

不同大氣條件下煙幕擴散與視覺遮蔽效益評估模式之建立

張厚起* 苗志銘** 余斯慰***

*國防大學理工學院國防科學研究所
**國防大學理工學院機電能源及航太工程學系
***國防大學理工學院環境資訊及工程學系

摘 要

本研究整合投影幾何、高斯擴散模式 (Gaussian Dispersion Model) 與 Bouguer-Lambert 公式，成功地開發出一套可快速計算並模擬煙幕擴散與其對視覺衰減效應的電腦軟體程式。此程式可考量不同大氣風速、風向、大氣穩定度、地形條件、與不同發煙機的配置型態，計算煙幕擴散型態、及其相對應之視覺度衰減影響。研究結果顯示，煙幕對視覺的衰減效能隨著大氣穩定度的增加而增加；在相同的大氣穩定度與地形條件時，大氣風速在 3~5ms-1 時，煙幕可提供較佳的視覺衰減與遮蔽效果。此外，研究結果亦顯示，除非大氣穩定度為極不穩定時，風向角的改變對近距離的煙幕視覺衰減效能影響不大。

關鍵字：煙幕、高斯擴散模式，視覺衰減、大氣穩定度、地形條件

Establishment of a Prediction Code on Smoke Dispersion and Visibility Decay under Various Atmospheric Conditions

Hou-Chei Chang*, Jr-Ming Miao **, and Szu-Wei Yu ***

* Graduate School of Defense Science Studies, Chung Cheng Institute of Technology National Defense University, Taoyuan, 335, Taiwan, R.O.C.

**Department of Mechanic, Energy and Aerospace Engineering, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University, Taoyuan, 335, Taiwan, R.O.C.

***Department of Civil Engineering, Chung Cheng Institute of Technology National Defense University, Taoyuan, 335, Taiwan, R.O.C.

ABSTRACT

In this study, a computer program, which integrates Projective Geometry, Gaussian Dispersion Model, and Bouguer-Lambert formula, was successfully developed. This program could both fast calculate and simulate the smoke dispersion and its related visibility decay. Different factors such as atmospheric wind velocities, wind directions, stability conditions of atmosphere, topographies, and arrangements of smoker generators could be taken into consideration in the calculation. Results showed that the effect of smoke to visibility decay was increased with the stability of atmosphere. The wind speed of 3~5ms-1 generated a better smoke sheltering effect if the same condition of atmospheric stability and topography were encountered. Moreover, the visibility decay for sheltering effect was insensitive to wind direction in the case of shorter range, unless a highly atmosphere instability of atmosphere was occurred.

Keywords: smoke dispersion, Gaussian dispersion model, visibility decay, stability of atmosphere, topography

1. 前言

自然界的降雨、霧、霾、沙塵暴等天候所產生的微粒由於會吸收光波的部份能量或造成光線的散射，因而影響光線的強度並降低大氣的能見度(Visibility)。早自遠古時代，蚩尤利用雲霧、黑夜設置「迷魂陣」，造成視覺度的衰減，讓黃帝的部隊迷失方向，因而多次大敗黃帝，直至黃帝發明指南車方才扭轉劣勢，但是限於自然界的雲霧、霾或沙塵暴均不是隨招隨來，或是能夠有效地控制其擴散範圍。因而在軍事運用上，為降低敵軍直接攻擊與提高部隊防護的能力，嘗試發展出一套以人工方式產生煙幕的作戰模式，用以偽裝、遮蔽與干擾敵方視覺及光學儀器的觀測，進而達到保護我方的戰力，稱之為煙幕技術[1]。

煙幕是由空氣中懸浮的大量細小物質微粒所組成，並以空氣為分散傳遞的介質。戰場上運用大面積煙幕支援作戰始於第二次世界大戰期間，如英軍利用煙幕遮蔽港口、工廠、城市等重要地區，或 1943 年美軍在北非的 Bizerte 港，利用煙幕產生器生成煙毯 (Smoke Blanket)，因而使得該港口雖遭到大量的炸彈轟炸，但卻無重大之戰損。美國國防部曾對偽裝、隱蔽、欺騙等作為進行有系統地研究，其結果顯示，若目標不採取偽裝、隱蔽、欺騙等作為，其目標存活率約 9~38%，若採取偽裝、隱密、欺騙等技術，其目標存活率約為 42~90%，其中煙幕施放為各項作為中效果最佳的方案。另依據美軍電腦兵棋推演的數據顯示，在守勢防衛作戰中若施放煙幕做為屏障，約可減少 25% 的人員及軍需物資損失，並能迫使敵軍前進速度減緩 50%。朱劍平[2]亦指出煙幕可使步槍的射擊效果降低 70-80%，反坦克導彈的效能降低 40-60%。因此煙幕在戰略、戰術彈道飛彈防禦

計畫中屬於價值效益比很高的防禦系統。

煙幕是人工產生的軍事遮蔽偽裝武器，由於煙幕具有遮蔽與偽裝的雙重特性，所以是現代戰場掩護我軍部隊行動或作為的有效屏障。在作戰期間，部隊指揮官若採用煙幕作為，則可達到遮蔽重要戰略與戰術目標、掩護部隊行動、迷亂敵人火力、干擾敵人有效偵搜與精確導引武器直接命中等效能，確保戰力之維持，煙幕擴散與視覺度遮蔽評估模式的建立是國防科技自主關鍵技術之一。

過去幾十年來，有關煙幕擴散與遮蔽效能之研究工作可區分為現地施放實驗量測與數值模擬分析兩類。由於台灣地區地小人稠，現地試驗施放煙幕時，大量的高濃度煙霧除造成鄰近地區視覺遮蔽干擾與妨礙交通運輸的順暢外，更會產生嚴重的環保問題，因此現地施放煙幕探討對視覺衰減的研究作業有其困難性。鑒於電腦科技的日新月異，藉助電腦快速與精準的計算能力，以數值模擬方法探討在不同大氣條件時，對煙幕的擴散型態與視覺衰減遮蔽效果之影響，已成為最經濟、快速與便捷有效的研究工具。

傳統的高斯擴散模式由於可以快速的計算下風處污染物分佈的狀況，因此被運用於大氣擴散中估算環境的空污問題[3]。由於煙幕是由高濃度的細小微粒所組成，其擴散傳送主要是藉由大氣中流動的氣流，因此風速的高低、風向的角度、大氣的穩定度與地表的型態，均為影響煙幕擴散範圍與遮蔽效能的重要參數，但是傳統的高斯擴散模式並未將風向對煙幕擴散遮蔽的影響因素納入考量。因此本研究利用幾何投影的方法，將大氣風向對一台或兩台發煙機所產生煙幕擴散及遮蔽效能的影響納入考量，併同大氣風速、大氣穩定度與地形條件等環境因素，建立煙幕在開闊地形的擴散型態及其對視覺度衰減影響性的分析評估模式。

2. 文獻回顧

在環境工程中，人工污染物在都會地區中的擴散行為一直是重要的研究課題。劉山豪[4]利用現場量測、採樣分析與模式推導三種方式，探討高雄地區大氣中的懸浮微粒特性，及其對能見度及消光係數之影響。戴君龍[5]藉由主成分因子分析法（Principal Component Analysis, PCA）及多重變異迴歸模式探討並建立都會地區及非都會地區之能見度與其影響因子之關係。

Chatzipanagiotidis and Olivari [6]利用光線散射技術（Light Scattering Technology）在風洞中量測不同大氣邊界層條件下，一股煙柱流過山丘後濃度場的變化情形。研究結果顯示，山丘的存在雖然會影響到煙柱的擴散型態，但是大氣邊界層厚度的效應更為顯著。同樣在風洞中進行量測，Yassin et al. [7]以一個城市街谷模型探討三種不同大氣穩定度下，C₂H₄ 在 16 個量測位置的濃度值，藉由風向的調整建立起完整的資料庫，可作為計算流體力學（Computational Fluid Dynamics, CFD）模式的驗證案例。

由於大氣穩定度影響到煙柱往下游的擴散行為，Liu and Leung [8]嘗試利用 CFD 模式進行分析，發現對於不穩定分層大氣環境（Unstable Stratified Atmosphere）中的煙柱而言，傳統 Gaussian 模式所無法預測出的煙柱下降與上昇軌跡皆可精確地模擬出。Kim et al.[9]則是以二維 RANS（Reynolds-Averaged Navier-Stokes）方程式配合 $\kappa-\varepsilon$ 紊流模式探討污染物流過山丘與建築物組合的流場與濃度場分佈情形，藉由流線可視化圖形，流場的結構可以清楚地辨別。Wang and McNamara[10]利用三維 RANS 模式探討街谷走向與交會型態對污

染物擴散的傳播機制（Dispersion Mechanism），但是在實際應用上仍然存在一些關鍵點，如紊流模式的選用、不同地形下壁面函數（Wall Function）的處理等，有待克服[11]。

Theurer et al.[12]指出污染物擴散行為受到地形、障礙物的形狀、排列方式、污染源排放位置等影響。比對不同分析模式後發現，若是處於平坦開闊的地形、穩定風速及污染源位於障礙物影響範圍以外的時候，高斯擴散模式可以獲致良好的結果。Riddle et al.[13]以類高斯擴散模式（Quasi-Gaussian Model）的大氣擴散模擬系統（Atmospheric Dispersion Modeling System, ADMS）與 FLUENT 多用途計算流體力學數值模擬軟體對一高度 30m 煙囪排放物在平坦地形（Flat Terrain）的擴散行為做一比較，模擬結果顯示兩者的計算結果相近。

由以上相關的文獻顯示，高斯擴散模式可適用於地表平坦的煙幕擴散之研究。在作戰部署時，氣象條件對煙幕的使用時機影響較大，有時甚至可以決定煙幕的使用與否，這是因為風向可以影響煙幕的輸送方向、長度、寬度與發煙器材的消耗量，由於傳統的高斯擴散模式僅考量大氣風速及大氣穩定度等氣象條件，至於風向對煙幕擴散與遮蔽的影響未納入考量，因此本研究利用座標投影之觀念，將大氣風向的因素納入考量，併同大氣風速與大氣穩定度，計算在不同天候時煙幕擴散的型態及對視覺遮蔽的效能。

三、研究方法

3.1 高斯擴散方程式

本研究利用高斯擴散方程式計算不同大氣天候條件下煙幕擴散的型態，模擬相關假設如下：

大氣流場為穩態均勻流場，風速為定值，無陣風(Gust Flow)或其他影響煙幕擴散的干擾因素，且其皮勒數 (Peclet Number) 遠大於 1。

1. 煙幕擴散的範圍內地表無建築物等明顯的地表物，亦即為平坦地表。
2. 地表為均勻的粗糙度，地面無吸收及吸附作用，地表對煙幕的作用為全反射，且煙幕本身是無沉降的被動成份。

描述煙幕濃度分佈的高斯擴散模式可以表示為

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \times \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (1)$$

式中 $C(x, y, z, H)$ 代表點 (x, y, z) 處的煙幕濃度 (gm^{-3})， Q 代表煙幕釋放強度 (gs^{-1})， H 代表發煙機噴出煙幕的有效高度 (m)， u 為局部風速 (ms^{-1})， σ_y 、 σ_z 分別代表下風處 y 與 z 方向擴散尺度的標準差 (Standard Deviation)。 σ_y 、 σ_z 為大氣穩定狀況與下風距離的函數，一般是以查表方式取得相關數值，但為數值模擬時程式運算執行的便利性，本研究的 σ_y 與 σ_z 以指數型態 (Power-Law) 表示，其公式如下 [14]

$$\sigma_y = R_y x^{\gamma_y} \quad (2)$$

$$\sigma_z = R_z x^{\gamma_z} \quad (3)$$

式 (2)、(3) 的 x 代表距離煙幕施放點的距離， R_y 、 R_z 、 γ_y 、 γ_z 則依大氣穩定度的條件設定其相對應的係數。

大氣穩定度以 Pasquill 所提出的分類標準為依據，量測垂直地表 10m 及 60m 高度的大氣溫度，依其溫差梯度將大氣邊界層流區分 A 至

F 等六個穩定度等級。大氣風速由於受地表無滑移與地表粗糙度的影響，因此風速自地表隨高度增加而增加，其速度剖面以冪函數模式表示如下：

$$u = u_0 \left(\frac{z}{z_0}\right)^n \quad (4)$$

式中風速指數 n 值是大氣穩定度與地面粗糙度的函數，其值介於 0.07 至 0.55 間，本研究的 n 值分別取 0.14、0.28 與 0.4 代表短草開闊地形 (Meadow)、長草開闊地區 (Grassland) 及都會地區 (Urban) [15]。 u_0 及 z_0 為參考高度及參考風速，參考高度以距地表 10m 為基準，參考風速則為參考高度的風速值。

3.2 煙幕消光之視覺衰減原理

大氣中粒子濃度與散射強度成正比，所以當煙幕中顆粒濃度越高，對光的散射強度就越高，相對視覺度的衰減亦隨之增加。依據 Bouguer-Lambert 定律，對一強度為 I_0 的單色光波通過厚度為 dy 的介質，其光強度 dI 的變化為

$$dI(\lambda) = -I_0(\lambda) \sigma_e(\lambda, y) dy \quad (5)$$

其中 λ 代表波長， y 代表距離， $\sigma_e(\lambda, y)$ 為介質的消光係數。消光係數包含顆粒吸收係數與散射係數兩部份，消光係數與煙幕顆粒的種類、粒徑大小、形狀與方向、表面粗糙度、光的波長等因素有關，而消光係數是指光的強度衰減到原來的 0.36 時的介質厚度。消光係數與溶液或煙霧粒子的濃度 C 成正比，亦即

$$\sigma_e = \alpha_e C \quad (6)$$

式中 α_e 稱為質量消光係數。若將 (6) 式

代入(5)式並加以積分，可以得到光線通過介質時之衰減影響

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp[-\int \sigma_e(\lambda, y) dy] \quad (7)$$

由於煙幕是由懸浮於空氣中細微粒子所組成，並會對光線造成視覺的衰減，因此本研究運用 Bouguer-Lambert 定律來計算不同天候條件下煙幕對觀測視覺衰減 (Visibility Decay) 的效果。

3.3 模擬範圍與邊界條件

為建立風速、風向、大氣穩定度及不同地形對大面積的煙幕擴散型態及視覺遮蔽影響效能的評估工具，模擬時將發煙機設置於座標原點，發煙機開口方向與縱軸(Y軸)同向，縱軸距離為 1000m，觀測者與目標物分別位於發煙機的橫軸(X軸)兩側，霧油用量為 40gs^{-1} 。另由於考量大氣風向偏移的影響，橫軸(X軸)的模擬範圍為 $X=-500\text{m}$ 至 $X=500\text{m}$ ，因此觀測的總長度為 1000m 的固定值，並假設觀測者或觀測器材的觀察高度為 $Z=1.5\text{m}$ 。由於過低或過高的風速皆不適宜煙幕的施放作業[16]，因此選定大氣風速 u_0 為 1ms^{-1} 至 7ms^{-1} ，風向角為大氣氣流與縱軸(Y軸)的夾角，模擬的風向角度由 0° 開始，每 5° 為一個增量至 45° ，共計 10 個風向模擬角度，大氣穩定度由 A 至 F，模擬範圍的幾何構型及尺寸圖如圖 1。

3.4 計算流程

本研究利用投影幾何的觀念將風向的影響因素納入考量，並將大氣風速、地表型態併同納入程式內計算煙幕的遮蔽效應。由於煙幕的

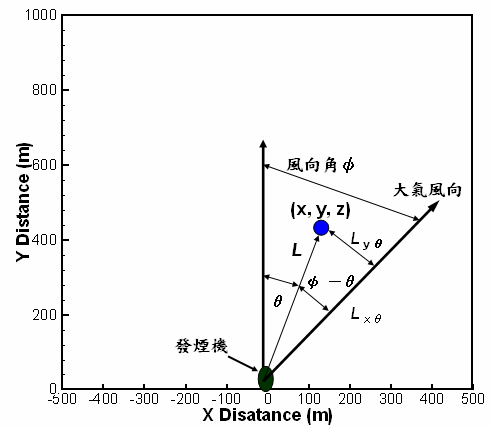


圖 1 模擬範圍幾何構型與尺寸圖。

擴散主要藉助大氣的流動，假設發煙機的噴口方向與 Y 軸同向，大氣風向角 ϕ 為大氣流動的方向與 Y 軸的夾角，對於計算域內任一點 P 與原點連線的長度為 L，L 線與 Y 軸之夾角為 θ ，L 線與大氣風向的夾角為 $\phi - \theta$ ，因此 P 點在計算域內投影於大氣風向的長度分別為

$$L_{x\theta} = L \times \cos(\phi - \theta) \quad (8)$$

$$L_{y\theta} = L \times \sin(\phi - \theta) \quad (9)$$

$$L_z = Z \quad (10)$$

將 (8) 至 (10) 式與邊界條件代入高斯擴散方程式，則可計算出計算域內每一點的煙幕濃度，再運用 Bouguer-Lambert 公式計算煙幕對觀測點至目標物造成視覺衰減的影響後，以繪圖軟體將模擬結果可視化，作為分析與討論的參考依據，程式計算流程如圖 2。

張厚起, 等.
不同大氣條件下煙幕擴散與視覺遮蔽效益評估模式之建立

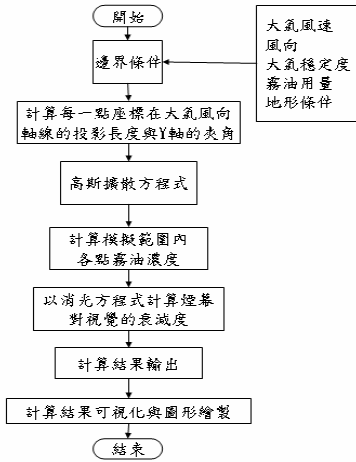


圖 2 煙幕擴散與視覺遮蔽衰減計算流程圖。

四、結果與討論

4.1 煙幕濃度分佈與對視覺度衰減的關係

人造煙幕是利用發煙機的高熱將霧油汽化後，由發煙機噴口噴出並藉由大氣風力將細小的霧油顆粒傳送到下風處，進而產生視覺遮蔽的效果。因此煙幕濃度的分佈情形會直接影響視覺遮蔽的效果。

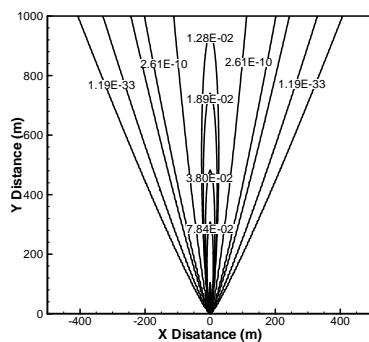


圖 3 風速 $u_0=3\text{ms}^{-1}$ ，風向角 $\psi=0^\circ$ ，大氣穩定度=F時，在短草開闊地形高度 $Z=1.5\text{m}$ 處的煙幕濃度(gm^{-3})分佈圖。

圖 3 為短草開闊地形在大氣風速 $u_0=3\text{ms}^{-1}$ ，風向角 $\psi=0^\circ$ ，大氣穩定度=F時，位

於高度 $Z=1.5\text{m}$ 處的煙幕濃度分佈圖。由於發煙機位於模擬區座標的原點，發煙機噴出的煙幕與大氣風向同方向，模擬結果顯示在大氣穩定度為穩定的F等級時，煙幕可藉由大氣穩定的氣流向下風處擴散，亦即濃度等值線會隨著大氣流動的距離增加而降低，並逐步向兩側($\pm X$ 方向)擴散。整體煙幕濃度等值線分佈的型態呈現喇叭形狀，其擴散範圍的夾角約為 40° ，亦即與Y軸的縱向軸線左右夾角各為 20° ，超過此一範圍，煙幕的濃度值即為0。

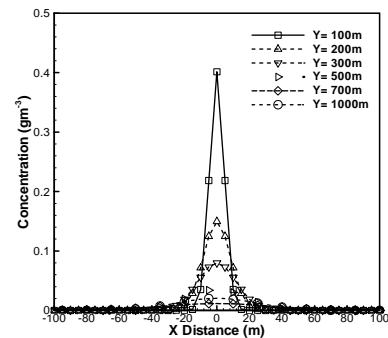


圖 4 風速 $u_0=3\text{ms}^{-1}$ ，風向角 $\psi=0^\circ$ ，大氣穩定度=F時，在短草開闊地形高度 $Z=1.5\text{m}$ 處，距離發煙機不同位置的煙幕濃度分佈圖。

圖 4 為相同大氣條件下，距發煙機不同距離的縱向剖面煙幕濃度分佈圖。由於風向角度為 0° ，因此煙幕濃度在 $X=0$ 的Y軸縱向線成對稱分佈的型態，在距發煙機下風處 $Y=100\text{m}$ 處，由於距離發煙機的距離較近，發煙機所噴出的霧油有較大的動能可以快速地向下風處流動，因此霧油的噴流結構不易被大氣中流動的氣流破壞並稀釋其濃度，因此距離發煙機越近，霧油的濃度值相對地較高。模擬結果顯示，在 $Y=100\text{m}$ 處的最大煙幕濃度約 0.42gm^{-3} ，其煙幕濃度曲線的分佈型態呈現近似尖錐形的分佈，隨著煙幕流動的距離增加，由於有更多的新鮮空氣稀釋煙幕的濃度，且煙幕亦逐漸向 $\pm X$ 方向

兩側擴散，因此涵蓋的範圍逐漸加大，而最大煙幕濃度值漸次降低。由Y=200m處的煙幕濃度分佈曲線，可以發現濃度分佈曲線已由尖錐形變為較緩的圓錐形狀，其最大煙幕濃度值約為 0.15gm^{-3} ，與Y=100m的煙幕濃度值相比較，煙幕濃度衰減約 63%。隨著大氣流動的距離再增加，濃度分佈曲線更由尖錐形、圓錐形逐漸衰減為鐘型分佈，在Y=300m處的煙幕濃度曲線，可以明顯的觀察到其分佈型態已轉變為對稱的鐘型分佈，其最大煙幕濃度值約為 0.08gm^{-3} 。更下游處Y=500m的位置，煙幕濃度分佈曲線已為較扁平的鐘型分佈，其最大煙幕濃度約為 0.03gm^{-3} 。當距離發煙機Y=1000m時，煙幕濃度分佈曲線已轉換近似平坦，其最大煙幕濃度約為 0.01gm^{-3} 。

煙幕遮蔽效果的評估，可以藉由煙幕對視覺度衰減的高低作為判斷的依據。當視覺度衰減百分比為 0% 時，代表觀測者或觀測設備與物標物之間無任何干擾物質的影響，因此觀測者或觀測設備可以清楚的看到遠方的物體或目標。當觀測者或觀測設備與目標物之間存在影響視覺的干擾物質時，視覺度隨即降低，亦即觀測者或觀測設備無法清楚的看到遠方的物體或目標。當視覺衰減度為 100% 時，即代表視覺完全被遮蔽。依視覺度衰減值的高低，煙幕遮蔽的效果區分為四個等級；很好(視覺度降低 95-100%)、好(視覺度降低 80-95%)、中等(視覺度降低 50-80%)、不好(視覺度降低少於 50%)[16]。

本研究假設在 Y=200m、500m、800m 及 1000m 的縱座標軸線上，分別設置固定式觀測器材，由 X=-500m 處的位置向 X=500m 處的目標實施觀測以判別煙幕的遮蔽效能。將圖 4 的結果帶入方程式(7)中分別計算各觀測線的視覺衰減效能後，由圖 5 顯示煙幕型成後對不同觀測位置造成視覺度衰減效能分布圖。由於煙幕

產生遮蔽的效果是利用霧油細微遮蔽材料對光線產生阻隔作用，當單位面積有較高的霧油濃度時，在很短的距離內就可以使視覺度大幅衰減，如果單位面積的霧油濃度值較低，則需要較長的距離方可使視覺度衰減。

由圖 4 的煙幕濃度分佈圖顯示，距發煙機 200m 處的煙幕濃度分佈曲線呈現圓錐形的分佈，且最大煙幕濃度為 0.14gm^{-3} ，顯示在中央軸線處附近的單位面積內有高濃度的煙幕，因此在圖 5 中 Y=200m 處觀測線的視覺度衰減曲線可以觀察到，高濃度的霧油在約 50m 的觀測距離內就使視覺度由完全清楚衰減到完全看不見的狀況。隨著離發煙機距離的增加，煙幕濃度分佈曲線逐漸變緩，因此對 Y=1000m 的觀測線而言，由於大氣為低風速高穩定的狀態，因此煙幕最大濃度值雖然已經大幅的降低至 0.01gm^{-3} ，但仍然在 150m 的側向煙幕涵蓋範圍內使視覺衰減 95%，而達到「很好」的遮蔽效果。

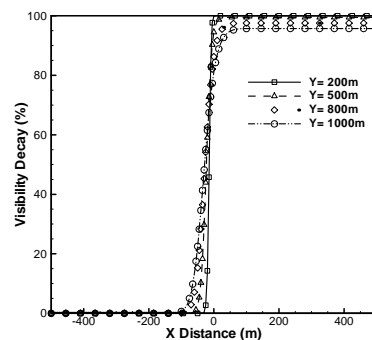


圖 5 風速 $u_0=3\text{ms}^{-1}$ ，風向角 $\psi=0^\circ$ ，大氣穩定度=F 時，在短草開闊地形高度Z=1.5m處，煙幕對不同觀測線的視覺衰減分佈圖。

4.2 大氣風速對煙幕遮蔽效能的影響

由於煙幕霧油細微粒子的擴散主要藉由大氣氣流的傳輸，當大氣風速改變時，相對地影響煙幕擴散的速度、分佈範圍與視覺衰減的效

能。當大氣穩定度為F等級，風向角 $\psi=0^\circ$ 時，不同的大氣風速對短草開闊地形在 $Y=1,000\text{m}$ 處所形成的煙幕濃度分佈與視覺衰減情形分別顯示於圖 6、7。由圖 6 中可以得當大氣風速 $u_0=1\text{ms}^{-1}$ 時，煙幕最大濃度值約為 $3.46 \times 10^{-2}\text{gm}^{-3}$ ，當大氣風速增加為 3ms^{-1} 時，煙幕最大濃度值約為 $1.15 \times 10^{-2}\text{gm}^{-3}$ ，兩者濃度值相差約 66%，顯示風速對煙幕的最大濃度有相當大的影響，雖然在數值模擬上顯示低風速可以獲得較高的煙幕濃度值，但由於煙幕傳輸主要藉助大氣流動，因此當風速較低時，因須較長的時間方可對遠端目標形成有效的遮蔽，無法達到煙幕快速形成遮蔽的目的。此外，相關文獻顯示，當風速小於 2ms^{-1} 時易使煙幕產生滯留現象，不利煙幕施放作業[16]。因此在大面積的煙幕施放時，主要探討 3ms^{-1} 至 7ms^{-1} 風速對煙幕施放的影響，對於低風速時的煙幕遮蔽則暫不討論。另外由圖 6 中亦可以發現，當大氣風速增加，對各觀測線的霧油濃度值除了最大濃度值較低外，等煙幕濃度值所包絡的範圍亦較小，因此在距發煙機相同位置的濃度分佈曲線亦顯示風速 $u_0=3\sim 7\text{ms}^{-1}$ 的煙幕濃度曲線均被 $u_0=1\text{ms}^{-1}$ 的煙幕濃度曲線包覆在內，顯示大氣風速的增加會減少煙幕的擴散範圍。

由圖 6 的煙幕濃度分佈顯示，煙幕擴散的範圍主要在 $X=-100\text{m}$ 至 100m 之間，因此在圖 7 視覺度的衰減曲線上亦顯示出，視覺自 $X=-100\text{m}$ 開始衰減，隨著觀測距離的增加，煙幕逐漸將視覺度降低。當風速為 $u_0=3\text{ms}^{-1}$ 時候，由於風速較低，煙幕被大氣帶離稀釋的速率較慢，相對的增加視覺度衰減的效果，因此煙幕使視覺度衰減約 96%，而達到「很好」的遮蔽效果。但隨著大氣風速的增加，稀釋大氣中的煙幕濃度值，降低煙幕對視覺度衰減的效能，因此在風速 $u_0=5\text{ms}^{-1}$ 時，煙幕僅使視覺度衰減約 88%，而達到「好」的遮蔽效果。當風速增加

至 $u_0=6\text{ms}^{-1}$ 時，煙幕僅使視覺衰減約 78%，而達到「中等」的遮蔽效果。若以煙幕所產生的視覺衰減度 80% 以上，亦即「好」的遮蔽效果為評判基準，由所選擇參數模擬結果顯示，對大面積的遮蔽煙幕在大氣風速 $3\sim 5\text{ms}^{-1}$ 時較低時有較佳的遮蔽效能，對於過高的風速將不利於煙幕的施放。

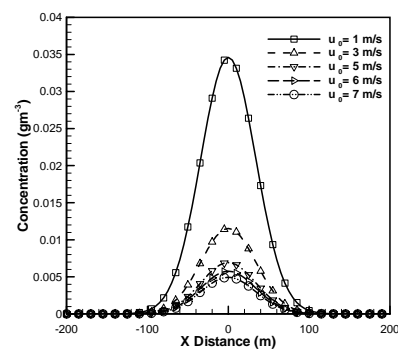


圖 6 大氣穩定度=F，風向角 $\psi=0^\circ$ ，高度 $Z=1.5\text{m}$ 處，不同大氣風速對短草開闊地形在 $Y=1000\text{m}$ 處的煙幕濃度分佈圖。

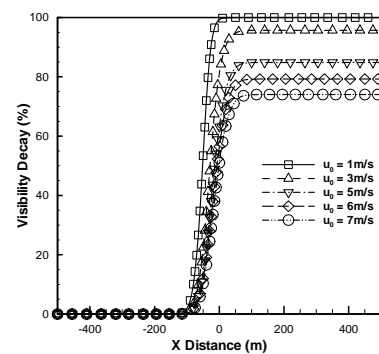


圖 7 大氣穩定度=F，風向角 $\psi=0^\circ$ ，高度 $Z=1.5\text{m}$ 時，不同大氣風速對短草開闊地形在 $Y=1000\text{m}$ 處的煙幕視覺衰減分佈圖。

4.3 地形對煙幕擴散遮蔽效能的影響

煙幕的細小微粒除藉由分子的自由擴散外，尚可藉由大氣的對流作用，將煙幕的細小

微粒帶至下風處。可預期的是，不同的地表型態會對靠近地表運動的氣流產生不同的阻力影響，因而在地表上方的氣流場速度剖面亦有所改變，一般以不同的風速指數來表示不同地形條件的氣流速度剖面。如前所述，本研究分別以風速指數 $n=0.14$ 、 0.28 、 0.4 代表短草開闊地形 (Meadow)、長草開闊地形 (Grassland) 及都會地區 (Urban) 等地表型態。

圖 8 為大氣風速 $u_0=3\text{ms}^{-1}$ 且風向角 $\psi=0^\circ$ ，大氣穩定度=A，在三種不同地形條件時，距發煙機 $Y=200\text{m}$ 處的煙幕濃度分佈圖。由圖中可以明顯的觀察到，在相同的風速與風向角時，不同地表型態下對應煙幕濃度分佈曲線存在有顯著的差異。當地表型態為短草開闊地形時 ($n=0.14$)，由於地表對大氣氣流的阻力相對較低，因此大氣氣流可以快速地將煙幕微粒帶至下游，因此在煙幕濃度分佈曲線上即顯現較低的最大的濃度值，在 $Y=200\text{m}$ 的最大的煙幕濃度約為 $3.61\times 10^{-3}\text{gm}^{-3}$ ，隨著地表型態改變為長草開闊地形 ($n=0.28$) 與都會區 ($n=0.4$)，最大的煙幕濃度值亦分別增加至 $4.71\times 10^{-3}\text{gm}^{-3}$ 、 $5.92\times 10^{-3}\text{gm}^{-3}$ ，增加比率為 30% 及 64%，顯示煙幕在開闊短草地型有較快的擴散現象，因此其最大濃度與擴散範圍皆相對較低，在都會地區，由於地表阻礙物增加，影響大氣氣流的流動，因此煙幕停留的時間較長，因此最大濃度與擴散範圍有所增加。

圖 9 為相同的大氣條件時，煙幕對視覺的衰減情形。由圖中可以觀察到，當煙幕施放於都會區地形時，煙幕可以使視覺衰減約 91%，而達到「好」的遮蔽效果。隨著地表型態的改變，亦即地表粗糙度的降低，使風速增加並降低煙幕的濃度值與視覺遮蔽的效能，對長草開闊地區與短草開闊地形而言，煙幕僅能使視覺衰減約 85% 及 77%，而達到「好」與「中等」的遮蔽效果。

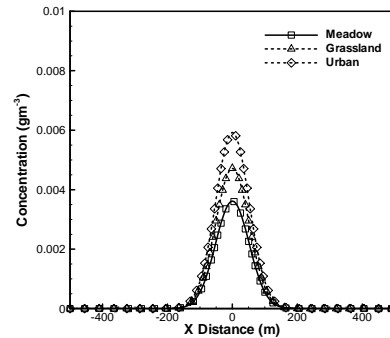


圖 8 風速 $u_0=3\text{ms}^{-1}$ ，風向角 $\psi=0^\circ$ ，大氣穩定度=A，高度 $Z=1.5\text{m}$ 時，三種不同地形條件在 $Y=200\text{m}$ 處的煙幕濃度分佈圖。

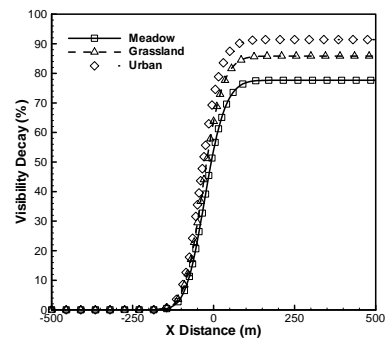


圖 9 風速 $u_0=3\text{ms}^{-1}$ ，風向角 $\psi=0^\circ$ ，大氣穩定度=A，高度 $Z=1.5\text{m}$ 時，三種不同地形條件在 $Y=200\text{m}$ 處的煙幕視覺衰減度分佈圖。

4.4 大氣穩定度對煙幕遮蔽效能的影響

圖 10 與圖 11 分別為大氣風速 $u_0=5\text{ms}^{-1}$ ，且風向角 $\psi=0^\circ$ 時，不同大氣穩定度下，在短草開闊地形 $Y=500\text{m}$ 處的煙幕濃度分佈與視覺衰減圖。當大氣穩定度為 F 時，由於氣流屬於非常穩定的狀態，煙幕被此穩定的氣流帶至下風處時，仍可維持較高的濃度，因此雖然距發煙機下風處 500m 的距離，最大煙幕濃度仍可維持 $2.11\times 10^{-2}\text{gm}^{-3}$ ，其濃度分佈曲線為陡峭的尖錐形分佈。但當大氣穩定度為 E 時，氣流的穩定度降低，亦即氣流的紊亂度增加，因而使下風處 $Y=500\text{m}$ 的煙幕濃度值降低約 55%，其最大煙幕濃度值約為 $9.19\times 10^{-3}\text{gm}^{-3}$ ，煙幕被大氣稀釋使其濃度分佈曲線漸趨平緩。隨著大氣穩定度的

改變至C時，由於氣流漸趨不穩定的狀態，使其最大濃度值降至 $4.83 \times 10^{-3} \text{gm}^{-3}$ ，且其濃度分佈曲線也變為平緩的鐘型分佈。當大氣穩定度為最不穩定的A級時，紊亂的氣流快速的將煙幕濃度稀釋，使其最大濃度值僅為 $2.27 \times 10^{-4} \text{gm}^{-3}$ ，與大氣穩定度A時的煙幕濃度相比，其間的濃度值差異達兩個級數 (Order)，顯示在相同的風速時，不同的大氣穩定度對煙幕的濃度值有很大的影響。

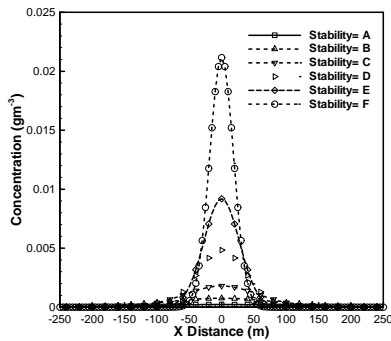


圖 10 大氣風速 $u_0=5\text{ms}^{-1}$ ，風向角 $\phi=0^\circ$ ，高度 $Z=1.5\text{m}$ 時，不同大氣穩定度條件下，在短草開闊地形 $Y=500\text{m}$ 處煙幕濃度分佈圖。

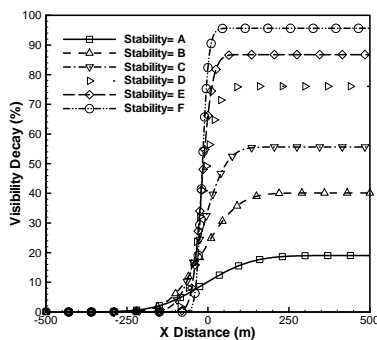


圖 11 大氣風速 $u_0=5\text{ms}^{-1}$ ，風向角 $\phi=0^\circ$ ，高度 $Z=1.5\text{m}$ 時，不同大氣穩定度條件下，在短草開闊地形 $Y=500\text{m}$ 處煙幕視覺衰減分佈圖。

另一方面由圖 10 得知，當大氣穩定度為 F 時，由於氣流為穩定的狀態，因此在圖 11 的視覺度衰減曲線顯示出煙幕在很短的距離內就使視覺度衰減達 95.6%，達到遮蔽度「很好」的

效果。隨著大氣穩定度的字母自 F 到 A 順序減少，氣流的不穩定度亦隨之增加。當大氣穩定度為 C 時，由圖 10 得知其煙幕濃度曲線分佈型態為對稱的鐘型分佈，煙幕的分佈範圍增加，但因為最大煙幕濃度值較低，因此遮蔽的效能較低，僅使視覺衰減 55%，達到「中等」的遮蔽效能。當大氣穩定度為 A、B 時，由於大氣氣流轉變為高度的不穩定，因此在下風處的煙幕被大氣氣流快速的稀釋，使煙幕濃度大幅降低，相對的使煙幕遮蔽效能減少，因此在距離與視覺衰減的曲線顯示，煙幕僅能使視覺降低約 19% 及 40% 的效能，已屬於「不好」的遮蔽效能，顯示在此種大氣條件時，煙幕已無法產生遮蔽效能。

4.5 風向角對煙幕遮蔽效能的影響

當大氣風速 $u_0=7\text{ms}^{-1}$ ，且大氣穩定度=D 之等級時，不同風向角 ϕ 對長草開闊地形在 $Y=800\text{m}$ 處煙幕濃度分佈與視覺衰減情形顯示於圖 12、13 中。由圖中發現當風向角為 0° 時，煙幕濃度分佈曲線在 $X=0\text{m}$ 的 Y 軸縱向軸線呈現對稱分佈，其最大濃度值約為 $2.06 \times 10^{-3} \text{gm}^{-3}$ 。當風向角改變為 10° 時，煙幕濃度分佈曲線在 $X=140\text{m}$ 的 Y 軸縱向軸線呈現對稱分佈，其最大濃度值約為 $2.01 \times 10^{-3} \text{gm}^{-3}$ 。當風向角增大為 20° 時，煙幕濃度分佈曲線在 $X=290\text{m}$ 的 Y 軸縱向軸線呈現對稱分佈，其最大濃度值約為 $1.86 \times 10^{-3} \text{gm}^{-3}$ 。當風向角在增大為 30° 時，煙幕濃度分佈曲線在 $X=460\text{m}$ 的 Y 軸縱向軸線呈現對稱分佈，其最大濃度值約為 $1.63 \times 10^{-3} \text{gm}^{-3}$ 。由以上的煙幕濃度分佈曲線顯示，由於風向角由與 Y 軸同向的 0° 逐漸增加 30° ，亦即風向逐漸偏向 +X 軸的方向偏移，濃度分佈曲線亦隨著風向角的增加逐漸向 +X 軸的方向偏移。當風向角度超過 30° 後，由於煙幕濃度分佈曲線在模擬區域內無法明確顯示其關係，

因此未納入繪製並討論。

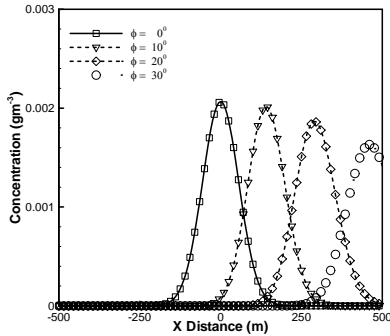


圖 12 大氣風速 $u_0=7\text{ms}^{-1}$ ，大氣穩定度=D，高度 $Z=1.5\text{m}$ 時，不同風向角 ϕ 在長草開闊地形 $Y=800\text{m}$ 處的煙幕濃度分佈圖。

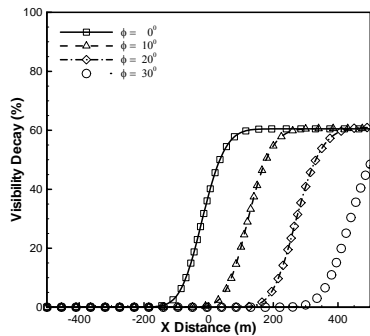


圖 13 大氣風速 $u_0=7\text{ms}^{-1}$ ，大氣穩定度=D，高度 $Z=1.5\text{m}$ 時，不同風向角 ϕ 在長草開闊地形 $Y=800\text{m}$ 處的煙幕視覺衰減圖。

當大氣流動的方向改變時，霧油細微粒子流動的方向亦隨之改變；當觀測位置與目標位置固定時，由於不同的風向角使煙幕細微粒子流動的方向改變，因此在固定的觀測距離內，煙幕的總濃度值亦隨之改變，相對的影響煙幕對光線的遮蔽效應。由圖 12 得知當風向角為 0° 時，煙幕濃度在 $Y=800\text{m}$ 處的分佈範圍約為 $X=-250\text{m}$ 至 $X=250\text{m}$ 之間，因此圖 13 顯示煙幕亦由 $X=-250\text{m}$ 處開始對視覺產生衰減的遮蔽效果。由於觀測位置距發煙機距離較遠，且大氣穩定度屬於輕度的不穩定狀態，因此煙幕濃

度值較低，僅能使視覺衰減 60.4%，可達到「中等」的遮蔽效能。此外圖 13 亦顯示出，當風向角偏移 10° 時，煙幕濃度分佈曲線亦向右平移，且煙幕對視覺衰減的作用位置亦由 $X=-250\text{m}$ 處延後至 $X=-50\text{m}$ 才開始產生作用，由於觀測位置與目標物之間的距離內仍有相當數量的煙幕總濃度，因此，煙幕仍能使視覺衰減約 60%，達到「中等」的遮蔽效能。

當風向角增加至 30° 時，由圖 12 煙幕濃度分佈曲線顯示，在模擬範圍內的煙幕濃度分佈曲線已非完整的鐘型分佈，顯示煙幕分佈的部分範圍已超過目標物，因此在固定的觀測距離內，煙幕的總濃度減少，因此圖 13 顯示其對視覺衰減的作用亦降低，僅能使視覺衰減約 48%，屬於「不好」的遮蔽效能。由圖 12 與圖 13 的分析得知，風向角雖然會造成煙幕濃度分佈曲線的偏移，但當觀測點與目標物之間有足夠的煙幕濃度時，煙幕仍可達到一定的遮蔽效果。

4.6 不同大氣風速、風向角與大氣穩定度組合對煙幕遮蔽效能的影響

由於煙幕的傳輸及對視覺度衰減效能受大氣條件的影響甚大，圖 14~17 為大氣風速固定為 $u_0=3\text{ms}^{-1}$ ，不同大氣穩定度與風向角時，在短草開闊地形 $Y=200\text{m}$ 、 500m 、 800m 及 1000m 位置的視覺衰減影響圖。基本上，當大氣穩定度為B至F等級時，在模擬參數的範圍內，風向角的改變對煙幕的遮蔽效能影響不明顯，因此煙幕可使視覺衰減達 80%以上，而達到「很好」或「好」的遮蔽效果。當大氣穩定度為極不穩定的A等級時，大氣風向角度的改變對視覺度衰減的影響亦不甚明顯，因此當風向角由 0° 增加至 45° ，煙幕使視覺的衰減由 78%降至 68%，仍可達到「中等」的遮蔽效果。顯示在低大氣風速且近距離的 200m 時，風向角的改變對煙幕

張厚起, 等.
不同大氣條件下煙幕擴散與視覺遮蔽效益評估模式之建立

遮蔽效應影響不大。

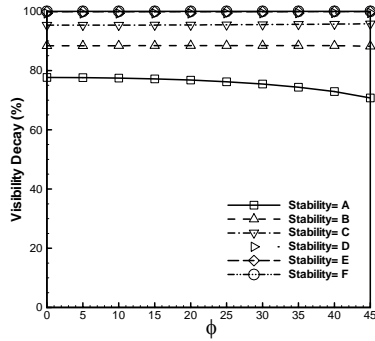


圖 14 大氣風速 $u_0=3\text{ms}^{-1}$ ，觀測高度 $Z=1.5\text{m}$ ，不同大氣穩定度與風向角時，在短草開闊地形 $Y=200\text{m}$ 處的視覺衰減效能圖。

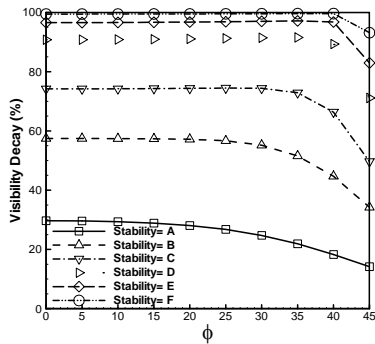


圖 15 大氣風速 $u_0=3\text{ms}^{-1}$ ，觀測高度 $Z=1.5\text{m}$ ，不同大氣穩定度與風向角時，在短草開闊地形 $Y=500\text{m}$ 處的視覺衰減效能圖。

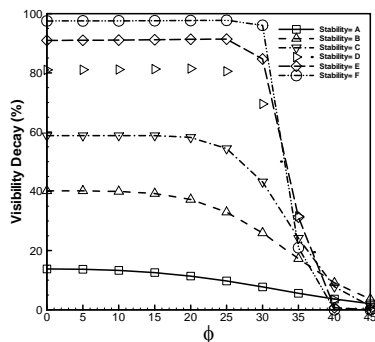


圖 16 大氣風速 $u_0=3\text{ms}^{-1}$ ，觀測高度 $Z=1.5\text{m}$ ，不同大氣穩定度與風向角時，在短草開闊地形 $Y=800\text{m}$ 處的視覺衰減效能圖。

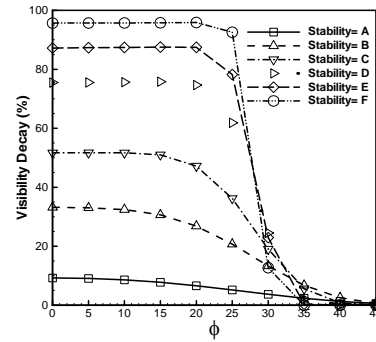


圖 17 大氣風速 $u_0=3\text{ms}^{-1}$ ，觀測高度 $Z=1.5\text{m}$ ，不同大氣穩定度與風向角時，在短草開闊地形 $Y=1000\text{m}$ 處的視覺衰減效能圖。

圖 15 顯示，對距離發煙機下風 $Y=500\text{m}$ 的觀測線而言，由於觀測位置距離發煙機較遠，煙幕流動的距離與範圍增加，煙幕濃度值相對的降低，因此煙幕整體的遮蔽效能降低。當大氣穩定度為 E、F 等級時，風向角超過 40° 以後，風向的改變才對煙幕的遮蔽效應發生影響。當大氣穩定度為 C、D 等級時，風向超過 30° 以後，即開始改變煙幕的遮蔽效應。當大氣穩定度為 A 時，由於氣流屬於高度的不穩定狀態，煙幕濃度值較低，因此風向的改變對煙幕遮蔽效能的影響就非常明顯。圖中亦顯示，隨著風向角由 0° 增加至 45° ，煙幕對視覺衰減的效能由 30% 降至約 15%，減少幅度約 50%。

往下游處到達 $Y=800\text{m}$ 時，由圖 16 顯示，當大氣穩定度為 D、E、F 時，若風向角超過 25° 以後，即開始影響到煙幕的遮蔽效能，而當風向角超過 30° 以後，更可以明顯地觀察到煙幕的遮蔽效能大幅降低。當大氣穩定度為 B、C 時，當風向角超過 15° 以後，即開始影響煙幕的遮蔽效能。當大氣穩定度為 A 時，由於大氣氣流屬於不穩定的狀態，煙幕的細微粒子迅速被氣流帶至下風處擴散稀釋。當風向角為 0° 時，煙幕對視覺的衰減約 14%，當風向角為 45° 時，煙幕對視覺的衰減約 2%。

當觀測位置離發煙機的距離增加至 1000m 時，由於大氣中的新鮮空氣使煙幕濃度稀釋的更為稀薄，因此由圖 17 可以觀察到，風向的改變使煙幕對視覺衰減的效應更為明顯，與圖 16 中 $Y=800m$ 的觀測線相比較，風向對 $Y=1000m$ 的觀測線平均提早 5° 開始影響煙幕的遮蔽效能。

當大氣風速增加為 $5ms^{-1}$ 、 $7ms^{-1}$ 時，模擬範圍內的煙幕濃度受大氣風速增加的影響而降低，相對的降低了視覺衰減的效應，而風向角度對視覺度衰減的影響，由於與風速 $u_0=3ms^{-1}$ 時的趨勢相同，由於篇幅的限制，因此暫予省略。

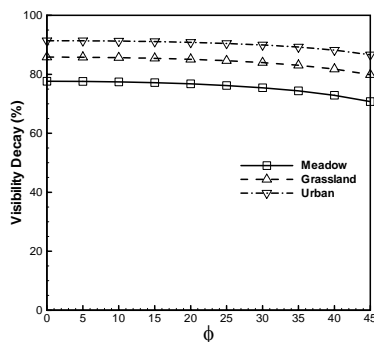


圖 18 大氣風速 $u_0=3ms^{-1}$ ，大氣穩定度=A，觀測高度 $Z=1.5m$ 時，三種不同地表型態時，大氣風向角改變對 $Y=200m$ 的煙幕視覺衰減效能圖。

圖 18 為大氣風速 $u_0=3ms^{-1}$ 且大氣穩定=A 等級時，三種不同地表型態下，大氣風向角的改變對 $Y=200m$ 處煙幕遮蔽效能影響的比較圖。由於大氣穩定度 A 屬於不穩定的氣流，當地表型態為開闊的短草地型時，煙幕對 $Y=200m$ 觀測線的視覺衰減由原先風向角 0° 時的 77%，隨著風向角增加至 45° 時下降到 68%，當地表型態為開闊的長草地型或都會地區的型態時，由於地表阻力增加，大氣風速相對減緩，因此對煙幕的濃度相對的增加，因此在圖中觀察到視覺衰減效能均整體的提升，其隨風向角增加而視覺衰減的趨勢與開闊的短草地型相似。對於其他

大氣穩定度與大氣風速的條件時，由於分佈趨勢與圖 15~18 相似，限於篇幅的影響，在此省略。

4.7 單、雙發煙機遮蔽效能之比對

由前面的分析可知，在大氣穩定度不佳或風速過大的天候下，若仍需施放煙幕以遮蔽相關設施時，單台發煙機不足以達成任務，若需獲得較佳的遮蔽效能，則須考量發煙量較大的發煙機或多台發煙機的併行發煙，相對而言，評估模式也必須具備能夠處理多台發煙機所產生煙幕擴散範圍的能力。當大氣風速為 $u_0=3ms^{-1}$ 、大氣穩定度=A 且風向角 $\phi=0^\circ$ 時，單發煙機於座標原點與雙發煙機位於 $X=-100m$ 與 $200m$ 處發煙時，計算出煙幕濃度等值線分佈圖如圖 19(a)、(b) 所示。圖 20 為相同大氣條件時，不同觀測位置，煙幕對視覺衰減的效能圖。由於大氣穩定度 A 屬於氣流不穩定的狀態，因此雖然距發煙機僅 200m，若是部署一部發煙機，煙霧對視覺的遮蔽效能僅能達到約 91%，屬於遮蔽效能「好」的等級。對於距離發煙機 $Y=500m$ 、 $800m$ 及 $1000m$ 的觀測線而言，煙幕使視覺的衰減值分別為 43%、21% 及 14%，皆屬於「不好」的遮蔽效能。顯示若當大氣條件不佳時，單一發煙機無法提供足夠的視覺遮蔽效能。為強化遮蔽效果，圖 19(b) 顯示，若是部署兩部發煙機，即便是距離發煙位置約 500m 處所形成的煙幕濃度值與單部發煙機相同均為 $6.9 \times 10^{-4} gm^{-3}$ ，但由於兩部發煙機同時發煙，因此其等濃度包絡線所涵蓋的範圍明顯的較單發煙機所涵蓋的範圍為大。對距發煙 $Y=1000m$ 處的煙幕濃度而言，由於兩台發煙機所產生的濃度疊加效應，使煙幕濃度值提升至 $1.52 \times 10^{-4} gm^{-3}$ ，提升率約 73%。

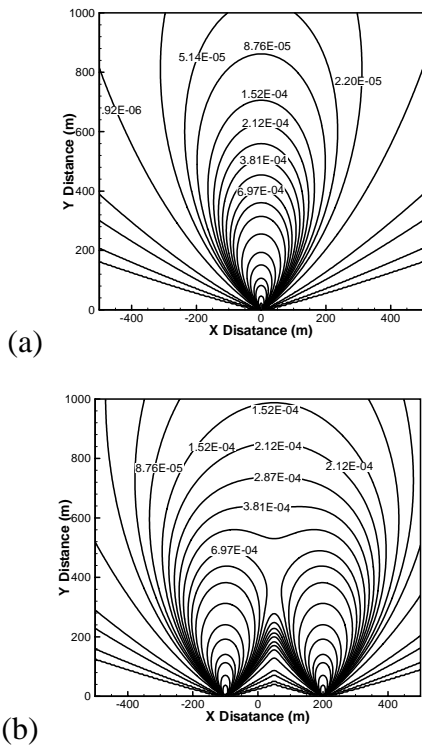


圖 19 大氣風速 $u_0=3\text{ms}^{-1}$ ，風向角 $\phi=0^\circ$ ，大氣穩定度=A時，發煙機在短草開闊地形高度 $Z=1.5\text{m}$ 處的煙幕濃度分佈圖(gm^{-3})：(a)單部發煙機，(b)兩部發煙機。

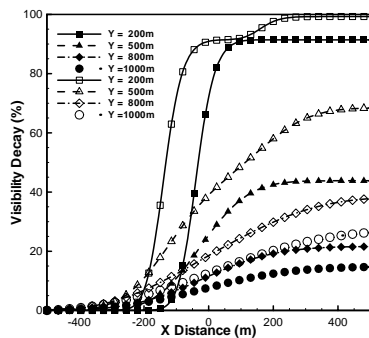


圖 20 大氣風速 $u_0=3\text{ms}^{-1}$ ，風向角 $\phi=0^\circ$ ，大氣穩定度=A時，一部發煙機(實心符號)與兩部發煙機(空心符號)在短草開闊地形高度 $Z=1.5\text{m}$ 處的煙幕視覺衰減效能圖。

由圖 20 更可以明顯的觀察到，對 $Y=200\text{m}$ 的觀測線而言，由於煙幕等濃度線涵蓋的範圍增加，因此對視覺衰減的效能亦從 91% 提升至

99.2%，遮蔽效能由「好」提升至「很好」的等級。對 $Y=500\text{m}$ 觀測線而言，視覺衰減的效能亦從 43% 提升至 68%，視覺遮蔽效能由「中等」提升至「好」的等級。對於 $Y=800\text{m}$ 與 1000m 的觀測線而言，由於增加一台發煙機，使觀測距離內的總煙幕濃度增加，相對的提升煙幕遮蔽的效能。

五、結論

本研究整合投影幾何、高斯擴散模式與 Bouguer-Lambert 公式，成功地開發出一套快速計算與模擬煙幕對視覺衰減的電腦軟體程式，用以分析評估不同的大氣與地形條件下，煙幕對視覺衰減遮蔽的效能，並歸納出下列之結論：

1. 本研究成功的利用高斯擴散模式，並利用自行撰寫之程式，可快速便捷的模擬煙幕在不同風速、風向、大氣穩定度及地形等條件時，對視覺度衰減的影響，並可考量不同的發煙機配置方式，以獲致預定的遮蔽效能。本程式不僅可提供實務運用時快速估算發煙機配置方式對煙幕的遮蔽效能，更可提供教學單位作為煙幕施放模擬之教學。
2. 模擬結果顯示，大氣穩定度為影響煙幕擴散的重要參數。煙幕對視覺的衰減效能隨著大氣穩定 A 到 F 的順序依續增加。當大氣條件為非常穩定時，被大氣帶至下風處的煙幕不易被大氣紊流稀釋，因此在單位長度內有較高的煙幕濃度，因而可產生較佳的視覺衰減效果；當大氣為非常不穩定的狀態時，被帶至下風處的煙幕會被大氣氣流快速的稀釋，因此煙幕所產生的視覺衰減效能不佳。
3. 在相同的大氣穩定度與地形條件時，大氣風速在 $u_0=3\text{ms}^{-1}$ 至 5ms^{-1} 時，由於大氣流動速度較慢，煙幕細微粒子相對的流動較慢，因此在單位距離內有較高的煙幕濃度，使煙幕有

較佳的視覺衰減與遮蔽效能。

4. 當大氣穩定度為 B 至 F 時，對近距離的觀測線而言，風向角的改變對煙幕視覺衰減性的影響不大，當觀測距離超過一定距離後，風向角即開始對視覺的衰減效能產生影響，且隨著大氣的不穩定度與距離的增加，風向角的改變對視覺遮蔽的影響益加顯著。

致謝

本研究承蒙國家科學研究委員會研究計畫 NSC-96-2623-7-606-010-D 之經費補助，特此致謝。

參考文獻

- [1] Yang, H., and Kang, S. W., "Improvement of Thickness Uniformity in Nickel Electroforming for the LIGA Process," *J. Machine Tools and Manufacture*, Vol. 40, pp. 1065-1072, 2000.
- [2] Savinell, R. F., Zeller, R. L., and Adams, J. A., "Electrochemically Active Surface Area: Voltammetric Charge Correlation for Ruthenium and Iridium Dioxide Electrodes," *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 137, No. 2, pp. 489-494, 1990.
- [3] Tan, H. J. and Chan, K. C., "Numerical Analysis of an Inside-out Tube Inversion Process," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 66, pp. 130-136, 1997.
- [4] Lee, S. L., Lee, Y. F., Chang, M. H., and Lin, J. C., "Pulse Plating Effects During Ni-W Electrodeposition," *Corrosion Prevention & Control*, pp. 71-76, 1999.
- [5] Yin, K. M., Jan, S. L., and Lee, C. C., "Current Pulse with Reverse Plating of Nickel-Iron Alloys in a Sulphate Bath," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 88, pp. 219-225, 1996.
- [6] Andricacos, P. C., Tabib, J., and Romankiw, L. T., "Stripping Voltammetry of Nickel-Iron Film Electrodeposited on Platinum Using a Rotating Ring-Disk Electrode," *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 135, No. 5, pp. 1172-1174, 1988.
- [7] Yamasaki, T., Schlobmacher, P., Ehrlich, K., and Ogino, Y., "Formation of Amorphous Electrodeposited Ni-W Alloys and Their Nanocrystallization," *Nanostructured Materials*, Vol. 10, No. 3, pp. 375-388, 1998.
- [8] Gould, R. D., and Lopez, M. G., "Electrical Conductivity and Dynamics of Electroforming in Al-SiO_x-Al Thin Film Sandwich Structure," *Thin Solid Films*, Vol. 433, pp. 315-320, 2003.
- [9] Hessami, S., and Tobias, C. W., "A Mathematical Model for Anomalous Codeposition of Nickel-Iron on a Rotating Disk Electrode," *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 136, pp. 3611-3616, 1989.
- [10] Pesco, A. M., and Cheh, H. Y., "The Current Distribution within Plated Through-Holes: II. The Effect of Periodic Electrolysis," *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 136, No. 2, pp. 408-414, 1989.
- [11] Kondo, K., Fukui, K., Uno, K., and Shinohara, K., "Shape Evolution of Electrodeposited Copper Bumps," *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 143, No. 6, pp.

- 1880-1886, 1996.
- [12] Georgiadou, M., “Modeling Current Density Distribution in Electrochemical Systems,” *Electrochemical Acta*, Vol. 48, pp. 4089-4095, 2003.
- [13] Duchanoy, C., and Lopicque, F., “Current Distributions on Patterned Electrodes in Laminar Flow,” *Chemical Engineering Science*, Vol. 55, pp. 1115-1126, 2000.
- [14] Beck, U., Smith, D. T., Reiners G., and Dapkunas, S. J., “Mechanical Properties of SiO₂ and Si₃N₄ Coatings: A BAM/NIST Co-Operative Project, ” *Thin Solid Films*, Vol. 332, pp. 164-171, 1998.
- [15] Hall, E. O., “The Deformation and Ageing of Mild Steel: III Discussion of Results,” *Proceedings of the Physical Society of London*, B64, pp. 747-753, 1951.
- [16] Petch, N. J., “The Cleavage Strength of Polycrystals,” *J. of the Iron and Steel Institute*, Vol. 174, pp. 25-28, 1953.
- [17] El-Sherik, A. M., Erb, U., Palumbo, G., and Aust, K. T., “Deviations from Hall-Petch Behaviour in As-Prepared Nanocrystalline Nickel,” *Scripta Metallurgica et Materialia*, Vol. 27, pp. 1185-1188, 1992.
- [18] Incropera, F. P., and DeWitt, D. P., “Fundamentals of Heat and Mass Transfer,” 5th ed., John Wiley and Sons, New York, pp. 348-354, 2002.
- [19] Nieman, G. W., and Weertman, J. R., “Mechanical Behavior of Nanocrystalline Cu and Pd,” *J. Mater. Res.* 6, Vol. 5, pp.1012-1027, 1991.