

行政院及所屬各機關出國報告

(出國類別：開會)

二〇〇六年美國地物師學會年會及短期研討
出國報告

出國人職稱：地球物理探勘師

出國地區：美國

出國期間：95年9月29日至10月3日

報告日期：95年12月20日

目錄

摘要	1
壹、目的	2
貳、過程	2
參、地物師學會年會心得	3
肆、『AAPG Course Practical mapping of surfaces/Rev.char』	
研討心得.....	6
一、前言	6
二、Univariate Data 的描述	11
1. 直方圖	11
2. 標準誤差與資料分佈的機率關連	13
3. Univariate Data 點群組的恰當性	14
4. Support Effect	14
三、Bivariate Data 的描述	15
1. Covariance	15
2. Correlation Coefficient	15
3. Linear Regression	17
四、空間模擬(Spatial Modeling).....	18
五、變異函數(Variogram).....	19
1. 變異函數的計算及相關名辭定義	19
2. 變異函數形貌與變數空間分佈關連	21
3. 變異函數的分解 (Decomposition)	23
4. Stationary vs. Non-stationary	26
六、Kriging.....	27
1. Kriging 計算原理.....	27
2. 變異函數的選擇對 Kriging 結果之影響	29
3. Kriging with an External Drift (KED)	33
4. Bayesian Kriging	34
5. Cokriging (CK) & Collocated Cokriging (CCK)	34
七、Stochastic Simulation.....	38

1. Conditional Simulation	39
2. Collocate Cosimulation	44
3. 蒙提卡羅 (Monte Carlo)	44
4. Sequential Simulation	44
八、Pixel vs. Object Simulation.....	47
1. Pixel Based Simulation	47
2. Object Based Simulation	48
九、地質統計震測逆推.....	49
伍、建議	51
陸、參考文獻	52

摘要

本次出國於九月二十八日自台北啟程，九月二十九日抵新奧爾良，九月三十日至十月一日參加 SEG 會前會短期研討課，十月二日參加年會發表論文"Interpretation and pitfalls of A/B analysis applied to shallow gas exploration in Plio/Pleistocene foreland basin, southwestern Taiwan"。年會中所見石油探勘相關解釋軟體益趨整合性及機動性，部分重合逆推彈性波阻抗的技術，除了由震測資料獲得傳統的 P 波三維阻抗資訊外，更進而推演 S 波三維阻抗資訊，地層岩性及孔隙內流體因而得以區別。這種技術已相當有效的應用於油氣潛能評估及油氣層監測。一般井測很少施測 S 波之聲波測錄，本技術之引進，須依賴 S 波聲波測錄及三維資料體之部分重合處理。本次出國任務達成返台後，特別查詢台南盆地現有井測資料，證實已有兩口井具 S 波之聲波測錄，經品管分析後亦確認資料之可用性。目前已與氣田開發現場單位及資料處理單位研商，擬定明年初建立此項技術，實際應用於台南盆地油氣開發及油氣潛能探尋之研究。會前短期訓練課程『AAPG Course Practical mapping of surfaces/Rev. char』，除了簡述各種地質統計的理論、原則外，更以相當多的實例，解釋地質統計分析參數設定和實際地質模型在空間分形貌的關連性，地質統計分析相當重要的變異函數，其曲線形貌之對應物理意義也詳加舉例說明。井數不足、難以製作平滑水平變異函數並據以用特定函數模擬，是儲集岩特性分析及模擬常遇到的問題，本次訓練課程所獲心得，對於此種狀況下模擬變異函數的選定、設計，提供相當大的助益。此外，本訓練課一開始即討論到儲集岩模型分析及模擬時各項模型元件在模擬中的優先順序，構造乃模型建立成功與否的首要因素，其次依序為層序地層架構、沉積相模擬、石油物理分析模擬，最後影響的因素為模型網格的粗化(up-scaling)。過去儲集岩特性分析研究工作，往往強調孔隙間地層物性(岩性、聲波阻抗、孔隙率)在空間不均質的傳播，卻忽視了構造模擬的重要性。本年度研究計畫「厄瓜多十七號礦區儲集岩及生產方案之研究」，油層模擬結果顯示，各井模擬的出水時間，均較實際出水時間晚許多。經檢驗該孔隙率模型所對應之岩性模型，尚屬合理。受益於此訓練課程所獲心得，了解到儲集岩模型更新以構造形貌修正為主的重要性，與生產井歷史諧調的油層模擬得以順利進行。

壹、目的

國際論文發表為探採研究所績效指標之一，傅員於四月中投稿 2006SEG(美國地球物理師學會)年會論文"Interpretation and pitfalls of A/B analysis applied to shallow gas exploration in Plio/Pleistocene foreland basin, southwestern Taiwan"一篇，並經 SEG 年會接受。因本年度地球物理組並無編列參加 SEG 年會出國計畫，為達成績效目標，特陳請探研所所長，同意勻支年度計畫第 69 項預算，執行九月二十九日至十月三日之 2006SEG(美國地球物理師學會)年會，論文宣讀出國計畫。本次奉派出國參加該會議期，為協助海域處外包 Prisim Seismic 公司台南盆地裂縫模擬之進行，傅員在 SEG 年會論文發表後，接續前往丹佛，執行該委外計畫控管任務，以利台南盆地氣田開發工作之進行。也因此，本次美國地球物理師學會年會參加之期間短至三天，主要目的即為論文發表參加及會前會之『AAPG Course Practical mapping of surfaces/Rev. char』短期訓練課，一則達成探採研究所績效目標，二則應用短期訓練課心得，日後可加強及改善儲集岩模型建立之技術，應用於探採事業部油氣田之油層模擬，提升油氣田開發的經濟效益。

貳、過程

九十五年九月二十八日自台北啟程，九月二十九日抵新奧爾良，九月三十日至十月一日參加 SEG 會前會『AAPG Course Practical mapping of surfaces/Rev. char』短期研討課，十月二日參加年會，發表論文『Comprehensive analysis of hydrocarbon entrapment style of the Hsinying gas field and its application to hydrocarbon exploration』。十月三日啟程抵丹佛，執行海域處外包 Prisim Seismic 公司『台南盆地裂縫模擬』計畫控管任務。

參、地物師學會年會心得

部分重合逆推彈性波阻抗(elastic impedance)的技術，近年已相當普遍的應用於油氣潛能評估、油氣層監測(4D seismic)。此技術類似本研究所引進 Fugro-Jason 公司套裝軟體中之 Rock Trace 模組，經由部分重合同步逆推(simultaneous partial stack inversion)，獲得 S 波阻抗三維資料體或 V_p/V_s 三維資料體，對於岩性及孔隙內流體，能有更佳的分辨性。一般井測很少施測 S 波之聲波測錄，本技術之引進，須依賴 S 波聲波測錄及三維資料體之部分重合處理。本次出國任務達成返台後，特別查詢台南盆地現有井測資料，證實已有兩口井具 S 波之聲波測錄，經品管分析(圖 1 至圖 4)、以 P-sonic(圖 1 第七個 panel 藍色曲線)及 S-sonic(圖 1 第一個 panel 粉紅色曲線)計算 V_p/V_s (P 波速度/S 波速度:圖 1 第五個 panel)及波松比常數(Poisson's Ratio:圖 1 第三個 panel)， V_p/V_s 如預期在頁岩(Gamma ray 值大於 75)中比值大於砂岩(Gamma ray 值小於 75)中比值。大部分波松比也在

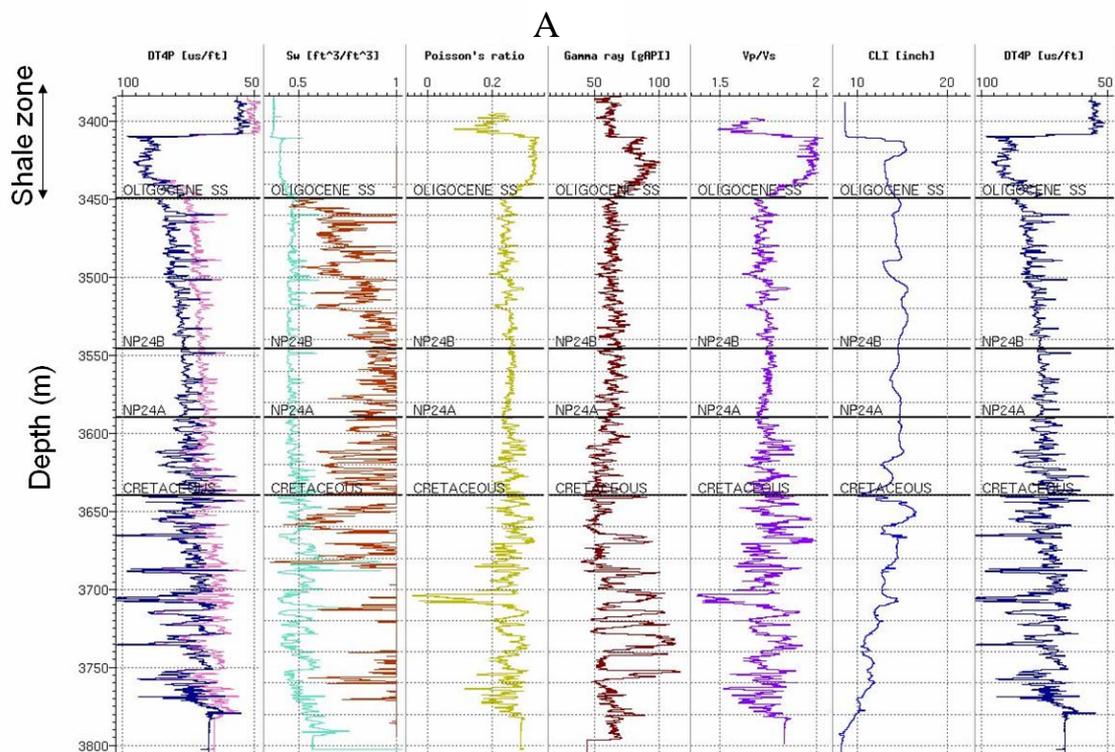


圖 1 台南盆地 A 號井 S 波之聲波測錄之讀取及可用性檢驗。 V_p/V_s 息息相關的比值為波松比 (σ)， $\sigma = (\gamma - 2) / 2(\gamma - 1)$ ， $\gamma = (V_p/V_s)^2$

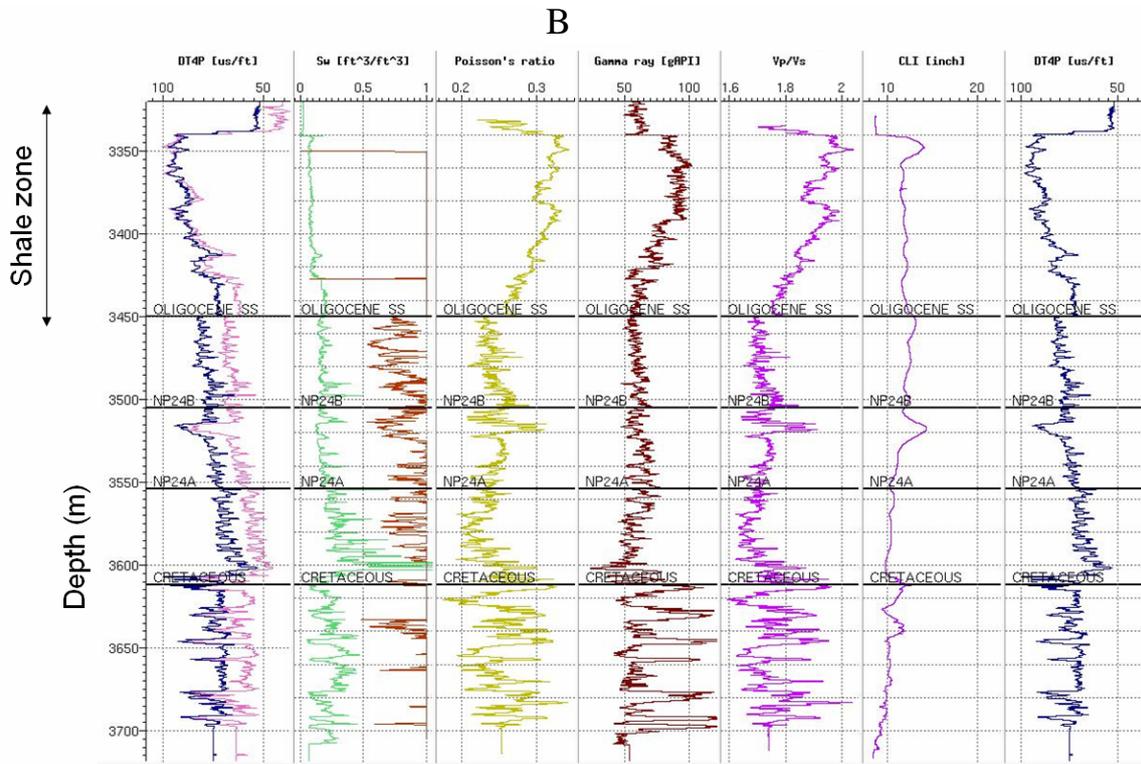


圖 2 台南盆地 B 號井 S 波聲波測錄之讀取及可用性檢驗。部分油氣高潛能地段，其波松比常數如預期降低。這些檢視，顯示 S 波之聲波測錄之可信度高。

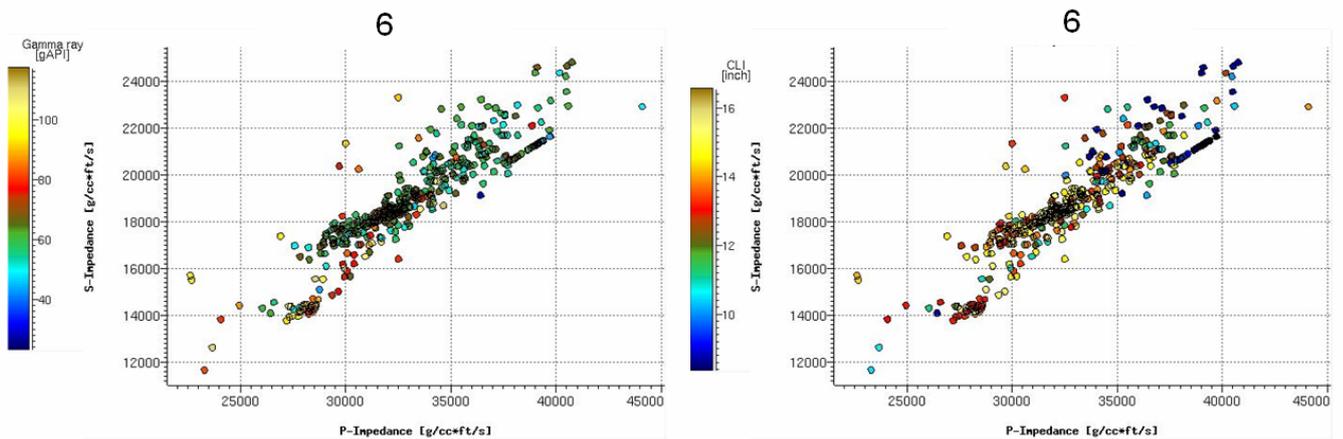


圖 3 台南盆地 A 號井 P 波聲波阻抗對 S 波聲波阻抗交叉圖分析。6 號井之井孔狀況較差(圖右 12~16 高 Caliper 值)，此交叉圖不如預期的能定義一 Mud Rock Line (Castagna, 1985)，使所有含水或含氣砂之取樣點，均落於此 Mud Rock(左圖紅、黃色高伽瑪值取樣點) Line 的左上方。顯示 S 波測錄尚需進一步作校正，方能具可信度。6 號井井孔大、井況差的區段，多為油氣高潛能帶。

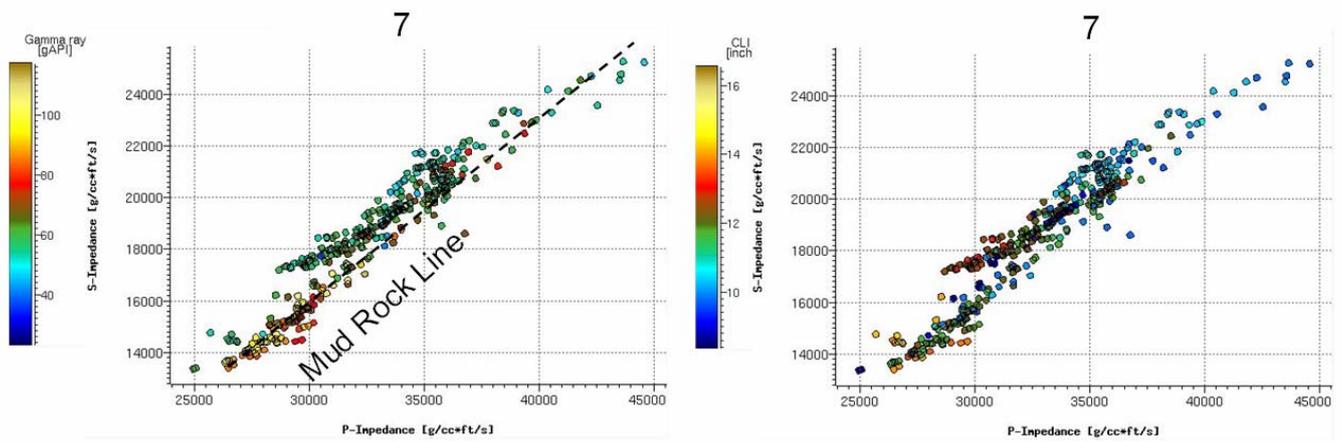


圖 4 台南盆地 B 號井 P 波聲波阻抗對 S 波聲波阻抗交叉圖分析。7 號井之井孔狀況較好(圖右 12~16 高 Caliper 值之取樣點明顯減少)，如圖左虛線所示，此交叉圖如預期的能定義一 Mud Rock Line (Castagna, 1985)，使所有含水或含氣砂之取樣點(珈瑪值小於 75、藍綠色取樣點)，均落於此 Mud Rock(左圖紅、黃色高珈瑪值取樣點) Line 的左上方。此現象顯示，7 號井 S 波測錄之可信度相當高。

合理範圍，部分油氣高潛能地段之波松比值亦如預期降低。圖 2 顯示，台南盆地 B 號井 S 波聲波測錄部分油氣高潛能地段，其波松比常數也如預期降低。這些檢視，顯示 S 波之聲波測錄之可信度高。圖 3 為台南盆地 A 號井 P 波聲波阻抗對 S 波聲波阻抗交叉圖分析。A 號井之井孔狀況較差(圖右 12~16 高 Caliper 值)，此交叉圖不如預期的能定義一 Mud Rock Line (Castagna, 1985)，使所有含水或含氣砂之取樣點，均落於此 Mud Rock(左圖紅、黃色高珈瑪值取樣點) Line 的左上方。顯示 S 波測錄尚需進一步作校正，方能具可信度。A 號井井孔大、井況差的區段，多為油氣高潛能帶。圖 4 為台南盆地 B 號井 P 波聲波阻抗對 S 波聲波阻抗交叉圖分析。B 號井之井孔狀況較好(圖右 12~16 高 Caliper 值之取樣點明顯減少)，如圖左虛線所示，此交叉圖如預期的能定義一 Mud Rock Line (Castagna, 1985)，使所有含水或含氣砂之取樣點(珈瑪值小於 75、藍綠色取樣點)，均落於此 Mud Rock(左圖紅、黃色高珈瑪值取樣點) Line 的左上方。此現象顯示，B 號井 S 波測錄

之可信度相當高。

在確認 S 波聲波測錄資料之可信度後，目前已與氣田開發現場單位及資料處理單位研商，擬定明年初建立此項技術，實際應用於台南盆地油氣開發及油氣潛能探尋之研究。

肆、『AAPG Course Practical mapping of surfaces/Rev. char』短期研討訓練課心得

一、前言

儲集岩模型分析及模擬時，構造乃模型建立成功與否的首要因素，其餘模型中各項元件在模擬中的優先順序依序為層序地層架構、沉積相模擬、石油物理分析模擬，最後影響的因素為模型網格的粗化(up-scaling)。地層頂部及底部的構造面(structural surface)，結合地層內部的層序地層面(stratigraphic surface)，稱為 3D Geometrical Model (圖 5)。地層內部的層序地層面的建構有三種模式：(1) 微層平行於頂部的進覆(Onlapping)；(2) 微層平行於頂部及底部的整合沉積(Proportional)；(3) 微層平行於底部的侵蝕截切(Erosional Truncation)。圖 5 右圖層序地層中的網格，稱之 stratigraphic Grid，一般地質模型建構時，典型的網格大小為長 50 公尺、寬 50 公尺、高 1 公尺。不同的層序地層建構方式，對地質模型中井孔外、物性的空間傳播影響甚大(圖 6)。過去儲集岩特性分析研究工作，往往強調井孔間地層物性(岩性、聲波阻抗、孔隙率)在空間不均質的傳播，卻忽視了構造模擬的重要性。本年度研究計畫「厄瓜多十七號礦區儲集岩及生產方案之研究」，油層模擬結果顯示，各井模擬的出水時間，均較實際出水時間晚許多。經檢驗該孔隙率模型所對應之岩性模型，尚屬合理。受益於此訓練課程所獲心得，了解到儲集岩模型更新以構造形貌修正為主的重要性，因而擬定儲集岩模型構造模擬及修正工作流程(圖 7)：

1. 在垂直剖面上同時展示修正前生產層頂部、底部構造面及油水界

面。

2. 以滑鼠加入修正後之生產層頂部、底部控制點，使地層厚度不變，生產層砂層底部盡量接觸到油水介面。
3. 以修正前生產層頂部、底部構造面為 Secondary Fit Surface，以新編輯之控制點為 Primary Input Surface，重新以 Earth Model 模組建立新構造面。
4. 以新構造面重新進行聲波阻抗及岩性三維模型之時深轉換，再重新進行深度域孔隙率模擬。

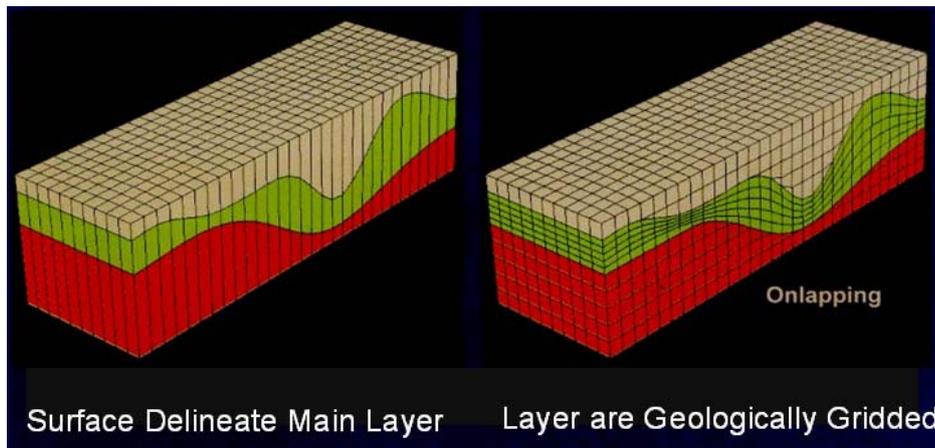


圖 5 Geometrical Model 中構造面及層序地層面。地層內部的層序地層面的建構有三種模式：(1)進覆(右圖最上層)；(2)整合沉積(右圖中間)；(3)侵蝕截切(右圖最下層)。(Dubrule, 2003)

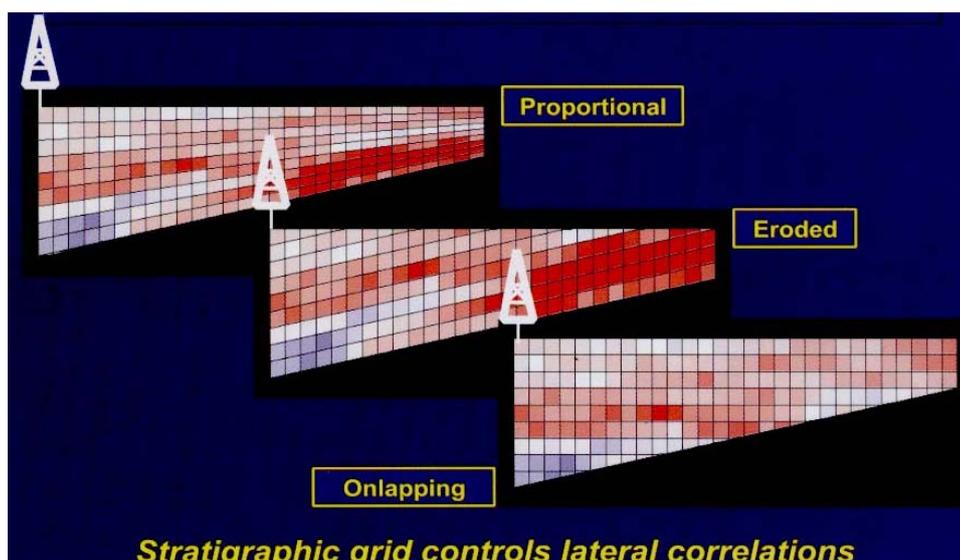


圖 6 層序地層建構方式，對地質模型中物性空間傳播影響。

構造模擬及修正乃儲集岩特性分析及油層模擬之首要影響因素

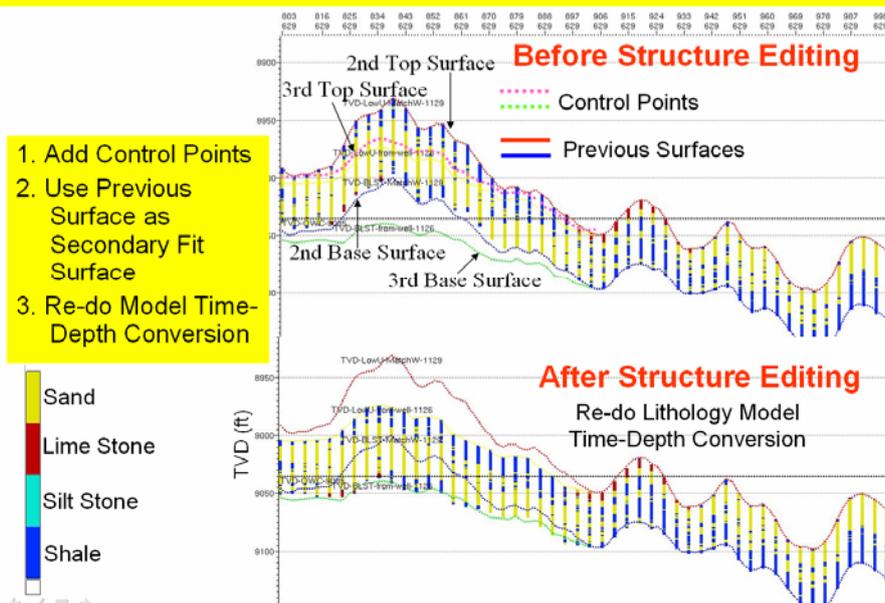


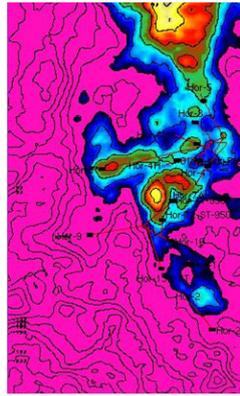
圖 7 為第二次及第三次構造修正後之岩性模型比較。

圖 7 為第二次及第三次構造修正後之岩性模型比較。第二次構造修正(1129)，生產層底部水層分佈(粉紅色)面積較小，油層動態模擬歷史諧調時不易出水，第三次構造修正後(3rd Editing Model-1207)，生產層底部水層分佈(粉紅色)面積較大，油層動態模擬歷史諧調時太快出水(圖 8)。第四次構造修正(1214)乃依據前兩次構造修正及模擬的經驗，構造應被限制在 1129 及 1207 兩 Surface 之間(圖 9)。

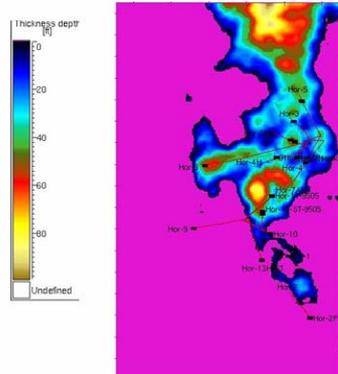
構造(Structure)、層序地層(Sequence Stratigraphy)架構的曲面建構，及井孔間地層之石油物理等物性在空間的傳播，可以用現有井下相關資料估算 (Estimation) 一單一模型(單一解)，亦可用井下統計資訊以模擬 (Simulation) 的方式獲得數組模型 (多組解)。前者稱為 Deterministic 方法，後者稱為 Stochastic 方法。估算的方式又可分為內插 (Interpolation) 及應用地質統計的 Kriging 兩種模式。由井下已知資訊估算某網格點之構造深度或物性參數時，不外是決定各已知點的權重。當採用內插方式估算時，不論內插所依據的理論方法為何，基本上各已知點的權重是相同的。換言之，內插方式估算是無方向

1. Keep the Net Pay
2. Drop the Structure to Force the Sand Base Touching O/W Contact

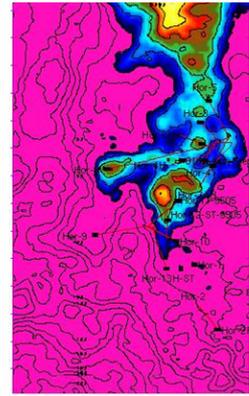
2nd Editing Model



4th Editing Model



3rd Editing Model



Net Pay of 3rd Editing Model

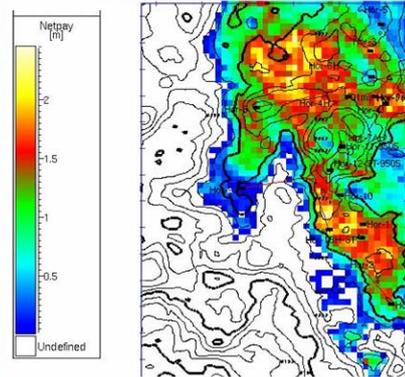


圖 8 構造修正前後，生產層底部水層分佈範圍之比較。第二次構造修正(1129)，生產層底部水層分佈(粉紅色)面積較小，油層動態模擬歷史諧調時不易出水，第三次構造修正後(3rd Editing Model-1207)，生產層底部水層分佈(粉紅色)面積較大，油層動態模擬歷史諧調時太快出水。

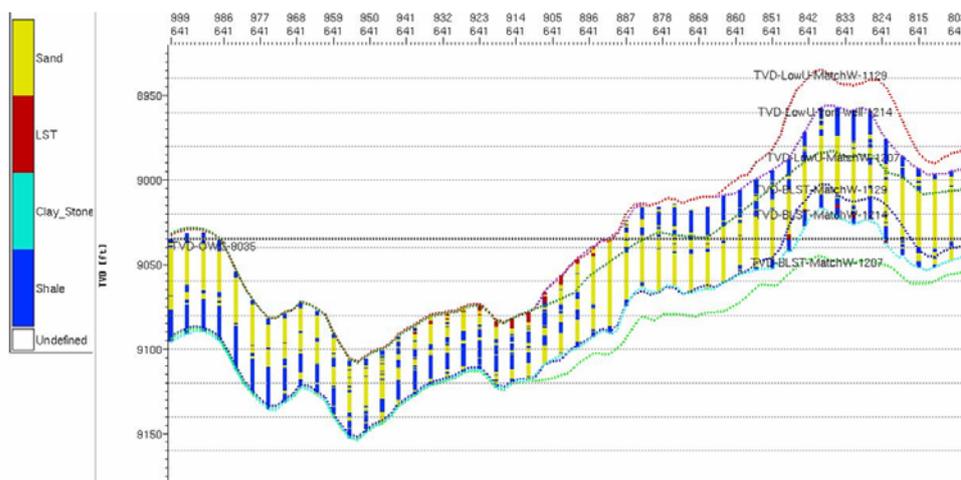


圖 9 第四次構造修正(1214)乃依據前兩次構造修正及模擬的經驗，構造應被限制在 1129 及 1207 兩 Surface 之間。

性的，各方向已知點的權重均相同(圖 10 左圖)。常見的內插方法有 Moving Average, Triangulation, Polynomial Fit, Least Squares, Minimum Curvature, Inverse Distance 等。當估算是採用地質統計的 Kriging 模式時，不同方向已知點的權重是不相同的(圖 10)。換言之，Kriging 模式的估算是具有方向性的(圖 10 右圖)，權重相對較大的方向即為地質模型中砂體延伸最長，或構造的主要走向方向。

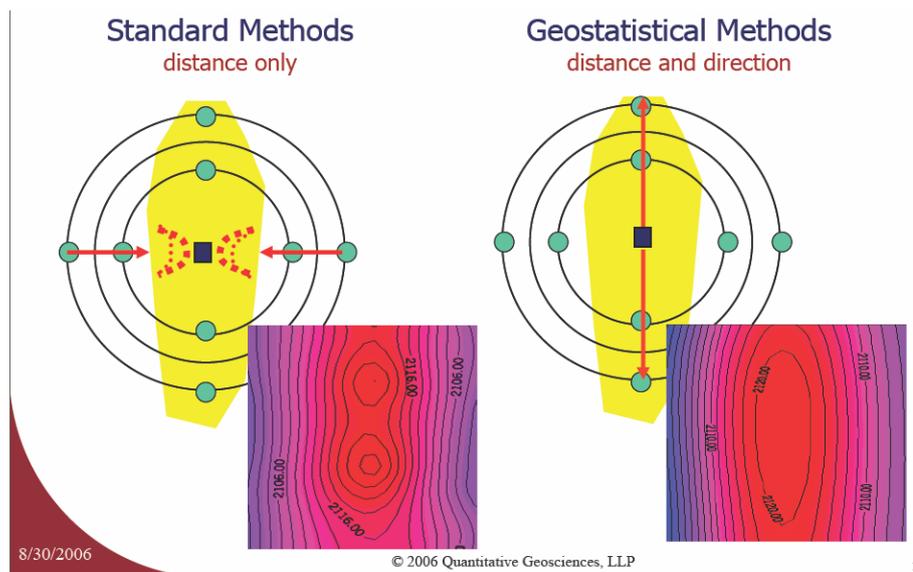


圖 10 基本內插方法與地質統計的 Kriging 模式的差異。基本內插方法，各方向已知點的權重均相同，估算結果受水平紅箭頭上四個已知點值的影響，等深線因而在軸部向內縮。以地質統計 Kriging 模式估算時，黃色長條形方向為構造的主要走向方向，在這個方向已知點的權重大於水平紅箭頭上四個已知點的權重，最終估算之等深線受到水平紅箭頭上四個已知點值的影響較小，構造形貌較平滑。

如同估算可分為傳統及地質統計兩種模式，用井下資訊模擬 (Simulation) 多組模型時，亦可分為傳統及地質統計兩種模式。傳統的方式即為應用已久之蒙提卡羅 (Monte Carlo)，井下資訊的直方圖是唯一需要輸入的資料，輸出值即由此直方圖隨機抽取，其模擬結果無需 honor 井下資料 (hard data)，亦無任何方向性的考量。地質統計的模擬，分為 Unconditional Simulation 及 Conditional Simulation 兩種，前者模擬結果無需 honor 井下資料，後者卻需 honor 井下資料。兩者模

擬進行均需輸入井下資訊的直方圖及 Spatial Model (Variogram)。不論估算或模擬地質現象(structure, properties)，考量到地質不均向分佈的自然特性，因而引入變異函數(Variogram)分析模擬的方法，均稱為地質統計方法。反之，傳統的估算或模擬，不考量到地質不均向分佈的自然特性，也無需進行變異函數(Variogram)分析模擬。以下即簡述各種地質統計的理論、原則，地質統計分析參數設定和實際地質模型在空間分形貌的關連性。

二、Univariate Data 的描述

1. 直方圖—描述地質模型中無論是構造或層序地層的架構面，或地層內部如孔隙率、滲透率、水飽合率等單一變數在模型中的分佈狀況，均可以一直方圖來描述(圖 11~15)。直方圖一旦建立後，Mean(圖 11)、Median(圖 12)、Mode、Standard Deviation、資料出現在某一範圍內的機率 (Confidence Interval) 均可表現在直方圖上(圖 16)。

(1). Mean

Mean, m

- the arithmetic average of all data values
- sensitive to erratic values (outliers):

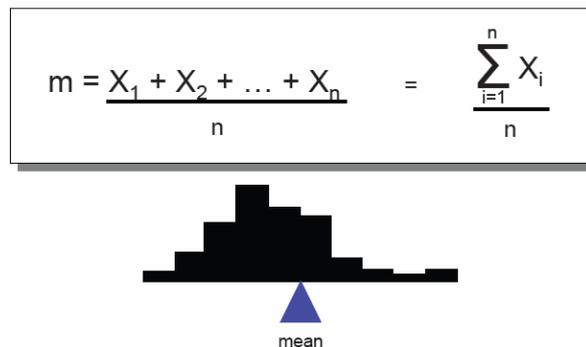


圖 11 Univariate Data 的 Mean (Yarus, J. M., 2006. Quantitative Geoscience, LLP)。

(2) Median 及 Range

Median, M

- midpoint of the observed values if they are arranged in increasing order. Half of the values are below and half of the values are above the median.
- on the cumulative probability distribution function (cdf) plot, the median is the value on the x-axis that corresponds to 50% (or P50) on the y-axis.
- not sensitive to how far away values are from the center

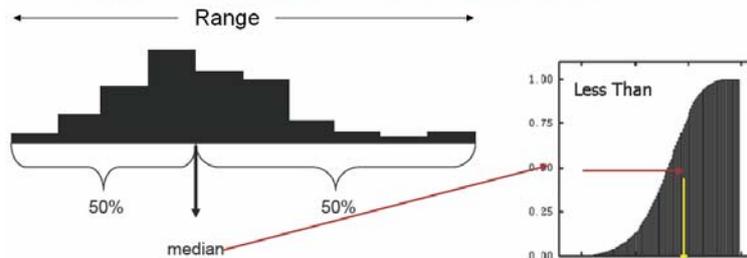


圖 12 Univariate Data 的 Median 及 Range (Yarus, J. M., 2006. Quantitative Geoscience, LLP)。

(3) Mode

Mode

- the value that occurs most frequently.
- the class with the tallest bar on a histogram gives a quick idea of the mode value.
- Sensitive only to the value with the highest frequency

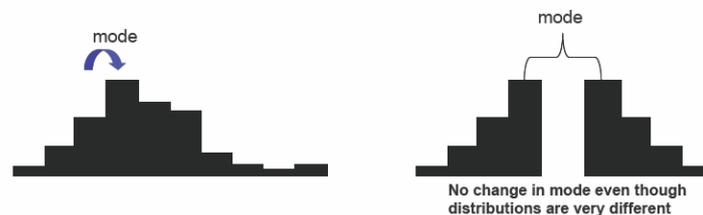


圖 13 Univariate Data 的 Mode (Yarus, J. M., 2006. Quantitative Geoscience, LLP)。

(4) Variance

Measures of Spread

- Variance
 - Average squared distance of the data about the mean
 - Very sensitive to outliers

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - m)^2}{n - 1}$$

圖 14 Univariate Data 的 Variance 計算。Variance 代表 Univariate Data 點群間分佈離散程度。m 為點群之平均值。(Yarus, J. M., 2006. Quantitative Geoscience, LLP)

(5) Standard Deviation(標準誤差)

Measures of Spread

■ Standard deviation

- Expressed in the same units as the data
- Standard deviation is the square root of the variance.

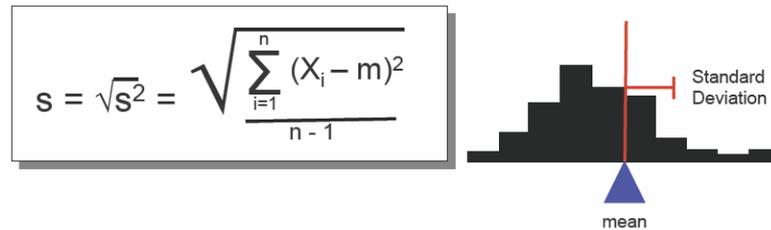


圖 15 Univariate Data 的 V 標準誤差計算。標準誤差亦代表 Univariate Data 點群間分佈離散程度。m 為 Univariate Data 點群之平均值。標準誤差為 Variance 的開根號值。(Yarus, J. M., 2006. Quantitative Geoscience, LLP)

2. 標準誤差與資料分佈的機率關連

在 Univariate Data 採樣率夠多的狀況，自然界很多單一的直方圖分佈均呈現高斯分佈，只要這個單一變數點群的平均值及標準誤差知道，便可重建此單一變數點群的直方圖。針對高斯分佈的單一變數點群而言，68.3%的資料出現離平均值左、右各一個標準誤差的範圍(圖 16)；94.5%的資料出現離平均值左、右各二個標準誤差的範圍，此範圍稱為 Confidence Interval；99.7%的資料出現離平均值左、右各三個標準誤差的範圍。滲透率的直方圖分佈卻常呈 Lognormal 形貌。

- 68% of the data lie within one standard deviation of the mean
- 95% of the data lie within two standard deviations of the mean

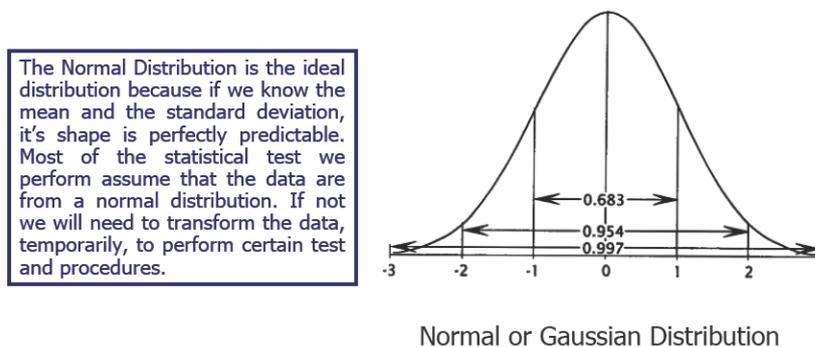


圖 16 標準誤差與資料分佈的機率關連(Yarus, 2006)。

3. Univariate Data 點群群組的恰當性(圖 17)

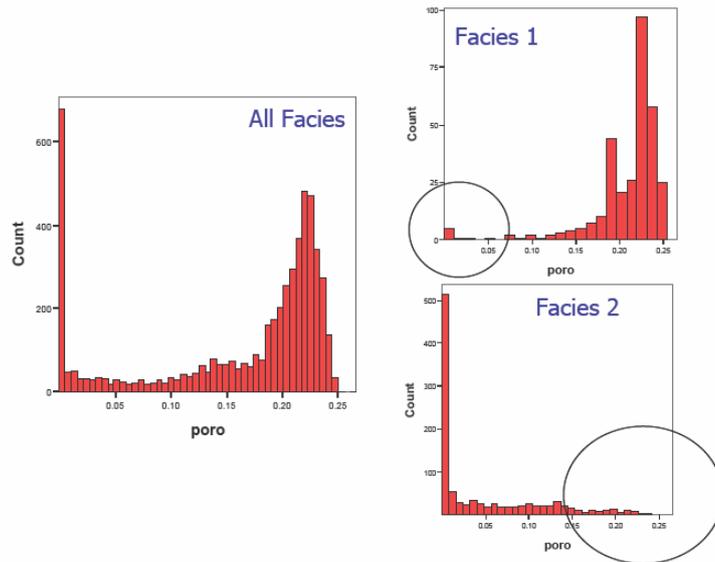


圖 17 Univariate Data 點群群組的恰當性分析。當整個點群分為兩個沉積相 (Facies 1 及 Facies 2) 時，直方圖的分佈較合理化。(Yarus, J. M., 2006. Quantitative Geoscience, LLP)

4. Support Effect—資料點量度來源的體積不同所造成統計分析結果不同(圖 18)

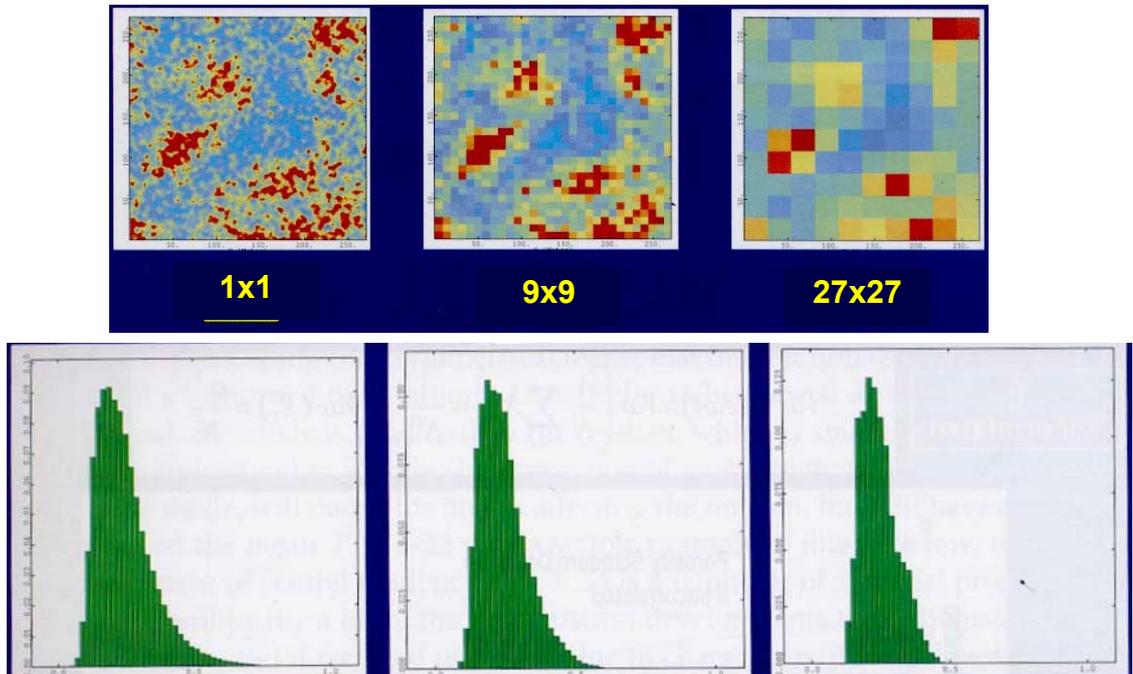


圖 18 Support Effect。當網格由左(1x1)至右(27x27)變大時，資料點量度來源的面積變大，直方圖分佈的 Range 變窄，標準誤差變小。

Core Plug 和電測 Log 所測得資料的差異，亦肇因於此 Support Effect。Core Plug 之 Support Volume 小、標準誤差大；電測 Log 所測得資料的 Support Volume 大、標準誤差小。

三、Bivariate Data 的描述

1. Covariance—量度兩組變數間之關連性，強烈受到資料異常極值的影響。

Covariance

- a statistic measuring the correlation between all points of two variables (e.g., porosity and acoustic impedance).

$$\text{COV}_{x,y} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - m_x)(Y_i - m_y)}{n}$$

- The magnitude of the covariance statistic is dependent upon the magnitude of the two variables.
- Value is strongly affected by extreme pairs (outliers)
- No real feeling for how "good" the relationship is between X and Y

圖 19 Bivariate Data 的 Covariance (Yarus, J. M., 2006. Quantitative Geoscience, LLP)。

2. Correlation Coefficient(相關係數)—(圖 20~圖 23)

Correlation Coefficient (r)

- Normalized version of the covariance
- Values range between 1 and -1

$$r = \frac{\text{COVARIANCE}_{X,Y}}{S_X * S_Y}$$

- S_x = standard deviation of attribute X
- S_y = standard deviation of attribute Y

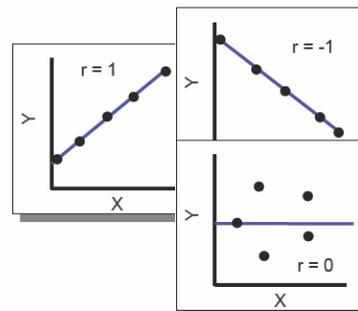


圖 20 Bivariate Data 的相關係數計算(Yarus, J. M., 2006. Quantitative Geoscience, LLP)。

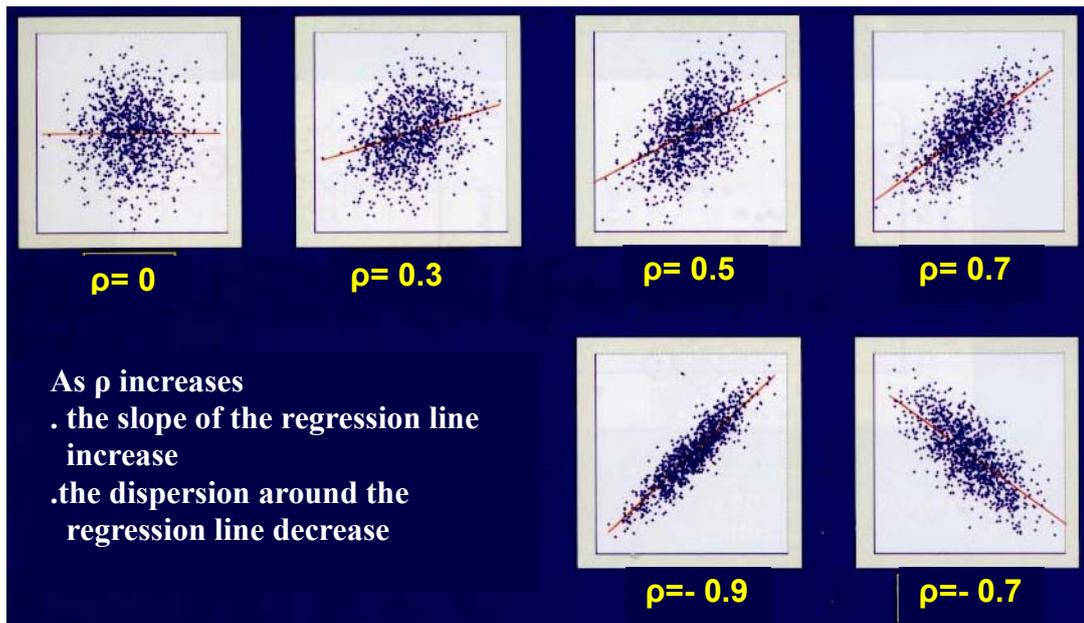


圖 21 相關係數大小和兩變數點群離散形貌關係(Dubrulle, 2003)。

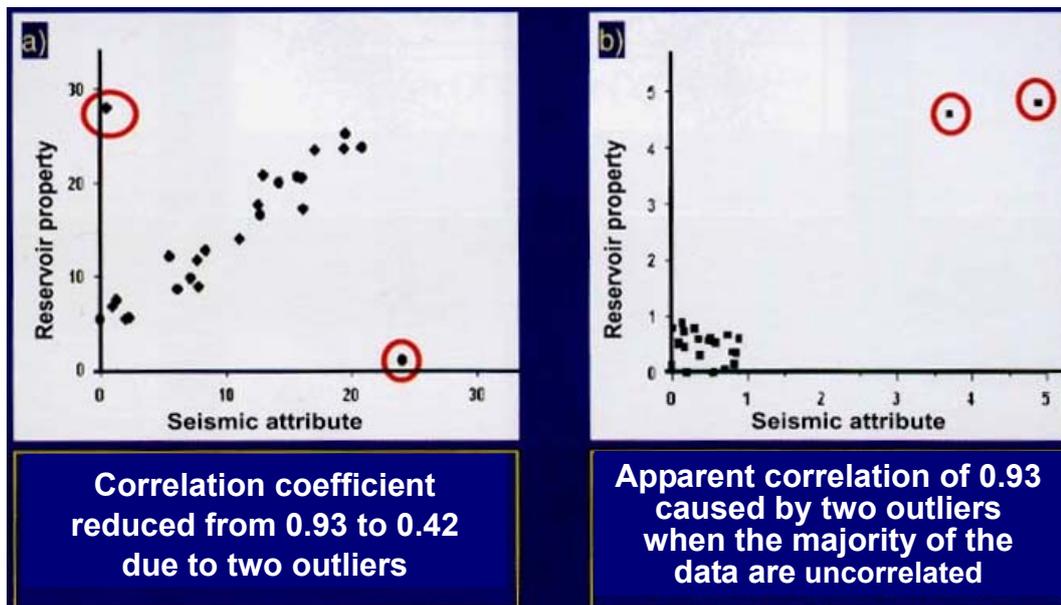


圖 22 相關係數大小很容易受異常的極值影響 (outliers) (Dubrule, 2003)。左圖原本相關性高達 0.93，卻因異常極值影響，降為 0.42。右圖原本相關性極低，卻因異常極值影響，上升為 0.93。(Dubrule, 2003)。

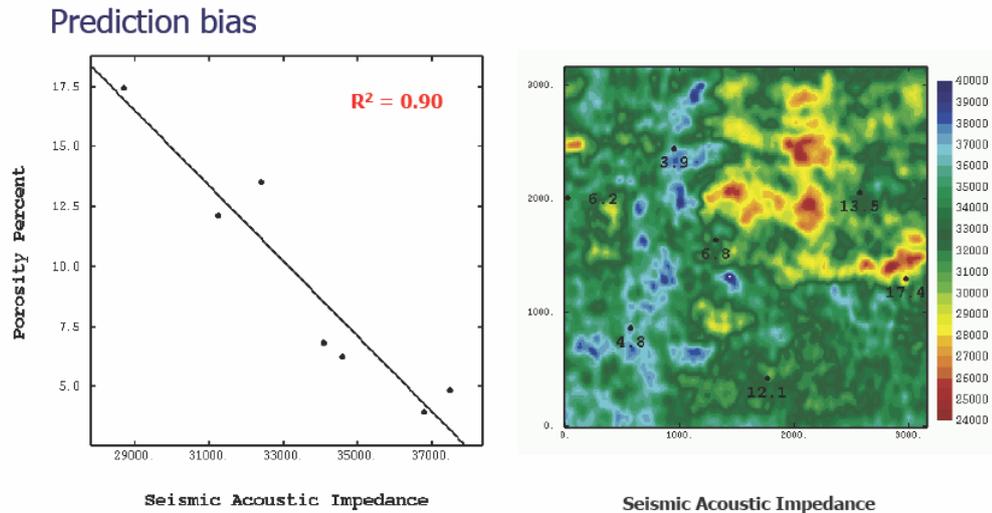


圖 23 孔隙率和聲波阻抗間之相關性為負相關(Yarus, J. M., 2006. Quantitative Geoscience, LLP)。

3. Linear Regression

假設：(1) 取樣數據是隨意取得；(2)不同取樣地點之同一物性變數，彼此間並無空間的關連性(圖 24)。兩變數間可依據期相關性，進行線性擬合，由其中一變數推演另一變數。如圖 23 所示，震測逆推所獲聲波阻抗資料體，可經由井下聲波阻抗測錄與孔隙率測錄所擬合之線性關係，轉為孔隙率資料體。當不同取樣地點之同一物性變數(聲波阻抗)，彼此間有空間的關連性時，若以線性擬合推估另一具相關性的變數(孔隙率)時，標準誤差與估算值(孔隙率)具相關性(圖 24 右圖)，此時孔隙率的估算稱為有偏差(biased)的估算。這種狀況下，如果採用地質統計的方法(Colocate Cokriging)來估算孔隙率分佈，則標準誤差是隨機分佈的，和估算值不具相關性，此時的估算稱為無偏差(unbiased)的估算。

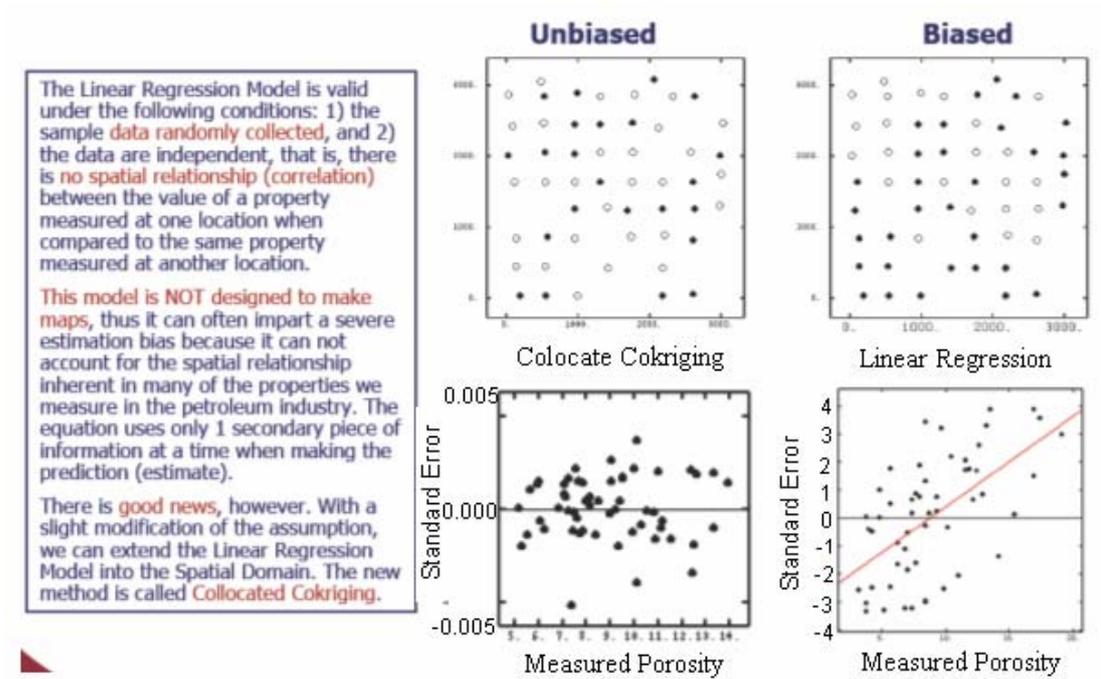


圖 24 線性擬合與估算之偏差(Yarus, J. M., 2006. Quantitative Geoscience, LLP)。

四、空間模擬(Spatial Modeling)

空間模擬的目的在於充填井孔間模擬變數(深度、孔隙率、滲透率、聲波阻抗、水飽合率等)的值，量度不準度(uncertainty)及可信度(reliability)。其方法可分為 Deterministic(單一解)及 Stochastic(多組解)兩種。這些方法是可以同時整合不同類型的資料，進行空間模擬。當模擬變數值的分佈與地理位置有關連性時，稱之區域化(regionalized)。此時變數值的連續性(continuity)是有方向性的，猶如自然界的河川、山脈、山角洲在地理環境中之分佈(圖 25)。空間模擬的方法，不再如傳統統計方法的無方向性，這種方向性的統計分析、應用於空間模擬，稱之地質統計分析。地質統計分析方法可有效的協助儲集岩特性分析，保留儲集岩的不均質性(heterogeneity)和連通性(connectivity)。

- Spatial Continuity
 Geologic surfaces and features have different scales and directions of continuity.
 A variogram is the metric which describes the anisotropic behavior of a regionalized variable.



Variograms can be calculated from discrete data or gridded data. The analysis is done by calculating the average squared difference between pairs of measurements at different separation intervals. The results are presented as a graph of variance against separation interval.

圖 25 自然界河川、山脈、山角洲在地理環境中分佈之方向性(Yarus, J. M., 2006. Quantitative Geoscience, LLP)。

五、變異函數(Variogram)

1. 變異函數的計算及相關名辭定義

變異函數是地質統計研究空間連續性最重要的基楚。圖 26 簡示變異函數之計算方式。對某一固定間距(lag)的任何一對變數值，計算其差異的平方(c)，將所有配對變數之計算結果相加，再除以兩倍的配對點數(n)，即為該 lag 的變異值(variogram)。一般 lag 的距離依 lag increment 的倍數逐漸增加，圖 26 的 lag increment 為 500 公尺，變異值的計算依序為 lag increment 為 1、2、3、4、5 (圖 26 g)。每個 lag 距離均計算出其對應之變異值後，即可獲得如 j 圖之變異函數。每個 lag 距離和其對應之變數值差異平方(squared difference)作圖，稱為 cloud of points 圖(圖 26 c)。變異函數的分析是可以有方向性，圖 26 e 為由正北開始、0 度~180 度間變異函數計算時，Lag 連結的方式。圖 26 f 為由正北開始、0 度~135 度間變異函數計算時，Lag 連結的方式。圖 26 i 為由正北開始、45 度~135 度間變異函數計算時，Lag 連結的方式。實際上一般的變異函數計算時，是由正北開始，等分為幾個方向，基於取樣點在空間分佈的密度問題，每個方向計算時又允許容忍度差異(tolerance)，某一方向變異函數計算時，實際上是在 tolerance angle 的

區間內進行(圖 27)。同理，lag increment 的定義也允許容忍度差異(lag tolerance)。對某一 Lag (h)及 lag tolerance 而言，並非所有 tolerance angle 區間內的取樣點，均被用於計算該角度之變異值，必需受限於定義之 band width。依據這些定義及規範，對圖 27 之原點取樣點而言，Lag 為 h、角度為 45° 的配對點取樣即為灰色被景內之兩取樣點。

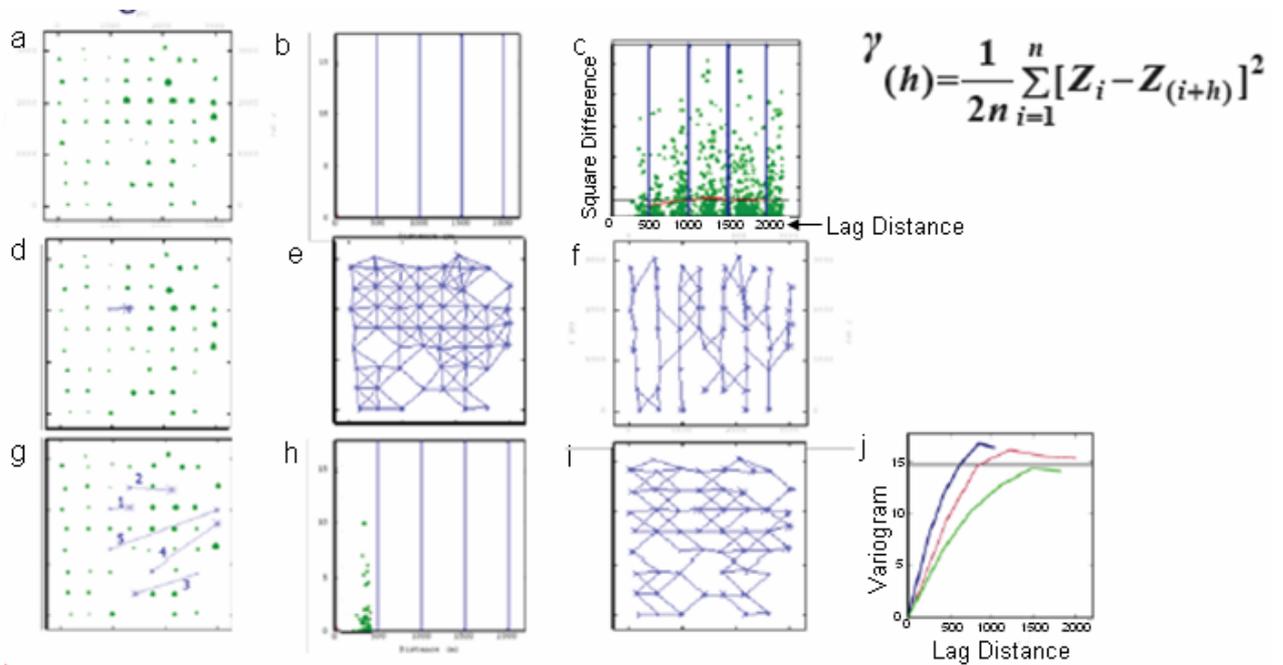


圖 26 變異函數之計算方式 (Yarus, J. M., 2006)。

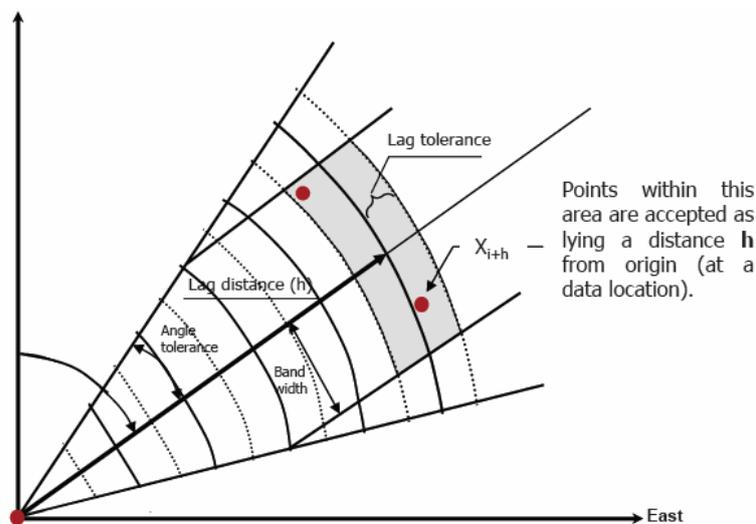


圖 27 變異函數計算之 lag tolerance、angle tolerance、band width 定義 (Yarus, J. M., 2006)。

2. 變異函數形貌與變數空間分佈關連

依據取樣點分析製作的 Variogram，一般在垂直方向尚能形成平滑的分佈，易於進一步以適當的函數(Spherical, Exponential, Gaussian, Nugget 等)模擬。水平方向的 Variogram 製作，較難獲得平滑的分佈，也不易進一步決定模擬的函數為合。圖 28 變異函數中，lag 為零時 Variogram 值垂直上升為 0.25，稱為 Nugget 效應，一般代表分析資料本身的隨機噪音(random noise)，或者分析資料體在地理位置中極小尺度的地質現象(圖 29)。震測資料分析所獲重合速度的變異函數分析，便常表現出噪音相關之 Nugget 效應。在 correlation range 內之變異函數曲線，反應了資料體在空間的連續性，該曲線的斜率越陡(如 Exponential 函數)，資料體在空間的連續性越小。反之，該曲線的斜率越緩(如 Gaussian 函數)，資料體在空間的連續性越大。當 Variogram 的值由 lag 為 0 開始，隨 lag 增加而增加直到 Variogram 開始持平的距離，稱為 Range。估算點和取樣點間距大於 Range 時，視為互不相關，取樣點的權重為零。Variogram 開始持平的 Variogram 值，稱為 Sill。

Anatomy of the variogram

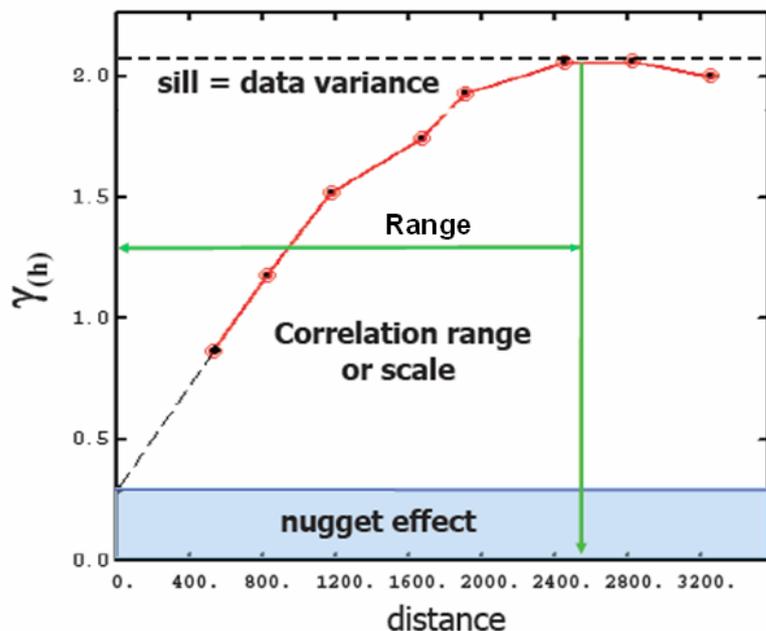


圖 28 變異函數形貌與變數空間分佈關連(Yarus, J. M., 2006)。

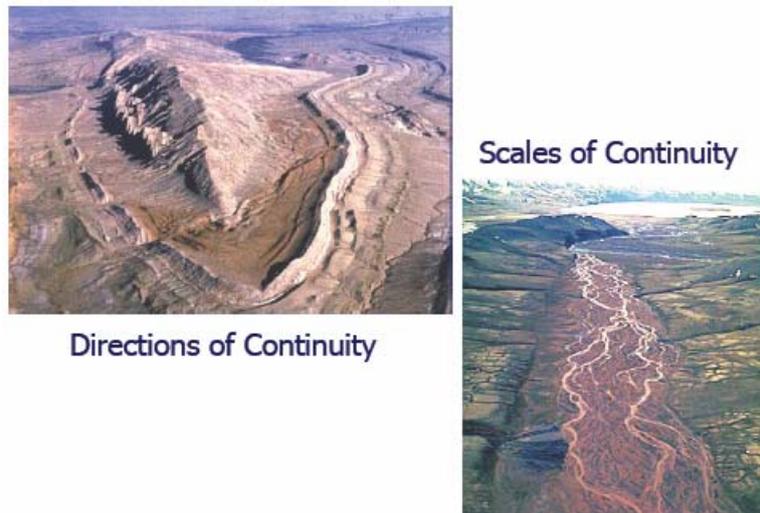


圖 29 自然界的地質狀況，存在方向性與尺度大小不同的現象。右圖連續性尺度最大的沉積系統為河流，但左下角觀察到的沖積扇則尺度相較小許多。如果空間模擬的尺度以河流為主，變異函數可用單一函數來描述。但如果極小尺度的現象也要描述時，可再加入 Nugget 函數(Yarus, J. M., 2006)。

變異函數以 Variogram Map(圖 30 右圖)的方式表示時，很容易感覺到模擬變數在空間分佈的方向性。一旦最大連續性方向的變異函數及最小連續性方向的變異函數計算獲得後，兩方向間各角度的變異函數曲線便可計算。最大連續性方向之 Range (X Range)和最小連續性方向之 Range (Y Range)可視為橢圓的長軸及短軸(圖 31)，Kriging 運算時，估算點為橢圓的中心，橢圓外取樣點之權重均為零。

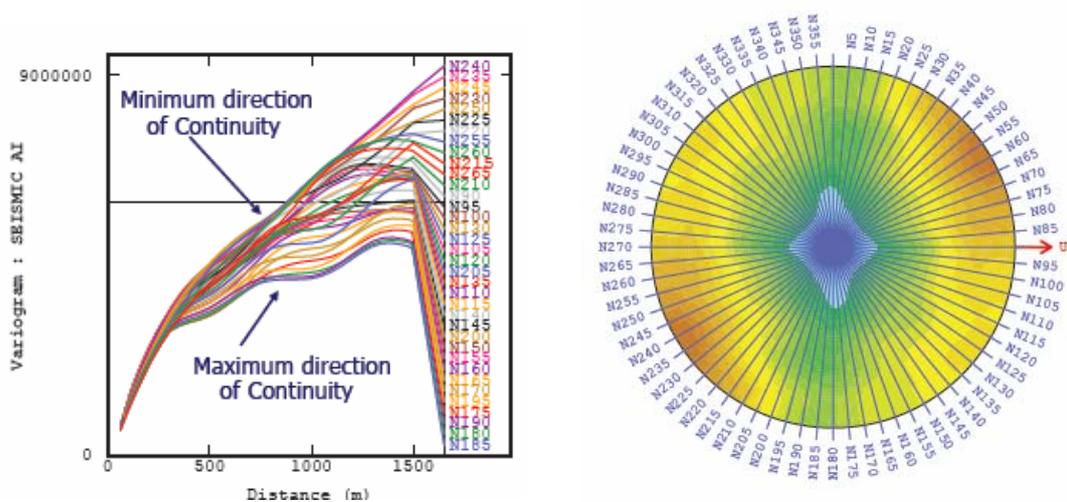


圖 30 變異函數可以 Variogram Map(右圖)的方式來表示(Yarus, J. M., 2006)。

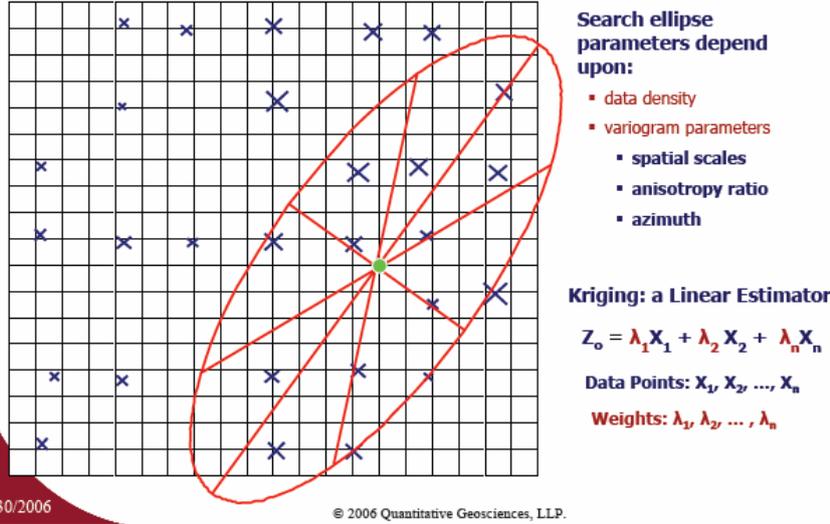


圖 31 最大連續性方向之 Range 和最小連續性方向之 Range 可視為橢圓的長軸及短軸，Kriging 運算時，估算點為橢圓的中心，橢圓外取樣點之權重均為零(Yarus, J. M., 2006)。

3. 變異函數的分解 (Decomposition)

圖 32 所示，上排最左為原始的單一變數空間分佈(構造、孔隙率等)，黑粗框之資料分佈為原始資料中的趨勢變化(trend)，在變異函數曲線上對應於黑色橢圓內的紅色曲線， variogram 的值隨 lag 距離持續增加而增加，不會轉平，亦即變異函數曲線不存在 Sill。紅粗框之資料分佈為原始資料中短尺度的資訊，在變異函數曲線上對應於紅色橢圓內的曲線。藍框之資料分佈為原始資料中大尺度的資訊，在變異函數曲線上對應於藍橢圓內的曲線。

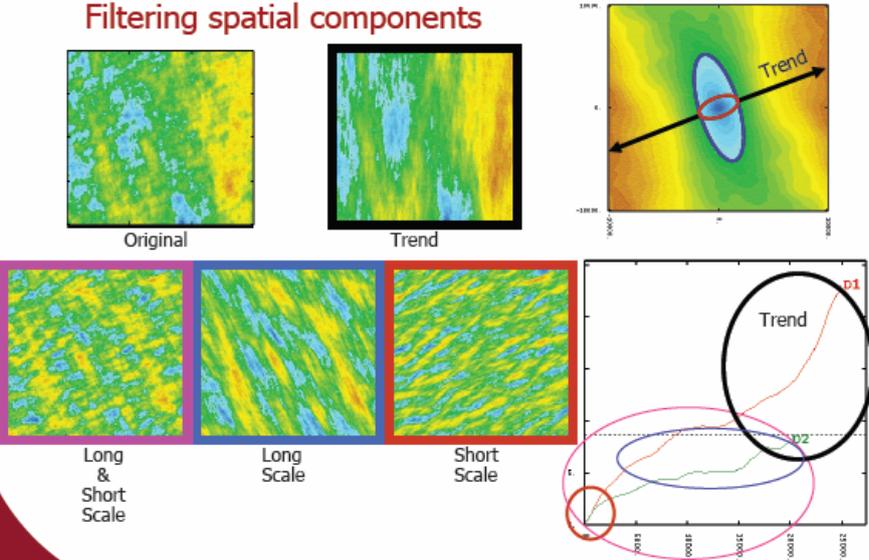


圖 32 變異函數的分解(Decomposition) (Yarus, J. M., 2006)

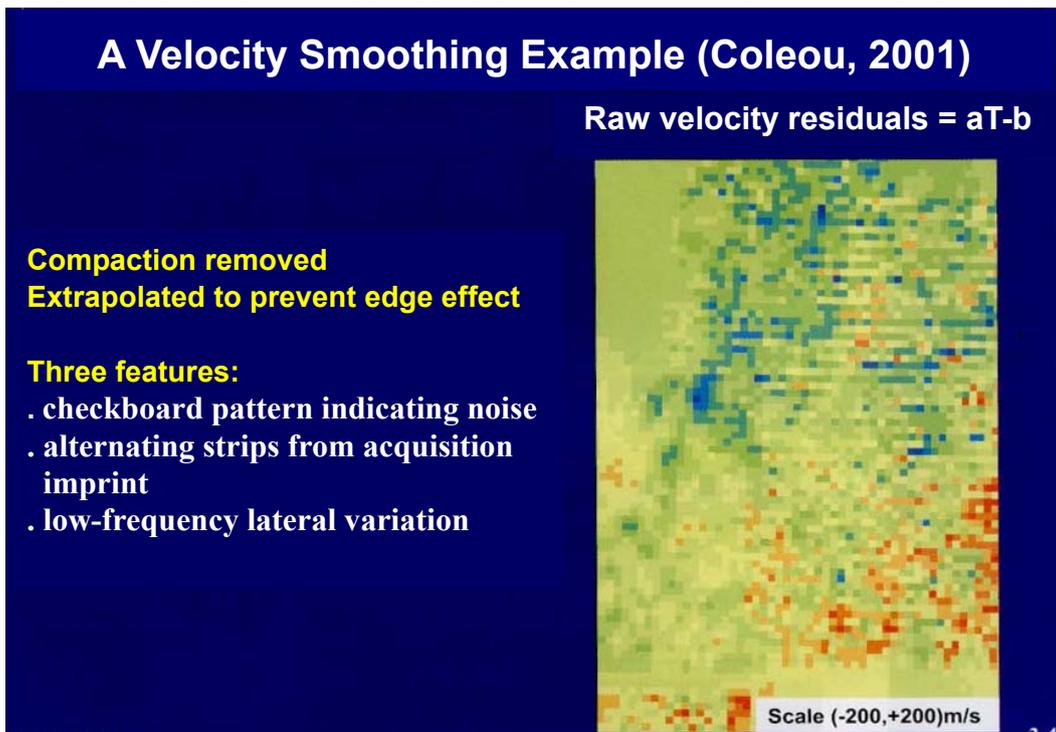


圖 33 重合速度之隨機殘餘分量圖。震測重合速度假設為雙程走時線性函數及一具空間相關性的隨機殘餘分量組成(見下節“Stationary vs. Non-stationary”說明)。此隨機殘餘分量肇因於三種現象：(1)checkboard pattern；(2)alternating strips from acquisition imprint；(3)low-frequency lateral variation。

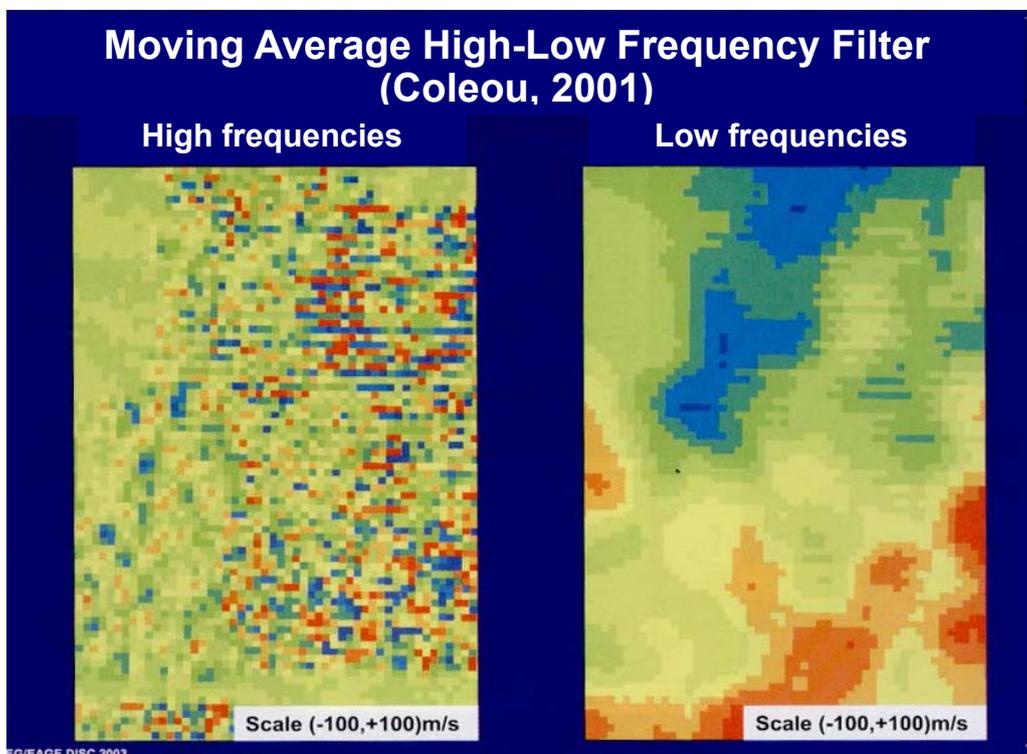


圖 34 圖 33 重合速度隨機殘餘分量經 Moving Average 濾波器濾波後，Low frequency 的速度分佈圖上，條狀的噪音仍無法去除。

Decomposition in Three Components (Coleou, 2001)

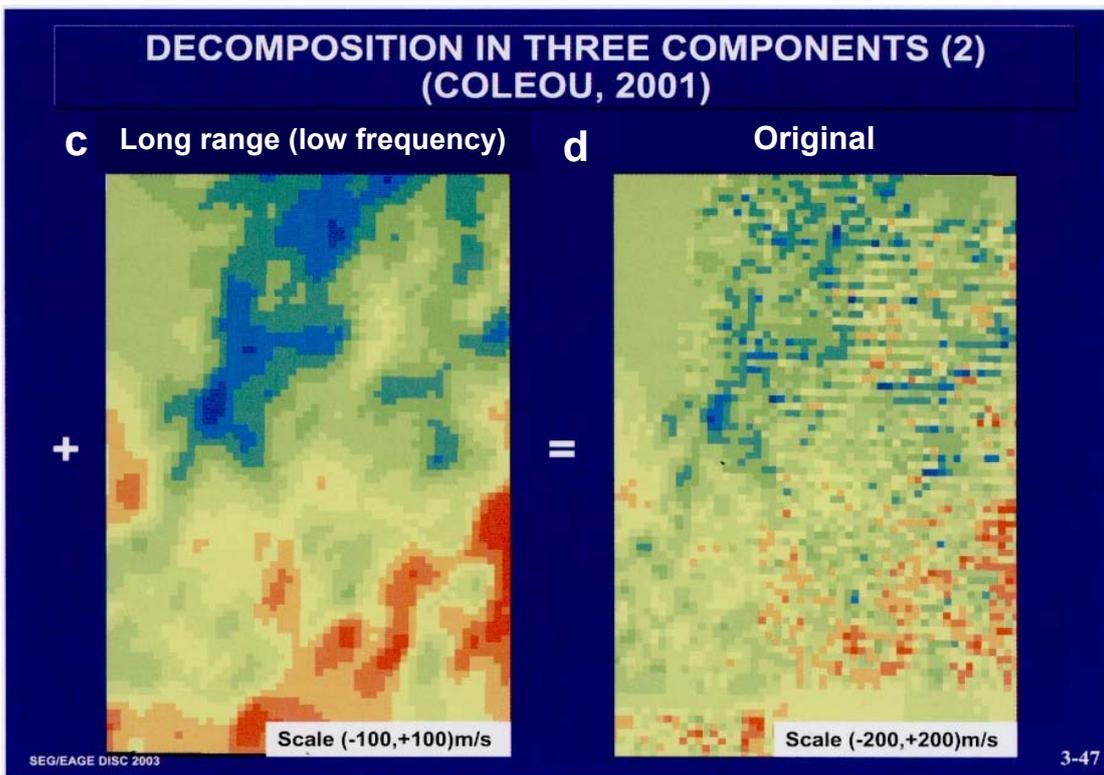
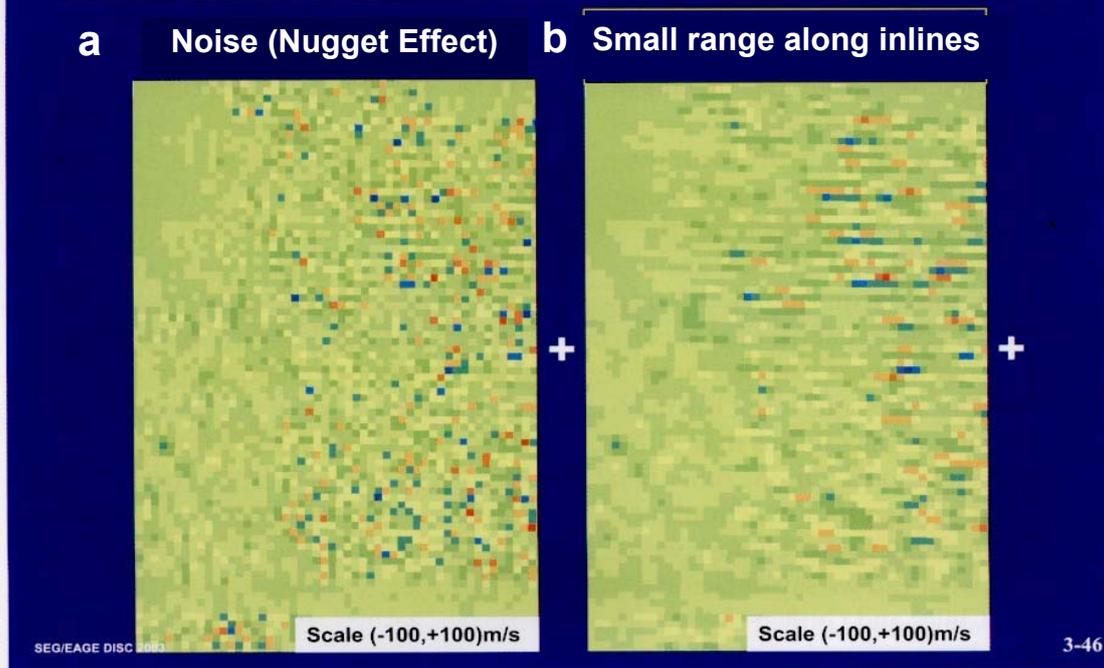


圖 35 應用地質統計方法，將重合速度隨機殘餘分量分解為三個分量：(1) Noise (Nugget Effect) (圖 35a)；(2) Small range along inline (strips) (圖 35b)；(3) Long range (Low frequency) (圖 35c)。三個分量相加之結果，等於原始重合速度隨機殘餘量(圖 35d)。Long range (Low frequency)的速度分佈圖，已不復見條狀之噪音。

4. Stationary vs. Non-stationary

地質統計最主要的假設即是：模擬或估算的地質相關變數，是由一個系統化的趨勢及隨機的殘餘分量(residual random function or component)合成的，此隨機的分量是在空間分佈上有相關性的(correlated in space)。如果此系統化的趨勢是定值，亦即系統化的定值為平均值，此地質模型稱為 Stationary Model (圖 36)，如果此系統化的趨勢是線性函數，此地質模型稱為 Non-Stationary Model。Stationary Model 之變異函數存在 Sill，Non-Stationary Model 卻無 Sill 存在。地質統計的 Non-Stationary Model 和傳統統計 Surface Trend 分析的最大差異，在於隨機殘餘分量的預測。前者之隨機殘餘分量在在空間分佈上具相關性，後者之隨機殘餘分量在在空間分佈上不具相關性。資料體是 Stationary 或 Non-Stationary 的區分，決定於以什麼樣的尺度來看。圖 37 之孔隙率測錄，整段來看可視為 Stationary 模型，但針對個別的目標層而言，黃色背景目標層之孔隙為 Non-Stationary 模型；藍背景目標層之孔隙則為 Stationary 模型。

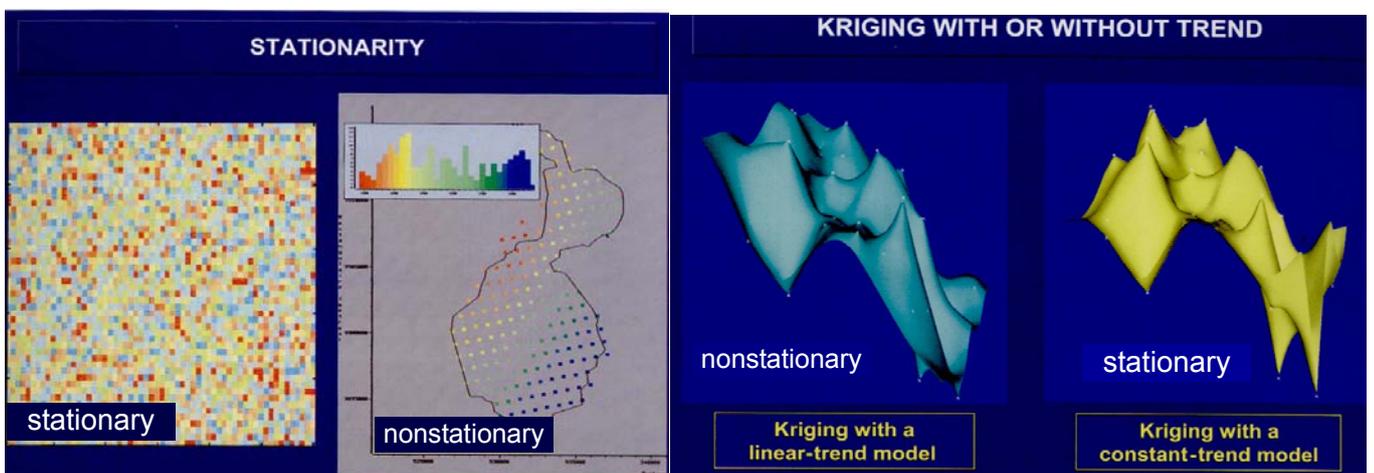


圖 36 Stationary vs. Non-stationary 模型 (Dubrule, 2003)。

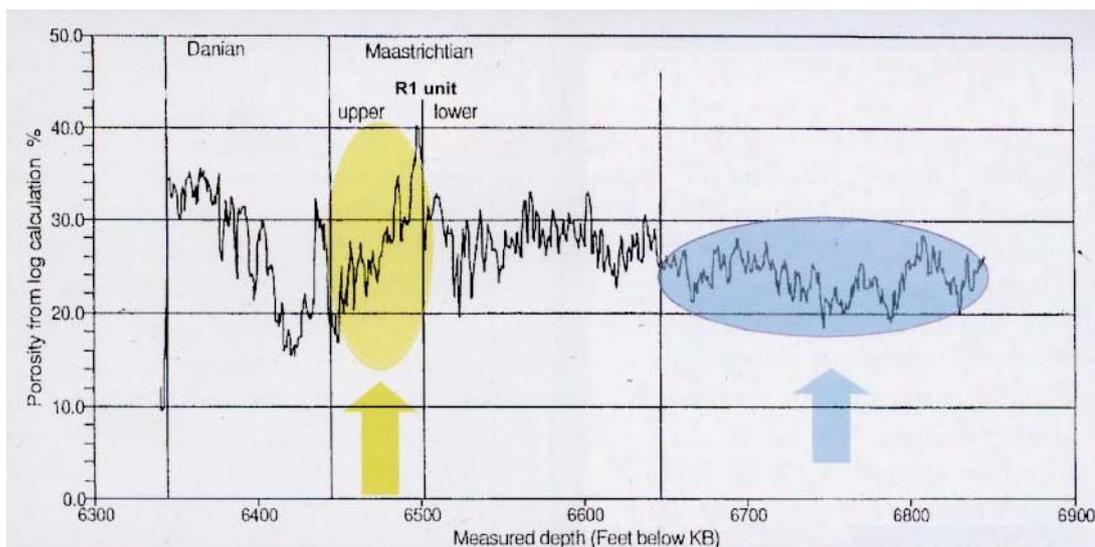


圖 37 資料體是 Stationary 或 Non-Stationary 的區分，決定於以什麼樣的尺度來看(Dubrule, 2003)。

六、Kriging

1. Kriging 計算原理

以圖 38 為例，藍方塊為估算點(Z_0)，三個取樣點(Z_1, Z_2, Z_3)用於估算時的權重($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$)，決定於 Z_0 與 Z_1, Z_2, Z_3 各自連結之三向量，及取樣點間相互連結之三向量的方向與大小。如果簡化變異函數為對稱函數 (isotropic)，則 Kriging 計算就只考量此六個向量的大小，亦即變異函數中 lag 距離的大小($h_{10}=942\text{ m}$ 、 $h_{20}=621\text{ m}$ 、 $h_{30}=1005\text{ m}$ 、 $h_{12}=1107\text{ m}$ 、 $h_{13}=1853\text{ m}$ 、 $h_{23}=1472\text{ m}$) (圖 39)。圖 38 矩陣方程式中， C_{ij} 為間距為某 lag 距離之所有成對點群的 Covariance 值。Covariance(h) 值可依據 Covariance(h) = Sill - $\lambda(h)$ 之關係式，由變異函數轉換計算出(圖 39)。圖 38 矩陣方程式中， C_{ij} 的值均可在圖 39 右下角之 Covariance 對 lag distance 之函數圖中讀取 lag 為 h_{ij} 所對應之 Covariance 值。 $C_{ii}(C_{11}, C_{22}, C_{33})$ 按定義，即為變異函數 Sill 之值。

The slope and constant terms are replaced by a covariance matrix which informs the system about the spatial relationships between the data points themselves and between the data points and the unsampled location (grid node)

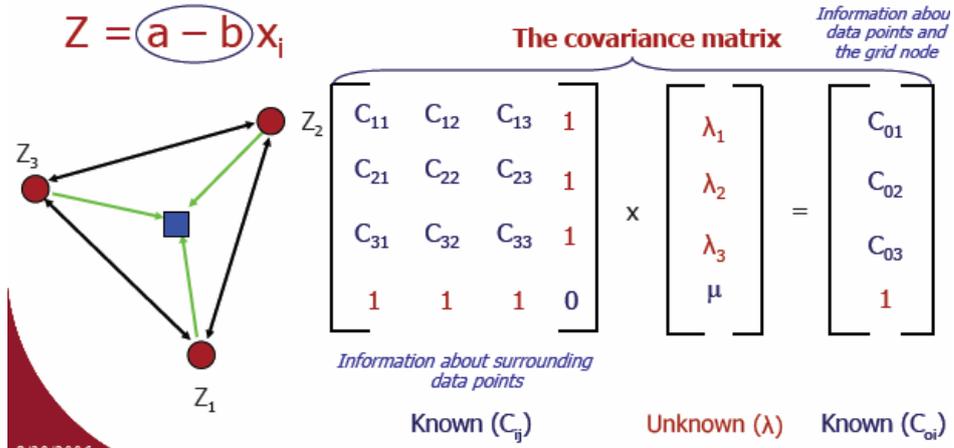
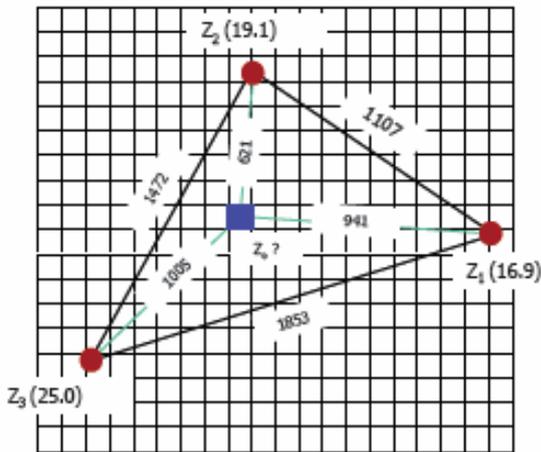


圖 38 Kriging 計算原理(Yarus, J. M., 2006)。

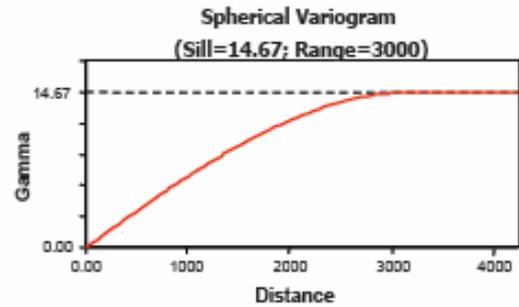


$$\gamma(h) = \left[C_1 \left(\frac{3}{2} * \frac{|h|}{a} \right) - \frac{1}{2} * \left(\frac{|h|}{a} \right)^3 \right]$$

C_1 = Sill of model + any Nugget term

h = Distance between data points and node

a = Range of model



What is used during Kriging

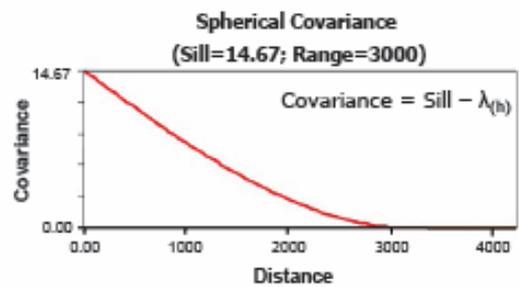


圖 39 Kriging 計算實例(Yarus, J. M., 2006)。

2. 變異函數的選擇對 Kriging 結果之影響

圖 40~圖 43 為同一組資料採用不同變異函數的 Kriging 計算結果比較。圖 44~圖 46 為另一組資料採用不同變異函數的 Kriging 計算結果比較。圖 47~圖 49 為另一 Kriging 計算案例比較。

Spherical Isotropic Model

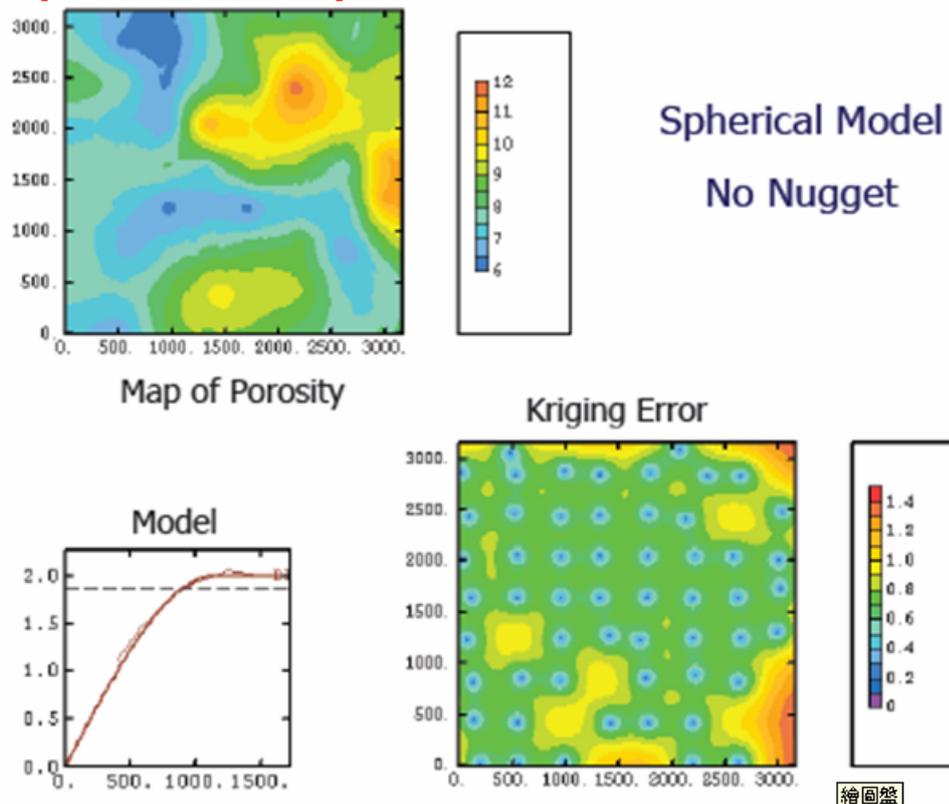


圖 40 變異函數選擇 Spherical Isotropic Model, 無 Nugget 效應之 Kriging 結果(Yarus, J. M., 2006)。

Spherical Anisotropic Model

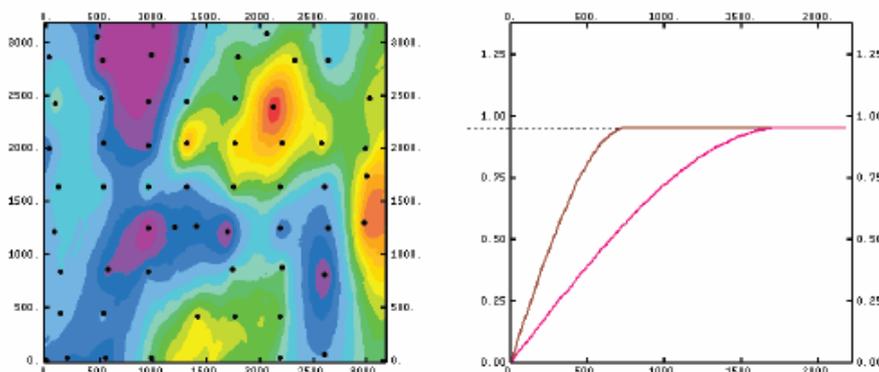


圖 41 變異函數選擇 Spherical Anisotropic Model, 無 Nugget 效應之 Kriging 結果(Yarus, J. M., 2006)。

Gaussian Anisotropic Model

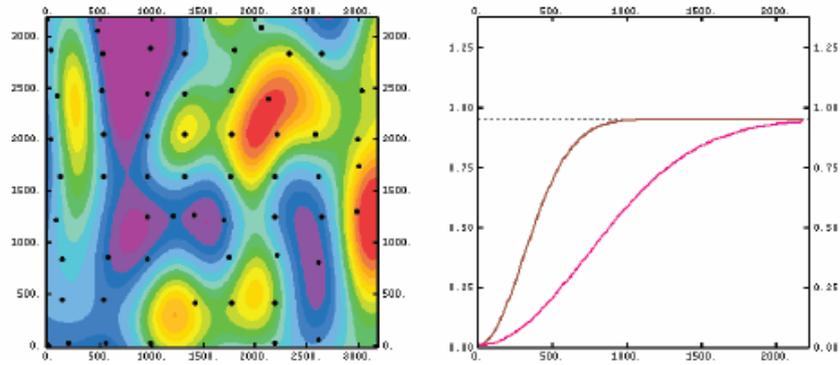


圖 42 變異函數選擇 Gaussian Anisotropic Model, 無 Nugget 效應之 Kriging 結果(Yarus, J. M., 2006)。

Gaussian Anisotropic Model with Nugget

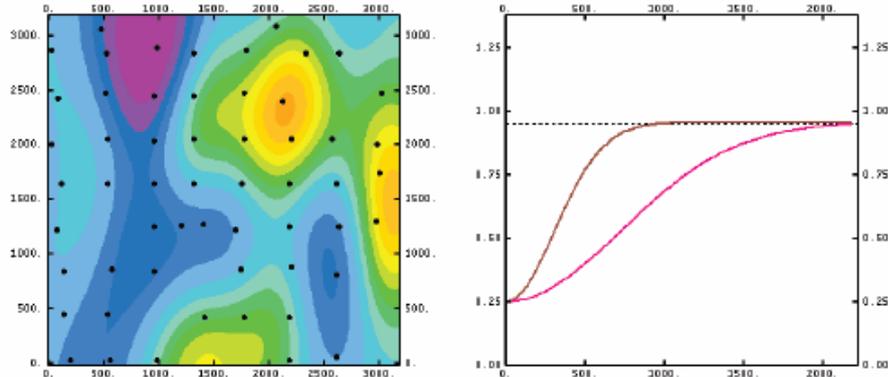


圖 43 變異函數選擇 Gaussian Anisotropic Model, 有 Nugget 效應之 Kriging 結果(Yarus, J. M., 2006)。

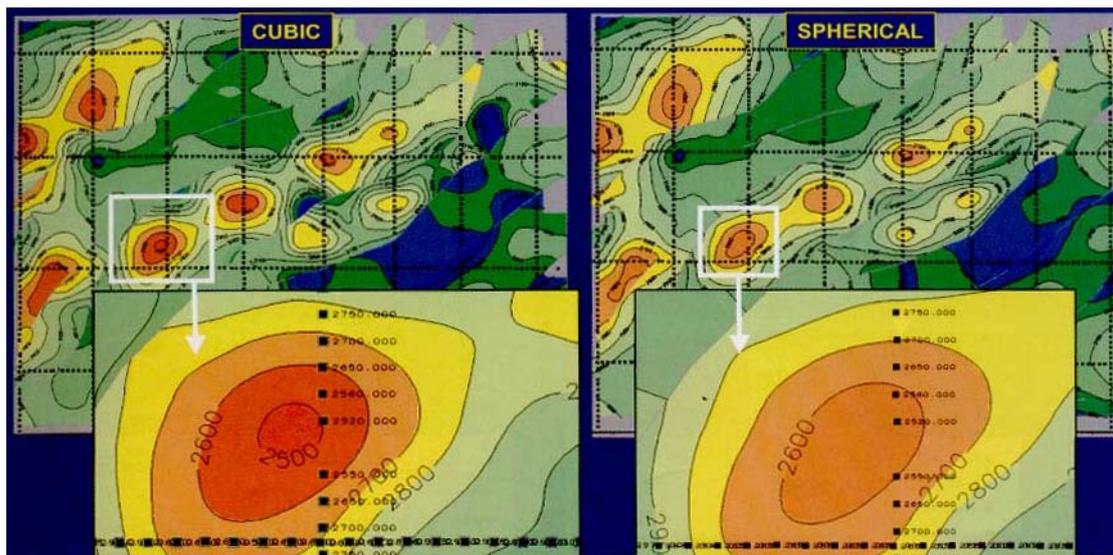


圖 44 Cubic 函數有強烈外插的傾向(左圖), 在原始資料中並未出現的 2500 等值線卻出現在左圖白框內。以 spherical 函數進行 Kriging 的結果, 在相對白框位置, 卻未出現的 2500 等值線(Dubrule, 2003)。

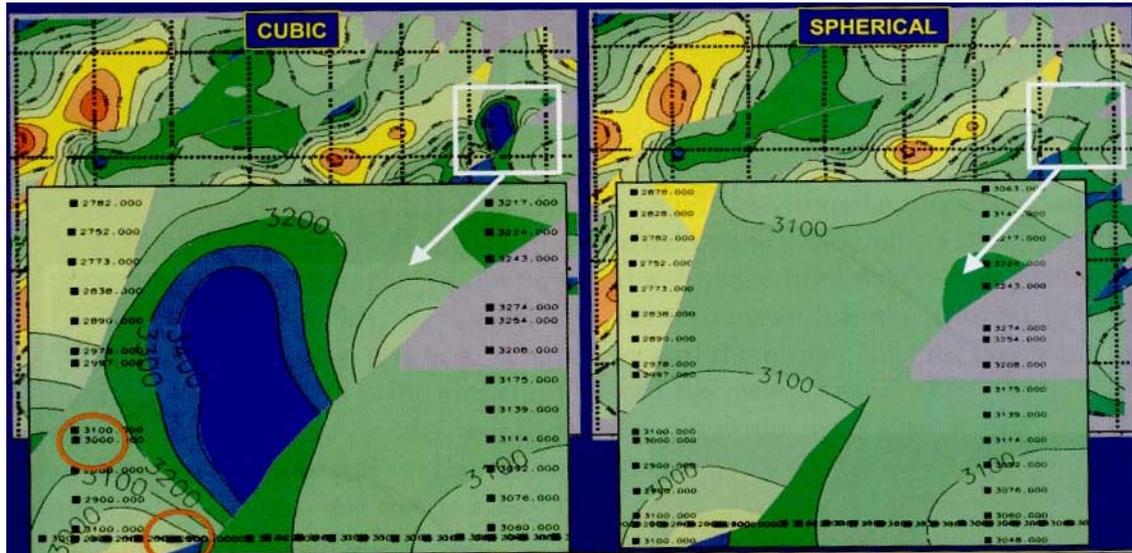


圖 45 當鄰近兩點資料有很大差異時，Cubic 函數 Kriging 的結果出現一深谷 (左圖白框)，以 spherical 函數進行 Kriging 的結果，在此兩資料點附近的坡度較緩(右圖白框)。(Dubrule, 2003)

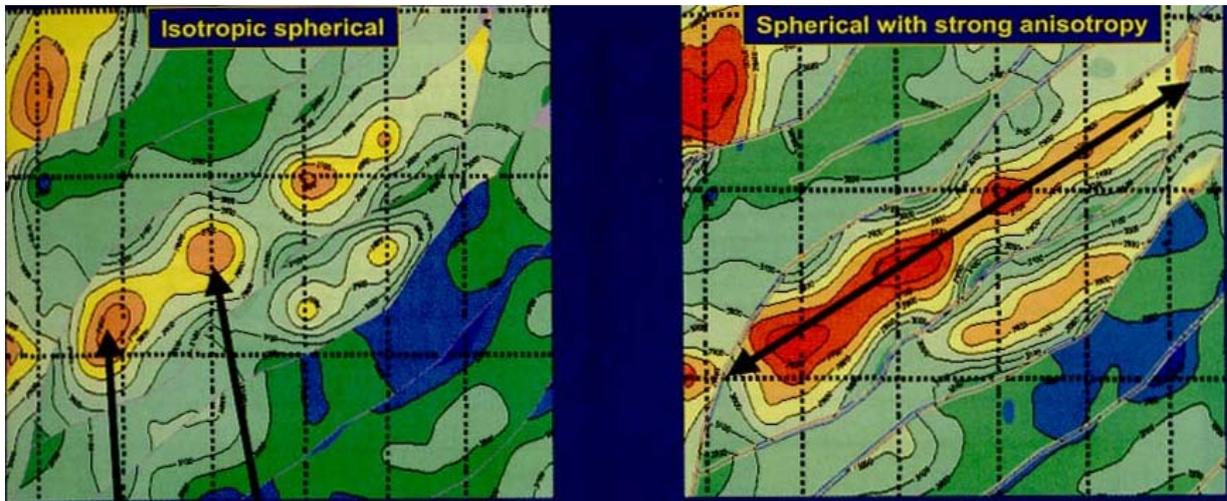


圖 46 左圖為採用 Isotropic Spherical 函數進行 Kriging 的結果，在測線位置上容易出現牛眼構造(Bulla-Eyes)。右圖為採用不對稱性強的 Spherical 函數進行 Kriging 的結果，牛眼構造不復出現，構造走向明顯 (Dubrule, 2003)。

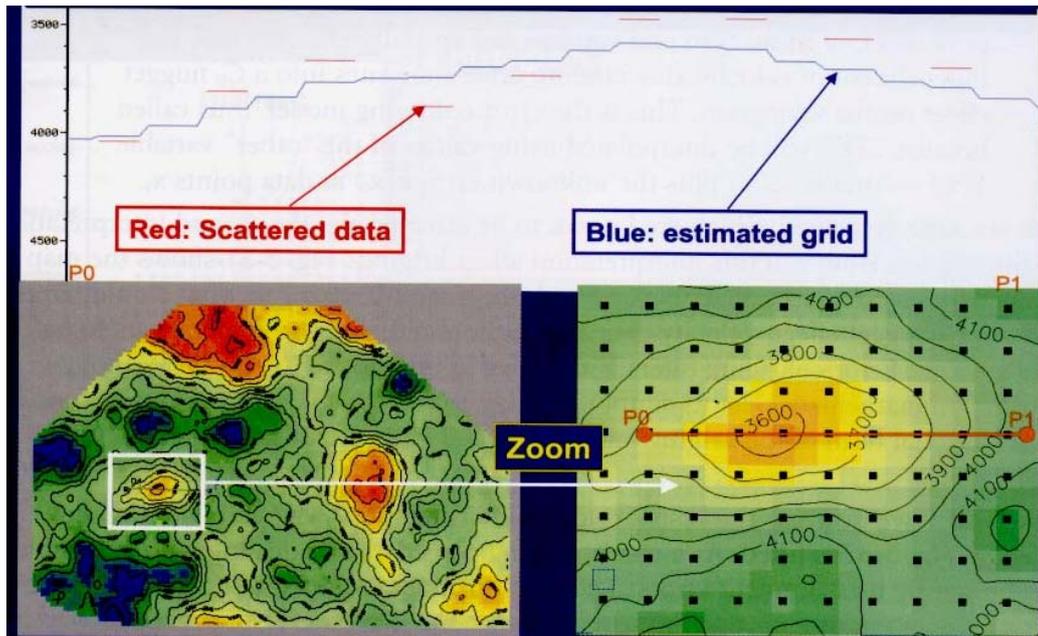


圖 47 以有 Nugget 效應的 Spherical 函數進行重合速度資料的 Kriging 計算結果。估算結果(上圖藍線)並不完全匹配原始資料點(紅色短線)，但等速度值圖相當平滑。(Dubrule, 2003)。重合速度資料一般是含相當多的噪音，添加 Nugget 效應的 Kriging 計算，估算結果雖不匹配有噪音之原始資料，卻可能較接近無噪音的速度分佈狀況。

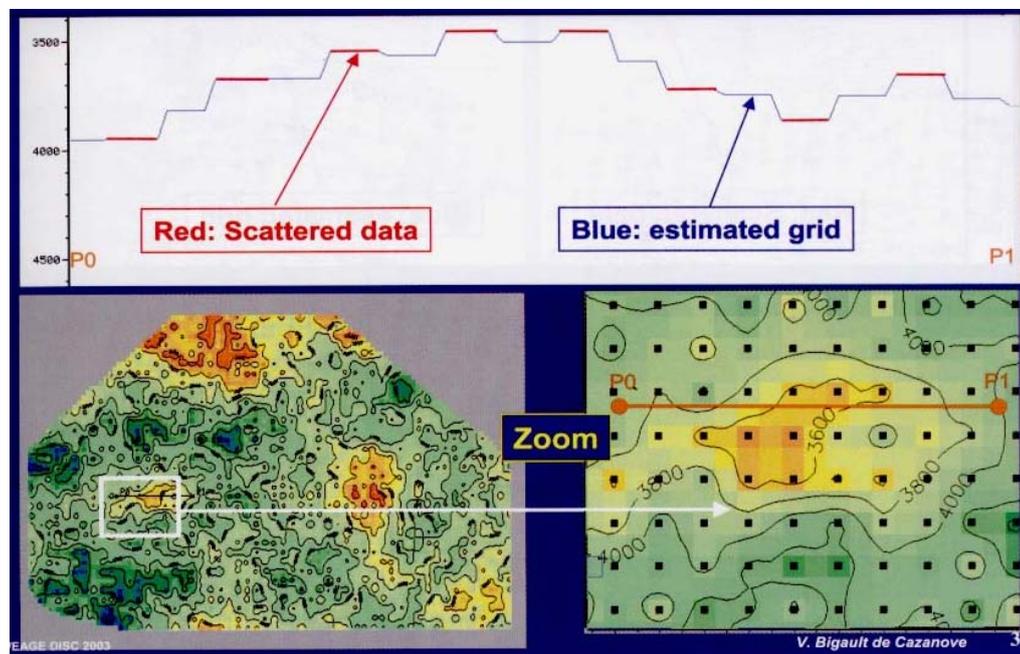


圖 48 強迫以無 Nugget 效應的 Spherical 函數擬合含噪音的重合速度資料所分析之變異函數，其 Kriging 的結果(上圖藍線)雖匹配原始資料點(紅色短線)，但等速度值圖相當 Noisy (Dubrule, 2003)。

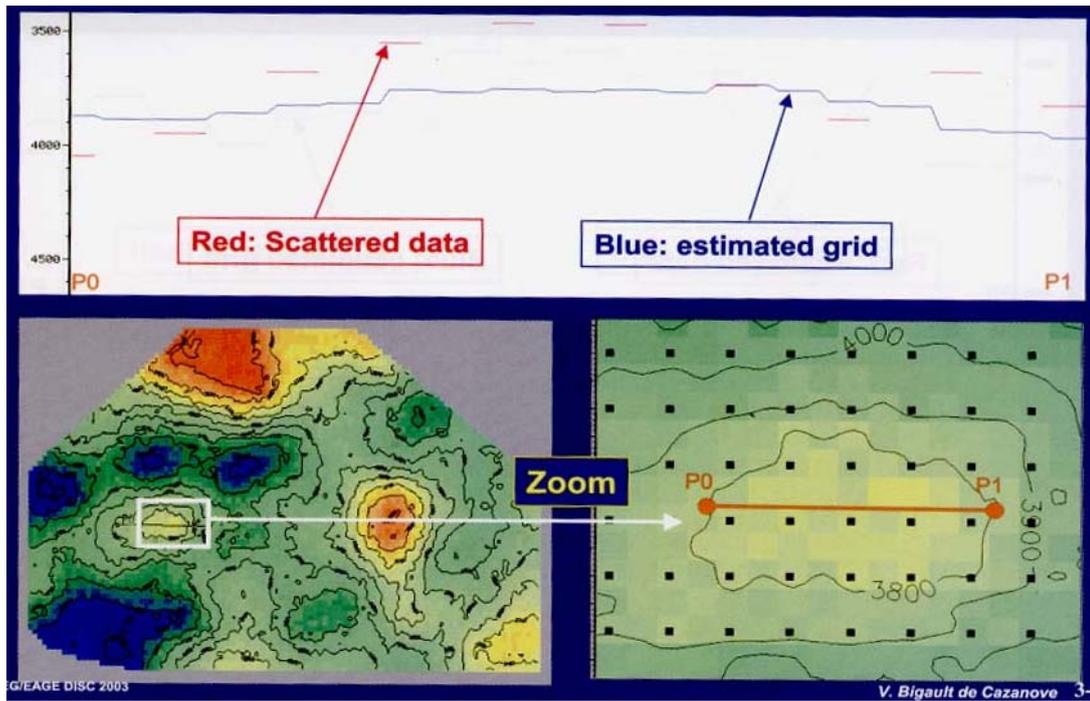


圖 49 以 Pure Nugget 函數進行含噪音重合速度資料的 Kriging 計算。估算結果(上圖藍線)並不匹配原始資料點(紅色短線)，但等速度值曲線呈現小尺度的搖擺現象(wiggles in contour lines)。零 Nugget 效應代表無噪音，Pure Nugget 函數代表無訊號。以 Pure Nugget 函數代表資料體的變異函數時，表示資料點在空間分佈無關連性，此時的 Kriging 計算等同 Trend-Surface Analysis，所有的取樣點具相同的權重(Dubrulle, 2003)。

3. Kriging with an External Drift (KED)

震測資料解釋所獲得之時間層面，可視為一種低頻之構造面，需和井下鑽遇層面之深度結合後，方能獲得深度構造面。地質統計之基本假設曾於前節討論：地質相關變數，是由一個系統化的趨勢及隨機的殘餘分量(residual random function or component)合成的，此隨機的分量是在空間分佈上有相關性的(correlated in space)。如果此系統化的趨勢是定值，亦即系統化的定值為平均值，此地質模型稱為 Stationary Model，如果此系統化的趨勢是線性函數，此地質模型稱為 Non-Stationary Model。依據此假設，深度構造面可視為由時間層面的線性函數及一殘餘分量所共同合成(圖 50)。此線性函數的假設，將外在的資料體(時間層面)，帶入深度構造面的 Kriging 計算。這種 Kriging 計算，稱為 Kriging with an External Drift (KED)。KED 和 universal kriging

with a linear trend 基本上是相同的。KED 常被用於震測資料解釋構造面的時-深轉換。

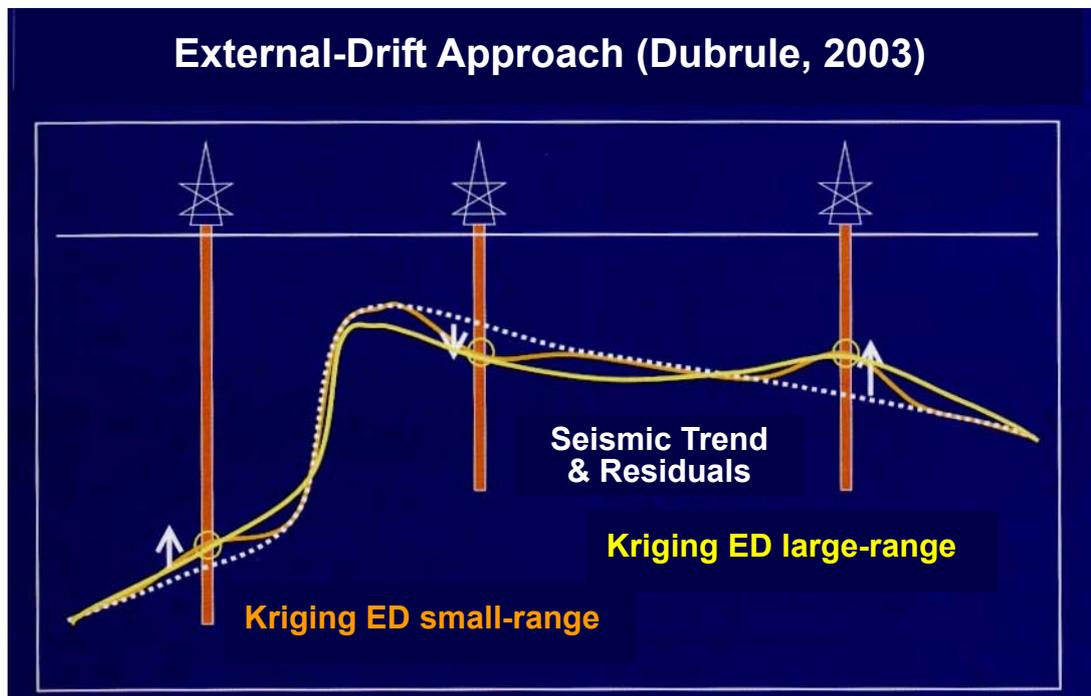


圖 50 深度構造面可視為由時間層面的線性函數及一殘餘分量所共同合成。此線性函數的假設，將外在的資料體(時間層面)，帶入深度構造面的 Kriging 計算。這種 Kriging 計算，稱為 Kriging with an External Drift (KED)。(Dubrule, 2003)。

4. Bayesian Kriging

Bayesian Kriging 是一種一般化的 KED。此時外在的資料體和估算的變數間，未必是線性的關係，而可以是據物理意義的任何函數關係。例如，時間構造面是平均速度的線性外在漂移(linear external-drift)： $V(x,y)=V_0 + kT(x,y)$ ，速度又為深度構造面的線性外在漂移，由此導出時間構造面是深度構造面的拋物線外在漂移(parabolic external-drift)： $DEPTH(x,y)=V_0 T(x,y) + kT^2(x,y)$ 。

5. Cokriging (CK) & Collocated Cokriging (CCK)

Cokriging 在礦業界應用的相當成功。Cokriging 的計算，需備有兩個變數各自的變異函數及兩個變數間的 cross variogram(圖 50)。

COKRIGING (DOYEN, 1988)

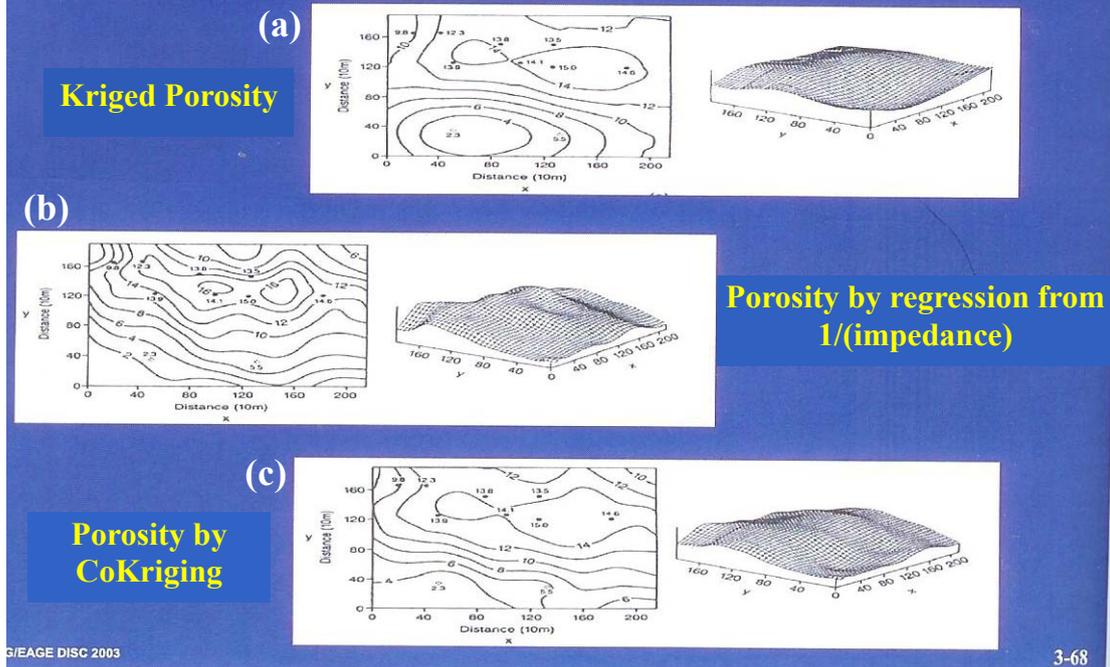


圖 50 以不同方法獲得之孔隙率分佈圖之比較。(1)以井下孔隙率資料，經由 Kriging 計算(a)；(2)以井下聲波阻抗測錄與孔隙率測錄擬合之線性關係，將震測逆推聲波阻抗資料體，轉為孔隙率資料體(b)；(3)以井下孔隙率資料與震測逆推聲波阻抗資料，進行 CoKriging 計算(c)。(Dubrule, 2003)。

以井下孔隙率資料與震測逆推聲波阻抗資料，進行 CoKriging 計算時，因為震測資料的平滑特性(或低頻特性)，一旦估算點之震測資料被用到後，估算點附近其它網格上之震測資料，並不會對估算點之估算提供額外的資訊。也因此，Xu 等人(Xu, et al., 1992)提出，CoKriging 計算時，在每個內插位置 X_0 (interpolation location X_0)，第二個變數只保留在 X_0 處之值，這種假設大大的簡化了解析系統，使得矩陣逆推更穩定。這種假設下的 CoKriging 計算，稱為 Collocate CoKriging。Xu 等人(Xu, et al., 1992)更進一步提出 Markov Model(圖 52)，假設兩個變數間之 cross-covariance 函數是和主要變數的 covariance 成比例。Collocate CoKriging 計算所需輸入之資料為：(1) 主要變數和次要變

數間之相關係數；(2)主要變數的變異函數；(3)兩個變數的 Variance(可由直方圖分析)。

Markov-Bayes Method

Collocated Cokriging with additional assumptions

- Variogram is computed from secondary variable (e.g., seismic data)
- The primary data (wells) variogram is a scaled version of the seismic variogram: the scalar is the variance ratio.
- The cross-variogram is computed from the correlation coefficient, r .

ALL MODELS HAVE THE SAME SPATIAL SCALES

圖 52 Markov Model 假設(Yarus, J. M., 2006)。

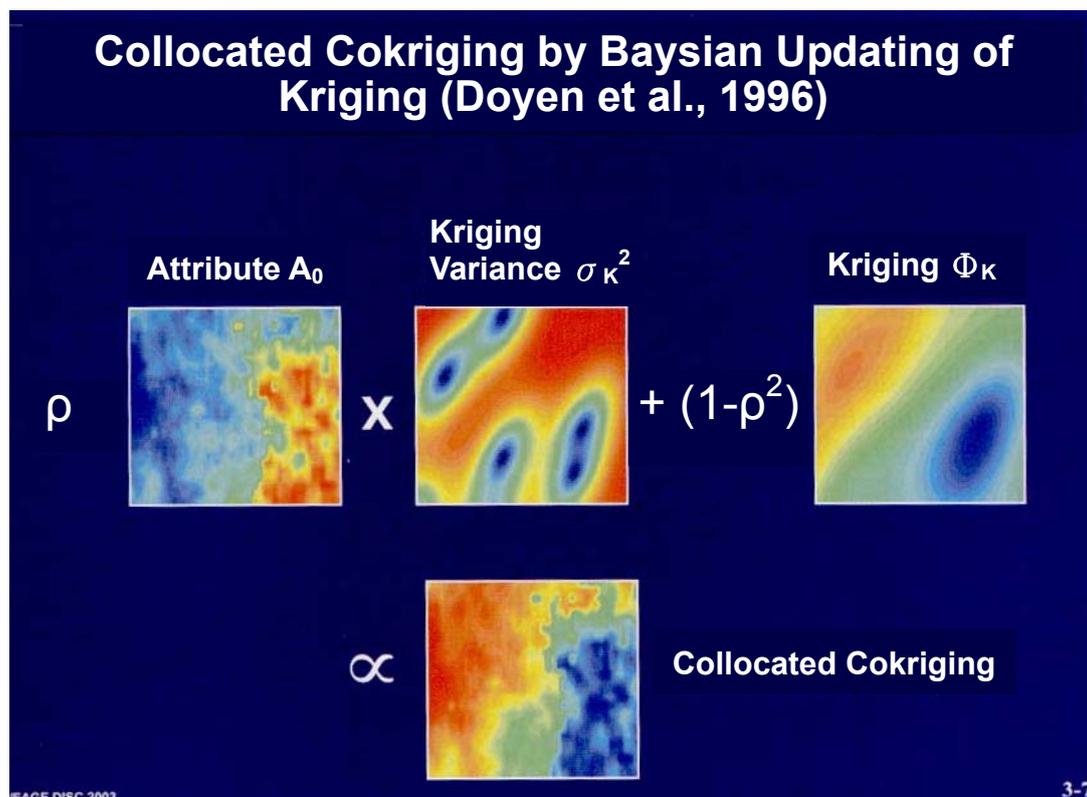


圖 53 Collocated Cokriging 可視為 kriging 及震測資料線性擬合結果之 weighted average。Weight factors 只和孔隙率與聲波阻抗間之相關係數有關。相關係數為零時，Collocated Cokriging 即為 kriging；相關係數為 1 時，Collocated Cokriging 只剩線性擬合(Dubrule, 2003)。

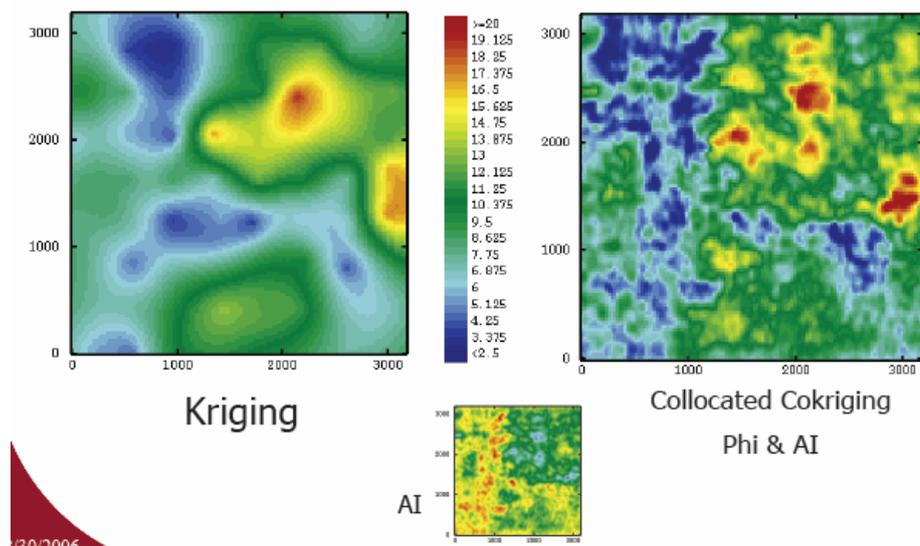


圖 54 Kriging 與 Collocate Cokriging 的比較。左圖為井下孔隙率測錄資料 Kriging 結果，右圖為孔隙率測錄(Phi)與震測逆推聲波阻抗(AI)進行 Collocate Cokriging 的結果。(Yarus, J. M., 2006)。

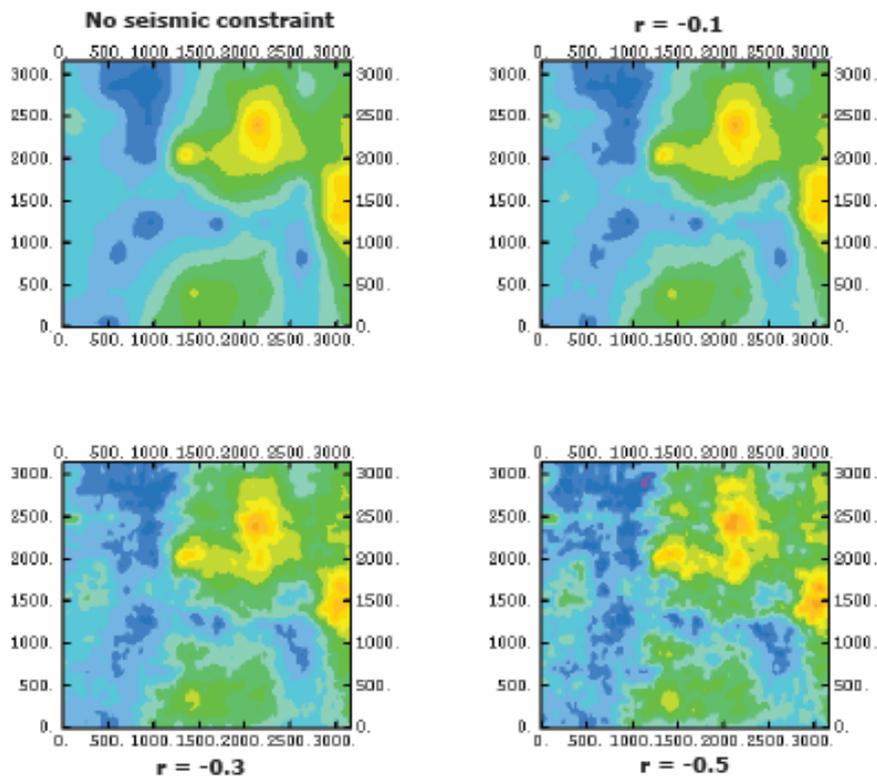


圖 55 孔隙率測錄與震測逆推聲波阻抗進行 Collocate Cokriging 時，使用不同相關係數計算結果的比較。(Yarus, J. M., 2006)。

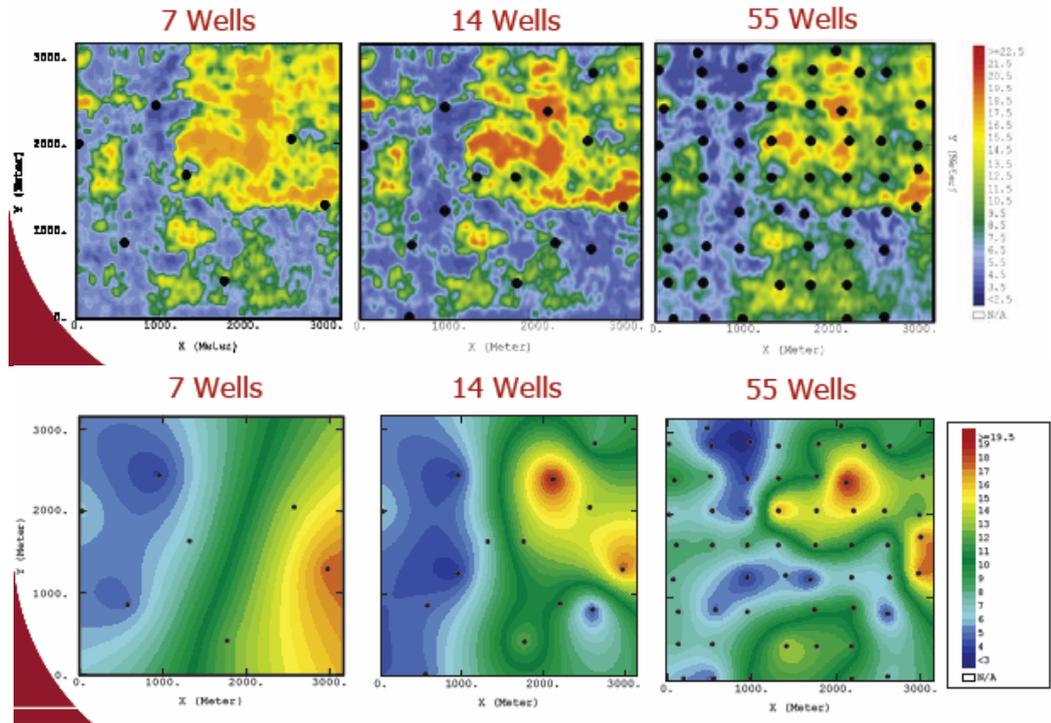


圖 56 Collocate Cokriging(上圖)與內插方法的比較(下圖)。井數多寡，對內插方法的結果影響極大，對 Collocate Cokriging 的影響卻不大。(Yarus, J. M., 2006)。

七、Stochastic Simulation

用井下統計資訊以模擬 (Simulation) 的方式獲得數組模型 (多組解) 的方法，稱為 Stochastic 方法。如同估算可分為傳統及地質統計兩種模式，用 Stochastic 方法以井下資訊模擬 (Simulation) 多組模型時，亦可分為傳統及地質統計兩種模式。傳統的方式即為應用已久之蒙提卡羅 (Monte Carlo)，井下資訊的直方圖是唯一需要輸入的資料，輸出值即由此直方圖隨機抽取，其模擬結果無需 honor 井下資料 (hard data)，亦無任何方向性的考量。地質統計的模擬，分為 Unconditional Simulation 及 Conditional Simulation 兩種，前者模擬結果無需 honor 井下資料，後者卻需 honor 井下資料。兩者模擬進行均需輸入井下資訊的直方圖及 Spatial Model (Variogram)。

1. Conditional Simulation

前述 Kriging 的目的是嘗試讓井孔間內插的誤差減至最小，通常計算結果均顯現一較平滑的面。Conditional Simulation 卻是要獲得井孔間的不均質性，同時滿足輸入資料的地質統計資料(mean, variance, and variogram)(圖 57,58)。Conditional Simulation 的步驟以圖 59 說明。

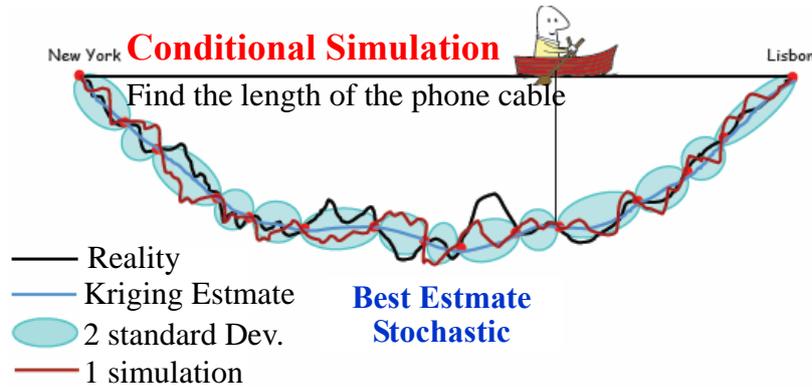


圖 57 Conditional Simulation 的 realization 在取樣點與輸入資料否配，取樣點間則分佈在以 Kriging 估算值(淺藍線)為中心，正負各一個標準誤差內。(Yarus, J. M., 2006)。

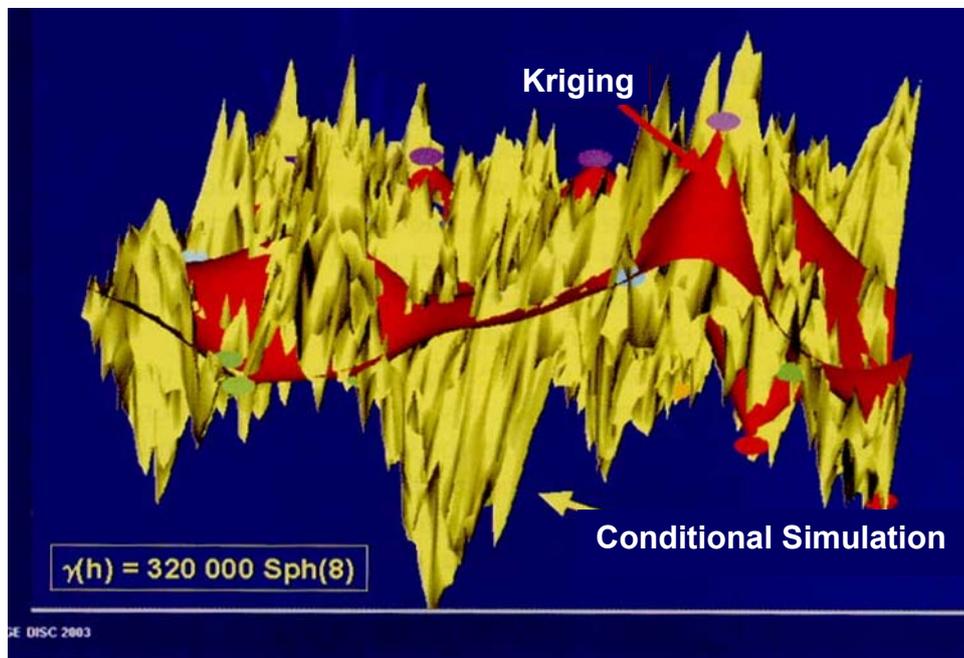


圖 58 Conditional Simulation 的 Surface(黃色)相較於 Kriging 的 Surface(紅色)，雜亂許多。當 Conditional Simulation 的實驗 (realization) 次數高達上百次時，這些 realizations 的平均，即為 Kriging 的結果(Dubrule, 2003)。

How Conditional Simulation Works

Simulation 1

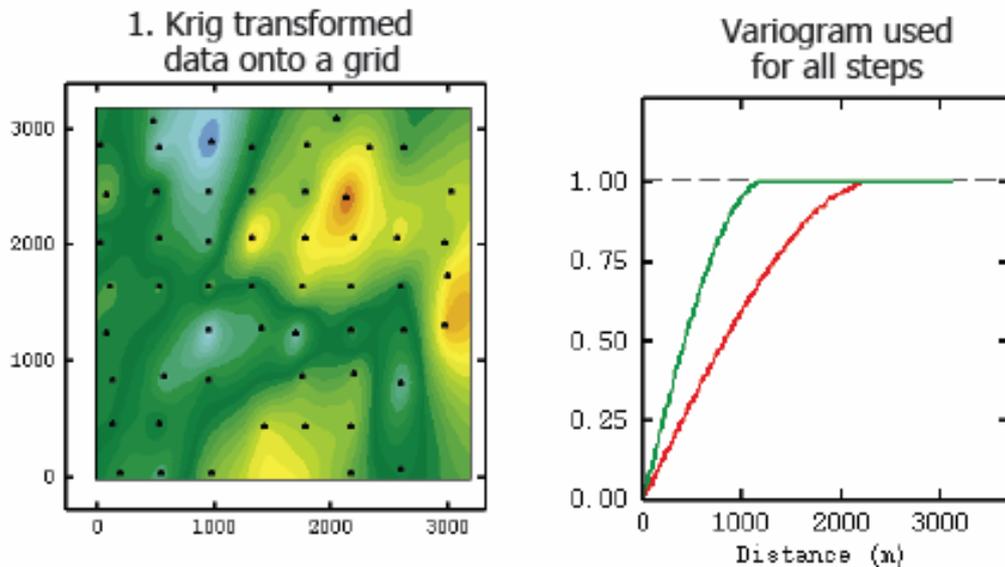


圖 59a Conditional Simulation 步驟 1。 (Yarus, J. M., 2006)

2. Perform unconditional simulation using data histogram and variogram as in step 1, but not honoring the well data.

3. Sample unconditional result at the well locations to create a new data set. Compare to original transformed data values.

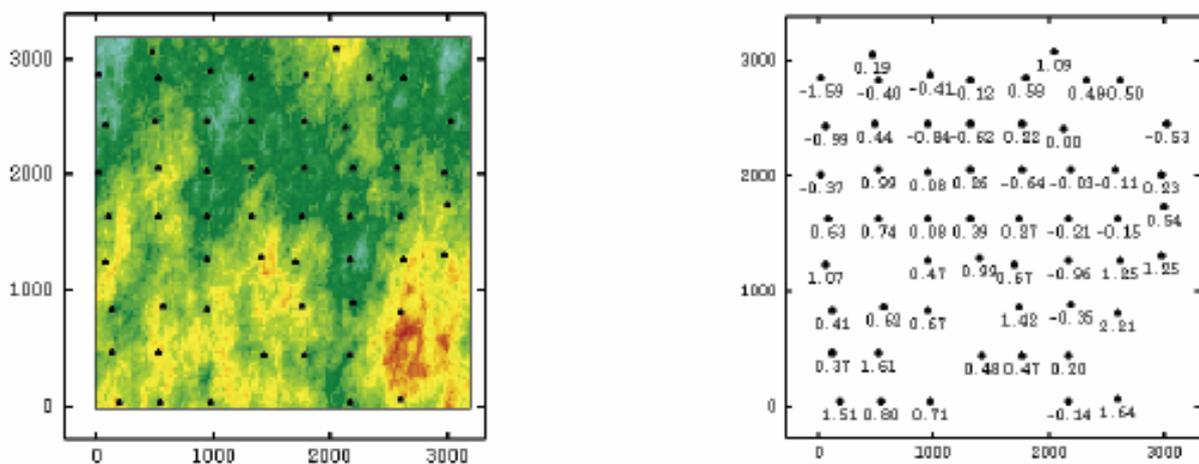
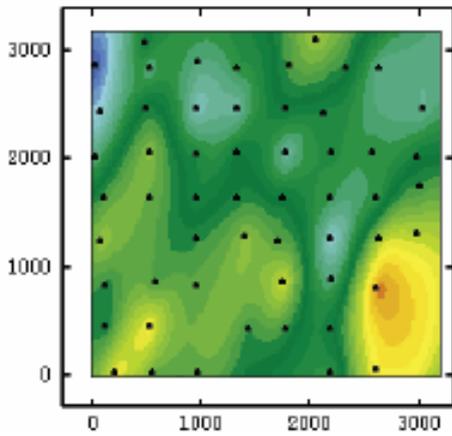


圖 59b Conditional Simulation 步驟 2~3。 (Yarus, J. M., 2006)

4. Krig unconditional values onto the grid using same variogram as with step 1.



5. Subtract Step 4 from Step 2 to create the residual variance.

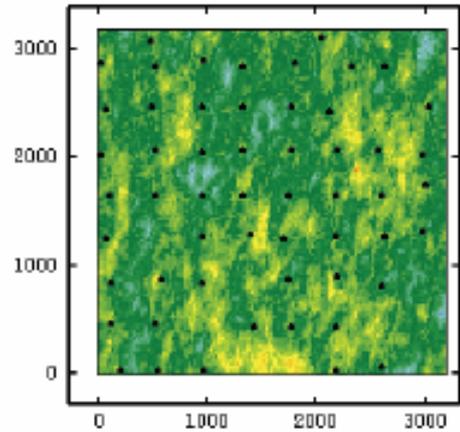
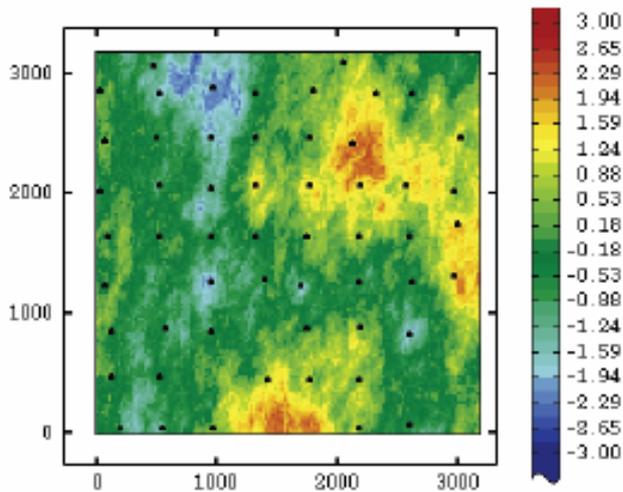


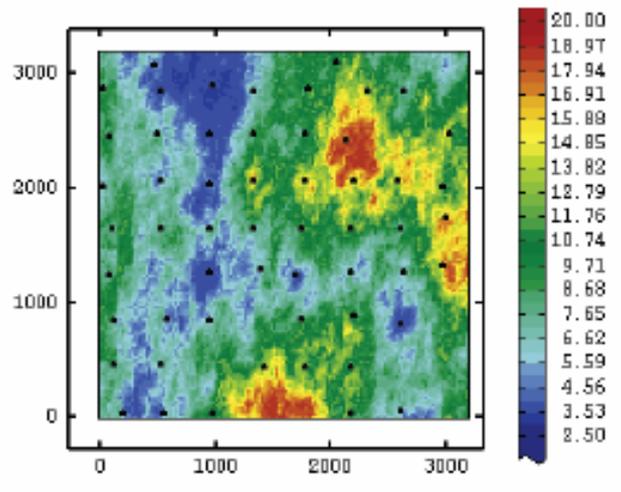
圖 59c Conditional Simulation 步驟 4~5。(Yarus, J. M., 2006)

6. Add residual variance (Step 4) to the kriged result of the transformed data (Step 1)



Scale = standard deviation

7. Back transform Step 6 so the result is in terms of percent porosity.



Scale = percent porosity

圖 59d Conditional Simulation 步驟 6~7。(Yarus, J. M., 2006)

Simulation 2 follows the same process but the unconditional simulation is different

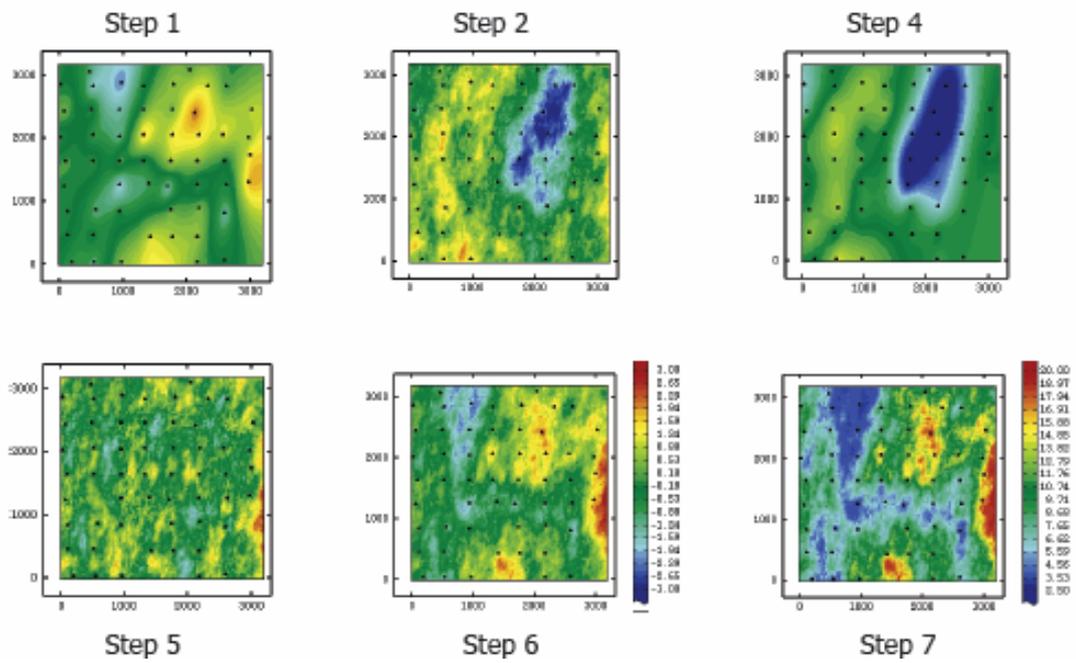


圖 60 Conditional Simulation 另一個實驗之步驟。(Yarus, J. M., 2006)

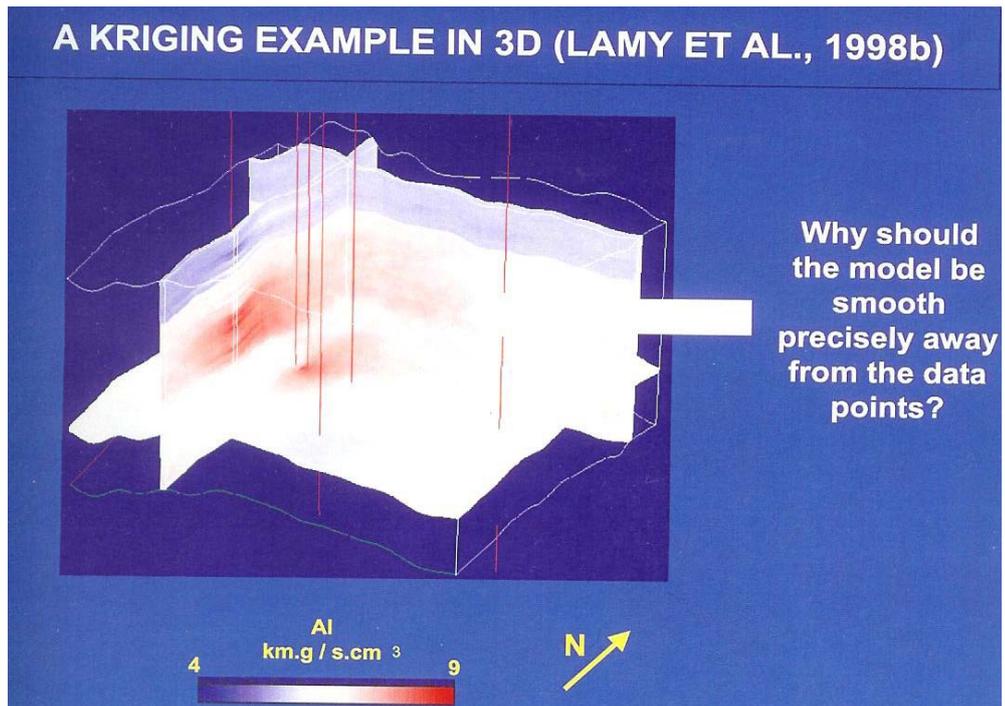


圖 61 a 聲波阻抗 Kriging 結果。輸入資料點的位置很容易由圖上的牛眼辨認出 (bulls-eyes)，如圖中 isolate 的紅色位置。(Dubrule, 2003)

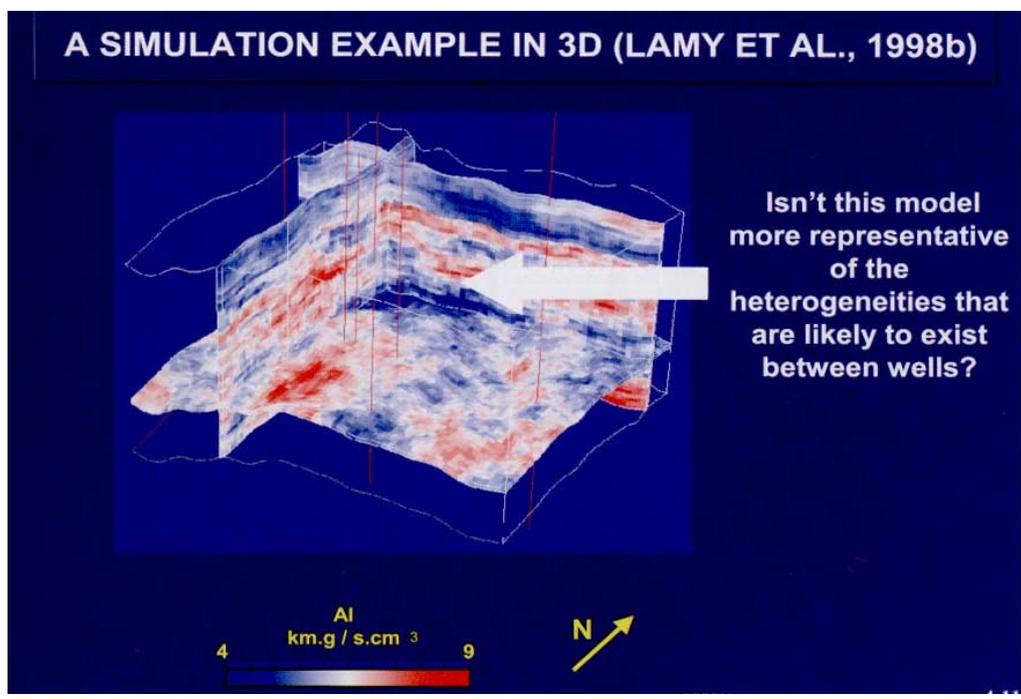


圖 61 b 聲波阻抗 Conditional Simulation 結果其中一個 realization。(Dubrule, 2003)

2. Collocate Cosimulation

如同 Collocate Cokriging 一般，Conditional Simulation 可加入第二個變數共同進行模擬，稱之 Collocate Cosimulation(圖 62)。

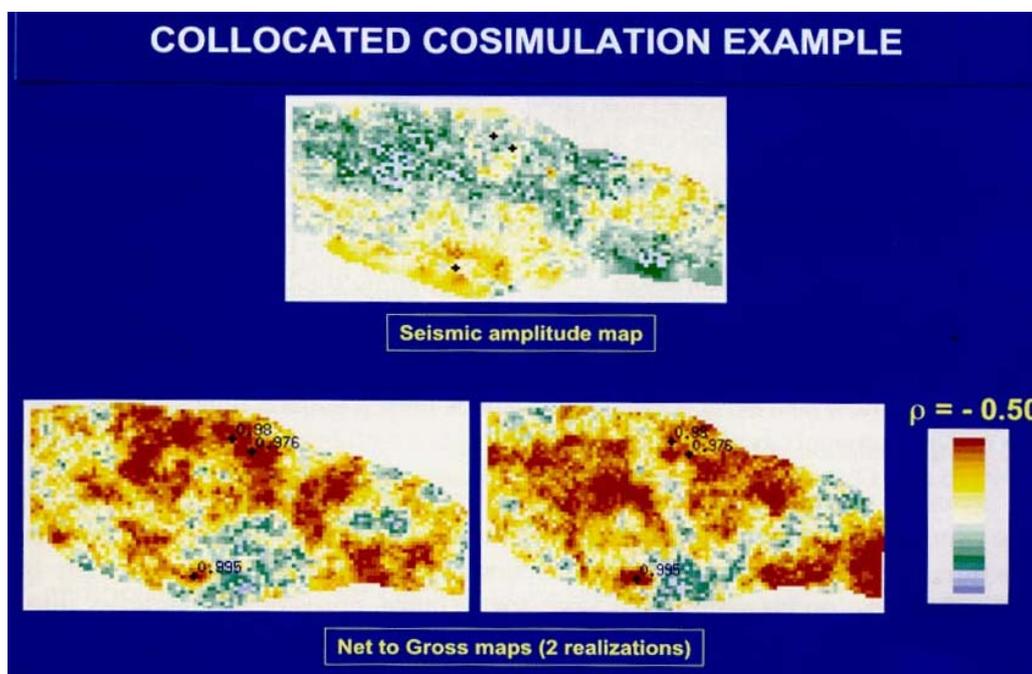


圖 62 以 Collocate Cosimulation 方式，模擬 Net to Gross Maps。次要變數為震測資料之振幅資料。(Dubrule, 2003)

3. 蒙提卡羅 (Monte Carlo)

蒙提卡羅 (Monte Carlo) 方法，井下資訊的直方圖是唯一需要輸入的資料，輸出值即由此直方圖隨機抽取，其模擬結果無需 honor 井下資料 (hard data)，亦無任何方向性的考量。依據直方圖所轉換之 Continuous Density Function (cdf)，任意、隨機抽取變數值，很容亦獲得成千上百個 realizations。

4. Sequential Simulation

Sequential Simulation 結果，決定於隨機取樣路徑 (random path)。相同的地質統計參數，一但隨機取樣路徑不同 (seed number 不同)，模擬

結果即不同 (圖 63)。Sequential Simulation 的另一特色為，前一估算點的值一旦決定後，將視為已知點(known value)，用於隨機取樣路徑中下一個估算點的計算。

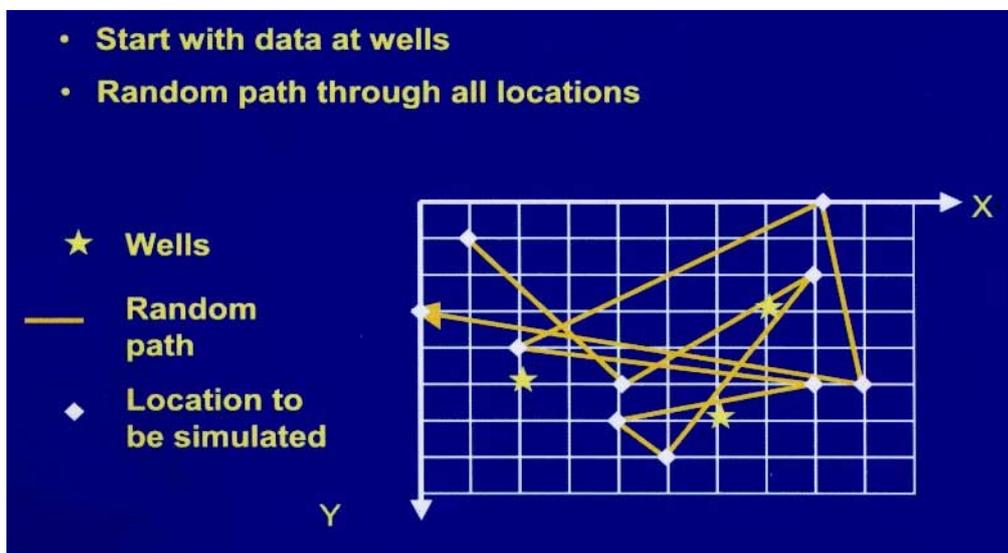
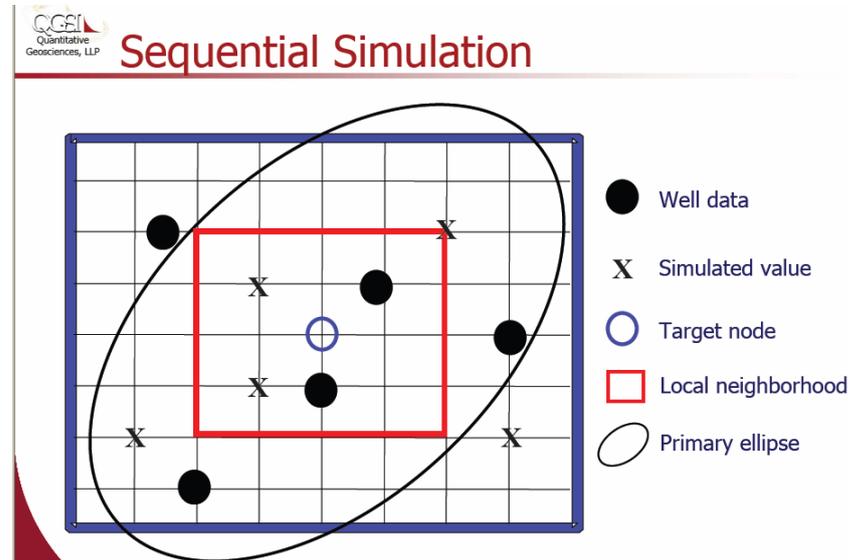


圖 63 Sequential Simulation 的計算及隨機取樣路徑(random path)。(Dubrule, 2003)。

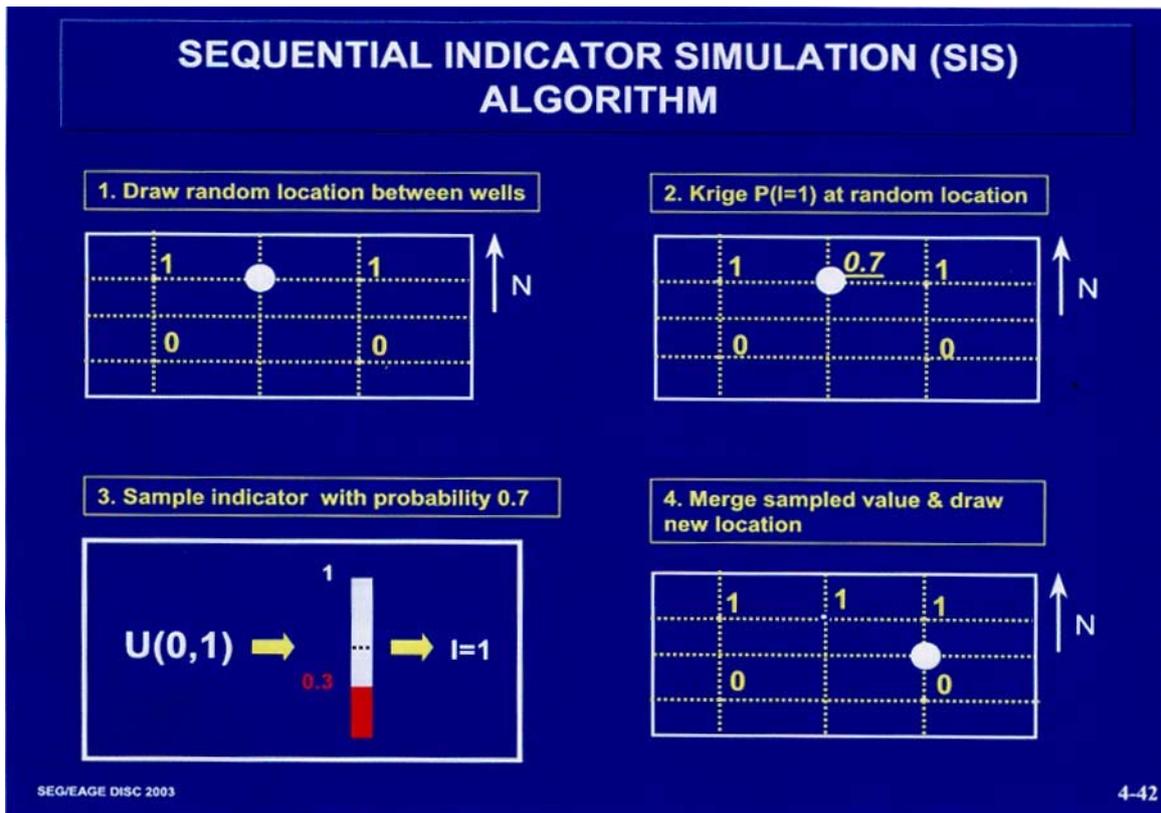


圖 64 Sequential Indicator Simulation 原理(Dubrule, 2003)。

上述幾種隨機模擬 (Stochastic Simulation) 之異同，簡示於圖 65。

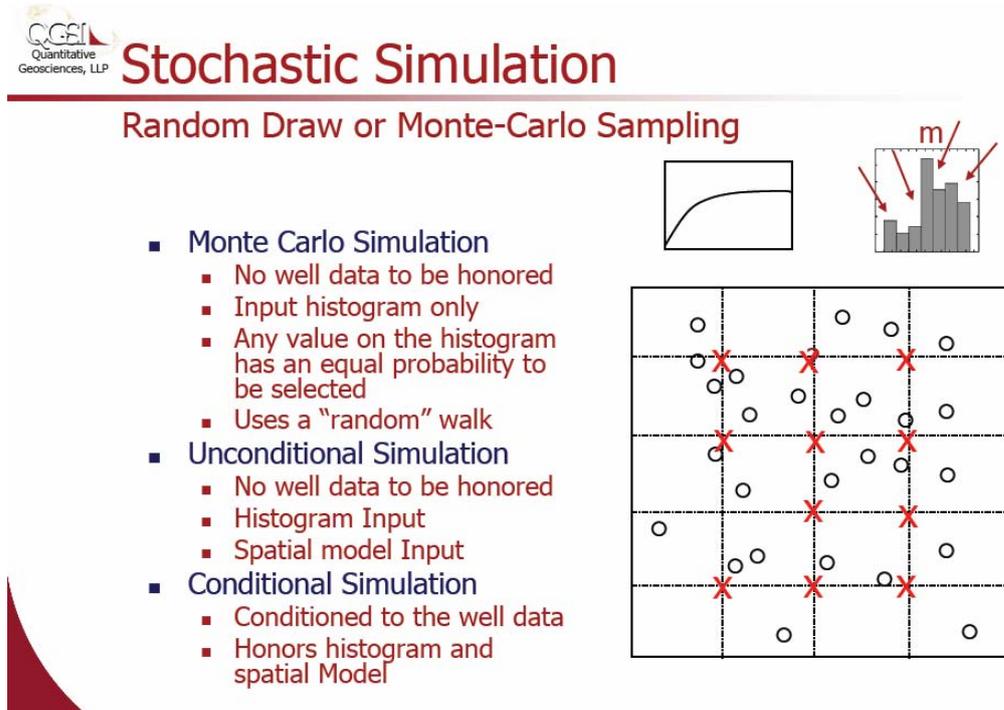


圖 65 三種隨機模擬 (Stochastic Simulation) 之異同(Yarus, J. M., 2006)。

八、Pixel vs. Object Simulation

Pixels and Objects

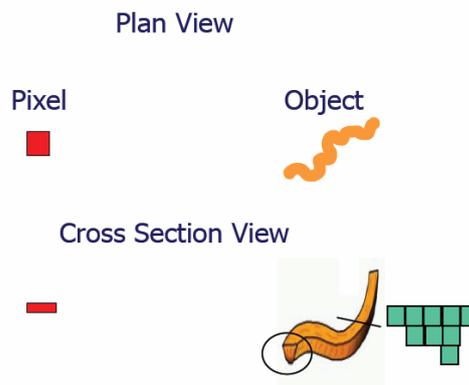


圖 66 Pixel 和 Object 為基礎之 Simulation 原理差異(Yarus, J. M., 2006)。

1. Pixel Based Simulation

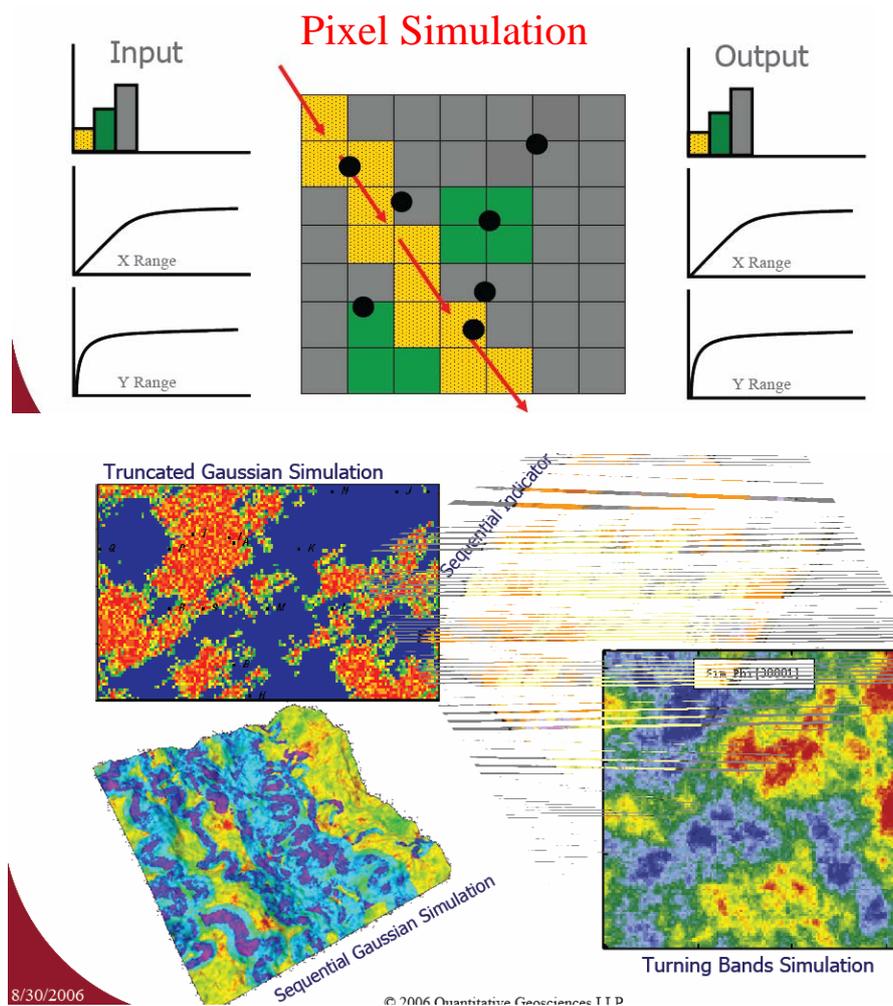


圖 67 Pixel Based Simulation 實例(Yarus, J. M., 2006)。

2. Object Based Simulation


Object Modeling

Facies Objects

- Channels
- Splays
- bars
- Shale plugs
- Sheet Sands
- Reefs
- Bioherms
- Oolitic Bars
- Etc.

Rules

- Channels/Bars
 - height
 - lengths
 - widths
 - etc.
- Sequences
 - flooding surfaces
 - type I
 - type II
 - etc.

圖 68 Object Based Simulation 模擬之沉積物件 (facies object)、及規則 (rule)。(Yarus, J. M., 2006)。


Guide for Geologists

- Think about possible 3-D Shapes of Deposit
- Think about possible Stacking Pattern

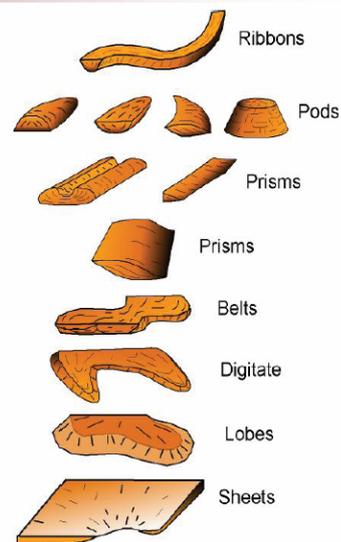
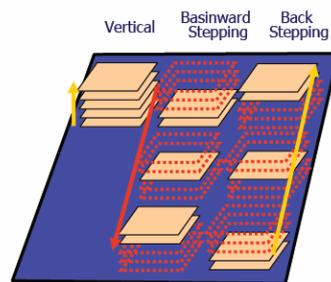


圖 69 Object Based Simulation 模擬之沉積物件形貌 (右圖) 及堆疊模式 (左圖)。(Yarus, J. M., 2006)。

九、地質統計震測逆推

基本上，地質統計震測逆推結果的低頻背景（background）是受地層井下資料統計資料束縛（constraint）的控制；其結果的中等頻寬（約 12~60 Hz），則完全受控於震測振幅資料；其結果的高頻部分，則受控於地質統計分析的 Variogram 模型（圖 70）。

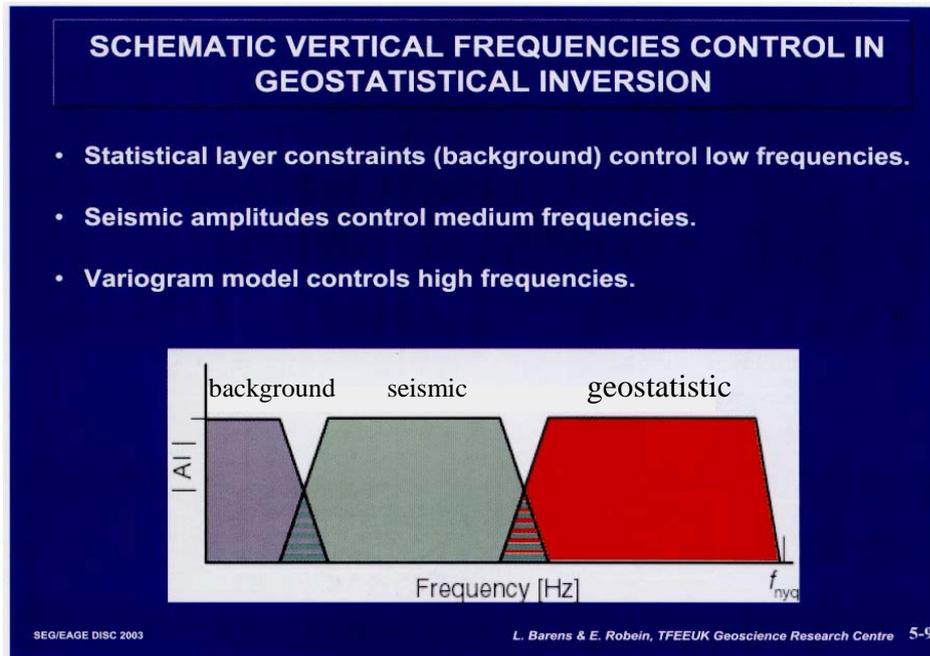


圖 70 地質統計震測逆推結果頻率分佈的控制因素(Dubrulle, 2003)。

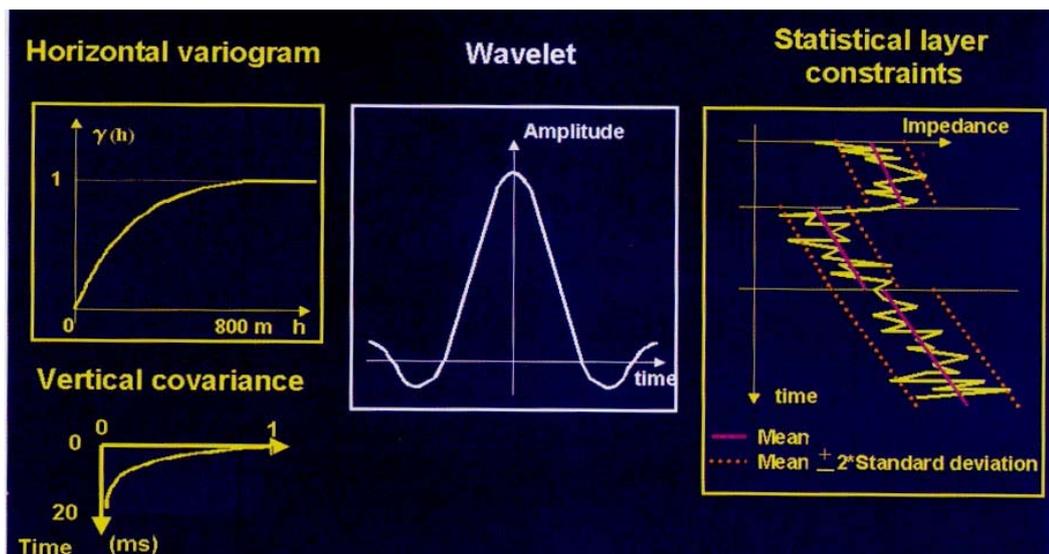
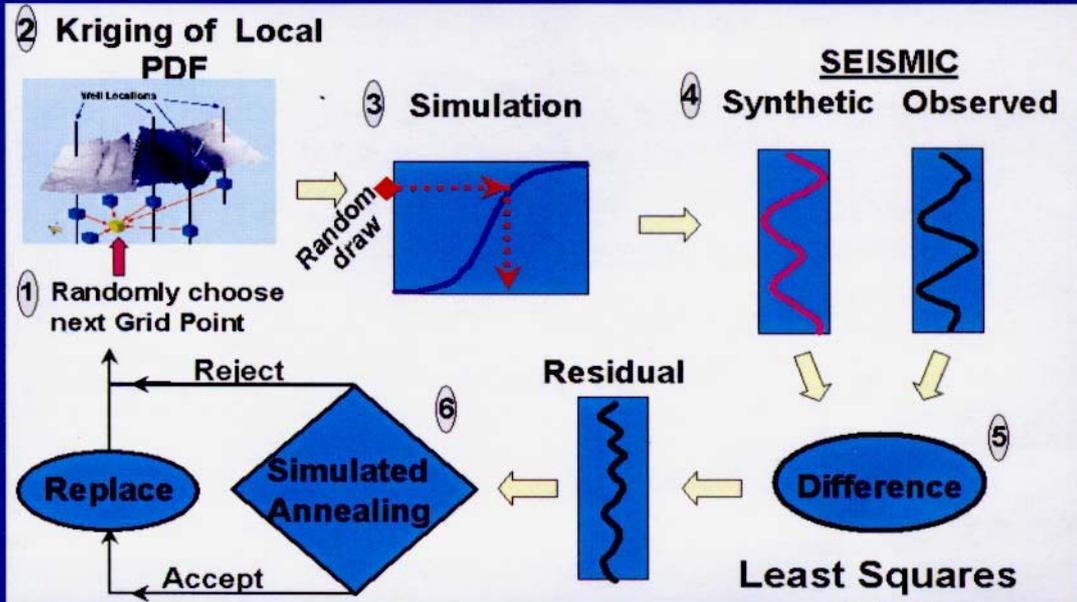


圖 71 地質統計震測逆推之相關井下資料統計資料束縛（constraint）、變異函數分析及漣波萃取(Dubrulle, 2003)。

ANOTHER GEOSTATISTICAL INVERSION ALGORITHM (GRIJALBA-CUENCA ET AL., 2000)



SEG/EAGE DISC 2003

5-18

圖 71 地質統計震測逆推之相關工作流程(Dubrulle, 2003)。

伍、建議

1. 部分重合逆推彈性波阻抗的技術，除了由震測資料獲得傳統的 P 波三維阻抗資訊外，更進而推演 S 波三維阻抗資訊，地層岩性及孔隙內流體因而得以區別。這種技術已相當有效的應用於油氣潛能評估及油氣層監測，值得引進。一般井測很少施測 S 波之聲波測錄，本技術之引進，須依賴 S 波聲波測錄及三維資料體之部分重合處理。本次出國任務達成返台後，特別查詢台南盆地現有井測資料，證實已有兩口井具 S 波之聲波測錄，經品管分析後亦確認資料之可用性。目前已與氣田開發現場單位及資料處理單位研商，擬定明年初建立此新技術，實際應用於台南盆地油氣開發及油氣潛能探尋之研究。
2. 會前短期訓練課程『AAPG Course Practical mapping of surfaces/Rev. char』，除了簡述各種地質統計的理論、原則外，更以相當多的實例，解釋地質統計分析參數設定和實際地質模型在空間分形貌的關連性，地質統計分析相當重要的變異函數，其曲線形貌之對應物理意義也詳加舉例說明。本次整理相關學習心得，可提供現場及本研究單位同人參考。
3. 本訓練課一開始即討論到儲集岩模型分析及模擬時各項模型元件在模擬中的優先順序，構造乃模型建立成功與否的首要因素，其次依序為層序地層架構、沉積相模擬、石油物理分析模擬，最後影響的因素為模型網格的粗化(up-scaling)。過去儲集岩特性分析研究工作，往往強調井孔間地層物性(岩性、聲波阻抗、孔隙率)在空間不均質的傳播，卻忽視了構造模擬的重要性。本年度研究計畫「厄瓜多十七號礦區儲集岩及生產方案之研究」，油層模擬結果顯示，各井模擬的出水時間，均較實際出水時間晚許多。經檢驗該孔隙率模型所對應之岩性模型，尚屬合理。受益於此訓練課程所獲心得，了解到儲集岩模型更新以構造形貌修正為主的重要性，與生產井歷史諧調的油層模擬得以順利進行。厄瓜多十六號礦區去年建立的儲集岩模型也產生油層模擬類似之困擾，建議嘗試構造的修正模擬。

陸、參考文獻

BOOKS

Agterberg, F. P., 1974, *Geomathematics*, New York, Elsevier Scientific Publishing, 596 p.

Armstrong, M., A. G. Galli, G. LeLoc'h, F. Geffroy, and R. Eschard, 2003, *Plurigaussian Simulations in Geosciences*, Springer-Verlag, New York, 149 p.

Clark, I., 1979, *Practical Geostatistics*, London, Applied Science Publishers, 129 p.

Cressie, N., 1991, *Statistics for Spatial Data*, New York, Wiley, 900 p.

David, M., 1977, *Geostatistical Ore Reserve Estimation*, New York, Elsevier Scientific Publishing, 364 p.

Davis, J. C., 1986, *Statistics and Data Analysis in Geology, Second Edition, John Wiley & Sons, New York, 646 p.*

Deutsch, C. V. and A. G. Journel, 1992, *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*, Oxford University Press, New York, Oxford, with software diskettes, 340 pp.

Deutsch, C.V., 2002, *Geostatistical Reservoir Modeling, Applied Geostatistics Series, Oxford University Press, New York, 376, pp.*

Henley, S., 1981, *Nonparametric Geostatistics*, Elsevier Applied Science Publishers LTD., Essex, UK, 145 p.

Hohn, M. E., 1999, *Geostatistics and Petroleum Geology, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 235 pp.*

Isaaks, E. H. and R. M. Srivastava, 1989, *An Introduction to Applied Geostatistics, Oxford University Press, Oxford, 561 p.*

Journel, A. G., 1989, *Fundamentals of Geostatistics in Five Easy Lessons*, Short course in Geology, Vol. 8, American Geophysical Union, 40 p.

Journel, A. G. and Huijbergts, 1978, *Mining Geostatistics*, Orlando, Florida, Academic Press, 600 p.

Olea, R. A., 1991, *Geostatistical Glossary and Multilingual Dictionary*, New York, Oxford University Press, 177 p.

Stochastic Modeling and Geostatistics, (1994), J. M. Yarus and R. L. Chambers, Eds. AAPG Computer Applications in Geology, 379, pp.

Wackernagel, H., 1995, *Multivariate Geostatistics: An Introduction with Applications*, Springer-Verlag, Berlin, 256 p.

PAPERS

Anguy, Y., R. Ehrlich, C. M. Prince, V. L. Riggert, and D. Bernard, 1994, The Sample Support Problem for Permeability Assessment in Sandstone Reservoirs, in *Stochastic Modeling and Geostatistics*, (1994), J. M. Yarus and R. L. Chambers, Eds. AAPG Computer Applications in Geology, No. 3, pp. 273-286.

Bahorich, M., L. Peyton, A. Vassiliou, R. L. Chambers, G. Partyka, and J. M. Ross (1996), *The Use of Seismic Attributes for a Geostatistical Based Integrated Reservoir Description and Uncertainty Assessment*, 17th Annual Research Conference, Gulf Coast Section, SEPM. Invited paper, poster and full publication in the proceedings.

Chambers, R. L., M. A. Zinger and M. C. Kelly, (1994), *Constraining Geostatistical Reservoir Descriptions with 3-D Seismic Data to Reduce Uncertainty*, in J. M. Yarus and R. L. Chambers, eds., *Stochastic Modeling and Geostatistics*, AAPG Computer Applications in Geology, No. 3, pp. 143-158.

Chambers, R. L. (1998), *Fundamentals of Statistics and Geostatistics for Reservoir Description and Characterization*, International Human Resources Development Corporation, International Petroleum Industry Multimedia System, Boston, MA, 163 p.

Chambers, R. L. And J. M. Yarus, (2002), *Quantitative Use of Seismic Attributes for Reservoir Characterization*, *RECORDER*, Canadian SEG, Vol. 27, pp. 14-25, June.

Chambers, R. L., J. M. Yarus and K. B. Hird (2000), *Geostatistics for the Non-Geostatisticians- Part 1*, published in *The Leading Edge*, May.

Chambers, R. L., J. M. Yarus and K. B. Hird (2000), *Geostatistics for the Non-Geostatisticians- Part 2*, published in *The Leading Edge*, June.

Clark, I., 1979, The Semivariogram – Part 1: *Engineering and Mining Journal*, Vol. 180, No. 7, pp. 90-94.

Clark, I., 1979, The Semivariogram – Part 2: *Engineering and Mining Journal*, Vol. 180, No. 8, pp. 90-97.

Cressie, N., 1990, The Origins of Kriging, *Mathematical Geology*, Vol. 22, No. 3, pp. 239-252.

Castagna, J.P., Batzle, M.L., and Eastwood, R.L., 1985. Relationship between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks: *Geophysics*, v. 50, p. 571-581.

Durbrule, Oliver, 2003. Geostatistics for seismic data integration in earth models: 2003 distinguished instructor short course. Distinguished instructor series, no. 6.

Cressie, N. and D. M. Hawkins, 1980, Robust Estimation of the Variogram, *Mathematical Geology*, Vol. 12, No. 2, pp. 115-125.

Englund, E. J., 1990, A Variance of Geostatisticians, *Mathematical Geology*, Vol. 22, No. 4, pp. 313-341.

Isaaks, E. H. and R. M. Srivastava, 1988, Spatial Continuity Measures for Probabilistic and Deterministic Geostatistics, *Mathematical Geology*, Vol. 20, No. 4, pp. 239-252.

Journel, A. G., 1988, Non-parametric Geostatistics for Risk and Additional Sampling Assessment, in *Principles of Environmental Sampling*, L. Keith, Ed., American Chemical Society, pp. 45-72.

Guerillot, D.R. and I.F. Morelon, 1992, Sorting equiprobable geostatistical images by simplified flow calculations, 67th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, SPE 24891, pp. 327-342.

Krige, D. G., 1951, A Statistical Approach to Some Basic Mine Evaluation Problems on the Witwatersrand, *J. Chem. Metall. Min. Soc. South Africa*, vol. 52, pp. 119-39.

King, M.J., and M. Mansfield, 1999, Flow simulation of geologic models, SPE Reservoir Eval. And Eng., SPE 57469, Vol. 2, No. 4, pp. 351-367.

Lines, L., H. Tan, S. Treitel, J. Beck, R. Chambers, J. Eager, C. Savage, J. Queen, W. Rizer, P. Buller, D. Cox, J. Sinton, J. Ballard, G. Kokkoros, A. Track, P. Guerendel, J. Harris, S. Lazaratos, and M. Van Shaak, (1995), *Integrated Reservoir Characterization: Beyond Tomography*, *GEOPHYSICS*, Vol. 60, No. 2, pp. 354-364. This paper received the 1996 SEG Best Paper Award.

Matheron, G., 1963, Principles of Geostatistics, *Economic Geology*, vol. 58, pp. 1246-66.

Olea, R. A., 1977, Measuring Spatial Dependence with Semivariograms, Lawrence, Kansas, Kansas Geological Survey, Series on Spatial Analysis, No. 3, 29 p.

Olea, R. A., 1994, Fundamentals of Semivariogram Estimation, Modeling and Usage, in *Stochastic Modeling and Geostatistics*, (1994), J. M. Yarus and R. L. Chambers, Eds. AAPG Computer Applications in Geology, No. 3, pp. 27-36.

Royle, A. G., 1979, Why Geostatistics?, *Engineering and Mining Journal*, Vol. 180, pp. 92-101.

In compiling a list of geostatistical terminology we selected only the most commonly encountered terms and have not attempted to duplicate Ricardo Olea's (1991) glossary of terminology. The terms are defined as we use them in teaching geostatistics, so they may be slightly different from Olea's definitions.

Admissibility (of semivariogram models): for a given covariance model, the kriging variance must be ≥ 0 , this condition is also known as *positive definite*.

Anisotropy: in geostatistics, anisotropy refers to covariance models that have major and minor ranges of different distances (correlation scale or lengths). There are two types of anisotropy: *Geometric* anisotropic covariance models have the same sill, but different ranges; *Zonal* anisotropic covariance models have the same ranges, but different sills.

Auto-correlation: to compute a spatial covariance model for regionalized variable. It measures a change in variance (variogram) or correlation (correlogram) with distance and/or azimuth.

Biased estimates: there is a correlation between the standardized errors and the estimated values (see Cross-Validation). A histogram of the standardized errors is skewed. Either of these conditions suggest that there is a bias in the estimates, so that there is a chance that one area of the map will always show estimates higher (or lower) than expected.

Block Kriging: making a kriging estimate over an area, for example estimating the average value at the size of the grid cell. The grid cell is divided into a specified number of sub-cells, a value is kriged to each sub-cell, and then the average value is placed at the grid node.

Cokriging: the process of estimating a regionalized variable from two or more variables using a linear combination of weights obtained from models of spatial auto-correlation and cross-correlation. This is the multivariate version of kriging.

Conditional Simulation: a geostatistical method to create multiple equally probable images of an regionalized variable based on a spatial model. It is conditional only when the actual control data are honored. Conditional simulation is a variation of conventional kriging or cokriging. By relaxing some of the kriging constraints (e.g. minimized square error), conditional simulation is able to reproduce the variance of the control data. The final "map" captures the heterogeneity and connectivity mostly likely present in the reservoir. Post processing conditional simulations produces a measure of error (standard deviation) and other measures of uncertainty, such as iso-probability and uncertainty maps.

Correlogram: a measure of spatial dependence (correlation) of a regionalized variable over some distance. The correlogram can also be calculated with an azimuthal preference.

Covariance: the kriging system uses covariance, rather than the variogram or correlogram values, to determine the kriging weights, λ . The covariance is the sill minus the variogram model (or zero minus the correlogram).

Coregionalization: the mutual spatial behavior between two or more regionalized variables.

Cross-correlation: to compute a spatial cross-covariance model between two regionalized variables. This provides a measure of spatial correlation between the two variables.

Cross-Validation: a procedure to check the compatibility between a data set, its spatial model and neighborhood design. This is used to check for biased estimates produced by poor model and/or neighborhood design.

Drift: often used to describe data containing a trend. Drift usually refers to short scale trends at the size of the neighborhood.

Estimation variance: the kriging variance at each grid node. This is a measure of global reliability, not a local estimation of error.

External Drift: when a secondary regionalized variable (e.g. seismic attribute) is used to control the shape of the final map created by kriging or simulation. This is a geostatistical linear regression technique that uses a spatial model of covariance.

Geostatistics: the statistics of spatially (or temporally) correlated data.

***h*-Scatterplot:** select a value for separation distance, h , then plot the pairs $Z_{(x)}$ and $Z_{(x+h)}$ as the two axes of a bivariate plot, the shape and correlation of the cloud is related to the value of the variogram for distance, h .

Histogram: a plot, which shows the frequency or number of occurrences (Y-axis) of data, falling into size classes of equal width (X-axis).

Iso-probability map: these maps are created by post processing conditional simulations. The maps show the value of the regionalized variable at a constant probability threshold, for example at the 10th, 50th (median), or the 90th percentiles. These maps provide a level of confidence in the mapped results.

Kriging: method of calculating estimates of a regionalized variable using a linear combination of weights obtained from a model of spatial correlation.

Kriging variance: see estimation variance

Lag: a distance parameter used during computation of the experimental covariance model. The lag distance typically has a tolerance of \pm one-half the initial lag distance.

Moving neighborhood: a search neighborhood designed to use only a portion of the control data point during kriging or conditional simulation.

Nested variogram model: a linear combination of two or more variogram (correlogram) models. For example, a short-range exponential model combined with a longer-range spherical model.

Nonconditional simulation: a method that does not use the control data during the simulation process. A method quite often used to observe the behavior of a spatial model and neighborhood design.

Nugget effect: a feature of the covariance model where the experimental points defining the model do not appear to intersect at the origin. The nugget model shows constant variance at all ranges, but is often modeled as zero variance at the control point (well location).

Ordinary (co-)kriging: the local mean varies and is re-estimated based on the control points in the search neighborhood ellipse (moving neighborhood).

Outliers: from a statistical definition, these are data points falling outside about ± 2.5 standard deviation of the mean value of the sample population. These could be the result of bad data values or local anomalies.

Point Kriging: making a kriging estimate at a specific point, for example at a grid node, or a well location.

Positive Definite: see admissibility

Random function: the random function has two components: (1) a regional structure component manifesting some degree of spatial auto-correlation (regionalized variable) and lack of independence in the proximal values of $Z_{(x)}$, and (2) a local, random component (random variable).

Random variable: created by some random process, whose values follow a probability distribution, such as a normal distribution.

Range: the distance where the variogram reaches the sill or when the correlogram reaches zero correlation; also known as the correlation range or correlation scale.

Regionalized variable: a variable that has some degree of spatial auto-correlation and lack of independence in the proximal values of $Z_{(x)}$.

Risk Map: see Uncertainty Map

Simple kriging: the global mean is constant over the entire area of interpolation and is based on all the control points used in a unique neighborhood (or is supplied by the user).

Semivariogram: a measure of spatial dependence (dissimilarity or increasing variability) of a regionalized variable over some distance. The variogram can also be calculated with an azimuthal preference. The semivariogram is commonly called variogram. See also correlogram.

Sill: the level of variance where the variogram reaches its correlation range. The variance of the sample population is the theoretical sill of the variogram.

Stationarity: the simplest definition is that the data do not exhibit a trend. This implies that a moving window average shows homogeneity in the mean and variance over the study area.

Stochastic modeling: used interchangeably with conditional simulation, although not all stochastic modeling applications necessarily use control data.

Unique neighborhood: a neighborhood search ellipse that uses all available data control points. The practical limit is 100 control points. A unique neighborhood is used with simple kriging.

Uncertainty map: these are maps created by post processing conditional simulations. A threshold value is selected, for example, 8 % porosity, an uncertainty map shows at each grid node, the probability that porosity is either above or below the chosen threshold.

Variogram: see semivariogram

Variogram map: A graph of the variogram presented in plan view showing the variance in all directions simultaneously. Differences in variance are depicted with gradational colors or contours. The origin of the graph is in the center of the map, at lag equals zero distance.

Weights: values determined during an interpolation or simulation that are multiplied by the control data points in the determination of the final estimated or simulated value at a grid node. To create a condition of unbiasedness, the weights, λ , sum to unity for geostatistical applications.

Suggested Reference

Olea, R. A., 1991, *Geostatistical Glossary and Multilingual Dictionary*, New York, Oxford University Press, 177 p.