



共収縮とは

横地健治

- スフィンクス
 • ライオンの身体
 • 美しい人間の女性の顔と乳房のある胸
 • 鷲の翼

モロー
 「オイディプスとスフィンクス」
 (メトロポリタン美術館)



Prader-Willi症候群



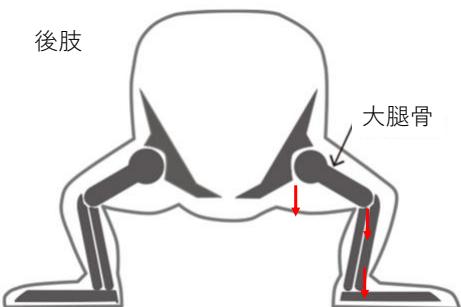
Down症候群

股屈曲過活動
 >股伸展荷重制限
 ≫股屈曲過活動

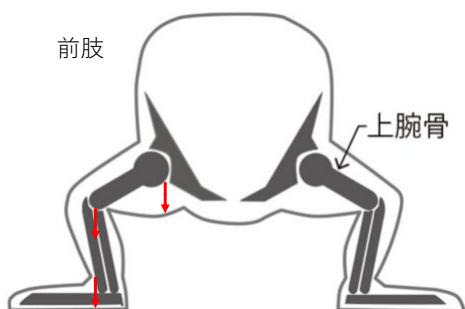
股伸展荷重制限
 ≫股屈曲過活動

1

両生類の側方型姿勢



股屈曲外転位・膝屈曲位・足背屈位で抗重力保持
 ↓
 股伸筋・膝伸展筋・足底屈筋の常時筋収縮状態



肩水平外転位・肘屈曲位・手背屈位で抗重力保持
 ↓
 肩水平内転筋・肘伸筋・手掌屈筋の常時筋収縮状態

当該筋が常時抗重力筋力を持つには

- ① 低エネルギー高頻度筋収縮 究極のtonic state (slow muscle)
 - ② 弹性エネルギーを発生するバネ
 - ③ 張力を発生する紐
- が考えられるが、①と②の混在であろう

2

1

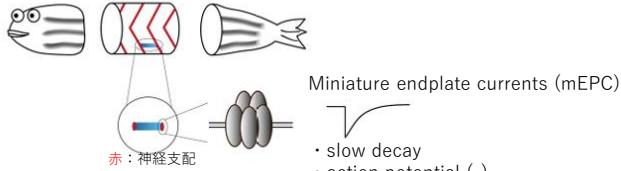
Luna VM, et al. "Slow" skeletal muscles across vertebrate species. Cell Biosci 2015;5:62.

- カエル筋は、tonicとphasicまたはslowとfastに二分 tonic筋はtwitchしない * 哺乳類tonic筋はtwitchあり

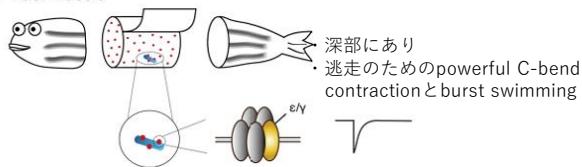
Zebrafish skeletal muscle fibers

・皮膚直下の浅部にあり

- a Slow muscle** 移動と摂食のためのslow undulatory swimmingを行う
* embryoのcoiling

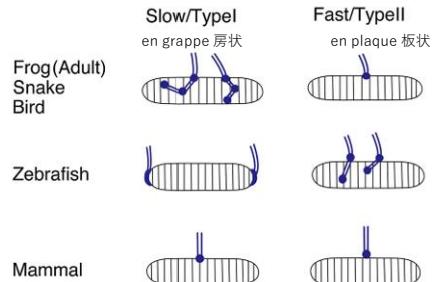


b Fast muscle



slow↔fast
type I↔type II

Motor neuron axons innervating

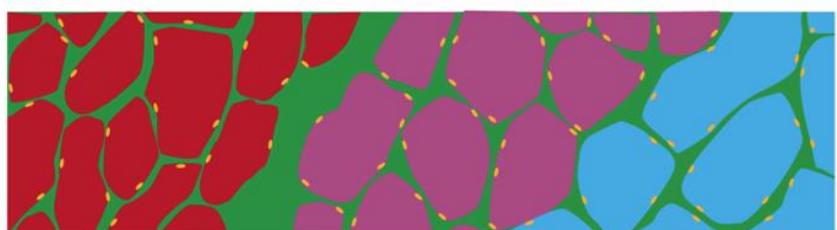


	"Tonic" fiber in frog	Slow fiber in (zebra) fish	Mammalian AP-less fiber	Mammalian type I fiber
Innervation	En grappe/myoseptal	Myoseptal	Multiple innervation	En-plaque
Action potential	(-)	(-)	(-)	(+)
Synaptic current kinetics	Slow	Slow	NA	Slow?
AChR subunits	NA	αβδ	NA	NA

3

Talbot J, et al. Skeletal muscle fiber type: using insights from muscle developmental biology to dissect targets for susceptibility and resistance to muscle disease. Wiley Interdiscip Rev Dev Biol 2016;5:518-34.

D
Illustration of adult zebrafish trunk muscle
Type Slow, Int., Fast



E
Overall fiber type:

Fiber type
Speed of Fatigue
Speed of Contraction
Metabolic Type
Representative Myosin

	Slow-twitch	Fast-twitch		
	Type 1	Type 2A	Type 2X	Type 2B
Speed of Fatigue	Slow <<	Fast <	Fast <	Fast
Speed of Contraction	Slow <<	Fast <	Fast <	Fast
Metabolic Type	Oxidative	Oxidative	Glycolytic	Glycolytic
Representative Myosin	MYH7	MYH2	MYH1	MYH4

- ヒト胎児では20週以前はすべてtype 2C 線維で、それ以降はtype 1 線維が分化し、次に2A、2B 線維が分化する
- 生下時はほぼ分化を完了しているが、5~10%の筋は未分化な状態で、これは1歳頃にはなくなる

4

Muscle Disorders With Effects On Specific Skeletal Muscle Fiber Types

Disorder	Fiber-type effects	Reference(s)
Duchenne muscular dystrophy	Type 2X fibers first to degenerate.	20,21,22
Facioscapulohumeral muscular dystrophy	Maximum force-generating capacity reduced in type 2 fibers. Increased proportion of type 1 fibers.	28,29
Myotonic dystrophy Type 1 (DM1)	Type 1 fiber atrophy and high frequency of type 1 fibers with central nuclei. Force generation reduced more in type 1 fibers.	31,32,33
Myotonic dystrophy Type 2 (DM2)	Type 2 fiber atrophy, type 2 fiber hypertrophy, and high frequency of type 2 fibers with central nuclei.	31,32
Congenital fiber type disproportion	Predominant proportions of type 1 fibers that are consistently much smaller than type 2 fibers.	34
Myosinopathies	<i>MYH7</i> mutations can cause smaller diameter type 1 fibers. <i>MYH2</i> mutations lead to loss of type 2A fibers.	38,149,150,151
Pompe disease	In mouse model, type 2 fibers smaller with massive autophagic build-up.	40,41
Obesity and type 2 diabetes	Reduced proportions of type 1 fibers and increased proportions of type 2X fibers.	47,48,49
Muscle inactivity (spinal cord injury, bed rest)	Type 1 fiber atrophy. Fiber-type shift from type 1 and 2A to 2X.	56,58
Aging/sarcopenia	Type 2 fiber loss and atrophy. Smaller diameter type 2 fibers.	61,62
Heart failure, chronic obstructive pulmonary disease	Fiber-type shift from type 1 to type 2 (limb muscles). Fiber-type shift from type 2 to type 1 (diaphragm).	69

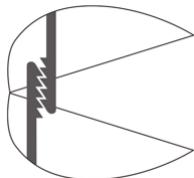
5

二枚貝のキャッチ収縮機構



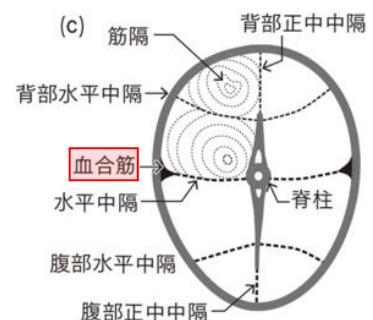
キャッチ筋 catch muscle

極めて少ないエネルギーで殻を開けようとする力に対抗する



ラチエット(ratchet)機構
歯車のかみ合った状態
twitchinのリン酸化

本川 達雄 「ウニはすごい バッタもすごい - デザインの生物学」(2017)
「ウマは走るヒトはコケる 歩く・飛ぶ・泳ぐ生物学」(2024)

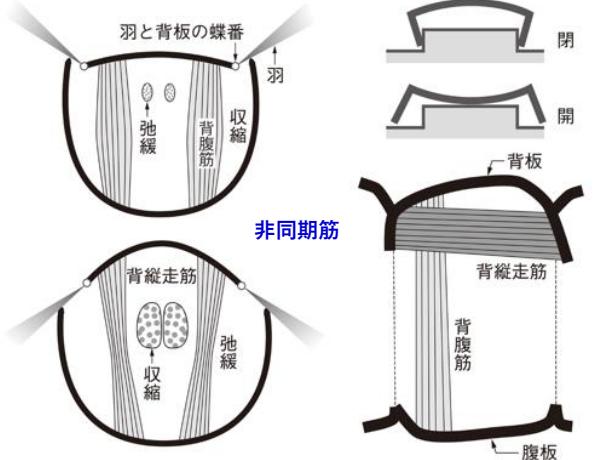


- 全筋の10%以下
- 酸化型遅筋（赤筋、type I）
- ふだんの泳ぎは血合筋を使う
*白筋は逃走や採餌に使う
- 体軸から最も遠いので大きなトルクを得る
- 筋膜で椎骨につながり、体幹の交互運動を行う *fascia*
- 両側体側筋はある程度常時収縮状態を保つ
- 筋膜の弾性エネルギーを使う
*マグロ泳ぐことにより水を口の中に押し込んでエラに酸素を供給している
→泳がなければ窒息してしまう ラム換水 ram ventilation

6

3

昆虫の間接飛翔筋



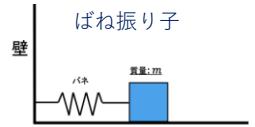
両筋とも主体はバネ様線維で、これに筋線維がついている

- ・羽を100~1000Hzで動かす
筋の収縮・弛緩の交代の上限は100Hz
例えば、120回/秒の羽ばたきで神経インパルスは3発/秒
- ・背腹筋と背縦走筋は、神経刺激を受けて飛翔モードに入ると、 Ca^{++} 濃度は保たれ、引っ張られると力を発生し、緩めると元に戻ろうとする **バネのようになる**
- ・背腹筋が縮むと背板が下に引っ張られ、前後に開き、背縦走筋が引き伸ばされる→背縦走筋が収縮して元に戻ろうとする→前後が狭まり、背板が上に上がる→背腹筋が引き伸ばされ、元に戻ろうとする

$$m \frac{d^2x}{dt^2}(t) = -kx(t)$$

$$x(t) = A \sin(\omega t) \quad \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

k : 筋肉とツチクラからなるばね定数:
 m : 羽の重量



- ・羽ばたき音の発生は、胸郭が共鳴箱となっているので、飛翔エネルギーを付与している
- ・小さい羽でも羽ばたき回数を増やし飛翔が可能となった

- ・跳躍に関節部のツチクラの弾性エネルギーを使う

ツチクラを筋肉でゆっくり引っ張り変形させて弾性エネルギーを蓄え、一気に開放する

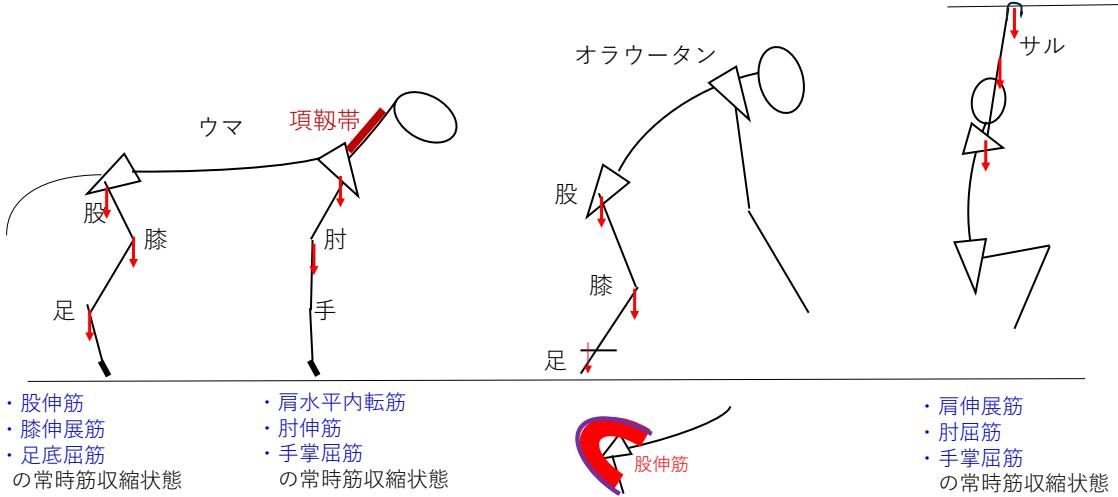
7



8

4

四足歩行から二足歩行へ



姿勢保持時の抗重力

- モーメントアームが長い筋表層に強靭な筋膜があり、これにslow fiberが付着する
- slow fiberの高頻度放電が筋膜に弾性エネルギーを与え、姿勢保持力となる
- 移動運動時には、これが筋収縮力に加重される *筋弛緩は阻害するが無害であろう

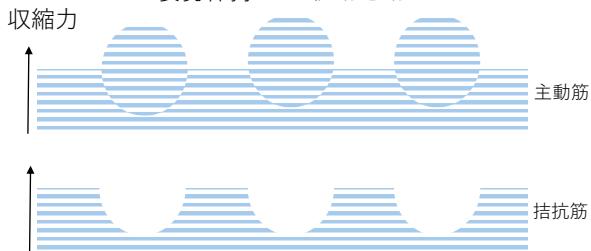
9

正常共収縮

↓ myofascial systemの弾性エネルギーが関与する

Tonic contraction

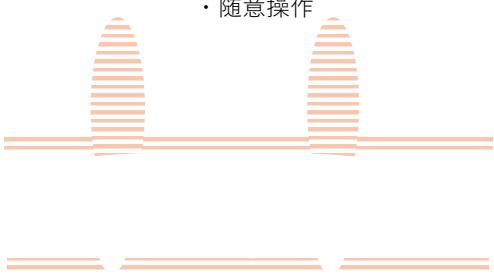
- ・姿勢保持
- ・移動運動



× agonist-収縮 ↔ antagonist-弛緩

Phasic contraction

- ・随意操作

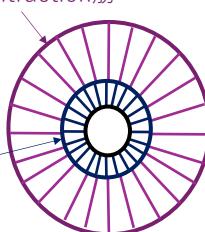


輪状咽頭筋
(食道入口部括約筋)

常時収縮していて、嚥下時ののみ弛緩する

固定された筋膜 phasic contraction筋

固定されない筋膜
tonic contraction筋



Writhing期筋活動

- ・持続収縮量が大きい
 - ・相反抑制量が小さい
- tonic contraction*

Preterm期筋活動

- ・持続収縮は寡少
- ・相反抑制の不要

*agonistのtwitching*様

Fidgety期筋活動

- ・持続収縮量が減る
- ・相反抑制量が大きくなる

phasic contraction

10

Einspieler C, Orayer D, Prechtl HFR. Fetal Behaviour: A Neurodevelopmental Approach. Mac Keith Press. 2012.

- Startles
- General movements
- Hiccup
 - Isolated arm movements
 - Isolated leg movements
 - Breathing movements
 - Micturition
 - Side-to-side movement of the head
 - Anteflexion and retroflexion of the head
 - Jaw opening

• Hand-face contact

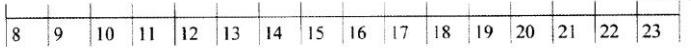
- Opening and closing of the fingers
- Stretch
- Yawn
- Isolated finger movements
- Tongue protrusion
- Sucking and swallowing

いずれも *phasic* な運動である

• Slow eye movements

• Rapid eye movements

• Blinking



Gestational age (weeks)

胎動は
脊髄にその発信機構があり
その運動知覚を脳が得て
身体図式を生成し
その運動ネットワークを生成する

2-day-old chick embryoで、lumbosacral cordを分離し、
sensory inputを切除する
→下肢運動は保たれる (Hamburger 1966)

11



安静時肢位 股屈曲外転外旋 強
間節運動速度 速い
共収縮 弱い

→
→
→

より股屈曲内転内旋
遅い
強い

12



満期産児
正常GM

- ・股膝屈曲の減少
- ・速い動き
- * 共収縮の減少



13



満期産児
正常GM

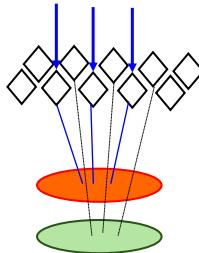
- ・股膝屈曲の減少
- ・速い動き
- * 共収縮の減少



14



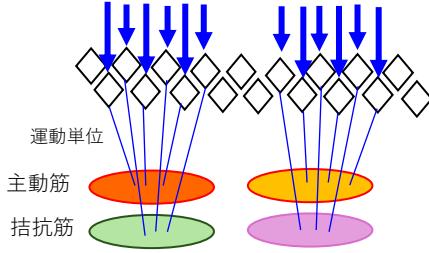
preterm *twitching*



- ・同時発火細胞は少数
- ・発火時間は短い

▶個体運動発生は、股屈曲から始まる

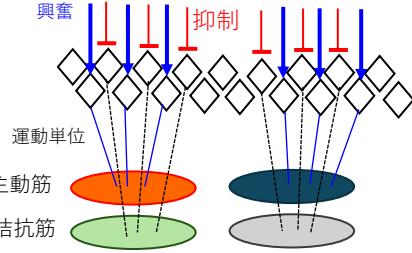
Writhing *tonic*



- ・同時発火細胞は多数
- ・主動筋・拮抗筋の区別が不能
- ・同時発火する連合運動筋(共同運動筋)あり
- ・発火時間は長い (tonic)

同時発火する脊髄運動ネットワークを最大限増加させる

Fidgety *phasic*



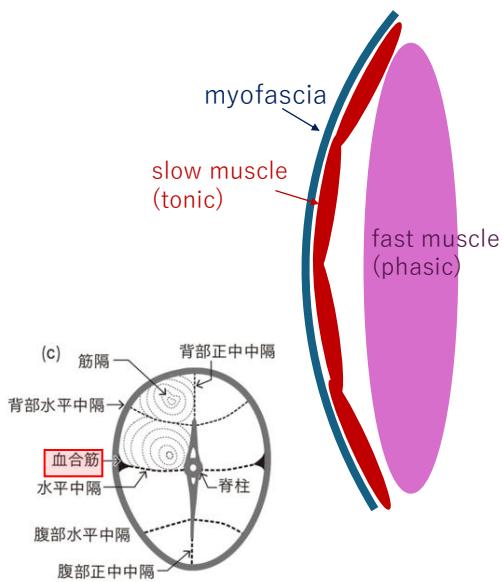
- ・拮抗筋の抑制が可能
- ・同時発火細胞は可変
- ・共同運動筋の発火を抑制し、非共同運動筋の発火が可能

増大した脊髄運動ネットワークに対し大脳抑制系の増大で対応する

15

持続抗重力筋の筋膜筋複合体支持

×骨性支持 ×骨靭帯支持



- ・後頸筋 + 項靭帯
- ・後背筋
- ・大殿筋 + 腸脛靭帯
- ・中間広筋
- ・ヒラメ筋



四つ足動物では股外転位で荷重するので、腸脛靭帯で支える

16

股屈曲過活動の成り立ち

- Writhingの股膝屈曲位tonic contraction優勢で相反抑制寡少の状態を脱却できない
- 股膝屈曲位のtonic contraction優勢のまま相反抑制は進化した
 - ・拮抗筋の筋活動量は多い
 - ・筋膜構造を強靭化し、弾性エネルギーを多用する

股伸展荷重制限の成り立ち

- Writhingの股膝屈曲位tonic contraction優勢の相反抑制寡少状態を脱却するが、phasic contractionの筋力動員系に制限がある
 - ・拮抗筋の筋活動量は少ない
 - ・股外転位・骨盤前出し位で股伸展筋負荷を減らす

17

大脳白質性共収縮制御障害の成り立ち

- 広汎な大脳白質障害により基底核運動系に対する大脳の調整が働かない状態が発達期に起こり、運動過活動状態となる
- Writhingの股膝屈曲位tonic contraction優勢の相反抑制寡少状態のまま運動過多となる
 - ・もともと拮抗筋活動は多いので、強い同時収縮は過多となる *dystonia*
 - ・同時収縮状態に加重する突発的運動を起こす 不随意運動 *myoclonus~chorea~ballismus*

*体幹伸展筋活動が強い→反り返り *足底屈筋活動が強い→固定的足底屈 *股過外転屈曲位固定

基底核性収縮制御障害の成り立ち

- 基底核運動系が働かない状態が発達期に起こり、運動過活動状態となる
- Tonic contractionおよびphasic contractionの相反抑制寡少で、運動が過多となる、運動の開始と終了が遅延することが起こる
 - ・拮抗筋活動は多いので、強い同時収縮となる
 - ・これに対抗するための過剰な連合運動となる
 - ・同時収縮状態に加重する突発的運動を起こす 不随意運動

18