

ヒト下顎骨に作用する力の材料力学的解析  
-関節突起にかかる顎関節反力の  
平衡側と作業側の負荷割合の変動の影響-

**Analysis of internal and external forces of a human mandible invested by strength of materials: influence of variation of loading ratio of balancing side to working side in temporomandibular joint reaction force upon condylar process**

草野雅章、北山若紫、山本一彦、山本伸介、池田悦子、村上和宏、倉木美穂、桐田忠昭

Masaaki KUSANO, Wakashi KITAYAMA,  
Kazuhiko YAMAMOTO, Shinsuke YAMAMOTO, Etsuko IKEDA,  
Kazuhiro MURAKAMI, Miho KURAKI, Tadaaki KIRITA

**Abstract:** Using a human mandibular model with whole premolar and molar zone oblique to sagittal plane (the angle:  $\theta = \tan^{-1}(3/4)$ ), influence of variation of loading ratio of balancing side to working side in temporomandibular joint reaction force upon condylar process (the ratio:  $\gamma$ ) as to external forces, that is to say, masticatory muscle forces, temporomandibular joint reaction forces and bite forces with teeth and internal forces produced by the external forces, was analyzed by strength of materials. The result obtained is as follows: the former value is in case of biting with the lower right first molar and the latter, the lower right premolar, respectively.

1. External forces

(1) In case of  $\gamma = 0$ , bearing ratio of balancing side to working side (the ratio:  $\alpha$ ) was around 0.01 ~ 0.02.

(2) In case of  $\gamma = 0.5$ ,  $\alpha$  was around 0.36 ~ 0.4.

(3) In case of  $\gamma = 1$ ,  $\alpha$  was around 0.64 ~ 0.72.

(4) In case of  $\gamma = 1.5$ ,  $\alpha$  was around 0.87 ~ 1.

(5) In case of limit value of  $\gamma$  approaching infinity,  $\alpha$  was around 3.31 ~ 4.62.

2. Internal forces

(1) The value of shearing force was decreased according to an increase of  $\gamma$ . The largest value of shearing force was 640 N (in the molar zone) ~ 460N (in the premolar and molar zone) in  $\beta = 1$  and  $\gamma = 0$ .

(2) At masticatory site, the value of bending moment increased according to an increase of  $\gamma$ . On the other hand, at balancing site, the value decreased. The largest absolute value of bending moment was 10720 N·mm (in the molar zone at balancing site in  $\beta = 1$  and  $\gamma = 1.5$ ) ~ 10680 N·mm (in the molar zone at masticatory site in  $\beta = 1$  and  $\gamma = 0$ ).

(3) The value of torsion moment increased according to an increase of  $\gamma$  in both anterior and posterior zone. The largest value of torsion moment was 260 ~ -170 N·mm at working site, 4550 ~ 3690 N·mm in the anterior zone and 1950 ~ 1670 N·mm at balancing site in  $\beta = 1$  and  $\gamma = 1.5$ .

**Keywords:** Oromaxillofacial biomechanics, Human mandibular mechanics, Temporomandibular joint, Masticatory function, Strength of materials

1. 緒言

顎顔面領域の臨床において、骨接合プレートとスクリューが受ける力の解析は重要であり、特に下顎骨に作用する力の解析は必須である。しかし、それに関する研究は少ない。片側咬合の場合でも、関節

突起にかかる顎関節反力は(1)作業側のみ<sup>(1)</sup>、(2)作業側優位<sup>(2,3)</sup>、(3)両側均等<sup>(4)</sup>、(4)平衡側優位<sup>(5,6)</sup>、(5)平衡側のみ<sup>(7)</sup>などいろいろあり統一の見解が得られていない。そのようなケースがあり得るのか、さらに、それらが咀嚼段階とどのような関連性があるのか、はこれまでのところ解明されているとは言い難い。その原因は、顎関節反力が実測できないことによる。さらに顎関節反力を生み出す原動力である咀嚼筋力も実測できないことにもよる。しかし、本研究では、著者が開発した咀嚼筋力、顎関節部における反力、咬合力によって下顎骨に発生する内力のうち剪断力、曲げモーメント、ねじりモーメントに関して材料力学的に解析する方法<sup>(8)</sup>によってそれらを求めることが可能である。本研究では、この方法と下顎骨の臼歯部と正中矢状面が傾斜しているモデルの解析方法<sup>(9)</sup>を用いて、関節突起にかかる顎関節反力の平衡側と作業側の負荷割合を変動させてその影響を検討することによって上記の問題を解析するとともに、内力に与える影響も検討した結果、興味ある知見が得られたので報告する。

## 2. 研究方法

### (1) 平衡側と作業側の顎関節反力の負荷割合

平衡側と作業側の顎関節反力の比  $\gamma$  を 0、0.5、1、1.5 と変動させた。

### (2) 解析モデル

下顎骨の形状と寸法は、下顎骨のドライ・スカルをもとにして計測したデータをベースとした。

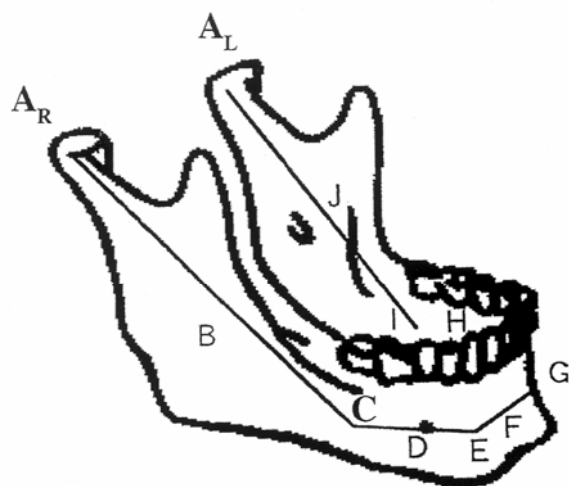


Fig. 1 Analysis model of a human mandible. A<sub>R</sub>: Right condyle region. B: Middle point of right ramus. C: Lower right second molar region. D: Lower right premolar region. E: Lower right canine region. F: Central incisor region. G: Lower left canine region. H: Lower left premolar region. I: Lower left second molar region. J: Middle point of left ramus. A<sub>L</sub>: Left condyle region.

Table 1 Magnitude of bite forces.

Point of application	Premolar	Molar
Value (N)	480	660

下顎骨の形状はビームを連結したものとした。下顎骨の臼歯部と正中矢状面とのなす角  $\theta$  は、下顎骨のドライ・スカルを実測した角度に近い角度として  $\theta = \tan^{-1}(3/4) \doteq 37$  度とした。以下の左右方向および前後方向の距離も下顎骨のドライ・スカルの実測したデータを参照しながら設定した。実際の生体の場合は、必ずしも有限小数ではなく無限小数になる場合もあるが、その場合も対応可能である。左右方向の距離としては、左右中切歯の中間点と犬歯までの距離を 12.5 mm、左右中切歯の中間点と側切歯までの距離を 7.5 mm とした。左右方向の距離として、犬歯と第二大臼歯までを 24 mm、第二大臼歯から下顎枝の中間点までを 10 mm、下顎枝の中間点から下顎頭までを 10 mm とした。臼歯部方向の距離としては、犬歯と小白歯間距離を 16 mm、小白歯と第一大臼歯間距離を 8 mm、小白歯と下顎枝前端までの距離を 24 mm、第一大臼歯と下顎枝の前端までの距離を 16 mm とした。前後

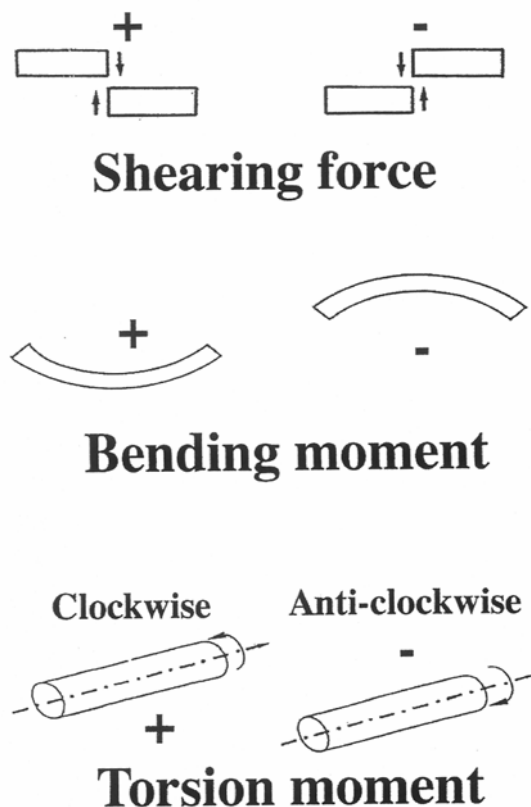


Fig. 2 Sign of direction of shearing force, bending moment and torsion moment.

$$(R_1, R_2, W_1, W_2, W_3) = (-721.6, -360.8, 1281.30, 461.10, -660)$$

+Upward -Downward Unit:N

$$\theta = \tan^{-1}(3/4), \beta = 1, \gamma = 0.5$$

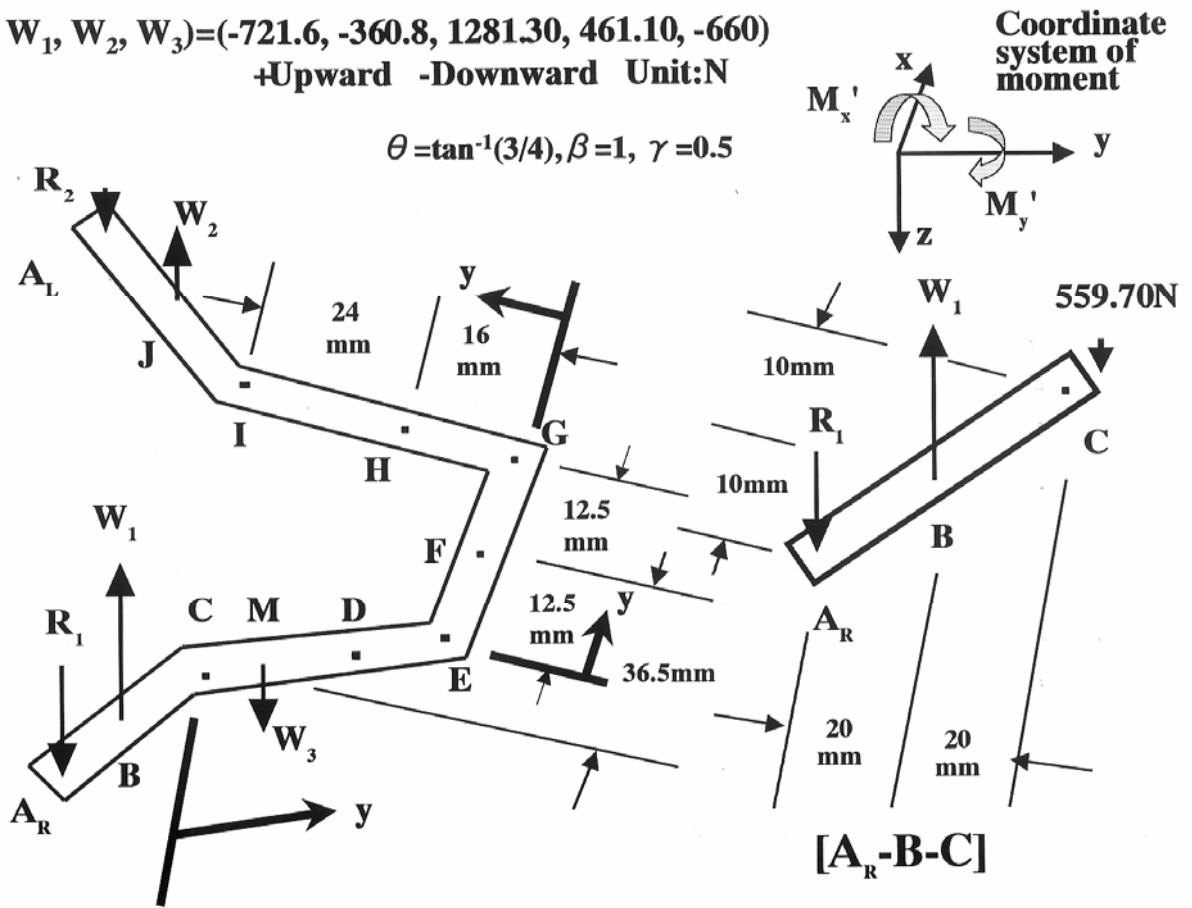


Fig.3 Forces acting upon a human mandible biting with the lower right first molar ( $\theta = \tan^{-1}(3/4)$ ,  $\beta = 1$ ,  $\gamma = 0.5$ ). Left: External forces. Right: Forces from the right condylar head to the lower right second molar. Following calculation leads  $M_x'(C)$  and  $M_y'(C)$ . Unit is N·mm.

$$M_x'(C) + R_1 \times 40 + W_1 \times 20 = 0 \quad \therefore M_x'(C) = -M_x'(C)$$

$$M_y'(C) - R_1 \times 20 - W_1 \times 10 = 0 \quad \therefore M_y'(C) = -M_y'(C)$$

Where  $R_1$  is a temporomandibular joint force on the right side and  $W_1$  is a resultant force of all mandibular elevator muscles taken together on the right side.

方向の距離として、第二大臼歯から下顎枝の midpoint までを 20 mm、下顎枝の midpoint から下顎頭までを 20 mm とした (Fig. 1)。数値は外力および内力の剪断力・曲げモーメント・ねじりモーメントの数値に揃えるため小数点以下 2 桁まで記載した。小数点以下 1 桁、2 桁がゼロとなる場合はそのゼロを記載しないこととした。

### (3) 解析した状態

片側臼歯部で噛む 2 種類の場合 (右側第一大臼歯、右側小臼歯) を設定した。

### (4) 座標軸の設定方法

材料力学的解析は、下顎の右側下顎頭部  $A_R$  を出発点として、右側第二大臼歯部 C、右側小臼歯部 D、右側犬歯部 E、中切歯部 F、左側犬歯部 G、左側小臼歯部 H、左側第二大臼歯部 I の順番に行い左側下顎頭部  $A_L$  を終点とした。座標軸は右手系を採用した。すなわち右側を y 軸の正方向に、下側を z 軸の正方向に設定し、解析の対象を見る方向と x 軸の方向とを一致させるために紙面の裏側方向を x 軸の正方向に

設定した。この座標系を、解析する対象とともに移動させた。y 軸の正方向は、 $A_R$ -C 間は下顎骨の前側、C-D-E 間は C から E に向かう方向、E-F-G 間は下顎骨の左側、G-H-I 間は G から I に向かう方向、I- $A_L$  間は下顎骨の後側である (Fig.1)。

### (5) 咀嚼筋による力の方向と作用点

下顎を挙上させる咀嚼筋として、咬筋、内側翼突筋、側頭筋を採用し、各筋の方向と咀嚼活動における負担割合を考慮して、それらの合力は垂直上方とした。合力の作用点は、下顎枝の midpoint とした。

### (6) 咬合力と咬合力変動率

右側第一大臼歯と右側小臼歯の基準となる咬合力は 660 N と 480 N とした (Table 1)<sup>(10)</sup>。本研究では平衡側と作業側の顎関節反力の比  $\gamma$  を 0, 0.5, 1, 1.5 と変動させた状態において、解析する咬合力と基準となる臼歯の咬合力に対する比である咬合力変動率  $\beta$  を 0.5, 1 と変動させた。なお、骨折が回復するにしたがい咬合力が回復していく場合と、健康人間において個人差がある場合があるが、両者併せて咬

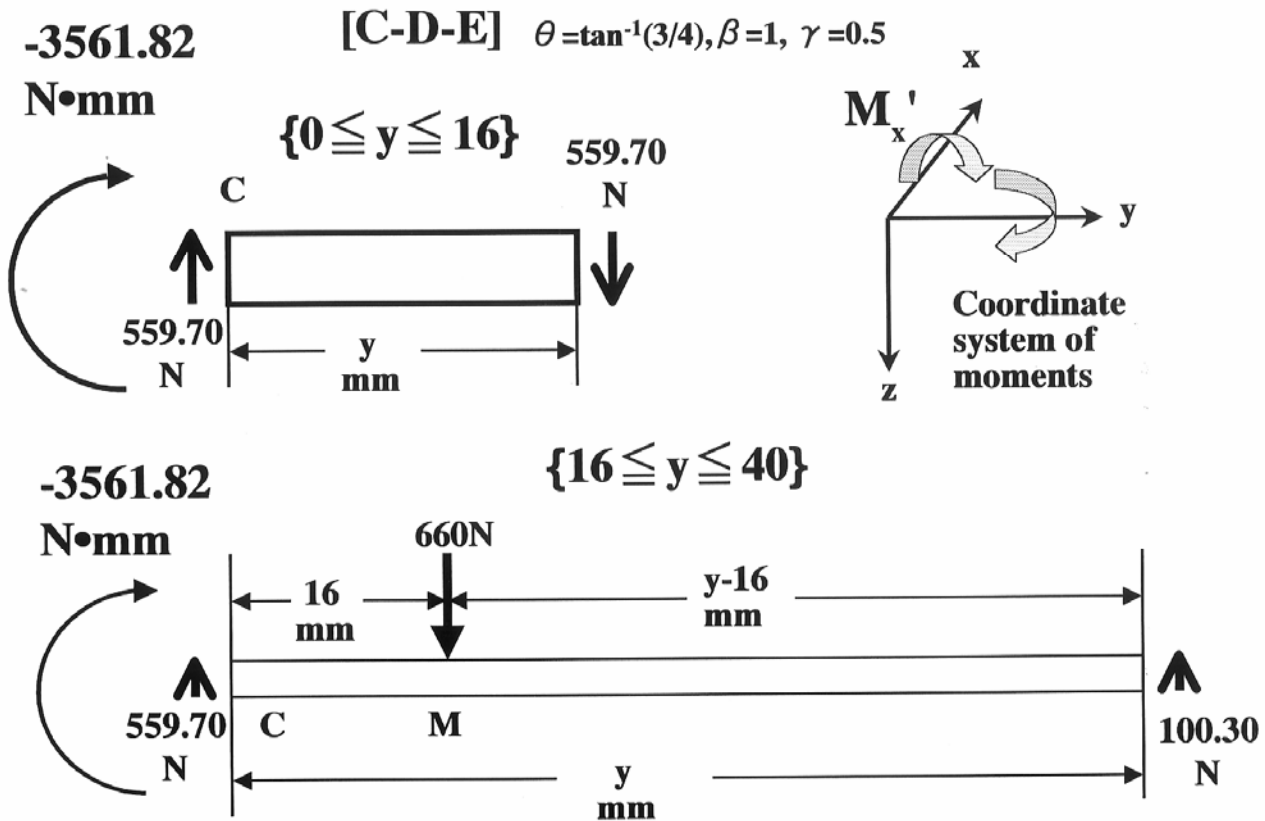


Fig. 4 Forces acting upon a human mandible from the lower right second molar to the lower right canine biting with the lower right first molar ( $\theta = \tan^{-1}(3/4)$ ,  $\beta = 1$ ,  $\gamma = 0.5$ ). Following calculation leads shearing force, bending moment and torsion moment. Unit is: N, shearing force; N·mm, bending moment; N·mm, torsion moment.

$0 \leq y \leq 16$

$$M_x' - 3561.82 + 559.70 y = 0 \quad \therefore M_x' = -559.70 y + 3561.82$$

$$\text{Bending moment} = M_x = 559.70 y - 3561.82, \quad M_x(y = 16) = 5393.36$$

$$\text{Shearing force} = dM_x/dy = 559.70, \quad \text{Torsion moment} = M_y = -647.60$$

$16 \leq y \leq 40$

$$M_x' - 3561.82 + 559.70 y - 660(y - 16) = 0 \quad \therefore M_x' = 100.30 y - 6998.18$$

$$\text{Bending moment} = M_x = -100.30 y + 6998.18, \quad M_x(y = 40) = 2986.13$$

$$\text{Shearing force} = dM_x/dy = -100.30, \quad \text{Torsion moment} = M_y = -647.60$$

In case where figures include infinite decimal, the fractions are rounded off to three decimal places.

合力変動率 $\beta$ で表わした。

#### (7) 支点反力と咀嚼筋力の決定方法

平衡側と作業側との顎関節反力の比 $\gamma$ を4種類設定したので、作業側の顎関節反力が決まれば平衡側の顎関節反力は決まる。それゆえ未知量は作業側の顎関節反力と両側下顎挙上筋の合力の3個である。したがって決定方程式としては、両側顎関節部を回転支点として、左右方向の軸回りと、前後方向の軸回りのモーメントの釣り合い、および、上下垂直方向の軸方向の力の釣り合いの3式で十分である。

#### (8) 解析した力の種類

下顎骨に発生する内力として、剪断力、曲げモーメントおよびねじりモーメントを、外力として両側の顎関節反力と両側下顎挙上筋の合力を求めた。

#### (9) 力およびモーメントの正負の規約

移動座標系において y 軸の正側を z 軸の正側に

動かそうとする剪断力を正と規約した。曲げモーメントは、z 軸の正側に引張応力が生じるように変形させる曲げモーメントを正と規約した。ねじりモーメントは、y 軸の正側が時計方向に回転するようなねじりモーメントを正と規約した(Fig.2)。垂直力は上向きを正、下向きを負とした。

#### (10) 曲げモーメントとねじりモーメントの決定方法

C-D-Eと正中矢状面のなす角を $\theta$ とする。A<sub>R</sub>-B-C間に関してC点の回りのモーメントの釣り合いを考えC点に作用するモーメント $M_x'$ と $M_y'$ を求める。C-D-Eにはそれらの反力 $-M_x'$ 、 $-M_y'$ が作用する。 $-M_x' = M_x$ 、 $-M_y' = M_y$ とおく。それをC-D-Eに垂直な成分と平行な成分に分解するとそれぞれ $M_x \cos\theta$ 、 $M_x \sin\theta$ 、 $-M_y \sin\theta$ 、 $M_y \cos\theta$ となる。それらを合成するとC-D-Eに垂直な成分は $M_X = M_x \cos\theta - M_y \sin\theta$ と

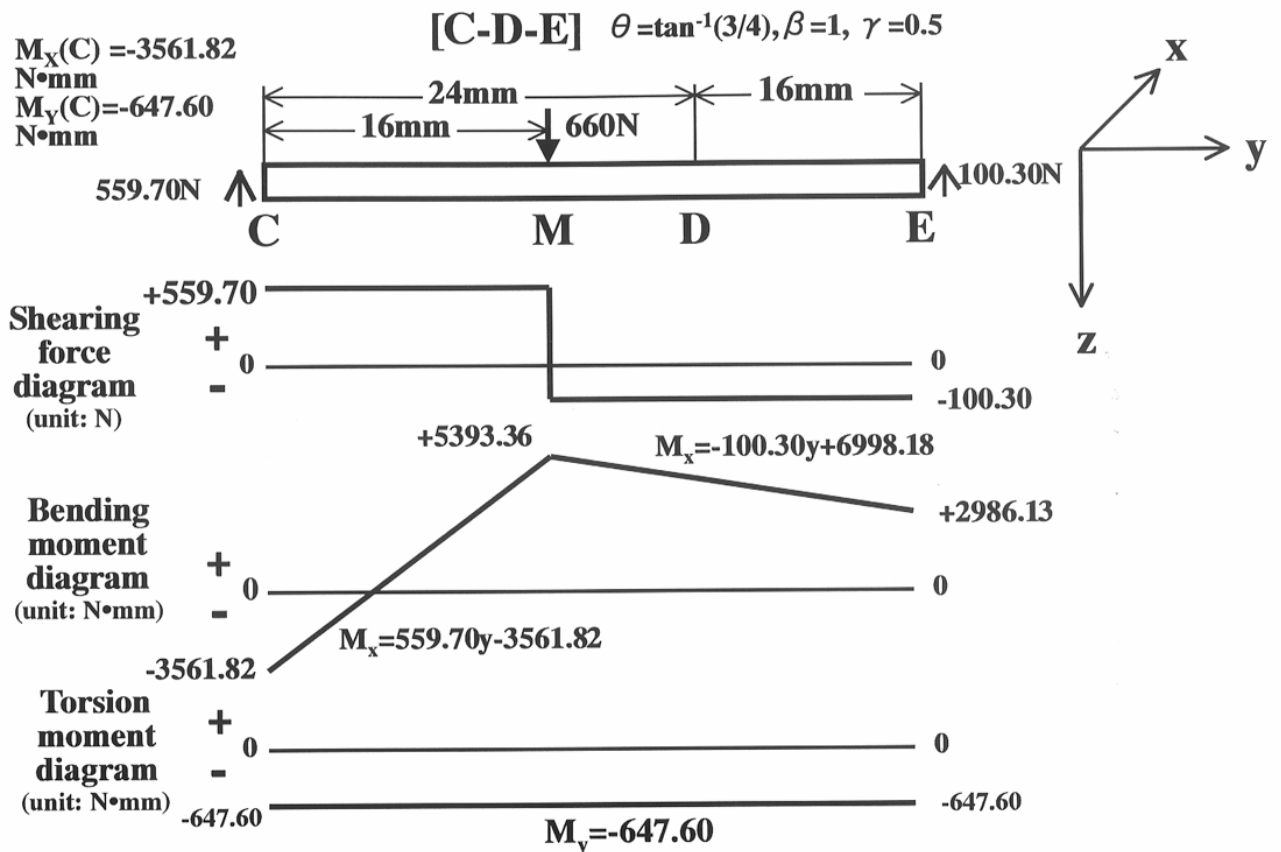


Fig. 5 Shearing force diagram, bending moment diagram and torsion moment diagram of a human mandible from the lower right second molar to the lower right canine biting with the lower right first molar ( $\theta = \tan^{-1}(3/4)$ ,  $\beta = 1$ ,  $\gamma = 0.5$ ).

Table 2 External forces biting with the lower right first molar.

$\beta$	$\gamma$	$R_1(N)$	$R_2(N)$	$W_1(N)$	$W_2(N)$	$W_3(N)$
0.5	0	-541.2	0	859.85	11.35	-330
0.5	0.5	-360.8	-180.4	640.65	230.55	-330
0.5	1	-270.6	-270.6	531.05	340.15	-330
0.5	1.5	-216.48	-324.72	465.29	405.91	-330
1	0	-1082.4	0	1719.69	22.7	-660
1	0.5	-721.6	-360.8	1281.3	461.1	-660
1	1	-541.2	-541.2	1062.1	680.3	-660
1	1.5	-432.96	-649.44	930.59	811.81	-660

なり、C-D-EのC端に作用する曲げモーメントとなり、平行な成分は $M_y = M_x \sin\theta + M_y \cos\theta$ となり、C-D-EのC端に作用するねじりモーメントとなる。同様に考えて点Eと点Gにおいては $M_x = M_x \sin\theta - M_y \cos\theta$ 、 $M_y = M_x \cos\theta + M_y \sin\theta$ となる。

(11) コンピューター・プログラミング

計算支援のためコンピューター・プログラミングの手法を用いた。ハードウェアは iMac(Apple

Computer Inc.)、ソフトウェアは Microsoft Excel 2001 for Macintosh を用いた。 $\beta$ と $\gamma$ をインプットすれば解析結果を得ることができる。

### 3. 研究結果

(1) 右側第一大臼歯で噛む場合の解析結果 ( $\beta = 1$ ,  $\gamma = 0.5$ ,  $\theta = \tan^{-1}(3/4)$ の場合)

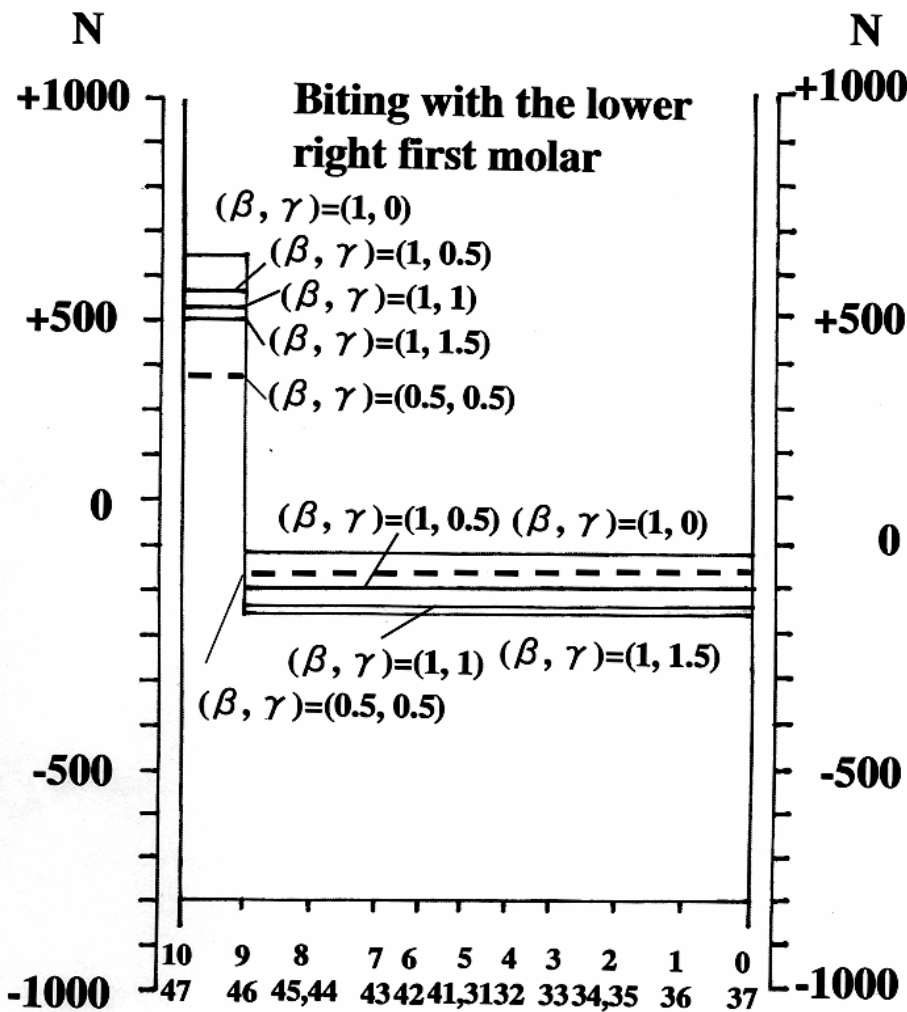


Fig. 6 Shearing force diagram ( $\theta = \tan^{-1}(3/4)$ ). The value of shearing force was decreased according to an increase of  $\gamma$ . The largest value of shearing force was 640 N in the molar zone in  $\beta = 1$  and  $\gamma = 0$  biting with the lower right first molar.

(a) 右側（作業側）顎関節には  $R_1 = -721.6$  N（下向き）、左側（平衡側）顎関節には  $R_2 = -360.8$  N（下向き）、右側の咀嚼筋力の合力は、 $W_1 = 1281.30$  N（上向き）、左側の咀嚼筋力の合力は、 $W_2 = 461.10$  N（上向き）、咬合力は、研究方法(6)およびTable 1 記載のとおり  $W_3 = -660$  N（下向き）とした(Fig.3)。ただし、説明上、数値が無限小数になる場合は小数点以下3桁目を四捨五入して示した。

(b) 右側顎関節部  $A_R$  から第二大臼歯部Cまでのビームを抜き出し、 $A_R$ -C間に作用する力を考える。 $A_R$  点には  $R_1 = -721.6$  N（下向き）、右側下顎枝の midpoint B には  $W_1 = 1281.30$  N（上向き）、C点には下向きに  $559.70$  Nの剪断力が作用した。C点の回りのモーメントの釣り合いを考えるとC点に作用するモーメントは  $M_x(C) = -3238.02$  N $\cdot$ mm、 $M_y(C) = 1619.01$  N $\cdot$ mmであった(Fig.3)。座標系の回転移動後の  $M_x(C) = -3561.82$  N $\cdot$ mm、 $M_y(C) = -647.60$  N $\cdot$ mmであった。ただし、説明上、数値が無限小数になる場合は小数点以下3桁目を四捨五入した。

(c) 右側第二大臼歯部C、右側第一大臼歯部M、小臼歯部D、右側犬歯部E間を抜きだし、 $A_R$ -B-C間と同

様に、材料力学の手法を用いて、モーメントの釣り合いを考えると、C-M間では曲げモーメント  $= M_x = 559.70y - 3561.82$ 、剪断力  $= dM_x/dy = 559.70$ 、ねじりモーメント  $= M_y = -647.60$  (Fig.4)、M-E間では曲げモーメント  $= M_x = -100.30y + 6998.18$ 、剪断力  $= dM_x/dy = -100.30$ 、ねじりモーメント  $= M_y = -647.60$  であった (Fig.4)。ただし、説明上、数値が無限小数になる場合は小数点以下3桁目を四捨五入した。単位は、剪断力についてはN、曲げモーメントとねじりモーメントについてはN $\cdot$ mmである。

(d) C-D-E間に作用する力の剪断力図、曲げモーメント図、ねじりモーメント図を描いた (Fig.5)。

(e) C-D-Eに連結するビームについても同様に求めた。

(2) 外力について

右側（作業側）顎関節反力、左側（平衡側）顎関節反力、右側の咀嚼筋力の合力、左側の咀嚼筋力の合力、咬合力をそれぞれ  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$  としてベクトル表示するとTable 2 のようになる。ただし、数値が無限小数になる場合は小数点以下3桁目を四捨五入した。整数の場合は小数点以下を、小数

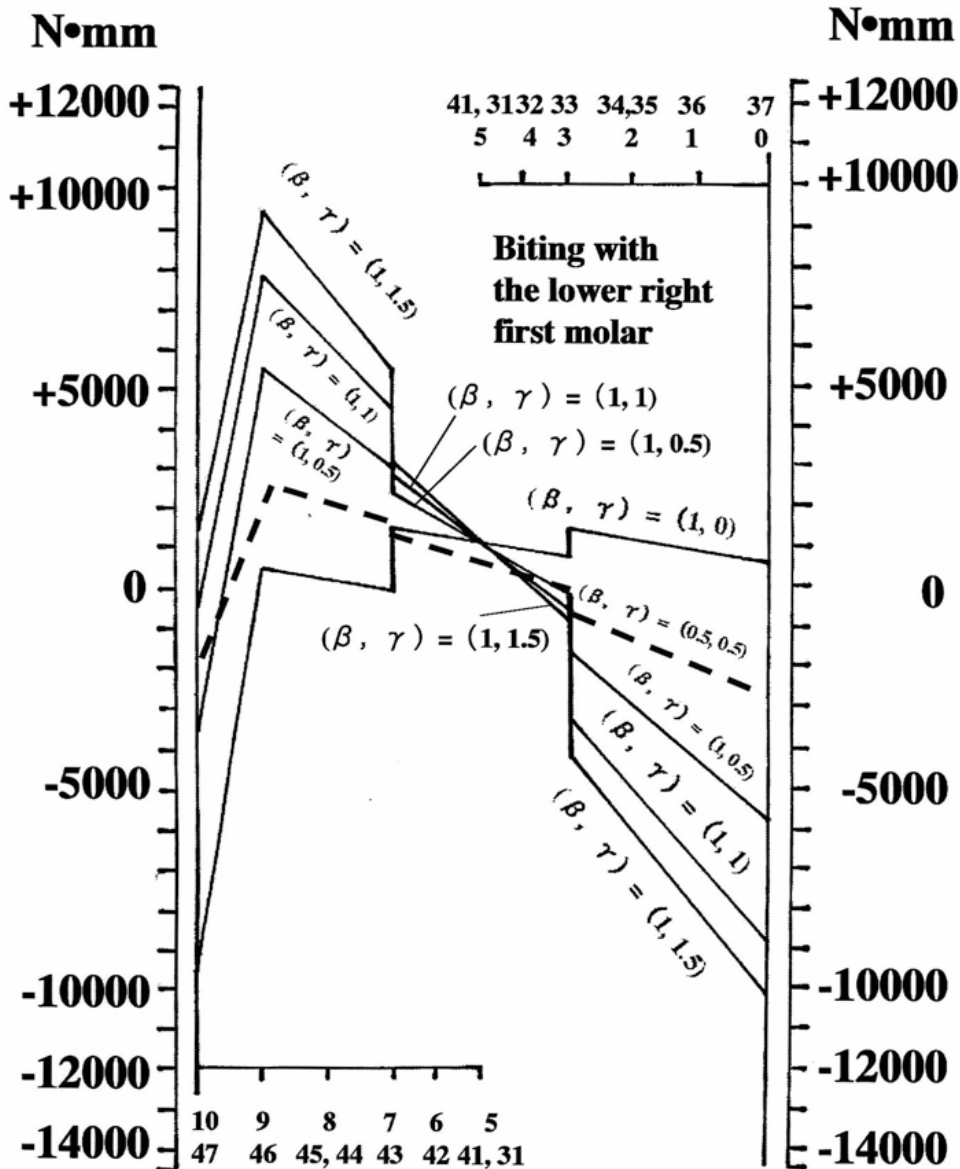


Fig. 7 Bending moment diagram ( $\theta = \tan^{-1}(3/4)$ ). At masticatory site, the value of bending moment increased according to an increase of  $\gamma$ . On the other hand, at balancing site, the value of bending moment decreased according to an increase of  $\gamma$ . The largest absolute value of bending moment was 10720 N·mm in the molar zone at balancing site in  $\beta = 1$  and  $\gamma = 1.5$  biting with the lower right first molar.

点以下2桁以下がゼロの場合は小数点以下2桁目を記載しなかった。

(3) 内力について

(a) 剪断力図

解析した状態について、剪断力の分布を一つの図にまとめた(Fig.6, 9)。横軸は歯牙の種類を示し、0は下顎左側第二大臼歯、1は下顎左側第一大臼歯、2は下顎左側小臼歯、3は下顎左側犬歯、4は下顎左側側切歯、5は中切歯部を示す。6から10は下顎右側の歯牙の種類を示す。縦軸は、剪断力の大きさを示す。単位はNで、上方が正、下方が負である。剪断力は $\gamma$ が大きくなるに従い、負の方向に移動した。剪断力図は $\gamma$ が大きくなるに従い、下方に移動した。剪断力の最大値は、 $\beta = 1$ 、 $\gamma = 0$ の場合に発生し、右側第一大臼歯部、右側小臼歯で噛む場合の値はそれぞれ 640 N、460 N、発生部位は

それぞれ下顎右側大臼歯部、下顎右側臼歯部であった。値は1位を四捨五入した。これらの傾向は $\beta = 0.5$ の場合も同様であった。ただし、値は $\beta = 1$ のときの1/2であった。

(b) 曲げモーメント図

解析した状態について、曲げモーメントの分布を一つの図にまとめた(Fig.7, 10)。横軸は、剪断力図と同様、歯牙の種類を示す。縦軸はモーメントの大きさを示す。単位は N·mm で、符号は上方が正、下方が負である。曲げモーメントは、 $\gamma$ が大きくなるに従い、しだいに、咀嚼側では正の方向に、平衡側では負の方向に移動した。曲げモーメント図は $\gamma$ が大きくなるに従い、時計回りに回転した。曲げモーメントの最大値は $\beta = 1$ 、 $\gamma = 1.5$ の場合に発生し、右側第一大臼歯、右側小臼歯で噛む場合の値はそれぞれ 9380 N·mm、7080 N·mm、発生部位はそれぞれ

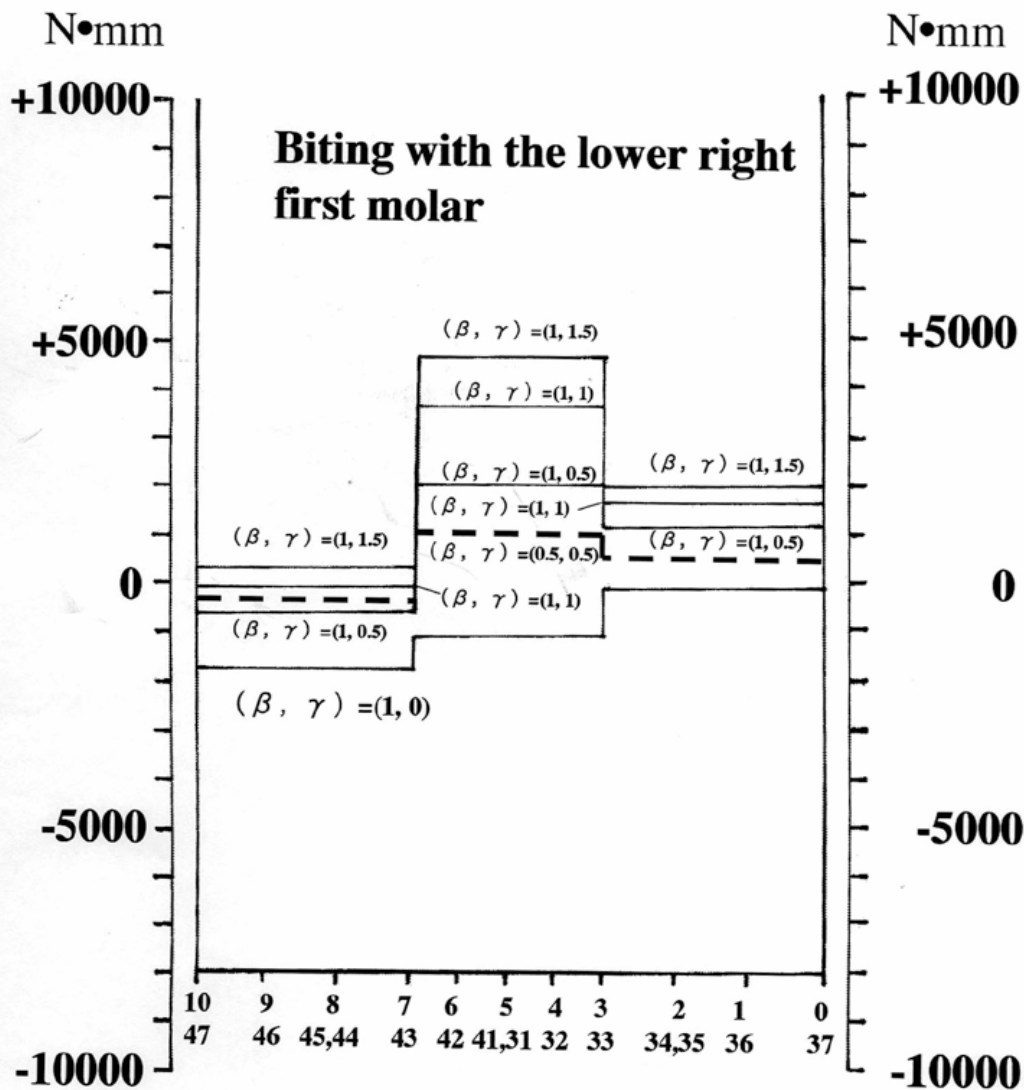


Fig. 8 Torsion moment diagram ( $\theta = \tan^{-1}(3/4)$ ). The value of torsion moment increased according to an increase of  $\gamma$  in both anterior and posterior zone. The largest value of torsion moment was 260 N·mm at working site, 4550 N·mm in the anterior zone and 1950 N·mm at balancing site in  $\beta = 1$  and  $\gamma = 1.5$  biting with the lower right first molar.

右側第一大臼歯部、右側小臼歯部、曲げモーメントの最小値は、右側第一大臼歯で噛む場合は  $\beta = 1$ 、 $\gamma = 1.5$  のとき  $-10720$  N·mm、発生部位は下顎の左側第二大臼歯部、右側小臼歯で噛む場合は  $\beta = 1$ 、 $\gamma = 0$  のとき  $-10680$  N·mm、発生部位は下顎の右側第二大臼歯部であった。値は1位を四捨五入した。これらの傾向は  $\beta = 0.5$  の場合も同様であった。ただし、値は  $\beta = 1$  のときの1/2であった。

(c) ねじりモーメント図

解析した状態について、ねじりモーメントの分布を一つの図にまとめた (Fig.8, 11)。横軸、縦軸、単位、符号のとり方は曲げモーメント図と同様である。ねじりモーメントの値は、 $\gamma$  が大きくなるに従い、前歯部、臼歯部ともにしだいに正の方向に移動した。ねじりモーメント図は  $\gamma$  が大きくなるに従い、上方に移動した。ねじりモーメントの最大値は、① 右側第一大臼歯、② 右側小臼歯で噛む場合は、いずれも  $\beta = 1$ 、 $\gamma = 1.5$  のときに発生し、値は作業側では① 260N·mm、② -170N·mm、前歯部では① 4550

N·mm、② 3690 N·mm、平衡側では① 1950 N·mm、② 1670 N·mmであった。値は1位を四捨五入した。これらの傾向は  $\beta = 0.5$  の場合も同様であった。ただし、値は  $\beta = 1$  のときの1/2であった。

4. 考察

片側咬合の場合でも、左右顎関節部の負荷様相については統一の見解が得られていない。(1)作業側のみ<sup>(1)</sup>、(2)作業側優位<sup>(2,3)</sup>、(3)両側均等<sup>(4)</sup>、(4)平衡側優位<sup>(5,6)</sup>、(5)平衡側のみ<sup>(7)</sup>、など諸説がある。本研究では(1)~(5)の場合における下顎骨に作用する外力を材料力学的に求め、各場合における下顎挙上筋合力との関係を検討した。まず下顎右側第一大臼歯で咬む場合を検討する。(1)の場合は  $\gamma = 0$  に相当する。このとき  $(\beta, \gamma, R_1, R_2, W_1, W_2, W_3) = (1, 0, -1082.4, 0, 1719.69, 22.7, -660)$  (単位: N) である。 $W_1: W_2 \doteq 75:1$  であるので、作業側の下顎挙上筋合力が平衡側の下顎挙上筋合力と比較し、顕著に優



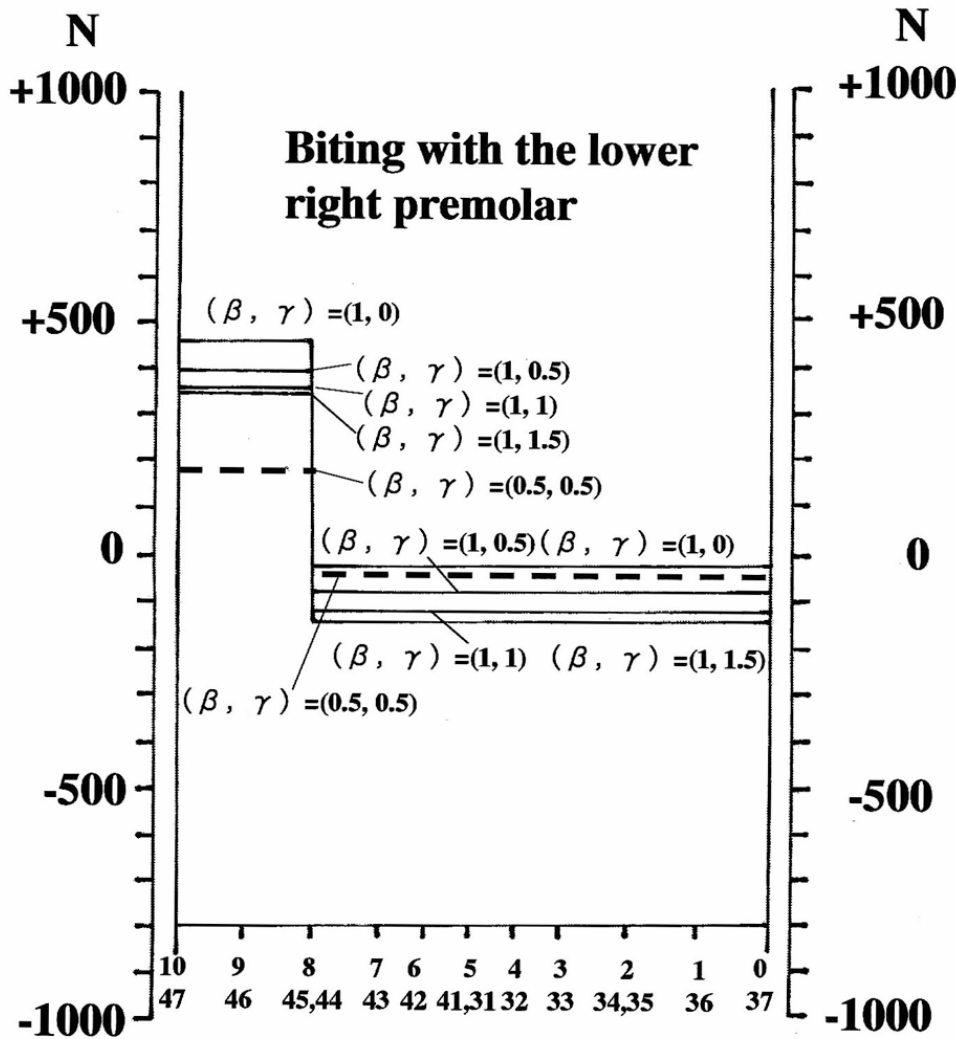


Fig. 9 Shearing force diagram ( $\theta = \tan^{-1}(3/4)$ ). The value of shearing force was decreased according to an increase of  $\gamma$ . The largest value of shearing force was 460 N in the premolar and molar zone in  $\beta = 1$  and  $\gamma = 0$  biting with the lower right premolar.

位に作用している。咀嚼筋活動がリズムカルになると、非咀嚼側の咬筋、内側翼突筋の筋活動量が低下し、咀嚼側の咬筋、内側翼突筋、両側の側頭筋前部の筋活動が顕著に優位となった咀嚼終期の段階に相当する。(2)の場合は $\gamma = 0.5$ に相当する。 $(\beta, \gamma, R_1, R_2, W_1, W_2, W_3) = (1, 0.5, -721.6, -360.8, 1281.30, 461.10, -660)$  (単位: N) である。 $W_1: W_2 \doteq 3:1$  であるので、作業側の下顎挙上筋合力が平衡側の下顎挙上筋合力と比較し、優位に作用している。咀嚼筋活動が比較的リズムカルになり、非咀嚼側の咬筋、内側翼突筋の筋活動量が比較的低下し、咀嚼側の咬筋、内側翼突筋、両側の側頭筋前部の筋活動が優位となった咀嚼終期に近い段階に相当する。(3)の場合は $\gamma = 1$ に相当する。 $(\beta, \gamma, R_1, R_2, W_1, W_2, W_3) = (1, 1, -541.2, -541.2, 1062.10, 680.30, -660)$  である。 $W_1: W_2 \doteq 3:2$  であるので作業側と平衡側の下顎挙上筋合力が均等ではないが、これは平衡側

の関節突起を中心として、モーメントの釣り合いをとると、作業側には、咬合力が負荷しているので、比較的大きな下顎挙上筋合力 $W_1$ を要することによる。咀嚼中期段階に相当する。(4)の場合は $\gamma = 1.5$ に相当する。 $(\beta, \gamma, R_1, R_2, W_1, W_2, W_3) = (1, 1.5, -432.96, -649.44, 930.59, 811.81, -660)$  である。 $W_2$ が次第に大きくなっていくに従い、平衡側の $R_2$ が優位となる。必ずしも $W_2$ が $W_1$ より大きくなるとも、平衡側が優位になり得る。咀嚼初期段階に相当する。(5)の場合を解析するために $\gamma \rightarrow \infty$ とおいた。すると以下のように外力を決定することが可能である。 $\gamma = R_2/R_1, R_1 = -660\beta \times 1.64/(1+\gamma), R_2 = -\gamma \times 660\beta \times 1.64/(1+\gamma), W_1 = 660\beta(57\gamma+242.32)/93(1+\gamma), W_2 = 660\beta(188.52\gamma+3.2)/93(1+\gamma), W_3 = -660\beta$  であるので、 $\beta = 1$  のとき $\gamma \rightarrow \infty$ として  $(\beta, \gamma, R_1, R_2, W_1, W_2, W_3) \rightarrow (1, \infty, 0, -1082.4, 660 \times 57/93, 660 \times 188.52/93, -660) \doteq (1, \infty, 0, -1082.4,$

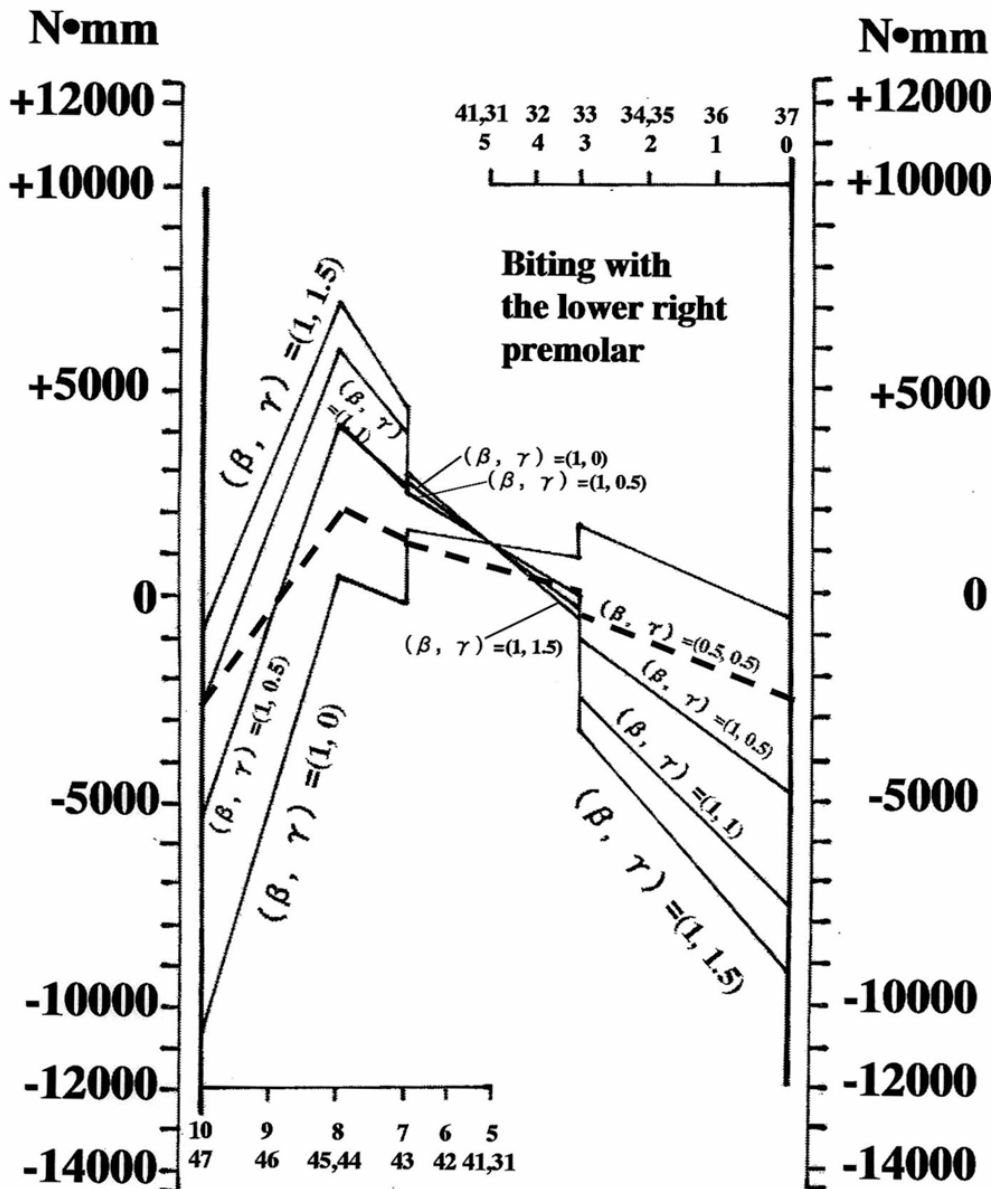


Fig. 10 Bending moment diagram ( $\theta = \tan^{-1}(3/4)$ ). At masticatory site, the value of bending moment increased according to an increase of  $\gamma$ . On the other hand, at balancing site, the value of bending moment decreased according to an increase of  $\gamma$ . The largest absolute value of bending moment was 10680 N·mm in the molar zone at masticatory site in  $\beta = 1$  and  $\gamma = 0$  biting with the lower right premolar.

404.52, 1337.88, -660)

したがって、必ずしも、あり得ないとはいえない。これに応じて、内力も決定し得る。咀嚼開始段階に相当する。下顎右側小白歯で咬む場合も同様であった。

次に、Champyらの報告<sup>(10)</sup>と本研究の結果を第一大臼歯・右側小白歯で噛む場合で定量的に比較してみる。前者の場合は、曲げモーメントは前歯部では-50~-100 kgf·mm = -490~-980 N·mm (条件1)、大臼歯部では 800~1700 kgf·mm = 7840~16660 N·mm (条件2)、ねじりモーメントは前歯部では 25~40 kgf·mm = 245~392 N·mm (条件3)、小白歯部、大臼歯部では 0 N·mm (条件4)であった。本研究の解析結果を示す。前者が第一大臼歯、後者が小白歯で噛む場合である。絶対値が最大となる曲げモーメントの値は前歯部では 3090 ( $\gamma = 1.5$ )~2980 ( $\gamma = 1.5$ ) N·mm (条件5)、大臼歯部では-10720 ( $\gamma = 1.5$ )~

-10680 ( $\gamma = 0$ ) N·mm (条件6)、ねじりモーメントの値は前歯部では、右側第一大臼歯で噛む場合、-1180 ( $\gamma = 0$ )、2000 ( $\gamma = 0.5$ )、3590 ( $\gamma = 1$ )、4550 ( $\gamma = 1.5$ ) N·mm、右側小白歯で噛む場合、-1290 ( $\gamma = 0$ )、1480 ( $\gamma = 0.5$ )、2860 ( $\gamma = 1$ )、3690 ( $\gamma = 1.5$ ) N·mm (条件7)、小白歯部、大臼歯部では、右側大臼歯で噛む場合、作業側では、-1780 ( $\gamma = 0$ )、-650 ( $\gamma = 0.5$ )、-80 ( $\gamma = 1$ )、260 ( $\gamma = 1.5$ ) N·mm、平衡側では、-90 ( $\gamma = 0$ )、1040 ( $\gamma = 0.5$ )、1610 ( $\gamma = 1$ )、1950 ( $\gamma = 1.5$ ) N·mm、右側小白歯で噛む場合、作業側では、-1940 ( $\gamma = 0$ )、-960 ( $\gamma = 0.5$ )、-470 ( $\gamma = 1$ )、-170 ( $\gamma = 1.5$ ) N·mm、平衡側では、-100 ( $\gamma = 0$ )、890 ( $\gamma = 0.5$ )、1380 ( $\gamma = 1$ )、1670 ( $\gamma = 1.5$ ) N·mm (条件8)であった。条件2の場合は、曲げモーメントのプラスの場合を上凸に、マイナスの場合を上凹としている。従って、条件6とほぼ同じとみてよい。条件1と条件5を絶対値で比較すると、条件5は条件1の6.3~3.0倍である。

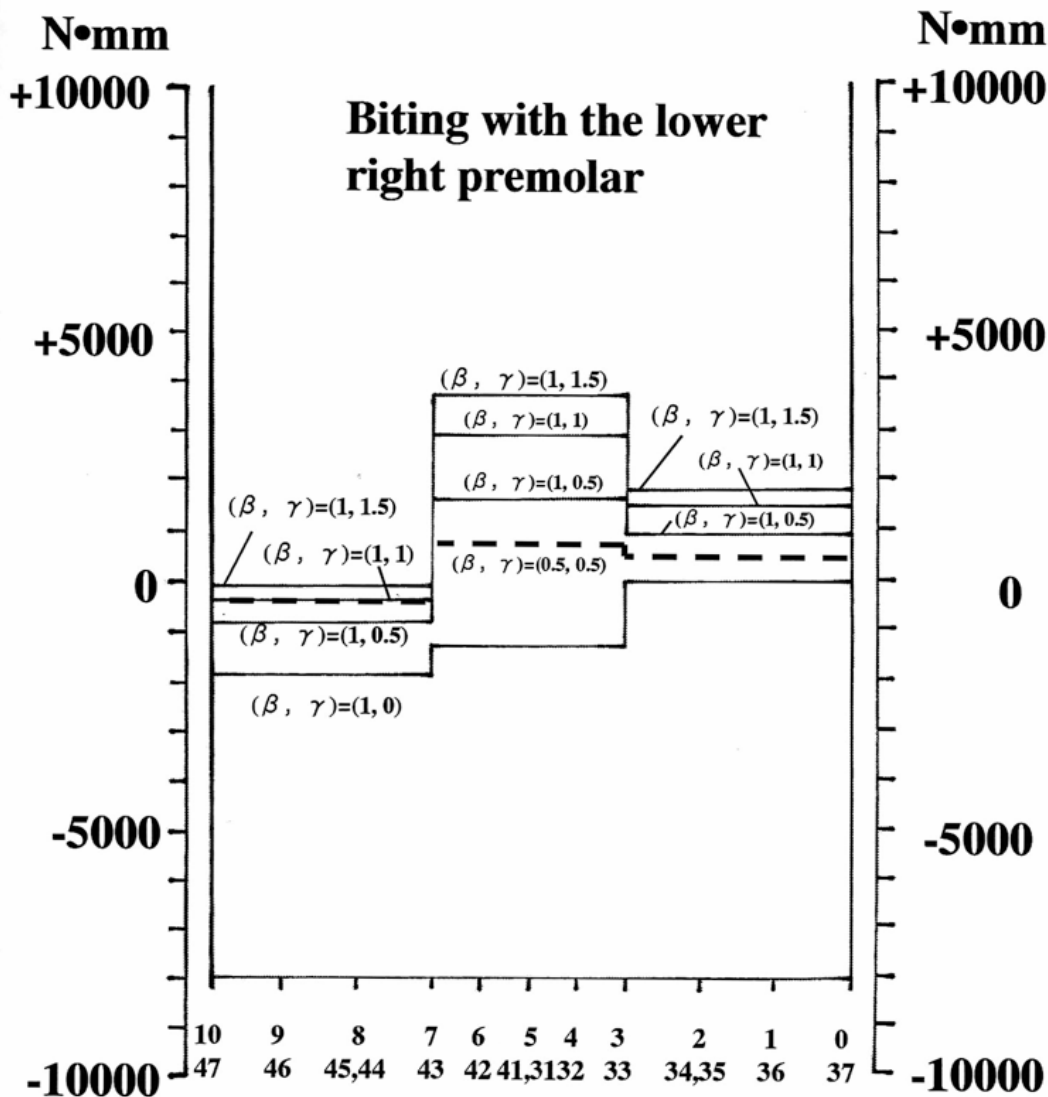


Fig. 11 Torsion moment diagram ( $\theta = \tan^{-1}(3/4)$ ). The value of torsion moment increased according to an increase of  $\gamma$  in both anterior and posterior zone. The largest value of torsion moment was  $-170 \text{ N}\cdot\text{mm}$  at working site,  $3690 \text{ N}\cdot\text{mm}$  in the anterior zone and  $1670 \text{ N}\cdot\text{mm}$  at balancing site in  $\beta = 1$  and  $\gamma = 1.5$  biting with the lower right premolar.

条件2と条件6を絶対値で比較すると、条件6は条件2の1.4~0.6倍である。したがってChampyらの報告<sup>(10)</sup>に近い。条件3と条件7を比較すると、条件7は、右側第一大臼歯で噛む場合、条件3の-4.8 ( $\gamma = 0$ )、8.2 ( $\gamma = 0.5$ )、14.7 ( $\gamma = 1$ )、18.6 ( $\gamma = 1.5$ )倍、右側小臼歯で噛む場合、条件3の-3.3 ( $\gamma = 0$ )、3.8 ( $\gamma = 0.5$ )、7.3 ( $\gamma = 1$ )、9.4 ( $\gamma = 1.5$ )倍、である。 $\gamma$ が大きいときは咀嚼活動前期の値を、 $\gamma$ が小さいときは咀嚼活動後期の値を示しているの、咀嚼活動後期の値がChampyらの報告<sup>(10)</sup>に近いと考えられる。本研究では $\gamma$ を4種類設定したので解析可能なモデルが拡大した。条件4と条件8を比較すると条件4では全く作用しないとしているのに対して、条件8では臼歯部においてもねじりモーメントが作用する結果となった。生体では臼歯部にもねじりモーメントが作用している場合があると思われる。次に、Champyらの報告<sup>(10)</sup>と本研究の結果を定性的に比較してみる。両者ともに、片側第一大臼歯、片側小臼歯で噛む場合に、前歯部において左右対称にねじ

りモーメントが作用するとしている。この点では両者はほぼ同じ傾向を示している。

本研究では下顎骨の臼歯部が正中矢状面と傾斜しているモデルを用いて、関節突起にかかる顎関節反力の平衡側と作業側の負荷割合を変動させてその影響を解析する方法を新たに考案した。これによって解析可能な対象がさらに拡大した。特定の個人について下顎骨に作用する力を解析するためには解析対象となる個人のデータが確定すればよい。それを用いて、いかなるモデルについても解析することが可能である。したがって本研究で開発した解析方法は応用性が大きな方法であると考えられる。

## 5. 結論

本研究では生体に近いモデル・ケースとして、下顎骨の臼歯部と正中矢状面が傾斜しているモデルの解析方法を用いて、関節突起にかかる顎関節反力の平衡側と作業側の負荷割合の変動の影響を検討

した結果、咀嚼筋力、顎関節部における反力、咬合力によって下顎骨に発生する外力および内力のうち剪断力、曲げモーメント、ねじりモーメントに関して解析し以下の結論を得た。 $\beta$ は咬合力変動率を、 $\gamma$ は平衡側と作業側の顎関節反力の比を表わす。

#### 1. 外力について

(1)  $\gamma = 0$ のときは、片側咬合でも、関節突起にかかる顎関節反力は作業側のみの場合で、作業側の下顎挙上筋合力が平衡側の下顎挙上筋合力と比較し、顕著に優位に作用し、平衡側と作業側の下顎挙上筋合力の比 ( $\alpha$ ) はおよそ 0.01 (下顎右側第一大臼歯で咬む場合) ~0.02 (下顎右側小臼歯で咬む場合)

(数値の記載順は、以下同様) であった。

(2)  $\gamma = 0.5$ のときは、片側咬合でも、関節突起にかかる顎関節反力は作業側優位の場合で、作業側の下顎挙上筋合力が平衡側の下顎挙上筋合力と比較し、優位に作用し、 $\alpha$  はおよそ 0.36~0.4 であった。

(3)  $\gamma = 1$ のときは、片側咬合でも、関節突起にかかる顎関節反力は両側均等の場合で、 $\alpha$  はおよそ 0.64~0.72 であった。

(4)  $\gamma = 1.5$ のときは、片側咬合でも、関節突起にかかる顎関節反力は平衡側優位の場合で、 $\alpha$  はおよそ 0.87~1 であった。

(5)  $\gamma \rightarrow \infty$ のときは、片側咬合でも、関節突起にかかる顎関節反力は平衡側のみの場合で、 $\alpha$  はおよそ 3.31~4.62 であった。

#### 2. 内力について

(1) 剪断力は  $\gamma$  が大きくなるに従い、負の方向に移動した。剪断力の値は  $\beta$  の値に正比例した。剪断力図は  $\gamma$  が大きくなるに従い、下方に移動した。

(2) 曲げモーメントは、 $\gamma$  が大きくなるに従い、しだいに咀嚼側では正の方向に、平衡側では負の方向に移動した。曲げモーメントの値は  $\beta$  の値に正比例した。曲げモーメント図は  $\gamma$  が大きくなるに従い、時計回りに回転した。

(3) ねじりモーメントは、 $\gamma$  が大きくなるに従い、前歯部、臼歯部ともにしだいに正の方向に移動した。ねじりモーメントの値は  $\beta$  の値に正比例した。ねじりモーメント図は  $\gamma$  が大きくなるに従い、上方に移動した。

3. 本研究では下顎骨の臼歯部が正中矢状面と傾斜しているモデルを用いて、関節突起にかかる顎関節反力の平衡側と作業側の負荷割合を変動させてその影響を解析する方法を新たに考案した。これによって解析可能な対象がさらに拡大した。特定の個人について下顎骨に作用する力を解析するためには

解析対象となる個人のデータが確定すればよい。それを用いて、いかなるモデルについても解析することが可能である。したがって本研究で開発した解析方法は応用性が大きな方法であると考えられる。

本論文の要旨は、第 13 回顎顔面バイオメカニクス学会大会 (2005 年 11 月 19, 20 日、大阪) および第 48 回日本歯科理工学会学術講演会 (2006 年 10 月 28, 29 日、名古屋) にて口頭発表した。

#### 参考文献

- 1) Page HL. Temporomandibular joint physiology and jaw synergy. *Dent Dig* 60: 54-59, 1954.
- 2) Hekneby M. The load of the temporomandibular joint: Physical calculations and analyses. *J Prosthet Dent* 31: 303-312, 1974.
- 3) Boyd RL, Gibbs CH, Mahan PE, Richmond AF, Laskin JL. Temporomandibular joint forces measured at the condyle of *Macaca arctoides*. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 97: 472-479, 1990.
- 4) Roydhouse RH. The temporomandibular joint: upward force of the condyles on the cranium. *J Am Dent Assoc* 50: 166-172, 1955.
- 5) Hylander WL. The human mandible: lever or link? *Am J Phys Anthropol* 43: 227-242, 1975.
- 6) Smith RJ. Mandibular biomechanics and temporomandibular joint function in primates. *Am J Phys Anthropol* 49: 341-350, 1978.
- 7) Greaves WS. The jaw lever system in ungulates: a new model. *J Zool Lond* 184: 271-285, 1978.
- 8) 草野雅章, 瀧岡 渡, 池田悦子, 熨斗利光, 村上和宏, 山本一彦, 杉村正仁. 人下顎骨に作用する力の材料力学的解析. *顎顔面バイオメカニクス学会誌* 7:48-57, 2001.
- 9) 草野雅章, 山本一彦, 池田悦子, 村上和宏, 桐田忠昭. 人下顎骨に作用する力の材料力学的解析—下顎骨の臼歯部が正中矢状面と傾斜しているモデルの解析—. *顎顔面バイオメカニクス学会誌* 9:34-44, 2003.
- 10) Champy M, Loddè JP, Schmitt R, Jaeger JH, Muster D. Mandibular osteosynthesis by miniature screwed plates via a buccal approach. *J Maxillofac Surg* 6: 14-21, 1978.

