

地球をめぐる水の旅

－地球温暖化と世界の水問題－

社会基盤学コース4

北海道大学大学院工学研究院

環境フィールド工学分野

河川・流域工学研究室

教授 泉 典洋

<http://earth-fe.eng.hokudai.ac.jp/>

1

土木工学の体系

水資源工学

河川工学, 海岸工学

港湾工学, ダム工学, 防災工学

鉄道工学, 道路工学, 舗装工学

隧道工学, 橋梁工学, 耐震工学

交通工学

応用

水理学, 水文学, 地盤力学

構造力学, コンクリート工学

土木計画学, 交通計画学, 測量学

基礎

2

環境と人間 地球に暮らす

地球をめぐる水の旅

1. 地球温暖化
2. 世界の水危機
3. 増加する極端現象
4. 適応策の模索

3

www.iceagenow.com

TUNIN
Moscow
RUSSIA

地球温暖化

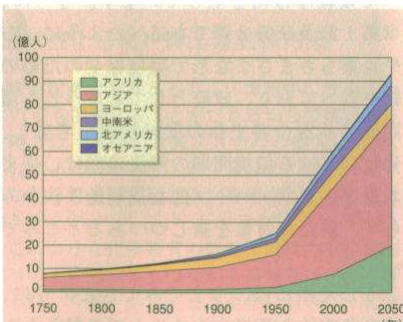


GLOBAL WARMING

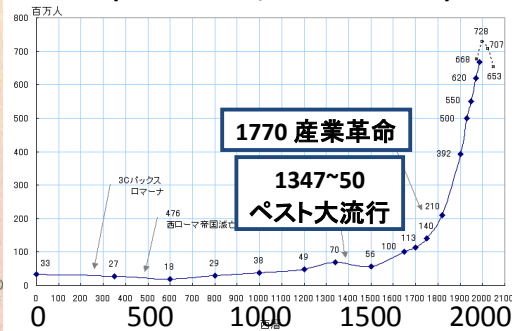
4

人口の変化

世界の人口の推移



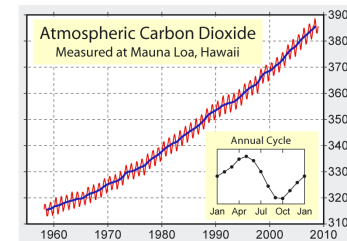
ヨーロッパの長期人口の推移 (横軸：西暦; 縦軸：百万人)



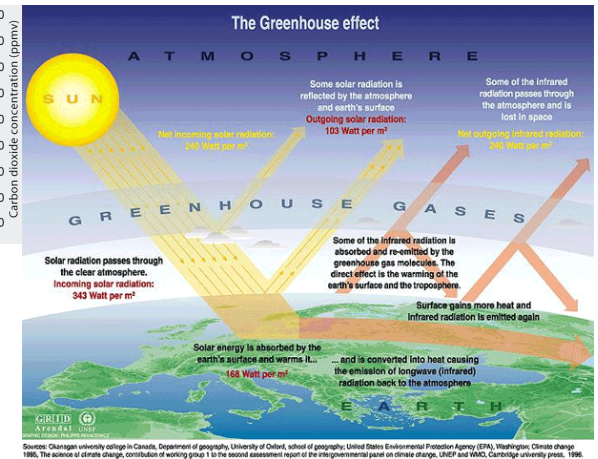
(注) 過去推移はワラル山脈以西の地域をヨーロッパとしている。点線は国連による将来推計人口(2004年改訂)。
(資料) T.G.ジョーダン「ヨーロッパ文化」(原著1989)、人口問題・社会保障研究所「人口統計資料集」2006年版

ヨーロッパ：産業革命と同時に人口が急激に増加
世界的には、1950年代からアジア・アフリカを中心に急増

地球温暖化の仕組み

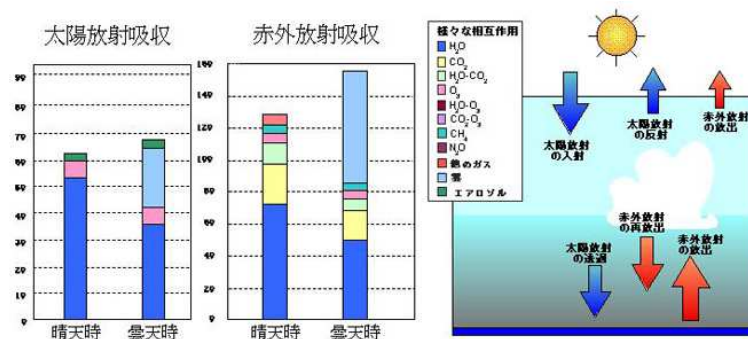


ハワイで観測された CO2の経年変化



6

大気中に放出される温室効果ガス



CO₂は無色無臭、不燃性、化学的に安定した気体であり、赤外線を効率よく吸収し、大気中に最も多く存在する温室効果ガス。その他に重要な温室効果ガスがメタン

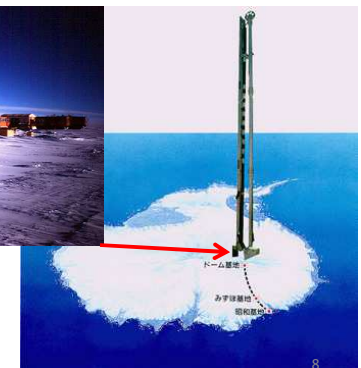
大気中に放出される温室効果ガスの変化

南極大陸の氷床コアから二酸化炭素データを収集

氷床コア

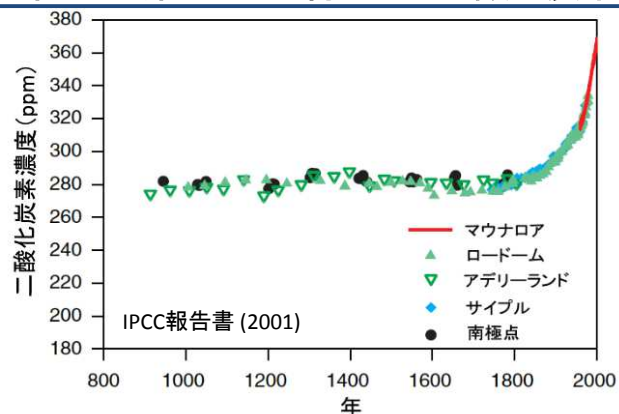


南極ドームふじ基地 (標高: 3810m; 年平均気温: -58°C)



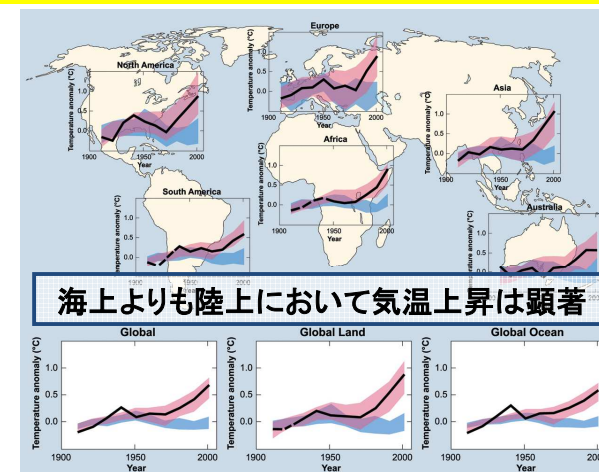
大気中に放出される温室効果ガスの変化

南極大陸の氷床コアから得られた二酸化炭素データ



産業革命(18世紀)から二酸化炭素濃度は上昇の一途

世界の気温の変遷 (大陸別)



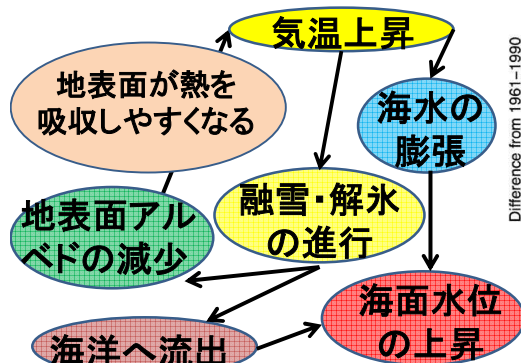
黒線: 観測値; 赤線: 再現計算(人間活動由来の温室効果ガスあり)
青線: 再現計算(人間活動由来の温室効果ガスなし)

IPCC - Climate Change 2007: Synthesis Report

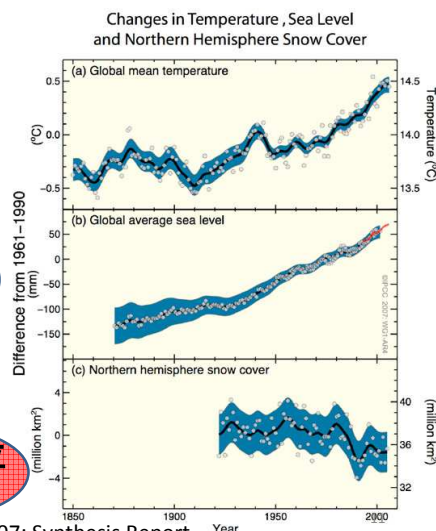
10

世界の気温, 海面水温, 積雪量の変遷

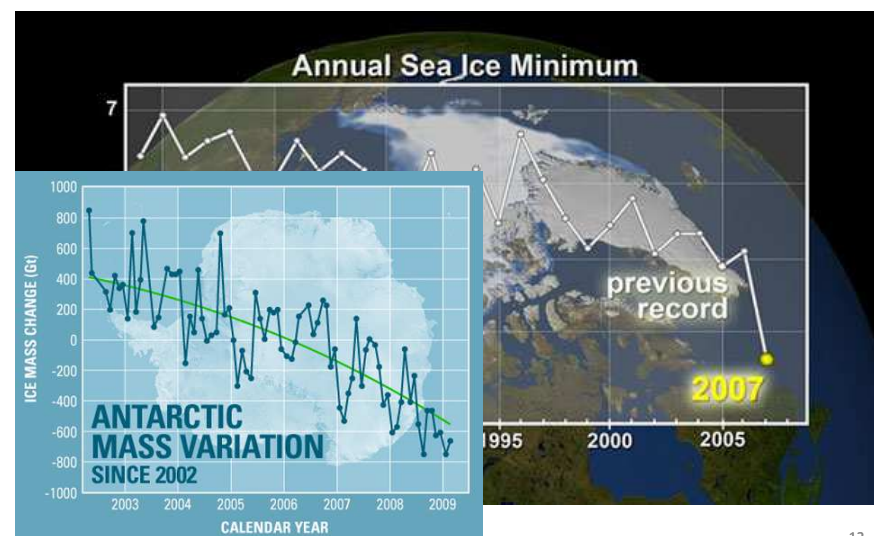
地球規模の気温上昇とともに、海面水位の上昇や積雪面積の減少が続いている



IPCC - Climate Change 2007: Synthesis Report

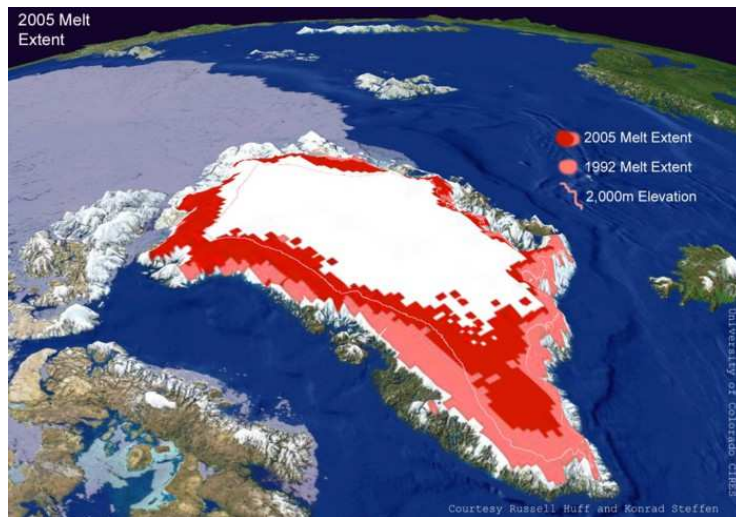


極域で進行する海水の減少 海水の経年変化



12

極域で進行する解氷 グリーンランド



13

地球温暖化に関する取り組みに対して ノーベル平和賞が贈呈



アメリカ合衆国元副大統領Al Gore氏
温暖化に関する映画「不都合な真実」で受賞

ラージェンドラ・
クマール・パチャウリーIPCC議長⁴

気候変動に関する政府間パネル IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)

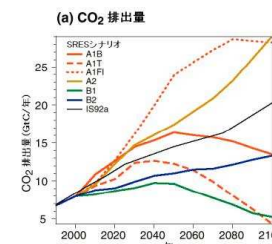
- 国際的な専門家で形成される, 地球温暖化についての科学的な研究の収集・整理のための政府間機構.
- 第1作業部会: **気候システム**及び**気候変動**に関する科学的知見の評価
- 第2作業部会: 気候変動に対する**社会経済システム**や**生態系の脆弱性**、**気候変動の影響**及び**適応策の評価**
- 第3作業部会: **温室効果ガス**の排出抑制及び気候変動の**緩和策の評価**

15

将来の温室効果ガス排出量シナリオを策定し、 全球気候モデルを用いて気候変動予測を実施

Atmospheric General Circulation Model (AGCM)

Simulate time evolution of land and atmosphere processes

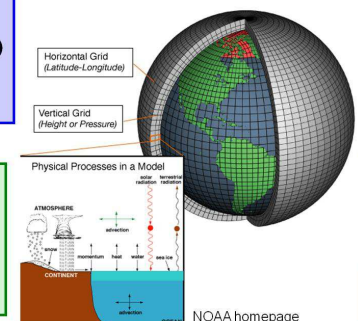


Atmospheric processes:

- Cloud physics (convective & Large scale)
- Radiative transfer
- Vertical diffusion
- Gravity wave

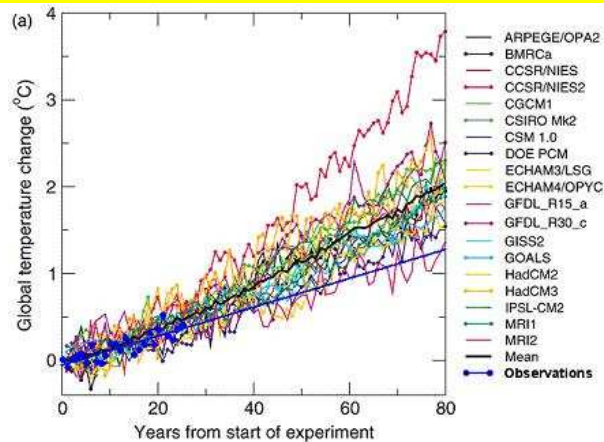
Land surface processes:

- Surface fluxes (LH&SH)
- Soil (moisture & temp.)
- Snow (temp. & albedo)
- Vegetation (transpiration)
- Runoff (surface and subsurface)



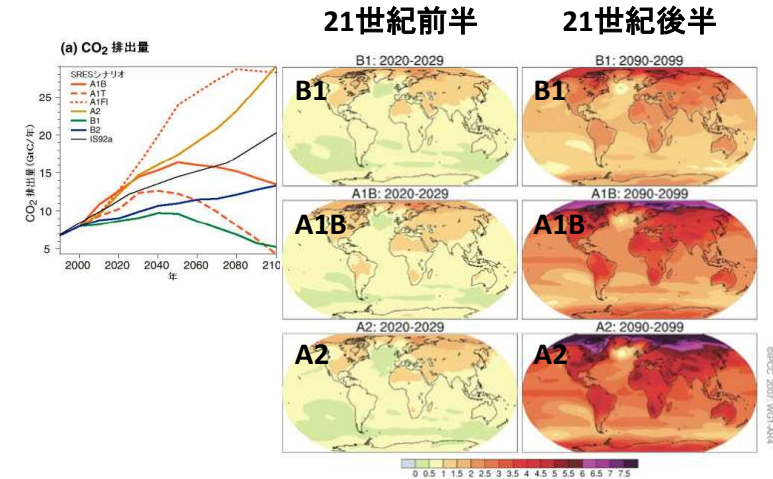
16

21世紀に予測されている気温の経年変化



世界中の気候モデルを用いた予測実験が行われている。モデルによるばらつきが大きいものの、一貫した昇温トレンド。¹⁷

21世紀に予測されている気温の全球分布



温室効果ガス排出シナリオごとに将来予測される気温は大きく異なる。高緯度ほど気温上昇は大きくなると予測されている。¹⁸



世界の水危機

水の世紀: 世界の水危機

世界銀行副総裁イスマル・セラルディン曰く:
「20世紀の戦争が石油をめぐる戦われたとすれば、
21世紀は水をめぐる争いの世紀になるだろう」

RiverはRivalの語源:
「Rival」は、ラテン語「Rivus」の派生語である
「Rivalis」に行きつく。「Rivalis」は「小川」という意味を
有する。つまり、「水を巡って争う人々」が「Rival」という
言葉につながった。

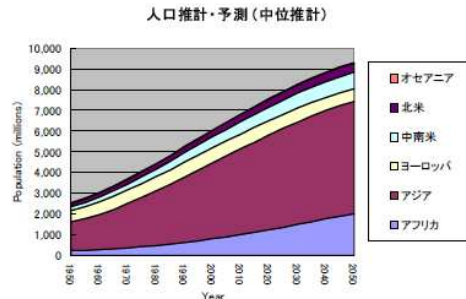
喧伝される世界の水危機

21世紀には世界の水問題はさらに深刻化する

—人口増加と人間活動の拡大

—温暖化等による地球規模での水資源分布の変化

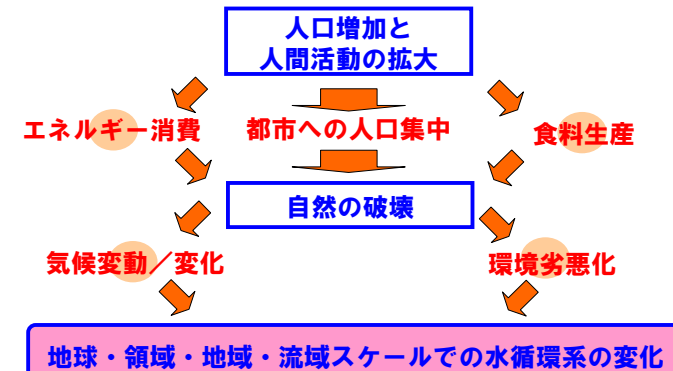
- ・世界人口の5分の1は、安全で安価な飲料水を確保できなくなる
- ・毎年数百万人が水に起因する病気で死亡する
- ・世界全体での取水量は、主に灌漑用水の需要増加が原因で、1995年の3500km³から2025年には4300-5200km³にまで増加する
- ・経済成長は、過度の水利用を引き起こし、自然生態系に深刻な影響を与える
- ・気候変動により水循環の時間的・空間的偏在が激化する
- ・以上の問題は、国際的な緊張や紛争を引き起こす可能性がある



「World Water Vision 2000」

21

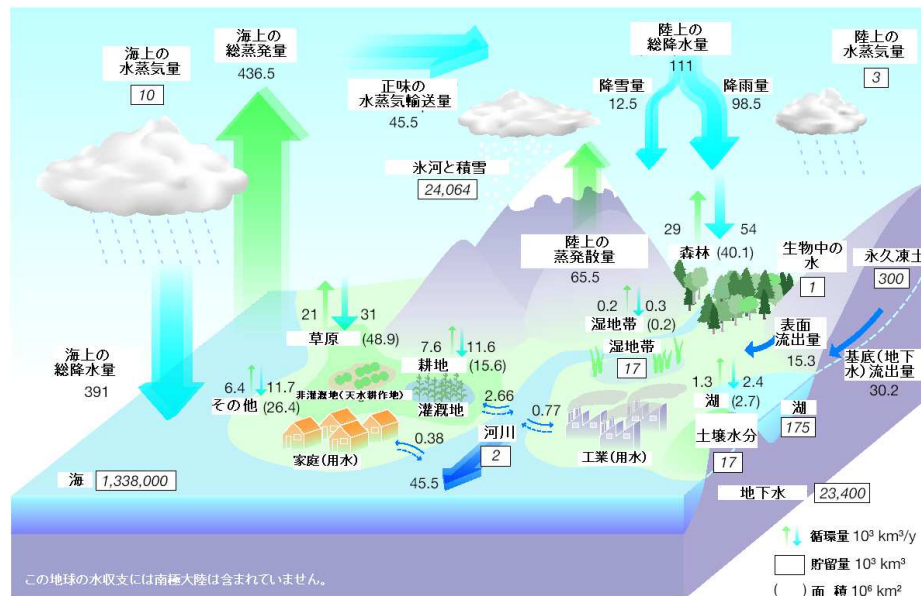
水循環系の変化と水問題発生構造



- ・水需給バランスの不均衡による水不足
- ・水域汚染と水生生態系の悪化
- ・水災害ポテンシャルの増大と水災害の激化

22

地球上の水循環 (From Oki and Kanae 2006)

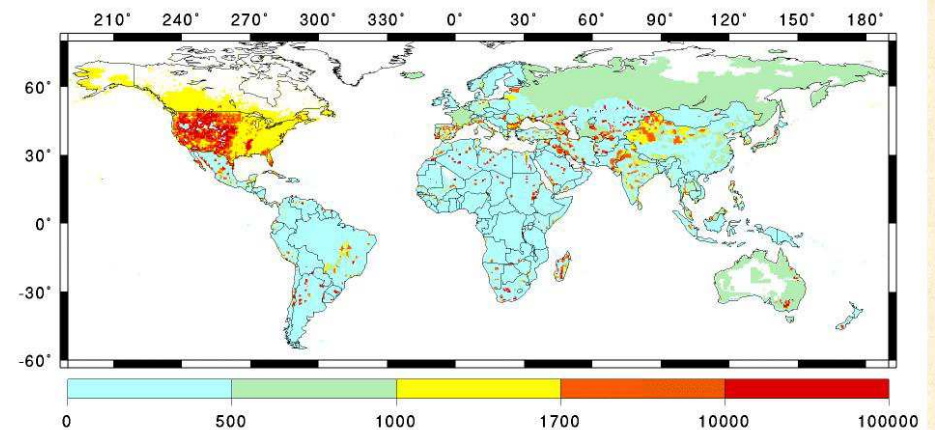


この地球の水収支には南極大陸は含まれていません。

一人当たり年使用水量 (m³/年・人)

(W - S) / population [m³ / year / person]

1995



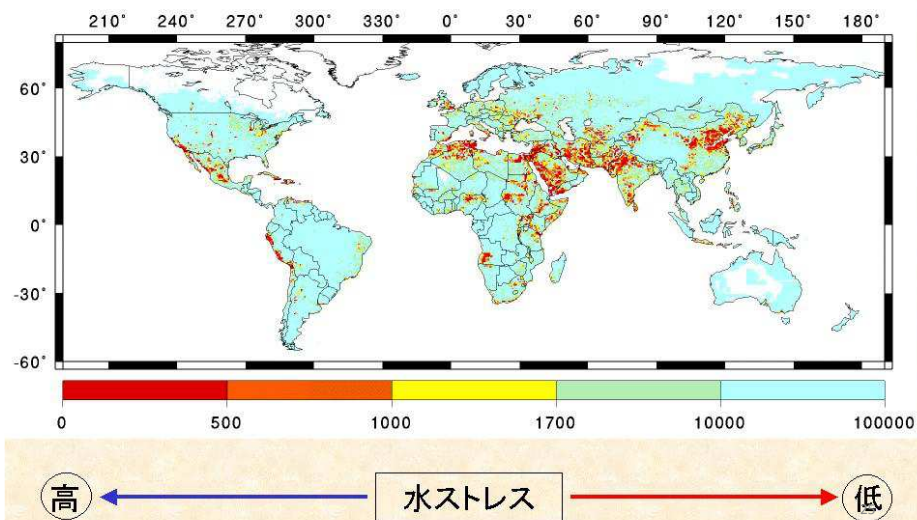
$R_{ws} = (W-S)/Q$ と $A_{wc} = Q/C (m^3/y/c)$ の分布が近似。
→ 1人当たり使用量 $(W-S)/C$ はグローバルに均一か?

24

一人当たり潜在的年使用可能水量($\text{m}^3/\text{年}\cdot\text{人}$)

[$\text{m}^3/\text{year}/\text{person}$]

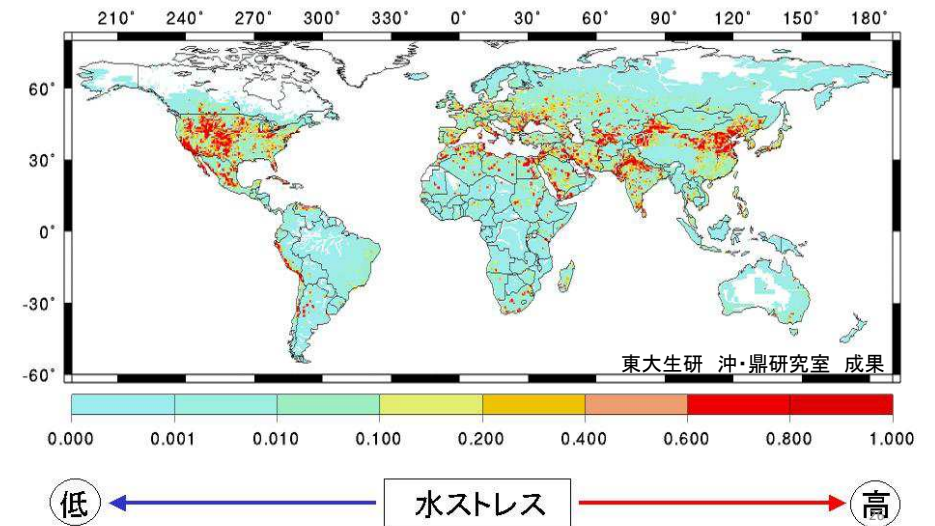
1995



水ストレス指標(年利用量/潜在的年利用可能量)

Alpha=1.0

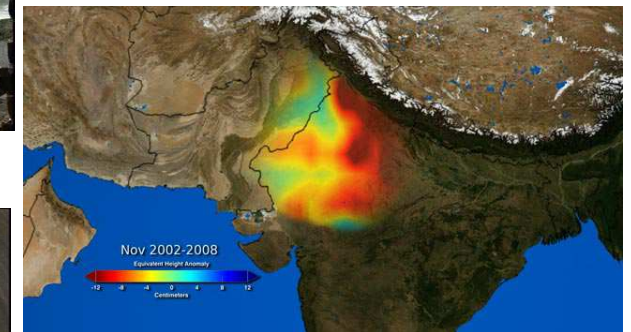
1995



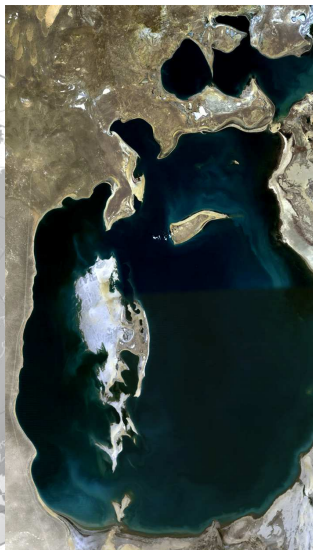
黄河断流



インドの地下水枯渇



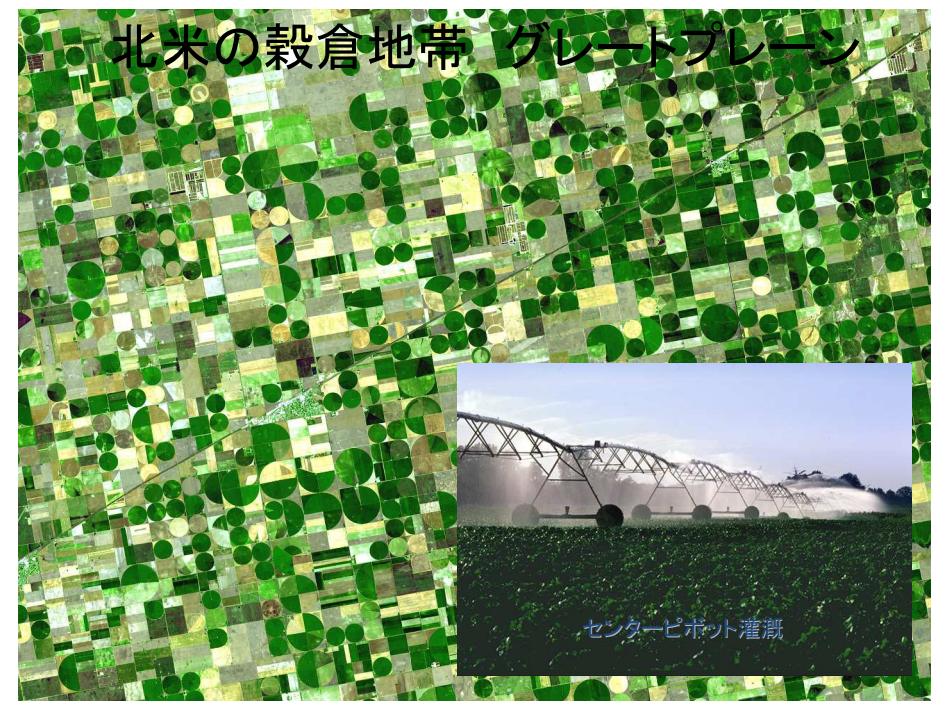
消えるアラル海



July - September, 1989



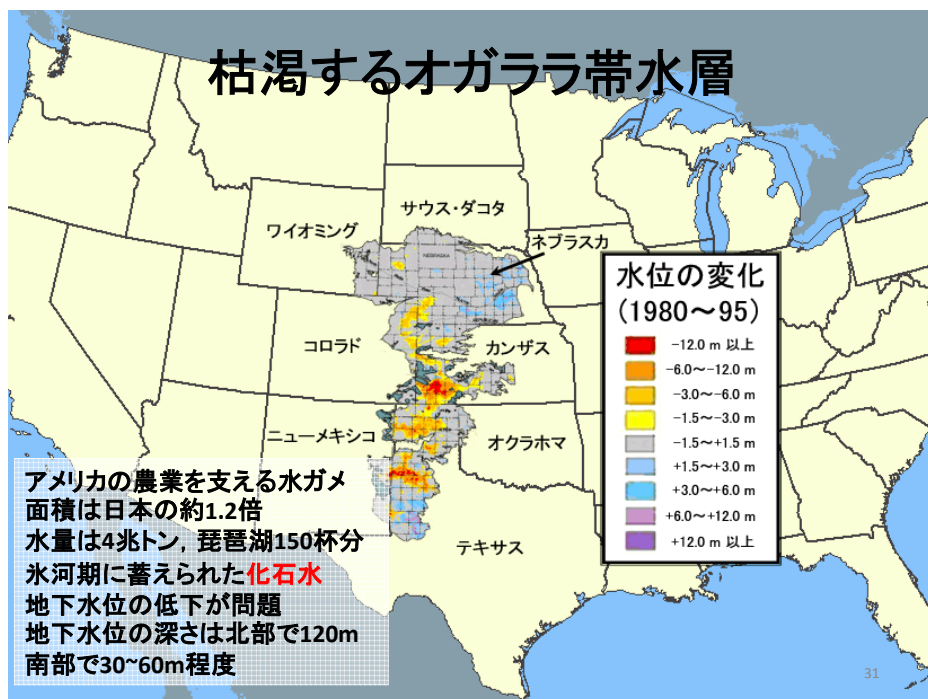
October 5, 2008



北米の穀倉地帯 グレートプレーン

センターピボット灌漑

枯渇するオガララ帯水層



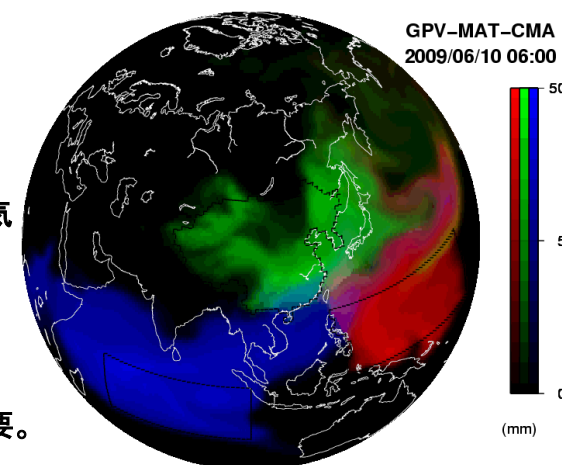
水蒸気はどこからやってくるのか？

大気中に水蒸気が滞在
する平均日数: 9日間

中国における土地利用の
変化は、日本に来る水蒸気
の量や時期を左右させる。



全球スケールにおける
水循環の把握・予測が必要。

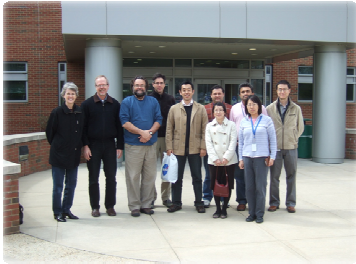


色は水蒸気の起源を示す。
緑: 中国; 青: インド洋;
赤: 西太平洋

Yoshimura et al. 2004

地球環境モニタリング研究 例: NASAの三大目標

- 宇宙のなぞを解明する
- 地球外生命体の有無を明らかにする
- 宇宙から地球環境を明らかにする



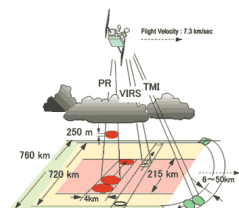
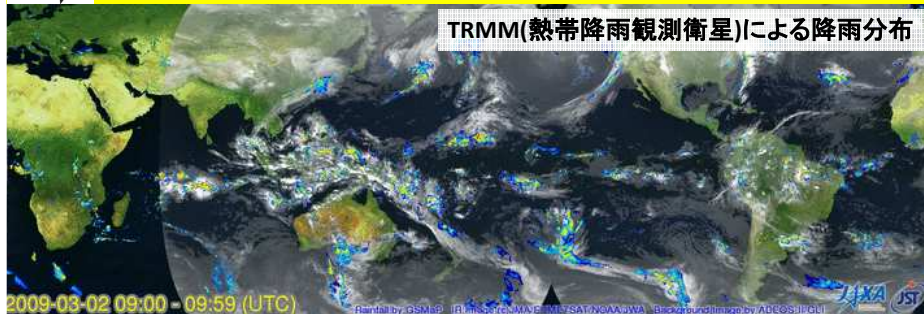
地球環境に関わる研究者・技術者が結集して取り組んでいる

33

A-Train: 積雪、土壌水分、降水など 目的ごとに観測される地球



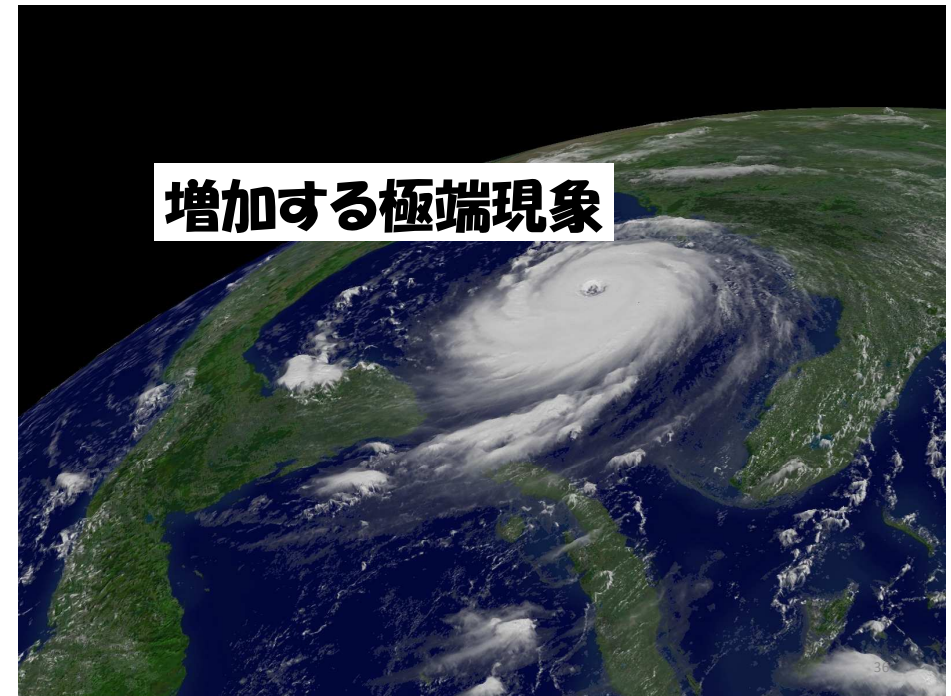
全球降水観測計画 (2014年打ち上げ) (Global Precipitation Measurement)



地球環境の変化は降水量にどのような影響を与えるのか?
地球水循環の解明は、
・洪水・渇水災害の低減
・安定的な水資源の確保
を行う上で極めて重要である

35

増加する極端現象



36

米国におけるトルネードの様子



先進国における水災害 2005年ハリケーンカトリナ

先進国においても、一度巨大な熱帯性低気圧が来襲すると、被害は甚大。気候変動に伴う熱帯低気圧の数・強度の変化を予測することは、今後の対応策(適応策)を作成する上でも重要である。

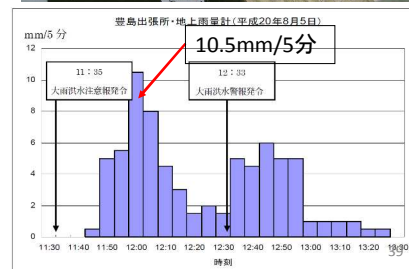
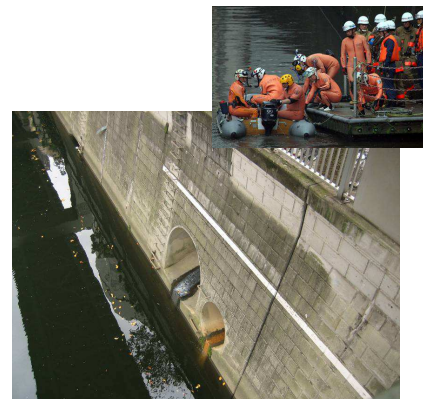


ゲリラ豪雨の脅威

2008年8月5日、大雨で増水した東京都豊島区雑司が谷の下水道工事の現場で作業員5人が流され、亡くなった。

東京地検は2009年3月30日付で、業務上過失致死容疑で書類送検されていた元請けの竹中土木(東京都江東区)の社員2人と法人を不起訴処分とした。

2人は現場責任者(58)と気象情報担当者(33)。地検は「自然現象による急激な増水を予見することは困難」と判断した。



都賀川水難事故

兵庫県神戸市の都賀川で2008年7月28日に発生した災害。上流域を襲った局地的豪雨(31.5mm/hr)で都賀川の水位が10分間に1.3m上昇し、5名の命を奪った。



2010年8月北海道豪雨



2010年8月23日から24日にかけて、石狩川の支流、忠別川および美瑛川周辺において集中豪雨による橋梁および道路の崩壊が発生。4名の方々が災害に巻き込まれ、内2名の人命が失われた。

2010年8月24日降雨状況

1時間雨量データ
(気象庁)

東川町・・・42.5mm

石狩市・・・53.5mm

札幌市・・・42.0mm

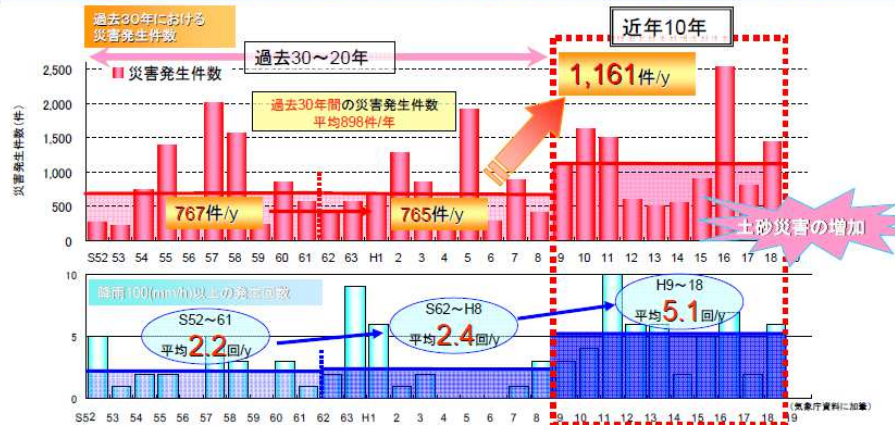
北海道内8地点で1時間あたりの降水量が過去最大を記録



気象庁

帯状に長い形状を有する線状降水帯

近年の土砂災害発生件数と集中豪雨の状況



過去30年間の災害発生件数の平均は898件/年。気候変動の激化に伴い、土砂災害も増加の傾向。今後もIPCC報告の通り、気温上昇が進行すれば、土砂災害が増加・激化する事が予想。

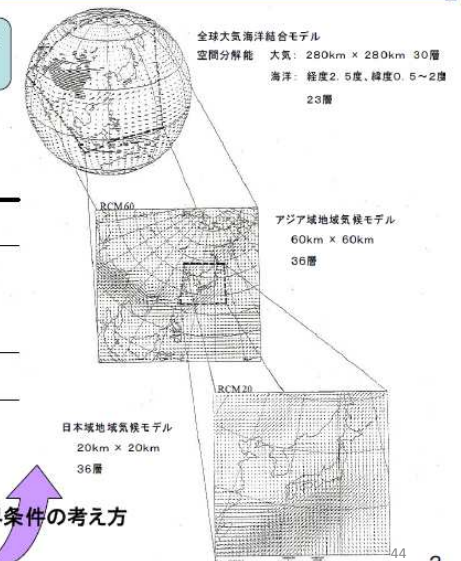
IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change):気候変動に関する政府間パネル

(※H4-7の釧路市及びその周辺を除く。S52～57の土砂災害、地すべりの件数は推計値:砂防部保全課調べ)

地域気候モデル(RCM20とGCM20)

近年、より詳細な地域気候の予測が可能なシミュレーションモデルも開発されている。

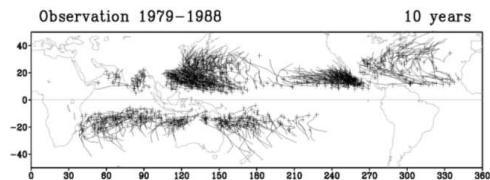
	地域気候モデル	
	GCM20 (General Circulation Model)	RCM20 (Regional Climate Model)
計算の領域	全球	日本周辺
水平解像度	約280km	約20km
格子数	1920×960	129×129
鉛直層数	60層	36層
側面境界条件	全球モデルのため不要	アジア域気候モデル



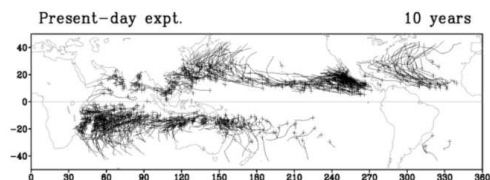
RCM20の境界条件の考え方

現在の熱帯低気圧の経路と将来予測

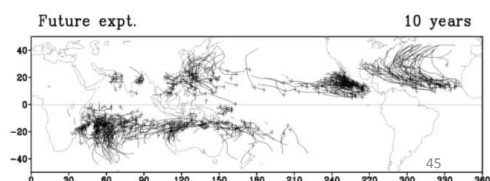
観測値



数値シミュレーションによる
再現実験

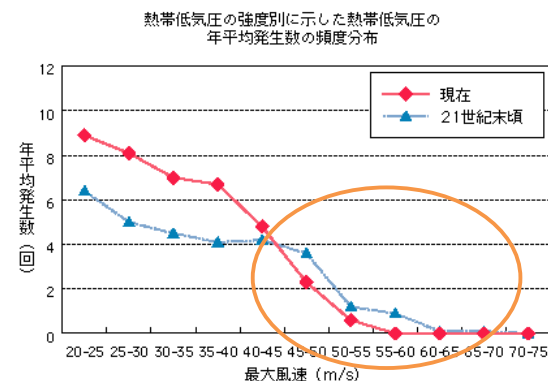


数値シミュレーションによる
将来予測実験



Oouchi et al. (2005)

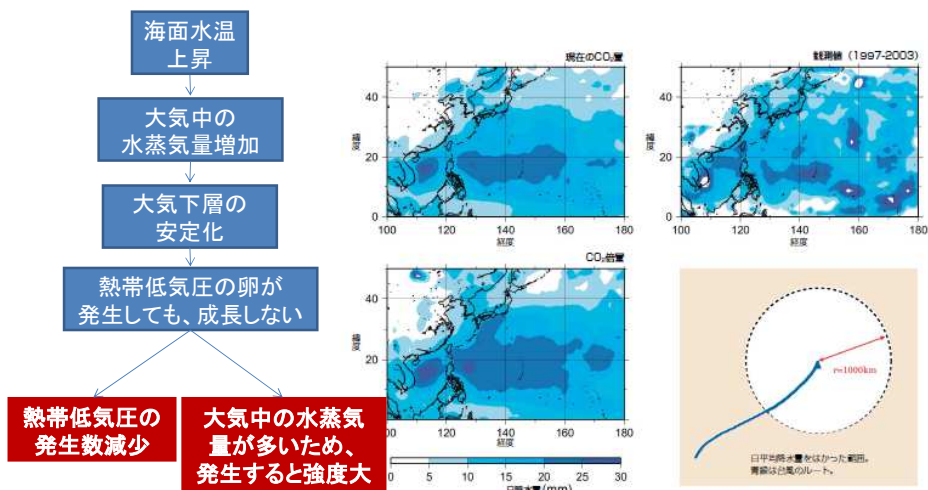
現在と21世紀末頃の熱帯低気圧 発生件数と最大風速



(注) 実線は現在気候再現実験、破線は温暖化予測実験の結果を示す。
資料) 気象庁「異常気象レポート2005」

最大風速45m/s以上の熱帯低気圧の数は今後増加するとの予測がなされている。なぜ、強度が増すのだろうか？

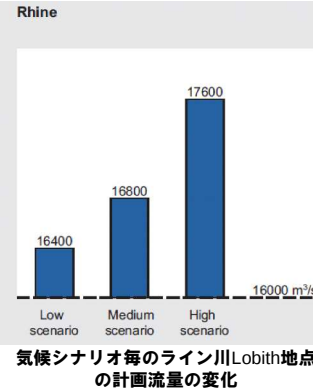
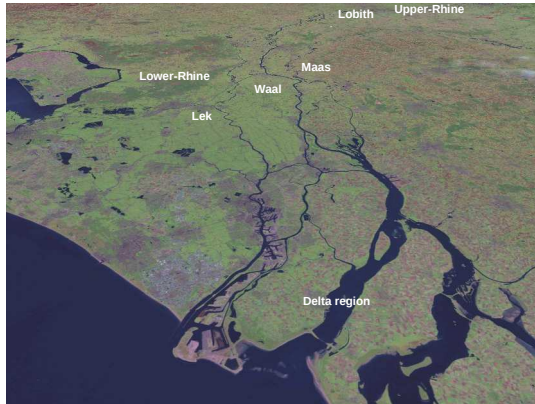
地球温暖化と熱帯低気圧の関係



Hasagawa (2004)

対応策の模索

海外における適応策の事例:オランダ



ライン川では、異常豪雨による洪水リスクの増大が懸念されており、気候シナリオに基づく将来(2050年)予測において、現行計画流量16,000 m³/s (Lobith地点) から約18,000 m³/s (High Scenarioの場合)に増加すると予測されている。このような状況に鑑み、オランダの洪水リスク管理計画である「Room for the River」において、将来の計画流量を18,000 m³/sとし、約7,000 haの遊水地の確保等により治水安全度の向上を図っている。

※IPCCシナリオを境界条件とした地域気候モデルでシミュレーションした流量予測

(出典) Netherlands Environment Assessment Agency 2005.
Delft Hydraulics

海外における適応策の事例:オランダ



- 1953年の高潮災害を踏まえ、現況施設はデルタプラン等で予め将来の海面上昇(当時は100年間で30cm、基本的に耐用年数50年で15cm)で設計・施工
- 現時点で新たに堤防を整備したり、既存堤防の大幅改修を行う場合は、今後50年間の海面上昇(25cm～50cm程度)見込んで設計

50

海外における適応策の事例

水資源問題に関する気候変動に対する国レベルでの活動

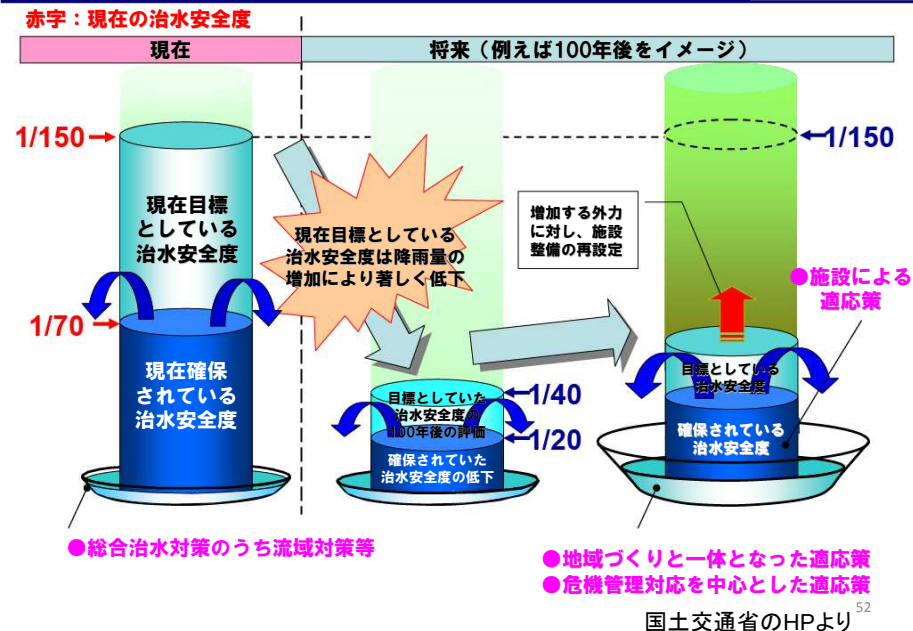
「Climate change and water adaptation issues (EEA Technical report(2007.2))」の「Annex 1 Country level activities on climate change in relation to water resource issues」より

国名	ベルギー	チェコ共和国	フィンランド	フランス
主な活動	・堤防建設時、60cmの海面上昇を考慮する。 ・気候変動と海面上昇により2100年までに、洪水リスクレベルは、現在の350年に1回から、25年に1回にまで上昇する。	・BILAN, CLIRUN, SAC-SMAモデルを使用して、エルベ川、Zelivka川とUpa川流域への気候変動によるインパクトスタディを実施した。 ・2001～2002年に、水文学者チームは、気候変動の水資源への影響を評価する新手法の実用性を検討した。	・気候条件と経済条件のシナリオを設定して、社会全体としての適応戦略を策定した。 ・(農林省、2005年) (2005年～2015年の適応策として、洪水リスク地区の一層厳格な洪水リスク管理総合計画の準備等を策定)。 ・ハザードのリスク解析手法、水文学者チームによるシミュレーション及びその結果の地域計画への応用等について研究中である。	・2006年に、水管理の気候変動への適応を目的とした立法上の枠組み(2006年水法)を制定した。 ・洪水ハザードマップは、フランス全土で作成済みであり、インターネットで閲覧可能である。 ・ミューズ、ロアール、ジロンド、ローヌ川流域における適応策に関する研究を開始した。
国名	ドイツ	アイスランド	スペイン	スウェーデン
主な活動	・洪水頻度の増加と洪水流量の増加の可能性を考慮に入れた洪水管理を試行している。 ・バーデン地方とバイエルン地方では、新しい洪水管理計画において、気候変動要因の検討結果(ネッカー流域において2050年には小規模、中規模洪水の洪水流量が約40～50%増加し100年確率の洪水が15%増加する)を取り入れた。	・予想される海面上昇はアイスランドの新しい進捗の設計において既に考慮されている。	・国家適応戦略を策定済み。	・Rossbyセンターシナリオに基づき、将来の気候変化、平均的な流出量の変化について明らかにした(選択シナリオの差、地域差、季節変動等について明らかにしている)ただし、確率ハザードについては、今後の課題である。 ・適応についての国家戦略は未策定であるが、2005年の夏に気候と適応性についての政府調査を開始し、2007年10月に調査結果がまとまる予定。 ・調査報告には、種々の分野(社会基盤(道路、鉄道、および通信)、建物、エネルギーと水供給、林業、農業、人の健康、および生物多様性)における、経済上の結果が記述される。

国土交通省のHPより

適応策の考え方

6. 気候変動に対する我が国の対応



52

施設による適応策

6. 気候変動に対する我が国の対応

新たな堤防整備や河道の拡幅・洪水調節ダムの建設など新規施設の整備と施設の徹底活用

新規設備の整備



洪水調整施設の整備(ダム)



洪水調整施設の整備(地下調整地)



高規格堤防の整備

国土交通省のHPより

19

施設による適応策

6. 気候変動に対する我が国の対応

施設の信頼性の向上、既存施設の有効活用・多目的利用・長寿命化を図る

既存施設の安全性の維持・向上(海岸施設の例)

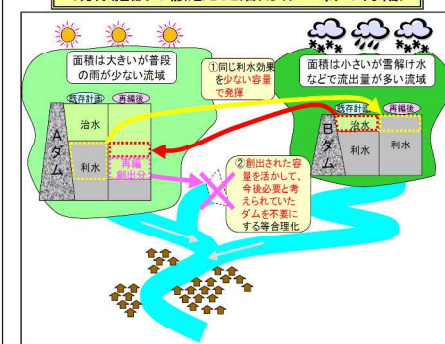


コンクリートの劣化等老朽化が進んだ護岸



前腹付けによる老朽化対策後の護岸

既存施設の徹底した活用(ダム群の再編)



- ダム群の再編
- 既存ダムの治水容量の治水への活用
- 既存ダム・新設ダムをあわせた容量振り替え

洪水調節効果を高め、治水安全度を向上させる

国土交通省のHPより

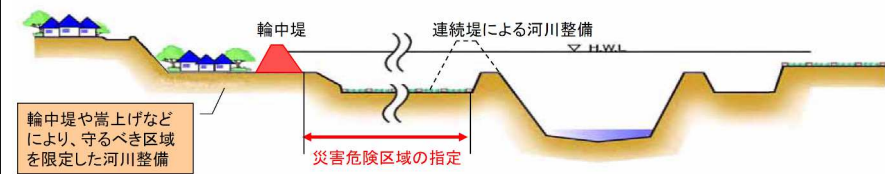
26

土地利用の規制・誘導など地域づくりと一体となった適応策

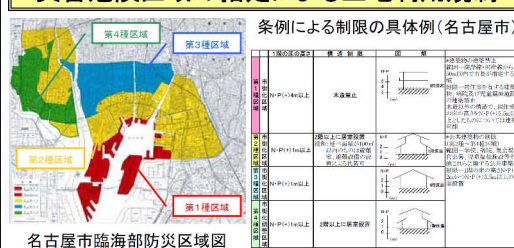
6. 気候変動に対する我が国の対応

施設による対応のレベルを越える大きな洪水に対して、浸水を許容する土地利用や地域づくりで対応

被害を最小化する土地利用や住まい方への転換



災害危険区域の指定による土地利用規制



浸水に強いまちづくりへの転換



○洪水時に被害がないようピロティ構造を採用

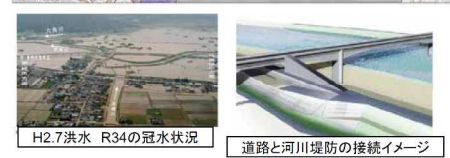
国土交通省のHPより

21

危機管理対応を中心とした適応策

6. 気候変動に対する我が国の対応

堤防・緊急用河川敷道路や高架道路等と広域防災拠点等との連携による広域防災ネットワークの構築



インフラの早期復旧を図る初動対応の強化とそのための体制充実

《緊急災害対策派遣隊(TEC-FORCE)》



- 活動内容
- ・被災状況調査
- ・応急対策
- ・災害危険度予測
- ・対策の企画立案
- ・高度な技術指導
- ・復旧工事支援 等

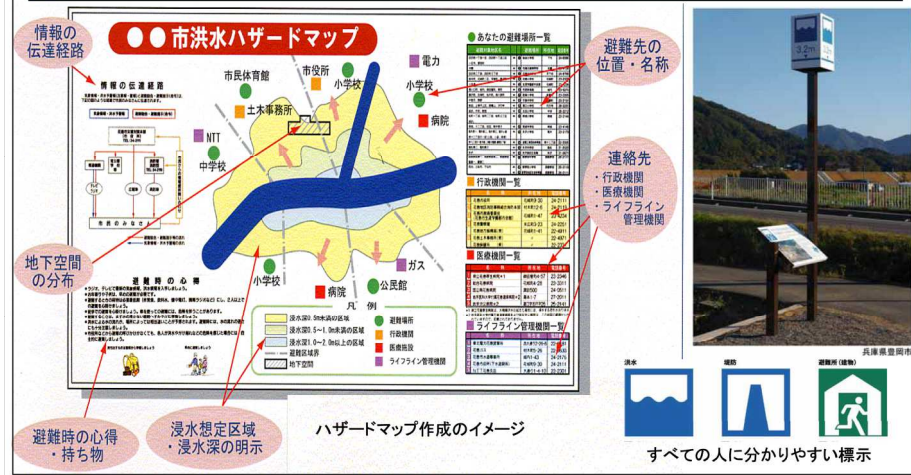


国土交通省のHPより

22

水害危険度に関する事前情報の共有

ハザードマップや市街地内に過去の災害時の水位を明示するなどの取組みを実施



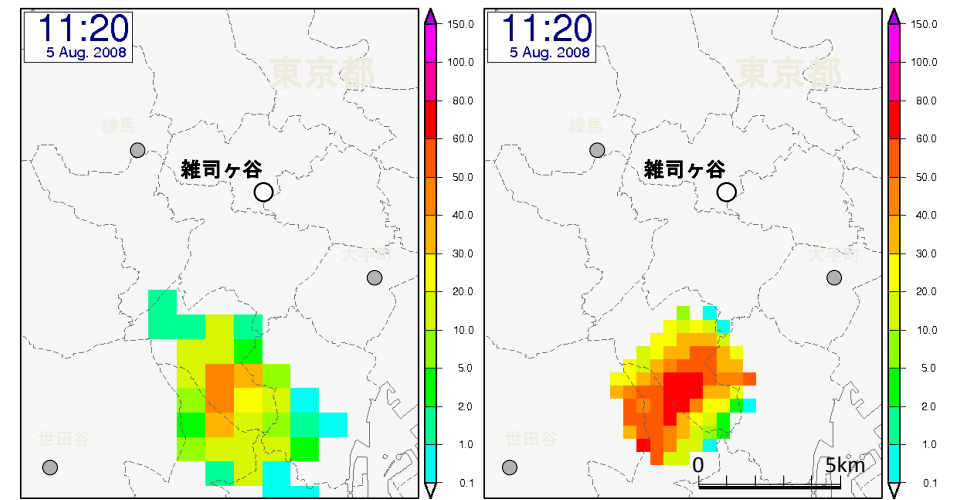
国土交通省のHPより

23

2008年8月5日 ゲリラ豪雨

気象庁合成レーダー

MPLレーダー



1km格子, 10分間隔

500m格子, 5分間隔

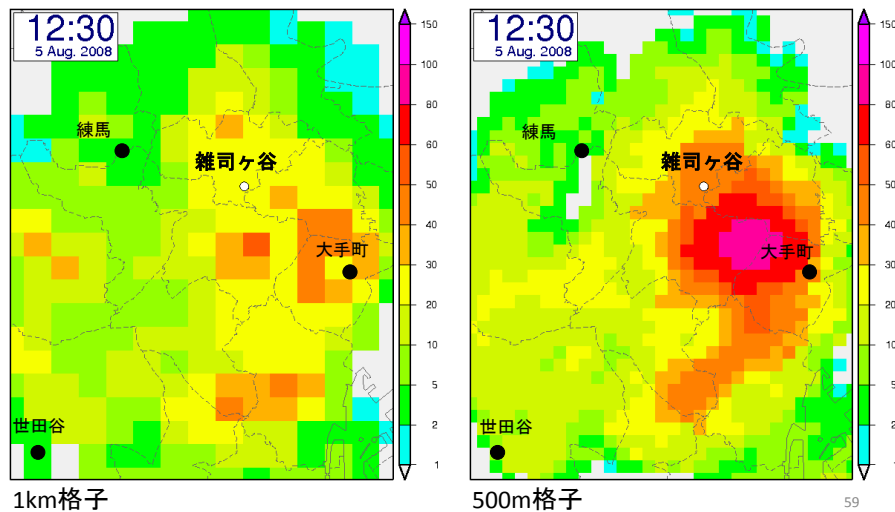
11時40分頃 豊島区雑司ヶ谷で下水道工事事故

58

11:30~12:30の1時間雨量

気象庁解析雨量

MPLレーダー

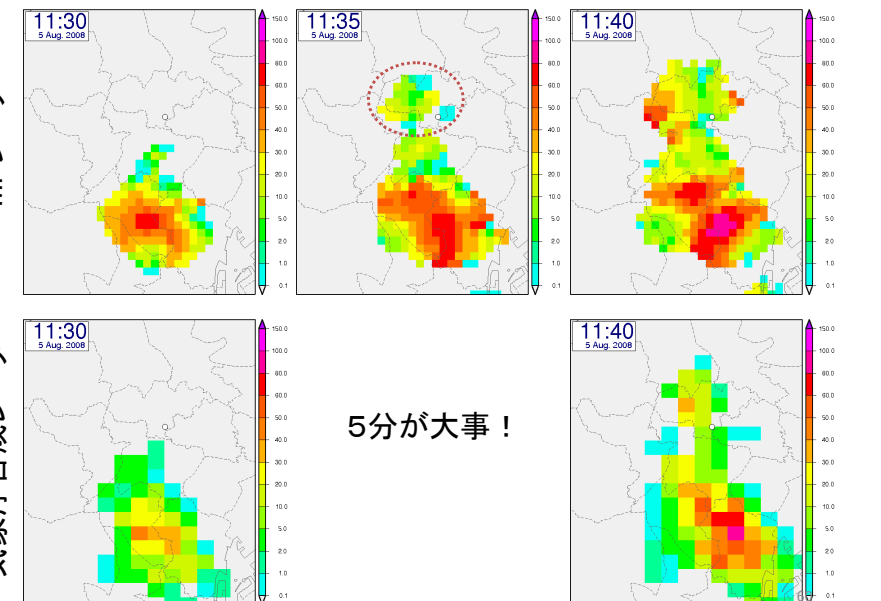


59

2008年8月5日 ゲリラ豪雨

MPLレーダー

気象庁合成レーダー



- 本日の講義に対する感想や, 地球規模での温暖化それによる気候変動に対して我々のできること, しなければならないこと等について述べよ.

<http://earth-fe.eng.hokudai.ac.jp/lecture/Socio-EnvironmentalEng.html>

61

前回の質問への回答

質問: 防波堤, 防潮堤の効果はどれぐらいあるのか?

岩手県普代村では, 元村長, 故和村幸得氏の主張で15.5mの高さに作られた防潮堤のお蔭で被害を免れました.

氏は, 三陸沿岸で10mの防潮堤が整備された際, 昭和三陸津波の経験から15.5mを主張して譲らなかったとされます.

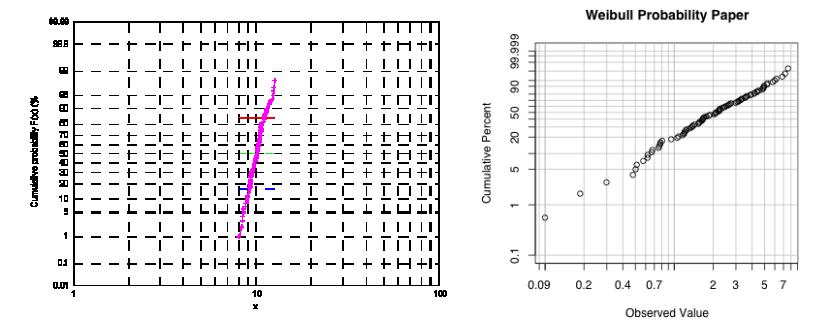


質問: 防波堤, 防潮堤の素材は?

- 経済性を考えて原則土です. 表面にブロックが張ってあることもあります.
- 主として土でできているため津波が越水することで壊滅的な被害を受けました. それで現在, 越水しても簡単には壊れない堤防の研究が行われています.

質問:「2000年に一度の洪水」とはどんな計算から出てくるの？

- 2000年に一度発生(再現期間2000年)の事象が1年に起こる確率(超過確率)は1/2000です。これまでのデータを確率統計解析することで、洪水の規模と超過確率を推定することができます。



質問:防災で想定するレベルはどのように決定する？

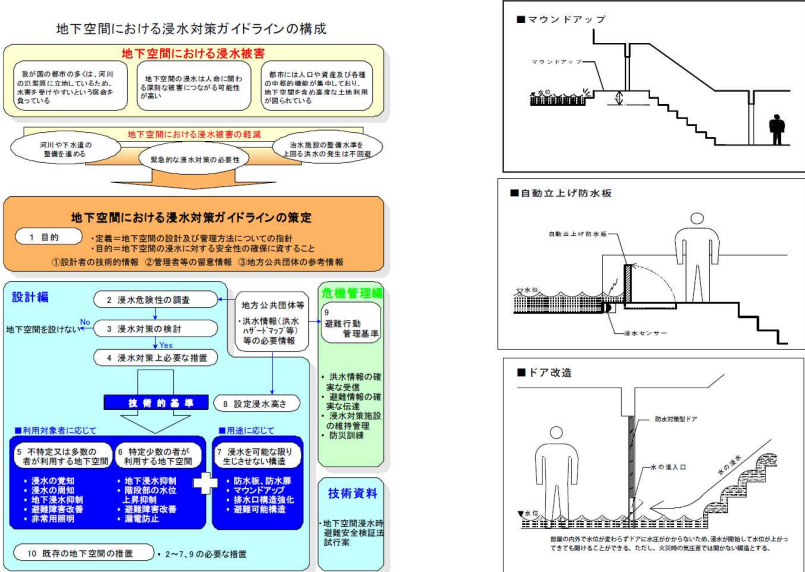
- 行政的、政治的判断です。
- 例えば現在、重要な河川(一級河川)で洪水の再現期間が100年から200年、二級河川で50年になるよう整備が進められています。
- 津波のための防潮堤をどの程度のレベルにするかは現在議論が進んでいるところです。

質問:液状化が起こらないよう土地を改善することは可能か？

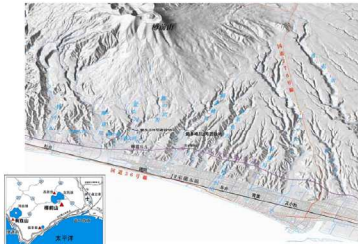


※GUS関東「造成地地の耐震対策に関する研究委員会」メディア懇談会資料、液状化対策工法設計・施工マニュアル(案)、TF4メンバーからの意見に基づき再構成

質問:地下空間の洪水対策は？



質問: 台風や津波以外の災害に対する対策は？



樽前山では噴火によって発生する泥流、火砕流の氾濫を防ぐための大規模土木施設が作られています。



質問: 沖縄の台風対策？

- 沖縄は歴史的に台風の常襲地帯ですから民間レベルで生活の知恵として様々な台風対策が行われています。
- 特に公共事業として行われている特別な対策はありません。

質問: 雨の少ない香川県. 県内で水を賄えないか？

- 海水の淡水化等, 考えられる方法ではありますが, コストが高く実用的とは言えません。
- 香川用水がベストの対策だと思います。

質問: 洪水を地下に流した後の上手い利用方法はあるのか？

- ありません。地下に流した洪水はポンプで汲み上げて海に捨てられています。

質問: 東京外郭放水路の地上はどうなっている？

- 東京外郭環状道路(国道16号線)になっています

質問: 台風と規模があまり変わらないハリケーンでアメリカに多大な被害が出るのはなぜか？

- 厳しい自然環境
- 自分の生命や財産は自分で守るという意識。「公共防災施設より個人の保険」という風潮
- 大きい貧富の差。国民皆保険すらない実態
- 連邦と州の役割の違い
- 政治のポピュリズム。敬遠される地味な公共事業

質問:利根川はなぜ小さなダムを沢山つくるのか?大きなダムの方がコストや発電に有利なのでは?

- 日本の川は全流域に万遍なく人が住んでいる. 大きなダムを造るためには大勢の人の移転が必要となりコストが膨大になるばかりか, 住民の合意が得難い.

質問:津波と火山, 地滑り等から本当に安全なところはあるか?

- 日本にはおそらくない
- 比較的安全なのは「まほろば」である大和か?
- 後はいち早く逃げるしかない

質問:森林が減っている現在, 治水工事で洪水を防ぐのと森林を保護するのはどちらが効率が良い?

- 森林は減っていません. 現在の日本の山は有史以来, 最も多くの森林に覆われていると言われています.
- そのため, 土砂の生産が減って海岸侵食や河床低下が問題となっています.
- 森林は雨水を蓄える能力がありますが, ある程度以上沢山の雨が降ると洪水を防ぐ役には立たないと言われています.