



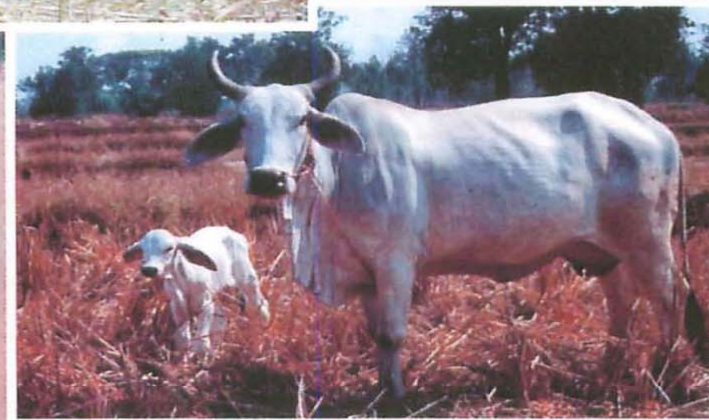
土と農作物

農学国際専攻

国際農業開発学研究室

岡田 謙介

(akokada@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp)



東北タイの風景

養水分の供給と保持のバランス

※なぜ作物栽培に土が必要か

- **水** : 吸水と通気性のバランス
- **養分** : 吸収のしやすさと保持のバランス
 - N : 有機物との結合による調節
 - NH_4^+ : 陽イオン交換容量(CEC)
 - P : ミネラルによる保持、有機態
 - 陽イオン(K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) :
 - 陽イオン交換容量(CEC)
- **有機物(C)** : 粘土鉱物との結合による保持

保水性と通気性のバランスの鍵＝土壌団粒

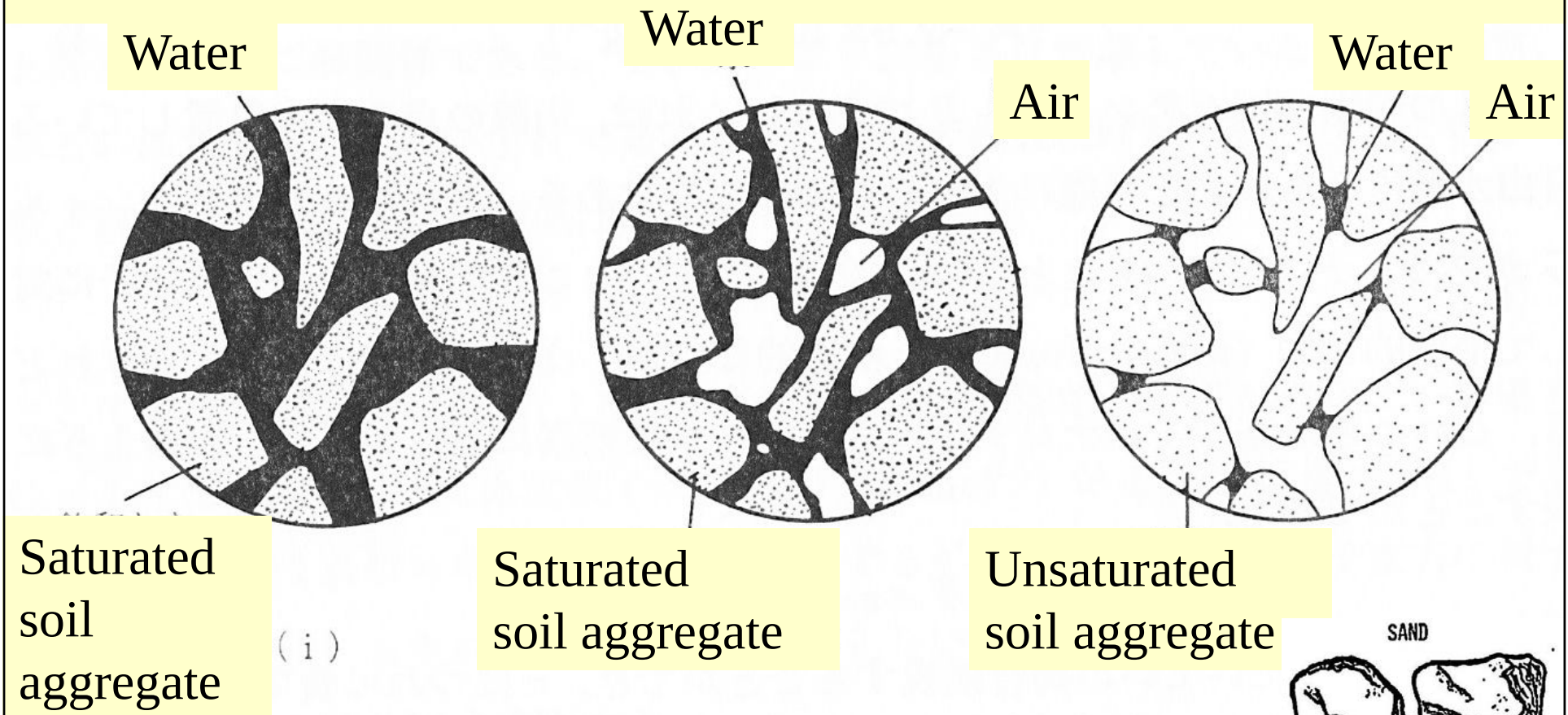
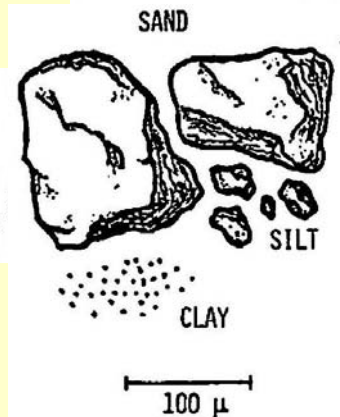


図 2.5 団粒化した土壌における水分喪失過程

Youngs, E. G. (1965) *Society for Experimental Biology Symposium* 19,



aggregate = 団粒

1. Stabilization of soil C by soil particles

Mean residence time

	C content native (g m ⁻²)	C content disturbed (g m ⁻²)	C loss (g m ⁻²)	C loss (%)	MRT	C loss* (yr)	MRT ¹⁴ C (yr)†
Canadian chernozem (prairie; 65 yr cultivation)							
Whole soil (-20 cm)	8,750‡	4,500‡	4,250‡	49‡		98‡	ND
Coarse C	3,250‡	1,000‡	2,250‡	70‡		55‡	ND
Mineral-assoc. C	5,500‡	3,500‡	2,000‡	36‡		144‡	330
Brazilian ferralsol (semi-arid thorn-forest; 6 yr cultivation)							
Whole soil (-20 cm)	3,380§	2,000§	1,380§	40§		11§	ND
Coarse C, root C	380§	0§	380§	100§		0.5§	ND
Mineral-assoc. C	3,000§	2,000§	1,000§	33§		15§	113% modern
Venezuelan ferralsol (rainforest; 3 yr slash-and-burn)							
Organic layer	7,000	1,300	5,700	81		2	ND
Whole soil (-15 cm)	5,100	3,600	1,500	29		9	ND
Coarse C, root C	2,800	ND	—	—		—	ND
Root C alone	500■	500■	0	0		0.4#	ND

* MRT was calculated as the inverse of the decomposition constant k , assuming that C declines from the native value C_n following $C = C_n e^{-kt}$. For the organic layer, k was obtained from litter decomposition studies and from the relationship of litter production to standing stock. For soils, k was based on three measurements of the C decline over three years for the Venezuelan, and one measurement each for the Canadian and Brazilian soils. † MRT equals radiocarbon age; ‡ ref. 6; § ref. 3; || ref. 19; ■ refs 17, 18; # refs 10, 17; ND, not determined.

(Tiessen et al. 1994, NATURE)

2. Soil C affects soil CEC (cation exchange capacity)

1. 熱帯の主要な土、その性質とそのメカニズム
2. 東南アジアの土壌



半乾燥熱帯インドデカン高原の土壌 (Alfisols)

世界の土壌

6

Order	相対面積 (%)	Order	相対面積 (%)
Gelisols 極地、2m以上の永久氷の下	～9.1	Aridisols 乾燥地のCaCO ₃ 集積土壌	～12
Histosols 有機物集積、寒地、湿地	～1.2	Ultisols 強風化、粘土集積層	～8.1
Spodosols 北方森林土壌	～4.0	Molisols 乾燥地の草原土壌	～7.0
Andisols 火山灰土壌	～1	Alfisols やや乾燥地、粘土集積層	～10.1
Oxisols 熱帯・亜熱帯の強風化土壌	～7.5	Inceptisols 未風化、沖積地など	～17.0
Vertisols 粘土質、膨潤伸縮、ひび割れ	～2.4	Entisols 新しい土壌、砂漠など	～16

■おすすめリンク Univ. Idaho, Soil & Land Resources Div. 12の土壌オーダーについて
<http://soils.ag.uidaho.edu/soilorders/orders.htm>

1. Oxisols

- 湿潤熱帯(熱帯降雨林、湿潤サバンナ等)
- もっとも風化と溶脱が進んだ土壌
- 易風化鉱物は残っておらず、酸化鉄、酸化アルミが豊富
- **酸性**(pH4.3～)
- 低肥沃度
- 低CEC
- 物理性は優れており水分保持力と排水性がよい



ブラジル・セラード(カンポグランデ)

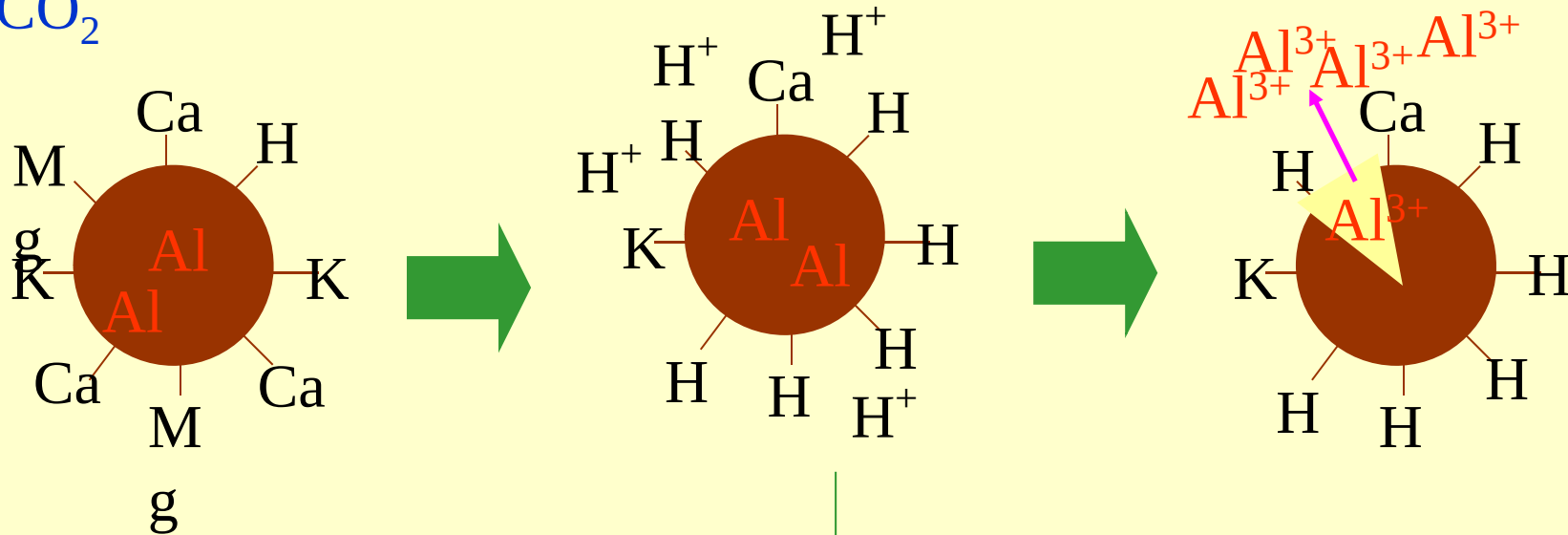
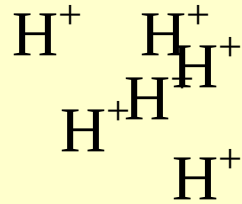
土壤酸性の要因① 母岩 Igneous rocks (火成岩)

	Felsic Acid rock 酸性岩	Intermedate 中性岩	Mafic Basic rock 塩基性岩	Ultra mafic 超塩基性岩
volcanic rock 火山岩	rhyolite 流紋岩 	andesite 安山岩 	basalt 玄武岩 	kimberlite キンバーライト 
plutonic rock 深成岩	granite 花崗岩 	diorite 閃緑岩 	gabbro 斑糲岩 	peridotite 橄欖岩 

土壤酸性の要因② 雨水

Cause of natural soil acidification in humid climate

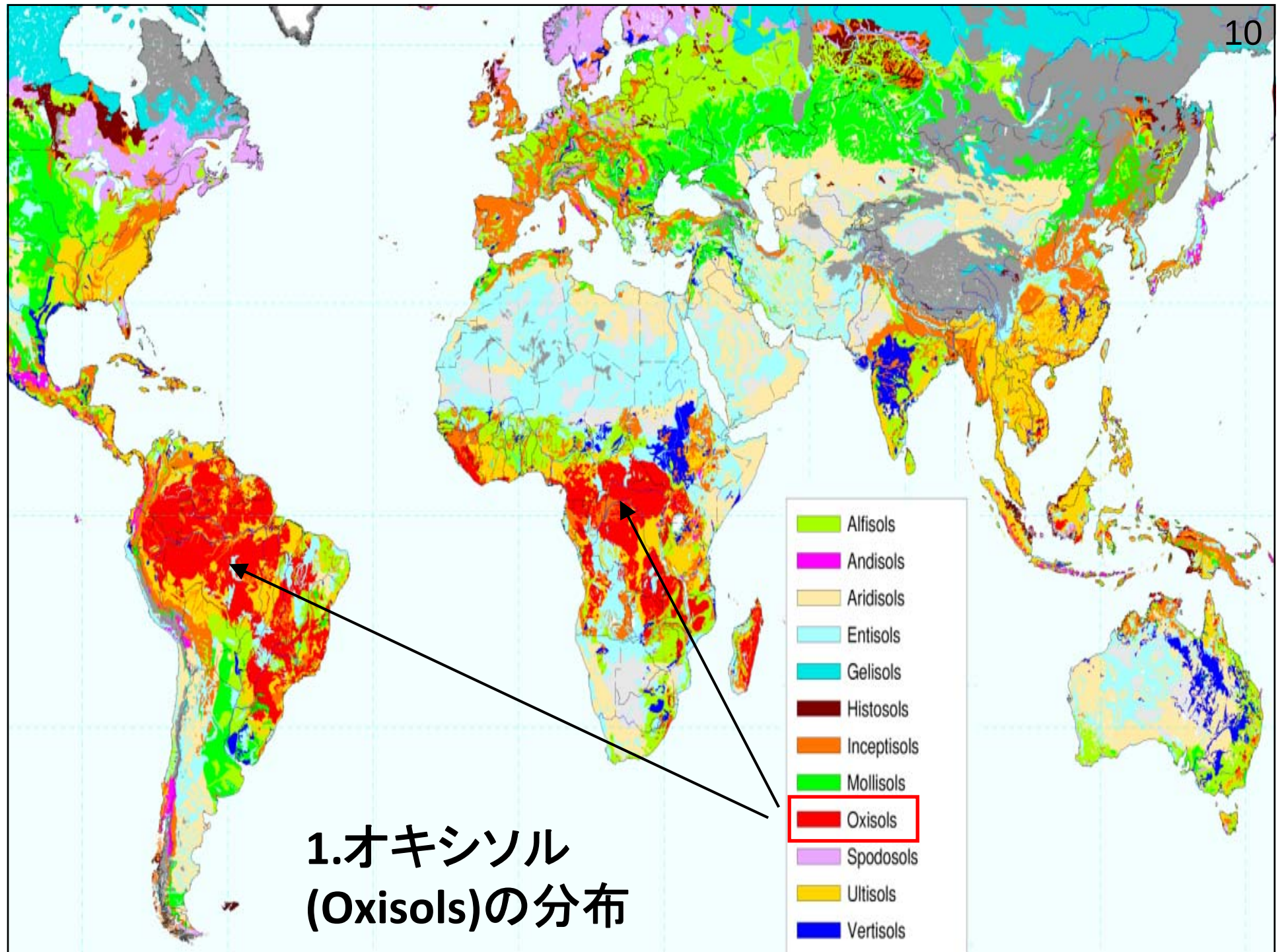
Rain
(pH=5.6)
due to
 CO_2



Leaching of cations
to sub soil or under water

$$\begin{array}{cc} \text{Mg}^{2+} & \text{Ca}^{2+} \\ \text{Mg}^{2+} & \text{Ca}^{2+} \\ \text{Ca}^{2+} & \text{K}^+ \end{array}$$

土壤酸性の要因③
土壤の古さ

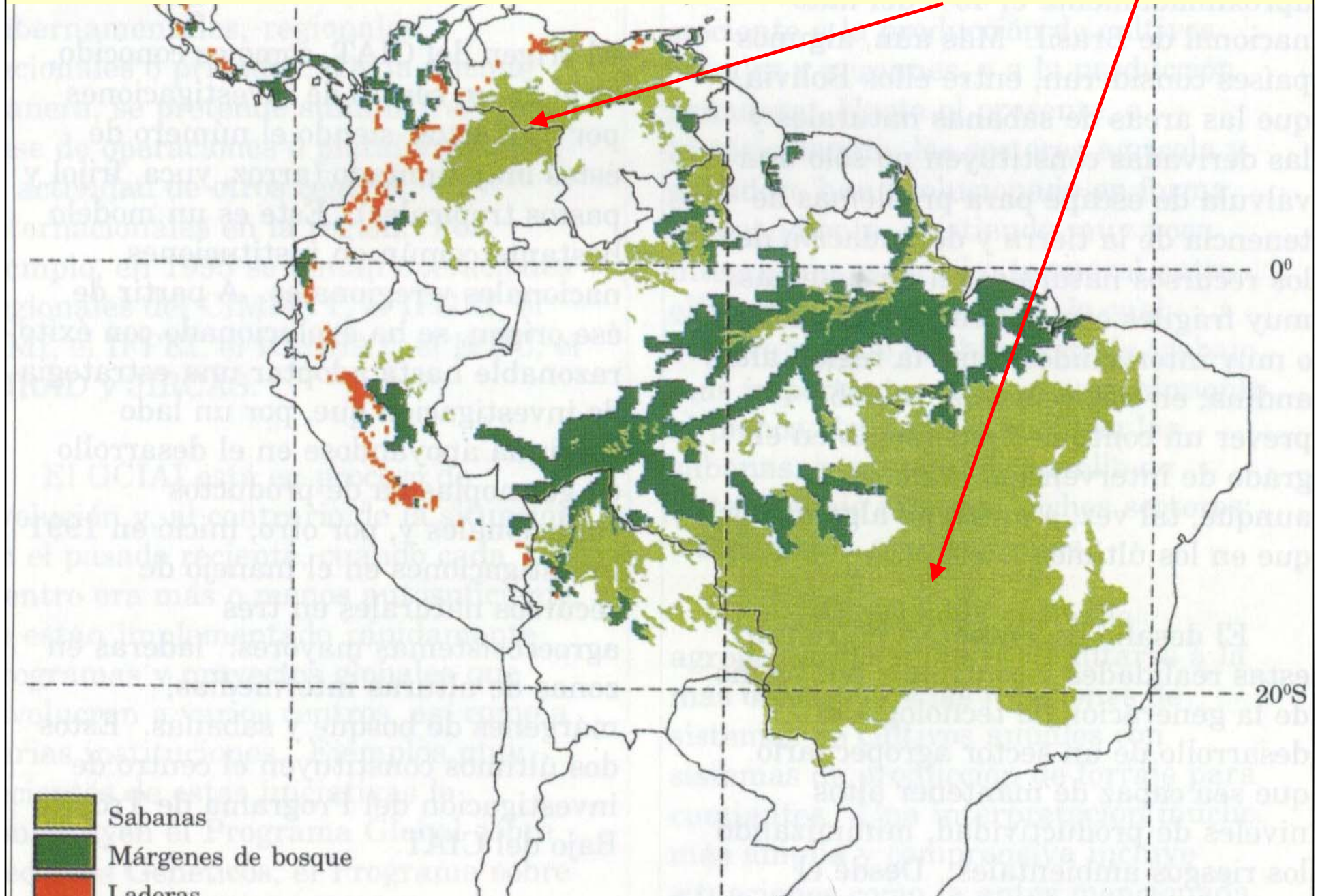


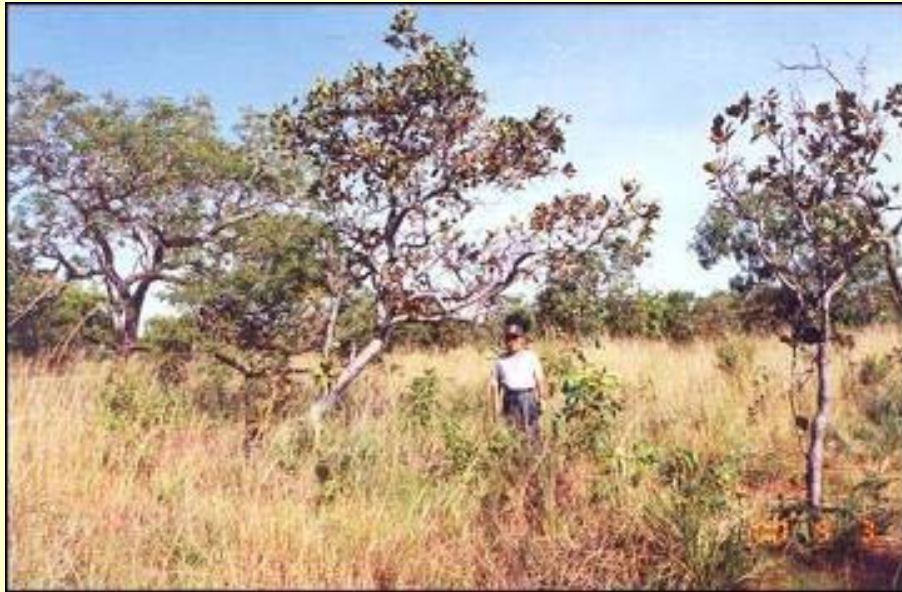
熱帯多雨林地域 森林伐採、種の多様性の減少、土壌流亡



リオ・ブランコ(ブラジル) by Okada

南米における亜湿潤サバンナ(ジャンスとセラード)¹²

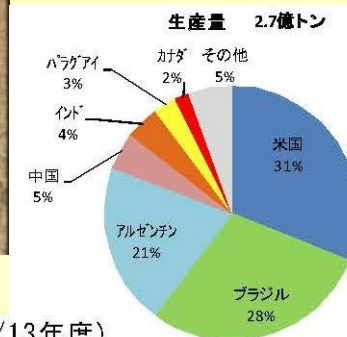




かつては農業が不可能な不毛な地と考えられていた



世界最大のダイズ生産基地へと変貌



世界の大豆のシェア (2012/13年度)



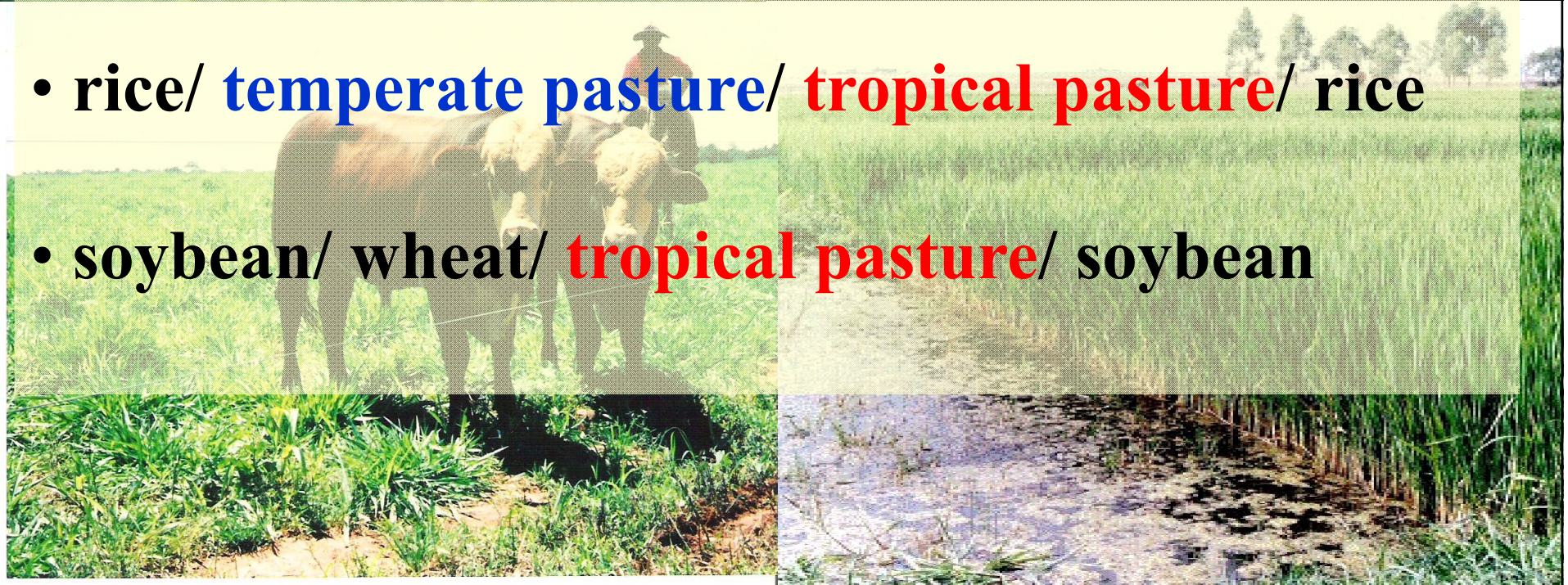
ダイズ生産の拡大(EMBRAPA)



Rice-pasture system at maturity of rice
(Rice + *Brachiaria* + *Centrosema*)

The main crop-pasture systems are:

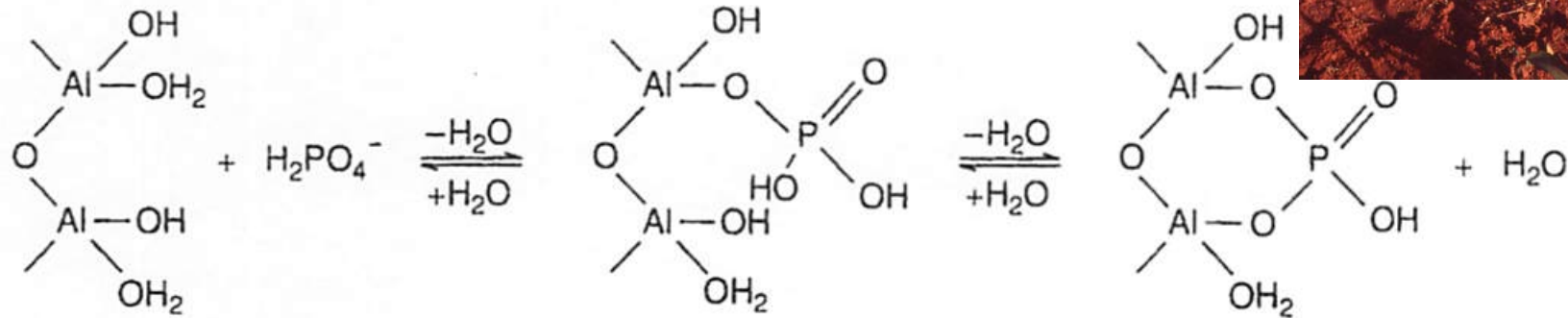
- wheat/ soybean/ **temperate pasture**/ maize
- soybean/ rice/ **temperate pasture**/ soybean/ rice
- rice/ **temperate pasture**/ **tropical pasture**/ rice
- soybean/ wheat/ **tropical pasture**/ soybean



Adsorption mechanisms of P



Acidic soils



Labile P

Nonlabile P

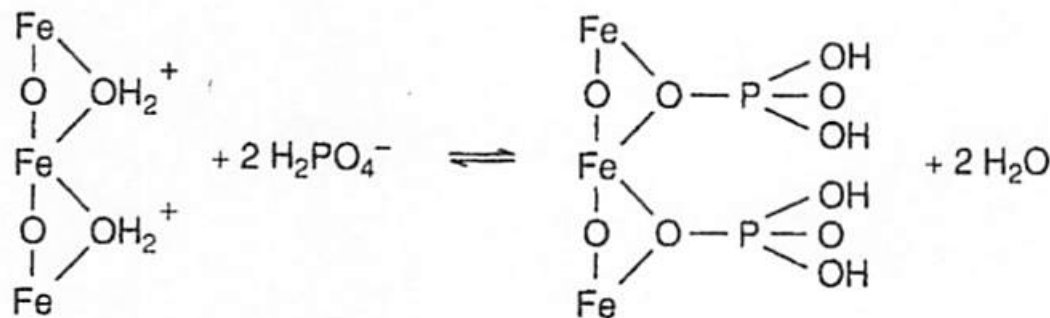
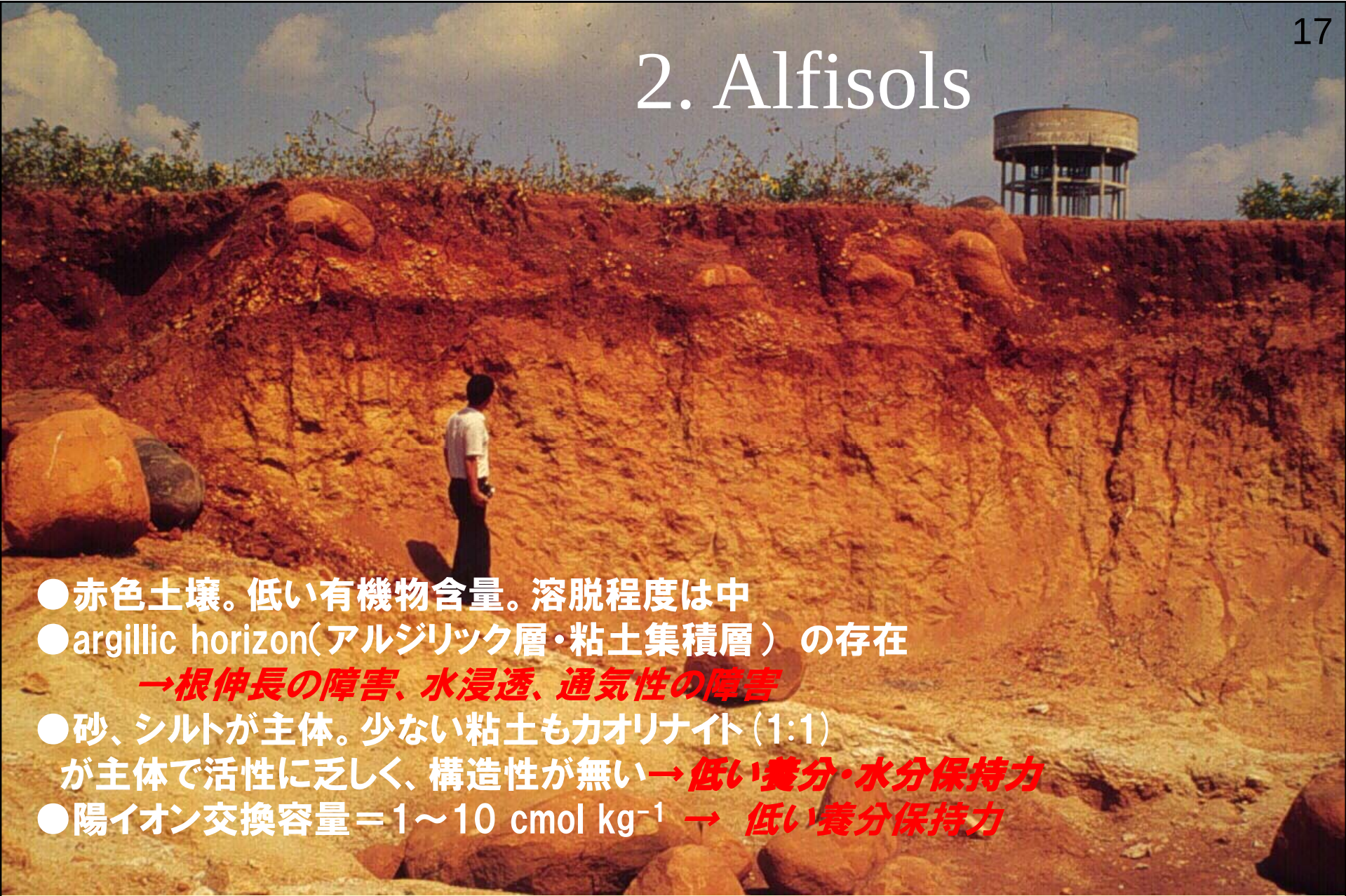


Figure 5-9 Mechanism of P adsorption to Al/Fe oxide surface. Phosphate bonding through one Al-O bond results in labile P; however, bonding through two Fe-O or Al-O bonds produces a stable structure that results in very little desorption of P.

Calcareous soils

1. low-P ----- small quantities adsorb CaCO₃ surface
2. high-P ----- Ca-P minerals precipitate on the CaCO₃ surface

2. Alfisols

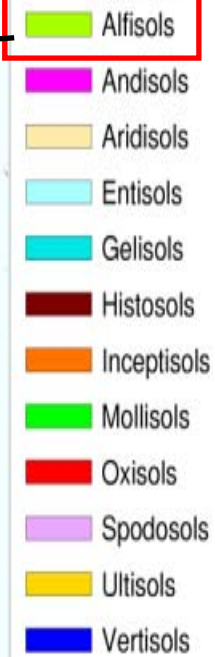
- 
- 赤色土壌。低い有機物含量。溶脱程度は中
 - argillic horizon(アルジリック層・粘土集積層) の存在
→根伸長の障害、水浸透、通気性の障害
 - 砂、シルトが主体。少ない粘土もカオリナイト(1:1)
が主体で活性に乏しく、構造性が無い→低い養分・水分保持力
 - 陽イオン交換容量 = $1 \sim 10 \text{ cmol kg}^{-1}$ → 低い養分保持力

インド・デカン高原のAlfisolの断面

分布(半乾燥地帯):

- ・東北ブラジル、パラグアイ
- ・西・南部アフリカ
- ・インド

4. アルフィソル Alfisols



Alfisols : Low in Phosphorus

NPK trial of sorghum on an Alfisol fields

NPK

N

K

P

4-Sep-1986 ICRISAT, Panancheru, India

Alfisols

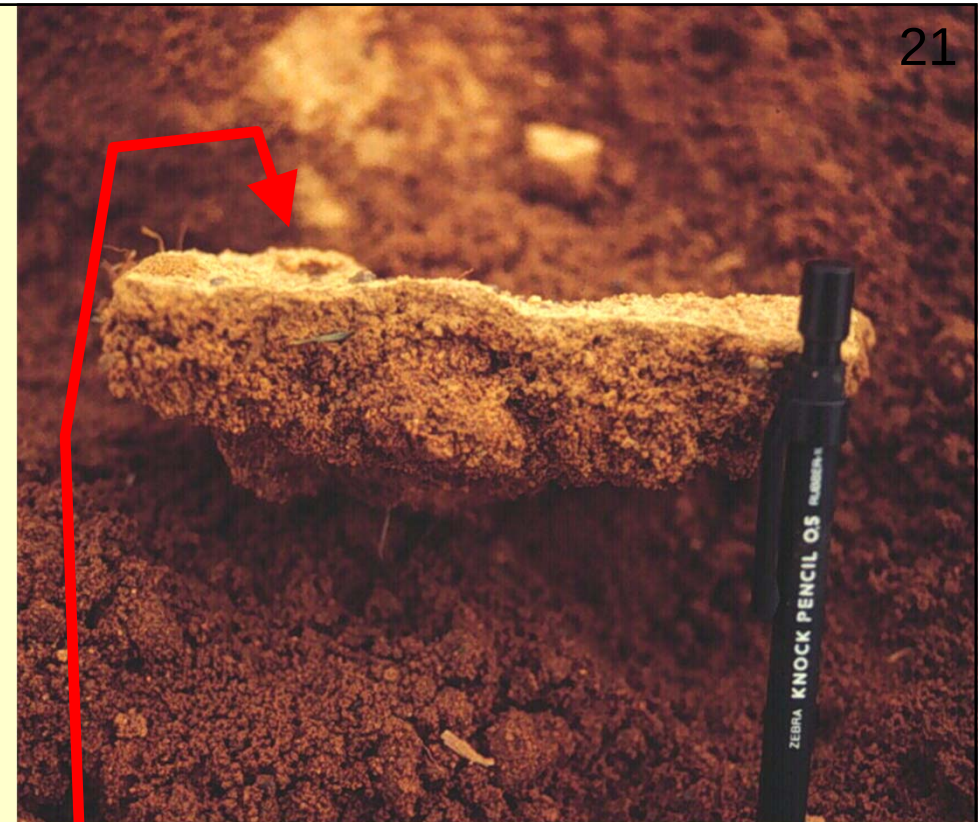
20



Low water holding capacity : Intermittent drought during rainy season

●固結性、コンパクション
→乾燥時の硬化。作業のしにくさ。

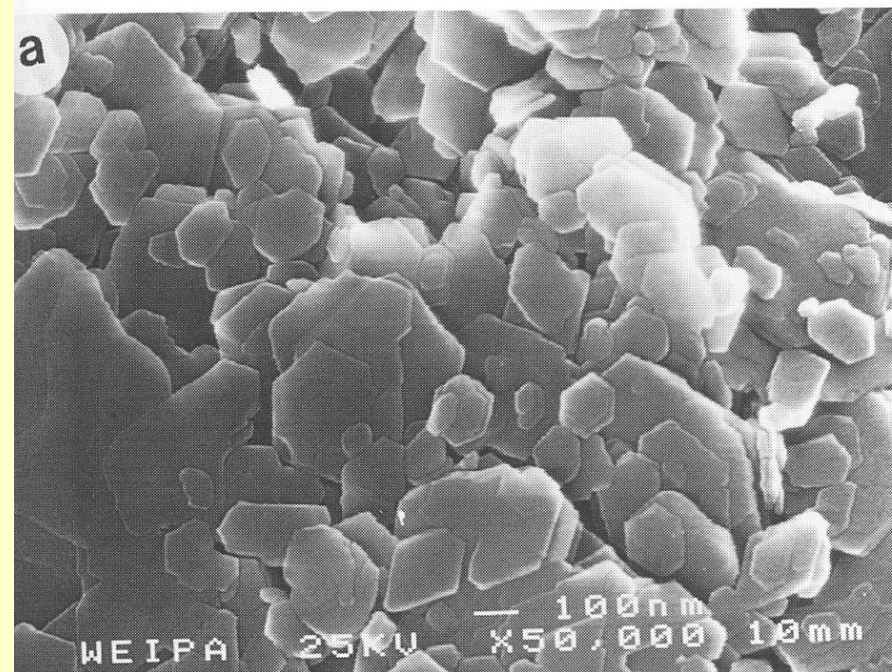
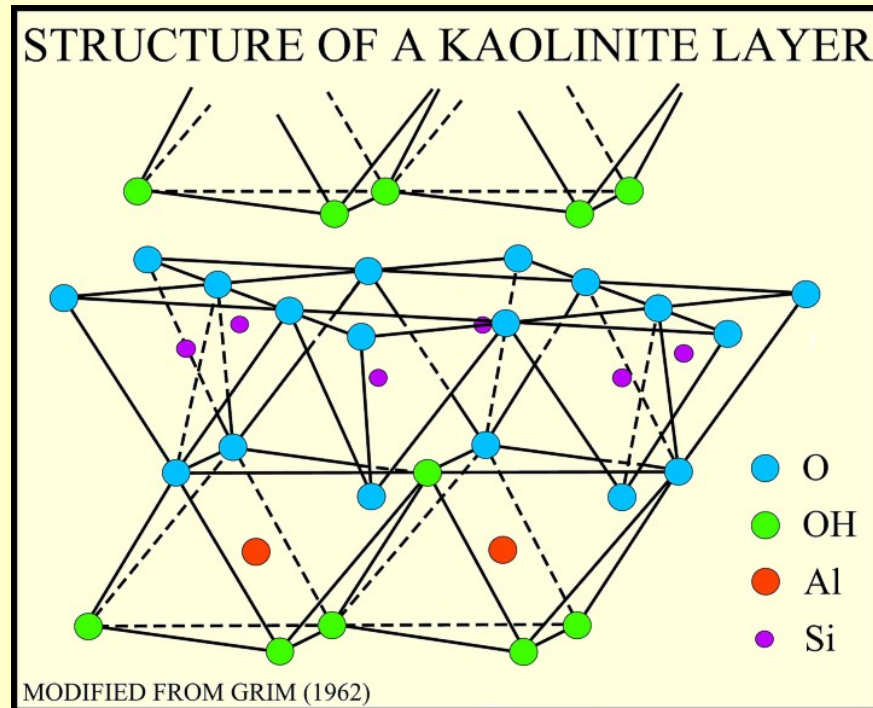
Alfisolのクラスト問題



団粒が弱く、粘土が分散（水中に浮遊）しやすいために、表面水が下に抜けるときに、土壌表面の孔隙に粘土粒子が詰まり、乾燥すると堅くなる

→出芽阻害
→表面流去

kaolinite = major clay in Alfisols



SEM image of kaolinite

- Argillic horizon

- The layer in the soil at certain depth, to which dispersed clay minerals leached down and accumulated.
- This layer reduces water and air permeability, causes low infiltration.



Clay dispersion

24

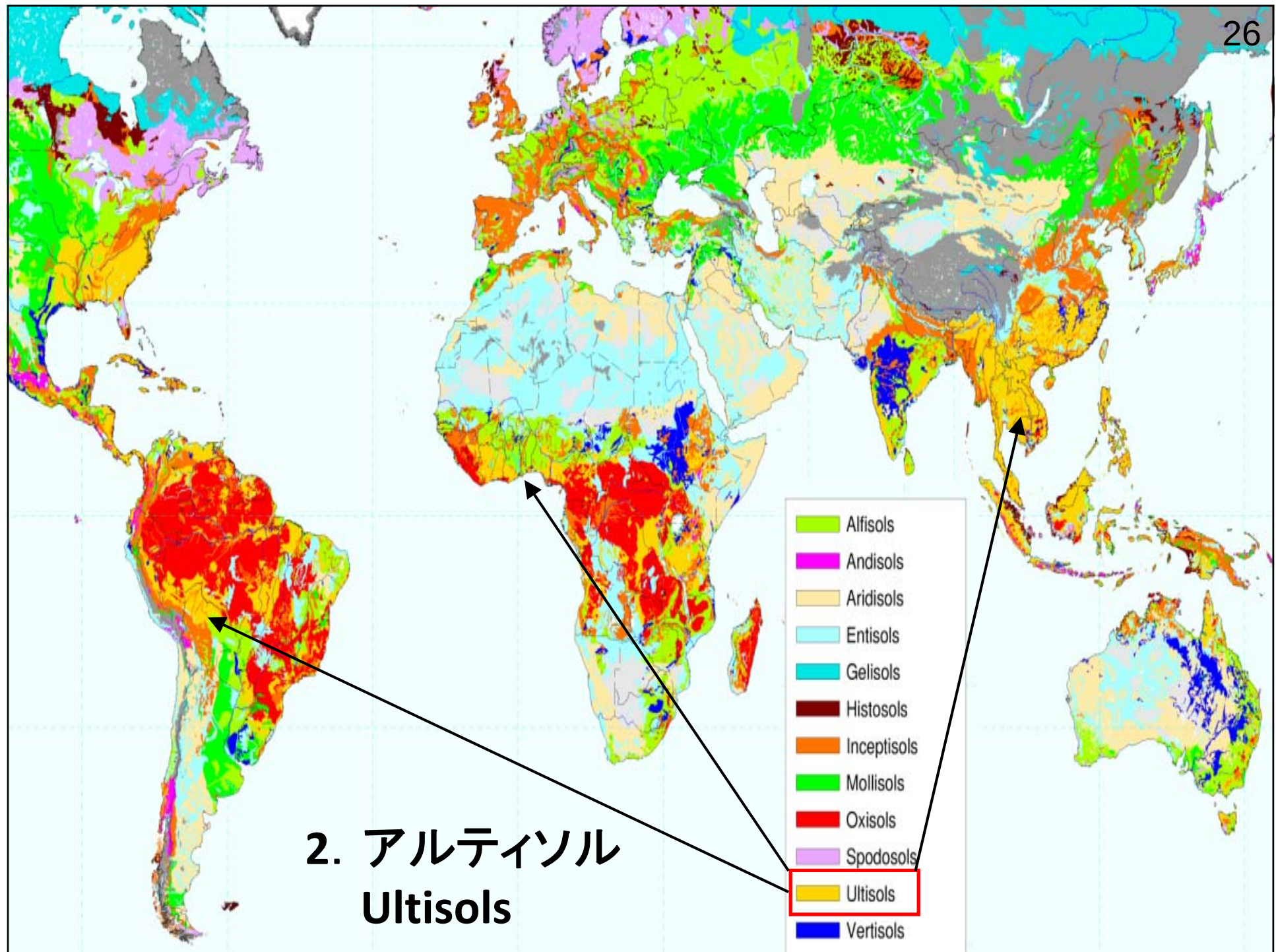


Higher pH increases dispersion of variable-charge clay (eg. kaolinite)

3. Ultisols

- 強度に溶脱された酸性の森林性土壌
- 主に湿潤な温帯～熱帯に分布
- 古くからの安定した土地に存在
- 一次鉱物の風化が起こり、養分(Ca, Mg, Kに乏しい)。
- Alfisolと同様に粘土集積層を持ちクラストも生じることがあるがAlfisolに比べると酸性。
- 風化の度合いはOxisolsより若干低い。
つまりOxisolsよりは若い土壌。
- 中程度のリン固定力を持つ

Order	風化程度	酸性	気候
Alfisols	弱		半湿潤～半乾燥
Ultisols	中	中	中
Oxisols	強	強	湿潤



水田においてしばしばリン欠乏が見られる

- また、鉄過剰もみられる（P,K欠乏ぎみで、水が停滞する場所。なおかつ、その水田の上に斜面があり、そこを流れてきた水が流れ込むような場所によく起きる。

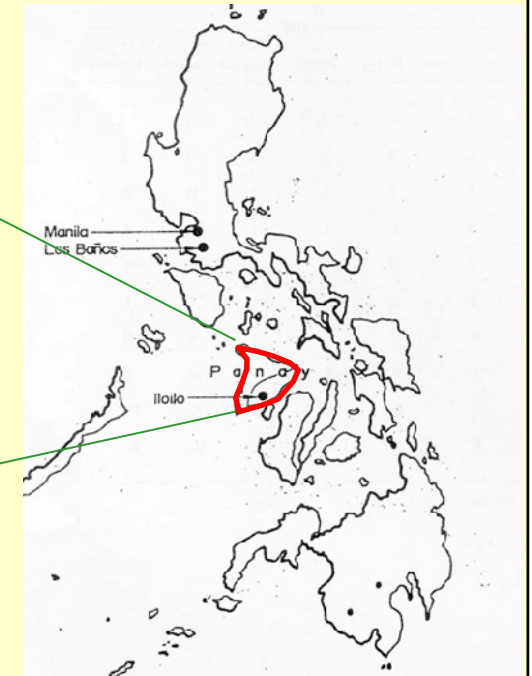
（写真：フィリピン、パナイ島）

水稻の鉄過剰症

Panay island, Dan Dionisio (Screening site of IRRI for Fe toxicity and low P)

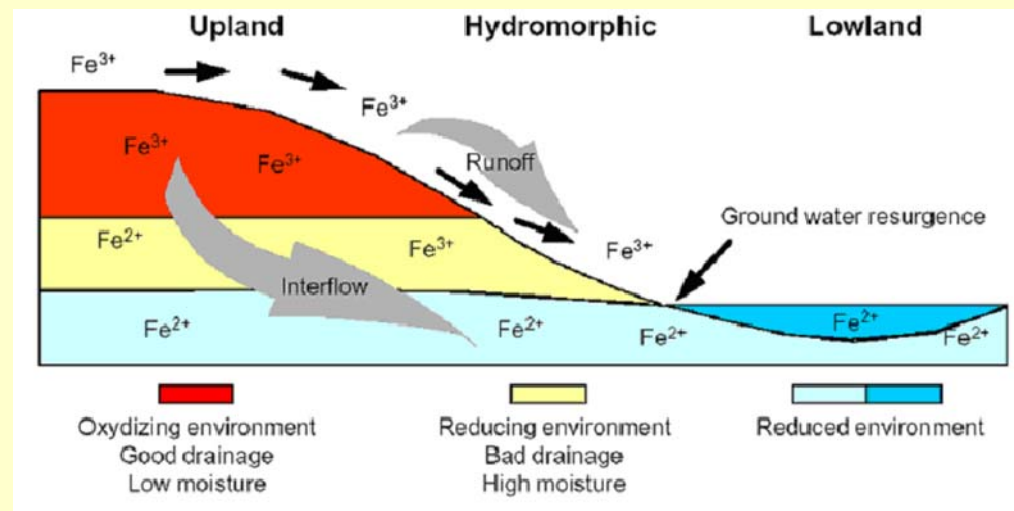


イネの葉のbronzing
(鉄過剰症)(フィリピン、
パナイ島)



Mechanism of iron toxicity

29



(WARDA, 2002)



Fe^{3+} of low pH in flooding water



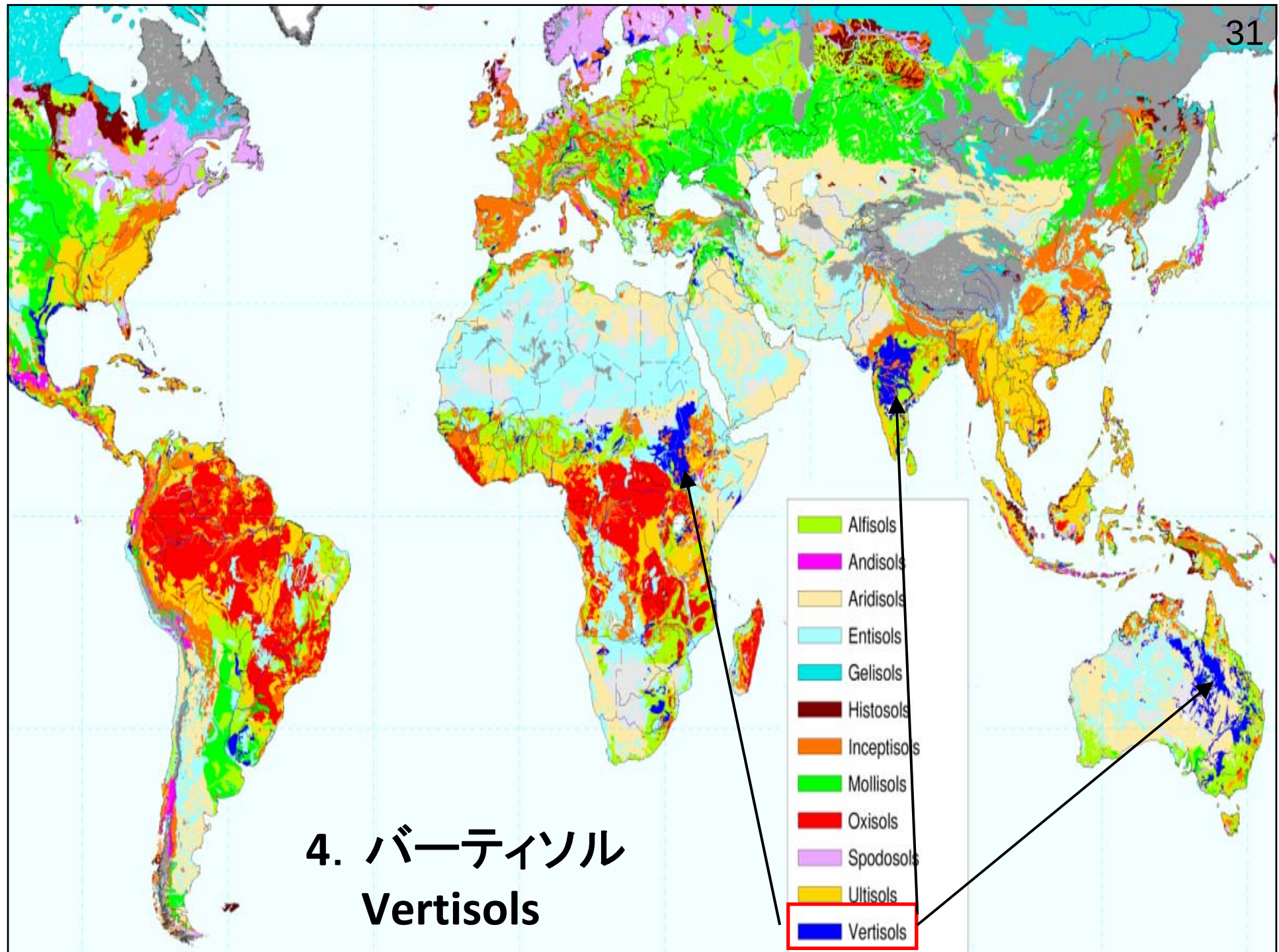
Fe^{2+} in reduced layer of the soil
(black color)

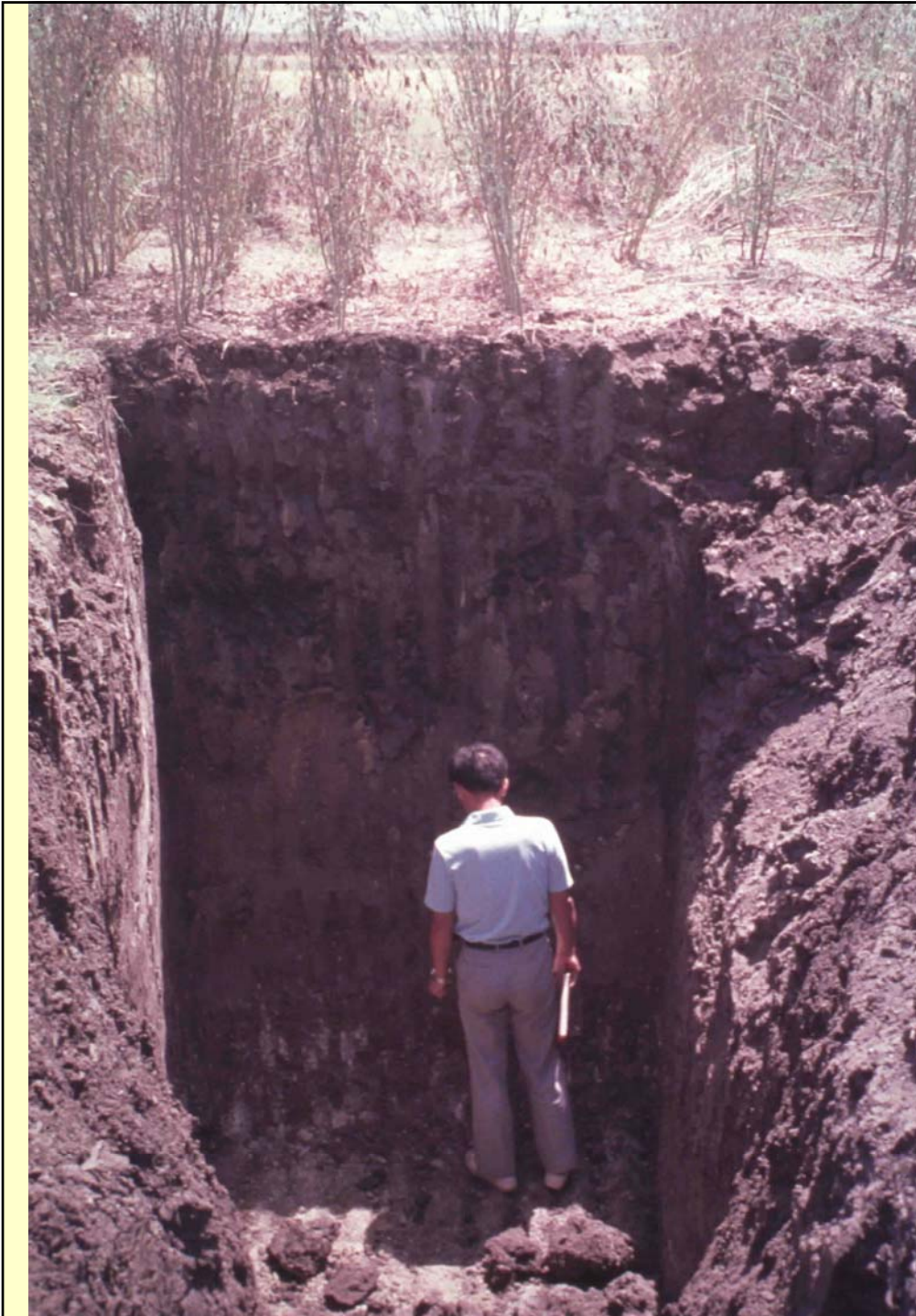
4. Vertisols (black cotton soils)



- 分布：インド、スーダン、エチオピア、オーストラリア、米国等（生成に水が関与）
- 深い土層（数m）。
- 黒色であるが、低い有機物含量（有機C含量0.2%程度）。
- 乾期に亀裂(数cm幅、数m深)。雨期に粘土状(→**遅い排水と通気性不良**)。
 - ・ 重粘土質（粘土含量30%以上）→ **高い保水力**
 - ・ 2:1構造の粘土（通常モンモリロナイト）が主。
 - ・ 中～塩基性。陽イオン交換容量=47～66 cmol kg⁻¹
→ **高い肥沃度と養分保持力。**

インド・デカン高原のVertisol(黒色綿花土)（雨期の初め）





乾期のひび割れ(米国ユタ州)

Vertisolの
垂直断面(乾期)
(インド、デカン高原)



Usually very dark, but the organic matter content is low (Organic C = ca. 0.2%)

- Heavy soils with high clay content is high (>30%)
- Having high water holding capacity



(wikipedia)

Problem of water logging and deteriorated aeration during heavy rain



Traditionally the farmers did not use the Vertisol fields during the rainy season, but in the post-rainy season utilizing residual water owing to the high water holding capacity and deep soil layers.

But now it is utilized during the rainy season thanks to the broad-bed and furrow technologies



- Swelling (wet) and Shrinking (dry) nature of the Vertisols



(Vertisols at ICRISAT)



Cracking in dry season
(Utah state in US)

The soils form **deep crack** in the dry season, and cause **self-mulching** due to this nature.

What gives this nature to Vertisols?



gilgai

2:1 clay (montmorillonite)



High surface area
High cation exchange capacity
(CEC=47-66 cmol kg⁻¹)
High fertility and high nutrient retention capacity

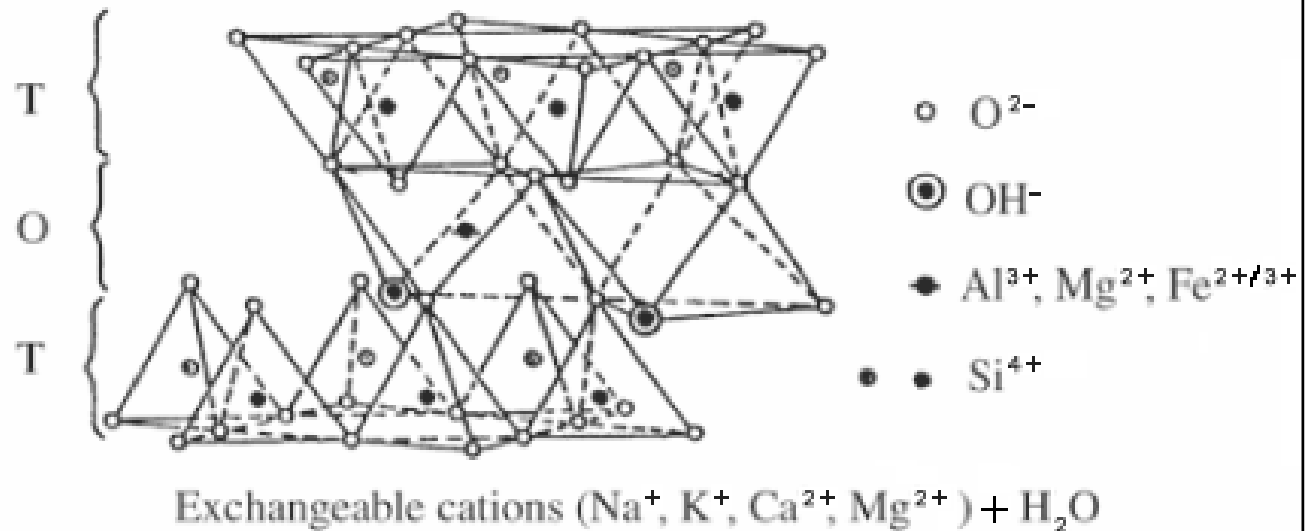
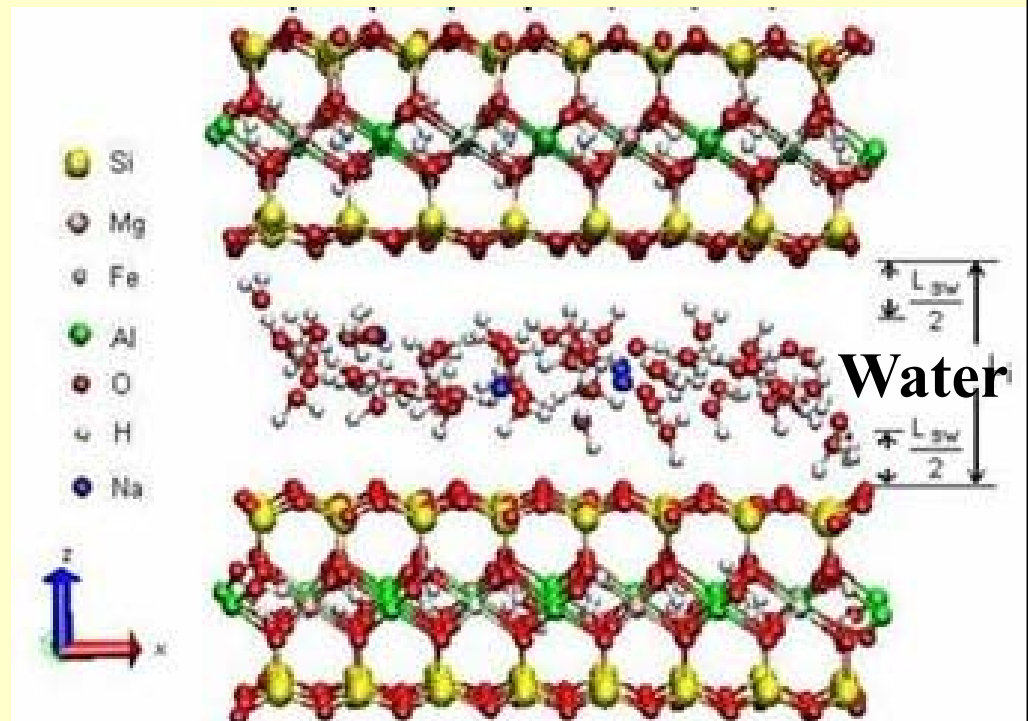


Figure 1. Montmorillonite structure. T: tetrahedral sheet; O: octahedral sheet.



Formation of Vertisols

- Mother rock = highly basic rock (eg. basalt)
- Climate seasonally humid or subject to erratic drought and floods,
- Tropical savanna, semi-arid

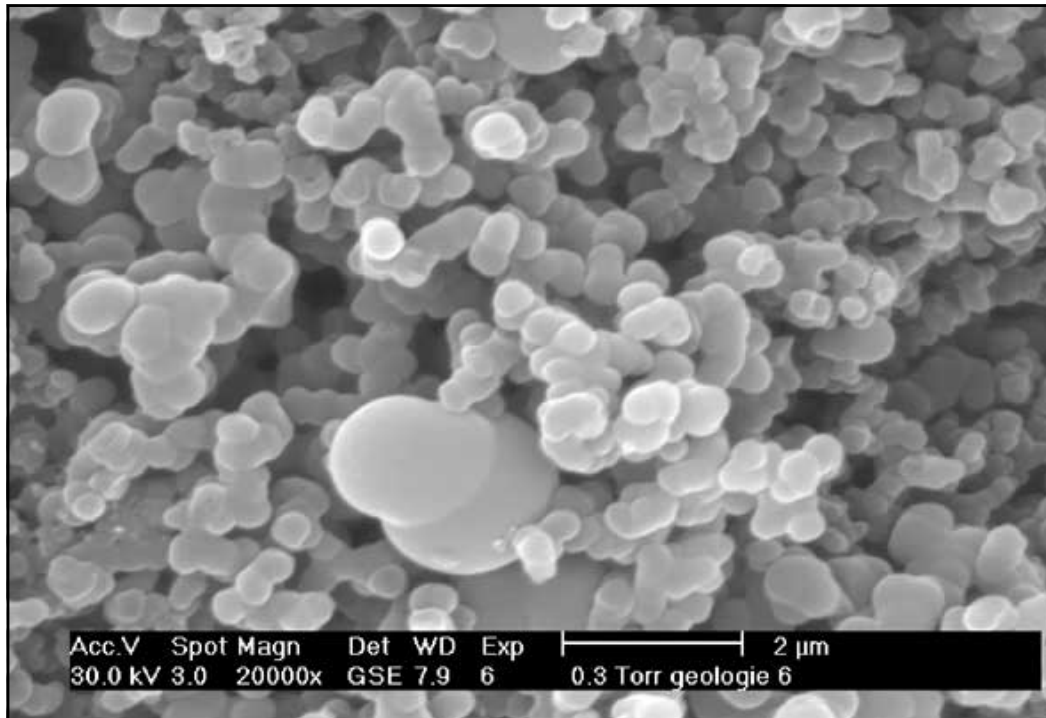
Deccan shield = old soils

- Deccan plateau is the shield or craton, which is the oldest land not affected at least 500 millions years.

5. Andisols

- Dark soil (*Kuroboku-do*, black soil in Japanese)
- Volcanic soils
- Low bulk density (sometimes less than 1)
- Allophane, imogolite and halloysite, etc.
- Usually fertile because they are the young soils, but high in P fixation, and acid nature





Allophane (amorphous material)

Immogolite

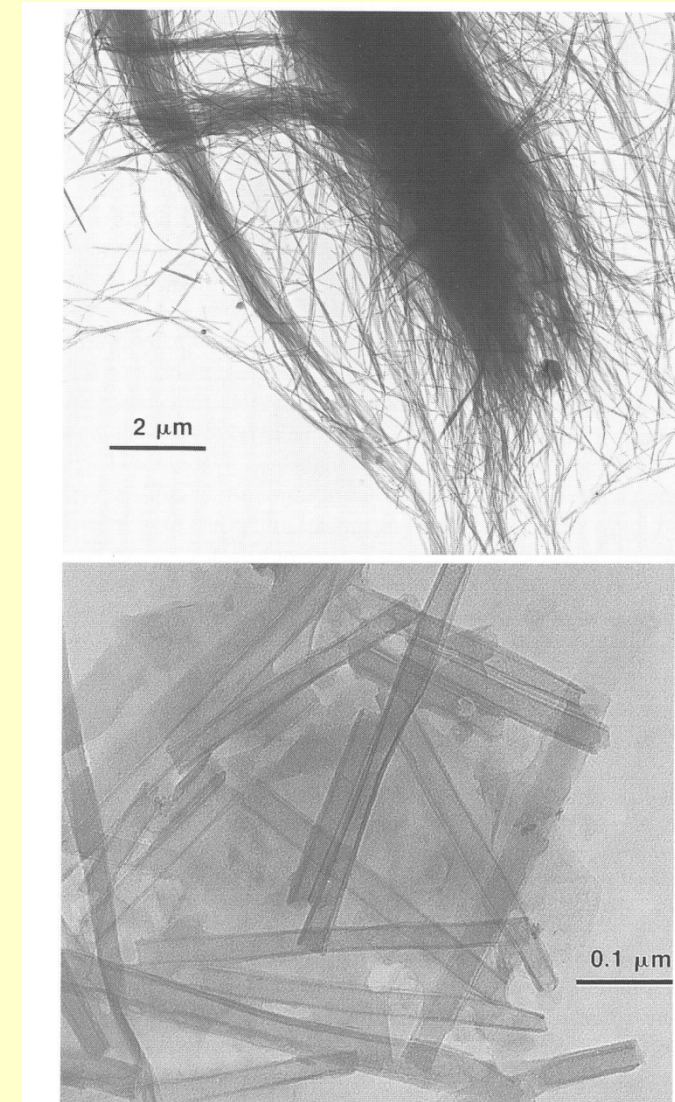
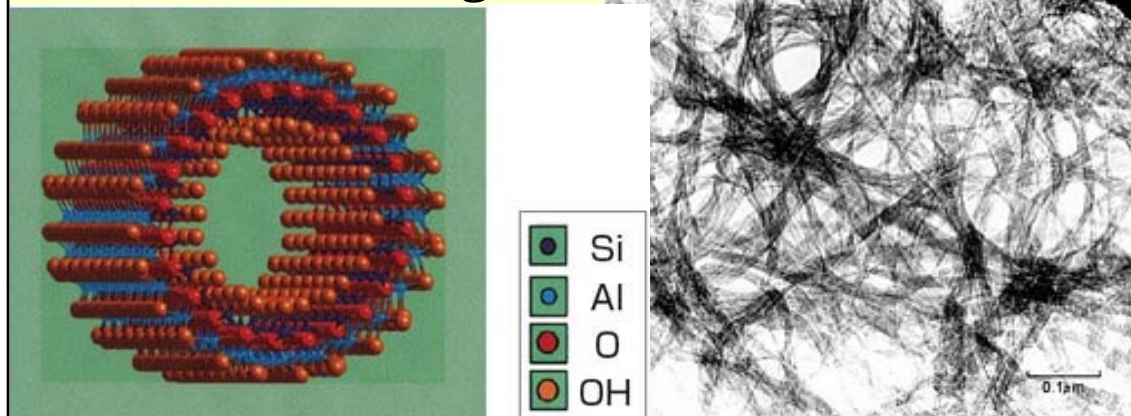
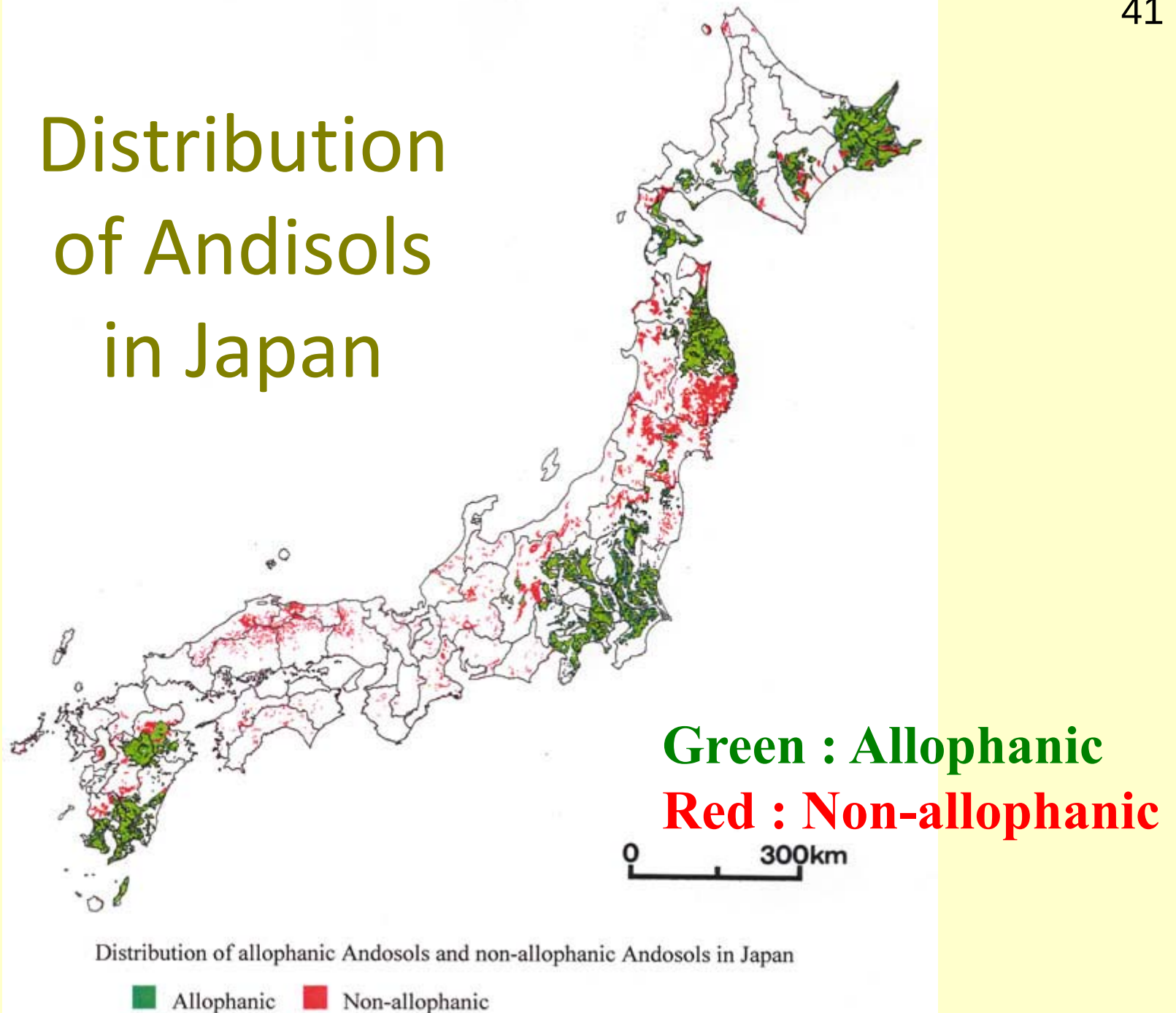


Fig. 16 Micrographs of Para Vista halloysite: (a) the thin walled tubes are ~ 250 Å diameter; (b) in the undispersed particles tubes are arranged as close packed fibres.

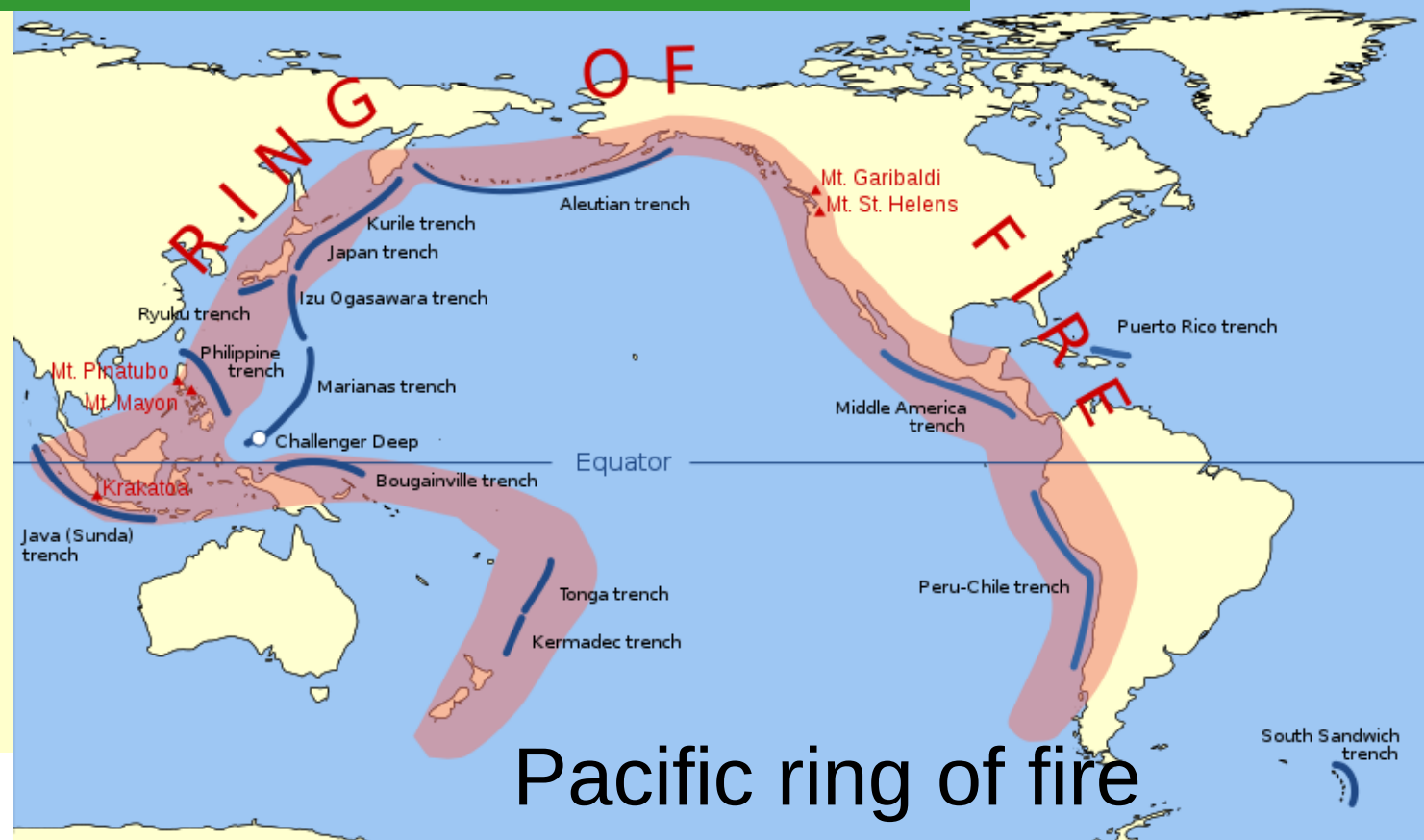
Halloysite

Distribution of Andisols in Japan



Two major volcanic belts in the world

42



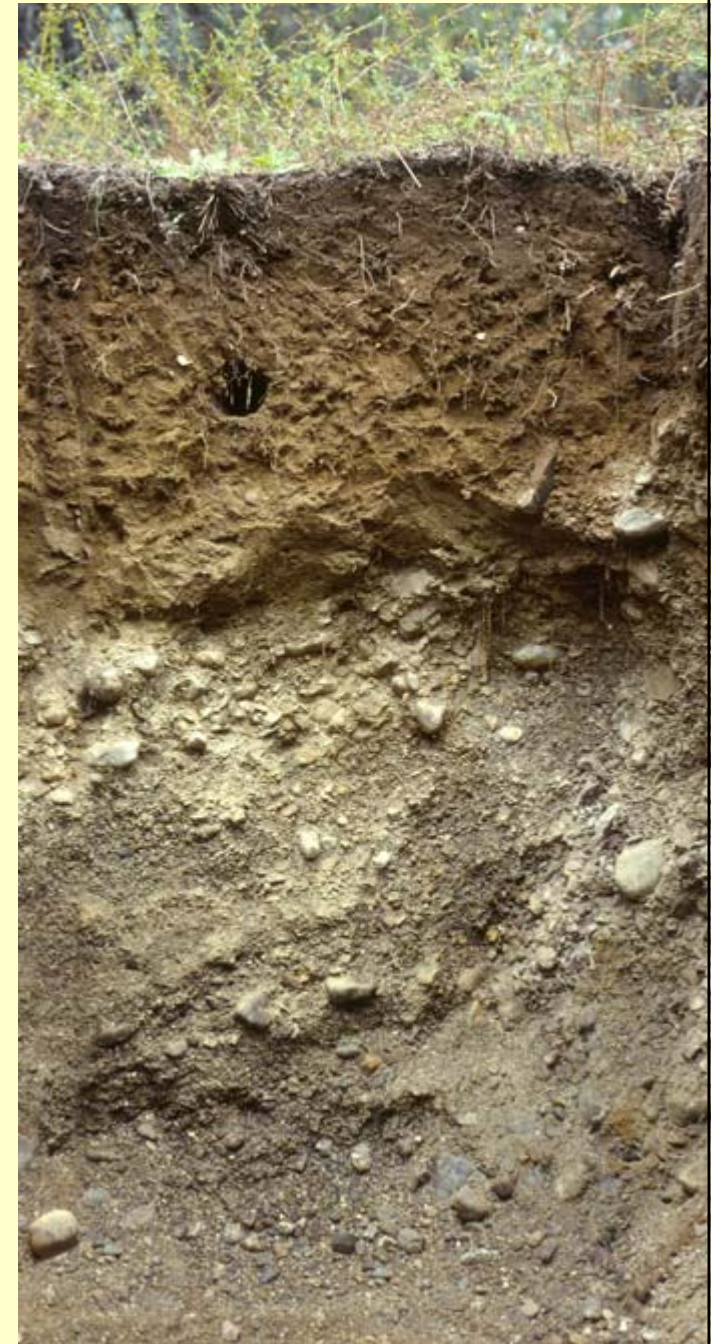
Pacific ring of fire



Alpide belt

6. Inceptisols

- Young soils (older than Entisols).
- No accumulation of clays, Fe, Al, or OM.
- Typically alluvial soils

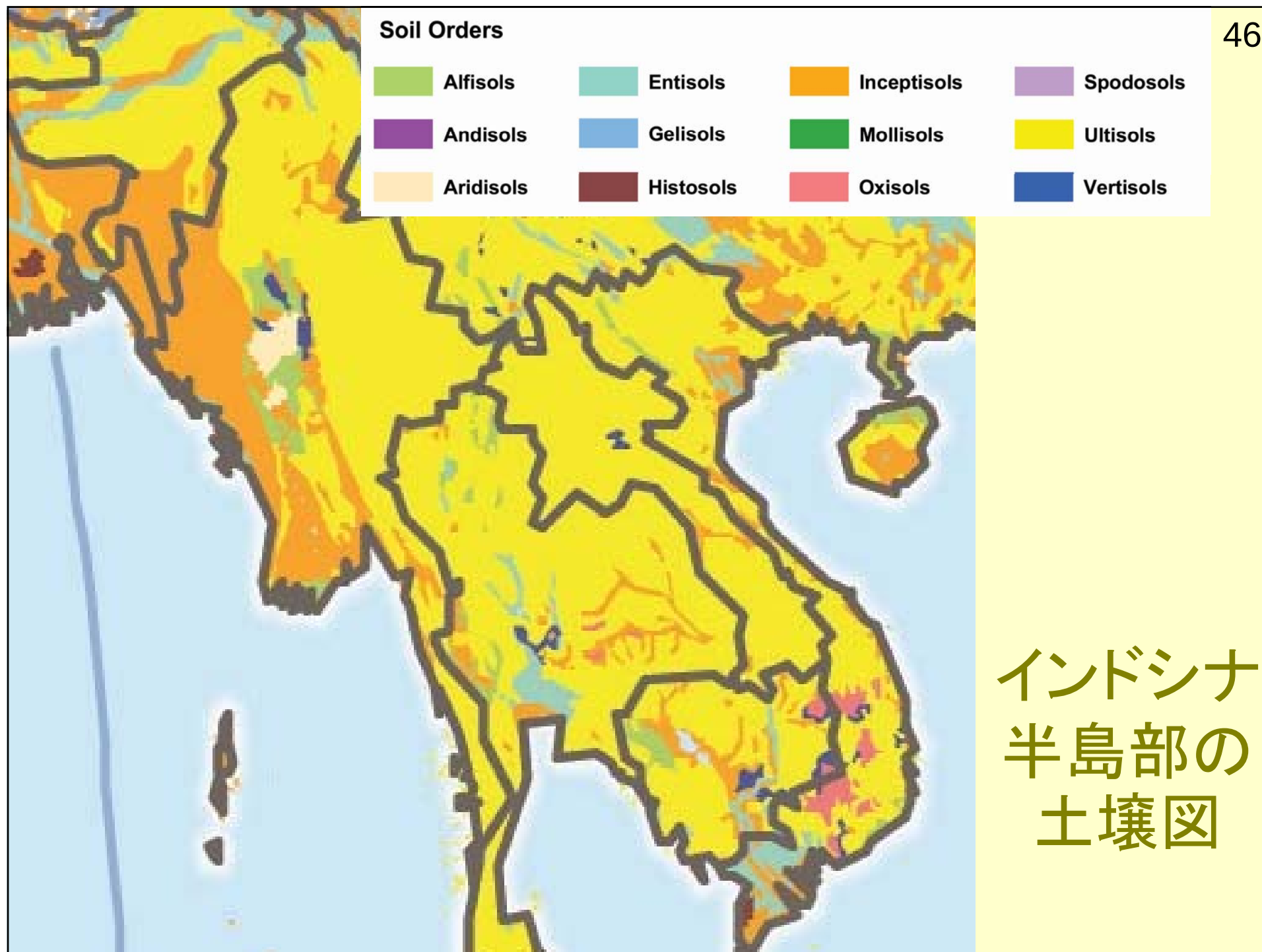


7. Entisols

- Youngest soils
- Many soils are sandy or very shallow



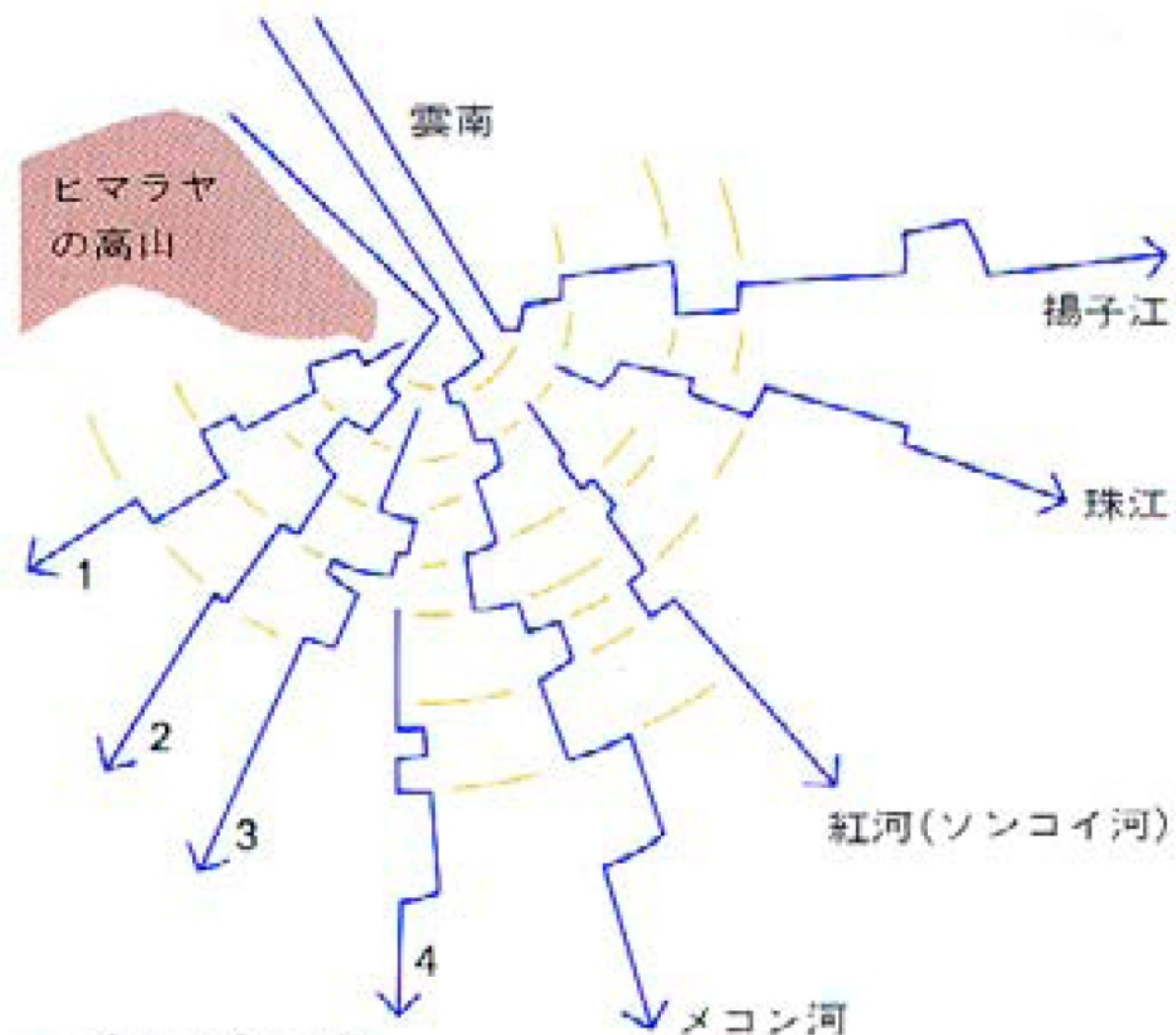
2. 東南アジアの土壌（東北タイ、ジャワ）



島嶼部



図2ー東南アジアの主要河川の流路模式図

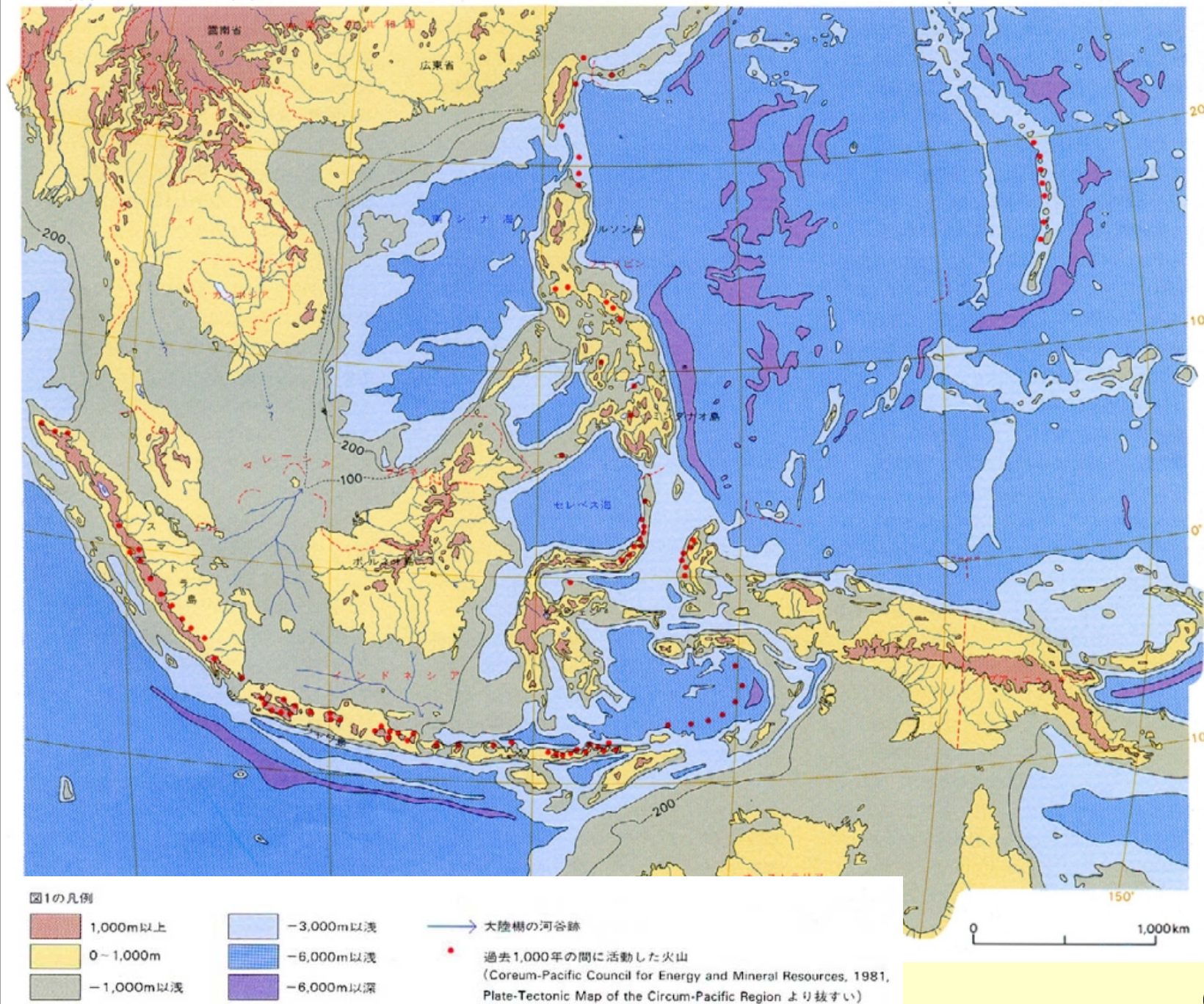


- 1 ブラマプトラ河
- 2 イラワジ河
- 3 サルウィン河
- 4 チャオブラヤ河(メナム河)

東南アジアの河川

(高谷1986)

図1ー東南アジアの地形と大陸棚



(高谷1986)

Development of Sustainable Agricultural System in Northeast Thailand through Local Resource Utilization and Technology Improvement

Edited by O. Ito and N. Matsumoto



Japan International Research Center for Agricultural Sciences (JIRCAS)

東北タイ

陸稲から、低地水田、河川に至る一連の地形

Ultisolにおける下層土のハードパン

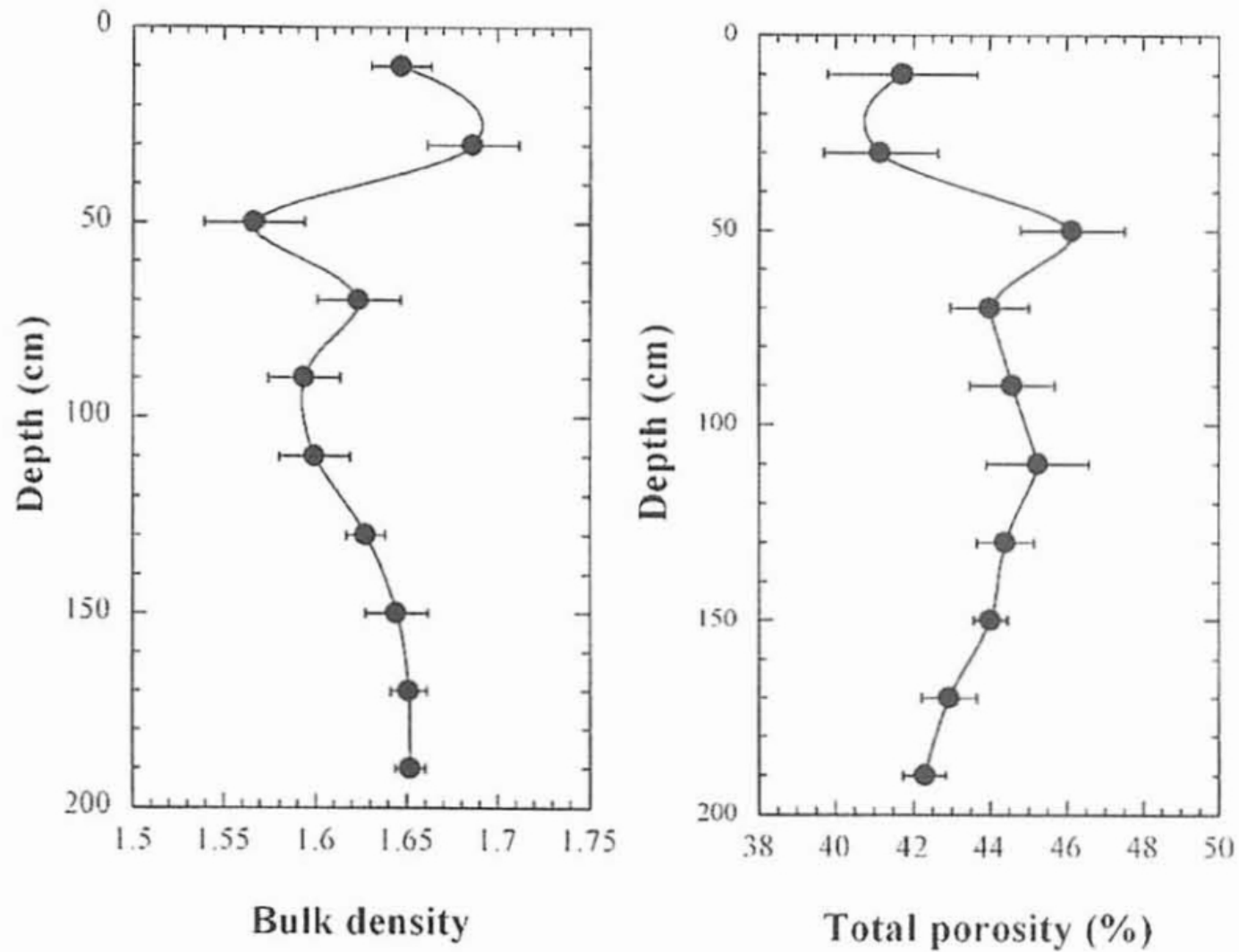


Fig. 1. Soil physical characteristics of experimental field.

(Matsuo et al.
2002)

サブソイラー播種機

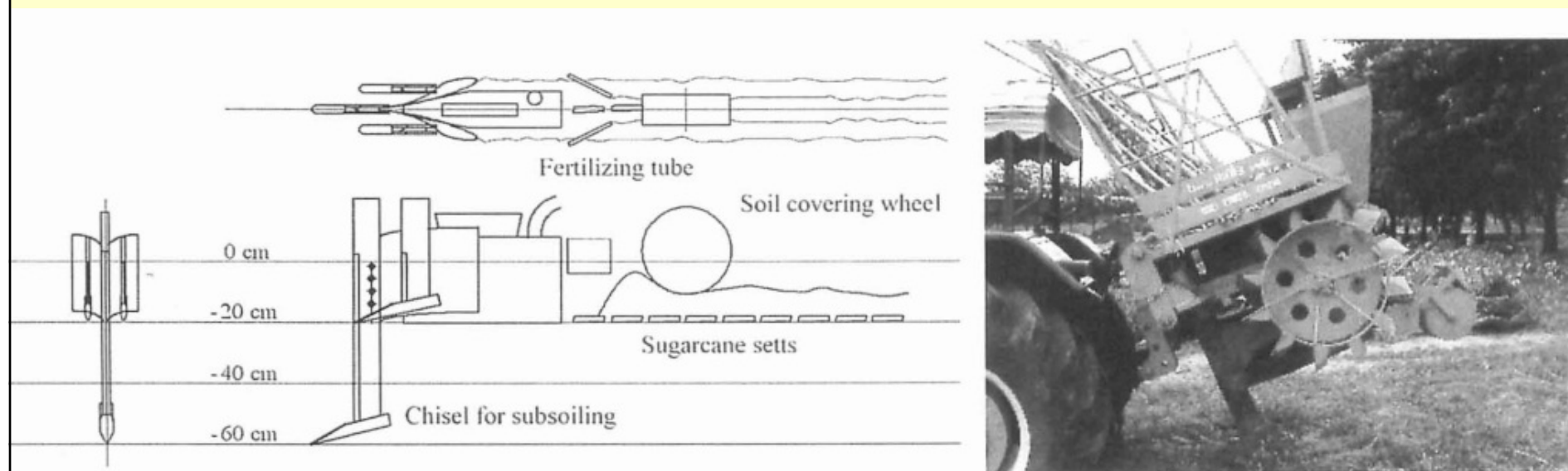


Fig. 5. Structure of developed attachment for planting and subsoiling.

(Matsuo et al. 2002)

サブソイラーの下層土への 水の浸透促進効果

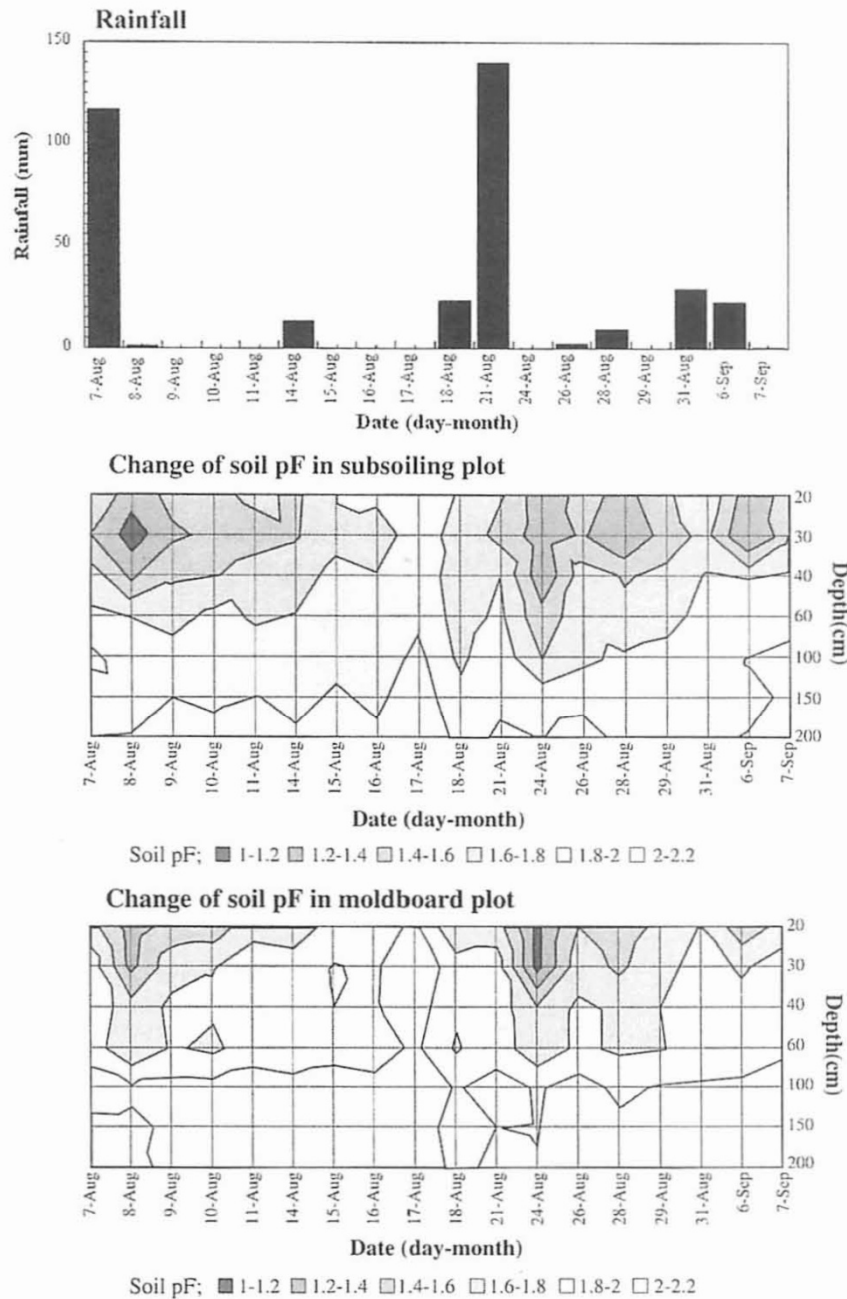


Fig. 2. Effect of tillage treatment on the changes of soil pF at different depths of the soil.



(Matsuo et al. 2002)

耕起法の違いがサトウキビの根系分布に及ぼす影響

(Matsuo et al.2002)

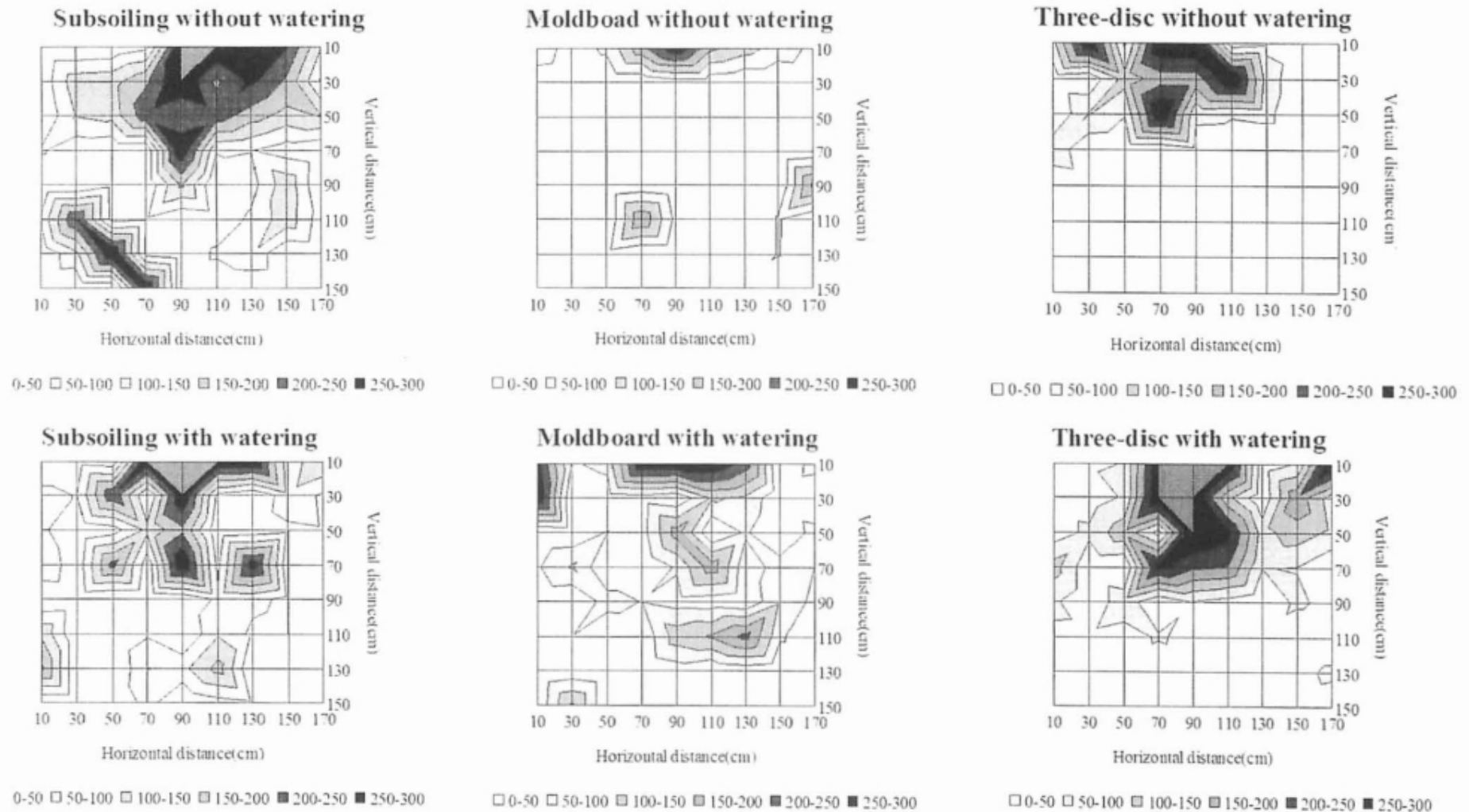


Fig. 4. Effects of tillage treatments and supplemental watering on the root distribution of sugarcane.

サブソイラーがトウモロコシの収量に及ぼす効果

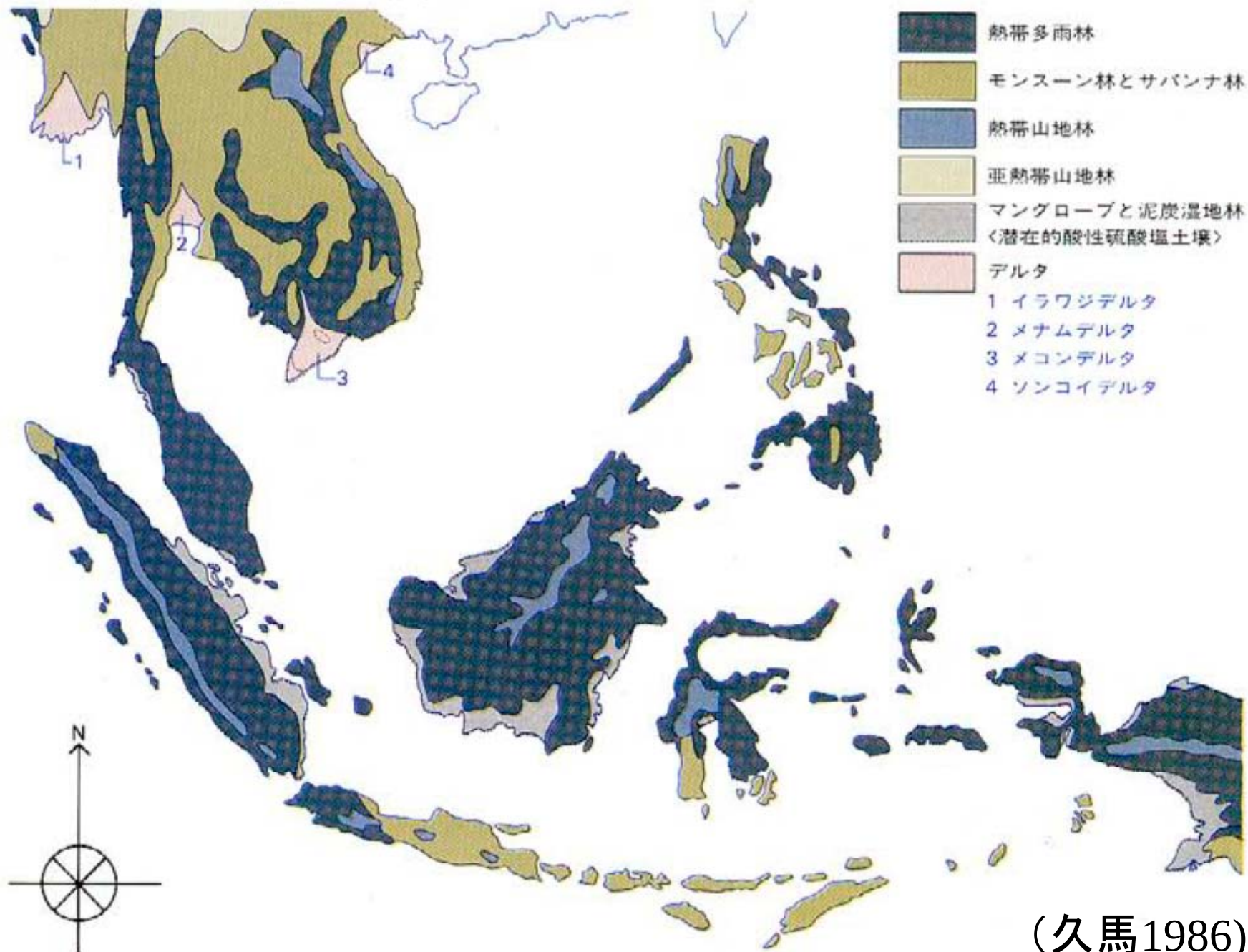
Table 1. Effects of tillage treatments on the yield of maize

Year	Treatment	Total (DM t/ha)	Stem and leaves (DM t/ha)	Ear (DM t/ha)	Harvest index (%)
2000	Subsoiling	6.02 ± 0.28	2.59 ± 0.12	3.43 ± 0.20	56.8 ± 1.3
	Moldboard	5.36 ± 0.24	2.54 ± 0.09	2.83 ± 0.16	52.4 ± 0.9
	Three-disc	5.82 ± 0.35	2.60 ± 0.17	3.23 ± 0.22	55.3 ± 1.5
2001	Subsoiling	6.41 ± 0.61	3.29 ± 0.28	3.12 ± 0.38	46.8 ± 2.9
	Moldboard	5.62 ± 0.62	2.92 ± 0.25	2.70 ± 0.40	45.8 ± 2.7
	Three-disc	4.66 ± 0.40	2.46 ± 0.15	2.20 ± 0.28	45.4 ± 2.3

(Matsuo et al. 2002)

図1ー東南アジアの森林分布の概略図

〈原図 高谷〉



酸性硫酸塩土壌(Acid sulfate soils)

生成 1

- かつては海、湖、池等の底泥であり、海水中の硫酸基が、水酸化鉄や有機物を含んだ陸上起源の堆積物と混ざって生成した。
- 嫌気的環境において、lithotrophic bacteria (eg. *Desulfovibrio desulfuricans*) が、硫化水素鉄、iron hydrogensulfide (H_2S), iron sulfide (FeS , unstable), and iron disulfide (FeS_2 , 安定, **pyrite**)を含むようになった。



Iron sulfide
非晶質、
不安定
(Wikipedia)



Pyrite
金属、
安定
(Brooklin college)

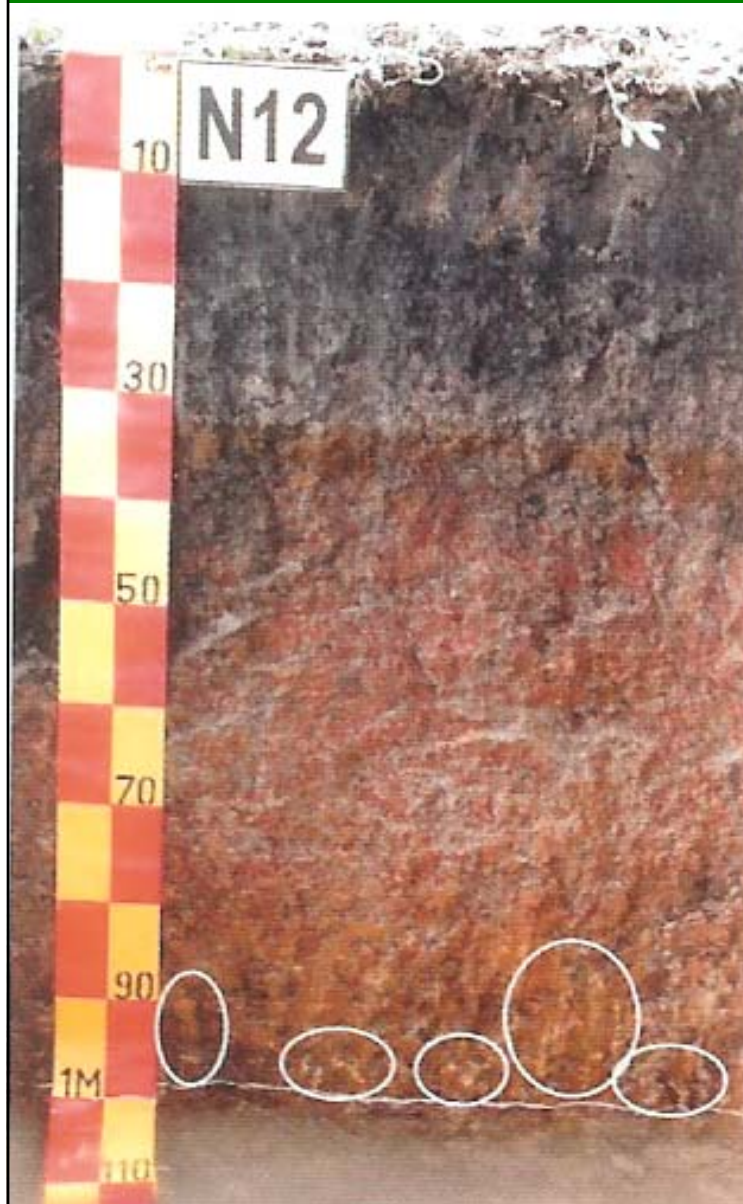
酸性硫酸塩土壌

生成2

- パイライトは嫌気条件下で安定である.
- 通常パイライトから, ジャロサイト(**jarosite**、 $(\text{KFe}_3(\text{OH})_6(\text{SO}_4)_2)$ (下図))が生成し、蓄積する。



酸性硫酸塩土壌(Acid sulfate soils)



下層において、水に
不溶のジャロサイ
トが蓄積している(
白線で囲んである
部分).

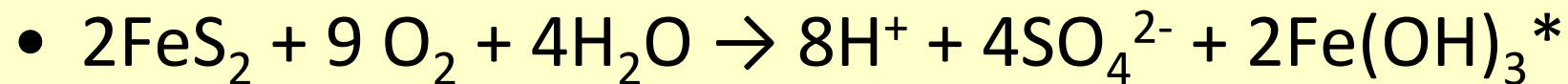
pHは表層土壌で 4.6
下層土で 3.2.

(松中 2003)

酸性硫酸塩土壌 (Acid sulfate soils)

好氣的条件下にすると極端な酸性土壌を生じる

- これらの土壌が農業生産のために排水工事がなされると、硫化水素 (hydrogen sulfide) が生じ、強い酸性化が進行する。



*水酸化鉄(3価) (オレンジ色)
沈殿する。



(The University of New South Wales,
Water Research Laboratory)



表4ーバンコク平野の代表的酸性硫酸塩土壌と対照非酸性硫酸塩土壌の肥沃度の諸性質
 <Attanandana et al., 1981>

土壌統記号 (適性分級区分)	(B) (P-I 最適)	(Ra) (P-I 最適)	(S) (P-IIa 適)	(Rs) (P-IIIa 中)	(Rva) (P-IVa 不適)
1. 土性	HC	SiCL	HC	HC	HC
2. pH	5.2	5.8	4.7	4.8	3.9
3. 有機物, %	1.3	1.5	2.2	2.1	3.1
4. 可給態P, ppm P	23.6	50.8	9.6	10.5	6.1
5. 交換性K, meq/100g	0.67	0.16	0.42	0.37	0.17
6. 交換性Na, meq/100g	2.70	0.76	0.60	1.20	3.70
7. 交換性Ca, meq/100g	10.0	7.50	13.1	10.0	2.50
8. 交換性Mg, meq/100g	9.3	2.7	4.0	8.5	5.6
9. 交換性Al, meq/100g	0.18	0.09	0.55	0.81	11.4
10. 可給態ケイ酸mg SiO ₂ /100g	14.1	11.4	10.1	10.9	3.6
11. 陽イオン交換容量meq/100g	23.2	17.4	31.2	26.4	30.6
12. 7Å 鉱物, %	25	50	55	50	65
13. 10Å 鉱物, %	20	25	15	10	10
14. 14Å 鉱物, %	55	25	30	40	25
15. 全S, ppm S	1131	181	1281	706	5235
16. 水溶性S, ppm S	520	0	440	176	400
17. ジャローサイトS, ppm S	0	0	560	492	2287
備考	非酸性 海成沖積物 由来 テイビック・トロ バクエプト	河成沖積物 由来 テイビック・トロ バクエプト	図3のC サルフィック・ トロバクエ プト	図3のC サルフィック・ トロバクエ プト	図3のB テイビック・ サルファク エプト

(久馬1986)

対処法：事例1：インド

India (Samra and Randhawa 1991)

- ケララ州、西ベンガル州に11万ha存在する
- 土壌pH は3.2-3.8 であり、排水によってさらに低下する
- その他の問題として、Al, H₂S and Fe の過剰害とP、Caの欠乏がある
- 排水なしの水稲栽培が最良の土地利用であることが分かっている

事例2: マレーシア

Malaysia (Othman et al. 1991)

- 海岸平野部にかなり存在する
- 生育制限要因は低low pH, Al過剰害, 一般的な養分欠乏、冠水害、過剰排水の害
- ひとたび酸化すると30-45cmの深さで pH が2.6-3.4にまで低下する
- 浅層排水と地下水面制御の実施が必要である。そのうえで、アブラヤシやココナツプランテーションとして利用されている。

Summary

1. Oxisols

soil acidity / P adsorption / role of aggregates

2. Alfisols

soil dispersion / argillic horizon

3. Ultisols

4. Vertisols 2:1 clay

5. Andisols

6. Inceptisols

7. Entisols

A. Northeast Thailand --- Subsoiling

B. Java, Indonesia --- volcanic ash soils, acid sulfate soils