

# 熟練ピアニストの「しなやかな打鍵動作」の力学メカニズム

## Effective exploitation of arm dynamics in keystroke by expert pianists.

古屋晋一<sup>1,2</sup> 片寄晴弘<sup>1</sup> 木下博<sup>2</sup>

Shinichi FURUYA<sup>1,2</sup>, Haruhiro KATAYOSE<sup>1</sup>, and Hiroshi KINOSHITA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 関西学院大学 理工学研究科/JST CrestMuse

<sup>1</sup> Kwansai Gakuin University/JST CrestMuse

<sup>2</sup> 大阪大学大学院 医学系研究科

<sup>2</sup> Graduate School of Medicine, Osaka University

**Abstract:** The present study investigated the expert-novice difference in the kinetics of upper-limb movement during the keystroke on the piano. Kinematic recordings were made while experts (N = 7) and novices (N = 7) of classical-piano players performed a right hand octave keystroke with staccato articulation to produce four different sound dynamics. Using the inverse dynamics method, interaction and muscular torques generated at the shoulder, elbow and wrist joints were computed. At all sound dynamics, the experts produced larger interaction torques at the elbow and wrist joints compared to the novices, and thereby had smaller muscular torques at these joints. This suggests that through the long-term piano training the expert pianists acquired motor skill of reducing muscular load during the keystroke by effectively exploiting the interaction torques.

## 1. はじめに

熟練したピアニストは数時間に及ぶ演奏会において、最後の一音まで素晴らしい音楽を奏でることができる。筋肉が疲労すると、発揮筋力は低下し、ミスタッチは増大することから、ピアニストは長時間演奏しても手や腕の筋肉が疲労しない演奏技術を習得していることが必要である。さらに、演奏や練習時における不必要な筋収縮は、手や腕を故障するリスクを増大させるため、運動効率の良い打鍵動作技術の習得は、一生涯に渡り、健康に演奏活動が続けるためにも不可欠である[4, 7, 12].

我々は現在までに、ピアニストとピアノ初心者の打鍵動作における上肢運動の運動学的特徴（キネマティクス）および筋活動パターンの違いを調べる研究を行ってきた[5, 6]. 初めに、打鍵するために腕を振り下ろしている間の上肢の運動学的特徴をピアニストとピアノ初心者と比べたところ、ピアニストは、関節運動が、肩、肘、手首の順番で起こるムチ動作（運動連鎖）を利用しており、一方でピアノ初心者の打鍵動作では、各関節の運動はほぼ同時刻に起こることが明らかとなった[5]. このような上肢運動パターンの違いの持つ意味を明らかにするために、腕振り下ろし動作中の上肢の各関節運動の減速度を計算したところ、ピアニストの肩と肘の最大減速度は

初心者に比べてより大きな値を示した。ある身体部位が減速すると、隣接する身体部位には慣性力が生じるため、ピアニストは打鍵動作を行う際にムチ動作を利用することで、初心者に比べて肘と手首により大きな慣性力を作り出していることが示唆された。

次に我々は、指先が鍵盤と接触してから鍵盤が最下部に達するまでの間（押し込み期）の、上肢の運動学的特徴および筋活動パターンについて、ピアニストとピアノ初心者の間で比較する研究を行った[6]. その結果、ピアニストは指先が鍵盤と接触した直後に、上腕を前方に回転させることで手を前方に押し出し、それにより、鍵盤を押し込んでいる間に指関節および前腕の筋肉にかかる負荷量を軽減するという特殊な打鍵運動技術を用いていたが、ピアノ初心者ではそのような動作パターンは一切認められなかった。

以上2つの研究結果は、ピアニストと初心者の打鍵動作における上肢運動パターンの違いを示しているが、その背景にある関節運動の動力学特性、すなわち、各関節に生じる関節トルク（注：関節を回転させる力）の特徴の違いについては、一切知られていない現状である。

打鍵動作のように、複数の関節が運動時に連動する多関節運動では、ある関節の運動は筋肉の力発揮によってのみ起こるわけではなく、身体部位間の相

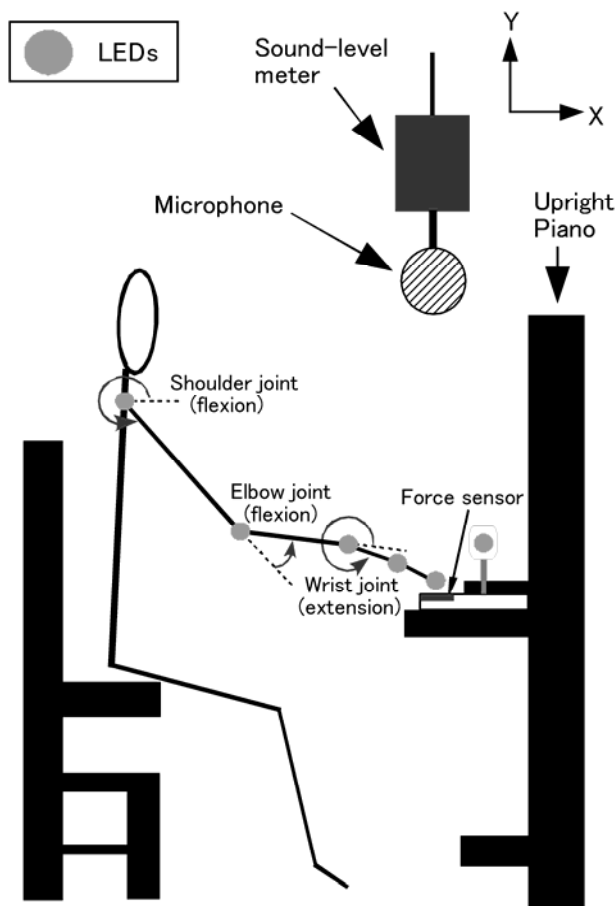
相互作用によって生じる力の影響も受ける。これには、慣性力、遠心力、コリオリ力といった力が含まれ、その結果各関節に生じるトルクは“相互作用トルク”と呼ばれている[3]。しかし、脳が運動指令を出力することによって直接制御することができる対象は、筋力のみであるため、多関節運動を脳がどのようにして制御しているか理解するためには、相互作用トルクと、筋力の発揮によって関節に生じるトルク(筋トルク)とを分離して調べる「動力学的解析(キネティクス)」が不可欠である。

現在までに、多関節運動の動力学的解析は、腕到達運動や描画運動、投球動作などで詳細に行われてきた[2, 9, 11]。その結果、(1) 脳は各関節に生じる相互作用トルクの大きさとタイミングを予測することができること、(2) その予測に基づいて、脳は各筋肉に運動指令を送っていること、(3) その結果作り出された筋トルクが相互作用トルクを相殺することで、望みどおりの運動を生成することができること、などが明らかとなった。しかし、長期的な運動訓練が相互作用トルクの制御方略に及ぼす影響については、現在までに一切調べられていない。したがって、本研究では、ピアニストとピアノ初心者の打鍵動作における上肢関節の動力学特性を比較することによって、長期的な運動訓練が上肢多関節運動における相互作用トルクの制御方略に及ぼす影響について明らかにすることを狙いとした。我々の先行研究の結果に基づき、ピアニストは相互作用トルクを効果的に利用することで打鍵動作時の筋トルクの生成量を減らし、それにより打鍵動作の運動効率を高めていることを、本研究の仮説とした。

## 2. 方法

国内外のコンクールにおいて入賞歴のあるピアニスト7名(24.3 ± 3.2歳)およびピアノ学習歴が1年未満のピアノ初心者7名(21.0 ± 4.6歳)を対象に、G3, G4 鍵盤に対し、右手親指小指を用いてのスタッカートでのオクターブ連打(30回)を4段階の音量(p=92.4, mp=95.8, mf=99.2, f=102.6 dB)で実施した。被験者は、身体の矢状面が鍵盤と直交し、さらにG4 鍵盤と右手小指、前腕、および上腕が同一直線上に位置する姿勢で座った。中手指節関節(手)、手首関節、肘関節、および肩関節の関節中心、および指先の運動をポジションセンサー・カメラセット(浜松ホトニクス社製:C5949)により各チャンネル150Hzで取り込んだ(Fig. 1)。これらに同期して、鍵盤の鉛直方向運動を他のポジションセンサー・カメラセット(浜松ホトニクス社製:C5949)により、さらに鍵盤に実装した力センサーによって打鍵時に鍵盤に加わる鉛直方向の力を収録した[10]。また、

ピアノ音は騒音計を介してコンピュータ内に収録した。



**Fig. 1.** LED placement and definition of joint angles. The counterclockwise direction is defined as a positive direction in angular displacement at each joint. Positive angular displacement describes flexion movement at the shoulder and elbow joints and extension movement at the wrist joint.

各関節中心の変位情報から、指、手首、肘、肩関節の角度変位、およびそれらの角速度、角加速度を算出した。本研究では、関節角度変位の正方向を、肩と肘では屈曲方向、手首関節では伸展方向と定義した(Fig.1)。さらに、ニュートン・オイラー方程式を用いた逆動力学計算により、これら身体運動情報から、手首、肘、肩の3つの関節における、重力によるトルク(重力トルク:GRAトルク)、運動依存性のトルク(相互作用トルク:INTトルク)、筋活動によるトルク(筋トルク:MUSトルク)、鍵盤反力によるトルク(反力トルク:KEYトルク)およびそれらの総和(総トルク:NETトルク)を算出した。なお、これらのトルクの間には次の関係が成り立つ。

$$\text{NET} = \text{MUS} + \text{INT} + \text{GRA} + \text{KEY}$$

MUSトルクは、GRAトルクに抗する静的な成分

と、運動の生成に寄与する動的な成分を持つため、本研究では動的な成分 (MUS-|GRA|) を、「MUS+」と表記することとした。

打鍵中に発揮した INT トルクと MUS+トルクの総量を調べるため、これらのトルクを、手の下降動作の開始 (T1) から鍵盤が底に着く瞬間まで (T2) の区間で積分した。

個々のトルクに対するグループ (被験者間要因: ピアニスト, 初心者), 音量 (被験者内要因: p, mp, mf, f) の主効果および相互作用効果は、繰り返しのある 2 元配置の分散分析法 (2 × 4 混合要因計画) によって検定した ( $\alpha = .05$ )。

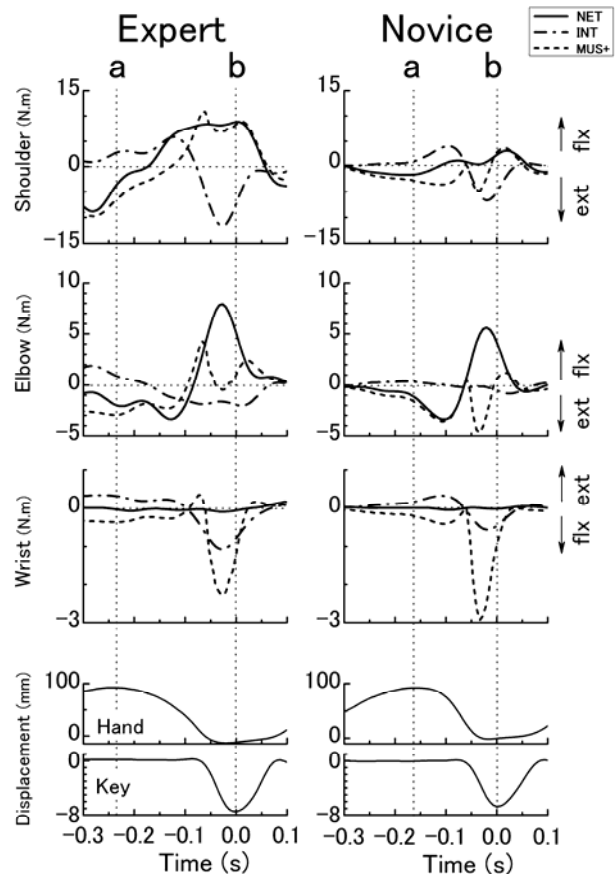
### 3. 結果

#### 3. 1 トルクの時系列変化

Fig.2 はフォルテの音量で打鍵した際の、肩、肘、手首関節における NET, INT, MUS+トルク、および手と鍵盤の鉛直方向運動変位の時系列データを表す。肩では、ピアニストは、指先と鍵盤が接触するおよそ 100ms 前から鍵盤が底面に衝突するまでの間、屈曲方向の MUS+トルクが増大し、その結果、屈曲方向の NET トルクが作り出されていた (Fig.2 “shoulder” 左)。一方で、初心者は、打鍵動作を行う間、常に伸展方向の MUS+トルクを発揮していた。しかし、屈曲方向の INT トルクが生じていたため、MUS+トルクと INT トルクが相殺しあった結果、初心者の肩関節の NET トルクに顕著な増大は認められなかった (Fig.2 “shoulder” 右)。

肘では、ピアニストと初心者の双方で、手を降下させている間は伸展方向の NET トルクが作り出されており、指先が鍵盤を押さえている間は屈曲方向の NET トルクが作り出されていた。ピアニストでは、指先が鍵盤を押さえている間、伸展方向の INT トルクが生じていたが、伸展方向の MUS+トルクはほとんど認められなかった (Fig.2 “elbow” 左)。一方で、初心者ではこの間、伸展方向の INT トルクの生成はほとんど認められず、伸展方向に顕著な MUS+トルクの増大が認められた (Fig.2 “elbow” 右)。

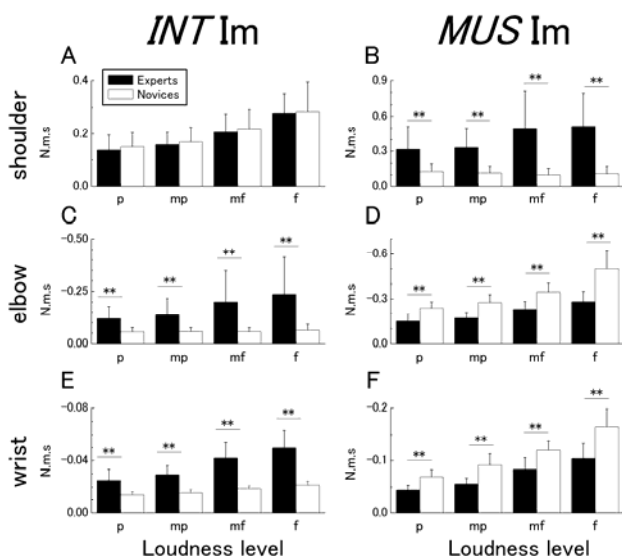
手首では、指先が鍵盤を押さえている間、ピアニストと初心者の双方で、屈曲方向の INT トルクと MUS+トルクの発揮が認められた (Fig.2 “wrist”)。しかし、ピアニストの方が初心者に比べてより大きな INT トルクを作り出しており、一方で MUS+トルクの発揮量はピアニストの方が少なかった。



**Fig. 2.** The time-history curves of the computed NET (solid line), INT (dashed line), and MUS+ (gray line) at the shoulder, elbow, and wrist joints, and key and hand vertical position at *forte* loudness level, and in one representative expert (left panel) and novice (right panel) pianist. The curves represent the average of 30 keystrokes. The dotted vertical lines indicate the moments of the highest hand position (a) and the lowest key position (b).

#### 3. 2 熟練度とトルクの積分量の関係

Fig.3 の A, C, E は、それぞれ肩、肘、手首関節における INT トルクの積分値 (INTIm) を被験者全員で平均した値を、音量毎に示している。分散分析を行った結果、肘の伸展方向 ( $F(1, 12) = 7.04, p = .021$ ) と手首の屈曲方向 ( $F(1, 12) = 33.75, p < .001$ ) の INTIm は、全ての音量でピアニストの方がピアノ初心者よりも有意に大きな値を示した。グループと音量の交互作用も、肘の伸展方向 ( $F(3, 36) = 4.20, p = .012$ ) と手首の屈曲方向 ( $F(3, 36) = 7.28, p < .001$ ) の INTIm で認められた。また、全ての関節で有意な音量の主効果が認められた。



**Fig. 3.** *Left panel:* The group means of the *INTIm* for shoulder flexion (A), elbow extension (C), and wrist flexion (E) during the keystroke. *Right panel:* The group means of the *MUSIm* for shoulder flexion (B), elbow extension (D), and wrist flexion (F) during the keystroke. Error bars represent  $\pm 1$  SD.

Fig.3のB, D, Fは、それぞれ肩、肘、手首関節におけるMUS+トルクの積分値(MUSIm)を被験者全員で平均した値を、音量毎に示している。分散分析を行った結果、肘の伸展方向( $F(1, 12) = 24.67, p < .001$ )と手首の屈曲方向( $F(1, 12) = 27.73, p < .001$ )のMUSImは、全ての音量でピアニストの方がピアノ初心者よりも有意に小さな値を示し、一方で、肩の屈曲方向のMUSImは、全ての音量でピアニストの方がピアノ初心者よりも有意に大きな値を示した( $F(1, 12) = 12.97, p = .004$ )。グループと音量の交互作用は、肩の屈曲方向( $F(3, 36) = 4.56, p = .008$ )と肘の伸展方向( $F(3, 36) = 4.77, p = .007$ )のMUSImで認められた。また、全ての関節で有意な音量の主効果が認められた。

## 4. 考察

### 4. 1 ピアニストとピアノ初心者の打鍵動作における上肢関節の動力学特性の違い

本研究において、我々は、ピアニストとピアノ初心者の打鍵動作における上肢関節の動力学特性の違いについて調べた。その結果、全ての音量域において、ピアニストは初心者に比べて、より多くの相互作用トルクを肘と手首に作り出していた。我々の先行研究の結果、ピアニストは初心者に比べて、打鍵時の肩関節伸展運動の減速度が有意に大きな値を示した[5]。また、肩の伸展動作の減速に先行して、肩

の屈筋(三角筋前部)の筋活動の増大が、ピアニストにおいてのみ認められた[6]。本研究ではさらに、肩の屈曲方向の筋トルクは、ピアニストの方が初心者よりも大きな値を示すことが明らかとなった。したがって、ピアニストは近位の身体部位(肩)の運動を三角筋前部の収縮によって意図的に減速させることで、遠位の身体部位(肘、手首)に相互作用トルクを作り出しており、一方で初心者は、腕の降下中に肩関節の回転運動を減速させておらず、そのため、遠位の身体部位において相互作用トルクをほとんど利用していないことが明らかとなった。さらに、音量の増大に伴って、ピアニストは肘と手首の相互作用トルク量を増大させていたのに対し、初心者の相互作用トルク量には顕著な変化が認められなかった。これらの結果は、長期的なピアノ訓練によって、ピアニストはより効果的に相互作用トルクを利用することが可能な上肢運動制御方略を獲得したことを示唆している。

### 4. 2 熟練に伴う打鍵動作の生理学的運動効率の向上

ピアニストは初心者に比べ、筋トルクの発揮量は肘と手首ではより小さな値を、肩ではより大きな値を示した。これは、ピアニストは肩の屈筋を用いて打鍵動作にブレーキをかけることで肘と手首に相互作用トルクを作りだし、それによって、肘と手首の筋トルクを軽減させていることを示唆している。人間の身体構造は、体幹から指先の方に向かうにつれて、筋肉の太さ(横断面積)が小さくなるという性質を持つ。また、筋肉の疲労のしやすさは、筋肉の横断面積の大きさに反比例することが知られている[8]。したがって、肩の筋トルクを増やすことで、肘と手首の筋トルクを減らすというピアニストの方略は、「疲労しやすい筋肉の仕事量を軽減させ、その代わりに、疲労しにくい筋肉の仕事量を増大させている」と解釈することができる。演奏中に前腕や上腕の筋肉が疲労すると、打鍵動作は不正確になり、また筋肉が発揮できる力も低下する。その結果、ミスタッチは増加し、演奏テンポは遅くなるなど、時間と共にパフォーマンスの質は低下していく。さらに、数時間に及ぶ練習の間、手や腕に負担のかかる打鍵動作を続けると、腱鞘炎や局所ジストニアといったピアニストにとって職業病といわれる故障が発症するリスクが増大する[7]。これらの問題を回避するために、ピアニストは長期的な訓練を通して、相互作用トルクを利用することで上肢の筋の疲労を軽減する打鍵運動制御方略を獲得したものと推察される。

### 4. 3 演奏、指導現場への提言

リストやラフマニノフの楽曲やショパンの練習曲といった、高度な演奏技巧が求められるピアノ曲を

演奏・練習する際に、手や前腕の筋肉が疲労することは少なくない。演奏時の筋疲労を回避する一つの方法は、筋力をつけることであろう。事実、先行研究では、ピアニストの手の筋肉はピアノ初心者に比べ耐疲労特性が強いという報告がなされている[13]。しかし、我々がピアニストとピアノ初心者の握力および各指の握み力を比較した結果、両者の間に有意な差は認められなかった[1]。演奏時の筋疲労を回避するもう一つの方法として、打鍵時の筋肉の仕事量を軽減させることが考えられる。それを実現する運動技術の一つとして、本研究では、ピアニストは相互作用トルクを効果的に利用することで、上腕部および前腕部の筋肉の仕事量を初心者の約3分の2程度にまで軽減させていることが明らかとなった。肘と手首に生じる相互作用トルクは、主に腕を振り下ろしている際に肩の屈曲筋（三角筋前部）が適切なタイミングで収縮することによって作り出されているため、初学者から中級者はその使い方を習得することで、運動効率の良い打鍵動作が可能となることが期待される。しかし、打鍵テンポを増大する際に、ピアニストがこのような運動制御方略を利用しているかは不明であり、今後の研究が必要である。

## 謝辞

本研究の遂行にあたり、温かい激励と献身的なご指導をいただいたハノーバー音楽大学音楽生理学研究研究所長の Eckart Altenmüller 教授、ATR 脳情報研究所の大須理英子主任研究員、中西淳研究員、大阪大学工学部・ERATO 浅田プロジェクトの細田耕准教授、東京大学教育学部・JSPS 学振特別研究員の平島雅也博士、同志社女子大学音楽学部の中野慶理准教授、大阪大学医学系研究科の橋詰謙准教授、松尾知之講師に、心よりの感謝の意を表します。本研究の一部は、中山隼雄科学技術文化財団「平成19年度研究開発助成(B)」の支援を受け、実施いたしました。

## 参考文献

- [1] Aoki, T., Furuya, S., & Kinoshita, H. (2005). Finger tapping ability in male and female pianists and non-musician controls. *Motor Control*, 9, 23-39.
- [2] Bastian, A.J., Martin, T.A., Keating, J.G., & Thach, W.T. (1996). Cerebellar ataxia: abnormal control of interaction torques across multiple joints. *Journal of Neurophysiology*, 76, 492-509.
- [3] Dounskaia, N. (2005). The internal model and the leading joint hypothesis: implications for control of multi-joint movements. *Experimental Brain Research*, 166, 1-16.

- [4] 古屋晋一, 木下博 (2003). 打鍵運動. 矢部京之助, 大築立志, 笠井達哉ら編, 入門運動神経生理学 (pp. 223-229). 市村出版.
- [5] Furuya, S. & Kinoshita, H. (2007). Roles of proximal-to-distal sequential organization of the upper limb segments in striking the keys by expert pianists. *Neuroscience Letters*, 421, 264-269.
- [6] Furuya, S. & Kinoshita, H. (2008). Organization of the upper limb movement for piano key-depression differs between expert pianists and novice players. *Experimental Brain Research*, 185, 581-593.
- [7] Furuya, S., Nakahara, H., Aoki, T., & Kinoshita, H. (2006). Prevalence and causal factors of playing-related musculoskeletal disorders of the upper extremity and trunk among Japanese pianists and piano students. *Medical Problems of Performing Artists*, 21, 112-117.
- [8] Herzog, W. (2000). Muscle properties and coordination during voluntary movement. *Journal of Sports Science*, 18, 141-152.
- [9] Hirashima, M., Kudo, T., & Ohtsuki, T. (2003). Utilization and compensation of interaction torques during ball-throwing movements. *Journal of Neurophysiology*, 89, 1784-1796.
- [10] Kinoshita, H., Furuya, S., Aoki, T., & Altenmüller, E. (2007). Loudness control in pianists as exemplified in keystroke force measurements on different touches. *Journal of the Acoustical Society of America*, 121, 2959-2969.
- [11] Koshland, G.F., Galloway, J.C., & Nevoret-Bell, C.J. (2000). Control of the wrist in three-joint arm movements to multiple directions in the horizontal plane. *Journal of Neurophysiology*, 83, 3188-95.
- [12] Mark, T. (著), 小野ひとみ (監訳), 古屋晋一 (訳) (2006) ピアニストならだれでも知っておきたい「からだ」のこと, 春秋社
- [13] Penn, I-W., Chuang, T-Y., & Hsu, T.C. (1999). EMG power spectrum analysis of first dorsal interosseous muscle in pianists. *Medicine & Science in Sports and Exercise*, 31, 1834-1838.