

## Matching policy and science: Rationale for the ‘4 per 1000 - soils for food security and climate’ initiative

政策と科学の照合：食料の安全と気候変動緩和のための土壌「1000分の4」戦略の理念

Jean-François Soussana <sup>a,\*</sup>, Suzanne Lutfalla <sup>a</sup>, Fiona Ehrhardt <sup>a</sup>, Todd Rosenstock <sup>b</sup>, Christine Lamanna <sup>b</sup>, Petr Havlík <sup>c</sup>, Meryl Richards <sup>d</sup>, Eva (Lini) Wollenberg <sup>d</sup>, Jean-Luc Chotte <sup>e</sup>, Emmanuel Torquebiau <sup>f</sup>, Philippe Ciais <sup>g</sup>, Pete Smith <sup>h</sup>, Rattan Lal <sup>i</sup>

Soussana, J.-F. et. al, Soil & Tillage Research (2017),  
<https://doi.org/10.1016/j.still.2017.12.002>

以下の翻訳は筒木が自分の勉強のために行っているものであり、よく理解できていない点や誤訳なども含むため、随時更新します。(2019年12月6日)

### ABSTRACT 要約

At the 21st session of the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC, COP21), a voluntary action plan, the ‘4 per 1000 Initiative: Soils for Food Security and Climate’ was proposed under the Agenda for Action.

気候変動に関する国連枠組み会議(UNFCCC, COP21)において、食料の安全と気候変動緩和のための土壌：「1000分の4」戦略が行動のための議題として提案された。

The Initiative underlines the role of soil organic matter (SOM) in addressing the three-fold challenge of food and nutritional security, adaptation to climate change and mitigation of human-induced greenhouse gases (GHGs) emissions.

この戦略は、食料と栄養の安全、気候変動への適応、人為的な温室効果ガス排出への緩和という 3 つの問題の解決において土壌有機物の役割を基盤においている。

It sets an ambitious aspirational target of a 4 per 1000 (i.e. 0.4%) rate of annual increase in global soil organic carbon (SOC) stocks, with a focus on agricultural lands where farmers would ensure the carbon stewardship of soils, like they manage day-to-day multipurpose production systems in a changing environment.

この戦略は、地球上の土壌有機炭素(SOC)の貯蔵量を毎年 0.4% ずつ増加させようという意欲的で積極的な目標を掲げており、農家が変わりつつある環境のなかで多様な生産システムを日々管理しているように、農地の土壌中の炭素の管理にも関わるができるようになることをめざしている。

In this paper, the opportunities and challenges for the 4 per 1000 initiative are discussed. We show that the 4 per 1000 target, calculated relative to global top soil SOC stocks, is consistent with literature estimates of the technical potential for SOC sequestration, though the achievable potential is likely to be substantially lower given socio-economic constraints.

この論文では「1000 分の 4」戦略の可能性と問題点について議論している。私たちは地球上の表土中の土壌有機炭素の貯蔵量に対して計算された「1000 分の 4」という目標が、社会経済的制約のもとで達成可能な値はこれよりかなり低くなるものの、土壌有機炭素の隔離に対して各種の論文が推定した技術的な可能性と整合していることを示す。

We calculate that land-based negative emissions from additional SOC sequestration could significantly contribute to reducing the anthropogenic CO<sub>2</sub> equivalent emission gap identified from Nationally Determined Contributions pledged by countries to stabilize global warming levels below 2 ° C or even 1.5 ° C under the Paris agreement on climate.

私たちは土壌有機炭素のさらなる隔離による土地からの排出の抑制は、人為的な CO<sub>2</sub> と等価な排出量の削減に著しく貢献できることを算定した。この削減量は気候に関するパリ合意のもとに地球規模の温暖化の水準を 2°C以下またはさらに 1.5°C以下にするために諸国によって誓約された「国ごとに決められた貢献」で確認されたものである。

The 4 per 1000 target could be implemented by taking into account differentiated SOC stock baselines, reversing the current trend of huge soil CO<sub>2</sub> losses, e.g. from agriculture encroaching peatland soils.

「1000 分の 4」という目標は、明瞭な土壌有機炭素貯蔵量のベースラインを考慮に入れ、例えば泥炭土壌を侵食する農業のように、土壌 CO<sub>2</sub> の莫大な損失という現在の傾向を逆転させることによって実現可能となるであろう。

We further discuss the potential benefits of SOC stewardship for both degraded and healthy soils along contrasting spatial scales (field, farm, landscape and country) and temporal (year to century) horizons.

私たちはさらに劣化した土壌および健康な土壌の双方に対して土壌有機炭素を健全に管理することの利益について、異なる空間的規模（圃場、農場、地域、および国家）と時間軸（年から世紀）にわたり議論する。

Last, we present some of the implications relative to non-CO<sub>2</sub> GHGs emissions, water and nutrients use as well as co-benefits for crop yields and climate change adaptation.

最後に、私たちは非 CO<sub>2</sub> 温室効果ガスの排出、水および養分の利用さらには作物の収量と気候変動への適応との間の相互利益に関連したいくつかの考察を提出する。

We underline the considerable challenges associated with the non-permanence of SOC stocks and show how the rates of adoption and the duration of improved soil

management practices could alter the global impacts of practices under the 4 per 1000 initiative.

私たちは土壌有機炭素の貯蔵庫が非永続的なものであることに伴う問題点を明らかにし、より良い土壌管理の採用の速度と持続期間が「1000 分の 4」戦略の地球規模での効果にどのように影響するかを指摘する。

We conclude that the 4 per 1000 initiative has potential to support multiple sustainable development goals (SDGs) of the 2030 Agenda. It can be regarded as no-regret since increasing SOC in agricultural soils will contribute to food security benefits that will enhance resilience to climate change. However, social, economic and environmental safeguards will be needed to ensure an equitable and sustainable implementation of the 4 per 1000 target.

私たちは、「1000 分の 4」戦略は 2030 年行動計画における多様で持続可能な開発目標(SDGs)を支える可能性を持っていることを結論する。農業土壌において土壌有機炭素を増やすことは食料の安全に貢献し、気候変動に対する回復力を増大させるため、この戦略は悔いの残らないものになるであろう。しかし、「1000 分の 4」の目標を公正かつ持続的に達成するためには社会的、経済的、環境的な支持が必要になるであろう。

## 1. Introduction 緒言

Anthropogenic emissions of greenhouse gases (GHGs) have strongly influenced the global carbon (C) cycle, leading to an increase of the atmospheric concentration of carbon dioxide, CO<sub>2</sub>, to ca. 400 parts per million by volume (ppm) (Dlugokencky and Tans, 2017).

人為的な温室効果ガスの排出は地球規模での炭素循環に著しい影響を及ぼし、大気中の二酸化炭素濃度を容積あたりで 400 ppm まで増大させた (Dlugokencky and Tans, 2017)。

In addition to CO<sub>2</sub>, atmospheric concentrations of nitrous oxide, N<sub>2</sub>O, and methane, CH<sub>4</sub>, are also increasing. Together, increasing atmospheric concentrations of GHGs are influencing the radiative forcing and increasing the Earth's mean temperature. Therefore, reducing atmospheric concentration of CO<sub>2</sub> and other GHGs is important to mitigate climate change and avoid increased volatility (extreme events) and adverse manifestations of regional and global climate change (IPCC, 2013).

二酸化炭素に加えて、大気中の亜酸化窒素 N<sub>2</sub>O およびメタン CH<sub>4</sub> の濃度も増大している。同時に、大気中温室効果ガス濃度の増大は強制放射力にも影響し、地球の平均気温を増大させている。従って、大気中の二酸化炭素およびその他の温室効果ガスの濃度を減少させることは、気候変動を緩和し、極端な異常気象の増加や地域的および地球規模での気候変動の悪影響を避けるうえで重要である (IPCC, 2013)。

Today, the land surface including non-managed and managed ecosystems, the latter having by far the largest area, are assessed to be a net source of CO<sub>2</sub> equivalent (CO<sub>2</sub> eq) to the atmosphere (Tian et al., 2016), mainly because the warming effect of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from agriculture overcomes the cooling effect of the global carbon sink.

今日、管理されていない生態系と管理された生態系（現在では後者が最大の面積を占めている）を含む陸地表面は大気中への CO<sub>2</sub> 等価ガス (CO<sub>2</sub> eq) の主要な排出源とみなされている (Tian et al., 2016)。これは農業起源のメタンおよび亜酸化窒素による温暖化効果が地球規模での炭素貯蔵庫による冷却効果を打ち消しているためである。

Agriculture (mainly CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from established cropland and pasture, and CO<sub>2</sub> emissions from peat drained from agriculture) and land-use change (mainly forest clearing for agricultural expansion in tropical regions) are major sources of land-based GHGs, responsible for approximately 24% of total

GHG emissions (Smith et al., 2014 in IPCC, 2014).

農業（主として既に確立された耕地および牧草地からのメタンと亜酸化窒素の排出および農業によって排水された泥炭地からの二酸化炭素の排出）、および土地利用変化（主として熱帯地域における農地拡張のための森林破壊）などが土地に由来する温室効果ガスの主な給源であり、温室効果ガスの全排出量の 24% を占めている (Smith et al., 2014 in IPCC, 2014)。

Carbon losses from soils have a large role in land- based emissions. In particular, peatland drainage accounts for one-third of global cropland GHG emissions (Carlson et al., 2017). For instance, the tropical peatland C stocks in South East Asia upon which agriculture is established are vulnerable to fires induced by drought, resulting into large emissions during dry El Niño years, and released 2 gigatons of carbon (GtC, 1 GtC corresponds to 1 petagram of carbon) in 1997 and 0.5 GtC in 2015 (GFED, 2016; Page et al., 2002; Yin et al., 2016).

土壌からの炭素の消失は土地に由来する排出において主要な役割を占めている。特に泥炭地の排水は地球規模での耕地からの温室効果ガス排出の 3 分の 1 を説明している (Carlson et al., 2017)。例えば、農業が確立された東南アジアの熱帯泥炭地の炭素貯蔵庫は、乾燥によって引き起こされる火災の被害を受けやすく、乾燥したエルニーニョの年には大量の二酸化炭素を排出し、その量は 1997 年には 2 ギガトンの炭素、2015 年には 0.5 ギガトンの炭素に及んだ (GFED, 2016; Page et al., 2002; Yin et al., 2016)。

Annual crop losses of 0.3% per year have been estimated and the continuation of this trend could lead to a global yield decline of 10% by 2050 (FAO and ITPS, 2015). Land degradation poses a threat to agriculture, and climate change may accelerate the rate of degradation with major impacts on food security and wellbeing of small farmers.

1 年間に 0.3% の作物が失われていることが推定されており、この傾向が続けば 2050 年までに地球規模での収量の減少は 10%にも及ぶであろう (FAO and

ITPS, 2015)。土地の劣化は農業を脅かし、気候変動は劣化の速度を加速し、ひいては食料の安全と小規模農家の福利に甚大な影響を及ぼす。

In this context, the role of land carbon management needs to be re-examined. Namely, soil organic carbon (SOC) sequestration, afforestation and reforestation including tree planting through agroforestry, are the only land-based negative emissions (i.e. removing CO<sub>2</sub> from the atmosphere) which are readily available at low cost (Smith et al., 2016).

このような背景のもとで、土地の炭素管理の役割について再検討されるべきである。すなわち、土壌有機炭素の隔離、アグロフォレストリーにおける樹木の植え付けを含めた造林および再植林が、土地に基盤を置いた温室効果ガス排出の削減のための低コストで行うことができる唯一の方法である (Smith et al., 2016)。

Yet, SOC sequestration is currently not considered in global climate stabilization scenarios (IPCC, 2014). Concerns about the permanence of sequestered SOC, long-term changes in agricultural systems and the difficulty of detecting improvements have hitherto limited the attention given to SOC sequestration.

しかし、土壌有機炭素の隔離は現在のところ地球規模の気候安定化のシナリオとして考慮されていない(IPCC, 2014)。隔離された土壌有機炭素の永続性に関する懸念、農業体系の長期間にわたる変化、改善の効果を検出することの困難さが、これまでのところ土壌有機炭素の隔離に対する注目を限られた範囲に留まらせている。

Carbon stocks in the upper soil layers respond within years to changes in land use and management, providing an opportunity to store carbon and remove CO<sub>2</sub> from the atmosphere in the short term, which is relevant in the context of the Nationally Determined Contributions (NDC) targets set to 2030. Soils also carry a significant potential for carbon sequestration, especially through restoration measures on degraded soils (Lal, 2010).

土壌表層における炭素の貯留量は土地利用および管理方法の変化に対して数年のうちこれに反応するので、短期間のうちに炭素を貯留し大気中から二酸化炭素を除去する機会を提供することになる。このことは2030年に向けて設定された「各国ごとに決定された貢献」(NDC)の一連の目標にかなうものとして重要である。土壌はまた特に劣化した土壌の修復方法を通じて炭素の隔離のための顕著な能力を擁している(Lal, 2010)。

The Paris agreement at the 21st Conference of Parties (COP21) of the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), calls for limiting global warming well below 2 ° C, and to pursue efforts to limit the temperature increase even further to 1.5 ° C. It also requests increasing the ability to adapt to the adverse impacts of climate change and foster climate resilience and low GHG emissions development, through pathways that will not threaten food production.

国連の気候変動に関する枠組み会議(UNFCCC)の第21回諸国会議(COP21)におけるパリ合意は、地球の温暖化を2°C以下に制限し、さらに気温上昇をさらに1.5°C以下にするよう努力することを提案した。パリ合意はまた、気候変動の悪影響に対して適応する能力を増大させ、食料生産を脅かさない方法によって気候変動に対する回復力と温室効果ガス低排出の開発を推進することを要求している。

Nevertheless, under current policy, aggregate anthropogenic GHG emissions could reach 55 Gt CO<sub>2</sub> equivalents in 2030 resulting in a 60% likelihood (Fawcett et al., 2015) of reaching global warming levels by 2100 relative to preindustrial levels of 3 ° C.

しかしながら現在の政策のもとでは、一連の人為的な温室効果ガスの排出量は2030年までに55 Gt CO<sub>2</sub> 等価量に達し、60%の信頼度で(Fawcett et al., 2015)、2100年までに地球温暖化のレベルは工業化以前のレベルと比較して3°C上昇する。



In order to meet the Paris Agreement objectives, anthropogenic emissions will most likely need to peak within the next 10 years and continue to decrease during the following decades up to a value close to zero, or even to a net GHG removal by the end of the century.

パリ合意の目標にかなうためには、人為的な温室効果ガスの排出は今後 10 年以内にピークに達し、その後の期間は今世紀の終わりまでに排出量ゼロあるいは温室効果ガスの正味の除去にむけて減少し続けなくてはならない。

Alternative scenarios such as ‘overshoot scenarios’ with continued emissions followed by very rapid and intense emission reductions bear a risk of warming above 2 ° C (Walsh et al., 2017). Within the agriculture sector, reducing N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> mitigation alone along with plausible development pathways cannot deliver the level of agricultural mitigation (ca. 1 Gt CO<sub>2</sub> eq per year by 2030) required to stay within the 2 ° C global warming objective (Wollenberg et al., 2016). In fact, about 90% of the total technical mitigation potential in agriculture (excluding bioenergy and improved energy use) is based on SOC sequestration options (Smith et al., 2008; Paustian et al., 2016).

温室効果ガスの排出をしばらく続けたあとで非常に急激に強力に排出を減少させようという ‘オーバーシュートシナリオ’ のような別のシナリオは 2°C以上の温暖化をもたらす危険性がある (Walsh et al., 2017)。農業部門では妥当な開発の経路と並行して亜酸化窒素ガスとメタンの排出の削減による緩和策だけでは、地球温暖化のレベルを 2 °C以下に保つために必要な農業分野での緩和目標 (2030 年までに約 1 Gt CO<sub>2</sub> 等価量)を達成できない (Wollenberg et al., 2016)。実際のところ、農業における技術的な緩和可能性の約 90%は、(バイオエネルギーおよびエネルギー利用の改善を除けば)、土壌有機炭素の隔離に基づいている (Smith et al., 2008; Paustian et al., 2016)。

At COP21, 103 countries have set mitigation and adaptation targets in agriculture, and 129 included targets related to other land use including forests and degraded land (Richards et al., 2016). Yet, the proposed actions are diverse across countries

and are not detailed, which highlights the need for a shared and ambitious target for land-based mitigation and adaptation that could provide a bridge to remain below the 2 ° C global warming level.

COP21 において 103 カ国が農業分野での緩和と適応の目標値を設定し、そのうち 129 カ国は森林および劣化した土地を含むその他の土地利用に関連した目標を含めていた(Richards et al., 2016)。しかし、提案された方法は国ごとに多様であり、詳細なものではない。このことから、土地に基づいた緩和と適応のための共通し意欲的な目標の必要性が明らかとなり、これによって 2°C の地球温暖化レベルに留まるための架け橋を提供することができるであろう。

Such a voluntary action plan, the ‘4 per 1000 Initiative: Soils for Food Security and Climate’ was launched at COP21 and is supported by 39 countries and more than 190 organizations as of June 2017 (4 per 1000, 2017). This initiative sets a global aspirational goal to increase SOC stock at an annual rate of 0.4% per year (or 4 per 1000) in all land uses, including forests.

このようなことから、「1000 分の 4 戦略：食料の安全と気候のための土壌」という自発的な戦略が COP21 において発足し、2017 年 6 月に 39 カ国と 190 の機関によって支持された(4 per 1000, 2017)。この戦略は森林を含めたすべての土地利用において土壌有機炭素の貯蔵量を 1 年間に 0.4% の割合で増加させるという地球規模での上昇志向的な目標を設定している。

If such increases were possible to implement fully by 2030, this SOC sequestration target would double the total mitigation encompassed by the COP21 Nationally Determined Contributions (NDCs), compared to a middle of the road baseline scenario of the fifth assessment report of the Intergovernmental panel on climate change (IPCC, AR5) (UNEP, 2015). Here, we assess the implications and challenges created by the 4 per 1000 aspirational target for global soil carbon and we discuss the following questions: is 4 per 1000 technically feasible? How might it be achieved? What are the benefits for yields and for climate change mitigation and adaptation? What are the main barriers?

もし 2030 年までにこのような増加が完全に実施可能ならば、この土壌有機炭素の隔離の目標は COP21 の「国別に決定された貢献」(NDC's)によって包含された全ての緩和目標を、気候変動に関する政府間パネルにおける第 5 次評価報告書(IPCC, AR5) (UNEP, 2015)における中間到達ベースラインシナリオと比較して倍増させることになる。そこで、私たちは地球土壌炭素に対する 1000 分の 4 増加計画という高度な目標の意義と問題点について評価し、以下のような質問について議論することにする。すなわち、「1000 分の 4」は技術的に可能なのか？それはどうしたら達成できるのか？作物の収量や気候変動の緩和と適応にとっての利益は何か？主な障害は何か？

## 2. Materials and methods 試料と方法

### 2.1. Global SOC stocks by depth and by biome

#### 2.1. 深さごとおよび気候植生区分ごとの地球の土壌有機炭素の貯蔵量

Global SOC stock was interpolated between estimates over 30 cm (Batjes, 1996; Hiederer and Köchy, 2011), 100 and 200 cm (Batjes, 1996; Scharlemann et al., 2014) using a third order polynomial fit (see Supplementary material, S.M., Fig. S1). The distribution of SOC stock by biome at 1 m depth was derived from Table 3 of Jobbágy and Jackson (2000) and the fraction of this SOC stock to 40 cm was calculated by biome (crops, grasslands, forests) from their Fig. 5 (see Supplementary material).

地球規模の土壌有機炭素貯蔵量は、30 cm 以上 (Batjes, 1996; Hiederer and Köchy, 2011)、100 cm と 200 cm (Batjes, 1996; Scharlemann et al., 2014) における推定値から、3次元多項式当てはめ法(see Supplementary material, S.M., Fig. S1)によって推定した。気候植生区分ごとの1 mの深さまでの土壌有機炭素の分布は Jobbágy and Jackson (2000)の表3から求め、40 cm までの土壌有機炭素貯蔵量は気候植生区分ごとに同論文の図5から推定した。

### 2.2. Yields and SOC sequestration

#### 2.2. 収量および土壌有機炭素の隔離

The estimation of the potential impact of an agricultural SOC increase by 0.4% per year on crop yields is derived from 32 studies. The 32 studies were identified from a reference library compiled for a meta-analysis that reviewed the impact of agriculture practices on productivity, adaptive capacity and mitigation, including yield and SOC outcomes, in developing countries (Rosenstock et al., 2016).

年間 0.4%の農地の土壌有機炭素の増加が作物の収量に及ぼす影響の推定は 32の研究から導き出した。この32の研究は発展途上国において農業行為が生産性、

収量と土壌有機炭素の関係を含む適応能力と緩和に及ぼす影響についてレビューしたメタ分析についてまとめた参考文献の中から選んだ(Rosenstock et al., 2016)。

The 32 selected articles met the following three criteria: (i) conducted over four years or longer ( $13.6 \pm 8.5$  years, mean  $\pm$  sd), (ii) reported data on both yield and SOC, and (iii) contained paired data on the impacts of both a conventional and an improved agricultural management practice such as organic fertilizer use, crop and soil management, water management and intercropping agroforestry (see references included in Supplementary material). Less than 10% of the data were derived from studies with conservation agriculture (CA) and reduced tillage. A Standard Major Axis regression (Legendre and Legendre, 2012) was used to correlate the relative changes in yields and in SOC, since none of these two variables can be considered as independent.

32 の論文は以下の 3 つの基準に適合した。(1) 4 年以上にわたって行われた研究であること ( $13.6 \pm 8.5$  年, 平均  $\pm$  sd)。(2) 収量と土壌有機炭素の双方のデータを報告していること。(3) 慣行農法と改善された農業管理 (例えば有機肥料の使用、作物と土壌の管理、水分管理、および間作を導入したアグロフォレストリーなど) について対になるデータを報告していること。10%以下のデータが保全的農業(CA) および減耕起農法から得られていた。標準主軸回帰法、A Standard Major Axis regression (Legendre and Legendre, 2012)、という方法を用いて、収量と土壌有機炭素の相対的な変化を関連させた。なぜならこれらの 2 つの変数はどちらも独立変数であるとは考えられなかったためである。

### 3. Results and discussion 結果と考察

#### 3.1. Soil depth and the global 4 per 1000 target

#### 3.1. 土壌の深さと地球「1000分の4」戦略の目標

Not accounting for C in permafrost, the world's soils contain a total SOC stock of about  $1500 \pm 230$  Gt C down to 1 m depth, which is equivalent to twice the amount of C as CO<sub>2</sub> in the atmosphere (i.e., 828 Gt C in 2011, Le Quéré et al., 2015).

永久凍土中の炭素を考慮に入れていないが、世界の土壌有機炭素の貯蔵量は1 mの深さまでにおよそ  $1500 \pm 230$  Gt Cである。この量は大気中のCO<sub>2</sub>としての炭素量 (i.e., 828 Gt C in 2011, Le Quéré et al., 2015) の2倍に相当する。

The early recognition that the stock of SOC over 0–3 m is at least twice as much as that represented by CO<sub>2</sub>-C in the atmosphere (Bolin et al., 1986) has led to the proposal that an annual increase in this reservoir by 0.4% per year (a rate of 4 per 1000) would store as much C as the anthropogenic emission of fossil C (Balesdent and Arrouays, 1999).

私たちの研究に先立って0-3 mの深さに含まれる土壌有機炭素の量は大気中のCO<sub>2</sub>-Cの約2倍であることを示した研究がある(Bolin et al., 1986)。この研究から土壌有機物の貯蔵量を1年間に0.4%ずつ(1000分の4の割合で)増やすことにより、化石炭素からの人為的な排出量と同じ量の炭素を蓄えることができることが提案された(Balesdent and Arrouays, 1999)。

However, no claim was made by these authors that it would be technically feasible to increase SOC stock over the full soil depth (0–3 m) at an annual growth rate of 0.4%.

しかし、これらの著者たちは土壌の深さの全域(0–3 m)にわたって毎年0.4%の割合で土壌有機炭素を増やすことが技術的に可能かどうかについては述べてい

ない。

Indeed, there are large stores of soil organic matter (SOM) at depth, but they were formed over millennia, as deep soil carbon has a slow accumulation rate (Fontaine et al., 2007).

実際、深い部位には多量の土壌有機炭素が存在しているが、深い部位の土壌炭素は集積速度が遅いので(Fontaine et al., 2007)、それらの土壌有機物は数千年にわたって形成されてきたものである。

In contrast, top soil SOM can increase or decrease rapidly after changes in land use and agricultural practices (Conant et al., 2017) because it is directly connected to input from below-ground productivity, and because most of the decomposition occurs in the top soil.

これとは対照的に表層土壌の土壌有機物は土地利用の変化や農業事業の変化に伴って急速に増加したり減少したりする(Conant et al., 2017)。なぜならそれは地下の生産性に由来する投入量と直接関係しており、さらに分解は表層土壌中で起こるためである。

Thus, agricultural top soil SOC is frequently observed to increase at rates often equal or higher than the aspirational target of +0.4% per year (Minasny et al., 2017).

従って、農地の表土中の土壌有機炭素はしばしば毎年 0.4% の増加という高度な目標値と等しいかそれよりも高い割合で増加することが観察されている (Minasny et al., 2017)。

As shown in Table 1, if it were possible to increase the global top SOC stock by 0.4% per year, this would provide a global SOC sequestration of 2.8 and 3.4 Gt C · yr<sup>-1</sup> over 0–30 and 0–40 cm, respectively.

表 1 に示したように、地球上の表層土の土壤有機炭素を毎年 0.4% 増やすことが可能ならば、地球上の土壤有機炭素をそれぞれ 0-30 cm では年間に 2.8 Gt C、0-40 cm では 3.4 Gt C 隔離することが可能となる。

These values are in the range (2.6–5.0 Gt C · yr<sup>-1</sup>) of technical SOC sequestration rates achievable when harnessing all land use types and combining different sequestration practices to maximize soil C gains (Lal, 2010; Smith et al., 2013).

これらの値は、すべての土地利用にわたり炭素の獲得を最大限に増やすために考案された各種異なる隔離方法を結合させた場合に技術的に達成可能な土壤有機炭素の隔離速度の範囲（毎年 2.6 – 5.0 Gt C）に相当する (Lal, 2010; Smith et al., 2013)。

In contrast, aiming to increase all SOC (down to 1 m or to 3 m) at a rate of 0.4% per year is not plausible, as it would require SOC sequestration rates that are higher than even the most optimistic estimates (Table 1).

これとは対照的に(1–3 m の深さまでの)全ての土壤有機炭素を増加させることを目標とするのは現実的ではない。なぜならそのためには最も楽観的な推定値よりも高い土壤有機炭素の隔離速度を必要とすることになるからである。



Table 1. For depths ranging between 30 and 300 cm, global soil organic carbon (SOC) stocks, soil to atmosphere C stock ratio and aspirational SOC sequestration target assuming a 0.4% (4 per 1000) annual growth rate in SOC stock. Note that the estimated global technical potential for SOC sequestration is estimated at 2.6–5.0 Gt C · yr<sup>-1</sup> (Lal, 2010) and that in 2011 the atmospheric C content as CO<sub>2</sub> reached 828 Gt C (Le Quéré et al., 2015).

表1 土壌の深さ 30 から 300cm の範囲における、地球規模の土壌有機炭素 (SOC)貯蔵量、土壌炭素と大気中炭素の比率、および土壌有機炭素貯蔵量を毎年 0.4%(1000 分の 4)増大させることを想定したときの上昇志向的な土壌有機炭素隔離の目標値。土壌有機炭素隔離に対して推定された地球規模での技術的可能性は 1 年間に 2.6 – 5.0 Gt であり (Lal, 2010)、2011 年には CO<sub>2</sub> としての大気中の炭素含量は 828 Gt C に達している (Le Quéré et al., 2015) ことに着目すること。

土壌の 深さ	土壌有機炭素 貯蔵量	文献	土壌：大気 炭素貯蔵量 の比率(2011)	1000分の4戦 略におけるSOC 隔離量	文献
cm	GtC			GtC·yr <sup>-1</sup>	
0–30	690 ± 90	Batjes (1996); Hiederer and Köchy (2011)	0.8	2.8 ± 0.36	-
0–40	860	Interpolation, see Fig. S1 (S.M.)	1.0	3.4	-
0–100	1500 ± 230	Batjes (1996); Scharlemann et al. (2014)	1.8	6.0 ± 0.92	Chabbi et al. (2017)
0–300	2344	Jobbágy and Jackson (2000)	2.8	9.4	Balesdent and Arrouays (1999); cited by Minasny al. (2017)

### 3.2. Agricultural, land management and forestry practices

#### 3.2. 農業、土地管理および林業に関わる行動

The ecosystem C balance (ECB) can be calculated from the sum of gross inputs and outputs of inorganic and organic C to the ecosystem: (i) carbon trace gases exchanged with the atmosphere (i.e. CO<sub>2</sub>; CH<sub>4</sub>; volatile organic compounds, VOC; and emissions during fires), (ii) organic C imports (compost, manures) and exports (harvests, animal products), (iii) dissolved C lost in waters (dissolved organic and inorganic C) and lateral transport of soil C through erosion. ECB (tC·ha<sup>-1</sup>·y<sup>-1</sup>), which is the measurable change of ecosystem C stock, can be calculated from the mass balance of these fluxes (Soussana et al., 2010):

生態系における炭素収支(ECB)は生態系への無機炭素および有機炭素の総入力と総出力から計算することができる。その内訳は (i) 大気中で交換される炭素を含む微量の気体 (例: CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, 揮発性有機化合物 VOC、および火災での排出物)、(ii) 有機炭素の入力 (堆肥、糞尿) および系外への搬出 (収穫物、畜産物)、(iii) 水中に失われる溶存炭素 (溶存性の有機および無機炭素) および侵食による土壌炭素の水平方向への移動などである。ECB (tC·ha<sup>-1</sup>·y<sup>-1</sup>)、すなわち生態系中の炭素の測定可能な変化は、これらの流束の質量バランスから計算した (Soussana et al., 2010) :

$$\text{ECB} = \text{NPP} - R_h + F_{\text{manure}} - F_{\text{CH}_4\text{-C}} - F_{\text{VOC}} - F_{\text{fire}} - F_{\text{harvest}} - F_{\text{animal-products}} - F_{\text{leach}} - F_{\text{erosion}} \quad (1)$$

Where NPP and R<sub>h</sub> are the net primary productivity (NPP) and the heterotrophic (soil + animal) respiration, F<sub>CH<sub>4</sub>-C</sub>, F<sub>VOC</sub> and F<sub>fire</sub> are trace-gas C losses from the ecosystem, through soil and enteric methane emissions, volatile organic compounds and fires, respectively. F<sub>manure</sub> is the organic C input through manure and other amendments application, while F<sub>harvest</sub> and F<sub>animal-products</sub> are organic C exports in crop and grassland harvests and in milk and meat products, respectively. F<sub>leach</sub> and F<sub>erosion</sub> are organic (and/or inorganic) C losses through leaching and erosion, respectively.

$$\text{ECB} = \text{NPP} - R_h + F_{\text{manure}} - F_{\text{CH}_4\text{-C}} - F_{\text{VOC}} - F_{\text{fire}} - F_{\text{harvest}} - F_{\text{animal-products}} - F_{\text{leach}} - F_{\text{erosion}} \quad (1)$$

## 各項の説明

ECB：生態系における炭素収支

NPP: 正味の一次生産、 $R_h$ : 従属栄養的な（土壌+動物）呼吸、

$F_{\text{CH}_4\text{-C}}$ ,  $F_{\text{VOC}}$  および  $F_{\text{fire}}$ ：それぞれ土壌および家畜の腸からのメタン排出、揮発性有機化合物、および火災による炭素消失などからなる生態系からの微量ガスの損失、

$F_{\text{manure}}$ ：糞尿およびその他の投入物による有機炭素の入力、

$F_{\text{harvest}}$ ：作物および草地からの収穫による有機炭素の系外搬出

$F_{\text{animal-products}}$ ：乳製品および肉製品による有機炭素の系外搬出

$F_{\text{leach}}$ ：溶脱による有機炭素（および／あるいは）無機炭素の損失

$F_{\text{erosion}}$ ：侵食による有機炭素（および／あるいは）無機炭素の損失

Eq. (1) has dominant terms at annual time scale, which usually are NPP,  $R_h$ ,  $F_{\text{manure}}$  and  $F_{\text{harvest}}$ , with other fluxes being relatively small on short time scales but becoming important when considering ECB on multi-decadal time scales.

式(1) の主要な項、すなわち NPP,  $R_h$ ,  $F_{\text{manure}}$  and  $F_{\text{harvest}}$  などは1年毎のタイムスケールを持っている。その他の物質の流れは比較的小さく短いタイムスケールを持っているが、ECB を数十年というタイムスケールで考える時には重要となってくる。

Erosion is a carbon loss at site scale, for instance wind erosion organic carbon losses range from 0.3 to 1.0 Gt C · yr<sup>-1</sup> (Chappell et al., 2016). Although the net C balance of erosion removal, compensatory soil sink, transport and re-deposition processes is highly uncertain, it is believed to be a net C sink at global scale (Wang et al., 2017). Nevertheless, even if erosion could potentially induce a sink for atmospheric CO<sub>2</sub>, strong agricultural policies are needed to prevent or reduce soil

erosion, in order to maintain primary productivity and soil health (Lugato et al., 2016).

侵食は場所のスケールでの炭素の損失であり、例えば、風食による有機炭素の損失は 0.3 から 1.0 Gt C · yr<sup>-1</sup> (Chappell et al., 2016)の範囲である。侵食による除去、それを補う土壌炭素の蓄積、移動および再堆積などのプロセスの正味の炭素収支は非常に不確実であるが、地球のスケールでは正味の炭素貯蔵であると信じられている(Wang et al., 2017)。しかしながら、侵食が大気中の二酸化炭素の貯蔵を誘導する可能性があるとしても、一次生産能力と土壌の健康を維持するためには土壌侵食を防止するか減少させるための強力な農業政策が必要である。

Most of the fluxes composing Eq. (1) have contrasted values depending on soil, climate, land-use and land management. For instance, CH<sub>4</sub>-C emissions from paddy rice and wet grasslands are high, but CH<sub>4</sub>- C oxidation is documented in many arable crop and forest systems (Conrad, 2009).

式(1)を構成する流束の多くは土壌、気候、土地利用および土地管理の違いによって対照的な値をとることがある。例えば、水田および湿った草地からのメタン C の排出量は大きい、多くの農耕地および森林の系ではメタン C の酸化が報告されている。

$$ECB = \Delta SOC + \Delta AGC \quad (2)$$

The ecosystem C balance is the sum of a below-ground component ( $\Delta SOC$ , net change in SOC stock) and of an above-ground component ( $\Delta AGC$ , net change in the C stock accumulated in above-ground bio- mass).

$$ECB = \Delta SOC + \Delta AGC \quad (2)$$

生態系における炭素の収支は地下部の構成要因 ( $\Delta SOC$ , 土壌有機炭素貯蔵量の正味の変化) と地上部の構成要因 ( $\Delta AGC$ , 地上部のバイオマスに蓄積された炭素貯蔵量の正味の変化) の和である。

Hence, the soil C balance ( $\Delta \text{SOC}$ ) can be derived from ECB by accounting for changes in above-ground C stock ( $\Delta \text{AGC}$ ), which are typically small with annual crops and grasslands, intermediate with perennial crops, rangelands and agroforestry, and large with forestry:

$$\Delta \text{SOC} = (\text{NPP} - \text{Rh} - \Delta \text{AGC}) + (\text{F}_{\text{manure}} - \text{F}_{\text{harvest}} - \text{F}_{\text{animal-products}} - \text{F}_{\text{CH}_4\text{-c}}) - (\text{F}_{\text{erosion}} + \text{F}_{\text{fire}} + \text{F}_{\text{leach}} + \text{F}_{\text{VOC}}) \quad (3)$$

従って、土壌炭素の収支( $\Delta \text{SOC}$ )は地上部の炭素貯蔵量の変化( $\Delta \text{AGC}$ )を説明することによって ECB から求めることができる。 $\Delta \text{AGC}$  は単年生の作物および草地では典型的に小さく、多年生の作物、放牧地、およびアグロフォレストリーでは中くらいであり、森林では大きい。

$$\Delta \text{SOC} = (\text{NPP} - \text{Rh} - \Delta \text{AGC}) + (\text{F}_{\text{manure}} - \text{F}_{\text{harvest}} - \text{F}_{\text{animal-products}} - \text{F}_{\text{CH}_4\text{-c}}) - (\text{F}_{\text{erosion}} + \text{F}_{\text{fire}} + \text{F}_{\text{leach}} + \text{F}_{\text{VOC}}) \quad (3)$$

Eq. (3) shows the three categories of fluxes that govern  $\Delta \text{SOC}$  at the ecosystem scale: the flux of organic carbon partitioned below-ground ( $\text{NPP} - \text{Rh} - \Delta \text{AGC}$ ), the human appropriation of above-ground carbon ( $\text{F}_{\text{manure}} - \text{F}_{\text{harvest}} - \text{F}_{\text{animal-products}} - \text{F}_{\text{CH}_4\text{-c}}$ ) and the carbon losses at ecosystem scale ( $\text{F}_{\text{erosion}} + \text{F}_{\text{fire}} + \text{F}_{\text{leach}} + \text{F}_{\text{VOC}}$ ). Management strategies to increase  $\Delta \text{SOC}$  target these three categories in different ways:

式3は生態系のスケールにおいて  $\Delta \text{SOC}$  を支配する3つのカテゴリーの物質の流束があることを示している。すなわち：地下部に分配された有機炭素の流束 ( $\text{NPP} - \text{Rh} - \Delta \text{AGC}$ )、地上部の炭素に対する人為的関与 ( $\text{F}_{\text{manure}} - \text{F}_{\text{harvest}} - \text{F}_{\text{animal-products}} - \text{F}_{\text{CH}_4\text{-c}}$ )、そして生態系のスケールにおける炭素の損失 ( $\text{F}_{\text{erosion}} + \text{F}_{\text{fire}} + \text{F}_{\text{leach}} + \text{F}_{\text{VOC}}$ )である。 $\Delta \text{SOC}$  を増大させるための管理戦略はこれら3つのカテゴリーに対して異なった方法で立ち向かおうとしている。

- Soil conservation. Soil conservation requires reducing C losses from the ecosystem e.g. by avoiding fires, reducing erosion and leaching (i.e. reducing  $\text{F}_{\text{erosion}}$ ,  $\text{F}_{\text{fire}}$  and  $\text{F}_{\text{leach}}$ ). Many conservation practices can be combined and these have been reviewed by the UN Food and Agriculture Organization (FAO) and the

Intergovernmental Technical Panel on Soils (ITPS) in a dedicated report (FAO and ITPS, 2015) and are studied by the WOCAT network (WOCAT, 2017). Soil conservation also has implications for other fluxes which are directly (e.g.  $F_{\text{harvest}}$ ), or indirectly (e.g.  $R_h$ ) controlled by agricultural management. For instance, no-till, cover crops, direct drilling into mulch can be used to protect cultivated soils from erosion and will have feedbacks on plant production and harvest, through soil moisture and nutrients.

# 土壌保全。土壌保全のためには生態系からの炭素の損失を減少させることが必要である。例えば火災を避け、侵食と溶脱を減少させる（すなわち、 $F_{\text{erosion}}$ 、 $F_{\text{fire}}$  と  $F_{\text{leach}}$  を減少させる）。多くの保全の方法を組み合わせることが可能であり、このことについてはFAO および土壌に関する政府間技術パネル(ITPS)の詳細な報告書によってレビューされているし(FAO and ITPS, 2015)、WOCAT ネットワークによっても研究されている(WOCAT, 2017)。土壌保全は農業管理によって直接的に(例えば  $F_{\text{harvest}}$ )、あるいは間接的に(例えば  $R_h$ )調整されるその他の物質の流束に対しても影響力を持っている。例えば、不耕起、被覆作物、マルチへの直播などの技術は耕地土壌を侵食から防ぐために用いることが可能であり、土壌水分と養分が保全されることによって作物の生産と収穫量にフィードバックをもたらす。

- Carbon management. C management aims at increasing ECB by accumulating above-ground biomass (e.g. in forests, in agroforestry) and by sequestering SOC (in all ecosystems). Protecting SOC stocks requires avoiding adverse land use change and management practices (e.g. deforestation, ploughing of grasslands, soil sealing, etc.), avoiding drainage and cultivation of organic soils (e.g. drained peatlands). C management also has strong implications for the balance between primary productivity (NPP), soil and animal respiration ( $R_h$ ), manures and harvests ( $F_{\text{manure}}$ ,  $F_{\text{harvest}}$ ). Avoiding overgrazing (which reduces NPP and increases  $F_{\text{CH}_4\text{-C}}$  and  $R_h$ ), balancing SOM decomposition with the supply of manures, crop residues and litter, and increasing the mean annual NPP allow to increase  $\Delta$  SOC in agricultural systems (Jansson et al., 2010).

#炭素の管理。炭素の管理は地上部のバイオマス（例えば森林およびアグロフォレストリー）を蓄積することと、（全ての生態系において）土壤有機炭素を隔離することによって ECB を増大させることを目指している。土壤有機炭素の貯蔵量を守るためには、悪い土地利用変化や管理方法を避けること（例えば森林を減らすこと、草地を耕すこと、土壤を密閉することなど）、有機質土壤の排水や耕耘を避けること（例えば乾燥させた泥炭地）などが求められる。炭素の管理はまた一次生産（NPP）、土壤と動物の呼吸（ $R_h$ ）、糞尿および収穫（ $F_{\text{manure}}$ ,  $F_{\text{harvest}}$ ）の間の収支にも大きな影響を及ぼしている。過放牧（これによって NPP が減少し、 $F_{\text{CH}_4\text{-C}}$  と  $R_h$  が増大する）を避けること、糞尿、作物残渣、落葉落枝を施用することによって土壤有機物の分解による損失を補うこと、そして平均的な年間の NPP を増大させることによって、農業システムにおける  $\Delta\text{SOC}$  を増大させることができる (Jansson et al., 2010)。

- Meta-analyzes conducted in recent years and covering the entire soil column (Luo et al., 2010; Virto et al., 2012) suggested no significant positive difference in  $\Delta\text{SOC}$  on average in no-till soils, although some increase in organic matter (and hence C) concentration in the 15–20 cm layer of top-soil is usually observed. Positive effects such as reduced soil erosion and improved water retention and infiltration, may increase crop yields and soil C in dry conditions under no-till, because of reduced soil evaporation (caused by mulch), but apparently not in cool-moist climates given increased risks of waterlogging (Pittelkow et al., 2015; Powlson et al., 2014). In addition, in humid regions no-till may reduce crop yields and soil C due to increased weed development (Giller et al., 2009; Pittelkow et al., 2015). SOM stabilization would be increased through rhizodeposition and root litter inputs (Dignac et al., 2017) and could therefore be higher with perennial plant species compared to annuals. Indeed, Jobbágy and Jackson (2000) have shown that the vertical distribution of SOC in contrasted soil profiles corresponds to that of the vertical root distribution. Systems mixing perennials and annual crops (e.g. agroforestry) and crop-grass rotations can therefore be beneficial for SOC sequestration (Soussana and Lemaire, 2014). Tropical agroforestry trees can show impressive root growth rates. Roots of *Sesbania sesban* in an agroforestry fallow in Zambia were found growing to a depth of 7 m after 2 years, at a rate of

about  $1 \text{ cm}\cdot\text{day}^{-1}$ . This represents a carbon input between  $0.6$  and  $1 \text{ tC}\cdot\text{ha}^{-1}$  (Torquebiau and Kwesiga, 1996).

#### #メタ分析

最近行われたすべての深さの土壌カラムをカバーして行ったメタ分析(Luo et al., 2010; Virto et al., 2012)によると、不耕起土壌において平均的に  $\Delta\text{SOC}$  には有意な正の変化は認められなかった。しかし、表層土壌の  $15\text{-}20 \text{ cm}$  の層における有機物(従って炭素)濃度のある程度の増加が通常認められた。土壌侵食の減少、水分保持能および浸透能の改善などのポジティブな効果が、乾燥条件下で不耕起を行うことにより、土壌からの水分の蒸発が(マルチによって)減少し、作物収量および土壌炭素含量を増大させるであろう。しかし、冷涼で湿潤な気候の下で湛水の危険が増大するような条件下ではこのような効果は無い(Pittelkow et al., 2015; Powlson et al., 2014)。さらに、湿潤な地域では不耕起は雑草の発生を増やすことによって作物の収量と土壌炭素含量を減少させる可能性がある(Giller et al., 2009; Pittelkow et al., 2015)。土壌有機物の安定化は根の蓄積や根の残渣の投入によっても増大するであろう(Dignac et al., 2017)。従って、単年生作物よりも多年生作物による効果が大きいであろう。実際、Jobbágy and Jackson (2000)は様々な特徴的な土壌断面における土壌有機炭素の分布は根の垂直分布と対応していることを示した。単年生と多年生の植物を混合して栽培すること(例えば agroforestry)や、作物と草地を輪作するシステムは、従って土壌有機炭素の隔離にとって有利である(Soussana and Lemaire, 2014)。熱帯のアグロフォレストリーで植えられる木は著しい成長速度を持っている。ザンビアで行われたアグロフォレストリーの休閑地で植えられたセスバニアセスバン: 和名キダチデンセイ(*Sesbania sesban*)の根が2年間に  $7 \text{ m}$  の深さまで  $1 \text{ cm}\cdot\text{day}^{-1}$  の速さで伸びた。これは  $1 \text{ ha}$  あたり  $0.6$  から  $1 \text{ t C}\cdot\text{ha}^{-1}$  (Torquebiau and Kwesiga, 1996)に相当する。

- Agricultural and forestry intensification. Shifting from natural to planted forests, from semi-natural to sown grasslands and intensifying arable crop production by use of modern varieties and of supplies of fertilizers and pesticides inputs has been largely used to increase food, feed and fiber production often resulting in NPP increases, but not necessarily improving ECB and  $\Delta\text{SOC}$ , since the human



appropriation of NPP through harvests, grazing and fires has been increasing (Haberl et al., 2014).

#農業および林業の集約化。天然林から植林された森林への移行、半天然の草地から播種された草地への移行、現代的な品種を採用し、肥料や農薬を使用して作物の生産を増大させることは、食料、飼料、繊維の生産を増大させるために行われ、同時に NPP の増大をももたらしてきたが、必ずしも ECB および  $\Delta$  SOC の増大には結びついてこなかった。それは収穫、家畜による摂食および火災によって人為的に NPP の増加分が奪われてきたからである (Haberl et al., 2014)。

Adoption of improved agronomic practices results in relative annual SOC increases that are often in excess of 0.4% in tropical grasslands (Assad et al., 2013) and in temperate and tropical cropping systems (Stockmann et al., 2013). A synthesis of internationally distributed long-term field crop trials (Minasny et al., 2017) has recently confirmed this finding and has shown that the relative growth rate of SOC stocks is usually higher when starting from degraded soils (1.5% per year, on average, for an initial SOC stock of 20 tC·ha<sup>-1</sup>) than from C rich soils (0.4% per year for an initial SOC stock of 80 tC·ha<sup>-1</sup>).

改善された農法を採用することによって、熱帯の草地 (Assad et al., 2013) および温帯および熱帯の栽培体系 (Stockmann et al., 2013) において、土壤有機物炭素の相対的な年間の増加量はしばしば 0.4% 以上に及んだ。世界各地で行われてきた長期圃場作物栽培試験の結果を総合すると、土壤有機物の相対的な増加速度は、劣化した土壤から始めた場合の方が（初期の土壤有機炭素貯蔵量が 20 tC·ha<sup>-1</sup> の土壤では平均して毎年 1.5% 炭素が増加）、炭素に富んだ土壤から始めた場合よりも大きいことが示された（初期の土壤有機炭素貯蔵量が 80 tC·ha<sup>-1</sup> の土壤では平均して毎年 0.4% 炭素が増加）。

Agricultural practices which can be used to store additional SOC include crop species and varieties with greater root mass and with deeper roots, use of N-fixing legumes in N-deprived soils, use of cover crops during fallow periods, use of crop rotations providing greater C inputs, increased residue retention and addition of

amendments such as compost and biochar (Paustian et al., 2016).

さらに土壌有機炭素の貯蔵を増やすために用いることができる農業行為としては、根の量がより多い作物種あるいは品種を栽培すること、窒素が欠乏した土壌において窒素固定マメ科植物を栽培すること、休閑期間に被覆作物を栽培すること、炭素の投入量がより大きくなるような輪作体系を採用すること、作物残渣を土壌中に残留させること、そして堆肥や生物炭のような有機物を施用することなどが含まれる(Paustian et al., 2016)。

These practices may reduce organic C losses (e.g. by reducing fires, overgrazing, harvests of timber and soil erosion), or increase organic C returns to the soil (crop residues, manures) and, moreover, change the balance between photosynthesis and ecosystem respiration. The latter can be achieved by increasing crop photosynthesis (e.g. through cover crops, intercropping, agroforestry) and by minimizing soil disturbance (e.g. conservation agriculture, CA).

これらの行動は有機炭素の損失を減少させ（例えば火災、過放牧、木材の伐採、土壌侵食を減少させることによって）、あるいは土壌中への有機炭素の返還（作物残渣や家畜糞尿）を増大させ、さらに、光合成と生態系による呼吸との間の収支を変化させる。後者は作物による光合成を増大させ（例えば被覆作物、間作、アグロフォレストリーによって）、土壌の攪乱を最小にすることによって（例えば保全的農業、CA）達成される。

Large gains in crop carbon balance can also be obtained through improved crop cultivars, use of N-fixing legumes and of organic and inorganic fertilizers, thereby enhancing the amounts of crop residues returning to the soil. Improved water management is also a strong driver of primary productivity and can complement the aforementioned practices. The use of cover crops increased SOC stock on average by  $0.32 \text{ tC ha}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$  over 50 years (Poeplau and Don, 2015).

改良された作物品種を用いることや、窒素固定マメ科作物および有機質および無機質の肥料を用いることによって作物の炭素収支を大きく増大させることが

でき、それに伴って土壤中に返される作物残渣の量を増やすことができる。水管理法の改善も一次生産増大のための強力な動機となり、上述の行為を補うことができる。被覆作物の利用により、50年の期間にわたって毎年  $0.32 \text{ tC ha}^{-1}$  の土壤有機炭素の貯蔵量を増やすことができた(Poeplau and Don, 2015)。

With grasslands, seeding highly productive  $C_4$  grasses (e.g. *Brachiaria* sp.) and applying N and P fertilizers under tropical conditions in Brazil provides high rates of soil C sequestration, especially when restoring degraded pastures (Assad et al., 2013; Braz et al., 2013).

草地に関しては、ブラジルの熱帯条件下において、生産性の高い  $C_4$  種の草を播き(例えば *Brachiaria* sp.)、窒素およびリン酸肥料を施用することによって、効率的に土壤炭素の隔離を行うことができ、特に劣化した草地を回復させるのに有効であった(Assad et al., 2013; Braz et al., 2013)。

A literature review of SOC storage in Sub-Saharan Africa showed that 79 and 63% of the observations in the published studies had relative rates that were larger than 0.4% per year in agroforestry and CA respectively (Corbeels et al. (in prep.)).

サハラ砂漠以南のアフリカにおける土壤有機炭素の貯蔵に関する文献をレビューしたところ、公刊された研究の観測例のうち、アグロフォレストリーの 79% および保全的農業(CA)の 63%で相対的な土壤有機炭素の増加率は 0.4%以上であった。

### 3.3. Co-benefits for food security and climate change adaptation

食料の安全および気候変動への適応にとっての相乗効果

Practices that sequester SOC also tend to improve food security and climate change adaptation. With increasing SOC, co-benefits for yields (ca.  $0.07 \text{ ton (t) of dry matter/t SOC sequestration}$ ) could be obtained each year under tropical conditions (Lal, 2006). Improving SOC stock by one ton C per hectare would have the potential to increase grain production in developing countries by 24–40

million t·y<sup>-1</sup> (Lal, 2006).

土壌有機炭素を隔離する行為は同時に食料の安全と気候変動の緩和に貢献する傾向がある。土壌有機炭素の増加によって、熱帯条件下で毎年土壌有機炭素1トンの隔離に対しておよそ0.07トンの乾物収量の増大という相乗効果を得ることができた(Lal, 2006)。土壌有機炭素の貯蔵量を1ヘクタールあたり1トン増加させることにより発展途上国での穀物の収量を毎年2400万トンから4000万トン増加できる可能性がある(Lal, 2006)。

Hijbeek et al. (2017) when looking for a similar effect across a wide range of crops in Europe, found that the mean additional yield effect of organic inputs was not significant but a significant effect for root and tuber crops, spring sown cereals, and for crops for very sandy soils or wet climates. They also reported a significant correlation between increase in attainable yields and increase in SOM content.

Hijbeek et al. (2017)は、ヨーロッパの広範囲の作物で同様な効果を探すなかで、有機物の投入が収量におよぼす平均的な効果は有意ではなかったが、根菜類や芋類、春蒔きの穀類、非常に砂質の土壌や湿潤な気候で栽培される作物に対しては有意な効果が認められた。また彼らは達成可能な収量増加と土壌有機物含量の増加の間に有意な相関があることを報告した。

In the literature review presented here, we compiled 32 published studies from developing countries reporting both changes in grain yields and in top-soil SOC stocks, 4 years or more after changes in management practices (see Materials and Methods section and Supplementary material).

ここで紹介した文献のレビューでは、私たちは開発途上国からの32の公開された研究を集約させた。その中では圃場管理の方法を変化させた後4年またはそれ以上後に、穀物の収量と表層土壌の有機炭素の変化がどちらも起こることを報告している（「試料および方法」および補助資料を参照のこと）。

The corresponding field experiment data with corn, rice, wheat and beans show

considerable scatter in the effects of improved agricultural practices, with some studies reporting large annual increases in crop productivity (up to +40%) and in topsoil SOC stocks (up to +8%) (Fig. 1). Despite this scatter, grain crop yield increases are significantly ( $P < 0.012$ ) and positively correlated with the relative change in SOC stock. On average, across these studies in Africa, Asia and Latin America, a 1.3% annual increase in crop grain yields was associated with a 0.4% annual increase in SOC stock (Fig. 1). This positive correlation confirms that there are win-win strategies combining SOC sequestration and increasing crop yields in developing countries.

トウモロコシ、稲、小麦、豆などの関連した圃場試験データは、農業事業改善の効果にかなりバラツキを示していたが、いくつかの研究では毎年の作物の収量(+40%に達する)および表層土中の土壌有機炭素の貯蔵量(+8%に達する)が著しく増大していた(Fig. 1)。このようなバラツキにも関わらず、穀粒作物の収量の増加は土壌有機炭素貯蔵量の相対的な変化と有意な( $P < 0.012$ )正の相関を示した。平均的に、アフリカ、アジア、ラテンアメリカで行われたこれらの研究を通じて、土壌有機物貯蔵量が年間 0.4%増大すると、穀物の収量は 1 年間に 1.3%増加した(Fig. 1)。この正の相関から、発展途上国では土壌有機炭素の隔離と作物収量の増加を結びつける Win-win の戦略が成立することを確認できる。

When including a positive effect of soil C mitigation on crop yields (based on Lal, 2006, who assumed a lower yield enhancement than the regression shown in Fig. 1), it was found in the global modeling study of Frank et al. (2017) that the average calorie deficit in developing countries, under 2 ° C and 1.5 ° C global warming constraints, could be reduced below 100 kCal per capita and per day (ca. 4% of daily dietary energy availability).

作物の収量に対する土壌炭素緩和の正の効果を含めると (図 1 に示した回帰直線よりも収量の促進効果が少ないと予想した Lal, 2006 の研究によれば)、Frank et al. (2017)の地球規模でのモデル化研究において、2°Cおよび 1.5°Cに地球温暖化を制限することによって、発展途上国における平均的なカロリー不足を人口 1 人 1 日当たり 100 kCal 以下に減らすことができることが明らかとなった

(これは1日あたりに利用できる食事のエネルギーの約4%に相当する)。

Hence, SOC sequestration would have large co-benefits for food security compared to land-based mitigation policies not including SOC sequestration, since these land-based mitigation policies involve a rise in food prices (due e.g. to pressure on arable land) with calorie availability losses exceeding 300 kCal per capita per day in developing countries under the 1.5 ° C target (Frank et al., 2017).

従って、土壌有機物の隔離は、土壌有機物の隔離を含めない土地に基盤を置く緩和政策と比べて、食料の安全にとって大きな相乗効果を持つであろう。なぜならこれらの土地に基盤を置く緩和政策は食料価格の高騰が見込まれており(例えば耕地への圧力が高まることにより)、1.5 ° C 温暖化抑制目標の下で発展途上国においては人口1人1日あたり300 kCal以上のカロリー獲得可能性が損失する(Frank et al., 2017)。

In addition, SOC sequestration helps reduce climate induced yield variability (Pan et al., 2009) by improving water availability to plants through SOM mediated improvements in soil structure, water infiltration and water holding capacity, thereby reducing risks of soil-related droughts as well as flooding since infiltration reduces peak flows (Herrick et al., 2013). Increased SOC content also leads to improved soil biological properties (Guimarães et al., 2013).

これに加えて、土壌有機炭素の隔離は、気候によってもたらされる収量変動(Pan et al., 2009)を減少させるためにも役立つ。これは土壌有機物の働きによって土壌構造、透水性、水分保持能が改善されることによって植物に対する水分の有効性が改善され、さらにそのことによって、土壌に関連した干害の危険性が減少するとともに、透水性の増大によってピーク時の流量が減少する(Herrick et al., 2013)ため洪水の危険性も減少することによるものである。土壌有機炭素含量の増加はまた土壌の生物的特性も改善する(Guimarães et al., 2013)。

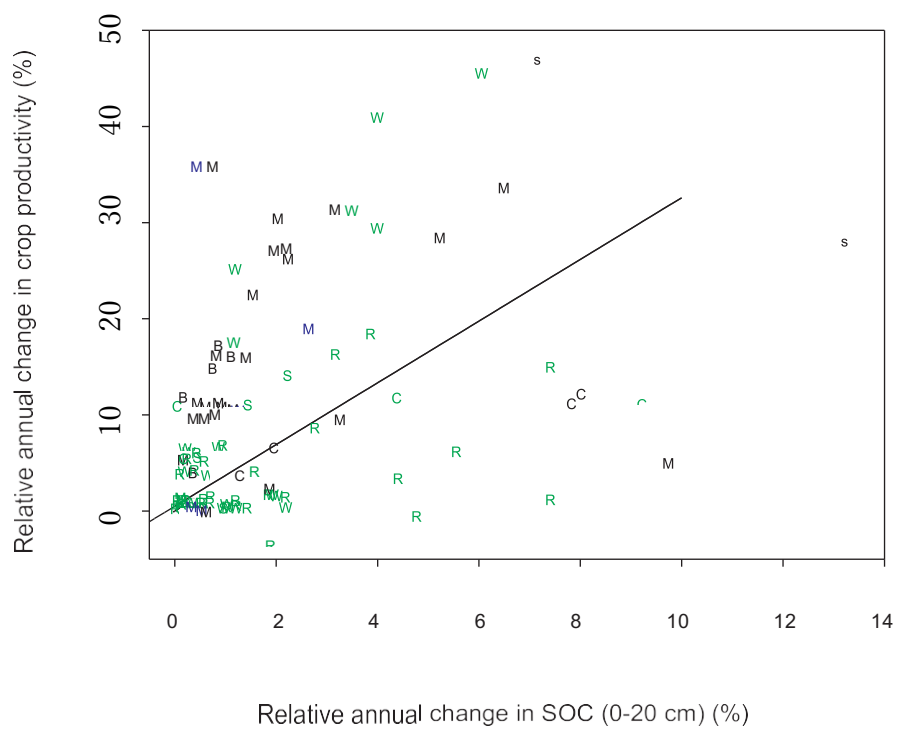
Moreover, restoring degraded forests and expanding tree cover in agricultural landscapes could reduce the local magnitude of heat waves and induce benefits for the hydrological cycle and for the micro-climate (Ellison et al., 2017). Thus, restoring degraded soils and expanding agroforestry have large potential for climate change adaptation of agriculture, for yield increases and for the development of resilient production systems, especially under tropical conditions (Branca et al., 2013; Lipper et al., 2014). Therefore, the adoption of land management practices supporting SOC sequestration could be enhanced in developing countries by the need for rapid climate change adaptation, rather than by greenhouse gas mitigation concerns.

さらに、破壊された森林を回復させ、農地景観において樹木被覆度を高めることは、熱波の地域的な強度を減少させ、水文学的な循環と微気候に利益をもたらす (Ellison et al., 2017)。従って、劣化した土壌を回復し、アグロフォレストリーを拡大することは、環境変動に対する農業の適応、収量の増大、回復力のある生産システムの発展にとって、特に熱帯条件下において大きな可能性を持っている (Branca et al., 2013; Lipper et al., 2014)。従って、地球温暖化ガスの緩和に対する関心よりも、急速な気候変動に対する適応の必要性から、発展途上国において、土壌有機炭素の隔離を組み入れた土地管理事業の採用を促進させる必要がある。

Fig. 1. Relative annual changes in crop productivity and in soil organic carbon stock (over 0–20 cm) (%) after changes in land management improving soil carbon. The results correspond to a meta-analysis of 32 papers, reporting 151 relevant comparisons of location, practice, and crops over 4 years or more. Crop species: B, beans; C, cassava; M, maize; P, sweet potatoes; R, rice; S, soybean; s, sorghum; W, wheat. Field experiment regions: Africa (Black); Asia (Green); Latin America (Blue). The solid line is the Standard Major Axis regression for all data points ( $n = 151$ , Spearman's rank correlation:  $y = 0.495 + 3.21 x$ ;  $r = 0.205$ ,  $P < 0.012$ ). See references and information in Supplementary material. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

図 1. 土地管理方法を改善した後の1年当たりの作物の生産性と土壌有機物貯蔵量 (0–20 cm) の変化(%). 結果は4年間あるいはそれ以上の期間にわたり立地、事業、および作物に関して151の重要な比較を行った32の論文のメタ分析に基づいている。作物の種類: B, 豆類; C, キャッサバ; M, トウモロコシ; P, サツマイモ; R, 稲; S, 大豆; s, ソルガム; W, 小麦. 圃場試験の地域: アフリカ (黒); アジア (緑); ラテンアメリカ (青). 実線は全てのデータに対する標準主軸回帰直線である ( $n = 151$ , Spearman's rank correlation:  $y = 0.495 + 3.21 x$ ;  $r = 0.205$ ,  $P < 0.012$ ). 補充資料中の文献と情報を参照すること。(For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)





### 3.4. To which extent could the 4 per 1000 target contribute to atmospheric carbon stabilization?

1000分の4という目標は大気中の炭素の隔離にどの程度貢献できるか？

In the current state of the global carbon cycle (Fig. 2A), approximately half of the anthropogenic emissions of CO<sub>2</sub>-C are compensated by the land and ocean carbon sinks. Therefore, if it was at all possible to enhance within a few years the land carbon sink by fully harnessing the total technical potential of SOC sequestration across all land use types (3.4 GtC·y<sup>-1</sup>) (see Section 3.1) and by halting net deforestation (0.9 GtC·y<sup>-1</sup>), the atmospheric growth of CO<sub>2</sub> (4.3 GtC·y<sup>-1</sup>) would be stopped. This is only a thought experiment however, since:

現在の地球規模の炭素循環の状態において（図 2A）、人為的な CO<sub>2</sub>-C の排出量のうちのおよそ半分は陸上および海洋の炭素貯蔵庫によって取り込まれている。従って、全ての土地利用類型における土壌有機物隔離の技術的可能性(3.4 GtC·y<sup>-1</sup>)をフルに集約することによって数年のうちに炭素貯蔵を促進することが可能であれば（セクション 3.1 参照）、また正味の森林破壊(0.9 GtC·y<sup>-1</sup>) を停止すれば、大気中の CO<sub>2</sub> 濃度の増大 (4.3 GtC·y<sup>-1</sup>) を止めることは可能だったであろう。しかし、これは思考実験に過ぎない。何故なら、

- It may take decades to fully implement the SOC sequestration technical potential and this would also require high CO<sub>2</sub> prices, since the economic potential of SOC sequestration in agriculture is substantially lower than the technical potential even for carbon prices up to 100 USD per ton CO<sub>2</sub> (see Section 3.5)

土壌有機物の隔離の技術的可能性を完全に達成するには数十年の時間が必要であり、このことはまた高額な CO<sub>2</sub> 価格を必要とする。なぜなら農業における土壌有機物隔離の経済的な可能性は、1 トンの CO<sub>2</sub> の炭素価格が 100USD であったとしても、その技術的可能性よりもかなり低いからである (see Section 3.5)。

- In 2030, with full implementation of the conditional NDCs from the Paris agreement, anthropogenic emissions from fossil fuels and cements should reach 10.9 GtC (+22% compared to current, Fawcett et al., 2015), with an additional 0.76 GtC emitted by net land use change (-25% compared to current, Grassi et al., 2017). Although, close to half of these emissions would still be compensated by the net ocean and land sinks, assuming that their sink efficiency will not decline (Fig. 2B), it would take a much stronger land carbon sink enhancement to compensate for the atmospheric CO<sub>2</sub> growth.

2030年には、パリ合意に基づく条件的 NDC が完全に達成されたとしても、化石燃料およびセメントからの人為的排出は 10.9 GtC に達し (Fawcett et al., 2015 によれば、これは現在と比べて 22%増加)、正味の土地利用変化によって 0.76 GtC が排出される (Grassi et al., 2017 によればこれは現在に比べて 25%の減少)。もしこれらの貯蔵庫の効率性が減少しないと仮定すれば (図 2B)、これらの排出量の半分近くは正味の海洋および陸上貯蔵庫によって取り込まれるであろうが、大気中の CO<sub>2</sub> の増加を打ち消すには陸上の炭素貯蔵をさらに強く拡大させる必要がある。

To explore the maximum level of land sink enhancement that could be possible within a few decades, relevant for the NDCs targets, we detail below a scenario combining the technical potential of SOC sequestration and the contribution of C storage in above-ground forest biomass (Table 2, Fig. 2C).

NDC の目標と関連して、この数十年のうちに陸上での貯蔵庫を最大限に強化する方法を開発するために、私たちは以下で土壌有機物の隔離と地上部森林バイオマスによる炭素貯蔵の技術的可能性を結合させるシナリオを詳しく述べる。

For croplands and grazing lands (excluding bioenergy), the mean global SOC sequestration technical potential by 2030 was estimated at 1.4 GtC per year averaged over 0–30 cm (Smith et al., 2008) based on integrated impacts of changes in agricultural practices over the top 30 cm of the soil profile (reviewed by Ogle et al., 2005). Unfortunately, the integrated impacts of changes in

agricultural practices have not yet been estimated over depths greater than 30 cm of the soil profile.

農耕地および放牧地（バイオエネルギーを除く）に対して、2030年までの平均的な土壌有機炭素隔離の技術的可能性は0-30 cmの深さで平均して1年当たり1.4 GtC (Smith et al., 2008)と推定された。これは土壌断面の表層30cmで行われる農業行為の変化の総合的な影響に基づくものである(Ogle et al., 2005によってレビューされている)。残念ながら土壌断面の30cm以上の深さにおいて農業行為の変化が総合的に及ぼす影響についてはまだ見積もられていない。

This potential is equivalent to a relative annual SOC stock growth rate of 0.6%, slightly higher than the 4 per 1000 target, when calculated by reference to a global agricultural SOC stock of 233 GtC, as estimated over 0–30 cm from biome areas and SOC stocks by depth (see Jobbágy and Jackson, 2000). The relatively high technical potential in agricultural soils, compared to other lands uses, is likely to be related to SOC depletion, since conversion from natural to agricultural ecosystems has generally resulted in a significant loss of SOC (up to 50%) (Lal, 2010).

各種バイオーム地域および深さごとの土壌有機炭素の貯蔵量(see Jobbágy and Jackson, 2000)から0-30cmの深さについて推定された地球規模の農地の土壌有機炭素貯蔵量 233GtCを参照して計算すると、この可能性は相対的な年間土壌有機物貯蔵量の増加割合 0.6%に相当し、1000分の4の目標よりもわずかに高い。他の土地利用と比較して農地土壌で比較的高い技術的可能性が見積もられたのは、農地土壌での土壌有機炭素の損失によるものと考えられる。これは自然生態系から農業生態系への変換によって一般にかなりの土壌有機炭素の損失(50%にも及ぶ場合がある)が引き起こされたためである(Lal, 2010)。

It includes restoring low water tables organic soils that are now under cultivation, but barely considers the potential for expanding agroforestry ( $0.01 \text{ GtC}\cdot\text{y}^{-1}$ ) and considers only a small potential ( $0.16 \text{ GtC}\cdot\text{y}^{-1}$ ) for the restoration of desertified and salinized land. Below, we argue why these two options may in fact

have a higher potential.

この推定値には現在農地として利用されている地下水位の低い有機質土壌が含まれているが、アグロフォレストリーを拡大すること ( $0.01 \text{ GtC}\cdot\text{y}^{-1}$ ) についてはほとんど考えておらず、また砂漠化したおよび塩類化した土地の修復については低い能力 ( $0.16 \text{ GtC}\cdot\text{y}^{-1}$ ) しか考慮していない。以下では、私たちは何故これらの2つの選択肢が実際上もっと高い能力をもっているかについて議論する。

Recently, it was shown that 43% of global agricultural land has at least 10% tree cover and that the tree cover has increased by 2% over the last 10 years, resulting in additional annual C storage of at least  $0.2 \text{ GtC}\cdot\text{y}^{-1}$  (Zomer et al., 2016). Given the large amount of agricultural land potentially suitable for increasing tree cover density, agroforestry or additional tree planting in agricultural areas has a potential to sequester C while simultaneously enhancing food security (Lorenz and Lal, 2014; Lipper et al., 2014). Agroforestry is currently developed over roughly 820 million ha (Mha) of agricultural land, that is 20 and 15% of global croplands and grasslands, respectively, not including 200 Mha of forests managed as agro-forests (Nair et al., 2009). In the scenario proposed in Table 2, we assume its expansion over an additional 320 Mha of agricultural land (6% of global agricultural land).

最近、地球上の農地の43%は少なくとも10%の面積が樹木で覆われており、この10年間の間に樹木による被覆率は2%増大し、追加的な年間の炭素貯蔵量の増加は少なくとも  $0.2 \text{ GtC}\cdot\text{y}^{-1}$  に達した (Zomer et al., 2016)。樹木による被覆密度を増大させることに適した農地が広い面積で与えられるならば、アグロフォレストリーあるいは農地へのさらなる樹木の植林は炭素を隔離すると同時に食料の安全を増進する可能性を持っている (Lorenz and Lal, 2014; Lipper et al., 2014)。アグロフォレストリーは現在8億2千万ヘクタールの農地で開発されており、これは農耕地の20%、草地の15%に相当し、これにはアグロフォレストとして管理されている2億ヘクタールの森林は含まれていない。表2に提案したシナリオでは、さらに3億2千万ヘクタールの農地 (地球上の農地の6%) にアグロフォレストリーが拡大することを想定している。

Restoration of salt-affected lands and desertification control could add 0.5–1.4 GtC·y<sup>-1</sup> (Lal, 2010). The Land Degradation Neutrality Fund Global Mechanism of the United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD) targets in the next 20 years the rehabilitation of 300 Mha of this land use type, which would create a carbon sink of 0.27 GtC·y<sup>-1</sup> (UNCCD Global Mechanism, 2017). Consistently with the 4 per 1000 target, we assume here that accelerated land rehabilitation could take place and use a potential SOC sequestration value of 0.9 GtC·y<sup>-1</sup> with this option (Table 2).

塩類化した土地の修復および砂漠化の防止により 0.5-1.4 GtC·y<sup>-1</sup> の土壤有機炭素の隔離をもたらすことができる (Lal, 2010)。The Land Degradation Neutrality Fund Global Mechanism of the United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD) は今後 20 年間にこのような土地の修復を 3 億ヘクタールにわたって行うことを目標としている。これにより 0.27 GtC·y<sup>-1</sup> の炭素を隔離することができる (UNCCD Global Mechanism, 2017)。1000 分の 4 目標と整合して、土地の修復が加速され、この選択肢によって 0.9 GtC·y<sup>-1</sup> の土壤有機炭素隔離が可能になると私たちは推定している。

Two additional options for SOC sequestration in the agriculture sector have been recently highlighted by Paustian et al. (2016): biochar and the use of deep rooted crops, through enhanced plant phenotypes. Both options could be used on large agricultural land areas (above 1000 Mha) and could bring a total of 0.76 GtC·y<sup>-1</sup> of potential SOC sequestration (Paustian et al., 2016). Nevertheless, these novel options may not be mature enough for reaching full potential within a few decades and are thus considered here (Table 2) at half their potential value.

農業分野における 2 つのさらなる土壤有機炭素隔離法が最近脚光を浴びた (Paustian et al., 2016)。すなわちバイオチャーおよびフェノタイプ (表現型) を改良された深根性の作物である。これらの選択肢は広い農地面積 (10 億ヘクタール以上) で採用することができ、全部で 0.76 GtC·y<sup>-1</sup> の土壤有機炭素の隔離

をもたらすことができる (Paustian et al., 2016)。しかしながらこれらの新しい選択肢はこの数十年のうちにはその可能性をフルに発揮できるほどには成熟しないと予測されるため、この論文では表 2 に示したようにその可能性の半分の数値を採用している。

Biochar is charcoal produced through pyrolysis under controlled temperature and low oxygen environment, and generally characterized by a fine texture, which could mineralize 10–100 times more slowly than uncharred biomass, though these estimates are still debated (Schmidt et al., 2011; Lutfalla et al., 2017). However, reductions in crop yields have been reported in some instances after biochar addition, and long-term effects on soil fertility are largely unknown.

バイオチャーは管理された温度のもとで低酸素条件下での熱分解によって製造された炭であり、一般にきめ細かい組織を持ち、炭化していない植物体と比較すると 10-100 倍遅く分解される。ただしこれらの推定はまだ議論されている (Schmidt et al., 2011; Lutfalla et al., 2017)。しかし、いくつかの例でバイオチャーの添加により作物収量が減少した例も報告されている。土壌肥沃度に対する長期的効果もまだ未知である。

Additionally, compared with un-amended soils, gaseous emissions from biochar-amended soils have been reported for methane and nitrous oxide (Mukherjee and Lal, 2014). Net life-cycle emissions largely depend on whether the biomass used for biochar would have otherwise been burnt, added to a landfill or left in place as living biomass (DeLonge et al., 2013).

さらに、非添加土壌と比べて、バイオチャーを添加した土壌でメタンおよび亜酸化窒素などのガス排出が増えたことも報告されている (Mukherjee and Lal, 2014)。正味のライフサイクルでの排出量は、バイオチャーの生産に使用されたバイオマスが、バイオチャーにされなかった場合には燃焼されていたか、あるいはゴミ処理場に運ばれたか、あるいは生きたバイオマスとして元の場に残されたかなどの場合との比較に依存する。

Breeding for deep-rooted crops may also pose significant challenges. The rise in crop harvest index obtained from selecting plants with decreased allocation to roots and higher allocation to grain, is considered as one of the main levers of the sustained increase in cereal crop yields over the last decades. In modern cereal crop varieties, approximately half of the total plant biomass is harvested as grains, whereas with old varieties only one third of biomass contributes to grain yields (Sinclair, 1998).

深根性の作物の育種は著しい問題点を抱えるであろう。作物の収穫指標の増大は根への分配を減らし穀粒への分配を増やした植物を選ぶことによって達成されてきており、過去数十年の間穀粒性作物の収量を持続的に増加させるための主要な手段のひとつと考えられてきた。近代的な穀物種においては、植物バイオマスの約半分が穀粒として収穫されているが、古い品種ではバイオマスの3分の1しか穀粒の収量に貢献していない。

Therefore, partitioning more dry-matter to deep roots could reduce yields and crop nutrients uptake if rooting density is reduced in the top soil. However, going for more deep-rooted crops would have the advantage of a better resistance to drought stress and should not be ignored as an option. Breeding for deep roots is a current objective for several important crops, e.g. cotton (Lacape et al., 2016).

従って、深い根に乾物をより多く分配させることは、もし表層土中の根の密度が減少すれば作物の収量および作物養分の吸収を減少させることになる。しかし、より深根性の作物を選択することにより、乾燥ストレスに対する抵抗性が高くなるという利点があり、ひとつの選択肢として無視されてはならない。例えば綿花のようにいくつかの重要な作物にとって深根性の品種の育種が現在課題となっている(Lacape et al., 2016)。

44% of the C stock of world's forests is ascribed to soils (Pan et al., 2011) and, on average, one-third of the photosynthetic C is estimated to be partitioned below-ground in forests (Capioli et al., 2015).



Houghton et al. (2015) have underlined that secondary forest regrowth in the tropics could play a large role in stabilizing atmospheric CO<sub>2</sub>. These authors estimate that carbon is currently accumulating in secondary forests recovering from harvests and from past slash and burn agriculture at rates as high as 3 GtC·y<sup>-1</sup>.

世界の森林の炭素貯蔵量の 44%は土壤中に存在しており(Pan et al., 2011)、平均して光合成された炭素の 3 分の 1 は森林の地下部に分配されている(Campioli et al., 2015)。Houghton et al. (2015) は熱帯における二次林の再成長は大気中の CO<sub>2</sub>を安定化するうえで大きな役割をもっていることを強調した。これらの著者は伐採地や過去の焼畑農業地から回復された二次林で現在蓄積している炭素の量は 3 GtC·y<sup>-1</sup>に及ぶと推定している。

If C emissions associated to harvests and re-clearing of fallows were stopped, this accumulation rate could last for decades. The restoration of degraded tropical forests is supported by the Bonn Challenge (The Bonn Challenge, 2017), which has a global goal to restore 150 Mha of deforested and degraded land by 2020, consistent with the 161.6 Mha of COP21 NDC pledges on reforestation, afforestation and restoration of forests. However, to avoid possible double counting with the current land C sink (3.0 GtC·y<sup>-1</sup>), we use a net accumulation rate of 1.5 GtC·y<sup>-1</sup> for the restoration of degraded forests, with one third of the C being partitioned below-ground (Table 2).

もし森林伐採と休閑林の再伐採による排出を止めるならば、この炭素集積速度は数十年にわたって持続する。破壊された熱帯森林の修復は Bonn Challenge (2017)で支持された。この計画では 1 億 5 千万ヘクタールの森林破壊された土地や劣化した土地を 2020 年までに修復させることを提案しており、COP21 の NDC 目標における 1 億 6 千万ヘクタールの再植林、造林および劣化した森林の修復計画と一致している。しかしながら、現在の陸上の炭素貯蔵速度(3.0 GtC·y<sup>-1</sup>)との重複カウントを避けるため、私たちは劣化した森林の修復に対しては、炭素の 3 分の 1 が地下部に分配されるとみなして正味の貯蔵速度として 1.5 GtC·y<sup>-1</sup>を用いた (表 2)。

A potential of  $1 \text{ GtC}\cdot\text{y}^{-1}$  for net sequestration of C through afforestation, reforestation, forest restoration and improved forest management was estimated by Nabuurs et al. (2007). Reforestation comes with large land requirements (Houghton et al., 2015; Smith et al., 2013) and with risks of displacing agricultural production, thereby inducing de-forestation. Afforestation, especially at high latitude, would change albedo, weakening the cooling effect of increased carbon stocks (Smith et al., 2016). Values considered in the scenario (Table 2) assume a re-forestation (on 280 Mha) which is in the upper range of afforested areas used in bioenergy scenarios by 2050 for a  $2^\circ \text{C}$  scenario (Popp et al., 2017) and would take place on previously forested degraded pastures or marginal lands and not at high latitude.

造林、再植林、森林修復、および森林管理法の改善によって正味の炭素隔離として  $1 \text{ GtC}\cdot\text{y}^{-1}$  の可能性が Nabuurs et al. (2007) によって見積もられた。再植林は広大な土地を必要とし (Houghton et al., 2015; Smith et al., 2013)、農業生産を置き換え、従って森林破壊を誘導するリスクがある。特に高緯度地方での植林はアルビドを変化させ、炭素貯蔵量の増大による冷却効果を弱める影響がある (Smith et al., 2016)。シナリオ (表 2) で考慮した値は、 $2^\circ \text{C}$  シナリオのための 2050 年までのバイオエネルギーシナリオで使用される造林地域の上限範囲での再植林 (280 Mha に及ぶ) を想定しており、以前に植林され劣化した牧草地あるいは限界的な土地で行われ、高緯度地域での実施は想定していない。

Therefore, this technical potential scenario suggests that the land carbon sink could be enhanced by up to  $6.1 \text{ GtC}\cdot\text{y}^{-1}$ , of which 60% could take place as SOC sequestration (Table 2). With this enhancement, the net land C sink would in theory reach  $8.3 \text{ GtC}\cdot\text{y}^{-1}$ , thereby compensating, together with the ocean sink, the atmospheric growth of  $\text{CO}_2$  after 2030 or 2040. This optimistic scenario, which combines forests (Houghton et al., 2015; Nabuurs et al., 2007) and soil (Lal, 2010; Smith et al., 2013) carbon sequestration technical potentials, would therefore allow for an early offsetting of anthropogenic  $\text{CO}_2$  emissions (Table 2 and Fig. 2).

従って、この技術的可能性のシナリオは陸上の炭素貯蔵速度は  $6.1 \text{ GtC}\cdot\text{y}^{-1}$  まで増やすことができ、そのうちの 60% が土壌有機炭素の隔離として実現すると提案している (表 2)。この増加により、正味の陸上での炭素貯蔵は理論的に  $8.3 \text{ GtC}\cdot\text{y}^{-1}$  に達し、それによって海洋の貯蔵庫とともに、2030 年あるいは 2040 年以降の大気中の  $\text{CO}_2$  の増加を打ち消すことができる (表 2 および図 2)。この楽観的なシナリオは、森林 (Houghton et al., 2015; Nabuurs et al., 2007) および土壌 (Lal, 2010; Smith et al., 2013) の炭素隔離における可能性を結合したものであり、人為的な  $\text{CO}_2$  排出をより早い時期に打ち消すことができる (Table 2 and Fig. 2)。

This scenario is, however, at the limits of global technical potential and should be considered as implausible when considering adoption constraints and socio-economic barriers (see Section 3.5). Nevertheless, it shows that the full technical potential of the 4 per 1000 target for soils requires considering forestry and agroforestry options which add a large above-ground C storage component and can contribute later in the century to bioenergy production. It also reinforces the conclusion that the restoration of the biosphere should happen in concert with the phasing out of fossil fuels to avoid hazardous climate change.

しかしながらこのシナリオは地球規模の技術的可能性の限界にあるものであり、もしその採用に対する制約や、社会経済的障害が起こった場合には実現が困難となる (セクション 3.5 参照)。それにもかかわらず、土壌の 1000 分の 4 戦略の完全な技術的可能性のためには林業およびアグロフォレストリーの選択肢を考慮することが必要となり、これにより地上部での炭素貯蔵要因を大きく増加させ、今世紀の後半にはバイオエネルギーの生産にも貢献することができる。このことはまた、有害な気候変動を避けるためには、生物圏の修復が、化石燃料の利用の終焉と同調して実現されなくてはならないという結論をさらに強めることになる。

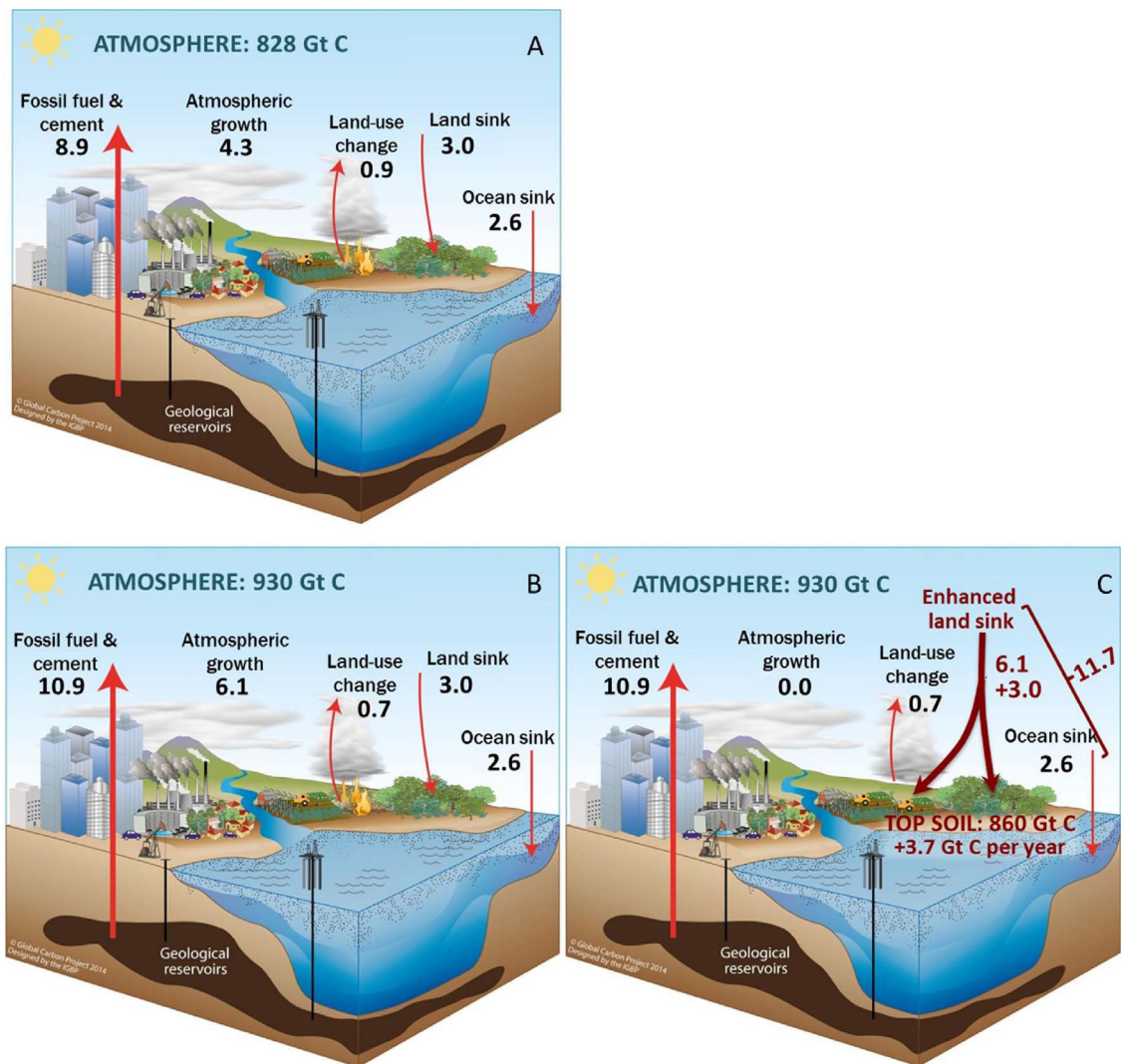


Fig. 2. The global carbon cycle in 2011 (A) and in 2030–2040 without (B) or with (C) an enhanced land carbon sink. The enhanced land carbon sink scenario explores the full technical potential of soil carbon sequestration ( $3.7 \text{ GtC}\cdot\text{y}^{-1}$ , following the aspirational 4 per 1000 target) and carbon storage in aboveground biomass ( $2.4 \text{ GtC}\cdot\text{y}^{-1}$ , forestry, agroforestry and restoration of secondary tropical forests), in addition to the current land carbon sink ( $3.0 \text{ GtC}\cdot\text{y}^{-1}$ , assumed to be constant over 2015–2040). Fossil fuel and cement emissions follow the Paris agreement pledges for 2030 (Fawcett et al., 2015). The land use

change emissions are estimated at  $0.75 \text{ GtC}\cdot\text{y}^{-1}$  (Grassi et al., 2017). The ocean carbon sink was assumed to be constant over 2011–2040. Modified after Le Quéré et al. (2015).

図 2.

(A) 2011 年における地球規模での炭素循環。

(B) 陸上での炭素貯蔵を伴わない場合の 2030-2040 年の地球規模での炭素循環。

(C) 陸上での炭素貯蔵を伴う場合の 2030-2040 年の地球規模での炭素循環。

陸上での炭素貯蔵を促進するシナリオには、現在の陸上の炭素貯蔵速度に加えて(2015 年から 2040 年にかけて一定とみなされる  $3.0 \text{ GtC}\cdot\text{y}^{-1}$ )、土壌炭素隔離の技術的可能性をフルに発揮すること (1000 分の 4 戦略に従い  $3.7 \text{ GtC}\cdot\text{y}^{-1}$  を隔離する) と、地上部バイオマスによる炭素貯留 (林業、アグロフォレストリー、熱帯の二次林の修復による  $2.4 \text{ GtC}\cdot\text{y}^{-1}$ ) が含まれる。

化石燃料およびセメントからの排出は 2030 年までのパリ合意による各国の誓約に従う (Fawcett et al., 2015)。

土地利用の変化による排出は  $0.75 \text{ GtC}\cdot\text{y}^{-1}$  と見積もる (Grassi et al., 2017)。

海洋による炭素貯蔵量は 2011 から 2040 年にかけて一定とみなす。

Le Quéré et al. (2015) を修正した。

Table 2

A scenario with full implementation of the global aspirational 4 per 1000 target and its effects on the land and soil carbon sinks. The 4 per 1000 target refers here to a +0.4% annual growth rate in SOC stock over a reference soil depth of 0–40 cm.

表2 地球規模の1000分の4戦略をフルに実行したシナリオとそれが陸上および土壌中の炭素貯蔵に及ぼす影響。1000分の4戦略とは、対応する土壌の深さ0-40 cmにおいて土壌有機物の貯蔵量を年間に0.4%ずつの割合で増加させることをいう。

Table 2

A scenario with full implementation of the global aspirational 4 per 1000 target and its effects on the land and soil carbon sinks. The 4 per 1000 target refers here to a +0.4% annual growth rate in SOC stock over a reference soil depth of 0–40 cm.

A. Baseline atmospheric carbon balance following conditional NDCs		GtCy <sup>-1</sup>		Literature source	Comments
Emissions from fossil fuels and cement		10.9		Fawcett et al. (2015)	
Land carbon sink		-3.0		Le Quéré et al. (2015)	Assumed to be constant until the 2030's
Ocean carbon sink		-2.6		Le Quéré et al. (2015)	
Emissions from net land use change (tropical deforestation)		0.76		Grassi et al. (2017)	Terrestrial carbon (CO <sub>2</sub> ) source
B. Land carbon storage scenario	Biomass	SOC	Literature source	Comments	Literature range
	GtC·y <sup>-1</sup>				GtC·y <sup>-1</sup>
Agriculture (croplands, grasslands)	0.0	-1.4	Smith et al. (2008); Lal (2010); Paustian et al. (2016)	Changes in agricultural practices (excluding: restoration of degraded lands and agroforestry, see below)	-1.8-1.4
Biochar	0.0	-0.3	Paustian et al. (2016)		-0.49
Enhanced root phenotypes (deep roots)	0.0	-0.2	Paustian et al. (2016)		-0.27
Agroforestry	-0.6	-0.2	IPCC (2000); Nair et al. (2009)	Agroforestry over 320 Mha	-1.0 -0.2
Salinized and desertified land	0.0	-0.7	Lal (2010)	Restoration of degraded lands	-1.4 -0.5
Secondary forest regrowth	-1.0	-0.5	Houghton et al. (2015)	Reducing emissions from harvests and re-clearing of fallows in secondary tropical forests	-3.0
Reforestation	-0.8	-0.4	Smith et al. (2016); Houghton et al. (2015)	Reforestation over 280 Mha of degraded pastures and marginal lands, mainly in tropical regions	-1.2 -1.0
Additional land carbon sink	-2.4	-3.7			
Total additional land carbon sink	-6.1				
Net land carbon sink (GtC·y <sup>-1</sup> )	-8.3				
Net atmospheric flux (GtC·y <sup>-1</sup> )	0.0				

簡略化した表2の和訳

A: ベースラインとしての大気中の炭素収支

	GtC·y <sup>-1</sup>	文献	コメント
化石燃料およびセメントからの排出	10.9	Fawcett et al. (2015)	
陸上の炭素貯蔵	- 3.0	Le Quéré et al. (2015)	Assumed to be constant until the 2030 <sup>a</sup>
海洋の炭素貯蔵	- 2.6	Le Quéré et al. (2015)	
土地利用の変化による排出 (熱帯での森林破壊)	0.76	Grassi et al. (2017)	Terrestrial carbon (CO <sub>2</sub> ) source

B: 陸上炭素貯蔵のシナリオ

	バイオマス	土壌有機炭素	文献の範囲	コメント
	GtC· y <sup>-1</sup>	GtC· y <sup>-1</sup>	GtC· y <sup>-1</sup>	
農業 (耕地、草地)	0.0	-1.4	-1.8 ~ -1.4	Changes in agricultural practices (excluding: restoration of degraded lands and agroforestry, see below)
バイオチャー	0.0	-0.3	-0.49	
深根性作物	0.0	-0.2	-0.27	
アグロフォレストリー	-0.6	-0.2	-1.0 ~ -0.2	Agroforestry over 320 Mha
塩類化および砂漠化した土地	0.0	-0.7	-1.4 ~ -0.5	Restoration of degraded lands
二次林の再生	-1.0	-0.5	-3.0	Reducing emissions from harvests and re-clearing of fallows in secondary tropical forests
再植林	-0.8	-0.4	-1.2 ~ -1.0	Reforestation over 280 Mha of degraded pastures and marginal lands, mainly in tropical regions
追加された陸上炭素貯蔵	-2.7	-3.7		
追加された陸上炭素貯蔵全量	-6.1			
正味の陸上炭素貯蔵	-8.3			
正味の大气中炭素の流れ	0.0			

### 3.5. Permanence of SOC, adoption constraints and socio-economic barriers

#### 3.5. 土壤有機炭素の永続性、採用にあたっての制約、社会経済的障害

One of the questions which remains after having estimated the technical potential from the available literature relates to the permanence of SOC stocks, and to the feasibility of implementing the global 4 per 1000 target in a relatively short time and in contrasted social and economic environments.

利用可能な文献から技術的可能性を推定したあとで残る疑問のひとつとして土壤有機炭素貯蔵庫の永続性の問題と、様々に異なる社会的および経済的環境の下で比較的短期間に地球規模の1000分の4戦略を遂行することの実施可能性がある。

As shown by radiocarbon studies, the mean age of SOC is of several millennia ( $3100 \pm 1800$  years over 1 m depth, He et al., 2016). Most of the SOC turns over relatively slowly, within decades and centuries (at least). Nevertheless, some SOC turns over more quickly, on time scales ranging from days to decades. This more labile SOC feeds the SOC that turns over more slowly, and is influenced by soil management practices, since it predominantly originates from plant litter and root exudates, and from animal and microbial residues (Dignac et al., 2017).

放射性炭素濃度による研究によって示されているように、土壤有機炭素の平均年代は数千年のオーダー（He et al., 2016によれば土壌1 m以下の深さでは $3100 \pm 1800$ 年）である。ほとんどの土壤有機炭素は比較的ゆっくりと代謝回転し、代謝に要する年数は数十年から数百年の範囲である（少なくとも）。しかしながら、一部の土壤有機炭素は数日から数十年の時間スケールでもっと速く代謝回転する。このより分解しやすい土壤有機炭素はもっとゆっくりと代謝回転する土壤有機炭素の給源となり、土壌管理の行為によって影響を受ける。なぜなら、分解されやすい土壤有機炭素は植物残渣や根の分泌物、および動物と微生物の死骸に由来するからである(Dignac et al., 2017)。



The extra soil C accumulating is partly in unprotected forms (i.e. labile pool) and the size of this pool cannot be maintained without continuous supply of organic matter to the soil. Moreover, the amount of C that can be stabilized in a given soil layer (i.e. slow pool) is often viewed as limited by a saturation potential of clays and silt (Feng et al., 2013; Powlson et al., 2014; Six et al., 2002).

その他の土壌炭素の一部には保護されていない形態のものがあり（すなわち動的な貯蔵庫）、この貯蔵庫は土壌に連続的に有機物を供給しないと維持することはできない。さらに、ある土壌層位の中で安定化される炭素の量（すなわち遅い貯蔵庫）は、しばしば粘土およびシルトの飽和能力によって制限されるとみなされている(Feng et al., 2013; Powlson et al., 2014; Six et al., 2002)。

Nevertheless, below-ground C stocks are less vulnerable to disturbances than the above-ground C and, compared to afforestation, their enhancement can be achieved without large land requirements. However, reaping the climate benefits of SOC sequestration requires an understanding that: i) SOC will increase only over a finite period, up to the point when a new SOC steady-state is approached (Sommer and Bossio, 2014), ii) the additional SOC stock will need to be monitored and preserved by adapting land management practices to climate change.

しかしながら、地下部の炭素貯蔵庫は地上部の炭素と比べて攪乱の影響を受けにくく、そして造林と比べると、それらの増強は広大な土地を必要とせずに達成できる。しかし土壌有機炭素の隔離が気候に及ぼす利益を手に入れるためには以下の点を理解する必要がある。i) 土壌有機炭素はある有限な期間、すなわち、土壌有機炭素が新しい定常状態に到達するまでの期間だけしか増加しないこと(Sommer and Bossio, 2014)。ii) 追加された土壌有機炭素の貯蔵庫は、気候変動に対応した適応的な土地管理行為によって監視され保護される必要がある。

In agricultural lands, the temporal dynamics of SOC stock changes will be

constrained by the adoption rate and by the long-term maintenance of improved land management practices. Practical limitations are, in part, reflected by economic potential calculations. For example, according to mitigation marginal abatement cost curves, 47, 65 and 86% of the technical potential for SOC sequestration in agricultural (croplands and grasslands) soils would be reached at costs of 20, 50 and 100 USD per t CO<sub>2</sub>, respectively (Smith et al., 2008).

農地においては、土壤有機炭素変化の時間的なダイナミクスは、改良された土地管理行為の採用の速度と長期にわたる維持によって制約を受ける。実際的な制約は、部分的には、経済的な可能性の計算によって反映される。例えば緩和の限界削減費用曲線によれば、農地（耕地および草地）における土壤有機炭素隔離の技術的可能性の47, 65 および86% が 1t のCO<sub>2</sub>の価格をそれぞれ20, 50, 100 USDに設定することによって達成することができる (Smith et al., 2008)。

At the global scale, if agricultural SOC sequestration options were incentivized, the cost-effective contribution of the agriculture, forestry and land use (AFOLU) sector to achieve the goals of the Paris Agreement on Climate, including N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> mitigation, is up to 3.1 Gt CO<sub>2</sub>-C eq·y<sup>-1</sup> by 2050 (Frank et al., 2017).

地球規模でもし農業による土壤有機炭素隔離に報奨金をだして奨励されるならば、農業、林業および土地利用分野(AFOLU)が、N<sub>2</sub>O および CH<sub>4</sub> の緩和を含めた気候に関するパリ合意の目標を達成するためのコスト効率的な貢献は、2050年までに3.1 Gt CO<sub>2</sub>-C eq·y<sup>-1</sup> に達するであろう。

For croplands, the economic potential could reach 62% of the technical potential with a price of 100 USD per t CO<sub>2</sub> (Smith et al., 2008), their scenario being compatible with keeping global warming below 2 ° C by 2100 (radiative forcing of 2.6 W·m<sup>-2</sup>), but not below 1.5 ° C (radiative forcing of 1.9 W·m<sup>-2</sup>, compatible with a price of 190 USD per t CO<sub>2</sub>) (Frank et al., 2017).

農耕地に関しては、CO<sub>2</sub> 1t あたりの価格を100 USDに設定することにより、経済的な可能性は技術的可能性の62%に達するであろう (Smith et al., 2008)。これらのシナリオによって、2100年までに地球温暖化を2°C以下(強制放射力 2.6 W·m<sup>-2</sup>)に保つことができるが、1.5°C以下にすることは困難である (そのためには強制放射力を 1.9 W·m<sup>-2</sup>とし、CO<sub>2</sub> 1t あたりの価格を190 USDに設定することが必要である) (Frank et al., 2017)。

Therefore, if the CO<sub>2</sub> price remains below 100 USD per t CO<sub>2</sub>, less than two thirds of croplands (i.e. 850 Mha assuming a constant total arable land use) could be converted to SOC sequestration-enhancing practices.

従って、CO<sub>2</sub> 1t あたりの価格が100 USD以下にとどまるならば、農耕地の3分の2以下 (すなわち常に耕作している農地を想定すると8億5000万ヘクタール) にしか土壌有機炭素の隔離を促進する事業を導入することができない。

One important question is how long it may take to reach the ceiling economic potential. Recent trends in the sector, such as the global adoption of conservation agriculture (CA) show that large-scale changes can occur at decadal scale: within 12 years, CA area increased from 45 Mha in 1999 up to 125 Mha in 2011 across all continents, including both small and large farms (Derpsch et al., 2010; Dumanski and Peiretti, 2013). Similarly, tree cover on agricultural land has increased by 2% over the last 10 years (Zomer et al., 2016).

ひとつの重要な問題は、経済的可能性の上限値に達するにはどのくらいの時間がかかるかということである。この分野における最近の研究によると、保全的農業(CA)を地球規模で採用することにより、広大なスケールの変化が10年規模ですなわち12年以内に起こることが示された。保全的農業(CA)の面積は1999年には4500万ヘクタールであったが、小規模と大規模の農場を含めて2011年には全ての大陸にわたって1億2500万ヘクタールに増加した(Derpsch et al., 2010; Dumanski and Peiretti, 2013)。同様に農地における樹木の被覆率は過去10年間に2%増大した(Zomer et al., 2016)。

This illustrates the rapid recent development (+8.9% area growth per year) during the last decade of agricultural practices contributing to soil conservation. If this historical relative growth rate was applicable to the future adoption of SOC sequestration practices, the ceiling area (corresponding to an economic potential of 850 Mha for improved cropland management practices) could be reached before 2030 (Fig. 3).

このことは、土壌保全に貢献する農業行為が過去10年間の間に近年急速に拡大したこと（1年間に+8.9%の面積拡大）を示している。もしこの歴史的な相対成長速度が将来の土壌有機炭素隔離行為にも適用されるならば、上限となる面積(改善された農耕地管理行為の経済的可能性8億5000万ヘクタールに相当する)は2030年以前に達成されるであろう。

Even assuming a lower adoption rate (+5% area per year), an economic potential corresponding to 850 Mha under agricultural practices enhancing SOC sequestration would be reached before 2050 (Fig. 3).

採用速度がもっと低いと仮定しても（年間に5%）、土壌有機炭素隔離を促進するための農業行為が8億5000万ヘクタールで実施されているという経済的可能性は2050年までに到達できるであろう (Fig. 3)。

Nevertheless, part of the cropland area having adopted practices enhancing SOC sequestration could revert after some decades to land degrading practices. For instance there has been large dis-adoption of CA in sub-Saharan Africa (Giller et al., 2009). If dis-adoption happened, on average, after 50 years (i.e. average annual drop-out rate of 1.4% per year, see Materials and Methods section), the ceiling area corresponding to the economic potential would be reached in the mid 2030's for the historical adoption rate (8.9% per year) and in the mid 2060's for the reduced adoption rate (5% per year) (Fig. 3).

しかし、土壌有機炭素隔離を促進する事業を採用した農耕地の一部が数十年のうちに土地劣化の傾向に転じることもある。たとえば、サハラ砂漠以南の地域

では過去に保全的農業(CA)が広い範囲で中止されたことがある(Giller et al., 2009)。このような中止が平均して50年後に起こると(試料と方法で述べたように、平均的な年間の中止割合を1.4%とみなす)、経済的可能性に依存した上限の面積には、歴史的な採用速度(年間に8.9%)のもとでは2030年代の半ばに、低い採用速度の下では(年間に5%)2060年代の半ばに到達するであろう。

These simple calculations show that the adoption rate of improved practices (Sommer and Bossio, 2014) and the duration during which these practices will be maintained are critical for the impacts of action plans implementing the 4 per 1000 target. Adoption constraints, costs and numerous trade-offs across mitigation options strongly reduce the economic potential of management alternatives compared to what is technically possible (Smith et al., 2016; Herrero et al., 2016).

これらの単純な計算は、改善された行為の採用率(Sommer and Bossio, 2014)と、これらの事業が維持される期間が、「1000分の4」戦略を実施する行動計画の影響力にとって非常に影響力をもっていることを示している。採用にあたっての制約や、緩和のための選択肢をめぐっての経費と多くの利益背反は、技術的な可能性に反して、管理方法の改善事業の経済的可能性を著しく減少させる(Smith et al., 2016; Herrero et al., 2016)。

Nevertheless, consistent policy options may increase adoption and raise the economic potential, e.g. in the livestock sector (Gerber et al., 2013). SOC sequestration policies can increase the value of C-enhancing production systems by paying farmers for the provided C sink, and thus allow for more agricultural land to remain in production, in turn benefitting food production (Frank et al., 2017).

しかしながら、例えば家畜分野での取り組み(Gerber et al., 2013)のように、一貫して政策の選択肢を提示することによって採用速度を増大させ、経済的可能性を上昇させることができる。土壌有機炭素隔離の政策は、提供された炭素貯

蔵に対して農家に報奨金を支払うことによって、土壌炭素を増強する生産システムの価値を増大させることができる。そしてこのことによってより多くの農地が生産活動にとどまることができ、ひいては食料生産に貢献できる(Frank et al., 2017)。

However, whether C offset schemes and similar policies can provide sufficiently high incentives that can be maintained over enough years to support agricultural practices that preserve increased SOC stocks in agriculture while protecting existing legitimate land rights, remains an open question. In this respect, it should be noted that agricultural subsidies in the top 21 food-producing countries, responsible for almost 80% of global agricultural value added in the world, are estimated to amount to 486 billion USD in 2012 (Worldwatch Institute, 2017).

しかし、カーボンオフセットという計画や同様の政策が、既に存在している合法的な土地の権利を保護しつつ、農地中の増加した土壌有機炭素を保全する農業行為を長い期間維持できるような十分高い動機を提供できるかどうかということも問題提起されている。このことと関連して、世界中で加えられる地球規模の農業価値のほとんど80%を請け負っている上位から21カ国の食料生産国における農業補助金は2012年に4860億USDに達すると推定されていることに着目する必要がある(Worldwatch Institute, 2017)。

With a CO<sub>2</sub> price of 100 USD per t CO<sub>2</sub>, fully implementing the technical potential of the 4 per 1000 initiative on croplands and grasslands via agricultural subsidies would require a total budget representing less than 30% of these agricultural subsidies, which shows the potential to value SOC sequestration in agricultural food supply chains.

1 tのCO<sub>2</sub> の価格を100USD とすると、農耕地および草地において1000分の4戦略の技術的可能性をフルに実現するためには、これらの農業補助金の30%以下に相当する予算が必要になる。このことは農業による食料供給のチェーンのなかで土壌有機炭素の隔離を評価する可能性を示している。

The total number of farms would reach 460 million in 111 countries, with 72% of farms of less than one hectare (24% of the total agricultural area), while farms over 20 ha are dominant in terms of agricultural land area (42% of the total) (Lowder et al., 2014). These numbers illustrate the major social dimension of agriculture and the opportunity to preserve, or even develop, rural employment especially with small holders through soil conservation and restoration actions implementing the 4 per 1000 target.

農家の戸数は111の諸国で4億6千万戸に達し、そのうち72%は1ヘクタール以下の農家で、全農地面積の24%を占めているが、20ヘクタール以上の農家は農地面積という観点からは全体の42%と主要なものである(Lowder et al., 2014)。これらの数値は農業の主要な社会的次元を示しており、1000分の4戦略を実行しつつ土壌を保全し回復させる事業によって特に小規模農家に対して農村での雇用を保全しあるいは開発する機会となることを示している。

However, the preliminary work on economic potentials presented here is not the only driver for effective soil carbon sequestration and for the adoption of relevant management practices: additional studies are needed to refine and improve our understanding of the conditions which foster or perpetuate sustainable practices, i.e. the enabling environment for soil carbon sequestration.

しかしここで示した経済的可能性についての予備的な研究は土壌有機炭素の隔離を効果的に推進し重要な管理事業の採用を促進するための唯一の推進力ではない。すなわち土壌炭素隔離のための環境を可能にするような持続的な行為を促進し持続させるための条件に対する私たちの理解を整理し改善するためにさらなる研究が必要である。

This enabling environment can be refined and strengthened, inter alia, via an analysis of situations where effective governance, institutional and organizational arrangements, public policies, including financial mechanisms, incentive and regulatory instruments have allowed to promote, perpetuate and reward relevant

sustainable practices.

このような実現を可能にする環境は、とりわけ、効果的なガバナンス、機関および組織による調整、財政的なメカニズムを含めた公共政策、動機および調整機関が、重要な持続的行動を促進し、持続させ、報奨することを可能にするような状況を分析することによって、洗練化され強化される。

Specific challenges relate to short term, near term and long term effects, including the risk of reversibility of practices and negative direct or indirect side effects of practices at different scales on relevant sustainable development goals.

特定の諸問題は、重要な持続的開発のための行動目標に関して様々なスケールで、事業が逆戻りする危険性と、事業に対して直接的あるいは間接的な負の副次効果が発生することを含む短期、中期および長期的な効果に関係している。



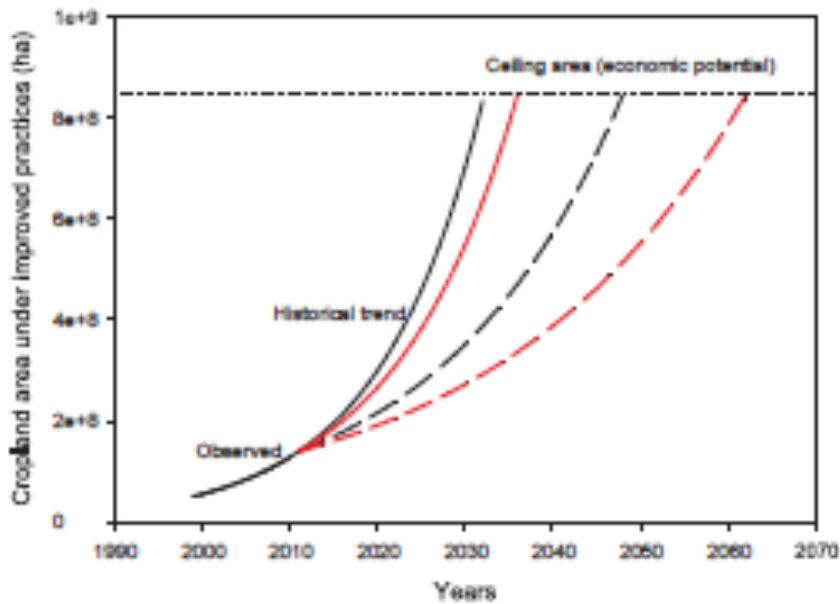


Fig. 3. Historical trend in the expansion of cropland area under conservation agriculture (1999–2011) and projected trends assuming similar (solid lines, 8.9%) or reduced (dashed lines, 5%) annual relative adoption rate, with permanent improved practices (black) and with an average 50-year duration of the improved practices before drop-out (i.e. 1.4% annual relative drop-out rate) (red). (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

### 図3

保全的農業が行われている農耕地の面積の拡大に関する歴史的傾向(1999–2011)と今後予想される傾向。

実線：これまでと同じ年間相対的採用率（8.9%）での傾向。

破線：年間相対的採用率が減少した場合（5%）での傾向。

黒：改善された事業が永続した場合。

赤：改善された事業が50年継続しその後中止された場合。（すなわち年間の相対的中止割合が1.4%）

### 3.6. Spatial scale and baseline issues for the local implementation of the 4 per 1000 aspirational target

1000分の4戦略を地域で実施するための空間的スケールとベースラインに関連した事項

Long-term agricultural studies investigating SOC stock changes were often restricted to the top soil (e.g. 0–20, or 0–30 cm), although an increasing number of studies show subsoil SOC stock changes in response to changes in land use and in agricultural management practices (Ward et al., 2016). In practice, for monitoring if intended SOC increases are effectively realized, SOC stock relative growth rates would need to be directly estimated from top (e.g. 0–30 cm or 0–40 cm) soil samples and checked with deep soil samples.

土壌有機炭素の貯蔵量の変化を研究する長期的な農業研究はしばしば表層土壌（例えば0-20 または0-30 cm）に限られてきた。しかしながら、ますます多くの研究が土地利用および農業管理行為の変化に反応して下層土の土壌有機炭素の貯蔵量も変化していることを示している(Ward et al., 2016)。実際上、目標とした土壌有機炭素の増加が効果的に実現しているかどうかをモニターするためには、土壌有機炭素貯蔵量の相対的な増加速度を表層土壌（例えば0-30 cm または 0-40 cm）のデータから直接推定し、深い層の土壌試料と比較しなくてはならない。

Some soils keep a rather constant SOC stock over decades, while others may degrade leading to SOC stock decline, or build-up SOC after improved practices (FAO and ITPS, 2015; Minasny et al., 2017). Under such contrasted conditions, should the 4 per 1000 aspirational target be considered as a fixed increase rate, or as a differential increase compared to a baseline?

ある種の土壌は数十年にわたってかなり一定な土壌有機炭素貯蔵量を維持しているが、その他の土壌は劣化して土壌有機炭素貯蔵量が減少している場合もあるし、また他の例では改善された事業によって土壌有機炭素が増加している場合もある(FAO and ITPS, 2015; Minasny et al., 2017)。このような対照的

な条件下において、1000分の4の高度な目標は固定的な増加率として考慮すべきであろうか、あるいはベースラインと比較して異なる増加率として考慮すべきだろうか？

In Fig. 4, we consider three hypothetical baselines (A, increasing by 0.4% per year, B, neutral, C, declining by 0.4% per year) for SOC. Implementing a 4 per 1000 target which is independent from the baseline requires establishing in all soils a relative annual increase by +0.4%. With this assumption, no change would be required for soil A, soil B would have to shift by +0.4% per year compared to its neutral SOC baseline and soil C by +0.8% per year compared to its declining SOC baseline (Fig. 4).

図4で私たちは土壤有機炭素に対する3つの仮定的なベースライン（A: 毎年0.4%増加、B: 中立、C: 毎年0.4%減少）を考慮した。ベースラインと無関係に1000分の4戦略を実施するということは、全ての土壤において相対的な年間増加率+0.4%を要求することになる。このような想定の下では、土壤Aでは変化の必要は無いが、土壤Bではその無変化のベースラインに対して年間+0.4%の変化が必要であり、土壤Cでは減少傾向の土壤有機炭素のベースラインに対して年間+0.8%の増加が必要となる（図4）。

This would result in soil management targets requiring stringent changes with degrading soils and, in contrast, no change when SOC already builds up at rates already higher or equal to 0.4% per year. In contrast, implementing a 4 per 1000 target relative to the baseline implies SOC stocks would all shift by +0.4% per year compared to their baseline, resulting in +0.8, +0.4 and 0% annual increase rates for soils A, B and C, respectively (Fig. 4, A2, B2, C2).

このことから、劣化しつつある土壤に対しては厳しい変化を要求する土壤管理の目標が必要となり、対照的に土壤有機炭素が既に既に毎年0.4%あるいはそれ以上増加している土壤においては何もしなくて良いことになる。対照的に、それぞれのベースラインに対応して1000分の4戦略を実施すると、土壤有機炭素の貯蔵量は土壤A, B, Cに対してそれぞれのベースラインと比べて毎年

+0.8, +0.4, 0 % の増加率となる(図 4, A2, B2, C2)。

These hypothetical implementation cases would provide an averaged SOC stock growth by +0.4% per year, thereby matching the 4 per 1000 target criterion. However, the effort sharing between degrading and accruing soils would differ between the two cases. In the first case (target independent from the baseline) the magnitude of the effort would be higher for soils initially degrading (reversal from a loss of  $-0.4\%$  per year to a gain of  $+0.4\%$  per year) than for accruing soils (no change) (Fig. 4).

これらの仮定的な実施例によれば、平均的な土壌有機炭素の増加が毎年+0.4%の割合で得られることになり、従って1000分の4戦略の基準に適合している。しかしながら、劣化しつつある土壌と土壌有機物が増えつつある土壌では2つの例の間で努力の必要度が異なってくる。最初の例（ベースラインに無関係な目標）では、初期状態で劣化している土壌では努力の程度が高くなる（毎年-0.4%の減少から毎年0.4%の増加に転ずる必要がある）が、土壌有機物が増加している土壌では変化をもたらす必要が無い。

This would result in a strong priority being set on the rehabilitation of degrading land, in agreement with the land degradation neutrality (LDN) objective of the UNCCD, and there would be no enrolment in 4 per 1000 projects of land with already accruing SOC stocks at averaged rates equal or higher than 0.4% per year.

このことから、劣化した土壌の修復に強い優先性を付与することが必要となり、UNCCDの土地劣化の中立化(LDN)と整合することになるが、土壌有機炭素が毎年0.4%またはそれ以上増加している土壌においては1000分の4戦略は実施しなくてもよいことになる。

In contrast, in the second case (target relative to the baseline), efforts would be equally shared across the three example soils (Fig. 4) and the accruing soil (A) would need to reach an even higher SOC sequestration rate ( $+0.8\%$  per

year). With this case (target relative to the baseline), virtually all land would need to be enrolled in 4 per 1000 projects to achieve the global target potential. Since no priority would be set on degrading lands, this option would not be consistent with the LDN objective of the UNCCD.

2つ目の例（ベースラインに対応した目標）では、3種類の土壤の例での努力は等しく配分されることになり（図4）、現在土壤有機物が増加している土壤(A)ではさらに高い土壤有機炭素隔離割合(+0.8%)を達成しなくてはならなくなる。この例（ベースラインに対応した目標）では、実質的に全ての土地で地球規模の目標の可能性を達成するために1000分の4戦略に関わる必要があるとなる。劣化しつつある土地に対しては優先性を設定しないので、この選択肢はUNCCDのLDNの目的とは一致しなくなる。

This example illustrates some of the challenges associated with the implementation of the 4 per 1000 target and questions the spatial scales over which this aspirational target could be used. The LDN is defined as ‘a state whereby the amount and quality of land resource necessary to support ecosystem functions and services and enhance food security, remains stable or increases within specified temporal and spatial scales and ecosystems’ (Orr et al., 2017).

この例は1000分の4戦略の実施にあたってはいくつかの問題が存在することを示しており、この高度な目標を用いるにあたっての空間的スケールが問題となってくる。LDNは「生態系の機能およびサービスを支持し、食料の安全性を強化するために必要な土地資源の量と質が、特定の時間的および空間的スケールおよび生態系の範囲内で維持されるかあるいは増加すること」と定義されている(Orr et al., 2017)。

This definition helps in showing that a given spatial unit, including one or more ecosystem types, needs to be defined when targeting the local implementation of the global 4 per 1000 aspirational target. To be consistent with this target, actions taken to increase SOC stock in the spatial unit should aim at an average relative growth rate of SOC stock by at least +0.4% per year

over at least 0–30 cm soil depth and, if possible, down to 30 or 40 cm.

この定義は、地球規模での1000分の4戦略の高度な目標を地域規模で実施するにあたって、1つあるいは複数の生態系タイプを含む所与の空間単位が定義される必要があることを示すのに役立っている。この目標と整合するためには、空間単位で土壌有機炭素の貯蔵量を増加させるためにとられる行動は、少なくとも0-30 cmの土壌の深さ、可能ならばさらに30-40cmの土壌の深さにおいて、土壌有機炭素貯蔵量の平均的な相対的な増加割合を少なくとも毎年+0.4%とすることを目標とすべきである。

For the sake of consistency with the LDN principle and in agreement with findings showing that degraded soils have more potential for SOC sequestration (Minasny et al., 2017), priority could initially be given to the rehabilitation of degraded lands (i.e. 4 per 1000 target independent from the baseline). In a later stage, the relative to baseline 4 per 1000 target could be used, through the use of technologies that could raise SOC stock growth rate above 0.4% per year (e.g. Fig. 4A2).

LDNの原則との整合をはかるため、そして劣化した土壌は土壌有機炭素の隔離能力がより高いという知見(Minasny et al., 2017)に基づいて、まず最初に劣化した土地の修復に優先性が与えられるべきである（すなわち、ベースラインに依存しない1000分の4戦略）。その後の段階で、土壌有機炭素貯蔵量を毎年0.4%以上増やすことができるような技術を使用することによって、ベースラインに関係付けられた1000分の4戦略を導入することができるであろう(e.g. Fig. 4A2)。

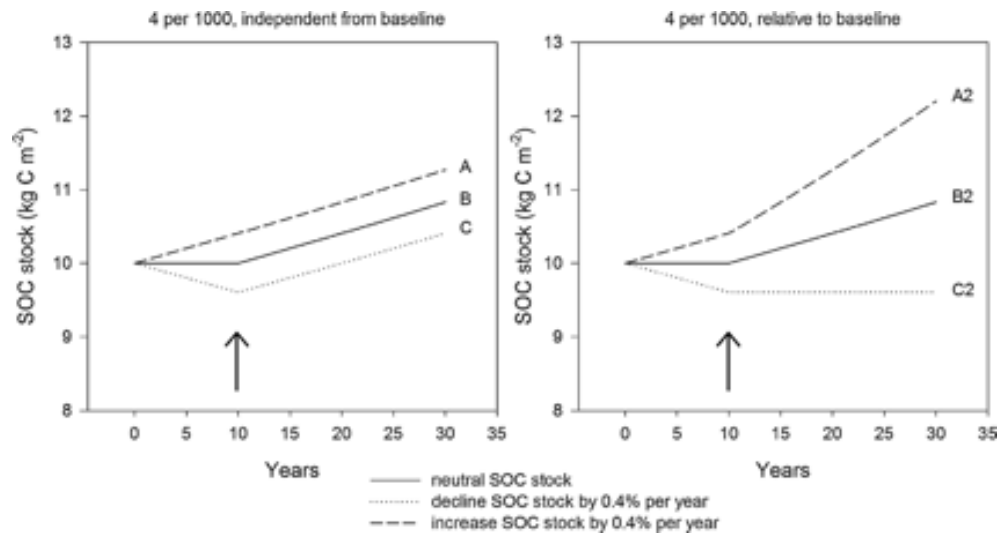


Fig. 4. Hypothetical changes in SOC stock over 30 years assuming a 4 per 1000 increase (i.e. +0.4% per year SOC stock growth rate over 0–40 cm), independent from baseline (left) and a 4 per 1000 change relative to baseline (right). Until year 10, soils A, B and C are with increasing, constant and declining SOC stock baselines, respectively. After year 10 (vertical arrow), all SOC stocks increase at +0.4% per year (left), or all SOC stocks change by +0.4% per year relative to their baseline (right).

図4 1000分の4の増加を仮定した場合の30年間の土壌有機炭素貯蔵量の仮定的な変化（すなわち0-40 cmの土壌の深さにおける土壌有機炭素貯蔵量の増加割合が毎年+0.4%）。左：ベースラインに依存しない場合、右：ベースラインに依存した1000分の4の変化の場合。10年目まで、土壌A, B, Cはそれぞれ土壌有機炭素貯蔵量が増加(A)、無変化(B)、および減少(C)していた。10年目（垂直の矢印）以降、左の図では土壌有機炭素の貯蔵量が毎年0.4%の割合で増加し、右の図では全ての土壌有機炭素貯蔵量がそれぞれのベースラインに対して相対的に毎年+0.4%ずつ変化している。

### 3.7. Non-CO<sub>2</sub> GHG emissions and nutrients cycling

#### 3.7. 非CO<sub>2</sub> 温室効果ガスの排出と養分循環

SOC sequestration options affect agricultural N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emissions. The case of no-till compared to conventional tillage is an example of the interplay between these factors, since during the first years after adoption of no-till, N<sub>2</sub>O emissions generally increase (van Kessel et al., 2013). The effectiveness of no-till and CA can, however, be enhanced by adopting a system-based approach (Lal, 2016).

土壌有機炭素隔離の選択肢は農地からのN<sub>2</sub>OおよびCH<sub>4</sub>の排出に影響する。慣行の耕起法と不耕起の例はこれらの要因の間の相互作用の例である。なぜなら、不耕起を採用するとその後の最初の数年の間にN<sub>2</sub>Oの排出が一般に増大する(van Kessel et al., 2013)。不耕起および保全的農業の有効性は、しかしながら、システムに基づいた取り組みを採用することによって増大させることができる(Lal, 2016)。

With grazing systems, restoration of degraded pastures increases SOM content (Assad et al., 2013) but may also leads to higher N fertilizer applications and to higher animal stocking density, hence, increasing N<sub>2</sub>O and enteric methane emissions per unit area. It is still unclear whether increasing beef production through pasture intensification could lower GHG emissions in Brazil by avoiding deforestation (Barioni et al., 2017; de Oliveira Silva et al., 2016; Phalan et al., 2016).

放牧システムにおいては、劣化した牧草地を修復することによって土壌有機物含量は増加するが(Assad et al., 2013)、同時により多量の窒素肥料が施用され、家畜の飼養密度が増大し、従って一定面積からのN<sub>2</sub>Oと家畜の腸内からのCH<sub>4</sub>の排出が増加する。牧草地の集約化によって肉牛の生産を増大させることが、森林破壊を避けることによりブラジルでの温室効果ガスの排出を抑制できるかどうかについてはまだ未解明である(Barioni et al., 2017; de Oliveira Silva et al., 2016; Phalan et al., 2016)。



Within terrestrial ecosystems, the C, N and P cycles are strongly coupled by the elemental stoichiometry characterizing both plant autotrophy and soil microbial heterotrophy (Soussana and Lemaire, 2014). The elemental C:N and C:P ratios of SOM vary little and are close to 12 and 50, respectively (Kirkby et al., 2011). The build-up of SOC in some productive agricultural soils is often much less than expected from the amounts of C-rich residues returned to them because optimum C sequestration may require additional nutrients above that required for crop production alone (Kirkby et al., 2014).

陸上の生態系においては、C, N, Pの循環は植物の独立栄養と微生物の従属栄養の両者によって支配される元素の化学量論的反応と強く共役している (Soussana and Lemaire, 2014)。土壤有機物の原子数比C:NおよびC:P比はほとんど変化せず、それぞれ12および50に近い値である (Kirkby et al., 2011)。いくつかの生産性の高い農業土壌における土壤有機炭素の形成は、それらの土壌に返される炭素に富んだ残渣の量から期待されるよりもはるかに少ない。なぜなら、適正な土壤炭素の隔離のためには作物生産のみに必要な量以上の追加的な養分が必要になるからである。

Therefore, C sequestration may require an additional immobilization of nitrogen and phosphorus in SOM, which may question the feasibility, costs and environmental consequences of SOC sequestration (van Groenigen et al., 2017).

従って、炭素の隔離のためには土壤有機物への窒素とリン酸の追加的な固定が必要になる。このことは土壤有機炭素隔離の実現可能性、コストおよび環境への影響に関する問題提起となる (van Groenigen et al., 2017)。

In this discussion, it is important to note the large impact of soil erosion on the nutrients balance of agricultural lands. Although the global net C balance of erosion processes is highly uncertain and has been estimated to be a net C sink (Wang et al., 2017), when erosion occurs at site scale, it represents a carbon loss which can induce serious yield and fertility losses and which thus needs to be

limited. Soil erosion by water induces annual losses of 23–42 Mt (megaton) N and 15–26 Mt P in agricultural land (FAO and ITPS, 2015).

この議論において、土壌侵食が農地の養分バランスに大きな影響を持っていることに着目する必要がある。侵食のプロセスに関わる地球規模での炭素収支は高度に不確実であり、正味の炭素貯蔵になると推定されてきた(Wang et al., 2017)が、地域的なレベルで侵食によって炭素の損失が起こると、深刻な収量と肥沃度の損失がもたらされるので、防止されなくてはならない。水による土壌侵食は農地中の23-42 Mt (メガトン) の窒素と15-26 Mt のリンの損失を毎年引き起こす(FAO and ITPS, 2015)。

These nutrients losses, which are of the same order of magnitude than annual fertilizer application rates (ca. 112 Mt of N and ca. 18 Mt of P, FAO and ITPS, 2015), need to be replaced. Several options can be considered for replacing lost nutrients, among which the addition of fertilizers. However, fertilization can only be done at an economic cost which is too high in poor regions such as sub-Saharan Africa.

年間の肥料の施用量(約 112 Mt のN および 約18 Mt の P, FAO and ITPS, 2015)に匹敵するこれらの養分の損失は補填されなくてはならない。失われた養分を補填する方法としてはいくつかの選択肢が考えられるが、そのうちの一つとして肥料の施用がある。しかし、肥料の施用には経済的なコストがかかり、例えばサハラ砂漠以南のアフリカのような貧しい地域においては高すぎる。

As a consequence, the removal of nutrients by erosion from agricultural fields is much higher than the amount of fertilizer applied. Limiting erosion and land degradation could therefore preserve a source of nutrients both for plants and for the build-up of SOM and at global scale would reduce the needs for additional fertilizer inputs (Table 3).

結果として、侵食による農地圃場から失われる養分の量は施用される肥料

の量よりもはるかに多い。従って、侵食と土地の劣化を抑制することによって植物の生育と土壌有機物の形成に必要な養分の給源を保全することができ、地球規模のスケールにおいて追加的な肥料投入の必要性を減少させることになる（表3）。

The 4 per 1000 target provides a guideline for locally increasing SOC stocks. With this aspirational target, degraded soils with low fertility and low SOC stocks need to immobilize less N and P than soils rich in organic matter. For instance, with an initial SOC stock of  $20 \text{ tC} \cdot \text{ha}^{-1}$ , 7 and 1.6 kg N and P per hectare per year would need to be immobilized. In contrast, for an initial SOC stock of  $80 \text{ tC} \cdot \text{ha}^{-1}$  soil nutrients immobilization would reach 28 and 6.4 kg N and P per hectare per year.

1000分の4戦略は地域的に土壌有機炭素貯蔵量を増加させるための指針を提供している。この高度な目標においては、肥沃度が低く土壌有機炭素貯蔵量の低い劣化した土壌は有機物に富んだ土壌よりも窒素およびリンを固定する必要性が低い。例えば、初期の土壌有機炭素貯蔵量が $20 \text{ tC} \cdot \text{ha}^{-1}$ の場合、毎年1ヘクタールあたり7 kg のNと1.6 kgのPが固定される必要がある。対照的に、初期の土壌有機炭素貯蔵量が $80 \text{ tC} \cdot \text{ha}^{-1}$ の場合、土壌養分の固定量は毎年1ヘクタールあたり28 kg のNと6.4 kgのPに達する。

Reactive N ( $N_r$ ) availability in agricultural ecosystems is large (ca.  $300 \text{ Mt } N_r \cdot \text{y}^{-1}$ ; Ciais et al., 2013), but it is unevenly distributed. In some agricultural regions, since there is excess supply of reactive N to croplands, additional soil N immobilization through SOC sequestration could reduce environmental pollution without harming crop yields (e.g. in China, van Groenigen et al., 2017).

農業生態系における反応性窒素( $N_r$ )の可給性は大きい(約  $300 \text{ Mt } N_r \cdot \text{y}^{-1}$ ; Ciais et al., 2013)が、それは不均一に分布している。いくつかの農業地域においては、反応性窒素が過剰に供給されているため、土壌有機炭素の隔離によって土壌窒素がさらに固定されることにより、作物の収量を損なうことなく環境

汚染を減少させることができる(中国での事例, van Groenigen et al., 2017)。

In contrast, in extensive agricultural and forestry systems,  $N_r$  and P availabilities may limit SOC sequestration. The mean SOC stock of the world's croplands is  $52 \text{ t C} \cdot \text{ha}^{-1}$  over 0–40 cm depth, leading to a mean aspirational 4 per 1000 annual SOC sequestration target of  $208 \text{ kg C} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$  (Table 3). If, among the different options available to provide immobilization of  $N_r$ , P and Sulphur (S) in soils, only fertilizer applications were considered, the annual cost of the required fertilizers would reach approximately 37 USD per hectare, that is 177 USD per ton of C sequestered ( $48 \text{ USD per tCO}_2$ ) (Table 3).

対照的に、粗放的農業および森林システムにおいては、反応性  $N_r$  および P の可給性は土壌有機炭素の隔離を律速する。世界の農耕地の平均的な土壌有機炭素の貯蔵量は0–40 cm の深さで  $52 \text{ t C} \cdot \text{ha}^{-1}$  であり、平均的で上昇志向的な1000分の4戦略における土壌有機炭素隔離の目標は  $208 \text{ kg C} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$  となる(表 3)。土壌中の反応性の  $N_r$  , P およびイオウ (S) の固定のために利用できる各種の選択肢の中で、もし肥料の施用だけを考慮すると、必要とされる肥料の価格は1ヘクタールあたり37USDとなり、炭素隔離量1t当たり177USDとなる(1tの $\text{CO}_2$  当りでは48USDとなる)。

Therefore, inorganic fertilizers would be, in most cases, too expensive to achieve the 4 per 1000 SOC sequestration target, although a limited use of inorganic fertilizers may be needed in some regions and some systems. In addition, the recycling of organic fertilizers derived from livestock or from urban wastes (Chabbi et al., 2017) could be used to counter N and P deficiencies, provided that over-fertilization is avoided.

従って、いくつかの地域およびいくつかのシステムにおいては少量の無機質肥料の使用が必要となるものの、無機質肥料はほとんどの場合に1000分の4土壌有機炭素隔離戦略を実行する上で高価すぎる。これに加えて、過剰な施肥を避けるならば、家畜排泄物および都市廃棄物から得られた有機質肥料の循環をNとPの欠乏に対応するために利用することができる(Chabbi et al., 2017)。

Beyond erosion limitation at local scale and sustainable fertilizer applications, an increased use of biological N fixation by legumes in cropping and grazing systems has a large potential to overcome N limitation, while bringing additional benefits for climate change adaptation (Lipper et al., 2014; Lüscher et al., 2014). Phosphorus availability is likely to limit biological N fixation in some soils, but symbiotic N<sub>2</sub> fixation plants possess an advantage in phosphorus acquisition especially in warm climates, e.g. through root phosphatase (Houlton et al., 2008).

地方的スケールでの侵食の防止と持続的な肥料の施用に加えて、農耕および放牧システムにおいてマメ科植物による生物的窒素固定をさらに利用することは、窒素の不足を克服する上で大きな可能性を提供すると同時に、気候変動への適応に向けて追加的な利益をもたらす(Lipper et al., 2014; Lüscher et al., 2014)。いくつかの土壌においてリンの可給性が生物的窒素固定を制限している場合がある。しかし、共生的窒素固定植物は、特に温暖な気候の下では、例えば根からのフォスファターゼの分泌のように、リンの獲得において有利な特性を持っている(Houlton et al., 2008)。

In the long term, since the global N:P stoichiometry is increasing under human influence (Peñuelas et al., 2013), P limitation could become more critical for global SOC sequestration than N limitation. Both scientific knowledge and traditional farmer's knowledge will be needed to create sustainable agricultural and forestry systems sequestering C in soils without large requirements for additional fertilizers.

長期的には、地球規模のN:Pの化学量論比は人為的影響の下で増大しつつあるので(Peñuelas et al., 2013)、土壌有機炭素の隔離にとってPの欠乏の方がNの欠乏よりもより制限的になる可能性がある。追加的な肥料が多量に必要なにならないような、土壌中に炭素を隔離することのできる持続的な農業および林業体系を作り出すために、科学的な知識と伝統的な農家の知識が必要になるであろう。

Table 3

Global mean and standard deviation of annual SOC sequestration at a rate of 0.4% per year (4 per 1000) and of N, P and S additional soil immobilization assuming C:N, C:P and C:S elemental ratios of 12, 50 and 71 (Kirkby et al., 2011), respectively. Estimated N, P and S fertilizer costs are calculated per ton SOC (updated from Kirkby et al., 2011, source WorldBank, 2017) and per hectare, in a scenario based on a strong assumption: all nutrients immobilized to reach the 4 per 1000 SOC sequestration rate in croplands come from mineral fertilizers applications. This simple calculation shows that relying on inorganic fertilizers only would be, in most cases, too expensive to achieve the 4 per 1000 SOC sequestration target. Note that the mean estimate for annual N and P losses by erosion in agricultural lands reaches  $6.6 \text{ kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$  and  $4.2 \text{ kgP}\cdot\text{ha}^{-1}$  (FAO and ITPS, 2015). The mean SOC stock of global croplands is estimated over 0–40 cm depth at  $52.0 \text{ tC}\cdot\text{ha}^{-1}$  with a standard deviation of  $30 \text{ tC}\cdot\text{ha}^{-1}$  (source: Harmonized World Soil Map, [www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/](http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/), Accessed May 14, 2017).

C, N, P and S fluxes	Mean	s.d.	Fertilizer price (USD per t SOC)	Fertilizer price (USD.ha <sup>-1</sup> )
0.4% annual SOC sequestration (kgC.ha <sup>-1</sup> .y <sup>-1</sup> )	208	156	–	
Additional N immobilization (kgN.ha <sup>-1</sup> .y <sup>-1</sup> )	17.3	13.0	121	25
Additional P immobilization (kgP.ha <sup>-1</sup> .y <sup>-1</sup> )	4.2	3.1	27	5.7
Additional S immobilization (kgS.ha <sup>-1</sup> .y <sup>-1</sup> )	2.9	2.2	20	4.1

表 3. 1 年に 0.4%(4 per 1000)の速度での地球規模での土壌有機炭素隔離、および C:N, C:P, C:S の比率がそれぞれ 12, 50, 71 (Kirkby et al., 2011)とみなした場合の N, P, S の追加的な土壌中への固定量の平均と標準偏差。

N, P, S の肥料価格は、農耕地において 1000 分の 4 の土壌有機炭素隔離を達成するために固定された N, P, S は全て無機肥料の施肥に由来すると仮定したシナリオの下で、1 t の土壌有機炭素あたり (updated from Kirkby et al., 2011, source WorldBank, 2017) と 1 ヘクタールあたりで計算したものである。この単純な計算によると、無機肥料だけに頼ることは、1000 分の 4 戦略を実現する上で、ほとんどの場合においてコストがかかりすぎることを示している。農耕地土壌の侵食において 1 年間に失われる平均的な N と P の量は  $6.6 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$  および  $4.2 \text{ kg P} \cdot \text{ha}^{-1}$  (FAO and ITPS, 2015) に達することに着目すべきである。0-40 cm の深さの範囲で推定される地球上の農耕地の平均的な土壌有機炭素の貯蔵量は  $52.0 \text{ t C} \cdot \text{ha}^{-1}$  で、標準偏差は  $30 \text{ t C} \cdot \text{ha}^{-1}$  と見積もられている。

(source: Harmonized World Soil Map, [www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/](http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/), Accessed May 14, 2017).

C, N, P, S の流束	平均	標準 偏差	肥料価格 (USD per t SOC)	肥料価格 (USD ha <sup>-1</sup> )
0.4% 年間 SOC 隔離 (kgC.ha <sup>-1</sup> .y <sup>-1</sup> )	208	156	-	
追加的 N 固定量 (kgN.ha <sup>-1</sup> .y <sup>-1</sup> )	17.3	13.0	121	25
追加的 P 固定量 (kgP.ha <sup>-1</sup> .y <sup>-1</sup> )	4.2	3.1	27	5.7
追加的 S 固定量 (kgS.ha <sup>-1</sup> .y <sup>-1</sup> )	2.9	2.2	20	4.1

### 3.8. Synergies with the united nations conventions and resolutions

#### 3.8. 国連の会議および決定との相乗作用

The importance of soils has been raised e.g. by the International Year of Soils (2015) and by the first report of the ITPS (FAO and ITPS, 2015). Soils can contribute to the achievement of a number of UN sustainable development goals (SDGs) (Keesstra et al., 2016).

土壌の重要さは例えば国際土壌年(2015)やITPS(FAO and ITPS, 2015)の第1回報告書によって提起された。土壌は多くの国連による持続的開発のための行動目標の達成(SDGs)に貢献する(Keesstra et al., 2016)。

Soil C sequestration could bring direct benefits to three SDGs: SDG2: End hunger, achieve food security and improved nutrition and promote sustainable agriculture; SDG13: Take urgent action to combat climate change and its impacts; SDG15: Protect, restore and promote sustainable use of terrestrial ecosystems sustainably manage forests, combat desertification, and halt and reverse land degradation and halt biodiversity loss (FAO, 2017).

土壌炭素の隔離は3つのSDGsに直接的な利益をもたらす。SDG2: 飢餓を終わらせ、食料の安全と栄養状態の改善を達成し、持続的農業を推進する；SDG13: 気候変動とその影響に対して闘う行動を促進する；SDG15: 陸上生態系を守り、修復し、その持続的な利用を促進する。そして森林を持続的に管理し、砂漠化と戦い、土地の劣化を止めて回復させ、生物多様性の損失を止める(FAO, 2017)。

It can also contribute to the achievement of two other SDGs: SDG6: Ensure availability and sustainable management of water and sanitation for all and SDG12: Ensure sustainable consumption and production patterns.

土壌炭素の隔離はまた、その他2つのSDGsの達成に貢献する。SDG6: 全



ての人のために水の利用可能性を確保し、持続的に管理し、衛生状態を確立する。SDG12: 持続的な消費と生産のパターンを確実にする。

The interconnectedness of international targets for the AFOLU sector and the opportunity for streamlined action to achieve multiple goals is being increasingly recognized as can be seen from the ongoing reports by the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES) on land degradation and biodiversity (IPBES, 2017) and by the launch of the IPCC Special Report on land degradation, food security and climate change.

AFOLU分野の国際的な目標の相互的な関連付けと多くのゴールを達成するためのスムーズな行動の機会が益々認識され、そのことは土地の劣化と生物多様性と生態系のサービス(IPBES)に関する政府間の科学と政策のプラットフォーム(IPBES, 2017)によって現在進められている報告書や、土地の劣化、食料の安全性および気候変動に関するIPCCの特別報告書の発行などによって認識することができる。

The Global Soil Partnership (GSP) for food security and climate change adaptation and mitigation has a knowledge pillar and develops a global soil map, including SOC stocks (GSP, 2017). The UNCCD supports countries to set Land Degradation Neutrality (LDN) targets, in agreement with the SDG target 15.3. This target includes an indicator on SOC stocks, which baseline is currently being established through collaboration between UNCCD and GSP and is supported by the above-cited land degradation neutrality fund (UNCCD Global Mechanism, 2017).

食料の安全と気候変動への適応と緩和のための地球土壌パートナーシップ(GSP)は知識の柱を持っており、土壌有機炭素貯蔵量の情報を取り込んだ地球土壌地図を開発している(GSP, 2017)。UNCCDはSDGの目標15.3に基づいて諸国が土壌劣化防止(Land Degradation Neutrality : LDN)の目標を打ち立てるのを支援している。この目標は土壌有機炭素貯蔵量の指標を含んでおり、その

ベースラインは、現在UNCCD と GSPの共同作業によって確立されつつあり、上記のland degradation neutrality fund (UNCCD Global Mechanism, 2017) によって補助されている。

Since 2008, the United Nations collaborative initiative on Reducing Emissions from Deforestation and forest Degradation (UN-REDD) supports country-driven REDD+ processes that extend to agriculture and include the restoration of degraded tropical forests supported by the above-cited Bonn challenge.

2008年から、森林破壊と森林劣化に伴う温室効果ガスの排出を抑制するための国連の共同戦略(UN-REDD)が、各国によって進められるREDD+のプロセスをサポートし、それは農業にまで拡大し、劣化した熱帯森林の修復を含むプロジェクトは上で述べたボンチャレンジ (Bonn challenge) によってサポートされている。

In this context, the 4 per 1000 initiative can bring added value by collaborating with multiple initiatives and by facilitating local decision making at the field, farm, landscape and regional scales. Any practical implementation (i.e. action plan of the 4 per 1000 initiative) will have to take into account local circumstances and a large number of social and economic factors in order to create useful changes for climate and for food security, while supporting the SDGs and taking into account legitimate concerns for land rights and for human rights, including gender equity (Montanarella, 2015).

このような背景において、1000分の4戦略は多くの戦略と共同し、地域的な意思決定を圃場、農家、景観および地域のスケールで可能にすることによってその価値を高めることができる。いかなる実用的な遂行も（例えば1000分の4戦略の行動計画）、SDGsをサポートし、土地の権利に対する法的な関心およびジェンダーの平等性をふくめた人権を考慮に入れながら、気候や食料の安全のために有益な変化を作り出すために、地域的な状況と多数の社会的経済的要因を考慮に入れる必要がある。

## 4. Conclusions

### 結論

The global aspirational goal of the 4 per 1000 Initiative appears as a technically feasible, no regret, and indispensable climate action. It can be regarded as (i) technically feasible, given its alignment with technical potentials estimated by IPCC, (ii) no-regret for its climate change adaptation and food security benefits, adding to overall climate resilience, and (iii) indispensable for its negative emissions.

1000分の4戦略の地球規模での上昇志向的目標は、技術的に達成可能な、後悔のない、気候に対処するかけがえのない行動である。それは (i) IPCCによって推定された技術的可能性と整合させるならば技術的に可能である。(ii) 全般的な気候に関する回復力に加えて、気候変動への適応と食料の安全への利益に対して後悔がなく、(iii) 負の排出の実現にとってかけがえがない。

Turning the aspirational goal of the '4 per 1000' soil C initiative into social and economic realities is a challenge that will require the involvement of science to inform policy.

「1000分の4」土壌炭素戦略の高度な目標を社会的経済的実体に転換することは、政策への情報提供に対する科学の関与を要求する挑戦となる。

A collaborative research program is planned on: i) improved knowledge of the potential and implications (e.g. for yields, non-CO<sub>2</sub> GHG emissions, water cycle, etc.) of SOC sequestration; ii) co-design and assessment of agricultural and forestry strategies and practices; iii) defining and strengthening the enabling environment including cost-benefit and value chain analyses, economic and social dimensions, and policy options; iv) metrics and methods for low-cost monitoring, reporting and verifying of soil C sequestration; v) training and capacity building (4 per 1000 research program, 2017).

以下の課題についての共同研究プログラムが計画された。i) 土壌有機炭素隔離の可能性と意義に対する知識の改善（例えば、収量、非CO<sub>2</sub>温室効果ガスの排出、水分循環などに対する）、ii) 農業および林業の政策と実行を共同で計画し評価すること、iii) 費用対利益およびバリューチェーン分析、経済的・社会的次元、および政策の選択肢を含む実現のための環境を明らかにし強化すること、iv) 土壌有機炭素隔離のコストのかからないモニタリング、報告、および検証のための技術と方法、v) 訓練および能力開発（4 per 1000 research program, 2017）。

This research program is needed to support action plans leading to its adoption by multiple stakeholders and by governments worldwide, and to fully understand its multiple implications for sustainable development in contrasted land use and land management systems.

この研究プログラムは世界中の多数の利害関係者や諸国政府によるこの計画の採用に導くための行動計画をサポートするためと、大きく異なる土地利用および土地管理システムにおける持続的発展にとっての多様な意義を完全に理解するために必要である。