

第 5 章

牧草に対するリンの効率的な施肥法

これまでの研究結果から、草地土壌が酸性化した場合には、牧草はリン吸収の低下を伴った生育低下を示し、このことには土壌溶液に溶出したアルミニウムと牧草の根が密接に関係していることが示唆された。そこで本章では、草地土壌の経年的酸性化を前提として、草地に対するリンの効率的な施肥法を解明するために、酸性褐色森林土（天北農試）と黒色火山性土（根釧農試）におけるリンの施肥時期について検討した。実験は原則的に炭酸カルシウムを施用した系列（ $+CaCO_3$ 区）と施用せずに土壌酸性化を促進した系列（ $-CaCO_3$ 区）とを併設して行ったが、適正な pH 条件でのリンの施肥時期に関する検討と酸性化草地における検討を第 1 節と第 2 節に分けて論ずることとする。

なお、リン施肥処理開始年の牧草生育はリン施肥時期が早い順に収量、リン吸収量ともに高くなるので、年間を通じたリンの施肥効率を正確に把握するために、リンの施肥時期の検討は原則としてリン施肥処理開始翌年からの牧草生育を対象とした。

第 1 節 適正な pH 条件の草地におけるリンの効率的な施肥時期

1. 黒色火山性土におけるリンの施肥時期が牧草生育に及ぼす影響

実験方法

1) オーチャードグラスに対するリンの効率的な施肥時期

1985年7月に根釧農試内の黒色火山性土においてオーチャードグラス（キタミドリ）単播草地を造成し、1987年まで少量の施肥で管理した後1988年からリン施肥時期（-P 区、5月と8月の2回分施肥区、5月、6月および8月の3回分施肥区、5月全量施用区、6月全量施用区、8月全量施用区）と炭酸カルシウム施用処理（ $+CaCO_3$ 系列：毎年秋に炭酸カルシウムとして100 kg/10a 施用、 $-CaCO_3$ 系列：施用しない）を組み合わせた処理を開始し、これらを1990年まで繰り返した。各年度の施肥は窒素18 kgN/10a を硫安で、リン10 kgP₂O₅/10a を過石で、カリウム22 kgK₂O/10a を硫加で、マグネシウム4 kgMgO/10a を硫苦で施用した。硫安と硫加は3回

の均等分施とし硫苦は5月に全量施用した。1区面積は6.25 m²であり、4反復で年3回牧草地上部を刈り取った。

供試草地のリン肥沃度はリン施肥処理前の段階で Bray(II)-P で0~2 cm 土壌が11 mg、2~5 cm が6 mg/100g であり、リン肥沃度は中庸であった。なお黒色火山性土の土壌診断基準値（0~5 cm 土壌）は8.7~21.8 mgP/100 g である。

2) チモシーに対するリンの効率的な施肥時期

根釧農試内の黒色火山性土において1985年にチモシー（センボク）単播草地を造成し、1986年まで少量の施肥で管理した後、1987年からリン施肥時期（-P 区、5月と6月の2回分施肥区、5月全量施用区、6月全量施用区、9月全量施用区）と炭酸カルシウム施用の有無（ $+CaCO_3$ 系列に対しては毎年10月に炭酸カルシウム100 kg/10a を施用）を組み合わせた処理を開始し、処理を継続しながら処理開始翌年の1988年から1990年まで3ヶ年にわたって牧草生育を解析した。施肥は窒素15 kgN/10a を硫安で、リン10 kgP₂O₅/10a を過石で、カリウム20 kgK₂O/10a を硫加で、マグネシウム4 kgMgO/10a を硫苦で行った。硫安・硫加の施肥配分は1番草：2番草=2：1とした。1区面積は6.25 m²であり、4反復で年2回地上部を収穫した。リン施肥処理開始前における供試草地の土壌リン肥沃度は Bray(II)-P で0~2 cm 土壌が6 mg/100g、2~5 cm が4 mg/100g であり、リン肥沃度は低い草地であった。

3) チモシー・シロクロバ混播草地に対するリンの効率的な施肥時期

根釧農試の黒色火山性土において1985年にチモシー（センボク）・シロクロバ（カリフォルニアラジノ）混播草地を造成し、1986年まで少量の施肥で管理した後、1987年からリンの施肥量と時期を組み合わせた処理（-P 区、5月と7月の2回分施肥区、5月全量施用区、5月区におけるリン用量試験：P₂O₅ 20, 40, 80 kg/10a）を行い、1988~89年の牧草生育を解析した。施肥は窒素5 kgN/10a を硫安で、リン10 kgP₂O₅/10a を過石で、カリウム20 kgK₂O/10a を硫加で、マグネシウム4 kgMgO/10a を硫苦で行った。1区面積は6.25 m²であり、4反復で年2回地上部を収穫した。リン施肥処理前の土壌のリン肥沃度は Bray(II)-P が0~2 cm 土壌が30 mg/100g、2~5 cm が8 mg/100g であり、中庸

Table 24. Experimental treatments of P application in the Cumulic Andosol grasslands.

Grass species	Orchardgrass(Pure)	Timothy(Pure)	Timothy and White clover(Mixture)
Establish year	1985	1985	1985
Treatment year	1988-90	1987-90	1987-89
P-Treatment	-P 2-times split (May and Aug.) 3-times split (May, June and Aug.) May June August	-P 2-times split (May and Aug.) May June September	-P 2-times split (May and Aug.) May 20kgP ₂ O ₅ /10a 40kgP ₂ O ₅ /10a 80kgP ₂ O ₅ /10a
Amount of fertilizer	N-P ₂ O ₅ -K ₂ O-MgO= 18-10-22-4kg/10a	N-P ₂ O ₅ -K ₂ O-MgO= 15-10-20-4kg/10a	N-P ₂ O ₅ -K ₂ O-MgO= 5-10~80-20-4kg/10a
CaCO ₃ treatment	100kgCaCO ₃ /10a/year for +CaCO ₃ treatment	100kgCaCO ₃ /10a/year for +CaCO ₃ treatment	

のリン肥沃度であった。

なお、本項の試験における施肥時期の名称と実際の施肥時期との対応関係は次の通りである（表24）。

5月全量区：5月上旬に全量を施用した。

6月全量区：チモシーでは1番草刈取後である6月下旬から7月上旬に、オーチャードグラスでは同じく6月上旬から中旬に全量施用した。

8月全量区：オーチャードグラスの2番草刈取後である8月上旬から中旬に全量施用した。

9月全量区：チモシーの2番草刈取後である9月に全量施用した。

分施肥区：最終番草を除く各番草刈取毎に均等に施用した。オーチャードグラスの場合の2回分施肥区は5月と8月に、3回分施肥区は5月、6月、8月に、それぞれ均等に分施肥した。

実験結果

表25に黒色火山性土の一般的な理化学性を示した。高いリン酸吸収係数と気相率、比較的低いカチオン置換容量（CEC）と容積重が特徴である。

図67に土壌 pH の推移をオーチャードグラス、チモシーを一括し、さらに +CaCO₃ 区と -CaCO₃ 区を並記して示した。この図から炭酸カルシウム施用によって表

Table 25. Physico-chemical properties of the Cumulic Andosol used in the experiment (0-20cm layer).

Three phases distribution	
Solid phase	28.9%
Liquid phase	50.6
Gaseous phase	20.5
Soil texture classification	L
Volume weight	66.9g/100ml
Chemical properties	
Phosphorus absorption coefficient	1829
Cation exchange capacity(CEC)	17.8me/100g
Base-saturation percentage	31.8%
Total carbon content	6.05%
Total nitrogen content	0.44%
C/N ratio	13.8

層土壌の pH が好適な状態に保たれたことがわかる。

1) オーチャードグラス

施肥処理開始前の土壌化学性を表26に示した。土壌 pH は好適な範囲にあり、リン肥沃度は中庸であった。

土壌酸性化の影響を排除した +CaCO₃ 系列において、2年間の合計乾物収量（表27）は、1番草では3回分施肥区、2回分施肥区、5月全量区で、2番草では2回分施肥区、3回分施肥区、6月全量区で多く、3番草では8月全量区で多く、年間合計では3回分施肥区 ≥ 2回分施肥区 ≥ 5月全量区 ≥ 8月全量区 ≥ 6月全量区であった。地上部リン含有率（表28）は3番草 > 2番草 > 1番草の順であり、1番草では5月全量区、2回分施肥区で高く、2番草では3回分

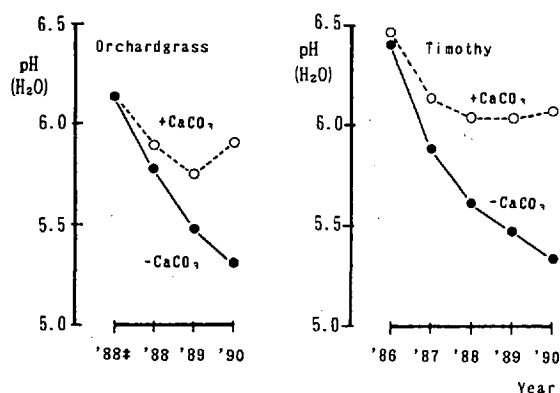


Fig. 67 Changes in soil pH during the experimental years in the Cumulic Andosol: (0-5 cm layer, soil sample was taken in every October): (* sample was taken in April '88 before fertilizer application instead of October '87).

Table 26. Chemical properties of the soil before the experimental treatments of orchardgrass in the Cumulic Andosol (October 1987).

Soil depth	pH	Bray (II)-P mgP/100g	Ex-Ca	Ex-Mg me/100g	Ex-K
0-2cm	6.28	11.1	8.35	1.29	0.32
2-5	6.00	6.0	7.49	0.54	0.20
5-10	6.25	5.5	7.85	0.41	0.09
10-15	6.12	6.1	8.02	0.47	0.12

Table 27. Dry matter yield of orchardgrass grown in the Cumulic Andosol (kg/10a).

Year	Lime	Time of P(1)	1st cut	2nd cut	3rd cut	Total	Index
1989	-CaCO ₃	-P	71	383	207	661	100
		2-times split	102	390	211	703	106
		3-times split	89	400	230	719	109
		May	122	381	195	698	106
		June	62	382	197	641	97
		August	61	400	216	677	102
	+CaCO ₃	-P	81	325	187	593	90
		2-times split	113	384	211	708	107
		3-times split	128	382	225	735	111
		May	123	343	229	695	105
		June	106	375	223	704	107
		August	119	344	235	698	106
1990	-CaCO ₃	-P	250	309	235	794	100
		2-times split	273	341	261	875	110
		3-times split	307	334	260	901	113
		May	290	317	245	852	107
		June	271	329	235	835	105
		August	288	331	248	867	109
	+CaCO ₃	-P	254	311	250	815	103
		2-times split	292	348	253	893	112
		3-times split	320	339	243	902	114
		May	298	341	250	889	112
		June	254	319	245	818	103
		August	271	329	260	860	108
Total (1989-90)	-CaCO ₃	-P	321	692	442	1455	100
		2-times split	375	731	472	1578	108
		3-times split	396	734	490	1620	111
		May	412	698	440	1550	107
		June	333	711	432	1476	101
		August	349	731	464	1544	106
	+CaCO ₃	-P	335	636	437	1408	97
		2-times split	405	732	464	1601	110
		3-times split	448	721	468	1637	113
		May	421	684	479	1584	109
		June	360	694	468	1522	105
		August	390	673	495	1558	107

(1)P application timing; 2-times split: equally divided in May and June. 3-times split: equally divided in May, June and August. May: All amount of P was applied before 1st cutting growth. June: All amount of P was applied just after 1st cutting. August: All amount of P was applied just after 2nd cutting.

施区, 2 回分施区, 6月全量区で高く, 3 番草では処理間差が不明瞭であった. その結果年間合計リン吸収量(表 29) は 3 回分施区と 2 回分施区で高く, 5月全量区がそれに次いだ. 2 年間の施肥リン吸収率は 3 回分施区 (20.6%) $\geq$ 2 回分施区 (19.6%) $>$ 5月全量区 (17.7%) $>$ 6月全量区 (15.9) $>$ 8月全量区 (13.3%) であった. これ

らの結果から黒色火山性土におけるオーチャードグラスに対する効率的なリン施肥時期は5月, 6月, 8月の3回均等分施 (早春と1, 2 番草刈取後) であると結論される. なお, $-CaCO_3$ 系列の結果については次節で論ずる.

Table 28. P content in the shoots of orchardgrass grown in the Cumulic Andosol (P%).

Year	Lime	Time of P application	1st cut	2nd cut	3rd cut	Average
1989	$-CaCO_3$	-P	0.21	0.24	0.36	0.28
		2-times split	0.30	0.36	0.37	0.35
		3-times split	0.31	0.34	0.38	0.35
		May	0.34	0.31	0.36	0.33
		June	0.26	0.34	0.39	0.34
		August	0.30	0.25	0.39	0.30
		Average	0.28	0.30	0.36	0.30
	+ $CaCO_3$	-P	0.22	0.27	0.38	0.30
		2-times split	0.29	0.35	0.39	0.36
		3-times split	0.31	0.36	0.41	0.37
		May	0.32	0.34	0.40	0.36
		June	0.26	0.36	0.41	0.36
		August	0.27	0.31	0.38	0.33
		Average	0.28	0.32	0.40	0.33
1990	$-CaCO_3$	-P	0.26	0.31	0.37	0.31
		2-times split	0.30	0.37	0.43	0.37
		3-times split	0.29	0.39	0.45	0.38
		May	0.31	0.41	0.44	0.39
		June	0.30	0.38	0.44	0.37
		August	0.29	0.34	0.47	0.36
		Average	0.29	0.35	0.42	0.35
	+ $CaCO_3$	-P	0.24	0.30	0.39	0.31
		2-times split	0.31	0.40	0.46	0.39
		3-times split	0.29	0.39	0.46	0.37
		May	0.31	0.37	0.46	0.38
		June	0.27	0.39	0.49	0.38
		August	0.29	0.34	0.49	0.37
		Average	0.29	0.35	0.42	0.35
Average (1989-90)	$-CaCO_3$	-P	0.25	0.28	0.36	0.30
		2-times split	0.30	0.36	0.40	0.36
		3-times split	0.29	0.37	0.42	0.36
		May	0.32	0.35	0.41	0.36
		June	0.29	0.36	0.42	0.36
		August	0.29	0.29	0.43	0.33
		Average	0.29	0.32	0.40	0.33
	+ $CaCO_3$	-P	0.23	0.29	0.39	0.30
		2-times split	0.31	0.38	0.43	0.37
		3-times split	0.29	0.38	0.44	0.37
		May	0.32	0.36	0.43	0.37
		June	0.27	0.37	0.45	0.37
		August	0.28	0.32	0.44	0.35
		Average	0.29	0.34	0.42	0.34

Table 29. Total P uptake of the shoots of orchardgrass grown in the Cumulic Andosol (kgP/10a).

Year	Lime	Time of P application	1st cut	2nd cut	3rd cut	Total	Index	P-use efficiency(1)	Production efficiency(2)
1989	$-CaCO_3$	-P	0.15	0.94	0.74	1.83	100		361
		2-times split	0.31	1.39	0.78	2.47	135	7.4	284
		3-times split	0.27	1.37	0.86	2.50	137	7.8	287
		May	0.41	1.16	0.71	2.27	124	5.1	307
		June	0.15	1.28	0.78	2.21	121	4.4	290
		August	0.18	1.00	0.85	2.03	111	2.3	334
		Average	0.17	0.89	0.71	1.77	97		335
	+ $CaCO_3$	-P	0.17	0.89	0.71	1.77	97		335
		2-times split	0.33	1.36	0.83	2.51	137	8.5	282
		3-times split	0.39	1.40	0.93	2.73	149	11.0	269
		May	0.40	1.17	0.91	2.48	136	8.2	280
		June	0.27	1.36	0.91	2.55	139	8.9	276
		August	0.31	1.06	0.89	2.27	124	5.7	308
		Average	0.31	1.27	0.87	2.45	134		281
1990	$-CaCO_3$	-P	0.66	0.97	0.87	2.50	100		318
		2-times split	0.82	1.27	1.13	3.21	128	8.2	272
		3-times split	0.89	1.30	1.18	3.38	135	10.1	266
		May	0.92	1.29	1.08	3.28	131	9.0	260
		June	0.80	1.26	1.02	3.08	123	6.6	271
		August	0.83	1.11	1.15	3.09	123	6.7	281
		Average	0.83	1.11	1.15	3.09	123		281
	+ $CaCO_3$	-P	0.60	0.93	0.98	2.52	101		324
		2-times split	0.91	1.41	1.17	3.49	139	11.1	256
		3-times split	0.91	1.33	1.12	3.36	134	9.7	268
		May	0.93	1.27	1.16	3.35	134	9.5	265
		June	0.70	1.23	1.20	3.13	125	7.0	261
		August	0.78	1.13	1.27	3.18	127	7.6	271
		Average	0.82	1.21	1.21	3.24	129		271
Total (1989-90)	$-CaCO_3$	-P	0.82	1.91	1.61	4.33	100		336
		2-times split	1.13	2.65	1.90	5.69	131	15.6	278
		3-times split	1.17	2.68	2.04	5.89	136	17.9	275
		May	1.32	2.45	1.78	5.56	128	14.1	279
		June	0.96	2.54	1.80	5.29	122	11.0	279
		August	1.01	2.11	1.99	5.11	118	9.0	302
		Average	1.01	2.11	1.99	5.11	118		302
	+ $CaCO_3$	-P	0.78	1.82	1.69	4.29	99		328
		2-times split	1.24	2.76	2.00	6.00	139	19.6	267
		3-times split	1.30	2.73	2.06	6.09	141	20.6	269
		May	1.33	2.44	2.07	5.83	135	17.7	271
		June	0.97	2.59	2.11	5.68	131	15.9	268
		August	1.10	2.19	2.16	5.45	126	13.3	286
		Average	1.10	2.19	2.16	5.45	126		286

(1)P-use efficiency means "Fertilizer P use efficiency" calculated as

% of {(Total P uptake)-(Total P uptake of -P treatment)}/(Total P application rate).

(2)Production efficiency means "DM production per unit of absorbed P" calculated as (DMg)/(P uptake 1g).

2) チモシー

実験開始直後の土壌化学性を表30に示した。pH, 有効態リンともに好適な範囲にあった。

Table 30. Chemical properties of the soil at the beginning of the experiment of timothy in the Cumulic Andosol (October 1987, -P/-CaCO₃ treatment).

Soil depth	pH	Bray(II)-P mgP/100g	Ex-Ca	Ex-Mg me/100g	Ex-K
0-2cm	5.91	14.1	4.64	0.71	0.27
2-5	6.01	9.0	5.28	0.53	0.15
5-10	6.00	10.1	7.59	0.73	0.10
10-15	5.91	9.2	7.77	0.60	0.12

合計乾物収量は1番草では分施肥区で最も高く、次いで5月全量区で、6月全量区で低かった。2番草では分施肥区と6月全量区で高く、9月全量区で低く、年間合計収量では分施肥区>5月全量区>6月全量区≒9月全量区であった(表31)。地上部リン含有率は2番草>1番草であったが処理間差が小さかった(表32)。その結果年間合計リン吸収量は分施肥区>5月全量区>6月全量区≒9月全量区となり(表33)、施肥リン吸収率も分施肥区(2.1%)>5月全量区(10.5%)>6月全量区(7.8%)≒9月全量区(7.8%)であった。この結果から黒色火山性土におけるチモシーに対する効率的なリン施肥時期は5月と6月の2回均等分施(早春と1番草刈取後)であると結論される。

Table 31. Dry matter yield of timothy grown in the Cumulic Andosol (kg/10a).

Year	Lime	Time of P(1)	1st cut	2nd cut	Total	Index
1988	-CaCO ₃	-P	385	224	609	100
		2-times split	572	246	818	134
		May	559	231	790	130
		June	493	243	736	121
		August	519	209	728	120
	+CaCO ₃	-P	459	231	690	113
		2-times split	553	257	810	133
		May	551	223	774	127
		June	502	230	732	120
		August	528	213	741	122
1989	-CaCO ₃	-P	254	263	517	100
		2-times split	432	340	772	149
		May	403	295	698	135
		June	410	320	730	141
		August	413	265	678	131
	+CaCO ₃	-P	324	260	584	113
		2-times split	483	312	795	154
		May	439	312	751	145
		June	410	335	745	144
		August	463	300	763	148
1990	-CaCO ₃	-P	216	270	486	100
		2-times split	353	359	712	147
		May	350	348	698	144
		June	323	336	659	136
		August	336	301	637	131
	+CaCO ₃	-P	312	313	625	129
		2-times split	396	364	760	156
		May	383	350	733	151
		June	350	365	715	147
		August	354	312	666	137
Total (1988-90)	-CaCO ₃	-P	855	757	1612	100
		2-times split	1357	945	2302	143
		May	1312	874	2186	136
		June	1226	899	2125	132
		August	1268	775	2043	127
	+CaCO ₃	-P	1095	804	1899	118
		2-times split	1432	933	2365	147
		May	1373	885	2258	140
		June	1262	930	2192	136
		August	1345	825	2170	135

(1)P application timing; 2-times split: equally divided in May and June. May: All amount of P was applied before 1st cutting growth. June: All amount of P was applied just after 1st cutting. August: All amount of P was applied just after 2nd cutting.

Table 32. P content in the shoots of timothy grown in the Cumulic Andosol (P%).

Year	Lime	Time of P	1st cut	2nd cut	Average
1988	-CaCO ₃	-P	0.20	0.31	0.24
		2-times split	0.24	0.35	0.27
		May	0.25	0.34	0.28
		June	0.20	0.35	0.25
		August	0.21	0.34	0.24
	+CaCO ₃	-P	0.21	0.34	0.25
		2-times split	0.23	0.35	0.27
		May	0.23	0.35	0.27
		June	0.22	0.35	0.26
		August	0.23	0.34	0.26
1989	-CaCO ₃	-P	0.17	0.22	0.19
		2-times split	0.22	0.24	0.23
		May	0.22	0.22	0.22
		June	0.19	0.25	0.22
		August	0.20	0.23	0.21
	+CaCO ₃	-P	0.17	0.21	0.19
		2-times split	0.20	0.26	0.22
		May	0.22	0.25	0.23
		June	0.21	0.24	0.22
		August	0.21	0.26	0.23
1990	-CaCO ₃	-P	0.18	0.20	0.19
		2-times split	0.23	0.23	0.23
		May	0.24	0.21	0.22
		June	0.21	0.24	0.23
		August	0.23	0.24	0.23
	+CaCO ₃	-P	0.20	0.21	0.21
		2-times split	0.23	0.24	0.24
		May	0.24	0.23	0.24
		June	0.21	0.24	0.23
		August	0.23	0.24	0.23
Average (1988-90)	-CaCO ₃	-P	0.19	0.24	0.21
		2-times split	0.23	0.26	0.24
		May	0.24	0.25	0.24
		June	0.20	0.28	0.23
		August	0.21	0.26	0.23
	+CaCO ₃	-P	0.20	0.25	0.22
		2-times split	0.22	0.28	0.24
		May	0.23	0.27	0.25
		June	0.22	0.27	0.24
		August	0.22	0.27	0.24

Table 33. Total P uptake and P use efficiency of timothy grown in the Cumulic Andosol(kgP/10a).

Year	Lime	Time of P apply	1st cut	2nd cut	Total	P-use effi ciency(1)	Production efficiency(2)	
1988	-CaCO3	-P	0.77	0.69	1.46		418	
		2-times split	1.35	0.86	2.21	17.3	370	
		May	1.39	0.80	2.19	16.8	361	
		June	0.99	0.85	1.85	8.9	399	
		August	1.07	0.71	1.78	7.4	409	
	+CaCO3	-P	0.97	0.78	1.75		395	
		2-times split	1.28	0.90	2.18	10.0	371	
		May	1.28	0.79	2.07	7.4	374	
		June	1.13	0.80	1.93	4.2	380	
		August	1.20	0.72	1.92	3.9	387	
	1989	-CaCO3	-P	0.43	0.57	1.00		515
			2-times split	0.94	0.82	1.76	17.3	439
May			0.88	0.66	1.54	12.3	453	
June			0.77	0.81	1.58	13.2	462	
August			0.82	0.62	1.44	10.0	471	
+CaCO3		-P	0.56	0.55	1.12		523	
		2-times split	0.97	0.80	1.77	15.0	449	
		May	0.95	0.79	1.75	14.4	430	
		June	0.84	0.82	1.66	12.5	448	
		August	0.98	0.76	1.75	14.4	437	
1990		-CaCO3	-P	0.38	0.54	0.92		528
			2-times split	0.80	0.82	1.62	16.0	440
	May		0.82	0.73	1.55	14.5	449	
	June		0.69	0.83	1.52	13.7	434	
	August		0.75	0.70	1.46	12.3	437	
	+CaCO3	-P	0.64	0.68	1.32		474	
		2-times split	0.91	0.90	1.81	11.3	420	
		May	0.92	0.82	1.74	9.6	422	
		June	0.75	0.86	1.61	6.8	443	
		August	0.80	0.74	1.54	5.0	434	
	Total (1988-90)	-CaCO3	-P	1.58	1.80	3.38		477
			2-times split	3.09	2.50	5.59	16.9	412
May			3.10	2.19	5.28	14.5	414	
June			2.45	2.49	4.94	11.9	430	
August			2.64	2.03	4.68	9.9	437	
+CaCO3		-P	2.17	2.01	4.18		454	
		2-times split	3.16	2.61	5.76	12.1	410	
		May	3.15	2.40	5.55	10.5	407	
		June	2.72	2.48	5.20	7.8	421	
		August	2.98	2.22	5.20	7.8	418	

(1)P-use efficiency means "Fertilizer P use efficiency" calculated as % of $\{(\text{Total P uptake}) - (\text{Total P uptake of -P treatment})\} / (\text{Total P application rate})$.

(2)Production efficiency of absorbed P means "DM productivity per unit of P uptake" calculated as $(\text{DMg}) / (\text{P uptake lg})$.

3) チモシー・シロクロバ混播草地

表34に実験開始直後の土壌化学性を示した。pH, 有効態リンともに好適な範囲にあった。

Table 34. Chemical properties of the soil at the beginning of the experiment of timothy and white clover in the Cumulic Andosol (October 1987, -P treatment).

Soil depth	pH	Bray(II)-P mgP/100g	Ex-Ca —————	Ex-Mg me/100g	Ex-K —————
0-2cm	6.41	29.8	9.82	3.15	0.29
2-5	6.49	7.5	9.30	1.49	0.25
5-10	6.57	8.0	10.14	0.81	0.14
10-15	6.29	9.5	8.49	0.59	0.10

マメ科率および乾物収量に対するリン施肥時期の影響は不明瞭であった(表35)。シロクロバのリン含有率は分施肥区>5月全量区の傾向であり、チモシーでは差が

小さく分施肥区で5月全量区より高かった(表36)。その結果リン吸収量はシロクロバでは5月全量区≧分施肥区であったが、チモシーでは分施肥区>5月全量区であり、チモシーとシロクロバのリン吸収量合計値では分施肥区≧5月区であった(表37)。施肥リンの吸収率は分施肥区(8.5%)>5月全量区(6.5%)であった。このことからチモシー・シロクロバ混播草地においても分施肥が効果的なリン施肥法と考えられた。

リン用量を5月全量で10~80 kgP₂O₅/10aの範囲で増加させることにより、チモシーの乾物収量は微増し、シロクロバの乾物収量は低下した。しかしマメ科率は80 kg P₂O₅/10a区で低い以外はリン施肥量の影響を受けなかった(表35)。牧草のリン含有率は上昇し、その程度はシロクロバでチモシーより著しかった(表36)。

Table 35. Dry matter yield (Total amount of 1st and 2nd cutting; kg/10a).

Time of P application	1988			1989			Total '88-'89			
	TY*	WC**	Total	TY	WC	Total	TY	WC	Total	Legume%(1)
-P	779	105	884	704	151	855	1483	256	1739	14.7
2-times split	862	106	968	677	147	824	1539	253	1792	14.1
May	834	108	942	676	165	841	1509	273	1782	15.3
20kgP ₂ O ₅ /10a	800	109	909	738	153	890	1538	262	1800	14.6
40kgP ₂ O ₅ /10a	874	99	973	743	159	902	1617	257	1874	13.7
80kgP ₂ O ₅ /10a	886	83	969	759	99	858	1645	182	1827	10.0

(1) Legume% based on dry weight. *, **: TY:Timothy, WC:White clover.

Table 36. P content in the shoots (Annual average %).

Time of P application	1988			1989			Total '88-'89		
	TY*	WC**	Total	TY	WC	Total	TY	WC	Total
-P	0.28	0.41	0.30	0.24	0.31	0.25	0.26	0.25	0.27
2-times split	0.31	0.51	0.33	0.26	0.41	0.28	0.28	0.45	0.31
May	0.31	0.48	0.32	0.24	0.38	0.27	0.28	0.42	0.30
20kgP ₂ O ₅ /10a	0.31	0.50	0.34	0.26	0.44	0.29	0.30	0.46	0.33
40kgP ₂ O ₅ /10a	0.32	0.55	0.34	0.26	0.47	0.30	0.29	0.51	0.32
80kgP ₂ O ₅ /10a	0.34	0.57	0.35	0.28	0.47	0.30	0.31	0.52	0.33

*, **: TY:Timothy, WC:White clover.

Table 37. Total P uptake of shoots (Total amount of 1st and 2nd cutting kgP/10a).

Time of P application	1988			1989			Total '88-'89			P-use efficiency (1)
	TY*	WC**	Total	TY	WC	Total	TY	WC	Total	
-P	2.22	0.44	2.66	1.65	0.47	2.12	3.88	0.90	4.78	(%)
2-times split	2.67	0.54	3.21	1.72	0.59	2.31	4.39	1.13	5.52	8.5
May	2.54	0.52	3.00	1.66	0.62	2.28	4.20	1.14	5.34	6.5
20kgP ₂ O ₅ /10a	2.50	0.55	3.05	1.89	0.67	2.56	4.64	1.21	5.91	6.5
40kgP ₂ O ₅ /10a	2.77	0.55	3.32	1.96	0.75	2.70	4.72	1.30	6.02	3.6
80kgP ₂ O ₅ /10a	2.97	0.48	3.44	2.12	0.47	2.59	5.09	0.94	6.03	1.8

(1) P-use efficiency means "fertilizer P use efficiency" calculated as % of $\{(\text{Total P uptake}) - (\text{Total P uptake at -P treatment})\} / (\text{Total P application rate})$.

*, **: TY: Timothy, WC: White clover.

2. 酸性褐色森林土におけるリンの施肥時期が牧草生育に及ぼす影響

実験方法

1) オーチャードグラスに対するリンの効率的な施肥時期

天北農試内の酸性褐色森林土において1980年にオーチャードグラス（キタミドリ）単播草地を造成し、1981年まで少量の施肥で管理した後、-P区、4、6、8月の3回均等分施肥区、4月全量区、6月全量区、8月全量区および10月全量区からなるリン施肥時期の6処理を1982年より開始し、処理を繰り返しつつ1983年～85年の牧草生育を解析した。施肥は窒素18 kgN/10aを尿素で、リン10 kgP₂O₅/10aを過石で、カリウム18 kgK₂O/10aを硫加で施用した。1区面積は12 m²であり、4反復で年3回地上部を収穫した。尿素と硫加は4、6、8月の3回均等分施とした。供試草地のリン肥沃度は中庸であり、処理開始年（1982年）における-P区のBray(II)-Pは0～2 cm土壌：7.4 mg/100g、2～5 cm：3.4 mg/100g、5～10 cm：4.4 mg/100g、10～15 cm：3.6 mg/100gで、リン施用区ではその後のリン施用によって表層土壌のリン肥沃度が経年的に増加した。

2). チモシーに対するリンの効率的な施肥時期

天北農試内の酸性褐色森林土において1981年にチモシー（センボク）単播草地を造成し、-P区、4月と6月の2回均等分施肥区、4月全量区、6月全量区、9月全量区からなるリン施肥時期の5処理を1982年から開始し、処理を継続しながら1983年～86年の4年間にわたる牧草生育を解析した。施肥は窒素14 kgN/10aを塩安で、リン10 kgP₂O₅/10aを過石で、カリウム14 kgK₂O/10a

を塩加で施用した。塩安・塩加の施肥配分は1番草：2番草＝8：6とした。1区面積は12 m²であり、4反復で年2回地上部を収穫した。処理開始年（1982年）における-P区のBray(II)-Pは0～2 cm土壌：9.6 mg/100g、2～5 cm：6.1 mg/100g、5～10 cm：5.7 mg/100g、10～15 cm：4.4 mg/100gであり、リン施用区ではその後のリン処理によって表層土壌のリン肥沃度が経年的に増加した。

なお本項の実験における施肥時期の名称と実際の施肥時期との対応は次の通りである。

4月全量区：萌芽期である4月下旬に全量施用した。

6月全量区：オーチャードグラスでは1番草刈取後である6月上旬から中旬に施用し、チモシーでは1番草刈取後である6月下旬から7月上旬に全量施用した。

8月全量区：オーチャードグラスの2番草刈取後である8月上旬から中旬に全量施用した。

9月全量区：チモシーの2番草刈取後である9月に全量施用した。

10月全量区：オーチャードグラスの3番草刈取後である10月に全量施用した。

分施肥区：4月と各番草刈取毎（最終番草を除く）に、年間合計量が全量施用区と等量になるように均等に分施した。

実験結果

表38に酸性褐色森林土の一般的な理化学性を示した。低いリン酸吸収係数と気相率、高いカチオン置換容量（CEC）と容積重が特徴としてあげられる。

Table 38. Physico-chemical properties of the Acid Brown Forest soil used in the experiment (0-20cm layer).

Three phases distribution	
Solid phase	34.3%
Liquid phase	51.9
Gaseous phase	13.8
Soil texture classification	LiC
Volume weight	98.2g/100ml
Chemical properties	
Phosphorus absorption coefficient	660
Cation exchange capacity(CEC)	23.3me/100g
Base-saturation percentage	43.1%
Total carbon content	2.77%
Total nitrogen content	0.31%
C/N ratio	8.9

1) オーチャードグラス

表39に施肥処理開始直後の-P区の土壌化学性を示した。pH, 有効態リンとともに好適な範囲にあった。

3年間の合計乾物収量は1番草では10月全量区>4月全量区>6月全量区>分施肥区>8月全量区であり, 2番草

では6月全量区>4月全量区>10月全量区≧分施肥区>8月区, 3番草では10月全量区が他区より低収量である以外は差がなく, 年間合計では4月全量区≧6月全量区≧10月全量区>分施肥区>8月全量区であった(表40)。地上部リン含有率は1番草では4月全量区で高く8月全量区で低く, 2番草では6月全量区と4月全量区で高く8月全量区で低く, 3番草では分施肥区で高く6月全量区で低かった(表41)。牧草のリン吸収量はリン含有率と同じ傾向であり, 年間合計吸収量は4月全量区>6月全量区≧分施肥区≧10月全量区≧8月全量区であった(表42)。差し引き法による施肥リン吸収率は処理後の年次を経るにつれて全体的に上昇し, 4月全量区>6月全量区>分施肥区>10月全量区>8月全量区であった(表42)。これらの結果からオーチャードグラスに対する効率的なリン施肥時期は4月であり, 8月の施肥効率はとくに低いと考えられた。

Table 39. Chemical properties of the soil at the beginning of the experiment on orchardgrass (November, 1982).

Time of P application	Soil depth	pH	Bray(II)-P mgP/100g	Ex-Ca	Ex-Mg me/100g	Ex-K
-P	0-2cm	5.60	16.8	3.42	0.56	0.76
	2-5	5.81	7.8	7.60	0.76	0.25
	5-10	6.21	10.0	10.34	0.95	0.10
	10-15	6.30	8.5	10.84	0.99	0.08

Table 42. Total P uptake and P-use efficiency of orchardgrass grown in the Acid Brown Forest soil (kgP/10a).

Year	Time of P apply	1st cut	2nd cut	3rd cut	Total	P-use efficiency(1)	Production efficiency(2)
1983	-P	1.02	1.01	0.74	2.76		303
	3-times split	1.14	1.17	0.95	3.26	11.3	257
	April	1.33	1.31	0.92	3.56	18.2	249
	June	1.19	1.29	0.88	3.36	13.7	261
	August	0.99	0.94	0.88	2.80	0.8	284
	October	1.22	1.14	0.83	3.19	9.7	274
1984	-P	0.71	0.73	0.84	2.27		311
	3-times split	0.83	0.88	1.23	2.94	15.2	245
	April	0.96	0.96	1.19	3.11	19.3	247
	June	0.82	0.92	1.12	2.85	13.3	260
	August	0.71	0.74	1.10	2.55	6.3	274
	October	0.91	0.94	1.04	2.88	14.0	265
1985	-P	0.96	0.89	1.06	2.91		243
	3-times split	1.18	1.33	1.39	3.91	22.8	203
	April	1.25	1.36	1.45	4.06	26.2	202
	June	1.18	1.41	1.39	3.97	24.3	211
	August	1.12	1.24	1.49	3.85	21.5	205
	October	1.30	1.16	1.35	3.80	20.4	212
Total	-P	2.69	2.63	2.63	7.95		283
	3-times split	3.15	3.39	3.57	10.10	16.4	232
	April	3.54	3.63	3.56	10.73	21.2	231
	June	3.18	3.62	3.38	10.19	17.1	241
	August	2.82	2.91	3.46	9.20	9.5	248
	October	3.42	3.23	3.22	9.88	14.7	247

(1)P-use efficiency means "Fertilizer P use efficiency" calculated as % of $\{(\text{Total P uptake}) - (\text{Total P uptake of -P treatment})\} / (\text{Total P application rate})$.

(2)Production efficiency of absorbed P means "DM productivity per unit of P uptake" calculated as $(\text{DMg}) / (\text{P uptake lg})$.

Table 40. Dry matter yield of orchardgrass grown in the Acid Brown Forest soil (kg/10a).

Year	Time of P(1)	1st cut	2nd cut	3rd cut	Total	Index
1983	-P	376	260	201	837	100
	3-times split	367	256	215	838	100
	April	401	278	206	885	106
	June	394	277	206	877	105
	August	337	250	209	796	95
	October	405	274	195	874	104
1984	-P	267	260	179	706	100
	3-times split	246	262	210	718	102
	April	287	275	208	770	109
	June	271	264	208	743	105
	August	237	260	201	698	99
	October	293	275	197	765	108
1985	-P	263	225	220	708	100
	3-times split	268	273	251	792	112
	April	280	269	270	819	116
	June	276	310	254	840	119
	August	268	258	265	791	112
	October	303	261	241	805	114
Total	-P	906	745	600	2251	100
	3-times split	881	791	676	2348	104
	April	968	822	684	2474	110
	June	941	851	668	2460	109
	August	842	768	675	2285	102
	October	1001	810	633	2444	109

(1)P application timing; 3-times split: equally divided in April, June and August. April: All amount of P was applied before 1st cutting growth. June: All amount of P was applied just after 1st cutting. August: All amount of P was applied just after 2nd cutting. October: All amount of P was applied just after 3rd(final) cutting.

Table 41. P content in the shoots of orchardgrass grown in the Acid Brown Forest soil (P%).

Year	Time of P apply	1st cut	2nd cut	3rd cut	Average
1983	-P	0.27	0.39	0.37	0.33
	3-times split	0.31	0.46	0.44	0.39
	April	0.33	0.47	0.45	0.40
	June	0.30	0.47	0.43	0.38
	August	0.29	0.38	0.42	0.35
	October	0.30	0.41	0.43	0.36
1984	-P	0.27	0.28	0.47	0.32
	3-times split	0.34	0.34	0.58	0.41
	April	0.34	0.35	0.57	0.40
	June	0.30	0.35	0.54	0.38
	August	0.30	0.28	0.55	0.36
	October	0.31	0.34	0.53	0.38
1985	-P	0.37	0.40	0.48	0.41
	3-times split	0.44	0.49	0.55	0.49
	April	0.45	0.51	0.54	0.50
	June	0.43	0.45	0.55	0.47
	August	0.42	0.48	0.56	0.49
	October	0.43	0.45	0.56	0.47
Total	-P	0.30	0.35	0.44	0.35
	3-times split	0.36	0.43	0.53	0.43
	April	0.37	0.44	0.52	0.43
	June	0.34	0.43	0.51	0.41
	August	0.34	0.38	0.51	0.40
	October	0.34	0.40	0.51	0.40

2) チモシー

施肥処理開始直後の土壌化学性を表43に示した。pH、有効態リンともに好適な範囲にあった。

4年間の合計乾物収量は1番草では4月全量区と9月全量区で高く、2番草では6月全量区で高い傾向であったがその差は小さく、年間合計収量では6月全量区がやや高い以外は明瞭な差は認められなかった(表44)。地上部リン含有率は1番草では4月全量区で高く、2番草では9月全量区で低く、年平均では4月全量区でやや高かった(表45)。リン吸収量は1番草では4月全量区>9月全量区≒分施肥区>6月全量区、2番草では6月全量区>4月全量区≒分施肥区>9月全量区、年間合計では4月全量区≧6月全量区≧分施肥区≧9月全量区であった(表46)。施肥リン吸収率は4月全量区(19.6%)≧6月全量区>分施肥区≧9月全量区(17.0%)であった(表46)。この結果からチモシーに対する効率的なリン施肥時期は4月であり、9月の施肥効率はやや低かった。ただしその差は小さかった。

た(表45)。リン吸収量は1番草では4月全量区>9月全量区≒分施肥区>6月全量区、2番草では6月全量区>4月全量区≒分施肥区>9月全量区、年間合計では4月全量区≧6月全量区≧分施肥区≧9月全量区であった(表46)。施肥リン吸収率は4月全量区(19.6%)≧6月全量区>分施肥区≧9月全量区(17.0%)であった(表46)。この結果からチモシーに対する効率的なリン施肥時期は4月であり、9月の施肥効率はやや低かった。ただしその差は小さかった。

Table 43. Chemical properties of the soil at the beginning of the experiment on timothy (November, 1982).

Time of P application	Soil depth	pH	Bray(II)-P mgP/100g	Ex-Ca	Ex-Mg me/100g	Ex-K
-P	0-2cm	5.56	9.6	4.32	0.37	0.66
	2-5	6.11	6.2	6.67	0.34	0.18
	5-10	6.15	5.8	5.31	0.27	0.09
	10-15	5.91	4.4	5.21	0.32	0.08

Table 44. Dry matter yield of timothy grown in the Acid Brown Forest soil (kg/10a).

Acid Brown Forest Soil (kg/10a).					
Year	Time of P(1)	1st cut	2nd cut	Total	Index
1983	-P	460	133	593	87
	2-times split	500	143	643	94
	April	512	170	682	100
	June	563	171	734	108
	September	494	151	645	95
1984	-P	325	206	531	80
	2-times split	368	272	640	97
	April	408	254	662	100
	June	365	277	642	97
	September	409	262	671	101
1985	-P	276	216	492	65
	2-times split	386	389	775	102
	April	379	378	757	100
	June	371	394	765	101
	September	389	391	780	103
1986	-P	237	171	408	64
	2-times split	387	252	639	100
	April	399	239	638	100
	June	365	298	663	104
	September	396	253	649	102
Total	-P	1298	726	2024	74
('83-86)	2-times split	1641	1056	2697	98
	April	1698	1041	2739	100
	June	1664	1140	2804	102
	September	1688	1057	2745	100

(1) P application timing; 2-times split: equally divided in April and June. April: All amount of P was applied before 1st cut growth. June: All amount of P was applied just after 1st cutting. September: All amount of P was applied after 2nd(final) cutting.

Table 45. P content in the shoots of timothy grown in the Acid Brown Forest soil (P%).

Year	Time of P apply	1st cut	2nd cut	Total
1983	-P	0.19	0.27	0.21
	2-times split	0.21	0.28	0.23
	April	0.22	0.28	0.24
	June	0.21	0.28	0.22
	September	0.21	0.27	0.22
1984	-P	0.17	0.14	0.16
	2-times split	0.20	0.15	0.18
	April	0.21	0.18	0.20
	June	0.21	0.18	0.20
	September	0.20	0.17	0.18
1985	-P	0.19	0.23	0.21
	2-times split	0.24	0.26	0.25
	April	0.25	0.24	0.25
	June	0.23	0.26	0.24
	September	0.24	0.24	0.24
1986	-P	0.19	0.17	0.18
	2-times split	0.27	0.21	0.25
	April	0.27	0.21	0.25
	June	0.24	0.21	0.23
	September	0.25	0.20	0.23
Total -P		0.19	0.20	0.19
('83-86) 2-times split		0.23	0.22	0.23
April		0.24	0.23	0.23
June		0.22	0.23	0.23
September		0.22	0.22	0.22

Table 46. Total P uptake of timothy grown in the Acid Brown Forest soil (kgP/10a).

Year	Time of P apply	1st cut	2nd cut	Total	P-use efficiency(1)	Production efficiency(2)
1983	-P	0.86	0.37	1.23		483
	2-times split	1.05	0.40	1.45	5.0	444
	April	1.14	0.48	1.62	9.0	421
	June	1.15	0.49	1.64	9.4	448
	September	1.01	0.40	1.42	4.3	456
1984	-P	0.55	0.28	0.83		638
	2-times split	0.72	0.42	1.14	7.0	562
	April	0.85	0.47	1.32	11.2	501
	June	0.78	0.50	1.28	10.2	503
	September	0.80	0.43	1.24	9.3	542
1985	-P	0.53	0.49	1.02		482
	2-times split	0.94	1.02	1.96	21.6	395
	April	0.94	0.92	1.87	19.4	406
	June	0.86	1.01	1.87	19.5	409
	September	0.95	0.96	1.91	20.3	409
1986	-P	0.46	0.30	0.75		541
	2-times split	1.05	0.53	1.57	18.8	406
	April	1.10	0.50	1.60	19.3	399
	June	0.89	0.64	1.53	17.8	434
	September	1.00	0.50	1.50	17.1	433
Total -P		2.40	1.43	3.83		528
('83-86) 2-times split		3.76	2.36	6.12	17.5	441
April		4.03	2.37	6.41	19.6	428
June		3.69	2.63	6.32	19.0	444
September		3.77	2.29	6.06	17.0	453

(1) P use efficiency means "Fertilizer P use rate" calculated as % of $\{(\text{total P-uptake}) - (\text{total P-uptake at -P treatment})\} / (\text{total P application})$.

(2) Production efficiency of absorbed P means "DM productivity per unit of P uptake" calculated as $(\text{DMg}) / (\text{Total P uptake g})$.

3. 酸性褐色森林土および黒色火山性土に対するリン添加実験

酸性褐色森林土と黒色火山性土におけるリンの効率的な施肥時期の違いの要因を解析するために、両土壌について施肥リンの土壌溶液への溶出性を比較する実験を行った。

実験方法

表47に示す天北農試内のリン肥沃度の低い酸性褐色森

林土と、根釧農試内の黒色火山性土を生土で70 g ずつ100 cc 採土管に充填し、これに硫酸で0.3 gN(150 kgN/10a 相当)とともに過石で0.2 gP₂O₅(100kgP₂O₅/10a 相当)を混和し、10℃で培養しつつ、混和後1日、4日、7日、11日、14日、20日、30日、および60日後に遠心法によってpF 4.2までの土壌溶液を採取し、最大で60日間の土壌溶液中のリン濃度を測定した。なお、酸性褐色森林土サンプルのpHは4.99であったので(表47)、炭酸カルシウム2 g/70gを添加してpHを6.5にまで上げた処理(+CaCO₃区)を設けた。

Table 47. Chemical properties of the soil after the end of experiment.

Soil ¹⁾	Treatment	pH (H ₂ O)	P-absorption coefficient	Bray(II)-P mg/100g	Ex-Ca me/100g	Ex-Mg me/100g	Ex-K me/100g
Bf	+CaCO ₃	6.52	460	5.4	15.87	0.46	0.35
Bf	-CaCO ₃	4.99	456	4.9	1.00	0.50	0.38
CA	-CaCO ₃	6.05	1578	5.5	4.32	0.55	0.18

¹⁾ Bf: Acid Brown Forest soil, CA: Cumulic Andosol.

実験結果

酸性褐色森林土の土壌溶液リン濃度は、添加直後から非常に高濃度であり、経時的に低下したが添加後30日の時点でも2 mg/Lを維持した(図68)。これに対し黒色火山性土では添加直後は高濃度であったもののその程度は酸性褐色森林土に比べると低く、30日目には0.1 mg/Lまで低下した。この結果から、酸性褐色森林土に比べて黒色火山性土の施肥リンの吸着が速やかであり、施肥後の時間が経過した場合の土壌溶液リン濃度は酸性褐色森林土>黒色火山性土になると考えられる。このことは黒色火山性土におけるリン分施の有利性を裏づける重要な要因である。

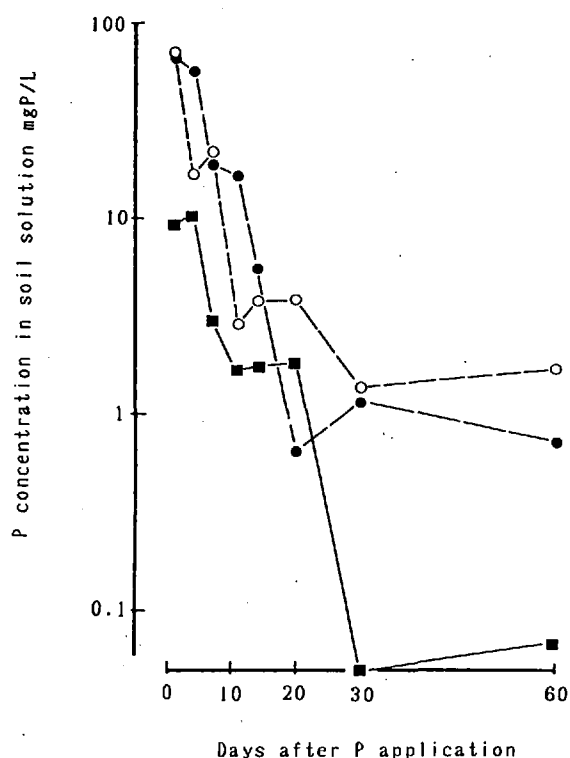


Fig. 68 Comparison of changes in P concentration of the soil solution between Acid Brown Forest soil and Cumulic Andosol (●: Acid Brown Forest soil, -CaCO₃, ○: Acid Brown Forest soil, +CaCO₃, ■: Cumulic Andosol, -CaCO₃).

4. 考 察

1) リン施肥時期の効果に対する土壌の違いの影響

本試験の結果、土壌 pH を適正に維持した場合に、酸性褐色森林土では4月にリンを全量施用する方法、黒色火山性土では何回かに分けてリンを施用する分施が効率的な施肥方法であり、オーチャードグラスとチモシーの草種の違いは小さかった。黒色火山性土と酸性褐色森林土では理化学性に本質的な違いがあるので(表25, 38)、リン施肥方法に対する牧草の生育反応が異なることは予測可能なことである。

その違いの一つは土壌のリン吸着力である。すなわち、酸性褐色森林土のリン酸吸収係数は600~900程度であるのに対し、黒色火山性土では1500以上であり、施肥リンの土壌吸着力は後者ではるかに大きい。両土壌に対するリン添加実験の結果、黒色火山性土では速やかに土壌溶液のリン濃度が低下するのに対し、酸性褐色森林土では比較的長期間にわたって高いリン濃度が維持された(図68)ことは、リン吸着力の違いの影響である。このため、黒色火山性土では施肥後比較的短期間のうちに施肥リンの大部分が土壌に強く吸着されるので、施肥回数を増やすことにより牧草による吸収を増加することができるために、分施が有利であったものと考えられる。

もう一つの要因として、気象条件を反映した土壌条件、すなわち、夏期間の土壌水分の違いの影響があげられる。天北地方では牧草生育期間の降水量の変動が非常に大きく、しばしば早魃状態を呈する。本試験が行われた1982~86年においても夏期間のいずれかの時期に土壌水分が低下しており、とくに1984、86年で著しかった。その結果この期間の施肥リンの有効性が低下し、土壌水分が比較的多い6月以前の施肥(吸収)効率が相対的に高まったことが考えられる。これに対し、根釧地方では土壌水分は通年的に潤沢で、土壌水分が不足することはない。

主に上記の2要因が複合的に作用して黒色火山性土と酸性褐色森林土におけるリン施肥反応の違いを生じたものと考えられる。

2) リン施肥時期の効果に対する草種の違いの影響

リン施肥時期の効果に対する草種の違いの影響は土壌の違いほど大きくなかった。しかしオーチャードグラスとチモシーには生育パターンに違いがあるのは事実であり、なぜ施肥時期に対する違いが現われなかったかを以下に考察したい。

1) オーチャードグラス：リン施肥時期として早春全量施用が効率的であることは、この時期が牧草の生育開始時期であり、かつ低温条件にあることを考えると理解

しやすい。とくにリン吸着力の小さい酸性褐色森林土では、越冬後にあまり障害なく再生を開始し、刈り取り前後も生育が中断しないオーチャードグラスの生育パターンから考えると早春全量施肥の有利性は当然と考えられる。ところが黒色火山性土では同様の考え方が当てはまらない。その要因は、第一に土壌的な特徴から強いリン吸着力のために施肥後の期間が長くなった場合、牧草に十分なリン供給がでなさいこと。第二に根釧地方の厳しい越冬条件のために耐寒性の小さいオーチャードグラスは越冬中に損傷(凍害と病害)を受ける結果、1番草の生育が抑制されることにある。事実、本実験における乾物収量比は1番草：2番草：3番草=25：45：30であった。そのため早春全量の施肥効率が低下し、分施の効率が高まったと考えられる。

2) チモシー：チモシーの場合も早春の萌芽期以降に急激な伸長を展開し、その時期にリンが供給されることの必要性はオーチャードグラスと同じであるが、チモシーの場合には1番草として刈り取られた出穂茎の根が脱落するとともに、新分げつの再生が始まる独立再生長期までに1週間以上の準備期間が存在する。一般に作物のリン吸収能は根量に支配されるので、チモシーのこの時期のリン吸収能は低下していると考えられ、この期間の存在も単位期間当たりの吸収量の観点からリン吸収能の低下に結びつく。したがってこの時期に土壌溶液中のリン濃度を高めることがチモシーにとっては必要なことと考えられ、黒色火山性土で得られたチモシーに対する分施の有利性には妥当性がある。このことは松中らの実験⁽¹⁵³⁾でも2番草の独立再生長期以降、継続的にリン供給があることがチモシーの乾物生産量を高めていることから裏付けられるものである。

一方、天北地方ではチモシーのリン施肥時期に対する反応は緩慢であるが、その反応は年次によって変動し、全体的には4月全量区の施肥(吸収)効率が高かった。その理由として、前述の土壌水分低下(早魃)の影響が考えられる。すなわち、1番草刈り取りによって根が脱落する時期のチモシーはオーチャードグラスに比べると耐旱性が低く、土壌水分が低下する2番草生育期間ではオーチャードグラスの場合よりも早魃による生育抑制の程度が大きい。図69に2番草生育期間の降水量とリン施用区におけるチモシーの平均リン含有率の関係を示した。多少のばらつきはあるが、降水量の少ない年次ではリン含有率が低下することが認められる。このことから、チモシーのリン吸収に対しては土壌水分の影響が大きいために、リンの施肥時期が土壌水分の低下した時期に重なった場合には施肥効率が低下し、土壌水分が比較的潤沢

で、しかも生育量の大きい1番草に直接的に有効な早春全量施肥の施肥効率が高かったと考えられる。

3) チモシー・シロクロバ混播草地(黒色火山性土における検討): チモシーでは分施肥の有利性において単播条件と同様の結果であったが、シロクロバのリン施肥時期に対する反応は緩慢であった。この要因の一つは土壌のリン肥沃度が十分に高かったことにあると思われる。すなわちリン施肥処理前の供試草地の Bray(II)-P は $13.1 \text{ mg}/100\text{g}$ と十分であり、そのためシロクロバの乾物収量はリン施肥量に対してほとんど反応しなかった。この点については天北農試の試験結果⁽¹⁰⁰⁾においても同様のことが指摘されている。また、混播条件ではイネ科牧草とマメ科牧草の構成比率の変動による影響が大きいために、一般に施肥に対する反応はイネ科牧草単播草地に比べて緩慢になる。しかし、シロクロバのリン含有率やチモシー・シロクロバの合計リン吸収量からみると分施肥の有利性が示されており、土壌のリン肥沃度が本実験の供試土壌より低い場合には、チモシー・シロクロバ混播草地に対しても分施肥が有利と考えられる。

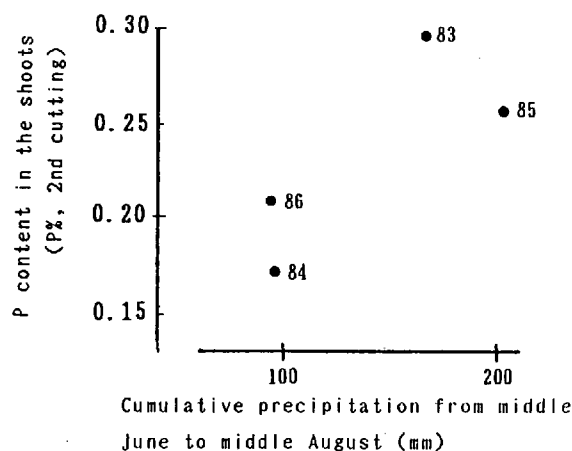


Fig. 69 Relationship between cumulative precipitation during 2nd cutting stage and P content in the shoots of 2nd cutting timothy under Acid Brown Forest soil of Tenpoku district (Average P content of P applied treatments, Numbers show the year, 1983-86).

第2節 経年的酸性化草地におけるリンの効率的な施肥時期

1. 黒色火山性土の経年的酸性化草地におけるリンの効率的な施肥時期

実験方法

第1節・黒色火山性土の実験に組み込まれた $-\text{CaCO}_3$ 系列におけるリン施肥時期の影響を解析する。

実験結果

1) オーチャードグラス

実験期間における表層0~5 cm 土壌の酸性化の状況を図67に示した。 $-\text{CaCO}_3$ 系列では年数の経過に伴って酸性化が急速に進行した。 $-\text{CaCO}_3$ 系列の乾物収量は $+\text{CaCO}_3$ 系列より低かったが、その差は小さく、とくに $-P$ 区では差が逆転した(表27)。リン施肥時期の影響は $+\text{CaCO}_3$ 系列と同様に3回分施肥区 $>$ 2回分施肥区 $\geq$ 5月全量区 $\geq$ 8月全量区 $>$ 6月全量区であった(表27)。地上部リン含有率は1番草では $-\text{CaCO}_3$ 系列 $>$ $+\text{CaCO}_3$ 系列, 2, 3番草では $+\text{CaCO}_3$ 系列 $>$ $-\text{CaCO}_3$ 系列であったがリン施肥時期間では差はなかった(表28)。リン吸収量は各番草とも $-\text{CaCO}_3$ 系列 $>$ $+\text{CaCO}_3$ 系列であったが、 $-P$ 区では差がなかった(表29)。また $-\text{CaCO}_3$ 系列では $+\text{CaCO}_3$ 系列と同様に分施肥で高く、全量施用区との差は $+\text{CaCO}_3$ 系列よりもさらに明瞭となった。施肥リン利用率は1989年より1990年の値が大きく、平均値では3回分施肥区(17.9%) $>$ 2回分施肥区(15.6%) $>$ 5月全量区(14.1%) $>$ 6月全量区(11.0%) $>$ 8月全量区(9.0%)であった。

2) チモシー

実験期間における表層0~5 cm 土壌の酸性化の状況を図67に示した。 $-\text{CaCO}_3$ 系列では年数の経過に伴って酸性化が急速に進行した。乾物収量は $+\text{CaCO}_3$ 系列 $>$ $-\text{CaCO}_3$ 系列であったが、 $-P$ 区を除くとその差は小さかった(表31)。年間合計乾物収量をリン施肥時期別に比較すると、 $+\text{CaCO}_3$ 系列, $-\text{CaCO}_3$ 系列ともに2回分施肥区 $>$ 5月全量区 $>$ 6月全量区 $>$ 8月全量区であった。地上部リン含有率は $+\text{CaCO}_3$ 系列 $>$ $-\text{CaCO}_3$ 系列であったが、その差は非常に小さかった。リン施肥時期の影響は CaCO_3 処理にかかわらずほぼ同様で、1番草では5月全量区, 2番草では6月全量区が高い傾向であったが、 $+\text{CaCO}_3$ 系列ではその差がなかった(表32)。 $-\text{CaCO}_3$ 系列におけるリン施肥時期に対する牧草のリン吸収量の反応は、 $+\text{CaCO}_3$ 系列とほぼ同じであり、2回分

施肥区>5月全量区>6月全量区>8月全量区であったが、
 -CaCO₃ 系列では5月全量区と分施肥区の差がやや大きく
 なる傾向にあった(表33)。-CaCO₃ 系列における施肥
 リン吸収率の平均値は2回分施肥区(16.9%)>5月全量
 区(14.5%)>6月全量区(11.9%)>8月全量区(9.9
 %)であった。

2. 酸性褐色森林土の経年的酸性化草地におけるリンの 効率的な施肥時期

1) 経年的酸性化草地におけるリンの効率的な施肥時期

実験方法

1982年に天北農試内酸性褐色森林土に造成したオーチャ
 ャードグラス(キタミドリ)単播草地において、経年的
 酸性化を促進する区(-CaCO₃ 系列)と酸性化を防止し
 た区(+CaCO₃ 系列:炭酸カルシウム100 kg/10aを毎
 年10月に施用)を設け、リン施肥時期(4月全量区と3
 回均等分施肥区)による肥効の違いを1983年から1986年の
 4年間にわたって比較した。年間の施肥量は窒素18
 kgN/10aを塩安で、リン8 kgP₂O₅/10aを過石で、カリ
 ウム18 kgK₂O/10aを塩加で施用した。塩安-塩加は3
 回均等分施とした。1区面積は6.25 m²であり、4反復
 で年3回地上部を収穫した。供試草地のリン肥沃度は低
 く、1983年における-P区の0~5 cm土壌のBray(II)-P
 は4.8 mg/100gであった。なお、この試験では造成時
 にあらかじめ過石で100 kgP₂O₅/10aを作土層に施用し
 て0~5 cm土壌のリン肥沃度を11.3 mgにまで高めた処
 理区、およびリン施用量を5 kg/10aに減らした処理区
 をそれぞれ4反復で併設し、上記リン施肥処理を行った。

実験結果

4年間の施肥処理によって-CaCO₃ 系列では酸性化が
 進行してpHと交換性カルシウムの低下がみられたのに
 対し+CaCO₃ 系系列では酸性化がほぼ防止できた(図
 70)。年間合計乾物収量(表48)は-P区および4月全量
 区では+CaCO₃ によって増加し、とくに-P区におい
 て炭酸カルシウムの増収効果が大きかった。しかし3回
 分施肥区では+CaCO₃ 処理の効果はみられなかった。乾
 物収量を分施肥区と4月全量区と比較すると-CaCO₃ 系
 列では分施肥区>4月全量区、+CaCO₃ 系列では分施肥区<4
 月全量区であり、試験後半でその傾向はより明瞭になっ
 た。地上部リン含有率も試験後半でその差が現われ、4
 年目についてみると、+CaCO₃ 処理によってリン含有

率が上昇し、3処理の総平均で0.30% Pが0.33% Pと
 なった。リン施肥期間で比較すると-CaCO₃ 系列にお
 いては1番草では分施肥区<4月全量区、2・3番草では
 分施肥区>4月全量区であり、+CaCO₃ 処理によって2・
 3番草における分施肥区と4月全量区の含有率の差が小さ
 くなった。これらを反映して年間合計リン吸収量は
 +CaCO₃ 系列<+CaCO₃ 系列であり、-CaCO₃ 系
 列では分施肥区>4月全量区であったのに対し-CaCO₃ 系
 列では分施肥区<4月全量区であった。その結果、分施肥区と4月
 全量区のリン吸収量は+CaCO₃ 系列では一貫して分施
 区<4月全量区であるのに対し、-CaCO₃ 系列では当初
 分施肥区≤4月全量区であったものがpHの低下に伴っ
 てしだいに分施肥区>4月全量区に変化した(表48)。つまり、
 -CaCO₃ 系列における経年的酸性化に伴って分施肥区のリン
 施肥効率が高まった。

なお土壌のリン肥沃度が高い場合にはリン施肥時期の
 影響は上記ほど明瞭には現れず、またリン施肥量が5
 kg P₂O₅/10aと少ない場合にもリン肥沃度にかかわら
 ずリン施肥時期の影響は小さかった(表49)。

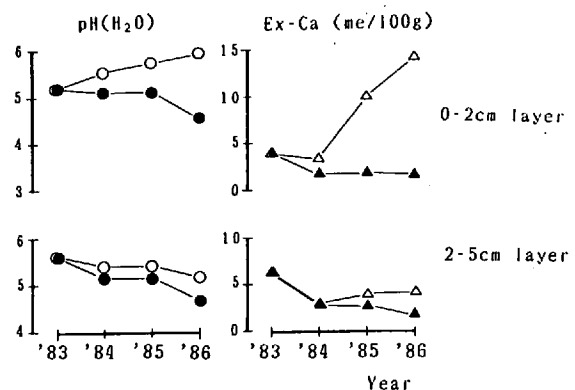


Fig. 70 Changes in pH and Ex-Ca during the years of P-application experiment (●: pH of -CaCO₃ treatment, △: Ex-Ca of +CaCO₃ treatment).

Table 48. Dry weight, P content and total P uptake of orchardgrass shoots.

Item	CaCO ₃ treatment	Timing of P application	Year				Total
			1983	1984	1985	1986	
Dry weight kg/10a	-CaCO ₃	-P	880	594	628	274	2376
		3-times split	962	796	921	664	3343
		April	938	800	904	611	3253
	+CaCO ₃	-P	949	705	787	494	2935
		3-times split	925	777	912	648	3262
		April	993	864	1016	731	3604
P content in the shoots %	-CaCO ₃	-P	0.23	0.16	0.22	0.21	0.21
		3-times split	0.30	0.24	0.32	0.35	0.30
		April	0.32	0.25	0.32	0.34	0.31
	+CaCO ₃	-P	0.23	0.17	0.24	0.23	0.26
		3-times split	0.30	0.24	0.34	0.38	0.39
		April	0.32	0.26	0.35	0.39	0.41
Total P uptake kgP/10a	-CaCO ₃	-P	2.00	9.43	1.37	0.58	4.89 (486)*
		3-times split	2.85	1.96	2.95	2.34	10.10 (331)*
		April	2.99	2.02	2.88	2.04	9.94 (327)*
	+CaCO ₃	-P	2.16	1.21	1.87	1.15	6.38 (460)*
		3-times split	2.74	1.92	3.09	2.47	10.22 (319)*
		April	3.16	2.23	3.59	2.82	11.81 (305)*

*:() shows Production efficiency of absorbed P, calculated as
(DMg)/(Total P uptake 1g).

Table 49. Effect of soil P fertility and amount of P application on total P uptake of orchardgrass (-CaCO₃ treatment).

P fertility	Amount of P apply kgP ₂ O ₅ /10a	Time of P appli- cation	Relative total P uptake (April=100) (%)			
			1983	1984	1985	1986
High-P (11mgP)*	5	Split April	99 (3.49)	106 (2.26)	102 (3.17)	
	8	Split April	95 (3.67)	98 (2.74)	98 (3.67)	
Low-P (5mgP)*	5	Split April	90 (2.92)	95 (1.71)	96 (2.58)	106 (1.82)
	8	Split April	95 (2.99)	97 (2.02)	103 (2.88)	115 (2.04)

*:Bray(II)-P mgP/100g. at 0-5cm layer. **: () shows total P uptake kgP/10a.

2) 酸性・低リン肥沃土草地におけるリンの効率的な施肥時期

実験方法

1983年に天北農試内酸性褐色森林土未耕地を耕起して酸性矯正をせずに造成したオーチャードグラス（キタミドリ）単播草地において、1985年に -P 区と、リンを4月、6月、8月の3時期に均等に分施した区（分施肥区）、4月に全量を施用した区（4月全量区）、6月に全量を施用した区（6月全量区）、8月に全量を施用した区（8月全量区）および10月に全量を施用した区（10月全量区）の6処理を設定し、実験を2年間継続した。年間の施肥量は窒素18 kgN/10aを硫酸で、リン10 kgP₂O₅/10aを過石で、カリウム18 kgK₂O/10aを硫酸で施用した。硫酸一塩加は3回均等分施とした。1区面積は6.25 m²であり、5反復で年3回地上部を収穫した。

実験結果

2年間の処理終了後の土壌化学性を表50に示した。実験開始前のデータはないが、-P 区の化学性が実験開

始前のそれをほぼ示していると考えられる。pHは全層にわたり4.5から5.0程度の強酸性であり、交換性塩基および有効態リン酸が非常に低い。表層土壌（0~2 cm）の有効態リン酸はリン施肥によって高まった（-P 区を除く）。なお、6月全量区、8月全量区および10月全量区のデータは示していないが、4月全量区のそれとほぼ同様であった。

実験開始後2年目の乾物収量は1番草では10月全量区で高く、2番草では分施肥区と4月全量区で高く、3番草では分施肥区と6月全量区で高かった（表51）。年間合計では分施肥区が最も高い収量であった。地上部リン含有率は1番草では4月全量区、2番草では6月全量区、3番草では8月全量区でそれぞれもっとも高かった。年間合計リン吸収量は分施肥区で最も高く、6月全量区、4月全量区がこれに次いだ。施肥リン吸収率は分施肥区（28.7%）>6月全量区（26.8%）>4月全量区（23.7%）>8月全量区（21.9%）>10月全量区（19.5%）であった。したがって、強酸性・低リン条件にある草地ではリンを何回かにわけて施用する分施肥が施肥効率がもっとも高いと判断することができる。

Table 50. Chemical properties of the soil after the end of experiment (October 1986).

Time of P application	Soil depth	pH	Bray (II)-P mgP/100g	Ex-Ca	Ex-Mg me/100g	Ex-K
-P	0-2cm	4.64	4.5	0.36	0.04	1.45
	2-5	4.53	1.3	0.29	0.02	0.82
	5-10	4.90	1.2	0.96	0.08	0.71
	10-15	5.13	1.4	1.21	0.12	0.58
3-times split	0-2cm	4.48	27.4	1.18	0.05	1.21
	2-5	4.44	2.1	0.71	0.03	0.69
	5-10	4.68	1.0	1.85	0.05	0.42
	10-15	4.98	1.0	1.71	0.14	0.34
April	0-2cm	4.60	31.1	0.75	0.19	1.56
	2-5	4.47	1.5	0.75	0.04	0.82
	5-10	4.74	1.0	1.82	0.05	0.38
	10-15	5.07	0.7	1.57	0.13	0.27

Table 51. Dry weight, P content and total P uptake.

Item	Time of P application	Cutting			P-use	
		1st	2nd	3rd	Total	efficiency(1)
Dry weight kg/10a	-P	77	200	68	345	
	3-times split	168	285	176	629	
	April	161	290	146	597	
	June	144	279	171	590	
	August	176	267	164	607	
	October	190	261	143	594	
P content in the shoots %	-P	0.19	0.19	0.18	0.19	
	3-times split	0.26	0.31	0.31	0.30	
	April	0.32	0.27	0.27	0.28	
	June	0.23	0.34	0.32	0.31	
	August	0.26	0.22	0.34	0.27	
	October	0.28	0.23	0.26	0.25	
Total P uptake kgP/10a	-P	0.15	0.38	0.13	0.65	
	3-times split	0.44	0.89	0.54	1.91	28.7
	April	0.51	0.29	0.39	1.69	23.7
	June	0.34	0.94	0.55	1.84	26.8
	August	0.46	0.58	0.13	1.61	21.9
	October	0.54	0.59	0.38	1.51	19.5

(1) P-use efficiency means "Fertilizer P use rate" calculated as % of $\{(Total\ P\ uptake) - (P\ uptake\ at\ -P\ treatment)\} / (Amount\ of\ P\ application)$.

3) 作土層のリン肥沃度と表層酸性化がオーチャードグラスの生育に及ぼす影響

実験方法

1) 無底ポット実験

直径33 cm, 長さ50 cm の塩化ビニール管を天北農試圃場に埋設し, 表層土壌 (0~3 cm) に0.29 N- 硫酸70 ml/ 生土1 kg を加えて pH を5.1に調整した区と, 炭酸カルシウム2 g/ 生土1 kg を加えて6.2に調整した区を設けた。さらに, 作土層 (3~20 cm) のリン肥沃度を過石5 g/ 生土1 kg の添加の有無によって調整した酸性褐色森林土を図71のように充填し, オーチャードグラス(カタミドリ)を1981年5月に播種した。播種時に N-K₂O=3-3 kg/10a (尿素-硫加)を施用し, 1回刈取後低 pH 区に対しては塩安, 高 pH 区に対しては尿素で N-K₂O=8-8 kg/10a (カリウムは硫加)を施用した。8月に刈り取り, N-K₂O=12-8 kg/10aを施用し, 10月に最終刈り取りを行った。実験は4反復で行い, 収量

調査後, 圃場よりポットを掘り出し, 水洗法によって土層別に根重を測定した。

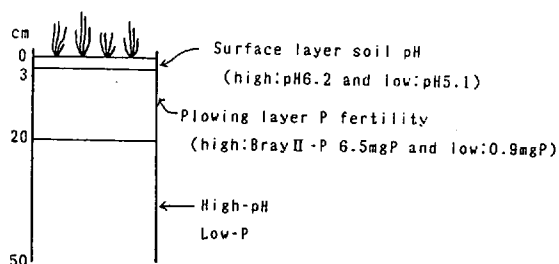


Fig. 71 Treatment of the surface soil in the acidity and P fertility experiment (Diameter of the pot (No-bottom): 33 cm).

2) 土層深とリン肥沃度を変えた土壌に対する塩加アルミニウム添加実験

15×15×5 cm (薄型)と15×15×15 cm (厚型)の木箱に酸性褐色森林土を供試して炭酸カルシウム1 g/生土1 kgを加えて pH を6.0に調整し, 全層土壌に過石1 g/ 生土1 kg を添加した高リン区と, 過石を施用しない低リン区を設定した。1981年9月にオーチャードグラス

(キタミドリ)を播種し、さらに4葉期に塩加アルミニウム粉末を1 g/pot 表面施用し、その後20日間生育させた。播種時の施肥量は $N-P_2O_5-K_2O = 9-9-9$ kg/10a 相当(硫安-過石-硫加)であり、4反復で実験を行った。

実験結果

無底ポット実験では表層の pH 処理によって0~5 cm 土壌の pH は低 pH 区で5.12から5.36程度であったのに対し、高 pH 区では6.06から6.23であり、作土層のリン肥沃度処理によって、5~20 cm 土層の Bray(II)-P は高リン区で6.1から7.0 mgP/100g であったのに対し低リン区では1 mgP/100g であった(表52)。その結果、オーチャードグラスの乾物収量・リン含有率・リン吸収量ともに表層土壌の酸性化の影響で低下したが、低下の程度は高リン区より低リン区で大きかった(図72)。このうち地上部乾物収量は高リン区では表層酸性化の影響はほとんどみられなかったが低リン区では酸性化によって明らかな収量低下がみられた。地上部リン含有率は高リン区、低リン区ともに酸性化の影響で低下したが、低下の度合いは低リン区で著しかった。地上部アルミニウム含有率は酸性化によって若干高まり、高リン区<低リン区であった。0~35 cm 土層の全根重は高リン区>低リン区であり、高リン区では表層酸性化の影響はみられなかったが、低リン区では表層酸性化によって根重がやや低下した(図73)。このうち0~5 cm 土層の根重は高リン区>低リン区であり、いずれも酸性化によって低下した。根重の垂直分布割合は0~5 cm 土層に全根重の56

~62%が集中しており、地上部乾物収量はこの部位の根重と全根重の両者にほぼ対応した。作土層のリン肥沃土が高いとき、表層から作土層まで全体の根重が多かった。表層の酸性化によって、表層の根重割合が高リン区の場合62%が56%に、低リン区の場合60%が59%にそれぞれ低下し、酸性化した土層の直下の分布割合が高リン区の場合19%が25%に、低リン区の場合19%が24%にそれぞれ高まった(図74)。

土層深と全層土壌のリン肥沃度を変えた土壌に対する塩加アルミニウム添加実験において、実験終了時の土壌化学性はアルミニウム添加区の pH は4.77から4.81であり、無添加区では5.56から5.62であり、Bray(II)-P は高リン区で20.9から21.0 mgP/100g であり、低リン区では6.0から6.2 mg であった(表53)。

地上部乾物収量は塩加アルミニウム添加によっても高リン・15 cm 区では少なくとも低下はせず、高リン・5 cm 区と低リン区ではつねに低下し、低下の程度は15 cm 区より5 cm 区で、高リン区より低リン区で著しかった(表54)。根部乾物重は地上部乾物重にほぼ対応したが、アルミニウム添加による低下割合は地上部より小さかった。地上部アルミニウム含有率は塩化アルミニウム添加によって高まり、その程度は高リン区より低リン区の方が、また5 cm 区より15 cm 区の方が著しかった。地上部リン含有率は高リン区で低リン区の2倍以上の値であり、両区ともに5 cm 区>15 cm 区であり、塩化アルミニウム添加によって高リン区の15 cm 区を除いてリン含有率は低下した。

Table 52. pH and available-P of the soil after the end of experiment 3.

pH treatment	High pH				Low pH			
	High P		Low P		High P		Low P	
P treatment	pH	Bray(II)-P	pH	Bray(II)-P	pH	Bray(II)-P	pH	Bray(II)-P
0-2cm layer	6.06	34.7	6.08	34.0	5.28	36.2	5.36	34.2
2-5cm	6.22	15.3	6.23	6.7	5.12	14.1	5.15	11.7
5-10cm	6.26	6.1	6.22	1.0	6.12	6.5	5.98	1.0
10-20cm	6.22	7.0	6.34	1.0	6.32	6.2	6.30	1.0

Bray(II)-P: mgP/100g

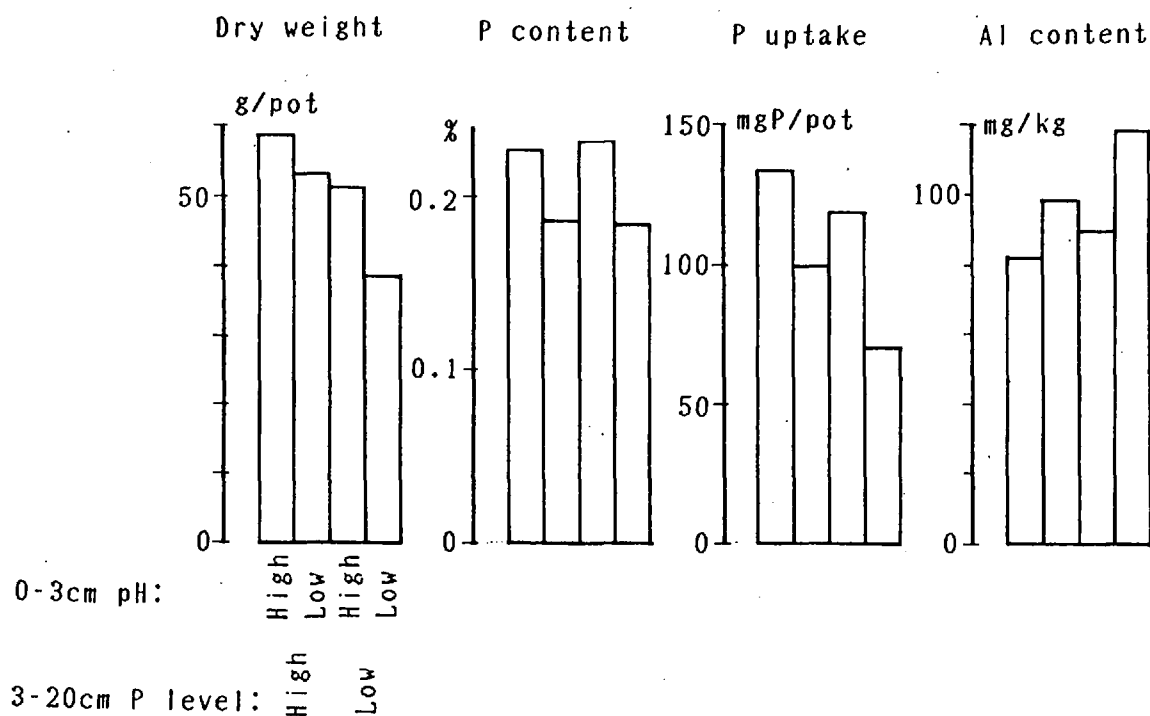


Fig. 72 Effect of soil acidity of the surface layer having different P fertilities of plowing layer on yield, P content, total P uptake, and Al content in the shoots.

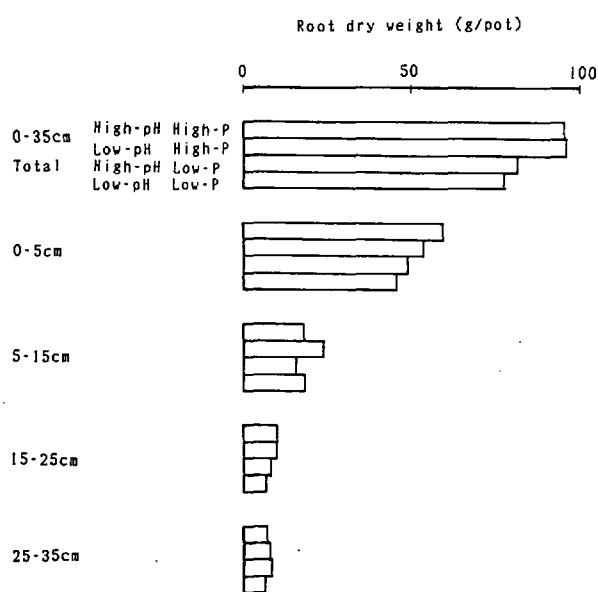


Fig. 73 Effect of soil acidity of the surface layer having different P fertilities of plowing layer on root dry weight.

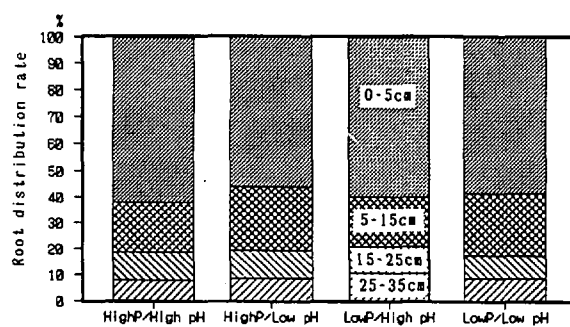


Fig. 74 Vertical distribution of root dry weight.

Table 53. pH and available P of the soil after the end of experiment (0-5cm soil layer).

P fertility	Al treatment	pH (H ₂ O)	Bray(II)-P (mgP/100g)
High P	+Al	4.81	21.0
	-Al	5.62	20.9
Low P	+Al	4.77	6.2
	-Al	5.56	6.0

Table 54. Effect of Al application on yield, root weight, Al and P content under different conditions of soil depth and P fertility.

P fertility	Soil Depth treatment	Al treatment	Dry weight(g/pot)		Content(mg/kg)	
			Shoot	Root	Al	P
High P	5cm	-Al	5.32	1.89	33	0.36
		+Al	4.40	1.81	43	0.29
	15cm	-Al	5.98	2.81	29	0.33
		+Al	6.58	2.87	48	0.37
Low P	5cm	-Al	4.14	1.61	37	0.17
		+Al	3.55	1.49	56	0.16
	15cm	-Al	5.30	3.04	25	0.15
		+Al	4.25	2.61	63	0.13

3. 考 察

1) 経年的酸性化草地におけるリンの効率的な施肥時期

酸性褐色森林土、黒色火山性土両土壌において、経年的酸性化によって4月または5月全量区に対する分施肥区の効率が相対的に高まった。この理由は次のように考えられる。まず土壌側では、酸性条件で施肥リンが土壌に吸着されやすいために、リンを早春に全量施用する区よりも何回かに分けて施用する方が牧草に吸収されやすいことが考えられる。

前節におけるリン施肥時期の効果に対する土壌の違いの影響解析のためのリンの溶出実験で、酸性褐色森林土に炭酸カルシウムを2g/70g添加することによりpHを高めた処理を設けたところ(+CaCO₃区)、添加後20日以降では明らかに+CaCO₃区>-CaCO₃区となった(図68)。これは酸性条件における土壌へのリン吸着の強さを示すものである。一方牧草側では、酸性条件で根の伸長が停滞するために牧草のリン吸収速度が低下する。酸性条件で根の生育が抑制されることは本節の図73および前章の図47に示されているが、その結果、リン施肥後の期間が長くなり土壌に吸着される割合が高まる2～3番草においては、リン吸収量がさらに低下する。

つまり、+CaCO₃区や試験前半の-CaCO₃区では、土壌から牧草へのリン供給と牧草根からのリン吸収に阻害要因がなく、4月区のリン吸収量が最大となるが、試験後半の-CaCO₃区では酸性化によって土壌からのリ

ン供給、牧草のリン吸収ともに抑制された結果、分施肥区の効率がしだいに高まったと解釈できる。また、経年的酸性化草地における実験結果は、前章で検討した非酸性化草地における効率的リン施肥時期から強酸性条件における結果への移行段階とみることもできる。

なお、この試験を行った年は5月～6月の低温により1番草収量が極端に少なかったため、2番草収量が相対的に増加し、その結果4月区より6月区のリン吸収量が多くなった。通常の番草別収量割合は1番草：2番草：3番草＝4：3：3程度であるので、分施肥の次に効率的な施肥時期は通常の条件では割合の大きい1番草に効果のある4月と考えられる。

2) 作土層のリン肥沃度と表層酸性化がリンの効率的な施肥時期に及ぼす影響の解析

本実験の無底ポット実験では0～3cm土層を酸性化させることによる影響を3～20cm土層のリン肥沃度との関連で検討した。土層深とリン肥沃度を変えた木箱実験では土層深5cmと15cmを処理として用いた。本実験の結果から、1.表層の酸性化によって乾物収量およびリン吸収が低下すること(表54, 図72)、2.表層の酸性化によるリン吸収の低下程度は酸性化していない作土層のリン肥沃度が低いときに著しいこと(表54, 図72)、3.酸性化していない作土層のリン肥沃度が高い場合には土層深が深いとアルミニウム添加の影響はさらに緩和されること(表54)、4.酸性化によってその土層の根重が低下すること(表54, 図73)、が明らかになった。

このうち1.2.および3.は作土層のリン肥沃度が高い場

合には表層の酸性化の悪影響が小さいことを意味しており、表層が酸性化した場合における作土層のリン肥沃度の重要性を示している。つまり、表層が酸性化した場合、表層におけるリン吸収が低下するので、酸性化していない作土層からのリン吸収量の相対的割合が高まるということである。3.の土層深の実験において、土壌のリン肥沃度が高い場合には、アルミニウム添加によって土層深5 cm ポットではオーチャードグラスの生育が低下したが土層深15 cm ポットでは低下がみられなかった。これに対しリン肥沃度が低い場合にはいずれでも低下した(表54)。この結果は次のように解釈できる。土層深5 cm ポットでそれ以下の作土層をもたない場合には、アルミニウム添加によってリン肥沃度に関係なく根の伸長阻害とそれに起因するリン吸収阻害によって生育が低下した。一方、土層深15 cm ポットで酸性化していない土層が存在する場合には、アルミニウム濃度が高い土層で根の伸長阻害を受けるものの、オーチャードグラスはアルミニウム耐性が高いので、その土層まで根を伸長し、その土層のリン肥沃度が高い場合にその土層からリンを吸収して生育を正常に保った。なお、表面散布されたアルミニウムが短期間のうちに下層に移動するのであれば15 cm ポットでは5 cm ポットに比べて土層全体のアルミニウム濃度が小さいことが考えられるが、アルミニウム処理後1~3週間には5 cm 以下土層ではほとんどアルミニウ

ムが検出されなかったこと、牧草地上部のアルミニウム含有率が5 cm ポットに比べ15 cm ポットの方が高かったこと(表54)から判断しても、表層(0~5 cm)におけるアルミニウム濃度はポットの根域の深さにかかわらず一定であったと考えられる。4.の根重の結果は、酸性化によるリン吸収低下が根重の低下を伴って発現していることを示すもので、前章で検討した結果と一致する(表54, 図73)。

一方、経年的酸性化草地における効率的なリンの施肥時期の検討結果においても、供試草地のリン肥沃度はリン施肥時期に対する牧草の生育反応に対して影響を及ぼした。すなわち、経年的酸性化草地で効率的なリンの施肥時期は4月全量区より分施肥区であるという傾向は、リン肥沃度が低い場合により明瞭に現われ、肥沃度が高い場合には差が小さくなった(表49)。このような現象は、施肥リンに対する依存度が土壌のリン肥沃度によって異なることに由来するもので、土壌の経年的酸性化の影響を受けたリン施肥時期に対する反応のみならず、適正なpH条件におけるリン施肥時期の反応性にもあてはまる。表55に経年的酸性化草地におけるリン肥沃度を変えた試験区の、+CaCO₃区のリン吸収量指数を示したが、酸性褐色森林土における4月全量区の有利性はリン肥沃度が低く、しかもリン施肥量が多い場合に顕著であった。

Table 55. Effect of soil P fertility and amount of P application on total P uptake of orchardgrass (+CaCO₃ treatment).

P fertility	Amount of P apply kgP ₂ O ₅ /10a	Time of P application	Relative total P uptake (April=100) (%)			
			1983	1984	1985	1986
High-P (11mgP)*	5	Split April	99 (3.49)**	98 (2.58)	95 (3.76)	
	8	Split April	95 (3.67)	93 (2.72)	88 (3.86)	
Low-P (5mgP)*	5	Split April	88 (2.95)	107 (1.76)	103 (2.96)	98 (2.39)
	8	Split April	88 (3.16)	86 (2.23)	86 (3.59)	87 (2.82)

*:Bray(II)-P mgP/100g, at 0-5cm layer. **: () shows total P uptake kgP/10a.

第 6 章

炭酸カルシウム施用による牧草生育改善方策

第 1 節 酸性化草地に対する炭酸カルシウム施用効果の解析

実験方法

1 酸性化草地に対する炭酸カルシウム施用実験

1974年に天北農試酸性褐色森林土に造成したオーチャードグラス(キタミドリ)単播草地に窒素12 kgN/10a (12 N 区) または24 kgN/10a (24 N 区) を硫酸で、リン10 kgP₂O₅/10a を過石で、カリウム15 kgK₂O/10a を硫酸で施用しつつ8年間圃場試験を継続し、十分に酸性化させた上で、炭酸カルシウムを0, 200, 400, 800 kg/10a 施用した(1983年4月)。1区面積は2.25 m²とし4反復で実験を行った。それまでの施肥処理を継続して牧草生育を観察しつつ、何回かにわたって土壌溶液を採取した(方法は第3章「草地土壌の酸性化解析試験」に準ずる)。また、1983年10月に採取した土壌サンプル(採取後8時間以内)を用いて、次の方法により微生物活性の測定を行なった。

バクテリア計数：卵アルブミン寒天培地希釈平板法。

カビの計数：ローズベンガル寒天培地希釈平板法⁽⁸⁸⁾。

糸状菌長：Jones⁽¹¹⁴⁾によるアニリンブルー染色寒天フィルム法。

2, 3, 5-Triphenyltetrazolium chloride(TTC)還元活性：Casidaの方法⁽³¹⁾。

フラクトース分解活性：10 gの生土に1%フラクトース溶液を1 ml 加え、30℃で4時間培養後、80 mlの1 M-KCl溶液で残存フラクトースを抽出し、アンスロン法によって定量した。

尿素分解活性：10 gの生土を100 mlのプラスチック容器に入れ、尿素3%溶液を1 mlを加え、30℃で15時間培養後80 mlの1 M-KCl溶液で残存尿素を抽出し、濾液2 mlに1 mlの80%トリクロル酢酸と1 mlのDABA溶液(p-dimethylaminobenzaldehyde=DABA=2.0 g+95%エタノール100 ml+塩酸10 ml)を加え、室温に放置後420 nmの吸光度を測定した。

2 酸性化草地に対する炭酸カルシウム施用が根重に及ぼす影響解析実験

根釧農試内の古い一般管理草地から表層が十分に酸性化している3地点(オーチャードグラス放牧地1地点、

チモシー採草地2地点)を選び、これに1/5000 aのステンレス製無底ポット(深さ21 cm)を自然の植生状態になるように埋め込み、窒素20 kgN/100aを塩安で、カリウム20 kgK₂O/10aを硫酸で施用し、1989年5月22日に炭酸カルシウム500 kg/10aを表面施用した(+CaCO₃区)。土壌と根がくずれ落ちないようにポットの底に植木鉢用のふたをして網室に持ち込み、あるいは圃場に埋め込んだまま、前者にはオーチャードグラス、後者にはチモシーを同年10月23日まで栽培した。オーチャードグラスは地上部を6月27日、8月10日、9月8日の3回収穫し、チモシーは6月27日、9月8日の2回収穫した。その後、根部を水洗して土壌から分離し、全根重を測定した。炭酸カルシウムは5月のみに施用し、塩安と硫酸は刈り取りごとに1回目の施肥量と同量を繰り返し施用した。

実験結果

オーチャードグラスの年間合計乾物収量は炭酸カルシウム施用量に対応して微増した(図75)。各番草に対する炭酸カルシウム施用効果もこれと同様であった。牧草による養分吸収量のうち、炭酸カルシウム施用によってリンとカルシウムが増加し、窒素は変動が小さかった。このうちリンでは、炭酸カルシウム800 kg/10a区で無施用区に対するリン吸収量指数が109% (12 N 区) ~ 121% (24 N 区)であり、明らかに増加した。この背景にはリン含有率の増加があり、800 kgの炭酸カルシウム施用によって年平均含有率は0.38 %Pが0.39 %P (12 N 区) または0.32 %Pが0.38 %P (24 N 区)に高まった。牧草のリン含有率は窒素施用量の増大によって低下した。リンとともに牧草のカルシウム含有率が上昇し、カルシウム吸収量が増加した。一方、12 N 区における牧草の窒素含有率に対する炭酸カルシウム施用の影響は明瞭ではなかったが、24 N 区ではやや低下する傾向であった。その他、カリウムやマグネシウムでは明確な傾向はみられなかった。

炭酸カルシウム施用後6か月の土壌pHは0~2 cm土層で明らかな上昇が認められたが、2~5 cmあるいは5~10 cm土層ではほとんど変化しなかった(図76)。交換性カルシウムはpHとほぼ同じ反応を示したが、2~5 cm土層で若干増加したものの5 cm以下土層では変化がみられなかった。土壌溶液組成に対する炭酸カルシウム

施用の影響は、0~2 cm 土層で明瞭に現れたが2~5 cm 土層では不明瞭で、またサンプル採取時期により若干の変動がみられたもののその違いは小さかった。最も典型的な例として炭酸カルシウム施用後2か月時点における0~2 cm 土層の土壌溶液組成を図77に示した。炭酸カル

シウム施用によって pH, カルシウムおよび硫酸濃度が著しく上昇したのに対し、アルミニウム、窒素およびリン濃度が低下した。これらの変化は12 N 区よりも24 N 区で大きかった。

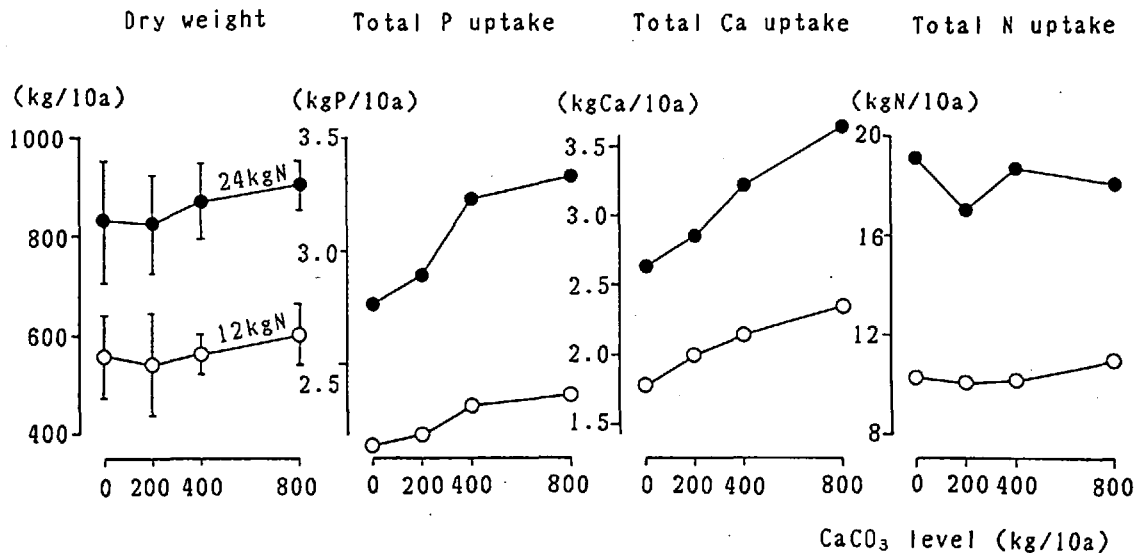


Fig. 75 Effect of lime application on yield and the amount of total uptake of P, Ca and N (○: 12 kgN/ 10 a, ●: 24 kgN/ 10 a).

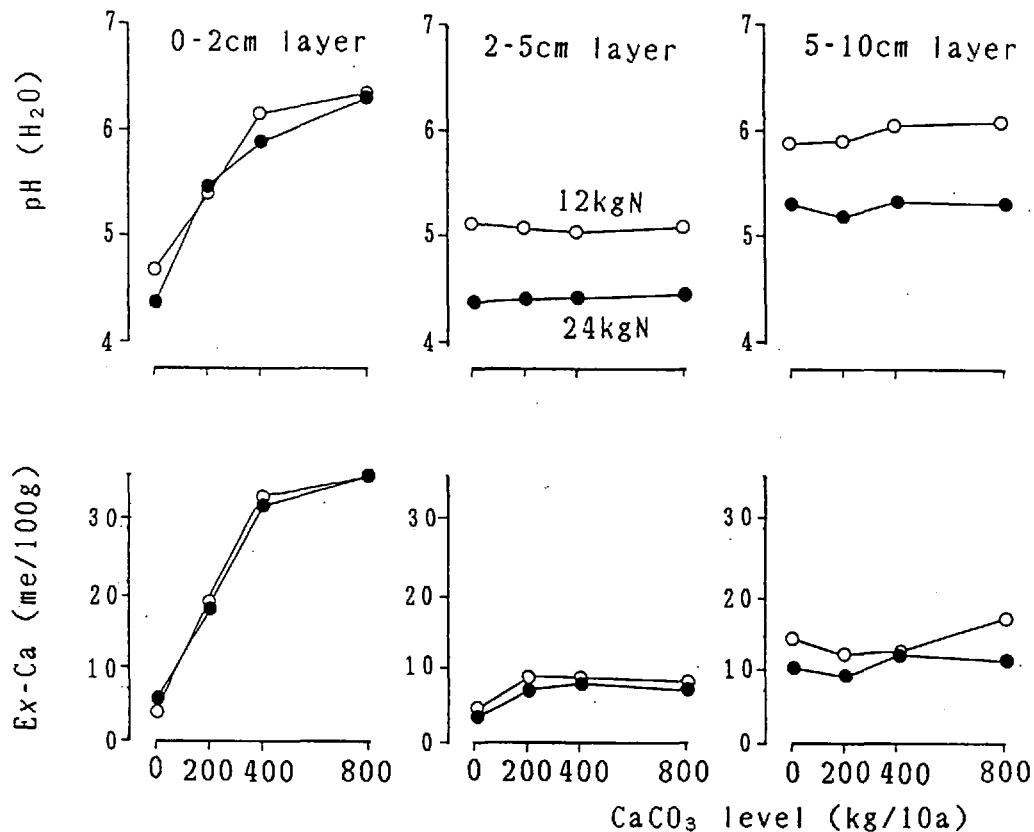


Fig. 76 Effect of lime application on pH and Ex-Ca of the soil (○: 12 kgN/ 10 a, ●: 24 kgN/ 10 a).

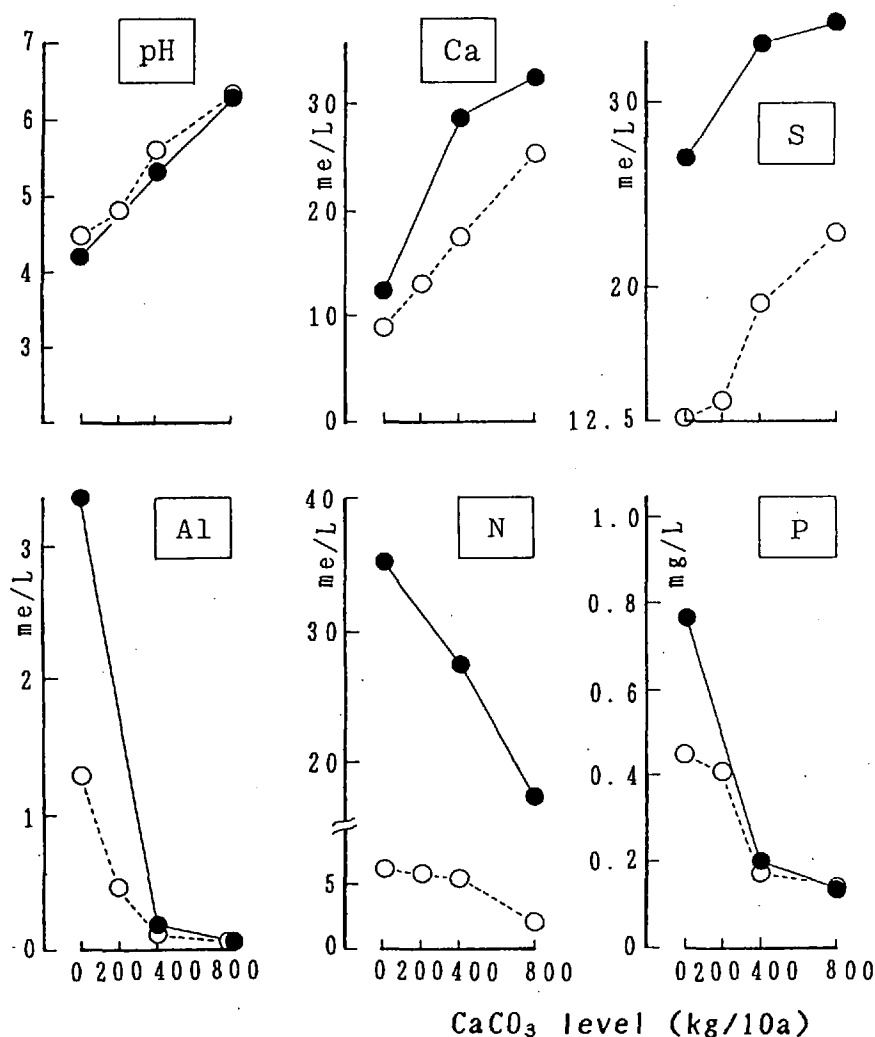


Fig. 77 Effect of lime application on the soil solution composition (2 months after lime application, 0-2 cm layer, ○: 12 kgN/ 10 a, ●: 24 kgN/ 10 a).

Table 56. Effects of CaCO₃ application on microbial and biochemical activities (October 1983, 12kgN/10a treatment, 0-2cm layer).

CaCO ₃ rate kg/10a	TTC reducing activity (1)	Decomposing Activities		Numbers		Hyphal length m/g
		Fructose (2)	Urea (3)	Bacteria 10 ⁶ /g (4)	Fungal spores 10 ⁶ /g (5)	
0	37	271	150	12.8a	15.8a	201
200	105	345	183	13.4a	12.9a	216
400	287	471	211	13.7b	13.9a	269
800	172	392	254	22.3c	9.1b	270

(1), (2), (3): These activities are expressed as mg of product formed or mg substrate decomposed per 100g soil per day at 30° C.

(4), (5): a, b and c denote statistical difference, when the same are used they are not significant at 5% level of significance.

炭酸カルシウム施用後6か月時点における0~2cm土層の微生物の活性と数を表56に示した。TTC還元活性、フラクトース分解活性、尿素分解活性、バクテリア数および糸状菌長がそれぞれ増加し、カビ胞子数は減少した。これらの結果はいずれも微生物活性が炭酸カルシウム施用によって高まったことを示すものである。

埋め込みポット試験では、炭酸カルシウム施用によっ

て土壌pHは4.5~4.9から6以上に上昇し、有効態リン含量はわずかに減少し、交換性カルシウムが著しく増加した(表57)。その結果根重が増加し(図78)、牧草体の窒素、リン、カリウム、カルシウム、マグネシウム含有率が上昇したが、地上部乾物収量に対する影響は不明瞭であった(図79)。

Table 57. Chemical properties of the soil after the end of experiment (0-5cm layer).

Grass species	CaCO ₃ treatment (3)	pH	Bray(II)-P mgP/100g	Ex-Ca	Ex-Mg me/100g	Ex-K
Orchardgrass	-CaCO ₃	4.48	37.5	1.36	0.19	0.20
	+CaCO ₃	6.11	59.0	19.22	0.34	0.29
Timothy(1)	-CaCO ₃	4.91	6.9	1.75	0.21	0.34
	+CaCO ₃	6.38	4.8	19.22	0.25	0.30
Timothy(2)	-CaCO ₃	4.87	11.0	1.34	0.25	0.34
	+CaCO ₃	6.36	9.3	22.93	0.26	0.35

Timothy(1) and Timothy(2) were taken from different grasslands.

(3):5gCaCO₃/pot was applied for +CaCO₃ treatment.

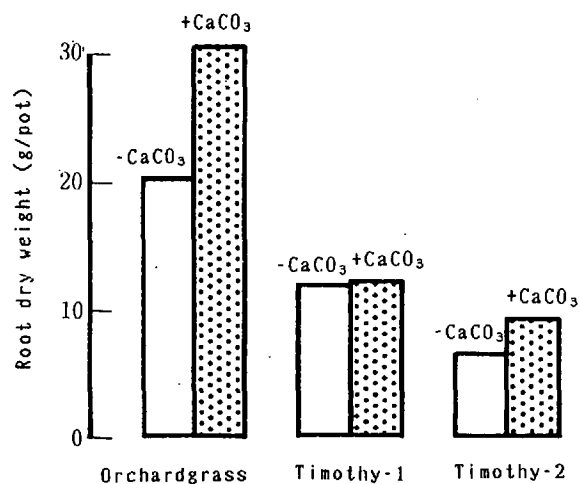


Fig. 78 Effect of lime application on root dry weight of orchard-grass and timothy (+CaCO₃: 5gCaCO₃/pot).

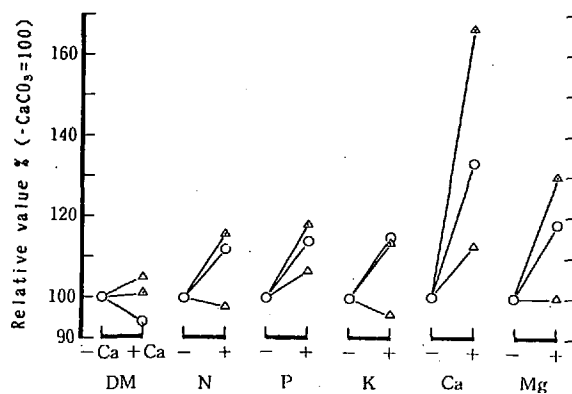


Fig. 79 Effect of lime application on relative value of yield and element content in the shoots (Relative value: -CaCO₃ = 100, O: orchardgrass, Δ: timothy-1, ▲: timothy-2).

考 察

土壌溶液組成に対する炭酸カルシウム施用の影響は、炭酸カルシウムが土壌溶液に溶出した結果、カルシウム濃度とともに pH が上昇し、pH 上昇によってアルミニウム濃度が低下したものである。土壌溶液組成のうち、炭酸カルシウム施用に対する硫酸根とカルシウムの反応およびサンプリング時別の変動が両者で類似したことが特徴的であった。この原因として、炭酸カルシウムとして与えられたカルシウムと、肥料とともに与えられた硫酸根が硫酸カルシウムを形成し、その一部が土壌溶液に溶解したことが考えられる。この他、pH 上昇に伴い土

壤のカチオン交換容量（CEC）が増大するとともにアニオン交換容量（AEC）が減少するので（図80），それまで土壌が保持していた硫酸を放出したことも要因の一つと考えられる。カルシウム濃度の上昇がみられたのはせいぜい 5 cm までの土層であったことは、炭酸カルシウム施用後 6 か月の間にカルシウムが移動するのは 5 cm 以内であり、5 cm 以下の土層まで酸性化した草地土壌に炭酸カルシウムを多量に施用しても、施用当年にその土層まで酸性矯正することが不可能であることを意味する。

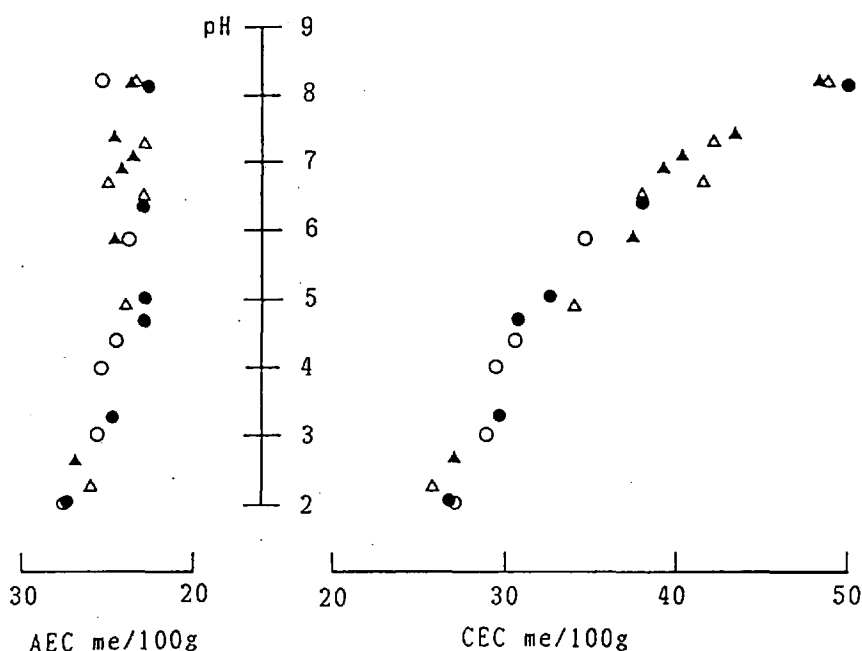


Fig. 80 pH dependent electric charge of the soil determined by using 0.2 N-NH₄Cl solution (0-2 cm layer, ○: No-CaCO₃, ●: 200 kgCaCO₃/10 a △: 400 kgCaCO₃/10 a, ▲: 800 kgCaCO₃/10 a).

炭酸カルシウム施用によって土壌溶液のリン濃度が低下した原因として、次のことが考えられる。1) カルシウムアパタイトを形成してリンが不溶化した、2) 牧草生育が旺盛になった結果牧草によるリン吸収速度が増大した、3) 微生物数の増大の結果、リンが微生物にとりこまれた。炭酸カルシウム施用によって土壌側からのリン供給力が低下するとする報告は多い^(7, 32, 81, 82, 237)。それにもかかわらず牧草のリン吸収量が増加したことについては、次のように考えることができる。1) 炭酸カルシウム施用によって土壌溶液リン濃度が低下したとしても、その濃度は800 kg区の場合であっても0.04 mgP/Lを越えており、この値は牧草生育に十分である、

2) アルミニウム濃度低下によって牧草根が正常に伸長した結果リン吸収力が増大し、それによるリン吸収量の増大が土壌溶液のリン濃度の低下よりも影響力が大きい。Haynes⁽⁸²⁾はアルミニウム障害によってリンの吸収、移動、利用が阻害され、石灰施用によってアルミニウム毒性が軽減された結果リンの利用性の向上がもたらされることを指摘しており、後述の埋め込みポット試験の結果とともに2)の推論を裏づけるものである。

土壌微生物数と土壌の生化学的分解活性は密接に関連し⁽⁸⁹⁾、有機物分解に重要な役割を演ずる。また、土壌微生物数に最も強い影響を及ぼす要因は土壌 pH である⁽⁹⁰⁾。したがって炭酸カルシウム施用によって土壌微生物

物数と生化学的分解活性が増大した要因の一つは土壌 pH の上昇にある。また一方で土壌のアルミニウム濃度も微生物活性を低下させる要因であるので⁽²⁷⁴⁾、pH とともにアルミニウム濃度の低下も微生物活性の増加に關与している。その結果、土壌表層に蓄積している有機物の分解が促進され、放出（無機化）されるリンやカルシウムなどの養分が牧草に供給されることも、これらの養分吸収量が増加した間接的な要因と考えられる。本実験では土壌溶液の窒素濃度が炭酸カルシウム施用によって低下したこと、あるいは牧草の窒素吸収量が低下したことは、このことが事実であるとするなら、その原因は有機物分解過程における施肥窒素の有機化にあると考えることができる。なお、酸性化草地に対する炭酸カルシウム施用においては、施肥窒素の揮散も考えられるが、三木ら⁽¹⁶²⁾によれば、その割合は0.3%にすぎないとされているので、実質的には問題とはならない。

牧草のリンおよびカルシウム吸収に対する炭酸カルシウム施用効果は12 N 区より24 N 区でより明瞭であったが、この理由として二つの説明が可能である。第一に、炭酸カルシウム施用前の土壌 pH が24 N 区の方が低いために、pH 上昇効果が明瞭に発現したことがあげられ、第二に牧草の養分吸収活性が24 N 区のほうが高いために、炭酸カルシウム施用後の養分吸収量が12 N 区より多く、その結果両者の差が拡大したことが考えられる。

埋め込みポット試験の結果は炭酸カルシウム施用によって牧草根が正常に伸長し、同時に各養分吸収量が増大したことを示している（図78, 79）。各種養分のうちカルシウムは炭酸カルシウム施用によって土壌溶液中の濃度が上昇した直接の影響を受けているためにとくに含有率の上昇が著しいが、その他の養分ではこのような土壌から牧草への供給力の急激な増大は考えられない。とくにリンでは上述の試験結果からも土壌溶液リン濃度は低下している。それにもかかわらず本実験ではリン吸収は炭酸カルシウム施用によって増加した（図79）。これまでに報告された研究結果では、土壌 pH の上昇にともなって水溶性リンが低下するとする報告^(7, 32, 81, 237)と、ある種の有効態リンとしては増加するとする報告^(32, 81, 144, 206)がみられ、それに伴って作物のリン吸収も増加する場合^(7, 32, 81)と低下する場合^(32, 215, 237)が報告され、この関係は一律ではないとの報告^(82, 86)もみられる。このように、土壌 pH 上昇によって作物の養分吸収が増加する場合と減少する場合とがみられるのは、炭酸カルシウムが施用される以前の作物根がアルミニウムによって障害を受けていたか否かによると推察できる。つまり、酸性化の程度によって溶出するアルミニウム濃度が大きく異なり、

pH 5.0～6.0の弱酸性土壌の場合、土壌溶液のアルミニウム濃度はそれほど高まっていないために、作物根の伸長阻害＝養分吸収力の低下は著しくない。その状態において炭酸カルシウムを施用すると水溶性リンが低下したり、微生物活性の増大に伴う養分の有機化⁽¹⁶²⁾などによる作物に対する養分供給力の低下のみが顕在化する。これに対し、本試験で取り扱った pH 4.5～5.0程度の著しい酸性土壌の場合には、炭酸カルシウム施用による土壌溶液中アルミニウム濃度の低下によってそれまで停滞していた根の伸長が急激に再開した結果、土壌からの供給力の低下がありながらも、著しい吸収力の増大によってリンなどの養分吸収が増大するのである。このような pH 領域別の酸性障害の解釈は既報^(253, 254)にもみられ、また、第4章・アルミニウム存在下における牧草のリン吸収の結果と良く一致するものである。

第2節 経年的酸性化草地に対する炭酸カルシウム施用適量

実験方法

まず、1976年～1982年における各年次のカチオン（カルシウム、マグネシウムおよびカリウム）およびアニオン（硫酸と塩酸）の施肥による施用量と牧草による吸収量の積算値を求める。次にそれぞれの値について添加量から吸収量を差し引いたものが土壌に残存するはずの過剰アニオン量とし、これと等量のカチオン量を施肥によって流亡するはずのもの、すなわち流亡量の理論値とする。

$$\begin{aligned} \Sigma \{ & (\text{カチオン施用量}) - (\text{カチオン吸収量}) \} \\ & = (\text{カチオン残存量}) \\ \Sigma \{ & (\text{アニオン施用量}) - (\text{アニオン吸収量}) \} \\ & = (\text{アニオン残存量}) \\ & \quad (\text{アニオン残存量}) - (\text{カチオン残存量}) \\ & = (\text{過剰アニオン量}) \\ & = (\text{カチオン流亡量理論値}) \end{aligned}$$

なお、この場合、硝酸およびアンモニアは牧草根に速やかに吸収されるものとして計算の対象からはずした。次に、第3章に供試したオーチャードグラス草地の1975年収穫後と1982年（7年間の施肥処理後）の跡地土壌（0～15 cm）の交換性カチオンの差から求めた7年間の実験期間中のカチオン流亡量を求め、これを施肥によるカチオン流亡量の実測値とする。

実験結果

施肥によるアニオン施用量と牧草による吸収量から求めた土壌に残存するはずの過剰アニオン量相当のカチオン流亡量理論値は0.51~2.09 ke/10aであった(表58). これに対し実験終了時の土壌から求めた窒素施用処理区のカチオン流亡量(表59)は 0.52~1.82 ke/10a (年

間)であり、このうち6 N区および12 N区では理論値より実際の流亡量の方が多かった. この差を仮に自然流亡量と呼ぶことにすると、自然流亡量は窒素施用量によって異なり、6 N区(0.43~0.49 ke/10a) > 12 N区(0.07~0.20 ke/10a) > 24 N区(-0.34~0.01 ke/10a)の順に多かった.

Table 58. Amount of cation and anion leached from 0-15 cm soil calculated from application-uptake balance (ke/10a/year).

Fertilizer treatment	N level kgN/10a	Application with fertilizers				Uptake by grass shoots				Amount remained in the soil		
		Anions (1)	Ca (2)	Mg (3)	K (4)	Anions (5)	Ca (6)	Mg (7)	K (8)	Anions (9)	Cations (10)	Balance (11)
-F*	0	0	0	0	0	0.17	0.10	0.09	0.21	-0.17	-0.40	-0.23
-N**	0	0.81	0.63	0	0.32	0.22	0.18	0.10	0.39	0.59	0.28	0.31
Ammonium sulfate	6	1.24	0.63	0	0.32	0.25	0.15	0.12	0.49	0.99	0.19	0.80
Ammonium chloride	6	1.24	0.63	0	0.32	0.34	0.16	0.13	0.54	0.90	0.12	0.78
Urea	6	0.81	0.63	0	0.32	0.27	0.17	0.15	0.54	0.54	0.09	0.45
Ammonium sulfate	12	1.67	0.63	0	0.32	0.29	0.13	0.10	0.58	1.38	0.14	1.24
Ammonium chloride	12	1.67	0.63	0	0.32	0.39	0.14	0.10	0.57	1.28	0.14	1.14
Urea	12	0.81	0.63	0	0.32	0.27	0.14	0.15	0.56	0.54	0.10	0.44
Ammonium sulfate	24	2.53	0.63	0	0.32	0.41	0.17	0.14	0.61	2.12	0.03	2.09
Ammonium chloride	24	2.52	0.63	0	0.32	0.56	0.19	0.22	0.55	1.96	-0.01	1.97
Urea	24	0.81	0.63	0	0.32	0.33	0.21	0.17	0.60	0.48	-0.03	0.51

Anions: SO_4^{2-} and Cl^- . (9): (1)-(5), (10): {(2)+(3)+(4)} - {(6)+(7)+(8)}, (11): (9)-(10)

*: No fertilizer was applied, **: Fertilizers except nitrogen were applied.

Table 59. Amount of leaching caused by fertilizer application (ke/10a/year).

Fertilizer treatment	N level kgN/10a	Amount of cation leaching*				Compensation by CaCO_3 kg/10a (13)	Amount of Natural leaching (14)
		Ca	Mg	K	Total (12)		
-F	0	0.53	0.05	0.06	0.64	33.8	0.87
-N	0	0.54	0	-0.03	0.51	27.0	0.20
Ammonium sulfate	6	1.30	0.02	-0.03	1.29	68.7	0.49
Ammonium chloride	6	1.32	-0.02	-0.03	1.27	67.2	0.49
Urea	6	0.95	-0.06	-0.01	0.88	46.4	0.43
Ammonium sulfate	12	1.35	0.05	0.04	1.44	76.0	0.20
Ammonium chloride	12	1.21	0	0	1.21	64.0	0.07
Urea	12	0.65	-0.03	0	0.62	32.8	0.18
Ammonium sulfate	24	1.67	0.07	0.01	1.75	92.5	0.34
Ammonium chloride	24	1.81	0.02	-0.01	1.82	96.2	0.15
Urea	24	0.43	0.07	0.02	0.52	27.5	0.01

*: Calculated from the differences in exchangeable cations of the soil after the experiment between 1981 and 1975. (13): Compensation for excess leaching of cation by CaCO_3 which contains 53% CaO . (14): (12)-(11).

考察

草地土壌の経年的酸性化の主要因はアンモニアの硝酸化成の課程で生成するプロトンにあるが、酸性化の結果である土壌の交換性カチオンの流亡量は、施用されるアニオン量に規定される。そのため施肥によるカチオン流亡量理論値は、肥料に含まれるアニオン量と牧草による吸収量の差から求められる土壌に残存するはずのアニオン過剰量から算出でき、硫酸、塩安区ともに窒素1 kg 当たり年間0.08~0.13 ke/10a 程度であった。これに自然流亡量を加えて得られる実際の流亡量は硫酸・塩安区の場合12 N 区で1.21~1.44 ke/10a, 24 N 区で1.75~1.82 ke/10a となり、これを炭酸カルシウム量に換算すると12 N 区, 24 N 区でそれぞれ64~76 kg/10a, 92~96 kg/10a に相当する。したがって、これを毎年草地に施用することにより経年的酸性化は根本から防止できるはずである。しかし現実にはすでにある程度の酸性化が進んだ草地が多いので、実際の農業場面ではどこまで酸性化が進むと影響があるのか、あるいはどこまで酸性化が進んだときに対策を講じる必要があるのかが重要な問題である。そこで、経年的酸性化の影響を敏感に反映したオーチャードグラスのリン吸収量(指数)と土壌 pH との関係性を求めた(図81)。この図から0~2 cm 土層の pH が5.0を下回るときリン吸収量は明らかに低下していることが認められ、これを2~5 cm 土層の pH でみると5.5ないし6.0であった。0~2 cm 土層の pH 5.0は同じ土層の土壌溶液のアルミニウム濃度が急上昇する点と一致し(図18)、また三木らによれば有機物分解の結果放出されると考えられる窒素無機化量もこの pH 領域で低下する⁽¹⁶¹⁾。したがってオーチャードグラス草地

においては、土壌 pH がこれらの値を下回らないうちに炭酸カルシウムを施用することが、酸性化の影響を未然に防ぐ有効な手段になると考えられる。

交換性カルシウムの流亡量は肥料に含まれるアニオン量と自然流亡量の合計値に相当する量であるので、経年的酸性化対策としての炭酸カルシウムの施用量もこれにしたがって算出すべきである。肥料のアニオン含有量は肥料製造段階における原料割合から計算することができ、例として北海道における草地用の肥料のアニオン含有量とそれに対応する炭酸カルシウム量を表60に示した。自然流亡量を構成する要因として、第一に降雨中に含まれる炭酸イオンなどの酸性物質があり、基本的には単位面積あたりの投入酸性物質の量に対応すると考えられる。第二に牧草生育に伴う養分吸収の結果生じる根圏の酸性化がある。これは根から吸収される養分のカチオン・アニオンバランスに起因する根からのプロトン放出によるものである^(73, 74, 84, 85, 110, 111, 120, 157, 158, 159, 185, 201, 216, 233, 239)。この他に、硝酸態として窒素成分の一部が流亡することが考えられるが、本実験では施用された窒素肥料のほぼ全量が吸収されているので、硝酸溶脱が酸性化に寄与した可能性は小さい。

現段階では自然流亡量の絶対値に関する詳しいデータがないので、当面、年間10~20 kgCaO/10a 相当量が妥当な量と考えられる(表58)。

三木らは草地土壌における有機物分解の視点から天北農試圃場において多くの炭酸カルシウム施用試験を行っている⁽⁹⁹⁾。それによれば炭酸カルシウム施用当年に若干の収量低下がみられる場合があり、その原因について施肥窒素の揮散と草地表層に蓄積された粗大有機物の分

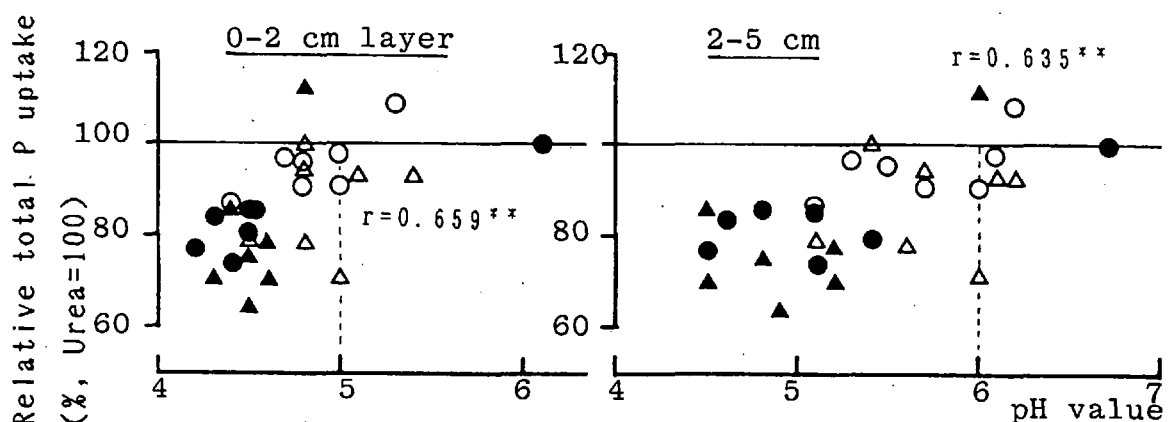


Fig. 81 Relationship between soil pH and relative P uptake of orchardgrass (○: ammonium sulfate 12 kgN/10a, ▲: ammonium chloride 24 kgN/10a, **shows statistical significance at 1% level).

解の両面から検討し、主に炭酸カルシウム施用による急激な有機物分解に施肥窒素の一部が取り込まれる有機化の結果であることを示した⁽¹⁶²⁾。本試験でも、炭酸カルシウム用量が少ない場合、収量は若干低下し、また牧草の窒素吸収量も低下する傾向がみられたが、この原因も

上述の施肥窒素の有機化にあると考えられる。炭酸カルシウム用量がある一定量を越えた場合には、より急激なpH上昇による生育促進効果の影響が有機化の影響よりも大きくなったために、施用当年であっても収量や養分吸収が増加したものと考えられる。

Table 60. Amount of anion contained in commercial fertilizers and the equivalent amount of CaCO_3 to compensate it.

Classification	Commercial name	Chemical content N-P ₂ O ₅ -K ₂ O-MgO (%)	Major material	Amount of anion ke/1kgN	Equivalent CaCO ₃ kg
High-analysis mixed fertilizers	122	10-20-20-5	Urea, DAP**	50.0	2.6
	055	10-25-15-5	DAP, K ₂ SO ₄	64.3	3.4
	456	14-25-26-5	Urea, DAP, K ₂ SO ₄	44.6	2.4
	565	15- 6-15-3	Urea, DAP	64.3	3.4
	052	10-25-12	DAP, K ₂ SO ₄	71.4	3.8
	022	10-12-22-5	DAP, K ₂ SO ₄	78.6	4.2
	652	6-15-22-5	DAP, K ₂ SO ₄	130.4	6.9
	556	15-15-16-4	Urea, DAP	44.6	2.4
	306	13-20-16-4	Urea, DAP	46.4	2.5
	503	15-20-13-4	Urea, DAP	35.7	1.9
	470	14-17-10	DAP, KCl	73.2	3.9
Low-analysis mixed fertilizers	Grassland No. 2	6-11-11	Urea	58.9	3.1
	Grassland No. 3	8-11- 8	Urea	44.6	2.4
	Grassland No. 7	7-14- 8	Urea	46.4	2.5
	Grassland No. 10	12- 9-12	Urea	51.8	2.7
NK-fertilizers	NK-C-6	17- 0-17	NH ₄ Cl, KCl	96.4	5.1
	NK-C-52	15- 0-22	NH ₄ Cl, KCl	107.1	5.7
	NK-C-13	12- 0-30	NH ₄ Cl, KCl	130.4	6.9
	NK-C-84	18- 0-14	NH ₄ Cl, KCl	92.9	4.9
	NK-20	20- 0-10	NH ₄ Cl, KCl	85.7	4.5
Bulk-blend fertilizers	BB-122	10-22-20-5		60.7	3.2
	BB-052	10-25-12	Urea	69.6	3.7
Straight fertilizers	Ammonium sulfate	21- 0- 0	(NH ₄) ₂ SO ₄	71.4	3.8
	Ammonium chloride	25- 0- 0	NH ₄ Cl	71.4	3.8
	Urea	46- 0- 0	Urea	0	0
	Potassium sulfate	0-50- 0	K ₂ SO ₄	23.2*	1.2*
	Potassium chloride	0-60- 0	KCl	21.4*	1.2*

*: Amount per 1kg K₂O. **:Diammonium phosphate.

第 7 章

総 合 考 察

1 草地土壌における経年的酸性化とアルミニウム溶出の機構

異なる窒素肥料による用量試験を8年間継続しつつ土壌化学性を追跡することによって、経年的酸性化の原因が窒素肥料の施用にあることを明らかにした。すなわち、窒素肥料として施用されたアンモニアは硝酸化成の課程でプロトンを放出し、これが施肥による酸性化の本質である。このため窒素肥料の施用量に酸性化は比例する。硝酸が牧草に吸収される一方で、放出されたプロトンは土壌コロイドに吸着されている交換性塩基と置換し、この塩基が土壌溶液の電荷バランスによってアニオンを溶出させ、塩基とアニオンが同時に溶脱する。この場合の塩基の溶脱量はアニオン量によって規定されるので、結果としてアニオン施用量が酸性化を規定する。

硫安または塩安区と尿素区との酸性化の進行速度の違いは、尿素の場合、硝酸化成によって生成するプロトンが少なく、かつ炭酸イオン濃度が高まることによる緩衝作用があるために、酸性化の程度がきわめて緩やかとなる。

塩基を流亡させるアニオンとしてはこの他に硝酸化成によって生成した硝酸そのものと、リン肥料およびカリウム肥料等に随伴するアニオンがある。このうち硝酸溶脱については、オーチャードグラスを供試した本実験条件では施肥窒素のほぼ全量が牧草に吸収されていたので、硝酸の溶脱が酸性化の原因となる可能性は小さかった。

チモシーの場合、15 kgN/10aの窒素施用量の場合には5.7 kgN/10a程度の硝酸が流亡する可能性があるものの、施肥量が9 kgN/10aでは全量が吸収されると考えられた。また、硫安および塩安を施用した場合と尿素を施用した場合における酸性化の著しい違いも硝酸そのものの流亡では説明できない。これらのことから、窒素施肥量がオーチャードグラスで18 kg/10a以下、チモシーで15 kg/10a以下である北海道の草地においては、硝酸の流亡が酸性化の主要因ではないと判断できる。

リン肥料に随伴するリン酸と硫酸のうち、前者は土壌に吸着されることに加えてそれと等量のカルシウムが随伴すること、後者では吸着の他にカルシウムと石膏を形成して沈澱することから、これらが単独で酸性化の要因とはならない。一方、カリウム肥料として施用される硫加や塩加に随伴する硫酸および塩素は、窒素肥料とともに

に施用されるので上記の窒素肥料に随伴するアニオンと同様の機構で酸性化の原因となる。ただし本実験ではこれらを共通肥料として均一に施用したために、処理間差としては現れなかった。

このように草地土壌の経年的酸性化の原因が窒素肥料に由来するアンモニアの硝酸化成にあるため、酸性化の程度は窒素施用量に比例し、しかも塩安 $\geq$ 硫安 $>>$ 尿素的の順で酸性化が著しかった(図5)。このうち塩安と硫安の違いは塩化物と硫酸塩の溶解度の違いに起因し、最終的に到達するpHはほぼ同一であった。尿素を施用した場合は尿素自体は酸性化をほとんど進行させず、カリウム肥料に随伴するアニオンが唯一の酸性化の原因であるために、酸性化の速度がきわめて緩慢であった。また、繰り返される表面施肥のため、硝酸化成によって生成されるプロトンが表層ほど高濃度に存在するので、酸性化は表層ほど激しく、とくに0~2 cm土層で顕著であった。

以上のことから、草地土壌の経年的酸性化の機構を次のようにとりまとめることができる。①窒素肥料を施用することにより、肥料と土壌との反応による酸性化に引き続き、アンモニアの硝酸化成によってプロトンが生成する。②硝酸は牧草に吸収される一方、プロトンは土壌コロイドに吸着されている交換性塩基と置換し、交換性塩基を土壌溶液中に溶出させる。③土壌溶液の電荷バランスにより塩基とともにアニオンが溶出し、降雨に伴って下層へ流亡する。④結果として交換性塩基の流亡による塩基飽和度の低下が起きる。⑤酸性化は窒素肥料の施用量に比例し、本実験の処理区では24 kgN区 $>$ 12 kgN区、塩安区 $\geq$ 硫安区 $>>$ 尿素区の順に酸性化の程度が大きい。⑥草地では表面施肥が繰り返されるために、草地表層ほど酸性化が著しい。⑦多量の窒素施肥を行わない限り、硝酸の流亡自体は酸性化の主要因とはならない。

酸性化した草地の土壌表層では土壌溶液にアルミニウムが溶出した(図15, 16)。アルミニウムの濃度は塩安を施用した場合に最も高濃度であり、硫安がそれに次ぎ、尿素を施用した場合には非常に低濃度であった(図17)。また施肥後の期間および土層深に反比例し、最高で5 me/L (45 mg/L)以上に達した。土壌溶液のアルミニウム濃度は土壌のpHとアニオン濃度に支配されていた(表5)。

多くの研究においてアルミニウムのpKは4.8前後と

されているが、本研究で供試した土壌条件では pH 4.5～4.8 で急激なアルミニウムの溶出がみられた。土壌溶液へのアルミニウムの溶出は、土壌溶液の pH が 4.8 前後の条件において交換性塩基の溶出に代わる土壌の緩衝作用としての側面があり、アルミニウムの溶出によって急激な pH 低下を抑制する結果をもたらすものと考えられる。

以上の結果はオーチャードグラス主体草地において得られたものであるが、草地土壌の経年的酸性化の速度は草種によって違いがあることも明らかとなった。すなわち、処理後 3 年間に限ってみると 0～5 cm 土層の酸性化の速度はオーチャードグラス、チモシーおよびペレニアルライグラスのイネ科牧草に比べアルファルファおよびシロクロバのマメ科牧草の方が速やかに進行した（表 17）。この要因としては、根から吸収されるカチオンとアニオンの量の違い^(87, 159, 201, 233)や根から分泌される有機酸の影響⁽²⁰⁰⁾などが考えられ、マメ科牧草の根圏土壌はイネ科牧草より酸性化が進みやすいとする報告^(84, 158, 216)とも一致する。

2 酸性化草地における牧草生育阻害要因

土壌酸性化が牧草生育に及ぼす悪影響として次の 3 通りが考えられる。

①アルミニウムの直接的影響：供試したオーチャードグラスの場合、耐酸性が非常に強いいためアルミニウムを過剰に吸収することなどによる直接の障害は受けなかった。しかし、耐酸性がこれより弱い草種の場合、とくにマメ科牧草の場合にはアルミニウムの地上部移行性が高く、根粒菌の耐酸性はホストであるマメ科牧草よりもさらに弱いとされているので^(78, 94, 120, 139, 174)、他の養分吸収の低下とは別にアルミニウムそのものの影響による生育低下も予想される。

②アルミニウムによる根の伸長阻害あるいは養分吸収活性の低下に起因する間接的影響：土壌溶液にアルミニウムが溶出した場合、牧草根の伸長が阻害されることが水耕培養実験（図 50）、ポット試験（図 44）から認められた。草地土壌の経年的酸性化の機構を解析する実験において、酸性化草地では酸性化していない草地に対しリン含有率の低下を伴った収量低下が明らかとなったが（表 6）、この主な原因も根長の低下の影響とみることができる。すなわち、アルミニウムによる根長低下によって牧草の養分吸収全般が低下するが（図 49）、中でも土壌中の濃度が極端に低いリンの吸収が最大の影響を受けるのである。オーチャードグラス、チモシー、アルファルファ、アカクロバではリン吸収量と根重は常に一定

の関係にあり、アルミニウムの影響は単に根長（根重）を低下させることにあって、単位根重当たりのリン吸収量は影響されていなかった（図 45）。したがってこれらの草種ではアルミニウムの影響の主体は根の生育阻害にあり、リン吸収および収量低下はその結果としての現象と考えることができる。

一方、ペレニアルライグラスとシロクロバでは、単位根重当たりのリン吸収そのものも低下しており、単位根のリン吸収能もアルミニウムによって低下した可能性がある。もしそうであるとすれば、Wright⁽²⁶⁹⁾、Wright ら⁽²⁷⁰⁾、Clarkson⁽³⁶⁾、McCormic ら⁽¹⁵⁵⁾が指摘するような根におけるリンとアルミニウムの共沈など生体内におけるアルミニウム－リンの特殊な結合やリン吸収活性の低下によって、単位根重当たりのリン吸収量の低下がもたらされたと考えられる。したがって、リン吸収量が根重によって単純に規定されていたオーチャードグラス、チモシー、アルファルファ、アカクロバと、単位根重当たりのリン吸収が低下したペレニアルライグラスやシロクロバの間には、前者では根の伸長抑制がリン吸収抑制の主原因であったのに対し後者では根長抑制に加えて根の養分吸収能そのものが抑制されたという、基本的な違いがある可能性が示唆された。

ところで、吸収リン単位重量あたりの乾物収量をリンの乾物生産効率として、これに対するアルミニウム溶出処理の影響を草種で比較した（表 61, 62）。酸性褐色森林土および黒色火山性土の両土壌条件において、すべての草種でリンの乾物生産効率がアルミニウム処理によって高まる傾向を示した。このことはリン施肥時期の圃場実験におけるリンの乾物生産効率を $+CaCO_3$ 区と $-CaCO_3$ 区で比較しても同様の結果であった（表 29, 33, 48）。すなわち、これらの草種では酸性条件下でリン吸収が低下してもリンの乾物生産効率、すなわちリンの利用効率は低下せず、逆に上昇することを意味している。したがって、この場合のリン利用効率が根で吸収したリンが光合成部位で利用される効率と考えれば、酸性条件下における生育低下はリン吸収の低下によってもたらされるものであって、乾物生産に関わるリンの体内代謝系が阻害されることによるものではないと考えることができる。

③低 pH およびアルミニウムによって活性が低下する土壌微生物の影響：草地土壌の微生物活性は表層で高く、最大の規制要因は土壌 pH である^(88, 90)。またアルミニウムの存在によって微生物活性は低下する⁽²⁷⁴⁾。一方、草地土壌の表層には牧草茎葉あるいは枯死根由来の多量の有機物が集積しており、この有機物の分解によって無機化する窒素を中心とする養分は牧草生育に大きな影響を

Table 61. Comparison of production efficiency of absorbed P in the experiments in the Acid Brown Forest soil (DMg(shoot)/1g of absorbed P).

Species	Experiment number					
	Pot exp. 1		Pot exp. 2		Field exp.	
	-Al	+Al	Low Al	High Al	+CaCO ₃	-CaCO ₃
Orchardgrass	111	110	152	176	336	344
Timothy	87	94	121	141	460	479
Perennial ryegrass	105	104	87	89	312	329
Alfalfa	108	153	154	172	416	432
Red clover	159	182				
White clover	138	317	123	180	350	347

Experiment methods described in Chapter 4, paragraph 1 and 2.

Table 62. Comparison of production efficiency of absorbed P in the experiments in the Cumulic Andosol (DM(shoot) g/1g of absorbed P).

Species	Days after Al treatment					
	10 days		20 days		30 days	
	-Al	+Al	-Al	+Al	-Al	+Al
Orchardgrass	625	736	783	1033	983	1116
Timothy	444	529	641	762	918	1014
Perennial ryegrass	365	429	560	723	750	942
Alfalfa	620	615	379	384	401	464
Red clover	779	830	406	435	539	616
White clover	378	419	364	447	500	606

Experiment methods described in Chapter 4, paragraph 3.

及ぼす^(162, 164)。したがって、草地土壌の経年的酸性化は有機物分解を停滞させ、草地表層に粗大有機物を蓄積する。その結果、有機物由来の養分供給が低下し、生育低下を引き起こす⁽¹⁶²⁾。このように、酸性化による微生物活性の低下は有機物循環の停滞を経て牧草生育の低下につながる。

以上のことから、経年的酸性化草地における牧草生育低下のしくみを図82にまとめた。すなわち、窒素肥料の硝酸化成によって生成したプロトンが土壌コロイドに吸着された交換性塩基を溶出させ、これがアニオンとともに流亡することにより土壌表層が酸性化する。その課程で土壌溶液にアルミニウムが溶出し、その結果根の伸長

が阻害される。そのため養分および水分吸収全体が抑制されるが、なかでも吸収量が根長に支配されているリンの吸収が低下する。また土壌の交換性カルシウム含量の低下によって牧草のカルシウム吸収も低下する。ペレニアルライグラスやシロクロバではリンの吸収活性を低下させることもある。一方、低 pH およびアルミニウムによって土壌微生物活性が低下する。その結果、表層の有機物循環が停滞し、有機物分解によって供給される養分が減少する。これらの影響を総合的に受けて、牧草のリンおよびカルシウムをはじめとする養分含有率が低下し、収量が低下する。この影響の本質的原因は土壌溶液のアルミニウム濃度であり、降水量が少ない年次ほどア

ルミニウム濃度は高いので、降水量が少ない年次ほど酸性化の影響は大きくなる。

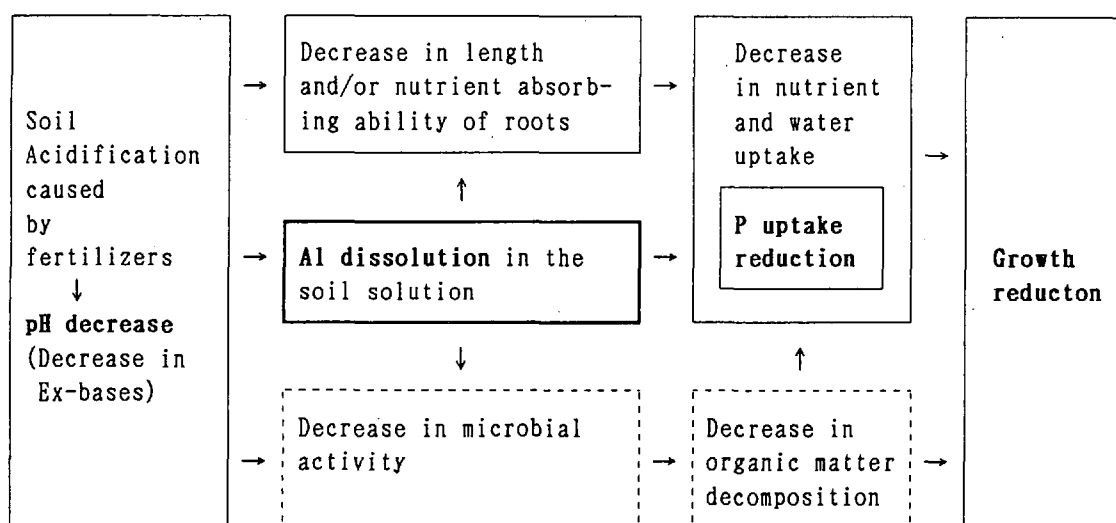


Fig. 82 Schematic processes of grassland acidification and its effect on grass growth.

3 耐酸性の草種間差とその発現機構

土壌溶液のアルミニウム濃度を変えた土耕条件での生育量から判定した耐酸性はオーチャードグラス≧ケンタッキーブルーグラス>チモシー>アカクロバ>ペレニアルライグラス≧レッドトップ≧アルファルファ>シロクロバの順であり、生育障害を受けるアルミニウム濃度から判定したアルミニウム耐性はオーチャードグラス>チモシー≧ケンタッキーブルーグラス>アカクロバ≧ペレニアルライグラス≧レッドトップ>アルファルファ>シロクロバの順であり、両者はほぼ対応した（表23）。したがって土壌の酸性化による主要な牧草生育阻害要因の一つとしてアルミニウム過剰害をあげることができる。これらの結果から判定した耐酸性はオーチャードグラス>チモシー≧ケンタッキーブルーグラス>アカクロバ≧ペレニアルライグラス≧レッドトップ>アルファルファ>シロクロバの順であった。

経年的に酸性化が進行する圃場条件における各草種の耐酸性はおおむね上記の土耕実験の結果と対応したが、アルファルファは土耕実験より耐酸性が大きかった（図42）。この違いは酸性化が及ぶ土層深と牧草の根張り特性によって説明することができる。アルファルファの場合、主根が作土層下部にまで伸長し、全体の根重も大きいのにに対し、経年的酸性化の影響が及ぶ土層深は主に0～5 cmであるため、アルファルファの根圏全体に占める酸性化土層の割合が小さく、アルファルファは本来それほどアルミニウム耐性が強くないにもかかわらず圃場条件では酸性化の影響をそれほど強くは受けなかったと考えられる（図43）。しかも、アルファルファの根は土

壌の酸性化が進む以前に作土層下部まで伸長する。このように牧草根の発達に並行して土壌の酸性化が進行する点も、草地の経年的酸性化に対する牧草の生育反応に重要な影響を及ぼす要因である。

耐酸性の順位については、過去にこれらの草種を一括して供試した例がないので直接の比較はできないが、部分的には、イネ科牧草>マメ科牧草であることは多くの報告があり、オーチャードグラスの耐酸性が強いことは田中ら⁽²⁵²⁾も認めている。オーチャードグラス>ペレニアルライグラスであることはEdmeadesら⁽⁴⁹⁾と一致し、アカクロバ>アルファルファである点では田中ら⁽²⁵²⁾、Baligarら^(12, 15, 18)、Joら⁽¹¹²⁾と一致する。シロクロバの耐酸性が最も弱いことについてはJoら⁽¹¹²⁾、Andrewら⁽⁸⁾とは異なった。

耐酸性の草種間差は根の生育および牧草のリン含有率と比例的な関係にあり、アルミニウムの地上部移行性とは反比例的関係にあった（図61）。一方、アルミニウム共存下におけるリン吸収の低下はすべての草種で根の生育の低下に支配されたが（図45, 50, 51）、ペレニアルライグラスおよびシロクロバではこれに加えて単位根重あたりのリン吸収効率の低下も関与した（図45）。アルミニウム耐性が強いオーチャードグラスにおいても経年的酸性化に伴って収量は低下した（表2）。その際、地上部リン含有率が低下し（図23）、土壌溶液のリン濃度は土壌が酸性化した場合に高く（図25）、アルミニウムの溶出によるリン吸収阻害も生育低下の主要因の一つであった。

これらのことから、培地の低濃度のリンを効率的に吸

収する能力や体内におけるリンの利用効率を高めて低濃度の体内リンで十分な生育をする能力は、アルミニウム耐性と密接に関連していると理解される。本実験の-P区におけるリン含有率および吸収量はオーチャードグラスがチモンシーに比べると常に多く(表28/32, 表41/45), 低リン耐性はオーチャードグラス>チモンシーといえるが、アルミニウム耐性においてもオーチャードグラス>チモンシーである。また、オーチャードグラスおよびペレニアルライグラスでは、アルミニウム感受性系統より耐性系統の方がリン利用効率が高かった(図66)。一方、牧草の低リン耐性は低pH条件で低下し、アルミニウム耐性は低リン肥沃度条件で低下した(図38, 39)。このように、アルミニウム耐性と低リン耐性は密接な関係にあるので、牧草における耐酸性の支配要因の一つとして、根長あるいは根表面積によって規制されるリン吸収・利用効率をあげることができる。これまで作物の耐酸性機構として指摘されてきた根圏pH上昇能^(62, 256, 257, 258)、根圏への有機酸分泌によるアルミニウムキレート能^(66, 123, 133, 169, 189)、アルミニウム排除能を含むアルミニウム吸収と体内移動に関する機構^(166, 168, 213, 262, 263)、根のCECの機構^(173, 190, 212)に加えて、リンを含む各種養分の利用効率^(53, 59)とともに、根長を介してのリン吸収が重要な要因である。

酸性化による収量低下の程度は降水量が少ない年次でとくに著しく、多雨年ではその影響が小さかった(図27, 28, 30)。その原因は土壤溶液のアルミニウム濃度が土壤水分が少ない条件でより高濃度になることにあり(図31)、少雨年で酸性化の悪影響が顕著となったと考えられた。このためアルミニウムによって吸収が阻害される牧草のリン含有率も少雨年で低かった(図32)。

4 草地土壌の経年的酸性化と草地におけるリンの肥培管理法

土壌pHを適正に維持し、酸性化を考慮しない場合、もっとも効率的なリン施肥時期はオーチャードグラスでは酸性褐色森林土は4月全量、黒色火山性土は2回または3回の分施、チモンシーでは酸性褐色森林土においては4月全量、黒色火山性土においては分施または5月全量であった。この場合、草種間差は小さく、黒色火山性土と酸性褐色森林土の違いが明確に現れた。つまり、両草種とも酸性褐色森林土では春にまとめて施用する方法、黒色火山性土では何回かに分けて施用する方法が吸収量が多かった。その根拠として土壌のリン吸着力の違いが考えられた。すなわち、図68に示されるように黒色火山性土では施肥後土壌溶液に水溶性リンとして溶出している濃度が酸性褐色森林土に比べると低く、しかも短期間

(約30日)で非常に低濃度に減少した。このため黒色火山性土では施肥後の期間が長くなる1回の施肥方法より、施肥回数の多い方法が有利であった。これに対し酸性褐色森林土では、リン吸着力が火山性土ほど大きくないために施肥後の期間が長くなってもある程度の量が可給態リンとして存在すること(図68)、天北地方は根釧地方に比べ夏季間の土壌水分が非常に少ないため、水分が潤沢な春先に多量のリンを施用することが相対的に効率的であることなどにより、春先1回の施用が効率的であった。なお、両土壌で共通的な現象として、1回全量施用に限って施肥時期を比較した場合、春先がもっとも吸収効率が高く、最終番草生育後の夏から秋にかけての施用の吸収効率が最低であった。これは基本的に生育直前に施用されたリンがもっとも良く吸収されるためで、この点ではPaynter⁽¹⁹⁹⁾の結果と一致する。

経年的酸性化の影響が加わった場合、すなわち表層土壌に施肥リンが蓄積しつつその土層のpHが年次を追って低下した場合、酸性褐色森林土のオーチャードグラスではもっとも効率的な施肥時期が春先1回施用から何回かに分けて施用する分施区に移行した(表48)。黒色火山性土のオーチャードグラス、チモンシーともに分施区の効率が低いことには変わりなかったが、春1回施用区の効率が酸性化に伴って低下した(表29)。酸性条件で分施区のリン吸収効率が低いことについて、土壌側の要因として酸性条件で活性化するアルミニウムによる固定も含めてリン吸着力が高まること、牧草側の要因として酸性条件で溶出するアルミニウムによって根長が抑制されることによるリン吸収効率の低下があげられ、いずれも土壌中のアルミニウムが重要な要因となっており、このためある程度のリンがある条件では施肥回数が多いことが有利であった。

一方、供試草地のリン肥沃度とリン施肥量はリン施肥時期に対する牧草の生育反応に対して影響を及ぼした。すなわち、経年的酸性化草地で効率的なリンの施肥時期は4月全量区より分施区であるという傾向は、リン肥沃度が低い場合により明瞭に現われ、肥沃度が高い場合には差が小さくなった(表49)。しかもこの傾向はリン施肥量が多い場合により明瞭であった。このような現象は、施肥リンに対する依存度が土壌のリン肥沃度によって異なることに由来するもので、土壌の経年的酸性化の影響を受けたリン施肥時期に対する反応のみならず、適正なpH条件におけるリン施肥時期の反応性にもあてはまった。

以上の結果はアルミニウム耐性の強いオーチャードグラスおよびチモンシーによるものであるが、アルミニウム

耐性が弱い草種の場合には、経年的酸性化条件における分施の有効性がさらに高まることが予想される。アルミニウム耐性が弱い草種では酸性条件におけるリン吸収力が小さいので（図58）、土壌のリン吸着力との競争を考えると、施肥回数が多いことの有利性がさらに増すと考えられるからである。

5 経年的酸性化草地における土壌の pH 管理およびリン施肥法

本試験の結果から、表層土壌が集中的に酸性化した草地あるいは酸性化しつつある草地に炭酸カルシウムを施

用する効果は次の様にまとめることができる（図83）。炭酸カルシウムを施用することにより、第一次的に①土壌 pH が上昇し、その結果、②土壌溶液アルミニウム濃度が低下し、③カルシウム濃度が上昇し、④アルミニウムによる根の伸長阻害が解除さる。第二次的には⑤土壌微生物数および活性の増加と、⑥蓄積有機物の分解を促進することによる養分供給量の増加がもたらされ、⑦牧草根伸長による養分吸収力の上昇を誘発し、最終的に、⑧リンを代表とする養分吸収量の増加によって生育量が増大する。

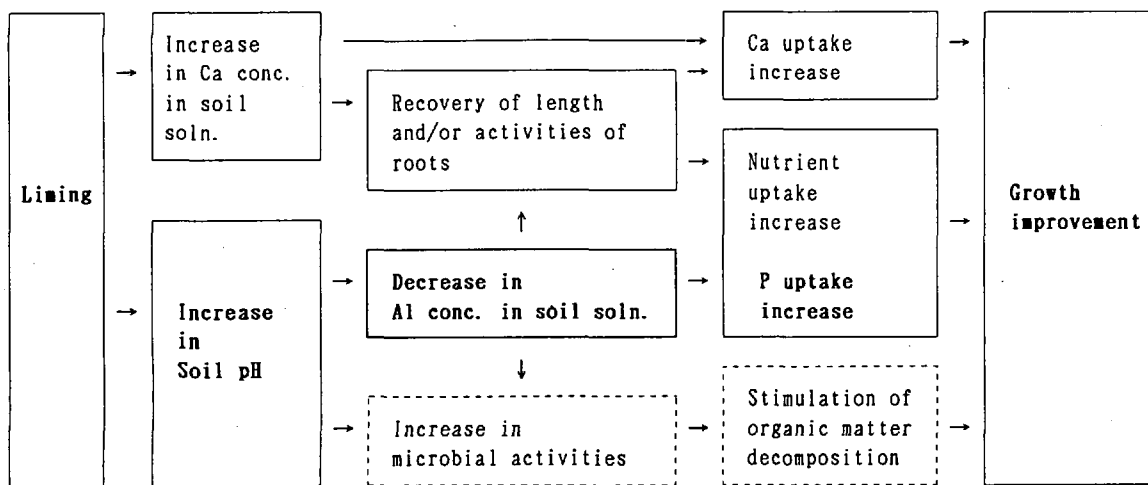


Fig. 83 Schematic processes of liming effects on grass growth.

この機構を構成するそれぞれの要因は前述の経年的酸性化機構（図82）の要因とまったく同一であり、このことは経年的酸性化が炭酸カルシウム施用によってほぼ完全に修復（もとの状態まで改善）することが可能であることを示す。しかしこの場合の制限要因は、炭酸カルシウムの土層内移動速度にあり、5 cm 以下の土層にまで酸性化が進行した場合には酸性矯正が進む速度が酸性土壌にまで到達しない。さらに、酸性化によって溶脱する塩基の流亡速度が炭酸カルシウムが土層内を移動する速度よりも大きいので、酸性矯正は追いつかないことになる。したがって、もっとも理想的な酸性化防止方策としては、施肥によって投入されるアニオン量と自然流亡量の合計量に見合う炭酸カルシウムを、施肥の都度施用することで、そのことによって酸性化を完全に防ぐことができると考えられる。アニオン含有量は肥料銘柄によって異なり、草地用肥料の代表的なもののアニオン含有量とそれに対応した炭酸カルシウム量を表60に示した。これによりオーチャードグラス単播草地の炭酸カルシウム

施用量の例を計算すると年間55～75 kg/10 aであり、チモシー・シロクロバ混播草地の場合で年間34～58 kg/10 aである。

次に、すでに酸性化が進行した草地に対しては、土壌溶液のアルミニウム濃度が上昇しはじめ、かつ、牧草のリン吸収が低下する土壌 pH を草種ごとに求め、これを炭酸カルシウム施用のタイミングとして炭酸カルシウムを施用することが効率的である。酸性矯正が必要になる限界 pH は、オーチャードグラスで5.0、チモシーおよびケンタッキーブルーグラスで5.1、ペレニアルライグラス、アカクロバ、レッドトップで5.2、アルファルファ、シロクロバで5.4であった。これら以上の pH ではリンの施肥法によって対応することが可能である。以上の対策をまとめて表63に示した。

Table 63. Countermeasures to grassland acidification.

Grass species	Classification of Al-tolerance (1)	Critical Al con- centration and pH for liming		P application method			
		mgAl/L (2)	pH (3)	Limed		Acidified	
				Bf (4)	CA (5)	Bf (4)	CA (5)
Orchardgrass	Very strong	100	5.0				
Timothy	Strong	10-20	5.1				
Kentucky bluegrass	Strong	15<	5.1				
Red clover	Medium	<15	5.2	April	Split	Split	Split
Perennial ryegrass	Medium	<15	5.2				
Redtop	Medium	<15	5.2				
Alfalfa	Weak	<4	5.4				
White clover	Very weak	<4	5.4				

(1), (2): from Table 23. (3): Example in the Acid Brown Forest soil synthesized from (2) and Fig. 18.
 (4): Acid Brown Forest soil, (5): Cumulic Andosol.

要 約

良質な粗飼料として十分量の牧草生産を行うためには、適切な施肥が不可欠である。その結果として土壌の酸性化が進行するので、草地土壌の酸性化は必然的に起こる現象である。したがって、持続的な草地管理のためには草地土壌の酸性化の機構に応じた対策が必要である。

そこで本研究では、草地土壌の経年的酸性化の機構と牧草生育に対する影響を解析して、酸性条件および低温条件下で重要性が増す牧草のリン施肥法を検討し、あわせて炭酸カルシウム施用による牧草生育改善効果を解析することを目的として実験を行ない、以下の結果を得た。

1 草地土壌の経年的酸性化とアルミニウム溶出の機構

1) 草地土壌の経年的酸性化は、窒素肥料に含有されるアンモニアの硝酸化成に起因し、その結果生成するプロトンが土壌に吸着されている交換性塩基を溶出させ、溶出した塩基が肥料に随伴するアニオンとともに降雨とともに流亡することによる塩基飽和度の低下が酸性化の二次的な要因として関与した。繰り返し表面施用される窒素肥料が酸性化の主要因であるので、酸性化の程度は窒素施用量に比例し、土壌表層ほど著しかった。尿素の場合は硝酸化成によって生成するプロトンが少なく、かつ炭酸イオン濃度が高まることによる緩衝作用があるために、酸性化の程度がきわめて緩やかであった。

2) 酸性化した草地の土壌溶液には有害なアルミニウムが高濃度に溶出した。アルミニウムの濃度は塩安>硫安>>尿素の順で高く、窒素施用量に比例し、施肥後の期間および土層深に反比例し、最高で5 me/L (45 mg/L) 以上に達した。土壌溶液のアルミニウム濃度は土壌のpHとアニオン濃度に規制されていた。土壌溶液へのアルミニウムの溶出は土壌のpHが5.0以下で発現し、pHの低下に伴って増加した。

2 酸性化による牧草生育阻害要因とその発現機構

1) 土壌溶液のアルミニウム濃度を変えた土耕条件下における生育量から判定した耐酸性はオーチャードグラス≡ケンタッキーブルーグラス>チモシー>アカクロバ>ペレニアルライグラス≡レッドトップ≡アルファルファ>シロクロバの順であり、生育障害を受けるアルミニウム濃度から判定したアルミニウム耐性はオーチャードグラス>チモシー≡ケンタッキーブルーグラス>アカクロバ≡ペレニアルライグラス≡レッドトップ>アル

ファルファ≡シロクロバの順であり、両者はほぼ対応した。したがって土壌の酸性化による主要な牧草生育阻害要因の一つとしてアルミニウム過剰害をあげることができる。また両者から判定した耐酸性はオーチャードグラス>チモシー≡ケンタッキーブルーグラス>アカクロバ≡ペレニアルライグラス≡レッドトップ>アルファルファ>シロクロバの順であった。

2) 経年的に酸性化が進行する圃場条件下における各草種の耐酸性はおおむね土耕実験の結果と対応したが、酸性化による生育低下量は土耕実験より小さく、とくにアルファルファは土耕実験より耐酸性が大きかった。この原因がアルファルファの根は作土層下部にまで伸長するのに対し、経年的酸性化が進行する土層は表層0~5 cmに限られていたことにあったことから、圃場条件下における耐酸性評価には根張り特性も重要な要因であった。

3) 経年的酸性化に伴ってアルミニウム耐性が強いオーチャードグラスにおいても収量は年次変動を伴いつつ低下した。その際、地上部リン含有率が低下した。土壌溶液のリン濃度は土壌が酸性化した場合に高く、アルミニウムの溶出によるリン吸収阻害も生育低下の主要因の一つであった。

4) 耐酸性の草種間差は根の生育および牧草のリン含有率と比例的な関係にあり、アルミニウムの地上部移行性とは反比例的な関係にあった。アルミニウム共存下におけるリン吸収の低下はすべての草種で根の生育の低下に支配されたが、ペレニアルライグラスおよびシロクロバではこれに加えて単位根重あたりのリン吸収効率の低下も関与した。アルミニウム耐性系統は感受性系統に比べてリンの吸収・利用効率が高かった。酸性条件下における牧草の生育低下はアルミニウムによる根の伸長阻害に起因するリン吸収の低下によってもたらされるものであり、乾物生産に関わる体内代謝系が阻害されることによるものではなかった。一方、牧草の低リン耐性は低pH条件下で低下し、アルミニウム耐性は低リン肥沃度条件下で低下した。これらのことから、牧草におけるアルミニウム耐性と低リン耐性は、根の生育を介在要因として密接に関連していると理解された。

5) 酸性化による収量低下の程度は降水量が少ない年次でとくに著しく、多雨年にはその影響が小さかった。その原因は土壌溶液のアルミニウム濃度が土壌水分が少ない条件下でより高濃度になることにあり、少雨年で酸性

化の悪影響が顕著となったと考えられた。このためアルミニウムによって吸収が阻害される牧草のリン含有率も少雨年で低かった。

3 経年的酸性化草地における牧草の生育特性と対応した肥培管理法

1) 土壌 pH を適正に維持した場合のリン吸収効率は、酸性褐色森林土ではオーチャードグラス、チモシーともに早春にリンを全量施用する方法が最も高く、8月に全量施用する方法が最も低かった。これに対し黒色火山性土では両草種とも、数回に分けて施用する分施あるいは早春全量施用で吸収効率が高く、8月または9月の全量施用で低い吸収効率であった。土壌間の違いは主に土壌のリン吸着力の差に由来した。

2) 酸性条件におけるオーチャードグラスに対する効率的なリンの施肥方法は3回の分施であった。効率的なリン施肥時期は酸性褐色森林土では経年的酸性化過程で早春全量施肥から分施へ移行した。黒色火山性土ではオーチャードグラス、チモシーともに酸性化の初期から分施が効率的であり、分施の効果は経年的に高まった。

3) 経年的に酸性化した草地に炭酸カルシウムを施用

することにより、第一次的に①土壌 pH が上昇し、その結果、②土壌溶液アルミニウム濃度が低下し、③カルシウム濃度が上昇し、④アルミニウムによる根の伸長阻害が解除され、第二次的に⑤土壌微生物数および活性の増加と、⑥蓄積有機物の分解を促進することによる養分供給量の増加がもたらされ、⑦牧草根伸長による養分吸収力の上昇を誘発し、最終的に、⑧リンを代表とする養分吸収量の増加によって生育量が増大する、と考えられた。

4) 交換性カルシウムの流亡量は肥料に含まれるアミノ量と自然流亡量の合計値相当量であり、これに相当する1年当たりの炭酸カルシウム施用量は、使用する肥料の種類および量によって異なるが、オーチャードグラス単播草地で55~75 kg/10a、チモシー・シロクロバ混播草地で34~58 kg/10a 程度であった。

5) 酸性矯正が必要になる0~2 cm 土壌の限界 pH は牧草のアルミニウム耐性によって異なり、オーチャードグラスで5.0、チモシーおよびケンタッキーブルーグラスで5.1、ベレニアルライグラス、アカクロバ、レッドトップで5.2、アルファルファ、シロクロバで5.4であった。これら以上の pH ではリンの施肥法によって対応することが可能である。

引用文献

- 1 F. Abruna, J. Vicente-Chandler, and R. W. Pearson: Effects of liming on yields and composition of heavily fertilized grasses and on soil properties under humid tropical conditions, *Soil Sci. Soc. Proc.*, 1964, 657 - 661 (1964).
- 2 F. Adams: Alleviating chemical toxicities: Liming acid soils; in *Modifying the root environment to reduce crop stress*, ed. G. F. Arkin and H. M. Taylor, p 269 - 301, American Society of Agricultural Engineers, ASAE Monograph number 4, U. S. A. (1981)
- 3 F. Adams and B. L. Moore: Chemical factors affecting root growth in subsoil horizons of coastal plain soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47, 99 - 102 (1983).
- 4 S. N. Adams: Some effects of lime, nitrogen and soluble and insoluble phosphate on the yield and mineral composition of established grassland, *J. Agric. Sci. Camb.*, 102, 219 - 226 (1984).
- 5 相見霊三・村上高：作物の生育におよぼすアルミニウムの影響に関する細胞生理学的研究, 農枝研報告, D-11, 331 - 394 (1964).
- 6 M. W. Alison, Jr. and C. S. Hoveland: Root and herbage growth response of birdsfoot trefoil entries to subsoil acidity, *Agron. J.*, 81, 677 - 680 (1989).
- 7 S. L. Amarasiri and S. R. Olsen: Liming as related to solubility of P and plant growth in an acid tropical soil, *Soil Sci. Soc. Am., Proc.*, 37, 716 - 721 (1973).
- 8 C. S. Andrew and P. J. Vanden Berg: The influence of aluminium on phosphate sorption by whole plants and excised roots of some pasture legumes, *Aust. J. Agric. Res.*, 24, 341 - 351 (1973).
- 9 C. S. Andrew, A. D. Johnson, and R. L. Sandland: Effect of aluminum on the growth and chemical composition of some tropical and temperate pasture legumes, *Aust. J. Agric. Res.*, 24, 325 - 339 (1973).
- 10 I. Anghinoni and S. A. Barber: Phosphorus application rate and distribution in the soil and phosphorus uptake by corn, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 1041 - 1044 (1980).
- 11 M. Anuradha and A. Narayanan: Promotion of root elongation by phosphorus deficiency, *Plant and Soil*, 136, 273 - 275 (1991).
- 12 V. C. Baligar, R. J. Wright, O. L. Bennett, J. L. Hern, H. D. Perry, and M. D. Smedly: Lime effects on forage legume growth and mineral composition in an acid subsoil, *Commun. in Soil Sci. Plant Anal.*, 16, 1079 - 1093 (1985).
- 13 V. C. Baligar, R. J. Wright, T. B. Kinraide, C. D. Foy, and J. H. Elgin, Jr.: Aluminum effects on growth, mineral uptake, and efficiency ratios in red clover cultivars, *Agron. J.*, 79, 1038 - 1044 (1987).
- 14 V. C. Baligar, R. J. Wright, N. K. Fageria and C. D. Foy: Differential responses of forage legumes to aluminum, *J. Plant Nutr.*, 11, 549 - 561 (1988).
- 15 V. C. Baligar, J. H. Elgin, Jr., and C. D. Foy: Variability in alfalfa for growth and mineral uptake and efficiency ratios under aluminum stress, *Agron. J.*, 81, 223 - 229 (1989).
- 16 D. Barraclough, M. J. Hyden and G. P. Davies: Fate of fertilizer nitrogen applied to grassland. I. Field leaching results, *J. Soil Science*, 34, 483 - 497 (1983).
- 17 D. Barraclough, E. L. Geens and J. M. Maggs: Fate of fertilizer nitrogen applied to grassland. II. Nitrogen-15 leaching results, *J. Soil Science*, 35, 191 - 199 (1984).
- 18 R. J. Bartlett and J. L. McIntosh: pH-dependent bonding of potassium by a spodosol, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 33, 535 - 539 (1969).
- 19 R. J. Bartlett and C. J. Picarelli: Availability of boron and phosphorus as affected by liming an acid potato soil, *Soil Science*, 116, 77 - 83 (1973).
- 20 野口弥吉・福田仁志訳, ベーバー土壌物理学, pp

- 228-256, 朝倉書店, (1955).
- 21 G. Belanger, J. E. Richards, and R. B. Walton: Effects of 25 years of N, P and K fertilization on yield, persistence and nutritive value of a timothy sward, *Can. J. Plant Sci.*, 69, 501-512 (1989).
 - 22 E. Brenes and R. W. Pearson: Root responses of three gramineae species to soil acidity in an oxisol and an ultisol, *Soil Science*, 116, 295-302 (1973).
 - 23 K. G. Briggs, G. J. Taylor, J. Sturges, and J. Hoddinott: Differential aluminum tolerance of high-yielding, early-maturing canadian wheat cultivars and germplasm, *Can. J. Plant Sci.*, 69, 61-69 (1989).
 - 24 M. D. Cahn, R. W. Zoble, and D. R. Bouldin: Relationship between root elongation rate and diameter and duration of growth of lateral roots of maize, *Plant and Soil*, 119, 271-279 (1989).
 - 25 T. A. Campbell, J. H. Elgin, Jr., C. D. Foy and J. E. McMurtrey III: Selection in alfalfa for tolerance to toxic levels of aluminum, *Can. J. Plant Sci.*, 68, 743-753 (1988).
 - 26 T. A. Campbell, N. J. Nuernberg, and C. D. Foy: Differential responses of alfalfa cultivars to aluminum stress, *J. Plant Nutr.*, 12, 291-305 (1989).
 - 27 T. A. Campbell, N. J. Nuerunberg, and C. D. Foy: Differential responses of red clover germplasms to aluminum stress: *J. Plant Nutr.*, 13, 1463-1474 (1990)
 - 28 J. R. Caradus: Effect of root hair length on white clover growth over a range of soil phosphorus levels, *N. Z. J. Agric. Res.*, 24, 353-358 (1981).
 - 29 J. R. Caradus: The effect of shoot and root genotype on phosphorus concentrations of shoots and roots, *Plant and Soil*, 123, 165-167 (1990).
 - 30 J. R. Caradus and R. W. Snaydon: Effect of grass competition, cutting frequency, and soil type on the phosphorus response of semi-natural populations of white clover, *N. Z. J. Agric. Res.*, 31, 95-103 (1988).
 - 31 L. E. Casida: Microbial metabolic activity in soil as measured by dehydrogenase determinations, *Appl. Environ. Microbiol.*, 34, 630-636 (1977).
 - 32 J. Chen and S. A. Barber: Effect of liming and adding phosphate on predicted phosphorus uptake by maize on acid soil of three soil orders, *Soil Science*, 150, 884-850 (1990).
 - 33 R. H. Chisholm and G. J. Blair: Phosphorus uptake and dry weight of stylo and white clover as affected by chlorine, *Agron. J.*, 73, 767-771 (1981).
 - 34 D. T. Clarkson: Effect of aluminum on the uptake and metabolism of phosphorus by barley seedlings, *Plant Physiol.*, 41, 165-172 (1966).
 - 35 D. T. Clarkson: Interactions between aluminium and phosphorus on root surfaces and cell wall material, *Plant and Soil*, 27, 347-356 (1967).
 - 36 M. Collins: Mineral concentrations in whole crop and pressed forage of three legumes, *Agron. J.*, 81, 901-906 (1989).
 - 37 J. R. Cumming and G. J. Taylor: Mechanisms of metal tolerance in plants: Physiological adaptations for exclusion of metal ions from the cytoplasm, in stress responses in plants: Adaptation and acclimation mechanisms, p 329-356 (1990).
 - 38 D. Curtin and G. W. Smille: Soil solution composition as affected by liming and incubation, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47, 701-707 (1983).
 - 39 D. Curtin and G. Smillie: Effects of liming on soil chemical characteristics and grass growth in laboratory and long-term field-amended soils, *Plant and Soil*, 95, 15-22 (1986).
 - 40 A. B. K. Dahmane and R. D. Graham: Effect of phosphate supply and competition from grasses on growth and nitrogen fixation of medicago trunculata, *Aust. J. Agric. Res.*, 31, 761-772 (1981).
 - 41 M. R. Davis: The comparative phosphorus requirements of some temperate perennial legumes, *Plant and Soil*, 133, 17-30 (1991).
 - 42 T. E. Devine, C. D. Foy, A. L. Fleming, C. H. Hanson, T. A. Campbell, J. E. McMurtrey III, and J. W. Schwartz: Development of alfalfa strains with differential tolerance to aluminum toxicity, *Plant and Soil*, 44, 73-79 (1976).
 - 43 J. L. Dionne, A. R. Pesant, G. M. Barnett, and W. N. Mason: Effects des regimes thermiques et hydriques, des pH du sol et de la fumure

- phosphate sur la response au phosphore de la luzerne, *Can. J. Plant Sci.*, 69, 1149 - 1163 (1989).
- 44 日本土壤肥料学会編：昭和62年度酸性雨による土壌影響調査（総合解析調査），昭和62年度環境庁委託業務結果報告書（1988）。
 - 45 R. J. Dowdell and C. P. Webster: A lysimeter study using nitrogen-15 on the uptake of fertilizer nitrogen by perennial ryegrass swards and losses by leaching, *J. Soil Science*, 31, 65-75 (1980).
 - 46 D. C. Edmeades: Effects of lime on effective cation exchange capacity and exchangeable cations on a range of New Zealand soils, *N. Z. J. Agric. Res.*, 25, 27-33 (1982).
 - 47 D. C. Edmeades, R. M. Pringle, G. P. Mansell, and P. W. Shannon: Effects of lime on pasture production on soils in the North island of New Zealand, 1. Introduction and description of database, *N. Z. J. Agric. Res.*, 27, 349-356 (1984).
 - 48 D. C. Edmeades, R. M. Pringle, P. W. Shannon, and G. P. Mansell: Effects of lime on pasture production on soils in the North island of New Zealand, 4. Predicting lime responses, *N. Z. J. Agric. Res.*, 27, 371-382 (1984).
 - 49 D. C. Edmeades, D. M. Wheeler, R. A. Christie: The effects of aluminum and pH on the growth of a range of temperate grass species and cultivars, in *Plant-soil interactions at low pH*, ed. R. J. Wright et al., 913-924 (1991).
 - 50 E. Erikson: The physico-chemical behavior of nutrients in soils, *J. Soil Science*, 3, 238-250 (1952).
 - 51 C. E. Evans and E. J. Kamprath: Lime response as related to percent Al saturation, solution Al, and organic matter content, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 34, 893-896 (1970).
 - 52 L. S. Evans: Biological effects of acidity in precipitation on vegetation: A review, *Environmental and Experimental Botany*, 22, 155-169 (1982).
 - 53 N. K. Fageria: Influence of aluminum in nutrient solutions on chemical composition in two rice cultivars at different growth stages, *Plant and Soil*, 85, 423-429 (1985).
 - 54 N. K. Fageria and V. C. Baligar: Response of legumes and cereals to phosphorus in solution culture, *J. Plant Nutr.*, 12, 1005-1019 (1989).
 - 55 N. K. Fageria, V. C. Baligar and R. J. Wright: Growth and nutrient concentrations of alfalfa and common bean as influenced by soil acidity, *Plant and Soil*, 119, 331-333 (1989).
 - 56 D. Foehse and A. Jungk: Influence of phosphate and nitrate supply on root hair formation of rape, spinach and tomato plants, *Plant and Soil*, 74, 359-368 (1983).
 - 57 D. Foehse, N. Claassen and A. Jungk: Phosphorus efficiency of plants, I. External and internal P requirement and P uptake efficiency of different plant species, *Plant and Soil*, 110, 101-109 (1988).
 - 58 D. Foehse, N. Claassen and A. Jungk: Phosphorus efficiency of plants, II. Significance of root radius, root hairs and cation-anion balance for phosphorus influx in seven plant species, *Plant and Soil*, 132, 261-272 (1991).
 - 59 R. H. Fox: Soil pH, aluminum saturation, and corn grain yield, *Soil Science*, 127, 330-334 (1979).
 - 60 C. D. Foy: General principles involved in screening plants for aluminum and manganese tolerance, in *Plant adaptation to mineral stress in problem soils*, *Proceedings of a Workshop held at the NAL, Beltsville*, ed. M. J. Wright, p 255-386 (1976).
 - 61 C. D. Foy, R. L. Chaney and M. C. White: The physiology of metal toxicity in plants, *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 29, 511-566 (1978).
 - 62 C. D. Foy and A. L. Fleming: Aluminum tolerance of two wheat genotypes related to nitrate reductase activities, *J. Plant Nutr.*, 5, 1313-1333 (1982).
 - 63 C. D. Foy: The physiology of plant adaptation to mineral stress, *Iowa J. Res.*, 57, 355-391 (1983).
 - 64 C. D. Foy: Plant adaptation to mineral stress in problem soils, *Iowa J. Res.*, 57, 339-354 (1983).
 - 65 C. D. Foy: Physiological effects of hydrogen, aluminum, and manganese toxicities in acid soil; in *Soil acidity and liming*, ed. F. Adams, p 57-97, American Society of Agronomy, Inc., Publisher

- Madison, Wisconsin U. S. A., (1984).
- 66 C. D. Foy and E. H. Lee: Differential aluminum tolerances of two barley cultivars related to organic acids in their roots, *J. Plant Nutr.*, 10, 1089-1101 (1987).
 - 67 C. D. Foy: Plant adaptation to acid, aluminum-toxic soils, *Commun. in Soil Sci. Plant Anal.*, 19, 959-987 (1988).
 - 68 C. D. Foy, C. L. Dewald and W. A. Berg: Differential tolerances of two old world bluestem genotypes to excess aluminum in acid soil and nutrient solution, *Journal of Plant Nutrition*, 12, 1231-1254 (1989).
 - 69 C. D. Foy, E. H. Lee, C. A. Coradetti and G. J. Taylor: Organic acids related to differential aluminum tolerance in wheat cultivars, in *Plant nutrition-physiology and applications*, ed. M. L. van Beusichem, p 381-389, Kluwer Academic Publishers (1990).
 - 70 C. D. Foy, J. A. Duke and T. E. Devine: Tolerance of soybean germplasm to an acid tatum subsoil, *J. Plant Nutr.*, 15, 527-547 (1992).
 - 71 C. D. Foy: Soil chemical factors limiting plant root growth, *Advances in Soil Science*, 19, 97-149 (1992).
 - 72 P. R. Furlani and R. B. Clark: Screening sorghum for aluminum tolerance in nutrient solutions, *Agron. J.*, 73, 587-594 (1981).
 - 73 A. D. Gillespie and P. E. Pope: Rhizosphere acidification increases phosphorus recovery of black locust, I. Induced acidification and soil response, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54, 533-537 (1990).
 - 74 A. D. Gillespie and P. E. Pope: Rhizosphere acidification increases phosphorus recovery of black locust, II. Model predictions and measured recovery, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54, 538-541 (1990).
 - 75 N. R. Glass, G. E. Glass, and P. J. Rennie: Effects of acid precipitation in North America, *Environment International*, 4, 443-452 (1980).
 - 76 K. M. Goh and L. M. Condon: Plant availability of phosphorus accumulated from long-term application of superphosphate and effluent to irrigated pastures, *N. Z. J. Agric. Res.*, 32, 45-54 (1989).
 - 77 U. E. Grauer and W. J. Horst: Effect of pH and nitrogen source on aluminum tolerance of rye and yellow lupin, *Plant and Soil*, 127, 13-21 (1990).
 - 78 P. G. Hartel, A. M. Whelan, and M. Alexander: Nodulation of cowpeas and survival of cowpea rhizobia in acid, aluminum-rich soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47, 514-517 (1983).
 - 79 橋本武・中村和弘: 施肥による土壌酸性化ならびに中和に関する研究, 1. 土壌と肥料との化学的反応ならびに硝酸化成による土壌 pH の変化, *土肥誌*, 42, 453-458 (1971).
 - 80 橋本武・中村和弘・横田弘司: 施肥による土壌酸性化ならびに中和に関する研究, 2. 溶脱による土壌 pH の変化, *土肥誌*, 45, 213-218 (1974).
 - 81 R. J. Haynes and T. E. Ludecke: Effect of lime and phosphorus applications on concentrations of available nutrients and on P, Al and Mn uptake by two pasture legumes in an acid soil, *Plant and Soil*, 62, 117-128 (1981).
 - 82 R. J. Haynes: Effects of liming on phosphate availability in acid soils, A critical review, *Plant and Soil*, 68, 289-308 (1982).
 - 83 R. J. Haynes: Effect of lime and phosphate applications on the adsorption of phosphate, sulfate, and molybdate by a spodosol, *Soil Science*, 135, 221-227 (1983).
 - 84 R. J. Haynes: Soil acidification induced by leguminous crops, *Grass and Forage Science*, 38, 1-11 (1983).
 - 85 R. J. Haynes: Active ion uptake and maintenance of cation-anion balance, A critical examination of their role in regulating rhizosphere pH, *Plant and Soil*, 126, 247-264 (1990).
 - 86 K. R. Helyar and A. J. Anderson: Effects of lime on the growth of five species, on aluminum toxicity, and on phosphorus availability, *Aust. J. Agric. Res.*, 22, 707-721 (1971).
 - 87 L. Hendriks, N. Classen und A. Jungk: Phosphatverarmung des Wurzelnahen Bodens und Phosphataufnahme von Mais und Raps, *Z. Pflanzenernaehr. Bodenk.*, 144, 486-499 (1981).
 - 88 S. Higashida and K. Takao: Seasonal changes in microbial activities in the surface soil of a grassland, *Soil Sci. Plant Nutr.*, 31, 647-651 (1985).

- 89 S. Higashida and K. Takao: Seasonal fluctuation patterns of microbial numbers in the surface soil of a grassland, *Soil Sci. Plant Nutr.*, 31, 113-121 (1985).
- 90 S. Higashida and K. Takao: Relations between soil microbial activity and soil properties in grassland, *Soil Sci. Plant Nutr.*, 32, 458-597 (1986).
- 91 東田修司・宝示戸雅之・西宗昭：天北地方のマメ科混播草地におけるN移譲，道立農試集報，56, 19-30 (1987).
- 92 P. R. Hill, J. L. Ahlrichs and G. Ejeta: Rapid evaluation of sorghum for aluminum tolerance, *Plant and Soil*, 114, 85-90 (1989).
- 93 平島利昭：根釧地方における永年放牧草地の維持管理に関する研究，道立農試報告，27, 1-97 (1978).
- 94 J. S. Hohenberg and D. N. Munns: Effect of soil acidity factors on nodulation and growth of *vigna unguiculata* in solution culture, *Agron. J.*, 76, 477-481 (1984).
- 95 北海道農務部編：土壌診断活動実績－現状における土壌養分の実態 (1986).
- 96 北海道農業試験会議 [普及並びに指導参考事項] 土壌および作物栄養の診断基準，改訂版 (1989).
- 97 北海道開発局編，重粘土構造分類報告書，p 55-60 (1967).
- 98 北海道立根釧農業試験場土壌肥料科：根釧地方における火山灰草地の土壌酸性化と石灰施用法，昭和61年度北海道農業試験会議資料，P 1-14 (1987).
- 99 北海道立天北農業試験場土壌肥料科：草地の経年化に伴う土壌酸性化と石灰施用，昭和58年度北海道農業試験会議資料，1-26 (1984).
- 100 北海道立天北農業試験場土壌肥料科：鉍質土草地のりん酸肥沃度に対応した施肥法，昭和63年度北海道農業試験会議資料，1-27 (1989).
- 101 ホクレン資材推進部：肥料農薬情報 NO. 21, 18-22 (1990).
- 102 W. J. Horst: Quick screening of cowpea genotypes for aluminum tolerance in an aluminum-treated acid soil, *Z. Pflanzenernaehr. Bodenk.*, 148, 335-348 (1985).
- 103 W. J. Horst, F. Klotz and P. Szulkiewicz: Mechanical impedance increases aluminum tolerance of soybean roots, *Plant and Soil*, 124, 227-231 (1990).
- 104 今井弘樹・岡島秀夫：土壌の養分保持能に関する研究，1. CEC，AECが土壌溶液のイオン濃度に及ぼす影響，土肥誌，50, 33-39 (1979).
- 105 今井弘樹・岡島秀夫：土壌の養分保持能に関する研究，2. NO_3 吸着について，土肥誌，51, 102-106 (1980).
- 106 稲松勝子・木内美江子・渋谷加代子：桑園土壌の酸性化－筑波台地に分布する火山灰土壌の場合，土肥誌，62, 351-356 (1991).
- 107 P. M. Irving: Acidic precipitation effects on crop: A review and analysis of research, *J. Environ. Qual.*, 12, 442-453 (1983).
- 108 S. Itoh and S. A. Barber: Phosphorus uptake by six plant species as related to root hairs, *Agron. J.*, 75, 457-461 (1983).
- 109 S. Itoh and S. A. Barber: A numerical solution of whole plant nutrient uptake for soil-root systems with root hairs, *Plant and Soil*, 70, 403-413 (1983).
- 110 S. C. Jarvis and A. D. Robson: The effects of nitrogen nutrition of plants on the development of acidity in western Australian soils, I. Effects with subterranean clover grown under leaching conditions, *Aust. J. Agric. Res.*, 34, 341-353 (1983).
- 111 S. C. Jarvis and A. D. Robson: The effects of nitrogen nutrition of plants on the development of acidity in western Australian soils, II. Effects of differences in cation/anion balance between plant species grown under non-leaching conditions, *Aust. J. Agric. Res.*, 34, 355-365 (1983).
- 112 J. Jo, S. Yoshida and R. Kayama: Growth and nitrogen fixation of some leguminous forages grown under the acidic soil conditions, *J. Japan Grassl. Sci.*, 25, 326-334 (1980).
- 113 V. D. Jolley and W. H. Pierre: Soil acidity from long-term use of nitrogen fertilizer and its relationship to recovery of the nitrogen, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41, 368-373 (1977).
- 114 P. C. T. Jones and J. E. Mollison: A technique for the quantitative estimation of soil organisms, *J. Gen. Microbiol.*, 2, 54-69 (1948).
- 115 J. P. Jones and R. L. Fox: Phosphorus nutrition of plants influenced by manganese and aluminum uptake from an oxisol, *Soil Science*, 126, 230-236

- (1978).
- 116 R. E. Joost and C. S. Hoveland: Root development of sericea lespedeza and alfalfa in acid soils, *Agron. J.*, 78, 711-714 (1986).
 - 117 A. Jungk and S. A. Barber: Phosphate uptake rate of corn roots as related to the proportion of the roots exposed to phosphate, *Agron. J.*, 66, 554-557 (1974).
 - 118 A. Jungk and S. A. Barber: Plant age and the phosphorus uptake characteristics of trimmed and untrimmed corn root systems, *Plant and Soil*, 42, 227-239 (1975).
 - 119 Von A. Jungk: Phosphatdynamik in der Rhizosphaere und Phosphatverfuegbarkeit feur Pflanzen, *Die Bodenkunde*, 35, 99-107 (1984).
 - 120 A. Jungk and N. Claassen: Pflanzenverfuegbarkeit von Phosphat und Kalium als Ergebnis von Wechselwirkungen zwischen Wurzeln und Boden in der Rhizosphaere, *Z. Pflanzenernaehr. Bodenk.*, 149, 411-427 (1986).
 - 121 H. H. Keyser and D. N. Munns: Tolerance of rhizobia to acidity, aluminum, and phosphate, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43, 519-523 (1979).
 - 122 木曾誠二・菊地晃二: チモンシ (*Phleum pratense* L.) を基幹とする採草地におけるマメ科草混生割合に基づいた窒素施肥量, *日草誌*, 34, 169-177 (1988).
 - 123 北川貴子・森下豊秋・橋泰憲・生井兵治・太田安定: コムギのアルミニウム抵抗性の品種間差異と有機酸分泌, *土肥誌*, 57, 352-358 (1986).
 - 124 北村征生: 南西諸島における暖地型マメ科牧草の実用栽培に関する研究, XIV. 暖地型マメ科・イネ科18草種の生育におよぼす土壌 pH の影響, *日草誌*, 32, 20-28 (1986).
 - 125 小林義之・小原道朗・宮内紀一・浜崎和雄・原慎紀・辻藤吾: オーチャードグラス単播草地の維持に及ぼすリン酸と石灰の追肥効果について, *草地試研究報告*, 10, 96-105 (1977).
 - 126 近藤熙・木村武・小山雄生: アクチバブルトレーサー法を用いた牧草根の養分吸収活力の評価, *土肥誌*, 56, 245-248 (1985).
 - 127 近藤秀雄: オーチャードグラス (*Dactylis glomerata* L.) のリン酸栄養診断, *日草誌*, 34, 286-291 (1989).
 - 128 今野隆光: 酸性雨の陸上生態系への影響, *研究ジャーナル*, 11, 4-15 (1988).
 - 129 E. C. Krug and C. R. Frink: Acid rain on acid soil: A new perspective, *Science*, 221, 520-525 (1983).
 - 130 久津那浩三・坪野敏美・野本亀雄: 畑土壌における Ca^{2+} の行動について, 第1報, Ca^{2+} と H^{+} の置換について, *土肥誌*, 35, 278-281 (1964).
 - 131 J. Lambert and G. Denudt: Influence of various factors on the phosphorus content of herbage, *AGRI Digest* 22, 22-33 (1971).
 - 132 J. J. Lee, G. E. Neely, S. C. Perrigan, and L. C. Grothaus: Effect of simulated sulfuric acid rain on yield, growth and foliar injury of several crops, *Environmental and Experimental Botany*, 21, 171-185 (1981).
 - 133 E. H. Lee and C. D. Foy: Aluminum tolerance of two snapbean cultivars related to organic acid content evaluated by high-performance liquid chromatography, *J. Plant Nutr.*, 9, 1481-1498 (1986).
 - 134 G. E. ライケンズ・R. F. ライト・J. N. ギャロウェイ・T. J. バトラー: 酸性雨, *サイエンス*, 9, 13-19 (1979).
 - 135 Zhongyan Lin and Donald L. Myhre: Citrus root growth as affected by soil aluminum level under field conditions, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54, 1340-1344 (1990).
 - 136 W. L. Lindsay: Chemical equilibria in soils, p 1-449, John Wiley & Sons, New York, (1979).
 - 137 A. D. Mackay and S. A. Barber: Soil temperature effects on root growth and phosphorus uptake by corn, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48, 818-823 (1984).
 - 138 A. D. Mackay, J. R. Caradus and M. W. Pritchard: Variation for aluminum tolerance in white clover, *Plant and Soil*, 123, 101-105 (1990).
 - 139 R. L. Mahler: Influence of pH on yield and N and P nutrition of alfalfa grown on an andic mission silt loam, *Agron. J.*, 75, 731-735 (1983).
 - 140 R. L. Mahler and R. W. Harder: The influence of tillage methods, cropping sequence, and N rates on the acidification of a northern Idaho soil, *Soil Science*, 137, 52-60 (1984).
 - 141 R. L. Mahler and H. A. Menser: Forage production on andic soils: 2. The influence of phosphorus

- fertilization on red and white clover, *Soil Science*, 145, 87-92 (1988).
- 142 G. P. Mansell, R. M. Pringle, D. C. Edmeades, and P. W. Shannon: Effects of lime on pasture production on soils in the North island of New Zealand, 3. Interaction of lime with phosphorus, *N. Z. J. Agric. Res.*, 27, 363-369 (1984).
- 143 H. Marschner, V. Roemheld, W. J. Horst und P. Martin: Wurzel-induzierte Veraenderungen in der Rhizosphaere: Bedeutung fue die Mineralstoffernaehrung der Pflanzen, *Z. Pflanzenernaehr. Bodenk.*, 149, 441-456 (1986).
- 144 J. A. Martini and R. G. Mutters: Effect of lime rates on nutrient availability, mobility, and uptake during the soybean-growing season: 1. Aluminum, manganese, and phosphorus, *Soil Science*, 139, 219-226 (1985).
- 145 松田敬一朗：化学肥料の施与による土壌の酸性化，田中明編，酸性土壌とその農業利用，一特に熱帯における現状と将来一，p 195-216，博友社（1984）。
- 146 H. Matsumoto, E. Hirasawa, H. Torikai and E. Takahashi: Localization of absorbed aluminium in pea root and its binding to nucleic acids, *Plant & Cell Physiol.*, 17, 127-137 (1976).
- 147 H. Matsumoto and S. Morimura: Repressed template activity of chromatin of pea roots treated by aluminium, *Plant & Cell Physiol.*, 21, 951-959 (1980).
- 148 松本英明：根圏の pH に及ぼす植物の作用，*土肥誌* 62, 563-572 (1991)。
- 149 松中照夫・小関純一：チモシーの 1 番草生育に及ぼす N・P・K 供給時期の影響，*土肥誌*, 53, 99-105 (1982)。
- 150 松中照夫・小関純一：チモシーの 2 番草生育に及ぼす N・P・K 供給時期の影響，*土肥誌*, 54, 137-142 (1983)。
- 151 松中照夫・小関純一・松代平治・赤城仰哉・西陰研治：経年化に伴う草地生産力低下の土壌間差異，*日草誌*, 29, 212-218 (1983)。
- 152 松中照夫・小関純一：刈取り前後の P 供給時期がチモシーの 2 番草生育に及ぼす影響，*土肥誌*, 55, 527-532 (1984)。
- 153 松中照夫・小関純一・松代平治・赤城仰哉・西陰研治：収量規制要因としての草種構成の重要性，*日草誌*, 30, 59-64 (1984)。
- 154 松中照夫：寒冷・寡照地域のチモシー草地に対する窒素施肥法に関する研究，*道立農試報告*, 62, 1-72 (1987)。
- 155 L. H. McCormick and F. Y. Borden: Phosphate fixation by aluminium in plant roots, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 36, 799-802 (1972).
- 156 L. H. McCormick and F. Y. Borden: The occurrence of aluminium-phosphate precipitate in plant roots, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 38, 931-934 (1974).
- 157 A. A. Meharg and K. Killham: The effect of soil pH on rhizosphere carbon flow of *Lolium perenne*, *Plant and Soil*, 123, 1-7 (1990).
- 158 K. Mengel und D. Steffens: Beziehung zwischen Kationen/Anionen-Aufnahme von Rotklee und Protonenabscheidung der Wurzeln, *Z. Pflanzenernaehr. Bodenk.*, 145, 229-236 (1982).
- 159 K. Mengel and S. Schubert: Active Extrusion of protons into deionized water by roots of intact maize plants, *Plant Physiol.*, 79, 344-348 (1985).
- 160 三木直倫・佐藤辰四郎：草地における表面施肥，*日本土壌肥料学会編，施肥位置と栽培技術*，p 49-91 (1982)。
- 161 三木直倫・高尾欽弥：経年酸性化草地における施肥窒素の利用率と土壌窒素供給力，*道立農試集報*, 51, 43-54 (1984)。
- 162 三木直倫・高尾欽弥：経年草地の炭カル表面施用に伴う施肥窒素の動態，*道立農試集報*, 53, 21-31 (1985)。
- 163 三木直倫・高尾欽弥・西宗 昭：天北地方重粘土草地の生産力と気象，土壌水分特性の関係，*道立農試集報*, 54, 21-30 (1986)。
- 164 三木直倫：草地型酪農における物質（肥料成分）循環と問題点，*北海道草地研究会報*, 24, 18-28 (1990)。
- 165 三木直倫：寒冷地における草地土壌の有機物並びに窒素の経年的動態とそれに基づく窒素施肥管理法に関する研究，*道立農試報告*, 79, 1-98 (1993)。
- 166 M. M. Millard, C. D. Foy, C. A. Coradetti, and M. D. Reinsel: X-ray photoelectron spectroscopy surface analysis of aluminum ion stress in barley roots, *Plant Physiol.*, 93, 578-583 (1990).
- 167 R. K. Misra, A. M. Alston and A. R. Dexter: Role of root hairs in phosphorus depletion from a

- macrostructured soil, *Plant and Soil*, 107, 11-18 (1988).
- 168 S. C. Miyasaka, L. V. Kochian, J. E. Shaff, and C. D. Foy: Mechanisms of aluminum tolerance in wheat, An investigation of genotypic differences in rhizosphere pH, K^+ , and H^+ transport, and root-cell membrane potentials, *Plant Physiol.* 91, 1188-1196 (1989).
- 169 S. C. Miyasaka, J. G. Buta, R. K. Howell, and C. D. Foy: Mechanism of aluminum tolerance in snapbeans, *Plant Physiol.*, 96, 737-743 (1991).
- 170 C. H. Morel and J. C. Fardeau: Native soil and fresh fertilizer phosphorus uptake as affected by rate of application and P fertilizers, *Plant and Soil*, 115, 123-128 (1989).
- 171 S. Morimura and H. Matsumoto: Effect of aluminium on some properties and template activity of purified pea DNA, *Plant & Cell Physiol.*, 19, 429-436 (1978).
- 172 R. J. Morris, R. H. Fox, and G. A. Jung: Growth, Puptake, and quality of warm and cool-season grasses on a low available P in soil, *Agron. J.*, 74, 125-129 (1982).
- 173 L. M. Mugwira and S. M. Elgawhary: Aluminum accumulation and tolerance of Triticale and wheat in relation to root cation exchange capacity, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43, 736-740 (1979).
- 174 H. E. Murphy, D. G. Edwards and C. J. Asher: Effects of aluminium on nodulation and early growth of four tropical pasture legumes, *Aust. J. Agric. Res.*, 35, 663-673 (1984).
- 175 J. J. Murray and C. D. Foy: Differential tolerances of turfgrass cultivars to an acid soil high in exchangeable aluminum, *Agron. J.*, 70, 769-774 (1978).
- 176 R. P. Murrmann and M. Peech: Effect of pH on labile and soluble phosphate in soils, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 33, 205-210 (1969).
- 177 G. Naidoo, J. McD. Stewart, and R. J. Lewis: Accumulation sites of Al in snapbean and cotton roots, *Agron. J.*, 70, 489-492 (1978).
- 178 R. Naidu, J. K. Syers, R. W. Tillman and J. H. Kirkman: Effect of liming on phosphate sorption by acid soils, *J. Soil Sci.*, 41, 165-175 (1990).
- 179 E. I. Newman: A method of estimating the total length of root in a sample, *J. Appl. Ecol.*, 3, 139-145 (1966).
- 180 M. L. Nguyen, D. S. Rickard and S. D. McBride: Pasture production and changes in phosphorus and sulphur status in irrigated pastures receiving long-term applications of superphosphate fertilizer, *N. Z. J. Agric. Res.*, 32, 245-262 (1989).
- 181 A. D. Noble, M. V. Fey, and M. E. Sumner: Calcium-aluminum balance and the growth of soybean roots in nutrient solutions, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52, 1651-1656 (1988).
- 182 農業環境技術研究所編: 酸性雨の農業生態系への影響評価に関する研究の展望, 第4回農業環境シンポジウム資料 (1987).
- 183 野本亀雄: 畑土壌中における塩基の行動に関する研究, 1. 石灰の溶脱について, 東海近畿農業試験場研究報告・栽培部, 4, 140-145 (1957).
- 184 能代昌雄: 牧草の耐凍性と冬枯れ対策, 北海道土壌肥料研究通信, 84, 1-9 (1982).
- 185 P. H. Nye: Changes of pH across the rhizosphere induced by roots, *Plant and Soil*, 61, 7-26 (1981).
- 186 P. H. Nygaard and G. Abrahamsen: Effects of long-term artificial acidification on the ground vegetation and soil in a 100 year-old stand of Scots pine, *Plant and Soil*, 131, 151-160 (1991).
- 187 K. M. Oates and E. J. Kamprath: Soil acidity and liming: I. Effect of the extracting solution cation and pH on the removal of aluminum from acid soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47, 686-689 (1983).
- 188 尾形昭逸・実岡寛文・松本勝士: 暖地型飼料作物の水ストレス耐性機構の解析, I. 圃場条件下における水ストレス耐性の草種間差, 日草誌, 31, 34-42 (1985).
- 189 小島邦彦: 組織培養による Al 耐性作物の選抜と育成—選抜細胞の再分化にも曙光—, 化学と生物, 19, 165-167 (1981).
- 190 小島邦彦・小池博・裏野元・大平幸次: アルミニウム耐性を異にするコムギ2品種の川渡黒ボク土における生育, 土肥誌, 57, 563-570 (1986).
- 191 岡島秀夫・今井弘樹: 土壌の養分供給能に関する研究, 4. 畑苗代土壌溶液の無機イオン組成と濃度, 土

- 肥誌, 47, 256 - 262 (1976).
- 192 岡島秀夫・石渡輝夫：土壌温度と作物生育—とくにリン酸肥効との関連について—, 土肥誌, 50, 334 - 338 (1979).
- 193 奥村純一：天北地方に分布する各種土壌とそれに対応する草地造成, 管理の基本方式, 道立農試報告, 22, 1 - 108 (1973).
- 194 大村邦男・木曾誠二・赤城仰哉：火山灰草地における施肥管理が草地の経年変化に及ぼす影響, 道立農試集報, 52, 65 - 76 (1985).
- 195 大崎玄佐雄・奥村純一：根圏土壌の理化学性が牧草生育に及ぼす影響, I. 土壌密度と牧草生育の関係, 道立農試集報, 27, 77 - 88 (1973).
- 196 大崎玄佐雄・奥村純一：根圏土壌の理化学性が牧草生育に及ぼす影響, II. 鉍質土壌における牧草根の発達, 道立農試集報, 32, 35 - 44 (1975).
- 197 C. E. Owensby, K. L. Anderson and D. A. Whitney: Some chemical properties of a silt loam soil after 20 years' nitrogen and phosphorus fertilization of smooth brome grass, Soil Science, 24 - 29, (1969).
- 198 W. L. Pan, A. G. Hopkins and W. A. Jackson: Aluminum inhibition of shoot lateral branches of Glycine max and reversal by exogenous cytokinin, Plant and Soil, 120, 1 - 9 (1989).
- 199 R. M. Paynter and P. M. R. Dampnay: The effect of rate and timing of phosphate fertilizer on the yield and phosphate offtake of grass grown for silage at moderate to high levels of soil phosphorus, Grass and Forage Science, 46, 131 - 137 (1991).
- 200 W. Petersen and M. Boettger: Contribution of organic acids to the acidification of the rhizosphere of maize seedlings, Plant and Soil, 132, 159 - 163 (1991).
- 201 W. H. Pierre, J. Meisinger, and J. R. Birchett: Cation-anion balance in crops as a factor in determining the effect of nitrogen fertilizers on soil acidity, Agron. J., 62, 106 - 112 (1970).
- 202 W. H. Pierre, J. R. Webb, and W. D. Shrandor: Quantitative effects of nitrogen fertilizer on the development and downward movement of soil acidity in relation to level of fertilization and crop removal in a continuous corn cropping system, Agron J. 291 - 297 (1971).
- 203 A. Pinkerton and J. R. Simpson: Effects of sub soil acidity on the shoot and root growth of some tropical and temperate forage legumes, Aust. J. Agric. Res., 32, 453 - 463 (1981).
- 204 E. Polle, C. F. Konzak, and J. A. Kittrick: Visual detection of aluminum tolerance levels in wheat by hematoxylin staining of seedling roots, Crop Science, 18, 823 - 827 (1978).
- 205 J. V. Pothuluri, D. A. Whitney, and D. E. Kissel: Residual value of fertilizer phosphorus in selected Kansas soils, Soil Sci. Soc. Am. J., 55, 399 - 404 (1991).
- 206 B. van Raij and J. A. Quaggio: Extractable phosphorus availability indexes as affected by liming, Commun. in Soil Sci. Plant Anal., 21, 1267 - 1276 (1990).
- 207 A. Rangeley: The suitability of plant tissue tests to indicate phosphorus deficiency in perennial ryegrass, Grass and Forage Science, 44, 91 - 95 (1989).
- 208 P. E. Rasmussen and C. R. Rohde: Soil acidification from ammonium-nitrogen fertilization in moldboard plow and stubble-mulch wheatfallow tillage, Soil Sci. Soc. Am. J., 53, 119 - 122 (1989).
- 209 J. E. Rechcigl, D. D. Wolf, R. B. Reneau, Jr., and W. Kroontje: Influence of surface liming on the yield and nutrient concentration of alfalfa established using no-tillage techniques, Agron J., 77, 956 - 959 (1985).
- 210 J. E. Rechcigl, R. B. Reneau, Jr., D. D. Wolf, W. Kroontje and S. W. Van Scoyoc: Alfalfa seedling growth in nutrient solutions as influenced by aluminum, calcium, and pH, Commun. in Soil Sci. Plant Anal., 17, 27 - 44 (1986).
- 211 D. A. Reid, A. L. Fleming, and C. D. Foy: A method for determining aluminum response of barley in nutrient solution in comparison to response in Al-toxic soil, Agron. J., 63, 600 - 603 (1971).
- 212 Z. Rengel and D. L. Robinson: Determination of cation exchange capacity of ryegrass roots by summing exchangeable cations, Plant and Soil, 116, 217 - 222 (1989).
- 213 Z. Rengel and D. L. Robinson: Aluminum and plant age effects on adsorption of cations in the

- Donnan free space of ryegrass roots, *Plant and Soil*, 116, 223 - 227 (1989).
- 214 Z. Rengel and D. L. Robinson: Aluminum effects on micronutrient uptake by annual ryegrass, *Commun. in Soil Sci. Plant Anal.* 20, 253 - 269 (1989).
- 215 R. D. Rhue and D. R. Hensel: The effect of lime on the availability of residual phosphorus and its extractability by dilute acid, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47, 266 - 270 (1983).
- 216 A. J. Rixon: Soil fertility changes in a redbrown earth under irrigated pastures, I. Changes in organic carbon, carbon/nitrogen ratio, cation exchange capacity, and pH, *Aust. J. Agric. Res.*, 17, 303 - 316 (1966).
- 217 W. P. Robarge and R. B. Corey: Adsorption of phosphate by hydroxy-aluminum species on a cation exchange resin, *Soil Soc. Am. J.*, 43, 481 - 487 (1979).
- 218 S. G. Robbins and R. D. Voss: Acidic zones from ammonia application in conservation tillage systems, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53, 1256 - 1263 (1989).
- 219 W. Roemer, J. Augustin and G. Schilling: The relationship between phosphate absorption and root length in nine wheat cultivars, *Plant and Soil*, 111, 199 - 201 (1988).
- 220 A. Ronse, L. De Temmerman, M. Guns, and De Borger: Evolution of acidity, organic matter content, and CEC in uncultivated soils of north Belgium during the past 25 years, *Soil Science*, 146, 453 - 460 (1988).
- 221 J. S. Rowarth, A. G. Gillingham, R. W. Tillman, and J. K. Styers: Effect of season and fertilizer rate on phosphorus concentrations in pasture and sheep faeces in hill country, *N. Z. J. Agric. Res.*, 31, 187 - 193 (1988).
- 222 M. P. Russelle, L. L. Meyers, and R. L. McGraw: Birdsfoot trefoil seedling response to soil phosphorus and potassium availability indexes, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53, 828 - 836 (1989).
- 223 J. E. Sachay, R. L. Wallace and M. A. Johns: Phosphate stress response in hydroponically grown maize, *Plant and Soil*, 132, 85 - 90 (1991).
- 224 三枝俊哉・菊地晃二・近藤熙: 根釧地方の火山性土における草地のカリ施肥対応, 道立農試集報, 60, 99 - 109 (1990).
- 225 三枝俊哉・松原一實・能代昌雄: 根釧地方の火山性土における草地のリン酸肥沃度に基づくリン酸施肥反応, 道立農試集報, 60, 111 - 124 (1990).
- 226 三枝正彦: 低pH土壌における作物の生育, 植物有害Alと下層土のエダフォロジー, 土肥誌, 62, 451 - 459 (1991).
- 227 坂本宣崇: 高緯度積雪地帯におけるオーチャードグラスの周年管理に関する栄養生理学的研究, 道立農試報告, 48, 1 - 58 (1984).
- 228 T. Sakuma: Characterization of acidity and its improvement of problem soils in Hokkaido, in *Plant-Soil Interactions at low pH*, ed. T. Sakuma, pp 30 - 35, Hokkaido University (1992).
- 229 M. Sampson, D. T. Clarkson and D. D. Davies: DNA synthesis in aluminum-treated roots of barley, *Science*, 148, 1476 - 1477 (1965).
- 230 N. Sanginga, S. K. A. Danso and G. D. Bowen: Nodulation and growth response of *allosuarina* and *casuarina* species to phosphorus fertilization, *Plant and Soil*, 118, 125 - 132 (1989).
- 231 佐藤冬樹・今井弘樹・岡島秀夫: 草地土壌溶液の無機イオン組成について, 土肥誌, 54, 228 - 234 (1983).
- 232 W. M. H. Saunders and A. J. Metson: Seasonal variation of phosphorus in soil and pasture, *N. Z. J. Agric. Res.*, 14, 307 - 328 (1971).
- 233 S. Schubert, E. Schubert and K. Mengel: Effect of low pH of the root medium on proton release, growth, and nutrient uptake of field beans, *Plant and Soil*, 124, 239 - 244 (1990).
- 234 A. P. Schwab, M. D. Ransom, and C. E. Owensby: Exchange properties of an argiustoll: Effects of long-term ammonium nitrate fertilization, *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 53, 1412 - 1417 (1989).
- 235 A. P. Schwab, C. E. Owensby, and S. Kulyingyong: Changes in soil chemical properties due to 40 years of fertilization, *Soil Science*, 149, 35 - 43 (1990).
- 236 P. W. Shannon, R. M. Pringle, G. P. Mansell, and D. C. Edmeades: Effects of lime on pasture production on soils in the North Island of New Zealand, 2. The nature of seasonal pasture responses to lime application, *N. Z. J. Agric. Res.* 27, 357 - 361 (1984).

- 237 下野勝昭：多湿黒ボク土の土壌 pH が畑作物の生育、収量に及ぼす影響，土肥誌，61, 8-15 (1990).
- 238 S. Shoji, M. Saigusa, and T. Takahashi: Plant root growth in acid andosols from northeastern Japan: 1. Soil properties and root growth of burdock, barley, and orchardgrass, Soil Science, 130, 124-131 (1980).
- 239 R. W. Smiley: Rhizosphere pH as influenced by plants, soils, and Nitrogen fertilizers, Soil Sci. Soc. Am. Proc., 38, 795-799 (1974).
- 240 T. J. Smyth and P. A. Sanchez: Effects of lime, silicate, and phosphorus applications to an oxisol on phosphorus sorption and ion retention, Soil Sci. Soc. Am. J., 44, 500-505 (1980).
- 241 早田隆典・矢野文夫：ばれいしょ連作畑に於ける土壌改良資材および有機物施用の効果について，長崎県総合農林試験場研究報告，10, 43-50 (1982).
- 242 D. Steffens: Wurzelstudien und Phosphat-Aufnahme von Weidelgras und Rotklee unter Feldbeidungen, Z. Pflanzenernaehr. Bodenk., 147, 85-97 (1984).
- 243 S. Suthipradit, D. G. Edwards and C. J. Asher: Effects of aluminum on tap-root elongation of soybean, cowpea and green gram grown in the presence of organic acids, Plant and Soil, 124, 233-237 (1990).
- 244 但野利秋・安藤忠男：酸性土壌の作物生育阻害要因とそれらに対する作物の耐性，田中明編，酸性土壌とその農業利用—特に熱帯における現状と将来—，p 217-258, 博友社 (1984).
- 245 但野利秋・田中明：アルミニウムによる作物根の伸長阻害と根先端近傍におけるアルミニウムの集積，土肥誌，56, 77-84 (1985).
- 246 T. Tadano and H. Sakai: Secretion of acid phosphatase by the roots of several crop species under phosphorus-deficient conditions, Soil Sci. Plant Nutr., 37, 129-140 (1991).
- 247 高木洋子・生井兵治・村上寛一：ヘマトキシリン染色によるコムギのアルミニウム耐性検定法の評価，育雑，31, 152-160 (1981).
- 248 高橋英一：植物の栄養と環境 (16)，農業及び園芸 48, 877-881 (1973).
- 249 K. Tan and W. G. Keltjens: Interaction between aluminium and phosphorus in sorghum plants, I. Studies with the aluminium sensitive sorghum genotype TAM 428, Plant and Soil, 124, 15-23 (1990).
- 250 K. Tan and W. G. Keltjens: Interaction between aluminium and phosphorus in sorghum plants, II. Studies with the aluminium tolerant sorghum genotype SC 0283, Plant and Soil, 124, 25-32 (1990).
- 251 田中明・早川嘉彦：耐酸性の作物種間差，1. 耐低 pH 性の種間差—比較植物栄養に関する研究—，土肥誌，45, 561-570 (1974).
- 252 田中明・早川嘉彦：耐酸性の作物種間差，2. 耐 Al 性および耐 Mn 性の種間差—比較植物栄養に関する研究—，土肥誌，46, 19-25 (1975).
- 253 田中明・櫃田木世子：酸性土壌の作物生育阻害要因の解析的研究 (予報)，土肥誌，51, 119-125 (1980).
- 254 田中明・但野利秋・吉田志郎：Al-P 系水耕液における作物生育に対する pH の影響，土肥誌，52, 475-480 (1981).
- 255 K. R. Tate, T. W. Speir, D. J. Ross, R. L. Parfitt, K. N. Whale and J. C. Cowling: Temporal variations in some plant and soil P pools in two pasture soils of widely different P fertility status, Plant and Soil, 132, 219-232 (1991).
- 256 G. J. Taylor and C. D. Foy: Mechanisms of aluminum tolerance in triticum aestivum (wheat). I. Differential pH induced by winter cultivars in nutrient solutions, Amer. J. Bot., 72, 695-701 (1985).
- 257 G. J. Taylor and C. D. Foy: Mechanisms of aluminum tolerance in triticum aestivum L. (wheat). II. Differential pH induced by spring cultivars in nutrient solutions, Amer. J. Bot., 72, 702-706 (1985).
- 258 G. J. Taylor and C. D. Foy: Mechanisms of aluminum tolerance in triticum aestivum L. (wheat), III. Long-term pH changes induced in nutrient solutions by winter cultivars differing in tolerance to aluminum, J. Plant Nutr., 8, 613-628 (1985).
- 259 M. R. Toxopeus: Lime responses in sheep grazing pastures on yellow-brown loams of the Northern King Country, North Island, New Zealand, N. Z. J. Agric. Res., 32, 81-94 (1989).
- 260 C. D. Vincent and P. J. Gregory: Effects of temperature on the development and growth of

- winter wheat roots, I. Controlled glasshouse studies of temperature, nitrogen and irradiance, *Plant and Soil*, 119, 87-97 (1989).
- 261 C. D. Vincent and P. J. Gregory: Effects of temperature on the development and growth of winter wheat roots, II. Field studies of temperature, nitrogen and irradiance, *Plant and Soil*, 119, 99-110 (1989).
- 262 T. Wagatsuma: Effect of non-metabolic conditions on the uptake of aluminum by plant roots, *Soil Sci. Plant Nutr.*, 29, 323-333 (1983).
- 263 我妻忠雄: 植物のアルミニウム過剰害と耐性の機構, *化学と生物*, 24, 769-771 (1986).
- 264 我妻忠雄: 耐アルミニウム性機構に関する作物栄養学的研究, *山形大学紀要 (農学)*, 10, 637-745 (1988).
- 265 S. U. Wallace and I. C. Anderson: Aluminum toxicity and DNA synthesis in wheat roots, *Agronomy*, 76, 5-8 (1984).
- 266 M. H. Wolfe and J. D. Joslin: Honeylocust root response to aluminum and calcium, *Plant and Soil*, 119, 181-185 (1989).
- 267 K. E. Wright: Internal precipitation of phosphorus in relation to aluminum toxicity, *Plant Physiol.*, 18, 708-712 (1943).
- 268 K. E. Wright and B. A. Donahue: Aluminum toxicity studies with radioactive phosphorus, *Plant Physiol.*, 28, 674-680 (1953).
- 269 R. J. Wright, J. L. Hern, V. C. Baligar, and O. L. Bennett: The effect of surface applied amendments on barley root growth in an acid subsoil, *Commun. in Soil Sci. Plant Anal.*, 16, 179-192 (1985).
- 270 R. J. Wright, V. C. Baligar and J. L. Ahlrichs: The influence of extractable and soil solution aluminum on root growth of wheat seedlings, *Soil Science*, 148, 293-302 (1989).
- 271 山神正弘: 生態的観点からみた草地の生産性, *北海道土壌肥料研究通信*, 25, 13-27 (1978).
- 272 矢野文夫・永尾嘉孝・早田隆典: ばれいしょ連作栽培の畑土壌について: 長崎県総合農林試験場研究報告, 10, 35-42 (1982).
- 273 安田環・藤井義晴・渋谷知子: 低リン条件下における植物の生育及びリン吸収の種間差, *土肥誌*, 58, 180-186 (1987).
- 274 吉田富男・坂井弘: 北海道における各種土壌の微生物学的研究, 4, 土壌微生物相におよぼすアルミニウムの影響, *北農試彙報*, 82, 23-27 (1965).
- 275 吉田稔・宮内信文: 酸性条件における土壌のリン酸固定容量の測定, *土肥誌*, 46, 89-93 (1975).
- 276 吉田武彦: 湿潤亜寒帯農業試論, *北農*, 52, 1-12 (1985).

Studies on grassland acidification caused by fertilizer application and its effects on grass growth.

Masayuki Hojito

Summary

In order to obtain a sufficient amount of grass production, adequate fertilizer application is essential. Since soil acidification is caused by fertilizers application, grassland acidification is an inevitable problem. Therefore, effective countermeasures are needed to maintain optimal grassland soil conditions.

In this study, the mechanism of grassland soil acidification and its effects on grass growth were analysed, and phosphorus application which is important under acid and low temperature condition, was studied. The effect of lime application on acidified grassland was analysed, and effective management methods for continuous and productive grassland were proposed.

1. Grassland acidification and aluminum dissolution.

1) Grassland acidification is originally caused by the nitrification of the ammonium ion which was contained in the potentially acid fertilizers, and the formations of protons which displace base cations adsorbed on the soil colloid. Since the nitrogen fertilizers applied repeatedly was the primal cause, an extent of acidification was proportionate to the amount of nitrogen fertilizers and the surface layer of the soil was intensively acidified. Urea, which forms smaller amounts of protons and has a buffer action by increase in concentration of bicarbonate ion, showed a very slow acidification.

2) Aluminum was dissolved into the soil solution of acidified grassland. The concentration of aluminum was in the order of ammonium chloride > ammonium sulfate >> urea, and it was proportional to the amount of nitrogen fertilizer and disproportional to the length after the fertilizer application and soil depth. Maximal concentration was over 5me/L (45mg/L). The concentration of aluminum was controlled by soil pH and the concentration of anions in the soil solution.

2. Growth limiting factors of grassland acidification and the mechanism of grass response to the acidity.

1) Acid tolerance, judged by dry plant weights in a pot experiment was in the order of orchardgrass = Kentucky bluegrass > timothy > red clover > perennial ryegrass = redtop = alfalfa > white clover, and aluminum tolerance judged by the critical aluminum concentration of the soil solution was in the order of orchardgrass > timothy = Kentucky bluegrass > red clover = perennial ryegrass = redtop > alfalfa =

whiteclover. These two tolerance were nearly equal. Therefore, aluminum is a major limiting factor of grass growth on acidified grassland. General acid tolerance judged by these two factors was in the order of orchardgrass > timothy = Kentucky bluegrass > red clover > perennial ryegrass = redtop > alfalfa > white clover.

2) The order of acid tolerance in the grassland field where the soil is acidified little by little from the surface layer, was almost the same as that mentioned above. However, the extent of growth decrease by the acidification was smaller than in the pot experiment, particularly in the case of alfalfa, which produced greater growth under field conditions. The reason for these difference was the fact that alfalfa rooted more deeply in the soil while soil acidification occurs mostly in the surface layer such as 0 to 5 cm. As shown above, root development is an important factor in the estimation of acid tolerance in the field.

3) Even in the case of orchardgrass, which has a strong tolerance to aluminum, showed growth decrease with annual variation by grassland acidification. Phosphorus content of the shoot was decreased with soil acidification. Since the phosphorus concentration in the soil solution was not decreased by the acidification, obstruction of phosphorus uptake with aluminum was one of important factor of growth decrease.

4) Differences in acid tolerance between grass species were proportional to both root growth and phosphorus content of the shoots, and disproportional to aluminum translocation to the shoots. Decrease in phosphorus uptake in the presence of soluble aluminum was controlled by the decrease in root weight in all grass species studied; however, in the case of perennial ryegrass and white clover, decrease in the phosphorus uptake efficiency per unit of root weight was also related to it. Aluminum tolerant cultivars showed a higher efficiency of phosphorus uptake and usage comparing to aluminum sensitive cultivars. Growth decrease in acid soil was mainly caused by the decrease in phosphorus uptake which was caused by the obstruction of root elongation by aluminum, and it was not caused by obstruction at the site of phosphorus metabolism in the plant shoots which concerns the dry matter production. On the other hand, grass tolerance to low phosphorus condition in the soil was decreased in low pH condition, and the aluminum tolerance decreased in low phosphorus condition. These results indicate that aluminum tolerance and low phosphorus tolerance are closely correlated through effects on a root growth.

5) Yield decrease in acidified grassland was remarkable in low precipitation year, and reverse in high precipitation year. The cause was that the aluminum concentration in the soil solution increased in drought condition; therefore, the effect of acidification was magnified in a low precipitation year. Accordingly, the phosphorus

content of the shoots which is obstructed by aluminum showed lower value at low precipitation year.

3. Grass growth response to soil acidification and effective management as a countermeasure.

1) In optimal pH condition of Brown Forest soil, phosphorus uptake efficiency was highest with a single application in April or May, and lowest with a single application in August, both in the case of orchardgrass and timothy. However in Cumulic Andosol, under optimal pH condition, phosphorus uptake efficiency was maximal with two or three time split application, both in orchardgrass and timothy. These differences in phosphorus responses in soil type were mainly derived from the differences in the intensity of phosphorus adsorption of the soils.

2) In acidified soil, the most effective phosphorus application method was a three time split application for orchardgrass both in Brown Forest soil and Cumulic Andosol. Depending upon the degree of soil acidification, the effective phosphorus application method changed from one time application in April to three time application in May, June and in August. In cumulic Andosol, the split application method was effective before and after the acidification, but the effect was increased according to the soil acidification.

3) The effect of lime application on acidified grassland was described as follows; i) pH is increased by liming, ii) concentration of aluminum in the soil solution is decreased, iii) concentration of calcium is increased, iv) consequently, the obstruction of root elongation caused by aluminum is reduced, v) while the microbial activities and numbers are increased, vi) the organic matter decomposition is accelerated, and nutrient availability is increased, vii) while the nutrient uptake ability of the grass is increased because of increased root elongation, viii) finally, the growth is increased through increase in the uptake of nutrients such as phosphorus.

4) Amount of calcium leaching was equal to the equivalent amount of anions included in the fertilizers and the natural leaching from the soil. The equivalent amount of lime was depended on the kind and the amount of fertilizers used.

5) The critical pH of the surface (0-2cm) soil at which lime is needed depends on the aluminum tolerance of grass species, as follows; orchardgrass:5.0, timothy and Kentucky bluegrass:5.1, perennial ryegrass, red clover, and redtop: 5.2, alfalfa and white clover: 5.4. At higher pH values, the method of phosphorus application is adaptable.