

# 香港國際機場海風的預測及起始時間的研究

張冰、劉心怡

香港天文台

## 摘要

當天氣尺度系統較弱時，香港國際機場跑道風向的轉變，主要由日照造成海陸溫差而產生的地區性海陸風主導。成功預測海風的建立，並掌握其起始時間，對發出準確機場風向及風切變預報十分有用。海風能否建立及其起始時間受多個因素影響，當中包括海陸溫差、背景離岸風的強度及雲量等。我們在本文引用一個海風指數，預測當天會否有海風建立；同時也提出一個根據基本環流模式推論出來的方程，利用本地清晨在機場附近的氣象觀測數據預測當日海風的起始時間。文章會利用2003至2005年的海風個案簡述有關指數及方程的推導、其中參數的調較，並提供2006年的驗證結果。

## **Study on the occurrence of sea breeze and its onset time at Hong Kong International Airport (HKIA)**

P. Cheung, Sharon S. Y. Lau

Hong Kong Observatory

## Abstract

When the synoptic scale weather systems are weak, localized land-sea breeze induced by day heating becomes a major factor for causing runway wind changes at the Hong Kong International Airport. Information of sea breeze occurrence and its onset time is essential for the accurate forecasting of winds and windshear at HKIA. The occurrence of sea breeze and its onset time depend on various factors such as land-sea temperature difference, the strength of the off-shore background wind, cloud amount, etc. In this article, we made use of a sea breeze index to forecast the occurrence of sea breeze, together with an equation based on circulation model to forecast sea breeze onset time using weather elements observed around HKIA in the early morning. The formulation of the sea breeze index, the onset time equation, and the calibration of their parameters will be presented using sea breeze cases collected during 2003 to 2005. Verification results for 2006 will be given as well.

# 香港國際機場海風的預測及起始時間的研究

張冰、劉心怡  
香港天文台

## 1. 引言

香港天文台第103號的技術報告（文獻〔1〕），詳述了有關香港國際機場由海風引致的顯著風切變。文獻〔1〕中指出：在背景東風約為10海浬（20公里）或以上時，海風的入侵會在跑道範圍產生較為明顯的風切變。這是由於機場跑道粗略為東西走向，當機場受日照升溫，與西面珠江口的溫差增加，海陸風環流建立，向岸的海風主要以偏西風形態入侵跑道範圍。當背景東風較大而海風能成功進入機場範圍，離岸風和向岸風的對立會在跑道上產生較明顯的順風—逆風變化，造成風切變。

故此，準確預測海風能否在機場範圍內建立，並推算其起始時間，對機場發出風向及風切變預報十分有用。

天文台第96號技術報告（文獻〔2〕）則分析了香港機場的海陸風特性。根據報告內容，機場海風主要依賴於海陸溫度差異，越大則越利於海風建立；背景離岸風的強度，風力大則不利於海風向岸推進；同時，大部分海風個案的日照時間都長於5小時。

在2005年尾，我們總結以上經驗，發展了一套系統，根據機場清晨的氣溫、背景東風、水溫及預測的機場最高氣溫，得出當日海風能否抵達跑道範圍及其起始時間。本文介紹該系統的設計和2006年的應用結果。

## 2. 海風個案收集及處理

根據機場氣象所當值預報員的判斷，從2003至2004年的氣象日誌中抽取所有海風個案。根據這些海風個案，收集當天的氣象圖（M e t e o g r a

m) 、機場北跑道中測風儀的每小時讀數，經過再分析後，將部分形成機制存疑或特徵不明顯的海風個案剔除，總共得到 1 2 5 個海風個案。這些個案大多符合以下條件：

- (甲) 背景風為偏東風，
- (乙) 天氣大致良好，
- (丙) 天氣形勢沒有受到冷鋒、強季候風等大型天氣系統支配，
- (丁) 日間時段內機場北跑道中間位置測風儀風向由偏東轉為偏西風，並於傍晚日落後轉回偏東方向。

一般來說，當背景風為離岸風（偏東風），且天氣系統較弱時，機場的海風入侵過程較為明顯：地面日間升溫引起海陸溫差不斷擴大，海陸風環流生成後，向岸風（西風）慢慢移向陸面。在背景離岸風和海風形成的向岸風爭持下，形成明顯的切變線或海陸風鋒面（圖一），根據該切變線的位置可以較為客觀地界定海風能否抵達跑道範圍及其起始時間。文獻〔1〕中的第二類海風，即由整個大嶼山受日照升溫而引起的海風（主要為北或西北風），由於這一類海風較少機會在跑道產生明顯風切變，故此收集海風數據時並不包括出現此類海風的情況。當背景風本身為西風時，縱使海陸風環流仍能生成，但界定海風的起始時間十分困難，在這研究內亦不包括此類海風。

基於所收集得的海風數據中風向變化集中為東—西風，加上影響機場由海風造成的跑道風切變亦主要為東—西風的變化，我們可將採用較為簡單的一維模型。在一維模型中所描述的海陸風為離岸風及向岸風，分別對應海風數據中風的東、西分量。儘管我們沒有考慮到南北分量的風力，但由於在大尺度系統較弱情況下海風才會形成，因此忽略風的南北分量應不會造成太大誤差。

### 3 · 海風指數

根據 Fry s i n g e r e t a l (文獻 [ 3 ] ) , 基本海風指數的方程為 :

$$SBI = \frac{\pm U^2}{\Delta T} \quad \text{方程 ( 1 )}$$

當中  $U$  為離岸風速, 而  $\Delta T$  則為陸面空氣及海面空氣的溫差。從圖二 (文獻 [ 三 ] 圖一) 的分類可見, 象限一是  $SBI$  的可用範圍, 當  $SBI$  方程中分母偏大而分子偏小, 海風比較容易建立。

上式的物理含義可理解為離岸風的能量和海陸溫差的熱能之比: 當風能量較大 (離岸風較強) 時則不利海風推進, 相反當熱能足夠大時 (海陸溫度差異大) 則可抵消離岸風力而進入陸地。

由於機場預報員須於早上六時前發出當天的機場天氣預報。因此我們利用早上 5 : 3 0 在機場觀測的風的資料, 計算背景東風 (離岸風) 分量。海溫則代入上一天下午於北角的海水溫、地面氣溫則用當天機場預報的最高溫度:

$$SBI = \frac{U_{5:30am}^2}{(CLKMaxTemp - SeaTemp)} \quad \text{方程 ( 2 )}$$

根據 2 0 0 3 至 2 0 0 4 年收集到的海風數據, 我們發現大部份的個案中  $SBI$  的數值都小於  $7ms^{-2}K^{-1}$ 。因此  $SBI \leq 7ms^{-2}K^{-1}$  是一個可用的判別指標。與文獻 [ 3 ] 相比, 香港國際機場的  $SBI$  比  $Charles ton$  使用的指標 (  $2.7ma^{-2}K^{-1}$  ) 為高, 這相信是與海風受地形影響而較容易產生有關。

上式並沒有考慮多雲的情況對海風建立的影響, 需另加判別條件。由於雲層的厚薄對其會否因受日照而消散關係密切, 因此我們同時參考了機場雲量報告及探空資料中底層空氣的濕度作為另一客觀指標。

在業務運作時，海風指數的應用方法如下：

機場海風無法建立的條件為：

(甲)  $SBI > 7$ ，或

(乙) 清晨六時機場觀測到的雲量為六分雲或以上，並且925百帕至850百帕的平均濕度為85%或以上。

#### 4 · 海風始現時間方程

如圖三所示，計算海陸風環流最簡單的模型為Holtson (文獻 [4]) 中所描述的環流方程：

$$\dot{v} = \frac{D\langle v \rangle}{Dt} = \frac{R \ln(P_0/P_1)}{2(h+L)} (\bar{T}_2 - \bar{T}_1) \quad \text{方程 (3)}$$

正  $v$  代表向岸風，負值為離岸風； $\dot{v}$  是風的加速度； $P_0$ 、 $P_1$  分別代表地面及海陸環流層頂的氣壓； $h$ 、 $L$  分別是環流高度及水平尺度； $R$  為乾空氣氣體常數； $\bar{T}_1$ 、 $\bar{T}_2$  則是地面上空及海面上空的平均氣溫。

由於上式沒考慮地面摩擦，海陸溫差亦用常數，故得出加速度為恆定值，依此計算則海風風速可在短時間內增至很大。為使上式得出較合理結果，我們加入以下幾個方程項：

(甲) 摩擦項，並設海風的終端速度  $v_{max}$  為10海浬，可得：

$$\dot{v} t = -v_{max} \ln \left( \frac{v_{max} - v}{v_{max} - v_0} \right) \quad \text{方程 (4)}$$

$v_0$  為起始風速，應用時代入背景東風的強度，取負值。

(乙) 地面升溫過程。以晴天的太陽輻射通量為  $1000$  焦耳/平方米/秒計，代入地表熱容得出日間地面升溫率為  $\phi = 5.12 \times 10^{-4} \text{ K s}^{-1}$ ，並考慮日出後太陽方位角的變化  $\dot{\theta} = 7.27 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ，折算為地面實際接收到的能量。不考慮海面的升溫下有：

$$T_{land} - T_{sea} = T = \int \phi \sin(\dot{\theta}t) \quad \text{方程 (5)}$$

當中  $t=0$  為當天日出時間，然而在實際運算中，此時間統一取為早上 7:30。

(丙) 離岸風造成的溫度平流。由於離岸風的存在，一部分經由地表加熱的空氣會輸送到海面，形成實際海陸溫差比預期小。而在海風入侵後期情況則相反：海風將水面較涼的空氣輸送至陸地。由於方程的目的是計算海風起始時間，溫度平流的影響只在海風建立初期才予以考慮。上段 b) 的方程需修訂為：

$$\frac{dT}{dt} - v \frac{T}{L} = \phi \sin(\dot{\theta}t) \quad \text{方程 (6)}$$

(丁) 邊界層溫度變化。方程中的  $\bar{T}_1$ 、 $\bar{T}_2$  應理解為地表至環流頂的平均溫度，因此不能單純代入地面及海面氣溫。為簡化計算，我們引入一個可調參數  $\epsilon$ ，代表實際的平均溫差和近地面海陸溫差的比。根據海風數據作迴歸分析後，取值為  $0.167$ 。

根據以上引入的新方程項，海風起始方程的最終形式為：

$$\frac{R \ln(P_0/P_1)}{2(h+L)} \epsilon T(t) t = -v_{max} \ln \left( \frac{v_{max} - v}{v_{max} - v_0} \right) \quad \text{方程 (7)}$$

當中  $T(t)$  為近地面的海陸溫差：

$$T(t) = \frac{\phi}{\dot{\theta} + \frac{v^2}{\dot{\theta} L^2}} \left[ e^{vt/L} - \cos(\dot{\theta}t) - \frac{v}{\dot{\theta}L} \sin(\dot{\theta}t) \right] + T_0 e^{vt/L} \quad \text{方程 (8)}$$

$T_0$  是當  $t=0$  時的海陸溫差。上列方程給出向岸風  $v$  隨時間  $t$  的變化。當  $t=0$  時，初始風力為  $v_0$ ，即背景離岸風力。在實際計算時，我們定義海風起始時間為當  $v$  達致 +1 米/秒的時間。在  $v_0$  過大或  $T(t)$  過小的情況下方程對於  $v=1$  無解，則代表海風無法建立。

表一列出了業務運作時上式所用各項參數值。需特別指出的是，儘管該環流模型只是一個概念模型，在各項參數的取值上依然盡量採用現實數據，以便該方程有較好的通用性。雖然式中有很多參數可供調較，但由於收集到的海風個案有限，實際上我們只是集中調試了  $\epsilon$  值，其他的參數全部採用經驗值。若將海風起始時間的容許誤差範圍定為 2 小時內（例如給出起始時間為 03–05 UTC，而實際的海風起始時間介乎 03 至 05 則當預測正確），則調校後的方程有 80% 的命中率。

## 5 · 業務應用

在 2005 年底，系統完成自動化，並將結果以網頁（圖四）形式放於天文台的內聯網上供機場氣象所的預報員參考。系統讀取當天清晨 5:30 的天氣資料進行運算，其結果可幫助預報員發出當日 00–24 時段的機場天氣預報（TAF）。由於海風指數及海風起始時間為兩個互相獨立的子系統，有機會出現海風指數預測當天海風能夠建立但系統無法算出起始時間，或系統給出海風起始時間但海風指數卻偏大等不一致的結果。在實際應用中，預報員需分析比對兩者的計算結果才能得出較為合理的預測。

在業務運作上，預報員需首先分析天氣形勢，判斷天氣尺度系統的強弱。當預料海風有可能在機場建立時，預報員可參考該系統的運算結果以決定當天海風會否建立及其起始時間。

## 6 · 2006年驗證結果

由於海風指數及海風起始方程有機會給出不一致的結果，為方便驗證，我們只取兩者的合集：即當海風指數顯示海風能夠建立，同時海風起始方程亦可計算出海風起始的時間時才分類為系統預測海風建立。

表二列出2006年的驗證得分。為方便比對，表中同時列出了2005及2006年機場天氣預報（TAF）的得分。由表中可見，預報員參考海風系統提供的資料後，2006年TAF的POD比2005年提高11%，但FAR則大致維持不變（2005年37%，2006年34%）。而海風起始時間的準確率則提高至78%。可見系統對海風預測有正面的影響。

由於系統現時只考慮東風分量的強度，並未考慮實際的風速，在背景風為大南風或大北風而東風分量細小情況下，系統有時會錯誤地預測海風成功建立。這方面需進一步改善才可把虛報降低。

## 7 · 結論及未來發展

我們總結了以前關於香港國際機場的海陸風特性及其影響的研究，開發了一套海風預測系統。根據機場清晨的氣象數據及預測氣溫，該系統可判斷當天機場範圍內會否有海風建立，並計算海風的起始時間。系統於2005年尾正式投入運作。2006年的驗證結果顯示，系統可協助機場預報員發出更準確風向及風速預報。

從圖一可見，一完整的海陸風過程除了海風的向岸推進，亦包括海風環流的消滅和日落後離岸風的增強。目前系統只可粗略掌握海風在機場內的起始時間但無法推算海風的消退時間。根據預報員的經驗，機場海風消退時往往伴隨著風向順轉為東南風的情況，對此需做進一步研究。

天文台正計劃設立一套自動機場氣象預報系統，該系統將整合各類氣象預報，包括數值天氣預報的時間序列，自動生成供機場預報員參考的機場天氣預報。由於數值天氣預報系統的水平解析度有限，未能夠正確反映機場附近的海陸

風過程。未來我們會嘗試將目前的海風預測系統的輸出導入該系統中，以得出機場風向風速較精細的變化。

### 鳴謝

作者就黃冠華先生、宋文娟女士就系統設計以至業務運行方面提供的協助及意見，特此致謝。

### 參考文獻

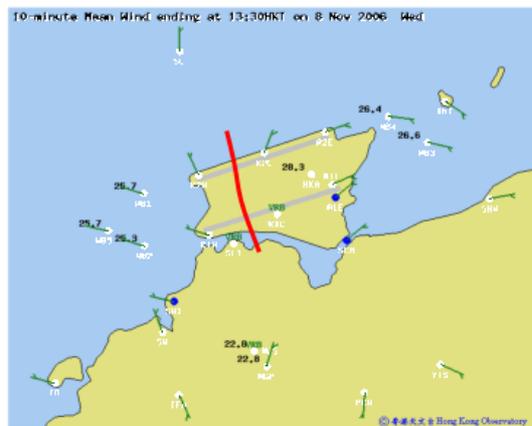
- [ 1 ] Cheng C M. 2002. Sea-breeze induced windshear at Chek Lap Kok, HONG KONG. Technical Note No. 103, Hong Kong Observatory.
- [ 2 ] Cheng C M., 1999. Characteristics of sea-breezes at Chek Lap Kok. Technical Note No. 96, Hong Kong Observatory.
- [ 3 ] Frysinger J R, Lindner B L and Brueske S L. 2003. A Statistical Sea-Breeze Prediction Algorithm for Charleston, South Carolina. *Weather and Forecasting*, 18, 614-625.
- [ 4 ] Holton J R. 1992. *An Introduction to Dynamic Meteorology* (3<sup>rd</sup> edition). Academic Press.



10:00pm



15:50pm



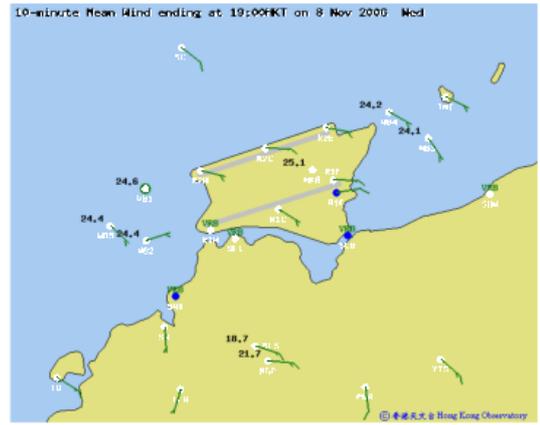
13:30pm



17:00pm

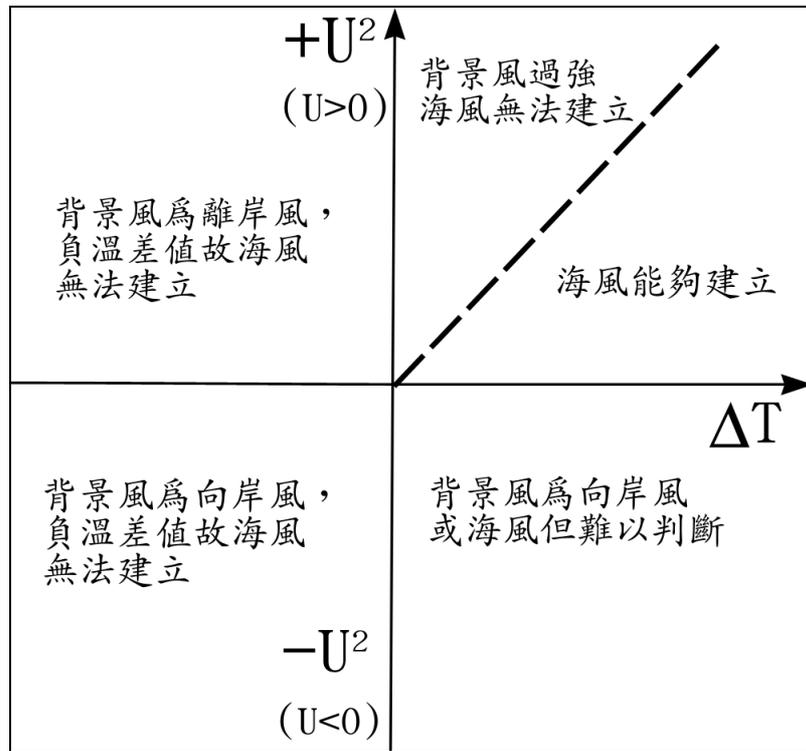


13:50pm



19:00pm

圖一． 香港國際機場的海風過程



圖二. F r y s i n g e r e l a l [ 文 獻 [ 3 ] ) 的 圖 一 , S B I 分 類

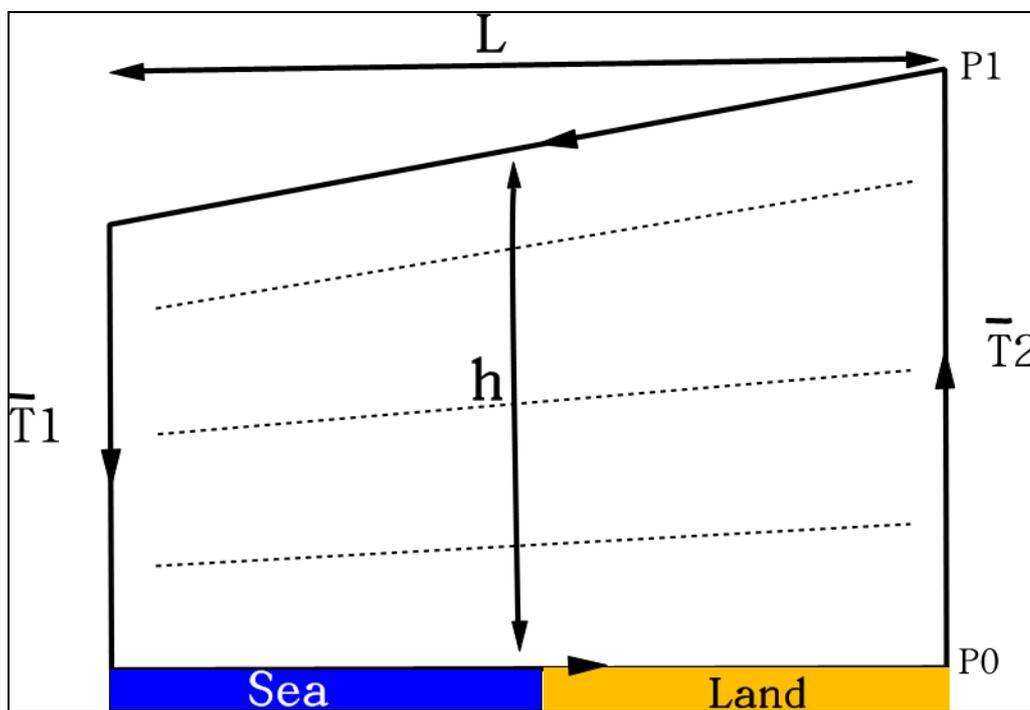


圖 三 . H o l t o n ( 文 獻 [ 4 ] ) 中 描 述 的 海 陸 風 環 流

## Web page for indicating the occurrence of sea breeze at CLK

### SeaBreeze Index

**Sea Breeze for today**  
**20061212(YYYYMMDD)**

**NO**

*Notes on the calculation method of Seabreeze Index.*

The occurrence of seabreeze is based on the following raw data:

Sea breeze index (SBI): **0.3**  
Actual cloudiness at 5 a.m.: **6** okta  
Mean RH between 925 and 850 hPa: **86** %  
U (the cross-coast component of the offshore winds): **0.8** m/s  
Sea Temp(North Point): **21.0** degree C  
Max Temp(VHHH TAF): **23** degree C

### Sea breeze onset time

**Seabreeze onset time estimated for**  
**20061212(YYYYMMDD).**

If seabreeze is forecast, then the estimated onset time is between: **03 to 05** UTC

*Notes on the calculation method of onset time.*

The calculation of seabreeze onset time is based on the following raw input at 05:30 HKT:

Wind  
Stn: WGL, Direction: 10 degree, Force: 3.6 m/s  
Stn: R2C, Direction: 345 degree, Force: 3.7 m/s  
Stn: TMS, Direction: 90 degree, Force: 5.0 m/s  
Stn: TMT, Direction: 16 degree, Force: 4.0 m/s  
Stn: NLS, Direction: 72 degree, Force: 5.7 m/s

Pressure  
Stn: HKA 1016.9 hPa  
Stn: NLS 933 hPa

Temperature  
HK Airport: 19.4 degrees  
Sea temperature at North Point: 21.0 degrees  
(Note: reading taken at 14:00H yesterday)

圖四 . 內聯網上的海風預報網頁

表一：海風起始方程中各項參數值

| 參數項   |
|---|
| $h = 1,000 \text{ m}$                               |
| $L = 16,000 \text{ m}$                              |
| $P_1 =$ 清晨 5 : 30 彌勒山氣壓                             |
| $P_0 =$ 清晨 5 : 30 機場氣壓                              |
| $\epsilon = 0.167$                                  |
| $V_{max} = 10 \text{ kt}$                           |
| $\phi = 5.12 \times 10^{-4} \text{ K s}^{-1}$       |
| $\dot{\theta} = 7.27 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ |
| 太陽輻射通量 = $1000 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$     |
| 地表熱容 = $2.13 \times 10^6 \text{ J m}^{-3}$          |
| $R = 287 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$          |
| $T_0 =$ 清晨 5 : 30 機場溫度減上一天北角水溫                      |

表二：2005及2006年驗證得分

|                    | 實際海風<br>日數<br>(N) | 預測海風<br>日數<br>(n) | 命中日數<br>H | POD<br>H/N | FAR<br>(n-H)/n | 起始時間<br>準確率 |
|--------------------|-------------------|-------------------|-----------|------------|----------------|-------------|
| 2006年機場預報<br>(TAF) | 97                | 110               | 73        | 75%        | 34%            | 78%         |
| 2005年機場預報<br>(TAF) | 96                | 97                | 61        | 64%        | 37%            | 49%         |