

原 著

片側の大臼歯遠心移動に関する力学的解析

吉田 教 明 古賀 義之 小林 和 英

長崎大学歯学部歯科矯正学講座

Yoshida Noriaki, Koga Yoshiyuki and Kobayashi Kazuhide
Department of Orthodontics, School of Dentistry, Nagasaki Universityキーワード：非対称フェイスボウ，片側Ⅱ級不正咬合，パワーアームフェイスボウ，トランスパラルアーチ，
骨組構造解析

抄録：片側Ⅱ級不正咬合の治療には，非対称フェイスボウが有効であるが，副作用として側方力が生じ，Ⅱ級側の大臼歯を交叉咬合に導く危険性が示唆されてきた。本研究では，パワーアームフェイスボウと，副作用を引き起こす側方力を減弱させる目的で設計された2種類の非対称フェイスボウ装着時に，大臼歯に作用する力系を骨組構造解析を用いて算出し，比較検討を行った。さらに，副作用を伴わない，片側の大臼歯遠心移動を達成するための治療メカニクスについて検討した。

その結果，以下の結論が得られた。

非対称フェイスボウのデザインを変えることで，側方力の左右側大臼歯への分配比を変化させることはできたが，両側大臼歯に発生する側方力の和は不変であることが明らかとなった。非対称フェイスボウと頭頸部固定の組み合わせによる矯正力伝達システムでは，側方力の発生は不可避で，Ⅱ級側の大臼歯交叉咬合を引き起こす可能性を完全に取り除くことは不可能と考えられた。側方への副作用を伴わない片側の大臼歯遠心移動を達成するためには，対称フェイスボウとトランスパラルアーチの併用が推奨された。

(Orthod. Waves 60(1) : 1~6, 2001)

**Mechanical analysis and consideration
for unilateral molar distalization**

Abstract : The asymmetric face-bow is an effective, widely used appliance for asymmetric molar distalizations in the treatment of unilateral Class II malocclusions. However, it has been proven that the effective asymmetric face-bows also generate undesirable lateral forces which tend to move the molar which receives the greater distal force into a lingual cross-bite. By using the framed structure analysis, force systems acting on the molars under the application of some designs of the asymmetric face-bow were calculated. Also, an appropriate method to achieve unilateral molar distalization was discussed.

It was concluded as follows ;

The proportion of lateral forces acting on individual molars could be controlled by changing the design of asymmetric face-bows, whereas the net lateral force on both molars remains unchanged. The force delivery system with a combination of an asymmetric face-bow and a neck strap or a head cap unavoidably produces lateral forces and the resultant transversal side effects are clinically critical. To achieve a true unilateral molar distalization without any side effects, the use of a symmetric face-bow in combination with a transpalatal arch seems recommendable.

(Orthod. Waves 60(1) : 1~6, 2001)

緒 言

片側Ⅱ級不正咬合の治療において、顎外固定法を利用する際には、左右側大臼歯に異なる大きさの遠心への力を加える必要がある。これには、非対称フェイスボウが有効であり、これまでにさまざまなデザインが考案、研究されてきた。アウターボウの長さを非対称にしたパワーアームフェイスボウは、市販のフェイスボウから容易に作製できることから、矯正臨床に幅広く応用されている。この場合、長い方のアウターボウがⅡ級側を向くようにフェイスボウを挿入することにより、他側と比較して、より大きな遠心力が大臼歯に伝達される。しかし、副作用として側方力が生じ、Ⅱ級側の大臼歯の舌側移動により、交叉咬合を引き起こす可能性が指摘されている¹⁾。また、Hershey ら²⁾や Breier ら³⁾も、側方力の発生により両側大臼歯が一塊として同一方向に変位し、大きな遠心力が作用する大臼歯側では交叉咬合傾向、小さな遠心力の生じる大臼歯側では鉗状咬合傾向を生じると報告している。この副作用を排除するためのフェイスボウ^{4,5)}も考案され、臨床応用されているが、側方力を完全に除去することは難しいと考えられている。

非対称フェイスボウの作用効果に関する研究には、剛体の静力学に基づいた理論解析^{6,7)}、実験的解析^{2,3,5,8~10)}、骨組構造解析を用いた数値解析^{11,12)}、生体での歯の変位測定法による解析¹³⁾などが行われてきた。しかしながら、非対称フェイスボウのデザインが左右側大臼歯に作用する遠心力、側方力およびモーメントに及ぼす影響について、解析結果に大きなバラツキがみられる。どのデザインが最も効果的に左右非対称な大臼歯の遠心移動を達成するか、あるいは副作用が小さいかについての一致した結論はいまだに得られていない。

著者らは、前報¹²⁾においてアウターボウの一侧を他側に比べて長くした場合と側方拡大した場合の左右側大臼歯に働く力系の変化を検討した。今回、基本形のパワーアームフェイスボウと側方力を減弱させる目的で設計された非対称フェイスボウ装着時の両側大臼歯に働く遠心への力、側方力およびモーメントを骨組構造解析法を用いて算出し、解析結果を比較検討した。さらに、片側の大臼歯遠心移動を達成するための治療メカニクスについて考察した。

材料ならびに方法

非対称フェイスボウに荷重を与えた時の大臼歯に作用する力とモーメントは、平面曲げ系構造解析プログラム (FEMBE)¹⁴⁾を用いて算出した。解析モデルは、

3 M ユニテック社製のフェイスボウより改変し、35 節点、34 要素に分割した(図 1)。より大きな遠心移動が必要な大臼歯側のアウターボウを 25 mm 延長したものを、パワーアームフェイスボウとした(図 1 A)。以下、より大きな遠心への力を生じる大臼歯側を大荷重側、小さな遠心への力を生じる大臼歯側を小荷重側とする。次に、パワーアームフェイスボウの副作用を減弱させると考えられる、2 種類のデザインをモデル化した。パワーアームフェイスボウの小荷重側のインナーボウ後端にインセットを付与したものを、片側インセットフェイスボウとし(図 1 B)、アウターボウとインナーボウの鑑着部を中央から小荷重側へ偏位させたものを、鑑着部偏位フェイスボウとした(図 1 C)。3 種類のフェイスボウにおいて、初期条件での顎外力の合成ベクトルの大きさと方向が同一となるように、インナーボウ後端の節点 1 と 27、アウターボウ後端の節点 31 と 35 の座標を同じ位置に設定した。片側インセットフェイスボウにおいて、インセットの付与に伴い、インナーボウの節点 3~9 をわずかに外側に移動した。また、鑑着部偏位フェイスボウにおいて、鑑着部の移動に際し、アウターボウの節点 28, 29, 32 の位置を基本形のパワーアームフェイスボウの位置から変更した。

フェイスボウモデルは荷重範囲内では、弾性体と考え、ヤング率を 20,500 kg/mm²に設定し、3 種類の材料で構成した。節点 1~7, 21~27 のインナーボウ後方は直径 1.14 mm、断面二次モーメント 0.0829 mm⁴に設定し、節点 7~12, 16~21 のインナーボウ前方部とアウターボウは直径 1.83 mm、断面二次モーメント 0.5505 mm⁴、節点 12~16 の鑑着部は幅 3.65 mm、厚さ 2.39 mm の楕円形とし、断面二次モーメントを 5.707 mm⁴に設定した。また、インナーボウ後端の節点 1 と 27 は、二次元の変位および回転の 3 自由度を拘束した。アウターボウ後端の節点 31, 35 に与える外力は 3 N とした。荷重方向は咬合平面と平行に、頭部外形に接するように設定し、荷重ベクトルと正中矢状面とのなす角度を、大荷重側において 45°、大荷重側で 27°とした。

結 果

大臼歯(節点 1 および 27)に働く遠心への力および非対称効果を表 1 に示す。大荷重側に働く遠心への力の、左右側の合計に対する比率を百分率で表し、非対称効果とした。この値が大きいほど、左右側大臼歯に非対称な遠心への力が分配されることになる。以下、非対称フェイスボウの遠心への非対称な作用効果を評価する際には、この値を用いる。

それぞれの非対称フェイスボウのアウターボウ後端

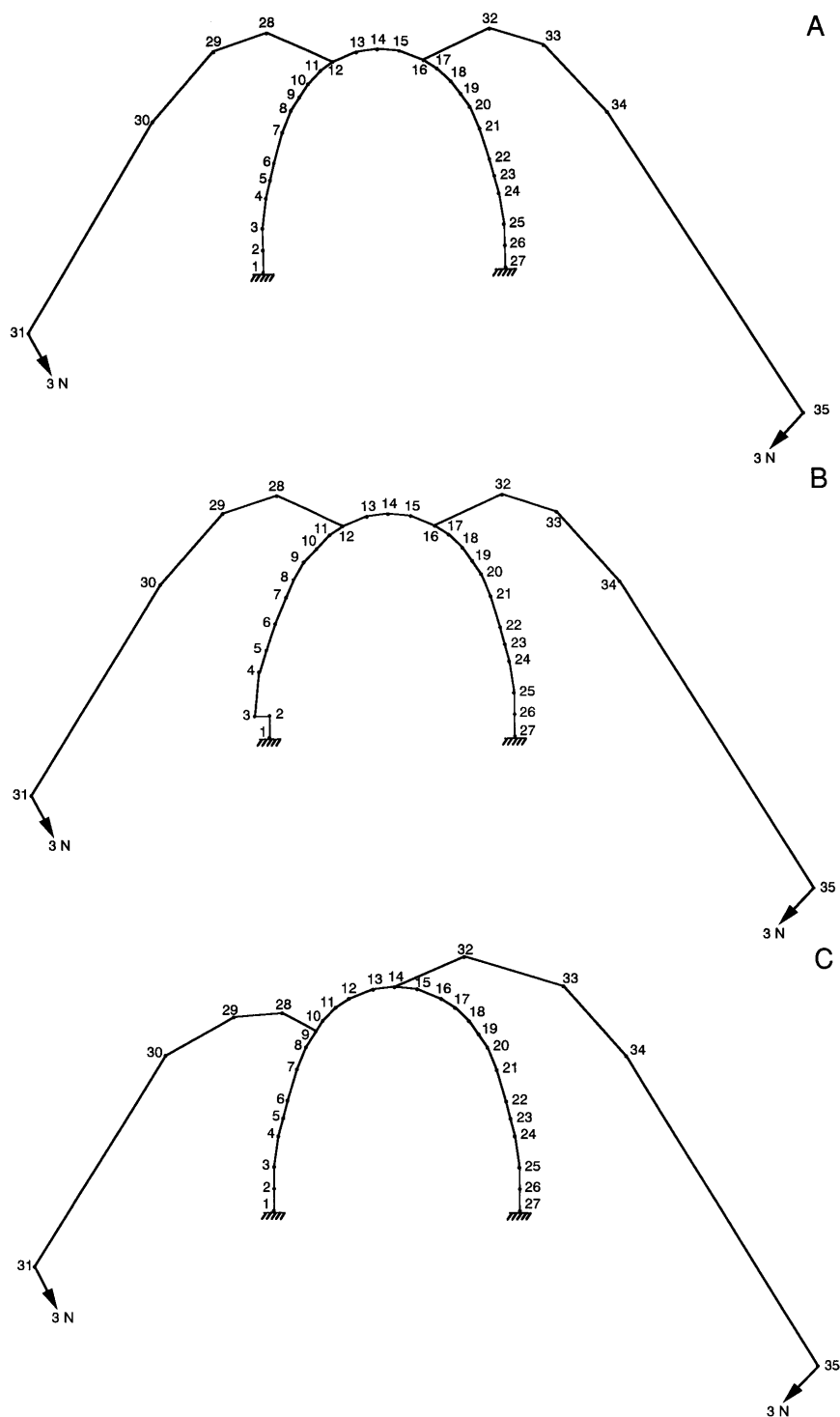


図 1 非対称フェイスボウの骨組構造解析モデル

A: パワーアームフェイスボウ, B: 片側インセットフェイスボウ, C: 鑢着部偏位フェイスボウ
全解析モデルは 35 節点, 34 要素に分割し, インナーボウ後端の節点 1 と 27 の二次元の変位および回転の 3 自由度を拘束した。

に 3 N の荷重を与えた場合に, 大荷重側の大臼歯には, 3.52~3.55 N の遠心への力, 小荷重側の大臼歯には, 1.37~1.38 N の遠心への力が生じ, 小荷重側に比

べて大荷重側で, 有意に大きな遠心への力が生じた。非対称効果も 72.0~72.2%と, 十分に大きな値を示した。また, 3 種類のフェイスボウ間で両側大臼歯に生じ

表 1 大臼歯に働く遠心への力および非対称効果 (3 N 荷重時)

	遠心への力 (N)		非対称効果 (%)
	小荷重側	大荷重側	
	D _L	D _H	$\frac{D_H}{D_L + D_H} \times 100$
パワーアームフェイスボウ	1.37	3.52	72.0
片側インセットフェイスボウ	1.37	3.55	72.2
鑑着部偏位フェイスボウ	1.38	3.54	72.0

表 2 大臼歯に働く側方力および側方効果 (3 N 荷重時)

	側方力 (N)		側方効果
	小荷重側	大荷重側	
	L _L	L _H	L _L + L _H
パワーアームフェイスボウ	+0.66	-0.09	0.75
片側インセットフェイスボウ	+0.63	-0.12	0.75
鑑着部偏位フェイスボウ	+1.10	+0.35	0.75

(+) 頬側 (-) 舌側

る遠心への力および非対称効果には、ほとんど差が認められなかった。

大臼歯 (節点 1 および 27) に働く側方力および側方効果を表 2 に示す。側方効果は大荷重側から小荷重側へ向かう方向を正とした側方力ベクトルの左右側の和で、両側大臼歯を一塊として側方へ移動させようとする効果、すなわち、非対称フェイスボウの副作用の大きさを表す。

パワーアームフェイスボウにおいては、大荷重側の犬歯に 0.09 N の舌側方向の力、小荷重側の犬歯には、0.66 N の頬側方向の力が生じた。片側インセットフェイスボウにおいては、大荷重側の犬歯に 0.12 N の舌側方向の力が生じ、パワーアームフェイスボウよりもわずかに大きな値を示した。小荷重側においても、パワーアームフェイスボウと同様に頬側方向の力が生じたが、0.63 N とわずかに小さな値を示した。鑑着部偏位フェイスボウでは、他のフェイスボウとは反対に、大荷重側の犬歯には頬側方向の力が作用した。小荷重側にも、他のフェイスボウと比較して、大きな頬側方向の力が生じた。左右側それぞれの大臼歯に生じる側方力は、3 種類のフェイスボウ間でバラツキが認められたが、側方効果を示す値は一致していた。

考 察

本研究では、片側Ⅱ級不正咬合の改善に用いられる非対称フェイスボウのうち、一般に広く臨床応用されているパワーアームフェイスボウと、副作用を引き起

こす側方力を減弱させる目的で設計された 2 種類の非対称フェイスボウ装着時に、犬歯に与えられる力系を骨組構造解析を用いて算出した。

その結果、両側犬歯に生じる遠心への力および非対称効果は、3 種類のフェイスボウ間でほぼ一致した値を示した。非対称フェイスボウの解析には、Haack⁶⁾が剛体の静力学理論を用いて行ったものがあり、顎外力の合成ベクトルの延長線が左右側犬歯を結んだ線分を内分する逆の比率で、遠心力が左右犬歯に分配されると報告している。本研究における解析結果も理論値とほぼ一致し、非対称フェイスボウ装着時の両側犬歯に生じる遠心力は、剛体の静力学理論を用いてほぼ正確に算出されると考えられた。フェイスボウが剛体であれば、アウターボウはあくまで、荷重を犬歯に伝達するためのアームであり、両側犬歯に作用する遠心への力の大きさは、アウターボウの外形には関係なく、作用点である犬歯に対する顎外力のベクトルおよびアウターボウ後端の位置関係により決定される。フェイスボウの弾性により、荷重時にアウターボウ後端が変位し、荷重方向が変化することによる力系への影響が予想されたが、3 種類のフェイスボウ間において、遠心へ生じる力の差はわずかにすぎなかった。したがって、片側インセットフェイスボウと鑑着部偏位フェイスボウモデル上の数節点を便宜上、基本形のパワーアームフェイスボウの位置から移動した影響も無視できるものと考えられた。

両側犬歯に生じる側方力は、遠心への力と比較すると、各フェイスボウ間で大きなバラツキが認められ

た。パワーアームフェイスボウにおいて、大荷重側の大臼歯には比較的小さな舌側方向の力が生じた。一方、小荷重側の大臼歯には、大荷重側と比較して大きな力が頬側方向に発生した。片側インセットフェイスボウにおいては、パワーアームフェイスボウと同じ傾向を示したものの、大荷重側の大臼歯に与えられる舌側方向の力は、わずかに大きな値を示し、小荷重側では逆に、わずかに小さな頬側方向の力を生じた。インナーボウ後端にインセットを与えると、側方拡大力が弱められることが、理論解析¹⁵⁾により明らかにされており、小荷重側に生じる頬側方向の力を減弱する目的で、片側インセットフェイスボウが設計された。その結果、予測通り小荷重側に発生する頬側方向の力は減少したものの、大荷重側に生じる舌側方向の力が同じ変化量だけ増加し、両側大臼歯に及ぼされる副作用の大きさを表す側方効果としては変化しなかった。

非対称フェイスボウ使用時に望ましくない副作用として、側方力が生じることは、やはり Haack ら⁹⁾が剛体の静力学理論を用いて明らかにしている。この中で、側方力は大荷重側から小荷重側の方向に発生し、大荷重側の大臼歯には舌側方向、小荷重側の大臼歯には頬側方向の力が1:1の大ききで分配されると結論づけているものの、算出課程は明示されていなかった。実際には、左右側大臼歯に生じる側方力を求める力の釣り合い式は不定方程式となり、彼らが用いた静力学理論では解を決定できない。本研究において、側方力の比率は1:1ではないこと、フェイスボウのデザインにより、側方力の左右側大臼歯への分配比は変化することが明らかとなった。

鑑着部偏位フェイスボウでは、他のフェイスボウとは反対に、頬側方向の力が大荷重側の大臼歯に加わった。小荷重側にも、他のフェイスボウと比較して、大きな頬側方向の力が生じた。対称フェイスボウにおいて、インナーボウとアウターボウの接合部を近心に移動すると、インナーボウアーチが拡大し、大臼歯に作用する頬側方向の力が増加することを著者ら¹⁶⁾が報告した。そこで鑑着部偏位フェイスボウは、交叉咬合を生じる危険性を低減させるため、大荷重側の大臼歯に頬側方向の力が作用するように、鑑着部を中央から小荷重側へ偏位させるデザインとした。解析結果は予測通り、パワーアームフェイスボウ装着時に大荷重側に生じていた舌側方向の力が抑えられ、逆に頬側方向の力が発生した。しかし一方では、その変化分だけ小荷重側には、より大きな頬側方向の力が生じた。

側方効果を示す値は3種類のフェイスボウ間で一致した。力学的には、一塊としての両側大臼歯に与えられる力系は、頭部外形とアウターボウ後端の位置関係により決定される。このため、インナーボウへのインセットの付与などの内部構造の変化により、左右側大

臼歯に分配される側方力の比率を変えることはできても、両側大臼歯に発生する側方力のベクトルの和である側方効果を変化させることができないことは自明である。

従来より、非対称フェイスボウ装着時の側方力による影響を減弱させることを目的として、さまざまなデザインが開発されてきた。Kaprelian⁴⁾や Sander⁵⁾は、小荷重側の大臼歯に生じる頬側への力を相殺するために、同側のインナーボウの大臼歯近心部に蝶番を付加したデザインを考案した。しかし、小荷重側の蝶番によって緩衝される頬側への力は、大荷重側の大臼歯へ反対方向の舌側への力として畳重され、副作用を増大させることが生体での歯の変位測定法による研究¹³⁾で明らかとなっている。以上より、非対称フェイスボウと頭頸部固定の組み合わせによる矯正力伝達システムでは、側方力の発生は避けられなかった。II級側の大臼歯交叉咬合を引き起こす可能性を完全に取り除くことは不可能と考えられた。

片側II級不正咬合の治療には、大臼歯の頬舌的な咬合関係を崩す危険性のある非対称フェイスボウを用いるよりも、むしろ対称フェイスボウとトランスパラタルアーチの併用が望ましい。トランスパラタルアーチの片側性の活性化により、左右大臼歯に同じ大きさで方向が逆の一对の力を発生させることができる。すなわち、トランスパラタルアーチの小荷重側脚部にディスタルトーインバンドを付与する。この時、バンドを付与した小荷重側の大臼歯には近心力、大荷重側の大臼歯には同じ大きさの遠心力が生じる。さらに対称フェイスボウの装着により生じる遠心力が、小荷重側の大臼歯に働く近心力を相殺し、大荷重側の大臼歯に生じる遠心力に付加される。このようにして、側方への副作用を伴わない片側の大臼歯遠心移動が達成されると考えられる。

稿を終えるにあたり、フェイスボウの構造解析にご協力いただきました佐賀大学理工学部都市工学科・佐々木広光技官ならびに荒牧軍治教授に深く感謝いたします。

本論文の要旨は、第55回日本矯正歯科学会（1996年10月、福岡）において発表した。

文 献

- 1) Fields, H. W. : Treatment of nonskeletal problems in preadolescent children, in : Contemporary orthodontics, ed. Profitt, W. R., St Louis, 1986, CV Mosby, 312-353.
- 2) Hershey, H. G., Houghton, C. W. and Burstone, C. J. : Unilateral face-bows : A theoretical and laboratory analysis, Am J Orthod 79 : 229-249, 1981.

- 3) Breier, M., Drescher, D. and Bourauel, C. : Laterale und transversale Kräfte beim indirekten Headgear und seinen Modifikationen, Fortschr Kieferorthop 54 : 83-90, 1993.
- 4) Kaprelian, G. : An effective unilateral facebow, J Clin Orthod 16 : 60-61, 1982.
- 5) Sander, F.G. : Die Biomechanik des asymmetrischen Headgears, Prakt Kieferorthop 4 : 293-304, 1990.
- 6) Haack, D. C. and Weinstein, S. : The mechanics of centric and eccentric cervical traction, Am J Orthod 44 : 346-357, 1958.
- 7) Oosthuizen, L., Dijkman, J. F. P. and Evans, W. G. : A mechanical appraisal of the Kloehe extraoral assembly, Angle Orthod 43 : 221-232, 1973.
- 8) Jacobson, A. : A key to the understanding of extraoral forces, Am J Orthod 75 : 361-386, 1979.
- 9) Martina, R., Viglione, G. and Teti, R. : Experimental force determination in asymmetric face-bows, Eur J Orthod 10 : 72-75, 1988.
- 10) Wichelhaus, A., Sander, F. G. and Inglezos, E. : Wie effektiv ist der asymmetrische Headgear in der praktischen Anwendung?, Fortschr Kieferorthop 56 : 327-338, 1995.
- 11) Nobel, P. M. and Waters, N. E. : Investigation into the behavior of symmetrically and asymmetrically activated face-bows, Am J Orthod Dentofac Orthop 101 : 330-341, 1992.
- 12) 吉田教明, 古賀義之, 阿部理砂子, 小林和英, 佐々木広光, 荒牧軍治 : 非対称フェイスボウによる大臼歯遠心移動の左右差に関する力学的研究, 日矯歯誌 57 : 240-246, 1998.
- 13) Yoshida, N., Jost-Brinkmann, P.-G., Miethke, R.-R., *et al.* : An experimental evaluation of effects and side effects of asymmetric face-bows in the light of in vivo measurements of initial tooth movements, Am J Orthod Dentofac Orthop 113 : 558-566, 1998.
- 14) 荒牧軍治, 黒木健実 : マイコン構造力学演習, 初版, 東京, 1984, 理工図書, 109-134.
- 15) Baldini, G., Haack, D. C. and Weinstein, S. : Bilateral buccolingual forces produced by extraoral traction, Angle Orthod 51 : 301-318, 1981.
- 16) 吉田教明, 古賀義之, 阿部理砂子, 小林和英, 佐々木広光, 荒牧軍治 : 顎外固定装置においてフェイスボウのデザインが大臼歯に作用する側方力およびモーメントに及ぼす影響, 日矯歯誌 56 : 149-158, 1997.

主 任 : 小 林 和 英 教 授 2000 年 8 月 9 日 受 付

連絡先 : 吉 田 教 明
 長崎大学歯学部歯科矯正学講座
 〒 852-8588 長崎市坂本 1-7-1