

ISSN 1881-7297

日本保健物理学会専門研究会報告書シリーズ

Vol.4, No.1

航空機搭乗者の宇宙線被ばくに関する

専門研究会

2006年3月

日本保健物理学会

日本保健物理学会専門研究会報告書シリーズ ISSN 1881-7297  
Vol.4, No.1, 航空機搭乗者の宇宙線被ばくに関する専門研究会

---

2006年3月

発行者 日本保健物理学会企画委員会  
発行所 日本保健物理学会  
〒160-0023 東京都新宿区西新宿3-3-11 杉本ビル3F  
NPO 事務センター内 日本保健物理学会事務局  
TEL : 03-5339-7286  
FAX : 03-5339-7285  
E-mail : [jhps@wwwsocnii.ac.jp](mailto:jhps@wwwsocnii.ac.jp)  
<http://wwwsoc.nii.ac.jp/jhps/index.html>

航空機搭乗者の宇宙線被ばくに関する  
専門研究会

報 告 書

2006 年 3 月

日本保健物理学会



# 「航空機搭乗者の宇宙線被ばくに関する専門研究会」報告書

## 目 次

1. はじめに .....	3
2. 航空機被ばくをとりまく現状について .....	4
2.1. 宇宙放射線環境 .....	4
2.2. 線量レベル .....	7
2.3. 太陽フレアについて .....	9
2.4. 疫学研究的知見 .....	11
2.4.1 航空機乗務員を対象とした最近の疫学研究的概要 .....	11
2.4.2 航空機乗務員における悪性腫瘍 .....	12
2.4.2.1 全悪性腫瘍 .....	12
2.4.2.2 女性の乳がん .....	12
2.4.2.3 皮膚がん .....	13
2.4.2.4 白血病 .....	13
2.4.2.5 中枢神経系の腫瘍（悪性、良性、性状不詳を含む） .....	14
2.4.2.6 その他の部位の腫瘍 .....	14
2.4.3 航空機乗務員におけるその他の疾患 .....	14
2.4.4. まとめ .....	15
2.5 航空機乗務員の被ばく管理に関する内外の動向 .....	27
2.5.1 国内の動向 .....	27
2.5.1.1 放射線審議会の意見具申 .....	27
2.5.1.2 日本乗員組合連絡会議（ALPA Japan）などの要請 .....	27
2.5.1.3 文科省放射線安全規制検討会の報告書 .....	28
2.5.1.4 放射線審議会のガイドライン .....	29
2.5.2 国外の動向 .....	29
2.5.2.1 国際放射線防護委員会（ICRP）の勧告等 .....	29
2.5.2.2 国際定期航空操縦士協会連合会（IFALPA）の声明 .....	29
2.5.2.3 欧州連合の欧州放射線防護指令（96/29/EURATOM（1996）） .....	30
2.5.2.4 欧州連合（EU）以外の国々 .....	30
3. 今後必要な対応について .....	32
3.1 計算精度の向上 .....	32
3.2 評価体系の整理 .....	35

3.2.1 実効線量.....	35
3.2.2 放射線荷重係数と線質係数の整合性の問題.....	36
3.2.3 中性子.....	36
3.2.4 陽子.....	38
3.2.5 実効線量と臓器線量の関係.....	39
3.2.6 まとめ.....	40
3.3 実測による検証について.....	41
3.4 疫学研究の課題.....	43
3.4.1 方法論的な課題.....	43
3.4.2 日本における疫学研究の実施可能性.....	44
3.4.3 まとめ.....	45
3.5 労務管理への反映.....	45
3.5.1 航空機乗務員の業務.....	45
3.5.2 航空機乗務員の勤務実態.....	46
3.5.2.1 出発準備作業.....	46
3.5.2.2 乗務.....	46
3.5.3 航空機乗務員の有害な作業環境と過酷な労働.....	47
3.5.3.1 低気圧.....	47
3.5.3.2 低酸素.....	47
3.5.3.3 騒音.....	47
3.5.3.4 低湿度.....	48
3.5.3.5 飛行姿勢と狭い作業空間.....	48
3.5.3.6 長時間・早朝・深夜(徹夜)労働及び時差との格闘.....	48
3.5.4 航空機乗務員の被ばく管理.....	48
3.5.4.1 被ばくの特徴.....	48
3.5.4.2 管理の内容について.....	49
3.6 専門家の役割に関して ~ 情報提供と非専門家との意見交換.....	52
<b>4. さいごに.....</b>	<b>55</b>

本専門研究会について(参考)

編集後記

## 1. はじめに

日本保健物理学会では、2004年2月、民間航空会社の乗務員により組織されている団体(日本乗務員組合連絡協議会と客室乗務員連絡会)が宇宙放射線による被ばく(以下「宇宙線被ばく」という。)の実態把握と適切な管理の要請を国に対して行ったのを機に、宇宙線被ばくに関連した最新の科学的知見をとりまとめ、放射線防護の専門家としての見解を広く社会に提示して航空機乗務員や乗客が抱く過度の不安の解消に努めることを目的として、「航空機搭乗者の宇宙線被ばくに関する専門研究会」を設置し、2004年秋より1年半にわたり検討を行ってきました。

当学会では、過去に「人為的に高められた環境放射線専門研究会」(2000～2001年度)等を組織し、宇宙飛行士や航空機搭乗者の宇宙線被ばくの実態や問題点を把握することを狙いとした検討を行いました。本研究会では、航空機搭乗者の宇宙線被ばくの問題に焦点を絞り、疫学研究の結果や乗務員の被ばく管理に関する国内外の動向などを含む、ここ数年進展が著しい当該分野の最新の情報を集約するとともに、今後特に重要性を増すと考えられる検討課題などを整理し明示することに努めました。その過程で、民間航空会社の乗務員の方をお招きし有意義な意見交換をすることもできました。また、当学会の第39回研究発表会(2005年7月、青森県六ヶ所村)において特別セッション「航空機内被ばくの問題点」を企画・開催し、学会内のコンセンサスの形成を図りました。

一方、文部科学省では、科学技術・学術政策局放射線安全規制検討会の元に設置されたワーキンググループによって航空機乗務員の宇宙線被ばくについて独自に審議が進められてきましたが、本研究会は、2005年9月、このワーキンググループにおいて専門家として招かれ、検討中の事項や見解を紹介しました。これらは、今般文部科学省の作成したガイドラインにも少なからず寄与したと自負しています。

2006年3月には、当学会の支援を得て、企画委員会主催により「航空機搭乗者の宇宙線被ばくに関するシンポジウム」(東京都千代田区)を開催し、乗務員の方々や労働衛生の専門家の方等数多くの参加を得て、活発な議論を行いました。また、当該シンポジウムにはマスコミ(NHK)が取材に訪れ、TVニュースでも報道されました。このことは、宇宙線被ばくに対する社会的関心の高さや放射線防護の専門家による取り組みが社会から期待されていることの現われと考えています。

本報告書は、こうした数々の機会での議論や個別に頂いた御意見等に基づき、宇宙線被ばくに関心にある方に、関連する知見を分かりやすく整理して示すために作成したものです。本書が、宇宙線被ばくに関する正確な科学的知識の普及や、今後取り組みが必要な調査研究の効率的な進展等に、多少なりとも役立つようでしたら幸いです。

## 2. 航空機被ばくをとりまく現状について

### 2.1. 宇宙放射線環境

宇宙空間には、超新星や太陽などから生じた放射線が飛び交っています。これらは宇宙放射線あるいは宇宙線と呼ばれ、太陽系外から飛来する銀河宇宙線 (galactic cosmic rays: GCR) と太陽起源の太陽放射線に大別されます (図 2.1.1)。いずれの宇宙線も、その多くは陽子が占めます。このうち、航空機で飛行している時に浴びる宇宙放射線は、エネルギーの高い GCR 起源のものになります。太陽粒子は、GCR と比べてエネルギーが低いため (~100MeV)、ごく稀な巨大な太陽フレアの発生時を除けば、通常民間の航空機が飛行する高度 (10 ~ 12km) にはほとんど影響しません。

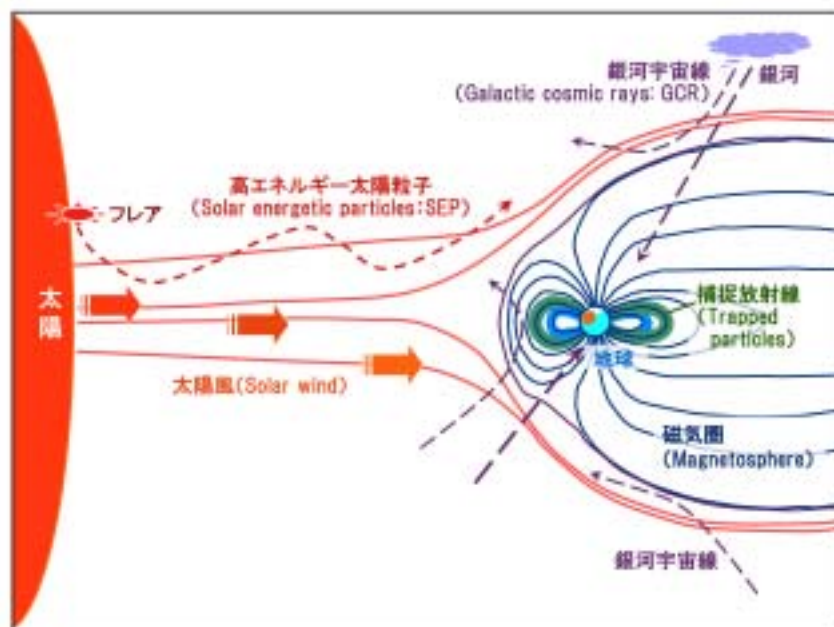


図 2.1.1. 地球をとりまく宇宙放射線環境のイラスト; エネルギーの低い太陽粒子 (太陽フレアで放出される粒子の一部を除く) は地球の磁場や大気に遮られ、航空機高度の放射線環境にはほとんど影響を及ぼさない<sup>1)</sup>。

GCR は、主に超新星の爆発に伴って生じたと考えられており、地球近傍の宇宙空間には比較的均一に分布しています。その組成は、98%が原子核で2%が電子、原子核のうち87%が陽子で12%がヘリウム、残りの1%が更に重い粒子となっています。これらのうち、エネルギーの比較的低い成分は地球の磁場によりはじかれてしましますが、ある一定値以上のエネルギーを持つ粒子は、磁場を通過して地球の大気圏まで侵入します。地球が粒子をはじく力(カットオフリジディティ)は、地球磁場の形状に対応して、極地方ほど低く、赤道に近くなるほど高くなります。したがって、地磁気

緯度の高いところでは粒子が侵入し易いため宇宙放射線の線量率は高くなり、地磁気緯度の低いところでは低くなります。一例として、高度 12km におけるカットオフリジディティと周辺線量当量率の関係を図 2.1.2 に示します。欧米とアジアの都市では、緯度の差に比べて地磁気緯度の差が大きく、宇宙放射線の強度にも相当の違いが見られます。

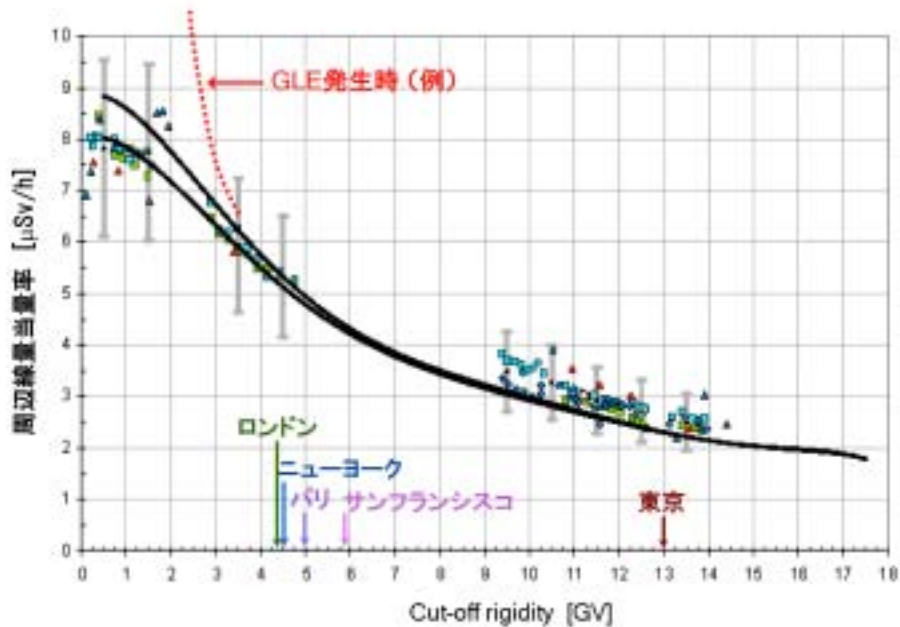


図 2.1.2. 高度 11,887m における 1cm 周辺線量当量率と垂直カットオフリジディティとの関係;実線は EPCARD コードによる計算値、プロットは 1992 年 5 月～2003 年 5 月に得られた実測データに基づく評価値<sup>2)</sup>。

大気圏に入ってきた粒子の多くも、分厚い大気(航空機高度で  $200 \sim 300 \text{ g cm}^{-2}$ 、地上で約  $1 \text{ kg cm}^{-2}$ )を通過する間に、原子・分子との相互作用によってエネルギーを失います。しかし、高エネルギー粒子の一部が大気原子と衝突して破碎し、図 2.1.3 に示すように様々な二次粒子(中性子、陽子、電子、光子、ミュー粒子、パイ粒子等)が雪崩状に発生します。これらの粒子の一部は航空機高度まで達し、搭乗者の被ばくに寄与する主な成分になります。ちなみに、この粒子の雪崩(=カスケード)現象は一般にカスケード反応と呼ばれ、地表に向けて降り注ぐ放射線群は「宇宙線シャワー」あるいは「空気シャワー」と呼ばれます。

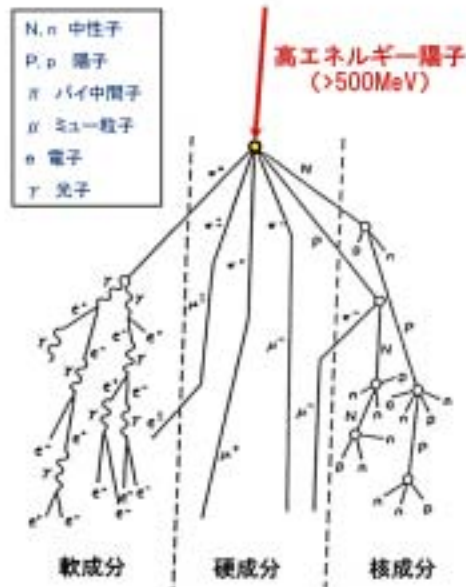


図 2.1.3. 宇宙線陽子の大气内カスケード反応.

航空機高度(10-12km)での被ばくをもたらす放射線のうち、最も大きく寄与する成分は中性子で、実効線量の半分以上を占めると評価されています。電離成分については、陽子が1~2割で、残りの3割程度を電子、光子、ミュー粒子、パイ粒子が占めると推定されています。(図 2.1.4)。なお、これらの粒子のほとんどは、電離損失等によってエネルギーを失い、地上にまで到達することはできません。地上で私たちが浴びている宇宙放射線は、ミュー粒子が支配的な構成になっています。

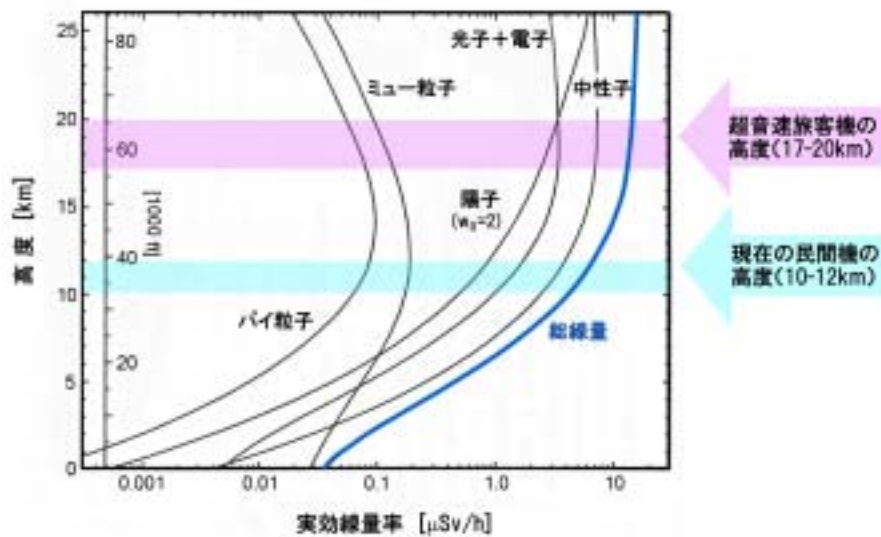


図 2.1.4. 宇宙放射線の実効線量率の典型的な高度分布; 陽子の放射線荷重係数には2を用いている.

## 参考文献(2.1)

- 1) 保田浩志; 航空機搭乗時の宇宙放射線による被ばくについて, 放射線科学, 48, 317-326 (2005), 実業公報社, 東京.
- 2) European Radiation Dosimetry Group: “Cosmic radiation exposure of aircraft crew: compilation of measured and calculated data”, A report of EURADOS Working Group 5. European Commission: Luxembourg, 2004.
- 3) 西村純 編著; 宇宙放射線, 実験物理学講座 (1986), 共立出版, 東京.
- 4) 古川雅英; 地球規模の自然放射線 (2), 二次宇宙放射線強度の空間分布, 月刊地球, 号外 22, 55-62 (1998), 海洋出版, 東京.

## 2.2. 線量レベル

航空機で高高度を飛行している時には、地上で日常浴びているより百倍程度強い自然放射線に曝されます。この放射線強度の上昇は宇宙から来る放射線、いわゆる宇宙放射線に由来し、航路が高緯度(正確には高地磁気緯度)にあるほど、また、フライト時間が長いほど、飛行中に浴びる宇宙放射線の量は大きくなります。

航空機の巡航高度(10~12km)における宇宙線強度は比較的安定していますので、太陽活動(磁場)の状態が分かれば、航空機高度における宇宙放射線の強度を推定することが可能です。そして、推定された放射線強度の空間分布と飛行条件(航路、高度及び飛行時期)に基づき、航空機に搭乗した場合に受ける被ばく線量、いわゆる「航路線量」を計算で求めることができます。航路線量は一般に実効線量で表されます。

航路線量の計算に利用されているコードには、米国連邦航空局(FAA)のFriedbergらが開発したCARI<sup>1)</sup>、ドイツ国立環境健康研究センター(GSF)のSchraubeらが開発したEPCARD<sup>2)</sup>、カナダ王立軍事大学(RMC)のLewisらが開発したPC-AIRE<sup>3)</sup>等があります。ここでは、CARIコード(CARI-6)を用いて、日本発着の国際路線に対する航路線量値を系統的に計算した結果<sup>4)</sup>を図2.2.1に示します。世界の主要都市に対する成田発着の往復飛行における標準の搭乗時間と保守的な条件で計算された実効線量値の関係をプロットしています。日本発着の国際線では、距離の短い便は低緯度を、長い便は高緯度を飛行する傾向があるため、往復搭乗時間でおおよそ20時間を境として被ばく線量に大きな差が生じる点が特徴的です。

なお、ここでいう「保守的」とは、航空機高度の宇宙放射線強度が大きくなる太陽活動極小期を想定し、通常商用機が飛行する最高レベルの40,000ft(約12km)を巡航高度として、上昇と下降に要する時間を短く与えた条件を意味し、平均的な条件よりもかなり高めの線量を評価しています。標準的な巡航高度(34,000~37,000ft)で計算した場合には、20~30%低い値が得られます。また、太陽活動による影響については、高緯度を飛行する場合、例えばニューヨーク便で30%程度の変動が見られます。低緯度の飛行、例えばオーストラリアの各都市への飛行では10%未満の変動にとどまります。

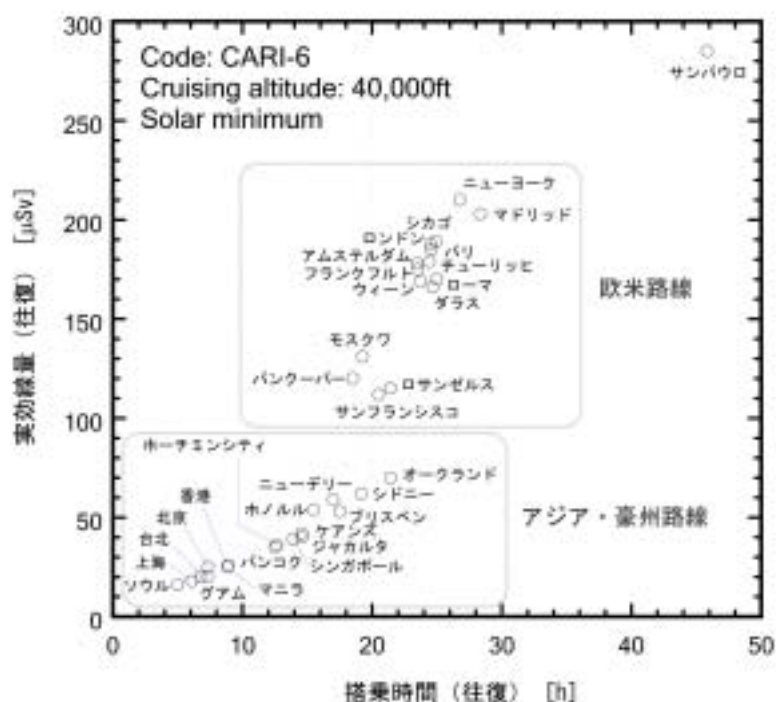


図 2.2.1. 世界の主要な都市へ成田から往復飛行した場合の搭乗時間と実効線量値の関係. 計算は CARI-6 コードを用いて、線量が高めとなる保守的な飛行条件(太陽活動極小期、巡航高度 40,000ft、上昇時間 15 分及び下降時間 20 分)の下で行った(保田らのデータ<sup>4)</sup>に基づいて作成)。

なお、放射線医学総合研究所では、CARI-6 による計算で得られた日本発着国際線の航路線量値をデータベース化し、それを基に海外渡航時に受ける被ばく線量を簡便な操作で知ることのできるインターネットツール(JISCARD: Japanese Internet System for Calculation of Route Doses)を開発し、ホームページ上(<http://www.nirs.go.jp:8080/jiscard/index.htm>)で一般向けに公開しています<sup>5)</sup>。ぜひ一度アクセスしてみてください。

#### 参考文献(2.2)

- 1) Federal Aviation Administration: Radiobiology Research Team web site, 2005, [http://www.faa.gov/education\\_research/research/med\\_humanfacs/aeromedical/radiobiology/](http://www.faa.gov/education_research/research/med_humanfacs/aeromedical/radiobiology/).
- 2) GSF: EPCARD, 2005; <http://www.gsf.de/epcard>.
- 3) PCAIRE Inc.: PCAIRE, 2005; <http://www.pcaire.com/>.
- 4) 保田浩志、藤高和信、高木俊治、岩井敏: 航空機乗務員の被ばく管理に関する考察. 保健物理, 2004; 39: 345-351.
- 5) 保田浩志: 航路線量計算システム(JISCARD)について. 放射線科学, 48(11), 389-395, 2005.

## 2.3 太陽フレアについて

太陽活動は約 11 年の周期で変動し、通常、航空機に搭乗している程度の時間スケールではほぼ一定と考えられます。現在宇宙線強度の予測に広く用いられている太陽磁場のデータ(ヘリオセントリックポテンシャル)についても、月単位の平均値として広く提供されています。また、太陽から定常的に放出されている粒子、いわゆる「太陽風」の粒子は、GCR と比べてエネルギーが低いため(～100MeV)、民間の航空機が通常飛行する高度(10～12km)にはほとんど影響しません。

ただし、ごく稀に、太陽活動が日レベルの短い時間で急激に変動することがあります。過去、太陽表面の黒点の周囲において突然大きな爆発が起こり、プラズマの炎とともに大量の高エネルギー粒子(ほとんどが陽子)が惑星間空間に放出される事象、いわゆる「フレア」と呼ばれる現象が観測されています。フレアが発生すると、蓄えられた太陽磁場のエネルギーが短時間のうちに開放されることによって粒子が加速され、高いエネルギーを持つ大量の粒子が地球の磁気圏に侵入してきます。大規模なフレアでは、地球近傍で観測される陽子(>10MeV)のピークフラックスが平常時の 1,000 倍を超えることもあります。

このような、太陽フレア時に放出される大量の粒子は、通常は地球の磁場や分厚い大気によって遮られるため、宇宙空間で観測されるような線量率の顕著な増加が航空機高度で見られることはほとんどありません。ただし、ごく限られた事例ながら、太陽フレアの影響が地上まで及び、カスケード反応で生じた中性子の強度が地上で明らかに上昇したケースがいくつか観測されています。こうした事象は「Ground Level Event(GLE)」と呼ばれ、地磁気緯度の高い(カットオフリジディティが小さい)ところで顕著な上昇が見られます。

中性子の測定データが存在する 1940 年代以降、被ばくの観点から過去最大の太陽フレアは、5 番目に観測された 1956 年 2 月 23 日の GLE 事象(以下「GLE5」という。)であると考えられています<sup>1)</sup>。GLE5 では、高いエネルギー(> 500MeV)を持った太陽粒子が大量に大気圏へ侵入したと推定され、最近のフランスの研究グループによる、過去の GLE 事象に伴う航空機搭乗者の被ばくを経験的なモデルで計算した結果<sup>2)</sup>によれば、線量が最大となるようなタイミングで GLE5 が発生したという仮定のシナリオで、北磁極(グリーンランド西)近くの上空を通るパリ - サンフランシスコ間の飛行(巡航高度 11km、飛行時間 11.5h)において、4.5mSv の被ばくを受け得ると推定されています。また、パリ - 東京間について、シベリア南部を通る航路(飛行時間 11.6h)で 0.9mSv、アラスカを経由して北極地方上空を通る航路(飛行時間 15h)では 3.8mSv という推定値も示されています。一般公衆に対する年間の線量限度を 1mSv が与われていることを考えると、1回の飛行でこれだけの線量を浴びる可能性があるならば、何らかの対策を講じる必要があるのではないかと考えられます。

しかしながら、GLE5 クラスの太陽フレアが発生する確率(頻度)は非常に低く、1 回の飛行で 1mSv を超えるような被ばくを受け得るような GLE 事象は、過去 50 年間起こっていません(図 2.3.1)。太陽フレアは自然災害の一種(津波のようなもの)とみなすことが適当と考えられ、その潜在的なリスクを論じて搭乗を制限するのではなく、万が一の発生に備えた体制を整備してお

くことが望まれます。具体的には、人工衛星等で得られる太陽活動のリアルタイム情報に注意して、巨大なフレアが発生したと分かった時点で適切な対策を採ることが望まれます。

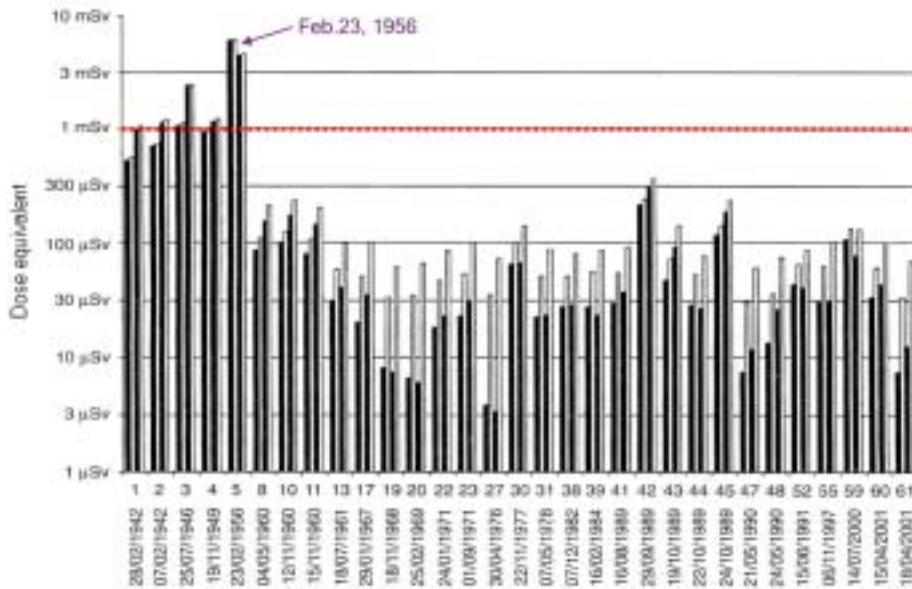


図 2.3.1. 過去に地上での中性子の増加 (Ground Level Event: GLE) が比較的大きく観測された太陽フレアに対し、線量が最大となるような飛行条件において経験的なモデル (SiGLE モデル) を用いて計算された周辺線量当量値。黒いバーは太陽フレア粒子の寄与、白いバーは総線量を示し、左のペアはパリ～ニューヨーク間のコンコルドでの飛行 (巡航高度 17km、飛行時間 3.5h)、右のペアはパリ～サンフランシスコ間のエアバス A340 での飛行 (巡航高度 11km、飛行時間 11.5h) での線量を示す (Lantos and Fuller の論文<sup>2)</sup>より) ; 観測史上最大級の GLE 事象は、1940 年代以降 5 番目に観測された 1956 年 2 月 23 日のフレアとなる。

ここで強調しておきたい点として、巨大なフレアが発生した際に航空機内での線量率の変化を実測で検証できた事例はほとんどなく、上記の推定値の正確さについて更なる検討を要するということがあります。数少ない実測例の1つとして、2001年4月の最大級フレアの発生時において小型のSi検出器で得られた結果が報告されています<sup>3)</sup>、そのデータによれば、SPEの発生に伴い線量率は急激に上昇し、平常時の値を約2倍程度上回りました。しかし、Si検出器の指示値そのものは電離成分の一部に由来する線量を示しており、平常時に受ける航路線量値よりも低くなっています。電離成分の増加をもたらした太陽粒子由来の宇宙線の線質については、通常の銀河宇宙線起源のものとは異なり、中性子が線量の大部分を占めることが分かっています。半導体を用いた小型の電子線量計は、高エネルギー中性子に対する感度が非常に小さく、航空機の巡航飛行高度のような中性子と荷電粒子が混在する場における線量測定には適しません。

## 参考文献(2.3)

- 1) Nealy, J.E., Striepe, S.A. and Simonsen, L.C.: “MIRACAL: A Mission Radiation Calculation Program for Analysis of Lunar and Interplanetary Missions”, NASA TP-3211, 1992.
- 2) Lantos, P. and Fuller, N.: History of the solar particle event radiation doses on-board aeroplanes using a semi-empirical model and Concorde measurements. Radiat. Prot. Dosim., 104(3): 199-210, 2003.
- 3) Spurny, F. and Dachev, Ts. Measurements in an aircraft during an intense solar flare, Ground Level Event 60, on April 15, 2001. Radiat. Prot. Dosim. 95:273-275, 2001.

## 2.4 疫学研究の知見

1990年代以降、操縦士や客室乗務員などの航空機乗務員の宇宙放射線による被ばくを規制の対象として扱う動きが活発になり、航空機乗務員を対象とした疫学研究が世界各国で盛んに実施されるようになりました。欧州では、大規模な国際共同研究も進められており、研究結果が徐々に公表されています。本章では、航空機乗務員における疾患、主として悪性腫瘍(がん)に関して疫学研究から得られた知見を概括します。

### 2.4.1 航空機乗務員を対象とした最近の疫学研究の概要

航空機乗務員を対象とした疫学研究は、その研究デザインによってコホート研究、症例・対照研究、PMR(Proportional Mortality Ratio)を用いる研究などに分類されます(表 2.4.1～2)。初期の研究では、関心のある疾患での死亡の割合を一般集団と比較した、PMRを用いる研究が比較的多かったのですが、その後、固定した集団を追跡することにより、標準化死亡比(Standardized Mortality Ratio; SMR)や標準化罹患比(Standardized Incidence Ratio; SIR)を算出して関心のある疾患の死亡率や罹患率を一般集団と比較するコホート研究が多くなっています。ごく最近では、症例・対照研究により潜在的な交絡因子の情報を得て解析に取り入れる研究もいくつか実施されています。

国単位のコホート研究では、研究対象者数が最大でも数千人程度に留まり、十分な対象者数を得られませんが、最近では、欧州で ESCAPE(The European Study of Cancer Risks among Airline Personnel)と呼ばれる国際共同研究が実施され、数万人を対象とした検討が可能となっています。多くの研究では、航空機乗務員の乗務歴とがんの罹患や死亡のデータに基づき、過去に遡って追跡調査が開始されています。被ばくの指標としては、雇用年数や搭乗時間あるいはブロック時間(巡航高度を飛行している時間)を用いた研究が大半ですが、最近では乗務歴と計算コードに基づいて推定した個人線量を用いた研究も見られます。北欧以外の国では、健康影響に関する検討指標(エンドポイント)として悪性腫瘍やその他の疾患による死亡を調べた研究が多いのですが、北欧諸国では全国的ながん登録制度に基づいて確認した悪性腫瘍の罹患を調べている点が特徴的です。悪性腫瘍以外のエンドポイントでは、航空機乗務員の

子供の出生体重や先天性異常を検討した研究もあります。

#### 2.4.2 航空機乗務員における悪性腫瘍

航空機乗務員における悪性腫瘍について、主にコホート研究から得られた知見を以下に紹介します。まず最初に全悪性腫瘍を、次いで、いくつかの部位別に紹介します。悪性腫瘍の死亡率や罹患率を一般集団と比較した結果については、図 2.4.1～6 に示し、それらの率を雇用年数や搭乗時間など職業被ばくの指標や推定線量別に比較した結果については、表 4～7 に示します。

##### 2.4.2.1 全悪性腫瘍

悪性腫瘍を全部位で一括して見た場合、航空機乗務員を対象とした多くの疫学研究では、その死亡率や罹患率は一般集団と比べて低いと同程度であることが示されています(図 2.4.1)。全悪性腫瘍の統計学的に有意な増加を報告した研究としては、ノルウェーでの Haldorsen らの研究(2001)および米国での Reynolds らの研究(2002)があり、SIR は、それぞれ 1.7(95%CI: 1.3-2.2)、2.4(95%CI: 1.6-3.6)です。しかし、前者では、上部呼吸器・消化器および皮膚の悪性腫瘍が、後者ではカポジ肉腫が悪性腫瘍の大部分を占めており、放射線との関連性は明らかではありません。

一方、航空機乗務員における悪性腫瘍を職業被ばくの指標や推定線量別に検討した、いわゆる内部比較を行った疫学研究のほとんどでは、被ばくに関連した有意な増加は報告されていません。ドイツの操縦室乗務員を対象とした Zeeb らの研究(2002)では、雇用年数の増加と共に全悪性腫瘍の死亡率が増加する有意な傾向を示しましたが、推定線量やブロック時間と全悪性腫瘍の死亡率との間には有意な関連は見られていません。また、大規模な国際共同研究でも、乗務歴や被ばく線量に関連した全悪性腫瘍の有意な増加は見られていません(表 2.4.4～7)。前述した航空機乗務員における全悪性腫瘍の死亡率増加は、宇宙放射線への被ばくよりも、生活様式や他の要因による交絡やその他のバイアスによる可能性が高いと考えられます。これまでの疫学的知見からは、航空機乗務に伴う宇宙放射線への職業被ばくの影響があったとしても、悪性腫瘍全体のリスクを高めるほどではないことが示唆されます。

##### 2.4.2.2 女性の乳がん

数多くの疫学研究で放射線被ばくとの関連が示されてきた部位で、航空機乗務員を対象としたいくつかの疫学研究でも、一般集団と比べ死亡率や罹患率が高いことが報告されています(図 2.4.2)。しかし、欧州の国際共同研究による大規模なコホート研究では、乗務歴と乳がん死亡率の間に明瞭な関連は認められていません(表 2.4.5)。航空機乗務員における乳がんの死亡率や罹患率が高い理由として、放射線以外の要因では、出産歴などの生活様式が交絡している可能性が指摘されています。また、その他に航空機乗務によるサーカディアンリズムの乱れや精神的ストレスなども潜在的な交絡因子として疑われています。

症例・対照研究により出産歴等の潜在的交絡因子の影響を調整した研究も行われています。Rafnsson らの研究(2003)では、アイスランドの女性客室乗務員を対象としたコホート内症例・対照研究により、初産年齢を調整した場合に、1970年以前の乗務年数が5年以上の集団では5年未満の集団に比べ乳がん罹患の相対リスクが 5.2(95%CI:1.6-17.4)と統計学的に有意に高いことが示されています。しかし、この結果はわずか 35 症例に基づいており、慎重に解釈する必要があります。

#### 2.4.2.3. 皮膚がん

黒色腫と非黒色腫の大きく 2 つに分類される皮膚がんのうち、黒色腫については放射線被ばくによるリスク増加に関する疫学的証拠は乏しいのですが、航空機乗務員における皮膚がんは、いずれの種類についても死亡率や罹患率が一般集団と比べて高いことがいくつかの疫学研究で報告されています(図 2.4.3~4)。

推定線量や乗務歴と死亡率や罹患率との関連を解析した国際共同研究の中で約 1 万人の男性操縦士を対象とした Pukkala らの研究 (2002)では、蓄積線量が 10~20mSv の群で、悪性黒色腫の罹患の相対リスクが 2.2(95%CI:1.0-4.7)と統計学的に有意に高く、また、蓄積線量の増加と共に黒色腫の罹患率が増加する有意な傾向が示されています(表 2.4.7)。一方、約 2 万 8 千人の男性客室乗務員を対象とした Blettner らの研究 (2003)や、約 1 万 9 千人を対象とした Langner らの研究 (2004)では、航空機乗務に伴う黒色腫リスクの有意な増加は見られていません(表 2.4.4, 6)。

黒色腫および非黒色腫の主要なリスク因子として紫外線が知られており、航空機乗務員における皮膚がんリスクの増加は、野外でのレジャー活動に伴う紫外線曝露が起因している可能性が古くから指摘されています。しかし、Rafnsson らの研究 (2003)は、航空機乗務員における紫外線曝露を含む皮膚がんのリスク因子の保有割合は一般集団と比べて顕著な差がなく、航空機乗務員における皮膚がんのリスク増加が紫外線曝露だけで説明出来ないことを示唆しています。

#### 2.4.2.4 白血病

航空機乗務員を対象とした個々の疫学研究では、症例数が少ないことによる統計学的なバラツキが大きいこともあり、白血病の有意なリスク増加が報告されていません(図 2.4.5)。ただ細かい病型に注目した場合、急性骨髄性白血病の罹患率あるいは死亡率が一般集団に比べて統計学的に有意に高いことが、デンマークのやカナダの操縦士(それぞれ SIR=5.1、95%CI:1.0-14.9、SIR=4.7、95%CI:2.1-9.3)において報告されています。しかし、症例数がそれぞれ 4 例、6 例と少なく、これらの有意な白血病増加は偶然による可能性が高いと考えられます。また、航空機乗務に伴うベンゼンなど化学物質による交絡の影響も否定できません。多数の症例を含む大規模な国際共同研究では、航空機乗務に関連して白血病の死亡率や罹患率が増加することを示す証拠は得られていません。

#### 2.4.2.5 中枢神経系の腫瘍（悪性、良性、性状不詳を含む）

航空機乗務員を対象とした疫学研究では、一般集団と比べた場合の死亡率や罹患率の増加を示す報告は限られています(図 2.4.6)。航空機乗務員を対象とした研究のうち、カナダの約 900 人の操縦士を対象とした Band らの研究 (1990)は、脳腫瘍の SMR が 4.2(95%CI: 1.4-9.5)、SIR が 3.5(95%CI: 1.2-7.9)でともに有意に高いことを示しましたが、死亡数、罹患数ともに 4 例と少ないことに注意すべきです。研究対象者と追跡期間を拡大した Band らの研究 (1996)では、脳腫瘍の有意な増加は見られていません。同様に、約 400 人の英国の操縦士における死亡原因を検討した Irvine と Davies の研究(1992)では、死亡原因のうち脳腫瘍の割合が一般集団と比べて 2.7 倍と有意に高いことが報告されましたが、研究対象者と追跡期間を拡大した Irvine と Davies の研究(1999)では、そのような有意な増加は報告されていません。また、乗務歴や推定線量と脳腫瘍の死亡率や罹患率との間に有意な関連は報告されていません。したがって、一部の研究で見られた航空機乗務員における脳腫瘍のリスク増加は、少数の症例に基づく偶然による結果か、放射線以外の要因の交絡などのバイアスによる結果だと解釈するのが妥当だと考えられます。

#### 2.4.2.6 その他の部位の腫瘍

上記の 4 つの部位以外では、航空機乗務員における悪性腫瘍の死亡率や罹患率が一般集団と比べて有意に高いと報告された部位として、骨、上部呼吸器・消化器、肝臓、前立腺、腎臓、非ホジキンリンパ腫などがあります。これらの結果は、非ホジキンリンパ腫を除けば、一国の乗務員を対象とした研究における比較的少数の症例に基づいた結果であることに注意すべきです。また、非ホジキンリンパ腫の有意な増加は、欧州 8 国の約 1 万 1 千人の男性客室乗務員を追跡した結果に基づきますが、同じ研究で約 3 万 3 千人の女性客室乗務員においてはそのような増加は見られていません。

放射線に被ばくした他の集団を対象とした疫学研究からは、これらの部位については、必ずしも放射線被ばくとリスク増加の明瞭な関連を示していません。したがって、一般集団と比べて死亡率や罹患率が高いと報告されたこれらの結果のいくつかは、少数の症例に基づく偶然か、誤診断等のバイアスによるものと解釈するのが妥当だと考えられます。

#### 2.4.3 航空機乗務員におけるその他の疾患

航空機乗務員を対象とした疫学研究のいくつかでは、心疾患を初めとする悪性腫瘍以外の疾患による死亡率を一般集団と比較していますが、多くの研究では、強い健康労働者効果により、航空機乗務員における死亡率は総じて低いことが報告されています。

AIDS は例外の 1 つで、ドイツの研究や欧州 8 国の共同研究では、男性客室乗務員における AIDS 死亡率が一般集団と比べて有意に高いことが報告されています。しかし、航空機乗務員における AIDS は、宇宙放射線への被ばくの点よりも、HIV への感染に関わる生活様式などの点からリスクの増加が説明出来ると思われれます。

また、ごく最近、Rafnsson ら(2005)の研究では、症例・対照研究により、操縦士における白内

障リスクが操縦士以外に比べて有意に高く、また、白内障リスクと雇用年数や推定線量との関連も示されました。しかし、この解析では症例と対照の年齢をマッチさせずに、共変量として調整されている点、また、用いられた線量が実効線量である点などにおいて、白内障のリスクを議論するためには必ずしも充分ではありません。航空機乗務員における白内障についてはさらなる知見が待たれます。

さらに、Irgens ら(2003)の研究では、ノルウェーの男性操縦士と女性客室乗務員の合計約7,000人について、彼らの子供の低出生体重、早期産、先天性異常などを一般の子供と比較し、そのような妊娠や出産に関わる影響が増えていることはない結論しました。

#### 2.4.4. まとめ

以上述べたように、航空機乗務員を対象とした疫学研究では、航空機乗務員のがん死亡率やがん罹患率を一般集団と比較した場合、女性乳がんと皮膚がんが有意に増加することがしばしば報告されています。しかし、航空機への乗務歴や推定された被ばく線量とそれらのがんリスクとの間には明瞭な関連が認められていません。大部分の研究では生活習慣等に関する潜在的な交絡因子の情報が得られていないため、報告されたこれらのがんリスク増加は、交絡やバイアス、あるいは少数の症例に基づく偶然による可能性を否定できません。結論として、これまでの疫学的知見からは、航空機乗務員におけるがんリスク増加を宇宙放射線への被ばくだけで説明することは難しいと考えられます。

#### 参考文献(2.4)

- 1) International Commission on Radiological Protection (ICRP). Recommendation of the International Commission on Radiological Protection. Publ.60, Annals of ICRP 21. Oxford: Pergamon Press. 1991.
- 2) Pukkala E et al. Incidence of cancer among Finnish airline cabin attendants, 1967-92. *BMJ* 1995;311:649-652.
- 3) Gundestrup M and Storm HH. Radiation-induced acute myeloid leukemia and other cancers in commercial jet cockpit crew: a population-based cohort study. *Lancet* 1999;354:2029-2031.
- 4) Haldorsen T et al. Cancer incidence among Norwegian airline pilots. *Scand J Work Environ Health* 2000;26:106-111.
- 5) Haldorsen T et al. Cancer incidence among Norwegian airline cabin attendants. *Int J Epidemiol* 2002;40:825-830.
- 6) Hammar N et al. Cancer incidence in airline and military pilots in Sweden 1961-1996. *Aviat Space Environ Med* 2002;73:2-7.
- 7) Linnarsjö A et al. Cancer incidence in airline cabin crew: experience from Sweden. *Occup Environ Med* 2003;60:810-814.
- 8) Rafnsson V et al. Incidence of cancer among commercial airline pilots. *Occup Environ Med* 2000;57:175-179.
- 9) Rafnsson V et al. Risk of breast cancer in female flight attendants: a population-based study (Iceland). *Cancer Causes Control* 2001;12:95-101.
- 10) Zeeb H et al. Cohort mortality study of German cockpit crew, 1960-1997. *Epidemiology* 2002;4:693-699.
- 11) Blettner M et al. Mortality from cancer and other causes among airline cabin attendants in

- Germany, 1960-1997. *Am J Epidemiol* 2002;156:556-565.
- 12) Ballard TJ et al. A retrospective cohort mortality study of Italian commercial airline cockpit crew and cabin attendants, 1965-1996. *Int J Occup Environ Health* 2002;8:87-96.
  - 13) Paridou A et al. Mortality among pilots and cabin crew in Greece, 1960-1997. *Int J Epidemiol* 2003;32:244-247.
  - 14) Milanov et al. Cancer incidence in Republic of Bulgaria aircrew, 1964-1994. *Aviat Space Environ Med* 1999;70:681-5.
  - 15) Irvine D and Davies DM. British Airways flightdeck mortality study, 1950-1992. *Aviat Space Environ Med* 1999;70:548-557.
  - 16) Kaji M et al. Mortality experience of cockpit crewmembers from Japan Airlines. *Aviat Space Environ Med* 1993;64:748-750.
  - 17) Band PR et al. Mortality and cancer incidence in a cohort of commercial airline pilots. *Aviat Space Environ Med* 1990;61:299-302.
  - 18) Band PR et al. Cohort study of Air Canada pilots: mortality, cancer incidence, and leukemia risk. *Am J Epidemiol* 1996;143:137-143.
  - 19) Reynolds P et al. Cancer incidence in California flight attendants (United States). *Cancer Causes Control* 2002;13:317-324.
  - 20) Rafnsson V et al. Breast cancer risk in airline cabin attendants: a nested case-control study in Iceland. *Occup Environ Med* 2003;60:807-809.
  - 21) Salisbury DA et al. Mortality among British Columbia pilots. *Aviat Space Environ Med* 1991;62:351-2.
  - 22) Irvine D and Davies DM. The mortality of British Airways pilots, 1966-1989: a proportional mortality study. *Aviat Space Environ Med* 1992;63:276-279.
  - 23) Nicholas JS et al. Mortality among US commercial pilots and navigators. *J Occup Environ Med* 1998;40:980-985.
  - 24) Nicholas JS et al. Health among commercial airline pilots. *Aviat Space Environ Med* 2001;72:821-6.
  - 25) Irgens A et al. Pregnancy outcome among offspring of airline pilots and cabin attendants. *Scand J Work Environ Health* 2003;29:94-99.
  - 26) Blettner M et al. Mortality from cancer and other causes among male airline cockpit crew in Europe. *Int J Cancer* 2003;106:946-952.
  - 27) Zeeb H et al. Mortality from cancer and other causes among airline cabin attendants in Europe: a collaborative cohort study in eight countries. *Am J Epidemiol* 2003;158:35-46.
  - 28) Langner I et al. Cosmic radiation and cancer mortality among airline pilots: results from a European cohort study (ESCAPE). *Radiat Environ Biophys* 2004;42:247-256.
  - 29) Pukkala E et al. Incidence of cancer among Nordic airline pilots over five decades: occupational cohort study. *Brit Med J* 2002;325:567-571.
  - 30) Pukkala E et al. Cancer incidence among 10,211 airline pilots: a Nordic study. *Aviat Space Environ Med* 2003;74:699-706.
  - 31) Rafnsson V et al. Risk factors for cutaneous malignant melanoma among aircrews and a random sample of the population. *Occup Environ Med* 2003;60:815-820.
  - 32) Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations. Sources and effects of ionizing radiation: UNSCEAR 2000 report to the general assembly, with scientific annexes. New York, NY: United Nations 2000.
  - 33) Preston DL et al. Studies of mortality of atomic bomb survivors. Report 13: Solid cancer and noncancer disease mortality: 1950-1997. *Radiat Res* 2003;160:381-407.
  - 34) Howe GR et al. Analysis of the mortality experience amongst U.S. nuclear power industry

workers after chronic low-dose exposure to ionizing radiation. Radiat Res 2004;162:517-526.  
 35) Rafnsson et al. Cosmic radiation increases the risk of nuclear cataract in airline pilots: a population-based case-control study. Arch Ophthalmol 2005;123:1102-1105.

表 2.4.1. 各国の航空機乗務員を対象とした主な疫学研究の概要(コホート研究)

文献	対象*	対象者数	観察期間	曝露の指標	エンドポイント
Pukkala et al. (1995)	フィンランド、CA、男女	1,764	1967-1992	なし	がん罹患
Gundestrup and Storm (1999)	デンマーク、CC、男女	3,877	1943-1995	搭乗時間、搭乗機種	がん罹患
Haldorsen et al. (2000)	ノルウェー、PL、男性	3,701	1953-1996	ブロック時間、蓄積線量等	がん罹患
Haldorsen et al. (2001)	ノルウェー、CA、男女	3,693	1953-1996	雇用年数	がん罹患
Hammar et al. (2002)	スウェーデン、PL、男性	4,298	1961-1996	ブロック時間等	がん罹患
Linnarsjö et al. (2003)	スウェーデン、CA、男女	3,202	1961-1996	ブロック時間、搭乗機種	がん罹患
Rafnsson et al. (2000)	アイスランド、PL、男女	458	1955-1997	ブロック時間、蓄積線量	がん罹患
Rafnsson et al. (2001)	アイスランド、CA、男女	1,690	1955-1997	雇用年数	がん罹患
Zeeb et al. (2002)	ドイツ、CC、男性	6,061	1960-1997	雇用年数、ブロック時間、蓄積線量	がんとその他の死亡
Blettner et al. (2002)	ドイツ、CA、男女	20,551	1960-1997	雇用年数等	がんとその他の死亡
Ballard et al. (2002)	イタリア、CC・CA、男女	9,834	1965-1996	雇用年数等	がんとその他の死亡
Paridou et al. (2003)	ギリシャ、CC・CA、男女	2,678	1960-1997	搭乗時間等	がんとその他の死亡
Milanov et al. (1999)	ブルガリア、PL、男性	52,963 (人年)	1964-1994	なし	がん罹患
Irvine and Davies (1999)	英国、PL、男性	6,209	1950-1992	長距離 vs 短距離搭乗	がんとその他の死亡
Kaji et al. (1993)	日本、CC、男性	2,327	1952-1988	なし	がんとその他の死亡
Band et al. (1990)	カナダ、PL、男性	913	1950-1988	なし	がんとその他の死亡、がん罹患
Band et al. (1996)	カナダ、PL、男性	2,740	1950-1992	なし	がんとその他の死亡、がん罹患
Reynolds et al. (2002)	米国、CA、男女	8,111	1988-1995	就業年数等	がん罹患

\* CA:客室乗務員、CC:操縦室乗務員、PL:操縦士

表 2.4.2. 各国の航空機乗務員を対象とした主な疫学研究の概要(コホート研究以外)

文献	対象*	対象者数	観察期間	曝露の指標	エンドポイント
症例対照研究					
Rafnsson et al. (2003)	アイスランド、CA、女性	35(症例)、140(対照)	1957-2000	雇用年数	乳がん罹患
Rafnsson et al. (2005)	アイスランド、PL および一般人、男性	71(症例)、374(対照)	1957-2000	乗務員としての雇用歴、推定線量	白内障
PMR を用いた研究					
Salisbury et al. (1991)	カナダ、PL、男性	402 (死亡数)	1950-1984	なし	がんその他の死亡
Irvine and Davies (1992)	英国、PL、男性	446 (死亡数)	1966-1989	なし	がんその他の死亡
Nicholas et al. (1998)	米国、CC、男女	1,538 (死亡数)	1984-1991	なし	がんその他の死亡
断面研究					
Nicholas et al. (2001)	米国、PL、男女	10,678	1970-1998	なし	がん罹患とその他の疾患の有病
Irgens et al. (2003)	ノルウェー、PL・CA、男女	7,394	1967-1995	搭乗時間、蓄積線量	周産期死亡、低出生体重、先天性異常等

\* CA:客室乗務員、CC:操縦室乗務員、PL:操縦士

表 2.4.3. 航空機乗務員を対象とした国際共同研究の概要

文献	対象*	対象者数	観察期間	曝露評価	エンドポイント
Blettner et al. (2003)	デンマーク、フィンランド、独、英、ギリシャ、アイスランド、伊、ノルウェー、スウェーデン、CC、男性	27,797	1960-1997	雇用期間、年数	がんその他の死亡
Zeeb et al. (2003)	上記 9 国のうち英国を除く 8 国の CA、男女	44,142	1960-1997	雇用期間、年数	がんその他の死亡
Langner et al. (2004)	上記 8 国のうちギリシャを除く 7 国の PL、男性	19,184	1960-1997	ブロック時間、蓄積線量	がんその他の死亡
Pukkala et al. (2002)	デンマーク、フィンランド、アイスランド、ノルウェー、スウェーデン、PL、男性	10,032	1943-1997	蓄積線量	がん罹患
Pukkala et al. (2003)	デンマーク、フィンランド、アイスランド、ノルウェー、スウェーデン、PL、男女	10,211	1943-1997	搭乗時間、蓄積線量等、	がん罹患

\* CA:客室乗務員、CC:操縦室乗務員、PL:操縦士

表 2.4.4. 欧州 9 国の共同研究による約 28,000 人の男性操縦士における乗務年数とがん死亡リスクの関係: 1960-97 年(Blettner et al. Int J Cancer 2003;106:946-952)

	全がん	皮膚の黒色腫	中枢神経系	白血病
雇用年数	RR(95%CI)	RR(95%CI)	RR(95%CI)	RR(95%CI)
0-9	1 (対照群)	1 (対照群)	1 (対照群)	1 (対照群)
10-19	0.80 (0.63-1.01)	0.82 (0.36-1.83)	1.69 (0.93-3.08)	1.02 (0.55-1.86)
20-29	0.84 (0.68-1.03)	0.80 (0.35-1.86)	1.01 (0.55-1.86)	0.30 (0.14-0.64)
30+	0.85 (0.64-1.13)	0.79 (0.23-2.76)	0.45 (0.16-1.26)	0.77 (0.33-1.80)
傾向性の p 値	0.29	0.65	0.10	0.02

\* RR: 相対リスク、95%CI: 95%信頼区間

表 2.4.5. 欧州 8 国の共同研究による約 44,000 人の客室乗務員における乗務年数とがん死亡リスクの関係: 1960-97 年(Zeeb et al. Am J Epidemiol 2003;158:35-46)

雇用年数	全がん		白血病		乳がん
	SMR(95%CI)		SMR(95%CI)		SMR(95%CI)
	女性	男性	女性	男性	女性
0-9	0.74 (0.59-0.95)	1.27 (0.96-1.75)	1.12 (0.47-2.59)	1.66 (0.45-4.56)	1.12 (0.75-1.63)
10-19	0.85 (0.61-1.17)	0.83 (0.55-1.26)	0.00 (0.00-1.63)	0.70 (0.02-4.22)	1.27 (0.74-2.07)
20-29	0.84 (0.55-2.42)	0.65 (0.45-0.93)	2.52 (0.31-10.4)	2.43 (0.15-5.18)	0.80 (0.32-1.77)

\* SMR: 標準化死亡比、95%CI: 95%信頼区間

表 2.4.6. 欧州 7 国の共同研究による約 19,000 人の男性操縦士における蓄積線量とがん死亡リスクの関係:1960-97 年(Langner et al. Radiat Environ Biophys 2004;42:247-256)

	全がん	皮膚の黒色腫	白血病
蓄積線量(mSv)	RR(95%CI)	RR(95%CI)	RR(95%CI)
0-4.99	1 (対照群)	1 (対照群)	1 (対照群)
5.0-14.99	0.75 (0.53-1.05)	0.71 (0.23-2.18)	1.52 (0.49-4.68)
15.0-24.99	0.79 (0.58-1.09)	1.26 (0.45-3.50)	0.83 (0.23-3.06)
25.0+	0.74 (0.51-1.06)	0.33 (0.06-1.85)	0.81 (0.19-3.43)
傾向性の p 値	0.10	0.48	0.62

\* RR:相対リスク、95%CI:95%信頼区間

表 2.4.7. 欧州 5 国の共同研究による約 10 千人の男性操縦士における蓄積線量とがん罹患リスクの関係:1943-97 年(Pukkala et al. Brit Med J 2002;325:567-571)

	全がん	皮膚の黒色腫	黒色腫以外の皮膚がん	白血病
蓄積線量(mSv)	RR(95%CI)	RR(95%CI)	RR(95%CI)	RR(95%CI)
0-2.99	1 (対照群)	1 (対照群)	1 (対照群)	1 (対照群)
3.0-9.9	1.12 (0.81-1.53)	2.10 (0.91-4.87)	0.52 (0.06-4.26)	1.90 (0.32-11.5)
10.0-19.9	1.19 (0.92-1.54)	2.20 (1.03-4.72)	1.50 (0.50-4.48)	1.42 (0.23-8.70)
20.0+	1.19 (0.93-1.51)	2.78 (2.40-5.93)	1.92 (0.74-4.98)	1.78 (0.32-10.0)
傾向性の p 値	0.13	0.01	0.14	0.53

\* RR:相対リスク、95%CI:95%信頼区間

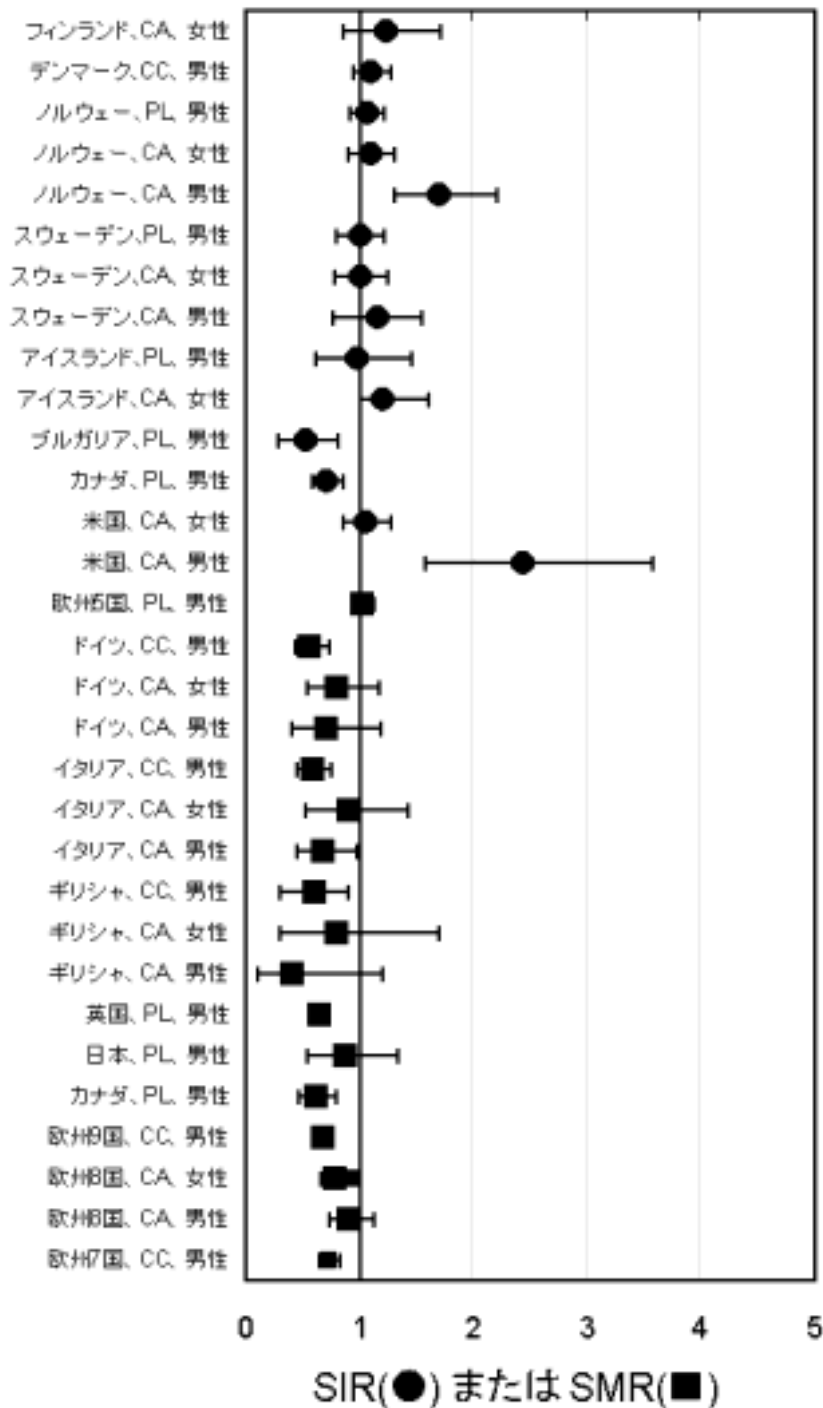


図 2.4.1. 航空機乗務員における全悪性腫瘍の標準化罹患比(SIR)と標準化死亡比(SMR)  
 CA:客室乗務員、CC:操縦室乗務員、PL:操縦士

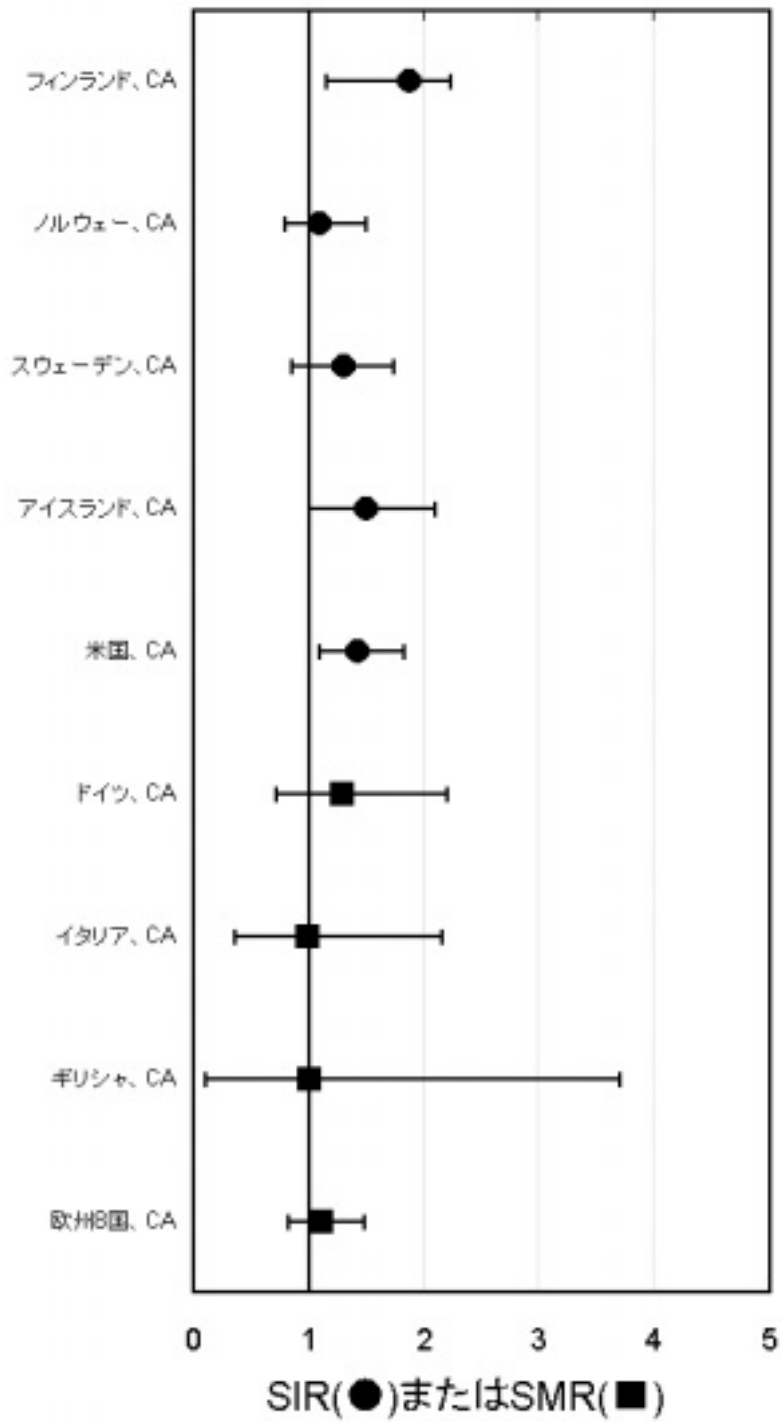


図 2.4.2. 女性客室乗務員における乳がんの標準化罹患比(SIR)と標準化死亡比(SMR)

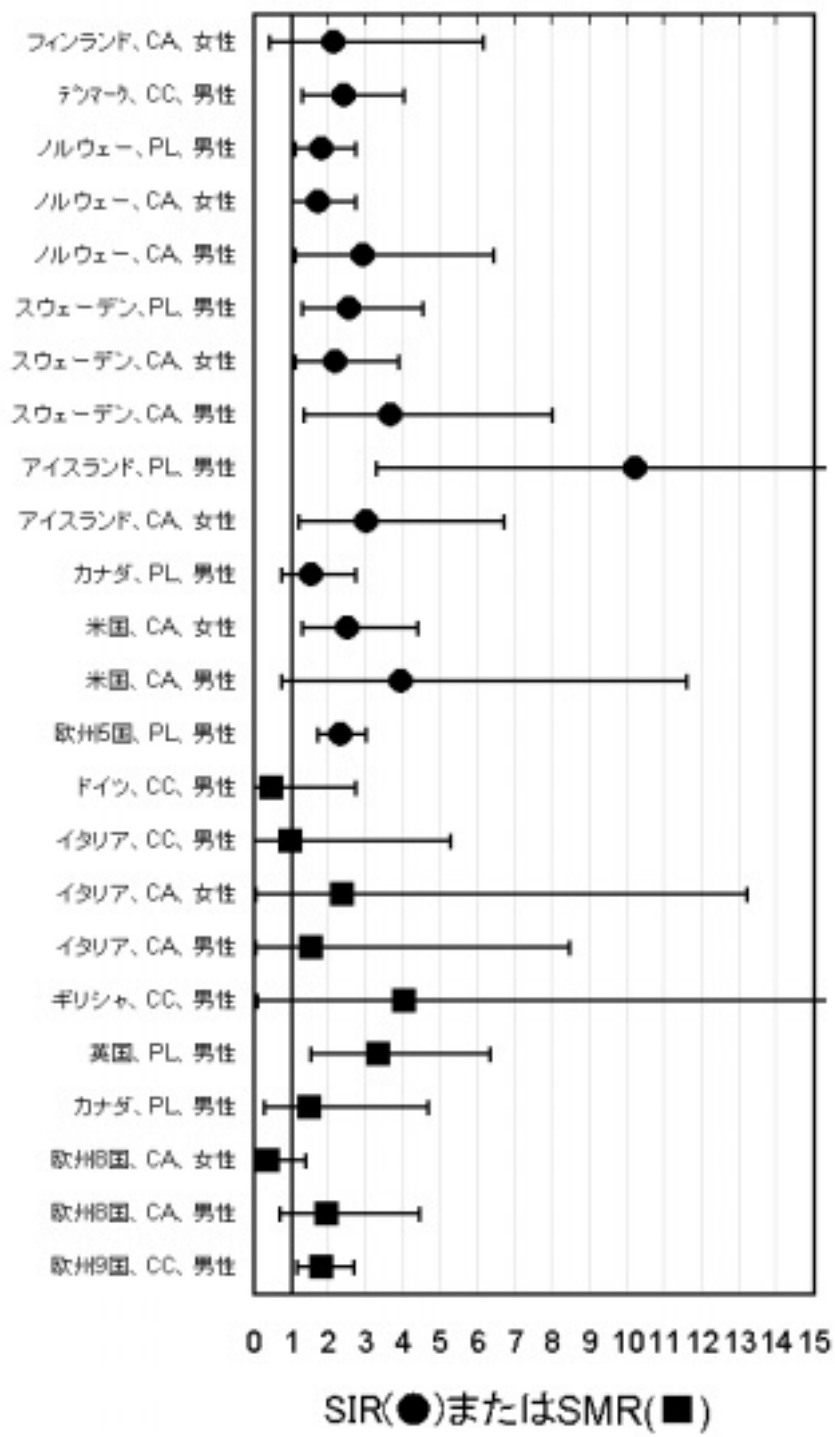


図 2.4.3. 航空機乗務員における皮膚黒色腫の標準化罹患比(SIR)と標準化死亡比(SMR)  
 CA:客室乗務員、CC:操縦室乗務員、PL:操縦士

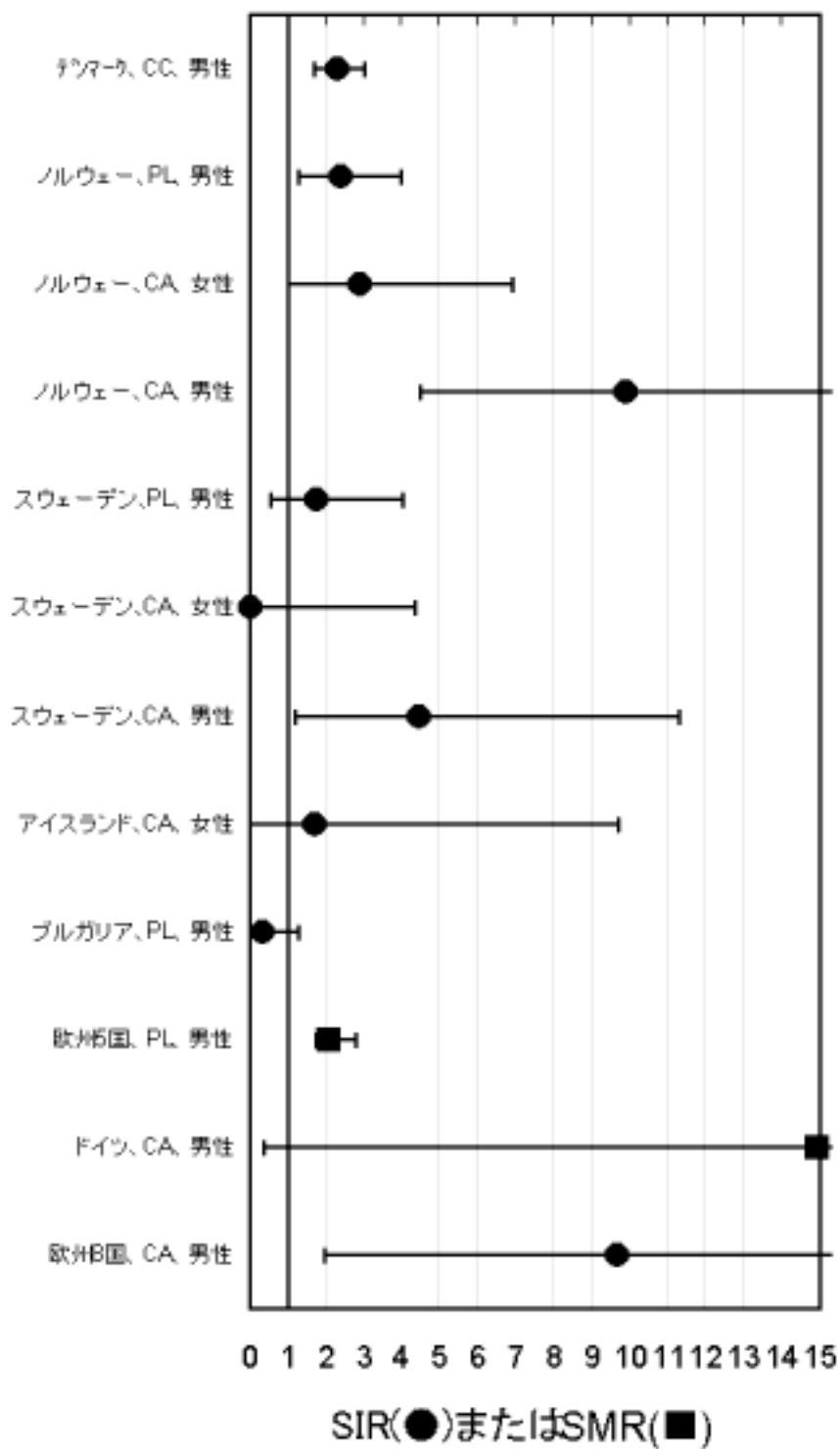


図 2.4.4. 航空機乗務員における皮膚非黒色腫の標準化罹患比(SIR)と標準化死亡比(SMR)  
 CA:客室乗務員、CC:操縦室乗務員、PL:操縦士

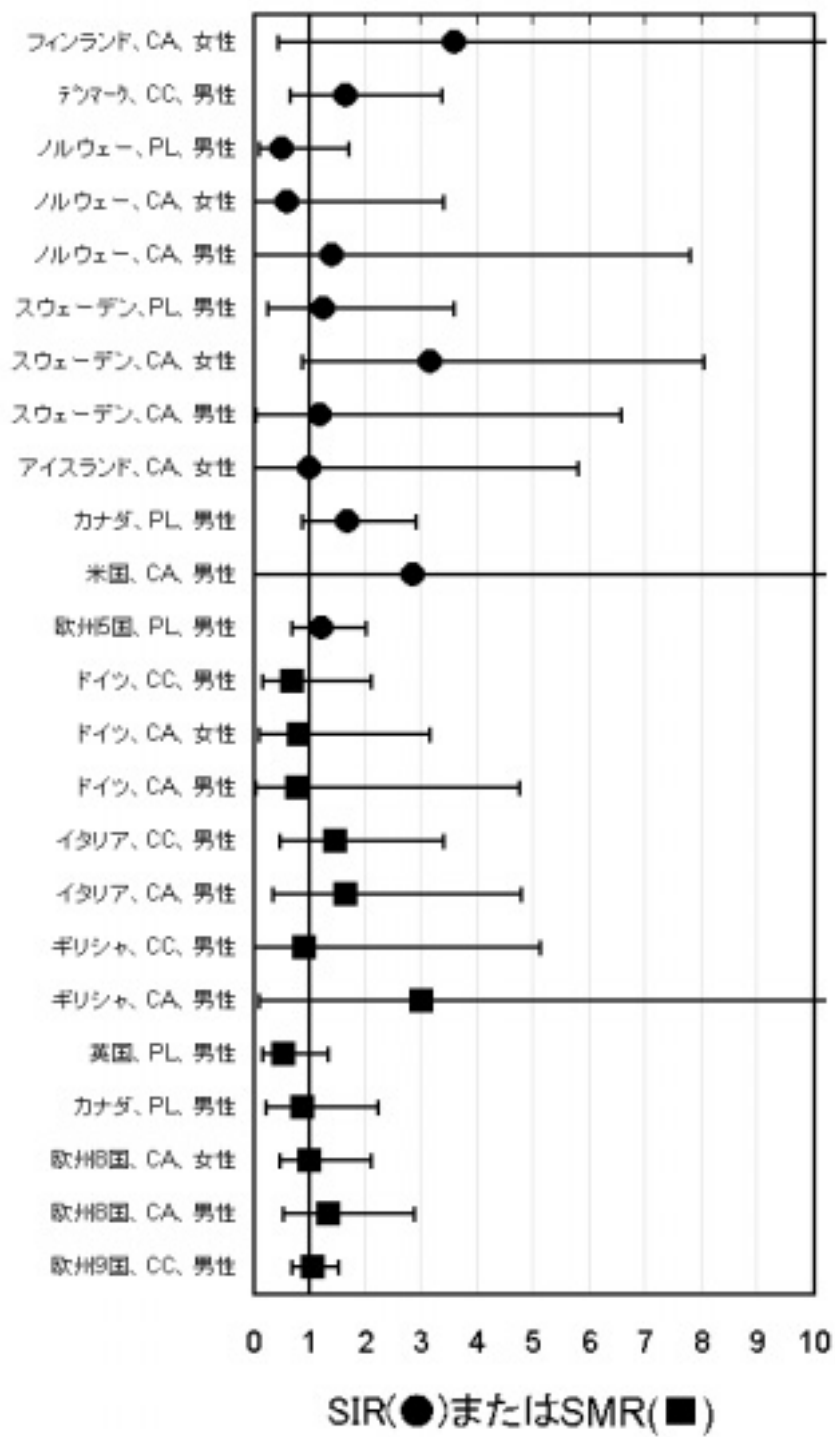


図 2.4.5. 航空機乗務員における白血病の標準化罹患比(SIR)と標準化死亡比(SMR)  
 CA:客室乗務員、CC:操縦室乗務員、PL:操縦士

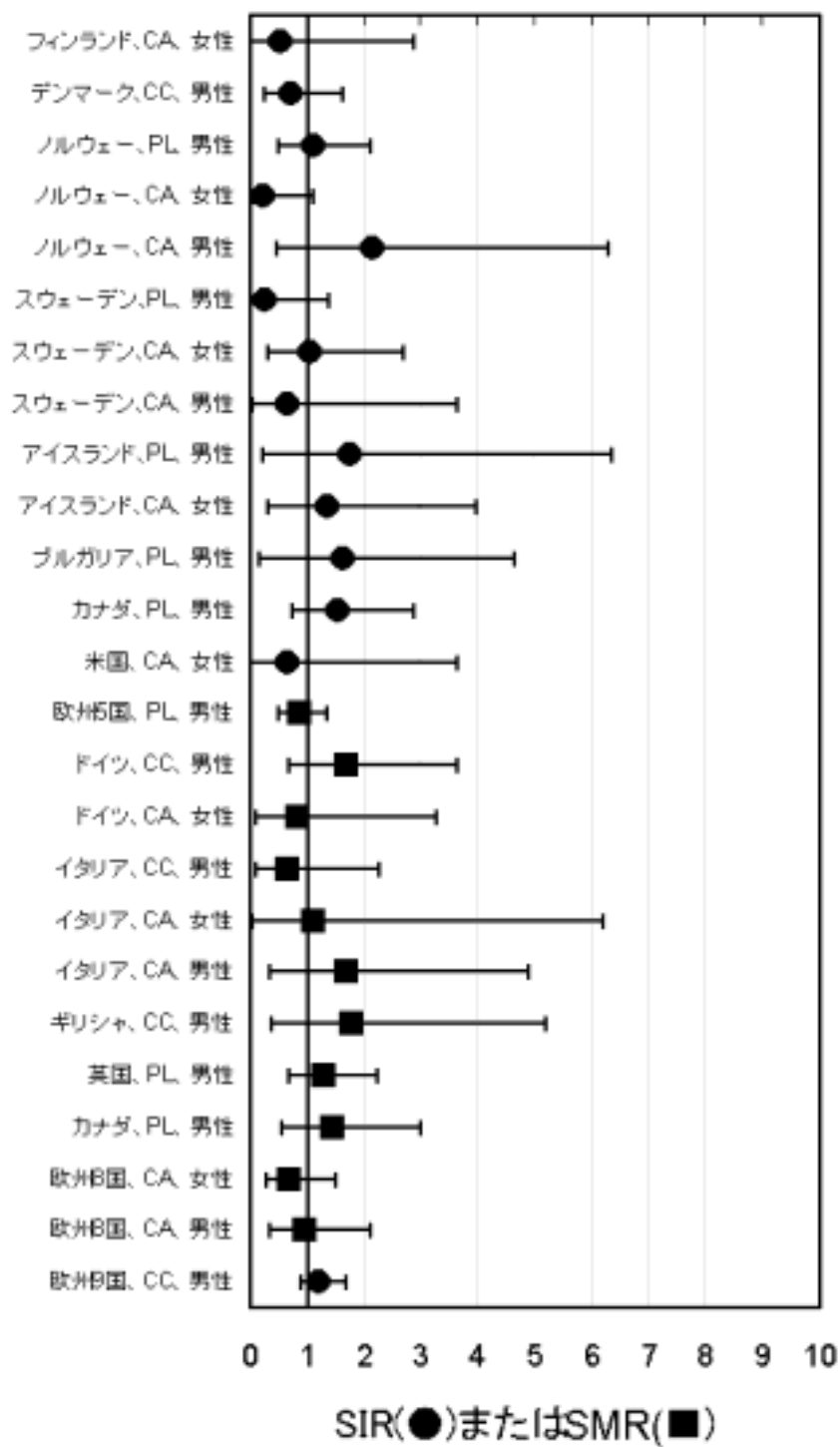


図 2.4.6. 航空機乗務員における脳および中枢神経系腫瘍の標準化罹患比(SIR)と標準化死亡比(SMR); CA:客室乗務員、CC:操縦室乗務員、PL:操縦士

## 2.5 航空機乗務員の被ばく管理に関する内外の動向

### 2.5.1 国内の動向

#### 2.5.1.1 放射線審議会の意見具申

ICRP1990年勧告(Pub.60)を受け、放射線審議会は1991年3月以降、ICRP1990年勧告の国内法への取り入れについて検討してきました。1998年6月、『ICRP1990年勧告(Pub.60)の国内制度等への取入れについて』の意見具申内容を決定し、関係行政機関の長に意見具申しました。意見具申によれば、取り入れに当たっての基本的考え方は、以下のとおりです。

- ・ ジェット機の運航に伴う航空機乗務員の被ばくについては、航空機内の線量レベルに関するいくつかの調査が行われており、公衆の実効線量限度である年1mSvを超える被ばくの可能性も考えられる。
- ・ 乗務員の被ばくが一定の線量レベルを超えることがある場合には、適切な管理を行うことが必要である。
- ・ 航空機内の線量レベルに関しては、測定方法、中性子線等に起因する線量評価等についてより詳細な調査・検討を行う必要があり、当面、乗務員等に対して放射線に関する知識の普及等を行うとともに国際的動向も考慮しつつ対応することが適当である。

#### 2.5.1.2 日本乗員組合連絡会議(ALPA Japan)などの要請

日本乗員組合連絡会議(ALPA Japan, Airline Pilots' Association of Japan)など航空労働者4団体は、1996年3月、航空機乗務員の宇宙線被ばく防護に関する要請を関係行政機関の長に行いました。その要請内容は、以下のとおりです。

- ・ ICRP1990年勧告を国内法に取り入れる際、航空機乗務員を職業被ばく者として位置づけること。
- ・ 航空機乗務員の宇宙線被ばく線量を低減化させるための具体的方策を、早急に検討すること。
- ・ 国の責任において、航空機乗務員の宇宙線被ばくの実態を究明するために必要な調査・研究を早急に実施し、その調査・研究結果をすべて公表すること。
- ・ 乗務中の宇宙線被ばく線量を測定・記録する方策について、関連する航空機の装置や装備の開発と改良を含め、早急に研究すること。

8年後の2004年2月、日本乗員組合連絡会議と客室乗務員連絡会は、航空機乗務員の宇宙線被ばく防護に関する再度の要請を行いました。この要請は、ICRP1990年勧告から14年経った時点でもなお航空機乗務員の宇宙線被ばくに関する規制が実現していない状況を踏まえ、宇宙線被ばく線量を必要最小限度にとどめるため、改めて関係行政機関の長に行ったものです。上記要請と重複する部分もありますが、「再度の要請」内容は以下のとおりです。

- ・ ICRP1990年勧告に沿って関係法規において航空機乗務員の宇宙線被ばくを職業被ばくとして位置づけること。

- ・ 航空会社が航空機乗務員に対して宇宙線被ばくに関する教育を実施するよう義務付けること。
- ・ 航空機乗務員の宇宙線被ばく線量の測定(または算定)、記録、被ばく低減化のための措置、被ばくが特定の個人に集中しない対策、被ばくに対する健康管理など、航空会社が「適切な管理」を行うよう義務付けるよう関係法規に盛り込むこと。
- ・ 宇宙線の長期被ばくが人体に与える影響等についての調査研究、ソーラーフレア時の航空機乗務員の宇宙線被ばくに関する調査研究及びその対策など、国際機関や他国とも連携しながら国が責任を持って実施すること。

### 2.5.1.3 文科省放射線安全規制検討会の報告書

文部科学省は、同省科学技術・学術政策局放射線安全規制検討会の下に「航空機乗務員等の宇宙線被ばくに関する検討ワーキンググループ」を組織し、2004年6月以来検討を続け、検討結果を取りまとめた放射線安全規制検討会報告書「航空機乗務員等の宇宙線被ばくについて」を2005年11月に発表しました。検討結果の中の航空機乗務員の被ばく管理に関する部分の概要は、以下のとおりです。

- ・ 航空機乗務員の宇宙線被ばくへの対応は必要であるが、a)その被ばく経路が既に存在しており、被ばく線量を管理することも可能であることから「介入」の対象としてとらえることができる、b)その年実効線量は5mSvほどであり、この線量レベルはICRP Pub.82の介入のレベルから考えると、「介入が正当化されそうにない一般参考レベル」に相当する、c)他の自然放射線(ラドン、精錬残渣等)による被ばくについてはNORM報告書で、法令による規制は行わず、対策レベルを検討するとされており、これとの整合性を図る、という観点から法令による規制対象とする必要はない。事業者により自主的にかつ適切に航空機乗務員の被ばくへの対応が実施されることが望まれる。
- ・ 事業者の自主的な取組みとして実施する対応方法は、以下のとおりと考えられる。
  - ア)自主的に管理目標値を設定し、被ばく線量を抑えるよう努めること。管理目標値としては年5mSvが適当である。
  - イ)被ばく線量の評価は計算による線量評価を実施し、必要に応じて校正目的で実測を行い、その精度確保に留意すること。個人線量計によるモニタリングなどの放射線業務従事者並の被ばく管理は必要ない。
  - ウ)宇宙線被ばくに関する説明と教育を航空機乗務員に行うこと。特に、女性の航空機乗務員等に対しては、胎児への放射線影響についての教育も行い、宇宙線被ばくについての認識を持ってもらうことが重要である。
  - エ)自主管理を適切に行えるようにするため、航空機乗務員等の宇宙線による被ばく線量の閲覧、記録及び保存をすること。
  - オ)労働安全衛生法に基づいて定期的に一般健康診断が行われていることを勘案すれば、放射線による健康影響の検知を目的として、新たに付加的な健康診断を行う必要はない。

カ) 低線量が及ぼす健康影響について、専門家の間においても様々な意見があるため、今後とも関連する情報を適切に入手し、放射線防護の対応方法に役立てていくことが重要である。

#### 2.5.1.4 放射線審議会のガイドライン

放射線審議会は、「ジェット機の運航」に伴う航空機乗務員の宇宙線被ばくへの対応として放射線安全規制検討会報告書を妥当であると判断し、放射線安全規制検討会報告書を受け、航空事業者が自主的な取組みとして実施する対応方法のガイドライン(案)を作成しました。ガイドライン(案)は、放射線安全規制検討会報告書の上記ア)～オ)とほぼ同じ内容になっています。ガイドライン(案)については現在、国民の意見を広く聴くための意見募集(期間:2006年2月23日～3月24日)が行われており、放射線審議会はこれらの意見も踏まえガイドラインを取りまとめる予定です。

#### 2.5.2 国外の動向

##### 2.5.2.1 国際放射線防護委員会(ICRP)の勧告等

ICRPは1990年勧告(Pub.60)の中で、「“(放射線に対する)職業被ばく”という用語の使用を、操業管理者の責任であると合理的にみなすことのできる状況の結果として、作業時に受ける被ばくに限定する」とし、「ジェット機の運航」に起因する「自然放射線源による被ばくを職業被ばくの一部として含める必要があるべきである、と勧告」しました。また、Pub.75『作業者の放射線防護に対する一般原則』の「5.自然放射線源に対する職業被ばくの管理」の中で、「高められたレベルの宇宙線に被ばくする主な職業グループは、航空機乗務員である。」「ジェット機乗務員の被ばくは職業被ばくとして扱うべきである。」との見解を再度表明しています。

##### 2.5.2.2 国際定期航空操縦士協会連合会(IFALPA)の声明

93カ国10万人の定期航空操縦士で構成される国際定期航空操縦士協会連合会([IFALPA, International Federation of Airline Pilots' Associations](http://www.ifalpa.org))は、その活動の基本的目標である、航空運送の安全かつ秩序ある発展と定期航空操縦士の共通の利益の向上のため、航空の技術的問題を規定する国際民間航空機関(ICAO)の標準及び勧告に準拠したIFALPA POLICY(IFALPAとしての方針)の策定を目的として、総会を毎年開催しています。航空機乗務員の宇宙線被ばく防護に関連する声明(POLICY STATEMENT)は2003年4月の総会で採択されています。この声明をもとにIFALPAはICAOに対し、IFALPAに加盟する各国の定期航空操縦士会(ALPA)は当該国の関係当局に対し、IFALPAの声明を実現するよう働きかけを行います。日本の定期航空操縦士会に相当する日本乗員組合連絡会議(ALPA Japan)が航空機乗務員の宇宙線被ばく防護に関する要請を関係行政機関の長に行っていることは前述しましたが、要請を行う動機のひとつになったのが2003年4月に採択されたIFALPAの声明で、その概要は以下のとおりです。

・ 宇宙線被ばく線量の評価は、8,000m(26,000ft)を超えて運航するすべての航空機で行われ

なければならない。

- ・ 航空機乗務員の宇宙線被ばくによる年線量限度は、ICRP 及び欧州放射線防護指令 (EURATOM) により規定された5年平均で年 20mSv であるべきである。航空機乗務員の宇宙線被ばく線量が年1mSv を超える可能性がある場合には、職業被ばく労働者と認定されるべきである。宇宙線は航空機乗務員にとって潜在的な健康リスクとなる可能性があるため、各国は被ばく線量の評価と検証を内容とする法制化を行うべきである。
- ・ 航空機乗務員の健康リスクを減少させるため、航空会社は“ALARA”の原則に従い、飛行中の被ばく線量を低減化させる措置を法に準じて講ずるべきである。
- ・ 航空機乗務員は、胎児の被ばく線量は1mSv を超えるべきではないということを警告されなければならない。航空機乗務員が自己の妊娠を申告した後において、航空事業者はこの限度値を超えることのないように被曝を最小限とするような飛行勤務の調整（低高度の飛行や地上勤務を行うこと）を規定化すべきである。
- ・ 航空機乗務員は、自己の累積被ばく線量の記録を持ち、永続的に監視されなければならない。
- ・ 間近に迫ったソーラーフレア活動の予測情報は航空機乗務員に提供されるべきである。可能ならば当該期間中の被ばく線量の増加を最小限にするための経路・高度で飛行計画が作成されるべきである。
- ・ 航空会社の経営者は、被雇用者に対する「保護義務」を再認識すべきである。

#### 2.5.2.3 欧州連合の欧州放射線防護指令(96/29/EURATOM(1996))

欧州連合 (EU) は、1996 年 5 月に発した欧州放射線防護指令 (Council Directive 96/29/EURATOM(1996)) の中で、年間被ばく線量が1mSv を超える航空機乗務員の宇宙線被ばく線量の管理に関する国内法等の整備を2000年5月までにするよう加盟各国に対して求めた。特に、以下の項目については適切な対応が採られるよう強調している。

- ・ 航空機乗務員の宇宙線被ばくに関するアセスメントを行うこと。
- ・ 被ばく線量の高い乗務員の線量低減を念頭においた業務計画を検討すること。
- ・ 乗務員に対する、業務にともなう健康リスクについて説明すること。
- ・ 女性の乗務員の妊娠判明後から出産までの間における胎児の線量が1mSv を超えないように、可能な限り低く保つこと。

欧州連合 (EU) は、経済通貨統合を進めるとともに共通外交安全保障政策、司法・内務協力等のより幅広い協力をもめざす緩やかな政治・経済統合体であるとはいえ、従来の国際機関とはまったく異なるいわば国家に準ずる存在です。そのため、欧州放射線防護指令にもとづいて、フランスやドイツをはじめとする加盟各国は航空機乗務員の宇宙線被ばく線量管理に関する国内法等の整備をすすめています。

#### 2.5.2.4 欧州連合 (EU) 以外の国々

前記の文部科学省報告書によれば、米国やカナダ、豪州及び中国などのアジア各国にお

いては、法令による規制ではなく、独自にガイドラインを示す等によって対応しています。タイ、インドネシア、マレーシアなどの低緯度地方の国などでは対応自体が不要と判断されている状況にあるといえます。

#### 参考文献(2.5)

- 1) ICRP Pub.60「国際放射線防護委員会の1990年勧告」、日本アイソトープ協会編集・発行、1991年11月。
- 2) ICRP Pub.75「作業者の放射線防護に関する一般原則」、日本アイソトープ協会編集・発行、1998年12月。
- 3) IFALPA Annex 6, International Federation of Air Line Pilots Associations, Annex 6. POL-STAT (Policy Statement) 2003, “6.12 Cosmic Radiation”
- 4) European Union, Council Directive 96/29/Euratom; Basic Safety Standards Directive (Radiation Protection 88); and Exposure of Air Crew to Radiation (Radiation Protection 85).
- 5) 文部科学省科学技術・学術政策局放射線安全規制検討会:「航空機乗務員等の宇宙線被ばくに関する検討について」、2005年11月。

### 3. 今後必要な対応について

#### 3.1 計算精度の向上

航空機搭乗者の宇宙線被ばく問題に関して今後解決すべき科学的課題の一つとして、航路線量計算の高精度化が挙げられます。航路線量は、航空機内における放射線のフルエンスを計算し、その値にフルエンスから線量への換算係数を乗ずることにより導出できます。したがって、航路線量を正確に評価するためには、航空機内における放射線、特に線量寄与の大きい中性子のフルエンスを精度良く計算する必要があります。そのためには、大気中の放射線挙動を正確に再現できる粒子輸送計算コードの開発が不可欠となります。本節では、その開発の現状を解説するとともに、航路線量計算の高精度化を目指した今後の展望について述べます。

現在、大気中の放射線輸送計算に使われている代表的なコードとして、米国で開発されている LUIN<sup>1)</sup>と、欧州で開発されている FLUKA<sup>2)</sup>があります。前者は、1次元空間におけるボルツマン方程式を決定論的手法に基づいて解くタイプ(決定論的コード)であり、航路線量計算コード CARI で採用されています。一方、後者は、3次元空間における放射線挙動をモンテカルロ法により解析するタイプ(モンテカルロコード)であり、航路線量計算コード EPCARD で採用されています。一般的に、モンテカルロコードは、決定論的コードと比べて計算時間は長いが精度は良いという特徴があります。

LUIN は、中性子線量の高度依存性を再現できるよう最適化されているため、現状の放射線防護体系に対する航路線量をある程度正確に計算することができます。しかし、中性子スペクトルに関しては、近年の高精度測定により明らかにされた、lethargy 表記における 100MeV 付近のピークを適切に再現できない問題点が指摘されています。したがって、次節で述べるように、今後 ICRP 等により防護量の定義が変更された場合、中性子線量の計算精度が低下する可能性があります。一方、FLUKA により計算された中性子スペクトルは、標準的な巡航高度においては、実験結果を精度良く再現することが報告されています。しかし、地表面近くの低高度における中性子スペクトルに関しては、FLUKA の計算値は実験値をあまり精度良く再現できないことが知られています。これは、FLUKA など、一般的なモンテカルロ粒子輸送計算コードが高エネルギー核反応を模擬するために採用している核内カスケードモデル<sup>(\*)</sup>が、窒素や酸素など大気を構成する比較的軽い原子核に対する核反応を適切に模擬できないことに起因すると考えられています。したがって、FLUKA を用いて計算した中性子スペクトルを基に導出した航路線量は、離着陸時など低高度における線量を精度良く再現できない可能性が指摘されています。

このような背景から、日本では、日本原子力研究開発機構を中心として、より精度の高い大気中の粒子輸送計算モデルを確立するための研究を進めています。具体的には、汎用モンテカルロ粒子輸送計算コード PHITS<sup>3)</sup>に、最新の核データライブラリ<sup>(\*\*)</sup>を組み合わせることで大気中の粒子輸送計算を行い、その結果を高度・太陽活動周期・地磁気緯度・航空機構造の4つのパラメータにより表現することにより、様々な条件に対する航空機内の中性子スペクトルを瞬時に導出

可能なモデルの構築を目指しています。まだ予備的な段階ではありますが、現状のモデルによる中性子スペクトルの計算値を実験値<sup>4,5)</sup>及びFLUKAによる計算値<sup>6)</sup>と比較した結果を図3.1.1及び図3.1.2に示します。図より、PHITSをベースとしたモデルによる計算値は、標準巡航高度だけでなく地表面付近においても、実験値を精度良く再現できることがわかります。今後、このモデルにより計算した中性子スペクトルに線量換算係数を乗じて航路線量を導出する計算システムを確立し、日本の法令に適應したより信頼性の高い国産の航路線量計算コードを開発することが、我々の保健物理分野の研究者の急務であると考えています。なお、PHITSをベースとした大気中の中性子スペクトル計算モデルは、今後、様々な条件に対する精度検証を行った後、本年中に公開される予定です。

#### 用語解説

##### (\*)核内カスケードモデル

原子核を古典的な点核子の集合と仮定し、そこに入射した核子と原子核内の核子が2体衝突反応を引き起こしながらカスケードを形成していく過程を模擬する核反応モデル

##### (\*\*)核データライブラリ

核反応断面積など、核反応に関する様々なデータを核種毎に評価し、その奨励値をまとめたデータライブラリ。従来は、20MeV以下の中性子により引き起こされる核反応のみ評価の対象としていましたが、近年は、陽子や高エネルギー中性子に対するライブラリの整備も精力的に行われています。

#### 参考文献(3.1)

- 1) K. O'Brien *et al.* Environ. Int. **22**, (Suppl.1), S9 (1996).
- 2) A. Fasso *et al.*, Proc. of the Monte Carlo 2000, Lisbon, Oct. 23-26, 955 (2001).
- 3) H. Iwase *et al.*, J. Nucl. Sci. Technol., **39**, 1142 (2002).
- 4) P. Goldhagen *et al.*, Radiat. Prot. Dosim. **110**, 387 (2004).
- 5) T. Nakamura *et al.*, J. Nucl. Sci. Technol. **42**, 843 (2005).
- 6) J. M. Clem *et al.*, Radiat. Prot. Dosim. **110**, 423 (2004).

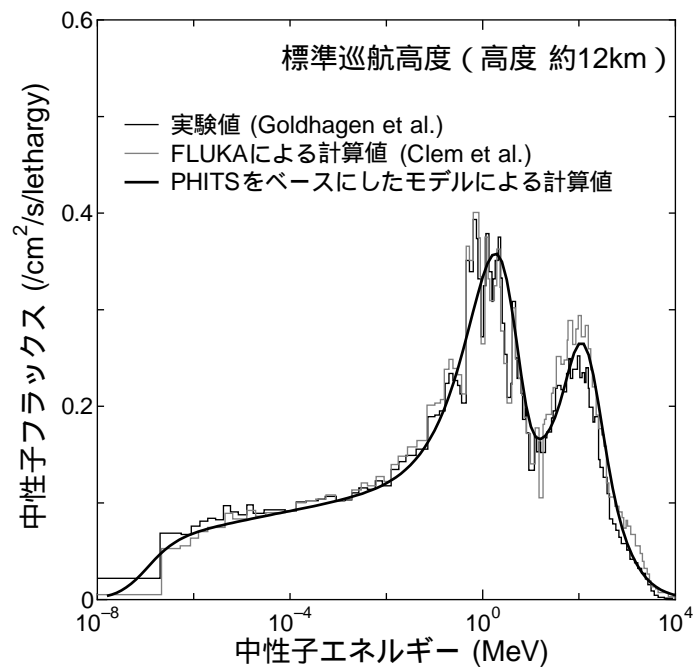


図 3.1.1 標準巡航高度(高度約 12km)における中性子スペクトルの実験値及び計算値

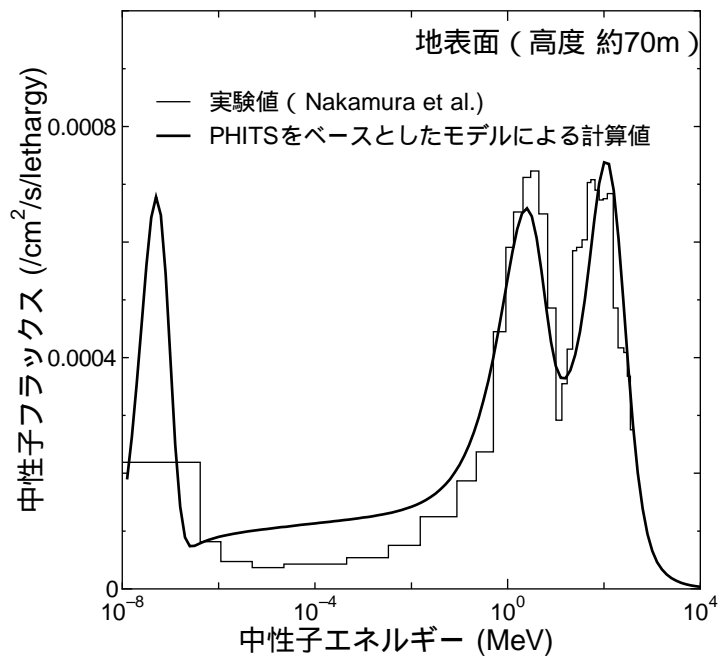


図 3.1.2 地表面付近(高度約 70m)における中性子スペクトルの実験値及び計算値

### 3.2 評価体系の整理

#### 3.2.1 実効線量

ICRP60<sup>1)</sup>では、実効線量は各組織または臓器の等価線量(Equivalent Dose) $H_T$  に、該当する組織荷重係数(Tissue Weighting Factor) $w_T$  を乗じて合計したものとされ、次式で与えられます。

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R} \quad (3.2.1)$$

ここで、 $H_T$  は組織または臓器 $T$ の等価線量、 $w_T$ は組織 $T$ の組織荷重係数です。ICRP60で与えられた組織荷重係数を表3.2.1に示します。 $D_{T,R}$  は放射線 $R$ による吸収線量を組織または臓器 $T$ にわたって平均したものです。 $w_R$  は放射線荷重係数(Radiation Weighting Factor)であり、ICRP60は表3.2.2の値を与えています。

表3.2.1 ICRP60で勧告された組織荷重係数

Tissue or organ	Tissue weighting factor, $w_T$
Gonads	0.20
Bone marrow (red)	0.12
Colon	0.12
Lung	0.12
Stomach	0.12
Bladder	0.05
Breast	0.05
Liver	0.05
Oesophagus	0.05
Thyroid	0.05
Skin	0.01
Bone surface	0.01
Remainder	0.05

表3.2.2 ICRP60で勧告された放射線荷重係数

Types of energy range of radiation	Radiation weighting factor, $w_R$
Photons, all energies	1
Electrons and muons, all energies*	1
Neutrons, energy	
< 10 keV	5
10-100 keV	10
> 100 keV to 2 MeV	20
> 2-20 MeV	10
> 20 MeV	5
Protons, other than recoil protons, energy > 2 MeV	5
Alpha particles, fission fragments, heavy nuclei	20

\* Excluding Auger electrons emitted from nuclei bound to DNA, for which special microdosimetric considerations are needed.

航空機乗務員の被ばくを考える際には、表3.2.2に示す様々な放射線による複合的な被ばくを考慮する必要があります。特に、放射線荷重係数が1を超える、陽子と中性子による被ばくについては、放射線荷重係数の変更により実効線量も変動することになります。

### 3.2.2 放射線荷重係数と線質係数の整合性の問題

2003年に発表されたICRP92では、ICRP60で導入された $w_R$ の値の選択が、十分念入りに行われなかったことを指摘しています<sup>2)</sup>。ICRP92では、 $w_R$ の再評価が重要な目的とされており、特に航空機被ばくで重要な陽子と中性子の $w_R$ について、ICRP60に変わる新たな修正値の提案がなされています。ICRP92では以下のように問題が指摘されています。

「実効線量 $E$ は $w_R$ で定義されているため測定には不適當である。したがって $Q(L)$ は、実用量の定義の中で保持されている。しかし、2つの別々の概念の使用は計算と測定間の比較を妨げ、また $w_R$ と $Q(L)$ に対する数値的取り決めには、現在正式な関係も一貫性もないので、問題は重大になっている。」(ICRP92, 211項より)

「 $w_R$ の現在の概念には、 $Q(L)$ への正式なリンクが欠けている。このため計算と測定との間に大きな障壁が持ち込まれ、引き続く問題と若干の批判を生じるに至った。そのため、現在のシステムからの逸脱を最小にし、達成できる一貫性を最大にするようにして、この問題を取り除くための変更が求められている。」(ICRP92, 221項より)

「 $w_R$ と $Q(L)$ に対する取り決めが一貫しかつ変換可能であったならば、この変更だけで問題が引き起こされることはなかったであろう。」(ICRP92, 232項より)

航空機被ばくの問題は、前述の“変更”を求めている重要な問題の一つです。ここで、ICRP92が指摘している問題とは、ICRP60以後の様々な研究成果から、従来より計測可能な実用量として用いられてきた線質係数に基づく量と、 $w_R$ により定義され線量限度等の直接の対象となる防護量であるところの実効線量との間に乖離が大きいことが明らかになってきたことを示しています。ここでは、ICRP92による放射線荷重係数の修正提案の概要と、それが航空機被ばくの線量評価に及ぼす影響について、著者の研究成果も交えて紹介したいと思います。

### 3.2.3 中性子

ICRP92では、主に1MeV以下の中性子に対して、放射線荷重係数が過大な値となっていることを問題点として指摘しています。これは、1MeV以下の中性子による被ばくに対して寄与の大きい光子成分による被ばくが過大評価されることに起因しています(ICRP92, 255項参照)。この問題を解決するために、ICRP92では次式で示す $w_R$ の修正値を提案しています。

$$w_r = 1.6q_E - 0.6 \quad (3.2.2)$$

$q_E$ は実効的な線質係数で次式により求められます。

$$q_E = H_E / D'$$

$$D' = \sum w_T D_T \quad (3.2.3)$$

ここで、 $H_E$ はICRP60の $Q(L)$ と $w_T$ による実効線量当量、 $D_T$ は臓器・組織の平均吸収線量です。また、中性子エネルギー $E_n$ の関数として以下の近似式も与えられています (ICRP92, 271項参照)。

$$w_R = 2.5 \left[ 2 - \exp(-4E) + 6 \exp(-\ln(E)^2 / 4) + \exp(-\ln(E/30)^2 / 2) \right] \quad (3.2.4)$$

なお、ICRP60では中性子の放射線荷重係数は、中性子エネルギーの関数として次式で与えられています。

$$w_R = 5 + 17 \exp(-(\ln(2En))^2 / 6) \quad (3.2.5)$$

$q_E$ は、物理量である臓器荷重の吸収線量から、実用量で用いられている $Q(L)$ 関係をもとにした実効線量当量を算出する場合の係数に対応しています。防護量である実効線量に対応するこの係数は、放射線荷重係数に他なりません。図3.2.1に、修正前後の放射線荷重係数の関係を示します。

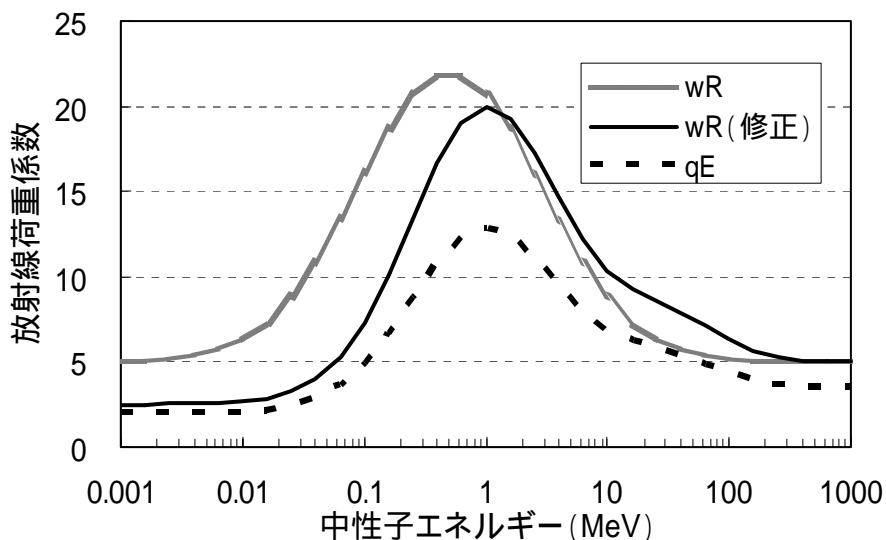


図3.2.1 中性子エネルギーと、放射線荷重係数及び実効的な線質係数との関係

前述のように、中性子における放射線荷重係数の修正は、1MeV以下の中性子入射の際に、二次的に発生する光子成分による被ばくが過大に評価されるのを避けるためでした。その結果として提案された放射線荷重係数は、航空機被ばくを検討する際に重要な10MeV以上で、従来よりも高い値になっています。ICRP92では、「宇宙線高エネルギー中性子に対する全体的な値 $w_R=6$ は適切である」(ICRP92, 275項参照)としていますが、この変更に伴い、中性子による被ばく線量は従来の $w_R$ を用いた場合や実効線量当量にもとづく場合よりも、約20%程度増加する可能性

があります<sup>1</sup>。

### 3.2.4 陽子

航空機乗務員の被ばく線量を評価する際に重要となる高エネルギー陽子の放射線荷重係数の適切な選択については、生物物理学的な側面と放射線生物学的な側面の両方からの考察の必要性が指摘されました(ICRP92, 148項)。

陽子エネルギーとICRP60で与えられた $Q(L)$ 及び飛程の関係を表3.2.3に示します。

表3.2.3 陽子エネルギーと $Q(L)$ 及び飛程の関係(ICRP92, 表3.6より)

陽子エネルギー (MeV)	平均の $Q$	組織中での飛程(cm)
1	13.0	0.002
2	9.0	0.008
4	4.75	0.025
10	2.5	0.12
20	1.75	0.43
50	2.4	2.2
100	1.15	7.7
150	1.1	16

上表より、4MeV以下の陽子のみが5以上の $Q$ を持っていることが分かります。一方、そのエネルギー範囲の陽子の飛程は0.025cm以下であり、ほとんどの臓器の被ばくには寄与しないと考えられます。これらの生物物理学的な考察から、「宇宙陽子線に対して $w_R = 2$ が推奨される」(ICRP92, 152項)と述べられています。また、放射線生物学的なデータの検討からも、高エネルギー陽子による被ばくの効果は他の低LET放射線と同等とし、 $w_R = 5$ はあまりにも高すぎることに、及び人体中で高エネルギー陽子によって生じ、吸収される高LETの2次粒子の影響を考慮して、 $w_R=2$ が推奨されました(ICRP92, 158項, 277項, 373項)。

ここで、陽子に対しても中性子と同様に、 $w_R$ 及び $q_E$ の関係を図3.2.2に示します。 $q_E$ はモンテカルロ計算コードによる計算結果です<sup>3,4</sup>。計算結果より、陽子エネルギー30MeV以上の範囲では $w_R$ と $q_E$ の間に概ね整合性が取れていることが分かります。しかしながら、30MeV以下では $w_R$ が $q_E$ を下回っています。このエネルギー範囲の陽子による被ばくが支配的な場においては、例えば、放射線荷重係数を2.5程度に増加させるなどの検討も必要でしょう。

<sup>1</sup> 100MeV 程度の中性子による被ばくが支配的な場合

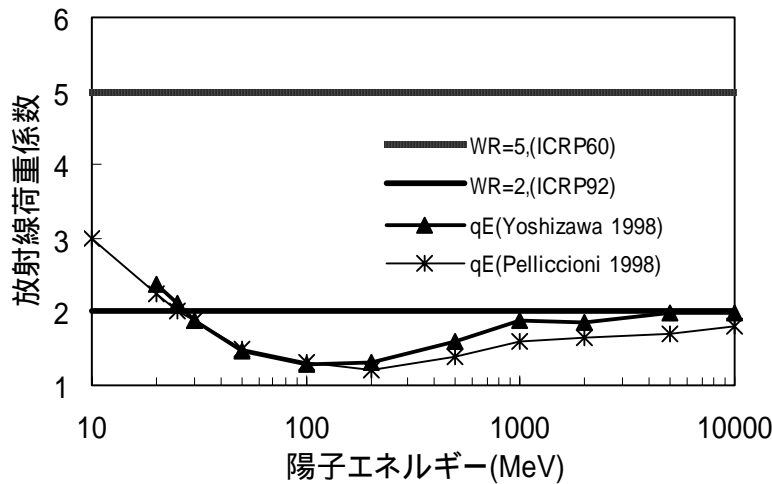


図3.2.2 陽子エネルギーと放射線荷重係数の関係

### 3.2.5. 実効線量と臓器線量の関係

エネルギー20MeV程度の陽子による被ばくは、陽子の飛程が数ミリ程度と短いことから、体表面付近の臓器(主に皮膚組織)に限定されます。(3.2.1)式による実効線量の計算では、対象となる臓器の吸収線量 $D_T$ がゼロの場合、最終的に実効線量の計算に寄与した臓器のみの組織荷重係数が考慮されることとなります。このため、次式に示すように組織荷重係数の総和が見かけ上、1を下回ることとなります。

$$\sum_T w_T < 1 \text{ (本来は } = 1 \text{ であるべき)} \quad (3.2.6)$$

例えば、皮膚以外の臓器の吸収線量がゼロの場合、実効線量は

$$E=0.01 \text{ (皮膚の組織荷重係数)} \times w_R \times \text{皮膚の吸収線量} \quad (3.2.7)$$

となり、等価線量の百分の一となってしまいます。皮膚は確定的影響に関しても注意を要する臓器(組織)であることから、その線量を過小評価することは大きな問題となります。図3.2.3には、皮膚のフルエンス・実効線量換算係数と皮膚のフルエンス・吸収線量換算係数の比較を示します。計算結果は、参考文献5にもとづいています。図より分かるように、陽子エネルギー20MeVから30MeV程度の範囲で、実効線量の換算係数が皮膚の吸収線量の換算係数を下回っています。もちろん、航空機内での陽子のエネルギースペクトルは単色ではないので、実効線量と皮膚の吸収線量の関係は複雑になりますが、仮に20~30MeVの陽子が支配的な放射線場が形成されるような場合には、実効線量のみでの評価では不十分となります。このような問題に対応するためには、航空機乗務員の被ばくを検討する際に、実効線量に加えて皮膚の吸収線量の評価も行うことが重要です。

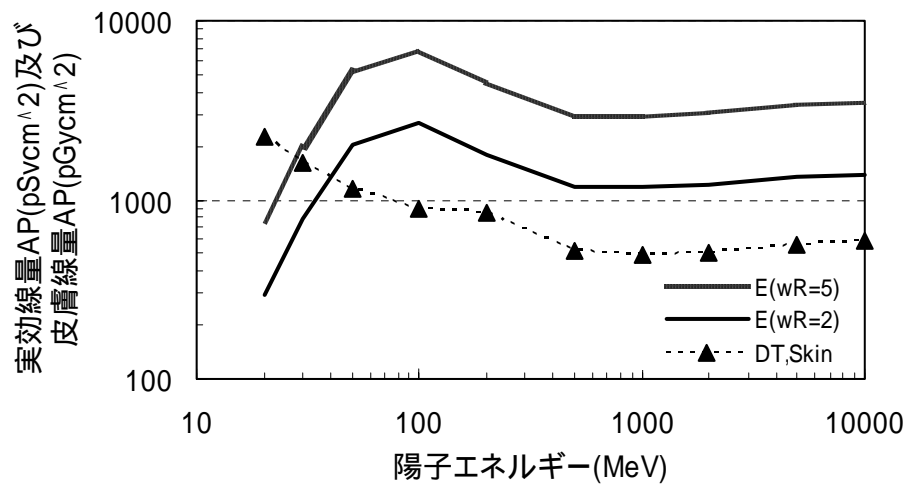


図3.2.3 陽子に対するフルエンス・実効線量換算係数と皮膚組織のフルエンス・吸収線量換算係数の比較

### 3.2.6 まとめ

航空機被ばくで重要となる線量の評価体系についてまとめました。特に重要な、高エネルギー中性子と陽子の放射線荷重係数の扱いについて、ICRP92を中心に最新動向を紹介するとともに、放射線荷重係数の修正が航空機被ばくの線量評価に及ぼす影響についても検討しました。また、20MeV程度の陽子に関して、現状の評価体系では陽子による実効線量が皮膚の吸収線量を下回る可能性があることを指摘しました。

### 参考文献(3.2)

- 1) ICRP: ICRP Publ.60 国際放射線防護委員会の1990年勧告, 日本アイソトープ協会, (1991年)  
関連する解説文献としては、草間他, 「放射線健康科学」, 杏林書院(1995)をあげる。
- 2) ICRP: ICRP Publ.92 生物効果比(RBE)、線質係数(Q)及び放射線荷重係数(wR), 日本アイソトープ協会, (2005年)
- 3) Yoshizawa, N. et al. J. Nucl. Sci. and Technol.,35, 928(1998).
- 4) Pelliccioni, M. Radiat. Protect. Dosimet. 80,371(1998).
- 5) Yoshizawa, N. et al. Proc. of the 9th International Conference on Radiation Shielding, Oct.17-22,1999 Tsukuba, Japan.

### 3.3. 実測による検証について

計算で求めた航路線量値の正確さについては、欧州を中心とした線量計測の専門家チームによって詳細な検討が行われてきました。その検討結果をまとめた最新のレポートによれば、飛行条件が確定した後に様々なコードで計算された航路線量値の不確かさは全体で 25%程度と評価されています。ただし、飛行前に予測された計算値の不確かさは更に大きくなります。今後、この計算の不確かさを低減するための取り組みが必要であると考えられます。

航空機高度での被ばくに最も大きな割合で寄与する成分は中性子で、実効線量の半分近くを占めると考えられています。このことは、航空機搭乗者の線量評価における中性子の測定評価の重要性を示しています。特に、航空機高度での被ばくの特徴として、現在地上の放射線管理等で用いられている計測機器では測定が困難な、高エネルギー (>10MeV) の中性子が実効線量の相当の割合 (~30%) を占める点があります。

現在 FAA が提供している CARI-6 コードは、O'Brien らが開発した LUIN コードを基盤としていますが、LUIN では宇宙線中性子のエネルギースペクトル (lethergy 表記) に見られる 100MeV あたりのサブピークが適切に表現できていないことが知られています。この 100MeV 付近のピーク部分は、航空機高度において、中性子全体の实効線量の約 70% を占めると推定されており、被ばく線量の評価に大きく影響する要素です。CARI コードにこのような問題があること等から、粒子の輸送をより忠実に記述する FLUKA コードを組み入れた EPCARD コード等が開発されましたが、その正確さについての検証は十分とはいえません。

航空機高度における中性子エネルギースペクトルの実測は過去に何度か行われています。図 3.3.1 に、航空機内において実測された中性子のエネルギースペクトルとして、Hess ら、Hewitt ら及び中村らの測定結果を示します<sup>1)</sup>。

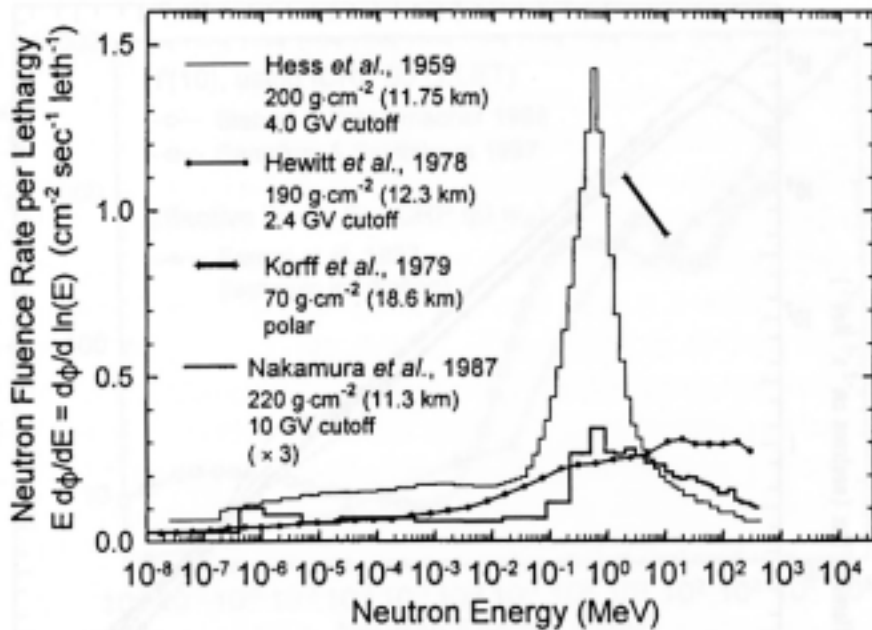


図 3.3.1. 過去実測によって得られた中性子のエネルギースペクトル<sup>1)</sup>. Hess  
ら及びHewittらのデータは米国上空のほぼ同じ高度で得られている。  
中村らのデータは緯度の違いを考慮し定数倍(×3)している。

これらの比較から、中性子のエネルギースペクトルには相当の不確かさがあることが分かります。このうち、Hessら及びHewittらのデータは米国上空のほぼ同じ高度で得られており、太陽活動の違いを考慮すればHewittらのデータが高くなると予想されますが、逆の結果となっています。

ところで、上図に示したデータは全て、多減速材付き中性子測定器、通称「ボナーボール測定器」を用いて測定されています。この測定器では、エネルギースペクトルをアンフォールディングと呼ばれる逆変換計算によって求めますが、その場合計算結果が初期値に大きく依存するという特徴があり、初期値の推定が極めて重要です。中村らは、最近の論文において、図3.3.1に見られるデータの乖離が、ボナーボール測定器の信号からエネルギースペクトルを求める際の初期値の与え方に原因があることを明らかにしました。

このような、本来実測によるべき初期値を別途正確に推定して与えなければ大きな誤差を生じ得るという性質を持つボナーボール測定器には、測定精度上の限界があるといえます。これからの課題として、初期値の妥当性も検証でき、1GeVにも及び宇宙線中性子に適用できるような新たな中性子スペクトロメータの開発・利用が必要と考えられます。先述した巨大フレアの発生がもたらす潜在的な被ばくリスクを明らかにするためにも、フレアが発生した瞬間に航空機内で中性子(特に10MeVを超える高エネルギーの中性子)を実測できる体制を日頃から整えておくことが望まれます。

### 参考文献(3.3)

- 1) Goldhagen, P. Overview of aircraft radiation exposure and recent ER-2 measurements. Health. Phys. 79: 526-544, 2000.

## 3.4 疫学研究的課題

航空機乗務員を対象とした疫学研究が世界各国で実施され、これまで多くの知見が得られてきました。しかしながら、これらの研究は種々の限界を持つため、得られた研究結果を解釈する際は十分に注意する必要があります。本章では、航空機乗務員を対象とした疫学研究的課題について検討した結果を報告します。

### 3.4.1. 方法論的な課題

航空機乗務員を対象とした疫学研究における課題のうち、方法論に関連した主なものとしては、曝露の評価、交絡の除去、統計学的検出力などが挙げられます。

第一の曝露の評価について、初期の研究の多くは、航空機乗務員と一般集団とで関心のある疾患の死亡率や罹患率を比較するだけで、曝露評価が充分ではありませんでした。このような研究では、SMR や SIR を用いた外部比較が行われることが多いのですが、特に注意が必要な点に、健康労働者効果(Healthy Worker Effect)が挙げられます。一般に、労働者は健康なために採用され、また、健康であるから労働を続けられるため、労働者集団は一般集団より健康で死亡率が低いことは容易に想像されます。この健康労働者効果は航空機乗務員の疫学研究でも顕著で、死亡率や罹患率を一般集団と比較した場合、この健康労働者効果により、SMR や SIR は 1 を大きく下回る場合がよくあります。

航空機乗務員は、原子力施設等の放射線作業員などとは異なり、業務中の被ばく線量測定は義務付けられていないため、研究対象者の個人線量データを得ることはきわめて困難です。このため、多くの研究では雇用年数や雇用開始年などを被ばくの指標として用い、健康影響との関係が検討されています。最近の一部の研究では、乗務歴や計算コードに基づいて個人線量の推定が行われていますが、推定値の精度が放射線の健康影響を評価する上で重要な点となります。

第二に交絡の問題が挙げられます。例えば、外部比較では航空機乗務員における放射線以外の要因の分布が比較対象となる他の集団と異なる場合があります。このような要因により、実際には放射線による健康影響がないのに、見かけ上は健康影響が存在するような結果が得られることがあります。この現象を交絡、交絡の原因となる要因を交絡因子と呼びますが、集団内部で比較を行う場合にも、放射線への曝露レベルの違いが、放射線以外の要因の分布の違いを伴うことがあります。例えば、騒音、振動、気圧の減少、低湿度、電磁波、ジェット燃料、サーカディアンリズムの乱れなど、航空機乗務に伴う放射線以外の様々な物理的、化学的、精神的な要因への曝露が放射線曝露レベルと相関し、その結果、交絡を生じる場合があります。

交絡を防ぐことは、放射線の健康影響評価において、きわめて重要ですが、現実には難しいことが多いです。また、潜在的な交絡因子への曝露に関するデータを得ることが、交絡を除去するために必要ですが、これも実際には容易ではありません。

次に、統計学的検出力の不足の問題が挙げられます。航空機乗務員における被ばく線量のレベルは年間平均で数ミリシーベルトと比較的低く、平均蓄積線量は数十ミリシーベルト程度です。そのような低い被ばく線量による潜在的なリスクを疫学研究で統計学的に検出するためには、膨大な観察人年が必要となります。例えば、コホート研究により10ミリグレイの放射線被ばくによる女性乳がんリスクを80%の確率で統計学的に検出するためには、直線閾値なしモデルに従った場合、1億人規模の集団を20年間追跡することが必要となり、現実的に極めて困難です。この検出力不足の問題に対しては、他の集団を対象とした低線量放射線疫学研究、例えば、原子力施設等の放射線作業員を対象とした疫学研究や屋内ラドンの疫学研究と同様に、国際共同研究によるプール解析（個々の研究でのオリジナルデータを一括した解析）やメタ解析（個々の研究で得られたリスク推定値などの結果を統合した解析）による結果が一層期待されます。

その他に、問題の疾患を発症した患者や死亡者をどのように同定するか、その正確性は充分かどうか、なども疫学研究を実施するにあたって方法論に関連した重要な課題です。

### 3.4.2. 日本における疫学研究の実施可能性

日本では航空機乗務員の疫学研究は、1993年に公表されたKajiらの研究以降、本格的な研究は実施されていません。さらなる研究を実施するためには、多くの課題が残されます。前述した、曝露評価、交絡因子、統計学的検出力など方法論的な課題以外には、航空会社や航空機乗務員を初めとした関連当事者からの合意が得られるかどうか、要する多大な費用を誰がどのように負担するか、どのような枠組みで調査を実施するか、などが検討すべき課題として挙げられます。

日本で航空機乗務員の疫学研究を行う場合には、前述したような種々の困難が予想されます。しかしながら、航空機乗務員における宇宙放射線被ばくの問題は、今後日本においても大きな社会問題となりうるため、疫学研究に基づく情報提供はリスクコミュニケーションの一手段として有用だと考えられます。また、これまで得られた航空機乗務員の疫学的知見の大部分は北米や欧州の集団での研究結果に基づいており、日本での調査は、これまで欠けているアジア地域における貴重なデータを国際社会に提供することになります。これは、航空機乗務に伴う宇宙放射線被ばくにより皮膚がんや乳がんなどのリスクがアジアの集団でも増加するかどうかの検討や、アジア集団を含む国際共同研究に基づくプール解析やメタ解析を可能とさせます。このような点においても、日本での疫学研究は重要だと思われます。疫学研究実施のためには、十分な準備と予算を確保し、幅広い専門家の協力を得て、信頼に足るデータに基づき、国際的な評価に耐えることが可能な研究体制を確立する必要があります。

### 3.4.3. まとめ

航空機乗務員を対象とした疫学研究により、これまで多くの知見が得られてきました。しかしながら、曝露評価、交絡、検出力などの点から、宇宙放射線への被ばくによってがんなどの疾患のリスクが増加するかどうかについては、明確な結論が得られていません。これらの課題を克服したさらなる疫学研究により、中性子や陽子への被ばくによる健康影響について、ヒトを直接観察して得た知見を蓄積することが重要だと考えられます。

### 参考文献(3.4)

- 1) Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations. Sources and effects of ionizing radiation: UNSCEAR 2000 report to the general assembly, with scientific annexes. New York, NY: United Nations 2000.
- 2) Boice JD et al. Epidemiologic studies of pilots and aircrews. Health Phys 2000;79:576-584.
- 3) Epidemiological Study Group of Nuclear Workers (Japan). First analysis of mortality of nuclear workers in Japan, 1986-1992. J Health Phys 1997;32:173-184.
- 4) Iwasaki T et al. Second analysis of mortality of nuclear industry workers in Japan, 1986-1997. Radiat Res 2003;159:228-238.
- 5) Land CE. Estimating cancer risks from low doses of ionizing radiation. Science 1980;209:1197-1203.
- 6) Kaji M et al. Mortality experience of cockpit crewmembers from Japan Airlines. Aviat Space Environ Med 1993;64:748-750.
- 7) Cardis E et al. Effects of low doses and low dose rates of external ionizing radiation: cancer mortality among nuclear industry workers in three countries. Radiat Res 1995;142:117-132.
- 8) Lubin JH, Boice JD Jr. Lung cancer risk from residential radon: meta-analysis of eight epidemiologic studies. J Natl Cancer Inst. 1997; 89:49-57.
- 9) Darby S et al. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. BMJ. 2005;330:223.

## 3.5 労務管理への反映

### 3.5.1 航空機乗務員の業務

航空機乗務員は、「運航乗務員」と「客室乗務員」に大別されます。運航乗務員は「操縦士」と「航空機関士」に分けられ、さらに操縦士(パイロット)は「機長」と「副操縦士」に分けられます。機長は、主として操縦や航法など運航全般の総責任を負います。副操縦士は、主として機長の操縦や航法の援助業務を行うほか、通常は通信業務なども行います。航空機関士はすべての型式の航空機に乗務しているわけではなく、航空機の型式証明に搭乗が義務付けられている航空機にのみ乗務します。航空機関士は、操縦・航法・通信以外の業務(たとえば機体の状態、

燃料・電気・作動油・空調・与圧・発動機の状態、各種警報装置の状態などの監視や操作など)を行います。客室乗務員は、客室の保安と乗客の安全確保を第一義的な任務とし、乗客に対するサービスも担当します。

### 3.5.2. 航空機乗務員の勤務実態

#### 3.5.2.1 出発準備作業

運航乗務員はあらかじめ割り当てられた運航便の出発予定時刻の1～2時間前に運航課事務所に出頭し、運航準備作業を開始します(国際線乗務の場合には、路線が長いために飛行計画の確認に時間を要し、また運航中にいろいろな国の領域を通過することから万一緊急に(または臨時に)着陸しなければならない事態に備えそれらの国ぐにの法律や多様な事情を改めて確認するため、出頭時刻は国内線よりもっと早くなります)。運航準備作業には当日の天候、予定された航路上の気流状態の確認、燃料搭載の計画、機材の整備状態、航路や空港の標識・照明の状態、乗客や貨物の確認など、運航に関連するあらゆる事柄についての確認と、飛行計画(時刻・高度・航路、機体とその装備など、運航便の出発から到着までのあらゆる計画を記した書類)の国土交通省航空交通管制部への提出が含まれます。運航準備作業を終えると、出発予定時刻の30～40分前(国際線乗務の場合にはもっと早くなります)に航空機に乗り込みます。その前後には客室乗務員との打合せなどを行います。その後、機体の出発準備作業を開始します。出発準備作業には、燃料やオイルの搭載状況をはじめとする機体の整備状況の確認、操縦室の計器や装備などの機能点検、客室の装備など安全性の確認などが含まれます。乗客の搭乗が終わりすべての扉が閉められると、操縦士は無線で管制機関の承認を求めます。この承認を得て、はじめてエンジンを始動できることとなります。

#### 3.5.2.2 乗務

出発の承認が得られると操縦士は航空機を動かします。エンジン始動後、地上を走行して滑走路に向かい、離陸します。通常、車輪止めが外されて機体が動き出した時点を「乗務開始」(ブロックアウト)といい、着陸して指示されたゲート(駐機場)に到着し車輪止めがかけられて航空機が停止した時点を「乗務終了」(ブロックイン)といいます。「乗務時間」(ブロックタイム)とは「航空機が動いている時間」であり、運航乗務員の労働時間は、その前後での準備作業、乗務後の各種報告などの作業を終える全拘束時間をいいます。「乗務時間」は航空機乗務員の労働時間の一部でしかありません。航空機が動き出してからゲートに到着するまで、地上と空中とを問わず、操縦士は必ず管制承認を得なければなりません。天候などの事情により予定した航路を一時的に変更したり、高度を変更したりする時にも常に管制機関との通信がなされ、すべて許可を得て行われます。自動操縦装置に任せてさえいれば、目的地まで「寝ていても飛ぶ」などというのは、運航乗務の現場を知らない者の言葉でしかありません。自動操縦装置にエラーが出たり、人間の思い違いで誤った入力や操作をすることもあります。飛行中のエンジンの異常燃焼など、大事故につながりかねないトラブルが起こることもあります。きわめて稀な事例ですが、飛行中にエンジンが突如止まってしまうことさえあります。ハイテク機であれ在来機であ

れ、乗客からは見えない操縦室の中で、操縦士は冷静に、多くの仕事を短時間にこなしています。乗務中には根気強い監視と、正確な判断や操作が要求されます。

なお、業務の内容は異なりますが、客室乗務員の出発準備作業と乗務に関する労働時間は、運航乗務員とほとんど同じ実態にあります。

### 3.5.3 航空機乗務員の有害な作業環境と過酷な労働

飛行中の航空機内の環境は地上とはまったく異なるため、航空機乗務員はきわめて健康かつ頑丈でなければ務まりません。航空機乗務員は有害な作業環境と過酷な労働条件の下におかれているからです。従来から指摘されている航空機乗務員の有害な作業環境と過酷な労働条件の典型的な特徴を以下に列記します。

#### 3.5.3.1 低気圧

飛行中の航空機内は、実際に飛行している高度よりも、与圧によりかなり低い高度の気圧に保たれています。しかし、それでもその気圧は 800hPa 程度でしかありません。これは 1900m ほどの気圧高度に相当し、飛行中はその環境下で労働することになります。なお、操縦室と客室の気圧は同一ですが、当然のことながら操縦室では事前に気圧の変化がわかるのに対し、客室はそうではありません。したがって、急激な高度変更の際などに運航乗務員はあらかじめ機内の気圧変化に対して「身構える」ことができるのに対し、一時的とはいえ客室乗務員は「耳が詰まる」可能性が高くなります。耳が詰まる現象は中耳腔の気圧と機内気圧が平衡になっていないことに起因するものですが、航空機乗務員には耳閉感、耳痛、難聴などを伴う「航空性中耳炎」なる職業病がれっきとして存在し、発症者も決して少なくはありません。また、副鼻腔の気圧と機内気圧が平衡になっていない場合には、前頭部痛などを伴う「航空性副鼻腔炎」なる職業病も発症しやすくなります。

#### 3.5.3.2 低酸素

低気圧状態では酸素も薄くなるため、航空機乗務員は循環器や呼吸器にかかる負担が増えます。また、酸素を摂取しにくい分、地上の場合より疲労が増えます。客室乗務員の場合、航空機内を歩行することは地上でジョギングするのと同じエネルギーを必要とすると指摘されています。

#### 3.5.3.3 騒音

航空機内の前方と後方で騒音レベル、周波数特性に若干の差異はありますが、騒音レベルは 80dB ほどであるといわれています。そのため、航空機乗務員は「騒音性難聴」を発症するリスクが高いと指摘されています。また、振動と騒音は耳石器官に作用し、自律神経失調症の原因になる場合もあります。

#### 3.5.3.4 低湿度

航空機内の湿度は非常に低く(～20%)、その乾燥度は砂漠並みといわれています。低湿度は細菌感染を招きやすく、風邪をひきやすくします。その他、オゾン汚染、紫外線(運航乗務員にほぼ限られます)、揺れ(乱気流によるものに加え、航空機は微動の振動が常時発生しています)などは、国際的にも注目されています。1990年頃以降に開発されたB747-400、B777などの航空機の場合、操縦室にのみ加湿器が導入されました。しかし、客室ほどではないにせよ、低湿度であることに変わりはありません。

#### 3.5.3.5 飛行姿勢と狭い作業空間

航空機は巡航中、機首をあげて飛行しています。その傾斜角度は2～3度です。客室乗務員の場合、揺れと傾斜の中で乗客に飲食物のサービスをします。サービスの際に使用するカートの重さは90kgほどあり、低酸素下にある傾斜2～3度の坂道を、90kgの重量物を押したり引いたりすることになります。これが客室乗務員の疲労を増幅させる一因となっています。また、航空機は可能な限り多くの乗客を収容できるようにデザインされており、航空機乗務員の作業空間はかなり狭いものです。客室乗務員の場合、狭い作業空間の中で無理な姿勢で業務に携わることになります。それが腰痛などの疾病を持つ客室乗務員を増加させる一因になっています。「疲労性腰痛」は客室乗務員の職業病といわれるほど罹患者が多くなっています。運航乗務員の作業空間は客室乗務員よりさらにいっそう狭くなります。運航乗務員の99%以上の業務時間は座ったままの姿勢を強いられるため、腰痛や深部静脈血栓症(いわゆるエコノミークラス症候群として知られていますが、長時間座ったままの姿勢でいると下肢の深部静脈が圧迫され静脈還流が停滞した状態となると深部下肢静脈血栓症を発症しやすくし、またその血栓が静脈系から肺動脈へと移動して肺塞栓症を発症することもあり、国際的に問題になっています)などの疾病リスクを高める一因となっています。

#### 3.5.3.6 長時間・早朝・深夜(徹夜)労働及び時差との格闘

上記に加え、国際線乗務員の場合、労働時間がきわめて長いことも指摘されています。それだけではなく、航空機乗務員の負担になるのは早朝労働、深夜(徹夜)労働及び時差の問題です。運航ダイヤは、乗客の利便性を考えて目的地の到着時間を優先して作成されているため、乗務員の健康や生活パターンへの配慮はきわめて不十分です。時差をとまなう労働、深夜(徹夜)労働は肉体的疲労が激しく、身体の変調を増幅させる疾病を招くことが明らかになっています。

### 3.5.4. 航空機乗務員の被ばく管理

#### 3.5.4.1 被ばくの特徴

航空機乗務員の有害な作業環境と過酷な労働は前述したとおりですが、有害な作業環境因子のひとつとして国際的にも指摘されているのが宇宙からの放射線(宇宙線)です。その実効線量は、一般人の年実効線量限度1mSvを優に超えることは間違いありません。一方、日本の

運航乗務員の場合、巡航高度が 37,000 ~ 39,000ft ほど、かつ乗務時間の年制限値が 900 時間((株)日本航空の「運航乗務員就業規程」によります)などから推定する限り、年 5mSv を超えない線量レベルにあることもたぶん間違いないところです。また、巡航高度が一定であることから年実効線量分布はかなり狭い範囲にあり、仮に年 5mSv を超える航空機乗務員がいたとしても、太陽フレア時を除けば、年 5mSv を大きく超えることはないと推察されます。女性の航空機乗務員の場合、腹部表面の等価線量限度である妊娠中 2mSv を超える可能性はありますが、現実には妊娠の事実が事業主に申告されると地上勤務に順次切り替える措置が各航空会社で採られているため、妊娠中 2mSv という等価線量限度を超える可能性はきわめて低いものです。

#### 3.5.4.2 管理の内容について

航空機乗務員の宇宙線被ばくは上記のような特徴があります。航空機乗務員の宇宙線被ばくは、一般人の年実効線量限度である年 1mSv を優に上回り、かつ乗務する以上避けることのできない職業上の被ばくといえます。自然界に存在する放射線による被ばくとはいえ制御可能な被ばくであり、すべての被ばくは合理的に達成できる限り低く保たなければならない(As Low As Reasonably Achievable)という放射線防護の原則からいっても、放射線防護の対象とすべき被ばくであると考えられます。ICRP も 1990 年勧告の中で「ジェット機の運航」にともなう宇宙線被ばくを「職業被ばくの一部として含める必要があるべきである」と勧告しています。また、ICRP Pub.75『作業者の放射線防護に対する一般原則』の中で再度、「委員会は仕事のために乗る乗客の被ばくを職業被ばくとして扱う必要があるとは考えていない。高められたレベルの宇宙線に被ばくする主な職業グループは、航空機乗務員である。」「ジェット機乗務員の被ばくは職業被ばくとして扱うべきである。」等の見解を明示しています。

航空機乗務員の宇宙線被ばくが最大でも年 5mSv を超えそうにないことから、ICRP Pub.82『長期放射線被ばく状況における公衆の防護』を引用して、「介入が正当化されそうにない一般参考レベル」の被ばく線量であり法令による規制対象とする必要はないとする議論が一部にはあります。しかし、ICRP Pub.82 が明記しているように、「この報告書は、公衆被ばくの制御しうる長期被ばく成分についてのみ言及する。」ものですので、ICRP Pub.82 をもって航空機乗務員の宇宙線被ばくを法令による規制対象とする必要はないと結論するのは、介入の考え方の誤用ではないかと考えられます。

また、ICRP Pub.75 は、「妊娠申告後の妊娠作業者の作業条件は、受胎産物に対する追加の等価線量が妊娠の残りの期間中においておおよそ 1mSv を超えることがありそうもないようにすべきである、と勧告する。」と述べています。この勧告を受けて、法令の等価線量限度ではないにしても、放射線防護の観点からは、妊娠中 1mSv を超えないことを確認するための管理を行う必要があると考えられます。

では、航空機乗務員の宇宙線被ばくをどのように管理すべきでしょうか。法令による規制をするか否かは難しい問題です。しかし、法令による規制をしないとした上で、管理目標値を設定し

て被ばく線量の低減化に努めよ、航空機乗務員等の被ばく線量の評価をせよ、航空機乗務員に対して宇宙線被ばくに関する説明と教育をせよ、航空機乗務員の宇宙線被ばく線量の閲覧・記録・保存をせよ、などと言ってみても、結局のところそれらの内容はすべて航空事業者を実施を「期待する」、「希望する」という以上の域を出ないこととなります。ICRP Pub.60 や Pub.75 が航空機乗務員のジェット機の運航にともなう被ばくを職業被ばくとして管理するよう規制当局等に求めていることに照らすと、事業者による自主的管理は、不十分な対応とはいえないでしょうか。むしろ航空機乗務員の宇宙線被ばくを職業被ばくとして位置付け、その上で、地上における通常の放射線管理とは異なる、航空機乗務員の勤務実態と宇宙線被ばくの実態に適した放射線管理のあり方が検討されるべきであると思われます。

以下、地上における放射線管理のあり方と対比させながら、いくつか航空機乗務員の宇宙線被ばくの管理のあり方について述べてみます。

#### (1) 線量評価

航空機乗務員の年被ばく線量が放射線業務従事者についての法令の年実効線量限度や等価線量限度を超えることはないとしても、一般人の年実効線量限度を優に上回る状況を考慮するならば、管理目標値を設定し、航空機乗務員の被ばく線量を評価し、管理目標値を超えないよう管理される必要があります。妊娠した女性の航空機乗務員については、腹部表面が妊娠中 2mSv、「受胎産物」が 1mSv を超えないよう管理される必要があります。地上における通常の放射線管理では3月 1.3mSv を超える恐れのある区域を管理区域に設定し、一般の作業区域と区別して環境の管理を行っています。航空機の場合には3月 1.3mSv を超える恐れがある場合であっても、そうした区域の設定は現実的ではなく必要ありません。ICRP Pub.75 も「他に実際的な制御手段がないため、指定区域の使用を考慮する必要はない。」と述べています。

線量評価法には実測法と計算法がありますが、航空機乗務員の煩雑な運航準備作業を考慮すると、実測法は航空機乗務員の負担を増やすことにつながる恐れもあり、必ずしも良いとはいえません。いずれの方法を採るか慎重に検討される必要があります。ただし、この問題は計算法による線量評価の精度とも関連します。計算法による線量評価精度が $\pm 40\%$ もあるようであれば、実測法を採用せざるを得ないでしょう。また、航空機内の宇宙線線量が場所により大きく変わらないのであれば、実測法による線量評価を行う場合であっても、航空機乗務員の全員に個人モニタを携帯させる必要はありません。地上における通常の放射線管理では場所と作業員の線量測定を行っています。航空機内の宇宙線線量が場所により大きく変わらないのであれば、いずれか一方で足ります。さらに、航空事業者は線量評価結果の写しを一定期間ごとに評価対象者に対し交付するとともに、線量低減化のための資料として記録・保存しておく必要があります。これらの資料をもとに、被ばくが特定の個人に集中しない運航計画の立案が可能になると考えられます。

#### (2) 教育訓練

航空機乗務員は、宇宙線を含む放射線の人体影響などについての教育を航空事業者が行

うよう義務付けることを規制当局に要望しています。ICRP1990年勧告が発表され、航空機乗務員が一般人の年実効線量限度を優に上回る被ばくをしている状況がありながら、航空会社が航空機乗務員に対して十分な教育訓練を行ってこなかった面は否めません。航空機乗務員が安心して運航業務及び客室業務に専念できるよう、航空事業者は一定期間ごとに繰り返し教育訓練を行わなければなりません。女性の航空機乗務員に対しては、胎児に対する放射線影響についての教育を積極的に行う必要があります。また、現在の航空機が多数の放射性物質を輸送していることを考慮すると、万一の緊急事態に備えて、教育訓練の項目には放射性物質の安全取扱いに関することも必要かも知れません。

### (3) 健康診断

地上における通常の放射線管理では、法令により一定期間ごとに放射線作業員の健康診断を行うことが義務付けられています。健康診断の方法は、問診及び検査又は検診とされている。航空機乗務員の健康診断は通常の一般健康診断より厳しいといわれているが、従来行われてきた航空機乗務員の健康診断において仮に検査又は検診項目上記放射線作業員に対して行われている検査又は検査項目を満たしていないのであれば、可能な限り満たされる必要があると考えられます。

なお、航空機乗務員の宇宙線被ばくで大きな寄与を占める中性子と陽子については、放射線荷重係数の再評価がICRP Pub.92で行われており、再評価の結果如何により防護量である等価線量、実効線量は大きく変わる可能性があります。このことをもって、線量制限値を定めて法令による厳密な規制をする意味がない(したがって管理する事業者の判断に基づく自主管理でよい)とする意見も聞かれます。しかしながら、ICRPが線量の測定評価に相当の不確かさがあることに言及しつつ明確な線量限度を定めているように、現在の宇宙線被ばく線量の評価に不確かな点があるという事実と、厳密な管理が必要か否かという問題は、別の次元にあると考えられます。

### 参考文献(3.5)

- 1) 航空労働研究会編「規制緩和と航空リストラ」、旬報社発行、1998年2月。
- 2) 藤高和信・福田俊・保田浩志編「宇宙からヒトを眺めて—宇宙放射線の人体への影響—」、研成社発行、2004年10月。
- 3) ICRP Pub.60「国際放射線防護委員会の1990年勧告」、日本アイソトープ協会編集・発行、1991年11月。
- 4) ICRP Pub.75「作業員の放射線防護に関する一般原則」、日本アイソトープ協会編集・発行、1998年12月。
- 5) ICRP Pub.82「長期放射線被ばく状況における公衆の防護」、日本アイソトープ協会編集・発行、2002年3月。

### 3.6 専門家の役割に関して ～ 情報提供と非専門家との意見交換

世の中には様々な放射線及び放射性物質といった被ばく源が存在し、私たちは、常日頃から上空から降り注ぐ宇宙線や大地からの自然放射線にさらされています。本報告書で取扱っている航空機搭乗者の被ばくも上空から降り注ぐ宇宙線によるものです。また、原子力施設由来のものや治療・診断に利用される機器類から発生するものなども存在します。しかし、普段私たちは、こうした放射線の存在をあまり意識していません。放射線による被ばくについても、よく知っている人もいれば、わからないといった人もいます。さらに、一般の人々の間では、自然のものは「安全」、人工のものは「危険」と誤った認識をしていたり、リスク(健康に有害な影響を及ぼす確率と深刻さをかけ合わせたもの)の実際とリスクに関する認知の間にずれが生じることがあります。

このような誤解や不安を取り除き、より一層の理解を深めてもらうため、放射線防護の専門家や行政機関は、放射線の人体影響や環境影響、測定技術の開発などの関連研究を行うとともに、研究成果の公表、原子力や放射線に関する説明会や講演会、一般向け冊子の作成などを行ってきました。しかし、これまでのやり方は、情報の送り手である専門家や行政機関が、「必要な情報」、「わかりやすいもの」と考えて情報提供したものであり、一方通行になりがちでした。情報の送り手の教育(啓蒙活動)は、情報を必要とする非専門家(情報の受け手)の知識を増やすことには効果的なものの、それを受け入れ、有効性や行動の変化まで起こさせるといったことは期待できないという指摘もあります。このようなことから、最近では、同じような問題を抱えた様々な分野で、関係者が相互に情報や意見を交換、評価し合い、その過程の中で、関係者間の理解レベルの向上が図られるコミュニケーション、「リスクコミュニケーション」の実施の考え方が広まってきました。

リスクコミュニケーションという言葉は、1970年代中頃、米国で誕生しました。最初は、事業者などからの情報の公表、開示レベルでした。1980年代中頃、米国では有害廃棄物、原子力発電所及び危険物質に対する不安の増大に直面、このような状況の中、環境及び職業人の健康に対するリスク管理及びコミュニティの意思決定に必要な構成要素であるリスクコミュニケーションの考え方が国家により認められました。そして、1990年代中頃、上に述べた「相互の意見交換」という意味で、この言葉が利用され、住民が自分たちに影響を及ぼす課題に対して、決定プロセスに参加するようになりました。同じ頃、放射線防護の分野では、経済協力開発機構・原子力機関・放射線防護・公衆保健委員会(OECD/NEA/CRPPH)が、『Radiation Protection Today and Tomorrow』(<http://www.nea.fr/html/rp/reports/1994/rp.html>)の中で、ステイクホルダー(利害関係者)の意思決定への関与について以下のようなことを指摘しました。それは、自分たちの生活に影響を及ぼす意思決定に対する関心が高まり、特に人の健康や環境への影響に関する意思決定の中には社会と切り離すことができないものがあり、利害関係者を含めた意思決定を実施する必要があるといったことです。これを受けて、1990年後半には意思決定支援プロセスへのステイクホルダー関与に関するワークショップが開催され、欧米各国の実際に放

放射性物質により汚染された土地の利用に関する課題に、住民が参加して意思決定を行った事例や解析結果などが報告されました。さらに、2002 及び 2004 年には、OECD/ NEA の放射線防護体系専門家グループ (EGRP) のワークショップが日本で開催され、放射線防護に関連した意思決定プロセスへのステイクホルダーの関与について、アジアの現状、取組みなどが紹介され、アジアの放射線防護の専門家、日本の行政機関、NEA の専門家などの間で意見交換が行われました。

リスクコミュニケーションに対する日本の行政機関の取組みは2000年頃から始まりました。原子力や放射線に関連した分野では、原子力委員会(原子力の政策、立法、研究開発等を管理、決定している政府機関(<http://aec.jst.go.jp/>))、原子力安全委員会(原子力利用の安全規制に関する政策の決定、安全規制基準・ガイドラインなどの策定、安全規制のダブルチェック(二次審査)などを行う政府機関(<http://www.nsc.go.jp/>))では、リスクコミュニケーションの重要性を指摘するとともに、社会とのコミュニケーションの推進として、各地でシンポジウム等を開催し、一般の人々との対話を通し、また学会などの場での専門家との討論などを通して社会とのコミュニケーションを一層密にしていこうという取組みがなされています。また、文部科学省では、「安全・安心な社会の構築に資する科学技術政策に関する懇談会」の報告書の中で、安全を安心につなげるための重点課題としてリスクコミュニケーションの推進が示されています。このような状況下で、2005年11月末に文部科学省の放射線安全規制検討会では、航空機乗務員の宇宙線被ばくに対する管理目標値を示した『航空機乗務員が飛行中に浴びる宇宙線の被ばく対策に関する報告書』を発表しました。この報告書の検討にあたっては、行政機関、専門家及び航空機乗務員の代表が意見を交換する場が設けられました。また、原子力技術の開発・利用に伴うリスク問題を取り上げ、リスクコミュニケーションを社会的に定着させることを目的として、公募型研究プロジェクト、「原子力技術リスクC3研究: 社会 (Community) との対話 (Communication) と協働 (Collaboration) のための社会実験 (<http://tokaic3.fc2web.com/indextop.html>)」なども実施され、社会実験の実施、システム設計、ガイドライン作成、社会的効果の解明が行われています。

これ以外の分野では、BSE(伝達性牛海綿状脳症)問題などをきっかけに、内閣府への食品安全委員会の設置、さらに、この中にリスクコミュニケーション専門調査会が設置され、リスクコミュニケーションに対する課題についての報告書(<http://www.fsc.go.jp/senmon/risk/index.html>)が取りまとめられました。これを受け、厚生労働省や農林水産省では現在検討が進められています。また、経済産業省や環境省では、有害性のある多種多様な化学物質の発生源及び環境中への排出量などを把握、集計及び公表する「特定化学物質の環境への排出量の把握等及び管理の改善の促進に関する法律(PRTR 法)

([http://www.meti.go.jp/policy/chemical\\_management/law/](http://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/law/))」が公布され、リスク管理によるリスク低減の取り組みやホームページでリスクコミュニケーションに対する解説を行っています。

このように様々な分野でリスクコミュニケーションの取組みが進められていますが、共通した課題は以下のようなものがあります。

まず、リスクコミュニケーションが情報の送り手と受け手との相互作用過程であるという考え方において、送り手が情報を独占したり、送り手の都合から情報を提供してはならないということ

す。受け手には、十分な情報を提供し、問題に対する理解を深めてもらう必要があります。そして、情報公開や提示は、タイムリーであること、専門家でなくても分かりやすいこと、受け手のニーズ(望んでいる情報)を反映していることが重要です。情報の送り手である専門家は、一般的に多くの科学的及び技術知見を持っており、分析能力も優れていますが、さらに豊富な知識を蓄えておくために、専門家間で十分な意見交換を行い、知識を共有しておく必要があります。また、情報の送り手は、受け手が色々な背景を持った人であり、その理解レベルは様々な段階にあることをよく認識しておかなければなりません。このような理解レベルの段階の異なる人たちへ、科学的知見をゆがめることなく、分かりやすく情報を提供することは非常に難しいことです。このため、社会科学関連の研究者や広報担当者などの協力を得るとともに、専門家と非専門家間での意見交換を繰り返し行い、送り手は受け手のニーズを十分に把握しておく必要があります。さらに、わかりやすく説明するためのコミュニケーション方法や技術に精通した専門家の育成や専門家間または専門家・非専門家間の意見交換に積極的に参加できる仕組みを構築しておく必要もあるでしょう。

一方、情報の受け手側も情報を判断する能力を鍛えておく必要があります。専門的な判断、事前予測、評価などは、明確になっていないことを仮定して行います。このため、新たな科学的知見が得られることで、この仮定が崩れてしまうことも考えられます。また、情報は専門家からだけではなく、メディアから入手することも多いでしょう。メディアは、大変わかりやすく情報を提供してくれます。しかし、報道の頻度と実際のリスクの発生頻度や重要度は必ずしも一致しないことがあります。実際のリスクの発生頻度や重要度は低くても、話題性があるもの、人の同情を引く事件や事故が大きく取上げられることもあります。また、専門的知識が十分でないため、重要な情報が欠落するといった恐れもあります。したがって、受け手もこれらの情報を鵜呑みにしないように注意しなくてはなりません。

以上、上記の課題は、航空機搭乗者の宇宙線被ばくに関するリスクコミュニケーションを行う場合にも同様に重要であると考えられます。しかし、交換される情報は、対象とする集団の性質(職業人、女性が多いなど)や検討する内容、意思決定のレベル(国、市、地域など)でそれぞれ異なります。このため、航空機搭乗者の宇宙線被ばくに対するリスクコミュニケーションを実効的なものにするためには、事前にコミュニケーションの方法を具体的に良く検討しておく必要があるでしょう。

#### 参考文献(3.6)

- 1) 吉川肇子:”リスクとつきあう”,(2000), 有斐閣, 東京.
- 2) 岡本浩一:”リスク心理学入門 - ヒューマンエラーとリスクイメージ - ”,(2004), サイエンス社, 東京.

## 4. さいごに

本報告書では、航空機利用にともなう宇宙線被ばくについて、疫学、被ばく管理、線量の計測・モデル計算・評価、リスクコミュニケーション等に関連する情報をとりまとめるとともに、放射線防護の専門家としての見地から、今後検討を要すると考えられる問題点を示しました。本章では、宇宙線被ばくに対する適切な対応と関連する研究の効率的な進展を促す狙いから、あらためて重要な点を指摘しておきたいと思います。

### (1) 職業被ばくとしての位置づけ

ICRP は、1990 年勧告などで、ジェット航空機の乗務員が宇宙線によって受けている被ばくは職業被ばくと考えられることを述べています。我が国においても、この勧告に従った見解が示されることが望めます。ただし、被ばく源そのものは自然界のもので管理義務がなく、乗務員は放射線や放射性物質を取り扱っているわけではないので、これを地上の原子力施設等で働く放射線作業従事者と同様に扱うことは適切でないと考えられます。放射線作業者と一般公衆の中間に位置するような別のカテゴリーを設け、他の自然放射線や人工放射線と区別した宇宙線による被ばくだけを対象とした管理の方法が検討される必要があると考えます。具体的な対応方法については、EU 加盟国で既に施行されている法令やガイドライン等が参考になると思います。

### (2) 疫学研究による情報の蓄積

欧米を中心に実施されたこれまでの疫学的知見からは、航空機乗務員について報告された一部のガン増加を宇宙線被ばくのみで説明することは困難です。疫学研究では、被ばく線量や健康影響の情報に加え、交絡因子の情報を得て解析することが重要です。また、日本人乗務員を対象とした疫学研究により、現在は知見が乏しいアジア人集団に関するデータを国際社会に提供することも重要です。疫学研究によるさらなる情報の蓄積により、宇宙線被ばくに関する新たな知見が得られるとともに、より適切な被ばく管理のあり方が示されると考えられます。

### (3) 太陽フレア対策

極めて稀な事象ながら、巨大な太陽フレアによって過剰な宇宙線被ばくを受ける可能性があります。津波等の自然災害と同様に、万が一に備えて被害を食い止めるための管理体制を普段から整えておくことが望めます。すでに、人工衛星などを使って太陽活動の観測が国際的に進められており、フレアの発生時期や規模、ならびに地球環境への影響に関する予報が、専門研究機関(日本では情報通信研究機構)を通して提供されています。今後は、その予報を航空機搭乗者の被ばく低減に生かす技法を開発するとともに、こうした予報情報に基づき、巨大フレアの影響が予想される場合には、適切な対応(通常よりも低高度を飛行して被ばくの増大を避けること等)を迅速に行う体制が望めます。なお、安全運航の観点からは、高エネルギー宇宙線の電子機器に与える影響も十分に検討する必要があると考えます。

#### (4) 航路線量計算コードの開発

現在普及している航空機搭乗時の被ばく線量を計算するコードは、残念ながら海外(米国、カナダ、欧州)のものばかりです。我が国においても、高い精度を有する粒子輸送計算コードの開発が進んでおり、これをベースに独自のコードが開発・運用されることが期待されます。特に、評価の信頼性が従前より問題となっていた中性子線量の精度について大きな改善がなされ、様々な条件における航空機内の中性子スペクトルを瞬時に導出することのできるコードが完成の域に達してきました。これを活用することにより、日本人のグループで宇宙線被ばくの正確な実態把握に取り組むことが可能です。専門家や研究機関のみならず、航空会社や乗務員団体等においても独自かつ容易に線量の計算ができる環境が整備されるよう、関係各位に強く要望したいと思います。

#### (5) 宇宙線計測機器と評価体系の開発

上述の航路線量計算コードによる評価精度を検証するには、航空機が飛行する高度(～12km)における中性子のエネルギースペクトルを定期的に精密に実測することが必要です。その測定に必要な中性子測定器、特に10 MeVを超える高エネルギーの中性子にも適用可能な中性子スペクトルメータの開発は急務と考えられます。一方、宇宙線に対する実効線量の評価に際しては、ICRPが提示している放射線荷重係数の値を用いることは適切とは言えません。例えば、現状の線量評価体系では陽子による実効線量が皮膚線量を下回る可能性があります。今後、荷重係数値の修正、もしくは評価体系の抜本的な見直しを念頭においた検討が必要と考えられます。また、ここで述べた測定機器や線量評価体系の開発は、航空機飛行における放射線防護のみならず、今後の人類の宇宙進出にとっても重要な意味を持ちます。

#### (6) 被ばく管理とリスクコミュニケーション

航空機乗務員の宇宙線被ばくが人体にもたらす影響には、まだ相当の不確かさがあります。こうした不確かさが、線量レベルとは釣り合わない不安を人々に与えていることを念頭におく必要があります。不安の解消に有効な取り組みとして第一に挙げられることは、放射線防護の理念や放射線のヒトへの影響などについて、航空機乗務員や航空会社の管理職クラスを対象とした教育を行うことです。専門家が直接疑問に答えること、すぐには答えられない疑問には誠意をもって解決を図ることが大切であると思います。また、被ばく管理のあり方や教育の実施を検討する際には、航空会社の職員や放射線防護の専門家だけにとどまらず、関係する省庁や事業体などのステークホルダーが参加したリスクコミュニケーションを行う必要があると考えられます。また、このようなコミュニケーションの方法や技術に精通した専門家の養成や、多くの関係者が意見交換に積極的に参加できる仕組みを構築して風通しのよい社会を形成することも、間接的ながら重要な課題といえるでしょう。





## 「航空機搭乗者の宇宙線被ばくに関する専門研究会」について

航空機で飛行中には、地上で日常的に浴びているより強い自然放射線に曝される。この放射線強度の上昇は宇宙から来る放射線(宇宙放射線)に由来し、航路が高緯度地域にあるほど、また、フライト時間が長いほど、宇宙放射線により被ばくする放射線の量(線量)は大きくなる。

国際放射線防護委員会(ICRP)は、その1990年勧告等において、ジェット機の運航や宇宙飛行等における宇宙放射線による被ばくを放射線防護の対象(職業被ばく)として考える必要性を指摘した。既に、欧州諸国では、航空機乗務員の被ばくを管理低減するため、国内法の整備等が進められてきた。

我が国ではこれまで、宇宙放射線による被ばくは法規制の対象外とされてきたが、2004年6月、乗務員の団体からの要請に応じる形で文部科学省科学技術・学術政策局放射線安全規制検討会の下に「航空機乗務員等の宇宙線被ばくに関する検討ワーキンググループ」(主査:小佐古敏荘 東大教授、事務局:放射線規制室)が設置され、航空機乗務員の宇宙線被ばくの取り扱い等について幅広い視点から検討が行われた。そして、2005年11月には、航空会社による自主的な被ばく管理を求めること等を明記した指針「航空機乗務員等の宇宙線被ばくに関する検討について」がとりまとめられ、今後の検討は指針を運用する段階へと進もうとしている。

こうした社会的関心の高まりを背景として、放射線防護の専門家を集める日本保健物理学会においても、本問題に対する見解を速やかに社会に対して示し、航空機に搭乗する人々が抱く過度の不安の解消に努めるべきであると考えた。その責務を効率的に果たすため、2004年10月に本専門研究会を設置、航空機搭乗者の宇宙線被ばくに関わる最新の情報を効率的に整理・吟味し、それらを分かり易い言葉で一般に伝える報告書を作成することを目的として活動を続けてきた。その活動の一環として、第39回研究発表会での特別セッション、乗務員の方々を招いての意見交換、そして、企画委員会の協力による「航空機搭乗者の宇宙線被ばくに関するシンポジウム」の開催等も行った。

(別添)

- ・ 同専門研究会 構成員名簿及び開催実績

2006年3月

航空機搭乗者の宇宙線被ばくに関する専門研究会  
構成員名簿

(任期:2004年10月1日~2006年3月31日)

(五十音順)

氏名	所属(2006年3月1日時点)	主担当執筆箇所
佐藤 達彦	日本原子力研究開発機構	3.1
野口 邦和	日本大学 歯学部	2.5, 3.5
古川 雅英 <sup>1</sup>	琉球大学 理学部	1, 4
保田 浩志 <sup>2</sup>	放射線医学総合研究所	2.1~2.3, 3.3, 4
横山 須美	日本原子力研究開発機構	3.6
義澤 宣明	三菱総合研究所	3.2
吉永 信治	放射線医学総合研究所	2.4, 3.4

<sup>1</sup>主査、<sup>2</sup>幹事

(根拠規程)

日本保健物理学会規定「企画委員会運営細則第3条(学会規則第2号)」及び「専門研究会運営細則(細則第2号)」による。

<開催実績>

- 第1回 2004年10月21日
- 第2回 2005年1月13日
- 第3回 2005年4月27日
- 第4回 2005年9月9日
- 第5回 2005年12月16日
- 第6回 2006年3月11日(シンポジウム)

(編集後記)

本報告書は、航空機内宇宙線被ばくに関する現状や重要な論点を多くの人に理解してもらうことを狙いとして、専門研究会のメンバーが分担執筆したものです(担当については前頁の構成員名簿を御参照ください。)。その狙いが少しでも果たせれば幸いです。

執筆にあたっては、専門家だけでなく、宇宙線被ばくのことをよく知らない方にも無理なく読んでもらえるよう、できるだけ平易な表現を用いるよう心掛けました。しかし、言うは易しでなかなか難しく、一読して「非常に分かりやすい!」とはお世辞にも言えません。当初の構想では専門用語集を末尾に付けるつもりだったのですが、取り上げる用語や説明の内容を十分吟味する時間がとれず、省く結果となりましたことは残念でした。分かりにくい専門用語の意味等については、原子力百科事典(ATOMICA)や放射線医学総合研究所の航路線量計算システム(JISCARD)等のウェブサイトを参考にさせていただければと思います。

本研究会は2006年3月で活動を終了しますが、宇宙線被ばくについては、2006年現在も様々な新しい知見が次々と報告されています。近い将来、本書で述べている内容を大きく見直す必要が出てくる可能性もあります。実際、大詰め of 検討が行われているICRPの新勧告では、中性子や陽子の荷重係数値等、航路線量の値を大きく変え得る線量評価法の見直しが予定されています。こうした放射線防護体系の改訂に迅速・的確に対応できる体制を国内に堅持しておくことは、国民生活の安定という見地からも重要なことであると思います。

本研究会での活動を終える私どもも、宇宙線被ばくに関わる最新の科学的知見を収集・集約するための調査研究に引き続き取り組んでいきたいと考えています。読者の皆様からの、更なる御支援御鞭撻をお願い申し上げる次第です。

2006年3月

H.Y.

本報告書につきまして、ご意見ご感想などがございましたら、  
下記編集担当まで是非お寄せください。

保田 浩志（幹事）

〒263-8555 千葉県稲毛区穴川 4-9-1

放射線医学総合研究所 放射線防護研究センター

宇宙線被ばく研究チーム

Tel. 043-206-3233 Fax. 043-251-4531

E-mail: [h\\_yasuda@nirs.go.jp](mailto:h_yasuda@nirs.go.jp)



