

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：13301

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(A））

研究期間：2020～2022

課題番号：19KK0370

研究課題名（和文）地中熱利用ポテンシャルの気候変動下のグローバルトレンド動的評価と国際応用，標準化

研究課題名（英文）Evaluation of globally dynamic trends for potential utilization of shallow geothermal energy under climate change, and its application and standardization

研究代表者

阪田 義隆（Sakata, Yoshitaka）

金沢大学・地球社会基盤学系・准教授

研究者番号：10754236

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,600,000円

渡航期間： 7ヶ月

研究成果の概要（和文）：本研究はカナダブリティッシュコロンビア大学を拠点としたエネルギー学としての分野横断・学際的な国際共同研究であり，当地の地中熱促進協会との情報収集およびフィールド調査も踏まえながら，中長期的に動的変化する気候変動進行による熱負荷および地下熱収支の予測とそれを踏まえた地中熱システムシミュレーションおよびライフサイクルコストとその不確実性の評価手法の開発し，その標準化に向けた学術論文を発表した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

再生可能エネルギーである地中熱利用の普及のカギとなるライフサイクルコストの低減において，その評価に必要な気候変動下における熱需要の変化とそれに応じた地下の熱収支の予測および，それに基づく地中熱利用システムの長期性能および資源コストの変遷も踏まえたコスト評価という多様な分析を一元的に評価可能とする手法を開発した。また本手法はわが国だけでなく世界の他地域にも適用できることにより，再生可能エネルギー地中熱利用に関する普及を促すとともに，その結果として省エネ・低炭素社会の実現に貢献しうるとともに，学術的にも地中熱研究の進歩に資する研究成果となる。

研究成果の概要（英文）：A cross-sectoral and interdisciplinary energy study was performed through an international collaboration at The University of British Columbia, Canada. With the association's supports and field research, this study developed a methodology for evaluating performances and life cycle costs and their uncertainty of geo-exchange systems based on predictions of long-term thermal demands and underground heat budgets under climate changes as dynamic trends, resulting in a journal paper for standardizing the methodology in the world.

研究分野：地盤環境エネルギー工学

キーワード：再生可能エネルギー 地中熱 ヒートポンプシステム 気候変動 地下熱収支 ライフサイクルコスト
グローバルトレンド

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

化石燃料資源の減少, 全球規模での気候変動が進行する中, 人類の持続的な繁栄を確保するには, 自然再生可能エネルギーの普及は喫緊の課題である。地中熱は, 深度数 10 ~ 200 m 付近の安定した地下の熱源であり, ヒートポンプと組み合わせた地中熱ヒートポンプシステム (GSHP システム, 図 1 左) は高い採熱効率を有する再生可能エネルギーシステムとして注目される。一方, その普及には国別に大きな偏在がある (図 1)。最も導入が進むのは米国, 中国だが, 人口経済規模がわが国と同程度の国々と比べても普及出力は一桁小さい状況である。普及の課題に中長期的な地中熱利用の環境・経済的な優位性に関する不確実性が指摘される。特に今後進行する気候変動に対し, 建物の熱負荷や熱源となる地中温度の予測も踏まえたシステム性能およびライフサイクルコスト評価の手法の確立と国際的な標準化・規格化が求められる。

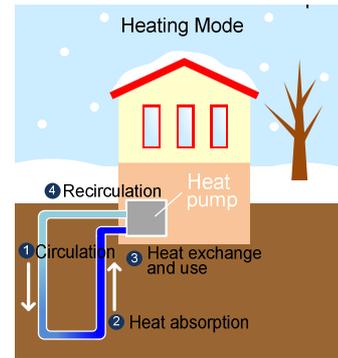


図 1 GSHP システムの概要

2. 研究の目的

本研究の目的は, カナダブリティッシュコロンビア大学 (UBC) を拠点に分野横断・学際的な国際共同研究として, 基課題における地中熱ポテンシャル評価法をベースに, 気候変動進行に伴う世界各都市の地中熱利用によるライフサイクルコストとその不確実性を地中熱利用ポテンシャルのグローバルトレンドとして動的に評価する手法を確立することである。

3. 研究の方法

本研究のベースは開発した地中熱利用ポテンシャル評価システムである (図 2)。本システムは全国 5 万本のボーリングデータをデジタル化し, それらを用いた地質及び物性値の確率的推定を行うとともにシステムの運転性能およびそれに伴う CO₂ 排出量の削減など地中熱利用のポテンシャルを全国で統一的に行うことができる。

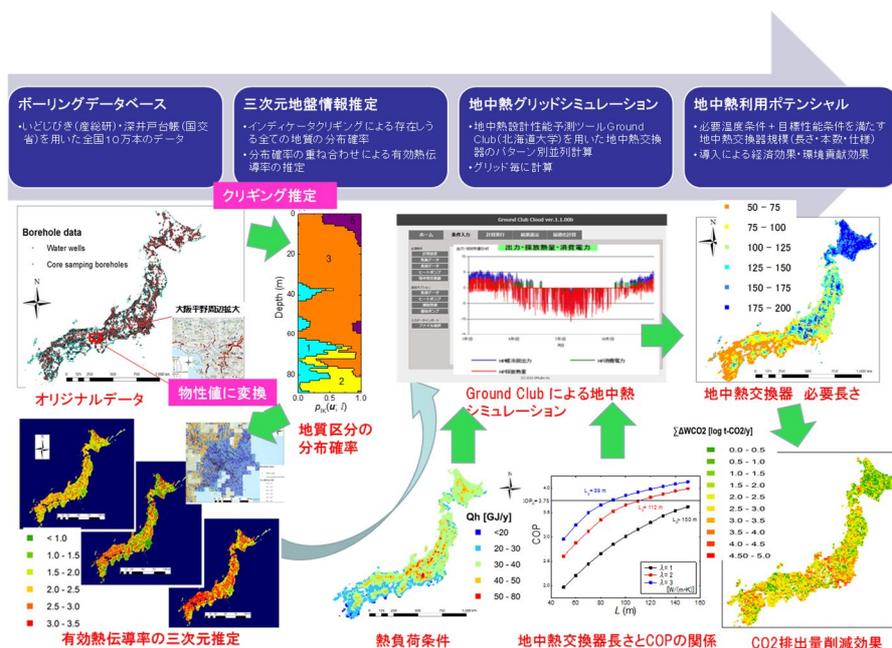


図 2 地中熱ポテンシャル評価システム

研究の流れを図3に示す。本研究では、IPCCによる6つの温暖化効果ガスの排出シナリオ別の推定値を用い、建物熱負荷を予測する。併せて、システムの熱源となる地中温度分布を地下水流も加味した地下熱水輸送シミュレーションで予測する。戸建住宅および事務所ビルへの暖冷房用のために導入すると想定したGSHPシステムのサイクルシミュレーションを行い、将来における期間成績係数とともにライフサイクルコストについて燃料や電気代のトレンドも加味した評価を行った。

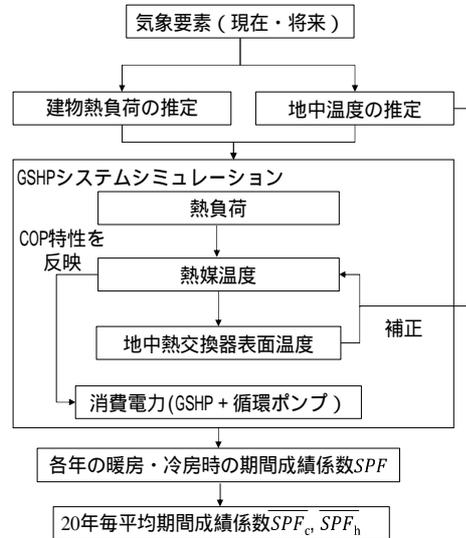


図3 研究の流れ

4. 研究成果

4.1 熱負荷の推定

気象庁地球温暖化予測情報第8巻に公開する温室効果ガス排出シナリオ SRES A1B シナリオでの気象要素から計算した現在 1980~1999年および将来 2076~2096年における時刻別熱負荷の計算例として戸建て住宅(木造, 2階建, 延床面積 200m²)の札幌での暖房の場合を図4に示す。暖房負荷は1~7kW, ピークが4kWであり, 将来的には温暖化によって全体に1~3kWの範囲にシフトする。この総和である年間の熱負荷は60.5GJ/yから35.6GJ/yに減少する。一方, 冷房は戸建て住宅の場合, 現在も全体で2.8GJ/yに留まり, 温暖化により増加するものの暖房の減少ほど顕著ではない。

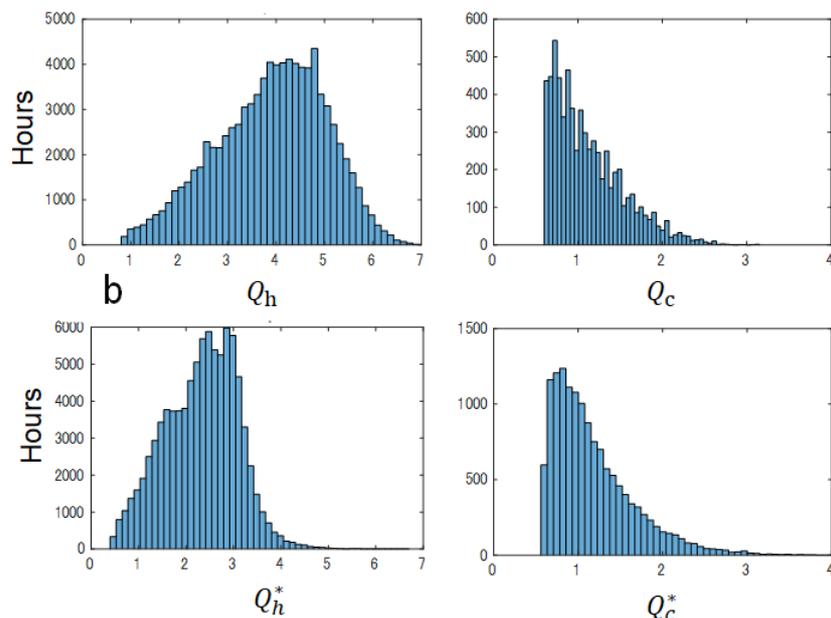


図4 時刻別熱負荷の頻度分布(いずれも札幌, 上: 現在, 下: 将来, 左: 暖房, 右: 冷房)

4.2 地中温度の将来予測

図5に, 地下熱水輸送シミュレーションの結果の一例を示す。図において気温 T_a , 水平地中熱交換器を想定した深度 2m における地中温度 T_s および鉛直地中熱交換器を想定した深度 50m における地中温度 T_d の将来予測である。浅部の地中温度 T_s は外気温に比べて変動は小さいものの, 平均温度で比較すると日射の影響から 2°Cほど高くなる。トレンドは 100 年間当たり札幌が 6°C

で現在と変わらないが、東京では現在 1.5°C が将来 4°C 程度になると推測され、寒冷地の方がより温暖化の影響を受けやすいことが分かった。一方、深部の地中温度 T_d は年間の変動は小さく、100 年あたりの上昇率は札幌で 2°C 、東京で 1°C に留まり、一般的なヒートポンプの性能的には地中温度への影響は小さいと予想された。

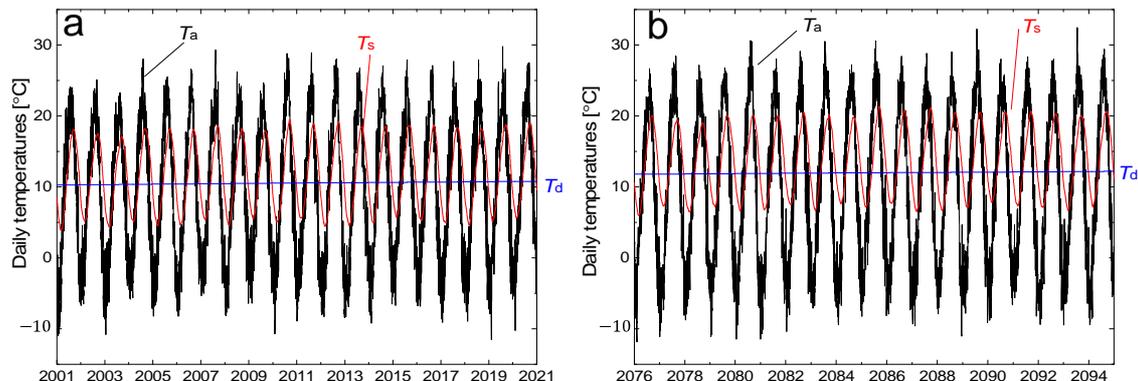


図5 地中温度の将来予測（いずれも札幌，左：現在，右：将来）

4.3 地中熱ヒートポンプシステムの運転性能予測

本研究では、20 年毎での平均期間成績係数 SPF について異なる 3 つの気候変動シナリオ（SRES A1F1, A2, B1）における現在（2001～2020 年平均）と将来（2080～2100 年平均）の比較を行った（図6）。その値は暖房・冷房期間，冷地（札幌）・温暖地（東京），垂直管・水平管の組み合わせによって，増加あるいは減少する傾向が異なることが示された。このことは気候変動がもたらす気温上昇は，熱負荷の変化と熱源となる地中温度の変化をもたらすが，将来的な GSHP システムへの影響は対象とする用途，地域，地中熱交換器によって異なることを意味する。特にシステムを稼働するための常時電力が，特に熱負荷が小さい場合（例えば，東京での暖房利用）がより性能評価に効いてくることが明らかになった。

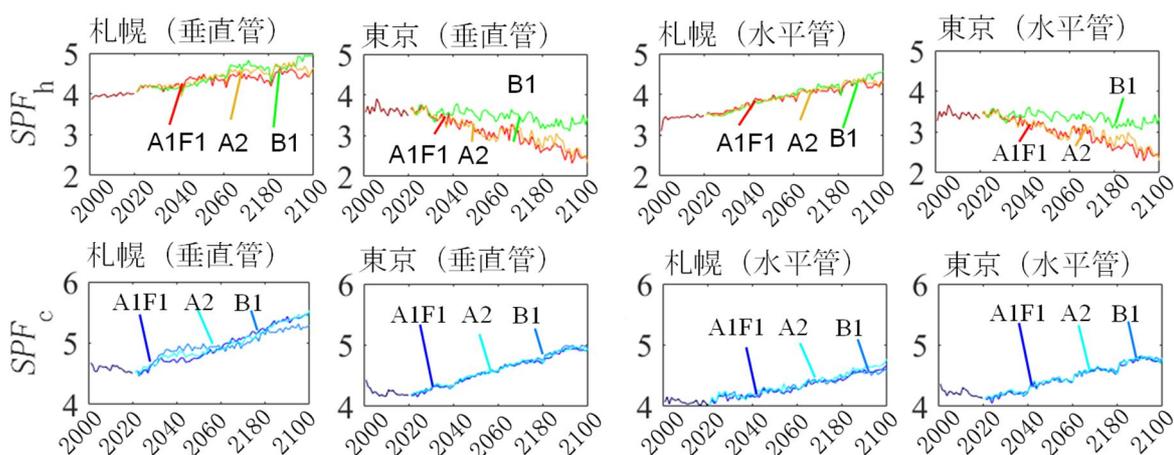


図6 各都市におけるシナリオ毎の期間成績係数（上：暖房時 SPF_h ，下：冷房時 SPF_c ）の推移

4.4 地中熱利用システムのコスト及び不確実性の予測

本研究では、分析した燃料・電気量器のコストトレンドに基づき、S1：変わらない，S2：20 年後に燃料コスト 2 倍（上昇率，年約 5% に相当），ただし電気料金は変わらない，S3：化石燃料と電気料金ともに 2 倍となるシナリオを用意に対し，GSHP システムと既存システムのライフサイクルコストを比較分析した。期間成績係数（図7）は，札幌では将来において高くなるが変動幅

も大きく不確実性が高くなる。東京では暖房はむしろ低くなる可能性が指摘され、低負荷に対する地中熱システムの高効率化が求められる結果となった。図8に、シナリオS1~S3における札幌および東京でのGSHPシステムおよび既存システムのライフサイクルコストを示す。開始ゼロ年での初期コストはGSHPシステムが高いが、効率性から傾きは小さく、やがて既存システムよりもライフサイクルコストは少なく済む。その年数が少ないほどGSHPシステムの経済的に導入が妥当であることになる。現在のシナリオでは、札幌において16年でペイバックができるが、東京では20年以上かかる計算になる。燃料コストが変わらないシナリオS1では札幌のペイバックがほぼ変わらないが、東京では依然20年以上かかる。燃料コストが2倍となるが電気代が変わらないシナリオS2では札幌のペイバックタイムは8年まで大きく減少するのに対し、東京でもSPFが低下することから依然20年以上かかる。また燃料と電気代がともに2倍となるシナリオS3では東京のペイバックタイムが約20年とやや短くなる。以上から、気候変動を考慮した将来予測において、将来の燃料や電気代コスト変動トレンドを考慮した場合には、寒冷地である札幌において経済的な導入優位性が高まると予想されるのに対し、温暖地である東京では現在と将来で優勢に大きな変化はなく、GSHPシステムの普及拡大には、システムの効率性のさらなる向上や低熱負荷での最適運転などが必要になると結論付けられた。

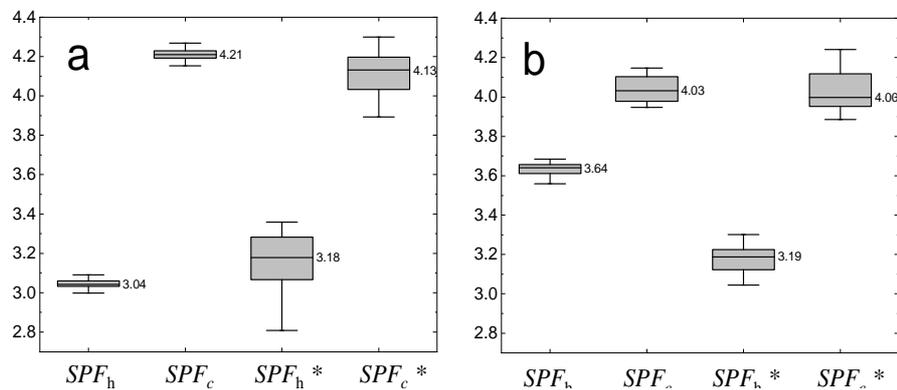


図7 20年期間成績係数ボックスプロット（左：札幌，右：東京，h：暖房，c：冷房，*は将来）

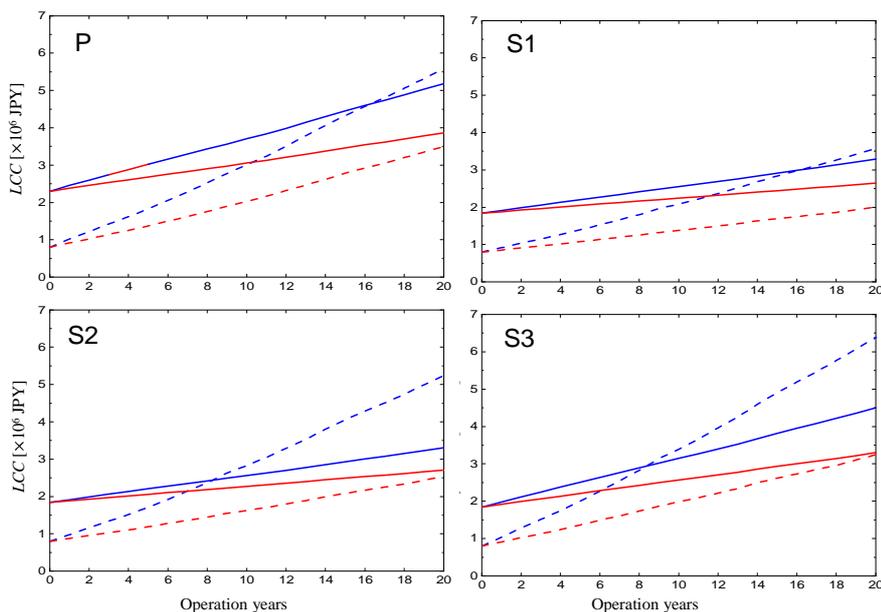


図8 現在と将来のライフサイクルコスト推定（実線:GSHP，破線:既存，青:札幌，赤:東京）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 阪田義隆	4. 巻 70
2. 論文標題 確率論的アプローチに基づく地盤物性値の推定：確率加重平均法	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 地盤工学会誌	6. 最初と最後の頁 31-34
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sakata Yoshitaka, Akeyama Yuma, Katsura Takao, Nagano Katsunori	4. 巻 16
2. 論文標題 Evaluating Long-Term Performance of a Residential Ground-Source Heat Pump System under Climate Change in Cold and Warm Cities of Japan	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Energies	6. 最初と最後の頁 2742 ~ 2742
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/en16062742	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 SAKATA Yoshitaka, AKEYAMA Yuma, KATSURA Takao, NAGANO Katsunori	4. 巻 78
2. 論文標題 100-YR PREDICTIONS OF PERFORMANCES IN A GROUND-SOURCE HEAT PUMP SYSTEM FOR AN OFFICE BUILDING UNDER DIFFERENT CLIMATE SCENARIOS	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. G (Environmental Research)	6. 最初と最後の頁 I_179 ~ I_187
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2208/jscej.78.5.I_179	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Yoshitaka Sakata, Yuma Akeyama, Takao Katsura, Katsunori Nagano, Hadi Dowlatabadi
2. 発表標題 EVALUATING LONG-TERM PERFORMANCES OF A GROUND-SOURCE HEAT PUMP SYSTEM UNDER CLIMATE CHANGE
3. 学会等名 9th Global Conference on Global Warming（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 沖原峻, 阪田義隆, 長野勝則
2. 発表標題 積雪寒冷地ZEB におけるオープンループ地中熱利用システムの運用評価: 還元井目詰まりの進行に関する分析
3. 学会等名 日本地下水学会2020秋季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoshitaka SAKATA
2. 発表標題 EVALUATING LONG-TERM PERFORMANCE OF GROUND-SOURCE HEAT PUMP SYSTEMS CONSIDERING LOCAL URBANIZATION AND CLIMATE CHANGE
3. 学会等名 9th Global Conference on Global Warming (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 阪田義隆, 小泉謙, ディアナアレン
2. 発表標題 カナダ・ブリティッシュコロンビア州における地中熱利用と熱応答試験
3. 学会等名 日本地熱学会令和4年東京大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	ダウラタバディ ハディ (Dowlatabadi Hadi)	ブリティッシュコロンビア大学・IRES・名誉教授	
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	ヨネミツ ノボル (Yonemitsu Noboru)	ブリティッシュコロンビア大学・土木工学科・教授	
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	アレン ダイアナ (Allen Diana)	サイモンフレーザー大学・地球科学科・教授	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------

カナダ	The University of British Columbia,	Simon Fraser University		
-----	-------------------------------------	-------------------------	--	--