

ロールベールラップサイロの広域流通に向けた
基盤技術に関する研究

2021年1月

松尾 守展

ロールベールラップサイロの広域流通に向けた
基盤技術に関する研究

筑波大学大学院

生命環境科学研究科

先端農業技術科学専攻

博士（農学）学位論文

松尾 守展

目次

第1章	序論	…	1
1.1	日本の食料自給率の現状	…	2
1.2	我が国の飼料生産・利用における問題点とその対策	…	9
1.3	国産飼料の広域流通におけるソフト面の課題	…	20
1.4	国産飼料の広域流通におけるハード面の課題	…	27
1.5	本研究のねらいと本論文の構成	…	30
第2章	プラスチックフィルムで被覆された小規模サイロを用いた含水率非破壊推定の基礎実験	…	33
2.1	はじめに	…	34
2.2	材料と方法	…	35
2.2.1	測定用サンプルの調製	…	35
2.2.2	測定装置の接続および設定	…	37
2.2.3	測定手順およびデータ解析	…	42
2.3	結果	…	43
2.3.1	位相変化 ($\Delta\phi$) と振幅変化 ($\Delta\alpha$) との関係	…	43
2.3.2	$\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio の周波数特性	…	48
2.3.3	$\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio と含水率との関係	…	51
2.4	考察	…	54
2.5	要約	…	56
第3章	実規模のロールベールラップサイロにおける含水率非破壊推定技術の検証	…	57
3.1	はじめに	…	58
3.2	材料と方法	…	59
3.2.1	供試飼料	…	59
3.2.2	測定装置の接続および設定	…	62
3.2.3	電磁波の測定手順	…	65
3.2.3.1	電磁波の touch 測定	…	65
3.2.3.2	電磁波の press 測定	…	67
3.2.4	電磁波のデータ解析	…	69
3.3	結果	…	70

3.3.1	位相変化 ($\Delta\phi$) と振幅変化 ($\Delta\alpha$) との関係	…	70
3.3.2	$\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio と含水率との関係	…	74
3.4	考察	…	77
3.4.1	ラップサイロにおいて測定した電磁波の $\Delta\phi$ と $\Delta\alpha$	…	77
3.4.2	$\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio と含水率との関係	…	82
3.5	要約	…	83
第4章	ロールベールラップサイロの広域流通に向けた簡易荷役具の開発	…	85
4.1	はじめに	…	86
4.2	材料と方法	…	86
4.2.1	開発目標の設定	…	86
4.2.2	荷役具の試作	…	89
4.2.3	荷役試験に供試したラップサイロ	…	92
4.2.4	荷役具の着脱およびトラックへの積載における作業性の調査	…	92
4.2.5	荷役具およびラップサイロの損傷と荷役の安定性の評価	…	96
4.2.6	TMR への適用拡大	…	96
4.3	結果	…	97
4.3.1	荷役具の概略	…	97
4.3.2	ラップサイロへの荷役具の着脱およびトラックへの積載における作業性	…	101
4.3.3	荷役具およびラップサイロの損傷と荷役の安定性	…	111
4.3.4	TMR への適用拡大	…	113
4.4	考察	…	118
4.5	要約	…	120
第5章	総合考察	…	121
5.1	本研究の有効性	…	122
5.2	本研究の応用・展開	…	126
5.3	残された課題	…	130
5.4	今後の展望	…	133
	摘要	…	136
	Summary	…	139
	謝辞	…	142
	関連業績リスト	…	146
	引用文献	…	148

図目次

図 1-1	我が国および諸外国の食料自給率	…	4
図 1-2	国民 1 人・1 年あたり供給純食料	…	5
図 1-3	国内農業における作目毎の生産・消費仕向額の内訳 (2019 年)	…	6
図 1-4	品目別の食料自給率	…	7
図 1-5	畜産物と飼料における自給率の内訳	…	8
図 1-6	乳用牛の飼養戸数および頭数	…	15
図 1-7	飼料作物の作付面積 (牧草)	…	16
図 1-8	飼料作物の作付面積 (青刈りトウモロコシ)	…	17
図 1-9	飼料作物の作付面積 (稲発酵粗飼料・飼料用米)	…	18
図 1-10	乾草およびサイレージの収穫・調製作業体系の例	…	26
図 1-11	バールハンドラの分類 (グリップ式およびリフト式)	…	29
図 1-12	本論文における章構成	…	31
図 2-1	MSTL の構造および中心のストリップ導体付近における電磁界	…	38
図 2-2	VNA および MSTL による測定イメージ	…	39
図 2-3	測定レイアウト	…	40
図 2-4	3.6 GHz における位相変化 ($\Delta\phi$) と振幅変化 ($\Delta\alpha$) との関係 (ライムギ)	…	44
図 2-5	3.6 GHz における位相変化 ($\Delta\phi$) と振幅変化 ($\Delta\alpha$) との関係 (トウモロコシ)	…	45
図 2-6	位相変化 ($\Delta\phi$) と振幅変化 ($\Delta\alpha$) との相関 (ライムギ)	…	46
図 2-7	位相変化 ($\Delta\phi$) と振幅変化 ($\Delta\alpha$) との相関 (トウモロコシ)	…	47
図 2-8	$\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio の周波数特性 (ライムギ)	…	49
図 2-9	$\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio の周波数特性 (トウモロコシ)	…	50
図 2-10	3.6 GHz における $\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio と含水率との関係	…	52
図 2-11	$\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio と含水率との相関	…	53
図 3-1	電磁波測定ゾーンの設定および測定方法の概略	…	61
図 3-2	VNA および MSTL による測定イメージ	…	63
図 3-3	測定風景 (touch 測定)	…	66
図 3-4	測定風景 (press 測定)	…	68
図 3-5	位相変化 ($\Delta\phi$) と振幅変化 ($\Delta\alpha$) との相関 (touch 測定・3.6 GHz)	…	71
図 3-6	位相変化 ($\Delta\phi$) と振幅変化 ($\Delta\alpha$) との関係 (press 測定・3.6 GHz)	…	72

図 3-7	touch 測定と press 測定における $\Delta\phi$ と $\Delta\alpha$ との相関	…	73
図 3-8	press 測定・3.6 GHz における $\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio と含水率との関係	…	75
図 3-9	press 測定での $\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio と含水率との回帰分析における p 値および R^2	…	76
図 3-10	追加実験のレイアウト	…	80
図 3-11	MSTL を押し当てる荷重と、 $\Delta\phi$ と $\Delta\alpha$ との分布との関係	…	81
図 4-1	グリップ式ベールハンドラによるロールベールラップサイロの荷役風景	…	88
図 4-2	底部エッジからのすくい上げによるラップサイロ荷役方法	…	90
図 4-3	荷役具の基本設計	…	91
図 4-4	ラップサイロ積載・荷下ろし時間計測時の試験レイアウト	…	94
図 4-5	ラップサイロ積載試験時の作業風景	…	95
図 4-6	試作したロールベール荷役具の概略	…	98
図 4-7	試作した荷役具, および胴巻きベルトの長さ調整機構の外観	…	100
図 4-8	荷役具をロールベールラップサイロに被せる様子	…	103
図 4-9	荷役具の補ていロープを引き締める様子	…	104
図 4-10	荷役具の補ていロープを結束しストッパーで固定する様子	…	105
図 4-11	荷役具によるトラック荷台へのラップサイロ搭載作業	…	106
図 4-12	荷役具による水田圃場からのラップサイロ搬出作業	…	107
図 4-13	TMR のラップサイロ向けに簡略化したロールベール荷役具の概略	…	114
図 4-14	荷役具を装着した状態で, 出荷前に TMR センターにて一次貯留されるラップサイロ	…	117
図 5-1	サイレージ調製の各段階における乾物損失	…	129

表目次

表 1-1	イネ WCS の生産における連携・作業形態および流通体制の種類	…	19
表 2-1	供試サンプルの一覧および含水率	…	36
表 2-2	電磁波の測定条件および設定	…	41
表 3-1	供試したロールベールラップサイロ	…	60
表 3-2	電磁波の測定条件および設定	…	64
表 4-1	試作したロールベール荷役具の諸元	…	99
表 4-2	ロールベール荷役具のラップサイロへの着脱作業時間	…	108
表 4-3	ラップサイロのトラック荷台への搭載作業時間	…	109
表 4-4	ラップサイロのトラック荷台からの荷下ろし作業時間	…	110
表 4-5	荷役によるラップサイロ変形量および変形部位	…	112
表 4-6	TMR のラップサイロ向けに簡略化したロールベール荷役具の仕様	…	115
表 4-7	ハンドリングに伴う TMR のラップサイロの変形量	…	116

第 1 章 序論

1.1 日本の食料自給率の現状

我が国の食料自給率は、1960年代には70%台だったが年々減少した。近年は横ばい傾向にあるが30%台後半で、諸外国と比較すると低い水準にある（農林水産省2020a, 図1-1）。つまり我が国は、人間の生命維持に不可欠な食料について、その多くを外国からの輸入に頼っている。我が国の食料安全保障を確保するうえで、このことは重要な問題であり、国内外の様々な要因によって影響を受けない安定した食料供給対策を講じる必要性が指摘されている（農林水産省1999）。

第二次世界大戦後の日本では、食生活が大きく変化した。国民1人・1年あたりの食料消費量を品目別に見ると、1965年から2018年の間に米の消費量が半減してきた一方で、同じ期間に牛乳・乳製品は2.5倍、肉類は3.6倍、鶏卵は1.5倍に消費量が伸びている（農林水産省2020a, 図1-2）。このような消費の拡大に伴って畜産は、国内生産額の27%を、また国内消費仕向額の32%を産出し、日本の農林水産業において重要な位置を占めている（農林水産省2020b, 図1-3）。

これらの畜産物について2019年の品目別自給率を見ると、牛乳・乳製品が62%、肉類が53%、鶏卵が96%となっており、鶏卵は主食用米の97%と遜色ないものの乳製品や肉類は低い（農林水産省2020a, 図1-4）。しかし、この品目別自給率は重量ベースで計算されたものである。家畜の飼料は粗飼料（繊維質の多い牧草類など）と濃厚飼料（デンプンやタンパク質が多い穀実類など）に大別されるが、粗飼料は1980年代から、濃厚飼料は1960年代からそれぞれ自給率が低下している

（農林水産省2020a, 図1-5）。畜産物の品目別自給率を、家畜の飼養に不可欠な飼料の自給率およびその可消化養分総量（Total digestible nutrients, TDN）からカ

ロリーベースの自給率に換算すると、牛乳・乳製品は 25 %、肉類は 7 %、鶏卵は 12 %と顕著に低下する（図 1-5）。すなわち、日本国内で消費される畜産物の多くは国内で生産されているが、家畜の飼養に用いられる飼料の多くは外国からの輸入に依存しており、このように低い飼料自給率が、日本の食料自給率を低下させている要因の 1 つと考えられる。

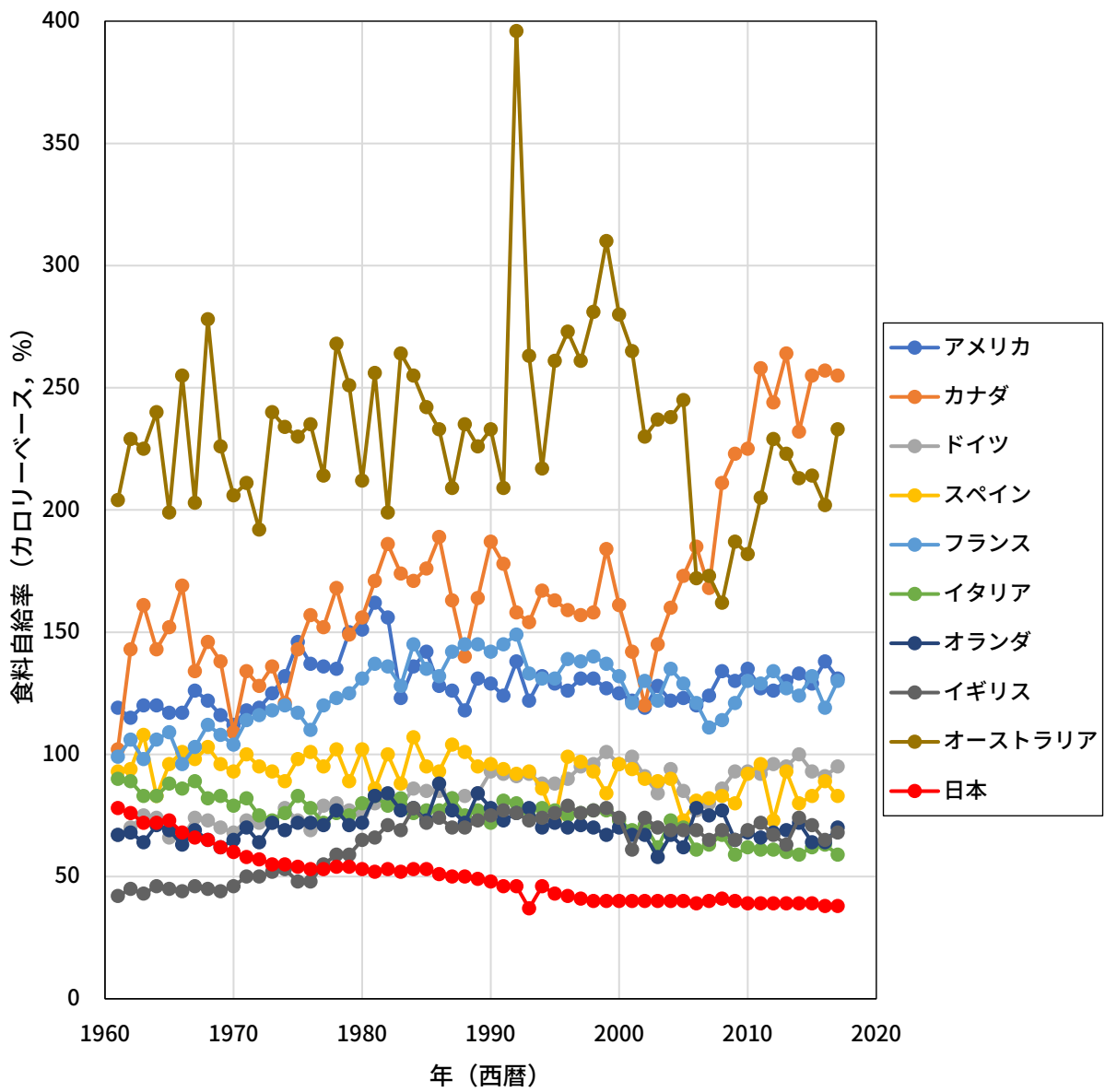


図 1-1. 我が国および諸外国の食料自給率

(農林水産省 2020a より作図)

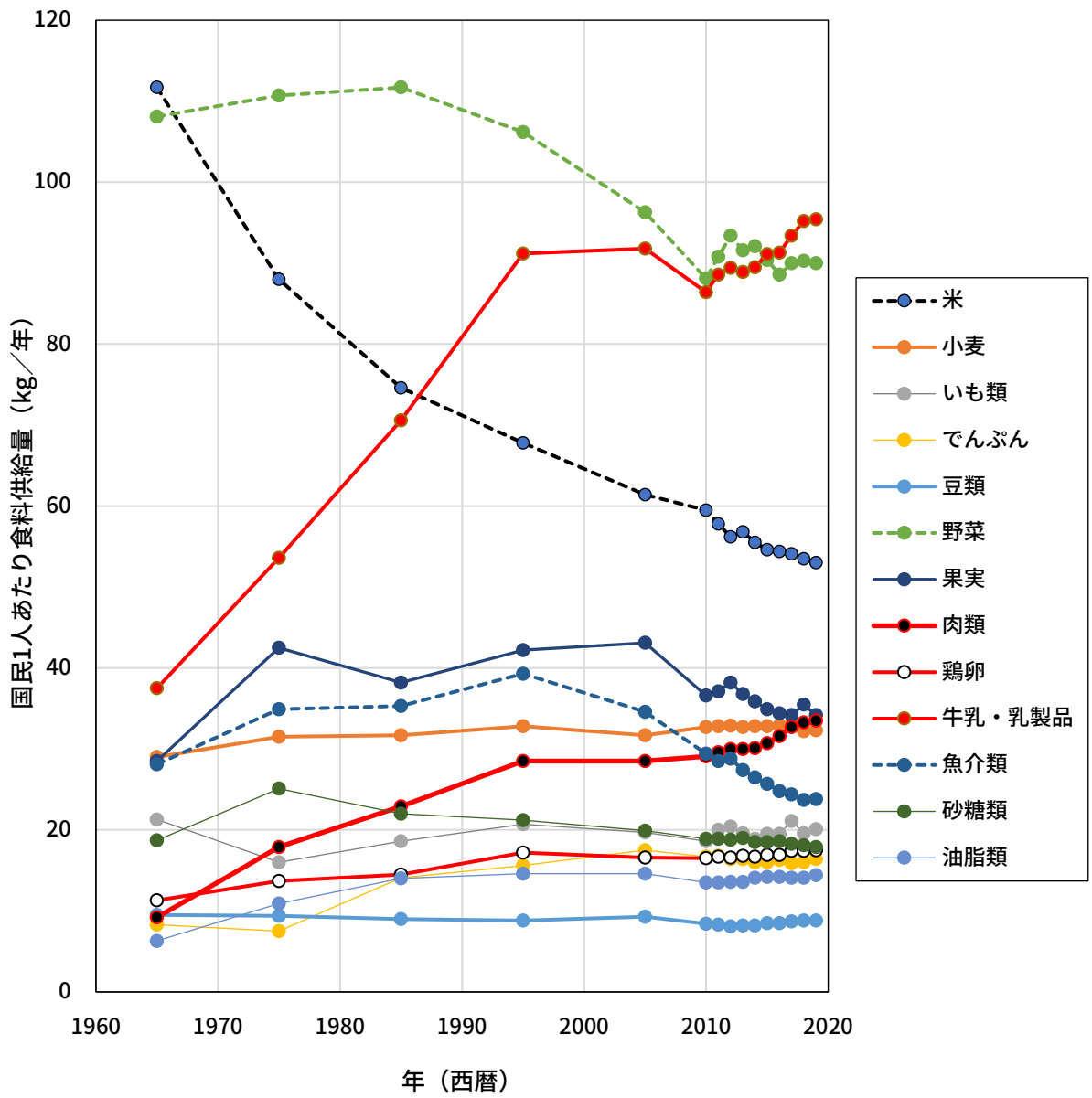


図 1-2. 国民 1 人・1 年あたり供給純食料

(農林水産省 2020a より作図)

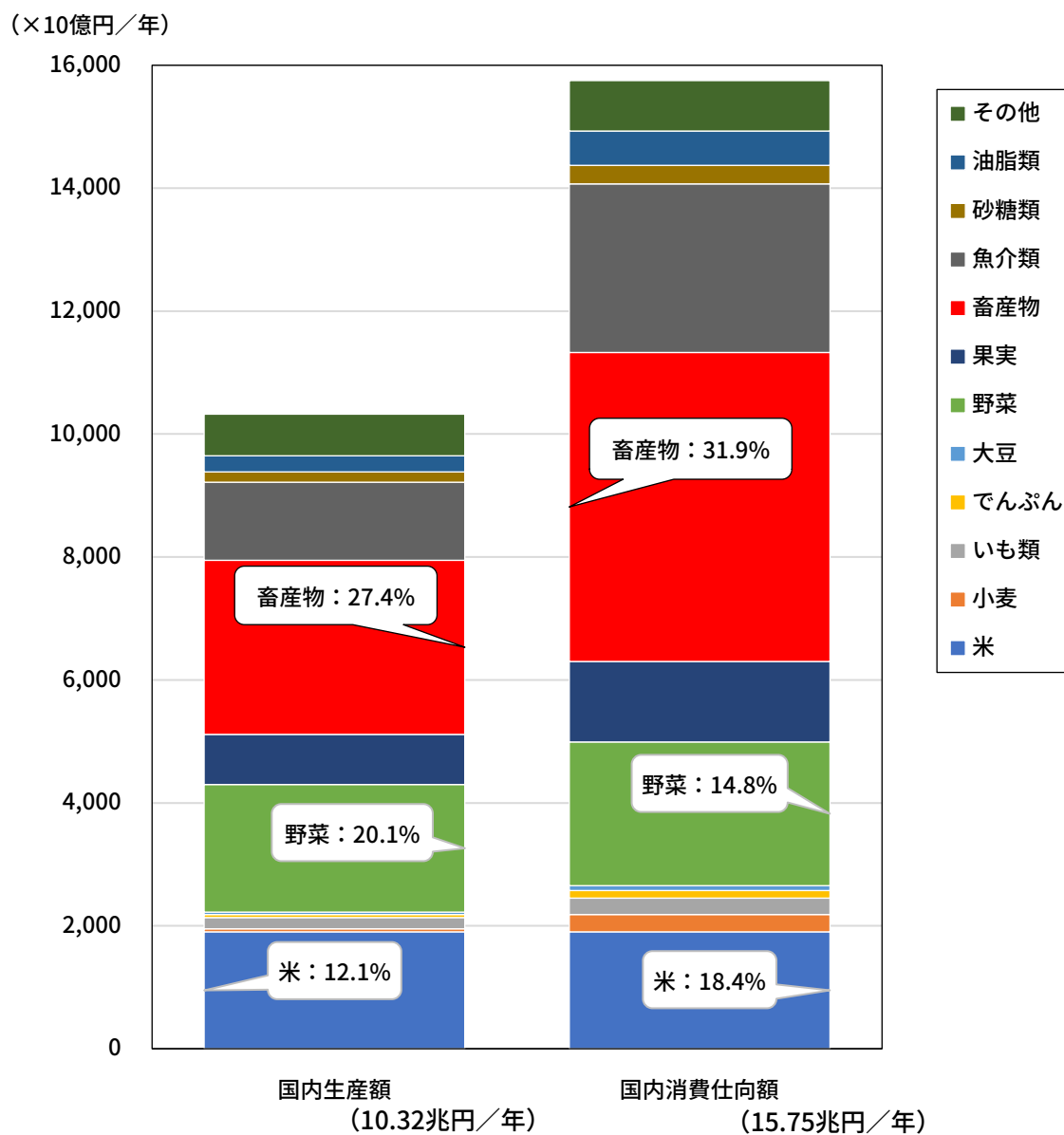


図 1-3. 国内農業における作目毎の生産・消費仕向額の内訳 (2019 年)

(農林水産省 2020b より作図)

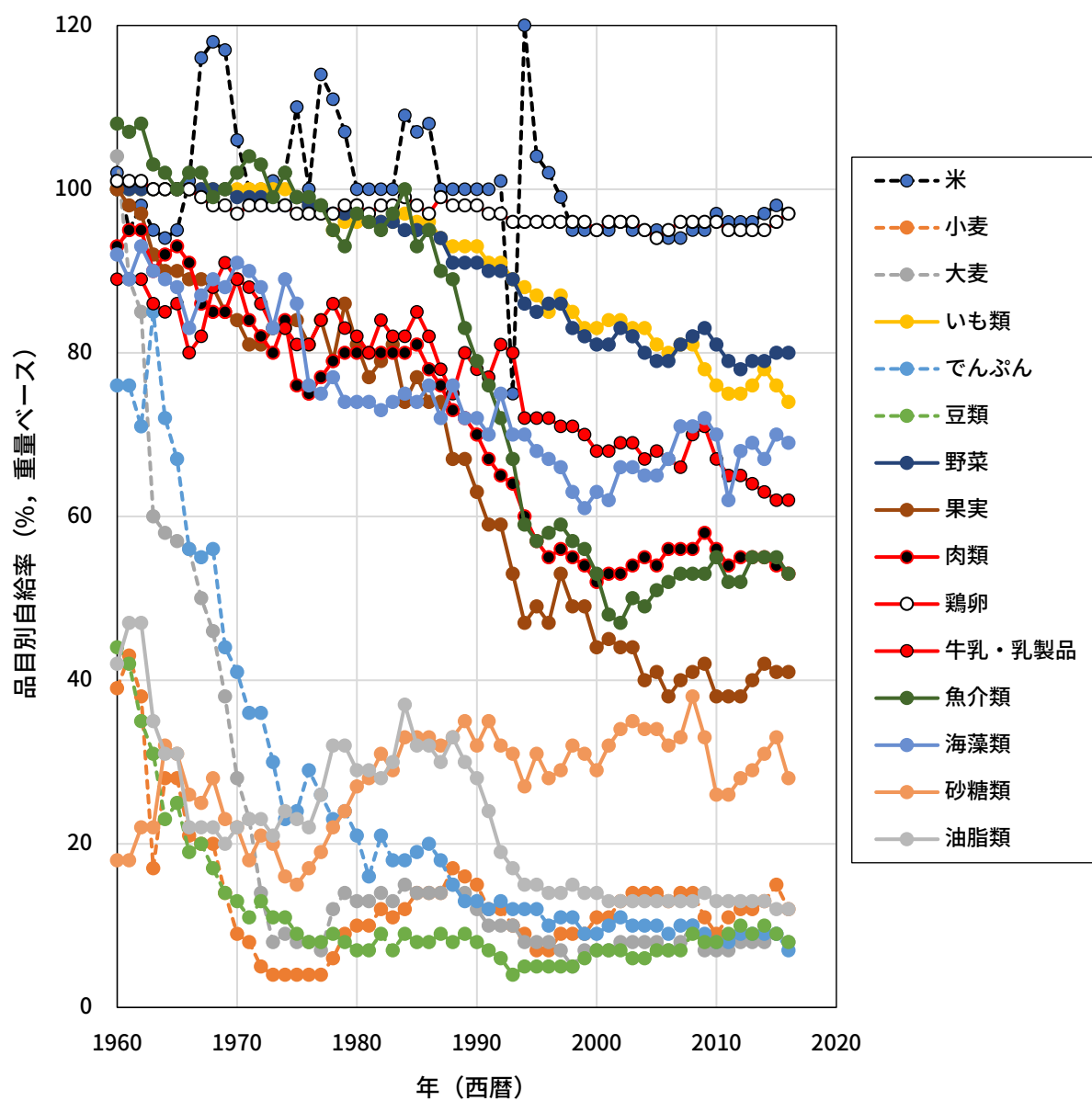


図 1-4. 品目別の食料自給率

(農林水産省 2020a より作図)

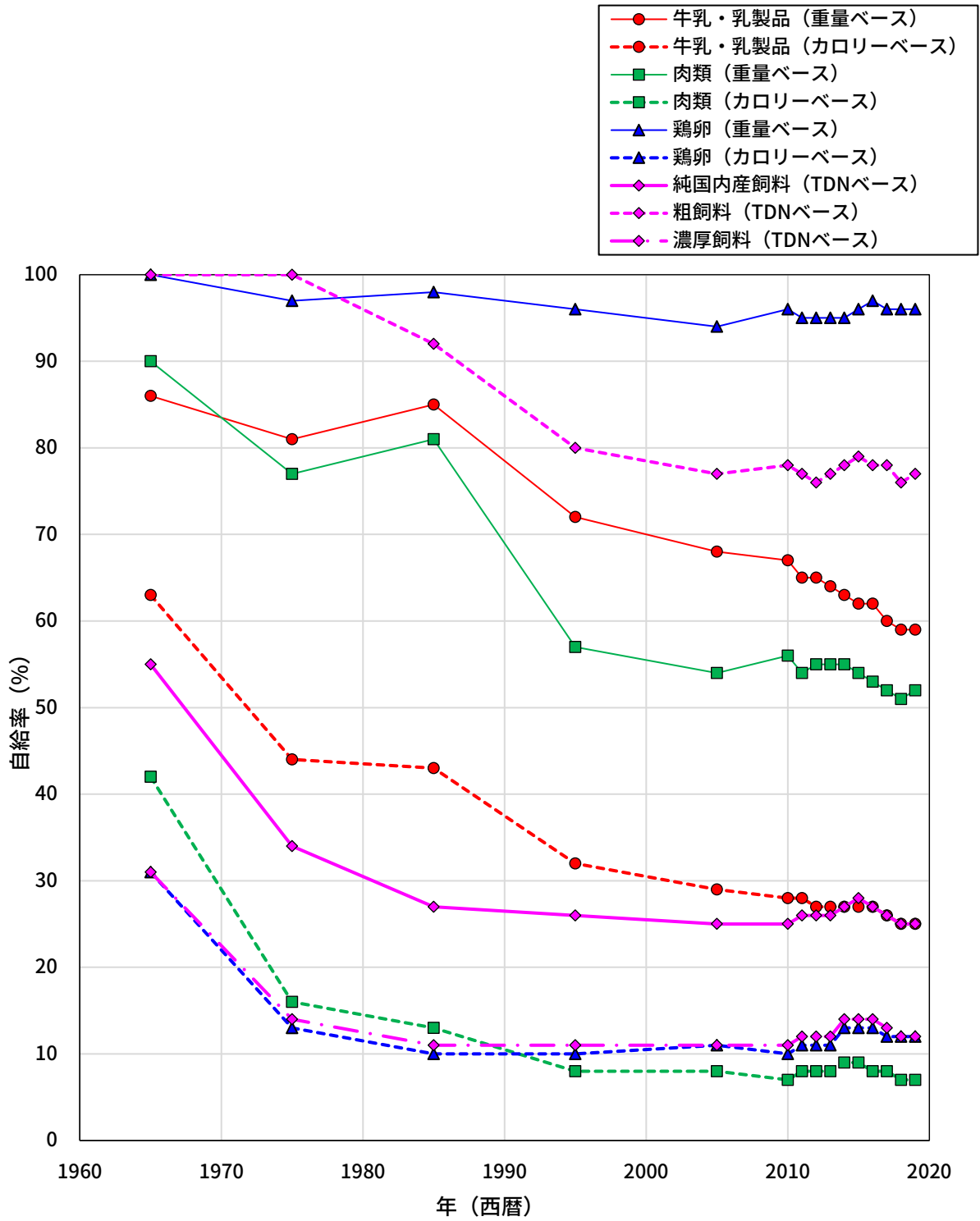


図 1-5. 畜産物と飼料における自給率の内訳

(農林水産省 2020a より作図)

1.2 我が国の飼料生産・利用における問題点とその対策

次に、このように畜産物の自給率が低下してきたことの背景を整理するとともに問題点を指摘する。また、その対策を飼料の調製利用の観点から提案する。

酪農は、1961年に施行された農業基本法において選択的拡大が謳われた作目の1つであった。それまで国内の乳用牛は、水田作・畑作等の副業として一戸あたり1—2頭程度が飼養され、その飼料は山野草・農場副産物等で自給されていた。また、このような零細な経営体の数が増えることで酪農生産は拡大していた。農業基本法が施行された後は、このような零細な経営体の数は急激に減少し、酪農家は急速に専業化・大規模化が進み、一戸あたり飼養頭数が増加することで酪農生産は拡大した。乳用牛の飼養戸数は農業基本法が施行された翌々年の1963年をピークに減少し、2019年には15000戸（うち北海道5970戸、都府県9030戸）となっている。一戸あたりの乳用牛飼養頭数は、1965年には北海道の平均が6.4頭、都府県の平均が2.9頭であったが2019年にはそれぞれ134.2頭、58.8頭となり、この間で約20倍に規模拡大した（農林水産省2020c, 図1-6）。

飼料生産基盤となる牧草地や飼料畑の面積を図1-7、図1-8、図1-9に示す。牧草の作付面積は1960—1970年代に大いに増加した。この背景として、農業基本法の施行に伴い大規模な草地開発が進んだこと（田代1982）、また飼料作物の栽培技術やサイレージ調製技術等が普及したことがうかがえる（菅野2011）。しかし、この増加傾向は1980年代には鈍化し、近年は北海道・都府県ともに漸減傾向にある（図1-7）。トウモロコシの作付面積は、1980年前後に増加したものの減少傾向にあり、北海道では近年増加に転じたが都府県では減少が止まっていない（図1-8）。近年は都府県

を中心に水田飼料作としての稲発酵粗飼料（以下、イネ WCS）および飼料用米の作付が増えているが、全国的な作付面積の減少を補うには至っていない（図 1-9）。技術的には、飼料生産の機械化・高度化やロールベアラを基軸とした機械作業体系の開発等も精力的に行われ（宮崎ら 1993, 浦川・水野 1993, 糸川ら 1995, 宮崎ら 1999, 岡戸ら 1999, 岡戸ら 2002, 志藤・山名 2002, 浦川・吉村 2003a, 浦川・吉村 2003b, 浦川・吉村 2003c, 浦川ら 2004a, 浦川ら 2004b, 志藤ら 2005, 志藤ら 2010）、これらは飼料増産に重要な貢献をした。しかし、飼料自給率が上昇に転じるには至っていない。つまり、基本法農政のもとで一定程度は自給飼料の生産・利用が増加し、また多くの飼料生産技術が開発されたものの、急激な拡大を続ける乳用牛の飼養規模ほどには飼料作物の栽培面積は増加せず、このことが近年の粗飼料自給率の低下に現れているものと考えられる。

飼料の輸入に関する歴史的な背景を見る。農業基本法の制定・施行に前後して、1953年に承認工場制度が配合飼料製造業に適用され、1960年にはトウモロコシの輸入が自由化され、関税の免税措置を受けた安価な輸入とうもろこしを原料とする配合飼料の生産が増えた（井上 1982）。このように増産された配合飼料により畜産農家は、飼料の生産基盤である土地のあり方、すなわち飼料作物の栽培面積に関係なく飼養規模を拡大できるようになり、輸入飼料を主原料に畜産物を生産する「加工型畜産」が確立された。さらに、かつての高度経済成長やバブル経済、円の変動相場制への移行やプラザ合意等に伴う円高によっても、輸入飼料への依存は助長された。しかしながら、このように輸入飼料への依存を過剰に深めることは、環境・外来雑草・食料安全保障の観点から適切ではないと考える。

第1に、環境の問題について指摘する。家畜の飼養によって畜産物は生産されるが、その一方でふん尿も排せつされる。ふん尿は適切に堆肥化（あるいは液肥化）されることで良質な有機質肥料となるが、不適切な堆肥化や過剰な量の圃場還元が行われると、土壌や地下水・河川等を汚染するとともに悪臭の発生源となり、地域環境に悪影響をおよぼす。飼養規模の拡大は、堆肥の生産規模も拡大することを意味する。したがって、輸入飼料への過度な依存は堆肥の供給過剰につながりやすく、適正量を大きく越える量の堆肥の施用や、十分に発酵が進んでいない未熟堆肥の施用を助長することとなる。飼料畑や牧草地に過剰な堆肥が施用されると、飼料作物の収量は増加するものの硝酸態窒素の蓄積量も増加し、これは反芻家畜への中毒を引き起こす（増子 1999, 西尾 2007）。また発酵が不十分な未熟堆肥には発芽能力を持つ雑草種子が残存するため、後述するような外来雑草による顕著な被害の原因となる。さらに、大量のふん尿が発生し、それを堆肥化するということは、畜産農家が悪臭の発生源となりやすくなることをも意味する。悪臭については、農村地域と住宅地が近接化すること等により苦情問題が顕在化しやすくなっており（農林水産省 2020d）、このため畜産産業の廃業をやむなくされる場合もある。このように、行き過ぎた輸入飼料への依存は、深刻な環境問題の原因となるとともに、畜産経営そのものを継続できなくなるリスクにつながる。

第2に、外来雑草の観点について指摘する。近年、飼料畑の強害雑草が増えており、この原因は輸入飼料に混入する種子であると指摘されている（Kurokawa et al. 2003）。輸入飼料に混入した雑草種子は家畜の消化管を通過し、堆肥化された後に圃場へ散布されるが、これら雑草種子のほとんどはウシの消化管を通過しても発芽能力

を維持するため、外来雑草は国内に広く拡散する。雑草は飼料畑に混入すると作物が本来吸収すべき土壤中の栄養分を収奪し、飼料作物の収量や栄養価を下げる。これに加えて、例えばアレチウリやガガイモのようなつる性の雑草は、飼料用トウモロコシ等に絡みつくことで収穫作業を困難にし、繁茂の程度によっては収穫が不可能になる。またワルナスビやヨウシュチョウセンアサガオのように家畜への毒性を示す雑草が混入すると、混入の程度によっては生産した飼料を家畜に給与できなくなる。イチビやカラクサナズナのように異臭を放つ雑草は、乳用牛が採食すると生乳へ臭いが移行するため、混入の程度によっては異常風味乳となり生乳の廃棄につながる（黒川 2017）。また、これら雑草種子の発芽能力を失わせるには種子を 57°C以上の高温に 17 時間以上さらす必要があり、適切な堆肥化が求められる（Nishida et al. 1999）。これら雑草被害への根本的な対策は、輸入飼料の使用量を減らし、外部から持ち込まれる雑草種子の量を少なくすることと考えられる。

第 3 に、食料安全保障について指摘する。世界の人口は 2019 年の 77.1 億人から 2050 年には 97.4 億人へと増加すると予測されており（United Nations 2019）、食料の需要量は長期的に増加すると見込まれる（農林水産政策研究所 2020）。一方で、既に顕在化しつつある地球温暖化の影響は今後さらに拡大し、2100 年までに世界の平均地上気温は 0.3—4.8 °C 上昇すると試算されている（IPCC 2013）。つまり、将来的には人口増による食料需要の増大と地球温暖化・気象災害に伴う農産物の減収リスクが、ともに顕在化しやすくなる。また近年は、家畜における口蹄疫や CSF（豚熱）、ヒトにおける新型コロナウイルス等の感染症のリスクも高まっている。食料の輸出国でこのような不確定なリスクが高まると、輸出の制限や、それに伴う国際相場

の急騰，さらには「お金があっても食料を買えなくなる」逼迫した状況が発生する懸念が高まる（伊地知 2020）．そのため，輸入飼料へ依存した自給率の低い畜産物生産を続けることは，畜産経営にとっても，また国内産業全体にとっても大きなリスク要因になる．

したがって，これらのリスク軽減に向けて飼料自給率を高める，すなわち国産飼料の利用を拡大する必要がある．さらに，堆肥や液肥を適切に生産するとともに適正量を圃場へ施用し，その圃場から得られた飼料を中心に牛を飼養し，その牛から排せつされたふん尿を原料にして堆肥や液肥を再生産する，これまでの「加工型畜産」から環境負荷の少ない「循環型畜産」へと転換していくことが重要と考える．

ただし，既に指摘したように国内の飼料作物栽培面積は十分とは言えない．また，コントラクタ（飼料生産等の農作業請負組織）や TMR センター（粗飼料・濃厚飼料・サプリメント等の飼料混合・調製を受託・代行し，またそれら TMR を販売する組織，TMR は Total mixed rations：完全混合飼料，の略）は増加傾向にあるものの（農林水産省 2020d），畜産経営が年々大規模化している現状において，経営体の多くは日常的な搾乳や給飼などの飼養管理で手一杯となり，飼料生産・調製作業に十分な労働力を割く余力は少ない．

このような状況における有効な対策として，畜産経営だけでなく近隣あるいは広域の耕種農家と連携して資源循環の輪を構築する「耕畜連携」を提案したい．これは，飼料生産・調製の一部または大部分を耕種農家またはコントラクタや TMR センター等が行い良質飼料を畜産農家へ供給，畜産農家は飼養管理に注力するとともに良質な

堆肥を耕種農家の圃場へ供給，といった，飼料と堆肥の相互流通が一例として考えられる。

耕畜連携は古くから提唱されてきた概念でもある。イネ WCS においては耕畜連携の類型が複数示されており（浦川 2003，宮武 2008，恒川・堀江 2009，浦川 2014，表 1-1），地域内で耕畜連携が成立した事例も多い（藤原 2014，恒川 2015）。ただ，循環型畜産の確立と飼料自給率の向上を両立させるためには，イネ WCS に留まらず様々な飼料をより多く，幅広く国産流通飼料として活用することが重要であり，このために国産飼料の広域流通が必要と考える。国産飼料は地域内での流通事例は多いものの，広域に流通する例は北海道の TMR センターから東日本大震災の被災地域へのロールベールラップサイロの輸送や宮城県農業公社を介したイネ WCS 流通事例など少数に留まっている（佐々木 2013，伊藤ら 2014）。

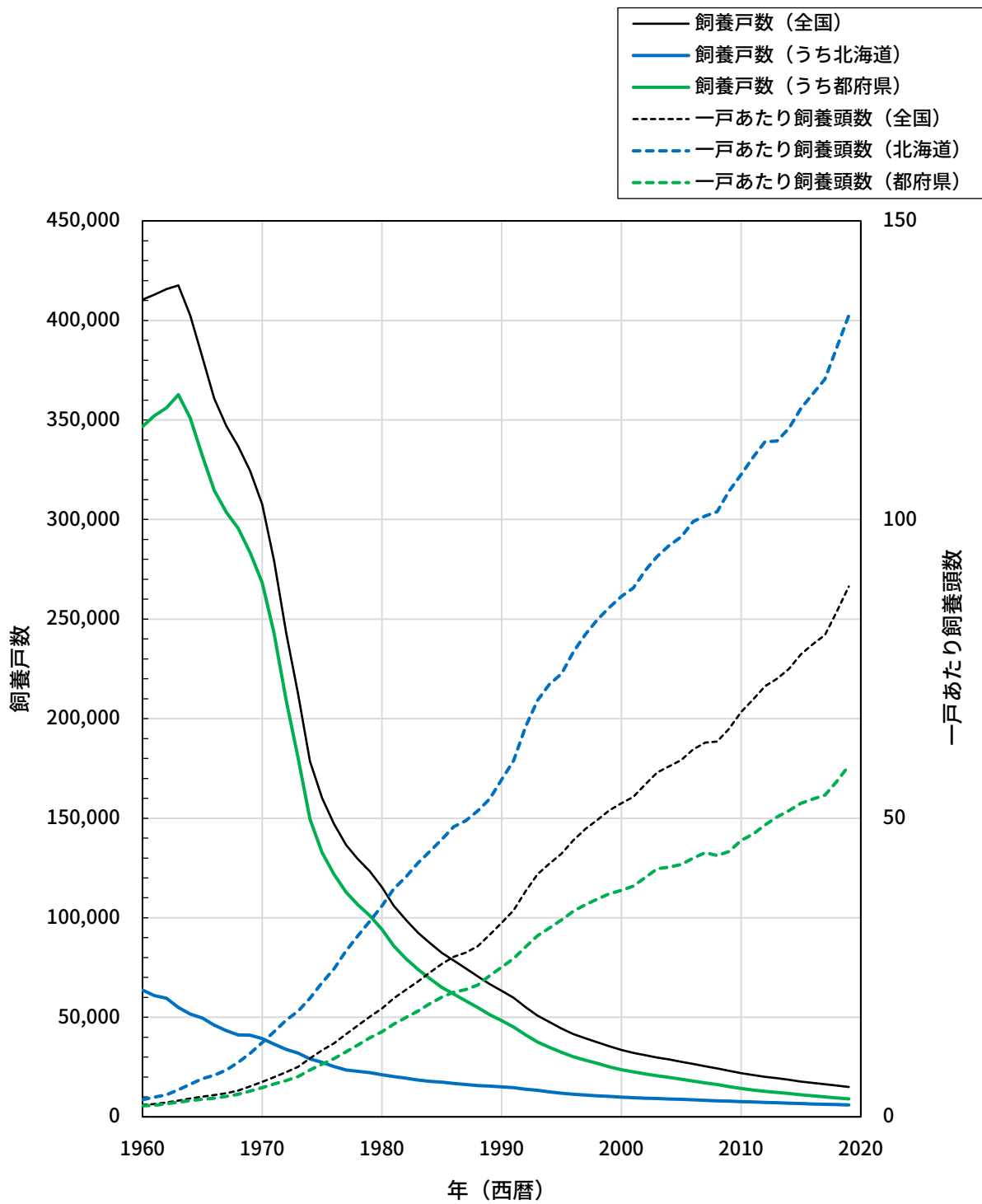


図 1-6. 乳用牛の飼養戸数および頭数

(農林水産省 2020c より作図)

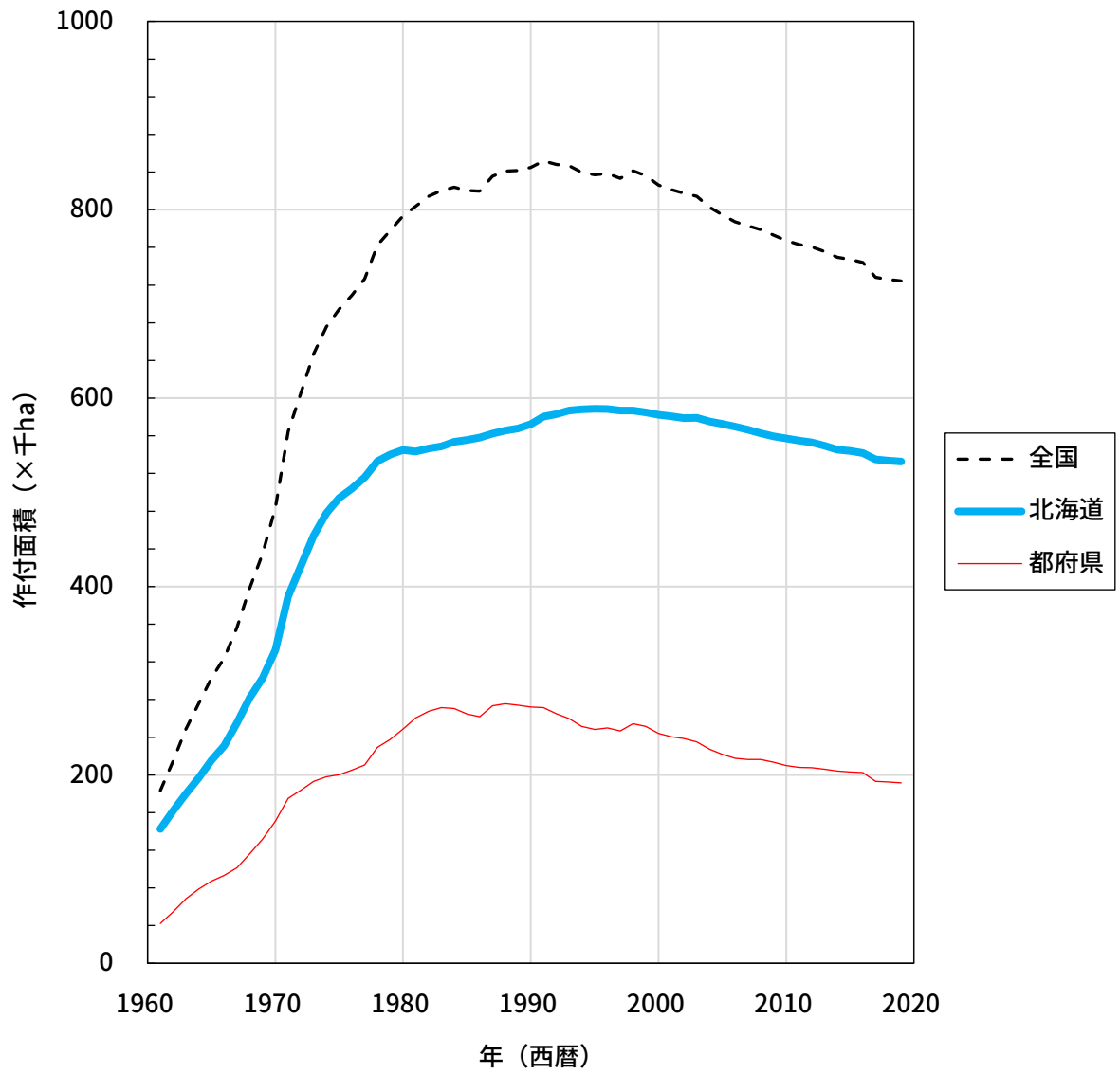


図 1-7. 飼料作物の作付面積 (牧草)

(農林水産省 2019 より作図)

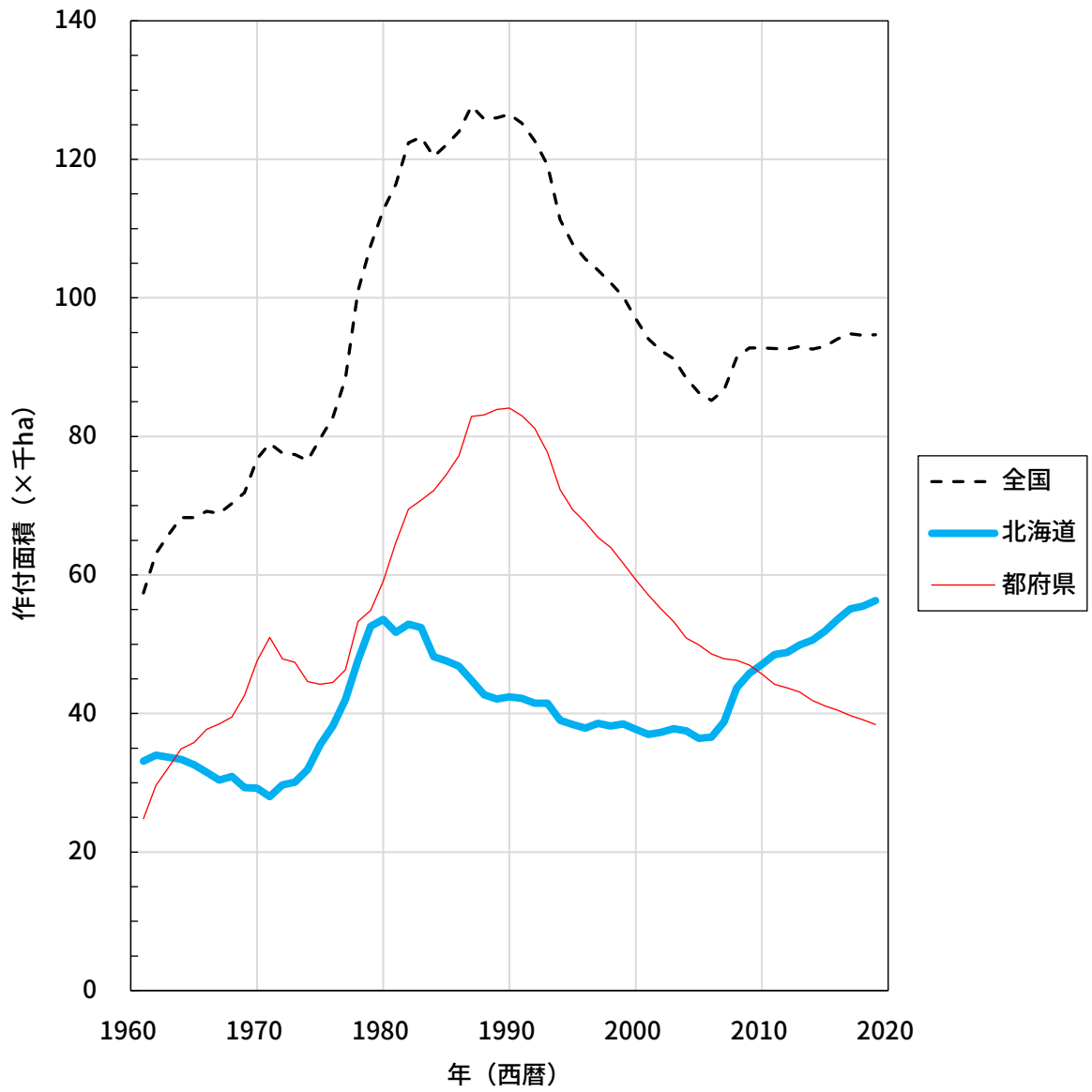


図 1-8. 飼料作物の作付面積 (青刈りトウモロコシ)

(農林水産省 2019 より作図)

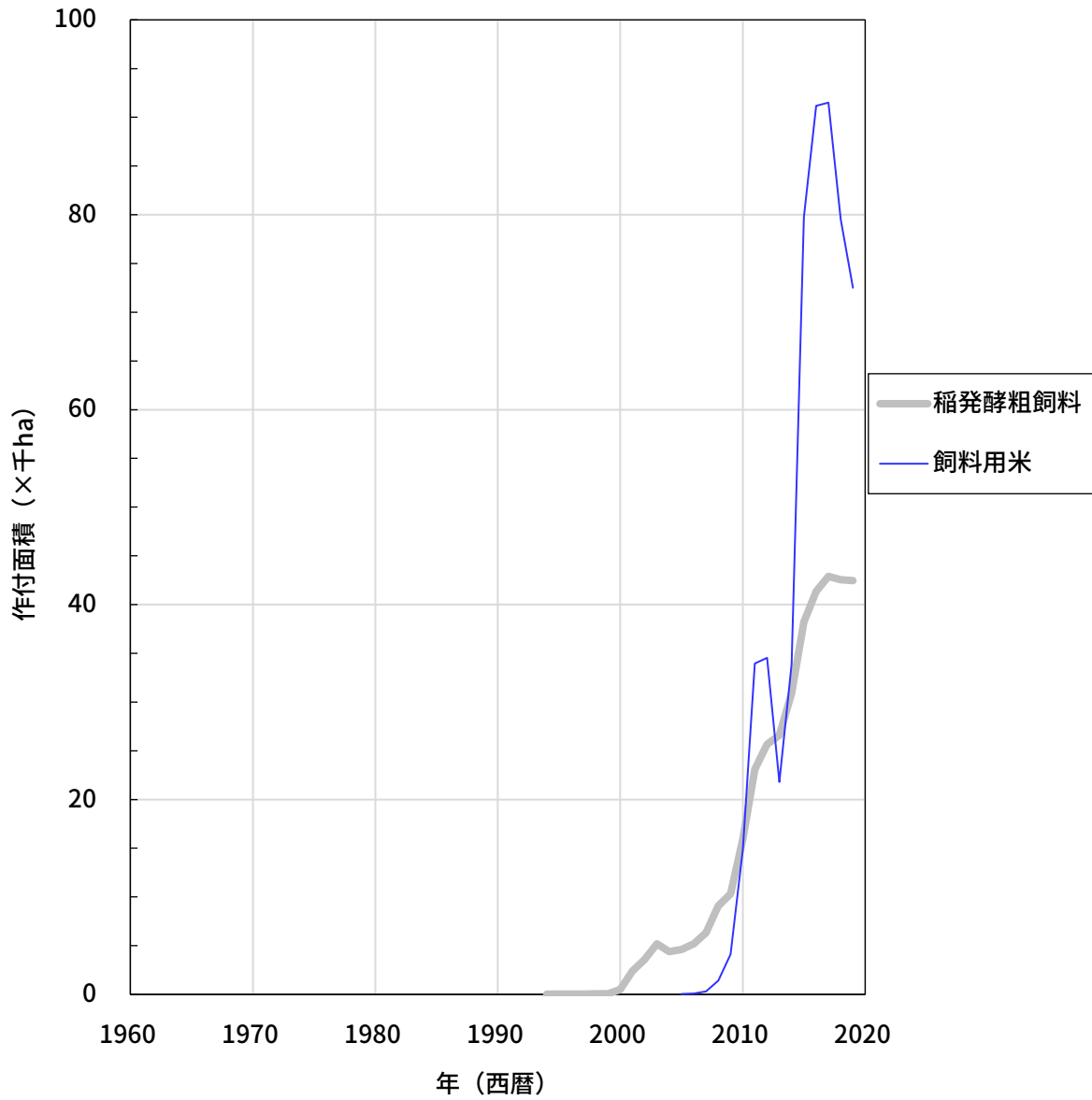


図 1-9. 飼料作物の作付面積（稲発酵粗飼料・飼料用米）

（農林水産省 2020e, 農林水産省 2020f より作図）

表 1-1. イネ WCS の生産における連携・作業形態および流通体制の類型

類型	流通範囲	栽培管理	収穫調製	輸送
自己完結型	自家経営内	畜産農家	畜産農家	畜産農家
作業分担型	地域内	耕種農家	畜産農家	畜産農家
完全流通型	地域内 広域	耕種農家 or コントラクタ	耕種農家 or コントラクタ	耕種（畜産）農家 専門の輸送業者

※浦川（2003）より作成

1.3 国産飼料の広域流通におけるソフト面の課題

ここでは、我が国における飼料生産・調製技術の現状および先行研究から、国産飼料の流通におけるソフト面の課題を指摘する。

牧草等の飼料作物について、その含水率が20%以下になるまで乾燥したものを乾草と称する（デーリィ・ジャパン社 2011）。流通に供される飼料作物は、その運搬効率を高めるため収穫後に複数回の転草作業が行われて圃場で十分に乾燥（予乾）される。乾草は、レーキにより集草されるとともにコンパクトベアラやロールベアラ等で拾い上げ・成形・結束されて、直方体あるいは円柱形のベールに調製される。欧米ではこのような乾草調製が一般的に行われるが、これには刈り倒してから拾い上げるまでに少なくとも3日以上連続晴天が必要となる。一方で、我が国の大部分は温帯モンスーン気候にあるため飼料作物の収穫適期には降水量が多く、上述のような乾燥調製体系を取ると圃場予乾中に降雨に遭うリスクが高い。予乾中に降雨に遭うと栄養価および消化率が大きく低下するため（土屋・高橋 2002）、我が国のほとんどの地域では良質乾草を安定的に調製するのは困難である。かつては40%程度の水分まで圃場予乾した材料草を圧縮成形する技術（中ら 1976）や、コンパクトベール（牧草や稲わら等がコンパクトベアラで直方体に成形されたもの、大きさは概ね0.4 m×0.4 m×1 m程度）を積み上げ、そこへ人工的に送風することで効率的に良質乾草を調製する技術開発も行われたが（市戸ら 1985）、オイルショックに伴う燃料高騰により普及しなかった。一方で我が国の気候に適した飼料作物の貯蔵法および給与法として、飼料作物をその収量と栄養価が最大となる時期に一斉収穫するとともにサイロ内に密封し、嫌氣的条件下で乳酸発酵を促しサイレージ調製すること、またそのサイ

レージを年間通して乳用牛に給与する通年サイレージ方式（高野ら 1977a, 高野ら 1977b, 高野ら 1977c, 高野ら 1977d, 高野ら 1977e）が広く普及した。乾草調製およびサイレージ調製における作業体系の例を図 1-10 に示す。

ロールベアラにより成形され、ベールラップにより密封された小型可搬式サイロをロールベールラップサイロと称する。この生産作業は組作業を必ずしも必要とせず、機械化一貫体系で完結できること、作業効率が高いこと、さらにラップサイロは運搬が可能で流通に適すること等の特長を有するため、1980 年代以降急速に普及した。

また、拾い上げた材料草を粗く切断するとともにロールベールに成形するカッティングロールベアラや、細断物をホッパに荷受けするとともに高密度なロールベールを成形できる細断型ロールベアラ等も開発され（志藤・山名 2003, 志藤ら 2005）、牧草だけではなくトウモロコシもロールベールラップサイロに調製できるようになった。現在は、収穫後 1 日程度の予乾もしくは予乾なしでダイレクトに収穫した材料草を、ロールベアラを用いてトワインあるいはネットで成形するとともにベールラップを用いてプラスチックフィルムで密封する、ロールベールサイレージの調製が一般的に行われている。

このような背景から、国産粗飼料はロールベールラップサイロを主な荷姿として、また乾草ではなくサイレージとして地域内で流通されるようになった。地域内流通では、耕種農家やコントラクタ等の生産者と酪農家等の利用者が「顔の見える関係」にある相対取引が中心である。しかし、広域流通になると生産者と利用者は「顔の見えない関係」になることから、安全・安心を確保し安定的に継続した取引を行うための基準が必要となる。さらにイネ WCS の地域内流通が進みつつある状況も相まって、

イネ WCS とトウモロコシサイレージについては、その流通基準が策定された（日本草地畜産種子協会 2011a, 日本草地畜産種子協会 2011b）。この流通基準においては、1 圃場で生産された飼料を 1 ロットとみなし、栽培管理情報や収穫調製情報などの生産履歴に加えて、含水率や粗タンパク質、NDF（中性デタージェント繊維）等の品質情報をも表示することが推奨されている（浦川 2011）。ところが、コントラクタ等による飼料の収穫調製作業は年間で最も繁忙な時期に重なるため、原料品質の情報収集を作業の直前・同時もしくは直後に行い、かつロールベール個々の情報として紐付けることは困難である。さらに、ロールベールを的確に管理するためには収穫時に圃場からサンプリングした材料の分析値だけでは不十分で、ラップサイロの品質を個体毎に測定・管理することが望ましい。これらの情報を明示するラベル表示やトレースバックのシステム化については既に開発例があるが（浦川ら 2013）、品質の簡易測定法については、質量においてベールラップの油圧シリンダを活用した簡易計量法が開発されているものの（喜田ら 2012）、その他の品質情報に関しては近赤外分光法（Amari and Abe1999）等のように材料のサンプリングや前処理が必要な方法に限られている。そのため実際には、収穫時の熟期からおよその含水率や成分値を推測する、または収穫時に圃場の一部でサンプリングを行い、その分析値を代表値とする程度の品質情報の提示・活用となっている。

ところで、ロールベールサイレージは、ロールベールにより品質のばらつきがある（糸川ら 1995, 野中・名久井 1997, 野中 2002, 河本ら 2003, 河本 2010）。飼料の流通における品質管理では 1 圃場から生産されたものが 1 ロットとして扱われることが多いが、同一圃場内でも異なる位置でサンプリングされた材料草は、その含水率

や粗タンパク質含量等の品質に有意な差が生じる。このため、圃場の原料草全てを代表するサンプル採取は困難であることが指摘されている（野中・名久井 1997）。また、圃場内でも品質変動がみられる原料草から生産された低水分ロールベールにおいては、ロールベールの代表サンプルを得るために表層 4 箇所以上からのサンプリングが必要とも指摘されている（野中・名久井 1998）。このことから、ロールベールラップサイロを荷姿として国産飼料を流通させる場合、現状は 1 圃場を 1 ロットとして扱われるものの、品質はロールベール毎に複数点で把握することが望ましい。

飼料の品質の中でも含水率は、発酵の成否を左右する重要な情報であり（大山・柗木 1968, Muck 1988）、また原物質量から乾物量を算出して取引価格を設定する上でも欠かせない。しかし、これまでの含水率測定技術は、材料を熱風や赤外線で乾燥させた前後の質量から求める通風乾燥法や加熱乾燥法、材料を有機溶媒とともに蒸留して水を定量するトルエン蒸留法（内田 1993）のような、材料のサンプリングを必要とする破壊測定であり迅速ではない。

迅速な含水率測定法としては、直流抵抗・静電容量・インピーダンスや誘電率等の電気的特性が含水率に応じて変化することが水分計の開発に応用されている。また電磁波は空中を伝播できることから、非破壊での測定技術として有望と考えられる。ただし現状では、穀粒や種子のような低水分材料への適用が主で（Nelson and Trabelsi 2016）、含水率の高いサイレージに対応した先行研究はほとんどない。

飼料作物やサイレージの含水率について迅速測定を試みた先行研究としては、フォーレージハーベスタのシュート部分に装着可能な近赤外分光センサにより含水率を測定する技術（Digman and Shinnars 2008）、静電容量の測定レンジを拡張して含水率

を推定する研究（川出ら 2012）、電磁波信号の TDR（Time Domain Reflectometry）測定結果から含水率を推定する研究（服部ら 2015）等がある。これらの手法は迅速測定が可能ではあるが、電気的特性は材料の含水率によって変化するだけでなく、密度や温度によっても変化することが知られている（Nelson and Trabelsi 2016）。また、ロールベールの密度は、同じロールベールで成形した場合でも材料の含水率（Tremblay et al. 1997）、また切断長によっても変化する。例えば服部ら（2015）は、測定に先立って材料の密度毎に検量線を作製することが望ましいと指摘しているが、生産現場においてロールベールの梱包密度をリアルタイムに把握するとともに、密度に応じて検量線を逐次作製・補正し、実用的な含水率測定を行うことは困難と考えられる。しかも、これらの手法はプローブを材料に接触させたり突き刺す必要があり、ロールベールラップサイロを測定する場合は外装のフィルムの破壊を伴う。フィルムを剥がさずにラップサイロ内部を非破壊測定する先行研究としては、川村ら（2015）がサーモグラフィにより表層の変質部位の温度上昇を測定した試みがある。ただし、カビが増殖していても測定時に発熱していないものは検出できない等の課題があり、定量的な測定には至っていない。

このように、含水率に代表されるロールベールサイレージの品質を測定するには、材料をサンプリングしたり測定プローブを材料に接触させるため、外装のプラスチックフィルムを剥がす必要がある。一度プラスチックフィルムを破壊すると、ラップサイロ内へ空気が流入し嫌気状態が失われるため、サンプリング後にフィルムを補修してもサイレージ品質の劣化は避けられず、流通飼料としては商品価値を失うことになる。このためロールベールサイレージの含水率測定は、調製作業の後には行うことが

できないのが現状である。また既に指摘したようにロールベールは個体間での品質がばらつくため、一部の代表サンプルのみでは誤差の把握もできず、流通飼料の品質表示としては不十分と考えられる。

一方で、近年、透過電磁波の振幅変化と位相変化との比率を活用することで、密度による影響を排除しつつ材料の特性を計測できる可能性が提案されている。この一例として、電磁波伝送路としてマイクロストリップライン (Microstrip transmission line, MSTL) を伝播した電磁波の、振幅の変化 ($\Delta\alpha$) に対する位相の変化 ($\Delta\phi$) の割合を指標とすることで、材料の量すなわち密度に影響されずにコメの含水率の違いをリアルタイム検出できた報告がある (Kon et al. 2016, Kon et al. 2020)。電磁波は空間を伝播できることから、このような電磁波の新たな解析法を基にした含水率推定法は、ロールベールサイレージのようにプラスチックフィルムで密封された高水分の飼料作物の非破壊推定にも応用できると期待される。フィルムを破らず含水率を推定できれば、同一のロールベールを異なる点で複数回測定して代表サンプルとみなせ、流通に供するロールベールの全数を検査することもできる。このため品質の確認やトレーサビリティの確保が飛躍的に容易になり、取引の安心感は顕著に高まると考えられる。

このような背景を踏まえて本研究における目的の1つを、ラップサイロ内の含水率を迅速かつ非破壊で測定することと設定する。そのために、サイレージを被覆するプラスチックフィルムの上から電磁波を伝播させ、その信号の応答と含水率との関係を明らかにする。また、この結果を実規模のロールベールラップサイロへ適用し、含水率の非破壊推定に向けた適性を明らかにする。



図 1-10. 乾草およびサイレージの収穫・調製作業体系の例

1.4 国産飼料の広域流通におけるハード面の課題

ここでは、我が国における飼料調製利用技術の現状および先行研究から、国産飼料の流通におけるハード面の課題を指摘する。

当然ながら、国産飼料の流通には運搬作業が必須となる。地域内流通の場合ラップサイロは収穫時に圃場の脇に集積され、日を改めて圃場から畜産農家の軒先まで運搬されるケースが多い。

ベールハンドリング機器は、ベールハンドラと呼ばれ、ベールを突き刺して持ち上げるフォーク式、ベールを下からすくい上げるリフト式、ベールを把持して持ち上げるグリップ式に大別される（本田 1996，図 1-11）。中でもトラクタやホイールローダのフロントローダに取り付けるグリップ式ベールハンドラが、縦置き・横置きのどちらにも対応でき汎用性が高いことから普及している（市戸 1999）。ただし、このようなハンドリング機器は畜産農家以外にはほとんど普及しておらず、またグリップ式ベールハンドラはハンドリングに際してロールベールを大きく変形させてしまうといった問題がある。ラップサイロを被覆するフィルムに穴が開くと気密性が損なわれサイレージの変質につながる（Pitt 1986）。穴が開かなくても変形に伴ってフィルムの接着面が剥がれ、ベール内に空気が流入してサイレージの変質につながるリスクもあることから、熟練したオペレータによる慎重なハンドリング操作が求められる。そのため、コントラクタや耕種農家による運搬作業への対応が困難な場合も多く、運搬作業が畜産農家の負担となることもある。

一方で飼料の流通が広域化すると、畜産農家はもとよりコントラクタにおいても運搬作業を担うのは困難となり、運搬業務を外部委託する必要性が生じる。ここで重要と

なるのは運搬を低コストかつ確実に行うことであり、大型トラックの帰り便を活用した大ロット輸送等によるコスト低減が求められる。また、大ロットでの運搬を行うにはロールベールは各圃場に点在させず、効率的な荷役作業が可能な拠点（ストックヤード）に一次集積し、その上で集中的に運搬することが重要となる。

ところが、前述のようにベールハンドラは畜産農家でのみ一般的に普及しており、運搬作業の委託を受ける物流業界にとっては不慣れな機械である。そのため、大ロット・低コストな運搬を外部委託で行うためには、物流業界に一般的に普及しているフォークリフトを活用したラップサイロの荷役作業技術を開発・提供する必要がある。また、グリップ式ベールハンドラのようにロールベールを変形させるハンドリングを何度も行うと、運搬に伴う品質劣化のリスクとなるため（武内 2012）、変形の少ないハンドリング技術で、なおかつ既存のフォークリフトで簡易に応用できる手法が必要となる。

このような背景を踏まえて本研究における第 2 の目的を、フォークリフトに適應したラップサイロの簡易ハンドリング技術を開発することとする。また、ラップサイロの変形軽減効果や荷役作業の安定性を評価し、開発技術の生産現場への適用性を明らかにする。

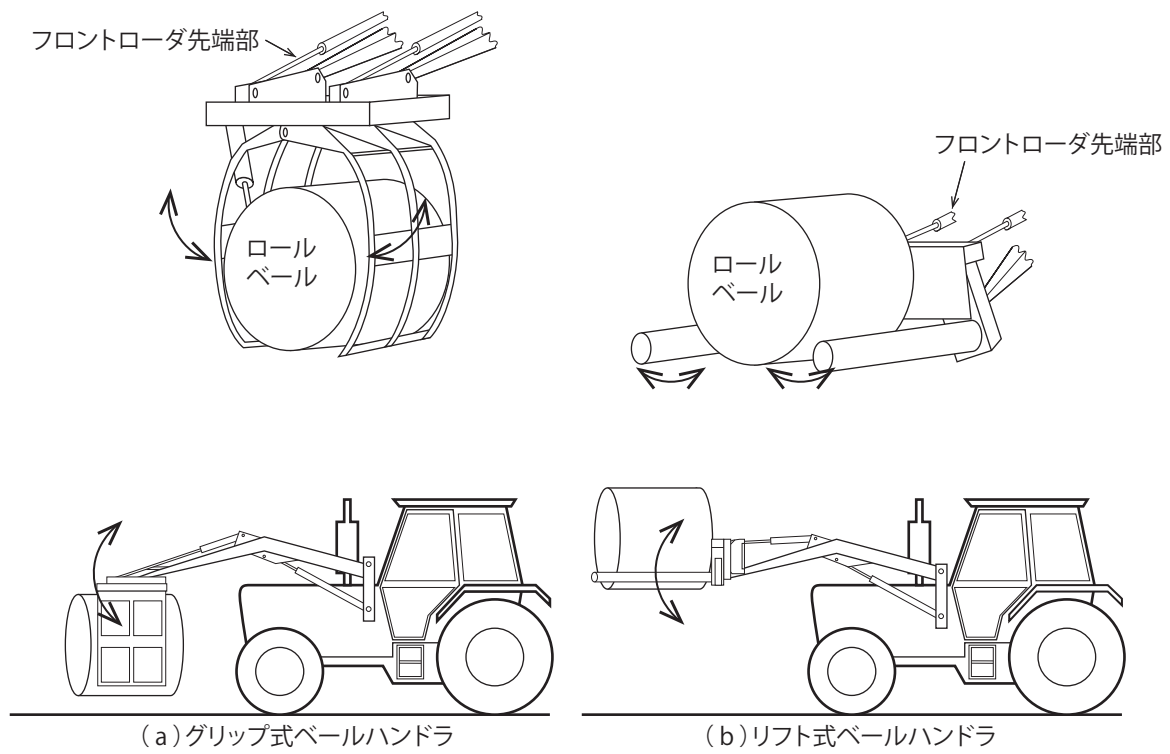


図 1-11. ベールハンドラの分類 (グリップ式およびリフト式)

(本田 1996 より作図)

1.5 本研究のねらいと本論文の構成

以上、これまで指摘してきた日本の酪農・飼料生産における問題点、ならびに飼料の流通に必要な技術のうちこれまでの研究が十分でなかった要素を踏まえて、本研究では国産飼料の広域流通を図るために、ロールベールラップサイロの含水率を非破壊でフィルムを剥がすことなく、かつ迅速に推定する、またロールベールラップサイロを変形させず安全かつ簡易にハンドリングする研究開発を行い、国産粗飼料の広域流通における課題に対してソフト面とハード面の両面から解決を図る。これにより循環型畜産・耕畜連携・飼料自給率の向上に貢献することをねらいとする。

本論文における章構成およびその関連性を図 1-12 に示す。本論文においては、第 2 章ではプラスチックフィルムで被覆された小規模サイロ（パウチサイロ、田中・大桃 1995）を用いた含水率非破壊推定の基礎実験について（Matsuo et al. 2019）報告し、第 3 章では実規模のロールベールラップサイロを対象に含水率を非破壊で推定する実証実験（Matsuo et al. 2021）について報告する。第 4 章ではロールベールラップサイロの広域流通に欠かせない運搬作業を外部委託するための簡易荷役具の開発（松尾ら 2010）について報告し、第 5 章で総括することとする。

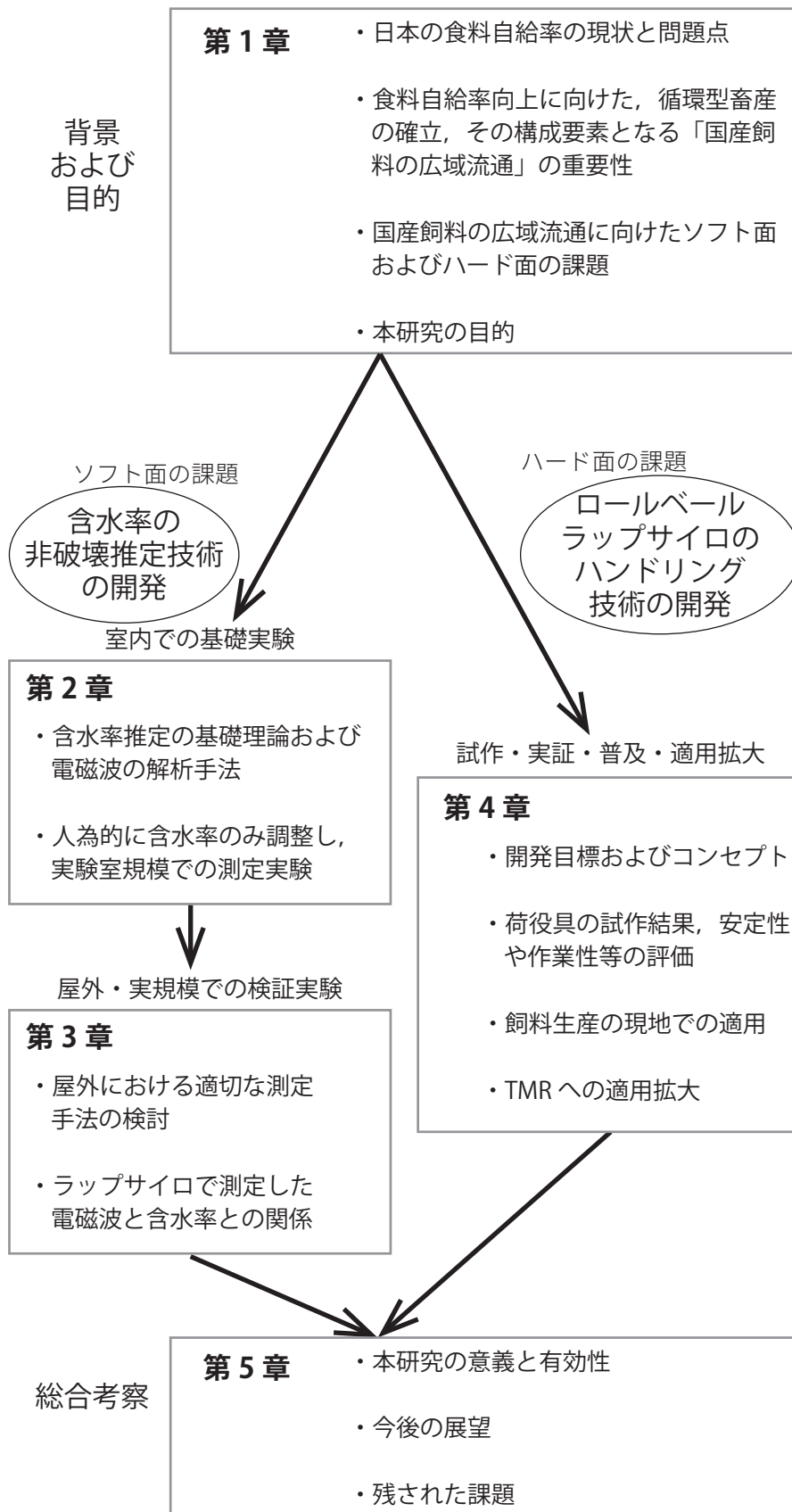


図 1-12. 本論文における章構成

**第 2 章 プラスチックフィルムで被覆された小規模サ
イロを用いた含水率非破壊推定の基礎実験**

2.1 はじめに

第1章において、ロールベールラップサイロ内部の含水率測定を非破壊で行う重要性について、また電磁波は空中を伝播するため非破壊推定に有望であることを述べた。ただし電磁波は材料の含水率以外に密度や温度等の要因にも影響を受けることが知られており (Nelson and Trabelsi 2016)、ロールベールの密度は含水率等の様々な要因により異なることから測定の不安定さや誤差の拡大が懸念される。一方で近年、材料の密度補正を必要としない電磁波の測定・解析手法 (Kon et al. 2016, Kon et al. 2020) が提案されており、これが高水分飼料の含水率の非破壊推定へ応用できれば実用性の高いラップサイロの測定技術を開発できる。そこで本章では、まず基礎的な室内実験として、プラスチックフィルムで被覆された小規模サイロ (パウチサイロ) に封入した飼料の含水率が Kon et al. (2016) の方法で測定・解析した電磁界に与える影響を明らかにし、非破壊での含水率測定技術への適用可能性を検討する。

2.2 材料と方法

2.2.1 測定用サンプルの調製

測定試料として、ライムギ（品種：ライ太郎）およびトウモロコシ（品種：KD777）を用いた。ライムギは出穂期に収穫・細断および風乾した。この風乾物および風乾物に3水準の加水を行って、4水準の含水率にサンプルを調製した。トウモロコシは黄熟期に汎用型飼料収穫機（志藤ら 2010）で収穫・細断するとともに自走式ベールラップ（浦川・吉村 2003a）で密封しロールベールサイレージを調製した。その3ヶ月後にラップサイロからサンプリングしたサイレージを庫内温度 40℃に設定した恒温乾燥機に投入するとともに異なる水準の含水率になるまで乾燥させ、無乾燥のサイレージ原物と合わせて4水準の含水率のサンプルを得た。サンプル含水率の区分は、含水率の高い順に high・middle・low・dry とし、いずれの草種・含水率区分においても材料を良く混合した上で小規模なプラスチックサイロであるパウチサイロ（旭化成パックス，飛龍 KN-210，フィルム厚さ 0.075 mm）4袋に投入し、それぞれバキュームシーラ（旭化成パックス，SQ-205S）により脱気密封した。各サンプルの含水率は、電磁波測定後にパウチサイロを開封して通風乾燥法（105℃ 24 h）により求めた（表 2-1）。

表 2-1 供試サンプルの一覧および含水率 †

区分	草種	rye (%)	corn (%)
high	1	81.9	71.5
	2	81.9	70.7
	3	81.3	70.6
	4	75.8	69.0
middle	1	64.3	49.7
	2	63.5	47.6
	3	63.1	47.3
	4	62.8	46.9
low	1	45.7	35.7
	2	45.4	31.0
	3	45.3	30.0
	4	42.7	29.9
dry	1	20.7	7.0
	2	20.1	7.0
	3	19.9	6.4
	4	19.6	6.2

† Oven-dry method (105 degrees celsius 24 hours)

2.2.2 測定装置の接続および設定

電磁波伝送路の一種であるマイクロストリップライン（Microstrip transmission line, MSTL）に電磁波を伝播させると、伝播電磁界の大部分は MSTL の中心導体と金属基盤（Ground plane）との間にあるが、一部の電磁界は空気中に漏れ、外部の影響を受けることが知られている（岩崎 2007, 図 2-1）。このように外部に漏れ出す電磁界は、MSTL の中心導体からの距離が離れるほど、その距離の 2 乗に反比例して減衰することから、実際には中心導体周辺への伝播に留まると考えられる。したがって、MSTL の中心導体に被測定物を接近させた状態で MSTL に電磁波を伝播させ、その際の電磁波の信号変化を解析することで、被測定物の特性を評価できると考えられる。

そこで、測定ヘッドとなるセンサ部として、中心導体長 80 mm、特性インピーダンス 50 Ω の MSTL を用い、この両端のコネクタを同軸ケーブル（Keysight, N9910X-708）で 2 ポートベクトルネットワークアナライザ（Keysight, N9926A, 以下 VNA）に接続した（図 2-2, 図 2-3）。なお、同軸ケーブルの芯線は MSTL の中心導体に接続され、同軸ケーブルの外部導体は MSTL の金属基盤に接続されるようにした。一連の校正および測定は、環境温度が 20 ± 1 $^{\circ}\text{C}$ になるよう空調を整えた室内にて行った。VNA の出力、中間周波数（intermediate frequency, 以下 IF）帯域幅、掃引周波数および周波数のインターバルは、それぞれ -1 dBm, 1 kHz, 0.2—6.2 GHz, 10 MHz とした（表 2-2）。なお、VNA では S パラメータ（VNA のポート間で伝送または反射された電磁波の特性を表わすパラメータ, Kurokawa 1965）を測定し、このうち port 1 から port 2 へ伝送される成分である S_{21} を解析に供した。

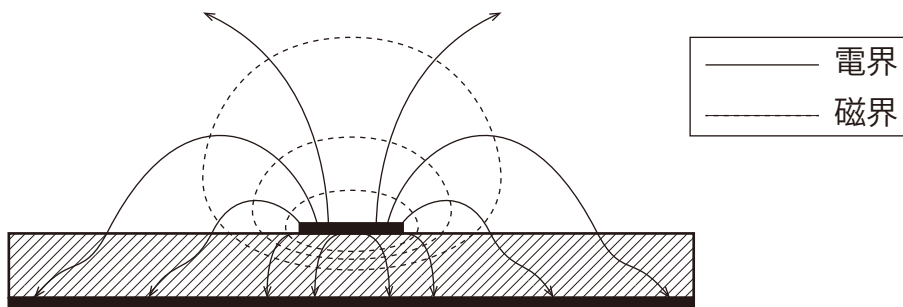
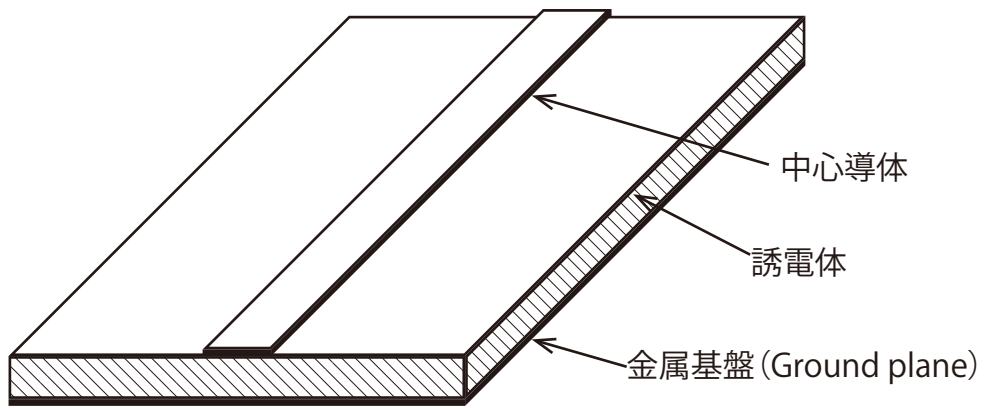


図 2-1. MSTL の構造および中心導体付近における電磁界

(岩崎 2007 を基に作図)

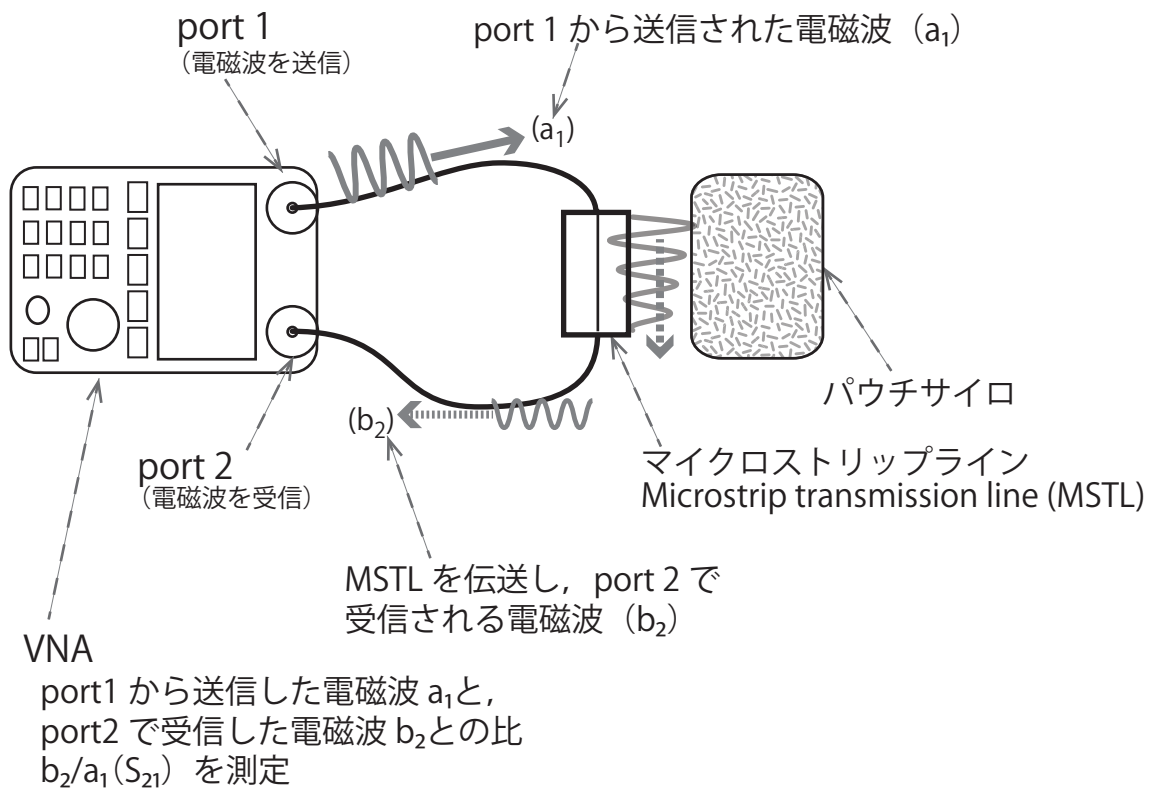


図 2-2. VNA および MSTL による測定イメージ

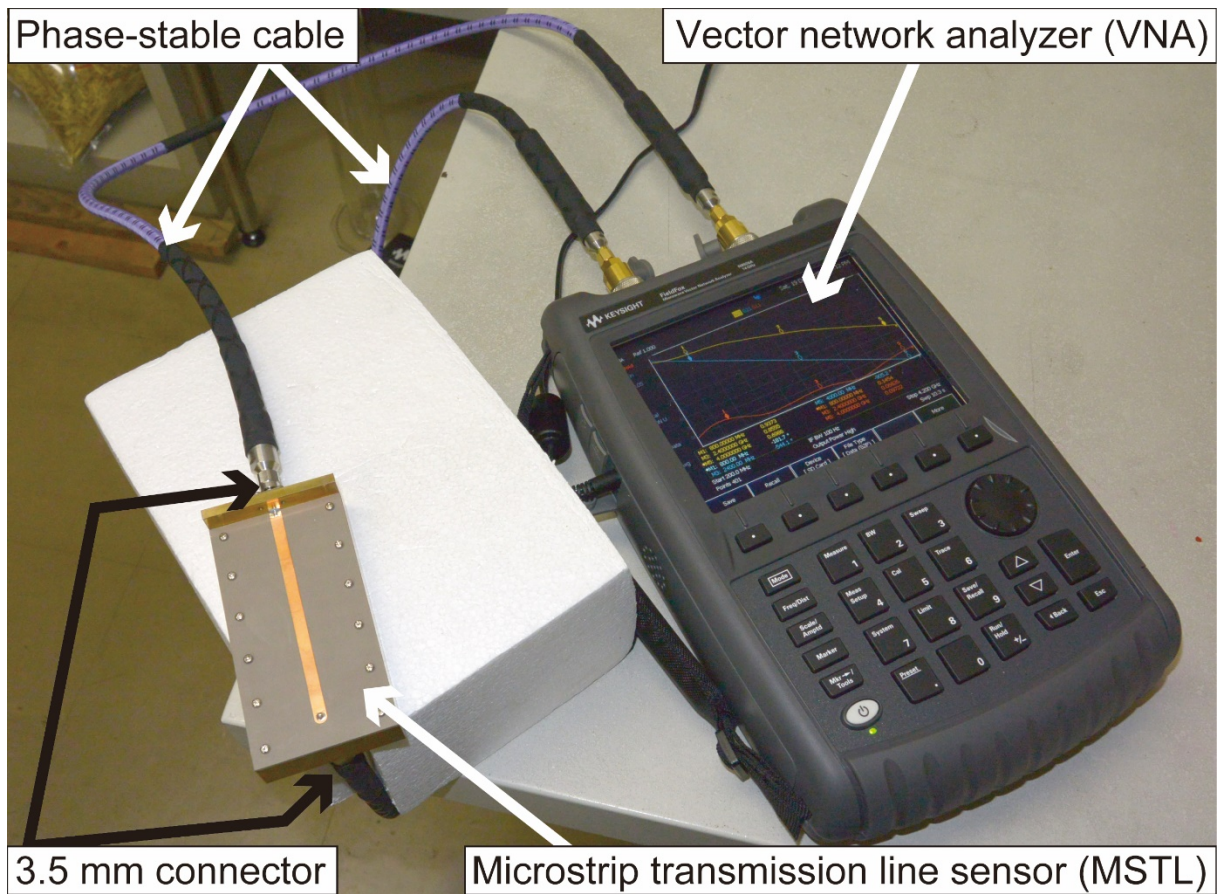


図 2-3. 測定レイアウト

表 2-2 電磁波の測定条件および設定

Device	Vector Network Analyzer	(Keysight N9926A)
	Output power	-1 dBm
	Frequency min.	0.2 GHz
	max	6.2 GHz
	interval	0.01 GHz
	IF bandwidth	1 kHz
	Calibration	Full 2-port CAL (83052D)
Sensor	Microstrip transmission line	(Prototype)
	Conductor length	80 mm
	Characteristic Impedance	50 ohms
Connection	Rugged phase-stable cable	(Keysight N9910X-708)

2.2.3 測定手順およびデータ解析

まず、VNA の port 1 および port 2 に同軸ケーブルを接続したのみの状態で、接続した 2 本の同軸ケーブル先端のコネクタに電気的特性が既知のキャリブレーションキット（Keysight, 83052D）を接続して短絡・整合・開放時の S パラメータを予め測定し、実験データを適正に得られるように校正した（フル 2 ポート校正）。フル 2 ポート校正の後、同軸ケーブル先端のコネクタに MSTL を接続して、MSTL 上に何も置かない状態で電磁波を送受信した。この時の S パラメータのうち port 1 から port 2 に伝搬した電磁波の伝送特性である S_{21} をゼロ点のデータとした。その後サンプルを MSTL 上に静置した状態で電磁波を送受信し、得られた電磁波の S_{21} を VNA に記録した。

同一サンプルでの測定の繰り返しについては、MSTL の位置は固定したまま、パウチサイロを静置する位置のみをわずかにずらし再度電磁波を送受信して S_{21} を測定した。この測定を 20 回繰り返し、1 サンプルにつき 20 点の S_{21} を記録した。 S_{21} から得た振幅および位相の値とゼロ点との差を各サンプルにおける振幅変化 ($\Delta\alpha$) と位相変化 ($\Delta\phi$) とし、以下の解析に供した。

各サンプルから得られた 20 組のデータについては、 $\Delta\alpha$ を x 軸に、 $\Delta\phi$ を y 軸に取り、各周波数において $\Delta\phi$ と $\Delta\alpha$ との単回帰分析を最小二乗法により行った。また $\Delta\phi$ と $\Delta\alpha$ との一次回帰直線の傾きを $\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio と定義し、この値とサンプル含水率との関係を検討した。統計解析は R3.5.3 を用い、 $p < 0.05$ を有意とみなした。

2.3 結果

2.3.1 位相変化 ($\Delta\phi$) と振幅変化 ($\Delta\alpha$) との関係

ライムギにおける $\Delta\phi$ と $\Delta\alpha$ との関係のうち 3.6 GHz での一例を図 2-4 に、トウモロコシにおける一例を図 2-5 に示す。ほぼ全てのサンプルで $\Delta\phi$ と $\Delta\alpha$ との有意な相関が確認できた。また、同一サンプルにおいて $\Delta\phi$ と $\Delta\alpha$ が変化する割合はほぼ一定であった。ただし、絶乾させたトウモロコシにおいては $\Delta\phi$ と $\Delta\alpha$ の相関が有意ではなかった。また、 $\Delta\phi$ と $\Delta\alpha$ との一次回帰直線の傾き ($\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio) は含水率が高まるにつれて低下する傾向がうかがわれた。

$\Delta\phi$ と $\Delta\alpha$ との回帰分析により得られた決定係数の周波数特性について、high・middle・low・dry の 4 水準に含水率を調整したライムギでの平均値を図 2-6 に、トウモロコシでの平均値を図 2-7 に示す。 $\Delta\phi$ と $\Delta\alpha$ との相関は周波数によらず一貫して高かった。ただし、絶乾されたトウモロコシにおいては $\Delta\phi$ と $\Delta\alpha$ は有意ではなく、また決定係数の変動が大きかった (図 2-7)。

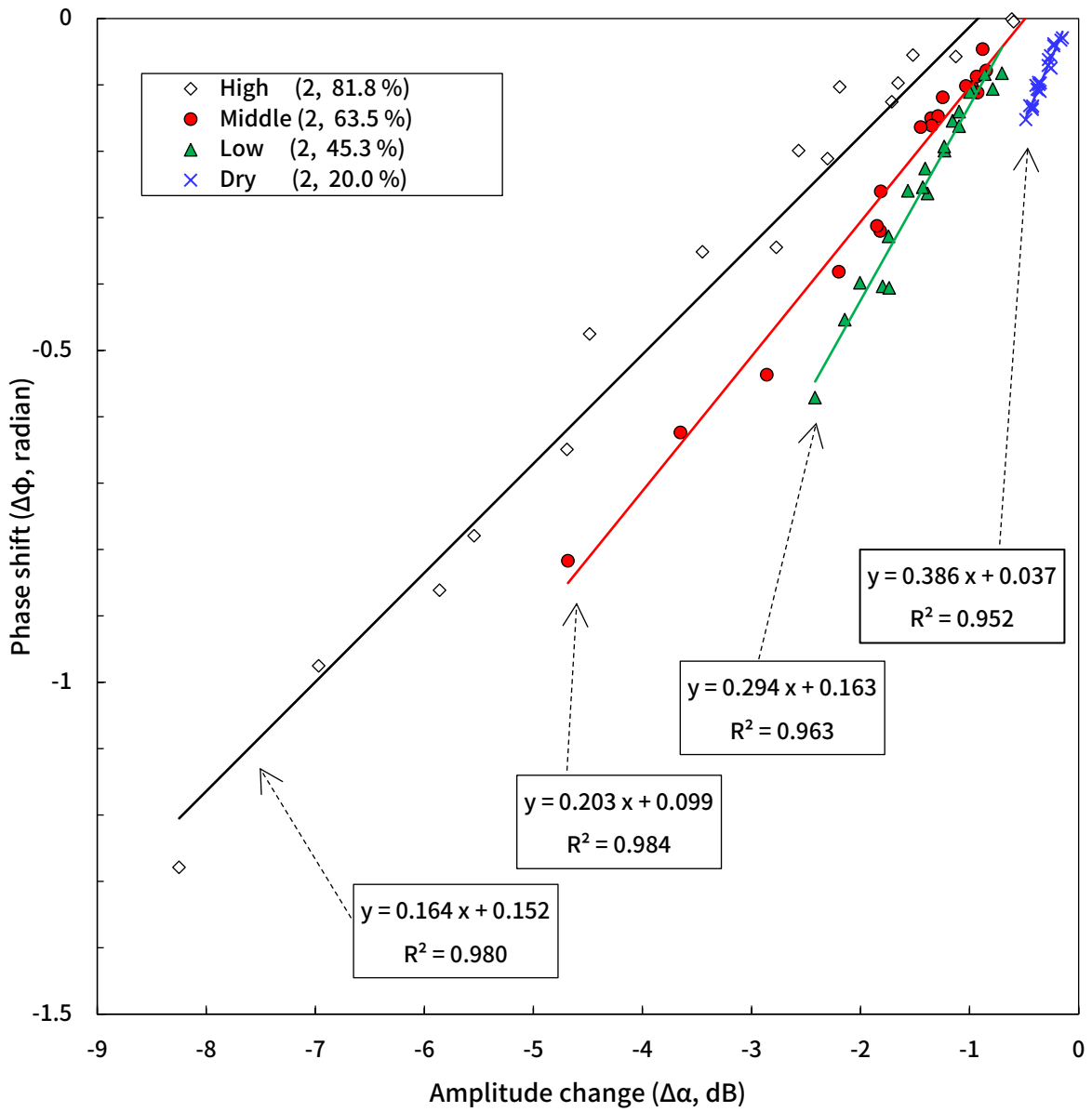


図 2-4. 3.6 GHz における位相変化 (Δφ) と振幅変化 (Δα) との関係 (ライムギ)

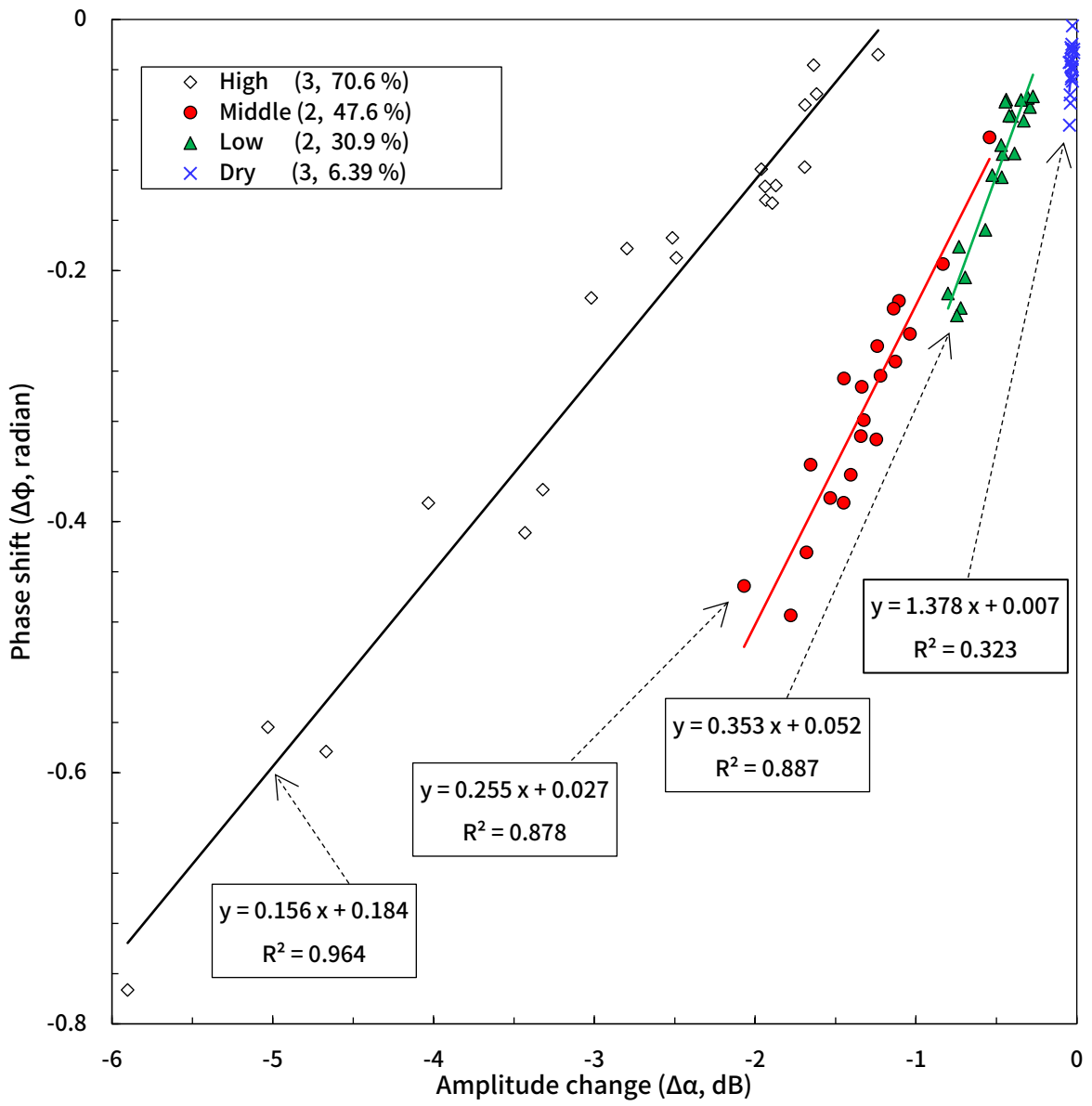


図 2-5. 3.6 GHz における位相変化 ($\Delta\phi$) と振幅変化 ($\Delta\alpha$) との関係 (トウモロコシ)

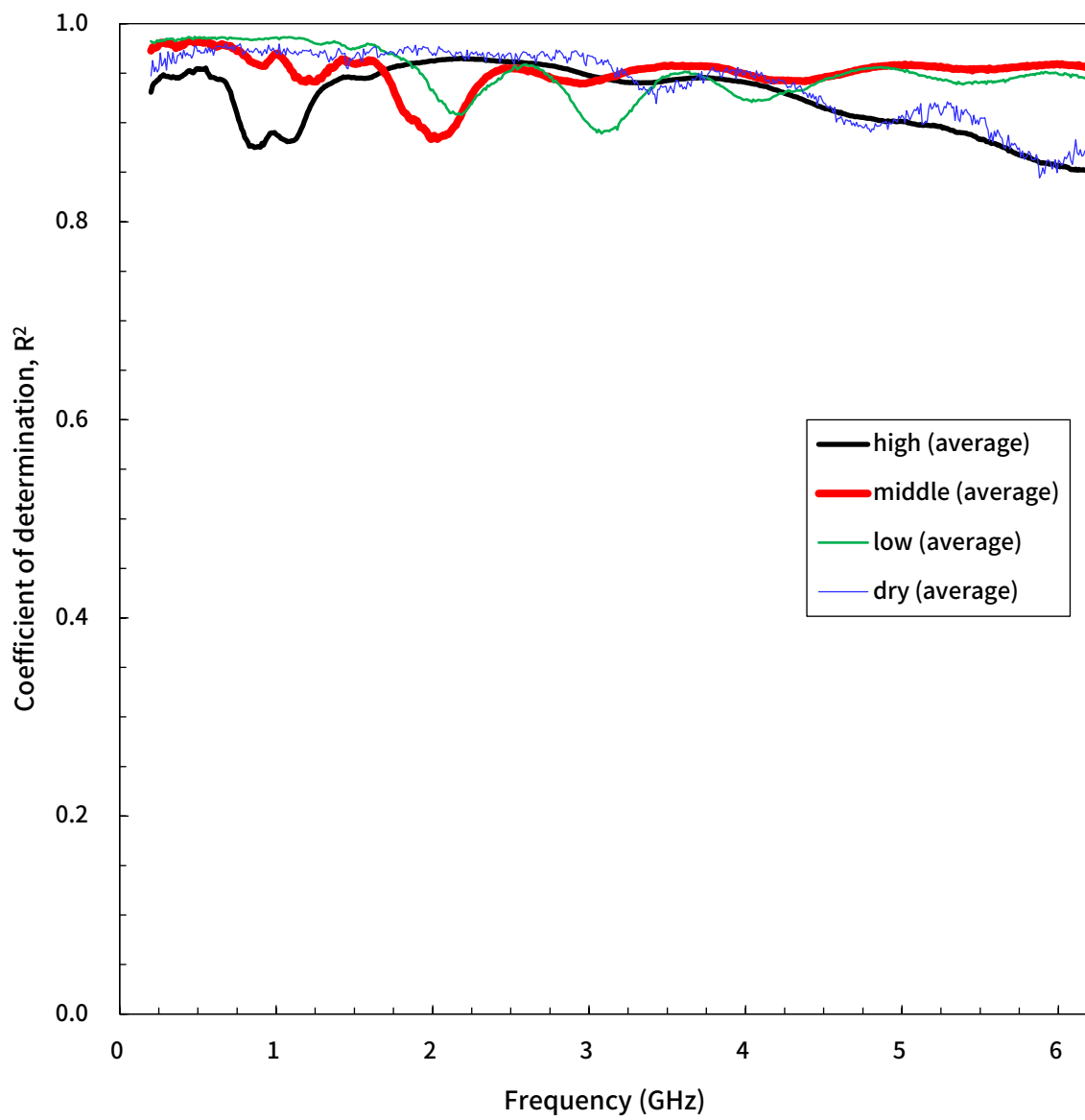


図 2-6. 位相変化 ($\Delta\phi$) と振幅変化 ($\Delta\alpha$) との相関 (ライムギ)

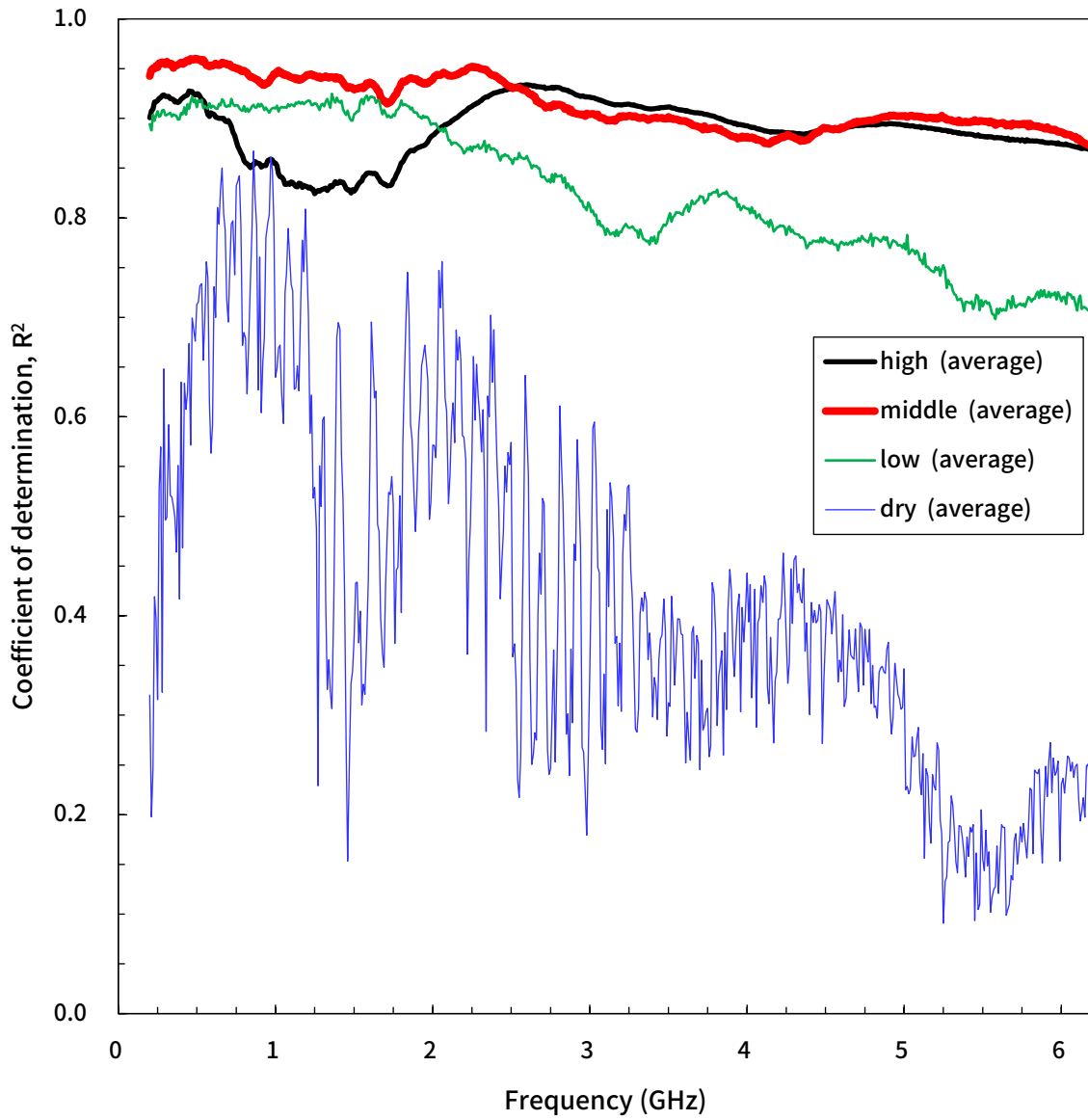


図 2-7. 位相変化 ($\Delta\phi$) と振幅変化 ($\Delta\alpha$) との相関 (トウモロコシ)

2.3.2 $\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio の周波数特性

$\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio の周波数特性について、high・middle・low・dry の 4 水準に含水率を調整したライムギの平均値を図 2-8 に、トウモロコシの平均値を図 2-9 に示す。周波数 1—1.5 GHz 前後で最大値となり、それ以降は周波数の増加につれて漸減する傾向が見られた。また、2 GHz を上回る周波数においては含水率の高いサンプルほど $\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio は低くなる傾向にあった。ただし、絶乾したトウモロコシでは周波数の変化に対して急激な値の変動が見られた。

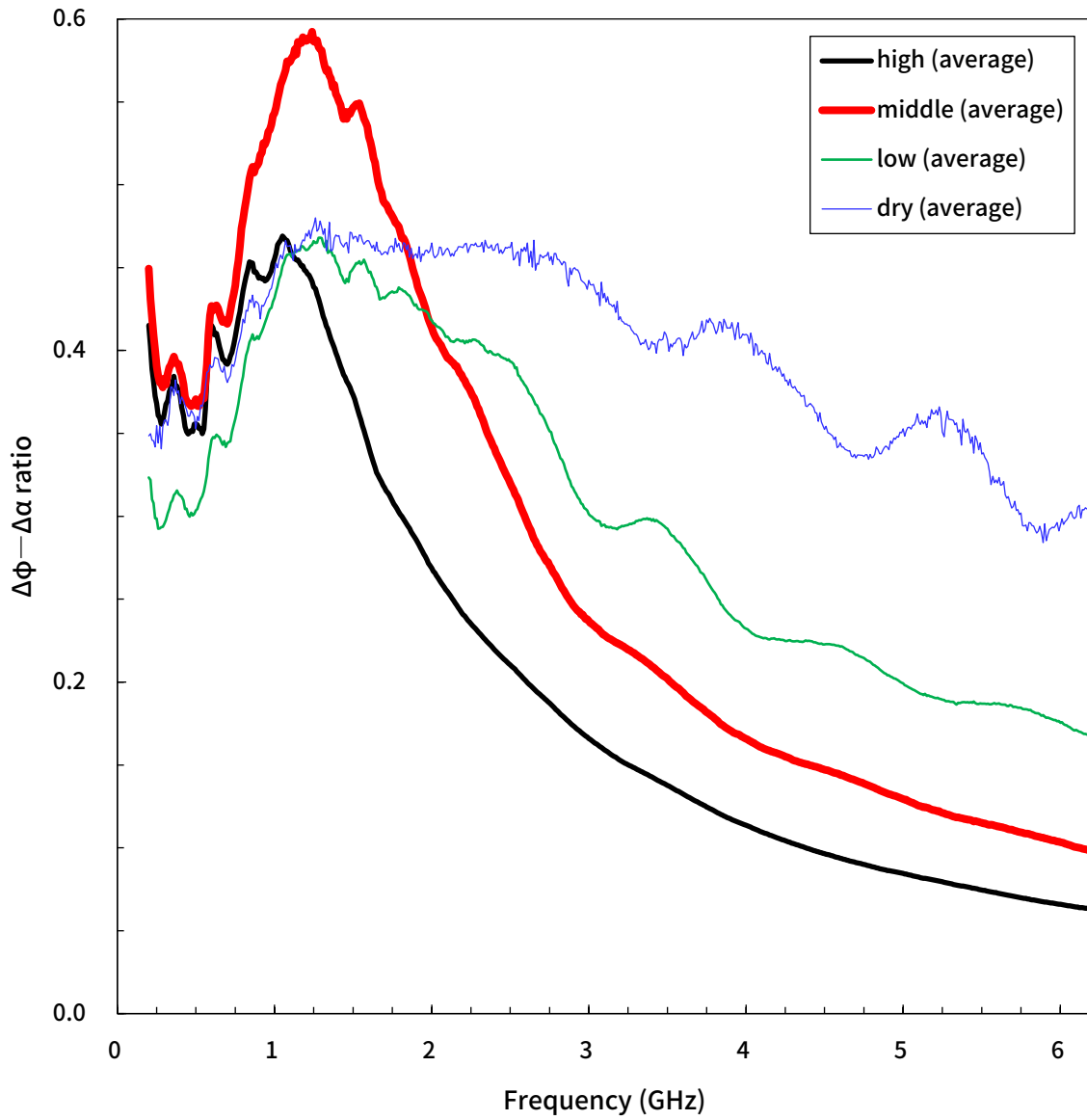


図 2-8. $\Delta\phi-\Delta\alpha$ ratio の周波数特性 (ライムギ)

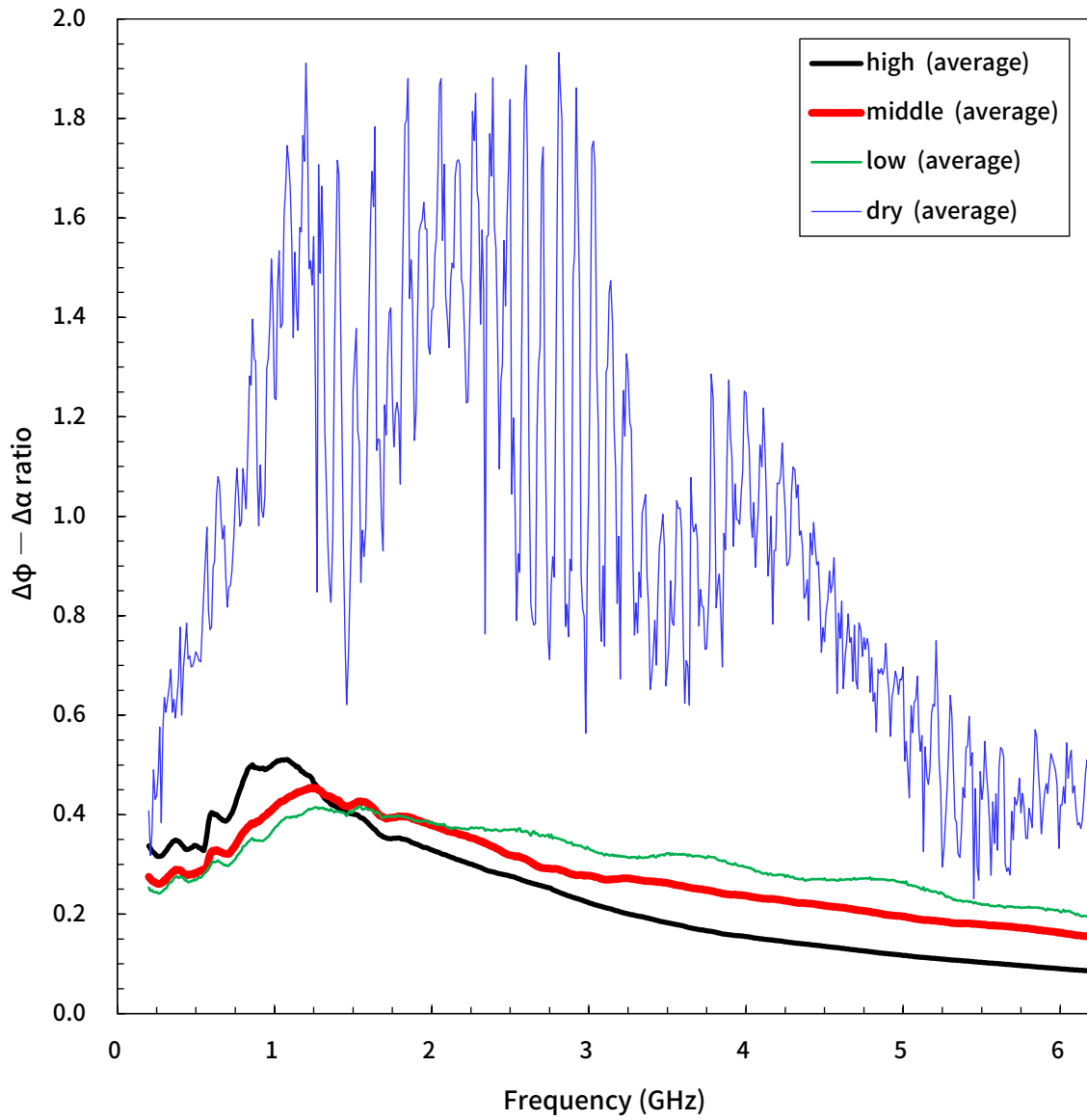


図 2-9. $\Delta\phi - \Delta\alpha$ ratio の周波数特性 (トウモロコシ)

2.3.3 $\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio と含水率との関係

図 2-7 で示したように絶乾させたトウモロコシのサンプルでは $\Delta\phi$ と $\Delta\alpha$ との間に有意な相関が認められなかったため、この絶乾トウモロコシのサンプル 4 点を除き $\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio と含水率を回帰分析した結果について、3.6 GHz での関係を図 2-10 に例示する。 $\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio と含水率とは有意な負の相関があった。また 3.6 GHz では、異なる草種であるライムギとトウモロコシにおいて、回帰直線の切片および傾きが有意に異なることはなかった。 $\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio と含水率との回帰分析における決定係数について、その周波数特性を図 2-11 に示す。ライムギ・トウモロコシのどちらも 1.5 GHz 前後で相関が失われたが、それ以降の周波数では急激に相関が高まり、ライムギでは 2.2 GHz、トウモロコシでは 3.6 GHz を越えると $\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio と含水率との決定係数は 0.8 を上回った。また 3.6 GHz 以上の周波数では決定係数は大きく変化しなかった。

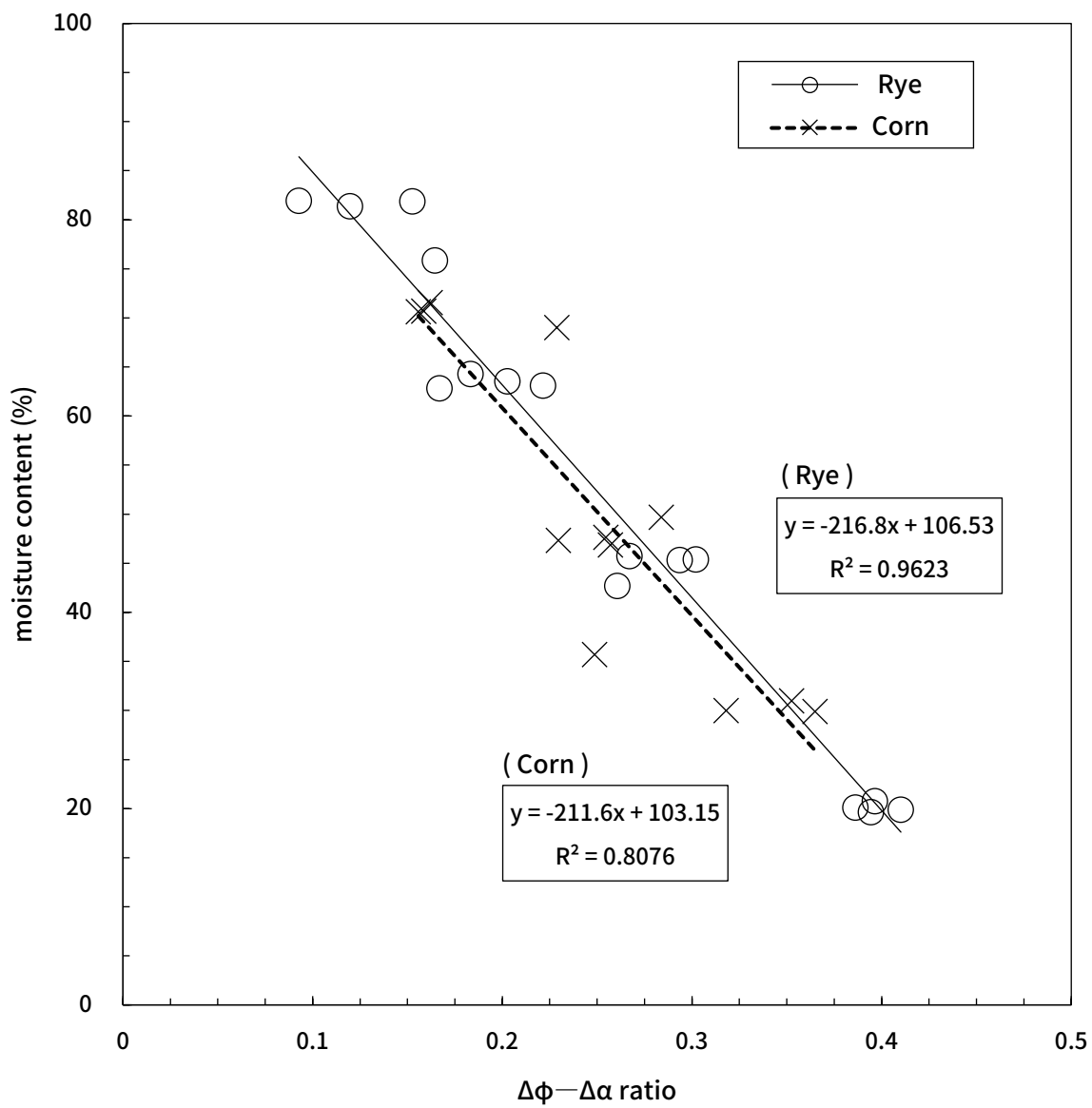


図 2-10. 3.6 GHz における $\Delta\phi-\Delta\alpha$ ratio と含水率との関係

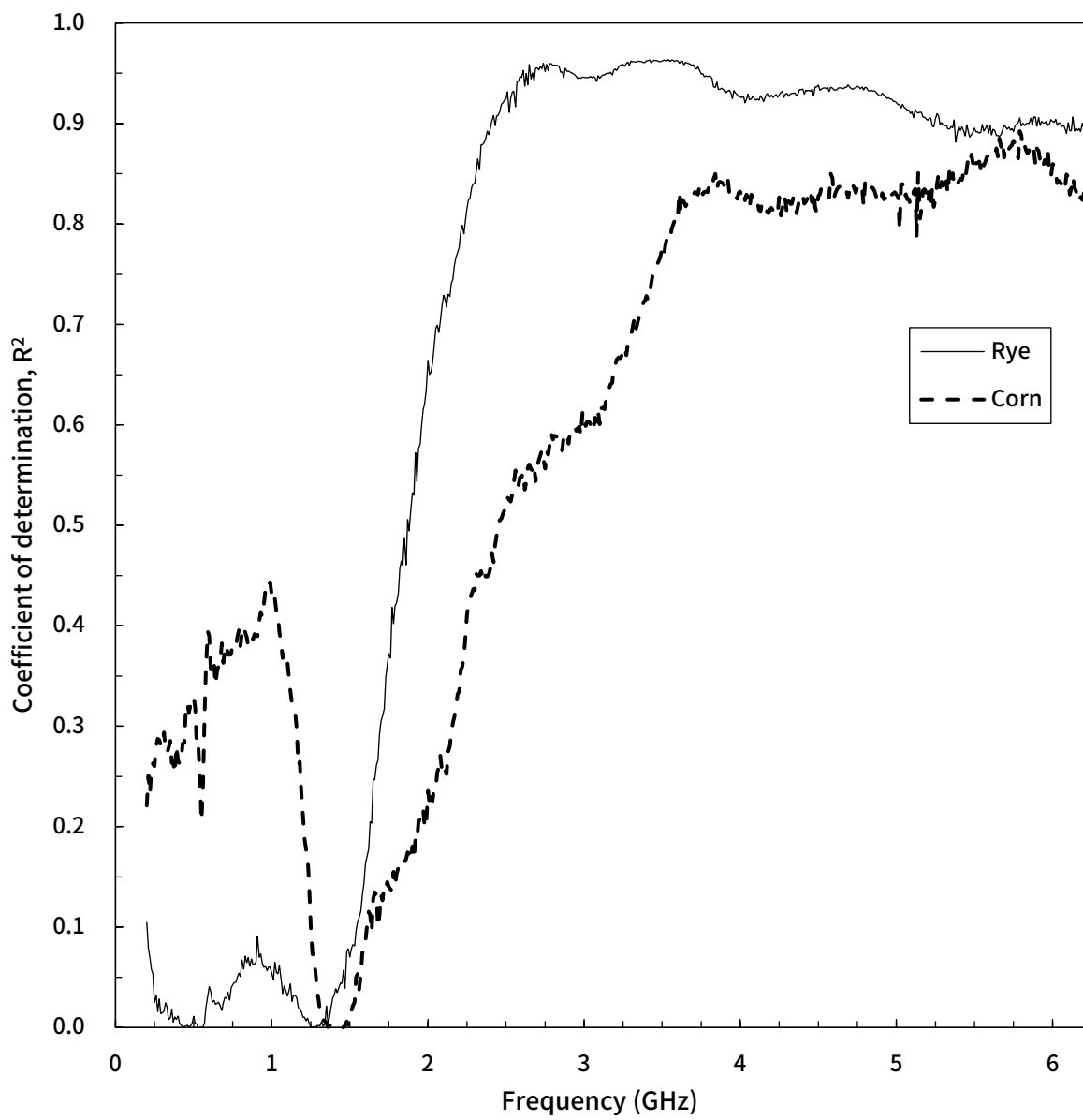


図 2-11. $\Delta\phi - \Delta\alpha$ ratio と含水率との相関

2.4 考察

MSTL 上にパウチサイロを静置することで、電磁波伝送路である MSTL を伝播する電磁界の一部がパウチサイロによってふさがれ、透過電磁波の振幅と位相に変化が生じたものと考えられる。また、この変化は MSTL 上にパウチサイロを置いた位置におけるパウチサイロの厚さ、すなわち電磁界を遮った飼料の量によって、さらにそこに含まれる含水率によって $\Delta\phi \cdot \Delta\alpha$ それぞれの変化量が変わったものと推察される。既報 (Kon et al. 2016) ではコメの原物を直接 MSTL 上に置いたり動的に流したりする検討が行われ、 $\Delta\phi$ と $\Delta\alpha$ との高い相関が得られ、またその相関を基に得られた $\Delta\phi$ と $\Delta\alpha$ との比率が含水率に応じて変化したと報告されている (Kon et al. 2016)。本実験では材料をプラスチックフィルムに包んだまま測定し、また Kon et al. (2016) と異なり材料の含水率は 80 %程度にまでおよぶ幅広い範囲であったが、 $\Delta\phi$ と $\Delta\alpha$ との高い相関を得ることができた。また、 $\Delta\phi - \Delta\alpha$ ratio と含水率との相関は、およそ 3.6 GHz の周波数で高かった。

このことから、MSTL を介して送受信した電磁波は、MSTL 上に測定対象を静置する位置を変えることで変化するが、同一材料であれば $\Delta\phi$ と $\Delta\alpha$ が変化する割合はほぼ一定であることが確認できた。また、 $\Delta\phi$ と $\Delta\alpha$ との比 ($\Delta\phi - \Delta\alpha$ ratio) は、測定対象がプラスチックフィルムに包まれた高水分な飼料であっても、その含水率に応じて変化する事が明らかとなった。したがって、この測定手法により得た $\Delta\phi$ と $\Delta\alpha$ との比 ($\Delta\phi - \Delta\alpha$ ratio) を指標とすることで、飼料のような含水率の高い材料についても、その含水率を非破壊推定できる可能性が認められた。また、乳酸発酵したトウモロコシサイレージでも、風乾したものに加水したライムギでも同様の傾向が認め

られたことから、この測定手法が、発酵の程度や有無によらず含水率の推定に適用できる可能性も示唆され、高い実用性が期待できる。

一方で、絶乾させたトウモロコシに限っては位相と振幅との相関が低く、 $\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio と含水率との関係は明瞭ではなかった。このことは、電磁波の位相と振幅との関係性から含水率をフィルム越しに推定するには、低水分材料への適用は困難となる可能性を示唆している。この原因としては、絶乾付近の材料においては電磁波が大きな影響を受ける水分子がほとんど含まれず、電磁波の信号変化が微弱となったこと、そのため本実験における測定系そのものにおいて発生するノイズレベルと測定された信号レベルとの差が不明瞭となったことが考えられる。一方で昆らはフィルムに被覆せずコメの穀粒をバラ測定しており (Kon et al. 2016)、含水率が 13 %程度の試料が測定可能なことは示されている。今後、MSTL の設計や測定に用いる VNA の仕様、測定手法等を最適化することで低水分材料の含水率もフィルム越しに測定できる可能性もあるが、このような条件の最適化については今後の課題と考えられる。

ただし、これは室内での小規模実験であることから、今後は実際のロールベールを使った検証実験、含水率の推定精度および精度向上方法の検討などが課題として考えられる。

2.5 要約

マイクロストリップラインを用い、飼料作物を詰めたパウチサイロに電磁波を透過させた。電磁波の振幅変化 ($\Delta\alpha$) に対する位相変化 ($\Delta\phi$) の関係は直線的で、その比 ($\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio) は含水率に応じて変化した。この $\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratioを指標に、飼料作物の含水率を非破壊で推定できる可能性が示された。

第 3 章 実規模のロールベールラップサイロにおける 含水率非破壊推定技術の検証

3.1 はじめに

第2章において、透過電磁波のデータから求めた位相変化と振幅変化との比 ($\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio) は、含水率と直線的な関係になること、またそれは MSTL と測定飼料との間にプラスチックフィルムを挟んだ状態であっても適用できることを明らかにし、含水率を非破壊で推定できる可能性を示した。しかし生産現場で使用されるラップサイロは大きく重く、同一サンプルで多回数の電磁波測定を行うために第2章のようにサンプルを動かすことはできず、MSTL すなわち測定系をシフトさせる必要がある。本章では、その適切な手法を検討するとともに、含水率の非破壊推定について、屋外作業の適用性を検討する。

3.2 材料と方法

3.2.1 供試飼料

トラクタけん引式の定径式ロールベアラとベールラップの機能を組み合わせた一体型の作業機（Vicon, FBP2135, Borreani et. al., 2007）により調製されたロールベールラップサイロ（直径 1.2 m, 高さ 1.2 m）を供試した。ロールベールの密封に用いたラップフィルムの幅は 500 mm, 厚さは 0.025 mm である。供試したラップサイロは, 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構（農研機構）那須塩原事業場内の, 予乾程度がそれぞれ異なる 5 筆の圃場で生産され, 1 圃場あたり 5 点ずつランダムサンプリングされた 25 点とした。原料草はオーチャードグラス 1 番草, 含水率は 15.0—74.7 % の範囲にあり, うち 20 点はサイレージ, うち 5 点は乾草とした（表 3-1）。

電磁波測定を行う部位としては, 各ラップサイロの円柱面中央部に直径約 15 cm の電磁波測定ゾーン（図 3-1）を設定した。この測定ゾーンの内側で, ラップサイロ表層のフィルムを剥がすことなく電磁波を測定した。各ラップサイロの含水率は, 電磁波測定の直後に測定ゾーンのフィルムおよびネットを切除し, その中央において直径 10 cm, 深さ 5 cm の原料草を採取し, 105 °C 24 時間の通風乾燥法により求めた。

表 3-1. 供試したロールペールラップサイロ

Sampling field	Moisture content (%) †	Film layers
A (silage)	74.7	6 ‡
	71.5	
	70.7	
	69.9	
	66.9	
B (silage)	61.0	6 ‡
	59.0	
	51.1	
	46.7	
	36.9	
C (silage)	54.2	6 ‡
	49.2	
	45.4	
	42.2	
	33.3	
D (silage)	36.2	6 ‡
	35.0	
	32.4	
	31.3	
	30.3	
E (hay)	17.8	2 §
	16.2	
	15.2	
	15.1	
	15.0	

† Oven-dry method (105 degrees Celsius 24 hours)

‡ 3D wrapping method (Borreani et. al., 2007)

§ conventional wrapping

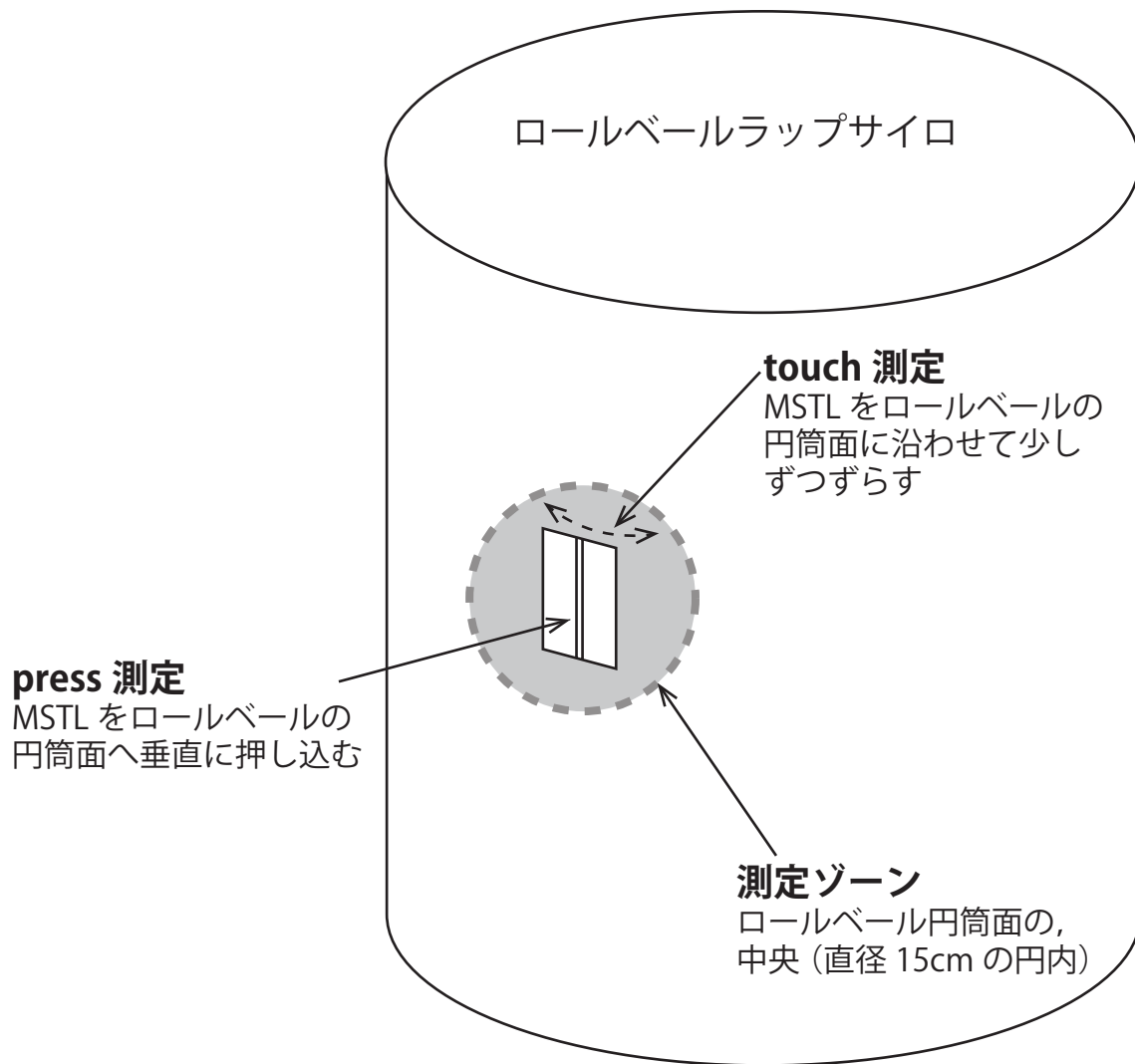


図 3-1 電磁波測定ゾーンの設定および測定方法の概略

3.2.2 測定装置の接続および設定

2ポート VNA (Keysight, N9926A), および特性インピーダンス $50\ \Omega$ のマイクロストリップライン (MSTL, 中心導体長さ: 80mm) を同軸ケーブルで接続した (図 3-2). 測定系のセッティングを表 3-2 に示す. 測定前に同軸ケーブル終端の 3.5mm コネクタにおいてフル 2ポート校正を行い (Keysight, 85521A), 校正の実施直後に MSTL を接続し, MSTL を空中に向けて電磁波を送受信した時の S_{21} をゼロ点のデータとした. VNA の出力, IF 帯域幅, 掃引周波数および周波数のインターバルは, それぞれ -1 dBm , 1 kHz , $0.2\text{--}6.2\text{ GHz}$, 10 MHz とした (表 3-2).

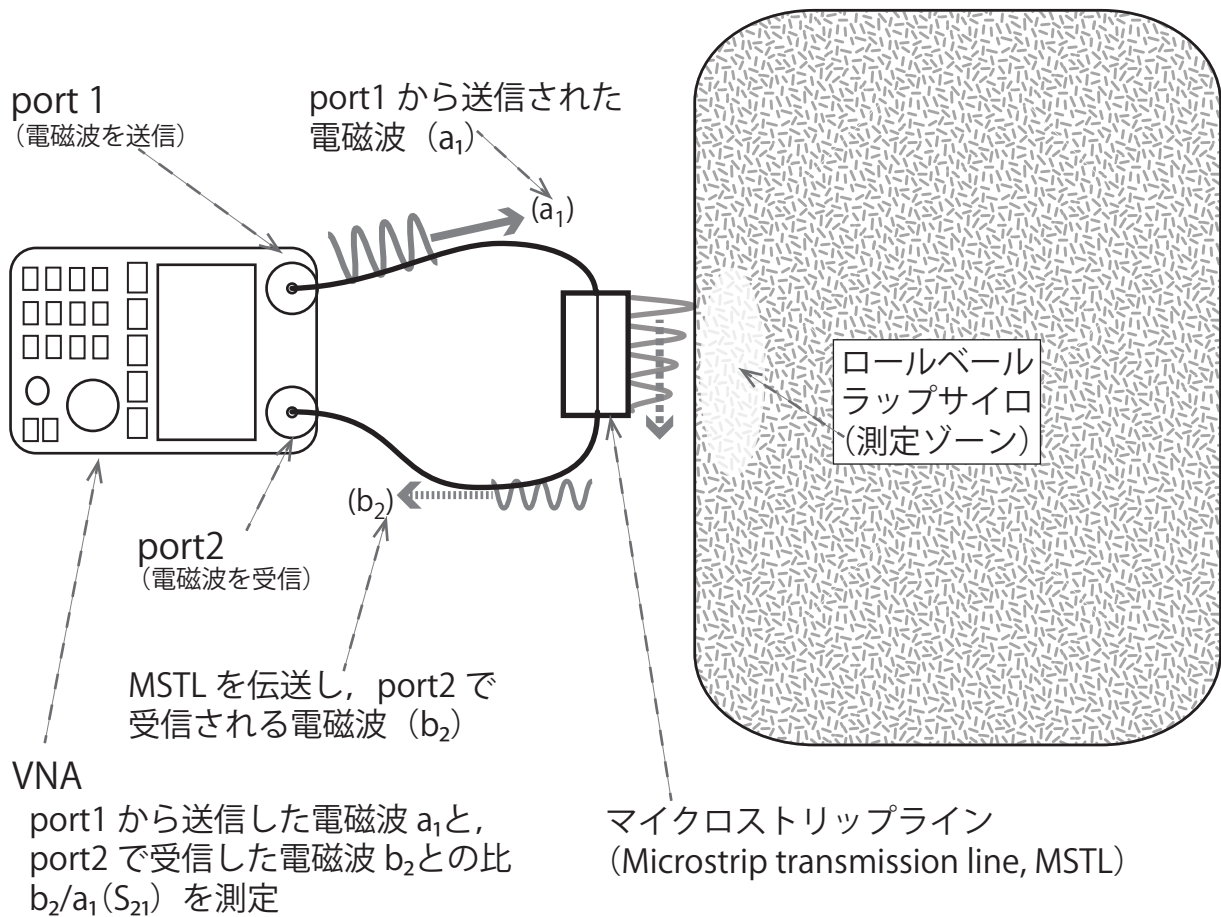


図 3-2 VNA および MSTL による測定イメージ

表 3-2. 電磁波の測定条件および設定

Vector Network Analyzer		(Keysight N9926A / N9918A)
Output power		-1 dBm
Frequency	min	0.2 GHz
	max	6.2 GHz
	interval	0.01 GHz
IF bandwidth		1 kHz
Calibration	Full 2-port	(85521A)
Sensor	Microstrip transmission line	(Prototype)
	Conductor length	80 mm
	Characteristic Impedance	50 ohms
Connection	Semi-flexible coaxial cable	

3.2.3 電磁波の測定手順

屋外に置かれたラップサイロの測定ゾーンへ MSTL を以下の 2 通りの方法で接触させ、MSTL を透過した電磁波信号 (S_{21}) を測定し、VNA に記録した。なお、ラップサイロの測定は、農研機構那須塩原事業場にて行った。測定時の外気温、相対湿度はそれぞれ 4.9—8.7 °C、46—57 % で、天候は曇であった。

3.2.3.1 電磁波の touch 測定

MSTL をラップサイロのフィルム表面に接触させるとともに静止させ、ラップサイロへの圧縮力を加えずに、VNA から MSTL へ電磁波を送受信した (図 3-3)。同一ラップサイロにおける測定の繰り返しにおいては、ラップサイロの測定ゾーン内側で MSTL をわずかにずらした。その部位で再度 MSTL をラップサイロのフィルム表面に接触させ、VNA から MSTL へ電磁波を送受信した。この操作を繰り返し、1 つのラップサイロにつき 20 点の S_{21} を VNA に記録させた。

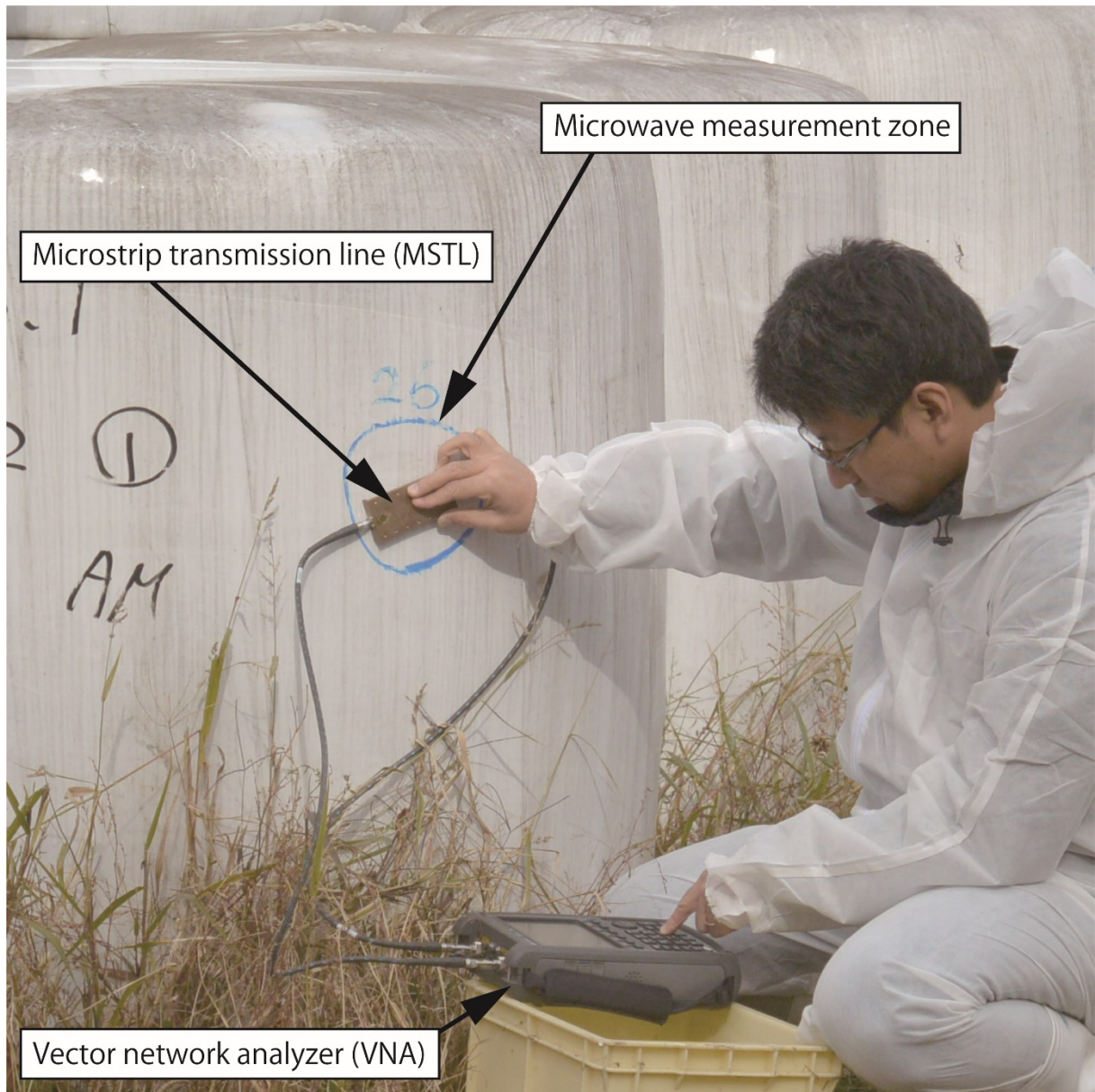


图 3-3 測定風景 (touch 測定)

3.2.3.2 電磁波の press 測定

touch 測定の直後に、MSTL を測定ゾーン中央に接触させるとともに、MSTL をラップサイロ中心に向けて押して任意の圧縮力を手動で加えた。この状態を維持したまま VNA から MSTL へ電磁波を送受信した。同一ラップサイロにおける測定の繰り返しにおいては、ラップサイロ表面で MSTL を接触・押しつける位置を変えることなく、MSTL をラップサイロ中心に向けて押しつける力のみを手動で変更し、VNA から MSTL へ電磁波を送受信した。この操作を繰り返し、1つのラップサイロにつき 20 点の S_{21} を VNA に記録させた。なお、圧縮力を加える際には、同軸ケーブルおよびコネクタの変形および破損を防ぐため簡易な治具を製作し、圧縮力が MSTL のみに加わるよう配慮した (図 3-4)。



图 3-4 測定風景 (press 測定)

3.2.4 電磁波のデータ解析

VNA に記録させた S_{21} から、MSTL を伝播した電磁波の振幅および位相を求めた。これについて、それぞれゼロ点からの差を、各測定における振幅変化 ($\Delta\alpha$)、位相変化 ($\Delta\phi$) とした。各ラップサイロで得られた $\Delta\phi$ と $\Delta\alpha$ との単回帰分析を各周波数で行い、ここで得られた決定係数を指標に touch 測定と press 測定を比較した。

次に、上記の touch 測定と press 測定のうち $\Delta\phi$ と $\Delta\alpha$ との相関が高かった測定手法における、電磁波信号の変化と含水率との関係を解析した。得られた $\Delta\alpha$ を x 軸に、 $\Delta\phi$ を y 軸に取り単回帰分析を行い、 $\Delta\phi$ と $\Delta\alpha$ との回帰直線の傾きを $\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio とした。この $\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio と、通風乾燥法で求めた質量含水率との回帰分析を各周波数で行った。

なお、Matsuo ら (2019) が、乾草において $\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio と含水率との相関が低いと報告していることを踏まえて、 $\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio と含水率との回帰分析のみは、乾草を除いたサイレージ 20 点で行った。統計解析は R software (3.6.3) により行った。回帰分析は最小二乗法により行い、 $p < 0.01$ を有意とした。

3.3 結果

3.3.1 位相変化 ($\Delta\phi$) と振幅変化 ($\Delta\alpha$) との関係

$\Delta\phi$ と $\Delta\alpha$ の代表的なデータの例として、含水率 74.7 %、42.2 %、15.0 % のラップサイロで測定した 3.6 GHz における、touch 測定での結果を図 3-5 に、press 測定での結果を図 3-6 に示す。touch 測定における $\Delta\alpha$ および $\Delta\phi$ の分布は極めて小さい範囲に留まった。また、相関関係が有意と認められなかった $\Delta\phi$ と $\Delta\alpha$ が多数認められた。一方で、press 測定における $\Delta\alpha$ および $\Delta\phi$ の分布は、touch 測定と比較すると顕著に広い範囲にあり、 $\Delta\phi$ と $\Delta\alpha$ との間には明瞭な正の相関が認められた (図 3-6)。図 3-5 および図 3-6 では一部サンプルデータのみを抜粋しているが、全サンプルにおいてこの傾向が認められた。

$\Delta\phi$ と $\Delta\alpha$ との回帰分析における決定係数 (R^2) について、touch 測定と press 測定を比較した結果を図 3-7 に示す。touch 測定における R^2 値は低く、ほとんどの周波数において有意ではなかった。一方で press 測定における $\Delta\phi$ と $\Delta\alpha$ は、測定周波数の全てにおいて、また全てのラップサイロにおいて極めて高く有意であった。

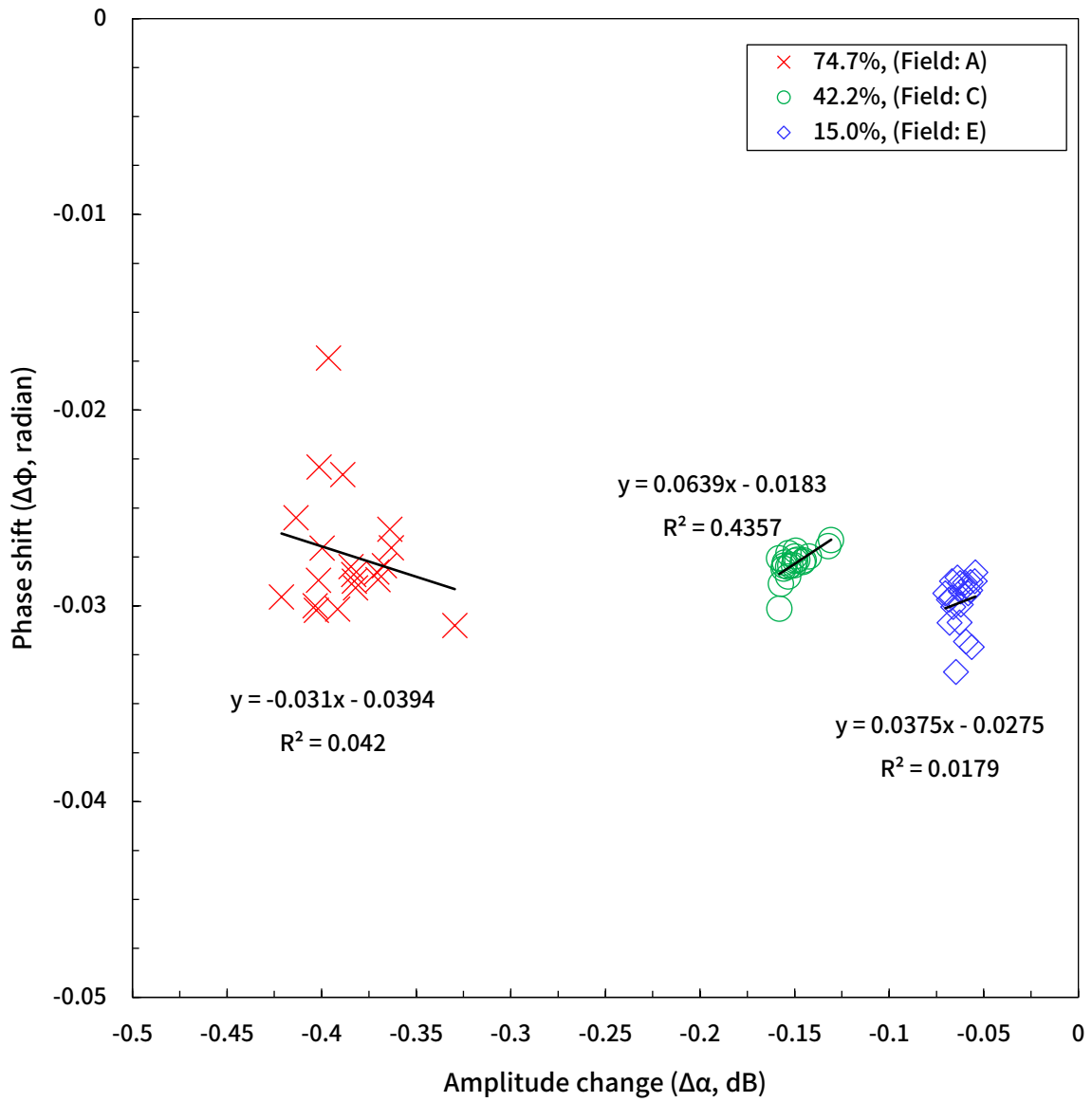


図 3-5. 位相変化 ($\Delta\phi$) と振幅変化 ($\Delta\alpha$) との関係 (touch 測定・3.6 GHz)

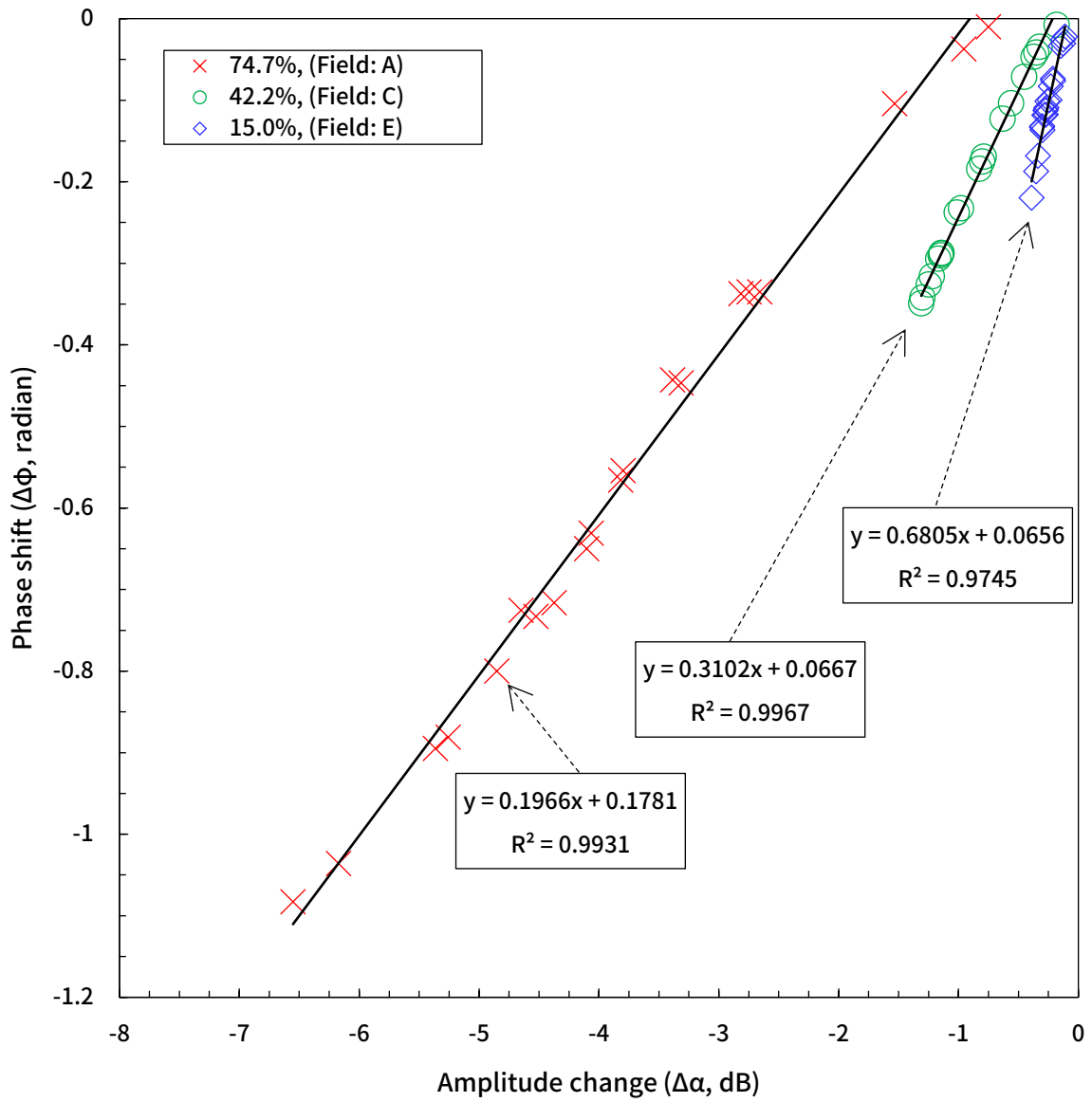


図 3-6. 位相変化 ($\Delta\phi$) と振幅変化 ($\Delta\alpha$) との関係 (press 測定・3.6 GHz)

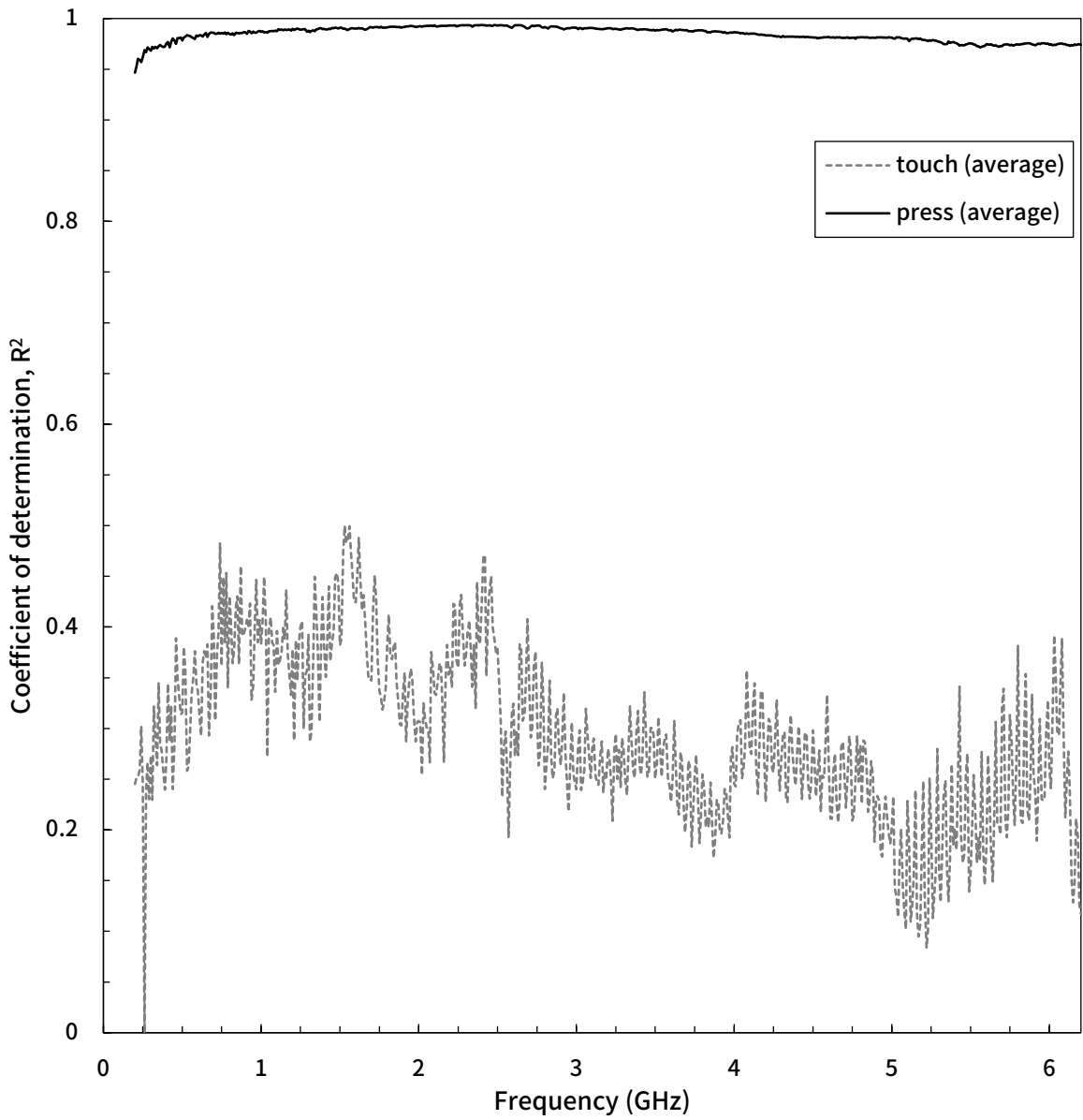


図 3-7. touch 測定と press 測定における $\Delta\phi$ と $\Delta\alpha$ との相関

3.3.2 $\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio と含水率との関係

press 測定で得られた代表的なデータとして、3.6 GHz における $\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio と含水率との関係を図 3-8 に示す。含水率が 30—75 % の範囲において、 $\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio と含水率は有意な相関関係にあることが確認できた (図 3-8)。なお、圃場 E から得られた乾草のロールベールラップサイロについては回帰分析には供していないが、サイレージにおける直線的な関係からは外れた値にあった (図 3-8)。

また、p 値および決定係数 R^2 の周波数特性を図 3-9 に示す。 $\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio と含水率との相関については、周波数 0.2—2.6 GHz では弱い相関もしくは無相関だった。周波数 2 GHz を越えると周波数の増加にともない顕著に相関が強まる傾向にあった。周波数が 2.37 GHz 以上の範囲では有意であった。また、周波数が高まるにつれて負の相関が強まる傾向にあった。ただし、周波数 3.6 GHz を越える帯域では、相関の強さの変化は緩やかだった (図 3-9)。

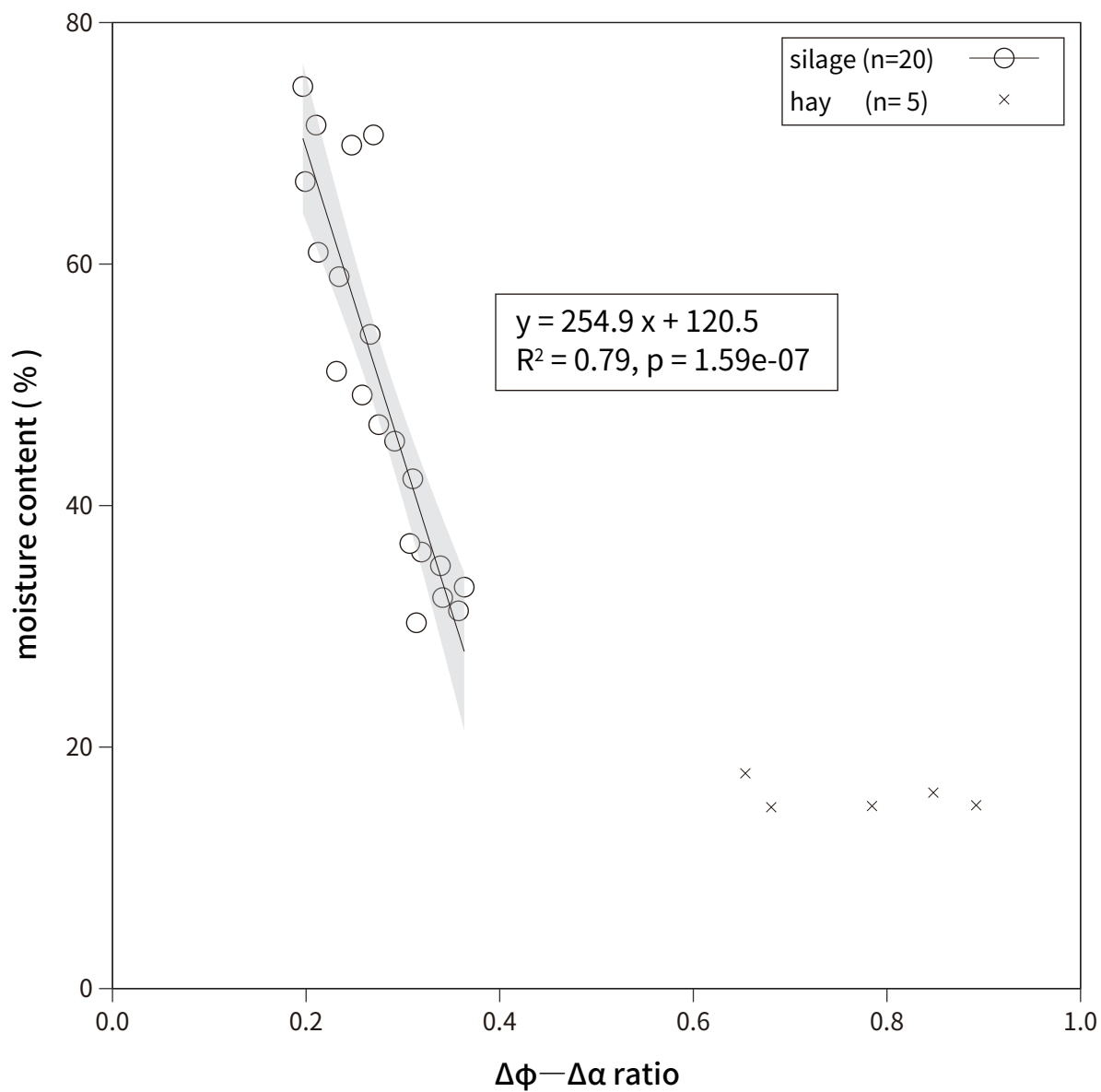


図 3-8. press 測定・3.6 GHz における $\Delta\phi - \Delta\alpha$ ratio と含水率との関係

(灰色の塗りつぶしは 95 %信頼区間を示す)

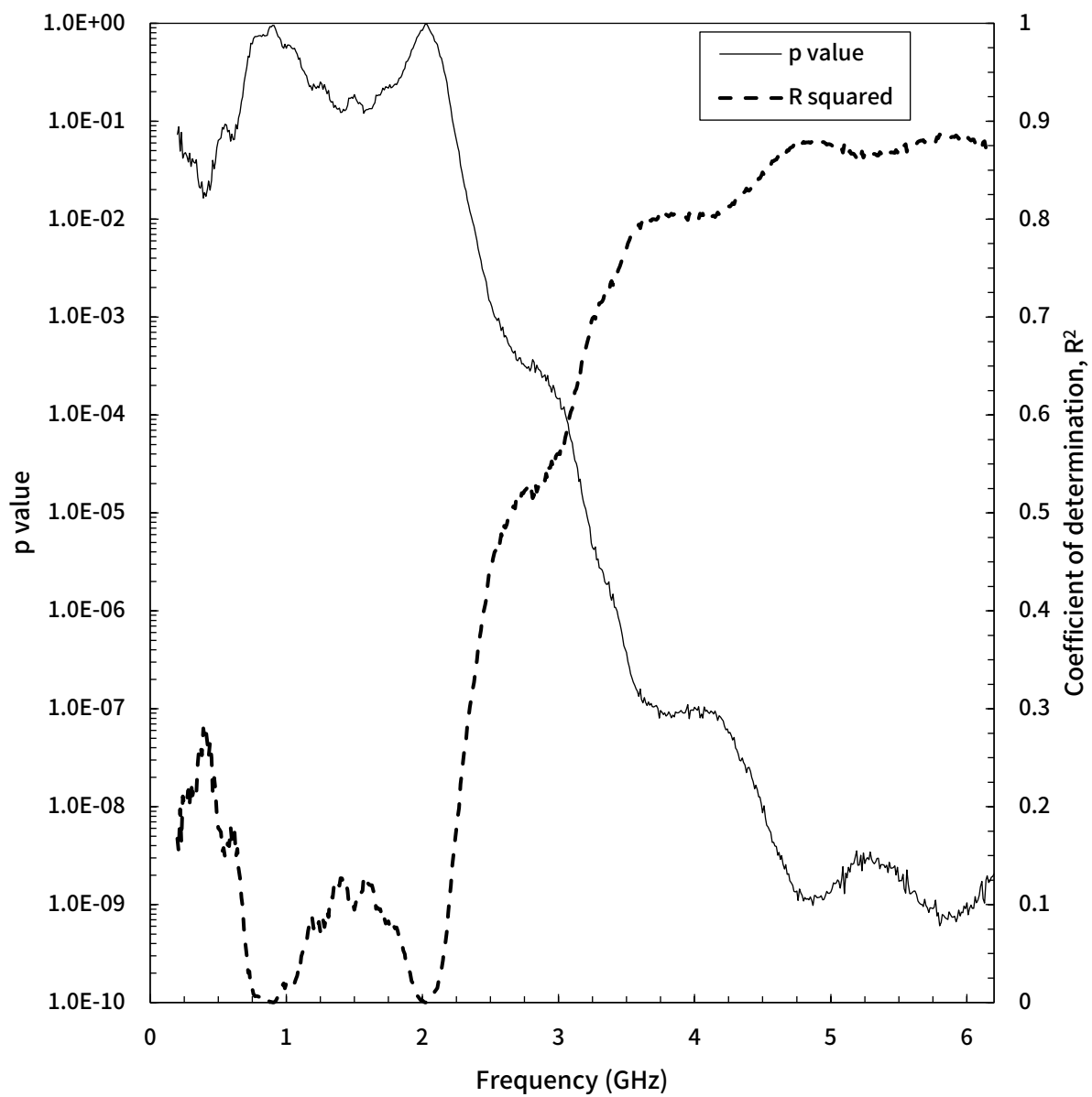


図 3-9. press 測定での $\Delta\phi$ - $\Delta\alpha$ ratio と含水率との回帰分析における p 値および R^2

3.4 考察

3.4.1 ラップサイロにおいて測定した電磁波の $\Delta\phi$ と $\Delta\alpha$

Matsuo ら（2019）が行った飼料作物の非破壊測定は小型のパウチサイロが対象であった。位置を固定した MSTL の上にパウチサイロを置き、パウチサイロの位置を少しずつシフトさせて、同一サンプルでの電磁波データを複数得ていた。ところが、寸法・質量が大きいラップサイロを測定の度に動かすことは難しい。したがって Matsuo ら（2019）の室内実験の方法を屋外のラップサイロで適用するにはラップサイロの代わりに MSTL、すなわち測定系を動かす必要が生じる。

MSTL を動かす方向を、MSTL 基板面の平行方向（touch 測定）および法線方向（press 測定）の 2 通りに設定して得られた $\Delta\phi$ と $\Delta\alpha$ との関係は、touch 測定で相関が見られなかった一方、press 測定では明らかに直線性の高い関係が得られ、顕著な差が認められた。したがって、 $\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio を指標としてラップサイロの含水率推定を行うには、press 測定が妥当な方法と考えられる。

次に、 $\Delta\phi$ と $\Delta\alpha$ の相関が touch 測定で低く press 測定で顕著に高かった原因について考察する。Matsuo ら（2019）が用いたパウチサイロは、寸法・厚みが小さくムラがある小規模な実験用サイロである（田中・大桃 1995）。したがって、MSTL 上での位置をわずかに変えるだけで、MSTL 直上にある材料の量（≒厚み）が変わる。一方でラップサイロは MSTL の大きさと比べると顕著に寸法が大きく円柱状であるため、MSTL を touch させる位置をわずかに変えるだけでは MSTL 直上にある材料の量の変化は無視できるほど小さいと考えられる。このため、同一試料で 20 回の測

定を行っても $\Delta\phi$ および $\Delta\alpha$ は極めて狭い範囲でしか変化せず，結果として有意な相関関係が得られにくかったものと考えられる．

一方で press 測定の場合は，MSTL をラップサイロ表面へ押し当てている．この人力での押し当てにより，ラップサイロ表面ではわずかな変形が生じ，MSTL 表面付近の材料には圧縮作用による密度変化が起きていたと考えられる．この密度変化によって， $\Delta\phi$ および $\Delta\alpha$ の変化は touch 測定と比較して大きくなり，その結果，直線的な $\Delta\phi$ と $\Delta\alpha$ の関係を得ることができたと考えられる．

この考察を裏付けるための追加実験として，MSTL を押し当てる力の大きさと $\Delta\phi$ および $\Delta\alpha$ の大きさとの関係を確認した．模擬材料として，吸湿させたコルク粒（粒径：2—3mm）をパウチサイロ（旭化成パックス，飛龍 KN-210）に封入し，角形の型枠内でバキュームシーラ（旭化成パックス，SQ-205S）により脱気密封することで，概ね直方体に成形した試料を供試した．これを，アルミフレーム内に固定した MSTL へハンドジャッキにより押し当て，押し当て荷重をデジタルフォースゲージで測定しつつ，荷重を変化させた際の電磁波伝送特性 S_{21} を VNA で測定した（図 3-10）．

この追加実験の結果について，3.6 GHz における一例を図 3-11 に示す．MSTL を押す荷重が高まるにつれて振幅変化および位相変化は大きくなる傾向が明瞭に確認できた．このことは，MSTL を強く押すことにより $\Delta\phi$ と $\Delta\alpha$ の広範囲な分布を得ることができること，すなわちラップサイロにおける非破壊含水率測定においては，MSTL を押し当てる press 測定が適していることを改めて強く示唆するものと考えられた（図 3-11）．

ただし，MSTL をラップサイロ表面へ押し当てる力の大きさと実際のラップサイロ表面における圧密程度との関係は，今回は測定していない．より安定的に $\Delta\phi$ と $\Delta\alpha$ を測定し，高い精度で含水率を非破壊推定するためには，密度変化の影響の定量化や圧密の有無および程度が電磁界の伝播範囲におよぼす影響の解析，さらに MSTL 押し当て条件の最適化等が必要と考えられるが，今回の実験結果だけからはこの考察はできない．この検討は今後の課題である．

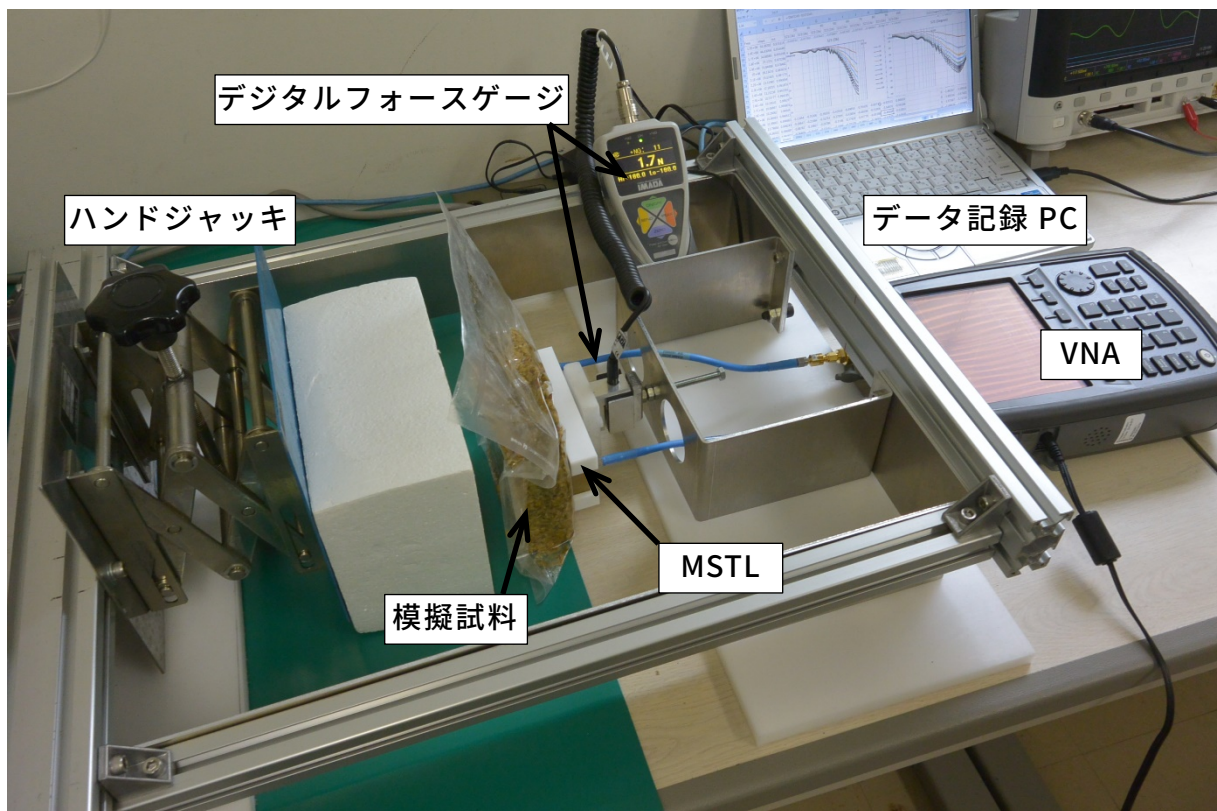


図 3-10. 追加実験のレイアウト

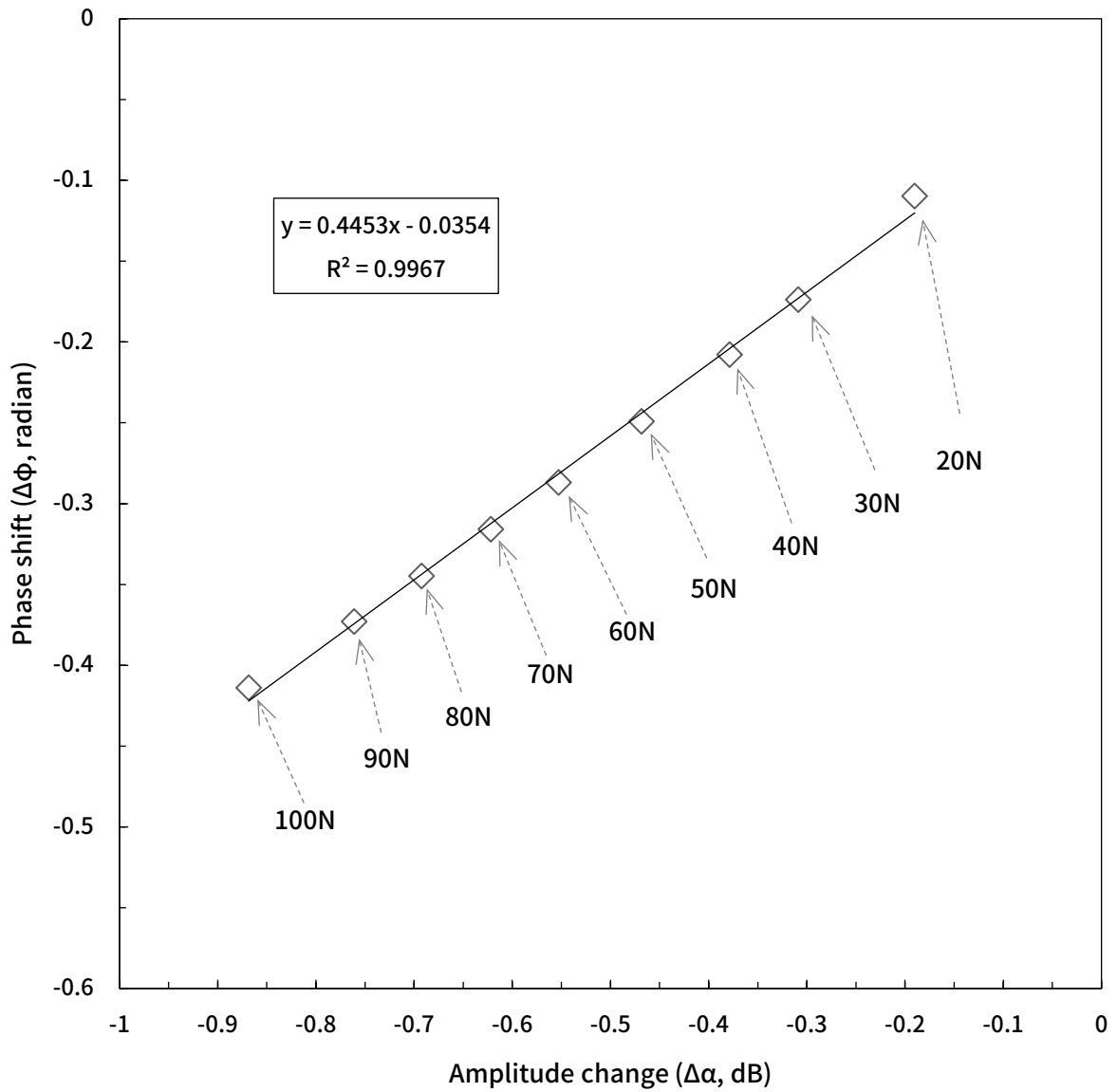


図 3-11. MSTL を押し当てる荷重と， $\Delta\phi$ と $\Delta\alpha$ の分布との関係

(室内での追加実験，模擬材料のパウチサイロ，周波数 3.6 GHz のデータを抜粋)

3.4.2 $\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio と含水率との関係

press 測定における $\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio と含水率との関係は、2.37 GHz 以上の周波数で有意であった。 $\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio と含水率との決定係数 R^2 についてみると、2.0—3.6 GHz の区間では周波数の増加とともに急激に高まる傾向にあったが、それ以降の周波数では大きく変化せず、顕著な周波数特性は認められなかった（図 3-6）。したがって、3.6—6.2 GHz の範囲の周波数は、MSTL を用いて測定した透過電磁波の $\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio を基にラップサイロの含水率を推定する上で、有効な周波数帯の1つと考えられた。また、Matsuo ら（2019）がパウチサイロで室内測定したデータも、2 GHz 付近で $\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio と含水率とは無相関になり、それ以上の周波数では、周波数に応じて顕著に相関が高まり、3.6 GHz を越える周波数では相関の強さに変化が少ない傾向が見られた。このデータは今回の相関関係のデータと類似することから、 $\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio と含水率との相関は屋外でも室内と同様の傾向にあり、これに基づいた含水率の非破壊推定方法は、実規模で生産され屋外で保管されるラップサイロにも応用可能と考えられる。

一方で、今後ラップサイロを対象とした非破壊水分計を開発するには、この関係を基に検量線を作成し、非破壊での含水率推定精度を検証するとともに、必要に応じて改善する必要がある。ただし、今回はオーチャードグラスのみのデータであり、多様な草種でも同様の検量線を作成できるか確認・検討する必要がある。これらのことから、含水率の推定精度を詳細に検証するためには、今後さらなるデータの充実が望まれる。

また、今回は広範囲な周波数帯域の検討に留まっており、最適周波数の解明には至っていない。今後、非破壊での含水率推定精度を高めるためには、単回帰分析だけでなく、複数の周波数を使った重回帰分析、より最適な周波数の探索も有効と考えられる。このような解析技術の検討についても、今後の課題と考えられる。

3.5 要約

マイクロストリップ線路 (MSTL) を用いて実規模のロールバールラップサイロを対象として、内部含水率の非破壊推定を試みた。透過電磁波の位相変化と振幅変化との比 ($\Delta\phi - \Delta\alpha$ ratio) を指標とすることは、室内だけでなく実規模のラップサイロを対象とした屋外測定にも適用可能なことが示された。また、屋外での含水率非破壊推定に際しては、MSTL をラップサイロ表面に押し当てつつ電磁波測定することが極めて有効なことが明らかとなった。

第 4 章 ロールベールラップサイロの広域流通に向けた簡易荷役具の開発

4.1 はじめに

第1章において、国産飼料の広域流通におけるハード面の課題として、ベールハンドラの普及は畜産農家に限られていること、またベールハンドラの中で最も普及しているグリップ式ベールハンドラは、その特性上ラップサイロを变形させてしまい品質劣化のリスクとなること、この軽減のためには慎重なハンドリングによりラップサイロの变形量を最小限にする必要があることを述べた。

本章においては、国産飼料の流通に欠かせないハンドリング技術について述べる。可搬式サイロの一種であるロールベールラップサイロを対象として、物流業界で一般的な荷役機械であるフォークリフトに適應し、ラップサイロへの变形を少なくしつつ簡易に運搬するための補助具の開発について、またそのTMRへの適用拡大について述べる。

4.2 材料と方法

4.2.1 開発目標の設定

これまでのラップサイロハンドリング技術は、グリップ式ベールハンドラを対象とした報告（本田 1996；浦川・吉村 2003b；増田・平久保 2006；福井ら 2009）が多い。グリップ式ベールハンドラはトラクタまたはホイールローダ等のフロントローダに装着するアタッチメントで、ラップサイロを両側から挟み込んで把持する（図4-1）。このような専用アタッチメントには導入コストがかかること、またラップサイ

ロの変形はサイレージ品質が劣化する原因となり慎重なハンドリングが求められることなどから、物流業者へのベールハンドラの導入例はほとんどない。ベルト状の吊り具を活用してフォークリフトでラップサイロを吊り上げて荷役する事例（望月 2009）もあるが、この吊り具を装着するにはラップサイロを持ち上げて底面にベルト状の吊り具を挿入する必要があるため、TMR センターを起点とした利用に留まっている。代表的なベールハンドラであるグリップ式ベールハンドラによる荷役作業の一例を図 4-1 に示す。

一方でフォークリフトは、物流業者をはじめ産業界へ広く普及している。これを活用できれば一般の物流業者でもラップサイロを簡便かつ確実に輸送できるようになると考えられる。しかし現状、フォークリフトを保有する一般的な輸送業者はロールベールラップサイロの取扱経験がほとんどない。また、ハンドリングの際にラップサイロを大きく変形させると、ラップサイロ内への空気の流入、これによるサイレージ品質の劣化が懸念される（武内 2012）。そこで、ストックヤードへ一次集積されたイネ WCS のロールベールラップサイロへの対応を念頭に、下記の通り目標を設定した。

- (1) 縦置きラップサイロの吊り上げを可能とする。
- (2) フォークリフトのフォークに差し込み可能な形状とする。
- (3) 荷役具の着脱にラップサイロの持ち上げを必要としない。
- (4) 直径 1.1 m、質量 300 kg のラップサイロを対象とする。
- (5) プラスチックフィルムの損傷およびラップサイロの変形を起こさない。

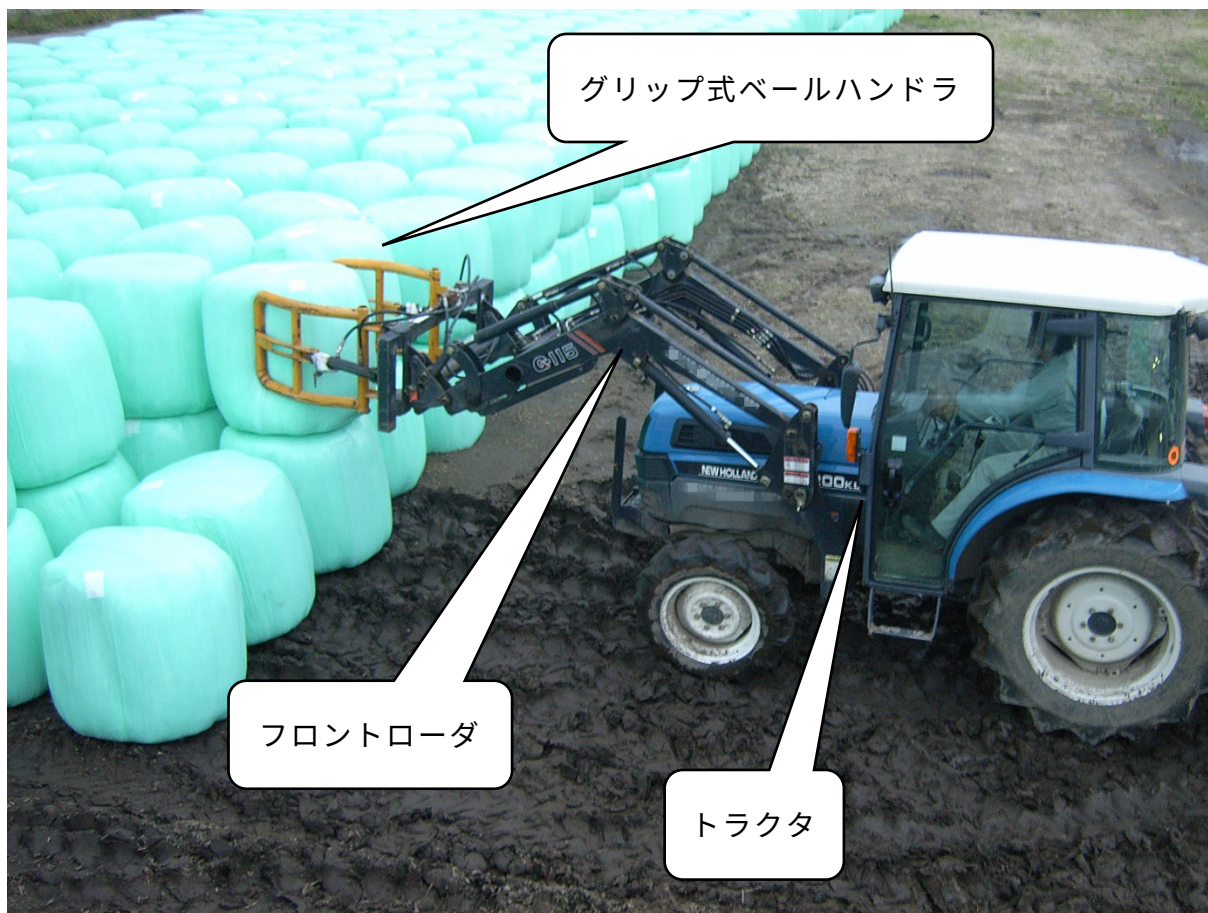


図 4-1. グリップ式ベールハンドラによるロールベールラップサイロの荷役風景

4.2.2 荷役具の試作

ラップサイロの形状は、円柱形のベール両平面付近で梱包密度が低下するので、完全な直円柱にはならないことに着目した。また、平面を下にした置き方（以下、縦置き）とした場合、底面と円柱面との境界をなす外縁部（以下、底部エッジ）は丸みを帯びており、底部エッジと地表面との間には隙間が生じる。直径 0.9–1.1 m のラップサイロ 50 個を無作為に計測したところ、接地面の直径は最大直径の 70–85 % であった。このような形状の特長から、ベルト上の装具をラップサイロの底部エッジへ挿入し、挿入後にベルトの位置ズレを防止することで懸垂力をラップサイロ底面より作用させる、すなわち下方よりリフトアップすることで荷役する方式を考案した（図 4-2）。

具体的な製作にあたっては、フレキシブルコンテナバッグ（フレコンバッグ）に活用される素材を流用し、ラップサイロ吊り上げ時の主荷重を担う 4 本の吊りベルトと、吊りベルトの配置を均等に保つとともにラップサイロの横転を防ぐ胴巻きベルトを縫製した。吊りベルトの最上部と中間部および最下部は環状に縫製し、吊り具との接続部分およびロープ（以下、補ていロープ）を通すガイドにするとともにフォークリフトによる 4 点での吊り上げ、また床上操作式クレーン等による 1 点での吊り上げに対応できるようにした。吊りベルトの位置ずれ防止のためには、プラスチック製のワンタッチストッパーで補ていロープを固定することにした。なお、吊りベルト下部には人力での荷役具取外し作業を補助する取っ手を装着した。基本設計を図 4-3 に示す。

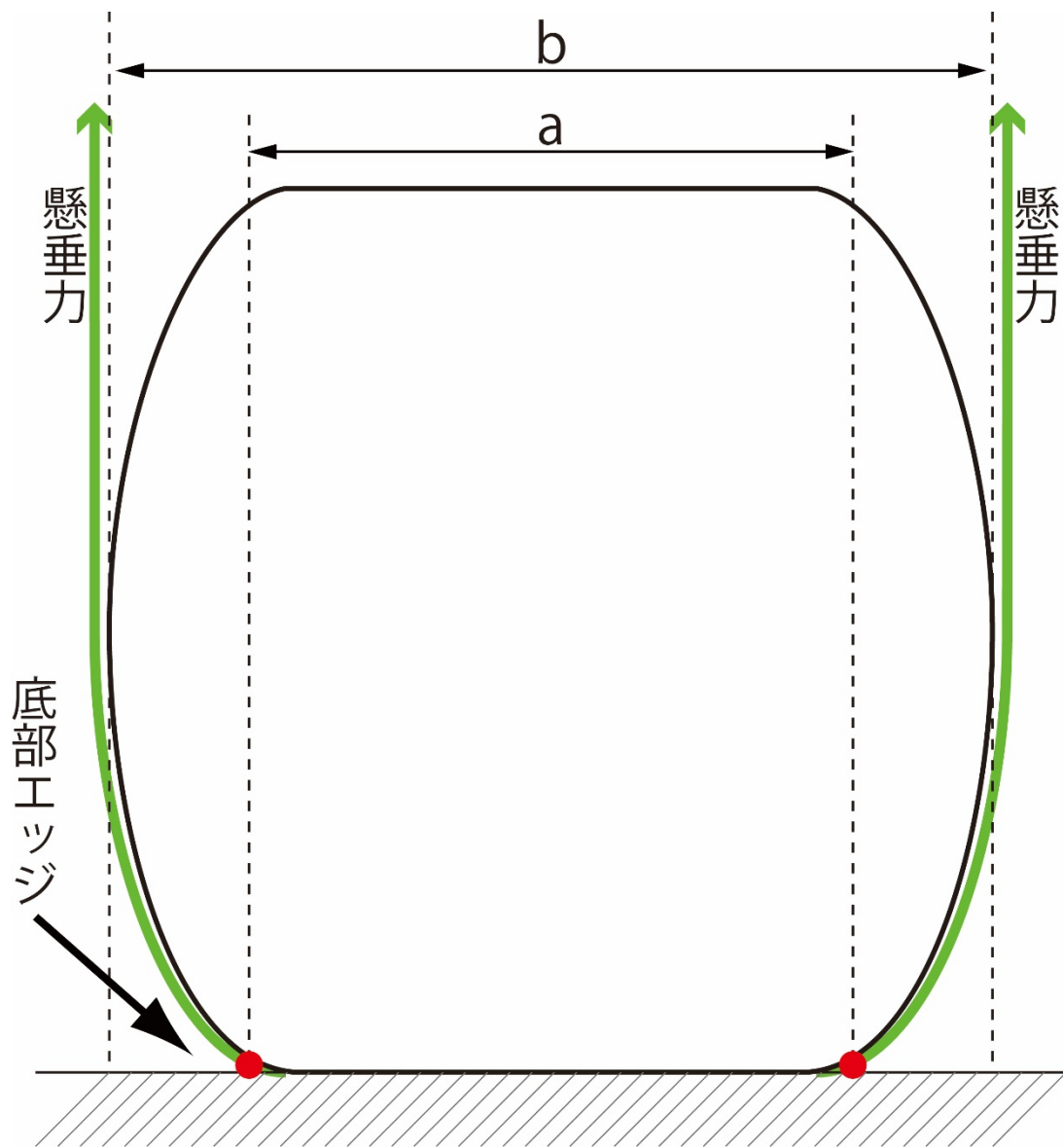


図 4-2. 底部エッジからのすくい上げによるラップサイロ荷役方法

(a : ラップサイロ接地面の直径)

(b : ラップサイロの最大直径)

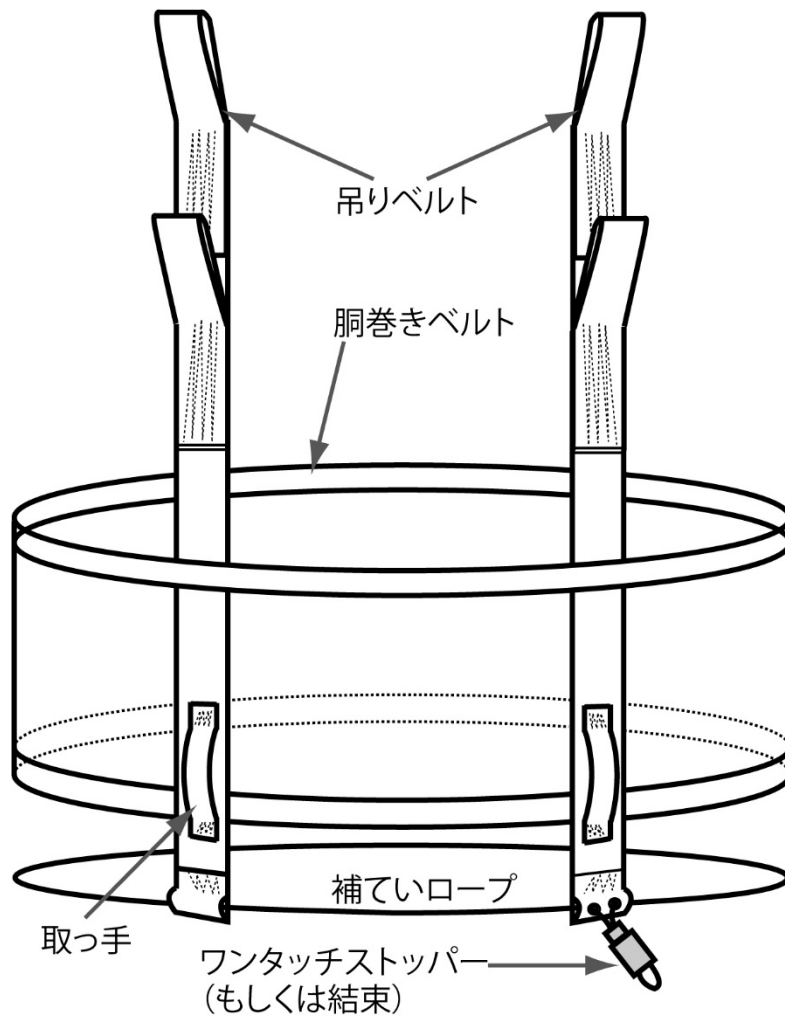


図 4-3. 荷役具の基本設計

4.2.3 荷役試験に供試したラップサイロ

荷役具の利用場面としては、まず地域内で流通しているイネ WCS のラップサイロへの適用が想定されたため、トラックへの積載・荷下ろしをフォークリフトまたは天井クレーンで安全に行う必要がある。そこで、設計・試作した荷役具による一連の試験には、イネ WCS を汎用型飼料収穫機（志藤ら 2010）で成形し、自走式ベールラップ（浦川・吉村 2003a）によりプラスチックフィルム 6 層で密封されたロールベールラップサイロ（n=3）を供試した。質量は 285 ± 8 kg、最大直径は 1.1 ± 0.04 m、高さは 0.91 ± 0.02 m であった。ただし、繰り返し昇降試験の際には、開発目標として設定したラップサイロ質量（300 kg）の 2 倍の負荷を掛けるため、追加ウェイトを載せて吊り上げ時の質量が 600 kg になるようにした。

4.2.4 荷役具の着脱およびトラックへの積載における作業性の調査

従来の手法と比較して作業時間・作業性が同等以上か評価するため、縦置きラップサイロから 1.0 m 離れた地面に試作荷役具を静置し、被験者が荷役具を手にとってからラップサイロへ装着完了するまでの所要時間を計測した。なお、装着後はラップサイロを床上操作式クレーン（以下、クレーン）によって 0.5 m 吊り上げ、装着の確実性を確認した。取り外しは装着の逆手順を採り、荷役具の静置完了までの所要時間を計測した。

また、地上に置いたラップサイロをトラック（荷台高さ：1.15 m）へ積載する時間およびトラック荷台から地上に荷下ろしするまでに要する作業時間を、慣行のグ

リップ式ベールハンドラによる作業とフォークリフトおよび荷役具を用いる体系とで比較した。図 4-4 に示す作業レイアウトにおいて作業時間計測を 3 回繰り返し行い、所要時間の平均値を比較した。試験風景を図 4-5 に示す。

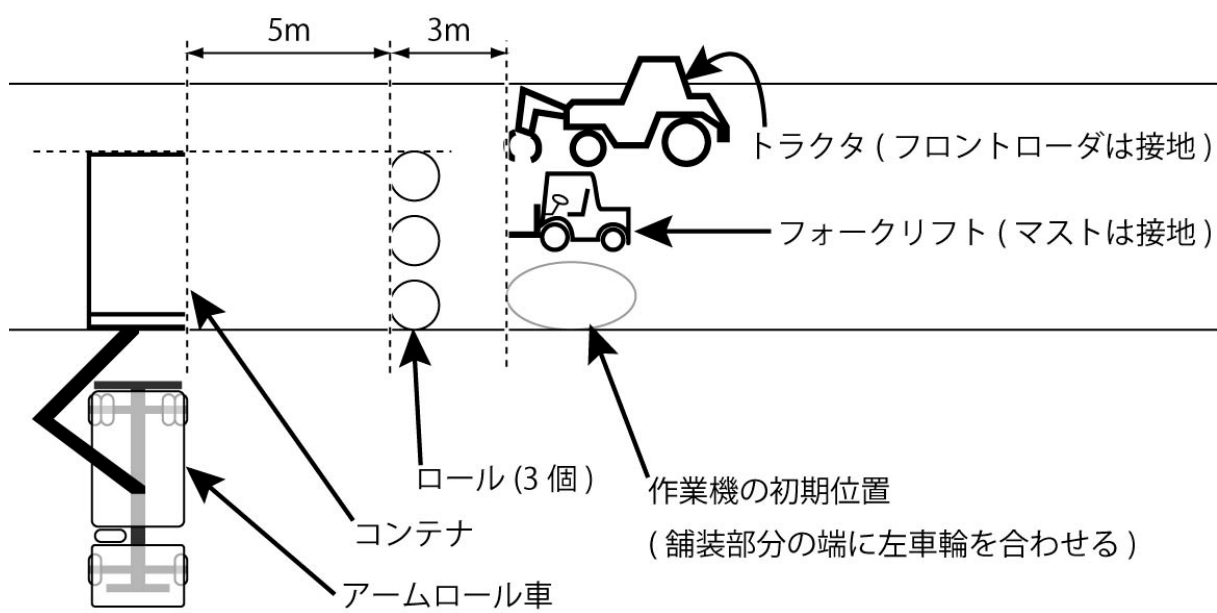


図 4-4. ラップサイロ積載・荷下ろし時間計測時の試験レイアウト



図 4-5. ラップサイロ積載試験時の作業風景

4.2.5 荷役具およびラップサイロの損傷と荷役の安定性の評価

荷役中の操作により荷役具に縫製のほつれや損傷が発生しないか、また荷役の安定性について目視で確認した。フォークリフトによる急降下および急停止試験（速度 0.48 m/s, 高低差 3 m）を 5 反復、クレーンにて 1 点吊りした状態での揺動試験（振幅 2.25 m）を 25 往復行った。さらに、フレコンバッグの繰り返し頂部吊り上げ試験（日本フレキシブルコンテナ工業会 2008）を想定し、ウェイトを載せて想定質量の 2 倍（600 kg）としたラップサイロを床上操作式クレーンで繰り返し昇降させた（速度 0.09 m/s, 高低差 1.5 m, 連続 70 回繰り返し）。各試験において、吊り上げ 1 回目における吊りベルト、胴巻きベルト、補ていロープの位置をマークし、試験終了後にベルト・ロープの位置ずれ、荷役具およびラップサイロへの損傷の有無を目視にて確認した。

4.2.6 TMR への適用拡大

細断型ロールベアラにより TMR を梱包しプラスチックフィルムで密封することで、TMR をラップサイロとして調製・流通できることが示されており（浦川ら 2005）、またベルト状の吊り具で荷役されている事例がある（望月 2009）。しかし、ここで従来活用されている吊り具は、その装着のためにラップサイロを持ち上げてラップサイロ底面にベルトを挿入する必要がある。ここに本研究の中で開発している荷役具を応用できれば、TMR センターではベルト装着のためのラップサイロ持ち上げ装置に追加の設備投資をする必要がなく、また TMR のロールベアララップサイロ

の側面を一度も変形させずに畜産農家に届けることが可能となり、品質劣化リスクの軽減と流通の低コスト化を両立できる可能性がある。そこで、荷役具を TMR センターでのワンウェイ利用に適用できるように構造の簡易化によりコストダウンさせるとともに、良好な装着作業性と十分な強度を満たせるよう、荷役具を改良した。また、TMR のラップサイロへ装着して取扱性および実用性を確認・実証した。

4.3 結果

4.3.1 荷役具の概略

試作した荷役具の概略を図 4-6 に示す。吊り上げ荷重を主に受け持つ吊りベルトの素材には、荷役時の強度と収納時の柔軟性を併せ持たせるため、ポリプロピレン繊維を編みこんだ破断荷重 10 kN 以上のテープを用いた。吊りベルト底部を結束する補ていロープの素材には、地面とラップサイロとの接触・摩擦による損傷を防ぐため、直径 6.0 mm、破断荷重 7.2 kN 以上の二重組み打ちロープ（日本繊維ロープ工業組合 2005）を用いた。外形については、直径 1.1 m のイネ WCS のラップサイロに対応するよう、吊りベルト伸長時の全高を 1.6 m に、胴巻きベルトの最大開口部直径を 1.2 m にしたところ、荷役具の質量は 1.9 kg となった（表 4-1）。なお、変形したラップサイロへ対応できるように胴巻きベルトの長さ調整機能も組み込んだ（図 4-7）。

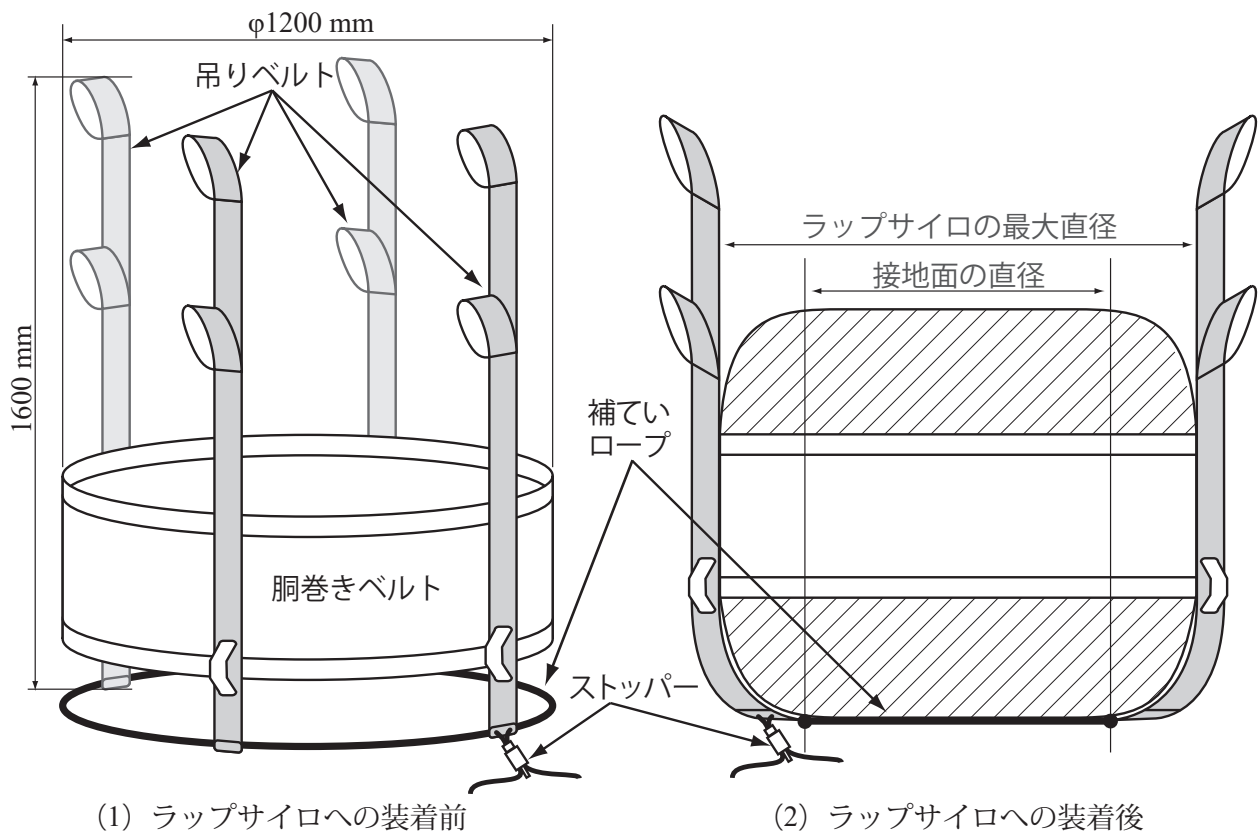


図 4-6. 試作したロールバール荷役具の概略

表 4-1 試作したロールベール荷役具の諸元

運搬対象	ロールベール 1 個
素材	PP (ポリプロピレン)
全高	1600 mm
開口部直径	1200 mm
質量	1.9 kg (フック取付具を含む)
静的引張強度 (吊りベルト)	25 kN
静的引張強度 (補ていロープ)	7.4 kN
対応ロールベール質量	100–600 kg
対応ロールベール直径	850–1100 mm



図 4-7. 試作した荷役具，および胴巻きベルトの長さ調整機構の外観

4.3.2 ラップサイロへの荷役具の着脱およびトラックへの積載における

作業性

本荷役具を用いた作業は以下のように行なった。①吊りベルト底部の補ていロープを解放した状態でロールベールの上方から荷役具を被せ（図 4-8）、②補ていロープによって吊りベルトの底部側を締め（図 4-9）、③ストッパーにより補ていロープを固定する（図 4-10）。これにより保持されたロールベールは、吊りベルトの上部を吊り上げることで荷役される。フォークリフトでの作業が可能だけでなく（図 4-11）、積載式トラッククレーン（ユニック車）等と組み合わせることで、水田等からのロールベール搬出にも活用できる（図 4-12）。直径の異なるロールベールを取扱う場合には、胴巻きベルトの長さ、すなわち開口部直径を調節することで容易に適用可能だった。

試作した荷役具は、事前にラップサイロを持ち上げることなく装着が可能であった。また、補ていロープのストッパーを緩め、4本の吊りベルトを人力もしくはフォークリフトにより引き上げると補ていロープはラップサイロ底面から抜け、ラップサイロから荷役具を容易に取外すことができた。着脱作業の所要人員数は1名、荷役具の装着から吊りベルトをフックに掛けるまで、および荷役具の取り外しに要したラップサイロ1個あたりの所要時間は、1点吊りの場合で平均40.8秒および25.4秒、4点吊りの場合で平均45.2秒および28.4秒であった（表 4-2）。

トラック荷台への積載および荷下ろしに要した時間を表 4-3 および表 4-4 に示す。グリップ式ベールハンドラと比較すると、荷役具による運搬作業時間は長くなった。ただし作業時間の差は積載および荷下ろしの合計で22.7秒であり、荷役具をラップ

サイロに装着する作業時間の 25—28 秒より短かった。予めラップサイロに荷役具が装着されている場合を想定すると、トラックへの積載や荷下ろしの作業時間は従来と同等とみなすことができた。



図 4-8. 荷役具をロールベールラップサイロに被せる様子



図 4-9. 荷役具の補ていロープを引き締める様子



図 4-10. 荷役具の補ていロープを結束しストッパーで固定する様子



図 4-11. 荷役具によるトラック荷台へのラップサイロ搭載作業



図 4-12. 荷役具による水田圃場からのラップサイロ搬出作業

表 4-2 ロールベール荷役具のラップサイロへの着脱作業時間 (n = 3)

	装着時間 (s)				取外時間 (s)			
	装着	ロープ 固定	フック掛け※	合計	フック外し※	ロープ 解放	除去	合計
1点吊り			12.3	40.8	4.3			25.4
4点吊り	13.4	15.1	16.7	45.2	7.3	16.8	4.3	28.4

※1点吊りは床上操作式クレーンのフックへの着脱

※4点吊りはフォークリフト爪に装着したフックへの着脱

表 4-3 ラップサイロのトラック荷台への搭載作業時間 (n = 3)

	移動 (s) (荷役具装着)	把持 (s) (吊り上げ)	移動 (s)	グラブ解放 (s) (離脱)	移動 (s) (復帰)	合計
慣行	8.8	3.4	12.8	7.4	18.1	50.5
荷役具	28.5	18.6	6.9	2.7	16.5	73.2

※慣行はグリップ式ベールハンドラ

※荷役具はラップサイロへの装着作業時間を含む

※荷台はアームロールトラック (高さ 1.15 m)

表 4-4 ラップサイロのトラック荷台からの荷下ろし作業時間 (n = 3)

	移動 (フック装着)	把持 (吊り上げ)	移動 (移動+フック外し)	グラブ解放 (取り外し)	合計
慣行	11.9	5.1	19.1	5.3	41.4
荷役具	9.2	1.8	8.0	21.1	40.1

※慣行はグリップ式ベールハンドラ

※荷役具はラップサイロからの取り外し時間を含む

※荷台はアームロールトラック (高さ 1.15 m)

4.3.3 荷役具およびラップサイロの損傷と荷役の安定性

荷役具のベルト・ロープの位置ずれについては、急降下および急停止、1点吊りでの揺動、繰り返し頂部吊り上げ、いずれの試験においても認められなかった。なお、荷役中に補ていロープのストッパーが緩むことはなかった。

プラスチックフィルムの損傷およびラップサイロの変形について、プラスチックフィルムの損傷は認められなかったがラップサイロはわずかに変形した。底部エッジおよび底面では、吊りベルトによりエッジ部が、補ていロープにより底面が圧迫されたが、上部エッジ・下部エッジ・底面におけるラップサイロの変形量はそれぞれ 3.2 mm, 1.7 mm, 0.1 mm とわずかであった。なお、上部エッジの変形はフォークリフトにより4点吊りすることで回避可能であった。一方で、従来のグリップ式ベールハンドラでは最大 135 mm の変形が認められた（表 4-5）。

表 4-5 荷役によるラップサイロ変形量および変形部位 (n = 3)

ハンドリング機器	最大窪み	変形部位
グリップ式ベールハンドラ	135 mm	側面
	0.1 mm	底面
荷役具	1.7 mm	上部エッジ
	3.2 mm	下部エッジ

4.3.4 TMR への適用拡大

TMR へ応用する場合、装着作業を行う場所はストックヤードや圃場のような屋外ではなく、TMR センターすなわち施設内となる。屋外と比較すると良好な作業環境であり、TMR 製造ラインに荷役具の装着工程を組み込むことができる、すなわち変形したラップサイロへの装着を考慮する必要がないことから、胴巻きベルトの長さ調整機構による変形ロールへの対応は最小限で済むと考えられた。さらに、小型移動式クレーンによる 1 点吊りに対応できれば 4 点吊りに備えたフックも不要であった。このような実状を踏まえて製作した TMR 向け荷役具の概要を図 4-13 に、諸元を表 4-6 に示す。

試作した簡略化荷役具を TMR のラップサイロ（質量 500 kg）の吊り上げに適用したところ、胴巻きベルトのみ素材へ着色することで TMR センターのオペレータによる装着が困難になることはなかった。また、1 点吊りのため上部エッジで変形が発生したが、その最大量は 23 mm でグリップ式バールハンドラでの 139 mm に比較すると軽微であった（表 4-7）。これらのことから、荷役具は構造を簡略化して TMR へも適用拡大が可能であることが示された。また、実際に TMR センターでの出荷にも採用され生産現場に普及した（図 4-14）。利用者である酪農家からも荷役作業の容易さについて好評を得た。

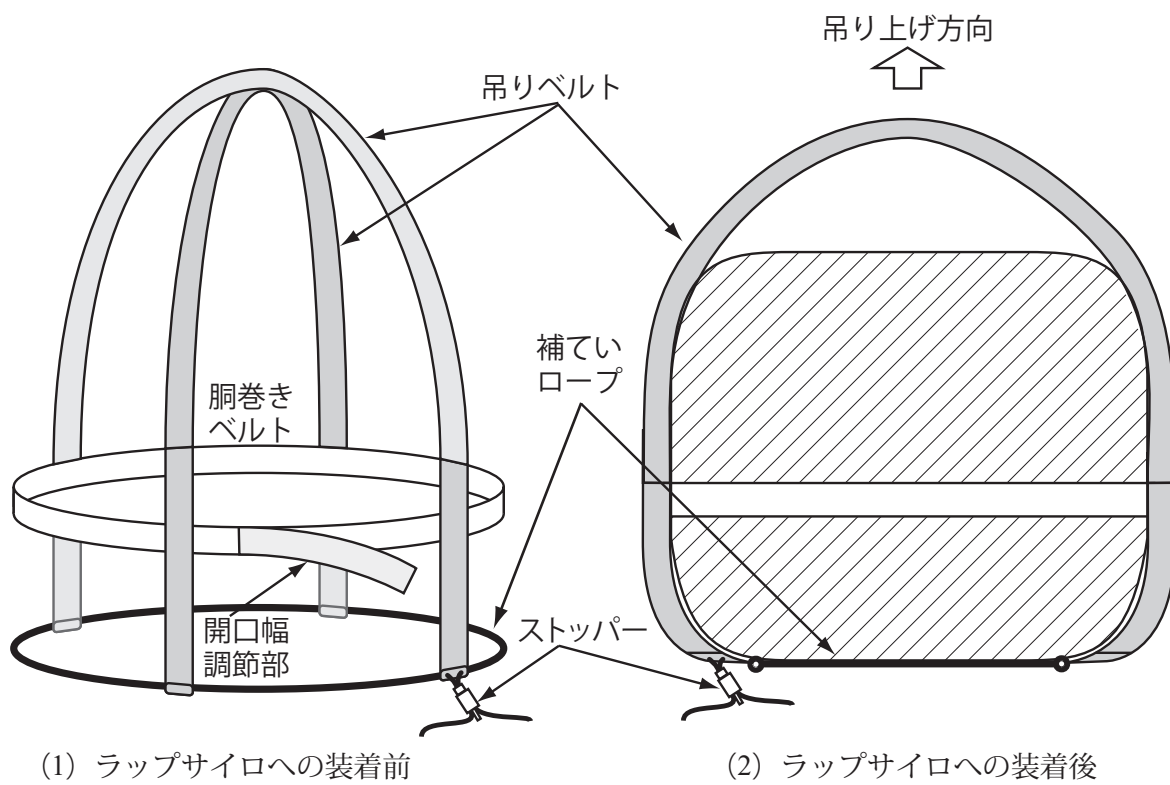


図 4-13. TMR のラップサイロ向けに簡略化したロールバール荷役具の概略

表 4-6. TMR のラップサイロ向けに簡略化したロールベール荷役具の仕様

素材	PP (ポリプロピレン)
全高	1.6 m
開口部直径	1.2 m
乾燥重量	0.62 kg
静的引張強度 (吊りベルト)	20.9 kN
静的引張強度 (補ていロープ)	7.2 kN
対応ロールベール質量	500 kg 以内
対応ロールベール直径	— 1.15 m

表 4-7. ハンドリングに伴う TMR のラップサイロの変形量 (n = 3)

	荷役中	荷役直後		
	最大変形量 (mm)	長半径 (mm)	短半径 (mm)	扁平率 (%)
慣行	139	544	475	87.3
荷役具	23	518	518	99.8

※慣行はグリップ式ボールハンドラ



図 4-14. 荷役具を装着した状態で，出荷前に TMR センターにて一次貯留されるラップサイロ

4.4 考察

武内（2012）は、トウモロコシ細断物および無細断のイタリアンライグラスを材料としたロールベールラップサイロを異なる変形量でハンドリングしており、ハンドリング直後に扁平率が76%となったイタリアンライグラスのラップサイロが、その3日後に扁平率93%まで復元したことを確認している（武内2012）。このことは、ハンドリングに伴い変形およびその後に復元したロールベールラップサイロ内に空気が流入したことを強く示唆するものである。すなわちラップサイロの変形は、空気流入による品質劣化リスクの原因と考えられる。

開発した荷役具による吊り上げでラップサイロに生じた変形部位および変形量は、上部および下部のエッジ部分で最大23mmであった。ベールラップの構造上、側面を6層で被覆されたラップサイロの底面ではプラスチックフィルムの巻き数が大きく増える。糸川（1996）の指摘からは、直径1.2mのラップサイロにフィルムを2層巻き付ける場合に10回前後のターンテーブルの回転が必要と考えられる。すなわち円柱面で6層ラッピングされる間に上下の平面では30層程度のラッピングがされており、上下の平面におけるラップサイロの変形は、円柱面をなす側面が変形する場合と比較すると、サイレージ品質への悪影響には直結しないと考えられる。したがって、荷役具によって生じるラップサイロの変形のうち、下部エッジおよび底面での変形はサイレージ品質の劣化につながりにくいと考えられた。また、上部エッジでの最大変形量は23mmであったが、増田・平久保（2006）によると、細断トウモロコシのラップサイロ調製においては、ラッピング前の変形量が34mmの場合は密封に問題ないものの、変形量が88mmになると密封後のラップサイロ内で空気の滞留が確

認められ、品質劣化の懸念につながると報告されている（増田・平久保 2006）。荷役具で生じたラップサイロの変形は増田らの報告において問題なかったとされる変形量 34 mm の 70 %以下と小さいことから、サイレージ品質に及ぼす悪影響は少ないと考えられた。

荷役具の強度について、吊りベルト 1 本あたりにかかる力の大きさは、質量 300 kg のラップサイロを 4 点吊りする場合には吊りベルトは垂直方向の荷重を受けるため $300 \times 9.8 / 4 \approx 735 \text{ N}$ と試算される。同様にクレーンでの 1 点吊りで吊り角度が 100 °になる場合を想定すると 1.15 kN と試算されるが、吊りベルトおよび補ていロープの破断荷重は、この値の 21.7 倍および 6.4 倍であり、十分に上回っている。また、試作荷役具は大部分でフレコンバッグと同等の素材を用いているためフレコンバッグの製品試験（日本フレキシブルコンテナ工業会 2006）を想定した昇降試験を行ったところ、吊りベルト・補ていロープ・ワンタッチストッパーの損傷はなく、同様に急降下および揺動試験でも損傷が認められなかった。したがって、試作荷役具はラップサイロのハンドリングにおける適正な強度と安全性を有すると考えられた。

ただし、当然ながら荷役具の使用にあたっては、縫製のほつれや生地の変形がないことを予め確認して装着・荷役をすること、荷役具を装着して吊り上げられているラップサイロの直下には人間が侵入しないこと等の、基本的な作業安全を徹底する必要があることは言うまでもない。

なお、一連の試験により確認された安全性は、荷役具で吊り上げられたロールベールラップサイロが決して落下や損傷しないことを保証するものではない。試作・試験および現地での運用中において、ロールベールラップサイロが荷役中に落下したこと

があり，その原因は，補ていロープを結束するストッパーが破損し，補ていロープが緩んだことであった．試験においては，補ていロープが緩まない限りは安定した荷役が可能であることを確認できているため，流通範囲が広域化し複数のストックポイントを経由することが見込まれる場合は，補ていロープの固定にはワンタッチストッパーに加えて，ロープを結束することによる確実な固定が望ましい．ただ，垂直方向へ吊り上げる荷重を有効に作用させるための，補ていロープを固定する適切なストッパーの強度など，詳細な力学的解析については未実施である．より改良し，完成度の高い荷役具とするには，今後さらなる解析・改良が必要と考えられる．

4.5 要約

ロールベールラップサイロの形状に着目し，簡易な構造でラップサイロを下方よりリフトアップできる荷役具を開発・改良した．縦置きラップサイロの荷役に対応し，フォークリフトでの作業に適用可能で，ラップサイロへの変形量は極めて少なく，荷役具の着脱にラップサイロの持ち上げを必要としない等，当初の開発目標を満たすことを確認した．また，荷役具は胴巻きベルトの長さを調整することで異径ロールベールにも対応可能で，また軽量で取扱も容易であること等から，TMRのラップサイロへも適用拡大可能であった．

第 5 章 総合考察

5.1 本研究の有効性

従来、ロールベールラップサイロに調製された飼料の含水率は、その内容物をサンプリングし、風乾する方法や有機溶媒とともに蒸留する方法（内田 1993）により求められていたが、これには長時間を要する。近赤外分光法による迅速測定技術は開発されているが（Amari and Abe 1999）、これには材料を粉砕する等の前処理を要する。電磁波を活用した迅速測定技術としては、電磁波の減衰量測定（塚本・西崎 2005）、静電容量の測定（川出ら 2012）、Time domain reflectometry（TDR）の測定（服部ら 2015）等の研究がある。しかし、これら方法での測定値は材料の含水率だけでなく梱包密度によっても影響を受けるため、梱包密度が既知なラップサイロでなければ精度の高い測定はできない。しかも、これらの従来技術はいずれも、サンプリングやプローブの接触・挿入が必要で、ラップサイロを測定するにはフィルムを剥がす必要があった。ロールベールラップサイロは、調製後にフィルムが剥がされると、サイロ内に空気が流入して品質が劣化することから、国産飼料を流通飼料すなわち商品として取り扱うためには、フィルムを剥がすことなく品質をセンシングする技術が必要とされていた。

このような状況において本研究では、MSTL 表面付近の電磁界を活用することに着目して、プラスチックフィルムを剥がさずにロールベールラップサイロの内部品質を推定するための技術開発に取り組み、その含水率の違いを検出することに成功した。また、測定に際して MSTL をラップサイロ表面に押し付けることが有効であること
を明らかにするとともに、屋外で実規模のラップサイロを測定可能なことを示し、実用的なラップサイロの非破壊水分計を開発するための基礎的知見を蓄積した。

本研究においては、伝搬電磁波における振幅変化だけでなく位相の変化量をも解析に活用し、振幅変化と位相変化との比 ($\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio) を含水率推定の指標としているところが特長である。第2章において、 $\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio は含水率の推定指標として有望であることを、小型のパウチサイロを用いた基礎実験にて示した。第3章においては、MSTLを測定対象に押しつけてラップサイロ表層に局所的な密度変化を起こすことで、実規模のラップサイロでも有効な $\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratioが得られることを明らかにし、またこの $\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratioは基礎実験と同様に含水率と高い相関関係にあることを明らかにした。これらの結果から、対象となるラップサイロの密度が異なる場合においても、その密度変化を利用して有用な含水率の推定指標である $\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratioを得ることができる、すなわち従来技術では測定が困難だった多様な密度のラップサイロを非破壊で測定できるようになると考えられる。しかも本手法は、測定に際してプラスチックフィルムを破る必要がないことから、ラップサイロの全量を検査することや、同一ラップサイロを複数点で測定しラップサイロ内の品質のバラつきを把握することにも応用できる。このことにより、適切な含水率のラップサイロを選別し、一定品質のラップサイロのみを広域流通に仕向けることが可能となる。さらに、質量情報と含水率情報を組み合わせることで個々のラップサイロに含まれる乾物量を簡易かつ客観的に評価できる。これらの応用が可能となる本技術は、ロールベールラップサイロの広域流通において取引の信頼性を高め、国産飼料の利用拡大を継続的に進めるためのキーテクノロジーとなり得る。

また、流通におけるロールベールラップサイロのハンドリング作業は、従来グリップ式ベールハンドラにより行われているが、この従来技術にはラップサイロを大きく

変形させるという課題がある。この変形はラップサイロ内部への空気の流入を促し品質劣化のリスクとなるため、グリップ式ベールハンドラを適切に操作するには、ラップサイロを変形させすぎないように慎重なハンドリング、すなわちオペレータの熟練が必要である。さらに、グリップ式ベールハンドラはロールベールの専用機で畜産農家以外に普及していないため、ハンドリングに熟練したオペレータを確保しにくいこともラップサイロを広域流通させる際の課題となっていた。

本研究は、従来技術であるグリップ式ベールハンドラの仕組みを応用した研究（増田・平久保 2006，小畑ら 2004，喜田ら 2008，福井ら 2009，武内 2012）とは異なる視点のもとで、リフト式ベールハンドラのようにラップサイロを下方からすくい上げる機能を、フレコンバッグの素材を活用して構成した点に特長がある。このように開発した荷役具は、ロールベールラップサイロの形状の特徴を活用し、ハンドリングにおけるラップサイロへの変形を極めて少なくできる。また、縦置きされたラップサイロの安定した荷役が可能であった。さらに荷役具は、フォークリフト・小型移動式クレーン・ホイールローダ等の様々な機器に対応し、圃場からの搬出、ストックヤード内での荷役、畜舎への搬入など多様な用途へ活用することもできる、加えてロールベールラップサイロの広域流通におけるトラックへの積載・荷下ろし等のハンドリング作業に、グリップ式ベールハンドラの操作に熟練したオペレータを必要としない。これら第 4 章で明らかにした特長が有効と評価され、コントラクタ等の生産現場で活用されるに至った。

一方で、都府県の TMR センターの多くは従来 TMR の梱包にフレコンバッグを用いているが（川出ら 2013，滝元 2017）、畜産業における防疫問題は近年ますます重

要さを増しており、フレコンバッグ等を回収・洗浄・補修および再利用することは、防疫の観点からも薦められるものではない。細断型ロールペーラ（志藤・山名 2002, 志藤ら 2005）を用いて TMR の梱包をフレコンバッグからロールペールラップサイロにすると、梱包密度の向上により品質の安定化が期待できることはわかっているが（浦川ら 2005, 川出ら 2013, 川出ら 2015）、TMR をロールペールラップサイロとして流通させる上で、物流業者はグリップ式ペールハンドラの操作に習熟したオペレータを確保しにくく、そのままでは適切なハンドリングが困難なことが課題であった。この解決のため、TMR のロールペールラップサイロにベルト状の吊り具を出荷前に装着する事例があるが（望月 2009）、このためには出荷前のラップサイロをグリップ式ペールハンドラで持ち上げる操作を TMR 製造工程に組み入れる必要があった。

本研究の中で開発した荷役具は、防疫対策が必須となる TMR センター等にとっては、比較的安価でワンウェイ利用が可能な資材として活用できる。さらに装着のためにラップサイロを別途ハンドリングする必要もなく、荷役具を装着したラップサイロはフォークリフト等で簡易に荷役できる。このため、ラップサイロの輸送を一般の物流業者に外部委託しやすくなると考えられる。今後、TMR センターでの梱包形態がロールペールラップサイロとなるケースが増えるにつれて、本研究において開発したハンドリング技術はさらに幅広く活用可能になるものと考えられる。

5.2 本研究の応用・展開

本研究の応用展開として、これまでに述べた含水率の非破壊推定技術とラップサイロのハンドリング技術を組み合わせることで、国産飼料が広域流通する場面に備えた新たな技術体系を構築できると考える。

現在、地域内で流通するラップサイロの材料草として代表的なものにイネ WCS がある。これは新規需要米として確実に供給させるため、現状はほぼ全量が契約生産されている。ただし、第 1 章で述べたように飼料自給率向上に向けて広域に耕畜連携を推進するには、イネ WCS に留まらず様々な飼料を国産流通粗飼料として利用拡大していくことが重要となる。すなわち、新規需要米のような助成制度への依存度を下げた国産飼料の流通利用を目指すことが望まれる。ここで、高品質かつ一定品質のラップサイロを選別するために含水率の非破壊推定技術を活用し、選別されたラップサイロには荷役具を装着して広域に出荷・販売することが考えられる。すなわち、コントラクタ等は、含水率の非破壊推定技術を活用して同レベルの品質のラップサイロを事前に選別するとともに、そのラップサイロに予め荷役具を装着しておく。物流業者は、ストックヤードにおいて運搬すべきラップサイロを容易に識別でき、また専門オペレータの助力なしにトラックへの積載・荷下ろしができ、的確かつ弾力的な輸送体系を採ることが可能となる。一定品質のものだけが選別・出荷されるため、コントラクタは品質不良によるクレーム対応や再輸送が減ることで流通コストが削減される。そして畜産農家は、安心して国産流通飼料を家畜へ給与できるようになる。

このような生産・流通体系が確立できれば、高品質で信頼性の高い国産粗飼料を軸として広域な耕畜連携を継続的な取組とすることができると考えられる。本論文の中

で展開した一連の研究は、ロールベールラップサイロの広域流通を実現していく上で
の基盤技術として、個別の技術としてだけでなく、要素技術の組み合わせとして
も、貢献できるものとする。

広域流通以外の視点からの応用展開としては、含水率を指標としたラップサイロの
選別による利用率向上が考えられる。含水率は、高すぎると排汁の発生や酪酸菌の増
殖による不良発酵の原因となり、低すぎると発酵が微弱となり開封後の好気的変敗が
懸念される等、飼料作物の発酵品質および貯蔵性を左右する重要な品質情報である
(大山・柁木 1968, Muck 1988)。

本研究で明らかにした知見を応用することで、予乾が不十分で高水分なラップサイ
ロは早期に給与して品質劣化を未然に防ぎ、適切な予乾が行われているラップサイロ
は長期保管に仕向ける等、品質によりラップサイロの用途を分けた利用が可能とな
る。このような応用には、数段階の含水率区分を識別できれば十分なため実現は比較
的容易と考えられる。Borreani et al. (2018)によると、サイロ内における発酵ロ
スは、適切な管理下にあっても 5 %程度、良好ではない管理の下では加えて 13 %
程度が生じると見積もられている (図 5-1)。ラップサイロ個々の含水率データに基
づいて適切に飼料を給与することで、この 13 %のロスは軽減可能と考えられる、す
なわち国産飼料の調製ロスが減少し、無駄を削減できると考えられる。このように含
水率の非破壊推定技術は、広域流通だけでなく、自給飼料の利用率向上に向けても
幅広い応用展開が可能と考えられる。

さらなる展開としては、国産飼料の広域流通を呼び水として、畜産農家で生産され
る堆肥をも流通させ広域での資源循環を図る、すなわち、加工型畜産から循環型畜産

への転換が考えられる。ただし、畜産農家の堆肥を広範囲の耕種農家に流通させ、圃場に散布するには、飼料の流通以上に運搬および散布のコスト低減、また堆肥の品質確保が問題になると考えられる。このため畜産農家では入念な繰り返し等による高品質な堆肥の製造が求められるが、堆肥の製造においては堆肥の原料となるふん尿と、その通気性を高めて好氣的発酵を促すための副資材が混合される。ここで適正な副資材の混合程度は含水率を指標に判断されることから、堆肥に関しても含水率の迅速把握は重要であり、この品質管理に本研究を応用できる可能性もある。

なお、本研究では H_2O の誘電率が他の物質と比較して顕著に高いことを利用しているが、視点を変えると、 H_2O 以外の誘電率が高い物質の量を検出すること、例えば、飼料の乾物中における金属等の異物検出にも応用できる可能性がある。また、当然ながら飼料以外の材料を対象とした非破壊含水率推定への応用も期待できる。

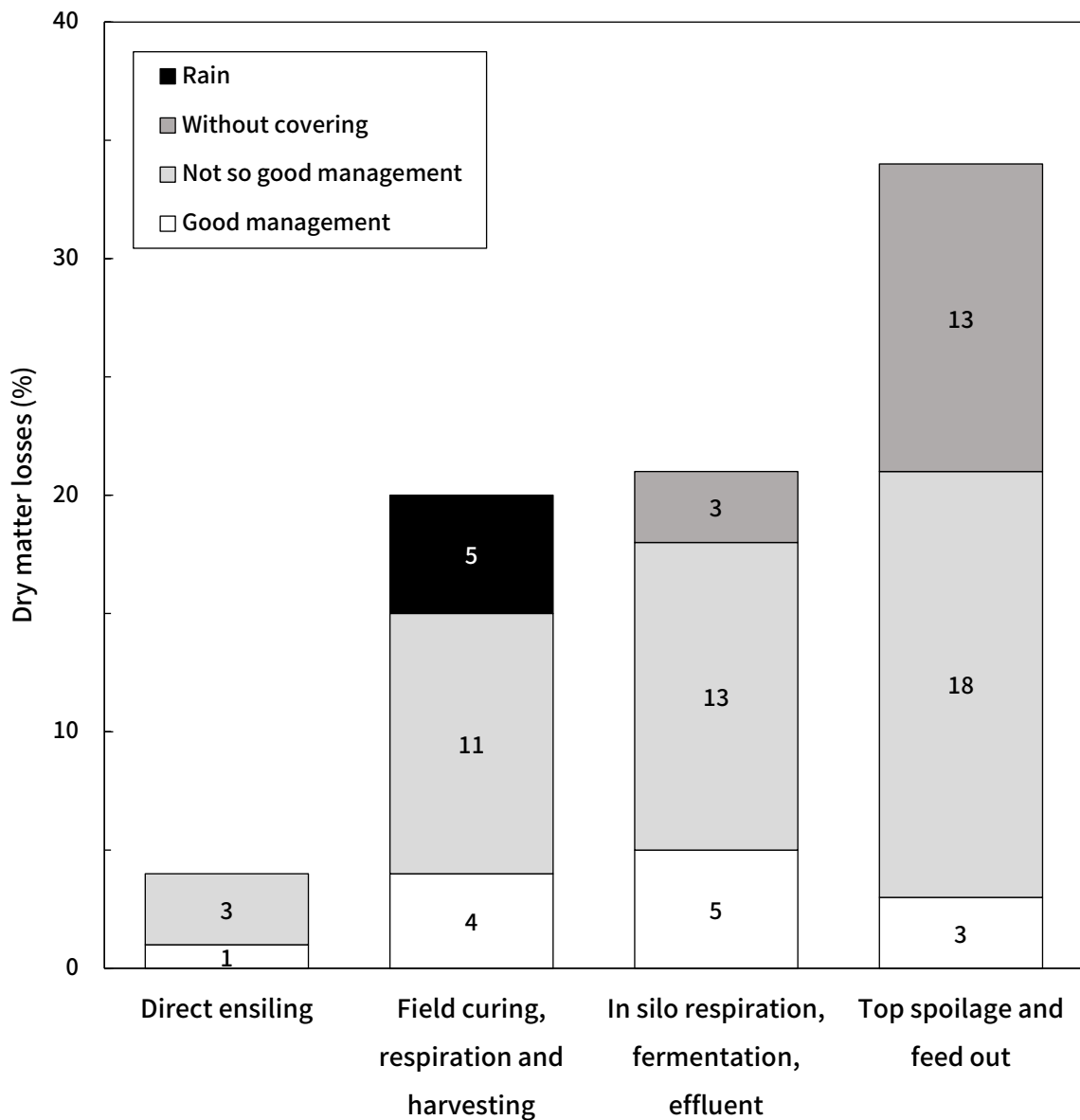


図 5-1 サイレージ調製の各段階における乾物損失

(Borreani et al. 2018, doi: 10.3168/jds.2017-13837 より転載)

5.3 残された課題

本研究で得た $\Delta\phi-\Delta\alpha$ ratio と含水率との検量線における 95 %信頼区間は含水率 60 %において ± 10 %程度であり、現時点での含水率推定誤差は 10 %程度が見込まれる。このため、現状では流通取引において乾物量を算出し価格決定を行うには精度が不足していると考えられる。例えば質量 400 kg・含水率 50 %のラップサイロに対する含水率推定において 5 %の推定誤差があり 45 %と見積もった場合、実際の乾物量 200 kg に対して推定される乾物量は 220 kg となり乾物換算での誤差は 10 %となる。また、トウモロコシサイレージのように高水分原料のラップサイロを想定すると、質量 400 kg・含水率 75 %のラップサイロの含水率を 5 %の推定誤差で 70 %と見積もった場合、実際の乾物量 100 kg に対して推定される乾物量は 120 kg となり、乾物換算で 20 %の誤差となる。このように含水率の推定誤差は、対象とする材料の含水率が高いほど乾物量の推定誤差が大きくなる。トウモロコシサイレージのラップサイロのように高水分で梱包される飼料の流通をも想定し、70 %台の含水率においても ± 5 %程度の誤差で乾物量を見積もる目標を設定するには、2 %を下回る精度で含水率を推定する必要がある。この点で本技術はまだ改善の余地が大きく、今後さらなる推定精度の向上が望まれる。

さらなる含水率推定精度の向上に向けて、本研究では MSTL をラップサイロ表面に押し当てる際の荷重をランダムに人力により設定したが、この荷重値を一定範囲に最適化することで、推定精度を向上できる可能性がある。また本研究では単一周波数による推定を行ってきたが、重回帰分析や部分的最小二乗回帰（partial least squares regression, PLS 回帰）分析等の多変量解析を行い、適切な複数の周波数

を抽出・利用することでも推定の高精度化が期待できる。この他、電磁波は温度条件にも影響を受けることが知られているが、本研究の中では外気温や測定物の表面温度が電磁波の信号変化におよぼす影響、およびこの影響を推定式に組み込むことでの推定精度向上に関しては検討していない。さらに、ラップサイロの品質を代表する測定値を得るために必要な MSTL での測定回数・点数および部位についても検討する必要がある。電磁波は材料の誘電率が高いほど、また周波数が高いほど減衰しやすいため、本手法では表層付近のみの測定に留まっている可能性が高い。今後、電磁界解析等を活用して本手法で測定可能な範囲を把握したり、ラップサイロを代表する品質情報を得るため必要な、適切な測定条件を明らかにしていく必要もある。これらの要因が電磁波へおよぼす影響を明らかにすることで、本手法での含水率推定精度はさらに高まると考えられる。

これに加えて、将来的な実用化に向けた装置の低コスト化は欠かせない。本研究に用いた実験装置は一般的な VNA をベースとしている。VNA は多数の周波数を網羅的に解析できる高精度な測定機だが、推定に重要な周波数を PLS 回帰分析等により絞り込めれば、単一ないし狭帯域の周波数の送受信に特化したモジュール等を応用することで、飛躍的に安価で簡易な測定システムを開発できる可能性がある。

本研究において開発した荷役具はクロスシングル型のフレコンバッグ（日本フレキシブルコンテナ工業会 2008）をベースとしていた。荷役具の開発においては、補修を経た繰り返し使用や長期的な耐久性確保に関する検討は行っていないが、生産現場からは、収穫後に圃場脇で一次貯留されたラップサイロを後日搬出する場面等において、同じ荷役具を複数回再使用したいとのニーズが高い。このようなニーズに応え、

荷役具へ更に強度を持たせるための詳細な力学的解析および改良については、残されている課題である。今後、特に補ていロープおよびそのストッパーに着目した解析・改良を行い、圃場で繰り返し使用する耐久性のある補修可能な荷役具を開発できれば、本研究で開発した荷役具はさらに広く応用可能になると考えられる。

なお、荷役具は量産することで顕著な低コスト化が可能となるが、言い換えると流通量の規模、流通の起点や中継地点となるストックヤードの整備状況、および流通の距離等によっては従来技術より流通コストが高まる。また本技術は荷役に伴うラップサイロの変形が少なく、従来技術と比べて品質劣化リスクは軽減されることが考えられるが、このリスク軽減の効果を定量化した、適正な流通コストの比較および荷役具を活用した適正流通範囲の検討には至っていない。このリスク評価には相当数のラップサイロを対象に、ハンドリングの回数・変形量・被覆するフィルムの層数・材料草種・梱包密度および含水率等をパラメータとしてそれらと品質との関係を網羅的に検討する必要があると考えられる。

国産飼料を広域流通しようとする取り組みは、イネ WCS に関する報告が多い（恒川・堀江 2009, 川原田 2010, 佐藤 2010, 本田 2010, 吉澤 2013, 伊藤ら 2014）。これは、イネ WCS は新規需要米の助成制度の適用を受けるため確実に畜産農家へ供給される必要があり、実質的な契約生産となっているためと考えられる。さらに、品質の高いイネ WCS を流通し、畜産農家に安心して利用してもらうための流通基準（日本草地畜産種子協会 2011a, 日本草地畜産種子協会 2011b）や、それに対応した生産履歴管理システムが開発され（浦川ら 2013, 喜田ら 2014）、生産現場に品質管理の重要性が促されていることも要因として考えられる。

一方で、それ以外の牧草やトウモロコシを素材とした広域流通事例はまだ少ない（青木 2012, 佐々木 2013）。トウモロコシにおいては、北海道の畑作農家が転作物として作付する場合があるものの、その作業の多くは畜産農家によって行われ、イネ WCS のような契約生産が少ないためと考えられる。一方で、広域流通している事例を見ると、遠方にある農家同士でも以前から交流があったり、情報を随時提供しあったり、悪天候などの影響で必ずしも最善の品質でない場合もありのままを先方に知って納得してもらう等、信頼関係の構築・維持への配慮がなされている（青木 2012）。言い換えると、国産飼料の広域流通に関しては、未だ相対取引が主流であると言える。広域流通の拡大により国産飼料の利用を増やし耕畜連携を深めるためには、飼料を生産する耕種農家と購入・利用する畜産農家が「顔の見えない関係」にあっても品質を担保できるよう、省力的かつ低コストなセンシング技術へ本研究を発展させるとともに、ICT 技術等と融合させたシステム開発への展開が望まれる。多様な草種のロールベールラップサイロを対象とした含水率推定の適用拡大についても、今後研究を進めていく必要がある。

5.4 今後の展望

本研究における非破壊含水率推定技術はまだ開発・改良の余地が残されているが、MSTL を測定対象に押しつけることでプラスチックフィルムを剥がすことなく含水率の推定が可能になったことは明らかになった。また、従来、生産履歴を収集・管理するには、飼料を収穫調製するオペレータに履歴情報を記帳してもらう必要があったが、飼

料を収穫調製する時期はコントラクターが年間で最も繁忙な時期であり、情報を記帳する労力の確保は困難であった。これらのことから、今後の開発展開の一例として、国産流通飼料への生産履歴の付与および品質情報の記録の自動化が考えられる。一例を挙げると、飼料生産・調製に活用されるロールベアラ・ベールラップ・ベールハンドラ等に含水率推定機能を組み込むとともに測定を自動化することが考えられる。これが実現すれば、飼料の収穫やロールベールラップサイロのハンドリング・調製作業において、従来通りの飼料生産・調製・ハンドリング作業を行うだけで、オペレータに一切負担をかけずにラップサイロ単位で生産履歴や品質等の情報を測定・収集および管理できるようになる。これにより、生産の段階では一定の確率で発生してしまう低品質なラップサイロおよび低品質化するリスクの高いラップサイロを、出荷段階での確かつ速やかに抽出・選別することが可能となる。ただしこのためには、本研究および既往の質量計測技術（喜田ら 2012）や生産履歴管理システム（浦川ら 2013）を改良し、既往の飼料生産・調製作業体系へ組み込むとともに無線通信技術等と組み合わせ、ロールベールラップサイロの詳細な生産履歴・品質情報のデータベースを圃場もしくはストックヤードの段階でリアルタイムに構築できるようなシステム開発が必要となり、農学と工学との融合が今後一層求められるものと考えられる。将来的には、飼料の生産履歴および品質情報を畜産物の生産履歴と紐付けることで、消費者へ畜産物が国産飼料を基に生産されたことを明示することができ、新たな商品価値の創出にもつながると考えられる。これにより国産流通飼料の利用拡大がさらに促され、国産飼料の利用拡大すなわち飼料自給率を漸増させることが可能になると考える。さらに、これらの国産流通飼料に関する情報を乳牛の飼養管理システムや全国版畜産クラウド

(農林水産省 2020g) 等に統合することで、精密なウシの飼養管理や疾病の原因分析への応用、ひいては家畜の生産性向上にも寄与できると考えられ、本研究はさらに広範な活用・展開が期待される。

摘 要

ロールベールラップサイロの広域流通に向けた基盤技術に関する研究

我が国の飼料自給率を向上させる有効な方策として、広域な耕畜連携すなわち国産飼料の広域流通が挙げられる。この実現に向けては、大きくソフト面とハード面の両面に課題があることから、本研究ではその解決に取り組んだ。

まずソフト面の課題として、飼料生産の担い手として期待されるコントラクタや耕種農家と、国産飼料の利用者となる畜産農家が「顔の見えない関係」となる広域流通において、その流通取引の信頼性を高める目的でラップサイロ内の飼料を対象とした含水率の非破壊推定技術の開発に取り組んだ。

次にハード面の課題として、ラップサイロが広域に輸送される場合、農業者だけでは流通の担い手が不足する。そこで、ラップサイロのハンドリングに熟練していない一般の物流業者が安全かつ低コストにラップサイロをハンドリングできるよう、広域流通に適したロールベールラップサイロの荷役技術の開発に取り組んだ。これらの概要は以下の通りである。

- (1) 電磁波の伝送線路の一種であるマイクロストリップライン (Microstrip transmission line, MSTL) を用いて、飼料作物を詰めたパウチサイロを載せた状態で MSTL に電磁波を透過させた。

- (2) MSTL を伝播した電磁波の振幅変化 ($\Delta\alpha$) と位相変化 ($\Delta\phi$) との間には、有意な相関関係が認められた。
- (3) 電磁波の $\Delta\alpha$ に対する $\Delta\phi$ の比を、 $\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio と定義した。
- (4) $\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio は測定対象の含水率と有意な相関があること、また含水率が高まるにつれて減少する傾向が認められたことから、 $\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio を指標に、飼料作物の含水率を非破壊で推定できる可能性が示された。
- (5) 屋外で実規模のロールベールラップサイロの含水率を非破壊推定する際には、MSTL をラップサイロ表面に押し当てつつ電磁波測定することが極めて有効なことが明らかとなった。
- (6) 屋外でロールベールラップサイロの表面で測定した $\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio は、周波数 2.37GHz を越えると含水率と有意な関係になった。
- (7) MSTL を用いて測定した $\Delta\phi$ — $\Delta\alpha$ ratio と含水率の関係は室内実験でも屋外実験でも同様の結果を示したことから、実規模のラップサイロを対象とした屋外測定にも適用可能なことが検証された。
- (8) ロールベールラップサイロの形状に着目し、簡易な構造でラップサイロを下方よりリフトアップできる荷役具を開発・改良した。これは吊りベルト・補ていロープおよび胴巻きベルト、また補ていロープのストッパーで構成される。
- (9) 開発した荷役具は縦置きラップサイロの荷役に対応し、フォークリフトでの作業に適用可能で、ラップサイロへの変形量は極めて少なく、荷役具の着脱にラップサイロの持ち上げを必要としない等の有効性が確認された。

(10) 荷役具は胴巻きベルトの長さを調整することで異径ロールベールにも対応可能で、また軽量で取扱も容易であること等から、TMRのラップサイロへも適用拡大が可能であった。

Fundamental study on wide-area distribution of wrapped round bales of silage

Morinobu Matsuo

Summary

The objective of this study was to develop techniques for wide-area distribution of wrapped round bales (WRBs) of domestic forage crops as commodity crops. Wide-area distribution of WRBs can strengthen the cooperation between crop and livestock farmers and improve the forage self-sufficiency of Japan. To accomplish this objective, the study focuses on two points. The first is to develop a nondestructive technique to determine the moisture content in WRBs and the second is to improve the ease of handling of WRBs.

The points covered in this study are as follows:

- (1) Microwaves through a microstrip transmission line sensor (MSTL) with small scale bag silos placing onto the MSTL were measured by vector network analyzer (VNA).

- (2) The coefficients of determination between amplitude change ($\Delta\alpha$) and phase shift ($\Delta\phi$) in 20 transmitted microwaves were significant.
- (3) The slopes of the linear regression lines with $\Delta\alpha$ on the x-axis and $\Delta\phi$ on the y-axis were defined as “ $\Delta\phi$ - $\Delta\alpha$ ratio.”
- (4) Significant linear relationships between $\Delta\phi$ - $\Delta\alpha$ ratio and moisture content for rye and corn packed in small scale bag silos were obtained, except for fully dried corn samples. The $\Delta\phi$ - $\Delta\alpha$ ratio tended to decrease with an increase in the moisture content.
- (5) Strong positive correlations between $\Delta\phi$ and $\Delta\alpha$ were obtained for the method of MSTL pressing against WRBs surfaces under outdoor conditions.
- (6) The relationship between the $\Delta\phi$ - $\Delta\alpha$ ratio and moisture content for WRBs under outdoor conditions were significant and exhibit a negative correlation at frequencies above 2.37 GHz.
- (7) The $\Delta\phi$ - $\Delta\alpha$ ratio was verified to be an effective nondestructive method for determining the moisture content in farm-scale WRBs under outdoor conditions.
- (8) A WRB handling assister, which consists of: (a) main lifting belts, (b) bottom rope, (c) side belt, and (d) bottom rope holder was developed.
- (9) The WRB handling assister developed can be lifted by forklift with minimal deformation to WRBs.

(10) The WRB handling assister can be used to various sizes of WRBs made of various types forages such as rice whole crop silage, corn silage, and fermented TMR.

謝辞

本論文の取りまとめは、筑波大学大学院生命環境科学研究科先端農業技術科学専攻 深津時広教授（国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 農業技術革新工学研究センター）のもとに行いました。終始懇切丁寧な御指導，度重なるご校閲および多大な御助言を賜りました深津教授に深甚なる感謝の意を表します。

また，本論文の取りまとめにおいて多大なご指導およびご助言を頂きました，筑波大学大学院生命環境科学研究科先端農業技術科学専攻 杉浦綾教授（国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 農業情報研究センター），筑波大学大学院生命環境科学研究科生命産業科学専攻 北村豊教授，筑波大学大学院生命環境科学研究科国際地緑技術開発科学専攻 野口良造准教授に，謹んで感謝の意を表します。そして，本研究の遂行および本論文の作成において貴重なご指導とご助言を賜りました，元・農研機構中央農業研究センター生産体系研究領域バイオマス利用グループ長 重田一人博士に心より謝意を表します。

本論文は，筆者が農研機構畜産草地研究所，生物系特定産業技術研究支援センターおよび農業技術革新工学研究センターへの在籍中に行った研究を取りまとめたものです。研究着手時における著者の上司であった農研機構畜産草地研究所 浦川修司博士（現・国立大学法人山形大学農学部教授）からは，本研究を着想・遂行し，取りまとめていく上で，折に触れて道を示して頂くとともに激励して頂きました。また，農研機構畜産研究部門畜産飼料作研究監 野中和久博士，中央農業研究センター飼養管理技術研究領域長 河本英憲博士，同・作業技術グループ長 阿部佳之博士，住田憲俊

上級研究員，小島陽一郎博士には論文の取りまとめにあたり多大な業務上のご配慮を頂きました。ここに謹んで深甚の謝意を表します。

非破壊水分推定技術に関する研究については，国立研究開発法人 産業技術総合研究所 堀部雅弘博士，昆盛太郎博士，株式会社関東電子応用開発 田原健氏から電磁波に関する全般的な知見を提供して頂くとともに実験の遂行およびデータの解析において貴重なご助言・ご協力を頂きました。株式会社イトラスト 立川隆氏，日本無線株式会社 奥出光生氏，森章典氏，須田保氏からは本研究を着想する上で貴重なご示唆およびご協力を頂きました。ラップサイロを対象とした実規模の実験においては，農研機構畜産草地研究所 川出哲生氏（現・農業技術革新工学研究センター），的場和弘氏（現・東北農業研究センター）に多大なご協力を頂きました。また研究実施時の上司・同僚であった生物系特定産業技術研究支援センター畜産工学研究部 橘保宏博士（現・農業技術革新工学研究センター），農業技術革新工学研究センター総合機械化研究領域長 天羽弘一博士，同・畜産工学ユニット長 志藤博克博士，松野更和氏，豊田成章氏，滝元弘樹氏，長田享氏，および浜洋子氏からは，実験に協力頂くとともに研究の方向性について貴重な示唆を頂きました。この研究の一部は JSPS 科研費 JP25850180 の助成を受けて実施しました。ここに記して御礼申し上げます。

ロールベールラップサイロのハンドリング技術に関する研究については，その基本設計および実験・改良において，徳島県立農林水産総合技術支援センター畜産研究課 福井弘之氏，馬木康隆氏，武内徹郎氏，中井文徳氏に貴重なご助言および重要なご示唆を頂きました。その製作においては，株式会社フクナガエンジニアリング 山本功氏，株式会社大宮製作所 寺田佳紀氏，有限会社極東マテリアル 渡邊康郎氏にご協

力を頂きました。その実験・実証においては、広島県立総合技術研究所畜産技術センター 神田則昭氏，三重県畜産研究所（現・三重県中央農業改良普及センター） 川村淳也氏，株式会社那須の農 藤原基男氏，有限会社ドリームファームスズカ 吉澤道彦氏，杉本二良氏，尾和明洋氏，社団法人宮城県農業公社（現・みやぎ農業振興公社） 佐藤富雄氏，JA 東日本くみあい飼料株式会社 望月雅之氏，JA 西日本くみあい飼料株式会社 清水克彦氏に多大なご協力および貴重なご助言を頂きました。研究実施時の同僚であった農研機構畜産草地研究所 喜田環樹博士（現・畜産研究部門 御代田研究拠点），井上秀彦博士（現・農業技術革新工学研究センター），および農研機構管理本部中央技術支援センター那須業務科の諸氏には実験における全般的な協力をして頂くとともに貴重なご助言を頂きました。この研究の一部は農林水産省委託プロジェクト研究「自給飼料を基盤とした国産畜産物の高付加価値化技術の開発（国産飼料プロ）」の助成を受けて実施しました。ここに記して御礼申し上げます。

最後に，研究生活全般において支えてくれた妻 麻子に心から感謝いたします。

関連業績リスト

原著論文

松尾守展・浦川修司・喜田環樹・福井弘之・馬木康隆・中井文徳・武内徹郎

(2010) ロールベール向け簡易荷役具の試作. 日本草地学会誌 56(1), 56-59.

Matsuo M., Osada A., Kon S. (2019). Non-destructive prediction of forage crop moisture contents using microwave transmitted signals with a microstrip transmission line sensor, *Grassland Science*, 66(4), 225-230., doi:10.1111/grs.12271

Matsuo M., Kon S., Takimoto H., Osada A. (2021). Non-destructive detection of moisture content in Orchardgrass (*Dactylis glomerate L.*) silage in wrapped round bales using microstrip transmission line sensor and its transmitted microwaves, *Grassland Science*, doi:10.1111/grs.12324, in press

招待講演

松尾守展（2010）飼料イネロールベールサイレージの広域流通技術．平成 21 年度飼料イネの研究・普及に関する情報交換会，畜産草地研究所，2010 年 3 月 1 日

松尾守展（2010）ロール発酵 TMR の効率的輸送を目指した荷役技術の開発状況．平成 22 年度自給飼料活用型 TMR センターに関する情報交換会，畜産草地研究所，2010 年 12 月 14 日

松尾守展（2014）イネ WCS の生産履歴管理に向けた取り組みについて．那須地方農業技術者連絡会議畜産部会第 3 回研修会，那須地方農業技術者連絡会議，2014 年 2 月 25 日

引用文献

- (1) Amari M., Abe A. (1997). Application of near infrared reflectance spectroscopy to forage analysis and prediction of TDN contents, *Japan Agricultural Research Quarterly*, 31(1), 55-63.
- (2) 青木康浩 (2012) トウモロコシサイレージの国内流通の現状と課題. 平成 24 年度自給飼料利用型 TMR センターに関する情報交換会資料, 畜産草地研究所, 栃木, 71-78.
- (3) Borreani, G., Bisaglia, C., and Tabacco, E. (2007). Effects of a New-Concept Wrapping System on Alfalfa Round-Bale Silage. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 781-787. <https://doi.org/10.13031/2013.23132>
- (4) Borreani G., Tabacco E., Schmidt R. J., Holmes B. J., Muck R. E. (2018). Silage review: Factors affecting dry matter and quality losses in silages, *Journal of Dairy Science*, 101: 3952-3979. doi: 10.3168/jds.2017-13837
- (5) デーリィ・ジャパン社 (2011) 乾草. 新版・酪農用語解説 第 2 版 (柏村文郎 総監修), デーリィ・ジャパン社, 東京, 64.
- (6) Digman M. F., and Shinnars K. J. (2008). Real-time moisture measurement on a forage harvester using near-infrared reflectance spectroscopy, *Transactions of the ASABE*, 51(5), 1801-1810.

- (7) 藤原基男（2014）農業生産法人那須の農の取り組み．平成 25 年度全国コント
ラクター等情報連絡会議資料，日本草地畜産種子協会，東京，81-90.
- (8) 福井弘之・馬木康隆・志藤博克・橘保宏・川出哲生・加藤雅徳（2009）大きさ
の異なるロールベールに対応するベールグリッパの開発（第 1 報），日本草地
学会誌 55(別)，49.
- (9) 服部育男・長尾かおり・藤原基次・加藤直樹・小林良次・城田圭子・井上浩
一・山下憲男・指田勝美（2015）ロールベールサイレージの流通促進のための
迅速な水分測定手法．日本草地学会誌 60(4)，268-274.
- (10) 本田文博（2010）大分県におけるコントラクターを活用した稲発酵粗飼料の
広域流通事例．平成 21 年度飼料イネの研究と普及に関する情報交換会資料，
畜産草地研究所，栃木，69-81.
- (11) 本田善文（1996）ベールハンドリング機器．生物生産機械ハンドブック（農
業機械学会編），コロナ社，東京，679-682.
- (12) 市戸万丈・桑名隆・富樫辰志（1985）開放型梱包牧草乾燥貯蔵装置の研究．
1.装置の構成と改良．草地試験場研究報告 32，100-112.
- (13) 市戸万丈（1999）サイロ施設の進歩．サイレージ科学の進歩（内田仙二
編），デーリィ・ジャパン社，東京，250-272.
- (14) 伊地知宏（2020）食料自給率からみた日本の農業の可能性．野村アグリプラ
ンニング&アドバイザーレポート，[https://www.nomuraholdings.com/jp/
company/group/napa/data/20200623.pdf](https://www.nomuraholdings.com/jp/company/group/napa/data/20200623.pdf)

- (15) 井上喜一郎 (1982), 自給飼料政策の展開. 畜産経営と土地利用 総括編—飼料問題の展開と経営構造— (梶井功編), 農山漁村文化協会, 東京, 80-128.
- (16) IPCC (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- (17) 糸川信弘・本田善文・小林亮英 (1995) ラップサイロの特性および調製貯蔵条件と発酵品質. 日本草地学会誌 40(4), 478-487.
- (18) 糸川信弘 (1996) ロールベール密封機械. 生物生産機械ハンドブック (農業機械学会編), コロナ社, 東京, 676-679.
- (19) 伊藤和子・藤森英樹・関野幸二・石川志保・大森裕俊 (2014) 稲発酵粗飼料 (イネ WCS) の広域流通におけるシステムのモデル化と流通組織の機能—宮城県農業公社を事例として—. 農村経済研究 32(2), 55-60.
- (20) 岩崎俊 (2007) 各種伝送線路. 電磁波計測—ネットワークアナライザとアンテナ—, コロナ社, 東京, 30-41.
- (21) 菅野勉 (2011) 飼料作物生産技術. 畜産技術発達史, 畜産技術協会, 東京, 265-275.
- (22) 川出哲生・小島智美・橘保宏 (2012) 静電容量式水分測定器を用いた粗飼料の含水率簡易測定. 日本草地学会誌 58(別), 8.

- (23) 川出哲生・志藤博克・橘保宏・高橋仁康（2013）可変径式細断物成形機構の開発（第1報）—成形機構の検討と試作—。農業機械学会誌 75(3), 210-215.
- (24) 川出哲生・志藤博克・橘保宏（2015）可変径式細断物成形機構の開発（第2報）—試作機の改良と TMR 成形試験—。農業食料工学会誌 77(2), 122-128.
- (25) 河本英憲・佐竹康明・張建国・青木康浩・加茂幹男（2003）ロールベールサイレージの細断，再貯蔵がその後の発酵品質に及ぼす影響。畜産草地研究所研究報告 3, 9-13.
- (26) 河本英憲（2010）ロールベールサイレージの発酵改善と安定貯蔵技術に関する研究。東北農業研究センター研究報告 111, 29-84.
- (27) 川村淳也・平岡啓司・乾清人・伊藤均・石崎雄介（2015）広域流通を促進するためのロールベールサイレージの品質管理技術の開発。日本草地学会誌 60(4), 275-279.
- (28) 川原田直也（2010）三重県における稲発酵粗飼料の広域流通と飼料ムギ生産。平成 21 年度飼料イネの研究と普及に関する情報交換会資料，畜産草地研究所，栃木，53-58.
- (29) 喜田環樹・松尾守展・重田一人（2008）懸架式ロールベール用クランプ。畜産草地研究成果情報，<http://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/nilgs/2007/nilgs07-08.html>
- (30) 喜田環樹・浦川修司・松尾守展・志藤博克（2012）自走式ベールラップによるロールベール計量手法。日本草地学会誌 57(4), 205-208.

- (31) 喜田環樹・浦川修司・松尾守展・田中史彦・内野敏剛 (2013) ロールベール流通のための生産履歴管理システムの開発. 1.システムの構築と生産法人における検証. 日本草地学会誌 59(1), 14-20.
- (32) 喜田環樹・浦川修司・松尾守展・田中史彦・内野敏剛 (2014) ロールベール流通のための生産履歴管理システムの開発. 2.自走式ベールラッパ用ロールベール計量装置の開発. 日本草地学会誌 60(3), 186-192.
- (33) Kon S., Horibe M., Kato Y. (2016). Dynamic measurements of moisture content using microwave signal and its verification, *2016 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2016)*, 1-2.
<https://doi.org/10.1109/CPEM.2016.7540568>
- (34) Kon S., Kato Y., Horibe M. (2020). Dynamic Measurement of Moisture Content using Microwaves for Moisture Evaluation of Agricultural Products, *IEEE transactions on electrical and electronic engineering*, 15, 166-171. doi:10.1002/tee.23097
- (35) Kurokawa K. (1965). Power Waves and the Scattering Matrix, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 13(2), 194-202. <https://doi.org/10.1109/TMTT.1965.1125964>
- (36) Kurokawa S., Shimizu N., Uozumi S., Yoshimura Y. (2003). ISSR variation in a worldwide collection of velvetleaf (*Abutilon theophrasti*) and the genetic background of weedy strains mingled in grains imported into Japan, *Weed Biology and Management*, 3, 179-183.

- (37) 黒川俊二 (2017) 農耕地における外来雑草問題と対策. 雑草研究 62(2), 36-47.
- (38) 増田隆晴・平久保友美 (2006) 細断型ロールベアラ体系の能率向上に向けた改良ハンドラの開発. 岩手県農業研究センター研究報告 6, 91-96.
- (39) 増子孝義 (1999) 硝酸態窒素の集積と硝酸塩中毒. サイレージ科学の進歩 (内田仙二編), デーリィ・ジャパン社, 東京, 116-125.
- (40) 松尾守展・浦川修司・喜田環樹・福井弘之・馬木康隆・中井文徳・武内徹郎 (2010) ロールベール向け簡易荷役具の試作. 日本草地学会誌 56(1), 56-59.
- (41) 松尾守展・浦川修司・喜田環樹・立川隆・森章典 (2011) 国産粗飼料の生産履歴管理システムの試作～粗飼料の収穫調製作業におよぼす履歴取得作業の影響～. 第 70 回農業機械学会年次大会講演要旨, 36-37.
- (42) 松尾守展・浦川修司・喜田環樹 (2013) 国産粗飼料の生産履歴管理システムの改良～飼料用稲麦二毛作における生産履歴収集の適用範囲拡張～. 第 72 回農業食料工学会年次大会講演要旨, 209.
- (43) Matsuo M., Osada A., Kon S. (2019). Non - destructive prediction of forage crop moisture contents using microwave transmitted signals with a microstrip transmission line sensor, *Grassland Science*, 66 (4), 225-230. doi:10.1111/grs.12271
- (44) Matsuo M., Kon S., Takimoto H., Osada A. (2021). Non-destructive detection of moisture content in Orchardgrass (*Dactylis glomerata* L.) silage in wrapped round bales using microstrip transmission lin

- e sensor and its transmitted microwaves, *Grassland Science*, doi:10.1111/grs.12324, in press
- (45) 宮崎昌宏・岡崎紘一郎・長崎裕司（1993）ミニロールベールラッピング処理技術の開発 第1報 車載式細断物梱包装置の開発. 農作業研究 28(2), 109-114.
- (46) 宮崎昌宏・猪之奥康治・石束宣明・長崎裕司・田中宏明・角川修（1999）ミニロールベールラッピング処理技術の開発 第2報 トウモロコシサイレージへの適用. 農作業研究 34(4), 269-276.
- (47) 望月雅之（2009）細断型コンビラップを活用した TMR センターの取り組み. 平成 20 年度自給飼料活用型 TMR センターに関する情報交換会資料, 畜産草地研究所, 栃木, 33-41.
- (48) Muck, R. E. (1988). Factors Influencing Silage Quality and Their Implications for Management, *Journal of Dairy Science*, 71(11), 2992-3002. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(88\)79897-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(88)79897-5)
- (49) 中精一・川村五郎・山内敏雄・加茂幹男（1976）半乾燥粗飼料の圧縮成形化技術の開発に関する研究. 東北農業試験場研究報告 53, 63-171.
- (50) 名久井忠（1994）原料草の水分は何%に調節したらよいか. ロールベールラップサイレージ Q&A その調製と利用の技術マニュアル（日本草地協会編）, 日本草地協会, 東京, 27-28.
- (51) Nelson S. O., and Trabelsi S. (2016). Historical development of grain moisture measurement and other food quality sensing through el

- ectrical properties. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 19(1), 16-18. <https://doi.org/10.1109/MIM.2016.7384955>
- (52) 日本フレキシブルコンテナ工業会（2008）非危険物用フレキシブルコンテナ。JIS Z 1651, 日本規格協会, 東京, 1-52.
- (53) 日本繊維ロープ工業組合（2005）繊維ロープ用語。JIS L 0219, 日本規格協会, 東京, 1-10.
- (54) 日本草地畜産種子協会（2011a）トウモロコシサイレージの流通基準。 <http://souchi.lin.gr.jp/skill/pdf/201102cone.pdf>
- (55) 日本草地畜産種子協会（2011b）稲発酵粗飼料の流通基準。 <http://souchi.lin.gr.jp/pdf/news20120119.pdf>
- (56) Nishida T., Kurokawa S., Shibata S., Kitahara N. (1999). Effect of duration of heat exposure on upland weed seed viability, *Journal of Weed Science and Technology*, 44(1), 59-66. <https://doi.org/10.3719/weed.44.59>
- (57) 西尾道徳（2007）堆肥の過剰害と利用の課題。堆肥・有機質肥料の基礎知識, 農林漁村文化協会, 東京, 85-126.
- (58) 野中和久・名久井忠（1997）低水分ロールベールラップサイレージの簡易評価法。1. 品質判定指標と最適サンプリング位置の検討。日本草地学会誌 42(4), 364-368.

- (59) 野中和久・名久井忠（1998）低水分ロールベールラップサイレージの簡易評価法． 2． 同一圃場から生産した低水分ベールサイレージの最小抽出個数ならびに原料草の品質変動． 日本草地学会誌 44(3), 255-259.
- (60) 野中和久（2002）寒地型牧草低水分ロールベールサイレージの安定調製ならびに品質評価に関する研究． 北海道農業研究センター研究報告 176, 1-55.
- (61) 農林水産政策研究所（2020）2029年における世界の食糧需給見通し—世界食糧需給モデルによる予測結果—． https://www.maff.go.jp/primaff/seika/attach/pdf/200403_2019_01.pdf
- (62) 農林水産省（1999）食料・農業・農村基本法．（平成11年法律第106号）
- (63) 農林水産省（2019）耕地及び作付面積統計． 飼料作物作付（栽培）面積累年統計， <https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/menseki/index.html>
- (64) 農林水産省（2020a）食糧需給表． 令和元年度， <https://www.maff.go.jp/j/zukyu/fbs/attach/pdf/index-9.pdf>
- (65) 農林水産省（2020b）食料・農業・農村白書． https://www.maff.go.jp/j/wpaper/w_maff/r1/attach/pdf/zenbun-2.pdf
- (66) 農林水産省（2020c）畜産統計． 令和2年2月1日現在， <https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/tikusan/index.html#y>
- (67) 農林水産省（2020d）畜産環境をめぐる情勢． <https://www.maff.go.jp/j/chikusan/kankyo/taisaku/pdf/2008kmegji.pdf>

- (68) 農林水産省 (2020e) 飼料をめぐる情勢. https://www.maff.go.jp/j/chikusan/sinko/lin/l_siryo/attach/pdf/index-540.pdf
- (69) 農林水産省 (2020f) 新規需要米等の用途別作付・生産状況の推移. <https://www.maff.go.jp/j/seisan/jyukyuu/komeseisaku/attach/pdf/index-98.pdf>
- (70) 農林水産省 (2020g) 全国版畜産クラウドの現状. https://www.maff.go.jp/j/chikusan/gijutu/lin/l_katiku/cloud/attach/pdf/chikusan-cloud-8.pdf
- (71) 小畑寿・溝辺敬美・鈴木淑恵・藤井真理 (2004) 自給飼料生産の機械体系化確立試験(1)ロールベール・ラップサイロ取扱技術の検討. 宮崎県畜産試験場研究報告, 第 17 号, 63-64.
- (72) 岡戸敦史・本田善文・石田三佳・芋生憲司・竹永博・糸川信弘 (1999) 飼料作圃場作業におけるトラクタ自律走行技術の開発. 草地試験場研究報告 58, 26-37.
- (73) 岡戸敦史・石田三佳・澤村篤・住田憲俊 (2002) フォレージハーベスタの吹き込み方向制御技術の開発. 畜産草地研究所研究報告 1, 17-23.
- (74) 大山嘉信・柁木茂彦 (1968) サイレージ発酵に影響する諸要因に関する研究. III. 材料の水分含量, 詰込み密度およびサイロ内の気体の置換の影響. 日本畜産学会報 39(4), 168-174.
- (75) Pitt, R. E. (1986). Dry Matter Losses Due to Oxygen Infiltration in Silos, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 35(3), 193-205. [https://doi.org/10.1016/S0021-8634\(86\)80056-7](https://doi.org/10.1016/S0021-8634(86)80056-7)

- (76) 佐々木二郎（2013）東日本大震災・福島第1原発事故に伴う粗飼料支援に取り組んで～今後の可能性～．平成24年度全国コントラクター等情報連絡会議資料，日本草地畜産種子協会，東京，63-79.
- (77) 佐藤富雄（2010）宮城県における稲発酵粗飼料の広域的収穫調製と流通．平成21年度飼料イネの研究と普及に関する情報交換会資料，畜産草地研究所，栃木，59-68.
- (78) 志藤博克，山名伸樹（2002）試作細断型ロールベアラを基軸とした長大型作物収穫調製技術の開発．日本草地学会誌 47(6)，610-614.
- (79) 志藤博克・高橋仁康・山名伸樹・澁谷幸憲・奥村政信・正田幹彦・福森宏一・上村雄二・只野克紀・玉森幸雄・高田雅透・福森功（2005）青刈りトウモロコシの省力化収穫調製技術の開発（第3報）—試作2号機の開発と実用化試験—．農業機械学会誌 67(3)，106-113.
- (80) 志藤博克・橘保宏・川出哲生・高橋仁康・岡嶋弘・北中敬久・正田幹彦・古田東司・和田俊郎・安藤和登（2010）汎用型飼料収穫機の開発とトウモロコシ収穫調製作業体系の構築．日本草地学会誌 56(3)，187-193.
- (81) 高野信雄・萬田富治・正岡淑邦（1977a）通年サイレージ方式の導入とその効果（1）．畜産の研究 31(1)，56-60.
- (82) 高野信雄・萬田富治・正岡淑邦（1977b）通年サイレージ方式の導入とその効果（2）．畜産の研究 31(2)，317-319.
- (83) 高野信雄・萬田富治・正岡淑邦（1977c）通年サイレージ方式の導入とその効果（3）．畜産の研究 31(3)，404-406.

- (84) 高野信雄・萬田富治・正岡淑邦（1977d）通年サイレージ方式の導入とその効果（4）. 畜産の研究 31(4), 538-542.
- (85) 高野信雄・萬田富治・正岡淑邦（1977e）通年サイレージ方式の導入とその効果（5）. 畜産の研究 31(5), 637-642.
- (86) 武内徹郎（2012）大きさの異なるロールベールに対応するベールグラブの開発. 平成 24 年度自給飼料活用型 TMR センターに関する情報交換会資料, 畜産草地研究所, 栃木, 97-103.
- (87) 滝元弘樹（2017）TMR センターを基軸とした国産飼料流通における技術課題調査. 平成 28 年度革新工学センター研究報告会資料, 農業技術革新工学センター, 埼玉, 44-53.
- (88) 田中治・大桃定洋（1995）プラスチックフィルムを用いた小規模サイレージ発酵試験法(パウチ法)の開発. 日本草地学会誌 41(1), 55-59.
- (89) 田代洋一（1982）草地開発事業の新たな展開と土地問題—大規模畜産基地と農業公社牧場の建設—. 畜産経営と土地利用 総括編—飼料問題の展開と経営構造—（梶井功編）, 農山漁村文化協会, 東京, 129-174.
- (90) Tremblay D., Savoie P., Lephart Q. (1997). Power requirements and bale characteristics for a fixed and a variable chamber baler, *Canadian agricultural engineering*, 39(1), 73-76.
- (91) 土屋いづみ・高橋正宏（2002）サイレージおよび乾草調製中の降雨による飼料成分の損失. 日本草地学会誌 48(2), 150-153.

- (92) 塚本隆行・西崎邦雄（2005）マイクロ波減衰量計測による牧草水分の推定。
農業機械学会誌 67(6), 113-119.
- (93) 恒川磯雄・堀江達哉（2009）中山間地域における耕畜連携地域営農モデルの
特徴と導入条件—中国地域における飼料用稲の生産・利用を中心に—。農業経
営研究 47(1), 23-26.
- (94) 恒川磯雄（2015）府県における WCS 用稲収穫を主とするコントラクターの
実態と課題。中央農業総合研究センター研究資料 11, 132-144.
- (95) 内田仙二（1993）サイレージの乾物含量並びに飼料価値の評価に関する研
究。VI.水分定量のためのトルエン蒸留法,凍結乾燥法及びガスクロマトグラ
フィーの評価と応用。日本草地学会誌 39(2), 155-161. <https://doi.org/10.14941/grass.39.155>
- (96) United Nations (2019). World Population Prospects 2019 Highlights,
<https://www.un.org/development/desa/publications/world-population-prospects-2019-highlights.html>
- (97) 浦川修司・水野隆夫（1993）稲・麦用カッティングロールベアラの開発。三
重県農業技術センター研究報告 21, 95-101.
- (98) 浦川修司（2003）飼料イネ収穫と機械。農業機械学会誌 65(6), 9-13.
- (99) 浦川修司・吉村雄志（2003a）飼料イネ用自走式ベールラップの開発。日本
草地学会誌 49(3), 248-253.
- (100) 浦川修司・吉村雄志（2003b）ラップサイロ用簡易ベールハンドラの開発。
日本草地学会誌 49(5), 501-506.

- (101) 浦川修司・吉村雄志（2003c）飼料イネ用カッピングロールベアラの開発。日本草地学会誌 49(1), 43-48.
- (102) 浦川修司・吉村雄志・平岡啓司・奥村政信（2004a）飼料イネ用小型ロールベアラの開発。日本草地学会誌 49(6), 652-668.
- (103) 浦川修司・吉村雄志・平岡啓司・奥村政信（2004b）高能率作業を目的とした飼料イネ用自走式ベアラの改良。日本草地学会誌 50(3), 304-309..
- (104) 浦川修司・山本泰也・吉村雄志・松岡清隆・乾清人・平岡啓司（2005）細断型ロールベアラを利用した稲発酵粗飼料主体の TMR ラップサイロ調製技術。日本草地学会誌 51(別), 122-123.
- (105) 浦川修司（2011）自給飼料の広域流通の現状と今後の展開—稲発酵粗飼料の流通基準の策定と広域流通に伴う技術開発の今後の展開—。平成 23 年度自給飼料利用研究会資料，畜産草地研究所，栃木，49-56. http://www.naro.affrc.go.jp/archive/nilgs/kenkyukai/files/jikyushiryoriyo2011_09.pdf
- (106) 浦川修司・松尾守展・喜田環樹（2013）フィールド端末機を用いた稲発酵粗飼料の生産履歴管理システム。畜産草地研究所研究成果情報，https://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/nilgs/2012/120c6_03_18.html
- (107) 浦川修司（2014）飼料イネと飼料用米の今後の展望。農業食料工学会誌 76(5), 365-370.
- (108) 吉澤道彦（2013）有限会社ドリームファームスズカにおける飼料用稲 WCS 生産の取り組み。平成 24 年度全国コントラクター等情報連絡会議資料，日本草地畜産種子協会，東京，81-86.