成長期の頭顔部形質における環境変異の因子分析

——男子 1 卵性双生児について——

栗 栖 浩 二 郎
くり す こう じ ろう

九州大学歯学部 口腔解剖学第 2 講座*

〔受付：昭和46年 5 月10日〕

生物集団の形質的変異を研究する場合、まず表現型分散を遺伝成分と環境成分とに分割することは、最も基本的な要件である¹⁾。実験可能な生物集団では、その分割は比較的容易であり、分割された各成分をさらに詳しく分析することもできる。例えば、BAILEY²⁾ は、マウスの近交系を用いて、その下顎形質の表現型分散を遺伝成分と環境成分とに分割し、さらに各成分についての分散共分散行列を主成分分析することによって、各成分の変動要因を追求している。

一方、人類集団にみられる表現型分散を遺伝成分と環境成分とに分割するには種々の方法があるが、それらは次のように分類することができる。まず第 1 のカテゴリーに属する方法は、1 卵性および 2 卵性双生児の組内変異を比較する方法である。この方法は、DAHLBERG によって確立されて以来、多くの報告がなされている³⁻⁵⁾。第 2 のカテゴリーに属する方法は、同一個体または集団が異った環境条件のもとにおかれた場合の表現型の変化より、環境変異を推定する方法である。この場合の集団は、多世代にわたって遺伝的に隔離された集団ではなければならないので、研究対象としては多くの制約がある。

以上の 2 種の方法のうち、有効なデータが比較的容易に得られる方法は、やはり第 1 の双生児を用いる方法であり、頭顔部の形質に関しても多く

の報告がある⁶⁻¹¹⁾。しかし、これらの研究は、個々の形質についてその表現型分散を遺伝および環境成分に分割する段階までのものであり、BAILEY²⁾ がマウスについて行なったように、分割された遺伝および環境成分をさらに相関分析した報告は、ヒトに関する限りまだない。言いかえれば、ヒトの形質の表現型分散の分割に関する研究は、もっぱら単一変量として取扱ったものであって、多変量としての分析法を用いた研究はまだない。

次に、共分散行列（変動行列）を分析する方法としては、一般に因子分析法がよく用いられる¹²⁻¹⁵⁾。この分析法は元来心理学など行動科学の分野で発展した方法であるが、HOWELLS¹⁶⁾ らによって形質人類学の分野に応用されて以来数多くの研究がなされており、とくに頭顔部の形質に関しては、HOWELLS¹⁷⁾、LANDAUER¹⁸⁾、BROWN¹⁹⁾、KANDA & KURISU²⁰⁾ らの報告がある。

著者は、成長期の 1 卵性双生児の頭顔部の計測値を用いて、環境変異に基く共分散行列を推定する方法を考案し、これを因子分析することによって、環境成分を構成する因子を求め、さらにそれらの因子の経年的変化を追求した。

資料と方法

資料は、1954 年より 3 年間行なわれた大阪市とその近郊に在住する双生児の共同研究のうち、大

Factor analysis of the environmental variance of the cephalo-facial traits of young monozygotic twins
K. KURISU (Department of Oral Anatomy, Faculty of Dentistry, Kyushu University, Katakasu, Fukuoka)

* 福岡市字堅粕 1276 (〒812)

Jap. J. Oral Biol. 13 : 232-238, 1971.

阪大学医学部第2解剖学教室が所有する生体計測結果の一部である。この調査結果のうち、双生児の類似度に関しては、すでに鎌田¹⁰⁾、加藤¹¹⁾が報告している。資料は各年齢に属する組数が十分大きくないので、本研究では2～3年毎にまとめ、合計3つの年齢階級に分け、各年齢階級について分析した(表1)。

Table 1. Age group and no. of pairs

Age group	Age	No. of pairs
1	7	17
	8	11
	9	7
2	10	6
	11	8
	12	10
3	13	23
	14	18

用いた測定項目は、頭顔部に関する7項目で、頭長、頭幅、頭耳高、頬骨弓幅、下顎角幅、容貌顔面高、形態顔面高である。また計測方法は全てMARTIN²¹⁾の方法によった。

分析の対象となる環境変異に基く変動行列は、まず各年齢について、次のようにして求めた。

$$\sum_M = \frac{1}{n} (X_1 - X_2)(X_1 - X_2)'$$

(p×p) (p×n) (p×n)

ただし、nはその年齢に属する組数、pは用いた計測項目数(ここでは、p=7)を表わし、 X_1, X_2 はそれぞれ双生児の組の1方の計測値の行列で、いずれも(p×n)の行列である。こうして求めた(p×p)行列 $\sum_M$ は、実は双生児の組内分散共分散行列の各年齢についての pooled estimation²²⁾ になっている。本来なら各年齢について $\sum_M$ を分析すべきであるが、先にも述べたように各年齢の組数が大きくないので、表1に示すように、連続する2～3の年齢についての $\sum_M$ を累計して、年齢階級についての $\sum_M$ を求め、これを分析した。実はその前に、まず累計される行列 $\sum_M$ が互に等しいものとみなしてよいか否かを検定してみなければならぬ¹⁴⁾。実際、検定してみると、いずれの年齢階

級においても、各年齢の $\sum_M$ が5%の有意水準で、等しいことが否定されなかった。ただし、10歳については、組の数が6で、測定項目数7より小さいため、その $\sum_M$ の行列式は0となって検定できないので、この年齢階級については、11歳と12歳の $\sum_M$ を比較検定したにとどまっている。

ここで、1卵性および2卵性双生児の組内変動行列の成分のモデルを考えてみると、それらは各々次式で与えられる。

$$\sum_M = \sum_E + E$$

$$\sum_D = \sum_G + \sum_E + \sum_{G \times E} + E$$

すなわち、1卵性双生児の組内変動行列 $\sum_M$ は環境変異に基く変動行列 $\sum_E$ と測定誤差に基く変動行列Eの和として与えられ、2卵性双生児の組内変動行列 $\sum_D$ は、遺伝変異に基く変動行列 $\sum_G$ 、環境変異に基く変動行列 $\sum_E$ 、遺伝と環境との交互作用に基く変動行列 $\sum_{G \times E}$ 、測定誤差に基く変動行列Eの和として与えられる。従って、何らかの方法でEを推定することができれば、上の2式より、 $\sum_G + \sum_{G \times E}$ および $\sum_E$ が得られ、これらの変動行列を相関分析することによって、遺伝成分(厳密には遺伝と環境の交互作用成分も含む)および環境成分の各々を構成する主要な因子を追求することができる。ところが、本研究の資料となった双生児調査では、2卵性双生児の組の数が少なかったので $\sum_D$ の推定値に信頼性が乏しく、比較的組の数の多い1卵性双生児の測定値より推定される $\sum_M$ の分析だけにとどめた。

ところで、Eの推定法としては種々の方法が考えられる。例えば、同一個体を2度づつ測定し、これらの測定値の組内変動行列を求めるのも1つの方法であろう。しかし、本研究では、その目的に利用できる測定値が与えられていないので、一応Eを考慮しないことにした。もっとも、任意の2つの変量間にみられる測定誤差に基く共変動を0と仮定すれば、誤差分散は各変量固有の因子(特殊因子)に主として関係し、共通因子を分析の対象とする因子分析においては、分析結果には大きな影響がないものと考えられる。

なお、分析にあたっては、 $\sum_M$ を次の方法によ

って規準化し、相関行列 Σ_{MC} として、これを因子分析した。

$$\Sigma_{MC} = \Sigma_M^{-\frac{1}{2}} \Sigma_M \Sigma_M^{-\frac{1}{2}}$$

ただし、 $\Sigma_M^{-\frac{1}{2}}$ は Σ_M の各対角要素の平方根の逆数を対角要素とし、他の要素を全て 0 とした行列である。

因子分析法は、まず主軸法¹²⁾によって共通因子の数とその因子荷重行列を求め、これをバリマックス回転した。プログラムは、それぞれ芝¹²⁾、浅野¹³⁾によるものに著者が一部手を加えて使用し、NEAC 2200 を用いて計算した。

結 果

男子 1 卵性双生児の成長期の 3 つの年齢階級における環境変異に基く変動行列を因子分析したところ、各年齢階級に共通する 4 つの因子が抽出された。表 2～4 は、各年齢階級についての、バリマックス回転後の因子荷重、固有値、コミュナリ

ティー、ユニークネスを示したものである。因子荷重の大きいものには * 印を付してある。

第 1 年齢階級 (7～9 歳) について (表 2)

第 1 因子は頭長と頭耳高に大きな荷重を示しており、頭蓋容積に關係する因子(“頭蓋容積因子”と仮称する)と考えられる。この因子の固有値は 1.88 (全変動に対する割合は 26.9%)である。第 2 因子は頭幅と頬骨弓幅に大きな荷重を持つので、幅徑に關係する因子(“幅徑因子”)と考えられる。その固有値は 1.60 (22.9%)である。第 3 因子は下顎角幅のみに大きな荷重をもつ因子(“下顎幅因子”)であり、その固有値は 1.22 (17.4%)である。従って、同じ顔面の幅徑であっても、頬骨弓幅と下顎角幅とは互に異なる因子に關係していることがわかる。第 4 因子は、容貌顔面高、形態顔面高に大きな荷重をもつ因子で、顔面の高さに關係する因子(“顔面高因子”)と考えられる。その固有値は、0.84 (12.0%)である。以上 4 つの共通因子の固有

Table 2. Factor loadings of age group 1

Factor Traits	F 1	F 2	F 3	F 4	c	u
Head length	.744*	-.151	-.239	.205	.675	.325
Head breadth	.057	.855*	-.116	-.137	.766	.234
Head height	.709*	.287	.355	.183	.745	.255
Bizygomatic	-.219	.747*	-.099	.379	.760	.240
Bigonial	-.010	.081	.938*	-.025	.887	.113
Phys. fac. h.	.026	-.017	-.440	.749*	.756	.244
Morph. fac. h.	.311	-.052	.010	.660*	.537	.466
Eigenvalue	1.88	1.60	1.22	0.84		

(c: communality, u: uniqueness)

Table 3. Factor loadings of age group 2

Factor Traits	F 1	F 2	F 3	F 4	c	u
Head length	-.363	.750*	-.027	-.112	.713	.287
Head breadth	.920*	.117	.161	-.114	.899	.101
Head height	.244	.786*	.066	-.048	.683	.317
Bizygomatic	.891*	-.090	-.073	.098	.816	.184
Bigonial	-.126	-.121	.027	.968*	.969	.031
Phys. fac. h.	-.141	-.295	.834*	.018	.803	.197
Morph. fac. h.	-.013	.390	.775*	-.086	.760	.240
Eigenvalue	1.88	1.70	1.31	0.85		

Table 4. Factor loadings of age group 3

Traits \ Factor	F 1	F 2	F 3	F 4	c	u
Head length	-.050	.218	.802*	-.145	.715	.285
Head breadth	.813*	-.216	-.041	.152	.732	.268
Head length	-.068	-.185	.816*	.158	.729	.271
Bizygomatic	.808*	.199	.104	.129	.720	.280
Bigonial	.156	-.030	.016	.896*	.828	.172
Phys. fac. h.	-.085	.860*	.045	.158	.774	.226
Morph. fac. h.	.227	.775*	-.024	-.266	.723	.277
Eigenvalue	1.74	1.56	1.32	0.87		

値の合計は5.54でありこれは全変動の79.1%である。従って、残る20.9%は各変量に固有な特殊因子および測定誤差に基く変動によるものである。

一方、コミュニティ（共通性）は、下顎角幅でやや大きく（0.89）、形態顔面高では逆にかなり小さい（0.54）他はどの項目も0.67～0.77の範囲内にある。

第2年齢階級（10～12歳）について（表3）

第1年齢階級にみられた因子と全く同じ4つの因子が、順序だけを異にして現れている。すなわち、第1因子は第1年齢階級の第2因子である“幅径因子”である。その固有値は1.88（26.9%）。第2因子は、同じく第1年齢階級の第1因子である“頭蓋容積因子”である。その固有値は1.70（24.3%）。第3因子は、第1年齢階級の第4因子である“顔面高因子”で、固有値は1.31（18.7%）である。第4因子は、第1年齢階級の第3因子である“下顎幅因子”で、固有値は0.85（12.1%）。以上4つの共通因子の固有値の合計は5.74で、これは全変動の81.9%である。

コミュニティは、下顎角幅が特に大きな値（0.97）を示している。

第3年齢階級（13～14歳）について（表4）

この年齢階級においても、前の2つの年齢階級でみられた4つの因子が、その順序だけを変えて現れている。しかもその順序は、第2年齢階級の第2因子（“頭蓋容積因子”）と第3因子（“顔面高因子”）とを入れ換えただけのものになっている。すなわち、第1因子は“幅径因子”で、その固有値は1.74（24.9%）、第2因子は“顔面高因子”で、

固有値は1.56（22.3%）、第3因子は“頭蓋容積因子”で、固有値は1.32（18.9%）、第4因子は“下顎幅因子”で、固有値は0.87（12.4%）である。また以上4つの共通因子の固有値の合計は5.49で、これは全変動の78.3%である。

次に見方を変えて、各因子の順位が年齢と共にどのように変化するかを注目してみると、非常に興味深い事実がわかる。まず、“頭蓋容積因子”についてみると、この因子は第1年齢階級では第1因子であるが、第2、第3年齢階級ではそれぞれ第2、第3因子となっている。すなわち、年齢の増加に伴って、より低い順位に移っている。次に“幅径因子”についてみると、第1年齢階級では第2因子であるが、第2、第3年齢階級ではともに第1因子である。これは、先の“頭蓋容積因子”とは全く逆の傾向で、年齢の増加に伴って、より高い順位に移っている。“下顎幅因子”は、第1年齢階級では第3因子であるが、第2、第3年齢階級では共に第4因子である。この移動方向は、“頭蓋容積因子”と同じである。“顔面高因子”は第1年齢階級では第4因子であるが、第2、第3年齢階級ではおのおの第3、第2因子であり、この移動方向は、“幅径因子”と同じく、高い順位への移動である。

要するに、環境変異に基く変動を構成する4つの共通因子には、“頭蓋容積因子”、“下顎幅因子”のように年齢と共に、その相対的寄与率が低下する傾向の因子群と、“幅径因子”、“顔面高因子”のように、逆に、上昇する傾向の因子群とがあるといえる。もっとも、“下顎幅因子”は第3、第4因

子と云った、いずれも固有値の小さい因子間での順位の移動であり、本研究の場合、標本数が比較的小さいことでもあるので、“頭蓋容積因子”と同じ傾向をもつとみなすことには問題がある。

また、4つの共通因子の固有値の合計の全変動に対する割合、云いかえれば、4つの共通因子による変動の全変動に対する寄与率は、各年齢階級でほぼ一定しており、80%内外である。

一方、コミュニティについてみると、3年齢階級を通じて、下顎角幅がとくに大きな値を示している他は、0.7~0.8内外にほぼ集中している。

考 察

一般に、身体形質に変異をもたらす環境要因としては、体外的ないし体内的にさまざまな要因が考えられるが、本研究でとりあげたのは双生児の組内の環境変異であるから、その環境変異をもたらす要因は、一般の人類集団に環境変異をもたらす要因に比べれば、はるかに限定されたものであると考えられる。しかも、対象とした形質は頭顔部だけであるから、その要因はさらに限定されよう。同じ時期に、しかも殆んど同じ家庭環境に育った双生児の形質に変異をもたらす環境要因として重要なものは何であろうか。本研究で用いた資料は、7~14歳の成長期のものであり、対象とした形質が頭顔部の形質であることを考え合せると、代謝機能など全身的要因と共に、咀嚼咬合機能に關係する食習慣は極めて重要な環境要因と考えられる^{23,24)}。

身体形質の表現型の変動のうち、環境に基く変動—環境成分—は、上記のようにさまざまな環境要因の作用の結果生じる訳であるが、本研究では、その環境に基く変動行列を分析して得られたのは、“頭蓋容積因子”、“幅径因子”、“顔面高因子”、“下顎幅因子”の4つの共通因子であった。ちなみに、本文で用いている「要因」は形質に影響を与える原因であり、「因子」は結果としての形質と同等のものである。さて、上の4因子のうち、“頭蓋容積因子”以外の因子は、直接または間接に咀嚼咬合機能に關係している。すなわち、“幅径因

子”は頭幅と頬骨弓幅に特に密接に關係する因子であるが、この2つの形質、とくに後者は、側頭筋の発達と密接な關係がある。まだ“顔面高因子”は文字通り顔面の高さに關係した因子であるが、顔面の發育には、咀嚼咬合の刺激が重要な要因であると考えられる。WATT and WILLIAMS²³⁾、MOORE²⁴⁾らはラットを用いて、顔および頭蓋の發育に咀嚼咬合が重要な要因として働いていると報告している。また、“下顎幅因子”は主として下顎角幅に關係する因子であるが、下顎角幅は咀嚼咬合に關係する筋のうち、下顎枝より下顎骨体部にかけて付着する筋によってその發育は強く影響されよう。

以上のように考えると、頭顔部の形質の環境変動を構成する因子群と、その形質の成長發育とはかなり密接な關係があるのではないかと思われる。かりに、成長速度が大きい時期の形質では環境要因による影響を受け易いといったことがあるとすれば、逆に固有値の大きい因子に關連する形質では、成長速度がその時期で大きいと云えよう。この仮定に基けば、因子パターンの年齢的变化は次のように説明されよう。すなわち、7~9歳までは頭蓋容積に關係する形質の成長速度が大きい、10歳以上では顔面形質など咀嚼咬合機能に關係する形質の成長速度が次第に大きくなり、頭蓋容積のそれを凌駕するようになる。ところが実際には、平均値でみるかぎり、本研究の資料についても、GOLDSTEIN⁶⁾の研究についても、頭部と顔部の成長には、7~9歳で成長速度の交代が起ると云う現象は想定できない。もっとも、頭部は顔部に比して早く(14~15歳)成長を終ると云われているので⁶⁾、あるいはこのことが何ならかの關係を持つのかもしれない。いずれにしても、環境変動を構成する因子と成長速度とは關係があるとしても単純なかたちではないといえる。

従って、本研究で得られた因子パターンの年齢的变化については、次のような結論にとどめておくのが適當であろう。7~9歳の年齢層では、頭蓋容積に關係する形質が、咀嚼咬合に關係する形質よりも環境要因に影響されやすいが、10歳以上

の年齢層では、その関係は逆転して、咀嚼咬合に関係する形質の方が頭蓋容積に関係する形質よりも、環境要因に影響されやすくなる。その場合、環境要因に影響されやすくなる原因としては、一般に成長速度の増加が考えられるが、そのことを積極的に支持するデータは得られていない。

なお、各測定項目に対するコミュニティを各年齢階級についてみると、下顎角幅が特に大きな値を示していたが、このことの理由は、共通因子とは云え殆んど下顎角幅のみに荷重をもつ“下顎幅因子”が下顎角幅の特殊因子と区別できなくなっているためではないかと思われる。

結 論

1 卵性双生児の組内変異より、環境に基く変動行列を導く方法を考案し、得られた行列を因子分析した。用いた資料は、7～14歳の100組の男子1卵性双生児の頭顔部の7項目の測定値で、全資料を3つの年齢階級に分け、それぞれについて分析し、次の結果を得た。

1) 3つの年齢階級とも、4つの共通因子が抽出された。これらの因子は、“頭蓋容積因子”、“幅径因子”、“顔面高因子”、“下顎幅因子”で、どの年齢階級でもこの4つの共通因子が抽出され、それ以外の因子はなかった。

2) 年齢階級によって因子の順序、すなわち固有値の大きさの順序が異なる。この因子パターンの年齢的变化には、次のような傾向がみられた。“頭蓋容積因子”は、高い年齢階級ほど因子の順位が下がり、逆に“幅径因子”と“顔面高因子”は高い年齢階級ほど因子の順位は上がる。

以上の分析結果に対し、頭顔部の成長発育と咀嚼咬合機能の問題を加味しながら考察した。

本研究にさいし、双生児の調査資料の使用をこころよくご承諾下さった、今は亡き元大阪大学教授小浜基次先生に深謝し、ご冥福をお祈り致します。また、再三懇切な助言とご協力を頂いた大阪大学医学部・欠田早苗助教授、吹田市民病院小児科・加藤昌太良博士に衷心より深謝致します。

文 献

- 1) ALANIS, L. B.: Environmental and genotype-environmental components of variability. I. Inbred lines. *Heredity*, 22: 387-397, 1966.
- 2) BAILEY, D. W.: A comparison of genetic and environmental principal components of morphogenesis in mice. *Growth*, 20: 63-74, 1956.
- 3) HIERNAUX, J.: Heredity and environment: Their influence on human morphology: A comparison of twin independent lines of study. *Am. J. Phys. Anthropol.*, 21: 575-589, 1963.
- 4) KEMPTHORNE, O. and OSBORNE, R. H.: The interpretation of twin data. *Am. J. Hum. Genet.*, 13: 320-339, 1961.
- 5) WILSON, R. S.: Bloodtyping and twin zygosity. *Hum. Hered.*, 20: 30-56, 1970.
- 6) GOLDSTEIN, M. S.: Changes in dimension and form of the face and head with age. *Am. J. Phys. Anthropol.*, 22: 37-89, 1936.
- 7) HOROWITZ, S. L., OSBORN, R. H. and DE-GEORGE, F. V.: A cephalometric study of craniofacial variation in adult twins. *Angle Orthodont.*, 30: 1-5, 1960.
- 8) HOROWITZ, S. L.: Clinical aspects of genetic research in dentistry. *J. Dent. Res.*, 42: 1330-1343, 1963.
- 9) SHAPIRO, B. L.: A twin study of palatal dimensions partitioning genetic and environmental contribution to variability. *Angle Orthodont.*, 39: 139-151, 1969.
- 10) 鎌田直茂: 双生児の頭顔部の類似度に関する研究とその方法. 人類学輯報, 20: 53-72, 1958.
- 11) 加藤昌太良: 生体計測よりみた双生児の類似度について. 人類学輯報, 22: 1-18, 1958.
- 12) 芝祐順: 相関分析法, 97-115頁, 東京大学出版会, 東京, 1970.
- 13) 浅野長一郎, 塩谷実: 多変量解析論, 123-178頁, 共立出版, 東京, 1966.
- 14) SEAL, H.: *Introduction to Multivariate Statistical Analysis for Biologists*, pp. 101-183, Methuen, London, 1968.
- 15) ANDERSON, T. W.: Classification by multivariate analysis. *Psychometrika*, 16: 31-51, 1951.
- 16) HOWELLS, W. W.: Factors of human physique. *Am. J. Phys. Anthropol.*, 9: 159-191, 1951.
- 17) HOWELLS, W. W.: The cranial vault: Factors of size and shape. *Am. J. Phys. Anthropol.*, 15: 19-48, 1957.
- 18) LANDAUER, C. A.: A factor analysis of the

- facial skeleton. *Hum. Biol.*, **34** : 239-253, 1962.
- 19) BROWN, T., BARRETT, M. J. and DARROCH, J. N. : Factor analysis in cephalometric research. *Growth*, **29** : 97-107, 1965.
- 20) KANDA, S. and KURISU, K. : Factor analysis of Japanese skulls. *Med. J. Osaka Univ.*, **18** : 1-9, 1967.
- 21) MARTIN, R. and SALLER, K. : *Lehrbuch der Anthropologie*, 3 Auflage, Bd. 1, S. 308-343, G. Fischer, Stuttgart, 1957.
- 22) RAO, C. R. : *Advanced Statistical Methods in Biometric Research*, pp. 236-272, John Wiley, New York, 1952.
- 23) WATT, D. G. and WILLIAMS, C. H. M. : The effects of the physical constituency of food on the growth and development of the mandible and maxilla in the rat. *Am. J. Orthodont.*, **37** : 895-928, 1951.
- 24) MOORE, W. J. : Masticatory function and skull growth. *J. Zool.*, **146** : 123-131, 1965.