数種動物の遠心加速度に対する耐性の比較¹⁾

藤 原 弘・岩 根 正 昭*

防衛庁航空医学実験隊*

1967 年 12 月 6 日受付

I. ま え が き

人類が宇宙船により地球を離れて、宇宙空間を飛翔可能にしたことは、まず、最初に生体に加わる G の問題を解決したことから始まる。宇宙船の発射から大気圏外突入時および地上にかえるための再突入の際、かならず遭遇しなければならない。わが国でも生物衛星の計画が具体化しつつあるとき、生体の G に対する耐久性の問題については、なお多くの検討すべき問題が残されている。

生体の G に対する耐久限界は、加速度の大きさ、作用方向、作用時間、動物の種類差、その時の一般状態、環境条件に影響を受ける。

航空医学の分野では、現在生体に G がかかる例として、航空機の方転換、落下傘の開傘、落下傘での接地時、射出席の射出時、カタバルト射出時、自由落下時の荷重、その他数多くの G の問題について研究している⁽²⁾。

今回は、航空医学実験隊の遠心力発生装置を用いて、人体の耐久限界よりさらに高い G 負荷における数種動物の耐久限界を検討したので報告する。

II. 被験動物および実験方法

被験動物は、動物業者から購入後、温度 $22.0 \pm 2.0^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $50.0 \pm 6.0\%$ に空調してある実験動物舎で 7~10 日間健康管理したのち実験に供した。

イヌは雑種、♂、体重 7.5~14.5 kg のもの 40 頭、ウサギは日本白色種、♂、体重 2.3~2.9 kg のもの 50 羽、モルモットは雑種、♂、体重 300~500 g のもの 50 匹、ラットは Wistar 系、♂、体重 160~220 g のもの 150 匹、ハムスターはゴールデン、♂、体重 90~160 g のもの 50 匹、およびカエルはニホントノサマガエル、♂、8 匹を用いた。これらに対しての G 負荷の方向は 3

種類で、頭部から足部方向に加わる加速度(+Gz)、足部から頭部方向に加わる加速度(-Gz)、および体軸に直角に腹背方向に加わる加速度(Gx)である。これらの G の大きさは、イヌには +10Gz、ウサギには +15Gz、-5Gz および 15Gx、モルモット、ラットにはウサギと同 G を、ハムスターは、+15Gz、-15Gz および 15Gx、カエルには +15Gz、-15Gz を負荷した。負荷に際しては、いずれの動物の場合も、特製固定器に呼吸を妨げないようにマスキングテープで固定し、イヌ以外は同時に 3~6 例またはそれ以上の匹数を実験した。死亡確認には、心電図電極を側胸部両側に貼付し、Multiscraptor を用い、心拍記録をしながら判定したもの、あるいは一定時間負荷し、装置をとめた後肉眼的に判定したものの 2 通りである。人体の +Gz の加速度に対しての耐久限界は、7G 付近であるが、著者らは別種の実験から動物の耐久限界は人体より著しく高いことを経験で知っているので、+15Gz の負荷条件とした。

III. 実験成績

1. 遠心加速度 +15Gz 負荷における数種動物の死亡時間の範囲

頭部から下腿の方向にかかる G における哺乳類(モルモット、ハムスター、ウサギ、ラット)と、両棲類(カエル)の耐性を死亡に至るまでの負荷時間をもって表わ

図 1 遠心加速度 +15Gz 負荷における数種動物の死亡時間、半数例生存時間、および安全限界時間の範囲

¹⁾ Hiroshi FUJIWARA and Masaaki IWANE*: Comparative Study on Tolerance to Centrifugal Acceleration in Several Animals.

* Aeromedical Laboratory, Defense Agency, Tachikawa, Tokyo.

すと図1のとおりである。

カエルはモルモット、ハムスター、ウサギおよびラットに比べて耐性が著しく高いことを認めた。カエルの限界まで知るためにはさらに高いGで実験する必要がある。この種の実験では、温血より冷血動物の方が強いことがわかる。また、同種動物においても耐久限界は個体差が認められる。一般的な傾向として、ウサギよりラット、ハムスター、モルモットの方がG耐性が大きい。

+15Gz 負荷中、死亡発現の最短例から最終死亡の最長例に要した時間は、ラット4分、ウサギ2分、ハムスター4.5分およびモルモット3分で、この時間内にバラついていることになる。この4種の哺乳動物に+15Gz 負荷した場合、作用時間が23分続けば、どの動物も死亡することになる。図にみられるように、半数例が生ずる範囲は、イヌ(+10Gz)では3~5分、ウサギ(+15Gz)5~6分、モルモット(+15Gz)12~15分、ラット(+15Gz)9~11分、ハムスター(+15Gz)9~10分である。この負荷をあたえても安全である時間は、半数生存域よりさらに短時間である。

2. 遠心加速度 -5Gz, -10Gz, および -15Gz 負荷における数種動物の死亡時間の範囲

生体は一般に、足部から頭部に向かってかかるGに対しては弱いものである。このときの実験は、モルモット、ラット、ウサギに-5Gzを、ハムスターには-10Gzおよびカエルには-15Gzを負荷した。

図2 遠心加速度 -5Gz, -10Gz および -15Gz 負荷における数種動物の死亡時間、半数例生存時間および安全限界時間の範囲

図2に示すように、カエルにおいては耐久限界が著しく高い。+Gz, Gx と同様に、このG負荷でも哺乳類より数倍以上耐えられることがわかった。どの動物においても-Gz 負荷では、苦悶状態が早期に起こり、とくに体動が激しい。死亡時間の範囲は、ハムスターを除いてGx 負荷時より大きい。一番最後に死亡した時間、つまり、最高に生存しえた例の時間だけについてみると、-5Gz ではモルモット23分、ラット20分、ウサギ10分であり、-10Gz のハムスターでは16分である。また、半数例が生ずる時間は、ウサギ5~7分、モ

ルモット5~8分、ラット1~3分、ハムスター8~10分で、この負荷の安全域は3分以下である。ラットは最短で0.5分である。

3. 遠心加速度 15Gx 負荷における数種動物の死亡時間の範囲

生体は体軸に直角(横軸 transverse)に加わる加速度に対しては、他の+Gz, -Gz より耐久度が一段と高く、また、背から腹に向うGより、腹から背に向うGの方に対して耐えられることは知られている。カエルは+15Gz に長時間耐えられるのであるから、このときの実験では使わなかった。この成績は図3に示すとおり、

図3 遠心加速度 15Gx 負荷における数種動物の死亡時間、半数例生存時間および安全限界時間の範囲

ハムスター、ラット、モルモット、ウサギである。これらの動物は+15Gz と同数を用いた。図でわかるようにいずれの動物も、+15Gz の場合より著しく強いことがわかる。ハムスターは、弱い個体でも負荷時間30分目に死亡がみられるが、強い個体で120分時に死亡している。したがって個体差がきわめて著しい。この負荷での半数例生存しうる範囲は、ウサギ8~11分、モルモット9~12分、ラット13~15分、ハムスター30~60分である。また、安全域は+Gz, -Gz の場合より延びている。

要するに、100% 死亡する時間帯と半数生存しうる時間帯は弱い個体の群と強い個体の群によりちがってくる。

IV. 考 察

動物の加速度に対する報告は、+Gz の実験が主で、BRITTON ら^(1,2)によると、+6G の加速度負荷において、ウサギよりネコの方が耐性が高く、ネコよりイヌ、マウスの方がさらに強く、イヌ、マウスよりモルモット、ラットの方が耐性があり、マウスはほぼヒトと同等の耐性であるといっている。たとえば、モルモット、ラットでは、この6G の作用時間が8分過ぎから12分半ぐらいで死亡するとしている。また、BECKMAN ら、あるいは G. H. KYDD と A. M. STOLL^(3,4) は、+G に対す

るヒトとサルとの耐性を加速度の大きさと、漸増負荷の場合における作用時間から耐性がどう変わるかについて調べ、それにより推定評価を行ない、サルの方がヒトより耐性が強く、限界加速度の大きさ、すなわち、作用時間に無関係に耐えうる加速度の大きさは $2.5G$ くらいであり、限界作用時間の方は 3 秒くらいのところにあるといっている。サルは $+10G$ 負荷では 7 秒が限度で、ヒトはそれより短い時間が限度で、 $+7G$ 4.5 秒くらいと推定している。生体は、加速度に対して限界作用時間と限界加速度の大きさの両者に影響を受けるわけである。

また、ヒトよりも体の小さい小動物は、循環血が偏在して脳の酸素欠乏が起こっても、低酸素耐性が強いために、 G 耐性も大きいものと考えられる。BRITTON^(1,2)の結果は、著者らの結果より耐性が低くなっているが、この差異がどうして生じたかについては、評価を検討してみなければわからないが、おそらく実験条件の差がもっとも大きく影響していると考えられる。たとえば、動物は苦しい荷重に際して暴れることが多く、苦しまぎれに、もがき姿勢の変動があった場合では、著しく耐久時間に影響するから、同じ G の大きさであっても耐性が低下してくるなどの事実がある。

今回の動物実験は、もちろん、耐性を弱める因子を除くように心がけ、また、呼吸を妨げないようにマスキングテープを用いて注意深く固定した。しかし、自由の状態で G 負荷される場合より、体に巻いたマスキングテープは、あたかも耐 G 服を着用したような効果を生じ、ある程度 G 耐性をたかめる役目を持つものと思われる。

したがって、この固定の上手下手は生存時間の長短となって現われる。従来報告されている成績と、著者らの負荷方法が異なるので耐久限界は必ずしも一致するとは考えられないが、従来の結果が正しい耐久限界を示しているという証明もない。

今回は、航空医学実験隊に設置してある人体用遠心力発生装置の性能にもとづいて実験条件を定めたが、さらに今後は、人体の限界 G 付近で、慢性的に負荷した場合の影響をみてゆく必要がある。

また、耐性の決め手に加担するのは環境条件であるので、気温 $30^{\circ}C$ を越える場合とか、湿度 90% 以上の日は実験をさけ、ほぼ飼育室温湿度に近い春季と秋季に実験をすすめたが、今後は高温時のときの耐性も検討する必要がある。また、上記の実験成績から小動物は大動物より G 耐性が高いことが明らかであるが、その理由については、とくに $+Gz$ では低酸素耐性の高い小動物がこの G 耐性も高いものと考えられる。

V. 要 約

著者らは、動物の加速度の耐久限界を求めるため、被験動物には、イヌ 40 頭、ウサギ 50 羽、モルモット

60 匹、ラット 150 匹、ハムスター 50 匹およびカエル 8 匹を用いた。加速度の種類は、頭から足の方に作用する $+Gz$ と、足から頭の方に作用する $-Gz$ 、および体軸に直角に作用する横軸の Gx の 3 種である。イヌは $+10Gx$ 、ウサギ、モルモットおよびラットは $+15Gz$ 、 $-5Gz$ 、 $15Gx$ およびカエルは $+15Gz$ 、 $-15Gz$ である。

これらの負荷からそれぞれの動物が全例死亡するまでの時間、半数例死亡するまでの時間、および全例が生命保続できる安全域時間を検討した。

結果はつぎのとおりである。

(1) イヌに $+10Gx$ を負荷した場合、 100% 死亡する時間は $8\sim 11$ 分で、 50% 生存には $3\sim 5$ 分、安全域は 1 分以内である。

(2) ウサギに $+15Gz$ を負荷した場合、 100% 死亡する時間は $7\sim 9$ 分で、 50% 生存には $5\sim 7$ 分、安全域は 2 分以内である。また、 $-5Gz$ の場合、全例死亡 $10\sim 13$ 分、 50% 生存 $5\sim 7$ 分、安全域 2 分以内で、 $15Gx$ の場合は、 $+Gz$ 、 $-Gz$ 負荷より延長し、 100% 死亡には $13\sim 15$ 分、 50% 生存には $8\sim 11$ 分、安全域 6 分以内である。

(3) モルモットに $+15Gz$ を負荷した場合、 100% 死亡する時間は $17\sim 20$ 分、 50% 生存には $13\sim 15$ 分、安全域は 2 分以内である。 $-5Gz$ の場合、 100% 死亡 $20\sim 23$ 分、 50% 生存には $5\sim 8$ 分、安全域 3 分以内で、 $15Gx$ の場合、 100% 死亡 $21\sim 25$ 分、 50% 生存には $9\sim 11$ 分、安全域 6 分以内である。

(4) ラットに $+15Gz$ を負荷した場合、 100% 死亡する時間は $14\sim 18$ 分、 50% 生存 $9\sim 11$ 分、安全域は 0.5 分である。また、 $-5Gz$ の場合、 100% 死亡 $15\sim 20$ 分、 50% 生存には $1\sim 3$ 分、安全域 0.5 分で、 $15Gx$ の場合、 100% 死亡する時間 $21\sim 25$ 分、 50% 生存する時間 $13\sim 15$ 分および安全域 $5.5\sim 6.5$ 分でモルモットとほぼ同様である。

(5) ハムスターに $+15Gz$ 、 $-10Gz$ および $15Gx$ を負荷した場合、ウサギ、モルモット、ラットに比べて耐久時間が著しく延長し、いずれの負荷にも強い。

(6) カエルに $+15Gz$ 、 $-15Gz$ を負荷しても耐性が高く、 1 時間負荷においても全例死亡しない。また、カエルは哺乳類に比べて著しく耐久度が高い。

Summary

Forty mongrel dogs, fifty rabbits, sixty guinea pigs, one hundred and fifty rats, fifty hamsters, and eight frogs were used for the experiments of determining their acceleration tolerance limits. Centrifugal acceleration was given to the animals in three ways, headward direction ($+Gz$), tail ward

direction(-Gz), and forward or backward direction (Gx). Given magnitudes of acceleration were +10 Gz to dogs, +15Gz, -5Gz and 15Gx to rabbits, guinea pigs and rats, and +15Gz and -15Gz to frogs. Full lethal time, half survival time, and full survival limit time for the acceleration loads stated above were determined in all species of animals and the result is as follows.

1) Dogs which were given +10Gz of acceleration, showed 100% lethal time of 8 to 11 minutes, half survival time of 3 to 5 minutes and full survival limit time within one minute.

2) In rabbits which were given +15Gz of acceleration, 100% lethal time was 7 to 9 minutes, half survival time was 5 to 6 minutes, and full survival limit time was within 2 minutes. In case of -5Gz of acceleration all rabbits killed in 10 to 13 minutes, half survived in 5 to 7 minutes and all survived within 2 minutes. Gx was more tolerable; *i. e.* rabbits showed 100% lethal time of 13 to 15 minutes, half survival time of 8 to 11 minutes and full survival limit time within 6 minutes for 15Gx of acceleration.

3) Guinea pigs showed 100% lethal time of 17 to 20 minutes, half survival time of 13 to 15 minutes, and safe limit within 2 minutes for +15Gz. These tolerance times were 20 to 23 minutes, 5-8 minutes, and 3 minutes, respectively, in case of -5Gz and 21 to 25 minutes, 9 to 11 minutes, and 6 minutes, respectively, in case of 15Gx.

4) Rats showed 100% lethal time of 14 to 18 minutes, half survival time of 9 to 11 minutes, and safe limit within 30 seconds for +15Gz. These

tolerance times were 15 to 20 minutes, 1-3 minutes, and 30 seconds, respectively, for -5Gz and 21 to 25 minutes, 13 to 15 minutes, and 5.5 to 6.5 minutes for 15Gx.

5) Hamsters which were given +15Gz, -10Gz and 15Gx showed very longer tolerance times than those of rabbits, guinea pigs and rats.

6) Frogs showed the strongest tolerance to G as compared with mammals. All frogs were safely survived for more than one hour in case of +15Gz and -15Gz.

文 献

- (1) BRITTON, S.W. and COREY, E.L. 1942 Centrifugal and gravitational effects on animals and their alleviation. University of Virginia, Report No. 40, Committee on Aviation Medicine. National Research Council, Division of Medical Sciences (Feb. 2), (Confidential).
- (2) BRITTON, S.W., COREY, E.L. and STEWART, G.A. 1946 Effect of high acceleratory forces and their alleviation. *Am. J. Physiol.* **146**: 33-51.
- (3) BECKMAN, E.L., ZIEGLER, J.E., DUANE, T. D. and HUNTER, H. N. 1953 Some observations on human tolerance to accelerative stress, II. Preliminary studies subjected to maximum simple accelerative loads. *J. Aviation Med.* **24**: 377.
- (4) KYDD, G. H. and STOLL, A. M. 1958 G tolerance in primates. *J. Aviation Med.* **29** (6): 413-421.
- (5) 斎藤一郎ほか 1962 加速度負荷の循環機能に及ぼす影響. 第1報, +G 負荷中における心臓の形態変化と生命の危険関について. *医実報告* **2**(2): 1-11.