

水資源問題と対策

SCEエネルギー部会資料

2021/10/18

山田知純

- 世界の水資源需要
 - 農業用水
 - 工業用水
 - 生活用水
- 世界の水資源供給力
 - 河川水
 - 地下水
- 需要と供給能力のアンバランス
 - 雨量の変化による河川取水量の減少
 - 地下水の枯渇による供給の減少
 - 地球温暖化による水資源の偏在化
- 対策
 - 偏在の解消
 - 需要の抑制
 - 供給量の増進

世界の水需要需要

1. 世界の水使用量

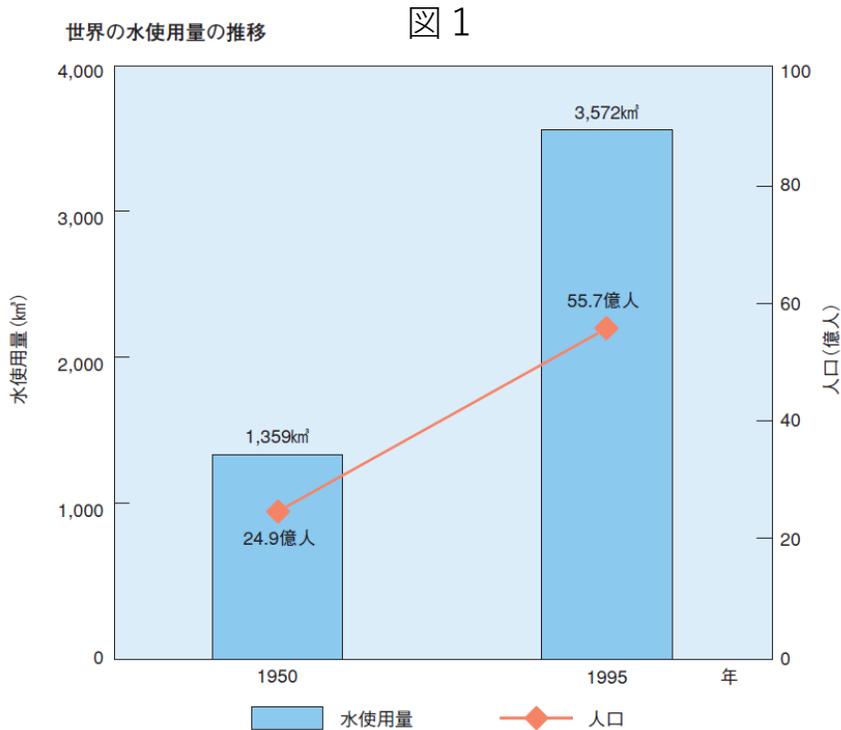


表 1
1950年と1995年の世界の水使用量及び1人当たり水使用量

	1950年		1995年		増加率	
	総量① (km³/年)	1人当たり② (L/日/人)	総量③ (km³/年)	1人当たり④ (L/日/人)	③/① (%)	④/② (%)
農業用水	1,124	1,235	2,504	1,231	223	100
工業用水	182	200	714	351	392	176
生活用水	53	58	354	174	668	300
計	1,359	1,493	3,572	1,756	263	118
人口	24.9億人	—	55.7億人	—	224	—

資料：I, A. Shiklomanov, Assessment of Water Resources and Water Availability in the World, 1996年（世界気象機関）

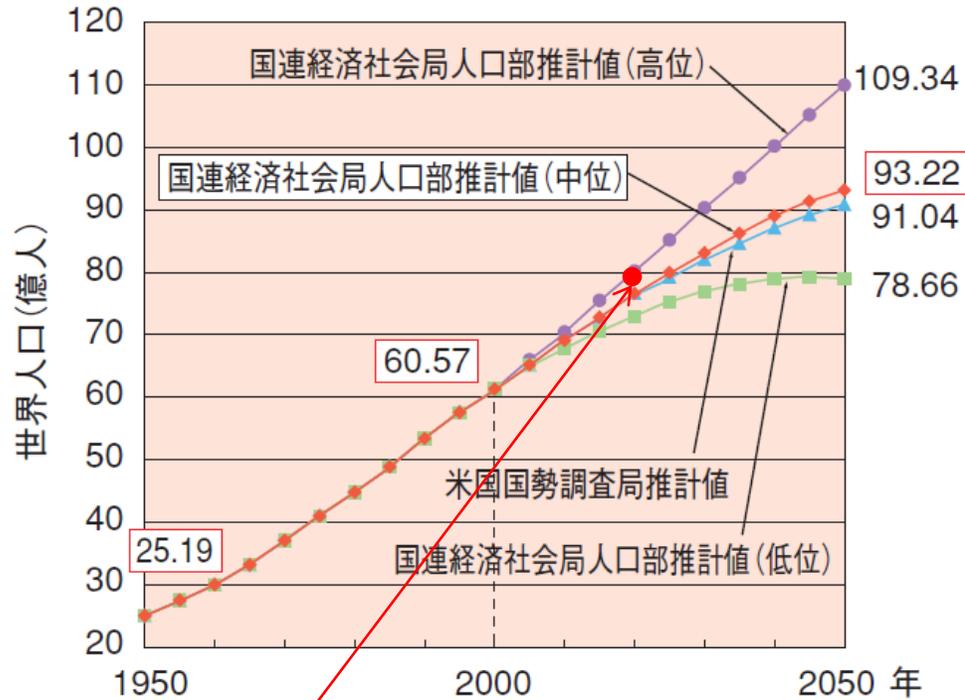
水需要は、人口増と一人当たり水使用量の増加という二つの要因で急激に増大している。
水需要量を以下の様に推定する。

$$\begin{aligned}
 \text{水需要量} &= \text{人口} \times \text{一人当たり水使用量} \\
 &= \text{人口} \times (\text{一人当たり農業用水} + \text{一人当たり工業用水} + \text{一人当たり生活用水}) \\
 &\quad \text{(健康で文化的な生活を送るに必要な量、として考える)}
 \end{aligned}$$

2. 人口の増大による水需要の増大

図2

世界人口の主な推計値

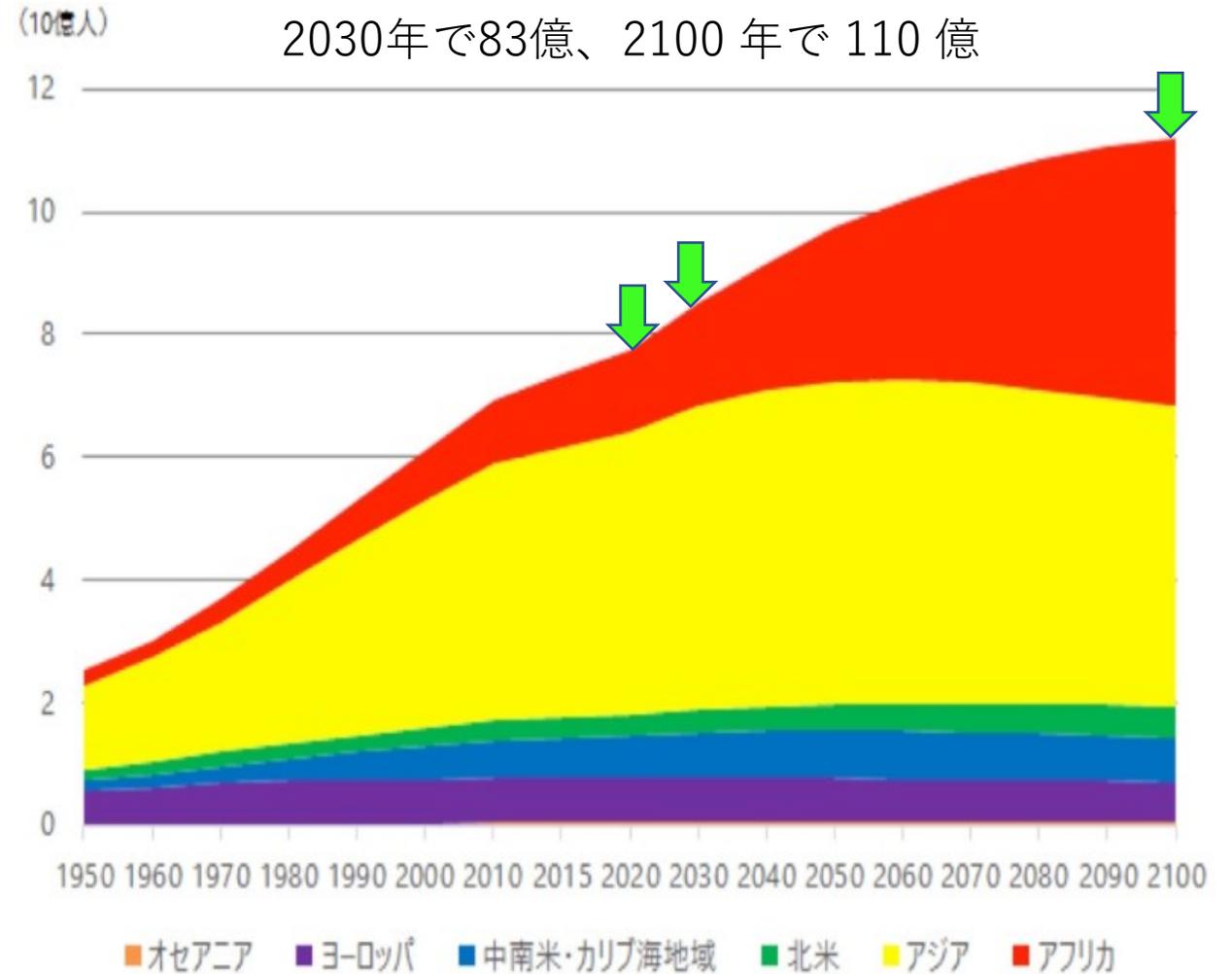


資料：1) World Population Prospects: The 2000 Revision, 2001年 (国連経済社会局人口部)
2) International Data Base, 2000年 (米国国勢調査局)

- 国連人口基金 (UNFPA) が発表した「世界人口白書2021」によると、2021年の世界人口は78億7500万人。
- 2000年予測の高位で推移している。

図3

2030年で83億、2100年で110億



地域別の人口予測

([United Nations Population Division](https://www.un.org/en/development/desa/population/))

3. 農業用水

3.1 一人当たり穀物換算必要量 と水換算量 (2009/2011平均)

穀物換算量：食肉の場合は、食肉 1 kg生産に必要な穀物量

サトウキビ、芋についてはカロリーベースで穀物 1 kgに匹敵する量 (*)

魚介類では穀物換算量はゼロ (*)

果実、野菜、その他は暫定的にゼロ (*、カロリーベースで総カロリーの5~10%)

表2 一人当たり必要な農業用水 (牧草を除外)

国名	一人当たり一日 摂取カロリー	穀物換算量 Kg/年人	水換算量 m3/年人
英国	3,160	660	1,290
米国	3,640	840	1,670
日本	2,330	450	990
中国	2,178	440	1,000
ベトナム	2,120	340	900
インド	2,230	310	760
ナイジェリア	2,400	310	670

一人当たり 450 kg/人年が健康で豊かなレベルの換算穀物必要量と考えられる (*)。 (サトウキビ、芋は穀物換算)

この場合、必要換算穀物量は
2030年(83億人)で 37.4億トン
2100年(110億人)で 49.5億トン

必要用水量は一人当たり1,000m3/人年として
2030年(83億人)で 8,300 km3/y
2100年(110億人)で 11,000 km3/y
(牧草地への天水を除く)

(*) 山田

表 2 の計算例

熱量 kcal/kg	穀物換算量 kg/kg	必要水量 m3/kg		イギリス				日本			
				kcal/人/D	kg/人/y	穀物換算量	水換算量	kcal/人/D	kg/人/y	穀物換算量	水換算量
3570	1	3.6米		50	5.1	5.1	18.4	600	61.3	61.3	220.8
3700	1	2小麦		810	79.9	79.9	159.8	350	34.5	34.5	69.1
3500	1	2.6他		42	4.4	4.4	11.4	95	9.9	9.9	25.8
760	0.2	0.8芋		178	85.5	17.1	13.7	60	28.8	5.8	4.6
3870	1	1.6砂糖		372	35.1	35.1	56.1	256	24.1	24.1	38.6
1430	1	2.3豆		53	13.5	13.5	31.1	118	30.1	30.1	69.3
2980	3.5	1.9牛		136	16.7	58.5	111.1	80	9.8	34.3	65.2
3860	3.5	1.9ブタ		442	41.8	146.3	278.0	8	20.0	70.0	133.0
2290	3.5	1.9鶏		119	19.0	66.5	126.4	109	17.3	60.6	115.0
630	0.55	1.9牛乳		407	235.8	129.7	246.4	126	73.0	40.2	76.3
820	0	0魚介類		37	16.5	0.0	0.0	138	61.4	0.0	0.0
9200	5	2.3油脂類		512	20.3	101.6	233.6	383	15.2	76.0	174.7
				3158.6	573.6	657.6	1,285.9	2322.6	385.6	446.8	992.4

↑
表 6 主として図 9

↑
表 4

↑
図表 1

3.2 一人当たり摂取カロリー（他の資料との比較）

表 3

国名	一人当たり一日 摂取カロリー	
	FAO2015	FAO2012（右図）
英国	3,160	
米国	3,640	3,700
日本	2,330	2,700
中国	2,178	
ベトナム	2,120	
インド	2,230	2,300
ナイジェリア	2,400	

日本の数値がかなりちがっているが、理由は不明。
その程度の精度である、と考えるしかない

図 4



ヨーロッパ

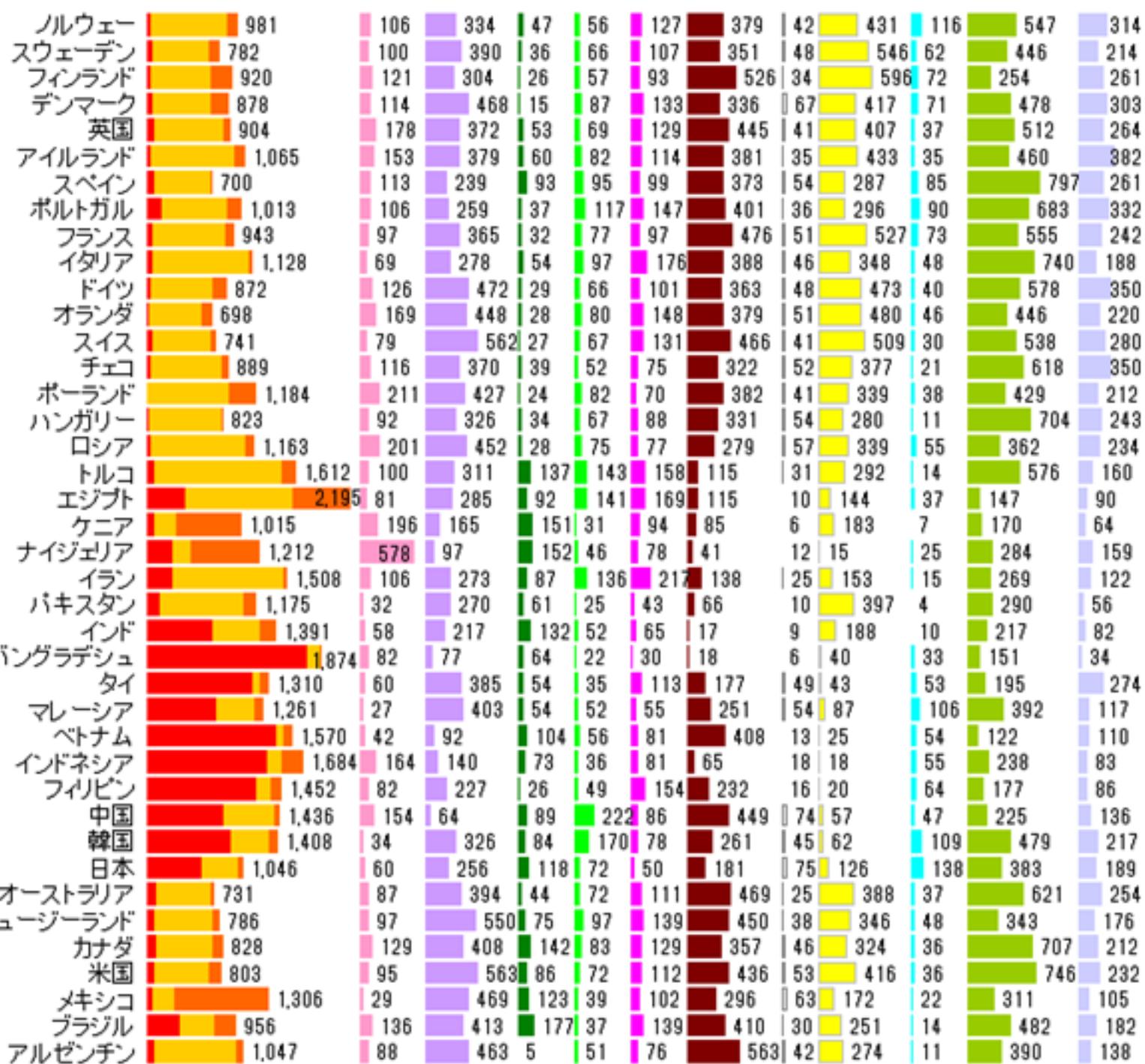


表4

人間は何を食べているか(国際比較) - 分離図版

1人1日当たり食料供給(kcal/capita/day) 2009~11年平均

- 米
- 小麦
- その他穀物
- 豆類
- 野菜
- 果実
- 牛乳・乳製品
- 魚介類
- 油脂類
- いも類
- 砂糖・甘味料
- 肉類
- その他
- 卵

(注) 油脂用作物の大豆・落花生を豆類に含め、動物性油脂のバター・クリームを牛乳・乳製品に含めた。米、小麦、その他穀物については穀物計の値のみを表示した。

(資料) FAOSTAT ("Food Supply", 2015.8.21)

中近東・アフリカ

アジア

大洋州

米州

3.3 食肉消費量

図表 1. 主要国の人口 1 人当たり食肉消費量の動向 (単位: kg/人)

国名	2000 年			2012 年			合計の 変化率(%)		
	合計	牛	豚	鶏	合計	牛		豚	鶏
アルゼンチン	103.9	70.8	8.0	25.1	110.8	59.9	8.8	42.1	6.6
米国	122.8	44.3	29.9	48.5	114.0	37.4	26.9	49.7	▲ 7.2
ブラジル	76.7	35.6	10.7	30.4	101.7	39.9	13.6	48.2	32.7
オーストラリア	82.9	34.8	18.2	29.8	97.0	32.5	22.3	42.2	17.1
EU	77.5	16.7	41.8	19.0	77.7	15.3	40.3	22.1	0.3
シンガポール	59.1	6.0	16.1	37.0	70.6	6.4	23.2	41.0	19.5
韓国	45.4	12.7	22.7	9.9	60.6	13.7	30.9	16.1	33.7
メキシコ	59.8	23.7	12.7	23.4	63.5	15.7	15.8	32.0	6.1
南アフリカ	39.6	14.7	2.7	22.2	54.9	15.7	4.8	34.4	38.8
(マレーシア)	34.9	6.2	-	28.7	49.9	7.4	-	42.5	43.0
中国	42.7	4.0	31.2	7.4	53.9	4.1	39.7	10.0	26.3
日本	43.5	12.3	17.2	14.0	47.2	9.8	20.0	17.3	8.6
ベトナム	18.8	2.4	12.6	3.8	37.6	4.6	24.3	8.7	100.0
フィリピン	25.0	4.5	13.5	7.0	30.2	5.4	15.1	9.7	20.5
(インドネシア)	4.0	-	-	4.0	6.3	-	-	6.3	59.0
(インド)	2.2	1.1	-	1.1	4.2	1.7	-	2.6	92.5

注: 国名の括弧書きは、一部の品目のデータが存在しない国 出所: 米国農務省資料および IMF 公表データより作成

3.4 食肉生産量と飼料必要量

図表 3. 主要国の食肉生産量と飼料消費量の動向

	食肉生産量 (百万トン、%)		飼料消費量 (百万トン、%)		食肉 1kg 当たり 飼料消費量 (kg)		
	2012 年	2000 年比 増減率	2012 年	2000 年比 増減率	2000 年	2012 年	増減
中国	72.7	34.4	170.8	63.6	1.9	2.4	0.4
EU	41.8	4.5	165.5	0.8	4.1	4.0	▲ 0.1
米国	41.7	12.6	126.1	▲ 24.8	4.5	3.0	▲ 1.5
ブラジル	25.8	76.1	47.2	52.7	2.1	1.8	▲ 0.3
インド	6.6	153.7	14.7	48.6	3.8	2.2	▲ 1.6
ロシア	6.5	93.8	28.3	3.9	8.1	4.4	▲ 3.8
メキシコ	6.0	23.7	19.8	▲ 2.6	4.2	3.3	▲ 0.9
アルゼンチン	5.0	25.0	8.1	14.4	1.8	1.6	▲ 0.2
カナダ	4.1	7.9	17.4	▲ 25.9	6.2	4.2	▲ 1.9
オーストラリア	3.5	19.0	7.0	13.1	2.1	2.0	▲ 0.1
ベトナム	3.3	124.2	5.8	262.3	1.1	1.7	0.7
日本	3.1	8.7	14.2	▲ 13.7	5.7	4.5	▲ 1.2
その他	33.1	30.9	180.7	51.4	4.7	5.5	0.7
総計	253.2	28.6	805.6	15.3	3.5	3.2	▲ 0.4

出所：米国農務省資料より作成

中国では、食肉 1 kg 当たり飼料消費量が 1.9 kg から 2.4 kg に増えている。この理由は、牧草や残飯・残肴を食べさせて生産するスタイルから、畜舎などで飼料穀物を与えて肥育する「工業型」の生産様式に移行したためと考えられる。

表 5

食肉と魚介類の 1 人あたりの年間消費量 (単位: キログラム)

国・地域	1985 年			2010 年		
	食肉消費量	魚介類消費量	合計	食肉消費量	魚介類消費量	合計
EU	74.4	22.1	96.5	76.4	21.8	98.2
日本	33.7	69.6	103.3	47.6	53.7	101.3
米国	110.3	19.0	129.3	119.6	21.9	141.5
東南アジア	11.8	18.2	30.0	27.9	32.7	60.6
中国	19.1	6.5	25.6	57.8	32.2	90.0
世界平均	31.5	12.5	44.0	42.1	18.7	60.8

食肉生産量は増えているが、飼料生産はそれほど増えていない。2000年の食肉生産量224百万トンに対し、飼料生産量は790百万トン。よって食肉1kg当たり飼料量は3.5kg/kgとなる。

3.5 換算穀物量と単位農産物当たり農業用水

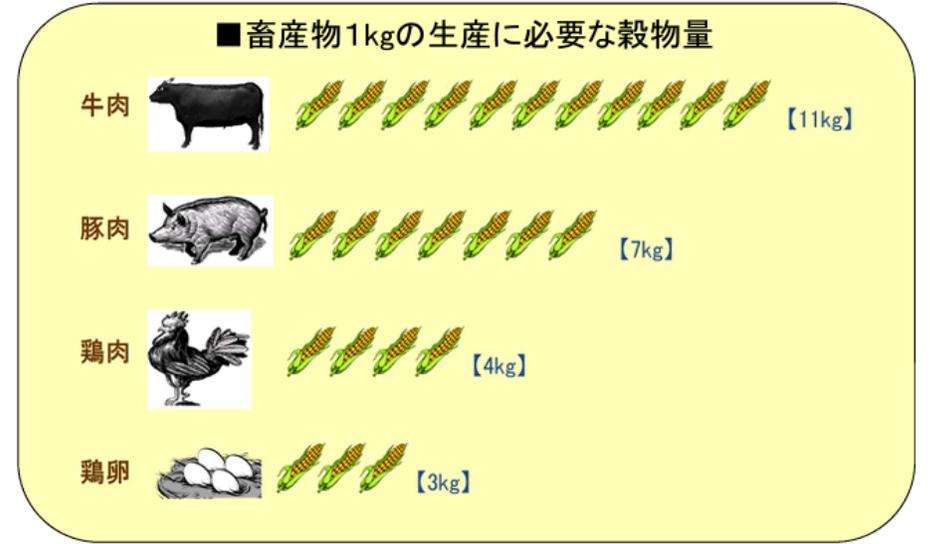
表 6

食品	熱量 kcal/k g-食品	穀物必要量Kg-穀物/kg-食品		水必要量 m3/kg-穀物
		オリジナル	修正値	
小麦	3,760			2
こめ	3,560			3.6
イモ類	760	1	0.2	0.8
砂糖	3,870	8	1	1.6
豆	1,430			2.3
牛肉	2,980	11	3.5	1.9
豚肉	3,860	7	3.5	1.9
鶏	2,290	4	3.5	1.9
牛乳	630		0.55	1.9
魚介類	820		0	0
油脂類	9,200	5		2.3

熱量は2009～2011 平均

図表 3 と図 5, 図 6 の差は牧草である。

図 5



資料:農林水産省で試算。(日本における飼養方法を基にしたとうもろこし換算による試算)

図 6

極めて非効率な食肉生産

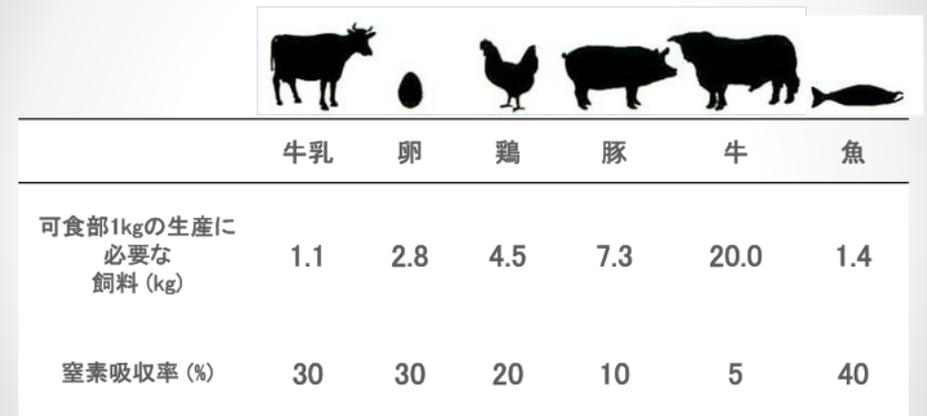


図7 世界飼料生産量推移

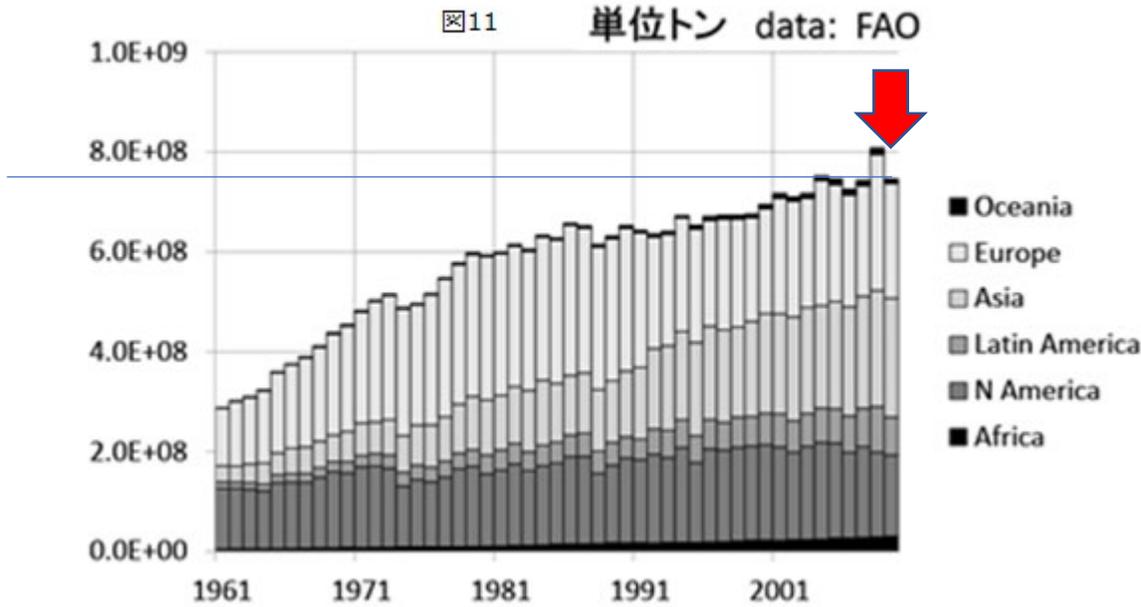
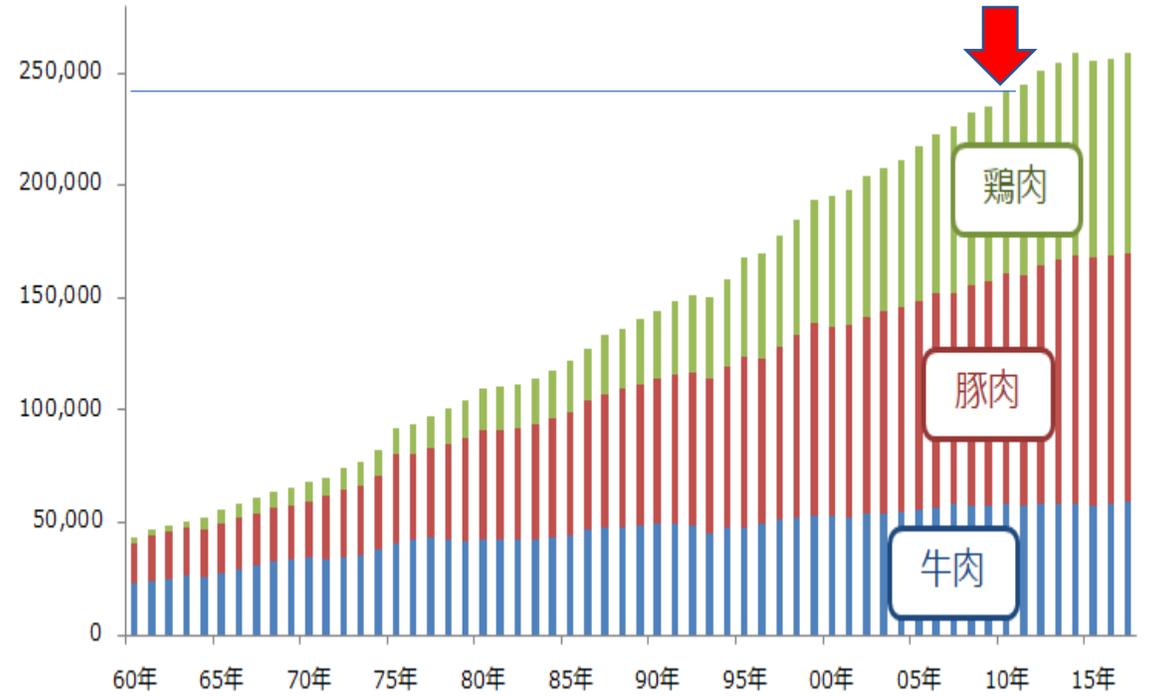


図8 世界食肉生産量



出所：USDA（米農務省）のデータより吉田哲作成（2018）

食肉生産量は増えているが、飼料生産はそれほど増えていない。2010年の食肉生産量24百万トンに対し、飼料生産量は760百万トン。よって食肉1kg当たり飼料量は3.2kg/kgとなる。これは図表3の2012の値に近い。

3.6 牧草についてのコメント

家畜の飼育にはトウモロコシ、大豆などの飼料が使われるが、それ以上に重要なのが牧草類である。牛、豚、鶏の飼育には、2020年現在おおよそ、10億トンの穀物（穀物全生産量のおおよそ半分）が使われているが、牧草類は推定11億トン（乾物換算）程度が消費されている。しかし、草地には天水以外の水は利用されていないと思われるので、以後の考察からは外している。

表7 草地の年間乾物生産量
(トン/ha)

	過湿潤	湿潤	亜乾燥	乾燥
亜寒帯	4	8	-	-
温帯	25	15	9	4
亜熱帯	120	40	10	4
熱帯	150	70	12	4

(Snaydon, 1981)

表8 世界の土地利用実態と家畜飼養頭数

	土 地 利 用 (100万ha)					家畜飼養頭数(100万頭)				
	全陸地	農耕地	永年草地	森 林	その他	牛	水牛	ラクダ	めん羊	山羊
アフリカ	2,964	185(6.2)	787(26.6)	686(23.1)	1,304(44.0)	178	2.5	14	197	164
北・中アメリカ	2,138	274(12.8)	367(17.2)	686(32.1)	811(37.4)	166	-	-	19	15
南アメリカ	1,753	142(8.1)	475(27.1)	900(51.3)	237(13.5)	258	1.1	-	109	21
アジア	2,679	451(16.8)	679(25.3)	539(20.1)	1,010(37.8)	387	134	4.5	331	282
ヨーロッパ	473	140(29.6)	84(17.8)	157(33.2)	92(19.4)	128	0.4	-	139	13
オセアニア	843	49(5.8)	450(53.4)	156(18.5)	187(22.3)	30	-	-	213	1.7
ソ 連	2,227	233(10.5)	372(16.7)	944(42.4)	679(30.4)	122	0.3	0.3	142	6.5
計	13,077	1,474(11.3)	3,214(24.6)	4,069(31.1)	4,320(33.0)	1,271	138.3	18.8	1,151	503.2

(FAO, Yearbook, Production, 1987)

「世界における土地利用と家畜生産の比較」(1991、北大、大久保)

3.7 食物の水原単位

図9

水消費原単位の算定 —農作物—



主要穀物・豆類(可食部)の水消費原単位

(日本の単位収量、1996年~2000年平均のFAO統計)

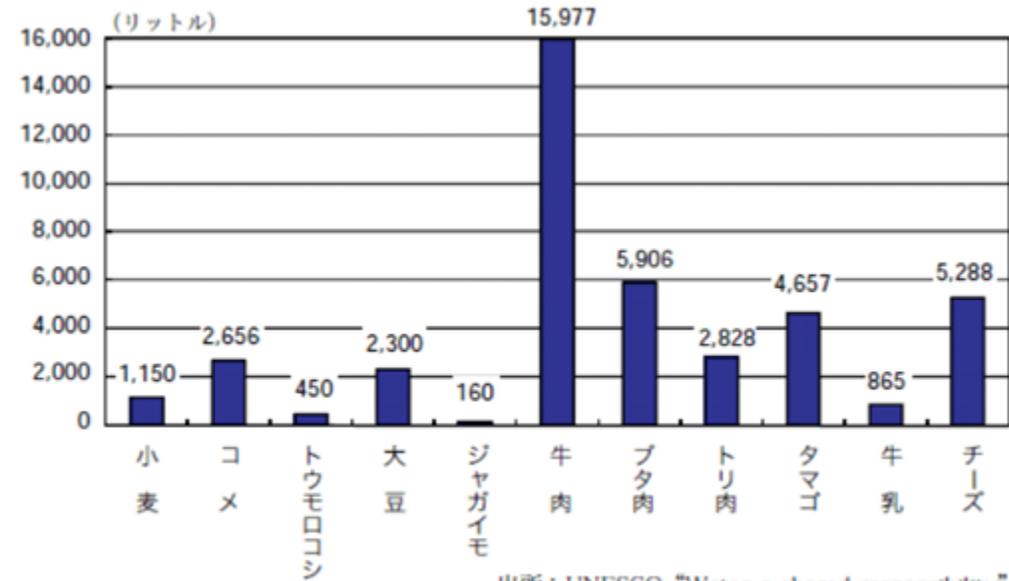
表9

作物生産には水が大量に必要

・ 農作物1キログラムを生産するのに必要な水

農産物名	水量	農産物名	水量
米	3.6トン	牛肉	20.6トン
大麦	2.6トン	豚肉	5.9トン
小麦	2.0トン	鶏肉	4.5トン
トウモロコシ	1.9トン	卵	3.2トン
大豆	2.5トン		

沖 2003より



出所: UNESCO "Water-a shared responsibility"

図10 主要農産物1kgの生産に必要な水量

図9, 表2は日本の値
 図10はUNESCO資料なのでおそらく、
 世界各地の値を考慮しているか?

表9-1 単位穀物当たり必要農業用水

	木谷2006 現実投入水	UNESCO	沖2003 仮想投入水 (日本)
	m ³ /ton	m ³ /ton	m ³ /ton
小麦	900	1,150	2,000
米	1,900	2,656	3,600
トウモロコシ	1,100	450	1,900
ジャガイモ	500	160	
大豆	1,650	2,300	2,500
牛肉		15,977	20,600
豚肉		5,906	5,900
鶏肉		2,828	4,500
卵		4,657	3,200
牛乳		865	

現実投入水 生産国で消費された水量
 仮想投入水 輸入国でそれが生産された場合に
 必要な水量

同じ生産物でも、各国で使われる水の量がちがうことが、現実投入水と仮想投入水がちがってくる理由である。

アメリカから小麦を買う場合、アメリカでは900m³/tonの水を使うが、それがもし、日本で生産されれば、2000m³/tonの水を使うことになる。日本が輸入した仮想水は900m³/tonではなく、2000m³/tonとなる。

3.8 穀物生産量（穀物は充分生産されているか）

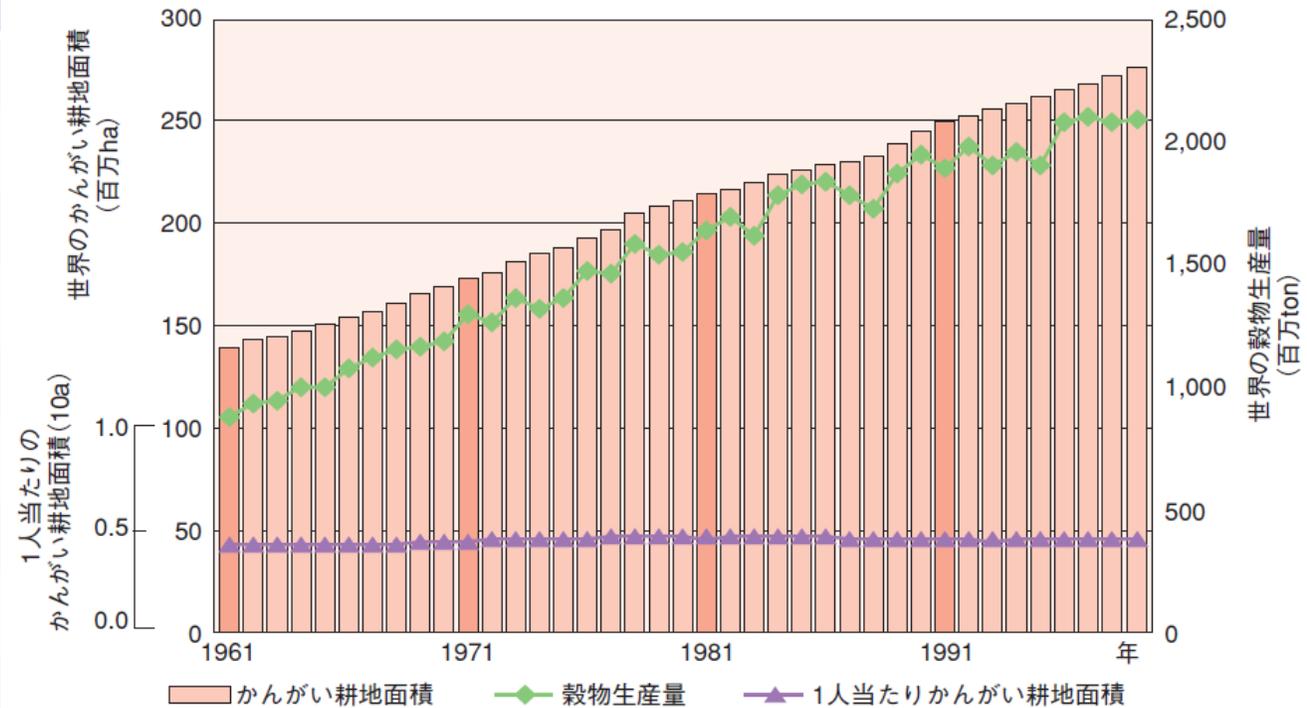
表10 種別農産物生産量

農産物		生産量 億トン			
		2001		2020	
		現物	穀物換算	現物	穀物換算
穀類	米	5.98	5.98		
	トウモロコシ	6.14	6.14		
	小麦	5.90	5.90		
穀物計		21.07	21.07	27.3	27.3
大豆		1.77	1.77	3.3	3.3
ジャガイモ		3.12	0.59	3.7	0.7
サトウキビ				18.9	2.3
総計		25.96+	23.43+		33.6

2001は木谷2006

図11

世界の穀物生産量とかんがい耕地面積の推移



資料：1) Statistical Databases (国連食糧農業機関)
2) World Population Prospects: The 2000 Revision, 2001年 (国連経済社会局人口部)

3.9 食料の需給

2020年の人口は78億人

健康で豊かなレベルの生活に必要な食料は換算穀物必要量は $78 \times .45 = 35.1$ 億トン
実際の生産量は 33.6 億トン(表10)

であるから、平均としてみれば生産量はほぼ足りているように見える。

但し、トウモロコシの10% (1億トン)、サトウキビの45%(穀物換算1億トン)はバイオ燃料に使われている。
これを差し引けば、2020年の食料生産は穀物換算で31.6 億トン、一人当たりで約400kg/y である。

4. 生活用水

表 1 1

地域	人口 (百万人)	一人当たり生活用水 m ³ /y	一人当たり生活用水 L/D
日本	127	137	375
アフリカ	792	23	63
アジア	3,667	47	128
ヨーロッパ	723	83	227
南北アメリカ	806	144	395
オセアニア	29	161	441
全体	6,021	62	170

木谷2006

左図に依れば、日本における水使用量は325 L/Dで天井に達している。350L/Dが十分な必要量とすれば

2030年 (83億人) で 1,060 km³/y
 2100年 (110億人) で 1,400 km³/y

図 1 2 世界各国の家庭での水使用量 (m³/人・年)

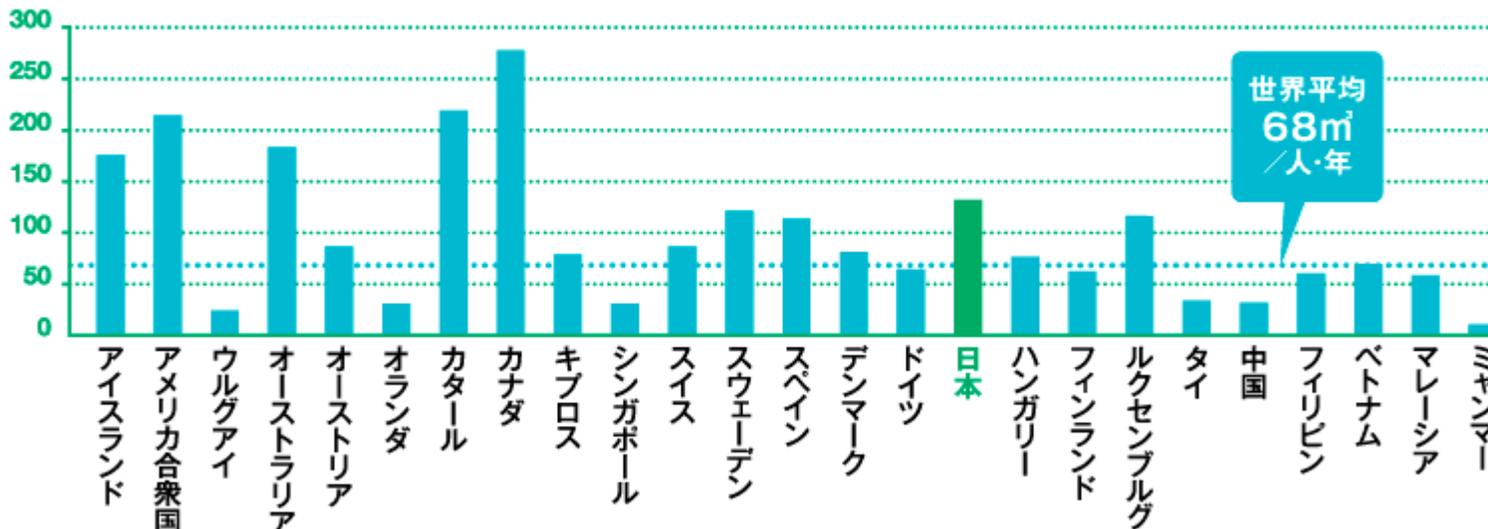
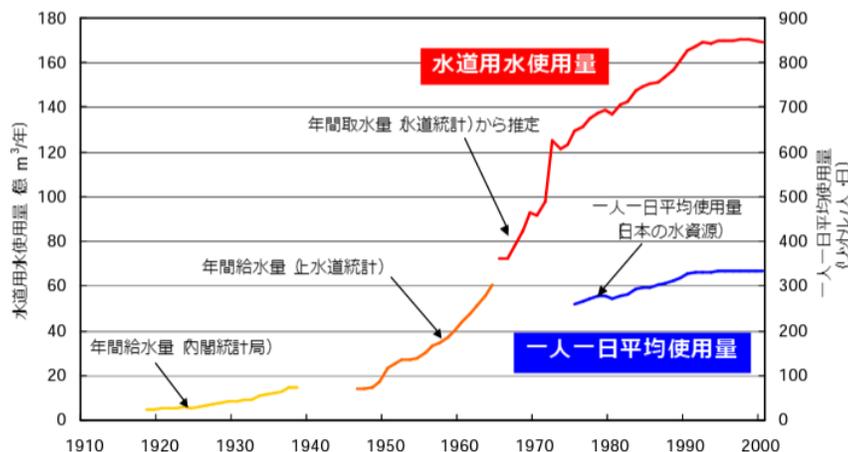


図 1 3 水道水使用量の推移

利用の内訳 (東京都)



資料:国土交通省水資源部「平成15年版 日本の水資源」、国勢調査及び人口推計年報

5. 工業用水

表 1 2

年度	工業用水 日本 km ³ /y	工業用水 世界 km ³ /y	生活用水 km ³ /y	全取水量 km ³ /y	資料
1996		700	320	3,440	国土交通省2003平成15年版日本の水資源
2000		827 776	384	3,973	香川大学 経済政策研究 石井2007/3 ロビン・クラーク「水の世界地図」
2000	使用量 55 取水量 11.7				経済産業省工業統計
2000	15.7	1,144	373	4,173	木谷2006
2006	使用量 52 取水量 11				サントリー水大辞典

工業用水の需要は、GDPのほぼ0.9乗に比例してして増えるという統計結果がある。

日本では水使用の内80%以上が回収再利用されているが、世界ではどれほど回収されているか不明である。今後の回収技術の普及次第では工業用水の使用量が減る可能性がある。

火力発電の冷却水は日本では海水が用いられており、上記には含まれない。産業における節水技術も進み、鉄鋼の水使用量はかつての1/4になったと言われる。日本では工業用水は減少傾向にある。世界ではかなりの増大傾向にある。多くの要因が絡むので、工業用水の需要レベルをどこに置くかは難しい問題である。

ここでは仮に **1,000 km³/y** としておく。

表12-1 日本の工業用水

		1970	2000	2007	2010	2016
		km ³ /y				
使用量	淡水	31	56	55.5	49.4	
	海水(製造業冷却)			15.6	15.2	
	海水(発電冷却)					54.2
総使用量				71.2		
淡水取水量	河川水			3.16		2.7
	地下水			3.39		5.9
	水道			5.61		1.1
淡水総取水量		16	12.0	12.2		9.8
海水総取水量						54.2
総取水量						63.1

1970 data 大和総研 国土交通省

2000 data 大和総研 国土交通省

2010 data 大和総研 国土交通省

2007 data 経済産業省工業統計調査(製造業のみ)

2016 data 太平洋セメントCSRレポート2017

WBCSD持続可能な開発のための世界経済人会議

発電冷却用海水必要量

海水温度差は7°Cが基準。

発電量 800TWh@2020=2.88×10¹⁵kJ

冷却量 7.2×10¹⁵kJ

冷却量 29.4×10³ kJ/m³

245 km³/y

6. 水の需要まとめ

健康で文化的な生活を送るために世界で必要な水の量

表 1 3 - 1 単位 km³/y

	2021	2030	2100
人口	78	83億	110億
農業用水	7,800	8,300	11,000
生活用水	1,000	1,060	1,400
工業用水	1,000	1,000	1,000
合計	9,800	10,360	13,400

表 1 3 - 2 単位 L/人D

	2030	2100
人口	83億	110億
農業用水	2,750	2,750
生活用水	350	350
工業用水	330	250
合計	3,430	3,350

表 1 3 - 3 単位 m³/人D

	2030	2100
人口	83億	110億
農業用水	1,000	1,000
生活用水	130	130
工業用水	120	90
合計	1,250	1,220

世界の水の供給能力

7. 地表上の水の存在量とその循環

表 1 4

7.1 存在量

水の種類	量 (千km ³)	全水量に対する 割合 (%)	全淡水量に対する 割合 (%)
●塩水			
海水	1,338,000	96.5	—
地下水のうち塩水分	12,870	0.94	—
湖水のうち塩水分	85.4	0.006	—
塩水 計	1,350,955	97.5	—
●淡水			
河川水	2.12	0.0002	0.006
湖水のうち淡水分	91.0	0.007	0.26
沼地の水	11.5	0.0008	0.03
小計	104.62	0.0075	0.3
地下水のうち淡水分	10,530	0.76	30.1
極地などの氷	24,064	1.74	68.7
土壌中の水	16.5	0.001	0.05
永久凍結層地域の地下の氷	300	0.022	0.86
生物中の水	1.12	0.0001	0.003
大気中の水	12.9	0.001	0.04
淡水 計	35,029	2.5	100
合 計	1,385,984	100	—

資料：I, A. Shiklomanov, Assessment of Water Resources and Water Availability in the World, 1996年（世界気象機関）

7.2 水の循環

図14

単位 兆トン/年 (= 千km³) /年

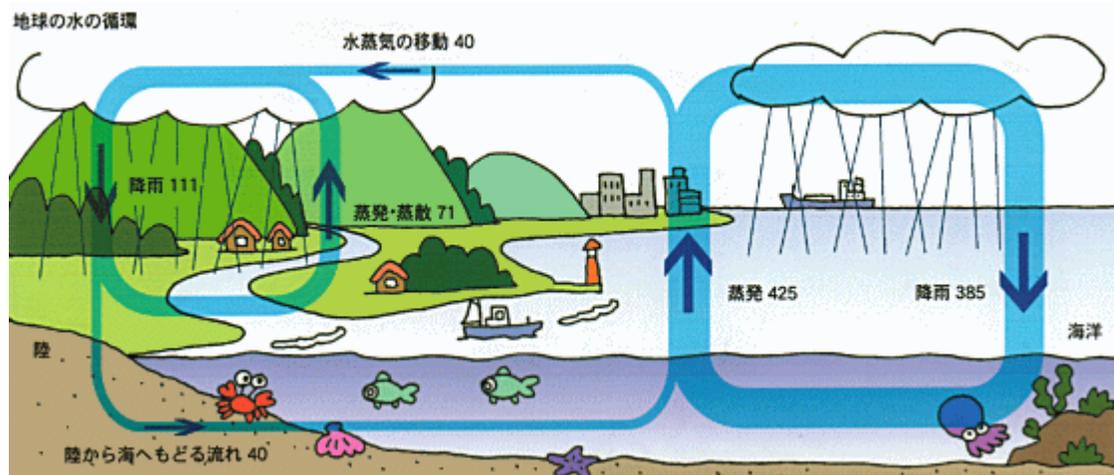


表15

リザーバー	滞留時間	
海洋	3,200年	4,000年
氷河	20~100年	
季節的な雪	2~6ヶ月	
土壌	1~2ヶ月	
浅層地下水	100~200年	
深層地下水	10,000年	
湖沼	20~100年	
河川	2~6ヶ月	10日?
大気	9日	12日

表16

7.2 水の循環 (続き)

図15 水循環の模式図



(南極大陸に関しては氷河のみ考慮)

資料: Oki and Kanae, Science, 2006

8.2 河川流量

表 1 8

流動状態	流動量 年平均 10 km ³ /年		
		図14	図15(1)
陸地への降水	107	111	111
陸地からの蒸発	71	71	65.5
地表流+地下水	36	40	45.5
(上記の内地下水)			(30.2)
海洋への降水	398	385	391
海洋からの蒸発	434	425	436.5

表 1 9

種別	Km ³ /y(1)	Km ³ /y(2)	Km ³ /y(3)
	図15(1)	(2)	(3)
降雨・降雪	111,000		
蒸発	65,500		
表層水 (河川)	15,300	36,600~ 43,900	42,500
地下水	30,200		2,100

- (1) 図15 Oki and Kanae
 (2) 西沢、『アマゾン生態と開発』
 (3) 木谷、『世界の水資源の現状とその利用』
 農業経済研究報告Vol.38,2006/10

西沢、木谷は地下水を非常に小さく見積もっているようだ。
 木谷に依れば、地下水量は河川水の5%である。

8.3 取水量の推移

世界の水使用量の推移 図16

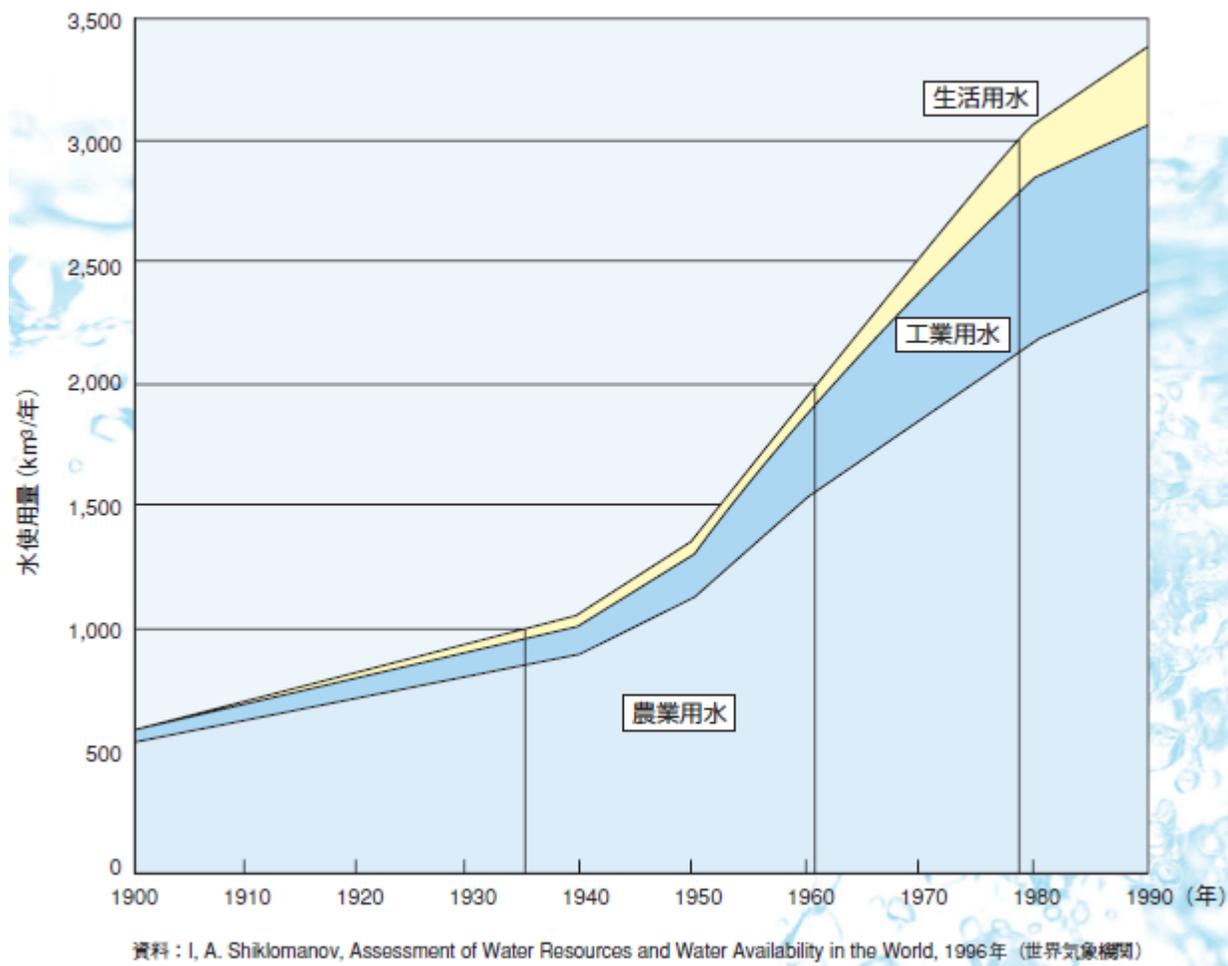
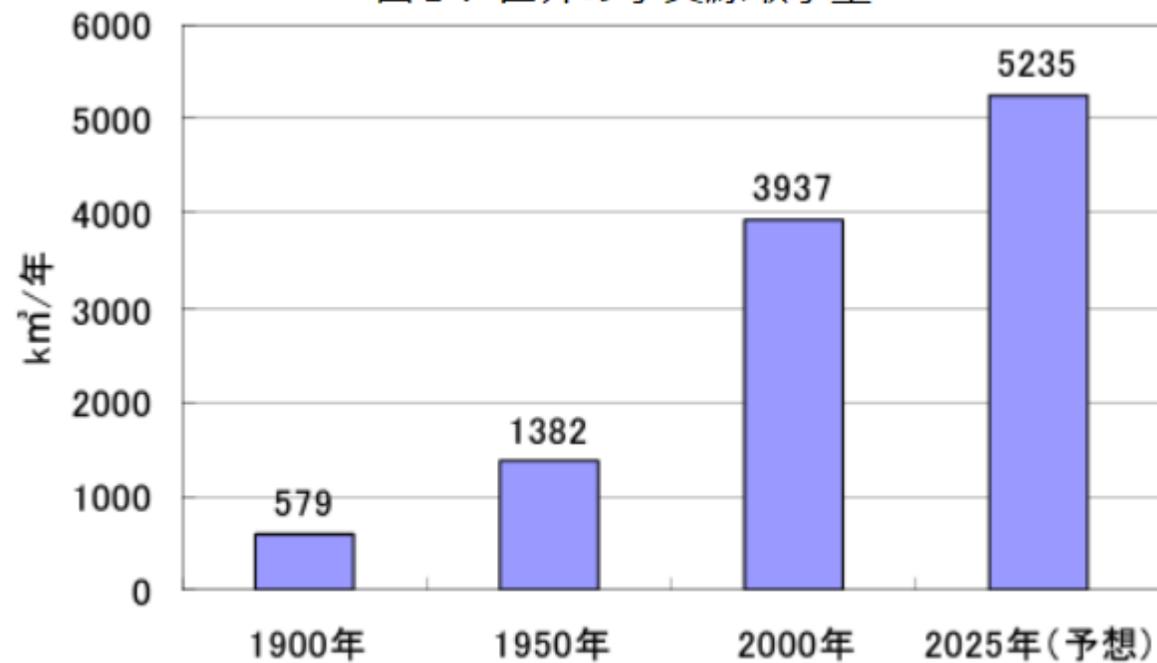


図17 世界の水資源取水量



(出所) ロビン・クラーク「水の世界地図」p.21 より作成

香川大学 経済政策研究 第3号 (通巻第3号) 2007年3月

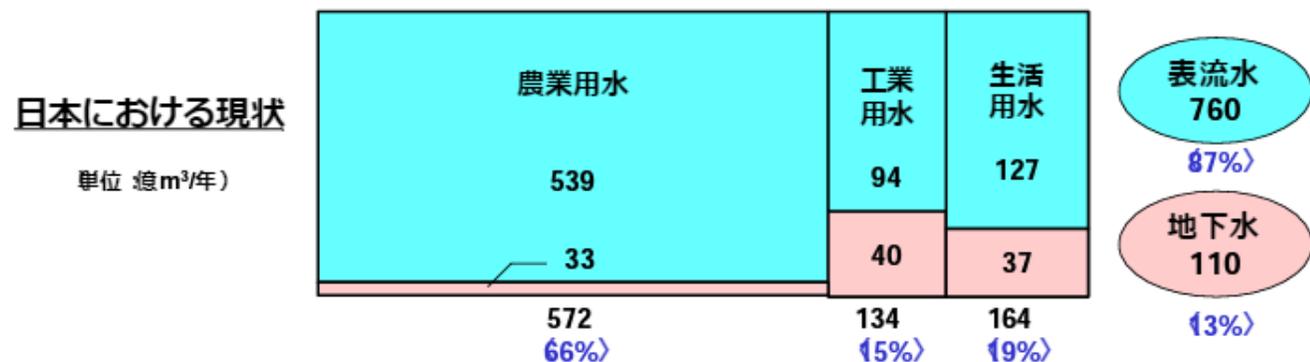
「世界の水資源と農業用水を巡る課題の解決に向けて」第一部

8.4 日本及び世界における取水量の内訳

図18

日本及び世界における水利用

●水利用状況は、農業用水、工業用水、生活用水という用途別に把握されている



資料：国土交通省水資源部「平成15年版 日本の水資源」



資料：I.A. Shiklomanov「Assessment of Water Resources and Water Availability in the World」WMO、1996

表20 水の使用量(取水量)

用途	Km ³ /y		
	WMO 1996	WMO 1995	図17 2000
農業用水	2,420	2,504	
工業用水	700	714	
生活用水	320	354	
計	3,440	3,572	3,937

表流水（河川水）、地下水の他に雨水が供給源としてあるはずだが、雨水が河川に注がれる前に耕作地、牧草地でどれだけ利用されたかの統計は見つからない。

7. 水の需給まとめ

2100 世界中で 110 億の人間が中位の食生活をするのに必要な水の量は 13,400 km³/y

2030 で 83億の人間が必要とする水の量は 10,360 km³/y である。

2021現在78億の人間が必要とする量は 9,800 km³/y (スライド20,表13-1)

河川流量 (地下水を含む) 36,600～43,900 km³/y は必要水量13,200 km³/y(天水を除く)を越えて充分あると思われるのに、実際の河川からの取水量は 1990現在で 3,400 km³/y (図16)、1996現在で 3,440 (表20)、2000現在で 3,937(表20)、表11)で内農業用水は 1,940 km³/y にとどまっている。これは河川水全量の8～11%に過ぎない。これはなぜであろうか。

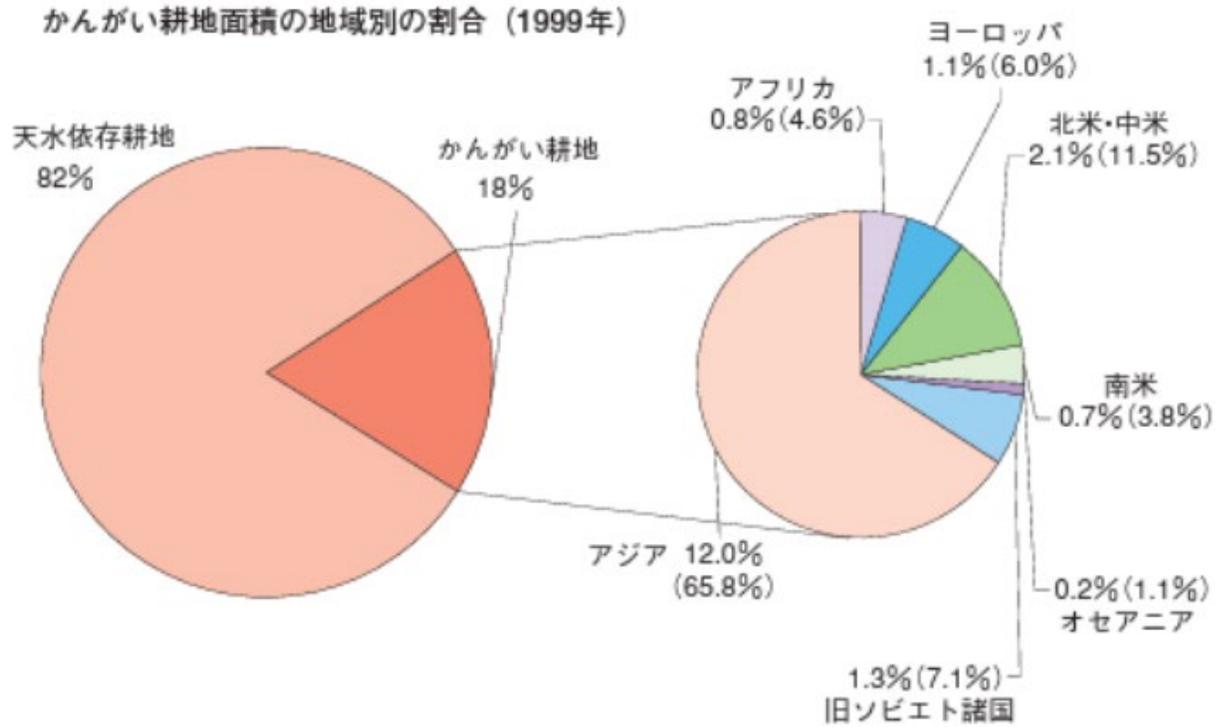
これは水資源が、時間的空間的に偏在していることが主な要因である。

農地の生産性と 必要な農地面積 (幕間)

8. 農地の生産性

8.1 灌漑耕地の生産性

図19



() 内数値は、全かんがい耕地に占める各地域ごとの割合である。

資料：Statistical Databases (国連食糧農業機関)

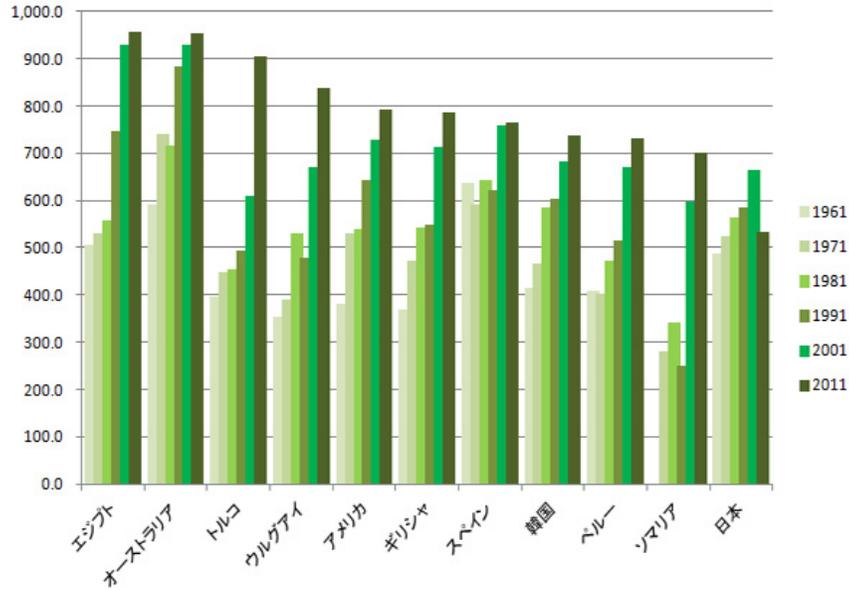
灌漑耕地は全耕地の18%を占めるに過ぎないが、世界の食糧生産量の4割を生産していると言われる。

灌漑耕地での生産力は天水依存耕地の三倍程度あることになる。

農業用水が充分あれば、食料生産量は飛躍的に増えることが明らかである。

8.2 農業技術の進歩

図 20-1 コメ kg/10a



近年の農業技術の進歩は著しく、単位面積当たりの収量は飛躍的に増大している。これを見れば、耕地の減少はそれほど心配する必要は内容である。

しかしながら、後に見るように近年は耕地の荒廃が甚だしく、反収増大は地下水の汲み上げすぎ、耕地の酷使を伴っている可能性がある。

図 20-2 小麦 kg/10a

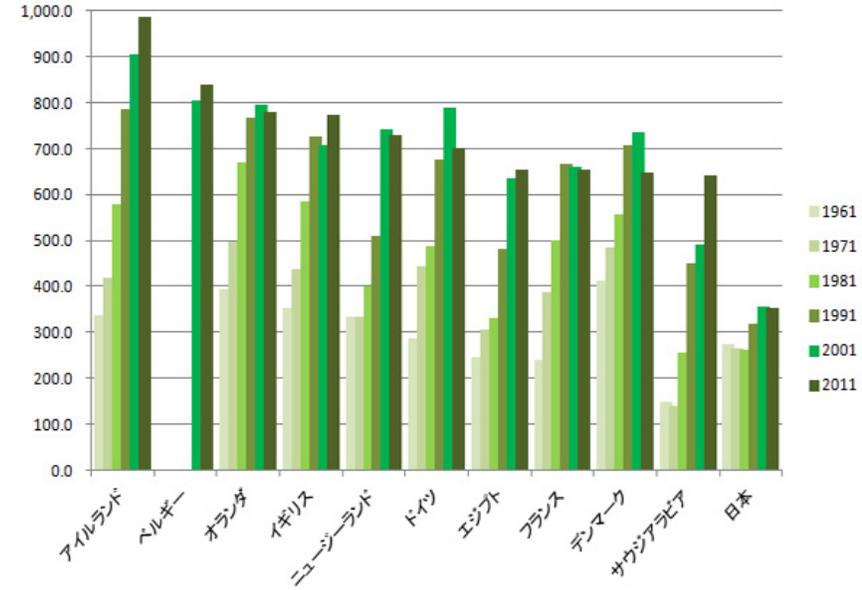
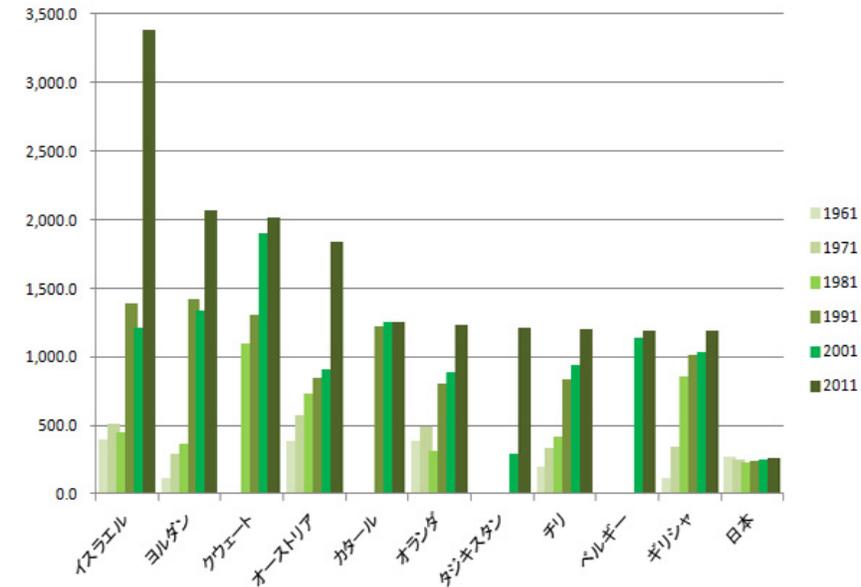


図 20-3 トウモロコシ kg/10a



反収の増加は「緑の革命」による？ 遺伝子組み換え品種による？

緑の革命で、1960～70年代のアジア、ラテンアメリカで、新しく品種改良された稲・麦・とうもろこしなどの普及がすすみ、単収が劇的に向上した

耐肥性：肥料の投入量が増えたとき、それに耐えて育つ性質

肥料反応性：肥料の投入量が増えたとき、それに応じて実りがよくなる性質

米国を含む世界で遺伝子組み換え作物(GMO)の商業的な生産が開始されたのは1996年とされており、GMOは直近約15年間で米国のトウモロコシ生産において一気に導入が進み、現在では同国のトウモロコシ作付面積の9割以上でGM品種のトウモロコシが生産されている。トウモロコシにおいて遺伝子組み換えにより付与される特性は、大きく分けて**害虫抵抗性(Bt)**と**除草剤耐性(Ht)**の2つあり、近年では両方の特性を兼ね備えたスタック品種が大半を占めるようになっている。

GM品種の導入が近年の単収の増加に寄与していることは間違いなさそうである。コラム1図のように、GM品種の作付割合は天井に達したように思えるものの、近年では、干ばつに強い耐干性の品種などが新たに開発され広がり始めていることから、同国におけるトウモロコシの増産余力は底が見えたとは言いがたい状況にあり、まだまだ奥深い底力が秘められている。

8.4 牧草地の生産力

表4に依れば、草地は全世界で 32,140 千km² あるが、その半分が利用可能とする。牛と綿羊の頭数はほぼ等しい（他の家畜は無視小）。牛の内半分が肉牛であったとすると、肉牛用の草地は約8,000千km²となる。ここで2018年の世界牛肉 7,200 万トンの食肉を生産するとする。肉牛の50%が食肉とすれば、肉牛生産量は14,400万トンである。

これは 18 t/km² すなわち 180 kg/ha に相当する。

これは温帯自然放牧の中位に相当する。

十分な水さえあれば、十分な広さの牧場はあると考えられる。

表 21 草地からの肉牛増体量 (kg/ha/年)

	温 帯	熱 帯 (乾季5～6カ月)	熱 帯 (生育期長い地域)
自然草地			
自然放牧	100 - 400	10 - 80	60 - 100
マメ科草追播・施肥(過燐酸)	200 - 500	120 - 170	250 - 450
人工草地			
混播・施肥(過燐酸)	400 - 1200	200 - 300	300 - 600
施肥(窒素)	700 - 1400	300 - 500	400 - 1200

(Simpson and Stobbs, 1981)

以上から、食料生産のネックは土地よりも水だと考えることができる。

水資源 需要と供給のアンバランス 現状の問題

9. 水資源の偏在

水資源は以下の要因で著しく偏在している。

1. 大河川が農業に適さない森林地帯、寒冷地帯を通過している。
2. 降雨が地域的にかなり偏っている。
3. 季節変動が大きい。

9.1 大陸による偏在

図 2 1 世界の砂漠の分布



世界の砂漠の面積はおよそ19～34億ヘクタール（陸地面積の13～23%）で、図 2 1 の濃い赤と薄い赤を合わせた部分です。

Global Deserts Outlook (UNEP, 2006)

鳥取大学乾燥地研究センターHP「砂漠化の原因・現状」

9.1 広大な砂漠地域と乾燥地帯

表 2 2 大陸別水資源量

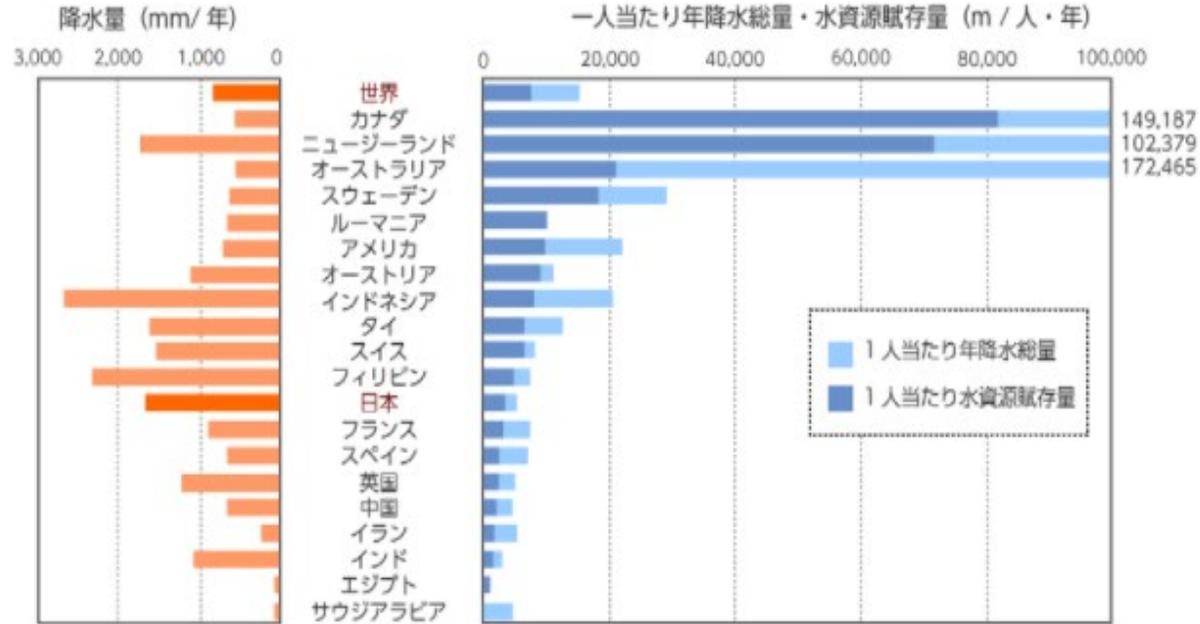
地域	人口 (億人)	取水可能量 km ³ /y	面積当たり り流量 Km/y	一人当たり 取水可能量 m ³ /人y	一人当たり 取水量 m ³ /人y
アジア	36.673	11,757	0.264	3,206	648
アフリカ	7.921	3,993	0.134	5,041	264
ヨーロッパ	7.168	6,560	0.644	9,152	538
南北アメリカ	8.062	18,562	0.436	23,024	938
オセアニア	0.289	1,518	0.178	52,516	917
日本	1.271	424		3,332	
計	60.123	42,390		7,050	

地域における偏り（「世界における水資源の現状とその利用」木谷忍、農業経済研究報告2006-2010）

9.2 国、地域による偏在

図 2 2

一人当たり年降水量と水資源量



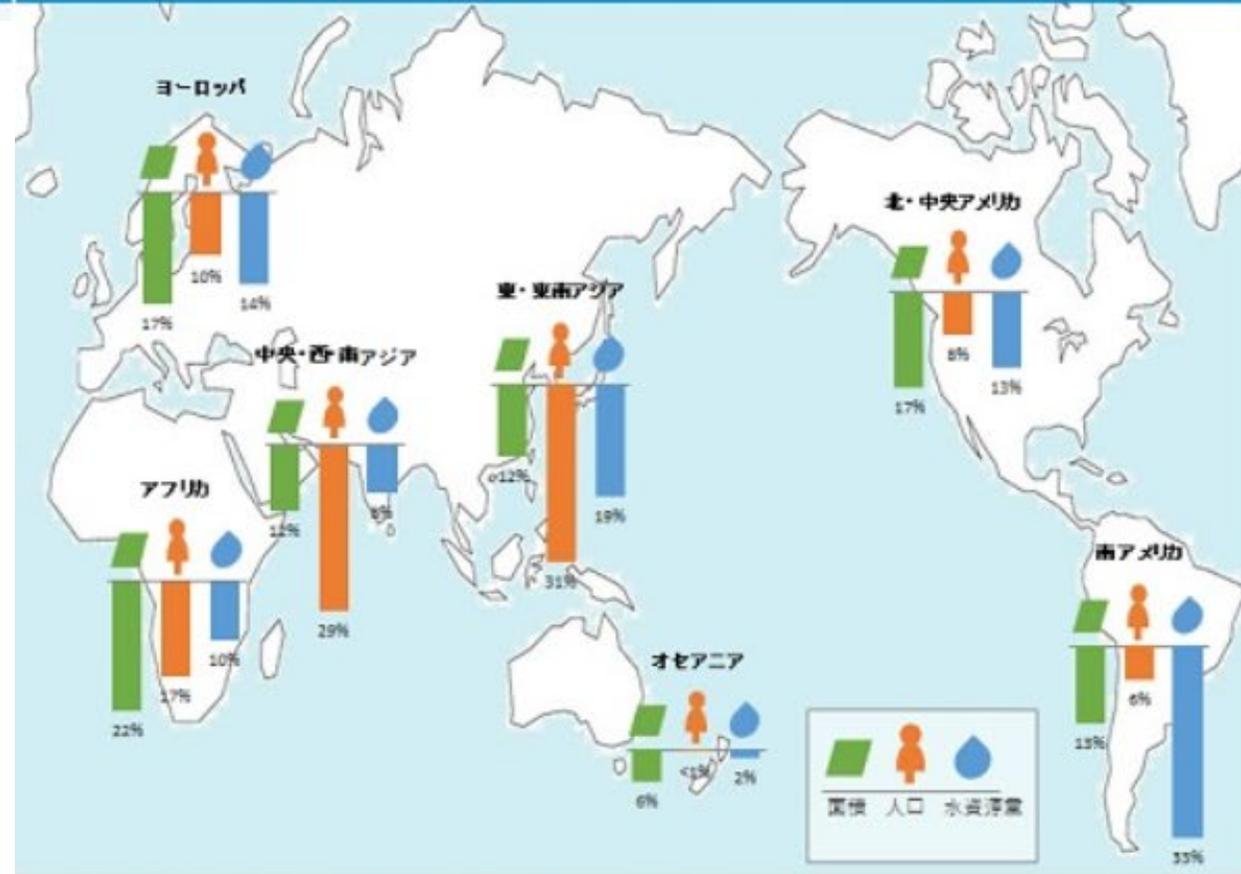
(注)

1. FAO (国連食糧農業機関) [AQUASTAT] の 2016 年 12 月時点の公表データをもとに国土交通省水資源部作成
2. 1 人当たりの水資源賦存量は、[AQUASTAT] の [total renewable water resources (actual)] をもとに算出
3. 「世界」の値は [AQUASTAT] の [total renewable water resources (actual)] が掲載されてる 182 国による

国土交通省水管理・国土保全局水資源部 平成28年度版 日本
の水資源の現状 より引用 2018年11月9日閲覧

図 2 3

世界の地域別水資源量と人口および面積の比較



FAO (国連食糧農業機関) 「AQUASTAT」の2020年10月時点の公表データを基に作成

賦存量

ある資源について、理論的に導き出された総量。資源を利用するにあたっての制約などは考慮に入れないため、一般にその資源の利用可能量を上回ることになる。

表 2 3 国別 水資源量

国名	①面積	②人口	③平均降水量	④降水総量= ①×③	⑤資源量	⑥一人当たり資 源量=⑤/②
	1000km ²	千人	mm/y	k m ³ /y	k m ³ /y	m ³ /人 y
カナダ	9,971	30,757	537	5,552	2,902	94,353
ブラジル	8,547	170,406	1,120	15,236	8,233	48,314
ロシア	17,075	145,491	460	7,855	4,507	30,980
オーストラリア	7,741	19,138	534	4,137	492	25,708
アメリカ	9,629	283,230	736	7,087	3,069	10,837
フィリピン	300	75,653	2,348	704	479	6,332
フランス	552	59,238	867	478	204	3,439
日本	378	127,096	1,718	649	424	3,332
中国	9,598	1,282,437	627	6,018	2,897	2,259
インド	3,287	1,008,37	1,083	3,559	1,897	1,880
エジプト	1,001	67,884	51	51	58	859
サウディアラビア	2,150	20,346	59	127	2	118
世界	133,935	6,060,580	880	119,000	55,293	9,124

FAO「AQUASTAT2003」面積、人口は2000、平均降水量は1961-1990平均

9.3 河川－1 耕作不適地を通っている大河もある

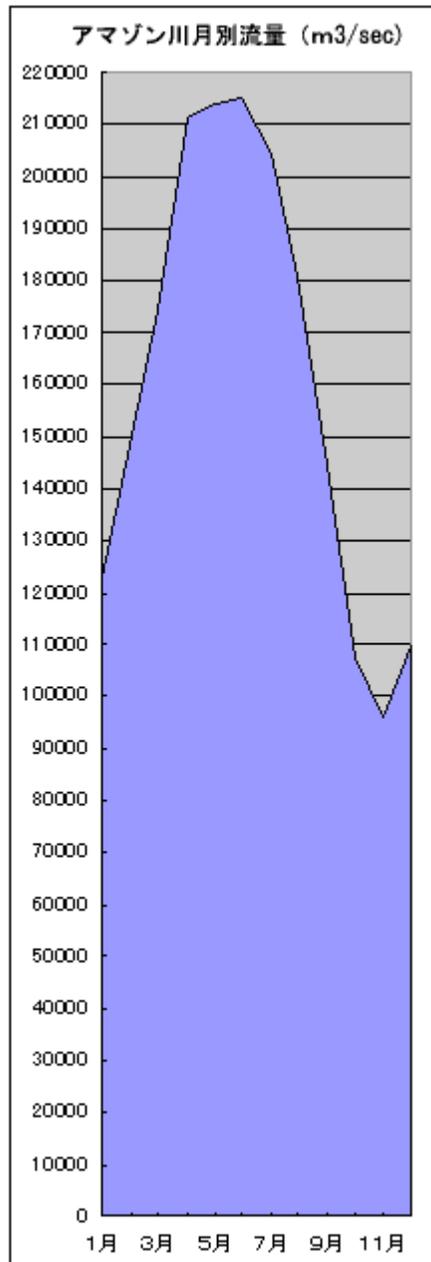
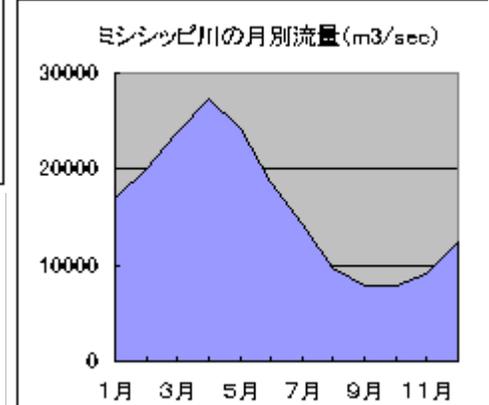
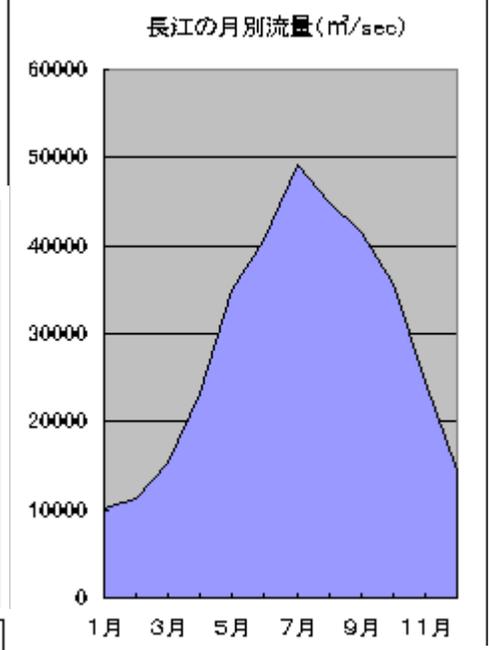
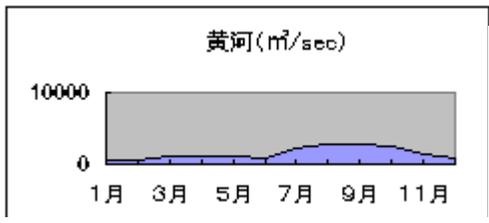
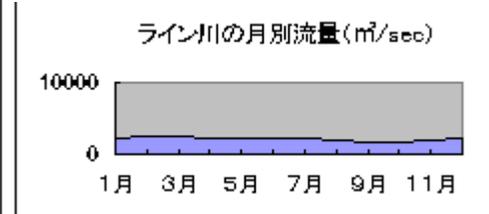
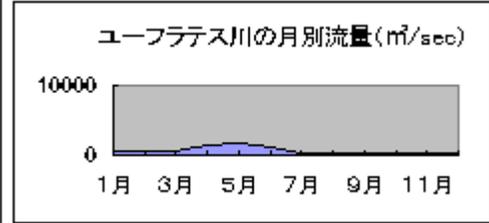
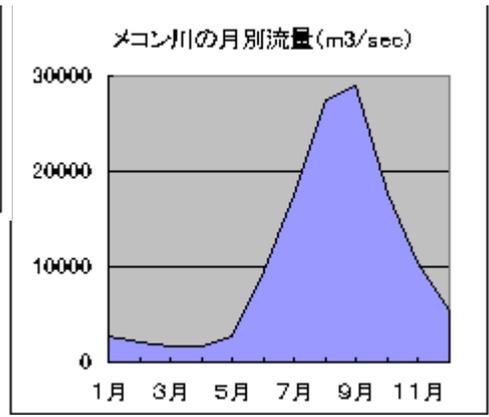
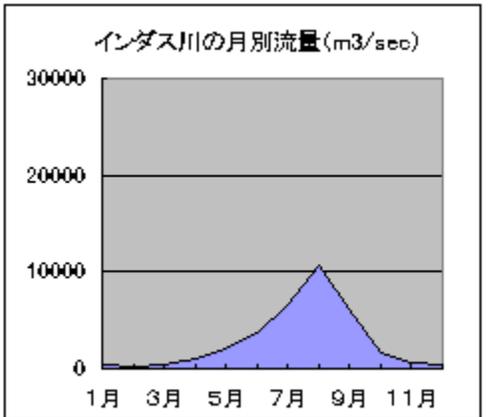
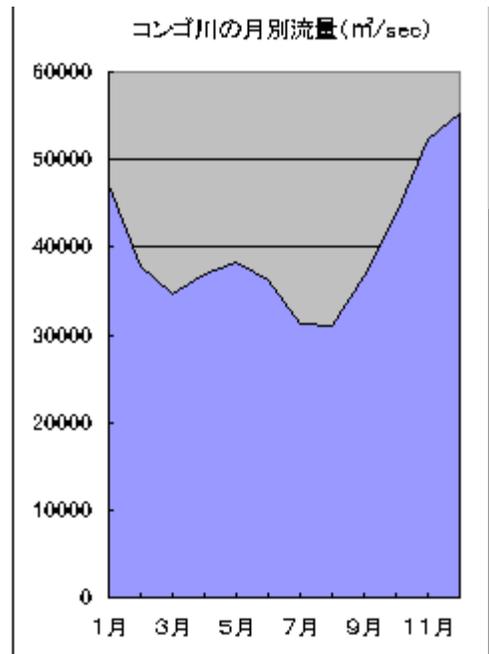
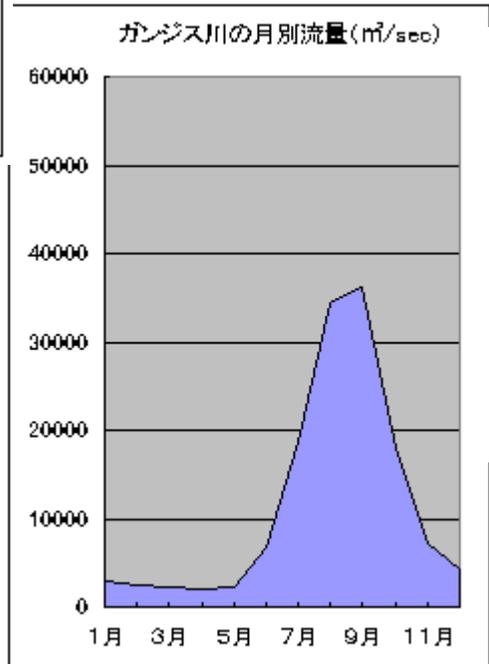
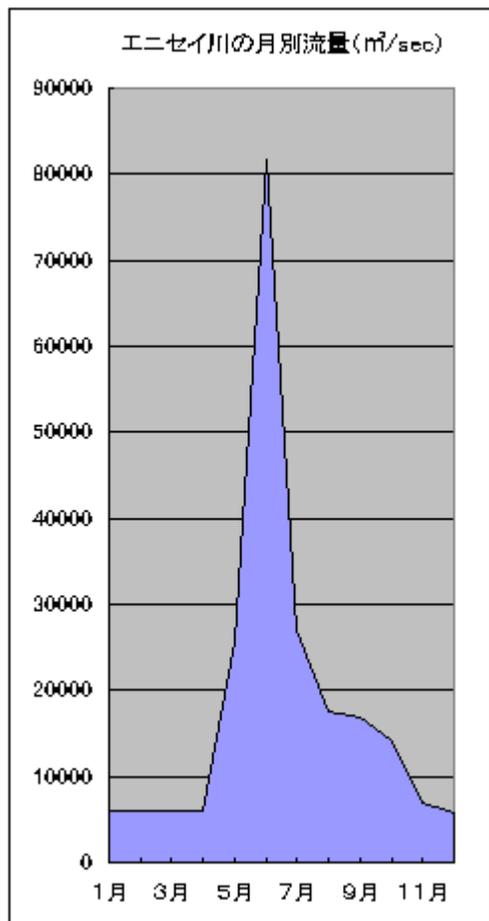
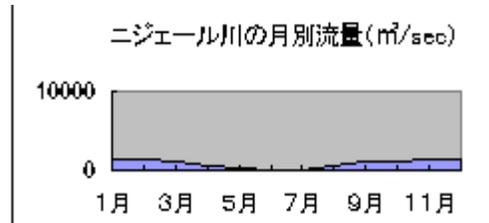
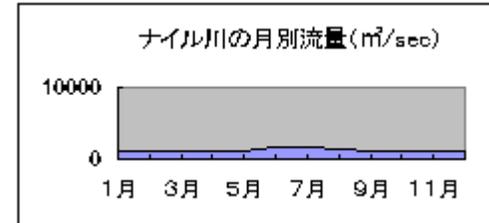
表 2 4

河川	流域面積 千km ²	長さ km	年平均流量 千m ³ /s
アマゾン	7,050	6,516	209.0
コンゴ(ザイール)	3,700	4,700	39.0
長江	1,800	6,300	30.9
ガンジス	1,730	2,545	18.5
ミシシッピ	3,200	3,779	18.0
メコン	795	4,200	16.0
ヴォルガ	1,300	3,700	8.0
インダス	1,165	3,200	6.6
ナイル	2,900	6,650	2.8
信濃川		367	0.5
その他			
全河川総流量			1,160～1,390 ⁽²⁾

個別流量はWikipedia

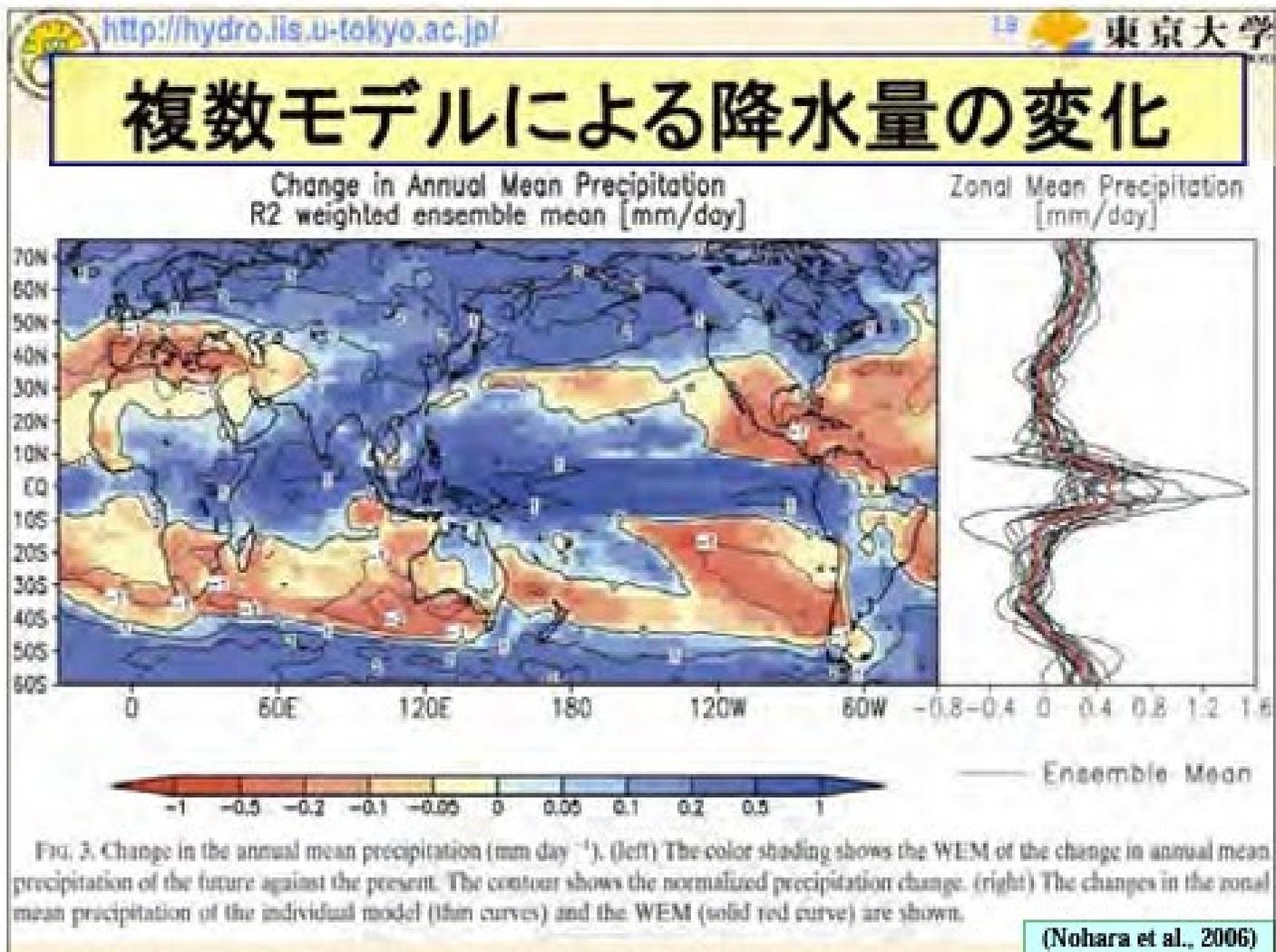
(2)Wikipedia(西沢、『アマゾン生態と開発』)によればアマゾンの流量は全河川総流量の15～18%。この数値を基にすれば総流量は1160～1390 千m³/s=36,600～43,800 km³/y となる。木谷もこの説。

9.3 河川-2 図2.4 河川流量の季節変動が大きい



1 0. 温暖化と水資源の関係

1 0.1 降水の地域差が拡大する



- 温暖化は一般的には雨量を増大させる。

しかしながら、地域的には雨量が減少する地域もある。乾燥地域で減少し、多雨地帯で増加する傾向がある。

地中海沿岸、中近東、アフリカ南部、アメリカの中西部では、降水量が減り、年間の河川流量も減ると予測されています。

サハラ砂漠さばくの南では、1930年以降干ばつが数年おきに現れるようになった。1985年以降に雨の量が少なくなってきている。特に1968～73年の干ばつは厳しく、大地がひからびた。地球の温暖化と何らかの関係があるのではないかとされているが、因果関係は不明。

図 2 5 人間活動を考慮した世界水循環水資源モデル 沖大幹

1 0.2 雨量の季節的変動が大きくなる。

日本では近年雨量の明確な変化は認められないが、集中豪雨など変動は明らかに大きくなっている。

1 0.3 降雪による貯蔵量が減少する。

降雪が降雨となり、山岳地帯での雪線が上がってきている。河川水の減少に繋がる。
アフガニスタン・クナール川（インダス川の上流）

1 1 現状の問題

1 1.1 河川水の過剰取水による耕作地の荒廃

(1) アラル海 20世紀最大の環境破壊と言われる。



アラル海は無謀な灌漑によって30年間の間に湖水面積は1/10となり、円の集積した土地が広がった。

アラル海の再生計画シルダリア川が注ぐ河口の南側にコクアラルダムが2005年に完成。20メートルほどだった水深は42メートルまで回復した。

元に戻ることはない。

(2) アメリカ、テキサス州コロラド川 灌漑用水のため、上流のフーバーダムとグレートキャニオンダムが建設され、下流が干上がってしまった。

取水のため、塩分濃度が高くなり、メキシコで深刻な農業被害が出た。脱塩施設で脱塩しているが、元には戻っていない。

(3) 黄河断流

1960年以前 50km³/y 寧夏、内蒙古の灌漑農地の拡大

1990 26km³/y 河口付近で15km³/y

黄河の水が河口まで届かない断流減少がしばしばおこるようになった。

大きなダムが1969,1987にでき、流れは安定した。

砂防ダム、森林造成で地表面流出はなくなったが、蒸散が増大、河川への流入が減った。

1 1.2 地下水の過剰汲み上げによる地下水位の低下

(1) アメリカ中西部のオガララ帯水層は2000年当時、すでに地下水の半分が失われていた。そのため、オクラホマ、カンザス、テキサスでは深刻な水不足、旱魃が起きている。(木谷2006)

コロラド鉱山学者インゲ・デ・グラーフによれば、2050年から2070年の間に枯渇する可能性がある。

(2) 同じくインゲ氏によれば、インドの上ガンジス、スペイン南部、イタリアでは2040年～2060年の間に地下水が底をつく。

48

註) 枯渇 地下水位が90m以下になり、汲み上げ費用が高価になりすぎる時点を枯渇という。汲み上げ電力原単位は、0.25 kWh/m³。アメリカでは電力費が安いとしても、1 ¥/m³になる。総コストは2～3円/m³になると思われる。農業用水としては限界コストだろう。

(5) 中国華北平原では地下水位が 1m/年低下している (2012.12.25 National Geographic News)

1 1.3 持続不可能な灌漑農地

英国ユニバーシティ・カレッジ・ロンドンの研究者キャロル・ダーリンによれば、灌漑農地の少なくとも20%が持続不可能な状態にあるという。

1 1.4 砂漠化

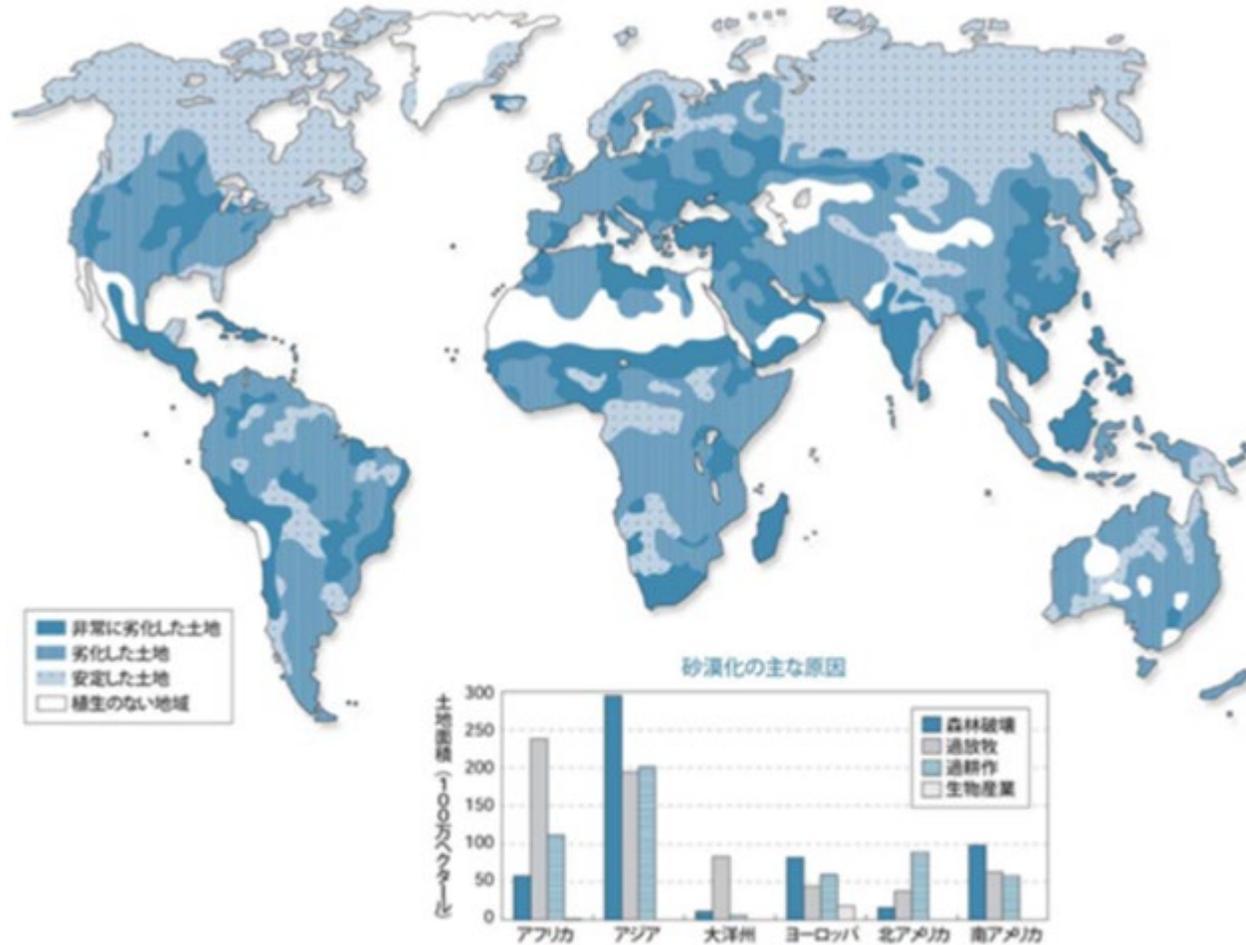


図26 砂漠化危険地図

* 出典4：JICA「世界の砂漠化」（2006）

森林伐採による砂漠化の原因

熱帯雨林を中心に、森林伐採などが原因で年間730万haの森林面積が減少。森林伐採による砂漠化は、木々の減少により地中の保水力がなくなり、その後に雨水が土を流してしまう「水食（すいしょく）」が原因で起こる。

アフリカ

中部・西部に熱帯雨林が集中。これらの地域は人口が増加し、現在もハイペースで森林が伐採されている。食料や燃料を確保するために伐採が行われ、伐採後には焼き畑が盛んに行われます。

人口増加による食料不足から、休耕期間を短縮し土地が復元する前に耕作しなければならない状況

オーストラリア

ユーカリ林などの自然植生を伐採し一年生作物の農地や牧草に転換したことが要因で、塩害による砂漠化が深刻となった。農地面積は2000年時点で465万haあり、2050年には1366万haまで拡大する。

東南アジア

東南アジアでは、焼き畑に加え、木材の輸出増に伴う過伐採が原因で、現在も森林の減少と砂漠化が進んでいます。日本、アメリカをはじめとする先進国や、中国、インドなど新興国からの需要も多く、輸出増に対応するための伐採が収束する気配はありません。

森林伐採の原因

「人口増加と貧困を背景に焼畑が拡大して熱帯林が減少した」という広く普及した通説は、約20年にわたる研究成果により見直しが進んだ。農地拡大がおもな原因であることに変わりはないが、焼畑原因説は影をひそめ、代わって商品作物や輸出用農産物の生産拡大の影響が重要視されている。人口増加と貧困の影響については、多くの実証研究により検証がなされたものの、賛否両論で議論が分かれている。道路建設の影響は多くの実証研究で裏付けられており、道路建設が森林減少を加速する仕組みについては生産物の輸送コストの低下による熱帯奥地の土地収益性(地代)の上昇が指摘される。

日本森林学会誌 9 2 巻(2010)「総説、熱帯における森林減少の原因」

水資源確保のための対策

1 2 水資源確保のための方策

水資源が空間的・時間的に偏在していることを所与条件として対策を考える必要がある。

積極的方策

- 淡水の移送

- 河川からの給水強化（取水堰、用水路）

- 淡水の貯蔵

 - 植林による保水

 - 降雪による保水

 - ダムに依る貯水

- 淡水の製造

消極的方策

- 農業用水の節水

- 工業用水の節水

これらの内どれを取るかは、その地域の実情に合わせて取るべきであり、どこでもいつでも適用できる共通の方策があるわけではない。

1 2. 1 水コストの目安

生活用水 100~200 円/m³
 工業用水 10 円/m³
 農業用水 0.1~1 円/m³ ?

日本の農業用水 3¥/m³ (木谷2006, 沖ミツカン水の文化交流フォーラム2004)

表 2 5 作物における水原価の試算

	国際価格 ¥/kg	水原単位 m ³ /kg	0.1 ¥/kg		1 ¥/kg	
米	50	3.6	0.36	0.7%	3.6	7%
大豆	50	2.3	0.23	0.5%	2.3	5%
小麦	20	2	0.20	1.0%	2.0	10%
ともろこし	20					

(3)続き

表 2 6 パイプラインによる輸送費

	375万m ³ /y (1)	62.5万m ³ /y (2)	125万m ³ /y (2)	625万m ³ /y (2)	2500万m ³ /y (2)	1 km ³ /y 1,000,000万m ³ /y (3)
	¥/m ³ ・100km					
設備費(20年償却)	60					
ポンプ電力費	7					
修繕費	12					
人件費など	10					
税保険	24					
金利(6.5%)	53					
計1965価格(4)	166	828	324	97	43	
計2020価格(5)	226	1,130	440	131	58	12

(1)石油・天然ガスのパイプラインと工業開発(1964.10.7)

野口研究所大島幹義

(2)M.E.Hubbard:1960世界動力会議資料

(3) 式(*) D=3.6m

(4) 360¥/\$

(5) 金利は0と仮定

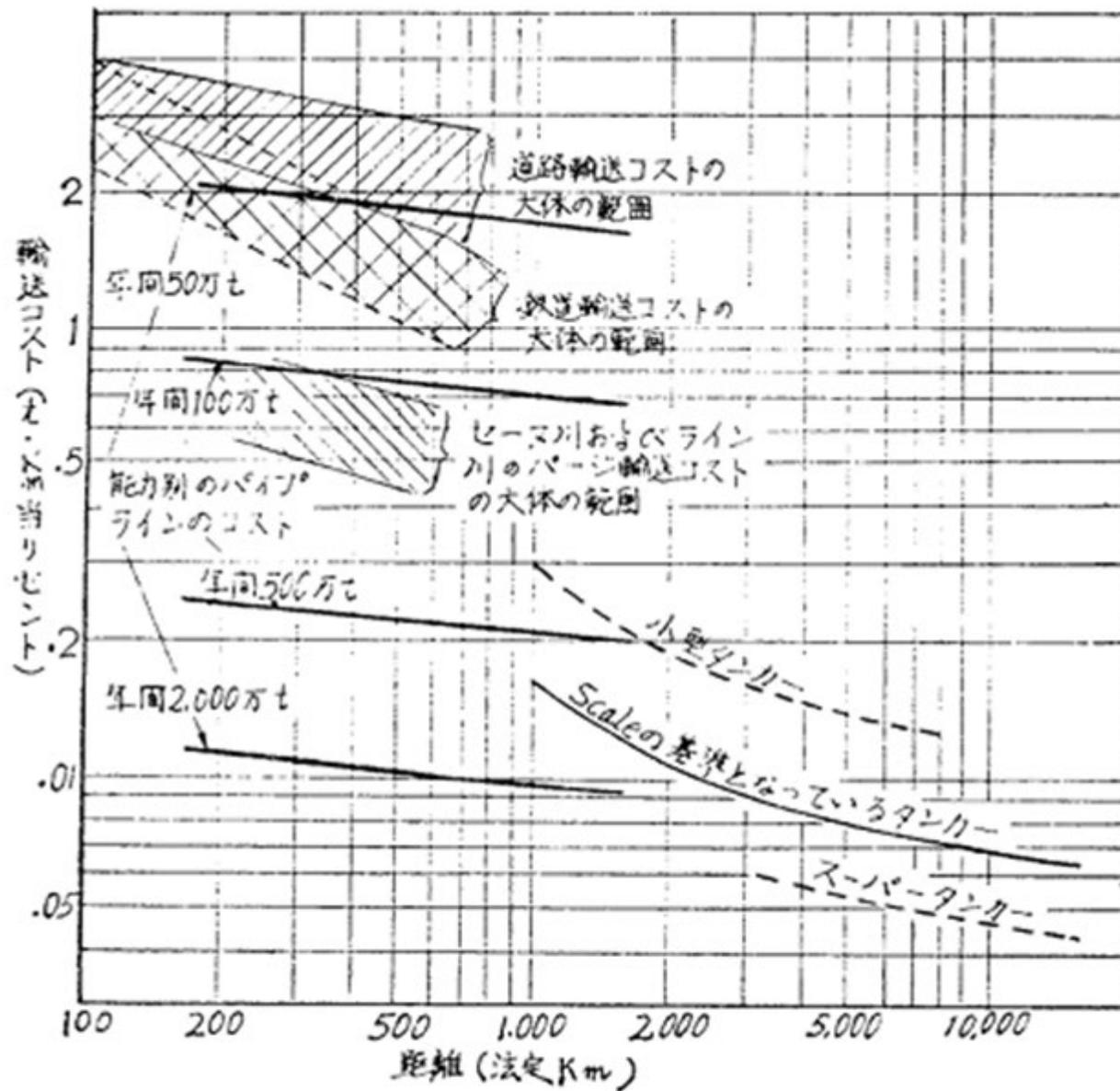


図27 輸送距離からみた各種輸送方法のコスト比較

図27からおおよそ

$$C = 725Q^{-0.783}$$

C : コスト ¥/m³・100km
為替物価修正後

Q : 流量 百万m³/y

石油・天然ガスのパイプラインと工業開発
(1964.10.7)

野口研究所大島幹義

M.E.Hubbard:1960世界動力会議資料

(3) パイプライン輸送コストの検討

Hubbardの結果は流量依存性が大きすぎるように思えたので、検討してみた。

$$\text{最適経済速度} \quad u = 2.5D^{0.17} \quad [\text{m/s}]$$

$$\text{最適経済流量} \quad Q = 1.96D^{2.17} \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

$$= 61.8 \times 10^6 D^{2.17} \quad [\text{m}^3/\text{y}]$$

$$C_{total} = \frac{(C_{pipe} + C_{pomp})}{k} + C_{op}$$

$$C_{pipe} = \alpha LD^{1.3}$$

$$C_{pomp} = \varepsilon W$$

$$C_{op} = \gamma W \theta$$

$$C_{total} = \frac{\alpha L}{k} D^{1.3} + \left(\frac{\varepsilon}{k} + \gamma \theta \right) W$$

$$\Delta P_f = 4(0.0791) \text{Re}^{-0.24} \frac{L}{D} \frac{\rho u^2}{2}$$

$$W = \frac{Q \Delta P_f}{\eta} = \frac{0.1582}{\eta} \rho^{0.75} \mu^{0.25} u^{1.75} D^{-1.25} L Q$$

$$C = \frac{C_{total}}{LQ} = \frac{0.67\alpha}{k} Q^{-0.4} + \left(\frac{\varepsilon}{k} + \gamma \theta \right) \frac{1.492}{\eta} \rho^{0.75} \mu^{0.25} Q^{-0.44}$$

$$C \cong 224Q^{-0.42} \quad C \text{ は大体 } Q \text{ の } -0.4 \text{ から } -0.44 \text{ 乗に比例する。} \quad (*)$$

(4) 運河・用水路による輸送

これは古来から利用されてきた方法で、近距離であれば十分経済的に成り立つ。
しかし、地理的制約が大きい。

クナール川（アフガニスタン東部）



緑の部分が灌漑地区
耕地 16,500 ha
住民 65 万

用水量 4~5 m³/s

1 2.2 淡水の貯蔵

ダムによるもう行用水の貯蔵 アスワンダム、アスワンハイダムによってエジプトの農業用水は安定したといわれる。しかし、河口付近では、肥沃な土が堆積しなくなったり、地下水くみ上げによる塩害などが発生したりしているという（木谷）

1 2.3 淡水の製造

淡水化技術には

1. 逆浸透法(2005 世界シェア43%)
2. 多段フラッシュ法 (46%)
3. 多重効用缶法(11%)

がある。

淡水化コスト

1990年代	150¥/m ³
2005	50¥/m ³

2007サウディシユケイク 2 の応札

逆浸透法	1.03\$/m ³
多段フラッシュ	1.33 \$/m ³
多重缶法	1.38 \$/m ³

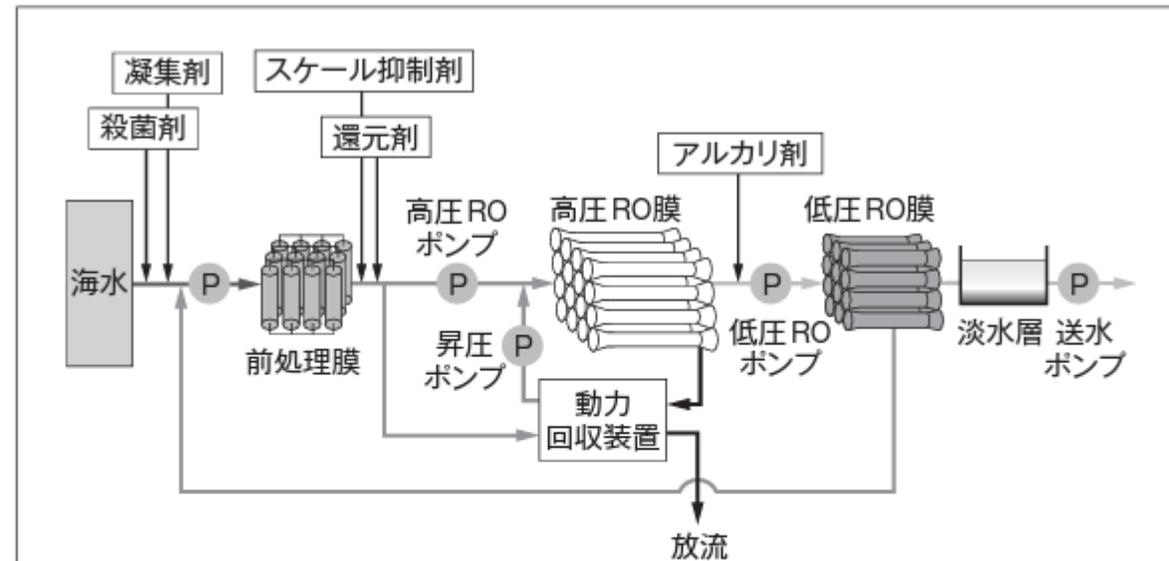


図1. 二段RO膜処理の海水淡水化プラントの概要 — RO膜による海水淡水化プラントの例である。純度の高い水質が求められる場合は、得られた淡水を更に低圧タイプのRO膜で二段処理する。

Outline of double-stage RO membrane type seawater desalination plant

Table 1 稼動または建設中の大規模逆浸透法海水淡水化装置

	国	プラント	容量 (m ³ /d)	受注年	プラント建設者	膜メーカー
1	イスラエル	アシュケロン	330,000	2003	IDE / Veolia	Dow
2	イスラエル	ハデラ	274,000		IDE	Dow
3	オーストラリア	シドニー	250,000	2007	Veolia	Dow
4	スペイン	トレビージャ	240,000		Acciona Agua	Dow
5	サウジアラビア	シュケイク 2	216,000	2007	三菱重工	東洋紡 / Dow
6	アルジェリア	レムセン- ハウナイネ	200,000	2008	Geida consortium	
7	アルジェリア	ハマ	200,000	2008	GE	東レ
8	アルジェリア	モスタガネム	200,000	2008	Inima	Dow
9	アルジェリア	ベニ サフ	200,000		AEC and Geida	
10	サウジアラビア	ラービグ	192,000	2005	三菱重工	東洋紡 / 日東電工
19	サウジアラビア	ヤンプ 2	128,000	1992	三菱重工	東洋紡

* インターネット等により調査

2009現在で 1,000,000 m³/dのプラントが計画されている。

淡水化技術の動向と課題
芹澤暁

Bull. Soc. Sea Water Sci., Jpn., 63, 8 – 14 (2009)

1 2.3 農業用水の節水

水耕栽培

植物工場 レタスは比較的弱い光で栽培可能なので実用化されている。
しかし、それでも露地物よりコストは高い。気候に左右されず、安定的に供給できる利点が
生かせる市場のみ。日本ではレタス以外の植物工場は、今のところ実用化されていない。
オランダでは葉物、トマト、イチゴ、ピーマンなど。

点滴灌漑 作物の根本だけに水を給水する
パイプを埋め込むなどをして、作物の根の部分に点滴灌漑する方法である。
通常25%蒸発によって失われる水分が5%にまで減らせる。
コスト 110万円/ha?

ホース灌漑 ホースに小さな穴を開けた「ホース灌漑」

土壌改良材 2008- モロッコ 多孔質発泡ガラス 水の使用料が半分、コスト？
廃ガラスと貝殻（炭酸カルシウム）を原料

空気中から水？ ソーラー発電システムと水生成装置elixir（エリクサー）
株式会社HIPOWER及び同社のグループ会社（以下、HPグループ）
13kWh/m³

1 2.4 工業用水の節水（略）

完