

# 氣候變遷對跨太平洋航線之影響及永續航空燃料應用之成本效益分析

The Impact of Climate Change on Trans-Pacific Flights with Cost-Benefit Analysis of the Use of Sustainable Aviation Fuels

盧曉櫻 (Cherie Lu)<sup>①\*</sup>、涂凱閔 (Kai-Hung Tu)<sup>②</sup>

## 摘要

航空業與氣候變遷有相互影響之關係，航空器排放溫室氣體促進氣候變遷；而氣候變遷則直接影響航班營運。本研究評估氣候變遷對民航機在巡航階段的影響，並探討其影響所衍生之環境與財務成本；再分析以永續航空燃料 (Sustainable Aviation Fuel, SAF) 作為長期調適措施之成本效益。實證分析結果顯示，氣候變遷會增長跨太平洋航線之旅程時間，以臺北洛杉磯航線為例，國籍航空公司每年總計將額外支出新臺幣 2,456 萬燃油成本，整體北美航線則增加新臺幣 9,512 萬；而環境社會成本主要來自二氧化碳與氮氧化物。另外，唯有在傳統油料價格上升或 SAF 價格下降時，使用 SAF 才符合成本效益；敏感度分析顯示，在高二氧化碳價格情況下，若 SAF 價格下降至現有之 70% 時，使用 SAF 之環境效益將高於其增加之購油成本。

關鍵字：氣候變遷、飛機巡航、環境成本、永續航空燃料

## Abstract

Increasing economic development has caused a rise in greenhouse gas (GHG) emissions over the past century. These emissions lead to global warming and hence

①\* 通訊作者，長榮大學航運管理系教授；通訊地址：71101 臺南市歸仁區長大路 1 號，長榮大學；電話：06-2785123 2259；E-mail: cherie@mail.cjcu.edu.tw。

② 長榮大學航運管理系碩士班研究生；E-mail: 108m00595@mailst.cjcu.edu.tw。

climate change. The commercial aviation sector is a major contributor to this, accounting for about 2% of global man-made carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions, and expected to reach around 4% by 2050 (IPCC, 2014). Conversely, climate change affects aviation since changes to temperature, and wind speed, lead to changes to flight routes, which thus causes extra journey time, fuel consumption and operating costs; and so to yet more GHG emissions. This paper aims to explore the impacts of climate change on the cruise stage of commercial flights on trans-Pacific routes and evaluate both the environmental and financial costs of extra fuel consumption, and analyzing the cost-benefit of using sustainable aviation fuel (SAF) as a potential long-term adaptation measure. The empirical results for TPE-LAX flights show that climate change is expected to lengthen the journey time of these flights, causing an extra fuel cost of NT\$ 24.5 million for Taiwanese airlines. This translates to an extra NT\$ 95.1 million for northern trans-Pacific flights for these airlines. Of all the exhaust pollutants, CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> are responsible for the majority of the environmental social costs during the cruise stage. Incentives for the use of SAF in commercial flights could potentially derive from an increase in traditional fuel price or a reduction in biofuel price. The sensitivity analysis shows that, in a high CO<sub>2</sub>-cost scenario, if the additional cost of replacing traditional fuel by SAF for the extra travel time caused by climate change is to be less than the environmental benefit of using SAF, the price of biofuel must be reduced to 70% of its current level.

**Keywords:** Climate Change, Aircraft Cruise, Environmental Cost, Sustainable Aviation Fuel.

## 壹、前言

隨著經濟的發展，溫室氣體排放量有所增加，航空產業是全球暖化和空氣污染的主要貢獻者之一，約占全球人造二氧化碳的 2% 排放量，預計到 2050 年將達到 4% 左右 (IPCC, 2014)。而目前商用飛

機動力來源是透過燃燒源自化石原油和商業石油的噴射燃料，航空產業正積極以替代燃料、研發新的省油機型、空中導航等技術及營運面的改進，降低產業發展對環境的影響，目標是在 2050 年將二氧化碳排放量減少至 2005 年水平的一半 (IATA, 2016)。國際民用航空組織 (International

Civil Aviation Organization, ICAO) 估計，即使在最樂觀的情況下，長期燃油效率預計每年成長 1.37%，也無法達到國際民航組織的理想目標，即每年 2% (ICAO, 2019a)；而根據 Airbus 出版之 2019~2038 年全球市場預測，未來 20 年空運運量將以每年 4.3% 的幅度成長，相比之下，未來運量成長幅度遠超過新科技所能提高的效能 (Airbus, 2019)。

ICAO 在 2019 年環境報告中彙整了 8 種與全球航空業有關的氣候影響，包含：海平面上升、風暴強度增加、溫度變化、降雨變化、結冰條件的改變、風的改變、沙漠化以及生物多樣性的變化 (ICAO, 2019b)。海平面上升和風暴潮對沿海機場造成威脅，其中許多機場的海拔僅比平均海平面高出幾公尺 (Burbidge, 2016)；愈來愈高的溫度也使起飛重量的限制變得更頻繁；極端天氣如雷擊、降雨可能會增加航班延誤的機率；在巡航高度，不斷變化的風型可能會改變最佳飛行路線，並影響飛行時間，而更強的噴射氣流風切改變則會增強晴空亂流 (Williams, 2017)。

全球已有許多國家、機場、航空公司及旅客都受到氣候變遷的影響。國際機場理事會 (Airports International Council, ACI)、國際航空運輸協會 (International Aviation Transportation Association, IATA) 及 ICAO 等組織都對氣候變遷調適出版了許多報告，提供各國政府及機場參考。過去較多的研究著重於地面上氣候變遷之影

響及調適策略，近期有愈來愈多研究探討氣候變遷對航機飛行的影響 (Burbidge, et al., 2016；Grewe et al., 2014；Irvine, et al., 2014；Thompson, 2016；Williams, 2016, 2017；Ryley, et al., 2020)。其中最主要的影響為噴射氣流 (Jet Stream) 及晴空亂流 (Clean-Air Turbulence, CAT) 的增強，前者可能導致旅程時間改變；而後者則影響航空器飛行時的穩定性。航機排放溫室氣體，間接促進氣候變遷；而氣候變遷則以溫度改變、風速改變以及航路的改變等面向，影響航空產業，衍生出額外旅行時間、消耗更多燃油、提高航空公司成本以及排放更多的溫室氣體，可見航空產業與氣候變遷有相互影響之關係。

然而為了減緩氣候變遷之影響，航空產業積極採用各種溫室氣體減量措施，而永續航空燃料 (Sustainable Aviation Fuel, SAF) 相較於傳統航空燃油排放更少的溫室氣體，被視為是航空業朝向淨零碳排 (Net-zero Emission) 的重要措施之一 (ICAO, 2019a)，亦可達到長期調適之效益。本研究欲探討使用傳統燃油與使用永續航空燃料之差異，來探討飛行時間因噴射氣流增強而改變後，兩種燃油所致之環境社會成本，以及航空公司之購油成本進行比較。此外，市場經濟措施 (Market-based measures, MBMs) 如碳交易市場、污染物附加費等，也於國際間航空產業開始施行並預計廣泛應用，此舉將使得航空運輸產業需負擔其部分之環境社會成本

(ICAO, 2019b)。因此，本篇論文旨在探討氣候變遷對航空公司之航機在巡航階段的影響，並進一步對其影響所衍生的環境與財務成本加以分析，再探討航空業使用永續航空燃料的成本效益，以提出結論與建議供相關單位參考。

目前有關氣候變遷對航線影響之研究，大多數是以跨大西洋航為範圍，然而氣候變遷是全球性的，太平洋也存在相同的氣候現象，本研究根據中華民國交通部民用航空局 108 年度民航統計資料，篩選出臺灣兩大國籍航空之北美航線、每週飛行架次及使用機型，選定飛航架次最多之臺北 (TPE) 至洛杉磯 (LAX) 航線為代表，評估氣候變遷對於飛行路線之影響，以及所作的航線調整，對航空公司成本之影響，進行成本效益分析。航空公司航線架次及機型彙整如表 1。

## 貳、文獻回顧

### 2.1 全球氣候變遷

自工業化時代以來，人為排放的溫室氣體推動了大氣中二氧化碳 (Carbon Dioxide, CO<sub>2</sub>)、甲烷 (Methane, CH<sub>4</sub>) 及一氧化二氮 (Nitrous oxide, N<sub>2</sub>O) 的大量增加，在 1750 年至 2011 年之間，人為大氣累積的二氧化碳排放量為 2040 ± 310 GtCO<sub>2</sub>，這些排放約有 40% 留在大氣中，其餘的則從大氣中移出並儲存在陸地 (植物和土壤) 和海洋中 (IPCC, 2014)。人類為氣候系統帶來顯著的影響，近年來人為排放的溫室氣體量刷新歷史紀錄，氣候變遷已在人類和自然系統上產生廣泛的影響，自 1950 年代以來，許多觀測到的變化在

表 1 108 年國籍航空公司北美航線架次及機型彙整

航空公司	航線	每週飛行架次	使用機型
C 航空	臺北 - 洛杉磯 (TPE-LAX)	20	B777-300ER
	臺北 - 安大略 (TPE-ONT)	14	B777-300ER
	臺北 - 溫哥華 (TPE-YVR)	14	A350-900
	臺北 - 舊金山 (TPE-SFO)	14	B777-300ER
	臺北 - 紐約 (TPE-JFK)	8	B777-300ER
E 航空	臺北 - 多倫多 (TPE-YYZ)	14	B777-300ER
	臺北 - 西雅圖 (TPE-SEA)	20	B777-300ER
	臺北 - 休士頓 (TPE-IAH)	14	B777-300ER
	臺北 - 洛杉磯 (TPE-LAX)	42	B777-300ER
	臺北 - 紐約 (TPE-JFK)	14	B777-300ER
	臺北 - 溫哥華 (TPE-YVR)	14	B777-300ER
	臺北 - 舊金山 (TPE-SFO)	42	B777-300ER
	臺北 - 芝加哥 (TPE-ORD)	10	B777-300ER

資料來源：本研究彙整自交通部民用航空局 108 年民航統計年報。

幾十年前到幾千年前都是前所未有的，大氣及海洋皆有暖化趨勢，自 1960 以來南北半球的中緯度西風皆有增強 (IPCC, 2014)，氣候變遷所帶來的實際風險，包括海平面上升、溫度增加、降雨變化、大氣中的濕度改變、風速增加與更頻繁的暴風等。

在飛機引擎排放的廢氣中，除了飛行過程中排放量最高的 CO<sub>2</sub> 外，另有多種對人體健康、生態和氣候有不同程度負面影響的污染物，分別為氮氧化物 (Nitric oxide, NO<sub>x</sub>)、碳氫化合物 (Hydrocarbon, HC)、一氧化碳 (Carbon Monoxide, CO)、懸浮微粒 (Particulate Matter, PM) 與硫氧化物 (Sulfur Oxide, SO<sub>x</sub>) (US FAA, 2012)。各氣體對大氣的影響彙整如表 2。

飛機在巡航階段對氣候造成複雜的影響，該階段排放的污染物通常與燃料消耗呈非線性關係 (Pawlak, 2018)。ICAO 的污染物排放資料庫 (Aircraft Engine Emissions Databank) 主要為起降階段 (Landing and Take-Off, LTO) 的排放 (ICAO, 2021)，並未有關於巡航階段之污染物排放係數資料；

儘管如此，目前已有模型可以計算巡航階段的排放，例如：歐洲空中航行安全組織 (European Organization for the Safety of Air Navigation, EUROCONTROL) 之 IMPACT 模型，以及美國聯邦航空總署 (US Federal Aviation Administration, FAA) 之 AEDT (Aviation Environmental Design Tool) (Lu, 2018)。

## 2.2 氣候變化對航線造成之影響

氣候變遷對航線造成的影響在國際上已開始被討論，近年來有數個研究分析了會影響飛行路線的大氣條件 (Burbidge et al., 2016；Grewe et al., 2014；Irvine et al., 2014；Kim et al., 2016；Williams, 2016；Williams and Joshi, 2013)，以及其他與飛航管制、航線規劃、晴空亂流、氣體排放及調適相關之研究，大部分的研究範圍僅限於跨大西洋地區，因此，還需要在其他地區進行分析以瞭解全球的影響 (Thompson, 2016)。

航線管理與最佳飛行計畫有關，該

表 2 航空廢氣對大氣的影響

氣體	影響
CO <sub>2</sub>	導致全球暖化
H <sub>2</sub> O	捲雲和飛機凝結尾促使暖化
NO <sub>x</sub>	促進對流層頂部臭氧的生成、消耗對流層底部的臭氧、影響飛行高度的物理和化學變化
SO <sub>2</sub>	硫酸可以充當凝結核、硫酸氣溶膠會改變反照率
HC, CO	影響飛行高度的物理和化學變化

資料來源：Gössling (2018)。

計畫在給定風況、對流天氣模式和空中交通管制的情況下，將油耗和飛行時間降至最低，飛行計畫之算法會考慮這些限制因素，而氣候變化會改變這些算法中的風況和天氣條件，從而改變航線規劃，可能會對燃油消耗和飛行時間產生重大影響 (Thompson, 2016)。

Williams (2016) 的研究顯示，當大氣中二氧化碳濃度增加一倍時，會使大西洋上空的噴射氣流風速增強，導致東行的跨大西洋航線旅程時間明顯縮短；西行則明顯延長，但縮短的時間及延長的時間無法相抵消，故總體往返的旅程時間會延長。因此，整體跨大西洋航線每年將多出 2,000 小時的飛行時間，消耗 720 萬加侖燃油；約為支出 2,200 萬美元的燃油成本及排放 7,000 萬公斤的二氧化碳。

此外，對流層上部和平流層下部較強的中緯度風切改變破壞了大氣的穩定性，並加劇晴空亂流的現象 (Williams and Joshi, 2013)。人為的氣候變化預計將增強航空器巡航高度中噴射氣流的垂直風切改變，此情況亦增加產生晴空亂流的可能性。

先前的研究 (Storer et al., 2017) 使用氣候模型模擬 2050 至 2080 年全球氣候變遷可能對全球晴空亂流產生的影響，研究顯示晴空亂流在各種強度及海拔範圍內都在增強，且全年都有增強趨勢。表 3 顯示了晴空亂流在各地區的年平均變化，在中緯度和高緯度地區 (北大西洋、北美、北太平洋、歐洲及亞洲) 最繁忙的國際空域中，晴空亂流發生機率的增長幅度超越全球平均，在 200 hPa 時，強度晴空亂流的數量大約增加了一倍 (北美增加 112.7%；北太平洋增加 91.6%；歐洲增加 160.7%)。

晴空亂流的加劇可能對航空產業帶來重大的影響，也是許多人害怕飛行的原因 (Sharman et al., 2012)，亂流所導致的經濟成本來自乘客和機組人員所受的傷害、機體和機艙的損壞、航班延誤、檢查、維修和事故調查，估計總經濟成本從每年約 1 億美元至僅美國的航空業就將近 2 億美元 (Williams, 2017)，其影響不容小覷。

### 2.3 永續航空燃料之應用

由於石油來源有限，永續能源變得愈

表 3 工業化前至 2050~2080 期間晴空亂流數量平均百分比變化

強度類別	北大西洋		北美		北太平洋		歐洲	
	200 hPa	250 hPa	200 hPa	250 hPa	200 hPa	250 hPa	200 hPa	250 hPa
輕度	+75.4	+47.3	+110.1	+71.0	+120.7	+82.0	+90.5	+59.9
輕度至中度	+124.1	+80.7	+113.6	+57.5	+106.6	+53.8	+130.7	+75.8
中度	+143.3	+74.4	+100.3	+50.2	+90.2	+41.6	+126.8	+60.8
中度至強度	+148.9	+71.0	+94.3	+47.0	+73.1	+35.3	+142.1	+66.1
強度	+181.4	+88.0	+112.7	+58.9	+91.6	+40.1	+160.7	+90.6

資料來源：本研究彙整自 Storer et al. (2017)。

表 3 工業化前至 2050~2080 期間晴空亂流數量平均百分比變化 (續)

強度類別	南美		非洲		亞洲		澳洲	
	200 hPa	250 hPa	200 hPa	250 hPa	200 hPa	250 hPa	200 hPa	250 hPa
輕度	+18.3	+13.4	+24.2	+18.9	+102.5	+65.1	+18.0	+9.5
輕度至中度	+27.1	+18.0	+27.9	+23.3	+92.4	+48.7	+23.1	+12.9
中度	+34.3	+22.8	+34.3	+26.0	+78.1	+48.7	+29.6	+19.1
中度至強度	+43.3	+23.8	+36.6	+26.9	+59.2	+47.9	+36.9	+24.8
強度	+62.0	+31.6	+51.1	+40.2	+64.1	+55.4	+52.5	+35.4

備註：  
 1. 地理區域為北大西洋 (50°N ~ 75°N, 10°W ~ 60°W)、北美洲 (25°N ~ 75°N, 63°W ~ 123°W)、北太平洋 (50°N ~ 75°N, 145°E ~ 123°W)、歐洲 (35°S ~ 35°N, 10°W ~ 30°E)、南美 (55°S ~ 10°N, 35°W ~ 80°W)、非洲 (35°S ~ 35°N, 15°W ~ 50°E)、亞洲 (10°N ~ 75°N, 45°E ~ 145°E)、澳洲 (12°S ~ 46°S, 113°E ~ 177°E)。  
 2. 以 RCP8.5 情境模擬。

資料來源：本研究彙整自 Storer et al. (2017)。

來愈重要。航空業對於燃料的需求不斷成長，而燃燒航空用油產生的廢氣也對環境及人類健康造成影響，永續航空燃料因其對環境更友善且更具備永續發展之條件，被視為是解決問題的方法之一，包括航空生質燃油 (Biojet fuel) 以及各種替代燃料 (Alternative Fuel)。生質燃料乃為近 10 年應用較廣之 SAF，IATA (2015) 預測生質燃料將在 2030 年達到航空燃料 30% 的占比。

ICAO 自 2007 年起開始對 SAF 進行研究，於 2009 年第一屆航空及替代燃料大會 (ICAO Conference on Aviation and Alternative Fuels, CAAF) 上表示使用 SAF 是減少航空排放的重要措施，並對 SAF 的發展、其生命週期及相關標準提出了建議。隨後於 2013 年 ICAO 第 38 屆大會上表示，有必要以經濟、社會及環境都可接受的方式發展和引入 SAF (ICAO,

2019b)。儘管燃燒 SAF 所產生的二氧化碳與燃燒傳統燃料相似 (Bullerdiek, et al., 2021)，但永續航空燃料在其整個生命週期產生更低的溫室氣體排放，可比傳統航空燃料低 80% (IATA, 2018, 2019)。目前國際間主要以非食用作物如麻瘋樹、藻類、廢棄油品與廢棄物等製成。

在 2011 至 2015 年間，有 22 間航空公司共執行了 2,500 多次商業飛行，最多混合了 50% 的生質燃料；至 2019 年 12 月，全球已執行了超過 215,000 次使用生質燃料的商業飛行，數家航空公司已與 SAF 供應商簽訂了長期承購合約，許多機場亦同意透過其加油系統供應 SAF。目前 SAF 的發展已有相當的進展，包含其生產認證之過程以及降低生產成本等，且已有 9 個機場持續提供 SAF (包括美國洛杉磯國際機場 LAX、舊金山國際機場 SFO；瑞典阿蘭達國際機場 ARN、布魯瑪

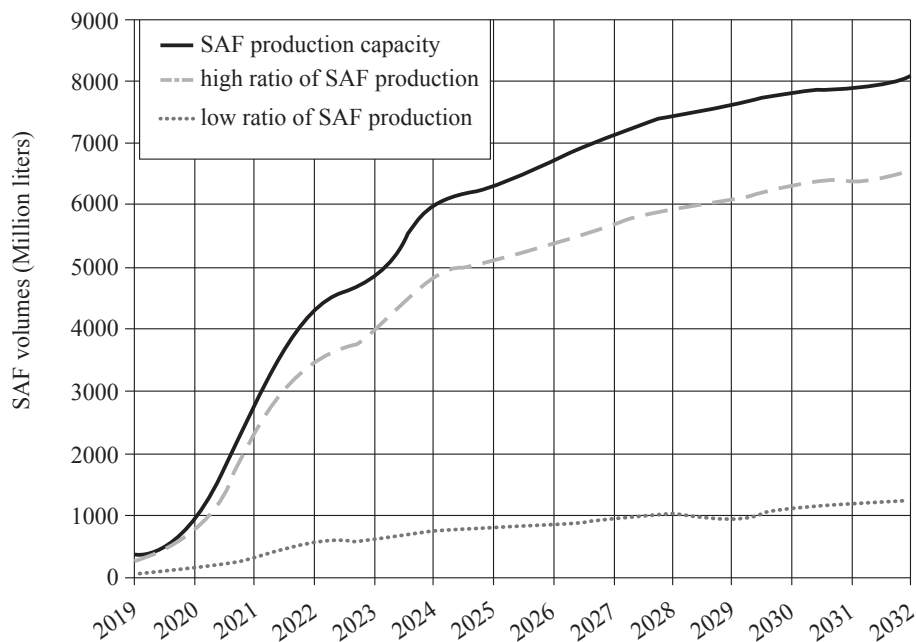
機場 BMA、卡爾馬機場 KLR、韋克舍斯莫蘭機場 VXO、哈姆斯塔德機場 HAD；挪威卑爾根機場 BGO、奧斯陸機場 OSL) (ICAO, 2019b)。

ICAO 的統計資料顯示全球 SAF 未來的產能趨勢(圖 1)，預期至 2032 年，SAF 每年產能將達到 6.5 噸(80 億公升)，以及 SAF 生產比率為 10% 和 80% 的情況，與其他燃料相比，SAF 產能的占比仍存在很大的不確定性 (ICAO, 2019b)。

根據 ICAO 2016 年的趨勢評估，至 2050 年時使用 100% 永續航空燃料，可減少國際航班之基準二氧化碳排放量的 63% (ICAO, 2018)。在全球各航空公司和

各種生質燃油料的試驗中，和燃油及排放相關的數據通常是航空公司及相關單位的機密資料，而引擎性能亦會根據不同的原料而有不同 (Lu, 2018)。然而，波音公司已完成了使用生質柴油 (Biodiesel) 混合的試飛，證明了生質柴油可於航空領域使用 (ICAO, 2016)。

研究 (Bart et al., 2010) 顯示，與傳統燃油的排放相比，生質柴油可減少大部分污染物的排放量。如表 4 所示，混合 20% 的生質柴油 (B20)，雖然 NO<sub>x</sub> 的排放會增加 2%，但其可將 PM 排放降低 12%；HC 排放降低 20%；CO 排放降低 12%，以及 SO<sub>x</sub> 排放降低 20%。若使用 100% 生質柴



資料來源：ICAO (2019b)。

圖 1 全球 SAF 生產趨勢 (以 2019 為基準)



表 4 生質柴油與傳統燃油排放之比較

污染物	100% 生質柴油 (B100)	20% 生質柴油 (B20)
一氧化碳 (CO)	-43.2%	-12.6%
二氧化碳 (CO <sub>2</sub> )	-63.0%*	-15.7%
碳氫化合物 (HC)	-56.3%	-11.0%
懸浮微粒 (PM)	-55.4%	-18.0%
氮氧化物 (NO <sub>x</sub> )	+5.8%	+1.2%
硫氧化物 (SO <sub>x</sub> )	-100%	-20.0%

資料來源：本研究彙整自 Bart et al. (2010); ICAO (2018)。

\* 引用 ICAO (2018) 之數據。

油 (B100)，雖然 NO<sub>x</sub> 排放會增加 5.8%，但 PM 排放會降低 55%；HC 降低 56%；CO 降低 43%，以及 SO<sub>x</sub> 降低 100%，意即不會排放 SO<sub>x</sub>。

## 參、研究方法

### 3.1 環境社會成本分析

航空器引擎所排放污染物的量隨著營運模式、引擎種類、排放效率、飛行和巡航時間等變化而有所不同，在 LTO 階段排放的廢氣與巡航階段的影響亦有所區別 (Lu, 2018)，本研究主要針對航空器在巡航階段對環境造成之影響進行分析。

#### 3.1.1 各污染物於巡航階段排放之社會成本

如前所述，在航空器引擎排放的廢氣中，6 種影響最大的污染物為 CO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、HC、CO、PM 及 SO<sub>x</sub>，而巡航階段主要以 CO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、HC 與 CO 為大

宗。表 5 彙整了文獻回顧中每種污染物的單位社會成本 (新臺幣 / 公斤)，由低到高列出。衡量範圍涵蓋經濟、環境、公共衛生、公共健康及綜合評估層面，因不同領域關注的污染物不盡相同，即使同種污染物在不同領域價格亦有所差異，其價格在衡量時難有一固定值，而是一個價格區間；亦因相關文獻中，無單篇涵蓋 6 種污染物之文獻，故難以就單一文獻作為計算社會成本之基礎。因此，為更全面評估綜合影響，本研究以多篇文獻之平均作為單位社會成本之基礎。然而 CO<sub>2</sub> 在時間軸上有目前以及未來長期之不同影響，文獻回顧結果以兩種價格展現，即目前每公斤 2.08 元，以及未來 5.98 元。

航空器引擎運轉除了產生巨大的噪音，同時也排放對人體及氣候有害之廢氣，本研究旨在估算巡航階段各種污染物之綜合影響，因此以劑量反應分析法 (Dose-Response Method) 來估計航空器排放的外部成本，即描述在不同劑量投入一段時間後有機體的變化，通常用於化學研

表 5 各污染物之單位社會成本 (新臺幣 / 公斤)

文獻		CO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	PM	HC	SO <sub>x</sub>	期間	範疇
Gallagher & Taylor (2003)	低	—	5.53	29.09	—	—	29.09	1993 ~ 2001	經濟
	高	—		349.07	—	—	87.27		
Schipper (2004)	低	—	—	54.69	148.06	20.94	44.51	—	環境 (歐盟)
	高	—	—	1,108.29	3,119.78	400.26	1,192.35		
Jonathan et al. (2014)	低	—	—	212.46	658.57	—	—	—	公共衛生
	高	—	—	778.02	6,882.56	—	—		
Dhar et al. (2009)		1.16	—	—	—	—	—	—	公共健康
Hope (2011)		2.99	—	—	—	—	—	—	經濟
Pindyck (2019)		5.98	—	—	—	—	—	—	經濟
European Commission (2019)		—	—	—	6,832.51	—	—	—	綜合
平均		2.08	5.53	467.77	4,079.00	210.60	338.31	—	—
		5.98 (未來)							

資料來源：本研究彙整。

究之中，其結果往往是公共政策，如環境評估等的參考指標 (陳瑞翔，2015)，也是一種評估航空器引擎廢氣污染造成之損害的方法 (Lu, 2018)。

各污染物於巡航階段排放之環境社會成本 ( $P_{ik}$ ) 如數學式 (1)：

$$P_{ik} = T_k F_k E_i C_i / 1,000 \quad (1)$$

$P_{ik}$ ： $i$  污染物於  $k$  高度巡航之環境社會成本 (新臺幣 / 架次)； $i$  為各污染物，包括 CO、CO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 及 HC，共 4 種； $k$  為巡航高度，本研究以  $k$  平均巡航高度 38,000 英尺為基準做計算。

$T_k$ ：航空器於  $k$  高度之巡航時間 (分鐘)。

$F_k$ ：航空器於  $k$  高度巡航之燃油消耗 (公斤 / 分鐘)。

$E_i$ ： $i$  污染物於巡航階段之排放係數 (公克 / 公斤油耗)。

$C_i$ ： $i$  污染物之單位社會成本 (新臺幣 / 公斤)。

### 3.1.2 排放係數

各污染物之排放係數 (Emission Index)，除了 CO<sub>2</sub> 外，皆因飛行階段不同而有所差異。根據 ICAO (2017) 報告，CO<sub>2</sub> 的產生與航空燃油的消耗呈現性關係，燃燒 1 公斤之航空燃油，會產生 3.16 公斤之 CO<sub>2</sub>，意即 CO<sub>2</sub> 排放係數為 3,160 (公克 / 公斤油耗)；其他污染物於 LTO 階段之排放係數則根據 ICAO 公告而訂定。然而各引擎排放係數皆有不同，這些係數可於 ICAO 排放資料庫查詢，以 E 航空 777-300ER 所用之 GE90-115B 引擎為例，其 LTO 階段污染物排放係數如表 6 所示。

表 6 GE90-115B 引擎 LTO 階段之排放係數

排放係數 (公克 / 公斤油耗)	起飛 (T/O)	爬升 (C/O)	進場 (App)	滑行 / 怠速 (Taxi/Idle)
ENO <sub>x</sub> LTO	50.34	35.98	16.50	5.19
EHCLTO	0.04	0.03	0.06	4.24
ECOLTO	0.08	0.07	1.98	39.11

資料來源：ICAO Aircraft Engine Emissions Databank (2021)。

值得注意的是，ICAO 並未公布巡航階段各污染物的排放係數，因此需要由文獻資料確認 CO<sub>2</sub> 以外之其他污染物排放係數。本研究根據 Pawlak 等人 (2018) 之研究，確定了適用於巡航階段中 CO、HC 及 NO<sub>x</sub> 排放係數之算法，考慮到高度、速度、壓力及溫度的變化，必須適當調整 LTO 階段之排放係數，降低排放係數之數學式如下：

$$E_{CO} = E_{COLTO} \times \frac{\theta^{3.3}}{\delta^{1.02}} \quad (2)$$

$$E_{HC} = E_{HCLTO} \times \frac{\theta^{3.3}}{\delta^{1.02}} \quad (3)$$

$$E_{NO_x} = E_{NO_xLTO} \times \sqrt{\frac{\delta^{1.02}}{\theta^{3.3}}} \times e^h \quad (4)$$

$E_{CO}$ ,  $E_{HC}$ ,  $E_{NO_x}$ ：在指定高度下 CO、HC 及 NO<sub>x</sub> 之排放係數。

$E_{COLTO}$ ,  $E_{HCLTO}$ ,  $E_{NO_xLTO}$ ：LTO 階段下 CO、HC 及 NO<sub>x</sub> 之排放係數。

$\theta$ ：溫度變化係數，如數學式 (5)：

$$\theta = \frac{T_c}{288.15 \text{ K}} \quad (5)$$

$T_c$ ：總溫度 (°K)，如數學式 (6)：

$$T_c = T_o \times (1 + 0.2 \times Ma^2) \quad (6)$$

$T_o$ ：依據國際標準大氣壓 (International Standard Atmosphere, ISA) 指定高度下環境溫度 (°K)。

$Ma$ ：航空器速度 (馬赫)。

$\delta$ ：壓力變化係數，如數學式 (7)：

$$\delta = \frac{P_c}{101325 \text{ Pa}} \quad (7)$$

$P_c$ ：總壓力 (Pa)，如數學式 (8)：

$$P_c = P_o \times (1 + 0.2 \times Ma^2)^{3.5} \quad (8)$$

$P_o$ ：依據 ISA 指定高度下環境壓力 (Pa)。

$e$ ：常數，為 2.72。

$h$ ：取決於海拔高度之空氣濕度係數，如數學式 (9)：

$$h = -19 \times (\omega - 0.00634) \quad (9)$$

$\omega$ ：比濕，

其中  $\omega = 10^{-3} \times e^{-0.0001426 \times (H-12900)}$ ，

$H$  為巡航高度 (英尺)。

由數學式 (2) 至 (9) 算出 CO、HC 及 NO<sub>x</sub> 於巡航階段之排放係數後，再將其數值帶入數學式 (1) 即可得出此三種污染物於巡航階段之社會成本。

### 3.1.3 飛行時間增加與廢氣排放

計算出各種污染物於巡航階段之單位社會成本後，即可進一步計算因飛行時間增加而衍生的成本，如 2.2 節所述，噴射氣流的增強可能導致更長的飛行時間，增加燃油消耗與廢氣的排放，本研究對於廢氣排放之環境社會成本計算，如數學式 (10)：

$$C_e = \sum_{i=1}^4 P_{ik} \left( \frac{T_1 - T_g}{T_g} \right) \quad (10)$$

$C_e$ ：因飛行時間增加而衍生之環境社會成本 (新臺幣 / 架次)。

$P_{ik}$ ： $i$  污染物於  $k$  高度巡航之環境社會成本 (新臺幣 / 架次)。

$T_1$ ：延長後總飛行時間 (分鐘)。

$T_g$ ：原飛行時間 (分鐘)。

### 3.2 航空公司成本分析

根據 IATA (2017) 報告，航空公司成本可分為直接營運成本及間接營運成本，直接營運成本包含飛航操作、維修及折舊等成本；間接營運則本則有場站費用、旅客服務費、票務及行政業務等成本，詳如表 7 所示。各項成本中以燃油成本占 22.8% 為最大宗，可知燃油消耗增加會為航空公司帶來可觀的經濟損失。航空器巡航階段之燃油消耗計算方式如數學式 (11) 所示：

$$C_f = F_{cruise} T_{cruise} \quad (11)$$

$C_f$ ：巡航階段之燃油消耗量 (公斤)。

$F_{cruise}$ ：巡航階段引擎燃油流量 (公斤 / 分鐘)。

表 7 航空公司成本結構

直接營運成本 Direct Operating Costs (DOC)	1. 飛航操作 – 總計	47.1%
	機組員 – 薪資、訓練、雜費	8.8%
	燃油	22.8%
	機場及過境導航費	6.7%
	航空器租賃、保險等費用	7.0%
	其餘飛航操作之花費	1.8%
	DOC 總計	<b>63.1%</b>
間接營運成本 Indirect Operating Costs (IOC)	4. 場站、地面費用	7.8%
	5. 旅客服務 (包含機組員)	8.2%
	6. 票務、銷售、促銷	6.7%
	7. 行政及其他業務費用	14.2%
IOC 總計	<b>36.9%</b>	
總營運成本 Total Operating Costs (TOC)		100.0%

資料來源：IATA (2017)。

$T_{cruise}$ ：巡航時間(分鐘)。

透過文獻回顧瞭解因氣候變遷所增加之巡航時間後，則可計算航空公司因飛行時間增加而衍生之額外燃油成本，再進一步探討使用 SAF 之成本效益。

## 肆、實證分析

### 4.1 環境成本

#### 4.1.1 案例環境成本

各污染物於巡航階段社會成本之分析，以 TPE 至 LAX 之跨太平洋航線為例。如表 1 所示，國籍 C 航空及 E 航空直飛該航線之機型皆為波音 777-300ER，引擎類型皆為 GE90-115B，根據兩家國籍航空所提供之資訊，巡航速度為 0.84 馬赫，平均飛行時間：TPE 至 LAX 需 710 分鐘；LAX 至 TPE 需 855 分鐘。巡航時間則是以平均飛行時間減去 ICAO 所公布之 LTO 階段時間總和，分別為：起飛 (Take-off) 0.7 分鐘；爬升 (Climb-out) 2.2 分鐘；進場 (Approach) 4.0 分鐘以及怠速 / 滑行 (Idle / Taxi) 26.0 分鐘，總計 32.9 分

鐘，計算後 TPE 至 LAX 之巡航時間為 677.1 分鐘；LAX 至 TPE 之巡航時間為 822.1 分鐘，相加後巡航時間為 1,499.2 分鐘。案例基本資料彙整如表 8 所示。

由於航空器巡航並非維持在同一高度，而是有高度的改變，本研究對於各污染於巡航階段社會成本 ( $P_{ik}$ ) 之計算考慮了排放係數 ( $E_i$ )，而排放係數則隨巡航高度改變而改變。跨洋長程航線大多巡航於 36,000 英尺至 40,000 英尺，因此，本研究以 38,000 英尺作為計算污染物於巡航階段排放成本之基礎。巡航油耗則根據 EUROCONTROL (2019) 公布之航空器基本資料 (Aircraft Performance Summary Tables for The Base of Aircraft Data, BADA) 中，波音 777 於 38,000 英尺巡航，燃油量為每分鐘 128.2 公斤。

各污染物於巡航階段之社會成本如表 9 所示。在所有排放物中，以  $\text{NO}_x$  之社會成本達 164 萬為最高，其次為  $\text{CO}_2$  約 120 萬、HC 約為 13 萬，最後為 CO 約 3 萬，而當  $\text{CO}_2$  價格為每公斤 5.98 元新臺幣時，其社會成本高達 360 萬。相較於其他排放物，目前  $\text{CO}_2$  之單位社會成本雖然較低，但其排放係數最高，亦為排放廢氣中

表 8 案例基本資料

機型	引擎	巡航速度 (馬赫)	起迄點	平均飛行時間 (分鐘)	平均巡航時間 (分鐘)
波音 777-300ER	GE90-115B	0.84	TPE-LAX	710	677.1
			LAX-TPE	855	822.1
			來回	1,565	1,499.2

資料來源：本研究彙整。

表 9 各排放物於巡航階段之社會成本 ( $P_{ik}$ )(新臺幣)

污染物	巡航時間 (分鐘)	巡航油耗 (公斤 / 分鐘)	污染物 單位社會成本 (新臺幣 / 公斤)	排放係數 (公斤 / 公斤 燃油)	社會成本 (新臺幣 / 架次)
CO <sub>2</sub>	1,499.2	128.2	2.08	3.16	1,263,276
			5.98		3,631,917
HC			210.60	0.00325	131,550
CO			5.53	0.02999	31,875
NO <sub>x</sub>			467.77	0.01828	1,643,449

資料來源：本研究彙整。

最主要的成分，因此在排放物於巡航階段之社會成本中，仍然偏高，而未來若其單價上升，整體社會成本更是加倍；而目前 NO<sub>x</sub> 則以其高昂的單位社會成本位居所有污染物社會成本之首。

#### 4.1.2 氣候變遷飛行時間改變後之環境成本

Williams (2016) 之研究表示，噴射氣流強度增加對跨大西洋航線東行及西行的影響有所不同，紐約甘迺迪國際機場 (JFK) 至倫敦希斯羅機場 (LHR) 之平均飛行時間由 338 分鐘縮短至 334 分鐘，減少 4 分鐘，相當於 1.183%；西行航班 LHR 至 JFK 之平均飛行時間則由 400 分鐘延長至 405.3 分鐘，相當於 1.325%。由於目前並無關於噴射氣流如何影響跨太平

洋航線飛行時間之文獻，因此，本研究以 Williams (2016) 之研究為基礎，計算跨太平洋航線飛行時間增長，所衍生之廢氣排放成本。

改變後飛行時間如表 10 所示，TPE 至 LAX 之飛行時間由 710 分鐘縮短至 701.6 分鐘；LAX 至 TPE 之飛行時間由 855 分鐘延長至 866.3 分鐘，總體來回飛行時間從 1,565 分鐘延長至 1,576.9 分鐘，共延長 2.9 分鐘，相當於 0.185%。因飛行時間增加而衍生之環境社會成本 ( $C_e$ ) 彙整如表 11。在不同的 CO<sub>2</sub> 價格下，所增加的成本分別為新臺幣 5,679 及 10,061 元，飛行時間延長後總環境社會成本達 307 萬及 544 萬。

表 12 顯示全年度所有臺北之洛杉磯

表 10 改變後飛行時間 (分鐘)

起迄點		原飛行時間	變化	縮短 / 延長	改變後飛行時間
TPE	LAX	710	1.183%	縮短 8.4	701.6
LAX	TPE	855	1.325%	延長 11.3	866.3
來回		1,565	0.185%	延長 2.9	1,576.9

資料來源：本研究彙整。

表 11 因飛行時間增加而衍生之環境社會成本 ( $C_e$ )(新臺幣)

各污染物	巡航階段之社會成本	各污染物因飛行時間增加之成本	因飛行時間增加而衍生之環境社會成本 ( $C_e$ )	飛行時間增加後巡航階段社會成本	飛行時間延長後總環境社會成本
CO <sub>2</sub>	1,263,276	2,337	低：5,679 高：10,061	1,265,613	低：3,075,830 高：5,448,853
	3,631,917	6,719		3,638,636	
HC	131,550	243		131,793	
CO	31,875	59		31,934	
NO <sub>x</sub>	1,643,449	3,040		1,646,489	

資料來源：本研究彙整。  
註：四捨五入至整數計算。

表 12 臺北至洛杉磯航線因飛行時間增加而衍生之環境社會成本 (新臺幣 / 年)

	$C_e$	全年班次數	增加之環境社會成本
低	5,679	3,224	18,309,096
高	10,061		32,436,664

資料來源：本研究彙整。

航班，因飛行時間增加而衍生之環境社會成本，分別為新臺幣 1,800 萬及 3,200 萬元。如前述，CO<sub>2</sub> 在所有排放物中雖然占比最大，然而因 NO<sub>x</sub> 有相對高之單位社會成本，因此於探討氣候變遷飛行時間增加所衍生之社會成本時，仍以 NO<sub>x</sub> 之環境社會成本最高 (占比 54%) 其次為 CO<sub>2</sub> (占比 41%)，唯有在 CO<sub>2</sub> 未來高單位社會成本情境下，CO<sub>2</sub> 將為最主要之環境社會成本來源 (占比 67%)。

## 4.2 航空公司燃油成本分析

如 3.2 節所述，在航空公司各項成本中，燃油占 22.8%，隨著飛行時間的增加，燃油消耗也隨之增加，燃油成本的增加對於航空公司而言將是巨大的財務壓力。表 13 彙整了在一般情況下，波音

777-300ER 執飛臺北至洛杉磯航線之燃油消耗量，以及飛行時間變化後之燃油消耗量及燃油成本，雖然臺北至洛杉磯航段的飛行時間減少，燃油消耗亦減少，但洛杉磯至臺北航段的飛行時間增加幅度大於臺北至洛杉磯航段，因此總體燃油消耗較原本增加 372 公斤。而根據中油公告之航空燃料歷史價格，108 年平均為每公升 0.53 美元，約為每公斤新臺幣 20.49 元 (以 108 年平均匯率 1 美元兌新臺幣 30.925 元計算)，增加 372 公斤燃油相當於增加新臺幣 7,622 元燃油成本。

因此，因氣候變遷巡航時間增加，在使用傳統燃油之情況下，每一 TPE 至 LAX 來回航班所衍生之燃油成本與環境社會成本，比較如圖 2 所示。其中燃油成本介於兩種情境下之環境社會成本之間。

表 13 燃油消耗量變化及燃油成本

起迄點	原巡航階段油耗 (公斤)	飛行時間增加後 巡航階段油耗 (公斤)	差異 (公斤)	變化率
TPE-LAX	86,804	85,727	-1,077	-1.24%
LAX-TPE	105,393	106,842	+1,449	+1.37%
來回	192,197	192,569	+372	+0.19%
LTO 油耗 (雙引擎)		3,092	-	-
總油耗	198,381	198,753	+372	+0.19%
燃油成本 (新臺幣)	4,064,827	4,072,449	+7,622	+0.19%

資料來源：本研究彙整。

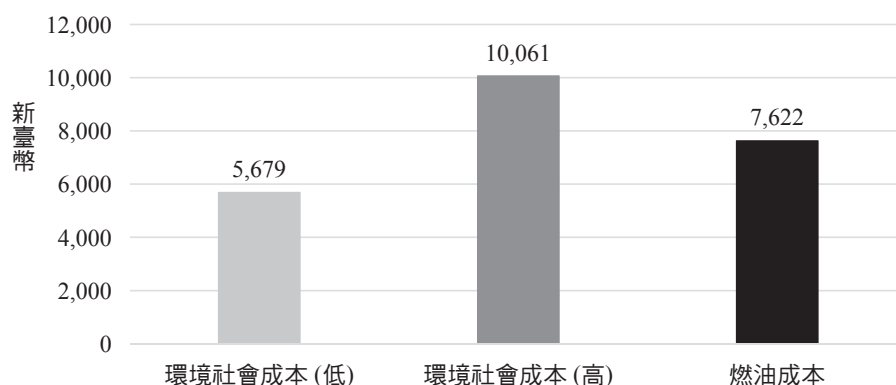


圖 2 氣候變遷巡航時間增加所衍生之環境社會成本與燃油成本 (元 / 來回航班)

由表 1 可知 108 年 C 航空臺北至洛杉磯航線每週有 20 班；E 航空每週有 42 班，換算整年度 C 航空為 1,040 班；E 航空為 2,184 班，年度燃油消耗共增加 386,880 公斤及 812,448 公斤，將年度增加之燃油消耗乘以每公斤航空燃油油價格即可得出臺北至洛杉磯航線全年燃油成本。C 航空每年須額外支出 792 萬購油成本；E 航空須額外支出 1,664 萬；總計我國籍航空公司臺北洛杉磯航線每年將額外支出 2,456 萬燃油成本，計算結果與環境社會

成本比較如表 14 所示。

根據表 1 之資料，本研究再進一步估算飛行時間延長對整體北美航線之影響，C 航空北美航線每週有 20 班，每年共 3,640 班；E 航空北美航線每週有 170 班，每年共 8,840 班，將增加之油耗乘以每年班次及油價，即可得出整體北美航線因飛行時間增加而衍生之額外燃油成本。計算結果與環境社會成本比較如表 15 所示，C 航空北美航線每年增加 2,700 萬購油成本；E 航空增加 6,700 萬，總計我國



表 14 臺北至洛杉磯航線因飛行時間增加而衍生之成本

航空公司	增加之油耗 (公斤 / 年)	增加之購油成本 (新臺幣 / 年)	增加之環境社會成本 (新臺幣 / 年)
C 航空	386,880	7,927,171	低：18,309,096 高：32,436,664
E 航空	812,448	16,647,060	
加總		24,574,231	

資料來源：本研究彙整。

表 15 北美航線因飛行時間增加而衍生之成本

航空公司	每年班次	增加之購油成本 (新臺幣 / 年)	增加之環境社會成本 (新臺幣 / 年)
C 航空	3,640	27,745,099	低：70,873,920 高：125,561,280
E 航空	8,840	67,380,955	
加總	12,480	95,126,054	

資料來源：本研究彙整。

國籍航空公司北美航線每年將額外支出 9,500 萬燃油成本。

### 4.3 使用生質燃料成本效益分析

成本效益分析 (Cost-Benefit Analysis, CBA) 常用來評估一項計畫或方案的可行性，其原理是在過程中，將比較分析的項目或決策之成本，以尋求最小成本得到最大利益之方式 (陳瑞翔，2015)。考量生質燃油之使用已為航空產業中長期重要之溫室氣體減量措施，透過此減排措施，也期抑制氣候變遷速度，間接降低調適成本。本研究透過比較使用傳統燃油與使用生質燃油之差異，探討兩種燃油在飛行時間增加後所衍生之社會成本，以及航空公

司使用永續航空燃料之成本效益。因使用 100% 生質燃油 (B100)<sup>⑥</sup> 對於減少污染之效益較明顯 (表 4)，故以下計算以使用 B100 為基準。計算方式為各排放物於巡航階段之社會成本 ( $P_{ik}$ ) 乘以使用 B100 之減量百分比，再乘以改變後飛行時間變化之百分比 (表 10)，即可得到使用 B100 的社會成本。直得注意的是，目前尚無相關研究顯示使用傳統燃油或生質燃油對於飛行時間及燃油效率是否有所差異，因此本研究僅探討使用兩種燃油之社會成本，不考慮其他變動因素。

相較於傳統燃油，在使用 B100 後，氣候變遷巡航時間增加下，衍生之 CO<sub>2</sub> 社會成本在單價低時為臺幣 865 元，單價高時為 2,486 元，分別減少了 1,472 元及

<sup>⑥</sup> 波音公司於 2018 年在 FedEx Express 777 貨機上進行了世界上首次使用 100% 生質燃料的飛行。(Boeing, 2019)。

4,233 元；HC 之社會成本為 106 元，減少 137 元；CO 之社會成本為 33 元，減少 26 元，以及 NO<sub>x</sub> 之社會成本為 3,217 元，增加 177 元。使用生質燃油之環境效益分別為 1,458 元及 4,219 元，此為使用生質燃油相較於傳統燃油可減少之社會成本，結果如表 16 所示。

生質燃料之生產成本依據不同的提煉技術及原料而有相當大的差異，可為傳統石化噴射燃料的 2 倍至 8 倍 (ICCT, 2019)，最常見的兩種提煉方法分別為氫化再生 / 氫化酯與脂肪酸法 (Hydroprocessed Renewable Jet/ Hydroprocessed Esters and Fatty Acids, HRJ/HEFA) 及 費托合成法 (Fischer-Tropsch, FT)。前者是指透過氫化

過程及脂肪酸轉化而成的燃料，例如使用糧食作物 (大豆、油菜籽) 及非糧食作物 (亞麻薺、麻瘋樹)、藻類、廢食用油及動物脂肪等為來源。後者是將天然氣、煤炭等透過合成轉化後，轉變為液態燃料 (陳瑞翔, 2015)。而生質燃料之價格依其生產方式不同，可為傳統燃料的 1.5 倍至 3 倍 (ICAO, 2018)，本研究對於生質燃料價格之計算，是以其平均值 2.25 倍為基準，為每公斤新臺幣 46.1 元，傳統航空燃油價格以 108 年中油公告價格之平均為基準，為每公斤新臺幣 20.49 元。使用傳統燃料及生質燃料對巡航階段飛行時間增加所致額外油耗之購買成本如表 17。表 18 則彙整氣候變遷巡航時間增加下，使用傳統燃料

表 16 兩種燃油在飛行時間增加後所衍生之社會成本及環境效益 (新臺幣)

污染物	傳統燃油社會成本	B100 社會成本	差異
CO <sub>2</sub> (低)	2,337	865	1,472
CO <sub>2</sub> (高)	6,719	2,486	4,233
HC	243	106	137
CO	59	33	26
NO <sub>x</sub>	3,040	3,217	-177
加總	低：5,679 高：10,061	低：4,221 高：5,842	—
環境效益			低：1,458 高：4,219

資料來源：本研究彙整。

表 17 巡航階段傳統燃料與生質燃料之購買成本 (新臺幣)

燃料種類	單價 (新臺幣 / 公斤)	增加之油耗 (公斤 / 來回巡航)	購買成本 (元 / 來回巡航)
傳統燃料	20.49	372	7,622
生質燃料	46.10		17,149
價差	25.61	—	9,527

資料來源：本研究彙整。

表 18 氣候變遷巡航時間增加下使用生質燃料之成本效益比較 (元 / 來回巡航)

成本		傳統燃料	生質燃料	環境效益 (減少之環境成本)	
環境社會成本	低	5,679	4,221	低	1,458
	高	10,061	5,842	高	4,219
購油成本		7,622	17,149	增加之燃油成本	
				9,527	

資料來源：本研究彙整。

及生質燃料所衍生之環境社會成本與購油成本，並比較其成本效益。

由表 17 及表 18 可知，生質燃料之購買成本較傳統燃料高出許多，其環境效益不及購油成本，依現況而言使用生質燃料不符合成本效益，未來 CO<sub>2</sub> 價格高時，雖然使用生質燃料之環境效益大幅上升，但仍不符合成本效益。即便如此，亦無法否認使用生質燃料對於環境有相當大的助益。

#### 4.4 生質燃料價格敏感度分析

依現況而言使用生質燃料不合成本效益，主要是因為生質燃料之價格仍較傳統航空燃油高出許多，然而若將油價的波動納入考量，則可能產生不同的結果。本節主要針對生質燃料之價格進行敏感度分析，以瞭解油價變動對整體燃料使用成本之影響，而環境社會成本因 CO<sub>2</sub> 價格高低不同而有所不同，其為影響整體環境效益之重要指標。

本研究假設未來隨著提煉技術的進步，生質燃料的生產與使用率提高，其價格下降，以及傳統燃料之價格維持不

變(每公斤新臺幣 20.49 元)，生質燃料價格下降使用生質燃料才符合成本效益。圖 3 顯示未來 CO<sub>2</sub> 價格高時(每公斤新臺幣 5.98 元)，於氣候變遷增加飛行時間下，使用生質燃油替代傳統油料，其衍生之飛行時間的環境效益與增加之購油成本進行比較。若生質燃料價格下降至 32.17 元時(約為現有價格 70% 時)，兩種燃油成本價差已趨近環境效益；而於生質燃料價格低於此價格時，環境效益已高於購油成本之價差，意即使用生質燃料符合成本效益。

## 伍、結論與建議

目前國內有關氣候變遷對航空器飛行影響之研究較為缺乏，國際上雖然已開始討論此議題，但研究範圍仍以歐美航線為主，故本研究引用國外研究之數據，針對國籍航空公司臺北至洛杉磯航線為例進行評估。本研究首先蒐集有關全球氣候變遷趨勢、氣候變遷對飛行影響以及航空替代燃料相關應用之文獻，歸納出評估重點後，進一步計算相關成本，再以使用航空

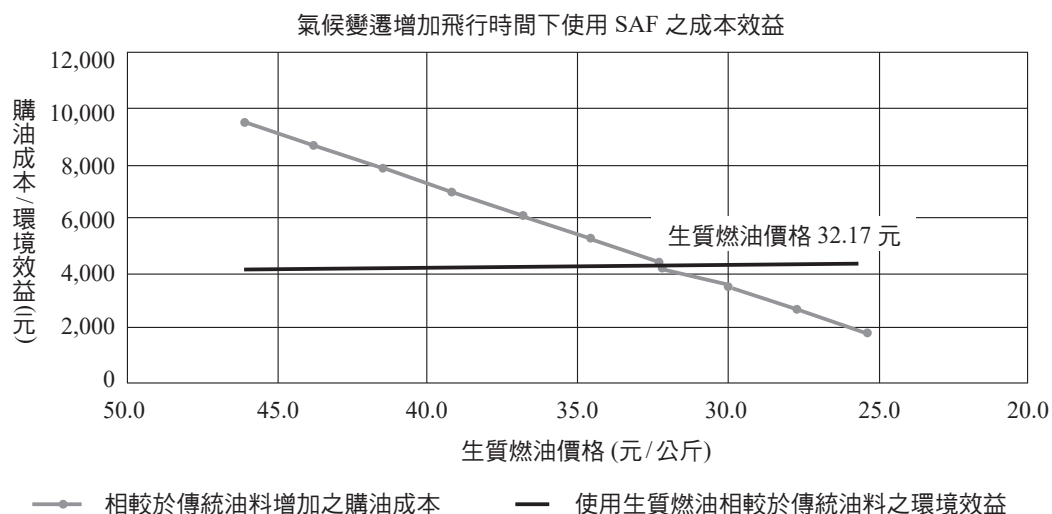


圖 3 生質燃料價格變動下環境效益與增加購油成本之比較

替代燃料評估航空公司實施調適措施之成本效益，最後提出結論與建議供相關單位參考。

研究結果顯示，在巡航階段所有排放物中以 NO<sub>x</sub> 之單位社會成本最高，在現今 CO<sub>2</sub> 價格下，每一航班之環境社會成本以 NO<sub>x</sub> 占比最大；然而，由於 CO<sub>2</sub> 具有最高之排放係數，若未來 CO<sub>2</sub> 價格達每公斤新臺幣 5.98 元之情境下，CO<sub>2</sub> 仍為最主要之環境社會成本來源，約占總環境社會成本之 67%。在航空公司營運成本方面，兩大國籍航空因氣候變遷飛行時間增加，每年臺北至洛杉磯來回航班巡航階段之購油成本預計將增加 2,456 萬；整體北美航線預計增加 9,512 萬。

使用生質燃料對排放減量效果顯著，但其價格仍高出傳統燃油數倍。透過敏感度分析發現，在傳統燃料價格不變的條件

下，生質燃料價格在社會成本高時，需下降至每公斤 32.17 元（約為現有價格之 70%）時，使用生質燃料才符合成本效益。

氣候變遷影響層面廣大，ICAO、IATA 等國際組織對於排放標準日益嚴苛，政府、機場及航空公司等在運量成長及氣候條件改變的情況下，需要思考應對應的解決之道。目前臺灣有關氣候變遷對飛行影響之研究明顯不足，建議政府相關單位可對該議題進行研究，以發展應對策略與國際接軌。本研究受限於人力及時間等因素，僅能引用國外研究之數據做估算，未來可對太平洋上空之大氣條件進行研究，以更全面瞭解氣候變遷對跨太平洋航線之影響。（感謝科技部贊助，計畫編號 MOST 109-2410-H-309-010，使得本研究可順利完成）

## 參考文獻

- 交通部民用航空局，2019，108年民航統計年報，<https://www.caa.gov.tw/Article.aspx?a=1092&lang=1>，2020年6月21日。
- 經濟部能源局，2021，油價資訊管理與分析系統——國際油品價格，[https://www2.moeaboe.gov.tw/oil102/oil2017/A00/Oil\\_Price2.asp](https://www2.moeaboe.gov.tw/oil102/oil2017/A00/Oil_Price2.asp)，2021年4月27日。
- 臺灣中油股份有限公司，2021，航空燃油歷史價格，<https://www.cpc.com.tw/cp.aspx?n=55>，2021年4月27日。
- 陳瑞翔，2015，生質燃油於我國航空業之應用，長榮大學航運管理學系碩士論文，臺南市。
- Airbus, 2019, *Global Market Forecast 2019-2038*.
- Burbidge, R., 2016. Adapting European airports to a changing climate. *Transportation Research Procedia*, 14, 14-23.
- Bart, J. C. J., Palmeri, N., and Cavallaro, S., 2010. *Biodiesel Science and Technology: From Soil to Oil: Chapter 14 Sustainability and Use of Biodiesel*. Woodhead Publishing Limited: Cambridge.
- Boeing, 2019. Boeing offers biofuel to customers flying their new commercial jets home. Available at: <https://www.boeing.com/company/about-bca/washington/biofuel-factory-fill-03-08-19.page> (accessed 19 July 2021)
- Bullerdiek, N., Neuling, U., and Kaltschmitt, M., 2021. A GHG reduction obligation for sustainable aviation fuels (SAF) in the EU and in Germany. *Journal of Air Transport Management*, 92, 102020.
- Dhar, D., Macmillan, A., Lindsay, G., and Woodward, A., 2009. Carbon pricing in New Zealand: implications for public health. *New Zealand Medical Association*, 122(1290), 105-115.
- EUROCONTROL, 2019. *Aircraft Performance Summary Tables for The Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.0*.
- Gallagher, K.P., and Taylor, R., 2003. International Trade and Air Pollution: The Economic Costs of Air Emissions from Waterborne Commerce Vessels in the United States. *G-DAE Working Paper*, 03-08.
- Grewe, V., Dameris, M., Fichter, C., and Sausen, R., 2014. Impact of aircraft NO<sub>x</sub> emissions. Part 1: Interactively coupled climate-chemistry simulations and sensitivities to climate-chemistry feedback, lightning and model resolution. *Meteorologische Zeitschrift*, 11(3), 177-186.
- Gössling, S., 2018. Air transport and climate change. In Halpern, N., and Graham, A. (Eds.), *The Routledge Companion to Air Transport Management*, Routledge: London.
- Hope, C., 2011. The Social Cost of CO<sub>2</sub> from the PAGE09 Model. *Economics Discussion Papers*, 2011-39, Kiel Institute for the World Economy.

- Irvine, E. A., Hoskins, B. J., and Shine, K. P., 2014. A simple framework for assessing the trade-off between the climate impact of aviation carbon dioxide emissions and contrails for a single flight. *Environmental Research Letters*, 9 (6), 064021.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC., 2014. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*, Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- International Air Transport Association, IATA., 2015. *Sustainable alternative fuel-advocacy*, 1 th edition 2015. 2-21. Montreal, Geneva.
- International Air Transport Association, IATA., 2016. *IATA Annual Review 2016*.
- International Air Transport Association, IATA., 2017. *IATA Annual Review 2017*.
- International Air Transport Association, IATA., 2018. *Sustainable Aviation Fuels Guide Version 2*.
- International Air Transport Association, IATA., 2019. *Sustainable Aviation Fuels Fact sheet*.
- International Civil Aviation Organization, ICAO., 2016. *ICAO Global Framework for Aviation Alternative Fuels*.
- International Civil Aviation Organization, ICAO., 2017. *Carbon Emissions Calculator Methodology Version 10*.
- International Civil Aviation Organization, ICAO., 2018. *Sustainable Aviation Fuels Guide Version 2*.
- International Civil Aviation Organization, ICAO., 2019a. *Annual Report of the Council*.
- International Civil Aviation Organization, ICAO., 2019b. *Environmental report 2019*.
- International Civil Aviation Organization, ICAO., 2021. *Aircraft Engine Emissions Databank*. Available at: <https://www.easa.europa.eu/domains/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank> (accessed 19 July, 2021)
- Kim, J. H., Chan, W. N., Sridhar, B., Sharman, R. D., Williams, P. D. and Strahan, M., 2016. Impact of the North Atlantic Oscillation on transatlantic flight routes and clear-air turbulence. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 55 (3), 763-771.
- Lu, C., 2018. When will biofuels be economically feasible for commercial flights? Considering the difference between environmental benefits and fuel purchase costs. *Journal of Cleaner Production*, 181, 365-373.
- Pawlak, M., Majka, A., Kuzniar, M., and Pawluczy, J., 2018. Emission of selected exhaust compounds in jet engines of a jet aircraft in cruise phase. *Combustion Engines*, 173(2), 67-72.
- Pindyck, R.S., 2019. The social cost of carbon revisited. *Journal of Environmental Economics and Management*, 94, 140-160.

- Ryley, T., Baumeister, S., and Coulter, L., 2020. Climate change influences on aviation: A literature review. *Transport Policy*, 92, 55-64.
- Schipper, Y., 2004. Environmental costs in European aviation. *Transport Policy*, 11(2), 141-154.
- Sharman, R. D., Trier, S. B., Lane, T. P., and Doyle, J. D., 2012. Sources and dynamics of turbulence in the upper troposphere and lower stratosphere: A review. *Geophysical Research Letters*, 39(12), 1-9.
- Storer, L. N., Williams, P. D., and Joshi, M. M., 2017. Global response of clear-air turbulence to climate change. *Geophysical Research Letters*, 44(19), 9976-9984.
- Thompson, T.R., 2016. Climate Change Impacts Upon the Commercial Air Transport Industry: An Overview. *Carbon & Climate Law Review*, 10(2), 105-112.
- The International Council on Clean Transportation, icct., 2019. *The cost of supporting alternative jet fuels in the European Union*. Working Paper 2019-05.
- United States Federal Aviation Administration, US FAA., 2012. *Aviation Environmental and Energy Policy Statement*.
- Williams, P. D. and Joshi, M. M., 2013. Intensification of Winter Transatlantic Aviation Turbulence in Response to Climate Change. *Nature Climate Change*, 3, 644-648.
- Williams, P. D., 2016. Transatlantic flight times and climate change. *Environmental Research Letters*, 11(2), 1-8.
- Williams, P. D., 2017. Increased light, moderate, and severe clear-air turbulence in response to climate change. *Advances in Atmospheric Sciences*, 34(5), 576-586.

