

平成 22 年 3 月 10 日現在

研究種目：基盤研究 (A)
研究期間：2005～2008
課題番号：17253003
研究課題名 (和文) 米国アラスカ州南部における後氷期地殻隆起の総合測地観測と粘弾性構造の推定
研究課題名 (英文) Study on viscoelastic structure beneath Southeastern Alaska, United States through geodetic observation of crustal uplift Caused by deglaciation
研究代表者 三浦 哲 (MIURA SATOSHI)
東北大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：70181849

研究成果の概要：本研究では、平成 18～20 年度に絶対重力測定を毎年実施した。測定結果を 1987 年の測定結果と比較したところ、過去約 20 年の間米国アラスカ州南部において、 $4\mu\text{gal/year}$ を超える速度で重力値が減少していることが明らかになった。このような高速の重力減少速度は、氷河融解に伴うものとしては、世界的にも例がない。この結果とアラスカ大学がこれまで実施してきた GPS 観測による地殻上下変動は、氷河融解に伴う弾性・粘弾性変形モデルで良く説明できることがわかった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005 年度	14,700,000	4,410,000	19,110,000
2006 年度	6,100,000	1,830,000	7,930,000
2007 年度	6,100,000	1,830,000	7,930,000
2008 年度	6,600,000	1,980,000	8,580,000
年度			
総計	33,500,000	10,050,000	43,550,000

研究分野：固体地球物理学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：地球温暖化・氷河融解・地殻変動・絶対重力・GPS・粘弾性構造

1. 研究開始当初の背景

米国アラスカ州南東部グレイシャー湾周辺では、アラスカ大学などによる潮位観測やGPS観測が行われており、場所によっては年間30mm以上という地球上でもまれな、急激な地殻隆起現象がとらえられている(4. 研究成果の図1参照)。この隆起量はテクトニックな変動では説明できない大きさであるため、当該地域周辺に存在する氷河の長期間にわたる融解現象によるものと解釈されている (Larsen et al., 2004, GJI)。

2. 研究の目的

本研究は、既往研究により行われてきた研究対象領域直下の粘弾性構造の推定のためのデータに、GPS 連続観測や重力変動といった新たな測地学的観測データを加えることにより、より信頼性の高い構造モデルを提案することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、これまでアラスカ大学により行われてきたキャンペーン方式の GPS による地殻変動観測の時間分解能を向上させるため、研究

対象領域に 5 点の GPS 連続観測点を設置する。

また、研究対象領域直下の粘弾性構造を推定する際の制約を与える新たなデータとして重力変化を加えるため、高速地殻隆の中心地域を含む複数の観測点において絶対重力測定を毎年実施する。

数値シミュレーションを実施する際に、これらの観測データを総合的に用いて、これまで行われてきた粘弾性構造の推定の空間分解能を向上させ、より信頼性の高い粘弾性構造モデルを推定する。

4. 研究成果

(1) 測地観測データの充実

図 1 の黄色の丸で示した点において絶対重力測定を実施した。これらの観測点のうちで RSLG は既往研究により明らかにされている高速地殻隆起の中心に近い。また、HNSG、BRM においては、1987 年にも Sasagawa et al. (1989) により測定が行われており、長期的な重力変化が得られた。

また、赤色の丸で示した地点に GPS 連続観測点 6 点を設置した(内 1 点はアラスカ大学による)。これまでの解析結果によると、これらの観測点では、経年的な地殻隆起傾向に加えて、顕著な季節変動も観測されており、従来行われてきたキャンペーン観測の結果にその補正を加えることで精度向上が期待できる。

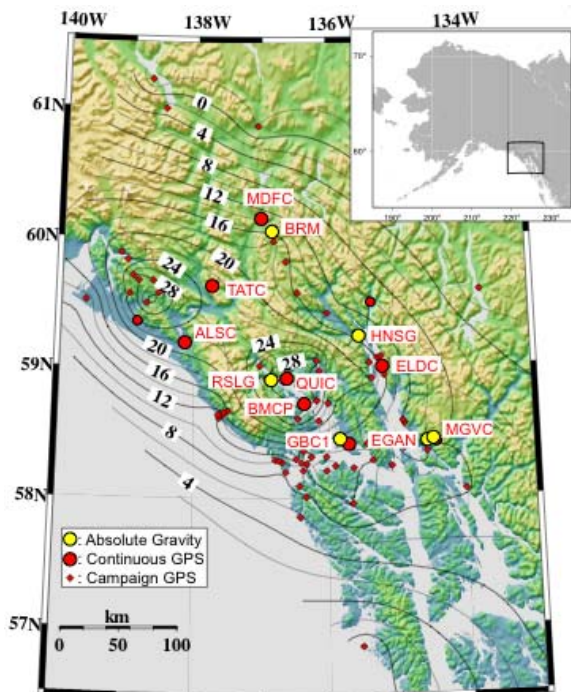


図 1. アラスカ州南東部で進行する地殻隆起現象。黄丸、赤丸は本研究で新設された重力・GPS 観測点。

(2) 長期的重力変化

図 2 に重力観測点における重力変化の時系列を示す。HNSG、および BRM 両観測点については、それぞれ、本研究により 2006 年、2007 年、2008 年の 3 回、および 2007 年、2008 年の 2 回の測定がなされており、これらと 1987 年の測定結果もあわせて推定された回帰直線も示した。得られた重力減少率は、それぞれ $-4.4 \mu\text{gal}/\text{yr}$ (HNSG)、および $-3.0 \mu\text{gal}/\text{yr}$ (BRM) であり、これらは、氷河・氷床融解現象に伴うものとしては世界的にも最大級のものである。本研究による測定結果はそれぞれの直線上によくのっており、両観測点周辺では少なくとも過去 20 年間ほぼ一定レートで重力が減少していることを示唆する。

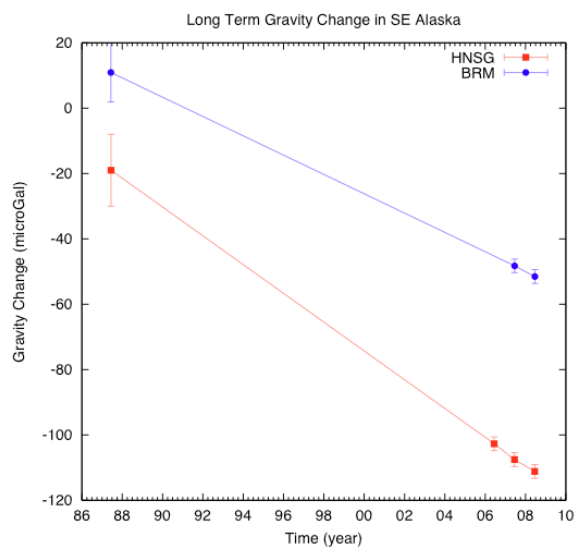


図 2 HNSG、および BRM 観測点(Fig. 1 参照)における絶対重力の変化。

得られた重力変化率と先行研究で得られている地殻上下変動速度を、本研究で推定された粘弾性構造モデル(次項)による予測値と比較した。HNSG 観測点において、現在の氷河融解による弾性応答、小氷期以降の氷河消長に伴う粘弾性応答、後氷期以降の氷床変動に伴う粘弾性応答の各項は、 -1.7 、 -2.9 、 $-0.1 \mu\text{gal}/\text{yr}$ で、総計 $-4.7 \mu\text{gal}/\text{yr}$ となり、観測値 $-4.4 \mu\text{gal}/\text{yr}$ と良く一致している。また、BRM 観測点でも同様に、各項は -0.6 、 -2.3 、 -0.1 で総計 $-3.0 \mu\text{gal}/\text{yr}$ となり、観測結果と等しい結果となった。

GPS による地殻上下変動速度についても同様に調査したところ、HNSG では $22.9 \text{mm}/\text{yr}$ の観測値に対して $23.4 \text{mm}/\text{yr}$ 、BRM では $24.3 \text{mm}/\text{yr}$ に対して $17.8 \text{mm}/\text{yr}$ と概ね満足すべき一致をみている。

(3) 粘弾性構造の推定

観測される地殻上下変動や重力変動には、

現在進行している氷河融解の影響に対する弾性応答と、過去の氷河融解の履歴に対する粘弾性応答の2種類が含まれている。前者について、本研究では、Larsen et al. (2007)によって求められている現在の融解速度を使って評価を行った。計算は、Farrell (1972)の方法に基づき、PREM 地球構造モデルについて 10,000 次までの球面調和関数で近似した荷重 Love 数を用いたグリーン関数を用いて実施した。

粘弾性応答については、Larsen et al. (2005)で採用されている地域的な氷河・氷原消長時系列に対して、Spada (2003)による計算プログラム TABOO を用いて評価した。この場合の球面調和関数の次数は、計算コストを勘案して 1024 次までとした。

最も単純な弾性層であるリソスフェアと粘弾性を仮定したアセノスフェアの2層を仮定したモデルによる計算の結果、弾性層の厚さは 55 ± 10 km、アセノスフェアの粘性係数は $(8 \pm 4) \times 10^{18}$ Pa s という推定結果が得られた。このような比較的薄いリソスフェアとアセノスフェアの低粘性の特徴は、カナダからアラスカ州にいたる太平洋沿岸地域の共通の特徴として、異なる種類のデータを使った他の研究でも指摘されており、それらと調和的な結果が得られた。このような特徴は、北米大陸北部西岸域が、かつての沈み込み帯の背弧域に相当しており、その熱構造的特徴からリソスフェア-アセノスフェア境界が比較的浅いものと考えられる。

(4) 潮汐観測

本研究の対象領域では複雑な海岸地形(図1)もあいまって、海洋潮汐の振幅が場所によっては 10m 近くに達する。このような大きな海洋潮汐は荷重変動となって、GPS や重力の観測に影響を及ぼしている。この影響は特にキャンペーン GPS 観測や絶対重力測定のように、1 観測点あたり数日間のみデータしか得られない場合には、測定結果に誤差要因として入ってくる。

そこで、本研究では、研究対象領域内のジュノー市にあるアラスカ大学サウスイースト校において重力連続観測を実施し、潮汐解析を行った。図3に2006年6月から2007年6月まで行われた観測の内の2ヶ月間のデータを最上段に示す。このデータについて、BAYTAP-G (Tamura et al., 1991) により潮汐成分、トレンド成分、ノイズを同図の2, 3, 4 段目に示す。

観測された潮汐成分は、現在広く用いられているグローバルな海洋潮汐モデル、例えば Matsumoto et al. (2000)による NAO.99b 等では説明できない。これは、これらのモデルが衛星海面高度データと、主として外洋の潮位データに基づいているからである。そこで、本研究では、地形・海底地形のデータとして ETOPO2 に基づき、ナビエ-ストークス方程式を解くことで、潮汐計算を行った。その結果、M2 分潮では観測値と予測値の違いを 1%以内に収めることができた。

さらに高精度化をはかるため、 $54.25^\circ - 59.75^\circ$ N, $137.25^\circ - 129.75^\circ$ W の海域を設定し、単層の順圧海洋モデルを仮定し、計算領域の境界に FES2004 (Lyard et al., 2006)の主要8分潮を与えて領域内の海水を駆動し、それぞれの分潮の調和定数を計算した。重力波の伝播速度は水深に敏感であるため、シミュレーション結果を、異なる海底地形データセットを用いた場合で比較した。比較する地形データは、上記と同じ ETOPO2 (Smith and Sandwell, 1997)と GINA (Lindquist et al., 2004)である。フィヨルド湾内において、GINA の水深は ETOPO2 の水深に比べ、全体的に数十から 100 m 程度深く評価されている。

2通りのシミュレーションに基づく M2 分潮の調和定数と、8点の観測に基づく調和定数との比較を行った結果、GINA を用いたシミュレーションはフィヨルド湾内外で高い再現性を示したが、ETOPO2 を用いた場合は、フィヨルド湾内で観測に基づく振幅を 40-50 cm 過大評価していることがわかった。以上のように、研究対象領域において、これまでにない高い精度の海洋潮汐の領域モデルが完成した。

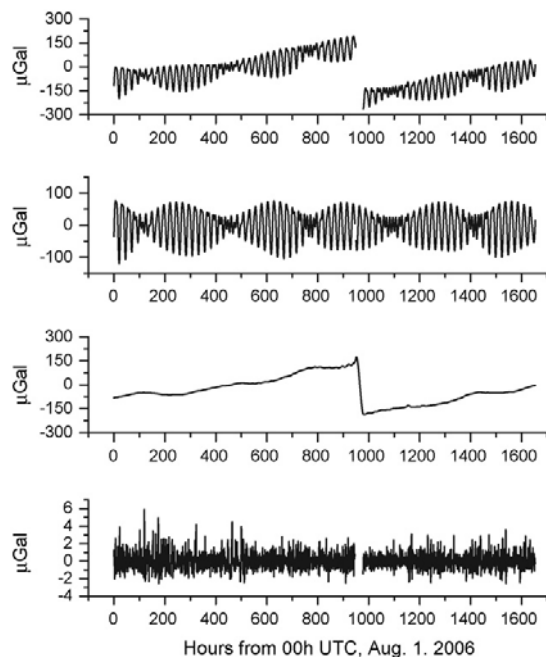


図3 EGAN 観測点(図1参照)における2ヶ月間の重力連続観測データ。上から、観測データ、潮汐成分、トレンド成分、ノイズ成分。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

1) Inazu, D., T. Sato, S. Miura, Y. Ohta, K.

Nakamura, H. Fujimoto, C. F. Larsen, and T. Higuchi, Accurate Ocean Tide Modeling in Southeast Alaska and Large Tidal Dissipation around Glacier Bay, *J. Oceanog.*, *65*, 335-347, 2009. (査読有)

2) Sato T., S. Miura, Y. Ohta, H. Fujimoto, W. Sun, C.F. Larsen, M. Heavner, A.M. Kaufman, and J.T. Freymueller, Earth tides observed by gravity and GPS in southeastern Alaska, *J. Geodyn.*, *46*, 78-89, 2008. (査読有)

[学会発表] (計 27 件)

1) Miura, S., W. Sun, T. Sugano, A. Kaufman, T. Sato, H. Fujimoto, Y. Ohta, C. Larsen, and J. Freymueller, Geodetic measurements for monitoring rapid crustal uplift in southeastern Alaska caused by the recent deglaciation, *AGU 2008 Fall meeting, San Francisco*, Moscone Center, (2008 年 12 月 17 日) .

2) Sato, T., C. F. Larsen, S. Miura, Y. Ohta, H. Fujimoto, W. Sun, T. Sugano, A. M. Kaufman, and J. T. Freymueller, Effects of Present-Day Ice Melting on the Geodetic Measurements in Southeast Alaska, *AGU 2008 Fall meeting, San Francisco*, Moscone Center, (2008 年 12 月 17 日) .

3) Fujimoto, H., S. Miura, T. Sato, and D. Inazu, Ocean bottom pressure observation in the midst of Lynn Canal, Southeast Alaska, *ASC・SSJ合同大会*, つくば市, つくば国際会議場, (2008 年 11 月 27 日) .

4) Miura, S., T. Sato, H. Fujimoto, Y. Ohta, W. Sun, T. Sugano, A. M. Kaufman, C. Larsen, and J. T. Freymueller, Geodetic measurements for monitoring rapid crustal uplift in southeastern Alaska caused by the recent deglaciation, *ASC・SSJ合同大会*, つくば市, つくば国際会議場, (2008 年 11 月 27 日) .

5) 佐藤忠弘・三浦哲・太田雄策・孫文科・菅野貴之・C. Larsen・M. Kaufman・J. T. Freymueller, アラスカ州南東部における現在の氷河融解の測地観測への影響, *日本測地学会第110回講演会*, 函館市, 函館市民会館, (2008 年 10 月 23 日) .

6) 三浦哲・佐藤忠弘・藤本博己・太田雄策・孫文科・菅野貴之・M. Kaufman・C. Larsen・J. T. Freymueller, アラスカ州南東部にお

ける氷河融解に伴う高速地殻隆起・長期的重力変化の観測, *日本測地学会第110回講演会*, 函館市, 函館市民会館, (2008 年 10 月 23 日) .

7) 藤本博己・三浦哲・佐藤忠弘・稲津大祐, アラスカ州南東部の内陸の水陸中央における海底圧力観測, *日本測地学会第110回講演会*, 函館市, 函館市民会館, (2008 年 10 月 23 日) .

8) 太田雄策・三浦哲・佐藤忠弘, キネマティックGPS解析に基づく海洋潮汐加重変形検出の安定性評価, *日本地球惑星科学連合2008年大会*, 千葉, 幕張メッセ, (2008 年 5 月 29 日) .

9) 佐藤忠弘・太田雄策・高塚晃多・三浦哲, キネマティックPPP法で得られた潮汐時系列の潮汐解析と残差, *日本地球惑星科学連合2008年大会*, 千葉, 幕張メッセ, (2008 年 5 月 29 日) .

10) Inazu, D., T. Sato, K. Nakamura, S. Miura, H. Fujimoto, C. F. Larsen, and T. Higuchi, Accurate tide modeling and semidiurnal seiches in Southeastern Alaska, *2008 Ocean Sciences Meeting, Orlando*, Orange County Convention Center, (2008 年 3 月 4 日) .

11) Inazu, D., T. Sato, K. Nakamura, S. Miura, T. Higuchi, and C. Larsen, Accurate modeling of regional oceanic tides for detiding gravimeter data at southeastern Alaska, *AGU 2007 Fall Meeting, San Francisco*, Moscone Center, (2007 年 12 月 13 日) .

12) Miura, S., T. Sato, W. Sun, T. Sugano, A. M. Kaufman, J. T. Freymueller, and H. Fujimoto, Long term gravity change and rapid uplifting caused by glacial isostatic adjustment in southeastern Alaska, *AGU 2007 Fall Meeting, San Francisco*, Moscone Center, (2007 年 12 月 13 日) .

13) Sato, T., S. Miura, Y. Ohta, H. Fujimoto, W. Sun, C. Larsen, M. Heavner, A. M. Kaufman, and J. T. Freymueller, Earth tides observed by gravimeter and GPS in Juneau, Southeastern Alaska, *AGU 2007 Fall Meeting, San Francisco*, Moscone Center, (2007 年 12 月 13 日) .

14) 佐藤忠弘・三浦哲・太田雄策・藤本博己・

孫文科・C. Larsen・M. Heavner・M. Kaufman・J. T. Freymueller, 南東アラスカ・ジュノーにおける重力とGPSによる潮汐観測結果, 日本測地学会第108回講演会, 新宮市, ホテル浦島, (2007年11月9日) .

16) 稲津大祐・佐藤忠弘・中村和幸・三浦哲・樋口知之・藤本博己・C. Larsen, アラスカ州南東部における氷河後退に伴う高速地殻隆起の総合測地観測－海洋潮汐・領域モデルの改良－, 日本測地学会第108回講演会, 新宮市, ホテル浦島, (2007年11月9日) .

17) 三浦哲・佐藤忠弘・藤本博己・孫文科・菅野貴之・M. Kaufman・J. Freymueller, アラスカ州南東部における氷河後退に伴う高速地殻隆起の総合測地観測－長期的重力変化－, 日本測地学会第108回講演会, 那智勝浦町, ホテル浦島, (2007年11月9日) .

18) 三浦哲・佐藤忠弘・藤本博己・孫文科・菅野貴之・A. Kaufman・J. Freymueller, アラスカ州南東部における氷河後退に伴う高速地殻隆起の総合測地観測－長期的重力変化－, 日本地震学会2007年秋季大会, 仙台, 仙台国際センター, (2007年10月25日) .

19) Miura, S., T. Sato, and J.T. Freymueller, Geodetic measurements for monitoring rapid crustal uplift in southeast Alaska caused by post-glacial rebound - Outline of the project -, *7th International Conference on Global Change: Connection to the Arctic (GCCA-7)*, Fairbanks, Fairbanks Princess Riverside Lodge, (2007年2月19日) .

20) Sato, T., S. Miura, H. Fujimoto, W. Sun, M. Kaufman, R. Cross, J.T. Freymueller, and M. Heavner, Geodetic measurements for monitoring rapid crustal uplift in southeast Alaska caused by post-glacial rebound - Observation of Gravity Tide at Juneau in Southern Alaska, *7th International Conference on Global Change: Connection to the Arctic (GCCA-7)*, Fairbanks, Fairbanks Princess Riverside Lodge, (2007年2月19日) .

21) Sun, W., S. Miura, T. Sato, J.T. Freymueller, M. Kaufman, R. Cross, and H. Fujimoto, Geodetic measurements for monitoring rapid crustal uplift in southeast Alaska caused by post-glacial rebound -Absolute gravity measurements -, *7th International Conference on Global Change: Connection to the Arctic (GCCA-7)*,

Fairbanks, Fairbanks Princess Riverside Lodge, (2007年2月19日) .

22) Miura, S., T. Sato, H. Fujimoto, W. Sun, J.T. Freymueller, A. M. Kaufman, and R. Cross, ISEA (International geodetic project in SouthEastern Alaska) for rapid uplifting caused by glacial retreat: (1) Outline of the project, *AGU 2006 Fall Meeting, San Francisco*, Moscone Center, (2006年12月13日) .

23) Kaufman, A. M., J.T. Freymueller, S. Miura, R. Cross, T. Sato, W. Sun, and H. Fujimoto, ISEA (International geodetic project in SouthEastern Alaska) for Rapid Uplifting Caused by Glacial Retreat: (2) Establishment of Continuous GPS Sites (CGPS), *AGU 2006 Fall Meeting, San Francisco*, Moscone Center, (2006年12月13日)

24) Sun, W., S. Miura, T. Sato, A. M. Kaufman, R. Cross, and J.T. Freymueller, ISEA (International geodetic project in SouthEastern Alaska) for rapid uplifting caused by glacial retreat: (3) Absolute gravity measurements, *AGU 2006 Fall Meeting, San Francisco*, Moscone Center, (2006年12月13日) .

25) Sato, S., S. Miura, W. Sun, A. M. Kaufman, R. Cross, J.T. Freymueller, and M. Heavner, ISEA (International geodetic project in SouthEastern Alaska) for rapid uplifting caused by glacial retreat: (4) Gravity tide observation, *AGU 2006 Fall Meeting, San Francisco*, Moscone Center, (2006年12月13日) .

26) 三浦哲・佐藤忠弘・孫文科・藤本博己, アラスカ州南東部における氷河後退に伴う高速地殻隆起の総合測地観測－プロジェクトの概要とGPS観測－, 日本地震学会2006年秋季大会, 名古屋, 名古屋国際会議場2号館, (2006年10月31日) .

27) 佐藤忠弘・三浦哲・孫文科・藤本博己, アラスカ州南東部における氷河後退に伴う高速地殻隆起の総合測地観測－重力潮汐観測－, 日本地震学会2006年秋季大会, 名古屋, 名古屋国際会議場2号館, (2006年10月31日) .

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三浦 哲 (MIURA SATOSHI)
東北大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：70181849

(2) 研究分担者

佐藤忠弘 (SATO TADAHIRO)
東北大学・大学院理学研究科・客員教授
研究者番号：10000176

藤本博巳 (FUJIMOTO HIROMI)
東北大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：50107455

太田 雄策 (OHTA YUSAKU)
東北大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：50451513

笠原 稔 (KASAHARA MINORU)
北海道大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：40001846

高橋浩晃 (TAKAHASHI HIROAKI)
北海道大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：30301930

孫 文科 (SON BUNKA)
東京大学・地震研究所・准教授
研究者番号：10323651

菅野貴之 (SUGANO TAKAYUKI)
東京大学・地震研究所・研究機関研究員
研究者番号：20378566

奥野淳一 (OKUNO JUNICHI)
国立極地研究所・研究教育系・特任研究員
研究者番号：00376542

(3) 連携研究者

稲津大祐 (INAZU DAISUKE)
東北大学・大学院理学研究科・産学連携研究員
研究者番号：30462170

(4) 研究協力者

ジェフ・フライミュラー
(Jeff Freymueller)
アラスカ大学・地球物理学研究所・教授

クリス・ラーセン (Chris Larsen)
アラスカ大学・地球物理学研究所・准教授

マット・ヘフナー (Matt Heavner)
アラスカ大学・サウススイースト校・准教授

マックス・カウフマン (Max Kaufman)
アラスカ大学・地球物理学研究所・技術職員