

モンゴルの半乾燥草原地域において
放牧が炭素動態に与える影響

吉 井 英 治

200620273

平成 20 年 1 月

筑波大学大学院環境科学研究科

平成 19 年度修士（環境科学）学位論文

要旨

生物や植物がその活動を維持していく上で炭素は必須の物質であり、炭素の動態を評価することは、ある地域の陸上生態系の持続可能性を検討する上で有効な指標となる。

モンゴル国 Kherlen 川流域の KBU 集落(正式名 Kherlenbayaan-Ulaan)は北緯 47°28'、東経 108°78' に位置する、ステップ帯に区分された草原の広がる地域である。この地域では放牧が盛んに行なわれており、遊牧を生業としている地域が多い。このモンゴル国は 1991 年の政治体制の変革によって市場経済への移行が行なわれた国である。それまで、国の管理の下にあった遊牧のシステムも自由化へと切り替わり、国民は資産を蓄えるために所有する家畜の数を増大させ、砂漠化への進行が懸念されている。

アルレンゲタル(2006)は 1990 年まで約 41,600 箇所確認されていた井戸の数が 16 年間に 4,000 箇所までに減少していたという報告をしている。モンゴル国全土の家畜所有頭数は、1991 年から 2001 年までの間に 800 万頭の増大と 2001 年～2003 年までの間に約 500 万頭の減少が小長谷 (2002)によって報告されているが、アルレンゲタル(2006)によると 2001 年～2003 年までの減少は寒波の到来による家畜の死亡が原因とされている。今後所有する家畜は再び増大する可能性があり、ステップ帯の陸域生態系の持続可能性について検討する必要があると考えられる。

モンゴル国 KBU 集落近郊では RAISE プロジェクトの下、2002 年にステップ帯に区分される草原に設置した放牧の影響を受けない「禁牧区」と、通常の草原「放牧区」の両区において 2003 年より現在に至るまで経年的に気象観測、植生調査などの比較観測が行なわれてきた。本研究では、そのデータを使用し、その経年変化とそれに関わる環境要因が KBU 草原における炭素動態に与える影響を明らかにすることを目的とする。また Kato (2007)によるカメラによる放牧家畜の自動観測と GPS による家畜の行動調査を基に、より精度の高い放牧圧の評価を行なうことを目的とする。

本研究により算出された炭素動態の経年変化から、禁牧区は 2004 年を除き、常に放牧区よりも低い炭素収支にあることが推定された。また、陸上のバイオマス量では常に放牧区より禁牧区が高い値を示しているのに対して、生態系純生産 (NEP)、総一次生産量 (GPP) では禁牧区の方が低い算出量を示し、2005 年の放牧区では NEP の増大、禁牧区では減少といった異なる挙動を示した。

環境要因が NEP に与える影響としては両区において同様の Ta、VPD において禁牧区のほうが低い NEP となる傾向が見られ、C4 植物の占有率が寄与している可能性が示唆された。また SWC<10%の条件下における NEP において低くなる傾向が見られている。両区において測定した地下 12cm における土壌含水率は禁牧区において早く低下する傾向が見られること。浅く埋設している TDR 土壌水分計において土壌含水率が低く観測されていることなどから、土壌水分からの供給量不足がバイオマスの多い禁牧区において十分な水分条件での炭素生産を行なえていない可能性が示唆される。

これらは本研究対象地域において、禁牧による影響が草原の炭素動態を低下させる一つのファクターとなりうることが示唆された。また、同時に観測されている熱収支との相関性についても比較を行ない、潜熱、正味放射と正の相関性を、顕熱と弱い負の相関を示した。

インターバルカメラによる観測から推定された放牧圧は、生育期において Chen et al.

(2007)によって示された徐々に草原が砂漠化へと移行するとされる放牧圧 0.8 SEU ($\text{SEU}=\text{羊一頭あたりに換算した放牧圧}$) ha^{-1} を越える値は観測されなかった。また、冬季において放牧圧が低下する原因については、生育期と非生育期における放牧地の移動が観測地から家畜を遠ざけていることがGPSによる位置情報の取得から判明した。GPSによる家畜の行動調査については、家畜の体に巻きつける事で家畜の行動調査による放牧圧の評価を行なった。結果として、移動の範囲内において 0.8 SEU ha^{-1} を越える放牧圧が算出された。局所的に高い値を示すものの、非生育期における家畜の移動が草原の荒廃を緩和させる働きを持つことが推測される。

目次

目次	i
表目次	ii
図目次	iii
1. はじめに	1
1.1. 背景	1
1.2. 研究の目的	2
2. 研究手法	4
2.1. 研究対象地域	4
2.2. 炭素動態	12
2.3. 総一次生産量	12
2.4. 生態系純生産量	14
2.5. 生態系呼吸量	15
2.6. その他の環境要因	16
2.7. 地表面熱収支	17
2.8. バイオマス	18
2.9. 放牧家畜が草原に与える影響の評価	22
3. 結果と考察	26
3.1. 炭素動態の年積算値の比較	28
3.2. 本研究対象地域における放牧圧	39
3.3. 地表部バイオマス、リターの経年変化	47
3.4. Ta、VPDの増減に対するNEPの関係性	54
3.5. SWCの増減に対するNEPの関係性	79
3.4. 地表面熱収支との比較	94
4. 結論	106
5. 謝辞	108
引用文献	109

表目次

表 1	放牧区、禁牧区における各観測項目	11
表 2	箱ひげ図を基に設定したしきい値	19
表 3	家畜の観測使用したGPS	25
表 4	DOY、月区分対応表	27
表 5	両区の炭素動態の年積算値、生育期積算値、及び既存研究の年積算値	31
表 6	刈取り法によって測定されたバイオマス量	49
表 7	7月のlitterを差し引いた年積算GPPとAGB	52
表 8	生育期間におけるNEP、気温の月別平均値、標準偏差	57
表 9	NEP月平均値とPAR月平均値の比較に使用した値	60
表 10	生育期日中におけるNEP月平均値と飽差(VPD)月平均値の比較に用いた値	67
表 11	図 43～46 に使用した値一覧	74
表 12	NEPと熱収支の比較に用いた値	104
表 13	熱収支との比較に使用した回帰式一覧	105

図目次

図 1	炭素の循環を示すコンパートメントモデル	3
図 2	モンゴル国KBU集落位置(赤い点により表示)	5
図 3	1993 年～2006 年におけるKBU集落の気温・降水量の推移	6
図 4	1993 年～2002 年におけるKBU集落の気温・降水量の月毎の変化	7
図 5	KBU集落(赤い点)、GPS対象地(黒いフラグ)俯瞰図	8
図 6	KBU集落放牧区の景観とAWSステーション	9
図 7	KBU集落禁牧区の景観とAWSステーション	10
図 8	非成長期における放牧区(上)、禁牧区(下)の景観	13
図 9	刈取り法におけるコドラート設置地点	20
図 10	刈取り法の様子	21
図 11	カメラのファインダーから見た撮影範囲	23
図 12	2003 年放牧区における炭素動態とLi et al. (2005)の算出との比較	30
図 13	放牧区におけるNEPの日積算の推移	32
図 14	禁牧区におけるNEPの日積算の推移	33
図 15	放牧区におけるERの日積算の推移	34
図 16	禁牧区におけるERの日積算の推移	35
図 17	放牧区におけるGPPの日積算の推移	36
図 18	禁牧区におけるGPPの日積算の推移	37
図 19	両区における炭素フラックスの月平均値の比較	38
図 20	政府統計より推定された首都、及びKherlen川流域周辺における放牧圧 ...	41
図 21	インターバルカメラによる放牧圧の推定結果	42
図 22	生育期と非生育期における放牧地の違い	43
図 23	生育期、非生育期におけるGPSによる放牧圧の観測結果	44
図 24	生育期において観測されたGPSによる放牧圧	45
図 25	非生育期において観測されたGPSによる放牧圧	46
図 26	両区における 2003 年～2007 年までのAGBとlitterの経年変化	50
図 27	両区におけるC3 植物、C4 植物バイオマスの関係	51
図 28	推定された禁牧区のBGBとAGBの比較	53
図 29	両区におけるNEP月平均値と月平均気温の相関関係	56
図 30	放牧区における 2004 年～2005 年生育期のNEP月平均値とPAR月平均値の比 較	58
図 31	禁牧区における 2004 年～2005 年生育期のNEP月平均値とPAR月平均値の比 較	59
図 32	2003 年放牧区において異なる気温(Ta)条件下でのNEPとPARの挙動	61
図 33	2004 年における異なる気温(Ta)条件下でのNEPとPARの挙動	62
図 34	2005 年における異なる気温(Ta)条件下でのNEPとPARの挙動	63
図 35	2006 年における異なる気温(Ta)条件下でのNEPとPARの挙動	64
図 36	放牧区の生育期日中におけるNEP月平均値と飽差(VPD)月平均値の比較 ...	65
図 37	禁牧区の生育期日中におけるNEP月平均値と飽差VPD月平均値の比較	66

図 38	2003 年放牧区において異なる飽差(VPD)条件下でのNEPとPARの挙動	68
図 39	2004 年において異なる飽差(VPD)条件下でのNEPとPARの挙動	69
図 40	2005 年において異なる飽差(VPD)条件下でのNEPとPARの挙動	70
図 41	2006 年において異なる飽差(VPD)条件下でのNEPと光合成有効放射(PAR)の挙動	71
図 42	ヘルレン川流域における地表部バイオマス(AGB)と葉面積指数(LAI)の相関性	72
図 43	様々な論文からまとめられた光合成有効放射に対する純光合成速度の違い	73
図 44	図 42 より推定した 2003 年におけるC3、C4 植物の光合成能力の差異	75
図 45	図 42 より推定した 2004 年におけるC3、C4 植物の光合成能力の差異	76
図 46	図 42 より推定した 2006 年におけるC3、C4 植物の光合成能力の差異	77
図 47	図 42 より推定した 2007 年におけるC3、C4 植物の光合成能力の差異	78
図 48	2003 年 4 月から 2007 年 4 月までの日積算降水量(PPT)の推移	81
図 49	放牧区の生育期日中におけるNEP月平均値と月積算値降水量(PPT)の比較	82
図 50	禁牧区の生育期日中におけるNEP月平均値と月積算値降水量(PPT)の比較	83
図 51	2003 年放牧区において異なる土壌含水率(SWC)条件下でのNEPとPARの挙動	84
図 52	2004 年における異なる土壌含水率(SWC)条件下でのNEPとPARの挙動	85
図 53	2005 年における異なる土壌含水率(SWC)条件下でのNEPとPARの挙動	86
図 54	2006 年における異なる土壌含水率(SWC)条件下でのNEPとPARの挙動	87
図 55	2003 年における降水量(PPT)と土壌含水率(SWC)の季節変化	88
図 56	2004 年における降水量(PPT)と土壌含水率(SWC)の季節変化	89
図 57	2005 年における降水量(PPT)と土壌含水率(SWC)の季節変化	90
図 58	2006 年における降水量(PPT)と土壌含水率(SWC)の季節変化	91
図 59	2003 年と 2005 年の深度 12cmの土壌含水率(SWC)の違い	92
図 60	2006 年における深度 12cmの土壌含水率(SWC)調査	93
図 61	放牧区における 2003 年から 2006 年における熱収支の月平均値の変化	95
図 62	放牧区における月平均値によるNEPと正味放射量(Rn)の比較	96
図 63	禁牧区における月平均値によるNEPと正味放射量(Rn)の比較	97
図 64	放牧区における月平均値によるNEPと顕熱(H)の比較	98
図 65	禁牧区における月平均値によるNEPと顕熱(H)の比較	99
図 66	放牧区における月平均値によるNEPと潜熱(IE)の比較	100
図 67	禁牧区における月平均値によるNEPと潜熱(IE)の比較	101
図 68	放牧区における月平均値によるNEPと地中熱流量(G)の比較	102
図 69	禁牧区における月平均値によるNEPと地中熱流量(G)の比較	103

1. はじめに

1.1. 背景

生物や植生がその活動を維持していく上で炭素は必須の物質であることから、ある地域の陸域生態系の持続可能性について考えた場合、その地域の炭素動態は一つの指標として有効である。生態系における炭素の一連の流れのうち、一つは植生による炭素の生産、もう一つは捕食者による消費と捕食者・植生・微生物の呼吸による放出の二つによって大別することが出来る(図 1)。

陸域生態系の炭素動態を考える場合、太陽からエネルギーを受け、光合成を行った植生が体内に炭素を同化させた量を **GPP**(総一次生産量)、従属栄養生物と植生による呼吸と土壤中の有機物が落葉を分解して発する炭素の放出量を **ER**(生態系呼吸量)という。これら二つの炭素の流れの差が正であれば、地上部に残された余剰なバイオマスがその陸域生態系に貯留されたことになり、また負であれば、その生態系は炭素の放出源として作用したとみなされる。この差から求められる値は **NEP**(生態系純生産量)と呼ばれ、群落上における二酸化炭素のフラックス観測によって推測が可能である。

モンゴル国は、乾燥・半乾燥帯に区分され、降水量の少ない乾燥した国である。雨期である夏の三ヶ月間でおおよそ年降水量の 70%が降り、残りは乾季が続く。雨季が過ぎると植生が少なくなり、遊牧民は植生の残っている地域へと移動し、放牧を行う。また、北部では年平均降水量が 400mm であるのに対して、南部に向かうにつれて降水量は減少し、南部の砂漠帯では 100mm 程度しか観測されていない(青木・橋本 1992)。また、その植生分布は降水量と気温の分布に沿う形で配列しており、外部条件、干ばつなどを始めとした気象条件の変化や人為的影響などの外部条件に対して脆弱な特徴を持つ(Sugita et al. 2007)。

モンゴル国では RAISE プロジェクト(「北東アジア植生変遷域の水循環と生物・大気圏の相互作用の解明」を目的とする研究プロジェクト)のもと、さまざまな研究が行われている。Kherlen 川流域 KBU 集落では二つの自動気象観測ステーション(AWS)を設置することで、2003 年から気象等の比較を行なってきた。一つは放牧の侵入を柵で防いだ 170m×200m×1.5m のエリアの中に、もう一つを草原に設置し(以降、前者を禁牧区 後者を放牧区 とする)、放牧が草原に与える影響を研究してきた。

Kato (2007)では、2003~2005 年の観測で、植生(草丈、バイオマス)、気象(降水量、土壌水分、気圧、風向)、フラックス(正味放射、顕熱、潜熱、地中熱流量)の比較から、草原の植生・熱収支の放牧区と禁牧区における経年の違いについて明らかにした。また、Li (2007)では、2003 年における、地表部・地下部における炭素動態について $GPP: 179 \text{ g C m}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ 、 $ER: 138 \text{ g C m}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ 、 $NEP: 41 \text{ g C m}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ といった算出値を渦相関法を基に明らかにした。Chen et al. (2007)では、1993~2002 までの長期の観測記録を利用したモデリングによって、KBU草原の持続可能な放牧圧について推定している。

しかし、2003 年放牧区についての炭素動態は明らかとなったが、禁牧区内及び、2004 年以降の炭素動態については未解明である。Li (2007)では 2003 年において草原は弱いシンクであったことを明らかとしたが、放牧量の増大によって $-23 \sim +20 \text{ g C m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ほど変動することも示唆されている。特にモンゴル国は降雨の年変動の大きい地域であり、2003 年の年降水量は平均年降水量の 127%に相当し、その降水量などの気象要因、人為的影響

が経年の炭素動態に与えた影響についてはまだ明らかにされていない。

1.2. 研究の目的

本研究は Li (2007)において調査された草原において、2003～2007 年における炭素動態を明らかにし、放牧区、禁牧区における 2003～2007 年の炭素動態の経年変化と放牧、及び環境要因が草原に与える影響について明らかにすることを目的とする。

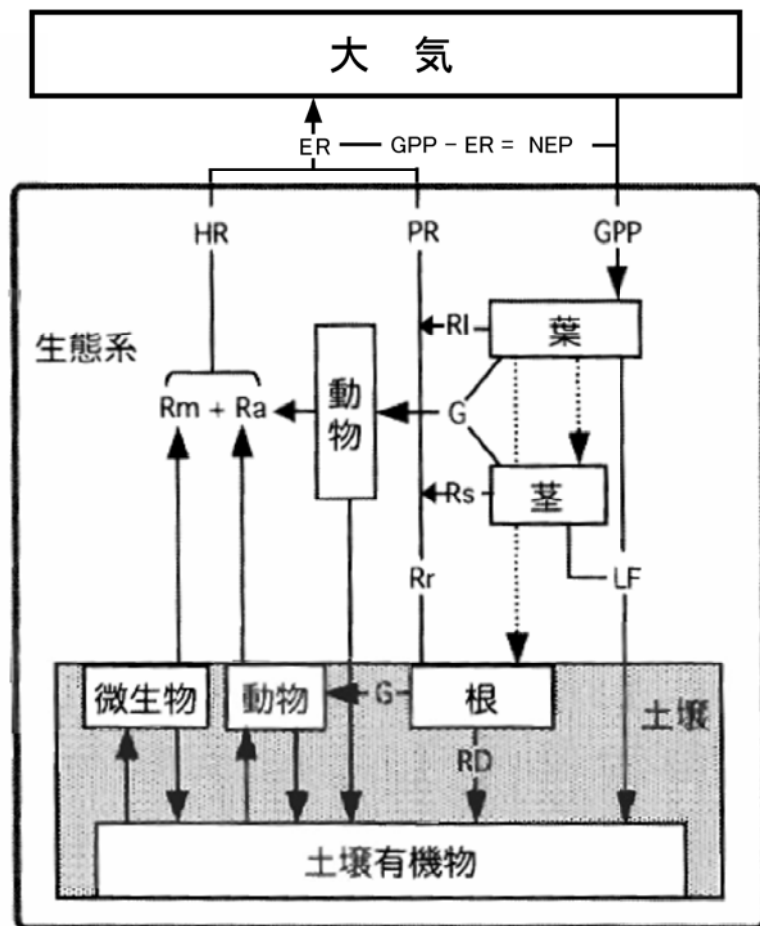


図 1 炭素の循環を示すコンパートメントモデル

(図は鞠子ほか 2007 より出典及び改変)

それぞれ、GPP：総一次生産、PR：植物の呼吸による炭素消費、Rl：葉の呼吸、Rs：茎の呼吸、Rr：根の呼吸、PR:植物の呼吸、G:グレイジング、LF：リターフォール、RD:リゾデポジッション、Rm：微生物呼吸、Ra:動物呼吸、HR:従属栄養生物呼吸 NPP:純一次生産、ER：生態系呼吸量、NEP：生態系純生産を示す。

2. 研究手法

本研究では KBU における 2003 年から 2006 年まで自動回収による気象観測されたデータの 30 分平均値を用いて 4 年分の総一次生産、生態系呼吸、生態系純生産について渦相関法を基に算出した。

2.1. 研究対象地域

本研究の研究対象地域はモンゴル首都ウランバートルより南東 200km に位置する、Kherlen 川流域ヘルレンバイヤンウラン(以下 KBU と表記する)集落である (図 2)。この地域における気温、降水量の経年の推移と気温、降水量の季節変化について図 3、図 4 に示す。この地域は内陸性気候に属しており、雨期である生育期のうち三ヶ月間でおよそ年降水量の 70%が降り、残りは乾季が続く。雨季が過ぎると植生が少なくなり、植生の立ち枯れた状態のまま再び雨季が訪れるまで続く。この KBU 集落はモンゴル国の植生区分においてステップ帯に位置しており、雨季は草原が繁茂している。

この KBU 集落から北西 1km の距離に 200m×170m×1.5m の家畜の侵入を防ぐ柵と、内外に環境測定用の AWS ステーションを 2002 年夏に設置し、2003 年より比較観測を行っている。AWS ステーションの配置を図 5 に、各ステーションの景観写真を図 6、図 7 に示す。また各 AWS ステーションにおいて設置されている観測器について表 1 に記す。また、放牧圧の評価を行うために GPS による家畜の行動調査も行った。この地域の放牧は集落より離れた位置にゲルを配置し、家畜を放牧させる。家畜は群で植生を捕食しながら夜間ゲルに戻るという一連の行動を繰り返す。この家畜の行動範囲の調査を 2006 年の生育期・非生育期について、生育期は KBU 集落より西に約 10km の位置の川沿いのゲル(以降、Summer Camp と表記する)にて実施した。非生育期は KBU 集落を約 15km 北に位置するゲル (以降、winter Camp と表記する) と約 10km 北に位置するゲル (以降 Winter Camp2 と表記する) にて実施した。

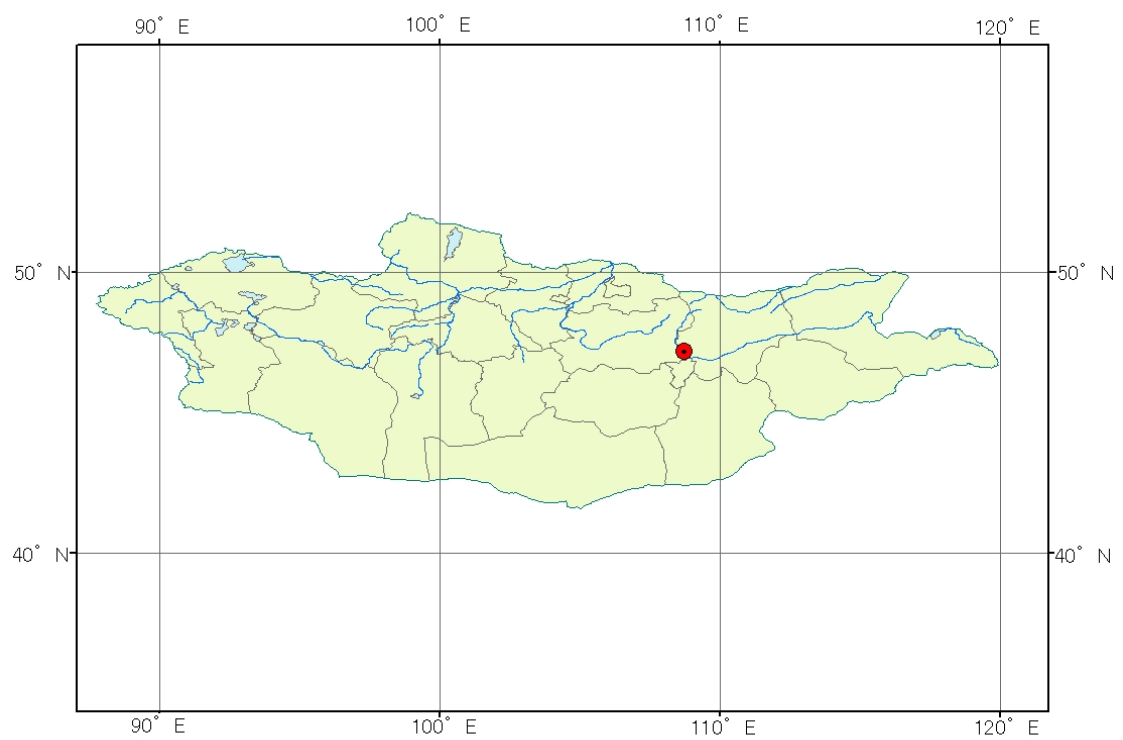


図 2 モンゴル国 KBU 集落位置(赤い点により表示)

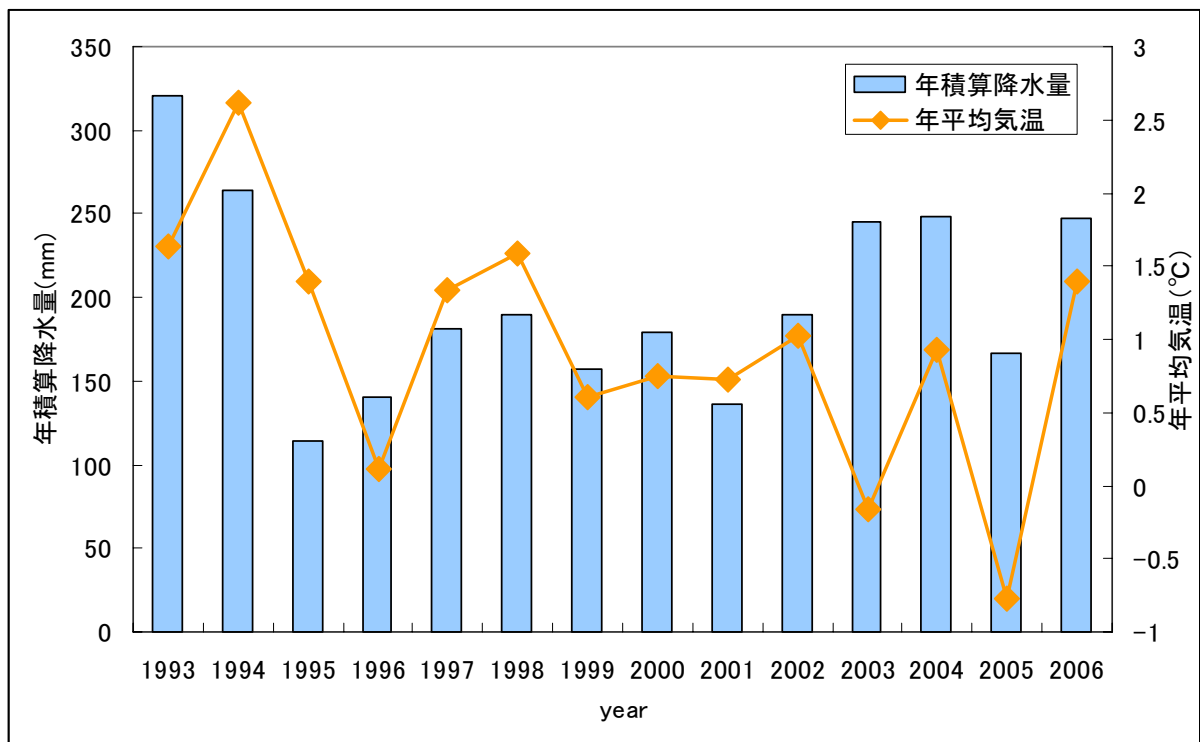


図 3 1993 年～2006 年における KBU 集落の気温・降水量の推移

(図は Kato 2007 より出典及び改変)

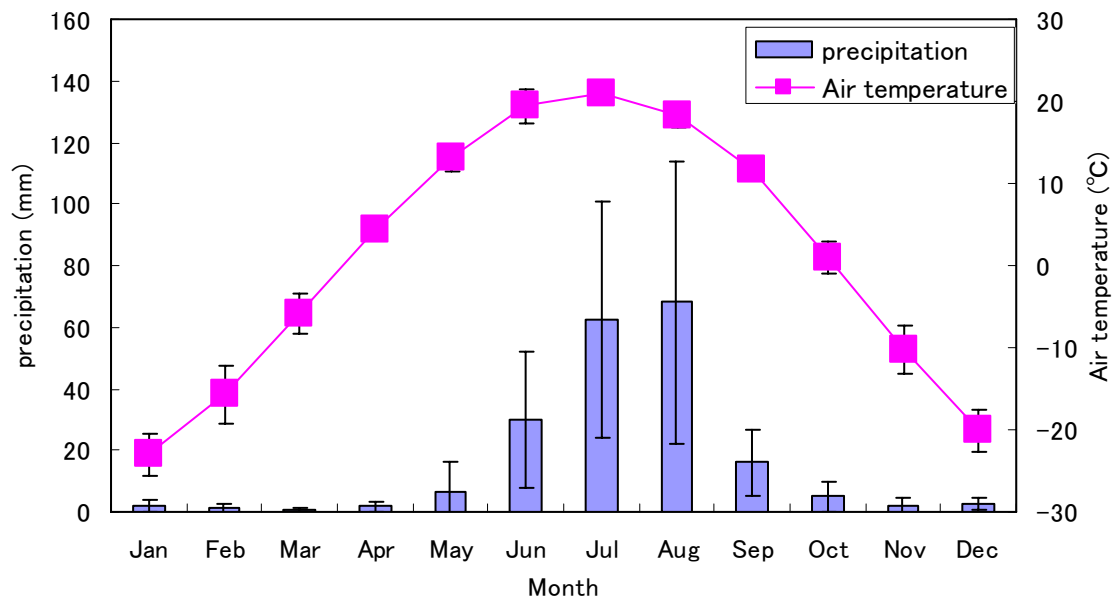


図 4 1993 年～2002 年における KBU 集落の気温・降水量の月毎の変化

(図は Kato 2007 より出典)

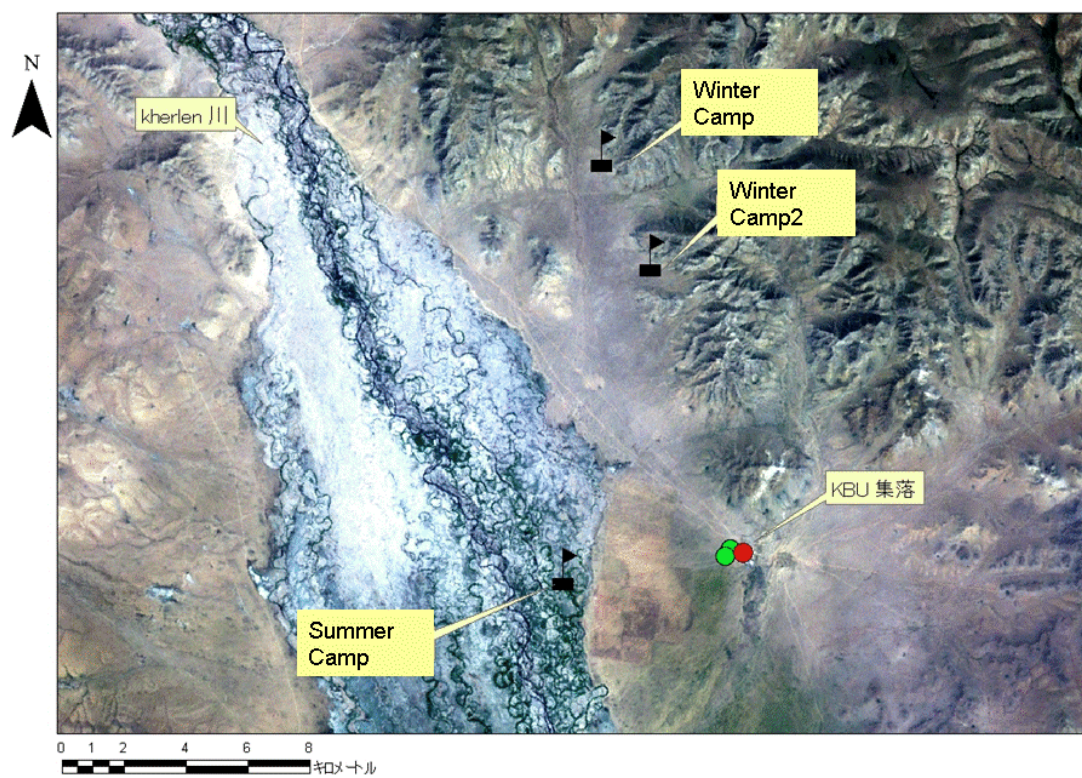


図 5 KBU 集落(赤い点)、GPS 対象地(黒いフラグ)俯瞰図
(緑の点は放牧区、禁牧区 AWS ステーション位置)



図 6 KBU 集落放牧区の景観と AWS ステーション

(写真は 2006 年 7 月撮影)



図 7 KBU 集落禁牧区の景観と AWS ステーション

(写真は 2006 年 7 月撮影)

表 1 放牧区、禁牧区における各観測項目

観測項目	器具	モデル/製造業者（場所）	測定高度/ 測定深度
比湿/気温	湿度温度プローブ	HMD45D/Vaisara Oy.(Helsinki,Finland)	3.0m
比湿/気温	横型通風筒	PVC-02-AC/Prede CO.Ltd.(Tokyo,Japan)	3.0m
地表面温度	赤外線温度計	303F/KonicaMinolta Holdings,Inc. (Tokyo,Japan)	2.5m
風速・湿度変動 潜熱/顕熱	三次元超音波風向風速計	SAT550/Kaijo Sonic CO. (Tokyo,Japan)	3.0m
CO2/水蒸気	赤外線ガス分析計	Li7500/Li-cor Inc.(Lincoln,U.S.)	3.0m
全天日射量	短波放射計	CM3/Kipp and Zonen B.V .(Delft,Netherlands)	2.5m
長波放射	赤外放射計	CG3/KippandZonen B.V .(Delft,Netherlands)	2.5m
気圧	デジタル気圧計	PTB210/Vaisala Oy.(Helsinki)	1.3m
降水量	転倒ます式雨量計	52202/R.M.Young Inc.(Traverse,U.S.)	
地熱フラックス	熱流板	HFT1.1/REBS Inc. (SeattleU.S.)	-0.02m -0.1m
地温	地温センサー	C-PTG /Climatec Inc. (Tokyo,Japan)	-0.05m -0.1m -0.2m -0.3m -0.5m -0.7m -1.0m -1.5m
体積土壌含水率	TDR 土壌水分計	CS616/CambelScientific Inc.(Logan,U.S.)	-0.1m -0.2m -0.3m -0.7m -1.0m -1.5m

（降水量観測は放牧区のみ実施）

（禁牧区における TDR 土壌水分計は設置高度は-0.05m,-0.25m）

（Kotani 2006 より出典、及び改変）

2.2. 炭素動態

2.3. 総一次生産量

炭素動態を算出するために総一次生産量 GPP の算出を行う。 GPP は二酸化酸素フラックスからの NEP の算出から、以下の式によって推定できる。

$$GPP = NEP + ER \quad \cdots (1)$$

(1)式における NEP は生態系純生産量を、 ER は生態系呼吸量を表している。モンゴル草原は乾期と雨季の差が顕著に表れる地域である。植生は主に降雨の集中する 4 月下旬から 10 月上旬にかけて成長し、雨季を終える 11 月から、翌年の 4 月下旬まで成長を止め、落葉・あるいは捕食されながら、減少していく。本研究では 5 月 5 日～10 月 30 日を生育期、10 月 31 日～翌年の 5 月 4 日までを非生育期と定義した。非生育期における各区の景観について図 8 に示す。禁牧区における非生育期の植生は捕食されることなく、立ち枯れたままリターとして残される。



図 8 非成長期における放牧区(上)、禁牧区(下)の景観

(写真は 2007 年 3 月撮影)

2.4. 生態系純生産量

2.4.1. 生育期における日中の算出

(1)における日中(光合成有効放射 $PAR > 0$)の生態系純生産量 NEP は渦相関法による CO_2 フラックスの観測に基づき、以下の式より算出した。

$$NEP = - \overline{w'c'} \quad \dots (2)$$

w は鉛直風速成分を示し、AWS に設置されている三次元超音波風向風速計 (SAT550, Kaijo Sonic Co.) より観測されている。 c は二酸化炭素濃度を示し、同じく AWS に設置されている赤外線ガス分析計 (Li-7500, Li-cor Inc.) によって観測されている。それぞれにおける「 $\overline{\quad}$ 」は 30 分平均値、「 $'$ 」は時間平均からの偏差を表す。

また、宮田 (2003) から以下の指針を設け異常値とした。

- ・ 降雨 > 0
- ・ $\left| \overline{w'c'}_{(i-1) \leq i \leq (i+1)} - \overline{w'c'}_i \right| > 3\sigma_{\overline{w'c'}_{(i-1) \leq i \leq (i+1)}}$
- ・ $\alpha < \overline{w'c'} \quad \{ \alpha = 1.0 \}$
- ・ $\beta > \overline{w'c'} \quad \{ \beta = -4.5 \}$

観測に使用している Li-7500 はオープンパス型の観測器であり、降雨・降雪中は出力信号が乱れて正常な測定が行えないため、降雨が観測された時間の値は欠損値と判断した。また、フラックスデータの時系列上において、前後から突出しているデータについても除外した。その基準は、ある 30 分間 i における CO_2 フラックスの移動平均値 $\overline{w'c'}_{(i-1) \leq i \leq (i+1)}$ と $\overline{w'c'}_i$ の差の絶対値が、 $(i-1) \sim (i+1)$ の間の $\overline{w'c'}$ の標準偏差 σ の 3 倍を超えた場合を異常値とした。また、フラックスの値にしきい値となる最大値、最小値を設定し、それらを超える値についても異常値と判定した。しきい値となる最大値、最小値については通常とりうる値の二倍程度が望ましいとされているため。宮田 (2003) による異常値の除外を行った後、各年の $u^* \geq 0.2 (m \cdot s^{-1})$ における観測値を下記の 3 つに区分けした後、箱ひげ図により上四分位、下四分位の中央値からの三倍の値を参考に決定した。表 2 に各年のしきい値を表記する。

- ・ 非生育期、昼夜
- ・ 生育期、夜間
- ・ 生育期、日中

その結果、全観測値のうちおよそ半数以上が欠損値として除外された。

年間の NEP を算出するために、欠損値として除外された $\overline{w'c'}$ の補完を行った。補完の手順について以下に記す。

① 2 時間以内の欠損については内挿補完法から補完した。

② 次に Li et al. (2005) で使用されている look-up table 法を使用して補完した。

③次に、2 時間以内の欠損値があれば、もう一度内挿補完法で補完した。

④最後に残された欠損値については前後 1 週間の平均値により補完した。

②におけるlook-up table法は、Falge et al. (2001) により提案された、他の環境条件を基に欠損したデータを埋め合わせる手法である。今回使用したLi et al. (2005)で使用されたlook-up tableによる $\overline{w'c'}$ の補完においては、時間と気温 Ta と光合成光子量束 Q_{PPFD} のクラス分けを行い、時間におけるクラス分けは 4 月~5 月、6 月~7 月、8 月~9 月、10 月~11 月、12 月~翌年 4 月の 5 分類、昼夜別とし、10 クラスに分類されている。 Ta は $-30\sim 52^{\circ}\text{C}$ の範囲において 2°C ごと 41 クラスに分類されている。 Q_{PPFD} は $0\sim 2200\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ までの範囲において $100\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ごとの 23 クラスに分類されている。各クラスにおける二酸化炭素フラックスの値は分類されたクラスごとにおける標準偏差を意味しており、その中におけるギャップを線形補完法で補完している。

2.4.2. 生育期における夜間の算出

夜間における植生の光合成によるバイオマス生産活動は行われないので、(2)式は $GPP = 0$ となり、また日中と比較し、欠損値や測定値の誤差も大きくなる。そのため、上記の $\overline{w'c'}$ の補完では補填しきれない。本研究では Li et al. (2005)を参考に、夜間については $NEP = -ER$ として補完した。 ER の算出は後述の方法にて推定している。

2.4.3. 非生育期における算出

非生育期における NEP は長期的には ER と等しくなると仮定し、 $NEP = -ER$ とした。これは、非生育期における植生がほぼ立ち枯れており、落葉し、土壤中の微生物に分解されるか、家畜によって捕食されるか、あるいは立ち枯れたまま呼吸し続けるかのいずれかになるためである。また通常の渦相関法では冬季におけるエラー値の数が昼夜ともに日中の成長期と比較して多い。総一次生産量を 0 と仮定し、 ER と等しいものと定義した。

2.5. 生態系呼吸量

(1)式における生態系呼吸量 ER は、 $u^* \geq 0.2$ 以上の条件においては以下の式より算出した。

$$ER = -\overline{w'c'} \quad \dots(3)$$

$u^* < 0.2$ においては、Urano(未発表)より以下の気温との回帰より推測した。

$$ER = a e^{(b \cdot Ta)} \quad \dots(3)$$

a と b は定数であり、 a は $u^* \geq 0.2\text{ms}^{-1}$ 、 $PAR < 0$ の条件を満たすデータにおける気温に対する CO_2 フラックスの回帰定数、 Ta は地上 2.5mにおける気温を表す。(3)

本研究対象地における PAR の算出は Li et al (2005)、Weiss & Norman (1995)より以下の式によって表される。

$$PAR = 2.16 \times K_d \quad \dots(4)$$

Kd は下向き短波放射量の値を示し、AWSにて自動観測されているデータを使用した。

2.6. その他の環境要因

植生が太陽からの光を受けて光合成を行なう際に、気孔を通じて水蒸気と二酸化炭素の交換が行なわれる。Urano(未発表)はチャンバー法による GPP と ER の算出から、乾燥状態で降雨があるとき GPP と ER は増加するとしているが、小島(2004)では逆に土壌水分と刈取り法による葉面積指数 (LAI) では関係性がみられないとしている。光と水が地表群落上の生態系純生産にどのような影響をもたらすのか検証するために、 T_a 、土壌含水率 (SWC)、飽差 (VPD) の違いが NEP にどのように影響をもたらすのか検討した。また、PPT と併せて SWC の経年変化、及び放牧区と禁牧区の違いについても記す。

気温 T_a の算出には湿度温度プローブ (HMP45A, Vaisala Oy.)、PPT の算出は転倒ます式雨量計 (52202/R.M.Young Inc.)、VPD の算出は近藤 (2000) より以下の式を用いて、 T_a とティテンスの実験式より算出を行なった。

$$VPD = e_{sat}(T_a)(1 - rh) \quad \cdots (5)$$

$$e_{sat}(T_{wet}) = 6.1078 \times 10^{\alpha} \quad \cdots (6)$$

$$\alpha = \frac{aT_{wet}}{b + T_{wet}} \quad \cdots (7)$$

e_{sat} は飽和水蒸気圧、 rh は相対湿度、 $e_{sat}(T_{wet})$ はAWSに設置されている通風筒内の湿球温度 T_{wet} の時の水面に対する飽和蒸気圧である。水面上において $a=7.5, b=237.3$ である。

SWC については常時設置されている TDR 土壌水分計 (CS616/Cambel Scientific Inc.) によって自動観測されているデータを使用し、降水量と SWC の経年変化について比較する。しかし、CS616 は設置高度が放牧区と禁牧区で 50cm 異なる。そのため、小島(2004)及び、RAISE によって 2003 年、2005 年に観測された値を両区において比較し、検討を行なう。小島(2004)において、AWS から 5m 毎、100m までの 20 点の深度 12cm の土壌含水率を TDR 土壌水分計 (CS 620 /Cambel Scientific Inc.) による調査において表層土壌の含水率は 5%~12%と平面状の大きな変化が見られなかったことを報告している。2005 年、2006 年はそれぞれ、坂口 (未発表)と Li (未発表)による土壌含水率の調査もまた小島(2004)と同様の調査手法を用いて表層土壌の含水率について調査を行なっている。2005 年における調査も小島(2004)と同様の手法を用いている。調査は 8 月 2 日に行なわれ、放牧区については 9:50~10:00、禁牧区については 11:17~11:32 に実施された。また当日に降雨は観測されず、前日の降水量は 2003 年 8 月 1 日積算量として 0.4mm が観測されている。2005 年における調査は 8 月 5 日に行なわれ、放牧区については 11:25、禁牧区については 14:25 に実施されものを使用した。また当日に降雨は観測されず、前日の降水量は 2003 年 8 月 4 日積算量として 0.4mm が観測されている。2006 年については両区において 6 月 14 日、7 月 30 日、8 月 2 日、9 月 23 日、9 月 24 日の未明に行なわれている。

2.7. 地表面熱収支

水が蒸発し水蒸気になるとき気化熱が必要となり、そのエネルギーを潜熱(IE)と呼ぶ(近藤 2000)。上述の通り、植物が光合成を行なう際に、気孔を通じて水蒸気と二酸化炭素の交換が行なわれる。佐々木 (2004)では水の安定同位体比から 7 月～8 月の KBU 草原における蒸発散の内、蒸散の割合を平均化した結果、7 月で 52%、8 月で 47%とおおよそ半分を占めると表している。光合成量の増減が間接的に IE の増減に影響をもたらしていると考えられるため、NEP と IE の比較について行なった。また、同時に他熱収支に関するデータ、正味放射量 (R_n)、顕熱 (H)、地中熱流量 (G)についても算出を行ない、NEP との相関性の比較を行なった。以下に算出方法について記述する。算出方法は Kato (2007)より引用している。

R_n は以下の式によって算出される。

$$R_n = K_d - K_u + L_d - L_u \quad \dots(8)$$

K_u は上向き短波放射、 L_d は下向き長波放射、 L_u は上向き長波放射を表している。これらの放射成分については、短波放射計(CM3/Kipp and Zonen B.V.) 赤外放射計(CG3/KippandZonen B.V.)によって自動観測されている。観測は渦相関法によって行なわれ、測定周期は 10Hz データによる 30 分平均値を採用している。Kotani and Sugita (準備中) では、熱放射による大気への影響を考慮する必要があることを示唆している。その補正式について、以下に記す。

$$L_d = \tau_a L_{\text{obs} \downarrow} + L_a \quad \dots(9)$$

$$L_{\text{obs} \uparrow} = \tau_a L_u + \tau_a(1 - \epsilon_s)L_d + L_a \quad \dots(10)$$

$$L_u = \frac{L_{\text{obs} \uparrow} - L_a - \tau_a(1 - \epsilon_s)(\tau_a L_{\text{obs} \downarrow} + L_a)}{\tau_a} \quad \dots(11)$$

$L_{\text{obs} \downarrow}$ はセンサーによって得られた下向き長波放射、 L_a はセンサーと地表面との間の層における放射の放出、 $L_{\text{obs} \uparrow}$ はセンサーによって得られた上向き長波放射、 τ_a は放射計と地表面までの空気の層の透過率、 ϵ_s は地表面の放射率を表す。 τ_a と L_a の値については気温と比湿の統計データによる LOWTRAN7 プログラム (Kneizys et al.1988) から算出した。

$$\tau_a = -(a_1 T_a + a_2) \ln(RH) - a_3 T_a + a_4 \quad \dots(12)$$

$$L_a = -(b_1 T_a + b_2) \ln(RH) - b_3 T_a + b_4 \quad \dots(13)$$

RH は比湿、 a_i と b_i は近似定数 ($a_1 = 1.5 \times 10^{-3}$, $a_2 = 4.2 \times 10^{-2}$, $a_3 = 5.8 \times 10^{-3}$, $a_4 = 8.7 \times 10^{-1}$, $b_1 = 6.2 \times 10^{-1}$, $b_2 = 8.9$, $b_3 = 2.14$, $b_4 = 30.59$)、使用する再計算された L_d (L_{srf}) の値、土壌表層温度は以下のステファン・ボルツマンの式より算出された。

$$Ts^4 = \frac{L_{sky}}{\sigma} \quad \dots(14)$$

σ はステファン・ボルツマン定数 ($5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$) を表している。 H 、 IE については渦相関法を基に以下の式から算出した。

$$H = \rho(\overline{w'T'}) \quad \dots(15)$$

$$IE = l\rho(\overline{w'q'}) \quad \dots(16)$$

それぞれにおける「 $\overline{\quad}$ 」は 30 分平均値、「 $'$ 」は時間平均からの偏差を表す。 c_p は空気の定圧比熱、 ρ は空気の密度、 w は鉛直風速、 T は気温、 l は蒸発による潜熱、 q は比湿変動を表している。本研究では Kato (2007) で使用されたデータを用いて、2003 年～2006 年の IE と炭素動態について比較を行なう。

2.8. バイオマス

RAISE によって測定されている植生データを基に、年積算 GPP とバイオマス(地表部バイオマス: AGB リターフォール: litter)の比較を各年に行なった。以下に、Urano (2005) を参考に、KBU 集落で行なった地表部バイオマスの測定方法について記述する。

地表部バイオマスの測定には刈取り法を用いた。本研究対象地域においてバイオマスの測定を行なったのは、2003 年は 6 月、7 月、8 月、9 月。2004 年は 7 月。2005 年は 8 月。2006 年は 6 月、7 月、8 月、9 月、2007 年は 7 月に 1 回の計 11 回実施されている。禁牧区内・および禁牧区外近傍における無作為に算出された 4 箇所、20m×20m のコドラートを設置(図 9)、それらのコドラートの中に 50cm×50cm のサブコドラートを 3 箇所ずつ、各区で 12 箇所を設置した。サブコドラート内の植生を剪定ばさみによって刈り取り、各植物種ごとに分けられた地表部バイオマスとリターフォールを全て回収し(図 10)、72 時間オーブンで乾燥させ、乾重量を測定した。

表 2 箱ひげ図を基に設定したしきい値

しきい値($\mu \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	非生育期 昼夜		生育期 夜間		生育期 日中	
	最大値	最小値	最大値	最小値	最大値	最小値
放牧区						
2003年	0.28	-0.28	1.9	0	0.57	-6
2004年	0.42	-0.42	2.8	0	1.4	-6
2005年	0.25	-0.25	2.8	0	0.7	-6
2006年	0.35	-0.35	2.7	0	1.2	-5

しきい値($\mu \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	非生育期 昼夜		生育期 夜間		生育期 日中	
	最大値	最小値	最大値	最小値	最大値	最小値
禁牧区						
2004年	0.24	-0.24	2	0	2	-2
2005年	0.3	-0.3	2	0	4	-2
2006年	0.35	-0.35	1.2	0	2	-3

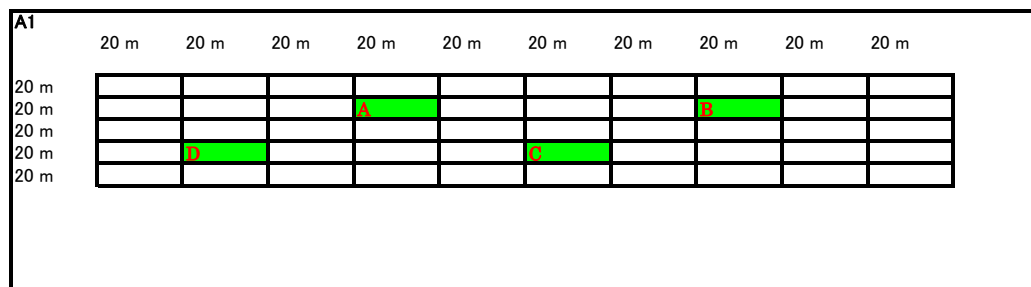


図 9 刈取り法におけるコドラート設置地点

各セルは 20m×20m のコドラート設置地点を示し、アルファベット表記のセル内にサブコドラートを三箇所設置。A1 は放牧区を示す。

図は Li, S.-G., “RAISE”Internet:
<http://raise.suiri.tsukuba.ac.jp/new/member/dir/vegetation/2004biomass.xls>
 Viewd January, 29,2008 より出典



図 10 刈取り法の様子

(上)刈取り前のサブコドラート(下)地上部バイオマスの採取後

(写真は 2006 年 8 月禁牧区にて撮影)

2.9. 放牧家畜が草原に与える影響の評価

放牧圧(GI)の評価には以下の二つの手法から検討を行う。

2.9.1. カメラの自動観測による放牧圧の評価

放牧区では、地表部植生に影響をもたらす放牧の影響を観測するためにデジタルカメラ (CP-800/Epson Inc.) を設置している。30 分毎に自動でシャッターを切るように設定され、2004 年から観測が続けられている。Kato (2007) では、撮影された家畜頭数から算出した二年間の平均化された放牧圧について各季節における変化を表している。カメラによって観測されている画像の中から、ある一定範囲の面積を観測範囲として定義し (Kato 2007 より 41887m^2)、撮影された家畜の頭数に、観測範囲面積と 1 日の撮影回数で除することによって GI としている (図 11)。本研究では Kato (2007) によって観測された 2004 年から 2005 年までに観測されたインターバルカメラの結果を用いて考察を行なう。

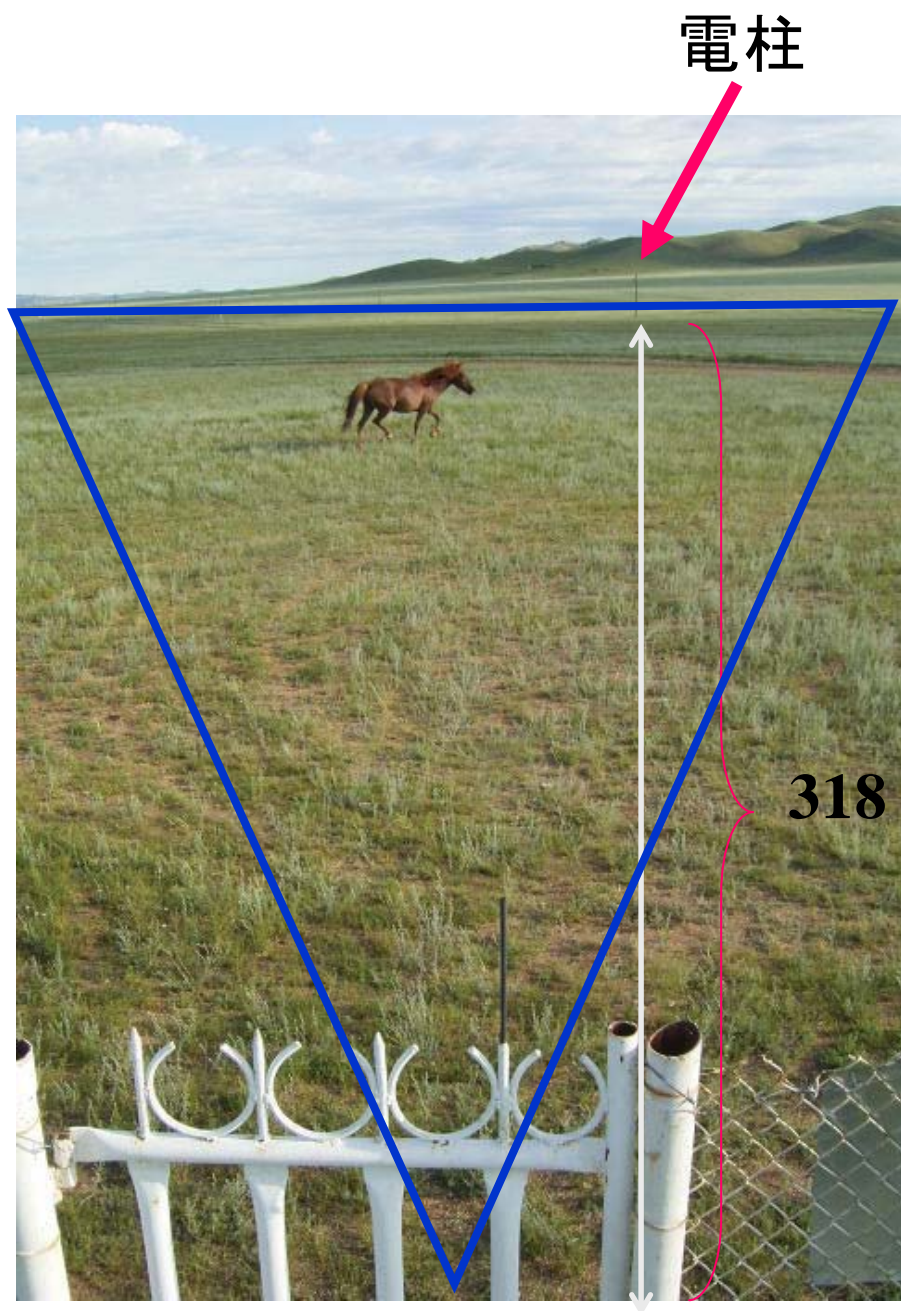


図 11 カメラのファインダーから見た撮影範囲
(奥の電柱までの青い三角形のエリアを観測範囲：41887m²とした)

(図は Kato 2007 より出典)

2.9.2. GPS による家畜の観測による放牧圧の評価

GPS による(GI)の測定調査は夏の生育期と冬の非生育期に行った。使用した GPS について表 2 に記す。GPS はそれぞれ、耐水性の高いカバー(AQUAPAC/ AQUAPAC CO.,Ltd.)に収納し、伸縮性の高い帯に取り付けられるように細工を行い、羊、山羊については胴体に、牛については首に巻きつけて観測を行なった。生育期においては KBU 集落の主要家畜である羊、山羊、牛について行なった。馬については現地住民の移動手段等にも用いられることから観測を見送った。

Summer Camp の家畜頭数は羊が約 100 頭、山羊が約 100 頭、牛が 16 頭放牧されている。Winter Camp の家畜頭数は羊が約 100 頭、山羊が約 100 頭、牛が 16 頭放牧されていた。Winter Camp 2 の家畜頭数は羊が 211 頭、山羊が 211 頭、牛が 18 頭飼育されている。

KBU 集落における放牧は主に朝家畜を放し、家畜は主に牛のグループと羊・山羊のグループに分かれ、維持行動を行なうためにキャンプの周辺を遊歩する。維持行動中、家畜は摂食・休息・排泄を行ない、夕方飼育者によって集められるという一連の動作を繰り返す。生育期の調査は 7 月 28 日～8 月 3 日までの七日間行った。AM8:00 に家畜への機材取り付けから PM8:00 に機材の回収を行うまでの 12 時間。1 分毎の軌跡データを回収した。非生育期の調査は 2 月 26 日～3 月 4 日までの七日間行い、AM8:00 に家畜への機材取り付けから PM6:00 までの機材回収を行うまでの 10 時間。一分ごとの軌跡データを回収した。

観測された移動データは Kato(2007) を改変した以下の式を用いて GI と定義した。

$$GI_j = \frac{a \times HD_{cow}}{A} \times \frac{n_{cow}}{N_{cow}} + \frac{b \times HD_{goat}}{A} \times \frac{n_{goat}}{N_{goat}} + \frac{c \times HD_{sheep}}{A} \times \frac{n_{sheep}}{N_{sheep}}$$

GI_j は j 日における放牧圧、*a*、*b*、*c*は各家畜を羊一頭分に算出するための羊換算頭数(SEU)であり、*a* =5、*b* =0.75、*c* =1 である。HDは群の頭数、*n_{cow}*、*n_{goat}*、*n_{sheep}*はj日におけるあるグリッド 1ha中の各種ごとの全GPS点、*N_{cow}*、*N_{goat}*、*N_{sheep}*は j日における全GPS点、Aはグリッド面積(1ha)を示しており、家畜種ごとのGPSにより求められた値を羊一頭分に算出し、グリッド面積と全GPS点を除することによって放牧圧としている。

表 3 家畜の観測使用した GPS

機種	GARMIN CO., Ltd. eTrex	EMPEX Inc. 38EX	Sony Inc. handy GPS
個数	6	2	5
寸法 (mm)	112×52×29	146×51×34	44×70×14
重量	150 g (電池含 む)	269 g (電池含 む)	44 g (電池含ま ず)
位置精度	± 1.5 m	± 15m	± 10m

(非生育期における観測には e Trex 6 個、38EX 2 個を使用した。)

3. 結果と考察

本研究では時系列の表示に関して一部において DOY(Day Of Year)による表記を使用している。各月と DOY の対応については表 4 に表す。

表 4 DOY、月区分対応表

月	DOY
4	91～120
5	121～151
6	152～180
7	181～211
8	212～242
9	243～272
10	272～302
11	305～334
12	335～365
1	1～31
2	32～61
3	61～90

3.1. 炭素動態の年積算値の比較

算出された炭素動態について 2003 年放牧区の月平均値の推移を図 12 に示す。また、既存研究との比較として Li et al. (2005)における値を改変し、月ごとの平均値に変換させたものを並列させた。また 2003 年放牧区における算出結果は、Li et al. (2005)による 2003 年放牧区において算出した結果と傾向としては似ているものの、生育期・非生育期共に低い算出結果となった。2003 年放牧区における年積算算出値は Li et al. (2005)に対して NEP は 81%、ER は 87%、GPP は 86%の割合を持つことがわかった。放牧区、禁牧区、Li et al. (2005)の各項目の年積算値を表 5 に示す。

また、放牧区、禁牧区における経年の炭素動態の日積算値の推移を示す。放牧区の NEP について図 13 に、禁牧区の NEP については図 14 に、放牧区の ER については図 15 に、禁牧区の ER については図 16 に、放牧区の GPP については図 17 に、禁牧区の GPP については図 18 に示す。2003 年の禁牧区の 2003 年～2004 年 3 月までのデータは測器による不備があり、現在は算出を見送っている。2004 年以降の両区における測器の違いによる差異はなく、表 1 に記された観測機の一覧は放牧区では 2003 年～2006 年の測器について、禁牧区については 2004 年～2006 年における測器を記している。

放牧区の年積算値の推移から、NEP は 2003 年の $33 \text{ g C m}^{-2}\text{y}^{-1}$ から、2003 年～2004 年にかけて $29 \text{ g C m}^{-2}\text{y}^{-1}$ 減少し、2004 年～2005 年では $19 \text{ g C m}^{-2}\text{y}^{-1}$ 増大し、2005 年～2006 年では $23 \text{ g C m}^{-2}\text{y}^{-1}$ 減少した結果となった。鞠子ほか(2007)において NEP は炭素の収支を示しており、本研究地域は 2003 年、2005 年では炭素の吸収源として働き、2004 年、2006 年では炭素の吸収と放出が拮抗した状態であるという結果になった。

ER は 2003 年においては $120 \text{ g C m}^{-2}\text{y}^{-1}$ となり、2003 年～2004 年にかけて $19 \text{ g C m}^{-2}\text{y}^{-1}$ の増大、2004 年～2005 年にかけて $18 \text{ g C m}^{-2}\text{y}^{-1}$ の減少、2005 年～2006 年にかけて $9 \text{ g C m}^{-2}\text{y}^{-1}$ の増大という結果となった。

GPP は 2003 年において $153 \text{ g C m}^{-2}\text{y}^{-1}$ という算出となり、2003 年～2004 年にかけて $10 \text{ g C m}^{-2}\text{y}^{-1}$ 減少し、2004 年～2005 年にかけて $1 \text{ g C m}^{-2}\text{y}^{-1}$ 増大し、2005 年～2006 年にかけて $14 \text{ g C m}^{-2}\text{y}^{-1}$ 減少した。

放牧区の年積算値の推移の傾向としては、NEP が減少する年は ER が増大し、GPP も減少する。逆に NEP が増大する年は ER が減少し、GPP が増大するという推移を示した。

禁牧区では 2004 年に $18 \text{ g C m}^{-2}\text{y}^{-1}$ という値を示し、2004 年～2005 年にかけて $34 \text{ g C m}^{-2}\text{y}^{-1}$ 減少し、2005 年～2006 年にかけて $9 \text{ g C m}^{-2}\text{y}^{-1}$ 増大し、放牧区の NEP とは逆の推移を示した。禁牧区では 2004 年に炭素の吸収源として働き、2005 年、2006 年では炭素の放出源として働いていることが示唆される結果となった。

ER は 2004 年の $91 \text{ g C m}^{-2}\text{y}^{-1}$ から 2005 年にかけて減少し、 $21 \text{ g C m}^{-2}\text{y}^{-1}$ の減少、2005 年～2006 年にかけて $18 \text{ g C m}^{-2}\text{y}^{-1}$ の減少という結果となった。GPP は 2004 年の $109 \text{ g C m}^{-2}\text{y}^{-1}$ から 2004 年にかけて $56 \text{ g C m}^{-2}\text{y}^{-1}$ の減少、2005 年～2006 年にかけて $8 \text{ g C m}^{-2}\text{y}^{-1}$ の減少という結果となった。

以上の結果から両区の推移においていくつかの異なる点が挙げられる。

- ・ 禁牧区は NEP の減少・増大に関わらず、2005 年から ER、GPP は減少する。
- ・ 禁牧区 2004 年～2005 年にかけて GPP は大きく減少している。

- ・放牧区と禁牧区の NEP の年変化は、増大と減少の傾向が逆に推移している。
- ・放牧区と禁牧区では禁牧区の NEP、ER、GPP が放牧区を上回ることはなかった。

図 19 において両区における算出結果の月平均値の変化を時系列上にまとめたものを示す。生育期間(5 月～10 月)における積算値について増減の傾向は変わらないが、放牧区においては生育期間において吸収されたCO₂が非生育期間にかけて減少し、経年草原の炭素収支を保たせている事が推測できる。逆に禁牧区では、2004 年までは放牧区と同等のNEPであるが、2005 年以降大きく減少へと傾いている様子が特徴的である。本研究対象地域は半乾燥草原地域であることからこのNEPの増減には降水量が大きく寄与していると考えられるが、降水量の年積算値において 2003 年、2004 年、2006 年はそれぞれ 245mm、248mm、247mmと大きな差は見られず平均降水量を上回っている。一方で 2005 年の降水量は 166mmと 2003 年～2006 年における観測では大きく減少した年である。この 2005 年において放牧区ではNEPが吸収へと働き、逆に禁牧区のNEPは大きな減少を見せるという異なる結果を見せており、禁牧による影響が表在化してきたことを伺わせている。

GPPはNEPとERの加算により算出しているため、放牧区と禁牧区の両区の違いはNEPとERにより左右される。NEPとER共に禁牧区のほうが少ない値であったことは植生の生産活動そのものが低下している可能性が示唆される。

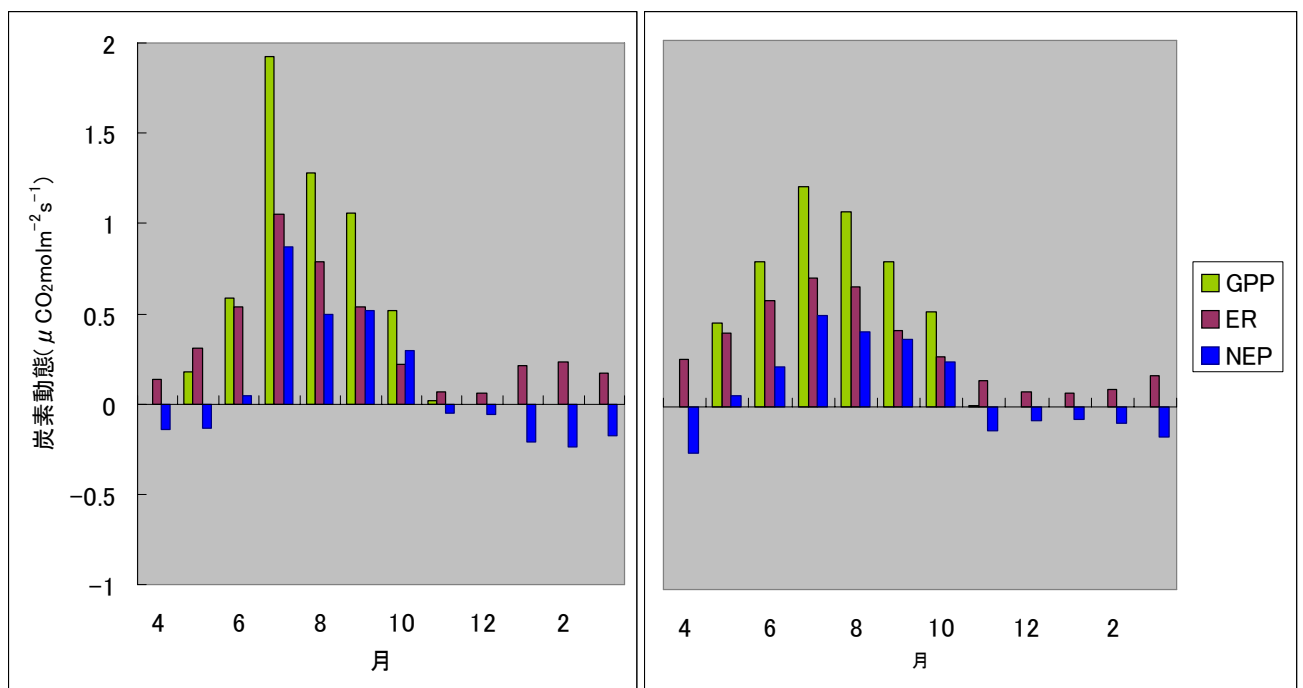


図 12 2003 年放牧区における炭素動態と Li et al. (2005)の算出との比較

横軸は 2003 年 4 月から 2004 年 3 月を範囲としている。

(右は本研究手法における算出、左は Li et al.2005 を改変および出典)

表 5 両区の炭素動態の年積算値、生育期積算値、及び既存研究の年積算値

年積算値			
放牧区	GPP	ER	NEP
2003年	153	120	33
2004年	143	139	4
2005年	144	121	23
2006年	130	130	0
平均値	143	128	15
禁牧区	GPP	ER	NEP
2004年	109	91	18
2005年	53	70	-16
2006年	45	52	-7
Li et al.(2005)による積算値			
放牧区	GPP	ER	NEP
2003年	179	138	41

生育期積算値			
放牧区	GPP	ER	NEP
2003年	153	96	57
2004年	143	107	35
2005年	144	96	48
2006年	130	106	24
平均値	142	101	41
禁牧区	GPP	ER	NEP
2004年	109	73	36
2005年	53	53	0
2006年	45	34	10

(単位はg C m⁻²y⁻¹)

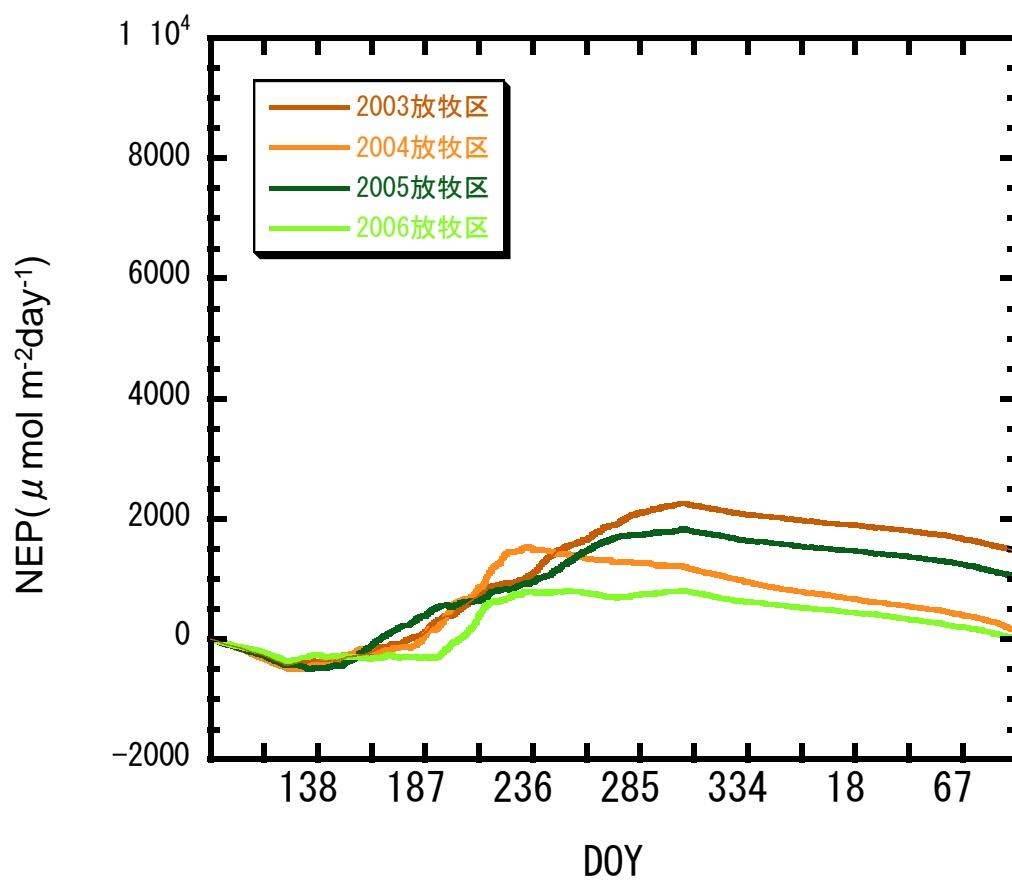


図 13 放牧区における NEP の日積算の推移

x 軸は観測日を示し、積算値の算出は 3 月 30 日(x 軸 DOY 90)より開始し、翌年の 3 月 29 日(x 軸 DOY 89)まで行なっている。

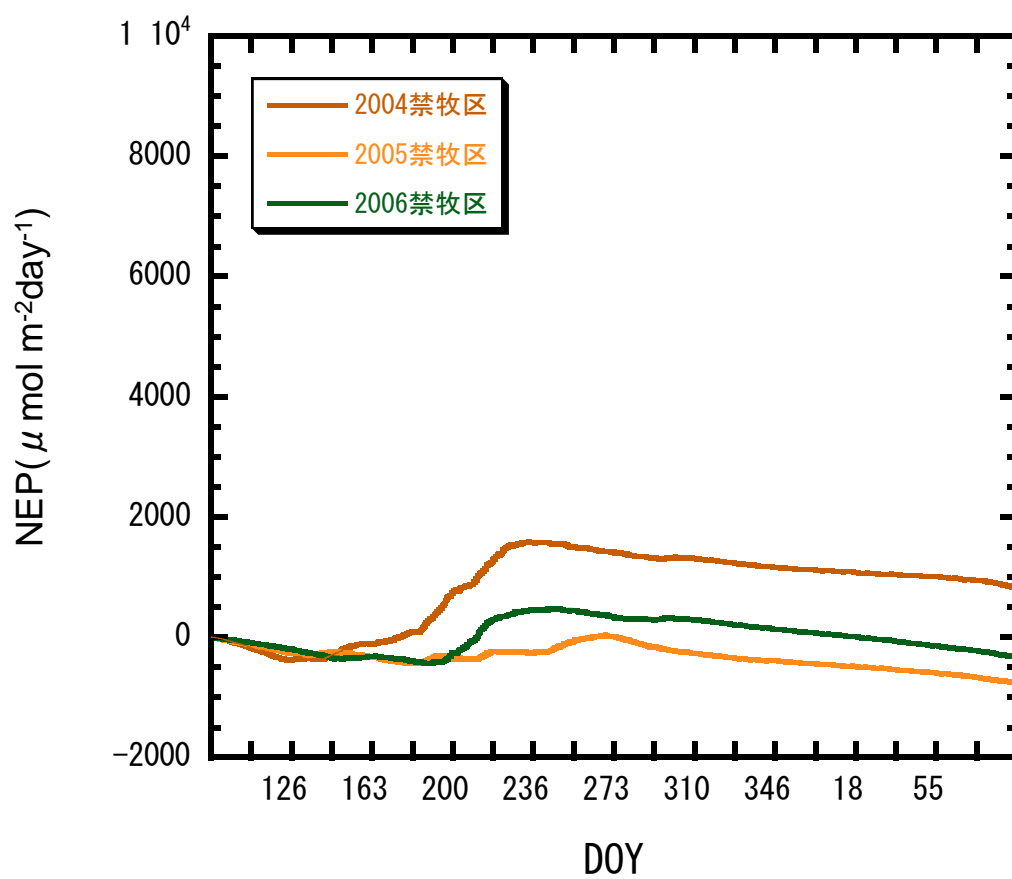


図 14 禁牧区における NEP の日積算の推移

x 軸は観測日を示し、積算値の算出は 3 月 30 日(x 軸 DOY 90)より開始し、翌年の 3 月 29 日(x 軸 DOY 89)まで行なっている。

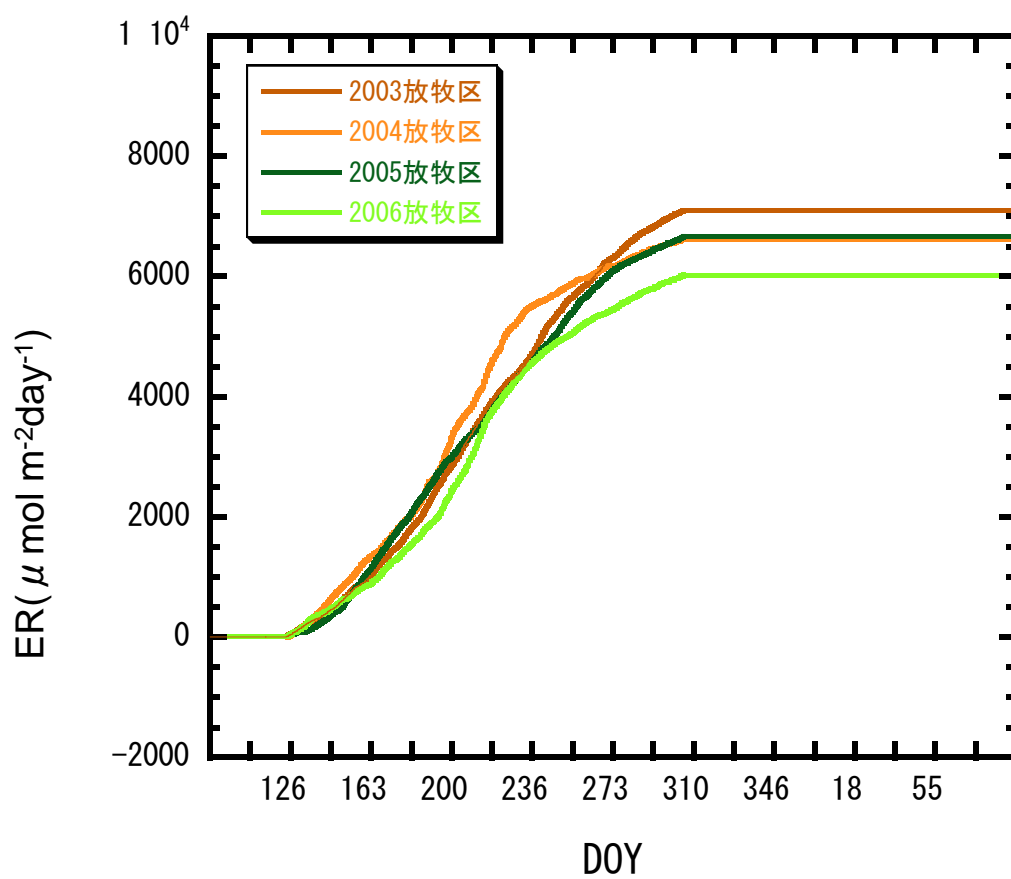


図 15 放牧区における ER の日積算の推移

x 軸は観測日を示し、積算値の算出は 3 月 30 日(x 軸 DOY 90)より開始し、翌年の 3 月 29 日(x 軸 DOY 89)まで行なっている。

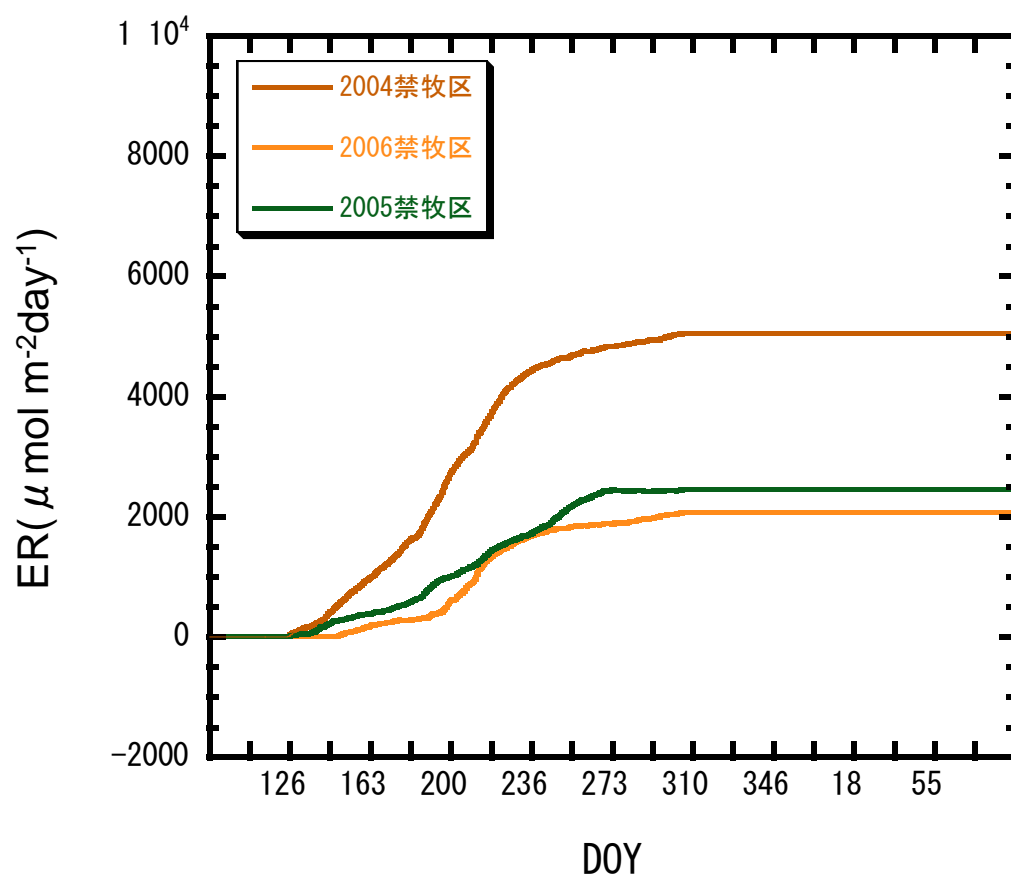


図 16 禁牧区における ER の日積算の推移

x 軸は観測日を示し、積算値の算出は 3 月 30 日(x 軸 DOY 90)より開始し、翌年の 3 月 29 日(x 軸 DOY 89)まで行なっている。

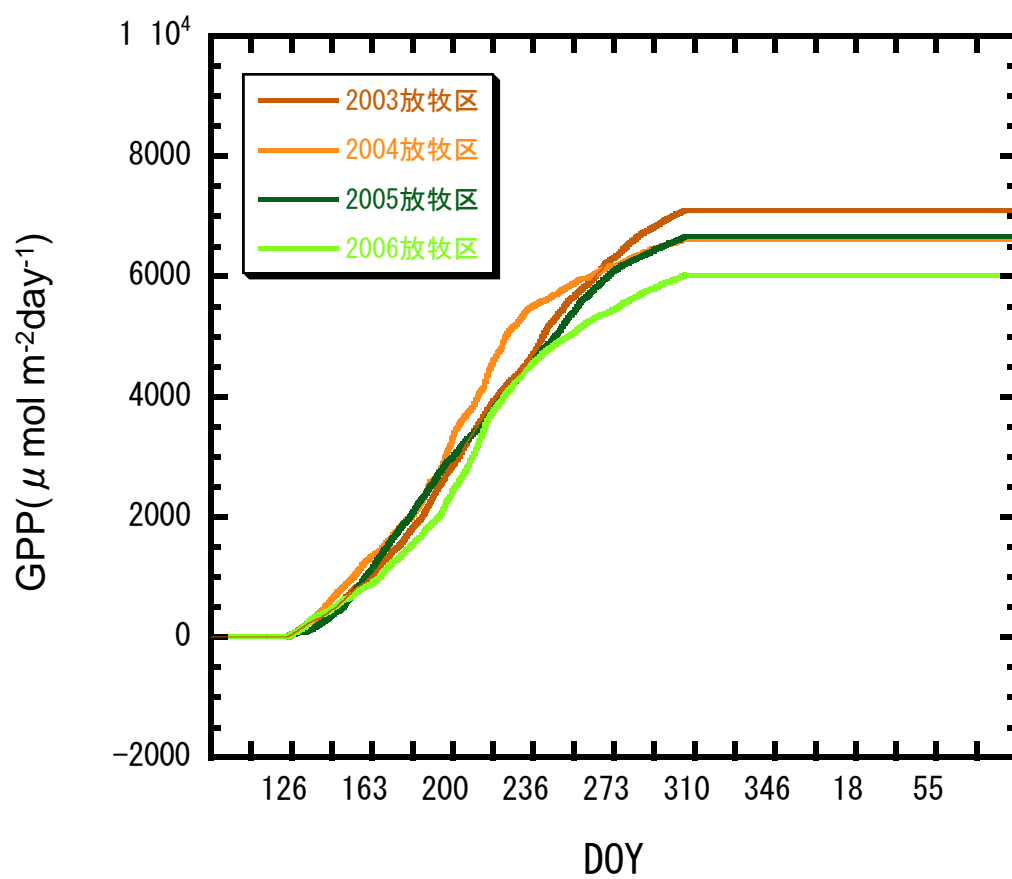


図 17 放牧区における GPP の日積算の推移

x 軸は観測日を示し、積算値の算出は 3 月 30 日(x 軸 DOY 90)より開始し、翌年の 3 月 29 日(x 軸 DOY 89)まで行なっている。

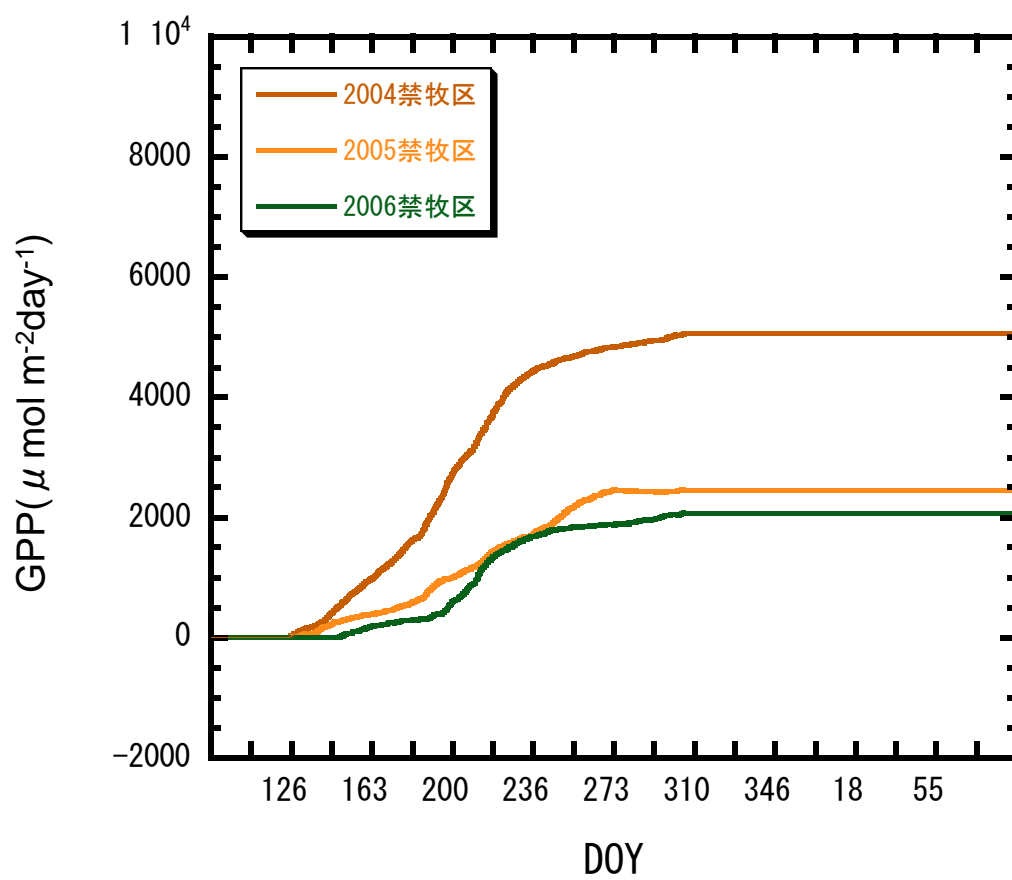


図 18 禁牧区における GPP の日積算の推移

x 軸は観測日を示し、積算値の算出は 3 月 30 日(x 軸 DOY 90)より開始し、翌年の 3 月 29 日(x 軸 DOY 89)まで行なっている。

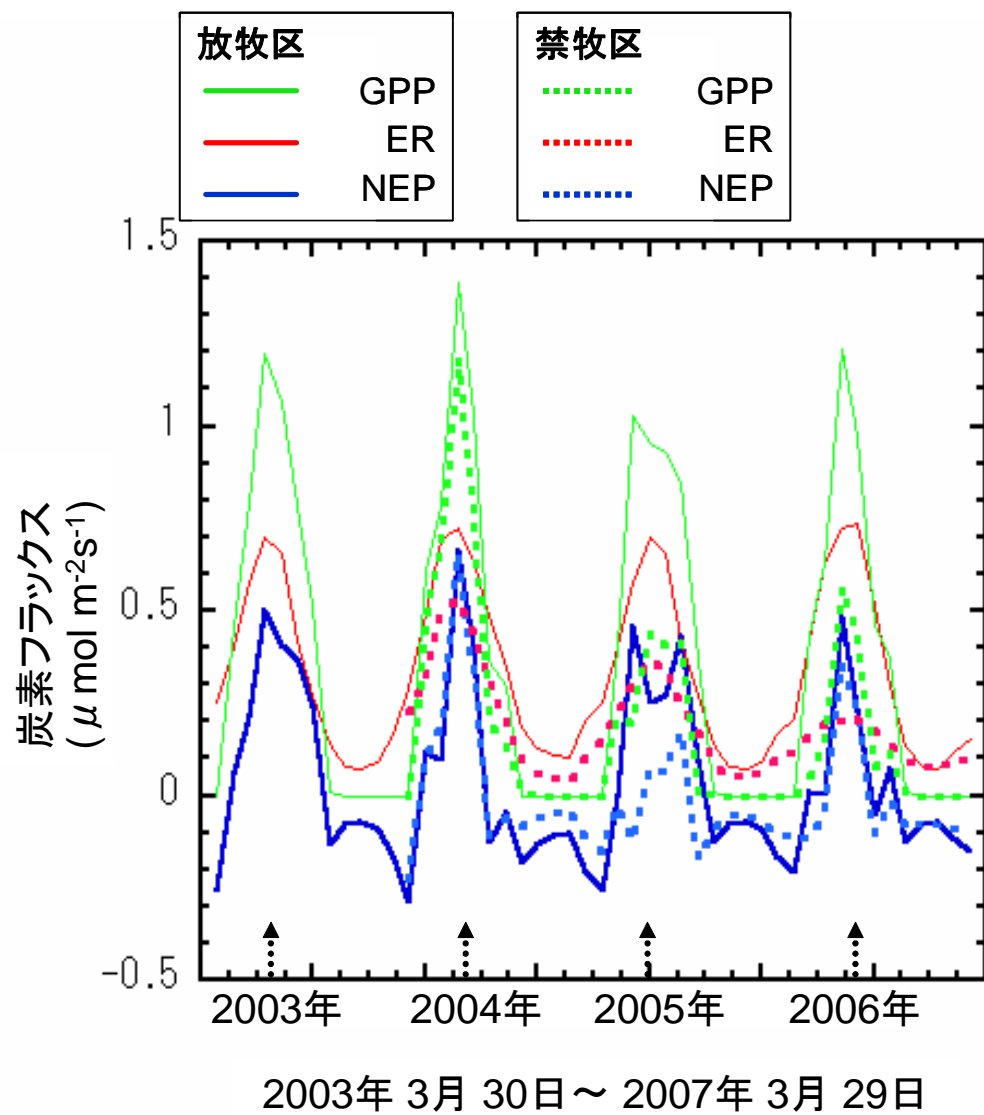


図 19 両区における炭素フラックスの月平均値の比較

点線の矢印は各年の 7 月を示している。

3.2. 本研究対象地域における放牧圧

次に、本研究対象地域 KBU 草原においてどの程度の放牧がかかっているのか、禁牧による影響を考察する前に模式的に示す。

はじめに Kato (2007)より引用したモンゴル国首都ウランバートル(Ulaanbaatar city)及び、ヘルレン(Kherlen)川流域における各集落にて政府統計調査より確認されている家畜頭数を集落面積によって割り出した各集落の放牧圧の経年変化を図 20 に示す。図 20 において 1992 年～2002 年にかけて KBU 集落の家畜所有頭数については KBU への家畜の移動頭数と前年における頭数から推定された値を用いている。

インターバルカメラによる放牧圧の推定について、Kato (2007)によって観測された結果を図 21 に示す。インターバルカメラの有効範囲における放牧圧は成長期 7 月において 2004 年は 0.25 頭ha^{-1} が最大で、非成長期にかけて減少する。2005 年においてもその傾向は同様であり、7 月において最大 0.48 頭ha^{-1} となる。非成長期において放牧圧が減少しているのは遊牧における放牧地の移動によるものと考えられる。生育期と非生育期における放牧地の違いについて図 22 に示す。聞き取り調査による生育期の放牧はヘルレン川流域近くを中心に展開していることが判明しており、Summer Camp の位置は赤色のフラグの位置であったり、その範囲に該当する。非生育期における放牧地は青色のフラグで記された山岳地帯で、GPS による位置情報を現地で回収した。Chen et al. (2007)によるモデルから算出された、KBU 集落における持続可能な放牧圧は 0.8 SEU ha^{-1} とされている。放牧区におけるインターバルカメラの結果は持続可能な放牧圧の領域内であることが示されている。

GPS による家畜の放牧圧の評価については図 23 に広域の図面を、図 24 に Summer Camp における観測結果の詳細な図を、図 25 に Winter Camp、Winter Camp2 における観測結果の詳細な図をそれぞれ示している。図 23 から生育期における家畜の移動は Camp の周辺で円を描くように分布しているのに対して、非生育期における家畜の移動は直線的かつ生育期よりも長い距離を移動していることが判明した。また図 24 より、生育期において Camp 周辺から 500m ほどの距離に放牧圧の高い ($0.8 \text{ SEU ha}^{-1}\text{day}^{-1}$ 以上)箇所が点在していることがわかる。これは Camp 周辺が既に裸地化していたため、Camp よりやや離れた地域において放牧圧が高くなっていることが考えられる。図 25 においては非生育期においては Winter Camp2 において Camp 周辺の他に Camp 南西方向の平地部に放牧圧の高い地点 ($0.8 \text{ SEU ha}^{-1}\text{day}^{-1}$ 以上)が存在していることが確認された。斜面の移動は家畜の体力を奪うことから、体力の消耗の少ない平野部をより長く移動することによって少ない植生を僅かでも多く摂取しようとする本能的なものと考えられる。これは Winter Camp にも同様の傾向が見られている。しかし、Winter Camp においては Camp 周辺以外に放牧圧が高い地点 ($0.8 \text{ SEU ha}^{-1}\text{day}^{-1}$ 以上)が北 1km の地点に確認された。この山岳部では主に斜面、山岳頂上において植生が僅かに点在していることが見られたことから、僅かな植生に放牧圧が集中していることを示唆しているものと考えられるが、全体的な傾斜地を嫌う傾向とは異なる結果といえる。

GPS による観測から、局所的には Chen et al. (2007)による持続可能ではない状態を示す $0.8 \text{ SEU ha}^{-1}\text{day}^{-1}$ 以上の放牧圧が観測される地点が見られることが判明した。しかし、遊牧による放牧地の移動というシステムがそれらを緩和させることへと繋がっていることが考えられる。しかし、小長谷 (2002)によれば、近年家畜所有の自由化に伴う、山羊の所有

頭数の増大が懸念されている。山羊は羊、馬、牛等の本地域における主要な家畜と異なり、放牧圧の低い家畜主である。しかし、新芽や植生の根まで摂取することが知られており、植生の再生の遅れが懸念される。今後急速な家畜頭数の増大が発生した場合、その炭素動態のバランスがどのように推移していくのかは憶測の域を出ない。しかし、インターバルカメラによる観測によって本研究対象地域である放牧区の生育期においては中程度の放牧圧が草原にかかっていることが考えられる。

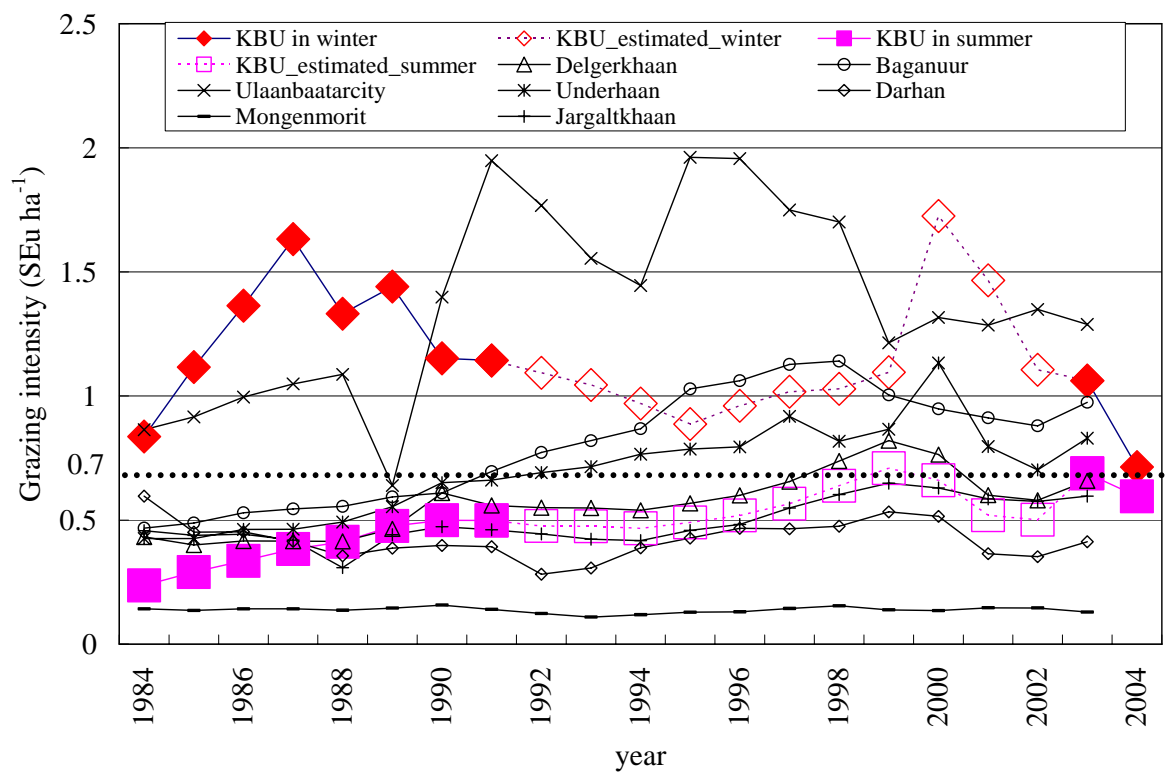


図 20 政府統計より推定された首都、及び Kherlen 川流域周辺における放牧圧

(図は Kato 2007 より出典)

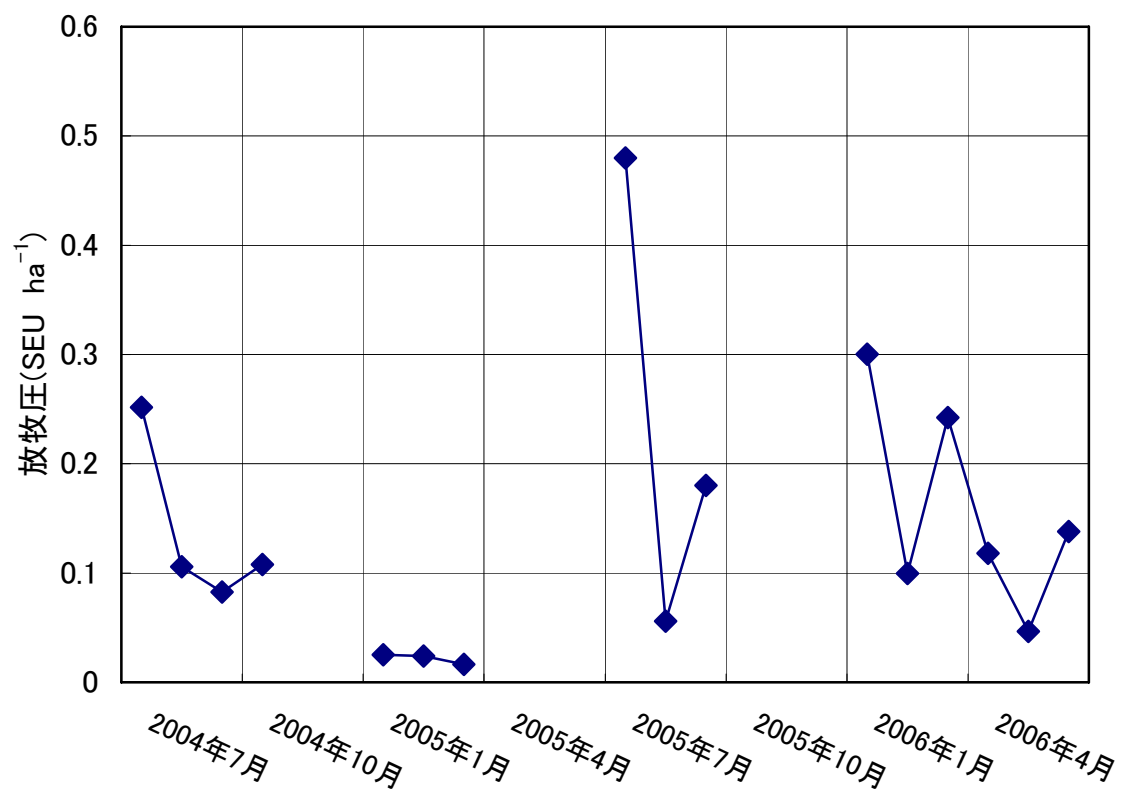


図 21 インターバルカメラによる放牧圧の推定結果

(図は Kato 2007 より出典、及び改変)

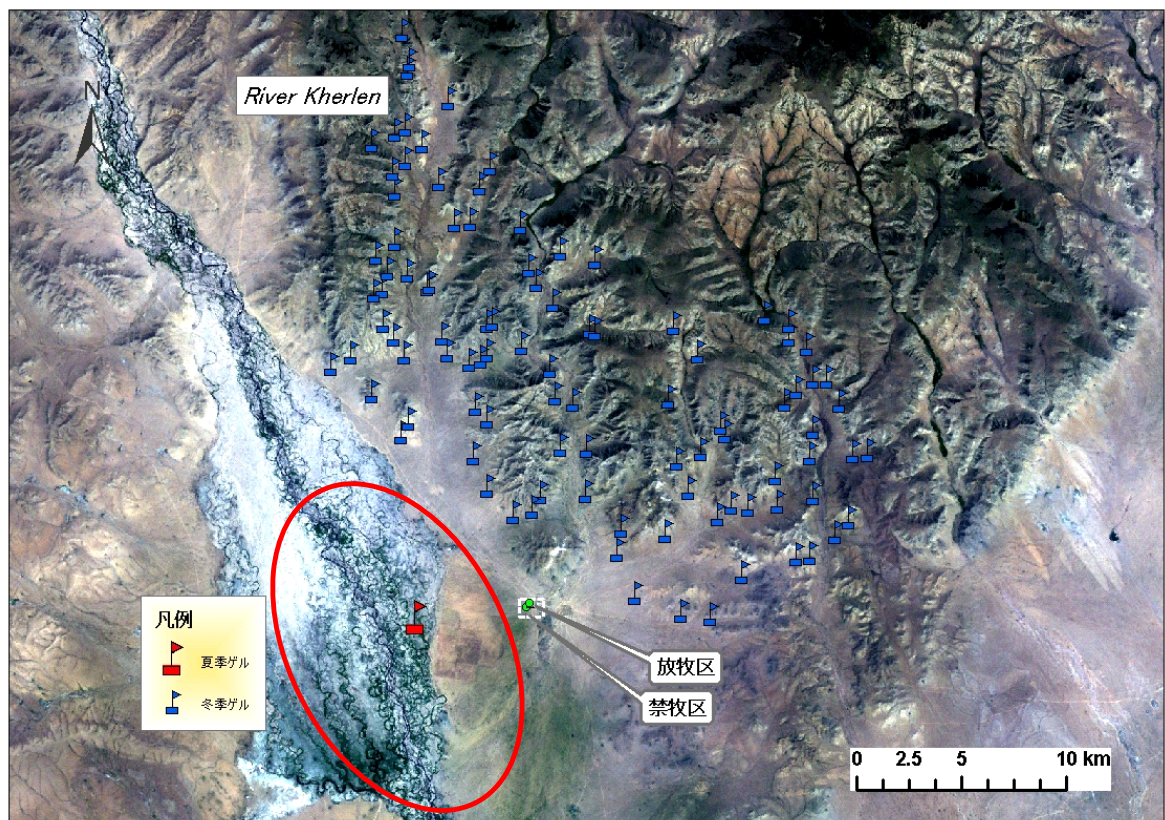


図 22 生育期と非生育期における放牧地の違い

図中における赤い枠は聞き取り調査（2006 年 7 月実施）において夏季ゲル（camp）が主に設営されているとされた地域を示している。赤いフラグの位置は GPS により家畜の移動調査を行なった地点、青いフラグは非生育期において設営されている KBU 集落の冬季ゲル（camp）の位置を示している。

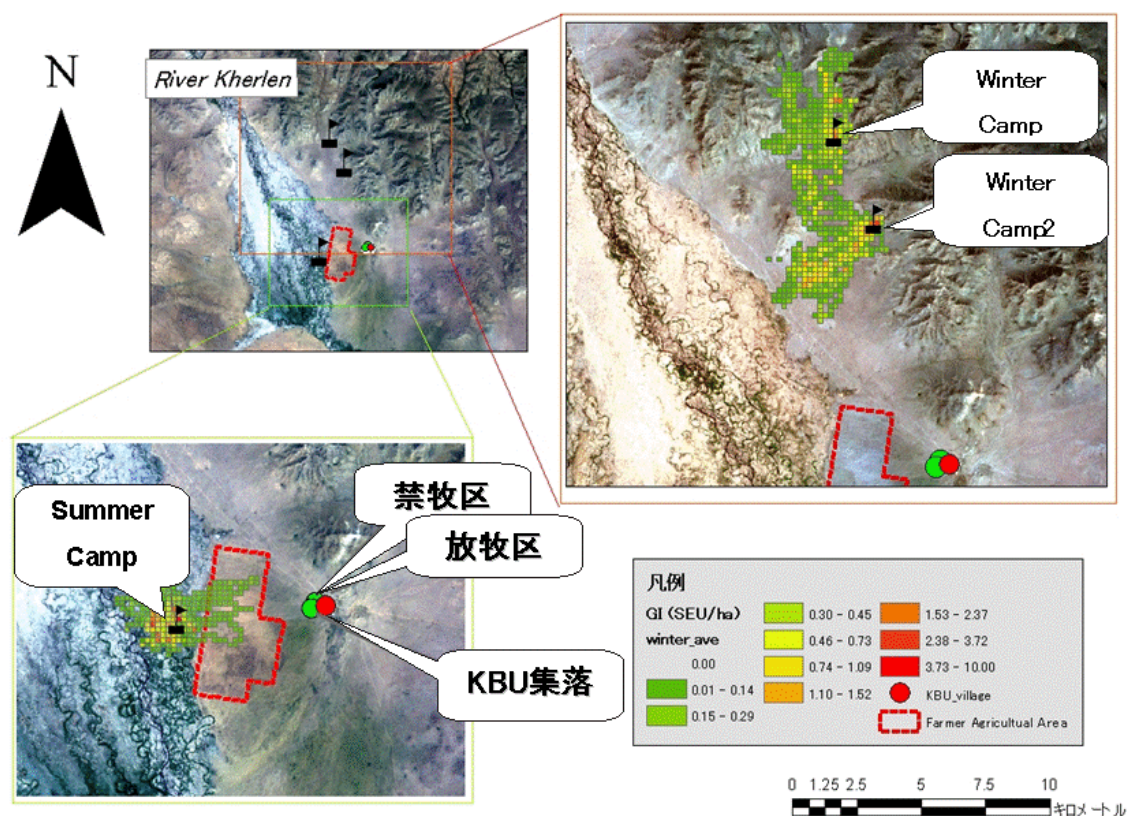


図 23 生育期、非生育期における GPS による放牧圧の観測結果

凡例内における GI は放牧圧の高さを示す (Grazing Intensity)。SEU は家畜を羊一頭あたりの放牧圧に換算するための単位 (Sheep Equivarent Unit) を示す。Farmer Agricultural Area は耕作放棄地の範囲を示す。

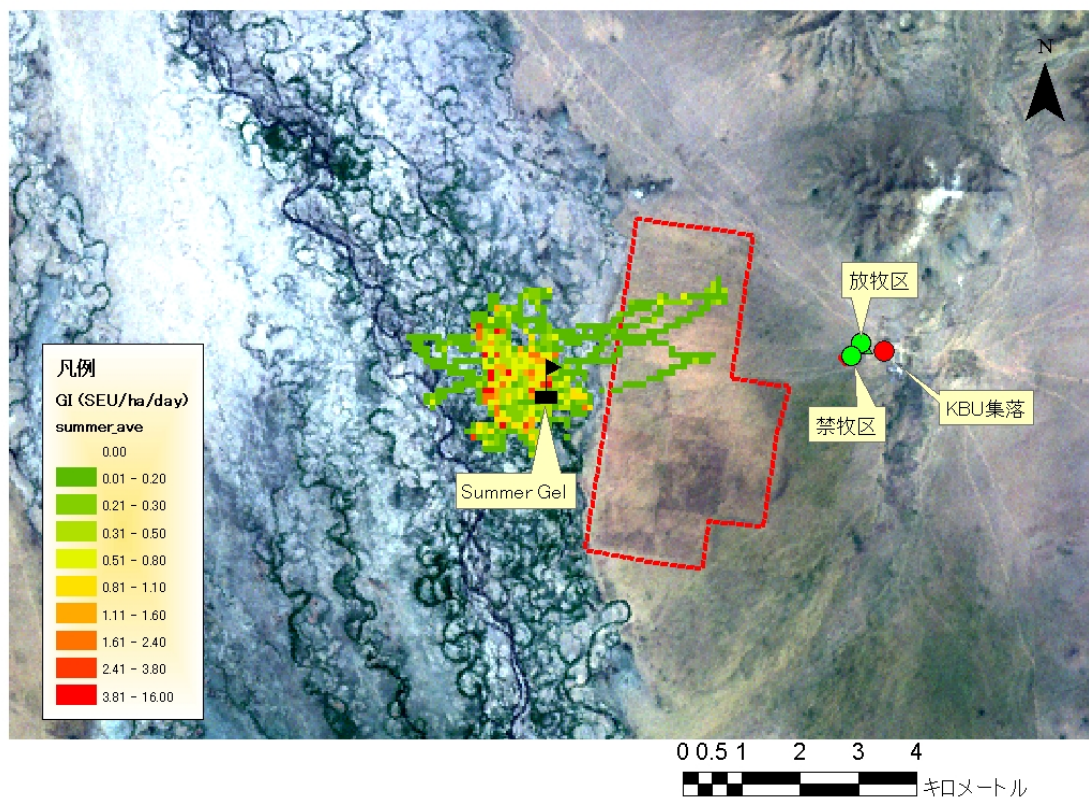


図 24 生育期において観測された GPS による放牧圧

凡例内における GI は放牧圧の高さを示す (Grazing Intensity)。SEU は家畜を羊一頭あたりの放牧圧に換算するための単位 (Sheep Equivarent Unit) を示す。Farmer Agricultural Area は耕作放棄地の範囲を示す。

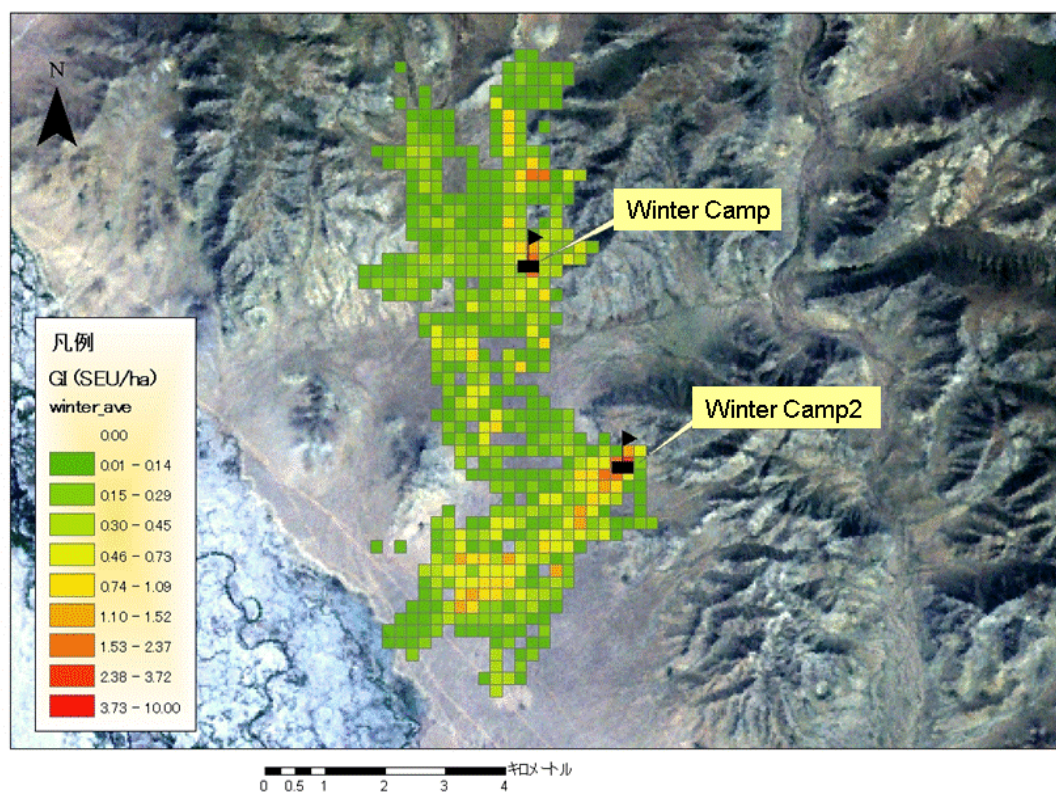


図 25 非生育期において観測された GPS による放牧圧

凡例内における GI は放牧圧の高さを示す (Grazing Intensity)。SEU は家畜を羊一頭あたりの放牧圧に換算するための単位 (Sheep Equivarent Unit) を示す。

3.3. 地表部バイオマス、リターの経年変化

放牧区と禁牧区のバイオマス量には景観上からも明確な違いが見られ、それは図 7、図 8 においても顕著である。刈取り法によって測定された両区における 2003 年～2006 年のバイオマス量と測定日について表 6 に記す。また表 6 を基にした経年のバイオマス量の推移を図 26 に示した。2003 年以外においては AGB の増大に対して litter は減少、AGB の減少に対して litter は増大といった傾向が見られた。AGB は全ての測定日において禁牧区の値が放牧区と同等か、もしくはそれ以上の値を示す結果となった。7 月の AGB だけを見ても 15%～60%ほど禁牧区の方が高い値を示している。また litter においても同様に、litter における両区の差は経年開いていく傾向を見せた。

C3 植物と C4 植物に分けて測定されたものについて図 27 に示す。図 27 は 2005 年以外の年でバイオマスのピークを示す可能性の高い 7 月の測定値を使用している。下の図は AGB に対する C4 植物の割合を占有率として表した図である。2004 年以降、禁牧区において C4 植物が経年大きく減少を続け、2007 年ではほとんど C4 植物が見られないという結果が得られた。測定された AGB と GPP、NEP を比較した結果、それらは明瞭な相関性を示すことはなかった。これに対しては二つの考え方が可能である。

近藤(2000)において冷温帯落葉広葉樹林における森林・大気間における CO₂交換量の年間積算値は 0.66 kg m⁻²y⁻¹、森林・土壌間における CO₂交換量の年間積算値は 2.28 kg m⁻²y⁻¹ であるとしており、純一次生産量 (NPP) には土壌からの放出される CO₂の放出が大きなファクターとして働いていることを示している。NEP=NPP-Rs(土壌中の有機物分解速度)であり(三枝 2003)、本研究ではLi et al. (2005)より地表から 3m の位置における CO₂フラックスによって定義している。それに対して、ERは本研究では浦野(未発表)よりある条件における CO₂フラックスとそれに対する気温との回帰より求めた値を使用している。これに対してLi et al. (2005)におけるERにはLloyd & Taylor (1994)による土壌呼吸と気温との回帰から求めた値を使用している。そのために、算出方法からなる食い違いが生じた可能性が一つとして考えられる。しかし、土壌呼吸の測定は 2003 年と 2006 年にしか行なっていないため、経年の変化を詳細に読み取るために本研究ではこのような手法を講じた。

もう一つは増加を続ける litter による影響が考えられる。放牧区では litter が経年増減を繰り返す傾向にあるが、禁牧区における litter は 2005 年では前年比の 3 倍近い増加を見せるなど、放牧区に対して大きな増加を見せている。放牧区における litter は、地表付近の風を遮る遮蔽物などがないために、その大半が吹き散らされる。しかし、放牧区では立ち枯れた AGB が遮蔽物となり、litter の吹き散らしを防いでいる。降雨が多く、土壌の有機物が活発な地域であれば、地表部に残った litter は土壌中の有機物に起因する化学的風化作用によって分解される。しかし、本研究対象地域における土壌中では化学的風化作用は非常に低いものとされており、光合成によって生産された炭素量のうち litter となった一部のバイオマスが翌年まで持ち越されている可能性が考えられる。また放牧区における litter は家畜による被食を受けるのに対して、禁牧区ではそれがほぼ発生していない。その点を考慮した場合、禁牧区における litter の前年からの増加量はその前年における全 AGB を示している可能性が考えられる。それは同時に、算出された GPP から翌年までの litter の増加分を差し引いた場合、それ以外の GPP は地下への炭素貯留分、地下部バイオ

マス(BGB:Below Ground Biomass)を推定できる可能性がある。そのため BGB が AGB に対してどのような関係性を持つのか検討を試みた。

表 7 に 7 月から翌年 7 月までに増加した litter を差し引いた年積算 GPP を示す。またそれらがその年の AGB に対してどのような挙動を示すのか禁牧区において比較を行なった。その図を図 28 に示す。その結果、禁牧区では 2004 年～2006 年において AGB に対して増加する傾向が見られた。このことは AGB が $15 \text{ gCO}_2\text{m}^{-2}\text{y}^{-1}$ までは、地下部への炭素貯留量は増加しにくい、 $20 \text{ gCO}_2\text{m}^{-2}\text{y}^{-1}$ 以上の AGB から地下部への炭素著流量が増加することを示唆している。

表 7 には 2003 年、2006 年、Liu et al. (2005) によって測定された BGB の測定値も同時に掲載している。その測定方法は Chen et al. (2006) より、刈取り法による AGB の刈取りが終了した後、サブコドラート内 5 箇所ハンドオーガーで 10cm 深度ごとに土壌サンプルを採取する。土壌サンプル中の植生の乾重量を示したものが表 7 に示されている。この BGB の採取は 8 月の測定日が欠損しているが、およそヶ月周期で行なわれている。この BGB の増加量について見ると、2003 年から 2006 年にかけて BGB の増大は特に 2006 年の枯死した BGB(表中の Dead BGB)の増大が目立っている他、2006 年の禁牧区では根(表中では LIVE BGB)も増大している様子がわかる。これらは禁牧の影響が地中部への炭素の流入を増加させていることを示唆していると思われるが、20003 年、2006 年だけのデータからは推測が難しいのが現状である。

表 6 刈取り法によって測定されたバイオマス量

年	月日	放牧区		禁牧区	
		AGB(g m ⁻²)	litter(g m ⁻²)	AGB(g m ⁻²)	litter(g m ⁻²)
2003	4月21日	17	41	16	71
	6月15日	66	34	88	79
	7月18日	85	63	98	101
	9月30日	31	52	48	80
	10月21日	0			
2004	7月15日	69	6	113	50
2005	7月31日	45	82	67	147
2006	5月15日	0	29	0	160
	6月14日	2	5	6	141
	7月30日	55	3	80	126
	9月24日	0	45	0	200
2007	7月6日	16	15	82	137

値は Li,S.-G.,”RAISE”Internet:

“<http://raise.suiri.tsukuba.ac.jp/new/member/dir/vegetation/2006biomass.xls>”

Viewd January,29,2008.及び、Kato (2007)より出典

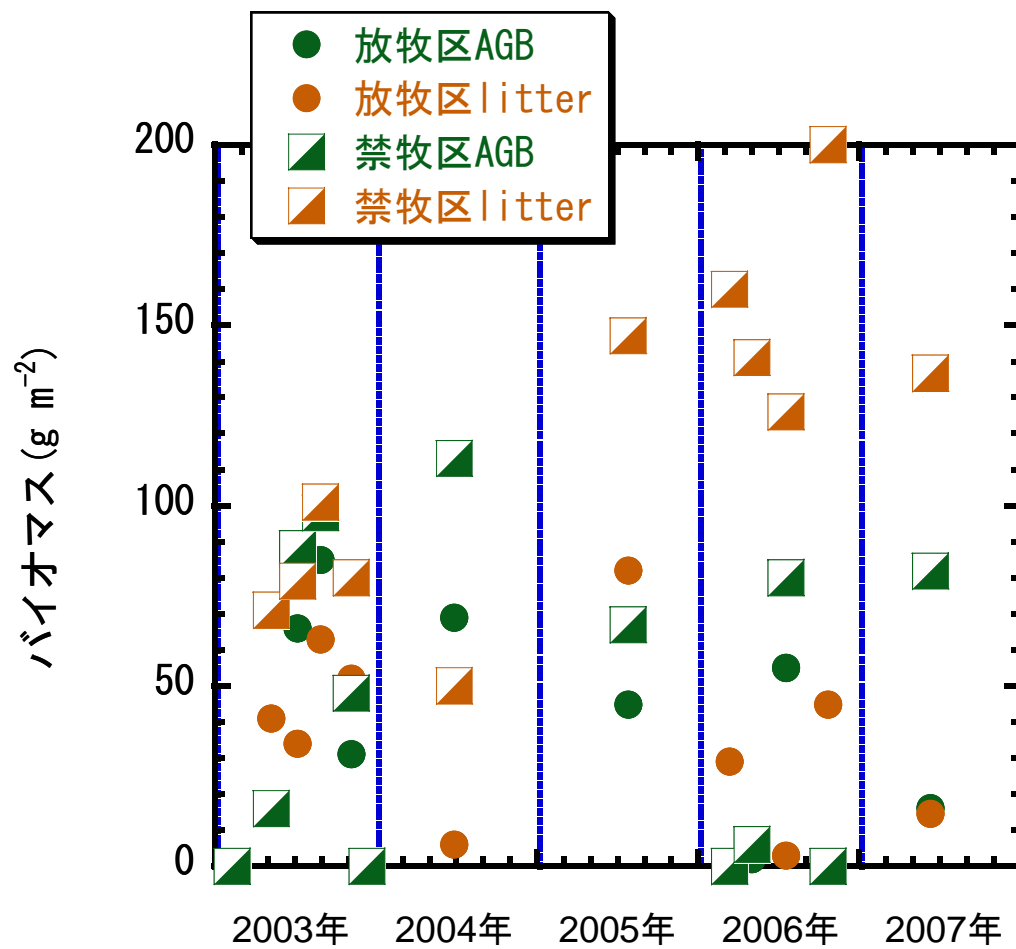


図 26 両区における 2003 年～2007 年までの AGB と litter の経年変化

値は Li, S.-G., "RAISE" Internet:

"<http://raise.suiri.tsukuba.ac.jp/new/member/dir/vegetation/2006biomass.xls>"

Viewd January, 29, 2008. 及び、Kato (2007) より出典

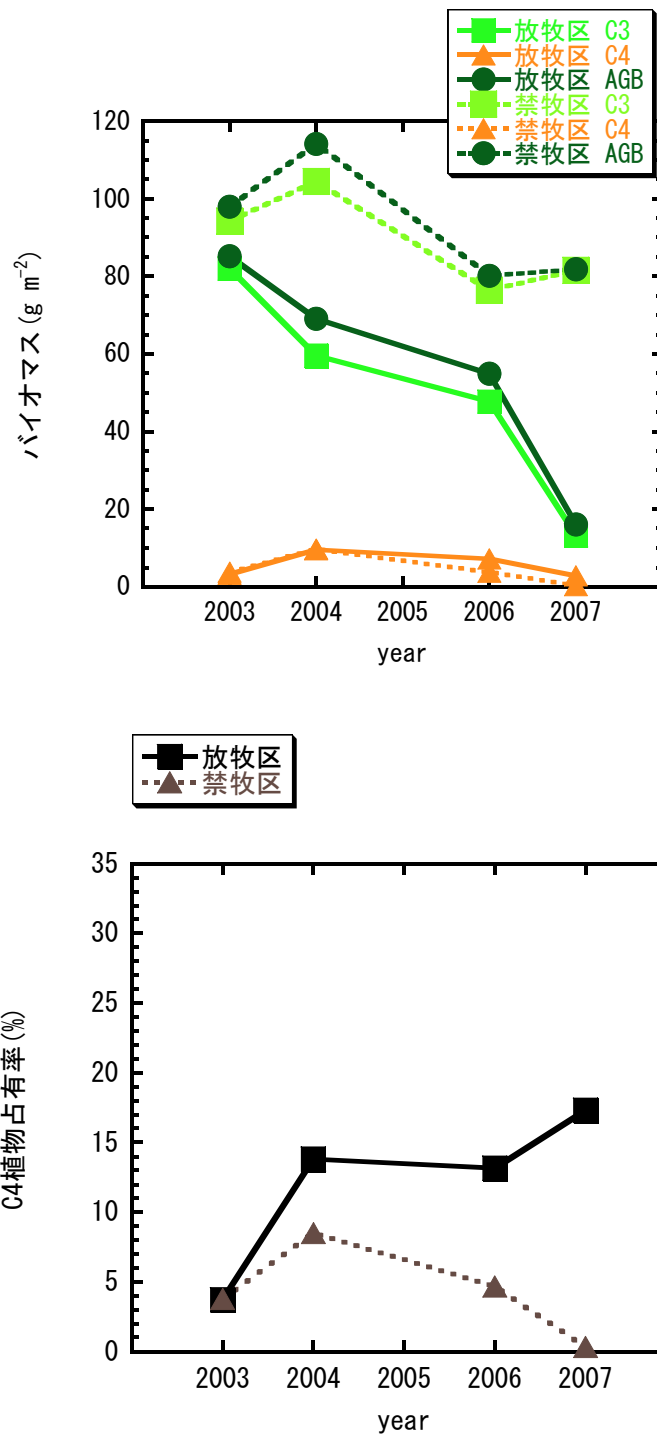


図 27 両区における C3 植物、C4 植物バイオマスの関係

上図はバイオマスの違い、下図は両区における AGB に対する C4 植物の優位性の経年変化
値は Li,S.-G.,”RAISE”Internet:

“<http://raise.suiri.tsukuba.ac.jp/new/member/dir/vegetation/2006biomass.xls>”

Viewd January,29,2008.及び、Kato (2007)より出典

表 7 7月の litter を差し引いた年積算 GPP と AGB

放牧区			禁牧区		
BGB (g CO ₂ m ⁻² y ⁻¹)			BGB (g CO ₂ m ⁻² y ⁻¹)		
AGB (g CO ₂ m ⁻²)			AGB (g CO ₂ m ⁻²)		
2003	153	23	2004	123	31
2004	155	19	2005	27	18
2005	127	12	2006	51	22
2006	152	15			

	2003年	LIVE BGB	標準偏差	年次増加量	Dead BGB	標準偏差	年次増加量
		0～50cm(g C d. w. /m ²)		(g d. w. /m ²)	0～50cm(g C d. w. /m ²)		(g C d. w. /m ²)
放牧区	6月	288	52		253	69	
	7月	326	55	38	252	58	-1
	9月	344	63	18	233	57	-19
禁牧区	6月	261	52		276	69	
	7月	309	51	48	249	53	-26
	9月	343	51	33	226	57	-24

	2006年	LIVE BGB	標準偏差	年次増加量	Dead BGB	標準偏差	年次増加量
		0～50cm(g C d. w. /m ²)		(g d. w. /m ²)	0～50cm(g C d. w. /m ²)		(g C d. w. /m ²)
放牧区	6月	219	69		202	64	
	7月	223	61	5	408	112	206
	9月	287	25	64	266	23	-142
禁牧区	6月	243	47		306	59	
	7月	289	75	46	542	141	236
	9月	419	19	130	528	24	-14

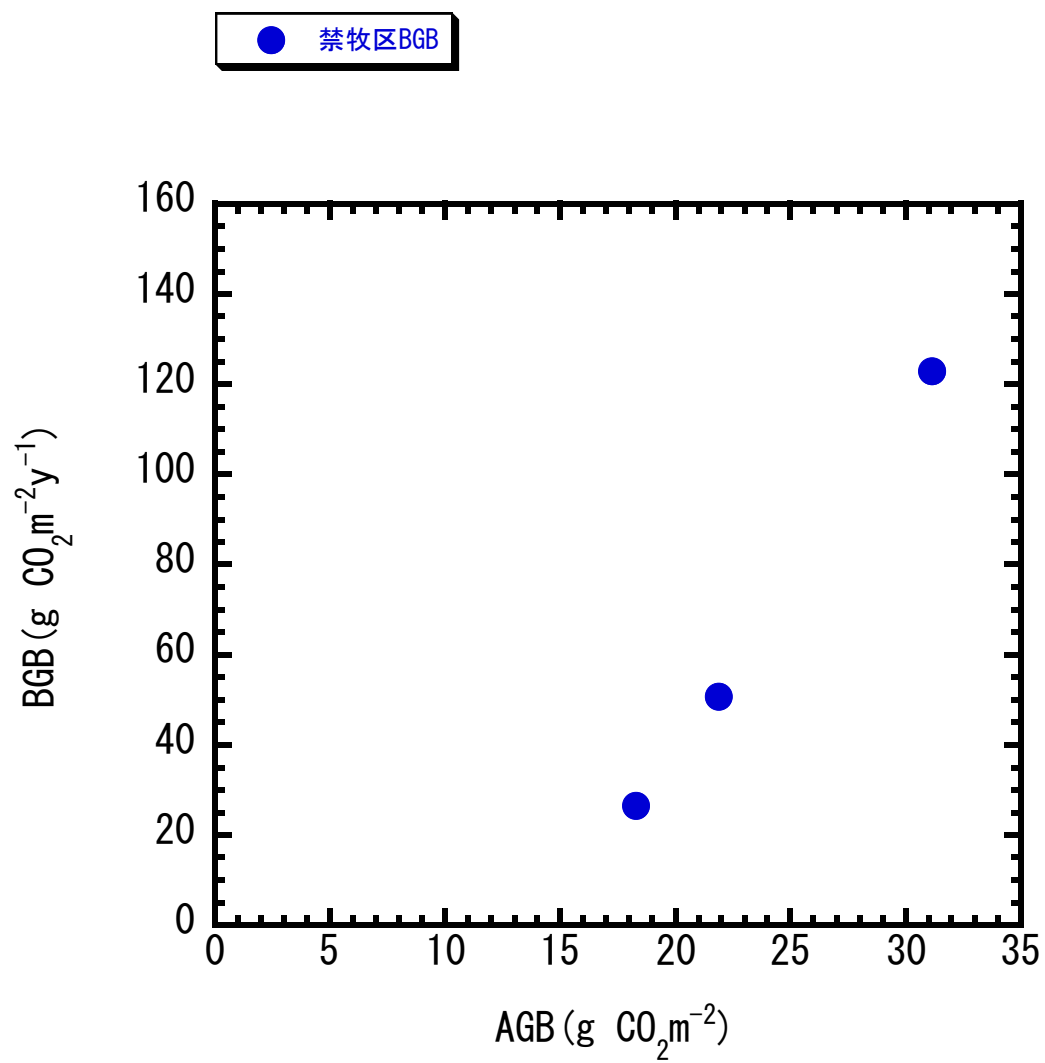


図 28 推定された禁牧区の BGB と AGB の比較

3.4. Ta、VPD の増減に対する NEP の関係性

算出した炭素動態と他の環境要因との相関関係について検討するために、生育期間における NEP と Ta の値を月別に平均化し、比較を行なった。

気温と NEP の相関関係の比較については、NEP は夜間においてしきい値が異なること、CO₂ フラックスが日中において活発になることを考慮し、PAR=0 のものについては除外した。比較したものを図 28 に示す。図 28 に使用した値について表 7 に示す。放牧区と禁牧区共に気温に対する NEP はやや正の相関性が見られるが、月平均という観点からは相関性は見られなかった。青木・橋本 (1992) では、モンゴル国は一日の最大気温と最低気温の差が激しく、季節変化による気温の変動は 40℃ 近くに達する地域とされている。そのため、気温の増減に対して植生の光合成量が鋭敏に反応を示すという習性を持たないためと推測される。

PAR と NEP には一般的に正の相関性があり、NEP_{sat}(生態系純生産の極大値)までは上昇を続けるとされている。生育期 5 月～10 月における月平均化した日中の PAR と NEP の相関関係について両区で比較検討を行なった。放牧区の結果について図 29 に、禁牧区の結果について図 30 に示す。また、比較に用いた値を表 8 に記す。月平均化された値からでは、両区で明確な相関性を見出すことは出来なかった。Urano(未報告)では同草原において降雨の前後によって PAR に対する NEP の値が変化することを示している。降雨の前後について分割を行わずに月平均化した値で相関性を見ることは出来ない。気温と同様にこちらも精査する必要があると思われる。

次に、生育期間日中において $u^* \geq 0.2 \text{ m s}^{-1}$ における NEP の PAR に対する挙動が、異なる Ta においてどのように影響を受けるか調べるために、Li et al.(2005)、Falge(2001)を参考に $Ta < 10^\circ\text{C}$ 、 $10^\circ\text{C} \leq Ta < 20^\circ\text{C}$ 、 $20^\circ\text{C} \leq Ta$ に分けて PAR100 毎、0～2200($\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$)の範囲における NEP と PAR を平均化したものを示した。2003 年放牧区を図 31 に示す。

多くのデータにおいて PAR の増大に伴う NEP の上昇が見られ、PAR1500～2200($\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$)にかけて NEP が減少する傾向が見られた。これは Li et al. (2005)、Larcher(2003)において PAR1600 以上の条件化では気孔が閉じるためとされており、図 31～図 34 はおおむねその傾向に準じている。放牧区においては経年緩やかに値が減少していく傾向が見られたほか、禁牧区では 2005 年以降 Ta、PAR が増大していても NEP が増加しにくい特徴が見られた。

次に VPD についても Ta と同様の調査を行なった。VPD は飽和水蒸気圧と水蒸気圧の差であり、空気の乾燥の程度を示す指標となる。植生は乾燥状態が続くと過剰な蒸散を防ぐため気孔を閉じる(近藤 2000)。KBU 草原の植生の活動が空気の乾燥に対して正常に対応しているか、NEP の値から検討を行なった。生育期 5 月～10 月における月平均化した日中の NEP と VPD の相関関係について両区で比較をおこなった。その結果を放牧区については図 35 に、禁牧区については図 36 に示す。また使用した値については表 9 に示す。生育期の日中における月平均値の観点からは両区において明瞭な差は見られず、両区において VPD に対して NEP の弱い正の相関関係が見られた。

次に、生育期間日中において $u^* \geq 0.2 \text{ m s}^{-1}$ における NEP の PAR に対する挙動が、異なる VPD においてどのように影響を受けるか調べるために、Ta についておこなった手法と同様

に $VPD < 10kPa$ 、 $10kPa \leq VPD < 20kPa$ 、 $20kPa \leq VPD$ に分けて PAR100 毎、 $0 \sim 2200(\mu mol \text{ photons } m^{-2}s^{-1})$ の範囲における NEP と PAR を平均化したものを示した。2003 年放牧区を図 37 に、2004 年両区について図 38 に、2005 年両区について図 39 に、2006 年両区について図 40 に示す。

多くのデータにおいて PAR の増大に伴う NEP の上昇が見られ、PAR1500 \sim 2200($\mu mol \text{ photons } m^{-2}s^{-1}$)にかけて NEP が減少する傾向が見られた。この傾向も Li et al. (2005) と同様である。近藤(2000)において VPD の高い条件化では葉の気孔が閉じるとされており、本算出においても高い VPD 条件において NEP が低くなる傾向が見られた。放牧区においてはこの傾向が見られ、禁牧区では 2005 年以降 $VPD \leq 20kPa$ の条件下における NEP にばらつきが多く、その傾向について断定することは出来ないが、ばらつきの少ない低い VPD 条件下における NEP は放牧区に対して大きく減少していた。

図 31 \sim 図 34 と図 37 \sim 図 40 によって禁牧区は 2005 年以降明らかに低い NEP を示している。この違いの要因は図 27 による C4 植物の占有率が関係しているものと思われる。C4 植物は Larcher(2003)において一般的に高温耐性、乾燥耐性に優れ、C3 植物よりも高い光合成能力を持つ植物とされている。2005 年、禁牧区では C4 植物が経年減少を続け、高温、乾燥状態において C4 植物と比較して低い光合成能力しか持たない C3 植物が光合成を頻繁に行なえず、NEP を低下させたものと考えられる。

次に、2003 年から 2007 年のうち、2005 年以外の植生についてはその個々の重量が測定されている。そこから、C3 植物、C4 植物ごとにおける光合成能力の違いについて考察を試みる。2003 年時点では浦野 (2002)等によってチャンバー法から C3 植物のみの土壌呼吸と C4 植物の土壌呼吸が測定されている。しかし、それ以降、禁牧区におけるバイオマス量の増加によって C3、C4 植物のみでのチャンバー法の適用は困難になった。そのため、小島(2004)において使用された、KBU 流域におけるバイオマス量と葉面積指数(LAI)の回帰式を使用してバイオマス量から LAI に変換した値(図 41)を Larcher(2003)によってまとめられた C3 植物、C4 植物ごとにまとめられた PAR に対する光・光合成曲線(図 42)に掛け合わせて検討を試みた。Larcher(2003)において LAI は 6 に達するまでその光合成能力は増大し、PAR1500($\mu mol \text{ photon } m^{-2}s^{-1}$)まではその光合成量は増大するとされている。図 42 は図を Adobe Photoshop 7.0 に取り込み、値の推定を行なった。読み取った値は PAR100、400、800、1000、1200、1400 $\mu mol \text{ m}^{-2}s^{-1}$ における C3 植物の最大値(max)、中央値(center)、最小値(min)、C4 植物の最大値(max)、中央値(center)、最小値(min)とした。読み取った値に 7 月における C3 植物、C4 植物、AGB をそれぞれ LAI に改変したものを乗じたものを図 43 \sim 46 に示す(測定日、測定値については表 6、表 10 に示す)。

Larcher (2003)における図 42 は温暖な気候における植物を中心としたものをまとめているため単純な比較は出来ないが、図 43 \sim 46 より放牧区と禁牧区における C3 植物と C4 植物の割合の差が AGB 全体に大きな影響をもたらしている様子は見られなかった。しかし、環境の変動が激しい本研究対象地域において、C3 植物と C4 植物のバランスが炭素収支に与える影響は 2006 年、2007 年の両区を見るに決して小さくはないと思われる。また今後はより半乾燥帯の植生にあった比較の方法を用いて検討を行なうべきだと思われる。

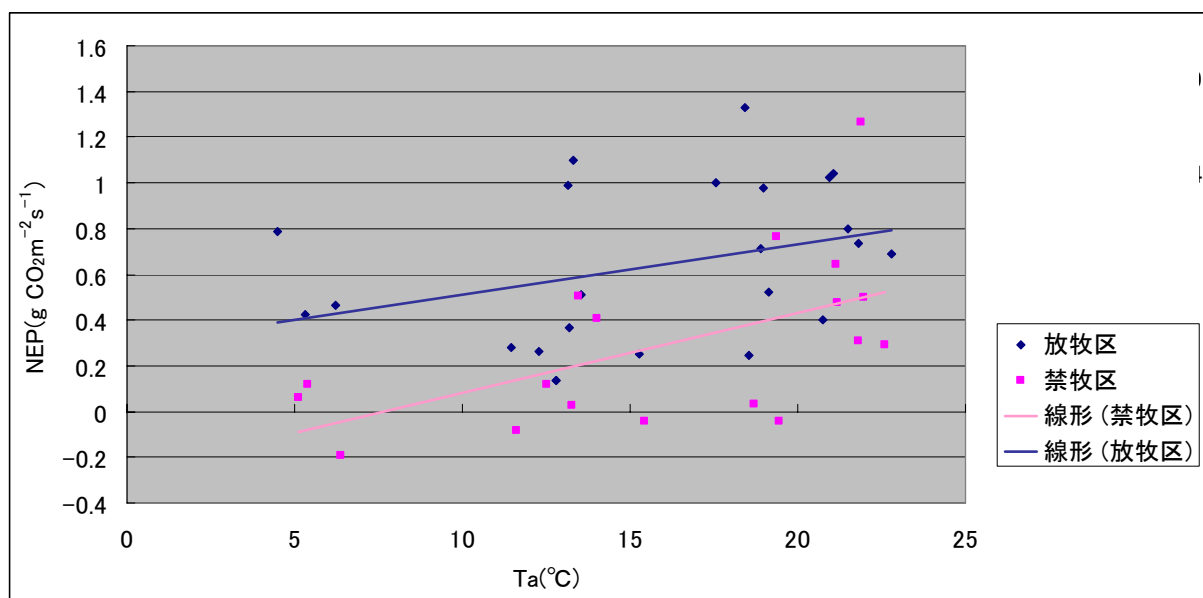


図 29 両区における NEP 月平均値と月平均気温の相関関係

表 8 生育期間における NEP、気温の月別平均値、標準偏差

		5月	6月	7月	8月	9月	10月	線形回帰式	R ²	標準偏差
2003放牧区	NEP	0.37	0.52	1.02	1.00	0.99	0.79	y = 0.0347x - 0.264	0.3187	0.28
	Ta	13.19	19.14	20.96	17.57	13.15	4.47			5.94
2004放牧区	NEP	0.51	0.40	1.33	0.98	0.14	0.14			0.48
	Ta	13.56	20.75	18.41	18.99	12.78	12.78			3.57
2005放牧区	NEP	0.26	0.71	0.69	0.80	1.10	0.46			0.29
	Ta	12.29	18.92	22.80	21.50	13.30	6.23			6.34
2006放牧区	NEP	0.28	0.25	1.04	0.74	0.25	0.43			0.32
	Ta	11.45	18.53	21.05	21.82	15.29	5.30			6.33
		NEP標準偏差	0.11	0.20	0.26	0.13	0.50	0.27		
		Ta標準偏差	0.95	0.98	1.81	2.04	1.12	3.79		
2004禁牧区	NEP	0.41	0.48	1.27	0.77	0.02	0.06	y = 0.0219x + 0.2909	0.1141	0.47
	Ta	14.01	21.16	21.90	19.38	13.28	5.13			6.36
2005禁牧区	NEP	0.12	-0.04	0.29	0.31	0.51	-0.19			0.26
	Ta	12.50	19.44	22.61	21.82	13.45	6.38			6.34
2006禁牧区	NEP	-0.08	0.03	0.64	0.50	-0.04	0.12			0.30
	Ta	11.63	18.69	21.13	21.96	15.43	5.37			6.34
		NEP標準偏差	0.21	0.24	0.55	0.32	0.26	0.14		
		Ta標準偏差	1.21	1.27	0.74	1.45	1.19	0.66		

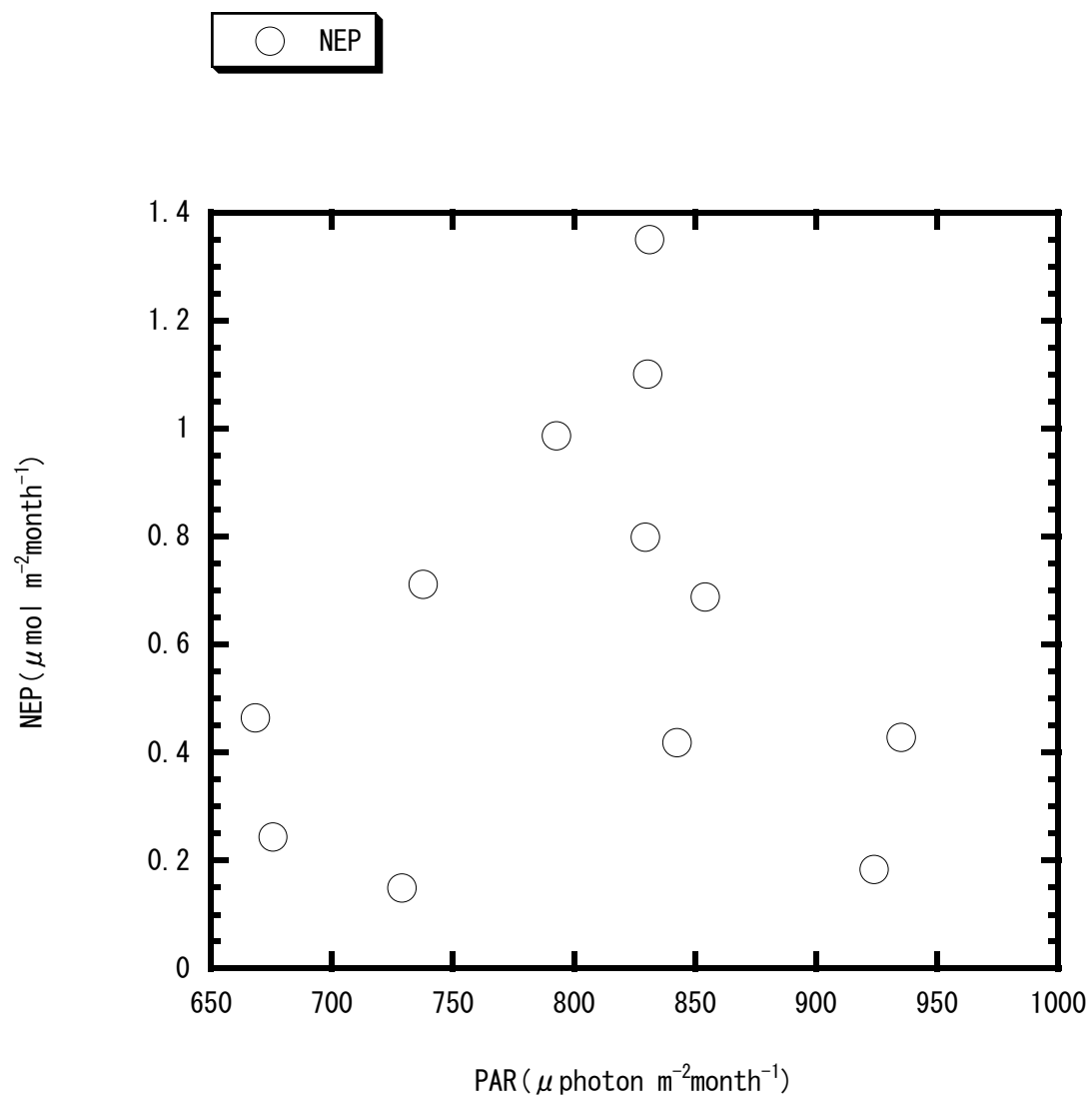


図 30 放牧区における 2004 年～2005 年生育期の NEP 月平均値と PAR 月平均値の比較

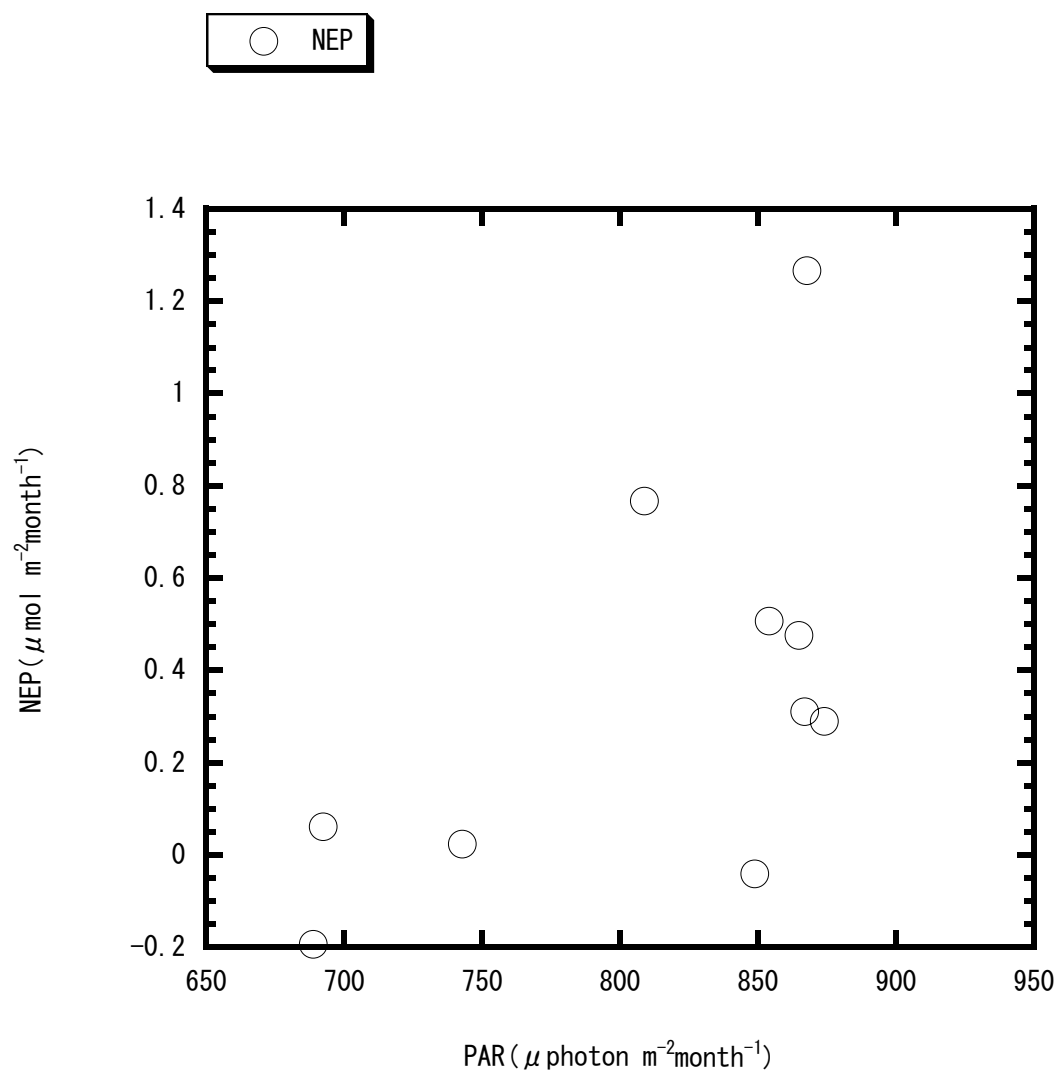


図 31 禁牧区における 2004 年～2005 年生育期の NEP 月平均値と PAR 月平均値の比較

表 9 NEP 月平均値と PAR 月平均値の比較に使用した値

2004放牧区				2005放牧区				放牧区 標準偏差			
	NEP	PAR	Ta	NEP	PAR	Ta		NEP	PAR	Ta	
	($\mu\text{g CO}_2\text{ m}^{-2}\text{month}^{-1}$)	($\mu\text{ photon m}^{-2}\text{month}^{-1}$)	($^{\circ}\text{C}$)	($\mu\text{g CO}_2\text{ m}^{-2}\text{month}^{-1}$)	($\mu\text{ photon m}^{-2}\text{month}^{-1}$)	($^{\circ}\text{C}$)					
5	0.43	935.19	13.83	0.18	923.95	12.29		0.17	7.95	1.08	
6	0.42	842.55	20.97	0.71	737.46	18.69		0.21	74.31	1.61	
7	1.35	831.17	18.62	0.69	854.21	22.80		0.47	16.29	2.96	
8	0.99	792.72	19.25	0.80	829.43	21.50		0.13	25.95	1.59	
9	0.15	728.83	13.10	1.10	830.32	13.30		0.67	71.76	0.14	
10	0.24	675.58	4.97	0.46	668.21	6.23		0.16	5.21	0.89	
2004禁牧区				2005禁牧区				禁牧区 標準偏差			
	NEP	PAR	Ta	NEP	PAR	Ta		NEP	PAR	Ta	
	($\mu\text{g CO}_2\text{ m}^{-2}\text{month}^{-1}$)	($\mu\text{ photon m}^{-2}\text{month}^{-1}$)	($^{\circ}\text{C}$)	($\mu\text{g CO}_2\text{ m}^{-2}\text{month}^{-1}$)	($\mu\text{ photon m}^{-2}\text{month}^{-1}$)	($^{\circ}\text{C}$)					
5	0.32	956.65	14.01	0.08	968.05	12.50		0.17	8.06	1.07	
6	0.48	864.87	21.14	-0.04	848.81	19.21		0.37	11.36	1.37	
7	1.27	867.69	21.90	0.29	873.93	22.61		0.69	4.42	0.50	
8	0.77	808.75	19.38	0.31	866.97	21.82		0.32	41.17	1.73	
9	0.02	742.69	13.28	0.51	854.02	13.45		0.34	78.72	0.12	
10	0.06	692.26	5.13	-0.19	688.86	6.38		0.18	2.40	0.89	

左端の数字は各月を示す(生育期 5 月～10 月)。また本研究の比較には 2004 年と 2005 年のデータを使用した。

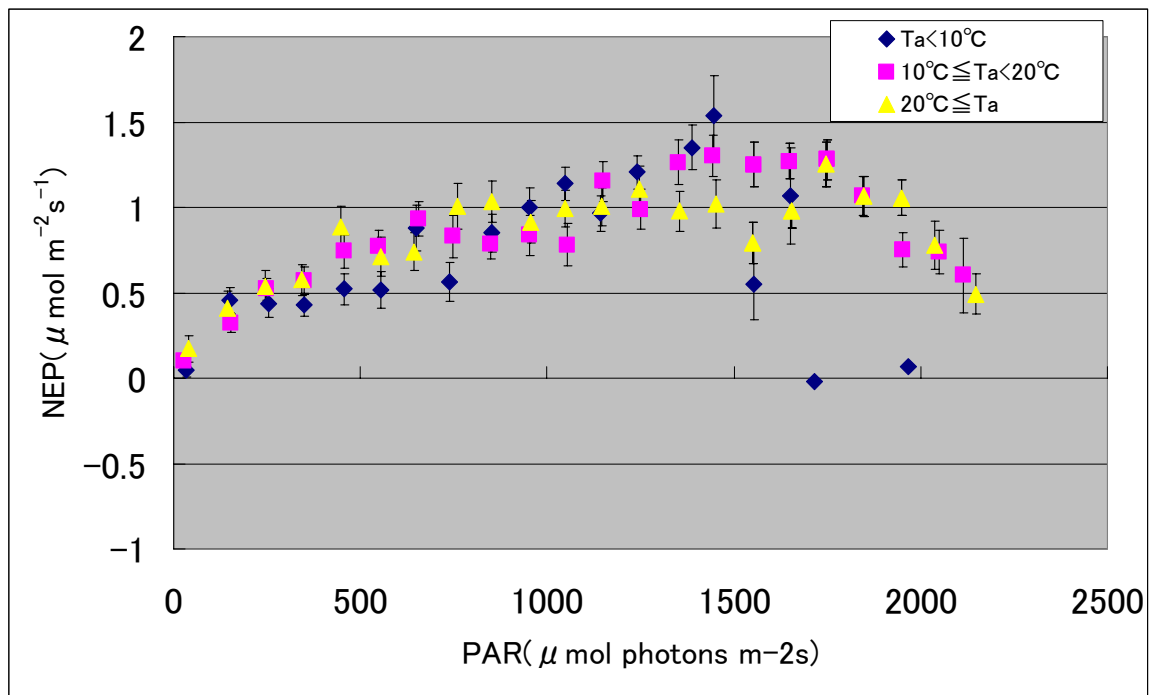


図 32 2003 年放牧区において異なる気温(T_a)条件下での NEP と PAR の挙動

図中のエラーバーは標準誤差を示す。

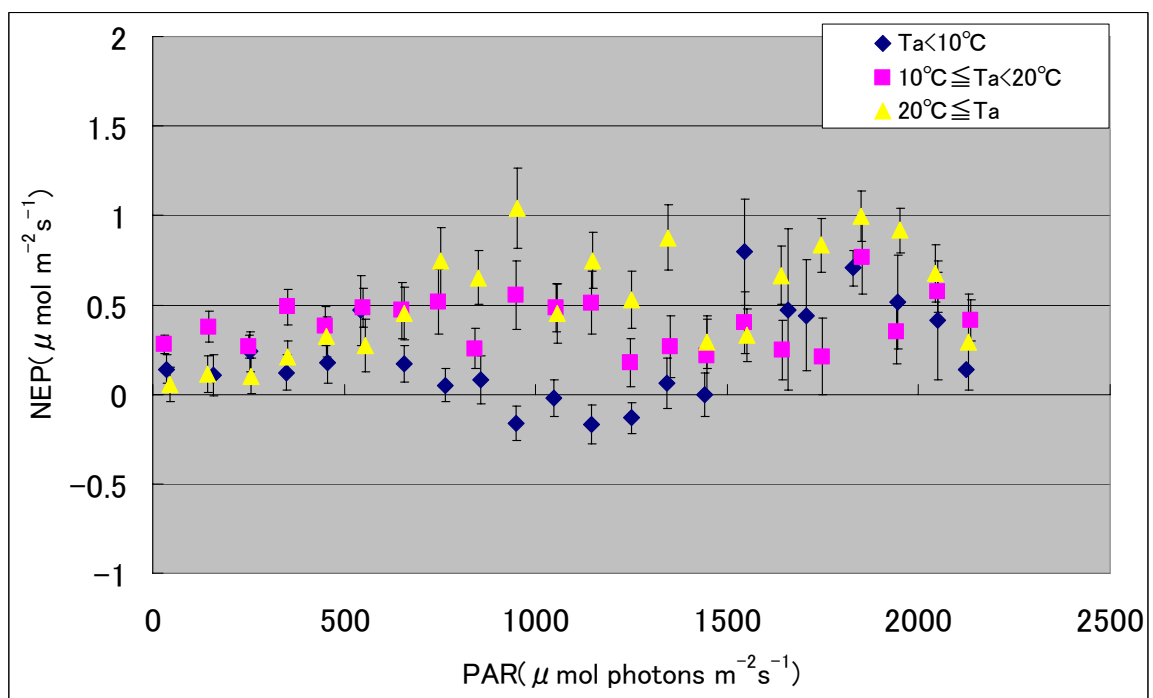
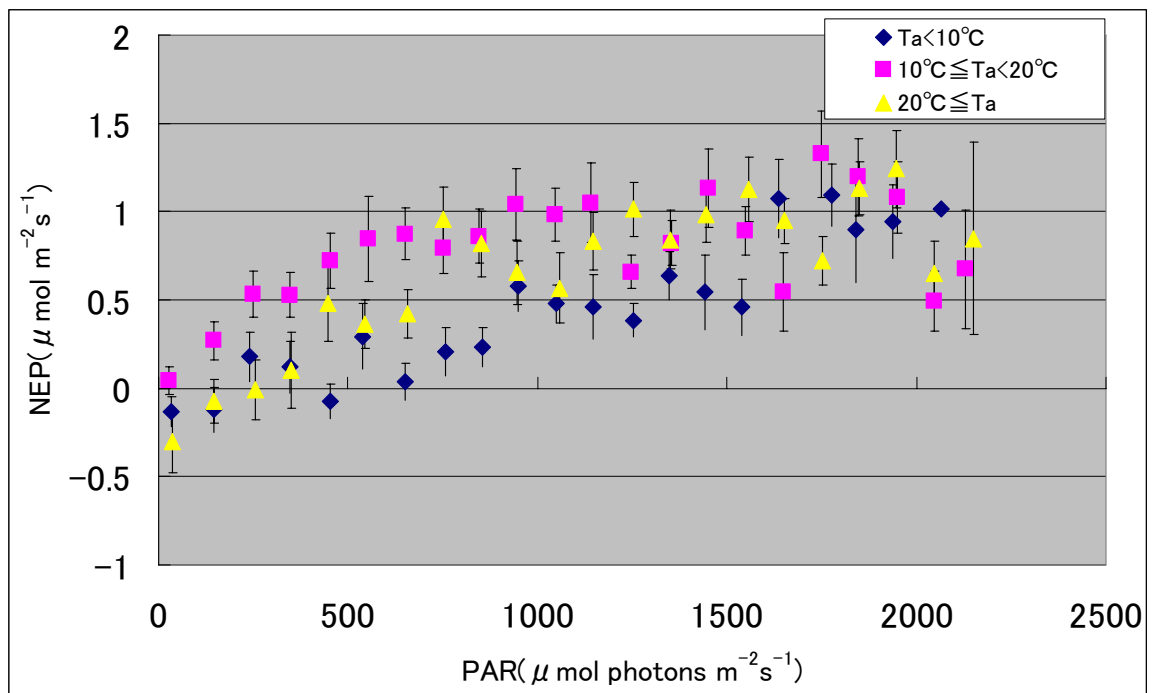


図 33 2004 年における異なる気温(T_a)条件下での NEP と PAR の挙動

上図は放牧区、下図は禁牧区を示す。また、エラーバーは標準誤差を示す。

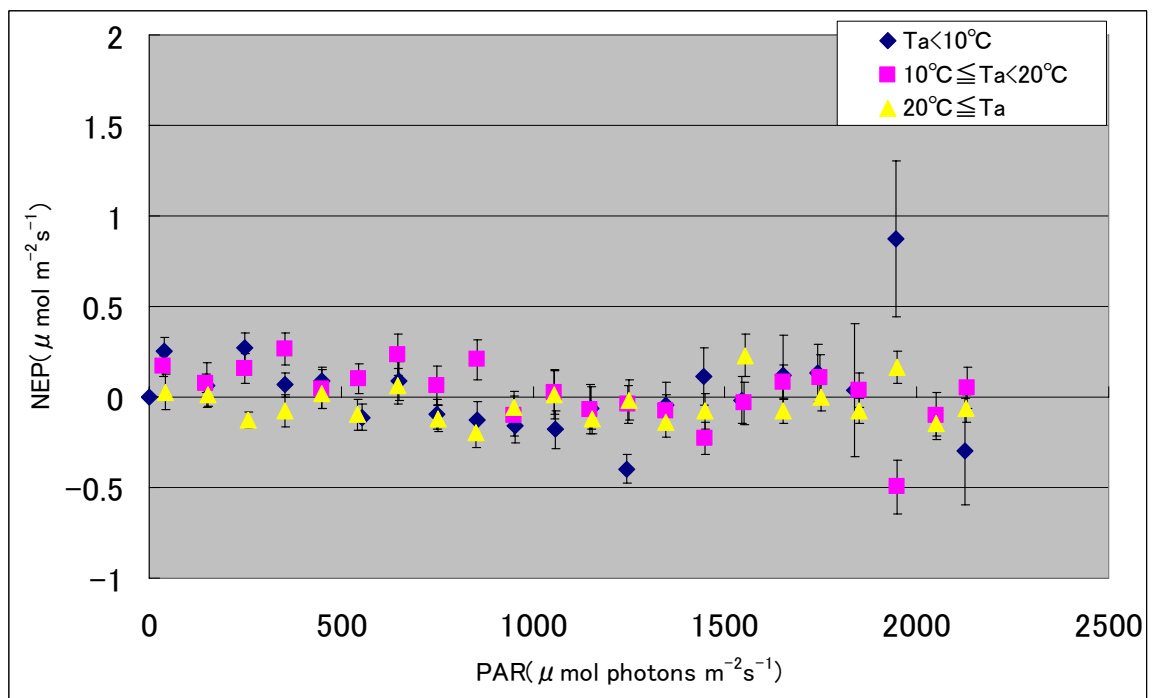
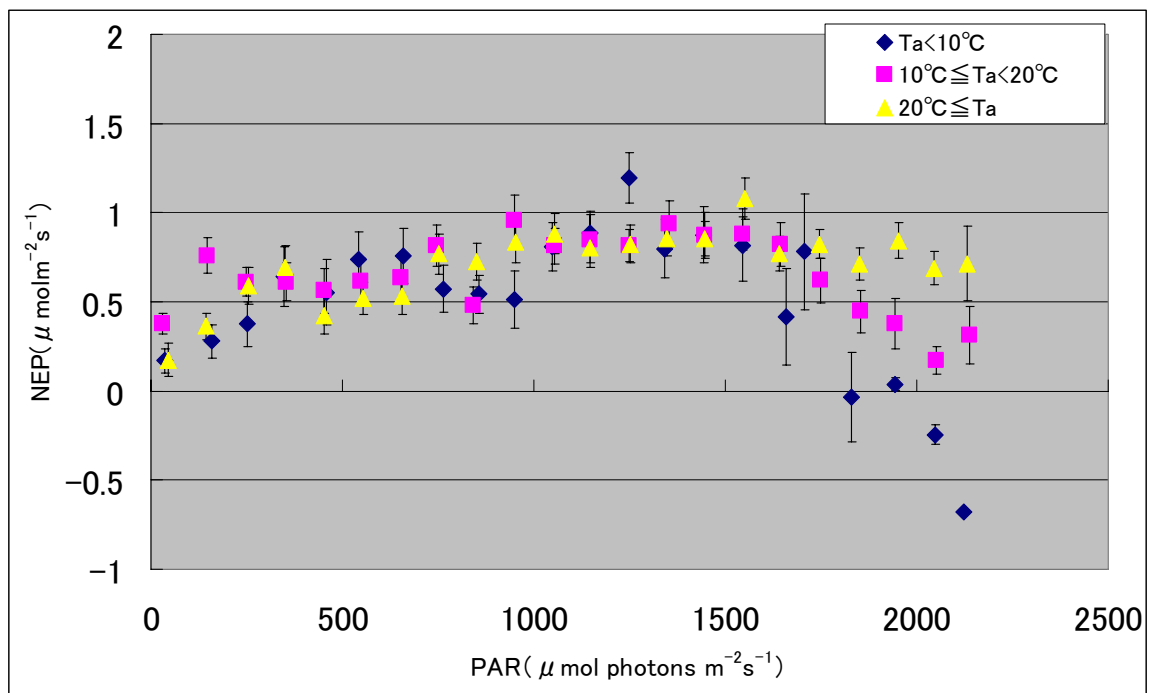


図 34 2005 年における異なる気温(T_a)条件下での NEP と PAR の挙動

上図は放牧区、下図は禁牧区を示す。また、エラーバーは標準誤差を示す。

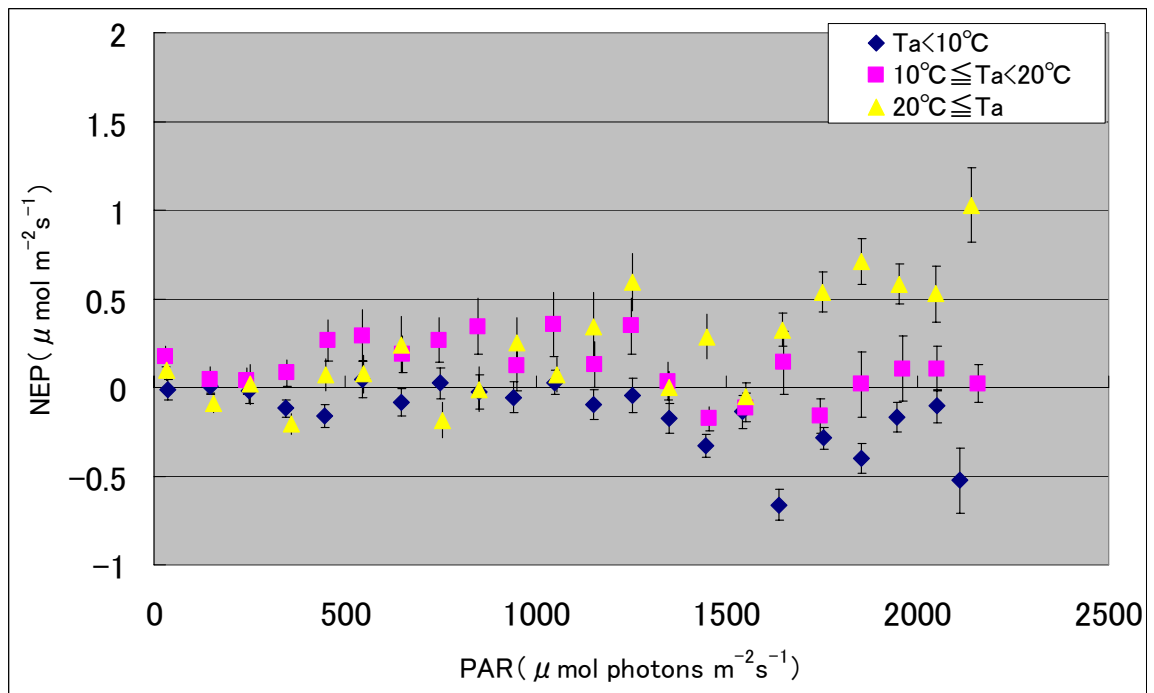
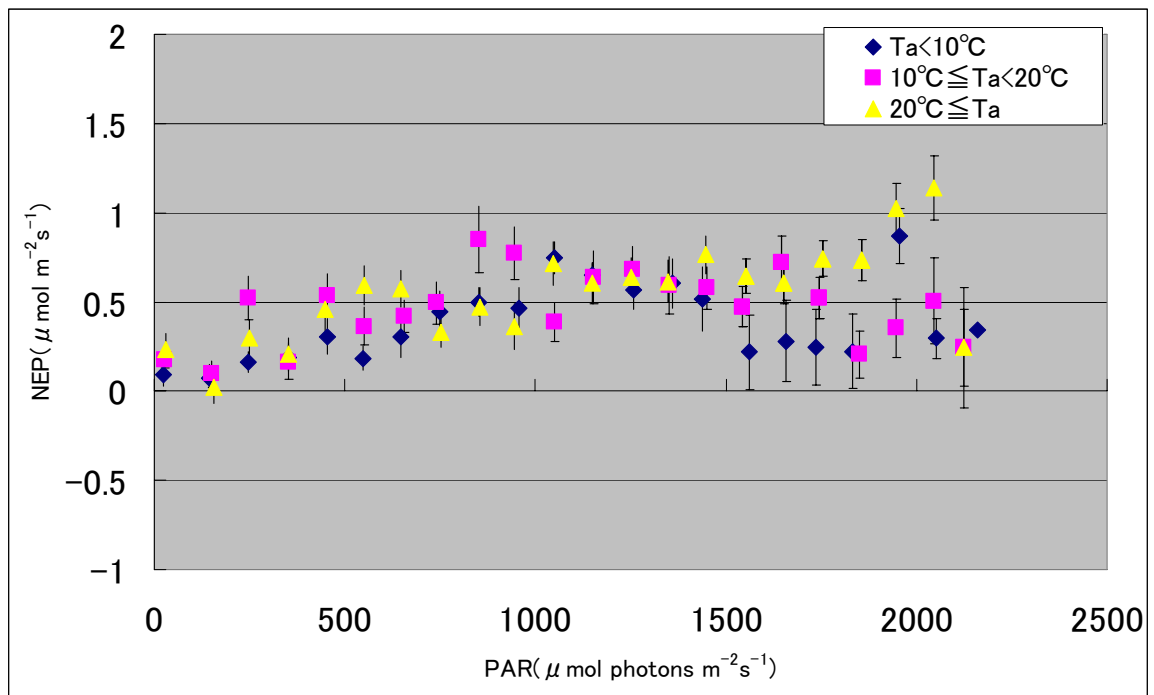


図 35 2006 年における異なる気温(T_a)条件下での NEP と PAR の挙動

上図は放牧区、下図は禁牧区を示す。また、エラーバーは標準誤差を示す。

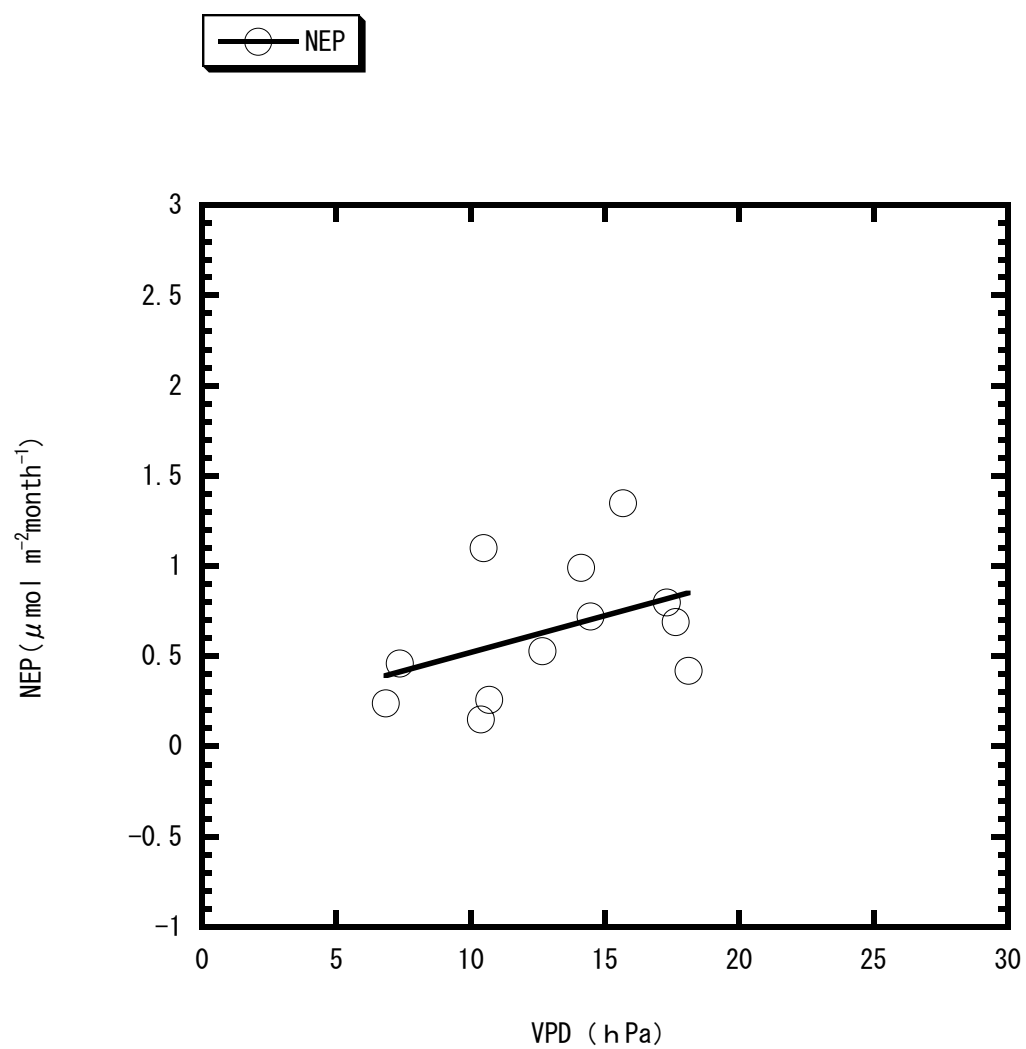


図 36 放牧区の生育期日中における NEP 月平均値と飽差(VPD)月平均値の比較

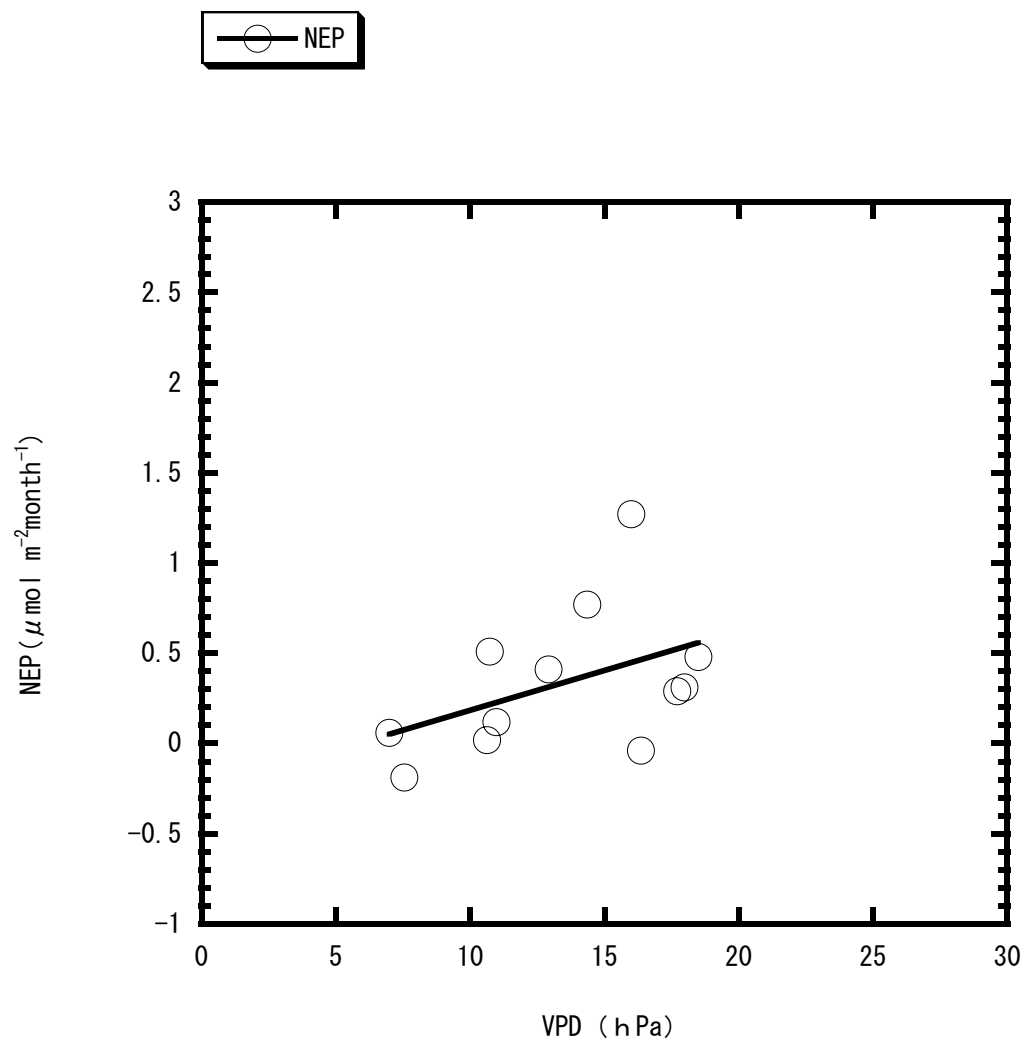


図 37 禁牧区の生育期日中における NEP 月平均値と飽差 VPD 月平均値の比較

表 10 生育期日中における NEP 月平均値と飽差(VPD)月平均値の比較に用いた値

	2004放牧区			2005放牧区		
	NEP (g CO ₂ m ⁻² month ⁻¹)	PAR (μ photon m ⁻² month ⁻¹)	VPD (hPa)	NEP (g CO ₂ m ⁻² month ⁻¹)	PAR (μ photon m ⁻² month ⁻¹)	VPD (hPa)
5	0.53	935.19	12.67	0.26	923.95	10.69
6	0.42	842.55	18.11	0.72	737.46	14.46
7	1.35	840.30	15.67	0.69	854.21	17.63
8	0.99	792.72	14.12	0.80	829.43	17.30
9	0.15	728.83	10.38	1.10	830.32	10.47
10	0.24	675.58	6.83	0.46	668.21	7.36
	2004禁牧区			2005禁牧区		
	NEP (g CO ₂ m ⁻² month ⁻¹)	PAR (μ photon m ⁻² month ⁻¹)	VPD (hPa)	NEP (g CO ₂ m ⁻² month ⁻¹)	PAR (μ photon m ⁻² month ⁻¹)	VPD (hPa)
5	0.41	956.65	12.93	0.12	968.05	10.98
6	0.48	864.87	18.51	-0.04	848.81	16.37
7	1.27	867.69	16.01	0.29	873.93	17.71
8	0.77	808.75	14.35	0.31	866.97	17.99
9	0.02	742.69	10.63	0.51	854.02	10.73
10	0.06	692.26	6.98	-0.19	688.86	7.54
	放牧区 標準偏差			回帰式		
	NEP	PAR	VPD	R ²	y = 0.26+0.04 x	0.2
5	0.17	7.95	1.40			
6	0.21	74.31	2.58			
7	0.47	16.29	1.38			
8	0.13	25.95	2.25			
9	0.67	71.76	0.06			
10	0.16	5.21	0.38			
	禁牧区 標準偏差			回帰式		
	NEP	PAR	VPD	R ²	y = 0.11+0.04 x	0.18
5	0.17	8.06	1.37			
6	0.37	11.36	1.51			
7	0.69	4.42	1.20			
8	0.32	41.17	2.58			
9	0.34	78.72	0.07			
10	0.18	2.40	0.40			

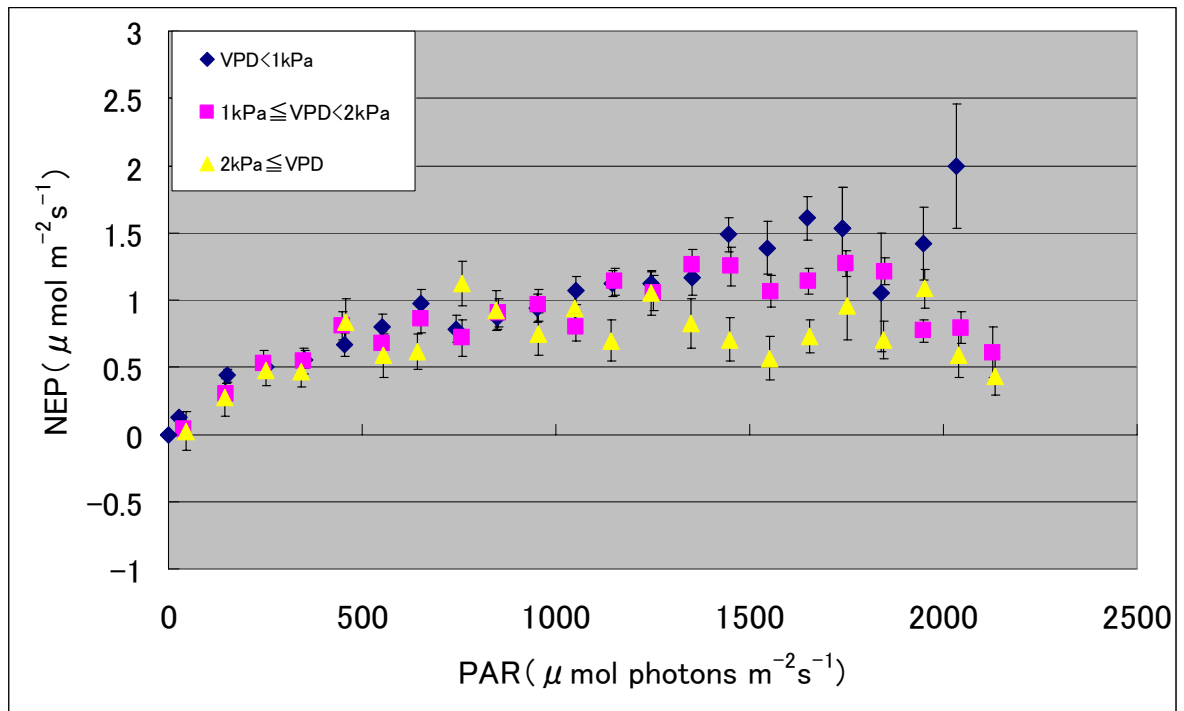


図 38 2003 年放牧区において異なる飽差(VPD)条件下での NEP と PAR の挙動

図中のエラーバーは標準誤差を示す。

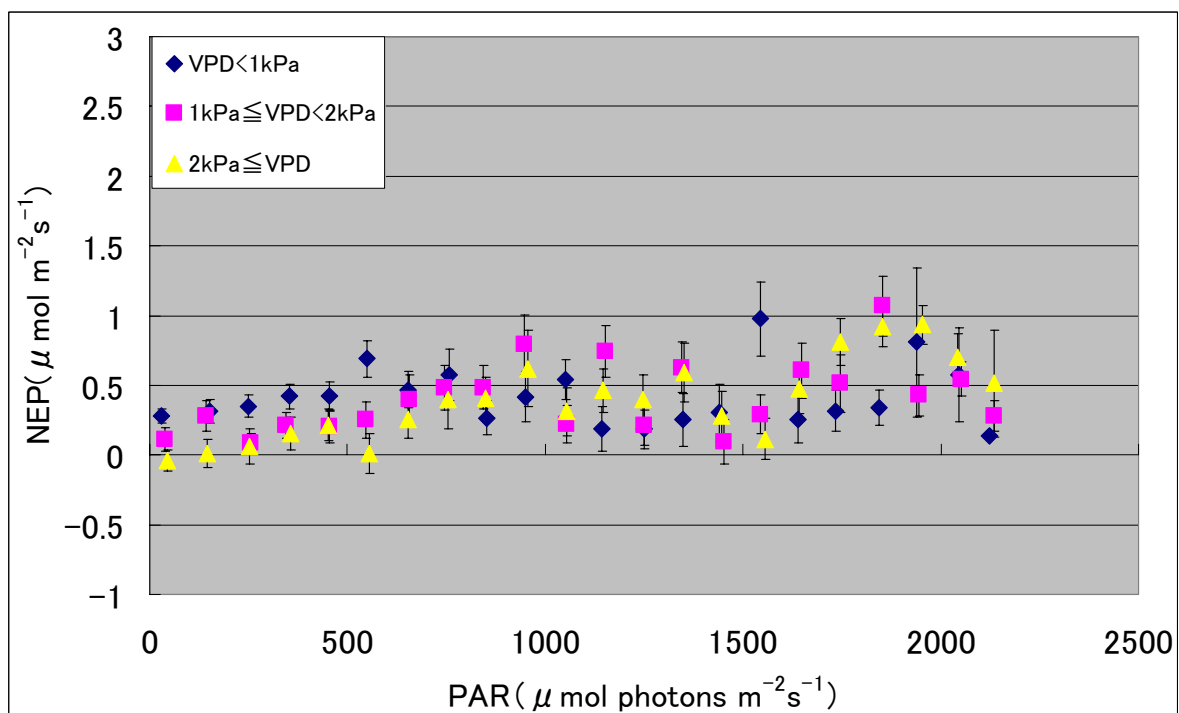
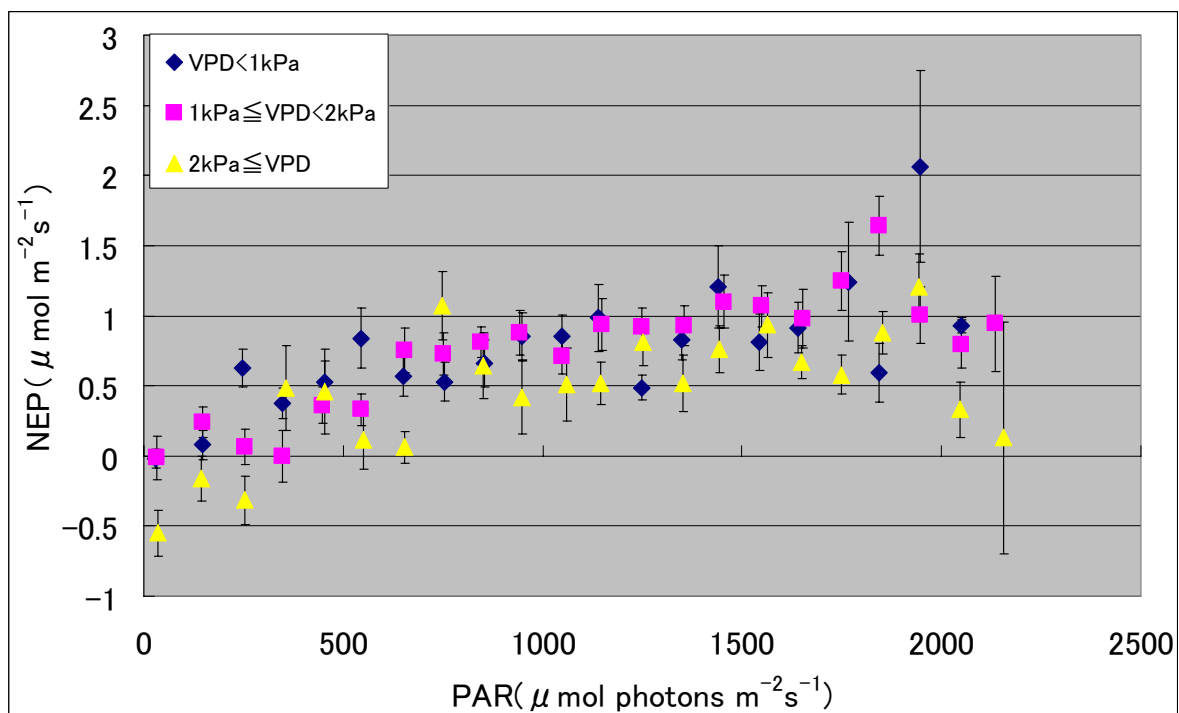


図 39 2004 年において異なる飽差(VPD)条件下での NEP と PAR の挙動

上図は放牧区、下図は禁牧区を示す。また、エラーバーは標準誤差を示す。

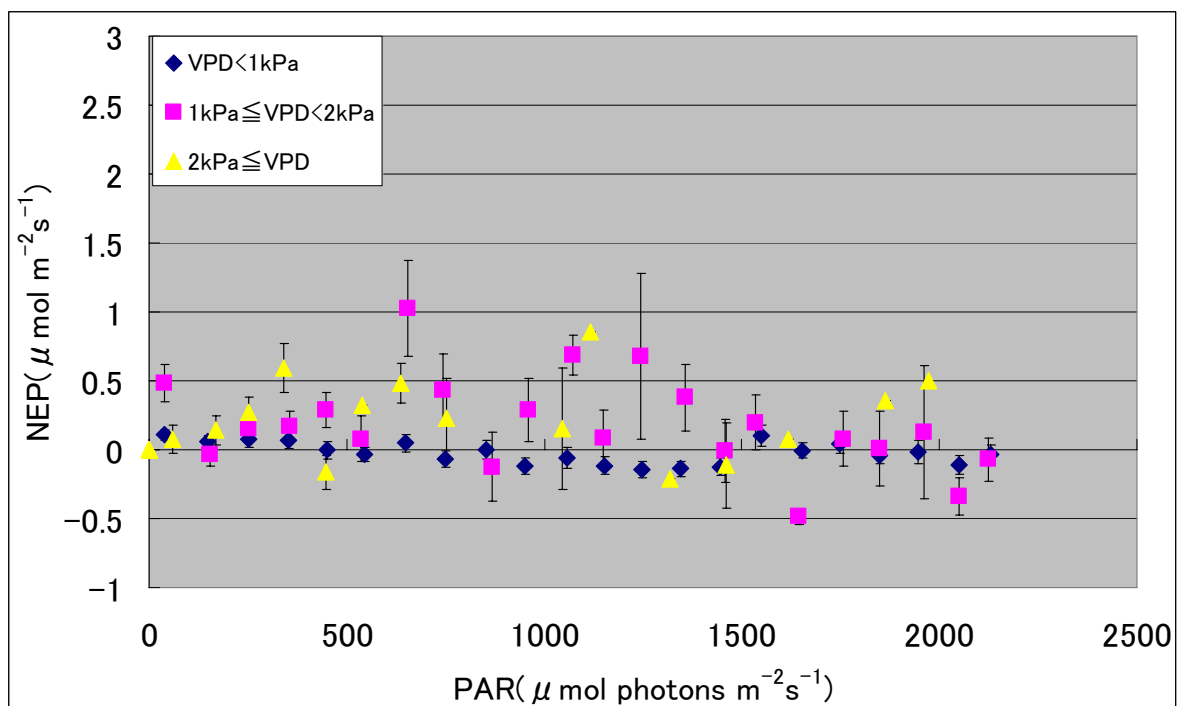
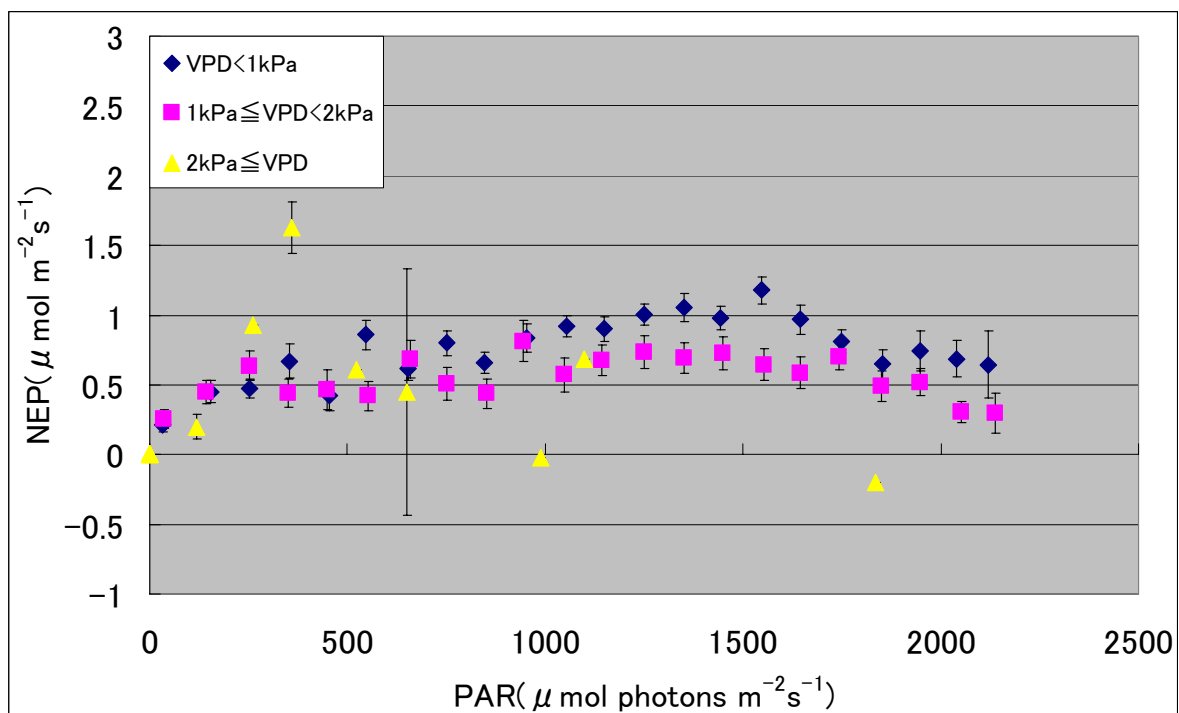


図 40 2005 年において異なる飽差(VPD)条件下での NEP と PAR の挙動

上図は放牧区、下図は禁牧区を示す。また、エラーバーは標準誤差を示す。

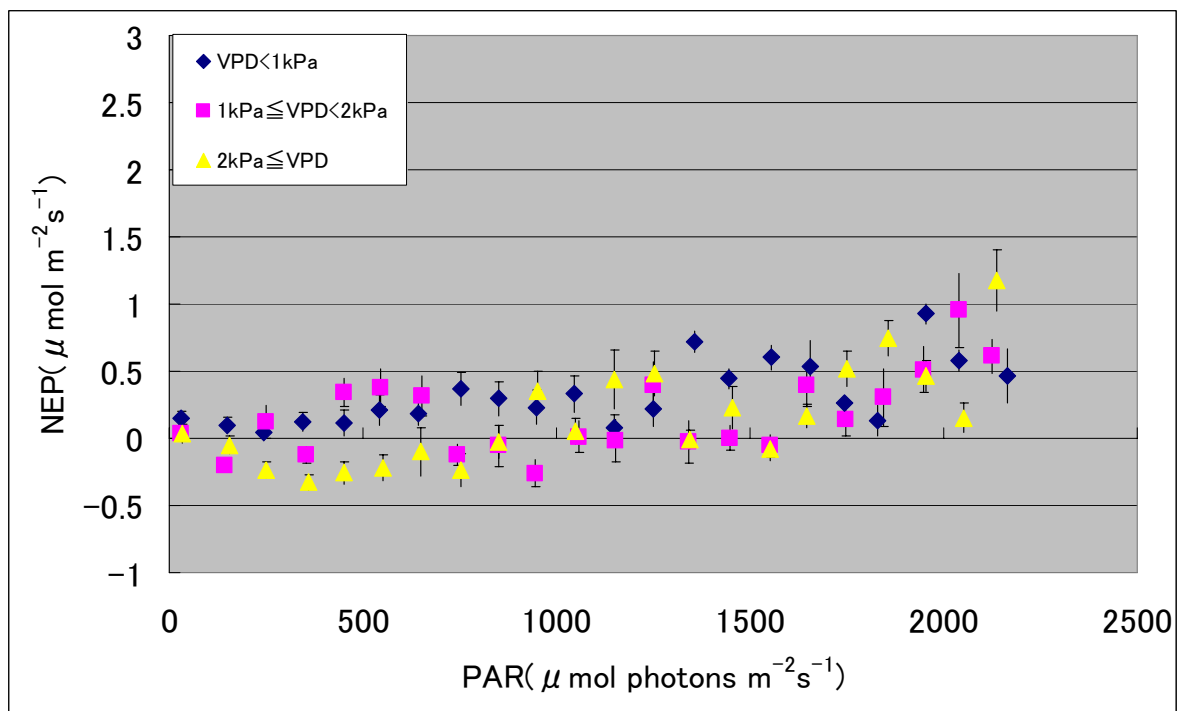
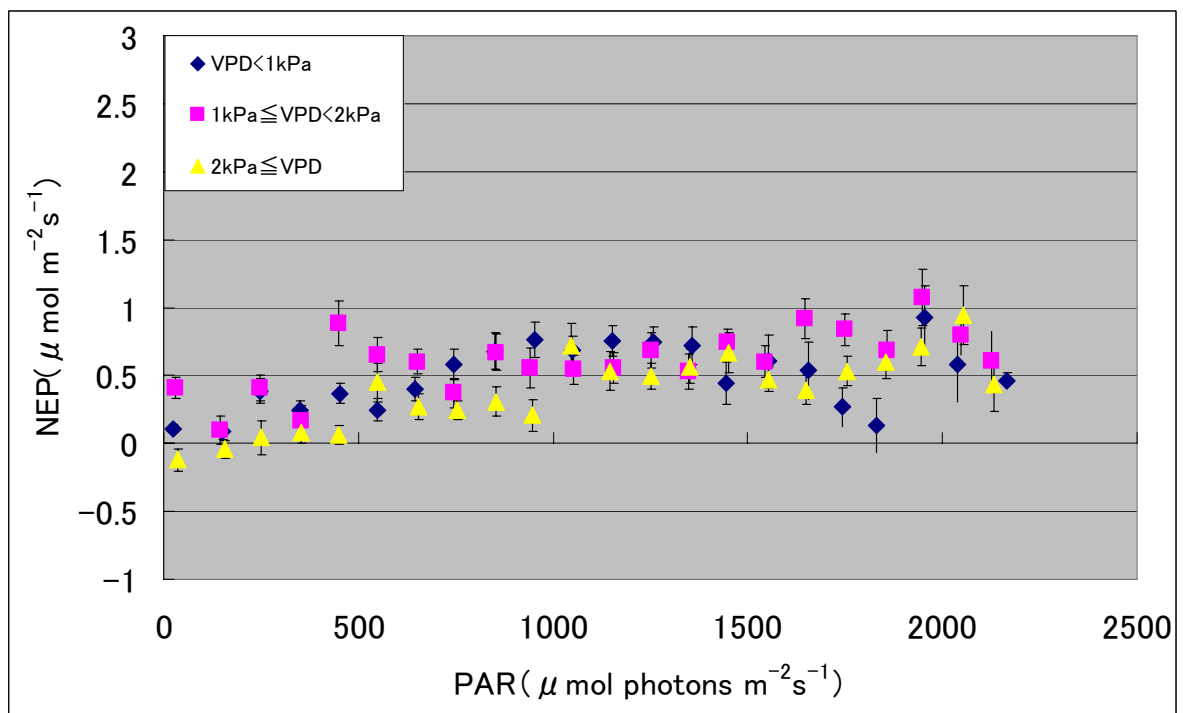


図 41 2006年において異なる飽差(VPD)条件下でのNEPと光合成有効放射(PAR)の挙動

上図は放牧区、下図は禁牧区を示す。また、エラーバーは標準誤差を示す。

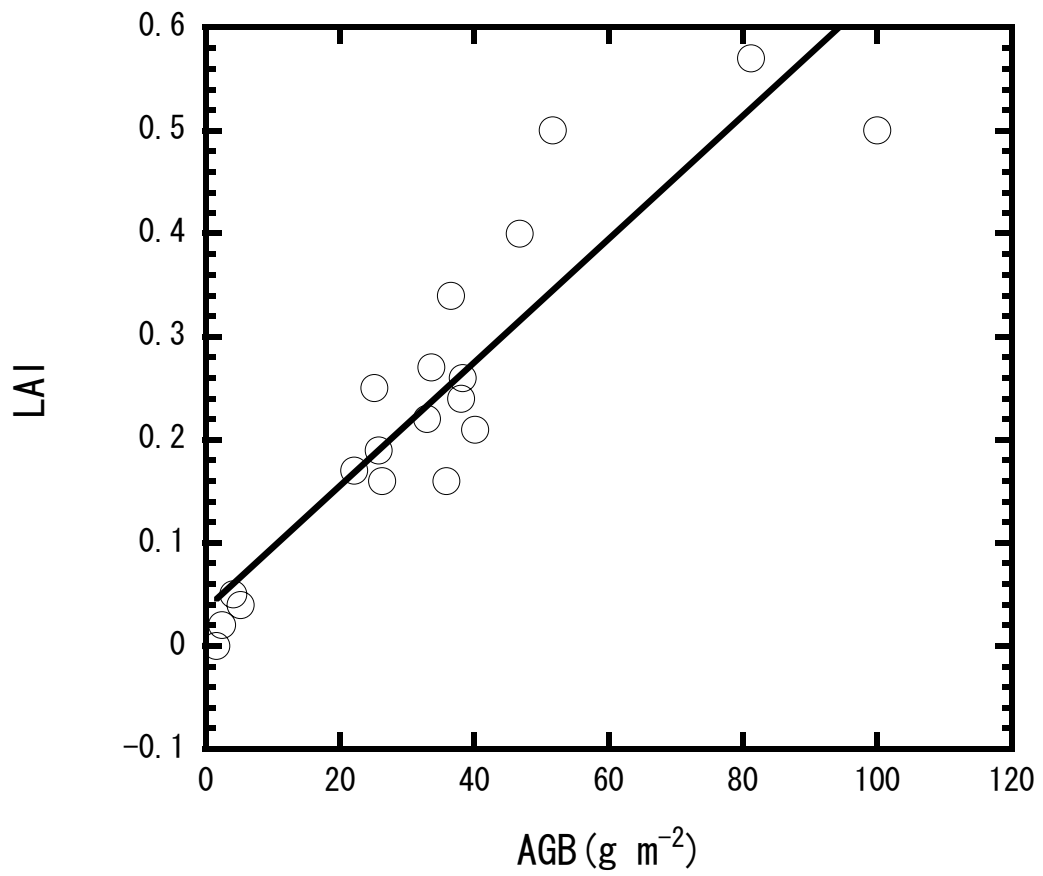


図 42 ヘルレン川流域における地表部バイオマス(AGB)と葉面積指数(LAI)の相関性

(値は小島 2004 より引用)

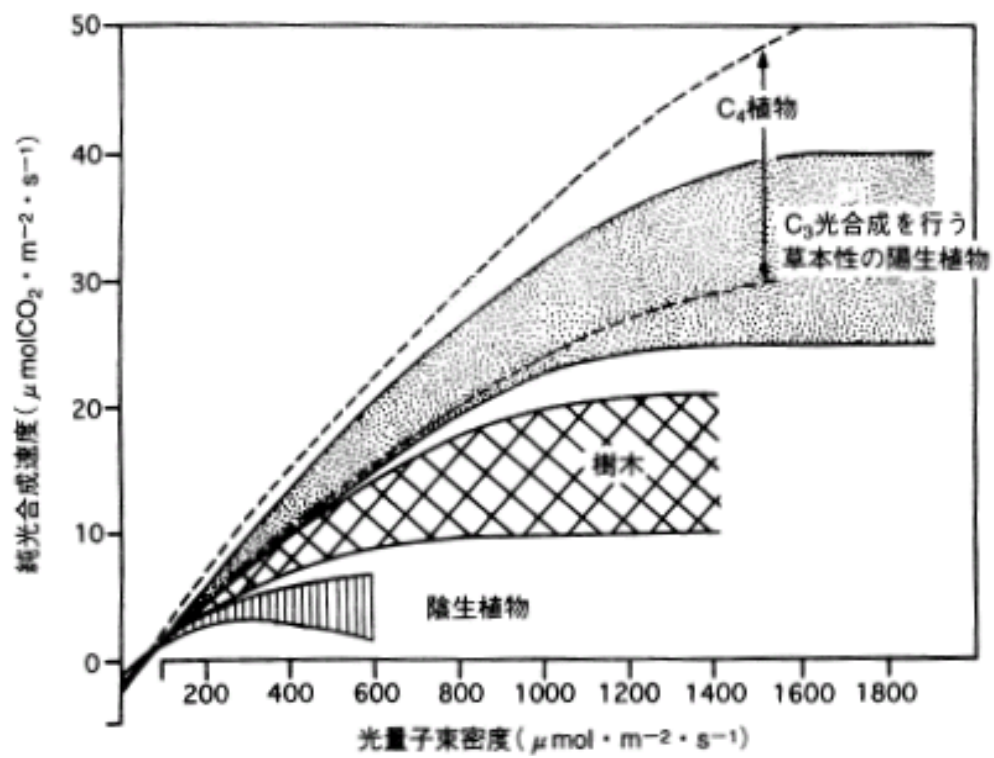


図 43 様々な論文からまとめられた光合成有効放射に対する純光合成速度の違い

(図は larcher(2003)より出典)

表 11 図 43～46 に使用した値一覧

2003放牧区	C3			C4			AGB		
PAR ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	max ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	center ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	min ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	max ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	center ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	min ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	max ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	center ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	min ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
100	1.08	1.08	1.08	0.11	0.11	0.11	1.19	1.19	1.19
400	10.72	9.45	8.18	1.21	1.03	0.85	11.93	10.48	9.03
800	20.30	17.57	14.84	2.34	1.97	1.59	22.64	19.54	16.44
1000	24.10	20.77	17.44	2.83	2.37	1.92	26.93	23.15	19.36
1200	27.46	23.06	18.65	3.31	2.73	2.14	30.78	25.78	20.79
1400	29.37	24.26	19.15	3.68	2.99	2.31	33.04	27.25	21.47
2004放牧区	C3			C4			AGB		
PAR ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	max ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	center ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	min ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	max ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	center ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	min ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	max ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	center ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	min ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
100	0.80	0.80	0.80	0.19	0.19	0.19	0.99	0.99	0.99
400	7.98	7.04	6.09	2.06	1.75	1.44	10.04	8.78	7.53
800	15.11	13.08	11.05	3.96	3.33	2.70	19.08	16.41	13.75
1000	17.94	15.47	12.99	4.80	4.03	3.25	22.75	19.49	16.24
1200	20.45	17.17	13.88	5.62	4.62	3.63	26.07	21.79	17.51
1400	21.86	18.06	14.26	6.23	5.08	3.92	28.10	23.14	18.18
2006放牧区	C3			C4			AGB		
PAR ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	max ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	center ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	min ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	max ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	center ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	min ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	max ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	center ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	min ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
100	0.66	0.66	0.66	0.16	0.16	0.16	0.82	0.82	0.82
400	6.54	5.76	4.99	1.75	1.49	1.23	8.29	7.25	6.22
800	12.38	10.72	9.05	3.37	2.84	2.30	15.75	13.55	11.35
1000	14.70	12.67	10.64	4.09	3.43	2.77	18.79	16.10	13.40
1200	16.75	14.06	11.37	4.78	3.93	3.09	21.53	18.00	14.46
1400	17.91	14.80	11.68	5.30	4.32	3.34	23.21	19.12	15.02
2007放牧区	C3			C4			AGB		
PAR ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	max ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	center ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	min ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	max ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	center ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	min ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	max ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	center ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	min ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
100	0.24	0.24	0.24	0.11	0.11	0.11	0.34	0.34	0.34
400	2.34	2.07	1.79	1.16	0.99	0.81	3.50	3.05	2.60
800	4.44	3.84	3.25	2.24	1.88	1.52	6.68	5.72	4.77
1000	5.27	4.54	3.82	2.71	2.27	1.83	7.98	6.81	5.65
1200	6.01	5.04	4.08	3.17	2.61	2.05	9.18	7.65	6.13
1400	6.42	5.31	4.19	3.51	2.86	2.21	9.94	8.17	6.40

2003禁牧区	C3			C4			AGB		
PAR ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	max ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	center ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	min ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	max ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	center ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	min ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	max ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	center ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	min ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
100	1.23	1.23	1.23	0.12	0.12	0.12	1.35	1.35	1.35
400	12.22	10.77	9.33	1.28	1.09	0.90	13.50	11.86	10.22
800	23.13	20.03	16.92	2.47	2.08	1.68	25.61	22.10	18.60
1000	27.47	23.68	19.88	2.99	2.51	2.03	30.47	26.19	21.91
1200	31.30	26.28	21.25	3.50	2.88	2.26	34.81	29.16	23.52
1400	33.47	27.65	21.83	3.89	3.16	2.44	37.36	30.82	24.28
2004禁牧区	C3			C4			AGB		
PAR ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	max ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	center ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	min ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	max ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	center ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	min ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	max ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	center ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	min ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
100	1.35	1.35	1.35	0.19	0.19	0.19	1.55	1.55	1.55
400	13.46	11.87	10.27	2.08	1.77	1.46	15.54	13.64	11.73
800	25.49	22.06	18.64	4.01	3.37	2.74	29.50	25.44	21.37
1000	30.27	26.08	21.90	4.86	4.08	3.29	35.13	30.16	25.19
1200	34.49	28.95	23.42	5.69	4.68	3.67	40.17	33.63	27.09
1400	36.88	30.46	24.05	6.31	5.14	3.97	43.18	35.60	28.02
2006禁牧区	C3			C4			AGB		
PAR ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	max ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	center ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	min ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	max ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	center ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	min ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	max ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	center ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	min ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
100	1.01	1.01	1.01	0.12	0.12	0.12	1.13	1.13	1.13
400	10.04	8.85	7.66	1.29	1.10	0.90	11.33	9.95	8.57
800	19.01	16.45	13.90	2.49	2.09	1.70	21.49	18.54	15.59
1000	22.57	19.45	16.33	3.01	2.53	2.04	25.58	21.98	18.37
1200	25.72	21.59	17.46	3.52	2.90	2.28	29.24	24.49	19.74
1400	27.50	22.72	17.94	3.91	3.18	2.46	31.41	25.90	20.40
2007禁牧区	C3			C4			AGB		
PAR ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	max ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	center ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	min ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	max ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	center ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	min ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	max ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	center ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	min ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
100	1.07	1.07	1.07	0.08	0.08	0.08	1.15	1.15	1.15
400	10.67	9.41	8.14	0.83	0.70	0.58	11.50	10.11	8.72
800	20.20	17.49	14.77	1.60	1.34	1.09	21.80	18.83	15.86
1000	23.99	20.68	17.36	1.93	1.62	1.31	25.93	22.30	18.67
1200	27.34	22.95	18.56	2.26	1.86	1.46	29.60	24.81	20.02
1400	29.23	24.15	19.07	2.51	2.04	1.58	31.74	26.19	20.65

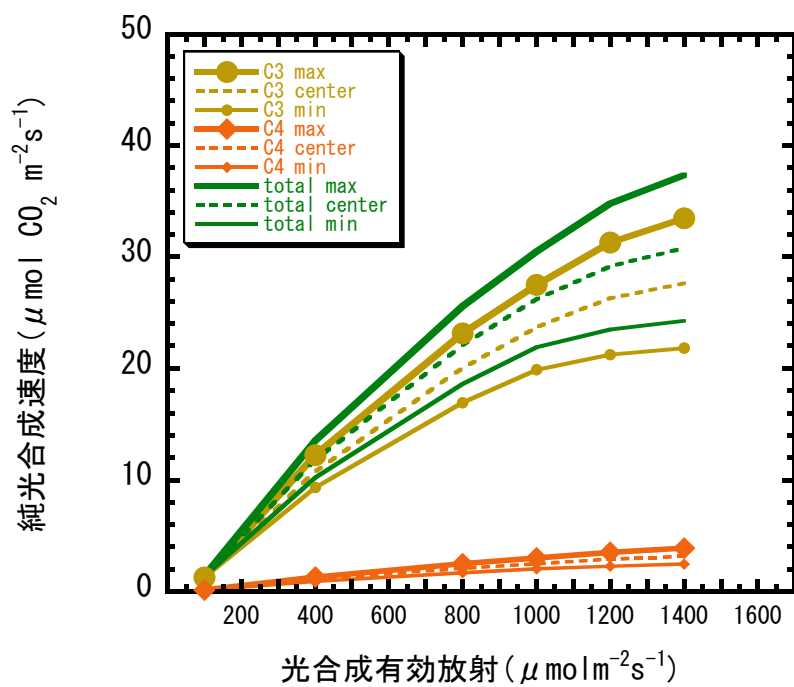
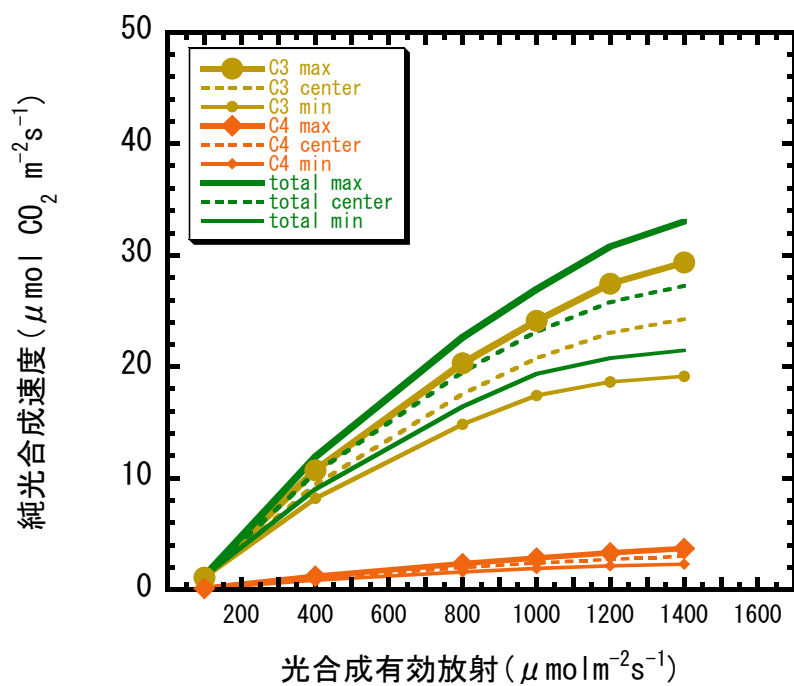


図 44 図 42 より推定した 2003 年における C3、C4 植物の光合成能力の差異
上図は放牧区、下図は禁牧区を示す。

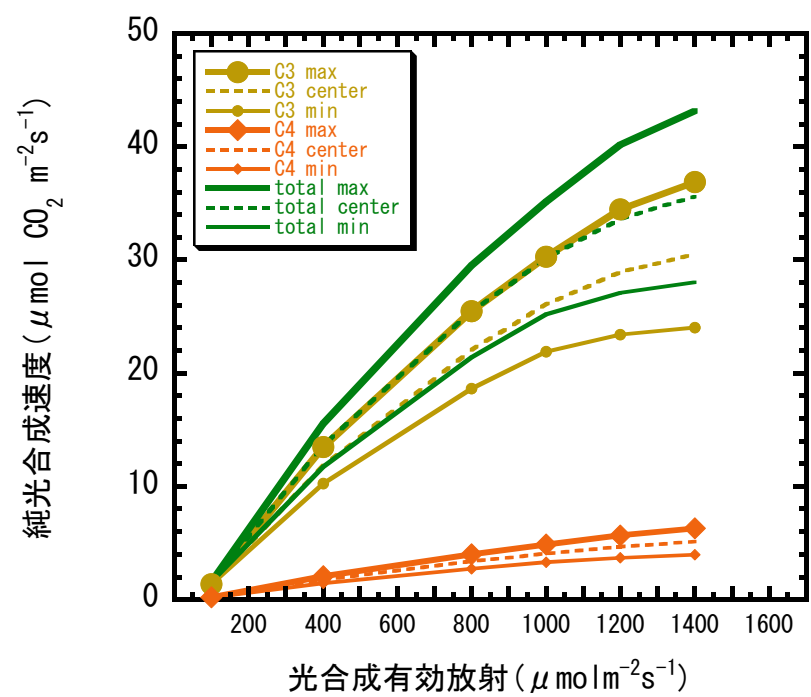
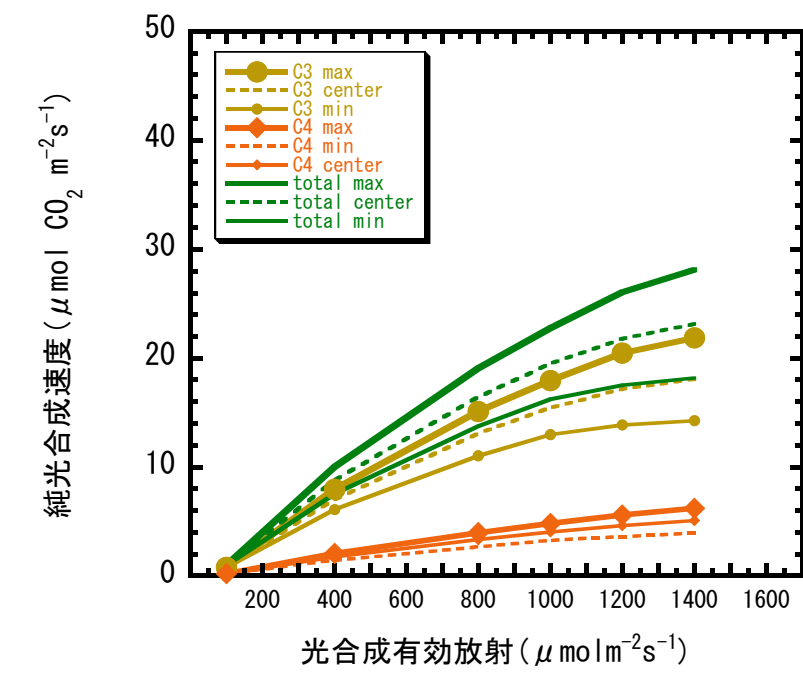


図 45 図 42 より推定した 2004 年における C3、C4 植物の光合成能力の差異
上図は放牧区、下図は禁牧区を示す。

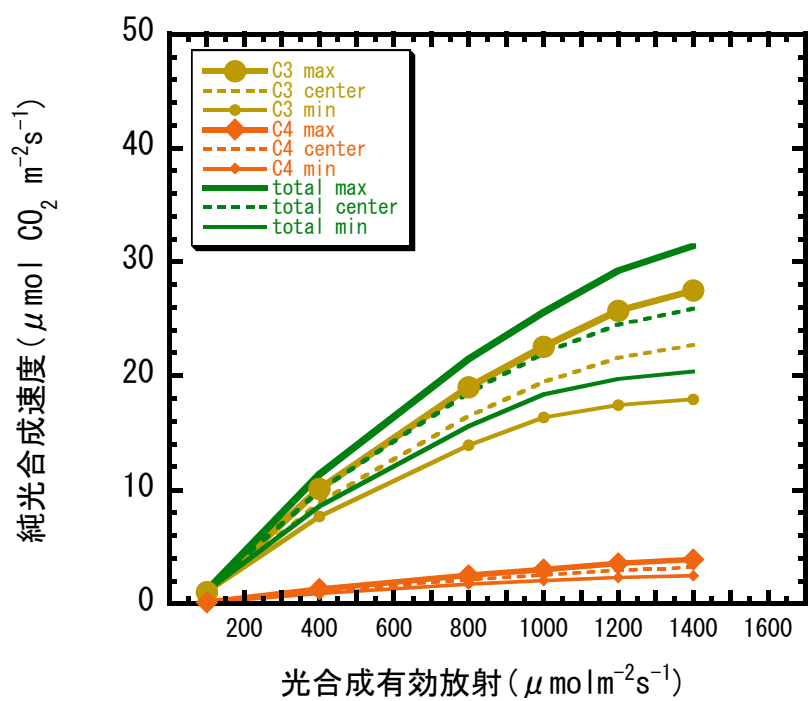
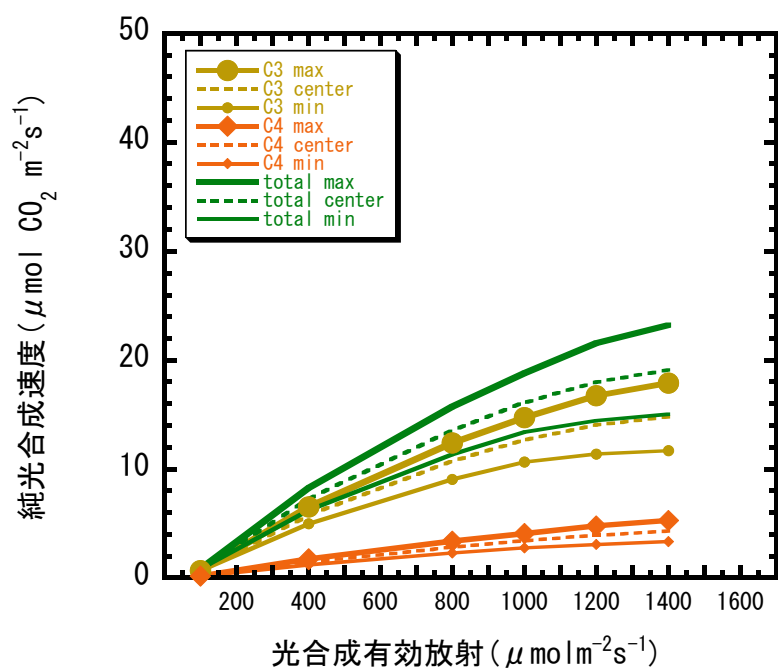


図 46 図 42 より推定した 2006 年における C3、C4 植物の光合成能力の差異
上図は放牧区、下図は禁牧区を示す。

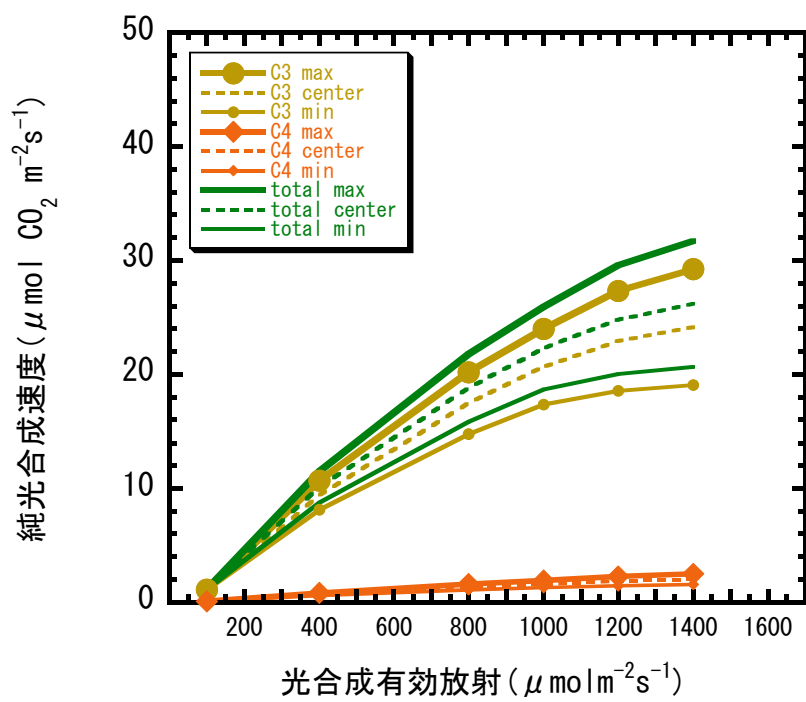
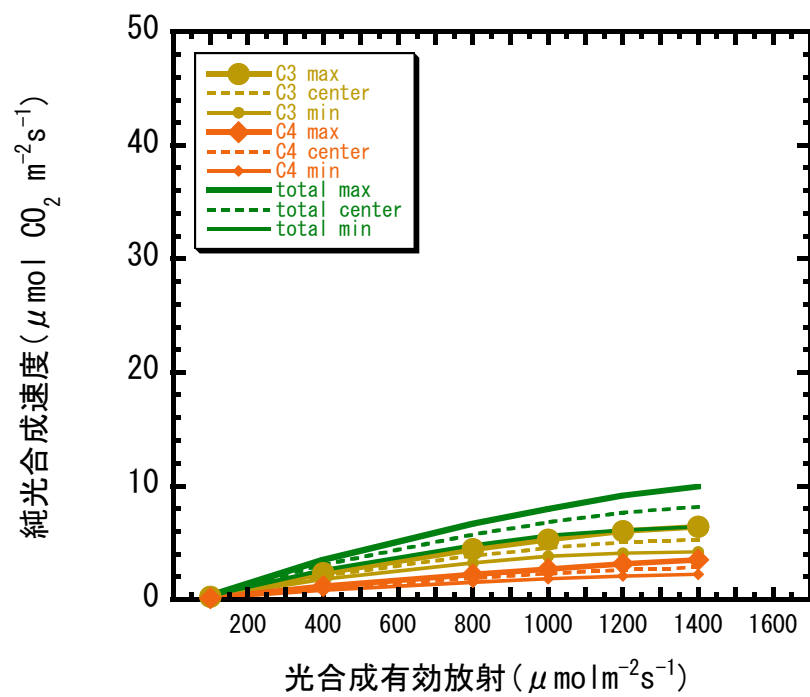


図 47 図 42 より推定した 2007 年における C3、C4 植物の光合成能力の差異
上図は放牧区、下図は禁牧区を示す。

3.5. SWC の増減に対する NEP の関係性

転倒ます式雨量計によって観測された日積算降水量について図 47 に示す。また、2004 年と 2005 年の生育期 5 月～10 月における日中の日積算値 NEP と日積算値 PPT について相関性を検討してみた。放牧区については図 48 に、禁牧区については図 49 に示す。どちらも月平均化した値から相関性を読み取ることは出来なかった。

次に、生育期間日中において $u^* \geq 0.2 \text{ m s}^{-1}$ の NEP について、異なる SWC においてどのように影響を受けるか調べるために、Li et al. (2005) を参考に、Ta、VPD と同様に検討を行なってみた。SWC < 10%、 $10\% \leq \text{SWC} < 15\%$ 、 $15\% \leq \text{SWC}$ の 3 区分において、PAR100 毎、 $0 \sim 2200 (\mu \text{ mol photons m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ の範囲における NEP と PAR を平均化したものを図に示した。2003 年放牧区を図 50 に、2004 年両区について図 51 に、2005 年両区について図 52 に、2006 年両区について図 53 に示す。

多くのデータで高い SWC 条件下における NEP の増大が見られる。図 51～図 53 はおおむねその傾向に準じている。放牧区においては経年緩やかに値が減少していく傾向が見られ、2005 年を除き、SWC $\leq 15\%$ 条件化における NEP については大きな減少は見られない。しかし、誤差が大きくなっているため、SWC $\leq 15\%$ 条件下においても減少していく傾向にあることは変わらないと思われる。2005 年は降雨の少ない年であり、そのため SWC $\leq 15\%$ 条件でデータ個数が少ないため、欠損の多いグラフとなった。しかし、他の年と異なり、SWC < 10% の条件における NEP が $10\% \leq \text{SWC} < 15\%$ 条件における NEP よりも高くなるという逆の傾向を見せている。禁牧区では 2005 年以外は高い SWC 条件ほど、PAR の増大に伴う NEP の増加の傾向が見られた。2004 年は誤差の範囲が広がるものの、放牧区と近い挙動を見せている。2005 年は放牧区と異なり、SWC 条件が高いほどに NEP が増大する傾向が見られる。2006 年については SWC < 10% の条件下における NEP は放牧区よりも低い傾向が見られる。

SWC について 2003 年～2006 年における降水量(4 月 1 日～翌年 3 月 31 日まで)と両区における土壌含水率の変化について図 54～図 57 に示す。両区において降雨イベントに対して土壌含水率の変化が発生していることが読み取れる。DOY 3 月から 5 月にかけて降雨の観測がないにもかかわらず、土壌含水率が変化する時期が経年見られるほか、放牧区において土壌含水率が変化する時期が認められる。これは冬季の表層土壌の凍結の融解によって変化しているものと思われる。また、降雨のない状態における土壌含水率の違いは TDR 土壌水分計の設置高度の違いとバイオマスによる水分の摂取によるものと思われる。しかし、降雨発生直後において両区の土壌含水率は同一、もしくは禁牧区の方が高い値を示すことが判読できる。また、全体的に放牧区より禁牧区において PPT に対する反応が鋭敏であることが窺える。

次に、小島(2004)、坂口(未発表)による表層土壌 12cm における放牧区と禁牧区の SWC の違いについて図 58 に示す。2003 年から 2005 年にかけて禁牧区において比較的低い土壌含水率が見られる。また Li, S.-G.(未発表)においても同様の調査が 2006 年について五日間行なわれている。出展したものを図 59 に示す。その結果からは、両区において降雨イベントの直後 SWC は同等の値となるが、乾燥時には禁牧区で低い SWC が算出されていることが示されている。深度 12cm における土壌含水率の差、及び降雨イベント後

の禁牧区の土壌含水率の大きな減少は、禁牧区において地下深部への降雨の浸透以外の水の消費が起きているためと考えられる。高い SWC 条件下において NEP が増大する傾向が見られることから植生による光合成が活発化すると考えられ、放牧区よりも AGB の多い禁牧区では土壌からの水分の摂取も放牧区と比較してより大量に行なわれていると見られる。また、2006 年禁牧区において低い SWC 条件時に NEP の低い傾向が見られることと、禁牧区において降雨時以外の SWC が 10%を下回ることが多いことから、禁牧区では頻繁に土壌からの水分供給不足の状態が発生しており、その条件下で十分な光合成が行なえず、NEP の低下へと繋がっている事が考えられる。

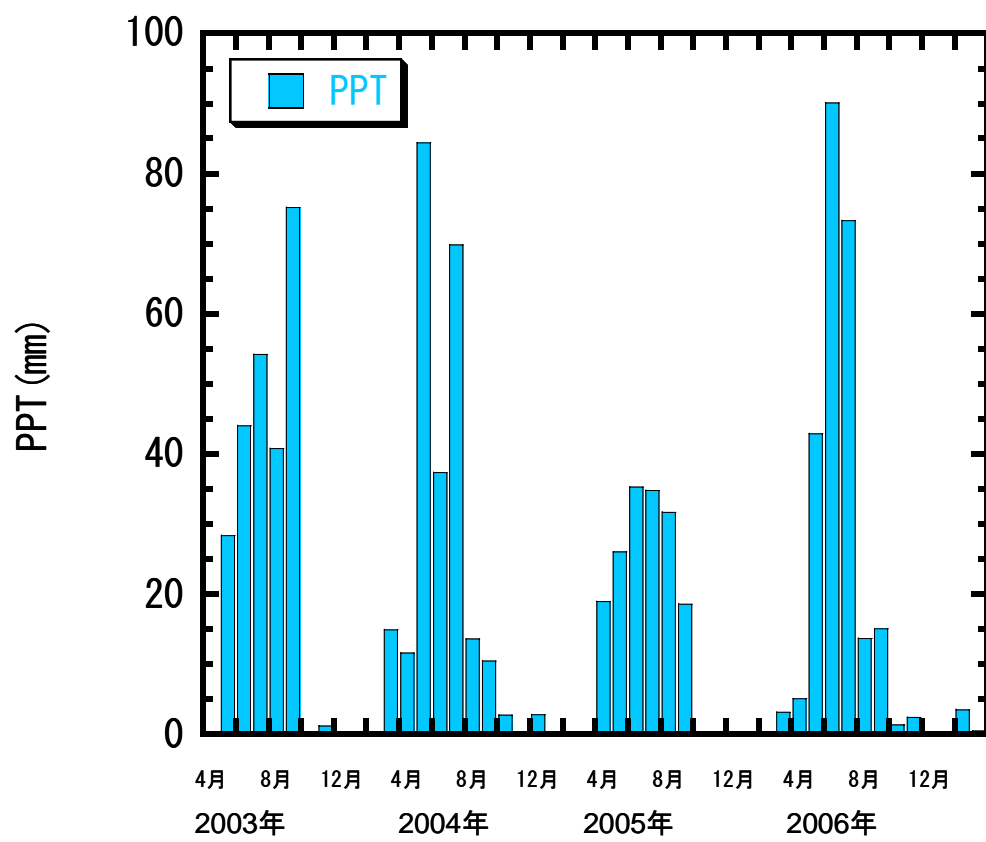


図 48 2003 年 4 月から 2007 年 4 月までの日積算降水量(PPT)の推移

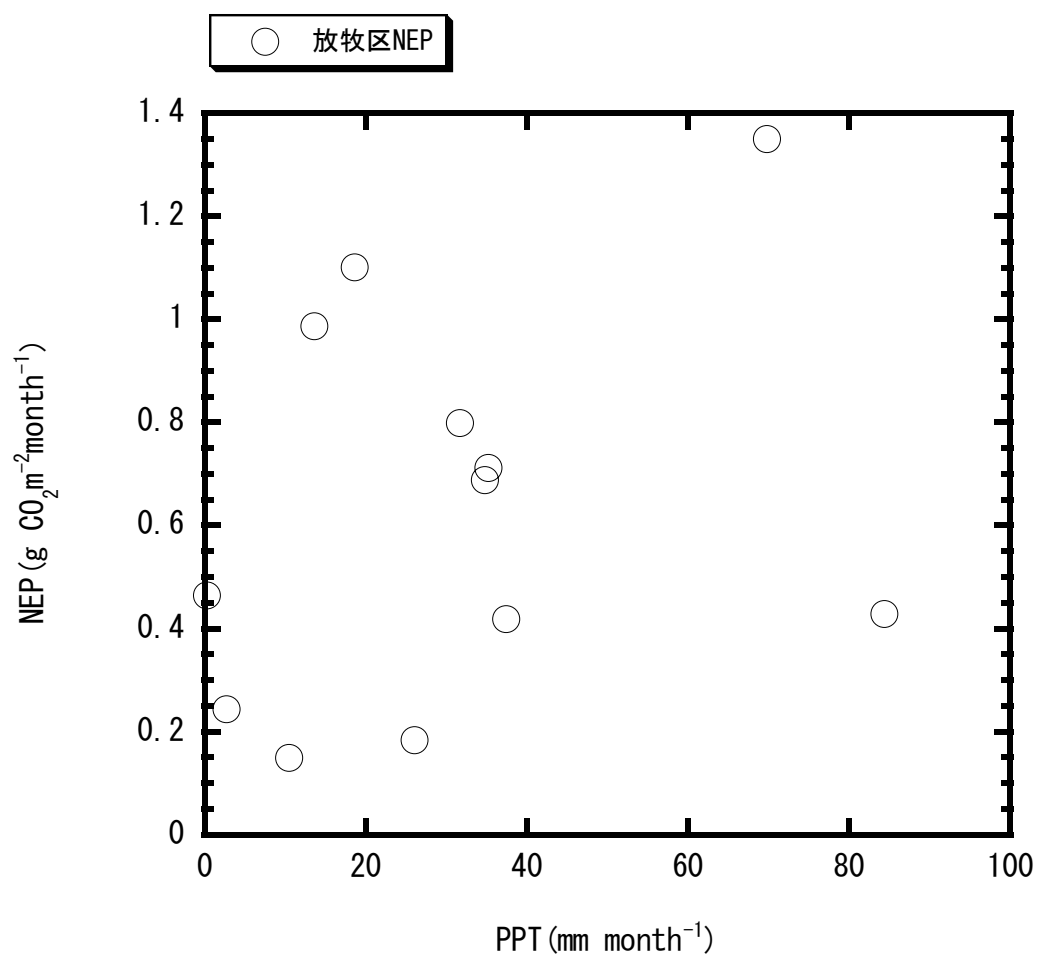


図 49 放牧区の生育期日中における NEP 月平均値と月積算値降水量 (PPT) の比較

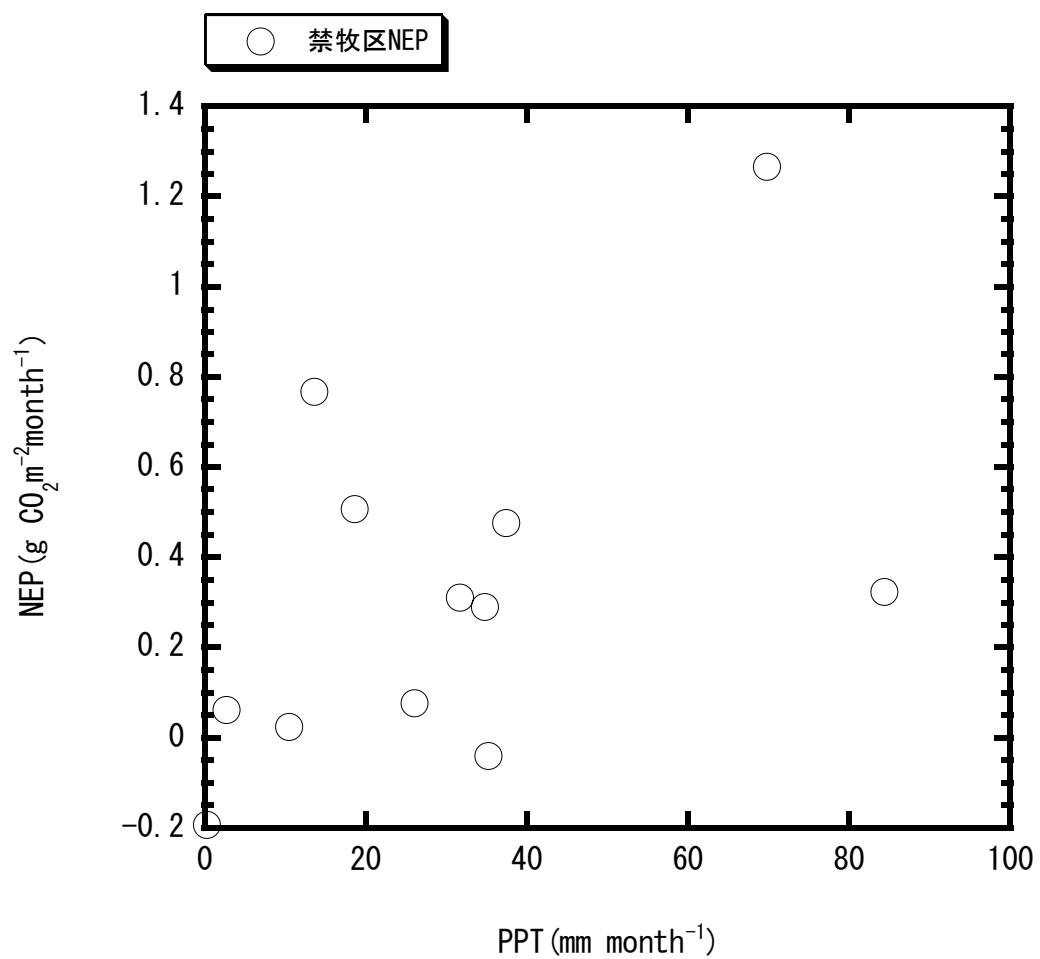


図 50 禁牧区の生育期日中における NEP 月平均値と月積算値降水量 (PPT) の比較

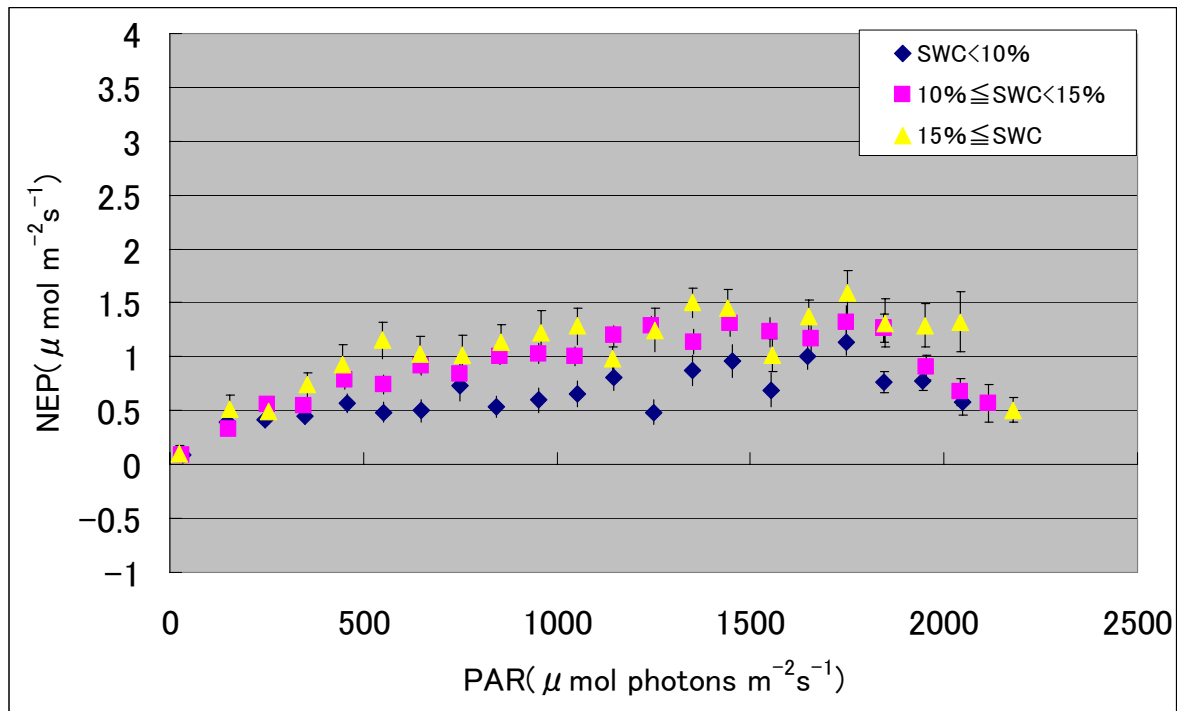


図 51 2003 年放牧区において異なる土壌含水率(SWC)条件下での NEP と PAR の挙動

図中のエラーバーは標準誤差を示す。

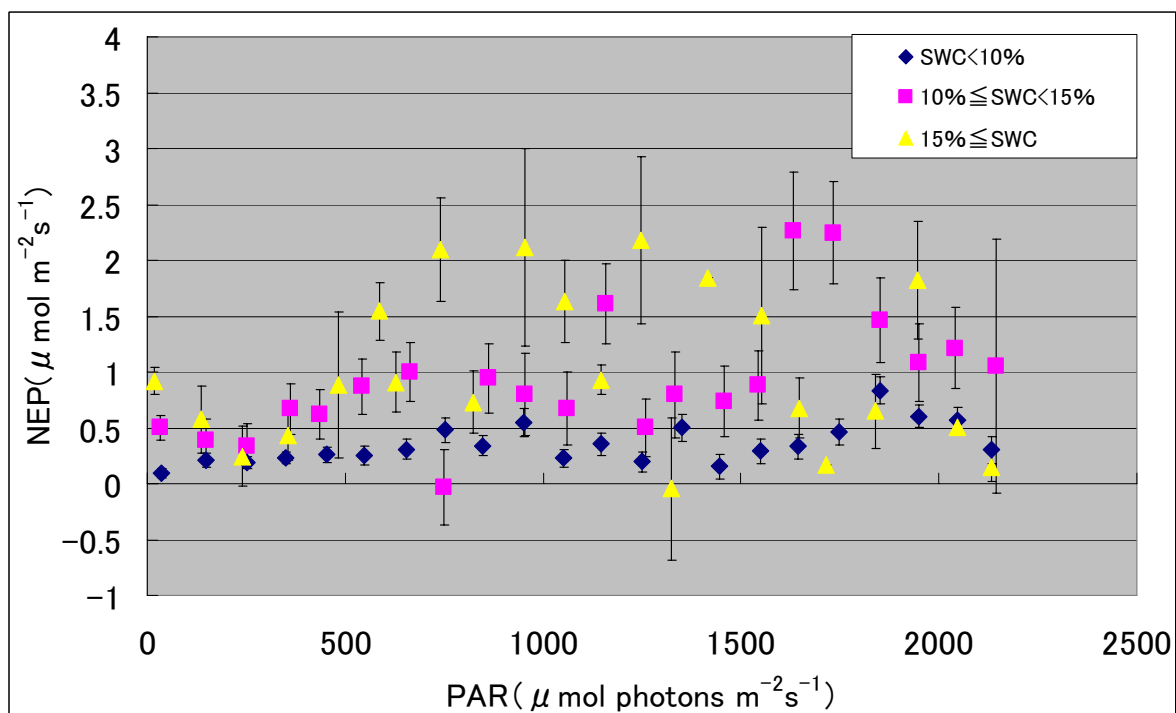
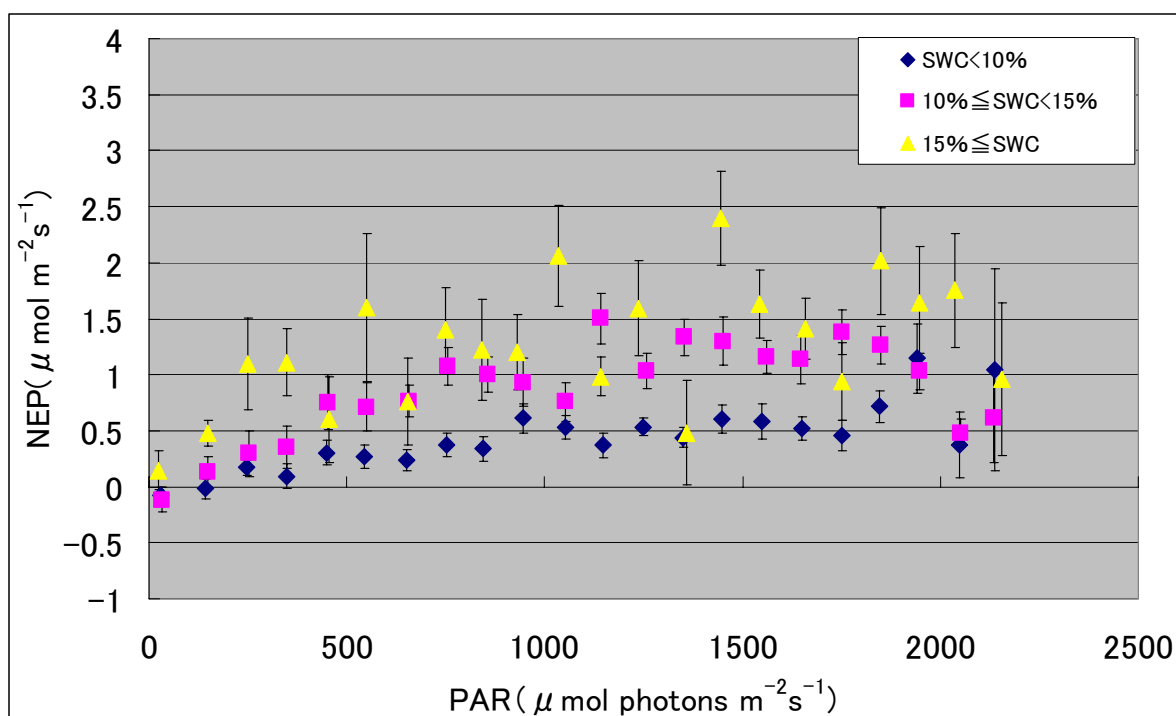


図 52 2004 年における異なる土壌含水率(SWC)条件下での NEP と PAR の挙動

上図は放牧区、下図は禁牧区を示す。また、エラーバーは標準誤差を示す。

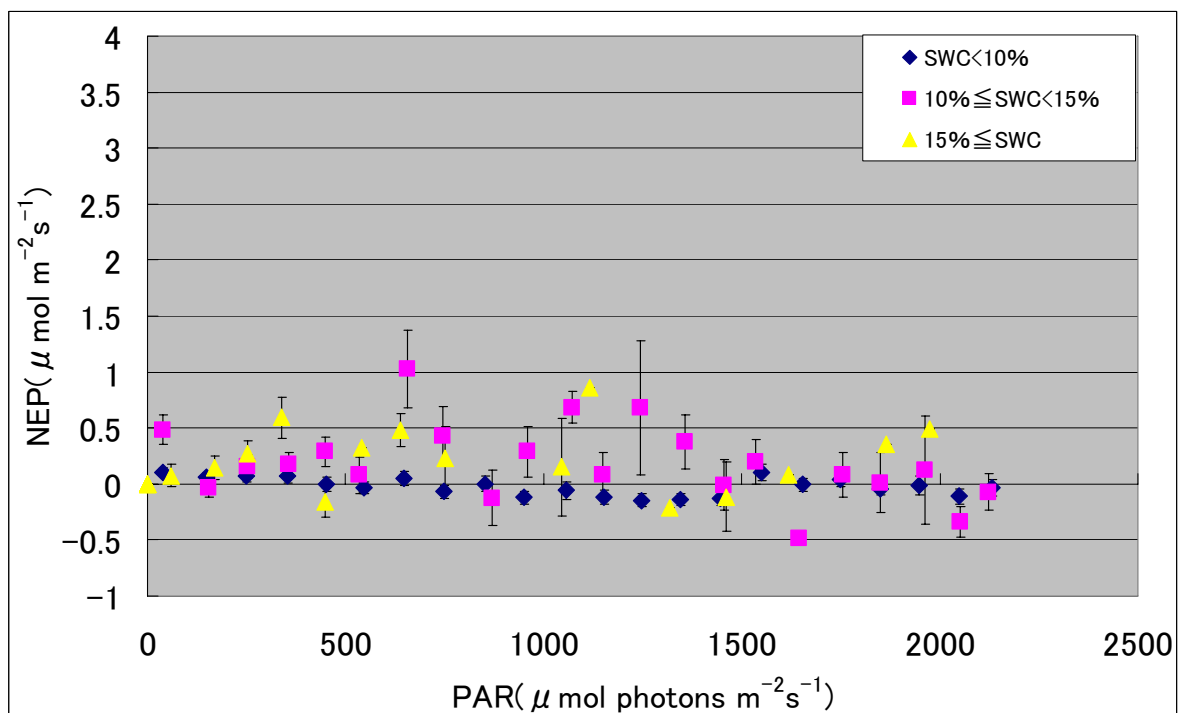
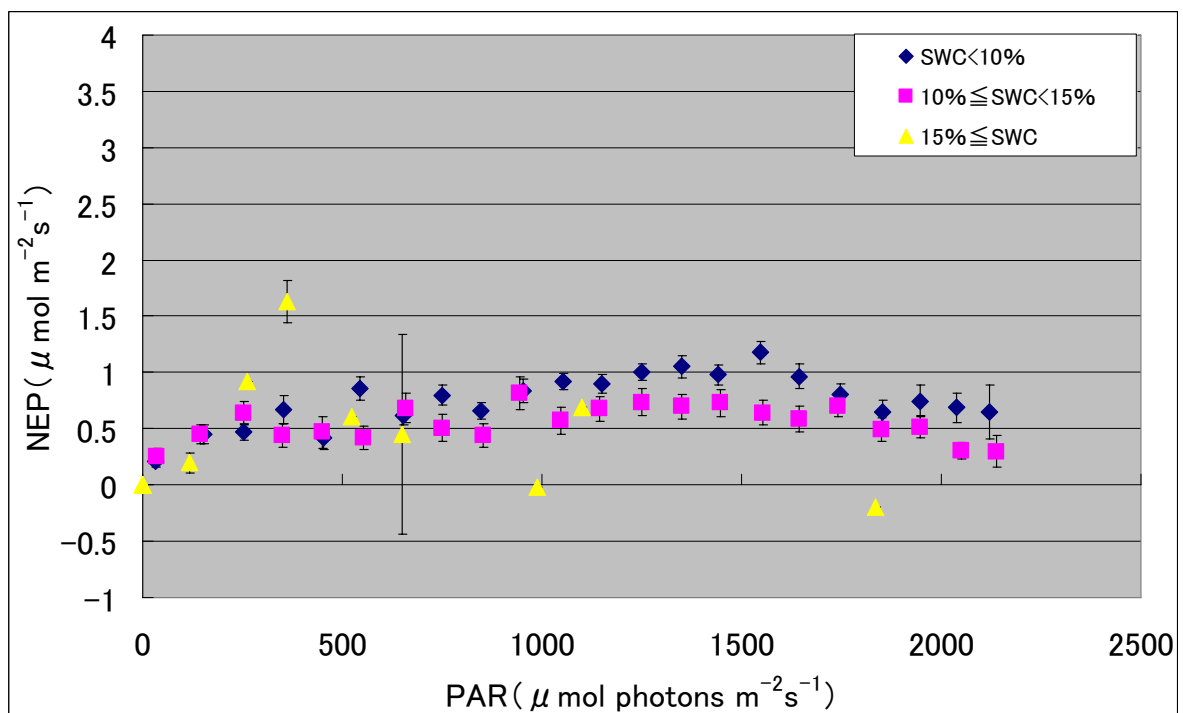


図 53 2005 年における異なる土壌含水率(SWC)条件下での NEP と PAR の挙動

上図は放牧区、下図は禁牧区を示す。また、エラーバーは標準誤差を示す。

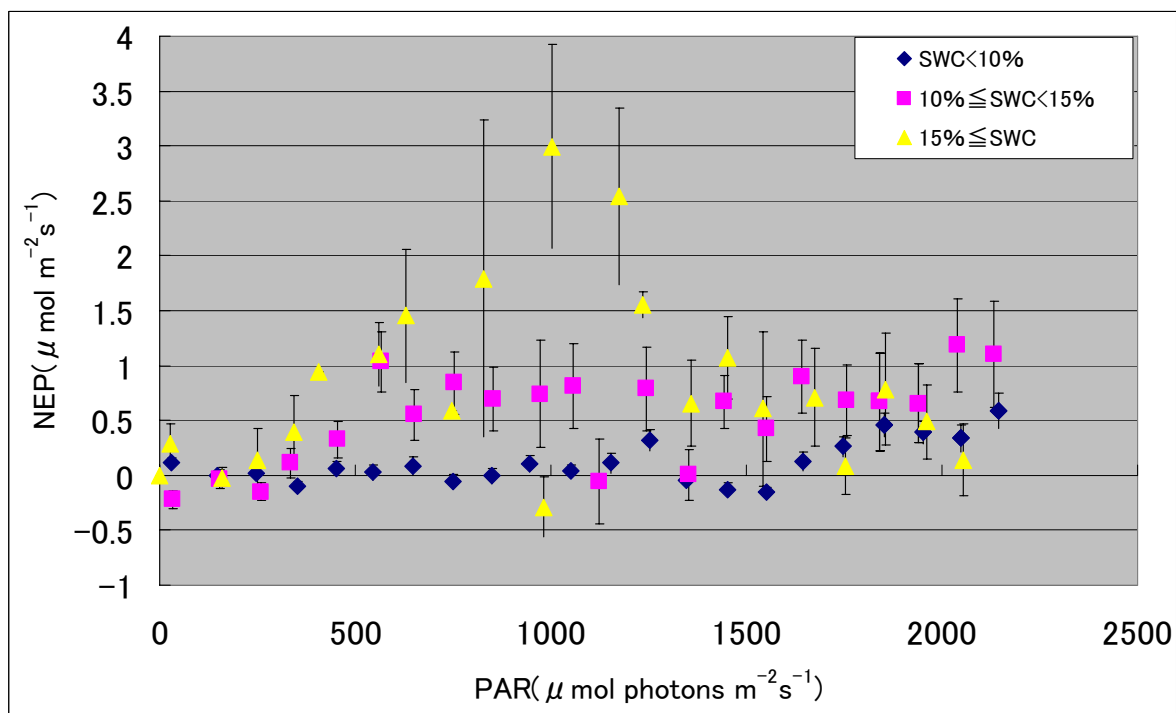
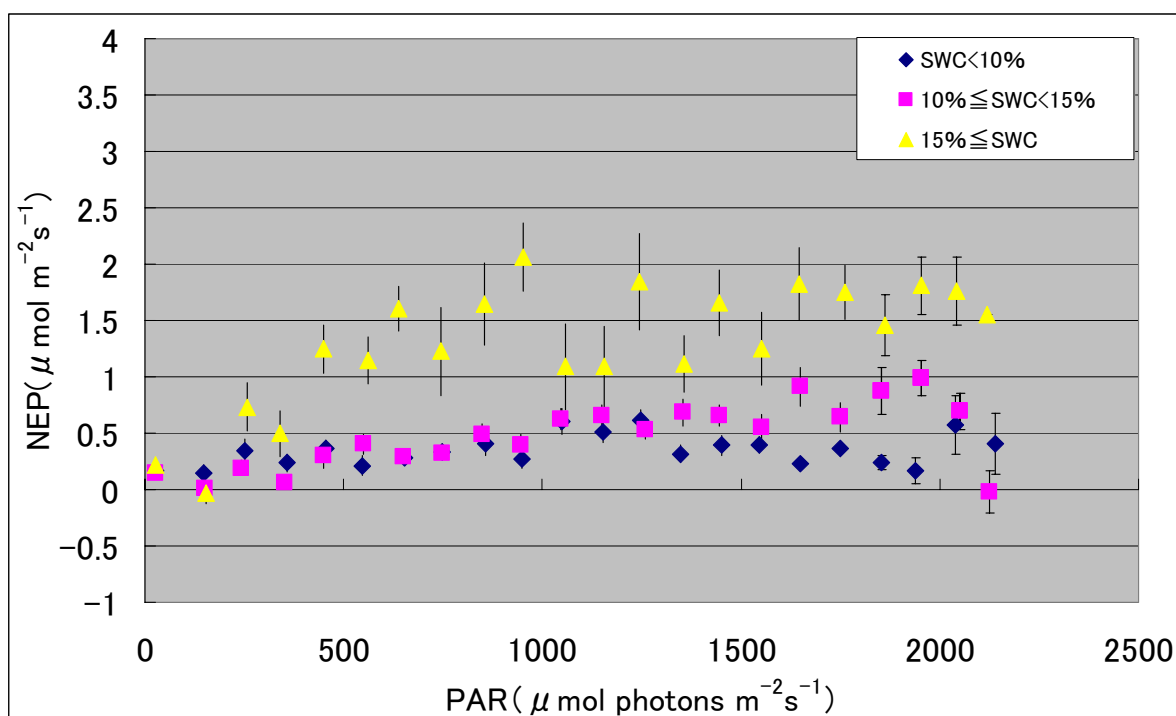


図 54 2006 年における異なる土壌含水率(SWC)条件下での NEP と PAR の挙動

上図は放牧区、下図は禁牧区を示す。また、エラーバーは標準誤差を示す。

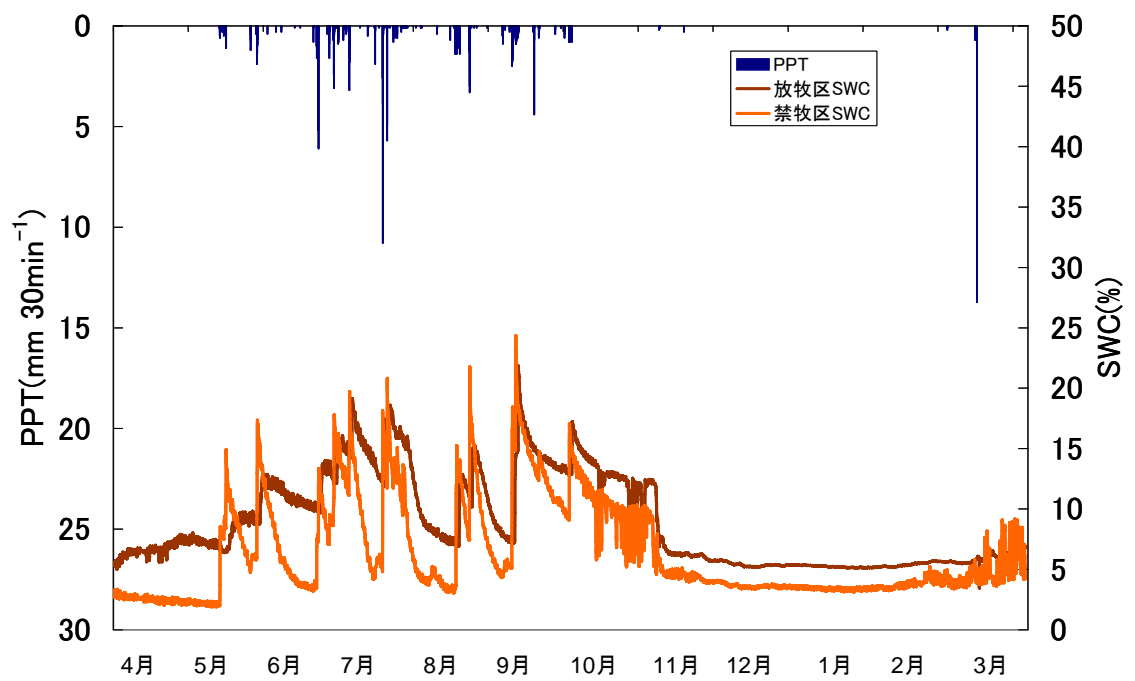


図 55 2003 年における降水量(PPT)と土壌含水率(SWC)の季節変化

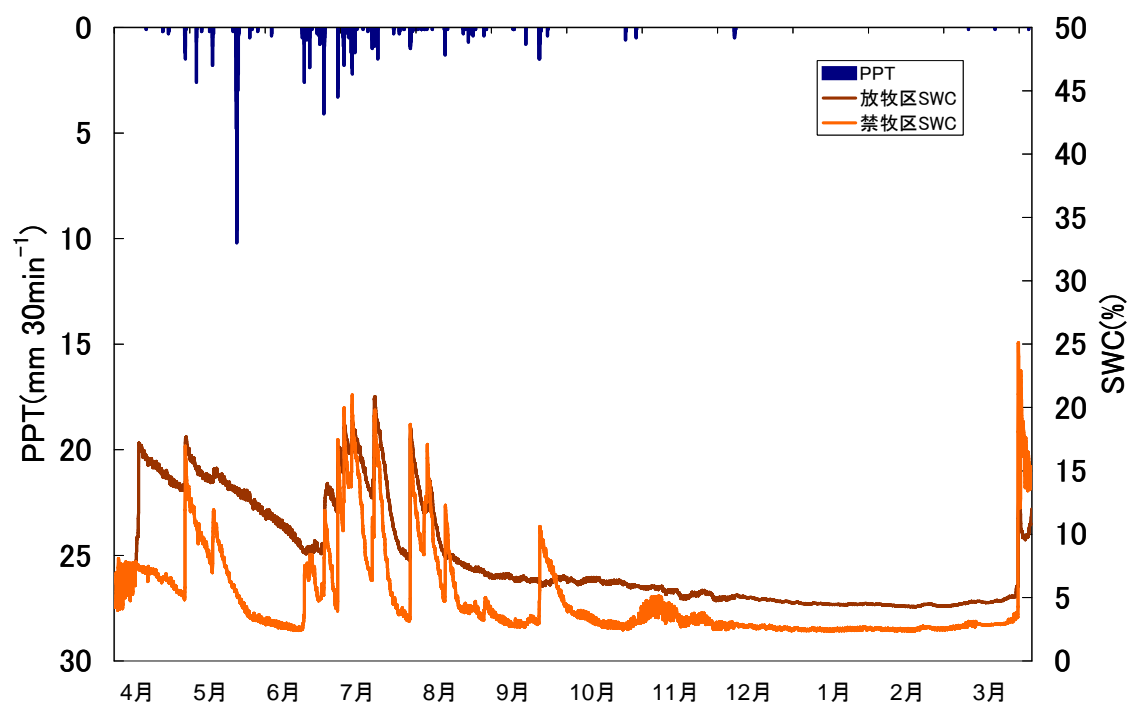


図 56 2004 年における降水量(PPT)と土壌含水率(SWC)の季節変化

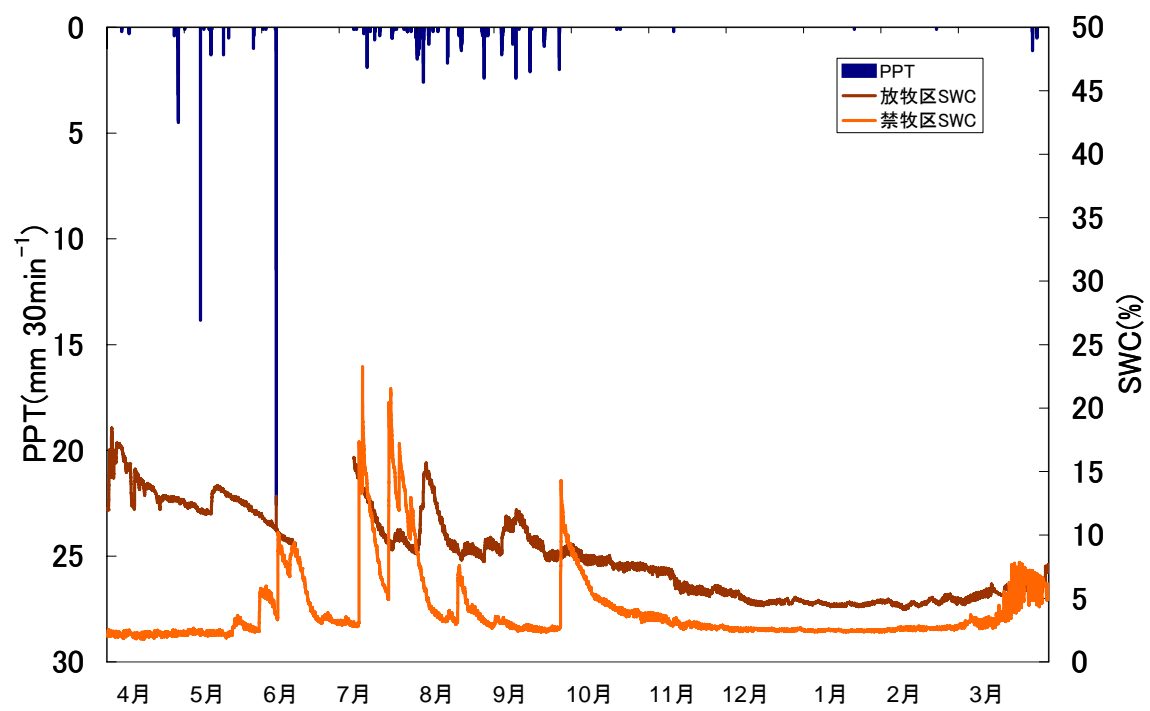


図 57 2005 年における降水量(PPT)と土壌含水率(SWC)の季節変化

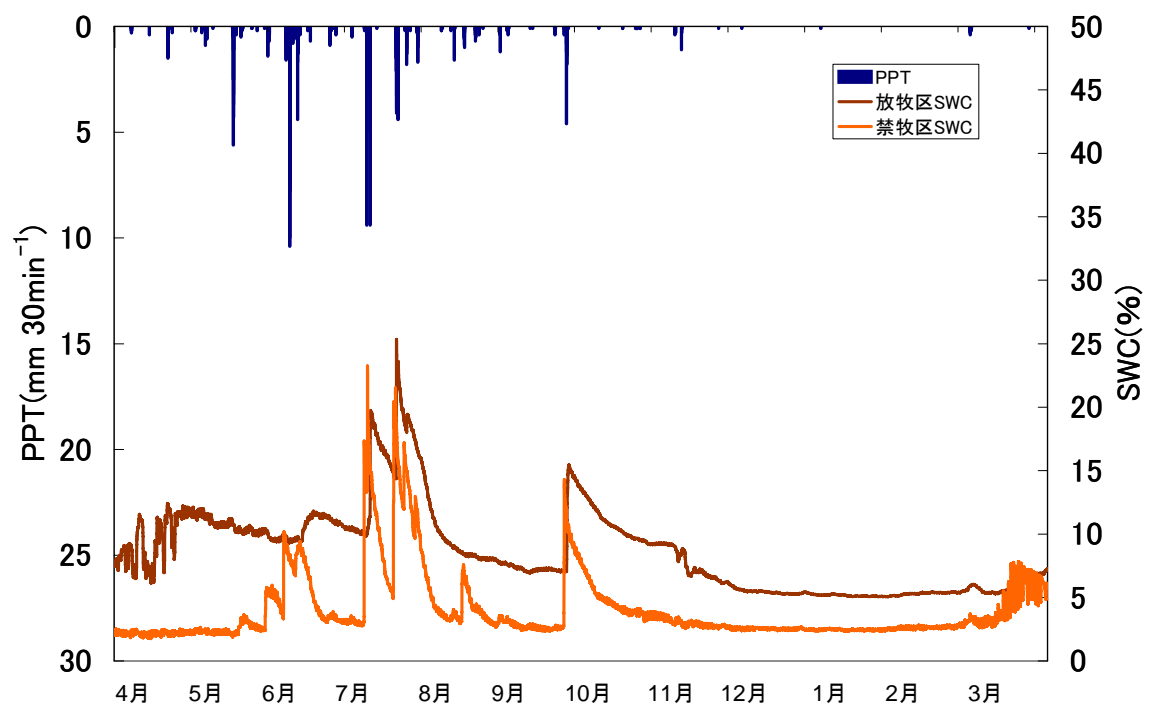


図 58 2006 年における降水量(PPT)と土壌含水率(SWC)の季節変化

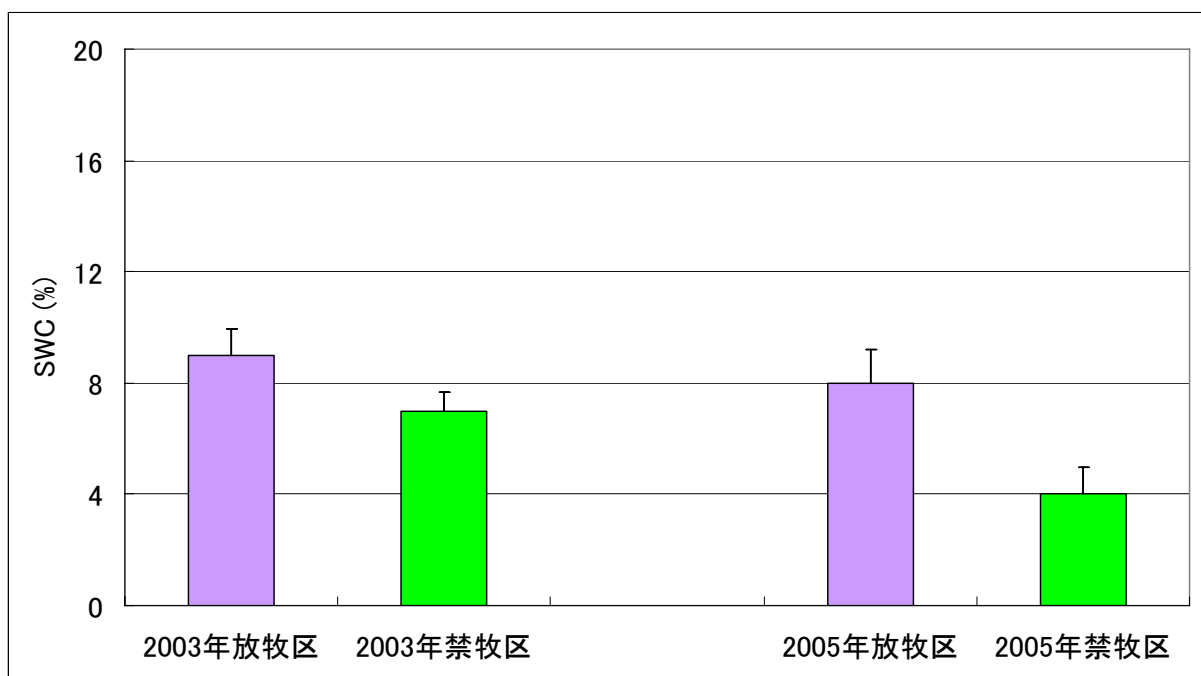


図 59 2003 年と 2005 年の深度 12cm の土壤含水率(SWC)の違い

縦軸の値は AWS ステーションにおける SWC (%) を、エラーバーは AWS ステーションから西方向へ 5m 間隔、20 点(AWS ステーションから 100m まで)測定された SWC の標準偏差を表しており、本研究対象地における平面状での土壤含水率の一様性を示す指標として掲載した。

(値は小島(2004)および坂口(未発表)より引用)

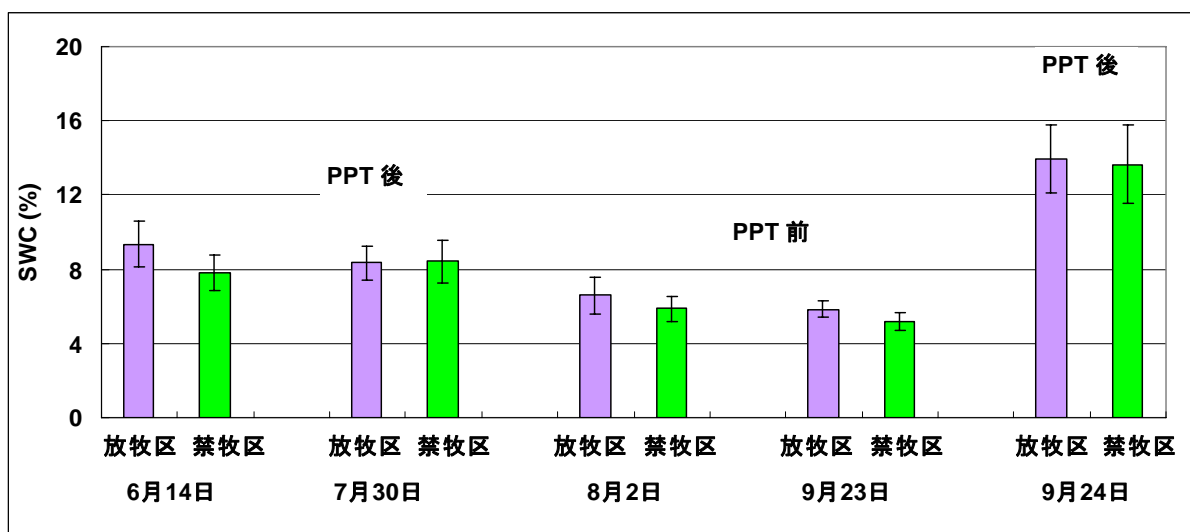


図 60 2006 年における深度 12cm の土壌含水率(SWC)調査

Jul.30(7 月 30 日)、Sept.24(9 月 24 日)は降雨イベント直後に測定したことを示す。

縦軸の値は AWS ステーションにおける SWC (%) を、エラーバーは AWS ステーションから西方向へ 5m 間隔で、20 点(AWS ステーションから 100m まで)測定した SWC の標準偏差を表しており、本研究対象地における平面状での土壌含水率の一様性を示す指標として掲載した。

値は Li S.-G.,(未発表)より出典、改変

3.4. 地表面熱収支との比較

算出した炭素動態と Kato (2007)によって算出された熱収支の値との比較を行なった。2003 年～2006 年までの両区における地表面熱収支量 R_n 、 H 、 IE 、 G を月毎に平均化したものを図 60 に示す。これらのうち 2004 年～2005 年において生育期間 5 月～10 月の NEP との比較を試みた。月ごとに平均化した放牧区の NEP と R_n について図 61 に、禁牧区における同様の比較について図 62 に示した。放牧区の日中における NEP と H について図 63 に、禁牧区における同様の比較について NEP と H について図 64 に、放牧区の日中における NEP と IE について図 65 に、禁牧区における同様の比較について NEP と IE について図 66 に、放牧区の日中における NEP と G について図 67 に、禁牧区における同様の比較について NEP と G について図 68 に示した。入力した値について表 11 に、表示されている回帰式については表 12 にそれぞれ示す。

R_n と NEP には両区において多項式による回帰式が得られた。 R_n の減少と共に NEP は M_0 へと回帰する挙動を見せ、増大と共に NEP は分散するが増大する傾向を見せた。 H と NEP には両区において弱い負の相関が見られた。 NEP と IE においては正の相関が両区において見られ、その相関性は禁牧区の方がより高いという結果になった。また NEP と G においては月平均値からの観点では両区において相関性を見ることは出来なかった。

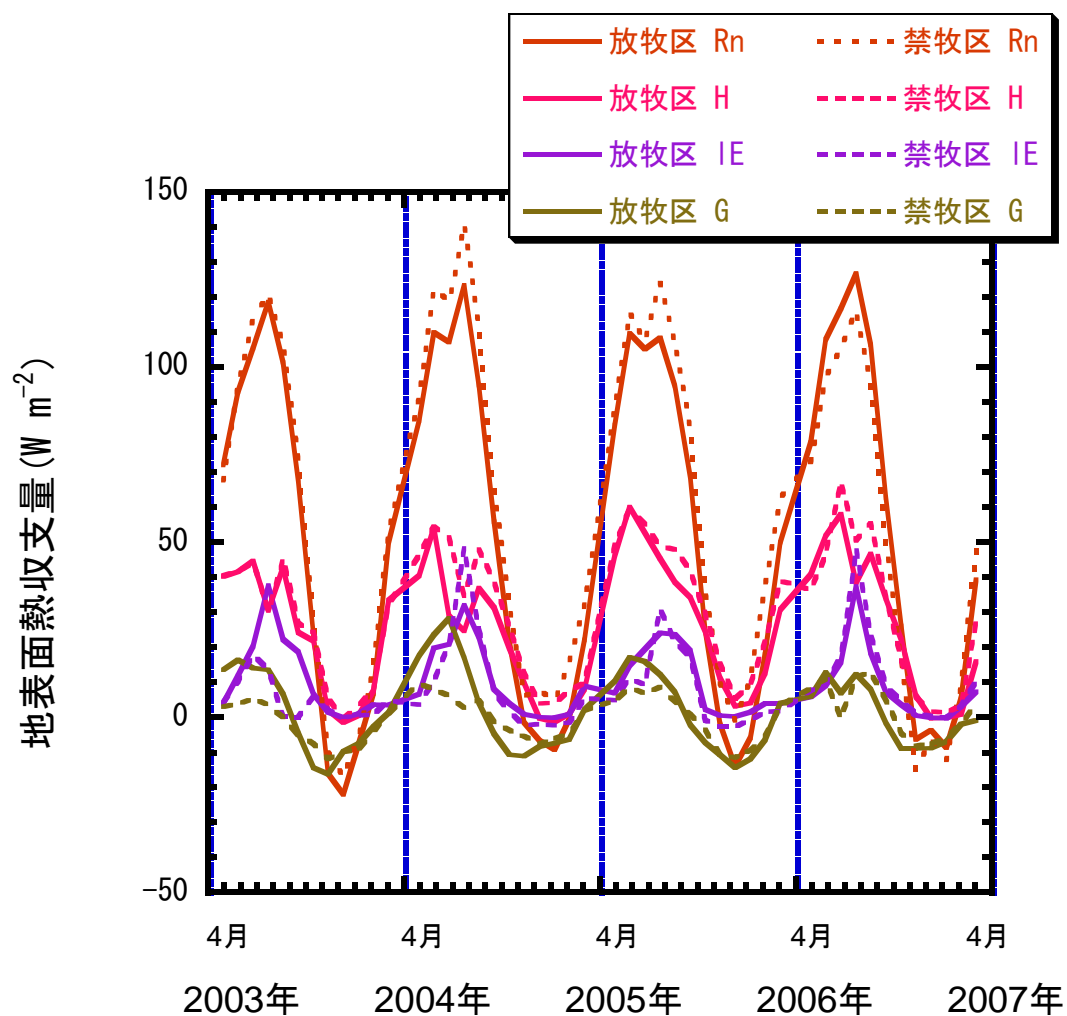


図 61 放牧区における 2003 年から 2006 年における熱収支の月平均値の変化

実線は放牧区を、点線部は禁牧区の推移を示している。青い縦の点線は各年の 4 月を示す。

(2003 年～2005 年の値は Kato (2007)を引用)

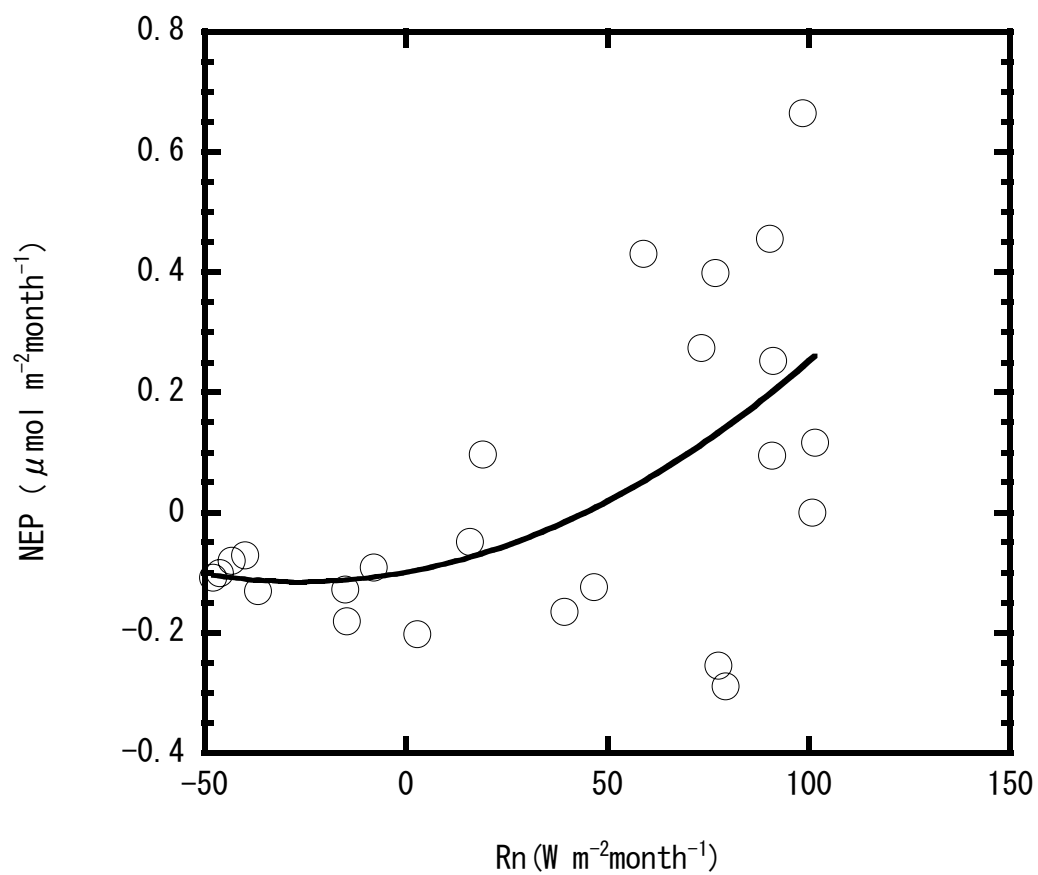


図 62 放牧区における月平均値による NEP と正味放射量(Rn)の比較

近似曲線は多項式曲線であり、使用した NEP、Rn は 2004 年 5 月～2005 年 10 月までの日中のデータを使用している。各値については表 11、表 12 に示した。

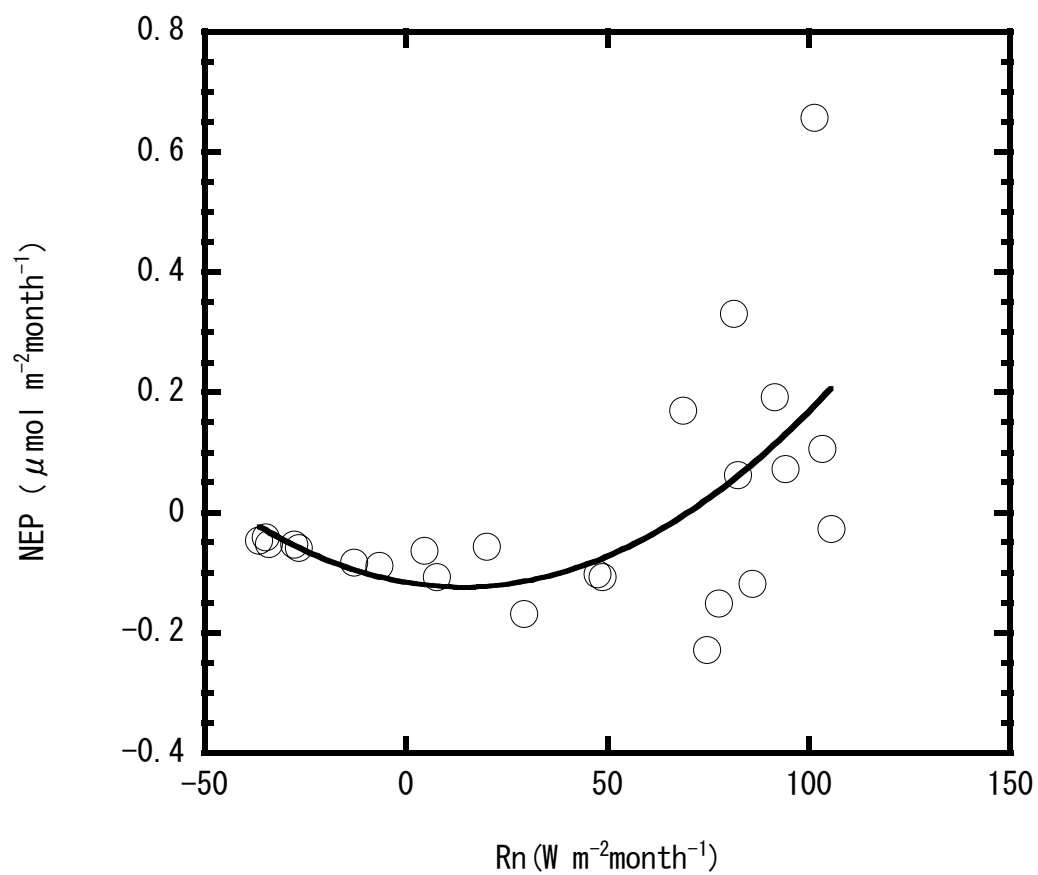


図 63 禁牧区における月平均値による NEP と正味放射量(Rn)の比較

近似曲線は多項式曲線であり、使用した NEP、Rn は 2004 年 5 月～2005 年 10 月までの日中のデータを使用している。各値については表 11、表 12 に示した。

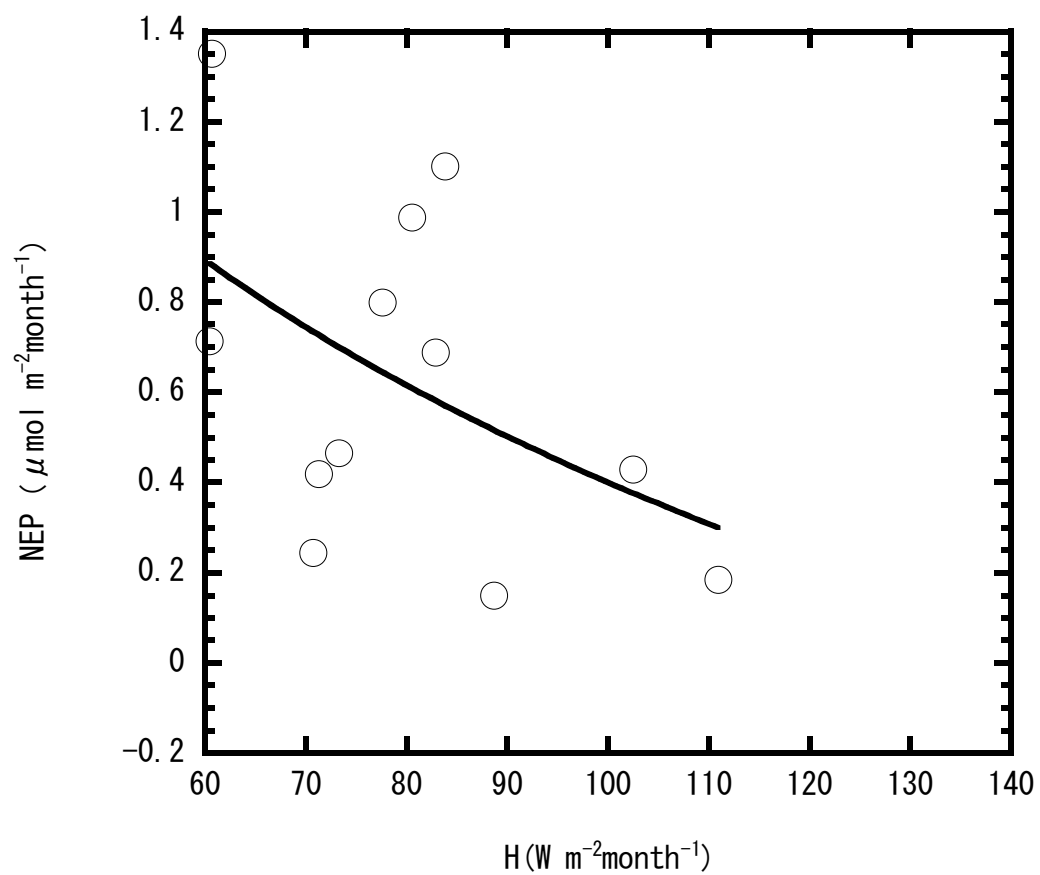


図 64 放牧区における月平均値による NEP と顕熱(H)の比較

近似曲線は対数近似曲線であり、使用した NEP、H は 2004 年 5 月～2005 年 10 月までの日中のデータを使用している。各値については表 11、表 12 に示した。

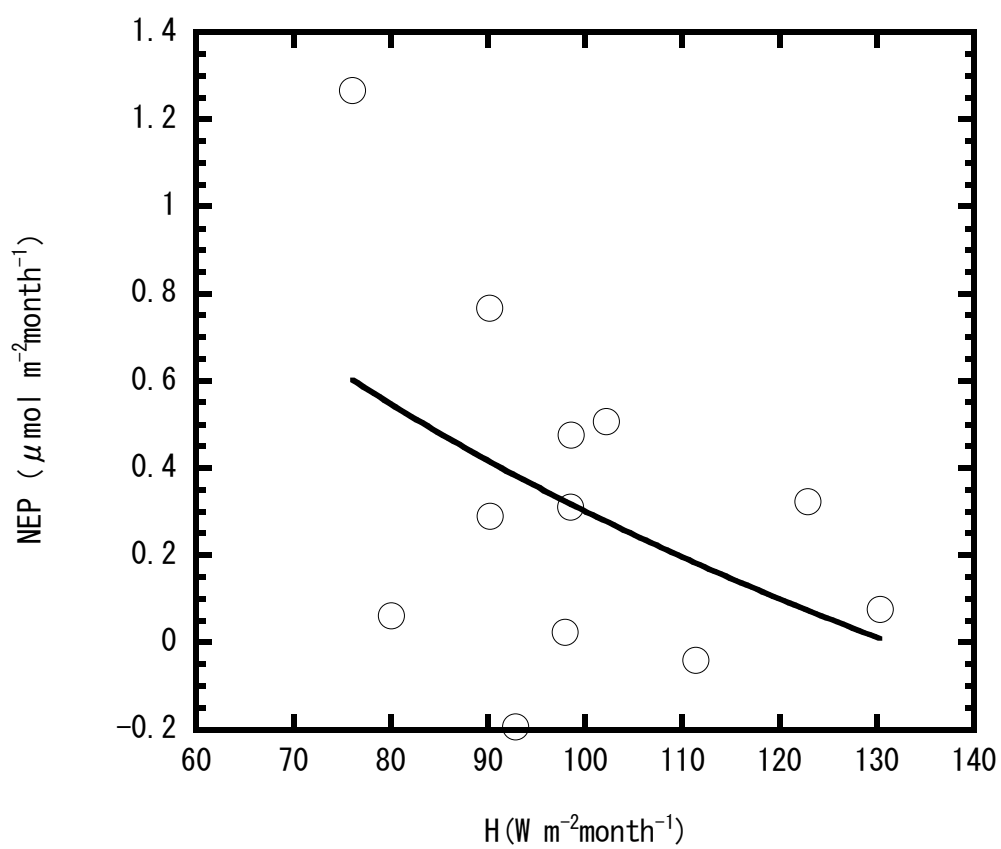


図 65 禁牧区における月平均値による NEP と顕熱(H)の比較

近似曲線は対数近似曲線であり、使用した NEP、H は 2004 年 5 月～2005 年 10 月までの日中のデータを使用している。各値については表 11、表 12 に示した。

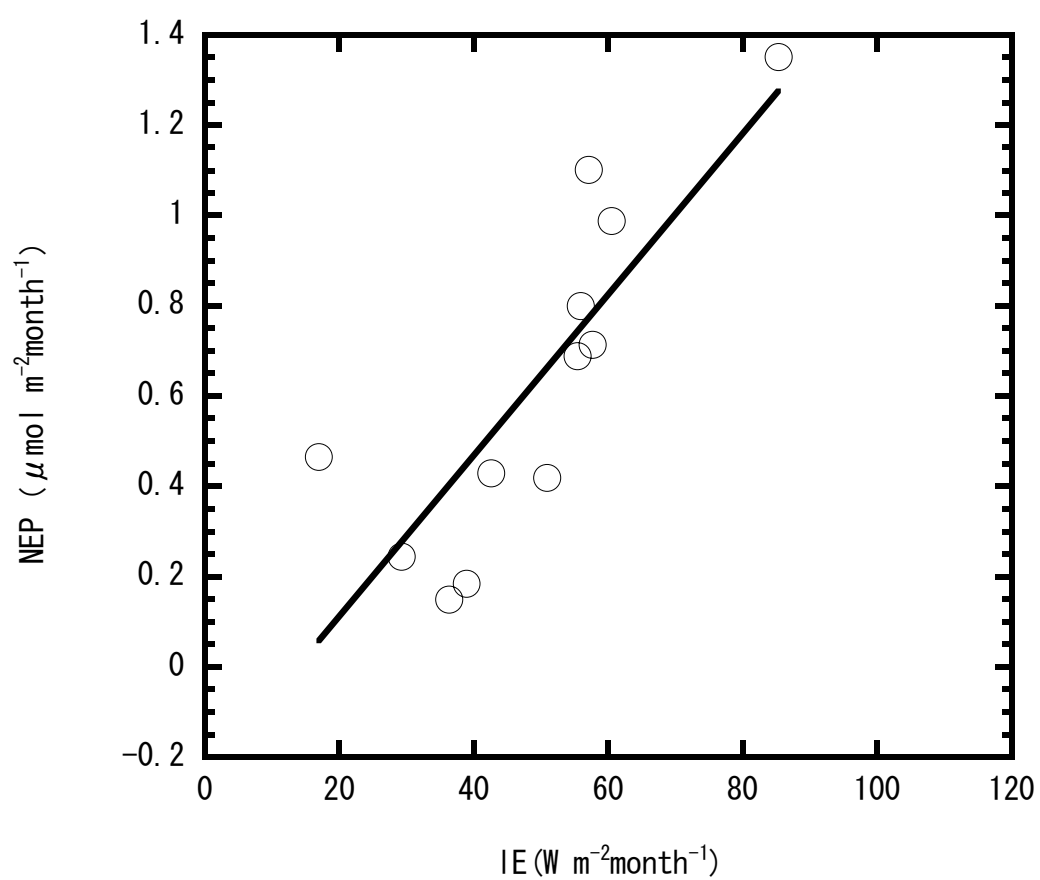


図 66 放牧区における月平均値による NEP と潜熱(LE)の比較

近似曲線は線形近似曲線であり、使用した NEP、LE は 2004 年 5 月～2005 年 10 月までの日中のデータを使用している。各値については表 11、表 12 に示した。

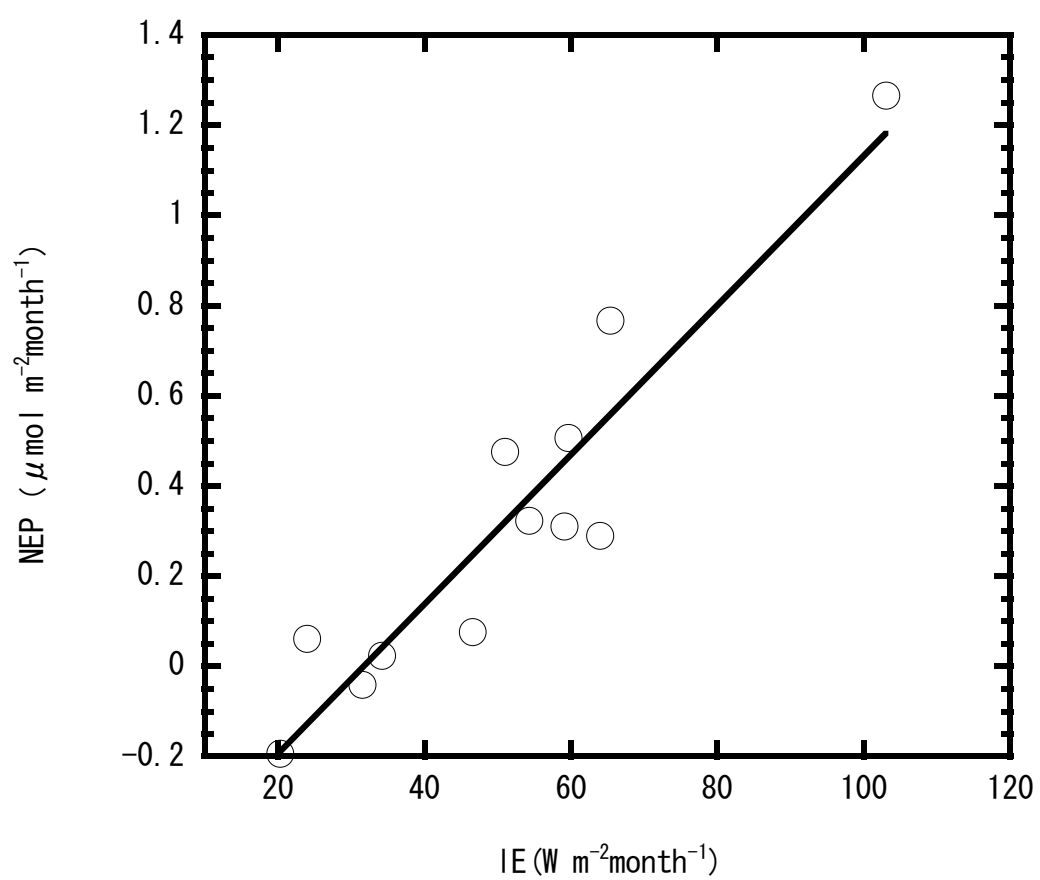


図 67 禁牧区における月平均値による NEP と潜熱(IE)の比較

近似曲線は線形近似曲線であり、使用した NEP、IE は 2004 年 5 月～2005 年 10 月までの日中のデータを使用している。各値については表 11、表 12 に示した。

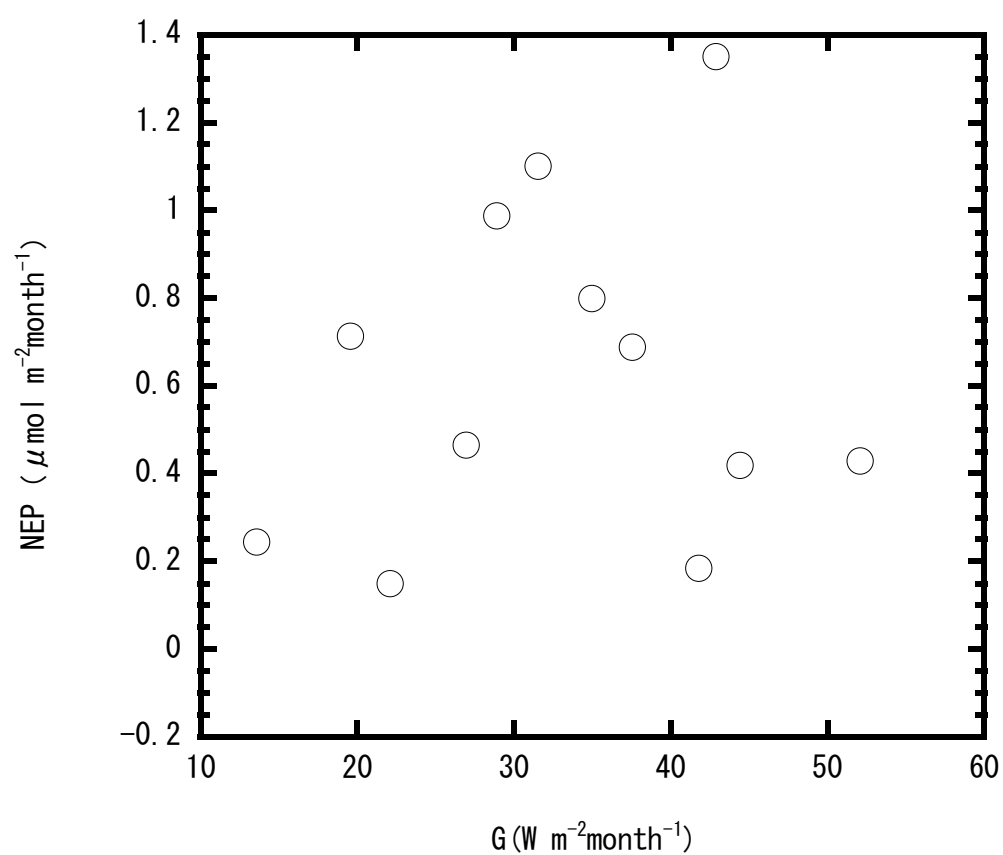


図 68 放牧区における月平均値による NEP と地中熱流量(G)の比較

使用した NEP、G は 2004 年 5 月～2005 年 10 月までの日中のデータを使用している。各値については表 11 に示した。

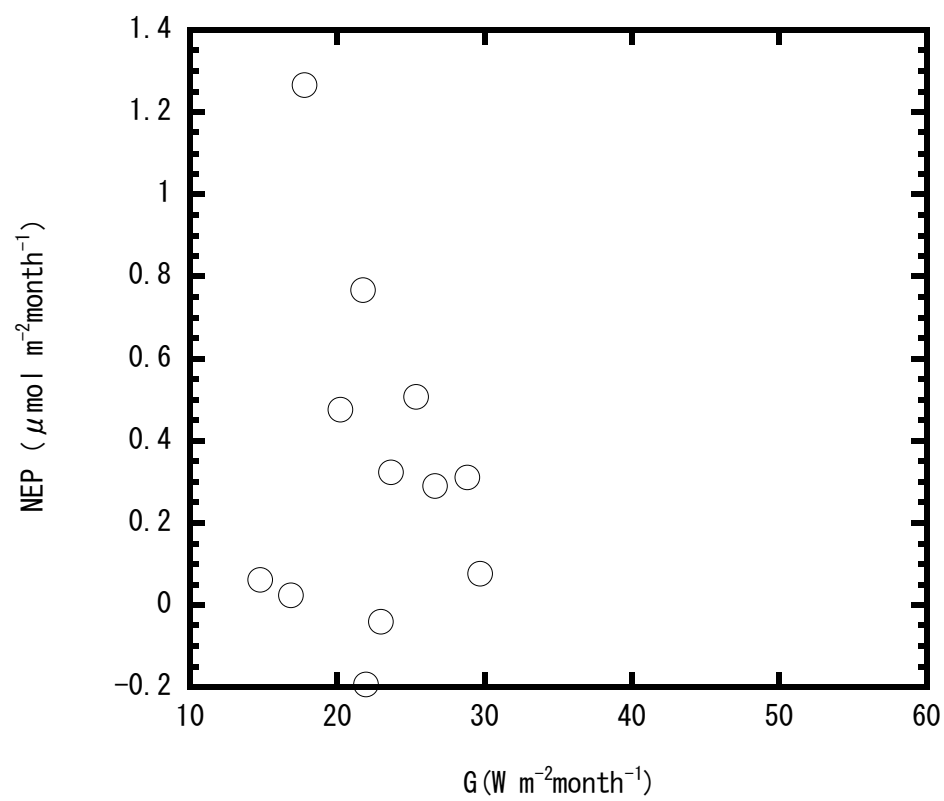


図 69 禁牧区における月平均値による NEP と地中熱流量(G)の比較

使用した NEP、G は 2004 年 5 月～2005 年 10 月までの日中のデータを使用している。各値については表 11 に示した。

表 12 NEP と熱収支の比較に用いた値

	NEP	Rn	H	IE	G
放牧区	(g CO ₂ m ⁻² month ⁻¹)	(W m ⁻² month ⁻¹)			
2004年5月	0.4	197.2	102.5	42.6	52.1
2004年6月	0.4	166.6	71.3	50.9	44.4
2004年7月	1.4	188.9	60.7	85.3	42.9
2004年8月	1.0	169.9	80.5	60.5	28.9
2004年9月	0.1	147.1	88.7	36.3	22.1
2004年10月	0.2	113.5	70.7	29.2	13.6
2005年5月	0.2	191.6	111.0	38.9	41.8
2005年6月	0.7	137.7	60.4	57.7	19.5
2005年7月	0.7	175.9	82.9	55.5	37.6
2005年8月	0.8	168.5	77.6	55.9	35.0
2005年9月	1.1	172.5	83.9	57.1	31.5
2005年10月	0.5	117.2	73.3	16.9	26.9
禁牧区					
2004年5月	0.3	200.9	122.9	54.3	23.7
2004年6月	0.5	169.8	98.6	51.0	20.2
2004年7月	1.3	196.9	76.1	103.0	17.8
2004年8月	0.8	177.3	90.2	65.4	21.7
2004年9月	0.0	149.0	97.9	34.3	16.9
2004年10月	0.1	118.8	80.1	24.0	14.8
2005年5月	0.1	206.6	130.3	46.6	29.7
2005年6月	0.0	165.9	111.4	31.6	22.9
2005年7月	0.3	180.8	90.2	64.0	26.6
2005年8月	0.3	186.5	98.5	59.1	28.8
2005年9月	0.5	187.2	102.2	59.7	25.4
2005年10月	-0.2	135.1	92.8	20.3	21.9

表 13 熱収支との比較に使用した回帰式一覧

		回帰式	M0	M1	M2	R ²
図61	放牧区NEP-Rn	$Y = M_0 + M_1 \times x + \dots M_8 \times x^8 + M_9 \times x^9$	-1.16E-01	-1.11E-03	3.95E-05	3.13E-01
図62	禁牧区NEP-Rn	$Y = M_0 + M_1 \times x + \dots M_8 \times x^8 + M_9 \times x^9$	-9.93E-02	1.21E-03	2.30E-05	3.19E-01
図63	放牧区NEP-H	$Y = M_0 + M_1 \times \log(X)$	4.85	-2.22		0.22
図64	禁牧区NEP-H	$Y = M_0 + M_1 \times \log(X)$	5.38	-2.54		0.19
図65	放牧区NEP-IE	$Y = M_0 + M_1 \times X$	-0.24	0.02		0.68
図66	禁牧区NEP-IE	$Y = M_0 + M_1 \times X$	-0.53	0.02		0.87

4. 結論

半乾燥地域モンゴルにおいて、家畜が草原に及ぼす影響について渦相関法を用いた炭素動態の経年の算出と禁牧区における炭素動態の算出を行い、放牧や環境要因が草原に与える影響について検討を行なった。炭素動態の算出については、Li (2007)とは異なる手法を用いたため、傾向の似たものとなったが全体的に値の小さな算出となった。

①Li (2007)における 2003 年放牧区における炭素動態と本研究で算出した炭素動態について年積算値で比較を行なうと NEP は 81%、ER は 87%、GPP は 86%の精度となった。今回の算出が低くなってしまったのは生態生理学的観点からのエラーの除外が出来なかったこと、エラー値の除外に不備が見られたということなどが考えられる。

次に、経年的に算出された炭素動態から以下のことが推測される。禁牧区において AGB、litter が常に高い測定値であったにもかかわらず、NEP、ER は常に禁牧区の方が低く見積もられた。生育期についてのみ見た場合、2005 年以降の NEP は放牧区で増大、禁牧区で現象という違いが見られた。

②また、インターバルカメラによる家畜の観測による放牧圧の推定は各年最大で 2004 年 7 月の 0.25SEU ha^{-1} 、2005 年 7 月の 0.48SEU ha^{-1} となった。Chen et al. (2007)から、この結果は持続可能性のある放牧圧であることがいえる。またGPSによる放牧圧の評価では、直接的に放牧区、禁牧区の放牧圧を評価することは出来なかったが、Camp周辺における放牧圧について評価することが出来た。その結果、Camp周辺ではChen et al. (2007)で持続不可能と判断される $0.8 \text{SEU ha}^{-1} \text{day}^{-1}$ 以上の放牧圧が観測され、Camp周辺が裸地化していたことから放牧による局地的な砂漠化は起きていることが確認された。しかし、インターバルカメラの結果から、放牧区での過放牧状態は考えにくい。また遊牧という放牧地を移動する文化が局所的に過放牧状態にあるKBU草原の放牧圧を緩和させているともいえる。

③Ta、VPD の異なる条件化における NEP の挙動については、両区において同 Ta、同 VPD 条件で禁牧区の NEP が低くなる傾向が見られた。これについては 2004 年以降両区において顕著な差が見られる C4 植物の占有率の差が要因として考えられる。禁牧の影響は 2004 年以降の C4 植物の生育を妨げる効果を持ち、高温時、乾燥時における光合成能力に優れた C4 植物が減少することによって、高い Ta、VPD の条件下における炭素の吸収が減退したものと考えられる。

④SWC の異なる条件化における NEP の挙動については、2006 年の両区の比較から次の推測を立てた。2006 年の禁牧区は低い土壌含水率における NEP が放牧区において低くなる傾向がある。さらに、土壌含水率は深度 12cm において禁牧区の方が早く減少することが判明しており、禁牧区のほうが浅く埋設されている TDR センサーにおいても常に禁牧区の方が低い土壌含水率を示している。これらから禁牧の影響は降雨時以外での土壌含水率の低下を招き、植生にとって水分の供給が不足した状態をもたらした。そのため十分な光合成が行なえず、低い炭素動態の結果を生み出す要因となったものと考えられる。

⑤また、生育期におけるNEPと気温、熱収支における相関性について検討してみたところ、Rnでは放牧区において 0 W m^{-2} 、禁牧区においては 20 W m^{-2} 以上において正の相関が見られた。またHとNEPにおいては弱い負の相関、IEにおいては高い正の相関関係が確認された。Ta、GとNEPの相関性については月平均値における検討から相関を見ることは出来なかった。

今回の解析では一つ一つの考察から本研究対象地域における放牧が草原に与える影響について解明されていない点も多く、個々の項目から結論付けることは出来なかったと言える。今後の課題として、ER、GPPについて算出方法から改めて見直し、環境要因、特にGPPとバイオマスの関係性について土壌の有機物分解速度等の観点から検討を行なうこと。土壌水分の地下部での挙動をより詳細に調べる必要が考えられる。KBU草原におけるC3、C4植物のCO₂フラックスの違いについて生理生態学的観点からの調査も必要となるだろう。また、放牧圧については、今後も観測の継続が望ましく、同様にC4植物、AGBの両区の違い、炭素動態などがどのように推移していくのか更なるデータの蓄積を望みたい。

5. 謝辞

研究を進めるにあたり、懇切なるご指導を賜った筑波大学大学院生命環境科学研究科 杉田倫明教授、浅沼順准教授、鞠子茂准教授には研究全般には深く感謝申し上げます。筑波大学大学院環境科学研究科 田瀬則雄教授、福島武彦教授、恩田裕一准教授、辻村真貴准教授には研究室のゼミを通して様々な助言を賜りました。

筑波大学大学院陸域生態研究室 浦野忠朗氏にはモンゴルでの現地調査はじめ、生理生態学的観点から様々な助言・ご協力をいただきました。筑波大学大学院生命環境科学研究科 Bambahoo 氏にはモンゴルでの現地調査に多大な協力をいただきました、元筑波大学生命環境科学研究科 加藤秀和氏、小谷亜由美氏には熱収支に関する知識からモンゴルでの観測方法など研究全般において大変お世話になりました。

筑波大学大学院 生命環境科学研究科・陸域生態研究室の皆様には部屋を自由に使わせていただきました。専攻の異なる私に暖かく接してくださいました。大変感謝しております。筑波大学大学院環境科学研究科の皆様には、有益な時間と多くの経験を与え、いつも励ましてくれました。この二年を皆様と過ごせたことは私にとって大切な道標となりました。

最後に、大学院修了課程まで進学させてくださいました両親と苦しいときに支えてくれた親友に感謝いたします。

引用文献

- 青木信治・橋本勝（編）（1992）入門モンゴル国．平原社，277p.
- Chen, Y., Lee, P., Lee, G., Mariko, S., Oikawa, T., (2006) Simulating root responses to grazing of a Mongolia grassland ecosystem. *Plant Ecology*, 183, 265-275.
- Chen, Y., Lee, G., Lee, P., Oikawa, T., (2007) Model analysis of grazing effect on above-ground net primary production of a Mongolian grassland ecosystem. *Journal of Hydrology*, 333, 155-164.
- D.アルレンゲタル（2006）モンゴル環境保全ハンドブック．見聞社，134p.
- Falge, E., Baldocchi, D., Olson, R., Anthoni, P., Aubinet, M., Bernhofer, C., Burba, G., Ceulemans, R., Clement, R., Dolman, H., Granier, A., Gross, P., Grünwald, T., Hollinger, D., Jenson, N. -O., Katul, G., Keronen, P., Kowalski, A., Lai, C. T., Law, B. E., Meyers, T., Moncrieff, J., Moors, E., Munger, J. W., Pilegaard, K., Rannik, Ü., Rebmann, C., Suyker, A., Tenhunen, J., Tu, K., Verma, S., Vesala, T., Wilson, K., Wofsy, S. (2001) Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agricultural and Forest Meteorology*, 107, 43-69.
- Kato, H., (2007) Influence of Grazing on Vegetation, Surface Energy and Water Balance over the Mongolian Steppe. Ph, M Thesis, Graduate School of Life and Environmental Science. the University of Tsukuba, 111p. 筑波大学大学院生命環境科学研究科修士学位論文.
- 小島透（2004）モンゴル・ヘルレン川流域における蒸発散を支配する要因の解明．筑波大学大学院環境科学研究科修士学位論文，85p.
- 近藤純正（2000）地表面に近い大気の科学 理解と応用．東京大学出版会，324p.
- Kotani, A., (2006) Characteristics of Scalar Admixture in the Atmospheric Boundary Layer and Estimation of Regional Surface Fluxes Over Semi-arid Area. Ph, D Thesis, Graduate School of Life and Environmental Science. the University of Tsukuba, 123p.
- Larcher, W (2003) Physiological Plant Ecology, 4th edition. Springer-Verlag, New York, 513p.
- Leuning, R and J. Moncrieff (1990) Eddy-covariance CO₂ flux measurements using open-and closed-path CO₂ analysers. *Boundary-Layer Meteorology* 53, 63-76.
- Li, S. -G. (2007) Productivity of grassland in central Mongolia. 筑波大学陸域環境研究センター報告，8, 95-96.
- Li, S. -G., Asanuma, J., Eugster, W., Kotani, A., Liu, J. -J., Urano, T., Oikawa, T., Davaa, G., Oyunbaatar, D. (2005) Net ecosystem carbon dioxide exchange over grazed steppe in central Mongolia. *Global Change Biology*, 11, 1941-1955.
- Liu, J., Urano, T., Mariko, S., Oikawa, T., 2005. Influence of Grazing Pressures on Belowground Productivity and Biomass in Mongolia Steppe. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*. 25, 88-93.
- Lloyd, J., and Taylor, J. A. (1994) On the temperature dependence of soil Respiration.

Functional Ecology, 8, 315-323.

鞠子茂・廣田充・川田清和・浦野忠朗 (2007) 草原の科学への招待. 筑波大学出版会, 122p

三枝信子 (2003) 地球環境調査計測事典. フジテクノシステム, 792-803.

宮田明 (2003) 陸域生態系における二酸化炭素等のフラックス観測の実際. 独立行政法人
国立環境科学研究所, 85-113.

小長谷有紀 (編) (2002) 遊牧がモンゴルを変える日. 出版文化社, 177p.

小長谷有紀 (編) (2006) モンゴル環境保全ハンドブック. 見聞社, 134p.

佐々木リサ (2004) モンゴル・ヘルレン川流域における水循環に伴う安定同位体比変動プロセス. 筑波大学大学院環境科学研究科修士学位論文, 55p.

M, Sugita., J, Asanuma., M, Tsujimura., S, Mariko., F, Kimura., D, Azzayaa., Ts, Adyasuren.
(2007) Rangelands Atmosphere-Hydrosphere-Biosphere Interaction Study Experiment in
northeastern Asia (RAISE). Rangelands Atmosphere-Hydrosphere-Biosphere Interaction
Study Experiment in northeastern Asia –Highlights of the RAISE Project. Bulletin of the
Terrestrial Environmental Research Center, University of Tsukuba, No.8, 116p.

浦野忠明 (2002) モンゴル半乾燥草原における放牧区及び禁牧区での地上部バイオマスと
CO₂フラックスの季節変化. 筑波大学大学院環境科学研究科修士学位論文, 45p.