

## Soils and climate change

土壌と気候変動

Pete Smith

Current Opinion in Environmental Sustainability 2012, 4:539-544

<http://dx.doi.org/10.1016/j.cosust.2012.06.005>

### 要約

土壌は巨大な炭素の貯蔵庫( ~150 Pg C)である。この量は大気中の二酸化炭素の量の2倍に相当する。

歴史的には、管理された生態系中の土壌はこの炭素の一部(40-90 Pg C)を土地利用の変化によって失ってきた。そのうちの幾分かは大気中に残留している。気候変動に関連しては、将来の気候変動によって引き起こされる土壌炭素の変化は、わずかな減少から中程度の増加までの範囲で予想されている。しかし、これらの地球規模での傾向はかなりの地域的な変動を伴っている。将来における土壌炭素の反応は気温の上昇と土壌水分の減少が分解速度に及ぼす影響の間の微妙なバランスと、分解による炭素の損失と生産性の増大による炭素の増大の間のバランスによって決定される。土壌を気候変動を緩和するための手段として利用するという観点からは、土壌炭素の隔離は地球規模で大きな、コストに見合った緩和能力を持っていると言える。しかしながら、土壌炭素の隔離の限界として、時間的な限界、永久的なものではないこと、炭素の移動、効果確認の困難さなどが挙げられている。これらの限界はあるけれども、土壌炭素の隔離は短期から中期の目標として有益であり、数多くの利益を土壌にもたらすため、大気中の CO<sub>2</sub> 濃度を短期的に減少させるための実行可能な選択肢となり、経済の全ての分野でより長期的に温室効果ガスの発生を削減するための解決策が開発されるまでの時間かせぎとなる。

### はじめに

土壌中の 1 m の深さまでの炭素の貯蔵量は大気中の量の約 2 倍、植生中の量の約 3 倍に及んでいる。この巨大な貯蔵庫からのわずかな損失でも将来の二酸化炭素濃度に著しい影響を及ぼし、従って地球温暖化に対する土壌の反応は、気候と炭素循環のフィードバック効果を評価するうえで非常に重要である[1]。気候と炭素循環を組み合わせたモデルの多くは、生命圏が大気に及ぼす影響の規模

において大きく異なっている。地球温暖化にたいする土壌の応答における不確実性を減少させるためにまだ残されている根本的な疑問としては、第1に土壌有機物（特により難分解性の貯蔵庫）の温度に対する感受性であり[1,2]、第2に生産の増大に伴う土壌への炭素の蓄積と分解速度の増大に伴う土壌炭素の損失の増大との間の収支の問題[3]、第3にその他の気候的な効果（例：水分収支の変動）、大気組成の変化（例：待機中の二酸化炭素濃度の増大）、および土地利用の変化などを含むその他の観点からの地球規模での変動と地球温暖化との間の相互関係である[4,5]。気候変動に対する応答に加えて、土壌は気候の緩和において重要な役割を果たしている。もし土壌中に炭素が隔離されるならば、これは大気中のCO<sub>2</sub>濃度を減少させるための優れた方法となりうる[6,7]。この短いレビューで、私は気候変動に対する土壌の応答の可能性について最近わかった事実を要約し、続いて土壌炭素の隔離が気候の緩和に及ぼす役割についての最近の知見をまとめ、気候の緩和に対するこの方法に関連したいくつかの限界について議論する。このレビューは無機質土壌に限って論じたものであり、泥炭地や永久凍土の土壌については範囲に含めていない。気候変動に対する泥炭地の役割については最近レビューされており[8]、同じ深さの全てのタイプの土壌について議論するには紙数が限られているためである。

## 気候変動が土壌に及ぼす影響

### 地球規模の炭素循環における土壌

地球規模では、土壌は1500 Pg (1 Pg = 1 Gt = 10<sup>15</sup> g)の有機炭素を含んでいる[9]。この量は植生中の炭素の3倍、大気中の炭素の2倍に相当する[10]。大気から土地へのCO<sub>2</sub>の毎年の流れ(地球規模での純一次生産[NPP])と、土地から大気への流れ(呼吸と火災)はともに60 Pg y<sup>-1</sup>のオーダーである[10]。1990年代に化石燃料の燃焼とセメントの生産により6.3 ± 1.3 Pg C y<sup>-1</sup>の炭素が大気中に放出され、土地利用の変化により1.6 ± 0.8 Pg C y<sup>-1</sup>の炭素が放出された[10,11]。その結果、大気中の炭素は3.2 ± 0.1 Pg C y<sup>-1</sup>の速度で増加し、海洋は2.3 ± 0.8 Pg C y<sup>-1</sup>の炭素を吸収し、陸上のシンクは2.3 ± 1.3 Pg C y<sup>-1</sup>と推定された[10,11]。土壌炭素の貯蔵庫は人間の介在する以前よりも小さなものになっている。歴史的には、土壌は農耕と攪乱によって地球規模で40 から90 Pg Cの炭素を失った[12-15]。土壌有機炭素(SOC)の貯蔵庫の大きさは陸上の

生物圏に流入ないし流出する炭素の総計および正味の年間流動速度と比べると大きい。

土壌有機炭素の貯蔵庫のわずかな変化でも大気中の CO<sub>2</sub> 濃度には劇的な影響を及ぼす。従って地球温暖化に対する土壌有機炭素のレスポンスは非常に重要である。陸成の炭素の放出がさらなる気候変動に及ぼす影響の可能性を示した最初の例は、Cox et al. [16]によって提出された。共役した炭素循環を伴う気候モデルを用いてこの研究は、温暖化の影響で陸成の炭素が放出されることは正のフィードバックをもたらし、その結果地球温暖化を促進することを示した。それ以来、多くの気候と炭素循環の共役モデル（いわゆる C4 モデル）が開発された。しかし、2100 年までに大気中の二酸化炭素濃度が～250 ppm 近く増大するという条件の下での陸成のフィードバックの範囲に関してはまだかなりの不確実性がある。これは IPCC SRES のエミッションシナリオによる化石燃料からの二酸化炭素発生量の変動の範囲も同じくらいである。その大部分は土壌からであるが、陸成の炭素からの発生量を正確に定量することは、地球温暖化に対する地球の反応の性質と範囲を理解する上で必須のことである。

#### 将来の気候変動に対する土壌の反応

気候変動によって世界中の土壌から炭素が著しく失われるだろうという 1990 年代に行われた推定に反して、より最近の研究では土壌炭素への気候変動の影響はそれほど著しくはないことを示唆している。ある特定の土壌中の土壌炭素の濃度は気候要因（例えば温度および水分体制）や土壌要因（例えば土壌母材、粘土含有量、陽イオン交換容量）を含めた多くの要因によって決定される。ある特定の土壌型についても、土壌有機炭素の貯蔵量は変動しうる。この貯蔵量は土壌への炭素（有機物として）の正味の流入量と、土壌からの炭素の正味の損失（二酸化炭素、溶存有機炭素、および侵食による損失）の収支差し引きによって決定される。

ヨーロッパにおいて農耕地および草地に対する気候の影響を検討する中で、Smith et al. [4] は、1990 年から 2080 年にかけて土壌有機炭素の貯蔵量はほとんど変化しないと推定した。これは、生産性が増大することにより土壌中により多くの炭素が供給され、気候変動の下で有機物の分解速度が速くなり土壌有機炭素が失われても、供給量が減少量を上回るからである。さらに、いくつかのヨ

ヨーロッパの地域では、将来の気候はより乾燥気味となり、そのためたとえ土壌温度が高くなっても分解速度が低下すると推定している[4]。Ciais et al.[19]は多くのヨーロッパでの研究をレビューし、その他のモデル化研究もこの知見を確認しており、農耕地の炭素貯蔵量は1990年から1999年にかけてほとんど変化しなかったと推定した。(O,RCHIDEESTICS, LPJml, および RotHC モデルのいずれによっても土壌への蓄積量は  $15 \text{ g C m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ 、放出量は  $1.3 - 7.6 \text{ g C m}^{-2} \text{ y}^{-1}$  となった。) 農耕地の土壌有機炭素の将来の変化は、土地の管理方法や土地利用の変化に関する推定に高度に依存するが、複合的な気候要因の直接的な影響はそれほど大きなものではないと推定された[19]。

地球規模では気候変動が無機質土壌に及ぼす影響についてはある程度の不確実性がある。それは、土壌の炭素収支を決定する要因の複雑さ[3]と気候要因の間の相互作用を扱うモデルにおける不確実性によるものである。このような不確実性はあるものの、各種の推定はよく似ている。Cramer et al. [22]は IS92a 人為的エミッションシナリオ（これは後の IPCC A1b シナリオと同様のものである）と Hadley Centre climate model の HadCM2-SUL バージョンを組み合わせ使用した。彼らのシミュレーションによれば SOC は2000年から2100年の間に10%の増大を示した（6種類の Dynamic Global Vegetation Models; DGVMs の平均）。Gottschalk et al.[20] は、RothC モデルを用い、各種の気候変動のシナリオと IMAGE 2.2 モデルから導かれた NPP を使用し、土壌有機炭素の貯蔵量が~8%増加するというよく似た気候変動の影響値を得た。Ito[23]は、IPCC A2 シナリオを応用した7つの気候モデルを用いて21世紀に向けての地球的な土壌有機炭素の変化を報告し、Cramer et al.[22]および Gottschalk[20] が用いたシナリオよりも気候変動の影響が少ないことを示した。驚くべきことではないが、Ito[23]は土壌有機炭素の変化を少なく見積もっている。Cramer et al. [22]および Gottschalk et al.[20]のよく似たシナリオを用いた研究でわずかな増加が見られた場合でも、わずかな損失が示されている。Lucht et al.[24]は2000年から2100年にかけての土壌有機炭素の貯蔵量の変化をシミュレートするために LPJ モデルを用い、Gottschalk et al.[20]の結果としての3.5%の増加とよく似た値の、~5-6%の土壌有機炭素の増加を示した。モデルを用いた推定の多くは地球規模での無機質土壌中の土壌有機炭素の変化の推定値は比較的小さく、将来の気候変動の下で土壌有機炭素は増加さえすることを示

している。しかしながら、この地球規模での知見は、地域での応答の複雑な表れかたを覆い隠している[20,25,26]。NPPの増大によって高温による土壌有機物の分解が補われることによってほとんどの地域の土壌有機物炭素の貯蔵量が増加する一方で、カナダの高緯度地域や東ヨーロッパ(シベリア)および東アジアの一部では土壌有機物の貯蔵量はほとんど変化しないかあるいは減少する。それは、これらの地域では高温による分解の促進が降水量やNPPの変化による土壌有機物の増加分を上回るためである。土壌有機炭素の変化における複雑な地域的な様相をFigure 1に示した。この図は1971年から2100年にかけての土壌有機炭素の貯蔵量の変化における平均的な傾向を、Gottschalk et al.[20]による10種類の気候変化のシナリオを通じて示したものである。変化する気候に対する土壌有機炭素の応答の空間的な不均質性を参照すると、相反する増加と損失のプロセスがいかにデリケートにバランスを保っているか、そして温度、水分、土壌型および土地利用におけるほんのわずかな違いが相互作用しつつ将来土壌有機炭素が増加するか減少するかを決定していることがわかる。この微妙なバランスを認めるならば、私たちは将来の気候条件のもとで土壌は土壌有機炭素を増やすか失うかという問題に対する一般化された問いかけをやめるべきである。この問いかけにたいしては単一の解答は存在しないように見えるからである。その代わりに、Smith et al.[27]が論じているように、変化の大きさや傾向を決定する要因についての私たちの予測を改善することと、土壌有機炭素を守り増加させるために実施することができる土地の管理方法を考えるために私たちの研究の努力を集中させるべきである。

## 気候変動を緩和するにあたっての土壌の役割

### 気候変動と戦うために土壌炭素の貯蔵量を増大させること(土壌炭素の隔離)

土壌中の炭素の貯蔵量は「最良の管理方法」を最適化することによって、管理された生態系においては増加させることができる。土壌の炭素貯蔵庫を増加させるための管理方法については多くのレビューが発表されてきた[28,29,30]。そのためここでは詳細なレビューは行わない。土壌中の炭素貯蔵庫を増大させることにより、土壌肥沃度、作業性、水分保持能が増大し、侵食の危険性が減少する[29]。土壌炭素の貯蔵庫を増大させると、将来の地球温暖化が管理された土壌に

及ぼす負の影響を少なくすることができる[27, 31]。土壌有機炭素を増加させるにあたって有効な管理方法としては、植物の生産性の改善（養分管理、輪作、農法の改善などによって達成される）、耕耘の減少あるいは保全的な耕耘、作物残渣の管理法、有機資材のより効果的な利用、土地利用の転換（作物から草地あるいは森林へ）、休耕、アグロフォレストリー、適正な家畜飼養密度、マメ科牧草や改良された草種の混播などが挙げられる[27]。これらの方法は土壌有機炭素の貯蔵庫をおよそ  $1.0\text{--}1.3 \text{ Pg yr}^{-1}$  増加させる技術的可能性をもっているが[27,29]、土壌有機物の隔離に対しての経済的可能性は、炭素の価格を  $\text{CO}_2$  相当の 1t 当り 0-20, 0-50, 0-100 USD とした場合、それぞれ 0.4, 0.6, 0.7  $\text{Pg yr}^{-1}$  と推定される[27]。永久凍土または泥炭地からのわずかな量の炭素の損失でもこの土壌炭素隔離効果を打ち消してしまうであろうが[8]、土地管理方法の改善によってもたらされた土壌有機炭素の増大は地球温暖化の下で将来起こるかもしれない土壌有機炭素の減少に対して土壌の脆弱性を減少させてくれることが期待される。このように、土壌炭素の隔離は多くの観点から win-win および「やって損はない」選択肢であるとみなされる[32-34]。

#### 気候緩和の方法としての土壌炭素隔離に関連した欠点

土壌有機炭素貯蔵量を増大させることには多くの利点があり、win-win および「やって損はない」選択肢を確認することができるが、土壌有機炭素の隔離に対しては様々な問題点もあり、そのことが土壌炭素隔離策を気候緩和のための危険な選択肢としている[35,36]。これらの問題は、第一に炭素貯蔵庫の飽和であり（大気中の炭素は土壌が土壌炭素の新しい平衡水準に達するまでしか除去されない）、第2に永久的ではない炭素の貯蔵庫は管理方法が悪いといつでも元に戻ってしまうこと[35]、第3に炭素資源の流出あるいは移動（例えば、ひとつの地域で土壌炭素貯蔵庫を増やすと他の地域での土壌炭素の減少をもたらす :IPCC2000）、第4に効果の確認に関する問題（貯蔵庫の量は測定することが可能か？[37]）、第5に温室効果ガス発生削減という目標と比べた場合の全体的な効率の問題（貯蔵庫では削減の一部しか達成できない[38]）などである。これらの問題について、以下に簡単に議論する。

#### 炭素貯蔵庫 (Carbon sink)の飽和

炭素貯蔵庫 (Carbon sink)は、毎年大気中から土壌中へと移行する炭素と定義さ

れる。炭素を隔離する方法をまず実行するとしたら、土壤炭素を変化させることが大きな効果を持っているのでまず行うべきことである。しかし、土壤が新しい平衡状態に近づくに伴って、時間の経過とともにこの効果は遅くなっていく (Figure 2[35])。シンクとしての強度は従って土壤が新しい平衡状態に到達するまで時間とともに減少していく。この現象はシンクの飽和と名付けられている。その他の温室効果ガスの発生抑制法は、その効果が無限に続くのに対して、土壤中への炭素の隔離（および植生中への隔離）は時間が限られており有限である [35]。より改善された管理方法はより高い土壤炭素貯蔵庫を維持するために無限に管理されなくてはならないが、新たなシンクを求めることは困難である。

### 非永久性

時間とともにシンクが減少していくことに加えて、土壤炭素のシンクは可逆的でもある。土壤管理法を改善することによって土壤中に増加した土壤炭素の貯蔵庫は、その改善された管理方法が維持されなければ急速に炭素を消失していく。炭素を失う速度は炭素を得る速度よりも速い [35]。その他の温室効果ガスの削減法と比較して、ガス発生の削減法は永久的な効果があるのに対して、土壤中（および植生中）に隔離された炭素は非永久的であり、将来再び発生してしまう危険性を持っている。

### 炭素の流出あるいは移動

土壤炭素貯蔵庫を増大させても必ずしも大気中の CO<sub>2</sub> 濃度の減少に結びつかない場合がある [39]。例えば、多量の有機物を施用することによってある地域の土壤炭素の貯蔵庫を増大させることは可能である。しかし、もしある地域で炭素を増やすために施用された有機物が他の地域で施用すべきものであったとしたら、他の地域では炭素が失われたことになる（すなわちエミッションが移動した；あるいは温室効果ガスの決算の境界の外でエミッションが起こる場合、流出 (leakage) という用語を用いる) [40]。この例では、2つの地域を通しての効果は中立的 (neutral) であり、大気中の炭素の正味の除去には結びつかない。この例における土壤炭素貯蔵庫の増大は純粋な意味での大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の減少はもたらさない [35]。ひとつの地域で行われる土地利用の変化がその他の地域での炭素の放出をもたらす場合にも、このようなプロセスは間接的な土地利用の変化と呼ばれるが、炭素の移動あるいは流出が起こることになる [41]。

### 効果の確認に関わる問題

土壤中に存在する莫大な炭素の貯蔵庫と比べて土壌炭素の変化の量は少ない。そのため土壌炭素貯蔵庫の変化は測定することが困難であり、監視(monitoring)、報告(reporting)、検証(verification) (MRV[37])にあたっての問題となる。もし、大気から除去された炭素の価値が、その変化を測定するためのコストよりも少ないならば、MRVのコストが土壌炭素の削減法をよりコストに引き合わないものにしてしまい、反対に温室効果ガスの削減という方法はその効果を示すにあたってより費用がかからない[37]。

### 発生削減の目標に関連した全体的な効果

土壌炭素の隔離は重要な気候緩和の戦略である。しかしそれは温室効果ガス発生削減のための万能薬ではない。貯蔵庫(Sinks)を通じては温室効果ガス削減の一部が達成されるに過ぎない[38]。土壌炭素の隔離は従って全ての分野を通じてのその他多くの温室効果ガス削減の戦略と並行して考えられなくてはならない。

気候緩和の方法として炭素を隔離するために土壌と植生を用いる試みに関する問題は、W.H.Schleginger によって、「地圏を生物圏に隔離させようと試みること」と簡潔に要約されている。人類が現代において化石燃料を使用することによって放出している炭素は、何億年もの年数の間に地圏に閉じ込められ、数百万年もの間に蓄積されてきたものである。この地圏の炭素を捉えるために生物圏を利用するという試みはうまくいかない(does not add up)。放出された地圏中の炭素は生物圏が効果的にそれを受け入れるにはあまりに大きすぎる。このことを理解するならば、炭素の発生を削減することは、いったんそれが発生したのちにその炭素を隔離しようとするよりもより重要なことである。

## 結論

気候変動に対する将来の土壌の応答に関してはまだ不確実性があるが、ほとんどの推定は、地球規模で、土壌はほんのわずかな量の炭素を失うか、あるいは土壌炭素の貯蔵量は実質的に増大することもある。地球の全体像(global picture)は、

しかしながら、その反応において地域的な変動があることによって支えられている。すなわちその反応は分解速度に対する温度上昇および土壌水分の減少の相反する影響や、分解による炭素の損失と生産性の増大による炭素の増加の間の収支などを含む諸要因の組み合わせによって決定される反応である。

気候変動を緩和するために土壌を利用するという観点からすると、土壌炭素の隔離は地球規模で大きくてコストに見合った緩和の能力を持っている。土壌炭素の隔離は短期から中期の目標達成に適している。気候変動の緩和能力に加えて、土壌炭素を増加させることは、土壌肥沃度、作業性、水分保持能、養分循環、ガス発生リスクの減少やその他の様々な良好な土壌特性などをもたらすという副次的な利益を提供する[29]。これらの議論はまた例えば時間的な制限、非永久性、炭素の移動、検証の困難さなどの上で述べた各種の限界とのバランスを考慮しなくてはならない。これらの限界はあるけれども、土壌炭素の隔離は短期的な大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の削減において貢献することができるし、従って経済の全ての分野にわたって長期的な発生削減の解決法が開発されるまでの時間かせぎになる。

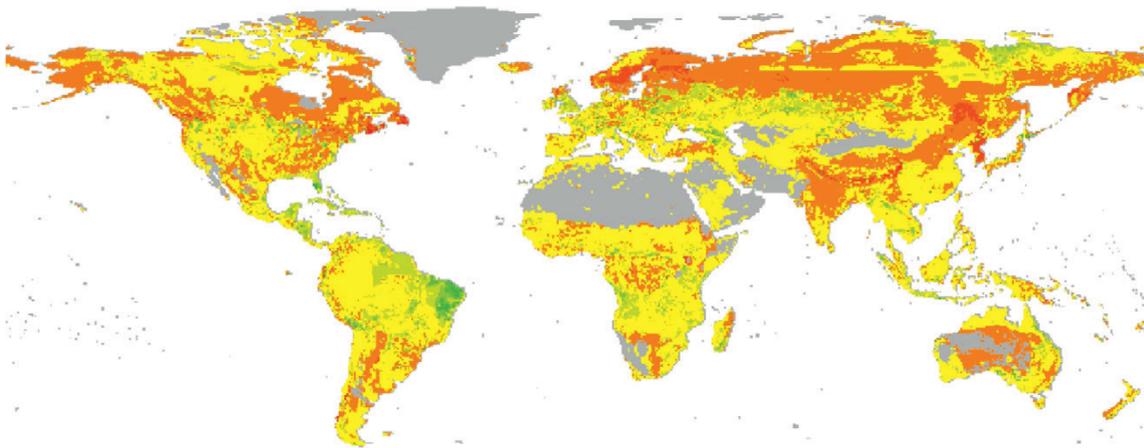
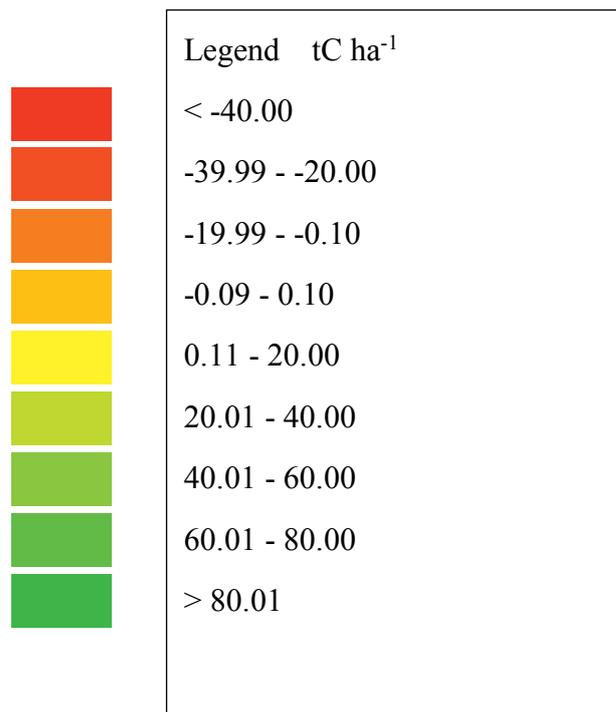


Figure 1. Average trend in SOC stock change 1971–2100 across 10 climate scenarios (after Gottschalk et al., 2012).



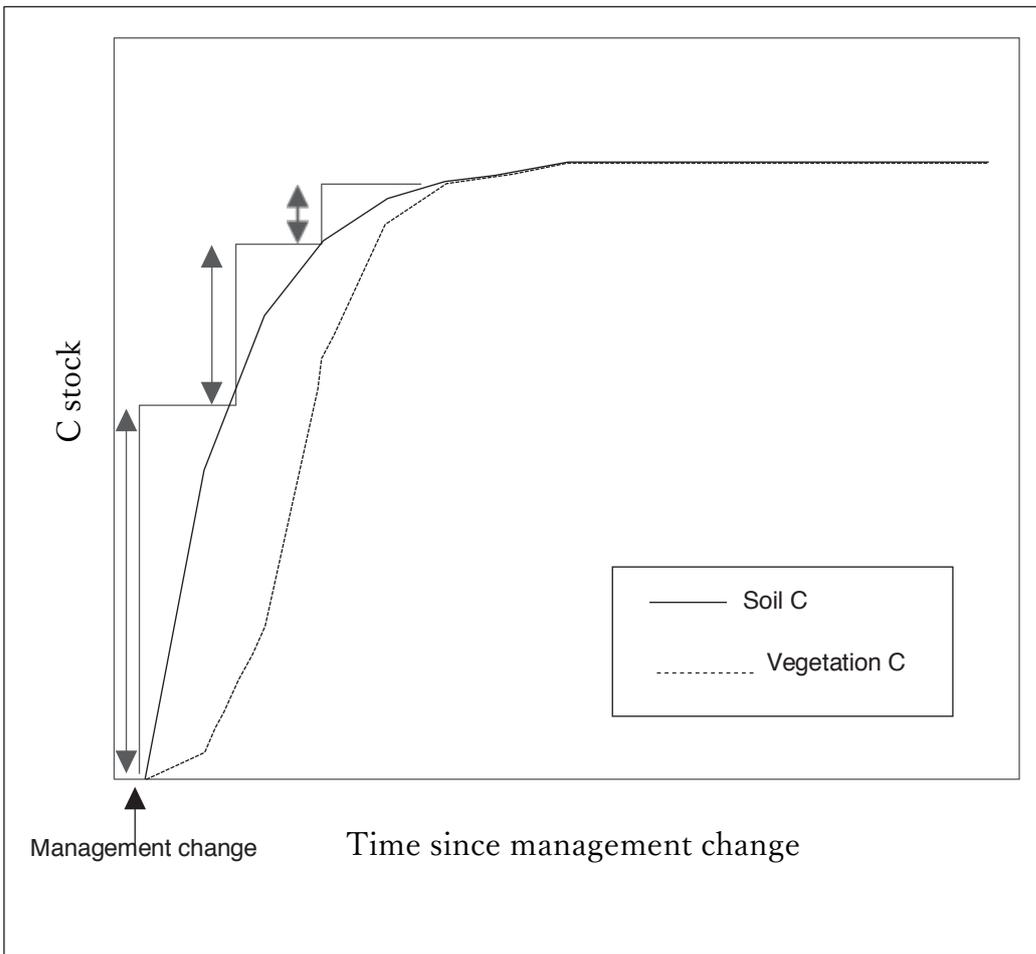


Figure 2

