國 立 交 通 大 學

土 木 工 程 學 系

碩 士 論 文

利用 TOPEX/Poseidon 及 Jason-2 測高衛星監測冰層及湖水位變化：以唐古拉山及赤布張錯為例

TOPEX and Jason-2 observations of height change over Mt. Tanggula and Lake Chibuzhang, Tibet

研 究 生：羅 元 旎

指導教授：黃 金 維

中華民國一○○年七月

利用 TOPEX/Poseidon 及 Jason-2 測高衛星監測冰層及湖水位變化：以唐古拉山及赤布張錯為例

研究生：羅元旎　　指導教授：黃 金 維

國立交通大學土木工程學系

摘　要

本研究使用 T/P 及 Jason-2 測高衛星，研究區域唐古拉山為長江發源地，另赤布張錯位於唐古拉山西邊且為其融化雪水流入的湖泊之一，此二區域恰好皆有 TOPEX/Poseidon 及 Jason-2 測高衛星軌道（pass155、pass242）經過，此次研究利用二衛星的觀測資料驗證唐古拉山冰層變化與赤布張錯湖水位變化的關聯性，並進一步印證全球暖化及聖嬰現象等地球物理現象。因唐古拉山表面為冰層，故採用門檻值演算法做波形重定，且因此區較崎嶇，故亦嘗試以坡度改正公式做修正，但改正結果不甚理想，地形梯度改正也嘗試利用測高資料擬和而成的表面做為模型修正之。

此次研究結果顯示，在 1993～2001 年間，唐古拉山冰層高度平均下降速率約為 11.59 m/year；赤布張錯在 1993～2001 年間，平均上升速率為 0.112 m/year，2008～2010 年間，平均上升速率為 0.47 m/year。推測與全球暖化有關，且兩區域的趨勢變化具有因果關係。另兩測區的跨年變化在 1998 年有一個極大反轉，唐古拉山冰層變化在 1992～1998 年，上升速率為 5.77 m/year，但 1998～2002 年，下降速率:21.81 m/year，而赤布張錯的湖水位變化也因此受到影響，在 1992～1998 年，上升速率：0.33 m/year，1998～2002 年，轉為下降，平均速率為 0.02 m/year。此變化趨勢亦與傳統監測資料顯示之唐古拉山冬克瑪底冰川末端變化的趨勢符合，推測此現象與聖嬰現象有關。

TOPEX and Jason-2 observations of height change over Mt. Tanggula and Lake Chibuzhang, Tibet

Student：Yuan Ni Lo　　Advisor：Dr. Cheinway Hwang

Department of Civil Engineering

National Chiao Tung University

Abstract

Mt. Tanggula is the origin of Yangtze River, the longest river in China. Lake Chibuzhang is situated 76 km west of Mt. Tanggula with water filled by the melting snow of the latter. Passes 155 and 242 of TOPEX （also Jason-2） travel through the southeastern part of Mt. Tanggula, and the central part of Lake Chibuzhang, respectively. Some sub-satellite points of pass 155 are over a flat ice sheet of Mt. Tanggula, where waveforms are less contaminated compared to nearby ones. This is also true of Lake Chibuzhang for pass 242, despite its small area. We retrack waveforms over such points to yield 10-day time series of height changes. The rates of height change over the ice sheet of Mt. Tanggula during the periods of 1993-1998 and 1998-2001 are 5.77 and -21.81 m/year, respectively, with an average rate of -11.59 in 1993-2001. The rates of lake level change of Chibuzhang are 0.33 and -0.02 m/year during 1993-1998 and 1998-2001, with an average rate of 0.11 m/year in 1993-2001. The changes of both ice sheet height and lake level reverse the trends in 1997-1998 over a large El Nino. Jason-2 cannot produce ice sheet change but yield a rate of 0.47 m/year over 2008-2009 over Lake Chibuzhang. The heights of the ice sheet and lake level are both affected by climate change.

誌謝

轉眼間，已在交大度過了四年大學生活及兩年研究生涯，還記得剛進大學時還有著小大一的青澀，到現在路上的人都稱呼學姐，才驚覺時光流逝，事物皆以無從察覺的速度改變著，一眨眼，我竟然完成了一本論文，最要感謝的就是我的指導教授黃金維教授，因為他的悉心指導及適時的叮嚀指引方向，總令像無頭蒼蠅的我能確定目標、勇往直前，他也常常鼓勵我們要充實自己、投資自己，才能面對未來的許多挑戰，真的非常感謝黃教授，讓我在專業領域及人生態度上都學到很多很多。我也非常感謝我的口試委員們，給我好多鼓勵和讚美，還有如及時雨般的建議，讓我受惠良多。

回想研究期間，最要感謝的是鐙凱同學，因為同是研究測高技術，他入門早又超認真，所以懂得比我多好多，卻每次都不厭其煩教我、回答我的大小問題，我真的由衷感謝你。還有貓哥學長，因為是接著他的題目做，所以很多程式、資料都是學長提供的，每次學長一來，我都占用他好多時間問他問題，若沒有學長這麼幫忙，這本論文現在可能還沒個影，祝學長研究事業家庭一切順利！我也要感謝研究室好多人，綉雯總是善解人意，常辦活動讓大家熱絡，亨利學長給我不少很專業的建議，還有測量五姬跟交大七匹狼，跟大家的回憶好多好美，我會記得你們很久很久。

謝謝男友 William 總是鼓勵我，幫我解決很多問題，在我變成無頭蒼蠅的時候，把我變回來，相信有朝一日你一定會成為你想要變成的那種強者，謝謝當了五年室友的育如，你一直都是我的榜樣，告訴我什麼是認真、什麼是敬業，我要快快學起來！也謝謝聖翔，陪我走過好多幾乎快走不過的日子。

最最要感謝的是我的家人，爸爸媽媽你們總是殷殷期盼，鼓勵、叮嚀我，從小努力栽培我，讓我能夠念到這麼高的學歷，感謝我的阿公阿嬤，你們總是對我很好，總是勉勵我要認真念書要加油，雖然阿嬤在碩二下的時候離開了，但我知道你一定看得到也為我高興，我終於拿到碩士學位了！

目　　錄

中文摘要 ii
英文摘要 iii
誌謝 iv
目錄 v
圖目錄 vii
表目錄 ix

第一章 前言 1
1-1 研究動機 1
1-2 文獻回顧 2
1-3 研究方法 5
1-4 論文架構 6
第二章 衛星測高原理與簡介 7
2-1 衛星測高原理 7
2-2 衛星測高改正分析 9
2-3 測高衛星任務簡介 11
2-3-1 TOPEX/Poseidon 衛星介紹 11
2-3-2 Jason-1 及 Jason-2 衛星介紹 11
2-4 衛星測高之應用 12
第三章 研究區域資料來源及處理 13
3-1 研究區域 13
3-1-1 唐古拉山（Mt. Tanggula） 13
3-1-2 赤布張錯（Lake Chibuzhang） 14
3-2 研究資料 15
3-3 計算高程方法 16
3-4 資料處理 17
3-4-1 資料分段 17
3-4-2 波型重定之距離改正 19
3-4-3 坡度改正（slope correction） 20
3-4-4 地形梯度改正（surface gradient correction） 22
3-4-5 粗差剔除 24

3-4-6 高斯濾波.....24
第四章 利用 T/P 測高資料監測唐古拉山冰層高度變化.....25
4-1 選點.....25
4-2 各項改正資料.....29
4-3 波形重定改正量.....33
4-4 坡度改正量.....37
4-5 地形梯度改正.....39
4-6 粗差剔除.....48
4-7 高斯濾波.....49
第五章 利用 T/P 及 Jason-2 測高資料監測赤布張錯湖水位變化.....53
5-1 選點.....53
5-2 各項改正資料.....57
5-3 波形重定改正量.....61
5-4 地形梯度改正.....64
5-5 粗差剔除.....66
5-6 高斯濾波.....69
第六章 唐古拉山冰層與赤布張錯湖面變化綜合分析.....72
6-1 趨勢及跨年變化分析.....72
6-1-1 唐古拉山冰層高度變化.....73
6-1-2 赤布張錯湖面高度變化.....76
6-2 唐古拉山冰層變化及赤布張錯湖水位變化與聖嬰現象的關係.....77
第七章 結論與建議.....79
參考文獻.....80

圖　　目　　錄

圖 1-1 冬克瑪底冰川冰層末端變化圖（資料來源：PU ET AL., 2008）.....4
圖 1-2 冬克瑪底地區各時期冰川分布疊加圖（資料來源：譙程駿, 2010）.....4
圖 1-3 1970～2003 年拉弄冰川變化圖（資料來源：張堂堂等人, 2004）.....4
圖 2-1 衛星測高原理示意圖.....8
圖 3-1 唐古拉山附近地形及 T/P 軌道 155 之地面軌跡.....13
圖 3-2 赤布張錯（湖）附近地形及 T/P 軌道 242 之地面軌跡.....14
圖 3-3 唐古拉山 BIN16 之測高資料點分布.....18
圖 3-4 赤布張錯 BIN05 之測高資料點分布.....18
圖 3-5 坡度改正原理示意圖.....21
圖 3-6 T/P PASS155 BIN16 測高資料點分布.....23
圖 4-1 唐古拉山附近波形.....26
圖 4-2 唐古拉山選點.....28
圖 4-3 唐古拉山（BIN16）衛星質心改正.....30
圖 4-4 唐古拉山（BIN16） 乾對流層改正.....30
圖 4-5 唐古拉山（BIN16） 濕對流層改正.....31
圖 4-6 唐古拉山（BIN16） 電離層改正.....31
圖 4-7 唐古拉山（BIN16） 地球固體潮改正.....32
圖 4-8 唐古拉山（BIN16） 極潮改正.....32
圖 4-9 唐古拉山（BIN16）波形重定改正量（CASE1）.....34
圖 4-10 唐古拉山（BIN16）波形重定後之高程變化（CASE1）.....34
圖 4-11 唐古拉山（BIN11～BIN20）波形重定改正量（CASE2）.....35
圖 4-12 唐古拉山（BIN11～BIN20）波形重定後之高程變化（CASE2）.....35
圖 4-13 唐古拉山（BIN01～BIN28）波形重定改正量（CASE3）.....36
圖 4-14 唐古拉山（BIN01～BIN28）波形重定後之高程變化（CASE3）.....36
圖 4-15 坡度與坡度改正量之關係圖.....38
圖 4-16 90 公尺之 SRTM DEM.....40
圖 4-17 SURFACE1.....40
圖 4-18 SURFACE2.....41
圖 4-19 SURFACE3.....41
圖 4-20 唐古拉山（BIN16）4 種模型地形梯度改正量之比較（CASE1）.....42
圖 4-21 唐古拉山（BIN01～BIN28）4 種模型地形梯度改正量之比較（CASE3）.....42
圖 4-22 唐古拉山（BIN16）經地形梯度改正後之高程變化圖（CASE1）.....43
圖 4-23 唐古拉山（BIN11～BIN20）經地形梯度改正後之高程變化圖（CASE2）.....44
圖 4-24 唐古拉山（BIN01～BIN28）經地形梯度改正後之高程變化圖（CASE3）.....45
圖 4-25 唐古拉山（BIN16）經高斯濾波後之高程變化圖（CASE1）.....50
圖 5-1 赤布張錯附近波形.....54

圖 5-2 赤布張錯選點.....56
圖 5-3 赤布張錯（BIN05）衛星質心改正.....58
圖 5-4 赤布張錯（BIN05） 乾對流層改正.....58
圖 5-5 赤布張錯（BIN05） 濕對流層改正.....59
圖 5-6 赤布張錯（BIN05） 電離層改正.....59
圖 5-7 赤布張錯（BIN05） 地球固體潮改正.....60
圖 5-8 赤布張錯（BIN05） 極潮改正.....60
圖 5-9 赤布張錯（BIN05）波形重定改正量（CASE1）.....62
圖 5-10 赤布張錯（BIN01～BIN10）波形重定改正量（CASE2）.....62
圖 5-11 赤布張錯（BIN05）經波形重定改正前後之高程變化圖（CASE1）.....63
圖 5-12 赤布張錯附近之 EGM08 GEOID 模型.....64
圖 5-13 赤布張錯（BIN05）地形梯度改正量（CASE1-2）.....65
圖 5-14 赤布張錯（BIN05）經粗差剔除後之高程變化圖（CASE1-1）.....67
圖 5-15 赤布張錯（BIN05）經粗差剔除後之高程變化圖（CASE1-2）.....67
圖 5-16 赤布張錯（BIN01～BIN10）經粗差剔除後之高程變化圖（CASE2）.....68
圖 5-17 赤布張錯（BIN05）經高斯濾波後之高程變化圖（CASE1-1）.....69
圖 5-18 赤布張錯（BIN05）經高斯濾波後之高程變化圖（CASE1-2）.....69
圖 5-19 赤布張錯（BIN01～BIN10）經高斯濾波後之高程變化圖（CASE2）.....70
圖 5-20 赤布張錯經高斯濾波後之高程變化圖（T/P + JASON-2 資料）.....71
圖 6-1 唐古拉山冰層高度變化圖（以 CASE3-1 為例）.....74
圖 6-2 安多氣象站 1992～2002 溫度變化圖（資料來源：中國氣象局）.....74
圖 6-3 安多氣象站 1992～2002 雨量變化圖（資料來源：中國氣象局）.....75
圖 6-4 大冬克瑪底冰川雪線高度變化圖（資料來源：PU ET AL., 2008）.....75
圖 6-5 赤布張錯湖面高度變化圖.....76
圖 6-6 唐古拉山冰層高度 98 年前後趨勢變化圖（T/P-CYCLE155）.....78
圖 6-7 赤布張錯湖面高度 98 年前後趨勢變化圖（T/P-CYCLE242）.....78

表　目　錄

表 4-1 唐古拉山各項改正量比較.....29
表 4-2 唐古拉山波形重定改正量之比較.....33
表 4-3 唐古拉山波形重定改正前後高程之比較.....33
表 4-4 唐古拉山坡度改正量及坡度之比較.....37
表 4-5 唐古拉山各 CASE 坡度範圍之點數分布.....37
表 4-6 唐古拉山各 CASE 之地形梯度改正量.....47
表 4-7 唐古拉山各 CASE 做地形梯度改正後高程之比較.....47
表 4-8 唐古拉山粗差剔除後高程變化之比較.....48
表 4-9 唐古拉山高斯濾波後高程變化之比較.....49
表 5-1 赤布張錯各項改正量比較.....57
表 5-2 赤布張錯波形重定改正量之比較.....63
表 5-3 赤布張錯波形重定改正前後高程之比較.....63
表 5-4 赤布張錯湖水位經地形梯度改正後高程之比較.....65
表 5-5 赤布張錯湖水位經粗差剔除後 3 種 CASES 之高程比較.....66
表 5-6 赤布張錯高斯濾波後 3 種 CASES 之比較.....70
表 6-1 由唐古拉山各 CASE 代入公式求解出未知數.....72
表 6-2 由赤布張錯各 CASE 代入公式求解出未知數.....72
表 6-3 冬克瑪底地區不同年份冰川面積變化（資料來源：譙程駿, 2010）.....75

第一章 前言

1-1 研究動機

衛星測高技術發展從 1969 年發展至今已有 40 多年歷史，測高衛星能提供連續且高精度的資料，有助於監測海水面變化及研究海洋大地水準面、重力場異常等（Fu and Cazenave, 2001），近年來更因多位學者陸續發展各種波形重定演算法，因此也漸漸有學者開始利用衛星測高技術來研究冰層變化及地表高程變化等等。

中國地區，有許多高山及偏遠區域，人煙稀少甚至人們無法到達來管理及監測，且近年來全球暖化，造成地表氣溫上升、冰川融化等現象，不僅對大自然帶來衝擊，也威脅人們的生命安全，測高衛星軌道遍佈全球，只要是衛星有經過的特定區域，若能借助衛星測高資料，對此區的研究勢必會有大幅提昇。

此次研究區域為位於青海省及西藏交界的唐古拉山（Mt. Tanggula），以及位於唐古拉山西邊約 76 km 且為其融化雪水流入的湖泊之一－赤布張錯（Lake Chibuzhang），此二區域恰好皆有 TOPEX/Poseidon（簡稱 T/P）及 Jason-2 測高衛星軌道（pass155、pass242）經過，透過衛星測高技術及 T/P 連續十年（1992 年 9 月～2002 年 8 月）及 Jason-2 連續兩年（2008 年 7 月～2010 年 12 月）的觀測資料，盼能獲得此區的地表高程變化及湖水位變化，藉由分析此二區域之測高資料，驗證唐古拉山冰層變化與赤布張錯湖水位變化的關聯性，並進一步印證全球暖化及聖嬰現象等議題。

1-2 文獻回顧

衛星測高技術最初是為了監測海水面變化而設計，目前對於海水面變化的研究越趨成熟，觀測精度可達公分級（Shum et al., 2003），近年來，全球暖化造成海水面上升的現象也是研究的重要課題，Cabanes et al.（2001）利用 TOPEX/Poseidon （T/P）衛星 1993～2000 年的測高數據計算出全球海水水面平均上升 2.5 ± 0.2 mm/year，Willis et al.（2010）更指出海水面上升已成為跨學科的研究課題，舉凡測高衛星（如 Jason 系列）、重力衛星（如 GRACE）及自主海洋觀測系統（如 Argo）皆可用來觀測海水面變化。測高數據也可用來研究大型湖泊的湖水位變化，如 Morris and Gill（1994）利用 TOPEX/Poseidon 測高衛星測量北美五大湖的湖水面變化，其標準差達 3.95 cm，扣除潮汐與湖面波動後，標準差只有 2.9～3.0 cm。彭敏峰（2003）和 Hwang et al.（2005）以 T/P 測高衛星觀測中國湖水位變化，驗證湖水位與天氣變化有關，西藏中部的昂孜錯湖水位變化與聖嬰現象有關。Kuo et al.（2008）利用 T/P 資料，觀測介於美加之間的伊利湖（Lake Erie）之湖水面變化，結果顯示伊利湖湖水位變化為–6.14 cm/year，且此結果與潮位站時間序列變化一致。測高資料也用來監測冰層變化及冰原質量變化（Zwally et al., 1989），Wingham et al.（1998）利用 ERS-1/2 衛星推算出 1992～1996 年南極大陸冰層每年變薄 0.9 ± 0.5 cm。Lee （2008）利用 T/P 及 Envisat 衛星觀測美國路易斯安那州沼澤區的水位變化，他亦利用 Envisat 及 GRACE 衛星監測南極冰原的質量變化，結果發現，2002～2007 年南極冰層下降速率為 13.2 ± 1.3 cm/year。

自從 Brown（1977）提出了平均脈衝回傳理論，為了提昇測高數據品質，陸續有學者針對不同的反射表面提出具物理意義及數學統計意義的波形重定演算法，如 β – 參數演算法（Martin et al., 1983）、OCOG（offset center of gravity）演算法（Bamber et al., 1994）及門檻值（Threshold）演算法（Davis, 1997）等，因此也帶動了波形重定的應用，Lee et al.（2008）監測北美的固體地球變形及後冰河時期反彈（Glacial Isostatic Adjustment，簡稱 GIA），對不同的地表分別利用三

種不同演算法做波形重定，夏秋季測區為苔原覆蓋，屬複雜波形，採用$\beta-$參數演算法，冬春季為冰層覆蓋，波形為 specular，則採用適合冰棚研究的 OCOG 或門檻值演算法來進行波形重定。

而當測區不是平坦的地表時，坡度的變化是造成誤差的來源之一，坡度 0.5 度就會造成 30～100 公尺的高差(Zwally and Brenner, 2001)，Brenner et al.(1983)提出利用星下點（衛星正下方的點位）的坡度來做修正，但必須在坡度小的情況下才能成立，詳述於 3-4-3。

唐古拉山平均海拔 5500 公尺以上，終年積雪，Pu et al.（2008）從 1989～2002 年監測唐古拉山冬克瑪底冰川(Xiao Dongkemadi Glacier)的質量平衡(Mass balance)，結果顯示（如圖 1-1）1989～1993 年都是正向的累積，冰層厚度共上升 970 mm，1994 年開始，出現負向的質量平衡，除 1997 年有一個大量的上升，1998 年劇烈下降，冰層厚度在這一年總共下降 701 mm，1989～1994 年趨勢向上，1994 年後下降，氣象資料顯示，1994 年後的質量劇烈下降是跟夏季炎熱冰川融化有關。譙程駿 （2010）亦利用 1973 年 MSS、1992 年 TM、2001 年 ETM+、2007 年 TM 數值遙感影像資料以及數值高程模型（DEM），結合第一次冰川編目資料分析出唐古拉山冬克瑪底地區不同年份的冰川分布範圍(圖 1-2)，結果顯示研究區內的冰川面積逐年減小。張堂堂等人(2004)於 1999 年和 2003 年採用 GPS 對位於唐古拉山南方的念青唐古拉山拉弄冰川末端位置進行測量，並加入 1970 年航攝冰川末端位置一起比對，結果顯示，1970～1999 年，拉弄冰川末端退縮 285 m，相當於每年退縮 9.8 m，1999～2003 年拉弄冰川退縮 13 m，相當於每年退縮 3.25 m，此結果代表冰川近年來皆是退縮的趨勢（圖 1-3）。

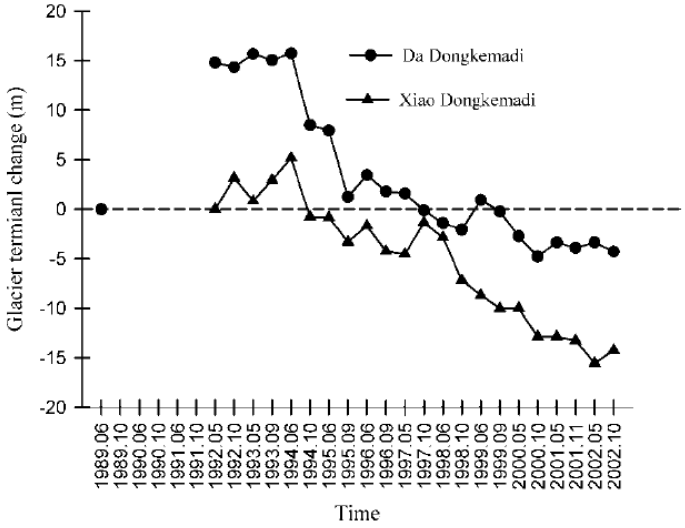


圖 1-1 冬克瑪底冰川冰層末端變化圖（資料來源：Pu et al., 2008）

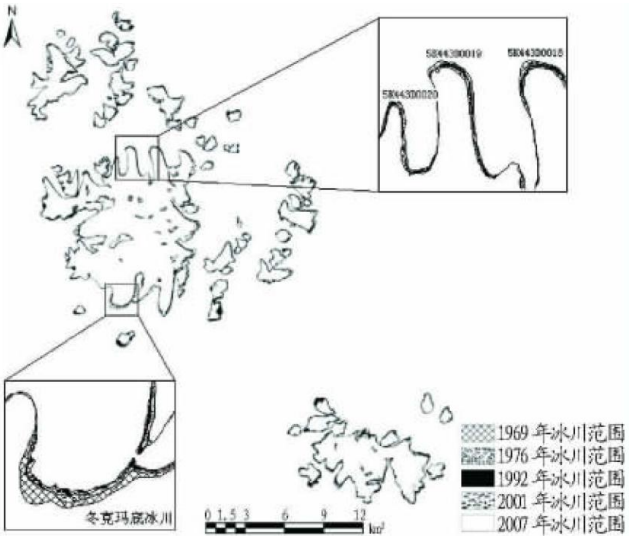


圖 1-2 冬克瑪底地區各時期冰川分布疊加圖（資料來源：譙程駿, 2010）

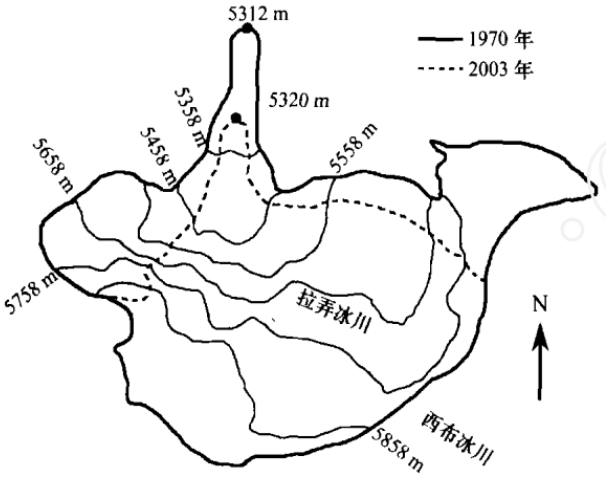


圖 1-3 1970～2003 年拉弄冰川變化圖（資料來源：張堂堂等人, 2004）

1-3 研究方法

本研究運用衛星測高技術監測唐古拉山冰層變化，以及赤布張錯湖水位變化。其中因為唐古拉山終年積雪，故本研究選用適合冰棚研究的門檻值（Threshold 50%）演算法，且山區地勢崎嶇，故也加入坡度改正，並做地形梯度修正，採用 90 公尺之 SRTM 數值地形模型及測高數據擬合而成的表面分別進行修正並比較之。

由於唐古拉山地形複雜，使得測高原始數據高差甚大，T/P 測高衛星擁有 1 Hz 及 10 Hz 兩種資料，由於雷達每秒打 10 個點，起初因為 SDR 檔每秒只有 1 筆資料，故將 GDR 檔的資料每 10 筆做 1 次平均結合 SDR 檔資料成為 1 Hz 資料，但隨著研究課題越來越深入，資料範圍要求越來越小，故把 GDR 檔 1 秒鐘內的 10 筆資料皆納入考量，而 SDR 檔的資料為環境參數，一般認為其在同 1 秒鐘內改變不大，故在同 1 秒內採用相同數據來做計算，此為 10 Hz 資料。10 Hz 資料因每秒有 10 個點位，各點距離較小（約 600 m），較容易選到接近測區的點位，且做地形梯度改正時，將各點修正至中點，因距離較短，計算結果應較精細，但缺點是若只選 1 個點，因涵蓋範圍較小，資料點較少（10 年約 365 點），若遇缺檔或剛好有粗差，容易造成資料時間序列中斷；若一次選擇 10 個點做計算（10 年約 3650 點），相當於 1 Hz 資料的範圍，資料範圍大（沿軌道相距 6 km），計算結果反應整個測區的平均變化，適合範圍較大的研究區域，且資料點多，較容易稀釋及剔除誤差，但缺點是較無法監測小範圍的測區變化。因此，本研究將兩種資料都列入計算並做比較。

計算出最終高程變化，將唐古拉山及赤布張錯的高程變化結果加入諧和函數做擬合，用最小二乘法算出趨勢、年變化及跨年變化等，並比較其關聯性。

1-4 論文架構

本論文共分七章進行討論，各章節內容簡述如下：

第一章：簡單說明研究動機、文獻回顧與研究方法及論文章節介紹。

第二章：介紹衛星測高原理與各項改正分析，並簡介測高衛星歷史及應用。

第三章：介紹研究區域與研究資料，並詳述資料處理方法與步驟 。

第四章：測區唐古拉山的資料處理及各項改正成果比較。

第五章：測區赤布張錯的資料處理及各項改正成果比較。

第六章：比較並分析唐古拉山及赤布張錯的成果，並驗證各物理現象如全球暖化及聖嬰現象。

第七章：對本論文做結論與建議。

第二章 衛星測高原理與簡介

衛星測高技術自 1969 年以來發展至今，已有四十多年的歷史。起初，由於海水表面較為平滑穩定且對於雷達訊號反射率較好，因此測高衛星被用於測量海平面高度，而陸地表面因為有植被、建物等覆蓋，且對於雷達訊號反射率較差，造成測高衛星在陸地上觀測精度也相對較差，所以近年來學者們（Martin et al., 1983;Bamber et al., 1994;Davis, 1997）紛紛研究發展出如波型重定等較有效的演算法，來提升陸地觀測精度。

2-1 衛星測高原理

測高衛星上的測高儀可連續發射雷達波至地球表面，再經由地表反射回來讓衛星上的接收裝置接收（圖 2-1），利用量測這段時間差及返回的波形代入

$$H_{alt} = c \times \frac{\Delta t}{2} \qquad (2\text{-}1)$$

即可計算出衛星至地表的距離（H_{alt}）。

其中，

H_{alt}：由衛星量測至地表面的距離

c：光速

Δt：雷達波發射至地表再反射回來讓衛星接收的時間差

再根據衛星的高度進而獲得地表面高程（LSH）：

$$LSH = H_{sat} - H_{alt} - cor. \qquad (2\text{-}2)$$

其中，

LSH：地表面高程（Land Surface Height）

H_{sat}：由定軌所得之衛星橢球高

H_{alt}：由衛星量測至地表面的距離

$cor.$：改正量

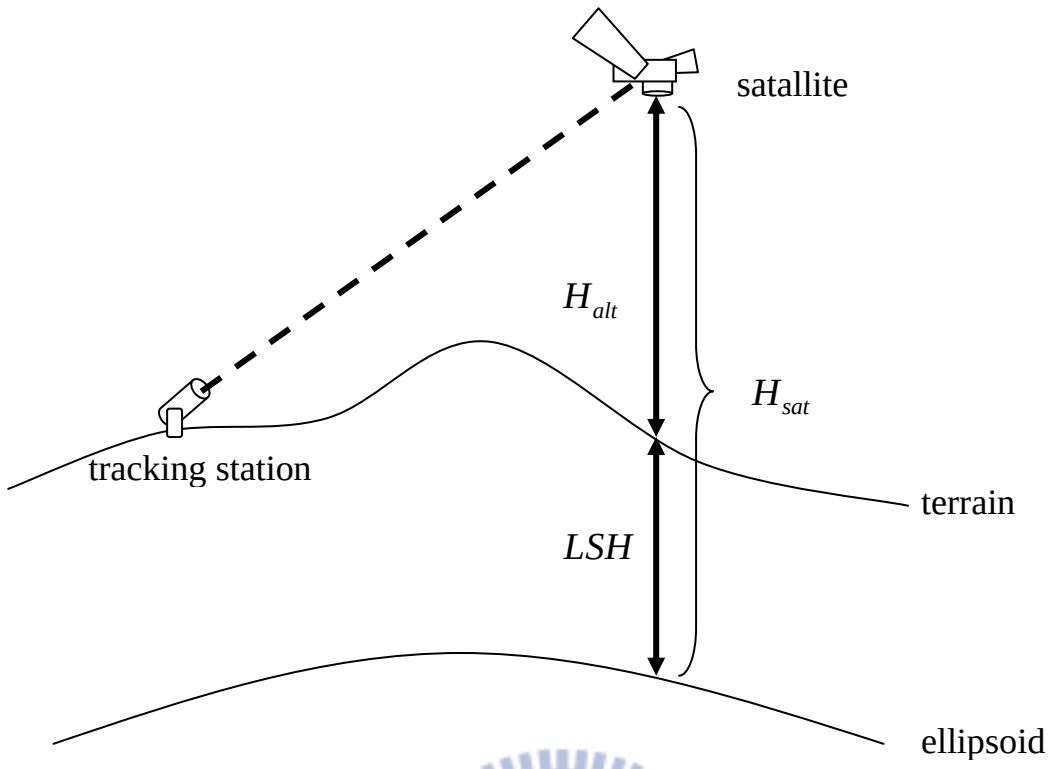


圖 2-4 衛星測高原理示意圖

2-2 衛星測高改正分析

在理想的情況下，測高衛星的觀測量應該等於衛星質心到地表面的距離，但此觀測量受許多不同因素影響，必須加以改正才能獲得真實的距離。此誤差及改正量大致可分為軌道誤差、測高儀誤差、訊號傳播造成之誤差、瞬時地表面與大地水準面之差四大類（Seeber, 2003），分述如下。

1.軌道誤差

造成軌道誤差的主要原因有以下四項：

（1） 地球重力場模型誤差

（2） 追蹤站座標誤差

（3） 追蹤系統誤差和限制

（4） 定軌計算之模型誤差

其中影響最大的是地球重力場，由於使用的地球重力場模型解析度有限，精度也隨之受影響，故需發展適合的重力模式。影響次大的是追蹤系統之誤差，T/P 使用的都卜勒追蹤系統為全天候雷達追蹤系統，較不受氣候的影響，故也較實用。

2.測高儀誤差

測高儀誤差來源主要分為以下三項：

（1） 雷達天線相位中心與衛星質量中心之距離

（2） 測高儀電力線路傳播延遲造成的誤差

（3） 量測系統之計時誤差

3.訊號傳播造成之誤差

此誤差為雷達訊號傳遞過程中受到干擾，造成延遲的現象所導致，造成干擾的原因主要有二項：

（1） 電離層延遲效應

由於太陽及其他天體的輻射線對地球上的空氣產生電離作用，形成帶電等離子體的大氣，稱為電離層，主要分布於地表面上 50～1000 公里的範圍，電離層

的電子密度隨著太陽的輻射強度、季節、時間及位置等因素而改變，自由電子含量白天比晚上多，多天比夏天多，其中又以太陽黑子活動對電離層變化影響最大。

當測高儀的雷達脈衝通過電離層時，雷達脈衝的傳播速度與電離層內自由電子含量成正比，與測高儀頻率平方成反比，對訊號產生延遲影響。為了消除電離層影響，可以使用 TOPEX 搭載的雙頻雷達測高儀（13.6GHz 與 5.3GHz）或 DORIS 系統分別改正，如果是單頻雷達測高儀，也可利用電離層模型來改正。

（2） 對流層延遲效應

對流層分布於地表面上 40 公里的範圍內，當雷達脈衝通過對流層時，會受到對流層內氣體與水氣的影響，造成折射使得速度延遲，稱為對流層延遲效應，此效應可分為乾、濕兩種分量，其中乾分量造成的誤差較穩定且易於估計，而濕分量因為水氣變化大，較不容易估計，目前的解決方法是利用多波段微波輻射儀或使用氣象模型，如歐洲中期氣象預報中心（Europe Center for Medium Range Weather Forecasting, ECMWF）所建立之數值模型來改正，但由於本研究區域為陸地及湖泊，T/P 搭載的三頻微波輻射儀（TOPEX Microwave Radiometer, TMR）遇到陸地這種無法反射的地貌，無法正常運作，故本研究使用 ECMWF 模型來估計濕對流層改正量。

4.瞬時地表面與大地水準面之差

（1） 地球固體潮改正

（2） 極潮改正

若觀測表面為陸地，則須增加三項改正：將在第三章詳述。

（1） 波形重定之距離修正量（distance correction）

（2） 坡度改正（slope correction）

（3） 地形梯度改正（surface gradient correction）

2-3 測高衛星任務簡介

1969 年在美國威廉斯鎮所召開的會議，提出利用測量衛星至海水面距離的雷達技術與精密軌道定位技術定出衛星位置，進而設計出測高衛星。第一顆測高衛星「Skylab」是由美國太空總署 NASA 研發，並於 1973 年 5 月發射成功。之後 Geos-3、Seasat、Geosat、ERS-1、TOPEX/Poseidon、ERS-2、GFO、Jason-1 、Envisat、Cryosat、Jason-2 等測高衛星陸續發射。最著名的測高衛星為 T/P，擁有連續十年的觀測記錄。

2-3-1 TOPEX/Poseidon 衛星介紹

TOPEX/Poseidon 由美國太空總署 NASA 和法國太空總署 CNES 共同合作研發，簡稱 T/P 衛星。於 1992 年 10 月發射成功，是第一顆專為量測海水面變化所設計的衛星，可持續不間斷的觀測全球海洋水面變化。

T/P 軌道資料（資料來源：http://topex-www.jpl.nasa.gov/missions/topex）

- 軌道高度：1336 km
- 軌道傾角：66 度
- 重複週期：9.91 天
- 運行速度：繞地球一周 112 分鐘
- 任務壽命：約 7 年（10 年）

2-3-2 Jason-1 及 Jason-2 衛星介紹

Jason-1 及 Jason-2 兩顆測高衛星分別於 2001 年 12 月及 2008 年 6 月發射。是接續 T/P 衛星繼續量測海平面高度的衛星計畫。Jason-2 觀測資料的精度較 Jason-1 為佳。Jason-1 衛星在陸地上的資料精度較差（Frappart et al., 2006），故本研究不採用此測高衛星數據。

Jason-2 軌道資料 （http://topex-www.jpl.nasa.gov/missions/ostmjason2/ ）

- 軌道高度：1336 km
- 軌道傾角：66 度
- 重複週期：9.91 天

- 運行速度：繞地球一周 112 分鐘
- 任務壽命：5 年

2-4 衛星測高之應用

衛星測高技術最初是用來監測海水位及湖水位高度變化等諸多海洋學應用，在大地測量及地球物理學的應用為決定大地水準面及重力異常，進而計算全球重力場，因此衛星測高在大地測量領域最大的貢獻就是提供具有統一高程基準且精度高的海洋大地水準面。

海洋環流是由海水的水平壓力梯度所引起的，它會造成海面高相對於大地水準面的傾斜，根據測高資料可以求得海面地形，再經由海面地形與地轉流的大小方向可以求得海洋環流的分布模式。

海潮的漲落也是海洋學家及地球物理學家一直以來關注的課題之一，其中，Schwiderski（1984）利用驗潮資料和水文動力方程式推導出全球海潮模式，且 Cartwright and Ray（1990）用 Geosat 測高衛星資料對此模式加以修正，得到更精準的海潮模式，這更說明了測高資料在海潮模型中扮演著非常重要的角色。

近年來，由於波形重定演算法的興起，測高衛星的應用更深入到陸地上，舉凡冰原的質量變動、沿海地層下陷等等，地表的高程變化也是主要的研究課題之一。

第三章 研究區域資料來源及處理

3-1 研究區域

3-1-1 唐古拉山（Mt. Tanggula）

唐古拉山脈（圖 3-1）的西段在西藏自治區境內，東段則為青海省與西藏自治區的界山。全長約 700 公里，山體寬 150 公里，平均海拔 5500～6000 公尺，相對高差 1300～1500 公尺，雪線高度 5400～5500 公尺，山區年均溫－4.4℃（沱沱河站），有多年凍土帶分布，植被以高寒草原為主。

唐古拉山脈是怒江、瀾滄江及長江等著名水系的發源地，由此可知其重要性。西段為藏北外流水系與內陸水系的分水嶺，東段則是太平洋水系與印度洋水系的分水嶺。青藏公路和青藏鐵路均橫穿此山。（資料來源：Wikipedia contributors, 2011）

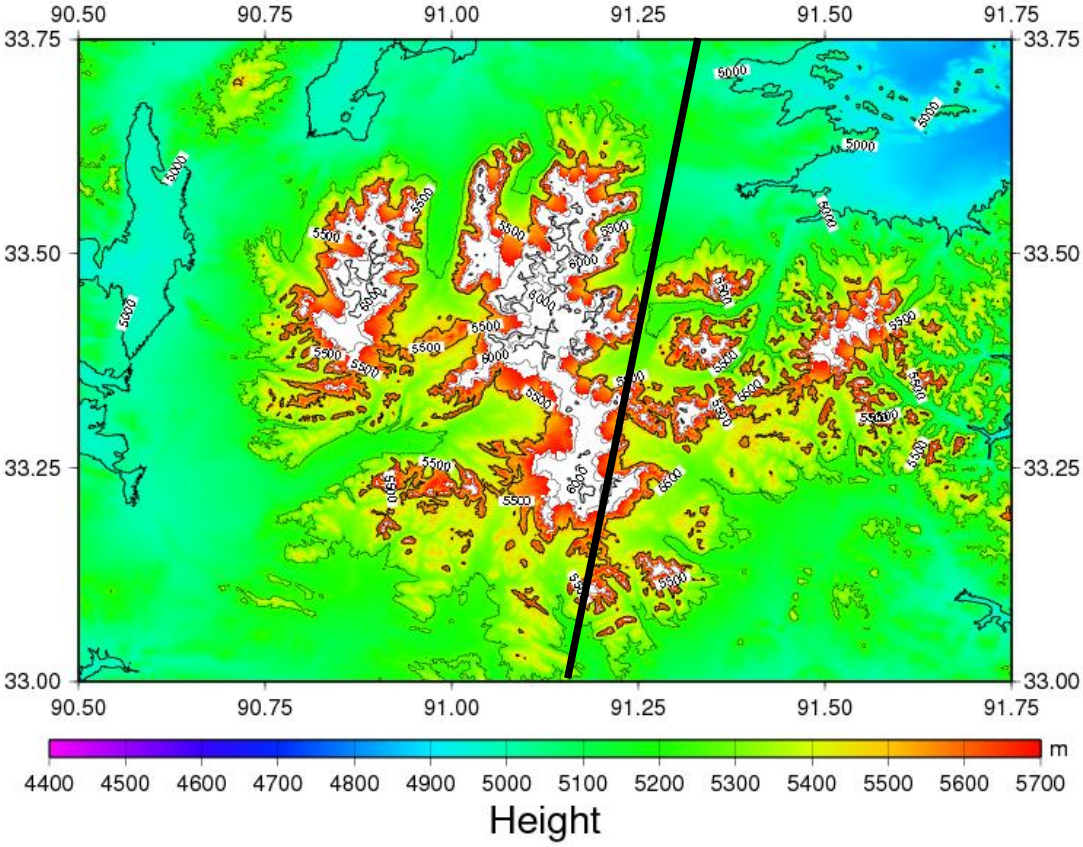


圖 3-1 唐古拉山附近地形及 T/P 軌道 155 之地面軌跡

3-1-2 赤布張錯（Lake Chibuzhang）

赤布張錯（圖 3-2）位於青海西南部與西藏自治區交界處，湖東段在青海省境內，西段在西藏境內，是可可西里湖區半鹹水湖。「赤布張」為藏語，意思為水橋湖，因湖兩端寬、中部窄，形似橋而得名。湖長 34.1 公里，寬 16.3 公里，面積 476.8 平方公里。湖面海拔 4931 公里。湖水主要靠冰雪融水補給，湖周圍港灣發達，湖濱地勢平坦，牧草生長旺盛。自古為青海西南部通往藏北高原的通道。（資料來源：Wikimepia contributors, 2011）

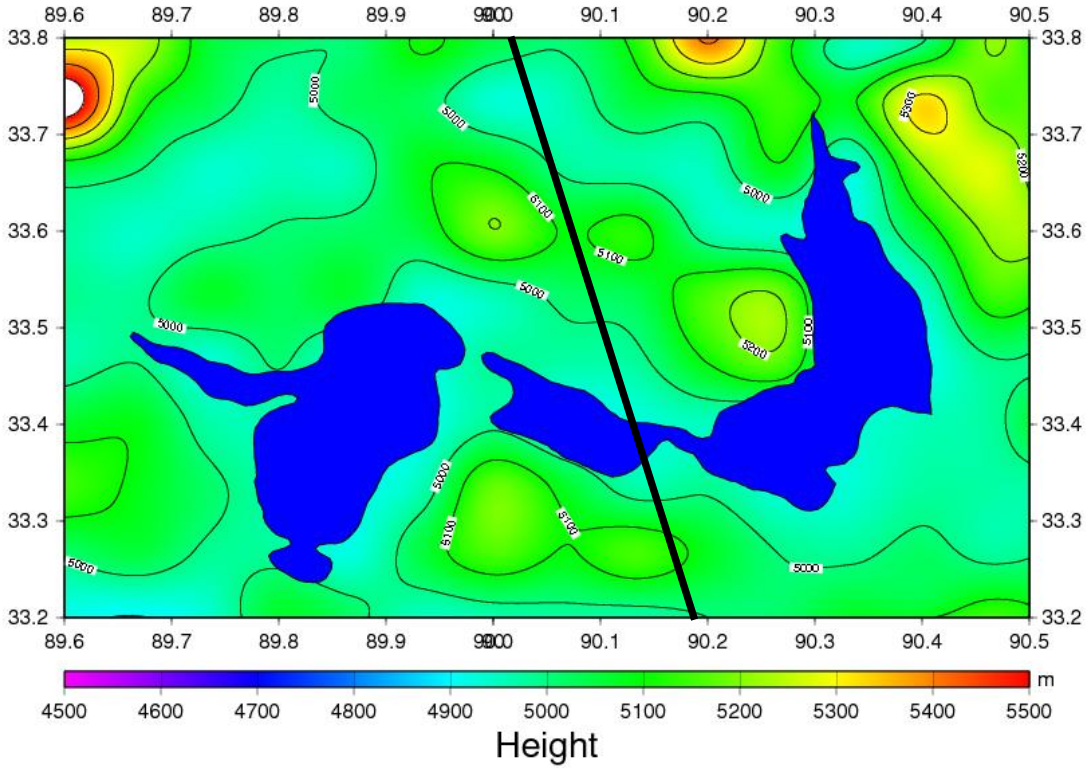


圖 3-2 赤布張錯(湖)附近地形及 T/P 軌道 242 之地面軌跡, 圖中藍色區域為湖面,非指高度 4700 公尺處。

3-2 研究資料

本研究採用 T/P 衛星的 GDR（Geophysical Data Records）資料和 SDR（Sensor Data Records）資料，資料涵蓋時間為 1992 年 10 月～2002 年 1 月（Cycles 002～364），Jason-2 衛星資料為 SGDR 資料，涵蓋時間為 2008 年 9 月～2010 年 2 月（Cycles 7～61）。T/P 衛星的 GDR 資料含 10 Hz 的衛星軌道資料及 1 Hz 的修正資料，SDR 資料含 10 Hz 的測距及波形 （waveform）資料。Jason-2 衛星的 SGDR 資料為 20 Hz 資料。測區唐古拉山採用軌道 155 資料，測區赤布張錯採用軌道 242 資料。

不使用 Jason-1 衛星資料的原因，是因為 Jason-1 衛星儀器設計問題和資料處理不夠精確，造成其陸地資料量少且精度不佳，無法提供足夠的資料量進行陸地研究（Frappart et al., 2006），故本研究不使用此衛星資料。因 Jason-2 衛星軌道 155，在唐古拉山測區剛好因為資料缺檔，無法獲取測高資料，故 Jason-2 衛星資料只能使用軌道 242 的資料研究赤布張錯。

3-3 計算高程方法

觀測湖或冰層高程最重要的觀測量為 LSH，定義如下：

$$LSH = H_{sat} - H_{alt} - Cor - C_{ret} - C_{slop} - C_{sur} \quad (3\text{-}1)$$

$$Cor. = (C_{COG} + C_{dry} + C_{wet} + C_{iono} + C_{sol} + C_{pol}) \quad (3\text{-}2)$$

其中，

H_{sat}：衛星軌道高度

H_{alt}：衛星測高儀至地表的距離

Cor：測高儀各改正量共六項。

C_{COG}：衛星質心改正

C_{dry}：乾對流層改正

C_{wet}：濕對流層改正

C_{iono}：電離層改正

C_{sol}：地球固體潮改正

C_{pol}：極潮改正

C_{ret}：波形重定之距離改正量

C_{slop}：坡度改正

C_{sur}：地形梯度改正量

因為測高衛星的雷達脈衝在陸地及易受陸地干擾的淺水上反射的波形較不理想，其反射表面不為水平面，故增加波形重定之距離改正量。且衛星軌道不同週期會有些許平移，並不是每次都在同一個軌道上運行，以 T/P 及 Jason-2 而言，軌道會在左右 1 公里的範圍內平移，故需增加地形梯度改正量，另在不是平坦的陸地上會因為坡度影響測高的測距，故增加坡度改正，但若用在湖水面觀測因其視為水平面或等位面，不會有坡度，故可不需做坡度改正。

3-4 資料處理

3-4-1 資料分段

首先將研究區域的測高數據及波形做大略的分析，在唐古拉山（pass 155）部分，選定緯度 33.16～33.30 度的資料，在赤布張錯（pass 242）部分，選定緯度 33.36～33.42 度的資料來作進一步分析，因為 T/P 及 Jason-2 衛星沿地面軌跡方向移動速度為每秒約 6 公里，且因地球自轉與軌道設計的關係，以 10 Hz 的高頻觀測資料而言，每週期的觀測點中心位置都不一定相同，但大概都會分佈在 600 m （沿軌道方向） x 2000 m（垂直軌道方向）區域中（圖 3-3、圖 3-4）。本研究將測高資料沿地面軌跡方向每約 600 公尺 x 垂直地面軌跡方向 2000 公尺的範圍畫定為一個”bin”，唐古拉山由南向北以 bin01～bin28 標示，赤布張錯由南向北以 bin01～bin12 標示，再根據式 3-3-1，逐一對測高數據做改正。

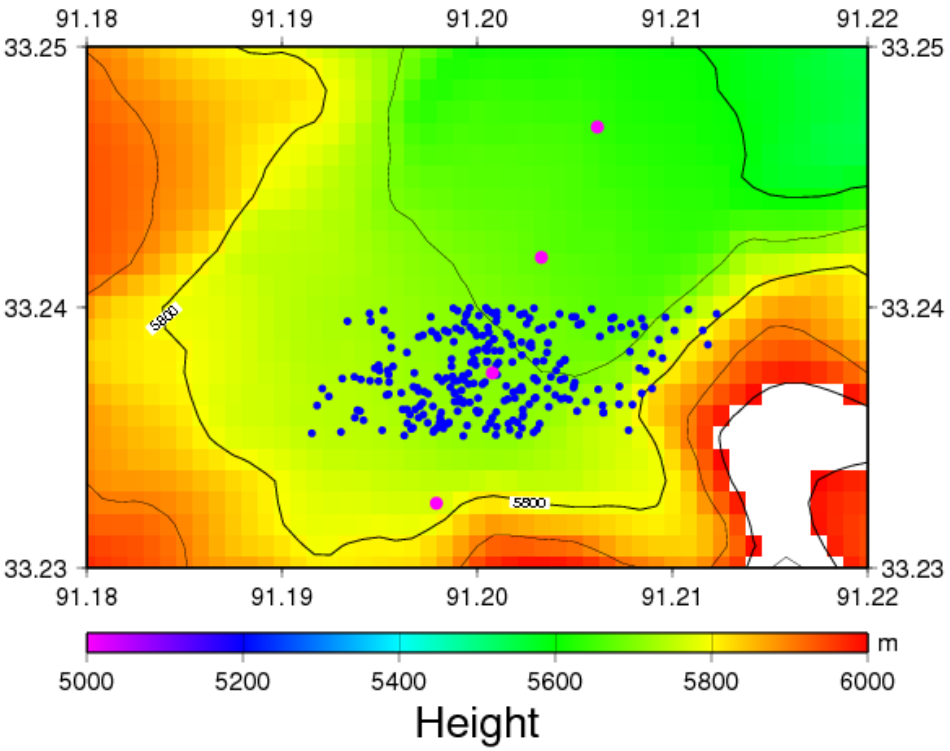


圖 3-3 唐古拉山 bin16 之測高資料點分布，藍色點為 bin16 內各點位置,桃紅色點為各 bin 點的中點,等高線間距 200 m,此 Bin 位於坡度較小的區域。

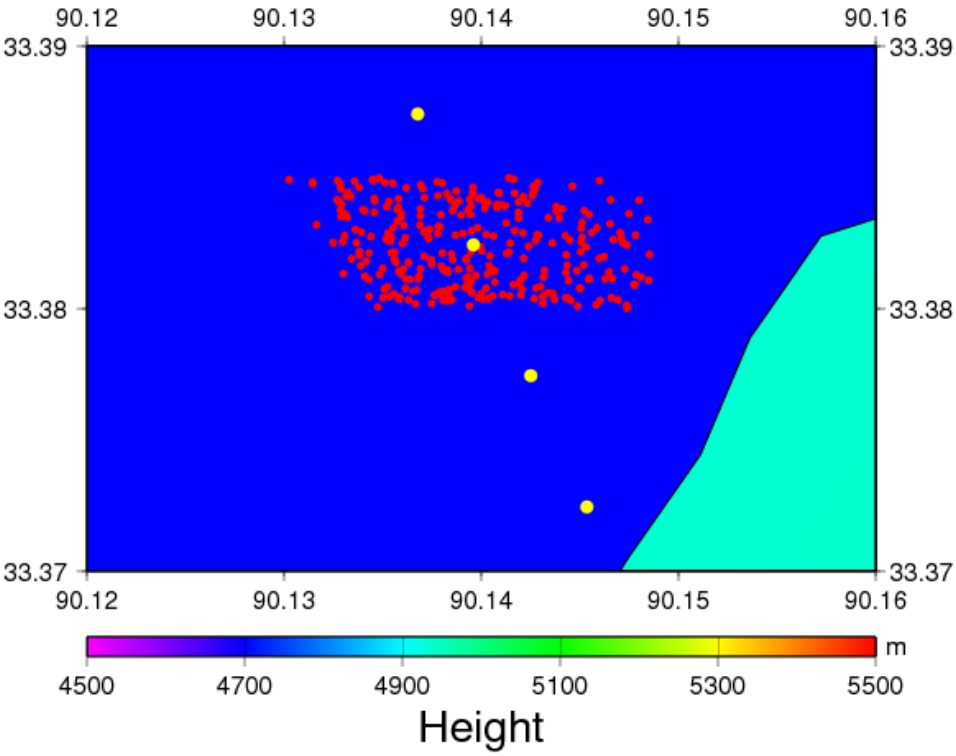


圖 3-4 赤布張錯 bin05 之測高資料點分布，紅點為 bin05 內各點位置,黃點為各 bin 點的中點。

3-4-2 波型重定之距離改正

本文使用適合觀測冰棚高程（Lee et al. 2008）的門檻值（Threshold 50%）演算法（Davis, 1997）來處理 T/P 衛星測高資料，此演算法是純統計的演算法，其原理詳述如下。首先，將波形前 5 個閥門值做平均得熱雜訊平均值（PN）。

$$PN = \frac{1}{5}\sum_{i=1}^{5} P(i) \tag{3-3}$$

其中，$P(i)$ 為第 i 個閥門的脈衝回波能量。

接著，計算波形前緣中點（TL），為了不讓熱雜訊干擾到振幅的計算，先搜尋出最大波形振幅（$A_{\max}$）與熱雜訊平均值相減即為真正的波形振幅，一般而言，波形前緣中點為波形振幅的一半，故使用 50%做為門檻值（Th），最後再將熱雜訊加回來，計算波形前緣中點（TL）的公式如下：

$$TL = PN + Th(A_{\max} - PN) \tag{3-4}$$

由求得之TL 內插求出上升區中點（G_r），公式如下：

$$G_r = G_{r-1} + \left(TL - P_{k-1}\right) / \left(P_k - P_{k-1}\right) \tag{3-5}$$

其中，P_k 為第 k 個閥門值且大於TL。

最後計算上升區中點（G_r）與預設閥門值（g）之差，乘上閥門間距離（ΔR），即可算出波形重定之距離修正量（C_{ret}）。

$$C_{ret} = \left(G_r - g\right)\Delta R \tag{3-6}$$

以 T/P 為例，預設閥門值為 32.5，閥門間距離可由閥門時間間隔（3.125 ns）乘上光速後除以二（脈衝發射至地表後返回）得到，約為 0.4679 公尺。

而Jason-2衛星本身提供測高儀波形重定演算法－Ice retracker，此法是將測高儀波形做幾何分析，得到測高距離（range）與反散射係數（sigma0）。其演算步驟和門檻值演算法大致相同，唯一不同處在於式3-4之門檻值（Th）設定為30%，而非50%，本文直接採用此內建演算法處理後之Jason-2測高衛星資料。

3-4-3 坡度改正（slope correction）

測高衛星發射的雷達脈衝，理論上都會打在衛星的正下方處，但由於陸地表面不一定平坦，當遇到有地形起伏的地方，雷達脈衝會先到達較高的表面，如圖 3-5 所示，S 點為衛星正下方的點位（星下點），P 點為衛星雷達脈衝最先打到的點，位於較高處，所以脈衝會先打到 P 點後就開始往回彈，而衛星將測到的距離記錄為星下點 S 點位置的高程，但實際上是測到星下點旁位置較高的 P 點。所以我們必須依據這個點位於的表面斜率將這項誤差修正回來，改正方法利用簡單的三角函數做幾何的改正，公式如下（Brenner et al., 1983）：

$$C_{slop} = H - H_m = H - H\cos\alpha = H(1-\cos\alpha) \approx \frac{H\alpha^2}{2} \qquad (3\text{-}7)$$

其中，

C_{slop}：坡度改正量

H：衛星到星下點距離

H_m：衛星到最先打到的點距離

α：星下點處的坡度

本文採用以上公式做坡度改正，但此改正難點有二，第一是 T/P 衛星雷達的 footprint 直徑約 2 公里，涵蓋了很多地形起伏，即便是同一個方向，在 2 公里範圍內，仍然會有坡度的不同，所以我們很難去決定在這 2 公里內應該取哪一處的坡度才是正確的，第二是坡向的問題，一個點有來自四面八方的坡向，我們應該取哪一個方向的坡度也是值得研究的問題（Zwally, 2001）。

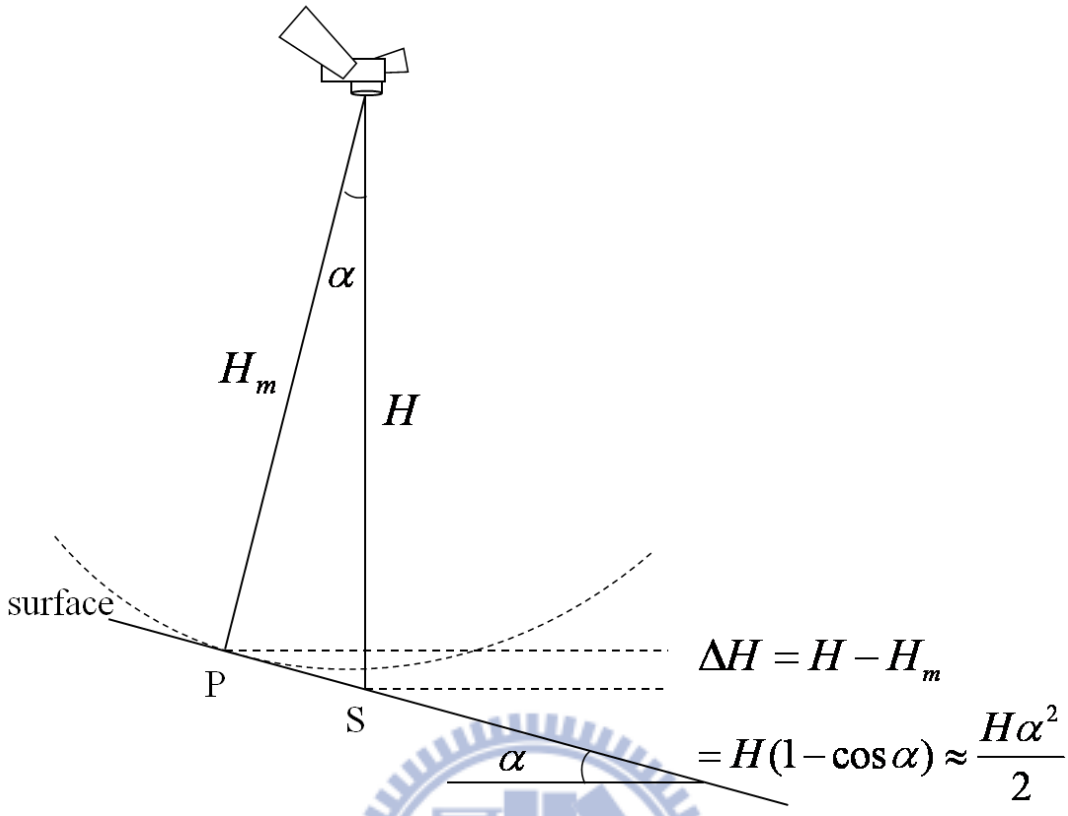


圖 3-5 坡度改正原理示意圖, S 為星下點,P 為衛星雷達先打到的點,α 為星下點的坡度,ΔH 為 P 點和 S 點的高差。

3-4-4 地形梯度改正（surface gradient correction）

由於 T/P 衛星是 10 天一週期的重複軌道觀測，但是每隔十天當衛星飛到同一上空時，雖然是同一軌道的觀測，但衛星的軌道會有所偏移，並不會在同一點上，如圖 3-6，為 T/P 衛星在這十年間經過同一個 bin 點，但實際打到的點位分佈，我們可以看出其點位是分散在中間點往東往西各一公里的範圍內，所以我們需要進行地形梯度改正，將每個點位約化至中間點（x_0），以提高高程變化的精度，中間點的計算方式為此 bin 內所有點位的經緯度平均值。由於測高數據擁有連續十年的資料，所以中間點的高程可能隨時間變動，因此，若要得知各點位到中間點的高差，需要使用一數值地形模型來當做高程參考的依據。假設同個週期內各個點高程與中間點高程之差等於 DEM 的各點高程與中間點高程之差，則地形梯度改正量可由 DEM 的中點與任意點的高程差估計求得，公式可表示為

$$C_{sur} = LSH(t, x_i) - LSH(t, x_0) = DEM(x_i) - DEM(x_0) \qquad (3\text{-}8)$$

其中，

C_{sur}:地形梯度改正量

$LSH(t, x_i)$:測高儀於 t 時刻 x_i 點位的橢球高

$LSH(t, x_0)$:任一時間 t 位於中間點（x_0）位置的橢球高

$DEM(x_i)$: x_i 點 DEM 的高程

$DEM(x_0)$: x_0 點 DEM 的高程

由於此模型並不隨時間變化，故假設一個 bin 點內同一時間內變化一致，可用模型修正之。

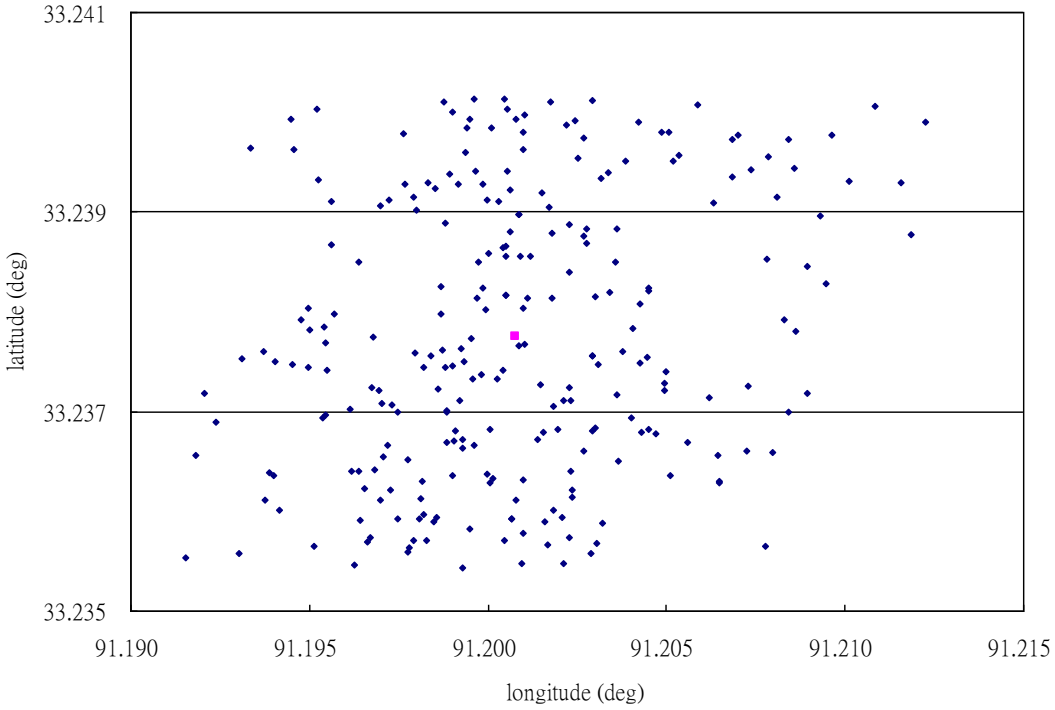


圖 3-6 T/P pass155 bin16 測高資料點分布

3-4-5 粗差剔除

T/P 測高資料含有粗差，必須加以剔除，本文採用誤差三倍後驗標準差來剔除此誤差，首先計算測區高程數據平均值，再代入下式計算求得標準差（σ）。

$$\sigma = \pm\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2} \tag{3-9}$$

其中，N 為總點數，$\bar{x}$ 為高程平均值，σ 為高程標準差，x_i 為各點高程。

根據誤差三倍後驗標準差的定義，滿足以下條件的點位才予以保留。

$$(\bar{x} - 3\sigma) < x_i < (\bar{x} + 3\sigma) \tag{3-10}$$

若不滿足此條件之點視為粗差，將予以剔除。

3-4-6 高斯濾波

將改正後的測高資料作高斯濾波處理，以利於觀察趨勢及跨年變化較方便，高斯濾波後的高程值為原始高程及高斯權函數的捲積，其計算方法如下：

$$H_filter(k) = \frac{\sum\left(wt(i) * h(i)\right)}{\sum wt(i)} \tag{3-11}$$

其中，$H_filter(k)$ 為高斯濾波後的高程值，$h(i)$ 為原始高程，$wt(i)$ 為高斯方程式的權值，定義如下：

$$wt(i) = e^{-\left(\frac{ds}{sigma}\right)^2} \tag{3-12}$$

$$ds = |x(k) - x(i)| \tag{3-13}$$

$$sigma = \frac{window}{6} \tag{3-14}$$

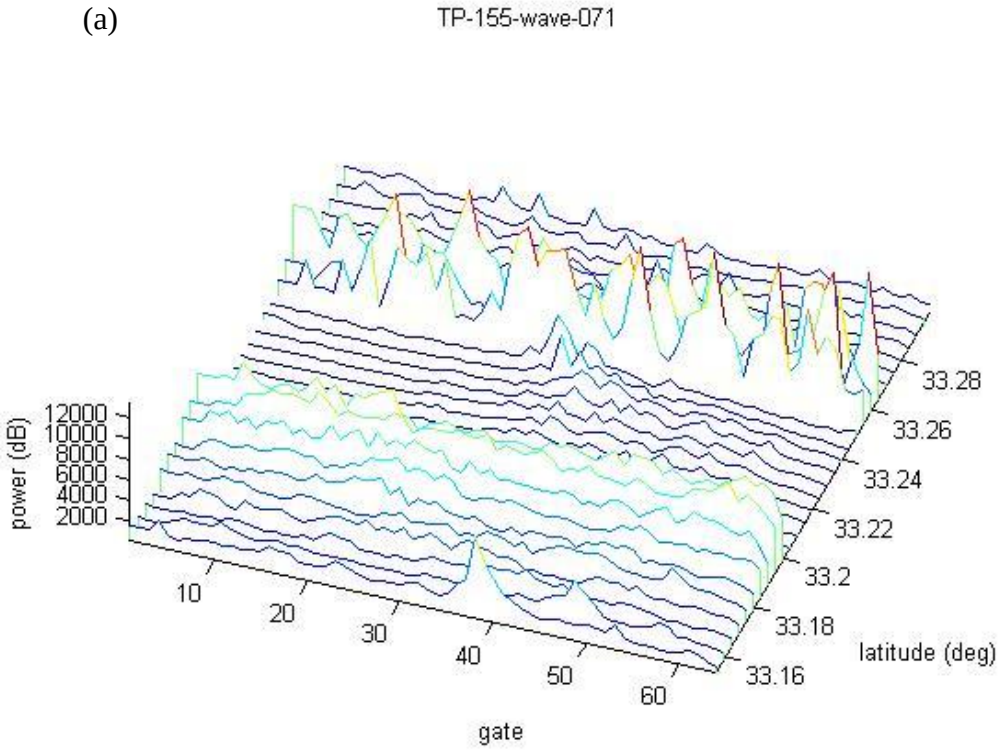
其中，window 即為單窗大小，本研究使用一年高斯濾波，故代 1 年。

第四章 利用 T/P 測高資料監測唐古拉山冰層高度變化

4-1 選點

因研究區域唐古拉山為高度 5500～6000 公尺的高山，地形崎嶇，測高衛星打下的雷達脈衝反射波形較差，所以本文比較唐古拉山測高衛星經過的區域波形 ，並舉出 4 個不同週期的波形資料為例（圖 4-1），加以說明比較，由圖 4-1(a)可以看出在北緯 33.2 度之前及 33.25 度之後的波形皆很紊亂，圖 4-1(b)的波形為 specular，可看出北緯 33.23 度之前及 33.28 度之後的最大波形有兩個或以上的波峰，為較差的波形，圖 4-1(c)在北緯 33.23 度～33.27 度的波形是相對較好的波形，圖 4-1(d)可很明顯的看出北緯 33.23 度～33.25 度的波形呈現一個波峰，是為可解算的波形，綜合以上評估出波形較好的區域在北緯約 33.24 度，故本研究選取 bin16 點（經度 91.2007683 度，緯度 33.2374876 度）（圖 4-2）為主要研究點位（Case1）。另選取 bin11～bin20 的資料（Case2），及 bin01～bin28 的資料（Case3），分成 3 種範圍大小不同的 Cases 做比較。

(a)



(b)

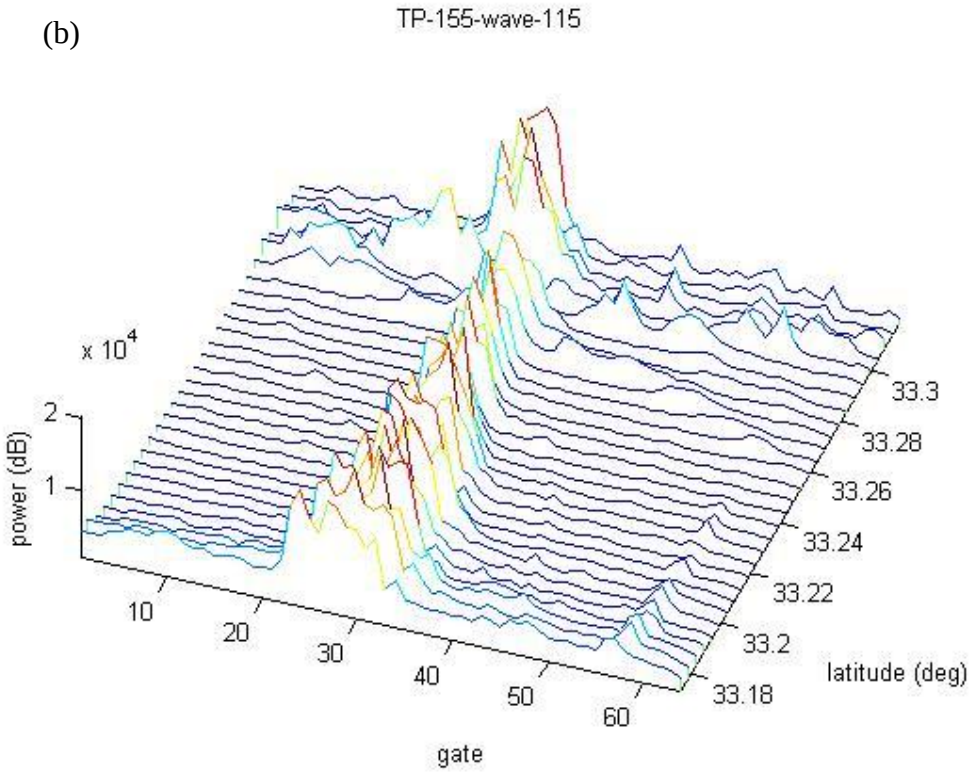
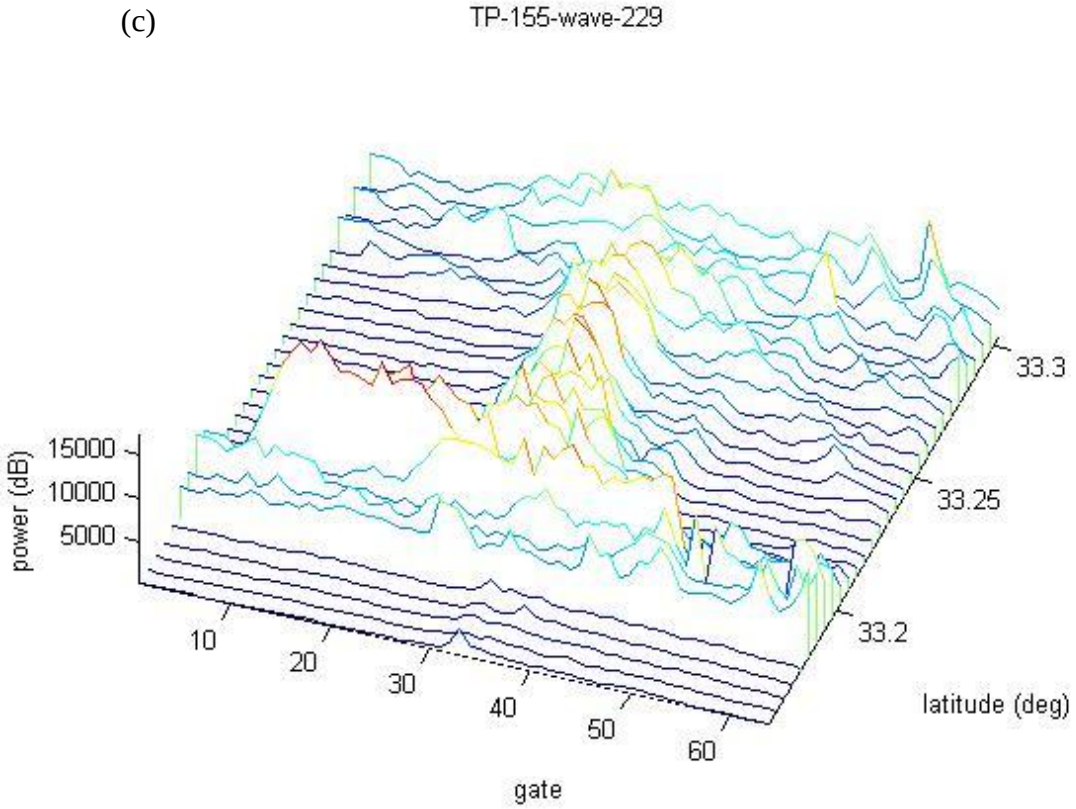


圖 4-1 唐古拉山附近波形 (a)為 T/P 軌道 155 第 71 週期之波形 (b)為第 115 週期之波形

(c)



(d)

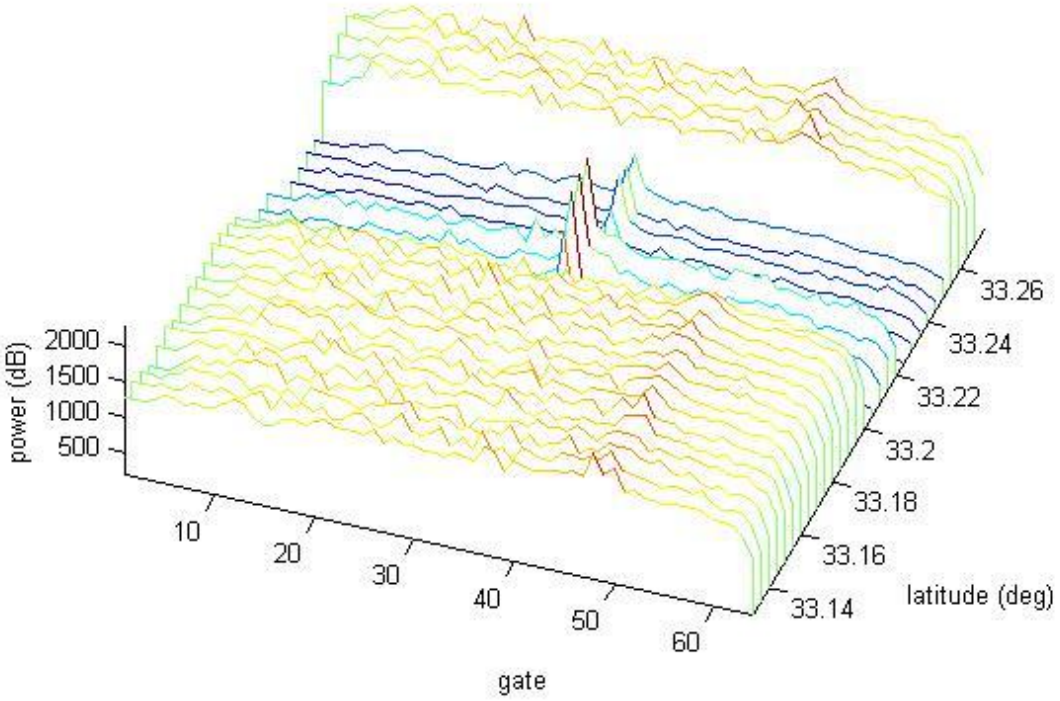


圖 4-1 唐古拉山附近波形（續） (c)為第 229 週期之波形 (b)為第 250 週期之波形

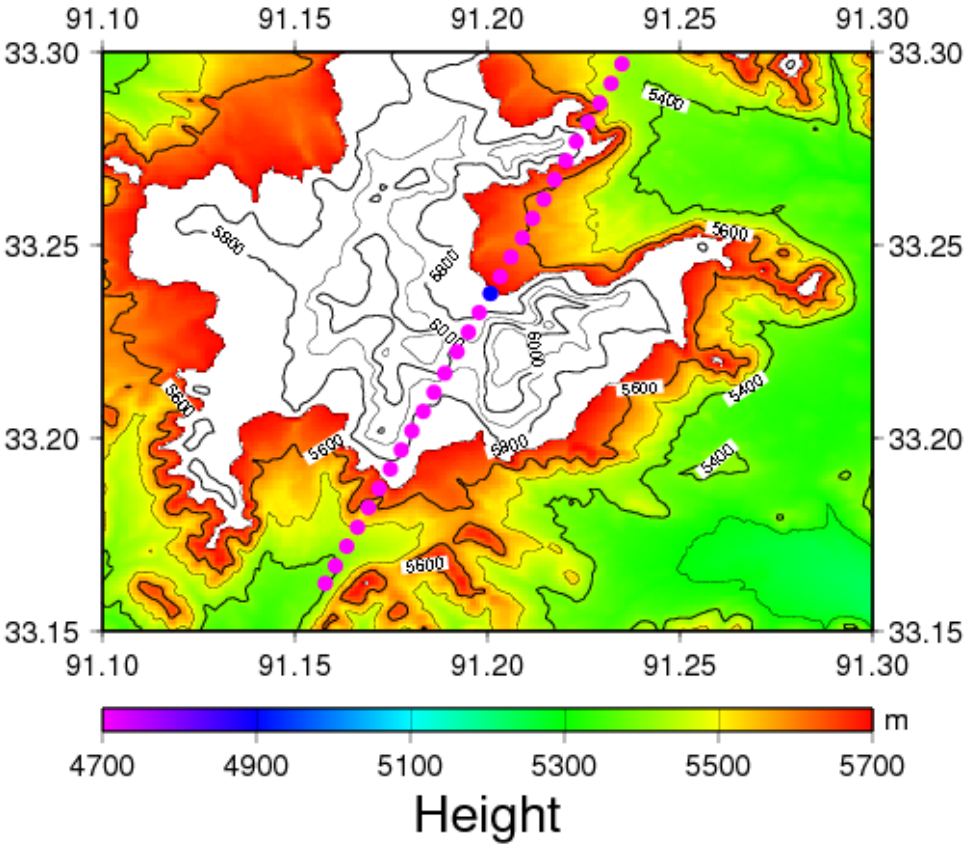


圖 4-2 唐古拉山選點, 桃紅點為 bin01～bin28 之中點,藍點為 bin16 之中點。

4-2 各項改正資料

以下列出計算公式內測高儀及環境等六項改正資料，縱座標刻度間距固定為 0.05 公尺，由圖 4-3～圖 4-8 得知，衛星質心改正量為最小；濕對流層改正量的年變化較明顯，改正量冬天較小，夏天較大；電離層改正量自 1998 年後，變化劇烈，推測與太陽黑子的活動有關。

由表 4-1 可知，衛星質心改正量為最小，主要由於衛星在製作時，已可用精密測高儀率定將誤差降至最低。而乾對流層改正量雖然最大，但其標準差較小，可以視為所有數據一起平移，對於我們比較重視的高差相對變化量影響較小。而地球固體潮，因其標準差最大，對高程變化的結果影響最大，若不改正，對結果影響較其他五項改正來得大。

表 4-1 唐古拉山各項改正量比較

	C_{COG}	C_{dry}	C_{wet}	C_{iono}	C_{sol}	C_{pol}
最小值	-0.008	-2.361	-0.086	-0.134	-0.190	-0.013
最大值	0.004	-2.276	-0.003	-0.003	0.296	0.019
平均值	-0.001	-2.316	-0.025	-0.033	0.029	0.000
標準差	0.003	0.016	0.022	0.031	0.099	0.008

單位:m

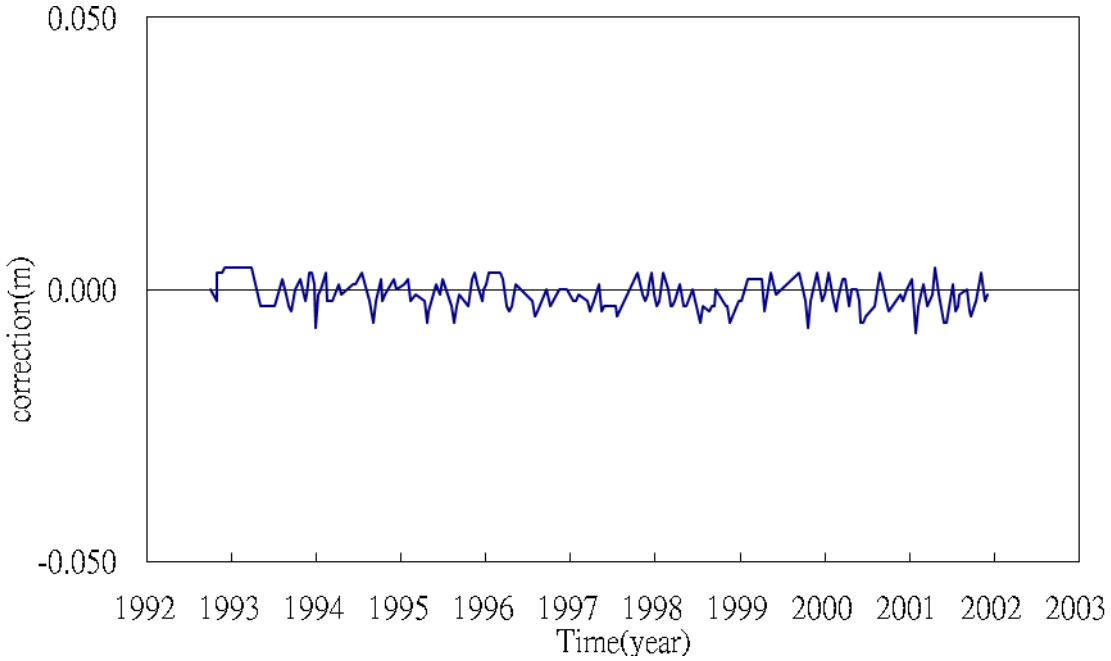


圖 4-3 唐古拉山（bin16）衛星質心改正

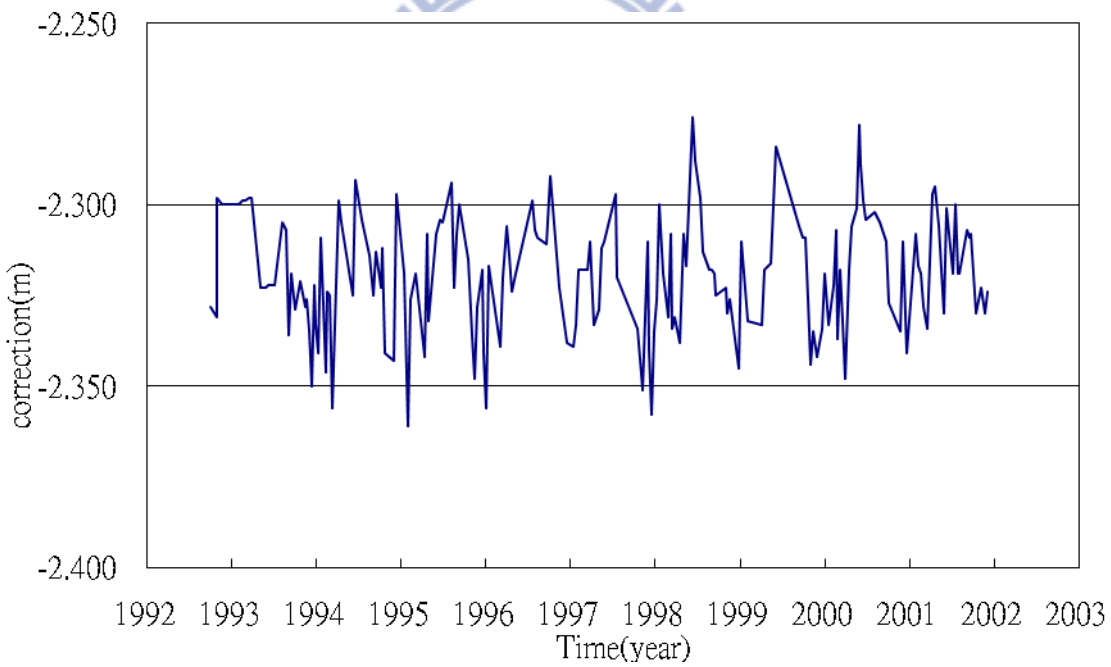


圖 4-4 唐古拉山（bin16） 乾對流層改正

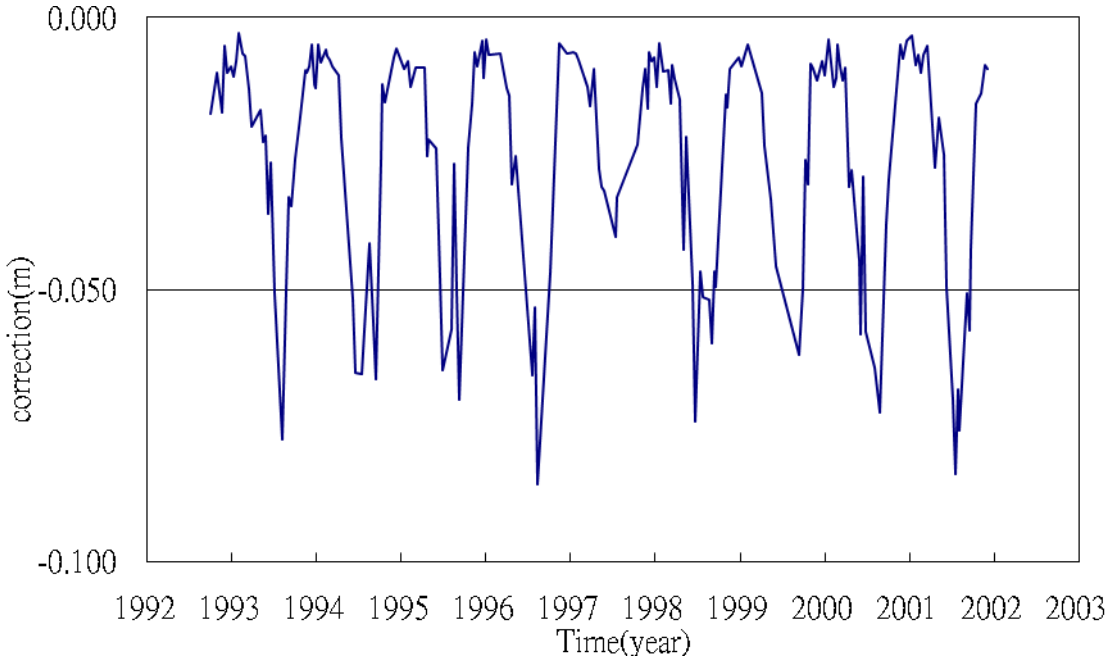


圖 4-5 唐古拉山（bin16） 濕對流層改正

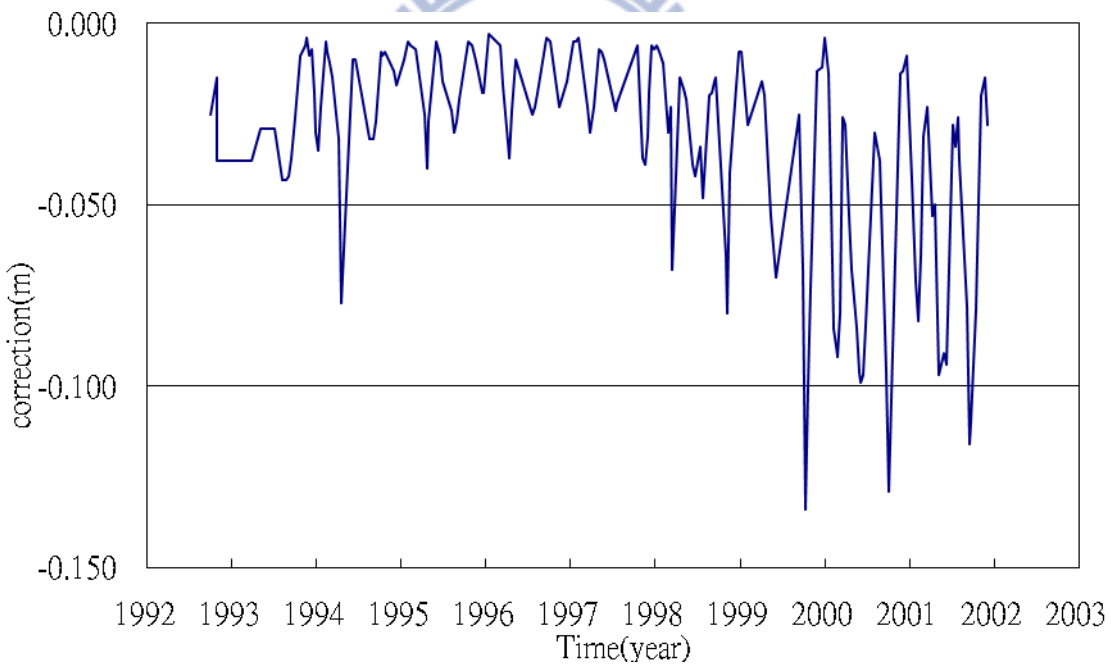


圖 4-6 唐古拉山（bin16） 電離層改正

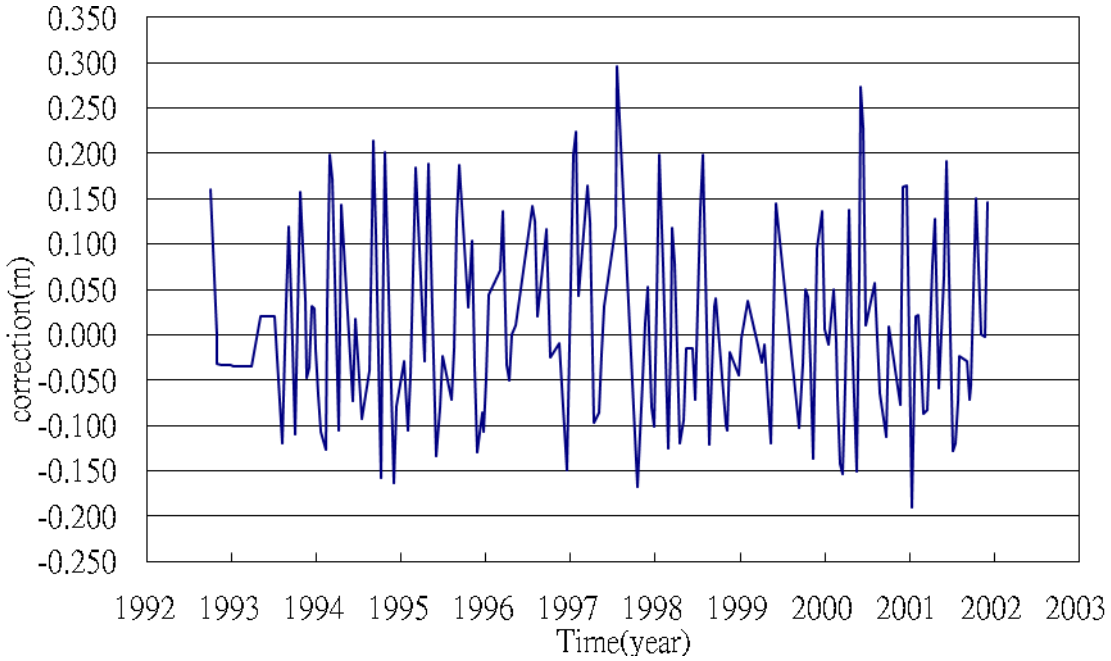


圖 4-7 唐古拉山（bin16） 地球固體潮改正

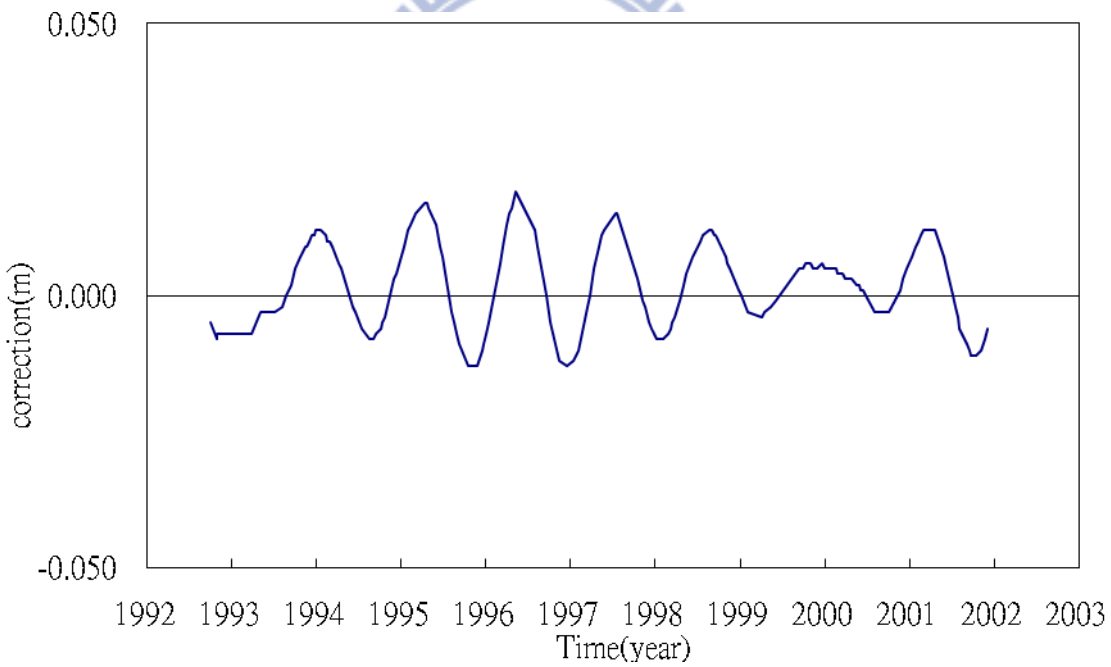


圖 4-8 唐古拉山（bin16） 極潮改正

4-3 波形重定改正量

因唐古拉山平均海拔 5500～6000 公尺，終年積雪，故採用較適合冰棚研究（Lee et al. 2008）的門檻值演算法（Threshold 50%）進行波形重定。改正量比較如表 4-2，改正前後高程比較如圖 4-9～圖 4-14，改正量平均分布在 -5～8 公尺之間，但也有少部份達到 40 公尺，顯示此處波形較複雜，可能是造成計算成果精度不佳的原因之一，高程變化的範圍在 5000～5900 公尺，3 個 Cases 高程變化差不多，差別僅在資料點的多寡。由表 4-3 可知，經過波形重定後高程資料的標準差變小，代表此波形重定改正減小了高程變化的差值。

表 4-2 唐古拉山波形重定改正量之比較

	Case1	Case2	Case3
最小值	-13.201	-15.927	-15.927
最大值	42.502	43.818	44.282
差值	55.703	59.745	60.209
平均值	1.487	5.996	7.255
標準差	9.548	10.297	11.434

單位:m

表 4-3 唐古拉山波形重定改正前後高程之比較

	Case1		Case2		Case3	
	改正前高程	改正後高程	改正前高程	改正後高程	改正前高程	改正後高程
最小值	5061.518	5023.853	5061.010	5021.208	5061.010	5021.208
最大值	9299.647	9260.687	9350.536	9311.591	11891.852	11896.935
差值	4238.130	4236.834	4289.527	4290.383	6830.842	6875.727
平均值	5599.637	5598.150	5587.771	5581.864	5541.653	5534.398
標準差	453.110	451.324	455.541	453.967	492.010	491.087

單位:m

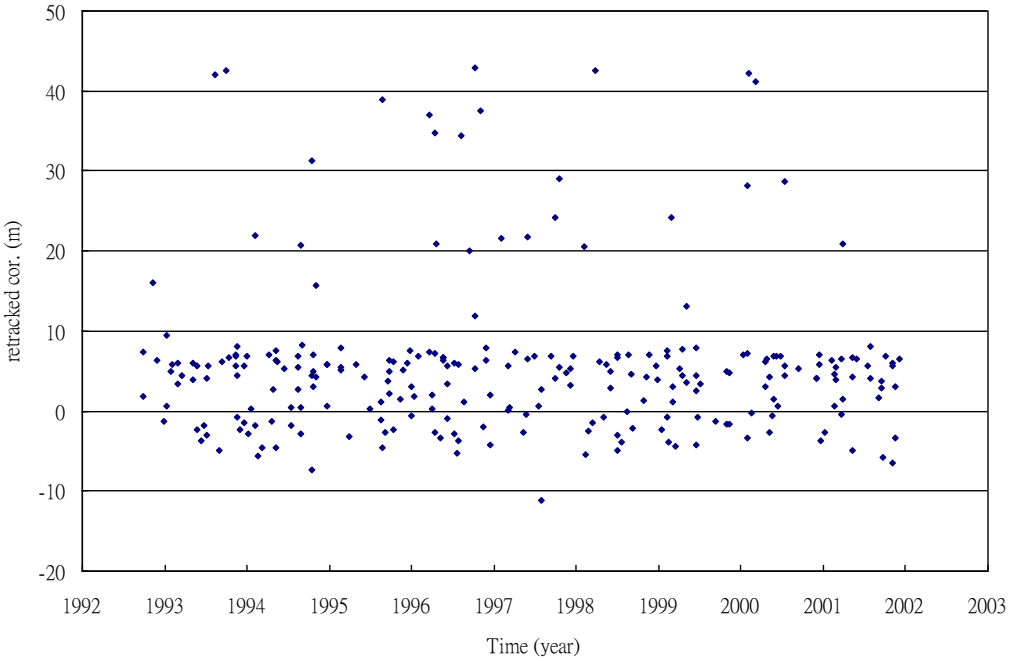


圖 4-9 唐古拉山（bin16）波形重定改正量（Case1）

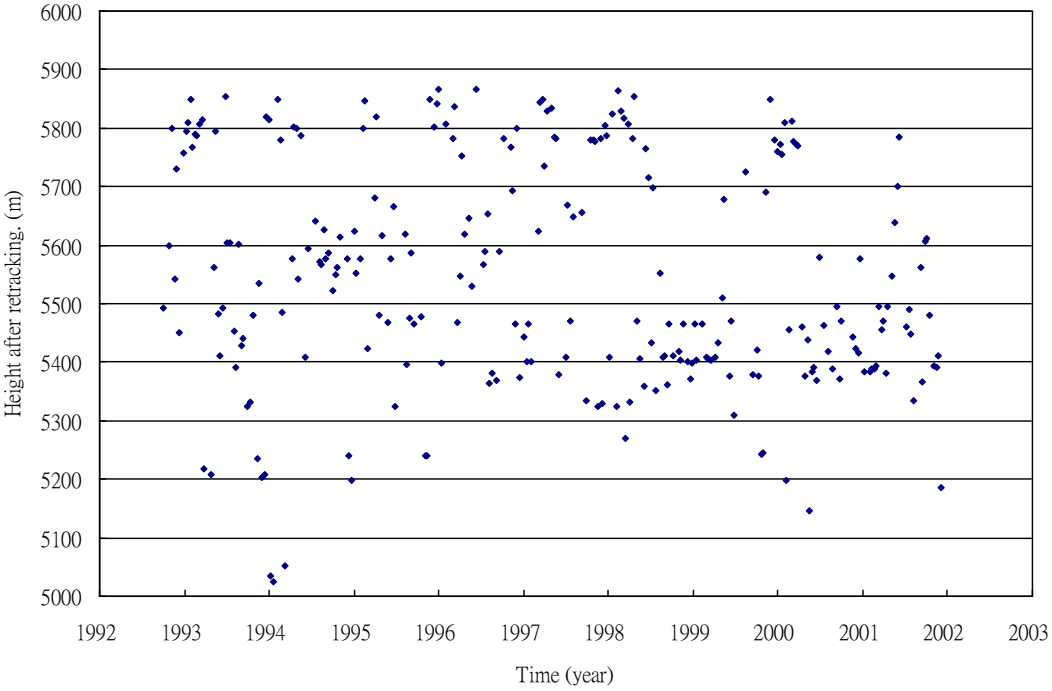


圖 4-10 唐古拉山（bin16）波形重定後之高程變化（Case1）

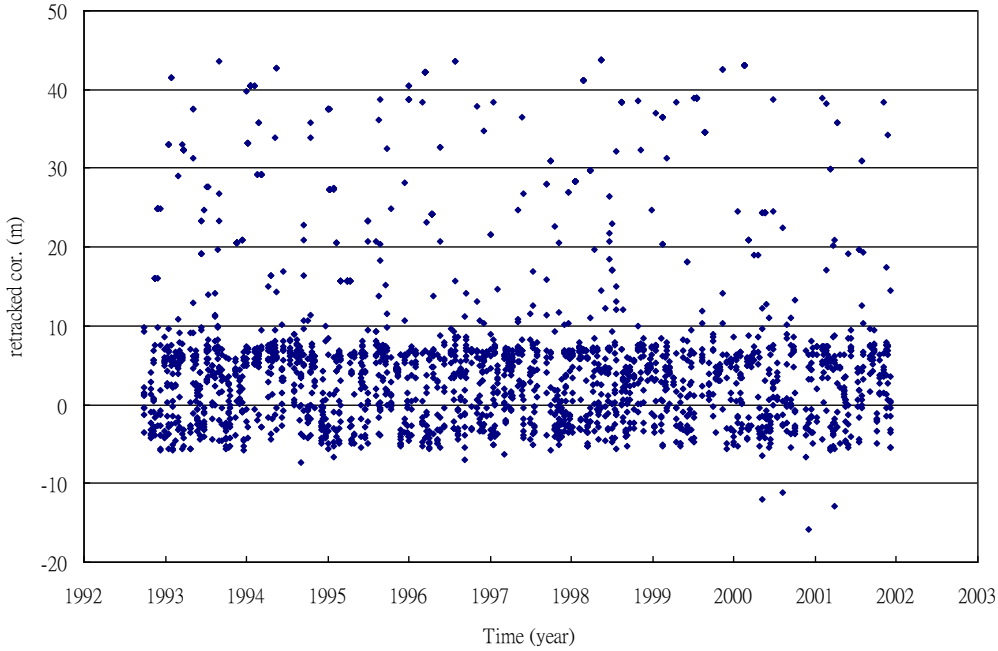


圖 4-11 唐古拉山（bin11～bin20）波形重定改正量（Case2）

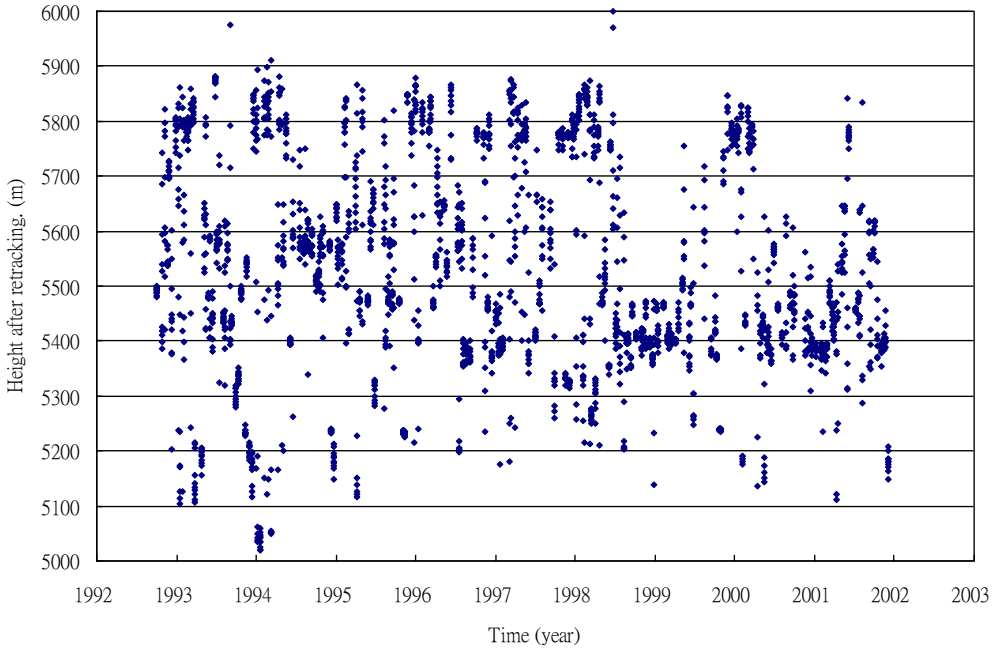


圖 4-12 唐古拉山（bin11～bin20）波形重定後之高程變化（Case2）

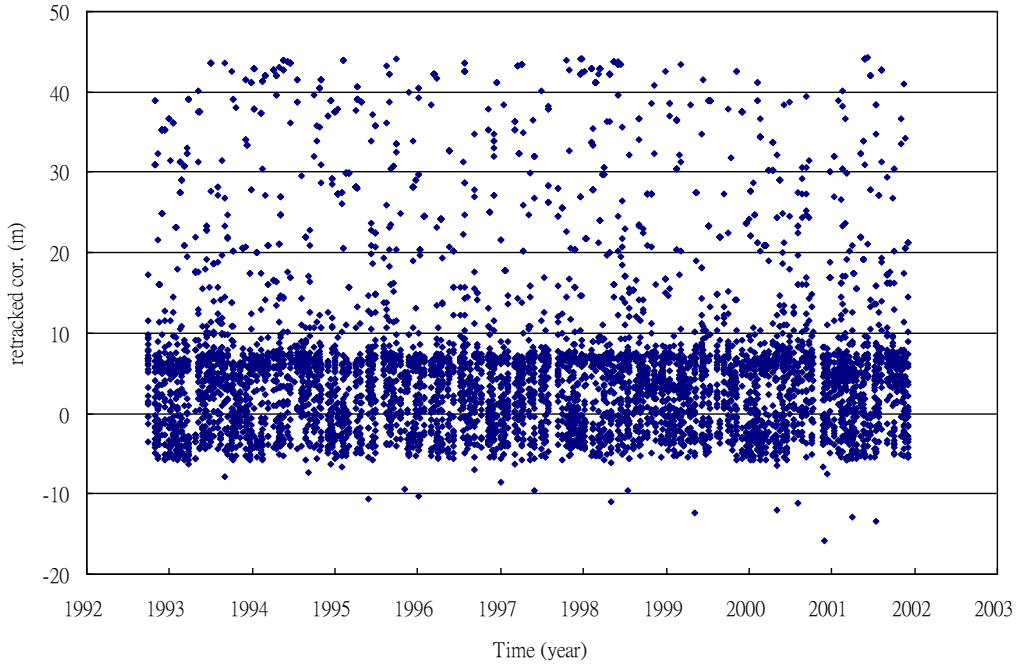


圖 4-13 唐古拉山（bin01～bin28）波形重定改正量（Case3）

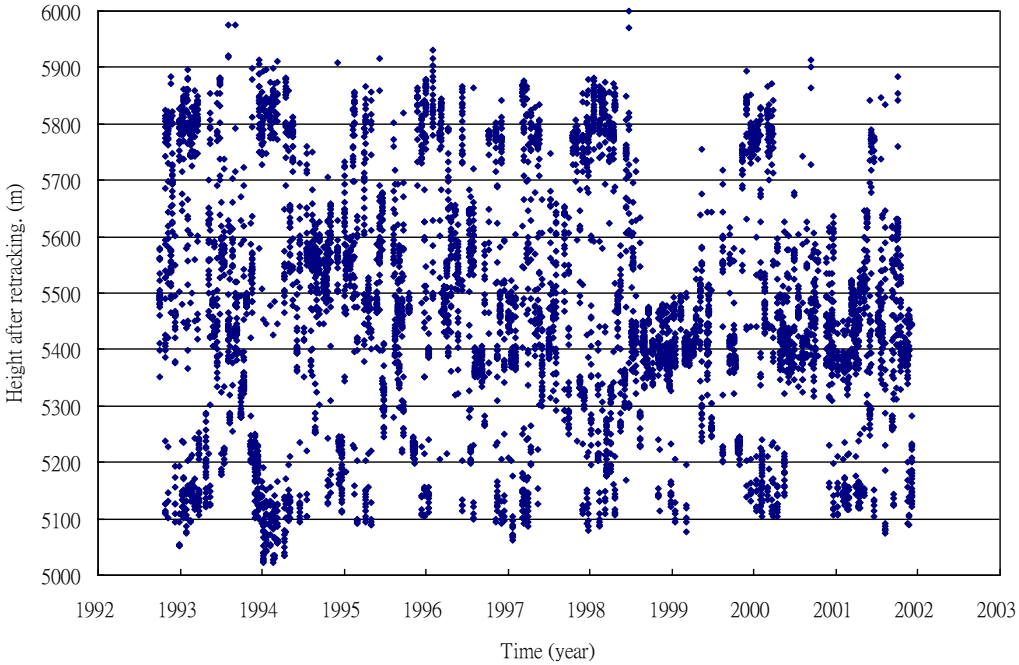


圖 4-14 唐古拉山（bin01～bin28）波形重定後之高程變化（Case3）

4-4 坡度改正量

本研究選用 90 公尺之 SRTM 模型利用 ArcGIS 作最大坡度的內插計算，將結果化算成一網格資料，再利用內插求得各點位的坡度，代入式 3-4-5 求出坡度修正量。唐古拉山的坡度改正量及坡度比較如表 4-4，可以看得出來 Case1 坡度最大達到 30.974 度，最小也有 1.925 度，改正量最大達 190950.774 公尺，Case2 及 Case3 坡度最大甚至達到 46.458 度，改正量最大達 416819.113 公尺，這些數據不僅顯示此區為地形起伏很大的山區，也表示此坡度改正的公式在這個區域不可行，我們將坡度及坡度改正量的關係用式 3-4-5 計算出來並作圖如圖 4-15，可知當坡度為 2 度，坡度改正量約為 1 公里，坡度為 3 度，坡度改正量約為 2 公里，但此區各點經內差計算的坡度平均值為 6.223 度（Case1）～12.246 度（Case3），且表 4-5 為 3 種 Case 各坡度範圍的點數分佈，Case1 坡度在 2 度以下的點只有 4 點，Case3 也只有 141 點，大部分點位集中在 2～10 度的範圍內，但如此改正量就將大於 1 公里，並無助於減小高程標準差，故在此區域暫不作此坡度改正。

表 4-4 唐古拉山坡度改正量及坡度之比較

	Case1		Case2		Case3	
	坡度改正量(m)	坡度(°)	坡度改正量(m)	坡度(°)	坡度改正量(m)	坡度(°)
最小值	756.000	1.925	93.190	0.676	93.190	0.676
最大值	190950.774	30.974	416819.113	46.458	416819.113	46.458
差值	190194.774	29.049	416725.923	45.782	416725.923	45.782
平均值	16893.899	6.223	38279.266	10.538	44267.176	12.246
標準差	40283.628	6.744	59322.312	8.934	53658.008	8.375

單位:m

表 4-5 唐古拉山各 Case 坡度範圍之點數分布

	Case1	Case2	Case3
0～2 度	4	73	141
2～10 度	213	1543	3013
10～20 度	19	477	2033
20～30 度	15	351	1075
30 度以上	3	98	198

單位:點

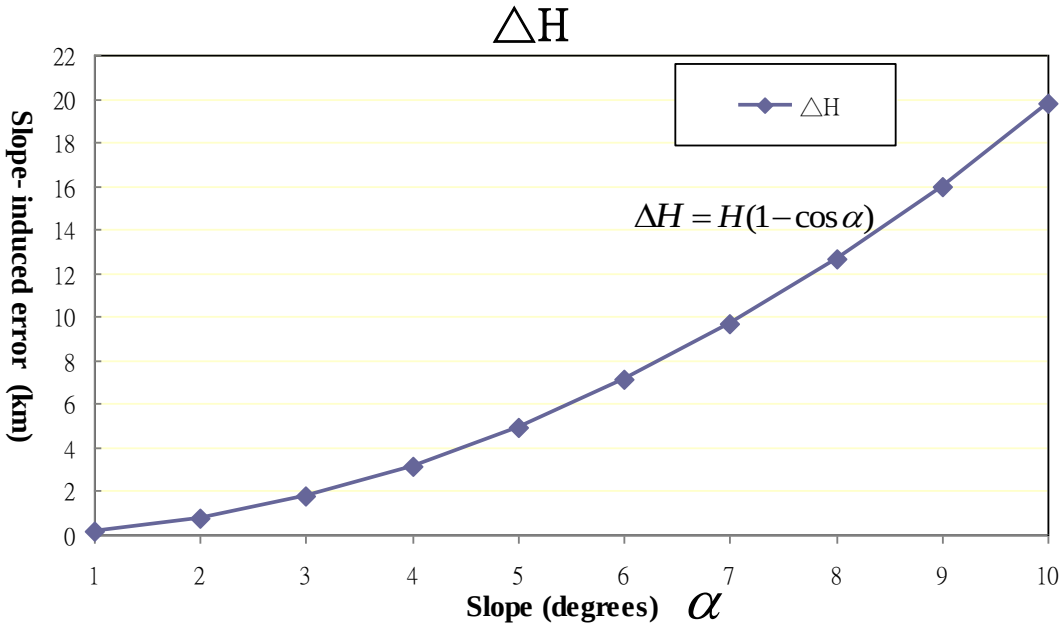


圖 4-15 坡度與坡度改正量之關係圖

4-5 地形梯度改正

唐古拉山採用 SRTM 任務解算之 DEM 及由測高資料產生之 DEM 做為改正模型，分為以下四種模型進行內插求取各點位及中間點的模型高程。

（1） SRTM 數據主要是由美國太空總署(NASA)和國防部國家測繪局(NIMA)聯合測量，進而化算出 90 公尺之 SRTM DEM（資料來源：http://srtm.csi.cgiar.org/），網格大小為 3’（圖 4-16）：Case1-1、Case2-1、Case3-1

（2） 將選取範圍內的測高數據經 GMT 軟體進行內插加細製成網格檔，再用最小曲率法及諧函數平滑面法化算出一個表面，網格大小為 1’，再使用高斯濾波，單窗大小 0.15 公里，網格大小為 1’，生成一個新的表面，此為最接近原本測高數據的表面（surface1） （圖 4-17）：Case1-2、Case2-2、Case3-2

（3） 作法同上，單窗大小改為 0.3 公里，生成較 surface1 平滑的表面（surface2） （圖 4-18）：Case1-3、Case2-3 、Case3-3

（4） 作法同 surface1，單窗大小改為 0.7 公里，生成最平滑的表面（surface3）（圖 4-19）：Case1-4、Case2-4、Case3-4

值得一提的是，由於（2）～（4）生成的表面是根據測高數據重新計算所得，故只要是沒有測高數據的地方，都是根據外插而來，其結果較不精確，相反的，有測高數據的位置，因為測高衛星擁有連續十年重複觀測的資料，理論上會比 SRTM 只有一次觀測的資料還要準確，所以本研究利用這三種模型對測高數據做地形梯度改正並比較之。

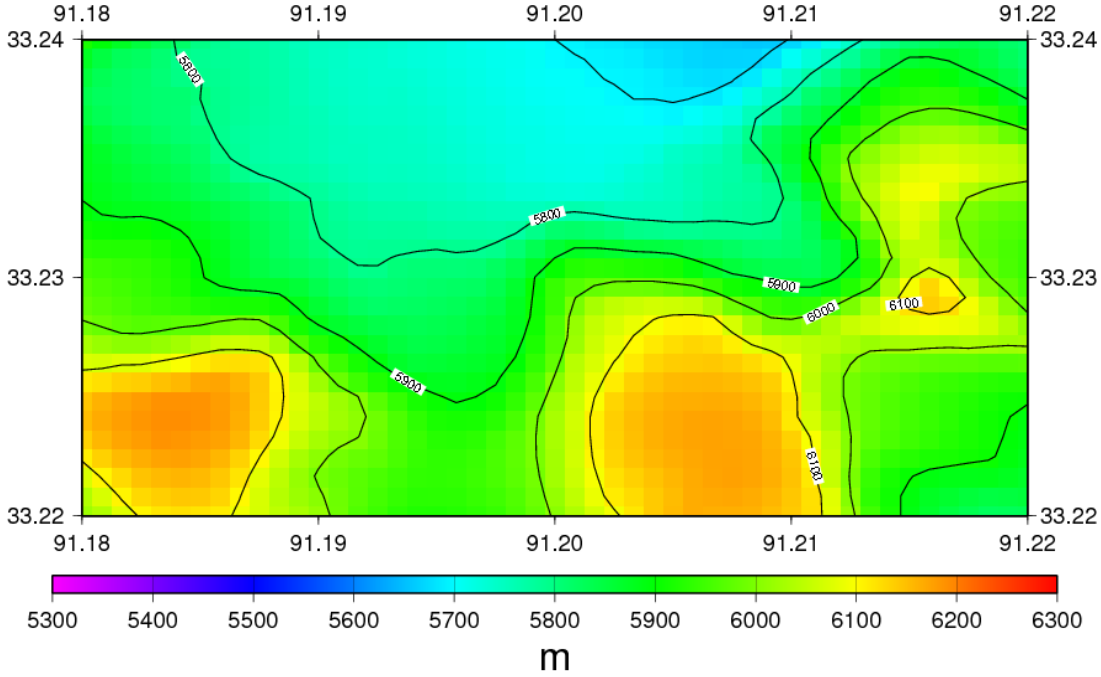


圖 4-16 90 公尺之 SRTM DEM

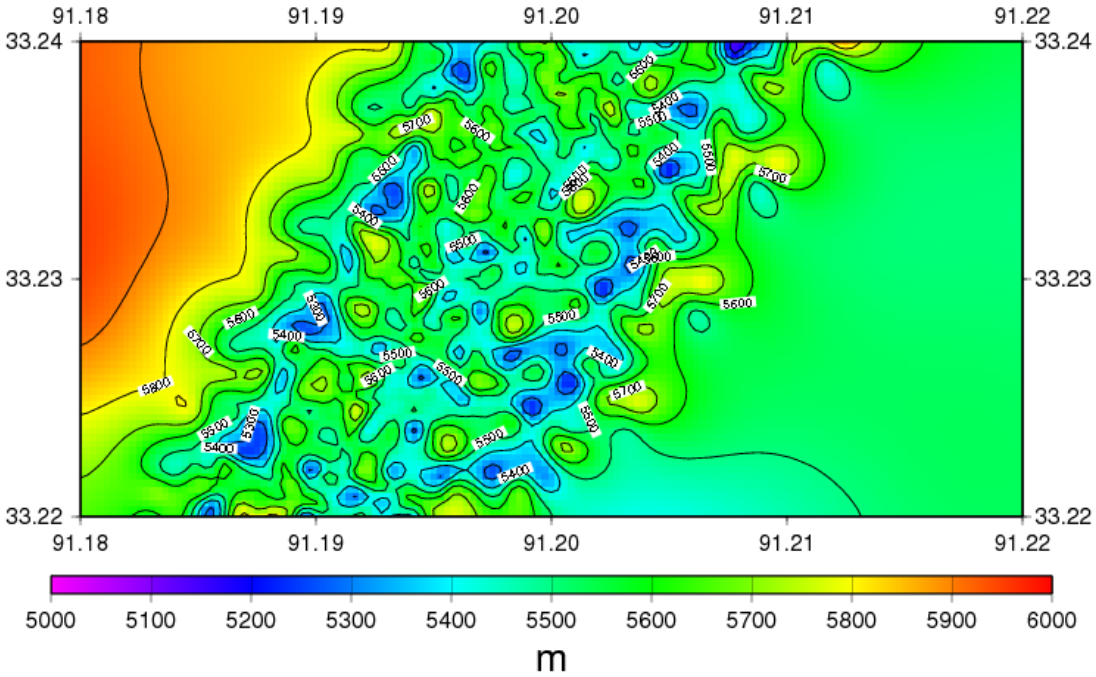


圖 4-17 surface1，單窗大小為 0.15 公里。

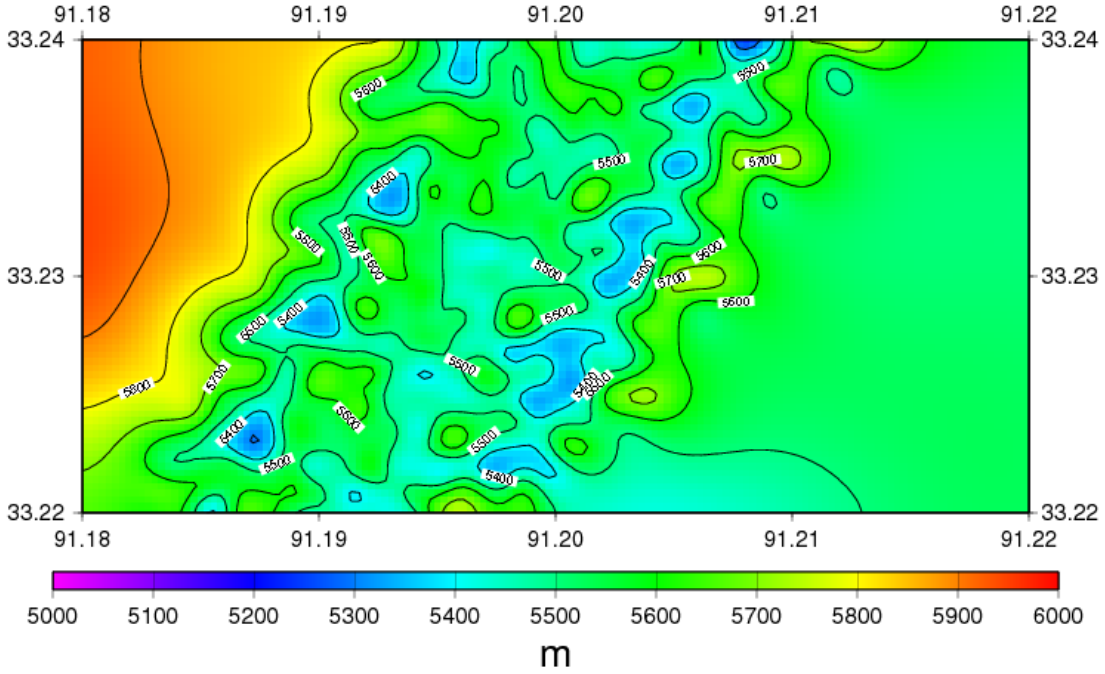


圖 4-18 surface2, 罩窗大小為 0.3 公里。

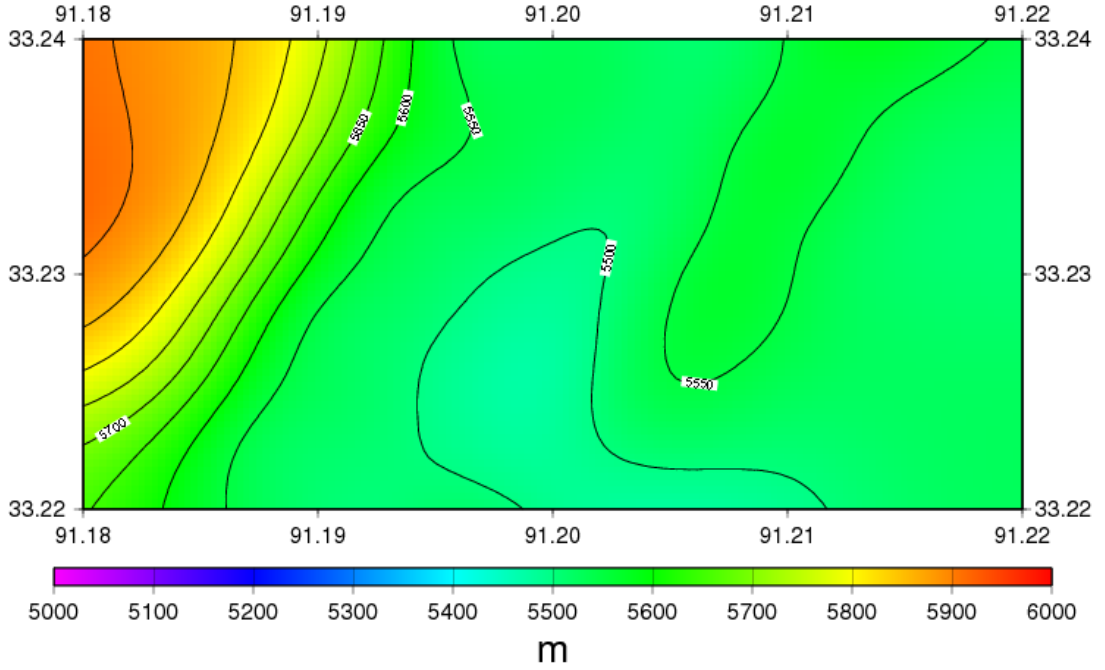


圖 4-19 surface3, 罩窗大小為 0.7 公里。

圖 4-20 及圖 4-21 為 Case1、Case3 之地形梯度改正量比較，可以看得出來 Case1 因為資料範圍只有一個 bin，故地形梯度改正量的範圍也較小，Case3 因為選取範圍多達 28 個 bin，故這項改正量的範圍會很大。而由圖 4-22 可知，使用（1）模型，點位明顯集中在一些特定的區域，可以解讀為 SRTM 模型因為解析

度較低，有些特定地區與實際的地形較不一致，可能實際地形有一個凸起小山丘，但礙於解析度較低的緣故，SRTM 模型無法忠實呈現。故在做地形梯度改正時，就比較沒辦法把起伏較大的點位改正回來。而（2）～（4）的點位相較之下分布較均勻，這對於最後做高斯濾波時，可能會較有幫助，不會因為某些點位很密集就影響到 filter 的成果。由圖 4-23 及圖 4-24，可以發現點位較多的時候，稍微能夠看出高程趨勢走向。

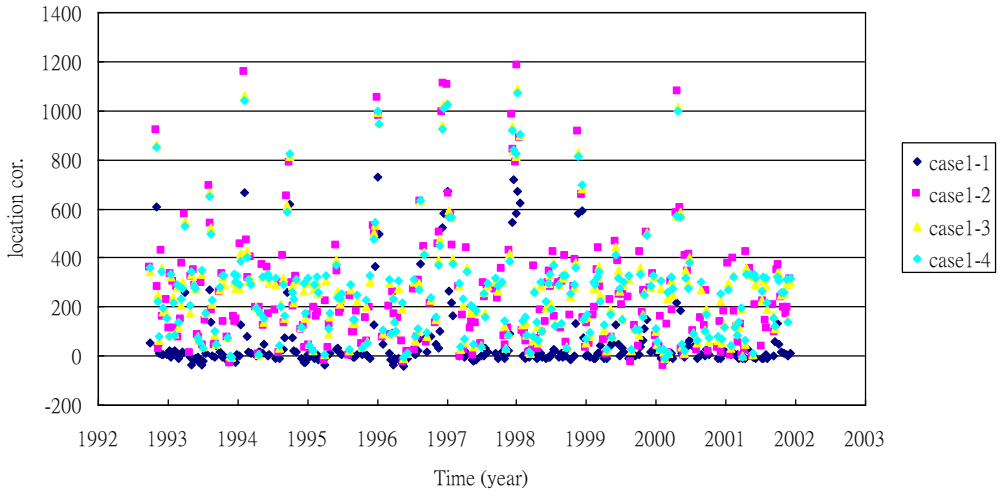


圖 4-20 唐古拉山（bin16）4 種模型地形梯度改正量之比較（Case1）

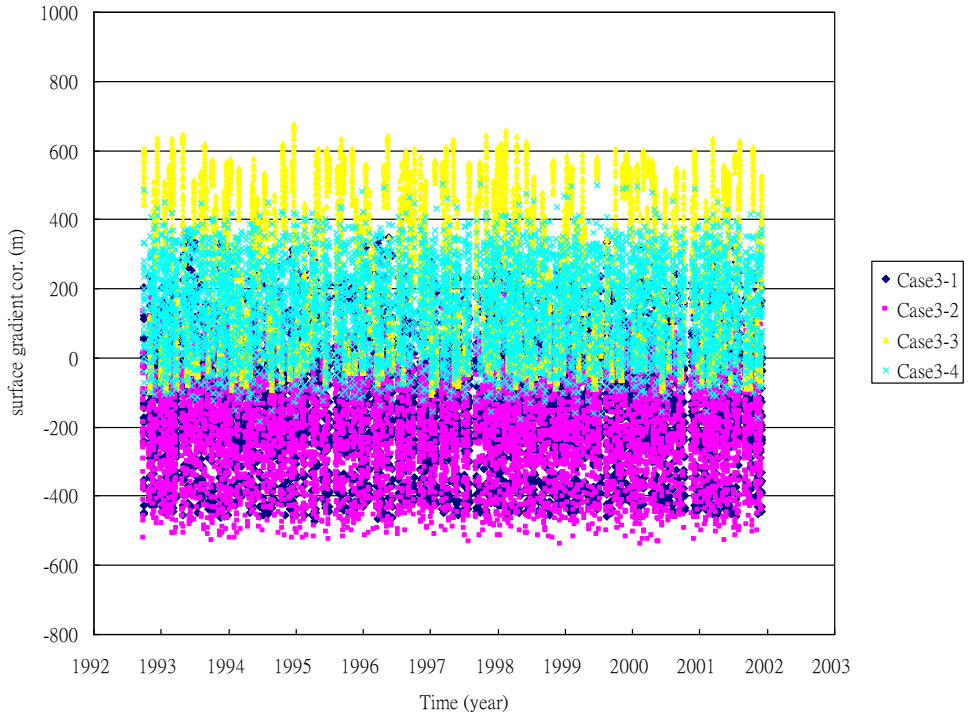


圖 4-21 唐古拉山（bin01～bin28）4 種模型地形梯度改正量之比較（Case3）

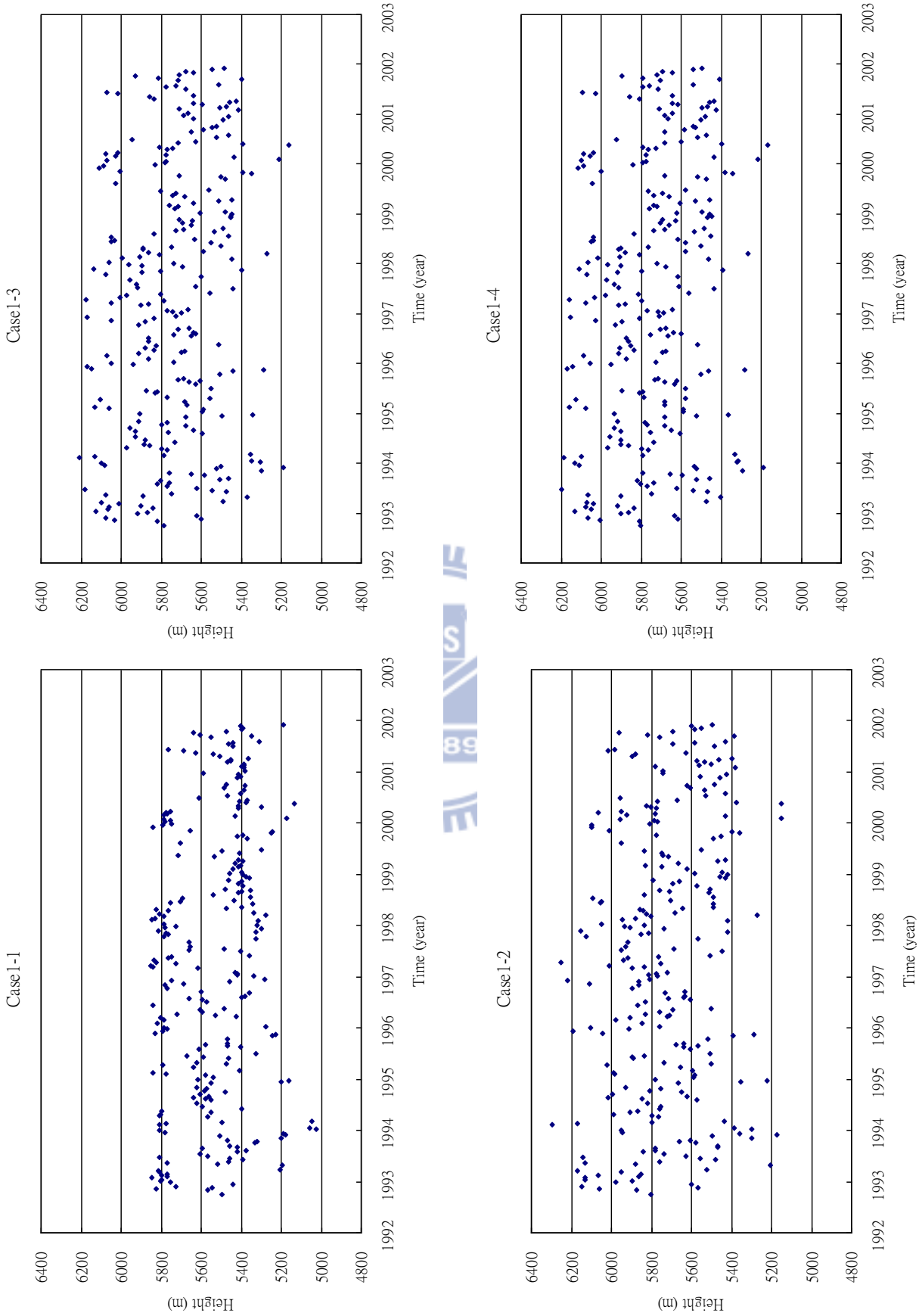


圖 4-22 唐古拉山（bin16）經地形梯度改正後之高程變化圖（Case1）

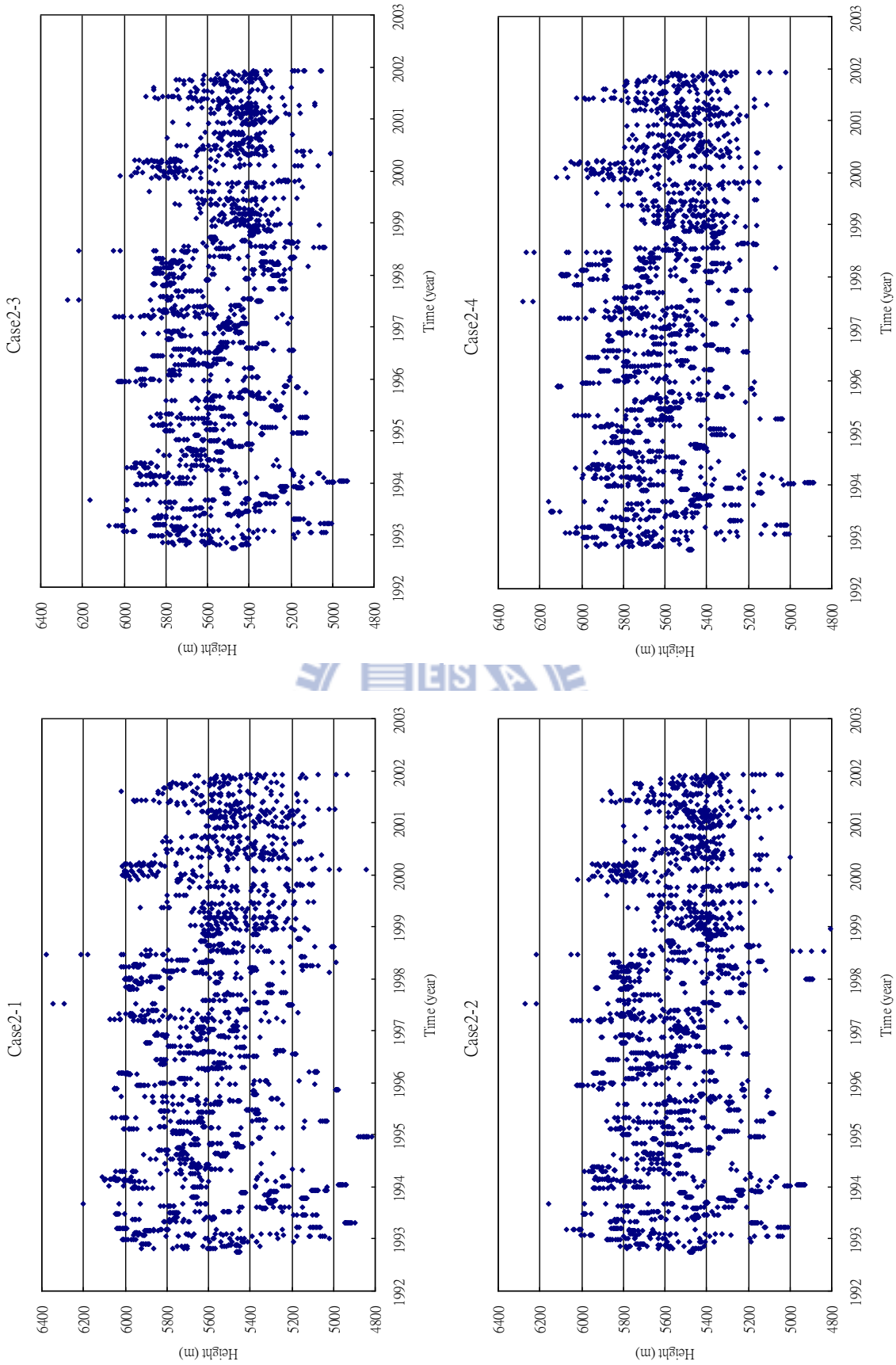


圖 4-23 唐古拉山（bin11～bin20）經地形梯度改正後之高程變化圖（Case2）

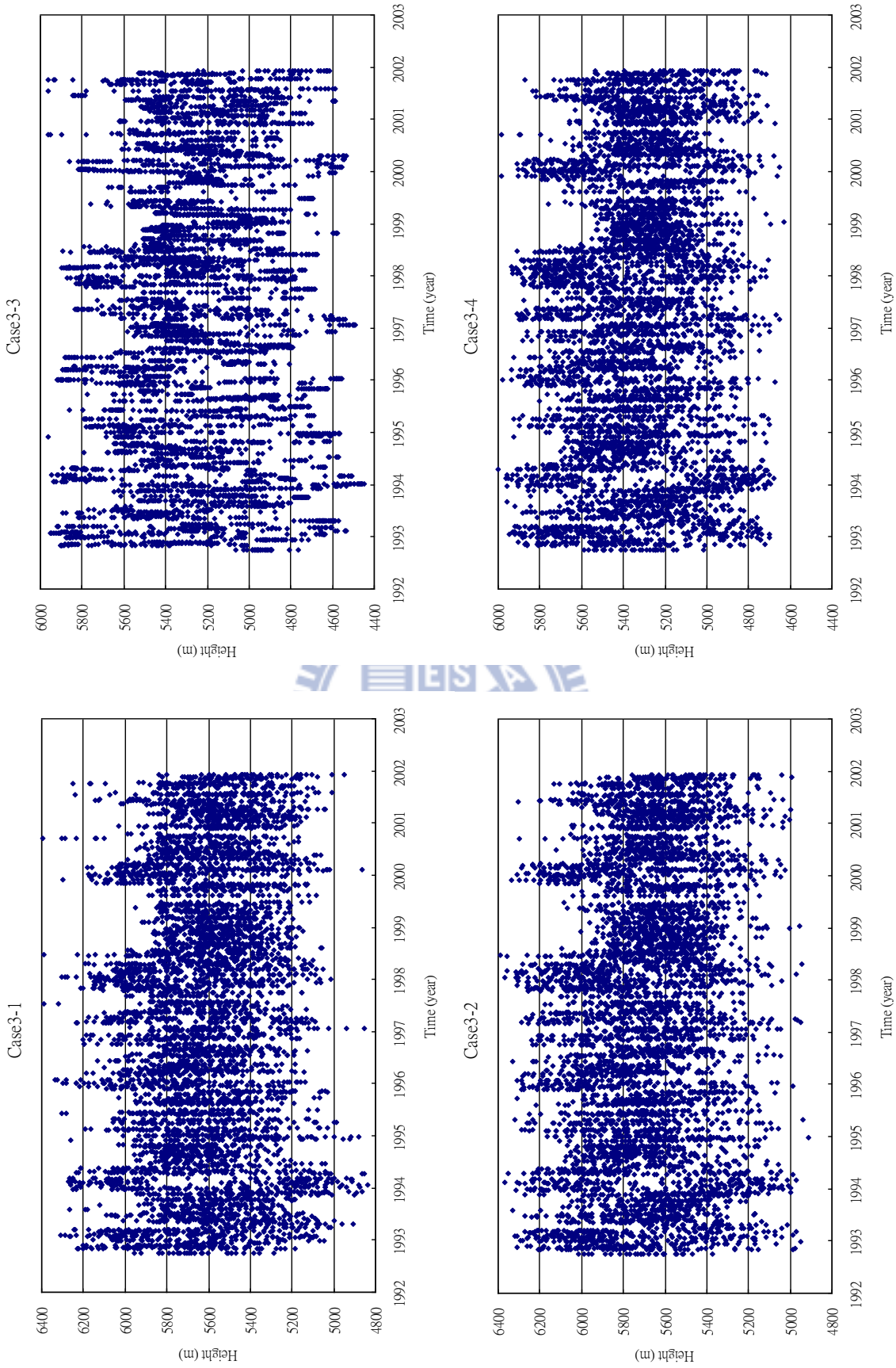


圖 4-24 唐古拉山（bin01～bin28）經地形梯度改正後之高程變化圖（Case3）

表 4-6 為此 12 種 Case 地形梯度改正量比較，在 Case1 裡，比較四種不同模型的改正，Case1-1 是改正範圍最小的，Case1-2 為最大，因其表面高低起伏最大所導致，在 Case2 裡，同樣是以 SRTM 為模型的 Case2-1 改正量差值最小，其他三種改正量甚至達到 10047 公尺，估計是同一粗差值所導致，這樣的結果並還未作粗差剔除，所以才會出現較離譜的數據。在 Case3 中，以 Case3-2 的改正量範圍為最小，Case3-1 次之。我們亦可由圖 4-21 稍稍看出各模型的改正量範圍分布，Case3-2 改正量分布較低介於-500～200 之間，多為負值，Case3-3 的改正量較大，介於 -100～600 公尺之間。接著，比較修正後高程之標準差（表 4-7），Case1 中以 Case1-1 的標準差 451.926 公尺為最小；Case2 中，則是 Case2-3 的標準差 469.133 公尺為最小，Case2-1 的 524.762 公尺相對較大，推測是因粗差所導致，因其高程最大值為 12098.037 公尺；Case3 裡，還是以 Case3-1 的標準差 493.032 公尺最小。所有 Case 中，標準差 Case3-3 的 539.490 公尺為最大。

表 4-6 唐古拉山各 Case 之地形梯度改正量

	最小值	最大值	差值	平均值	標準差
Case1-1	-121.470	36.239	157.708	-10.051	**22.216**
Case1-2	-48.810	449.671	498.481	181.264	135.715
Case1-3	-19.277	371.605	390.882	191.558	191.558
Case1-4	-20.199	351.479	371.678	194.288	113.336
Case2-1	-256.804	383.568	640.373	-41.923	**146.772**
Case2-2	-263.412	10042.725	10306.137	14.455	426.313
Case2-3	-237.433	10047.865	10285.298	11.332	419.942
Case2-4	-309.811	9928.047	10237.858	-46.281	425.669
Case3-1	-471.284	359.990	831.274	-139.875	166.938
Case3-2	-538.600	233.964	772.564	-212.428	**143.956**
Case3-3	-105.375	10612.165	10717.540	234.081	399.102
Case3-4	-185.163	10201.151	10386.314	153.913	349.570

單位:m

表 4-7 唐古拉山各 Case 做地形梯度改正後高程之比較

	最小值	最大值	差值	平均值	標準差
Case1-1	5027.115	9265.507	4238.392	5588.099	**451.926**
Case1-2	5148.217	9498.803	4350.586	5779.414	465.200
Case1-3	5160.611	9543.993	4383.382	5789.707	463.537
Case1-4	5168.094	9550.715	4382.621	5792.438	463.782
Case2-1	4813.802	12098.037	7284.235	5628.842	524.762
Case2-2	1160.307	9461.036	8300.729	5572.465	473.998
Case2-3	1155.167	9459.460	8304.293	5575.588	**469.133**
Case2-4	1274.985	9560.508	8285.523	5633.200	474.490
Case3-1	1107.704	9699.187	8591.483	5663.437	**493.032**
Case3-2	1222.330	9755.189	8532.860	5735.990	499.592
Case3-3	539.401	9346.371	8806.970	5300.317	539.490
Case3-4	949.186	9498.334	8549.148	5380.485	500.512

單位:m

4-6 粗差剔除

使用誤差三倍後驗標準差將粗差剔除後結果如表 4-8，各 Case 中分別以 Case1-1 的標準差 193.463 公尺，Case2-3 的標準差 221.017 及 Case3-1 的標準差 255.168 公尺為最小，值得一提的是 Case2 中，以 SRTM 為模型的 Case2-1 標準差是最大的，顯示由測高數據擬合而成的表面是有參考價值的。所有 Cases 中，標準差最大的是 Case3-3 的 310.148 公尺。

表 4-8 唐古拉山粗差剔除後高程變化之比較

	最小值	最大值	差值	平均值	標準差
Case1-1	5027.115	5852.376	825.261	5536.676	**193.463**
Case1-2	5148.217	6297.863	1149.645	5728.678	231.647
Case1-3	5160.611	6205.859	1045.248	5738.645	223.829
Case1-4	5168.094	6195.976	1027.883	5741.357	224.096
Case2-1	4813.802	6345.378	1531.576	5573.102	265.074
Case2-2	4892.692	6219.819	1327.127	5537.109	228.064
Case2-3	4930.212	6161.425	1231.213	5536.904	**221.017**
Case2-4	4920.314	6263.894	1343.580	5597.066	226.745
Case3-1	4855.011	6337.160	1482.149	5619.009	**255.168**
Case3-2	4911.509	6443.817	1532.307	5690.953	261.701
Case3-3	4450.482	6155.158	1704.677	5253.142	310.148
Case3-4	4631.281	6108.560	1477.279	5335.330	265.034

單位:m

4-7 高斯濾波

對 12 種 Cases 作一年高斯濾波，結果如圖 4-25～圖 4-27，其中除了 Case3-3 的結果與其他 Cases 不太一致以外，其餘 Cases 的走勢大致接近。

表 4-9 為 12 種 Cases 做高斯濾波後的成果比較，發現 Case3 的標準差 57.661～68.696 公尺是 3 個 Cases 裡最小的，推測原因為資料範圍較大，點夠多，不容易因缺檔或粗差影響最後 filter 結果，故推論若要觀測大範圍的區域變化，且此區的地表起伏大，原始數據高差大，無法經由改正得到較好的結果時，建議較大範圍的選點，能使誤差減小。

觀察唐古拉山的高程變化，可發現在 1993～1998 年間，高程是往上的趨勢，1998 年後，除了有個突降外，趨勢漸往下。

表 4-9 唐古拉山高斯濾波後高程變化之比較

	最小值	最大值	差值	平均值	標準差
Case1-1	5408.466	5695.800	287.334	5538.033	**77.136**
Case1-2	5564.015	5913.879	349.865	5729.673	88.957
Case1-3	5569.673	5898.453	328.780	5739.697	83.013
Case1-4	5574.186	5897.502	323.316	5742.386	82.708
Case2-1	5411.689	5756.093	344.405	5571.908	86.043
Case2-2	5394.158	5686.149	291.991	5538.779	**82.931**
Case2-3	5389.144	5683.103	293.959	5538.526	84.371
Case2-4	5414.742	5759.719	344.977	5602.242	87.705
Case3-1	5501.717	5735.506	233.789	5618.876	**57.661**
Case3-2	5569.260	5815.463	246.203	5691.547	60.490
Case3-3	5106.771	5451.441	344.670	5254.238	68.696
Case3-4	5220.136	5461.569	241.433	5334.498	58.006

單位:m

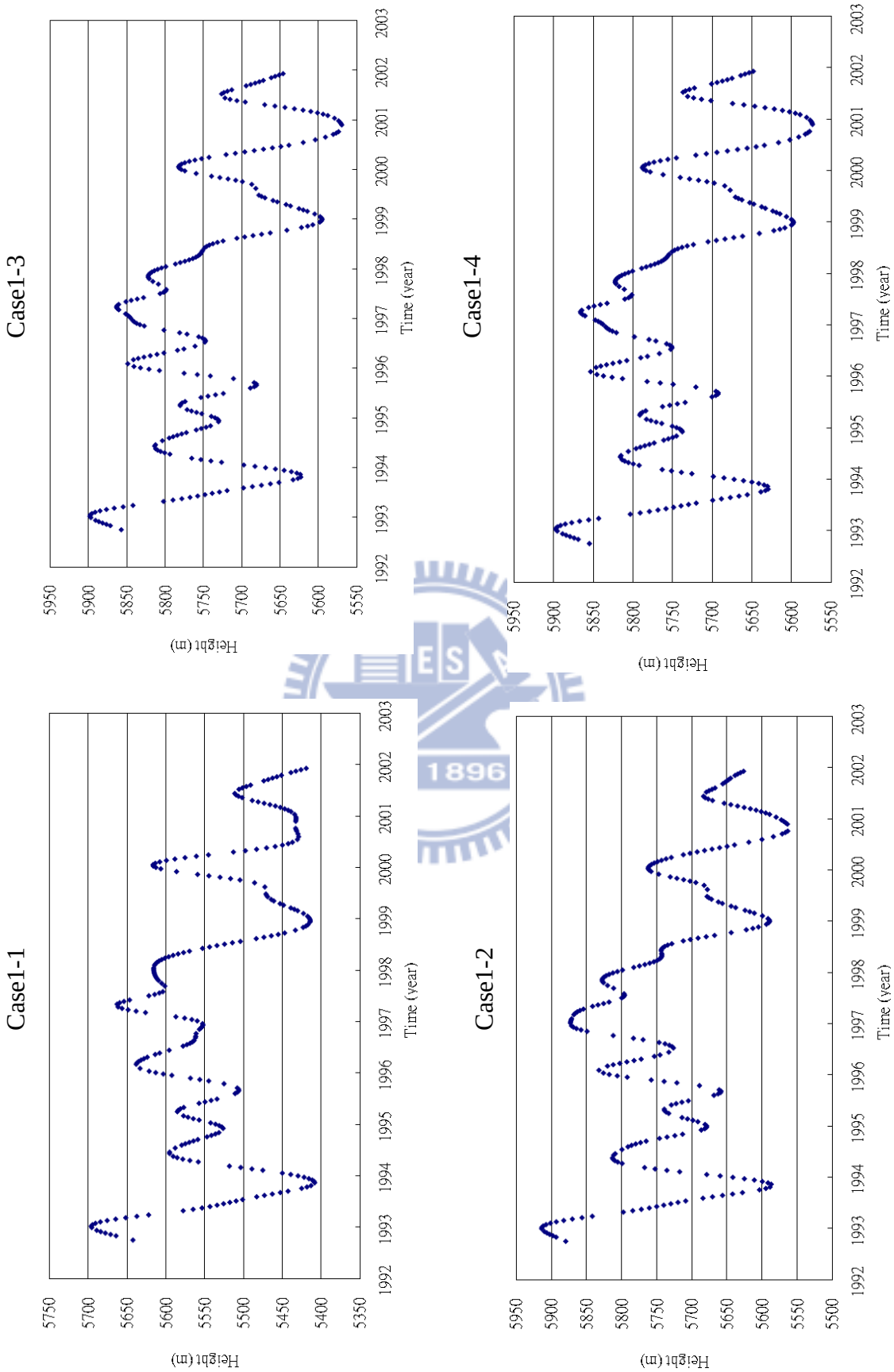


圖 4-25 唐古拉山（bin16）經高斯濾波後之高程變化圖（case1）

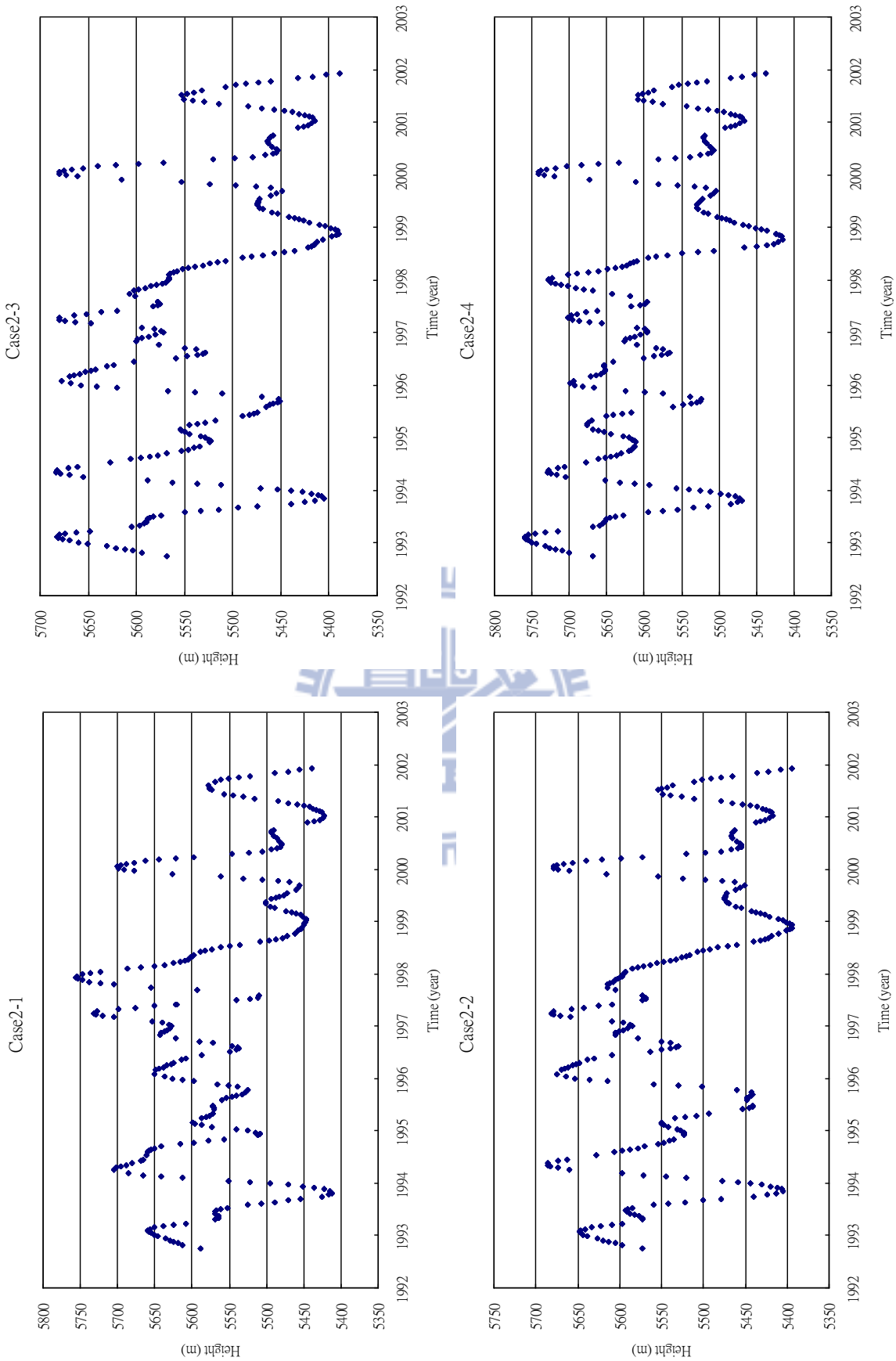


圖 4-26 唐古拉山（bin11～bin20）經高斯濾波後之高程變化圖（case2）

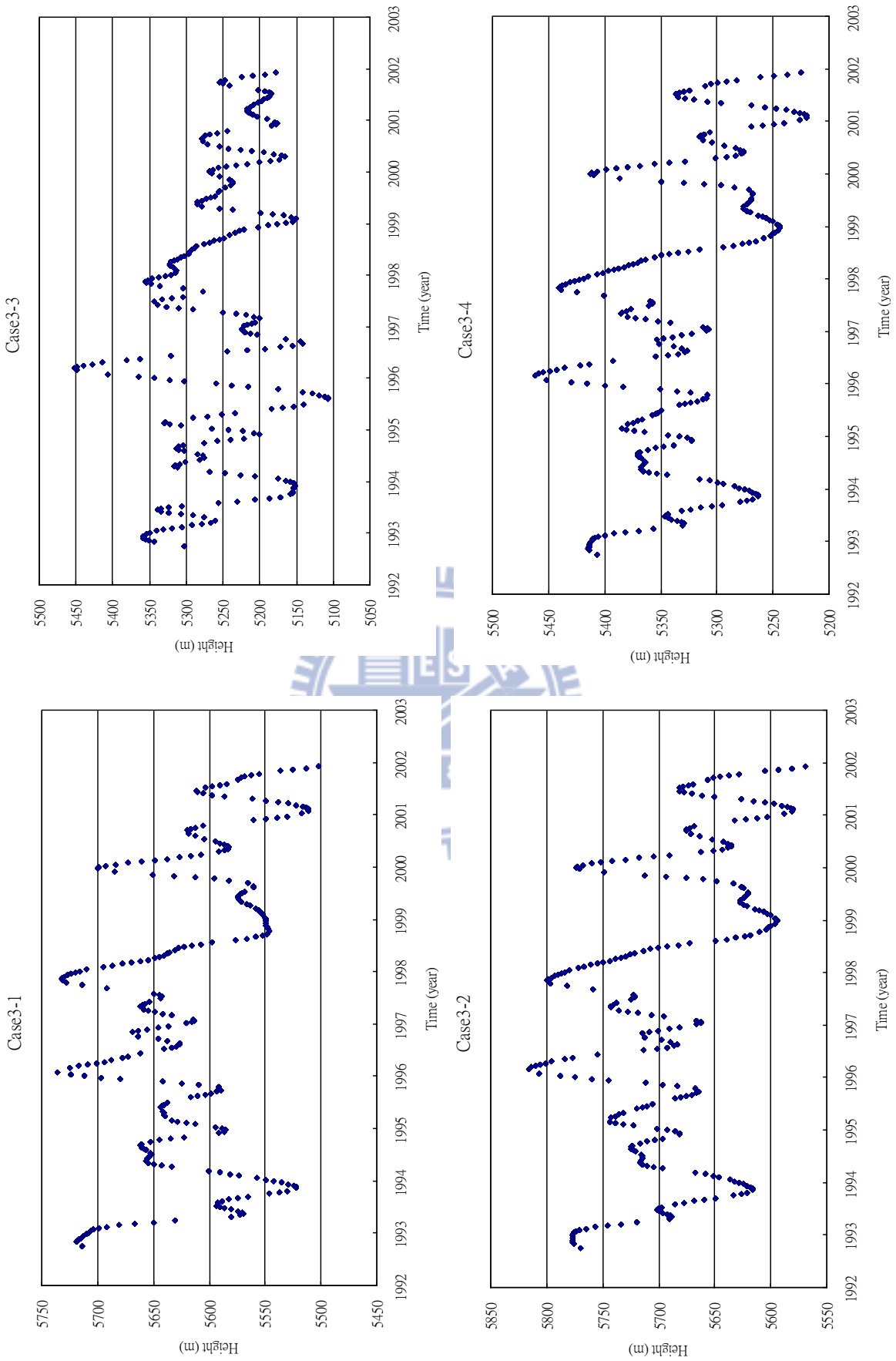


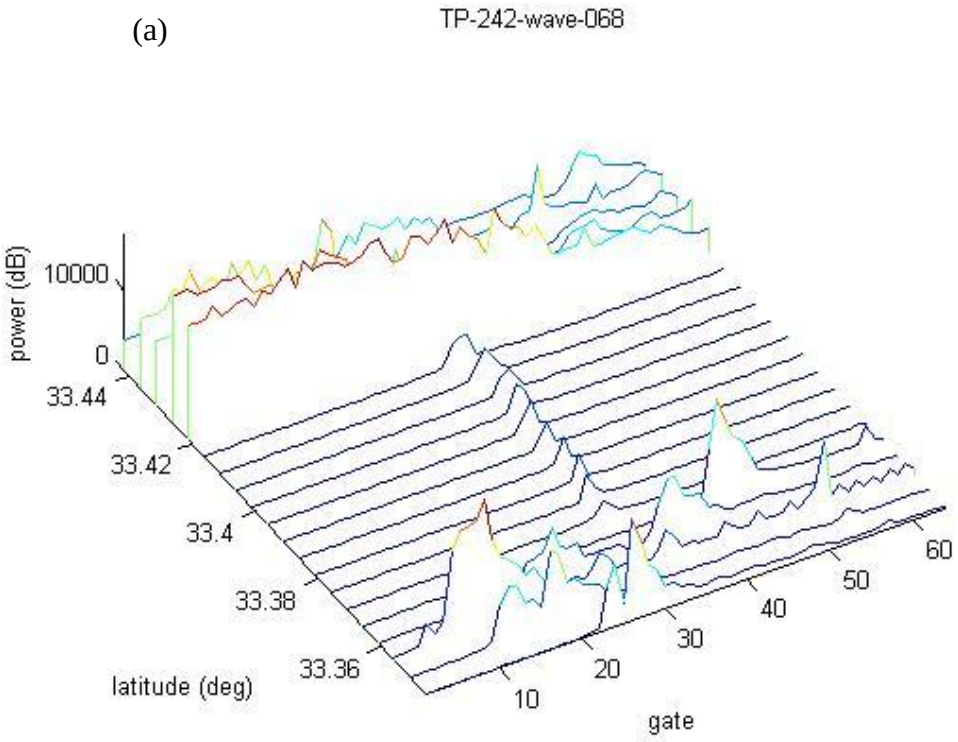
圖 4-27 唐古拉山（bin01～bin28）經高斯濾波後之高程變化圖（case3）

第五章 利用 T/P 及 Jason-2 測高資料監測赤布張錯湖水位變化

5-1 選點

分析 T/P 衛星 pass 242 在緯度 33.34 度～33.44 度的波形，此處列出 4 種不同週期的波形（圖 5-1），加以比較分析，圖 5-1(a)的波形在北緯 33.37 度之前及 33.42 度之後的波形較凌亂，推測原因為脈衝打到陸地所導致，圖 5-1(b)較接近海洋波形，推測此時湖面未結冰，且波形較好的區域在北緯 33.36 度～33.4 度之間，圖 5-1(c)在北緯 33.37 度～33.4 度之間的波形為 specular，可使用適合冰棚研究的波形重定法解算之，圖 5-1(d)在北緯 33.37 度之前的波形較差，北緯 33.37 度～33.39 度之間的波形僅有一個波峰，可以解算，北緯 33.39 度～33.42 度的波形多為不只一個波峰，較難使用波形重定法解算，北緯 33.42 度之後的波形維 specular，也是能夠解算的波形，綜合以上的分析，且此研究區域為湖面，應選擇最靠近湖中央的點，較不易受到淺灘或陸地的影響，因此選擇 bin05 點（經度 90.1395980 度，緯度 33.3824400 度）做為主要研究點位（Case1），亦選取 bin01～bin10 列入比較（Case2）（圖 5-2）。

(a)



(b)

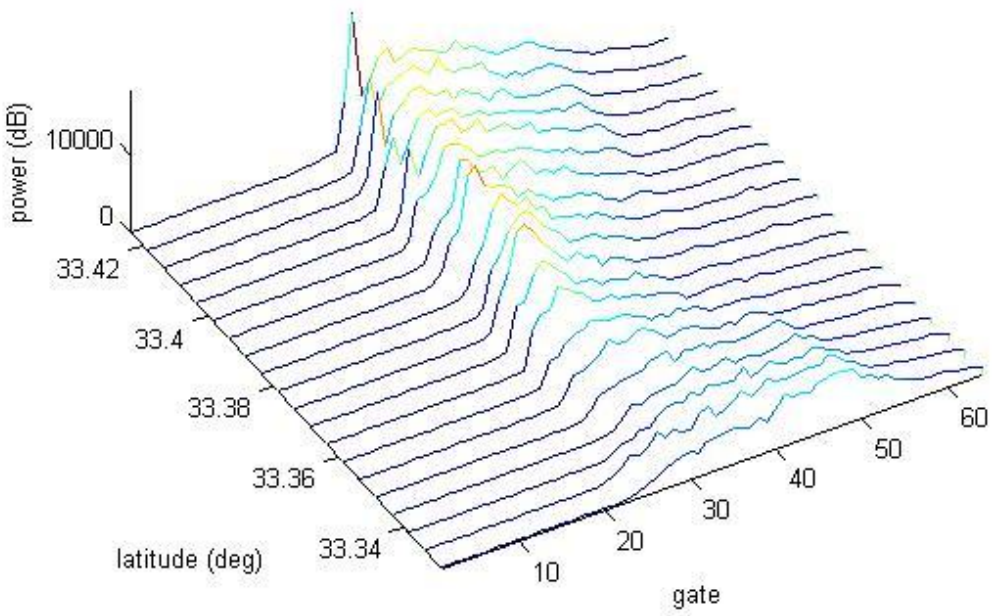
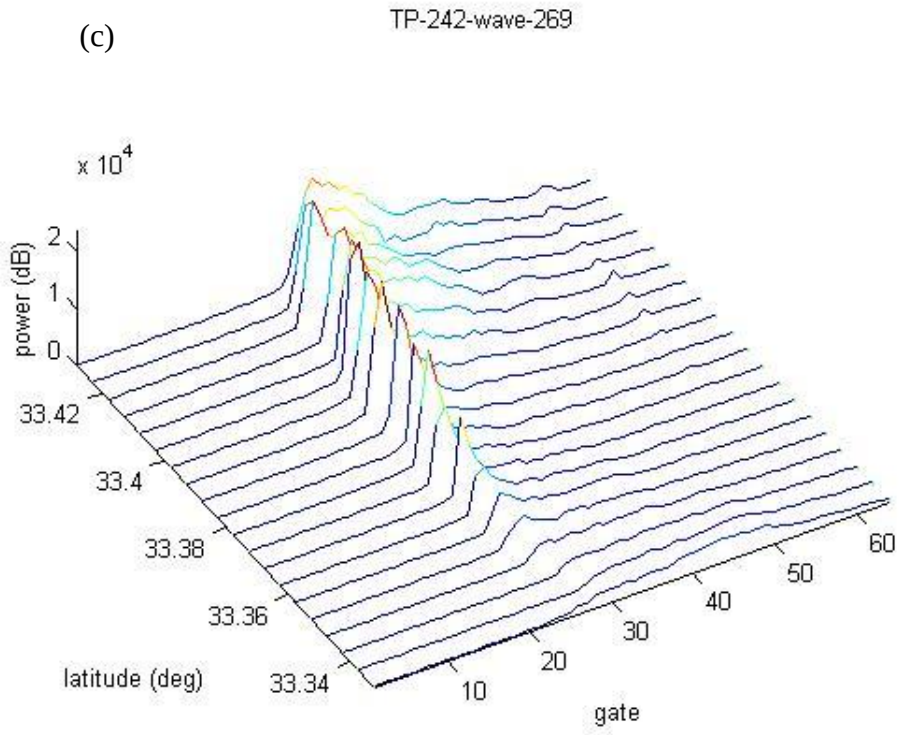


圖 5-1 赤布張錯附近波形 (a)為 T/P 軌道 242 第 68 週期之波形 (b)為第 92 週期之波形

(c)



(d)

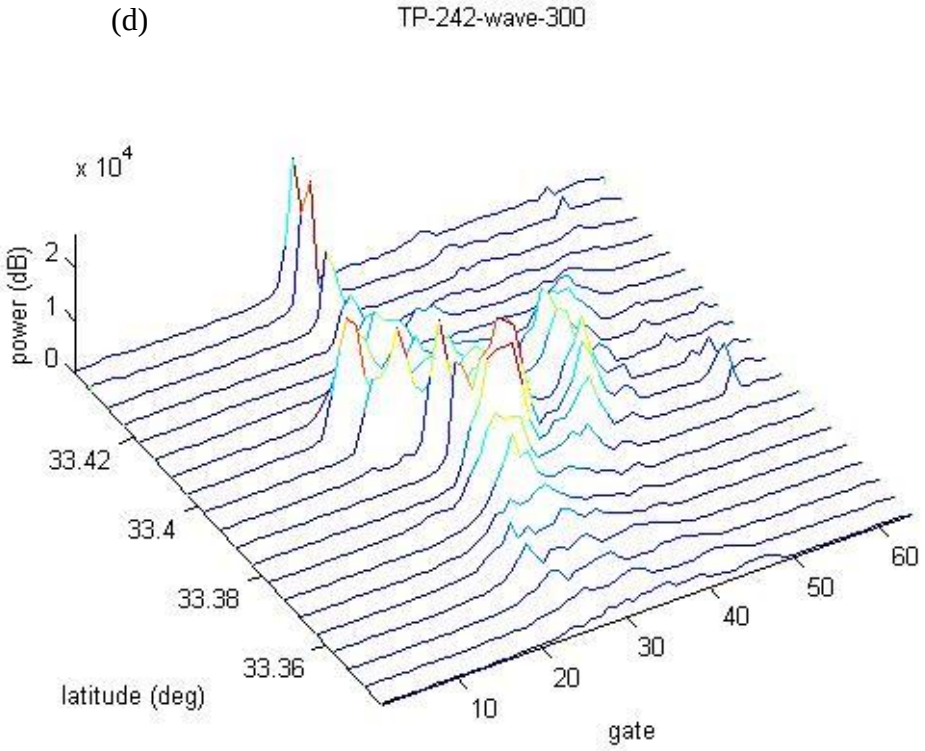


圖 5-1 赤布張錯附近波形（續） (c)為 T/P 軌道 242 第 269 週期之波形 (d)為第 300 週期之波形

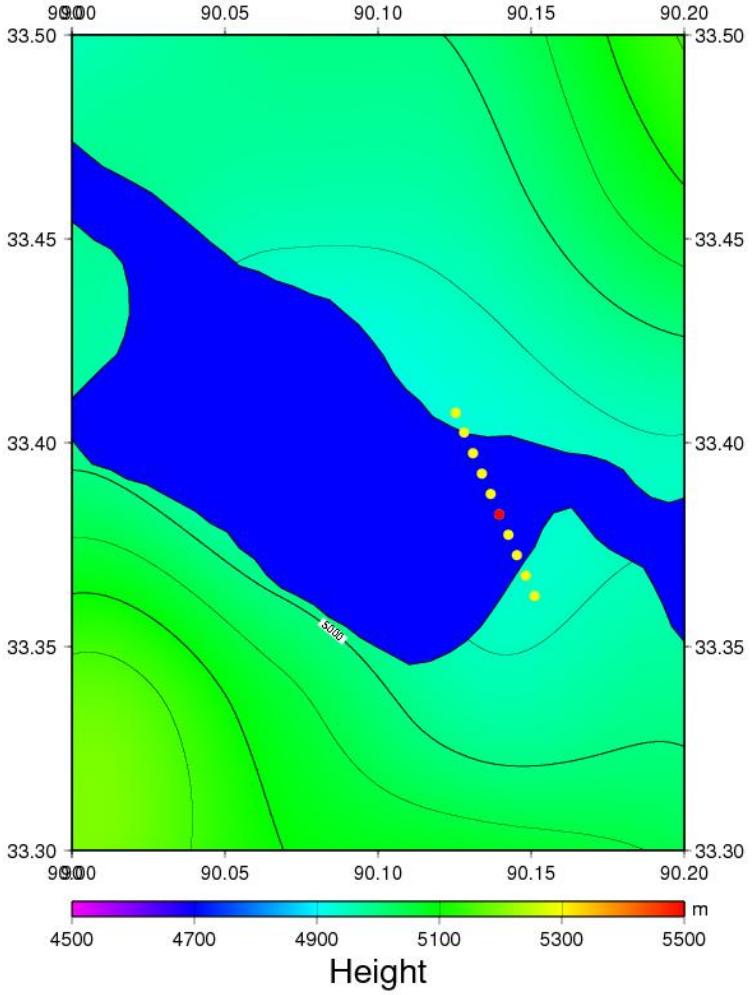


圖 5-2 赤布張錯選點, 黃點為 bin01～bin10 之中點,紅點為 bin05 之中點

5-2 各項改正資料

圖 5-3～圖 5-8 為赤布張錯測高儀及環境等六項改正，表 5-1 為六項改正量之比較，衛星質心改正量無論是平均值或標準差都最小，最大的是地球固體潮改正，此六項改正與唐古拉山的六項改正相去不遠，推測為距離相近，且此六項改正之趨勢及跨年變化較為穩定。

表 5-1 赤布張錯各項改正量比較

	COG	dry	wet	iono	sol	pol
最小值	-0.007	-2.364	-0.095	-0.150	-0.181	-0.013
最大值	0.004	-2.275	-0.003	-0.005	0.322	0.019
差值	0.011	0.089	0.092	0.145	0.503	0.032
平均值	-0.001	-2.318	-0.028	-0.039	0.005	0.002
標準差	0.003	0.014	0.018	0.030	0.092	0.008

單位:m

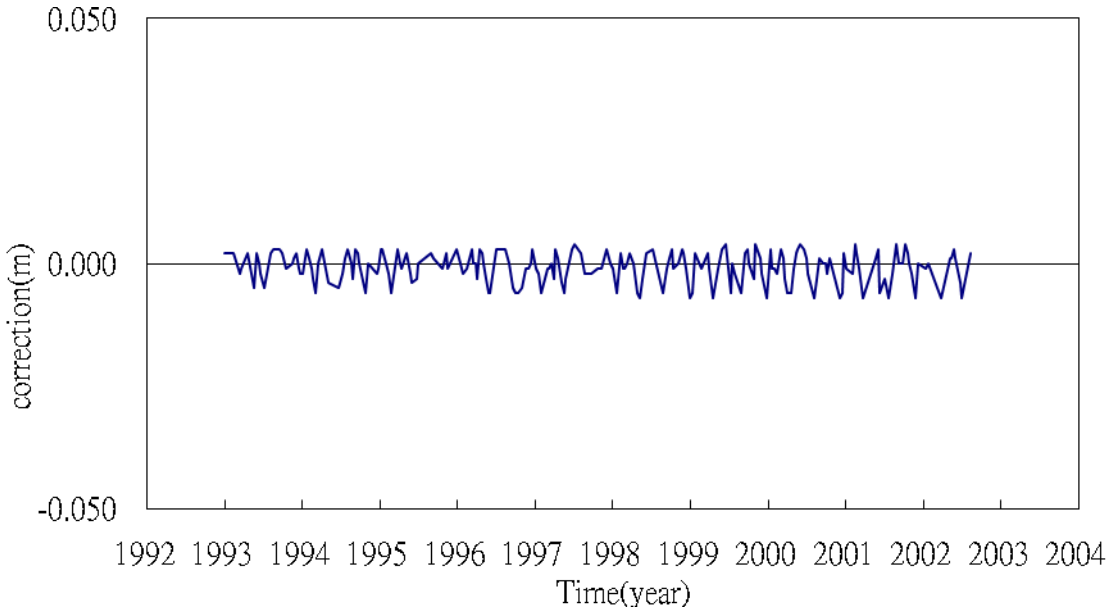


圖 5-3 赤布張錯（bin05）衛星質心改正

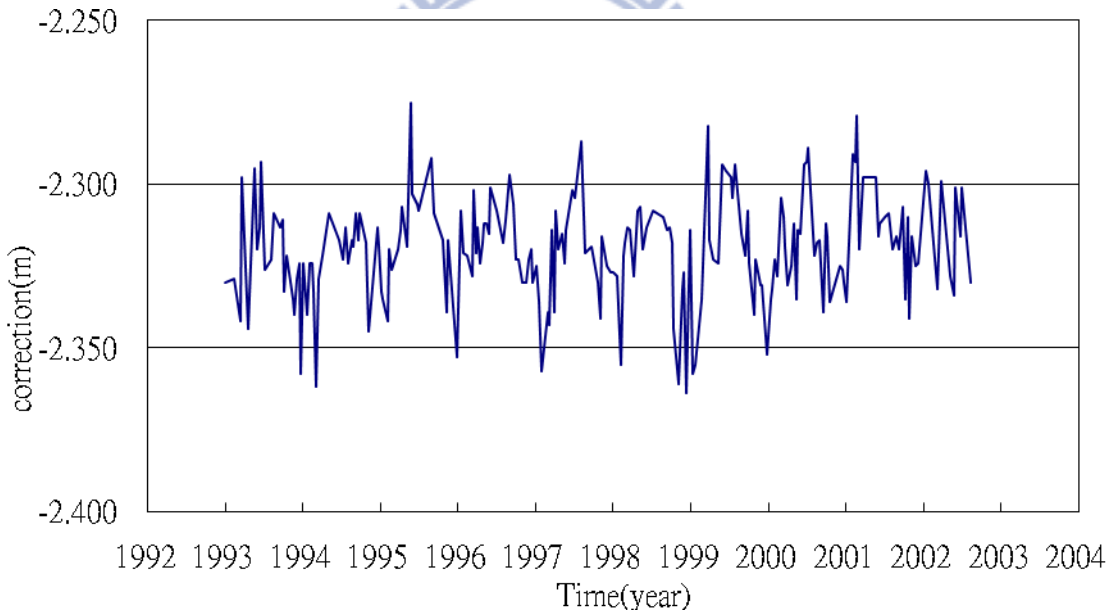


圖 5-4 赤布張錯（bin05） 乾對流層改正

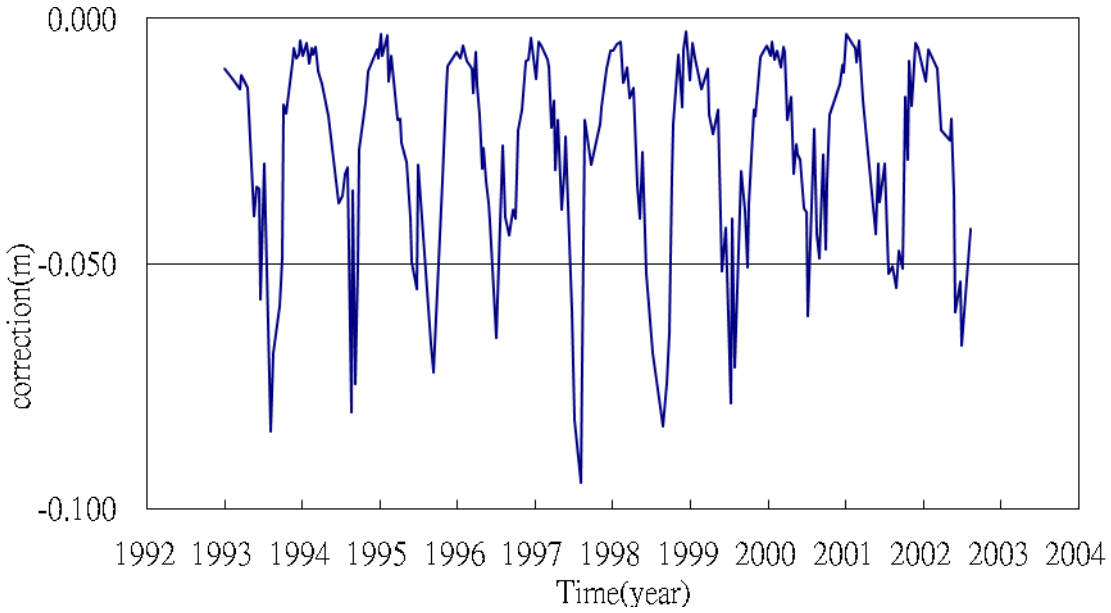


圖 5-5 赤布張錯（bin05） 濕對流層改正

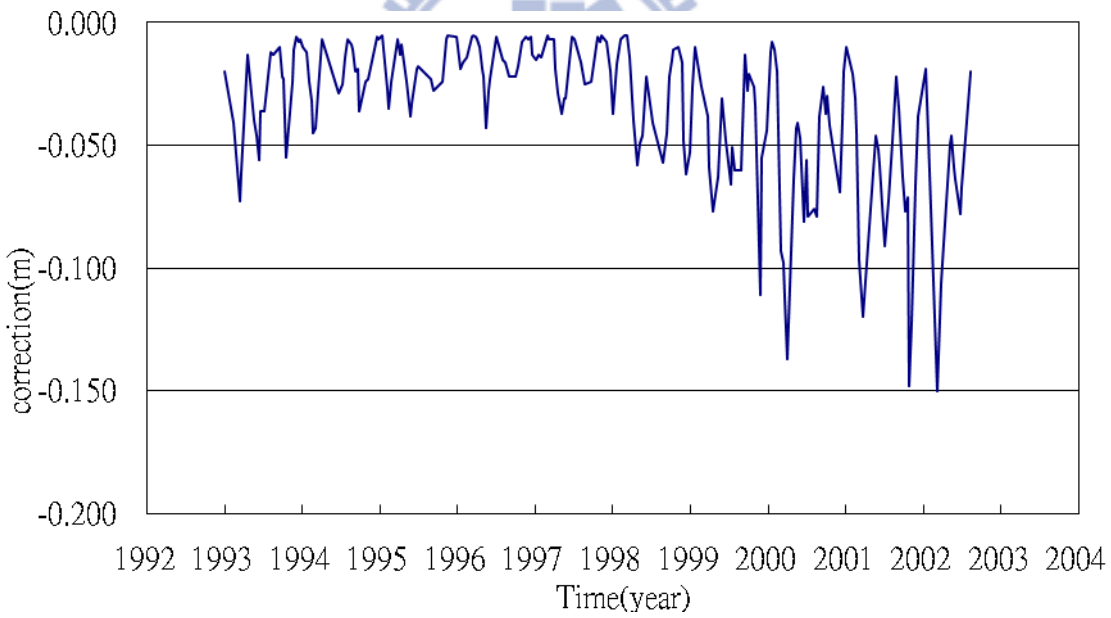


圖 5-6 赤布張錯（bin05） 電離層改正

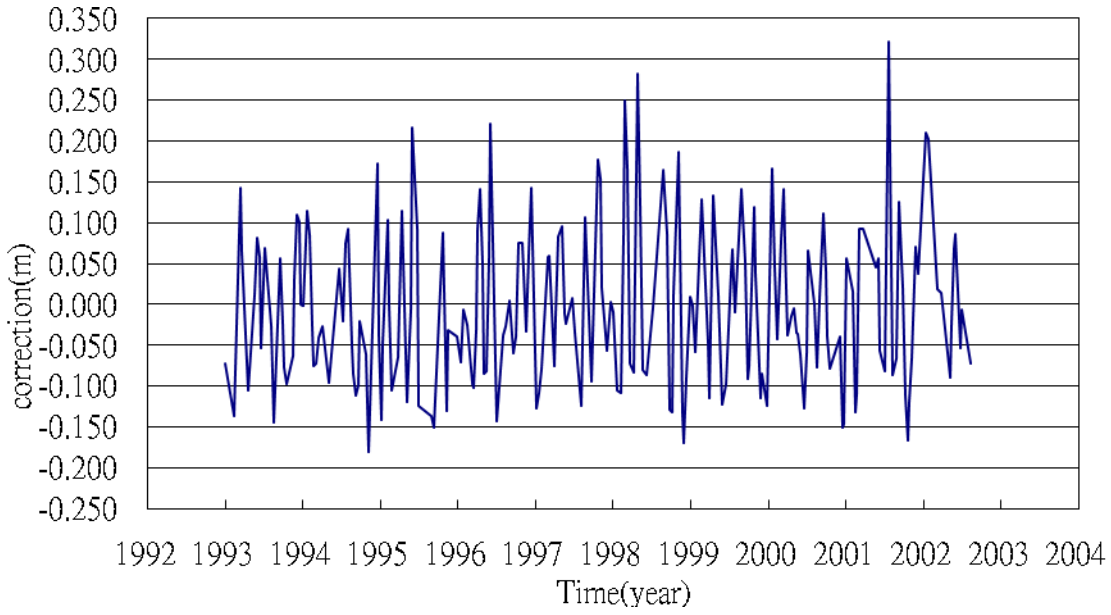


圖 5-7 赤布張錯（bin05） 地球固體潮改正

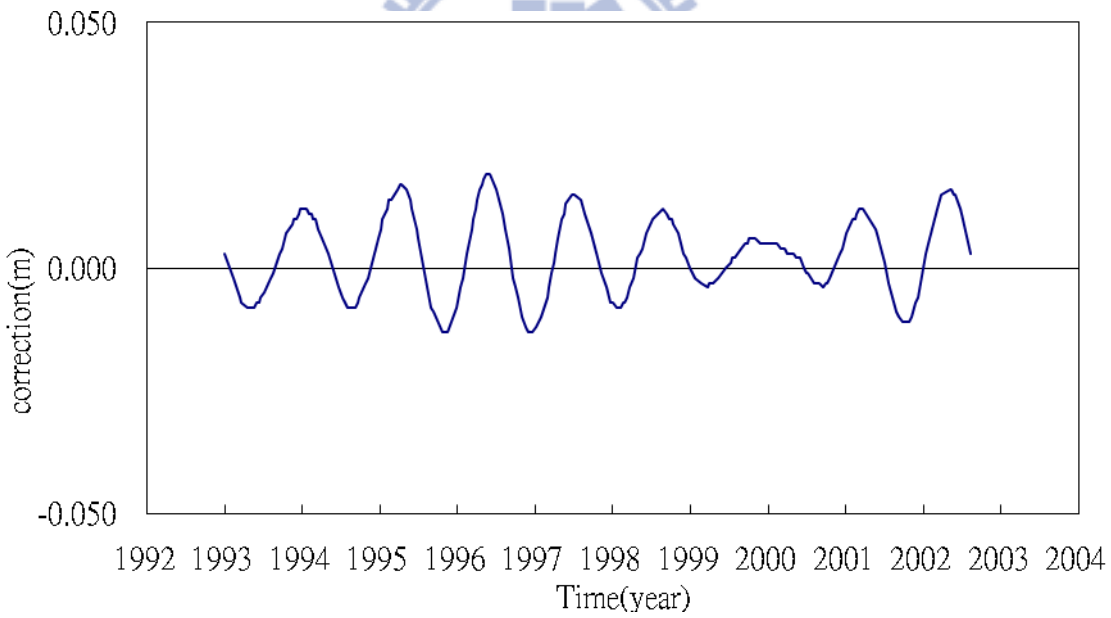


圖 5-8 赤布張錯（bin05） 極潮改正

5-3 波形重定改正量

同樣選用門檻值演算法（Threshold 50%）進行波形重定。改正量如圖 5-9 及圖 5-10，Case1 的改正量平均分布在 2～7 公尺的範圍，僅有一點達到 30 公尺，Case2 改正量平均分布在 -5～7 公尺的範圍，只有幾點達到 40 多公尺，顯示此處波形很明顯比唐古拉山單純，Case1 改正前後高程比較如圖 5-11，平均都是向下修正，且可發現一些較大或較小的高程值，估計為粗差，之後一併剔除。表 5-2 為兩種 Case 的波形重定改正量比較，Case2 因為點位較多，且有部份分布在陸地上，故標準差較大。由表 5-3 可知，經過波形重定後高程資料，Case1 的標準差從 148.053 公尺減為 147.387 公尺，平均高程從 4911.614 公尺降為 4906.949 公尺，Case2 的標準差從 193.000 公尺減為 192.530 公尺，平均高程從 4912.890 公尺降為 4907.906 公尺，顯示波形重定的改正有所成效，而兩 Case 之間相差約 1 公尺。

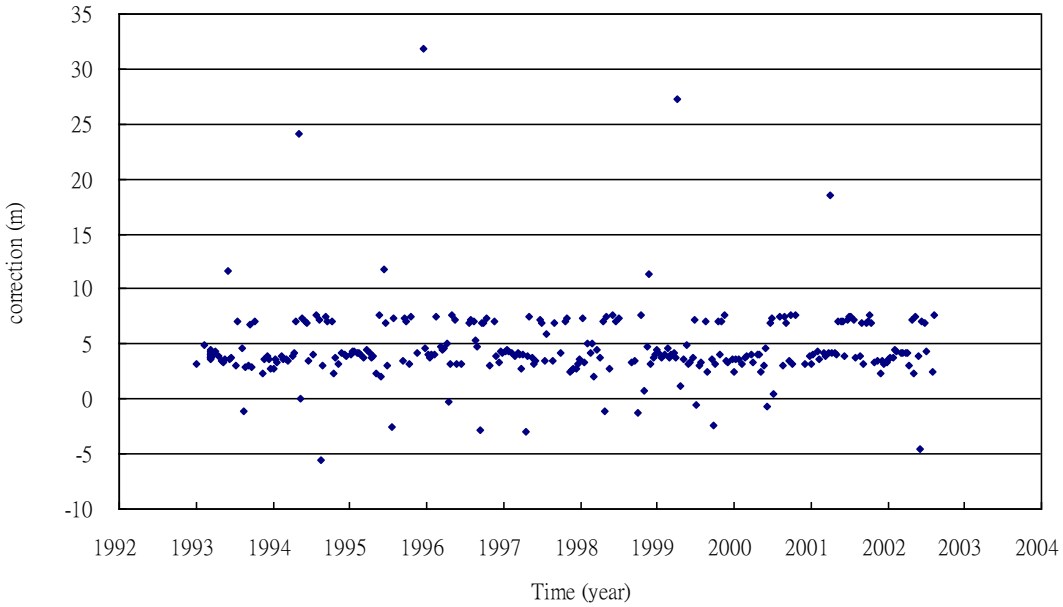


圖 5-9 赤布張錯（bin05）波形重定改正量（Case1）

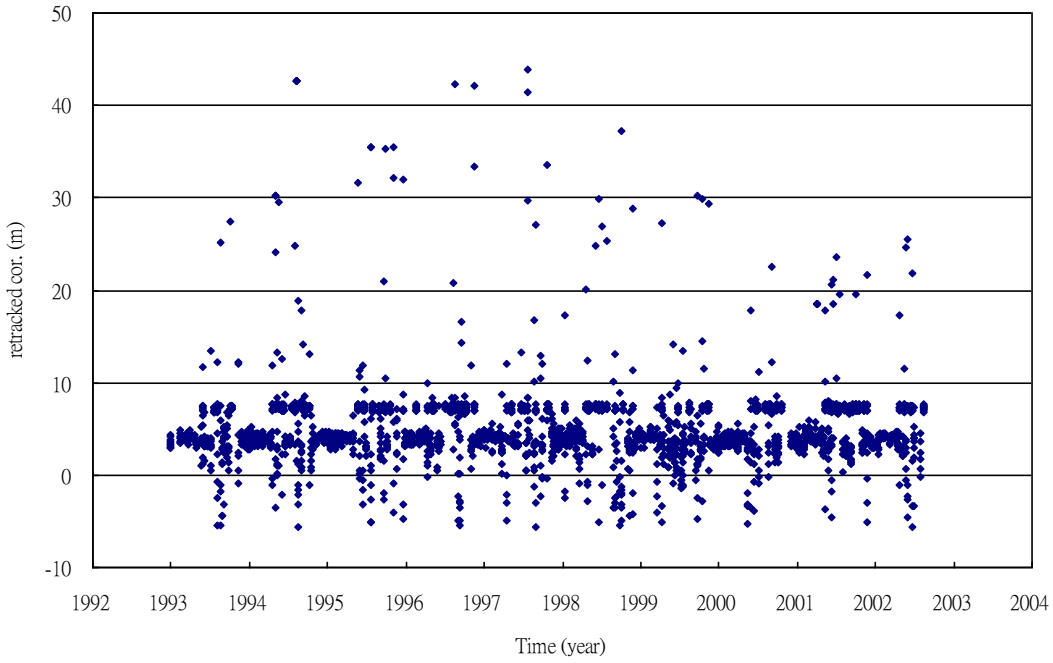


圖 5-10 赤布張錯（bin01～bin10）波形重定改正量（Case2）

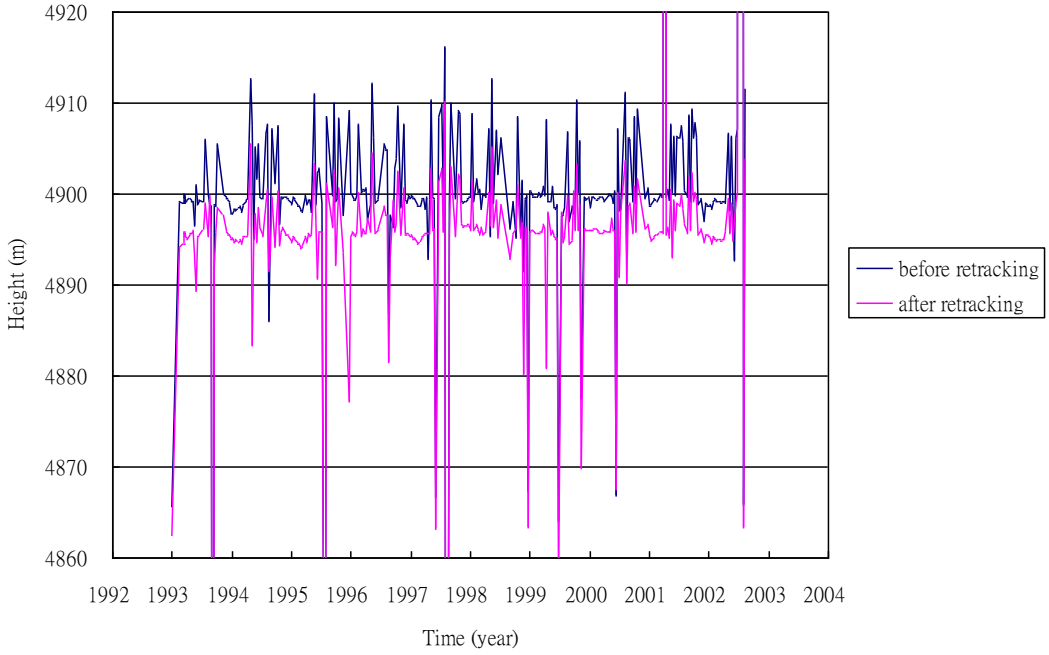


圖 5-11 赤布張錯（bin05）經波形重定改正前後之高程變化圖（Case1）

表 5-2 赤布張錯波形重定改正量之比較

	Case1	Case2
最小值	-5.616	-5.701
最大值	31.898	43.933
差值	37.514	49.634
平均值	4.665	4.984
標準差	3.406	4.624

單位:m

表 5-3 赤布張錯波形重定改正前後高程之比較

	Case1		Case2	
	改正前高程	改正後高程	改正前高程	改正後高程
最小值	4759.586	4756.475	4722.310	4719.884
最大值	6844.731	6826.209	11833.602	11830.622
差值	2085.145	2069.734	7111.292	7110.738
平均值	4911.614	4906.949	4912.890	4907.906
標準差	148.053	147.387	193.000	192.530

單位:m

5-4 地形梯度改正

由於此研究區域為湖面，理論上是平面，且選點位於湖中央，故將 Case1 分為不修正與加以做地形梯度改正兩種 Case 一起列入做比較：

Case1-1：為未做位置修正的結果。

Case1-2：因湖面理論上是等位面，故採用 EGM08 展開到 2160 階求得的大地起伏（geoid）值作為地形梯度改正之模型（圖 5-12），模型的產生方法如同唐古拉山的模型（2）～（4），由 GMT 軟體計算而得。

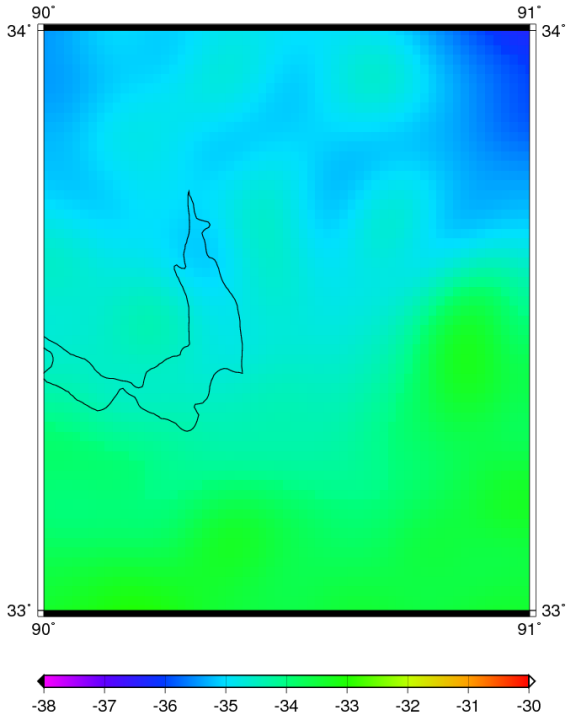


圖 5-12 赤布張錯附近之 EGM08 geoid 模型(單位: m), 圖中黑色線框起範圍為赤布張錯。

圖 5-13 為 Case1-2 之地形梯度改正量，可以看得出來其改正量在 -0.01～0.01 公尺之間，相較於 4906.949 公尺的平均高程，改正非常小，故我們將此兩結果做一比較（表 5-4），可知兩者平均值相差 0.0001 公尺，比較標準差以有做改正的 Case2 標準差 147.4268 公尺較 Case1 的標準差 147.4273 公尺小，故地形梯度改正在此研究中仍然有讓數據更加精確的效果，但影響有限。

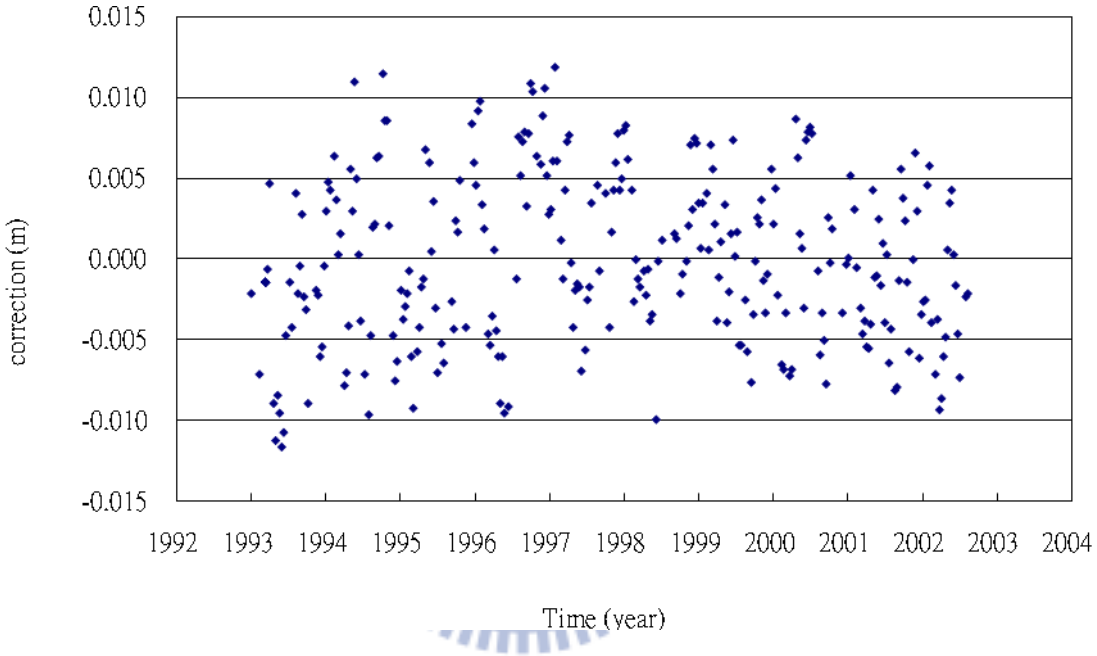


圖 5-13 赤布張錯（bin05）地形梯度改正量（Case1-2）

表 5-4 赤布張錯湖水位經地形梯度改正後高程之比較

	Case1-1	Case1-2
最小值	4748.0079	4748.0152
最大值	6826.2092	6826.2038
差值	2078.2013	2078.1886
平均值	4906.4011	4906.4010
標準差	147.4273	147.4268

單位:m

5-5 粗差剔除

使用三倍後驗標準差將粗差剔除後如圖 5-14～圖 5-16，但因為前二種 Cases 結果非常接近，故由表 5-5 來比較，得知 Case1-2 雖然在位置修正後，標準差較小，但經過粗差剔除後，反而比 Case1-1 的標準差稍大，但兩者依然非常的相近，故可推論在湖水面應可不需要做地形梯度改正，而 Case2 範圍較大，平均高程 4896.78835 公尺與 Case1 的 4896.40900 公尺相差約 0.3 公尺，其標準差 2.80321 公尺，也和 Case1 相去不遠，故可推論，在計算湖水面高程變化時，即使選到一點陸地的範圍，在依序做完改正後，仍可將陸地的高程點大致剔除掉。

表 5-5 赤布張錯湖水位經粗差剔除後 3 種 Cases 之高程比較

	Case1-1	Case1-2	Case2
最小值	4890.20800	4890.20200	4888.45568
最大值	4902.84400	4902.84200	4905.17483
差值	12.63600	12.63900	16.71915
平均值	4896.40900	4896.40900	4896.78835
標準差	2.18585	2.18588	2.80321

單位:m

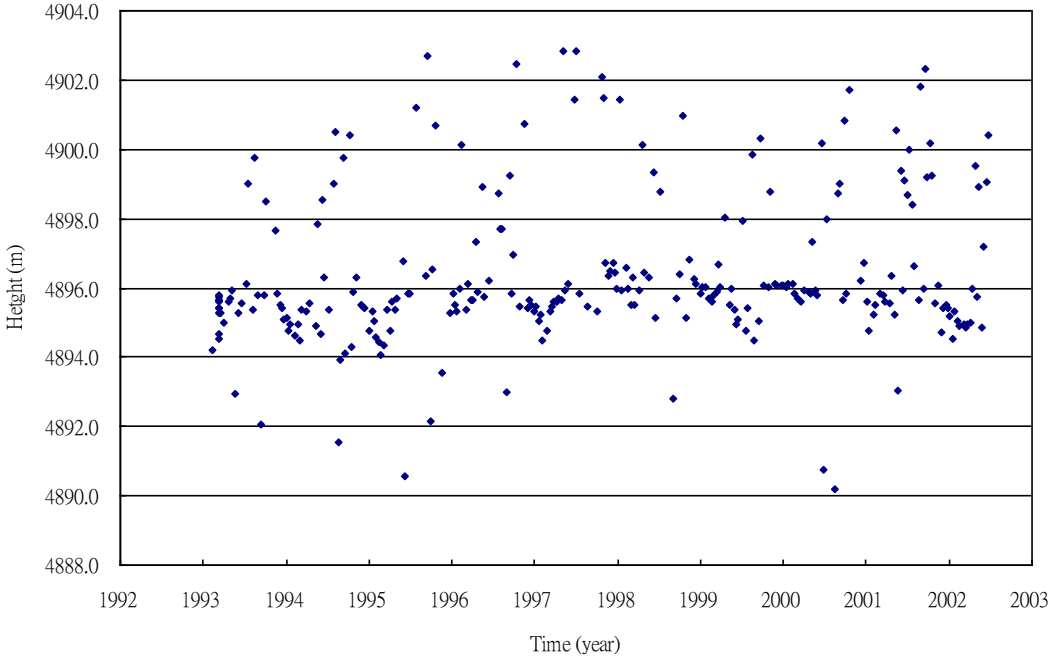


圖 5-14 赤布張錯（bin05）經粗差剔除後之高程變化圖（case1-1）

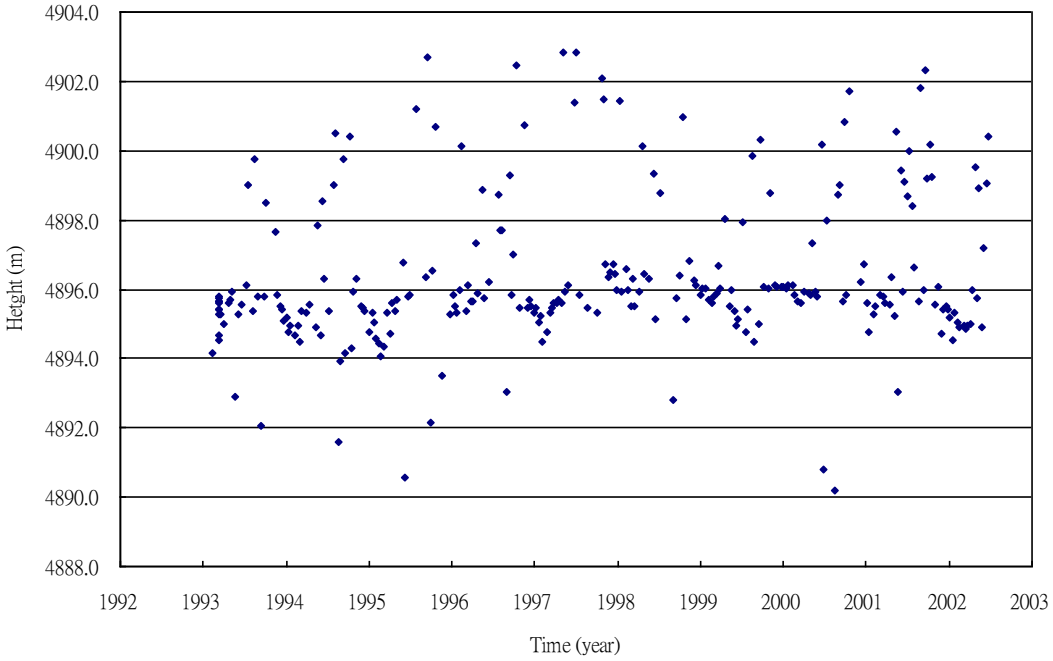


圖 5-15 赤布張錯（bin05）經粗差剔除後之高程變化圖（case1-2）

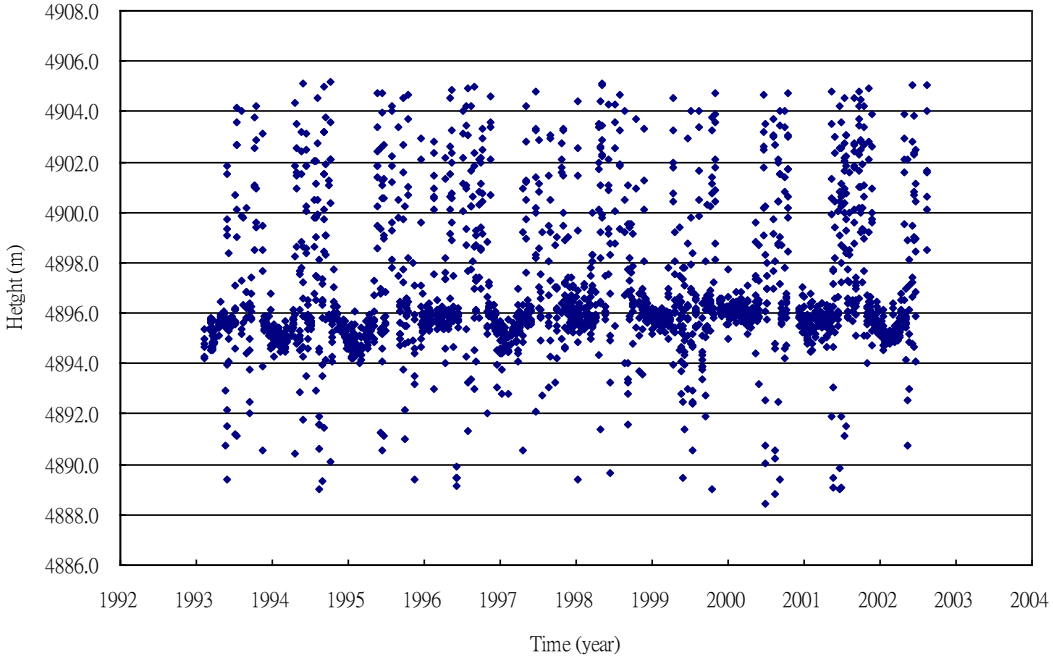


圖 5-16 赤布張錯（bin01～bin10）經粗差剔除後之高程變化圖（case2）

5-6 高斯濾波

對 3 種 Cases 分別做一年高斯濾波(圖 5-17～圖 5-19)，比較差異如表 5-6，前兩者最大最小值及平均值接近，Case1-1 標準差 0.688 公尺稍小，但基本上兩者差異非常小，Case2 標準差 0.742 公尺最大。

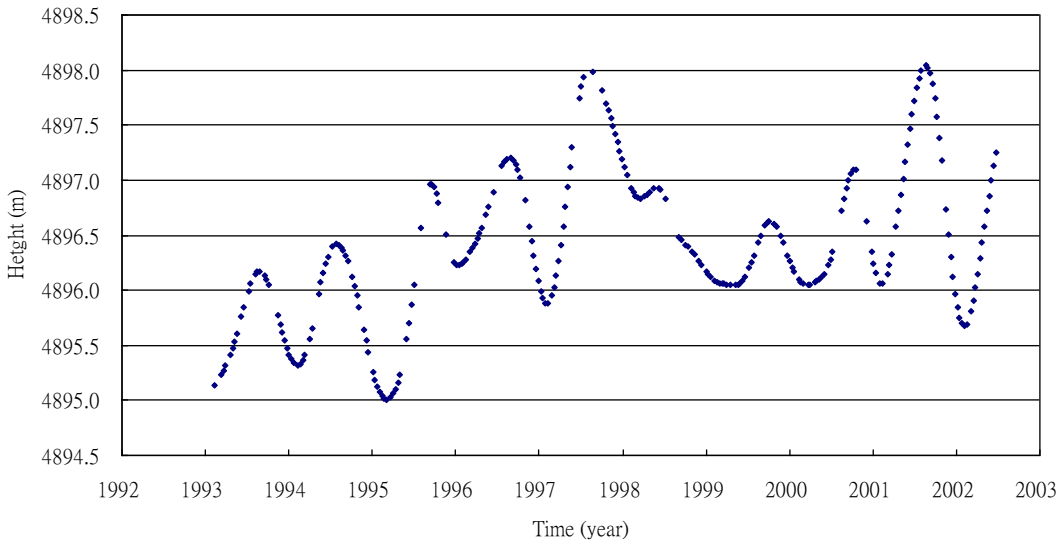


圖 5-17 赤布張錯（bin05）經高斯濾波後之高程變化圖（case1-1）

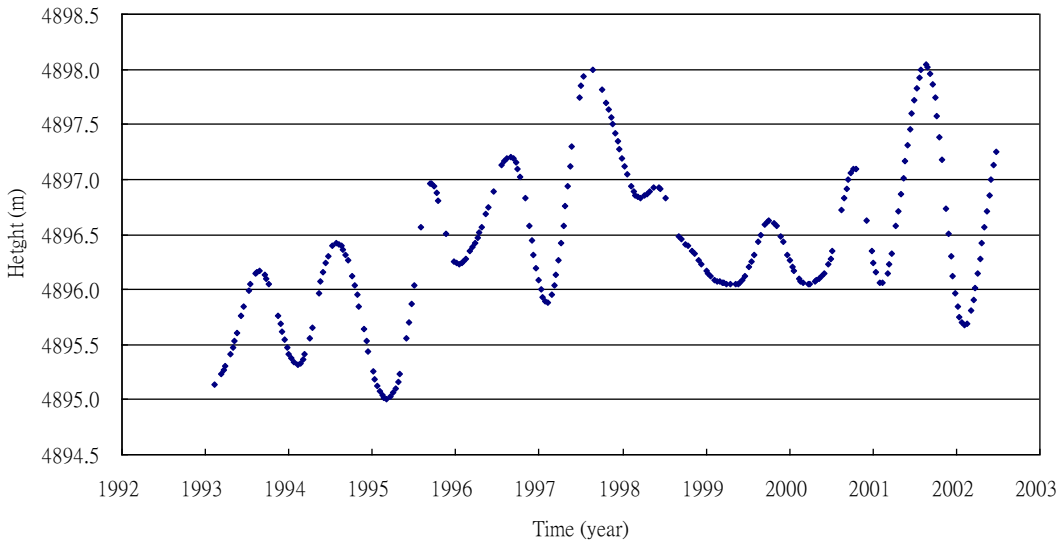


圖 5-18 赤布張錯（bin05）經高斯濾波後之高程變化圖（case1-2）

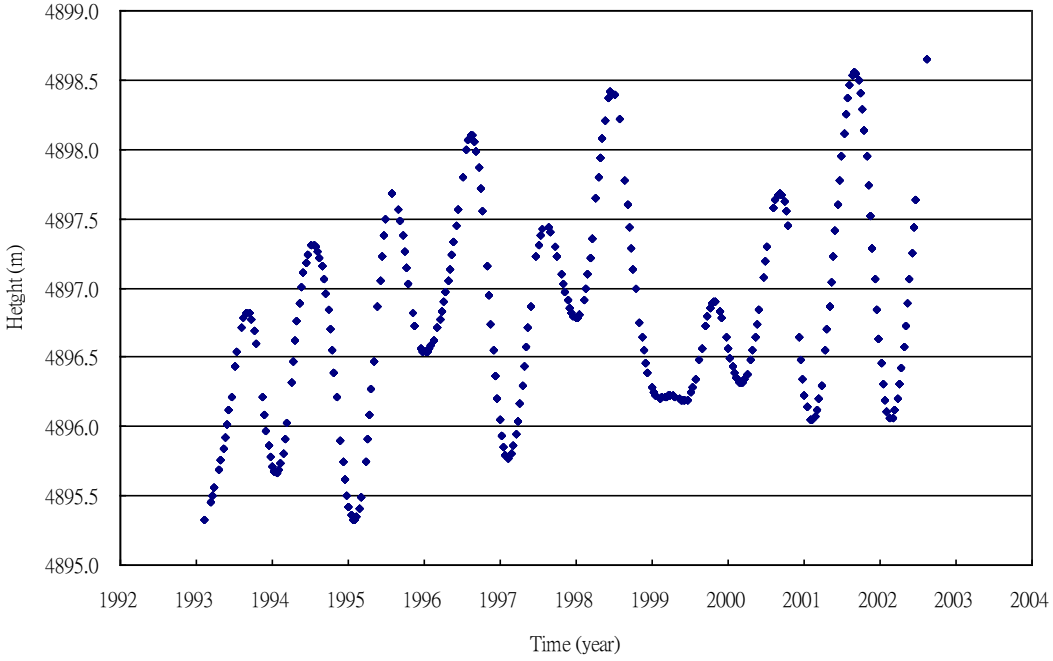


圖 5-19 赤布張錯（bin01～bin10）經高斯濾波後之高程變化圖（case2）

表 5-6 赤布張錯高斯濾波後 3 種 Cases 之比較

	Case1-1	Case1-2	Case2
最小值	4895.009	4895.007	4895.325
最大值	4898.048	4898.046	4898.646
差值	3.038	3.040	3.321
平均值	4896.390	4896.390	4896.753
標準差	0.688	0.689	0.742

單位:m

圖 5-20 為原有的 T/P 數據加入 Jason-2 資料的高程變化圖，Jason-2 的資料處理不再贅述，可以由圖看出湖水位趨勢，在 1993～1998 年間，湖水位是往上的趨勢，到了 1998 年後，有個突降，而後再漸漸上升。

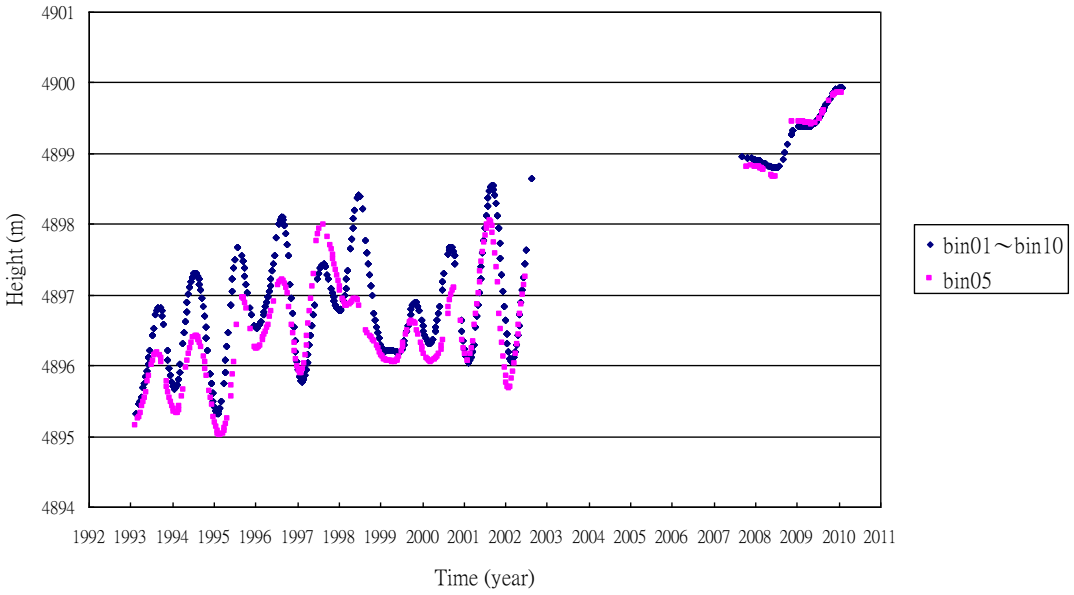


圖 5-20 赤布張錯經高斯濾波後之高程變化圖（T/P + Jason-2 資料）

第六章 唐古拉山冰層與赤布張錯湖面變化綜合分析

6-1 趨勢及跨年變化分析

為了比較山上冰層和湖水面的變化，我們假設一個包含趨勢、年變化及半年變化的調和函數，在將上一章處理過的測高數據利用最小二乘法代入並求解出未知數，假設函數如式 6-1-1，一共可解得 a～f 六個未知數

$$H(t)+v=a+bt+c\cos(\omega t)+d\sin(\omega t)+e\cos(2\omega t)+f\sin(2\omega t) \qquad (6\text{-}1)$$

其中，v 可視為殘差，a 為平均高度，b 為平均斜率，$\sqrt{c^2+d^2}$ 為年變化振幅，$\sqrt{e^2+f^2}$ 為半年變化振幅，ω 為 2π ，t 為相對於平均時間之時間。

分別將各個 Case 代入公式求得六項未知數，如表 6-1 及表 6-2。

表 6-1 由唐古拉山各 Case 代入公式求解出未知數

	a	b（m/year）	c	d	年變化	e	f	半年變化
Case1-1	5536.357	-11.593	-30.921	6.687	31.635	1.622	-0.035	1.622
Case1-2	5727.777	-15.502	-25.298	8.504	26.689	-1.041	4.203	4.330
Case1-3	5737.910	-15.382	-26.065	6.807	26.939	-0.733	3.144	3.228
Case1-4	5740.616	-15.479	-26.302	6.599	27.117	-0.579	2.653	2.715
Case2-1	5567.871	-9.663	-33.521	13.326	36.073	3.589	0.379	3.609
Case2-2	5534.400	-11.828	-37.422	4.877	37.739	-0.856	0.232	0.887
Case2-3	5533.665	-13.489	-41.584	3.397	41.723	1.364	0.341	1.406
Case2-4	5596.273	-15.534	-46.706	9.524	47.667	-6.226	5.234	8.133
Case3-1	5618.446	-7.168	-6.721	4.826	8.274	-1.128	1.567	1.931
Case3-2	5691.110	-9.366	-12.899	2.553	13.150	0.606	1.540	1.655
Case3-3	5253.816	-6.269	-21.509	-5.108	22.107	-0.066	6.503	6.503
Case3-4	5334.166	-9.087	-11.972	1.087	12.021	0.637	1.210	1.367

單位:m

表 6-2 由赤布張錯各 Case 代入公式求解出未知數

	a	b（m/year）	c	d	年變化	e	f	半年變化
Case1-1	4896.409	0.112	-0.508	-0.122	0.523	-0.030	0.027	0.040
Case1-2	4896.409	0.112	-0.508	-0.123	0.523	-0.030	0.027	0.040
Case2	4896.798	0.088	-0.747	-0.030	0.748	-0.002	0.050	0.050

單位:m

6-1-1 唐古拉山冰層高度變化

由表 6-1 可知，以 Case1-1 為例，1992～2002 年，唐古拉山冰層高度平均下降速率：11.593 m/year，年變化振幅為 31.636 公尺，半年變化的振幅為 1.622 公尺。圖 6-1 為唐古拉山冰層高度變化圖，以高斯濾波後標準差最小的 Case3-1 為例。圖 6-2 及圖 6-3 為距離測區最近的安多氣象站（32°21’ N , 91°06’ E）溫度及雨量資料，溫度除 1997 年有個突降以外，趨勢是逐年增加，速率約為 0.06 ℃/year，圖 6-3 顯示雨量亦為逐年增加的趨勢，速率約為 10 mm/year，溫度及降水變化是造成冰層變化的重要因素，故氣溫在 1997 年的突降和 1998 年的回升可能造成唐古拉山在這兩年間冰層的累積及融化。而降雨量在 1994 年減少可能是造成唐古拉山在 1994 年冰層下降的原因。

Pu et al. （2008）監測唐古拉山冬克瑪底冰川（Xiao Dongkemadi Glacier）的質量平衡，此冰川位於本研究測區西方約 83 公里，監測時間是 1989～2002 年，結果顯示 1997 年有一個大量的上升，1998 年劇烈下降，厚度在這一年總共下降 701mm，如圖 1-1，此結果與本研究在 1997 年～1998 年的趨勢很吻合。圖 6-4 是大冬克瑪底冰川的雪線高度變化圖，同樣在 1998 年有個大的跳動，跟本研究結果也符合，在 1997～1998 年期間，有個趨勢往上，雪線高度就變低，但 1998 年突降，使得雪線高度突升，推測與聖嬰現象有關。

張堂堂等人（2004）採用GPS對位於唐古拉山南方的念青唐古拉山拉弄冰川（30°26.14′ N , 90°33.64′ E）末端位置進行測量，結果顯示，1970～1999年，拉弄冰川末端退縮285 m，相當於每年退縮9.8 m，1999～2003年拉弄冰川退縮13 m，相當於每年退縮3.25 m，此結果代表冰川近年來皆是退縮的趨勢，與本研究趨勢一致。

譙程駿（2008）利用地理資訊系統和遙感圖像處理技術分析出唐古拉山位於本文測區西方約 80 公里處之冬克瑪底地區不同年份的冰川分布範圍，如表 6-3，結果顯示研究區內的冰川面積逐年減小，與本研究結果趨勢一致。

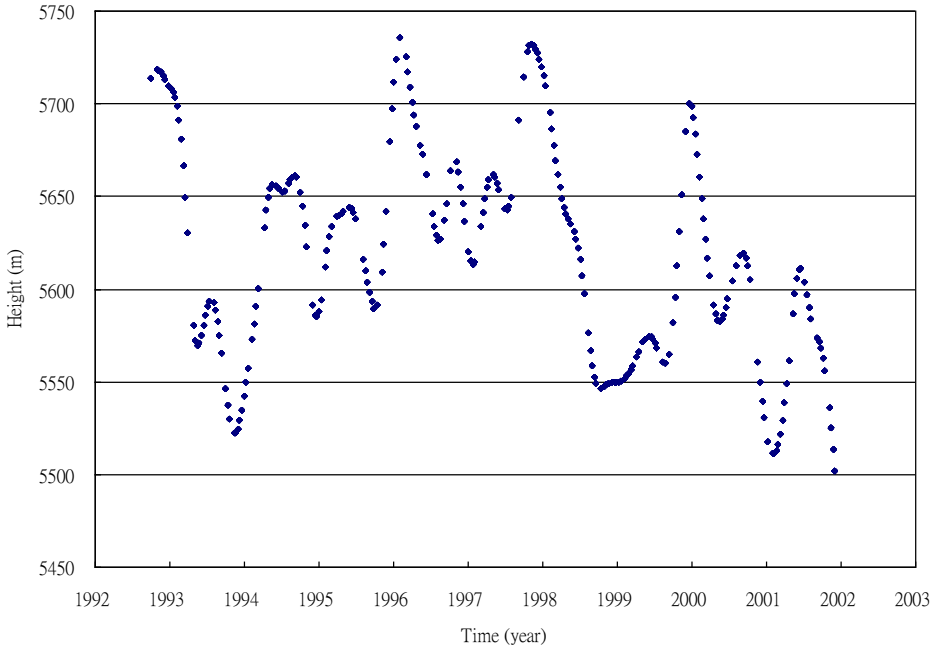


圖 6-1 唐古拉山冰層高度變化圖（以 Case3-1 為例）

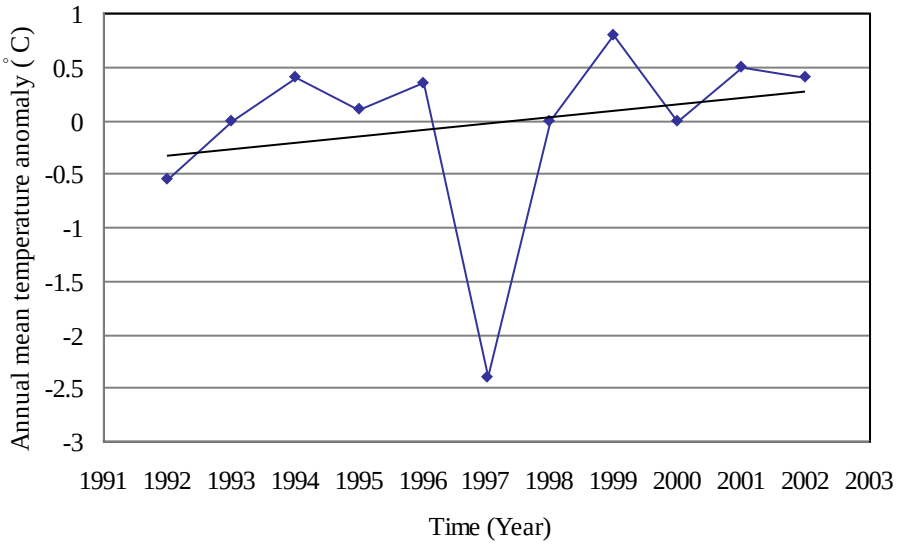


圖 6-2 安多氣象站 1992～2002 溫度變化圖（資料來源：中國氣象局）

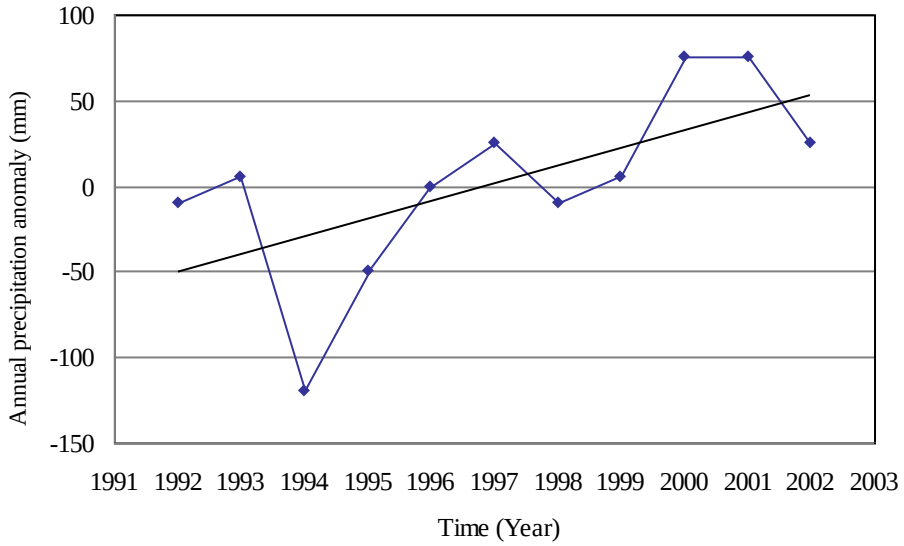


圖 6-3 安多氣象站 1992～2002 雨量變化圖（資料來源：中國氣象局）

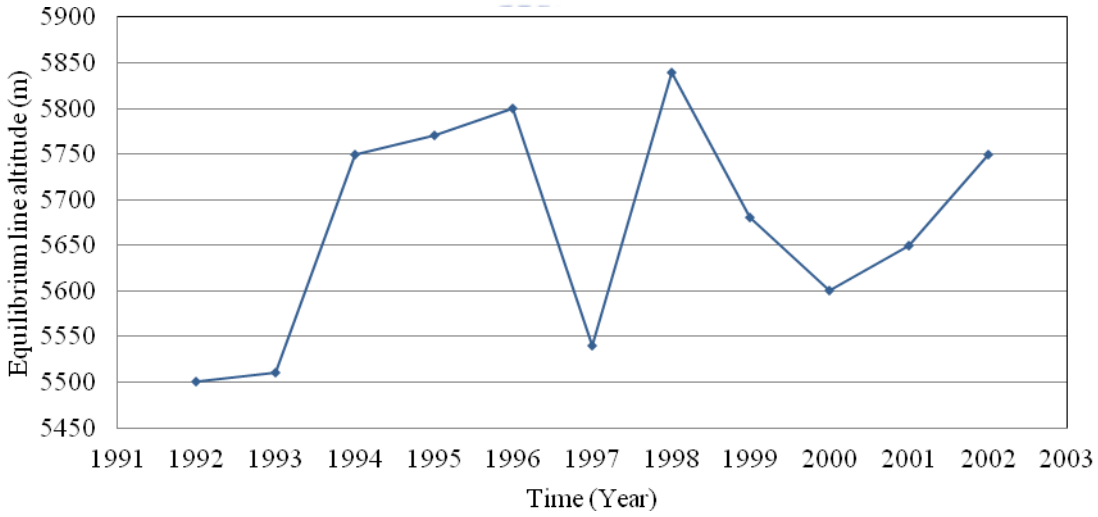


圖 6-4 大冬克瑪底冰川雪線高度變化圖（資料來源：Pu et al., 2008）

表 6-3 冬克瑪底地區不同年份冰川面積變化（資料來源：譙程駿, 2010）

時間（年）	面積（km^2）	面積變化（km^2）	面積變化（%）
1969	179.43	-	-
1976	177.92	-1.5	-0.84
1992	174.76	-3.16	-1.77
2001	167.35	-7.41	-4.24
2007	161.82	-5.54	-3.31

6-1-2 赤布張錯湖面高度變化

由表 6-2 Case1-2 的結果顯示 1992～2002 年，赤布張錯湖面平均上升速率為 0.112 m/year，年變化振幅為 0.523 公尺，半年變化的振幅為 0.040 公尺。最近幾年，湖水位上升的速率加劇，如 2008～2010 年，湖面平均上升速率為 0.46 m/year（圖 6-5）。近年來，因全球暖化造成極區冰層融化，海水面上升等現象，在本研究兩測區亦有同樣結果。

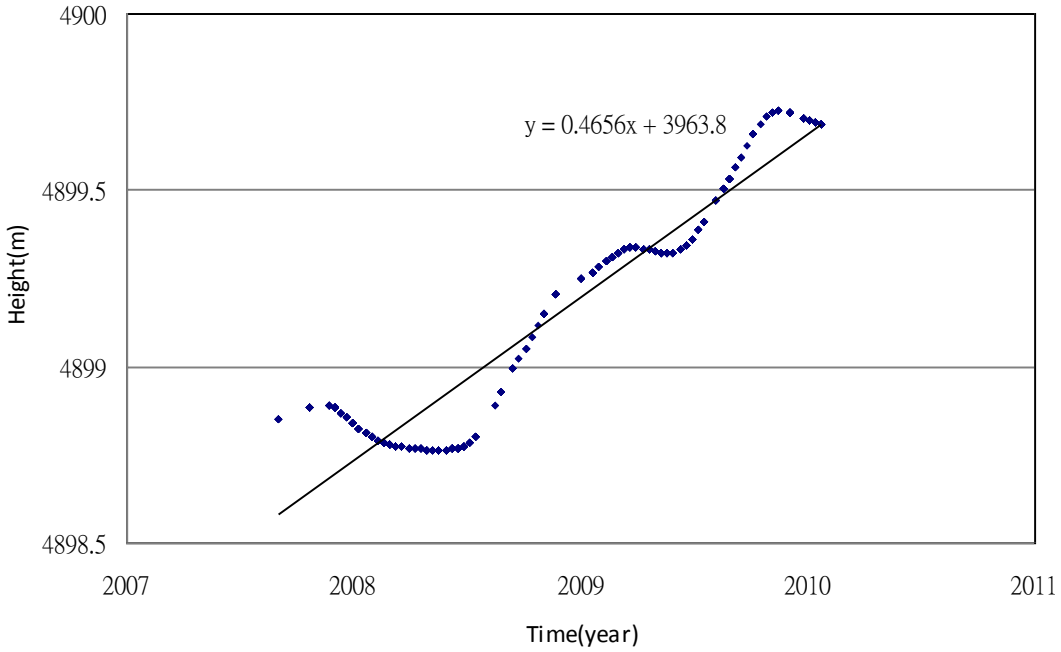


圖 6-5 赤布張錯湖面高度變化圖，此為 Jason-2 軌道 242 解算而得。

6-2 唐古拉山冰層變化及赤布張錯湖水位變化與聖嬰現象的關係

唐古拉山（圖 6-6）1992～1998 年，上升速率:5.77 m/year，1998～2002 年，下降速率:21.81 m/year；赤布張錯（圖 6-7）1992～1998 年，上升速率：0.33 m/year，1998～2002 年，下降速率：0.02 m/year。從圖 6-6 及圖 6-7 可發現 1997 年底～1998 年初是趨勢的分段點，唐古拉山在 1998 年前冰層緩慢的向上堆積，赤布張錯的湖水面也穩定且相對快速的上升，1998 年之後，唐古拉山冰層迅速的融化下降，赤布張錯的湖水面也因此持平不再往上升反有點往下降的趨勢，可推測為聖嬰現象導致，且此兩區域的變化有相關聯性。

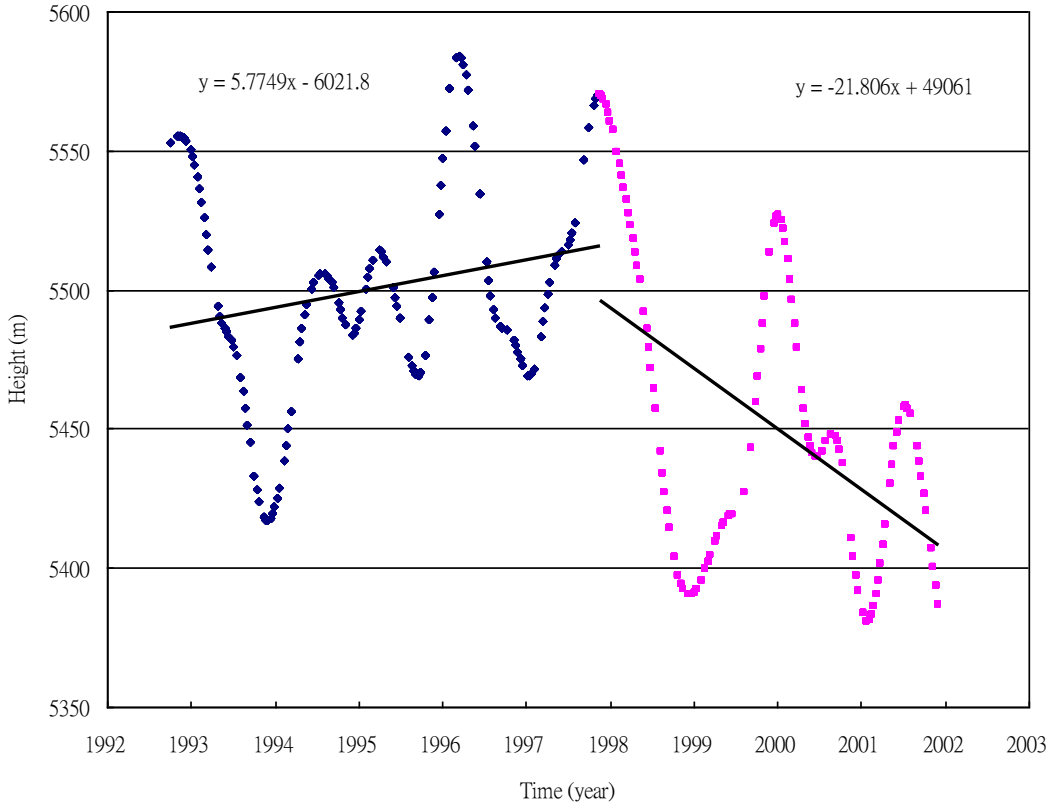


圖 6-6 唐古拉山冰層高度 98 年前後趨勢變化圖（T/P-cycle155）

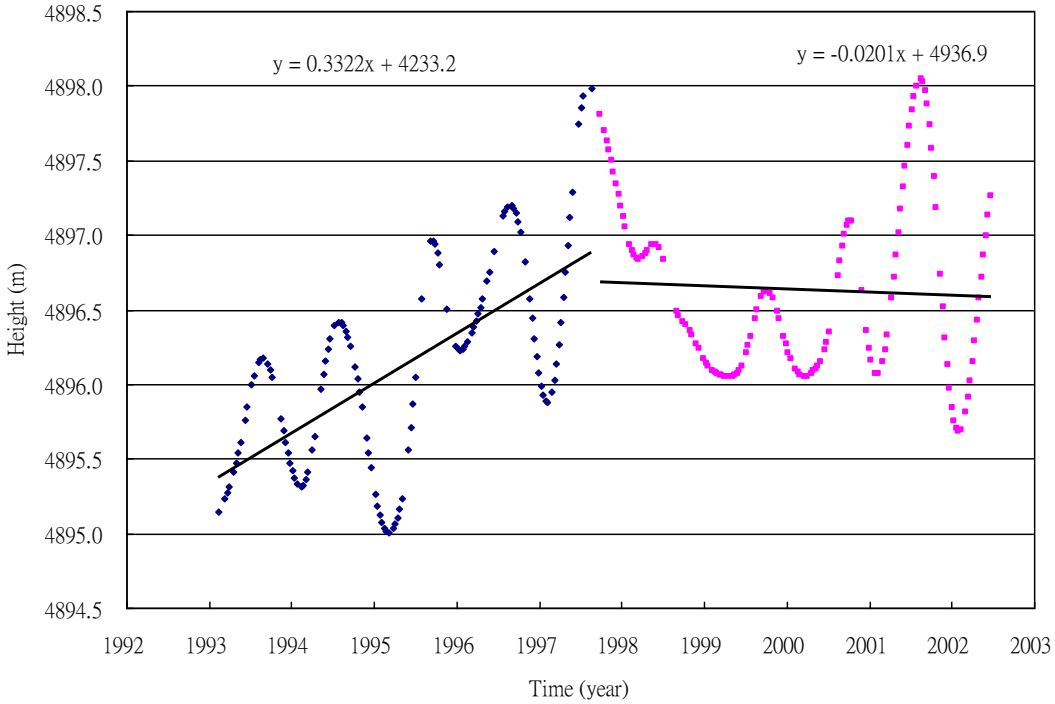


圖 6-7 赤布張錯湖面高度 98 年前後趨勢變化圖（T/P-cycle242）

第七章 結論與建議

經由測高資料推算，在 1993～2001 年間，唐古拉山冰層高度平均下降速率約為 11.593 m/year；赤布張錯的湖水位在 1993～2001 年間，平均上升速率為 0.112 m/year，2008～2010 年間，平均上升速率為 0.47 m/year。推測與全球暖化有關，而唐古拉山在 1997 年前，趨勢穩定緩慢的上升，此期間赤布張錯湖水面變化也逐年相對快速的上升，直到 1998 年後，唐古拉山趨勢迅速往下，此時赤布張錯的湖水面則停止上升，反倒微微往下降，顯示兩區域的趨勢變化具有因果關係。

值得注意的是唐古拉山的跨年變化在 1998 年有一個極大反轉，此區在 1992～1998 年，上升速率為 5.77 m/year，但 1998～2002 年，下降速率:21.81 m/year，赤布張錯的湖水位變化也因此受到影響，在 1992～1998 年，上升速率：0.33 m/year，1998～2002 年，轉為下降，平均速率為 0.02 m/year。此研究在唐古拉山的變化趨勢亦與 Pu et al.（2008）監測唐古拉山冬克瑪底冰川末端變化的趨勢符合，同樣都在 1997 年間有個迅速累積，雪線高度下降，到了 1998 年迅速下降，雪線高度也突升，推測此現象也與聖嬰現象有關。

測高數據用來解算湖水位變化，高低差值可達到 1m 左右，但用於解算唐古拉山的崎嶇地形，卻仍有幾百公尺的高差，顯示測高數據用於較崎嶇的地表仍有許多進步空間。唐古拉山測高原始數據高程差已有 1 公里以上之差，故改正效果極為有限，建議若要解算此種較複雜的地形，可使用大範圍的資料，得一平均後的結果，因資料點多範圍廣，較不受雷達 footprint 大小影響，標準差會變小，但若只取一 bin 點資料，因資料點範圍小，但雷達 footprint 很大，受坡度影響很大，精度恐怕不高。

坡度的影響對於唐古拉山來說非常的大，但坡度改正的簡易公式（Zwally, 2001）僅能適用坡度很小的區域，因為當坡度達到 2 度時，套用公式所得之坡度修正已有 1 公里大，坡度 3 度時，坡度修正量約為 2 公里，並不合理，對於平均坡度在 6 度以上的唐古拉山而言，如何改正坡度的影響是未來需要努力研究的課題。

參考文獻

張堂堂、任賈文、康世昌，2004。近期氣候變暖念青唐古拉山拉弄冰川處於退縮狀態，冰川凍土，第 26 卷，第 6 期，736-739 頁。

彭敏峰，2003。以 TOPEX/POSEIDON 衛星測高儀觀測中國湖水位變化，國立交通大學碩士論文，新竹。

譙程駿，2010。唐古拉山冬克瑪底地區冰川變化遙感監測，安徽農業科學，第 38 卷，第 14 期，7703-7705 頁。

Bamber, J. L., 1994. Ice sheet altimeter processing scheme, Int. J. Remote Sens., Vol. 15, pp. 925-938.

Brenner, A. C., R. A. Bindschadler, R. H. Thomas, and H. J. Zwally, 1983. Slope-induced errors in radar altimetry over continental ice sheets, J. Geophys. Res., Vol. 88, pp. 1617-1623.

Brown, G.. S., 1977. The average impulse of a rough surface and its applications, IEEE Transaction on Antennas and Propagation, AP-25, Vol. 1, pp. 67-74.

Cabanes, C., A. Cazenave, and C. Le Provost, 2001. Sea level rise during the 1990s and past 40 years: New insight from satellite and in situ observations, Science, Vol. 294, pp. 840-842.

Cartwright, D. E., and Ray, R. D., 1990. Observations of Mf ocean tide from Geosat altimetry, Geophys. Res. Lett., Vol.17, pp. 619–622.

Kuo, C. Y., C. K. Shum, A. Braun, K. C. Cheng and Y. Yi, 2008. Vertical motion determined using satellite altimetry and tide gauges. Terr. Atmos. Ocean. Sci., Vol.19, pp. 21–35.

Davis, C.H., 1997. A robust threshold retracking algorithm for measuring ice-sheet surface elevation change from satellite radar altimeter, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., Vol. 35, pp. 974-979.

Frappart, F., S. Calmant, M. Cauhope, F. Seyler, and A. Cazenave, 2006. Preliminary

results of Envisat RA-2 derived water levels validation over the Amazon basin, Remote Sens. Environ., Vol. 100, pp. 252-264.

Fu, L.L., and A. Cazenave, Satellite altimetry and earth sciences, 2001.

Hwang, C, MF Peng, JS Ning, J Luo and CH Sui, 2005. Lake level variations in China from TOPEX/Poseidon altimetry: data quality assessment and links to precipitation and ENSO Geophy. J Int., Vol. 161, pp. 1-11.

Lee, H.K., 2008. Radar Altimetry Methods for Solid Earth Geodynamics Studies, Ph.D. Dissertation, The Ohio State University, Columbus, Ohio, USA.

Lee, H.K., C.K. Shum, C.Y. Kuo, Y. Yi, and Alexander B., 2008. Application of TOPEX Altimetry for Solid Earth deformation Studies, Terr. Atmos. Ocean. Sci., Vol. 19, No. 1-2, pp. 37-46.

Martin, T.V., H.J. Zwally, A.C. Brenner, and R.A. Bindschadler, 1983. Analysis and Retracking of Continental Ice Sheet Radar Altimeter Waveforms, J. Geophys. Res., Vol. 88, pp. 1608-1616.

Morris C.S., and S.K. Gill., 1994. Evaluation of the TOPEX/POSEIDEN altimeter system over the Great Lake, J. Geophys. Res., Vol. 84, B8, pp. 3784-3792

Pu, J., Yao, T., Yang, M., Tian, L., Wang, N., Ageta Y., and Fujita, K.,2008, Rapid decrease of mass balance observed in the Xiao (Lesser) Dongkemadi Glacier, in the central Tibetan Plateau, Hydrol. Process. Vol. 22, pp. 2953-2958.

Schwiderski, H., 1984. Combined hydrodynamical and empirical modeling of ocean tides, In Seeber, Apel (Eds.), Geodetic Feature of the Ocean Surface and their Implications, pp. 215-229, D. Reidel, Dordrecht.

Seeber, G., 2003. Satellite Geodesy：Foundations, Methods, and Applications, Berlin, New York.

Shum, C. K., Y. Yi, K. Cheng, C. Y., Kuo, A. Braun, S. Calmant, and D. Chambers,

2003. Calibration of Jason–1 altimeter over Lake Erie, Marine Geodesy, Vol. 26, pp. 335–354.

SRTM HOME PAGE. http://srtm.csi.cgiar.org/

TOPEX HOME PAGE. http://topex-www.jpl.nasa.gov/

Wikipedia contributors, 唐古拉山脈, 維基百科, 自由的百科全書, Jan. 13, 2011. available at http://zh.wikipedia.org/

Wikimepia contributors, 赤布張錯, 2011. available at http://wikimapia.org/

Wingham, D.J., A.J. Ridout, R. Scharroo, R.J. Arthern, and C.K. Shum, 1998. Antarctic elevation change from 1992 to 1996, Science, Vol. 282, pp. 456-458.

Zwally, H.J., A.C. Brenner, J.A. Major, R.A. Bindscadler, and J. Marsh, 1989. Growth of Greenland Ice Sheet: Measurement, Science, Vol. 246, pp. 1587-1589.

Zwally, H.J. and A.C. Brenner, 2001. Ice sheet dynamics and mass balance, In L.L. Fu, and Anny Cazenave(Eds.), Satellite Altimetry and Earth Sciences-A Handbook of Techniques and Applications, pp. 351-367, Academic Press.