

十勝地域における黒ボク土地帯の耕地化が土壤炭素変化に及ぼす影響

○(株)ズコーシャ 丹羽勝久

農林水産省農林水産技術会議事務局（前 北海道農業研究センター） 永田 修

北海道農業研究センター 若林勝史

千葉大学 本郷千春

1. はじめに

土壤中の炭素量は植物の3-4倍とも言われ、世界全体で見た場合にその量は1500-2000 Pg Cに及ぶと試算されている(Batjes 1996; Watson *et al.* 2000)。このことから、土壤は二酸化炭素の吸収や放出を考える上で非常に重要なファクターであり、土壤炭素の増減は地球温暖化に影響することが示されている(Schlesinger, 2000)。また、これまで耕地化により、世界全体で50Pg Cもの土壤炭素が消失していることが報告されている(Paustian *et al.* 1998; Lal 1999, 2004)。このことから、各地域で耕地化による土壤炭素の増減を評価すると共に、その規定要因を明らかにした上で、土壤炭素の維持・増加のための対策を検討することが重要である。

北海道十勝地域は畑地帯であり、主要土壤は火山灰を母材とする黒ボク土である。当該地域では農耕期間の降水量が蒸発散量を上回ることから、特に排水不良が作物生産上の問題点とされており、排水不良区域に、これまで暗渠排水を中心とする排水改良が実施されてきた(Niwa *et al.*, 2008)。関谷ら(2009)は十勝地域の黒ボク土地帯の主要土壤のうち、多腐植質厚層多湿黒ボク土には膨大な土壤炭素量が蓄積しているが、排水改良を原因とし土壤有機物の分解量が増大傾向にあることを示した。

以上のことから、十勝地域の黒ボク土地帯では耕地の土壤炭素減少が懸念される状況にある。そこで、耕地における土壤炭素量の実態を探るため、帯広市を対象として、以下の調査を行った。まず、地域内の未耕地と隣接耕地において土壤炭素量の評価・比較を行い、耕地化による土壤炭素の増減を明らかにした。その上で、土壤炭素増減が土壤タイプや営農履歴(輪作体系や暗渠排水施工履歴等)といかなる関連性を有するかについて検討を行った。さらに、土壤タイプ別の土壤炭素増減を基に、調査区域の耕地化による土壤炭素の総増減量の試算を行った。

2. 材料および方法

(1) 調査区域

調査区域は帯広市の中でも黒ボク土地帯である中～高位段丘を対象とした。本区域の主要土壌は淡色黒ボク土と多腐植質厚層多湿黒ボク土である(北海道立中央農業試験場, 2008)。その区域には帯広市管轄の防風保安林が調査区域内を縦横に配置されている。このことから、未耕地として防風保安林に着目し、8箇所の調査地点を選定した。また、その保安林と隣接する圃場を調査対象とし、以下の手順により土壌調査・分析を行った。

(2) 土壌調査・分析

調査区域においては複数の火山灰が積層しており、表層の有機物層(A層)に加え、埋没A層が出現する。そこで土壌炭素量を計算する範囲を表層から埋没A層の最下層までとして、未耕地および耕地の土壌を掘削した。土壌断面を整形後、層位区分を行い、各層位で100ccコアによる不攪乱試料と攪乱試料を採取した。その際、未耕地については表層の未分解有機物層(O層)を除去した。不攪乱試料については絶乾法により容積重の分析を、攪乱試料については風乾調整後、乾式燃焼法により全炭素含量を分析した。

(3) 土壌炭素量の算定

土壌炭素量は表層から埋没A層の最下層までを対象として、下記の式により算出し、未耕地と耕地の土壌炭素量、およびその増減を算出した。

$$\text{土壌炭素量 (Mg C ha}^{-1}\text{)} = \sum_{i=1}^n (L_i \times B_i \times C_i) \times 10, \quad (1)$$

ただし、 L_i : 土層厚(m)、 B_i : 容積重(Mg m^{-3})、 C_i : 土壌炭素含量 (Mg m^{-3})、 i : 層位番号、 n : 調査土壌の総層位数

その際、客土等により未耕地に比べて極端に土量が増加した耕地等では、土壌炭素量の比較が困難と考えられるため、未耕地と耕地で埋没A層までの総土量が変わらないことを比較の条件とした。

(4) 農家聞き取り調査

調査した耕地(8 圃場)を所有する農家に、輪作体系、作物残渣の取り扱い、堆肥施用の有無、暗渠排水施工履歴等の営農実態について聞き取り調査を行った。

3. 調査結果

(1) 未耕地と耕地の土壌断面形態

写真 1 は調査区域の主要土壌である淡色黒ボク土、多腐植質厚層多湿黒ボク土の未耕地と耕地の代表土壌断面写真である。

両未耕地とも表層直下に白色の火山砂層(樽前-b 火山灰)が観察されたが、耕地では火山砂は目視では見られなかった。その理由として深耕による土層攪乱が挙げられる。

埋没 A 層の最下層までの深さを比較すると、淡色黒ボク土の未耕地では深さ 60cm まで確認されたのに対して、同一層位までの深さが 50cm に留まった。多腐植質厚層多湿黒ボク土の未耕地では深さ 90cm まで埋没 A 層が確認されたが、耕地では同一層位までの深さが 60cm に留まり、両土壌とも耕地化により埋没 A 層までの厚さが薄くなっていることを確認した。

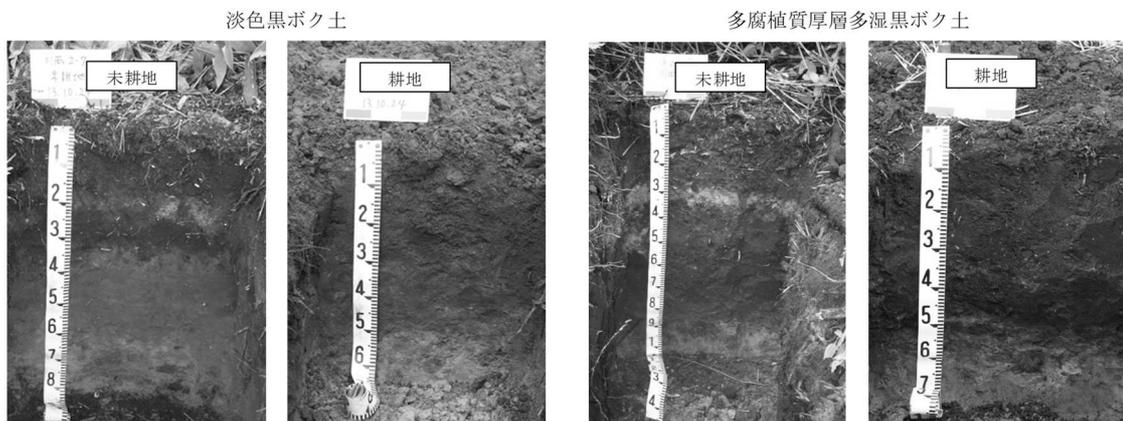


写真-1 淡色黒ボク土、多腐植質厚層多湿黒ボク土の未耕地と耕地の代表土壌断面写真

(2) 未耕地と耕地の土壌炭素量

未耕地と耕地の土壌炭素量を比較するにあたり、前提条件となる表層から埋没 A 層の最下層までの総土量を計算した(表 1)。

その結果、総土量の未耕地に対する耕地の変化割合は各地点で 5%未満であり、未耕地と

耕地の土量はほぼ同等であると判断した。このことから、各調査地点の未耕地と耕地の土壤炭素量の比較が可能と判断し、それぞれの土壤炭素量とその差を計算した(表 1)。なお、表中に示す変化量は未耕地の土壤炭素量から耕地の炭素量を差し引いたものであり、その値がマイナスを示す場合は耕地化により土壤炭素が集積したこと、プラスの場合は耕地化により土壤炭素が減少したことを示す。

各調査地点の耕地化による土壤炭素増減は地点によって異なり、耕地化により土壤炭素が集積した地点(グループ 1)、変化のない地点(グループ 2)、減少した地点(グループ 3)に大別された。一方、土壤タイプに焦点をあてると、グループ 1 ではいずれの耕地も淡色黒ボク土に分類されたが、グループ 2 の土壤は多腐植質普通黒ボク土、グループ 3 の土壤は多腐植質普通黒ボク土と多腐植質厚層多湿黒ボク土に該当した。したがって、耕地土壤は排水不良型の土壤タイプほど、耕地化による土壤炭素量減少が大きい傾向にあることが確認された。

表 1 各調査地点の未耕地および耕地の総土量、土壤炭素量および土壤タイプ

	総土量(Mg ha ⁻¹)		土壤炭素量(MgCha ⁻¹)			土壤タイプ(耕地)**
	未耕地	耕地	未耕地	耕地	変化量*	
グループ1	地点1	2909	2818	91.6	123.5	-31.8 淡色黒ボク土
	地点2	2981	2993	114.4	136.3	-21.9 淡色黒ボク土
	地点3	3410	3570	132.8	160.1	-27.3 淡色黒ボク土
グループ2	地点4	3130	3075	195.3	193.2	2.1 多腐植質普通黒ボク土
	地点5	2897	2775	232.5	235.8	-3.4 多腐植質普通黒ボク土
グループ3	地点6	3327	3174	305.6	198.0	107.6 多腐植質普通黒ボク土
	地点7	3486	3395	361.5	217.3	144.2 多腐植質普通黒ボク土
	地点8	4781	4706	477.7	327.9	149.8 多腐植質厚層多湿黒ボク土

*変化量は未耕地から耕地の土壤炭素量を引いた値

**土壤分類は農耕地土壤分類第3次改訂版に基づく(農耕地土壤分類委員会, 1995)

表 2 各調査圃場の輪作、作物残渣の取り扱い、堆肥施用の有無、土壌の乾湿および暗渠排水施工履歴

	土壌炭素 増加量 (MgC ha ⁻¹)	輪作体型	小麦 残渣*	馬鈴薯 残渣	テンサイ 残渣	豆類 残渣	堆肥施用	土壌の乾湿	暗渠排水
地点1	32	小麦(後作緑肥)→テンサイ→豆 類→馬鈴薯	搬出	鋤込	鋤込	鋤込	30 t ha ⁻¹ (テンサイ作付前)	排水良好	無施工
グループ1 地点2	22	小麦-小麦(後作緑肥)-テンサイ -豆類-馬鈴薯	搬出	鋤込	鋤込	鋤込	未施用(20年ほど)	排水良好	施工(1983年)
地点3	27	小麦→小麦(後作緑肥)→テンサイ →豆類→馬鈴薯	搬出	鋤込	鋤込	鋤込	30 t ha ⁻¹ (テンサイ作付前)	排水良好	施工(1980年頃)
グループ2 地点4	-2	小麦-小麦(後作緑肥)-テンサイ -豆類-馬鈴薯	搬出	鋤込	鋤込	鋤込	30 t ha ⁻¹ (テンサイ作付前)	排水良好	無施工
地点5	3	小麦-小麦(後作緑肥)-テンサイ -豆類-馬鈴薯	搬出	鋤込	鋤込	鋤込	未施用(20年ほど)	排水良好	施工(1980年頃)
地点6	-108	小麦→小麦(後作緑肥)→豆類→ 豆類→テンサイ	搬出	-	鋤込	鋤込	過去はテンサイ作付前に 20 t ha ⁻¹ 、但し最近6~7年は堆肥未施用	排水不良	施工(1992年、 1995年)
グループ3 地点7	-144	小麦→小麦(後作緑肥)→テンサイ →馬鈴薯→豆類	搬出	鋤込	鋤込	搬出	20 t ha ⁻¹ (テンサイ作付前)	排水不良	施工(1990年)
地点8	-150	小麦-小麦又は豆類-テンサイ -馬鈴薯	搬出	鋤込	鋤込	搬出又は 鋤込	25 t ha ⁻¹ (2作目の小麦播種前)	排水不良	施工(何度も)

*小麦残渣については搬出を基本とするが、刈株と根については各圃場とも鋤込みが行われている。

(3)農家聞き取り調査

各農家の聞き取り調査から、各圃場では小麦、テンサイ、豆類、馬鈴薯等、十勝地域を代表する作物が、4-6年周期の輪作で作付されていることが確認された。また、全ての圃場において、小麦は刈株および根のみが鋤込まれ、茎葉は圃場外に搬出されていた。バレイショおよびテンサイについては、全て圃場で茎葉等の全ての作物残渣が鋤込まれていたが、豆類については圃場によって作物残渣を搬出するケースも見られた。堆肥施用については、各圃場で施用履歴が異なり、過去20年間、堆肥が施用されていない圃場が2圃場、過去6-7年間、堆肥が施用されていない圃場が1圃場確認された。それ以外の圃場ではテンサイ作付前や、小麦収穫後に4-5年周期で、20-30 t ha⁻¹の堆肥が施用されていた(表2)。

また、圃場の排水性や暗渠施工状況について聞き取り調査した結果、グループ1、グループ2の圃場は排水が良好で、暗渠排水が未施工、または1980年代前半頃の施工であった。それに対して、耕地化により土壌炭素減少が顕著なグループ3は、いずれの圃場も排水不良で、暗渠排水は1990年以降に施工されていた。なお、そのうちの2圃場では、同じ場所に複数回、暗渠が施工されていた(表2)。

4. 考察

(1)未耕地と耕地の土壌断面形態の違い

未耕地と耕地の土壌断面形態を比較した結果、本地域を代表する淡色黒ボク土、多腐植質厚層多湿黒ボク土とも表層から埋没A層の最下層までの厚さが、耕地で薄くなっていた(写真1)。それに対して、同一深度までの総土量を比較すると、未耕地と耕地で大きな差異が認められないことから(表1)、土壌断面形態の違いは耕地化による土壌の圧縮に起因すると考えられる。土壌圧縮は大型農業機械の利用に伴い発生し、特に十勝地域では作土直下の堅密土層(耕盤層)生成が問題となっている(丹羽ら, 1998)。このことから、今後も大型機械による耕地の土壌圧縮の進行については注視していくことが必要である。

(2) 営農実態と耕地化による土壌炭素量増減の関係

関谷(2010)は、2007年に十勝地域の淡色黒ボク土と多腐植質厚層多湿黒ボク土の年間有機物分解量を実測すると共に、2007年の十勝地域の小麦、テンサイ、大豆、小豆および馬鈴薯等の収量実績に基づいて残渣由来の圃場への炭素投入量を試算した(表3)。ここではその計算結果(表3)を利用し、本調査の各調査圃場の総炭素投入量を試算し、耕地化による土壌炭素の増減量と比較した。

表3 関谷(2010)に基づく作物残渣由来の圃場への投入炭素量(2007年実績)

作物	鋤込部位	投入炭素量 (MgC ha ⁻¹)
小麦	刈株、根	1.90
テンサイ	茎葉	3.88
豆類*	茎葉、刈株、根	0.59
バレイショ	茎葉	1.16

*豆類の投入炭素量は大豆(1.04 MgC ha⁻¹)と小豆(0.13 MgC ha⁻¹)の平均値を利用

表4 調査圃場の土壌炭素投入量

	輪作 期間 (年)	炭素投入量(MgC ha ⁻¹)				合計 年間当たり	
		作物残渣由来*		堆肥由来**	緑肥由来***		
		輪作期間	年間当たり	年間当たり	年間当たり		
グループ1	地点1	4	7.52	1.88	0.84	0.65	3.37
	地点2	5	9.42	1.88	0.00	0.52	2.40
	地点3	5	9.42	1.88	0.68	0.52	3.08
グループ2	地点4	5	9.42	1.88	0.68	0.52	3.08
	地点5	5	9.42	1.88	0.00	0.52	2.40
グループ3	地点6	6	9.43	1.57	0.00	0.43	2.00
	地点7	5	8.83	1.77	0.45	0.52	2.73
	地点8	4	8.03	2.01	0.70	0.00	2.71

*作物残渣由来の炭素投入量は関谷(2010)の2007年の作物収量実績値に基づく計算値を利用
 残渣を搬出又は鋤込みと回答した場合は、鋤込み炭素量の炭素量の半数を計上
 作付作物が〇〇又は〇〇と回答した場合は、各作物の平均炭素投入量を計上
 **堆肥は現在施用中であることを条件とし、水分75%、炭素割合0.45で炭素量投入量を算出
 ***緑肥の炭素投入量はKoga *et al.* (2011)の十勝地域のエンバクの計算値(2.59 Mg C⁻¹)を利用

表3の豆類の残渣由来炭素投入量については関谷(2010)の大豆、小豆の平均値を用いた。
 表4では、農家聞き取り調査(表2)で作物残渣の取り扱いを「搬出又は鋤込み」と回答した場合は、その鋤込み量の半分が、「輪作作物が〇〇又は〇〇」と回答した場合には各作物の鋤込み量の平均量が圃場に還元されていると仮定した。また、堆肥については現在施用中

の調査圃場だけを対象とし、水分 75%、炭素係数 0.45 で炭素量投入量を算出、緑肥は Koga *et al.* (2011)の十勝地域のエンバク由来の炭素投入量の計算値を利用した。

その結果、各調査地点の年間当たりの土壌炭素投入量は 2.00-3.37MgC ha⁻¹ となり、各グループ間で明確な差がみられなかった。このことから、各グループ別に耕地化による土壌炭素増減の傾向が異なったことには、炭素投入量以外の要因が大きく影響していることが示唆された。

表 1 から、グループ 1 は全ての圃場が淡色黒ボク土に分類され、耕地化により 21.9-31.8 MgC ha⁻¹の土壌炭素量の増加が確認された(表 1)。また、各圃場の年間当たりの炭素投入量は 2.40-3.37 MgC ha⁻¹と見積もられた(表 4)。関谷(2010)が、淡色黒ボク土における 2007 年の年間土壌有機物分解量を実測した結果、その総量は年間当たり 1.95 MgC ha⁻¹になることを示した。この結果と表 4 を比較すると、グループ 1 では有機物分解に伴い消失する炭素よりも多くの土壌炭素が圃場に投入されていた。つまり、各調査地点で、耕地化により淡色黒ボク土の土壌炭素量がより増加したのは、営農管理面から考えても妥当な結果であり、今後も同様の営農を継続していくことで、本土壌では、土壌炭素がよりいっそう蓄積される可能性が示された。

グループ 2 は、各圃場の土壌が多腐植質普通黒ボク土に分類された(表 1)。グループ 2 は、グループ 1 と異なり、未耕地と耕地の土壌炭素量にほとんど変化がなかった。その他、未耕地の土壌炭素量が異なり、グループ 1 では 91.6-132.8 MgC ha⁻¹であったのに対して、グループ 2 では 195.3-252.5 MgC ha⁻¹であった(表 1)。一方、圃場への炭素投入量(表 4)、堆肥施用、土壌の乾湿および暗渠排水施工履歴等(表 2)、他の要因については両グループで顕著な差が認められなかった。Bellamy *et al.*(2005)は、耕地化による畑地の土壌炭素量の変化は、初期土壌炭素量に依存し、初期土壌炭素量が多い土壌ほど、土壌炭素量の減少が顕著になることを示した。このことから、本調査で得られたグループ 1、2 の耕地化による土壌炭素変化量の違いは初期土壌炭素量に起因すると考えられた。

グループ 3 の圃場は多腐植質普通黒ボク土と多腐植質厚層多湿黒ボク土に分類され、耕地化により 107.6-149.8 MgC ha⁻¹の土壌炭素量が減少していた(表 1)。その要因の一つに、

未耕地の土壤炭素量(初期土壤炭素量)が 300 MgC ha^{-1} 以上と他のグループに比べて高いことが挙げられた。また、その他、本グループではいずれの圃場も排水不良であること、暗渠排水が 1990 年以降に施工されており、そのうち 2 圃場では 2 度以上、同じ場所に暗渠を施工していること等、排水改良に積極的であることが、他グループとの相違点として挙げられた(表 2)。

一般的に、排水が良化すると、 CO_2 発生速度が高くなり、土壤有機物分解が促進される。関谷(2010)は十勝地域の多腐植質厚層多湿黒ボク土では排水改良により、土壤有機物の年間分解量が増加し、2007 年の実測では 3.43 MgC ha^{-1} と淡色黒ボク土(1.95 MgC ha^{-1})の 1.5 倍程度になることを示した(関谷, 2010)。この分解量と、表 4 のグループ 3 の年間当たりの炭素投入量を同一土壤タイプ(多腐植質厚層多湿黒ボク土：地点 8)で比較すると、分解により消失する炭素量よりも投入炭素量が 0.72 MgC ha^{-1} 不足していることが明らかになった。

以上のことから、グループ 3 では初期炭素量や排水改良に伴う有機物分解促進に起因する土壤炭素の消失が、現状の営農管理形態では補えない状況にあると考えられる。

(3)耕地化による土壤炭素量増減の広域評価

北海道土壤区一覧改訂版(北海道立中央農業試験場, 2008)によると、調査区域である帯広市の中～高位段丘の主要土壤は、淡色黒ボク土と多腐植質厚層多湿黒ボク土であり、それぞれ 7211ha、6324ha の耕地に分布し、調査区域の圃場全体の 96%を占める。本調査では土壤炭素変化量に基づいて各調査地点を 3 グループに区分しているが(表 1)、グループ 1 の圃場は全て淡色黒ボク土に分類され、グループ 3 の一部の圃場には多腐植質厚層多湿黒ボク土が含まれていた。

以上のことから、北海道土壤区一覧改訂版に示されている淡色黒ボク土が本調査で区分したグループ 1 に、多腐植質厚層多湿黒ボク土がグループ 3 に対応すると仮定し、各グループの平均土壤炭素変化量と土壤別の耕地面積に基づいて、調査区域の耕地化による土壤炭素の総変化量を試算した。

その結果、調査区域では 650000 MgC (-48Mg C ha^{-1})の土壤炭素が耕地化により減少しているが見積もられた。なお、耕地化した後、100年が経過したと仮定すると、その減少量は 650MgC year^{-1} ($-0.48\text{MgC ha}^{-1}\text{ year}^{-1}$)となる。

一方、調査区域の帯広市では経済活動に伴う CO_2 排出量が、2000年実績で約 400000 MgC year^{-1} であることが示されており、耕地化に伴う炭素の年間減少量は経済活動に伴う年間炭素排出量の 0.2%程度に留まることが明らかになった。

5. おわりに

上述したように、十勝地域の黒ボク土地帯の耕地化による土壤炭素量の増減は、炭素の圃場還元、初期土壤炭素量および排水改良に影響を受け、地域全体で見た場合に土壤炭素量が減少していることが明らかになった。しかし、その減少量は経済活動に伴う炭素放出量に比べてかなり少ないことも、同時に試算された。

畑地が地球温暖化に与える影響としては、有機物分解に伴う炭素放出(CO_2 発生)に加え、一酸化二窒素(N_2O)も考慮することが重要である。 N_2O は窒素肥料等をソースとし、土壤が還元状態になるほど発生量が増大する特徴を持ち、 CO_2 とはトレードオフの関係にある。つまり、排水改良を行うと N_2O 発生量は減少することが期待される。

以上のことから、今後の展開として、畑地の土壤水分状態、 CO_2 と N_2O 放出量を測定した上で、排水改良が温室効果ガス発生に与える影響を調査することが重要と考えている。

謝辞：本研究を行うにあたり、十勝農業協同組合連合会 梶 孝幸氏、帯広市川西農業協同組合 郡谷 純氏、平野英昭氏、帯広大正農業協同組合 角田征男氏には、圃場調査において便宜を図って頂きました。また、防風保安林の調査では、帯広市 吉田 渡氏、伊藤育子氏に協力を頂きました。ここに、謝意を表します。本研究は JSPS 科研費 24380142 の助成を受けたものです。

文 献

Batjes NH 1996: Total carbon and nitrogen in the soils of world. *Eur. J. Soil Sci.*, **47**, 151–163.

北海道立中央農業試験場 2008: 北海道土壤区一覽(改訂版), 北海道立農試試料, 37, p.1-180.

- Bellamy PH, Loveland PJ, Bradley RI, Lark RM, Kirk GJD 2005: Carbon losses from all soils across England and Wales 1978-2003. *Nature* **437**: 245-248.
- Koga N, Smith P, Yeluripati JB, Shirato Y, Kimura SD, Nemoto M 2011: Estimating net primary production and annual plant carbon inputs, and modelling future changes in soil carbon stocks in arable farmlands of northern Japan. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **144**, 51– 60.
- Lal R 1999: Soil Management and Restoration for C sequestration to mitigate the accelerated greenhouse effect. *Progress in Environment Science*, **1**, 307–326.
- Lal R 2004: Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, **304**, 1623–1627.
- 丹羽勝久・大淵清志・菊地晃二 1998: 細密土壌図による沖積畑土壌生産力低下の解析,ペドログリスト,**42**,107-116.
- Niwa K, Yokobori J, Seino N, Kikuchi K, Hongo C 2008: Effect of soil types on the time-course of changes in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) productivity in Tokachi district, Hokkaido, Japan. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **54**, 928–937.
- 帯広市 2009: 帯広市環境モデル都市行動計画, p.2.
- 農耕地土壌分類委員会 1995: 農耕地土壌分類第3次改訂版,農環研資料,**17**,p.1-79.
- Paustian K, Cole CV, Sauerbeck D, Samson N 1998: CO₂ Mitigation by agriculture, an overview. *Climatic Change*, **40**, 135–162.
- Schlesinger WH. 2000 Carbon sequestration in soils: some cautions amidst optimism. *Agric. Ecosyst. Environ*, **82**, 3, 121–127.
- 関谷長昭・高階史章・丹羽勝久・木村園子ドロテア・波多野隆介 2010: 北海道十勝管内耕地土壌の炭素賦存量とその動態. 日本土壌肥科学雑誌, **81**, 224-233.
- 関谷長昭 2010.畑作地帯における多湿黒ボク土の土壌有機物動態, p.1-67. 北海道大学大学院農学院 環境資源学専攻 地域環境学講座 土壌学分野 博士後期課程.
- Watson RT, Noble IR, Bolin B, Ravindranath NH, Verardo DJ, Dokken DJ 2000: Land use, land-use change, and forestry. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

