航空機乗務員の被ばく管理に関する考察

保田 浩志^{*1}, 藤高 和信^{*1}, 高木 俊治^{*2}, 岩井 敏^{*2}

(2004 年 7 月 12 日受理)

(2004 年 11 月 15 日再受理)

A Study on Radiation Exposure Management for Aircrews

Hiroshi YASUDA,^{*1} Kazunobu FUJITAKA,^{*1} Shunji TAKAGI^{*2} and Satoshi IWAI^{*2}

Some aircrews are certainly anxious about exposure to cosmic radiation. It is thus desired for experts of radiation protection to offer relevant correct information such as route doses and the health effects of low-dose radiation, so as not to make those concerned to suffer from excessive anxiety. In the present study, effective doses on round-trip flights from Tokyo's New International Airport (Narita) to major cities in the world are calculated under conservative conditions. Based on the calculation results, a method for screening the aircrews that need radiation exposure management is discussed.

KEY WORDS: aircrew, cosmic radiation exposure, radiological protection, route dose, CARI code

I 緒 言

ICRP は, 1990 年勧告¹⁾において, 自然放射線であっても管理可能なものは放射線防護の対象にすると述べるとともに, 職業被ばくの範疇に含める必要がある自然放射線源による被ばくの 1 つとして, ジェット機の運航に伴う被ばくを挙げている。その後, 作業者の放射線防護に対する一般原則についてまとめた Publication 75²⁾においても, 民間ジェット機乗務員の被ばくを職業被ばくとして扱うべきであるとの見解が示されている。

こうした勧告を踏まえ, 欧州を中心として, 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する動きが活発になってきた。欧州連合 (EU) は, 1996 年の EU 指令 (Council Directive 96/29/EURATOM)³⁾ の第 42 項において, 以下のような事項から成る国内法の整備を実施するよう求めている。

- ・航空機乗務員の被ばくに関するアセスメント
- ・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の検討
- ・乗務員に対する業務に伴う健康リスクについての説明
- ・女性乗務員に対する第 10 項の適用 (妊婦に対する ALARA (as low as reasonably achievable; 合理的に達成可能な限り低く)¹⁾ 並びに妊娠判明後出産までの期間における 1mSv の線量限度の適用)

この指令を受けて, EU 加盟国では法的な指針が検討・整備されている。例えば, ドイツでは, 放射線防護令 (Radiation Protection Ordinance) において航空機乗務員に対する被ばく管理が義務付けられている。英国では, 実際の運用は各航空会社に任せるとしながらも, 運輸省 (Department for Transport) が航空機被ばくに関するガイドラインを示している⁴⁾。

^{*1} 独立行政法人放射線医学総合研究所 宇宙放射線防護プロジェクト; 千葉市稲毛区穴川 4-9-1 (〒263-8555)

National Institute of Radiological Sciences, International Space Radiation Laboratory; 4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba 263-8555, Japan.

^{*2} 株式会社三菱総合研究所; 東京都千代田区大手町 2-3-6 (〒100-8141)

Mitsubishi Research Institute Inc.; 2-3-6 Otemachi, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8141, Japan.

米国では、放射線防護測定審議会 (NCRP) が 1995 年に刊行した Commentary 12⁵⁾ において、航空機の乗務員及び乗客について放射線防護の考え方及びガイドラインを策定するための検討を開始するべきであるとの提言がなされており、併せて、航空機内での実測を含む関連の調査研究が必要であるとされている。

我が国では、放射線審議会において航空機乗務員等の宇宙線被ばくについての審議が行われ、平成 10 年の意見具申⁶⁾において、「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」とされ、「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る」等とされている。こうした意見も踏まえて、放射線医学総合研究所 (平成 13 年 4 月以降は独立行政法人放射線医学総合研究所) では、航空機被ばくに係る調査研究を実施してきた⁷⁻⁹⁾。

更に、2004 年 2 月、民間航空会社の乗員で組織される団体が宇宙放射線による被ばくに対する適切な管理等を要望する要請書を国 (文部科学省、国土交通省及び厚生労働省) に提出したことをきっかけとして、2004 年 6 月に文部科学省科学技術・学術政策局に「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」(事務局: 原子力安全課放射線規制室) が設置された。2004 年 12 月現在、当該ワーキンググループにおいて、国際的な動向を踏まえつつ、航空機乗務員の被ばくの取り扱い等に関する検討が進められている。

こうした情勢にあって、保健物理 (放射線防護) の専

門家には、人々が宇宙放射線被ばくに対する過度の不安から不利益を被ることの無いよう、信頼にたる情報の収集・提供と啓蒙に努めることが望まれる。本報では、その端緒として、成田発着の比較的便数の多い国際航空路線について、1 フライト当たりの実効線量 (以下「航路線量」という。) の保守的な予測値を示すとともに、乗務員に対して被ばく管理の要否を判断するための実用的な手法について考察する。

II 航路線量の計算方法

航路線量の計算対象には、世界の主要な都市に対する成田発着の国際航空路線を選択した。各都市の位置を Fig.1 に示す。これらの路線について、米国の連邦航空局 (FAA: Federal Aviation Administration) が開発し無償提供している CARI-6 コード¹⁰⁾ を用いて、各路線を往復飛行した場合の実効線量値を計算した。CARI コードは、O'Brien らが開発した Luin コード^{11,12)} をベースとして、FAA の Friedberg ら¹³⁾ が作製した航路線量を簡便に計算するためのプログラムである。航路線量を簡便に計算するためのプログラムには、CARI 以外にも、主にイタリアのグループにより開発された FLUKA コードをベースとする EPCARD¹⁴⁾ や、カナダのグループにより測定で得られた経験式を導入して開発された PCAIRE¹⁵⁾ 等がある。

なお、CARI-6 では、米国放射線防護測定審議会 (NCRP) の提言¹⁶⁾ に基づき、陽子の放射線荷重係数 (w_R) として、ICRP が勧告している値 ($=5$)¹⁾ とは異なる w_R

Fig. 1 Destination cities selected for calculation of route doses from Narita Airport.

値 (=2) を用いて計算を行っている⁵⁾。一方、欧州等において広く用いられている EPCARD 等では、ICRP の 1990 年勧告に従った w_R 値を用いている。また、中性子のエネルギースペクトルについても、CARI-6 のベースとなっている LUIN コードと FLUKA コードでは、100 MeV 付近のピークの有無等に顕著な違いが認められる¹⁷⁻²⁰⁾。このため、同じ飛行条件であっても、どの計算コードを採用するかによって評価される線量が $\sim 30\%$ 異なるという状況が生じている。本報では、現在最終的な検討が行われている 2005 年刊行予定の新勧告において陽子の w_R 値が 5 から 2 に改訂される見込みであることを考慮し、既にその対応がなされている CARI-6 によって航路線量を計算することとした。

計算条件については、CARI-6 にあらかじめ組み込まれている標準的な飛行経路を採用した以外は、線量を安全側 (保守的) に評価するという原則に従って設定した。すなわち、飛行時間については、航空会社の時刻表のとおり離陸から着陸までの時間を与え (待機時間をゼロとし)、離陸から最高高度に達するまでの時間は 15 分、最高高度から着陸するまでの時間は 20 分と短めに設定した (Fig. 2)。上空を定常速度で飛行する時の巡航高度には、通常の運航で予想される最高高度の 40,000 ft (約 12 km) が維持されるとした。ちなみに、長距離の国際便における一般的な巡航高度は 34,000 ~ 37,000 ft (約 10 ~ 11 km) であり、40,000 ft における実効線量率はその平均的な高度に対して 20 ~ 30% 高い値となる。

航空機高度の放射線環境は、太陽活動 (太陽磁場) に

よっても大きな影響を受ける⁵⁾。太陽磁場の強さはヘリオセントリックポテンシャルの値で示されるが、これが大きいほど、大気圏に侵入する銀河宇宙線の量が減るため航空機高度での宇宙放射線強度は一般に弱くなる。ちなみに、大規模な太陽フレアが起こった 2003 年 11 月には、ヘリオセントリックポテンシャルは前後の月に比べて 30% 程度高い値となり²¹⁾、地表付近での宇宙放射線の強度が低下したことが各地で観測された²²⁾。Fig. 3 に、FAA が公表・提供している過去 45 年分 (1958 年 1 月 ~ 2003 年 7 月) のヘリオセントリックポテンシャルの月毎の平均値を示す。太陽活動はおおまかには 11 年弱の周

Fig. 3 Monthly averaged data of heliocentric potentials taken for 45 years from January 1958 to July 2003; these data are offered by the U. S. Federal Aviation Administration.

Fig. 2 The general flight pattern of an international flight. Conservative conditions such as the highest cruising altitude and short ascending or descending time were presumed in the calculation.

Table 1 Locations (latitude and longitude) of selected destination cities and flying times of round-trip flights to these cities from Narita Airport.

City		Flying time [h:m]		Effective dose [μSv]			Boarding restriction number (N)	
		Outward	Homeward	Outward	HomeWard	Total	Below 1 mSv y^{-1}	Below 6 mSv y^{-1}
America	New York	12:20	14:25	96	113	210	4.8	28.6
	Chicago	11:25	13:30	86	103	189	5.3	31.7
	Dallas	11:05	13:35	74	92	166	6.0	36.1
	San Francisco	9:00	11:30	49	63	112	8.9	53.4
	Los Angeles	9:25	12:00	50	65	115	8.7	52.0
	Honolulu	6:35	8:55	23	31	54	18.5	111
	Guam	3:35	3:45	10	10	20	49.3	296
	Vancouver	8:30	10:00	55	65	120	8.3	50.0
	Sao Paulo (via Vancouver)	21:55	23:55	134	154	285	3.5	21.1
	Moscow	9:55	9:20	68	64	131	7.6	45.7
Europe	London	12:40	11:50	97	91	188	5.3	32.0
	Paris	12:40	11:55	96	90	185	5.4	32.4
	Amsterdam	12:05	11:25	92	86	178	5.6	33.7
	Madrid (via Amsterdam)	14:30	13:50	104	99	203	4.9	29.6
	Frankfurt	12:10	11:20	91	84	175	5.7	34.4
	Zurich	12:35	11:50	92	87	179	5.6	33.5
	Rome	12:45	12:15	87	84	170	5.9	35.2
	Vienna	12:20	11:25	88	81	169	5.9	35.6
Asia	Beijing	4:05	3:15	14	11	25	39.7	238
	Seoul	2:40	2:20	8	7	16	64.1	385
	Shanghai	3:25	2:40	11	8	18	54.3	326
	Hong Kong	5:10	3:45	15	11	26	38.2	229
	Taipei	3:50	2:55	11	8	20	51.0	306
	Delhi	9:40	7:20	34	25	59	17.0	102
	Bangkok	7:00	5:40	20	16	36	27.5	165
	Manila	4:50	4:00	14	11	25	40.7	244
	Ho Chi Minh	6:55	5:35	20	16	35	28.3	170
	Singapore	7:25	6:30	21	18	39	26.0	156
	Jakarta	7:45	6:50	22	19	40	24.8	149
Oceania	Sydney	9:30	9:40	31	31	62	16.1	96.5
	Cairns	7:15	7:20	21	21	42	24.0	144
	Brisbane	8:40	8:50	26	27	53	18.8	113
	Auckland	10:30	10:55	35	36	70	14.2	85.2

期で変動を繰り返しているが、本報では、年間の実効線量を過小評価しないようにする観点から、**Fig. 3**に示したデータの5パーセンタイル値を採用した。

III 計算結果と考察

世界の各都市 (**Fig. 1**) に対する成田発着の国際便について、前章で説明した保守的な条件で計算された航路線量の値を **Table 1** にまとめる。これらのデータより、地磁気緯度の高いニューヨークやロンドン等へのフライトでは実効線量が高くなることが分かる。例えば、シカゴへの往復飛行 (搭乗時間: 25 h) における実効線量値

は 0.2 mSv に達し、搭乗時間 (21 h) の近い豪州オーストラランドへの飛行で浴びる線量の3倍近くになっている。この違いの理由は、地磁気の構造 (地球をとりまく磁力線の分布) から、高緯度地方ほど宇宙線が大気圏内に入り易いことに因る。

こうした比較的高線量の宇宙線を浴びる乗務員に対しては、何らかの被ばく管理の対策が求められる可能性がある。被ばくを低減するために飛行する経路や高度を変更することは、運用上相当の困難が伴うため合理的とは言えない。現実的な方法としては、放射線防護の基本理念である ALARA の考え方に従い、乗務計画を策定する

段階等において、同じ乗務員に線量の高い路線が集中しないよう配慮することが望まれる。

このような考えに基づき、EU 理事会指令³⁾において示されている妊婦に対する線量限度の 1 mSv 並びにドイツの放射線防護令において乗務員の被ばく管理を要する基準とされている 6 mSv を被ばく制限の基準値とした場合について、それぞれの基準値を超えない年間の最大往復飛行回数（搭乗制限回数： N ）を試算した。その結果を **Table 1** に併せて示す。

一般的な乗務員の年間搭乗時間（800～900 h）を考えると、被ばく管理の基準値を 1 mSv に設定した場合には、ほぼすべての乗務員が管理対象となる。一方、6 mSv を基準値とした場合には、限られた高緯度路線の乗務員のみが対象となる。

一例として、飛行時間が共に 20 時間前後である 2 つの路線：成田-サンフランシスコ便（SFO）及び成田-シドニー便（SDY）を取り上げる。まず、1 mSv を超えないとした場合、**Table 1** にあるように、SFO（往復飛行での実効線量 $E=112 \mu\text{Sv}$ ）に係る搭乗制限回数は 9 回、SDY（ $E=62 \mu\text{Sv}$ ）で 16 回となる。これらの値は、1 年間の巡航飛行時間（block hour）を 800 h～900 h として推定される現実的な搭乗回数（往復 40 回程度）を大きく下回る。したがって、何らかの被ばく管理のための措置が必要と判断される。

一方、6 mSv を超えないとした場合、SFO に係る搭乗制限回数は 53 回、SDY では 96 回となり、これらが保守的な線量値に基づいた試算であることを加味すれば、厳密な被ばく管理は要しないと判断される。

なお、1 年間に 2 路線を飛行する乗務員については、被ばく管理の要否に関する判断基準は以下のように与えることができる。

$$\left(\frac{n_i}{N_i} + \frac{n_j}{N_j} \right) > 1 \quad (1)$$

ここで、 n_i 及び n_j は、ある乗務員が航路 i 及び航路 j をそれぞれ 1 年間に飛行する見込みの回数、 N_i 及び N_j は各航路の搭乗制限回数である。例えば、1 年間にニューヨーク便往復 20 回及びホノルル便往復 20 回の乗務（年間搭乗時間：約 850 時間）を行う場合、被ばく管理の要否は以下のように判断される：

- ・基準値が 1 mSv y^{-1} の場合： $20/4.8+20/18.5=5.25>1$
→管理必要。
- ・基準値が 6 mSv y^{-1} の場合： $20/28.6+20/111.1=0.88<1$
→管理不要。

式 (1) の考え方を拡張することにより、担当する路線が 3 路線以上に及ぶような多様な乗務の形態も含めた被ばく管理の要否に係る判断基準は、以下のような一般式で与えることができる：

$$\sum_i \frac{n_i}{N_i} > 1 \quad (2)$$

なお、この判断基準は、年間業務計画を策定する時点等において、ある乗務員について何らかの管理を要するかどうかのスクリーニングに用いるべきものである。実際に乗務員個人が浴びた線量については、太陽活動の突発的な変動も念頭におき²³⁾、フライトを運航する毎に正確な被ばく線量を測定評価し、予測値が過小評価になっていないことを検証することが望まれる。

IV 結 論

航空機搭乗を職務とする人々の一部が宇宙放射線による被ばくに漠然とした不安を感じていることは確かである。今後、この不安が飛行機を頻繁に利用する企業家や妊婦等一般公衆へ広がることが懸念される。この問題に対して保健物理（放射線防護）の専門家に期待されている役割として、航空機搭乗に伴う被ばく線量やその線量レベルが生体に及ぼす影響等に関し、信頼にたる正確な科学的情報を提供していくことがあると思われる。本報で示した計算データ等が、航空機に搭乗する人々の不安の軽減に少しでも役立つのであれば嬉しい。

なお、本報では、直接線量値によって搭乗制限を論じるのではなく、放射線被ばくを考慮して導出された搭乗制限回数という任意のパラメータを用いる手法を提案した。これは、実際に搭乗制限を行う場合には、放射線被ばくだけでなく、他の健康に影響を及ぼす要因や運用上の制約等を考慮した、総合的な判断が求められるとの考えに拠ることを申し添えておく。

一方、今後予想される線量評価体系等の変更に伴い、過去に報告された航路線量値について改訂が求められる可能性がある。2005 年に刊行が予定されている ICRP の新勧告では、陽子の荷重係数が 5 から 2 に下げられるだけでなく、中性子（<1 MeV）の荷重係数も全体に小さくなる見込みである。こうした変更を受けて、本報で提示した航路線量や搭乗制限回数の値についても見直しが必要になる可能性がある。このような将来の線量評価体系の変更に迅速かつ的確に対応するための体制を国内に整えておくことは、国民生活の安定という見地から望ましいことであると思う。

CARI コードの使用を快く許可してくださいました, 米国連邦航空局の Wallace FRIEDBERG 博士に謝意を表します。また, 本論文の投稿を促していただきました, 本学会の第 38 回研究発表会大会実行委員会 (委員長: 小田啓二・神戸大学教授) の皆様に, この場をお借りして深謝いたします。

参 考 文 献

- 1) International Commission on Radiological Protection (ICRP); Recommendation of the International Commission on Radiological Protection, Publ.60, *Ann. ICRP*, **21** (1990).
- 2) International Commission on Radiological Protection (ICRP); General principles for the radiation protection of workers, Publ.75, *Ann. ICRP*, **27** (1997).
- 3) European Union (EU); Council Directive 96/29/EURATOM of 13 May 1996 laying down the basic safety standards for protection of the health of workers and the general public against the dangers arising from ionizing radiation, Off. J. Eur. Commun. L159 (1996).
- 4) U. K. Department of Transport; Protection of air crew from cosmic radiation: Guidance material, Department of Transport web site, (2004), http://www.dft.gov.uk/stellent/groups/dft_aviation/documents/page/dft_aviation_503468.hcsp
- 5) National Council of Radiation Protection and Measurements (NCRP); Radiation exposure and high-altitude flight, NCRP Commentary No.12, p.1-23 (1995).
- 6) 放射線審議会; 「ICRP1990 年勧告 (Pub.60) の国内制度等への取入れについて (意見具申)」, 第 68 回総会会議資料 (1998), 文部科学省, 東京.
- 7) H. YASUDA and K. FUJITAKA; Cosmic radiation protection dosimetry using the Electronic Personal Dosemeter (EPD) in selected international flights, *J. Radiat. Res.*, **42**, 57-68 (2001).
- 8) Y. UCHIHORI, E. BENTON, J. MOELLER and G. BENDRICK; Radiation measurements aboard NASA ER-2 high altitude aircraft with the Liulin-4J portable spectrometer, *Adv. Space Res.*, **32**, 41-46 (2003).
- 9) M. TAKADA, I. AWAYA, S. IWAI, M. IWAOKA, M. MASUDA, T. KIMURA, S. TAKAGI, O. SATO, T. NAKAMURA and K. FUJITAKA; Progress report on the Phoswich neutron detector to measure high-energetic neutron spectra onboard an aircraft and a spacecraft, *J. Nucl. Sci. Technol. Suppl.*, **4**, 399-402 (2004).
- 10) U. S. Federal Aviation Administration; CARI-6, Radiobiology Research Team web site, (2004), http://www.cami.jccbi.gov/AAM-600/Radiation/radio_CARI6.htm
- 11) K. O'BRIEN and J. E. McLAUGHLIN; Calculation of dose and dose-equivalent rates to man in the atmosphere from galactic cosmic rays, USAEC Report HASL-228 (1970), Health and Safety Laboratory, New York.
- 12) K. O'BRIEN; LUIN, a code for the calculation of cosmic ray propagation in the atmosphere, Technical Report EML-338 (update of HASL-275) (1978), National Technical Information Service, U.S. Department of Energy, Springfield, VA.
- 13) W. FRIEDBERG, K. COPELAND, F. E. DUKE, K. O'BRIEN and E. B. DARDEN, Jr.; Guidelines and technical information provided by the US federal aviation administration to promote radiation safety for air carrier crew members, *Radiat. Prot. Dosim.*, **86**, 323-327 (1999).
- 14) H. SCHRAUBE, V. MARES, S. ROESLER and W. HEINRICH; Experimental verification and calculation of aviation route doses, *Radiat. Prot. Dosim.*, **86**, 323-327 (1999).
- 15) B. J. LEWIS, M. DESORMEAUX, A. R. GREEN, L. G. I. BENNETT, A. BUTLER, M. MCCALL and J. C. SAEZ VARGA; Assessment of aircrew radiation exposure by further measurements and model development, *Radiat. Prot. Dosim.*, **111**, 151-171 (2004).
- 16) National Council of Radiation Protection and Measurements (NCRP); Limitation of exposure to ionizing radiation, NCRP Report 116, p.7 (1993).
- 17) A. FERRARI, M. PELLICIONI and T. RANCATI; Calculation of the radiation environment caused by galactic cosmic rays for determining air crew exposure, *Radiat. Prot. Dosim.*, **93**, 101-114 (2001).
- 18) H. SCHRAUBE, G. LEUTHOLD, S. ROESLER and W. HEINRICH; Neutron spectra at flight altitudes and their radiological estimation, *Adv. Space Res.*, **21**, 1727-1738 (1998).
- 19) P. GOLDHAGEN; Overview of aircraft radiation exposure and recent ER-2 measurements, *Health Phys.*,

- 79, 526-544 (2000).
- 20) P. GOLDHAGEN, M. REGINATTO, T. KNISS, J. W. WILSON, R. C. SINGLETERRY, I. W. JONES and W. Van STEVENINCK; Measurement of the energy spectrum of cosmic-ray induced neutrons aboard an ER-2 high-altitude airplane, *Nucl. Instrum. Meth.*, **A 476**, 42-51 (2002).
- 21) U. S. Federal Aviation Administration; Heliocentric potential, Radiobiology Research Team web site, (2004), http://www.cami.jccbi.gov/AAM-600/Radiation/radio_helio.htm
- 22) 例えば, 藤波直人, 渡辺哲也, 荒木智徳, 水本美佳, 筒井剛毅; 環境放射線モニタに認められた太陽フレアの影響, 保健物理, **39**(3), 215-219 (2004).
- 23) P. LANTOS and N. FULLER; History of the solar particle event radiation doses on-board aeroplanes using

a semi-empirical model and Concorde measurements, *Radiat. Prot. Dosim.*, **104**, 199-210 (2003).

保田 浩志 (やすだ ひろし)

1992 年京都大学大学院工学研究科衛生工学専攻博士後期課程中退。同年 4 月, 放射線医学総合研究所に入所。京都大学博士 (工学)。1999 ~ 2000 年米国 NASA ジョンソンスペースセンター Visiting Scientist。現職は, 独立行政法人放射線医学総合研究所放射線安全研究センター宇宙放射線防護プロジェクト第 2 チームリーダー。主な研究テーマは, 宇宙放射線防護のための線量測定に関する研究開発。趣味は絵を描くこと。

E-mail: h_yasuda@nirs.go.jp