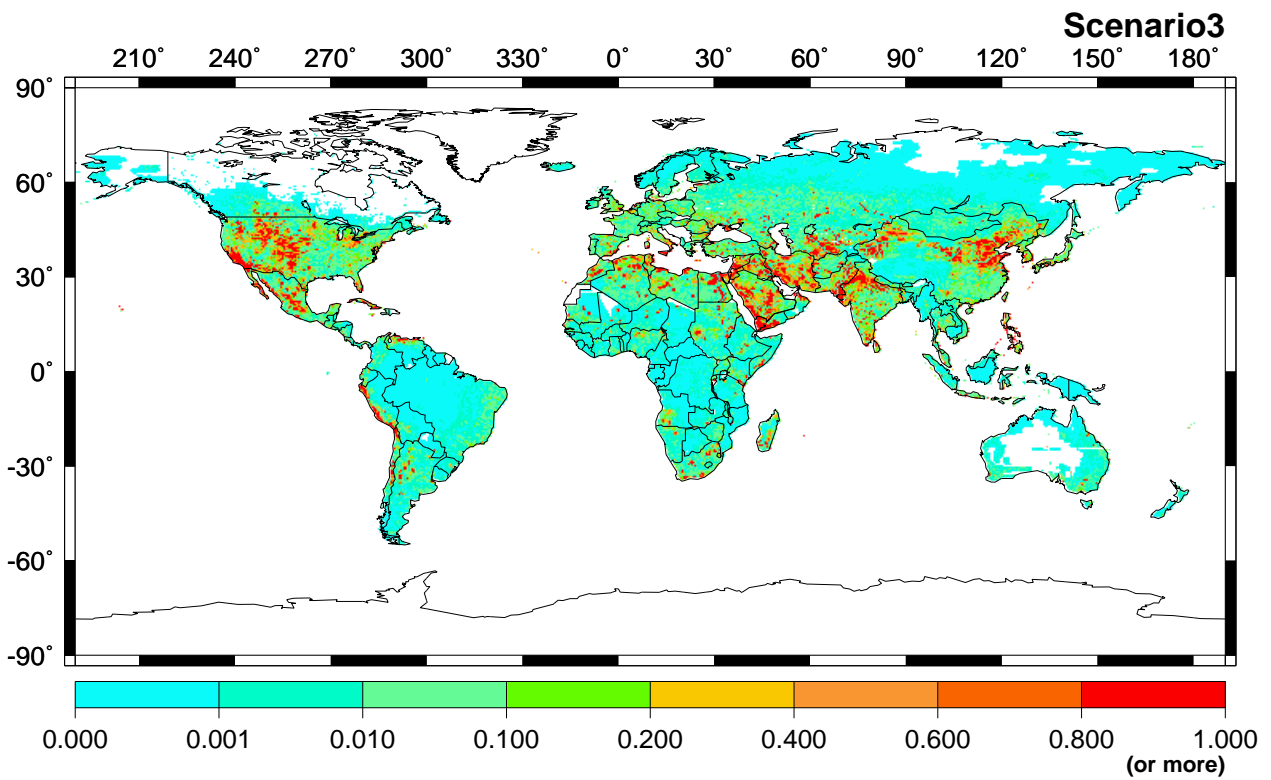


図 5.5: 2050 年の渇水比率 (上図) と 1990 年からの変化率 (下図) : シナリオ 3

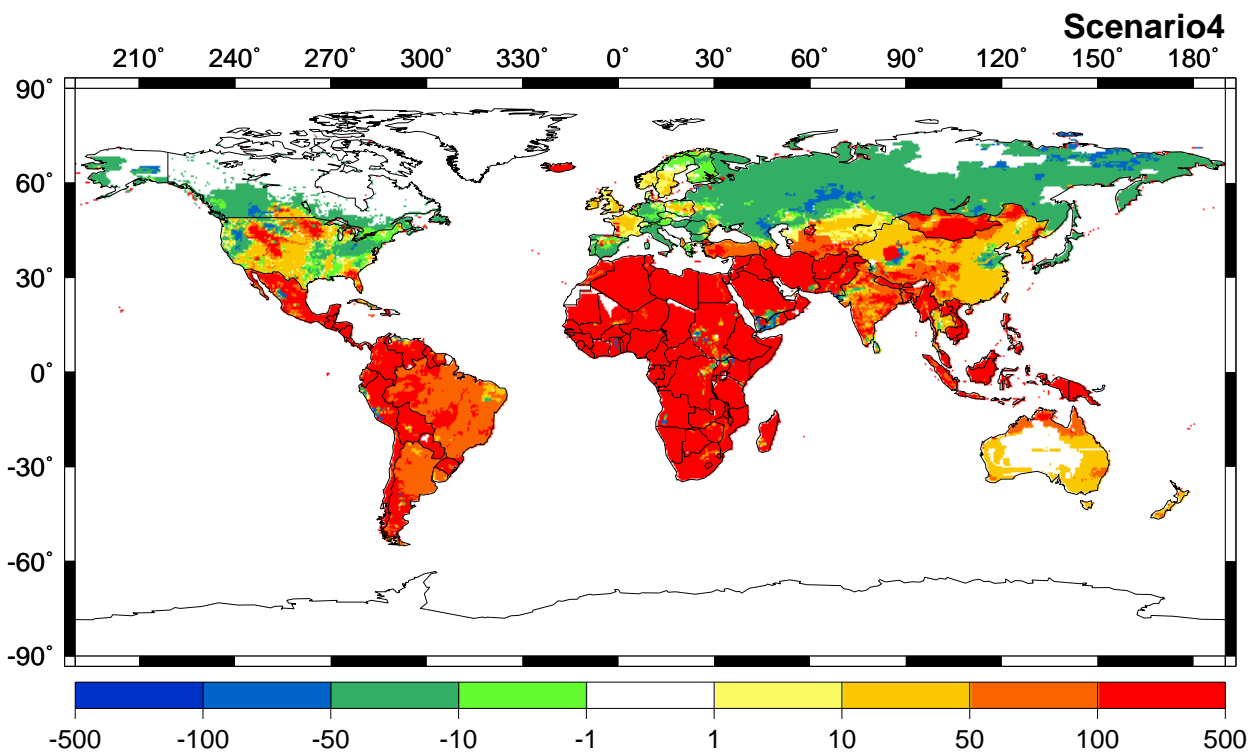
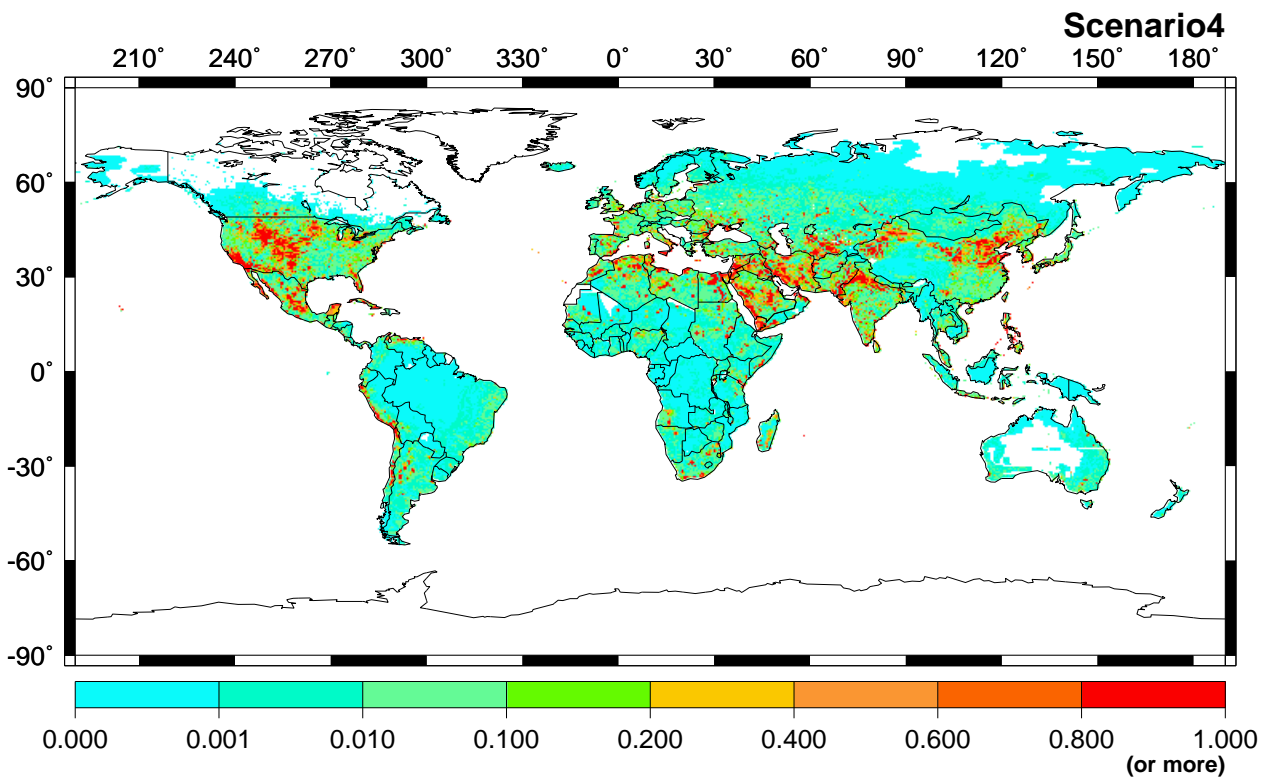


図 5.6: 2050 年の渇水比率 (上図) と 1990 年からの変化率 (下図) : シナリオ 4

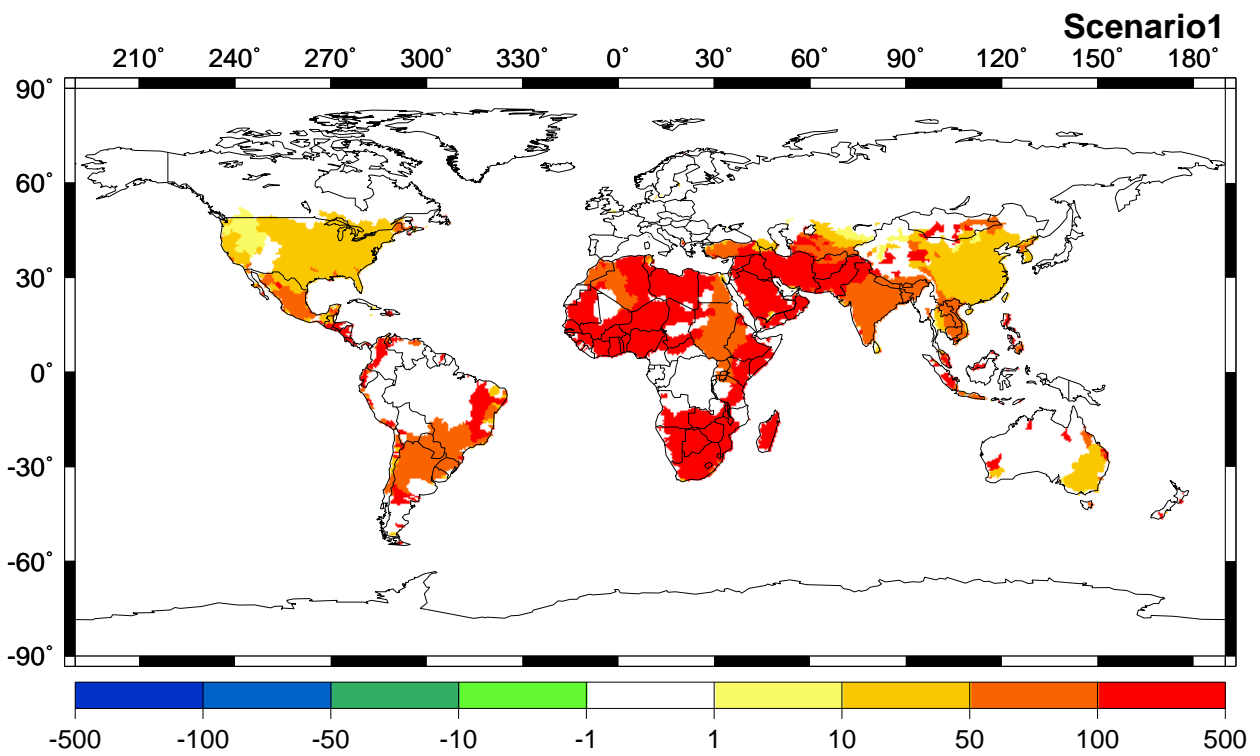
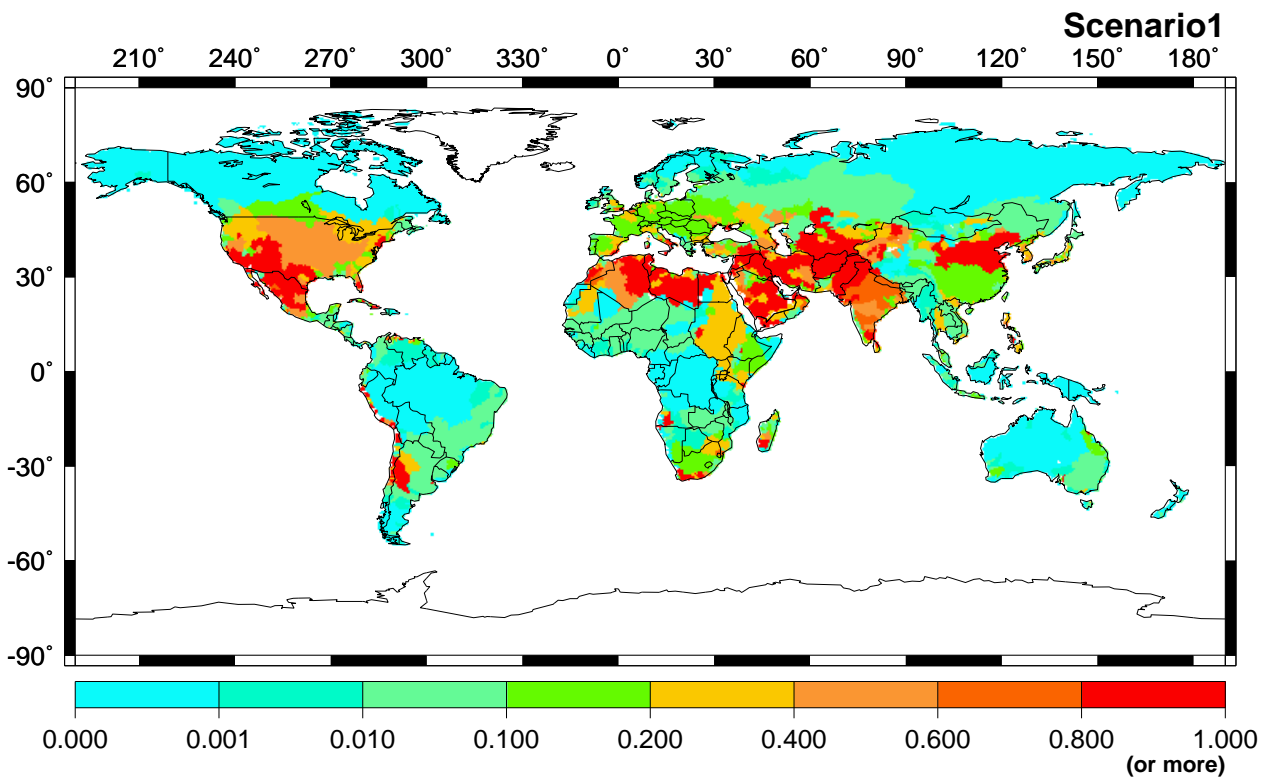


図 5.7: 2050 年の渇水比率 (上図) と 1990 年からの変化率 (下図) : シナリオ 1 [流域毎評価]

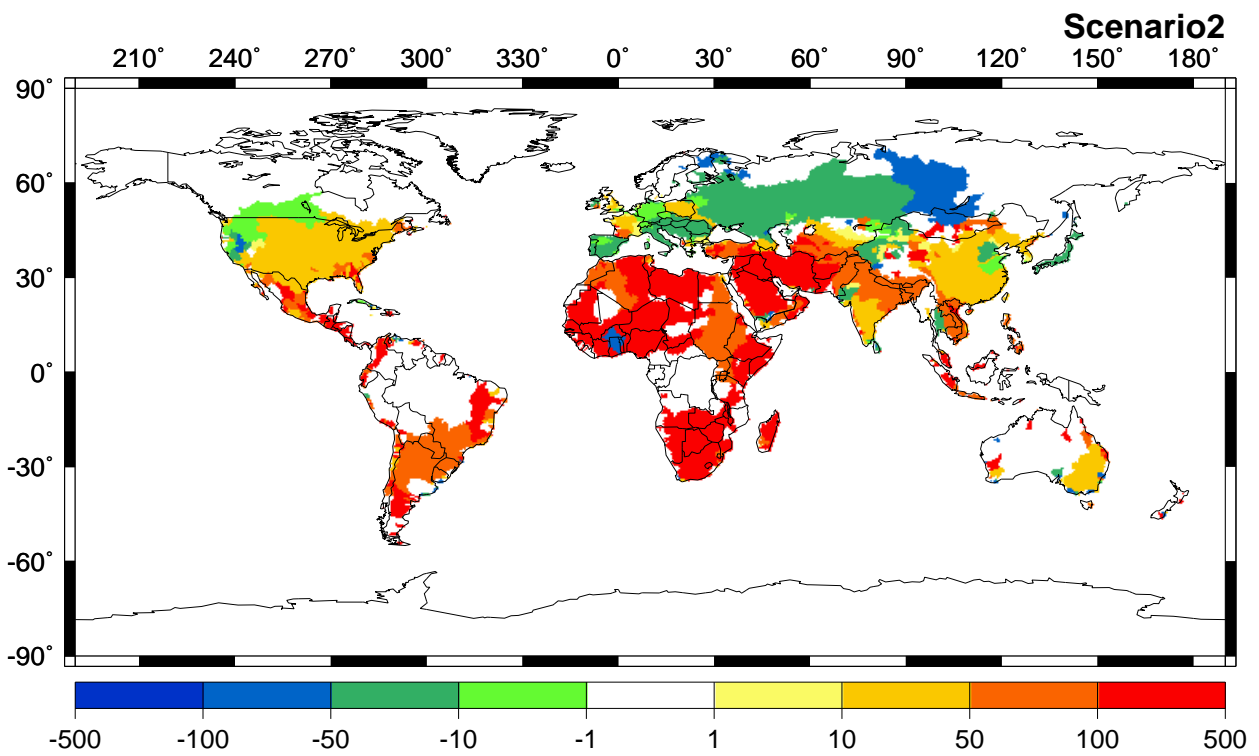
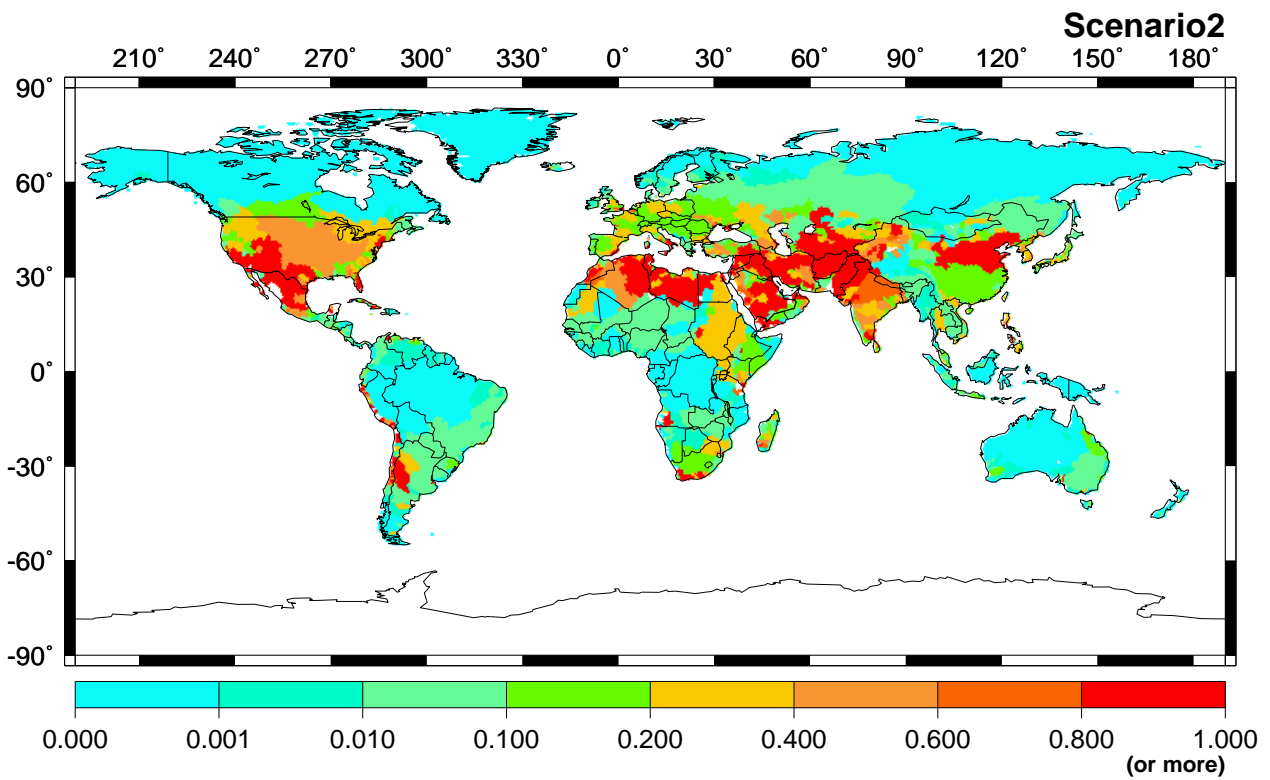


図 5.8: 2050 年の渇水比率 (上図) と 1990 年からの変化率 (下図): シナリオ 2 [流域毎評価]

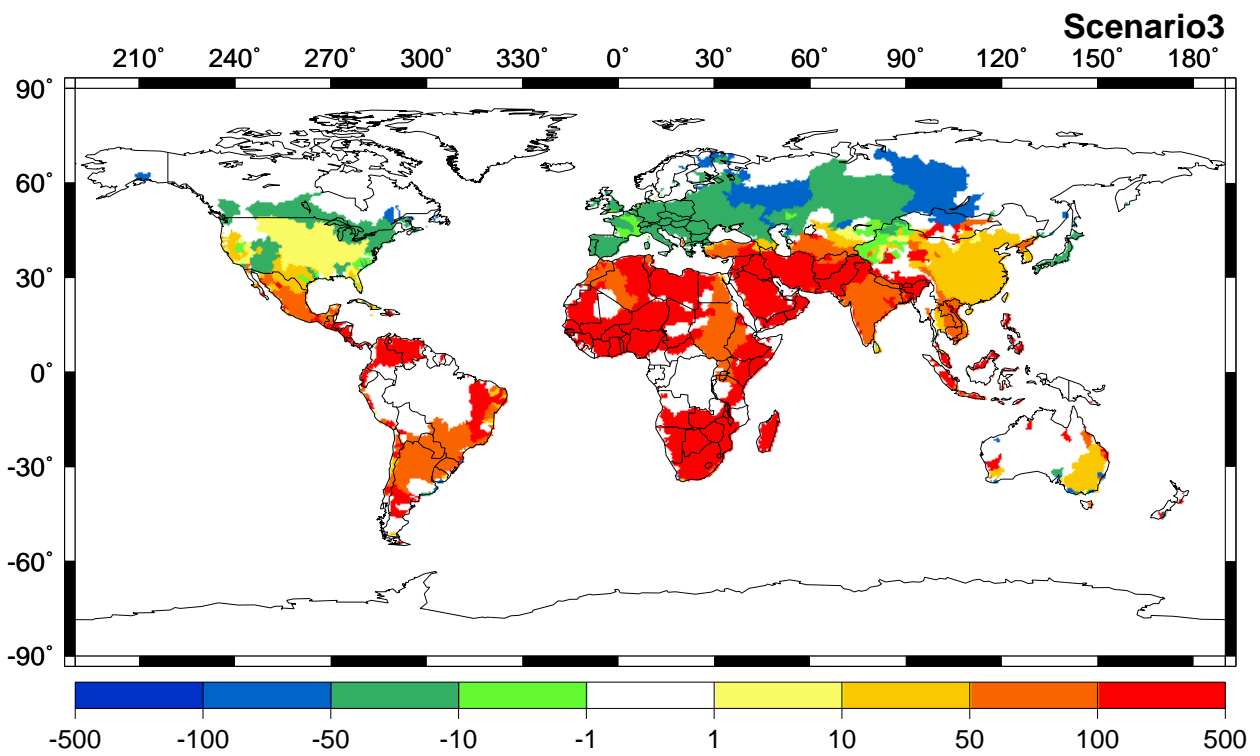
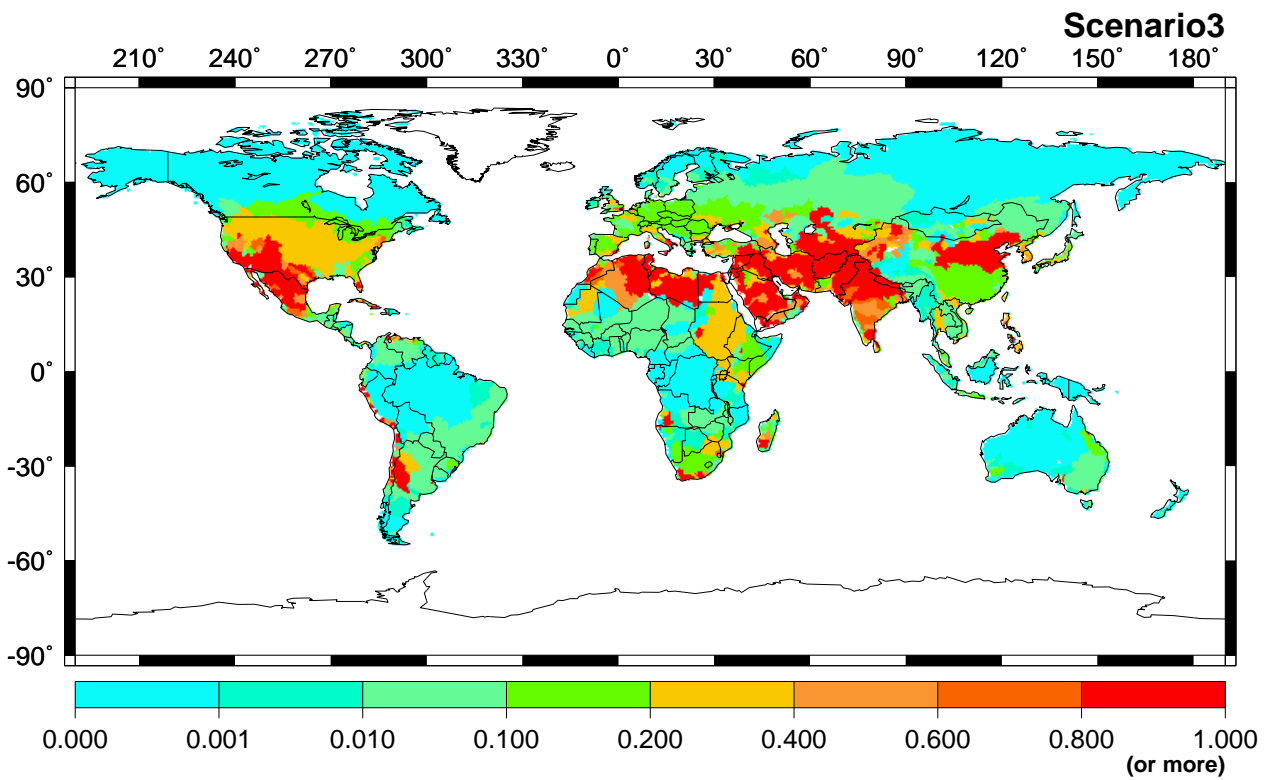


図 5.9: 2050 年の渇水比率 (上図) と 1990 年からの変化率 (下図): シナリオ 3 [流域毎評価]

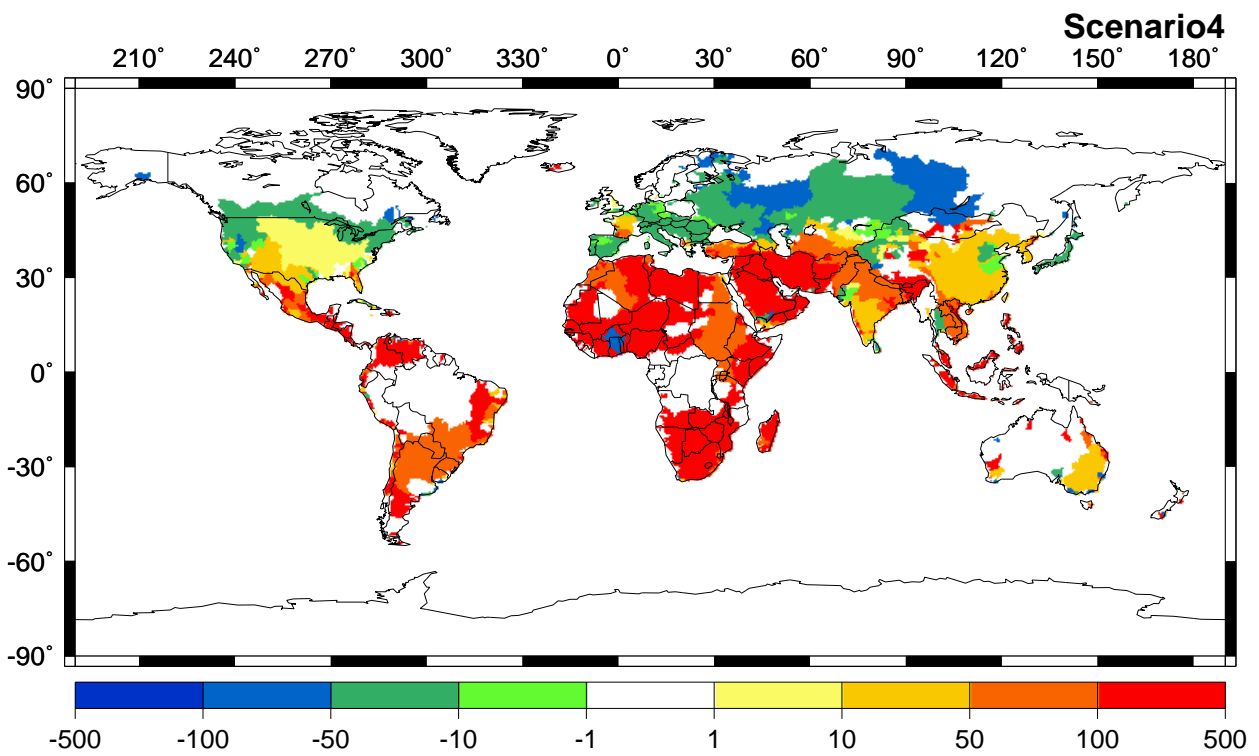
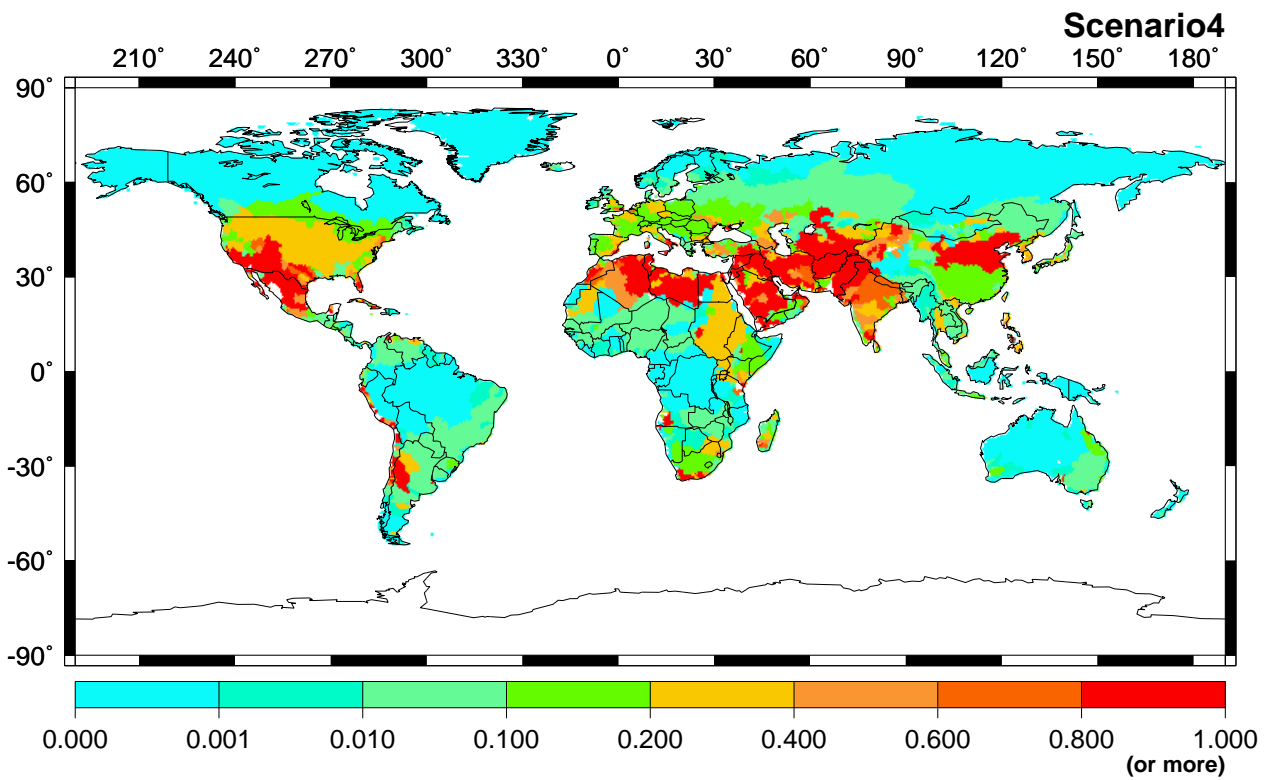


図 5.10: 2050 年の渇水比率 (上図) と 1990 年からの変化率 (下図) : シナリオ 4 [流域毎評価]

5.3 河川流域間シナリオ毎の比較

以上のような結果を、より詳しく見るために、幾つか河川流域を抽出して、シナリオ毎、流域毎の傾向の相違をまとめる。図 5.11は、シナリオ毎に長江、黄河、インダス川、及びドナウ川流域における渇水比率の変化を示した図である。流域選定の理由としては、まず、中国の2河川は、重要な農作地帯となっており、また、黄河流域では、これまでの結果において水資源が逼迫することが示されたこと、そして長江はそれとの比較対象として選定した。また、インダス川は、インド、パキスタンといった、農業国で取水量の極めて大きな国を含む国際河川であること、そして、ドナウ川は、上記のグローバルな将来推定の結果、渇水比率が常に減少の方向へ移行していることから、アジアにおける将来は水資源の逼迫傾向のある河川流域と比較するために選定した。

図に示されたように、長江では、水資源賦存量の多いことから、水需要量は将来増すとしても、ほとんど渇水比率は変化していない。続いて、黄河流域は、人口増加に伴って、渇水比率は高まる。重要な変化としては、水需要原単位変化により、わずかではあるが緩和の方向へ作用すること、そして、気候変化はそれを上回る影響力で渇水比率低減の方向へ作用することである。同様の傾向は、インダス川でも現れている。ただし、インダス川流域における渇水比率の高まりは、人口増加がシナリオ間の相違を圧倒していることによる。ここでは、水需要原単位の変化は、水利用効率の改善も含まれているため、渇水比率を低減する方向へ作用しているが、気候変化による低減の方が大きい。さらに、ドナウ川流域では、人口が減少すること、原単位変化双方により気候変化の有無に関わることなく、渇水比率低減へ作用している。

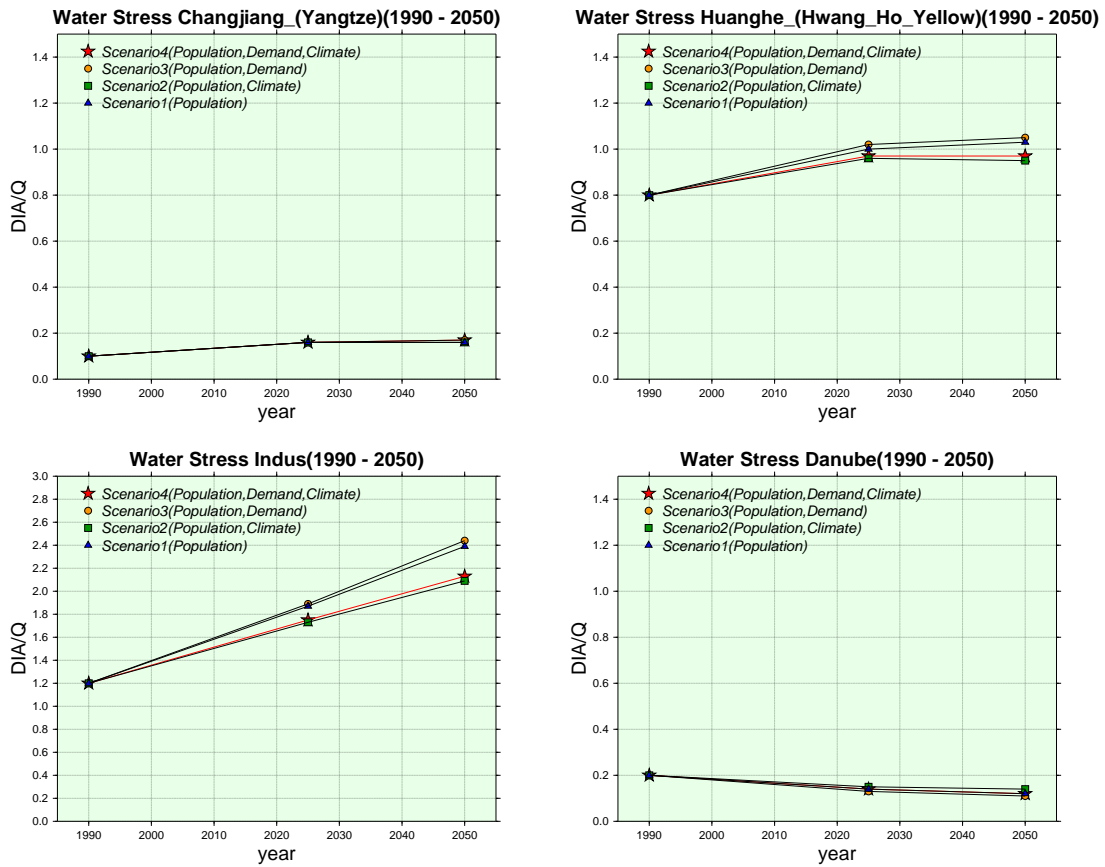


図 5.11: シナリオ毎の各流域の渇水比率変化

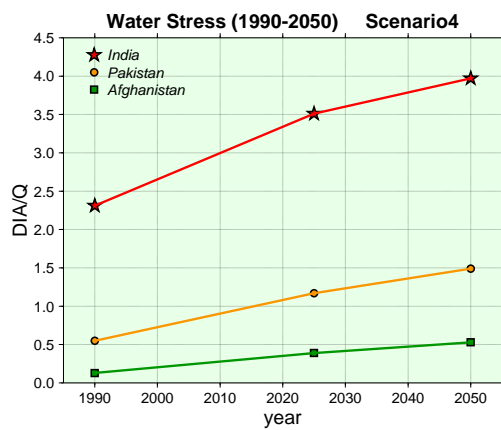


図 5.12: インダス川流域各国の渇水比率変化

5.4 国際河川における評価

次に、現在水資源が逼迫しており、かつ将来より一層逼迫することが想定され、しかも取水量の多い農業国が複数存在する国際河川であるインダス川を対象としてその流域内における国毎の評価をする。図 5.12は、インダス川流域における、水需要原単位が変化し、かつ気候が変化するシナリオ 4 における国毎の渇水比率の変化を表したものである。他のシナリオにおいても大まかな傾向は同様であったので、流域内における国家間の比較をするために、シナリオ 4 のみ対象とした。

この図からわかるように、5.11において、インダス川全体として渇水比率が高く、更に今後急速に高まるとされていたのであるが、こうして、流域内の国毎に比較を行なった場合、国毎に必要な差異があることが示されている。インドでは、全体として評価した場合よりも、遥かに水資源が逼迫した状況を示しており、持続不可能な地下水資源による灌漑が行なわれていることが考えられ、今後の動向が危惧される。

世界には数多くの国際河川が存在し、かつ、流域毎に事情は異なると考えられ、このような、インダス川の評価は、一例に過ぎず、今後はより一層各河川流域毎、国毎の情勢を考慮に入れた詳細な研究が必要であると考えられる。

5.5 本章におけるまとめ

最後に、本章における将来水資源予測の結果をまとめる。本章においては、各種将来推計データ、及び利用効率改善を含んだ水需要原単位変化のシナリオを適用した将来水資源予測を行なった。その結果、以下のようなことが考察される。

- 現状において渇水ストレスの高い地域は、将来、より逼迫の方向へ進みこそすれ、利用効率改善を含んだ水需要原単位変化及び気候変化による緩和にもかかわらず、現状よりも安全側へ移行することはない。
- 上記の点は、人口増加に極めて大きく依存する。
- しかし、水需要原単位の変化、気候変化は、わずかながらにはあるが、影響を及ぼす。
- 上記のことは、流域毎の評価によって、より顕著に示される。そして、それが国際河川の場合は、国毎に状況は大きく異なる。

以上のような将来水資源予測に関して、より信頼性の高い評価を下すためには、まず、需要側の変化に関する、より詳細、かつ多様なシナリオに対する検討が必要であると考えられる。また、本研究においては、気候変化シナリオとしては、東京大学気候システムセンター (CCSR) の温暖化実験結果 1 例のみを適用していたが、気候変化に関する実験の結果は各機関で大きく異なるので、他の機関による結果も複数適用したうえでの評価が必要であると考えられる。

Chapter 6

終章

6.1 結論

本研究では、水資源評価を目的として、TRIP を用いた水資源賦存量の推計、国別統計データ及び各種グリッドデータセットを用いた水需要量の推計、そして、水需給バランスによる現状及び将来に対するグローバルな水資源評価を行なった。また、現状の評価にあたっては、各国の経済指標も加えた評価を行なった。

本研究の特長として、以下のことが挙げられる。

- 全球を網羅した河川モデルである TRIP を水資源評価に用いることで、より気候モデル的な評価が可能になった。
- TRIP を含めた各種データセットを用いることにより、グローバルな分布を求めるだけでなく、大陸毎、国毎、及び流域毎の各スケールでの評価が可能となった。

上記において、前者のような、数値気候モデル・陸面過程モデル (GCM-LSM) に直結したグローバルな TRIP のような河川モデルを用いた水資源評価は、極めて意義深く、かつ今後のモデルの改良等による精度の向上が期待できるものと考えられる。

また、後者の各スケールを対象とした水資源評価は、急速なグローバル化が進展し、かつ今後進むとされる現状、及び水資源及び水需要の地域遍在が大きいことを考えると、極めて重要な点であると考えられる。

さらに、本研究における水資源評価の結果として、以下のような点が示される。

- 水資源賦存量及び水需要量の地域遍在は大きく、各地域間で水資源に対する逼迫度は大きく異なる。
- 特に、灌漑農地で水資源の逼迫度は厳しく、灌漑農地における取水量の占める割合が大きく、農業用水が水資源に関して重要な要素であることが言える。
- 水需給バランスに経済指標を加えることで、各地域における水資源に対する真の意味での危険度が、第一段階とはいえ、示すことができた。
- 将来推計では、地域毎に今後の動向が大きく異なり、これは人口増加が最も大きな要因であると考えられる。

-
- 水需要における原単位の変化及び、気候変化はそれに比べると影響は小さく、将来における水使用効率が改善されるとすれば多少緩和へ向かう。また、気候変化は、現在水資源が逼迫している地域では、水不足を緩和する方向で影響を及ぼしている。

6.2 データに関する問題点と本研究における対処について

本研究における水資源評価の過程において直面した問題点と、それに対する対処方法を、以下に示す。まず、問題点としては以下のようなものが挙げられる。

- 本研究では、水需給バランス評価において需要側として、水需要の最も良い指標となり、かつ最も広く入手可能であることから取水量データを用いたが、それでも、国別統計データは各国毎に精度及びデータ年次が異なる。
- 各種グローバルデータセットは、各機関で個別に作成されており、データ形式がそれぞれ異なるだけでなく、重要な点として、各種データセット間での海陸分布が異なる。

以上のような問題点に対し、本研究では、前者に対しては、Shiklomanov (1999) の過去 50 年に対する評価結果を用いて国毎に補正し、対象年次を 1990 年に統一した。

後者に対しては、国境データを基にして、海陸分布を統一した。また、流域毎評価においては、更に TRIP 流域分割に用いている海陸分布に人口分布を合わせる、ことにした。その国境データに関しても、現状との相違があると判断した場合には、手作業による修正を加えた。

6.3 今後の課題

より現実を反映した水資源評価を行なうために、今後の課題として以下のような点が挙げられる。

- 本研究で示された水需給バランス評価及び他研究で示されている結果を、実際の現状と比較することによる検証が必要
- 月毎、季節毎の需要・供給の変動を考慮した評価が重要である。その際、どのくらいの期間どの程度の渇水で社会及び生態系が重要な影響を受けるのか、を調査する必要がある。
- 水の再生利用、水利用効率の変化 (特に本研究では考慮に入れなかった灌漑用水に対して)、さらに、水の価格変化も考慮に入れた評価が必要である。
- 国毎及び地域毎の貯水池等の水資源施設の充実度、また将来の投資の可能性や、社会・経済的な情勢、さらには国際間の貿易とそれに付随する水の間接消費を考慮に入れた総合的な水資源評価が必要である。

上記の点に加えて、2000 年現在に対する水資源評価、及び、現在 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change: 気候変動に関する政府間パネル) において 2100 年に対する取り組みが検討されている背景から、それに対応した 2100 年に対する水資源評価をすることも重要であると考えられる。

いずれにしても、本研究は、この論文の段階で完成することのない類いのものであり、今後の更なる進展を期待したい。

References

- Alcamo, J., T. Henrichs and T. Rosh, 2000: World Water in 2025: Global Modeling and Scenario analysis for the World Commission on Water for the 21st Century. *Kassel World Water Series Report No.2*.
- Döll, P. and Siebert, 1999: A Digital Global Map of Irrigated Areas. *Report A9901 Center for Environmental System Research University of Kassel*.
- Entin, J. K., A. Robock, K. Y. Vinnikov, V. Zabelin, S. Liu, A. Namkhai and T. Adyasuren, 1999: Evaluation of Global Soil Wetness Project Soil Moisture Simulations. *Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol.77, No.1B, pp.183-198*.
- Gleick, P. H., 1998: THE WORLD WATER 1998-1999. *Island Press*.
- Heap, C., E. Kemp-Benedict and P. Raskin, 1998: Conventional Worlds: Technical Description of Bending the Curve Scenarios. *Polestar Series Report*.
- Koster, R. D., T. Oki and M. J. Suarez, 1999: The Offline Validation of Land Surface Models: Assessing Success at the Annual Timescale. *Journal of the Meteorological Society of Japan, 77*, 257–263.
- Messon, B. W., F. E. Corprew, J. M. P. McManus, D. M. Myers, J. W. Closs, K. J. Sun, D. J. Sunday and P. J. Sellers, 1995: ISLSCP Initiative I-Global Data Sets for Land-Atmosphere Models 1987-1988. *Published on CD-ROM by NASA*.
- Oki, T. and Y. C. Sud, 1998: Design of Total Runoff Integrating Pathways (TRIP) A Global River Channel Network. *Earth Interactions, 2*.
- Oki, T., T. Nishimura and P. Dirmeyer, 1999: Assessment of Annual Runoff from Land Surface Model Using Total Runoff Integrating Pathways (TRIP). *Journal of the Meteorological Society of Japan, 77*, 235–255.
- Raskin, P., 1997: Comprehensive Assessment of the Freshwater Resources of the World. *Water Futures: Assessment of Long-Range Patterns and Problems*.
- Raskin, P., E. Hansen and R. Morgolis, 1995: Water Sustainability: A Global Outlook. *Polestar Series Report no.4 SEI Boston*.
- Raskin, P., G. Galloppin, P. Gutman, A. Hammond and R. Swart, 1998: Bending the Curve: Toward Global Sustainability. *Polestar Series Report*.
- Shiklomanov, I. A., 1999: World Water Resources: Modern Assessment and Outlook For the 21st Century. *IHP UNESCO*.

- Shiklomanov, I. A., 2000: Appraisal and Assessment of World Water Resources. *International Water Resource Association*.
- Vörösmarty, C. J., P. Green, J. Salisbury and R. B. Lammers, 2000: Global Water Resources: Vulnerability from Climate and Population Growth. *Science*, **289**, 284–288.
- WRI, , UNEP, UNDP and T. W. BANK, 1998: World Resources 1998-99. *The World Resources Institute*.
- ジョエル E コーエン, 1998: 新人口論. 農文協.
- トーマス E グレーデル, ポール J クリュツツェン, 1997: 気候変動. 日経サイエンス社.
- ポステルサンドラ, 2000: 水不足が世界を脅かす. 家の光協会.
- レスター R ブラウン, 1995: 飢餓の世紀. ダイアモンド社.
- レスター R ブラウン, 1999: ワールドウォッチ地球白書 1999-2000. ダイアモンド社.
- レスター R ブラウン, 2000: ワールドウォッチ地球白書 2000-01. ダイアモンド社.
- 岡田康, 2000: 全球 0.5 度グリッド河川流路網情報構築による世界主要 河川流量のシミュレーション. 東京大学修士論文.
- 沖大幹, 鼎信次郎, 1997: 回転楕円体を考慮した地球表面の緯度経度直行格子内面積の算定. 水文・水資源学会誌 Vol.10, No.4 pp.371-374.
- 岩波講座地球惑星科学, 1996: 地球環境論. 岩波書店.
- 気象庁編, 1996: IPCC 第二次報告書 地球温暖化の実態と見通し. 大蔵省印刷局.
- 高橋裕, 河田恵昭, 1998: 水循環と流域環境. 岩波書店.
- 高橋潔, 松岡譲, 島田洋子, 嶋村亮, 2000: 気候変動下での地球規模の水資源評価と渇水対策戦略評価のためのモデル開発. 第 8 回地球環境シンポジウム講演論文集.
- 水文水資源学会編, 1995: 地球水環境と国際紛争の光と影. 信山社.
- 中山幹康, 1998: 国際流域の管理と係争の解決において国際機関が果たし得る役割. 水文・水資源学会誌, **11**, 723–731.

謝辞

これまで、外からの刺激を受けるばかりで、自ら立ち上がって一つの形を作る、という経験はすることはありませんでした。そんな私ではありますが、本日、こうして”修士論文”として、世の中に一つ足跡が残せるに至りました。こうした経験は、今後の私の人生において、一つの新しい出発点となるような気がしてなりません。まず、そうした状況に達することができたことが、個人的には非常に嬉しいです。そして、こうした”形”を作るにあたって、これまで自分を支えてくれた大勢の方々に対して感謝の気持ちで胸が溢れんばかりです。

まず、このような環境を作り上げた研究室の親分的存在である、虫明功臣教授には、深く感謝をしたいと思います。その穏やかな人柄が、この和やかな研究室の雰囲気を作り出しているものと思います。そして、その中で研究させて頂いたことは非常に幸せでありました。また、その穏やかな性格の反面、その何気ない姿勢から感じさせる研究に対する情熱が、大変よい刺激となったといえます。ありがとうございました。

主査の沖大幹助教授には、指導教官として大変お世話になりました。怠け癖の強い私を、時には尻を叩き、時には励まし、さらに研究に対する具体的な指針を示してくれるばかりでなく、日常生活においても元気づけて頂きまして、非常に感謝しています。

副査の柴崎亮介教授には、非常に的確で重要なアドバイスを頂くことができ、また、研究に対する、重要な方向性について示して頂きました、ありがとうございます。

阿部彩子 CCSR 助教授には、研究においてデータの収集にあたって、忙しいにも関わらず、気候シミュレーションの結果を提供して頂き、非常に感謝しています。

INCEDE の Herath A.S. 客員教授には、研究室ミーティングの際に貴重な意見と知識を与えて頂き大変感謝しています。

INCEDE の助手、Dushmanta Dutta さんには、研究に関するアドバイスを頂いただけでなく、昨年の夏に高松の居酒屋で一緒にお酒を飲めたことが大変思い出深いです。

前助手の仲江川敏之さんには、同じ研究室にいられたのはほんのわずかでしたが、気象研究所に転任される前までの短い期間、何もわからず研究室に入ってきた私に研究室生活について教えて頂きました。

鼎信次郎助手には、研究テーマの決定に際しても、また、その後の研究方針についても、常に具体的なアドバイスを受けることができ、非常に感謝しています。また、良識溢れるその言葉に何度救われたことか、感謝の言葉を述べ足りないくらいです。

弘中貞之教務技官には、船橋の海老川について、長年付近に住みながら何も知らなかった私に対して、非常に興味深い話をして頂き、感謝しています。

小池雅洋技術主任には、研究室の宴会の研究の計画にお世話になりました。また、秋の海老川観測に同行させて頂いたことには、非常に感謝しています。

虫明研究室の秘書の、森瑩子さん、黒澤綾子さん、坂田加奈子さん、曾根珠美さん、塚田 由紀さんには、事務的なことでお世話になったばかりでなく、時には昼食に同行させて頂くことができ、楽しいひとときを過ごさせて頂きました。

博士研究員の金元植さんには、研究のことだけでなく、軍事飛行機が好きだという話など、一つのことにも夢中になる楽しさについて話を聞かせて頂きありがとうございました。

博士研究員の楊大文さんには、研究初期段階におけるデータの整備において、また、研究を進めていく際においても有益なアドバイスを頂きました、ありがとうございます。

博士研究員の安形康さんには、日頃の激しい励ましの言葉に研究に対する情熱を頂くことができ、大変感謝しています。

留学生の、P. D. Assela Pathirana さん、Shakil A.Romshoo さん、G H A C Silva さん、Mughal Habib U Rehnem さん、Perapol Begkhuntod さん、Pham thai Nam さん、Chayanis Manuthiparom さんには、研究のことだけでなく母国に関する話などを聞かせて頂くことができました。

博士課程として京大農学部より来られた松田咲子さんには、和やかな人柄から、ほのぼのとした気持ちにさせて頂き、また、他愛もない話も聞いて頂き、感謝しています。

博士課程1年の大楽 浩司さん、瀬戸心太さんには、研究に対しても、ご自身の考え方にも、非常に得るべきところのある話を頂き、大変感謝しています。

同輩の平林由希子さんには、修士論文のためにともに努力してきた仲間として、時には励まし合い、大変助かりました。

昨年度卒業された新井 崇之さん、岡田 康さんには、研究室配属当初のいろはから、研究に関することまで有意義なお話を聞かせて頂くことができました、ありがとうございます。

修士1年の河村 愛さん、熊坂 和宏さん、芳村 圭さんは、研究室の宴会準備の大切な要だけだっただけでなく、重要なムードメーカーとして、研究室の良い雰囲気を作り出してくれました。

また、研究室唯一の卒論生である、平岩 洋三さんには、論文やデータの共有にあたって、また研究についての有意義な議論をさせて頂きました。

昨年度の千葉工業大学からの卒論生、沢田 裕介さん、染谷 浩さん、西元 正明さん、それぞれ個性派ぞろいで、有意義な話を聞かせて頂きました。

このように、私の研究室生活は大勢の方々によって支えられてきました。改めてここで感謝の意を表したいと思います、ありがとうございました。

最後に、現在の私を最も根底から支えてくれた両親に御礼を言いたいです。勝手な我儘から家を飛び出し、東京で独り暮らしを始めた私を、咎めることもなく、逆に毎日ちゃんとしたものを食べているか、風邪などひいてないか、気にかけてくれたことは、何よりも支えになりました。

2001年2月6日 研究室にて