

論文の内容の要旨

論文題目 **Physiology of resistance exercise combined with vascular occlusion**
—Effects on muscular structure and function—

血流制限下での筋力トレーニングに関する生理学的研究
—骨格筋の構造と機能に及ぼす効果—

氏名 宝田雄大

高齢化が進む現代社会では、筋機能の維持と改善は競技選手は言うまでもなく、一般中高年者にとっても重要な問題である。そのためには、高強度な筋力トレーニングが有用であることはよく知られている。筋力トレーニングの主な目的の一つに筋肥大があげられる。筋力を決める第一の要因は筋断面積であるので、トレーニングによる筋肥大は究極的には筋力の増大につながる。筋肥大を引き起こすメカニズムには不明な点が多いが、負荷による力学的刺激、筋損傷と再生、内分泌系の活性及び筋内環境などの複数の要素が相互に作用していると考えられる。一方、従来筋肥大に効果的とされる高強度な筋力トレーニングの実施は、トレーニング未経験者や、すでに加齢による筋萎縮が進行している中高年者にとっては、関節などの障害を生じる危険を伴う。そこで本研究では、力学的刺激以外の要素として筋内環境に注目し、筋血流を制限した環境下で低強度な筋力トレーニングを実施させた場合の、筋の構造及び機能の変化とそのメカニズムについて調べた。

身体の限られた部位への局所的な加圧は、その程度が最低血圧よりも大きくなると、動静脈を圧迫し、結果的に動脈からの血液流入量の減少と容量血管内の血液蓄

積を引き起こす。安静時において上腕基部への特製圧迫帯による5分間の加圧（100mmHg）をおこなうと、加圧1分後には上腕の末梢血管抵抗値〔ドップラーエコー流速計（QUANTUM 2000, Siemens Quantum Inc.）によって上腕動脈の血流速度を測定し、末梢血管抵抗値を算出した〕は加圧前の約1.6倍に増加し、加圧中この状態が続いた。このような局所的な加圧は、低い負荷強度の場合に限って（加圧の大きさが収縮時の筋内圧の大きさよりも大きい場合）、運動中の血流を制限することが分かった。たとえば、上腕基部への100mmHgの加圧は、最大挙上重量(1RM)の約40%の負荷で運動中、上肢の血流を約16%制限した。加圧による活動筋への血液供給量の減少は、運動後の血中乳酸濃度を顕著に増加させた（図2A）。このことは、局所的な低酸素環境と代謝産物の筋外排出の抑制がおこっていることを示唆する。運動中の筋の活動レベルは、筋の補償的な活動の増加によって顕著に増加した（図1）。こうした筋内環境の変化は交感神経活動を刺激し（図2B）、内分泌系の活性を高進させることが分かった。特に血中成長ホルモン（GH）濃度は、運動直後に著しく増加し、その値は安静時の約290倍にも達した（図2C）。

このような血流制限下の筋力トレーニングを長期間実施すると、負荷が通常筋力の向上や筋肥大を期待することができないほど低強度であるにもかかわらず、顕著な筋力及び筋断面積の増加を引き起こすことが分かった。この効果は、一般健常男子、中高年者及び一流競技者を対象とした場合で同様にみられた。特に、この効果の特徴は、1)たとえ負荷が~20%1RMという極めて低強度の場合においても、顕著な筋力及び筋断面積の増加を引き起こす、2)負荷が~40%1RMである場合、高強度の場合（~80%1RM）に匹敵する筋力（図3A, B）及び筋断面積の増加を引き起こすことにある。一方、同強度及び同容量の自然血流下の筋力トレーニングでは、血流制限下の筋力トレーニングでみられた顕著な筋力（図3C）及び筋断面積の増加が引き起こされなかったことから、血流制限下の筋力トレーニングによるトレーニング効果には運動中の局所的な筋内環境の変化が深く関係していると考えられる。

血流制限による代謝産物の蓄積や筋内環境の低酸素化は、骨格筋代謝受容器（muscle metaboreceptors）と筋内にあるグループIIIやIVの求心性神経終末を通して、交感神経を反射的に刺激することが知られる（筋内代謝受容器反射）。またこの経路は、視床下部-脳下垂体軸のGH分泌の調整にも深く関与していると考えられる。

GH濃度の増加は、筋自体の成長を促進させるインスリン様成長因子 (IGF-I) の合成と分泌を刺激する可能性がある。最近、GHが筋のサテライト細胞の増殖に直接関与していることやIGF-Iがサテライト細胞のGH受容体の合成を促進させることが明らかにされた。一方、GHの血中への投与がヒト骨格筋の筋の成長を刺激するかどうかは良く分かっていないが、GHの投与と運動刺激との組み合わせが筋肥大を促進させることは明らかなようである。したがって、このようなGH分泌の促進が本研究における血流制限下の低強度な筋力トレーニングの効果に重要な役割を果たしていると推察される。

以前から、高強度なトレーニングによる力学的刺激が筋肥大を引き起こす重要な生体内信号であるとされてきた。しかし、本研究で示されたように、力学的刺激の大きさによって、一義的に筋肥大の程度が決定されるわけではない。そのメカニズムの解明については今後の残された大きな研究課題であるが、現象論的にみれば低強度な筋力トレーニングにおいても適度に血流を制限することによって高強度な場合と同じような筋力の増加と筋肥大を引き起こすことが明らかとなった。この低強度な負荷は身体的及び心理的ストレスを軽減し、安全にトレーニング効果を引き出すことができる。したがって、血流制限下の低強度な筋力トレーニングは筋萎縮による筋機能の低下が著しい中高齢者の筋力強化や短期間の競技力向上を目的とした筋力トレーニング法として有用であると考えられる。

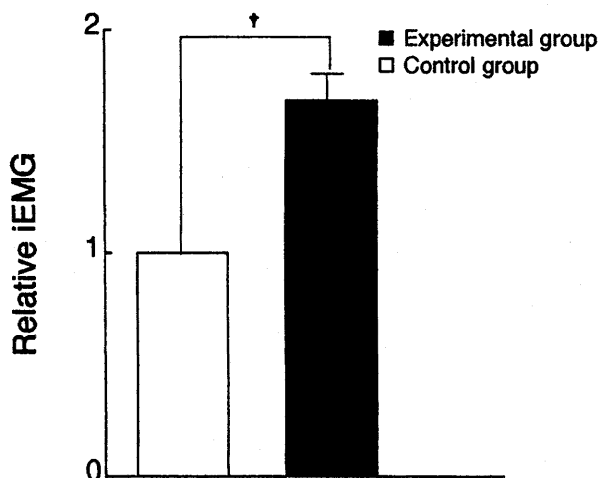


図1 局所的な血流制限が筋の活動量に与える影響。
外側広筋から表面電極により筋電図を導出し、1回挙上当たりの筋電図積分値を算出した。■は血流制限する実験群、□は血流制限しない対照群。値は対照群の値で規格化され、平均値 (N=6) とSEで示されている。アスタリクスは対照群の運動後の値との統計的な有意差を示す (†, $P < 0.01$, Student's paired t-test)。

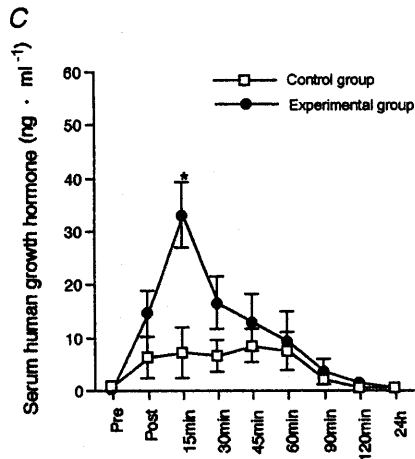
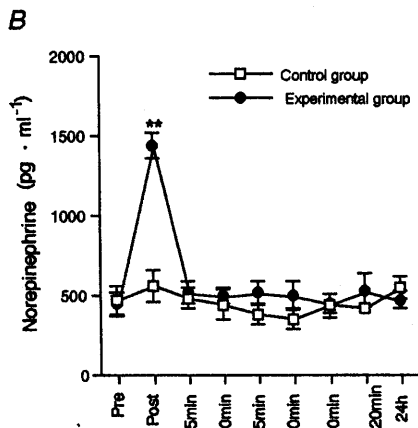
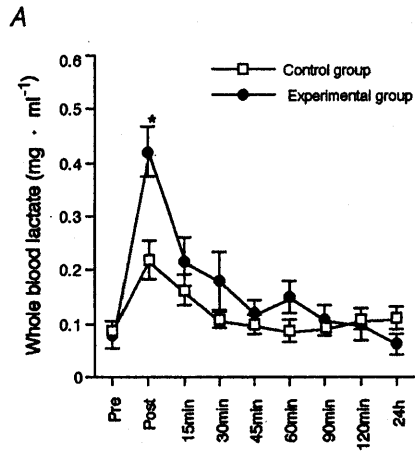


図2 局所的な血流制限が血中乳酸濃度 (A), ノルエピネフリン (B) 及び成長ホルモン (C) に及ぼす影響。
●は血流制限する実験群, □は血流制限しない対照群。
値は全て平均値 (N=6) とSEで示されている。アステリクスは対照群の運動後の値との統計的有意差を示す (*, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$, Student's paired t-test)。

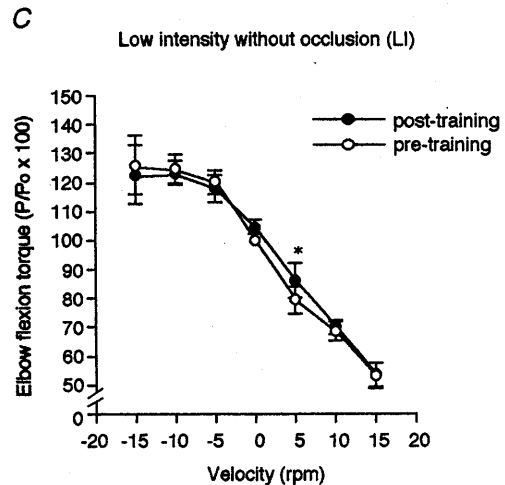
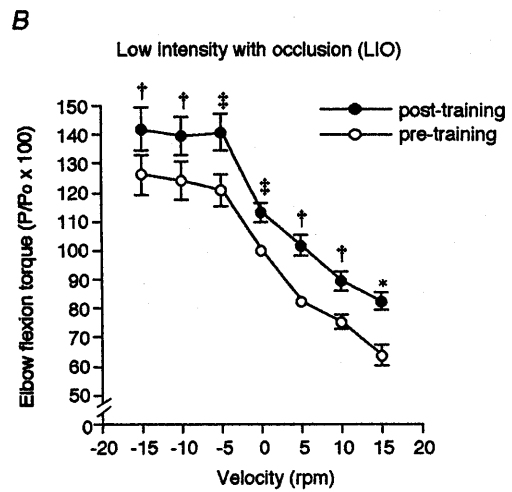
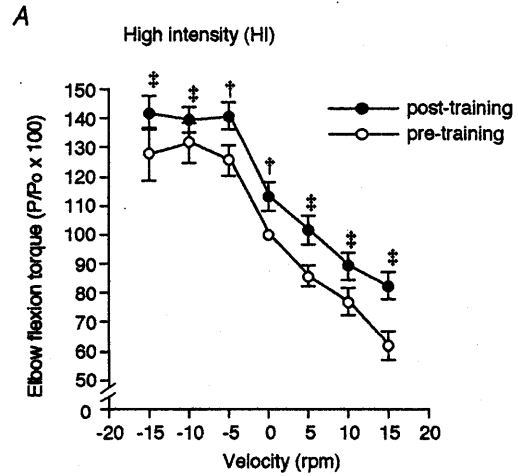


図3 16週間のトレーニング前 (○) 後 (●) で得られた肘関節筋筋群のトルク-速度関係。
値はすべてトレーニング前の等尺性トルクの値で規格化され、平均値 (N=19) とSEで示されている。Aは自然血流下での高強度 (~80%1RM) トレーニング群 (N=11), Bは血流制限下での低強度 (~40%1RM) トレーニング群 (N=11), Cは自然血流下での低強度 (~40%1RM) トレーニング群 (N=8)。負の速度は伸張性筋収縮を示す。*, $P < 0.05$, † $P < 0.01$, ‡ $P < 0.001$; Student's paired t-test。