HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	貧栄養土壌におけるススキ(Miscanthus sinensis)の地上部バイオマス生産に対する施肥効果 : 北海道苫小牧市における研究事例
Author(s)	当真, 要; 佐藤, 翔平; 泉, 弥希 他
Citation	北農, 79(2), 162-169
Issue Date	2012-04
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/49192
Type	journal article
File Information	hokunou79_2.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

＜試験成績・研究成果＞

貧栄養土壌におけるススキ（Miscanthus sinensis）の地上部バイオマス生産に対する施肥効果－北海道苫小牧市における研究事例－

当真 要[1] 佐藤 翔平[2] 泉 弥希[3] Fabián G. Fernández[4]
J. Ryan Stewart[5] 波多野 隆介[6] 西脇 亜也[7] 山田 敏彦[8]

要 旨

北海道苫小牧市のススキ地で地上部乾物生への制限因子を調査した。2008～2010年に窒素，リン，カリ施与の有無でのべ13処理区を設け，草丈，葉数，乾物重と窒素，リン，カリ含量を測定した。乾物重は気温と降水量の高かった2010年に増加し，また処理区間でも差が見られた。乾物重への施肥効果はリン＞カリ＞窒素であり，窒素とリンまたはカリの併用効果が大きかった。堆肥施与で増収効果があり，畜産廃棄物等の有効利用が期待できる。

1 まえがき

近年，化石燃料枯渇や地球温暖化に対する懸念から，再生可能な植物資源を用いたバイオ燃料の生産に関する研究が行われている。特に，食料と競合しないセルロース系バイオマスを原料とする研究が注目されており，その中でもススキ（*Miscanthus*）属に対する関心が集まっている。欧米ではススキ（*Miscanthus sinensis*）とオギ（*Miscanthus sacchariflorus*）の交雑種である *Miscanthus* x *giganteus* が資源植物として注目されている。*M.* x *giganteus* 栽培のメリットがいくつかあげられるが（Heaton et al. 2004，Somerville et al. 2010），その中でも多年生で高いバイオマス生産量，低い養分要求量，好酸性・耐Al性などが栽培の上での主なメリットとして考えられる。このために，*M.* x *giganteus* 栽培においては耕作放棄地のみならず耕作不適格地における栽培も可能であり，かつ一度定着すると毎年継続してバイオマスを得ることができる。

日本ではススキが古くから利用されており，代表的なものは茅葺き屋根の材料や家畜の飼料，そして有機肥料の材料として使われてきた。ところが1970年代までは日本のススキに関する研究も盛んであったが，それ以降は生活スタイルの変化と配合飼料などの普及やススキ草地を維持する農家の減少により，ススキ草地が減少しススキに関する研究も少なくなった。しかしながら，近年，外国でのススキ属植物の研究が注目されるようになり，日本においてもススキが再注目されてきた。ススキは東・東南アジアを原産とするため，日本では在来植物である。そのため，外来植物などの在来植物への影響を考慮することなく植物バイオマスの生産を行うことができる。また，日本に多く分布する黒ボク土はススキを始めとする草本植物の寄与より成立したとも言われている（山根 1973）。実際，厚層腐植質黒ボク土が広く分布する熊本県阿蘇地方では，1万年以上前から黒ボク土層にススキの植物ケイ酸体が認められており（宮縁・杉山 2006），ススキ草地の土壌炭素蓄積

Response of Fertilization to Aboveground Biomass Production of *Miscanthus sinensis* on Poor Fertility Soil. －Case study in Tomakomai, Hokkaido Japan－

1) 北海道大学北方生物圏フィールド科学センター（現 愛媛大学農学部）Yo Toma
2) 北海道大学大学院環境科学院 Syohei Sato
3) 北海道大学大学院農学研究院 Miki Izumi
4) イリノイ大学農学部 Fabian G. Fernandez
5) イリノイ大学農学部（現 ブリガムヤング大学生命科学部）J. Ryan Stewart
6) 北海道大学大学院農学院 Ryusuke Hatano
7) 宮崎大学農学部 Aya Nishiwaki
8) 北海道大学北方生物圏フィールド科学センター Toshihiko Yamada

速度は杉林のそれよりも約1.8倍大きいことが報告されている（Toma et al. 2012）。ススキ草地は刈取りや野焼きなどの人為的な作用により植生が維持される（大滝 1999）。すなわち，ススキ地上部が草地から持ち出されたり燃やされたりしながらススキ草地が維持されている。このことは，ススキをバイオ燃料の原料として利用しつつ土壌中に多くの炭素を固定することも期待できる。ススキをバイオ燃料として利用することは，その分化石燃料消費を減少させるだけでなく，大気中の二酸化炭素の減少にも寄与することが期待できる。

日本においては，農作物の生産に与える影響を小さくするために，バイオ燃料としてのススキの栽培は耕作不適格地や耕作放棄地が考えられる。ところが，これまでの研究では貧栄養土壌におけるススキの生長に対する制限因子が明確ではない。欧米のレビュー論文では*M.* x *giganteus*に対する窒素施与の効果はほとんどないとされるが（Heaton et al. 2004, Himken et al. 1997）。日本においては小原（1967）や松村ら（1975），星野ら（1975）による実験で窒素とリンまたはカリの併用効果が大きかったことを報告しているが，土壌の物理化学性などの詳細な記載は無い。欧米の報告では農地として利用されていたところでススキの栽培を行っており，比較的肥沃度の高い土壌状態での結果と考えられる。貧栄養土壌において生長の制限因子が明らかになれば，処分に困っている畜産廃棄物等の有効利用などを通してさらなるススキの地上部生産量の増加を期待できると考えられる。

ススキは個体の分布域の北限が東シベリアにも達し，日本でも北海道全域に分布している（Clifton-Brown et al. 2008）。また，集団としての分布は北海道の岩内－苫小牧－広尾を結ぶラインを北限としている（Numata 1969）。このような高緯度に北限を持つ草本のバイオ燃料作物はススキぐらいであり，日本でも寒冷地におけるバイオ燃料用として栽培できる作物の一つとして期待される。

以上のことから，本研究ではススキ草地の成立の北限である寒冷地の貧栄養土壌において各種組み合わせの施肥処理試験を行い，ススキ地上部生産に対する制限因子を明らかにすることを目的とした。

2．試験方法

2-1 試験地

調査は2008年から2010年にかけての3年間，北海道苫小牧市柏原の株式会社苫東管理地のススキ自然草地にて行った。この地は1972年に工業団地造成のために排水・開墾が行われ，その後に人為的な攪乱はなされずにススキ草地が自然に成立した。ススキやその他の植物の組成はToma et al.（2011）に詳しく記載されている。

表1に土壌の物理化学性を示した。土壌は火山放出物未熟土に分類され，表層の16cmはTa-aそれ以下の層はTa-bの火山放出物を母材としていた。土性は表層0－5 cmのSL以外は全層でSであった。降水量の多い夏期には地下水位が40cmにある。土壌pHは5.5-5.8の範囲にあり，CECは表層0－5 cmで最も高く（14.1 $cmol_c\ kg^{-1}$）以下の層では7.4 $cmol_c\ kg^{-1}$以下であった。炭素と

表1 調査地の土壌物理化学性

層位	深さ (cm)	密度 ($g\ cm^{-3}$)	土性（%） 砂	シルト	粘土		pH	CEC ($cmol_c\ kg^{-1}$)	全炭素 ($g\ C\ kg^{-1}$)	全窒素 ($g\ N\ kg^{-1}$)	C/N	可吸態リン ($mg\ P\ kg^{-1}$)	交換態カルシウム ($mg\ K\ kg^{-1}$)
Ah1	0-5	0.20	76.8	23.2	0	SL	5.50	18.7	94.76	7.39	12.8	5.10	165
Ah2	5-13	0.68	86.0	14.0	0	S	5.65	9.48	63.25	4.59	13.8	42.5	189
C	13-16	0.89	97.4	2.60	0	S	5.76	2.07	9.55	0.53	18.0	24.7	174
2Ab	16-18	0.90	93.6	5.36	1.07	S	5.61	6.49	27.43	1.80	15.2	33.4	34.5
2Bb	18-22	0.91	99.0	0.52	0.52	S	5.72	3.80	6.75	0.34	20.1	50.6	27.0
2C1	22-29	0.94	99.5	0.51	0	S	5.82	0.57	2.65	0.11	24.8	36.1	44.9
2C2	29-40	1.05	99.5	0.51	0	S	5.69	0.56	2.20	0.11	20.8	31.8	29.0
地下水	*+40*												

窒素含量はそれぞれ表層0－5 cmで最も高く，それぞれ94.8 g C kg^{-1} および7.39 g N kg^{-1} であった。表層30cmまでの炭素と窒素量はそれぞれ55.7 Mg C ha^{-1} および3.9 Mg N ha^{-1} であった。可吸態リン（ブレイII）は表層0－5 cmで最も低く（5.1 mg P kg^{-1}），以下の層では25-51 mg P kg^{-1} であった。交換態Kは0－16cmまでが165-189 mg K kg^{-1} であったが，それ以下の層では29-45 mg K kg^{-1} であった。

2-2 施肥処理

窒素，リン，カリの組み合わせで，10処理区{対照（C）区，無窒素（0N）区，窒素（N）区，3要素（NPK）区，窒素リン（NP）区，窒素カリ（NK）区，堆肥（M）区，窒素0.5倍（1/2N）区，窒素2倍（2N）区，窒素1.5倍（3/2N）区}を2008年に設けた。2009年と2010年においては，1/2N区，2N区，3/2N区をそれぞれ3要素0.5倍（1/2NPK）区，3要素2倍（2NPK）区，リンカリ（PK）区に変更した。各処理区4反復で5列×8行のブロック内に1処理区4 m×4 mの大きさでランダムに設けた。隣り合う処理区との間にはバッファーゾーンとして1 mを確保した。それぞれの区では，N，P，およびKはそれぞれ尿素やリン酸アンモニウム，塩化カリウムを組み合わせ，標準で窒素を100 kg N ha^{-1}，リンを50 kg P ha^{-1}，カリを100 kg K ha^{-1} となるようにて施与した。また，M区には毎年上田畜産（新得町）から購入したバーク堆肥を窒素量で100 kg ha^{-1} になるように施与した。C区以外には2008年の施肥時に400 kg ha^{-1} の石灰を散布した。施肥は2008，2009，2010年それぞれ，5月25日，5月21日，および5月20日に行った。各年各処理区における三要素の施与量を表2に示した。

2-3 調査項目

施肥後から草丈と葉数の調査を2週間に1回行った。葉数は出穂後の9月初旬まで測定を行い，草丈は開花後の10月初旬まで行った。2008年はC区，0N区，N区，NPK区で各処理区4反復で測定したが，2009年と2010年は全処理区10反復で測定した。地上部が完全に枯死した後に，2008年，2009年，2010年それぞれ11月18日，11月19日，および11月18日にススキ地上部の刈取りを行った。刈取りは各処理区1 m×1 mのコドラートを用い2反復で行った。また，地上部を刈り取る前にコドラート内のススキの草丈を10反復で測定した。刈り取ったススキ地上部は75度で48時間乾燥させ，乾燥重を測定した。乾燥重を測定後，微粉砕機にて0.2mmのふるいを通るまで粉砕し，窒素，リン，およびカリ含量の測定に供した。窒素含量は微粉砕試料を用いて元素分析計（Varil ELIII，Elemental，Hanau，Germany）で分析した。リンおよびカリ含量については，微粉砕試料を硫酸と過酸化水素で湿式分解し（Shinano et al. 2006），それぞれモリブデン青法および原子吸光法を用いて分析を行った。

窒素，リン，カリの施肥効率を下記の式より求めた。

窒素単独の肥効率(%)＝(N区の窒素吸収量－0N区の窒素吸収量)／(N区の窒素施与量)×100

窒素施与下のリンの肥効率(%)＝(NP区のリン吸収量－N区のリン吸収量)／(NP区のリン施与量)×100

窒素施与下のカリの肥効率(%)＝(NK区のカリ吸収量－N区のカリ吸収量)／(NK区のカリ施与量)×100

窒素とカリ施与下のリンの肥効率(%)＝(NPK区のリン吸収量－NK区のリン吸収量)／(NPK区のリン施与量)×100

窒素とリン施与下のカリの肥効率(%)＝(NPK区のカリ吸収量－NP区のカリ吸収量)／(NPK区のカリ施与量)×100

各処理区におけるススキの窒素，リン，およびカリ吸収量は，地上部乾物重に窒素，リン，カリ含量を乗じて算出した。

＜表2　各年の各処理区における窒素，リン，カリの施与量および地上部乾物重，窒素，リン，カリ含量＞

表2 各年の各処理区における窒素，リン，カリの施与量および地上部乾物重，窒素，リン，カリ含量

年	処理区	施与量 窒素	施与量 リン	施与量 カリ	地上部乾物重 (Mg ha^{-1}) 平均	地上部乾物重 SD	窒素含量 (mg N g^{-1}) 平均	窒素含量 SD	リン含量 (mg P g^{-1}) 平均	リン含量 SD	カリ含量 (mg K g^{-1}) 平均	カリ含量 SD
			(kg ha^{-1})									
2008	C区	0	0	0	2.00	0.95	3.73	1.80	0.55	0.25	1.77	1.85
	0N区	0	0	0	1.72	0.79	4.42	1.34	0.24	0.07	1.64	0.66
	N区	100	0	0	1.62	1.07	3.83	0.87	0.17	0.04	1.85	0.56
	NPK区	100	50	100	2.72	1.40	2.88	1.18	0.67	0.51	2.42	0.88
	NP区	100	50	0	3.50	2.83	3.46	1.44	0.43	0.21	1.79	1.06
	NK区	100	0	100	2.76	0.99	4.05	1.08	0.18	0.06	2.29	0.74
	M区	100	32	61	2.19	0.95	4.30	1.00	0.33	0.08	1.70	0.72
	1/2N区	50	0	0	1.88	0.96	4.28	1.18	0.19	0.04	2.59	2.22
	2N区	200	0	0	1.93	1.02	5.37	1.29	0.17	0.05	2.71	1.62
	3/2N区	150	0	0	1.45	0.54	7.41	2.22	0.27	0.05	1.70	1.02
2009	C区	0	0	0	1.45	0.67	4.34	0.93	0.23	0.06	1.39	0.23
	0N区	0	0	0	1.56	0.80	3.74	0.91	0.19	0.09	1.59	0.47
	N区	100	0	0	1.30	1.01	4.73	0.73	0.18	0.03	1.27	0.38
	NPK区	100	50	100	3.10	1.50	3.70	1.58	0.52	0.34	2.87	1.31
	NP区	100	50	0	2.67	1.37	3.44	0.87	0.41	0.15	1.13	0.29
	NK区	100	0	100	2.07	0.83	4.10	1.01	0.18	0.05	1.99	0.45
	M区	100	59	118	1.89	0.84	3.23	0.55	0.31	0.07	1.95	0.20
	1/2NPK区	50	25	50	1.46	0.33	3.26	0.59	0.23	0.03	1.52	0.44
	2NPK区	200	100	200	2.89	1.91	3.41	0.75	0.30	0.08	2.79	0.72
	PK区	0	50	100	1.47	0.69	3.21	0.46	0.26	0.05	2.06	0.35
2010	C区	0	0	0	2.66	0.99	3.35	0.75	0.24	0.04	3.02	0.70
	0N区	0	0	0	2.32	0.93	3.22	0.90	0.24	0.09	3.06	1.17
	N区	100	0	0	2.47	1.54	3.90	0.92	0.20	0.05	2.73	0.82
	NPK区	100	50	100	4.83	2.06	3.61	1.05	0.70	0.24	6.65	2.52
	NP区	100	50	0	4.58	3.02	3.47	0.90	0.52	0.17	3.31	1.33
	NK区	100	0	100	3.83	1.55	3.63	1.45	0.22	0.09	4.45	1.76
	M区	100	83	45	5.42	1.84	4.08	0.73	1.19	0.76	4.97	1.43
	1/2NPK区	50	25	50	3.42	1.13	2.40	0.65	0.31	0.10	4.26	1.78
	2NPK区	200	100	200	6.97	1.95	2.84	1.07	0.59	0.08	5.94	1.74
	PK区	0	50	100	3.96	1.11	2.70	0.59	0.50	0.08	5.93	1.56

2-4 統計解析

統計解析にはエクセル統計（ver.4.0 for Windows）を用いた。草丈と地上部乾物重の関係を回帰分析から求め，また各年における回帰式の差の検定も行った。地上部乾物重および窒素含量に対する処理区と年の影響について二元配置の分散分析を行った。本研究では2009年に3処理区を変更しているため，二元配置分散分析には3年間同一処理区であったC区，0N区，N区，NP区，NK区，NPK区およびM区のデータを用いた。ススキの開花後の葉数に対する処理区間と年の影響についても二元配置分散分析を行ったが，2008年は4処理区（C区，0N区，N区，NPK区）のみの測定であったため，2009年と2010年のC区，0N区，N区，NP区，NK区，NPK区およびM区のデータを用いて検定を行った。また，乾物中の窒素，リン，カリ含量を説明変数とし，それらの地上部乾物重に対する影響について増減法で重回帰分析を行った。

3．結果および考察

3-1 草丈と地上部乾物重の関係

収穫時の草丈と地上部乾物重には有意な正の相関があった（図1）。2008，2009，2010各年ともに正の有意な相関が見られた（2008: $y=0.042x-3.75$, $R^2=0.73$, $P<0.001$, 2009: $y=0.031x-2.29$, $R^2=0.67$, $P<0.01$, 2010: $y=0.085x-10.34$, $R^2=0.90$, $P<0.001$）。2008年と2009年の間には回帰直線に差が無かったが，2010年は2008年と2009年それぞれの回帰直線とは5％水準で有意に異なっていた。地上部乾物重と草丈に正の相関があることはこれまでにも報告されている（吉田 *1976*）。

本調査地のススキ草地は自然植生のためススキの株が均一では無いが，それでも両者に高い正の相関が確認されたことは，ススキの草丈から地上部乾物重を推定することが可能であることを示唆している。しかしながら，年によって回帰式に差があったことから調査地や年の違いにより回帰式が異なる可能性がある。実際に吉田（1976）の示した回帰式{log(地上部乾物重)＝0.005×草丈＋2.087}を用いて求めた本調査地の地上部乾物重の推定値は実測値を約19%過大評価しており，本研究で示された式を他のススキ草地に当てはめることには慎重になる必要がある。

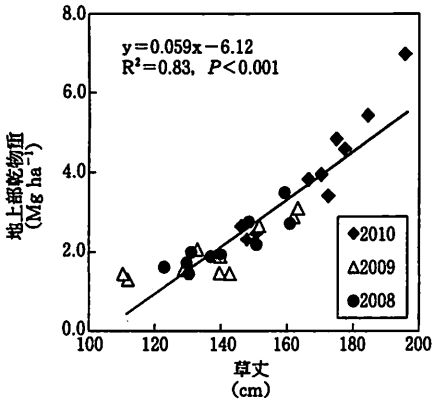

図1　収穫時の草丈と地上部乾物重の関係

3-2 ススキの地上部乾物重

地上部乾物重は全処理区・全調査期間の平均が2.74 Mg ha^{-1}であり，3年間同一処理をした試験区では，NP区が最も大きく（平均3.58 Mg ha^{-1}），N区で最も小さかった（平均1.80 Mg ha^{-1}）。また，年ごとの試験区平均では2010年が最も大きく（4.05 Mg ha^{-1}），2009年が最も低かった（1.99 Mg ha^{-1}）。日本でこれまでに報告されているススキの乾物収量は2.2-13 Mg ha^{-1}であり（Stewart et al. 2009），本調査地の地上部乾物重は他の調査と比較して小さかった。このことは，本調査地では気温が低いだけでなく，土壌の肥沃度が低いことが関係していると考えられる。宮城県川渡のススキ草地での調査から，土壌のA層の厚さが増すにつれてススキの草丈が上昇したことが報告されている（松村 1997）。この報告では土壌中の養分または水分がどのようにススキの生長に働いたかは明らかではない。しかしながら，本研究においては土壌が未発達のために土壌表層のA層が非常に薄い。このことはA層に含まれるススキの生長に必要な栄養素の絶対量が少ないことを意味し，したがって他の報告例と比較して本調査地で生育するススキの地上部乾物重が小さいと考えられた。

3-3 地上部乾物重に対する気象条件の影響

各年における地上部乾物重，および窒素，リン，カリの含量を表2に示した。二元配置分散分析の結果，地上部乾物重は各処理区および各年でそれぞれ有意に変動しており（$P < 0.001$），実際に2010年の全処理区の平均地上部乾物重は2009年の約2倍を示していた。検定に用いた処理区は3年間を通して同一であったため，年度の違いは気象条件の影響によると考えられる。一般的に，ススキは秋に地上部の養分を地下部に転流し，次年度の春の生長に用いるため，2009年の生長は2008年に加えた肥料の影響を受けていると考えられるが，2010年の回帰式のみが他の2年分の回帰式と異なったことについては，施肥によるものよりもむしろ気象条件が影響している可能性がある。2008年から2010年にかけて，調査地の年平均気温は7.9，8.0，8.3℃であり，年平均降水量は1,075，1,263，1,347mmであった。*M.* x *giganteus* は生育期間中の積算降水量と積算気温（Clifton-Brown et al. 2001），もしくは年間降水量が多いいほど乾物収量が増加することが報告されている（Heaton et al. 2004）。本調査地では，2010年において年間降水量と年平均気温共に他の2年よりも高く，そのことにより草丈と乾物収量との回帰式が他の2年と有意に異なったと考えられる。回帰式の傾きより，2010年は草丈に対する乾物収量が他の2年の2倍以上となっている。2010年に生長する芽は2009年の秋の時点で既に土中に準備されていると考えられるため（松村 1998b），茎の密度は傾きの増加にはあまり関係していないと思われる。草

丈の伸長に伴い，茎径の増加や葉数および葉身長の増加が見られたと考えられる。ススキにおいて茎径と草丈との関係は明確では無いが，茎当たりの葉数と葉身長が草丈に比例して増加することが報告されている（吉田 1976）。本調査地においては，二元配置分散分析の結果，2009年と2010年のデータの比較では，開花後の葉数に処理区間に有意な差は無く（$P=0.14$），2010年が2009年と比較して有意に葉数が多かった（$P<0.001$）。実際に2008年，2009年，2010年の出穂後の葉数の変動係数はそれぞれ2.58%（平均12.3枚），2.67%（平均10.8枚），3.27%（平均4.4枚）であり，処理区間の変動は小さい。これらのことから，2010年は平均気温や降水量の上昇により，草丈が伸長し，葉数や葉身長が増加した結果，1茎の重量が増加し，地上部乾物重の増加割合が増加したと考えられた。

3-4 地上部乾物重に対する施肥の影響

地上部乾物重は処理区間ではNPK区，NP区，NK区，およびM区ではC区，0N区およびN区より地上部乾物重が有意に大きく，また年次間の比較では2010年が前の2年よりも有意に大きかった。地上部乾物重はC区と0N区で差が無く，むしろ石灰施与により乾物重が減少する傾向があった。小原（1967）は石灰の施与により収量が減少したことを報告している。ススキは比較的酸性の土壌条件を好むため（Stewart et al. 2009, Kayama 2001），石灰施与による土壌pHの上昇は生長にとってむしろ負の影響を及ぼしていた可能性があり，同様な試験結果がこれまでにも報告されている（小原1967）。N区において，C区や0N区とに地上部乾物重の差が見られなかったことから，窒素の単独施与の効果が無いことが示唆された。欧米での調査結果をレビューした論文でも同様に，*M.* x *giganteus* の収量と窒素投入量には明確な関係は無かった（Heaton et al. 2007, Himken et al. 1997）。小原（1967）の報告では，施肥効果が窒素＞リン＞カリであったが，同時にNとPの併用効果が大きかったことを指摘している。松村ら（1975）も窒素，リン，カリの施与がそれらの無施与よりも大きかったことを報告している。

以上のことから，基本的にススキは窒素ではなくリンまたはカリが生長の制限因子となっている可能性がある。さらに，地上部乾物重を目的変数，施肥窒素・リン・カリ量を目的変数とした場合，リンのみが有意に選択され（重回帰式：地上部乾物重＝0.028×リン投入量，$R^2 = 0.41$，$P<0.001$），本研究地では主にリンの投入が地上部乾物重の増加に主に影響していたことが示唆された。試験ではリンやカリを含むバーク堆肥の施与で地上部乾物重が有意に増加しており，このことは畜産廃棄物等窒素だけでなくリンやカリを含む有機物の施与がススキの生長量増加に効果的である事を意味する。飼料に含まれるカリウムは乳牛のグラステタニー発生の一因になることが指摘されていることから（松本ら 2008），高カリウムの有機物等は牧草地への投入に慎重になる必要がある。しかしながら，ススキをバイオ燃料の原料として用いる場合にはこれらの事を考慮する必要性が少ないため，農地に施与できない有機物の受入先として機能することができる。さらに，これらの有機物は炭素を多量に含むため，ススキ草地への投入は炭素を土壌に固定し大気中の二酸化炭素濃度の低下にも寄与することができると考えられる（Shimizu et al. 2009）。

窒素含量は調査期間の全処理区で平均3.8 g N kg^{-1}｛最大：7.4 g N kg^{-1}（2008年3/2N区），最小：2.4 g N kg^{-1}（2010年1/2NPK区）｝，リンは平均0.36 g P kg^{-1}｛最大：1.19 g P kg^{-1}（2010年M区），0.17 g P kg^{-1}（2008年2N区）｝，カリは平均2.8 g K kg^{-1}｛最大：6.6 g K kg^{-1}（2010年NPK区），1.1 g K kg^{-1}（2009年NP区）｝であった。3年間の全ての処理区のデータを用い，目的変数を地上部乾物重，説明変数を窒素，リン，カリ含量として重回帰分析を行ったところ，有意な重回帰式が得られた｛地上部乾物重（Mg ha^{-1}）＝0.35×カリ含量－0.36×窒素含量＋1.66×リン含量（$R^2 = 0.31$，$P < 0.001$）｝。この式から，ススキの地上部植物体に含まれるカリおよびリン含量が高いほど地上部乾物重が増加しており，窒素含量が高いほど地上部乾物重が減少していた。3年間同じ施肥組み合わせを行った7処理区におけるススキ地上部の窒素含量について二元配置の分散分

析を行うと，ススキの窒素含量には年度（P＝0.36）および処理区の違いで有意な差は無かった（P＝0.22）。2008年の2N区や3/2N区のススキの窒素含量は前年を通して高かったが，地上部乾物重は2 Mg ha^{-1}を下回っており，このことが重回帰式において窒素含量の上昇が地上部乾物重低下に影響した結果となった可能性がある。すなわち，2008年の2N区や3/2N区ではススキの生長にリンやカリが足りず，植物体が窒素過多の状態になったため，窒素を過剰に蓄えた可能性が考えられた。

窒素単独施与の場合の肥効率は最も高くて2010年の1.3%で平均－0.62%であり，窒素の単独施与は施肥効果が全く期待できない結果であった（表3）。窒素施与下でのリンとカリの肥効率はそれぞれ平均2.53%および5.58%であり，窒素施与下ではカリの肥効率が高かった。同様に，窒素とリン施与下でのカリの肥効率（8.09%）は窒素とカリ施与下のリンの肥効率（2.36%）よりも高く，窒素施与によらずリンよりもカリの肥効率が高いことが明らかとなった。しかしながら，調査期間を通して肥効率は2010年の一部を除き10%以下と低く，ススキに対する施肥効果は大きくないことが示された。このことは，ススキが生育後期に地上部の養分を地下部に転流することで貧栄養下でもよく生育するという従来の研究結果を支持している。

草丈の季節変化を見ると，どの年においても7月から8月半ばにかけてNPK区やNP区，NK区，およびM区において，C区や0N区またはN区よりも伸長が大きくなっている（図2）これはちょうどススキの幼穂形成・出穂期であり，地上部の生長が旺盛で土壌から養分を吸収する時期に相当する（松村 1998a）。従って，この生殖生長の時期に吸収したリンやカリが地上部乾物重の増加に寄与していると考えられる。一般的に，植物にとって光合成や細胞分裂，エネルギー代謝等にリンやカリが必要となる。従って，C区や0N区，N区においてはこの生長が旺盛な時期にリンやカリが不足し，地上部生長量が抑制された可能性がある。

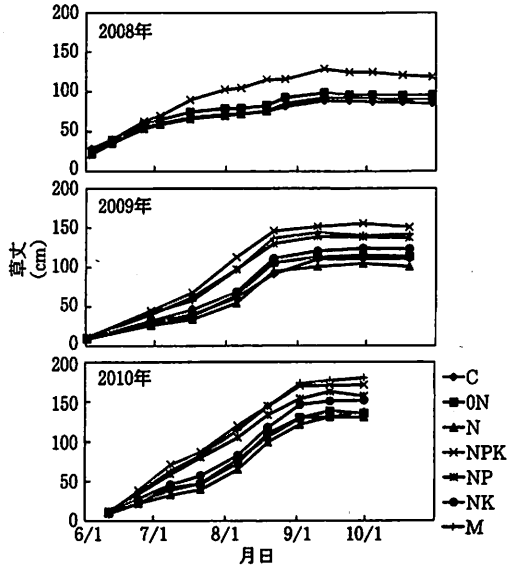

図2　草丈の季節変化

（2008年：C区，0N区，N区，NPK区の4処理区，2009年と2010年：C区，0N区，N区，NP区，NK区，M区の7処理区）

以上のことから，本研究におけるススキ地上部乾物重に対する施肥効果はリン＞カリ＞窒素と考えられ，特にリンまたはカリと窒素の併用効果が大きかった。さらに，本調査地においてはススキの生長がリンとカリに制限されており，植物体のリンとカリの含量が地上部乾物重の増加に影響していた。本調査地のような貧栄養の土壌条件下におけるバイオマス生産では，余剰となっている畜産廃棄物等の利用により生産量を増加させることが期待できることが明らかとなった。

表3　窒素単独，窒素施与下のリン，窒素施与下のカリ，窒素とカリ施与下のリン，および窒素とリン施与下のカリの肥効率

年	窒素単独の肥効率 (%)	窒素施与下のリンの肥効率 (%)	窒素施与下のカリの肥効率 (%)	窒素とカリ施与下のリンの肥効率 (%)	窒素とリン施与下のカリの肥効率 (%)
2008	−1.69	2.25	3.57	1.84	1.71
2009	−1.48	1.73	2.75	2.74	7.05
2010	1.30	3.60	10.4	2.50	15.5
平均	−0.62	2.53	5.58	2.36	8.09

4. 謝 辞

本研究の遂行にあたり，調査地をお貸しいただいた株式会社苫東とその従業員の皆様に対し，誌面をお借りしてお礼申し上げます。また，調査に協力していただいた北海道大学北方生物圏フィールド科学センター生物生産研究農場の技術職員の皆様にも厚くお礼を申し上げます。

5. 引用文献

1) Clifton-Brown J., Chiang Y.C., Hodkinson T.R. (2008) Miscanthus: Genetic resources and breeding potential to enhance bioenergy production., in Genetic improvement of bioenergy crops (ed. Vermerris W.), 273-294, Springer.
2) Clifton-Brown J., Long S.P., Jorgensen U. (2008) Miscanthus Productivity, in Miscanthus for energy and fibre (ed. Jones M.B. and Walsh M.), 46-67, EATHSCAN.
3) Heaton E, Voigt T, Long S.P. (2004) A quantitative review comparing the yields of two candidate C4 perennial biomass crops in relation to nitrogen, temperature and water., Biomass&Bioenergy, 27：21-30.
4) Himken H., Lammel J., Neukirchen D., Czypionka-Krause U., Olfs H.W. (1997) Cultivation of Miscanthus under West European conditions: Seasonal changes in dry matter production, nutrient uptake and remobilization., Plant and Soil, 189, 117-126.
5) 星野四郎，酒井友慶，久保田勝，今井悌三，伊藤公一（1975）北陸地方における牧草の栽培ならびに野草地の利用に関する研究 第9報 夏期用補助牧区としてのススキ期草原の利用法，新潟県農業試験場研究報告，24，79-87.
6) Kayama M (2001) Comparison of the aluminum torerance of Miscanthus sinensis ANDRESS. and Miscanthus sacchariflorus BENTHAM in hydroculture., International Journal of Plant Science, 162：1025-1031.
7) 松本武彦，糟屋広高，扇 勉，寶示戸雅之（2008）チモシー(Phleum pretense L.) 草地に対するスラリーの多量施用が牧草生産性，乳牛の泌乳量および血液成分に与える影響，日本草地学会誌，54：223-229.
8) 松村正幸，岩田悦行，中島仁蔵（1975）有用野草の播種増殖に関する基礎的研究 Ⅶ. ススキ及びカリヤスの播種に関する圃場試験及び播種利用の1・2の事例，岐阜大学農学部研究報告，38：351-357.
9) 松村正幸（1997）イネ科主要在来野草の個生態[15]－持続的利用の基礎として－，畜産の研究，51：76-82.
10) 松村正幸（1998a）イネ科主要在来野草の個生態[16]－持続的利用の基礎として－，畜産の研究，52：72-79.
11) 松村正幸（1998b）イネ科主要在来野草の個生態[17]－持続的利用の基礎として－，畜産の研究，52：80-86.
12) 宮縁育夫・杉山真二（2006）阿蘇カルデラ東方域のテフラ累層における最近約3万年間の植物珪酸体分析，第四紀研究，45：15-28.
13) Numata M. (1969) Progressive and retrogressive gradient of grassland vegetation measured by degree of succession－ecological judgement of grassland condition and trend 4. Vegetation, 19：97-127.
14) 小原通郎（1967）牧草地の造成と肥培管理ならびに利用(9)，畜産の研究，21：96-100.
15) 大滝典雄（1999）阿蘇千年の草原－野焼きの危機は草原の危機－，環境研究，114：31-36.
16) Shimizu M., Marutami S., Desyatkin A.R., Jin T., Hata H., Hatano R. (2009) The effect of manure application on carbon dynamics and budgets in a managed grassland of Southern Hokkaido, Japan., Agriculture, Ecosystems and Environment, 130：31-40.
17) Shinano T., Ando K., Okazaki K., Osaki M. (2006) Developmental changes of plant affecting primary photosynthate distribution in rice leaves. Photosynthetica, 44：591-598.
18) Somerville C., Youngs H., Taylor C., Davis S.C., Long S.P. (2010) Feedstocks for lignocellulosic biofuels., Science, 329：790-792.
19) Stewart J.R., Toma Y., Fernández F.G., Nishiwaki A., Yamada T., Bollero G. (2009) The ecology and agronomy of Miscanthus sinensis, a species important to bioenergy crop development, in its native range in Japan: a review., Global Change Biology Bioenergy, 1：126-153.
20) Toma Y., Fernández F.G., Sato S., Izumi M., Hatano R., Yamada T., Nishiwaki A., Bollero G., Stewart J.R. (2011) Carbon budget and methane and nitrous oxide emissions over the growing season in a Miscanthus sinensis grassland in Tomakomai, Hokkaido, Japan., Global Change Biology Bioenergy, 3：116-134.
21) Toma Y., Armstrong K., Stewart J.R., Yamada T., Nishiwaki A., Fernández F.G. (2012) Carbon sequestration in soil in a semi-natural Miscanthus sinensis grassland and Cryptomeria japonica forest plantation in Aso, Kumamoto, Japan., Global Change Biology Bioenergy, doi：10.1111/j.1757-1707.2012.ou60.x
22) 山根一郎（1973）黒ボク土の生成におけるススキの意義，ペドロジスト，17：84-26.
23) 吉田重治（1976）草地学的に見たススキ型草地，ススキの研究，45-68，平吉功先生退官記念事業会.