

## **Muscle-fiber pennation angles are greater in hypertrophied than in normal muscles**

YASUO KAWAKAMI, TAKASHI ABE, AND TETSUO FUKUNAGA

Muscle-fiber pennation angles are greater in hypertrophied than in normal muscles. *J. Appl. Physiol.* 74(6): 2740-2744, 1993.

Углы перистости были измерены в естественных условиях с использованием ультразвука, чтобы изучить отношение между перистостью и размером мышцы у 32 субъектов мужского пола (от нетренированных до высоко тренированных бодибилдеров). Посредством ультразвукового изображения В-способом, были определены углы перистости и толщина *triceps brachii*, первый как угол между направлением волокон и апоневрозом для длинной и медиальной головок *triceps brachii*, второй как расстояние между проекциями мышц и кости. Углы перистости были в диапазоне от 15 до 53 град для длинной головки и от 9 до 26 град для медиальной головки. Полученные значения, были похожими или несколько большими, чем в публикациях и существующих данных относительно человеческих трупов. Существенные различия были обнаружены между обычными людьми и бодибилдерами в толщине мышцы и углах перистости ( $P < 0,01$ ), Обнаружены существенные корреляции между толщиной мышцы и углами перистости обеих головок: длинной ( $r = 0.884$ ) и медиальной ( $r = 0.833$ ) предполагается, что гипертрофия увеличивает углы перистости мышцы

**ультразвук; толщина мышцы; перистые мышцы; *triceps brachii***

**МОРФОЛОГИЧЕСКИ**, скелетные мускулы разделены на два типа: мышцы с параллельным ходом мышечных волокон, которые лежат параллельно линии силы действия мышцы и мышцы с перистым ходом мышечных волокон, в которых волокна прикрепляются к сухожилию под углом к линии действия силы мышцы (10). Перистые мышцы привлекают внимание исследователей из-за их функциональных особенностей (3, 7, 17)

.Увеличение силы мышц при силовой тренировке связано с гипертрофией мышцы, нервной адаптацией, и изменениям в архитектуре мышечных волокон (4,9,10,14). Nacisi и др. (14) заключил, что гипертрофия мышцы объясняет 40 % увеличения силы мышцы, и другие 60 % были приписаны изменениям в нервном управлении, архитектуре мышцы, или обоим сразу. Maughan и др. (12) продемонстрировал обратные отношения между площадью поперечного сечения мышцы и отношением силы мышцы к площади ее поперечного сечения (CSA). Они предположили, что в больших мышцах углы перистости бы быть больше, что привело бы к меньшему отношению силы/CSA. Недавнее продвижение технологии сделало возможным измерение CSA мышц в естественных условиях с использованием ультразвука (8), компьютерной томографии (12), и магнитно-резонансного сканирования (14), тогда как, до настоящего времени, информация относительно архитектуры мышцы (углы перистости, длина волокна) была получена главным образом посредством исследования человеческих трупов (1, 2, 16). Недавно, Henriksson-Larsen и др. (6) предложил метод измерения углов перистости и длины мышечных волокон в естественных условиях с использованием аппарата ультразвука. Они показали, что углы перистости волокон vastus lateralis мускул были независимы от размера волокна. Эти результаты противоречили предыдущим исследованиям, процитированным выше.

**Цель** существующего исследования состояла в том, чтобы измерить углы перистости мышечных волокон в естественных условиях с использованием ультразвука, чтобы исследовать отношения между углами перистости и толщиной мышцы в аспекте различного тренировочного статуса исследуемых. Предполагалось, что большие мышцы имеют большие углы перистости.

**МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.** Исследовались тридцать два здоровых мужчины [возраст,  $23 \pm 5$  лет (SD); рост  $171 \pm 6$  см; масса,  $70 \pm 11$  кг]. Согласие на основе полной информации было получено от каждого исследуемого прежде, чем исследование началось. Исследуемые отличались по их тренировочному ста-

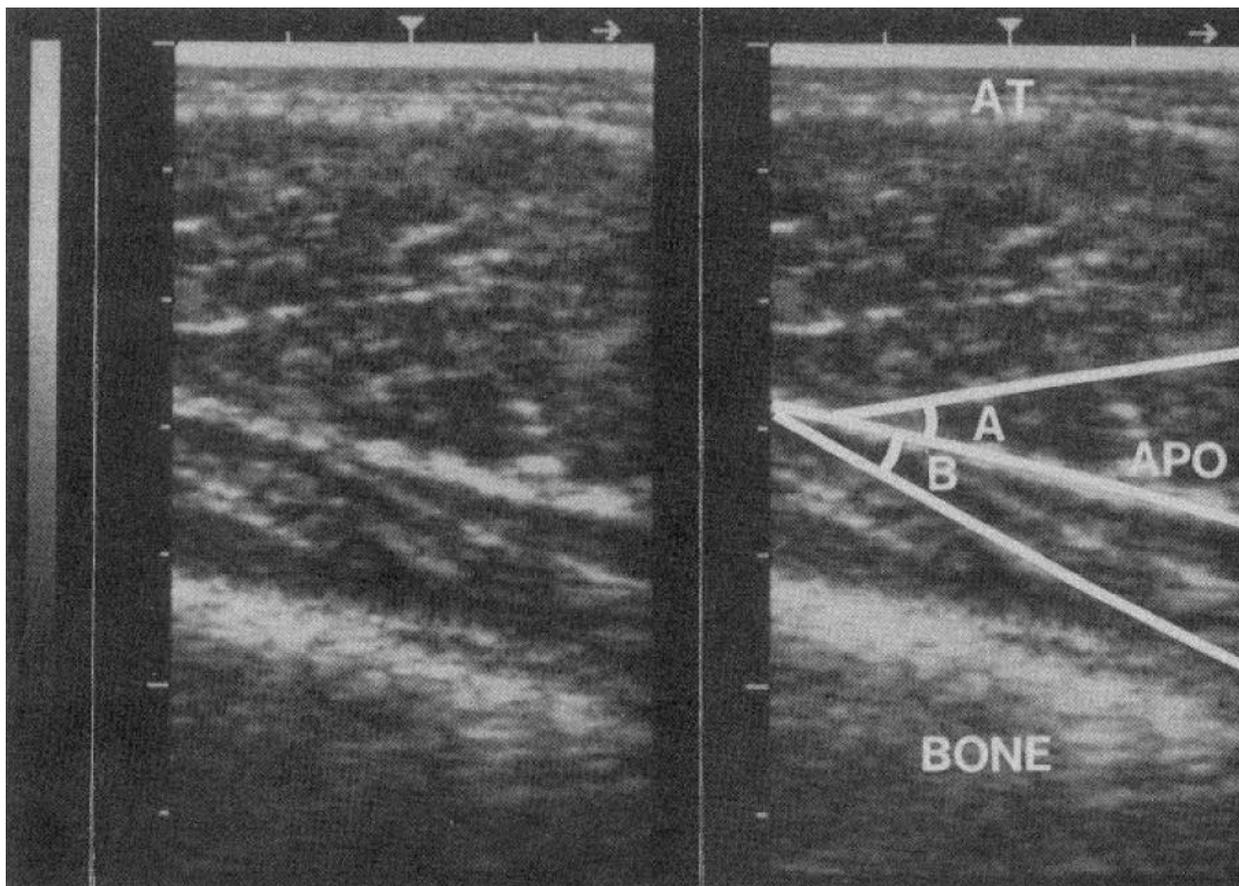
тусу и включали нетренированных необученных студентов, умеренно активных субъектов, и высоко квалифицированных бодибилдеров. обхват плеча у исследуемых варьировал от 24,8 до 40,5 см.

**Измерение толщины мышцы.** Толщина мышцы triceps brachii была измерена с аппаратом ультразвука В-способом (SSD-500, Aloka). Точность и линейность изображения были подтверждены заранее при использовании акустической величины отклонения (образцовый переменный ток 2, Лаборатории ATS) с булавками, прикрепленными по диагонали в изображении и сравнивая расстояние между булавками с вертикальным расстоянием между отражением булавок в восстановленном изображении. Относительная погрешность определялась как:

$$\text{отн. погрешность} = (\text{измеренное расстояние} - \text{фактическое расстояние}) / \text{фактическое расстояние}$$

Погрешность, наблюдаемая в поверхностных и глубоких областях изображения была такой же (1.3 %), и измерение расстояния от восстановленного изображения считали надежным. Наш метод определения толщины мышцы был подобен процедурам Weiss и Кларка (15) и Martinson и Топит (11). CSA измерялось однократно на участке 40 % расстояния от латерального эпикондилуса до акромиона лопатки, начиная от латерального эпикондилуса. измерение включало длинную и медиальную головки triceps brachii испытуемые стояли с расслабленной рукой в разогнутом положении. Преобразователь, имеющий сканирующую головку с частотой в 5MHz был помещен перпендикулярно ткани и перпендикулярно к плечевой кости. Сканирующая головка была покрыта растворимым в воде гелем, который обеспечил акустический контакт, без изменения высоты кожной поверхности. Подкожное изображение мышцы кости были идентифицированы посредством ультразвукового исследования. Толщина мышцы определялась как расстояние с от внешнего края мышцы до кости. В слой мышцы были включены длинная и медиальная головки.

*Измерение углов перистости мышечных волокон. Головка преобразователя сверхзвукового аппарата была помещена на том же самом участке, где измерялась толщина мышцы параллельно к длинной головке triceps brachii. Перед измерением, субъект вытягивал руку и немного напрягал мышцу. Испытатель*



*Рис. 1. Ультразвуковое изображение от 1 субъекта (слева) и то же самое изображение, в котором белые линии указывают на след от апоневроза (APO) и interspaces среди мышечных волокон (справа). Углы A и B были определены как углы перистости мышечных волокон длинной и медиальной головок, соответственно. AT – подкожная жирная ткань, BONE – плечевая кость.*

визуально определял брюшко мышцы длинной головки и проводил хирургической ручкой для маркировки продольную линию на кожной поверхности в центре брюшка мышцы. Углы между апоневрозом triceps brachii и мышечных волокон оценивались

как углы перистости мышечных волокон (рис. 1). Вид от мышечных волокон медиальной головки иногда был более четким, вид когда немного изменялось направление линии, проведенное ручкой, когда обновленное изображение использовалось для измерения углов перистости медиальной головки. Одиннадцать из 32 субъектов были беспорядочно отобраны и проверены дважды на надежность измерения. Чтобы оценить точность определения толщины мышцы и углов перистости, ультразвуковое исследование было выполнено на конечностях трех человеческих трупов [двое мужчин (73 и 84 лет) и одна женщина (75 лет)].

После диссекции, длинная головка *triceps brachii* была разделена по длинной оси мышцы. Толщина мышцы и углы перистости были измерены вручную, первая как расстояние между поверхностным слоем длинной головки и плечевой кости и последние как углы между апоневрозом и мышечными волокнами. Сверхзвуковой преобразователь был помещен на поверхность длинной головки, и в восстановленном изображении углы между изображением мышечных волокон и апоневроза и толщина мышцы для длинной и медиальной головок были измерены по сравнению с этими характеристиками, измеренными вручную. Углы перистости были измерены в двух положениях, и среднее этих двух изменений использовалась и в ручных и ультразвуковых измерениях. Измерения были выполнены отдельно на двух испытуемых, выбранных вслепую.

**Статистические исследования.** Воспроизводимость измерения толщины мышцы и углов перистости мышечных волокон проверялась посредством регрессионного анализа и критерием Стьюдента. Статистическая значимость взаимосвязи между толщиной мышцы и физическими параметрами (масса тела, обхват плеча) изучалась посредством расчета коэффициентов корреляции Пирсона ( $r$ ) и регрессионным анализом. Различия в толщине мышцы и углах перистости мышечных волокон между нормальными субъектами и бодибилдерами были проверены посредством  $t$ -теста для независимых выборок. Статистическое значение отношений между толщиной мышцы и уг-

лами перистости было проверено посредством регрессионного анализа. Уровень значимости был принят как  $P < 0.05$ .

**РЕЗУЛЬТАТЫ** Таблица 1 демонстрирует измерение толщины мышцы и углов перистости вручную и посредством ультразвука, выполненное на человеческих трупах. Толщина мышцы и углы перистости изменялись от 12 до 21 мм и от 9 до 16 град соответственно. Ультразвуковые размеры отличались от ручных размеров на 0-1 мм для толщины мышцы и 0-1 град для углов перистости. В естественных условиях измеренных на 32 субъектах, толщина мышцы варьировала от 28 до 61 мм. Коэффициент корреляции между первым и вторым измерением толщины мышцы для 11 субъектов составлял  $r = 0.978$ . Не было никаких достоверных различий в среднем арифметическом толщине мышцы этими двумя замераами. Статистически существенные взаимосвязи были установлены между толщиной мышцы и массой тела ( $r = 0,790$ ) и между толщиной мышцы и обхватом плеча ( $r = 0,882$ ).

**Таблица 1.**

Измерение толщины мышцы и углов перистости triceps brachii вручную и посредством ультразвука

	Возраст, лет	пол	Сторона	Толщина мышцы, мм		Угол перистости, град	
				вручную	УЗИ	вручную	УЗИ
Труп 1	73	М.	правая	19	19	14	14
Труп 2	84	М.	левая	21	20	16	15
			правая	18	19	10	11
Труп 3	75	Ж	левая	13	12	9	10

Толщины мышцы - для длинной и для медиальной головки. Углы перистости - для длинной головки. М.– мужчина; Ж – женщина.

Как показано в рис. 1, изображение мышечных волокон было получено для всех субъектов. Углы между апоневрозом и мышечными волокнами (углы перистости мышечных волокон) отличались немного (0,5-1 град) по ультразвуковому изображению. Таким образом, среднее трех измерений одного и того же изображении считали углом перистости Средние находились в

диапазоне 15 до 53 град для длинной головки и от 9 до 26 град для средней головки. Эти результаты соответствовали данным, полученным на человеческих трупах или были больше их (длинная головка на 9 град; медиальная на 13 град) (1) и измеренных на трупах (длинная головка, 9-16град). Два измерения на 11 субъектах дали коэффициенты корреляции  $r = 0.947$  для длинной головки и  $r = 0.865$  для медиальной головки, без достоверных различий между средними. Линии между мышечными волокнами были линейны (параллельны) по большинству субъектов, тогда как у высококвалифицированных бодибилдеров, имеющих обхват плеча в 40 см линии были криволинейны, являясь результатом прикрепления мышечных волокон к апоневрозу под более крутыми углами и постепенным уменьшением под менее крутыми углами (Рис. 2). Эта тенденция особенно четка видна на длинной головке. Сравнение между нормальными субъектами ( $n = 8$ ) и бодибилдерами ( $n = 8$ ) показало, что углы перистости мышечных волокон ( $15 \pm 6$  град против  $33 \pm 16$  град для длинной головки и  $11 \pm 5$ град против  $19 \pm 8$  град для средней головки) так же как толщины мышцы ( $26 \pm 11$  мм против  $46 \pm 18$  мм) было достоверно больше ( $P < 0,01$ ) у бодибилдеров по сравнению с нормальными испытуемыми. Подобные результаты были получены, когда толщина мышцы была нормализована к длине плеча. Отношения между толщиной мышцы и углами перистости мышечных волокон показаны на рис. 3. Толщина мышцы была нормализована к длине руки. Статистически существенные положительные корреляции были обнаружены для длинной головки  $r = 0,884$  и для медиальной головки  $r = 0.833$ .

**ОБСУЖДЕНИЕ** Вероятно, что измерения толщины мышцы могут оценить объем мышцы и степень ее гипертрофии, потому что Martinson и Stokes (11), показали существенную корреляцию между ультразвуковыми измерениями линейных размеров и CSA мышцы. Поэтому, в настоящем исследовании измерение толщины мышцы необходимо было для того, чтобы оценить ее CSA или объем.

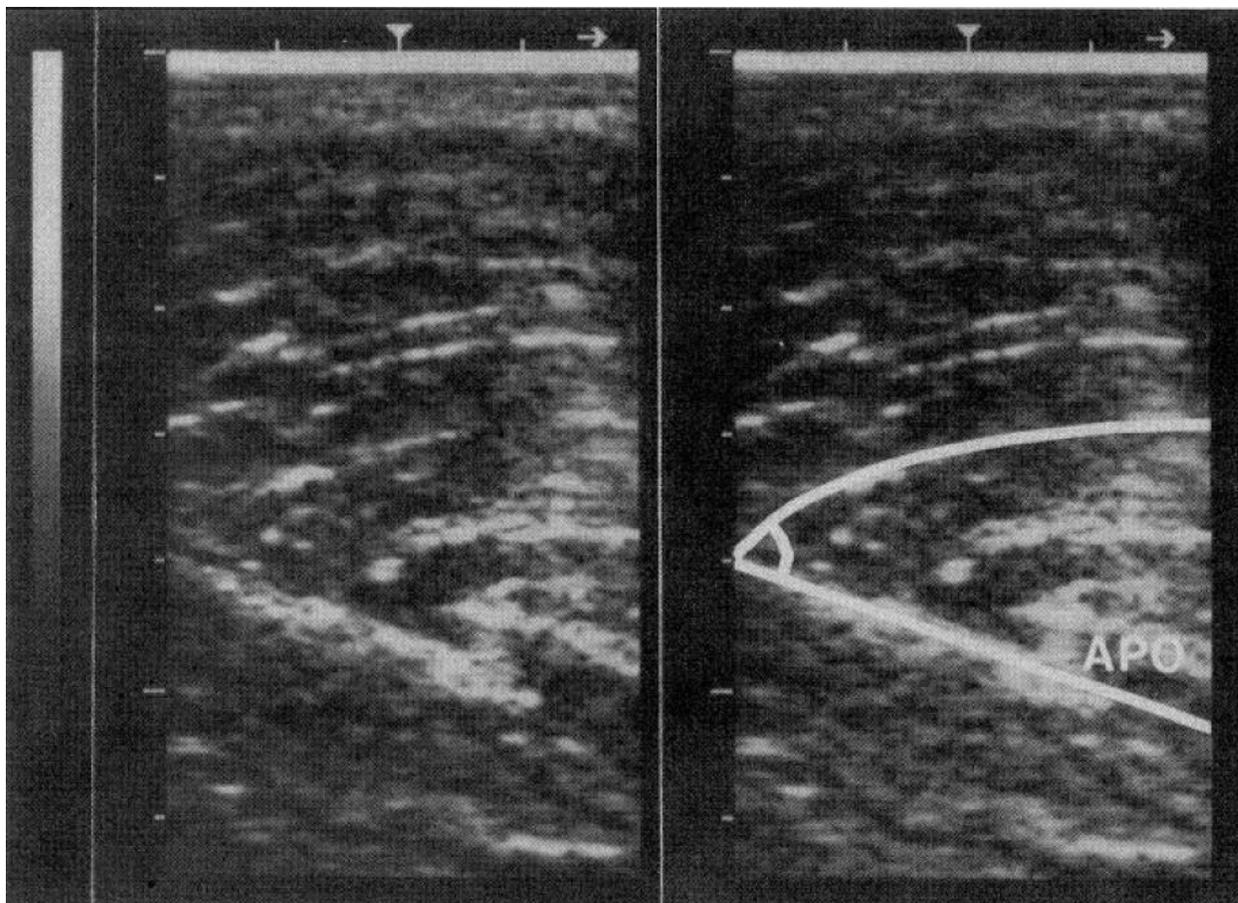


Рис. 2. Ультразвуковая фотография одного хорошо тренированного бодибилдера. Мышечные волокна расположены криволинейно образуют более крутой угол перистости по сравнению с средним положением прикрепления к апоневрозу.

Ультразвуковые и ручные измерения на трупах показали, что посредством ультразвукового исследования можно хорошо оценить толщину мышцы и углы перистости. Погрешность измерения составляет менее 1 мм и менее 1 град соответственно.

Однако, большие трудности связаны с измерениями толщины мышцы, потому что толщина мышцы очень сильно изменяется очень вдоль длины мышцы, как показано на рис. 1.

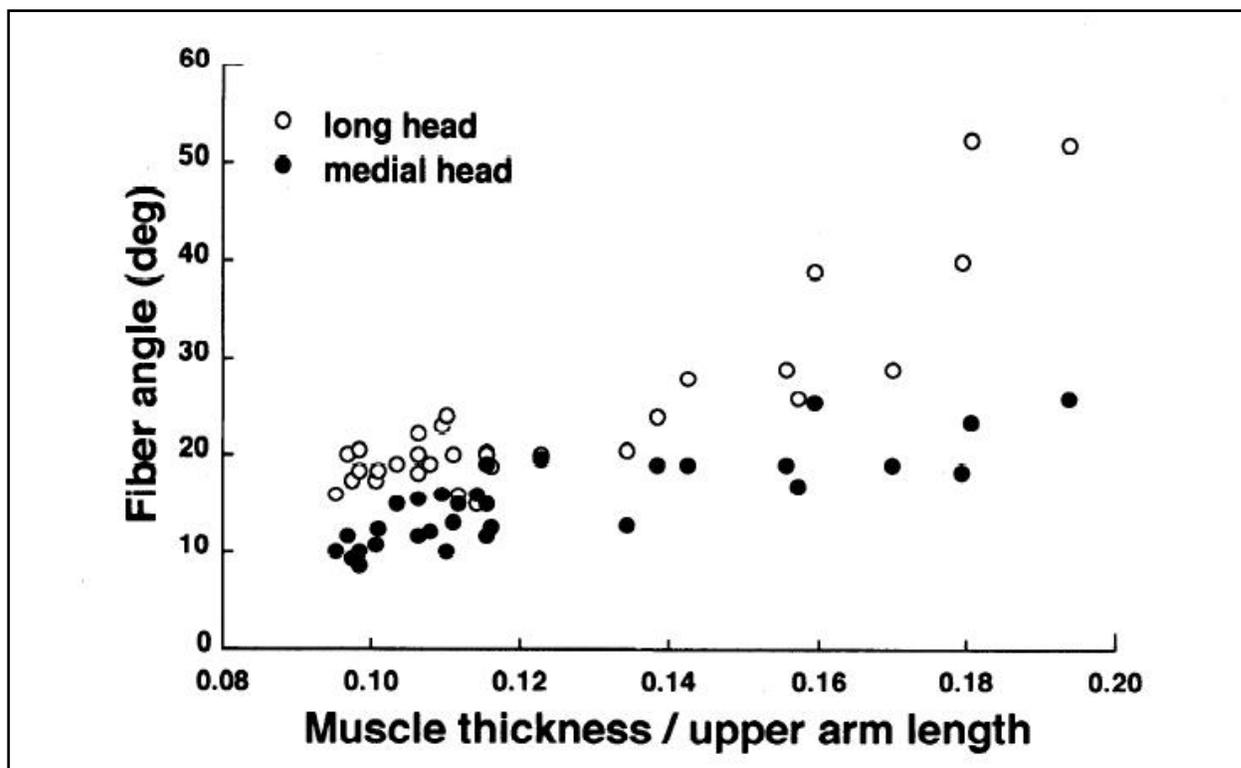


Рис. 3. Отношения между углами перистости мышечных волокон и отношением толщины мышцы к обхвату плеча. И для длинной и для медиальной головок, достоверные статистические коэффициенты корреляции (длинная головка,  $r = 0.884$ ; медиальная головка,  $r = 0.833$ ).

Углы перистости мышечных волокон были такими же или большими, чем соответствующие величины, полученные на трупах в предыдущем исследовании (1) и в настоящем исследовании. Эти несоответствия можно было бы объяснить тем, что в исследованиях, на трупах образцы обычно брались от старых людей, у которых неизвестна история здоровья и после широко переменных методов фиксации; таким образом возможно произошло сжатие в объеме мышцы (5).

Новые факты, обнаруженные в этом исследовании связаны с установлением взаимосвязи между толщиной мышцы и углы перистости мышечных волокон. Этот результат подразуме-

вает, что гипертрофия мышцы сопровождается увеличение углов перистости мышечных волокон. О такой возможности предполагалось в предыдущих исследованиях (9,10, 14). Maxwell et all. (13) предсказал, что для мышцы постоянной длины мышцы, длины волокна, количества волокон, гипертрофия (то есть, увеличение диаметра волокон) должна сопровождаться увеличением углов перистости и толщины мышцы. Полученные результаты подтверждают эту гипотезу. Однако, Henriksson-Larsen и др. (6) использовал те же методы, что и в настоящем исследовании и не нашел никакой корреляции между углами перистости и CSA мышечных волокон. Из чего был сделан вывод, что углы перистости независят от размеров волокон. И это противоречит полученным в настоящем исследовании результатам. Несоответствие между результатами могло бы быть приписано различию в субъектах и исследованных мышцах. Первое, в исследовании Henriksson-Larsen и др. (6) испытуемыми были женщины со средними физическими возможностями. Узкий диапазон изменения CSAs мышечных волокон, возможно, привел к недостоверности статистических результатов, характеризующих зависимость между размером волокна и углом перистости. Существующее исследование использовало мужчин, имеющих различную физическую подготовленность (от нормальных субъектов до высоко тренированных бодибилдеров), что позволило установить взаимосвязь между размером мышцы и углами перистости мышечных волокон. Во вторых, Henriksson-Larsen и др. изучали *m.vastus lateralis*. соотношение углов перистости и размеров мышцы у *m.vastus lateralis* и *triceps brachii* может быть различным. В связи с этим необходимы дальнейшие исследования.

У нормальных субъектов мышечные волокна шли линейно под одинаковыми углами, тогда как у высоко тренированных бодибилдеров с гипертрофированными мышцами мышечные волокна расположены криволинейно вокруг ароневроза с более крутыми углами. возможно, столь большие углы перистости связаны с большим контрактильным материалом, прикрепляемым на большей площади к сухожилию (9). Следовательно,

криволинейное расположение мышечных волокон является результатом гипертрофии. Такое расположение незначительно увеличивает анатомический поперечник мышцы, что делает соотношение между CSA мышцы и ее силой отличной от мышц с параллельным расположением волокон. Эта гипотеза могла бы объяснить результаты, полученные Jones и Rutherford (9), которые нашли, что силовая тренировка привела к увеличению силы в большей степени по сравнению с площадью поперечного сечения и результаты Maughan и др. (12), которые нашли, обратные отношения между CSA и силой/ CSA. Физиологический поперечник вычислялся по формуле (16)

$$\text{физиологический поперечник} = (MV/FL) \alpha$$

где MV - объем мышцы, и FL - длина волокна мышцы. Косинус угла перистости  $\alpha$  нормализует угол перистости относительно линии действия силы мышцы. Если бы гипертрофия мышцы сопровождала увеличение углов перистости мышечных волокон, то это изменение было бы невыгодным для развития силы. Однако, увеличение углов перистости является следствием того, что больше контрактильного материала присоединено к сухожилию, что, как указано выше, увеличивает объем мышцы и следовательно увеличивает физиологический поперечник. Эти гипотезы должны быть проверены посредством длительных исследований.

Нужно отметить, что углы перистости, измеренные в существующем исследовании были теми же между апоневрозом и мышечными волокнами. Углы перистости, возможно, не точные векторы для того, чтобы предсказать, что эффект перистости волокон влияет на силу переданную от мышцы к сухожилию, если апоневроз находится под углом к линии действия силы мышцы. Но, согласно визуальному наблюдению на человеческих трупах, угол апоневроза на глубокой границе к длинной оси длинной головки был маленьким по сравнению с тем из противоположного апоневроза; таким образом ошибка в предсказании воздействия перистости волокон на передачу силы от угла перистости была бы маленькой, по крайней мере для длинной

головки мышцы. Однако, информация относительно угла между апоневрозом и линией действия мышцы должна быть получена, чтобы точно исследовать передачу силы.

Авторы выражают их искреннюю оценку доктору Н. Ishii и Н. Yorifuji в Университете Токио и доктору М. Ohkubo и А. Imura в Токио Медицинский Колледж для их поддержки в понимании существующей научно-исследовательской работы. Это исследование было поддержано частично Предоставлением 04858024 от Министерства просвещения Японии. Адрес для запросов перепечатки: Y. Kawakami, департамент Спортивных Наук, Колледж Искусств и Наук, Унив Токио, Komaba 3-8-1, Meguro-ku, Токио 153, Япония. Полученный 15 июля 1992; принятый в заключительной форме 7 января 1993.

## REFERENCES

1. AMIS, A. A., D. DOWSON, AND V. WRIGHT. Muscle strengths and musculo-skeletal geometry of the upper limb. *Eng. Med.* 8: 41-48, 1979. .
2. AN, K. N., F. C. Fu, B. F. MORREY, R. L. LINSCHIED, AND E. Y. CHAO. Muscles across the elbow joint: a biomechanical analysis. *J. Biomech.* 14: 659-669, 1981.
3. .CUTTS, A. The range of sarcomere lengths in the muscles of the 10. human lower limb. *J. Amt.* 160: 79-88, 1988.
4. DAVIES, J., D. F. PARKER, O. M. RUTHERFORD, AND D. A. JONES. Changes in strength and cross sectional area of the elbow flexors as 11. a result of isometric strength training. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 57: 667-670, 1988.
5. FRIEDRICH, J. A., AND R. A. BRAND. Muscle architecture in the 12\* human lower limb. *J. Biomech.* 23: 91-95, 1990.
6. HENRIKSSON-LARSEN, K., M.-L. WRETLING, R. LORENTZON, AND L. OBERG. Do muscle fibre size and fibre angulation correlate in 13 . pennated human muscles? *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 64: 68-72, 1992.
7. HUIJING, P. A., A. A. H. VAN LOOKEREN CAMPAGNE, AND J. F. 14. KOPER. Muscle architecture and fibre characteristics of rat gastrocnemius and semimembranosus muscles during isometric contractions. *Acta Anat.* 135: 46-52, 1989.
8. IKAI, M., AND T. FUKUNAGA. Calculation of muscle strength

per 15. unit cross-sectional area of human muscle by means of ultrasonic measurement. *Int. 2. Angew. Physiol. Einschl. ArbeitsphysioZ.* 26: 16 | 26-32, 1968.

9. JONES, D. A., O. M. RUTHERFORD, AND D. F. PARKER. Physiological changes in skeletal muscle as a result of strength training. *Q. J. Exp. Physiol.* 74: 233-256, 1989.

10. MARTINSON, H., AND M. J. STOKES. Measurement of anterior tibial muscle size using real-time ultrasound imaging. *Eur. J. AppZ. Physiol. Occup. Physiol.* 63: 250-254, 1991.

11. MAUGHAN, R. J., J. S. WATSON, AND J. WEIR. Muscle strength and cross-sectional area in man: a comparison of strength-trained and untrained subjects. *Br. J. Sports Med.* 18: 149-157, 1984.

12. MAXWELL, L. C., J. A. FAULKNER, AND G. J. HYATT. Estimation of number of fibers in guinea pig skeletal muscles. *J. AppZ. Physiol.* 37: 259-264, 1974.

13. NARICI, M. V., G. S. ROI, L. LANDONI, A. E. MINETTI, AND P. CERRETELLI. Changes in force, cross-sectional area and neural activation during strength training and detraining of human quadriceps. *Eur. J. AppZ. Physiol. Occup. Physiol.* 59: 310-319, 1989.

14. WEISS, L. W., AND F. C. CLARK. Ultrasonic measurement of upperarm skeletal muscle thickness. *J. Sports Med.* 27: 128-133, 1987.

15. WICKIEWICZ, T. L., R. R. ROY, P. L. POWELL, AND V. R. EDGERTON. Muscle architecture of the human lower limb. *CZin. Orthop. Relat. Res.* 179: 275-283, 1983. JONES, D. A., AND O. M.

16. RUTHERFORD. Human muscle strength 17. training: the effects of three different regimes and the nature of the

17. WOITTIEZ, R. D., P. A. HUIJING, AND R. H. ROZENDAL. Influence of resultant changes. *J. Physiol. Land.* 391: 1-11, 1987. muscle architecture on the length-force diagram of mammalian muscle. *Pfluegers Arch.* 399: 275-279, 1983.