

Figure 1. The Solar Impulse aircraft, which uses a solar cell array for power, is being towed by a person on a bicycle. The aircraft is suspended in the air by a long tow bar. The aircraft's fuselage features the text "United Technologies" and "BALDWIN". The person on the bicycle is wearing a helmet and is positioned in the lower foreground, providing a sense of scale for the massive aircraft above.

ダイダロスプロジェクト 生理学的問題と解決

イーサン・R・ネイデル

スティーブン・R・ブツラリ

1985年4月、マサチューセッツ工科大学の技術者と科学者のチームは、ギリシャのクレタ島からパイロットの筋力だけで飛行機を飛行させる目的で、調査を始めた。計画はダイダロスと呼ばれ、約3500年前クレタ島の牢獄から、羽根を蠟で固めた翼を作って飛んだ、ギリシャ神話の発明家を讃えてのことである。いくつかの神話の諸説によると、息子のイカロスも彼に伴っている。イカロスは、父の警告に反して太陽に近づき過ぎて翼が溶け、海に墜落した。

ダイダロス計画で計画されたコースは、クレタ島のヘラクリオンの港町からサントリニ島までの119kmであった。1979年のブライアン・アレンによるゴッサマー・アルバトロス号の35kmの英国海峡を横断した人力飛行の世界記録の3倍以上の距離だった。記録樹立以後数年、人間であるパイロットの生理について、多くのことを調べる必要があったが、航空技術の進歩は、我々に更に大掛かりな計画を可能にした。実際、人力飛行の基礎的な問題は、動力装置としての人間の能力の限界にある。予備設計に基づく機体性能の見積もりでは、ダイダロスの飛行は、4~6時間必要だろうと考えられた。機体の詳細を設計するために、事前に長時間の持続運動の生理的な限界や、疲労が始まるのを遅らせることの可能な対策について調査する必要があった。我々は、飛行機的设计者が動力装置を機体に適用するのに用いるのと同じ装置で、人力を発生させる解析可能な工学的モデルを探求した。生理学者や航空工学者等の専門家の協力を得たのは、その目的のためであった。

飛行機のエンジンは自重を運搬するので、性能は単位重量当たりのパワー、つまり、パワー/ウエイト・レシオで表わされる。予備計算では、パイロットは、飛行するために体重1kg当たり、機械的な動力で約3.0~3.5ワット発生させることが必要と考えられた。更に興味深いことに、人力飛行機は、一定の高度で飛行したり地面から

2~3mの高度で穏やかに飛行することに比べて、上昇するためにはより大きなパワーが要求される。パイロットは、休息のために滑空する時間が取れないので、飛行中休むすることなく、パワーを持続的に発生させることが要求される。

パイロットが体重1kg当たり3.0~3.5ワットの一定の機械的動力を発生し続けるための代謝量を測定することは、比較的簡単である。潜在的なエネルギーは、骨格筋の収縮と弛緩の両方の過程に必要な高エネルギー化合物を生産するために蓄積された燃料の酸化によって、機械的な仕事に変換される(1985年7~8月アメリカン・サイエンティスト誌のイーサン・ネイデルの論文「骨格筋におけるエネルギー変換計算の詳細」参照)。また、一般に、人間は蓄積した燃料の潜在的エネルギーの代謝移入のうち、約24%しか機械的な仕事に変換できないことが認められている(オーストラランドとロダール)。この評価は機械

効率として知られている。残りの76%は、これらの変換のうち熱に調節変換され、パイロットの役に立たない。このように3.5ワット/kgの割合で機械的な動力を発生させるために、パイロットは14.6ワット/kgの割合の燃料酸化を維持しなければならない。そして、そのために、44mlO₂/(分kg)以上の酸素摂取が要求される。パイロットは、定常飛行を維持するために、休息なしに高酸素摂取率を維持しなければならない。この代謝量は、平地を37km/hの世界レベルの速度で自転車のペダルを漕ぐことに等しい(ホイットとウイルソン 1982年)。

ダイダロス計画における独特の問題は、4~6時間と予想される飛行中、エネルギーの発生が持続されるかどうかであった。現在ある文献を徹底的に検討したが、3時間以上の持続時間を考慮したデータは全く見つからなかった。そして、これで明確なパワーを見積もることは不可能であった(ホイットとウイルソンの「有用なデータの優れた要約」1982年参照)。それ故、疲労し始めるのを促進させると考えられる潜在的な要素を確認するため、また、我々がこれらの要素を取り除くことができるか、少なくとも疲労が始まるのを遅らせることができるかを確定するために、ダイダロス計画では長時間持続した人力

独特の生理学的

問題と解決法を

要する、6時間に

及ぶ人力飛行へ

の挑戦

Fig.1 カリフォルニア・エドワード空軍基地で初テストを受けるダイダロス号。リクライニング型自転車と併走しているのは、この飛行計画の指揮者で共著者のスティーブン・ブツラリ

(写真:スティーブ・フィンベルグ)



Fig2 神話で、ダイダロスが自ら作った羽根でクレタ島から脱出したと言う象徴的な再設定である。119kmのルートは、英国海峡を横断した人力飛行記録の3倍以上の距離である。

の発生に関して、独自の調査の必要があることは明らかであった。

高有酸素運動能力の審査

ダイダロス・チームが始めに着手しなければならない問題は、長時間飛行を維持するために十分な、一定の出力を維持できる人を探し出すことができるかどうかであった。多くの人々に、最大酸素運動能力と最大酸素摂取量の調査を行った。これらの2項目が最も重要である。そのうちの一方は、4~65歳の350人のスウェーデン人の男女の最大酸素摂取量を評価したデータで(オーストラランド 1960年)、もう一方は184人のアメリカ人の男女の募兵のデータであった(ボーゲル・エト・アル 1977年)。再調査の最大酸素運動能力の平均的な評価は、体重を平均化すると、女性より男性の方が約25%高かった。20~25歳の男性の最大酸素摂取量は、平均で50mlO₂/(分・kg)強であった。これはダイダロス号の定常飛行を維持するために必要と計算された45mlO₂/(分・kg)を僅かに上回っていた。従って、長距離飛行には不十分である。

運動選手でない人は、最大酸素能力の60%を超える過激な運動では、ますますエネルギーの発生を無酸素過程に頼る。無酸素代謝の副産物は、余分な乳酸と水

イーサン・ネイデルは、ウイリアム大学カリフォルニア・サンタバーバラ博士号、1969年卒業、エール大学医学部の伝染病学・生理学教授である。また、ジョン・B・ピアス基礎研究所の一員。彼は、人体のエネルギー変換の生理学的制御を中心に研究している。ステイブン・R・ブツラリは、航空工学と宇宙航空学の助教授である。彼はそこで卒業研究を行い、現在、宇宙空間で人体要素の研究を指導している。ダイダロス計画は、合衆国技術法人、シャクリー法人、MIT、NASA、スミソニアン協会、いくつかのギリシャ政府の機関によって支援されてきた。ネイデル博士の住所は、John B. Pierce Foundation Laboratory 290 Congress Avenue New Haven CT 06519

素イオンである。これらは、細胞の内部の状況を変化させて、酸素の相互作用の効率を減少させ、結果的にエネルギー発生率を減少させる。我々はこれらの評価に基づき、標準的な若い男性が30mlO₂/(分・kg)前後の酸素摂取を維持できるだろうと予測したが、長期的には十分でなかった。

ダイダロス号のパイロットは、非常に良好な体調の運動選手で無ければならないことは明らかであった。持久力のある運動選手は、有酸素運動の80%まで、要求される運動をしている間、余分な乳酸の発生なしに、エネルギーを生産し続けることができる。それ故、運動選手が65mlO₂/(分・kg)を超える高い酸素摂取量を持っていれば、数時間45mlO₂/(分・kg)前後の酸素摂取を維持できると予想できる。従って、パイロット選考チームの最初の目標は、高い最大酸素摂取量を持ち、最大能力の70%で高いパワーを発生できる志願者を選抜審査する事であった(超過乳酸の限界値に対して、安全性に余裕を持つために任意に選ばれた)。

ダイダロス計画のパイロットの募集を公表すると、300名の志願者が現れた。多くは、オリンピック級の運動選手であった。我々は25人(男性24名、女性1名)の試験をするために招待した。彼らは全員が自転車かトライアスロンの選手だった。我々は、ダイダロス号で最も効率良くパワーを出力できるのは、自転車でトレーニングしている運動選手だろうと言う結論に達した。何故なら、彼らはトレーニング体系において、自転車を漕ぐために特定の筋肉群を使ってきたからである。25名のグループには4名のギリシャの自転車ナショナル・チームの選手が含まれていた。我々の望みは、ダイダロス号のパイロット・チームに、少なくとも1人のギリシャ国民が含まれることであった。

最大酸素摂取量の試験は、固定式の自転車エルゴメーターで行われ、選手はそれに乗って、実機に似たセミリカンベント姿勢でペダルを漕いだ。ウォーム・アップの後、選手は好みの回転数(概ね76rpm)でペダルを漕ぎ始めた。フライ・ホイールのベルトを締めることによって、一定の回転数を維持するために必要なパワーを60ワットずつ、2分間隔で増加させた。選手は、負荷の増大に対して果敢に、できるだけ長時間ペダル回転を維持しようとした。この試験は、選手が回転数を維持できなくなったり、パワーが落ちた時点で終了した。試験の間、選手は、低抵抗の2口弁を通じて呼吸し、吐いた息の質量の比率やCO₂酸素量が常に記録された。最大酸素摂取量では、事前に確定していた評価の10%以内のペダル回転数を維持できなくなることと、必要パワーの増加に伴

い、酸素の吸収が安定すること、1.15 以上の CO_2 、 O_2 の呼吸変換率によって確かめられた。これは、血液中に無酸素代謝物が蓄積される結果の重度の過換気を示している。

Fig.3 は、典型的な最大酸素摂取量の試験結果を示している。酸素摂取と出力(常に無酸素成分を含む最高の評価値なしで計算された)の間に示された線形の関係は、次の方程式で表わされる。酸素摂取量 = $a + b \times$ 機械的出力、 a の値は(0W/kg の出力における酸素摂取量)、機械的出力とは無関係の代謝過程による酸素摂取量を表わす。 b の値は出力に対する酸素摂取量の比(すなわち方程式の勾配)を表わす。これから選手の機械効率が求められる。我々はこの方程式で、測定された酸素摂取量を代用することにより、最大酸素機械的出力を確定することができる。限界値の 70%の機械的出力を計算することは、最大量の 70%の酸素摂取量を代用し、機械的出力を計算することで求められる。

我々が 25 名の選手から得た平均値から、本当に試験のために精鋭のグループを選んだと確認された。最大酸素摂取量の範囲は、 $59 \sim 86 \text{ mlO}_2 / (\text{分} \cdot \text{kg})$ であった。これは持久力のある運動選手の表示値であることが確認できた(オーストランドとローダール 1986 年)。我々が選んだ 25 名の志願者の最大酸素摂取量は、184 名の新兵の調査で、ボーゲルとその同僚達によって得られた値より高い平均値が得られただけでなく(彼らは $50 \text{ mlO}_2 / (\text{分} \cdot \text{kg})$ を超えたのに比べて、我々は $69.2 \text{ mlO}_2 / (\text{分} \cdot \text{kg})$ 、以下も強調すべきである。つまり、我々のグループの高い値は、セミリカンベント姿勢のエルゴメーターで出されたことである。と言うのは、このエルゴメーターは、軍で調査に使われたトレッドミル(踏み車)よりも多くの活動筋肉を必要とするため、8~10%低い値が出るからである。我々が収集した選手の有酸素機械的出力は、平均して最大 5.25 ワット/kg であった。最大値の 70%では、平均 3.54 ワット/kg であった。(2.87~4.23 ワット/kg の範囲)。平均的な志願者がダイダロス号で定常飛行を維持するのに十分なパワーを出力できると言う判断を下せるものであった。機械効率、つまり、単位エネルギー当たりの出力は平均 24.1%、ハイレベルの自転車選手に期待した値に近いものであった。

注目すべきことに、25 名の選手の間で、機械効率は 18.0~33.7%の範囲に渡った。これは、最大酸素摂取量だけでは、能力の予測に十分ではないことを示していた。Fig.4 で説明されるように、近い値をもつ固有の最大酸素摂取量の 2 人の選手が、大きく異なる効率を示し得る。例として、20.1%と 26.6%が示される。最大酸素運動出力の機械パワーの発生値は、3.31 と 4.21 ワット/kg である。これは、2 人のうちで高出力を出す者は、最大酸素摂取量の 70%で、他方より 27%高い機械的パワーを出力できると言うことを意味する。2 人の違いのもう一つの見方は、3.5 ワット/kg のパワーを出力するのに必要な酸

素摂取量は、低効率な選手では 74%であり、高効率な選手は最大量の 59%だけで良いと言うことである。従って、我々は、後者をより高い持久力を持つ者として期待した。

効率に大きな開きが出る原因は、全てが明らかになっている訳ではない。相違のごく一部は、機械的パワーの発生には直接関係しない、補助筋肉グループの漸増における違いによるものと考えられる。言い換えると、選手の中の何人かは、主に上半身を使うと言うことである。上半身は、単に間接的にエルゴメーターによる動力の発生に関係する。相違の大部分は、代謝機構つまり筋肉収縮の速度の個人差の結果である。それ故、張力発生系の発達は、筋肉内の筋繊維のシオミン・アデノシン、トリフォス、ファターゼ等の特定酵素による遺伝的に決定された内容の機能である。

計画の当初から我々が注目し、文献から解決できなかった機械効率に関する疑問は、セミリカンベント姿勢が(この姿勢が、パイロットが最も自由に機体を操縦できる)、通常のアップライト姿勢よりも低い効率になるのかと言うことであった。自転車選手は、数年来のレースでリカンベント式がアップライト式に勝ることを知っている。他の全ての点について同じであるが、これは小さい正形状のリカンベント式の選手に生じる空気抵抗が小さいことが原因である(ホイットとウイルソン 1982 年)。それ

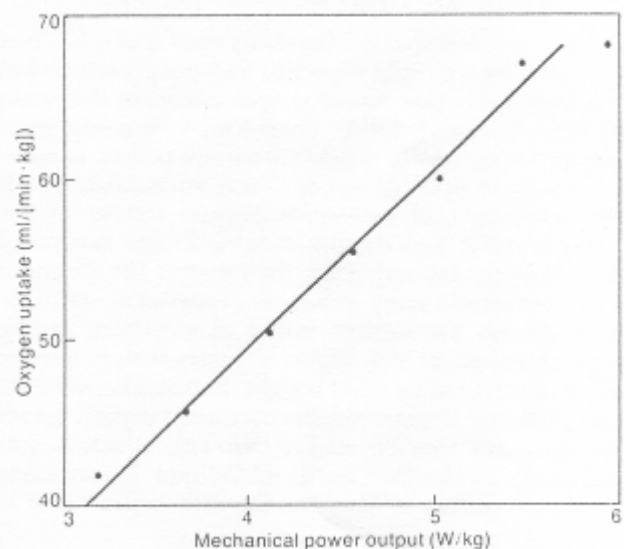


Fig.3 有酸素能力に対する試験の典型的な結果においては、各々のデータのポイントは、エルゴメーターを漕いでいる間、2 分間隔で選手の平均酸素摂取量を示している。エルゴメーターで一定のペダル回転数を維持するのに必要なパワーは、それぞれの間隔で 60 ワットずつ増加している。また、最大酸素摂取量は、一の間隔で維持される最高出力で確定される。この最大値は、常に無酸素運動の要素を含む(それは終わりの 2 つの表示値の酸素摂取量の、他よりも小さい差で示される)。従って、直線関係で示される平均を導くときには無視される。このことから、有酸素運動の機械的出力を計算することができる。

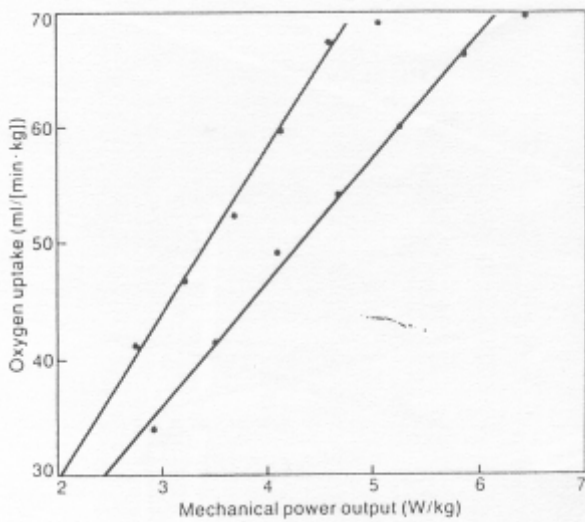


Fig4 ここに示した2人の選手は、70mlO₂/(min/kg)に近い最大酸素摂取量を持つが、機械効率(エネルギーの発生(酸素摂取量により表わされる)の機械的出力としての結果の出る割合)は、一方の選手(青)が他方の選手(グレイ)よりも遥かに大きい。

故、我々は志願者の何人かに、アップライト姿勢で2回目の時間測定試験を行った。Fig5に示すように、ベテランの自転車競技者では、2タイプの姿勢の間に、最大酸素摂取量と機械効率共に差は見られなかった。

酸素供給の維持

我々は、選手が2時間程度の飛行ならば、活動している骨格筋に必要な酸素の供給を維持できることを確信していたが、5~6時間以上(連鎖における関連の1つ、或いはその多数において、疲労が出始める可能性がある時間)、の長時間に及ぶ酸素供給を維持する問題に関しては、調査しなければならなかった。3時間以上に及ぶ運動に関する生理学についての文献は特に無かったので、我々には実際にこれが問題であるかさえ予測できなかった。

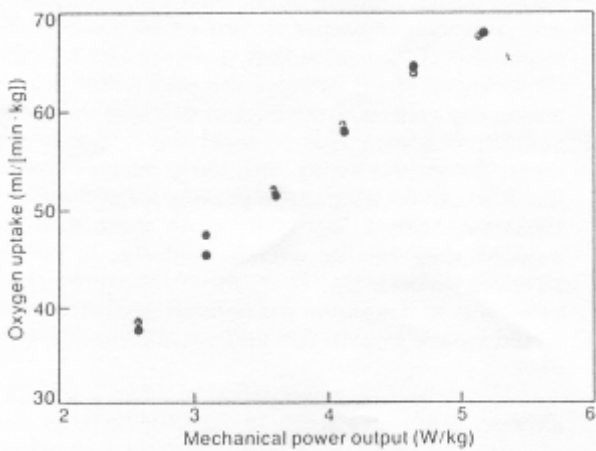


Fig5 この似た結果は、同じ選手が、リカンベント式(青)とアップライト式(グレイ)のペダリング姿勢の両方で、最大酸素摂取量と機械効率の試験をしたときの結果を示す。

その問題は、最大酸素摂取量の確定要素を調べることで概念化できる。

$$VO_{2MAX} = [HR_{MAX}] [SV_{max}] [(aO_2 - vO_2)_{max}]$$

これは、最大酸素量(mlO₂/(分·kg))は、最大心拍数(拍/分) × 最大心拍出量(血流/拍) × 動脈血液中の酸素量-静脈の混合血液中の酸素量の最大値(mlO₂/ml 血流)である。動脈と混ざった静脈の間の酸素量の差は、肉体に吸収された酸素量を示している。

長時間に及ぶ運動中の酸素摂取量の減少は、機体を定常飛行させるのに必要な相対的なコストを増大させる。言い換えれば、飛行機を飛ばすために必要な酸素量は一定なので、最大量が僅かでも減少すると、パイロットのエネルギー発生能力の限界に、より近づく結果に繋がる。こうして、エネルギーの発生は、どんどん無酸素的になり、活動筋肉の超過乳酸と水素イオンの発生と蓄積は疲労の発生を促進させる。

最大心拍数は、主に心臓の大きさに作用する。何故なら、どの筋肉も脱分極信号を伝えることができるのは、その容量によるからである。このようにして、心臓内のカリウム量が劇的に減少しない限り、また、心筋に好ましくない減少が発生しない限り、長時間運動の間に最大心拍数が減少することは無い。

しかし、最大心拍出量は、血漿水分の消失の結果として、度々長時間運動中に減少を余儀なくされる。また、血管の仕切りから著しい水分の体内への移行が運動中に生じる。これは流動体の筋肉組織の間隙への濾過を促進する、筋肉内での毛細血管血圧の増大と同時に、呼吸及び皮膚の蒸発による消失を伴う、体内水分のゆっくりした再配分による。皮膚からの蒸発の比率は、周囲の温度増加につれて飛躍的に増大するだろう。心筋の収縮力は、予荷重の間に弛緩の査証を行うので(スターリングの心臓の法則)、血漿水分の消失は、結果的に心臓を満たす圧力の低下、及びそれに関連して心拍出量の低下を引き起こす。血漿の消失は、他の体液区分からの水分への移行や、運動に対する全体的な反応に直接関与しない、血管床から離れた血流及び血量の再配分によって部分的に埋め合わされる(ローウェル1983年)。

しかし、長時間運動の間には、不可能ではないにしても、汗の水分やイオンの消失を完全に補充したり、脱水・血漿と言う結果を避けることは困難である。このようにして、長時間運動中に最大心拍出量の減少が進展すると考えられる。これは、フォートネイと彼女の同僚によって確かめられた(1983年)。彼女らは、血液量が運動による心拍出量に多大な影響を及ぼすことを示すために、人工的に血液量を上下させた。更に、血液量が少ないときには、暖かい環境で少きつい目の運動をした被験者は、血液量が平常時より高い比率で耐熱を蓄積した。逆に、血液量の増加(トレーニング中に生じるが(コンバー

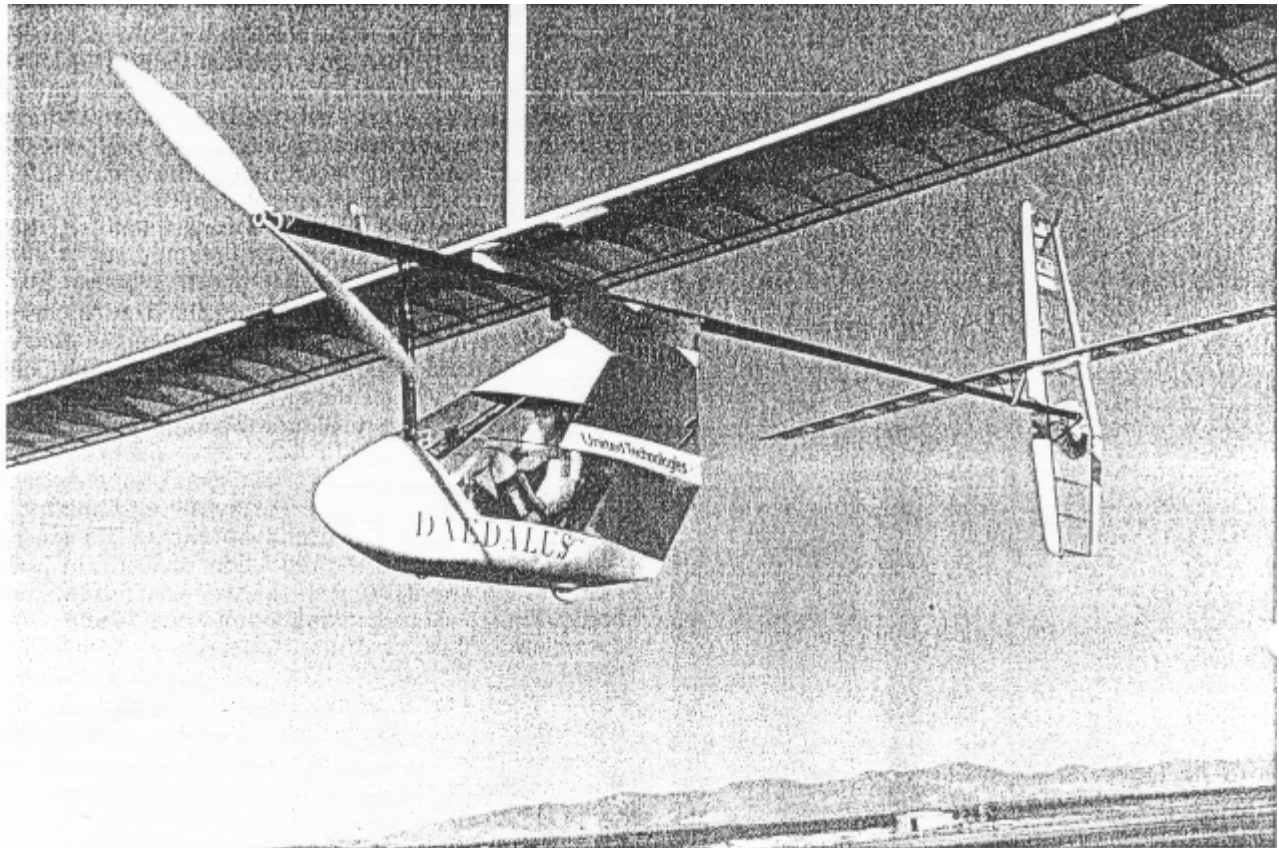


Fig6 ダイダロス号の操縦では、パイロットは手を離し、セミリカンベント姿勢でペダリングしている。Fig5 での証明が示すように、機械効率のロスを少しも生じていない。

(写真:マイク・スミス)

ティノ・エト・アル 1980 年))は、最大心拍出量を増加させ、最大酸素摂取量が高くなることが観察されることに対して、かなりの部分の説明になることが良く知られている(エクプロム 1969 年)。

一連のトレーニング体系に渡って、最大酸素抽出量は、次の適応によって増加する。まず第一に、筋肉を通る最大血液量を増加(任意の時刻での筋肉中の血液量の増加)させる対応、次に、毛細血管と活動筋繊維との間の酸素の拡散距離を減少させる適応、最後に、筋組織内の好気性酵素を増大させる適応(ネイデル 1985 年)。これらの適応は、訓練された選手たちが最大酸素摂取量を有することの一応の説明になる。しかしながら、激しい運動自体の間に、体内での最大酸素抽出量は、筋肉内での血流量が増加する特別な場合においてのみ縮小されるであろう。これは暑い環境で激しい運動中に生じる可能性があり、激しい運動によって、更に皮膚への血流量の増加が要求される。皮膚では相対的に酸素は殆ど抽出されない。ともすると、このことは運動している筋肉への血量を減少させる(ベル et al. 1983 年;ネイデル 1983 年)筋肉中の物質を含む全ての血管床が、動脈の血圧を維持するために活動する反射作用に関係していることは疑いない。

最大心拍出量が最大酸素抽出量が、多量に要求される状態において、減少するのは明らかで、それによって最大酸素能力が低下する。ダイダロス号の飛行中に、こ

れらの要素の内、どれかが低下するのを防ぐのは、パイロットを脱水と加熱から守ることに大きく依存するであろうことも明らかである。

熱の消散と保水

熱の消散には 2 つの問題がある。第一に、パイロットの皮膚の表面からの対流と蒸発による冷却のために、十分な空気の流れを機体のコックピットに供給しなければならぬ。これは生理学的な問題と言うよりも、飛行機の問題であるが、不適切な設計は飛行において肉体的な負担を増大することになる。生理学者は、パイロットの発熱量をかなり正確に計算することができ、技術者は、熱の消散の要求に応じた換気システムを設計することができる。空気が流れるほど最適な冷却に近づく。しかし、空気が流れるほど機体には大きな抗力が誘発されて、飛行に費やす労力が増加する。このように、技術者の挑戦とは、蒸発を確実にしながら抗力を減らす最適な換気の割合を決定することであった。

第二に、熱の消散に関する問題は生理学的なものである。激しい運動で生じる多量の熱を減少させる人の能力は、脱水の促進によって行われる。その後は、身体は通常の保水されている状態よりも遥かに速い速度で熱を蓄積していき、すぐに熱的な限界に達する。これには二つの理由がある。一つ目は、身体の中心から皮膚へ熱を運ぶための血液を循環させる能力が減少すること



Fig.7 ダイダロス号の操縦席の限られた空間は、飛行機の設計者にとって問題である。人力エンジンが相当な発熱を消散するために、パイロットの負担になる程の大きな抵抗を増やすこと無く、十分な空気流の供給が必要 (写真:マイク・スミス)

である。何故なら、脱水が血漿量を減少させることによる。血漿は、血液を身体を中心に移行させるため、皮膚の血管の抵抗を増加させる反射を順番に刺激する(ネイデル 1980 年)。二つ目は、上昇する体温に対する汗腺の反応の感度の低下によって、皮膚の表面から熱を消散する能力もまた低下してしまう(フォートネイ・エト・アル 1983 年)。以上に示したように、パイロットを飛行中十分に水分を維持した状態に維持することは、加熱や頭がぐらっとしたり、見当識障害、卒倒等の兆候に関連する障害の予防になる。

保水に対するもう一つの問題は、人間は、元来渇きに対する感覚が乏しく、手遅れになるまで脱水症状に気付かないことがある。それ故、パイロットは、飛行を達成するために必要な液体の量を予想することが本質になる。蒸発による水分の消失の割合は、熱負荷全体の関数である。熱負荷は、代謝的なものと環境的なものを組み合わせた負荷で、暑い中での激しい運動と言う極端な状況の中では、蒸発による水分の消失が体重の 3% を超える(70kg のパイロットで 1~2 時間)と、身体の脱水と言う悪影響が出始めるので、水分の消失と同程度の割合で体内へ水分の呼吸が行われない限り、運動能力は次第に失われていく。

このように、運動中の熱の消失と保水の問題は、組み合わせられたものになる。すなわち、発生した代謝熱を蒸発させるため、身体は皮膚の表面で十分多くの汗を発生させなければならない。また同時に、身体は、その中の水分の総量を減らしすぎてはならない。さもないと、脱水によって引き起こされた高体温の結果として、疲労が生じる。

しかし、多量に汗をかく状況下においては、どんなに頑張っても、人が十分水分を維持することを難しくする要素がある(グリーン・リーフ 1982 年)。人間は汗によってナトリウムを失い、発汗が激しくなればなるほど、ナトリウムの消失の割合も速くなる。ナトリウム不足の結果として、どんな純水による水分の補給の試みも無駄に終わるだろう。と云うのは、急激な血液の希釈は、水を飲みたいと言う衝動を取り除くには早過ぎるからである。更に、血液の希釈は、抗利尿性ホルモンを抑制して、それにより腎臓による尿の生成を刺激し、結果的に体内から吸水分の消失が生じる。このようにして、純水を飲むと、水分の吸収と同様に、液体保持の割合にも限界が生じる。

最近の一連の実験では、ノーズと彼の協力者(出版物で)は、人間は水だけを飲むよりも、ナトリウム溶液を飲んだ方が遥かに効果的に、熱による脱水症状から回復できることを確認した。更に、ナトリウムが入ったドリンクによる水分の補給は、血漿量の消失の回復をより速くする。この回復は恐らく、過酷な状況下において、運動中に収縮する筋肉や皮膚への血流の分配等の能力を高めるであろう。

ダイダロス号のパイロットへの要求の予想の中で、我々は運動からの回復中と同様に、運動中にも消失した液体の補充に関して、同様の原則が成立つと想定する。しかし、これはまだ十分に論証されるべきである。

燃料輸送の維持

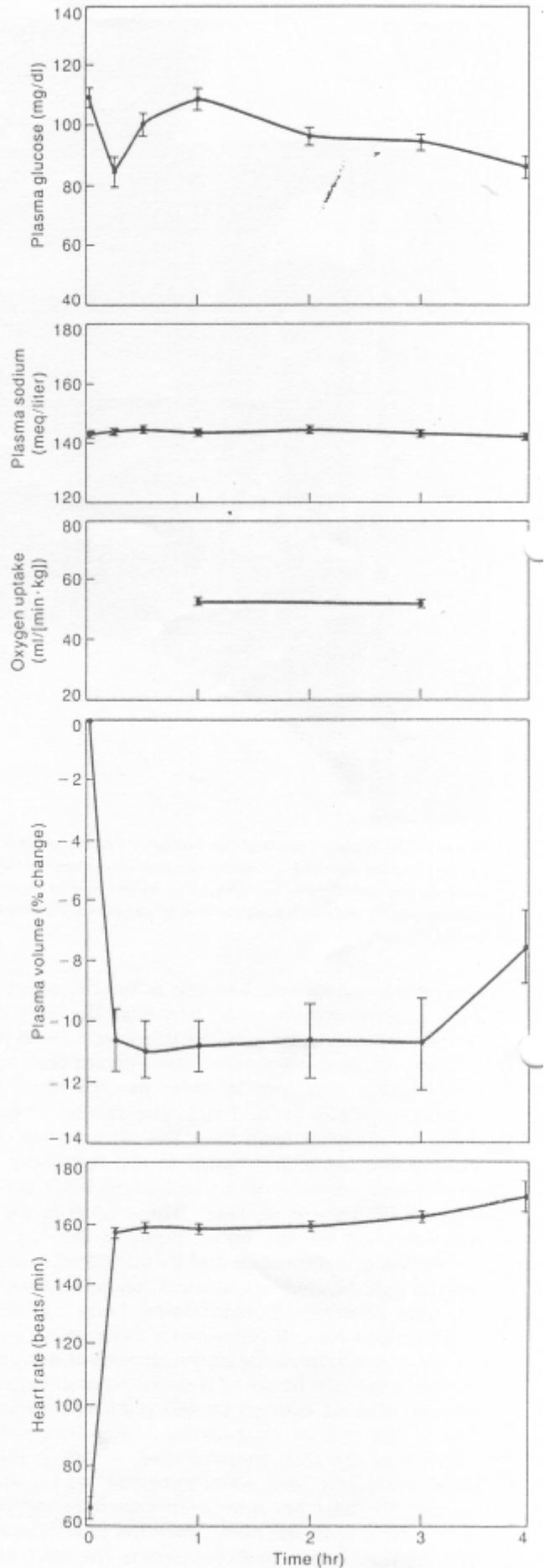
もう一つの長時間運動中の疲労の発生に関連した主要な現象は、肝臓及び繊維からのグリコーゲン(グルコースの貯蔵形態)の危急の枯渇である。身体において、燃料源は、幾日もの活動を維持するのに十分な量を内蔵しているが、酸素に関しては、僅か 1~2 分の激しい運動を維持できる程度の少量しか内蔵していない。これが制限になっている。蓄えるエネルギーの多くは、脂肪又は脂肪細胞の中でトリグリセリドの形態を採り、残りはグリコーゲンになる。運動中の酸化の為の即時の燃料源は、その筋肉内に蓄積されたグリコーゲンである。運動を続けると(脂肪から運ばれた)自由な脂肪酸と(肝臓から運ばれた)グルコースは、血流によって活動している筋肉に運ばれ、これもまた血流によって運ばれた酸素との酸化に利用される。筋肉はエネルギー発生のために、そこに蓄積された燃料からエネルギーを引き出すことができ、もし必要なら、輸送されてきた燃料からも同様にエ

エネルギーを引き出すことができる。肝臓からのグルコースは、血液中のグルコースが標準レベルで維持されるように供給され、それによってグルコース依存組織(例えば脳)は、運動への多大な要求の間、燃料源を奪われてしまうと言える。

何年もの間、長時間運動の疲労は筋肉のグリコーゲンの枯渇と同時に起こり、運動の前に炭水化物に富んだ食品を摂ることで、疲労開始時間を遅らせることができると思われてきた(カールソンとサルティン 1971年)。最近の研究により、この問題についてもっと詳しいことが解った。すなわち、コイルと彼の共同研究者たち(1986年)は、長時間運動において、グルコース・ドリンクを摂取することで、疲労を先送りすることができることを実証して見せた。偽薬を使った試験で、疲労(最大酸素量の70%を維持できなくなった時と定義した)は、約3時間後に生じ、血中のグルコースの減少が先行し、更に活動中の足の筋肉のグリコーゲンの元の量の約23%までに及ぶ消耗を伴った。グルコース・ドリンクを使った試験では、血中グルコースのレベルは落ちずに、疲労も4時間を越えるまでで出なかった。しかし、驚くべきことに、筋肉のグリコーゲンは、偽薬をつかった時と同じ割合で減っていたのである。コイルと彼の協力者たちは、長時間の激しい運動で、疲労の開始の遅延を筋肉以外(すなわちドリンク)から供給されたグルコースを酸化する訓練された選手たちの能力によるものとした。しかし、彼らは疲労の源が何なのかを説明できなかった。と云うのは、疲労時に血中グルコースは通常の範囲内であったし、炭水化物の酸化の割合も一定で、筋肉のグリコーゲンは1時間減じたレベルにあったからである。

これらのデータと結論から、激しい運動における疲労開始は、かなり遅らせることが可能であると言う楽観論が導かれた。しかし、疲労開始時刻が無制限に延びる訳ではない。このようにして、我々の試みは、グルコース溶液を飲んだ時に生じる疲労の源を認識し始めた。また、身体のグルコースの蓄積の枯渇から生じる疲労と同様に、このことに抗するための方法を、

Fig.8 4時間耐久試験の結果は、ダイダロス号の飛行が実現可能であることを示した。試験彼等の最大酸素摂取量の70%を受けた11名の選手は、全員飛行に必要な機械出力で、少なくとも3時間は持続可能であった。その内の8名は4時間も持続可能であった。これは、予想される4~6時間の飛行に近い時間である(その小さな標準偏差に示されるように、このグループの生理学的能力の間には、殆ど差が無かった)。しかし、選手たちは、水分とナトリウムを一定量(血漿量及び血漿中のナトリウム量の水準によって示されるように)維持するために、ナトリウムとグルコースを含む市販の手に入れやすいドリンクを与えられても、飛行が4時間を越えるようなことがあると、血漿中のグルコースの減少や心拍数の増加の割合は、弱まる傾向の可能性があった。



我々のパイロットに与えることができるようになってきた。更に、水分補給のためのドリンクも必要であった。それは、加熱と脱水に対する最適な抵抗力を与えるために、ダイダロス号のパイロットの燃料補給のみならず、液体とナトリウムの補給の役目も果たすことができる物でなくてはならない。水分補給用のドリンクは、市販品にもあるが、測定及び概算に基づく我々の計算によると、企画された飛行条件の元での過酷な要求に、完全に見合うものは、これらのうちに一つも無かった。我々は、独自の

水分補給ドリンクの開発のために、4時間の耐久試験(パイロット選考の最終段階)による客観的データを使用することにした。

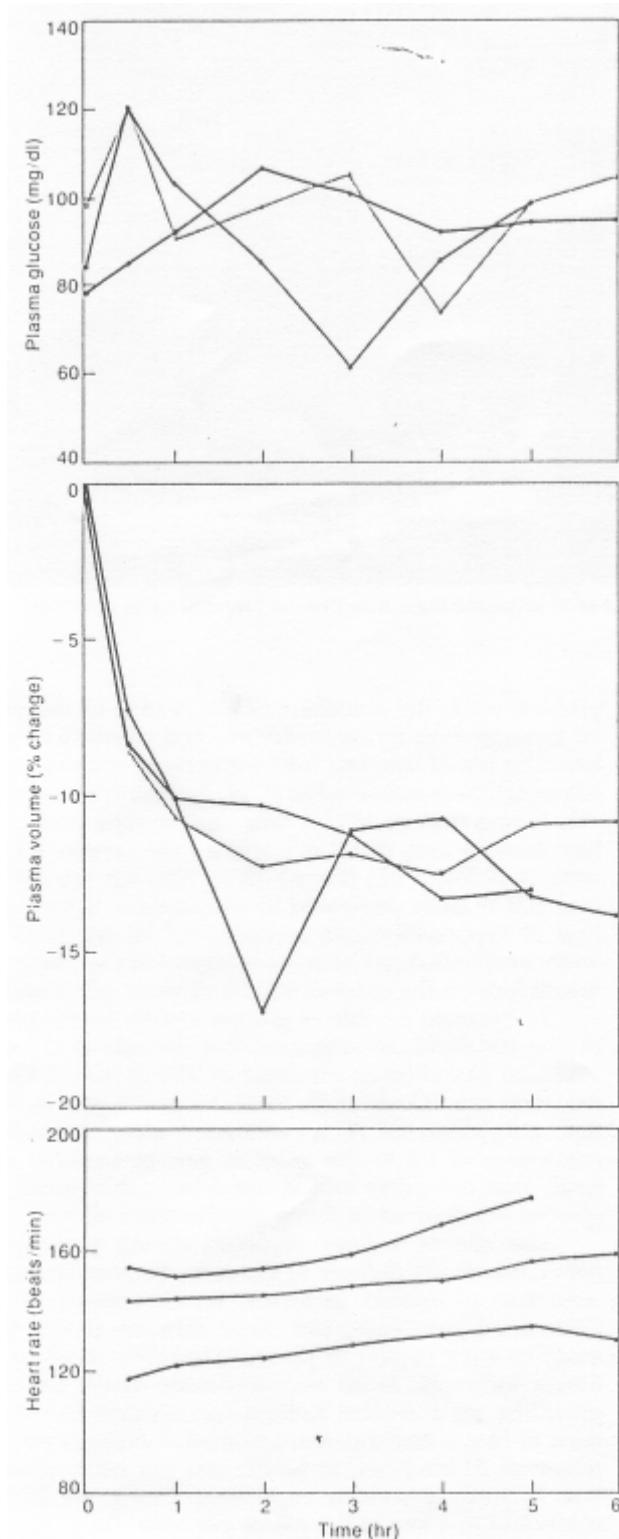
耐久試験

最大酸素摂取量の試験を行った25名の中から、我々は素晴らしい成績を残した11名を選抜した。と言うのは、彼らが更に延長した時間で、このペースを維持する能力を評価するために、彼等の最大出力の70%での4時間耐久試験を行うためであった。11名の選手の最大酸素摂取量の平均は $71.6 \text{ mlO}_2 / (\text{分} \cdot \text{kg})$ で、機械効率の平均値は25.7%、彼等の有酸素出力の70%は3.73ワット/kgであった。この4時間に渡る試験の目標は、最終的な4~5名のパイロットの選出のみならず、長時間運動において、これらの重要な変数の変化を調べ、どのような生理学的変数が制限となっているのかを予想することであった。

4時間に渡る試験は、実験の第一段階で用いられたものと同じエルゴメーターで行われ、かなり楽観的な状況下のものであった。試験に先立つ数日間、選手たちは彼等の熱負荷を最小にするために、 $16 \sim 18^\circ\text{C}$ と言う比較的涼しい状態に保たれ、1時間に1リットルの割合で市販のスポーツ・ドリンク(グルコース7%、1リットル中に10meq(ミリグラム等量)のナトリウムが入った)を飲んだ。試験の間じゅう血液のサンプルが採取・解析され、酸素摂取量を測定、心拍数が記録された。4時間に渡る試験の結果(Fig 8 に要約されている)ダイダロス・チームは、適した状況を与えれば、更に延長しても十分に高出力を維持する試みが可能だと言う確信を得た。4時間の試験を実施した11名のうち8名までがそれを達成した。失敗した3名も全員、疲労が出始めたのは最後の1時間で、前もって規定したペダルの回転数が維持できなくなる形で現れた出力の低下であった。しかし、特定の疲労との相互関係は無かった。

この結果に基づき、5名の選手がダイダロス号のパイロットとして選ばれた。彼等の最大酸素摂取量は $69.9 \text{ mlO}_2 / (\text{分} \cdot \text{kg})$ であり、最大の70%で平均3.72ワット/kgのパワーを出力することができた。彼ら5名の使命は、ダイダロス号のプロトタイプ of 飛行方法を学ぶことと、彼等の肉体的コンディションを高水準に維持することであった。

4時間の試験の結果、選手へのグルコース・電解質混
Fig 9 4名のダイダロス号のパイロット(別々の色の線で表現してある)は、機体を空中に浮かすのに十分なパワー出力での6時間に渡るダイダロス号の飛行シミュレーションを行った(4名のうちの1名は、エルゴメーターのシートの肉体的不快差から、試験を全うすることができなかった)。これらの結果は、飛行用に特別に開発されたドリンクの有用性を示している。:血漿中グルコースは維持され、低下していないし(Fig 8 に示される市販のドリンクを使用した場合の結果とは対照的である)、血漿量も劇的に上昇・降下していない。途中でやめた選手の心拍数のみ限界に近づいている傾向を示していた。



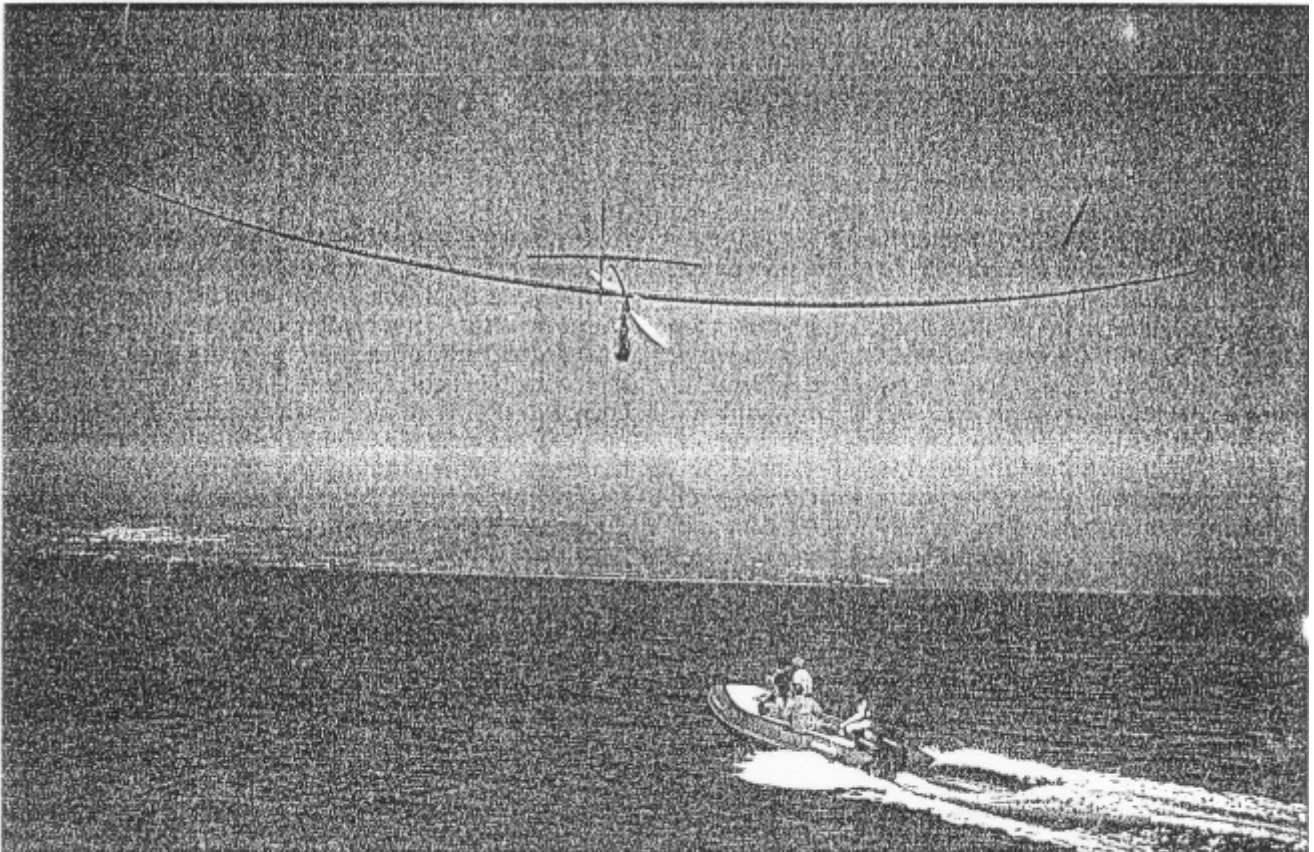


Fig.10 1988年4月23日のダイダロス号 カネロス・カネロコーポラスにより飛行した。クレタ島からサントリニ島までの飛行の達成間近の写真

(写真: ペジー・スコット)

合ドリンクの補給の重要性が確認された。1時間に1リットルのドリンクを飲むスケジュールは、脱水を防ぐのに十分であることが解った。何故なら、最初から最後まで血漿中のナトリウム濃度は増加することも無く、血漿量が徐々に減少していくことも無かったからである。しかし、この補給にもかかわらず、最後の1時間までに血中グルコースは劇的に低下し、心拍数もまた激しく増加していた。もしこの進行が続けば疲労してしまうだろう。このようにして、もし完全に、飛行中肉体の消失分を補うことができるドリンクをパイロットに供給することができれば、過酷な飛行の状況下でパイロットのグルコースやナトリウム、水分を一定に保つ能力を楽なものにできると感じた。

ダイダロス・ドリンクの開発

ダイダロス号の飛行のためのドリンク開発への我々の最初のアプローチは、同様の問題に直面した時に、他の人々が見つけた解決方法を研究することであった。我々がざっと目を通した文献の多くは、(マーレイ(1987年)による、市場に出回っている多くの炭水化物・電解質混合ドリンクの固有の生理学的効果の評価を含む)運動中に炭水化物または電解質を補給した被験者の能力の論証された回復を引用していた。しかし、これらのドリンクのどれ一つとして、ダイダロス号の要求に見合う十分な炭水化物・電解質を含んでいなかった。それ故、我々は実験に基づくアプローチに頼らざるを得なかった。:

我々は 3.3 ワット/kg の機械出力での 6 時間に渡る運動中の、水・グルコース・ナトリウムの消費量を算出し、これらの消費分を補うドリンクを開発しなければならなかった。

体内の水分の消失量は、一定値(運動中、高いレベルで一定値を維持する)に体内温度を維持するための蒸発による熱損失から割り出すことができた。我々の計算では、68kg のパイロットでは 24%の機械効率で定常飛行の間、約 13 ワット/kg 又は 900 ワットの代謝熱を発生するはずであった。225 ワットは、直接物理的仕事の形態で下界に伝えられるであろうから、残りの 675 ワットは、蒸発・放射・滞留によるヒート・ロスを通じて消散されるはずであった。放射や滞留による身体からの熱損失の割合は、60 ワットと概算される。これは皮膚の温度が 33°C、操縦室の温度が 28°C、熱の出入りする面積が 1.2 m²、熱伝達係数が 10 ワット/m²°Cと想定した(ゲエジ 1972 年)。これにより 600 ワットを超えるものが蒸発によって消散されることになる。気化熱を考慮して(毎時蒸発した水 1 グラムごとに 0.7 ワット)我々は、パイロットは毎時 900ml の水分を失うと算出した。

飛行中の身体のグルコース摂取の割合を算出するために、グルコースの酸化の割合は、全体の燃料酸化の割合の 50%であると仮定した(コイル et al. 1986 年)。全体の酸化の割合は 900 ワットであるので、毎時酸化グルコース 1 グラム毎に 4.6 ワットのエネルギー変換として、ダイダロス号の飛行中、グルコースを毎時約 100 グラム

消費するだろうと計算された。

長時間の激しい運動中のナトリウムの消失割合の算出は難しい。と言うのは、遺伝的に決定されているであろう汗の中のナトリウムの濃度は、人によって 10~100meq/l の範囲に及ぶからである。しかし、肉体的適応が進むにつれて汗はどんどん薄くなり、それによって激しい運動の状況下で、対応したナトリウムの保存のために備えているのである。我々は、ナトリウム濃度を 20 meq/l と想定した。この場合、我々のパイロットは飛行中に毎時 18meq のナトリウムを失い、これは 0.4 グラムの消失に相当する。

単純化のために私達はパイロットに、1 時間毎に 1 リットルの割合で、液体による水分の補給を提案した。この摂取の割合は、明らかに単に水だけの胃が空になる最大の割合よりも遅い(ダベンポート 1982 年)。どんな運動であったのかはあまり明らかではないが、摂取された液体の内容物、又は、両方とも胃が空になる割合に影響し、総論としては逆に、胃が空になることと消化器からの液体の摂取は、快適な環境での最大値の 75~80% の激しさの運動によって、影響を受けない(マリー 1987 年)。更に、液体のエネルギー分は、胃が空になる割合(エネルギー分がある特定の域を超えて増加すると遅くなる)の決定に関して、エネルギーの運ばれる濃度や停滞よりも大変重要に思われる。グルコースとナトリウムが共に少ないと、消化器からの吸収が増すことは良く知られている(ダベンポート 1982 年)。私達は、ドリンクをグルコース 10%、ナトリウム 18meq/l とした。濃度は、その消失率にあわせて、グルコース及びナトリウムを補給できるように決めた。

味の良いドリンクの試作品が作り上げられるとすぐに、我々は算出された飛行パワー(3.1 ワット/kg)で、考えられる最長の時間(6 時間)の自転車エルゴメーターでのダイダロス号の飛行シミュレーションで、血中グルコース・血漿量・身体の水和維持の効率を試験した。パイロットのうち 4 名がこのシミュレーションに参加した(5 人目は腱炎からの回復中であった)。ドリンクは彼らに 1 時間に 1 リットルの割合で与えられ、彼らは衝撃的でなく、自らの意思の下にそれを飲んだ。血液のサンプルは決まった間隔で採取され、心拍数はずっと記録され、体重は始めと終わりに計られた。4 名のパイロットのうち 3 名がこのシミュレーションを成し遂げた(4 人目は 4.3 時間でやめた)。

シミュレーションの結果(Fig.9に要約されている)は、ドリンクの性能が素晴らしいものであることを示していた。血中グルコースは、パイロット全員において運動の間中維持された。血漿量の相対的変化も、この運動の激しさにおいて予想される範囲に留まっていたし、一番重要なことに、6 時間の過程のうち、それははっきりと変化しなかったことが上げられる。途中でやめたパイロットだけが甚だ高い心拍数を示した(彼の初期の心拍数は、事前

の較正に比べて 10 拍/分程度高かった。我々の主観的な印象は、彼がケブラー・シート(ある程度は被験者の 4 名全員が不快と感じた)の不快さによって、十分効率的にペダリングできなかつたと言うことである。パイロット全員の血漿中ナトリウムは妥当な範囲内であったし、体重の減少も 0~1.5kg のなかに納まっていた。このことは、毎時約 1 リットルに及ぶ蒸発による損失にも関わらず、極めて良好に保水されていたことを意味する。4 名のうち 3 名は、シミュレーションの間にトイレに行かなければならなかつた。これにより、彼等の液体摂取は損失分よりもかなり上回っていたと言うもう一つの確証を得た。

これらのシミュレーションの結果、長時間でのグルコースの燃料物質代謝の維持への有効性(コイル et al. 1986 年)と、ナトリウムの体内の液体のバランス維持への有効性(ノーズ et al. 出版物)の重要性に関する概念を確認した。シミュレーションは、ドリンク開発への実験に基づいたアプローチの正当性を確かなものにし、また特筆すべきは、このシミュレーションが事実)多くのシミュレーションに忍び寄る、未知の予期せぬ変数によって、めつたに気付くことの無い確証)によって証拠付けられたと言う論証の点である。これらは統制された研究ではなかつたけれども、我々は、適切な燃料・水・ナトリウムの補給によって、疲労の開始を遅らせることができ、パイロットは通常の限界を超えて運動を延長することができるという結論を得た。

補遺

1988 年 4 月 23 日の夜明け、ダイダロス号は、カネロス・カネロポラスの操縦で、3.1 ノットの追い風の中を離陸した。約 4 時間後、119km の地点で 12 ノットの逆風の中、着水した。サントリニ島の南岸パリサベー地の沖合い 9m の地点であった。カネロスは、約 4 リットルのエネルギー・電解質ドリンクを飲んだ。彼の心拍数(連続的に送信、記録された)は、飛行中、決して 142 拍/分を超えることは無く、これによって我々の実験室のシミュレーションによる評価を確認できた。また、飛行中一時たりとも切迫した疲労の兆候は無かつた。

参考文献

- Åstrand, I. 1960. Aerobic work capacity in men and women with special reference to age. *Acta Physiol. Scand.*, supp. 169.
- Åstrand, P.-O., and K. Rodahl. 1986. *Textbook of Work Physiology*. McGraw-Hill.
- Bell, A. W., J. R. S. Hales, R. B. King, and A. A. Fawcett. 1983. Influence of heat stress on exercise-induced changes in regional blood flow in sheep. *J. Appl. Physiol.* 55:1916-23.
- Convertino, V. A., J. E. Greenleaf, and E. M. Bernauer. 1980. Role of thermal and exercise factors in the mechanism of hypervolemia. *J. Appl. Physiol.* 48:657-64.
- Coyle, E. F., A. G. Coggan, M. K. Hemmert, and J. L. Ivy. 1986. Muscle glycogen utilization during prolonged strenuous exercise when fed carbohydrate. *J. Appl. Physiol.* 61:165-72.
- Davenport, H. W. 1982. *Physiology of Digestive Tract*. Chicago: Yearbook Medical.
- Eklom, B. 1969. Effect of physical training on oxygen transport system in man. *Acta Physiol. Scand.*, supp. 328.

- Fortney, S. M., C. B. Wenger, J. R. Bove, and E. R. Nadel. 1983. Effect of blood volume on forearm venous and cardiac stroke volumes during exercise. *J. Appl. Physiol.* 55:884–90.
- Gagge, A. P. 1972. Partitioned calorimetry in the desert. In *Physiological Adaptations*, ed. M. Yousef et al. Academic.
- Greenleaf, J. E. 1982. Dehydration-induced drinking in humans. *Fed. Proc.* 41:2509–14.
- Karlisson, J., and B. Saltin. 1971. Diet, muscle glycogen, and endurance performance. *J. Appl. Physiol.* 31:203–06.
- Murray, R. 1987. The effects of consuming carbohydrate-electrolyte beverages on gastric emptying and fluid absorption during and following exercise. *Sports Med.* 4:322–31.
- Nadel, E. R. 1983. Effects of temperature on muscle metabolism. In *Biochemistry of Exercise*, ed. H. Knuttgen et al. Champaign, IL: Human Kinetic Publ.
- . 1985. Physiological adaptations to aerobic training. *Am. Sci.* 73:334–43.
- Nadel, E. R., S. M. Fortney, and C. B. Wenger. 1980. Effect of hydration state on circulatory and thermal regulation. *J. Appl. Physiol.* 49:715–21.
- Nose, H., G. W. Mack, X. Shi, and E. R. Nadel. In press. Role of osmolality and plasma volume during dehydration in humans. *J. Appl. Physiol.*
- Rowell, L. B. 1983. Cardiovascular adjustments to thermal stress. In *Handbook of Physiology. IV. The Cardiovascular System*, chap. 10. Bethesda, MD: Am. Physiol. Soc.
- Vogel, J. A., M. U. Ramos, and J. F. Patton. 1977. Comparison of aerobic power and muscle strength between men and women entering the US Army. *Med. Sci. Sports Ex.* 9:58.
- Whitt, F. R., and D. G. Wilson. 1982. *Bicycling Science*. MIT Press.