

1

大気CO₂

太陽 熱エネルギー 吸収

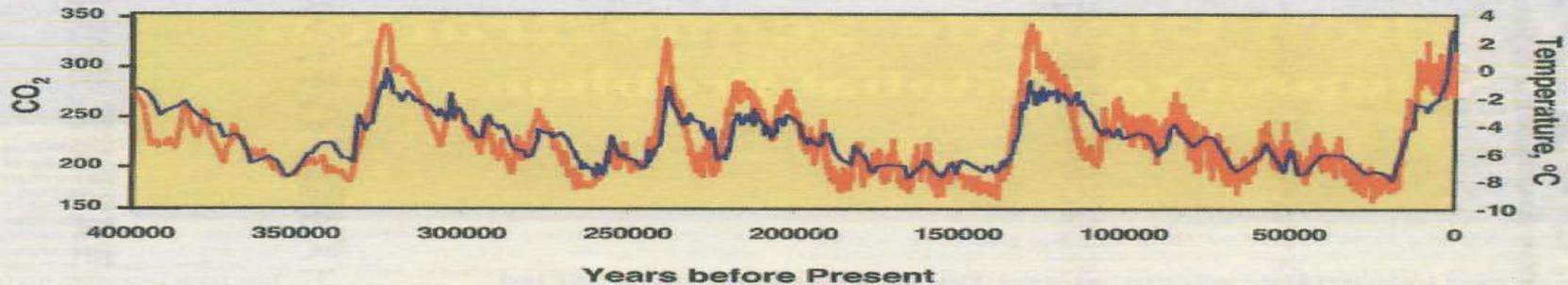
地表に向け放射



地表平均温度 (−18°C ⇒ +15°C)

CO₂の温室効果

温室効果を超えた温暖化 = 地球温暖化



過去40万年間の
大気のCO₂濃度(黒線)と温度(赤線)
(南極Vostok:氷床コア試料)
(Petitら 1999)

氷中:封じ込め気泡→大気CO₂濃度
氷 重酸素同位体比→大気の温度

3

20世紀後半 人間の経済活動 増大

⇒ 大気CO₂濃度増加

⇒ 地球温暖化

IPCC (気候変動政府間パネル)

2007年 報告



地球温暖化 抑制の基本

CO₂の大気からの隔離・貯留

- 土壌によるCO₂構成炭素の隔離・貯留

4 地球上の炭素の存在状況 (単位:ギガ・トン Gt = 10億 t)

(Oelkers & Cole 2008)

大気

800 (CO₂ 380ppm)

／
陸地

＼
海洋

植物 610

— 39,000

土壤 1,580 (有機物)

950 (無機物:炭酸塩) (Lal 2007)

5

陸地：植物（—動物—微生物—）土壤による 炭素の隔離・貯留とCO₂の放出

植物 CO₂

↓ 光合成 (CO₂ + H₂O + 無機物)

有機物 (有機物炭素の隔離・貯留)

植物体

生物体

動物体

⇒ 土壤

生物遺体

微生物体

腐植(土壤有機物)

⇒ 呼吸・有機物分解

CO₂ 放出

6

地球上でのCO₂の大気への放出と
大気からの隔離・貯留(炭素Gt/年)

放出源・貯留先	放出量	隔離・貯留量
化石燃料(燃烧)	6.3	—
土地(農業などの利用)	1.6	—
植物—土壤		
(光合成—腐植化)	—	111.4
(呼吸)	110	—
海洋	90	91.7
不明	—	1.7
総計	207.9	204.7

(Oelkers & Cole 2008)

地球温暖化 抑制

人為的CO₂ 放出(化石燃料・土地利用)抑制

京都議定書(1997)

国内外 産業・運輸・民生 取り組み

CO₂の大気への放出超過

$$\begin{aligned} \text{放出} - \text{隔離} \cdot \text{貯留} &= 207.9 - 204.7 \\ &= 3.2 \text{ G t C} / \text{年} \end{aligned}$$

土壌による炭素貯留 **3.2 Gt** / 年増加の可能性

- ①土壌の有機炭素量: 1580 G t の 0.2%増加
- ②陸地(植生・土壌)による正味炭素貯留量増加:
111.4 - 110 = 1.4 G t / 年 の 230%増加

8

有機物炭素の隔離・貯留～土壌の種類

最新の国際土壌分類 「Soil Taxonomy」

USDA(米国農務省) 土壌調査グループ

世界の土壌 12種類(土壌目という)に分類

各土壌目:有機炭素量、占有面積 公表

有機炭素量／占有面積

⇒土壌炭素貯留能 算出

205～3.5kgC／m³ 土壌

⇒有機炭素貯留の実状分析・対策立案

9

ヒストソル

- Histosols histos:ギリシャ語 組織
sol ラテン語:solum 土 (土壌目)
- 炭素貯留能 ① 205 kgC/m³土壌
- 有機炭素量 ② 324 Gt
- 占有面積割合 ⑪ 1.2 %
- 寒帯 > > > 温帯・熱帯、湿潤
- 有機質湿地土壌、泥炭土(ピート)
低温・過湿→植物遺体の分解 抑制



Histosols have a high content of organic matter and no permafrost. Most are saturated year round, but a few are freely drained.

Histosols are commonly called bogs, moors, peats, or mucks.

Histosols form in decomposed plant remains that accumulate in water, forest litter, or moss faster than they decay. If these soils are drained and exposed to air, microbial decomposition is accelerated and the soils may subside dramatically.

**HISTOSOLS MAKE UP ABOUT 1% OF THE WORLD'S
ICE-FREE LAND SURFACE.**

アンディソル

- Andisols ando 日本語（暗土）？
- 炭素貯留能 ② 31 kgC/m³土壤
- 有機炭素量 ⑪ 30 Gt
- 占有面積割合 ⑫ 0.75%
- 活火山帯、湿潤～半乾燥
- 火山灰土、黒色腐植；集積、特異粘土鉱物；生成、水分保持；大、養分保持；不定

12



なぜ アンデイソル 高い炭素貯留能？

火山灰(火山ガラス)の風化 ⇒

- ・ アルミニウムイオンの生成
- ・ 特異粘土鉱物の生成

ナノボール・ナノチューブ鉱物

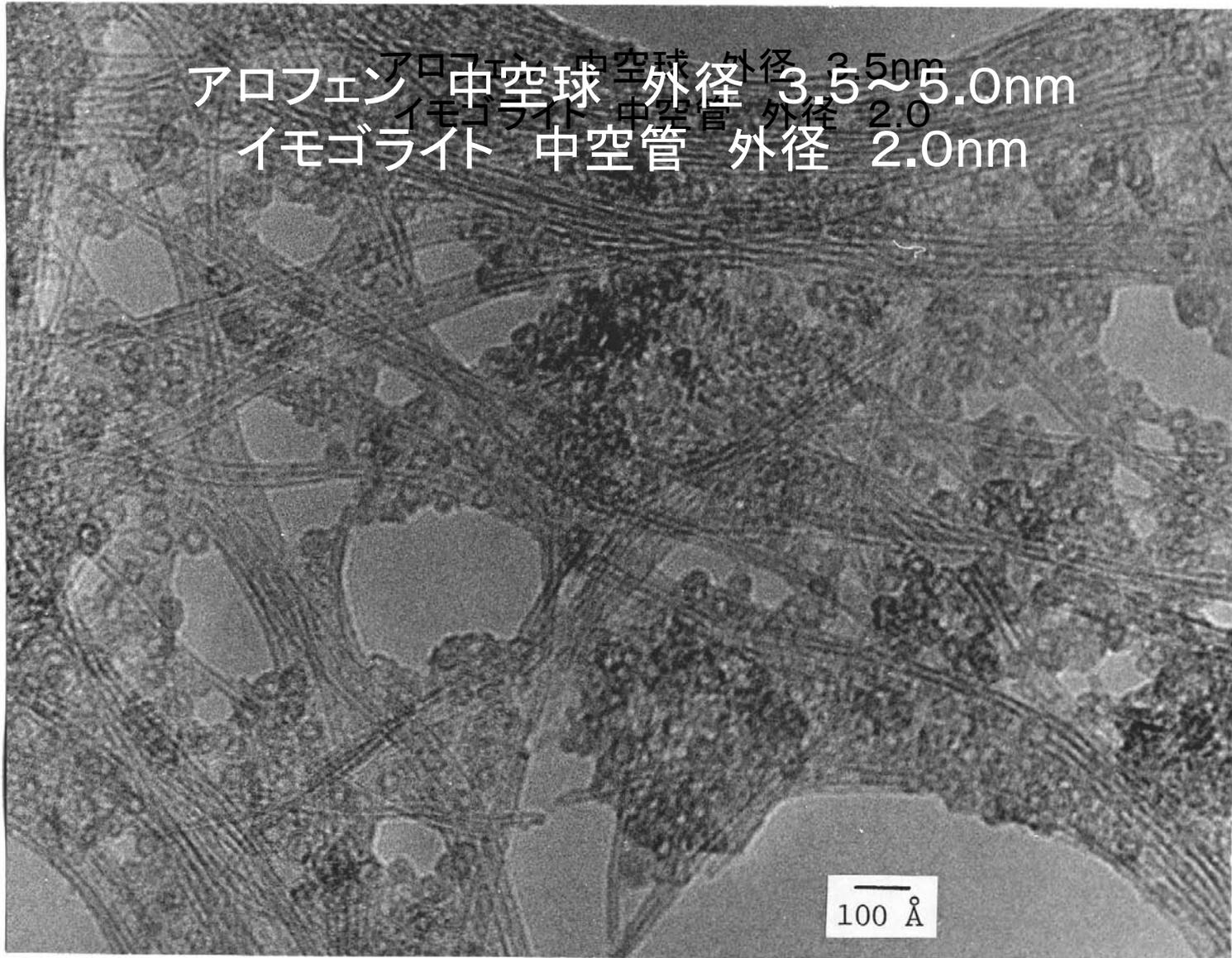
アロフェン・イモゴライト

⇒ アルミニウム、粘土鉱物と腐植との結合

⇒ 微生物による分解から腐植を保護・貯留

⇒ 腐植の安定化～高い炭素貯留能

14



Henmi & Wada (1976)

ジェリソル

- Gelisols gelare:ラテン語 凍る
- 炭素貯留能 ③ 20 kgC/m³土壤
- 有機炭素量 ③ 238 Gt
- 面積割合 ⑤ 9 %
- 寒帯、高山域、ツンドラ(永久凍土)
- 凍結→夏:表土・下層土一部 解凍
湿地植生 →秋:再凍結→ 有機物貯留



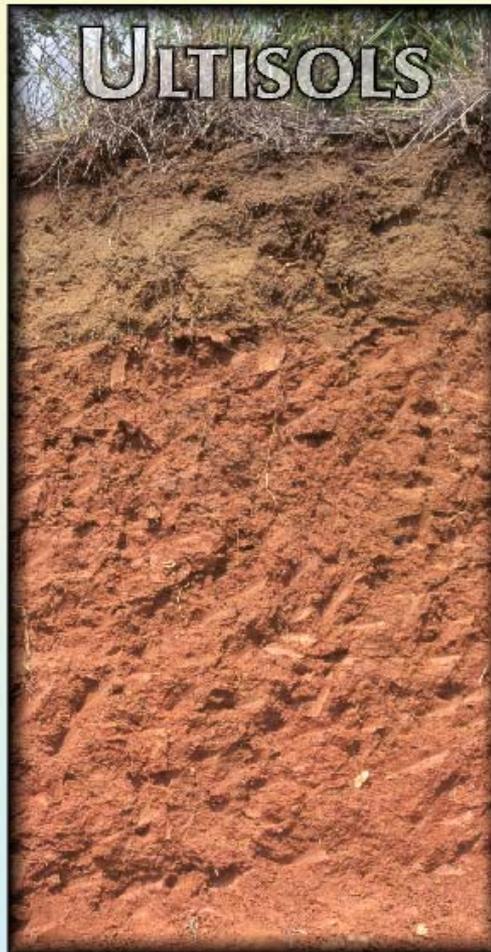
Gelisols are soils that have permafrost near the soil surface and/or have evidence of cryoturbation (frost churning) and/or ice segregation.

Gelisols are common in the higher latitudes or at high elevations.

GELISOLS MAKE UP ABOUT 9% OF THE WORLD'S ICE-FREE LAND SURFACE.

アルテイソル

- Ultisols ultimatum: ラテン語 終局の
- 炭素貯留能 ⑨ 9 kgC/m³ 土壌
- 有機炭素量 ⑦ 98 Gt
- 面積割合 ⑥ 8 %
- 温帯～熱帯、湿潤
- 風化・土壌化; 強く進行、酸性、低肥沃、
表層: 腐植、粘土: 表層→下層に移行



Ultisols are soils in humid areas. They formed from fairly intense weathering and leaching processes that result in a clay-enriched subsoil dominated by minerals, such as quartz, kaolinite, and iron oxides.

Ultisols are typically acid soils in which most nutrients are concentrated in the upper few inches. They have a moderately low capacity to retain additions of lime and fertilizer.

**ULTISOLS MAKE UP ABOUT 8% OF THE WORLD'S
ICE-FREE LAND SURFACE.**

アリディソル

- Aridisols aridus:ラテン語 乾燥
- 炭素貯留能 ⑫ 3.5 kgC/m³土壤
- 有機炭素量 ⑩ 54 Gt
- 占有面積割合 ③ 12 %
- 乾燥～半乾燥
- 砂漠土、蒸発量 > 降水量→塩類集積、
通常植物:生育不可能、土壤層位低分化



Aridisols are soils that are too dry for the growth of mesophytic plants. The lack of moisture greatly restricts the intensity of weathering processes and limits most soil development processes to the upper part of the soils. Aridisols often accumulate gypsum, salt, calcium carbonate, and other materials that are easily leached from soils in more humid environments.

Aridisols are common in the deserts of the world.

**ARIDISOLS MAKE UP ABOUT 12% OF THE WORLD'S
ICE-FREE LAND SURFACE.**

土壌の炭素(有機物)貯留に影響する主要因

1 土壌の生成に関わる自然要因

気候：温度と乾湿、生物：植物と微生物、母材、時間

2 土壌の理化学性 \leftrightarrow 植物・微生物の活動

砂・粘土含量、通気・透水性など

酸性・中性・アルカリ性、酸素含量、

植物・微生物養分含量など

3 人間による土壌の利用・管理

22

人間による土壌の管理・利用

土壌の理化学性 ⇔ 植物・微生物の活動

↓↑

土壌有機物の貯留・分解

↓↑

作物・林木の生産 ⇔ 食・住確保

+

土壌からのCO₂放出 ⇔ 温暖化

23 森林と森林土壌によるCO₂の貯留

- 森林の生育促進～施肥
- 焼畑の停止
- 湿地、泥炭地、老齡林の保護
- 造林の促進 (Nilsson・Schopfhauser 1995)
 - 世界の再植林可能地 (過去50年間森林なし)
3億4500万ヘクタール(全陸地の2.6%)
 - 再植林によるC貯留 推定値 1.5 Gt C/年
 - CO₂の大気への放出超過 3.2 Gt C/年
 - ⇒造林の有効性 問題:再植林地の確保

24

農業による土地利用～土壤炭素貯留

自然林・草地→ 開墾、耕耘、作物栽培・収穫



有機物(林木・草、収穫物・残渣)の持ち出し



微生物による土壤有機物(腐植)の分解促進



土壤の炭素(有機物)貯留 減少

数十年で1/3～2/3に!



作物生産力の低下・土壤浸食の増大

CO₂発生増加 ⇒ 温暖化促進

過去の農耕による土壌有機炭素損失推定値

42~78 Gt

農地管理改善による回復の最大期待値

過去の損失推定値の1/2~2/3

数十年で実現 0.4~1.2 Gt/年

(Lal 2004、Hillel & Rosenzweig 2009)

陸地(植物・土壌)による炭素貯留能 1.4 Gt/年

CO₂の大気放出超過 3.2 Gt/年

農地管理改善⇒土壌炭素貯留増強

農地管理改善

土壌有機炭素：貯留増加の方策

- 1 堆肥／厩肥施用 → 土壌有機物増加
- 2 不耕起(No-Till)～省耕起栽培
不(省)耕起－播種・植え付け－収穫
耕起⇒不(省)耕起 土壌有機物の分解抑制
作物残渣 → 土壌被覆(マルチ)・放置
裸地化防止、土壌浸食の抑制
- 3 間作(Cover crop) 作物列間・他作物栽培
裸地化防止、土壌有機物増加、土壌浸食の抑制



間作(クローバー／コムギ) 不耕起(ダイズ・トウモロコシ)

(CSA News 2010)

不耕起による土壌の炭素貯留増加

(West・Post、2002、Eveら 2001、
Franzluebbers 2005、Spargoら 2008)

地域	不耕起年数	土壌の炭素貯留増加 (kg/ha・年)
世界全域	15～20年	570 ± 140
USA	15年	89 ± 45
南東USA	10 ± 5年	420 ± 460
バージニア	14年	310 ± 280

土壌による炭素貯留 89～570 kg/ha

アルティソル中の炭素量の0.10～0.63%に相当

不(省)耕起栽培: 土壌炭素貯留の変化

(石橋ら 2009、戸上ら 2009、坂東・藤山 2010、Kogaら 2006)

地名	土壌炭素貯留変化	作物・地目・年数
岡山	増加	イネ・水田・14年
茨城	増加 (差なし)	ダイズ、オオムギ・畑・6年
鳥取	減少 (抑制 大)	ダイズ・水田→畑・6年
十勝	減少 (抑制 小)	コムギ、マメ・畑・20年

作物収量: 差 なし

作物残滓の投入: あり (十勝 なし)

連続不耕起から断続不耕起へ

・1994→2004年

米国農地 不耕起増加 14 → 23% へ

生産者、研究者、政策立案者 による

連続不耕起栽培全般 評価 反映

土壌有機物による土壌改善～侵食防止、

省エネルギー、炭素貯留～温暖化抑制

・連続不耕起の問題点 提示

土壌窒素の利用、病害虫・雑草の防除、

堆厩肥の投入、土壌圧縮・緊密化

⇒不耕起栽培 連続から断続へ

(Grandyら 2006)

土壤炭素貯留方策 新提案 有機物 加工 → 土壤 投入

植物体(バイオマス)

→炭化(CO₂放出 少)

→炭(バイオチャー)

高い炭素含量

微生物による分解に対し安定

⇒バイオチャー投入による土壤炭素貯留

(Glaser 2007、Lehmann 2007)

32

バイオチャー利用のきっかけ

中央アマゾン 1990年以降

Terra Preta 土壌の研究

500年以上

住民による炭、有機質ごみ、骨施用

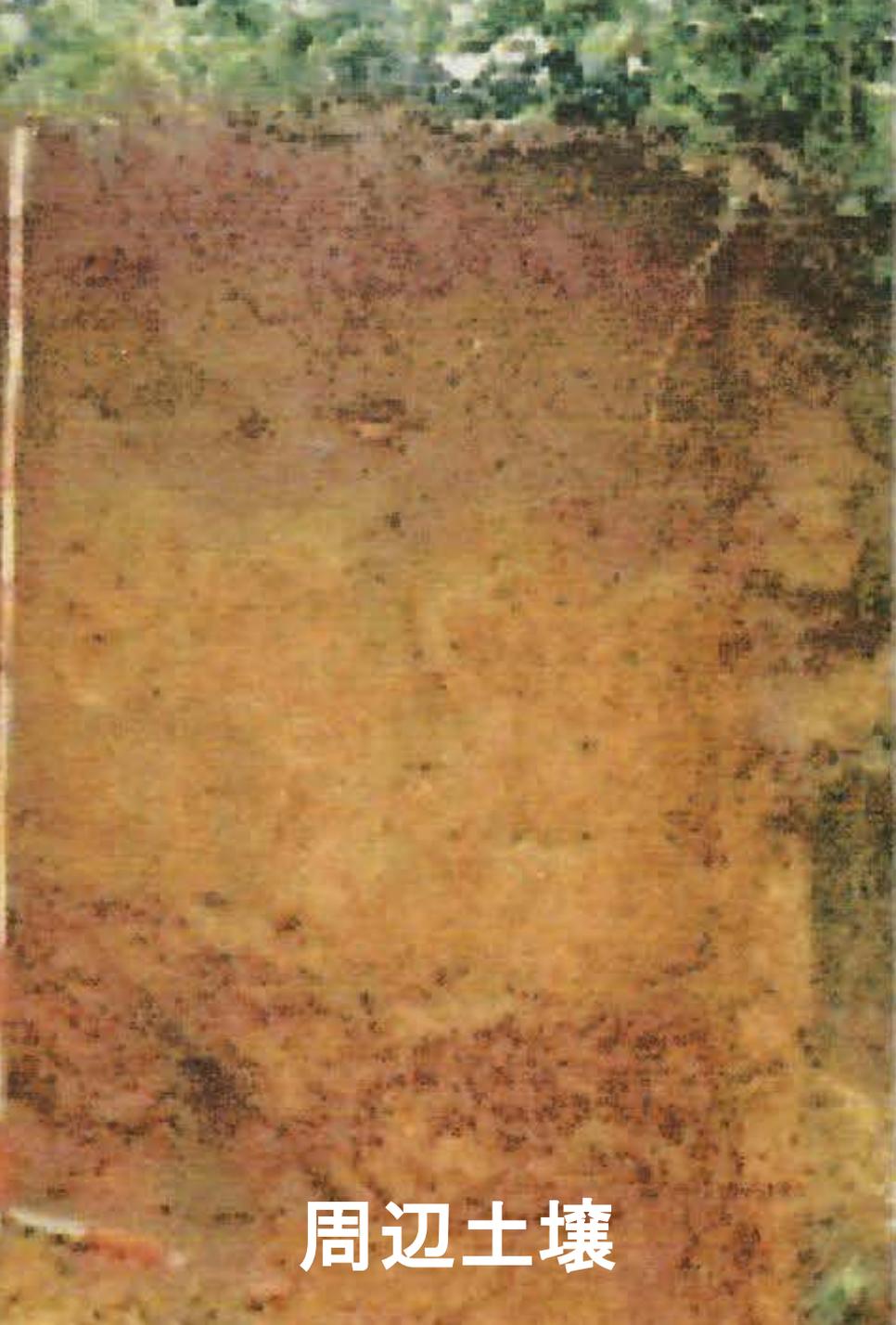
→ 肥沃度:

Terra Preta 土壌 >> 周辺土壌

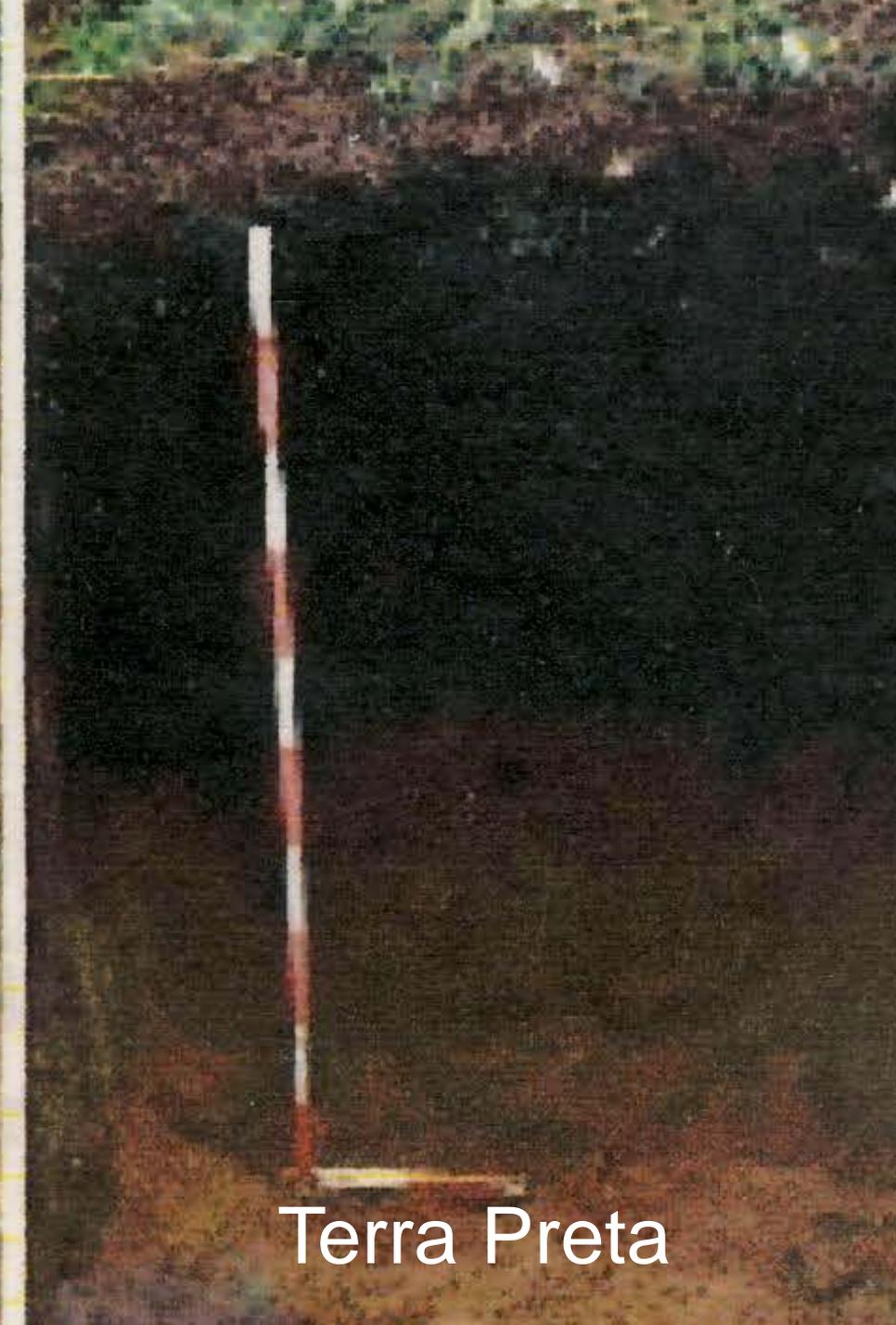
炭含量 70倍以上

土壌有機物、窒素、リン含量 3倍以上

バイオチャーによる炭素貯留⇒新Terra Preta つくり



周边土壤



Terra Preta

現代のバイオチャー

大規模 植物栽培

植物バイオマス→低酸素・低温熱分解

高炭素含量 細粒 炭製造 → 土壌投入

植物栽培、バイオチャー製造、土壌投入

大気CO₂隔離 > 大気へのCO₂放出

土壌中 寿命推定 数百～数千年

実現～コストと規模拡大の効果・影響の研究

35

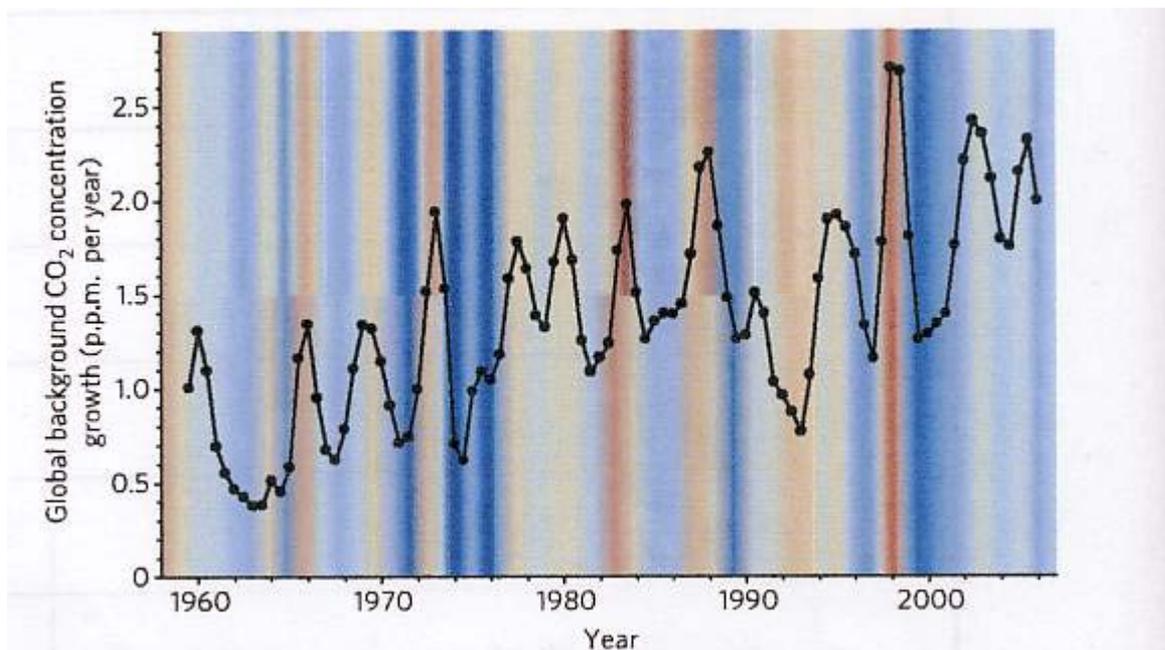
アンディソルの炭素貯留 12土壌目中第2位 「モデル」

有機物貯留の仕組み

人為的に農地土壌内に創出

アルミニウム 腐植との結合

- 米国 不耕起 炭素貯留増加 89kg/ha・年
- アンディソル 炭素貯留100kg:
10~14kgアルミニウムと腐植との反応
水溶性アルミニウム資材と施用方法



**大気CO₂の増加速度(ppm／年)
とエルニーニョ現象・南方振動
(高温相:褐色・低温相:青)**

(Heimann & Reichstein 2008)