

# 航空與氣候變遷

## Aviation and climate change

楊憶婷<sup>1</sup>

### 摘要

#### 一、前言

國際航空運輸對全世界各個國家而言，都是非常重要的交通運輸工具，也是促進經濟發展的重要交通方式。根據歐盟執委會 (European Commission) 統計，若將全球的航空業比喻為一個國家，其溫室氣體排放量名列前十名；聯合國環境規劃署 (United Nations Environment Program, UNEP) 在 2019 年提出的「第 6 期全球環境展望 (Global Environment Outlook 6, GEO-6)」，證實燃料燃燒產生的全球人為二氧化碳排放量中，航空業佔將近 2%。但航空運輸業對全球運輸及經濟十分重要，減少全球航空業排放量是非常困難的，因為經濟持續發展，需要航空運輸的人或物品會越多，航空業排放溫室氣體量也會提高。

在過去 40 年中，全球航空業在亞洲及其他開發中國家中迅速發展，使得國際航運所需燃料及對應二氧化碳排放量均明顯增加。從圖 1 中可知，1960 年至 2018 年二氧化碳排放成長是每年 15 Tg，且不論是整體人為排放或航空業排放二氧化碳都是逐年成長。在收益旅客公里 (RPK)<sup>2</sup> 及可售座位公里 (ASK)<sup>3</sup> 在逐年變化顯示不斷增加，且每收益旅客公里所耗費的二氧化碳則逐年下降，表示航空運輸的技

---

<sup>1</sup> 國立科學工藝博物館

<sup>2</sup> 收益乘客公里是衡量航空公司客運運量的指標，即一個航班收益旅客數與飛行公里數的乘積。

<sup>3</sup> 可售座位公里是衡量航空公司客運運能的指標，即一個航班提供的座位數與飛行公里數的乘積。

術不斷成長，飛機尺寸及客座率增加使得飛機效率增加，直到 2018 年可以達到 125 g CO<sub>2</sub> RPK<sup>-1</sup>。此外，以 2017 年 Airbus 公司的 1229 架航空器訂單及波音公司 1031 架航空器訂單中顯示(Airbus, 2017; Boeing, 2018)，亞太地區航空公司佔了訂單中的 20%及 38%，且 Airbus 公司預計未來兩年內 41% 訂單均來自亞太地區，足以顯示亞洲地區航空運輸業正迅速發展。

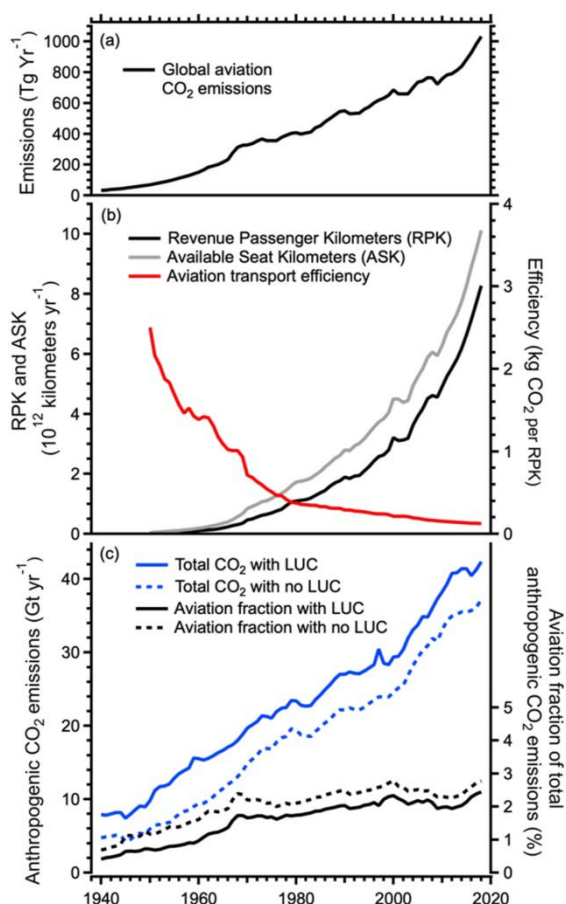


圖 1：1940 至 2018 年間全球交通運輸成長及二氧化碳排放。(a)為全球二氧化碳排放年際變化；(b)為收益旅客公里(Revenue passenger kilometers, RPK)、可售座位公里(Available seat kilometers, ASK)、及每收益旅客公里所耗費的二氧化碳(Efficiency)年際變化；(c)人為二氧化碳排放及航空業造成二氧化碳排放年際變化，虛線表示不考慮土地利用變化。

國際間對溫室氣體人為排放造成氣候變化已開始有很多政策上的努力，例如：聯合國認為需要制定一個具有國際約束力的議定書達到溫室氣體減量目標，故於1997年通過了「京都議定書」，將大氣中的溫室氣體穩定在一個適當的水準，並在2004年於俄羅斯簽訂，2005年生效。其中京都議定書第2條第2項指出，締約國應分別透過國際民航組織(International Civil Aviation Organization, ICAO)及國際海事組織(International Marine Organization)努力限制或減少航空與航海燃料所產出的不受「蒙特婁議定書」管制的溫室氣體排放。到了2015年聯合國氣候峰會中通過「巴黎協定」，希望能將全球平均氣溫升幅控制在與工業時代相比最多攝氏2度以內，以減少氣候變遷帶來的風險。但值得注意的是，航空業卻沒有在約束產業中，而航空業跨越各國領空排放多發生在國境外，很難歸屬排放責任。

但隨著地球永續發展的意識抬頭，航空業漸漸產業對地球環境的影響。每隔三年，國際民航組織的環境保護委員會(Committee on aviation environment protection)便會針對航空業造成未來環境影響進行評估，評估內容包含：航空器造成的溫室氣體排放、航空器的噪音汙染及航空器引擎排放對當地空氣汙染的影響。

IPCC(2013及2018)指出近數十年來全球變暖的主因是來自人為造成二氧化碳濃度增加。在交通便利及經濟發展的同時，航空器不僅因溫室氣體排放造成氣候變化，也透過其他方式加速全球氣候變遷(圖2)，例如：飛機凝結尾、二氧化碳、水蒸氣、氮氧化物及煙灰可使大氣溫度增加，硫酸鹽氣溶膠而可造成大氣溫度下降，其中氮氧化物會造成短期間臭氧增加，進而使大氣溫度增加，但進而產生甲烷、及造成平流層水蒸氣減少、長期下來臭氧減少等效應，

會使大氣溫度下降。航空業造成二氧化碳及非二氧化碳的排放對氣候的影響，是物理、化學、運輸及輻射學的複雜過程。航空業之於氣候變遷的議題非常廣泛，本文將針對目前的研究有關航空運輸過程可能造成的氣候變化簡介。

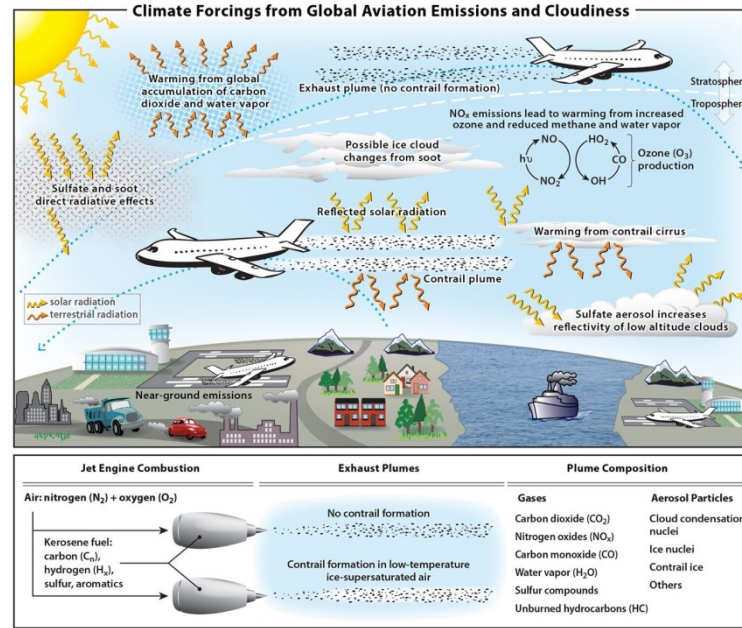


圖 2：因航空器排放及造成雲量增加對氣候的影響。

## 二、航空業造成有效輻射驅動力

Lee et al. (2020)嘗試計算因航空器排放所產生的各個項目，相對的有效輻射驅動力(effective radiative forcing, ERF)，ERF為正值表示有增溫的效果，反之有冷卻的效果，其單位為每平方公尺瓦特，Wm<sup>-2</sup>(IPCC, 2013)。

### (一) 二氧化碳有效輻射驅動力

計算二氧化碳的濃度需使用全球碳循環模式，Lee et al. (2020)以 LinClim (Sausen and Schumann, 2000), CICERO-SCM (Fuglestvedt and Berntsen, 1999; Skeie et al., 2017)及 FaIR (Millar et al.,2017)三種

模式來計算，2018 年航空器排放二氧化碳濃度分別為 2.9、2.4 和 2.4 ppm，在過去 20 年中大約成長 2 倍。換算出 2018 年的二氧化碳有效輻射驅動力分別為 38.6、32.0 和 32.4  $\text{mWm}^{-2}$ ，平均為 34.3  $\text{mWm}^{-2}$ 。

## (二) 氮氧化物有效輻射驅動力

航空業的氮氧化物排放對於臭氧( $\text{O}_3$ )、甲烷( $\text{CH}_4$ )及活化氫( $\text{HO}_x$ )均有影響。統整過去的研究(IPCC, 1999; Sausen et al., 2005; Stordal et al., 2006; Köhler et al., 2008; Hoor et al., 2009; Myhre et al., 2011; Frömming et al., 2012; Olivie et al., 2012; Gottschaldt et al., 2013; Köhler et al., 2013; Olsen et al., 2013; Skowron et al., 2013; Khodayari et al., 2014a; Khodayari et al., 2014b; Søvde et al., 2014; Skowron et al., 2015; Pitari et al., 2015; Kapadia et al., 2016; Pitari et al., 2016; Lund et al., 2017)共 18 個模式顯示結果如下圖 3，航空器排放氮氧化物造成短期臭氧增加導致有效輻射驅動力為正值，但長期甲烷生命期及濃度減少、長期臭氧及平流層水蒸氣 (Stratospheric Water Vapor, SWV) 減少，其有效輻射驅動力為負值 (IPCC, 1999; Sausen et al., 2005; Lee et al. 2009; Holmes et al., 2011; Myhre et al., 2011)。換算 2018 年的氮氧化物有效輻射驅動力約為 17.5  $\text{mW m}^{-2}$ ，但研究中也同時提到航空器排放的氮氧化物估算有許多不確定性及爭議。

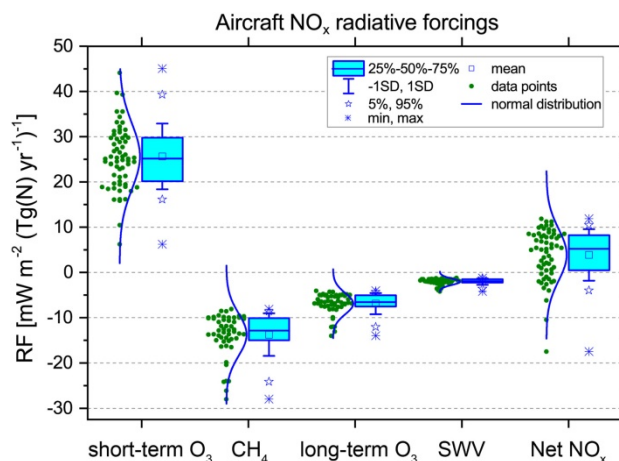


圖 3：18 個模式對於航空業排放氮氧化物所產生輻射驅動力，包含短期臭氧造成正影響、甲烷、長期臭氧及平流層水蒸氣造成負影響。

### (三) 水蒸氣排放有效輻射驅動力

航空業的水蒸氣排放大多發生在北半球的平流層底層，由於對流層頂會隨著季節性有高度的變化，因此因飛機排放水蒸氣所造成水平和垂直水氣分佈變化複雜，也使得氣候強迫作用不易估算。研究中針對過去 9 個研究探討航空業排放平流層水蒸氣的影響估算 (IPCC, 1999; Marquart et al., 2001; Gauss et al., 2003; Ponater et al., 2006; Frömming et al., 2012; Wilcox et al., 2012; Lim et al., 2015; Pitari et al., 2015 and Brasseur et al., 2016)，平流層水蒸氣有效輻射驅動力約介於  $0.4 \text{ mW m}^{-2}$  至  $3.0 \text{ mW m}^{-2}$  間，主要差異是來自於各研究使用的運輸模式不同。估算 2018 年平流層水蒸氣排放的有效輻射驅動力為  $2.0 \text{ mWm}^{-2}$ 。

### (四) 飛機凝結尾卷雲有效輻射驅動力

在航空器飛行的高度周圍大氣若對冰而言是過飽和的，飛機通過時排放煤煙等微粒可以做為凝結核，產生冰結晶有助於生成凝結尾，增加全球的雲量 (IPCC, 1999)，跟著飛機尾產生一條卷雲，也

是俗稱的飛機雲。在白天時，有阻擋短波輻射及長波輻射的作用，但在晚上只有阻擋長波輻射的作用。

Bock and Burkhardt (2019)研究中使用 ECHAM5-CCMod 氣候模式，該模式具有飛機凝結尾卷雲參數化，探討因航空器產生飛機凝結卷雲對 2050 年氣候的影響，研究中也考慮了航空運輸需求逐年成長及引擎效率提升，結果發現從 2006 年至 2050 年間，全球的飛機凝結尾卷雲輻射驅動力增加了 3 倍(從  $49\text{mWm}^{-2}$  增加為  $159\text{Wm}^{-2}$ )。全球各個地區因航空運輸所產生飛機凝結卷雲進而增加輻射驅動力隨時間而增加，尤其以東亞地區相對增長幅度最大。研究中指出引擎效率提升、燃料改善及使用替代燃料，航空業的排碳量會降低，也會使排放凝結核的顆粒減少，進而減少飛機凝結卷雲的生成。根據 Lee et al. (2020)估計，2018 年全球飛機雲造成的有效輻射驅動力為  $57\text{mWm}^{-2}$ 。

#### (五) 淨有效輻射驅動力

綜合以上討論將結果以圖 4 表示，圖 4 為 1940 至 2018 年間航空器排放造成的各項有效輻射驅動力。從圖中顯示，飛機凝結尾卷雲為有效輻射驅動影響最大，其次是二氧化碳及氮氧化物的排放。在 1940-2018 年間，航空器排放造成淨有效輻射驅動力達  $100.9\text{mWm}^{-2}$ ，其中非二氧化碳產生的淨有效輻射驅動力達到  $66.6\text{mWm}^{-2}$ ，占了 66%。IPCC 針對 1750-2011 年提供人為造成的有效輻射驅動力達  $2290\text{mWm}^{-2}$ ，如以 2011 年的資料而言，航空器總排放對淨有效輻射驅動力貢獻達 3.5%，航空器排放二氧化碳對淨有效輻射驅動力貢獻達 1.59% (Myhre et al., 2013)。

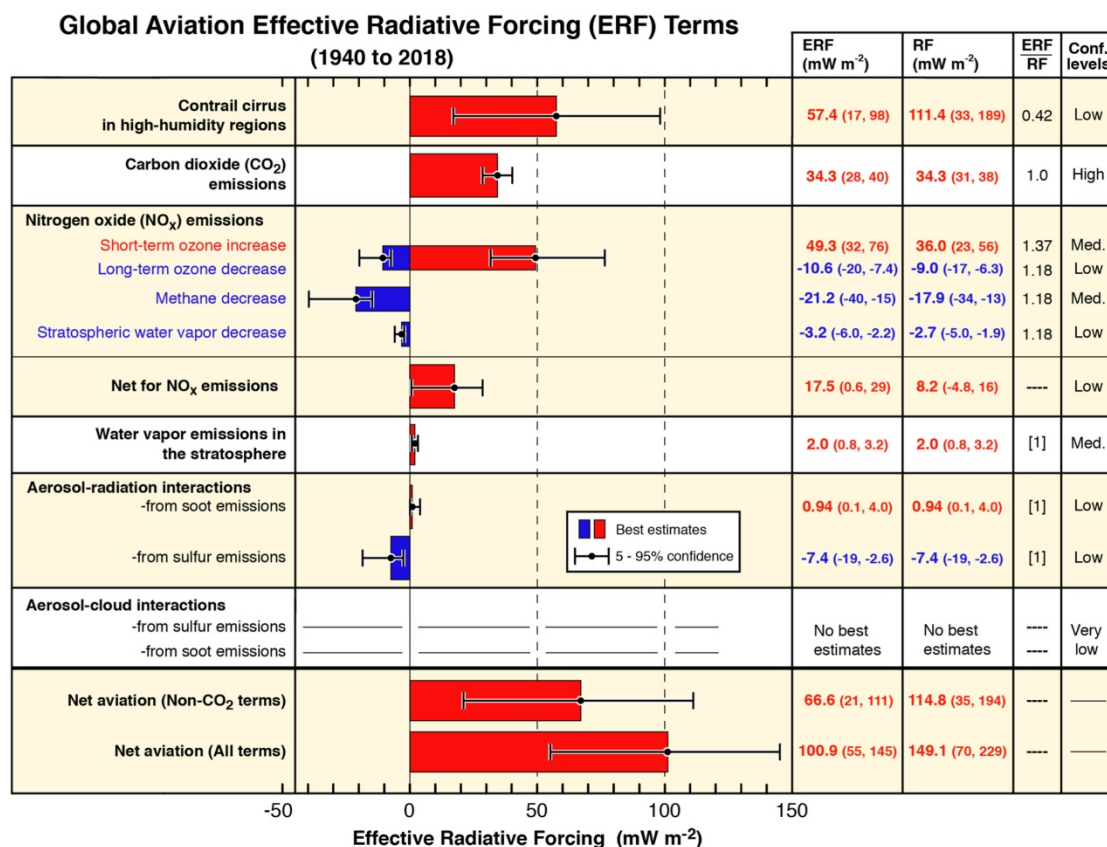


圖 4：1940 年至 2018 年間全球航空器造成的有效輻射驅動力。藍色及紅色分別表示有效輻射驅動力造成降溫及增溫作用，長條表示最佳估算的範圍，黑色線範圍表示 5%-95% 間的信心度。

### 三、國際民航組織政策

2016 年 ICAO 第 39 屆大會中，ICAO 針對國際航空業的溫室氣體排放有實際的管制，ICAO 希望每年將航空燃料效率提高 2%，並從 2020 年起，國際民用航空須達到「零碳成長」，另通過「國際航空業碳抵消與減排計畫」(Carbon Offsetting and Reduction Scheme for international Aviation, CORSIA)，顯示 ICAO 希望降低航空器造成氣候變化影響的決心，各界人士及非營利組織都持正面且支持的態度，但這些政策並未包含國內線航空管制。CORSIA 預計分階段實施，分為示範階段、第一階段及第二階段，分別為 2021 年至 2023 年、2024 年至 2026 年及 2027 年至 2035 年。示範階段及第一



階段中，均為自願性參加，到第二階段後，所有 ICAO 會員國除了低度開發、小島型與內陸型開發中國家及國際航空活動極少的國家外，其餘國家均有義務參加。從 2019 年起，許多國際航空公司開始蒐集其下二氧化碳排放資訊、ICAO 也提供小型航空公司監測及申報二氧化碳排放量的簡化工具。

從國內航空公司的企業社會責任中，可以發現各航空公司也在著手朝向零排碳的目標。例如：華航及長榮均以國際航空運輸協會 (International Air Transport Association, IATA) 設定的三大目標及四大策略來執行，第一階段(2009-2020)中平均每年提升 1.5% 使用燃油效率；第二階段(2020)中零碳成長；第三階段(2020-2050)中 2050 年排碳量減至 2005 年排放水準的 50%。透過提升科技技術(機身減重、使用替代能源等)、改善營運操作(改善機場的基礎設施及營運管理效率等)、改善基礎設施效率(改善飛航作業流程、精進節油管理等)、採用經濟措施(有效的經濟措施如抵換及排放交易等)，逐步達成階段目標。可以發現，航空公司對零排碳的決心，但非二氧化碳的影響尚未納入其中。

#### 四、結論與討論

航空運輸與各國家經濟發展有密切相關，隨著人類對航空運輸的依賴及氣候變遷議題的重視，世界各國開始重視航空器造成的氣候影響。如果將航空業比喻為一個國家，航空業造成的人為二氧化碳排放占了全世界人為二氧化碳排放約 2%。但航空器航行時，不只有排放二氧化碳，其他的排放物可能對全球的氣候產生影響，例如：飛機凝結尾、水蒸氣、氮氧化物及煙灰可使大氣溫度增加，硫酸鹽氣溶膠而可造成大氣溫度下降，其中氮氧化物會造成短期間臭氧增

加，進而使大氣溫度增加，但進而產生甲烷、及造成平流層水蒸氣減少、長期下來臭氧減少等效應，會使大氣溫度下降。

另外，最新的研究顯示，因航空業產生的氣候影響中，三分之二來自於飛機凝結尾、氮氧化物、水蒸氣、煙灰及其他氣溶膠，其餘則是歸因於 1940-2018 年間排放常生命期的 326 億噸二氧化碳對大氣增溫的影響，而這個數量等同於 2010 年全球二氧化碳的總排放量。用 ERF 標準研究顯示，飛機軌跡變為卷雲使氣候變暖的影響最大。

IPCC(2018)提出，除了要達成且維持全球人為二氧化碳淨零排放，且要降低非二氧化碳的輻射驅動力，才能停止未來數十年間因人為導致全球氣候變化。因此，航空業應該要重視二氧化碳淨零排放目標外，非二氧化碳的輻射驅動力作用也必須重視，才有機會在未來停止或減緩人為導致的氣候變化。

## 參考文獻

- Airbus, Global Market Forecast 2017–2036 (Airbus, France 2017).
- Boeing, Orders and Deliveries for January 2018,  
[http://www.boeing.com/commercial/#/orders-deliveries\(2018\)](http://www.boeing.com/commercial/#/orders-deliveries(2018)).
- Bock L., U. Burkhardt, Contrail cirrus radiative forcing for future air traffic. *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 8163–8174 (2019).
- Brasseur, G. P., M. Gupta, B. E. Anderson, S. Balasubramanian, S. Barrett, D. Duda, G. Fleming, P. M. Forster, J. Fuglestedt, Impact of Aviation on Climate: FAA’s Aviation Climate Change Research Initiative (ACCRI) Phase II. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97, 561–583,  
<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00089.1> (2016).
- Frömming, C., M. Ponater, K. Dahlmann, V. Grewe, D. S. Lee, R. Sausen, Aviation-induced radiative forcing and surface temperature change in dependency of the emission altitude. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 117, 9717–9736, <https://doi.org/10.1029/2012JD018204> (2012).
- Gauss, M., I.S.A. Isaksen, S. Wong, W.C. Wang, Impact of H<sub>2</sub>O emissions from cryoplanes and kerosene aircraft on the atmosphere. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 108, 4304, <https://doi.org/10.1029/2002JD002623> (2003).
- Gottschaldt, K., C. Voigt, P. Jöckel, M. Righi, R. Deckert, S. Dietmüller, Global sensitivity of aviation NO<sub>x</sub> effects to the HNO<sub>3</sub>-forming channel of the HO<sub>2</sub> + NO reaction. *Atmospheric Chemistry and Physics* 13, 3003–3025,  
<https://doi.org/10.5194/acp-13-3003-2013> (2013).
- Holmes, C. D., Q. Tang, M. J. Prather, Uncertainties in climate assessment for the case of aviation NO. *Proceedings of the National Academy of Science U.S.A.* 108(27), 10997–11002, <https://doi.org/10.1073/pnas.1101458108> (2011).
- Hoor, P., J. Borken-Kleefeld, D. Caro, O. Dessens, O. Endresen, M. Gauss, V. Grewe, D. Hauglustaine, I. S. A. Isaksen, P. Jöckel, J. Lelieveld, G. Myhre, E. Meijer, D. Olivié, M. Prather, C. Schnadt-Poberaj, K. P. Shine, J. Staehelin, Q. Tang, J. van Aardenne, P. van Velthoven, R. Sausen, The impact of traffic emissions on atmospheric ozone and OH: results from QUANTIFY. *Atmospheric Chemistry and Physics* 9, 3113–3136, <https://doi.org/10.5194/acp-9-3113-2009> (2009).
- IPCC (1999), “Aviation and the Global Atmosphere”, Intergovernmental Panel on Climate Change 963 Special Report, J. E. Penner, D. H. Lister, D. J. Griggs, D. J. Dokken, M. McFarland, Eds. (Cambridge 964 University Press, Cambridge, UK, 1999) <https://www.ipcc.ch/report/aviation-and-the-global-atmosphere-9652/>.
- IPCC (2013) “Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of

- Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change”, T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P. M. Midgley, Eds. (Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013).  
<https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
- IPCC (2018) “Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty”, Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds), (2018).  
<https://www.ipcc.ch/sr15/download/>
- Kapadia, Z. Z., D. V. Spracklen, S. R. Arnold, D. J. Borman, G. W. Mann, K. J. Pringle, S. A. Monks, C. L. Reddington, F. Benduhn, A. Rap, C. E. Scott, E. W. Butt, M. Yoshioka, Impacts of aviation fuel sulfur content on climate and human health. *Atmospheric Chemistry and Physics* 16, 10521–10541,  
<https://doi.org/10.5194/acp-16-10521-2016> (2016).
- Khodayari, A., S. C. Olsen, D. J. Wuebbles, Evaluation of aviation NO<sub>x</sub>-induced radiative forcings for 2005 and 2050. *Atmospheric Environment* 91, 95–103,  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.03.044> (2014a).
- Khodayari, A., S. Tilmes, S. C. Olsen, D. B. Phoenix, D. J. Wuebbles, J.-F. Lamarque, C.-C. Chen, Aviation 2006 NO<sub>x</sub>-induced effects on atmospheric ozone and HO<sub>x</sub> in Community Earth System Model (CESM). *Atmospheric Chemistry and Physics* 14, 9925–9939,  
<https://doi.org/10.5194/acp-14-9925-2014>(2014b).
- Köhler, M. O., G. Rädcl, O. Dessens, K. P. Shine, H. L. Rogers, O. Wild, J. A. Pyle, Impact of perturbation of nitrogen oxide emissions from global aviation *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 113, D11305,  
<https://doi.org/10.1029/2007JD009140> (2008).
- Köhler, M. O., G. Rädcl, K. P. Shine, H. L. Rogers, J. A. Pyle, Latitudinal variation of the effect of aviation NO<sub>x</sub> emissions on atmospheric ozone and methane and related climate metrics. *Atmospheric Environment* 64, 1–9,  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.09.013> (2013).
- Lim, L. L., D. S. Lee, B. Owen, A. Skowron, S. Matthes, U. Burkhardt, S. Dietmuller, G. Pitari, G. Di Genova, D. Iachetti, I. Isaksen, O. A. Søvde, REACT4C: Simplified mitigation study. TAC-4 Proceedings, June 22nd to 25th,

- 2015, Bad Kohlgrub, 181-185,  
[https://www.pa.op.dlr.de/tac/2015/Proceedings\\_of\\_TAC4\\_conference\\_final.pdf](https://www.pa.op.dlr.de/tac/2015/Proceedings_of_TAC4_conference_final.pdf)  
(2015).
- Lund, M. T., B. Aamaas, T. Berntsen, L. Bock, U. Burkhardt, J. S. Fuglestedt, K. P. Shine, Emission metrics for quantifying regional climate impacts of aviation. *Earth System Dynamics* 8, 547–563, <https://doi.org/10.5194/esd-8-547-2017> (2017).
- Marquart, S., R. Sausen, M. Ponater, V. Grewe, Estimate of the climate impact of the cryoplanes, *Aerospace Science and Technology*, 5, 73-84,  
[https://doi.org/10.1016/S1270-9638\(00\)01084-1](https://doi.org/10.1016/S1270-9638(00)01084-1) (2001)
- Millar, R. J., Z. R. Nicholls, P. Friedlingstein, M. R. Allen, A modified impulse-response representation of the global near-surface air temperature and atmospheric concentration response to carbon dioxide emissions. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 17, 7213–7228,  
<https://doi.org/10.5194/acp-17-7213-2017> (2017).
- Myhre, G., K. P. Shine, G. Rädcl, M. Gauss, I. S. A. Isaksen, Q. Tang, M. J. Prather, J. E. Williams, P. van Velthoven, O. Dessens, B. Koffi, S. Szopa, P. Hoor, V. Grewe, J. Borken-Kleefeld, T. K. Berntsen, J. S. Fuglestedt, Radiative forcing due to changes in ozone and methane caused by the transport sector. *Atmospheric Environment* 45, 387–394,  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.10.001> (2011).
- Myhre, G., D. Shindell, F.-M. Breon, W. Collins, J. Fuglestedt, J. Huang, D. Koch, J.-F. Lamarque, D. Lee, B. Mendoza, T. Nakajima, A. Robock, G. Stephens, T. Takemura, H. Zhang, Anthropogenic and natural radiative forcing *Climate Change 2013: the Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press (2013).
- Olivié, D. J. L., D. Cariolle, H. Teyssèdre, D. Salas, A. Voldoire, H. Clark, D. Saint-Martin, M. Michou, F. Karcher, Y. Balkanski, M. Gauss, O. Dessens, B. Koffi, R. Sausen, Modeling the climate impact of road transport, maritime shipping and aviation over the period 1860–2100 with an AOGCM. *Atmospheric Chemistry and Physics* 12, 1449–1480,  
<https://doi.org/10.5194/acp-12-1449-2012> (2012).
- Olsen, S. C., G. P. Brasseur, D. J. Wuebbles, S. R. H. Barrett, H. Dang, S. D. Eastham, M. Z. Jacobson, A. Khodayari, H. Selkirk, A. Sokolov, N. Unger, Comparison of model estimates of the effects of aviation emissions on atmospheric ozone and methane. *Geophysical Research Letters* 40, 6004–6009,  
<https://doi.org/10.1002/2013GL057660> (2013).

- Pitari, G., D. Iachetti, G. Genova, N. De Luca, O. A. Søvde, Ø. Hodnebrog, D. S. Lee, L. L. Lim, Impact of coupled NO<sub>x</sub>/aerosol aircraft emissions on ozone photochemistry and radiative forcing. *Atmosphere* 6, 751–782, <https://doi.org/10.3390/atmos6060751> (2015).
- Pitari, G., I. Cionni, G. Di Genova, O. A. Søvde, L. Lim, Radiative forcing from aircraft emissions of NO<sub>x</sub>: model calculations with CH<sub>4</sub> surface flux boundary condition. *Meteorologische Zeitschrift* 26(6), 663–687, <https://doi.org/10.1127/metz/2016/0776> (2017).
- Ponater, M., S. Pechtl, R. Sausen, U. Schumann, G. Hüttig, Potential of the cryoplane technology to reduce aircraft climate impact: a state-of-the-art assessment. *Atmospheric Environment* 40, 6928–6944, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.06.036> (2006).
- Sausen R. and U. Schumann, Estimates of the climate response to aircraft CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emissions scenarios. *Climatic Change* 44, 27–58 (2000).
- Sausen, R. I. Isaksen, V. Grewe, D. Hauglustaine, D. S. Lee, G. Myhre, M. O. Köhler, G. Pitari, U. Schumann, F. Stordal, C. Zerefos, Aviation radiative forcing in 2000: An update on IPCC (1999). *Meteorologische Zeitschrift* 14, 555–561, <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2005/0049> (2005).
- Skeie, R. B., J. Fuglestedt, T. Berntsen, G. P. Peters, R. Andrew, M. Allen, S. Kallbekken, Perspective has a strong effect on the calculation of historical contributions to global warming. *Environmental Research Letters* 12, 024022, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa5b0a> (2017).
- Skowron, A., D. S. Lee, R. R. de León, The assessment of the impact of aviation NO<sub>x</sub> on ozone and other radiative forcing responses—The importance of representing cruise altitudes accurately. *Atmospheric Environment* 74, 159–168, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.03.034> (2013).
- Skowron, A., D. S. Lee, R. R. de León, Variation of radiative forcings and global warming potentials from regional aviation NO<sub>x</sub> emissions. *Atmospheric Environment* 104, 69–78, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.12.043> (2015).
- Søvde, O. A., S. Matthes, A. Skowron, D. Iachetti, L. Lim, B. Owen, Ø. Hodnebrog, G. Di Genova, G. Pitari, D. S. Lee, G. Myhre, I. S. A. Isaksen, Aircraft emission mitigation by changing route altitude: A multi-model estimate of aircraft NO<sub>x</sub> emission impact on O<sub>3</sub> photochemistry. *Atmospheric Environment* 95, 468–479, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.06.049> (2014).
- Stordal, F., M. Gauss, G. Myhre, E. Mancini, D. A. Hauglustaine, M. O. Köhler, T. Berntsen, E. J. G. Stordal, D. Iachetti, G. Pitari, I. S. A. Isaksen, TRADEOFFs in climate effects through aircraft routing: forcing due to radiatively active gases.

Atmospheric Chemistry and Physics Discussions 6, 10733–10771 (2006).  
Wilcox, L., K. P. Shine, B. J. Hoskins, Radiative forcing due to aviation water  
vapour emissions. Atmospheric Environment 63, 1–13,  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.08.072> (2012).