

現場の問題解決に役立つサイレージ技術と20年後の未来予想⁽³⁾

牧草サイレージの大量調製作業のポイント

—牧草の踏圧程度の指標と、収穫・調製作業の設計—

1 はじめに

近年、TMRセンターや数百頭規模の飼育頭数を有する酪農場では、大規模なバンカーサイロやスタックなどの大型水平サイロによって牧草のサイレージ調製を行なう傾向が顕著になっています。また、中規模経営の酪農場においても、牧草収穫・サイレージ調製などの作業をコントラクターへ委託するケースが多く見られます。

これらは、飼養頭数の増加に連動した労働量の増加を、飼料調製体系を見直すことで軽減することを目的にしている場合や、牧草の適宜収穫を念頭に迅速な調製作業を行なう場合があります。

最近では、大型の自走式ハーベスタが数多く普及していることもあり、サイレージ調製の大型化・高速化を底支えできる要素がそろいつつあります。

しかし、これらの状況に連動するように、各地で牧草のサイレージ調製が失敗し、酪酸発酵や開封後の二次発酵等の被害報告を多く見聞きするようになっていきます。サイレージ調製の失敗の原因は、様々な要因が推測されますが、断定的な判定・検証が難しい傾向があります。その理由として、日本に酪農業が根付いてからサイレージ調製は、垂直型サイロやラップサイレージなど調製ミスの少ない手法が主流であったこともあり、調製ミスの研究が取り上げられることが少なかったことが挙げられます。また、年に1～3回程度の牧草収穫（本州では4回も可能？）では、多くの経験を積み重ねた農場主でさえ、同じ品質・成分のサイレージを毎年調製することは困難であるからです。

これらの状況から、北海道立根釧農業試験場では、平成16年度に試験場内および現地農家において大掛かりな調査・分析を行い、牧草のサイレージ調製時に最も不明確な要素であった「牧草の踏圧具

合」に対して一定の成果を得ました。また、同研究の過程で牧草の収穫・サイレージ調製の作業を計画的に行なうためのツールを作成しました。

2 サイレージ調製の失敗の原因は踏圧？

サイレージ調製の失敗には、以下のような要因が考えられます。

- 1) 牧草の高水分収穫
- 2) 草地への施肥の時期・量のミス
- 3) 牧草収穫時に土砂・堆肥などの異物混入
- 4) 牧草の収穫遅れ
- 5) 牧草の踏圧不足
- 6) その他

これらの要素のうち、1) 牧草の高水分収穫については、十分な予乾を行なうことで水分を低下させるか、ギ酸などを添加することで対処する技術が確立されています。

2) 草地への施肥の時期・量のミスには、人為的なミスであるため、最大限留意していただくしかありません。

3) 牧草収穫時に土砂・堆肥などの異物混入は、草地の状態や牧草の刈高さに影響される要素ですが、草地更新時に圃場の起伏を改善し、収穫時の作業に細心の注意を払うことで対処できます。

4) 牧草の収穫遅れは、牧草中の発酵基質やTDNの減少につながるため好ましくはありませんが、著しい収穫遅れでない限り、サイレージ調製の失敗は見聞きしたことがありません（北海道内での情報に限定）

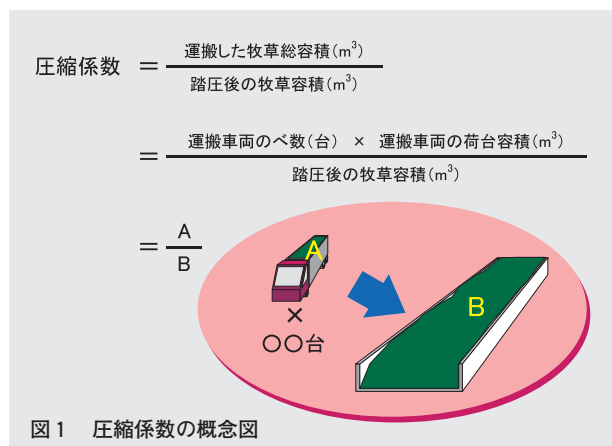
以上、これらの要素については、過去の研究成果が様々な文献や資料となっているため、詳しい内容については割愛させていただきます。

5) 牧草の踏圧不足は、この話題の主題でありませんが、従来の牧草サイレージの調製作業では、

「牧草を如何に迅速に収穫し、サイロを密封するか」という点のみに重点を置き、サイロ内での牧草の踏圧は軽視される傾向にありました。近年は、前述のとおり、大型の自走式ハーベスタが数多く導入され、収穫作業の能率が著しく向上していますが、牧草の収穫・運搬量に対してサイロ内での詰込み作業量が追いつかないため、踏圧作業を省略する傾向があるようです。また、現地農場ではサイロ内の牧草の充填具合を計測する方法がないため、長年の経験による判断によるところが大きいことや、どのくらい踏圧すればよいのか、という数値的な根拠が無い点も問題でした。研究者の意見においても、踏圧よりも迅速な密封を主張する人や、踏圧の効果そのものを疑問視する意見が少なからずありました。

これらの事情を検討しつつ、踏圧程度を数値的に表現し、指標化したものが「圧縮係数」です。圧縮係数とは、草地から運搬した牧草を体積Aとバンカーサイロに詰込み、踏圧した後の牧草体積Bを計測し、 $A \div B$ で算出された数値です。

実際には、運搬した牧草の容積は、運搬に使用したトラック等の荷台の容積と、運搬した回数乗じることで算出されます。この乗じた値Aが、バンカー内で踏圧した後の牧草体積Bに除することで、圧縮係数が算出されます（図1）。



例えば、荷台容積が10m³のトラックが牧草運搬を100回した場合、運搬した牧草体積Aは10（m³）×100（回）＝1000（m³）となります。この牧草をサイロ内で踏圧し、500m³まで牧草体積Bを圧縮した場合、圧縮係数は、 $A \div B$ なので、 $1000 \text{ (m}^3\text{)} \div 500 \text{ (m}^3\text{)} = 2.0$ となります。

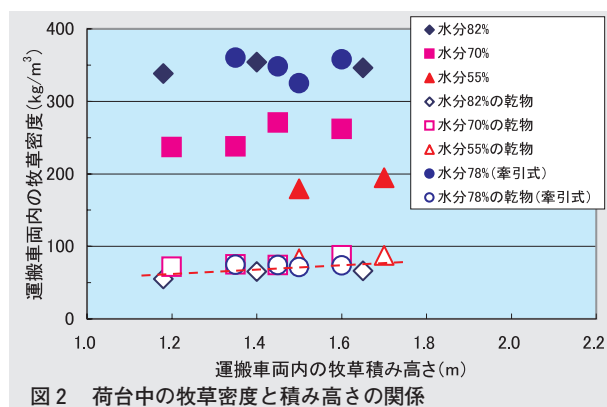
最近では、この係数を「踏圧係数」という人が増えていますが、圧縮係数の提案者である私も踏圧係

数の方が言い易く感じている今日この頃です。

この係数は、牧草をトンやkgなどの重量単位で扱わず、m³などの体積単位で扱っている点がポイントです。根釧農試や一部の農場では、収穫した牧草の重量を計測していましたが、牧草の水分により牧草重量が大きく変動し、各測定点で牧草水分を計測しないと牧草の乾物量がわからないという欠点がありました。

しかし、牧草収穫の調査を行なっている過程で、ハーベスタが収穫した牧草をトラック等の荷台に積載した時点では、牧草の水分変動にかかわらず、牧草の乾物量が一定であることが判明しました（図2）。

図2では、牧草水分が55%の低水分牧草から82%の高水分牧草を用いて、ハーベスタが収穫した牧草をトラックへ積載した時の、牧草の積み高さ（m）と水分、牧草重量を測定したデータです。また、自走式と牽引式のハーベスタの積載による影響も検証しました。この結果、現物牧草での牧草重量は水分差により大きく変動し、密度換算値では180～350kg/m³を推移しますが、乾物換算で算出すると概ね75DMkg/m³を推移することが判明しました。若干、牧草の積み高さで変動する傾向がありますが、牧草運搬に使用するトラック等の車両の積載高は1.5～1.8m程度であるため、75DMkg/m³は定値であるといえます。また、ハーベスタの違いによる影響はありませんでした。



このことから、トラック等の車両が一回に運搬できる牧草量は、乾物量から観察すると一定量しか運搬していず、残りは牧草の水分である、ということが解析されました。従来は牧草水分が高いと、多くの牧草が運搬でき、水分の低い牧草は運搬できる量が少なくなると言われていましたが、それらの知見

を覆す結果となりました。また、牧草量は、重量を測らずに体積を計測することで、簡易に計量化できることも判明しました。

図3は、根釧農試内のバンカーサイロにおいて、1番草のサイレージ調製を精密に計測した結果から、圧縮係数とサイロ内の牧草密度で表したグラフですが、各サイロで踏圧された牧草の現物密度とその圧縮係数は、直線的で高い相関が示されましたが、各サイロの牧草密度を乾物換算に変換した場合、牧草水分やサイロの違いによる影響が全く無い回帰式を得ることができ、非常に高い相関を得ることが出来ました。このことから、サイロ内で踏圧された牧草の乾物密度と圧縮係数は非常に高い相関関係であることがいえます。

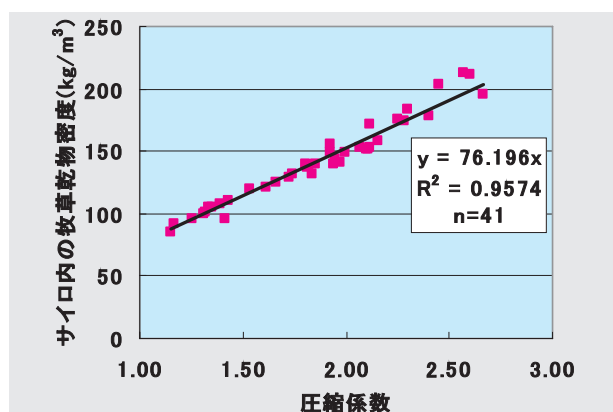


図3 圧縮係数とサイロ内で踏圧された牧草の乾物密度の関係

現地農場での調査で得られたサイレージの品質状況と圧縮係数を比較した場合、過去に一度でもサイレージ調製を失敗している農場では、圧縮係数が1番草では2.0以下、2番草では2.3以下になる傾向が確認されました。また、この傾向はバンカーサイロの規模や形状で影響を受けている兆候はありませんでした（図4）。

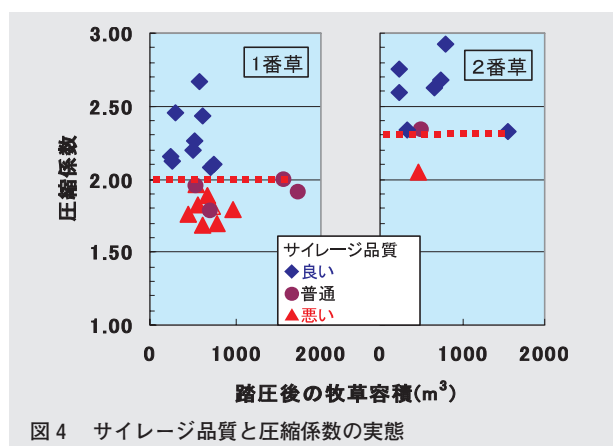


図4 サイレージ品質と圧縮係数の実態

また、現地農場のバンカーサイロ1番草のサイレージ（無添加もしくは乳酸菌製剤添加サイレージ）を回収・分析し、フリーク評点と圧縮係数をグラフ化した結果、サイロ中心部のサイレージのフリーク評点は、圧縮係数が2.0以上で100点になり、圧縮係数2.0以下ではフリーク評点が低下する傾向となりました。また、サイロ側壁部のサイレージでは、圧縮係数2.0で50点程度であり、圧縮係数が低くなるに連動して、フリーク評点も低下する傾向がありました（図5）。通常、フリーク評点は60点以上で給餌に供しえる品質で、80点以上で良質であると言われています。

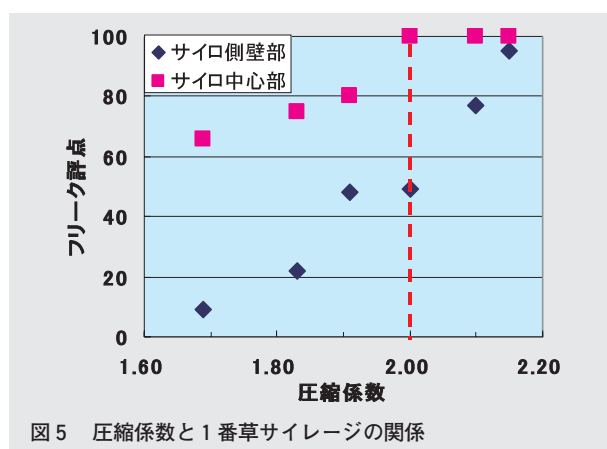


図5 圧縮係数と1番草サイレージの関係

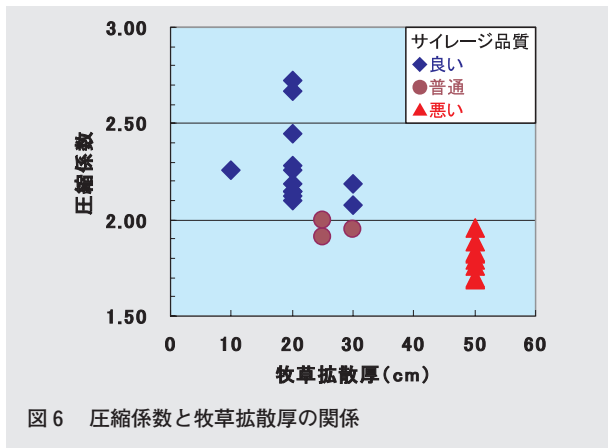
これらのことから、過去にサイレージ調製の失敗が無い農場では、圧縮係数が2.0以上の牧草踏圧を行っており、そのサイレージの大部分は良質であることが導き出されました。

3 踏圧不足になる要因は？

所定の圧縮係数を達成させるためには、踏圧不足につながる要素を解析する必要があります。従来の知見では、牧草の収穫能率が著しく向上したことにより、踏圧にかかる時間が短くなっている、との意見がある一方、踏圧を行なう作業者の技量に対して疑問視する意見もあります。

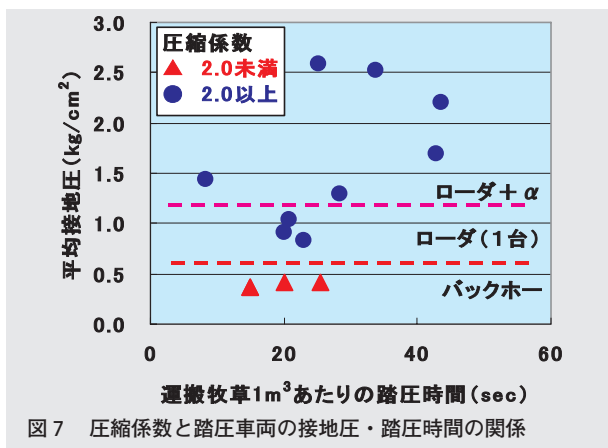
これらの意見を踏まえた上で、サイレージ調製作業を調査・解析した結果、3つの要素が踏圧の正否に大きな影響を与えることが判明しました。

まず一つ目は、草地から運搬されてきた牧草をサイロ内で排出し、ローダ等で牧草を拡散しながら踏圧を行ないますが、この時の拡散直後の牧草厚さが30cm以下の作業を行なっているサイロでは、圧縮係数が2.0以上を達成していました（図6）。アメリカでは15cm以下に牧草拡散してから踏圧するように



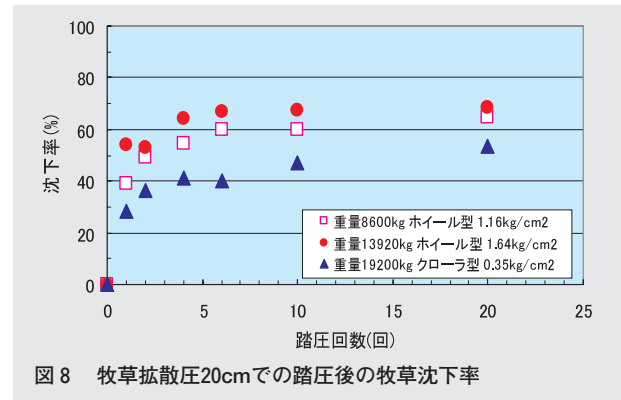
指導されていますが、それと同様に、極力薄く拡散することが必要です。

二つ目に、拡散した牧草を踏圧する車両は、ローダのようなホイール型の車両でなければいけません。バックホーのようなクローラ型の車両での踏圧では、圧縮係数が2.0以下の傾向でした。これは、ホイール型に比べクローラ型では牧草の接地面積が広いことから車両重量が分散し、接地圧が低くなるためです。また、踏圧にかけた時間を、運搬した牧草1m³あたりの所要時間で表したところ、圧縮係数との関係は見出すことが出来ませんでした(図7)。



牧草の拡散厚と踏圧車両の影響を検証するために、コンクリート路盤上に牧草拡散厚20cmの牧草帯を作成し、その上を車両重量8.6トン(接地圧1.16kg/cm)と13.9トン(接地圧1.64kg/cm)のホイール型の車両と、車両重量19.2トン(接地圧0.35kg/cm)のクローラ型の車両で踏圧作業を行なった結果、車両重量が一番重いクローラ型で20回踏圧したときの牧草沈下率と、クローラ型よりはるかに軽量のホイール型の車両2機種が1～2回踏圧した時の沈下

率が、ほぼ同等であることが確認されました(図8)。

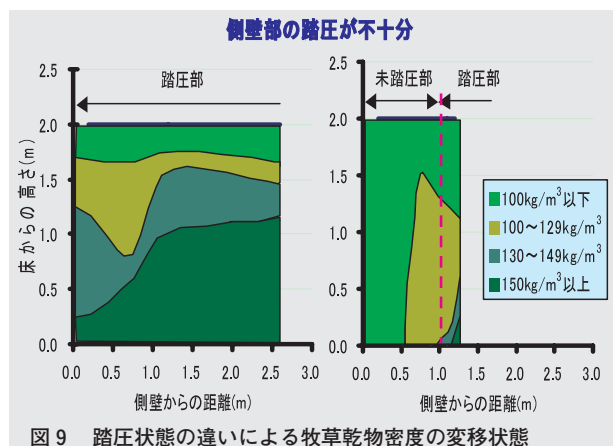


このため、踏圧作業に必要とする車両条件として、車両重量よりも牧草との接地面積が小さく接地圧が高いホイール型の車両を用いることが必須条件となります。また、牧草を拡散する工程でもバックホー等で薄く拡散することは、ホイールローダで拡散することより困難であることから、踏圧作業に用いる車両をホイール型としなければ著しく作業能率を低下させる結果をもたらします。

三つ目に、バンカーサイロの側壁部の踏圧が不十分である場合です。バンカーサイロにおける理想的なサイレージは、サイロのどの部位を利用しても品質・成分が一定で、かつ安定していることです。実際には、サイロ側壁部に近づくにつれて踏圧が難しくなりしっかりとした踏圧が行なえず、比較的ゆるい状態となってしまいます。側壁部の踏圧は牧草の密度や乾物密度に大きな影響を与え、サイロ開封後の二次発酵にも影響するため、しっかりとした踏圧を行なう必要があります。

図9は根釧農業試験場内において、通常の踏圧作業(側壁ギリギリまで踏圧作業を行なう)と、側壁から1.0mまで未踏圧の条件で踏圧作業をした時の牧草乾物密度を計測したグラフです。このグラフから側壁ギリギリまで踏圧を行なった圧縮係数2.0の牧草断面では、側壁面まで牧草乾物密度が150DMkg/m³以上に達していますが、側壁から1.0mまでを未踏圧とした圧縮係数1.73の牧草断面では、未踏圧部分は牧草乾物密度が100DMkg/m³以下となり、大部分では75DMkg/m³程度でありました。ハーベスタで収穫した牧草をトラックの荷台に充填した時の牧草乾物密度が75DMkg/m³程度(図2を参照)であったことから、未踏圧部分は牧草の自重で密には

ならず、タワー型サイロのような作業方法では対応できないことが判明しました。



- 以上のことから、踏圧技術の基本要素として、
- 1) サイロ内では牧草を薄く拡散してから踏圧する。
 - 2) 踏圧作業は接地圧が高く牧草の拡散がし易いバケットローダ等を使用する。
 - 3) サイロ側壁の踏圧は念入りに行なう。
- の3要素が挙げられます。

この他に、前述した圧縮係数を用いることで、バンカーサイロに詰込む牧草の必要量が算出でき、この値はサイロ容積を拡張しない限り普遍的な数値となります(図10)。

4 牧草収穫・サイレージ調製作業の設計方法

圧縮係数の概念から、牧草量は体積換算で計測・制御できることが判明し、また、図7から現地農場において牧草1m³あたりの踏圧にかかる時間が15～25秒程度であることが解析されたことから、これらを組合せることで、牧草収穫と踏圧作業の設計が厳密に行なうことが可能となりました。

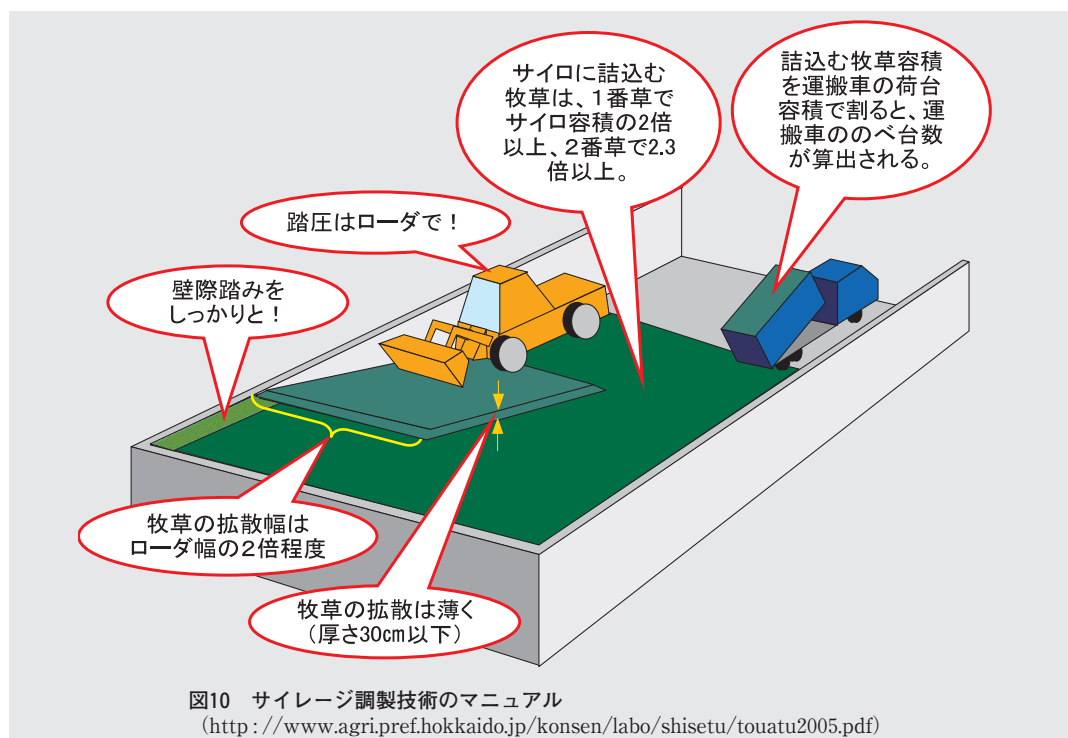
図11は、バンカーサイロに詰込む牧草量の計算方法と、牧草収穫・踏圧作業を円滑に行なうための作業設計表です。この表では事前に、牧草収穫に使用するハーベスタ機種を選定と、運搬車両の荷台容積、草地とサイロ間の距離と、草地の乾物収量を坪刈りなどで計測しておくことで、ハーベスタを最大能率で稼働させる時に必要とする運搬車両数と踏圧車両数が算出できます。また、この表を理解していただくため、例題集も併せて根釧農業試験場のHPで公開しています。

(<http://www.agri.pref.hokkaido.jp/konsen/labo/shisetu/siloreidai.pdf>)

5 最後に

サイレージ調製は、草地で生育した牧草の栄養価を極力損なうことなく貯蔵させるための作業であり、草種管理、施肥管理、収穫時期の判断、適切な収穫作業を行なった上で成立する作業です。また、踏圧作業は、前述の3要素を円滑に行なうためには

熟達した技術の上に成立することが、本研究で確認されました。



ーチェックシートー

バンカサイロに詰込む牧草量と、牧草の収穫・調製作業の設計

I. バンカサイロに詰込む牧草量の計算

- 1) バンカサイロの実容積

$$=[サイロ幅(m)] \times [サイロ壁高さ(m)] \times [サイロの実奥行(m)]$$

$$=[] \times [] \times []$$

$$=[] (m^3) \quad \text{※図1参照}$$
- 2) 目標とする圧縮係数

$$=[] \quad \text{※1番草で2.0以上、2番草で2.3以上を目標値とする。}$$
- 3) 運搬する牧草容積

$$=[バンカサイロの実容積(m^3)] \times [圧縮係数]$$

$$=[] \times []$$

$$=[] (m^3)$$
- 4) 牧草を運搬する車両の荷台容積

$$=[荷台幅(m)] \times [牧草積載高(m)] \times [荷台長(m)]$$

$$=[] \times [] \times []$$

$$=[] (m^3) \quad \text{※図2参照}$$
- 5) サイロ1基に要する運搬車両の
のべ台数

$$=[運搬する牧草容積(m^3)] \div [運搬車両の荷台容積(m^3/台)]$$

$$=[] \div []$$

$$=[] (台)$$
- 6) X台毎の詰め込み具合を確認
するためにサイロ側壁のマーキ
ングするポイントの間隔長「L」

$$=[サイロの実奥行(m)] \times [任意の車両台数(台)] \div [運搬車両ののべ台数(台)]$$

$$=[] \times [] \div []$$

$$=[] (m) \quad \text{※図3参照}$$

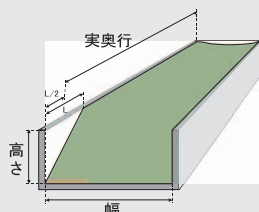


図1 サイロ寸法

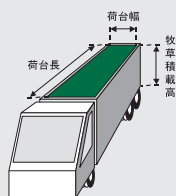


図2 運搬車の荷台寸法

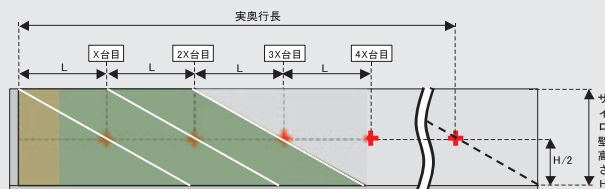


図3 サイロ側壁のマーキング位置図

II. 収穫・調製作業の設計

- 1) 1時間あたりの牧草収穫面積

$$=[1時間あたりの牧草の乾物収穫量(DM kg/時)]$$

$$\div [1haあたりの牧草の乾物収量(DM kg/ha)]$$

$$=[] \div []$$

$$=[] (ha/時) \quad \text{※乾物収量は坪刈りで概算}$$
- 2) 1haあたりの収穫牧草容積

$$=[1haあたりの牧草の乾物収量(DM kg/ha)]$$

$$\div [運搬車両中の牧草の乾物密度(DM kg/m^3)]$$

$$=[] \div []$$

$$=[] (m^3/ha) \quad \text{※乾物密度は75kg/m}^3$$
- 3) 1時間あたりの収穫牧草容積
=「収穫効率」

$$=[1時間あたりの牧草収穫面積(ha/時)]$$

$$\times [1haあたりの収穫牧草容積(m^3/ha)]$$

$$=[] \times []$$

$$=[] (m^3/時)$$
- 4) 1時間あたりの踏圧牧草容積
=「踏圧効率」

$$=3600 \div [運搬した牧草1m^3あたりの踏圧時間(秒/m^3)]$$

$$=3600 \div []$$

$$=[] (m^3/時) \quad \text{※踏圧時間は15~25秒/m}^3 \text{程度}$$
- 5) ハーベスタ1台をフルに活用
した時に詰込むサイロ数

$$=[1時間あたりの収穫牧草容積(m^3/時)] \div [1時間あたりの踏圧牧草容積(m^3/時)]$$

$$=[] \div []$$

$$=[] (基) \quad \text{※小数点以下は切り上げ}$$
- 6) ハーベスタ1台をフルに活用
した時に必要とする運搬車両数

$$=[収穫効率(m^3/時)] \times [牧草の往復運搬距離(km)]$$

$$\div [運搬車両の荷台容積(m^3)] \div [運搬車両の走行速度(km/時)]$$

$$=[] \times [] \div [] \div []$$

$$=[] (台)$$

表 1時間あたりの牧草の乾物収穫量
(ハーベスタの収穫能率)

メーカー名	機種	乾物収穫量 (DM kg/時)
CLAAS	840	25700
	690SL	25700
FIATAGRI	NH300/9630	15900
	NH2115	15900
NEW HOLLAND	FX375	15900
	FX450	21100
MAMMUT	6300	15100
	6800	15100
	7300	15100
JAGUAR	890	26600

出典: 農業機械性能試験(平成7~9年度)

図11 作業設計表

(<http://www.agri.pref.hokkaido.jp/konsen/labo/shisetu/silochek.pdf>)