

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2023

課題番号：18K05934

研究課題名（和文）比の形質を改良するための改良目標型選抜法の適用と育種効率の検証

研究課題名（英文）Application of selection for desired changes for improving the ratio-defined character

研究代表者

佐藤 正寛（Sato, Masahiro）

東北大学・農学研究科・教授

研究者番号：70370658

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、乳脂率や飼料要求率などの比の形質を改良する上で欠かせない相対希望改良量を達成するための制限付き選抜法において、線形代数的手法を用いることで、従来の制限付き選抜指数と相対希望改良量を達成するための制限付き選抜法の関係を明らかにした。また、相対希望改良量を達成するための選抜指標を明らかにした。これにより、相対希望改良量を達成するための選抜反応における遺伝的能力評価が可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

比の形質とは異なる2形質を分母と分子とする形質であり正規分布をしないため、方向性（育種目標）に向かって改良することが難しい形質である。比の形質は、畜産の現場では乳脂率や飼料要求率など非常に多く用いられている。本研究ではこのような比の形質を改良するための選抜指標および改良手法を明らかにした。これにより、従来の方法よりもより効率的に比の形質を育種改良することが可能となる。

研究成果の概要（英文）：This study clarified the relationship between the conventional restricted selection index and the restricted selection index for achieving relative desired changes, which is essential for improving traits such as milk fat percentage and feed requirement ratio, by using linear algebra. I also clarified the selection criterion for achieving the relative desired changes. This enabled the genetic evaluation for selection response to achieve the relative desired changes.

研究分野：動物遺伝育種学

キーワード：制限付き選抜

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

家畜の育種改良は、種畜候補における選抜形質の遺伝的能力(育種価)を予測し、その推定値に基づいて選抜、交配を繰り返すことによって行われる。育種改良の対象となる主要な形質の中には、乳脂率、飼料要求率、枝肉歩留まり、一日平均増体重、一腹産子生存率など、比の形質が数多く含まれている。

比の形質において、例えば飼料要求率は一定期間における飼料摂取量/増体重で表されるが、飼料摂取量と増体重が正規分布に従う場合、それらの比である飼料要求率が正規分布しないことは自明である。しかし、選抜における遺伝的改良量の予測理論では、選抜対象形質に正規性を仮定しているため、特に比の形質では選抜反応の予測値と実際の選抜結果との間に齟齬が生じる場合が少なくない。また、育種計画を構築する際、選抜対象の候補となる形質はすべて正規性を仮定し、その中から予測理論に基づき、育種目標に対して最大の改良量が得られるいくつかの形質を選抜対象形質として選択する。このとき、選抜対象形質が非正規分布である場合、選抜効率は当初の予測よりも著しく低下する。また、選抜対象形質間の改良量にもズレが生じるため、改良量の比である選抜の方向にも偏りが生じる。にもかかわらず、比の形質はその取り扱いが非常に難しいため、これまで正規分布が仮定できる形質と同様に扱われてきた。さらに、コンピュータシミュレーションによる選抜実験では真の育種価が既知であるため、選抜反応は各形質のBVや総合育種価の大きさによって評価される。しかし、制限付き選抜(制限付き選抜指数や制限付きBLUP法)による選抜反応において、制限が付加された形質における評価基準は存在しない。

### 2. 研究の目的

本来、比の形質を選抜の対象とする場合には、分布型に適した選抜を行う必要がある。一方、比の形質を構成する2つの形質(比の分母および分子となる形質)の多くは正規分布に従うため、比の形質における遺伝的能力で直接選抜するよりも、それを構成する2つの形質における遺伝的能力を同時に評価し、両者に適切な重み付けをした選抜によって、より大きな改良量を得ることができるはずである。

そこで本研究では、乳量や飼料要求率など、比で表される形質を効率的に育種改良するための選抜手法を開発する。これまで比の形質は、2形質の比を表現型値とし、それに基づいて推定した育種価を直接選抜することによって改良がすすめられてきた。しかし、比の形質は一般に正規分布を仮定できないため、効率的な育種改良がなされてこなかった。本研究では、これまで顧みられてこなかった比の形質に焦点をあて、申請者がこれまで長年研究してきた改良目標型選抜法を用いて、比の形質を効率的に改良するための手法を開発する。さらに、比の形質あるいは分母分子となる形質に対し、相対希望改良量を用いて選抜したときの遺伝的改良量の理論的な評価基準を開発する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 比の形質における表現型値および育種価の分布型の推定

比の形質は、育種価の分布型はもちろん、表現型値の分布の形状も不明確である。本研究では、モンテ・カルロ法によるコンピュータシミュレーションにより比の形質の育種価と表現型値を発生させ、乳脂率、飼料要求率など、比の形質を構成する2つの形質に正規分布を仮定し、その平均や分散から比の形質における表現型値の平均や分散を算出し、これらのパラメータを用いて、比の形質における表現型値の分布型の描写法を確立する。また、比の形質における相加的遺伝分散や環境分散および比の形質でない他の形質との相加的遺伝共分散や環境共分散を推定するとともに、育種価の分布型を推定する。

#### (2) 比の形質に対して改良目標型選抜法を適用した育種改良手法の開発

比の形質は次のように表される。

$$\text{比の形質} = \text{形質2} / \text{形質1}$$

そこで、比の形質を高める方向に改良するためには、①形質1を小さくする、②形質2を大きくする、③形質1を小さくして形質2を大きくする、の3通りが考えられる。このとき、比の形質の改良には、各構成形質の遺伝率や構成形質間の遺伝相関(遺伝的パラメータ)が影響する。そこで、選抜指数法およびBLUP法を用いて遺伝的パラメータの違いなどが改良量に与える影響を理論的に検討し、改良目標型選抜法を適用した比の形質に対する新たな育種改良手法を開発する。

#### (3) 比の形質の直接選抜と改良目標型選抜法を適用した新たな改良手法との比較

従来行われてきた比の形質を直接選抜したときの遺伝的改良量と(2)で開発した遺伝的改良手法に基づいて比の形質を選抜したときの遺伝的改良量の違いをコンピュータシミュレーションによって比較する。このとき、比の形質およびその構成形質は、(1)で得られた様々な比の形質データの遺伝的パラメータに基づいて発生させるものとする。

#### (4) 比の形質とその構成形質との同時選抜手法の開発

たとえば、乳量は乳脂率の構成形質である。いま、乳脂率と同時に乳量も改良したい場合など、

①比の形質とその構成形質を同時に育種改良したい場合がある。また、平成 27 年の家畜改良増殖目標（農林水産省）では、乳量を増加させ、現在の乳成分率を維持することを目標としている。このように、②比の形質における集団平均を変えずにその構成形質を育種改良したい場合がある。そこで、①や②の条件下で、比の形質とその構成形質を同時に改良する理論的な選抜手法を開発する。また、その手法をコンピュータシミュレーションによって評価する。

(5) 比の形質による相対希望改良量の評価基準の開発

比の形質あるいは分母分子となる形質に対し、家畜を当該形質によって選抜したときの遺伝的改良量を評価するため、特に相対希望改良量を用いて選抜したときの理論的な評価基準を開発する。

#### 4. 研究成果

以下の方法でモンテ・カルロ法シミュレーションを行った。まず、増体重(DG)と飼料摂取量(FI)を想定し、基礎集団(G0)は近交および血縁はないものとした。遺伝的パラメーターを高い精度で推定するため、G0における集団のサイズは雄100,000頭、雌1,000,000頭とした。雄1頭に雌10頭を交配し、次世代(G1)を得るものとした。G0の雌は1頭あたり雌雄各1頭を育成するものとした。したがって、G1は雌雄各1,000,000頭の計2,000,000頭である。このとき、飼料効率(FC)と飼料要求率(FC)を以下の式より求めた。

$$FE = DG/FI, FC = FI/DG.$$

また、DG、FIの遺伝率、変動係数、両者の遺伝相関と環境相関を0.7~1.3倍したときの、FEとFCの遺伝率、変動係数、両者の遺伝相関と環境相関の変化量を調べた。なお、遺伝率、遺伝相関、環境相関は親子回帰により求めた。反復回数は各条件下で1000とした。

設定値におけるDG、FI、FE、FCの遺伝的パラメーターの推定値を表1に示した。DGとFIの組み合わせ(2×2)が遺伝率、遺伝相関、環境相関の設定値部分で、DGとFIの遺伝相関が設定値よりも0.0001小さく推定されたが、他に遺伝的パラメーターは設定値通りであった。

表1 増体重(DG), 飼料摂取量(FI), 飼料効率(FE), 飼料要求率(FC)における遺伝的パラメーターの推定値

|    | DG            |                 | FI            |                 | FE            |                 | FC            |                 |
|----|---------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|
| DG | <u>0.3000</u> | <u>(0.0000)</u> | 0.6000        | (0.0001)        | 0.5906        | (0.0001)        | -0.6016       | (0.0001)        |
| FI | 0.6999        | (0.0001)        | <u>0.4000</u> | <u>(0.0000)</u> | -0.2836       | (0.0001)        | 0.2665        | (0.0001)        |
| FE | 0.3373        | (0.0001)        | -0.4353       | (0.0001)        | <u>0.2765</u> | <u>(0.0000)</u> | -0.9879       | (0.0000)        |
| FC | -0.3569       | (0.0001)        | 0.4164        | (0.0001)        | -0.9986       | (0.0000)        | <u>0.2729</u> | <u>(0.0000)</u> |

対角：遺伝率，対角下：遺伝相関，対角上：環境相関，括弧内は1000反復の標準偏差。

比の形質(FEとFC)の構成形質であるDGとFIの遺伝率、遺伝相関、環境相関、変動係数をそれぞれ設定値の0.7~1.3倍としたときのFEとFCの遺伝率を図1に示した。FEとFCの遺伝率はほぼ一致しており、分母と分子の形質(DG, FI)の遺伝相関による影響がもっとも強かった。図には示していないが、FEとFCの遺伝相関は常に0.998を越えており、遺伝率も類似していたことから、事前に遺伝的改良量を予測するためには、分布の歪度や尖度が正規分布に近いものを選ぶべきであることが明らかとなった。

比の形質の分布型を描写する方法を考案した。さらに、EXCELを用いて比の形質を図示した一例が図2である。図2の左図は形質の逆数の分布で、この分布に分母の形質の分布を掛け合わせたものが右図である。なお、右図は分母分子の形質の平均が同じで、分母の形質よりも分子の形質の分散を小さくした場合の分布図である。これにより、比の形質における分布型の描写が可能となった。

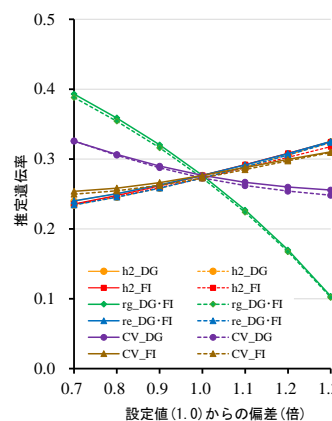


図1 飼料効率(実線)と飼料要求率(破線)の推定遺伝率。h2\_DG, h2\_FI: DG, FIの遺伝率, rg\_DG·FI, re\_DG·FI: DGとFIの遺伝相関, 環境相関, CV\_DG, CV\_FI: DG, FIの変動係数。

DG、FI、FE、FCの各形質によって表型選抜およびBLUP選抜を行ったときの各形質および総合育種価の選抜反応を表2に示した。予想されたように、BLUP選抜は表型選抜よりも遺伝的改良量が大きくなった。総合育種価はDGによる選抜が最も大きく、FIの選抜では負の値となった。これは経済的重み付け値が相対的

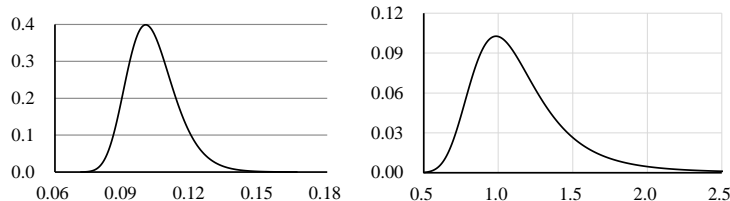


図2 形質の逆数の分布(左)と比の形質の分布(右)。比の形質の分布では、分母分子の形質の平均=1、分母の形質の分散=2、分子の形質の分散=1。

に FI に比べ DG で大きかったためである。比の形質である FE および FC による選抜は、ほぼ同様の選抜反応を示した。

表2 増体重(DG), 飼料摂取量(FI), 飼料効率(FE), 飼料要求率(FC)によって選抜したときの各形質および総合育種価の予測選抜反応(×10)

| 選抜形質(選抜法)  | ΔDG    | ΔFI    | Δ(FE) | Δ(FC)  | 総合育種価  |
|------------|--------|--------|-------|--------|--------|
| DG(表型選抜)   | 0.269  | 0.434  | 0.036 | -0.188 | 4535.4 |
| FI(表型選抜)   | -0.207 | -0.694 | 0.056 | -0.262 | -767.2 |
| FE(表型選抜)   | 0.061  | -0.321 | 0.106 | -0.514 | 3827.3 |
| FC(表型選抜)   | 0.061  | -0.321 | 0.106 | -0.514 | 3826.8 |
| DG(BLUP選抜) | 0.290  | 0.468  | 0.039 | -0.202 | 4865.9 |
| FI(BLUP選抜) | -0.215 | -0.721 | 0.058 | -0.272 | -810.5 |
| FE(BLUP選抜) | 0.079  | -0.321 | 0.115 | -0.557 | 4270.2 |
| FC(BLUP選抜) | 0.082  | -0.309 | 0.113 | -0.552 | 4276.3 |

乳用牛の後代検定を想定し、乳量、乳脂肪量、乳脂率のうちいずれか2形質を用いた3通りの相対希望改良量による選抜を行ったときの乳量と乳脂肪量の遺伝的改良量および改良方向を図3に示した。いずれの相対希望改良量も乳脂率を3.8%と一定にしているが、比の構成形質に相対希望改良量を設けて選抜したときの遺伝的改良量をもっとも大きく、また改良方向が真の相対希望改良量に近くなった。この原因として、比の形質における分布の歪みが考えられる。このことから、相対希望改良量を達成するための選抜では、比の形質ではなく、比の構成形質を用いた選抜が望ましいことが明らかとなった。

$n$  変量(形質)の育種価のベクトル( $\mathbf{g}$ )が平均 $\mathbf{0}$ 、分散 $\mathbf{G}_0$ の正規分布に従うとき、その確率密度関数は、

$$F(\mathbf{g}) = \frac{1}{2\pi |\mathbf{G}_0|^{1/2}} \exp\left(-\frac{1}{2} \mathbf{g}' \mathbf{G}_0^{-1} \mathbf{g}\right)$$

で表される。この式に基づき、

$$\mathbf{g}_R = [\mathbf{I} - \mathbf{G}_0 \mathbf{C} (\mathbf{C}' \mathbf{G}_0 \mathbf{C})^{-1} \mathbf{C}'] \mathbf{g} \quad (1)$$

が得られた。ここで、 $\mathbf{g}_R$ は制限付き育種価のベクトル、 $\mathbf{C}$ は制限行列である。また、(1)式の幾何学的解釈を図4に示した。(1)式を用いることにより、シミュレーションによる選抜実験において、制限が付加された複数の形質における遺伝的改良量を評価することができる。さらに、この方法は相対希望改良量により家畜を選抜したときの遺伝的改良量の評価に用いることができる。

以上の研究成果は、比の形質を効率的に改良するための手法を明示するとともに、遺伝的改良量の評価基準を明らかにしたことで、選抜手法の評価や手法の選択が可能となり、比の形質の育種改良に有用であると結論づけた。

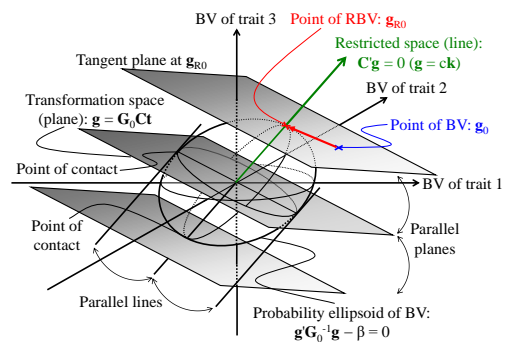


図4 3形質の育種価(青)と相対希望改良量による制限付き育種価(赤と緑が交わる点)との関係

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

|                                                                                                                         |                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| 1. 著者名<br>矢崎夏実・上本吉伸・小川伸一郎・佐藤正寛                                                                                          | 4. 巻<br>92            |
| 2. 論文標題<br>ブタにおける飼料要求率およびその構成形質による選抜反応の比較                                                                               | 5. 発行年<br>2021年       |
| 3. 雑誌名<br>日本畜産学会報                                                                                                       | 6. 最初と最後の頁<br>279-284 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.2508/chikusan.92.279                                                                      | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている（また、その予定である）                                                                                   | 国際共著<br>-             |
| 1. 著者名<br>矢崎夏実・上本吉伸・小川伸一郎・佐藤正寛                                                                                          | 4. 巻<br>92            |
| 2. 論文標題<br>比の形質を一定にして構成形質を増加させる選抜における遺伝的改良量：乳脂率の選抜による一例                                                                 | 5. 発行年<br>2021年       |
| 3. 雑誌名<br>日本畜産学会報                                                                                                       | 6. 最初と最後の頁<br>35-39   |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.2508/chikusan.92.35                                                                       | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている（また、その予定である）                                                                                   | 国際共著<br>-             |
| 1. 著者名<br>Sato Masahiro                                                                                                 | 4. 巻<br>90            |
| 2. 論文標題<br>Evaluation criterion for response to selection with constraint                                               | 5. 発行年<br>2019年       |
| 3. 雑誌名<br>Animal Science Journal                                                                                        | 6. 最初と最後の頁<br>462-466 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1111/asj.13174                                                                            | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている（また、その予定である）                                                                                   | 国際共著<br>-             |
| 1. 著者名<br>Sato Masahiro                                                                                                 | 4. 巻<br>141           |
| 2. 論文標題<br>Characteristics of restricted selection indices and geometrical interpretation of restricted breeding values | 5. 発行年<br>2024年       |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Animal Breeding and Genetics                                                                       | 6. 最初と最後の頁<br>353-363 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1111/jbg.12845                                                                            | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている（また、その予定である）                                                                                   | 国際共著<br>-             |

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

|                                |
|--------------------------------|
| 1. 発表者名<br>佐藤正寛                |
| 2. 発表標題<br>制限付き選抜指数とその予測育種価の特性 |
| 3. 学会等名<br>日本畜産学会第130回大会       |
| 4. 発表年<br>2022年                |

|                                            |
|--------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>佐藤正寛                            |
| 2. 発表標題<br>日本におけるブタの閉鎖群育種（系統造成）とその関連研究について |
| 3. 学会等名<br>第4回中国養豚学会（招待講演）（国際学会）           |
| 4. 発表年<br>2022年                            |

|                            |
|----------------------------|
| 1. 発表者名<br>佐藤正寛            |
| 2. 発表標題<br>母性遺伝効果を含む形質の選抜法 |
| 3. 学会等名<br>第17回統計遺伝育種研究会   |
| 4. 発表年<br>2023年            |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

| 6. 研究組織 | 氏名<br>（ローマ字氏名）<br>（研究者番号） | 所属研究機関・部局・職<br>（機関番号） | 備考 |
|---------|---------------------------|-----------------------|----|
|---------|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|