

強烈地震後應用整合式賽局模型最佳化搜救資源配置

吳正光

中原大學軍訓室
中北路200號
桃園縣320中壢市
samwu@cycu.edu.tw

陳奕明

國立中央大學資訊管理學系
中大路300號
桃園縣320中壢市
cym@mgt.ncu.edu.tw

吳大任

國立中央大學經濟學系
中大路300號
桃園縣320中壢市
drwu@mgt.ncu.edu.tw

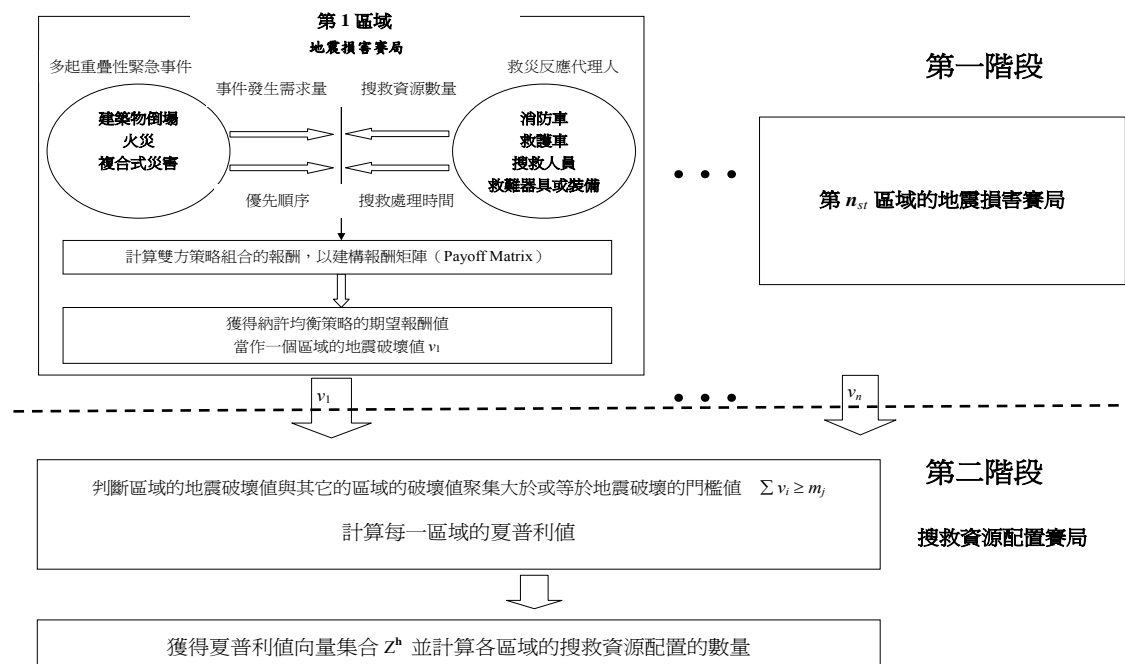
摘要

強烈地震發生後迅速動員搜救資源，可以降低人員的傷亡與財產損失。本研究建構一個兩階段、整合式的賽局模型，第一階段將每一個救災區「發生多起緊急事件」和「救災反應代理人」之間的互動行為，模式化在一個非合作、零和賽局中，每個賽局的納許均衡策略期望報酬值，當作一個區域的地震破壞值。第二階段利用所有救災區的地震破壞值及門檻值，計算每一個救災區的地震影響指標－夏普利值，當地震發生後，依據夏普利值計算出來的搜救資源配置集合，迅速將台灣各縣市（區）內的災害搜救資源重新配置，並動員災情較輕區域的搜救資源給較重的區域，以提升救災的成效。本研究利用921地震數值當作模擬資料，實驗結果顯示本研究計算出各縣市區域的搜救資源分配比例，和當時各縣市的死亡人數比例接近，因此驗證本模型可以滿足地震後各救災區的搜救資源需求。

關鍵詞： 搜救資源配置、地震破壞值、納許均衡、夏普利值。

一、緒論

1999年9月21日凌晨1點47分於南投縣集集鎮發生芮氏規模7.3地震，造成2115人死亡、29人失蹤及11305人輕重傷，地震發生後6小時內死亡人數達1284人，佔總死亡人數的56%，而24小時內死亡人數已達90% [5]。由此可知，當發生大規模的地震災害時，如果搜救資源能夠及時適量的調度到災區，立即執行搜救任務，將受困的傷者，從瓦礫中救出，予以醫治，必能降低死亡人數，達到減災的效果。



圖一：兩階段賽局流程圖

每一縣市警消單位均配置一定數量的搜救資源，這些搜救資源如：消防車、醫療服務（救護車）、搜救人員及救難器具或裝備（吊車）等等。當發生規模7級以上的地震時，受災較嚴重區域的搜救資源往往不足以應付大量的救援任務，此時中央災害應變中心（emergency operation center: EOC）需要依據各區受災的情況，評估救援的優先順序及輕重緩急，統一調度並合理地分配各地區的搜救資源，以便將閒置的資源迅速地援助災情較嚴重的區域。

本研究參考「應用賽局理論配置多重代理人資源的架構」[2]，建構一個最佳化搜救（search and rescue: SAR）資源配置的模型。首先它分析各救災區遭受強烈地震的破壞強度，計算各區域的地震破壞值。然後應用區域防守的概念，讓各縣市的救災反應代理人之間互相支援合作，充分利用所有區域的資源，以達到資源互助的目標。

本研究提出一個兩階段、整合式的賽局模型（如圖一）。第一階段在每一縣市區域中建構一個地震破壞賽局模型，這模型將每一個地區「發生多起緊急事件」和「救災反應代理人」之間的互動行為，模式化在一個雙人非合作的零和賽局中，然後根據雙方提供策略的測量安全因子及搜救部隊的資源多寡與遠近（例如：緊急事件類型及優先順序、緊急事件發生的需求比例、搜救資源的現有數量以及交通運輸時間），建構雙方互動的報酬函數（payoff function）。之後再利用這些函數算出每個賽局的納許均衡(Nash equilibrium)策略，將各區域發生多起緊急事件的納許均衡策略期望報酬值，當作一個區域的地震破壞值。接著，第二階段建構救災反應代理人的搜救資源配置賽局，將台灣全島各縣市區反應代理人的互助關係對應成一個合作賽局，根據每個區域的地震破壞值來計算門檻值，並建構一個投票系統，應用夏普利值(Shapley value)方程式，計算一個彼此均認可的成本配置集合。因此可以基於各個地震破壞值的平均邊際貢獻下得到一個夏普利值。我們依據各區域被地震破壞的夏普利值，重新計算每個區域的搜救資源配置數量，適時地調度受災較輕區域的救災資源給受災較嚴重區域，爭取災害搶救的黃金時

間，以降低無辜百姓的傷亡及財產的損失。

本研究利用數值模擬921地震發生的實況，來驗證模型的可行性，實驗結果顯示：本模型計算出各縣市的搜救資源配置數量的比例，相近於921地震時各縣市死亡人數的比例，因此本模型確實可提供中央災害應變中心一個配置有限搜救資源的建議表。

二、文獻探討

大規模強烈地震無法預期發生地點與強度，唯有預先做好防災演練及措施，方可防患未然，將災害損失降至最小。目前各國政府應變災難的相關部門，對於強烈地震的襲擊，只能災後迅速地執行搶救傷者的工作，因此，搜救資源能夠有效地、及時地分配到需要的地區，就變的非常重要[10]。Fiedrich等學者[6]考量救災區域重要因子（如交通建設、醫療設施等）、救援作業的工作項目（搜救、運輸等）及時間影響因子（如受困者的存活率、完成救援時間）等三個重要考量依據，利用模擬退火法，依時間排出救災區的資源配置表。王曉青等學者[1]以區域內人民生產毛額（GDP）及地震強度兩個重要因素，建構地震所造成的損害模型，預測地震對GDP的損失率及人員的死亡率，以此當作分配搜救資源的依據。李良等學者[3]建構一個搜救資源配置的運籌學模型（MESEA），這模型將埋在瓦礫中的傷者最大化存活數當作目標，以每一個資源點救援受災點所增加的存活人數，計算期望報酬，找出資源點與受災點的最佳的配置組合，以利搜救人員及相應物資能有效地分配到各救災區。

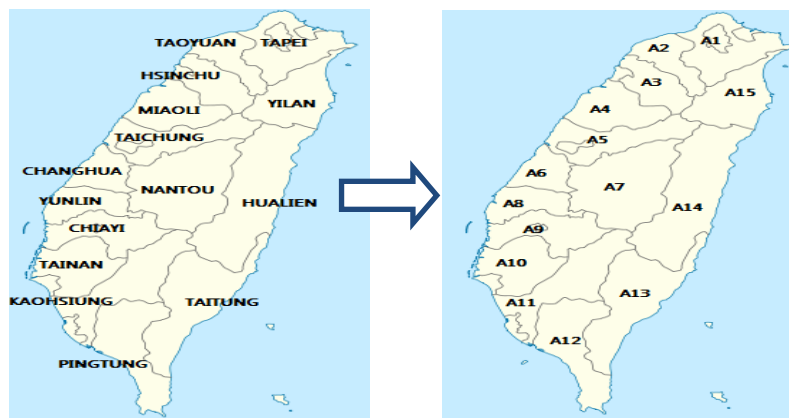
何宏林等學者[4]以地理資訊系統（GIS）為平台，建構地震災害評估和災害資料管理系統（EDMS），該系統根據中國地震局1988年所制定「地震現場工作大綱和技術指南」中的“現場地震災害評估方法”，來評估地震對鄉村造成的影響，其中死亡人數是以地震發生後7天內來計算，因此無法達到迅速救援的目的。Kondaveti 和Ganz[7]以救災資源（如醫護人員、消防員及警員）的需求數、獲得數及距離成本為計算因子，建構救災資源配置的決策支援系統，該研究只有考量三個小規模的救災區，如果發生7級以上的強烈地震，需要救災的區域會擴大，資源需配置到救災區的數量會較多。

當災難發生時，救災資源如何分配？從以上的相關研究可以知道，考量救災者的能力與災害對區域的影響程度，再做資源的分配會較有效率。但是現行的研究均是考量單方面的影響因素，並沒有探討兩者之間互動的關係，本研究應用賽局理論的競合模型，塑模地震引發的災害事件及救災區資源的互動關係，建構一個以賽局模型為基礎的最佳化搜救資源配置架構。

三. 劃分搜救資源配置區域

假設台灣某一縣市區域發生強烈地震，各縣市區域會同時面臨多起的緊急事件（例如：建築物的倒塌、火災及同時發生兩種事件的複合式災害）。在整個台灣本島中設有一個中央災害應變中心，負責掌管全島（區域）的搜救資源，它將全區域劃分15個區域（縣市區域）（如圖二）， $A = \{A_1, A_2, A_3, \dots, A_{15}\}$ ，每一個區域由一警政消防單位負責該區域的緊急事件監控與處理，我們定義它為「救災反應代理人」，它有權責調配與管理區域內的搜救資源，例如：消防車、救護車、搜救人員及救難器具或裝備，以因應多起緊急事件發生的需求。中央災害應變中心應用本模型計算各區域受災的嚴重程度，來配置不同數量的搜救資源，並迅速地調動受災較輕區域內資源給較重的區域，所有區

域的救災代理人有了應變中心的配置指示，將多餘的搜救資源就近給災情較重的區域，就算整體的資源有限，仍然可以依照配置表來調動資源，以提昇救災的能力，並降低無辜百姓的傷亡。



圖二：台灣本島搜救資源區域劃分圖

四、複合式賽局模型

本研究應用兩個賽局模型解決救災資源配置的問題，這模型分為兩個階段。第一階段為地震破壞賽局，此非合作賽局會計算出每一個區域的地震破壞值。第二階段為救災反應代理人之間的搜救資源配置賽局，此合作賽局會計算各縣市（區域）需要配置的數量，來調動各區域的搜救資源，以較經濟、少成本的方式分配資源，達到減災的效果。

1.模型的假設

第一階段賽局模式化各縣市（區）搜救資源對抗地震災害的衝突情境，以下訂出幾點假設：

- (1)台灣本島遭受到強烈地震的襲擊後，部份縣市區域會同時發生多起的建築物倒塌、火災或複合式災害等緊急事件。因此假定各縣市區域會進行一場：多起緊急事件與救災代理人間同步出手的雙人、零和非合作賽局。救災代理人負責指揮該區的搜救資源，來處理強烈地震所引發的緊急事件。救災代理人是玩家2，區域內發生多起緊急事件是玩家1。
- (2)第一階段的賽局模型是矩陣形式賽局（normal form game），它模式化區域內的救災代理人與發生多起緊急事件間策略互動關係。當強烈地震發生時，玩家2所管轄區域會產生三種緊急事件：建築物的倒塌、火災及複合式災害，處理這三種緊急事件具有優先順序，通常複合式災害為最高優先，而火災為最低優先。各個區域具有不同的搜救資源存量、人口密度，以及搜救資源的需求比例，這些都是雙方知悉的資訊（如表一至二）。
- (3)玩家1知道玩家2的策略有4個（消防車、救護車、搜救人員及救難器具或裝備），玩家2知道玩家1的策略有3個（建築物的倒塌、火災及複合式災害）。由於是同步出手，玩家1不知道玩家2會做那一個決定（策略）；同樣地，玩家2也不知道玩家1會做那一個決定（策略），但是它們能規劃在賽局中採用那一個策略，因此兩者遭遇決策上的問題，也就是如果救災代理人選擇錯誤的策略，例如誤判為火災，而實際上是建築物

的倒塌，派大型吊車機具去火災現場，則發生多起緊急事件就會獲得較大的利益；反之，救災代理人選擇正確的策略，例如採用消防車到火災地點救援，救災代理人就會獲得較大的利益。本研究假設雙方儘可能尋求自己利益最大化，玩家1期望破壞愈大愈好，玩家2期望破壞愈小愈好。

- (4)假設EOC會設計一個年度演練計劃來提昇搜救資源的處理緊急事件能力，在表三中每一區域不同的資源，到達不同的緊急事件平均所花費的時間，這些可以經由每年的演練獲得平均數據。

2. 地震破壞賽局模型

第一個賽局模型將各縣市區域中「發生多起緊急事件」和「救災反應代理人」的互動行為建構為一個雙人非合作賽局，從這個賽局裏計算一個地震破壞值。本研究假設有兩個玩家 $\{I_1, I_2\}$ ， I_1 是「區域內發生多起緊急事件」，它是發生事件者； I_2 是「區域內的救災反應代理人」，它是處理事件者，以下定義賽局模型使用的參數。

玩家1（發生事件者）：在地震破壞賽局裏，假設 S_1 是玩家1的策略集合（多起緊急事件） $S_1 = \{u_1, u_2, u_3\} = \{\text{火災、建築物的倒塌及複合式災害}\}$ ，事件愈嚴重，需要搜救的資源就愈多，相對發生事件者的獲利就愈多。在一區域中各緊急事件的需求數 W_j ： $W = \{w_1, w_2, \dots, w_j\}$ ， $w_{j,k}$ 指在 u_j 的緊急事件中對應 d_k 資源的需求數量，如表三。再者，假定不同緊急事件的危險程度大小會有不同的處理優先順序，其需要的搜救資源也會不同，如表一。較高優先的緊急事件，例如複合式災害需要較多的搜救資源；而較低優先的緊急事件，例如單純火災事件需要較少的搜救資源，每一個玩家會設定3個優先順序 p_j （ p_1 到 p_3 ，大小從1到3）來標示事件的優先順序， p_1 是最低優先， p_3 是最高優先。本研究以這值當作計算報酬的權重。此外，本研究假設每個發生多起緊急事件時，區域內的人口密度愈大，需要搜救資源的數量就愈多，如表二。如果在人口密度較大的區域內遭受強烈地震的襲擊時，將會造成較多無辜百姓的傷亡，傷亡愈多，發生事件者獲利愈多，而區域內的救災反應代理人（玩家2）將付出較多的成本（代價）。相反地，如果區域中人口密度小，需要搜救資源的數量相對較少，第 i^{th} 個區域的人口密度參數為 β_i 。

玩家2（處理事件者）：每一區域的賽局裏，都有一個處理事件者，即救災反應代理人負責該區搜救資源的指揮與調度，當發生多起緊急事件時，假定她（他）可以運用4種資源執行降災的任務，假定玩家2的策略集合為 $S_2 = \{d_1, d_2, d_3, d_4\} = \{\text{搜救人員、消防車、救護車及救難器具或裝備}\}$ 。搜救人員指受過專業搜救訓練人員。消防車包含消防人員及裝備。救護車包括醫護人員及所需裝備。救難器具或裝備為大型吊車或起重裝備。 O 是指所有區域中，每個區域內現有資源的數量集合： $O = \{o_1, o_2, o_3, o_4\}$ ， o_k 指在區域中，第 d_k 類資源的現有數量。 $t_{j,k}$ 是指 d_k 資源整備後到達 u_j 緊急事件所需的時間，如表三。本研究假設反應代理人達到緊急事件的時間，其中包括人員的調動、裝備整備，以及運輸裝備的耗費時間，這時間由年度演練測得。當發生多起緊急事件時，如果搜救資源需花較多的時間，玩家2的報酬會因此降低；相對地，玩家1獲得的報酬就增多；相反地，如果耗費時間愈少，玩家2的報酬會因此升高，玩家1獲得的報酬就愈少。在表三中，如果判定為複合式災害，其耗費的時間會較多，如果區域內發生火災事件時，玩家2耗費的時間相對較少。

表一：緊急事件的類型、處理優先順序及搜救資源的需求比例

	搜救人員	救護車	消防車	救難器具或裝備	優先順序(1-3)
火災	0	1	2	0	1
建物倒塌	3	2	0	0.3	2
複合式災害	3	3	2	0.5	3
總數	6	6	4	0.8	

表二：15縣市區域的人口密度及搜救資源存量

縣市區域		人口 密度	搜救資源存量			
			搜救人員	救護車	消防車	救難器具或裝備
A1	台北市(含新北市)	94	350	250	600	100
A2	桃園縣市	100	100	100	200	60
A3	新竹縣市	37	50	60	100	50
A4	苗栗縣市	19	25	40	50	45
A5	台中縣市	73	125	100	250	65
A6	彰化縣市	74	75	50	150	65
A7	南投縣市*	8	25	50	50	45
A8	雲林縣市	34	25	50	50	45
A9	嘉義縣市	25	30	60	70	47
A10	台南縣市	52	80	80	180	60
A11	高雄縣市	57	125	200	250	65
A12	屏東縣市	19	50	40	100	50
A13	台東縣市	4	20	20	30	44
A14	花蓮縣市	4	20	20	30	44
A15	宜蘭縣市	13	25	20	40	45
	總數		1125	1140	2150	830
備考	A1區包括台北市、新北市及基隆縣市。					

表三：某一區域各個搜救資源到達發生災害地點的所需時間

	搜救人員	救護車	消防車	救難器具或裝備
火災	5	5	5	5
建物倒塌	5	5	5	5
複合式災害	10	10	10	10
總數	20	20	20	20

以上時間單位由年度演習測得

表四：地震破壞賽局的報酬矩陣

玩家1	玩家2			
	d_1 搜救人員	d_2 救護車	d_3 消防車	d_4 救難器具或裝備
u_1 火災	$\left(\frac{w_{i,1}}{o_{all,1} - w_{1,1}}\right)t_{1,1}\beta_i p_1$	$\left(\frac{w_{i,2}}{o_{all,2} - w_{1,2}}\right)t_{1,2}\beta_i p_1$	$\left(\frac{w_{i,3}}{o_{all,3} - w_{1,3}}\right)t_{1,3}\beta_i p_1$	$\left(\frac{w_{i,4}}{o_{all,4} - w_{1,4}}\right)t_{1,4}\beta_i p_1$
u_2 建物倒塌	$\left(\frac{w_{i,1}}{o_{all,1} - w_{2,1}}\right)t_{2,1}\beta_i p_2$	$\left(\frac{w_{i,2}}{o_{all,2} - w_{2,2}}\right)t_{2,2}\beta_i p_2$	$\left(\frac{w_{i,3}}{o_{all,3} - w_{2,3}}\right)t_{2,3}\beta_i p_2$	$\left(\frac{w_{i,4}}{o_{all,4} - w_{2,4}}\right)t_{2,4}\beta_i p_2$
u_3 複合式災害	$\left(\frac{w_{i,1}}{o_{all,1} - w_{3,1}}\right)t_{3,1}\beta_i p_3$	$\left(\frac{w_{i,2}}{o_{all,2} - w_{3,2}}\right)t_{3,2}\beta_i p_3$	$\left(\frac{w_{i,3}}{o_{all,3} - w_{3,3}}\right)t_{3,3}\beta_i p_3$	$\left(\frac{w_{i,4}}{o_{all,4} - w_{3,4}}\right)t_{3,4}\beta_i p_3$

在這非合作賽局中，玩家 1 運用 3 個策略；而玩家 2 運用 4 個策略，它們之間的策略互動會形成一個 3x4 地震破壞賽局的報酬矩陣（如表四）。由於我們設定是零和賽局，因此事件處理者的損失就是事件發生者的獲得。本研究設定事件發生者的報酬是正值，而事件處理者的報酬為負值。在報酬矩陣中，玩家 1 會儘可能將自己得到的報酬總合最大化；相反地，玩家 2 會儘可能將玩家 1 得到的報酬總合最小化。事件發生者（玩家 1）得到的報酬是來自事件處理者（玩家 2）無法有效的降低無故百姓的傷亡，代表事件處理者需要花愈多的成本來執行搜救任務，事件處理者失去的報酬也就愈多。當玩家 1 發生第 j 策略，而玩家 2 用第 k 策略反制時，本研究設定緊急事件發生者（玩家 1）的報酬函數如下：

$$\pi_1 = \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^4 \left(\frac{w_{i,k}}{o_{all,k} - w_{j,k}} \right) \times t_{j,k} \times \beta_i \times p_j, \quad i \in n. \quad (1)$$

$o_{all,k}$ 在所有區域中的第 k 類資源（例如消防車）總數量。 $w_{i,k}$ 第 i 區中第 k 類資源的需求數量。因為這模型為雙人零和賽局，相對地，玩家 2 會失去報酬，所以我們用負的符號（-），來顯示他（她）的報酬，因此玩家 2 得到的報酬是多起緊急事件發生者（玩家 1）的負值，他（她）的獲得報酬函數如下：

$$\pi_2 = - \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^4 \left(\frac{w_{i,k}}{o_{all,k} - w_{j,k}} \right) \times t_{j,k} \times \beta_i \times p_j, \quad i \in n. \quad (2)$$

根據純粹納許均衡定義[9]：給定對手的策略選擇，考量報酬最大化，這組策略為雙方不會偏離的選擇，互為最適反應，此策略組合為納許均衡策略。策略形式的賽局為策略及報酬的集合： $\{S_1, S_2, \pi_1, \pi_2\}$ ，玩家須滿足下列條件：

$$\pi_1(u_j^*, d_k^*) \geq \pi_1(u_j, d_k^*), \quad \pi_2(u_j^*, d_k^*) \geq \pi_2(u_j^*, d_k), \quad u_j^* \in S_1, d_k^* \in S_2 \quad (3)$$

即給定對手的策略， u^* 與 d^* 為比較其它策略後選擇其報酬最大的策略。本研究以玩家 1 的納許均衡策略報酬值 $\pi_1(u_j^*, d_k^*) = v_i$ 為第 i^{th} 個區域的地震破壞值。

3. 搜救資源配置賽局

本研究假定在台灣本島發生強烈地震時，各縣市區域中發生緊急事件的地震破壞值會互相影響，所以區域的救災反應代理人會形成一個資源分享與互助的情境，這情境我們設定為一個合作賽局。本研究以各區域的地震破壞值，建構一個合作的投票賽局。一個法案需要投票人半數同意通過才可成立，本研究亦是以此概念，計算所有破壞值的多數門檻值（即所有總值的一半），再計算每一個破壞值，和其它區域破壞值組合的總值。如果有部份區域破壞值的組合總值大於等於多數門檻值，就形成一個結盟（winning coalition）。本研究根據這個概念來計算每一個破壞值在所有區域中發生多起緊急事件的重要指標（power index），這個重要指標就是夏普利值，以下解釋如何計算。

本研究定義 $y: V \rightarrow R^+$ 是一對一的特徵函數，函數的變數 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_k\}, k \in n, y(0) = 0$ ， v 是一個正實數或零，當地震全面襲擊全台時，調動搜救資源會以所有破壞值的多數門檻值 m_j 為考量依據，如果每一個破壞值和其它破壞值的組合威脅總值大於或等於多數門檻值 m_j 時，就會到達一個破壞水準（level） h_j ，判斷式如下：

$$h_j \text{ if } \sum_{k=1}^n v_k \geq m_j, m_j = v_{Mini} + \left(\frac{v_{Max} - v_{Mini}}{2} \right) \quad (4)$$

這破壞水準的多數門檻值 m_j 計算方法為：最大值 v_{Max} 減最小值 v_{Mini} 除以2，再加上最小值。我們可以將這些區域的地震破壞值，模式化成一個 N 人的合作賽局，所有參賽者（區域）集合為 $X = \{1, 2, \dots, N\}$ ，當 $V \subset N, v_k \neq 0, \forall k \in V, V = \{v_1, v_2, \dots, v_k\}, k \in n$ ，在所有區域中某些破壞值的組合總值大於門檻值，即為部份區域形成結盟 C (coalition)的次集合[8]，這些區域大於 m_j 門檻值的結盟是 X 的次集合，結盟 C 的群聚值是某些區域的地震破壞值（ v_k ）的加總 $\sum_{k \in C} y(v_k)$ 。依據破壞水準可以計算出每個地震破壞值對於其它破壞值的相對重要性。因此，我們可以計算第 i^{th} 個區域發生多起緊急事件的夏普利值。

$$\omega(i) = \sum_{\substack{C \subset X \\ k \in C}} \frac{(c-1)!(n-c)!}{n!} [y(C) - y(C - \{i\})]. \quad (5)$$

$$\Rightarrow \omega(i) = \sum_{C \subset X} \frac{(c-1)!(n-c)!}{n!}. \quad (6)$$

當依照方程式(4)判斷結盟 C 的群聚破壞值是否大於或等於安全水準的門檻值時？「大於或等於」不成立時， $y(C) - y(C - \{i\})$ 這部份產生的值為0，如果成立就產生1的結果，代表在這些區域的地震破壞值大於或等於門檻值 m_j ，而達到一個成功結盟 C' (winning coalition)， $\sum_{i \in C'} y(v_i) \geq m_j$ ，所以可以將方程式(5)簡化成方程式(6)。

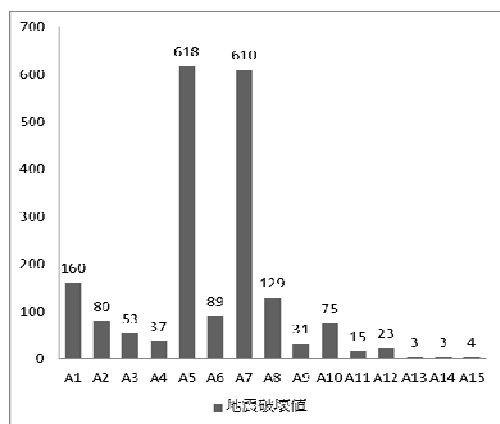
接下來本研究定義：第 i 個區域重新配置第 k 種類的搜救資源數為

$$e_k(i) = \omega(i) \times o_{all, k} \quad i, k \in N \quad (7)$$

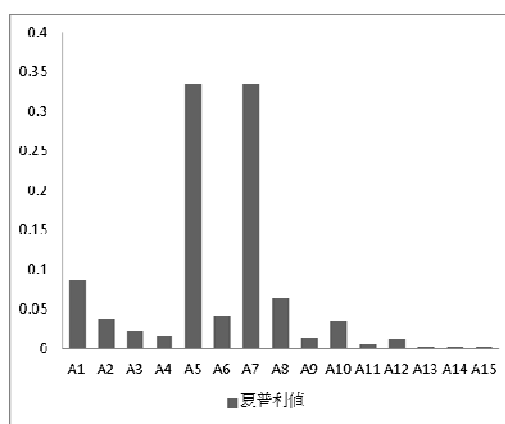
$O_{all,k}$ 在所有區域中的第 k 類資源（例如消防車）總數量，第 i 個區域重新配置第 k 種類的搜救資源數 $e_k(i)$ 是第 i 個區域的夏普利值 ω_i 與全區域的第 k 種類的搜救資源總數量 $O_{all,k}$ 的乘積。因此，我們會得到各區域所需各種類的搜救資源數量，以此為重新配置並調動全島搜救資源的依據，執行減災的任務。

表五：根據模擬資料計算 15 區域的破壞值及夏普利值

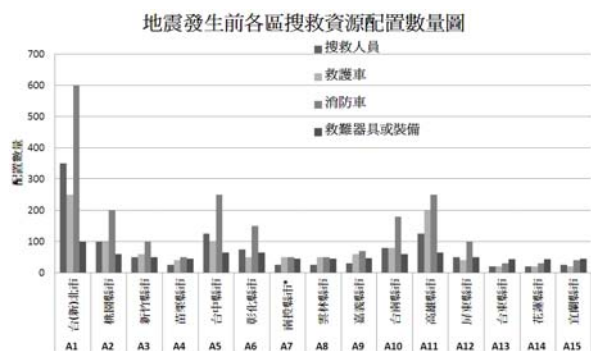
縣市區域		勤務中心接獲報案數量			救災資源需求量				地震破壞值	夏普利值
		火災	建物倒塌	複合式災害	搜救人員	救護車	消防車	救難器具或裝備		
A1	台(新)北市	5	50	40	275	225	180	46	160	0.086353
A2	桃園縣市	5	10	10	65	55	50	11	80	0.036489
A3	新竹縣市	8	16	20	116	100	92	19.6	53	0.022389
A4	苗栗縣市	8	20	30	158	138	126	26.6	37	0.015335
A5	台中縣市	30	200	200	1230	1030	860	206	618	0.334121
A6	彰化縣市	5	150	150	605	505	410	101	89	0.040354
A7	南投縣市*	20	300	350	1990	1690	1430	333	610	0.334121
A8	雲林縣市	4	100	100	604	504	408	50.4	129	0.062895
A9	嘉義縣市	10	10	20	200	170	160	17	31	0.013536
A10	台南縣市	8	8	16	212	196	188	19.6	75	0.034316
A11	高雄縣市	4	4	8	40	36	36	3.6	15	0.005728
A12	屏東縣市	2	2	20	68	66	66	6.6	23	0.011142
A13	台東縣市	2	2	10	38	36	36	3.6	3	0.001931
A14	花蓮縣市	2	2	10	38	36	36	3.6	3	0.001931
A15	宜蘭縣市	5	5	5	35	30	30	3	4	0.00129
Total		118	879	989					2229	1



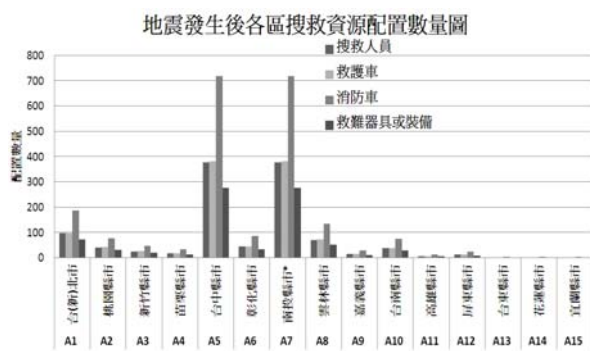
圖三(a): 15個區域的地震破壞值



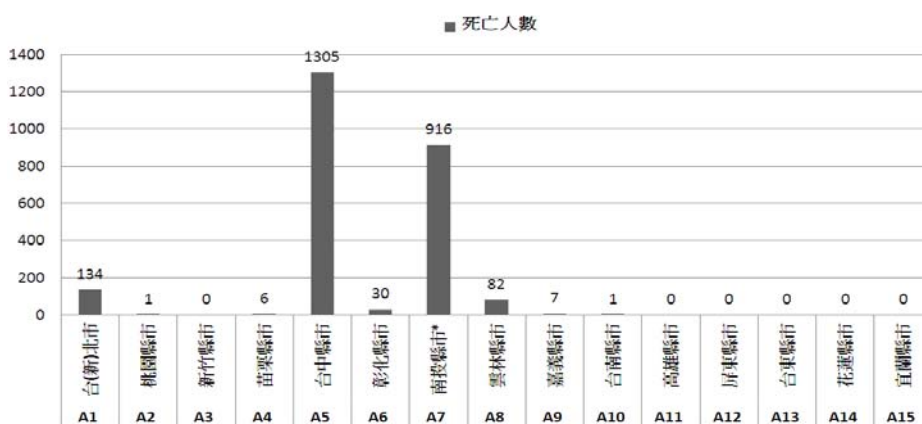
圖三(b): 15個區域的夏普利值



圖四(a): 地震發生前各區搜救資源配置數量



圖四(b): 地震發生後各區搜救資源配置數量



圖五: 921地震各縣市區域人員死亡圖 (資料來源: 921地震數位知識庫)

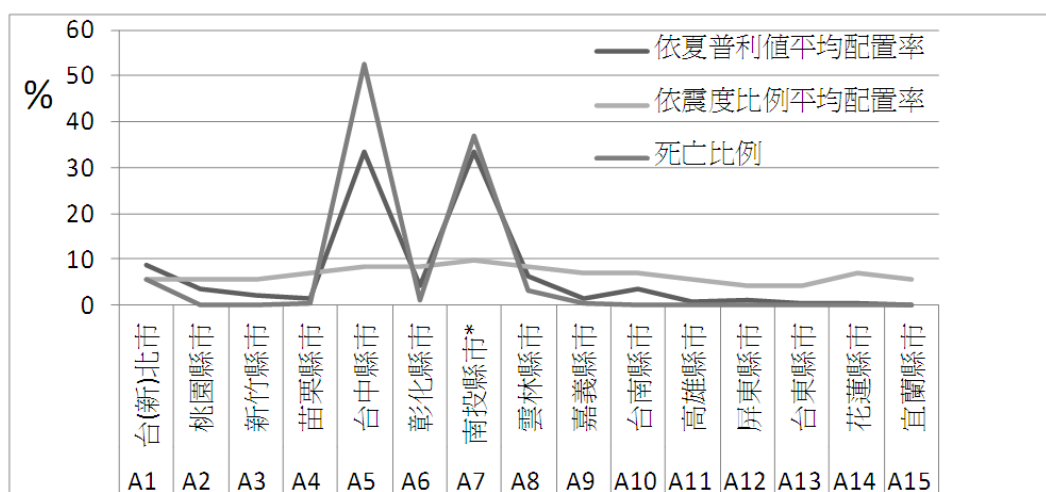
四. 數值模擬與結果討論

本研究假設全台設置一個中央災害應變中心 (EOC)，負責統籌管理全區域中所有搜救資源的配置。EOC將全台區分15個區域 (縣市區域)，編號從A1到A15，每一個縣市區域都有配置一定數量的搜救資源。我們利用表1至表3的假設數值，來模擬921地震發生緊急事件的情況，並假設各縣市區域緊急事件的需要搜救資源的數量：為各區域119勤務中心於地震發生後3小時內接收的報案數量，乘上表一搜救資源的需求比例，如表五。

當南投縣集集鎮發生強烈地震時，各個縣市區域會發生多起的緊急事件。我們根據假設的資料，模型化每個縣市區域多起緊急事件的零和賽局模型。依據方程式(1)-(3)計算15個縣市區域的地震破壞值，如圖三(a)。接著利用方程式(4)計算門檻值 $m_j = 310$ ，再利用方程式(6)計算每個縣市區域的夏普利值，如圖三(b)。最後我們利用方程式(7)計算每一縣市區域搜救資源的重新分配數量，如表六。

表六：按本研究分配 15 區域的搜救資源

縣市區域		地震發後搜救資源配置數量				地震發生後搜救資源配置比例(%)				平均配置率(%)	死亡人數	死亡比例(%)
		搜救人員	救護車	消防車	救難器具或裝備	搜救人員	救護車	消防車	救難器具或裝備			
A1	台(新)北市	97	98	186	72	8.62	8.60	8.65	8.67	8.64	134	5.40
A2	桃園縣市	41	42	78	30	3.64	3.68	3.63	3.61	3.64	1	0.04
A3	新竹縣市	25	26	48	19	2.22	2.28	2.23	2.29	2.26	0	0.00
A4	苗栗縣市	17	17	33	13	1.51	1.49	1.53	1.57	1.53	6	0.24
A5	台中縣市	376	381	718	277	33.42	33.42	33.4	33.37	33.4	1305	52.58
A6	彰化縣市	45	46	87	33	4.00	4.04	4.05	3.98	4.01	30	1.21
A7	南投縣市*	376	381	718	277	33.42	33.42	33.4	33.37	33.4	916	36.91
A8	雲林縣市	71	72	135	52	6.31	6.32	6.28	6.27	6.29	82	3.30
A9	嘉義縣市	15	15	29	11	1.33	1.32	1.35	1.33	1.33	7	0.28
A10	台南縣市	39	39	74	28	3.47	3.42	3.44	3.37	3.43	1	0.04
A11	高雄縣市	6	7	12	5	0.53	0.61	0.56	0.60	0.58	0	0
A12	屏東縣市	13	13	24	9	1.16	1.14	1.12	1.08	1.12	0	0
A13	台東縣市	2	2	4	2	0.18	0.18	0.19	0.24	0.20	0	0
A14	花蓮縣市	2	2	4	2	0.18	0.18	0.19	0.24	0.20	0	0
A15	宜蘭縣市	1	1	3	1	0.09	0.09	0.14	0.12	0.11	0	0
Total		1125	1140	2150	830	100	100	100	100	100	2482	100



圖六：本研究的資源分配和震度比例的資源分配方法比較圖

表七：按地震震度比例分配 15 區域的搜救資源

縣市區域		地表震度	地震發生後搜救資源配置數量				地震發生後搜救資源配置比例(%)				平均配置率 (%)	死亡人數	死亡比例 (%)
			搜救人員	救護車	消防車	救難器具或裝備	搜救人員	救護車	消防車	救難器具或裝備			
			A1	台(新)北市	4	63	64	121	47	5.63			
A2	桃園縣市	4	63	64	121	47	5.63	5.63	5.63	5.63	5.63	1	0.04
A3	新竹縣市	4	63	64	121	47	5.63	5.63	5.63	5.63	5.63	0	0.00
A4	苗栗縣市	5	79	80	151	58	7.04	7.04	7.04	7.04	7.04	6	0.24
A5	台中縣市	6	95	96	182	70	8.45	8.45	8.45	8.45	8.45	1305	52.58
A6	彰化縣市	6	95	96	182	70	8.45	8.45	8.45	8.45	8.45	30	1.21
A7	南投縣市*	7	111	112	212	82	9.86	9.86	9.86	9.86	9.86	916	36.91
A8	雲林縣市	6	95	96	182	70	8.45	8.45	8.45	8.45	8.45	82	3.30
A9	嘉義縣市	5	79	80	151	58	7.04	7.04	7.04	7.04	7.04	7	0.28
A10	台南縣市	5	79	80	151	58	7.04	7.04	7.04	7.04	7.04	1	0.04
A11	高雄縣市	4	63	64	121	47	5.63	5.63	5.63	5.63	5.63	0	0
A12	屏東縣市	3	48	48	91	35	4.23	4.23	4.23	4.23	4.23	0	0
A13	台東縣市	3	48	48	91	35	4.23	4.23	4.23	4.23	4.23	0	0
A14	花蓮縣市	5	79	80	151	58	7.04	7.04	7.04	7.04	7.04	0	0
A15	宜蘭縣市	4	63	64	121	47	5.63	5.63	5.63	5.63	5.63	0	0
Total		71	1125	1140	2150	830	100	100	100	100	100	2482	100

我們分析比較921地震發生前和發生後搜救資源的配置成效。在921地震發生前各縣市區域的搜救資源配置圖，如圖四(a)。當地震發生後4小時內，利用本模型計算地震發生後各縣市區域的搜救資源配置圖，如圖四(b)，我們再比對內政部消防署公布的921地震各縣市區域死亡人數圖，如圖五，發現本研究計算出各縣市搜救資源分配數量的高低，和各縣市因地震造成人員死亡數量的高低，大致相等。由此可知，本研究提出的模型可以滿足當時921地震後各救災區的救災需求。

假定強烈地震發生時，災害應變中心會依據各地引發不同的芮式規模震度，來配置不同數量的搜救資源，中央氣象局量測到地表面震度愈大的區域，會配置愈多的資源，也就是按地震的強度比例，來分配搜救資源，我們稱這分配方法為「震度比例分配」。按這分配方法定義第*i*區域重新配置資源的數量 $p_k(i)$ ，計算方式如下：

$$p_k(i) = \frac{M_i}{M_{Total}} \times o_{all,k} \quad i, k \in N \quad (8)$$

$O_{all,k}$ 代表全區域的第*k*種類的搜救資源總數量， M_i 為第*i*區的地震強度， M_{Total} 所有地區的地震強度總和。表七按方程式(8)計算地震發生後各種搜救資源的配置數量。為了評估可行性，我們比較「震度比例分配」和本研究提出的「夏普利值分配」的優劣性。

在圖六中發現：本研究的各區域資源配置比例和921地震時造成的死亡人數比例較相近；而按震度分配的比例較不符合死亡人數比例。因此本研究的搜救資源配置方法，可以在嚴重地震發生後的4小時內，讓全島各區域知道自己的配置資源數量，將多餘的資源迅速地就近支援其它區域，及時達到減災的成效。

五.結論與未來方向

我們從921集集大地震的經驗中學到，大規模的災變發生時，除了要即時的掌握各地災情，還必須有效地整合及分配全國救災資源，方能爭取災害搶救的黃金時間。但如何在短時間內調度搜救資源？這是一個資源配置的問題。本研究提出一個兩階段、整合式的賽局模型，當發生芮式規模7級以上的地震時，本模型可以提供決策者一個搜救資源的配置圖，讓決策者於地震發生後4小時內，做好全國搜救資源的調度計劃，使得各縣市區域的資源能適時適量地動員到指定的救災區，以減低無辜百姓的傷亡。本研究以數值模擬921地震發生的情況，實驗結果顯示：本模型計算的各縣市搜救資源分配數量可以滿足當時921地震後各救災區的救災需求。未來希望以實際發生大規模地震時的數值來驗證本模型的效率。

參考文獻

- [1]王曉青、丁香、王龍、王岩，”四川汶川8級大地震災害損失快速評估研究”，*地震學報*，31卷2期，2009：頁205 -211。
- [2]吳正光，”多重代理人系統與外部威脅－賽局理論之應用”，國立中央大學資訊管理研究所博士論文，2009。
- [3]李良、郭強、李軍，”震後緊急搜救資源配置”，*系統工程*，27卷8期，2009：頁1 -7。
- [4]何宏林、宋新初，”Development of Earthquake Damage Evaluation and Damage Data Management System (EDMS)-A Case Study on Lijiang Earthquake Damage”，*地震地質*，27卷3期，2005：頁396 -411。
- [5]許郁文，2000，”地震中消防機關應變之分析—以921集集大地震為例”，中央警察大學消防管理研究所碩士論文。
- [6]Fiedrich, F., Gehbauer, F. and Rickers, U., “Optimized Resource Allocation for Emergency Response after Earthquake Disasters,” *Safety Science*, Vol.35, 2000: pp.41-57.
- [7]Kondaveti, R. and Ganz, A., “Decision support system for resource allocation in disaster management“, *31st Annual International Conference of the IEEE EMBS*, 2009: pp.3425-3428.
- [8]Mishra, D. and Rangarajan, B., “Cost Sharing in a Job Scheduling Problem Using the Shapley Value”, *Proceedings of the 6th ACM conference on Electronic commerce*, 2005: pp.232-239.
- [9]Nash, J., “Non-Cooperative Games”, *Annals of Mathematics*, Vol.54, No.2, 1951: pp.286-295.

- [10] Sheu, JB., “An emergency logistics distribution approach for quick response to urgent relief demand in disasters“, *Transportation Research Part E*, Vol.43, No.6, 2005: pp.687-709.

[謝啓]

感謝審稿者能夠撥冗指正本研究，並給予真誠的建議，特此致謝。