

研究成果報告書

所属機関	職名	氏名
北海道大学 大学院 農学研究院	助教	加藤 知道

研究テーマ

生態系の生育状況を面的に測る光合成カメラの開発

研究報告

1. 研究の背景と目的

陸域生態系は光合成により、温室効果ガスであるCO₂を吸収し、地球温暖化を緩和していると考えられており、その量を正確に把握することは地球の気候変化の予測する上で非常に重要である。

光合成は利用されなかった太陽光エネルギーの一部(~3%)をクロロフィル(葉緑素)蛍光として放出する(図1)。クロロフィル蛍光には光合成機能に関する情報が含まれているが、これまでは個葉での光合成ストレス診断に用いられてきたのみであった。しかし最近、生態系レベルの大きなスケールで、クロロフィル蛍光と生態系光合成量との相関が大変高いことがわかってきている(Kato et al, in prep. など)。特にNASAのグループが、人口衛星GOSAT(JAXA)による太陽光誘発クロロフィル蛍光(Sun-Induced Fluorescence: SIF)測定を世界に先駆けて進めており(図2: Frankenberg et al., 2011, GRL)、このSIFを普遍的な指標として、様々な空間スケールでの光合成量推定に生かすことが非常に期待されている。

一方で従来の方では、一枚の葉の小さいスケールもしくは生態系全体の大きいスケールでの光合成を測ることしかできないため、人為的に破壊されつつある熱帯林、マツ食い虫によるマツ枯れ、生育ムラのある作物畑などのパッチワーク状に生育が良好・不良である、中間的なスケールでの光合成の面的分布を把握できなかった。

そこで申請者は画像としてSIFを検出する光合成カメラ(図3)を開発し、光合成を面的に評価するシステムの確立を目指している。これまでカメラ本体の組み立て、操作・解析のためのソフトウェア・プログラムの開発を行い、SIFによる光合成評価のための基本的な技術を確立した。そして平成26年度は、森林(苫小牧市)においてSIFの画像を撮影することが可能になったが、一方で、樹木と草本が多種類(10種類以上)生育している当該対象地では、画像内のSIF強度分布の原因が、植物の種類と生理活性のどちらの差に依るものなのかが不明であるという大きな課題があった。そこで、申請書提出時に予定していた森林から、品種が2つしかないが肥料散布量を変化させたコムギ畑を対象に変更し、SIFを利用した光合成カメラによる実証を行うことを目的とした。

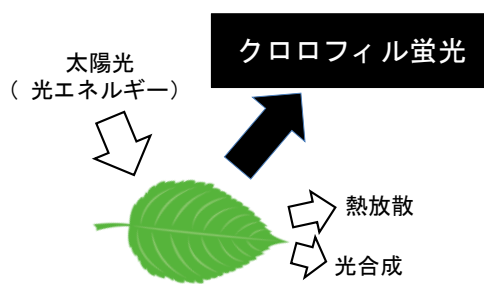


図1. 個葉のクロロフィル蛍光放射

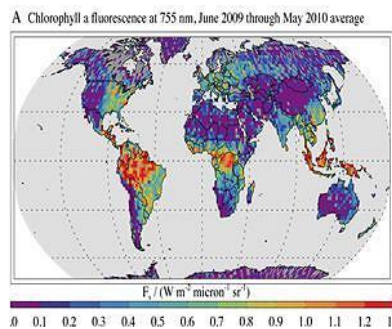


図2. 衛星 GOSAT によって観測された SIF の分布(Frankenberg et al., 2011, GRL). 生態系光合成量と分布が非常に近い。



図3. 開発中のカメラ

2. 研究成果および考察

2.1. マルチスペクトルカメラの開発

CMOSカメラによる太陽光誘発クロロフィル蛍光の画像計測装置を特注で製作した(図3; (株)北海道衛星, MS C1805P5ベース)。これは可視-近赤外光を測定できるモノクロCMOSカメラに、5枚のバンドパスフィルターを回転させながら撮影する機構がつけられている。フィルターは、SIF計算に必要な750nm, 760nm及び、NDVI等の植生指標の計算に必要な530, 570, 660nmの光を透過させるものを取り付けた。レンズは視野角22.5度で、フィルターごとに自動で露光時間を調整した。撮影管理は専用ソフトウェアを利用した。

2.2. SIFの計算方法

光合成カメラで観測された750、760nm付近 (O₂-A吸収波長帯) の放射照度から、Fraunhofer Line Depth法 (Maier et al., 2003, ASA Special Publication) を利用し、次のようにSIFを計算する。

$$SIF = (L_{760} - E_{760} / E_{750} * L_{750}) / (1 - E_{760} / E_{750}) \quad \text{式 (1)}$$

ここで、E・Lはそれぞれ太陽・生態系上面からの放射照度、750、760は各波長 (750, 760nm) を示す。また蛍光収率SIF yieldは、SIFを532nmの反射板からの放射で除したものを採用した。

2.3. コムギ畑におけるカメラ及び個葉計測:

カメラ及び個葉の計測は、2016年5-7月にかけて、秋まきコムギ (農研機構・北海道農業研究センター内圃場) 2品種 (キタホナミ・ゆめちから) を対象に行った。当該コムギは肥料を5段階 (起生期 (4月初旬)、幼形期 (4月下旬)、止葉期 (5月下旬) に施用する場合とそうでない場合) に分けたものを4反復の計40処理区 (2品種 x 5施肥段階 x 4反復) を設けており、収穫後に各処理区の子実収量・子実たんぱく質含有量・地上部乾物重量などが測定される。

カメラは最寄り電柱の高さ約7mにおいて水平方向から下向き12° に設置し、計12処理区 (2品種 x 6処理区 (K15からK20, Y15からY20)) を視野に入れた (図4)。二次標準反射板としてポリエチレンフォーム (黒色、L90cm x W45cm: サンプルCAL-900) を、画面上部に入るように地面から0.75mの高さに設置した。カメラ計測は5月8日から7月22日までの間に15分間隔で行った。

また月に一度程度で各処理区において、SPAD値 (葉色) をSPAD-502 plus (Konica-Minolta, Tokyo, JAPAN) で5個体の止め葉に対して、葉面積指数LAI (Leaf Area Index: 単位底面積あたりの葉面積を表す) をプラントキャノピーアナライザ-LAI-2000 (Li-cor, Lincoln, NE, USA) で5点、草丈を5点、量子収率QY (光合成活性を表す) をクロロフィル蛍光パラメータ測定装置Fluorpen FP100MAX (Photon System Instruments, Drasov, Czech) で5点測定し、平均して処理区の代表とした。

2.4. 結果と考察

カメラによるSIF計測は、各処理区の境界に沿ってSIFの強弱を明らかに捉えていた (図4)。また季節変化も明瞭に捉えた (図5)。このことから本研究で開発したカメラはSIF放射を的確に測定したと考えられた。

コムギ収穫後に測定された子実収量と地上部乾物重は、出穂期 (5月-6月初旬) のSIFや蛍光収率SIF yieldと関係が強かった (図4、表1)。これは葉が青々として活性の最も高い時期の光合成量と効率が、バイオマス生産量に直結しているためであると考えられる。一方でたんぱく質含有率は、ゆめちからでは登熟期 (7月) のSIFとの関係が最も強かったが、キタホナミでは出穂期のSIF yieldとの関係が強かった。これはゆめちからでは、SPADやLAIとの関係にも見られるように開花期以降の光合成の場としてのクロロフィル量・活性が反映されていると考えられる。一方でキタホナミでは、登熟開始の7月初旬からほぼ枯れ上がっているK19とK20区においてもわずかながらSIFやSIFyieldが検出されていることや、個葉観測でのQYとの相関の低さから、蛍光そのものの値がゼロに近づいている状態でのその正確な活性の測定には改良の余地があることを示している。これには、反射板ではなく直接太陽光の分光データを利用することや、画面内の角度依存性の検証が必要であることを示唆した。

一方でこれまで植生リモートセンシングで多用されてきた正規化植生指数NDVIは、一部をのぞいてほとんど収穫時の量・質との有為な関係が見られなかった (表1)。これは緑色がある程度以上濃くなると値が飽和してしまうNDVIの性質の影響であると考えられ、SIFやSIF yieldの有用性の高さを証明していることに繋がる。

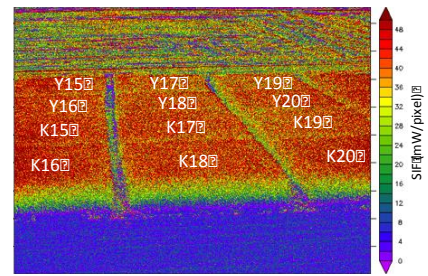


図4. SIF計測カメラによるSIF分布 (コムギ、北農研センター、2016/6/6 12:00)。矩形区画は処理区を表し、白文字は処理区名を示す (K: キタホナミ, Y: ゆめちから)。赤い (高いSIF) 部分で高い光合成活性があると推測される。一方で画面下部の裸地ではSIF放出はほぼゼロであった。

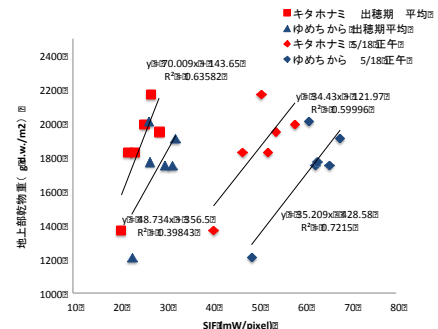
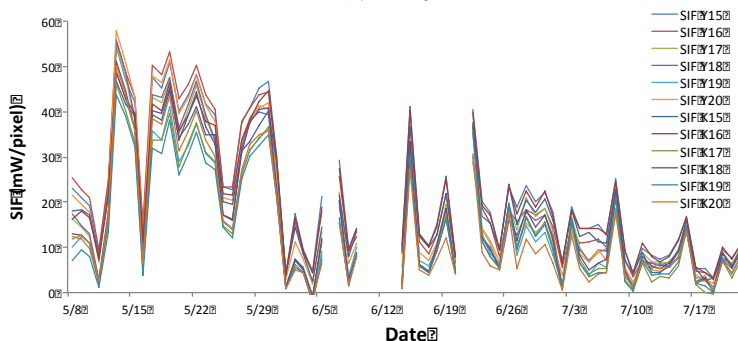


図 5. SIF 放射の日平均値の季節変化。

図 6. 地上部乾物重量 (収穫時) と SIF 放射 (出穂期) の関係。

表 1. 子実収量 (kg/10a)、たんばく質含有率 (%)、地上部乾物重量 (g d.w./m²: 収穫時) と SIF、蛍光収率(SIF yield)、正規化植生指数 NDVI、SPAD、LAI、草丈(Height)、量子収率 QY の関係における相関係数 *r*。赤字は 0.6 以上、白字に赤背景は有意な関係を示す。

計測方法	項目	期間	データ処理	相関係数 <i>r</i>							
				キタホナミ (n=6)			ゆめちから (n=6)				
				子実収量	たんばく含率	地上部乾物重	子実収量	たんばく含率	地上部乾物重		
カメラ計測	SIF	出穂期(5/8-6/5)	平均	0.82 **	0.72	0.80 *	0.61	0.46	0.63		
		開花期(6/6-6/30)	平均	0.61	0.70	0.55	0.37	0.54	0.30		
		登熟期(7/1-7/22)	平均	0.64	0.65	0.59	0.51	0.71	0.42		
		全期間(5/8-7/22)	平均	0.63	0.68	0.57	0.43	0.60	0.35		
		5/18	瞬時値(正午)	0.76 *	0.45	0.77 *	0.82 **	0.52	0.85 **		
		6/15	瞬時値(正午)	0.66	0.69	0.60	0.22	0.41	0.16		
		7/15	瞬時値(正午)	0.21	-0.07	0.19	0.74 *	0.83 **	0.63		
		出穂期(5/8-6/5)	平均	0.87 **	0.77 *	0.86 **	0.65	0.50	0.66		
		開花期(6/6-6/30)	平均	0.63	0.68	0.57	0.54	0.45	0.55		
		登熟期(7/1-7/22)	平均	0.61	0.52	0.58	0.63	0.62	0.60		
SIF yield	SIF	全期間(5/8-7/22)	平均	0.63	0.61	0.58	0.57	0.52	0.56		
		5/18	瞬時値(正午)	0.90 **	0.67	0.91 **	0.76 *	0.51	0.79 *		
		6/15	瞬時値(正午)	0.67	0.66	0.63	0.48	0.40	0.49		
		7/15	瞬時値(正午)	0.25	-0.09	0.27	0.84 **	0.67	0.82 **		
		NDVI	NDVI	出穂期(5/8-6/5)	平均	0.61	0.30	0.64	0.43	0.48	0.34
				開花期(6/6-6/30)	平均	-0.12	0.11	-0.22	0.69	0.49	0.68
				登熟期(7/1-7/22)	平均	0.32	0.55	0.22	0.79 *	0.62	0.77 *
				全期間(5/8-7/22)	平均	0.22	0.46	0.11	0.76 *	0.59	0.74
				5/18	瞬時値(正午)	0.28	-0.10	0.33	-0.25	-0.26	-0.26
				6/15	瞬時値(正午)	-0.35	-0.62	-0.35	0.63	0.42	0.62
7/15	瞬時値(正午)			0.59	0.50	0.54	0.73	0.59	0.70		
個葉計測	SPAD			5/18	瞬時値(日中)	0.83 **	0.56	0.85 **	0.86 **	0.74	0.81 *
				6/14	瞬時値(日中)	0.94 ***	0.80 *	0.95 ***	0.80 *	0.89 **	0.70
				7/12	瞬時値(日中)	0.70	0.86 **	0.67	0.57	0.93 ***	0.38
	LAI	5/18	瞬時値(日中)	0.76 *	0.52	0.78 *	-0.17	0.06	-0.22		
		6/14	瞬時値(日中)	0.46	0.16	0.52	0.82 **	0.61	0.82 **		
		7/12	瞬時値(日中)	0.91 **	0.94 ***	0.92 **	0.74 *	0.84 **	0.64		
	Height	5/18	瞬時値(日中)	0.52	0.36	0.49	0.64	0.07	0.77 *		
		6/14	瞬時値(日中)	0.79 *	0.55	0.78 *	0.74 *	0.58	0.75 *		
		7/12	瞬時値(日中)	0.76 *	0.50	0.76 *	0.92 **	0.53	0.96 ***		
	QY	5/18	瞬時値(日中)	0.50	0.52	0.56	0.75 *	0.76 *	0.67		
6/14		瞬時値(日中)	0.89 **	0.95 ***	0.84 **	0.82 **	0.95 ***	0.70			
7/12		瞬時値(日中)	-0.10	0.10	-0.05	-0.15	-0.38	-0.04			

* p < 0.1, ** p < 0.05, *** p < 0.01

3. 将来展望

本研究では、コムギを対象としてSIFの空間的・時間的分布を検出することに成功し、植物の光合成活性をうまくとらえて、収穫に関する値の予測に利用できる基本的な技術を確立した。一方で、キタホナミのたんばく質含有率との相関の低さから、活性 (SIF絶対値) の下がる登熟期における正確な測定について問題があることが示唆された。これは①標準反射板からの反射光を太陽からのエネルギーとして利用すること、②フィルターへの入射角の差に起因する画面内でのエネルギー値の不均一性などによる測定誤差が原因であることが考えられた。またSIF yieldと測定原理的に近い個葉QYとの間には強い相関関係があり光合成活性をうまく捉えていることを示していた (本報告ではデータは示していない) が、SIF絶対値そのものの検証が、野外条件かつ個葉レベルでは原理的に大変困難であり、実現しなかった。

そこで、対応策として、①太陽光スペクトルを直接分光放射計で測定する。②画面中心点からの対称位置にある処理区同士での比較を行う。③精度の高い分校放射計を利用し、群落直上で測定した反射スペクトルから計算したSIFとの間で絶対値の比較を行うことが挙げられる。今後の予定としては、上記対応を施した上で、同様コムギを対象に、追加検証実験を行うとともに、ドローン飛行による広域測定のための実証実験を行う。

4. 研究発表

吉川 慶, 加藤知道, 濱寄孝弘, 矢崎友嗣, 栗原純一, 廣田知良, 平野高司, 冬小麦キャノピーの分光画像モニタリングによる生育情報解析, 日本農業気象学会北海道支部会, 札幌, 2016年12月9日

Kei Yoshikawa, Takahiro Hamasaki, Tomomichi Kato, Tomotsugu Yazaki, Junichi Kurihara, Tomoyoshi Hirota, Takashi Hirano, Predicting the protein of winter wheat using hyper-spectral images, International Symposium on Agricultural Meteorology, Aomori, Japan, 2017年3月18日.

5. 謝辞

本研究では、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合技術研究機構・北海道農業研究センター・生産環境研究領域・寒地気候変動グループの濱寄 孝弘上級研究員に、コムギ観測サイト提供などの様々な便宜を図っていただいたことを感謝いたします。また北大農学研究院生態環境物理学研究室の平野高司教授と修士課程1年の吉川慶くんには野外作業等で協力していただきましたことを感謝します。