

運動時の牛乳タンパク質の有用性に関する研究： BCAA 代謝およびグリコーゲン代謝を中心に

名古屋工業大学・共通講座健康運動科学 教授 下村 吉 治

1. 研究目的

BCAA (BCAA:ロイシン、イソロイシン、バリン)は栄養学的な必須アミノ酸であり、食事中タンパク質に含まれる必須アミノ酸の約50%、筋タンパク質の約35%を占める¹。このようにBCAAはタンパク質に含まれる量が多いので、動物の運動中にエネルギー源及び糖新生の基質として利用されると考えられている。実際に、運動開始前にBCAAを投与すると、投与したBCAAの酸化分解の促進と共に筋タンパク質の分解が抑制されることがヒトにおいて報告されており²、タンパク質代謝に対するBCAA投与の影響は明らかに認められている。一方、ラットにBCAAを投与して運動させると、運動の持続時間が延長したとする報告³があるが、ヒトの持久力に対する影響でも類似の結果が報告されている⁴。これらの研究では、BCAAの単回の投与の影響を検討したもので、BCAAの長期投与や、異なる質のタンパク質の長期的な摂取が運動時の体内のタンパク質・アミノ酸代謝や糖質代謝に及ぼす影響は、国内外でほとんど研究されていない。タンパク質およびアミノ酸は栄養素として摂取するので、薬剂的な効果を検討するよりも、長期的な摂取による影響の検討が重要であろう。

牛乳タンパク質に含まれるBCAA量は21.4%であり、他の動物性タンパク質(豚肉、18.6%;牛肉、16.8%;鶏肉、18.3%)や植物性タンパク質(大豆、18.4%;米、16.3%;小麦粉、15.8%)と比べて含量が高い⁵。上述のように、運動中には多くのBCAAが酸化分解されるので、激しくスポーツを行うヒトにとっては牛乳タンパク質は有利なタンパク質であると考えられる。実際に、以前の申請者らの研究により、ミルクカゼインはBCAA摂取のための有利なタンパク質であることが示唆された⁶。牛乳について考えれば、激しくスポーツをする人に重要なカルシウムや運動後の水分を補給することもでき、タンパク質、カルシウムおよび水分を同時に摂取できる利点があるだろう。

このような背景により、本研究では、申請者らの以前の研究⁶の追加研究として、牛乳タンパク質にさらにBCAAを添加することが、運動トレーニングラットのBCAA代謝に対してどのような影響を及ぼすかを検討し、牛乳タンパク質にさらにBCAAを追加する必要があるか否かを調べた。さらに、ラットへの一過性のBCAA投与が運動持久力を高めるとすれば³、持久力の決定要素として知られているグリコーゲン代謝に影響する可能性があるので、牛乳タンパク質食およびそのBCAA添加食のグリコーゲン代謝に及ぼす影響を検討した。

2. 方法

2-1. 実験1：運動トレーニングラットのBCAA代謝に対するBCAA添加食の影響

2-1-1. ラットの飼育及び運動条件

7週齢のSprague-Dawley系の雄ラットをCE-2（一般市販食）による1週間の予備飼育の後、(1)ミルクカゼイン(30%)食、(2)5%BCAA添加ミルクカゼイン食、(3)大豆タンパク質(30%)食、および(4)5%BCAA添加大豆タンパク質食の4つの食事群に分け、それぞれの食餌を3週間自由摂取で与えた。30%カゼイン食はTable 1の組成であり、30%大豆タンパク食は30%カゼイン食のタンパク質を大豆タンパク質に置き換えた食餌を用いた。添加した5%BCAAは、約20%のミルクカゼインに含まれるBCAA量に相当する。

トレーニング群のラットには、昇り勾配6°の小動物用トレッドミル(KN-73, 夏目製作所)を用いて3週間の実験期間中(3日および4日に1日の休息日を含む)トレーニングを負荷した。トレーニング開始10日目までは走行速度を毎分15mから35mまで次第に高め、その後実験終了までの期間は毎分35mで30分間の走運動によりトレーニングを行った。ただし、屠殺時における急性運動の影響を最小限にするために、屠殺前の約48時間は運動を負荷しなかった。

Table 1. Composition of experimental diets for Experiment 1.

Ingredient	Diet			
	30 %-Casein	30 %-Casein + BCAA*	30 %-Soybean	30 %-Soybean +BCAA
	(g/kg diet)			
Casein, milk	300	300	--	--
Soybean protein	--	--	300	300
Soybean oil	50	50	50	50
DL-Methionine	3	3	3	3
Mineral mix, AIN 76	35	35	35	35
Vitamin mix, AIN 76	10	10	10	10
Choline bitartrate	2	2	2	2
Inositol	0.1	0.1	0.1	0.1
Cornstarch	400	400	400	400
Cellulose	50	50	50	50
Free amino acids#				
L-Leucine	--	20	--	20
L-Isoleucine	--	12.5	--	12.5
L-Valine	--	15	--	15
Sucrose		to make 100%		

*BCAA, branched-chain amino acids.
#Free amino acids were supplemented to the control diet to approximately equal BCAA content of the 50% casein diet.

2-1-2. 採血および肝臓採取方法と血清 BCAA 濃度の測定

実験最終日の8:00に全てのラットより餌を取り除き、7時間後(15:00)に屠殺を開始し2時間以内に終了した。頸部脱臼法により屠殺し、即座に肝臓を摘出した。肝臓は速やかに液体窒素で冷却したアルミクランプにより凍結し、分析まで -80°C で保存した。屠殺より肝臓の凍結までの所要時間はおよそ1分以内とした。

血清 BCAA 濃度は、高速液体クロマトグラフィーを用いた方法により測定した。

2-1-3. 肝臓の分岐鎖 α -ケト酸脱水素酵素 (BCKDH) 複合体の抽出と活性測定

BCKDH複合体の活性型の割合 (activity state) は、生体内で活性型として存在する酵素の活性と不活性型を含む総酵素活性 (total activity) を求め (Fig. 1参照)、総酵素活性に対する活性型酵素の割合 (%) として算出した。

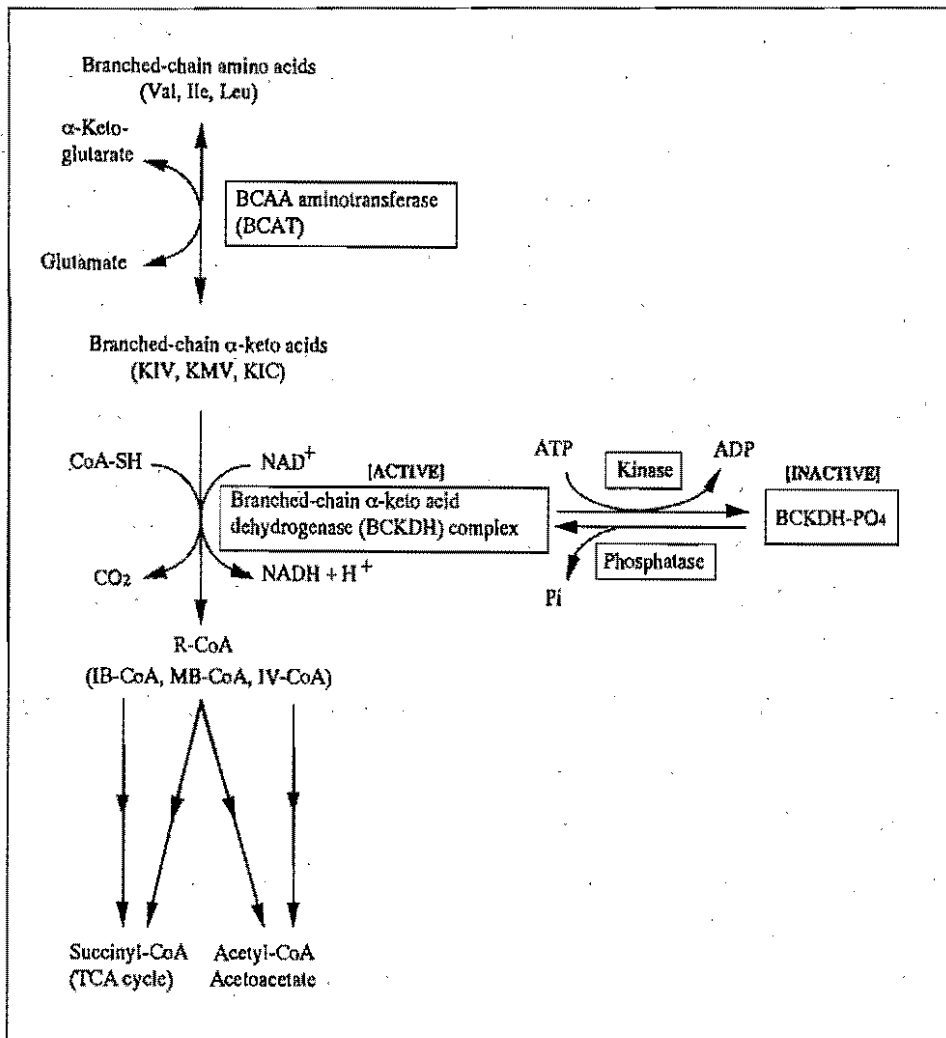


Fig. 1. Catabolism of branched-chain amino acids.

肝臓からの BCKDH 複合体の抽出および分光高度計を用いたその酵素活性の測定は、Shimomura らの方法⁷⁾に準じて行った。酵素活性は、1分間に $1\ \mu\text{mol}$ の NADH を生成する活性量

を1ユニットとした。総酵素活性は、予め全ての BCKDH 複合体を活性型にした後測定した。すなわち、ラットの肝臓より部分的に精製した広範囲に特異的なホスホプロテインホスファターゼと $MgSO_4$ (最終濃度:15mM) を添加し、37℃で30分間のインキュベーションにより BCKDH 複合体の脱リン酸化を行った。

2-1-4. 統計処理

データを平均値±標準誤差 (SE) で表し、二元配置の ANOVA により分散分析を行い、F 値が有意な項目について、Scheffe の方法を用いて有意差検定を行った。

2-2. 実験2：ラット肝臓と骨格筋のグリコーゲン代謝に対する高 BCAA 食の影響

2-2-1. ラットの飼育と運動トレーニング法

8週齢の Sprague-Dawley 系雄ラットを実験に用い、次の4群に分けた：(1)コントロール食-安静群、(2)コントロール食-トレーニング群、(3)高 BCAA 食-安静群、(4)高 BCAA 食-トレーニング群。実験食は全て粉末飼料とし、コントロール食群のラットにはミルクカゼインを20%含むコントロール食 (組成は文献8を参照) を与え、高 BCAA 食群のラットには約50%カゼイン食に相当するだけの BCAA をコントロール食に添加した食餌を与えて、それぞれ4週間個別ケージにて飼育した。この飼育期間中に、トレーニング群のラットにはトレッドミルによる強制走行運動を1日30分、週5日負荷した。トレッドミルの速度は、第1週目に毎分20m から25m に、第2週目に毎分25m から30m に、第3週目に毎分30m から35m と上昇することにより運動強度を高め、第4週は毎分35m を維持した。ラットの体重と摂食量は2日毎に測定した。

実験最終日に、コントロール食-トレーニング群と高 BCAA 食-トレーニング群の半数のラットに走運動 (スピード:30m/分) を30分間負荷し、直ちに頸部脱臼法により屠殺し、開腹して下大静脈より注射器を用いて採血した。次いで、直ちに肝臓と腓腹筋を採取し、フリーズ・クランプ法により凍結した。採取した肝臓と筋肉は、分析まで-80℃で保存した。得られた血液より血清を調製し、分析まで-80℃で保存した。

残りの全てのラットは、急性運動の影響を最小限にするために、約48時間運動を負荷しない安静の条件で屠殺し、上記と同様に処理した。

2-2-2. 血清グルコースとインスリンの測定

血清グルコースは市販のキット (酵素法) を用いて定量した。血清インスリン濃度は、radio-immunoassay により測定した。

2-2-3. 肝臓と骨格筋のピルビン酸脱水素酵素 (PDH) 複合体の活性測定

組織の PDH 複合体活性は、[1- C^{14}] ピルビン酸を用いて Nakai らの方法⁹により測定した。

2-2-4. グルコース輸送体 IV (Glut IV) の定量

骨格筋の Glut IV は、Nakai らにより改良された Western blotting 法¹⁰により測定した。

2-2-5. 肝臓と骨格筋のグリコーゲン量の測定

組織のグリコーゲン量は、Lo らの方法¹¹により測定した。

2-2-6. 統計処理

データを平均値±標準誤差 (SE) で表した。二元配置の ANOVA により分散分析を行い、F 値が有意な項目について Fisher's PLSD の方法を用いて有意差検定を行った。ただし、急性運動の実験では 2 群のみ存在するので、そのデータは Student's t-test により分析した。

3. 結果

3-1. 実験 1：運動トレーニングラットの BCAA 代謝に対する BCAA 食の影響

3-1-1. ラットの摂食量、体重、腓腹筋と肝臓の重量

安静およびトレーニングラットの体重、肝臓と腓腹筋重量、および摂食量のいずれにおいても、各食餌群間で差は認められなかった (Table 2)。

Table 2. Weights of body, liver and gastrocnemius muscle and food intake of sedentary and trained rats.

Group	Body weight	Liver	Gastrocnemius muscle	Food intake
		(g)		(g/day)
Soybean protein				
Sedentary	352 ± 8	11.3 ± 0.2	1.99 ± 0.06	27.3 ± 0.6
Trained	351 ± 9	10.9 ± 0.3	1.98 ± 0.09	30.0 ± 1.0
Casein				
Sedentary	364 ± 9	12.3 ± 0.6	1.97 ± 0.09	28.0 ± 0.9
Trained	351 ± 3	11.8 ± 0.3	1.95 ± 0.04	30.3 ± 0.8
Soybean protein + BCAA				
Sedentary	367 ± 5	12.3 ± 0.4	1.92 ± 0.05	26.8 ± 1.4
Trained	340 ± 6	10.3 ± 0.2	1.94 ± 0.04	27.4 ± 1.1
Casein + BCAA				
Sedentary	363 ± 5	13.3 ± 0.7	1.90 ± 0.05	27.7 ± 0.6
Trained	347 ± 5	11.5 ± 0.4	1.92 ± 0.04	29.5 ± 1.8

Values are means ±SE for 5-7 rats.

3-1-2. 血清アミノ酸濃度

安静ラットの各 BCAA 濃度には、BCAA 添加の有無に拘らずいずれの食餌群の間でも差は認められなかった (Fig. 2-1、2-2)。一方、トレーニングラットの BCAA 濃度では、ロイシン、イソロイシンとバリンのいずれも BCAA 無添加の大豆タンパク食群で他の食餌群よりも低値を示す傾向にあった (Fig. 2-1、2-2)。トレーニングラットの 3 つの BCAA の合計でも、同様な傾向を示した (Fig. 2-2)。

血清中の BCAA 以外の 6 種類の遊離アミノ酸の濃度に対する食餌タンパク質と BCAA 添加食、および運動トレーニングの影響も検討したが、いずれのアミノ酸濃度に対してもそれらの影響は認められなかった (Table 3)。

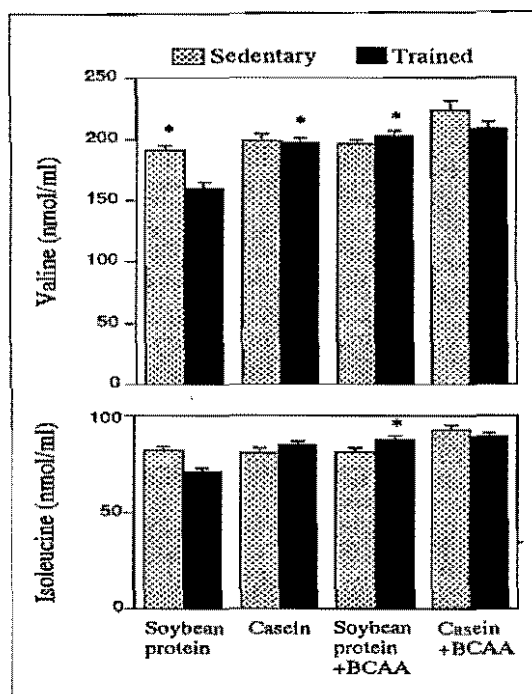


Fig. 2-1. Valine and isoleucine concentrations in serum of sedentary and trained rats. Values are means \pm SE for 5-7 rats. *Significantly different from trained rats fed the soybean protein diet ($P < 0.05$).

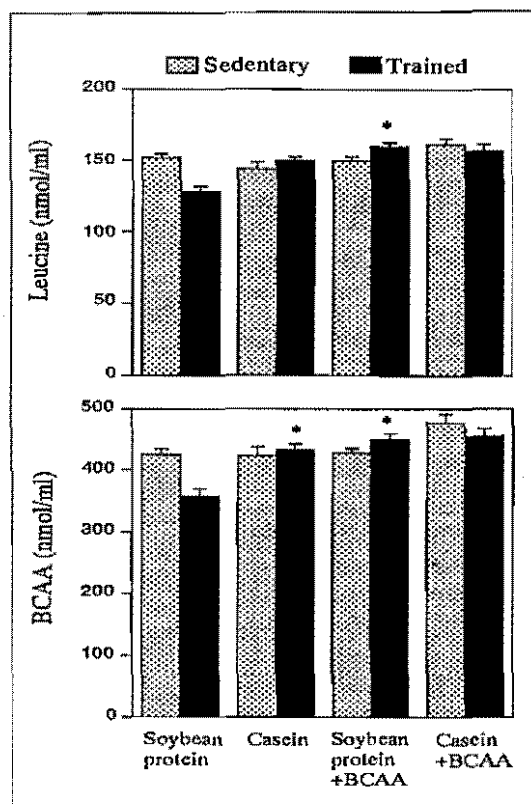


Fig. 2-2. Leucine and total branched-chain amino acid (BCAA) concentrations in serum of sedentary and trained rats. Values are means \pm SE for 5-7 rats. *Significantly different from trained rats fed the soybean protein diet ($P < 0.05$).

Table 3. Concentrations of Met, Tyr, Phe, Lys, His and Arg in serum of sedentary and trained rats.

Diet	Met	Tyr	Phe	Lys	His	Arg
	(nmol/ml)					
Soybean protein						
Sedentary	53 ± 2	88 ± 5	78 ± 1	447 ± 16	73 ± 1	195 ± 4
Trained	48 ± 2	70 ± 4	71 ± 3	498 ± 24	68 ± 3	189 ± 8
Casein						
Sedentary	55 ± 2	93 ± 8	82 ± 3	494 ± 41	74 ± 2	179 ± 14
Trained	52 ± 2	83 ± 4	78 ± 3	497 ± 12	74 ± 3	174 ± 6
Soybean protein + BCAA						
Sedentary	61 ± 1	93 ± 3	83 ± 2	476 ± 23	70 ± 1	190 ± 9
Trained	56 ± 1	70 ± 2	78 ± 1	430 ± 24	72 ± 1	165 ± 5
Casein + BCAA						
Sedentary	57 ± 1	99 ± 8	80 ± 1	476 ± 23	70 ± 2	168 ± 4
Trained	54 ± 1	81 ± 3	80 ± 1	484 ± 31	74 ± 2	166 ± 5

Values are means ± SE for 5-7 rats.

3-1-3. 肝臓の BCKDH 複合体活性

全ての群のラットの総 BCKDH 複合体活性はおよそ1500-2000mU/g 組織であり、いずれの群間にも差は認められなかった (Fig. 3)。

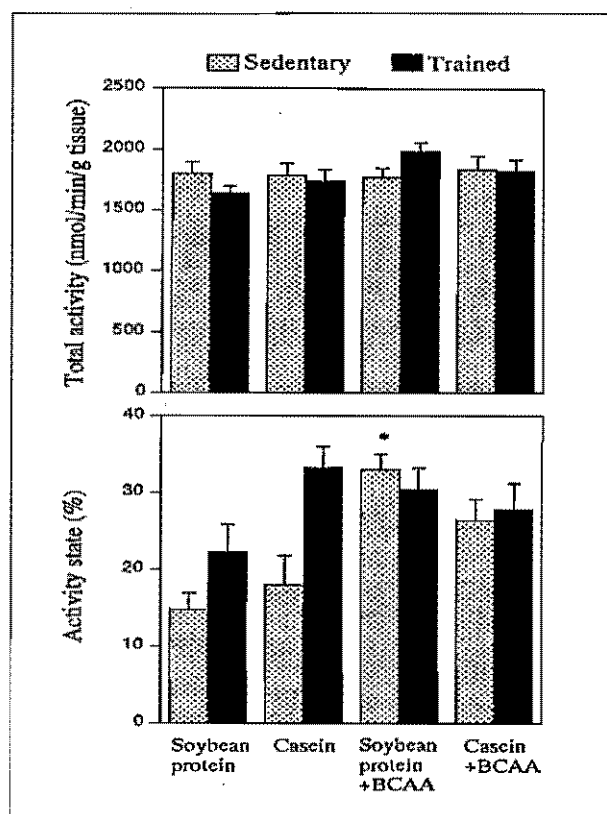


Fig. 3. The activities of BCKDH complex in liver of sedentary and trained rats. The total activity was obtained by full dephosphorylation of all the enzyme complex extracted from liver. The activity state means the percentage of the active/dephosphorylated form of the enzyme complex. Values are means ± SE for 5-7 rats. *Significantly different from sedentary rats fed the soybean protein diet ($P < 0.05$).

活性型酵素の割合 (activity state) は、いずれの群も 15~35%の間にあったが、安静ラットでは、大豆タンパク食群とカゼイン食群のいずれも BCAA 添加食群で高値を示す傾向にあった (Fig. 3)。一方、運動トレーニングラットでは、BCAA 無添加の大豆タンパク食群よりも他の 3 群が高値を示す傾向にあった (Fig. 3)。

3-2. 実験 2 : ラット肝臓と骨格筋のグリコーゲン代謝に対する高 BCAA 食の影響

3-2-1. ラットの体重と摂食量

実験最終日のラット体重は、安静ラットのコントロール食群で 469 ± 10 g、高 BCAA 食群で 455 ± 16 g、トレーニングラットのコントロール食群で 421 ± 10 g、高 BCAA 食群で 407 ± 12 g であった。両食餌群ともトレーニングラットで低い傾向にあったが、いずれの群間にも有意差は認められなかった。

実験最終日前の 5 日間の摂食量 ($23 \sim 28$ g/日) も、いずれの群間にも差は認められなかった。

3-2-2. 血糖および血清インスリン濃度

血糖値では、安静ラットおよびトレーニングラットのいずれにおいても各食餌群間に差は認められなかった (Table 4-1)。一方、屠殺直前に急性運動を负荷したラットでは、両食餌群の血糖値は低下したが、高 BCAA 食群ではコントロール食群の 2 倍以上の高値を示し (Table 4-2)、急性運動による血糖低下は高 BCAA 食摂取により抑制された。

血清インスリン濃度は、両食餌群ともトレーニングにより低下する傾向を示した (Table 4-1)。これは、トレーニングによるインスリン感受性の増加の結果であろうと考えられる。一方、食餌群間の比較では、安静ラットとトレーニングラットの両方でコントロール食群よりも高 BCAA 食群で低値を示す傾向にあったが、有意差は認められなかった (Table 4-1)。急性運動负荷ラットでは、両食餌群間に差は認められなかった (Table 4-2)。

Table 4-1. Effect of BCAA diet on serum glucose and insulin concentrations in sedentary and trained rats.

Group	Glucose (mM)	Insulin (ng/ml)
Sedentary rats		
Control diet	7.8 ± 0.2	7.8 ± 2.3
BCAA diet	8.1 ± 0.6	4.6 ± 0.6
Trained rats		
Control diet	7.7 ± 0.2	$3.4 \pm 0.2^*$
BCAA diet	7.3 ± 0.3	2.5 ± 0.5

Values are means \pm SE for 5 rats.
*Significantly different from sedentary rats fed the same diet ($P < 0.05$).

Table 4-2. Effect of BCAA diet on serum glucose and insulin concentrations in acutely exercised rats.

Group	Glucose (mM)	Insulin (ng/ml)
Control diet	2.2 ± 0.3	6.9 ± 4.2
BCAA diet	6.3 ± 1.0*	6.8 ± 2.3

Values are means ± SE for 5 rats.
*Significantly different from the control diet group (P<0.05).

3-2-3. 肝臓と骨格筋のグリコーゲン含量

肝臓のグリコーゲン含量では、安静ラットで高BCAA食摂取により増加する傾向が認められたが、トレーニングラットではその傾向は認められなかった (Fig. 4)。腓腹筋のグリコーゲン含量は、安静ラットおよびトレーニングラット共に高BCAA食摂取により増加する傾向が認められた (Fig. 4)。

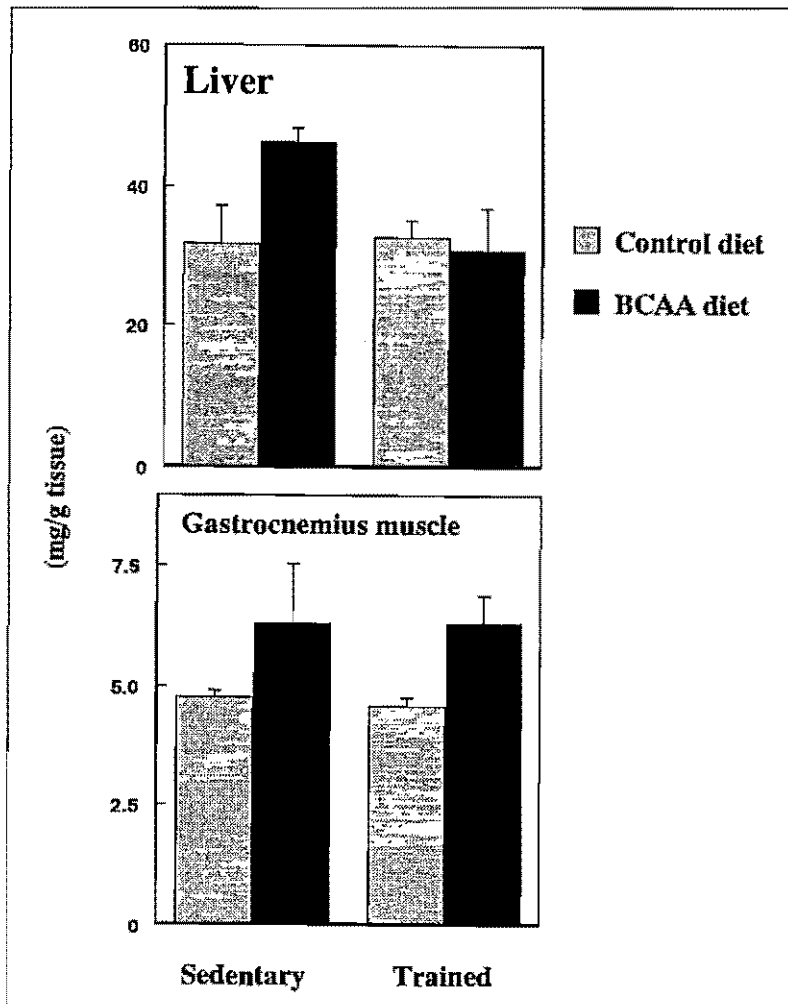


Fig. 4. Glycogen contents in liver and skeletal muscle of sedentary and trained rats. Values are means ± SE for 5 rats.

急性運動を30分間負荷した後のグリコーゲン含量を Fig. 5 に示した。肝臓のグリコーゲン含量では、コントロール食群よりも BCAA 添加食群で有意に高い値が得られた。腓腹筋のグリコーゲン含量では有意差はないものの高 BCAA 食群で高い傾向が認められた。よって、高 BCAA 食摂取は、運動による肝臓のグリコーゲン消費を抑制し、骨格筋でも運動後のグリコーゲン含量を高く保つことを示唆している。

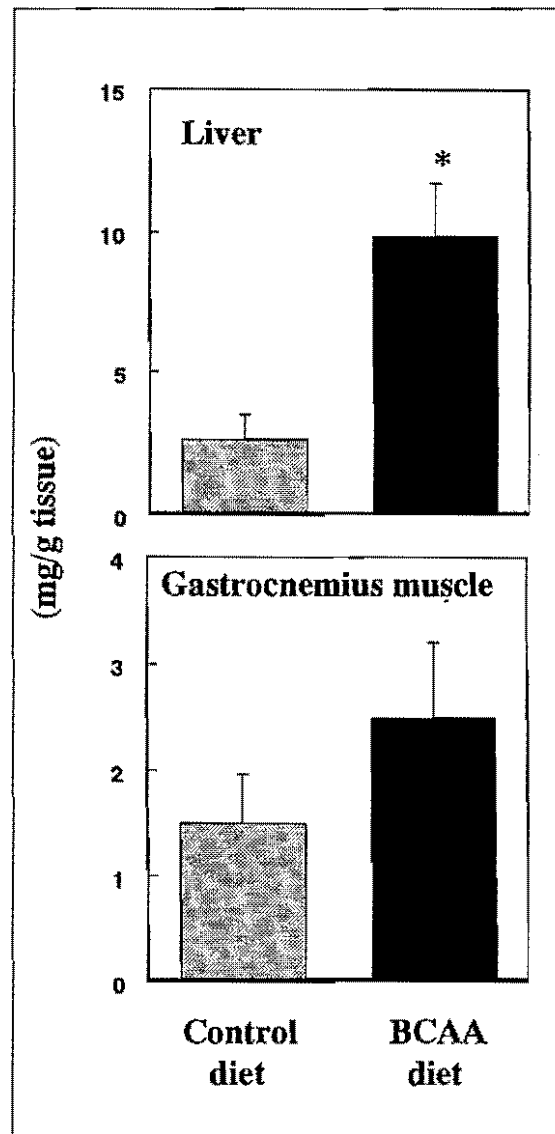


Fig. 5. Glycogen contents in liver and skeletal muscle after acute exercise. Values are means \pm SE for 5 rats. *Significantly different from the control diet group ($P < 0.05$).

3-2-4. 骨格筋の Glut IV 含量

Glut IV は、筋細胞へのグルコースの取り込みを調節する酵素として知られているので¹²、本研究では骨格筋のその酵素量を Western Blotting 法により定量した。その結果、コントロール食群ではトレーニングにより Glut IV 含量は増加傾向にあったが、BCAA 添加食群ではトレーニング

による変化は認められなかった (Fig. 6)。

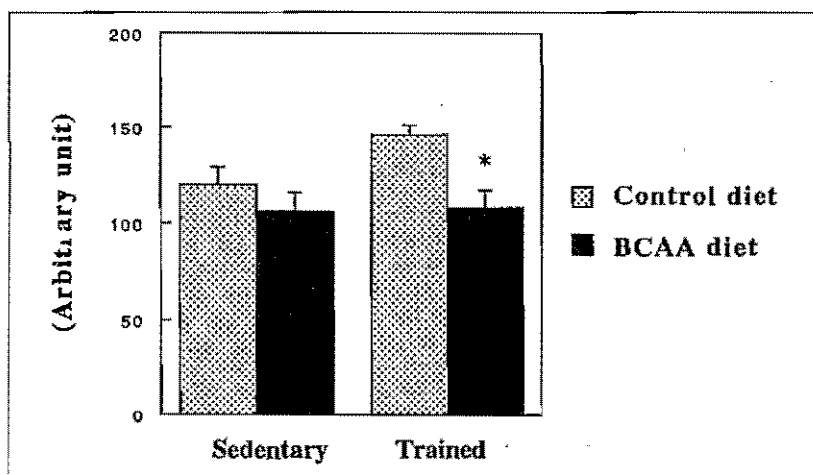


Fig. 6. Effect of the BCAA diet on glucose transporter IV contents in gastrocnemius muscle of sedentary and trained rats. Values are means \pm SE for 5 rats. *Significantly different from trained rats fed the control diet.

3-2-5. 急性運動負荷ラットの肝臓と骨格筋の PDH 複合体活性

PDH 複合体はグルコース代謝を調節する酵素であり、肝臓と心臓では PDH 複合体活性により組織のグリコーゲン量が影響されることが報告されている¹³。本研究における急性運動負荷ラットの肝臓の PDH 複合体活性では、総活性は高 BCAA 食摂取によりわずかに低下する傾向を示した (Fig. 7)。一方、活性型酵素の割合を示す activity state は、コントロール食群では 56% であったのに対して、BCAA 添加食群では 15% と有意な低値を示した (Fig. 7)。

腓腹筋の PDH 複合体活性では、有意差は認められなかったが、肝臓と同様な傾向にあった (Fig. 7)。

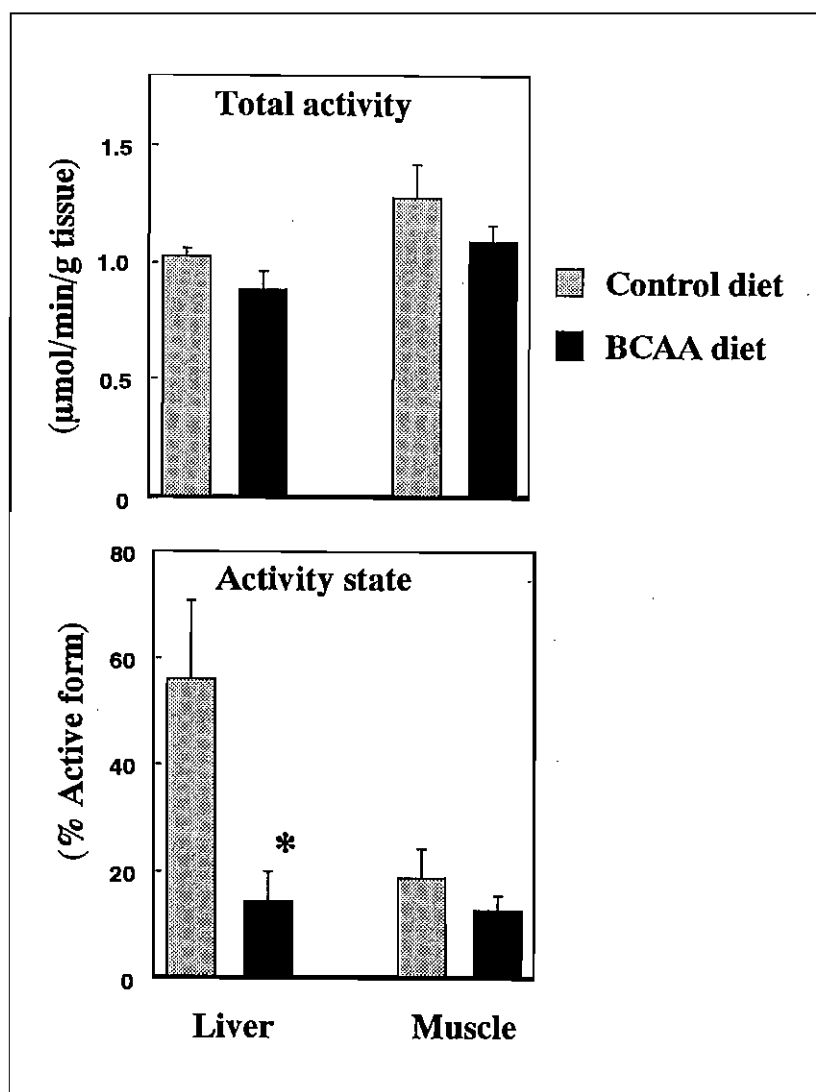


Fig. 7. PDH complex activities in liver and skeletal muscle after acute exercise. Values are means \pm SE for 5 rats.
*Significantly different from the control diet group ($P < 0.05$).

4. 考 察

実験1において、30%という高タンパク食をラットに摂取させたにも拘わらず、大豆タンパク食群では血清BCAA濃度が運動トレーニングにより低下する傾向が認められた。これは、運動によるBCAA消費の促進を反映した結果と考えられる。一方、大豆タンパク質食にBCAAを添加すると、トレーニングしても血清BCAA濃度の低下は認められなかった。さらに、ミルクカゼイン食を摂取したラットでは、BCAAの添加の有無に拘わらずトレーニングによる血清BCAA濃度の低下は認められなかったので、大豆タンパク質に比べてミルクカゼインはBCAAの供給という点では有利なタンパク質であると言える。よって、ミルクカゼインの場合、血清BCAA濃度を指標にするとBCAAを添加する必要のないタンパク質であることが示唆される。

ラット肝臓の BCKDH 複合体は BCAA 代謝の律速酵素であるとされているが (Fig. 1)、トレーニングラットのこの酵素活性は大豆タンパク食群で他の 3 群 (カゼイン食群、BCAA 添加の大豆タンパク質食群とカゼイン食群) よりも低い傾向にあり、血清 BCAA 濃度に対するトレーニングと同様な傾向にあった。この結果もミルクカゼインに BCAA を添加する必要のないことを支持するものである。

一方、食事中的 BCAA がグリコーゲン代謝に対する影響の検討 (実験 2) では、高 BCAA 食摂取により、急性運動による血糖および肝臓と骨格筋のグリコーゲン量の低下が抑制された。PDH 複合体は、解糖系と TCA サイクルを結びつける反応を触媒する酵素であり (Fig. 8)、PDH 複合体活性が高いとグルコースの酸化分解が促進され、グリコーゲンは蓄積しにくく、その活性の低下によりグリコーゲンの蓄積が促進されることが示唆されている¹³。本研究における急性運動負荷後のラット肝臓と骨格筋の PDH 複合体活性は低下傾向にあり、特に肝臓ではその傾向が著しかった。すなわち、これらの所見は、高 BCAA 食摂取ラットでは運動中の肝臓におけるグルコース利用が抑制されていたことを示唆しており、これにより運動後のグリコーゲン残量が高 BCAA 食群で有意に高かったことを説明できると考えられる。このラットでは運動後の血糖値が高 BCAA 食群で有意に高かったことも、高 BCAA 食摂取によりグルコース利用が抑制されていたことを支持すると考えられる。よって、運動中のグルコース代謝の観点からは、BCAA をなるべく多く摂取したほうが有利であると考えられる。

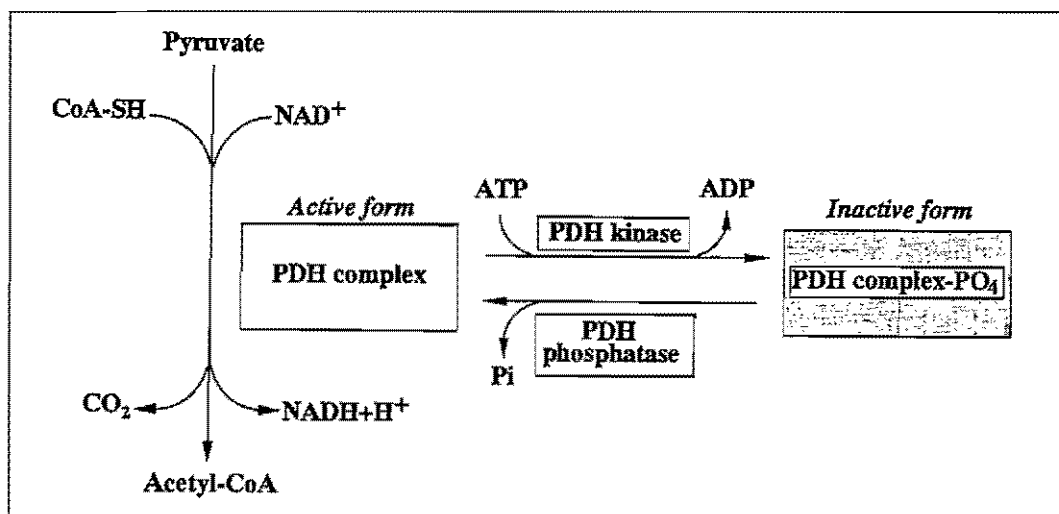


Fig. 8. Regulation of PDH complex by covalent modification.

BCAA 代謝の観点とグルコース代謝の観点からでは、カゼインに BCAA を添加すべきか否かが相反した結果となったように見受けられるが、BCAA を添加することによる欠点は現在のところ見当たらないので、運動する場合にはなるべく多くの BCAA を摂取するために、カゼインにも BCAA を添加した方が運動時には有利であろう。

骨格筋にグルコースを取り込む役割をになっているのは Glut であり、それは筋肉におけるグルコース代謝の重要な調節酵素である。さらに、骨格筋の Glut IV は運動トレーニングにより増加することが明らかにされている¹²。本研究では骨格筋の Glut IV を定量したが、その結果、コントロール食群ではトレーニングにより Glut IV 含量は増加傾向にあったが、BCAA 添加食群ではトレーニングによる変化は認められなかった。この結果は、高 BCAA 食群では、トレーニング時にエネルギー基質として BCAA が多く供給されるため、グルコースの供給を増加する必要がなかった可能性が考えられるが、詳細は不明である。この現象は極めて興味深い所見であるので、今後さらに検討が必要であると考えられる。

本研究では、ミルクカゼインにも BCAA を添加した方が有利な点が認められたので、スポーツマンが BCAA をなるべく多く摂取するために、良質なタンパク質を摂取してもさらに BCAA を追加して摂取した方が有利であろうと考えられる。しかし、タンパク質摂取量を増加すべきか、BCAA 摂取のみを増加すべきかは今後の検討課題である。

5. 引用文献

1. Harper, A.E., Miller, R.H., and Block, K.P. (1984) Branched-chain amino acid metabolism. *Annu. Rev. Nutr.* 4, 409-454.
2. MacLean, D.A., Graham, T.E., and Saltin, B. (1994) Branched-chain amino acids augment ammonia metabolism while attenuating protein breakdown exercise. *Am. J. Physiol.* 267 : E1010-E1022.
3. Calders, P., Pannier, J.L., Matthys, M.D. and Lacroix, E.M. (1997) Pre-exercise branched-chain amino acid administration increases endurance performance in rats. *Med. Sci. Sports Exerc.* 29, 1182-1186.
4. Mittleman, K.D., Ricci, M.R. and Bailey, S.P. (1998) branched-chain amino acids prolonged exercise during heat stress in men and women. *Med. Sci. Sports Exerc.* 30, 83-91.
5. 香川芳子監修 (1999) 四訂食品成分表、女子栄養大学出版部
6. 下村吉治 (1996) 平成 8 年度牛乳栄養学術委託研究報告書
7. Shimomura, Y., Suzuki, T., Saitoh, T., Tasaki, Y., Harris, R.A., and Suzuki, M. (1990) Activation of branched-chain α -keto acid dehydrogenase complex by exercise : effect of high-fat diet intake. *J. Appl. Physiol.* 68, 161-165.
8. American Institute of Nutrition Ad Hoc Committee (1977) Report of the American Institute of Nutrition Ad Hoc Committee on Standards for Nutritional Studies. *J. Nutr.* 107, 1340-1348.
9. Nakai, N., Sato, Y., Oshida, Y., Fujitsuka, N., Yoshimura, A., and Shimomura, Y. (1999) Insulin activation of pyruvate dehydrogenase complex is enhanced by exercise training. *Metabolism* 48, 865-869.
10. Nakai, N., Shimomura, Y., Ohsaki, N., et al. (1996) Exercise training prevents maturation-induced

decrease in insulin sensitivity. *J. Appl. Physiol.* 80, 1963–1967.

11. Lo, S., Russell, J.C., and Taylor, A.W. (1970) Determination of glycogen in small tissue samples. *J. Appl. Physiol.* 28, 234–236.
12. Goodyear, L.j., and Kahn, B.B. (1998) Exercise, glucose transport, and insulin sensitivity. *Annu Rev. Med.* 49, 235–261.
13. Holness, M.J., French, T.J., and Sugden, M.C. (1986) Hepatic glycogen synthesis on carbohydrate re-feeding after starvation. *Biochem. J.* 235, 441–445.