

南西諸島における暖地型イネ科牧草の周年放牧草地での
施肥管理技術に関する実証的研究

Study on fertilizer management for year-round grazing of
tropical grasses in south-western island Okinawa, Japan

屋良朝宣

2022

南西諸島における暖地型イネ科牧草の周年放牧草地での
施肥管理技術に関する実証的研究

Study on fertilizer management for year-round grazing of
tropical grasses in south-western island Okinawa, Japan

屋良朝宣

目 次

第 1 章 緒 論

1-1. 研究の背景	1
1-2. 論文の構成	4

第 2 章 沖縄地域の酸性土壌における数種暖地型イネ科牧草の
生育に及ぼすリン酸資材施用の影響

2-1. はじめに	6
2-2. 材料および方法	6
2-3. 結果	10
2-4. 考察	18
2-5. 摘要	20

第 3 章 沖縄地域の酸性土壌における数種暖地型イネ科牧草の
生育に及ぼす炭酸カルシウムおよびリン酸施用の影響

3-1. はじめに	23
3-2. 材料および方法	25
3-3. 結果	28
3-4. 考察	40
3-5. 摘要	50

第 4 章 暖地型イネ科牧草の集約的輪換放牧草地における
施肥由来窒素の利用効率

4-1. はじめに	51
4-2. 材料および方法	52
4-3. 結果	55
4-4. 考察	61
4-5. 摘要	65

第 5 章 沖縄地域の施肥管理された暖地型イネ科牧草の
周年放牧草地における牧養力評価

5-1. はじめに	66
5-2. 材料および方法	67
5-3. 結果と考察	70
5-4. 摘要	84

第 6 章 総合考察	85
第 7 章 要約	102
Summary	106
謝 辞	109
資料（写真 1，写真 2，写真 3，写真 4，写真 5）.	110
引用文献	115

第 1 章

緒 論

1-1. 研究の背景

(1) 沖縄地域における肉用牛生産と草地利用の特徴

沖縄地域の肉用牛生産は、離島である宮古地域や八重山地域を中心に繁殖経営による子牛生産が盛んである。2021 年 2 月現在において、一戸当たりの飼養頭数は 36.4 頭（全国 42 位）であるものの、飼養戸数は 2,250 戸（全国 8 位）、また、飼養頭数は 81,900 頭（全国 8 位）となり、沖縄県の 2019 年農業算出額 977 億円のうち 24.5%を占める主要な部門となっている（沖縄県農林水産部畜産課 2021）。

草地利用については、高温多湿な気候を活かし、暖地型イネ科牧草種を用いた自給粗飼料の生産が積極的に行われ、沖縄県の面積 10a 当たりの牧草生産量は全国平均の約 3 倍と高い値を示している（川本 1998）。本地域における自給飼料生産については、コスト低減と農家所得の向上を図るために各種事業を活用した牧草地の基盤整備が行われ、1970 年代から 2010 年代にかけて 5,486 ha の草地が整備されてきた（沖縄県農林水産部畜産課 2020）。

このような行政による農業施策の補助だけでなく、学術的な側面から暖地型牧草を利用した集約的な輪換放牧等の技術が開発（川本ら 2001）されたことによって、沖縄県の八重山地域では、

暖地型イネ科牧草草地の高位生産性を活かした黒毛和種繁殖牛の周年放牧が実施されている（川本 2008）。

（2）沖縄地域における暖地型イネ科牧草に関する先行研究

暖地型イネ科牧草は高い乾物生産を示す一方で、寒地型牧草に比べると消化率、粗タンパク質含量等の栄養価値が劣るとされている（Minson 1990）。このことから、沖縄地域における暖地型牧草に関するこれまでの研究は、それらの課題の克服に向けた、草種選定（花ヶ崎ら 2006）や乾物収量と栄養価を高める施肥管理に関する栽培試験（波平ら 2003；當眞ら 2002）、暖地型牧草種の育種（蝦名と幸喜 2009）に関するものが多くみられる。また、家畜生産の観点からは、採草あるいは放牧利用時の乾物収量や栄養収量を高める草地管理について検討されたものが多い（北村ら 1982；水町ら 2009 a；水町ら 2009 b；波平ら 2005；知念ら 2001；嘉陽と与古田 1999）。その一方で、近年は、沖縄地域における集約的な放牧利用について環境負荷への懸念が指摘されている（瀬戸口ら 2017）。沖縄地域での暖地型牧草を中心とした持続的な肉用牛生産を考える上では、放牧管理においても環境負荷の緩和を目指した暖地型イネ科牧草の能力を最大限に発揮できる栽培・利用技術を追究する必要があると考えられる。

（3）沖縄地域における暖地型牧草地の利用上の課題

沖縄地域で主として草地管理あるいは草地造成されている土

壤は、国頭マーヅあるいは島尻マーヅと呼ばれる特殊土壌である（川本 2004；沖縄県農林水産部畜産課 2010）。特に、国頭マーヅ土壌は pH4－5 の酸性土壌で、低肥沃度で生産性が低い（足立と興古田 1981）とされている。しかし、国頭マーヅ土壌は沖縄県において広く草地が分布している本島北部地域や八重山地域に広がる土壌であることから、今後も採草地あるいは放牧草地としての造成利用の可能性が高いと考えられる。

沖縄地域で利用されている牧草種の多くは暖地型永年生イネ科牧草となっているが、その中でも多く利用されている牧草種であるローズグラスでは 6－8 年、ギニアグラスでは 10－15 年で造成時の収量の半分に低下することが報告されている（川本 2004）。また、実際に沖縄地域の各草地で牧草出現頻度が低下し、強害雑草の侵入が目立つ草地も多い（知念ら 2020）。これらの理由から、沖縄地域においては、今後、草地更新の機会が増加してくる可能性が考えられる。そのため、本地域における酸性土壌である国頭マーヅ土壌での暖地型牧草の生育反応を考慮した施肥管理技術について検討することは、過剰な資材投入による生産コストの増加を防ぐだけでなく、環境への負荷軽減にも繋がると考えられる。

本地域においては、チガヤやツルメヒシバ等の野草が主体の自然草地を利用した周年放牧（屋良ら 2017）や、暖地型牧草による改良草地を利用しながらも無施肥条件による連続放牧に近い形態の周年放牧などが慣行的な放牧様式となっている（川本 2008）。一方で、川本（2008）によって、ジャイアントスターグラス放牧

草地において，放牧地からの退牧後の施肥管理と 30 日間の休牧期間を設ける集約的な輪換放牧により，慣行的連続放牧と比較して，極めて高い潜在的牧養力（7－8 頭/ha）が示されている。集約的な輪換放牧では，退牧後に 30 kg/ha の窒素施肥を行う（川本 2001）。我が国の暖地型イネ科牧草の放牧草地における窒素施肥管理については，杉本ら（1991；1994）の報告が挙げられるが，沖縄地域における暖地型イネ科牧草の放牧草地への施肥窒素に関する知見は少なく（川本 2002），これまでに，化成肥料を投入する集約的な放牧管理時の肥料効率あるいは適切な肥培管理等については検討されていない。さらに，退牧後の施肥管理と休牧期間を設けた集約的な輪換放牧による長期的な実証研究はみられない。よって，暖地型牧草主体の放牧草地への窒素施肥について検討することや，施肥管理を踏まえた長期的な放牧草地の利用について検証することは，本地域における持続的な草地管理による家畜生産システムを構築する上で重要な一助になると考えられる。

1-2. 論文の構成

最初に，第 2 章では，酸性赤黄色土壌の国頭マージ土壌におけるリン酸資材の施用が数種暖地型牧草の生育および土壌中の可給態リン酸含量に及ぼす影響について検討するために圃場栽培試験を行った。

第 3 章では，酸性赤黄色土壌の国頭マージ土壌における土壌 pH

の矯正と可給態リン酸含量との関係から炭酸カルシウムおよびリン酸の至適施用量を明らかにするために、スーダングラス、シグナルグラスおよびディジットグラス品種トランスバーラ（以下、トランスバーラ）を用いたポット栽培試験を行った。

第4章では、沖縄地域のジャイアントスターグラスとトランスバーラの黒毛和種繁殖牛の輪換放牧地において、 ^{15}N 同位体窒素を用いて施肥由来窒素の利用効率を測定し、化成肥料投入の集約的放牧管理下の施肥効率について検討した。

第5章では、酸性土壌で施肥管理条件下におけるトランスバーラ草地の利用特性と潜在的な牧養力を明らかにするために、高牧養力を示したジャイアントスターグラス草地と同様の放牧様式の下で草地生産性と牧養力について比較検討した。

第 2 章

沖縄地域の酸性土壌における数種暖地型イネ科牧草の生育に 及ぼすリン酸資材施用の影響

2-1. はじめに

沖縄地域に広く分布する国頭マージ土壌の多くは酸性を示し、土壌の化学性と物理性について多くの問題を抱えている。土壌化学性の改良方法の 1 つとして、リン酸資材等の施用が挙げられる。本地域での牧草栽培時におけるリン酸施肥量について、ソルガムとスーダングラスでは $25 \text{ kgP}_2\text{O}_5/10\text{a}$ 、ディジットグラス（パンゴラグラス）では $10 \text{ kgP}_2\text{O}_5/10\text{a}$ などの基準量は存在する（沖縄県畜産試験場 1999）が、その基準量が適正かどうかについては、これまでにあまり検討されていない。本章では、国頭マージ土壌におけるリン酸資材の施用が数種暖地型牧草の生育に及ぼす影響について検討を行った。また、国頭マージ土壌におけるリン酸資材の施用が土壌中可給態リン酸含量に及ぼす影響についても調査した。

2-2. 材料および方法

試験は、沖縄県東村の国頭マージ土壌で行い、試験 1 の期間は、2012 年 4 月から 9 月であり、試験 2 の期間は、2012 年 5 月から 8 月であった。試験 1 では、供試草種として暖地型短年生イネ科

Table 2-1. Chemical composition of Kunigami maaji soil on field experiment of Sudangrass.

Soil	pH (H ₂ O)	Available phosphoric acid (mgP ₂ O ₅ /100g soil)	Phosphate absorption coefficient ² (mgP ₂ O ₅ /100g soil)
Kunigami maaji soil (Red-Yellow Soil)	4.9 ± 0.2 ¹	11.2 ± 5.2	229.3 ± 45.8

¹ Values are expressed as mean ±S.D.

² Values measured Ammonium phosphate solution method.

牧草である *Sorghum* 属スーダングラス (*Sorghum sudanense* [Piper] Stapf) 品種リッチスーダン (以下 Sg) を用いた (写真 1, 2)。試験圃場の土壌 pH (H₂O) は 4.9, 可給態リン酸含量は 11.2 mgP₂O₅/100g 乾土, リン酸吸収係数は 229.3 mgP₂O₅/100g 乾土である (表 2-1)。処理として, 過リン酸石灰により基肥のリン酸施肥量を 0, 12.5 および 25.0 kgP₂O₅/10a の 3 水準を設け, それぞれ無施用区, 減肥区および標準区とした。1 区画面積を 6 m² とし, それぞれの処理区についてラテン方格法により 3 反復で配置した。リン酸施肥後, 種子を 4 kg/10a 播種し, N と K₂O をそれぞれ 10 kg/10a 施肥した。播種後 26 日目に初期生育調査として, 1 m² あたりの茎数と草高を調査し, 出穂期となった生育 70 日目に 1 回目の刈取調査を行い, 1 回目刈取日から再生 59 日目に 2 回目の刈取り調査を行った。試験 2 では, 供試草種として暖地型永年生イネ科牧草である, シグナルグラス (*Brachiaria decumbens* Stapf cv. Basilisk, 以下 Bd) とディジットグラス 品種トランスバーラ (*Digitaria eriantha* Steud. cv. Transvala, 以下 Tr) を用いた (写真 1, 2)。試験土壌の pH (H₂O) は 5.6, 可給態リン酸含量は 8.9 mgP₂O₅/100g 乾土, リン酸吸収係数は 234.3 mgP₂O₅/100g 乾土である (表 2-2)。処理として, 基肥のリン酸施肥量を 0, 5 および 10 kgP₂O₅/10a の 3 水準を設け, それぞれ無施用区, 減肥区および標準区とした。1 区画面積を 6 m² とし, それぞれの処理区について主試験区を草種, 副試験区をリン酸施用量として分割区法により 3 反復で配置した。リン酸施肥

Table 2-2. Chemical composition of Kunigami maaji soil on field experiment of Signalgrass and Transvala.

Soil	pH (H ₂ O)	Available phosphoric acid (mgP ₂ O ₅ /100g soil)	Phosphate absorption coefficient ² (mgP ₂ O ₅ /100g soil)
Kunigami maaji soil (Red-Yellow Soil)	5.6 ± 0.3 ¹	8.9 ± 5.3	234.3 ± 53.8

¹ Values are expressed as mean ±S.D.

² Values measured Ammonium phosphate solution method.

後，Bd は 5 kg/10a の種子を播種し，Tr は均一株を 4 株/m² 植付けた。基肥として N と K₂O をそれぞれ 5 kg/10a 施肥した。播種後 21 日目に初期生育調査として，1 m²あたりの茎数と草高を測定し，Tr については，植付株の定着割合も調査した。播種日から 63 日目に 1 回目の刈取調査を行い，2 回目刈取調査は 1 回目刈取後 41 日目，3 回目刈取り調査は 2 回目刈取後 45 日目に行った。なお，試験 1, 2 ともにリン酸施用直後と刈取り調査時に，試験 1 では圃場内の 3 カ所，試験 2 では 6 カ所より地表から 20 cm の深度まで円筒状に土壌を採取し，風乾細土とした後に土壌中可給態リン酸含量についてトルオーグ法（南篠 2000）により測定した。

統計処理については，試験 1 ではラテン方格法による分散分析を行い，試験 2 は主試験区を草種，副試験区をリン酸施肥量とする分割区法による分散分析を行った。分散分析で有意差が認められたリン酸施肥の効果については Tukey の HSD 検定による多重比較検定を行った。

2-3. 結果

(1) 暖地型短年生イネ科牧草へのリン酸施用効果

Sg の初期生育におけるリン酸施用の効果について表 2-3 に示した。1 m²あたりの茎数については，処理区間で顕著な違いは認められず，草高についても処理区間で顕著な違いは認められなかった。Sg の乾物収量におけるリン酸施用の効果について図 2-1 に

Table 2-3. Effect of phosphorous fertilizer on early growth of Sudangrass
at 21 days after seeding.

Treatment	Stem number/m ²	Height(cm)
Unfertilized P (0 kgP ₂ O ₅ /10a)	27.3 ± 4.2 ¹	40.1 ± 11.5
Reducing P (12.5 kgP ₂ O ₅ /10a)	24.7 ± 5.0	46.8 ± 15.3
Standard P (25.0 kgP ₂ O ₅ /10a)	27.3 ± 5.0	47.0 ± 11.5

¹ Values are expressed as mean ±S.D.

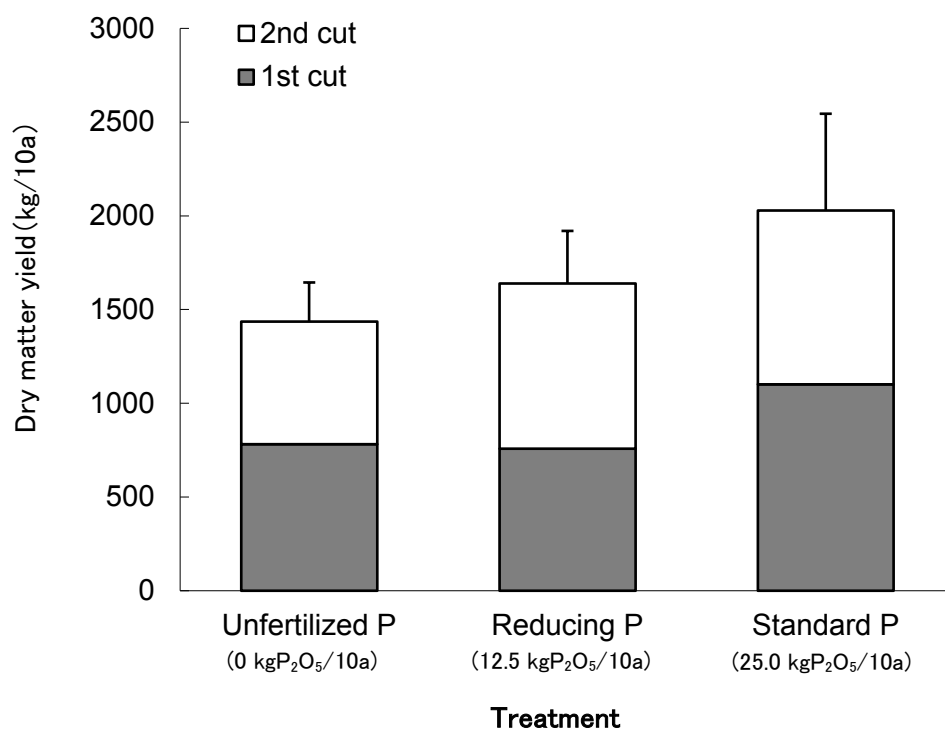


Figure 2-1. Effect of phosphorous fertilizer on dry matter yield of Sudangrass.

Note: 10a = 1,000m²

Table 2-4. Changes of available phosphoric acid in Kunigami maaji soil of Sudangrass experimental field at different times.

Treatment		Available phosphoric acid (mgP ₂ O ₅ /100g soil)			
		Before fertilizing	Just after fertilizing (0 day)	1st cut (72 day)	2nd cut (129 day)
Unfertilized P	(0 kgP ₂ O ₅ /10a)	11.2 ± 5.2	11.2 ± 5.2 ¹	10.5 ± 4.7	7.5 ± 4.8
Reducing P	(12.5 kgP ₂ O ₅ /10a)	11.2 ± 5.2	22.0 ± 9.8	10.5 ± 7.2	10.1 ± 6.6
Standard P	(25.0 kgP ₂ O ₅ /10a)	11.2 ± 5.2	27.2 ± 14.8	16.1 ± 3.5	13.7 ± 11.2

¹ Values are expressed as mean ±S.D.

示した。Sg の乾物収量は、リン酸施肥の増加に伴い、高くなる傾向を示し、標準区で最も高くなる傾向を示した ($P < 0.10$)。

Sg 栽培圃場における土壌中可給態リン酸含量の経時変化を表 2-4 に示した。土壌中の可給態リン酸含量は、リン酸施肥量の増加に伴い、増加し、施肥直後から 2 回目刈取時まで無施用区 < 減肥区 < 標準区の順に高い傾向で推移した。試験期間中の土壌中可給態リン酸は、無施用区の 2 回目刈取時を除いた全ての処理区と全刈取回次で基準値とされる $10 \text{ mgP}_2\text{O}_5/100\text{g}$ 乾土以上の値 (沖縄県畜産試験場 1999) を示した。

(2) 暖地型永年生イネ科牧草へのリン酸施用効果

Bd と Tr の初期生育におけるリン酸施用の効果について表 2-5 に示した。Tr の植付株の定着率は、いずれの処理区も 100% となった。Bd と Tr の 1 m^2 当たりの茎数および草高は、処理区間に顕著な違いは認められなかった。Bd と Tr の乾物収量におけるリン酸施肥の効果について図 2-2 に示した。Bd と Tr の乾物収量は、1, 2 および 3 回目刈取り時ともに、処理区間に有意差は認められず、Bd の合計乾物収量は $1,315 - 1,472 \text{ kg}/10\text{a}$ 、Tr の合計乾物収量は $943 - 1,021 \text{ kg}/10\text{a}$ の範囲となった。Bd と Tr 栽培圃場における土壌中可給態リン酸含量の経時変化について図 2-3 に示した。無施用区では、全期間で土壌中可給態リン酸含量が基準値 ($10 \text{ mgP}_2\text{O}_5/100\text{g}$ 乾土以上) 以下で推移した。減肥区では 1 回目刈取以降に、標準区では 3 回目刈取以降に基準値以下の値となった。また、0 日目の土壌中の可給態リン酸含量は、無施用区 9.5,

Table 2-5. Effect of phosphorous fertilizer on early growth of Signalgrass (Bd) and Transvala (Tr) at 21 days after seeding.

Species	Treatment		Establishment rate (%) ¹	Stem number / m ²	Height(cm)
Bd	Unfertilized P	(0 kgP ₂ O ₅ /10a)	-	125.3 ± 9.0 ²	8.9 ± 1.1
	Reducing P	(5 kgP ₂ O ₅ /10a)	-	115.3 ± 16.5	10.2 ± 1.6
	Standard P	(10 kgP ₂ O ₅ /10a)	-	102.0 ± 7.0	9.3 ± 0.5
Tr	Unfertilized P	(0 kgP ₂ O ₅ /10a)	100	36.0 ± 6.2	11.7 ± 1.9
	Reducing P	(5 kgP ₂ O ₅ /10a)	100	38.0 ± 5.3	10.9 ± 0.9
	Standard P	(10 kgP ₂ O ₅ /10a)	100	34.0 ± 5.0	12.1 ± 2.2

¹ Survive stubble / Planting stubble × 100.

² Values are expressed as mean ± S.D.

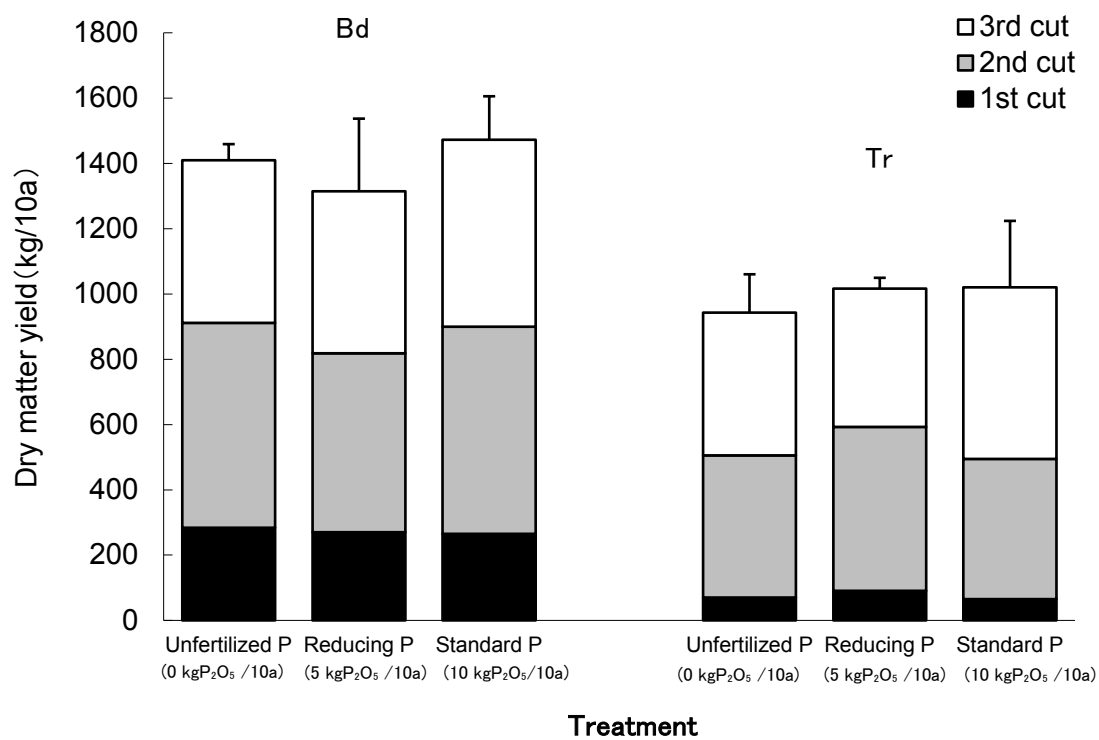


Figure 2-2. Effect of phosphorous fertilizer on dry matter yield of Signalgrass (Bd) and Transvala (Tr).

Note: 10a = 1,000m²

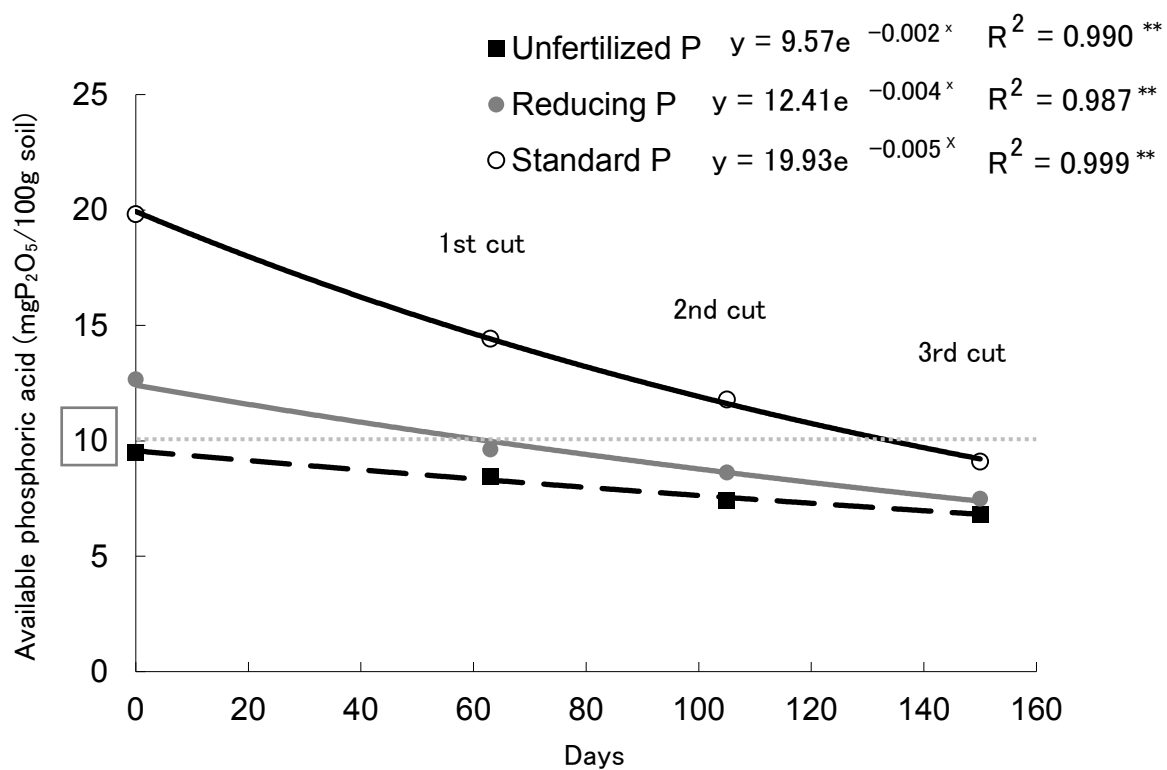


Figure 2-3. Changes of available phosphoric acid of Kunigami maaji soil in Signalgrass (Bd) and Transvala (Tr) with growing time.

$^{**}, P < 0.01$

減肥区 12.7, 標準区 19.8 mgP₂O₅/100g 乾土の順に有意 (P < 0.05) に高い値を示したが, 150 日目には, 無施用区 6.8, 減肥区 7.5, 標準区 9.1 mgP₂O₅/100g 乾土の順に高くなる傾向 (P < 0.10) を示したものの, 有意な処理区間差は認められなくなった。

2-4. 考察

リンは作物あるいは牧草の初期生育において, 特に重要と考えられている (但野と田中 1980 ; 原田 1967)。本試験で Sg, Bd および Tr については, リン酸施用量の増加に伴う 1 m² 当たりの茎数と草高への影響は認められなかった。また, Tr については, 植付株の定着割合がいずれの処理区についても 100% となり, 処理区間に顕著な違いは認められなかった。Sg, Bd および Tr ともにリン酸施用が初期生育に及ぼす効果については不明瞭であった。これらの結果から, Sg, Bd および Tr 栽培土壌の無施肥条件下における可給態リン酸含量 (Sg では 11.2, Bd と Tr では 9.5 mgP₂O₅/100g 乾土) が既に初期生育に十分な水準に達していた可能性があると考えられた。一方, Sg の乾物収量については, 有意差は認められないものの, リン酸施用量の増加に伴い, 合計乾物収量が増加する傾向 (P < 0.10) を示していたことから, 土壌中の可給態リン酸含量が基準値をわずかに上回るような土壌 (試験土壌の可給態リン酸含量 : 11.2 mgP₂O₅/100g 乾土) の場合においても, 草地造成時にはリン酸を基準量 (25 kgP₂O₅/10a) 施用することが望ましいと考えられた。Bd と Tr は, リン酸施用量の

増加に伴う乾物収量の増加は認められなかったことから、土壤中可給態リン酸が約 $9 \text{ mgP}_2\text{O}_5/100\text{g}$ 乾土の国頭マージ土壤では、リン酸無施肥でも草地造成初期の生産性に大きな影響を及ぼさないと考えられた。

Sg 栽培圃場および Bd と Tr 栽培圃場の土壤中可給態リン酸含量は、減肥区と標準区ともに、施用直後から約 130 日経過することで、約 40–50%減少していた。すなわち、リン酸吸収係数 $229 - 234 \text{ mgP}_2\text{O}_5/100\text{g}$ 乾土の国頭マージ土壤においては、暖地型牧草栽培時にリン酸を標準量施用した場合、約 4 ヶ月で土壤中可給態リン酸含量が半減することを表している。したがって、草種によっては造成初期にリン酸を多く施用することよりも、利用後（採草利用あるいは放牧利用）のリン酸追肥によって土壤中可給態リン酸を補うことが、リン酸肥料節約の観点から望ましいと考えられる。Sg 栽培土壤中の可給態リン酸含量については、 $12.5 - 25.0 \text{ kgP}_2\text{O}_5/10\text{a}$ のリン酸施用により、施用直後は基準値の 2.2–2.7 倍まで高まったが、2 回目刈取時（施用後 129 日目）には、基準値と同程度から約 1.4 倍の値まで低下した。Sg で最も高い乾物収量を示した標準区の 1 回目刈取は、土壤中の可給態リン酸含量が $27.2 - 16.1 \text{ mgP}_2\text{O}_5/100$ 乾土（リン酸施用直後から 1 回目刈取時まで）の条件下で生育していたことにより生育が促進され、乾物収量が高まった可能性もあることから、Sg に関しては、刈取毎のリン酸追肥が有効である可能性が示唆された。

Bd と Tr 栽培圃場における土壤中の可給態リン酸含量につい

ては，リン酸無施用区が全試験期間を通して基準値（10 mgP₂O₅/100g 乾土以上）以下で推移していたが，無施用区の乾物収量と減肥区および標準区の乾物収量を比較した場合，刈取回次ごと，もしくは合計乾物収量においても，顕著な違いは認められなかったことから，Bd と Tr は土壌中の可給態リン酸含量がかなり低い水準（10 mgP₂O₅/100g 乾土以下）の国頭マージ土壌においても，良好な生育を示す牧草種である可能性が示唆され，造成初期あるいは利用後（刈取後もしくは放牧利用後）のリン酸施用量をこれまでの基準量よりも低減できるのではないかと考えられた。

以上のことから，植付から短期間で高い収量が得られる Sg のような暖地型短年生イネ科牧草種を酸性の国頭マージ土壌で栽培する場合，草地造成時に基準量のリン酸を施用することおよび利用後（採草または放牧）にリン酸を追肥することが望ましいと考えられた。一方で，暖地型永年生イネ科牧草である Bd と Tr は，酸性の国頭マージ土壌における造成時の土壌中可給態リン酸含量の基準値やリン酸施用量を見直す必要性があると考えられた。

2-5. 摘要

国頭マージ土壌におけるリン酸資材の施肥が数種暖地型牧草の生育に及ぼす影響について検討を行った。

試験は，沖縄県東村の国頭マージ土壌（pH:4.9－5.6，可給態リ

ン酸含量：9－11 mgP₂O₅/100g 乾土）で行った．試験 1 では，供試草種として暖地型短年生イネ科牧草であるスーダングラス（品種：リッチスーダン，以下 Sg）を用いた．試験期間は，2012 年 4 月から 9 月である．処理として，過リン酸石灰により基肥のリン酸施肥量を 0，12.5 および 25.0 kgP₂O₅/10a の 3 水準設け，それぞれ無施肥区，減肥区および標準区とした．試験期間中に 2 回の刈取調査を行った．試験 2 では，供試草種として暖地型永年生イネ科牧草である，シグナルグラス（品種：Basilisk，以下 Bd）とディジットグラス（品種：トランスバーラ，Tr）を用いた．試験期間は，2012 年 5 月から 8 月である．処理として，基肥のリン酸施肥量を 0，5 および 10 kgP₂O₅/10a の 3 水準設け，それぞれ無施肥区，減肥区および標準区とした．試験期間中に 3 回の刈取調査を行った．なお，試験 1，2 ともにリン酸施肥直後と刈取り調査時の土壤中可給態リン酸含量について分析を行った．

Sg の乾物収量は，標準区が最も高くなる傾向を示した．試験期間中の土壤中可給態リン酸は，無施用区を除いた全ての処理区で基準とされる 10 mgP₂O₅/100g 乾土以上の値を示した．Bd と Tr の乾物収量は，1，2 および 3 回目刈取り時ともに，処理区間に有意差は認められなかった．土壤中可給態リン酸は，Bd，Tr ともに，減肥区では 1 回目刈取以降に，標準区では 3 回目刈取以降に基準値以下の値を示した．

本試験により，Sg への適正なリン酸施肥（造成時の基準量施肥と採草または放牧利用後の追肥）は乾物生産を高めるために必

要であると示唆された。一方，Bd と Tr は，リン酸施肥前に土壤中可給態リン酸が約 9 mgP₂O₅/100g 乾土の土壤では，リン酸無施肥でも草地造成初期の生産性に大きな影響を及ぼさないことが明らかとなった。

第 3 章

沖縄地域の酸性土壌における数種暖地型イネ科牧草の生育に 及ぼす炭酸カルシウムおよびリン酸施用の影響

3-1. はじめに

沖縄県で主として草地管理あるいは草地造成されている土壌は、国頭マーヅあるいは島尻マーヅと呼ばれる特殊土壌である（川本 2004；沖縄県農林水産部畜産課 2010）。特に、国頭マーヅ土壌は pH4－5 の酸性土壌で、低肥沃度で生産性が低いとされている（足立と興古田 1981）。しかし、この国頭マーヅ土壌は本県において広く草地が分布している本島北部地域や八重山地域に広がる土壌であることから、今後も採草地あるいは放牧草地としての造成利用の可能性が高いと考えられる。

一般的に、酸性土壌ではアルミニウム（AI）等の溶解度が高いため、溶出した AI イオンが植物の根の伸長を著しく阻害することが知られている（田中 1984）。また、土壌溶液中に存在する AI イオンは、土壌中に存在もしくは施用されたリンイオンの土壌への固定化を促し、植物が利用可能な可給態リン酸含量が不足する場合が多い。そこで、国頭マーヅにおいて牧草の生産性を高めるためには、草地造成時あるいは更新時に、pH5.5－6.5 への矯正を目標に炭酸カルシウム等の石灰質資材（沖縄県農業試験場 1979）の施用やリン酸質資材の土壌施用による植物へのリン供給の確

保が重要であると考えられる。

しかし，暖地型イネ科牧草の生育における至適土壌 pH は草種間差が著しいことが報告されている（北村 1986 b）。また，リン酸資材の施用は，土壌中の可給態リン酸（ P_2O_5 ）含量で，100g 乾土当たり 10 mg 以上となることを目標とするが，土壌 pH と同様にリン酸施用に対する生育の促進的反応には草種間差の存在が知られている（北村と尾形 1985；北村と庄子 1985）。よって，本地域の酸性土壌である国頭マージ土壌に栽培される牧草の生育に効果的な土壌 pH の矯正およびリン酸施用を行うためには，土壌中の Al イオンおよび可給態リン酸含量が各草種の生育に及ぼす影響を明らかにする必要があると考えられる。すでに国頭マージ土壌での牧草栽培時における炭酸カルシウムあるいはリン酸の施用効果については種々論じられている（大城ら 1986；仲宗根ら 1989；久場ら 1989；新城と星野 1997）が，それらの同時施用が牧草の生育に及ぼす影響の検討例は極めて少ない（大屋 1965；北村と尾形 1985）。さらに，近年導入され，本県での作付面積が拡大中あるいは栽培が有望視されている草種については，国頭マージの土壌 pH の矯正およびリン酸施用効果に関する知見は皆無である。

以上のことから，本試験では，耐酸性が低いとされる *Sorghum* 属（Moser ら 2004）に属するスーダングラス（*S. sudanense*：品種 リッチスーダン），酸性土壌でも良好に生育し，本地域における栽培試験の結果から，高い収量が得られることが示され，今後

の利用の拡大が期待されているシグナルグラス (*Brachiaria decumbens*) (Moser ら 2004; 望月ら 2005), さらに, 沖縄県で作付面積が年々増加中のディジットグラス (*Digitaria eriantha*: 品種 トランスバーラ) (沖縄県農林水産部畜産課 2020) を供試草種として用い, ポット栽培試験によって, 炭酸カルシウム施用による土壌 pH の矯正およびリン酸資材の施用効果を検討した。

3-2. 材料および方法

(1) 供試土壌および施用処理

供試土壌として沖縄県石垣市大川で採取した国頭マージ土壌(赤黄色土)を用いた。供試土壌は 3 mm の篩を通し夾雑物を取り除いた後に試験に供した。供試土壌の pH は 4.5 であったため, pH4.5, 5.5 および 6.5 となるように, 炭酸カルシウム施用量を 3 水準(それぞれ 0, 350 および 700 kgCaCO₃/10a)に決定した。また, 土壌中の可給態リン酸含量が 1.08 mgP₂O₅/100g 乾土であったため, 可給態リン酸含量が 1, 5 および 10 mgP₂O₅/100g 乾土となるように, リン酸のみの施用が可能なリン酸溶液(H₃PO₄)の添加量を 3 水準(0, 5 および 15 kgP/10a)に決定し, これらを相互に組み合わせた計 9 処理区を設けた。各処理区は 4 反復とした。供試土壌は, 炭酸カルシウムおよびリン酸施用処理を行った後, 1/5,000a ワグネルポットに 3.6 kg 充填した。また, 基肥として全ての処理区に, 硫酸アンモニウムおよび硫酸カリにより, N, K₂O の要素量でそれぞれ 5 kg/10a を施用した。

(2) 供試草種および栽培管理

供試草種として *Sorghum* 属スーダングラス (*Sorghum sudanense* (Piper) Stapf) 品種リッチスーダン (以下 Sg), シグナルグラス (*Brachiaria decumbens* Stapf cv. Basilisk, 以下 Bd) およびディジットグラス品種トランスバーラ (*Digitaria eriantha* Steud. cv. Transvala, 以下 Tr) を用いた。2009 年 10 月 23 日に, Sg と Bd は, ポットに 0.5 cm 深で 3 点播種し, Tr は琉球大学内の Tr 草地から均一な株を採取し, ポットに 3 個体植えた。2009 年 10 月 28 日に Sg と Bd は定着確認後に, 間引きにより 1 本立て (1 ポット 3 個体) とした (写真 3)。

2009 年 11 月 3 日に, 全草種を地際から 7 cm の高さで掃除刈りして, 試験を開始し, 12 月 4 日までの 31 日間 (平均気温: 24.8℃), 琉球大学農学部附属亜熱帯フィールド科学教育研究センター内のガラス室で栽培した。ポット内土壌の最大容水量の 60–70%を保つように, 朝夕適宜灌水を行った。

(3) 調査方法および無機養分分析方法

試験期間の最終日 (2009 年 12 月 4 日) に, ポット内の全ての植物体を地際から刈取り, 地上部と地下部に分別採取した。採取個体は, 70℃で 48 時間通風乾燥し, 乾物重量を測定後, 1 mm の篩を通るように粉碎し, 化学分析に供した。

供試草種中のリン (P), カリウム (K), カルシウム (Ca) およ

びマグネシウム (Mg) 含有率は、湿式灰化法 (石橋 2001) に準じて前処理を行い、ICP (ICPE-9000, 島津製作所 (株), 京都) 発光分析法により測定した。供試土壌および施用処理後の土壌試料の pH (H₂O) は、ガラス電極法により測定し、可給態リン酸含量はトルオーグ法 (南篠 2000) により測定した。交換性カルシウム (Ca), カリウム (K) およびマグネシウム (Mg) 含量は、バッチ法 (亀和田 2000) に基づき土壌抽出液を調製し、また、炭酸カルシウムおよびリン酸溶液の施用後の土壌中交換性アルミニウムイオン (Al³⁺) 含量については、1N 塩化カリウム溶液と土壌を 10:1 (土壌養分測定法委員会 1991) の比率で混合および振とうして得られた抽出液を調製し、いずれも ICP 発光分析法で測定した。分析から得られた土壌中の交換性 Ca, K, Mg および Al 含量から、Kamprath (2003) の手法により Al 飽和度を算出した。

(4)統計処理

炭酸カルシウムおよびリン酸施用後の供試土壌における化学的特性、各草種の地上部茎葉および根の重量、茎葉部のミネラル含有率と含有量をそれぞれ、StatviewJ-5.0 (SAS Institute Inc, Cray, NC, USA) を用いて分散分析を行った。さらに、地上部の茎葉と根の重量に交互作用が認められた場合、Tukey-Kramer 法により 1%および 5%水準で多重比較検定した。

3-3. 結果

(1) 供試土壌の化学的特性

表 3-1 に供試土壌の化学的特性を示した。土壌 pH (H₂O) は 4.50, 可給態リン酸含量は 1.08 mgP₂O₅/100g 乾土, 交換性塩基 (Ca, K, Mg) 含量はそれぞれ, 0.61, 0.42, 0.74 me/100g 乾土であった。同じく, AI 含量は 3.84 me/100g 乾土で, AI 飽和度は 68.3%と算出された。土壌 pH (H₂O), 可給態リン酸および交換性塩基 (Ca, K および Mg) の各種含量については, 沖縄本島北部地域や離島地域で認められる値 (新田ら 1991, 1992) の範囲内であり, 土壌中の交換性 AI 飽和度は, 本地域での報告は極めて少ないが, Oya と Higa (1995) および久場ら (1989) の報告に比べて比較的高い水準であった。

(2) 炭酸カルシウムとリン酸の施用が土壌の pH, リン酸および AI の含量に及ぼす影響

炭酸カルシウムおよびリン酸の施用処理による供試土壌の化学的特性に対する影響を表 3-2 に示した。土壌 pH (H₂O) は炭酸カルシウム施用量の増加に伴い, 高くなったが, 目標値 (pH5.5 – 6.5) に比べてやや低く, リン酸施用量による影響は認められなかった。可給態リン酸含有量において, 炭酸カルシウムの施用効果は認められなかったが, リン酸の施用量の増加に伴い, 可給態リン酸含量の増加も認められたものの, 目標値 (10 mgP₂O₅/100g 乾土 以上) よりもかなり低くなった。交換性 AI 含量および AI 飽

Table 3-1. pH, available phosphoric acid, exchangeable-bases and Al saturation of Kunigami maaji in the pot experiment.

Soil	pH (H ₂ O)	Available phosphoric acid (mgP ₂ O ₅ /100g)	Exchangeable-bases (me/100g)				Al Saturation (%) ²
			Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	
Kunigami maaji	4.50	1.08	0.61	0.42	0.74	3.84	68.3
Standard values ¹	5.5-6.5	10<	5.0-10.0	0.2-0.4	1.5-3.0	-	-

¹ Source of reference : Soil survey for maintenance of farmland fertility (Okinawa Agricultural Experiment Station 1979) .

² Al Saturation (%) = $\text{Al}^{3+} / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^{+} + \text{Al}^{3+}) \times 100$.

Table 3-2. Effect of calcium carbonate and phosphate fertilizer application on pH, available phosphoric acid, exchangeable-bases and Al saturation of Kunigami maaji soil in pot experiment.

Application level		pH (H ₂ O)	Available phosphoric acid (mgP ₂ O ₅ /100g)	Exchangeable Al (me/100g)	Al Saturation (%) ¹
CaCO ₃ (kg/10a)	H ₃ PO ₄ (kgP/10a)				
0	0	4.50	1.08	3.84	68.3
	5	4.47	2.26	3.78	68.2
	15	4.39	6.05	3.80	68.7
350	0	5.10	1.14	1.05	16.4
	5	5.09	2.21	0.86	14.2
	15	5.03	6.60	0.49	8.5
700	0	6.14	1.58	0.32	3.5
	5	6.21	2.42	0.32	3.5
	15	6.23	5.65	0.31	3.2
ANOVA					
	CaCO ₃	**	ns	**	**
	H ₃ PO ₄	ns	**	*	*
	CaCO ₃ × H ₃ PO ₄	ns	ns	*	*

**, P<0.01; *, P<0.05; ns, not significant.

¹ Al Saturation (%) = $\text{Al}^{3+} / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^{+} + \text{Al}^{3+}) \times 100$.

和度は、炭酸カルシウム施用量の増加に伴い、有意に低下した ($P < 0.01$) が、リン酸施用量を増加した場合には炭酸カルシウム施用 350 kg/10a 区においてのみ顕著に低下した。

(3)各草種の生育における炭酸カルシウムおよびリン酸施用の効果

各草種の乾物重に及ぼす炭酸カルシウムおよびリン酸の施用の影響を表 3-3 に示した。炭酸カルシウム施用量が乾物重に及ぼす影響には、草種間差異が認められた。すなわち、Sg では、無施用区の茎葉と根の乾物重はともに著しく低下したが、350 kg/10a 区では、茎葉と根の乾物重は無施用区と比較して、それぞれ 106, 189 倍、700 kg/10a 区ではそれぞれ 114, 219 倍と有意に増加し ($P < 0.01$)、炭酸カルシウム施用効果が認められた。Bd では炭酸カルシウムの施用による有意な効果 ($P < 0.05$) は認められないものの、茎葉と根の乾物重は低下する傾向を示した。Tr では 350 kg/10a 区において茎葉と根の乾物重が高くなる傾向を示した。

リン酸施用量が各草種の乾物重に及ぼす影響にも草種間差異が認められた。すなわち、Sg ではリン酸施用量の増加に伴い、茎葉と根の乾物重は増加し、その程度は茎葉で著しく、15 kgP/10a 区で、最も高い値を示した。

Bd では、茎葉と根いずれも、リン酸無施用区よりも 5 kgP/10a 区で有意に高い乾物重を示した ($P < 0.01$) が、5 kgP/10a 区と 15 kgP/10a 区の間には有意差は認められなかった。Tr では、リン酸施

Table 3-3. Effect of calcium carbonate and phosphate fertilizer application on dry matter weight of plant parts in each grass.

Treatment		Dry matter weight (gDM/pot-plant)					
		Sg		Bd		Tr	
Fertilizer	Application level	Foliage	Root	Foliage	Root	Foliage	Root
CaCO ₃	0 kg/10a	0.06 ^{B1}	0.03 ^B	4.57	2.18	6.50	2.75
	350 kg/10a	6.34 ^A	5.67 ^A	4.19	1.79	7.72	3.32
	700 kg/10a	6.82 ^A	6.58 ^A	3.71	1.79	7.31	3.10
H ₃ PO ₄	0 kg P/10a	1.31 ^C	1.29 ^B	1.83 ^B	0.98 ^B	5.12 ^c	2.83
	5 kg P/10a	4.28 ^B	4.91 ^A	4.83 ^A	2.25 ^A	9.20 ^a	3.75
	15 kg P/10a	7.63 ^A	6.08 ^A	5.82 ^A	2.54 ^A	7.21 ^b	2.59
ANOVA							
	CaCO ₃	** ²	**	ns	ns	ns	ns
	H ₃ PO ₄	**	**	**	**	**	ns
	CaCO ₃ × H ₃ PO ₄	**	ns	ns	ns	ns	ns

Pot size : Wagner pot (size 0.02 m²).

Sg, Sudangrass; Bd, Signalgrass; Tr, Transvala.

¹ Large and small letters in the same column indicate respective a significant difference at P<0.01 and P<0.05.

² **, P<0.01; ns, not significant.

用量の多寡は根の乾物重に影響を及ぼさなかったものの茎葉については，リン酸 5 kgP/10a 区で最も多く，次いで 15 kgP/10a 区であり，無施用区で最も少なくなった。

(4)各草種の生育における炭酸カルシウムとリン酸の交互作用

乾物重に及ぼす炭酸カルシウムとリン酸施用の交互作用が認められた Sg の乾物重を，図 3-1 に示した。Sg は茎葉の乾物重に交互作用が認められた ($P < 0.01$) ため，全処理区間で多重比較検定を行った。炭酸カルシウム無施用区では，リン酸施用は Sg の茎葉と根の乾物重に対する影響が認められなかった。一方，炭酸カルシウム 350 および 700 kg/10a 区では，リン酸施用量の増加に伴い，茎葉と根の乾物重は増加し，リン酸 15 kgP/10a 区の茎葉で最も高い値を示した ($P < 0.01$)。Bd と Tr では，茎葉と根の乾物重に対する炭酸カルシウム施用とリン酸施用との間には交互作用は認められなかった。

(5)茎葉中の無機養分含有率および含有量に及ぼす炭酸カルシウムとリン酸施用の影響

Sg の茎葉中無機養分含有率および含有量に及ぼす炭酸カルシウム施用とリン酸施用の影響を表 3-4 に示した。Sg の茎葉部の P, Ca, K および Mg の含有率と含有量は，炭酸カルシウム無施用区と比較して 350 および 700 kg/10a 区のいずれも有意 ($P < 0.01$) に高くなった。リン酸施用においても，リン酸無施用区と

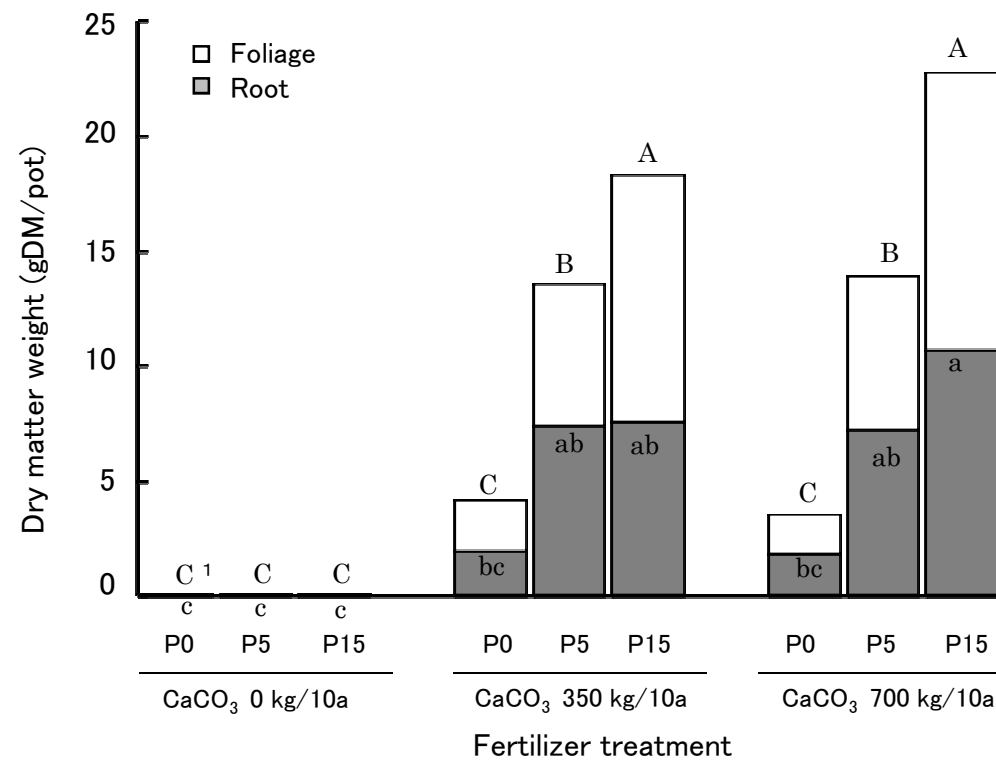


Figure 3-1. Effect calcium carbonate and phosphate fertilizer application on dry matter weight in Sudangrass (Sg) .

1 Bars with the different letters indicate significant difference.

Note: Capital letters for foliage (P<0.01) Small letters for root (P<0.05).

Table 3-4. Effect of calcium carbonate and phosphate fertilizer application on mineral content in the foliage of Sudangrass (Sg).

Treatment		P		Ca		K		Mg	
Fertilizer	Application level	(%)	(mg/pot)	(%)	(mg/pot)	(%)	(mg/pot)	(%)	(mg/pot)
CaCO ₃	0 kg/10a	0.08 ^B	0.04 ^B	0.32 ^C	0.17 ^C	0.86 ^C	0.48 ^B	0.16 ^B	0.09 ^B
	350 kg/10a	0.19 ^A	12.04 ^A	0.67 ^B	44.85 ^B	2.12 ^A	121.21 ^A	0.22 ^A	15.75 ^A
	700 kg/10a	0.17 ^A	10.66 ^A	0.87 ^A	59.60 ^A	1.99 ^A	111.46 ^A	0.25 ^A	17.71 ^A
H ₃ PO ₄	0 kg P/10a	0.15	2.32 ^C	0.57 ^b	8.51 ^C	2.14 ^A	34.96 ^B	0.17 ^B	2.23 ^C
	5 kg P/10a	0.15	8.13 ^B	0.66 ^a	35.72 ^B	1.56 ^B	82.63 ^A	0.23 ^A	11.56 ^B
	15 kg P/10a	0.14	12.29 ^A	0.64 ^{ab}	60.39 ^A	1.27 ^B	115.55 ^A	0.23 ^A	19.76 ^A
ANOVA									
	CaCO ₃	** ²	**	**	**	**	**	**	**
	H ₃ PO ₄	ns	**	*	**	**	**	**	**
	CaCO ₃ × H ₃ PO ₄	**	**	**	**	*	**	*	**

Data with different letters within each column indicate significantly difference at P<0.01.

**, P<0.01; *, P<0.05; ns, not significant.

比較して 5 と 15 kgP/10a 区の Ca と Mg の含有率は有意に高く (各々 $P < 0.05$, $P < 0.01$), P, Ca, K および Mg の各含有量は有意に高くなり ($P < 0.01$), P, Ca および Mg の各含有量は, 1.5 kg P/a 区で最も高くなった。

Bd の茎葉中無機養分含有率および含有量に及ぼす炭酸カルシウム施用とリン酸施用の影響を表 3-5 に示した。Bd の Ca の含有率, 含有量および Mg 含有率は炭酸カルシウム施用により増加し, P 含有量は低下した。リン酸の施用により, Ca および Mg の含有率と含有量が有意に増加した ($P < 0.01$) が, K 含有率は有意に低下し ($P < 0.05$), P 含有率に有意差は認められなかった。

Tr の茎葉中無機養分含有率および含有量に及ぼす炭酸カルシウムとリン酸施用の影響を表 3-6 に示した。Tr の P と K の含有率は, 炭酸カルシウム施用に伴い低下した ($P < 0.01$) が, Ca と Mg の含有率および含有量は有意に増加した ($P < 0.01$)。リン酸施用に伴い, P の含有率と含有量は増加した ($P < 0.01$) が, Ca, K および Mg の含有率は低下し ($P < 0.01$), Ca, K および Mg の含有量は, 5 kgP/10a 区で最も高くなった ($P < 0.01$)。

(6) 土壌中の AI 飽和度と根乾物重の関係

土壌中の AI 飽和度と根乾物重との関係を図 3-2 に示した。Sg の根乾物重は土壌中の AI 飽和度が 20%に増加するまでは著しく低下し, その後指数関数的に低下する傾向を示した。Bd と Tr における根乾物重と AI 飽和度との間には一定の傾向は認められな

Table 3-5. Effect of calcium carbonate and phosphate fertilizer application on mineral content in the foliage of Signalgrass (Bd).

Treatment		P		Ca		K		Mg	
Fertilizer	Application level	(%)	(mg/pot)	(%)	(mg/pot)	(%)	(mg/pot)	(%)	(mg/pot)
CaCO ₃	0 kg/10a	0.23	10.49 ^A	0.11 ^C	5.03 ^B	2.74	121.36	0.30 ^c	14.20
	350 kg/10a	0.23	8.78 ^{AB}	0.34 ^B	14.67 ^A	2.77	113.20	0.32 ^b	14.32
	700 kg/10a	0.22	8.11 ^B	0.51 ^A	19.39 ^A	2.62	90.80	0.36 ^a	14.41
H ₃ PO ₄	0 kg P/10a	0.22	3.91 ^C	0.30 ^B	4.82 ^B	3.02 ^a	55.50 ^b	0.26 ^B	4.73 ^B
	5 kg P/10a	0.22	9.88 ^B	0.32 ^{AB}	14.10 ^A	2.69 ^b	129.47 ^a	0.34 ^A	16.19 ^A
	15 kg P/10a	0.23	13.59 ^A	0.34 ^A	20.18 ^A	2.42 ^b	140.39 ^a	0.38 ^A	22.01 ^A
ANOVA									
	CaCO ₃	ns	*	**	**	ns	ns	**	ns
	H ₃ PO ₄	ns	**	**	**	**	**	**	**
	CaCO ₃ × H ₃ PO ₄	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns

Large and small letters in the same column indicate respective a significant difference at P<0.01 and P<0.05.

**, P<0.01; *, P<0.05; ns, not significant.

Table 3-6. Effect of calcium carbonate and phosphate fertilizer application on mineral content in the foliage of Transvala (Tr).

Treatment		P		Ca		K		Mg	
Fertilizer	Application level	(%)	(mg/pot)	(%)	(mg/pot)	(%)	(mg/pot)	(%)	(mg/pot)
CaCO ₃	0 kg/10a	0.24 ^A	15.48	0.10 ^C	6.37 ^C	1.50 ^A	95.75 ^A	0.11 ^C	6.83 ^B
	350 kg/10a	0.22 ^A	16.70	0.31 ^B	23.02 ^B	1.46 ^{AB}	108.87 ^A	0.12 ^B	9.36 ^A
	700 kg/10a	0.19 ^B	13.77	0.52 ^A	36.59 ^A	1.27 ^B	87.26 ^B	0.15 ^A	10.85 ^A
H ₃ PO ₄	0 kg P/10a	0.18 ^B	9.38 ^B	0.34 ^A	16.11 ^B	1.56 ^A	79.54 ^B	0.13 ^A	6.76 ^B
	5 kg P/10a	0.20 ^B	17.71 ^A	0.29 ^B	27.96 ^A	1.33 ^B	120.28 ^A	0.13 ^B	11.60 ^A
	15 kg P/10a	0.27 ^A	18.86 ^A	0.28 ^B	21.91 ^{AB}	1.34 ^B	92.06 ^B	0.12 ^B	8.67 ^B
ANOVA									
	CaCO ₃	**	ns	**	**	**	**	**	**
	H ₃ PO ₄	**	**	**	**	**	**	*	**
	CaCO ₃ × H ₃ PO ₄	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns

Large and small letters in the same column indicate respective a significant difference at P<0.01 and P<0.05.

**, P<0.01; *, P<0.05; ns, not significant.

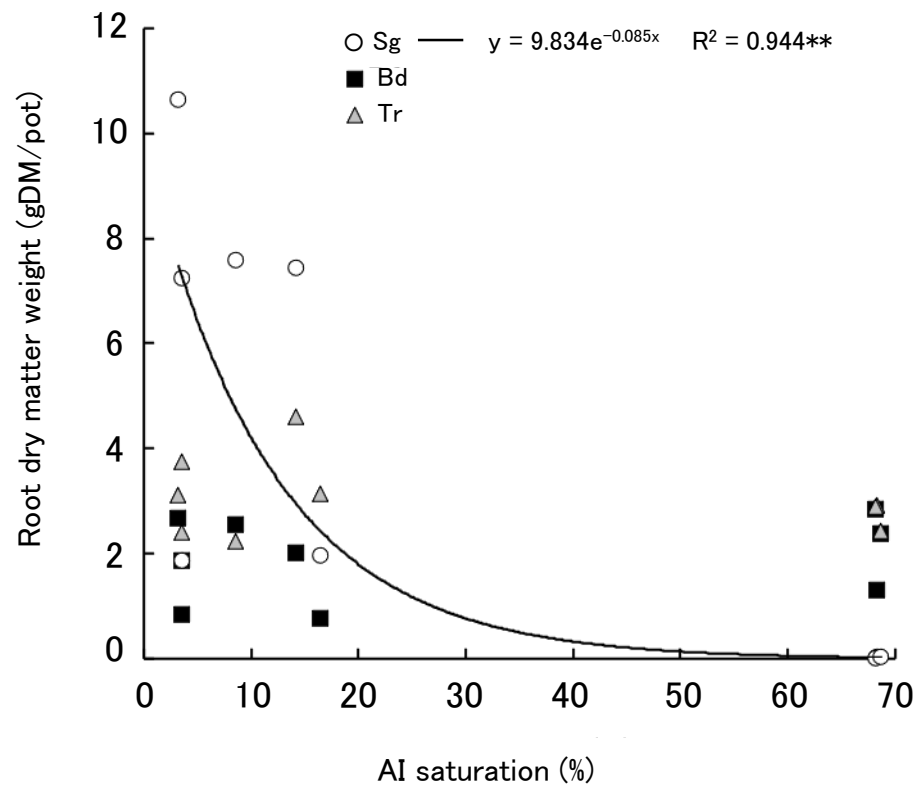


Figure 3-2. Relationship between Al saturation and root dry matter weight.

** : $P < 0.01$

かった。

(7) 土壌中の可給態リン酸含量と茎葉乾物重との関係

試験期間中の土壌中可給態リン酸含量の平均値と各草種の茎葉乾物重との関係を図 3-3 に示した。Sg の茎葉乾物重は，土壌中の可給態リン酸含量の増加に伴い，対数関数的に増加する傾向を示した。Bd の茎葉部乾物重は，土壌中の可給態リン酸含量が約 $4.1 \text{ mgP}_2\text{O}_5/100\text{g}$ 乾土までは増加し，それ以上の含量ではやや低下する傾向となった。Tr の茎葉部乾物重は，土壌中の可給態リン酸含量が約 $3.7 \text{ mgP}_2\text{O}_5/100\text{g}$ 乾土までは増加したが，それ以上の含量では，低下する傾向を示した。

3-4. 考察

(1) 国頭マージ土壌における炭酸カルシウムおよびリン酸の施用が土壌の化学性に及ぼす影響

本地域で栽培される牧草種の好適 pH に関する知見は少ない（北村 1986 a）が，暖地型牧草を栽培する場合の土壌 pH の矯正目標値は pH 5.5－6.5 の範囲（沖縄県農業試験場 1979）とするのが一般的である。本試験では，土壌 pH を 5.0－6.2 に矯正したため， $350\text{--}700 \text{ kg}/10\text{a}$ の炭酸カルシウム施用量は，概ね適正な炭酸カルシウムの施用量であったと考えられる。

土壌 pH と土壌中 Al 含量は一般に関係性が高い（Whiteman 1980；三枝 1991）が，本地域の国頭マージ土壌の pH と Al 含量

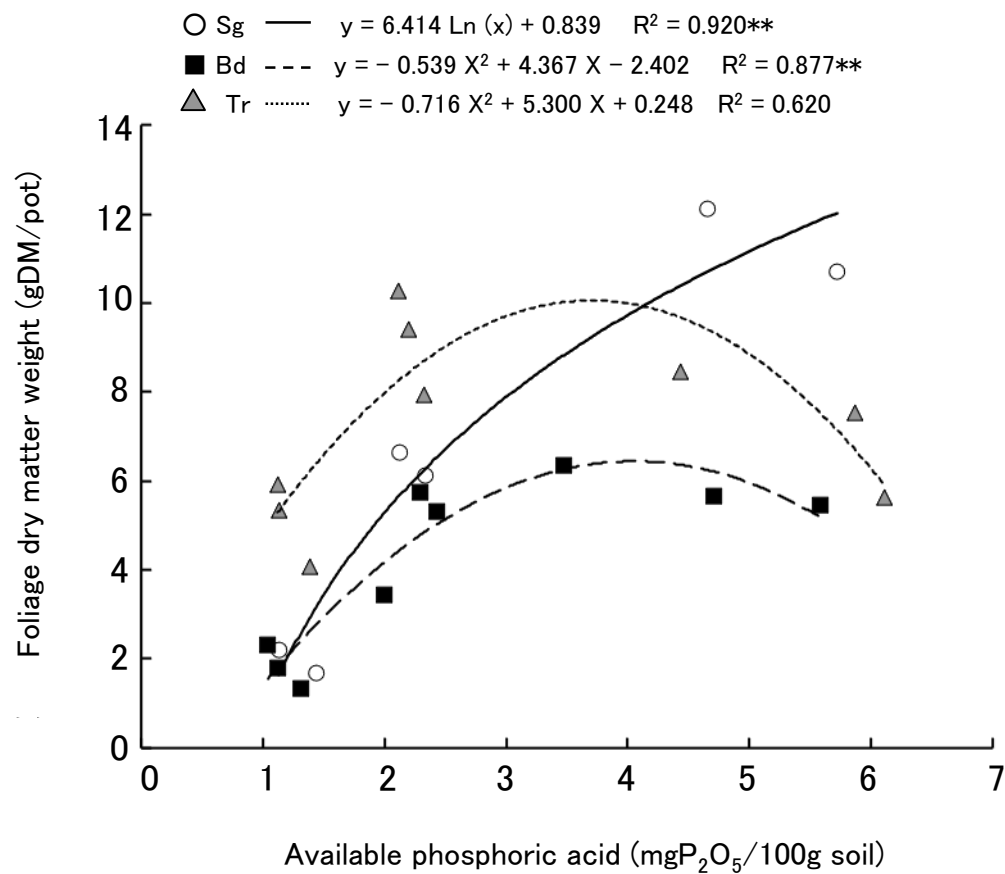


Figure 3-3. Relationship between available phosphoric acid in the soil and foliage dry matter weight.

******: $P < 0.01$

との関係に関する知見は極めて少ない。北村と尾形（1985）あるいは久場ら（1989）は，国頭マージ土壌で，炭酸カルシウム施用による土壌 pH 矯正によって，土壌中の交換性 Al 含量が減少することを報告し，本試験でも同様の結果となった。すなわち，炭酸カルシウム施用量の増加に伴い，土壌 pH は上昇する一方で交換性 Al 含量は低下し，pH 6 では 0.5 me/100g 乾土以下の含量となり，Al 飽和度は 5%以下に低下した。

本試験で施用したリンは 5－15 kgP/10a（ P_2O_5 としては 12－34 kg/10a）であり，推奨施用量（10 kg P_2O_5 /10a）（沖縄県畜産試験場 1999）をほぼ充たしていた。しかし一方で，土壌中の可給態リン酸含量は，最もリン酸施用量が多い 15 kgP/10a の場合においても 5.7－6.6 mg P_2O_5 /100g 乾土であった。

炭酸カルシウムの施用が，土壌中の可給態リン酸含量に与える影響は数多く報告されているが，土壌中の可給態リン酸含量を低下あるいは増加させる（Haynes 1982；田中 1984；北村と尾形 1985；下野 1990）という結果から，この反応は統一的にとらえられていないように思われる。炭酸カルシウムの施用に伴う，土壌中の可給態リン酸含量に対する一定の傾向は本試験では認められず，リン酸施用量の増加においてのみ土壌中の可給態リン酸含量の増加が認められた。Haynes（1982）は炭酸カルシウムの過剰施用が，土壌中の可給態リン酸を低下させると指摘しているが，本試験の炭酸カルシウムの施用量（350－700 kg/10a）では，土壌中の可給態リン酸含量の低下を招かなかったことから，炭酸カル

シウムの施用量は適正量であったと考えられる。

(2)各草種の生育に及ぼす炭酸カルシウム施用に伴う土壌 pH

矯正の効果

炭酸カルシウムの施用に対する成長量の草種間差異は酸性土壌への適応性により生じると考えられる。すなわち、炭酸カルシウム施用により、根の乾物重を著しく増加させた Sg は、pH4.5 程度の国頭マージ土壌には適応性を示さず、炭酸カルシウム無施用下では、酸性土壌のストレスを強く受けたと考えられる。一般的に *Sorghum* 属は、酸性土壌や酸性土壌で増加する Al イオン含量に対する耐性が低く（吉田 2002；Moser ら 2004）、生育が阻害されることが報告されている（Walker ら 1975；庄子ら 1986；久場ら 1989）。しかし、*Sorghum* 属は、高 Al イオン含量の強酸性土壌を除けば土壌適応性は広く、pH5.0－8.5 での栽培が可能であり（吉田 2002）、乾燥適応性や湛水耐性も有していることから、熱帯の多雨地域や半乾燥地帯でも栽培可能な有用草種である（松木ら 2009）。したがって、*Sorghum* 属草種の耐酸性あるいは Al イオン耐性を目的とした品種の選抜も試みられ（吉田 2002）、Al イオンに耐性を有する品種も育成されている（Flores ら 1988；Tan ら 1992）。本試験で用いた Sg（リッチスーダン）は、これまで、耐酸性あるいは Al イオン耐性について検討されていないが、本試験結果によると、Sg は両耐性を有していないことが明らかとなった。したがって、本県内の pH 約 4.5 の国頭マージ土壌で Sg

栽培を行う場合には，炭酸カルシウム等の土壌改良資材により，土壌 pH を 5.0－6.2 に矯正する必要があると考えられた。

一方，Bd と Tr では，炭酸カルシウム無施用区と施用区との間に根の乾物重の有意差が認められず，両草種は Sg よりも国頭マーグ土壌に対する適応性を有すると示唆された。様々な要因が関与して根の生育が阻害されるが，酸性土壌における最も重要な要因として，Al イオンの酸性条件下での溶解度の上昇が重要であると考えられる（田中 1984）。交換性 Al 含量や Al 飽和度は，土壌溶液中の Al 含量と深く関与しており，Al 飽和度が 60%以上の酸性土壌においては，ほとんどの植物の生育が阻害されることが報告されている（Adams 1984）。

本試験で用いた国頭マーグ土壌は，炭酸カルシウム無施用時には Al 飽和度が約 68%で，前述の植物生育の阻害をもたらす範囲にある。炭酸カルシウムを 700 kg/10a 施用することによって，土壌の Al 飽和度を約 3%程度にまで低下させることが可能であったが，この処理に伴う Bd と Tr の根乾物重には顕著な増加は認められなかった。これらの結果は，Bd と Tr は 68%の高 Al 飽和度下でも，根の生育阻害を受けていないことを示唆する。Bd は耐酸性や耐 Al イオン耐性を有しているとする報告（CIAT 1981；Adams 1984；Ishikawa ら 2000）が多く認められるが，*Digitaria* 属の栽培品種は，*Brachiaria* 属草種が適応する肥沃度が低い酸性土壌を好むとする報告のみが認められる（Moser ら 2004）。本試験の結果から，Tr も耐酸性，Al イオン耐性を有する可能性が示

唆された。

一般に，酸性土壌ではリン酸の他に Ca, K, Mg などの無機養分が欠乏しやすく，これらの養分の効率的獲得のために，植物は根を十分に伸長させなければならない。炭酸カルシウムの施用により，根乾物重が著しく増加した Sg では，植物体中の P 含有量および Ca, K, Mg の含有率と含有量も増加しており，根の生育が無機養分の吸収量を左右することを裏付けた。一方，炭酸カルシウム施用が Sg と異なり，根乾物重の顕著な変化を示さなかった Bd と Tr では，養分吸収において Sg と異なる様相を示した。Bd は炭酸カルシウム施用に伴い，Ca の含有率と含有量および Mg 含有率が増加したが，P 含有量は低下する傾向を示した。Mg 含有率は，炭酸カルシウム施用に伴う茎葉重の低下により見かけ上増加したと考えられる。それに対して，炭酸カルシウム施用により Ca の含有量と含有率は高くなったため，炭酸カルシウム施用が Ca 吸収量の増加をもたらしたと考えられる。

Tr では炭酸カルシウム施用に伴い P と K の含有率が低下する一方で，Ca と Mg の含有率と含有量は増加した。Tr は Bd と異なり，炭酸カルシウム施用により，茎葉と根の乾物重の増加とともに Ca および Mg の含有率と含有量の増加をもたらした。このことは，土壌溶液中 Al イオン濃度の低下が，根の伸長阻害を解除し（宝示戸と能代 1990），Ca と Mg の吸収を促進した結果によるものと考えられた。実岡ら（1986）は，数種暖地型飼料作物は高 Al 条件下において P, Ca および Mg の吸収が阻害され，それ

によって特に Ca と Mg の含有率が低下することを明らかにしている。さらに、高 Al 条件下において、Ca と Mg の吸収量を高く維持する草種ほど Al イオン耐性が高い草種であると示唆している。また、木村と倉島（1983）は、炭酸カルシウムの施用が Mg 吸収を抑制する交換性 Al を減少させ、Mg 吸収が促進されると報告している。炭酸カルシウム施用に伴い、Mg と Ca の吸収量が増加した Tr は炭酸カルシウム無施用の pH4.5 の土壌における Al 飽和度 68% の条件下では、根乾物重の著しい低下は認められないものの、土壌中 Al イオンによりわずかな生育阻害を受けていた可能性が示唆された。一方、Bd の土壌中 Al イオンによる吸収阻害は、炭酸カルシウム無施用時でも、認められないと考えられる。以上のことから、一般的に知られている草地の経年的な酸性化（宝示戸ら 1983；大城ら 1986）を考慮すると、Tr 草地の造成時には炭酸カルシウムを 35 kg/a 程度施用し、土壌 pH を 5 程度に高め、Al 飽和度を低下させることが、Tr 草地の長期利用の観点からは望ましいと考えられた。これに対して、Bd 草地においては、pH4.5 の国頭マージ土壌でも、炭酸カルシウム等による土壌 pH 矯正を必要とせず、長期利用を行える可能性が示唆された。

(3)各草種の生育に及ぼすリン酸施用の効果

リン酸施用が生育に及ぼす影響には、草種間差異が認められた。リン酸施用量の増加に伴い、Sg の茎葉と根の乾物重は増加した。さらに、リン酸施用に伴い Ca と Mg の含有率が増加する傾向を

示し、P、Ca、K および Mg などの無機養分の含有量の増加も認められた。リン酸施用量を 0 から 15 kgP/10a に増加すると、Sg の茎葉の乾物重がほぼ直線的に増加したことから、15 kgP/10a 以上の施用量においても、茎葉の乾物重の増加が期待される。

Bd では、0 から 5 kgP/10a 区までのリン酸施用量の増加に伴い、茎葉と根の乾物重の顕著な増加が認められたが、リン酸施用 5 kgP/10a と 15 kgP/10a 区の間には有意差は認められなかった。また、茎葉中の Ca と Mg の含有率と含有量は 5 kgP/10a まで増加したが、5 kgP/10a 区と 15 kgP/10a 区の値には有意差が認められなかったことから、Bd は 5 kgP/10a 程度のリン酸施用でも良好な初期生育が可能であると考えられた。コロンビアの Carimagua で行われたリン酸施用試験 (CIAT 1981) でも、Bd の乾物生産量はリン酸施用量が 4.4 kgP/10a で横ばいに転じ、本試験とほぼ同様の傾向を示している。

Tr では、リン酸施用に伴う根の乾物重の増加は認められなかったが、茎葉では、5 kgP/10a 区までは増加が認められ、15 kgP/10a 区では低下したことから、Tr においても 5 kgP/10a の施用量が生育を促進する適正量と考えられる。リン酸施用量の増加に伴い、茎葉中の P の含有量と含有率は増加する傾向を示したにも関わらず、Mg、K および Ca の各含有量は 15 kgP/10a 区では 5 kgP/10a 区よりも低下していたことも上述のことを裏付けている。

国頭マージ土壤の草地では、これまで用いられてきた可給態リン酸含量の基準値として、10 mgP₂O₅/100g 乾土以上とすること

が望ましいと考えられている（沖縄県農業試験場 1979）。原田（1967）は、土壌中の可給態リン酸含量が $3-10 \text{ mgP}_2\text{O}_5/100\text{g}$ 乾土の範囲の土壌では、寒地型牧草は施用されたリン酸に依存して初期生育を達成するが、 $10-20 \text{ mgP}_2\text{O}_5/100\text{g}$ 乾土程度になると、ほとんど土壌中に存在するリン酸で初期生育が達成されると報告している。暖地型牧草と寒地型牧草は栄養吸収特性が異なり、少しでも土壌中の利用可能なリン酸が増加した場合、暖地型牧草は直接的に乾物生産量の増加につながるという報告（原田ら 1998）と、リン酸施用量が少ない条件下でも、暖地型牧草は寒地型牧草よりも良好な生育を示すという報告（Wilson と Haydock 1971）がある。本試験の供試草種の生育と土壌中の可給態リン酸含量の関係について検証したところ、暖地型牧草である Bd と Tr は土壌中の可給態リン酸含量が、 $10 \text{ mgP}_2\text{O}_5/100\text{g}$ 乾土以下の状態であっても、十分に生育する可能性が示された。適切な土壌中のリン酸含量を、 $10 \text{ mgP}_2\text{O}_5/100\text{g}$ 乾土以上とする理由は、草地の造成後に牧草が十分定着できる環境条件を設定するためである。しかし、酸性土壌では施用されたリン酸が土壌中で固定されて難溶解性リン酸となりやすいこと（田中 1984）などを考慮すると、基肥としては、生育に必要最低限量のリン酸を施用し、利用後（採草後あるいは放牧後）の施肥によってリン酸を供給することが効率的なリン酸施用の観点からは望ましいと考えられる。以上のことから、国頭マージ土壌で草地造成時に基肥としてリン酸を施用する場合、Tr 草地で $2.1 \text{ mgP}_2\text{O}_5/100\text{g}$ 乾土以上になる

ようにリン酸資材を施用するだけでも，それらの草種の定着には十分有効であると考えられる。

(4)炭酸カルシウムとリン酸の同時施用の効果

pH 4.5 の国頭マージ酸性土壌では，Al イオン等による根の生育阻害をもたらすと考えられ，炭酸カルシウム無施用区においては，リン酸施用量を高めても，Sg の茎葉および根の乾物重増加は認められない。そのため，炭酸カルシウムを 350 または 700 kg/10a 施用し，土壌 pH を 5.0－6.2 程度に矯正した後に，リン酸を 1.5 kg P/a 施用することで，Sg に対するリン酸施用の高い効果が認められた。すなわち，炭酸カルシウムによる国頭マージ土壌の pH 矯正は，土壌中の交換性 Al イオンを低下させるため，酸性土壌において著しく根の生育阻害を受ける Sg のような草種には極めて効果的であることが明らかとなった。一方，酸性土壌でも十分生育できるような Bd あるいは Tr は，Sg で示されるような効果は認められないことが明らかとなった。しかし，Tr では，養分吸収を増加させる効果も認められたことから，pH 4.5 程度の強酸性国頭マージ土壌では，炭酸カルシウム施用により土壌 pH を 5.0－5.1 程度に矯正することが望ましいと考えられた。リン酸施用は，いずれの草種についても生育を促進させる効果が認められ，Bd および Tr は 5 kgP/10a (P_2O_5 として 12 kg/10a)，Sg には 15 kgP/10a (P_2O_5 として 34 kg/10a) 程度の施用量が適当であることが示された。しかし，Sg では炭酸カルシウム無施用区にお

いて、リン酸施用の効果が認められなかったことから、炭酸カルシウム施用により土壌 pH を 5.0－6.2 に矯正した後、リン酸を施用することがより有効である。また、Bd および Tr の生育に関しては、土壌中のリン酸含有量が 10 mgP₂O₅/100g 乾土以上に達していない場合でも、十分な生育が可能であるということが示唆された。

3-5. 摘要

酸性赤黄色土壌の国頭マージ土壌における土壌 pH の矯正と可給態リン酸含量との関係から炭酸カルシウムおよびリン酸の至適施用量を明らかにするために、スーダングラス（品種 リッチスーダン）、シグナルグラス（品種 Basilisk）およびトランスバーラを用いたポット栽培試験を行った。炭酸カルシウムの施用に伴い、土壌中の交換性アルミニウム含量は著しく低下した。炭酸カルシウムによる pH 矯正は、スーダングラスの生育に対しては極めて効果的であるが、シグナルグラスとトランスバーラに対しては、有意な効果を及ぼさないことが明らかとなった。また、基肥としてのリン酸の至適施用量は、スーダングラスでは pH 矯正を行い、可給態リン酸含量を増加させることで生育を促進させるが、トランスバーラとシグナルグラスでは pH 矯正を行わずとも、それぞれ 2.1 および 2.3 mgP₂O₅/100g 乾土以上であれば良好な生育がもたらされた。

第 4 章

暖地型イネ科牧草の集約的輪換放牧草地における施肥由来

窒素の利用効率

4-1. はじめに

沖縄地域の肉用牛生産では，高温多湿な気候を生かした暖地型イネ科牧草種を用いた自給粗飼料の生産が盛んである。年間を通じた集約的な周年利用のためには牧草地への適切な施肥管理が必要であり，沖縄地域における追肥時の窒素施肥量は 10－15 kgN/10a の範囲（沖縄県畜産試験場 1999）である。

暖地型イネ科牧草のジャイアントスターグラス（*Cynodon nlemfuensis* Vandyke, 以下 Gs）とトランスバーラ（*Digitaria eriantha* Steud. cv. Transvala, 以下 Tr）は沖縄地域の放牧地あるいは採草地の主要な草種として利用されている（沖縄県農林水産部畜産課 2019）。両草種の生育特性は，夏季の日乾物生産速度が優れ（水町ら 2011），10 kgN/10a の窒素施肥条件下で高い乾物収量が得られる（知念ら 2001）。放牧時には 1,340 CD の牧養力を示しており（嘉陽と与古田 1999），放牧利用も可能である。このことから，沖縄地域では放牧および採草のいずれでも利用可能な草種として広く栽培されている。しかしながら，これらの研究は，家畜生産の観点から，採草あるいは放牧利用時の乾物収量や栄養収量を高める草地管理について検討されたものであり，化

成肥料を投入する集約的な放牧管理時の肥料効率，適切な肥培管理等については検討されていない。

我が国の暖地型イネ科牧草における ^{15}N 同位体窒素を用いたトレーサー試験では，南九州のバヒアグラス放牧草地で黒毛和種繁殖牛の排泄尿由来窒素の動態を 1 年間追跡調査し，28－35%が植物体に，9－12%が土壌中に蓄積され，排尿を通して土壌に還元された窒素の 54－60%が土壌－植物系の圏外に損失していることが明らかにされている(杉本ら 1994)。沖縄地域では，川本(2002)の ^{15}N トレーサーを用いた黒毛和種繁殖雌牛の放牧試験において，Gs 放牧草地を弱放牧(4.9 頭/ha)から強放牧(6.6 頭/ha)に高めることで ^{15}N 回収量が高まったと報告しているが，追肥する化成肥料の肥料効率には言及していない。

そこで，本研究では沖縄地域の集約的な黒毛和種繁殖牛の輪換放牧草地に必要な退牧後の施肥管理に着目し， ^{15}N 同位体窒素を用いたトレーサー試験によって施肥由来窒素の利用効率について検討した。

4-2. 材料と方法

試験は沖縄県大宜味村(北緯 26.7° ，東経 128.1°)にある造成後 2 年が経過した Gs と Tr の放牧草地において 2003 年 6 月 24 日から 12 月 23 日までの期間に実施した(写真 4)。調査対象の放牧草地は，1 牧区当たりの面積が 0.15 ha であり，Gs 草地牧区，Tr 草地 2 牧区および Gs と Tr が混生している草地 1 牧区の計 5

牧区に区分された輪換放牧草地である。放牧管理は、黒毛和種繁殖雌牛 4－6 頭（体重 467.0 ± 17.4 kg）とその分娩子牛を 1 牧区当たり 5－10 日間（平均 8 日間）入牧させ、休牧期間が 28－45 日（平均 40 日）の範囲内で各牧区を順次移動させ、退牧後には化成肥料を追肥する集約的な輪換放牧が周年行われている。なお、通常の放牧管理で追肥する施肥窒素の要素量は沖縄地域の放牧草地の施肥基準（沖縄県畜産試験場 1999）に準じた $5 \text{ kgN}/10\text{a}$ であり、本試験期間中、合計 4 回の追肥と放牧が実施された。

本試験では、 ^{15}N 同位体窒素（ ^{15}N ）を用いたトレーサー試験によって輪換放牧草地の施肥窒素の利用効率を測定するため、Gs と Tr の両草地内に ^{15}N 混合肥料の施用区をそれぞれ 4 箇所設置した。すなわち、Gs と Tr の両草地に内径 30 cm（面積： 0.07065 m^2 ）、高さ 30 cm の塩化ビニル製円筒パイプ（塩ビパイプ）を地際から 30 cm の深さまで埋め込んだ（写真 5）。なお、 ^{15}N 混合肥料の施用区は放牧牛による植物体の採食を防止するため、塩ビパイプを中心に周囲 4 m^2 は簡易電気牧柵で囲んだ。

トレーサー試験で施用する ^{15}N 混合肥料は、通常の施肥管理で使用している化成肥料（窒素 18%，リン酸 10%，カリウム 14% 含有）を用いて調製した。化成肥料の窒素成分の構成はアンモニア態窒素が 11%，尿素が 9% であるため、それぞれの窒素成分の 10% 分を硫酸アンモニウムの ^{15}N （50.4 atom%）と尿素的 ^{15}N （49.9 atom%）で代替し、 ^{15}N 混合肥料を調製した。調製した ^{15}N 混合肥料の全窒素含量、 $^{15}\text{N excess}\%$ および $^{15}\text{N excess}$ 量は、それぞ

れ， 19.1%， 5.7%および 211.0 mg¹⁵N/m²となった。

Gs と Tr の両草地に設置した塩ビパイプ内への化成肥料の施用方法は，¹⁵N 混合肥料と ¹⁵N を含まない化成肥料を放牧牛の退牧時に合わせて交互に施用した。まず，放牧牛の退牧後，塩ビパイプ内の牧草を地際より約 5 cm の高さで刈取った後に塩ビパイプ内に ¹⁵N 混合肥料を施用した。次に，約 40 日の休牧期間を得て放牧 1 回目の退牧後に ¹⁵N を含まない化成肥料を追肥した。すなわち，試験期間中に実施した 4 回の放牧のうち，放牧 1 回目と 3 回目は ¹⁵N 混合肥料の追肥によって牧草を再生させ，放牧 2 回目と 4 回目は ¹⁵N を含まない化成肥料の追肥によって牧草を再生させた。なお，塩ビパイプ内に施用した施肥窒素の要素量は，川本（2002）の Gs 放牧草地における ¹⁵N トレーサー試験の方法に従い，いずれも 30 kgN/10a とした。

試験期間中における Gs と Tr の両草地の塩ビパイプ内の植物体の試料採取は，退牧後に塩ビパイプ内で再生した採食部位を地際より約 5 cm の高さで刈取りを行った。試験期間中，放牧回次に合わせて合計 4 回の採食部位の刈取り調査を実施した。放牧 4 回目の最終刈取り日には，塩ビパイプ内の刈株，根および土壌のすべてを採取した。30 cm までの土壌を，Gs，Tr 両草種の根圏土壌と見なした。繁殖牛群の放牧により Gs，Tr の両草地では 5 cm 高の草高まで被食されることを確認しているので，5 cm 高の刈取り部位を放牧牛による採食部位と見なした。採食部位，刈株および根の植物体の試料は生重量を測定後，70℃で 48 時間通風乾燥

させ、1 mm の篩を通るように粉碎した。採取土壌は常温で乾燥させ 1 mm の篩にかけた試料を分析に用いた。 ^{15}N 混合肥料、採食部位、刈株、根および根圏土壌の全窒素含量と $^{15}\text{N excess\%}$ の分析は昭光通商株式会社杉戸研究所（埼玉）に依頼した。得られた分析値から各試料の ^{15}N 回収率を以下の式を用いて算出した。ただし、 $^{15}\text{N excess\%}$ は自然界に存在する $^{15}\text{N excess\%}$ （平均 0.371%）を差し引いた値を用いた。

^{15}N 回収率（%）＝試料中の $^{15}\text{N excess}$ 量 / 各放牧回次までの土壌中への ^{15}N 投入量 $\times 100$

$^{15}\text{N excess}$ 量＝試料の乾物重量 \times 全窒素含有量 \times （ $^{15}\text{N excess\%}$ －自然界の $^{15}\text{N excess\%}$ ）

得られたデータは、エクセル統計 2012 for Windows（株式会社社会情報サービス）を用い、t 検定によって Gs 草地と Tr 草地を比較し、5%水準で有意差の検定を行った。

4-3. 結果

試験期間中における日平均気温と積算降水量の推移を、4 回の放牧期間および ^{15}N 混合肥料と ^{15}N を含まない化成肥料の施用日とともに、図 4-1 に示した。試験期間中の平均気温は 25.8℃（最高気温 30.7℃，最低気温 14.6℃），積算降水量は 896.5 mm となり、7 月から 9 月上旬までは 30℃を超える日があったが 10 月中

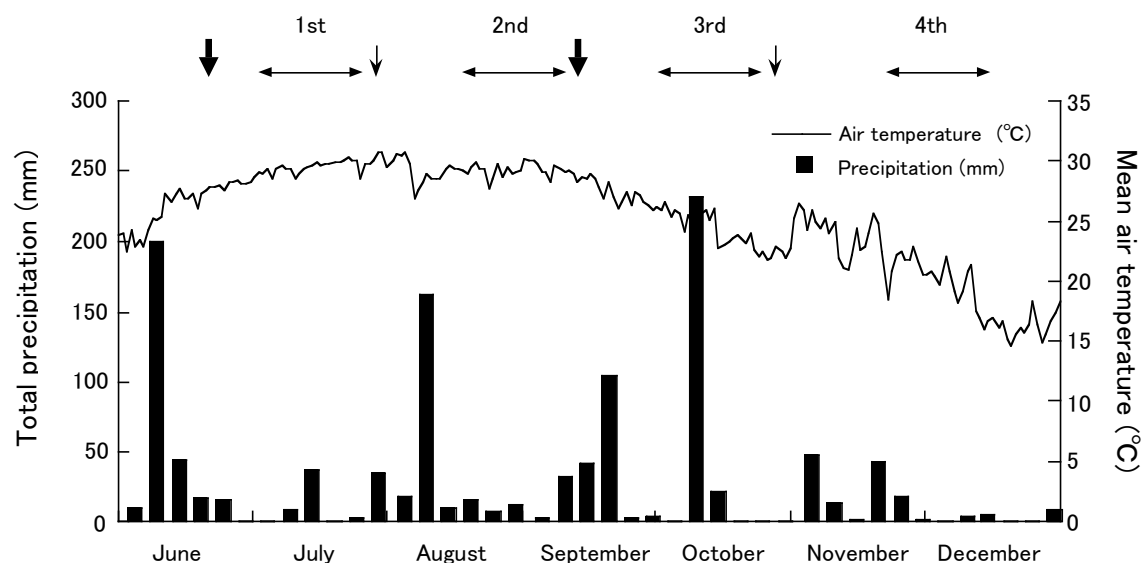


Figure. 4-1. Meteorological conditions of 5-day total of precipitation and daily mean air temperature during the experimental periods with the 1st to 4th grazing cycles and the time of ^{15}N -labelled (\blacktriangledown) and non-labelled (\triangledown) fertilizer application. The data were collected from Meteorology Branch Office, Kunigami village (8 km from the present experiment location) in Japan Meteorological Agency (2003) .

旬から徐々に気温が低下し、12月の放牧4回目には20℃を下回る日が12日あった。試験期間中の夏季から冬季にかけて平年通りの気象環境であった。

Gs草地とTr草地における採食部位および非採食部位（刈株、根）の乾物収量を表4-1に示した。採食部位の乾物収量は、Gs草地では2回目（8-9月）をピークに3回目（10月）から減少し、Tr草地では2回目以降から放牧回次が進むにつれて低下する傾向を示し、両草地間で比較すると放牧1回目（7月）を除いてTr草地よりもGs草地で高く推移し、3回目では有意に高くなった（ $P < 0.05$ ）。非採食部位のうち、根の乾物収量に草地間差は認められなかったが、刈株および刈株と根を合計した非採食部位の両乾物収量はGs草地がTr草地より有意に多かった（ $P < 0.05$ ）。試験期間中に得られた採食部位と非採食部位を合計した植物体全体の乾物収量は、Gs草地およびTr草地それぞれ2,805.8および2,168.0 g/m²となり、Gs草地で高くなる傾向であった。

Gs草地とTr草地における休牧期間中の個体群成長速度（CGR）と平均気温ならびに積算降水量との関係を図4-2に示した。両草地ともに平均気温とCGRとの間に有意な正の相関は認められた（ $P < 0.05$ ）が、積算降水量とCGRの間には有意な相関は認められなかった。

Gs草地とTr草地における採食部位、非採食部位および根圏土壌中の全窒素含量を表4-2に示した。採食部位の全窒素含量は放牧3回目においてGs草地よりもTr草地で有意に高くなった（ P

Table 4-1. Dry matter yield of herbage available to be grazed across the 1st to the 4th grazing cycles and plant unavailable to be grazed after the 4-times of grazing cycles in Giant stargrass (Gs) and Transvala (Tr) grazing pastures.

Pasture	Herbage available to be grazed (g/m ²)					Parts unavailable to be grazed (g/m ²)			Total dry matter (g/m ²)
	1st-grazing	2nd-grazing	3rd-grazing	4th-grazing	Total of four grazing	Stubble	Root	Total	
Gs	559.1 ± 192.2	678.7 ± 145.8	447.4 ± 123.1 ^a	267.6 ± 131.4	1952.9 ± 558.0	532.7 ± 107.3 ^a	320.2 ± 67.4	852.9 ± 160.6 ^a	2805.8 ± 701.4
Tr	715.0 ± 243.7	423.0 ± 161.5	205.1 ± 64.8 ^b	220.0 ± 96.4	1563.1 ± 549.4	220.0 ± 96.4 ^b	384.9 ± 41.1	604.9 ± 121.2 ^b	2168.0 ± 651.0
Mean ± SD	637.1 ± 110.2	550.8 ± 180.9	326.3 ± 171.3	243.8 ± 33.7	1758.0 ± 275.6	376.3 ± 221.1	352.5 ± 45.7	728.9 ± 175.4	2486.9 ± 451.0

Whole plant indicates the sum of available and unavailable parts of plant.

Data are expressed as mean ± SD of four replications.

Means with different superscripts within each column are significantly different at P<0.05 by t-test.

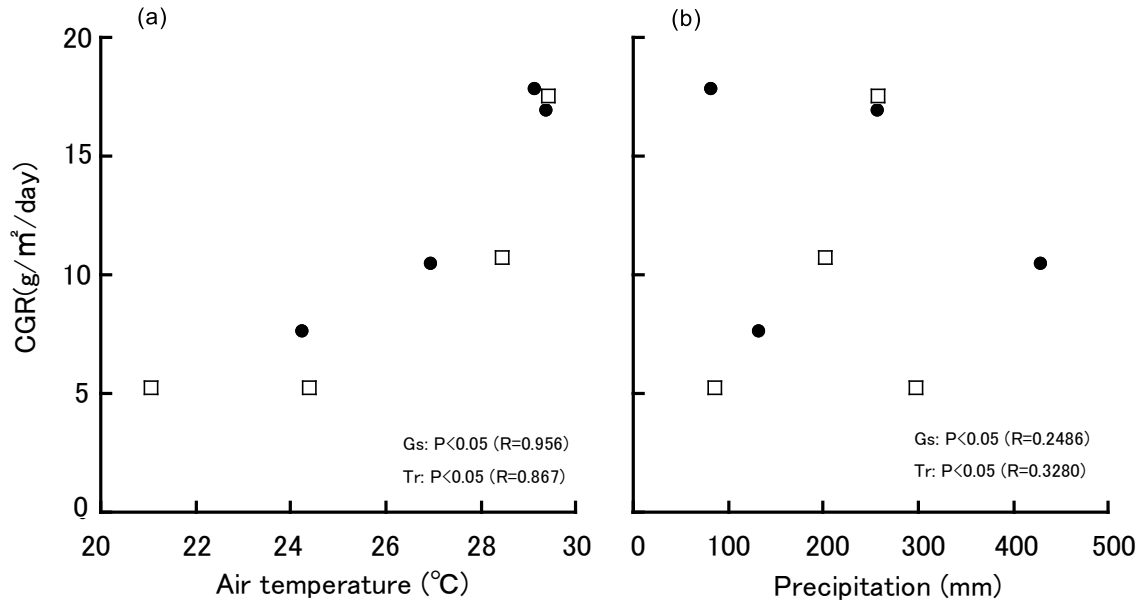


Figure 4-2. Relationships between crop growth rates (CGR) of giant stargrass (Gs) and Transvala (Tr) pastures and air temperature (a) and precipitation (b) during the experimental periods. The closed circle and open square indicate Giant stargrass (Gs) and Transvala (Tr), respectively.

Table 4-2. Total nitrogen (TN) content in herbage available to be grazed at different grazing time, and herbage unavailable to be grazed and rhizosphere soils after 4th grazing time in Giant stargrass (Gs) and Transvala (Tr) pastures.

Pasture	Herbage available to be grazed(TN%)					Plant unavailable to be grazed (TN%)		Rhizosphere soil (TN%)
	1st- grazing	2nd- grazing	3rd- grazing	4th- grazing	Mean of four grazing	Stubble	Root	
Gs	1.08 ± 0.22	1.01 ± 0.20	1.13 ± 0.05 ^b	2.01 ± 0.57	1.31 ± 0.47	0.76 ± 0.04	0.64 ± 0.05 ^b	0.38 ± 0.01
Tr	0.95 ± 0.21	1.09 ± 0.19	1.91 ± 0.33 ^a	1.98 ± 0.38	1.48 ± 0.54	0.77 ± 0.08	0.80 ± 0.07 ^a	0.39 ± 0.01
Mean ± SD	1.02 ± 0.09	1.05 ± 0.06	1.52 ± 0.55	1.99 ± 0.03	1.40 ± 0.12	0.77 ± 0.01	0.72 ± 0.11	0.39 ± 0.01

Rhizosphere soil was within 0-30 cm soil depth.

Data are expressed as mean ± SD of four replications.

Means with different superscripts within each column are significantly different at P<0.05 by t-test.

<0.05) が、試験期間中の採食部位の平均値における両草地間の有意差は認められなかった。非採食部位のうち、根の全窒素含量はGs草地よりもTr草地で有意に高く ($P < 0.05$)、刈株および土壌中の全窒素含量では両草地の差は認められなかった。

Gs草地とTr草地における採食部位、非採食部位および根圏土壌中の ^{15}N 回収率を表4-3に示した。直前の放牧後に ^{15}N 混合肥料を施用していずれも約40日経過した放牧1回目および3回目における採食部位の ^{15}N 回収率は20.2–30.7%の範囲にあり、 ^{15}N 混合肥料の施用後約80日経過した放牧2回目および4回目の ^{15}N 回収率は4.5–8.3%の範囲にあった。試験期間中に生産された採食部位を合計した ^{15}N 回収率に有意な草地間差は認められず、Gs草地およびTr草地それぞれ33.8%および31.8%となった。しかしながら、非採食部位の ^{15}N 回収率には草地間差が認められ、刈株の ^{15}N 回収率はTr草地よりもGs草地で有意に高く ($P < 0.05$)、根の ^{15}N 回収率はGs草地よりもTr草地で有意に高くなった ($P < 0.05$)。また、根圏土壌の ^{15}N 回収率はGs草地よりもTr草地で有意に高く ($P < 0.05$)、植物体と根圏土壌を合計した放牧地全体の ^{15}N 回収率に有意な草地間差は認められず、Gs草地およびTr草地それぞれ48.0%および49.1%となった。

4-4. 考察

塩ビパイプ内で得られた採食部位の乾物収量から沖縄地域の放牧草地の生産性を評価すると、Tr草地よりもGs草地で生産性

Table 4-3. ¹⁵N recovery rate in herbage available to be grazed at different grazing times, and herbage unavailable to be grazed, rhizosphere soils, and plant-soil system after 4th grazing in Giant stargrass (Gs) and Transvala (Tr) pastures.

Pasture	Herbage available to be grazed (%)					Plant unavailable to be grazed (%)		Rhizosphere soil (%)	Total Plant-soil (%)
	1st-grazing	2nd-grazing	3rd-grazing	4th-grazing	Mean of four grazing	Stubble	Root		
Gs	28.0 ± 7.4	6.0 ± 1.2	27.9 ± 7.6	5.7 ± 1.3	33.8 ± 6.9	3.9 ± 0.3 ^a	1.5 ± 0.3 ^b	8.8 ± 1.2 ^b	48.0 ± 7.4
Tr	30.7 ± 4.1	4.5 ± 0.3	20.2 ± 4.8	8.3 ± 2.5	31.8 ± 5.3	2.3 ± 0.5 ^b	2.3 ± 0.3 ^a	12.6 ± 1.2 ^a	49.1 ± 4.7
Mean ± SD	29.4 ± 1.9	5.3 ± 1.1	24.1 ± 5.4	7.0 ± 1.8	32.8 ± 1.4	3.1 ± 1.1	1.9 ± 0.6	10.7 ± 2.7	48.6 ± 0.8

Rhizosphere soil was within 0-30 cm soil depth.

Data are expressed as mean ± SD of four replications.

Means with different superscripts within each column are significantly different at P<0.05 by t-test.

が高く、牧草の再生速度に関与する TNC の貯蔵器官 (May 1960) である刈株の乾物収量が Tr 草地より Gs 草地で高かったことが要因として考えられる。本試験結果は無踏圧条件下で得られた乾物収量の値ではあるが、Gs と Tr の放牧試験 (Adjei ら 1988) や TNC 含量を測定したポット試験 (波平ら 2002) と同様の傾向を示したことから、沖縄地域では Tr 草地よりも Gs 草地において牧草生産性が優れている傾向にあると考えられた。しかしながら、本試験では両草種間の乾物収量に著しい差異がないことから、放牧頭数を制御することなく同等の放牧強度で輪換放牧が実施できた。

このような暖地型牧草地の集約的な輪換放牧条件下において、沖縄地域で使用されている化成肥料の施肥由来窒素の利用効率を、 ^{15}N を用いて検討した。その結果、Gs と Tr の両草地の全窒素含有量には草地間の著しい差異は認められず、採食部位の ^{15}N 回収率についても同様であった。このことから、化成肥料の窒素成分の吸収能には Gs 草地と Tr 草地で違いはないものと判断できた。実際に、退牧後に化成肥料を放牧地に施肥した場合、放牧 1 回目と 3 回目に得られた ^{15}N 回収率から、約 40 日間の休牧期間で 20.2 および 30.7% の施肥由来窒素が採食部位の物質生産に利用されていた。その後、休牧期間中に再生させて収穫した採食部位 (放牧 2 回目と 4 回目) からは約 80 日前に施用した ^{15}N が両草地から 4.5 および 8.3% 回収された。すなわち、次の入牧において採食された部位の再生にも、前回の放牧後に施用した化成肥

料由来窒素の一部が利用されたことになる。

沖縄地域と気候的に類似したアメリカ合衆国のフロリダ州で実施した圃場試験（Impithuksa と Blue 1985）では、採食部位の¹⁵N回収率はGs草地で35%、Tr草地で40%となり、本試験で得られた¹⁵N回収率とほぼ類似していた。このことから、約40日間隔で入退牧と追肥を繰り返す沖縄地域の集約的な放牧地管理においては、家畜生産に関与する採食部位での施肥窒素の利用効率31.8－33.8%であると推定できた。

放牧草地には直接利用されない非採食部位の刈株、根および根圏土壌の¹⁵N回収率をみると、採食部位に比べてその値は低く、施肥由来窒素の約5%程度が株と根に吸収・蓄積され、約10%程度が根圏土壌中に蓄積していた。このことから、採食部位の次の再生のために蓄積・利用される施肥由来窒素は約15%程度といえる。ただし、非採食部位の部位ごとの¹⁵N回収率を比較すると、少なくともGsは刈株において、Trは根において施肥由来窒素の蓄積能の高い草種であることも示唆された。以上のことから、沖縄地域の集約的な輪換放牧地における施肥由来窒素の利用効率はGs草地とTr草地に有意な差異はなく、両草地の平均で、退牧後に施肥した施肥由来窒素の32.7%が採食部位に利用され、5.1%が株と根に吸収・蓄積され、10.7%が根圏土壌中に蓄積することが明らかとなった。また、これらを合計した沖縄地域の植物体－土壌圏内での¹⁵N回収率は48.6%であったが、追肥時期や施肥量を考慮した集約的な放牧地管理によって施肥由来窒素の利用効

率を高める可能性も示唆された。

4-5. 摘要

沖縄地域のジャイアントスターグラス（Gs）とトランスバーラ（Tr）の黒毛和種繁殖牛の輪換放牧地において、 ^{15}N 同位体窒素（ ^{15}N ）を用いて施肥由来窒素の利用効率を測定し、化成肥料投入の集約的放牧管理下の施肥効率について検討した。放牧牛による採食部位の乾物収量，全窒素含量ならびに ^{15}N 回収率に有意な草種間差はなく，採食部位の施肥由来窒素の利用効率は，4 回の輪換放牧管理で Gs 草地が 33.8%，Tr 草地が 31.8%となった。両草地における部位別の ^{15}N 回収率から，退牧後に追肥した施肥由来窒素の 5.1%が根と刈株に吸収・蓄積され，10.7%が根圏土壌中に蓄積され，32.8%が採食部位に吸収・利用されていた。両草地の植物体－根圏土壌圏内における ^{15}N 回収率は 48.6%となり，施肥由来窒素の 51.4%が放牧地圏外に流亡・脱窒していることが示唆された。

第 5 章

沖縄地域の施肥管理された暖地型イネ科牧草の 周年放牧草地における牧養力評価

5-1. はじめに

南西諸島の放牧草地を構成する代表的な草種であるジャイアントスターグラスは、世界的に亜熱帯地域において利用され（Taliaferro ら 2004）、生産性および放牧耐性が高いこと（Adjei ら 1980, 1988）が知られている。沖縄県では 1980 年代に本格的に普及し、現在は八重山地域を中心に肉用繁殖牛の放牧利用が行われている。また、単年度の試験では、ジャイアントスターグラス草地の放牧利用時において、30 日間の休牧期間を設けた輪換放牧を行い、黒毛和種繁殖雌牛で 6–8 頭/ha 年の牧養力が得られ、慣行の連続放牧よりも約 2 倍高い牧養力を示すことが明らかにされている（川本 2001）。

一方、熱帯・亜熱帯地域で有用な草種として広く用いられているディジットグラス（*Digitaria* spp.）（Pitman ら 2004）の 1 品種であるトランスバーラは、1982 年に沖縄県に導入され（沖縄県畜産試験場 1983）、高い生産性（知念ら 2001; 望月ら 2005）や嗜好性が優れること（本村ら 2002）が明らかにされている。これまで世界的にみてもトランスバーラの放牧利用に関する知見は少なかったが（Adjei ら 1988）、沖縄県においては、放牧利用に

についても検討が行われている（嘉陽と与古田 1999; 當間ら 2003, 2005）。しかし，その 1 つである當眞ら（2003）の 2 年間の放牧試験は周年放牧ではなく，1 年目と 2 年目で放牧日数が大きく異なっているということ，および草地の休牧期間が季節によって大きく異なっている。

以上のことから，本地域においてトランスバーラあるいはジャイアントスターグラスの生産性を活かした効果的な放牧方式を確立するためには，さらに多くの知見を得る必要があると考えられる。そこで，本試験では，長期間（2 年間）の退牧後の施肥管理を前提としたトランスバーラ草地とジャイアントスターグラス草地の周年放牧時における草地生産性と牧養力を明らかにするため，川本（2001）が黒毛和種繁殖牛を用いて高牧養力を示した 30 日間の休牧期間を設けた輪換放牧方式に従い，放牧試験を行った。

5-2. 材料および方法

(1) 供試草地

試験は沖縄県大宜味村内において 2001 年に造成されたディジットグラス・トランスバーラ（*Digitaria eriantha* Steud. cv. Transvala, 以下 Tr）草地およびジャイアントスターグラス（*Cynodon nlemfuensis* Vanderyst, 以下 Gs）草地で行った。供試草地を造成した土壌は，強酸性土壌（pH4.6）である国頭マーヅ土壌であった。供試草地の植生の安定化を図るために 2002 年

に数回の掃除刈りを行った後に、簡易電気牧柵により 1 牧区当たりの面積を 15 a とし Tr が優占する草地と Gs が優占する草地をそれぞれ 2 牧区および両草種が混生している予備草地 1 牧区の合計 5 牧区を供試した（写真 4，5）。

(2) 供試牛および草地管理

2003 年 1 月から 2004 年 12 月の期間に、供試牛として黒毛和種繁殖雌牛（体重約 450 kg/頭；最小 3 頭－最大 6 頭）とそれぞれの分娩子牛を用い、5 牧区を順次放牧する輪換放牧を行った。輪換方法は Gs 優占草地 2 牧区、予備草地 1 牧区および Tr 優占草地 2 牧区の順に行った。基本的には、Gs 優占草地 2 牧区および Tr 優占草地 2 牧区での滞牧期間をいずれも 7 日間、休牧期間を 30 日前後としたが、草量に応じて放牧頭数および滞牧期間を調節し、特に 2004 年に休牧期間中の平均気温が 20℃ 以下となった期間については、休牧期間を 40 日前後に延長した。これらのことから年間の入退牧の回数は、2003 年では Tr 草地と Gs 草地ともに 9 回であったが、2004 年には Tr 草地は 9 回、Gs 草地は 10 回となった。試験期間中の供試牛に対し、水と鉱塩については自由摂取とし、濃厚飼料等の補助飼料の給与は行わなかった。施肥管理として、各牧区の退牧後に化成肥料を施用し、年間施用量は N， P_2O_5 および K_2O をそれぞれ要素量で 38 kg/10a，21 kg/10a および 29 kg/10a，2004 年の Gs のみは、42 kg/10a，23 kg/10a および 32 kg /10a であった。

(3)調査方法

各牧区ともに放牧開始前後に 10 地点を無作為に選び草高の測定を行った後，牧区内の 4 地点から 1m×1m のコドラート枠を用いて地際より 10 cm の高さで刈取った。刈取った試料は生草重量を測定した後，試料の一部を 70℃で 48 時間通風乾燥し，乾物重量を測定して乾物率を求めた。入牧前および退牧後の生草重量にそれぞれの乾物率を乗じたものを入牧前草量および退牧後草量とし，これらの値を用いて前後差法により滞牧期間中の草地利用率および採食量を算出した。なお，休牧期間中における牧草の再生量を休牧日数で除して 1 日当たりの牧草の生産速度（CGR）を算出し，得られた CGR の値から滞牧期間中の生産量も考慮して採食量を算出した。さらに，休牧期間中の日平均気温が 20℃以下の 12 月から翌年 3 月までの 4 ヶ月の期間を冬季，20℃以上の 4 から 11 月までの 8 ヶ月の期間を夏季とし，季節毎の平均 CGR を算出した。また，2003 年および 2004 年の各年次について，それぞれの年次の全滞牧期間における採食量の合計値に，各年次の放牧終了時の残存草量を加えた値を年間生産量として算出した。

乾物重量を測定する際に得られた乾燥試料を 1 mm のふるいを通るように粉碎し，ペプシン・セルラーゼ法（Goto と Minson 1977）による *in vitro* 乾物消化率（以下 IVDMD）の分析に供した。また，得られた IVDMD から Minson ら（1976）および Goto と Minson（1977）が示した TDN 関係式（ $TDN=0.683 \times IVDMD + 21.077$ ）により TDN を推定した。

牧養力については、各放牧回次の入牧頭数と放牧日数を基にカウデー（以下、CD）を算出し、体重 500 kg に換算した ha 当たりの年間 CD で表した。試験期間中の気温および降水量については、沖縄気象台の名護市観測所の数値（気象庁 2010）を用いた。

(4)統計解析

統計パッケージソフト、Stat view J-5.0（SAS Institute Inc Cary NC）を用い、各調査項目の平均値について t 検定による有意差の検定を行った。

5-3. 結果と考察

(1)試験期間中の気象条件と入牧前草量の季節推移

試験期間中の気象条件と入牧前草量の推移を図 5-1 に示した。試験期間中の年毎の平均気温は、2003 年および 2004 年がそれぞれ 22.9℃および 22.8℃となり、平年値の 22.5℃とほぼ同様の値であった。降水量については、2003 年および 2004 年がそれぞれ 1,531.0 mm および 2,171.0 mm となり、平年値の 2,127.3 mm の値と比較して 2003 年の値は低かった。

年間の入牧前草量は、2003 年の 5 月の期間を除くほぼ全期間を通じて Tr 草地は Gs 草地よりも低い値で推移した。両草地共にいずれの年次についても 1－3 月に最も低くなり、特に Tr 草地については、1－2 月に 50 kgDM/10a 以下まで低下した。いずれの草地も 4 月以降は入牧前草量が著しく高まる傾向となり、特に Tr 草地は Gs 草地と比較して変動傾向が顕著であった。また、夏季

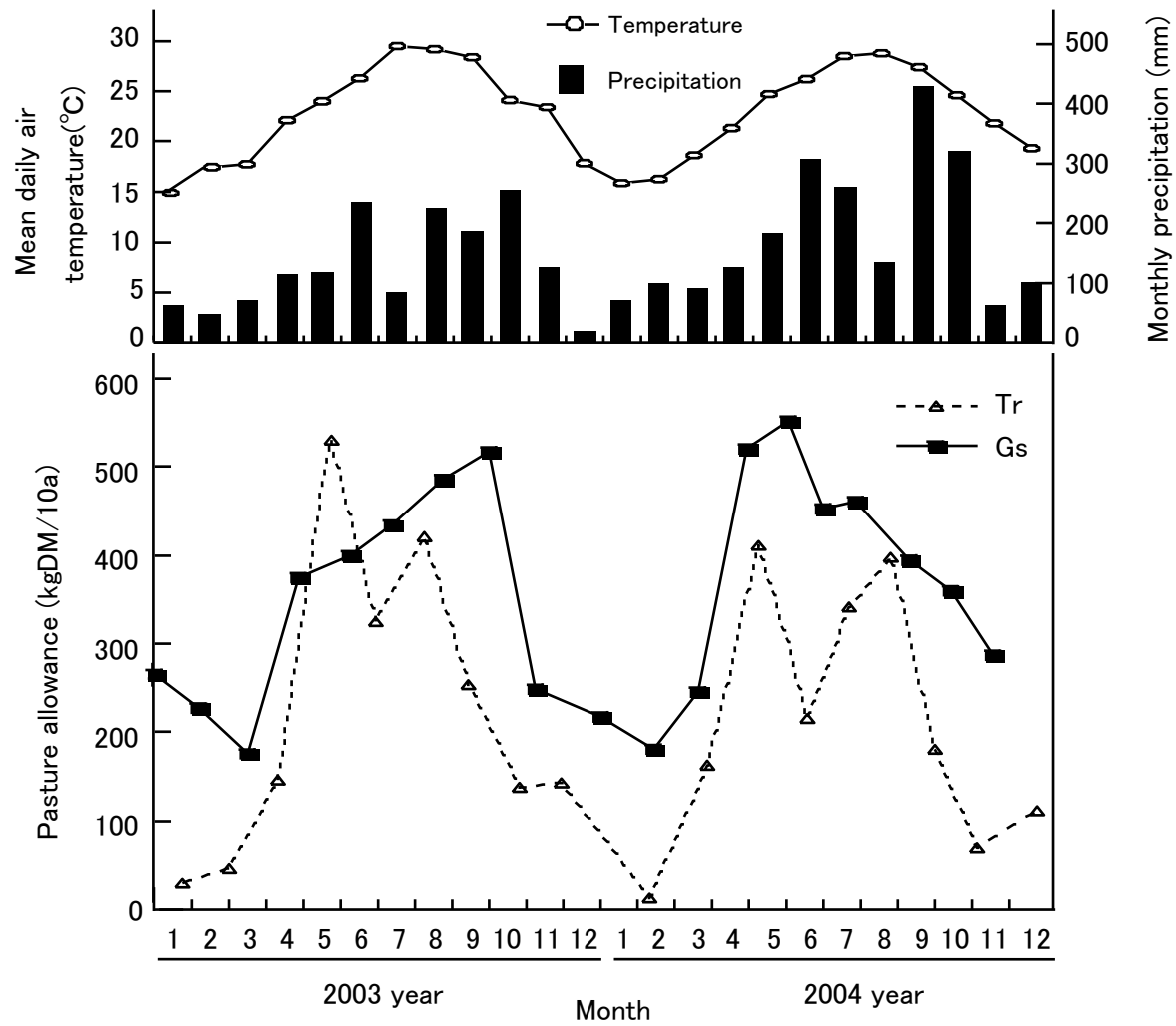


Figure 5-1. Climatic conditions during experimental period and seasonal changes in pasture allowance.

Note: 10a= 1,000 m²

において Tr 草地の入牧前草量はいずれの年次についても，5 月で高く，6 月に低下し，8 月に再び高まる傾向を示した後に以降の月は著しく低下したのに対して，Gs 草地では，6 月の低下はみられずに，2003 年は 4－10 月まで，2004 年は 4－8 月までそれぞれ高い値で推移し，それ以降は徐々に低下する傾向を示した。周年放牧草地において，放牧頭数の調整を容易にするためには，草地の草量が年間を通して平準化されていることが望ましいと考えられるが，いずれの草種も両年を通じて冬季は入牧前草量が夏季と比較して減少し，その程度は Tr 草地で 1/3，Gs 草地で 1/2 程度であった。2004 年については，前年の同時期より約 10 日間休牧期間を延長したが，両草地共に入牧前草量を高めることはできなかった。2 年間の 4－11 月および 12－3 月における入牧前草量の平均値を草地間で比較すると，Tr 草地（4－11 月：285.7 DMkg/10a，12－3 月：85.1 kgDMkg/10a）では Gs 草地（4－11 月：421.2 DMkg/10a，12－3 月：218.9 kgDMkg/10a）よりもそれぞれ，135.5 kgDM/10a および 133.8 kgDM/10a 低くなる傾向を示した。

(2)CGR の季節推移

CGR の季節推移について表 5-1 に示した。2 年間の夏季における CGR の平均値は，Tr 草地および Gs 草地でそれぞれ 7.14 g/m²/day および 9.06 g/m²/day，冬季における CGR は Tr 草地および Gs 草地それぞれ 2.23 g/m²/day および 4.05 g/m²/day となり，特

Table 5-1. Seasonal changes of CGR during experimental period.

Species	Year	CGR(g/m ² /day)		
		Summer	Winter	Annual mean
Tr	2003	7.11±4.3 ¹	2.23±1.9	5.48±4.4
	2004	7.17±3.8	2.23±1.7	5.52±4.0
	Mean	7.14±4.0 ^{n.s.2}	2.23±1.6 ^{n.s.}	5.50±4.1 ^{n.s.}
Gs	2003	7.92±2.4	4.81±1.5	6.89±2.6
	2004	10.03±2.6	3.28±1.7	8.01±4.0
	Mean	9.06±2.6 ^{n.s.}	4.05±1.7 ^{n.s.}	7.48±3.3 ^{n.s.}

¹Values are expressed as mean ±S.D.

²n.s. : No significant differences were found between mean value within the same column (P<0.05).

に Tr 草地の冬季における CGR の低下は顕著であった。また、Tr 草地の年間平均 CGR ($5.50 \text{ g/m}^2/\text{day}$) が Gs 草地 ($7.48 \text{ g/m}^2/\text{day}$) よりも低い傾向を示していた。これらのことから CGR の低下により、Tr 草地で Gs 草地より年間平均入牧前草量が低く、特に Tr 草地における冬季の入牧前草量の著しい低下を招いたと考えられた。

(3)入牧前および退牧後草高の季節推移

入牧前および退牧後草高の季節推移について図 5-2 に示した。Tr 草地および Gs 草地の入牧前草高は、いずれの草地および年次についても 1-3 月に最も低くなり、4-9 月には高い値で推移し、10-12 月にかけて再び低下する傾向を示した。試験期間中の入牧前草高の平均値は、Tr 草地で 35.3 cm、Gs 草地で 62.1 cm となり、Tr 草地が Gs 草地よりも有意に低かった ($P < 0.01$)。Tr 草地の退牧後草高は、1-3 月に試験期間を通じて最も低く、3-4 月には徐々に高くなり、8 月まではほぼ一定の値で推移し、9 月以降に徐々に低下した。試験期間中の退牧後草高の平均値は、Tr 草地で 14.9 cm、Gs 草地で 30.0 cm となり、Tr 草地が Gs 草地よりも有意に低かった ($P < 0.01$)。

草地の利用方法が不適切であった場合、永続性を保つことが困難となる。すなわち、導入草種の衰退などにより草地生産性が著しく低下し、それに伴い、飼養可能な放牧頭数も制限される。実際に Adjei ら (1980) の放牧試験では、Tr 草地は 1 年間の放牧利

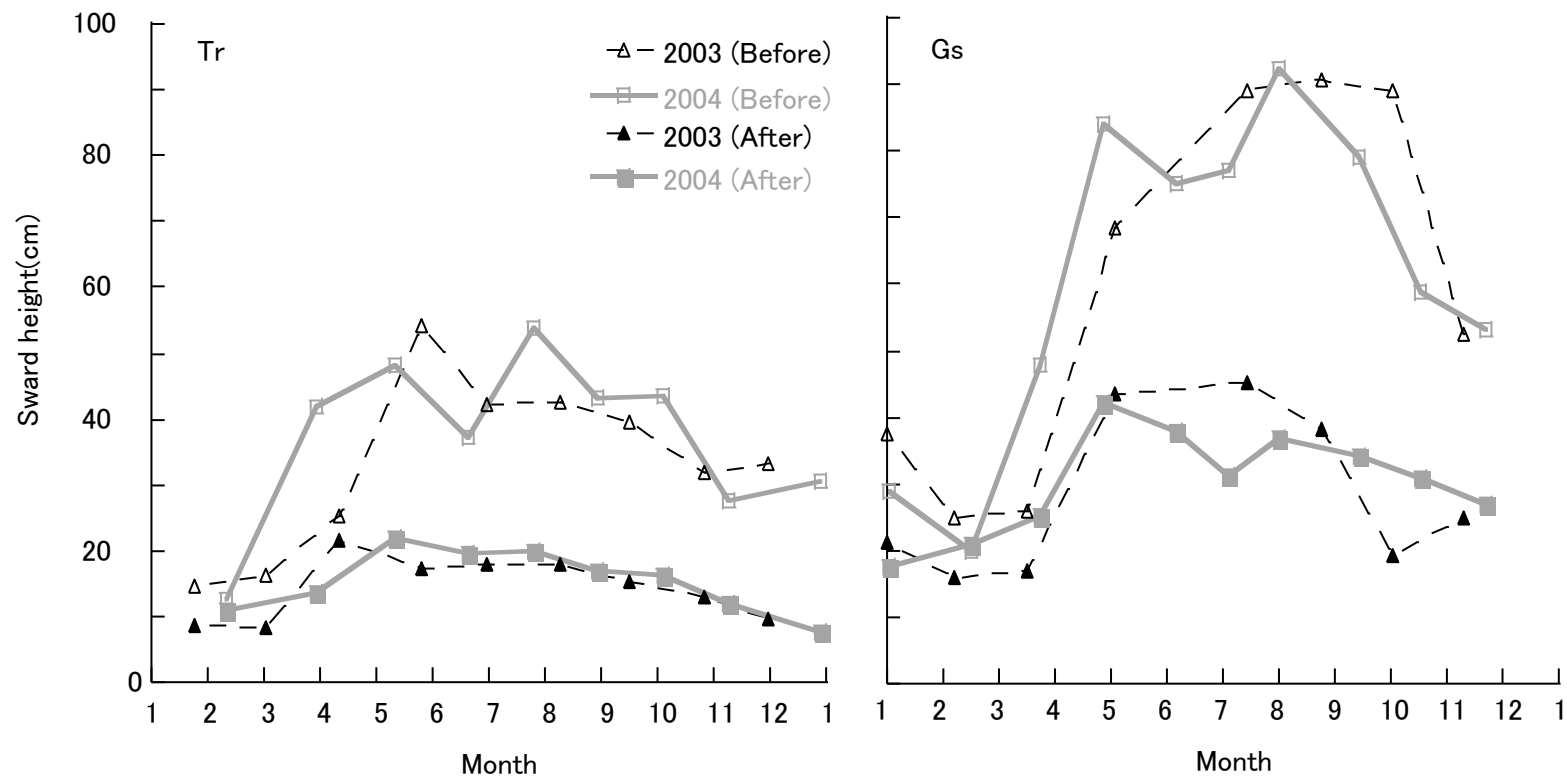


Figure 5-2. Seasonal changes of sward height of two pasture before and after grazing.

用により衰退し、侵入してきたバーミューダグラス (*Cynodon spp.*) に置き換わるという結果が得られている。従って、放牧方式と草地の永続性の関係について明らかにすることは重要である。草地内の牧草の草高は、草地内における放牧牛の入退牧の時期を決定するための視覚的情報として最も一般的であり、かつ簡易的に得られる情報であると考えられる。そこで、草地内の草高を判断基準として、本放牧方式による草地利用が適正であったか検討を行った。Tr を含む *Digitaria* 属数草種の総称であるディジットグラスの草地では、10–15 cm の草高まで放牧牛に利用させた時点で退牧させることが望ましいと考えられている (Vendramini ら 2009)。また、Adjei ら (1988) は、生育気温については詳細に述べていないが、Tr は低温による影響を受けやすく、草地の永続性を維持するためには、気温が低下する季節には 20 cm 程度までの利用が望ましいということを報告している。これらの観点から、本試験における Tr 草地利用方法の適正さについて評価すると、おおよそ 4–11 月までは、適切な草高の範囲付近で推移していたが、気温が著しく低下した 12–3 月については、退牧後の草高が約 10 cm で推移しており、過放牧の状態であったと考えられる。よって、冬季の Tr 草地に関しては、2004 年の冬季に設けた休牧期間 (40 日間) をさらに延長するか、あるいはさらに低い放牧強度 (3.4 頭/ha 以下) で放牧を行うことが望ましいと考えられた。一方、Gs 草地については、15–25 cm までの利用を維持することで、雑草による被覆度が低下するということが

報告されている (Sollenberger 2008)。本試験においては，その範囲内か，もしくは 25 cm 以上の値で推移していたため，Gs 草地については過放牧には至っていなかったと思われる。

(4) 両放牧草地の利用特性および入牧前 IVDMD の季節変動

両放牧草地における利用特性を表 5-2 に示した。入牧前平均草高，退牧後平均草高および平均入牧前草量については，いずれの年次ともに Tr 草地が Gs 草地よりも低い傾向を示し，2 年間の平均値では有意に低い値を示した ($P < 0.01$)。また，草地生産量の 2 年間の平均値についても，Tr 草地は Gs 草地よりも有意に低かった ($P < 0.05$)。一方，草地利用率についてはいずれの年次および季節ともに Tr 草地は Gs 草地よりも高い傾向を示し，2 年間の平均値では有意に高い値を示した ($P < 0.01$)。

入牧前牧草における IVDMD の季節変動について図 5-3 に示し，試験期間中の平均 IVDMD について表 5-3 に示した。IVDMD の推移は，2003 年 5 月と 2004 年 6 月を除いて，Tr 草地が Gs 草地よりも高い値で推移した。2 年間の平均値についても Tr 草地と Gs 草地の値はそれぞれ 56.3%と 49.3%となり，Tr 草地が有意に高い値を示した ($P < 0.05$)。Tr 草地の IVDMD はいずれの年次においてもほぼ 50%を上回ったが，Gs 草地については，1-4 月の期間を除いて 50%を下回った。

暖地型牧草においては，気温の上昇に伴い細胞壁割合が増加し，葉と茎それぞれの消化性を低下させることが知られている

Table 5-2. Comparison of pasture characteristics on utilization.

Species	Year	Mean sward height(cm)		Mean pasture allowance (kgDM/10a ²)	Herbage annual production (kgDM/10a)	Pasture utilization (%)		
		Before grazing	After grazing			Summer	Winter	Annual mean
Tr	2003	33.3	14.3	225.8	1826.4	78.1	86.3	80.8
	2004	37.3	15.5	211.8	2018.7	86.9	82.8	85.5
	Mean	35.3 ^{B1}	14.9 ^B	218.8 ^B	1922.5 ^b	82.5 ^A	84.6 ^{n.s.}	83.2 ^A
Gs	2003	62.6	29.7	347.6	2214.2	53.4	73.9	60.3
	2004	61.7	30.3	367.2	2891.8	63.2	57.1	63.8
	Mean	62.1 ^A	30.0 ^A	357.4 ^A	2553.0 ^a	60.0 ^B	65.5 ^{n.s.}	62.0 ^B

¹ Mean values with different superscript within the same column differ significantly

(Small letter, P<0.05 ; Capital letter, P<0.01).

² 10a = 1,000m².

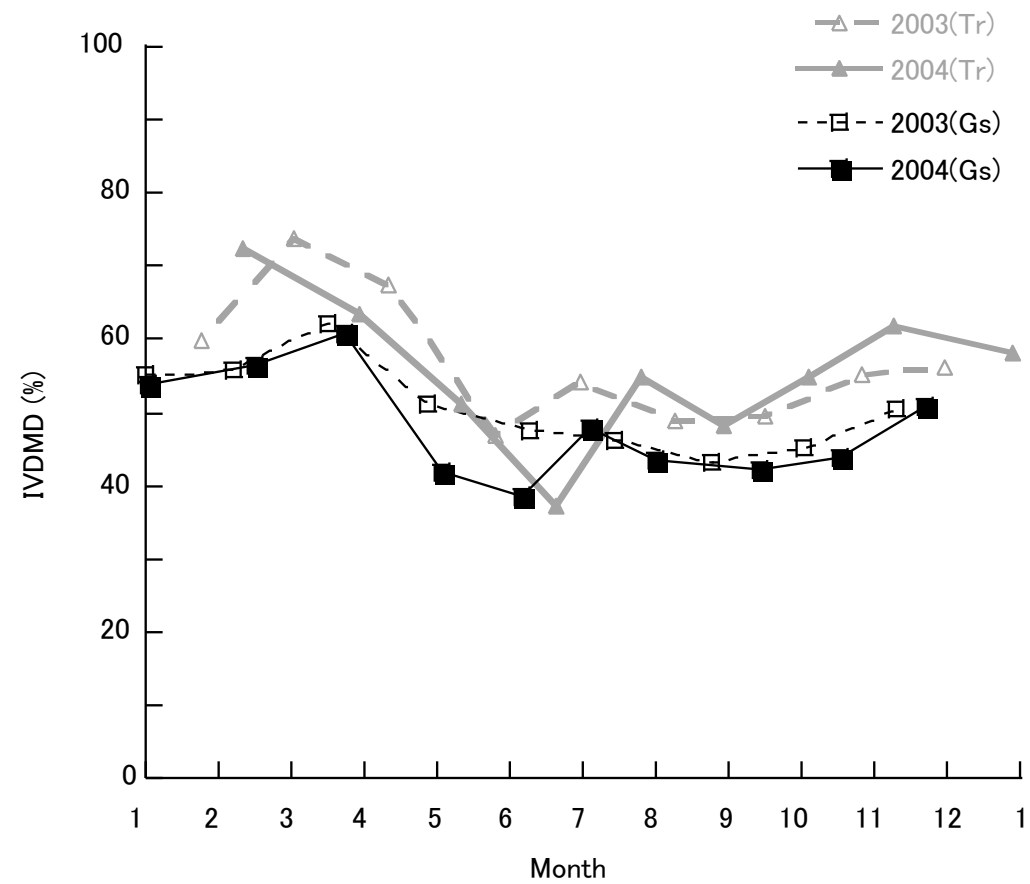


Figure 5-3. Seasonal changes in dry matter digestibility of each pasture.

Table 5-3. Average dry matter digestibility during experimental period.

Species	Year	IVDMD(%)		
		Summer	Winter	Annual mean
Tr	2003	51.7±3.8 ¹	67.1±7.1	56.9±9.0
	2004	51.3±8.3	64.7±7.1	55.8±10.0
	Mean	51.5±6.2 ^{A2}	65.9±6.5 ^a	56.3±9.2 ^a
Gs	2003	47.3±3.0	57.4±4.3	50.7±6.0
	2004	44.1±4.1	57.1±3.4	48.0±7.2
	Mean	45.6±3.9 ^B	57.2±3.5 ^b	49.3±6.6 ^b

¹Values are expressed as mean ± S.D.

²Mean values with different superscript within the same column differ significantly (Small letter, P<0.05; Capital letter, P<0.01).

(Wilson と Minson 1980)。本試験においても気温が高まる夏季に、いずれの草種も乾物消化率が低下する傾向を示したが、その傾向は Tr 草地よりも Gs 草地において顕著であった。

(5)放牧強度，採食量，TDN 摂取量および牧養力

試験期間中の放牧成績について表 5-4 に示した。本試験では 1 牧区当たり 7 日間の滞牧期間と 30 日前後の休牧期間を基本とした輪換放牧を行ったが、草量に応じて牛の放牧頭数や滞牧日数を調節した結果、Tr 草地および Gs 草地の年間放牧強度が異なり、Tr 草地の 2 年平均放牧強度は夏季に 6.5 頭/ha、冬季に 3.4 頭/ha と Gs 草地に比べてそれぞれ 0.4 頭/ha および 0.8 頭/ha 低かった。Tr 草地の採食量は、いずれの年次についても年間を通して Gs 草地の値よりも低い傾向を示した。

いずれの年次も夏季における TDN 摂取量は、Tr 草地と Gs 草地の値はほぼ同等であったが、冬季については、Tr 草地の値が Gs 草地よりも低い傾向を示した。2 年間の平均牧養力は、Gs 草地 2,226.9 CD/ha、Tr 草地で 1,942.2 CD/ha であり、Tr 草地は Gs 草地と比較して、284.7 CD/ha 低かった。放牧様式が多少異なる當眞ら（2003）の放牧試験では、2 年間の平均牧養力が Gs 草地で 1,870 CD/ha、Tr 草地で 1,912 CD/ha であることを報告している。この試験では 2 年間の年平均放牧期間が 265 日で、気温が低い期間は放牧しておらず、本試験における周年放牧と比較し、放牧期間が短いこと、特に、冬季に草量が多い Gs 草地を利用し

Table 5-4. Comparison of grazing pertinent details between the pastures.

Species	Year	Stocking rate(head/ha)			Herbage intake(kg/day/head) ¹			TDN intake(kg/day/head) ¹			Carrying capacity (CD/ha)
		Summer	Winter	Annual mean	Summer	Winter	Annual mean	Summer	Winter	Annual mean	
Tr	2003	6.5	3.7	5.5	10.8	4.9	8.9	6.0	3.4	5.1	1,932.0
	2004	6.6	3.1	5.4	10.8	6.2	9.3	6.0	3.9	5.3	1,952.3
	Mean	6.5	3.4	5.5	10.8 ^{n.s.}	5.6 ^{n.s.}	9.1 ^{n.s.}	6.0 ^{n.s.}	3.6 ^{n.s.}	5.2 ^{n.s.}	1,942.2
Gs	2003	6.8	4.6	6.0	9.7	11.3	10.2	5.2	6.7	5.7	2,070.5
	2004	7.1	3.7	6.1	12.5	8.2	11.2	6.4	4.9	6.0	2,383.3
	Mean	6.9	4.2	6.1	11.2 ^{n.s.}	10.0 ^{n.s.}	10.8 ^{n.s.}	5.8 ^{n.s.}	5.8 ^{n.s.}	5.8 ^{n.s.}	2,226.9

¹Herbage intake and TDN intake were represented as dry matter base.

²n.s. : No significant differences were found between mean value within the same column (P<0.05).

ていないことが，本試験と比較して牧養力が少なく評価された要因と考えられる。

日本飼養標準・肉用牛（農業・食品産業技術総合研究機構 2008）では，肉用繁殖牛（500 kg）の放牧時における標準的な1日1頭当たりの採食草量（乾物）および維持に必要な養分量（TDN）として，それぞれ7.60 kg および 3.76 kg と示されている。Gs 草地における年間の平均乾物摂取量および平均 TDN 摂取量については，いずれの年次についても必要量を満たしていたが，Tr 草地の採食草量（乾物）および平均 TDN 摂取量については，2003 年の冬季に若干不足し，2004 年については TDN 摂取量については満たしているものの，Gs 草地と比較して低い傾向を示した。これらの要因として，冬季における Tr 草地の入牧前草量は少なく，採食量が制限された結果，TDN 摂取量が低下したためと考えられる。したがって，放牧牛1頭1日当りに必要な採食草量（乾物）および TDN 摂取量を考慮した場合，Tr 草地の冬季における放牧強度は本試験における放牧強度（3.4 頭/ha）よりも低くすることが望ましいと考えられた。以上のように，退牧後の施肥管理を前提とした，滞牧期間を7日間，休牧期間を30日間前後とする輪換放牧時の牧養力は，Tr 草地 1,942 CD/ha，Gs 草地 2,227 CD/ha が得られた。また，Gs 草地については，冬季の放牧強度は 4.2 頭/ha 程度で十分であったが，夏季は 6.9 頭/ha 以上の放牧強度で放牧を行うことが望ましいと考えられた。一方，Tr 草地については，夏季の放牧強度は 6.5 頭/ha と十分であったが，気温が 20℃ 以下

となる冬期の入牧前草量の急激な低下のため、過放牧となりやすいことから、冬季には 40 日以上 of 休牧期間を設けるか、あるいは、3.4 頭/ha 以下の放牧強度により放牧を行うことが望ましいと考えられた。

5-4. 摘要

長期間（2 年間）の退牧後の施肥管理を前提とした Tr 草地と Gs 草地の周年放牧時における草地生産性と牧養力を明らかにするために、高牧養力を示した Gs 草地と同様の放牧様式の下で草地生産性と牧養力について比較検討した。Tr 草地における試験期間中の平均入牧前草量は、Gs 草地よりも低かった（ $P < 0.01$ ）。Gs 草地における年間の平均 TDN 摂取量は、いずれの年次も必要量を満たしていたが、Tr 草地では 2003 年の冬季に若干不足した。滞牧期間を 7 日間、休牧期間を 30 日間前後とする輪換放牧時の牧養力は、Tr 草地 1,942 CD/ha、Gs 草地 2,227 CD/ha が得られた。Tr 草地は、気温が 20℃ 以下となる冬季に、過放牧となりやすく、40 日以上 of 休牧期間を設けるか、3.4 頭/ha 以下の放牧強度により放牧を行うことが望ましいと考えられた。

第 6 章

総合考察

本研究の対象地域となった沖縄地域（以下，当地域）における暖地型イネ科牧草に関する研究は，草種選定や栽培管理技術，暖地型牧草種の育種に関するものが主であった。一方で，沖縄県内の草地土壌には国頭マージと呼ばれる特殊土壌が広く分布していることから，これらの土壌における化学性の変化が暖地型牧草の生育に及ぼす影響について明らかにすることは，過剰な資材投入を抑制し，低コストでの牧草生産を行うために必要なことであると考えられる。さらに，当地域の酸性土壌条件下で造成された，周年放牧草地における，窒素やリン酸を主とする施肥管理技術について検討することは，省力的で持続的な家畜生産システムを構築するために極めて重要であると考えられる。

本研究では，当地域における酸性土壌である国頭マージ土壌で栽培される暖地型牧草種のリン酸施肥に対する生育反応と，周年放牧草地における施肥窒素の利用特性を明らかにし，さらに酸性土壌に造成され，長期的に施肥管理された周年放牧草地における家畜生産を実証することで，省力的で省資源型な周年放牧草地の施肥管理技術を確立することを目的とした。

まず最初に，酸性の国頭マージ土壌におけるリン酸資材の施用が，数種暖地型牧草の生育と土壌中における可給態リン酸含量に

及ぼす影響について検討するため、圃場栽培試験を行った。

その結果、暖地型短年生イネ科牧草であるスーダングラスについては、リン酸施用量の増加に伴い、初期生育時の草高が高くなる傾向を示したが、暖地型永年生イネ科牧草であるシグナルグラスとトランスバーラについては、リン酸施用量を増加した場合においても、初期生育時の 1 m² 当たりの茎数や草高に顕著な違いは認められず、リン酸施用が初期生育に及ぼす影響については不明瞭であった。また、合計乾物収量についても、スーダングラスでは有意差は認められないものの、リン酸施用に伴い増加する傾向を示したのに対し、シグナルグラスとトランスバーラではリン酸施用量に伴う合計乾物収量の増加は認められなかった。このことから、スーダングラスでは、土壤中可給態リン酸含量が基準値をわずかに上回る土壤（11.2 mgP₂O₅/100g 乾土）においては、草地造成時にリン酸を基準量（25 kgP₂O₅/10a）施用することが望ましいと考えられた。一方、シグナルグラスとトランスバーラでは、リン酸無施用条件下の土壤中可給態リン酸含量（6.8－9.5 mgP₂O₅/100g 乾土）でも、初期生育や草地造成初期（播種日から約 150 日間）の生育に悪影響は認められなかったことから、両草種はかなり低い水準の土壤中可給態リン酸含量（10 mgP₂O₅/100g 乾土 以下）の酸性土壤においても良好な生育が可能な草種であることが示唆された。したがって、シグナルグラスとトランスバーラについては、草地造成時や造成初期のリン酸施用量をこれまでの基準量（10 kgP₂O₅/10a）よりも低減できると考えられた。酸

性の国頭マージ土壤に施用したリン酸については、スーダングラス栽培圃場およびシグナルグラスとトランスバーラ栽培圃場ともに、土壤中の可給態リン酸含量が施用直後から約 4 ヶ月で 40－50%減少していた。このことは、栽培されていた牧草種による土壤中のリン酸吸収と土壤中での化学反応によりリン酸の難溶解化が進んだことによるものであると推察されるが、元々の土壤由来の可給態リン酸のみを利用して生育したと考えられるリン酸無施用区における 4 カ月間での土壤中の可給態リン酸含量の減少率は、スーダングラスでは 33%、シグナルグラスとトランスバーラでは 28%となっており、リン酸施用区に比べると減少率が 10～20 ポイント低くなっていたため、リン酸施用区では、施用したリン酸の多くが土壤中で難溶解化し、土壤中可給態リン酸含量の低下を招いている可能性が考えられた。そのため、植付から短期間で高い収量が得られるスーダングラスのような暖地型短年生イネ科牧草種を酸性の国頭マージ土壤で栽培する場合、草地造成時に基準量のリン酸を施用し、さらに利用後（採草あるいは放牧）の追肥により、リン酸を施用することが望ましいと考えられたが、暖地型永年生イネ科牧草であるシグナルグラスとトランスバーラは土壤中の可給態リン酸含量がかなり低い水準（10 mgP₂O₅/100g 乾土以下）の国頭マージ土壤においても、良好な生育を示す牧草種である可能性があるため、省資源の観点から造成時の土壤中可給態リン酸含量の基準値やリン酸施用量を見直す必要があると考えられた。

次に，耐酸性が低いとされる *Sorghum* 属（Moser ら 2004）に属するスーダングラス，酸性土壌でも良好に生育し，当地域で今後の利用の拡大が期待されているシグナルグラス，さらに沖縄県で作付面積が年々増加中のトランスバーラを供試草種として用い，ポット栽培試験によって，炭酸カルシウム施用による土壌 pH の矯正およびリン酸資材の施用効果を検討した。酸性土壌の化学性の改良は，栽培植物の至適土壌 pH への矯正あるいは植物の生育にとって有害となる交換性 Al 含量の低減を目的に，炭酸カルシウムなどの土壌矯正資材の施用により行われる。本研究では，炭酸カルシウム施用量の増加に伴い，土壌 pH は上昇する一方で交換性 Al 含量は低下し，pH 6 では 0.5 me/100g 乾土以下の含量となり，Al 飽和度は 5%以下に低下した。国頭マージ土壌で草地造成を行う際のリン酸施用量は，土壌中の可給態リン酸含量（10 mgP₂O₅/100g 乾土以上）を基準とする場合と栽培草種に関わらず一定量（10 kgP₂O₅/10a）を施用する場合の 2 様式がみられる（沖縄県畜産試験場 1999）。本研究で施用したリンは 5–15 kgP/10a（P₂O₅ としては 12–34 kg/10a）であり，推奨施用量（10 kg P₂O₅/10a）をほぼ充たしていた。しかし一方で，土壌中の可給態リン酸含量は，本研究で最もリン酸施用量が多い 15 kgP/10a の場合においても 5.7–6.6 mgP₂O₅/100g 乾土であった。

炭酸カルシウム施用による土壌 pH 矯正が牧草生育に及ぼす影響については，スーダングラスは，炭酸カルシウム施用により根の乾物重を著しく増加させていたことから，pH4.5 程度の国頭マ

ージ土壌には適応性を示さず，炭酸カルシウム無施用下では，酸性土壌のストレスを強く受けていたと考えられる。したがって，本県内の pH 約 4.5 の国頭マージ土壌でスーダングラス栽培を行う場合には，炭酸カルシウム等の土壌改良資材により，土壌 pH を 5.0－6.2 に矯正する必要性がある。一方，シグナルグラスとトランスバーラでは，炭酸カルシウム無施用区と施用区との間に根の乾物重の有意差が認められず，両草種はスーダングラスよりも酸性の国頭マージ土壌に対する適応性を有すると示唆された。そのことを裏付けるものとして，本研究で用いた国頭マージ土壌は，炭酸カルシウムを 700 kg/10a 施用することによって，土壌の Al 飽和度を約 3%程度にまで低下させることが可能であったが，この処理に伴うシグナルグラスとトランスバーラの根乾物重には顕著な増加は認められなかった。これらの結果は，シグナルグラスとトランスバーラは 68%の高 Al 飽和度下でも，根の生育阻害を受けていないことを意味する。シグナルグラスは耐酸性や耐 Al イオン耐性を有しているとする報告（CIAT 1981；Adams 1984；Ishikawa ら 2000）が多く認められるが，*Digitaria* 属の栽培品種について，耐酸性あるいは AI イオン耐性についての報告は認められず，本研究の結果により *Digitaria* 属の栽培品種であるトランスバーラが *Brachiaria* 属と同等の耐酸性あるいは AI イオン耐性を有する可能性が示唆された。

リン酸施用が生育に及ぼす影響については，スーダングラスではリン酸施用量の増加に伴い，茎葉と根の乾物重は，ほぼ直線的

に増加したことから、15 kgP/10a 以上の施用量においても、茎葉の乾物重の増加する可能性が期待される。また、スーダングラスでは、リン酸施用に伴い Ca と Mg の含有率が増加する傾向を示し、P、Ca、K および Mg などの無機養分の含有量の増加も認められた。シグナルグラスでは、0 から 5 kgP/10a までのリン酸施用量の増加に伴い、茎葉と根の乾物重の顕著な増加が認められたが、リン酸施用 5 kgP/10a と 15 kgP/10a の間に有意差は認められなかった。また、茎葉中の Ca と Mg の含有率と含有量は 5 kgP/10a まで増加したが、5 kgP/10a と 15 kgP/10a の値には有意差が認められなかったことから、シグナルグラスは 5 kgP/10a 程度のリン酸施用でも良好な初期生育が可能であると考えられた。トランスバーラでは、リン酸施用に伴う根の乾物重の増加は認められなかったが、茎葉では、5 kgP/10a までは増加が認められ、15 kgP/10a では低下したことから、トランスバーラにおいても 5 kgP/10a の施用量が生育を促進する適正量と考えられる。リン酸施用量の増加に伴い、茎葉中の P の含有量と含有率は増加する傾向を示したにもかかわらず、Mg、K および Ca の各含有量は 15 kgP/10a 区では 5 kgP/10a 区よりも低下していたことも上述のことを裏付けている。Andrew と Robins (1971) は、数種の暖地型牧草を用いたポット栽培試験で、多くの草種の生育が阻害される土壌でもパンゴラグラス (*Digitaria* 属) はリン酸無施用でも生育可能であることや、地上部の P 含有率が低い状態でも、良好に生育することを明らかにしている。さらに、7 kgP/10a 以上のリン

酸施用時には、地上部の P 含有率の増加に反映されるが、乾物収量の増加に繋がらないことも示している。また、沖縄県における宮城と島袋（1966）の圃場試験で、パンゴラグラスはリン酸施用量が 3.8 kgP/10a を超えると乾物収量の低下が認められた。以上のことから、トランスバーラはシグナルグラスあるいはスーダングラスと比較して、多量のリン酸施用あるいは、多量のリン酸が存在する土壌を好まない草種であることが示唆された。国頭マージ土壌の草地では、これまで用いられてきた可給態リン酸含量の基準値として、10 mgP₂O₅/100g 乾土以上とすることが望ましいと考えられている（沖縄県農業試験場 1979）。一方で、本研究の供試草種の生育と土壌中の可給態リン酸含量の関係について検証したところ、暖地型牧草であるシグナルグラスとトランスバーラは土壌中の可給態リン酸含量が、10 mgP₂O₅/100g 乾土以下の状態であっても、十分に生育する可能性が示された。実際、コロンビアなどの他の地域の土壌で栽培されたシグナルグラスあるいは同属の *Brachiaria humidicola* は、可給態リン酸含量が 1.15 mgP₂O₅/100g 乾土以下の土壌においても、最大収量の 80%を示す収量反応が得られている（CIAT 1981; Jones 1990）。ただし、それらの試験で用いられた、可給態リン酸含量の測定法（Bray 法）と本研究における可給態リン酸含量の測定法（トルオーグ法）が異なっており、Bray 法に比べてトルオーグ法による可給態リン酸含量の測定値は低くなる傾向が認められていること（志茂ら 1985）から判断すると、本研究のように土壌中の可給態リン酸含

量が 2 mgP₂O₅/100g 乾土以上において茎葉の乾物重の増加が認められなかったトランスバーラおよびシグナルグラスの反応は相応であると推察される。適切な土壌中のリン酸含量を，10 mgP₂O₅/100g 乾土以上とする理由は，草地の造成後に牧草が十分定着出来る環境条件を設定するためである。しかし，酸性土壌では施用されたリン酸が土壌中で固定されて難溶解性リン酸となりやすいこと（田中 1984）などを考慮すると，基肥としては，生育に必要最低限量のリン酸を施用し，利用後（採草後あるいは放牧後）の施肥によってリン酸を供給することが効率的なリン酸施用の観点からは望ましいと考えられる。以上のことから，国頭マーージ土壌で草地造成時に基肥としてリン酸を施用する場合，トランスバーラ草地で 2.1 mgP₂O₅/100g 乾土以上になるようにリン酸資材を施用するだけでも，それらの草種の定着には十分有効であると考えられる。

炭酸カルシウムとリン酸の同時施用の効果について検証すると，pH 4.5 の国頭マーージ酸性土壌では，Al イオン等による根の生育阻害をもたらすと考えられ，炭酸カルシウム無施用区においては，リン酸施用量を高めても，スーダングラスの茎葉および根の乾物重増加は認められない。そのため，炭酸カルシウムを 350 または 700 kg/10a 施用し，土壌 pH を 5.0－6.2 程度に矯正した後，リン酸を 15 kgP/10a 施用することで，スーダングラスに対するリン酸施用の高い効果が認められた。すなわち，炭酸カルシウムによる国頭マーージ土壌の pH 矯正は，土壌中の交換性 Al イ

オンを低下させるため、酸性土壌において著しく根の生育阻害を受けるスーダングラスのような草種には極めて効果的であることが明らかとなった。一方、酸性土壌でも十分生育できるようなシグナルグラスあるいはトランスバーラは、スーダングラスで示されるような効果は認められないことが明らかとなった。しかし、トランスバーラでは、養分吸収を増加させる効果も認められたことから、pH 4.5 程度の強酸性国頭マージ土壌では、炭酸カルシウム施用により土壌 pH を 5.0－5.1 程度に矯正することが望ましいと考えられた。炭酸カルシウムとリン酸施用の効果についてまとめると、炭酸カルシウム施用による土壌 pH 矯正は、スーダングラスのような酸性土壌への適応性が低い草種には極めて有効で、リン酸施用は、いずれの草種についても生育を促進させる効果が認められ、シグナルグラスおよびトランスバーラは 5 kgP/10a (P_2O_5 として 12 kg/10a), スーダングラスには 15 kgP/10a (P_2O_5 として 34 kg/10a) 程度の施用量が適当であることが示された。一方で、シグナルグラスおよびトランスバーラの生育に関しては、土壌中のリン酸含有量が 10 mg P_2O_5 /乾土 100g 以上に達していない場合でも、十分な生育が可能であるということが示唆された。

次に、当地域の集約的な黒毛和種繁殖牛の輪換放牧草地に必要な退牧後の施肥管理に着目し、 ^{15}N 同位体窒素を用いたトレーサー試験によって施肥由来窒素の利用効率について検討した。ジャイアントスターグラス草地とトランスバーラ草地の採食部位の乾物収量を比較すると、トランスバーラ草地よりもジャイアント

スターグラス草地が高かった。一方で、ジャイアントスターグラスとトランスバーラの両草地の全窒素含有量には草地間の著しい差異は認められず、採食部位の ^{15}N 回収率についても同様であった。このことから、化成肥料の窒素成分の吸収能にはジャイアントスターグラス草地とトランスバーラ草地で有意な違いがなく、ほぼ同等と示唆された。退牧後の休牧期間を約40日間として輪換放牧を行った場合、退牧後施肥した窒素の20.2–30.7%が採食部位の物質生産に利用されていた。さらに、退牧後に施肥した窒素は、施肥後（退牧後）2回目の放牧利用に当たる80日後の採食部位の再生にも4.5–8.3%利用されていた。これらのことから、当地域の集約的な放牧草地管理においては、家畜生産に關与する採食部位での施肥窒素の利用効率は31.8–33.8%であると推定できた。また、放牧牛には直接利用されない非採食部位の刈株、根および根圏土壤の施肥由来窒素の回収率をみると、約5%程度が株と根に吸収・蓄積され、約10%程度が根圏土壤中に蓄積していた。このことから採食部位の次の再生のために蓄積・利用される施肥由来窒素は約15%程度といえる。これまでの結果をまとめると、当地域の集約的な輪換放牧草地における施肥由来窒素の利用効率はジャイアントスターグラス草地とトランスバーラ草地に有意な差異はなく、両草地の平均で、退牧後に施肥した施肥由来窒素の32.7%が採食部位に利用され、5.1%が株と根に吸収・蓄積され、10.7%が根圏土壤中に蓄積することが明らかとなった。また、これらを合計した当地域の植物体–土壤圏内での ^{15}N 回収

率は 48.6%であった。暖地型イネ科牧草地の施肥管理において、植物体（採食部、刈株部、根部、リターなど）と根圏土壤中を合計した植物－土壤圏内における施肥由来窒素の ^{15}N 回収率は 25－98%（Vallis ら 1973；Impithuksa と Blue 1985；Sugimoto ら 1985；杉本ら 1994；川本 2002）と幅広く、その変動の要因は肥料の種類、施肥時期、栽培草種および土壌成分などの違いや気象環境（降水量と気温）の変化が挙げられる。本研究のジャイアントスターグラス草地とトランスバーラ草地では植物体－土壤圏内の ^{15}N 回収率はいずれも 50%以下であった。部位別で比較すると、非採食部位（5.1%）＜根圏土壌（10.7%）＜採食部位（32.8%）の順で ^{15}N 回収率が高くなっていた。このことから、最も ^{15}N 回収率が高くなる採食部位の生産量の多寡（生産速度）が、放牧地管理で追肥する化成肥料の肥料効率を左右するものと推察される。しかし、窒素施肥量を 10 kgN/10a から 20 kgN/10a に増やして牧草の生産量を高めても ^{15}N 回収率に差が認められなかったとの報告（Impithuksa と Blue 1985）や施肥由来窒素の約 40%程度が揮発あるいは表面土壌から浸透水として流出する報告（Cathpoole 1975）もあり、本研究でも 51.4%の施肥由来窒素が放牧地圏外に流出していたものと推察された。このことから、高温多湿の当地域においては、集約的な輪換放牧を実施する場合、放牧草地の施肥由来窒素の利用率の向上には高窒素施肥による生産量の増加よりも、川本（2002）の放牧試験と同様に放牧強度や休牧期間を制御しながら草地利用率を高める方法が適するも

のと考えられた。しかしながら，サトウキビ栽培と肉用牛子牛生産が盛んな沖縄県宮古島では化成肥料の施用量が地下水濃度の増減に大きく寄与している報告（田代と高平 2001）もあることから，牧草の再生を考慮した追肥時期や施肥量について検討することにより，植物－土壌圏外への施肥由来窒素の流出量や環境負荷量を減少させることができるものと推察された。

次に，退牧後の施肥管理を前提としたトランスバーラ草地とジャイアントスターグラス草地の周年放牧時における長期間（2年間）にわたる草地生産性と牧養力を明らかにするため，川本（2001）が黒毛和種繁殖牛を用いて高牧養力を示した 30 日間の休牧期間を設けた輪換放牧方式に従い，放牧試験を行った。

年間の入牧前草量は，ほぼ全期間を通じてトランスバーラ草地はジャイアントスターグラス草地よりも低い値で推移する傾向を示した。両草地共にいずれの年次についても 1－3 月に最も低くなり，特にトランスバーラ草地については，50 kgDM/10a 以下まで低下した。いずれの草地も 4 月以降は入牧前草量が著しく高まる傾向となり，特にトランスバーラ草地はジャイアントスターグラス草地と比較して変動傾向が顕著であった。周年放牧草地において，放牧頭数の調整を容易にするためには，草量が年間を通して平準化されていることが望ましいと考えられるが，いずれの草種も両年を通じて冬季は入牧前草量が夏季と比較し減少する傾向があり，その程度はトランスバーラ草地で 1/3，ジャイアントスターグラス草地で 1/2 程度であった。2 年間の 4－11 月およ

び 12-3 月における入牧前草量の平均値を草地間で比較すると、トランスバーラ草地ではジャイアントスターグラス草地よりもそれぞれ、135.5 kgDM/10a および 133.8 kgDM/10a 低くなる傾向を示した。2 年間の夏季における CGR の平均値は、トランスバーラ草地およびジャイアントスターグラス草地でそれぞれ 7.14 g/m²/day および 9.06 g/m²/day、冬季における CGR は Tr 草地およびジャイアントスターグラス草地それぞれ 2.23 g/m²/day および 4.05 g/m²/day となり、特にトランスバーラ草地の冬季における CGR の低下は顕著であった。また、トランスバーラ草地の年間平均 CGR (5.50 g/m²/day) がジャイアントスターグラス草地 (7.48 g/m²/day) よりも低い傾向を示していた。これらのことから、CGR の低下によりトランスバーラ草地でジャイアントスターグラス草地より年間平均入牧前草量が低く、特にトランスバーラ草地における冬季の入牧前草量の著しい低下を招いたと考えられた。望月ら (2005) が行った 4 年間の採草利用による収量調査においても、トランスバーラ草地の年間乾物収量はジャイアントスターグラス草地よりも 0.2-0.4 tDM/10a 低いことが明らかにされている。これらの報告と本研究の結果から、当地域において、トランスバーラ草地はジャイアントスターグラス草地と比較して年間の乾物生産量がやや低い草種であると考えられた。本研究の放牧方式によるトランスバーラ草地およびジャイアントスターグラス草地の 2 年以上の長期利用の可能性について推察すると、いずれの草地についても入牧前草量の季節推移が年次間で顕著

な差異を示さなかったことや 1 年目と比べて 2 年目の草地生産量の低下が認められなかったことから、2 年間の調査期間における、草地植生は十分に維持されていたと考えられる。Adjei ら (1980) の 2 年間の放牧試験ではトランスバーラ草地は 1 年間の放牧利用により衰退し、バーミューダグラスに置き換わったが、本研究では、12-3 月に過放牧の状態であったと考えられるにもかかわらず、2 年間に亘り顕著な雑草の侵入やトランスバーラ草地の衰退はみられなかった。草地の維持管理において、適切な施肥管理による牧草の生育促進が雑草との競合にとって不可欠であり（農林水産省生産局 2006）、トランスバーラ草地への窒素施用量は Adjei ら (1980) が年間 22 kg/10a に対して本試験では年間 38 kg N/10a と多く、リン酸施用量についても Adjei ら (1980) が年間 4.6 kgP₂O₅/10a に対して本研究では、21 kgP₂O₅/10a と多く、草地内に侵入する雑草等他草種との競合関係にとって適切な施肥量であったことが、本試験でトランスバーラ草地が 2 年間維持された要因の 1 つと推察される。

次に、トランスバーラ草地とジャイアントスターグラス草地の利用特性について検証を行った。草地利用率については、いずれの年次および季節ともにトランスバーラ草地はジャイアントスターグラス草地よりも高い傾向を示した。入牧前牧草における IVDMD はトランスバーラ草地がジャイアントスターグラス草地よりも高い値で推移する傾向を示した。Adjei ら (1980) は、熱帯地域においてジャイアントスターグラス草地は生産性が高い

一方で，利用時の放牧強度が低い場合，草地利用後に低品質の大量の残存草を発生させると報告している。本研究においては，夏季におけるジャイアントスターグラス草地の入牧前草量はトランスバーラ草地よりも高い値で推移していたが，ジャイアントスターグラス草地の平均利用率（62.0%）はトランスバーラ草地の場合（83.2%）よりも低く（ $P < 0.01$ ），残存草割合が多かった。ジャイアントスターグラス草地の夏季における乾物消化率の著しい低下は，気温による影響に加えて，夏季の放牧強度（6.8頭－7.1頭/ha）が不十分であったことに起因すると考えられる。日本飼養標準・肉用牛（農業・食品産業技術総合研究機構 2008）によると，成雌牛の維持に必要な養分量として給与飼料中の TDN が 50%としている。IVDMD が 42.3%以上の値を示した場合に TDN が 50%を満たすが，トランスバーラ草地に比べてジャイアントスターグラス草地は，夏季に必要な IVDMD 水準が得られない期間が多く認められ，さらにほとんどの試験期間を通じて，ジャイアントスターグラス草地の IVDMD はトランスバーラ草地の値より低い値で推移した。これらのことから，夏季における乾物消化率の低下を抑制することを考慮するのであれば，ジャイアントスターグラス草地での放牧強度を本研究の場合（6.8－7.1頭/ha）よりも高めることが必要であると考えられた。一方，本研究におけるトランスバーラ草地の夏季の放牧強度（6.5－6.6頭/ha）は，乾物消化率の維持という観点からは適切であったと考えられる。1牧区当たり 7 日間の滞牧期間と 30 日前後の休牧期間を基本とした

輪換放牧を行ったが、草量に応じて牛の放牧頭数や滞牧日数を調節した結果、トランスバーラ草地およびジャイアントスターグラス草地の年間放牧強度が異なり、トランスバーラ草地の2年平均放牧強度は夏季に6.5頭/ha、冬季に3.4頭/haとジャイアントスターグラス草地に比べてそれぞれ0.4頭/haおよび0.8頭/ha低かった。トランスバーラ草地の採食量は、いずれの年次についても年間を通してジャイアントスターグラス草地の値よりも低い傾向を示した。放牧時のTDN摂取量は、夏季については、トランスバーラ草地とジャイアントスターグラス草地の値はほぼ同等であったが、冬季については、トランスバーラ草地の値がジャイアントスターグラス草地よりも低い傾向を示した。日本飼養標準・肉用牛（農業・食品産業技術総合研究機構 2008）では、肉用繁殖牛（500 kg）の放牧時における標準的な1日1頭当たりの採食草量（乾物摂取量）および維持に必要な養分量（TDN摂取量）として、それぞれ7.60 kg, 3.76 kgと示されている。Gs草地における年間の平均採食草量（平均乾物摂取量）および平均TDN摂取量については、いずれの年次についても必要量を満たしていたが、Tr草地の採食草量（乾物摂取量）および平均TDN摂取量については、2003年の冬季に若干不足し、2004年については満たしているものの、Gs草地と比較して低い傾向を示した。これらの要因として、冬季におけるTr草地の入牧前草量は低く、採食量が制限された結果、TDN摂取量が低下したためと考えられる。従って放牧牛1頭1日当たりに必要な採食草量（乾物摂取量）お

よび TDN 摂取量を考慮した場合，Tr 草地の冬季における放牧強度は本試験における放牧強度（3.4 頭/ha）よりも低い強度で放牧を行うことが望ましいと考えられた。したがって，退牧後の施肥管理（要素量で 4.8 kgN/10a, 2.6 kgP₂O₅/10a, 3.6 kgK₂O/10a）を前提とした，トランスバーラ草地とジャイアントスターグラス草地の集約的な輪換放牧により，トランスバーラ草地では 1,942 CD/ha，ジャイアントスターグラス草地では，2,227 CD/ha の牧養力が得られることが明らかとなった。

以上から，当地域の暖地型牧草を主体とする放牧地では，約 1 ヶ月間の休牧期間を設けた周年輪換放牧方式に，採草利用後の化成肥料施用量よりも約 50%減肥した退牧後の施肥管理を組み合わせることで，高い年間牧養力（5.5－6.1/ha）が維持できることが明らかとなった。このことは，当地域で暖地型牧草を中心とした持続的かつ集約的な肉用牛生産システムを構築するうえでの基礎知見となると考えられる。

第 7 章

要 約

南西諸島における暖地型イネ科牧草の放牧草地の持続的かつ集約的な周年放牧を可能にする施肥管理技術を構築するため、酸性土壌へのリン酸施用と酸度矯正に伴う数種暖地型イネ科牧草の生育反応とその有用性を検討した。また、 ^{15}N 同位体窒素 (^{15}N) を用いたトレーサー試験によって暖地型イネ科牧草地の肥料効率を明らかにし、さらに、施肥管理を組合せた集約管理下での放牧試験を 2 年間実施し、南西諸島における暖地型イネ科牧草の周年放牧草地の牧養力を実証的に評価した。

1. 沖縄地域の酸性土壌における数種暖地型イネ科牧草の生育に及ぼすリン酸施用の影響

暖地型短年生イネ科牧草であるスーダングラスについては、リン酸施用量の増加に伴い、初期生育が促進される傾向がみられたが、永年生暖地型イネ科牧草であるシグナルグラスとトランスバールについては、リン酸施用量を増加した場合においても、その効果は不明瞭であった。また、合計乾物収量についても、スーダングラスでは有意差は認められないものの、リン酸施用の増加に伴い増加する傾向を示したのに対し、シグナルグラスとトランスバ

ーラでは増加は認められなかった。このことから、スーダングラスでは、土壌中可給態リン酸含量が基準値をわずかに上回る土壌（ $11.2 \text{ mgP}_2\text{O}_5/100\text{g}$ 乾土）においては、草地造成時にリン酸を基準量（ $25 \text{ kgP}_2\text{O}_5/10\text{a}$ ）施用することが望ましいと考えられた。一方、シグナルグラスとトランスバーラでは、かなり低い水準の土壌中可給態リン酸含量（ $10 \text{ mgP}_2\text{O}_5/100\text{g}$ 乾土 以下）の酸性土壌においても良好な生育が可能な草種であることが示唆された。

2. 沖縄地域の酸性土壌における数種暖地型イネ科牧草の生育に及ぼす炭酸カルシウムおよびリン酸施用の影響

南西諸島の酸性赤黄色土壌（国頭マージ）では、炭酸カルシウムの施用に伴い土壌中の交換性アルミニウム含量が著しく低下する特性があり、スーダングラスでは土壌 pH 矯正によって可給態リン酸含量の増加に伴う著しい生育促進効果が得られ、トランスバーラとシグナルグラスでは土壌 pH 矯正の有意な効果を及ぼさなかった。また、トランスバーラとシグナルグラスは $0-10 \text{ kgP}_2\text{O}_5/10\text{a}$ のリン酸施用量で良好な初期生育を示し、土壌中の至適可給態リン酸含量はそれぞれ 2.1 および $2.3 \text{ mgP}_2\text{O}_5/100\text{g}$ 乾土以上であることが明らかとなった。

3. 暖地型イネ科牧草の集約的輪換放牧草地における施肥由来

窒素の利用効率

トランスバーラおよびジャイアントスターグラスの放牧草地にて ^{15}N を用いた施肥由来窒素の利用効率を測定し、化成肥料を投入する集約的放牧管理下の施肥効率について検討した。その結果、両草地の ^{15}N 回収率に有意な草地間差はなく、採食部位の施肥由来窒素の利用効率はジャイアントスターグラス草地が 33.8%、トランスバーラ草地が 31.8%となった。両草地における部位別の ^{15}N 回収率から、退牧後に追肥した施肥由来窒素の 5.1%が根と刈株に吸収・蓄積され、10.7%が根圏土壤中に蓄積され、32.8%が採食部位に吸収・利用されていた。両草地の植物体-根圏土壤圏内における ^{15}N 回収率は 48.6%となったことから、南西諸島の放牧草地における肥料効率は概ね 50%であることが明らかとなった。

4. 沖縄地域の施肥管理された暖地型イネ科牧草の周年放牧草地

における牧養力評価

暖地型イネ科牧草の採食部位での施肥窒素の利用効率を踏まえ、施肥管理を組合せた輪換放牧条件下での黒毛和種繁殖雌牛の放牧試験を 2 年間実施し、トランスバーラ草地とジャイアントスターグラス草地における草地生産性と牧養力を評価した。その結

果，トランスバーラ草地の草地生産性はジャイアントスターグラス草地より低く，年間を通した TDN 摂取量はジャイアントスターグラス草地では放牧牛の維持に要する必要量を満たしていたが，トランスバーラ草地では放牧 2 年目の冬季にわずかに不足した。集約的な周年放牧管理として滞牧期間を 7 日間，休牧期間を 30 日前後とした輪換放牧に退牧後の施肥管理（要素量：4.8 kgN/10a）を組合せることで，ジャイアントスターグラス草地では 2,227 CD/ha，トランスバーラ草地では 1,942 CD/ha の高い牧養力を維持できることが明らかとなった。

以上より，当地域の暖地型牧草を主体とする放牧地では，約 1 ヶ月間の休牧期間を設けた周年輪換放牧方式に，採草利用後の化成肥料施用量よりも約 50%減肥した退牧後の施肥管理を組合せることで，高い年間牧養力（5.5－6.1/ha）が維持できることが明らかとなった。このことは，当地域で暖地型牧草を中心とした持続的かつ集約的な肉用牛生産システムを構築するうえでの基礎知見となると考えられる。

Study on fertilizer management for year-round grazing of tropical grasses in south-western island Okinawa, Japan

Summary

The study was conducted to develop the intensive grazing management system of tropical grasses by clarify fertilizer management and grazing capacity on acid soil (Red-yellow acid soil, pH4-5) in subtropical Okinawa, Japan. Intensive grazing management system on acid soil was developed by studying the growth response of tropical grasses affected by phosphoric acid application and soil pH, ^{15}N -labelled fertilizer recovery and carrying capacity.

1. Field experiment of sudangrass (*Sorghum sudanense* [Piper] Stapf cv. Rich sudan, Sg), signalgrass (*Brachiaria decumbens* Stapf cv. Basilisk, Bd), and digitgrass (*Digitaria eriantha* Steud. cv. Transvala, Tr) examined the effects of phosphorous fertilizer on the growth in red-yellow acid soil. Results of the experiment suggested that tropical grasses could be cultivated on red-yellow acid soil in subtropical Okinawa with the reducing phosphorus fertilizer.

2. Pot experiment of sudangrass (*Sorghum sudanense* [Piper] Stapf cv. Rich sudan, Sg), signalgrass (*Brachiaria decumbens*

Stapf cv. Basilisk, Bd), and digitgrass (*Digitaria eriantha* Steud. cv. Transvala, Tr) was conducted to determine the optimum application rate of lime (calcium carbonate) and phosphorous fertilizer in red-yellow acid soil in Okinawa, Japan. As the application rate of calcium carbonate increased, the concentration of exchangeable aluminum significantly decreased in the soil. Lime application was highly effective in the growth for Sg, but not for Bd or Tr. The critical level of phosphoric required in the soil is more than 2.3 and 2.1 mg ($P_2O_5/100g$ dry soil) for Bd and Tr, respectively.

3. This study was carried out to clarify the efficiency of applied nitrogen fertilizer using ^{15}N -labelled fertilizer (^{15}N) on rotational grazing pastures of giant stargrass (Gs) and transvala digitgrass (Tr) in subtropical Okinawa. Dry matter yield, total nitrogen content and ^{15}N recovery rate of the available herbages were not significantly different between Gs and Tr pastures. The efficiency of nitrogen fertilizer on the available herbages was 33.8 and 31.8% in Gs and Tr pastures, respectively. The fertilized ^{15}N in the stubbles and roots, rhizosphere soils and available herbages averaged across the two grass pastures was recovered by 5.1, 10.7 and 32.8%, respectively. ^{15}N recovery rate in the plant-soil system averaged across both Gs and Tr pastures was 48.5%, which

means that 51.5% of applied nitrogen fertilizer was lost from the soil-plant system in the present subtropical grazing pastures.

4. Rotarional grazing experiment was conducted to compare pasture utilization and herbage accumulation responses of digitgrass (*Digitaria eriantha* Steud. cv. Transvala, Tr) and giant stargrass (*Cynodon nlemfuensis* Vanderyst, Gs) in subtropical Okinawa. The experiment was evaluated in 2002 and 2003 by grazing with Breeding Japanese Black Cattle. Mean value of pasture allowance before grazing of Tr was lower than that of Gs, because crop growth rate (CGR) in non-grazing period of Tr was lower than that of Gs in both summer and winter seasons. The annual mean herbage intake and TDN intake of Gs were estimated in both year. Carrying capacity obtained on the Tr and Gs pasture were 1,942 CD/ha and 2,227 CD/ha, respectively. Grazing cycle (7 days grazing period and about 30 days non-grazing period) was desirable for Gs at more than stocking rate of 6.9 head/ha in summer, but 4.2 head/ha in winter. On the other hand, it was desirable for Tr pasture at stocking rate of 6.5 head/ha, but less than stocking rate of 3.4 head/ha, which was subject to overgrazing because it remarkably decreased herbage mass in winter with below 20°C.

謝 辞

本研究の遂行ならびに本論文の作成にあたり，琉球大学農学部
の Md. Amzad Hossain 博士（主指導教員），伊村嘉美博士（第一
副指導教員）には有意義な御指導を頂き謹んで御礼申し上げます。
本論文の審査にあたり，鹿児島大学農学部の中西良孝博士（第二
副指導教員），佐賀大学農学部の鄭紹輝博士，琉球大学農学部の赤
嶺光博士に御助言を賜り厚く御礼申し上げます。元琉球大学農学
部の川本康博博士，玉城政信博士には長きに渡り，御指導および
御助言を頂き，謹んで感謝の意を表します。本論文の作成にあた
って多大なる御理解を賜った琉球大学農学部附属亜熱帯フィー
ルド科学教育研究センターのセンター長である内藤重之博士に
感謝申し上げます。また，本研究の実施にあたり，多大なる御協
力を頂きました琉球大学農学部草地学研究室に在籍していた諸
先輩方，卒業生の皆様に深く感謝申し上げます。

資料



スーダングラス栽培試験区



シグナルグラス，トランスバーラ栽培試験区

写真 1：第 2 章試験地（東村）の概要



スーダングラス
品種リッチスーダン

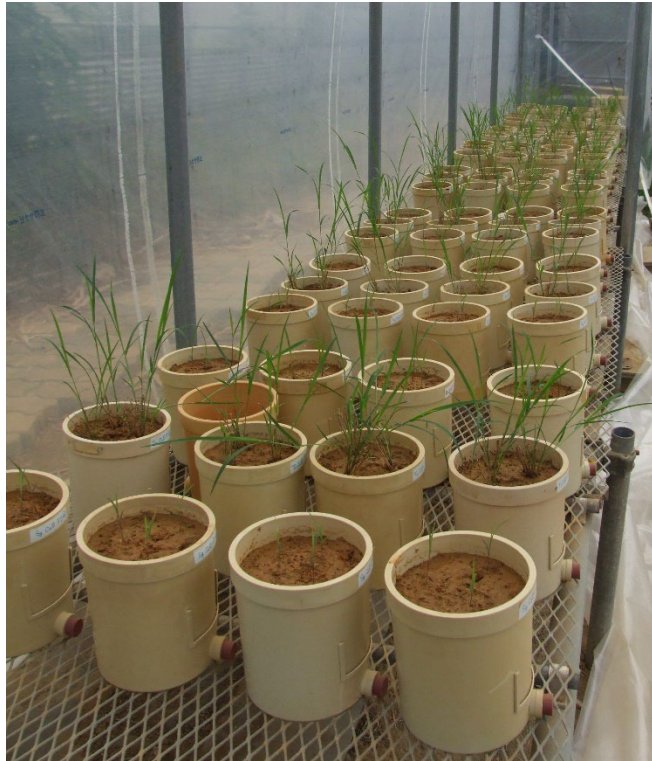


シグナルグラス
品種バシリスク



ディジットグラス
品種トランスパーラ

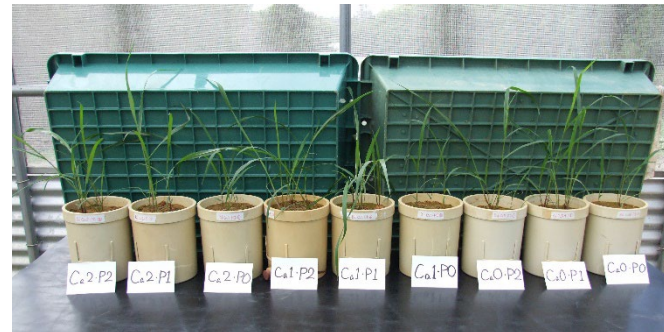
写真 2：第 2 章および第 3 章の供試草種



試験開始直後の様子



スーダングラス全処理区の様子（試験開始より 17 日目）



シグナルグラス全処理区の様子（試験開始より 17 日目）



トランスバーラ全処理区の様子（試験開始より 17 日目）

写真 3：第 3 章（ポット栽培試験）の様子



放牧地造成前の試験地の様子

(国頭マージ土壤)



試験地（輪換放牧牧草地）の様子

写真 4：第 4 章および第 5 章試験地（大宜味村）の概要①



輪換放牧の様子



供試草種：ジャイアントスターグラス



^{15}N トレーサ試験 (^{15}N 混合肥料施用区) の様子

写真 5：第 4 章および第 5 章試験地（大宜味村）の概要②

引用文献

- 足立嗣夫・興古田幹也（1981）主要土壌群の生産的特性．九州農業試験場研究資料 60:1-35
- Adams F (1984) Soil Acidity and Liming-Agronomy Monograph 12, 2nd Edition. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Inc., South Segoe Road, Madison, USA, p353-356
- Adjei MB, Mislevy P, Ward CY (1980) Response of tropical grasses to stocking rate. Agron J, 72: 863-868
- Adjei MB, Mislevy P, West RL (1988) Effect of stocking rate on the location of storage carbohydrates in the stubble of tropical grasses. Trop Grassl, 22:50-56.
- Andrew CS, Robins MF (1971) The effect of phosphorus on the growth, chemical composition, and critical phosphorus percentages of some tropical pasture grasses. Aust J Agric Res, 22: 693-706
- Cathpoole VR (1975) Pathways for losses of fertilizer nitrogen from a Rhodes grass pasture in South-eastern Queensland. Aust J Agric Res, 26: 259-268.
- Centro Internacional De Agricul Tropical (CIAT) (1981) Tropical pastures program annual report 1980. Soil Fertility and Plant Nutrition. Colombia, p55-56

知念雅昭・嘉手苺佳太・高江洲 斉・小山裕美子（2020）夏・秋期
における強害雑草の実態調査. 沖縄畜産, 55:55-59

知念 司・嘉陽 稔・川本康博・与古田 稔（2001）パンゴラグラス
（品種：トランスバーラ）とジャイアントスターグラスの生
産性の比較. 1.刈取り適期と窒素施肥量. 沖縄畜試研報,
39:84-88

土壌養分測定法委員会（1991）8.アルミニウム. 土壌養分分析法
（土壌養分測定法委員会編），養賢堂，東京，p86-93

蝦名真澄・幸喜香織（2009）特集－暖地型牧草の育種－ギニアグ
ラスの育種経緯と品種および利用. 日草誌, 55:172-178

Flores CI, Clark RB, Gourley LM (1988) Growth and yield
traits of sorghum grown on acid soil at varied aluminum
saturation. Plant Soil 106: 49-57

Goto I, Minson DJ (1977) Prediction of the dry matter
digestibility of tropical grasses using a pepsin-cellulase
assay. Animal Feed Sci Techn 2:247-253

花ヶ崎敬資・望月智代・守川信夫・長利真幸・當間嗣平・真境名
元次（2006）導入暖地型牧草の適応品種選定試験（2001～
2005年）(2)可消化乾物収量および粗タンパク質収量の比較.
沖縄畜研セ研報.44:79-88

原田 勇（1967）牧草の初期生育に及ぼす施肥位置の検討. 牧草に
おける養分吸収過程ならびにそれに基づく合理的施肥法に
関する研究（第6報）. 土肥誌 38: 351-356

- 原田久富美・須永義人・畠中哲也（1998）低リン条件下における
牧野草のリン吸収能力の比較．草地試研報 56: 21-27
- Haynes RJ (1982) Effects of liming on phosphate availability
in acid soils. Plant Soil 68: 289-308
- 宝示戸雅之・佐藤辰四郎・高尾鉄弥（1983）草地土壌の酸性化に
伴うアルミニウム溶出と牧草生育．北海道立農試集報 50:
43-53
- 宝示戸雅之・能代昌雄（1990）アルミニウム存在下における牧草
のリン吸収．土肥誌 61: 598-605
- Impithuksa V, Blue WG. (1985) Fertilizer nitrogen and
nitrogen-15 in three warm-season grasses grown on a
Florida Spodosol. Soil Sci Soc Am J, 49:1201-1204.
- 石橋 晃（2001）新編動物栄養試験法．（石橋 晃監修），養賢堂，
東京， p501-503
- Ishikawa S, Wagatsuma T, Sasaki R, Paul OM (2000)
Comparison of the amount of citric and malic acids in Al
media of seven plant species and two cultivars each in five
plant species. Soil Sci Plant Nutr 46: 751-758
- Jones RJ (1990) Phosphorus and beef production in northern
Australia. 1. Phosphorus and pasture productivity – a
review. Trop Grassl 24: 131-139
- 亀和田國彦（2000）7. 交換性陽イオン・陰イオン．土壌環境分析
法（日本土壌肥料学会監修），博友社，東京， p218-219

Kamprath EJ (2003) Soil acidity and liming. In: Papers Commemorating a Century of Soil Science. Soil Science Society of North Carolina. North Carolina, USA, p103-111, <http://sssnc.org/home> [cited 21 June 2011]

嘉陽 稔・与古田 稔 (1999) トランスバーラの放牧適応性.

沖縄畜試研報, 37: 87-90

川本康博 (1998) 暖地型牧草の家畜栄養的特性と南西諸島における利用上のいくつかの問題点. 日草九支報 28:7-15

川本康博 (2001) 南西諸島における新放牧システムの開発と牧養力の評価に関する研究. 平成 12 年度食肉に関する助成研究調査成果報告書, 伊藤記念財団報告書, 19:164-169

川本康博 (2002) 南西諸島の新放牧システムの開発と牧養力の評価に関する研究, 2 ジャイアントスターグラスの周年放牧草地における黒毛和種繁殖牛の牧養力と施肥窒素効率. 平成 13 年度食肉に関する助成研究調査成果報告書, 伊藤記念財団, 東京, 20: 181-185

川本康博 (2004) 持続的な周年利用草地のための造成技術と維持管理. 南西諸島での事例を中心に. 日草誌 50: 90-98

川本康博 (2008) 放牧による高牧養力草地管理 (<特集> 暖地型牧草による自給飼料生産基盤の特性). 日草誌 54:276-279

木村 武・倉島健次 (1983) 牧草カルシウムとマグネシウム吸収に及ぼす土壌中のこれらの塩基の相互作用. 土肥誌 54: 281-287

気象庁（2010）気象統計情報．国土交通省，東京，
<http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html> [2010年8月1
日参照]

北村征生・阿部二郎・堀端俊造（1982）南西諸島におけるイネ科
飼料作物の栽培と利用．1.ローズグラス，ギニアグラスおよ
びネピアグラスの乾物収量におよぼす刈取間隔および生育
季節の影響．日草誌 28:33-40

北村征生・尾形昭逸（1985）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．X. 国頭および島尻マージにおけ
る暖地型マメ科牧草の乾物生産量におよぼす燐および石灰
施与の影響．日草誌 31: 59-66

北村征生・庄子一成（1985）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．XI. 国頭および島尻マージにおけ
る暖地型マメ科およびイネ科牧草の燐酸施与に対する生育
反応．日草誌 31: 67-75

北村征生（1986 a）南西諸島で栽培した暖地型イネ科 7 草種の乾
物，可消化乾物および窒素の施与量と種類および刈取間隔の
影響．草試研報 33:36-49

北村征生（1986 b）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

久場峯子・オスカーキュロイ・セッサアウグストルナゴンザレ
ス（1989）国頭マージにおける炭カルおよびバガス堆肥施用

- が土壌酸性・土壌肥沃度およびソルゴーの生育に及ぼす影響.
 沖縄農試研報 13: 111-126
- 松木順子・浅野朋浩・石橋 晃 (2009) 飼料学 (58) -飼料原料-.
 畜産の研究 63: 821-830
- May LH. (1960) The utilization of carbohydrate reserves in
 pasture plants after defoliation. *Herbage Abstr*, 30: 239-
 245
- Minson DJ(1990) The chemical composition and nutritive value
 of tropical grasses, In *Tropical Grasses* (Ed. Skermana
 PJ and Riveros F), FAO, Rome.p163-180
- Minson DJ, Stobbs TH, Hegarty MP, Playne M(1976) Measuring
 the nutritive value of pasture plant. In : *Tropical Pasture
 Research* (Eds Shaw NH, Bryan W) ,CAB, England, p308-
 337
- 宮城常夫・島袋正雄 (1966) 暖地型牧草に対する三要素試験. 第
 1 報 暖地型牧草に対する磷酸の効果. 沖縄畜産 1: 32-33
- 水町 進・新城 健・川本康博・仲田 正 (2009a) ギニアグラスお
 よびセタリアの栄養価に及ぼす刈取間隔の影響. 日暖畜報,
 52 : 17-26
- 水町 進・新城 健・川本康博・仲田 正 (2009b) ギニアグラスお
 よびセタリアの乾物生産性に及ぼす刈取間隔の影響. 日草誌
 55:199-205
- 水町 進・新城 健・川本康博 (2011) 八重山地域・西表島におけ

る暖地型イネ科牧草の生育特性と適草種の選定．日暖畜報，
54：61-70

望月智代・守川信夫・長利真幸・當眞嗣平・真境名元次（2005）
導入暖地型牧草の適応品種選定試験（2001～2005年）（1）成
育特性および乾物収量の比較．沖縄畜試研報．43:30-37

Moser LE, Burson BL, Sollenberger LE (2004) In Warm-season
(C₄) Grasses. American Society of Agronomy, Crop Science
Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, USA, p715-
743, 1057-1079

本村 琢・水町 進・川本康博（2002）パンゴラグラス品種トラン
スバーラ（*Digitaria decumbens* cv. Transvala）の嗜好性の
要因について．沖縄畜産研究会誌 37:21-24

仲宗根一哉・前川 勇・伊佐真太郎・森山高広・庄子一成・大城
真栄・玉代勢秀正（1989）マージ土壌におけるギニアグラス
およびグリーンパニックの生育反応．沖縄畜試研報 26: 71-
84

波平知之・ブリノスマジャイ・水町 進・浅野陽樹・川本康博・仲
田 正（2003）南西諸島の冬季におけるジャイアントスター
グラス（*Cynodon aethiopicus* Clayton & Harlan）草地に対
する窒素施肥量と寒地型牧草イタリアンライグラス（*Lolium*
multiflorum Lam）追播の効果．西畜会報，46：63-69

波平知之・川本康博・玉城政信・仲田 正（2002）暖地型イネ科
牧草3草種における刈取り高さが乾物生産および貯蔵性炭水

- 化物の蓄積に及ぼす影響．西畜会報，45：85-88
- 波平知之・長嶺美加子・水町 進・Smerjai Bureenok・宮城 尚・
川本康博・玉城政信・仲田 正（2005）南西諸島における暖地
型イネ科牧草ジャイアントスターグラス（*Cynodon
nlemfuensis* Vandyke）草地の乾物収量および栄養価に及
ぼす刈取間隔の影響．日草誌，51：257-262
- 南篠正巳（2000）12．可給態リン酸．土壤環境分析法（日本土壤
肥料学会監修），博友社，東京，p267-269
- 新田孝子・森山高広・池田正治（1991）沖縄県における主要土壤
群草地のミネラル分布（1）宮古諸島・八重山諸島における草
地土壤の特性．沖縄畜試研報 29：119-129
- 新田孝子・森山高広・池田正治（1992）沖縄県における主要土壤
群草地のミネラル分布（2）沖縄本島北部における草地土壤の
特性．沖縄畜試研報 30：87-91
- 農業・食品産業技術総合研究機構（2008）日本飼養標準肉用牛
（2008年版）．中央畜産会，東京，p34
- 農林水産省生産局（2006）草地の植生管理．草地管理指標―草地の
維持管理編―．日本草地畜産種子協会．東京，p56-88
- 沖縄県畜産試験場（1983）畜産試験場のあゆみ．沖縄県農林水産
部，沖縄，p129
- 沖縄県畜産試験場（1999）牧草・飼料作物栽培の手引き．沖縄畜
試 No17 資料，沖縄，p19-32
- 沖縄県農業試験場（1979）地力保全基本調査総合成績書．沖縄県

農業試験場，沖縄，p276

沖縄県農林水産部畜産課（2010）おきなわの畜産．沖縄県農林水産部畜産課．沖縄，p33

沖縄県農林水産部畜産課（2019）おきなわの畜産．沖縄県農林水産部畜産課．沖縄，p32-33

沖縄県農林水産部畜産課（2020）おきなわの畜産．沖縄県農林水産部畜産課．沖縄，p2，32

沖縄県農林水産部畜産課（2021）おきなわの畜産．沖縄県農林水産部畜産課．沖縄，p2，5

大城真栄・前川 勇・仲宗根一哉・庄子一成・伊佐真太郎・福地 稔

（1986）草地土壌の改良に関する試験．第3紀泥灰岩（クチャ）および石灰岩の土壌改良効果．沖縄畜試研報 24: 23-60

大屋一弘（1965）沖縄本島土壌における石灰とリン酸の肥効．沖縄農業 4: 41-44

Oya K, Higa M (1995) Physical and chemical properties of the soil in the reclaimed land and forest of Iriomote island. Sci Bull Coll Agric Univ Ryukyus 42: 109-116

Pitman WD, Chambliss CG, Hacker JB (2004) Digitgrass and other species of digitaria. In: Warm-season (C_4) grasses (Eds Moser LE, Burson BL, Sollenberger LE), ASA, CSSA, SSSA, Madison, Wisconsin, Agronomy 45:715-743

三枝正彦（1991）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
- 実岡寛文・神田則昭・尾形昭逸（1986）暖地型飼料作物の不良土壌耐性の草種間差異．日草誌 32: 251-260
- 瀬戸口 暁・大石風人・熊谷 元・今井裕理子・川本康博・広岡博之（2017）亜熱帯地域における褐毛和種去勢牛周年放牧肥育に関する環境影響評価．システム農学, 33: 1-9
- 志茂守孝・渡嘉敷義浩・大屋一弘（1985）可給態リン酸測定法について．第1報 Truog 法, Bray No.2 法及び HSPA 法の比較検討．琉大農学報 32: 49-54
- 下野勝昭（1990）多湿黒ボク土の土壌 pH が畑作の生育，収量に及ぼす影響．土肥誌 61: 8-15
- 新城 健・星野正生（1997）草地による環境保全技術の確立．（1）環境保全のための適草種の選定と草地造成時におけるリン酸施肥の効果．琉大農学報 44: 323-329
- Sollenberger LE（2008）Sustainable production systems for *Cynodon* species in the Subtropics and tropics. *Revista Brasileira de Zootecnia* 37:85-100
- 杉本安寛・平田昌彦・上野昌彦（1991）バヒアグラス（*Paspalum notatum* FLÜGGE）放牧草地におけるエネルギーと物質の流れにおよぼす家畜の排糞の影響．日草誌, 36:376-383
- 杉本安寛・永松勝彦・上野昌彦・武藤 勲・豊満幸雄（1994）放牧地における尿窒素の動態に関する研究 2.バヒアグラス（*Paspalum notatum* Flüge）草地における ^{15}N -尿素態窒素

を指標とした牛尿窒素の動態．日草誌， 40:325-332

Sugimoto Y, Hirata M, Ueno M (1985) Fate of ^{15}N -labelled fertilizer nitrogen applied at different time of the year on bahiagrass pasture. Proceeding of the XV international grassland congress, Kyoto, 495-496.

庄子貞雄・三枝正彦・後藤 純（1986）黒ボク土下層の酸性状態とソルガムの窒素吸収および生育について．土肥誌 57: 264-271

但野利秋・田中 明（1980）低リン酸培養液濃度が初期生育に及ぼす影響の作物種間差．土肥誌 51: 399-404.

Taliaferro CM, Rouquette FM, Mislevy P (2004) Bermudagrass and stargrass. In: Warm-season (C_4) grasses (Eds Moser LE, Burson BL, Sollenberger LE) , ASA, CSSA, SSSA, Madison, Madison, Wisconsin, Agronomy 45:438

田中 明（1984）酸性土壌とその農業利用（日本土壌肥料学会監修），博友社，東京， p217-294

Tan K, Keltjens WG, Findenegg GR (1992) Acid soil damage in sorghum genotypes: Role of magnesium deficiency and root impairment. Plant Soil 139: 149-155

田代 豊・高平謙次（2001）宮古島における窒素負荷発生量と地下水窒素濃度の長期的推移．水環境学会誌， 24： 733-738

當眞嗣平・知念 司・嘉陽 稔・与古田 稔・守川信夫・真境名元次（2002）パンゴラグラス（品種：トランスバーラ）とジャイ

- アントスターグラスの生産性の比較(2)窒素施肥量と刈取間隔が栄養価に及ぼす影響. 沖縄畜試研報, 40: 98-103
- 眞嗣平・守川信夫・長利真幸・望月智代・知念 司・与古田 稔・真境名元次(2003) トランスバーラとジャイアントスターグラスの放牧利用における特性比較(1)草地利用率と採食量および牧養力の比較. 沖縄畜試研報, 41:108-112
- 眞嗣平・守川信夫・長利真幸・望月智代(2005) トランスバーラとジャイアントスターグラスの放牧利用における特性比較(2) 栄養摂取量の比較. 沖縄畜研セ研報, 43:58-61
- Vallis I, Henzell EF, Martin AE, Ross PJ. 1973. Isotopic studies on the uptake of nitrogen by pasture plants, V. ^{15}N balance experiments in field microplots. Aust J of Agr Res, 24: 693-702.
- Vendramini JMB, Newman YC, Sollenberger LE (2009) Digitgrass. Institute of Food Agricultural Sciences, University of Florida. Gainesville, <http://edis.ifas.ufl.edu/pdf/DS/DS12400>. Pdf [Cited 1 September 2010]
- Walker ME, Marchant WW, Ethredge WJ (1975) Effects of soil pH on forage yield, and chemical composition of sorghum and millet. Agron J 167: 191-193
- Whiteman PC (1980) Tropical Pasture Science. Oxford university press. New York, USA, p47-48

Wilson JR, Haydock KP (1971) The comparative response of tropical and temperate grasses to varying levels of nitrogen and phosphorus nutrition. Aust J Agric Res 22: 573-587

Wilson JR, Minson DJ (1980) Prospects for improving the digestibility and intake of tropical grasses. Trop Grassl 14:253-259

屋良朝宣・清水法明・波平知之・玉城政信・村田正将・大川威武
貴・桃井 唯・西澤 優（2017）八重山地域の共同利用牧場に
おける放牧牛の日中行動について．日暖畜誌 60:151-156

吉田智彦（2002）ソルガムとトウジンビエの生産と多収育種．
日作紀 71: 147-153