HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	土壌生態系における温室効果ガスの発生に関する研究 : とくに森林土壌における土壌呼吸，および畑土壌におけるN2O生成と放出を中心として
Author(s)	澤本，卓治
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(農学)
Dissertation Number	甲第5177号
Issue Date	2000-03-24
DOI	https://doi.org/10.11501/3168742
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/51658
Type	doctoral thesis
File Information	000000353934.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

土壌生態系における温室効果ガスの発生に関する研究

ーとくに森林土壌における土壌呼吸、および水田土壌におけるCH_4の生成と放出を中心としてー

農芸化学専攻　博士後期課程

浮本　卓治

土壌生態系における温室効果ガスの発生に関する研究

―とくに森林土壌における土壌呼吸、および畑土壌における N_2O 生成と放出を中心として―

農芸化学専攻 博士後期課程

澤本 卓治

目次

第1章　緒論と本研究の目的　1

第2章　研究史
　第1節　土壌呼吸に関する研究の研究史　5
　第2節　土壌からの N_2O 生成に関する研究の研究史　9

第3章　土壌におけるガスフラックスの測定方法
　第1節　はじめに　15
　第2節　材料と方法　16
　第3節　結果　18
　第4節　考察　20
　第5節　要約　21

第4章　シベリアタイガにおける土壌呼吸および N_2O・CH_4 フラックス
　第1節　はじめに　27
　第2節　調査地と調査方法　28
　第3節　結果　34
　第4節　考察　40
　第5節　要約　44

第5章　北海道の土壌構造が発達した灰色低地土タマネギ畑からの N_2O フラックス－3 ヶ年の調査による N_2O 放出量と既往の研究事例の比較－
　第1節　はじめに　46
　第2節　材料と方法　46
　第3節　結果　48
　第4節　考察　51
　第5節　要約　53

第6章　北海道の土壌構造が発達した灰色低地土タマネギ畑からの N_2O フラックス－N_2O 生成と放出のメカニズム－
　第1節　はじめに　54
　第2節　材料と方法　55
　第3節　結果　57
　第4節　考察　61
　第5節　要約　64

第7章　総合考察
　第1節　シベリアタイガ生態系と北海道灰色低地土タマネギ畑における温室効果ガス発生メカニズムの比較　66

第2節　年間土壌呼吸量・純一次生産量の推定およびその既往の研究事例との比較　68
第3節　シベリアタイガカラマツ林および北海道灰色低地土タマネギ畑における大気圏からのCO_2の取り込み（生態系純生産）　71
第4節　北海道灰色低地土における窒素循環　75
第5節　結論　76

第8章　要旨　78

引用文献　81

付表　92

図のタイトルと目次

1、	図 1-1	本論文の構成内容	3
2、	図 2-1	農耕地土壌からの N_2O 発生に関する測定事例の国別度数分布	12
3、	図 3-1	ガスフラックス測定法の原理	15
4、	図 3-2	土壌空気採取管の構造と設置方法	17
5、	図 3-3	N_2O フラックスおよび CO_2 フラックスの推移	19
6、	図 3-4	N_2O フラックスおよび CO_2 フラックスにおけるチャンバー法と拡散法の比較	20
7、	図 4-1	土壌断面における地温の分布	35
8、	図 4-2	土壌断面における水分飽和度の分布	35
9、	図 4-3	土壌断面における pH の分布	35
10、	図 4-4	土壌断面における EC（電気伝導度）の分布	35
11、	図 4-5	土壌断面における全有機炭素含量の分布	35
12、	図 4-6	土壌断面における CN 比の分布	35
13、	図 4-7	地温と土壌呼吸の関係	36
14、	図 4-8	土壌断面における微生物呼吸の分布	38
15、	図 4-9	鉱質土壌における地温（上）および全有機炭素含量（下）と微生物呼吸の関係	39
16、	図 4-10	土壌断面における N_2O および CH_4 濃度の分布	40
17、	図 4-11	土壌断面における相対ガス拡散係数（D/D_0）の分布	40
18、	図 4-12	Bouwman 1996 のまとめによる自然生態系からの N_2O 放出（範囲）	44
19、	図 5-1	3 年間（1995-1997）の生育期における N_2O フラックス、土壌呼吸、およびそれらの要因の推移	49
20、	図 5-2	3 年間の生育期における N_2O 積算フラックスの推移	50
21、	図 6-1	土壌気相中の N_2O（下段）および CO_2（上段）濃度の推移	58
22、	図 6-2	N_2O および CO_2 フラックスの推移	59
23、	図 6-3	降水量と暗渠排水からの硝酸態窒素溶脱の積算推移	59
24、	図 6-4	作土気相中における N_2O および CO_2 の平均滞留時間の推移	60
25、	図 6-5	1995 年、1996 年、および 1997 年における（A）降水、作土の硝酸態窒素含量（○）（1995 年は 0～5cm、1996 および 1997 年は 0～30cm）、および暗渠排水からの硝酸溶脱量の積算推移（実線）（B）土壌から大気への $N_2O \cdot CO_2$ フラックスの積算値、および（C）心土から作土への $N_2O \cdot CO_2$ フラックスの積算値の推移	61
26、	図 6-6	作土に存在する硝酸態窒素あたりの土壌から大気への N_2O フラックスの推移	62
27、	図 6-7	（A～E）土壌断面における粒団内の NO_3 分布推移と脱窒過程に	

よる N_2O 生成の模式図　(F)粒団レベルにおける物質の移動と変換模式図　63

28、　図 7-1　シベリアタイガ生態系と北海道灰色低地土タマネギ畑における温室効果ガス発生のメカニズム　67

29、　図 7-2　地温と土壌呼吸の関係(A、C、E)および年間土壌呼吸の推定(B、D、F)　69

30、　図 7-3　年間土壌呼吸量(右)および純一次生産量(左)　71

31、　図 7-4　シベリアカラマツ林における炭素循環　72

32、　図 7-5　北海道灰色低地土タマネギ畑における炭素・窒素循環　73

表のタイトルと目次

1、　表 1-1　主要な温室効果ガスの大気中濃度、増加速度、平均貯留時間、および温顔化寄与率　1

2、　表 2-1　研究史で紹介した土壌呼吸に関する既往の研究事例　8

3、　表 3-1　三笠土壌断面調査の結果　22

4、　表 3-2　三笠土壌の化学性　22

5、　表 3-3　三笠土壌の物理性　22

6、　表 3-4　三笠土壌の物理性　22

7、　表 3-5　三笠圃場管理とタマネギの状況　23

8、　表 3-6　圃場面積・栽植密度・品種、施肥　23

9、　表 3-7　チャンバー法による N_2O フラックス　24

10、　表 3-8　チャンバー法による CO_2 フラックス(土壌呼吸)　24

11、　表 3-9　深さ 5cm の土壌気相中、および土壌表面大気の N_2O 濃度　25

12、　表 3-10　深さ 5cm の土壌気相中、および土壌表面大気の CO_2 濃度　25

13、　表 3-11　深さ 0～5cm の相対ガス拡散係数(D/D_0)　26

14、　表 4-1　調査地点の概要　29

15、　表 4-2　調査項目とその実施年　30

16、　表 4-3　地点 Cont の土壌断面調査の結果　30

17、　表 4-4　地点 W96 の土壌断面調査の結果　30

18、　表 4-5　地点 S92 の土壌断面調査の結果　30

19、　表 4-6　地点 S73 の土壌断面調査の結果　31

20、　表 4-7　地点 Cont-2 の土壌断面調査の結果　31

21、　表 4-8　地点 S92-2 の土壌断面調査の結果　31

22、　表 4-9　地点 G の土壌断面調査の結果　32

23、　表 4-10　土壌呼吸についての分散分析表(一元分散分析)　36

24、　表 4-11　現場で測定した土壌呼吸の平均値、培養実験で測定した微生物呼吸、現場における微生物呼吸の推定、および

		土壌呼吸に対する根呼吸寄与率の推定	37
25、	表 4-12	N_2O および CH_4 フラックスの結果	40
26、	表 5-1	N_2O フラックスおよび CO_2 フラックス積算値の比較	50
27、	表 5-2	本調査地おける施肥窒素量および N_2O 放出量、および既往の農耕地における測定事例	51
28、	表 6-1	7 月から 10 月までの作土における N_2O 生産量とその大気へのフラックスに対する寄与率	60
29、	表 6-2	7 月から 10 月までの作土における CO_2 生産量とその大気へのフラックスに対する寄与率	60
30、	表 7-1	本研究の調査地における炭素循環	74
31、	表 7-2	灰色低地土における窒素循環	75

付表のタイトルと目次

1、	付表 1	シベリア土壌風乾土 土壌分析結果一覧	92
2、	付表 2	土層 1m までに存在する単位面積当たりの全有機炭素	95
3、	付表 3	土層 1m までに存在する単位面積当たりの全窒素量	96
4、	付表 4	土層 1m までに存在する単位面積当たりの水溶性 K	97
5、	付表 5	土層 1m までに存在する単位面積当たりの水溶性 Na	98
6、	付表 6	土層 1m までに存在する単位面積当たりの水溶性 Ca	99
7、	付表 7	土層 1m までに存在する単位面積当たりの水溶性 Mg	100
8、	付表 8	土層 1m までに存在する単位面積当たりの水溶性 Cl	101
9、	付表 9	土層 1m までに存在する単位面積当たりの水溶性 NO_2-N	102
10、	付表 10	土層 1m までに存在する単位面積当たりの水溶性 NO_3-N	103
11、	付表 11	土層 1m までに存在する単位面積当たりの水溶性 PO_4-P	104
12、	付表 12	土層 1m までに存在する単位面積当たりの水溶性 SO_4-S	105
13、	付表 13	土層 1m までに存在する単位面積当たりの交換性 K	106
14、	付表 14	土層 1m までに存在する単位面積当たりの交換性 Na	107
15、	付表 15	土層 1m までに存在する単位面積当たりの交換性 Ca	108
16、	付表 16	土層 1m までに存在する単位面積当たりの交換性 Mg	109
17、	付表 17	土層 1m までに存在する単位面積当たりの CEC	110
18、	付表 18	シベリア不撹乱土壌（100mL コア）採取時の物理性	111
19、	付表 19	シベリア不撹乱土壌の各水分吸引圧における物理性	112

謝辞

本研究を行うにあたり、北海道大学大学院農学研究科 波多野 隆介 教授から、研究計画の立案、具体的な研究の遂行から論文の執筆に至るまで、適切な御指導ならびに叱咤激励を賜りました。ここに厚くお礼申し上げます。同農学研究科 但野 利秋 教授には、修士論文の執筆から本論文の執筆に至るまで適切な御助言・御指導をいただきました。深く感謝いたします。同農学研究科 高橋 邦秀 教授には、シベリアにおける現地調査から論文の執筆に至るまで適切な御助言・御指導をいただきました。心から感謝致します。

シベリアにおける調査においては、北海道大学大学院農学研究科の矢島 崇 教授、渋谷 正人 助教授にはさまざまな御指導・御協力をいただきました。土壌試料の分析においては、北海道立中央農業試験場環境化学部土壌生態科長 三木 直倫博士ならびに北海道開発局開発土木研究所土壌保全研究室長の石渡 輝夫博士に御協力をいただきました。N_2O の分析においては、北海道農業試験場生産環境部 新田 恒雄 博士(現 四国農業試験場)・早川 嘉彦 博士・吉田 光二 博士に御協力をいただきました。また、北海道大学農学部生物機能化学科土壌学講座の山田 佳那子さん・上出 桂子さん・山本 吾一さんには分析の補助をいただきました。ここに記して厚くお礼申し上げます。

三笠における調査においては、森本 猛氏には、圃場を快く提供していただきました。氏の多大なご協力がなければ調査・研究は遂行できませんでした。N_2O の分析においては、北海道立中央農業試験場環境化学部環境保全科長 佐藤 龍男 博士ならびに大橋 優二 研究員に御協力をいただきました。また、北海道大学大学院農学研究科農芸化学専攻土壌学講座修了(現 JA)の林 康人さんには、現地調査の協力から硝酸溶脱に関してデータの提供および議論をいただきました。ここに記して深謝申し上げます。

6 年間所属した北海道大学大学院農学研究科農芸化学専攻土壌学講座においては、原口 昭 講師、中原 治 助教授、倉持 寛太 助手、入野 尚子 事務官、同作物栄養学講座 山口 淳一 助教授、信濃 卓郎 助手をはじめとして、多くの先輩・後輩方から実験・解析の手法を教えていただき、また研究や学生生活に対して議論や良い刺激・アドバイスなどをいただきました。紙面の都合上全員の名を挙げることはできませんが、これらの方々なしでは研究・学生生活を遂行できませんでした。心より感謝申し上げます。

本研究の一部は以下の補助を受けました。ここに記してお礼申し上げます。

○科学研究費補助金(基盤研究 B2)(課題番号 08456038)「農林地生態系の地球化学的物質循環速度調整能とそのモデル化」(研究代表者 北海道大学大学院農学研究科教授 波多野 隆介)

○科学研究費補助金(国際学術研究)(課題番号 09041140)「森林火災が北方ユーラシアの生物圏・凍土圏の生物多様性と炭素循環に与える影響の研究」(研究代表者 北海道大学大学院農学研究科教授 高橋 邦秀)

○戦略的基礎研究「温暖化ガスにかかわる永久凍土撹乱の制御技術」(研究代表者 北海道大学大学院低温科学研究所教授 福田 正巳)

○科学研究費補助金(基盤研究B)(課題番号 10460030)「ペドメトリックスを用いた農地からの環境窒素負荷量の 4 次元的評価」(研究代表者 京都大学大学院農学研究科教授 小崎 隆)

○「日本学術振興会 特別研究員」制度

2000 年(平成 12 年) 3 月 24 日

澤 本 卓 治

第1章　緒論

地球には大気が存在し、その中には温室効果ガス(主に CO_2、水蒸気、そして低濃度のガス類(亜酸化窒素(N_2O)、メタン(CH_4)など)が含まれる。これらのガスが地球から宇宙空間への赤外線を吸収する。その作用のために、もし、これらのガスが存在しなかった場合、地球表面の平均気温は現在よりも 33℃低い–15℃であったと予想されている(陽 1994)。このように、地球大気中の温室効果ガスは、地球を生物が居住可能な環境に維持している。

ところが、人間活動はそのようなバランスを壊しつつある。化石燃料を多量に消費すると、大気中の炭酸ガス濃度が上昇して、地球温暖化が起こるという説を最初に唱えたのは、スウェーデン王立科学アカデミー、ノーベル研究所所長でノーベル化学賞受賞者でもあるスバンテ・アレニウスで、今から 100 年以上前のことである 1896 年のことであった。アレニウスは炭酸ガス濃度が倍増すると地球の表面温度が 4～6℃上昇すると推定した(EPA 予測報告書 1984)。その後、1970 年代において、大気中の CO_2 濃度が上昇していることが確かであることが認識され、このころから全球上の炭素収支に関心が高まった(たとえば、Bolin 1977; Woodwell 1978)。1980 年代以降、地球温暖化の問題について研究や報告が盛んになり(例えば、「EPA 予測報告書」など)、IPCC(気候変動に関する政府間パネル)(1990 および 1992)は、「人間活動の結果として大気中の温室効果ガス濃度が上昇し続けると予想され、それが来世紀における重大な気候変化につながる」という懸念を提示するに至った(IPCC 1992)。

表1-1 主要な温室効果ガスの大気中濃度、増加速度、平均貯留時間、および温顔化寄与率

種類	平均貯留時間	年増加速度	1985年時点の濃度	赤外線吸収ポテンシャル	温暖化寄与率
	y	%		相対値	%
CO_2	100	0.5	345ppmv	1	50
N_2O	100-200	0.25	300ppbv	150	4
CH_4	8-12	1	1.65ppmv	32	19
O_3	0.1-0.3	2.0	25-70ppbv	2,000	8
CFCs	65-110	3.0	0.18-0.28ppbv	>10,000	15

Bouwman 1990を改変して作成した。

人間活動の影響を受ける主要な温室効果ガスとして、CO_2、CH_4、N_2O、ハロカーボン類が挙げられる。1990 年代における、これらのガスの大気中濃度は、産業革命以前と比較して明らかに上昇しており、現時点においても上昇しつづけている(表 1-1)(Bouwman 1990a)。これらの温室効果ガスの中でもっとも影響が大きいのは、濃度(存在量)が高い CO_2 であるが、濃度が低い N_2O や CH_4 も無視できない。なぜならば、N_2O および CH_4 は、分子あたりの赤外線吸収が CO_2 のおおよそ 150 倍(N_2O)、30 倍(CH_4)もあり、これら二つのガスだけで、温暖化へ 4 分の 1 程度寄与して

いるからである(表 1-1)。

土壌生態系におけるこれらの温室効果ガスの挙動に着目すると、CO_2 では、主に植物の根呼吸および土壌微生物の呼吸によって生成され、それらの合計として大気へCO_2が放出されている。これは一般に土壌呼吸と呼ばれている。N_2O では、土壌微生物による硝化過程($NH_4 \rightarrow NO_3$)の副産物、あるいは脱窒過程($NO_3 \rightarrow N_2$)の中間生成物としてN_2Oは生成され、大気に放出されている。CH_4 は、メタン生成菌によって生成するが、メタン酸化菌によって消費もされる。このように、それぞれのガスは、その土壌生態系における生成過程が異なっている。

CO_2収支の 1990 年代初頭の見積もりでは、発生源が 7.0Gt C(10^{15}g C)であるのに対し、大気圏への蓄積および海洋によるとりこみが 5.4Gt C であり、その差(1.6Gt C)がミッシングシンクとされていた(鶴田 1994)。しかし、IPCC(1995)によると、それらは、北半球の森林再生による吸収、窒素施肥と二酸化炭素施肥および気候の変動による他の取り込みによるとされている。しかしながら、温度上昇、窒素施肥、二酸化炭素施肥、撹乱(森林伐採、森林火災、森林の農地化)などによって、植生の現存量、純一次生産、および土壌呼吸がどのように変化するのかが、全球上の炭素循環に極めて重要である(Melillo et al. 1995)。

また、農耕地には人工的に固定された窒素肥料が投入されるため、農耕地土壌からの N_2O 発生量は自然生態系の土壌よりも高くなる可能性が高い。さらに余剰窒素が溶脱する危険性も高い。農耕地土壌からの N_2O 発生については、これまでの測定事例のほとんどが温帯の先進国に限られ、様々な条件(土壌タイプ・気象・作物・圃場管理など)による測定例は十分でなく、今後の測定事例の積み重ねとN_2O 生成・放出のメカニズムの解析が必要とされている(Mosier 1994)。

本研究の目的

以上のような背景を踏まえ、本研究では、人為の影響によって生態系の炭素・窒素循環の変化が顕在化すると思われるふたつの生態系－シベリアタイガおよび北海道の野菜畑－を研究地として選択した。シベリアタイガが位置する北方林は陸上生態系の炭素循環に重要な位置を占め(Kolchugina and Vinson, 1993; IIASA, 1997)、地球温暖化によってその炭素蓄積量の変化が地球全体の炭素循環に与える影響が懸念される地帯の一つとされる(Goldammer and Furyaev 1996)。しかしながら、永久凍土地帯に位置するシベリアタイガにおいては、人為による火災が頻発し(Valendik, 1996)、シベリアタイガの破壊が地球規模の気候システム・炭素循環において極めて重要視されている(福田・高橋 1999)。また、北海道灰色低地土タマネギ畑では、多量の施肥が行

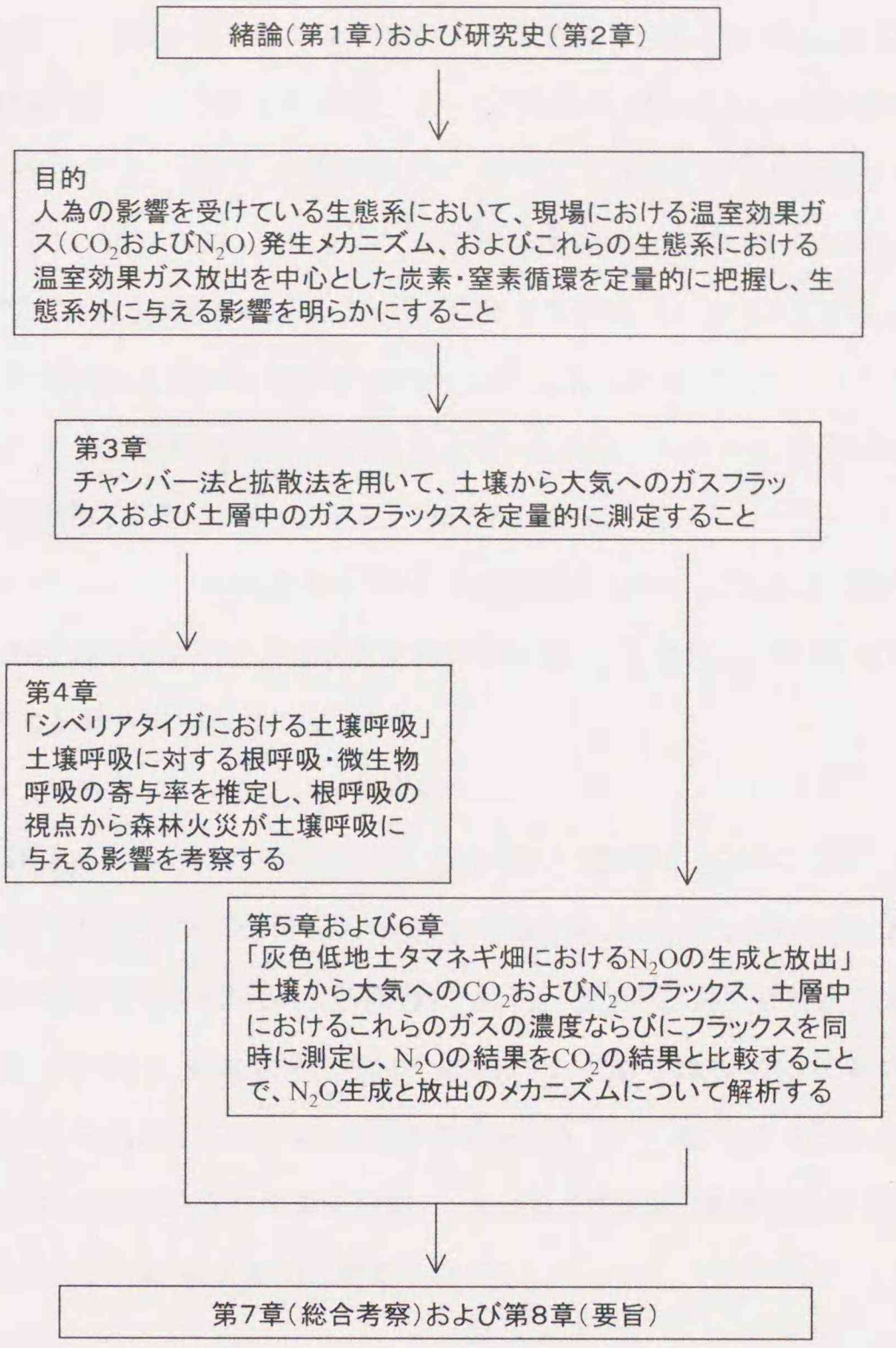


図1-1　本論文の構成内容

われ、温室効果ガスとして強い効果のある N_2O 発生と硝酸の溶脱の問題が顕在化する可能性が高い。

そこで、このような人為の影響を受けた生態系－シベリアタイガおよび北海道の野菜畑－において、現場における温室効果ガス(CO_2 および N_2O)のメカニズム、およびこれらの生態系における温室効果ガスを中心とした炭素・窒素循環を把握し、人為による炭素・窒素循環の変化が生態系外に与える影響を明らかにすることを目的とした。これらのことを明らかにすることは、人為による地球温暖化や環境負荷の影響を制御するための基本的なデータのひとつとして極めて重要であると思われる。

上述したように、土壌における CO_2 と N_2O の生成経路は異なる(CO_2 は主に根呼吸と微生物呼吸、N_2O は硝化・脱窒という微生物過程)。よって、現場におけるこれらの温室効果ガス発生のメカニズムを明らかにするためには、土壌呼吸では、根呼吸と微生物呼吸を分離することが必要である。N_2O の生成と放出に関しては、N_2O と CO_2 を同時に現場で測定・比較することによって、N_2O の生成と放出のメカニズムを明らかにすることが可能であると思われる。そのためには、これらのガスの土壌中における動態(土壌から大気へのフラックス・土層中におけるフラックス)を定量的に把握する必要がある。よって、本研究では、はじめに土壌から大気へのガスフラックスおよび土層中のガスフラックスを定量的に測定が可能であることを確認する。その上で、シベリアタイガおよび北海道灰色低地土タマネギ畑における温室効果ガスの生成と放出のメカニズムおよび放出量を明らかにし、さらにそれらの生態系において炭素・窒素循環を把握し、人為による炭素・窒素循環の変化が生態系外に与える影響を明らかにする。

本論文の構成について、図 1-1 に示す。第 2 章では研究史を述べる。第 3 章では、土層中のガス濃度、および土層中のガスフラックスを測定する方法について述べる。第 4 章では、シベリアにおける森林火災が土壌呼吸に与える影響について、根呼吸・微生物呼吸に着目して解析する。第 5 および第 6 章では、北海道灰色低地土において、N_2O および CO_2 の動態を同時に測定・比較し、N_2O 生成と放出のメカニズムについて考察を行う。第 7 章では、以上の結果を総合し、これらの生態系において炭素・窒素循環を把握し、人為による炭素・窒素循環の変化が生態系外に与える影響を明らかにする。第 8 章には要旨を述べる。

第 2 章　研究史

第 1 節　　土壌呼吸に関する研究の研究史

土壌呼吸は生態系の生物活性を反映するものとして、古くから測定が行われてきた。

Romell 1932 は、ムル(mull)型森林土壌では土壌呼吸が高いのではないか、という仮説を検証するために、1900 年頃からそれまでに得られた 47 地点の土壌呼吸の値と土壌型について検討した。その結果、土壌型と土壌呼吸の間には関係が認められなかった。また、測定された土壌呼吸の値は、北緯 63 度のスウェーデン北部から、ドイツ南部(北緯 47 度)において 0.2～0.7(g CO_2 m^{-2} h^{-1}) (15～53 μ g CO_2-C m^{-2} s^{-1})であった。

Lieth and Ouellette 1962 は、土壌呼吸を植生の CO_2 循環の一部として捉えた。すなわち、(1)乾物生産－(a)生産量が大きければ、分解されるものも大きい(b)生産量が大きければ、植物の根呼吸も大きい、(2)分解－(a)土壌微生物が多ければ、分解される有機物も多いなど、が土壌呼吸に大きな影響を与えると考えた。その上で、カナダ北方森林地域(北緯 48 度西経 64 度)の異なる 12 の生態系における土壌呼吸を調査した。その地域の生産性は低く、土壌呼吸の値(2.5～12.8 μ g CO_2-C m^{-2} s^{-1})は、ヨーロッパ中央部の温帯地域における土壌呼吸の下限値に相当した。しかしながら、栄養性の高い地点の土壌呼吸は高かった。

Witkamp and Frank 1969 は、アメリカのマツ林において、土壌呼吸に対する litter 層、humus 層、および鉱質土壌層の寄与率、および根呼吸の寄与率を求める実験を行った。現場でチャンバー法を用いて直接それぞれの呼吸を測定した。その結果、それぞれの寄与率は、28.3%、15.8%、55.8%であった。鉱質土壌にのみ根が認められたので、土壌呼吸に対する根呼吸の寄与率は 50%より高くないとした。また、この論文では、土壌呼吸に対する根呼吸の寄与率に関するそれまでの研究事例の紹介がある。それによると、1920 年から 1697 の 4 例で、無視しうる、3 分の 1、半分、2 分の 3 以上とある(これらのオリジナル論文については、入手できなかった)。

Coleman 1973 は、「根がない草地では土壌呼吸が 30%低下していた」、「森林において根呼吸は土壌呼吸の 30～40%を占めた」、「トウヒ林において根がない土壌では、土壌呼吸が 50%低下した」という研究事例を紹介した(これらのオリジナル論文については、入手できなかった)。そして、土壌呼吸に対する根呼吸の寄与率を求めるために、まず不撹乱土壌の呼吸量を測定した。さらにその不撹乱土壌をリター、根、および鉱質土壌の 3 要素に分割し、それぞれから呼吸を測定した。著者は、それまでそのような方法が採られなかった第一の理由は、不撹乱土壌に比べて撹

乱した場合には代謝活性を刺激すると思われてきたからであると述べている。実験の結果、リター、根、および鉱質土壌の 3 要素の呼吸量合計は不撹乱土壌の 89%から 143%以上となり、根呼吸の寄与率は 17%以下と見積られた。

Anderson 1973 は、イギリスの森林において年間を通して土壌呼吸を測定した。その結果、地温と土壌呼吸の対数値に正の有意な相関が認められ、Q_{10} = 3.2 (5-15℃) とした。年間土壌呼吸量を計算し、リターフォールによる土壌への炭素供給量と比較した。その結果、年間土壌呼吸量は 554 (gC m^{-2}) であったのに対し、リターフォールによる土壌への年間炭素供給量は 194 (gC m^{-2}) であった。定常状態を仮定すれば、それらの差 (360 gC m^{-2}) は、根の正味の生産量あるいは代謝量であるとした。この論文は、現在までさまざまな論文に引用されている。

Gloser and Tesarova 1978 は、チェコスロバキア森林土壌 2 地点において、Coleman 1973 の方法を改良し根呼吸の寄与率を求めた。すなわち、不撹乱土壌 (根＋土壌)、撹乱土壌 (根＋土壌)、および根からそれぞれ呼吸を求め、それらの値を組み合わせることで、土壌呼吸に対する根呼吸が占める割合を求めた。その結果、根呼吸の寄与率は 37%および 60%という値を得た。

Nakane 1980 は、三タイプの極相林 (冷温帯、温帯、熱帯) における土壌有機物の循環を、コンパートメントモデルを用いた速度論的解析を用いて解析した。その結果、A_0 層および鉱質土壌層腐植の半減期は熱帯ほど短く、物質循環速度が熱帯ほど高いことを明らかにした。また、どの林分でも全土壌呼吸に対する A_0 層および根呼吸の寄与率はそれぞれ、25%および 50%と計算された。

Nakane et al. 1983 は、広島県の 80 年生アカマツ林において、伐採前後して土壌呼吸を測定した。伐採跡地に網を被せ日射をコントロールした結果、伐採跡地と非伐採林分において地温と土壌水分は等しかった。伐採跡地では土壌呼吸が低下し、これは伐採による根呼吸の停止に主に起因していると思われた。伐採によって枯死した根の分解 (CO_2 化) および落葉枝・細根の更新の停止など、伐採後の土壌炭素の循環の変化を考慮した結果、根呼吸は全土壌呼吸の約 50%であると計算された。Nakane 1980 も併せて考えると、どのようなタイプの森林でも、ある程度成熟した場合、根の呼吸量は土壌呼吸の約半分を占めることが示唆されたとした。

以上の研究のように、土壌呼吸は生態系の生産性を示すものとして興味が持たれ、その生態系内の物質循環の中で、土壌呼吸に対するリター層分解の寄与、根呼吸の寄与などについて関心が持たれ、研究が積み重ねられてきた。

1980 年代に入り、第 1 章で述べたように、1970 年代後半から全球上の炭素収支に関心の高まった。森林生態系が大気から CO_2 を正味に吸収するのか放出するのか？について強い関心が持たれるようになった。陸上生態系が大気から正味に CO_2 を吸収する量は、生態系純生産(NEP)と呼ばれ、NPP は純一次生産量、Rh は土壌の従属栄養植物(主に土壌微生物)の呼吸量を用いて次式で定義される(Melillo et al. 1995)。

$$NEP = NPP - Rh$$

土壌呼吸から Rh を差し引いたものが根呼吸であることから、純一次生産量の変化あるいは根呼吸の寄与についてさらに関心が持たれるようになり、土壌呼吸の研究が、陸上生態系と大気間の炭素収支と強く関連付けられて論じられるようになった。

例えば、Edward and Ross-Todd 1983 は、その論文の中で、土壌生態系の炭素循環が、全球上の炭素循環に重要な位置を占めると述べた。そして、アメリカ Tennessee の落城樹林において、ふたつの伐採区と非撹乱区を設置し、土壌の炭素量の変化と土壌呼吸のちがいを、伐採から一年間に渡って測定した。その結果、土壌の炭素蓄積には違いが認められなかった。しかしながら、伐採後の秋から冬にかけては伐採区の土壌呼吸が大きく、これは伐採によって枯死した根の分解によると思われた。しかし、生育期では非撹乱区の土壌呼吸の方が高く、これは根呼吸によると結論づけた。年間土壌呼吸量を推定したところ、伐採区の土壌呼吸量が大きかった。伐採区と非撹乱区の土壌呼吸量の差に、アメリカの年間年間伐採面積を掛け合わせることで、伐採による CO_2 の発生量は 3×10^8 kgC であり、これは、年間の化石燃料燃焼による CO_2 放出量の 0.006%に相当すると推定した。

さらに、Raich and Schlesinger 1992 は、陸上生態系の純一次生産量・気候などと関連付けて、それまで得られた土壌呼吸に関して論じた。それによると、陸上生態系の年間土壌呼吸量は 68±4Pg C と推定された。しかし、乾燥地帯、半乾燥地帯、熱帯の土壌呼吸に関する測定が不足しており、さらに測定の積み重ねが必要であるとした。年間の純一次生産量(NPP)と土壌呼吸には強い正の相関が認められ、土壌呼吸の方が NPP よりも 24%高い。この差(24%)は、土壌呼吸に対する根呼吸の占める割合の見積もりに対して極小値を与えるとした。地球規模で土壌呼吸を捉えると、土壌呼吸は年間平均降水量および年間平均気温と正の有意な関係が認められたので、温度と降水量の変化が、今後の土壌呼吸の変化に重要なインパクトを与えるだろうと述べた。

このような背景の下、1980 年代から現在に至るまで、伐採や山火事が土壌呼吸や土壌の炭素蓄積に与える影響(Weber 1985; Gordon et al. 1987; Weber 1990; Bowden et al. 1993; Fernandez et

表2-1　研究史で紹介した土壌呼吸に関する既往の研究事例

引用文献	場所	土壌呼吸の範囲 $\mu g\ CO_2\text{-}C\ m^{-2}\ s^{-1}$	測定期間	土壌呼吸量 $g\ CO_2\text{-}C\ m^{-2}$	根呼吸などの寄与率
Romell 1932	北緯63度のスウェーデン北部から、ドイツ南部（北緯47度）の47地点	15～53	4～11月		
Lieth and Ouellette 1962	カナダ北方森林地域（北緯48度西経64度）の異なる12生態系	2.5～12.8	7～8月		
Witkamp and Frank 1969	アメリカのマツ林	6.2～7.6	10月		Litter層28.3%、Humus層15.8%、鉱質土壌55.8%、根呼吸は50%以下
Coleman 1973	南カロライナ州、アメリカ	培養実験			根呼吸の寄与率は17%以下
Anderson 1973	森林、Kent, England	7.6～41	年間	554	
Gloser and Tesarova 1978	チェコスロバキア森林土壌2地点	培養実験			根呼吸の寄与率は37%および60%
Nakane 1980	三タイプの極相林（冷温帯、温帯、熱帯）における土壌有機物の循環を、コンパートメントモデルを用いた速度論的解析		年間	冷温帯494 温帯989-1287 熱帯1429	A0層および根呼吸の寄与率はそれぞれ、25%および50%
Nakane et al. 1983	広島県の80年生アカマツ林伐採跡地と非伐採林分	12-42伐採跡地、14-91非伐採林分	年間	774伐採跡地、1300非伐採林分	根呼吸は全土壌呼吸の約50%
Edward and Ross-Todd 1983	アメリカTennesseeの落城樹林	1.6～27	年間	490伐採跡地、529非伐採林分	
Raich and Schlesinger 1992	既往の研究171の事例のまとめ（ツンドラ11地点、北方森林16地点、温帯草地9地点、温帯森林52地点、地中海森林など13地点、農地26地点、砂漠地帯3地点、熱帯サバンバ・草地9地点、熱帯乾燥森林4地点、熱帯雨林10地点、北方湿地12地点、湿地6地点）			11ツンドラ 322北方森林 662温帯森林 1260熱帯雨林 544農地 など	
Weber 1985	オンタリオ、カナダ、マツ林	11～17	5～11月		
Gordon et al. 1987	64N 148W アラスカ、マツ林	15～60	5～10月		
Weber 1990	46N 77W カナダ、ポプラ林	8～20	4～11月		
Bowden et al. 1993	マサチューセッツ、アメリカ、広葉樹林		年間	371	根呼吸33%、地上部リター37%、地下部リター30%
Fernandez et al. 1993	45N 70W アメリカ、トウヒ、マツ林	14～24	5～10月		
Mattison and Smith 1993	39N 79W アメリカ、ブナ、カエデ林	17～32	6～8月		
Toland and Zak 1994	44N 85W アメリカ、ブナ、カエデ林	15～35	4～11月	470	
Edwards et al. 1989	oakが優勢した5つの森林生態系、テネシー、アメリカ			194～314	根呼吸は土壌呼吸の43%から78%
Holt et al. 1990	19S 146E オーストラリアの半乾燥の森林	2～23	年間	380	土壌呼吸の約40%が根呼吸
Horwath et al. 1994	42N 85W ポプラミシガン州、アメリカ	64（平均）	7～9月		土壌呼吸の20%が根呼吸
Thierron and Laudelout 1996	50N 4E oak forest フランス		年間	700	土壌呼吸の90%が根呼吸
Lamade et al. 1996	6N 2E 油やし 南ベナン	38～120	1～2月（乾季）	1610	土壌呼吸の70%が根呼吸
Eguchi et al. 1997	北海道の広葉樹森林	42～87	9月		土壌呼吸の70%が根呼吸
Kelting et al. 1998	red oak テネシー、アメリカ	36（6月）	6～10月		根呼吸32%、根圏呼吸20%、鉱質土壌48%

al. 1993; Mattison and Smith 1993; Toland and Zak 1994; Pietikäinen and Fritze 1995）、土壌呼吸に対する根呼吸に占める割合（Edwards et al. 1989; Holt et al. 1990; Horwath et al. 1994; Thierron and Laudelout 1996; Lamade et al. 1996; 江口ら 1997; Kelting et al. 1998）、温度・土壌水分などと

表2-1　研究史で紹介した土壌呼吸に関する既往の研究事例(つづき)

引用文献	場所	土壌呼吸の範囲	測定期間	土壌呼吸量	根呼吸などの寄与率
		μ g CO_2-C m^{-2} s^{-1}		g CO_2-C m^{-2}	
Schlentner and Van Cleve 1985	アラスカの成熟林4地点	15～45	5～9月	359～451	
Pajari 1995	ヨーロッパアカマツ 62N 30E フィンランド	1.5～13	年間		
Pinol et al. 1995	41N 0E 森林低山帯 地中海性硬葉植物 スペイン	～34	年間		
Keith et al. 1997	Eucalyptus pauciflora foerst 35S 148E オーストラリア	9～44	年間	711	
De Jong and Schappert 1972	草地、カナダ	～200	5～10月	695	
Osozawa and Hasegawa 1995	36N 140E 茨城県 ダイズ畑と裸地	～140	年間	960裸地 1360ダイズ畑	
島田ら 1998	群馬県、スギおよびヒノキ林	～16	年間	177～365	

土壌呼吸の関係(Schlentner and Van Cleve 1985; Kicklighter et al. 1994; Lloyd and Taylor 1994; Krischbaum 1995; Pajari 1995; Pinol et al. 1995; Keith et al. 1997; Boone et al. 1998)、土層中の CO_2 濃度やフラックス(De Jong and Schappert 1972; Osozawa and Hasegawa 1995; Pinol et al. 1995; 江口ら 1997; 島田ら 1998)、に関する論文が数多く発表された。以上で紹介した引用文献について、表 2-1 にまとめて掲載した。

土壌呼吸の研究史に関してまとめる。土壌呼吸の研究は 1900 年ころから行われきた。1900 年から 1980 年においては、(主に森林の)乾物生産、分解を中心とした陸上生態系内の炭素循環の視点から研究が行われた。1980 年以降から現在に至っては、地球温暖化の懸念から、陸上生態系内の炭素循環に加えて、大気－陸上生態系間の炭素循環についても関心が持たれた。すなわち、(特に)森林生態系が大気 CO_2 を吸収するか放出するかといったことが疑問として提示され、そのために生物圏の純一次生産と土壌呼吸の定量化、およびそれらの気候変動による今後の変化を予測することが、今後の課題となっている(Melillo et al. 1995)。

第 2 節　土壌からの N_2O 生成に関する研究の研究史

現在、土壌からの N_2O 生成は、以下の 3 つの過程から成ることが判っている(Sahrawat and Keeney 1986)。すなわち、①脱窒過程、②硝化過程、③化学的脱窒である。このうち特殊な条件を除き、微生物過程である①および②から N_2O が生成する。脱窒過程(denitrification)(異化的硝酸還元反応)は、分子状酸素の代りに窒素酸化物を最終電子受容体とする嫌気条件下での呼吸形態の一種である。脱窒過程では、土壌中の NO_3 は、$NO_3 \rightarrow NO_2 \rightarrow NO \rightarrow N_2O \rightarrow N_2$ まで還元される。その最終産物である N_2 と中間産物である NO および N_2O は土壌から大気に放出する。硝化過程は、土壌中の NH_4 が、$NH_4 \rightarrow NO_2 \rightarrow NO_3$ と微生物によって酸化される過程をいう。この $NH_4 \rightarrow NO_2$

の副産物として NO および N_2O が生成される。

1985 年までの土壌からの N_2O 生成に関する研究に関しては、Sahrawat and Keeney 1986 の詳細な総説が発表された。Sahrawat and Keeney 1986 によると、N_2O の微生物過程による生成は、古くから知られていた。しかしながら、1970 年代において、有害な紫外線から生物圏を保護しているオゾン層破壊に N_2O が寄与しているという論文が発表され、さらに第 1 章でも述べたように、大気中の N_2O 濃度が上昇すれば、地球温暖化を加速させることの懸念が大きくなった。その結果、世界の食糧・飼料の需要を満たすために使用される窒素肥料の施与が、N_2O 放出にどのような影響を与えているのかについての研究が広く行われるようになった。そのような研究の進展から、以下のことが明らかになった。

Sahrawat and Keeney 1986 によると、一般に、土壌中で脱窒が起こるためには温度や pH などの一般的な条件の他に、酸素の欠乏、電子受容体となる窒素酸化物の存在、電子供与体となる有機物の存在の 3 条件を満たすことが必要である。さらに、脱窒に影響を与える因子として、基質(NO_3)濃度とその有効性、土壌水分、酸素の供給、炭素の供給、温度、pH がある。土壌中の NO_3 濃度と脱窒過程による N_2O 生成は正の関係にあり、NO_3 濃度の増加は N_2O/N_2 比を上昇させる。土壌水分は、直接的にまた酸素の拡散を通して間接的に脱窒による N_2O 生成に影響与え、一般的に土壌水分が増加するにつれて N_2O の生成が増加する。特に、Linn and Doran 1984 は、土壌の水分飽和度(WFPS)が 60%以上で脱窒活性が生じ、80%以上で急激に上昇すると報告している。酸素濃度の低下および炭素の供給は脱窒活性を上昇させ、N_2O/N_2 比も上昇させる。脱窒の至適 pH は 7.0 から 8.0 の間にあるといわるが、実際には広い範囲の pH で脱窒が生じている。これは、真正細菌、古細菌そして真核微生物にいたる広い範囲の微生物に脱窒能があり、土壌中に広く分布していることによると思われる(植田・松口 1994)。

土壌における N_2O の生成は主に脱窒過程であると考えられてきたが、現在では、硝化過程も N_2O 生成に寄与しているとされている。例えば、Freney et al. 1979 は、風乾土から圃場容水量までの土壌を阻害剤などを組み合わせながら培養した。その結果、すべての土壌水分で N_2O が生成しており、低水分の好気的条件では硝化過程によって N_2O が生成していることを明らかにした。Sahrawat and Keeney 1986 によると、土壌中で硝化が生じるための条件としては、基質となる NH_4 の存在が必要である。また、pH および土壌有機物濃度の上昇は N_2O 生成を上昇させ、無機態窒素の供給源となる残渣の供給も著しく N_2O 生成を上昇させる。また、温度(～40℃)の上昇に伴っても N_2O 生成が上昇する。

以上、Sahrawat and Keeney 1986 の総説を中心に、N_2O 生成に関する 1985 年頃までの研究で得られた知見について紹介した。次に、1985 年以降を中心に、現在に至るまでに得られた研究について述べる。

農耕地土壌における N_2O フラックスの研究

農耕地土壌からの N_2O フラックスは、施肥後数週間に大きく上昇し、その後ベースラインを描くように低く推移する例が多い（Mosier 1994; 楊 1994、Bouwman 1996）ことが明らかになった。しかし、降水や灌漑、有機物の供給によってフラックスが上昇する例もある。例えば、Mosier and Hutchinson 1981 は、アメリカコロラド州のトウモロコシ畑において N_2O フラックスを測定し、フラックスは土壌中の硝酸濃度と関係がなく、降水あるいは灌漑の後にフラックスの上昇が生じたことを報告した。Beauchamp et al. 1989、鈴木 1996、および Smith et al. 1998 は、作物残渣やその他の有機物の供給が N_2O フラックスを上昇させることを報告した。また、土壌の違いが N_2O フラックスに与える影響が大きいという報告がなされた（Byrnes et al. 1990）。このように、農耕地土壌からの N_2O フラックスは、圃場の環境によって大きく異なることが予想され、事実、Bouwman 1990b のまとめによれば、農耕地土壌からの N_2O フラックスは 2～1880（$\mu g\ N\ m^{-2}\ h^{-1}$）、年間の N_2O 放出量は 0.2～165（$kg\ N\ ha^{-1}$）までの、極めて広い範囲を示すことが明らかになった。しかし、施肥量が増加すれば N_2O 放出量は増加するという傾向が認められ、世界の窒素肥料の消費量から、2.29～3.65TgN の N_2O が放出されていると見積った（Bouwman 1990b）。Eichner 1990 も 1979 年から 1987 年における 104 圃場のデータを解析し、0.2～2.1TgN の N_2O が放出されていると見積ったが、それらのデータからは、N_2O 放出と土壌のタイプや農業形態の間に傾向は認められないとしている。Watson et al. 1992 では、この Bouwman 1990b と Eichner 1990 のまとめから、耕地土壌からの N_2O 放出は 0.03～3 TgN と幅の広い推定値を提示した。さらに、Bouwman 1996 は、これまで発表された約 250 のデータを解析した。その結果、測定期間が長くなれば施肥由来の N_2O 放出量も増加することを明らかにし、全世界の耕地土壌からの N_2O 放出量は 2.4 TgN（バックグラウンド 1.4、施肥由来 1.0）と推定した。

以上のように、全農耕地土壌からの N_2O 放出量の推定には進展が認められたが、圃場の条件（土壌タイプ・気象・作物・圃場管理など）が複雑であるにも関わらず、測定事例が絶対的に不足している（Mosier 1994）。また、図 2-1 には、Bouwman 1996 がまとめた農耕地土壌における N_2O 放出の 249 測定事例について、その国別度数分布を示した。図 2-1 は、先進国が位置する温帯で地域のデータがほとんどであり、そのほかの地域におけるデータも今後必要であることを示してい

る。

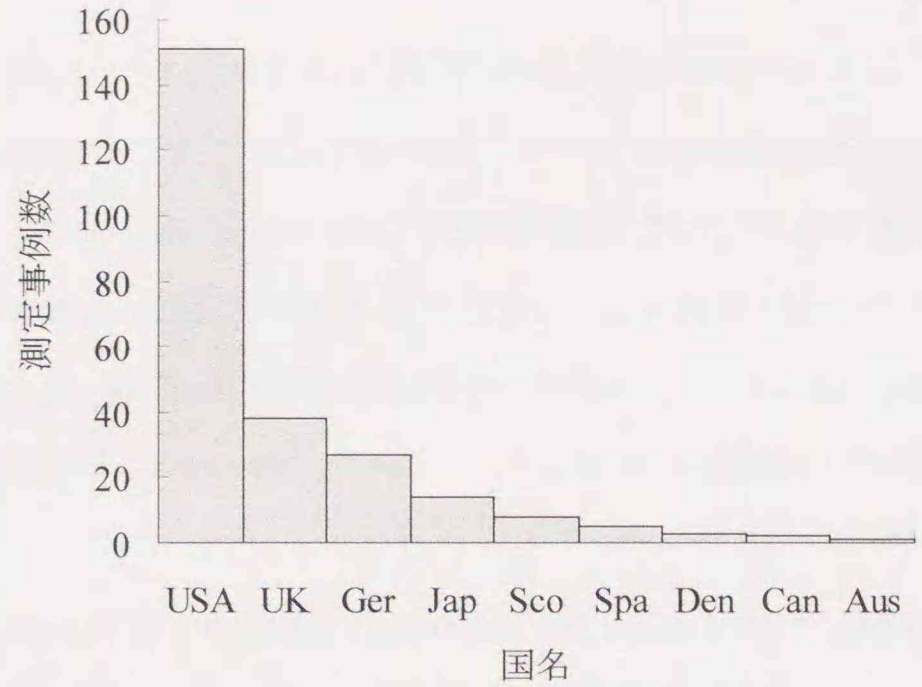


図2-1　農耕地土壌からのN_2O発生に関する測定事例の国別度数分布
（Bouwmann 1996のまとめによる249事例を改変した）。
USAはアメリカ合衆国、UKはイギリス、Gerはドイツ、Japは日本、Scoはスコットランド、Spaはスペイン、Denはデンマーク、Canはカナダ、Ausはオーストラリアを示す。

農耕地以外の自然生態系における N_2O フラックスの研究

農耕地以外の自然生態系からの N_2O 放出については、Bouwman 1990b および楊 1994 に詳しいまとめが報告された。測定例は農耕地土壌と比較して少ないが、熱帯雨林、亜熱帯、サバンナ、ステップ、プレーリー、温帯林の土壌について N_2O 放出量が測定されている。これらの自然土壌からの N_2O フラックスは 0.5～149（μ g N m^{-2} h^{-1}）、年間の N_2O 放出量は 0.0～13.1（kg N ha^{-1}）までの範囲を示す（Bouwman 1990b）。熱帯雨林以外の土壌では、1kg N ha^{-1} y^{-1} を超えることはまれである（楊 1994）。熱帯林土壌では、N_2O フラックスと窒素無機化量が比例関係にあることが示され、N_2O 放出が窒素循環速度に依存していることが明らかになっている（楊 1994）。これに関連して、Firestone and Davidson 1989 は、硝化・脱窒といったパイプを流れるフローが大きいほど、パイプの穴からリークする N_2O（NO）が増加するという、穴空きパイプモデルを提唱した。 Watson et al. 1992 では、熱帯雨林土壌からの N_2O 放出量を 2.2～3.7TgN と推定した。これは全農耕地土壌からの N_2O 放出量に匹敵する。これに対して温帯林や乾燥したサバンナでは 0.05～2.0TgN と推定した。

様々なスケールにおける N_2O 生成・フラックスに関する研究

N_2O の生成に影響を与える因子について、土壌粒団から地域までのスケールの階層において

空間的変動があり(Parkin 1993; Ball et al. 1997)、それぞれにあるいは相互に着目した研究が行われた。

土壌粒団に関連して、Smith 1980 は粒団内の嫌気的領域についてのモデルを提示した。それによると、粒団外側が好気的であっても、粒団の内部に嫌気的領域が発達する可能性を示した。Sexstone et al. 1985 および Hojberg et al. 1994 は実際に粒団内の酸素濃度および N_2O 濃度を微小センサーで測定し、粒団内で酸素濃度は低く N_2O 濃度は高いことを示した。Seech and Beauchamp 1988 は、silt loam の異なる粒団サイズの脱窒ポテンシャルを調べた。その結果、脱窒活性は粒団サイズが小さいほど高く、これは、大きな粒団では基質となる炭素の供給が小さいためだと考察した。

土壌断面の N_2O 濃度分布に関して、Dowdell and Smith 1974 は土壌断面中の N_2O 濃度分布を測定した。その結果、深度ごとの N_2O 濃度の変動係数は 100%にも達していたが、N_2O 濃度の上昇は同時に測定した酸素濃度の低下とともに生じる傾向が認められた。Rolston 1978 もカラム実験において、土壌断面中の濃度を測定し Dowdell and Smith 1974 と類似した濃度変動を得た。Goodroad and Keeney 1985 は、土壌中の N_2O 濃度が降水後深い位置で上昇したために、N_2O 生成の場所が表層から下層へ移動した可能性を示唆した。Arah et al. 1991 は、土層中の N_2O 濃度勾配を測定し土層中の N_2O フラックスを計算した結果、土壌から大気への N_2O フラックスよりも高く計算され、表層でさらに N_2 まで還元された可能性があると述べた。

チャンバー法を用いて N_2O フラックスを測定した際に大きな空間的変動が生じることが多くの研究者によって報告された(Bouwman 1990b)。Folorunso and Rolston 1984 は 3×30m のプロットで真のフラックスの±10%以内の値を得るためには 350、±50%以内の値を得るためには 14 の測定が必要であるとした。また、Smith et al. 1994 は同じ圃場において、微気象的方法とチャンバー法を用いて N_2O フラックスの測定を行った結果、メガチャンバー($64m^2$ 程度)を用いれば、フラックスのバラツキを減少させることができることを示した。

地域～国レベルまでの N_2O 放出量を面的に評価するための研究も行われた。地域スケールからの年間 N_2O 放出量評価するために、Corre et al. 1996 は、カナダの黒色土の一帯を 3 つの主要な土性地区に分類し、それぞれの土性地区の中に土地利用形態(無施肥・施肥の耕地、裸地、草地、森林)に基づいて測定地点を設定した。地形に沿って N_2O フラックスを測定し、斜面下方でフラックスが高い結果を得た。季節的には、施肥直後に降水があった夏と融雪期の春に大きな N_2O フラックスがあった。地区レベルでは、砂質土壌の地区はそれより細かい土性の地点より N_2O フラックスは小さかった。利用形態では、N_2O 放出量の順は森林＜裸地＝無施肥耕地＜施肥耕地の

順であった。この結果は、N_2O 放出とその要因の関係を空間変動に基づいて予測することの重要性を提起している。すなわち、得られた関係を用いて地形レベルから地区レベルまでの N_2O 放出を補完し推定するべきだと述べた。また、Velthof and Oenema 1995 は、オランダの砂質土壌、粘土質土壌、泥炭質土壌 2 地点の 4 地点、および施肥管理 3 処理で N_2O フラックスを測定した。その結果、施肥窒素量の増加によって N_2O 放出量が増加し、砂質土壌＜粘土質土壌＜泥炭質土壌の順に N_2O 放出量が増加した。オランダでは、多くの草地が泥炭質土壌に立地しているために、このような結果は、国全体からの N_2O 放出量を推定するために有効であるとしている。

土壌からの N_2O 生成に関する研究史をまとめる。1980 年ころまでの研究によって、土壌における N_2O 生成はおもに、硝化および脱窒といった微生物過程で生じることが明らかになった。さまざまな生態系における土壌からの N_2O フラックスが測定されたが、その測定値には大きな範囲（農耕地土壌では 0.2～165 kg N ha^{-1} y^{-1}、自然土壌では 0.0～13.1 kg N ha^{-1} y^{-1}）にあり、土壌タイプ・気象・作物・圃場管理・土地形態など、様々な条件における測定事例が極めて不足している状況にある。1985 年以降では、土壌粒団から地域までさまざまなスケールにおける N_2O 生成を捉え、それらの知見を総合化しようという研究方向も生まれつつある。

第 3 章 土壌におけるガスフラックスの測定方法

第 1 節　はじめに

これまで用いられてきた土壌から大気へのガスフラックスの測定法は、大きく分けて3つの方法、すなわち、微気象的方法、チャンバー法、および拡散法がある。微気象的な方法では、広い面積（例えば圃場単位以上）からのガスフラックス測定に適しており、目的とするガスの大気中の濃度勾配、風速および温度などを高精度（N_2O では <1ppb）および高応答時間（>1Hz）で測定する必要がある（Denmead 1994）。これに対して、チャンバー法は、従来の微気象的方法と比較して操作が簡単であること、微気象的方法よりも 100 倍程度の小さいフラックスを検出できるという利点があり（Denmead 1994）、これまで多くの研究者によって使用されてきた（例えば、Ambus et al. 1993 など多数）。チャンバー法と拡散法の測定原理を図 3-1 に示す。チャンバー法は、土壌表面にチャンバー（通常 1m^2 以下）を被せ、チャンバー内の濃度変化から土壌から大気へのガスフラックスを計算する。拡散法によるガスフラックスは、土壌中のガス濃度勾配と土壌のガス拡散係数から、拡散式によって計算する。これは、一般に、土壌中のガスフラックスは主に拡散によって生じる（Baver 1956）ことに基づいている。土壌中の N_2O 濃度について、Rolsoton 1978 は、95%信頼区間は得られた N_2O 濃度平均値の 100%程度であると述べ、土壌中のガス濃度およびガス拡散係数の空間変動が大きいことが、フラックス計算の際に大きな誤差になる可能性を示した。しかしながら、拡散法によるガスフラックスは、土壌から大気へのガスフラックスに加えて、チャンバー法では測定できない土層中のガスフラックスを計算できるという利点がある。

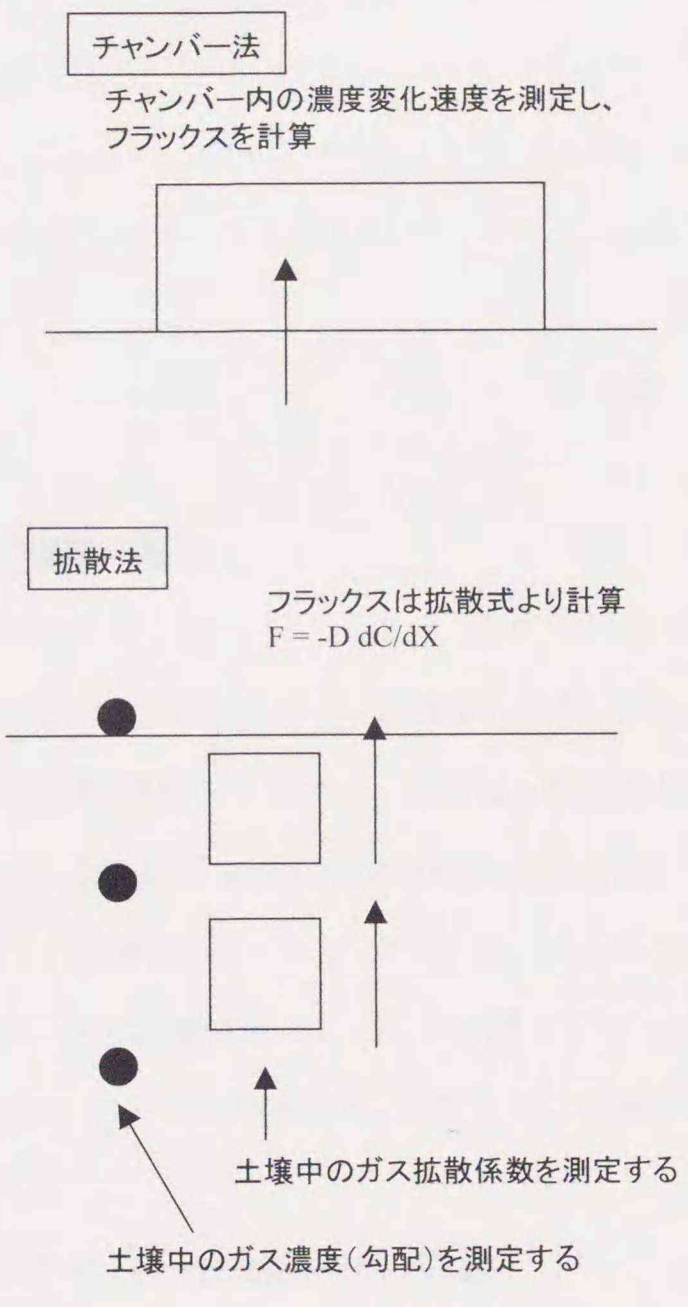


図3-1 ガスフラックス測定法の原理
上：チャンバー法　下：拡散法

これまで、チャンバー法と拡散法を比較検討した事例は少ない（Osozawa and Hasegawa 1995; 阪田ら 1994）。特に、土層中におけるガス濃度やフラックスを詳しく検討した事例は CO_2 では、De Jong and Schappert 1972; Osozawa and Hasegawa 1995; Pinol et al. 1995; 江口ら 1997、N_2O では Rolston 1978; Goodroad and Keeney 1985; Arah et al. 1991 に見られるが、CO_2 と N_2O を同時に詳細に比較した研究はない。

本研究では、土壌中における温室効果ガス動態を把握するために、土壌から大気へのフラックスを測定できるチャンバー法と、土層中のガスフラックスを計算できる拡散法のふたつの方法を用いることとした。そこで、本章では、このふたつの方法を用いて、定量的なガスフラックスの測定が可能であるかについて検討を行う。すなわち、土壌から大気への N_2O フラックスおよび CO_2 フラックスについて、チャンバー法と拡散法を用いて同時に測定・計算し、それらを比較することでふたつの方法を用いて定量的にガスフラックスの測定が可能であるかについて検討する。

第 2 節　材料と方法

(1)圃場の概要

1995 年、1996 年、および 1997 年の生育期において、北海道道央三笠市のタマネギ畑（43° 14'N, 141° 50'E）において調査を行った。圃場の面積は約 2ha であり、暗渠がおおよそ 80～100cm の深さに埋設されている。土壌は、腐植質灰色低地土；農耕地土壌分類委員会 1995（a fine, mesic, Mollic Fluvaquents; Soil Survey Staff 1990）である。土壌断面の理化学性を表 3-1～3-4 に示す。圃場管理について表 3-5 および 3-6 に示す。4 月下旬から 5 月上旬にタマネギ（*Allium cepa* L.）の苗を栽植密度 28、28、および 32（本 m^{-2}）で移植した。7 月下旬からタマネギ地上部の倒伏が生じ、8 月下旬に根切り、9 月中旬に収穫を行った。

(2)チャンバー法と拡散法の実施

計 27 回（1995 年 6～8 月に 12 回, 1996 年の 7～8 月に 7 回、1997 年 5～8 月に 8 回）の測定日において，圃場における測定およびサンプルの採取を行った。測定およびサンプルの採取は，その日の昼間の 5 時間以内にすべて終了したので，その間の日変動に起因する誤差は無視しうると考えた。また、圃場は平坦地であり、傾斜地に見られるような場所によるフラックスのトレンド（Ambus and Christensen 1995; Corre et al. 1996）はないと判断した。

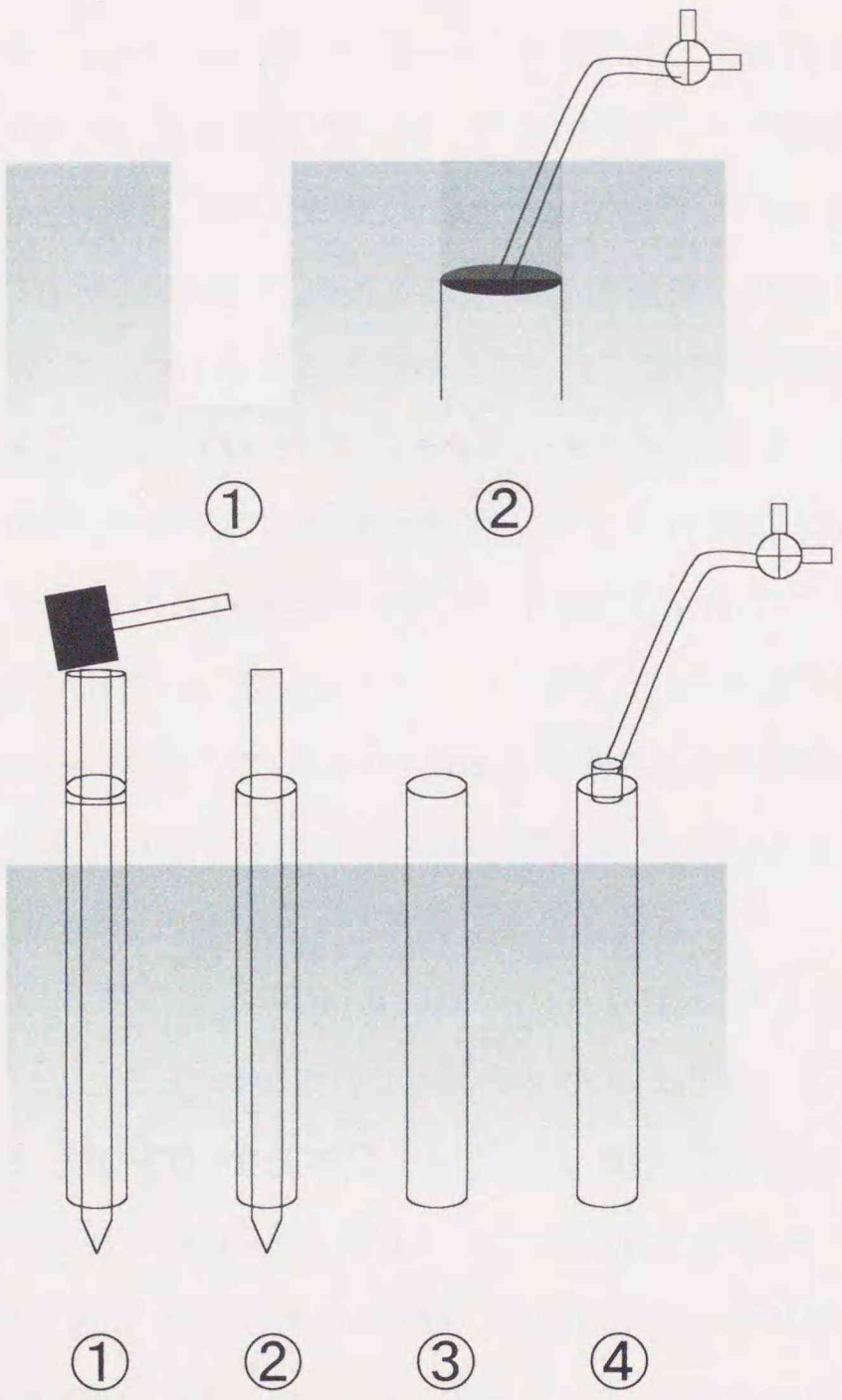


図3-2　土壌空気採取管の構造と設置方法
（上）土壌空気採取管にカップを用いた場合
①土壌を取り除く
②採取コックを取り付けたカップを入れ、土壌でふたをする
（下）土壌空気採取管にパイプを用いた場合
①パイプの先端が目的の深度になるようにハンマーで埋め込む
②ガイドを取り除く
③心棒を取り除く
④栓および採取コックを取り付ける

(3)チャンバー法

断熱性・遮光性に富むプラスチック素材を用いた密閉型チャンバー（底面積 11.7dm^2・体積 31dm^3）を用いた。このチャンバーにはガス採取口と温度センサーを取り付けた。測定日ごとに圃場内からランダムに 4 地点（4 反復）を選び測定を実施した。チャンバー内にタマネギの地上部 2 あるいは 3 体を含みながら、チャンバーを土壌に静置した。静置後、0 分および 15 分後，チャンバー内のガスを採取し、チャンバー内の温度を測定した。次式（八木 1997）を用いて、N_2O および CO_2 フラックスをを計算した。

$$F_C = \rho \times [V/A] \times (dC/dt) \times (273/T)$$
$$= \rho \times [V/A] \times [(C^{15} - C^0)/t] \times [(273 + 273)/(T^0 + T^{15})] \cdots (3\text{-}1)$$

ここで、F_C はチャンバー法による N_2O (CO_2) フラックス（g m^{-2} s^{-1}）、ρ はガスの密度（g m^{-3}）（CO_2、N_2O とも 1.98×10^3 g m^3：国立天文台 1999b）、dC/dt はチャンバー内のガス濃度変化速度（m^3 m^{-3} s^{-1}）、T はチャンバー内の気温（K）、V はチャンバーの体積（m^3）、A はチャンバーの底面積（m^2）、C^0 および C^{15} は、それぞれ 0 分後および 15 分後のチャンバー内の N_2O (CO_2) 濃度（m^3 m^{-3}）、t はチャンバー法の測定時間であり、ここでは 900（s）（15 分間）、T^0 および T^{15} はそれぞれ 0 分後および 15 分後のチャンバー内温度（K）である。フラックス 4 反復の平均値を、チャンバー法によるフラックスとした。

(4)拡散法

土壌空気採取管の構造および埋設の方法を図 3-2 に示す。1995 および 1996 年は、ガス採取

用チューブを取り付けた塩化ビニル製のカップ(直径 40 mm、高さ 40 mm)を深さ 5cm に埋設した(図 3-2 上)。1997 年では、ガス採取用チューブを取り付けた塩化ビニル製のチューブ(直径 12 mm)(遅沢 1997 を改変)を深さ 5cm に埋設した(図 3-2 下)。埋設地点は約 $2m^2$ の区画内においてランダムに選び、1995 年は 9 地点(9 反復)、1996 年および 1997 年は 10 地点(10 反復)に埋設した。1995 年および 1996 年は、各土壌空気採取管から約 50mL のガスを採取し、それぞれの N_2O および CO_2 濃度を分析した。1997 年では、各土壌空気採取管から一定量(約 10mL)を一つのテドラーバックにまとめて採取し、その N_2O 濃度を分析した。別に、土壌表面大気を 1 反復で採取し、その N_2O 濃度を分析した。土壌空気採取後に、深さ5cmに温度計を挿入し地温を測定した。測定日ごとに、圃場内のランダムに選んだ 3～6 地点(3～6 反復)から円筒コア(内径 5.0cm, 高さ 5.1cm)を用いて、深さ 0～5cm の不撹乱土壌を採取し、遅沢(1997)の方法に従い相対ガス拡散係数(D/D_0)を測定した。拡散式による N_2O および CO_2 フラックスは、以下の Fick の拡散式(Rolston 1986)を用いて計算した。すなわち、

$$F_D = -D\times[dC/dz] = (D/D_0)\times[D_0]\times[\rho\times(C_5-C_0)\times(273/T_5)/0.05]\cdots(3\text{-}2)$$

ここで, F_D は拡散法によるフラックス($g\ m^{-2}\ s^{-1}$), D は表層土壌のガス拡散係数($m^2\ s^{-1}$), dC/dz は N_2O(CO_2)濃度勾配($g\ m^{-3}\ m^{-1}$), D/D_0 は測定した表層土壌の相対ガス拡散係数(無次元)の平均値、$[D_0]$ は N_2O(CO_2)－空気相互拡散係数、ρ はガスの密度($g\ m^{-3}$)(CO_2、N_2O とも $1.98\times10^3\ g\ m^3$:国立天文台 1999b)、C_5 は深さ 5cm の N_2O(CO_2)濃度($m^3\ m^{-3}$)の平均値、C_0 は土壌表面大気の N_2O(CO_2)濃度($m^3\ m^{-3}$)、T_5 は深さ 5cm の地温(K)である。また、$[D_0]$ は次式で定義される。

$$D_S = [D_0]\times(273/T_5)^n\times(P/760)\cdots(3\text{-}3)$$

ここで、D_S は標準状態(273K、760mmHg)における N_2O(CO_2)－空気相互拡散係数($m^2\ s^{-1}$)(N_2O では 0.143×10^{-4}、CO_2 では、0.139×10^{-4};Pritchard and Currie 1982)、n は 1.79(Pritchard and Currie (1982))である。P は 760 とした。

(5)ガス濃度分析

採取したガスの N_2O 濃度測定は、ECD 検出器を備えたガスクロマトグラフ(島津製作所 GC-14A)を用いた。採取したガスの CO_2 濃度測定は、赤外線二酸化炭素分析計(富士電機 ZFP5)を用いて分析を行った。

第 3 節　結果

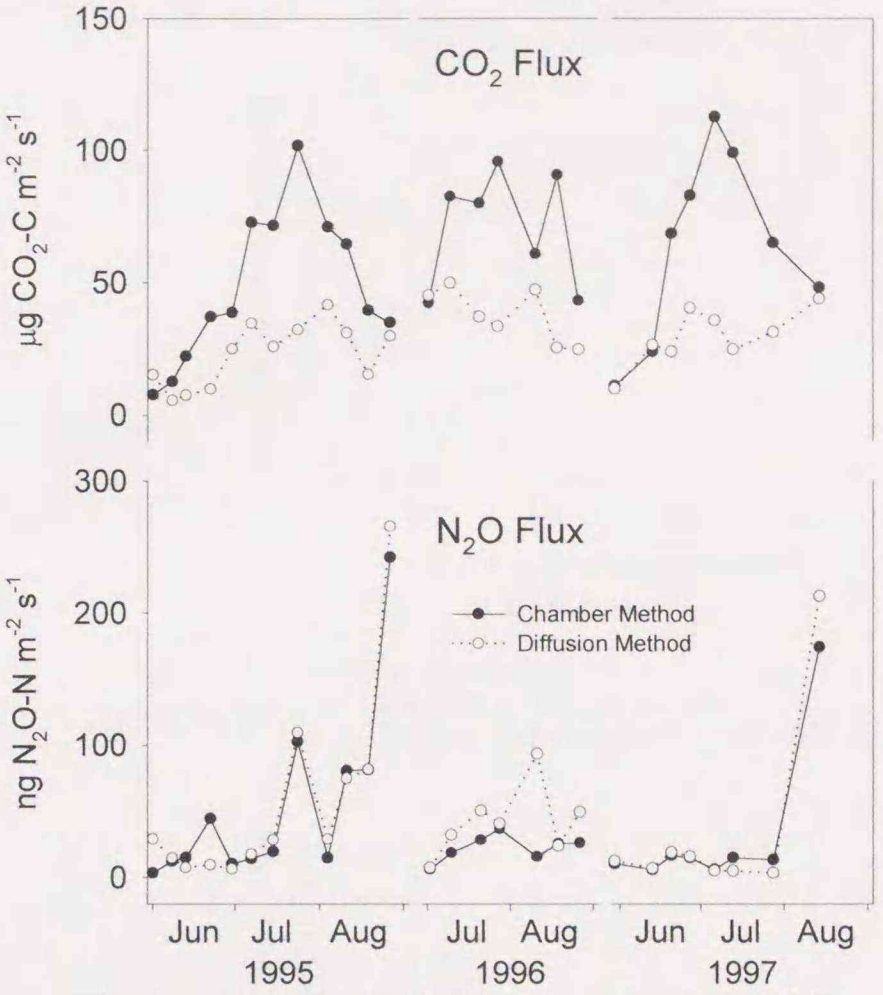


図3-3　N_2OフラックスおよびCO_2フラックスの推移

表 3-7 および 3-8 に、それぞれチャンバー法による N_2O フラックスおよび CO_2 フラックスの結果を示す。測定したフラックスの範囲は、N_2O フラックスでは 2.3～367（ng N m^{-2} s^{-1}）、CO_2 フラックスでは 2.3～146（μ g C m^{-2} s^{-1}）であった。それらの変動係数の範囲は、4～112%の範囲であった。表 3-9 に、深さ 5cm の土壌気相中および土壌表面大気の N_2O 濃度を示す。土壌気相中の N_2O 濃度は 0.38～21.3ppmv の範囲にあり、それらは土壌表面大気の N_2O 濃度よりも高かった。土壌気相中 N_2O 濃度の変動係数は 8～54%の範囲にあった。表 3-10 に、深さ 5cm の土壌気相中の CO_2 濃度とおよび土壌表面大気の CO_2 濃度を示す。土壌気相中の CO_2 濃度は 334～10800ppmv の範囲にあり、それらは土壌表面大気の CO_2 濃度よりも高かった。土壌気相中 CO_2 濃度の変動係数は 16～36%の範囲にあった。表 3-11 に深さ 0～5cm 土壌の D/D_0 を示す。D/D_0 の範囲は、0.002～0.241 であり、それらの変動係数は 7～71%の範囲であった。

図 3-3 に、チャンバー法と拡散法による N_2O フラックスおよび CO_2 フラックスの平均値の推移を示す。N_2O フラックスでは、両方法によるフラックスの推移はよく一致する傾向が認められた。これに対して、CO_2 フラックスでは、チャンバー法によるフラックスの方が高い傾向を示した。タマネギの地上部が小さかった 6 月上旬、および地上部の倒伏が生じた 8 月中旬では、ふたつの方法による

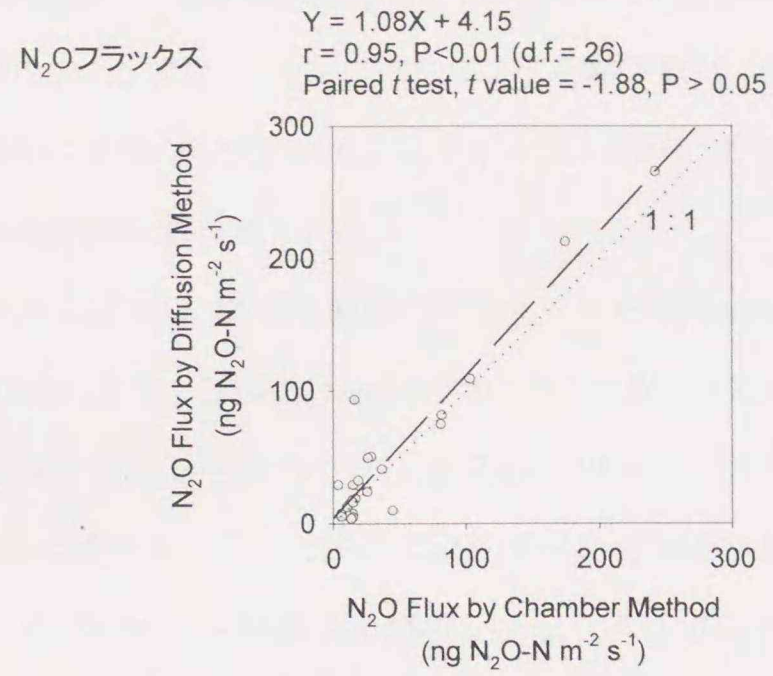


図3-4　N_2OフラックスおよびCO_2フラックスにおける
チャンバー法と拡散法の比較

CO_2 フラックスの差は小さかった。

図 3-4 に、チャンバー法と拡散法による N_2O フラックスおよび CO_2 フラックスの比較（平均値の散布図）を示す。N_2O および CO_2 フラックスにおいて、方法間には正の有意な相関が認められた。しかし、対にした t 検定の結果、CO_2 フラックスでは方法間に差が認められ、チャンバー法によるフラックスが有意に高かった。これに対し、N_2O フラックスでは、対にした t 検定の結果、方法間に差が認められなかった。

第 4 節　考察

測定したフラックスの値（表 3-7、3-8）は、既往の測定事例と同じ範囲にあった。すなわち、N_2O フラックスでは、2～1880（ng N m^{-2} s^{-1}）（Bouwman 1990b）、CO_2 フラックス（μ g C m^{-2} s^{-1}）では、4.6

～62.5（Bouwman 1990b）、～200（De Jong and Schappert 1972）、～140（Osozawa and Hasegawa 1995）の範囲に認められた。また、チャンバー法による変動係数は、Ambus et al. 1993 と類似していた。すなわち、彼らは 0.78 および 49dm^2 のチャンバーを用いて N_2O フラックスを測定しそれぞれ、77 および 40%の変動係数を得ている。

土壌中の N_2O および CO_2 濃度の変動（表 3-9、3-10）は、Dowdell and Smith 1974 および Rolston 1978、と類似していた。Dowdell and Smith 1974 は深さ 30cm の深さにおいて N_2O 濃度を測定し、1～10 倍程度の濃度差を認めている。Rolston 1978 は、深さ 5cm の N_2O 濃度について、反復間で 100%程度の濃度差の違いを認めている。De Jong and Schappert 1972 は深さ 5cm 中の CO_2 濃度を測定し、0～20%の変動係数を認めている。このように、チャンバー法および土壌中の N_2O・CO_2 濃度の変動係数はこれまで研究された事例と類似していた。

チャンバー法と拡散法による CO_2 フラックスの平均値は、タマネギの地上部が大きかった 7 月ではチャンバー法によるフラックスの方が高く（図 3-3）、測定期間を通してふたつの方法には有意差が認められた（図 3-4）。これは、チャンバー法による CO_2 フラックスの測定は、タマネギ地上部の呼吸と土壌から大気への CO_2 フラックスを同時に検出したためと考えられる。ゆえに、土壌から大気への CO_2 フラックスを測定する場合には、チャンバー内にタマネギの地上部を含まないことが必要である。これに対して、N_2O フラックスでは、ふたつの方法による推移はよく一致し（図 3-3）、方法間に有意差が認められなかったので（図 3-4）、チャンバー法と拡散法を用いて同じフラックスを測定することが可能であると判断した。

第 5 節　要約

本章では、ガスフラックスの測定法について、チャンバー法と拡散法の比較を行った。灰色低地土タマネギ畑において、両方法を用いて土壌から大気への CO_2 フラックスおよび N_2O フラックスを測定した。その結果、CO_2 フラックスでは、チャンバー法によるフラックスが拡散法によるフラックスより有意に高かった。これは、チャンバー内に含まれたタマネギの地上部の呼吸を検出したためと思われた。これに対し、N_2O フラックスで両方法によるフラックスに有意差が認められなかった。よって、チャンバー法と拡散法を用いて同じフラックスが測定可能であることを確認した。すなわち、両方法を用いて、土壌における温室効果ガスの動態をチャンバー法と拡散法のふたつの方法を用いて定量的に測定できると判断した。ただし、土壌から大気への CO_2 フラックスを測定する場合には、植生の地上部をチャンバー内に含まないことが必要である。次章以下では、両方法によって測定

したフラックスは同じのものとして扱うこととした。

表3-1　土壌断面調査の結果
(地点;北海道三笠市いちきしり　調査日;1996年10月21日　土地利用形態;タマネギ畑　母材;沖積土　土壌型;灰色低地土　地形;平坦地　天候;くもり)

層位	深さ cm	層界	粒径組成 砂 %	シルト %	粘土 %	土性	石礫	土色	構造	孔隙	コンシステンス 堅密度 山中式	砕易性	粘着性	可塑性	キュータン	湿り	根系	飽和透水係数* $m\ s^{-1}$
Ap_1	0～10	平坦明瞭	12.1	51.2	36.7	SiC	なし	7.5YR 3/2	膨軟で多孔質な数mmの粒団を一次構造とし、これが集合して1～6mmの二次構造を呈し、その発達程度は中～強	構造間孔隙富む	15	極砕易	中	強	なし	湿	細根5%	1.0×10^{-7}
Ap_2	10～33	平坦判然	11.3	50.9	37.8	SiC	なし	7.5YR 3/2 (90%) 7.5YR 4/6 (10%)	1～5cmの亜角塊状構造が中程度に発達し、その構造面のまわりに数mm程度の粒団が取り巻いている。この粒団は上の層で見られたものと同じではあるが、土層内ではっきりせず、断面から取り出してみると明瞭なペットとして判別できる。	構造間孔隙富む	17	砕易	中	強	なし	湿	細根5%	1.8×10^{-6}
Bg	33～64	平坦斬変	2.9	47.9	49.2	HC	なし	10YR 5/2 (基色) 7.5YR 6/5 (斑)	角塊状1～8cm、発達程度中～強	垂直方向ペッド間のきれつ 植物残渣によるペット内管状孔隙 (～2mm)	15	砕易	中	強	なし	湿	細根2%	4.6×10^{-6}
C	64～100+		6.1	56.3	37.6	SiC	なし	7.5YR 3~1/1	壁状		18					多湿	なし	2.2×10^{-4}

*Hayashi and Hatano 1999

表3-2　土壌の化学性
(地点;北海道三笠市いちきしり　採取日;1996年10月21日　土地利用形態;タマネギ畑　母材;沖積土　土壌型;灰色低地土)

層位	深さ cm	pH (H_2O 1:2.5)	pH (KCl 1:2.5)	EC(1:5) $\mu S\ cm^{-1}$	全炭素 %	全窒素 %	C/N ratio	CEC meq/100g	交換性K meq/100g	交換性Na meq/100g	交換性Ca meq/100g	交換性Mg meq/100g	交換性塩基合計 meq/100g
Ap_1	0～10	5.8	4.7	87.2	3.21	0.28	11.5	25.5	1.1	0.1	15.8	1.6	18.6
Ap_2	10～33	5.2	4.1	86.5	3.51	0.28	12.7	24.6	0.5	0.1	11.2	1.4	13.2
Bg	33～64	4.4	3.6	121	4.91	0.31	16.0	27.1	0.4	0.1	6.9	1.1	8.4
C	64～100+	4.7	3.7	88.8	7.66	0.44	17.4	33.1	0.4	0.2	5.9	3.6	10.1

表3-3　三笠土壌の物理性(100mLコアによる)

深さ cm	容積重 $Mg\ m^{-3}$	真比重 $Mg\ m^{-3}$	固相率 $m^3\ m^{-3}$	飽和透水係数 $cm\ s^{-1}$
5-10cm	1.15	2.62	0.44	9.75×10^{-5}
15-20cm	1.10	2.58	0.43	4.44×10^{-5}
23-28cm	1.03	2.63	0.39	8.97×10^{-5}
32-37cm	0.90	2.60	0.35	4.68×10^{-4}
43-48cm	0.76	2.60	0.29	2.76×10^{-3}
54-59cm	0.53	2.40	0.22	2.13×10^{-3}

表3-4　三笠土壌の物理性(100mLコアによる)

深さ	液相率 ($m^3\ m^{-3}$)						気相率 ($m^3\ m^{-3}$)						相対ガス拡散係数 (D/D_0)					
cm	pF=0.0	pF=0.5	pF=1.0	pF=1.5	pF=2.0	pF=2.5	pF=0.0	pF=0.5	pF=1.0	pF=1.5	pF=2.0	pF=2.5	pF=0.0	pF=0.5	pF=1.0	pF=1.5	pF=2.0	pF=2.5
5-10cm	0.50	0.50	0.50	0.49	0.47	0.46	0.06	0.06	0.06	0.07	0.09	0.10	0.00000	0.00150	0.00154	0.00203	0.00312	0.00468
15-20cm	0.51	0.51	0.50	0.50	0.49	0.47	0.06	0.06	0.07	0.07	0.08	0.10	0.00000	0.00150	0.00171	0.00187	0.00225	0.00244
23-28cm	0.57	0.57	0.57	0.56	0.55	0.54	0.04	0.04	0.04	0.05	0.06	0.07	0.00000	0.00147	0.00256	0.00203	0.00339	0.00498
32-37cm	0.61	0.60	0.60	0.59	0.58	0.56	0.04	0.05	0.05	0.06	0.07	0.09	0.00000	0.00150	0.00223	0.00238	0.00316	0.00510
43-48cm	0.66	0.65	0.64	0.63	0.62	0.60	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.11	0.00000	0.00185	0.00240	0.00362	0.00424	0.00737
54-59cm	0.76	0.74	0.74	0.73	0.71	0.68	0.02	0.04	0.04	0.05	0.07	0.10	0.00000	0.00180	0.00239	0.00274	0.00517	0.01568

pF=0.0は-0.098(kPa)、pF=0.5は-0.31(kPa)、pF=1.0は0.98(kPa)、pF=1.5は-3.1(kPa)、pF=2.0は-9.8(kPa)、pF=2.5は-31(kPa)に相当する

表3-5　三笠圃場管理とタマネギの状況

年	月	日	農作業等の内容
1995	4	26	施肥
	5	8	たまねぎ定植
	5	19	土壌空気採取管設置
	8	4	たまねぎ地上部倒伏多数
	8	11	たまねぎ地上部倒伏率約6割
	8	19	たまねぎ地上部倒伏率約10割
	8	28～30	根切り
	9	7～16	たまねぎ収穫
	9	17～24	石灰・骨粉まき、土ならし
	10	14～28	秋おこし
1996	4	26～28	施肥
	5	1～13	たまねぎ定植
	6	21	土壌空気採取管設置
	8	11	たまねぎ地上部倒伏多数
	8	19	たまねぎ地上部倒伏率約9割
	8	28～2	根切り
	9	17～26	たまねぎ収穫
	9	27～1	石灰・骨粉まき、土ならし
1997	4	20	施肥
	4	27～30	たまねぎ定植
	7	28	たまねぎ地上部倒伏率約15%
	8	14	たまねぎ地上部倒伏率約100%
	8	31	根切り終了している
	9	13	収穫作業が終了している
	9	28	石灰散布と表面の引っかき終了

表3-6　圃場面積・栽植密度・品種、施肥

年次	1995年	1996年	1997年
面積(ha)	2.05	2.05	2.05
栽植密度(個体/10a)	28000	28250	31900
品種		北もみじH86	
化成肥料と硫安による施肥量(kg ha^{-1})			
N	266	309	276
NH_4-N	228	>215	162
NH_4-NのうちASU*入り	80	80	162
NO_3-N	38	>40	38
尿素		40	残りは$CaCN_2$
P_2O_5	420	350	>314
K_2O	240	282	>257
MgO	66	75	>57
石灰	977	1463	2000
骨粉	488		1000

ASU*:硝化抑制材

表3-7　チャンバー法によるN_2O フラックス（単位は、ng N m^{-2} s^{-1}）

測定日（年-月-日）	最大値	平均値	最小値	標準偏差	変動係数 %	標本数
1995-06-01	5.0	3.6	2.3	1.2	32	4
1995-06-08	17.1	12.4	5.8	5.4	44	4
1995-06-13	40.0	15.0	3.6	16.8	112	4
1995-06-22	107.9	44.7	2.9	47.4	106	4
1995-06-30	20.5	10.5	2.4	7.5	71	4
1995-07-07	23.2	14.3	5.4	7.5	53	4
1995-07-15	33.7	19.7	14.0	9.4	48	4
1995-07-24	205.5	102.9	26.1	81.8	80	4
1995-08-04	22.8	14.8	8.9	7.2	49	3
1995-08-11	168.3	80.9	38.5	61.0	75	4
1995-08-19	124.0	81.7	28.1	41.1	50	4
1995-08-27	368.7	242.3	140.2	105.9	44	4
1996-07-02	8.1	6.2	3.7	1.8	29	4
1996-07-10	21.3	18.8	17.5	1.8	10	4
1996-07-21	32.8	28.5	20.3	5.8	20	4
1996-07-28	47.2	36.8	29.6	7.4	20	4
1996-08-11	23.9	15.9	10.5	5.8	37	4
1996-08-19	42.0	25.7	16.5	11.3	44	4
1996-08-27	44.1	26.2	16.6	12.5	48	4
1997-05-30	18.4	10.4	2.9	7.8	75	4
1997-06-06	11.7	6.1	3.0	4.1	67	4
1997-06-13	8.7	6.0	4.4	1.9	33	4
1997-06-20	23.6	16.7	9.8	6.5	39	4
1997-06-27	17.6	14.9	12.2	2.3	15	4
1997-07-06	9.2	6.2	3.9	2.2	36	4
1997-07-13	23.2	15.0	7.8	6.6	44	4
1997-07-28	18.7	13.5	7.5	4.7	35	4
1997-08-14	342.3	174.4	40.1	133.2	76	4

表3-8　チャンバー法によるCO_2 フラックス（土壌呼吸）（単位は、μ g C m^{-2} s^{-1}）

測定日（年-月-日）	最大値	平均値	最小値	標準偏差	変動係数 %	標本数
1995-06-01	12.0	7.7	4.0	3.9	51	4
1995-06-08	15.5	12.7	10.3	2.5	20	4
1995-06-13	39.2	22.2	6.2	13.5	61	4
1995-06-22	62.9	37.1	17.1	20.2	55	4
1995-06-30	49.1	38.8	23.5	12.4	32	4
1995-07-07	76.3	73.0	69.6	3.3	5	4
1995-07-15	87.6	71.8	55.9	13.1	18	4
1995-07-24	145.9	102.0	72.7	32.8	32	4
1995-08-04	95.6	71.2	54.6	21.6	30	3
1995-08-11	93.3	64.8	34.3	24.1	37	4
1995-08-19	56.0	39.7	27.8	11.8	30	4
1995-08-27	42.1	35.1	30.4	5.1	15	4
1996-07-02	54.2	42.6	31.5	9.3	22	4
1996-07-10	93.6	82.8	67.8	10.9	13	4
1996-07-21	93.2	80.3	71.8	9.2	11	4
1996-07-28	114.8	96.0	77.0	18.5	19	4
1996-08-11	67.9	61.1	51.0	7.2	12	4
1996-08-19	107.9	91.0	59.4	22.3	25	4
1996-08-27	59.5	43.5	29.0	12.5	29	4
1997-05-30	16.1	11.2	4.5	4.9	44	4
1997-06-06	16.8	11.4	2.3	6.4	57	4
1997-06-13	25.2	24.2	23.1	1.0	4	4
1997-06-20	81.5	68.8	58.3	9.6	14	4
1997-06-27	87.7	83.2	78.8	4.5	5	4
1997-07-06	128.5	113.0	77.1	24.4	22	4
1997-07-13	121.8	99.4	46.7	35.3	36	4
1997-07-28	87.3	65.4	45.0	17.3	26	4
1997-08-14	62.0	48.4	30.2	14.0	29	4

表3-9 深さ5cmの土壌気相中、および土壌表面大気のN_2O濃度（単位はppmv）

測定日	土壌表面大気	深さ5cmの土壌空気採取管					
（年-月-日）		最大値	平均値	最小値	標準偏差	変動係数%	標本数
1995-06-01	0.38	2.00	0.93	0.55	0.50	54	8
1995-06-08	0.37	1.12	0.78	0.51	0.22	28	9
1995-06-13	0.37	0.86	0.60	0.38	0.14	24	9
1995-06-22	0.38	0.92	0.61	0.43	0.16	26	9
1995-06-30	0.37	0.60	0.52	0.48	0.04	8	9
1995-07-07	0.37	1.10	0.78	0.49	0.16	21	9
1995-07-15	0.37	1.96	1.25	0.83	0.34	27	9
1995-07-24	0.38	5.71	2.81	1.78	1.23	44	9
1995-08-04	0.38	1.41	0.92	0.71	0.24	26	9
1995-08-11	0.38	4.90	3.43	2.28	0.93	27	9
1995-08-19	0.38	5.20	3.90	2.61	0.97	25	9
1995-08-27	0.40	11.45	7.57	6.17	1.91	25	9
1996-07-02	0.39	0.63	0.55	0.49	0.04	8	10
1996-07-10	0.39	1.69	1.20	0.94	0.21	18	10
1996-07-21	0.40	2.02	1.50	1.02	0.38	26	10
1996-07-28	0.41	1.98	1.55	1.08	0.32	21	10
1996-08-11	0.39	2.97	2.15	1.51	0.50	23	10
1996-08-19	0.39	1.94	1.39	0.94	0.37	27	10
1996-08-27	0.38	2.63	1.63	0.83	0.66	41	10
1997-05-19	0.40		1.15				1
1997-05-30	0.40		0.67				1
1997-06-13	0.40		0.62				1
1997-06-20	0.41		0.92				1
1997-06-27	0.40		0.75				1
1997-07-06	0.33		0.47				1
1997-07-13	0.32		0.43				1
1997-07-28	0.32		0.38				1
1997-08-14	0.32		21.3				1

表3-10 深さ5cmの土壌気相中、および土壌表面大気のCO_2濃度（単位はppmv）

測定日	土壌表面大気	深さ5cmの土壌空気採取管					
（年-月-日）		最大値	平均値	最小値	標準偏差	変動係数%	標本数
1995-06-01	385	1750	1073	805	291	27	8
1995-06-08	368	1040	733	368	232	32	9
1995-06-13	365	1142	909	512	214	24	9
1995-06-22	365	1300	938	334	314	33	9
1995-06-30	359	2190	1754	1329	274	16	9
1995-07-07	359	3032	2313	1667	390	17	9
1995-07-15	344	3022	2271	1762	432	19	9
1995-07-24	357	3623	2085	1313	689	33	9
1995-08-04	365	3226	2240	1649	554	25	9
1995-08-11	357	4460	3408	2633	537	16	9
1995-08-19	353	2574	1956	1440	413	21	9
1995-08-27	355	4124	2299	1625	822	36	9
1996-07-02	382	3774	2667	1884	618	23	10
1996-07-10	346	5880	3371	2247	1060	31	10
1996-07-21	360	3003	2308	1638	484	21	10
1996-07-28	387	3393	2640	1092	714	27	10
1996-08-11	359	3404	2500	1769	562	22	10
1996-08-19	346	3864	2920	1876	678	23	10
1996-08-27	349	2644	1851	1203	497	27	10
1997-05-19	350		1390				1
1997-05-30	350		870				1
1997-06-13	350		2310				1
1997-06-20	374		1950				1
1997-06-27	395		2530				1
1997-07-06	345		2780				1
1997-07-13	454		1830				1
1997-07-28	353		1570				1
1997-08-14	379		10820				1

表3-11 深さ0～5cmの相対ガス拡散係数(D/D_0)

測定日（年-月-日）	1995年1月1日からの日数	最大値	平均値	最小値	標準偏差	変動係数%	標本数
1995-06-01	152	0.237	0.188	0.128	0.038	20	6
1995-06-08	159	0.186	0.128	0.069	0.042	32	5
1995-06-13	164	0.173	0.115	0.048	0.056	48	6
1995-06-22	173	0.198	0.146	0.091	0.050	34	6
1995-06-30	181	0.196	0.153	0.106	0.034	22	6
1995-07-07	188	0.190	0.151	0.109	0.033	22	6
1995-07-15	196	0.175	0.114	0.025	0.057	50	6
1995-07-24	205	0.241	0.157	0.076	0.056	36	6
1995-08-04	216	0.226	0.186	0.118	0.041	22	6
1995-08-11	223	0.157	0.087	0.002	0.062	71	6
1995-08-19	231	0.132	0.081	0.003	0.060	74	6
1995-08-27	239	0.188	0.129	0.030	0.058	45	6
1996-07-02	549	0.181	0.141	0.092	0.037	27	6
1996-07-10	557	0.171	0.116	0.054	0.051	44	6
1996-07-21	568	0.194	0.133	0.042	0.060	45	6
1996-07-28	575	0.182	0.104	0.003	0.064	62	6
1996-08-11	589	0.216	0.156	0.048	0.060	39	6
1996-08-19	597	0.102	0.070	0.033	0.026	37	6
1996-08-27	605	0.209	0.115	0.023	0.073	63	6
1997-05-30	881	0.231	0.177	0.121	0.039	22	6
1997-06-13	895	0.188	0.142	0.086	0.042	30	6
1997-06-20	902	0.229	0.173	0.095	0.048	28	6
1997-06-27	909	0.215	0.160	0.119	0.040	25	6
1997-07-06	918	0.177	0.135	0.091	0.043	32	3
1997-07-13	925	0.194	0.140	0.112	0.047	33	3
1997-07-28	940	0.182	0.172	0.159	0.012	7	3
1997-08-14	957	0.041	0.034	0.027	0.007	21	3

第 4 章 シベリアタイガにおける土壌呼吸および N_2O・CH_4 フラックス

第 1 節　はじめに

森林土壌生態系における炭素循環は、植物の光合成および呼吸、リターフォール、および土壌呼吸から構成される。土壌呼吸は、土壌から大気への CO_2 の放出であり、土壌呼吸は、根呼吸および土壌有機物分解（土壌微生物の呼吸および土壌動物の呼吸）で構成される。よって、土壌呼吸はその生態系の生産性や栄養性を反映する（Lieth and Ouellette 1962: Raich and Schlesinger 1992; Singer and Munns 1999）。

Nakane (1980)は 3 つの湿性の原生林において、根呼吸およびリターの分解は土壌呼吸のそれぞれ 50%および 25%に相当すると見積った。Nakane (1983)は、土壌温度と土壌水分が原生林のそれと等しくなるように制御された伐採林と原生林の両地点ににおいて土壌呼吸を測定した結果、根呼吸は土壌呼吸の 50%に相当すると見積った。Edwards et al. (1989)は oak が優勢した 5 つの森林生態系で根呼吸は土壌呼吸の 43%から 78%に相当すると見積った。Holt et al. (1990)は、オーストラリアの半乾燥の森林で、土壌呼吸の約 40%が根呼吸であることを示した。江口ら (1997)は、北海道の広葉樹森林において土壌呼吸および林冠の CO_2 濃度分布を測定した。さらに、土壌微生物および動物の呼吸を培養法によって測定した。林冠の CO_2 濃度分布の結果から、土壌呼吸の 69%が、再び樹木によって吸収され、土壌呼吸の 70%が根呼吸で生じていたと見積った。この江口ら (1997)の見積もりは、根呼吸のほとんどは、再び樹木によって吸収されることを示唆している。以上の研究事例は、根呼吸は土壌呼吸にに大きく寄与しており、森林土壌生態系の炭素循環に重要な役割を担っていることを示している。

本章の研究地であるシベリアタイガが位置するロシアの北方林ー は、陸上生態系の炭素蓄積に重要な位置を占めている（Kolchugina and Vinson 1993; IIASA 1997）が、地球温暖化によってその炭素蓄積量の変化が地球全体の炭素循環に与える影響が懸念される地帯の一つとされる（Goldammer and Furyaev 1996）。加えて、この東シベリア・極東シベリアでは、年間降水量が 300mm 程度と少なく、春期の少降水量と人為による森林火災が頻発している（Valendik 1996）。この燃焼によって CO_2 が大気中に放出し（Dixon and Krankina 1993）、森林火災はタイガ生態系の森林再生（Matveev and Usoltzev 1996）に大きな影響を与えている。また、温室効果ガスのひとつである CO_2 に対して、森林火災は森林をシンクからソースに変化させる可能性がある（Auclair and Carter 1993; Kurz and Apps 1995）ことが知られている。さらに、本研究地のシベリアタイガは永久

凍土地帯に位置するため、その破壊は地球規模の気候システム・炭素循環において極めて重要な問題であるとされている(福田・高橋 1999)。

このように、シベリアタイガでは、地球温暖化および森林火災による炭素循環が極めて重要であるが、東シベリアにおける土壌呼吸の測定事例は極めて不足しており(Raich and Schlesinger 1992)、火災前後における土壌呼吸の比較は行われていない。森林火災によって、土壌の物理性、化学性、および生物性は変化し(Rouse 1976; Bääth 1980; Lucarotti 1980; Moore 1980; Pietikäinen and Fritze 1995)、土壌呼吸を変化させると思われる。さらに、火災による樹木の損傷あるいは枯死は根呼吸を減少させ、それは土壌呼吸を減少させるだろう。また、林冠の消滅は、土壌呼吸によって放出した CO_2 の樹木による再吸収も減少させると予想される。さらに、火災後の森林再生は、その地点の根および根呼吸を増加させ、土壌呼吸を増加させる可能性がある。しかしながら、東シベリアにおける土壌呼吸の測定事例は極めて不足しており(Raich and Schlesinger 1992)、火災前後における土壌呼吸の比較は行われていない。また、一般的に、通気された乾燥した土壌は、大気 CH_4 を吸収するシンクとして機能し(Schütz et al. 1990)、熱帯や温帯では自然森林の土壌は大気中に N_2O を放出するソースとして機能している(Bouwman 1990b; Watson et al. 1992)ことが知られている。しかしながら、シベリアタイガを含む北方林において、これらの CH_4 および N_2O フラックスの測定事例は不足している(Zelenev 1996)。

そこで、本章では、シベリアタイガ生態系の異なる森林火災履歴を持つカラマツ林において、森林火災が土壌の理化学性および土壌呼吸、および N_2O・CH_4 フラックスに与える影響を調べることを目的とした。

第 2 節　調査地と調査方法

(1)調査地

1997 年の 8 月上旬および 1998 年および 1999 年の 7 月下旬および 8 月上旬、ロシア連邦サハ共和国ヤクーツク市近郊において調査を行った。ヤクーツク市(62°05'N 129°45'E)の年平均気温は–10.0(℃)であり、1 月(最寒月)および 7 月(最暖月)の平均気温はそれぞれ–41℃および +18.7℃である。年平均降水量は 237(mm)である(国立天文台 1999a)。調査地点はヤクーツク市の北西約 40km に位置し、平坦地であり、標高は 220～230m にある。調査地点の概要を表 4-1 に示す。また、表 4-2 には、調査項目およびその実施年を示す。調査地点は全部で 8 地点あるが、そのうち 5 地点が Kenkeme(地名)に位置し、3 地点が Neleger(地名)に位置する。土壌は、砂質

表4-1　調査地点の概要

地点名	地名	位置	地点概要				
			土壌	火災履歴	植生など	カラマツについて	林床植生および草本類の乾物重
Cont	Kenkeme	62°13'N 129°10'E	砂質	なし	カラマツ(*Larix cajanderi*)林、林床植生はコケモモ(*Vaccinium vitis-idaea*)が優占	樹齢～約200年・樹木密度:2,235本/ha・平均樹高:8.97m・地上部のバイオマス量:124Mg/ha	130(g/m2) (1997年)
W96	Kenkeme	62°13'N 129°10'E	砂質	1996年に弱い火災	カラマツ林(*Larix cajanderi*)にアカマツ(pine)が混じっている。林床植生はほとんどなし		
S92	Kenkeme	62°13'N 129°10'E	砂質	1992年に強い火災	元カラマツ林、カラマツはすべて焼失し、コケ類(*Marchantia polymorpha*)や草本(*Chamaenerion angustifolium*)が侵入		67(g/m2) (1997年)
S73	Kenkeme	62°13'N 129°10'E	砂質	1973年に強い火災	再生したカラマツ(*Larix cajanderi*)林	樹齢～22年・樹木密度:10,000本/ha・平均樹高:4.68m・地上部のバイオマス量:16.2Mg/ha	データなし
Cont-2	Neleger	62°18'N 129°30'E	シルト質	なし	カラマツ(*Larix cajanderi*)林	樹齢～約200年・樹木密度:2,104本/ha・平均樹高:8.15m・地上部のバイオマス量:99.8Mg/ha	309(g/m2) (1997年)
S92-2	Kenkeme	62°12'N 129°06'E	シルト質	1992年に強い火災	元カラマツ林、カラマツはすべて焼失し、コケ類(*Marchantia polymorpha*)や草本(*Chamaenerion angustifolium*)が侵入		75(g/m2) (1997年)
G	Neleger	62°18'N 129°30'E	シルト質	なし	草地;草本類*Artemisia sp*.、*Potentilla anserina*,、*Vicia cracca*が優勢		162(g/m2) (1997年) 207(g/m2) (1999年)
W	Neleger	62°18'N 129°30'E	シルト質	なし	草本類;湿地水際(W_{+2}:地下水位9cm、W_{+1}:地下水位5cm、W_0:地下水位0cm、W_{-1}:地下水位-4cm(湛水)、W_{-2}:地下水位-8cm(湛水))優占植生は、*Carex visicaria*、*Heleocharis fennica*、*Calamagrostis langsdorffii*、*Inula britannica*、および*Potentilla anserina*		320(g/m2) (1999年)

地点W96、Cont、およびS92は、この順にほぼ一直線上にあり、W96からS92までの距離はおよそ100m
地点Contと地点S73は、約600m離れている
地点Cont-2、G、W_{+2}、W_{+1}、W_0、W_{-1}、およびW_{-2}は、この順にほぼ一直線上にあり、
Cont-2からWまでの距離はおよそ150m

あるいはシルト質のポドゾル性土(Soil Survey Staff, 1990)である。以下、各地点について述べる。

砂質およびシルト質土壌に立地する成熟したカラマツ(*Larix cajanderi*)林(ContおよびCont-2)では、林床は数 cm のリター層が存在し、林床の優占植生はコケモモ(*Vaccinium vitis-idaea*)であった。樹木密度(本 ha^{-1})はそれぞれ 2235 および 2104、平均樹高さ(m)はそれぞれ 8.97 および 8.15、地上部のバイオマス量(Mg ha^{-1})はそれぞれ 124 および 99.8 であった。林床植生の乾物重はそれぞれ 130 および 309(g m^{-2})であった。両地点の植生調査の詳細は、Yajima et al. (1998)に

表4-2 調査項目とその実施年

地点名	調査実施年			
	土壌断面調査	土壌呼吸	N_2O フラックス	CH_4 フラックス
Cont	1997	1997・1998・1999	1998・1999	1998
W96	1997	1997・1998・1999	1998・1999	1998
S92	1997	1997・1998・1999	1998・1999	1998
S73	1998	・1998・1999	1998・1999	1998
Cont-2	1997	1997・ ・1999	・1999	
S92-2	1997	1997・ ・		
G	1997	1997・ ・1999	・1999	
W		・ ・1999	・1999	1999

記載されている。土壌断面記載を表 4-3 および表 4-7 に示す。両地点において F/H 層が認められ、深さ約 100cm に永久凍土が認められた。

弱い森林火災を 1996 年に受けた地点(地点名 W96)の土壌断面記載を表 4-4 に示す。この地点は地点 Cont と隣接しているが、永久凍土が融解し地下水面が認められた。リター層とと林床植生が焼失していたが、F/H 層は認められた。

表4-3 地点Contの土壌断面調査の結果

地点	深さ cm	層位	土性	石レキ	土色	構造	孔隙	キュータン	硬度 mm	根 Total	根 >20mm	根 2-20mm	根 <2mm	含水率 %	容積重 Mg/m3	固相率 %	液相率 %	気相率 %
Cont	-7.5～-4.5	L			7.5YR7/8									19.4	0.00663	0	0	100
Cont	-4.5～0	FH	L	なし	7.5YR3/4	単粒状	多孔質		13	20%	1	7	33	33.1	0.0632	2	3	94
Cont	0～4	E	S	なし	7.5YR6/2	単粒状	多孔質		15	5%		5	22	7.44	1.25	47	10	43
Cont	4～23.5	B_2	S	なし	7.5YR5/4	単粒状	多孔質		16	2%		2	24	4.43	1.63	62	8	31
Cont	23.5～56.5	B_3	S	なし	10YR5/4	単粒状	多孔質		15	2%		3	34	7.18	1.74	66	13	21
Cont	56.5～100.5+	C	S	なし	2.5YR4/4	単粒状	多孔質		17	なし				8.49	1.85	70	17	13
Cont	100.5	凍結深度																

表4-4 地点W96の土壌断面調査の結果

地点	深さ cm	層位	土性	石レキ	土色	構造	孔隙	キュータン	硬度 mm	根 Total	根 >20mm	根 2-20mm	根 <2mm	含水率 %	容積重 Mg/m3	固相率 %	液相率 %	気相率 %
W96	-2～0	FH	LS	なし	7.5YR1.7/1	単粒状	多孔質									(A1 and A2)		
W96	0～10	E	S	なし	7.5YR7/1	単粒状	多孔質		9	10%	5	7	35	13.1	0.98	37	15	48
																(B21 and B22)		
W96	10～17.5	B_{21}	S	なし	7.5YR5/8	単粒状	多孔質		13					10.6	1.19	45	14	41
W96	17.5～38	B_{22}	S	なし	7.5YR6/4	単粒状	多孔質		11	3%		2	35	6.35	1.64	62	11	27
W96	38～48	B_3	S	なし	10YR6/3	単粒状	多孔質		12	<1%				7.57	1.7	64	14	22
W96	48～123+	C	FS	なし	10YR5/3.5	単粒状	多孔質		13	なし				12.7	1.79	68	26	6
W96	92	地下水位																

表4-5 地点S92の土壌断面調査の結果

地点	深さ cm	層位	土性	石レキ	土色	構造	孔隙	キュータン	硬度 mm	根 Total	根 >20mm	根 2-20mm	根 <2mm	含水率 %	容積重 Mg/m3	固相率 %	液相率 %	気相率 %
S92	-1～0	コケ														(O and A1)		
S92	0～3.5	A_{11}	LS	なし	7.5YR1.7/1	単粒状	多孔質		4	40%				34.3	0.3	11	16	73
S92	3.5～14	A_{12}	S	なし	10YR4/1	単粒状	多孔質		9	20%				11.9	1.35	51	18	31
S92	14～28	AB	S	なし	10YR5/2	単粒状	多孔質		14	10%				6.86	1.68	63	12	24
S92	28～31	B_2	S	なし	7YR6/6	単粒状	多孔質		13	2%				8.09	1.73	65	15	19
S92	31～57	B_3	S	なし	10YR7/3	単粒状	多孔質		14	<1%				11.4	1.75	66	23	11
S92	57～180+	C	S	なし	10YR6/4	単粒状	多孔質		11	なし				13.4	1.71	65	26	9
S92	105	地下水位																

1992 年に強い火災を受けカラマツが焼失し、コケ類(*Marchantia polymorpha*)や草本(*Chamaenerion angustifolium* (*Epilobium angustifolium*))が侵入したふたつの地点(S92 および S92-2)の土壌断面記載を表 4-5 および 4-8 に示す。F/H および E(A_2)層は認められなかった。地点 S92 は地点 Cont と隣接しているが、永久凍土が融解し地下水面が認められた。地点 S92-2 では、地下水面は認められず、深さ 170cm 以深に永久凍土が認められた。

1973 年に強い火災を受けその後カラマツ(*Larix cajanderi*)林が再生した地点 S73 では、カラマツの樹齢は 22 年以下であった。林床は数 cm のリターが認められ、林床植生としてシダ類

表4-6　地点S73の土壌断面調査の結果

地点	深さ cm	層位	土性	石レキ	土色	構造	孔隙	キュータン	硬度 mm	根 Total	根 >20mm	根 2-20mm	根 <2mm	含水率 %	容積重 Mg/m3	固相率 %	液相率 %	気相率 %
S73	-6～4	L		なし	10YR6/4			Al試薬(-)										
S73	-4～0	FH	S	なし	7.5YR2/1		多孔質	Al試薬(-)	8(5cm)									
S73	0～7	AB	S	なし	7.5YR3/2		多孔質	Al試薬(-)	12(10cm)					7.60(A+AB)	0.59(A+AB)	22	5	73
S73	7～19	E	S	なし	10YR6/3		多孔質	Al試薬(-)	15(20cm)					1.74	1.57	59	3	38
S73	19～34	B_2h	S	3cm大、極まれ	7.5YR4/1 5YR3/6(斑鉄) 10YR5/4(白い部分)		多孔質	Al試薬(+)	11(30cm)					3.02(20-25),6.53(25-30)	1.64(20-25),1.70(25-30)	63	8	29
S73	34～44	B_2ir	S	なし	10YR6/4 10YR5/6(斑鉄)		多孔質	Al試薬(+-)	11(40,50cm)					6.27	1.76	66	12	22
S73	44～84	B_2irg	S	なし	7.5YR4/6 10YR6/4(斑鉄)		多孔質	Al試薬(-)	10(70cm)					8.20(60-70),10.45(80-90)	1.78(60-70),1.87(80-90)	69	19	12
S73	84～94	B_3	S	なし	10YR5/4 7.5YR4/6		多孔質	Al試薬(-)	12(90cm)									
S73	94	凍結深度							32(frozen)									

表4-7　地点Cont-2の土壌断面調査の結果

地点	深さ cm	層位	土性	石レキ	土色	構造	孔隙	キュータン	硬度 mm	根 Total	根 >20mm	根 2-20mm	根 <2mm	含水率 %	容積重 Mg/m3	固相率 %	液相率 %	気相率 %
Cont-2	-10～-7	L			10YR6/6									14.3	0.0614	2	1	97
Cont-2	-7～0	FH			7.5YR3/4				3	20%				26.5	0.165	6	6	88
Cont-2	0～2	E_1	SiCL	なし	7.5YR7/1	板状(極弱)	多孔質		12	7%				11	1.12	42	14	44
Cont-2	2～24.5	E_2	SiCL	なし	7.5YR6/2 10YR2/2(有機物斑)	板状(中)1.5mm、粒状(弱)1.5mm	針状含む	表面に有機物キュータン	22	2%				7.1	1.51	57	12	31
Cont-2	24.5～55.5	B_2h	SiCL	なし	7.5YR4/4 10YR2/1(有機物斑) 7.5YR2/3(キュータン)	柱状(中)50～100mm、板状(中)1～3mm、角塊(強)3～5mm	割れ目0.5mm	表面に有機物キュータン	23	3%				10.4	1.51	57	18	25
Cont-2	55.5～73	B_3	SiCL	なし	10YR6/4 7.5YR2/3(キュータン)	柱状(弱)100mm、板状(弱)2～3mm	割れ目0.1mm以下	表面に有機物キュータン						11.4	1.5	57	19	24
Cont-2	73～108+	C	SiCL	なし	10YR6/4	板状(弱)			22	<1%				10.6	1.52	57	18	25
Cont-2	108	凍結深度																

(*Aulacomnium palustre*)および草本類(*Calamagrostis lapponica*)が優占していた。樹木密度(本 ha^{-1})は 10,000、平均樹高(m)は 4.68、地上部のバイオマス量(Mg ha^{-1})は 16.2 であった。植生調査の詳細は、Shibuya et al. (1999)に記載されている。土壌断面記載を表 4-6 に示す。地点 Cont および Cont-2 と同様に、F/H 層が認められ、深さ約 100cm に永久凍土が認められた。

表4-8　地点S92-2の土壌断面調査の結果

地点	深さ cm	層位	土性	石レキ	土色	構造	孔隙	キュータン	硬度 mm	根 Total	根 >20mm	根 2-20mm	根 <2mm	含水率 %	容積重 Mg/m3	固相率 %	液相率 %	気相率 %
S92-2	0～7.5	A_{11}	SiCL	なし	10YR1.7/1	粒状(中)2mm	多孔質		8	20%				18.7	0.755	28	17	54
S92-2	7.5～21	A_{12}	SiC	なし	10YR2/2	大柱状(中)100mm、亜角塊(弱)10mm、粒状(中)2mm	大きれつ(20～0.5mm)		17	10%				13.5	1.4	53	22	25
S92-2	21～46	AB	SiC	なし	10YR3/3 10YR5/4混合	大柱状(中)100mm、亜角塊(中)15mm、粒状(中)2mm、板状(弱)1mm	大きれつ(10～0.5mm)		19	2%				15.6	1.17	44	22	34
S92-2	46～80	B_2	SiC	なし	10YR5/3 10YR2/2混合	大柱状(中)100mm、亜角塊(中)15mm、粒状(中)2mm、板状(弱)1mm	大きれつ(10～0.5mm)		20	1%				18.4	1.32	50	30	20
S92-2	80～130	C	SiC	なし	10YR5/4	板状(弱)1mm	たて方向割目あり(最大巾0.5mm)		21	なし				12.9	1.58	60	23	17
S92-2	130～160+	2C	S	なし	10YR6/3	なし	多孔質		15	なし				12.1	1.64	62	23	16
S92-2	170	凍結深度																

地点 G は地点 Cont-2 に隣接した草地であり、その優占植生は、*Artemisia sp.*, *Potentilla anserina*,、および *Vicia cracca* であった。その面積当たりの乾物重(g m^{-2})は、162(1997 年時)およっび 207(1999 年時)であった。土壌断面記載を表 4-9 に示す。地下水面は認められず、深さ

表4-9　地点Gの土壌断面調査の結果

地点	深さ cm	層位	土性	石レキ	土色	構造	孔隙	キュータン	硬度 mm	根 Total	根 >20mm	根 2-20mm	根 <2mm	含水率 %	容積重 Mg/m3	固相率 %	液相率 %	気相率 %
G	0～12	A_1	SiC	なし	10YR2/2	粒状(中)	多孔質		19	20%				18.48	0.717	27	16	57
G	12～19	A_2	SiC	なし	2.5Y7/4	粒状(弱) 0.5～3mm	多孔質、割れ目		24	10%				8.96	1.52	57	15	28
G	19～31.5	B_2ir	SiC	なし	2.5Y4/6	板状(弱)2～3mm	針状、割れ目		25	5%				12.4	1.545	58	22	20
G	31.5～48.5	B_2h	SiC	なし	2.5Y3/3	板状(中)1～1.5mm、角塊状(中)1～10mm	管状		24	5%				13.8	1.6	60	26	14
G	48.5～78	B_3g	SiC	なし	2.5Y5/3 10YR6/8(鉄斑)	板状(中)1～1.5mm、角塊状(中)1～10mm	管状		26	2%				14.9	1.528	58	27	16
G	78～120+	Cg	SiC	なし	2.5Y4/2 10YR6/8(鉄斑)	板状(中) 0.5～1mm	管状		25	2%				15.1	1.5	57	27	17
G	171	凍結深度																

170cm 付近に永久凍土が認められた。

地点 W は地点 G に隣接した湿地水際であり、その中に 5 地点を設けた。W_{-2} は地下水位が 9cm、W_{-1} は地下水位が 5cm、W_0 は地下水位が 0cm、W_{+1} は地下水位が–4cm(湛水)、W_{+2} は地下水位–8cm(湛水)である。優占植生は、*Carex visicaria*、*Heleocharis fennica*、*Calamagrostis langsdorffii*、*Inula britannica*、および *Potentilla anserina* であった。その面積当たりの乾物重(g m^{-2})は、320 であった。

(2)土壌呼吸の測定

土壌呼吸の測定には密閉型チャンバーを用いた。チャンバーの体積と面積はそれぞれ 3.30 (dm^3)および 2.14 (dm^2)である。チャンバーを静置する前に、土壌表面を露出し、林床植生の呼吸を除くために、地上部(コケ類を除く)を切り取った。チャンバーを静置後、0 分および 6 分後にチャンバー内の大気をテドラーバックに採取し、チャンバー内の温度をデジタル温度計を用いて測定した。また、チャンバーを静置している間に、デジタル温度計を用いて深さ 3cm の地温を測定した。赤外線二酸化炭素分析計(富士電機 ZFP5)を用いて、テドラーバックの内の CO_2 濃度を分析した。土壌呼吸は、式(3-1)を用いて計算した。ひとつの隣接した地点に数日滞在し、低い地温時の土壌呼吸のデータも得るために、早朝および午後に土壌呼吸の測定を行った。

(3)土壌調査と土壌分析

地点 W を除く地点で土壌断面調査を永久凍土あるいは地下水面まで実施した。土性、土色、土壌構造、および根含量などを土壌生成層位ごとに記載した。土壌断面にデジタル温度計を挿入し、断面の地温分布を測定した。100mL 採土管を用いて土壌サンプルをそれぞれの層から200mL 採取した。それらの含水率および容積重を測定した。固相率、気相率および水分飽和度は土粒子密度が 2.65 (Mg m^{-3})と仮定し、容積重と含水率から計算した。地点 Cont、W96、S92、および S73 のいくつかの層から 100mL 採土管を用いて不撹乱土壌サンプルを持ち帰り、遅沢(1997)の方法

で相対ガス拡散係数(D/D_0)および気相率を測定した。それらの不撹乱土壌サンプルから得た気相率とD/D_0の関係を用いて、土層中のD/D_0の分布を推定した。

それぞれの層から採取した撹乱土壌は風乾後、2mm のふるいを通し、化学分析に供試した。これらのサンプルの pH および電気伝導度(EC)は水懸濁液を用いて測定した(土壌標準分析・測定法委員会編 1986)。全炭素および全窒素含量は、Vario-EL (ELEMENTAR)を用いて燃焼法で測定した(土壌標準分析・測定法委員会編 1986)。重炭酸塩炭素含量を Nelson (1982)の方法で求めた。有機炭素含量は、全炭素含量から重炭酸塩含量を差し引いたものとした。CN 比は、全有機炭素含量/全窒素含量とした。土層中の面積当たりの全有機炭素含量は、土壌の全有機炭素含量、層の深さ、容積重を掛け合わせそれらを土層 1m まで積算した。

(4)微生物呼吸量(有機物分解量)の推定

土壌微生物呼吸量を推定するために、土壌の培養実験を実施した。培養実験は江口ら 1995 の方法を修正した方法を用いた。すなわち、L および F/H 層土壌では 2.5g、鉱質土壌では 20g の風乾土を培養ビン(体積 1.15dm^3、底面積 0.95dm^2)に入れた。それぞれの培養ビンに、断面調査で測定した土壌水分に等しくなるように脱塩水を加えた後、栓をして 48 時間前培養を行った。48 時間後、培養ビン内の大気を CO_2 濃度が 370(ppmv)の清浄大気で置換し、栓をして 24 時間培養した。全培養および本培養の温度は、0.5、2.5、5.0、7.5、10.0、12.5、15.0、17.5、20.0、および 22.5℃の温度から断面調査で測定した各層の温度に一番近い地温を選択した。ただし、いくつかの層ではとなりあったふたつの地温を選択して培養し、得られた微生物呼吸を平均した。24 時間後の培養ビン内の CO_2 濃度変化から、土壌重さ当たりの微生物呼吸を計算した。

すべての層の微生物呼吸で生成した CO_2 は大気へ拡散し、土壌呼吸に寄与しているものと考えた。地点 Cont、Cont-2、および S73 では深さ 100cm 付近に永久凍土が認められたので、現地における微生物呼吸を比較するために、深さ 1m までの微生物呼吸を計算した。すなわち、各層ごとに、土壌重さあたりの微生物呼吸(g CO_2 m^{-2} g^{-1})、層の厚さ(m)、および容積重(g m^{-3})を掛け合わせて面積当たりの微生物呼吸(g CO_2 m^{-2} s^{-1})を求め、それを深さ 1m まで積算したものを現地における微生物呼吸とした。

(5)N_2O および CH_4 フラックス

地点 Cont、W96、S92、S73、Cont-2、G、および W(W_{-2} および W_{-1})において、土壌表面大気および土層中の N_2O・CH_4 濃度を測定した。すなわち、外径 9.7mm 内径 8.0mm の金属パイプを

土層中の数深度に埋設し、ガス採取口を取り付け、これを土壌空気採取管とした(図 3-2 下)。設置 1～2 日後、シリンジを用いて採取した 15mL のガス試料を 10mL の真空採血管に封入した。札幌を出発する前に、N_2O および CH_4 の標準ガスも同様にして真空採血管に封入し、それらをヤクーツクまで携帯し、採取した土壌ガスとともに札幌に持ち帰った。札幌に到着後、これらの試料を、N_2O は ECD 検出器付きのガスクロマトグラフィー(島津 GC-14B)で、CH_4 は FID 検出器付きのガスクロマトグラフィー(島津 GC-8A)を用いて分析した。標準ガスを用いて検量線を作成し、検量線から試料の濃度を計算した。フラックスは Fick の拡散式(3-2)を用いて計算した。ただし、(3-2)式中の ρ は、CH_4 では 0.717×10^3 ($g\ m^{-3}$) (国立天文台 1999b)、(3-3)式中の Ds は、CH_4 では 0.191×10^{-4} ($m^2\ s^{-1}$)、n は 1.70(化学工業協会 1971)である。

地点 W では、土壌呼吸測定に使用したチャンバーを用いてフラックスを測定した。すなわち、チャンバーを静置後、0、15、30、および 60 分後のチャンバー内大気 15mL を 10mL の真空採血管に封入した。これらの試料の濃度を上記と同じ方法で分析し、チャンバー内の濃度変化から式(3-1)を用いて N_2O および CH_4 フラックスを計算した。なお、フラックスの検出下限値は、N_2O で 0.75 ($ng\ N_2O\text{-}N\ m^{-2}\ s^{-1}$)、$CH_4$ で 1.69 ($ng\ CH_4\text{-}C\ m^{-2}\ s^{-1}$) であった。

第 3 節　結果

(1) 土壌の物理化学性

森林火災は、土壌の物理化学性に影響を与えていた。図 4-1 に、土壌断面における地温の分布を示す。全ての地点において地温は深さとともに低下したが、火災を受けた地点および草地(W96、S92、S92-2、および G)では、火災を受けていない地点および森林が再生した地点(Cont、Cont-2、および S73)と比較して地温の上昇が認められた。図 4-2 に、土壌断面における水分飽和度の分布を示す。水分飽和度は深さとともに上昇した。強い火災を受け森林が再生していない地点および草地(S92、S92-2、および G)では、樹木が生育している地点(Cont、Cont-2、W96、および S73)と比較して土壌水分飽和度が高かった。図 4-3 および図 4-4 に、土壌断面における pH および電気伝導度(EC)の分布を示す。O 層の EC は鉱質土壌のそれと比較して高かった。土壌表面から深さ 40cm までの範囲において、カラマツ林が焼失した地点および草地(S92、S92-2、および G)の pH および EC は、その他の地点と比較して高かった。図 4-5 および図 4-6 に、土壌断面における全有機炭素含量および CN 比の分布を示す。O 層の全有機炭素含量は著しく高い値(>20%)であった。カラマツ林が焼失した地点および草地(S92、S92-2、および G)では、表層鉱質

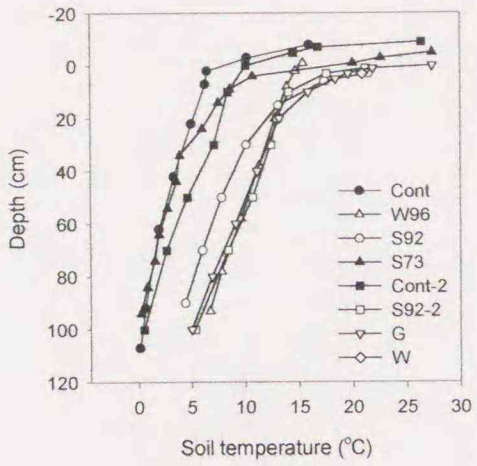


図4-1　土壌断面における地温の分布

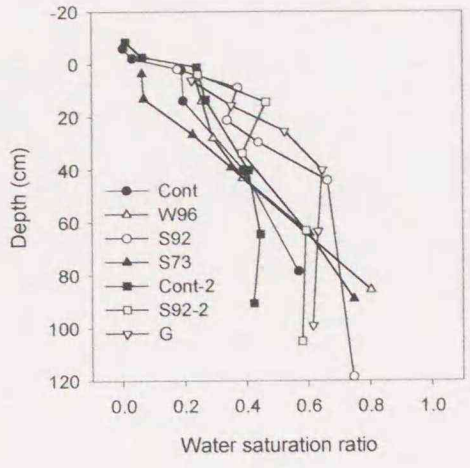


図4-2　土壌断面における水分飽和度の分布

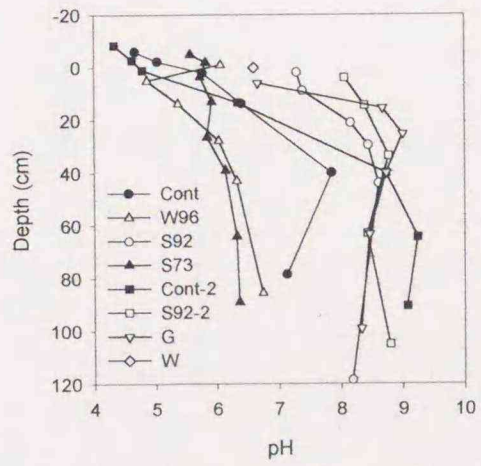


図4-3　土壌断面におけるpHの分布
地点Wの値は、湿地表層水を示す。

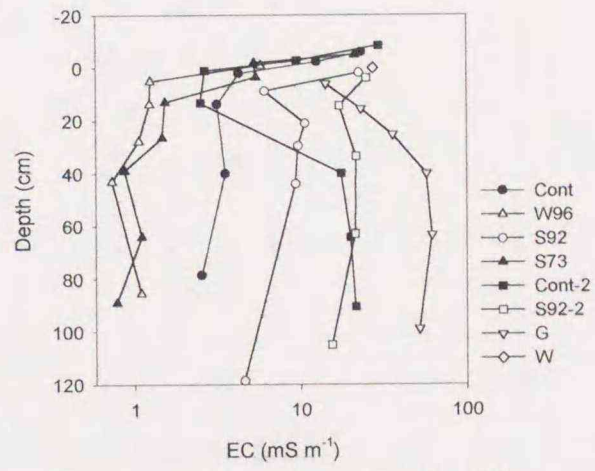


図4-4　土壌断面におけるEC(電気伝導度)の分布。地点Wの値は、湿地表層水を示す。

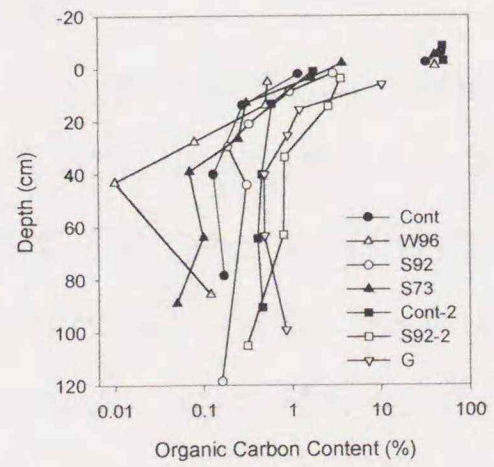


図4-5　土壌断面における全有機炭素含量の分布

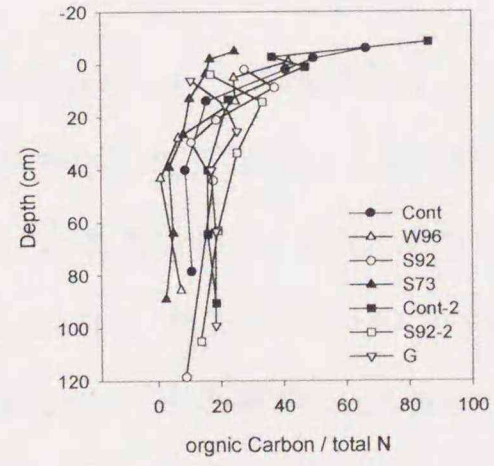


図4-6　土壌断面におけるCN比の分布

土壌の全炭素含量は、未撹乱の森林(Cont および Cont-2)と比較して高かったが、CN 比は低かった。土壌中深さ 1m の全有機炭素含量(kg C m^{-2})は、砂質土壌と比較してシルト質土壌で高かった。すなわち、砂質土壌の地点では、4.6(Cont)、2.9(W96)、5.1(S92)、および 3.8(S73)であったが、シルト質土壌の地点では、13.2(Cont-2)、13.9(S92-2)、および 18.3(G)であった。

なお、土壌の一般理化学性については付表に示した。

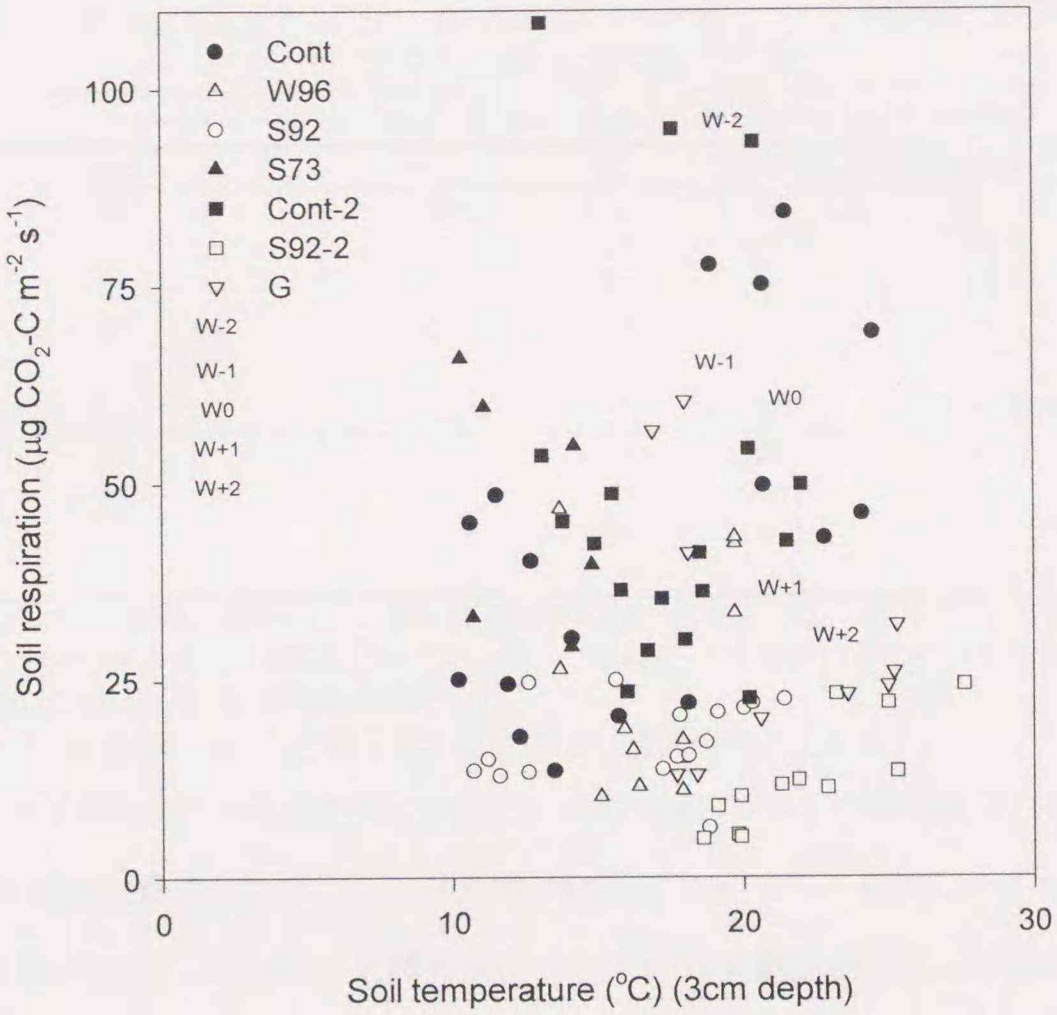


図4-7　地温と土壌呼吸の関係

(2)土壌呼吸

図 4-7 に、深さ 3cm の地温と土壌呼吸の関係を示す。 土壌呼吸は、4.9～108（μ g CO_2-C m^{-2} s^{-1}） の広い範囲にあった。地点 Cont および S92-2 では、地温と土壌呼吸に 5%水準で正の有意な指数相関が認められたが、その他の地点では有意な相関は認められなかった。未撹乱のカラマツ林およびカラマツが再生した地点（Cont、Cont-2、および S73）の土壌呼吸は、13.5～108（μ gCO_2-C m^{-2} s^{-1}）の範囲にあり、これは、温帯における針葉樹林（Anderson 1973）およびアラスカにおけるトウヒ樹林（Gordon 1987）における真夏の土壌呼吸測定結果と同程度であった。強い火災を受けカラマツ林が焼失した地点（S92 および S92-2）の土壌呼吸は、4.9～25.0（μ g CO_2-C m^{-2} s^{-1}）の範囲にあり、未撹乱の地点と比較して低かった。弱い火災を受けたカラマツ林および草地（W96 および G）の土壌呼吸は、10.2～60.4（μ g CO_2-C m^{-2} s^{-1}）の範囲にあり、この値は未撹乱のカラマ

表4-10　土壌呼吸についての分散分析表（一元分散分析）

要　因	偏差平方和	自由度	平均平方	F　値	P　値	判定
因子A	20419	7	2917	9.235	0.0000	**
誤差	27796	88	316			
全体	48215	95				

**:1%有意 *:5%有意

単位：μ g CO_2-C m^{-2} s^{-1}

表4-11　現場で測定した土壌呼吸の平均値、培養実験で測定した微生物呼吸、現場における微生物呼吸の推定、および土壌呼吸に対する根呼吸寄与率の推定

地点[*1]	現場で測定した土壌呼吸の平均値[*2]		深さ1m内の微生物呼吸（培養実験による測定）			現場における微生物呼吸の見積もり	土壌呼吸に対する根呼吸寄与率
			LおよびF/H層	鉱質土壌	全層		
	----------		10^{-6}g CO_2-C m^{-2} s^{-1} ----------				----- % -----
砂質土壌	(A)		(B)	(C)	(D=B+C)	(E=D×17/29)	(F=(A-E)/A×100)
Cont	43	ab	2	7	9	5	87
W96	24	c	1	22	23	14	44
S92	17	cd	-	29	29	17	0
S73	47	a	2	15	17	10	78
シルト質土壌	(A)		(B)	(C)	(D=B+C)	(E=D×47/149)	(F=(A-E)/A×100)
Cont-2	49	a	8	16	24	7	85
S92-2	13	d	-	41	41	13	0
G	31	bc	-	30	30	9	69
W	58	a	-	-	-	-	-

*1 Cont、Cont-2は未撹乱のカラマツ林、W96は1996年に弱い火災を受けたカラマツ林、S92、S92-2は1992年に強い火災を受けカラマツが焼失し、草本がわずかに侵入した地点、S73は1973年に強い火災を受けたがカラマツ林が再生した地点、Gは草地、Wは湿地水際を示す。
*2 同じ符号は、全地点をこみにした最小有意差法5%で有意差がないことを示す。

ツ林とカラマツが焼失した地点の間にあった。湿地水際（W）の土壌呼吸は、地下水位が上がるにつれて土壌呼吸は低下したが、30.5～95.9（μ g CO_2-C m^{-2} s^{-1}）の範囲にあり、未撹乱のカラマツ林と同程度であった。表 4-10 に、土壌呼吸について一元分散分析を行った結果を示す。土壌呼吸は、統計的にも地点間差が認められた。表 4-11(A)に、土壌呼吸の平均値と 5%水準による最小有意差検定を行った結果を示す。未撹乱のカラマツ林、カラマツが再生した地点、および湿地水際（Cont、Cont-2、S73 および W）は、統計的に土壌呼吸が高いと分類された。

(3)微生物呼吸（有機物分解）

図 4-8 に、培養実験によって測定した微生物呼吸（有機物分解）の土層内分布を示す。微生物呼吸は、0.000～0.845（ng CO_2-C g^{-1} s^{-1}）の広い範囲にあった。O 層および A 層（深さ 20cm まで）の微生物呼吸は、B 層以下（深さ 20cm 以深）と比較して高かった。O 層の微生物呼吸は、0.028～0.845（ng CO_2-C g^{-1} s^{-1}）の範囲にあったが、培養温度（地温）と正の相関は認められなかった。これに対し、鉱質土壌（A 層以下）の微生物呼吸は、0.000 から 0.260（ng CO_2-C g^{-1} s^{-1}）の範囲にあり、培養温度（地温）および全有機炭素含量と正の有意な関係が認められた。鉱質土壌における培養温度および全有機炭素含量と微生物呼吸の関係を、図 4-9 に示す。

鉱質土壌について、目的変数として微生物呼吸、説明変数として培養温度（地温）、全有機炭素含量、pH、EC、および CN 比を用いた重回帰分析（変数増減法）の結果、有意に回帰され以下の関係式を得た。すなわち、

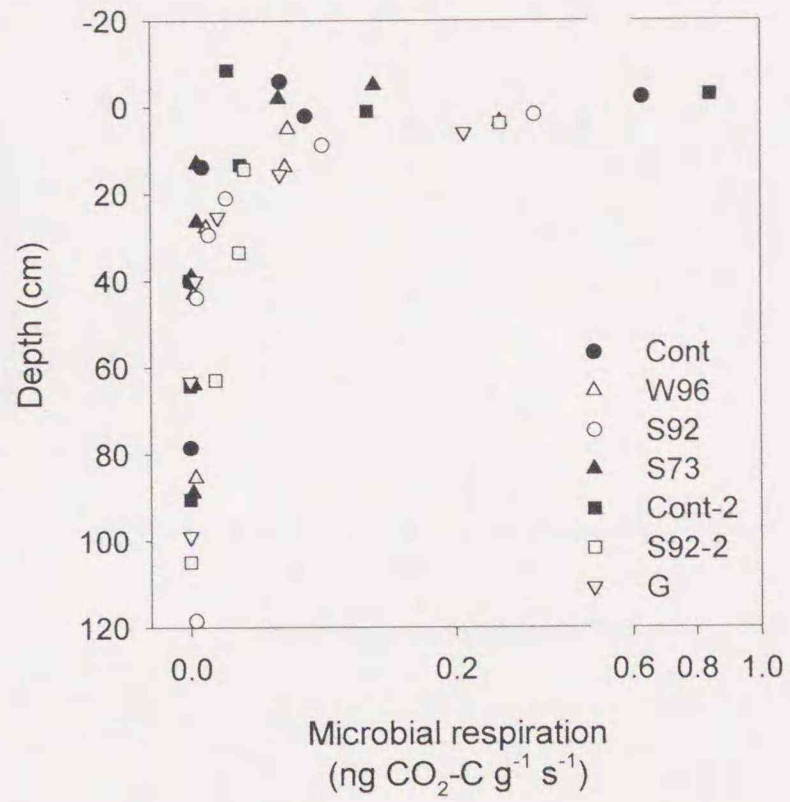


図4–8　土壌断面における微生物呼吸の分布

$$MR = 0.00605 \times T + 0.0175 \times orgC - 0.0129 \times pH - 0.0679$$

$$(n = 37、R^2 = 0.64、P<0.01) \cdots (4–1)$$

ここで、MR は、微生物呼吸（ng CO_2-C g^{-1} s^{-1}）、T は培養温度（地温）（℃）、orgC は土壌の全有機炭素含量（%）、pH は土壌の pH（H_2O）である。

深さ 1m まで積算した単位面積当たりの微生物呼吸量（有機物分解量）を表 4-11(B～D)に示す。全層の微生物呼吸は、9～41（μg CO_2-C m^{-2} s^{-1}）の範囲にあった。砂質土壌の地点では、強い火災を受けカラマツ林が焼失した地点（S92）の微生物呼吸は、未撹乱のカラマツ林およびカラマツが再生した地点（Cont および S73）よりも高かった。弱い火災を受けた地点（W96）の微生物呼吸は、未撹乱のカラマツ林とカラマツが焼失した地点の中間の値であった。シルト質土壌の地点でも、強い火災をうけカラマツ林が焼失した地点（S92-2）の微生物呼吸は、未撹乱のカラマツ林（Cont-2）と比較して高かった。

(4) N_2O および CO_2 フラックス

図 4-10 に、土壌断面における N_2O および CH_4 濃度の分布を示す。N_2O 濃度分布では、草地（G）のみに濃度勾配が認められ、土壌中の N_2O 濃度は大気中のそれと比較して高かった。

砂質土壌の 4 地点のすべてにおいて、土壌中の CH_4 濃度は大気中のそれと比較して低かった。これは、火災履歴に関係なく土壌は大気 CH_4 を吸収していたことを示している。湿地水際（W_{-2}

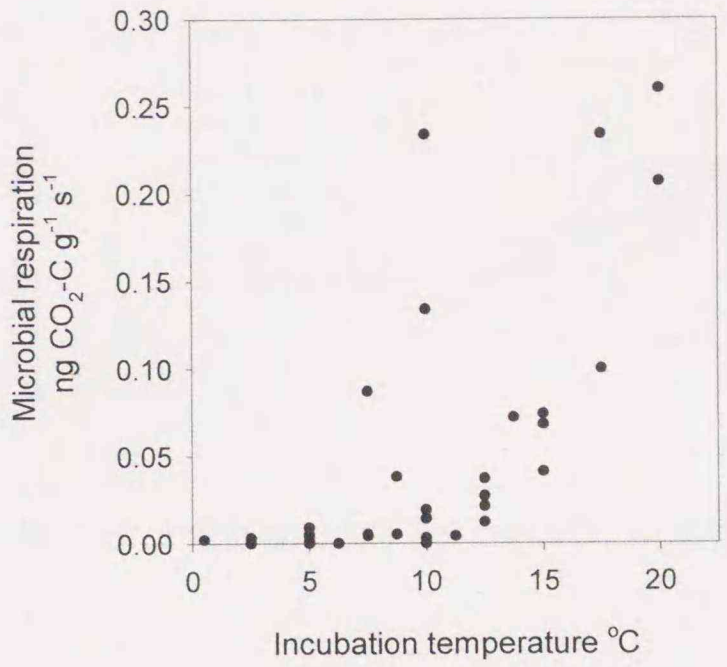


図4-9　鉱質土壌における地温（上）および全有機炭素含量（下）と微生物呼吸の関係

および W_{-1}）では、深さ 5cm 土壌中の CH_4 濃度は大気中の 1000 倍程度の濃度であり、土壌表層に高い濃度勾配が生じていた。これは、土壌から大気へ CH_4 が放出していたことを示している。

図 4-11 に、土層中の相対ガス拡散係数（D/D_0）の分布を示す。D/D_0 の実測値と推定値は良く一致した。表 4-12 に、拡散式を用いて計算した N_2O および CH_4 フラックス、およびチャンバー法を用いて測定した地点 W における N_2O・CH_4 フラックスの結果を示す。草地の N_2O フラックスは、8.9（ng N_2O-N m^{-2} s^{-1}）（放出）であった。砂質土壌の CH_4 フラックスは、–3.86～–11.8（ng CH_4-C m^{-2} s^{-1}）（吸収）の範囲（平均–6.09）にあった。一方、湿地水際（W）の CH_4 フラックスは、36～533（ng CH_4-C m^{-2} s^{-1}）（放出）の範囲（平均 278）にあった。CH_4 放出フラックスの絶対値は、吸収フラックスの 46 倍であった。湿地水際（W）の N_2O フラックスは検出限界以下であった。

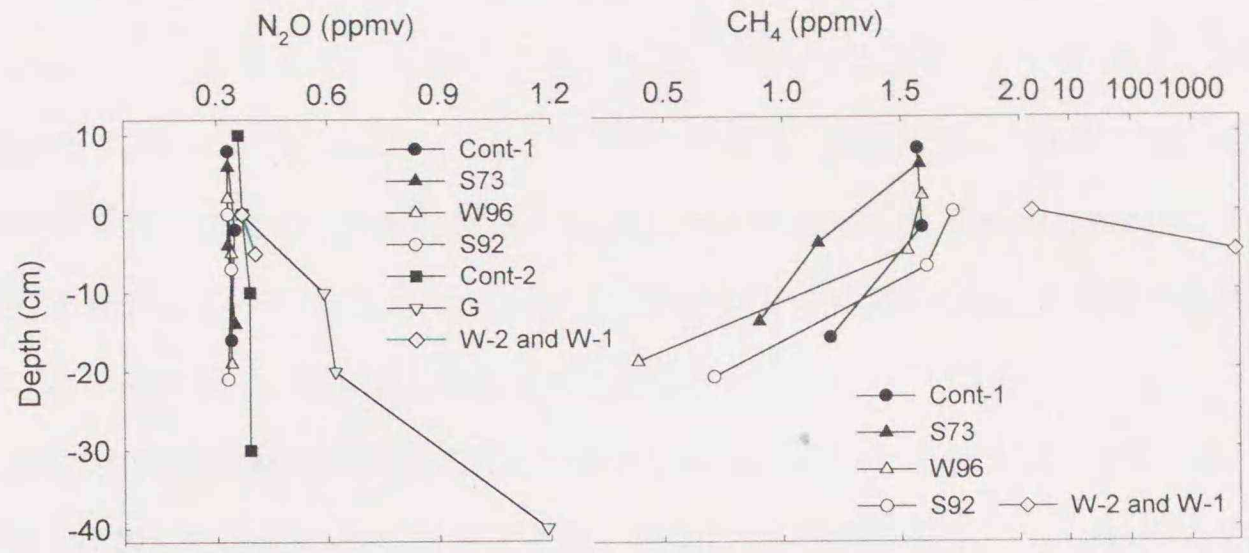


図4-10　土壌断面におけるN_2OおよびCH_4濃度の分布

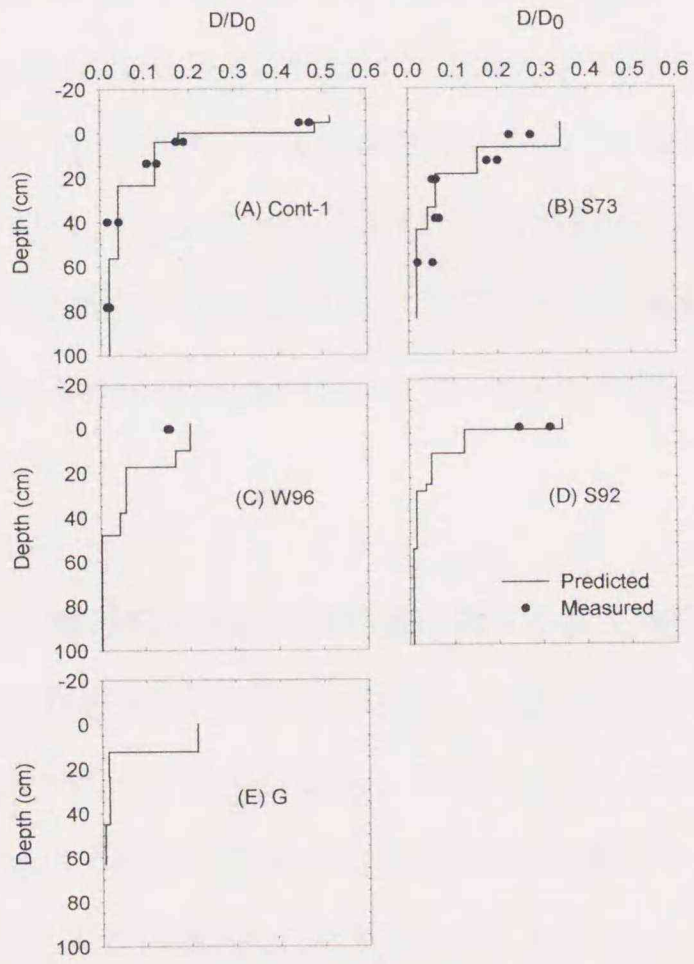


図4-11　土壌断面における相対ガス拡散係数（D/D_0）の分布　●：実測値、－：予測値

表4-12　N_2OおよびCH_4フラックスの結果

地点名		N_2Oフラックス ng N_2O-N m^{-2} s^{-1}	CH_4フラックス ng CH_4-C m^{-2} s^{-1}
砂質土壌			
Cont		trace	-4.20
W96		trace	-11.6
S92		trace	-4.74
S73		trace	-3.86
シルト質土壌			
Cont-2		trace	ND
S92-2		trace	ND
G		8.91	ND
W	W_{-2}	trace	168
	W_{-1}	trace	531
	W_0	trace	122
	W_{+1}	trace	533
	W_{+2}	trace	36

地点Wのみチャンバー法を用いた。
その他の地点は拡散式によって計算した。
traceは検出限界以下であったことを示す。
検出限界は、N_2Oフラックスで0.75、CH_4フラックスで1.69。
ND：データなし

第4節　考察

(1) 土壌の物理化学性

土壌の物理化学性は森林火災後に変化が認められた。弱く火災を受けた地点、カラマツが焼失した地点、および草地における地温の上昇（図 4-1）の原因として、林冠の消失による土壌への直射光による熱供給の増加あるいは火災燃焼による熱の供給が考えられる。事実、カラマツ林が

再生し、林冠が回復していた地点では、地温の低下が生じていたことは、その推察が正しかったことを示唆している。カラマツが焼失した地点では、カラマツが生育していた地点と比較して土壌水分飽和度が高かった(図 4-2)。これは、カラマツが焼失した地点では、カラマツによる水吸収・蒸発散が生じなくなったため、土壌水分が上昇したためと考えられる。Rouse (1976)は、本調査と類似した事例を報告している。すなわち Rouse (1976)のデータにおいても、火災後の森林では、地温の上昇、蒸発散の減少、および土壌水分の上昇を示していた。

土壌の化学性も森林火災後に変化が認められた。カラマツが焼失した地点では、未撹乱のカラマツ林と比較して A 層の全有機炭素含量が増加していた(図 4-5)。しかしながら、C/N 比は、低下していた(図 4-6)。さらに、カラマツが焼失した地点では、未撹乱のカラマツ林と比較して、深さ 40cm までの土壌断面において pH および EC の上昇が認められた(図 4-3 および 4-4)。これらの変化は、Lucarotti (1980)および Moore (1980)の結果と一致している。すなわち、燃焼によって植物あるいは土壌中の有機物が無機化されて土壌に供給され、さらにそれらから塩基性カチオンの溶出・拡散が生じていたと思われる。火災後に、A 層の全有機炭素含量は増加していたが、同じ土性の地点内では、深さ 1m に存在する単位面積あたりの全有機炭素の変化は明らかでなかった。また、Matsuura et al. (1994) は、レナ川地域において、本調査と類似した全炭素含有量を報告している。

(2)土壌呼吸および土壌呼吸に対する微生物呼吸(有機物分解)・根呼吸の寄与

火災を受け、カラマツが焼失した地点の土壌呼吸は、未撹乱カラマツ林の土壌呼吸と比較して、有意に低下していた(図 4-7、表 4-11A)。しかしながら、カラマツ林が再生した地点の土壌呼吸は、カラマツが焼失した地点の土壌呼吸と比較して、有意に上昇しており、未撹乱のカラマツの土壌呼吸と有意差は認められなかった(図 4-7、表 4-11A)。以上から、林床植物の根呼吸あるいは土壌微生物・動物の呼吸と比較して、カラマツの根呼吸が非常に高いことが示唆される。

火災による微生物呼吸(有機物分解)の変化

一般に、土壌微生物呼吸(有機物分解)は、温度(Kirscbaum 1995)に比例して上昇し、土壌微生物のバイオマスは土壌の全有機炭素含有率(Anderson and Domsch 1980)に比例して増加することが知られている。鉱質土壌において、地温の上昇および全有機炭素含量の増加は、乾土重量あたりの土壌微生物呼吸(有機物分解)を上昇させていた(図 4-9)。これは、Kirscbaum 1995 および Anderson and Domsch, 1980 の結果と一致している。また、微生物呼吸を目的変数とした重回

帰分析の結果、土壌 pH の上昇が微生物呼吸を低下させていると判断されたが、これは化学的反応が微生物活性を低下させたためであろう。

表 4-11(B～F)に、培養実験によって得られた土層 1m までの微生物呼吸(有機物分解)、現場における微生物呼吸、および土壌呼吸に対する根呼吸寄与率の推定結果を示した。鉱質土壌と比較して、有機質土壌は低い微生物呼吸を示した(表 4-11(B,C))。これは、乾土あたりの微生物呼吸は、有機質土壌と A 層では同程度の微生物呼吸を示したが(図 4-8)、有機質土壌の容積重が小さい値であったためである。カラマツが焼失した地点における微生物呼吸は、未撹乱のカラマツ林と比較して高かった(表 4-11(D)S92 と Cont、および S92-2 と Cont-2)。さらに、カラマツが焼失した地点の A 層では、地温および A 層の全有機炭素含有量が高かった(図 4-1 および 4-5)。以上から、カラマツが焼失した地点の微生物呼吸(有機物分解)は上昇しており、その原因は、地温上昇と A 層の全有機炭素含量の増加が原因であると考えられる。

土壌呼吸に対する根呼吸の寄与率

永久凍土が深さ 1m 付近に認められ(図 4-1)、培養実験による微生物呼吸は、C 層と比較して A 層で顕著に高かったので(図 4-8)、深さ 1m までの微生物呼吸は現場の微生物呼吸を表していると考えられる。しかし、砂質およびシルト質の両土壌とも、カラマツが焼失した地点の微生物呼吸は土壌呼吸よりも高かった(表 4-11、S92 および S92-2 の A と D)。この不一致を修正するために、以下の処理を行った。すなわち、カラマツが焼失した地点では、わずかな草本しか認められなかったため、根呼吸は無視できると仮定し、深さ 1m までの微生物呼吸が土壌呼吸のすべてを構成していると仮定した。さらに、土性が同じ地点内において、不一致の割合が同じように生じていると仮定し、現地における微生物呼吸を見積った(表 4-11(E))。さらに、土壌呼吸と微生物呼吸の差が根呼吸であるとして、土壌呼吸に対する根呼吸の寄与率を求めた(表 4-11(F))。なお、土壌呼吸に対する土壌動物の呼吸の寄与率は、極めて小さいとして無視した(例えば、江口ら 1997 は 3%、Paustian et al. 1990 は 7%と見積っている)。その結果、未撹乱カラマツ林および再生したカラマツ林で 75%以上の高い寄与率を示した。この値は、これまでの土壌呼吸に対する根呼吸の寄与率(Nakane 1980; Nakane 1983; Edwards et al. 1989; Holt et al. 1990; 江口ら 1997)と比較して同程度あるいはより高いが、シベリアカラマツ林においても、土壌呼吸に根呼吸が重要であることを示している。一方、弱い火災を受けた地点では、40%と低下していた。

Edwards and Ross-Todd (1983)は未撹乱森林および伐採地において土壌呼吸を測定した結果、

生育期において未撹乱地点の土壌呼吸が有意に高かった。さらに、現場の状態と等しい地温および土壌水分で微生物呼吸を測定した結果、伐採地で地温が上昇していたため、微生物呼吸（有機物分解）は伐採地で有意に高かった。よって、生育期において未撹乱地点の土壌呼吸が高かったのは、根呼吸が原因であると結論づけている。この事例は、本研究と極めてよく類似している。

以上から、カラマツが焼失した地点において、未撹乱のカラマツ林と比較して、有機物分解（微生物呼吸）が上昇するにも関わらず土壌呼吸が低下した原因は、根および根呼吸が消失したためであると考えられる。さらに、カラマツが再生した地点において土壌呼吸が上昇したのは、根および根呼吸が増加したためであると考えられる。弱く火災を受けた地点では土壌呼吸が低下し、根呼吸の寄与率が低下していたことから、カラマツが火災によってダメージを受け、根呼吸が減少したと推察される。なお、湿地水際における土壌呼吸が高かった（表 4-11(A)）のは、その地点における栄養性（有機物など）が高かったことが原因であると可能性がある。

(3) N_2O および CH_4 フラックス

これまで、熱帯や温帯の森林・草地において、土壌からN_2Oの放出が測定されている。例えば、図 4-12 には、Bouman 1990b のまとめによる耕地化されていない生態系における N_2O フラックスの範囲を示す。それによると、熱帯で 0.6～8.3（ng N_2O-N m^{-2} s^{-1}）、温帯森林で 0.28～21（ng N_2O-N m^{-2} s^{-1}）の範囲にあった（図 4-12）。本研究では、地点 G（シルト質土壌の草地）以外の地点における N_2O フラックスは検出限界（0.75 ng N_2O-N m^{-2} s^{-1}）以下であった。これらの値と熱帯および温帯森林の値を比較すると（図 4-12）、ヤクーツク一帯の森林では、熱帯および温帯土壌よりも N_2O フラックスが小さいと思われる。熱帯で N_2O フラックスが高い原因として、その窒素循環速度が速いことが原因であるとされている（Bouman 1990b、楊 1994）。また、一般に正味の窒素無機化速度は、北方林において熱帯林あるいは温帯林よりも低いといわれている（Nadelhoffer et al. 1992）。よって、ヤクーツク一帯の森林では、窒素循環速度が遅いため、N_2O フラックスが小さかった可能性が大きい。地点 G では、8.9（ng N_2O-N m^{-2} s^{-1}）と高い N_2O 放出が認められたが、この原因の究明は今後の課題である。また、ヨーロッパ温帯土壌には、無視できない量の窒素降下物が大気から供給されており（Dise et al. 1998）、それが森林からの N_2O フラックスに影響を与えている可能性がある。ヤクーツクを含むシベリア地域においての窒素降下物量および森林土壌の窒素循環についても、今後調査が必要と思われる。

砂質土壌の地点では森林火災履歴に関係なく、土壌は大気 CH_4 を吸収していた（表 4-12）。火災後土壌水分の上昇が認められたが、A 層の水分飽和度は 0.5 以下であり（図 4-2）、土壌は好

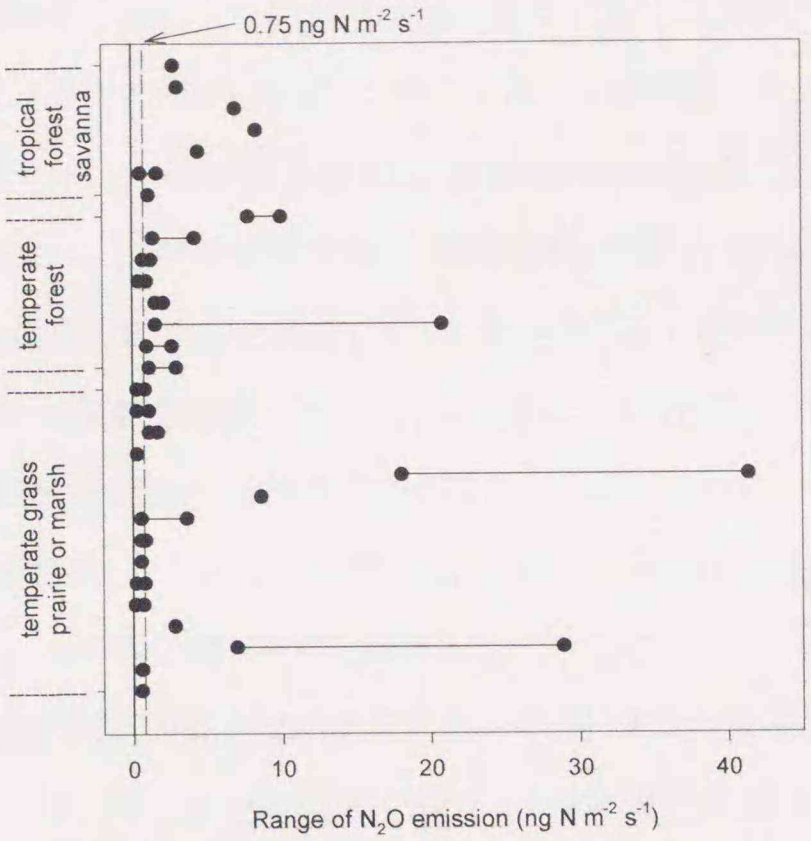


図4-12　Bouwman 1990のまとめによる自然生態系からのN_2O放出(範囲)。 点線は、本研究の検出限界値を示す。

気的に保たれていたと思われる。よって、土壌は CH_4 酸化菌が CH_4 を消費するための条件下(Schütz et al. 1990; Steudler et al. 1996)にあったものと考えられる。以上から、シベリア永久凍土地帯の森林土壌は大気 CH_4 を吸収していると思われる。しかしながら、湛水状態にあった地点 W では、高い CH_4 放出フラックスが認められた。よって、この地域における大気－土壌間のメタンフラックス収支を求めるためには、フラックスが放出から吸収に変化する境界とその面積を明らかにし、それらを積分する必要があることを示している。なお、砂質土壌の CH_4 フラックスの平均値は–6.09 (ng CH_4-C m^{-2} s^{-1}) であった(表 4-12)が、これは、スコットランド、デンマーク、およびポーランドにおける様々な北方林の CH_4 フラックス(–3.65 ～ –20.8; Dobbie et al. 1996)の範囲にあった。また、これまで永久凍土地帯の乾性ポドゾル性土壌における CH_4 フラックス測定事例は発表されていないが、本研究による CH_4 吸収フラックスは、ロシアの非永久凍土地帯・乾性ポドゾル性土における CH_4 フラックス(–35.3 ～ –25.0 ng CH_4-C m^{-2} s^{-1}) (Zelenev 1996)よりも小さかった。

第 5 節　要約

本章では、永久凍土地帯に位置する、シベリアヤクーツク近郊の砂質土壌およびシルト質ポドゾル性土壌に立地する異なる火災履歴を持つカラマツ林において、土壌呼吸および N_2O・CH_4 フ

ラックスを調査した結果について述べた。

未撹乱の土壌呼吸の値は、これまでの北方林における土壌呼吸と同程度であった。しかしながら、強い火災を受けカラマツ林が焼失した地点では、土壌呼吸は有意に低下した。また、カラマツ林が再生した地点では、土壌呼吸は上昇し、未撹乱の土壌呼吸と差が認められなかった。カラマツが焼失した地点では、土壌微生物呼吸（有機物分解）が高く、これは地温の上昇と火災による A 層への有機物供給が原因であると推察した。土壌呼吸と微生物呼吸の差を根呼吸とし、土壌呼吸に対する根呼吸の寄与率を見積ったところ、未撹乱および再生したカラマツ林では、75％以上の高い寄与率であった。以上から、カラマツが焼失した地点において、土壌呼吸が低下した原因は、根および根呼吸が消失したためであり、さらに、カラマツが再生した地点において土壌呼吸が上昇したのは、根および根呼吸が増加したためである。

火災履歴に関わらず、砂質土壌の地点において、土壌は大気 CH_4 を吸収していた。この吸収フラックスは、ヨーロッパ北方林と同程度であり、ロシアの非永久凍土地帯乾性ポドゾル性土壌における CH_4 吸収フラックスよりも小さかった。N_2O フラックスは、これまで熱帯および温帯の森林で測定された（放出）フラックスよりも小さい値であった。

第 5 章　北海道の土壌構造が発達した灰色低地土タマネギ畑からの N_2O フラックス
－3 ヶ年の調査による N_2O 放出量と既往の研究事例の比較－

第 1 節　はじめに

土壌中で亜酸化窒素（N_2O）は、硝化過程の副産物あるいは脱窒過程の中間生成物として生成される（Sahrawat and Keeney 1986）。N_2O は、その大気中の濃度が 0.25%/年の速度で上昇しており、赤外線吸収力が CO_2 の約 150 倍である温暖化ガスのひとつである（Bouwman 1990a）ことから、その濃度上昇が懸念されている。

FAO 1996 によると、全世界の窒素肥料消費量は約 80Tg（1995/96 年）であるが、Watson et al. 1992 の推定によると、窒素肥料を施用する農耕地から 0.03～3.0Tg/年（$Tg=10^{12}g$）の N_2O が放出されており、それは全 N_2O 発生源（5.2～16.1Tg/年）の重要な位置を占めている。最近では、Bouwman 1996 の推定によると、全世界の農耕地から 2.4Tg/年の N_2O が放出されていると見積られている。また、鶴田 1997 の推定によると、日本の畑全体から、4.4.Gg/年（$Gg=10^9g$）の N_2O が放出されていると見積られている。しかしながら、様々な条件（土壌タイプ・気象・作物・圃場管理など）による測定例は十分でなく、今後の測定事例の積み重ねと N_2O 生成・放出のメカニズムの解析が必要とされている。

一般的に日本では、野菜畑は作物体窒素吸収量に比較して多くの窒素が施肥されている（小川・酒井 1986）ので余剰窒素が大きく、硝酸溶脱や N_2O 放出が大きくなる可能性が高い。また、北海道の農業環境を本州と比較すると、12 月から 3 月が積雪期で生育期が短いこと、地温が低いこと、梅雨がない、などの違いがある。

本章では、北海道の灰色低地土タマネギ畑からの N_2O 放出量について調査を実施し、これまで得られている日本あるいは世界の測定事例と比較することを目的とした。N_2O フラックスの年次変動を考慮するために、調査は 3 年間（1995 年から 1997 年）の生育期に実施し、N_2O フラックスの推移および放出量を測定した。また、同時に土壌呼吸を測定した。土壌呼吸は作物の根呼吸および微生物呼吸によって構成される（阪田ら 1996）ので、土壌呼吸の推移および呼吸量の年次変動は、微生物活動のみで発生する N_2O のそれと異なることが予想される。よって N_2O フラックスと土壌呼吸の推移と放出量の年次変動について比較・検討した。

第 2 節　材料と方法

(1)調査地の概要

1995 年、1996 年、および 1997 年の生育期において、北海道道央三笠市のタマネギ畑(43° 14'N, 141° 50'E)において調査を行った。いずれの年も 4 月下旬に硫安と化成肥料による窒素施肥が全層施肥で行われた(表 3-5)。施肥量(括弧内はアンモニウム態窒素)(g N m^{-2})は、それぞれ 26.6(22.8)、30.9(21.7)、および 27.6(16.2)であった(表 3-6)。4 月下旬から 5 月上旬にタマネギ(*Allium cepa* L.)の苗が栽植密度 28、28、および 32(本 m^{-2})で移植された。いずれの年も 8 月下旬に根切りが行われ、9 月中旬に収穫が行われた(表 3-5)。圃場における調査は月 2 回以上実施した。調査地から約 6km 南西にある岩見沢気象台によれば、年平均気温は 7.2℃、年平均降水量は 1,204mm である(札幌管区気象台 1995～1997)。

(2)N_2O フラックスの測定

密閉型チャンバー(面積:11.7 dm^2、体積 31 dm^3)を用いて、土壌から大気への N_2O フラックスを測定した。方法については、第 3 章 第 2 節 (3)チャンバー法に記載した。

チャンバー法は、測定日毎にランダムに選んだ圃場内の 4 地点で実施し、そのフラックスの平均値を求めた。

(3)土壌呼吸の測定

土壌呼吸は Fick の拡散式を用いて計算した。方法については、第 3 章 第 2 節 (4)拡散法に記載した。

(4)その他の測定項目

日降水量:調査地から約 6km 南西にある岩見沢気象台のデータ(札幌管区気象台 1995～1997)を用いた。

地温:N_2O フラックスおよび土壌呼吸測定後に、深さ 10cm に温度計を挿入して測定した。

マトリックポテンシャル:テンシオメータを深さ 20cm に埋設し、地温測定時に、マノメータを用いてマトリックポテンシャル(kPa)を求めた。

土壌硝酸含量:1995 年は、0～5cm の土壌を採取した。1996 年および 1997 年は、0～30cm の土壌を採取した。採取した土壌の含水比を求め、水抽出(土:水＝1:5)液の硝酸態窒素濃度を測定した(土壌標準分析・測定法委員会編 1986)。以上から、乾土あたりの硝酸態窒素含量を計算

した。

タマネギ乾物重および窒素吸収量:生育期に 4 回以上タマネギを数体採取し、乾物重を測定した。さらにケルダール法を用いて窒素含量を測定した。窒素含量と栽植密度から、面積当たりのタマネギの窒素吸収を計算した。

第 3 節　結果

(1)N_2O フラックスおよび土壌呼吸の推移

図 5-1 に、3 年間の生育期における N_2O フラックス、土壌呼吸およびそれらの要因の推移を示す。

降水(図 5-1(A)、(B)、(C))は、どの年においても夏以降に大きかった。5 月から 10 月までの総降水量は、696mm(1995 年)、676mm(1996 年)、914mm(1997 年)であり、いずれの年も平年値(640mm)(札幌管区気象台 1995～1997)を上回っていたが、1997 年はそれぞれの降水イベントごとに大きな降水量が認められた。地温(図 5-1(D))は、3 年間にほとんど差が認められず、4 月末には約 10℃であったが、7 月末から 8 月はじめに 25℃まで上昇したのち、10 月末には再び約 10℃まで低下した。

深さ 20cm のマトリックポテンシャル(図 5-1(E))は降水に対応した変動を示し、強い降雨があった 8 月以降に上昇する傾向が認められた。

タマネギの窒素吸収速度(図 5-1(G))は 6 月および 7 月に高く、8 月に低下した。総吸収量(g N m^{-2})は、9.6(1995 年)、13.3(1996 年)、13.5(1997 年)であった。

作土中の硝酸態含量(図 5-1(F))は、1995 年では、6 月上旬までに増加したが、6 月上旬から 7 月下旬にはほぼ一定となり、タマネギの窒素吸収がほぼ停止し降水が大きかった 8 月上旬から 9 月上旬にかけて急激に減少した。1996 年および 1997 年では、作土の硝酸態窒素濃度は 6 月上旬まで増加したが、6 月から 10 月にかけて、徐々に減少した。

N_2O フラックス(図 5-1(H))の範囲は 0.03～20.9(mg N m^{-2} d^{-1})であった。1995 年では、施肥前と比較して施肥直後(2 週間)の N_2O フラックスの上昇は認められなかった。5 月の N_2O フラックスは、1995 年および 1996 年では 1.0(mg N m^{-2} d^{-1})以下と低く推移した。しかし、1997 年の 5 月は 3.0(mg N m^{-2} d^{-1})以上のフラックスが 2 回認められた。全ての年において、降水量が大きかった 7 月以降にフラックスが上昇し、8 月中旬から 9 月下旬にその年のフラックスの最高値が認められ、10 月下旬に N_2O フラックスは低下した。

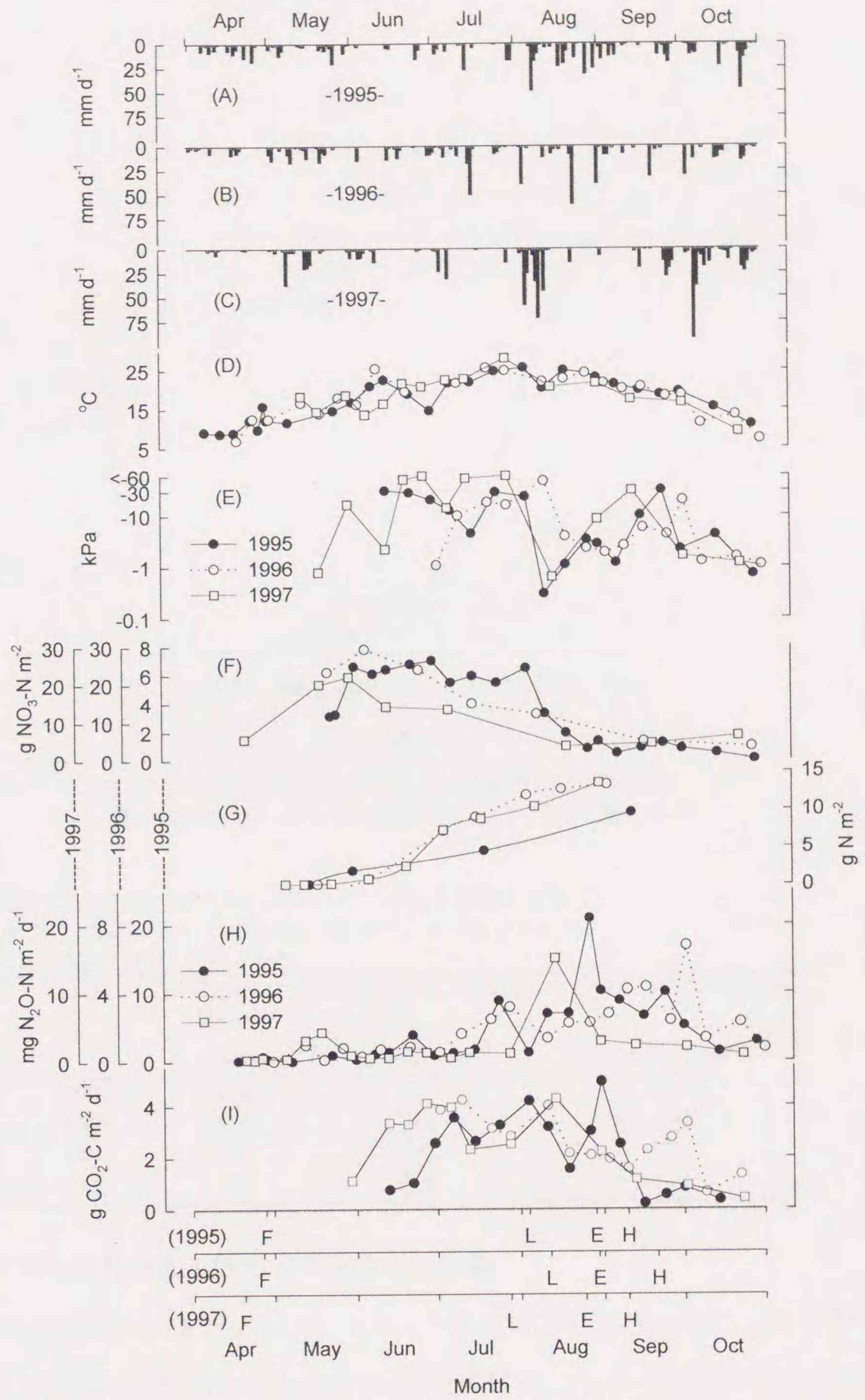


図5-1 3年間(1995-1997)の生育期におけるN_2Oフラックス、土壌呼吸、およびそれらの要因の推移。
(A)は1995年の日降水量、(B)は1996年の日降水量、(C)は1997年の日降水量、(D)は地温(深さ10cm)、(E)は土壌のマトリックポテンシャル、(F)は作土の硝酸含量(1995年は深さ0～5cm、1996、1997年は深さ0～30 cm)、(G)はタマネギの窒素吸収量、(H)はN_2Oフラックス、(I)は土壌呼吸を示す。
－●－は1995年、‥○‥は1996年、－□－は1997年を示す。(F)および(H)の縦軸の値は年次によって異なっている。横軸のFは施肥、Lはタマネギの地上部倒伏開始、Eは根切り、Hは収穫を示している。

土壌呼吸(図5-1(I))は、0.23～4.93(g C m^{-2} d^{-1})の範囲にあった。土壌呼吸は、1995年および1997年の6月に地温の上昇とタマネギの成長と併行して上昇した。土壌呼吸の最大値は7月と8

月に認められた。根切り後の地温の低下に伴って土壌呼吸は低下した。

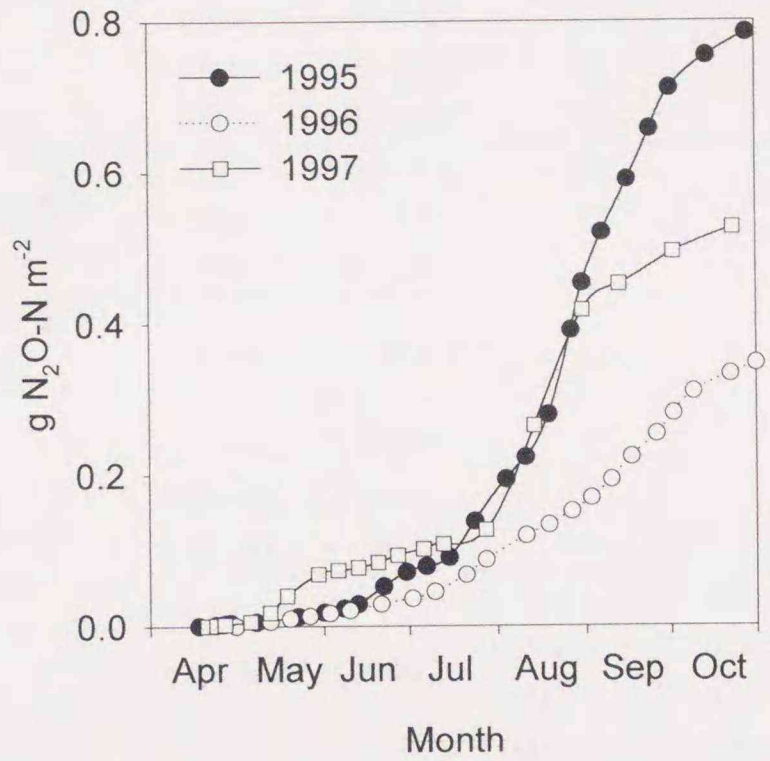


図5-2　3年間の生育期におけるN_2O積算フラックスの推移
—●—は1995年、‥○‥は1996年、—□—は1997年を示す。

表5-1　N_2OフラックスおよびCO_2フラックス積算値の比較
計算した期間は、全ての年次に両フラックスが測定された
7月上旬から10月下旬である。

年次	期間内の降水量	N_2Oフラックスの積算値	CO_2フラックスの積算値
	mm	mg N_2O-N m^{-2}	g CO_2-C m^{-2}
1995	570	713	205
1996	510	310	290
1997	740	433	262
最大年/最小年		2.3	1.4

(2)生育期における N_2O および土壌呼吸の全放出量

図 5-2 に、3 年間の生育期における N_2O フラックスの積算推移を示す。6 月下旬までの約 2 ヶ月間の N_2O 放出量は全期間の 20%以下であったのに対し、8 月～10 月の 3 ヶ月間の N_2O 放出量は全期間の少なくとも 50%以上を占めた。タマネギ生育期間の全 N_2O 放出量(g N m^{-2})は、0.78(1995 年)、0.35(1996 年)、0.53(1997 年)であり、3 年間で 2 倍程度の年次変動が認められた。

表 5-1 に、N_2O フラックスおよび CO_2 フラックス積算値の比較を示す。期間内の降水量と N_2O フラックス積算値には特に関係が認められないと思われた。N_2O フラックスの年次変動(最大年/最小年)は、2.3 倍であり、CO_2 のそれ(1.4 倍)と比較して高かった。

表5-2　本調査地おける施肥窒素量およびN_2O放出量、および既往の農耕地における測定事例

事例	測定年	N_2Oフラックス測定期間	施肥窒素量 (A)	N_2O放出量 (B)	施肥に対するN_2O放出量の割合 (B/A×100)
			g N m^{-2}	g N m^{-2}	%
本論文(道央灰色低地土)(タマネギ)	1995	4月～10月	27	0.78	2.9
	1996	5月～10月	31	0.35	1.1
	1997	4月～10月	28	0.53	1.9
道央灰色低地土における事例[*1](タマネギ)	1992	4月～10月	22	1.07	4.9
	1993	4月～10月	22	0.68	3.1
	1994	4月～10月	22	0.51	2.3
日本の畑地における推定値[*2]					
(麦類)	1992～94	3ヶ月間以上	10	0.04	0.5
(野菜)	1992～94	3ヶ月間以上	21	0.15	0.7
(馬鈴薯/春植え)	1992～94	3ヶ月間以上	8	0.16	2.0
(全体、茶園除く)	1992～94	3ヶ月間以上	11	0.08	0.7
(茶園)	1992～94	通年	80	3.69	4.6
世界における96の測定事例の結果[*3](鉱質土壌)	1978～90[*4]	5ヶ月間以上	11(0～ 52)[*5]	0.00～0.20(51事例)	0.8(0.0～2.1)[*5]
			23(0～123)[*5]	0.20～0.40(24事例)	1.7(0.3～2.9)[*5]
			23(0～ 41)[*5]	0.40～0.80(11事例)	3.2(1.2～7.7)[*5]
			54(14～ 70)[*5]	0.80～4.20(10事例)	4.3(1.6～6.7)[*5]
アメリカ合衆国における13の測定事例の結果[*3](有機質土壌)	1981～82[*4]	通年	0～17	0.7～16.5	42～89

*1 木曽(1999)による測定値。本論文とは別の圃場である。
*2 鶴田(1997)による推定値。
*3 Bouwman(1996)のまとめから、測定日が5ヶ月間(150日間)以上のデータのみ選択した。
*4 発表年
*5 平均値と範囲(括弧内)

第4節　考察

(1)N_2O 放出量および既往の測定事例との比較

これまで、施肥されたアンモニウム態窒素の硝化が進行している施肥後数週間内に N_2O フラックスが上昇することが、多くの研究者によって観察されている(Mosier 1994; 楊 1994)。しかし、降水や灌漑などによって土壌水分が上昇し、N_2O フラックスが上昇する事例(Mosier and Hutchinson 1981)も報告されている。本圃場では、施肥後から 6 月上旬までに土壌の硝酸含量の増加が認められた(図 5-1(F))ので、この期間に硝酸化成が生じていたと思われる。しかし、6 月下旬までの N_2O 放出量は全放出量の 20%以下であった(図 5-2)。一方、全ての年に共通して夏以降に N_2O フラックスが上昇し(図 5-1(H))、全 N_2O 放出量の少なくとも 50%以上は 8 月以降に認められた(図 5-2)。また、フラックスが上昇した夏以降では、土壌水分ポテンシャルが上昇する傾向が認められた(図 5-1(E))。以上から、N_2O 放出量のほとんどは脱窒過程による可能性が高い。

表 5-2 に、3 ヶ年における窒素施肥量、N_2O 放出量、および施肥に対する N_2O 放出量の割合、さらに、これまでに報告されている農耕地における同様の値（Bouwman 1996; 鶴田 1997; 木曽 1999）を示す。本圃場における N_2O 放出量は 0.35～0.78（g N m^{-2}）、施肥に対する N_2O 放出量の割合は 1.1～2.9%の範囲にあり、それらの年次変動は 2 倍以上であった。木曽 1999 によると、別の北海道灰色低地土タマネギ畑においても、3 年間の調査で本圃場と同程度の N_2O 放出量（0.51～1.07 g N m^{-2}）が認められ、フラックスの推移および放出量の年次変動も本圃場と類似していた。これらの北海道灰色低地土タマネギ畑の N_2O 放出量および施肥に対する割合は、茶園を除く本州の畑地（鶴田 1997）と比較して明らかに高かった。茶園における N_2O 放出量および施肥に対する割合が高い（鶴田 1997）のは、施肥窒素量が 80（g N m^{-2}）と極めて大きいことが原因と思われる。世界の農耕地 96 の測定事例（Bouwman 1996）では、全事例の半分以上の測定例で N_2O 放出量が 0.20（g N m^{-2}）以下であり、4 分の 3 の事例が 0.4（g N m^{-2}）以下の放出量であった。これら世界の事例と比較しても、本調査地点における N_2O 放出量は高かった。

この原因の解明は今後の検討課題であるが、本圃場が粘質で湿性な低地土であり、Linn and Doran 1984、Velthof and Oenema 1995 および Corre et al. 1996 が指摘しているように、土壌水分が強く影響している可能性が高い。

(2) N_2O フラックスと土壌呼吸の比較

土壌呼吸の推移は、N_2O フラックスの推移と比較して異なっていた。すなわち、土壌呼吸は、地温とタマネギの成長に伴って上昇し、地温の低下と根切り後に低下した（図 5-1(I)）。7 月から 10 月における土壌呼吸量は 205～290（g C m^{-2}）の範囲（表 5-1）であった。Paustian et al. 1990 は、スウェーデンのコムギ畑において生育期に 230（g C m^{-2} y^{-1}）の、本圃場とほぼ同量の土壌呼吸量を測定した。Osozawa and Hasegawa 1995 による日本（つくば）のダイズ畑における土壌呼吸測定の結果、夏の土壌呼吸は冬期間のそれよりも 10 倍以上高く、1360（g C m^{-2} y^{-1}）の本圃場よりも高い土壌呼吸量を測定した。これは、Osozawa and Hasegawa 1995 の場合では、地温が本圃場よりも高く、年間を通して測定を実施したためであると思われる。

本圃場における土壌呼吸量の年次変動は、N_2O 放出量の年次変動よりも小さかった（表 5-1）。土壌呼吸は根呼吸と微生物呼吸から生じる（阪田ら 1996）。よって、土壌呼吸量の年次変動が N_2O 放出量のそれよりも小さかったことは、根呼吸と微生物呼吸に影響を与える因子の変動が、N_2O フラックスに影響を与える因子の変動よりも小さかったことを示唆している。事実、根呼吸量に影響を与えると思われる成長量（窒素吸収量）、微生物呼吸に影響を与える地温の推移は 3 年間

でよく類似しておりそれらの年次変動は小さかった(図 5-1(D)、(G))。降水のパターンは土壌水分の推移を決め、土壌水分は硝化・脱窒に大きな影響を与えることが知られている(Linn and Doran 1984)。降水量と N_2O フラックスにはとくに関係が認めらないが(表 5-1)、降水のパターンは 3 年間で著しく異なっていた(図 5-1(A)、(B)、(C))ことが、N_2O 放出量の年次変動に寄与している思われた。

第 5 節　要約

本章では、北海道の灰色低地土タマネギ畑からの N_2O 放出量について調査を実施し、これまで得られている日本あるいは世界の測定事例と比較することを目的とした。N_2O フラックスを、3 ヶ年(1995 年～1997 年)の生育期(4 月～10 月)に測定した。N_2O フラックスは 0.03～20.9(mg N m^{-2} d^{-1})の範囲にあった。施肥後から 6 月までに硝酸化成が生じていたが、6 月下旬までの N_2O 放出量は全放出量の 20%以下であった。一方、全ての年に共通して夏以降に土壌水分ポテンシャルが上昇する傾向が認められ、N_2O フラックスが上昇し、全 N_2O 放出量の少なくとも 50%以上は 8 月以降に認められた。よって、N_2O 放出量の大部分はは脱窒過程による可能性が高いと思われた。

生育期におけるN_2O放出量および施肥窒素に対する割合は、0.78(g N m^{-2})・2.9%(1995 年)、0.38(g N m^{-2})・1.1%(1996 年)、0.53(g N m^{-2})・1.9%(1997 年)であった。これらの年次変動(最大年/最小年)は 2.3 倍であった。これまでの日本あるいは世界の測定事例と比較すると、N_2O 放出量は高い部類にあった。この理由として、本圃場が粘質な低地土であることが可能性として考えられる。土壌呼吸量(g C m^{-2})は、205(1995 年)、290(1996 年)、262(1997 年)であった。土壌呼吸量の年次変動は 1.4 倍であり、N_2O のそれと比較して小さかった。これは、地温およびタマネギ成長量の年次変動が小さかったためであろう。これに対して、N_2O 放出量の年次変動が大きかったのは、降水パターンの違いが寄与しているものと推察した。

第 6 章　北海道の土壌構造が発達した灰色低地土タマネギ畑からの N_2O フラックス
－N_2O 生成と放出のメカニズム－

第 1 節　はじめに

第 5 章において、北海道の土壌構造が発達した灰色低地土タマネギ畑からの N_2O フラックスを測定し、生育期(4 月～10 月)における N_2O 放出量は、これまでの日本あるいは世界の測定事例と比較して高い部類であったと述べた。また、前章では、6 月までに施肥窒素の硝酸化成が生じていたが、施肥後から 6 月下旬までの N_2O 放出量は、生育期間の全 N_2O 放出量の 20%以下であり、残りの 80%以上が 7 月以降に生じ、それは脱窒過程で生成した可能性が高いと述べた。本章では、7 月上旬から 10 月下旬における N_2O 生成と放出のメカニズムについて考察する。

一般に、高い土壌水分および酸素濃度の低下は、脱窒による N_2O の生成を増加させることが知られている(Linn and Doran 1984; Sahrawat and Keeney 1986; Arah et al. 1991)が、Smith 1980 は、一定以上の大きさの粒団は、その内部に嫌気的な領域を発達させることを示した。脱窒の基質となる硝酸イオンについて、Hatano et al. 1985、波多野ら 1988、Hatano and Sakuma 1991a 1991b は粒団が発達した土壌では、浸透水は主に粒団間粗孔隙を流れるが、溶脱する硝酸イオンの一部が粒団内にとりこまれるという硝酸に対する粒団のソースシンク効果を示した。Hojberg et al. 1994 は、粒団内部の酸素濃度と N_2O 濃度を測定し、粒団内で酸素濃度は低く N_2O 濃度は高いことを示した。以上の研究から、土壌構造が発達している場合には、硝酸に対する粒団のソースシンク効果が N_2O の生成と放出に重要である可能性が高い。

Hayashi and Hatano 1999 は、本圃場における硝酸溶脱の調査(1996 年実施)から、降水は作土では粒団間粗孔隙を流れ、心土ではきれつをすばやく移動することを示し、硝酸に対する粒団のソースシンク効果が生じていることを明らかにした。Hatano and Sawamoto 1997 は、本圃場における 1995 年の N_2O フラックスについて報告し、硝酸溶脱後に N_2O フラックスが上昇したため、硝酸に対する粒団のソースシンク効果によって、溶脱する硝酸の一部が粒団内に拡散し、粒団内に発達した嫌気的部位で脱窒過程によって N_2O が生成したと推察した。本章では、3 年間(1995 年～1997 年)の調査結果について、土壌から大気への N_2O フラックスに加え、土層中の濃度およびフラックスを N_2O と CO_2 で比較すること、硝酸溶脱の推移などから、N_2O 生成と放出のメカニズムを検討した。

第2節 材料と方法

(1)調査地の概要

1995 年、1996 年、および 1997 年の生育期において、北海道道央三笠市のタマネギ畑(43° 14'N, 141° 50'E)において調査を行った。圃場の面積は約 2ha であり、暗渠がおおよそ 80～100cm の深さに埋設されている。土壌は、腐植質灰色低地土;農耕地土壌分類委員会 1995(a fine, mesic, Mollic Fluvaquents; Soil Survey Staff 1990)である。作土層の厚さはおおよそ 30cm で、耕起深は 10～15cm である。心土には、角柱状の構造が認められ割れ目状の孔隙が認められた。本圃場では、降水は作土の粒団間粗孔隙を優先してすばやく流れ、心土ではきれつをすばやく移動し、硝酸に対する粒団のソースシンク効果が生じていることが示されている(Hayashi and Hatano 1999)。作土の土性は SiC、全炭素含量は 3.4%、C/N 比は 12.1、 pH(H_2O)は 5.5 であり、心土の土性は HC、全炭素含量は 4.9%、C/N 比は 16.0、pH(H_2O)は 4.4 であった(表 3-1、3-2)。

いずれの年も 4 月下旬に硫安と化成肥料による窒素施肥、4 月下旬から 5 月上旬にタマネギ苗が移植された。7 月下旬から 8 月上旬にタマネギの地上部倒伏が生じたが、倒伏した地上部はそのまま放置されていた。8 月下旬に根切り作業が行われ、9 月中旬に収穫された。詳細については表 3-3 および表 3-4 に記載した。

(2)土壌空気中の N_2O および CO_2 濃度

1995 および 1996 年では、ガス採取用チューブを取り付けた塩化ビニル製のカップ(直径 40 mm、高さ 40 mm)を深さ 5、10、20、および 30cm に埋設した。1997 年では、ガス採取用チューブを取り付けた塩化ビニル製のチューブ(直径 12 mm)(遅沢 1997 を改変)を 1995 年と同じ深さに埋設した。深さ 5cm は 9～10 反復で、深さ 10～30cm は 3～10 反復で埋設した。シリンジを用いて土壌中のガスをテドラーバックに採取し、その N_2O および CO_2 濃度分析を行った。また、深さ 0cm(地表面)の大気も同時に採取し分析した。N_2O 濃度の分析は、ECD 付きのガスクロマトグラフィーを用いた。CO_2 濃度の分析は、赤外線方式の CO_2 計(富士電機 ZFP-5)を用いた。

(3)土壌のマトリックポテンシャル、気相率、および土層中の相対ガス拡散係数(D/D_0)

テンシオメータを深さ 10、20、および 30cm に埋設し、マノメータを用いてマトリックポテンシャルを求めた。測定は、チャンバー法実施時に行った。さらに、5～10、15～20、および 23～28cm の 3 深度から 100mL の採土管を用いて不撹乱土壌を採取し、土壌のマトリックポテンシャルを、順次、

0.098（水飽和）、0.31、0.98、3.1、9.8、および 31（–kPa）に調整し、その都度 D/D_0 と気相率を測定した。D/D_0 は遅沢 1997 の方法で測定した。水飽和時の D/D_0 は 0 と仮定した。3 深度それぞれの土壌のマトリックポテンシャルと気相率および D/D_0（表 3-4）の回帰式を得、その回帰式と圃場で測定したマトリックポテンシャルを用いて、深さ5cm以深の気相率およびD/D_0を計算によって求めた。以上によって求めた土層中の D/D_0 と気相率は、以下に述べる心土から作土へ流入するガスフラックス、および作土気相中に存在する N_2O および CO_2 量の計算に用いた。

(4)心土から作土へ流入する N_2O、CO_2 フラックス

作土厚さは約 30cm なので、心土から作土へ流入するガスフラックスは、深さ 25cm を通過するガスフラックスであるとした。それは、拡散によって生じるものと考え、次式のフィックの拡散式を用いてを計算した。

$$F_D = -D \times [dC/dz] = -(D/D_0) \times [D_0] \times [\rho \times (C_{20}-C_{30})/d] \quad (6\text{-}1)$$

ここで、F_D はガスフラックス（g m^{-2} s^{-1}）、D は土壌のガス拡散係数（m^2 s^{-1}）、dC/dz はガスの濃度勾配（g m^{-3} m^{-1}）、D/D_0 はマトリックポテンシャルから計算した深さ 23～28cm の相対ガス拡散係数（無次元）、$[D_0]$ は N_2O あるいは CO_2 の自由大気中における拡散係数（m^2 s^{-1}）、ρ は N_2O あるいは CO_2 のガスの密度でどちらも 1.98×10^3（g m^{-3}）（国立天文台編 1999b）、C_{20} および C_{30} は深さ 20cm および 30cm におけるガス（N_2O あるいは CO_2）濃度（g m^{-3}）、d は距離（m）（ここでは 0.10）、である。鉛直上向きのフラックスを正とした。$[D_0]$ は次式で定義される。

$$D_S = [D_0] \times (273/T_S)^n \times (P/760) \quad (6\text{-}2)$$

ここで、D_S は N_2O あるいは CO_2 の標準状態における自由大気中の拡散係数（m^2 s^{-1}）であり、N_2O は 0.143×10^{-4}、CO_2 では 0.139×10^{-4} である（Pritchard and Currie 1982）。n は定数で 1.79（Pritchard and Currie 1982）、T_S は温度（K）、P は圧力（mm Hg）であり、ここではそれぞれ 293、760 とした。なお、心土から作土へ流入するフラックスの積算値（流入量）は、直線補完によって求めた。

(5)暗渠排水からの硝酸態窒素溶脱

1996 年および 1997 年において、暗渠排水口に三角堰を設置し、圧力センサを用いて暗渠排水流量を自動的に連続測定した。暗渠排水をおよそ週一回採取し、イオンクロマトグラフを用いてその硝酸態窒素濃度を測定した。暗渠排水流量とその暗渠排水中の硝酸態窒素濃度には有意な関係が認められ（Hayashi and Hatano 1999）、その関係式と流量の連続データを用いて、暗渠排水

からの硝酸態窒素溶脱量を連続的に推定した。

(6)作土における N_2O および CO_2 生産量、およびその土壌から大気への放出量への寄与率

作土における N_2O および CO_2 生産量を以下の物質収支式を用いて計算した。

$$P = \Sigma Fout - \Sigma Fin - (Me - Ms) \quad (6\text{-}3)$$

ここで、P は、期間のはじめから終わりまでの作土における N_2O および CO_2 の生産量、ΣFout は、期間開始から終了までの N_2O および CO_2 の土壌から大気への放出量、ΣFin は、期間開始から終了までの N_2O および CO_2 の心土から作土への流入量、Me は期間終了時に作土に存在する N_2O および CO_2 の存在量、Ms は期間開始時に作土に存在する N_2O および CO_2 の存在量である。Me および Ms は、土壌断面中のガス濃度およびマトリックポテンシャルより求めた気相率から計算した。単位はすべて g N m^{-2} (g C m^{-2}) である。計算期間は、7 月から 10 月とした。

大気への放出量に対する作土における N_2O および CO_2 生産量の寄与率(%)(C-top)は次式を用いて計算した。

$$C\text{-}top = P / (\Sigma Fout) \times 100 \quad (6\text{-}4)$$

また、大気への放出量に対する心土の寄与率(%)(C-sub)は次式を用いて計算した。

$$C\text{-}sub = (\Sigma Fin) / (\Sigma Fout) \times 100 \quad (6\text{-}5)$$

(7)作土気相中における N_2O および CO_2 の平均滞留時間

7 月から 10 月における、土壌から大気へのガスフラックスの作土(0～25cm)気相中における平均滞留時間は、次式によって表わされる。

$$R = M / F \quad (6\text{-}6)$$

ここで、R は平均滞留時間(s)、M は作土気相中に存在するガスの量(g m^{-2})、F は大気へのガスフラックス(g m^{-2} s^{-1})である。M は、土壌断面中のガス濃度およびマトリックポテンシャルより求めた気相率から計算した。R の値は、対象とする土層深さにより変化するが、ここでは作土(0～25cm)における N_2O と CO_2 の R 値の比較を目的とした。

(8)その他の測定項目

日降水量、および土壌硝酸含量:第 5 章 第 2 節 (4)その他の測定項目に記載した。

第 3 節　結果

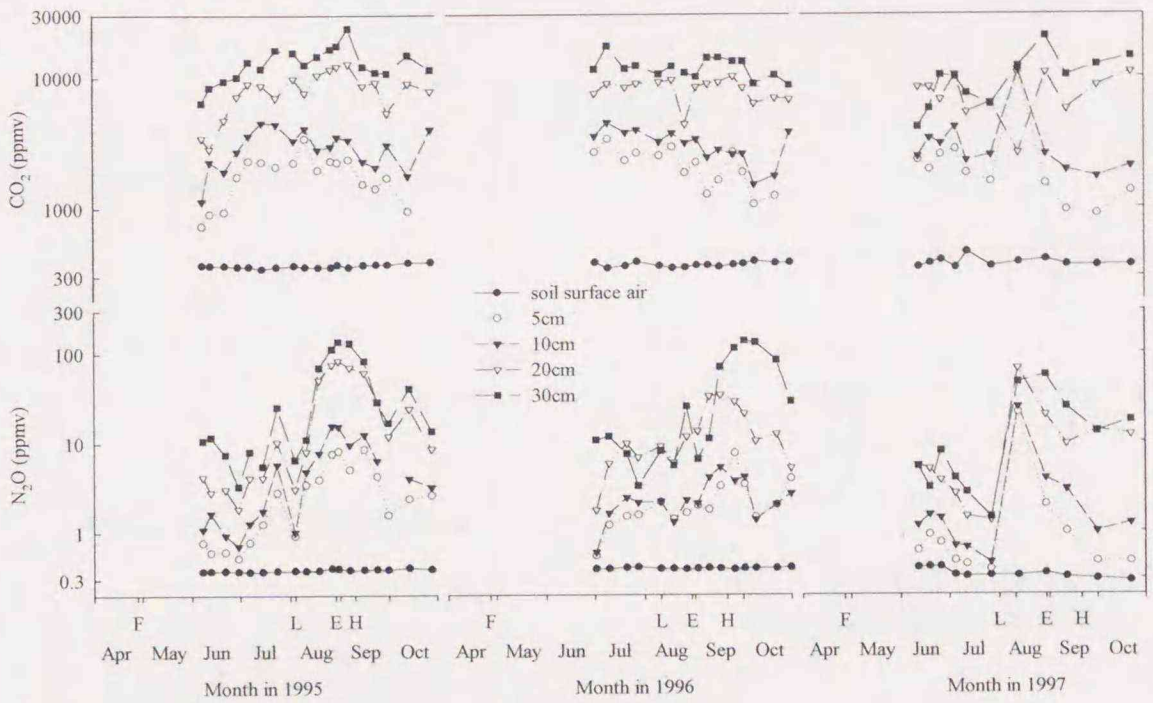


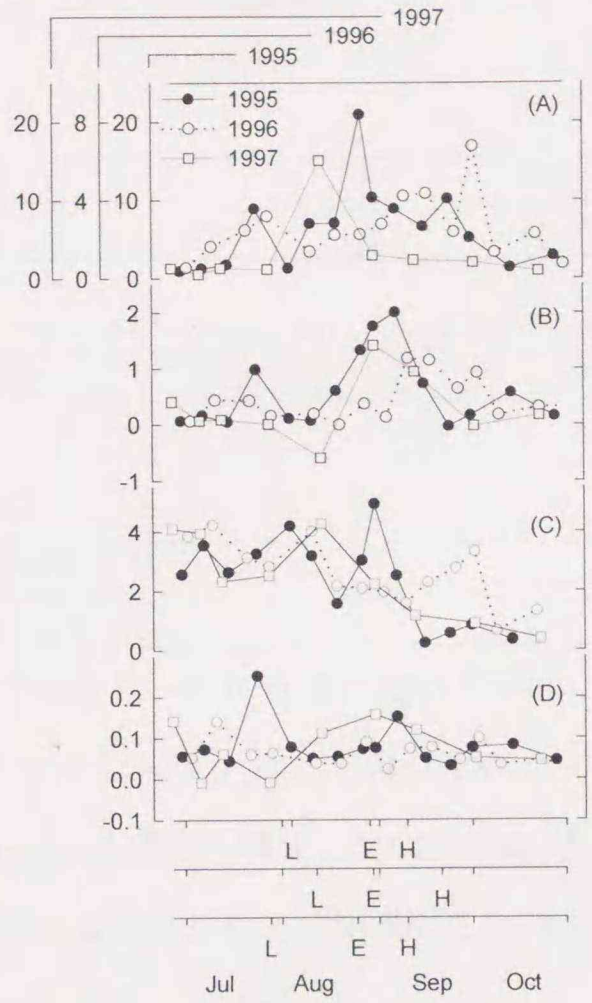
図6-1 土壌気相中のN_2O（下段）およびCO_2（上段）濃度の推移。
●は土壌表面大気、○は深さ5cm、▼は深さ10cm、▽は深さ20cm、■は深さ30cmの濃度を示す。
横軸のFは施肥、Lはタマネギ地上部の倒伏開始、Eは根切り、Hは収穫を示している。

(1) 土壌気相中の N_2O および CO_2 濃度推移

図 6-1 に、深さ 0、5、10、20、および 30cm における土壌気相中の N_2O および CO_2 の濃度推移を示す。深さ0cm（土壌表面大気）の濃度は、清浄大気中の濃度（陽1994）（CO_2では350ppmv、N_2O では 0.3ppmv）とほぼ等しい値であった。CO_2 と比較して N_2O の濃度推移は変化が大きく、夏以降に大きく上昇する傾向が認められた。両ガスとも 1997 年の数回の調査日を除いては、深さとともに濃度は上昇していた。これは土壌から大気へ、および心土から作土へガスが拡散したことを示している。

(2) 心土から作土へ流入する N_2O、CO_2 フラックスの推移

図 6-2 に、心土から作土へのフラックスの推移と、第 5 章で示した土壌から大気へのフラックス推移の結果と併せて示す。心土から作土へ流入するN_2Oフラックスは–0.59～2.00（mg N m^{-2} d^{-1}）、CO_2 フラックスは–0.009～0.252（g C m^{-2} d^{-1}）の範囲にあり、これらのフラックスは、全ての測定日おいて土壌から大気へのフラックスよりも低い値であった（図 6-2A と B･C と D）。土壌から大気への N_2O フラックスは 8 月および 9 月に高かった（図 6-2A）が、土壌から大気への CO_2 フラックス（土壌



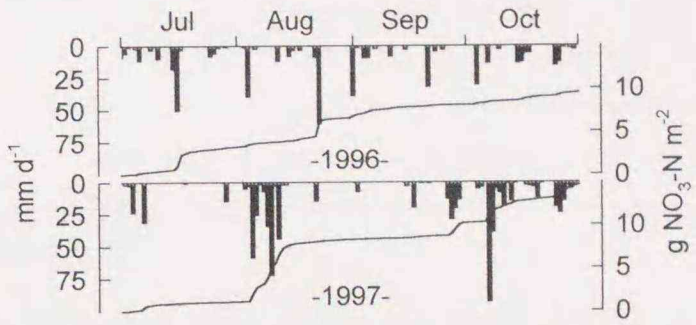


図6-3 降水量と暗渠排水からの硝酸態窒素溶脱の積算推移

図6-2 N_2OおよびCO_2フラックスの推移。
(A)は土壌から大気へのN_2Oフラックス、(B)は心土から作土へ流入するN_2Oフラックス、(C)は土壌から大気へのCO_2フラックス、(D)は心土から作土へ流入するCO_2フラックス、●は1995年、○は1996年、□は1997年を示す。横軸のLはタマネギ地上部の倒伏開始、Eは根切り、Hは収穫を示す。

呼吸)は 7 月上旬から低下した(図 6-2C)。心土から作土へ流入する N_2O フラックスは、土壌から大気への N_2O フラックスが高かった 8 月および 9 月に上昇した(図 6-2B)。しかし、心土から作土へ流入する CO_2 フラックスは、季節による変化は認められなかった(図 6-2D)。

(3)暗渠排水からの硝酸態窒素溶脱量の推移

図 6-3 に、暗渠排水からの硝酸態窒素溶脱量を降水量とともに示す。図 6-3 はその積算値である。1996 年では 7 月および 8 月に硝酸態窒素溶脱量が著しく増加し、これは降水量の増加と対応していた。1997 年においても、8 月上旬および 9 月下旬に硝酸態窒素の溶脱が著しく増加しており、これは降水量の増加と対応していた。7 月から 10 月の溶脱量は、1996 年で 9.5(g N m^{-2})、1997 年で 14.7(g N m^{-2})であった。

(4)作土における N_2O および CO_2 収支

表 6-1 に示すように、土壌から大気への N_2O 放出量の 83.6～92.7%は、作土で生産されていた。心土から作土へ流入した N_2O 量は、3 ヶ年で 31.6～68.3(mg N m^{-2})の範囲にあった。これは、

表6-1　7月から10月までの作土におけるN_2O生産量とその大気へのフラックスに対する寄与率

計算した期間	作土から大気へのN_2O放出積算値	心土から作土へ流入したN_2O積算値	計算開始時から終了時の作土気相中N_2O存在量の差	作土におけるN_2O生産量	大気へのフラックスに対する作土の寄与率	大気へのフラックスに対する心土の寄与率
	ΣFout	ΣFin	Me−Ms	P=ΣFout−Σfin +(Me−Ms)	C−top= (P/ΣFout)×100	C−sub= (Σfin/ΣFout)×100
	mg N m^{-2}	mg N m^{-2}	mg N m^{-2}	mg N m^{-2}	%	%
1995年 6/30〜10/28	713	68.3	0.06	645	90.4	9.6
1996年 7/02〜10/31	310	51.0	0.10	259	83.6	16.5
1997年 6/27〜10/23	433	31.6	0.02	402	92.7	7.3

表6-2　7月から10月までの作土におけるCO_2生産量とその大気へのフラックスに対する寄与率

計算した期間	作土から大気へのCO_2放出積算値	心土から作土へ流入したCO_2積算値	計算開始時から終了時の作土気相中CO_2存在量の差	作土におけるCO_2生産量	大気へのフラックスに対する作土の寄与率	大気へのフラックスに対する心土の寄与率
	ΣFout	ΣFin	Me−Ms	P=ΣFout−Σfin +(Me−Ms)	C−top= (P/ΣFout)×100	C−sub= (Σfin/ΣFout)×100
	g C m^{-2}	g C m^{-2}	g C m^{-2}			
1995年 6/30〜10/14	205	9.16	−0.02	196	95.5	4.5
1996年 7/02〜10/31	290	7.38	0.00	283	97.5	2.5
1997年 6/27〜10/23	262	8.73	−0.03	253	96.7	3.3

作土から大気へのN_2O放出量の7.3〜16.5%に相当した。

表 6-2 に示すように、土壌から大気への CO_2 放出量の 95.5〜97.5%は、作土で生産されていた。心土から作土へ流入した CO_2 量は、3 ヶ年で 7.38〜9.16(g C m^{-2})の範囲にあった。これは、作土から大気への CO_2 放出量の 2.5〜4.5%に相当した。

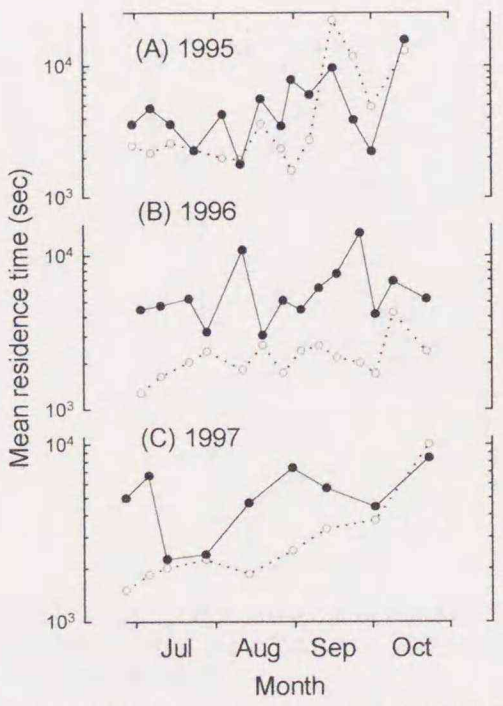


図6-4 作土気相中におけるN_2OおよびCO_2の平均滞留時間の推移。
(A)は1995年、(B)は1996年、(C)は1997年、●はN_2O、○はCO_2を示す。

(5)作土気相中における N_2O および CO_2 の平均滞留時間

図 6-4 に、作土気相中における N_2O および CO_2 のの平均滞留時間を示す。N_2O の平均滞留時間は、1,780〜15,700(sec)の範囲にあり、CO_2 のそれは 1,280〜22,200(sec)であった。3 ヶ年を

通して平均滞留時間は N_2O の方が高い傾向を示し(図 6-4)、対にした t 検定を実施したところ、N_2O の平均滞留時間が有意に長かった。

第 4 節　考察

(1)N_2O 生成と放出のメカニズム

第 5 章で示したように、施肥窒素の硝化が生じていた 6 月下旬までの N_2O 放出量は、全 N_2O 放出量の 20%以下であった(図 5-2)。よって、本圃場では、全 N_2O 生成の 80%以上が硝化以外のメカニズムで放出していたと推察される。7 月以降では、心土から作土へ流入する CO_2 フラックスには大きな季節変動が認められなかったのに対し、心土から作土へ流入する N_2O フラックスは、8 月から 9 月に大きく上昇するという特徴が認められた(図 6-2B･D)。また、この 8 月から 9 月には、降水直後に暗渠排水からの硝酸溶脱量が著しく増加していた(図 6-3)。この点に着目し、N_2O の生成のメカニズムを考察するために、降水、硝酸態窒素溶脱の積算値、土壌から大気への N_2O･CO_2 フラックスの積算値および心土から作土への N_2O･CO_2 フラックスの積算値の推移を、前章で示した作土の硝酸態窒素含量と併せて年次別に図 6-5 に示す。

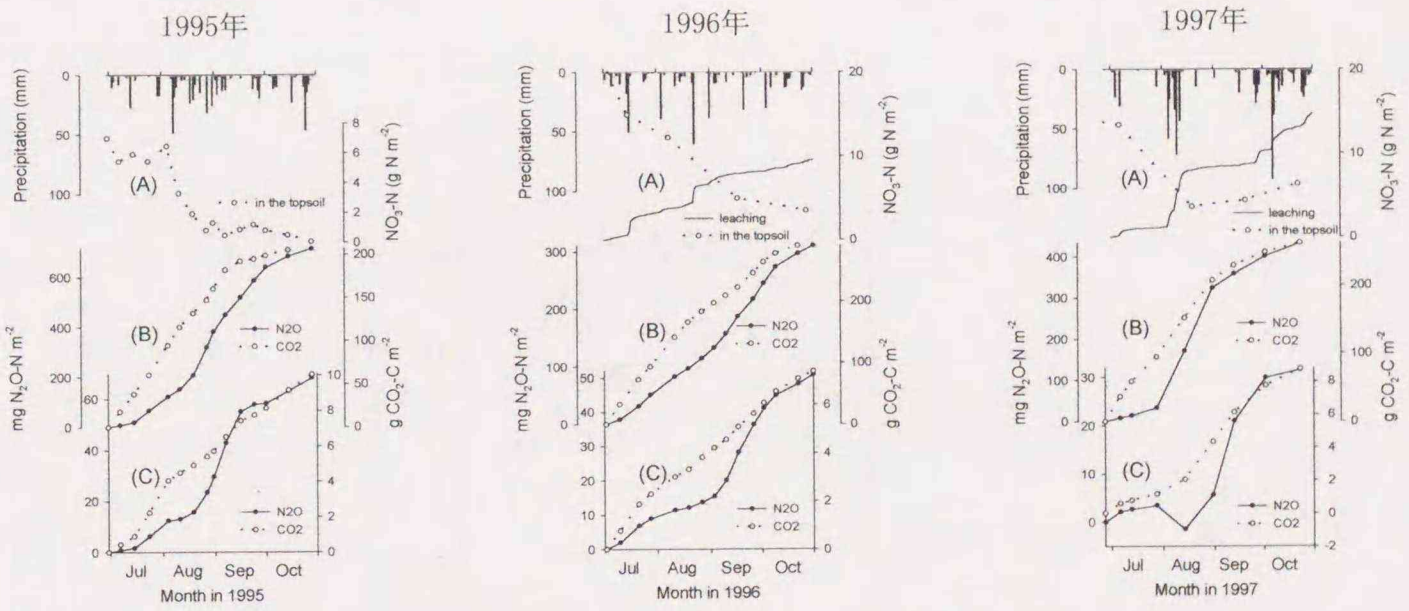


図6-5 1995年、1996年、および1997年における(A)降水、作土の硝酸態窒素含量(○)(1995年は0～5cm、1996および1997年は0～30cm)、および暗渠排水からの硝酸溶脱量の積算推移(実線)(B)土壌から大気へのN_2O･CO_2フラックスの積算値、および(C)心土から作土へのN_2O･CO_2フラックスの積算値の推移

心土から作土へ流入するフラックスの積算推移はN_2OとCO_2では大きく異なっていた(図6-5C)。すなわち、いずれの年においても、心土から作土へ流入する CO_2 はほぼ一定速度で増加する傾向であった。これに対し、心土から作土へ流入する N_2O は、硝酸溶脱量が著しく増加した後に増加した。すなわち、1996 年 7 月中旬から 8 月上旬、同年 9 月上旬から 9 月下旬、1997 年 8 月中旬から 9 月中旬において、心土から作土へ流入する N_2O フラックス積算値の傾きは CO_2 のそれと

比較して高かった(図 6-5)。1995 年でも、作土の硝酸態窒素濃度の推移から大きな硝酸溶脱が生じたと思われた後の 8 月中旬から 9 月中旬において同様の傾向が認められた。また、土壌から大気へのフラックスに対して心土から作土へ流入するフラックスの寄与率は、CO_2 では、2.5～4.5%であったのに対し(表 6-1)、N_2O では 7.3%～16.5%と高かった(表 6-2)。これは、N_2O が CO_2 よりも心土で多量に生成されたことを示している。

心土において排水は亀裂中をすばやく移動するが、その過程で、亀裂面から粒団内へ水吸収され、その際溶存する硝酸態窒素の一部が粒団のソースシンク効果によって粒団内に拡散する(Hatano et al. 1985; 波多野 1988)。本圃場でも同様のことが生じていると考えられる。さらに、粒団内に吸収された水は亀裂から排水されても留まり、粒団内に嫌気的な部位を発達させたのであろう。このようにして粒団に拡散して取り込まれた硝酸は、粒団内に発達した嫌気的部位で脱窒され、中間生成物である N_2O が生成したと考えられる。

さらに、土壌から大気への N_2O フラックスの 84%以上は作土で生産されており(表 6-2)、心土から作土へ流入するフラックスが上昇した際に、土壌から大気への N_2O フラックスも上昇していた(図6-5)。Hayashi and Hatano(1999)は本圃場の作土でも粒団のソースシンク効果を示唆している。よって、作土でも心土と同様の脱窒過程によるメカニズムによって N_2O が生成したものと考えられる。

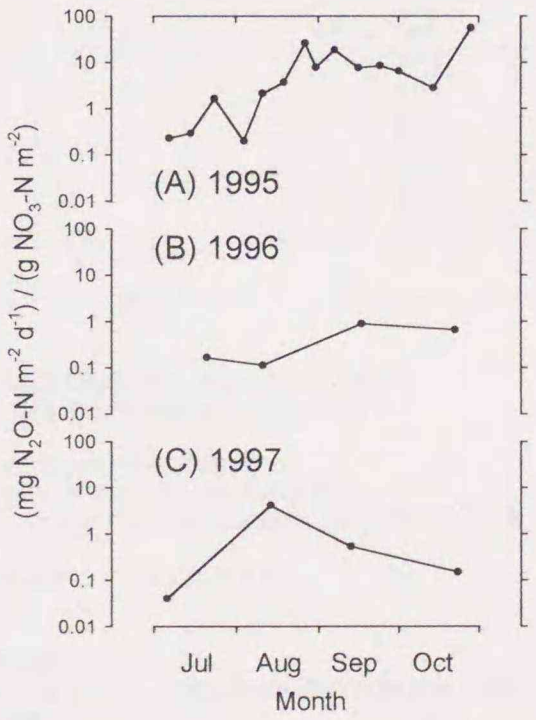
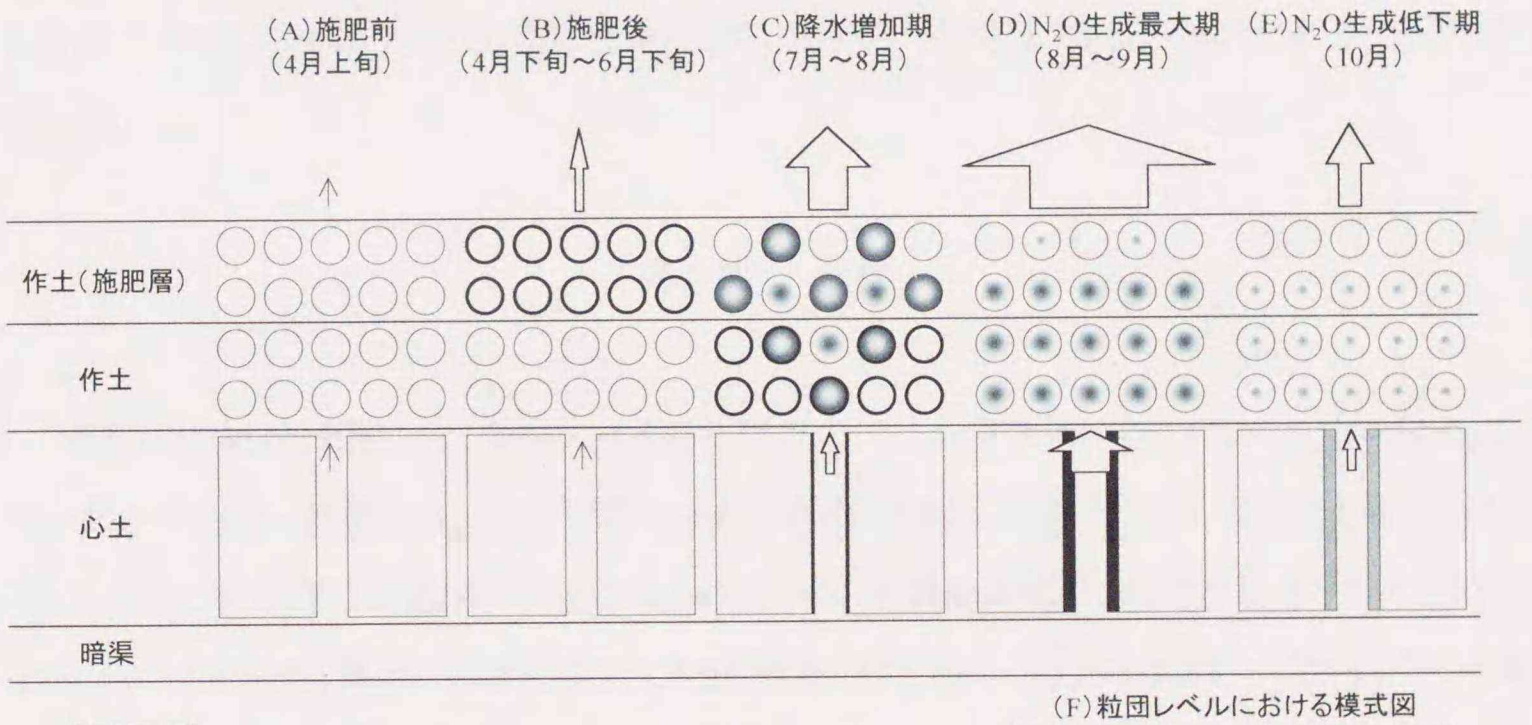


図6-6 作土に存在する硝酸態窒素あたりの土壌から大気へのN_2Oフラックスの推移
(A)は1995年、(B)は1996年、(C)は1997年を示す。

作土に存在する硝酸態窒素あたりの土壌から大気への N_2O フラックスを求めたところ、9 月に最も高かった(図 6-6)。また、7 月と比較して、N_2O フラックスが上昇した 9 月では、作土に存在す

る単位硝酸当たりの N_2O フラックスは、少なくとも 5 倍以上高かった。このことは、作土の粒団内に存在し脱窒をうける可能性がある硝酸態窒素が高まったことをを示している。また、いずれの年も 10 月には N_2O フラックスが低下した理由も、作土の粒団内に存在し脱窒をうける可能性のある硝酸態窒素が減少したためであるといえる。

また、N_2O および CO_2 の作土気相中の平均滞留時間は、いずれの年においても、N_2O は CO_2 のよりも有意に長かった(図 6-4)。これは、N_2O の方が CO_2 と比較して、土壌から大気への放出が生じにくいことを示している。CO_2 と N_2O の自由大気中の拡散係数はほとんど等しい(Pritchard and Currie 1982)ので、本来ならば平均滞留時間はほぼ等しくなるはずである。気相中の CO_2 は土壌中で形態変化を受けないと考えて良いが、N_2O は脱窒の中間生成物なので、さらに N_2 まで還元される可能性がある(Sahrawat and Keeney 1986)。これが、N_2O 平均滞留時間を長くした原因であると思われる。したがって、粒団内で生成された N_2O が N_2 まで還元される以前に粒団外に拡散し、粒団間の粗孔隙を通して拡散したという N_2O 放出のメカニズムが生じていたと考えられる。以上の考察に基づいて、粒団内の硝酸濃度推移と N_2O 生成のメカニズム模式図を図 6-7 にまとめた。



(F)粒団レベルにおける模式図

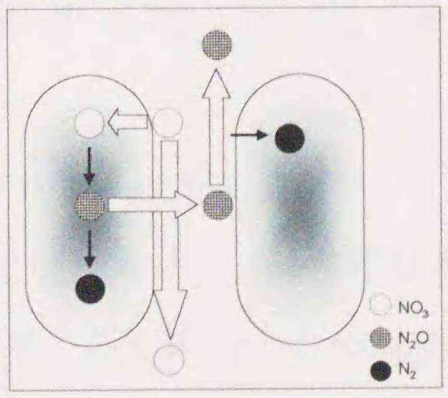


図6-7(A～E)
土壌断面における粒団内のNO_3分布推移と脱窒過程によるN_2O生成の模式図
(濃淡は粒団内のNO_3分布ををを示し、矢印の太さはN2O生成の大きさを示す)
(A)施肥前
(B)施肥後 硝酸化成によるN_2O生成、粒団内のNO_3濃度は低い
(C)降水増加期 粒団内にNO_3が拡散し、脱窒によるN_2O生成が増加
(D)N_2O生成最大期 作土全体のNO_3は減少するが、さらに粒団内にNO_3が拡散し、脱窒によるN_2O生成が最大となる
(E)N_2O生成低下期 粒団内のNO_3も減少し、N_2O生成は低下する

図6-7(F)
粒団レベルにおける物質の移動と変換模式図
濃淡は還元領域が、粒団内に発達した様子を示し、白抜矢印は物質の移動(溶脱と拡散)、矢印は物質の返還過程(脱窒)をしめす。

(2)タマネギ残渣が N_2O フラックスに与える影響

ところで、新鮮有機物の供給が微生物活性を高め、N_2O 発生を促進するという報告がなされて

いる(Beauchamp et al. 1989; 鈴木 1996; Smith et al. 1998)。これまで述べてきたように、7 月以降の N_2O フラックスの上昇は、硝酸態窒素が溶脱し、粒団内へ拡散が進行した後に生じていたものの、タマネギの地上部倒伏および地下部(根)残渣などの新鮮有機物の供給時期に重なっていた。したがって、地上部あるいは地下部(根)残渣が N_2O 生成に影響を与えた可能性はある。その経路として①残渣から無機態の窒素が土壌に分解放出される、②残渣の有機物が脱窒菌の栄養源(Sahrawat and Keeney 1986)となる、が考えられる。①に関して、タマネギの窒素吸収量は、前章によると 3 ヶ年で平均 12.1(g N m^{-2})であった。小川ら 1988 によると北海道のタマネギにおいて、総窒素吸収量に占める各部分の窒素吸収量の割合は、可食部 90%、地上部倒伏 9%、根 1%であり、残渣の窒素分解率は 0.5 年で 30%と報告されている。以上の値を本圃場に適用すると、タマネギの窒素吸収量の 10%が土壌に還元されるので、土壌に供給される無機態窒素量は、約 0.40(= 12.1×(9+1)/90×0.3)(g N m^{-2})と計算される。これに対して、作土に存在する硝酸態窒素含量は、9 月の時点で約 5(g N m^{-2})(図 6-5 1996・1997 年)であり、タマネギ残渣から供給される無機態窒素量(0.40)は大きな値ではない。ただし、②のように脱窒菌の栄養源となる有機物も同時に供給されるので、残渣が N_2O 生成にどの程度寄与しているかについては、今後の検討が必要であると思われる。

第 5 節　要約

構造が発達した土壌では、硝酸に対する粒団のソースシンク効果によって溶脱する硝酸イオンの一部が粒団内に拡散する。また、一定以上の大きさの粒団は内部に嫌気的な領域を発達させ、そこに拡散した硝酸は脱窒されることが知られている。本調査圃場は、構造が発達した灰色低地土タマネギ畑であり、降水は作土において粒団間粗孔隙を流れ、心土ではきれつをすばやく移動することが示されており、硝酸に対する粒団のソースシンク効果が生じている。このような土壌において、N_2O の生成と放出のメカニズムについて検討した。

施肥窒素の硝化が進行し、作土の硝酸含量が高く、降水量が少なかった施肥直後から 6 月下旬までの期間では、全 N_2O 放出量に対する寄与率は 20%以下であった。よって、本圃場では、施肥窒素の硝化過程による N_2O 生成は全 N_2O 生成の 20%以下の寄与率であったと思われた。これに対し、N_2O フラックスは、降水量が増加した夏以降に大きく上昇し、全 N_2O 放出量に対する 7 月から 10 月の寄与率は 80%以上であった。心土から作土へ流入する CO_2 フラックスと N_2O フラックスを比較したところ、N_2O フラックスは、硝酸溶脱が増加した後に上昇した。また、土壌から大気

への N_2O フラックスのほとんどは作土で生成されていた。以上から、硝酸に対する粒団のソースシンク効果によって、溶脱する硝酸の一部が粒団内に拡散し、粒団内に発達した嫌気的部位において脱窒過程によって N_2O が生成するというメカニズムを考えた。その粒団内で生成された N_2O が N_2 まで還元される以前に、粒団外に拡散し、粒団間の粗孔隙を通して拡散したと推察した。このように構造が発達した土壌では、硝酸に対する粒団のソースシンク効果が、脱窒過程による N_2O の生成と放出に大きな影響を与えていると考察した。

第 7 章　総合考察

本研究は、人為の影響によって生態系の炭素・窒素循環の変化が顕在化すると思われるふたつの生態系－シベリアタイガおよび北海道の野菜畑－を研究地として選択した。北方林は地球温暖化によって、その炭素蓄積量の変化が地球全体の炭素循環に与える影響が懸念される地帯の一つとされるが、人為による劣化（火災・伐採など）が問題となっている。その中でも特に、永久凍土地帯に位置するシベリアタイガの破壊が地球規模の気候システム・炭素循環において極めて重要視されている。また、北海道灰色低地土タマネギ畑では、多量の施肥が行われ、温室効果ガスとして強い効果のある N_2O 発生と硝酸の溶脱の問題が顕在化する可能性が高い。

本研究は、このような人為の影響を受けた生態系－シベリアタイガおよび北海道の野菜畑－において、現場における温室効果ガス（CO_2 および N_2O）の動態を定量的に測定し、土壌からの温室効果ガス発生についてそのメカニズムを明らかにするとともに、さらにこれらの生態系における温室効果ガスを中心とした炭素・窒素循環を把握し、生態系外に与える影響を明らかにすることを目的として行われたものである。これらのことを明らかにすることは、人為による地球温暖化や環境負荷の影響を制御するための基本的なデータのひとつとして極めて重要であると思われる。

本総合考察では、第 1 節においてふたつの生態系におけるそれらのメカニズムを比較しまとめる。さらに温室効果ガス発生を中心にした炭素・窒素循環を明らかにし、これらの生態が系外に与える影響について考察を行う。すなわち、年間土壌呼吸（根呼吸・微生物呼吸）および純一次生産量を推定し（第 2 節）、シベリアタイガ（および北海道農地）生態系が正味で吸収・放出する CO_2 量を推定し、森林火災が地球の炭素循環に与える影響を考察する（第 3 節）。さらに、農地では窒素循環過程を明らかにする（第 4 節）。

第1節

シベリアタイガ生態系と北海道灰色低地土タマネギ畑における温室効果ガス発生メカニズムの比較

前章までにおいて得られた結果から、図 7-1 に両地点における温室効果ガスの発生メカニズムをまとめて図示し、それらに対して比較を行う。

(1) 土壌呼吸

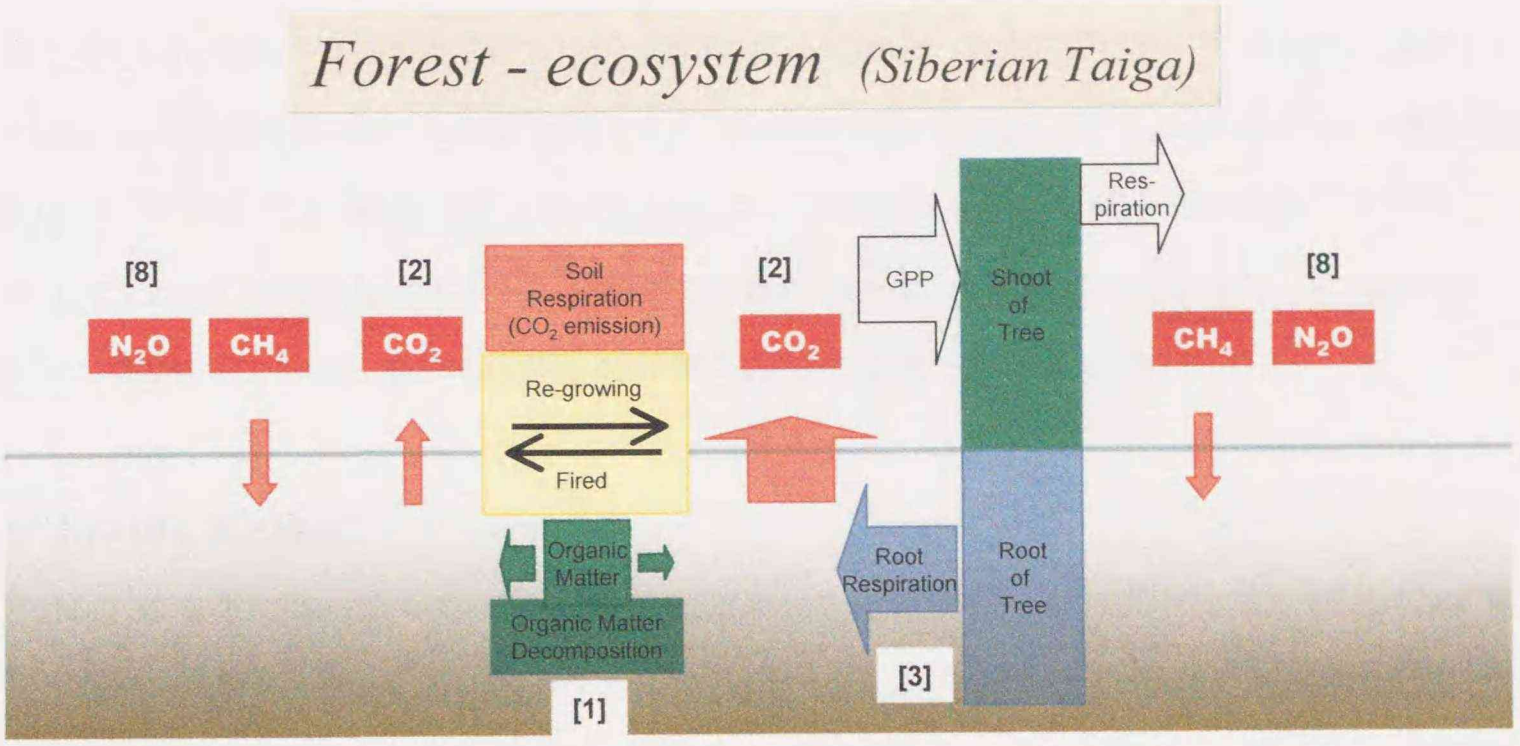


図7-1　シベリアタイガ生態系と北海道灰色低地土タマネギ畑における温室効果ガス発生のメカニズム
図中の[ ]内の番号については本文を参照のこと

シベリアタイガ生態系の土壌呼吸では、火災後に有機物分解量の増加が認められた（図 7-1[1]）（表 4-11）。これは、林冠の消失による地温上昇（図 4-1）および火災による有機物供給（図 4-5）が原因として考えられた。しかしながら、現場で測定した土壌呼吸は、火災後に低下し森林の回復後に上昇した（図 7-1[2]）（図 4-7）。土壌呼吸に対する根呼吸の寄与率は 70%以上であったため（図 7-1[3]）（表 4-11）、火災前後の土壌呼吸の変化は、主に根呼吸の増減で生じていた。

これに対して、北海道の農地における土壌呼吸の季節的推移は、春から夏にかけて土壌呼吸

が上昇し、収穫後に低下した(図 7-1[4])(図 5-1(I))。これは、春から夏にかけては地温の上昇(図 5-1(D))による微生物呼吸の増加(図 7-1[5])とタマネギの生育による(図 5-1(G))根呼吸の増加(図 7-1[6])、収穫後では、地温の低下(図 5-1(D))による微生物呼吸量の減少と根呼吸の消失(図 7-1[7])によると考えられる。このようにふたつの生態系における土壌呼吸については、基本的に同じメカニズムが生じており、根呼吸と微生物呼吸の消長が重要であるといえる。

(2)N_2O の生成と放出

N_2O の発生に関してシベリアタイガと北海道農地を比較すると、シベリアでにおいては N_2O 発生が認められなかった(図 7-1[8])(図 4-10)のに対し、北海道農地では、既往の測定例と比較しても高い放出量が認められた(図 7-1[9])(表 5-2)。このようにふたつの生態系における N_2O 発生は極めて対照的であった。これは、シベリアタイガと比較して農地には多量の窒素施肥が施与されるために、硝化(図 7-1[10])および脱窒(図 7-1[12])が強く進行し、その副産物あるいは中間生成物である N_2O が多量に生成したためである。すなわち、農地では人工的に窒素循環が増加し、N_2O 放出が増加したということができる。

北海道農地では、これまで多く指摘されていた硝化過程による N_2O 生成は大きく寄与しておらず、降水のパターンによって放出量が変化したと思われた(第 5 章)。土層中の N_2O・CO_2 フラックスを比較した結果、土壌粒団の嫌気的サイトにおける脱窒過程が重要であると推察した(第 6 章)。すなわち、降水によって生じる硝酸溶脱によって硝酸の一部が粒団内の嫌気的部位に拡散し(図 7-1[11])、還元的脱窒過程(図 7-1[12])で生成した N_2O が粗孔隙を経由して大気へ拡散する(図 7-1[13])というメカニズムを考えた。以上に述べたひとつひとつのプロセスは、第 2 章「研究史」、第 5・6 章で述べたように既往の研究によって明らかにされていたが、本研究では、土壌中の CO_2 フラックスと N_2O フラックスを定量的に比較することで、上に述べた一連の脱窒過程による N_2O 生成・放出が現場で実際に生じていると推察した。これまで、このような報告なされていない。今後は、この一連のメカニズムを別の視点からも検討する必要があると思われる。すなわち、粒団内の硝酸濃度および N_2O 濃度の実測、あるいは同様の方法を用いて異なる土壌において解析を行うことなどを検討する必要があると思われる。また、本研究では、タマネギ残渣の影響(図 7-1[14])は大きくないとしたが(第 6 章)、この点についても定量的に検討しておく必要がある。

第 2 節　年間土壌呼吸量・純一次生産量の推定およびその既往の研究事例との比較

前節で述べたように、本研究で取り上げたふたつの生態系における土壌呼吸については、根呼吸および微生物呼吸の消長が重要である。本節では、両地点の土壌呼吸量・純一次生産量を推定し、既往の研究における土壌呼吸量・純一次生産量と比較する。

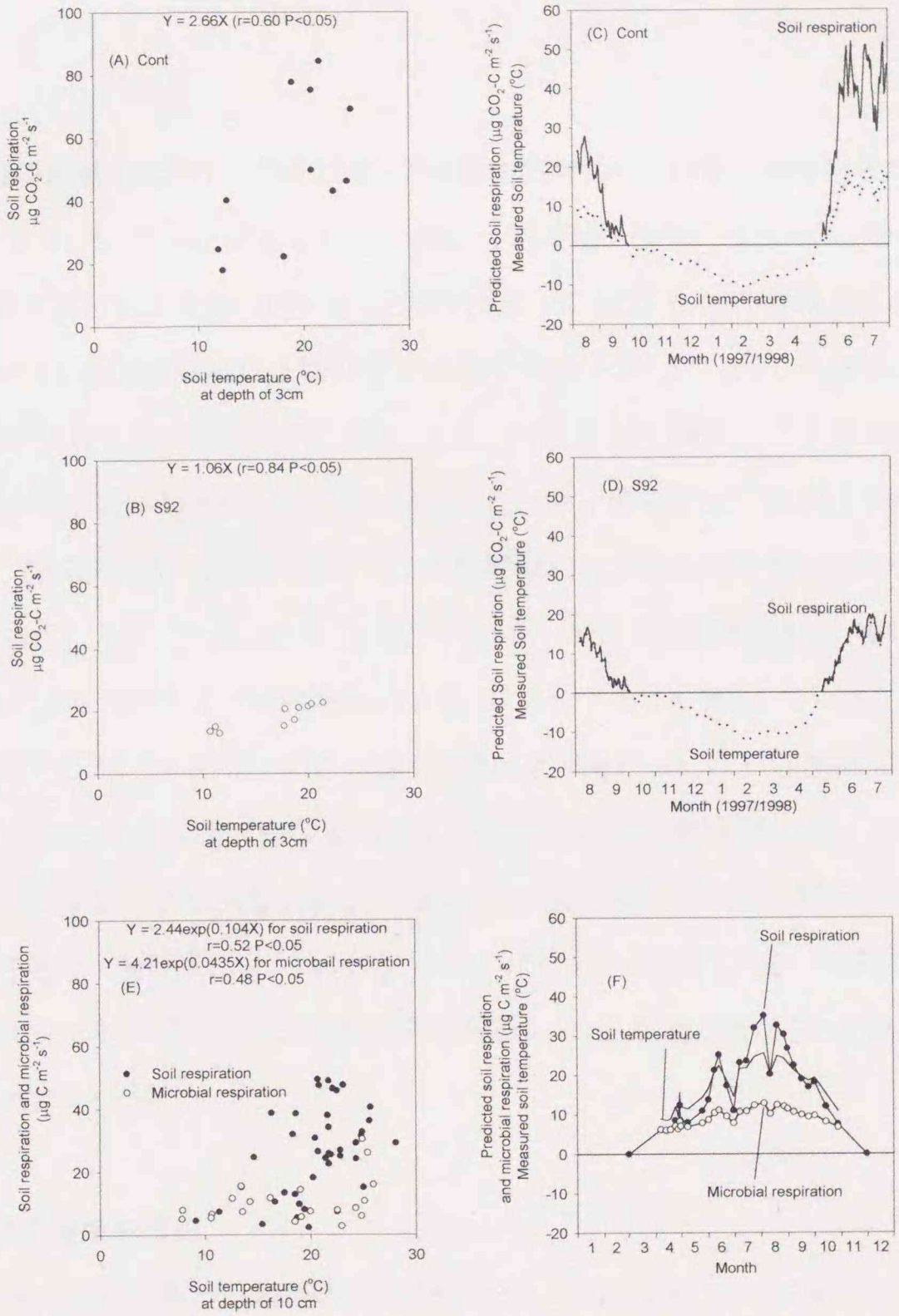


図7-2　地温と土壌呼吸の関係(A、C、E)および年間土壌呼吸の推定(B、D、F)
シベリア未撹乱カラマツ林Cont;AおよびB、シベリア火災を受けた地点S92;CおよびD、北海道灰色低地土タマネギ畑;EおよびF

(1)シベリアタイガ生態系における年間土壌呼吸量の推定

図 7-2(A～D)には、地点 Cont および地点 S92 における地温と土壌呼吸の関係(1997 年)および年間土壌呼吸の予測推移(1997/98 年)を示す。両地点における地温と土壌呼吸の間には有

意な正の関係が認められ、その関係式とロガーで測定した地温の推移を用いて、年間土壌呼吸の推移を予測した。予測した土壌呼吸の推移を積算して年間土壌呼吸量を推定した。その結果、年間土壌呼吸量は地点 Cont では 289 (g C m^{-2} y^{-1})、地点 S92 では 118 (g C m^{-2} y^{-1}) であった。Raich and Schlesinger (1992) のまとめによると、北方森林の年間土壌呼吸量 120 から 550 (g C m^{-2} y^{-1}) の範囲内にある。本研究で推定したシベリアタイガカラマツ林の年間土壌呼吸量もその範囲内にあった。

(2) 北海道灰色低地土タマネギ畑における年間土壌呼吸および微生物呼吸量の推定

図 7-2 (E) には、灰色低地土における地温と土壌呼吸の関係 (1995 年～1997 年) (黒丸)、および地温と微生物呼吸の関係 (1999 年; 土壌学講座 胡 栄桂氏による無植栽区のデータ、未発表) (白丸) を示す。微生物呼吸は土壌呼吸よりも低い傾向を示した。また、土壌呼吸および微生物呼吸とも地温と有意な正の相関関係が認められた。1995 年から 1997 年の 3 年間において地温推移にはほとんど差が認められなかった (図 5-1(D)) ことから、測定数が一番多い 1995 年の地温と、地温と呼吸の関係式 (図 7-2 (E)) を用いて、土壌呼吸および微生物呼吸の推移を予測した。その結果を図 7-2 (F) に示す。なお、11 月 31 日から 3 月 1 日までは積雪期とし土壌呼吸をゼロと仮定した。予測した土壌呼吸および微生物呼吸の推移 (図 7-2 (F)) を積算して年間土壌呼吸量・微生物呼吸量を推定した。その結果、年間土壌呼吸量は 339 (g C m^{-2} y^{-1})・年間微生物呼吸量は 186 (g C m^{-2} y^{-1}) であった。この差 153 (g C m^{-2} y^{-1}) が年間根呼吸量であると考えられる。土壌呼吸に対する根呼吸の寄与率は 45%を占める。Raich and Schlesinger (1992) のまとめによると、世界各地における農耕地の土壌呼吸は 41～1495 (g C m^{-2} y^{-1}) の広い範囲にある。本研究で推定した北海道灰色低地土タマネギ畑における年間土壌呼吸量は、世界各地で測定された農耕地における測定例の範囲内にあった。

(3) 純一次生産量の推定

次に、純一次生産量と土壌呼吸の比較を行なう。Cont 地点において年間のリターフォール量を測定したところ、240 (g m^{-2} y^{-1}) であった (現地共同調査を行った渋谷 正人助教授: 北大大学院農学研究科、未発表)。また、林床植生の乾物重は 130 (g m^{-2}) であった。地点 Cont はほぼ極相林を呈しており、下層植生が毎年更新されるとすると、ここではリターフォール量と下層植生が純一次生産量に等しいと考えられる。これらの炭素含有率を 45%と仮定すると、純一次生産量は 167 (= (240 + 130)*0.45) (g C m^{-2} y^{-1}) と推定される。

S92 地点ではわずかな草本類のみしか認められず、その乾物重さは 67(g m^{-2})であった。ここでも、これらの植生が毎年更新されそれらの炭素含有率が 45%であるすると、純一次生産量は 30 (= 67*0.45) (g C m^{-2} y^{-1})と推定される。

北海道灰色低地土タマネギの収穫部位(りん茎部)の乾物重は 3 ヶ年平均 577.5(g m^{-2})であった。小川ら 1988 によると北海道のタマネギ畑における、「りん茎部」:「葉部」:「根」の乾物比は 1:0.12:0.005 である。すなわち、「りん茎部」:「葉・根を含めた全体」の乾物比は 1:1.125 である。この乾物比および乾物に占める炭素含有率(ここでは 40%とした)を掛け合わせて、純一次生産量(g C m^{-2} y^{-1})は 260(=577.5×1.125×0.4)と推定される。

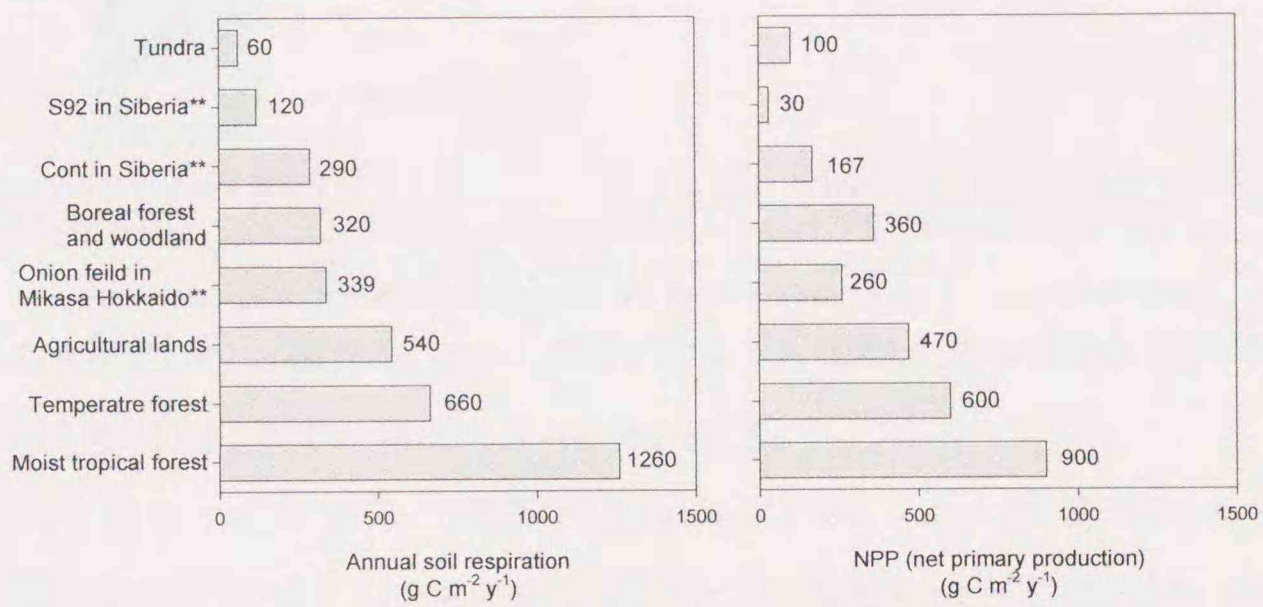


図7-3 年間土壌呼吸量(右)および純一次生産量(左)
**は本研究地、その他は、Raich and Schlesinger(1992)のまとめによる

図 7-3 には、本研究の 3 地点(シベリアタイガ生態系では Cont および S92、北海道灰色低地土タマネギ畑)と Raich and Schlesinger(1992)のまとめによる年間土壌呼吸量と純一次生産量(NPP)の比較を示す。図 7-3 は、世界全体の傾向として、生態系の純一次生産量が増加するにつれて土壌呼吸も増加することを示している。さらに本研究で推定した年間土壌呼吸量ならびに純一次生産量は、Raich and Schlesinger(1992)のまとめとよく一致していた。以上から、本研究で推定した年間土壌呼吸量および純一次生産量は、世界の測定事例と定量的に同質であり、比較し得るものである。

第 3 節 シベリアタイガカラマツ林および北海道灰色低地土タマネギ畑における大気圏からの CO_2 の取り込み(生態系純生産)

前節までにおいて、年間土壌呼吸量(その根呼吸量・微生物呼吸量の振り分け)および純一次

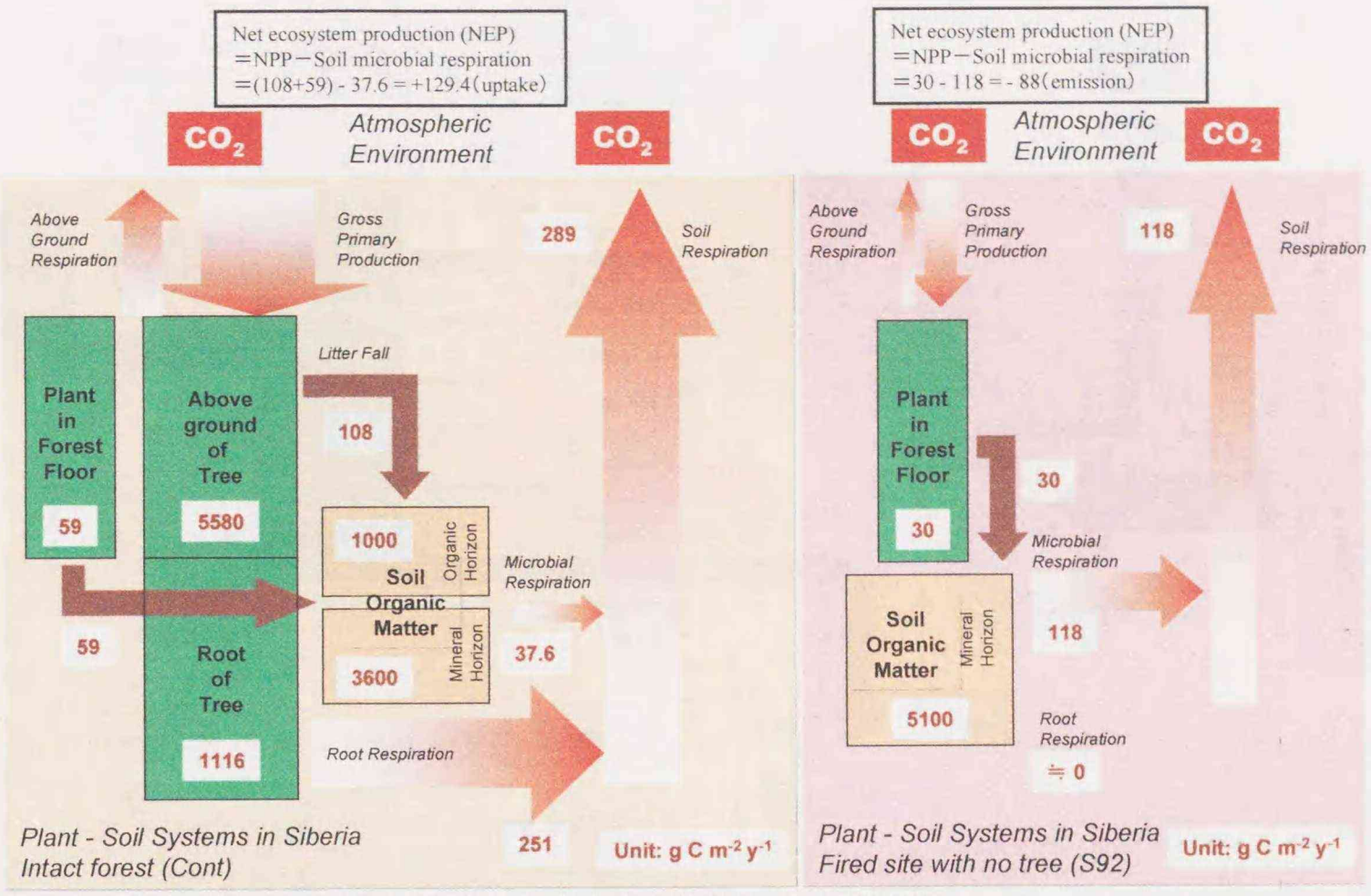


図7-4　シベリアカラマツ林(地点ContおよびS92)における炭素循環
矢印(赤)はCO2の流れ、矢印(濃い赤)は有機物の流れを示す。生態系純生産量NEPについては、本文を参照のこと。

生産量を推定した。本節では、植物－土壌生態系が大気圏から正味で吸収する年間炭素量(生態系純生産 NEP)を推定し、森林火災の影響を論じる。

図 7-4 には、シベリアカラマツ林(地点 Cont および S92)における炭素循環を示す。年間土壌呼吸量およびリターフォールについては前節で述べた。地点 Cont における樹木の地上部現存量は 124(Mg ha^{-1})であったので(第 4 章)、この炭素含有率を 45%と仮定すると 5580(g C m^{-2})に相当する。また、地下部の現存量は地上部の 20%と仮定すると 1116(g C m^{-2})である。土壌呼吸の根呼吸と微生物呼吸(有機物分解)への振り分けは表 4-11 に従った。土壌の有機物現存量は、第 4 章 結果 土壌の物理化学性で述べた深さ 1m の存在量を使用した。

図 7-5 には、北海道灰色低地土タマネギ畑を中心とした炭素・窒素の循環を示す。炭素循環では、第 2 節で述べたように土壌から大気へは土壌呼吸として 339(g C m^{-2} y^{-1})が放出されており、そのうち根呼吸が 153、微生物呼吸が 186 であった(図 7-5)。前節で述べた収穫量および小川ら 1998 の乾物比を用いて、収穫部位、葉、および根への炭素配分はそれぞれ、231、27.7、および 1.15(g C m^{-2})であるとした(図 7-5)。ここで、収穫部位(りん茎部)は農耕地系外(都市など)へ搬出され、葉および根は土壌へ還元される。窒素循環については次節で述べる。

ここで、植物－土壌生態系が大気圏から正味で吸収する年間 CO_2 量を生態系純生産(NEP: net ecosystem production)とすると、それは図 7-4 より以下の式で表わすことができる(NEP がプラスならば吸収を示し、マイナスであれば放出を示す)。すなわち、

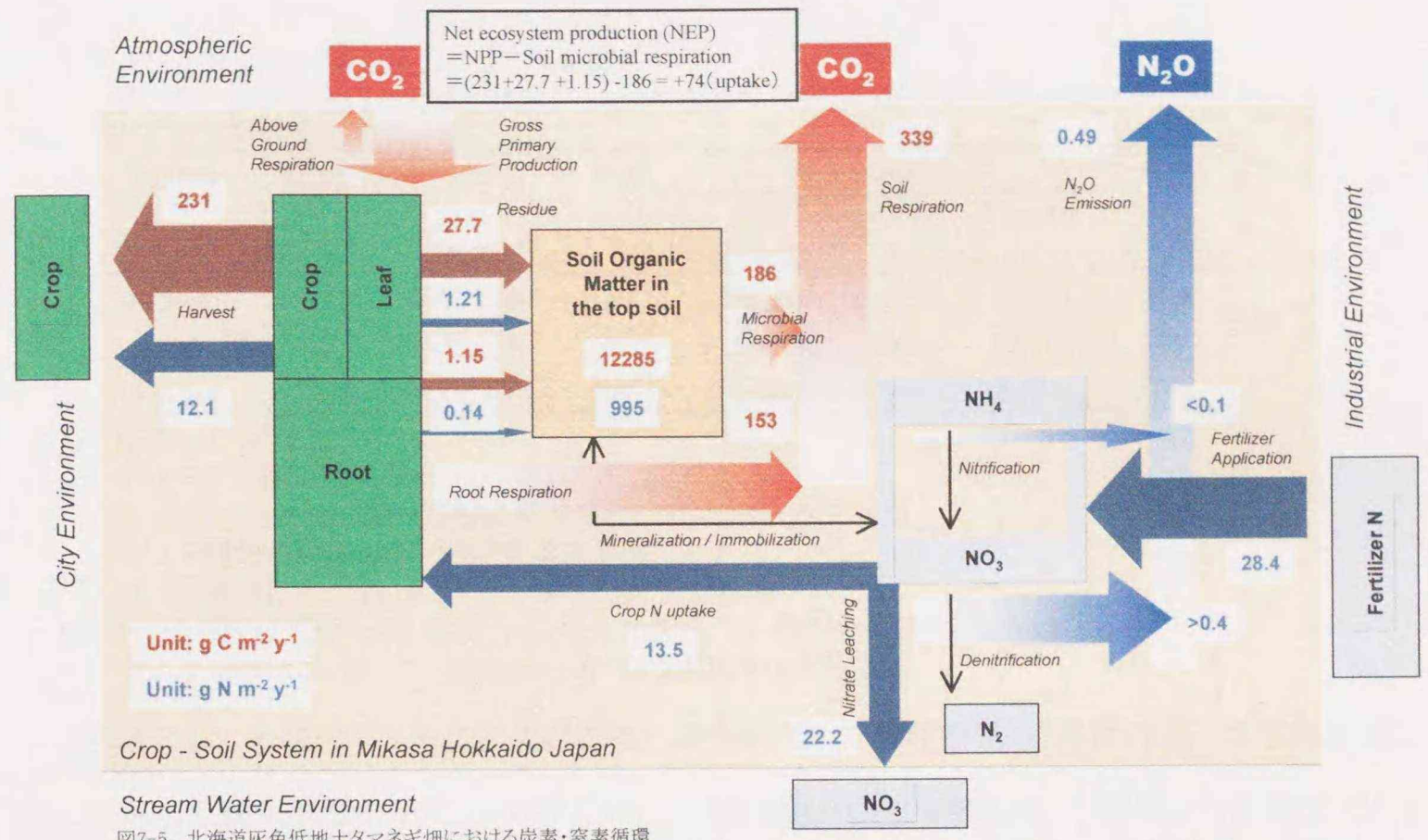


図7-5　北海道灰色低地土タマネギ畑における炭素・窒素循環
矢印(赤)はCO2の流れ、矢印(濃い赤)は有機物の流れを示す。生態系純生産量NEPについては、本文を参照のこと。矢印(青)はN2Oの流れ、矢印(濃い青)は無機態窒素の流れ(施肥、タマネギの吸収、および溶脱)を示す。矢印(黒)は窒素の形態変化を示す。

生態系純生産量 net ecosystem production (NEP)

＝総一次生産量 gross primary production (GPP)

－樹木の地上部の呼吸 above ground respiration (Ra)

－土壌呼吸 soil respiration (SR)　(7-1)

ここで、土壌呼吸は、根呼吸と微生物呼吸の合計であるので、

土壌呼吸 soil respiration (SR)

＝根呼吸 root respiration (RR)

+微生物呼吸(有機物分解) microbial respiration (MR)　(7-2)

また、純一次生産量は

純一次生産量 net primary production (NPP)

＝総一次生産量 gross primary production (GPP)

－樹木の地上部の呼吸 above ground respiration (Ra)

－樹木の地下部の呼吸(根呼吸) root respiration (RR)　(7-3)

である。(7-1)～(7-3)式を組み合わせると

$$NEP = NPP - MR \quad (7\text{-}4)$$

となる。ただし、単位はすべて(g C m^{-2} y^{-1})である。このように純一次生産量および土壌呼吸に対する根呼吸・微生物呼吸の寄与率を用いることによって植物－土壌生態系が大気圏から正味で吸収する量を見積ることが可能である。

表7-1 本研究の調査地における炭素循環
純一次生産量(NPP)、土壌呼吸量(Soil respiration)(その根呼吸・微生物呼吸の寄与)、および生態系純生産量(NEP)

地点名	位置	土壌	NPP	Soil respiration[*4]			NEP
				total	root	microbe	
			a	b(=c+d)	c	d	e(=a-d)
Cont	シベリア	砂質土壌	167[*1]	289(100)	251(87)	38(13)	129
S92	シベリア	砂質土壌	30[*2]	118(100)	0(0)	118(100)	-88
Mikasa	北海道	灰色低地土	260[*3]	339(100)	153(45)	186(55)	74

単位:g C m^{-2} y^{-1}
( )内は全体に対する%
*1 (リターフォール240+下層植生130(g m-2)) ×0.45;本文参照
*2 (下層植生67(g m-2)) ×0.45;本文参照
*3 (収穫部位577.5(g m-2)) ×0.40×1.125;本文参照
*4 土壌呼吸量の見積もりについては本文参照。根・微生物の寄与はContおよびS92については、表4-10に従った。Mikasaについては本章本文を参照。

表7-1には、本研究の3地点における純一次生産量、土壌呼吸量(その根呼吸と微生物呼吸)、および生態系純生産量を示す。シベリアタイガの未撹乱のカラマツ林は、大気圏から正味で129(g C m^{-2} y^{-1})の炭素を「吸収」している。これに対して、強い火災を受け森林が焼失した地点S92では、大気圏へ正味で88(g C m^{-2} y^{-1})の炭素を「放出」している。さらにS92地点において、火災前のカラマツ地上部・地下部の現存量が、隣接した地点Contと等しく、土壌有機物含量も等しかったとすると、図7-4よりその差6200(g C m^{-2})(≒5580(地点Contの樹木地上部炭素現存量) + 1116(地点Cont樹木地下部炭素現存量) + 4600(地点Contの土壌炭素現存量) − 5100(地点S92の土壌炭素現存量))が火災によって大気圏に放出されたと推定される。なお、北海道灰色低地土タマネギ畑では、正味で74(g C m^{-2} y^{-1})を大気圏から吸収している(表7-1)。波多野・細淵1999は、様々な生態系におけるNEPを試算し、その値は900(g C m^{-2})までの広い値を示し、温潤熱帯で高く、寒帯で小さく、砂漠では負の値を示している。本研究で推定したNEPは、波多野・細淵1999が試算した範囲内にあったが、熱帯林や温帯林および畑と比較すると、同程度から1/9程度と北方林であるシベリアの値が小さかった。

上述したように、シベリアタイガにおける森林火災は、森林を大気中の CO_2 に対してシンクからソースへ大きく変化させている。ここで、未撹乱の森林(Cont)と森林が完全に焼失した地点(S92)のみが存在すると単純化した場合、全体としてNEPが火災後一年間で正となるためには、未撹乱カラマツ林面積が火災面積の約48倍(≒(90+6200)/130)以上も必要となる。100年以上の長いスパンで考えると森林が再生する過程では、大気圏から CO_2 を吸収する。よって、火災を受けた地点が森林として再生するかどうかが、長期的な炭素収支には重要である。加えて、森林火災程度には強弱があり、かつ森林タイプによって成長量が異なるため、さまざまな森林おけるNEP推定を

積み重ねることも必要であろう。さらに、今後の気候変動によって、純一次生産量の変化や、その変化に対応した根呼吸および微生物呼吸の変化が生じ、植物－土壌内の炭素循環過程が変化する可能性がある。その結果 NEP も変化するために、それらを予測することも今後の大きな課題である。

第 4 節　北海道灰色低地土における窒素循環

本節では、北海道灰色低地土における窒素循環について考察する。

図 7-5 には、北海道灰色低地土タマネギ畑を中心とした炭素・窒素の循環を示す。炭素循環については前節で説明した。窒素循環では、化成肥料として 3 年間で平均して 28.4 ($g\ N\ m^{-2}$) (表 3-4) の窒素が土壌に投入されていた (図 7-5)。これに対して、タマネギの収穫部位 (りん茎部) の窒素吸収量は、3 ヶ年の平均で 12.1 ($g\ N\ m^{-2}$) であった (第 5 章)。小川ら 1988 によると北海道のタマネギ畑における、りん茎部:葉部:根の窒素分配比は 90:10:1 である。これらの分配比を用いて、収穫部位、葉、および根への窒素配分はそれぞれ、12.1、1.21、および 0.14 ($g\ N\ m^{-2}$) であるとした (図 7-5)。ここで、収穫部位 (りん茎部) は農耕地系外 (都市など) へ搬出され、葉および根は土壌へ還元される。Hayashi and Hatano (1999)によると、1996 年 5 月から 1997 年 4 月の一年間における暗渠排水からの硝酸溶脱は 17.9 ($g\ N\ m^{-2}\ y^{-1}$) であった。さらに、林 (1999) によると 1997 年 5 月から 1998 年 4 月では 26.5 ($g\ N\ m^{-2}\ y^{-1}$) の硝酸溶脱が認められた。このように年次変動が大きいものの 2 年間平均値で 22.2 ($g\ N\ m^{-2}\ y^{-1}$) の硝酸態窒素が暗渠排水から溶脱していた (図 7-5)。

表7-2　灰色低地土における窒素循環

	$g\ N\ m^{-2}$	施肥窒素に対する%
窒素施肥	28.4	(100)
硝酸溶脱	22.2	(78)
作物吸収	13.5	(48)
残渣による土壌への還元	1.35	(4.8)
N_2Oとして土壌から大気へ放出	0.49	(1.7)
うち硝化過程	≒0.1	(0.35)
うち脱窒過程	≒0.4	(1.4)
脱窒によるN_2の生成[*1]	1～8	(4～28)

*1 N_2/N_2O比 = 2.7～20 (Rolston et al. 1978) を用いた。

表 7-2 には、灰色低地土タマネギ畑における以上の窒素循環を示す。施肥窒素に対する作物吸収としての利用効率は、48%と低く、作物に吸収されない施肥窒素分が半分程度と大きい。一方、硝酸溶脱量は施肥窒素量の 78%にも達していた。さらに生育期では、土壌から大気圏に N_2O として 3 年間平均で 0.49 ($g\ N\ m^{-2}\ y^{-1}$) が放出されていた。これは、施肥窒素の 1.7%に相当し、この値は既往の日本あるいは世界の測定事例と比較して大きかった (第 5 章)。本研究では脱窒の

最終産物である N_2 の土壌から大気への放出については測定を行わなかった。しかしながら、Rolston et al. 1978 によると、耕地土壌から放出する施肥窒素由来の N_2/N_2O 比は 2.7～20 の広い値をとることを述べている。よって、窒素循環においては脱窒の最終産物である N_2 も無視できない量である可能性が高い（表 7-2）。

前節で述べたように、灰色低地土タマネギ畑においては、NEP が+74（g C m^{-2} y^{-1}）であり、大気中の CO_2 を正味で吸収しており、CO_2 からみると地球温暖化には寄与しないと考えられる。しかし、窒素利用効率が半分以下と低く、窒素肥料の半分以上に相当する量がが硝酸として水圏へ流出し、さらに地球温暖化に寄与する N_2O を大気圏に放出している。また、Bouwman 1990b によると酸性降下物の一因である NO は、耕地土壌から大気へ N_2O と同程度またはそれ以上の量が放出される可能性があることを述べている。このように、窒素循環の面からみると、施肥窒素量が大きいタマネギ畑のような野菜畑は、現状において、農耕地生態系外（大気圏および水圏）に対して汚染源として働いていると判断せざるをえない。

第 5 節　結論

本研究は、人為の影響によって生態系の炭素・窒素循環の変化が顕在化すると思われるふたつの生態系－シベリアタイガおよび北海道の野菜畑－において、現場における温室効果ガス（CO_2 および N_2O）の動態を定量的に測定し、土壌からの温室効果ガス発生についてそのメカニズムを明らかにするとともに、さらにこれらの生態系における温室効果ガスを中心とした炭素・窒素循環を把握し、生態系外に与える影響を明らかにすることを目的として行われたものである。

1）シベリアタイガカラマツ林および北海道灰色低地土タマネギ畑のふたつの生態系における土壌呼吸は、基本的に同じメカニズムで生じていると考えられた。すなわち、根呼吸と微生物呼吸（有機物分解）の消長が重要である。推定した年間の土壌呼吸量および純一次生産量は、既往の世界の測定事例と十分比較し得るものであった。それらの値を用いて、植物－土壌生態系が大気から正味に吸収する CO_2 量を推定した。シベリアタイガは、温帯、熱帯の森林あるいは畑に比べて正味の炭素固定量が同程度～1/9 と小さい上、強い森林火災を受けた地点では土壌からの有機物分解が増加し、大気への CO_2 ソース（放出）として振る舞うように変化していた。森林火災は森林の更新にも重要であるとされるが、今後その制御について十分な研究が必要である。

2）森林と比較して農地土壌からの N_2O 発生は、施肥によって窒素循環が増加し、N_2O 放出が増加したということができる。ただし、これまで多く指摘されていた硝化過程による N_2O 生成よりも

土壌粒団の嫌気的サイトにおける脱窒過程が重要であると認められ、降水のパターンによって放出量が変化した。硝酸の溶脱の問題とともに窒素循環の面からその放出量を少なくする対策を講じる必要がある。

第8章 要旨

近年、地球温暖化の影響が指摘されている。しかしながら、様々な陸上生態系からの温暖化ガス発生に関する研究事例の絶対数は不足しており、特に陸上生態系における温暖化ガス発生と今後の炭素・窒素循環の変化が研究上の大きな課題となっている。

このような背景の下、本研究では人為の影響によって生態系の炭素・窒素循環の変化が顕在化すると思われるふたつの生態系－シベリアタイガおよび北海道の野菜畑－において、その生態系における温室効果ガス発生に関する研究を行った。シベリアタイガ生態系は、陸上生態系の炭素循環に重要な位置を占める。この生態系では、人為的な森林火災が頻発し、シベリアタイガの破壊が地球規模の気候システム・炭素循環において極めて重要視されている。この地域においては、土壌呼吸のデータが不足しており、森林火災が土壌呼吸および生態系内の炭素循環に与える影響については調査されていない。北海道灰色低地土タマネギ畑では、多量の施肥が行われ、温室効果ガスとして強い効果のある N_2O 発生と硝酸の溶脱の問題が顕在化する可能性が高い。したがって、これらの生態系において土壌呼吸および N_2O 放出といった温室効果ガスの発生メカニズム、および炭素・窒素循環を明らかにする必要があると考えた。

本研究は、このような生態系において、「現場における温室効果ガスの動態を定量的に測定し、土壌からの温室効果ガス発生のメカニズムを解析すること」を目的とし、温室効果ガスを中心とした生態系の炭素・窒素循環を明らかにすることとした。

1　ガスフラックスの測定法

これまで、チャンバー法は土壌から大気へのガスフラックスを測定する際に用いられ、拡散法は土層中のガスフラックスを測定する際に用いられてきた。本研究では、チャンバー法と拡散法を用いて、土壌から大気へのN_2OおよびCO_2フラックスを同時に測定し、それらを比較した。その結果、両方法によって、等しく定量的にフラックスが測定可能であることを確認し、以下、両方法を用いてガスフラックスを測定した。

2　シベリアタイガにおける森林火災が土壌呼吸に与える影響

森林火災が頻発するシベリアタイガにおいて、森林火災が土壌呼吸に与える影響を調査した。有機物分解量(微生物呼吸量)を室内培養実験によって推定した結果、火災後に有機物分解量は増加した。しかしながら、現場で測定した土壌呼吸は未撹乱の森林あるいは火災後再生した森

林において高かった。これらの地点において、土壌呼吸に対する根呼吸の寄与率を推定した。根呼吸の寄与率は 70%以上であり、土壌呼吸の変化は主に根呼吸の増減によって生じていると結論した。

3　北海道灰色低地土タマネギ畑における土壌呼吸

北海道灰色低地土タマネギ畑における土壌呼吸は、作物の成長と地温の上昇に伴って上昇し、収穫後には地温の低下とともに低下した。土壌呼吸に対する根呼吸の寄与率は 45%とシベリアタイガに比べて有機物分解が盛んであることが示された。

4　両土壌植物系の炭素収支

土壌－植物系が大気から正味に吸収する CO_2 量を推定した。その結果、シベリアタイガにおける未撹乱の森林は大気から 129g C m^{-2} y^{-1} の炭素を吸収しているのに対し、火災によって森林が焼失した地点では、逆に大気に 88g C m^{-2} y^{-1} の炭素を放出していた。このようにシベリアタイガにおける森林火災は、森林を大気中の CO_2 に対してシンクからソースへ大きく変化させていた。灰色低地土タマネギ畑では、大気中の CO_2 を 74g C m^{-2} y^{-1} 吸収していると見積られた。

5　北海道灰色低地土タマネギ畑における N_2O 発生量

同じ灰色低地土タマネギ畑における、N_2O フラックスは、タマネギ生育後期で降水が大きく土壌水分が高かった夏から秋にかけて上昇した。これまで畑地からの N_2O フラックスは施肥直後の硝化に伴って生じるものが多いといわれていたが、この結果はそれと異なっていた。タマネギ生育期における N_2O 放出量は 0.38～0.78g N m^{-2} であり、これは施肥窒素の 1.1～2.9%であった。この N2O 放出量の値は、これまでの測定事例の中でも極めて高かった。

なお、同タマネギ畑に窒素施肥の利用効率は半分以下であり、水圏へ施肥窒素の半分以上に相当する窒素が硝酸として流出し、さらに地球温暖化に寄与する N_2O を大気圏に放出していた。

6　同タマネギ畑における N_2O 生成と放出のメカニズム

同タマネギ畑において、さらに、下層土から作土へ流入する CO_2 フラックスと N_2O フラックスを比較したところ、N_2O フラックスは、硝酸溶脱が増加した後に上昇した。このことは、作土から粗孔隙を通して溶脱した硝酸の一部が土壌粒団内に拡散し、粒団内に発達した嫌気的部位において脱窒され、その過程で N_2O ガスが生成したと考えられる。その N_2O ガスが N_2 ガスまで還元される

以前に、粒団外に拡散し、粗孔隙を通して大気へ放出されたと推察した。

以上のように、人為の影響による生態系内の炭素・窒素循環の変化が顕在化すると思われる生態系において、土壌における温室効果ガスの動態を定量的に測定することによって、土壌からの温室効果ガス発生のメカニズムを明らかにした。さらに、それらの生態系内の炭素・窒素循環から、森林火災は森林を大気中の CO_2 に対してシンクからソースへ大きく変化させ、農耕地においては大気中の CO_2 を正味で吸収しているものの、窒素利用効率が低く、系外に窒素負荷(N_2O 放出・硝酸溶脱)を与えていることを明らかにした。今後、炭素・窒素循環の面からこれらの負荷を軽減する対策を講じる必要がある。

引用文献

Ambus, P., Clayton, H., Arah, J.R.M., Smith, K.A., and Christensen, S. 1993: Similar N_2O flux from soil measured with different chamber techniques. *Atmospheric Environment*, **27A(1)**, 121-123

Ambus, P. and Christensen, S. 1995: Spatial and seasonal nitrous oxide and methane fluxes in Danish forest-, grassland-, and agroecosystems. *J. Environ. Qual.* , **24**, 993-1001

Anderson, J.M. 1973: Carbon dioxide evolution from two temperate, deciduous woodland soils. *J. Appl. Ecol.*, **10**, 361-378

Anderson, J.P.E. and Domsch, K.H. 1980: Quantities of plant nutrients in the microbial biomass of selected soils. *Soil Science*, **130**, 211-216

Arah, J.R.M., Smith, K.A., Crichton, I.J., and Li, H.S. 1991: Nitrous oxide production and denitrification in Scottish arable soils. *J. Soil Sci.*, **42**, 351-367

Auclair, A.N.D. and Carter, T.B. 1993: Forest wildfires as a recent source of CO_2 at northern latitudes. *Can. J. For. Res.*, **23**, 1528-1536

Ball, B.C., Horgan, G.W., Clayton, H., and Parker, J.P. 1997: Spatial variability of nitrous oxide fluxes and controlling soil and topographic properties. *J. Environ. Qual.*, **26**, 1399-1409

Baver, L.D. 1956: Soil physics. 3rd ed. p. 199-233. John Wily & Sons, New York

Beauchamp, E.G., Trevors, J.T., and Paul, J.W. 1989: Carbon Sources for Bacterial Denitrification. Advance in Soil Science, Vol.10, p.113-142

Bolin, B. 1977: Changes of land biota and their importance for the carbon cycle. – The increase of atmosphere carbon dioxide may partly be due to the expansion of forestry and agriculture. *Science*, **196**, 613

Boone, R.D., Nadelhoffer, K.J., Canary, J.D., and Kaye, J.P. 1998: Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration. *Nature*, **396**, 570-572

Bouwman, A.F. 1990a: Chapter 2 Introduction. *In* Soils and the greenhouse effect. ed. Bouwman, A.F., p. 25-32, John Wiley & Sons Ltd. Great Britain

Bouwman, A.F. 1990b: Exchange of greenhouse gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere. *In* Soils and the greenhouse effect. ed. A.F. Bouwman, p. 61-127. John Wiley & Sons Ltd., Great Britain

Bouwman, A.F. 1996: Direct emission of nitrous oxide from agricultural soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **46**, 53-70

Bowden, R.D., Nadelhoffer, K.J., Boone, R.D., Melillo, J.M., and Garrison, J.B. 1993: Contributions of aboveground litter, belowground litter, and root respiration to total soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Can. J. For. Res.*, **23**, 1402-1407

Byrnes, B.H., Christianson, C.B, Holt, L.S., and Austin, E.R. 1990: Extended Abstract 19.17 Nitrous oxide emission from the nitrification of nitrogen fertilizers. ed. Bouwman, A.F., p. 489-495, John Wiley & Sons Ltd. Great Britain

Bääth, E. 1980: Soil fungal biomass after clear-cutting of a pine forest in central Sweden. *Soil Biol. Biochem.*, **12**, 495-500

Coleman, D.C. 1973: Compartmental analysis of "total soil respiration": an exploratory study. *OIKOS*, **24**, 361-366

Corre, M.D., C.van Kessel, and Pennock, D.J. 1996: Landscape and seasonal patterns of nitrous oxide emissions in semiarid region. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **60**, 1806-1815

De Jong, E. and Schappert, H.J.V. 1972: Calculation of soil respiration and activity from CO_2 profile in the soil. *Soil Sci.*, **113**, 328-333

Denmead, O.T. 1994: Measuring fluxes of CH_4 and N_2O between agricultural systems and the atmosphere. *In* CH_4 and N_2O; Global emissions and controls from rice field and other agricultural and industrial sources. NIAES, pp. 209-234

Dise, N.B., Matzner, E., and Gunderson, P. 1998: Synthesis of nitrogen pools and fluxes from European forest ecosystems. *Water, Air, and Soil Pollution*, **105**, 143-154

Dixon, K.D. and Krankina, O.N. 1993: Forest fire in Russia: carbon dioxide emissions to the atmosphere. *Can. J. For. Res.*, **23**, 700-705

Dobbie, K.E., Smith, K.A., Prime, A., Christensen, S., Degorska, A., and Orlanski, P., 1996: Effect of land use on the rate of methane uptake by soils in northern Europe. *Atmospheric Environment*, **30(7)**, 1005-1011

土壌標準分析・測定法委員会編 1986: 土壌標準分析・測定法 博友社

Dowdell, R.J. and Smith, K.A. 1974: Field studies of the soil atmosphere: Occurrence of nitrous oxide. *J. Soil Sci.*, **25**, 231-238

EPA 予測報告書 1984: 「炭酸ガスで地球が温暖化する」: EPA 予測報告書 ワールドフォーラム;

35 出版者 東京 : ハイライフ出版

Edwards, N.T. and Ross-Todd, B.M. 1983: Soil carbon dynamics in a mixed deciduous forest following clear-cutting with and without residue removal. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **47**, 1014-1021

Edwards, N.T., Johnson, D.W., Mclaughlin, S.B. and Harris, W.F. 1989: Carbon dynamics and productivity. *In* Analysis of biogeochemical cycling in Walker Branch Watershed. ed. D.W. Johnson and R.I. Van Hook, p. 197-232, Springer-Verlag New York Inc.

江口 定夫・波多野 隆介・佐久間 敏雄 1995: 土壌の有機物分解に及ぼすミミズの影響、*土肥誌*, **66**, 165-167

江口 定夫・阪田 匡司・波多野 隆介・佐久間 敏雄 1997: 落葉広葉樹林土壌からの CO_2 フラックスの日変化と植生に対する CO_2 供給源としての重要性、*土肥誌*, **68**, 138-147

Eichner, M.J. 1990: Nitrous oxide emision from fertilized soils: summary of available data. *J. Environ. Qual.*, **19**: 272-280

FAO 1996: FAO Fertilizer Yearbook. 46, 1-7

Fernandez, I.J., Son, Y., Kraske, C.R., Rustad, L.E., and David, M.B. 1993: Soil carbon dioxide characteristics under different forest types and after harvest. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **57**, 1115-1121

Firestone, M.K. and Davidson, E.A. 1989: Microbiological basis of NO and N_2O production and consumption in soil. *In* Exchange of trace gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere, edited by Andreae, M.O. and Schimel, D.S., pp 7-21, John Wily and Sons, New York

Folorunso, O.A. and Rolston, D.E. 1984: Spatial variability of field measured denitrification gas fluxes. *Soil Sci, Soc. Am. J.*, **48**, 1214-1219

Freney, J.R., Denmead O.T., and Simpson, J.R. 1979: Nitrous oxide emission from soils at low moisture contents. *Soil Biol. Biochem.*, **11**, 167-173

福田 正己・高橋邦秀 1999: シベリアタイガの破壊が何をもたらすか *科学* **69(7)** 568-571 岩波書店

福士 定雄・陽 捷行 1981: 土壌の脱窒能の測定法、*土肥誌*、**52**, 193-200

Gloser, J.G. and Tesarova, M. 1978: Litter, soil, and root respiration measurement. An improved compartmental analysis method. *Podobiologia*, **Bd. 18, S.** 76-81

Goldammer, J.G. and Furyaev, V.V. 1996: Fire in ecosystems of boreal eurasia: Ecological impacts and links to the global system. *In* Fire in Ecosystems of Boreal Eurasia, Ed. J.G. Goldammer and V.V. Furyaev, p. 1-20, Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands

Goodroad, L.L and Keeney, D.R. 1985: Site of nitrous oxide production in field soils. *Biology and Fertility of Soils*, **1**, 3-7

Gordon, A.M., Schlentner, R.E. and Van Cleve, K. 1987: Seasonal patterns of soil respiration and CO_2 evolution following harvesting in the white spruce forests of interior Alaska. *Can. J. For. Res.*, **17**, 304-310

Hatano, R., Sakuma, T., and Okajima, H. 1985: The source-sink effect of clayey soil peds on solute transport. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **32**, 199-213

波多野 隆介・江 耀宗・斉藤 英樹・佐久間 敏雄・岡島 秀夫 1988: 水と溶存イオンの移動に対する畑土壌粒団の source-sink 効果－D_2O を水のトレーサーとして－、*土肥誌*、**59**、253-259

Hatano, R. and Sakuma, T. 1991a: A plate model for solute transport through aggregated soil columus. Ⅰ. Theoretical description. *Geoderma*, **50**, 13-23

Hatano, R. and Sakuma, T. 1991b: A plate model for solute transport through aggregated soil columus. Ⅱ. Experimental results and application of the model. *Geoderma*, **50**, 25-36

Hatano, R. and Sawamoto, T. 1997 : Emission of N_2O from a clayey aquic soil cultivated with onion plants. *In* Plant nutrition – for sustainable food production and environment. p.555-556 T. Ando et al. (Eds.), Kluwer Academic Publishers. Printed in Japan

波多野 隆介・細淵 幸雄 1999: 土壌植物系における炭素循環物理過程と炭素収支 農林地生態系の地球化学的物質循環速度調整能とそのモデル化(課題番号 08456038) 平成8年度～平成10年度科学研究費補助金(基盤研究 B2)研究成果報告書 平成11年3月 研究代表者 波多野 隆介

Hayashi, Y. and Hatano, R. 1999: Annual nitrogen leaching to subsurface drainage water from a clayey aquic soil cultivated with onions in Hokkaido, Japan. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **45**, 451-459

林 康人 1999: 農耕地からの硝酸態窒素流出の解析、修士論文、北海道大学大学院農学研究科

Hojberg, O., Revsbech, N.P., and Tiedjo, J.M. 1994: Denitrification in soil aggregates analyzed with microsensors for nitrous oxide and oxygen. *Soil Sci, Soc. Am. J.*, **58**, 1691-1698

Holt, J.A., Hodgen, M.J. and Lamb, D. 1990: Soil respiration in seasonally dry tropics near Townsville, North Queensland. *Aust. J. Soil Res.*, **28**, 737-745

Horwath, W.R., Pregitzer, K.S., and Paul, E.A. 1994: ^{14}C allocation in tree-soil systems. *Tree Physiology*, **14**, 1163-1176

IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis) 1997: Dialogue on Sustainable Development of the Russian Forest Sector – Volume 1: 22-44, Ed. S. Nilsson, Laxenburg, Austria

IPCC 1992: Climate Change 1992 – The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Edited by Houghton et al., Cambridge University Press.

IPCC 1995: 「全体要約」、気候変化 1995 －気候変化の科学－、p.9-46、気象庁訳

化学工業協会 1971: 物性定数 8 集(1970)、p.223-235、丸善、東京

Keith, H., Jacobsen, K.L., and Raison, R.J. 1997: Effects of soil phosphorus availability, temperature and moisture on soil respiration in Eucalyptus pauciflora forest. *Plant and Soil*, **190**, 127-141

Kelting, D.L., Burger, J.A., and Edwards, G.S. 1998: Estimating root respiration, microbial respiration in the rhizosphere, and root-free soil respiration in forest soils. *Soil Bio. Biochem.*, **30**, 961-968

Kicklighter, D.W., Melillo, J.M., Peterjohn, W.T., Rastetter,E.B., McGuire,A.D., Steudler,P.A., and Aber, J.D. 1994: Aspects of spatial and temporal aggregation in estimating regional carbon dioxide fluxes from temperate forest soils. *J. Geophysical Res.*, **99(D1)**, 1303-1315

Kirscbaum, M.U.F. 1995: The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic storage. *Soil Bio. Biochem.*, **27**, 753-760

木曽 誠二 1999: Ⅴ－5－2 畑地における亜酸化窒素の放出、北海道農業と土壌肥料 1999、日本土壌肥料学会北海道支部編、p. 323-325、財団法人 北農会発行

国立天文台編 1999a: 理科年表 第 73 冊, p.気 118(312), 163(357), 丸善株式会社

国立天文台編 1999b: 理科年表 第 73 冊, p.物 26(450), 丸善株式会社

Kolchugina, T.P. and Vinson, T.S. 1993: Equilibrium analysis of carbon pools and fluxes of forest

biomass in the former Soviet Union. *Can. J. For. Res.*, **23**, 81-88

Kurz, W.A. and Apps, M.J. 1995: Retrospective assessment of carbon flows in Canadian boreal forests. In Forest Ecosystems. Forest Management and the Global Carbon Cycle, Ed. M.J. Apps and D.T. Price, p. 173-182, NATO Advanced Science Institute Series, Berlin Heidelberg

Lamade, E., Djegui, N., Leterme, P. 1996: Estimation of carbon allocation to the roots from soil respiration measurements of oil palm. *Plant and Soil*, **181**, 329-339

Lieth, H. and Ouellette, R. 1962: Studies on the vegetation of the Gaspe Peninsula. *Can. J. Bot.*, **40**, 127-140

Linn, D.M. and Doran, J.W. 1984: Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **48**, 1267-1272

Lloyd, J. and Taylor, J.A. 1994: On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology*, **8**, 315-323

Lucarotti, C.J. 1980: The effect of fire and forest regeneration on mesofauna populations and microfungal species in lichen woodland soils. *McGill Sub-arctic Research Paper*, **32**, 7-26

Matsuura, Y., Sanada, M., Ohta, M. and Desyatkin, R. V. 1994: Carbon and nitrogen storage in soils developed on two different toposequences of Lena River terrain. *In* Proceedings of the 2nd symposium on the joint Siberian permafrost studies between Japan and Russia in 1993, ed. G. Inoue, p. 177-182.

Mattison, K.G. and Smith, H.C. 1993: Detrital organic matter and soil CO_2 efflux in forests regenerating from cutting in west Virginia. *Soil Bio. Biochem.*, **25**, 1241-1248

Matveev, P.M. and Usoltzev, V.A. 1996: Post-fire mortality and regeneration of Larix sibirica and Larix dahurica in conditions of long-term permafrost. *In* Fire in Ecosystems of Boreal Eurasia, Ed. J.G. Goldammer and V.V. Furyaev, p. 366-371, Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands

Melillo, J.M., Prentice, I.C., Farquhar, G.D., Schulze, E.-D., and Sala, O.E. 1995: 「第 9 章 環境変化に対する陸上生物の応答と気候へのフィードバック」、気候変化 1995 －気候変化の科学－、p.461-499、気象庁訳

陽 捷行 1994: 土壌圏と大気圏－土壌生態系のガス代謝と地球環境, 陽 捷行編著、p. 1-27,

朝倉書店

Moore, T.R. 1980: The nutrient status of subarctic woodland soils. *Arctic and Alpine Res.*, **12**, 147-160

Mosier, A.R. and Hutchinson, G.L. 1981: Nitrous oxide emission from cropped fields. *J. Environ. Qual.*, **10**, 169-173

Mosier, A.R. 1994: Nitrous oxide emissions from agricultural soils. *Fertilizer Research*, **37**, 191-200

Nadelhoffer, K.J., Giblin, A.E., Shaver, G.R., and Linkins, A.E. 1992: Microbial processes and plant nutrient availability in arctic soils. *In* Arctic ecosystems in a changing climate. An ecophysiological perspective. Eds. Chapin, F. Stuart (Francis Stuart), III et al. Academic press, Inc. San Diego, California. pp.281- 300

Nakane, K. 1980: Comparative studies of cycling of soils organic carbon in three primeval moist forests. *Jap. J. Eco.*, **30**, 155-172

Nakane, K., Yamamoto, M., Tsubota, H. 1983: Estimation of root respiration rate in a mature forest ecosystem. *Jpn. J. Ecol.*, **33**, 397-408

Nelson, R.E. 1982: Chapter 11 Carbonate and Gypsum. *In* Method of Soil Analysis Part 2. Chemical and Microbiological Properties, Agronomy Monograph no. 9 (Second Edition) p.181-197 Printed in the U.S.A.

農耕地土壌分類委員会 1995: 農耕地土壌分類第 3 次改訂版、農林水産省 農業環境技術研究所資料 第 17 号

小川 吉雄・酒井 一 1986: 畑地からの窒素の流出制御 －環境保全・省資源的施肥への提言－ *農業および園芸*、**61**、15-20

小川 和夫、竹内 豊、片山 雅弘 1988: 北海道の耕草地におけるバイオマス生産量及び作物による無機成分放出量、北海道農業試験場研究報告、149、p. 57-97

Osozawa, S and Hasegawa, S. 1995: Dial and seasonal changes in carbon dioxide concentration and flux in an andsol. *Soil Sci.*, **160**, 117-124

遅沢 省子 1997: 土壌環境分析法、第Ⅱ-12、13 章、p. 81-86、土壌環境分析法編集委員会編、博友社

Pajari, B. 1995: Soil respiration in a poor upland site of Scots pine stand subjected to elevated temperature and atmospheric carbon concentration. *Plant and Soil*, **188**, 563-570

Parkin, T.B. 1993: Spatial variability of microbial processes in soil – a review. *J. Environ. Qual.*, **22**, 409-417

Paustian, K., Andren, O., Clarholm, M., Hansson, A.-C., Johansson, G., Lagerlof, J., Lindberg,T., Pettersson, R., and Sohlenius, B. 1990: Carbon and nitrogen budgets of four agro-ecosystems with annual and perennial crops, with and without N ferrilization, *J. Applied Ecology*, **27**, 60-84

Pietikäinen, J. and Fritze, H. 1995: Clear-cutting and prescribed burning in coniferous forest: Comparison of effects on soil fungal and total microbial biomass, respiration activity and nitrification. *Soil Biol. Biochem.*, **27**, 101-109

Pinol, J., Alcaniz, J.M., and Roda, F. 1995: Carbon dioxide efflux and pCO_2 in soils of three Quercus ilex montane forests. *Biogeochemistry*, **30**, 191-215

Pritchard, D.T. and Currie, J.A. 1982: Diffusion coefficients of carbon dioxide, nitrous oxide, ethylene and ethane in air and their measurement. *J. Soil Sci.*, **33**, 175-184

Raich, J.W. and Schlesinger, W.H. 1992: The global dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, **44B**, 81-99

Rolston, D.E. 1978: Application of gaseous-diffusion theory to measurement of denirtification. *In* Nitrougen in the environment, Vol. 1. Nitrogen behavior in field soil. Academic press, New York.

Rolston, D.E., Hoffman, D.L., and Tov, D.W. 1978: Field measurement of denitrification: Ⅰ. Flux of N_2 and N_2O. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **42**, 863-869

Rolston, D.E. 1986: Gas flux, Method of soil analysis, Part 1. Physical and mineralogical Methods (2nd edition), pp. 1103-1119. American Society of Agronomy – Soil Science Society of America.

Romell, L.G. 1932: Mull and duff as biotic equilibria. *Soil Sci.*, 34, 161-188

Rouse, W.R. 1976: Microclimatic changes accompanying burning in subarctic lichen woodland. *Arctic and Alpine Res.*, *8*, 357-376

Sahrawat, K.L. and Keeney, D.R. 1986: Nitrous Oxide Emission from Soils. *In* Advances in Soil Science, vol. 4, Ed. Stewart, B.A. p. 103-148, Springer - Verlag New York Inc., Printed in the U.S.A. (1986)

阪田 匡司・波多野 隆介・佐久間 敏雄 1994: フロースルーチャンバーを用いた土壌呼吸測

定法の改良法、*土肥誌*、**65**, 334-336

阪田　匡司・波多野　隆介・佐久間　敏雄 1996：　粘土質コムギ畑の土壌呼吸における根と微生物呼吸の寄与、　*土肥誌*、**67**, 133-138

札幌管区気象台 1995：　北海道気象月報、札幌管区気象台編

札幌管区気象台 1996：　北海道気象月報、札幌管区気象台編

札幌管区気象台 1997：　北海道気象月報、札幌管区気象台編

Schlentner, R.E. and Van Cleve, K. 1985: Relationships between CO_2 evolution from soil, substrate temperature, and substrate moisture in four mature forest types in interior Alaska. *Can. J. For. Res.*, **15**, 97-106

Schütz, H, Seiler, W., Rennenberg, H., 1990: Soil and land use related sources and sinks of methane (CH_4) in the context of the global methane budget. *In* Soils and the greenhouse effect, ed. A.F. Bouwman, p. 269-285. John Wiley & Sons Ltd., Great Britain

Seech, A.G. and Beauchamp, E.G. 1988: Dentrification in soil aggregates of different sizes. *Soil Sci, Soc. Am. J.*, **52**, 1616-1621

Sexstone, A.J., Revsbech, N.P., Parkin, T.B., and Tiedje, J.M. 1985: Direct measurements of oxygen profiles and denitrification rates in soil aggregates. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **49**, 646-651

島田 博匡・戸田 浩人・生原 喜久雄・小池 孝良 1998：　森林土壌における斜面位置、深さ別のガス拡散係数の特徴およびCO_2フラックス、*森林立地学会誌 森林立地*、**40(1)**, 1-8

Shibuya, M., Sugiura, T., Takahashi, K., Sawamoto, T., Hatano, R., Cha, J. Y., Fukuyama, K., Isaev, A. P. and Maximov, T. C., 1999: Allometries and aboveground biomass of a 22-year-old stand of Larix cajanderi. *In* Proceedings of the Seventh Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1998, Tsukuba, Japan. p. 25-39

Singer, M.J. and Munns, D.N. 1999: Soils : an introduction – Fourth edition. p.163-226. Prentice-Hall, Inc. Simon & Schuster/A Viacom Company. Printed in the United States of America.

Smith, K.A. 1980: A model of the extent of anaerobic zones in aggregated soils, and its potential application to estimates of denitrification. *J. Soil Sci.*, **31**, 263-277

Smith, K.A., H.Clayton, Arah, J.R.M., Christensen, S., Ambus, P., Fowler, D., Hargreaves, K.J., Skiba, U., W.Harris, G., Wienhold, F.G., Klenmedtsson, L., and Galle, B. 1994: Micrometeorological and chamber methods for measurement of nitrous oxide fluxes

between soils and atmosphere: Overview and conclusion. *J. Geophy. Res.*, **99(D8)**, 16541-16548

Smith, K.A., McTaggart, I.P., Dobbie, K.E., and Conen, F. 1998: Emissions of N_2O from Scottish agricultural soils, as a function of fertilizer N. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **52**, 123-130

Soil Survey Staff 1990: Keys to Soil Taxonomy. SMMS Tech. Monograph, 19, 4th ed., Virginia Polytechnic Institute and State University (1990)

Steudler, P.A., Jones, R.D., Castro M.S., Melillo, J.M., Lewis, D.L., 1996: Microbial controls of methane oxidation in temperate forest and agricultural soils. *In* Microbiology of atmospheric trace gases. ed. J.C. Murrell and D.P. Kelly, p. 69-81, Springer, Berlin.

鈴木 聡 1996: 畑地における亜酸化窒素の発生と制御方法、栃木農試研報、No44、33-47

Thierron, V. and Laudelout, H. 1996: Contribution of root respiration to total CO_2 efflux from the soil of a deciduous forest. *Can. J. For. Res.*, **26**, 1142-1148

Toland, D.E. and Zak, D.R. 1994: Seasonal patterns of soil respiration in intact and clear-cut northern hardwood forests. *Can. J. For. Res.*, **24**, 1711-1716

鶴田 治雄 1994: 土壌圏と大気圏ー土壌生態系のガス代謝と地球環境, 陽 捷行編著、p. 29-54, 朝倉書店

鶴田 治雄 1997: 日本の水田からのメタンと畑地からの亜酸化窒素の発生量－3 年間(1992-1994)の全国調査結果の概要－、農業環境技術研究所 資源・生態管理科研究集録、13, 101-131

植田 徹・松口 龍彦1994; 「6.窒素の循環」、土壌生化学、著者代表 似王 以智夫・木村 眞人、朝倉書店

Valendik, E.N. 1996: Temporal and spatial distribution of forest fires in Siberia. *In* Fire in Ecosystems of Boreal Eurasia, ed. J.G. Goldammer and V.V. Furyaev, p. 129-138. Kluwer Academic Publishers, the Netherlands

Velthof, G.L. and Oenema, O. 1995: Nitrous oxide fluxes from grassland in the Netherlands : II. Effects of soil type, nitrogen fertilizer application and grazing. *European J. Soil Sci.*, **46**, 541-549

Watson, R.T,. Meira Filho, L.G., Sanhueza, E., and Janetos, A. 1992: Climate Change 1992, Houghton J.T., Callander, B.A., and Varney, S.K. (eds.), p. 25-46, Cambridge Univ. Press.

Weber, M.G. 1985: Forest soil respiration in eastern Ontario jack pine ecosystems. *Can. J. For. Res.*, **15**, 1069-1073

Weber, M.G. 1990: Forest soil respiration after cutting and burning in immature aspen ecosystems. *Forest ecology and Management*, **31**, 1-14

Witkamp, M. and Frank, M.L. 1969: Evolution of CO_2 from litter, humus, and subsoil of a pine stand. *Podobiologia*, **Bd. 9, S**, 358-365

Woodwell, G.M. 1978: The biota and the world carbon budget. *Science*, **199**, 141-146

八木 一行 1997: 土壌環境分析法第Ⅲ-8 章、p. 129-138、土壌環境分析法編集委員会編、博友社

Yajima, T., Takahashi, K., Sasaoka, E., Hatano, R., Sawamoto, T., Ivanov, B.I., Isaev, A.P. and Maximov, T.C. 1998: Stand structure and biomass of Larix cajanderi forest in the Siberian Taiga. *In* Proceedings of the Sixth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1997, ed. S. Mori, Y. Kanazawa, and G. Inoue, p. 72-80, Printed in March 1998, Tsukuba, Japan

楊 宗興 1994: 土壌圏と大気圏ー土壌生態系のガス代謝と地球環境, 陽 捷行編著、p. 85-105, 朝倉書店

Zelenev, V.V. 1996: Assessment of the average annual methane flux from the soils of Russia. Working Paper – 96-51 May 1996, IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis, A-2361 Laxenburg Austria.

付表1　シベリア土壌風乾土 土壌分析結果一覧

Site	層位名	T-C	T-N	TC/TN	CO3-C	CO3-C/T-C	org-C	org-C/TN	pH	EC
		（燃焼法）			（酸抽出法）				(1:2.5 H_2O)	(1:5 H_2O)
		%	%		%		%			mS m^{-1}
Cont	L	49.02	0.737	67	0.00	0.00	49.02	67	4.53[*1] 4.67[*2]	17.35[*1] 23.2[*2]
(Kenkeme)	FH	32.74	0.658	50	0.00	0.00	32.74	50	4.94[*1] 5.03[*2]	34.7[*1] 12.57[*2]
(Sandy Soil)	E	1.18	0.029	41	0.00	0.00	1.18	41	5.77	4.24
	B_2	0.28	0.018	16	0.00	0.01	0.28	16	6.40	3.13
	B_3	0.13	0.014	9	0.00	0.02	0.13	9	7.85	3.50
	C	0.17	0.016	11	0.00	0.02	0.17	11	7.13	2.52
	凍土	0.19	0.019	11	0.00	0.02	0.19	10	7.34	2.50
S92	A_{11}	2.95	0.106	28	0.02	0.01	2.93	28	7.29	22.50
(Kenkeme)	A_{12}	0.96	0.026	37	0.00	0.00	0.95	37	7.38	6.07
(Sandy Soil)	AB	0.34	0.018	19	0.01	0.02	0.33	19	8.16	10.64
	B_2	0.36	0.017	21	0.18	0.49	0.19	11	8.44	9.67
	B_3	0.87	0.018	49	0.56	0.64	0.31	18	8.61	9.35
	C	0.17	0.018	9	0.00	0.02	0.16	9	8.18	4.56
W96	FH	41.23	0.987	42	0.01	0.00	41.23	42	5.95[*1] 6.06[*2]	7.87[*1] 5.73[*2]
(Kenkeme)	E	0.54	0.022	24	0.00	0.00	0.54	24	4.86	1.24
(Sandy Soil)	B_{21}	0.51	0.020	25	0.00	0.00	0.51	25	5.37	1.23
	B_{22}	0.08	0.012	7	0.00	0.00	0.08	7	6.03	1.06
	B_3	0.01	0.013	1	0.00	0.13	0.01	1	6.32	0.73
	C	0.12	0.017	7	0.00	0.02	0.12	7	6.74	1.09
S73	L	40.97	1.67	25	0.03	0.00	40.94	25	5.57[*2]	21.20[*2]
(Kenkeme)	FH	3.70	0.22	17	0.02	0.00	3.69	17	5.82[*2]	5.24[*2]
(Sandy Soil)	AB	1.67	0.11	15	0.01	0.00	1.66	15	5.73	5.39
	E	0.31	0.03	10	0.00	0.01	0.31	10	5.92	1.523
	B_2h	0.25	0.03	8	0.00	0.01	0.25	8	5.84	1.462
	B_2ir	0.09	0.02	5	0.02	0.20	0.07	4	6.14	0.87
	B_2irg	0.10	0.02	5	0.00	0.02	0.10	5	6.32	1.098
	B3	0.08	0.02	4	0.03	0.39	0.05	2	6.36	0.777
S92-2	A_{11}	3.60	0.212	17	0.04	0.01	3.56	17	8.06	24.90
(Kenkeme)	A_{12}	2.59	0.077	34	0.01	0.00	2.58	33	8.38	17.15
(Silty Soil)	AB	1.07	0.033	33	0.25	0.23	0.83	25	8.77	21.60
	B_2	0.84	0.042	20	0.04	0.05	0.80	19	8.43	21.30
	C	0.55	0.023	24	0.24	0.44	0.31	14	8.79	15.39
	2C	0.14	0.014	10	0.03	0.23	0.11	8	8.74	10.63
Cont-2	L	50.30	0.582	86	0.00	0.00	50.30	86	4.29[*1] 4.33[*2]	36.4[*1] 29.6[*2]
(Neleger)	FH	51.98	1.427	36	0.00	0.00	51.98	36	4.52[*1] 4.62[*2]	13.75[*1] 9.51[*2]
(Silty Soil)	E_1	1.75	0.037	47	0.00	0.00	1.75	47	4.79	2.65
	E_2	0.60	0.027	23	0.00	0.00	0.60	23	6.34	2.49
	B_2h	0.48	0.029	17	0.02	0.04	0.46	16	8.73	17.57
	B_3	0.91	0.026	36	0.51	0.55	0.41	16	9.24	20.00
	C	1.01	0.025	40	0.54	0.54	0.46	18	9.07	21.40
G	A_1	10.39	0.983	11	0.00	0.00	10.39	11	6.66	14.22
(Neleger)	A_2	2.01	0.057	35	0.78	0.39	1.23	22	8.67	23.10
(Silty Soil)	B_2ir	1.83	0.035	52	0.93	0.51	0.90	25	9.00	35.90
	B_2h	0.94	0.029	32	0.45	0.47	0.49	17	8.73	57.30
	B_3g	0.81	0.026	31	0.32	0.40	0.49	18	8.46	61.70
	Cg	1.05	0.046	23	0.20	0.19	0.85	18	8.33	51.80

[*1] 1:10

[*2] 1:20

付表1　シベリア土壌風乾土 土壌分析結果一覧（つづき）

Site	層位名	K	Na	Mg	Ca	NH_4-N	Cl	NO_2-N	NO_3-N	PO_4-P	SO_4-S
		（水抽出法）									
		<<<<<<< $\mu g\ g^{-1}$ >>>>>>>									
Cont	L	460	20.4	296	1189	1.83	41.9	9.65	2.26	147	22.1
(Kenkeme)	FH	416	50.0	66.9	388	1.95	77.2	4.35	0.40	91.9	49.4
(Sandy Soil)	E	7.27	8.3	5.47	36.6	0.32	9.63	0.48	0.08	0.00	4.08
	B_2	4.71	11.1	3.04	18.4	0.39	10.9	0.00	0.09	0.00	6.09
	B_3	2.16	15.2	2.91	18.1	0.65	10.0	0.00	0.00	0.00	1.24
	C	5.71	10.8	2.60	12.8	0.65	9.19	0.00	0.06	0.00	0.93
	凍土	6.11	10.4	2.91	11.7	0.34	9.19	0.00	0.04	0.00	1.04
S92	A_{11}	26.1	13.4	20.7	190	0.34	7.80	1.03	0.52	0.25	8.15
(Kenkeme)	A_{12}	7.25	11.0	7.03	48.5	0.33	10.2	0.00	0.70	0.00	0.92
(Sandy Soil)	AB	4.24	16.2	11.3	77.5	0.34	8.36	0.51	0.10	0.00	1.08
	B_2	4.55	17.1	11.4	83.0	0.38	6.11	0.49	0.04	0.00	0.90
	B_3	5.24	16.4	10.2	89.0	0.38	5.19	0.47	0.03	0.00	1.30
	C	4.46	11.3	6.00	32.6	0.32	5.57	0.35	0.10	0.00	0.78
W96	FH	152	16.7	16.4	82.7	3.51	21.3	1.61	0.86	63.8	27.4
(Kenkeme)	E	7.87	3.91	1.23	5.41	0.32	3.38	0.21	0.05	0.35	0.84
(Sandy Soil)	B_{21}	6.33	4.91	1.98	5.82	0.31	3.55	0.19	0.01	0.00	2.15
	B_{22}	5.53	3.66	1.31	3.62	0.31	9.82	0.00	0.01	0.00	0.57
	B_3	3.21	3.04	0.96	2.43	0.28	3.61	0.22	0.02	0.00	0.51
	C	5.05	4.69	1.33	3.32	0.29	5.48	0.28	0.05	0.00	0.54
S73	L	442	70	151	490	0.00	101	6.67	0.00	21.90	47.6
(Kenkeme)	FH	39.8	31.8	24.0	138	0.27	29.6	0.66	0.54	0.52	6.69
(Sandy Soil)	AB	6.62	10.2	5.24	33.2	0.23	7.35	0.61	0.06	0.05	1.56
	E	3.18	6.03	0.00	9.41	0.76	5.17	0.28	0.14	0.06	0.65
	B_2h	3.86	7.24	0.06	6.92	0.06	5.1	0.09	0.12	0.06	0.43
	B_2ir	3.35	5.37	0.00	3.62	0.50	4.59	0.13	0.11	0.05	0.20
	B_2irg	2.46	6.13	0.00	3.69	0.21	4.28	0.05	0.04	0.00	0.29
	B3	3.02	5.65	0.00	2.94	0.03	4.87	0.08	0.18	0.00	0.83
S92-2	A_{11}	13.7	145	78.8	96.8	0.32	8.72	0.64	0.31	1.40	8.31
(Kenkeme)	A_{12}	5.81	187	40.2	59.2	0.30	6.61	0.74	1.04	0.00	4.01
(Silty Soil)	AB	7.71	197	42.0	69.7	0.30	12.3	0.00	0.00	0.16	12.6
	B_2	5.97	173	38.5	55.5	0.30	19.7	0.00	0.03	0.07	29.9
	C	6.57	123	31.1	71.9	0.29	11.7	0.00	0.00	0.00	14.9
	2C	7.82	52.4	25.5	60.0	0.29	15.2	0.00	0.00	0.00	11.1
Cont-2	L	562	35.0	689	888	1.59	57.2	13.2	3.16	244	20.6
(Neleger)	FH	313	77.6	90.2	120	1.80	47.0	3.49	0.00	129	29.1
(Silty Soil)	E_1	8.32	15.4	7.05	8.27	0.30	4.57	0.32	0.00	1.59	1.36
	E_2	3.05	24.6	2.20	3.84	0.28	4.13	0.25	0.00	0.00	0.68
	B_2h	4.27	177	28.6	22.6	0.30	5.45	0.67	0.00	0.00	1.32
	B_3	5.05	200	43.4	57.9	0.34	8.28	0.71	0.00	0.00	3.33
	C	4.45	188	45.4	67.3	0.29	9.99	0.76	0.00	0.00	5.02
G	A_1	42.3	17.1	54.7	31.0	0.97	11.6	0.73	0.34	0.00	8.42
(Neleger)	A_2	14.5	80.9	143	58.4	0.46	6.91	1.18	0.39	0.00	5.83
(Silty Soil)	B_2ir	9.71	228	141	34.9	0.34	34.2	0.00	0.38	0.00	106
	B_2h	10.1	357	170	40.0	0.34	56.1	0.00	0.25	0.00	240
	B_3g	13.7	331	188	83.4	0.63	59.1	0.00	0.10	0.00	269
	Cg	14.4	263	165	82.4	0.34	72.6	0.00	0.10	0.18	224

*1 1:10

*2 1:20

付表1　シベリア土壌風乾土 土壌分析結果一覧（つづき）

Site	層位名	CEC	Ex. K	Ex. Na	Ex. Ca	Ex. Mg	Ex. Sum.	base sat. ratio	Ca sat. ratio
		（ショーレンベルガー法）							
		<<<<<<<ceq kg^{-1}>>>>>>>						<<<%>>>	
Cont	L								
(Kenkeme)	FH								
(Sandy Soil)	E	12.34	0.17	0.05	9.98	1.42	11.61	94	81
	B_2	4.94	0.07	0.05	3.89	0.59	4.61	93	79
	B_3	5.17	0.08	0.09	4.77	0.65	5.60	108	92
	C	4.74	0.12	0.05	5.39	0.70	6.27	132	114
	凍土	5.08	0.12	0.05	3.85	0.85	4.87	96	76
S92	A_{11}	21.69	0.51	0.10	22.69	1.69	24.98	115	105
(Kenkeme)	A_{12}	12.08	0.13	0.05	10.81	1.33	12.32	102	89
(Sandy Soil)	AB	8.64	0.10	0.10	8.77	1.13	10.10	117	102
	B_2	4.92	0.08	0.10	17.72	0.86	18.75	381	360
	B_3	4.11	0.08	0.10	18.44	0.93	19.55	476	449
	C	5.87	0.12	0.05	5.43	1.02	6.62	113	93
W96	FH								
(Kenkeme)	E	3.15	0.08	0.01	0.33	0.13	0.55	18	11
(Sandy Soil)	B_{21}	5.26	0.10	0.02	0.74	0.31	1.17	22	14
	B_{22}	1.90	0.05	0.02	0.61	0.29	0.97	51	32
	B_3	1.38	0.04	0.02	0.60	0.28	0.94	68	43
	C	4.40	0.15	0.03	2.32	1.01	3.51	80	53
S73	L								
(Kenkeme)	FH	27.12	0.52	0.22	12.85	2.02	15.62	57.6	47.4
(Sandy Soil)	AB	12.44	0.17	0.12	6.12	1.20	7.61	61.2	49.2
	E	4.03	0.06	0.09	2.27	0.55	2.97	73.7	56.3
	B_2h	4.05	0.07	0.09	1.54	0.52	2.22	54.7	38.0
	B_2ir	2.20	0.05	0.09	0.80	0.32	1.26	57.0	36.3
	B_2irg	3.71	0.07	0.10	1.64	0.67	2.49	67.1	44.2
	B3	1.81	0.06	0.09	1.01	0.44	1.59	87.8	55.8
S92-2	A_{11}	25.39	0.43	1.06	22.34	12.43	36.26	143	88
(Kenkeme)	A_{12}	15.91	0.28	1.80	15.31	16.10	33.49	211	96
(Silty Soil)	AB	30.16	0.35	1.49	22.49	11.38	35.71	118	75
	B_2	18.19	0.37	1.29	10.94	9.63	22.23	122	60
	C	8.60	0.22	0.82	17.46	4.88	23.38	272	203
	2C	3.39	0.11	0.28	6.55	1.62	8.56	252	193
Cont-2	L								
(Neleger)	FH								
(Silty Soil)	E_1	9.05	0.13	0.09	1.01	1.51	2.74	30	11
	E_2	6.85	0.12	0.29	2.07	3.15	5.62	82	30
	B_2h	17.76	0.32	1.43	7.61	12.37	21.72	122	43
	B_3	11.10	0.22	1.42	19.80	9.75	31.19	281	178
	C	10.87	0.21	1.39	20.82	9.41	31.82	293	191
G	A_1	49.84	1.06	0.12	15.26	29.17	45.61	92	31
(Neleger)	A_2	13.62	0.39	0.64	18.21	16.36	35.60	261	134
(Silty Soil)	B_2ir	13.59	0.31	1.58	17.15	18.58	37.61	277	126
	B_2h	11.55	0.35	2.50	15.89	17.81	36.55	316	138
	B_3g	12.44	0.31	2.00	17.97	13.28	33.56	270	144
	Cg	16.31	0.45	1.74	16.36	13.33	31.89	196	100

*1 1:10

*2 1:20

付表 02

付表2 土層1mまでに存在する単位面積当たりの全有機炭素

Site	層位	上端	中央	下端	層厚	容積重	Organic Carbon Content		
		---------- cm ----------				Mg m^{-3}	%	g C m^{-2}	g C m^{-2}*
Cont	L	-7.5	-6.0	-4.5	3.0	0.00663	49.02	97	97
(Kenkeme)	FH	-4.5	-2.3	0.0	4.5	0.0632	32.74	931	1029
(Sandy Soil)	E	0.0	2.0	4.0	4.0	1.25	1.18	592	1621
	B_2	4.0	13.8	23.5	19.5	1.63	0.28	888	2509
	B_3	23.5	40.0	56.5	33.0	1.74	0.13	719	3228
	C	56.5	78.5	100.5	44.0	1.85	0.17	1362	4575
S92	A_{11}	0.0	1.8	3.5	3.5	0.30	2.93	307	307
(Kenkeme)	A_{12}	3.5	8.8	14.0	10.5	1.35	0.95	1353	1660
(Sandy Soil)	AB	14.0	21.0	28.0	14.0	1.68	0.33	775	2435
	B_2	28.0	29.5	31.0	3.0	1.73	0.19	97	2532
	B_3	31.0	44.0	57.0	26.0	1.75	0.31	1417	3948
	C	57.0	118.5	180.0	123.0	1.71	0.16	3417	5143
W96	FH	-2.0	-1.0	0.0	2.0	0.0632	41.23	521	521
(Kenkeme)	E	0.0	5.0	10.0	10.0	0.98	0.54	527	1048
(Sandy Soil)	B_{21}	10.0	13.8	17.5	7.5	1.19	0.51	453	1501
	B_{22}	17.5	27.8	38.0	20.5	1.64	0.08	255	1756
	B_3	38.0	43.0	48.0	10.0	1.70	0.01	19	1775
	C	48.0	85.5	123.0	75.0	1.79	0.12	1608	2890
S73	L	-6.0	-5.0	-4.0	2.0	0.00663	40.94	54	54
(Kenkeme)	FH	-4.0	-2.0	0.0	4.0	0.59	3.69	870	924
(Sandy Soil)	AB	0.0	3.5	7.0	7.0	0.59	1.66	685	1610
	E	7.0	13.0	19.0	12.0	1.57	0.31	580	2189
	B_2h	19.0	26.5	34.0	15.0	1.66	0.25	615	2805
	B_2ir	34.0	39.0	44.0	10.0	1.76	0.07	127	2932
	B_2irg	44.0	64.0	84.0	40.0	1.80	0.10	702	3635
	B_3	84.0	89.0	94.0	10.0	1.87	0.05	91	3781
Cont-2	L	-10.0	-8.5	-7.0	3.0	0.0614	50.30	926	926
(Neleger)	FH	-5.5	-2.8	0.0	5.5	0.165	51.98	4717	5644
(Silty Soil)	E_1	0.0	1.0	2.0	2.0	1.12	1.75	391	6035
	E_2	2.0	13.3	24.5	22.5	1.51	0.60	2045	8080
	B_2h	24.5	40.0	55.5	31.0	1.51	0.46	2175	10255
	B_3	55.5	64.3	73.0	17.5	1.50	0.41	1069	11324
	C	73.0	90.5	108.0	35.0	1.52	0.46	2472	13231
S92-2	A_{11}	0.0	3.8	7.5	7.5	0.755	3.56	2015	2015
(Kenkeme)	A_{12}	7.5	14.3	21.0	13.5	1.40	2.58	4873	6888
(Silty Soil)	AB	21.0	33.5	46.0	25.0	1.17	0.83	2414	9302
	B_2	46.0	63.0	80.0	34.0	1.32	0.80	3603	12905
	C	80.0	105.0	130.0	50.0	1.58	0.31	2433	13878
	2C	130.0	145.0	160.0	30.0	1.64	0.11	520	
G	A_1	0.0	6.0	12.0	12.0	0.717	10.39	8937	8937
(Neleger)	A_2	12.0	15.5	19.0	7.0	1.52	1.23	1313	10251
(Silty Soil)	B_2ir	19.0	25.3	31.5	12.5	1.55	0.90	1736	11986
	B_2h	31.5	40.0	48.5	17.0	1.60	0.49	1341	13327
	B_3g	48.5	63.3	78.0	29.5	1.53	0.49	2199	15526
	Cg	78.0	99.0	120.0	42.0	1.50	0.85	5335	18321

*: 最上層からその層までの合計値。ただし、深さ1mまで。

付表3 土層1mまでに存在する単位面積当たりの全窒素量

Site	層位	上端	中央	下端	層厚	容積重	Total Nitrogen Content		
		---------- cm ----------				$Mg\ m^{-3}$	%	$g\ N\ m^{-2}$	$g\ N\ m^{-2}$*
Cont	L	-7.5	-6.0	-4.5	3.0	0.00663	0.737	1	1
(Kenkeme)	FH	-4.5	-2.3	0.0	4.5	0.0632	0.658	19	20
(Sandy Soil)	E	0.0	2.0	4.0	4.0	1.25	0.029	14	35
	B_2	4.0	13.8	23.5	19.5	1.63	0.018	57	92
	B_3	23.5	40.0	56.5	33.0	1.74	0.014	82	174
	C	56.5	78.5	100.5	44.0	1.85	0.016	128	301
S92	A_{11}	0.0	1.8	3.5	3.5	0.30	0.106	11	11
(Kenkeme)	A_{12}	3.5	8.8	14.0	10.5	1.35	0.026	36	47
(Sandy Soil)	AB	14.0	21.0	28.0	14.0	1.68	0.018	41	89
	B_2	28.0	29.5	31.0	3.0	1.73	0.017	9	98
	B_3	31.0	44.0	57.0	26.0	1.75	0.018	80	178
	C	57.0	118.5	180.0	123.0	1.71	0.018	389	314
W96	FH	-2.0	-1.0	0.0	2.0	0.0632	0.987	12	12
(Kenkeme)	E	0.0	5.0	10.0	10.0	0.98	0.022	22	34
(Sandy Soil)	B_{21}	10.0	13.8	17.5	7.5	1.19	0.020	18	52
	B_{22}	17.5	27.8	38.0	20.5	1.64	0.012	39	91
	B_3	38.0	43.0	48.0	10.0	1.70	0.013	21	113
	C	48.0	85.5	123.0	75.0	1.79	0.017	224	268
S73	L	-6.0	-5.0	-4.0	2.0	0.00663	1.667	2	2
(Kenkeme)	FH	-4.0	-2.0	0.0	4.0	0.59	0.221	52	54
(Sandy Soil)	AB	0.0	3.5	7.0	7.0	0.59	0.108	44	99
	E	7.0	13.0	19.0	12.0	1.57	0.030	57	155
	B_2h	19.0	26.5	34.0	15.0	1.66	0.030	75	230
	B_2ir	34.0	39.0	44.0	10.0	1.76	0.020	35	265
	B_2irg	44.0	64.0	84.0	40.0	1.80	0.020	144	409
	B_3	84.0	89.0	94.0	10.0	1.87	0.020	37	469
Cont-2	L	-10.0	-8.5	-7.0	3.0	0.0614	0.582	11	11
(Neleger)	FH	-5.5	-2.8	0.0	5.5	0.165	1.427	130	140
(Silty Soil)	E_1	0.0	1.0	2.0	2.0	1.12	0.037	8	149
	E_2	2.0	13.3	24.5	22.5	1.51	0.027	90	239
	B_2h	24.5	40.0	55.5	31.0	1.51	0.029	136	375
	B_3	55.5	64.3	73.0	17.5	1.50	0.026	67	443
	C	73.0	90.5	108.0	35.0	1.52	0.025	134	546
S92-2	A_{11}	0.0	3.8	7.5	7.5	0.755	0.212	120	120
(Kenkeme)	A_{12}	7.5	14.3	21.0	13.5	1.40	0.077	146	266
(Silty Soil)	AB	21.0	33.5	46.0	25.0	1.17	0.033	95	361
	B_2	46.0	63.0	80.0	34.0	1.32	0.042	188	549
	C	80.0	105.0	130.0	50.0	1.58	0.023	180	621
	2C	130.0	145.0	160.0	30.0	1.64	0.014	68	
G	A_1	0.0	6.0	12.0	12.0	0.717	0.983	845	845
(Neleger)	A_2	12.0	15.5	19.0	7.0	1.52	0.057	61	906
(Silty Soil)	B_2ir	19.0	25.3	31.5	12.5	1.55	0.035	68	975
	B_2h	31.5	40.0	48.5	17.0	1.60	0.029	79	1053
	B_3g	48.5	63.3	78.0	29.5	1.53	0.026	119	1173
	Cg	78.0	99.0	120.0	42.0	1.50	0.046	291	1325

*: 最上層からその層までの合計値。ただし、深さ1mまで。

付表 04

付表4 土層1mまでに存在する単位面積当たりの水溶性K

Site	層位	上端	中央	下端	層厚	容積重	水溶性K含量		
		---------- cm ----------				Mg m^{-3}	μ g g^{-1}	g K m^{-2}	g K m^{-2}*
Cont	L	-7.5	-6.0	-4.5	3.0	0.00663	459.64	0.09	0.09
(Kenkeme)	FH	-4.5	-2.3	0.0	4.5	0.0632	415.93	1.18	1.27
(Sandy Soil)	E	0.0	2.0	4.0	4.0	1.25	7.27	0.36	1.64
	B_2	4.0	13.8	23.5	19.5	1.63	4.71	1.50	3.13
	B_3	23.5	40.0	56.5	33.0	1.74	2.16	1.24	4.37
	C	56.5	78.5	100.5	44.0	1.85	5.71	4.64	8.97
S92	A_{11}	0.0	1.8	3.5	3.5	0.30	26.07	0.27	0.27
(Kenkeme)	A_{12}	3.5	8.8	14.0	10.5	1.35	7.25	1.03	1.30
(Sandy Soil)	AB	14.0	21.0	28.0	14.0	1.68	4.24	1.00	2.30
	B_2	28.0	29.5	31.0	3.0	1.73	4.55	0.24	2.53
	B_3	31.0	44.0	57.0	26.0	1.75	5.24	2.38	4.92
	C	57.0	118.5	180.0	123.0	1.71	4.46	9.38	8.20
W96	FH	-2.0	-1.0	0.0	2.0	0.0632	151.94	0.19	0.19
(Kenkeme)	E	0.0	5.0	10.0	10.0	0.98	7.87	0.77	0.96
(Sandy Soil)	B_{21}	10.0	13.8	17.5	7.5	1.19	6.33	0.57	1.53
	B_{22}	17.5	27.8	38.0	20.5	1.64	5.53	1.86	3.39
	B_3	38.0	43.0	48.0	10.0	1.70	3.21	0.55	3.93
	C	48.0	85.5	123.0	75.0	1.79	5.05	6.77	8.63
S73	L	-6.0	-5.0	-4.0	2.0	0.00663	441.52	0.06	0.06
(Kenkeme)	FH	-4.0	-2.0	0.0	4.0	0.59	39.79	0.94	1.00
(Sandy Soil)	AB	0.0	3.5	7.0	7.0	0.59	6.62	0.27	1.27
	E	7.0	13.0	19.0	12.0	1.57	3.18	0.60	1.87
	B_2h	19.0	26.5	34.0	15.0	1.66	3.86	0.96	2.83
	B_2ir	34.0	39.0	44.0	10.0	1.76	3.35	0.59	3.42
	B_2irg	44.0	64.0	84.0	40.0	1.80	2.46	1.77	5.19
	B_3	84.0	89.0	94.0	10.0	1.87	3.02	0.57	6.10
Cont-2	L	-10.0	-8.5	-7.0	3.0	0.0614	562.37	1.04	1.04
(Neleger)	FH	-5.5	-2.8	0.0	5.5	0.165	313.30	2.84	3.88
(Silty Soil)	E_1	0.0	1.0	2.0	2.0	1.12	8.32	0.19	4.07
	E_2	2.0	13.3	24.5	22.5	1.51	3.05	1.04	5.10
	B_2h	24.5	40.0	55.5	31.0	1.51	4.27	2.00	7.10
	B_3	55.5	64.3	73.0	17.5	1.50	5.05	1.33	8.43
	C	73.0	90.5	108.0	35.0	1.52	4.45	2.37	10.25
S92-2	A_{11}	0.0	3.8	7.5	7.5	0.755	13.73	0.78	0.78
(Kenkeme)	A_{12}	7.5	14.3	21.0	13.5	1.40	5.81	1.10	1.87
(Silty Soil)	AB	21.0	33.5	46.0	25.0	1.17	7.71	2.25	4.13
	B_2	46.0	63.0	80.0	34.0	1.32	5.97	2.68	6.81
	C	80.0	105.0	130.0	50.0	1.58	6.57	5.19	8.89
	2C	130.0	145.0	160.0	30.0	1.64	7.82	3.85	
G	A_1	0.0	6.0	12.0	12.0	0.717	42.31	3.64	3.64
(Neleger)	A_2	12.0	15.5	19.0	7.0	1.52	14.47	1.54	5.18
(Silty Soil)	B_2ir	19.0	25.3	31.5	12.5	1.55	9.71	1.88	7.05
	B_2h	31.5	40.0	48.5	17.0	1.60	10.12	2.75	9.81
	B_3g	48.5	63.3	78.0	29.5	1.53	13.71	6.18	15.99
	Cg	78.0	99.0	120.0	42.0	1.50	14.42	9.08	20.75

*: 最上層からその層までの合計値。ただし、深さ1mまで。

付表 05

付表5 土層1mまでに存在する単位面積当たりの水溶性Na

Site	層位	上端	中央	下端	層厚	容積重	水溶性Na含量		
		---------- cm ----------				$Mg\ m^{-3}$	$\mu g\ g^{-1}$	$g\ Na\ m^{-2}$	$g\ Na\ m^{-2}$*
Cont	L	-7.5	-6.0	-4.5	3.0	0.00663	20.44	0.00	0.00
(Kenkeme)	FH	-4.5	-2.3	0.0	4.5	0.0632	50.00	0.14	0.15
(Sandy Soil)	E	0.0	2.0	4.0	4.0	1.25	8.33	0.42	0.56
	B_2	4.0	13.8	23.5	19.5	1.63	11.12	3.54	4.10
	B_3	23.5	40.0	56.5	33.0	1.74	15.17	8.71	12.81
	C	56.5	78.5	100.5	44.0	1.85	10.76	8.76	21.47
S92	A_{11}	0.0	1.8	3.5	3.5	0.30	13.38	0.14	0.14
(Kenkeme)	A_{12}	3.5	8.8	14.0	10.5	1.35	10.96	1.55	1.69
(Sandy Soil)	AB	14.0	21.0	28.0	14.0	1.68	16.19	3.81	5.50
	B_2	28.0	29.5	31.0	3.0	1.73	17.10	0.89	6.39
	B_3	31.0	44.0	57.0	26.0	1.75	16.41	7.47	13.86
	C	57.0	118.5	180.0	123.0	1.71	11.33	23.83	22.19
W96	FH	-2.0	-1.0	0.0	2.0	0.0632	16.67	0.02	0.02
(Kenkeme)	E	0.0	5.0	10.0	10.0	0.98	3.91	0.38	0.40
(Sandy Soil)	B_{21}	10.0	13.8	17.5	7.5	1.19	4.91	0.44	0.84
	B_{22}	17.5	27.8	38.0	20.5	1.64	3.66	1.23	2.07
	B_3	38.0	43.0	48.0	10.0	1.70	3.04	0.52	2.59
	C	48.0	85.5	123.0	75.0	1.79	4.69	6.29	6.95
S73	L	-6.0	-5.0	-4.0	2.0	0.00663	69.96	0.01	0.01
(Kenkeme)	FH	-4.0	-2.0	0.0	4.0	0.59	31.81	0.75	0.76
(Sandy Soil)	AB	0.0	3.5	7.0	7.0	0.59	10.22	0.42	1.18
	E	7.0	13.0	19.0	12.0	1.57	6.03	1.14	2.32
	B_2h	19.0	26.5	34.0	15.0	1.66	7.24	1.80	4.12
	B_2ir	34.0	39.0	44.0	10.0	1.76	5.37	0.94	5.06
	B_2irg	44.0	64.0	84.0	40.0	1.80	6.13	4.42	9.48
	B_3	84.0	89.0	94.0	10.0	1.87	5.65	1.06	11.17
Cont-2	L	-10.0	-8.5	-7.0	3.0	0.0614	35.00	0.06	0.06
(Neleger)	FH	-5.5	-2.8	0.0	5.5	0.165	77.59	0.70	0.77
(Silty Soil)	E_1	0.0	1.0	2.0	2.0	1.12	15.44	0.35	1.11
	E_2	2.0	13.3	24.5	22.5	1.51	24.61	8.36	9.48
	B_2h	24.5	40.0	55.5	31.0	1.51	176.73	82.73	92.20
	B_3	55.5	64.3	73.0	17.5	1.50	199.94	52.48	144.69
	C	73.0	90.5	108.0	35.0	1.52	187.95	99.99	221.82
S92-2	A_{11}	0.0	3.8	7.5	7.5	0.755	144.80	8.20	8.20
(Kenkeme)	A_{12}	7.5	14.3	21.0	13.5	1.40	186.84	35.31	43.51
(Silty Soil)	AB	21.0	33.5	46.0	25.0	1.17	197.17	57.67	101.18
	B_2	46.0	63.0	80.0	34.0	1.32	173.28	77.77	178.95
	C	80.0	105.0	130.0	50.0	1.58	122.84	97.05	217.77
	2C	130.0	145.0	160.0	30.0	1.64	52.38	25.77	
G	A_1	0.0	6.0	12.0	12.0	0.717	17.07	1.47	1.47
(Neleger)	A_2	12.0	15.5	19.0	7.0	1.52	80.88	8.61	10.07
(Silty Soil)	B_2ir	19.0	25.3	31.5	12.5	1.55	227.91	44.01	54.09
	B_2h	31.5	40.0	48.5	17.0	1.60	356.97	97.10	151.19
	B_3g	48.5	63.3	78.0	29.5	1.53	330.53	148.99	300.18
	Cg	78.0	99.0	120.0	42.0	1.50	263.13	165.77	387.01

*: 最上層からその層までの合計値。ただし、深さ1mまで。

付表6　土層1mまでに存在する単位面積当たりの水溶性Ca

Site	層位	上端	中央	下端	層厚	容積重	水溶性Ca含量		
		---------- cm ----------				$Mg\ m^{-3}$	$\mu g\ g^{-1}$	$g\ Ca\ m^{-2}$	$g\ Ca\ m^{-2}$*
Cont	L	-7.5	-6.0	-4.5	3.0	0.00663	1189.44	0.24	0.24
(Kenkeme)	FH	-4.5	-2.3	0.0	4.5	0.0632	388.03	1.10	1.34
(Sandy Soil)	E	0.0	2.0	4.0	4.0	1.25	36.63	1.83	3.17
	B_2	4.0	13.8	23.5	19.5	1.63	18.43	5.86	9.03
	B_3	23.5	40.0	56.5	33.0	1.74	18.05	10.37	19.39
	C	56.5	78.5	100.5	44.0	1.85	12.76	10.38	29.66
S92	A_{11}	0.0	1.8	3.5	3.5	0.30	190.03	2.00	2.00
(Kenkeme)	A_{12}	3.5	8.8	14.0	10.5	1.35	48.50	6.88	8.87
(Sandy Soil)	AB	14.0	21.0	28.0	14.0	1.68	77.50	18.23	27.10
	B_2	28.0	29.5	31.0	3.0	1.73	82.97	4.31	31.40
	B_3	31.0	44.0	57.0	26.0	1.75	89.01	40.50	71.90
	C	57.0	118.5	180.0	123.0	1.71	32.62	68.62	95.89
W96	FH	-2.0	-1.0	0.0	2.0	0.0632	82.67	0.10	0.10
(Kenkeme)	E	0.0	5.0	10.0	10.0	0.98	5.41	0.53	0.63
(Sandy Soil)	B_{21}	10.0	13.8	17.5	7.5	1.19	5.82	0.52	1.15
	B_{22}	17.5	27.8	38.0	20.5	1.64	3.62	1.22	2.37
	B_3	38.0	43.0	48.0	10.0	1.70	2.43	0.41	2.78
	C	48.0	85.5	123.0	75.0	1.79	3.32	4.45	5.87
S73	L	-6.0	-5.0	-4.0	2.0	0.00663	490.40	0.07	0.07
(Kenkeme)	FH	-4.0	-2.0	0.0	4.0	0.59	137.82	3.25	3.32
(Sandy Soil)	AB	0.0	3.5	7.0	7.0	0.59	33.23	1.37	4.69
	E	7.0	13.0	19.0	12.0	1.57	9.41	1.77	6.46
	B_2h	19.0	26.5	34.0	15.0	1.66	6.92	1.72	8.19
	B_2ir	34.0	39.0	44.0	10.0	1.76	3.62	0.64	8.82
	B_2irg	44.0	64.0	84.0	40.0	1.80	3.69	2.65	11.48
	B_3	84.0	89.0	94.0	10.0	1.87	2.94	0.55	12.36
Cont-2	L	-10.0	-8.5	-7.0	3.0	0.0614	887.99	1.64	1.64
(Neleger)	FH	-5.5	-2.8	0.0	5.5	0.165	119.67	1.09	2.72
(Silty Soil)	E_1	0.0	1.0	2.0	2.0	1.12	8.27	0.19	2.91
	E_2	2.0	13.3	24.5	22.5	1.51	3.84	1.30	4.21
	B_2h	24.5	40.0	55.5	31.0	1.51	22.63	10.59	14.81
	B_3	55.5	64.3	73.0	17.5	1.50	57.92	15.20	30.01
	C	73.0	90.5	108.0	35.0	1.52	67.30	35.80	57.63
S92-2	A_{11}	0.0	3.8	7.5	7.5	0.755	96.83	5.48	5.48
(Kenkeme)	A_{12}	7.5	14.3	21.0	13.5	1.40	59.24	11.20	16.68
(Silty Soil)	AB	21.0	33.5	46.0	25.0	1.17	69.71	20.39	37.07
	B_2	46.0	63.0	80.0	34.0	1.32	55.48	24.90	61.97
	C	80.0	105.0	130.0	50.0	1.58	71.93	56.82	84.70
	2C	130.0	145.0	160.0	30.0	1.64	59.97	29.50	
G	A_1	0.0	6.0	12.0	12.0	0.717	31.01	2.67	2.67
(Neleger)	A_2	12.0	15.5	19.0	7.0	1.52	58.36	6.21	8.88
(Silty Soil)	B_2ir	19.0	25.3	31.5	12.5	1.55	34.90	6.74	15.62
	B_2h	31.5	40.0	48.5	17.0	1.60	40.02	10.88	26.50
	B_3g	48.5	63.3	78.0	29.5	1.53	83.39	37.59	64.09
	Cg	78.0	99.0	120.0	42.0	1.50	82.39	51.91	91.28

*: 最上層からその層までの合計値。ただし、深さ1mまで。

付表7　土層1mまでに存在する単位面積当たりの水溶性Mg

Site	層位	上端	中央	下端	層厚	容積重	水溶性Mg含量		
		---------- cm ----------				$Mg\ m^{-3}$	$\mu g\ g^{-1}$	$g\ Mg\ m^{-2}$	$g\ Mg\ m^{-2}$*
Cont	L	-7.5	-6.0	-4.5	3.0	0.00663	295.90	0.06	0.06
(Kenkeme)	FH	-4.5	-2.3	0.0	4.5	0.0632	66.88	0.19	0.25
(Sandy Soil)	E	0.0	2.0	4.0	4.0	1.25	5.47	0.27	0.52
	B_2	4.0	13.8	23.5	19.5	1.63	3.04	0.97	1.49
	B_3	23.5	40.0	56.5	33.0	1.74	2.91	1.67	3.16
	C	56.5	78.5	100.5	44.0	1.85	2.60	2.11	5.25
S92	A_{11}	0.0	1.8	3.5	3.5	0.30	20.68	0.22	0.22
(Kenkeme)	A_{12}	3.5	8.8	14.0	10.5	1.35	7.03	1.00	1.21
(Sandy Soil)	AB	14.0	21.0	28.0	14.0	1.68	11.33	2.66	3.88
	B_2	28.0	29.5	31.0	3.0	1.73	11.41	0.59	4.47
	B_3	31.0	44.0	57.0	26.0	1.75	10.18	4.63	9.10
	C	57.0	118.5	180.0	123.0	1.71	6.00	12.61	13.51
W96	FH	-2.0	-1.0	0.0	2.0	0.0632	16.42	0.02	0.02
(Kenkeme)	E	0.0	5.0	10.0	10.0	0.98	1.23	0.12	0.14
(Sandy Soil)	B_{21}	10.0	13.8	17.5	7.5	1.19	1.98	0.18	0.32
	B_{22}	17.5	27.8	38.0	20.5	1.64	1.31	0.44	0.76
	B_3	38.0	43.0	48.0	10.0	1.70	0.96	0.16	0.92
	C	48.0	85.5	123.0	75.0	1.79	1.33	1.79	2.16
S73	L	-6.0	-5.0	-4.0	2.0	0.00663	151.15	0.02	0.02
(Kenkeme)	FH	-4.0	-2.0	0.0	4.0	0.59	23.97	0.57	0.59
(Sandy Soil)	AB	0.0	3.5	7.0	7.0	0.59	5.24	0.22	0.80
	E	7.0	13.0	19.0	12.0	1.57	0.00	0.00	0.80
	B_2h	19.0	26.5	34.0	15.0	1.66	0.06	0.01	0.82
	B_2ir	34.0	39.0	44.0	10.0	1.76	0.00	0.00	0.82
	B_2irg	44.0	64.0	84.0	40.0	1.80	0.00	0.00	0.82
	B_3	84.0	89.0	94.0	10.0	1.87	0.00	0.00	0.82
Cont-2	L	-10.0	-8.5	-7.0	3.0	0.0614	688.66	1.27	1.27
(Neleger)	FH	-5.5	-2.8	0.0	5.5	0.165	90.16	0.82	2.09
(Silty Soil)	E_1	0.0	1.0	2.0	2.0	1.12	7.05	0.16	2.24
	E_2	2.0	13.3	24.5	22.5	1.51	2.20	0.75	2.99
	B_2h	24.5	40.0	55.5	31.0	1.51	28.60	13.39	16.38
	B_3	55.5	64.3	73.0	17.5	1.50	43.37	11.38	27.76
	C	73.0	90.5	108.0	35.0	1.52	45.43	24.17	46.41
S92-2	A_{11}	0.0	3.8	7.5	7.5	0.755	78.80	4.46	4.46
(Kenkeme)	A_{12}	7.5	14.3	21.0	13.5	1.40	40.23	7.60	12.07
(Silty Soil)	AB	21.0	33.5	46.0	25.0	1.17	42.03	12.29	24.36
	B_2	46.0	63.0	80.0	34.0	1.32	38.52	17.29	41.65
	C	80.0	105.0	130.0	50.0	1.58	31.06	24.54	51.46
	2C	130.0	145.0	160.0	30.0	1.64	25.46	12.52	
G	A_1	0.0	6.0	12.0	12.0	0.717	54.67	4.70	4.70
(Neleger)	A_2	12.0	15.5	19.0	7.0	1.52	142.85	15.20	19.90
(Silty Soil)	B_2ir	19.0	25.3	31.5	12.5	1.55	140.80	27.19	47.09
	B_2h	31.5	40.0	48.5	17.0	1.60	170.11	46.27	93.37
	B_3g	48.5	63.3	78.0	29.5	1.53	188.27	84.86	178.23
	Cg	78.0	99.0	120.0	42.0	1.50	165.26	104.11	232.77

*: 最上層からその層までの合計値。ただし、深さ1mまで。

付表 08

付表8　土層1mまでに存在する単位面積当たりの水溶性Cl

Site	層位	上端	中央	下端	層厚	容積重	水溶性Cl含量		
		---------- cm ----------				$Mg\ m^{-3}$	$\mu g\ g^{-1}$	$g\ Cl\ m^{-2}$	$g\ Cl\ m^{-2}$*
Cont	L	-7.5	-6.0	-4.5	3.0	0.00663	41.87	0.01	0.01
(Kenkeme)	FH	-4.5	-2.3	0.0	4.5	0.0632	77.22	0.22	0.23
(Sandy Soil)	E	0.0	2.0	4.0	4.0	1.25	9.63	0.48	0.71
	B_2	4.0	13.8	23.5	19.5	1.63	10.85	3.45	4.16
	B_3	23.5	40.0	56.5	33.0	1.74	10.01	5.75	9.91
	C	56.5	78.5	100.5	44.0	1.85	9.19	7.48	17.30
S92	A_{11}	0.0	1.8	3.5	3.5	0.30	7.80	0.08	0.08
(Kenkeme)	A_{12}	3.5	8.8	14.0	10.5	1.35	10.19	1.45	1.53
(Sandy Soil)	AB	14.0	21.0	28.0	14.0	1.68	8.36	1.97	3.49
	B_2	28.0	29.5	31.0	3.0	1.73	6.11	0.32	3.81
	B_3	31.0	44.0	57.0	26.0	1.75	5.19	2.36	6.17
	C	57.0	118.5	180.0	123.0	1.71	5.57	11.72	10.27
W96	FH	-2.0	-1.0	0.0	2.0	0.0632	21.34	0.03	0.03
(Kenkeme)	E	0.0	5.0	10.0	10.0	0.98	3.38	0.33	0.36
(Sandy Soil)	B_{21}	10.0	13.8	17.5	7.5	1.19	3.55	0.32	0.68
	B_{22}	17.5	27.8	38.0	20.5	1.64	9.82	3.30	3.98
	B_3	38.0	43.0	48.0	10.0	1.70	3.61	0.61	4.59
	C	48.0	85.5	123.0	75.0	1.79	5.48	7.36	9.69
S73	L	-6.0	-5.0	-4.0	2.0	0.00663	100.92	0.01	0.01
(Kenkeme)	FH	-4.0	-2.0	0.0	4.0	0.59	29.58	0.70	0.71
(Sandy Soil)	AB	0.0	3.5	7.0	7.0	0.59	7.35	0.30	1.02
	E	7.0	13.0	19.0	12.0	1.57	5.17	0.97	1.99
	B_2h	19.0	26.5	34.0	15.0	1.66	5.10	1.27	3.26
	B_2ir	34.0	39.0	44.0	10.0	1.76	4.59	0.81	4.07
	B_2irg	44.0	64.0	84.0	40.0	1.80	4.28	3.08	7.15
	B_3	84.0	89.0	94.0	10.0	1.87	4.87	0.91	8.61
Cont-2	L	-10.0	-8.5	-7.0	3.0	0.0614	57.15	0.11	0.11
(Neleger)	FH	-5.5	-2.8	0.0	5.5	0.165	47.04	0.43	0.53
(Silty Soil)	E_1	0.0	1.0	2.0	2.0	1.12	4.57	0.10	0.63
	E_2	2.0	13.3	24.5	22.5	1.51	4.13	1.40	2.04
	B_2h	24.5	40.0	55.5	31.0	1.51	5.45	2.55	4.59
	B_3	55.5	64.3	73.0	17.5	1.50	8.28	2.17	6.76
	C	73.0	90.5	108.0	35.0	1.52	9.99	5.31	10.86
S92-2	A_{11}	0.0	3.8	7.5	7.5	0.755	8.72	0.49	0.49
(Kenkeme)	A_{12}	7.5	14.3	21.0	13.5	1.40	6.61	1.25	1.74
(Silty Soil)	AB	21.0	33.5	46.0	25.0	1.17	12.32	3.60	5.35
	B_2	46.0	63.0	80.0	34.0	1.32	19.74	8.86	14.21
	C	80.0	105.0	130.0	50.0	1.58	11.67	9.22	17.89
	2C	130.0	145.0	160.0	30.0	1.64	15.23	7.49	
G	A_1	0.0	6.0	12.0	12.0	0.717	11.61	1.00	1.00
(Neleger)	A_2	12.0	15.5	19.0	7.0	1.52	6.91	0.74	1.73
(Silty Soil)	B_2ir	19.0	25.3	31.5	12.5	1.55	34.16	6.60	8.33
	B_2h	31.5	40.0	48.5	17.0	1.60	56.14	15.27	23.60
	B_3g	48.5	63.3	78.0	29.5	1.53	59.11	26.64	50.24
	Cg	78.0	99.0	120.0	42.0	1.50	72.60	45.74	74.20

*: 最上層からその層までの合計値。ただし、深さ1mまで。

付表9 土層1mまでに存在する単位面積当たりの水溶性NO_2-N

Site	層位	上端	中央	下端	層厚	容積重	水溶性NO2-N含量		
		---------- cm ----------				$Mg\ m^{-3}$	$\mu g\ g^{-1}$	$g\ N\ m^{-2}$	$g\ N\ m^{-2}$*
Cont	L	-7.5	-6.0	-4.5	3.0	0.00663	9.65	0.00	0.00
(Kenkeme)	FH	-4.5	-2.3	0.0	4.5	0.0632	4.35	0.01	0.01
(Sandy Soil)	E	0.0	2.0	4.0	4.0	1.25	0.48	0.02	0.04
	B_2	4.0	13.8	23.5	19.5	1.63	0.00	0.00	0.04
	B_3	23.5	40.0	56.5	33.0	1.74	0.00	0.00	0.04
	C	56.5	78.5	100.5	44.0	1.85	0.00	0.00	0.04
S92	A_{11}	0.0	1.8	3.5	3.5	0.30	1.03	0.01	0.01
(Kenkeme)	A_{12}	3.5	8.8	14.0	10.5	1.35	0.00	0.00	0.01
(Sandy Soil)	AB	14.0	21.0	28.0	14.0	1.68	0.51	0.12	0.13
	B_2	28.0	29.5	31.0	3.0	1.73	0.49	0.03	0.16
	B_3	31.0	44.0	57.0	26.0	1.75	0.47	0.21	0.37
	C	57.0	118.5	180.0	123.0	1.71	0.35	0.73	0.63
W96	FH	-2.0	-1.0	0.0	2.0	0.0632	1.61	0.00	0.00
(Kenkeme)	E	0.0	5.0	10.0	10.0	0.98	0.21	0.02	0.02
(Sandy Soil)	B_{21}	10.0	13.8	17.5	7.5	1.19	0.19	0.02	0.04
	B_{22}	17.5	27.8	38.0	20.5	1.64	0.00	0.00	0.04
	B_3	38.0	43.0	48.0	10.0	1.70	0.22	0.04	0.08
	C	48.0	85.5	123.0	75.0	1.79	0.28	0.37	0.33
S73	L	-6.0	-5.0	-4.0	2.0	0.00663	6.67	0.00	0.00
(Kenkeme)	FH	-4.0	-2.0	0.0	4.0	0.59	0.66	0.02	0.02
(Sandy Soil)	AB	0.0	3.5	7.0	7.0	0.59	0.61	0.03	0.04
	E	7.0	13.0	19.0	12.0	1.57	0.28	0.05	0.09
	B_2h	19.0	26.5	34.0	15.0	1.66	0.09	0.02	0.12
	B_2ir	34.0	39.0	44.0	10.0	1.76	0.13	0.02	0.14
	B_2irg	44.0	64.0	84.0	40.0	1.80	0.05	0.03	0.17
	B_3	84.0	89.0	94.0	10.0	1.87	0.08	0.02	0.19
Cont-2	L	-10.0	-8.5	-7.0	3.0	0.0614	13.24	0.02	0.02
(Neleger)	FH	-5.5	-2.8	0.0	5.5	0.165	3.49	0.03	0.06
(Silty Soil)	E_1	0.0	1.0	2.0	2.0	1.12	0.32	0.01	0.06
	E_2	2.0	13.3	24.5	22.5	1.51	0.25	0.09	0.15
	B_2h	24.5	40.0	55.5	31.0	1.51	0.67	0.31	0.46
	B_3	55.5	64.3	73.0	17.5	1.50	0.71	0.19	0.65
	C	73.0	90.5	108.0	35.0	1.52	0.76	0.41	0.96
S92-2	A_{11}	0.0	3.8	7.5	7.5	0.755	0.64	0.04	0.04
(Kenkeme)	A_{12}	7.5	14.3	21.0	13.5	1.40	0.74	0.14	0.18
(Silty Soil)	AB	21.0	33.5	46.0	25.0	1.17	0.00	0.00	0.18
	B_2	46.0	63.0	80.0	34.0	1.32	0.00	0.00	0.18
	C	80.0	105.0	130.0	50.0	1.58	0.00	0.00	0.18
	2C	130.0	145.0	160.0	30.0	1.64	0.00	0.00	
G	A_1	0.0	6.0	12.0	12.0	0.717	0.73	0.06	0.06
(Neleger)	A_2	12.0	15.5	19.0	7.0	1.52	1.18	0.13	0.19
(Silty Soil)	B_2ir	19.0	25.3	31.5	12.5	1.55	0.00	0.00	0.19
	B_2h	31.5	40.0	48.5	17.0	1.60	0.00	0.00	0.19
	B_3g	48.5	63.3	78.0	29.5	1.53	0.00	0.00	0.19
	Cg	78.0	99.0	120.0	42.0	1.50	0.00	0.00	0.19

*: 最上層からその層までの合計値。ただし、深さ1mまで。

付表 10

付表10 土層1mまでに存在する単位面積当たりの水溶性NO_3-N

Site	層位	上端	中央	下端	層厚	容積重	水溶性NO_3-N含量		
		---------- cm ----------				Mg m^{-3}	μ g g^{-1}	g N m^{-2}	g N m^{-2}*
Cont	L	-7.5	-6.0	-4.5	3.0	0.00663	2.26	0.00	0.00
(Kenkeme)	FH	-4.5	-2.3	0.0	4.5	0.0632	0.40	0.00	0.00
(Sandy Soil)	E	0.0	2.0	4.0	4.0	1.25	0.08	0.00	0.01
	B_2	4.0	13.8	23.5	19.5	1.63	0.09	0.03	0.03
	B_3	23.5	40.0	56.5	33.0	1.74	0.00	0.00	0.03
	C	56.5	78.5	100.5	44.0	1.85	0.06	0.05	0.08
S92	A_{11}	0.0	1.8	3.5	3.5	0.30	0.52	0.01	0.01
(Kenkeme)	A_{12}	3.5	8.8	14.0	10.5	1.35	0.70	0.10	0.10
(Sandy Soil)	AB	14.0	21.0	28.0	14.0	1.68	0.10	0.02	0.13
	B_2	28.0	29.5	31.0	3.0	1.73	0.04	0.00	0.13
	B_3	31.0	44.0	57.0	26.0	1.75	0.03	0.01	0.14
	C	57.0	118.5	180.0	123.0	1.71	0.10	0.20	0.21
W96	FH	-2.0	-1.0	0.0	2.0	0.0632	0.86	0.00	0.00
(Kenkeme)	E	0.0	5.0	10.0	10.0	0.98	0.05	0.00	0.01
(Sandy Soil)	B_{21}	10.0	13.8	17.5	7.5	1.19	0.01	0.00	0.01
	B_{22}	17.5	27.8	38.0	20.5	1.64	0.01	0.00	0.01
	B_3	38.0	43.0	48.0	10.0	1.70	0.02	0.00	0.01
	C	48.0	85.5	123.0	75.0	1.79	0.05	0.07	0.06
S73	L	-6.0	-5.0	-4.0	2.0	0.00663	0.00	0.00	0.00
(Kenkeme)	FH	-4.0	-2.0	0.0	4.0	0.59	0.54	0.01	0.01
(Sandy Soil)	AB	0.0	3.5	7.0	7.0	0.59	0.06	0.00	0.01
	E	7.0	13.0	19.0	12.0	1.57	0.14	0.03	0.04
	B_2h	19.0	26.5	34.0	15.0	1.66	0.12	0.03	0.07
	B_2ir	34.0	39.0	44.0	10.0	1.76	0.11	0.02	0.09
	B_2irg	44.0	64.0	84.0	40.0	1.80	0.04	0.03	0.11
	B_3	84.0	89.0	94.0	10.0	1.87	0.18	0.03	0.17
Cont-2	L	-10.0	-8.5	-7.0	3.0	0.0614	3.16	0.01	0.01
(Neleger)	FH	-5.5	-2.8	0.0	5.5	0.165	0.00	0.00	0.01
(Silty Soil)	E_1	0.0	1.0	2.0	2.0	1.12	0.00	0.00	0.01
	E_2	2.0	13.3	24.5	22.5	1.51	0.00	0.00	0.01
	B_2h	24.5	40.0	55.5	31.0	1.51	0.00	0.00	0.01
	B_3	55.5	64.3	73.0	17.5	1.50	0.00	0.00	0.01
	C	73.0	90.5	108.0	35.0	1.52	0.00	0.00	0.01
S92-2	A_{11}	0.0	3.8	7.5	7.5	0.755	0.31	0.02	0.02
(Kenkeme)	A_{12}	7.5	14.3	21.0	13.5	1.40	1.04	0.20	0.21
(Silty Soil)	AB	21.0	33.5	46.0	25.0	1.17	0.00	0.00	0.21
	B_2	46.0	63.0	80.0	34.0	1.32	0.03	0.01	0.23
	C	80.0	105.0	130.0	50.0	1.58	0.00	0.00	0.23
	2C	130.0	145.0	160.0	30.0	1.64	0.00	0.00	
G	A_1	0.0	6.0	12.0	12.0	0.717	0.34	0.03	0.03
(Neleger)	A_2	12.0	15.5	19.0	7.0	1.52	0.39	0.04	0.07
(Silty Soil)	B_2ir	19.0	25.3	31.5	12.5	1.55	0.38	0.07	0.15
	B_2h	31.5	40.0	48.5	17.0	1.60	0.25	0.07	0.21
	B_3g	48.5	63.3	78.0	29.5	1.53	0.10	0.04	0.26
	Cg	78.0	99.0	120.0	42.0	1.50	0.10	0.06	0.29

*: 最上層からその層までの合計値。ただし、深さ1mまで。

付表 11

付表11　土層1mまでに存在する単位面積当たりの水溶性PO_4-P

Site	層位	上端	中央	下端	層厚	容積重	水溶性PO_4-P含量		
		---------- cm ----------				$Mg\ m^{-3}$	$\mu g\ g^{-1}$	$g\ P\ m^{-2}$	$g\ P\ m^{-2}$*
Cont	L	-7.5	-6.0	-4.5	3.0	0.00663	146.53	0.03	0.03
(Kenkeme)	FH	-4.5	-2.3	0.0	4.5	0.0632	91.91	0.26	0.29
(Sandy Soil)	E	0.0	2.0	4.0	4.0	1.25	0.00	0.00	0.29
	B_2	4.0	13.8	23.5	19.5	1.63	0.00	0.00	0.29
	B_3	23.5	40.0	56.5	33.0	1.74	0.00	0.00	0.29
	C	56.5	78.5	100.5	44.0	1.85	0.00	0.00	0.29
S92	A_{11}	0.0	1.8	3.5	3.5	0.30	0.25	0.00	0.00
(Kenkeme)	A_{12}	3.5	8.8	14.0	10.5	1.35	0.00	0.00	0.00
(Sandy Soil)	AB	14.0	21.0	28.0	14.0	1.68	0.00	0.00	0.00
	B_2	28.0	29.5	31.0	3.0	1.73	0.00	0.00	0.00
	B_3	31.0	44.0	57.0	26.0	1.75	0.00	0.00	0.00
	C	57.0	118.5	180.0	123.0	1.71	0.00	0.00	0.00
W96	FH	-2.0	-1.0	0.0	2.0	0.0632	63.77	0.08	0.08
(Kenkeme)	E	0.0	5.0	10.0	10.0	0.98	0.35	0.03	0.11
(Sandy Soil)	B_{21}	10.0	13.8	17.5	7.5	1.19	0.00	0.00	0.11
	B_{22}	17.5	27.8	38.0	20.5	1.64	0.00	0.00	0.11
	B_3	38.0	43.0	48.0	10.0	1.70	0.00	0.00	0.11
	C	48.0	85.5	123.0	75.0	1.79	0.00	0.00	0.11
S73	L	-6.0	-5.0	-4.0	2.0	0.00663	21.90	0.00	0.00
(Kenkeme)	FH	-4.0	-2.0	0.0	4.0	0.59	0.52	0.01	0.02
(Sandy Soil)	AB	0.0	3.5	7.0	7.0	0.59	0.05	0.00	0.02
	E	7.0	13.0	19.0	12.0	1.57	0.06	0.01	0.03
	B_2h	19.0	26.5	34.0	15.0	1.66	0.06	0.02	0.04
	B_2ir	34.0	39.0	44.0	10.0	1.76	0.05	0.01	0.05
	B_2irg	44.0	64.0	84.0	40.0	1.80	0.00	0.00	0.05
	B_3	84.0	89.0	94.0	10.0	1.87	0.00	0.00	0.05
Cont-2	L	-10.0	-8.5	-7.0	3.0	0.0614	244.14	0.45	0.45
(Neleger)	FH	-5.5	-2.8	0.0	5.5	0.165	128.62	1.17	1.62
(Silty Soil)	E_1	0.0	1.0	2.0	2.0	1.12	1.59	0.04	1.65
	E_2	2.0	13.3	24.5	22.5	1.51	0.00	0.00	1.65
	B_2h	24.5	40.0	55.5	31.0	1.51	0.00	0.00	1.65
	B_3	55.5	64.3	73.0	17.5	1.50	0.00	0.00	1.65
	C	73.0	90.5	108.0	35.0	1.52	0.00	0.00	1.65
S92-2	A_{11}	0.0	3.8	7.5	7.5	0.755	1.40	0.08	0.08
(Kenkeme)	A_{12}	7.5	14.3	21.0	13.5	1.40	0.00	0.00	0.08
(Silty Soil)	AB	21.0	33.5	46.0	25.0	1.17	0.16	0.05	0.13
	B_2	46.0	63.0	80.0	34.0	1.32	0.07	0.03	0.16
	C	80.0	105.0	130.0	50.0	1.58	0.00	0.00	0.16
	2C	130.0	145.0	160.0	30.0	1.64	0.00	0.00	
G	A_1	0.0	6.0	12.0	12.0	0.717	0.00	0.00	0.00
(Neleger)	A_2	12.0	15.5	19.0	7.0	1.52	0.00	0.00	0.00
(Silty Soil)	B_2ir	19.0	25.3	31.5	12.5	1.55	0.00	0.00	0.00
	B_2h	31.5	40.0	48.5	17.0	1.60	0.00	0.00	0.00
	B_3g	48.5	63.3	78.0	29.5	1.53	0.00	0.00	0.00
	Cg	78.0	99.0	120.0	42.0	1.50	0.18	0.11	0.06

*: 最上層からその層までの合計値。ただし、深さ1mまで。

付表 12

付表12 土層1mまでに存在する単位面積当たりの水溶性SO_4-S

Site	層位	上端	中央	下端	層厚	容積重	水溶性SO_4-S含量		
		---------- cm ----------				$Mg\ m^{-3}$	$\mu g\ g^{-1}$	$g\ S\ m^{-2}$	$g\ S\ m^{-2}$*
Cont	L	-7.5	-6.0	-4.5	3.0	0.00663	22.10	0.00	0.00
(Kenkeme)	FH	-4.5	-2.3	0.0	4.5	0.0632	49.39	0.14	0.14
(Sandy Soil)	E	0.0	2.0	4.0	4.0	1.25	4.08	0.20	0.35
	B_2	4.0	13.8	23.5	19.5	1.63	6.09	1.93	2.28
	B_3	23.5	40.0	56.5	33.0	1.74	1.24	0.71	3.00
	C	56.5	78.5	100.5	44.0	1.85	0.93	0.76	3.75
S92	A_{11}	0.0	1.8	3.5	3.5	0.30	8.15	0.09	0.09
(Kenkeme)	A_{12}	3.5	8.8	14.0	10.5	1.35	0.92	0.13	0.22
(Sandy Soil)	AB	14.0	21.0	28.0	14.0	1.68	1.08	0.25	0.47
	B_2	28.0	29.5	31.0	3.0	1.73	0.90	0.05	0.52
	B_3	31.0	44.0	57.0	26.0	1.75	1.30	0.59	1.11
	C	57.0	118.5	180.0	123.0	1.71	0.78	1.65	1.68
W96	FH	-2.0	-1.0	0.0	2.0	0.0632	27.36	0.03	0.03
(Kenkeme)	E	0.0	5.0	10.0	10.0	0.98	0.84	0.08	0.12
(Sandy Soil)	B_{21}	10.0	13.8	17.5	7.5	1.19	2.15	0.19	0.31
	B_{22}	17.5	27.8	38.0	20.5	1.64	0.57	0.19	0.50
	B_3	38.0	43.0	48.0	10.0	1.70	0.51	0.09	0.59
	C	48.0	85.5	123.0	75.0	1.79	0.54	0.73	1.09
S73	L	-6.0	-5.0	-4.0	2.0	0.00663	47.61	0.01	0.01
(Kenkeme)	FH	-4.0	-2.0	0.0	4.0	0.59	6.69	0.16	0.16
(Sandy Soil)	AB	0.0	3.5	7.0	7.0	0.59	1.56	0.06	0.23
	E	7.0	13.0	19.0	12.0	1.57	0.65	0.12	0.35
	B_2h	19.0	26.5	34.0	15.0	1.66	0.43	0.11	0.46
	B_2ir	34.0	39.0	44.0	10.0	1.76	0.20	0.03	0.49
	B_2irg	44.0	64.0	84.0	40.0	1.80	0.29	0.21	0.70
	B_3	84.0	89.0	94.0	10.0	1.87	0.83	0.16	0.95
Cont-2	L	-10.0	-8.5	-7.0	3.0	0.0614	20.57	0.04	0.04
(Neleger)	FH	-5.5	-2.8	0.0	5.5	0.165	29.12	0.26	0.30
(Silty Soil)	E_1	0.0	1.0	2.0	2.0	1.12	1.36	0.03	0.33
	E_2	2.0	13.3	24.5	22.5	1.51	0.68	0.23	0.56
	B_2h	24.5	40.0	55.5	31.0	1.51	1.32	0.62	1.18
	B_3	55.5	64.3	73.0	17.5	1.50	3.33	0.87	2.06
	C	73.0	90.5	108.0	35.0	1.52	5.02	2.67	4.12
S92-2	A_{11}	0.0	3.8	7.5	7.5	0.755	8.31	0.47	0.47
(Kenkeme)	A_{12}	7.5	14.3	21.0	13.5	1.40	4.01	0.76	1.23
(Silty Soil)	AB	21.0	33.5	46.0	25.0	1.17	12.60	3.69	4.91
	B_2	46.0	63.0	80.0	34.0	1.32	29.85	13.40	18.31
	C	80.0	105.0	130.0	50.0	1.58	14.89	11.77	23.02
	2C	130.0	145.0	160.0	30.0	1.64	11.08	5.45	
G	A_1	0.0	6.0	12.0	12.0	0.717	8.42	0.72	0.72
(Neleger)	A_2	12.0	15.5	19.0	7.0	1.52	5.83	0.62	1.35
(Silty Soil)	B_2ir	19.0	25.3	31.5	12.5	1.55	106.35	20.54	21.88
	B_2h	31.5	40.0	48.5	17.0	1.60	239.98	65.27	87.16
	B_3g	48.5	63.3	78.0	29.5	1.53	268.87	121.19	208.35
	Cg	78.0	99.0	120.0	42.0	1.50	224.00	141.12	282.27

*: 最上層からその層までの合計値。ただし、深さ1mまで。

付表 13

付表13　土層1mまでに存在する単位面積当たりの交換性K

Site	層位	上端	中央	下端	層厚	容積重	交換性K含量		
		---------- cm ----------				$Mg\ m^{-3}$	$ceq\ kg^{-1}$	$eq\ K\ m^{-2}$	$eq\ K\ m^{-2}$*
Cont	L	-7.5	-6.0	-4.5	3.0	0.00663			
(Kenkeme)	FH	-4.5	-2.3	0.0	4.5	0.0632			
(Sandy Soil)	E	0.0	2.0	4.0	4.0	1.25	0.17	0.08	0.08
	B_2	4.0	13.8	23.5	19.5	1.63	0.07	0.23	0.31
	B_3	23.5	40.0	56.5	33.0	1.74	0.08	0.49	0.80
	C	56.5	78.5	100.5	44.0	1.85	0.12	0.99	1.78
S92	A_{11}	0.0	1.8	3.5	3.5	0.30	0.51	0.05	0.05
(Kenkeme)	A_{12}	3.5	8.8	14.0	10.5	1.35	0.13	0.18	0.24
(Sandy Soil)	AB	14.0	21.0	28.0	14.0	1.68	0.10	0.24	0.48
	B_2	28.0	29.5	31.0	3.0	1.73	0.08	0.04	0.52
	B_3	31.0	44.0	57.0	26.0	1.75	0.08	0.37	0.89
	C	57.0	118.5	180.0	123.0	1.71	0.12	2.42	1.73
W96	FH	-2.0	-1.0	0.0	2.0	0.0632			
(Kenkeme)	E	0.0	5.0	10.0	10.0	0.98	0.08	0.07	0.07
(Sandy Soil)	B_{21}	10.0	13.8	17.5	7.5	1.19	0.10	0.09	0.16
	B_{22}	17.5	27.8	38.0	20.5	1.64	0.05	0.16	0.33
	B_3	38.0	43.0	48.0	10.0	1.70	0.04	0.07	0.40
	C	48.0	85.5	123.0	75.0	1.79	0.15	2.01	1.80
S73	L	-6.0	-5.0	-4.0	2.0	0.00663			
(Kenkeme)	FH	-4.0	-2.0	0.0	4.0	0.59	0.52	0.12	0.12
(Sandy Soil)	AB	0.0	3.5	7.0	7.0	0.59	0.17	0.07	0.19
	E	7.0	13.0	19.0	12.0	1.57	0.06	0.12	0.31
	B_2h	19.0	26.5	34.0	15.0	1.66	0.07	0.16	0.47
	B_2ir	34.0	39.0	44.0	10.0	1.76	0.05	0.09	0.57
	B_2irg	44.0	64.0	84.0	40.0	1.80	0.07	0.54	1.10
	B_3	84.0	89.0	94.0	10.0	1.87	0.06	0.11	1.28
Cont-2	L	-10.0	-8.5	-7.0	3.0	0.0614			
(Neleger)	FH	-5.5	-2.8	0.0	5.5	0.165			
(Silty Soil)	E_1	0.0	1.0	2.0	2.0	1.12	0.13	0.03	0.03
	E_2	2.0	13.3	24.5	22.5	1.51	0.12	0.39	0.42
	B_2h	24.5	40.0	55.5	31.0	1.51	0.32	1.48	1.90
	B_3	55.5	64.3	73.0	17.5	1.50	0.22	0.57	2.48
	C	73.0	90.5	108.0	35.0	1.52	0.21	1.13	3.35
S92-2	A_{11}	0.0	3.8	7.5	7.5	0.755	0.43	0.24	0.24
(Kenkeme)	A_{12}	7.5	14.3	21.0	13.5	1.40	0.28	0.52	0.77
(Silty Soil)	AB	21.0	33.5	46.0	25.0	1.17	0.35	1.01	1.78
	B_2	46.0	63.0	80.0	34.0	1.32	0.37	1.64	3.42
	C	80.0	105.0	130.0	50.0	1.58	0.22	1.73	4.11
	2C	130.0	145.0	160.0	30.0	1.64	0.11	0.55	
G	A_1	0.0	6.0	12.0	12.0	0.717	1.06	0.91	0.91
(Neleger)	A_2	12.0	15.5	19.0	7.0	1.52	0.39	0.42	1.33
(Silty Soil)	B_2ir	19.0	25.3	31.5	12.5	1.55	0.31	0.59	1.93
	B_2h	31.5	40.0	48.5	17.0	1.60	0.35	0.95	2.88
	B_3g	48.5	63.3	78.0	29.5	1.53	0.31	1.42	4.30
	Cg	78.0	99.0	120.0	42.0	1.50	0.45	2.85	5.79

*: 最上層からその層までの合計値。ただし、深さ1mまで。

付表 14

付表14　土層1mまでに存在する単位面積当たりの交換性Na

Site	層位	上端	中央	下端	層厚	容積重	交換性Na含量		
		---------- cm ----------				$Mg\ m^{-3}$	ceq kg^{-1}	eq Na m^{-2}	eq Na m^{-2}*
Cont	L	-7.5	-6.0	-4.5	3.0	0.00663			
(Kenkeme)	FH	-4.5	-2.3	0.0	4.5	0.0632			
(Sandy Soil)	E	0.0	2.0	4.0	4.0	1.25	0.05	0.02	0.02
	B_2	4.0	13.8	23.5	19.5	1.63	0.05	0.16	0.18
	B_3	23.5	40.0	56.5	33.0	1.74	0.09	0.52	0.70
	C	56.5	78.5	100.5	44.0	1.85	0.05	0.42	1.11
S92	A_{11}	0.0	1.8	3.5	3.5	0.30	0.10	0.01	0.01
(Kenkeme)	A_{12}	3.5	8.8	14.0	10.5	1.35	0.05	0.08	0.09
(Sandy Soil)	AB	14.0	21.0	28.0	14.0	1.68	0.10	0.23	0.31
	B_2	28.0	29.5	31.0	3.0	1.73	0.10	0.05	0.37
	B_3	31.0	44.0	57.0	26.0	1.75	0.10	0.45	0.82
	C	57.0	118.5	180.0	123.0	1.71	0.05	1.16	1.22
W96	FH	-2.0	-1.0	0.0	2.0	0.0632			
(Kenkeme)	E	0.0	5.0	10.0	10.0	0.98	0.01	0.01	0.01
(Sandy Soil)	B_{21}	10.0	13.8	17.5	7.5	1.19	0.02	0.02	0.03
	B_{22}	17.5	27.8	38.0	20.5	1.64	0.02	0.07	0.10
	B_3	38.0	43.0	48.0	10.0	1.70	0.02	0.03	0.13
	C	48.0	85.5	123.0	75.0	1.79	0.03	0.39	0.39
S73	L	-6.0	-5.0	-4.0	2.0	0.00663			
(Kenkeme)	FH	-4.0	-2.0	0.0	4.0	0.59	0.22	0.05	0.05
(Sandy Soil)	AB	0.0	3.5	7.0	7.0	0.59	0.12	0.05	0.10
	E	7.0	13.0	19.0	12.0	1.57	0.09	0.16	0.27
	B_2h	19.0	26.5	34.0	15.0	1.66	0.09	0.23	0.50
	B_2ir	34.0	39.0	44.0	10.0	1.76	0.09	0.15	0.65
	B_2irg	44.0	64.0	84.0	40.0	1.80	0.10	0.73	1.38
	B_3	84.0	89.0	94.0	10.0	1.87	0.09	0.16	1.64
Cont-2	L	-10.0	-8.5	-7.0	3.0	0.0614			
(Neleger)	FH	-5.5	-2.8	0.0	5.5	0.165			
(Silty Soil)	E_1	0.0	1.0	2.0	2.0	1.12	0.09	0.02	0.02
	E_2	2.0	13.3	24.5	22.5	1.51	0.29	0.98	1.00
	B_2h	24.5	40.0	55.5	31.0	1.51	1.43	6.68	7.69
	B_3	55.5	64.3	73.0	17.5	1.50	1.42	3.74	11.42
	C	73.0	90.5	108.0	35.0	1.52	1.39	7.37	17.11
S92-2	A_{11}	0.0	3.8	7.5	7.5	0.755	1.06	0.60	0.60
(Kenkeme)	A_{12}	7.5	14.3	21.0	13.5	1.40	1.80	3.40	4.00
(Silty Soil)	AB	21.0	33.5	46.0	25.0	1.17	1.49	4.35	8.35
	B_2	46.0	63.0	80.0	34.0	1.32	1.29	5.81	14.16
	C	80.0	105.0	130.0	50.0	1.58	0.82	6.51	16.76
	2C	130.0	145.0	160.0	30.0	1.64	0.28	1.39	
G	A_1	0.0	6.0	12.0	12.0	0.717	0.12	0.10	0.10
(Neleger)	A_2	12.0	15.5	19.0	7.0	1.52	0.64	0.68	0.78
(Silty Soil)	B_2ir	19.0	25.3	31.5	12.5	1.55	1.58	3.06	3.83
	B_2h	31.5	40.0	48.5	17.0	1.60	2.50	6.80	10.63
	B_3g	48.5	63.3	78.0	29.5	1.53	2.00	9.00	19.63
	Cg	78.0	99.0	120.0	42.0	1.50	1.74	10.98	25.38

*: 最上層からその層までの合計値。ただし、深さ1mまで。

付表 15

付表15 土層1mまでに存在する単位面積当たりの交換性Ca

Site	層位	上端	中央	下端	層厚	容積重	交換性Ca含量		
		---------- cm ----------				$Mg\ m^{-3}$	$ceq\ kg^{-1}$	$eq\ Ca\ m^{-2}$	$eq\ Ca\ m^{-2}$*
Cont	L	-7.5	-6.0	-4.5	3.0	0.00663			
(Kenkeme)	FH	-4.5	-2.3	0.0	4.5	0.0632			
(Sandy Soil)	E	0.0	2.0	4.0	4.0	1.25	9.98	4.99	4.99
	B_2	4.0	13.8	23.5	19.5	1.63	3.89	12.38	17.37
	B_3	23.5	40.0	56.5	33.0	1.74	4.77	27.40	44.77
	C	56.5	78.5	100.5	44.0	1.85	5.39	43.88	88.14
S92	A_{11}	0.0	1.8	3.5	3.5	0.30	22.69	2.38	2.38
(Kenkeme)	A_{12}	3.5	8.8	14.0	10.5	1.35	10.81	15.32	17.70
(Sandy Soil)	AB	14.0	21.0	28.0	14.0	1.68	8.77	20.63	38.33
	B_2	28.0	29.5	31.0	3.0	1.73	17.72	9.19	47.53
	B_3	31.0	44.0	57.0	26.0	1.75	18.44	83.89	131.42
	C	57.0	118.5	180.0	123.0	1.71	5.43	114.24	171.35
W96	FH	-2.0	-1.0	0.0	2.0	0.0632			
(Kenkeme)	E	0.0	5.0	10.0	10.0	0.98	0.33	0.33	0.33
(Sandy Soil)	B_{21}	10.0	13.8	17.5	7.5	1.19	0.74	0.66	0.98
	B_{22}	17.5	27.8	38.0	20.5	1.64	0.61	2.04	3.02
	B_3	38.0	43.0	48.0	10.0	1.70	0.60	1.02	4.04
	C	48.0	85.5	123.0	75.0	1.79	2.32	31.13	25.63
S73	L	-6.0	-5.0	-4.0	2.0	0.00663			
(Kenkeme)	FH	-4.0	-2.0	0.0	4.0	0.59	12.85	3.03	3.03
(Sandy Soil)	AB	0.0	3.5	7.0	7.0	0.59	6.12	2.53	5.56
	E	7.0	13.0	19.0	12.0	1.57	2.27	4.27	9.83
	B_2h	19.0	26.5	34.0	15.0	1.66	1.54	3.83	13.67
	B_2ir	34.0	39.0	44.0	10.0	1.76	0.80	1.41	15.07
	B_2irg	44.0	64.0	84.0	40.0	1.80	1.64	11.79	26.86
	B_3	84.0	89.0	94.0	10.0	1.87	1.01	1.89	29.89
Cont-2	L	-10.0	-8.5	-7.0	3.0	0.0614			
(Neleger)	FH	-5.5	-2.8	0.0	5.5	0.165			
(Silty Soil)	E_1	0.0	1.0	2.0	2.0	1.12	1.01	0.23	0.23
	E_2	2.0	13.3	24.5	22.5	1.51	2.07	7.02	7.25
	B_2h	24.5	40.0	55.5	31.0	1.51	7.61	35.60	42.85
	B_3	55.5	64.3	73.0	17.5	1.50	19.80	51.98	94.83
	C	73.0	90.5	108.0	35.0	1.52	20.82	110.75	180.26
S92-2	A_{11}	0.0	3.8	7.5	7.5	0.755	22.34	12.65	12.65
(Kenkeme)	A_{12}	7.5	14.3	21.0	13.5	1.40	15.31	28.95	41.60
(Silty Soil)	AB	21.0	33.5	46.0	25.0	1.17	22.49	65.79	107.39
	B_2	46.0	63.0	80.0	34.0	1.32	10.94	49.09	156.48
	C	80.0	105.0	130.0	50.0	1.58	17.46	137.90	211.64
	2C	130.0	145.0	160.0	30.0	1.64	6.55	32.23	
G	A_1	0.0	6.0	12.0	12.0	0.717	15.26	13.13	13.13
(Neleger)	A_2	12.0	15.5	19.0	7.0	1.52	18.21	19.38	32.51
(Silty Soil)	B_2ir	19.0	25.3	31.5	12.5	1.55	17.15	33.11	65.62
	B_2h	31.5	40.0	48.5	17.0	1.60	15.89	43.23	108.85
	B_3g	48.5	63.3	78.0	29.5	1.53	17.97	80.99	189.84
	Cg	78.0	99.0	120.0	42.0	1.50	16.36	103.09	243.84

*: 最上層からその層までの合計値。ただし、深さ1mまで。

付表 16

付表16　土層1mまでに存在する単位面積当たりの交換性Mg

Site	層位	上端	中央	下端	層厚	容積重	交換性Mg含量		
		---------- cm ----------				$Mg\ m^{-3}$	$ceq\ kg^{-1}$	$eq\ Mg\ m^{-2}$	$eq\ Mg\ m^{-2}$*
Cont	L	-7.5	-6.0	-4.5	3.0	0.00663			
(Kenkeme)	FH	-4.5	-2.3	0.0	4.5	0.0632			
(Sandy Soil)	E	0.0	2.0	4.0	4.0	1.25	1.42	0.71	0.71
	B_2	4.0	13.8	23.5	19.5	1.63	0.59	1.87	2.58
	B_3	23.5	40.0	56.5	33.0	1.74	0.65	3.73	6.31
	C	56.5	78.5	100.5	44.0	1.85	0.70	5.74	11.99
S92	A_{11}	0.0	1.8	3.5	3.5	0.30			
(Kenkeme)	A_{12}	3.5	8.8	14.0	10.5	1.35	1.69	0.18	0.18
(Sandy Soil)	AB	14.0	21.0	28.0	14.0	1.68	1.33	1.88	2.06
	B_2	28.0	29.5	31.0	3.0	1.73	1.13	2.65	4.71
	B_3	31.0	44.0	57.0	26.0	1.75	0.86	0.45	5.16
	C	57.0	118.5	180.0	123.0	1.71	0.93	4.23	9.39
							1.02	21.53	16.92
W96	FH	-2.0	-1.0	0.0	2.0	0.0632			
(Kenkeme)	E	0.0	5.0	10.0	10.0	0.98	0.13	0.13	0.13
(Sandy Soil)	B_{21}	10.0	13.8	17.5	7.5	1.19	0.31	0.28	0.41
	B_{22}	17.5	27.8	38.0	20.5	1.64	0.29	0.98	1.38
	B_3	38.0	43.0	48.0	10.0	1.70	0.28	0.48	1.86
	C	48.0	85.5	123.0	75.0	1.79	1.01	13.60	11.29
S73	L	-6.0	-5.0	-4.0	2.0	0.00663			
(Kenkeme)	FH	-4.0	-2.0	0.0	4.0	0.59	2.02	0.48	0.48
(Sandy Soil)	AB	0.0	3.5	7.0	7.0	0.59	1.20	0.50	0.97
	E	7.0	13.0	19.0	12.0	1.57	0.55	1.04	2.01
	B_2h	19.0	26.5	34.0	15.0	1.66	0.52	1.30	3.31
	B_2ir	34.0	39.0	44.0	10.0	1.76	0.32	0.56	3.87
	B_2irg	44.0	64.0	84.0	40.0	1.80	0.67	4.84	8.71
	B_3	84.0	89.0	94.0	10.0	1.87	0.44	0.82	10.01
Cont-2	L	-10.0	-8.5	-7.0	3.0	0.0614			
(Neleger)	FH	-5.5	-2.8	0.0	5.5	0.165			
(Silty Soil)	E_1	0.0	1.0	2.0	2.0	1.12	1.51	0.34	0.34
	E_2	2.0	13.3	24.5	22.5	1.51	3.15	10.69	11.03
	B_2h	24.5	40.0	55.5	31.0	1.51	12.37	57.90	68.93
	B_3	55.5	64.3	73.0	17.5	1.50	9.75	25.59	94.52
	C	73.0	90.5	108.0	35.0	1.52	9.41	50.05	133.13
S92-2	A_{11}	0.0	3.8	7.5	7.5	0.755	12.43	7.04	7.04
(Kenkeme)	A_{12}	7.5	14.3	21.0	13.5	1.40	16.10	30.43	37.47
(Silty Soil)	AB	21.0	33.5	46.0	25.0	1.17	11.38	33.29	70.76
	B_2	46.0	63.0	80.0	34.0	1.32	9.63	43.23	113.99
	C	80.0	105.0	130.0	50.0	1.58	4.88	38.57	129.42
	2C	130.0	145.0	160.0	30.0	1.64	1.62	7.95	
G	A_1	0.0	6.0	12.0	12.0	0.717	29.17	25.10	25.10
(Neleger)	A_2	12.0	15.5	19.0	7.0	1.52	16.36	17.41	42.50
(Silty Soil)	B_2ir	19.0	25.3	31.5	12.5	1.55	18.58	35.87	78.37
	B_2h	31.5	40.0	48.5	17.0	1.60	17.81	48.44	126.82
	B_3g	48.5	63.3	78.0	29.5	1.53	13.28	59.85	186.67
	Cg	78.0	99.0	120.0	42.0	1.50	13.33	83.96	230.65

*: 最上層からその層までの合計値。ただし、深さ1mまで。

付表 17

付表17　土層1mまでに存在する単位面積当たりのCEC

Site	層位	上端	中央	下端	層厚	容積重	CEC含量		
		---------- cm ----------				Mg m^{-3}	ceq kg^{-1}	eq m^{-2}	eq m^{-2}*
Cont	L	-7.5	-6.0	-4.5	3.0	0.00663			
(Kenkeme)	FH	-4.5	-2.3	0.0	4.5	0.0632			
(Sandy Soil)	E	0.0	2.0	4.0	4.0	1.25	12.34	6.17	6.17
	B_2	4.0	13.8	23.5	19.5	1.63	4.94	15.71	21.88
	B_3	23.5	40.0	56.5	33.0	1.74	5.17	29.71	51.59
	C	56.5	78.5	100.5	44.0	1.85	4.74	38.59	89.74
S92	A_{11}	0.0	1.8	3.5	3.5	0.30	21.69	2.28	2.28
(Kenkeme)	A_{12}	3.5	8.8	14.0	10.5	1.35	12.08	17.12	19.40
(Sandy Soil)	AB	14.0	21.0	28.0	14.0	1.68	8.64	20.32	39.72
	B_2	28.0	29.5	31.0	3.0	1.73	4.92	2.55	42.27
	B_3	31.0	44.0	57.0	26.0	1.75	4.11	18.69	60.96
	C	57.0	118.5	180.0	123.0	1.71	5.87	123.38	104.10
W96	FH	-2.0	-1.0	0.0	2.0	0.0632			
(Kenkeme)	E	0.0	5.0	10.0	10.0	0.98	3.15	3.09	3.09
(Sandy Soil)	B_{21}	10.0	13.8	17.5	7.5	1.19	5.26	4.70	7.78
	B_{22}	17.5	27.8	38.0	20.5	1.64	1.90	6.38	14.16
	B_3	38.0	43.0	48.0	10.0	1.70	1.38	2.35	16.51
	C	48.0	85.5	123.0	75.0	1.79	4.40	59.09	57.48
S73	L	-6.0	-5.0	-4.0	2.0	0.00663			
(Kenkeme)	FH	-4.0	-2.0	0.0	4.0	0.59	27.12	6.40	6.40
(Sandy Soil)	AB	0.0	3.5	7.0	7.0	0.59	12.44	5.14	11.54
	E	7.0	13.0	19.0	12.0	1.57	4.03	7.58	19.12
	B_2h	19.0	26.5	34.0	15.0	1.66	4.05	10.09	29.21
	B_2ir	34.0	39.0	44.0	10.0	1.76	2.20	3.88	33.09
	B_2irg	44.0	64.0	84.0	40.0	1.80	3.71	26.69	59.78
	B_3	84.0	89.0	94.0	10.0	1.87	1.81	3.39	65.21
Cont-2	L	-10.0	-8.5	-7.0	3.0	0.0614			
(Neleger)	FH	-5.5	-2.8	0.0	5.5	0.165			
(Silty Soil)	E_1	0.0	1.0	2.0	2.0	1.12	9.05	2.03	2.03
	E_2	2.0	13.3	24.5	22.5	1.51	6.85	23.27	25.30
	B_2h	24.5	40.0	55.5	31.0	1.51	17.76	83.14	108.44
	B_3	55.5	64.3	73.0	17.5	1.50	11.10	29.14	137.58
	C	73.0	90.5	108.0	35.0	1.52	10.87	57.83	182.19
S92-2	A_{11}	0.0	3.8	7.5	7.5	0.755	25.39	14.38	14.38
(Kenkeme)	A_{12}	7.5	14.3	21.0	13.5	1.40	15.91	30.06	44.44
(Silty Soil)	AB	21.0	33.5	46.0	25.0	1.17	30.16	88.21	132.65
	B_2	46.0	63.0	80.0	34.0	1.32	18.19	81.65	214.30
	C	80.0	105.0	130.0	50.0	1.58	8.60	67.98	241.49
	2C	130.0	145.0	160.0	30.0	1.64	3.39	16.69	
G	A_1	0.0	6.0	12.0	12.0	0.717	49.84	42.89	42.89
(Neleger)	A_2	12.0	15.5	19.0	7.0	1.52	13.62	14.49	57.37
(Silty Soil)	B_2ir	19.0	25.3	31.5	12.5	1.55	13.59	26.24	83.61
	B_2h	31.5	40.0	48.5	17.0	1.60	11.55	31.42	115.04
	B_3g	48.5	63.3	78.0	29.5	1.53	12.44	56.06	171.10
	Cg	78.0	99.0	120.0	42.0	1.50	16.31	102.74	224.92

*: 最上層からその層までの合計値。ただし、深さ1mまで。

付表 18

付表18　シベリア不撹乱土壌(100mLコア)採取時の物理性

地点	層位	コアNo.	固相率	液相率	気相率	容積重	土粒子密度	Ks	D/D_0
								Ks: cm s^{-1}	
			------	$m^3\ m^{-3}$	------		---Mg m^{-3}---	Log10(Ks)	
1997採取									
Cont	L+FH	B118	0.04	0.07	0.89	0.11	2.85	-0.45	0.473
Cont	L+FH	V225	0.03	0.08	0.90	0.10	3.68	-0.58	0.450
Cont	E+B_2	J6	0.44	0.12	0.44	1.11	2.52	-2.54	0.172
Cont	E+B_2	F78	0.44	0.12	0.43	1.10	2.49	-1.76	0.188
Cont	B_2	J5	0.58	0.10	0.32	1.59	2.75	-2.43	0.128
Cont	B_2	J2	0.59	0.11	0.30	1.61	2.71	-2.46	0.106
Cont	B_3	O31	0.65	0.20	0.15	1.72	2.63	-3.59	0.042
Cont	B_3	V11	0.80	0.07	0.14	1.80	2.26	-3.41	0.017
Cont	C	J4	0.69	0.23	0.08	1.81	2.64	-3.25	0.016
Cont	C	T13	0.68	0.21	0.10	1.80	2.63	-3.20	0.022
S92	コケ+A	O69	0.25	0.23	0.52	0.57	2.28	-1.03	0.247
S92	コケ+A	9093	0.17	0.21	0.62	0.34	1.99	-0.64	0.316
W96	FH+E	K47	0.42	0.19	0.39	1.09	2.60	-1.35	0.156
W96	FH+E	S124	0.44	0.18	0.37	1.11	2.52	-1.86	0.152
S92-2	A_{11}+A_{12}	V259	0.28	0.18	0.53	0.75	2.63	-1.34	0.193
S92-2	A_{11}+A_{12}	181	0.39	0.18	0.44	1.01	2.60	-2.12	0.152
S92-2	B_2	S73	0.56	0.28	0.16	1.46	2.60	-4.53	0.008
S92-2	B_2	K4	0.48	0.31	0.22	1.21	2.53	-3.91	0.013
1998年採取									
S73	FH+AB	J5	0.25	0.11	0.64	0.72	2.83	ND	0.227
S73	FH+AB	J2	0.19	0.13	0.68	0.58	3.06	ND	0.275
S73	E	V11	0.57	0.05	0.37	1.54	2.69	-2.06	0.177
S73	E	J6	0.53	0.05	0.42	1.50	2.83	-1.96	0.201
S73	25-30	F78	0.62	0.13	0.25	1.70	2.74	-2.50	0.063
S73	25-30	J4	0.61	0.15	0.24	1.67	2.72	-2.39	0.054
S73	40-50	1050	0.60	0.11	0.29	1.71	2.83	-2.30	0.069
S73	40-50	1055	0.63	0.11	0.26	1.73	2.75	-2.37	0.061
S73	60-70	031	0.61	0.14	0.25	1.69	2.78	-2.12	0.055
S73	60-70	1025	0.64	0.19	0.17	1.78	2.78	-2.26	0.021

付表 19

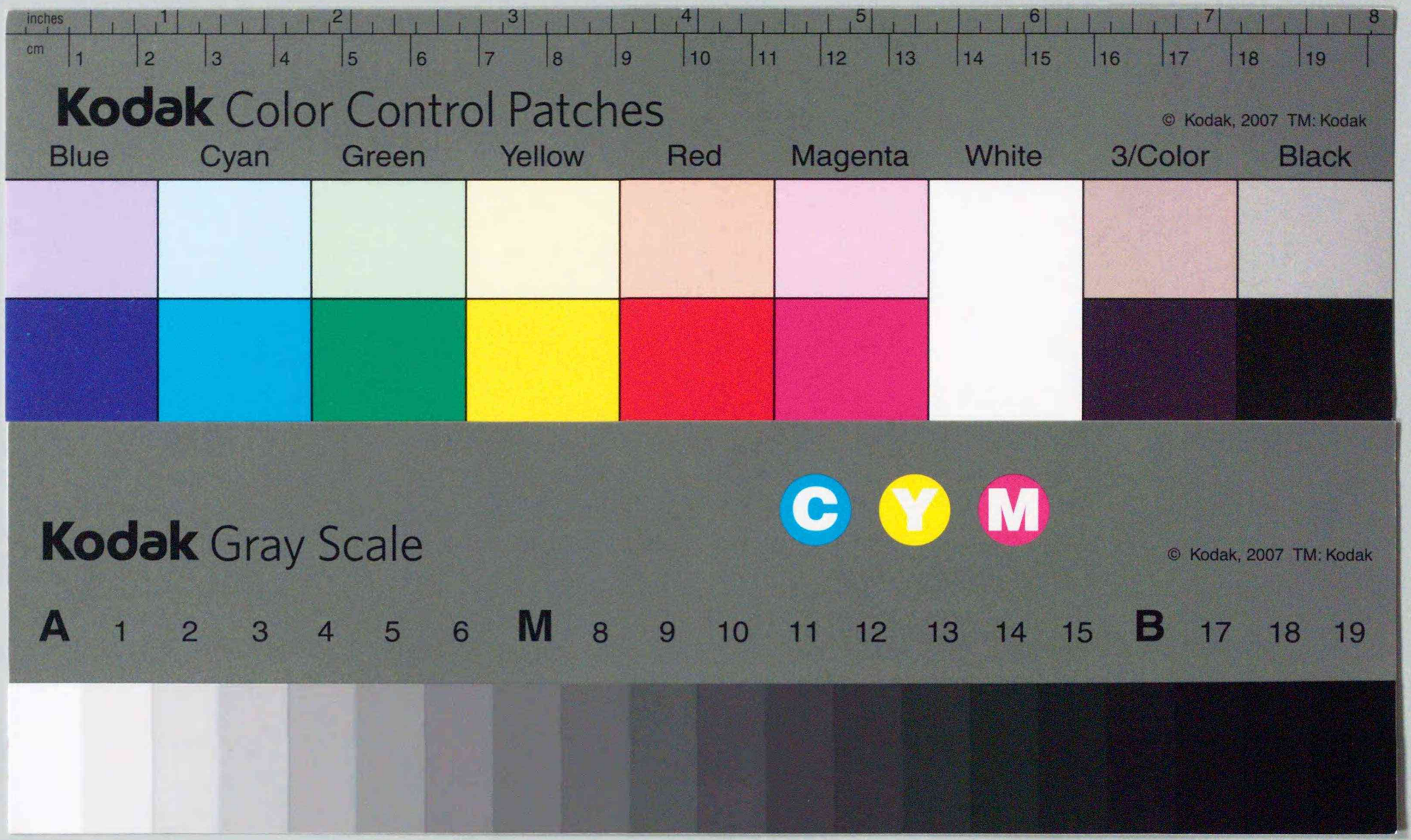
付表19　シベリア不撹乱土壌の各水分吸引圧における物理性

地点 層位 コアNo.	土壌水分 吸引圧 Log_{10}(cm)	固相率 ------	液相率 $m^3\ m^{-3}$	気相率 ------	D/D_0	生重/乾燥重 $g\ g^{-1}$	地点 層位 コアNo.	土壌水分 吸引圧 Log_{10}(cm)	固相率 ------	液相率 $m^3\ m^{-3}$	気相率 ------	D/D_0	生重/乾燥重 $g\ g^{-1}$
Cont	0.0	0.038	0.962	0.000		9.781	Cont	0.0	0.028	0.972	0.000		10.390
L+FH	0.5	0.038	0.380	0.582	0.082	4.468	L+FH	0.5	0.028	0.227	0.745	0.188	3.192
B118	1.0	0.038	0.296	0.665	0.183	3.705	V225	1.0	0.028	0.196	0.776	0.302	2.896
	1.5	0.038	0.237	0.725	0.270	3.163		1.5	0.028	0.171	0.801	0.342	2.648
	2.0	0.038	0.219	0.742	0.288	3.003		2.0	0.028	0.150	0.822	0.385	2.445
	2.5	0.038	0.228	0.734	0.281	3.082		2.5	0.028	0.148	0.824	0.328	2.433
	3.0	0.038	0.231	0.731	0.271	3.110		3.0	0.028	0.152	0.820	0.347	2.469
	3.5	0.038	0.226	0.735	0.293	3.068		3.5	0.028	0.146	0.826	0.334	2.409
	4.2	0.038	0.134	0.828		2.224		4.2	0.028	0.116	0.856		2.116
	7.0	0.038	0.000	0.962		1.000		7.0	0.028	0.000	0.972		1.000
	採取時	0.038	0.075	0.887	0.473	1.682		採取時	0.028	0.075	0.897	0.450	1.727
Cont	0.0	0.439	0.561	0.000		1.506	Cont	0.0	0.441	0.559	0.000		1.508
$E+B_2$	0.5	0.439	0.467	0.094	0.000	1.422	$E+B_2$	0.5	0.441	0.490	0.069	0.000	1.445
J6	1.0	0.439	0.449	0.112	0.000	1.405	F78	1.0	0.441	0.470	0.089	0.000	1.427
	1.5	0.439	0.365	0.196	0.009	1.330		1.5	0.441	0.365	0.194	0.008	1.331
	2.0	0.439	0.227	0.334	0.082	1.205		2.0	0.441	0.206	0.352	0.096	1.188
	2.5	0.439	0.198	0.363	0.101	1.179		2.5	0.441	0.173	0.386	0.130	1.157
	3.0	0.439	0.180	0.381	0.112	1.163		3.0	0.441	0.157	0.402	0.145	1.143
	3.5	0.439	0.171	0.390	0.122	1.154		3.5	0.441	0.144	0.414	0.146	1.131
	4.2	0.439	0.138	0.423		1.125		4.2	0.441	0.131	0.428		1.119
	7.0	0.439	0.000	0.561		1.000		7.0	0.441	0.000	0.559		1.000
	採取時	0.439	0.118	0.443	0.172	1.106		採取時	0.441	0.124	0.435	0.188	1.113
Cont	0.0	0.577	0.423	0.000		1.267	Cont	0.0	0.594	0.406	0.000		1.253
B_2	0.5	0.577	0.357	0.066	0.000	1.225	B_2	0.5	0.594	0.345	0.061	0.000	1.215
J5	1.0	0.577	0.346	0.077	0.000	1.218	J2	1.0	0.594	0.333	0.073	0.000	1.207
	1.5	0.577	0.325	0.098	0.000	1.205		1.5	0.594	0.318	0.088	0.000	1.198
	2.0	0.577	0.146	0.277	0.044	1.092		2.0	0.594	0.144	0.262	0.035	1.089
	2.5	0.577	0.157	0.267	0.000	1.099		2.5	0.594	0.151	0.256	0.029	1.094
	3.0	0.577	0.125	0.298	0.065	1.079		3.0	0.594	0.094	0.312	0.076	1.059
	3.5	0.577	0.085	0.338	0.112	1.053		3.5	0.594	0.082	0.324	0.096	1.051
	4.2	0.577	0.079	0.344		1.050		4.2	0.594	0.072	0.334		1.045
	7.0	0.577	0.000	0.423		1.000		7.0	0.594	0.000	0.406		1.000
	採取時	0.577	0.104	0.319	0.128	1.065		採取時	0.594	0.107	0.299	0.106	1.067
Cont	0.0	0.655	0.345	0.000		1.200	Cont	0.0	0.797	0.203	0.000		1.113
B_3	0.5	0.655	0.284	0.061	0.000	1.165	B_3	0.5	0.797	0.203	0.000	0.000	1.149
O31	1.0	0.655	0.268	0.077	0.000	1.156	V11	1.0	0.797	0.203	0.000	0.000	1.148
	1.5	0.655	0.266	0.080	0.000	1.154		1.5	0.797	0.203	0.000	0.000	1.145
	2.0	0.655	0.223	0.123	0.000	1.129		2.0	0.797	0.154	0.049	0.007	1.085
	2.5	0.655	0.162	0.184	0.016	1.094		2.5	0.797	0.129	0.073	0.018	1.072
	3.0	0.655	0.135	0.210	0.031	1.078		3.0	0.797	0.107	0.096	0.027	1.059
	3.5	0.655	0.113	0.233	0.038	1.065		3.5	0.797	0.087	0.115	0.034	1.048
	4.2	0.655	0.100	0.246		1.058		4.2	0.797	0.079	0.124		1.044
	7.0	0.655	0.000	0.345		1.000		7.0	0.797	0.000	0.203		1.000
	採取時	0.655	0.195	0.150	0.042	1.113		採取時	0.797	0.067	0.136	0.017	1.037
Cont	0.0	0.687	0.313	0.000		1.173	Cont	0.0	0.684	0.316	0.000		1.176
C	0.5	0.687	0.291	0.022	0.000	1.161	C	0.5	0.684	0.297	0.019	0.000	1.165
J4	1.0	0.687	0.284	0.029	0.000	1.157	T13	1.0	0.684	0.283	0.033	0.000	1.157
	1.5	0.687	0.274	0.039	0.000	1.151		1.5	0.684	0.279	0.038	0.000	1.155
	2.0	0.687	0.160	0.153	0.010	1.088		2.0	0.684	0.222	0.094	0.000	1.124
	2.5	0.687	0.108	0.205	0.037	1.059		2.5	0.684	0.093	0.223	0.043	1.052
	3.0	0.687	0.111	0.202	0.039	1.061		3.0	0.684	0.081	0.235	0.058	1.045
	3.5	0.687	0.074	0.239	0.063	1.041		3.5	0.684	0.058	0.258	0.072	1.033
	4.2	0.687	0.066	0.247		1.036		4.2	0.684	0.052	0.264		1.029
	7.0	0.687	0.000	0.313		1.000		7.0	0.684	0.000	0.316		1.000
	採取時	0.687	0.232	0.081	0.016	1.128		採取時	0.684	0.213	0.103	0.022	1.118

付表 19(つづき)

付表19(つづき)　シベリア不撹乱土壌の各水分吸引圧における物理性

地点 層位 コアNo.	土壌水分 吸引圧 Log_{10}(cm)	固相率	液相率	気相率	D/D_0	生重/乾燥重	地点 層位 コアNo.	土壌水分 吸引圧 Log_{10}(cm)	固相率	液相率	気相率	D/D_0	生重/乾燥重
		------	$m^3\ m^{-3}$	------		$g\ g^{-1}$			------	$m^3\ m^{-3}$	------		$g\ g^{-1}$
S92	0.0	0.250	0.750	0.000		2.315	S92	0.0	0.173	0.827	0.000		3.406
コケ+A	0.5	0.250	0.639	0.111	0.000	2.120	コケ+A	0.5	0.173	0.622	0.205	0.000	2.809
O69	1.0	0.250	0.577	0.173	0.017	2.012	9093	1.0	0.173	0.502	0.325	0.053	2.460
	1.5	0.250	0.400	0.350	0.065	1.702		1.5	0.173	0.336	0.491	0.155	1.978
	2.0	0.250	0.278	0.472	0.154	1.487		2.0	0.173	0.231	0.596	0.240	1.672
	2.5	0.250	0.233	0.517	0.195	1.409		2.5	0.173	0.214	0.613	0.253	1.623
	3.0	0.250	0.222	0.528	0.221	1.389		3.0	0.173	0.191	0.636	0.355	1.556
	3.5	0.250	0.208	0.542	0.225	1.365		3.5	0.173	0.178	0.649	0.281	1.516
	4.2	0.250	0.141	0.609		1.247		4.2	0.173	0.129	0.698		1.375
	7.0	0.250	0.000	0.750		1.000		7.0	0.173	0.000	0.827		1.000
	採取時	0.250	0.228	0.522	0.247	1.400		採取時	0.173	0.211	0.616	0.316	1.614
W96	0.0	0.421	0.579	0.000		1.529	W96	0.0	0.442	0.558	0.000		1.501
FH+E	0.5	0.421	0.532	0.047	0.000	1.486	FH+E	0.5	0.442	0.523	0.036	0.000	1.469
K47	1.0	0.421	0.511	0.068	0.009	1.467	S124	1.0	0.442	0.500	0.059	0.000	1.448
	1.5	0.421	0.408	0.171	0.029	1.373		1.5	0.442	0.412	0.146	0.013	1.370
	2.0	0.421	0.224	0.355	0.105	1.205		2.0	0.442	0.301	0.258	0.031	1.270
	2.5	0.421	0.193	0.386	0.132	1.176		2.5	0.442	0.210	0.349	0.100	1.188
	3.0	0.421	0.179	0.400	0.141	1.164		3.0	0.442	0.227	0.331	0.065	1.204
	3.5	0.421	0.152	0.427	0.155	1.139		3.5	0.442	0.169	0.390	0.131	1.151
	4.2	0.421	0.115	0.464		1.105		4.2	0.442	0.108	0.450		1.097
	7.0	0.421	0.000	0.579		1.000		7.0	0.442	0.000	0.558		1.000
	採取時	0.421	0.191	0.389	0.156	1.174		採取時	0.442	0.184	0.375	0.152	1.165
S92-2	0.0	0.284	0.716	0.000		1.956	S92-2	0.0	0.389	0.611	0.000		1.605
$A_{11}+A_{12}$	0.5	0.284	0.536	0.179	0.010	1.716	$A_{11}+A_{12}$	0.5	0.389	0.501	0.110	0.000	1.496
V259	1.0	0.284	0.496	0.219	0.029	1.663	181	1.0	0.389	0.473	0.139	0.000	1.468
	1.5	0.284	0.427	0.289	0.050	1.570		1.5	0.389	0.410	0.201	0.000	1.406
	2.0	0.284	0.331	0.385	0.093	1.442		2.0	0.389	0.312	0.299	0.026	1.309
	2.5	0.284	0.243	0.472	0.144	1.325		2.5	0.389	0.261	0.350	0.047	1.258
	3.0	0.284	0.211	0.505	0.142	1.281		3.0	0.389	0.232	0.380	0.059	1.229
	3.5	0.284	0.185	0.530	0.164	1.247		3.5	0.389	0.204	0.407	0.068	1.202
	4.2	0.284	0.106	0.609		1.142		4.2	0.389	0.124	0.488		1.123
	7.0	0.284	0.000	0.716		1.000		7.0	0.389	0.000	0.611		1.000
	採取時	0.284	0.183	0.532	0.193	1.245		採取時	0.389	0.176	0.436	0.152	1.174
S92-2	0.0	0.562	0.438	0.000		1.299	S92-2	0.0	0.478	0.523	0.000		1.433
B_2	0.5	0.562	0.408	0.030	0.000	1.279	B_2	0.5	0.478	0.470	0.052	0.000	1.389
S73	1.0	0.562	0.396	0.042	0.000	1.270	K4	1.0	0.478	0.450	0.073	0.000	1.372
	1.5	0.562	0.367	0.071	0.000	1.251		1.5	0.478	0.419	0.103	0.000	1.347
	2.0	0.562	0.337	0.101	0.002	1.230		2.0	0.478	0.364	0.158	0.000	1.301
	2.5	0.562	0.300	0.138	0.005	1.205		2.5	0.478	0.323	0.200	0.006	1.267
	3.0	0.562	0.263	0.175	0.009	1.180		3.0	0.478	0.285	0.238	0.017	1.236
	3.5	0.562	0.226	0.212	0.017	1.154		3.5	0.478	0.247	0.275	0.029	1.205
	4.2	0.562	0.187	0.251		1.128		4.2	0.478	0.208	0.314		1.172
	7.0	0.562	0.000	0.438		1.000		7.0	0.478	0.000	0.523		1.000
	採取時	0.562	0.275	0.163	0.008	1.188		採取時	0.478	0.307	0.216	0.013	1.254
S73 FH+AB J5	採取時	0.254	0.108	0.638	0.227	1.150	S73 FH+AB J2	採取時	0.190	0.127	0.683	0.275	1.218
S73 E V11	採取時	0.574	0.053	0.373	0.177	1.035	S73 E J6	採取時	0.530	0.053	0.417	0.201	1.036
S73 25-30 F78	採取時	0.620	0.129	0.251	0.063	1.076	S73 25-30 J4	採取時	0.613	0.150	0.238	0.054	1.090
S73 40-50 1050	採取時	0.604	0.106	0.290	0.069	1.062	S73 40-50 1055	採取時	0.627	0.113	0.260	0.061	1.066
S73 60-70 031	採取時	0.610	0.136	0.254	0.055	1.081	S73 60-70 1025	採取時	0.639	0.193	0.169	0.021	1.108


inches
cm
Kodak Color Control Patches
© Kodak, 2007 TM: Kodak
Blue
Cyan
Green
Yellow
Red
Magenta
White
3/Color
Black
Kodak Gray Scale
C
Y
M
© Kodak, 2007 TM: Kodak
A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19