



## 世界の農耕地と水田

- 世界の農耕地面積 14億ヘクタール
- 主要な農作物の栽培面積 6億ヘクタール  
(43%)
- 水田の面積 1億5000万ヘクタール  
(10.7%)
- 世界の米の生産量(モミ付)(2008)  
6億8500万トン (4.5t/ha)

## 人口と農地面積

世界の人口 70億人  
世界の農耕地面積 13億8000万ヘクタール

世界人口1人当りの農耕地面積は、  
全耕地面積を考えると0.2ヘクタール  
主要な農作物では0.09ヘクタール

主な農作物の収量 約2トン/ヘクタール  
0.09ヘクタールから180kg  
1人当たりの穀物所要量 年間180kg

## 水田の面積

- 世界中で1億5000万ヘクタール
- 世界の農耕地面積の10.7%
- 主要な農作物の栽培面積の25%
- **世界の人口の50%以上を水田が支えている。  
高い人口扶養力**

## 水田の高い生産性

- 熱帯では2期作、3期作が可能
- 連作障害が起こらない。
- 地力を消耗しない。
- 水田は長年耕作できる。  
(フィリピン バナウエのライステラスは6000年の歴史を持つ。)

## 世界の穀物生産量および単収

年	小麦		米	
	総生産量 (10 <sup>6</sup> ton)	単収 (kg/ha)	総生産量 (10 <sup>6</sup> ton)	単収 (kg/ha)
1961-63	242	1,176	248	2,033
1976-78	416	1,781	366	2,538
1992-93	563	2,533	354	2,416
2005-06	619	2,844	418	2,719
2014-15	705.2	3,163	479	2,968
2014-15	作付面積	223.0 x 10 <sup>6</sup> ha	作付面積	161.5 x 10 <sup>6</sup> ha

1978 以前:FAO  
1992 以降:USDA "World Market and Trade"

## 日本の農耕地 (2019)

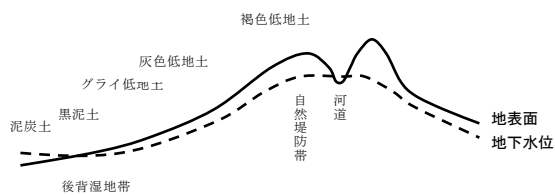
- 全体 439.7万ヘクタール
- 畑 200.4万ヘクタール
- 水田 239.3万ヘクタール
- 耕地利用率 91.6% (2018)

## 日本の人口と水田面積

- 日本の人口 1億2618万人 (2019)
- 1人当りの水田面積 0.02ヘクタール=200㎡
- 日本のお米の収量 5トン/ヘクタール
- 1人当り収量 約100kg(玄米)
- 年間1人当たりコメの消費量 60kg(精米)

## 地下水位および地形と土壌群の関係

土壌サイエンス入門 より

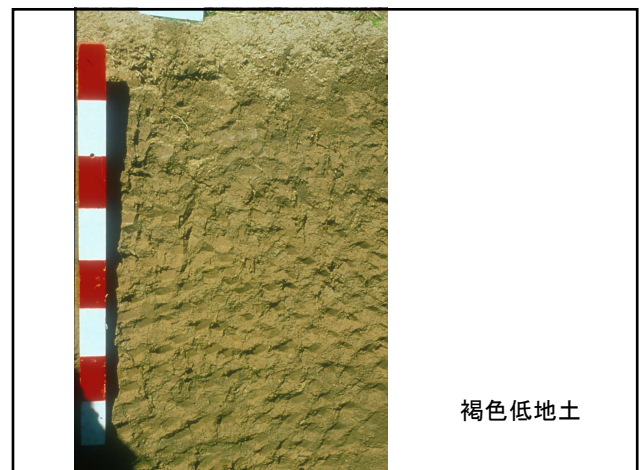


## 低地土の分類

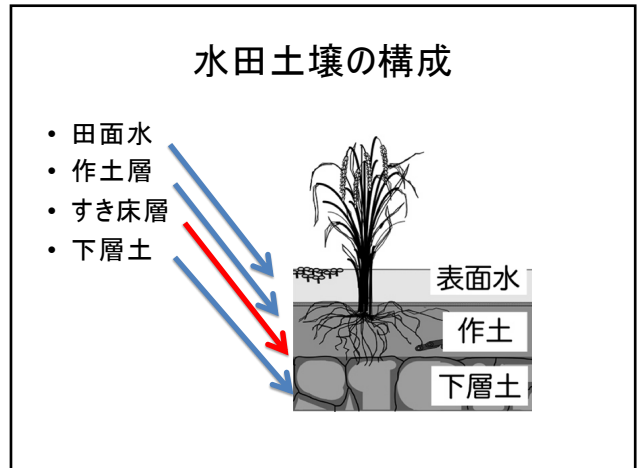
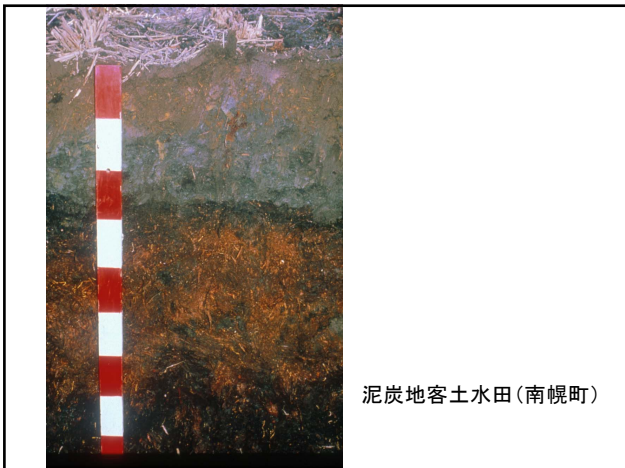
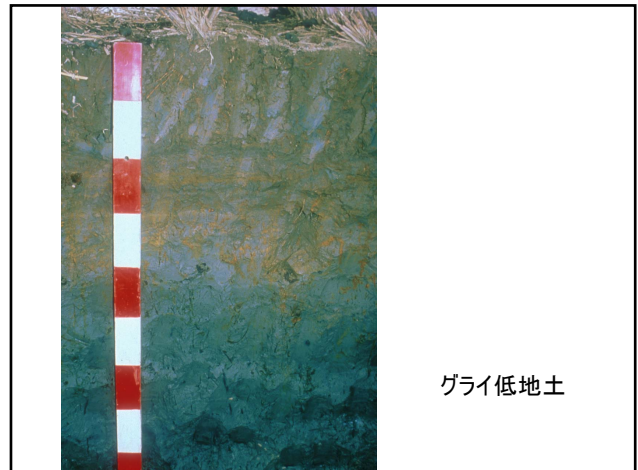
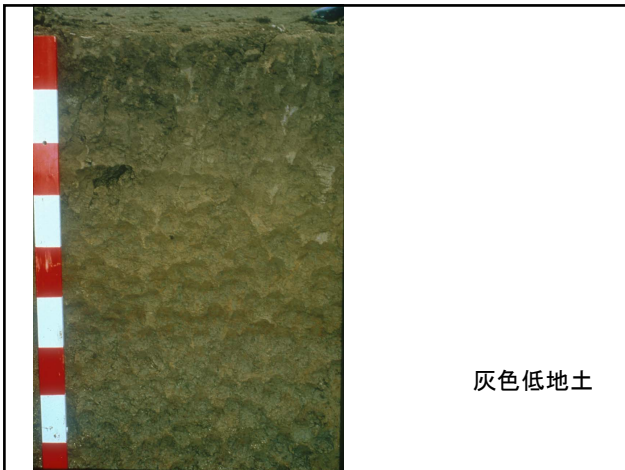
- ① 灰色低地土: 地下水位が50cm以下で平野部や扇状地に分布する。乾田型で生産性が高い。
- ② グライ低地土: 地下水位が50cm前後にあり、グライ層が観察される。周年還元的な環境にあり、湿田型である。異常還元やアンモニア過剰などの問題を生じることがある。
- ③ 褐色低地土: 自然堤防や扇状地上に分布し、鉄やマンガンの移動集積が顕著である。溶脱が激しい場合、老朽化水田となる。乾田型。

## 水田として使用される土壌

- 灰色低地土 37%
- グライ低地土 31%
- 多湿黒ボク土 10%
- 褐色低地土 5%



褐色低地土



### 田面水

- 藻類、ウキクサ類、プランクトン類の生育が旺盛で、それらの光合成によって多量の有機物が生産されている。また、それらの遺体は作土の表層に集積する。
- 藍藻やアカウキクサによる窒素固定も行われる。
- 灌漑水由来の豊富な養分を蓄えている。

### 作土層

- 酸化層  
作土層表層の5mmほどの薄い黄白色の層
- 還元層  
作土層の大部分を占める還元的な青灰色の層

### 酸化層

- 田面水に溶解した酸素の影響で酸化的な状態にある。
- アンモニウムイオンの硝酸イオンへの酸化が進行する。

### 還元層

- $\text{MnO}_2 \rightarrow \text{Mn}^{2+}$
- $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}^{2+}$
- $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$
- 磷酸の溶解度も増大
- 土壌のpHは中性に近くなる。
- $\text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{S}$
- $\text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4$   $\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4$

### すき床層

- 作土層直下には、透水性の悪い、堅く緻密なすき床層が形成される。
- この層の働きによって、灌漑水の浸透速度(減水深)が調節される。

### 下層土

- 乾田の場合、下層土は再び酸化的な状態にある。
- 酸化還元電位は高く維持され、下層土に移行した2価鉄は酸化鉄に酸化される。
- 水稻が吸収する窒素の約10~20%は下層土の有機態窒素に由来する。特に生育後期(出穂以降)に下層土からの窒素吸収の貢献が大きい。

### 水田土壌の特徴

- 水田土壌は水を湛える(たたえる)ことによってその特徴が出現する。
- 田面水により大気からの酸素の供給が制限され、土壌中の酸素が消失する。続いて酸化鉄や二酸化マンガンなどが微生物に利用され、土壌は還元状態になる。

### 湛水に伴う還元の進行

#### ① 条件的嫌気性菌が働く段階

分子状酸素の消失

好気性細菌 500~300mV

硝酸の消失、窒素ガスの生成

条件的嫌気性菌 400~100mV

$\text{Mn}^{2+}$  の生成

条件的嫌気性菌 400~ -100mV

$\text{Fe}^{2+}$  の生成

条件的嫌気性菌 200~ -200mV

### 湛水に伴う還元の進行

#### ② 絶対的嫌気性菌が働く段階

H<sub>2</sub>Sの生成

絶対的嫌気性菌 0 ~ -200mV

CH<sub>4</sub>の生成

絶対的嫌気性菌 -200 ~ -300mV

### 水田土壌における窒素の形態変化

酸化層:  $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_3^-$

(硝酸化成菌 = アンモニア酸化菌 + 亜硝酸酸化菌)

• 酸化層から還元層  $\text{NO}_3^-$  の溶脱

• 還元層:  $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$   
(脱窒菌)

### 脱窒による施肥窒素の損失と 全層施肥法

- 水田土壌における窒素損失のメカニズムは、塩入松三郎と青峯重範(1937)によって明らかにされた。そして、氏は窒素の損失を防ぐ施肥法として、全層施肥法を開発した。
- 還元層に硫安を直接施肥すれば、硝酸化成が起こらず、これに続く「脱窒」も起こらない。

### 水田土壌の長所

① 連作障害が起きにくい

• 原因:

- 1) 嫌気的環境で病原糸状菌や線虫が死滅する。
- 2) 灌漑水によって、生育阻害物質が流される。

→ 何千年も続けて稲作が続けられているところがある。フィリピン・バナウエの棚田

### ② 地力の減耗が少ない

- 原因:
  - 1) 灌漑水からの養分供給量が多い
  - 2) 嫌気的環境であるため、有機物の分解が抑制され、土壌有機物量が多い。
  - 3) 田面水中や根圏に窒素固定生物が多く生息する。

### ③ 天然養分供給力が高い

- 原因:
  - 1) 土壌窒素の供給が大きく、生成されたアンモニア態窒素が硝化反応をうけず粘土鉱物に保持されるため、安定で溶脱されにくい
  - 2) 畑状態では不溶態であったリン酸鉄化合物が、湛水後の鉄還元に伴い溶解し、リン酸が可給化する。
  - 3) 灌漑水中に溶存するカリウム・ケイ酸など無機養分が有効に利用される。
  - 4) 酸性土壌やアルカリ性土壌も、湛水後次第に土壌pHが中性化する。

### その結果、三要素施肥試験では

- 無カリウム区、無リン酸区、無窒素区、無肥料区でも収量があまり減少しない。
- 畑作物では無施肥区での収量減が著しい。

### 各種作物の三要素試験結果

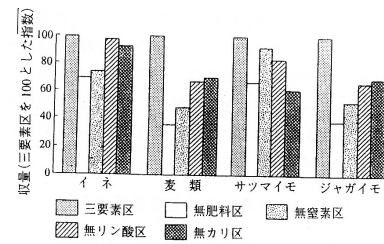


図 16.1 全国の三要素圃場試験 (藤巻ら, 1991)  
イネと畑作物の施肥条件と収量, 全国の地方農業試験場における3年継続試験成績の平均, 三要素区の収量を100とした指数 (田中 稔『畑作農法の原理』(1976)による)。

### ④ 気温調整能が高く、 気象災害に強い

- 原因
- 1) 水の比熱が高いため、地温が維持され寒冷地では冷害も軽減される。

### ⑤ 灌漑水中の窒素・リンを 吸収・吸着・除去

- 原因
- 1) 余剰の窒素は効率よく脱窒される。
- 2) リンは土壌成分に吸着されるので溶脱されにくい。

### ⑥ 土壌侵食が少ない

- 原因
- 1) 土地が均平である
- 2) 湛水と畦(あぜ)によって洪水や土壌侵食が防止される。

反面 圃場の均平化が必要

### ⑦ 雑草の発生が少ない

- 主な雑草はヒエ、カヤツリグサなど。
- 水の中に育つ雑草は多くない。

### 水田土壌の問題点

- 湛水(たんすい)に伴う還元障害の発生  
低分子有機酸の生成  
酢酸、プロピオン酸、酪酸
- 硫化水素の発生  
硫酸還元菌による  
 $SO_4^{2-} \rightarrow H_2S$

### 水田土壌の問題点

- 秋落ち現象  
硫酸を施用した砂質の水田で、夏までは生育が良くても、秋になると根腐れが起きて生育不良におちいる現象が認められた。
- 原因：老朽化水田  
鉄分の少ない花崗岩などに由来する土壌で、透水性も高かったため、鉄分を始めマンガンや各種の塩基も溶脱していた。

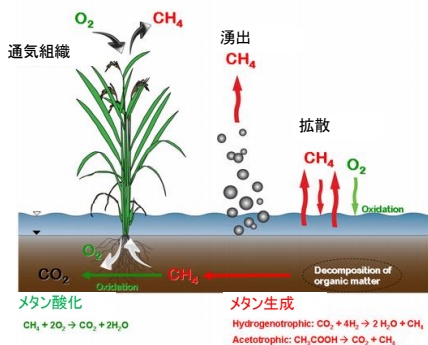
### 水田土壌の問題点

- 何故、老朽化水田で根腐れが起こったのか？
- 硫酸塩イオンの還元によって生成した硫化水素が鉄イオンに捕捉されずに、直接根に触れて、根を痛めたため。  $SO_4^{2-} \rightarrow H_2S$  (有毒)
- $H_2S + Fe^{2+} \rightarrow 2H^+ + FeS \downarrow$  (沈殿)
- 鉄が少ないとこの反応が起こらない。
- 対策：含鉄資材や山土の客土、含硫肥料の使用中止、下層土と作土の混和、中干しなど。

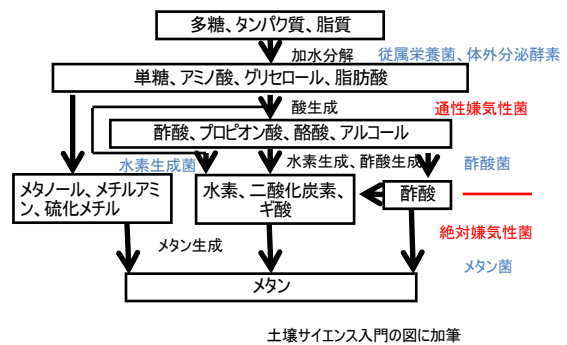
### 水田土壌の問題点

- メタンの発生
- メタンの地球規模の発生量のうち、水田に由来する部分は約10%
- 水田からのメタン発生量は、水稻の生育時期、栽培管理、水管理によって制御可能

### 水田土壌におけるメタン生成



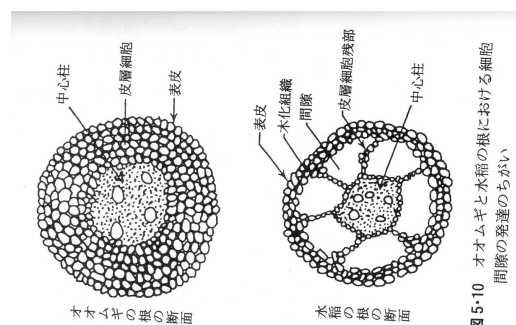
### 有機物の嫌気分解過程



## 地球温暖化係数

	気体名	地球温暖化係数
1	二酸化炭素 (CO <sub>2</sub> )	1
2	メタン(CH <sub>4</sub> )	21
3	一酸化二窒素(N <sub>2</sub> O)	310
4	トリフルオロメタン(CHF <sub>3</sub> )	11,700
5	ジフルオロメタン(CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub> )	650
6	フルオロメタン (CH <sub>3</sub> F)	150

## オオムギと水稲の根の比較



## 畑と水田の非根圏土壌

	酸化還元状態	主な微生物	各種物質の存在形態
畑	酸化的	好気性微生物	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Fe <sup>3+</sup> , MnO <sub>2</sub> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
水田	還元的	嫌気性微生物	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , Fe <sup>2+</sup> , Mn <sup>2+</sup> , S <sup>2-</sup>

## 畑と水田の根圏土壌

	窒素の吸収	pH	酸化還元状態
畑	硝酸(吸収) CO <sub>2</sub> (分泌)	非根圏に比べ上昇	非根圏に比べ低下
水田	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (吸収) H <sup>+</sup> (分泌)	非根圏に比べ低下	非根圏に比べ上昇

## 気候変動と人口増加と食料問題

- 2050年には地球の人口は200億人に増加
- 食料生産は地球温暖化と気候変動のため増加が期待できない。
- 巨大台風 → 洪水
- エルニーニョ → 干害
- 農耕地の塩類集積
  - ← 沿岸地域の洪水
  - ← 乾燥による塩類の濃縮

## 気候変動に耐える稲 IRRI の新品種

- 洪水に堪える稲
- 干害に耐える稲
- 塩害に耐える稲
- 高温に耐える稲
- 問題土壌に耐える稲 (亜鉛欠乏・カリウム欠乏・鉄過剰・アルミニウム過剰)
- [https://www.youtube.com/watch?feature=player\\_embedded&v=\\_7ygEfvBBY4#t=0](https://www.youtube.com/watch?feature=player_embedded&v=_7ygEfvBBY4#t=0)